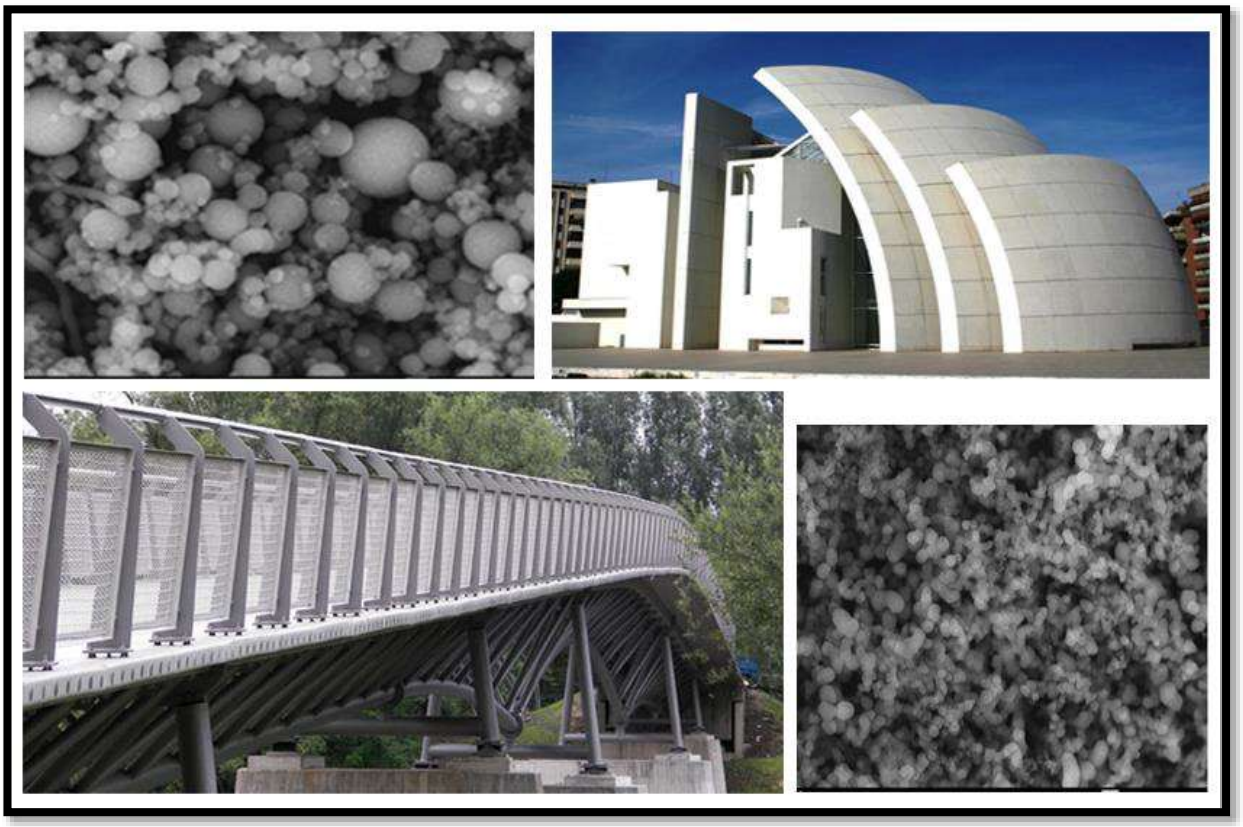
پژوهشگاه نیرو

بهبود عملکرد سازه‌های صنعت برق با شناسایی، به‌کارگیری و توسعه مواد نانو ساختار



مدیر پروژه: آزاده گودرزی

مجری پروژه: علی اصغر ذکاوتی

NRI-ER-764-PCVPN15-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.238

DOI: 10.30503/nripress.2020.238



DOI: 10.30503/nripress.2020.238

بهبود عملکرد سازه‌های صنعت برق با شناسایی، به‌کارگیری و توسعه مواد نانو ساختار

مدیر پروژه:
آزاده گودرزی

همکاران پروژه:
ایمان امین دهقان
آرش یگانه فلاح
مائده ذاکرصالحی
مهرداد کریمی پتانلار
روزبه مولایی
سپیده سفری خواجکینی

مجری:
علی اصغر ذکاوتی

انتشارات پژوهشگاه نیرو
۱۴۰۰

کد گزارش NRI-ER-764-PCVPN15-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.238

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

بهبود عملکرد سازه‌های صنعت برق با شناسایی، به‌کارگیری و توسعه مواد نانو ساختار/ آزاده گودرزی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو/ ۱۴۰۰.

۵۶۴ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. گودرزی، آزاده، ایمن دهقان، ایمان، یگانه فلاح، آرش، ذاکر صالحی، مائده، کریمی پتانلار، مهرداد، مولایی، روزبه، سفری خواجکینی سپیده. . ۲. ذکاوتی، علی اصغر، مجری. ۳. محور تخصصی مصالح و تجهیزات نوین و هوشمند در سازه‌ها

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی سازه‌های صنعت برق

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران،شهرک‌غرب،انتهای‌بلوارشهیددادمان،پژوهشگاه‌نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

DOI: 10.30503/nripress.2020.238

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب آزاده گودرزی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.
کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران :
۱. ایمان امین دهقان
۲. آرش یگانه فلاح
۳. مائده ذاکرصالحی
۴. مهرداد کریمی پتانلار
۵. روزبه مولایی
۶. سپیده سفری خواجکینی

پیشگفتار

نانوتکنولوژی چشم‌انداز جدیدی از تولید مواد، در مقیاس نانو را با خواص و چیدمان اتمی متفاوت در اختیار ما قرار می‌دهد. فناوری نانو روشی نوین در تولید مواد و ساخت اشیا در مقیاس نانو توسط مرتب‌سازی و چیدمان مناسب اتم‌ها بصورت کنترل شده است که بوسیله آن می‌توان ویژگی‌ها و خواص مواد را تحت کنترل درآورد.

امروزه فناوری نانو دارای کاربردهای وسیعی در علوم و رشته‌های مختلف از پزشکی تا الکترونیک و صنعت ساختمان و سازه‌های مختلف می‌باشد. کنترل خواص مواد در مقیاس نانو و نیز کنترل اثرات فیزیکی و شیمیایی مربوطه، تولید مواد و مصالح کاربردی در سازه‌ها با کارایی بالا را ممکن می‌سازد، که این امر باعث ایجاد ارزش افزوده، افزایش دوام، ارتقاء سطح کیفیت و پایداری محیط زیست می‌شود. فناوری نانو به عنوان یک فناوری کلیدی و بین رشته‌ای، فرصت‌های زیادی را جهت ساخت و ساز مقاوم‌تر، منعطف‌تر، مطلوب‌تر، پایدارتر و مقرون به صرفه‌تر فراهم کرده است. فناوری نانو را می‌توان در حوزه‌های مختلفی در ارتباط با سازه‌های صنعت برق به کار برد.

در فصل اول از این پروژه به شناسایی و معرفی مواد نانو ساختار و گردآوری ادبیات فنی و سوابق موضوعی بکارگیری از تکنولوژی نانو در سازه‌ها پرداخته می‌شود و تاریخچه‌ی استفاده از این مواد در صنعت (با تاکید بر کاربردی بودن در سازه‌ها) مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در فصل دوم از این پروژه به شناسایی دانش‌ها و فناوری‌های به‌روز جهانی مواد نانو ساختار در زمینه‌ی سازه‌ها پرداخته می‌شود و مقالات و تحقیقات داخلی و خارجی انجام گرفته در مورد بررسی مشخصات مکانیکی و کاربردهای مواد نانو ساختار معرفی شده در مرحله اول جمع‌آوری شده و پیشرفت‌ها و تحقیقات انجام گرفته در مورد استفاده از این مواد در سازه‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در فصل سوم از این پروژه به بررسی و امکان‌سنجی تولید و استفاده از مواد نانو ساختار در کشور پرداخته می‌شود. در این قسمت با شناسایی شرکت‌های فعال خارجی و همچنین داخل کشور، پتانسیل تولید و بکارگیری مواد نانو ساختار مورد استفاده در سازه‌ها در کشور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل چهارم از این پروژه اسناد بالادستی مرتبط با صنعت برق کشور مورد مطالعه قرار می‌گیرد و با توجه به رویکرد و اهداف این اسناد و نیازهای صنعت برق و انرژی کشور، الزامات بکارگیری از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین به منظور شناسایی جایگاه کنونی استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق، چرخه‌ی عمر فناوری و بازار استفاده از این مواد در سازه‌های صنعت برق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها، از میان عناوین اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو از سال ۹۵ تا ۹۷، عناوین پروژه‌هایی که می‌توانند با موضوع این پروژه مرتبط باشند استخراج و جمع‌آوری می‌شوند.

در فصل پنجم از این پروژه مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق معرفی می‌شوند و با توجه به مطالعات انجام گرفته، مزایا و معایب و محدودیت‌های استفاده از آنها و روش‌های بکارگیری آنها ارائه می‌شود و بکارگیری از آنها از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل ششم از این پروژه فهرست پروژه‌های مرتبط با به‌کارگیری مواد نانو ساختاردر سازه‌های صنعت برق به منظور تسریع توسعه‌ی این فناوری و نیل به ارزش‌های صنعت برق و انرژی کشور و تعیین مسیر روشن برای محققین در جهت تدوین سندهای راهبردی به جهت به‌کارگیری این مواد در سازه‌های صنعت برق، ارائه می‌شود.

در پایان از راهنمایی‌های ارزنده جناب آقای دکتر جانعلیزاده مدیر محترم گروه سازه‌های صنعت برق و مجری این پروژه و جناب آقای مهندس ذکاوتی، معاون محترم گروه و همکاران و اساتید محترم که در تهیه این گزارش ما را یاری کردند، آقایان مهندس امین دهقان، دکتر یگانه فلاح، مهندس مولایی و خانم مهندس سفری و همچنین آقای دکتر سلیمانی ناظر محترم پروژه و از پژوهشگاه نیرو به جهت حمایت مالی از این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

آزاده گودرزی

مدیر پروژه

فصل اول

شناسایی و معرفی مواد نانو ساختار و گردآوری ادبیات فنی و سوابق موضوعی

فهرست مطالب

مقدمه ۱۰

۱ شناسایی و معرفی مواد نانو ساختار و گردآوری ادبیات فنی و سوابق موضوعی ۱۱

۱-۱ معرفی مواد نانو ساختار و معرفی اجمالی خصوصیات مکانیکی و شیمیایی این مواد ۱۱

۱-۲ تاریخچه بکارگیری و استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌ها ۱۲

۱-۲-۱ بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای بتن با استفاده از مواد نانوساختار ۱۲

۱-۲-۱-۱ معرفی مواد نانو ساختار پرکاربرد در بهسازی خواص بتن ۱۵

۱-۲-۱-۱-۱ نانوذرات سیلیکا و سیلیکافوم ۱۶

۱-۲-۱-۱-۲ نانو آلومینا ۱۷

۱-۲-۱-۱-۳ نانوذرات کربنات کلسیم ۱۸

۱-۲-۱-۱-۴ نانوذرات اکسید تیتانیوم ۱۸

۱-۲-۱-۱-۵ نانوذرات رس ۱۸

۱-۲-۱-۱-۶ نانوذرات اکسید منیزیم ۱۸

۱-۲-۱-۱-۷ نانو ذرات اکسید آهن ۱۹

۱-۲-۱-۱-۸ نانو ذرات اکسید روی ۱۹

۱-۲-۱-۱-۹ نانوذرات اکسید زیرکونیوم ۱۹

۱-۲-۱-۱-۱۰ نانولوله‌های کربنی ۱۹

۱-۲-۱-۱-۱۱ نانوصفحات گرافن ۲۱

۱-۲-۲ بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای فولاد با استفاده از مواد نانوساختار ۲۲

۱-۲-۳ بهبود خواص و عملکرد سازه ای چوب با استفاده از مواد نانوساختار ۲۵

۱-۲-۴ مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی با استفاده از مواد نانو ساختار ۲۶

۱-۲-۵ کاربرد مواد نانو ساختار در میراگرها یا ابزارهای کنترل سازه ۳۰

۱-۲-۶ بررسی مصالح خود ترمیم شونده با بکارگیری مواد نانو ساختار ۳۱

۱-۲-۶-۱ خود ترمیمی بتن ۳۲

۱-۲-۷ معرفی نانو حسگرها و نانو سنسورها در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها ۳۳

۱-۲-۷-۱ کاربرد حسگرها در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها ۳۳

۱-۲-۷-۱-۱ انواع مواد نانو ساختار در تولید حسگر برای پایش سلامت سازه ۳۴
۱-۲-۷-۱-۲ معرفی برخی از کاربردهای حسگرهای تولید شده بر پایه مواد نانو ساختار در پایش سلامت سازه..... ۴۰
۱-۲-۸ بهبود شرایط ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار..... ۴۵
۱-۲-۸-۱ بررسی نانو ساختار خاک..... ۴۶
۱-۲-۸-۲ بهسازی خاک به کمک مواد نانو ساختار..... ۴۶
۱-۲-۸-۳ معرفی انواع مواد نانو مورد استفاده در ژئوتکنیک..... ۴۷
۱-۲-۸-۳-۱ نانوسیلیس ۴۷
۱-۲-۸-۳-۲ نانو رس..... ۴۸
۱-۲-۸-۳-۳ نانو لوله‌های کربنی ۴۹
۱-۲-۸-۳-۴ نانو کامپوزیت پلیمری ۵۰
۱-۲-۸-۳-۵ سایر نانو ذرات ۵۱
۱-۳ تاریخچه بکارگیری و استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق..... ۵۲
۱-۳-۱ مقدمه ۵۲
۱-۳-۲ سازه های صنعت برق..... ۵۳
۱-۳-۲-۱ دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده..... ۵۳
۱-۳-۲-۲ توربین‌های بادی..... ۵۵
۱-۳-۲-۲-۱ برج توربین بادی..... ۵۶
۱-۳-۲-۲-۲ پره توربین بادی ۵۸
۱-۴ شناسایی روش‌های استفاده و چالش‌های بکارگیری مواد نانو ساختار..... ۶۳
۱-۴-۱ چالش‌های استفاده از مواد نانو ساختار در صنعت بتن..... ۶۳
۱-۴-۲ روش‌های اضافه کردن نانومواد به مخلوط بتن..... ۶۴
۱-۴-۳ خالص‌سازی و عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی..... ۶۵
۱-۴-۳-۱ خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی..... ۶۶
۱-۴-۳-۲ عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی..... ۶۷
۱-۵ مراجع..... ۶۸

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ **:**ساختار نانومقیاس ژل کریستاله شده **C-S-H** بر روی بستر کلسیت،گرفته شده توسط میکروسکوپ اتمی[۱۰]..... ۱۳
شکل ۱-۲: پل **Gärtnerplatz** در آلمان-بهره گیری از بتن پرمقاومت در ساخت دال بتنی پل[۱۱] ۱۴
شکل ۱-۳: استفاده از بتن خود تمیزشونده در پوشش خارجی کلیسا جوبیلی-میلان[۱۳]..... ۱۵
شکل ۱-۴: عکس میکروسکوپی از ابعاد ریزدانه های سیلیسی[۱۵] : راست: سیلیکافوم چپ: نانوسیلیکا..... ۱۶
شکل ۱-۵: عکس‌های میکروسکوپی الکترونی از فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمان[۱۶] شکل**a**: کریستال های مصرف نشده **$Ca(OH)_2$** خمیر سیمان معمولی شکل **b**: مصرف کریستال‌ها توسط نانوسیلیس شکل **c**: مصرف کریستال‌ها توسط سیلیکافوم..... ۱۷
شکل ۱-۶: نانو لوله‌های تک‌جداره و چندجداره[۲۳]..... ۲۰
شکل ۱-۷: ریزساختار ملات سیمانی حاوی نانولوله‌های چندجداره با دو طول و دو نوع درصد تمرکز مختلف[۲۴] ۲۱
شکل ۱-۸: نمودار مقاومت کششی-کرنش فولادهای مختلف، مقاومت فولادهای پرمقاومت پیشرفته AHSS نانوساختار در برابر فولادهای متداول[۲۷]..... ۲۳
شکل ۱-۹: نمودار تنش-کرنش فولاد MMFX2 و فولاد متداول[۲۸]..... ۲۴
خط آبی: فولاد عیار ۶۰ مطابق با استاندارد ASTM A615 - خط زرد: فولاد MMFX با نانوساختارهای ورقه‌ای ۲۴
شکل ۱-۱۰: ریزساختار فولاد MMFX با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[۲۹] سمت راست: عکسبرداری حوزه تاریک سمت چپ: عکسبرداری حوزه روشن..... ۲۴
شکل ۱-۱۱: رکاب‌های فولادی شاه تیر بتنی پل که از فولاد MMFX استفاده شده است، اوکلهاما، آمریکا[۳۰] ۲۵
شکل ۱-۱۲: عکس های میکروسکوپی از نانو الیاف ولاستونیت[۳۵]..... ۲۶
شکل ۱-۱۳: میکروگراف‌های SEM نشان می‌دهد نانو تیوب‌های کربن باند بیشتری با الیاف کربن ایجاد می‌کنند (a) نمونه بدون CNT، (b) نمونه با CNT [۳۸]..... ۲۸
شکل ۱-۱۴: مقاومت فشاری نمونه کنترل و نمونه‌های با درصد MWNT متفاوت در سنین مختلف [۴۱]..... ۲۹
شکل ۱-۱۵: نمونه‌های ترک خورده (a) قبل، (b) بعد از ترمیم [۴۲]..... ۳۰
شکل ۱-۱۶: (a) تست خمش دو نقطه‌ای (b) نحوه شکست نمونه‌ها [۴۲]..... ۳۰
شکل ۱-۱۷: نانو ساختار کربن سیاه [۵۲]..... ۳۵
شکل ۱-۱۸:ساختار سیلندری نانو لوله‌های تک‌جداره (SWNT) [۵۳]..... ۳۶
شکل ۱-۱۹: ساختار سیلندری نانو لوله‌های چند جداره (MWNT) [۵۲]..... ۳۶
شکل ۱-۲۰: ساختار نانو الیاف کربنی [۵۲]..... ۳۷
شکل ۱-۲۱: ساختار نانو صفحات گرافن [۵۲]..... ۳۸
شکل ۱-۲۲: عکس‌های SEM از نوع‌های مختلف پودر نیکل [۵۲]..... ۳۹

شکل ۱-۲۳: طرحی از میدان کمک‌کننده به رسانایی ایجاد شده با نانو نوک‌های موجود بر سطح پودر نیکل کروی با نانو دانه‌های تیز [۵۲]..... ۴۰
شکل ۱-۲۴: فرآیند ساخت سنسور CNTCs ها [۶۱]..... ۴۲
شکل ۱-۲۵: فرآیند ساخت سنسور SEC ها [۶۱]..... ۴۳
شکل ۱-۲۶: بار اعمالی به تیر و پاسخ سنسورها: (a) بار هارمونیک اعمالی به تیر، (b) پاسخ سنسور CNTCs ، c)پاسخ سنسور SEC [۶۱]..... ۴۳
شکل ۱-۲۷: نتایج FDD، PSD (a) از خروجی CNTCs، (b) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب عمودی از شتاب‌سنجی که به طور همزمان با CNTCs بکار گرفته شد، (c) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب افقی از شتاب‌سنجی که به طور همزمان با CNTCs به کار گرفته شد، (d) PSD از خروجی SEC ، (e) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب عمودی از شتاب سنجی که به طور همزمان با SCE به کار گرفته شد، (f) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب افقی از شتاب سنجی که بطور همزمان با SCE به کار گرفته شد (g) شکل مودی استخراج شده از خروجی‌های شتاب [۶۱]..... ۴۴
شکل ۱-۲۸ : مقایسه اندازه ذرات [۶۶]..... ۴۶
شکل ۱-۲۹: نانو ذرات سیلیس..... ۴۸
شکل ۱-۳۰: نانو رس و تصویر میکروسکوپ الکترونی از مونت‌موریلونیت..... ۴۸
شکل ۱-۳۱: نانو لوله‌های کربنی[۶۹]..... ۴۹
شکل ۱-۳۲: انواع نانو کامپوزیت‌ها [۷۰]..... ۵۰
شکل ۱-۳۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانو لوله‌های کربنی[۷۰]..... ۵۱
شکل ۱-۳۴: الف) نانو اکسید آهن ب) نانو اکسید آلومینیم ج) زئولیت د) دی اکسید تیتانیوم..... ۵۱
شکل ۱-۳۵: تیر توزیع برق و دکل انتقال هوایی برق..... ۵۳
شکل ۱-۳۶: برج‌های خنک‌کننده و دودکش‌های نیروگاه[۷۲]..... ۵۴
شکل ۱-۳۷: قطعات پیش ساخته برج توربین بادی بتنی از جنس بتن فوق توانمند[۷۷]..... ۵۸
شکل ۱-۳۸: نمودارهای شکست خستگی و سختی شکست کامپوزیتهای حاوی چسب اپوکسی تقویت شدت با نانورس[۸۸]..... ۶۰
شکل ۱-۳۹: منحنی بار-جابجایی تیر طرهای دوبل با عرض ثابت برای تعیین سختی شکست بین لایه‌ای مود یک[۹۰]..... ۶۱
شکل ۱-۴۰: منحنی بار-جابجایی تیر طرهای دوبل با عرض کم شونده برای تعیین سختی شکست بین لایه‌ای مود یک[۹۰]..... ۶۱
شکل ۱-۴۱: نمودار تنش چرخهای و عمر سازه برای دو اپوکسی خالص و تقویت شده به کمک نانولولههای کربنی[۹۱]..... ۶۲
شکل ۱-۴۲: تفاوت سطح ویژه ذرات نانو و سایر اجزای بتن که منجر به جذب آب بالای نانو مواد می‌گردد..... ۶۴
شکل ۱-۴۳: تصاویر SEM a) ناخالصی‌ها و رسوب روی سانتریفیوژ b) محلول روی سانریفیوژ حاوی SWNT خالص[۱۰۰]..... ۶۷

فهرست جداول

جدول ۱-۱: خصوصیات مکانیکی رزین اپوکسی اصلاح شده [۳۷].....۲۷

مقدمه

در مرحله‌ی اول از این پروژه به شناسایی و معرفی مواد نانوساختار و گردآوری ادبیات فنی و سوابق موضوعی به کارگیری تکنولوژی نانو در سازه‌ها پرداخته می‌شود.

در این راستا در ابتدا مفاهیم اولیه تکنولوژی نانو و مواد نانو ساختار معرفی می‌شوند. در ادامه‌ی پروژه تاریخچه‌ی به کارگیری این مواد در صنعت ساخت و ساز و سازه‌ها ارائه می‌شود. با مطالعات انجام شده و تحقیقاتی که در این پروژه صورت گرفت مشخص شد سهم عمده‌ی بهره‌مندی سازه‌ها از مواد نانوساختار مربوط به بهبود عملکرد بتن سازه‌ای، بهبود خواص و عملکرد فولاد و چوب، استفاده از تکنولوژی نانو در مقاوم‌سازی سازه‌ها و یا کاربرد این تکنولوژی در میراگرها و یا ابزارهای کنترل سازه، استفاده از مواد نانو ساختار در تولید مواد خودترمیم شونده، پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار و همچنین بهبود شرایط ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانو ساختار می‌باشد.

در این مرحله سعی بر این است که در حوزه‌های مطرح شده، نقش تکنولوژی نانو و مواد نانو ساختار معرفی و ارائه شود. در هر قسمت، مواد نانو ساختار کاربردی و نقشی که در تغییر خواص ایجاد می‌کنند، شرح داده شده است. همچنین در این مرحله، چالش‌های به کارگیری از مواد نانو ساختار ارائه شده‌اند.

۱- شناسایی و معرفی مواد نانو ساختار و گردآوری ادبیات فنی و سوابق موضوعی

۱-۱- معرفی مواد نانو ساختار و معرفی اجمالی خصوصیات مکانیکی و شیمیایی این مواد

علم نانو معرف مطالعه ماهیت و بکارگیری هر ماده‌ای در مقیاس نانو است. مطابق با تعاریف اکثر منابع علمی ارائه شده در این حوزه، مواد نانوساختار از نظر فیزیکی دسته‌ای از مواد محسوب می‌شوند که دارای حداقل یک بعد در مقیاس ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشند[۱]. با این حال برخی منابع، ذراتی با ابعاد بزرگتر (تا ۱۵۰ نانومتر) و حتی بسیار کوچکتر (تا ۰/۱ نانومتر) را در دسته مواد نانوساختار معرفی می‌کنند[۲, ۳]. خصوصیات مواد نانوساختار می‌تواند در مقایسه با ویژگی‌های همان نوع ماده در ابعاد میکرو یا ماکرو تفاوت زیادی داشته باشد. فیزیکدان آمریکایی ریچارد فاینمن در سال ۱۹۵۹ با ارائه مقاله علمی خود با عنوان "فضای خالی بسیاری در آن پایین وجود دارد" در جمع انجمن فیزیکدانان آمریکا، برای اولین بار مجامع علمی را با این شاخه جذاب فناوری آشنا کرد[۴].

فناوری‌های نانو به شکل طراحی، مشخصه‌یابی، تولید و بکارگیری سازه‌ها، دستگاه‌ها و سیستم‌ها با کنترل شکل و اندازه در مقیاس نانو است. در مطالعه این شاخه از علوم نیاز است تا از فناوری‌های پیشرفته عکس‌برداری برای مطالعه و بهبود رفتار مواد و طراحی و تولید مواد در ابعاد زیر ۱۰۰ نانومتر استفاده گردد[۵].

بکارگیری نانومواد در سازه‌ها نه تنها موجب افزایش عمر و دوام آن‌ها شده، بلکه مقدار انرژی لازم برای ساخت سازه‌ها را کم کرده و واکنش این سازه‌ها را نسبت به آتش، خوردگی، نفوذ آب، شکست، ترک و سایر عوامل کنترل می‌کند[۶]. دو مکانیزم اساسی باعث ایجاد تفاوت در خصوصیات نانومواد نسبت به سایر مواد می‌گردد. اول آنکه در مقیاس نانو، شرایط محیطی به شکل متداول بر ذرات ماده تاثیر نمی‌گذارند؛ در این مقیاس اثر جاذبه کمرنگ شده و نیروهای الکترواستاتیکی تاثیرگذار بوده و اثرات کوانتومی وارد عمل می‌شوند. از طرف دیگر به دلیل ابعاد نانویی ذرات، نسبت اتم‌های موجود در سطح ماده نسبت به اتم‌های داخلی آن افزایش می‌یابد و موجب شکل‌گیری خواص جدیدی نسبت به حالات متداول ماده می‌گردد. در ادامه برخی از خواص مواد نانوساختار مورد بررسی قرار گرفته است:

- خواص الکتریکی: خصوصیات الکتریکی نانوذرات بازه وسیعی از توانایی انتقال الکتریسیته از رسانش زیاد مانند مواد فلزی تا رسانش محدود مانند نیمه هادی‌ها را در بر می‌گیرد. مقدار این رسانش به قطر نانوذره بستگی دارد. توانایی رسانایی بالای این مواد ناشی از نواقص بسیار محدود در ساختار این ذرات است.
- رسانایی گرمایی: رسانایی گرمایی نانومواد به دلیل ارتعاشات پیوندهای کوالانسی آن‌ها بسیار بالا است. به دلیل مشابهی که در خواص الکتریکی اشاره شد، رسانش گرمایی این مواد بسیار بیشتر از فلزات است.
- خواص مکانیکی: نانومواد از ساختار مستحکمی برخوردار بوده و توانایی تحمل مقدار بسیار بالایی از کرنش‌ها را دارند. بسیاری از مصالح معمول به دلیل وجود نقایص ساختاری، تحت تنش‌های خمشی دچار شکست می‌شوند اما این نواقص در نانوذرات بسیار کمتر است[۷].

انقلاب فناوری نانو، تاثیر شگرفی بر زمینه‌های مختلف علمی، مهندسی و تجاری داشته است که از این جمله می‌توان به حوزه ساخت‌وساز اشاره کرد. ویژگی‌های منحصر به فرد این مواد می‌تواند منجر به بهبود قابل ملاحظه در ویژگی‌هایی همچون قابلیت کاتالیز، رسانایی، استحکام مکانیکی و حسگری شده و امکان توسعه کاربردهایی همچون کاتالیزورها، ابزارهای الکترونیکی و ذخیره‌کننده انرژی، مواد پیشرفته مکانیکی و حسگرها را فراهم نماید. به دنبال کاربردهای فناوری نانو در صنایع زیست‌پزشکی و الکترونیک، اخیرا صنعت ساخت‌وساز نیز مشخصات بنیادی مواد ساختمانی همچون استحکام، دوام و سبکی را بهبود بخشیده و ویژگی‌ها و کارکردهای مفیدی همچون عایق‌بندی حرارتی و خودپاک‌شوندگی را در آن‌ها ایجاد نمایند. این مواد می‌توانند به عنوان قطعه اصلی حسگری در پایش ایمنی و سلامت ساختمآن‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

با وجود قیمت نسبتا بالای محصولات توانمند شده با نانو، به احتمال زیاد کاربرد آن‌ها در مواد ساختمانی به دلایل زیر افزایش خواهد یافت:

۱-ایجاد ویژگی‌های ارزشمند با اضافه کردن مقدار بسیار کمی افزودنی؛

۲-توسعه سریع کاربردهایی که از ویژگی‌های نانومقیاس بهره می‌برند؛

۳-کاهش قیمت نانومواد در اثر افزایش مقیاس تولید[۸].

سند RILEM TC 197-NCM نخستین گزارش از پتانسیل‌های بکارگیری نانومواد در صنعت ساخت‌وساز و مصالح ساختمانی را ارائه کرده است که بندهای آن عبارتند از[۹]:

- بکارگیری نانوذرات، نانولوله‌های کربن و نانوالیاف به منظور افزایش مقاومت و دوام کامپوزیت‌های سیمانی در عین کاهش تولید آلودگی.
- تولید فولادهای ارزان قیمت ضد خوردگی.
- تولید مصالح عایق حرارتی با عملکردی ۱۰ برابر بهتر از مصالح تجاری فعلی.
- تولید پوشش‌ها و لایه‌های نازک با قابلیت خود تمیزشوندگی و تغییر رنگ‌دهی خودکار به منظور کاهش مصرف انرژی.
- تولید نانوحسگرها و مواد خود ترمیم پذیر.

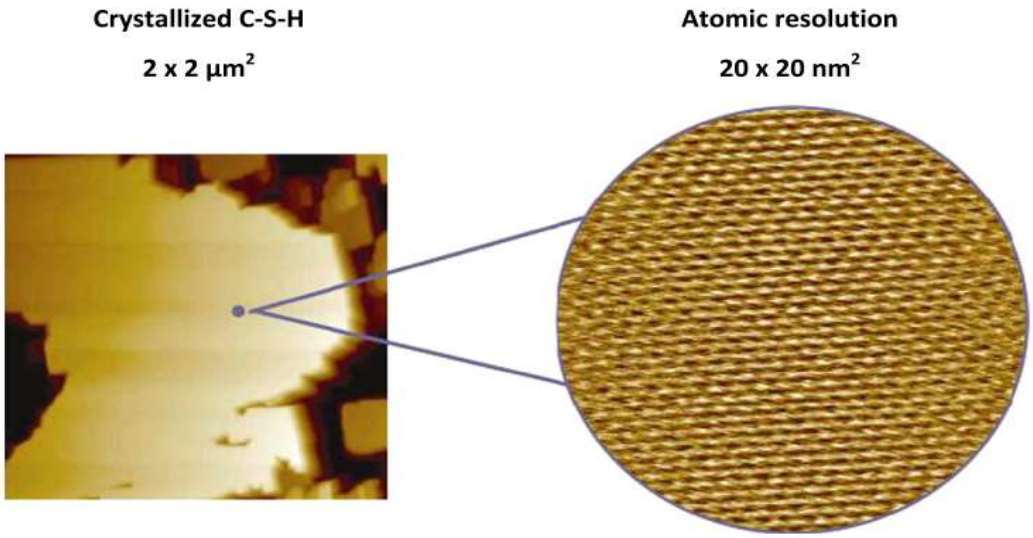
۲-۱- تاریخچه بکارگیری و استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌ها

۱-۲-۱ - بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای بتن با استفاده از مواد نانوساختار

بتن به عنوان رایج‌ترین مصالح ساختمانی دنیا، یک ماده در سطح ماکرو است که به شدت از خواص ذرات خود در ابعاد نانو تاثیر می‌پذیرد. لذا درک صحیح از این موضوع موجب هموار کردن مسیر در جهت ارتقای مقاومت، دوام و مراقبت از سازه‌های بتنی می‌گردد. در کاربردهای رایج، همواره خصوصیات مواد ساختمانی همچون بتن در مقیاس ماکرو ارزیابی شده است. به عنوان مثالی ساده، مواد سیمانی از حدود ۲۰۰۰ سال پیش به عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گرفت و امروزه نیز تولید سالانه بتن به ازای هر انسان بر روی کره زمین حدود ۲ تن برآورد شده است. مصالح سیمانی با وجود اهمیت زیاد، در دسترس بودن و سهولت ساخت آن، چون ساختار و ماهیت

پیچیده دارند، کمتر از بسیاری از مواد دیگر مورد فهم صحیح قرار گرفته‌اند. خصوصا بتن‌های سازه‌ای دارای سازه‌های کامپوزیتی، گستره بسیار متغیری از ابعاد را به عنوان مثال از مقیاس بسیار کوچک نانومتری مانند تخلخل‌ها و ژل C-S-H تا مقیاس‌های بزرگی همچون آرماتورهای فولادی را در بر می‌گیرند. در میان این دو سر بازه نیز سایر اجزای بتن مانند ذرات خمیر و سنگدانه‌های مختلف قرار دارند. این ساختار بتن با گذشت زمان و پیشرفت فرآیندهای هیدراتاسیون سیمان می‌تواند شکل پیچیده‌تری هم به خود بگیرد.

عملکرد بتن به شدت متاثر از محصول هیدراته اصلی سیمان و ژل C-S-H بوده و خود این ماده نیز ذاتا کامپوزیتی نانومقیاس و متشکل از شبکه‌های چند مقیاسه از ریزترک‌ها و منافذ مویرگی است (شکل ۱–۱)؛ از این رو بررسی اساسی نحوه رشد و رفتار ماتریس سیمان و نحوه اندرکنش آن با سایر عوامل و شرایط محیطی می‌تواند در توسعه بتن‌های توانمند[۱] و همچنین کنترل ویژگی‌های آن‌ها سودمند باشد. در سال‌های اخیر و با پیشرفت سریع تکنولوژی و ابزارهای آزمایشگاهی، پروژه‌های تحقیقاتی پرشماری در ارتباط با مطالعات نانو-میکرومقیاس مواد سیمانی در سازه‌های مختلف انجام گرفته است[۲].



شکل ۱–۱ :ساختار نانومقیاس ژل کریستاله شده C-S-H بر روی بستر کلسیت،گرفته شده توسط میکروسکوپ اتمی[۱۰]

نانوذرات به واسطه داشتن نسبت بالای سطح ظاهری به حجم، پتانسیل واکنش‌پذیری بسیار زیادی از خود نشان می‌دهند. مطالعات انجام شده بر روی نانوذرات اغلب بر روی شناخت خواص نانوسیلیس و نانو اکسید تیتانیوم انجام گرفته است. با این حال تحقیقاتی نیز بر روی افزودن موادی چون اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و نانوذرات رس به بتن انجام گرفته است. نانوذرات به شکل هسته‌هایی در کنار فاز سیمانی در نقش تقویت‌کنندگی بافت بتنی عمل کرده و به عنوان پرکننده باعث متراکم سازی ماتریس سیمانی شده و در نهایت تخلخل بتن را کاهش می‌دهند.

[۱] High Performance Concrete (UPC)

تحقیقات نشان می‌دهد افزودن نانوذرات سیلیس کارایی و مقاومت بتن را بهبود بخشیده و همچنین باعث افزایش مقاومت بافت بتن در برابر نفوذ آب شده و آبرفتگی کلسیم را بالا می‌برد. یکی از کاربردهای چنین نانوذراتی در ساخت بتن‌های پرمقاومت و یا بتن‌های فراتوانمند است. در این نوع از بتن‌ها با افزودن ذرات پرکننده کوچک مانند خاکستر بادی ریزساختار و همچنین نانوذرات سیلیس، مقدار ژل C-S-H یا در واقع همان قسمت اصلی بافت بتن افزایش می‌یابد و با نفوذ این ژل به حفره‌های مویرگی و فضاهای خالی، ساختار بتن متراکم‌تر و در نتیجه مقاومت فشاری آن افزایش می‌یابد. مصالح مورد استفاده برای ساخت پل Gärtnerplatzbrücke در آلمان از این نوع بتن بوده است که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. طبق پیش‌بینی متخصصان دانشگاه MIT، به دلیل استفاده از چنین بتنی با بافت بسیار متراکم، مقدار عمر این بتن در حدود دو برابر بتن‌های متداول یعنی چیزی در حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ سال خواهد بود[۱۰].



شکل ۱-۲: پل Gärtnerplatz در آلمان-بهره گیری از بتن پرمقاومت در ساخت دال بتنی پل[۱۱]

نانوذرات اکسید تیتانیوم دسته دیگری از نانوذرات افزودنی به بتن هستند که می‌توانند در کوتاه‌مدت باعث افزایش نرخ هیدراتاسیون سیمان پرتلند شوند و مقاومت‌های فشاری، خمشی و همچنین مقاومت در برابر سایش بتن را بهبود بخشند. علاوه بر تاثیرات سازه‌ای در بتن، در تحقیقات مختلفی خاصیت خود تمیزشوندگی بتن حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم و کمک آن به حفظ محیط زیست ثابت شده است. این ماده به وسیله عملکرد تحریک فوتوکاتالسیتی، آلودگی‌های NOx، کربن مونواکسید، VOCها، کلروفنول‌ها و آلدهیدهای ناشی از دود خودروها و صنایع را کاهش می‌دهد. امروزه بتن‌های خودتمیزشونده توسط شرکت‌های تجاری مختلف در پوشش سازه‌ها نظیر شکل ۱-۳ و در مصالح جاده‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند[۲].



شکل ۱-۳: استفاده از بتن خود تمیزشونده در پوشش خارجی کلیسا جوبیلی-میلان[۱۳]

افزودن نانوذرات اکسید آهن در بتن نوعی توانایی خود حسگری ایجاد می‌کند. در واقع مقاومت الکتریکی ملات سیمانی حاوی نانو اکسید آهن با توجه به بار وارده تغییر می‌کند که این خود بیانگر این است که بتن توانسته تنش فشاری بر خود را احساس کند. افزودن این نانوذرات به بتن موجب بهبود مقاومت فشاری و خمشی بتن نیز می‌گردد. کاربرد نانوذرات اکسید آلومینیوم در بتن به شدت در افزایش مدول الاستیسیته این ماده ساختمانی تاثیرگذار است. افزودن تنها ۵ درصد از این ماده به ملات سیمانی، مدول الاستیسیته آن را ۱۴۳ درصد افزایش می‌دهد. این در حالی است که بهبود چندانی در مقاومت فشاری با افزودن این نانوذرات مشاهده نشده است[۱۲].

نانوذرات رس توانسته‌اند بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد مکانیکی، مقاومت در برابر نفوذ کلراید، خواص خود تحکیمی و کاهش نفوذپذیری و افت بتن از خود نشان دهند.

نانوالیاف و نانولوله‌های کربن از جمله مناسب‌ترین گزینه‌ها به منظور تقویت مصالح پایه سیمانی هستند که مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. این نانوالیاف کربنی دارای استحکامی فوق‌العاده، مدول الاستیسیته بسیار بالا در حدود چندین تراپاسکال و مقاومت کششی چندین گیگاپاسکالی هستند[۱۱]. این مواد نانوساختار به دلیل ساختار رشته‌ای خود پتانسیل بالایی در بهبود مقاومت مکانیکی مواد سیمانی و مقاومت در برابر گسترش ترک دارند. طبق آزمایش‌های صورت گرفته، نانولوله کربن می‌تواند بر گیرش کوتاه مدت سیمان تاثیر گذاشته و می‌تواند یک اتصال مستحکم بین نانولوله و خمیر سیمان ایجاد کند[۱۳].

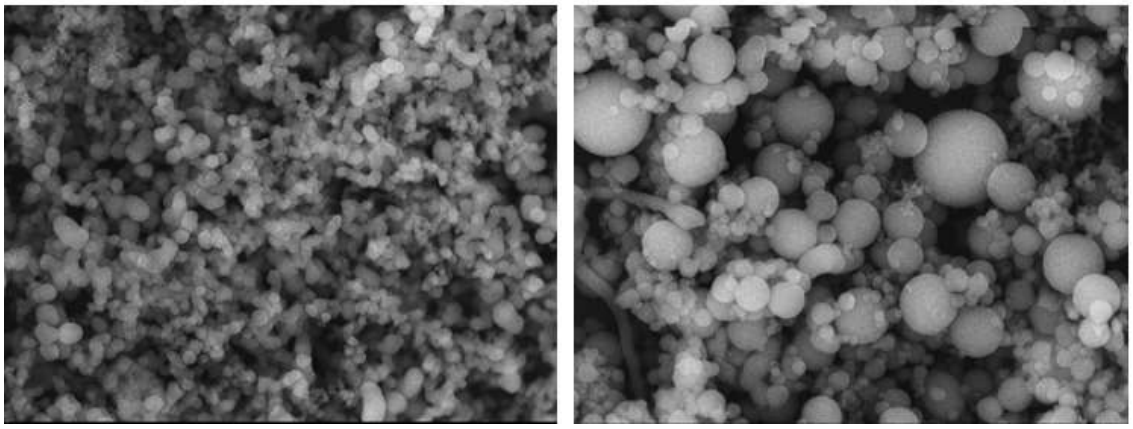
۱-۱-۲-۱- معرفی مواد نانو ساختار پرکاربرد در بهسازی خواص بتن

یکی از فواید کریستال‌های نانو مقیاس که از نانو ذرات تشکیل می‌شوند، پر کردن فضاها و حفرات خالی ماتریس سیمان است. اضافه کردن نانو ذرات که منجر به تشکیل نانو کریستال‌ها می‌شود، باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و برشی می‌شود.

۱-۱-۱-۲-۱- نانوذرات سیلیکا و سیلیکافوم

در ارتباط با کاربرد نانوتکنولوژی در بتن، نانو سیلیکا یا سیلیکون دی اکسید و فرم کلوییدی آن به نام سیلیکافوم توجه بسیاری از جوامع علمی را به خود جلب کرده است (شکل ۱-۴). خصوصیات ممتاز این مواد باعث شده تا در سال‌های اخیر مطالعات زیادی روی این مواد انجام گیرد. در واقع، کاربرد سیلیکافوم و نتایج مثبت استفاده از آن، به شکل وسیعی در جوامع تحقیقاتی بررسی شده است. از فواید این ماده می‌توان به مقاومت فشاری اولیه بالا، مقاومت کششی، خمشی و مدول الاستیسیته بالا، دوام مناسب و نفوذپذیری کم اشاره کرد. نقاط قوت این ماده نانوساختار موجب افزایش کاربرد این ماده در تولید بتن‌های پرمقاومت پل‌ها، دال بتنی پارکینگ‌ها و سازه‌های دریایی شده است[۱۴].

برای تهیه ملات یا بتن با نسبت آب به سیمان کم، اصطکاک داخلی بین دانه‌ها و کلوخه‌شدگی ذرات، بسیار شدید است و نهایتا موجب پراکنش ضعیف دانه‌های صلب در حالت بتن سخت شده می‌گردد. از این رو طبق تحقیقات، افزودن نانوسیلیس و سیلیکافوم کمک زیادی به بهبود ساختار بتن خواهد کرد.



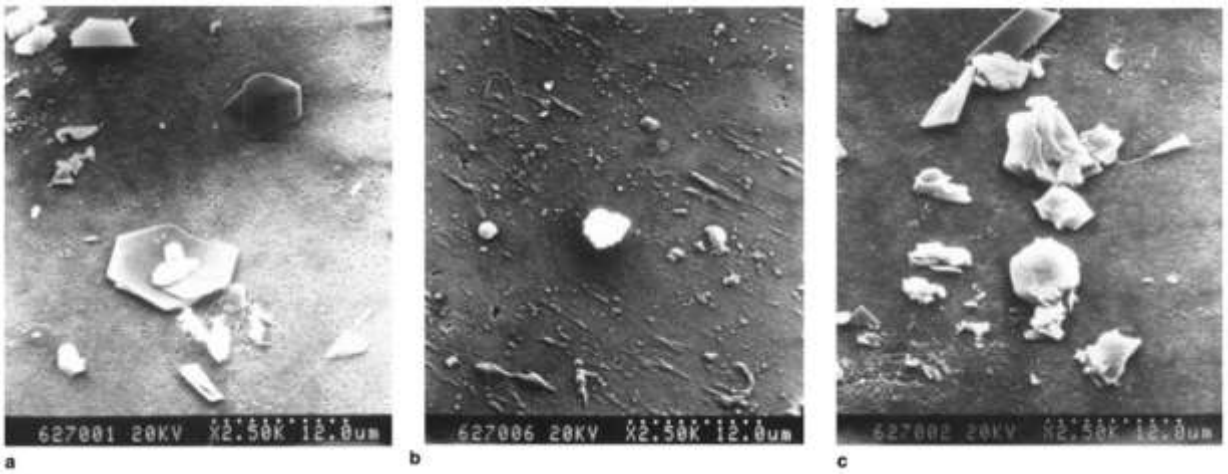
شکل ۱-۴: عکس میکروسکوپی از ابعاد ریزدانه های سیلیسی[۱۵] : راست: سیلیکافوم چپ: نانوسیلیکا

نانوسیلیکا و سیلیکافوم به دو شکل در بتن عمل عمل می‌کنند. در مرحله اول وقوع واکنش پوزولانی سیلیکا و کلسیم هیدروکسید(CH) است. این واکنش، مقدار بیشتری ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) یا همان جزء اصلی مقاومت و تراکم خمیر سخت شده سیمان را به وجود می‌آورد.

به دلیل سطح زیاد ذرات پوزولانی، واکنش‌های پوزولانی افزایش می‌یابند. مرحله دوم واکنش یک تاثیر فیزیکی است؛ زیرا که ذرات نانوسیلیکا در حدود ۱۰۰ برابر از ذرات سیمان کوچکتر هستند. این نانوذره می‌تواند حفرات موجود را در همان ابتدا و تا حدی پس از زمان گیرش پر کند و تراکم نهایی را افزایش دهد. طی این فرآیند، تخلخل و نفوذپذیری بتن کم شده و در نهایت وزن سیمان استفاده شده در مخلوط کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان گفت حضور نانوذرات سیلیکا در طرح اختلاط بتن، رفتار و خصوصیات بتن در حالت تازه و در حالت سخت شده را بسیار متحول می‌کند.

علیرغم فرمول شیمیایی یکسان و تشابه ساختار سیلیکافوم و نانوسیلیس، تاثیر حضور این دو ماده در بتن تا حد زیادی تفاوت دارد. نانوسیلیس به جهت ساختار نانویی و فعالیت پوزولانی خود، سرعت فرآیند هیدراتاسیون را به شکل قابل توجهی بالا می‌برد. به علاوه، نانوسیلیس قادر است مقدار بیشتری از کریستال‌های CH را مصرف کرده

و با این کار باعث بهبود قابل توجه فصل مشترک خمیر سیمان و سنگدانه‌ها و افزایش چسبندگی بین ذره‌ای آن‌ها شود و از این لحاظ بسیار موثرتر از سیلیکافوم عمل می‌کند. تصاویر حاصل از بررسی ذره‌بینی الکترونی خمیر سیمان معمولی، حاوی دوده سیلیس و نانو سیلیس در شکل ۱-۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود، در خمیر سیمان معمولی کریستال‌های CH با اندازه بزرگ و لبه‌های صاف وجود دارد. از سوی دیگر کریستال‌های CH در خمیر سیمان دارای دوده سیلیس، با اندازه کوچکتر و لبه‌های صاف مشاهده می‌گردد. در خمیر سیمان دارای نانو سیلیس، کاهش اندازه کریستال CH و همچنین ناصافی آن نشان‌دهنده واکنش‌پذیری بالای این ماده و ادامه واکنش‌های هیدراتاسیون می‌باشد [۱۶]. بازده عملکرد نانوذرات سیلیکا در بتن وابسته به مورفولوژی و ماهیت آن، کاربرد فوق‌روان‌کننده و فرآیندهای مختلف مانند فرآیندهای حرارتی، آلتراسونیک و ... است. با این حال، یکی از مهم‌ترین مشکلات بکارگیری نانوسیلیکا و کاهش مقاومت بتن آن، کلوخه‌شدگی نانوذرات در بازه ۳۰ تا ۱۰۰ نانومتری در مرحله پایانی خشک شدن فرآیند سُل-ژل است؛ لذا فرآیند دیسپسیون مرحله‌ای اساسی در تعیین مشخصات بتن تازه و بتن سخت شده و خواص مکانیکی آن محسوب می‌شود و لازم است تا به دقت مورد توجه قرار گرفته و پیاده‌سازی شود.



شکل ۱-۵: عکس‌های میکروسکوپی الکترونی از فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمان[۱۶] شکل a: کریستال‌های مصرف نشده $Ca(OH)_2$ خمیر سیمان معمولی شکل b: مصرف کریستال‌ها توسط نانوسیلیس شکل c: مصرف کریستال‌ها توسط سیلیکافوم

۲-۱-۱-۲-۱- نانو آلومینا

نانوذرات آلومینیوم ترکیبی شیمیایی متشکل از آلومینیوم و اکسیژن هستند و متداول‌ترین نوع اکسید آلومینیوم محسوب می‌شوند. این ماده به اختصار آلومینا نامیده می‌شود و عموما باعث بهبود خواص بتن می‌گردد. جایگزینی بخشی از سیمان با آلومینا به دلیل واکنش نانو آلومینیوم با کلسیم هیدروکسید باعث تشکیل ژل C-S-H در بتن می‌شود. نرخ این واکنش به سطح در دسترس بستگی دارد[۱۲].

۳-۱-۱-۲-۱- نانوذرات کربنات کلسیم

کربنات کلسیم متداول‌ترین ماده تشکیل‌دهنده سنگ‌ها است و قسمت عمده پوسته ارگانیسم‌های دریایی را تشکیل می‌دهد. محققان زیادی استفاده از این نانو ذره را باعث بهبود شکل‌گیری بافت بتن دانستند زیرا که این ماده به عنوان پایگاهی برای هسته‌زایی عمل کرده و سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون را افزایش می‌دهد[۱۲].

۴-۱-۱-۲-۱- نانوذرات اکسید تیتانیوم

کاربرد نانوذرات تیتانیوم در بتن از چندین جنبه قابل بحث و بررسی است. اصولا تولید سیمان با بوجود آوردن مقدار زیادی از انواع آلودگی‌های زیست‌محیطی مانند اکسیدهای کربن و نیتروژن همراه است که این موضوع باعث روی آوردن به تکنولوژی‌های جدید به منظور کاهش اثرات مخرب آن شده است. از این رو به دلیل خصوصیات فوتوکاتالیستی قوی نانوذرات تیتانیوم، بکارگیری آن موجب کاهش تاثیرات آلودگی و خصوصیاتی چون خودتمیزشوندگی، گندزدایی و پایداری ماده زمینه می‌گردد. از اثر خودتمیزشوندگی این ماده در برخی ساختمآن‌ها، مواد روسازی و روکش نهایی برخی سازه‌ها استفاده شده است. علاوه بر خصوصیات خود تمیزشوندگی نانوذرات تیتانیوم، استفاده از آن در کامپوزیت‌های سیمانی برخی خواص مربوط به این بتن‌ها را بهبود داده است[۱۲].

۵-۱-۱-۲-۱- نانوذرات رس

بکارگیری نانوذرات رس به منظور تقویت کامپوزیت‌های سیمانی توجه جوامع علمی و بخش‌های صنعتی را برانگیخته است زیرا که با افزودن مقادیر اندکی از این ماده در ترکیب، خواص مکانیکی بتن به طرز قابل توجهی بهبود می‌یابد. رس به دسته‌ای بزرگ از مواد معدنی تعلق دارد و ممکن است به عنوان یک سیلیکات هیدراته شناخته شود. کانی‌های رس با ساختار ریزدانه صفحه‌ای شکل خود شناخته می‌شوند. ذرات طبیعی رس در ابعاد میکرون و زیر میکرون بوده و اساس ساختار آن‌ها از لایه‌های کریستاله آلومینیوم فیلوسیلیکات تشکیل شده که هر کدام ضخامتی به اندازه ۱ نانومتر دارند. کانی‌های رس بسته به تفاوت در ساختار لایه‌ای به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند. کائولینیت، مونت‌موریلونیت، ایلیت و کلوریت، ۴ گروه اصلی رس می‌باشند. از میان آن‌ها دو گروه اول یعنی کائولینیت و مونت‌موریلونیت بیشتر به عنوان پرکننده در تولید بتن استفاده می‌شوند[۱۷-۲۱].

گروه کائولینیت چهار عضو مختلف از نظر ساختار فیزیکی دارد اما فرمول شیمیایی همه آن‌ها ثابت و به شکل $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ است. گروه مونت‌موریلونیت از گروه کائولینی بزرگ‌تر بوده و فرمول شیمیایی ساختار آن‌ها پیچیده و به شکل $(Ca,Na,H)(Al,Mg,Fe,Zn)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2XH_2O$ است. ساختار آن‌ها از لایه‌های سیلیکات به همراه لایه‌های فشرده از اکسید و هیدروکسید آلومینیوم تشکیل شده است. در حضور آلومینیوم و سیلیکا، ذرات رس به شکل هسته‌های هیدراتاسیون عمل می‌کنند و به دلیل دارا بودن خواص پوزولانی بالای خود، می‌توانند حفرات ماتریس سیمان را پر کنند و در نتیجه عملکرد بتن را بهبود دهند. متاکائولن دسته‌ای از کائولن‌ها هستند که طی واکنش با کلسیم، خواص پوزولانی بسیار بالایی کسب می‌کند که بکارگیری آن‌ها موجب ارتقای قابل توجه خواص مکانیکی بتن‌های پایه سیمانی می‌شود. از این رو در ادامه خواص بتن‌های حاوی نانوذرات رس از نوع متاکائولن بیشتر از بقیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند[۲۱, ۲۲].

۶-۱-۱-۲-۱- نانوذرات اکسید منیزیم

افزودنی‌های انبساطی بر پایه منیزیم که به منظور کاهش افت استفاده می‌شود چندین سال پیش کشف گردید و از آن موقع مورد استفاده قرار می‌گیرد. اکسید منیزیم با آب واکنش می‌دهد و واکنش هیدراتاسیون آن، هیدروکسید منیزیم را تولید می‌کند. به دلیل تفاوت در جرم حجمی اکسید منیزیم و هیدروکسید منیزیم، در اثر تبدیل MgO

به $Mg(OH)_2$ حجم مواد در حدود دو برابر می‌شود. با این حال دمای واکنش و اندازه ذرات اکسید منیزیم افزوده شده به طرح اختلاط بتن، تاثیر زیادی بر مقدار این انبساط و همچنین اندازه مقاومت مکانیکی بتن دارد[۲۰].

۷-۱-۱-۲-۱- نانو ذرات اکسید آهن

تحقیقات در مورد اکسید آهن یا هماتیت با فرمول Fe_2O_3 نشان داده است که این ذرات در ملات سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی و همچنین عامل ایجاد قابلیت خود-پایش بتنی می‌گردد. به علاوه بعضی پارامترها و ویژگی‌های دیگری مانند مقاومت الکتریکی بهبود می‌یابد[۲۰].

۸-۱-۱-۲-۱- نانو ذرات اکسید روی

در آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام شده بر روی ملات و بتن‌های دارای نانو ذرات اکسید روی (ZnO)، دیده شده که این ذرات زمان گیرش را افزایش و کارایی را کاهش می دهند؛ اما باعث افزایش مقاومت فشاری و همچنین افزایش دوام بتن می شوند[۲۲].

۹-۱-۱-۲-۱- نانوذرات اکسید زیرکونیوم

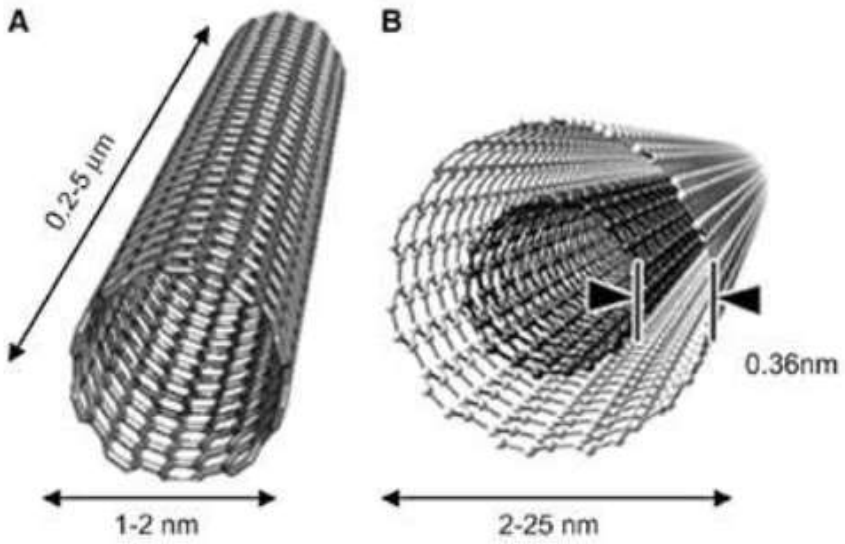
نانو پودر زیرکونیوم با فرمول شیمیایی ZrO_2 از جمله مواد پرمصرف در زمینه‌های مختلف الکترونیک، عایق، سرامیک و ... می‌باشد. اندازه این ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر بوده و نقطه ذوب آن ۲۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی ۵/۸۹ گرم بر میلی‌لیتر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نانوذرات اکسید زیرکونیوم به شکل nanodots، nanocrystals و nanofluids دارای سطح بیرونی هستند[۲۲].

۱۰-۱-۱-۲-۱- نانولوله‌های کربنی[۱]

نانولوله‌های کربنی به دلیل مقاومت مکانیکی بسیار بالاتر نسبت به سایر مواد نانوساختار، یکی از مهم‌ترین موادی هستند که در قرن بیست‌ویکم بیشتر مورد توجه قرار خواهد گرفت. این مواد در بسیاری از زمینه‌ها از جمله بیولوژی، شیمی، الکترونیک، داروسازی و اخیرا سازه کاربرد دارد. نانولوله‌های کربنی در ماتریس‌های مختلفی چون پلیمر، فلز و سیمان قرار داده شده و باعث بهبود مقاومت مکانیکی سازه‌ها شده است. نانولوله‌های کربنی ساختاری لوله‌ای شکل با قطری به ابعاد چند نانومتر هستند و نسبت طول به قطر بالایی دارند. ساختار اتمی آن از یک یا چند شبکه هم‌مرکز شش‌ضلعی متشکل از اتم‌های کربن تشکیل شده که با پیوند sp_2 و با فاصله ۰/۳۴ نانومتر از هم جدا شده‌اند[۲۳].

به دلیل ساختار خاص و مستحکم نانولوله‌های کربنی، این مواد دارای خواص سودمند زیادی هستند. CNTها دارای مدول یانگ بسیار بالا در حدود ۱ تراپاسکال هستند که در واقع حدود ۵ برابر بیشتر از مدول یانگ فولاد است و مقاومت کششی آن‌ها نیز در حدود ۵۰-۱۰۰ گیگاپاسکال می‌باشد. مطابق شکل ۱-۶، به طور کلی دو شکل از نانولوله‌های کربنی معرفی شده‌اند: نانولوله‌های کربنی تک‌جداره (SWCNT) و نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNT)[۲۳].

[۱] Carbon nano tubes

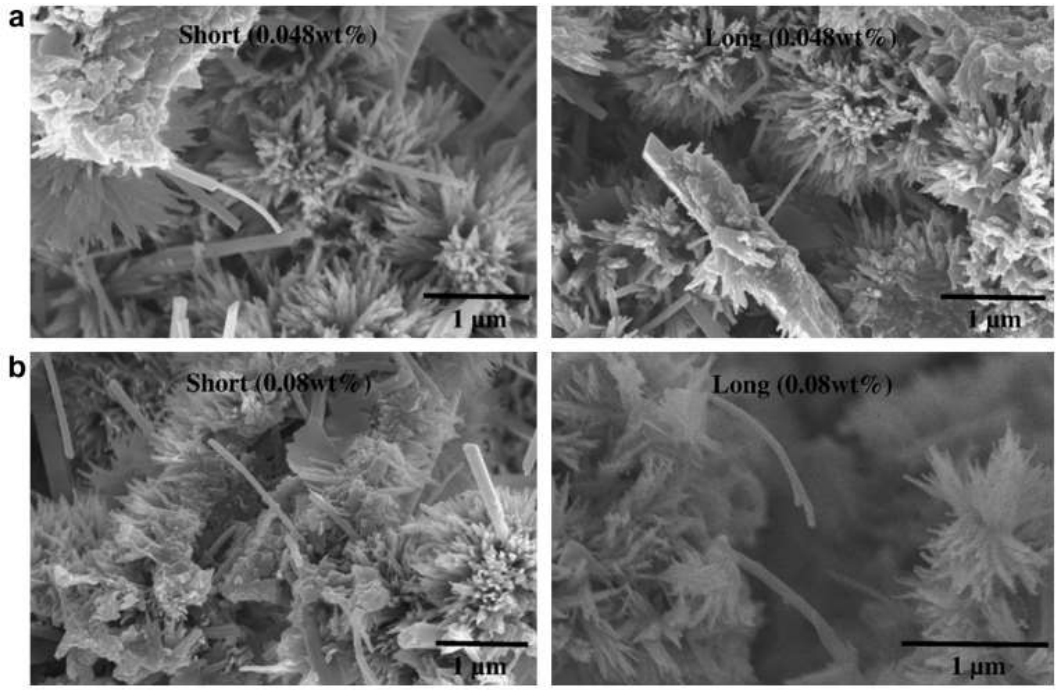


شکل ۱–۶: نانو لوله‌های تک‌جداره و چندجداره[۲۳]

نانولوله‌های کربنی تک‌جداره بهترین عملکرد مکانیکی خود را تحت بارهای کششی نشان می‌دهند؛ اما در معرض بارهای فشاری، چرخشی و یا مجموعی از این دو، دچار کاهش مقاومت و سختی می‌شوند. از سوی دیگر، عملکرد نانولوله‌های کربنی چندجداره در مقابل بارهای مختلف به مراتب پیچیده‌تر گزارش شده است. با این حال از نظر تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی، به نظر می‌رسد نانولوله‌های کربنی تک‌جداره، خواص مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و الکتریکی مطلوب‌تری نسبت به نانو لوله‌های چندجداره دارند. نسبت ابعادی بالای نانولوله کربنی به کاهش ترک‌های درون بتن کمک می‌کند.

جلوه مهمی از مطالعات مربوط به استفاده از نانولوله کربنی در بتن به پراکنش آن در ماتریس زمینه بستگی دارد. در واقع حضور موثر این ماده بستگی زیادی به قابلیت پراکنش نانولوله بدون کاهش نسبت ابعادی نانولوله‌ها دارد.

گدوتس و همکاران اثر دو نوع نانو لوله چندجداره مختلف با قطر و روش تولید یکسان و با طول‌های متفاوت بر روی پراکنش به روش آلتراسونیک را بررسی کردند (شکل ۱–۷). طول نانولوله بلند بین ۱۰ تا۳۰ میکرومتر و کوتاه بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر بود. هر دو نوع الیاف درون کامپوزیت با دو درصد تمرکز مختلف ۰/۰۴۸ و ۰/۰۸ قرار داده شدند و اثر طول لوله‌ها بر روی ریزساختار ملات سیمان بررسی شد. نتایج عکس‌های میکروسکوپی حاکی از آن بود که در اثر نیروی بالای آلتراسونیک، پراکنش نانولوله‌های کربنی چندجداره در داخل ملات به خوبی صورت گرفته است که این موضوع در واقع اهمیت انرژی مناسب آلتراسونیک در بهبود ریزساختار بتن را بیان می‌کند[۲۴].



شکل ۱–۷: ریزساختار ملات سیمانی حاوی نانولوله‌های چندجداره با دو طول و دو نوع درصد تمرکز مختلف[۲۴]

۱۱-۱-۱-۲-۱- نانوصفحات گرافن

گرافن یک آلوتروپ کریستالی دو بعدی از اتم‌های کربن است. در گرافن اتم‌های کربن به شکل ساختار منظم اتصالات شش ضلعی sp_2 و با طول پیوند بین اتمی ۰/۱۴۲ نانومتری قرار گرفته‌اند. یک نانولوله کربنی تک‌جداره در واقع یک صفحه لوله شده از صفحه گرافن محسوب می‌شود. از سوی دیگر صفحات گرافن بر روی هم قرار گرفته و ساختار گرافیت را تشکیل می‌دهند. گرافیت یک ساختار سه‌بعدی متشکل از میلیون‌ها لایه از گرافن است اما ساختار اکسید گرافیت کمی متفاوت می‌باشد. با اکسید شدن گرافیت، عامل‌های اکسیدکننده وارد شده به گرافیت در عین افزایش فاصله لایه‌های گرافن، این ماده را آب‌دوست می‌کنند. این خاصیت آب‌دوستی موجب پخش شدن این لایه‌ها در آب شده و در نهایت لایه یا لایه‌هایی از اکسید گرافن تولید می‌کند. تفاوت اصلی اکسید گرافیت و اکسید گرافن در تعداد لایه‌های آن‌ها است؛ در حالی که گرافیت اکساید یک سیستم چندلایه است، در پراکنش گرافن اکساید می‌توان یک لایه یا تعداد لایه‌های اندکی یافت.

یکی از فواید گرافن اکساید راحتی پراکنش این ماده در آب و سایر حلال‌های ارگانیک به دلیل عامل‌های اکسیژن آن است. این خصوصیت، کمک زیادی به خواص الکتریکی و مکانیکی ماتریس حاوی گرافن اکساید خواهد کرد.

گرافن اکساید به دلیل دارا بودن خواص ویژه یکی از نانومواد بسیار قابل توجه خواهد بود که کاربرد آن در صنعت ساخت‌وساز رو به افزایش است. مشابه نانومواد دیگر، گرافن اکساید سطح ویژه بالایی (۲۶۳۰ متر مربع بر گرم) دارد و مدول الاستیسیته آن در حدود ۱ تراپاسکال است. همچنین خواص رسانش الکتریکی و گرمایی بالای آن، استفاده از آن را در کاربردهای وسیعی توجیه می‌کند[۲۳].

۲-۲-۱ - بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای فولاد با استفاده از مواد نانوساختار

پس از انقلاب صنعتی دوم در اواخر قرن ۱۹ و ابتدای قرن ۲۰ تا به امروز، استفاده از فولاد به شکل گسترده در صنعت ساخت‌وساز فراگیر بوده است. صنعت ساخت‌وساز می‌تواند به میزان قابل توجهی از بکارگیری نانوتکنولوژی در فولاد بهره‌مند گردد. امروزه حوزه‌های زیادی از تحقیقات فولاد به علم نانوتکنولوژی اختصاص یافته است.

پدیده خستگی در فولاد موضوعی مهم است که می‌تواند باعث شکست سازه‌های در معرض بارهای چرخه‌ای مانند پل‌ها و برج‌ها گردد. این اتفاق ممکن است در تنش‌هایی کمتر از تنش تسلیم ماده رخ دهد و موجب کاستن از عمر مفید سازه شود. همچنین خستگی، تاثیر مهمی بر هزینه‌های چرخه عمر سازه‌ها دارد و استفاده مفید از منابع را محدود می‌نماید. بنابراین این موضوع در عین اهمیت از لحاظ ایمنی سازه، مساله‌ای مرتبط با پایداری منابع اقتصادی محسوب می‌گردد. مراکز تجمع تنش در فولاد، منبع شروع ترک بوده و گسترش همین ترک‌ها عامل خرابی ناشی از خستگی سازه می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که افزودن نانوذرات مس، ناهمواری‌های سطح فولاد را کاهش داده و موجب کاهش نقاط تمرکز تنش و افزایش مقاومت خستگی فلز می‌گردد[۲۵].

محل جوش و منطقه متاثر از حرارت[۱] که در مجاورت جوشکاری قرار دارند در صورت عدم پیش گرمایی قبل از عملیات جوشکاری، در صورت قرارگیری تحت بار دینامیکی ناگهانی، ممکن است ترد شده و بشکنند. لازم به ذکر است که تردشدگی ناشی از جوشکاری در مناطق با لرزه‌خیزی بالا، پدیده‌ای قابل توجه محسوب می‌شود. خرابی جوش و منطقه متاثر از حرارت در سازه‌های منطقه لس آنجلس پس از زلزله نورث‌ریج[۲] در ۱۹۹۴ باعث ارزیابی مجدد اتصالات جوشی سازه‌ها شد. در حال حاضر فلسفه طراحی اتصالات بر انتخاب نقاط ضعیف‌تر سازه به منظور تولید تغییرشکل‌های کنترل شده در نقاط دورتری از اتصالات جوشی ترد و یا بزرگ‌سازی سازه به منظور کاهش تنش‌های موجود برقرار است. در این حین، تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات منیزیم و کلسیم، ذرات موجود در ناحیه متاثر از حرارت جوش را در ورق‌های فولادی کوچکتر کرده و لذا سختی فلز افزایش می‌یابد. در نهایت، این افزایش سختی اتصالات جوش شده، موجب کاهش نیاز به منابع می‌گردد؛ زیرا در این صورت به مقدار ماده کمتری به منظور محدود کردن تنش‌ها در بازه مجاز نیاز است.

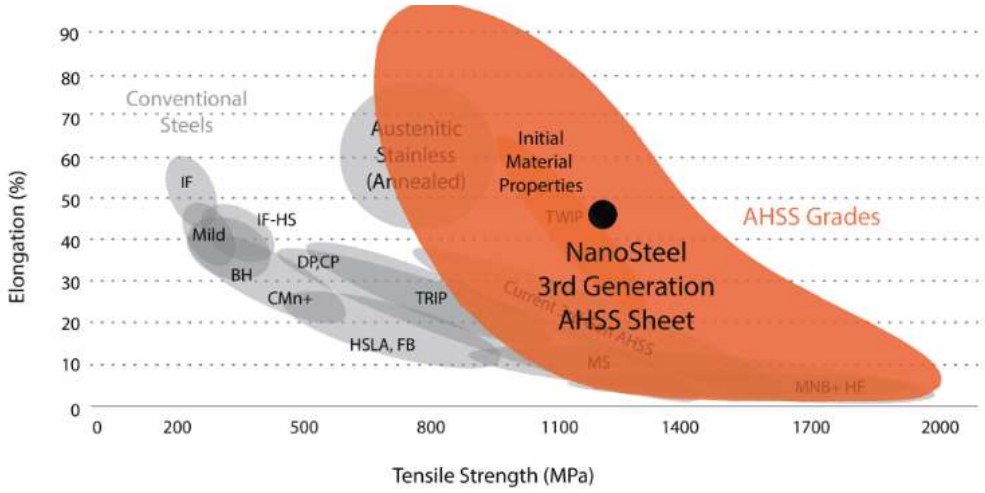
Sandvik Nanoflex و MMFX2 دو نوع از فولادهای تجاری پیشرفته با تکنولوژی بالا و حاوی تکنولوژی نانو و متعلق به دو شرکت تولیدی صنایع فولاد به همین نام‌ها هستند. هر دو نوع آن‌ها مقاوم در برابر خوردگی هستند. با این حال خصوصیات مکانیکی آن‌ها متفاوت است زیرا از دو نوع تکنولوژی نانوی مختلف در تولید آن‌ها استفاده شده است. فولاد Sandvik Nanoflex دارای مقاومت و مدول الاستیسیته بالا بوده و به دلیل داشتن ساختار نانومواد‌ی بسیار سخت مانند نانوذرات کروم، نیکل و مس، مقاومت آن‌ها در برابر خوردگی بالا بوده و کیفیت سطح و شکل‌پذیری مناسبی دارند. بکارگیری فولاد Sandvik Nanoflex در طرح‌های صلب و سازه‌های سبک بسیار به صرفه است. استفاده از این نوع خاص فولاد در صنعت در حال گسترش است؛ با این حال به دلیل قیمت بالا، استفاده از این نوع فولاد در آرماتورهای مسلح‌کنندگی بتن محدود به شرایط محیطی سختی است که بتواند هزینه‌های استفاده از آن را جبران کند. در شکل ۱–۸ نمودار مقاومت کششی-کرنش فولادهای مختلف و فولاد پرمقاومت مورد مقایسه قرار گرفته است. نوع دیگری از فولادهای تولید شده به وسیله تکنولوژی‌های نانو، فولاد MMFX2

---

[۱] Heat Affected Zone (HAZ)

[۲] Northridge

است که خواصی مشابه فولادهای ضد زنگ متداول دارند. در شکل ۱-۹ نمودار تنش کرنش فولاد MMFX2 و فولاد معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. این نوع فولاد به دلیل داشتن ساختار ورقه‌ای شکل، خواصی منحصر به فرد مانند مقاومت مکانیکی، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی دارند. ریزساختار فولاد MMFX2 در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. در این ساختار، نانوصفحات آستنتیت در بین لایه‌های جابجا نشده فاز مارتنزیت قرار می‌گیرند و یک فولاد خالی از کاربید را تشکیل می‌دهند. بدون تشکیل رگه‌های پیوسته کاربید، تشکیل سلول‌های میکروگالوانیک در فولاد کاهش می‌یابد. میکروگالوانیک‌ها عامل اصلی شروع و شتابدهی فرآیند خوردگی در فولاد هستند. این ریزساختار، نه تنها موجب جلوگیری از خوردگی فولاد شده، بلکه باعث افزایش مقاومت مکانیکی در عین شکل‌پذیری، مقاومت در برابر خستگی و همچنین مقاومت در برابر شکست ترد ناشی از حرارت می‌گردد. استفاده از فولاد MMFX2 در سازه‌های بتنی موجب دوام طولانی مدت سازه‌ها، تسهیل در جادهی بتن در قالب‌های به شدت مسلح به دلیل وجود فضای بیشتر(ناشی از نیاز کمتر به حجم فولاد زیاد)، نیاز به کاور بتن کمتر و در نهایت قیمت تمام شده پایین‌تر سازه بتنی می‌شود[۲۶]. نوع دیگری از فولادهای نسل جدید نانوساختار[۱] توسط شرکت NanoSteel تولید می‌شود. این دسته از فولادها به دلیل عملیات حرارتی ویژه‌ای که حین فرآیند تولید بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد، فازهای متداول بافت فولادی آن‌ها در ابعاد نانو تشکیل شده و استحکام کششی بسیار بالایی به این مواد می‌بخشد. این نوع از فولاد بیشتر در صنایع خودروسازی و در کاربردهای محیطی خاص مانند معدن و صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱].

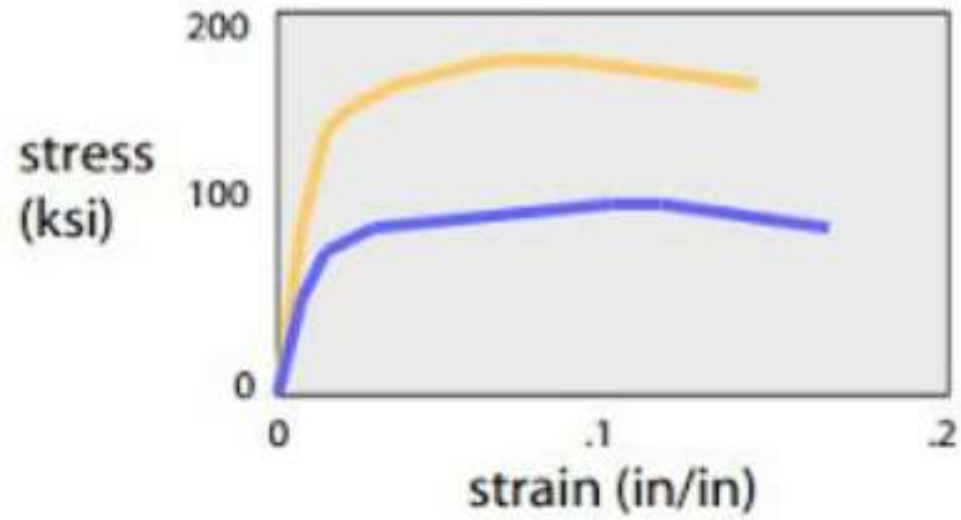


شکل ۱-۸: نمودار مقاومت کششی-کرنش فولادهای مختلف، مقاومت فولادهای پرمقاومت پیشرفته AHSS نانوساختار در برابر فولادهای متداول[۲۷]

از دیگر کاربردهای نانوساختارها در فلزات می‌توان به نانوذرات وانادیم و مولیبدن در پیچ‌های فولادی اشاره کرد. افزودن این مواد باعث به تاخیر افتادن وقوع ترک‌های ناشی از خستگی، کاهش اثرات تردی هیدروژنی و بهبود ریزساختار پیچ‌های پرمقاومت فولادی می‌گردد. ذکر این نکته مهم است که کاربرد نانولوله‌های کربنی به دلیل ماهیت لغزشی بودن این الیاف که ماهیتی گرافیتی دارند، در فولاد بسیار محدود است زیرا که پیوند خوردن این

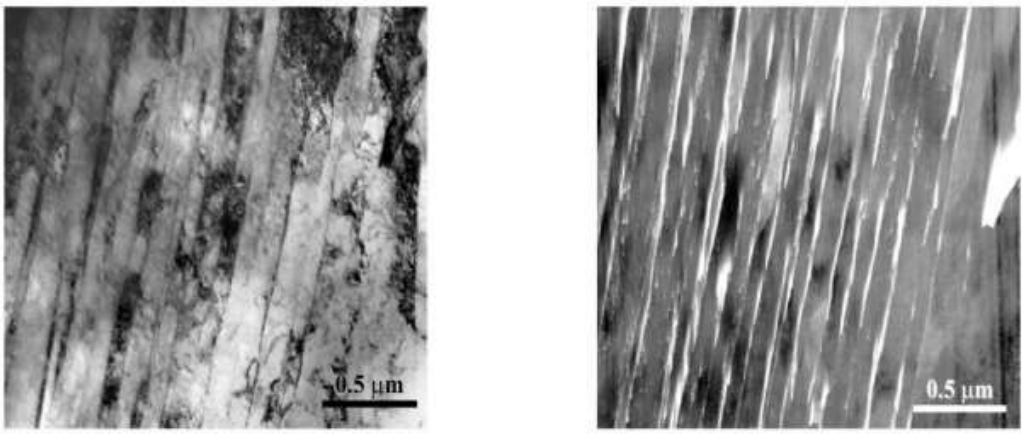
[۱] NanoSteel Advanced High Strength Steel (AHSS)

نانولوله‌ها با فولاد بسیار دشوار است. همچنین گرمای بسیار بالای فرآیند تولید فولاد، ارتعاش اتم‌های کربن را به شدت بالا می‌برد و باعث شکست پیوند ساختار نانولوله‌ها در ماتریس فولاد می‌گردد[۵].



شکل ۱–۹: نمودار تنش-کرنش فولاد MMFX2 و فولاد متداول[۲۸]

خط آبی: فولاد عیار ۶۰ مطابق با استاندارد ASTM A615 - خط زرد: فولاد MMFX با نانوساختارهای ورقه‌ای



Bright Field image (BF) **Dark Field image (DF)**

شکل ۱–۱۰: ریزساختار فولاد MMFX با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[۲۹]

سمت راست: عکسبرداری حوزه تاریک سمت چپ: عکسبرداری حوزه روشن

از پروژه‌های سازه‌های بتنی که در آن‌ها آرماتورهای فولادی MMFX استفاده شده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عرشه پل آیوا[۱]: آرماتورهای فولادی MMFX درون ساختار بتن عرشه پل بکارگرفته شدند. محل انجام پروژه: GundyCounty Iowa
- شاه‌تیر بتنی پل اوکلهاما[۲]: فولاد MMFX به عنوان گیره در بتن پیش ساخته شاه‌تیر پل (شکل ۱-۱۱)
- دال بتنی مجتمعی مسکونی در فلوریدا[۳]: این نوع آرماتورها در قسمت دال به منظور مقاومت در برابر خوردگی محیط ساحلی منطقه فلوریدا، در داخل بتن قرار داده شده‌اند[۲۹].



شکل ۱-۱۱: رکاب‌های فولادی شاه تیر بتنی پل که از فولاد MMFX استفاده شده است، اوکلهاما، آمریکا[۳۰]

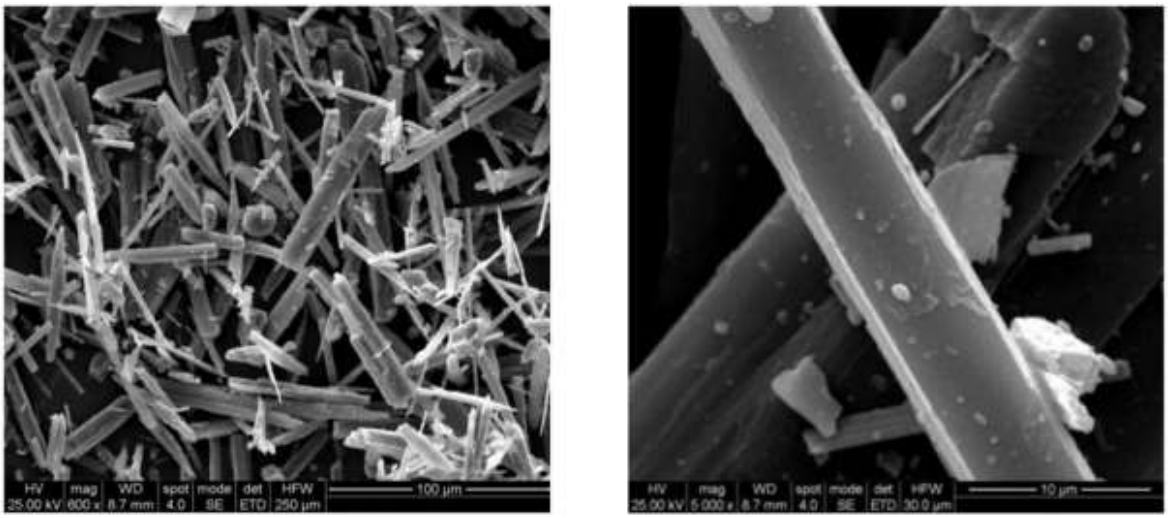
۳-۲-۱ - بهبود خواص و عملکرد سازه ای چوب با استفاده از مواد نانوساختار

چوب یک ماده سازه‌ای است که از ابتدای تمدن بشر تا به امروز برای ساخت خانه و پناهگاه مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال خلاف تصور عام مبنی بر استحکام پایین این ماده در مقایسه با فولاد، بافت چوب از نانولوله‌ها یا نانوفیبریل‌هایی به نام لیگنوسلولوزیک[۴] تشکیل شده که دو برابر فولاد استحکام دارند. این سطوح نانوساختار می‌توانند پتانسیل مناسبی برای کاربردهای خودتمیزشوندگی، خودترمیمی و بکارگیری حسگرهای الکترونیکی در بافت چوب باشند.

---

[۱] Iowa Bridge Deck
[۲] Oklahoma Bridge Girder
[۳] Florida residential complex
[۴] Lignocellulosic

طبق تحقیقات مشخص شده است که افزودن نانوذرات نقره و نانوذرات مس به چوب مانع ایجاد گرمای زیاد بر روی سطح چوب شده و از کاهش مقاومت مکانیکی آن در اثر افزایش دما جلوگیری می‌کند[۳۱]. بکارگیری سوسپانسیون نانوفلزات در پخش مناسب این نانومواد در بافت چوب موثر است. افزودن برخی نانوالیاف مانند ولاستونیت[۱] به چوب صنوبر باعث افزایش دوام در مقابل عوامل بیولوژیکی مهاجم می‌گردد. بر طبق تحقیقات دیگری، خصوصیات ضد آتشی چوب‌ها و سایر کامپوزیت‌های چوبی در اثر بکارگیری نانوذرات نقره و نانوالیاف ولاستونیت بهبود یافته است[۳۲, ۳۳]. این موضوع ناشی از ضرایب رسانایی بالای حرارتی این نانوذرات است که باعث شده تا گرما در یک سمت سطح چوب تجمع نکرده و با انتقال دادن این گرما به جهات مختلف، مانع از رسیدن دمای چوب به نقطه آتش‌گرفتگی در کوتاه مدت شود. نانوالیاف ولاستونیت از آنجا که ماده‌ای معدنی محسوب می‌شود (شکل ۱-۱۲) می‌تواند طبق یک سازوکار فیزیکی به عنوان یک مانع فیزیکی غیرقابل نفوذ در برابر شعله‌های آتش عمل کند. در واقع این الیاف در این حالت عملکردی مشابه رنگ‌های تورمی ضد آتش دارند و مانع آتش گرفتن چوب می‌شوند[۳۴].



شکل ۱-۱۲: عکس های میکروسکوپی از نانو الیاف ولاستونیت[۳۵]

۱-۲-۴ - مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی با استفاده از مواد نانو ساختار

مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی موجود شامل تکنیک‌های سنتی و پیشرفته می‌باشد. مواد متداولی که در عملیات مقاوم‌سازی، تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی و فولادی موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل: بتن، آرماتور، فولاد، پلیمرهای تقویت شده الیافی[۲] و رزین‌های اپوکسی[۳] می‌باشند[۳۶].

[۱] Wollastonite
[۲] Fiber Reinforced Polymer (FRP)
[۳] Epoxy resin

بیشتر سیستم‌های مقاوسازی شامل سیستم‌های مقاوم‌سازی مرکب است. اینگونه سیستم‌های مقاوم‌سازی می‌توانند با استفاده از افزایش مقطع، پس‌تنیدگی خارجی، چسباندن ورق‌های فلزی، بتن آرمه الیافی[۱]، FRP ها، چسباندن آرماتور، چسباند راد FRP نزدیک به سطح، کاشت آرماتور به همراه نصب شبکه آرماتور، ژاکت‌های بتنی، فولادی و FRP و یا ترکیب هر یک از این روش‌ها انجام پذیرند[۳۶].

مواد نانو ساختار در هر یک از این مصالح به منظور بهبود عملکرد فیزیکی و یا شیمیایی آن‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. رزین‌ها، اپوکسی‌ها، FRP ها و بتن‌های الیافی از جمله موادی می‌باشند که مواد نانو ساختار توانسته‌اند خصوصیات عملکردی آن‌ها را (مانند خصوصیات مکانیکی، خزش، دوام و ...) بهبود بخشند[۳۷-۴۰].

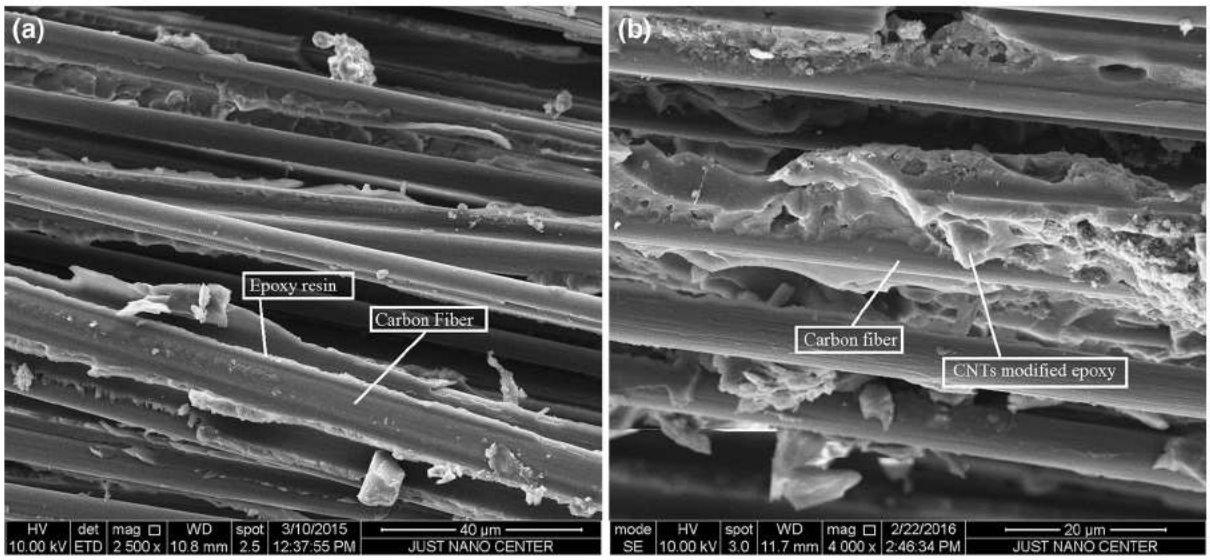
یکی از کاربردهای رزین‌های اپوکسی باند اتصال مصالح FRP با مصالح پایه (بتن، فولاد و یا FRP) است. تقویت سازه‌ها با FRP مزایای زیادی نظیر نسبت مقاومت به وزن بسیار بالا، مقاومت در برابر خوردگی و راحتی نصب دارد؛ اما تحت شرایط سخت آب و هوایی، بارهای ثابت رفت و برگشتی و ... مقاومت باند اتصال FRP و مصالح پایه کاهش می‌یابد. به منظور رفع این مشکل در اختلاط رزین اپوکسی فیلر نانو سیلیکا[۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد. رزین اپوکسی اصلاح شده مقاومت باند اتصال را تحت سیکل‌های طولانی شرایط بد حفظ کرده و علاوه بر این، خصوصیات مکانیکی آن نیز در شرایط برابر، افزایش قابل توجهی می‌یابد (جدول ۱-۱) [۳۷].

جدول ۱-۱: خصوصیات مکانیکی رزین اپوکسی اصلاح شده [۳۷]

Binder type	Compressive strength/MPa	Flexural strength /MPa	Tensile-shear strength /MPa	Tensile strength / MPa	Elongation rate /%	Young's Modulus /MPa
FRP-epoxy	98.1	81.6	21.8	48.0	1.84	2580
FRP-epoxy (Standard)	≥ 70	≥ 50	≥ 15	≥ 40	≥ 1.5	≥ 2500
Increasing rate to standard	40.1%	63.2%	45.3%	20.0%	22.7%	3.2%

نمونه دیگری از کاربرد نانو تکنولوژی در مقاوم‌سازی، استفاده از تیوب‌های نانو کربن[۳] در اپوکسی می‌باشد. استفاده از نانو تیوب‌های کربنی سبب افزایش مقاومت خمشی عضو مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای تقویت شده الیاف کربن[۴] می‌گردد. میکروگراف‌های SEM شکل ۱-**۱۳**، افزایش باند اتصال بین الیاف کربن، اپوکسی و بتن را در تیر مقاوم-سازی شده با CFRP نشان می‌دهد[۳۸].

[۱] Textile Reinforced Concrete (TRC)
[۲] Nano silica
[۳] Carbon Nanotubes (CNTs)
[۴] Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

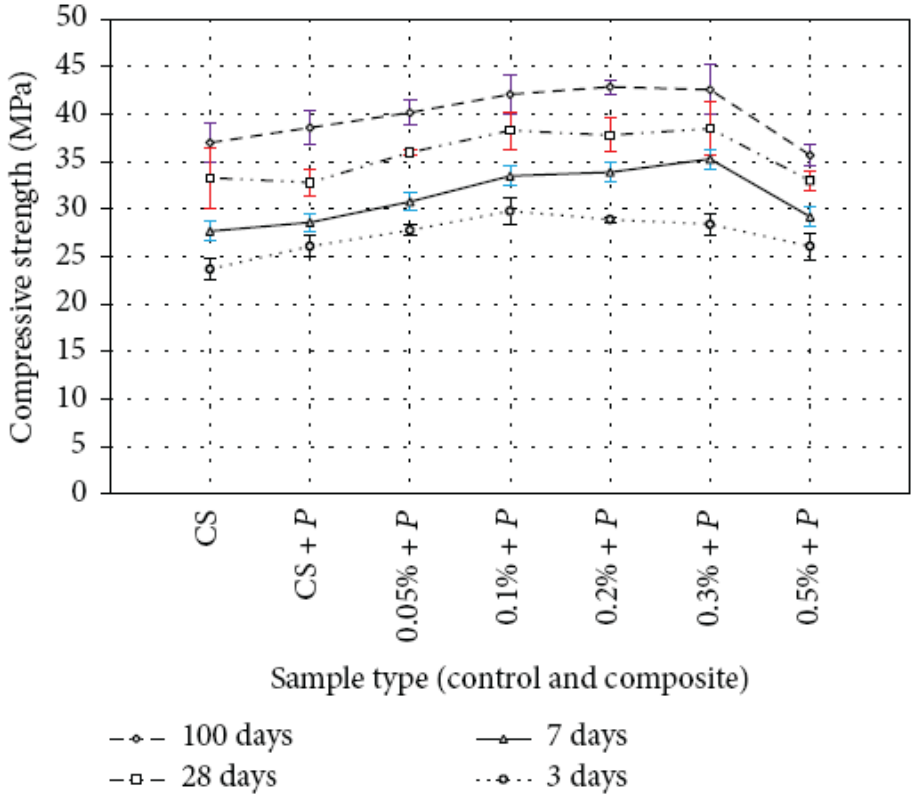


شکل ۱–۱۳: میکروگراف‌های SEM نشان می‌دهد نانو تیوب‌های کربن باند بیشتری با الیاف کربن ایجاد می‌کنند (a) نمونه بدون CNT، (b) نمونه با CNT [۳۸]

همانطور که از میکروگراف شکل ۱–۱۳ مشخص است سطح تماس بیشتری توسط نانو تیوب‌ها با FRP ایجاد می‌گردد و این موضوع سبب انتقال بیشتر بار می‌گردد.

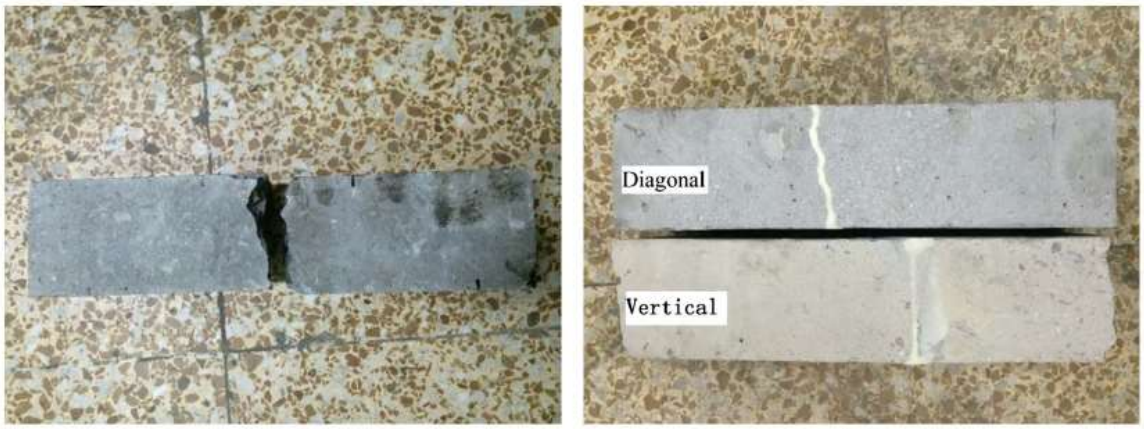
استفاده از نانو تیوب‌های کربن در سیمان به عنوان مصالح تعمیری بتن نمونه دیگری از کابرد نانوتکنولوژی در تعمیر و تقویت سازه‌های بتنی می‌باشد. استفاده از این نوع سیمان تحت عنوان کامپوزیت سیمانی تقویت شده با نانو تیوب‌های کربنی چند دیواره[۱] به منظور تعمیر بتن حائز اهمیت می‌باشد؛ این نوع سیمان دارای زمان گیرش مناسب، مقاومت باند مناسب بین کامپوزیت سیمانی و بتن است. نمودار شکل ۱–۱۴، مقاومت فشاری نمونه کنترل و نمونه-های با درصد مختلف MWNT را در سن‌های مختلف نشان می‌دهد[۴۱].

[۱] Multiwalled carbon nanotubes (MWNT)



شکل ۱–۱۴: مقاومت فشاری نمونه کنترل و نمونه‌های با درصد MWNT متفاوت در سنین مختلف [۴۱]

نمونه دیگری از کاربرد نانوتکنولوژی، استفاده از نانو سیلیکا در پودر اپوکسی برای مقاوم‌سازی سازه بتن‌آرمه ترک خورده می‌باشد. پودر نانو سیلیکا هم در اپوکسی مخصوص پرسازی ترک و هم در اپوکسی مخصوص چسباندن FRP استفاده می‌شود. نانو سیلیکا بطور قابل توجه‌ای شکل‌پذیری، مقاومت و کارآیی پودر اپوکسی را افزایش می‌دهد و همچنین موجب افزایش چسبندگی بین FRP و بتن نیز می‌شود. مطابق شکل ۱–۱۵ که حاصل کار لی و همکاران است، چسب ترک اصلاح شده به خوبی ترک‌های موجود را تقویت کرده و در بارگذاری مجدد ترک‌های جدید از محل‌هایی غیر از محل‌های پیشین عبور نمودند (شکل ۱–۱۶). پس از مقاوم‌سازی تیر ترک خورده با چسب، ترک اصلاح شده و اپوکسی مخصوص FRP اصلاح شده، ظرفیت نهایی باربری، تغییر مکان نهایی و انرژی شکست به اندازه قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت[۴۲].



شکل ۱–۱۵: نمونه‌های ترک خورده (a) قبل، (b) بعد از ترمیم [۴۲]



شکل ۱–۱۶: (a) تست خمش دو نقطه‌ای (b) نحوه شکست نمونه‌ها [۴۲]

۱-۲-۵ - کاربرد مواد نانو ساختار در میراگرها یا ابزارهای کنترل سازه

کنترل سازه‌های تحت نیروهای دینامیک مختلف مانند زلزله، بارهای چرخه‌ای و ضربه، بخش مهمی از مهندسی سازه را تشکیل می‌دهد. فونداسیون ماشین‌ها، ساختمان‌های مهم، پل‌ها و برج‌ها، نمونه‌های مهمی از این سازه‌های حیاتی محسوب می‌شوند. برای دفع و مستهلک کردن انرژی دینامیک وارد بر سازه، میراگرهای ویسکوالاستیک، ویسکوز سیال، مگنورئولوژ و میراگرهای اصطکاکی متداول‌ترین نوع میراگرها در سازه‌های صنعتی هستند. در این بین، میراگرهای مگنورئولوژیک[۱] با استفاده از سیال قرار گرفته در داخل محفظه خود، نسبت به بار وارده از خود واکنش نشان داده و در عین حال دارای خواص چندگانه هستند[۴۳]. گروه مهمی از این سیالات را سیالات فروفلوئید تشکیل داده که در واقع سوسپانسیونی کلوییدی از نانوذرات هستند که به صورت پایدار و یکنواخت در

[۱] Magnorheologic Dampers

سیال پایه پخش می‌شوند و توسط سورفکتانت‌ها محاصره می‌شوند و در اثر اعمال یک میدان مغناطیسی، ساختار زنجیره مانندی ایجاد می‌کنند که موازی با جهت میدان مغناطیسی بوده و حرکت سیال را محدود می‌کند. خصوصیت این نوع سیال، تنش تسلیم کم در عین پایداری بالا است. از سوی دیگر، گروهی دیگر از سیالات را سیالات هوشمند امآر[۱] تشکیل می‌دهند که تنش تسلیم بالا و محدوده دمای بالاتری را در بر می‌گیرند. لذا به منظور دست‌یابی به یک عملکرد مناسب، این دو سیال را با هم ترکیب کرده و سیالات فروفلوئید بر پایه امآر نامیدند. مطابق آنچه گفته شد، مبحث پایداری سیال ویسکوز مورد استفاده در دمپرها، یکی از خصوصیات اساسی در عملکرد مناسب میرایی محسوب می‌شود. یکی از نانومواد پایدارکننده سیال، نانوپودر سیلیکون (SiO_2) است. این نانوذره به دلیل نسبت حجم به وزن بالا، مانع افزایش چگالی سیال شده و با به دام انداختن ذرات میکروسایز تشکیل‌دهنده سیال و همچنین کاهش کشش سطحی سیال، پایداری آن را بالا می‌برد.

ادیبی و همکاران با ساخت و آزمایش دمپر مگنورئولوژیک حاوی نانوذرات سیلیس در جریان‌های ۰، ۱ و ۲ آمپر مشاهده کردند توان مقدار نیروی مستهلک کننده نسبت به حالت جریان صفر در بیشترین میدان مغناطیسی ۵ برابر شده که نشان از کارکرد مناسب استهلاک انرژی و تاثیر بالای پایداری سیال آن است [۴۴].

ساکار و هیرانی از ۳ نسبت ۰، ۰/۲۵٪ و ۰/۵٪ نانوذرات نقره در بافت سیال امآر استفاده کردند. افزودن مقدار نانوذرات نقره (Ag)، مقدار تنش برشی سیال‌ها را کاهش داد. همچنین در اثر افزودن این نانوذرات، افزایش درجه حرارت ناشی از تنش ترمز سیال با افزایش درصد نانوذرات، کاهش یافت. با این حال، سیال حاوی ۰/۲۵٪ نانوذرات نقره عملکرد بهتری نسبت به سیال حاوی ۰/۵٪ از خود نشان داد[۴۵]. ساکار و هیرانی در تحقیق دیگری، نمونه‌های سیال حاوی نانوذرات مس (Cu) را ساختند. در اثر افزودن این نانوذرات، حرارت سطحی ترمزهای امآر کاهش پیدا کرد. در نتیجه می‌توان گفت استفاده از این نانوذرات، در خنک‌سازی عملکرد دمپینگ موثر است[۴۶].

لیو و همکاران در آزمایشی بر روی سیال امآر، تاثیر افزودن نانوذرات اکسید آهن را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزودن مقدار کمی (۴٪ و ۶٪ وزنی) از این ماده موجب کاهش نرخ رسوب‌گذاری سیال سیلیکونی پایه روغنی می‌شود. همچنین آزمایش‌های تنش برشی نشان داد نانوذرات اکسید آهن تنش تسلیم برشی سیال را افزایش می‌دهند. لذا می‌توان گفت بکارگیری درصد اندکی از نانوذرات اکسید آهن در سیال امآر می‌تواند باعث نرخ رسوب‌گذاری کم، ویسکوزیته حوزه صفر پایین و تنش تسلیم برشی بالا گردد و در مجموع عملکرد میرایی بسیار مناسب از این نوع سیال بدست می‌آید[۴۷].

۶-۲-۱ - بررسی مصالح خود ترمیم شونده با بکارگیری مواد نانو ساختار

یکی از مهمترین خصوصیات برجسته مواد بیولوژیکی، توانایی خود اصلاح شوندگی و بازیابی عملکرد به محض اعمال آسیب توسط بارهای مکانیکی خارجی است. در طبیعت، خود اصلاح شوندگی در سطح مولکول‌های مجزا مانند ترمیم DNA یا در سطح میکروسکوپی مانند ترمیم استخوان‌های شکسته، بستن و ترمیم آسیب‌های وارده به رگ‌های خونی و ترمیم یک برش کوچک روی انگشت، اتفاق می‌افتد. اما مصالح ساخت بشر عموما این توانایی ترمیم را در اختیار ندارند. پلیمرها و کامپوزیت‌های ساخته شده توسط این مصالح هنگام قرارگیری در معرض بارگذاری

[۱] MR

ترمومکانیکی پی درپی، مستعد ایجاد میکرو ترک هستند. با گذر زمان و ماندگاری بارهای وارده، این میکرو ترک‌های زمینه به هم می‌پیوندد و باعث سایر خرابی‌ها مثل جدا شدن الیاف از زمینه و لایه‌لایه‌ای شدن آن می‌شود[۴۸]. تشخیص و ترمیم این آسیب‌ها، اغلب مشکل است زیرا این آسیب‌ها عمدتا در عمق سازه رخ می‌دهد و با پیشروی این آسیب‌ها، درنهایت یکپارچگی سازه به خطر می‌افتد. مواد خود اصلاح شونده دارای قابلیت‌های گسترده‌ای به ویژه برای کاربردهای ایمن در درازمدت در نواحی غیرقابل دسترس هستند. این مواد دارای خصوصیات ذاتی متفاوتی هستند؛ با این‌حال، برای همه آن‌ها اصلاح خود به خودی بر اساس اصول مشترکی است. پیش‌نیاز خود ترمیمی یک آسیب، تشکیل یک‌فاز متحرک است که ترک موجود را ببندد. اگر آسیبی روی ماده ایجاد شود ترک به وجود می‌آید. ترمیم خود به خودی در سطح میکروسکوپی تا ماکروسکوپی اتفاق می‌افتد. در ابتدا با بروز آسیب، به صورت خود به خودی یا به وسیله یک محرک خارجی، فاز متحرک تحریک می‌شود. سپس به دلیل انتقال مستقیم جرم به سمت محل آسیب و متعاقبا واکنش اصلاح موضعی، به تدریج آسیب از بین می‌رود. لازم به ذکر است که اتصال مجدد صفحات ترک با برهم‌کنش‌های فیزیکی و یا پیوندهای شیمیایی صورت می‌گیرد. پس از ترمیم آسیب، ماده متحرک قبلی مجددا ثابت می‌شود و بازیابی کامل خصوصیات مکانیکی حاصل می‌شود. این اصل کلی، محدود به یک دسته خاص از مواد نیست و با توجه به خواص مواد مختلف و دمای مورد نیاز برای شروع فرآیند، متفاوت خواهد بود. همچنین ابعاد آسیبی که می‌تواند توسط این مواد ترمیم شود با توجه به ابعاد نمونه و تعداد گونه‌های انتقال یافته متفاوت است. مواد خود اصلاح شونده را می‌توان بسته به محرک مورد نیاز جهت شروع فرآیند ترمیم، به دو دسته مختلف تقسیم کرد: مستقل و غیرمستقل. مواد خود اصلاح شونده غیرمستقل نیازمند تحریک خارجی مثل حرارت یا نور برای فعال‌سازی مکانیزم هستند. انرژی بیشتر برای فرآیند ترمیم با کنترل شرایط و استفاده از محرک‌های خارجی هدفمند (مثل نور لیزر، حرارت القایی یا مقاومتی) تأمین می‌شود. در مقابل، مواد خود اصلاح شونده مستقل، نیازمند محرک‌های خارجی نیستند و آسیب، خود محرکی برای فرآیند ترمیم است. مواد خود اصلاح شونده را همچنین می‌توان با توجه به منشأ فرآیند ترمیم به دودسته‌ی "برونی" و "درونی" تقسیم‌بندی کرد. مواد خود اصلاح شونده برونی دارای قابلیت نهان برای ترمیم خود به خودی نیستند. بلکه فرآیند ترمیم در آن‌ها به کمک مؤلفه‌های خارجی صورت می‌پذیرد، مثل کپسول‌های نانو یا میکرو که در ماتریس مواد مختلف نفوذ داده می‌شود. محتوای این کپسول‌ها فاز متحرک روی قسمت آسیب‌دیده را به وجود می‌آورد. در مقابل، ترمیم خود به خودی درونی نیازمند عامل‌های مجزایی نیست و درنتیجه بیشتر ترجیح داده می‌شود. اما بسته به نوع مواد و مکانیزم ترمیم همیشه امکان‌پذیر نخواهد بود. تشکیل پیوندهای شیمیایی (اولیه یا ثانویه) و نیز برهم‌کنش‌های فیزیکی بین سطوح ترک (چسبندگی، رطوبت) مثال‌های موفقی برای ترمیم خودبه‌خودی از این طریق است. در ادامه، فرآیند ترمیم خودبه‌خودی در انواع مواد بتنی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۶-۲-۱- خود ترمیمی بتن

بتن به دلیل قیمت ارزان و مقاومت فشاری بالا رایج‌ترین مصالح بکار رفته در صنعت ساختمان محسوب می‌شود. با این حال یکی از نقاط ضعف بزرگ آن را می‌توان حساسیت به تشکیل ترک دانست که از تبعات آن مقاومت کششی پایین بتن است. از این رو بتن همواره با آرماتورهای فولادی تقویت شده تا بارهای کششی توده توسط این تقویت‌کننده‌ها تحمل شود. با اینکه وجود این آرماتورها باعث محدود کردن عرض ترک‌ها در بتن می‌شود اما نمی‌توانند به طور کامل مانع از تشکیل ترک گردند[۴۹].

ترک، دوام سازه‌های بتنی را تهدید می‌کند چرا که از طریق این ترک‌ها مایع‌های شیمیایی و گازهای خورنده قادرند به ماده سازنده سازه یعنی بتن نفوذ کرده و موجب آسیب به آن شوند؛ در نتیجه عرض این ترک‌ها بیشتر شده و آرماتورهای مسلح‌کننده در معرض محیط قرار می‌گیرند و زمانی که این آرماتورها شروع به خوردگی کنند فروپاشی کامل سازه دور از انتظار نخواهد بود. بنابراین واضح است که مراقبت، نگهداری و ترمیم ترک‌های بتنی امری لازم است. با این حال ترمیم ترک‌ها در صورتی که آشکار یا قابل دسترس نباشند، کاری دشوار است. در اروپا هزینه‌های مربوط به ترمیم سازه‌های بتنی حدود ۵۰ درصد از هزینه‌های ساخت‌وساز را تشکیل می‌دهد. در کنار هزینه‌های مستقیم، بهره‌وری پایین و ایجاد ترافیک، زیان‌های اقتصادی سنگینی به بار می‌آورد. از این رو خودترمیم‌سازی سازه‌های بتنی می‌تواند بسیار سودمند باشد.

خود ترمیمی بتن پدیده‌ای شناخته شده و با سابقه است زیرا که این پدیده به صورت خودکار در طبیعت شکل‌گیری بتن رخ می‌دهد. به دلیل هیدراتاسیون پیوسته مواد معدنی کلینکر یا کربناسیون کلسیم هیدروکسید، ترک‌ها ممکن است بعد از گذشت مدتی ترمیم شوند. با این حال، خود ترمیمی ترک‌ها به ترک‌های کوچک محدود بوده و زمانی موثر است که آب در دسترس باشد. با این وجود، بتن احتمالا این امکان را دارد تا ترک‌های خود را به صورت خود به خود ترمیم کند.

۱-۲-۷ - معرفی نانو حسگرها و نانو سنسورها در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها

حسگرها ابزارهایی هستند که با استفاده از سازوکارهای مختلف الکتریکی، گرمایی و ... به منظور ثبت تغییرات شرایط محیطی و انتقال داده‌ها به یک مرکز جمع‌آوری اطلاعات، در صنایع مختلف مورد استفاده وسیعی قرار گرفته‌اند. بازه عملکردی حسگرها گستره وسیعی دارد. با این حال دسته نسبتا جدیدی از حسگرها را نانوحسگرها تشکیل می‌دهند. این حسگرها ابزاری بسیار ظریف و حساس‌اند که توانایی شناسایی و ارائه پاسخ به محرک‌های فیزیکی اطراف خود را دارند. نانوحسگر، اطلاعات مربوط به شرایط محیط و عملکرد مصالح را جمع‌آوری کرده و می‌تواند با سایر حسگرهای موجود در سازه ارتباط برقرار کند و سازه را در مجموع به یک شبکه هوشمند بدل سازد. گستره عملکرد نانوحسگرها در ابعاد نانومتر است و از این رو از دقت و واکنش‌پذیری بالایی برخوردار هستند. نانوحسگرها در صنایع مختلفی چون پزشکی، دفاعی، حمل و نقل، ارتباطات و ساخت‌وساز کاربرد یافته‌اند. در ساخت این گونه حسگرها، بیشتر از نانو لوله‌ها، نانوذرات فلزی و نانوذرات مغناطیسی استفاده می‌شود. در صنعت ساختمان، نانوحسگرها در دو کاربرد کلی پایش و کنترل شرایط محیطی (مانند گاز، دود، رطوبت) و پایش عملکرد مصالح (مانند تنش، کرنش، فشار، ارتعاش و فرسایش) توسعه یافته‌اند[۵۰]. متداول‌ترین کاربرد نانوحسگرها در مورد پایش تغییرات شرایط محیطی در ساختمان، نانوحسگرهای گازی‌اند که در صورت وجود حتی چند اتم گاز نیز واکنش نشان می‌دهند. نانوذرات اکسید روی (ZnO)، نانو اکسید اریدیوم (In_2O_3) و نانولوله‌های کربن (CNT) نمونه‌ای از مواد نانوساختار تشکیل دهنده نانوحسگرها در این حوزه هستند.

۱-۷-۲-۱- کاربرد حسگرها در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها

کاربرد دوم حسگرها در حوزه مهندسی عمران، مربوط به پایش سلامت سازه‌ها می‌باشد. در طول عمر مفید سازه ممکن است آسیب‌ها و خرابی‌های جزئی در آن‌ها ایجاد شود و به مرور زمان گسترش یابد که این مسئله می‌تواند در نهایت منجر به خرابی کلی بخشی از سازه گردد. بازبینی سازه‌ها به منظور بررسی آسیب‌های احتمالی وارد بر

سازه معمولا به شکل چشمی انجام می‌گیرد که قاعدتا دارای خطای بالایی است. از سوی دیگر بخش زیادی از آسیب‌های احتمالی سازه در درون بافت‌های سازه‌ای و دور از چشم ناظر قرار دارد که این باعث می‌شود دسترسی به آن قسمت از سازه بدون تخریب امکان‌پذیر نباشد. ارزیابی غیرمخرب، نوع دیگر ارزیابی سازه‌ای است که طی آن، سازه تخریب نمی‌شود و با استفاده از حسگرهای مخصوصی، رفتار اعضای سازه به محرک‌های محیطی مورد بررسی قرار می‌گیرد[۵۱]. این حسگرها بنا به قدرت تشخیص، قادر هستند مقدار، نوع و محل آسیب یا تغییر شرایط سازه‌ها را شناسایی کرده و یا محل دقیق آسیب و خرابی را به مرکز پایش داده‌های سازه گزارش کنند. حسگرهای مبتنی بر فناوری نانو می‌توانند عملکردهای مفیدی در پایش سلامت سازه داشته باشند[۵۰].

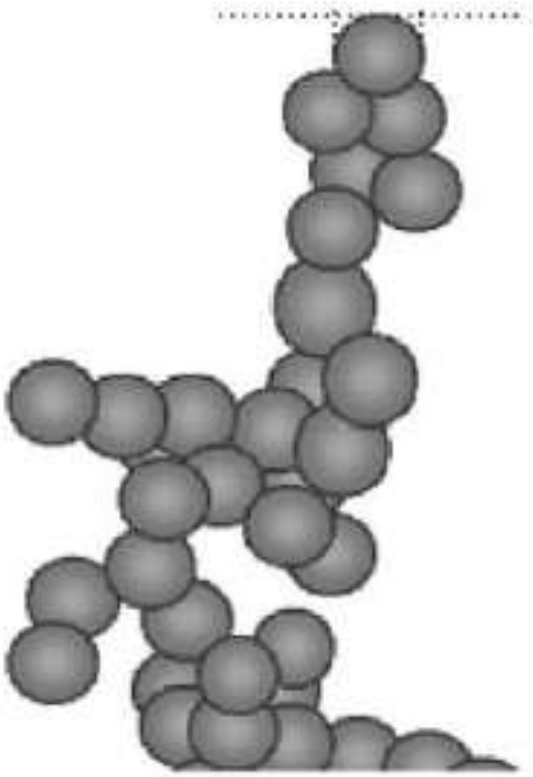
۱-۱-۷-۲-۱- انواع مواد نانو ساختار در تولید حسگر برای پایش سلامت سازه

مواد نانو ساختاری که برای استفاده در پایش سلامت سازه‌ها کاربرد دارند عمدتا برپایه کربن می‌باشند. این مواد عبارتند از: نانو لوله‌های کربنی[۱]، کربن سیاه[۲]، نانو صفحات گرافن[۳]، نانو الیاف کربن[۴]. همچنین ماده نانو ساختار پودر نیکل کروی با نانو دانه‌های تیز روی سطح آن در پایش سلامت سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. مواد نانو ساختار مذکور، وقتی بصورت کامپوزیت با مصالح دیگر به کار گرفته می‌شوند، به دلیل خصوصیت نیمه رسانایی که دارند، آن ماده کامپوزیت را به یک ماده خودسنجشگر تبدیل می‌کنند. خودسنجشگری در این مواد کامپوزیت، با تغییرات مقاومت الکتریکی به دلیل اعمال کرنش‌های مکانیکی، مانند مواد پیزو مقاومتی اتفاق می‌افتد. در ادامه توضیحاتی در مورد مواد نانو ساختار معرفی شده ارائه می‌گردد.

کربن سیاه از احتراق ناکامل هیدروکربن‌هایی نظیر مواد نفتی و زغال سنگ بدست می‌آید [۵۲, ۵۳]. مهم‌ترین تفاوت کربن سیاه با دوده در عین حال که شباهت‌هایی هم دارند، نظم بیشتر آن است که اغلب با شکل کروی با قطری در محدوده ۳۰ نانومتر تا ۱ میکرومتر می‌باشد (شکل ۱-**۱۷**). ریخت‌شناسی فیزیکی آن نشان می‌دهد که لایه‌های گرافیتی جهت‌دار بطور تصادفی به سطح کروی آن متصل می‌شوند. کربن سیاه دارای جرم مخصوص ۲/۰۵ تا ۲/۱۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و از نظر الکتریکی نیمه‌رسانا می‌باشد[۵۳]. این میکرو ساختار منحصر به فرد، موجب ایجاد ویژگی‌های جذاب در کربن سیاه می‌شود که استفاده از آن برای مقاصد مختلف را فراهم می‌آورد. این خصوصیت‌های منحصر به فرد به علاوه در دسترس بودن و قیمت نسبی پایین، سبب استفاده گسترده از آن در کاربردهایی نظیر افزایش مقاومت در برابر پارگی لاستیک‌ها، در رنگدانه تونرهای دستگاه‌های کپی و پرینترها، محافظت در برابر اشعه UV در پلاستیک‌ها و بسیاری از کاربردهای دیگر شود.

---

[۱] Carbon Nanotubes
[۲] black carbon
[۳] Graphene nanoplatelets
[۴] carbon nanofibers

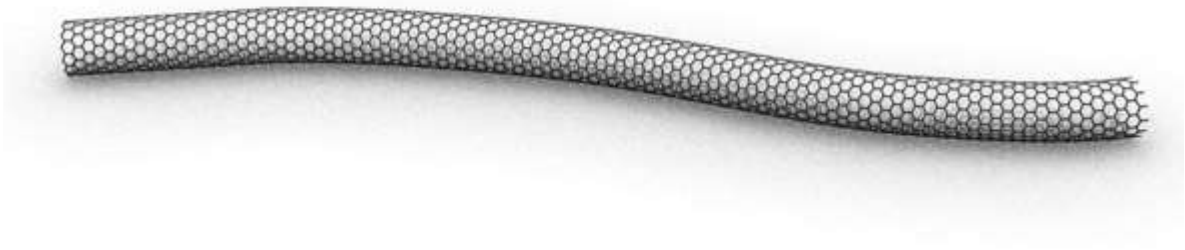


شکل ۱-۱۷: نانو ساختار کربن سیاه [۵۲]

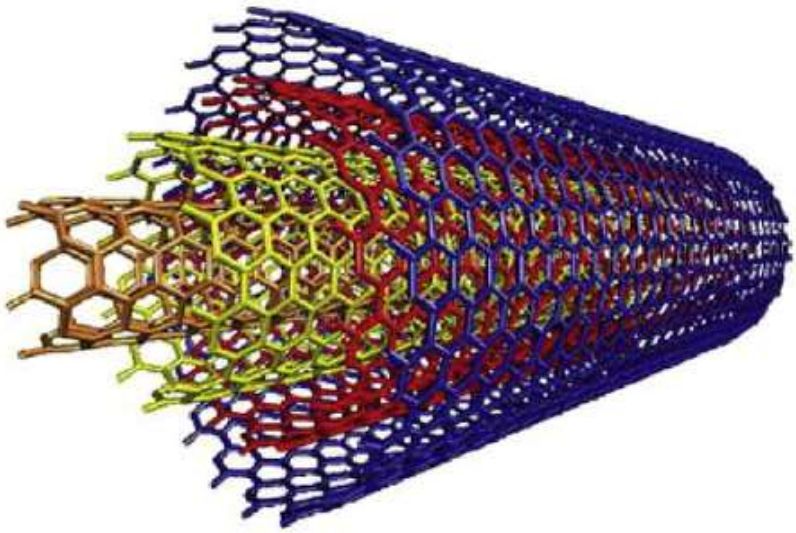
نانولوله‌های کربنی مثالی از کلاس جدید مواد نانو ساختار می‌باشند. مشخصه‌هایی نظیر ابعاد نانومتر با خواص الکترونیکی، مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و اپتیکی فوق‌العاده، نانولوله‌ها را از دانه‌های کربن متفاوت ساخته است. خواص قابل توجه آن، انگیزه بسیاری از افراد برای استفاده از نانو لوله‌های تک‌جداره[۱] و نانو لوله‌های چند جداره[۲] به به منظور کاربردهای مختلف شده است. SWNT به لحاظ فیزیکی تشکیل شده از یک ورق پیچیده شده از گرافیت (ویا گرافن) می‌باشد که یک ساختار سیلندری را به وجود می‌آورد (شکل ۱-۱۸) و MWNT در حقیقت به طور معمول از SWNT های هم مرکز به وجود می‌آید (شکل ۱-۱۹).

[۱] single-walled carbon nanotubes (SWNT)

[۲] multi-walled carbon nanotubes (MWNT)



شکل ۱–۱۸:ساختار سیلندری نانو لوله‌های تک‌جداره (SWNT) [۵۳]



شکل ۱–۱۹: ساختار سیلندری نانو لوله‌های چند جداره (MWNT) [۵۲]

قطر SWNT ها در حدود ۰/۴ تا ۲ نانومتر است. این مواد دارای نسبت سطح به حجم بسیار بالایی هستند (در حدود $۱۰^۴$) و برای کاربردهای مربوط به سطح بسیار ایده‌آل می‌باشند. قطر MWNT ها در حدود ۱۰ تا ۱۵ نانو متر و متوسط اندازه انباشته شده ۲۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد. ریخت‌شناسی ساختاری آن با استفاده از SEM و TEM قابل تشخیص نمی‌باشد. تعداد متوسط جداره‌های آن بین ۵ تا ۱۵، چگالی آشکار آن بین۵۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و طول آن بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر می‌باشد. از خصوصیات مکانیکی SWNT می‌توان به مدول یانگ (E) و تنش کشش نهایی (σ_f) آن اشاره کرد که به ترتیب برابر با $E \approx 1.1\ TPa$ و $\sigma_f \approx 75\ Gpa$ می‌باشد. به همین ترتیب برای MWNT مدول یانگ و تنش کشش نهایی برابر است با $E \approx 1.2\ TPa$ و $\sigma_f \approx$ $150\ Gpa$. SWNT ها بسته به جهت پیچیده شدن صفحات گرافن می‌توانند رسانا و یا نیمه رسانا باشند.

نانو الیاف کربنی ساختاری منحصر به فرد دارند و از صفحات گرافن که مانند فنجان‌های قرار گرفته روی هم هستند تشکیل شده است (**شکل ۱–۲۰**). نانو الیاف کربنی به روش تحت اثر قرار گرفتن در دمای پایین تا دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می شوند. این روش به صورت شیمیایی، کربن تبخیر شده بر سطح را به گرافیتی با ساختار منظم تبدیل می‌کند. قطر این مواد نانو ساختار بدست آمده بین ۷۰ تا ۲۰۰ نانومتر و طول آن‌ها بین ۵۰ تا ۲۰۰

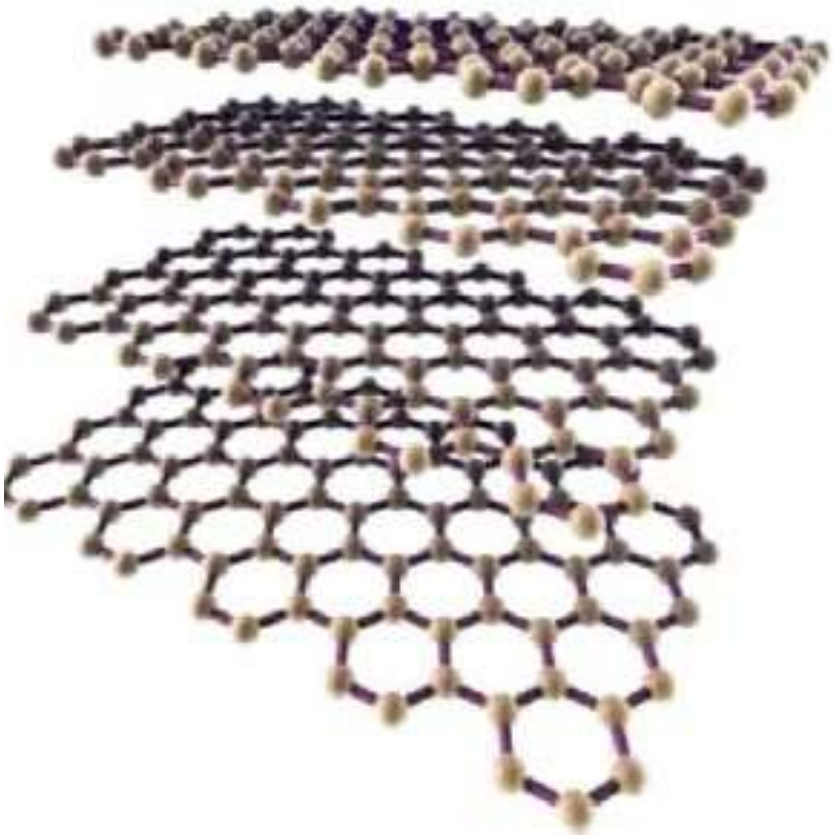
میکرومتر می‌باشد. نسبت سطح به جرم آن در حدود ۲۰ تا ۳۰ گرم در مترمربع بوده و جرم مخصوصی در حدود $1 gr/cm^3$ دارند[۵۲].



شکل ۱–۲۰: ساختار نانو الیاف کربنی [۵۲]

نانو صفحات گرافن از ورقه ورقه شدن گرافیت طبیعی بدست می‌آیند. این مواد همچنین از توده‌های کوچک گرافن با ضخامت در حدود ۳ تا ۱۰ نانومتر تشکیل می‌شوند. نانو صفحات گرافن به دلیل وجود گرافیت خالص در آن‌ها، رسانای الکتریکی و حرارتی بسیار عالی می‌باشند. بر خلاف مواد نانو ساختار نام برده شده در بخش‌های قبل، این مواد دو بعدی می‌باشند(شکل ۱–**۲۱**)؛ به همین دلیل استفاده از نانو صفحات گرافن سبب ایجاد مواد کامپوزیت همگرا[۱] می‌شود. متوسط قطر نانو صفحات گرافن در حدود ۱۵ میکرومتر و جرم مخصوص ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند [۵۲].

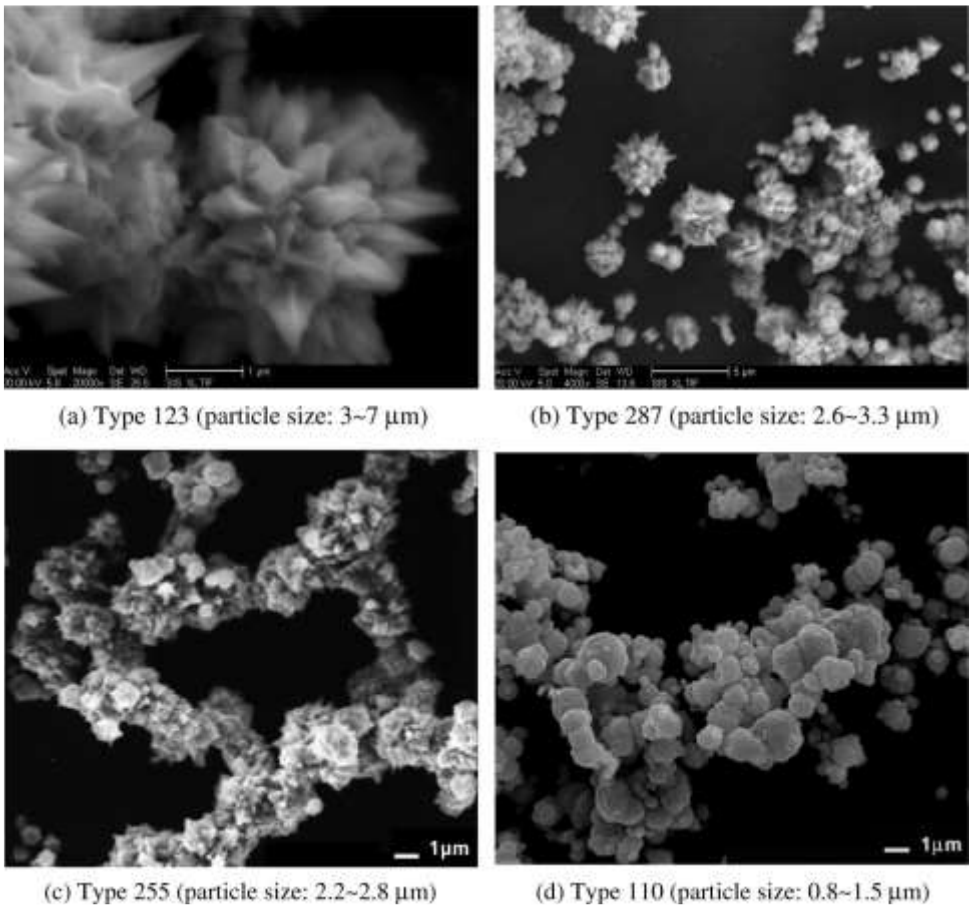
[۱] Isotropic



شکل ۱-۲۱: ساختار نانو صفحات گرافن [۵۲]

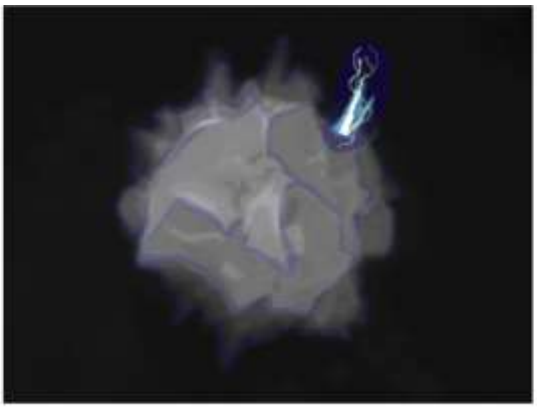
ماده نانو ساختار پودر نیکل کروی با نانو دانه‌های تیز روی سطح آن[۱] نیز به مانند مشتقات نانو کربن یکی از مواد نانو ساختاری است که برای ساخت سنسور و مواد کامپوزیت خودسنجش، مورد توجه قرار گرفته است. نیکل یکی از فلزات واسطه می‌باشد که سخت و انعطاف‌پذیر است؛ به همین دلیل برای ترکیب با فلزات دیگر بسیار مطلوب می‌باشد. به دلیل خواص مطلوب الکتریکی، حرارتی، مغناطیسی، مغناطیس‌سنجی و مقاومت خوردگی بالا، نیکل به عنوان یک ماده مؤثر پرکننده برای ساخت کامپوزیت‌های چند منظوره و هوشمند با مواد فلزی معرفی می‌شود. پودر نوک تیز کروی نیکل شامل برجستگی‌های تیزی بر سطحش می‌باشد که مشابه برجستگی‌های فوق‌العاده تیز سیلیکون یا نوک‌های موجود در انتشار میدان میکروسکوپی است (شکل ۱-۲۱). شارژ الکتریکی کامپوزیت‌های حاوی پودر نیکل کروی با نانو دانه‌های تیز سبب قرارگیری بار الکتریکی بر روی این ذرات می‌گردد و این موضوع سبب ایجاد میدان‌های قوی محلی بر روی نوک‌های تیز موجود در سطح ذرات می‌گردد. این نانو نوک‌های تیز بر سطح پودر نیکل سبب افزایش شدت میدان الکتریکی تا ۱۰۰۰ برابر نقاط دیگر می‌گردد. این امر موجب افزایش انتشار میدان شده به این معنی که پاسخ‌های هدایت الکتریکی کامپوزیت‌ها را نسبت به اعمال نیروی خارجی افزایش می‌دهد (شکل ۱-۲۳) [۵۲].

[۱] Spiky spherical nickel powders with sharp nanotips

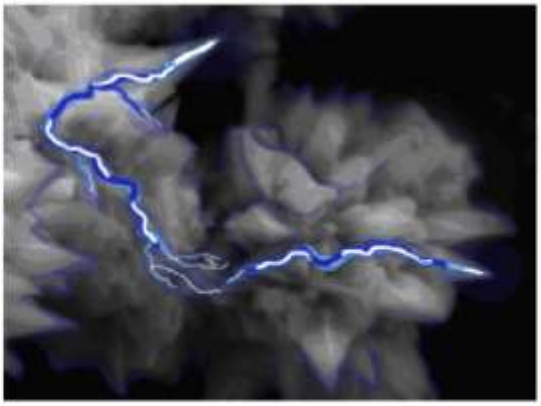


(a) Type 123 (particle size: 3~7 µm)
(b) Type 287 (particle size: 2.6~3.3 µm)
(c) Type 255 (particle size: 2.2~2.8 µm)
(d) Type 110 (particle size: 0.8~1.5 µm)

شکل ۱–۲۲: عکس‌های SEM از نوع‌های مختلف پودر نیکل [۵۲]



(a) The spikes on the nickel particles cause localized high electric fields at their tips



(b) As nanotip-induced ultrahigh pressure-sensitive composites are compressed the nickel particles are brought closer together allowing electrical conduction

شکل ۱–۲۳: طرحی از میدان کمک‌کننده به رسانایی ایجاد شده با نانو نوک‌های موجود بر سطح پودر نیکل کروی با نانو دانه‌های تیز [۵۲]

۲-۱-۷-۲-۱- معرفی برخی از کاربردهای حسگرهای تولید شده بر پایه مواد نانو ساختار در پایش سلامت سازه

غبارهای هوشمند[۱] که به نوعی ابزارهای ارزان قیمت چندکاره و بر پایه پیزوالکتریک هستند به منظور پایش خصوصیات بتن تازه ریخته شده مثل رطوبت، دما، رطوبت نسبی و رشد مقاومت در سنین کم بکار گرفته می‌شوند. از این حسگرها می‌توان برای پایش خوردگی شیمیایی و ترک‌خوردگی بتن استفاده نمود. غبارهای هوشمند، شبکه‌ای از سنسورهای بسیار کوچک را ایجاد می‌کنند که می‌توانند با یکدیگر در ارتباط بوده و با استفاده از این اشتراک اطلاعات، شبکه پایش قدرتمندی را ایجاد کنند[۵۴]. سنگدانه‌های هوشمند، عملکردی مشابه غبارهای هوشمند جهت پایش سلامت بتن و انتقال ویژگی‌های داخلی بافت بتن همچون تنش‌های داخلی، ترک‌ها و نیروهای فیزیکی را به مرکز داده‌ها ایفا می‌کنند. در تحقیقی که به منظور بررسی کارایی این نوع از حسگرها انجام گرفت،

[۱] Smart Dust

سنگدانه‌ها را با لایه‌های نازکی از نانو لوله‌های کربنی پوشانده و از آن‌ها به عنوان قالب بتن آماده شده استفاده کردند. پس از انجام آزمایشات فراوان بر روی اشکال مختلف سیلندری، مکعبی و صفحه‌ای بتن، مشخص شد این نانوحسگرهای سنگدانه‌ای قادر به پاسخ‌گویی به انواع خرابی وارده بر عضو و تعیین محل دقیق آسیب وارد شده هستند[۵۵].

در سال‌های اخیر سیستم‌های میکرو الکترومکانیکال[۱] و سیستم‌های نانو الکترومکانیکال[۲] به عنوان تکنولوژی پیشرفته و هوشمند حسگری با پتانسیل هزینه به تاثیرگذاری و پایش طولانی مدت سلامت سازه در حال مطرح شده‌اند. این گونه از سنسورها با خصوصیت بر خط بودن بصورت بی‌سیم و مصرف انرژی بسیار کم می‌توانند به شکل یک سنسور چندکاره، کرنش‌های محلی، دما و رطوبت را در روسازی فرودگاه پایش کنند[۵۶].

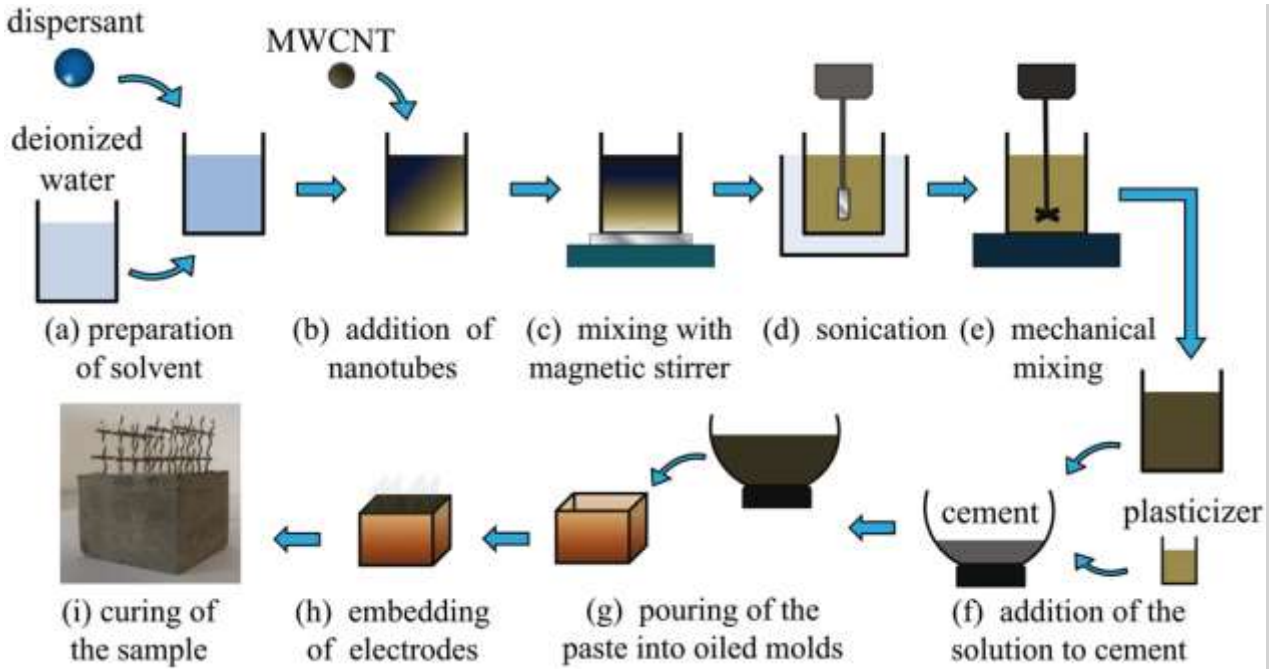
سازه‌های بتنی همواره تحت خرابی‌های غیرقابل کنترل ناشی از بارهای خستگی و عوامل محیطی قرار دارند که این عوامل تاثیرات خود را به صورت ترک در بتن نشان می‌دهد. از این رو برای دستیابی به دوام و عملکرد دراز مدت سازه، نیاز است تا سیستم‌های پایش مستمر سلامتی سازه با هدف نگهداری و ترمیم آن درنظر گرفته شود. به این منظور، محققان پایش سلامت سازه در دانشگاه ایالتی نورث داکوتا امریکا، شبکه‌هایی از الیاف نانو لوله کربن را در ملات سیمانی یا بتنی قرار دادند. با اندازه‌گیری مقدار مقاومت الکتریکی شبکه‌های نانو لوله کربنی، نحوه رشد خرابی قابل تشخیص و پایش است. در تحقیقی نحوه پاسخ‌دهی این الیاف به نوع بارگذاری بررسی شد و مشخص گردید که پاسخ الکتریکی شبکه کربنی با تغییر مقدار و نوع بارگذاری، تغییر می‌کند[۵۷].
همچنین در تحقیقی دیگر از لایه‌های نازک حاوی نانولوله‌های کربنی به منظور پایش یک تیر بتنی تحت بار خمشی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان دادند در عین حال که نانو لوله‌ها به صورت اتفاقی در لایه نازک گسترده شده‌اند، می‌توانند مقدار کرنش‌های خمشی در تیر بتنی را به خوبی مشخص کنند. با دانستن اینکه نانو الیاف کربنی به عنوان تقویت‌کننده مقاومتی سازه نیز استفاده می‌شود و در اختیار داشتن نتایج این گونه آزمایشات، می‌توان به سازه‌های هوشمند، مرکب از حسگرها و مصالح هوشمند دست یافت[۵۸]. علاوه بر این موارد، یکی از کاربردهای اخیر نانوحسگرها به منظور پایش سلامت پره توربین‌های بادی انجام می‌گیرد که در بخش ۱-۳ به آن پرداخته خواهد شد[۵۹].

یکی از زمینه‌هایی که پایش سلامت سازه با استفاده از مواد نانو ساختار در آن وارد شده است پایش شروع خرابی، نقص و گسترش آن در سازه‌های تقویت شده با FRP است. یکی از مطالعاتی که در این زمینه انجام گردیده، توانایی خودحسگری درخصوص کرنش و نقص در پلیمر تقویت شده الیافی بازالت[۳] می‌باشد که بصورت لایه‌ای توسط اپوکسی اصلاح شده با الیاف نانو کربن[۴] به یکدیگر چسبانده شده‌اند. ظرفیت خود حسگری (CNFs/BFRP) لایه‌ای تحت بار چرخه‌ای مورد تائید قرار گرفت چرا که در تمامی چرخه‌ها مقاومت الکتریکی آن با کرنش ایجاد شده متناسب بود[۶۰].

---

[۱] Micro-Electro-Mechanical Sensor (MEMS)
[۲] Nano-Electro-Mechanical Sensor (NEMS)
[۳] basalt fiber reinforced polymer (BFRP)
[۴] Carbon Nanotubes (CNTs)

استفاده از نانوکامپوزیت‌های نوظهور درپایش دینامیکی سازه‌ها می‌تواند در هزینه پایش سازه و همچنین دقت پایش با توجه به افزایش تعداد نقاط پایش در یک سازه بزرگ مقیاس بسیار موثر باشد. یکی از این نوع سنسورها، مبدل نانو تیوب کربنی بر پایه سیمان[۱] می‌باشد که براساس تغییر مقاومت الکتریکی عمل می‌کند و این سنسور می‌تواند به طور گسترده‌ای نزدیک به سطح بتن یک سازه بزرگ مقیاس را تحت پوشش قرار دهد. شباهت بین مصالح سنسور و سازه بتنی سبب شده تا بتوان آن را پیش از بتن‌ریزی در محل‌های از پیش تعیین شده قرار داد و سپس بتن‌ریزی کرد. با استفاده از CNTCs، کرنش محلی بصورت تغییرات مقاومتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. در شکل **۱-۲۴**، فرآیند ساخت CNTCs نشان داده شده است.

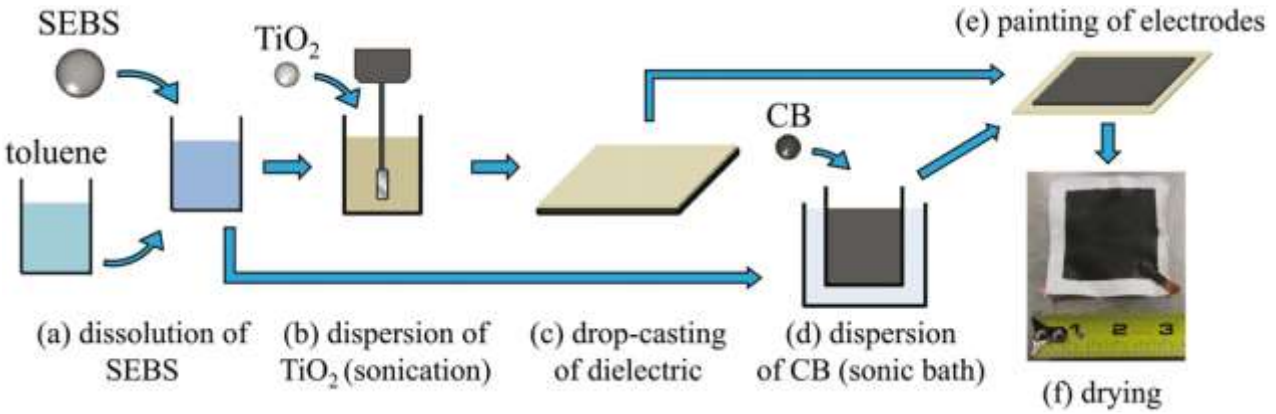


شکل ۱-۲۴: فرآیند ساخت سنسور CNTCs ها [۶۱]

سنسور مشابه دیگری که با هزینه بسیار کم می‌تواند بصورت گسترده در سطح سازه چسبانده شود، یک خازن الاستومری شکل‌پذیر[۲] رسانا می‌باشد که از ترکیب نانوکامپوزیت ساخته می‌شود. کرنش‌های محلی به صورت تغییرات خازنی تعیین می‌گردد. **شکل ۱-۲۵** فرآیند ساخت سنسور SEC را نمایش می‌دهد.

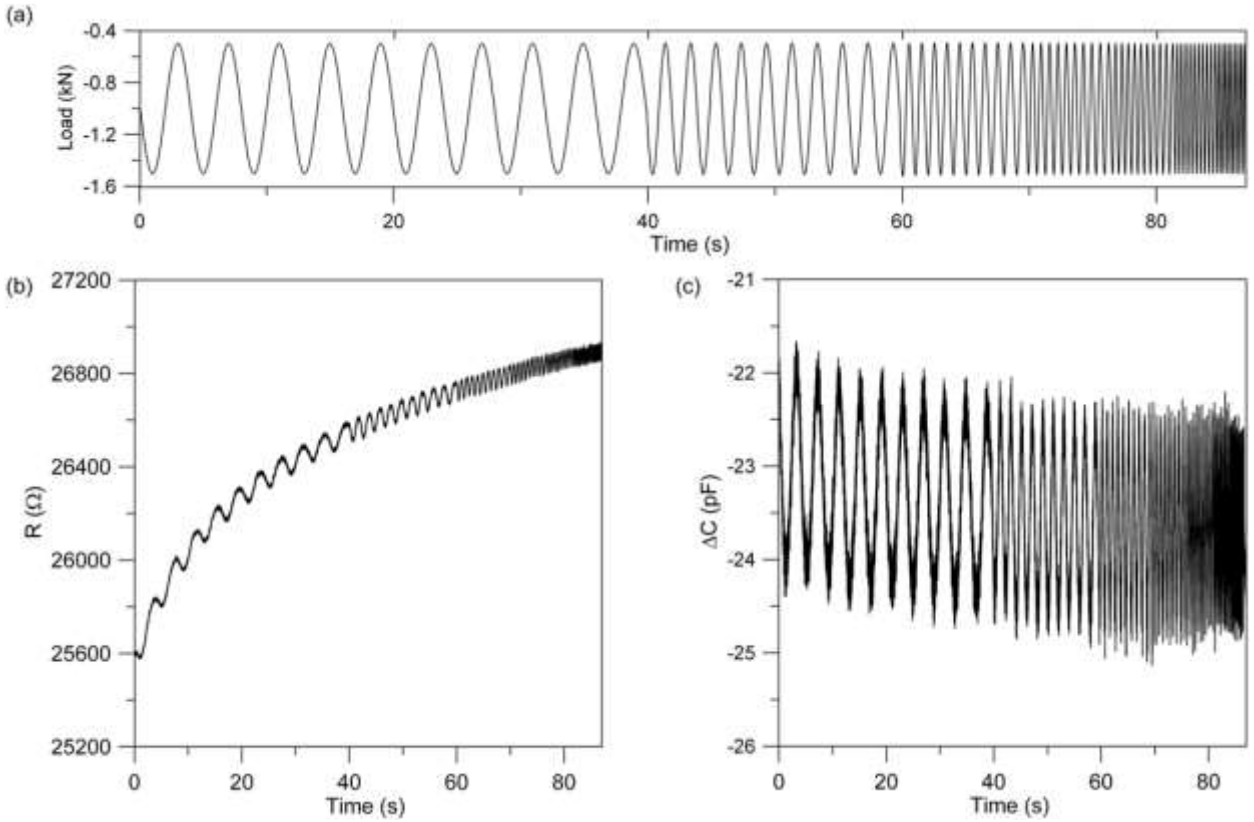
[۱] carbon nanotube cement based sensor (CNTCS)

[۲] soft elastomeric capacitor (SEC)



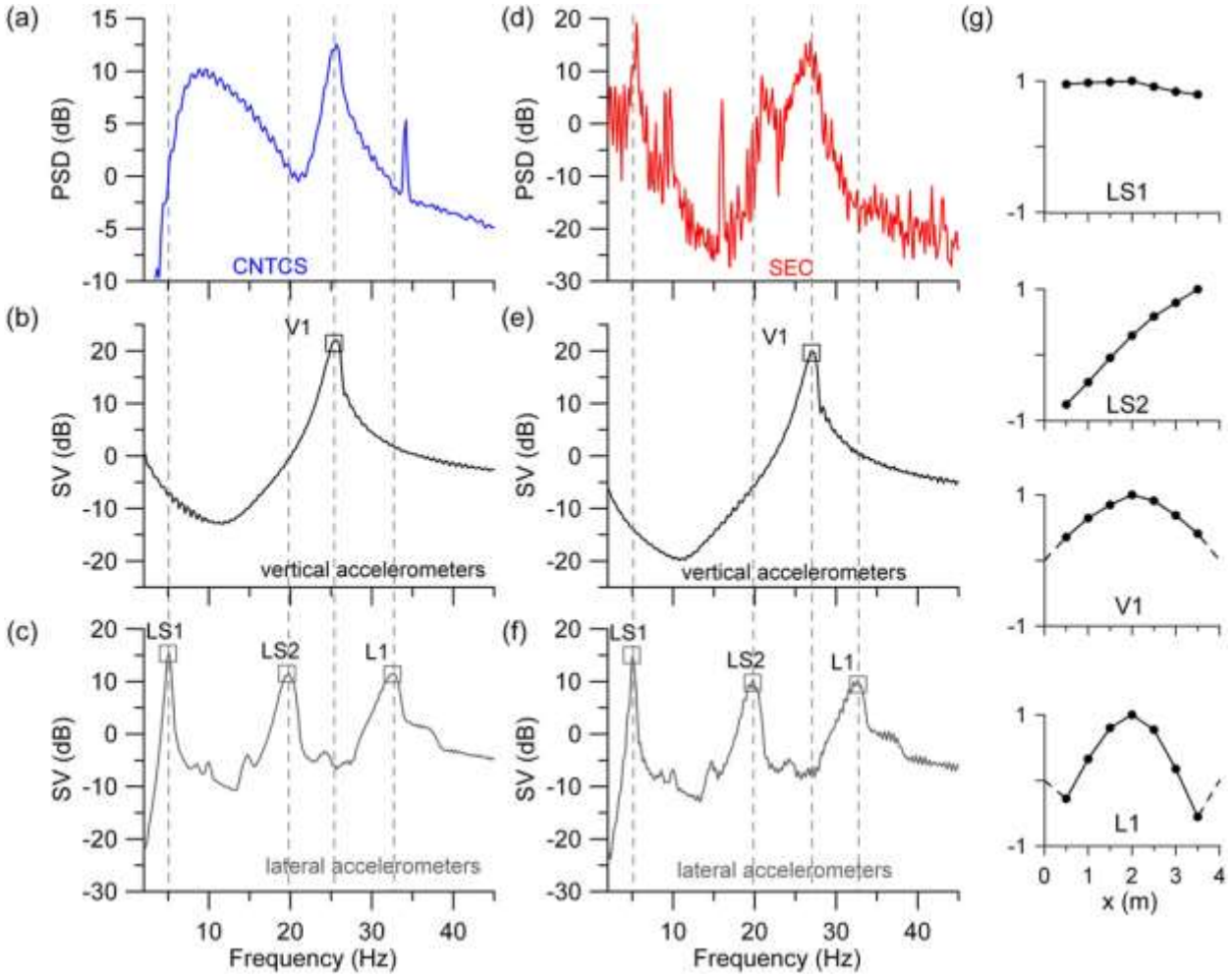
شکل ۱–۲۵: فرآیند ساخت سنسور SEC ها [۶۱]

برای بررسی عملکردی، هر یک از این نوع سنسورها بر روی تیر مشابهی بصورت جداگانه نصب شدند. سپس تیر تحت بار هارمونیک با بازه فرکانسی بین ۰/۲۵ تا ۱۵ هرتز قرار گرفت. شکل ۱–۲۶ پاسخ هر دو سنسور را در بازه فرکانسی ۰/۲۵ تا ۴ هرتز نمایش می‌دهد [۶۱].



شکل ۱–۲۶: بار اعمالی به تیر و پاسخ سنسورها: (a) بار هارمونیک اعمالی به تیر، (b) پاسخ سنسور CNTCs ، (c) پاسخ سنسور SEC [۶۱]

شکل ۱-۲۷ استخراج اطلاعات مودال با استفاده از روش تجزیه دامنه فرکانس کلاسیک[۱] را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نتایج این بررسی می‌توان مشاهده کرد، سنسورهای CNTCs و SEC با دقت مناسبی توانسته‌اند خصوصیات دینامیکی سازه را ثبت کنند. با توجه به هزینه تولید کم و امکان استفاده گسترده از آن‌ها در سطح سازه، سنسورهای بسیار مناسبی برای پایش دینامیکی سازه‌ها به حساب می‌آیند.



شکل ۱-۲۷: نتایج FDD، PSD (a) از خروجی CNTCs، (b) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب عمودی از شتاب‌سنجی که به طور همزمان با CNTCs بکار گرفته شد، (c) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب افقی از شتاب‌سنجی که به طور همزمان با CNTCs به کار گرفته شد، (d) PSD از خروجی SEC، (e) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب عمودی از شتاب سنجی که به طور همزمان با SCE به کار گرفته شد، (f) خط اول مقادیر ویژه استخراج شده از خروجی شتاب افقی از شتاب سنجی که بطور همزمان با SCE به کار گرفته شد (g) شکل مودی استخراج شده از خروجی‌های شتاب [۶۱]

[۱] frequency domain decomposition (FDD)

۸-۲-۱ - بهبود شرایط ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار

از آنجایی که تمامی سازه‌های وابسته به صنعت برق به نحوی بر خاک بستر قرار می‌گیرند و نیز سازه‌های خاکی نظیر سدها و دیواره‌های خاکی به طور مستقیم از انواع خاک‌ها ساخته می‌شوند، لذا یکی از بخش‌های اساسی این پژوهش، بررسی تاثیر مواد نانو ساختار در بهسازی خاک بستر و یا معادن قرضه ساخت سدها و سازه‌های خاکی و پی‌سازی در انواع خاک‌ها برای سازه‌های وابسته به صنعت برق می‌باشد. این بدان جهت است که امروزه در خصوص استفاده از مواد نانو ساختار مختلف جهت بهسازی کیفی خاک و صرفه‌جویی اقتصادی در پروژه‌ها، تحقیقات زیادی در سراسر دنیا در حال انجام است. این در حالی است که با استفاده از مواد نانو ساختار می‌توان در پیشرفت پروژه‌های کلان کشور بخصوص در بهسازی پی‌های مساله‌دار سازه‌های استراتژیک صنعت برق، در زمان و هزینه صرفه‌جویی‌های قابل توجهی انجام داد. در این پژوهش به بررسی جامع استفاده از انواع مواد نانو ساختار قابل استفاده در بهسازی انواع خاک‌ها پرداخته شده و میزان بهینه مصرف و نحوه تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی انواع خاک‌های رسی، لای و ماسه‌ای پس از بهسازی آن‌ها با مواد نانو به طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است.

ایده استفاده از نانوتکنولوژی در ژئوتکنیک، نخستین بار در سال ۱۹۵۹ توسط ریچارد فیمن معرفی شد. این تکنولوژی سال‌ها بعد باعث پیشرفت‌های چشمگیری در مهندسی ژئوتکنیک شد و روش‌های مدرن در بهسازی و رفع نقایص خاک را وارد این حوزه کرد. نانوتکنولوژی را به دو صورت زیر در مهندسی ژئوتکنیک می‌توان بررسی کرد[۶۲]:

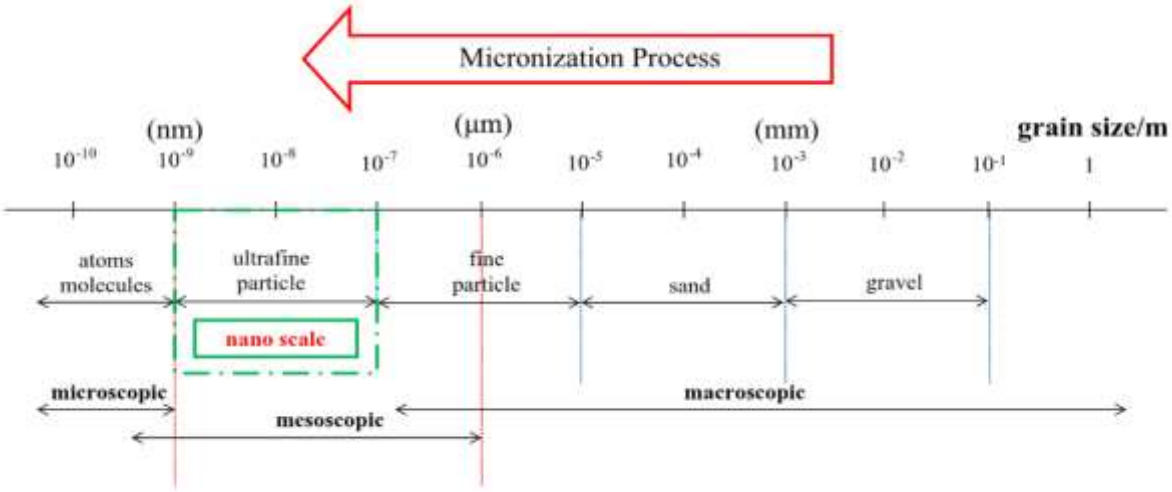
۱. مطالعه ساختار خاک در مقیاس نانومتر جهت شناخت بهتر ماهیت و عملکرد ذرات آن
۲. تقویت ساختار خاک در مقیاس اتمی و مولکولی با افزودن نانو ذرات به عنوان یک عامل خارجی

امروزه نانوتکنولوژی بر علوم مختلف تاثیرگذار است و در صنایع مختلف جهت صرفه‌جویی و افزایش کارایی از آن استفاده می‌شود. بی‌تردید این علم در صنعت ساخت و مهندسی سازه نیز کاربردهای متنوعی دارد. بهسازی خاک بستر و بهبود عملکرد سازه اصلی از جمله تاثیرات ورود علم نانو به صنعت ساخت است. در ادامه، تاثیر مواد نانو ساختار در صنعت برق جهت بهسازی بستر و بهبود عملکرد سازه‌های وابسته به این صنعت و بدنه سازه‌های خاکی صنعت برق نظیر سدها بررسی می‌شود.

اندازه ذرات خاک در شکل ۱-**۲۸** مشاهده می‌شود. با افزودن نانو ذرات به خاک، رفتار مکانیکی خاک بهبود می‌یابد. این مواد خواص سیمانی ندارند اما افزودن آن‌ها به خاک سیمانی سبب پر شدن فضاهای خالی بین ذرات و در نتیجه سخت‌تر و مقاوم‌تر شدن اسکلت خاک می‌گردد. نانو ذره به ذره‌ای گفته می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن در مقایس نانو باشد[۶۳, ۶۴].

نانو ذرات نه تنها در مواد مصنوعی وجود دارند بلکه حضور آن‌ها در برخی مواد طبیعی هم به چشم می‌خورد. به طور کلی ذرات نانو چهار نوع‌اند[۶۵]:

- نانو صفحات که یک بعد در مقیاس نانو متر دارند (مانند برخی از ذرات رسی صفحه‌ای).
- نانو تیوب‌ها که دو بعد در مقیاس نانو دارند (مانند ذرات فیبری).
- نانو دات‌ها (نانو نقطه‌ها) که دارای سه بعد در مقیاس نانو متر هستند.
- نانوسل که شامل ذرات با اندازه‌ی بین ۱ تا۱۰۰ نانومتر می باشد.



شکل ۱-۲۸ : مقایسه اندازه ذرات [۶۶]

۱-۸-۲-۱- بررسی نانو ساختار خاک

خاک ماده‌ای ذره‌ای است که تنوع گسترده‌ای از ذرات با ابعاد کوچکتر از ۱ نانومتر تا ۷۵ میلی‌متر را در بر می‌گیرد (حد بالای ذرات شن است). چنین محدوده گسترده‌ای از اندازه ذرات، خاک را به یکی از پیچیده‌ترین مواد برای مطالعه، تفهیم، مدلسازی و استفاده تبدیل کرده است. به طور معمول هرچه اندازه ذرات به سمت نانو مقیاس کاهش یابد، خصوصیات آن‌ها نیز در مقایسه با نظیرشان در مقیاس بزرگ تغییر می‌کند. تغییرات ایجاد شده در رفتار، ناشی از دو دلیل عمده افزایش سطح و غالب شدن اثرات کوانتوم است[۶۷].

نانو ذرات خاک با دیگر اجزای تشکیل‌دهنده خاک (شامل مایعات، کاتیون‌ها، مواد آلی و کانی‌های رسی) واکنش فعال نشان می‌دهند. دلیل این پدیده، سطح ویژه، ریخت‌شناسی ذرات، نانو حفرات و بار سطحی است که در مقیاس نانو اهمیت بیشتری در خاک دارند. به دلیل بی‌نهایت بزرگ بودن این خصوصیات در مقیاس نانو، این ذرات حتی در مقادیر بسیار اندک هم رفتار فیزیکی، شیمیایی و خصوصیات مهندسی خاک را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهند[۶۷].

فضاهای خالی بین ذرات خاک از چند میکرومتر تا چند نانومتر در تغییر است. چنین انتظار می‌رود که در صورت پر شدن این فضاهای خالی با نانو ذرات، ویژگی‌های خاک نیز تغییر کند. به همین دلیل در حالی که ویژگی‌هایی مانند مقاومت برشی، چگالی نسبی، مقاومت روانگرایی و ... می‌تواند بهبود یابد، ویژگی‌هایی چون تراکم‌پذیری، نفوذپذیری و شاخص پلاستیسیته نیز تاثیرپذیر است[۶۸].

۲-۸-۲-۱- بهسازی خاک به کمک مواد نانو ساختار

از آنجا که تمامی سازه‌ها به نحوی بر خاک بستر قرار می‌گیرند و سازه‌های خاکی نظیر سدها و دیواره‌های خاکی نیز خود جزئی از ارکان صنعت تولید و توزیع برق می‌باشند، لذا یکی از بخش‌های اساسی این پژوهش به بررسی تاثیر مواد نانو ساختار در بهسازی و بهبود کارایی خاک بستر و یا معادن قرضه ساخت سدها و سازه‌های تولید و یا انتقال برق می‌پردازد؛ زیرا استفاده از مواد نانو ساختار به منظور بهسازی کیفی خاک بستر و همچنین صرفه‌جویی

در هزینه و زمان پیشنهاد می‌گردد. در ادامه ویژگی‌های خاک‌های ریزدانه و ماسه‌ای و نیاز به بهسازی آن‌ها به کمک مواد نانو ساختار مورد بررسی قرار گرفته است.

الف- خاک‌های ریزدانه: این نوع خاک‌ها معمولا دارای مقاومت و ظرفیت باربری کم و مشکلات تورمی هستند. یکی از راه‌های مقابله با مشکلات این نوع خاک‌ها تثبیت خاک ریزدانه است. تثبیت خاک‌ها شامل فعالیت‌هایی است که در نتیجه آن‌ها مشخصات مهندسی خاک بهبود یافته و به ویژگی‌های مورد نظر نزدیک می‌شود. این اقدامات باعث افزایش مقاومت، کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی و اثرات بسیار سودمند دیگر می‌شود. در تثبیت به وسیله مواد شیمیایی، استفاده از آهک و سیمان بسیار متداول است. امروزه در کنار آهک و سیمان از مواد شیمیایی دیگری برای تثبیت خاک استفاده می‌شود. از این میان مواد نانو ساختار، دارای مشخصاتی همچون اندازه بسیار کوچک، سطح ویژه بالا، بارهای سطحی و نانو تخلخل بوده و لذا به صورت فعال با دیگر ذرات خاک واکنش می‌دهند؛ در نتیجه حتی در صورت استفاده بسیار کم از این ذرات در محیط‌های خاکی، خصوصیات مهندسی خاک را به صورت ویژه‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهند. از آنجا که خاک‌های ریزدانه یکی از ارکان اصلی بستر سازه‌ها و منابع قرضه ساخت بدنه سدهای خاکی می‌باشند، لذا بهسازی خواص کیفی و مقاومتی آن‌ها به کمک مواد نانو ساختار از جهات مختلف در سازه‌های صنعت برق موثر خواهد بود.

ب- خاک‌های ماسه‌ای: خاک‌های ماسه‌ای شل در پی سازه‌ها به شکل گسترده مشاهده می‌شود. از جمله مشکلات این خاک‌ها ظرفیت باربری پایین، نشست آنی و نیز بروز پدیده روانگرایی در زمان وقوع زلزله می‌باشد. از آنجایی که سازه‌های وابسته به صنعت برق در بخش‌های مختلف تولید و توزیع بر روی بسترهای مختلف ماسه‌ای سواحل و کویری قرار می‌گیرند لذا توجه به بهسازی انواع خاک‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار حائز اهمیت است.

۳-۸-۲-۱- معرفی انواع مواد نانو مورد استفاده در ژئوتکنیک

مواد نانو ساختار در شکل‌های پودری، الیاف و یا به صورت مایع موجود هستند و به صورت تزریق عمیق در خاک و یا به صورت اختلاط در محل، جهت بهسازی خاک‌ها اجرا می‌گردند. اصلی‌ترین مواد نانو مورد استفاده در بهسازی خاک‌ها شامل موارد زیر است:

۱-۳-۸-۲-۱- نانوسیلیس

سیلیسیم دی اکسید یا سیلیکا فراوان‌ترین ماده سازنده پوسته زمین است. این ترکیب با فرمول SiO_2 ساختاری شبیه الماس دارد. ماده‌ای بلوری و سفید رنگ با دمای ذوب و جوش نسبتا زیاد که در طبیعت به سه شکل پودر، ژل و کلوییدی یافت می‌شود. در شکل ۱-۲۹ نمونه‌ای از نانو سیلیس نشان داده شده است.



شکل ۱–۲۹: نانو ذرات سیلیس

۲-۳-۸-۲-۱- نانو رس

نانو رس‌ها، مواد ریزدانه‌ای هستند که در طبیعت به طور معمول یافت می‌شوند و اندازه ذرات آن‌ها کمتر از ۵ میکرومتر است. ذرات رس با چنین ابعادی دارای فعالیت بالا می‌باشند و هنگامی که در پلیمرها، سرامیک‌ها، جوهرها، رنگ‌ها و پلاستیک‌ها به کار بروند خصوصیاتی استثنائی به آن‌ها می‌دهند. در تولید نانو رس غالبا از بنتونیت استفاده می‌شود. بنتونیت نوعی کانی رسی است که عمدتا از مونت‌موریلونیت تشکیل شده است. در شکل ۱–۳۰ تصاویری از نانو رس و مونت‌موریلونیت آورده شده است.

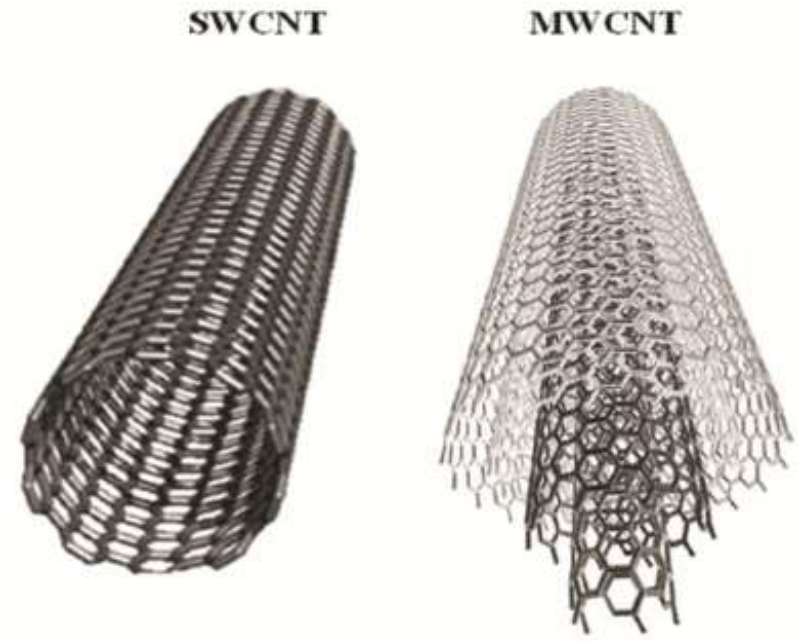


شکل ۱–۳۰: نانو رس و تصویر میکروسکوپ الکترونی از مونت‌موریلونیت

۳-۳-۸-۲-۱- نانو لوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی که از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌های توخالی ساخته شده است، در سال ۱۹۹۱ توسط سامیو ایجیما (از شرکت NEC ژاپن) کشف شد. نانو لوله‌های کربنی، ساختارهای حلقوی توخالی و متشکل از اتم‌های کربن هستند که می‌توانند به شکل تک یا چندجداره آرایش یابند و دارای خواص فلزی و شبه‌رسانایی نیز می‌باشند. نانو لوله‌های کربنی دارای سطح ویژه بسیار بالا، نفوذپذیری زیاد و پایداری مکانیکی و حرارتی مناسبی هستند؛ با این وجود، تخلخل نانو لوله‌های کربنی به‌طور قابل توجهی کم است. غشاهای نانو لوله‌ای نشان داده‌اند که به دلیل سطح داخلی صاف نانولوله‌ها، شدت جریان بیشتر یا برابری نسبت به تخلخل‌های بسیار بزرگتر دارند. شکل لوله‌ای کربن از دیگر شکل‌های کربن مانند ورقه‌های گرافیتی مطلوبتر است؛ زیرا ساختار لوله‌ای فاقد باندهای غیر پیوندی و معلق است و باعث می‌شود ساختار از انرژی کمتری برخوردار باشد. آن‌ها دارای استحکام غیرعادی، قابلیت ارتجاع، مقاومت کششی بالا و وزن کم هستند[۶۹].

نانو تیوب‌ها دارای فرم لوله‌ای با ساختار شش‌ضلعی می‌باشند. نانو تیوب‌ها را می‌توان صفحات گرافیتی فرض کرد که لوله شده‌اند. خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف و طبیعت کربنی بودن نانو تیوب‌ها (کربن ماده‌ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرآیندها که نسبت به فلزات برای تولید ارزان‌تر می‌باشد) باعث شده که در دهه گذشته تحقیقات مهمی درباره کارایی و پرباری روش‌های رشد نانو تیوب‌ها انجام گیرد. کارهای نظری و عملی زیادی نیز بر روی ساختار اتمی و ساختارهای الکترونی نانو تیوب متمرکز شده است (شکل ۱-۳۱) [۶۹].



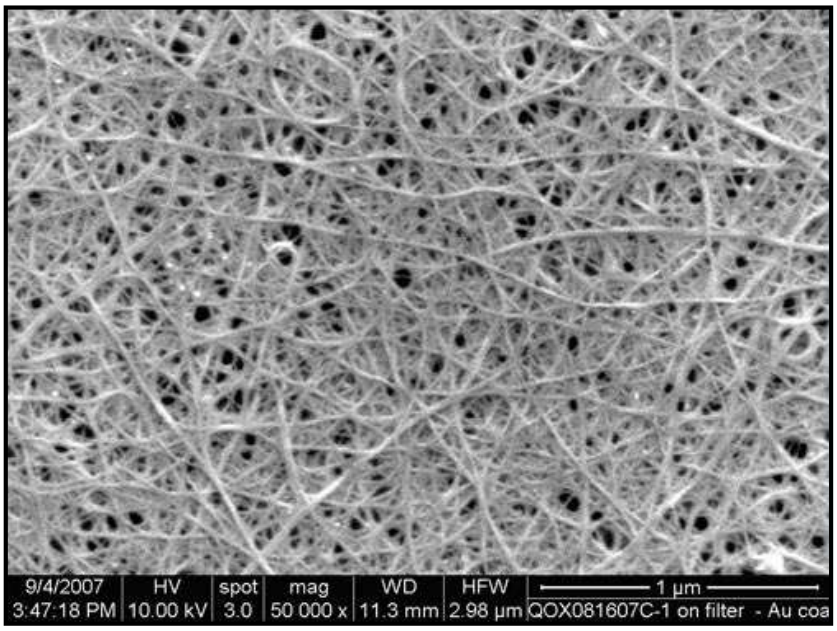
شکل ۱-۳۱: نانو لوله‌های کربنی[۶۹]

۴-۳-۸-۲-۱- نانو کامپوزیت پلیمری

نانوکامپوزیت، همان کامپوزیت است که یک یا چند جزء از آن، ابعاد کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر دارند. نانوکامپوزیت‌ها از دو فاز تشکیل شده‌اند. فاز اول یک ساختار بلوری است که در واقع پایه یا ماتریس نانوکامپوزیت محسوب می‌شود و ممکن است از جنس پلیمر، فلز یا سرامیک باشد. فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر هستند که به عنوان تقویت‌کننده و مواد پرکننده به منظور اهداف خاص از قبیل استحکام، مقاومت و هدایت الکتریکی توزیع می‌شوند. در بحث نانو مواد، نانوکامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. حضور ذرات و الیاف در ساختار نانوکامپوزیت‌ها معمولا باعث ایجاد استحکام در ماده پایه می‌شود. در واقع هنگامی که ذرات یا الیاف درون یک ماده پایه توزیع شوند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به طور یکنواختی به ذرات یا الیاف منتقل می‌شود. در بین نانوکامپوزیت‌ها بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانوکامپوزیت‌های پلیمری، خواص بی‌نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری عموما دارای وزن کم، استحکام، پایداری حرارتی، رسانایی الکتریکی و مقاومت شیمیایی بالا هستند. تقویت پلیمرها با استفاده از مواد آلی و معدنی بسیار مرسوم است (شکل ۱-۳۲ و شکل ۱-۳۳). بر خلاف تقویت کننده‌های مرسوم که در مقیاس میکرون هستند، در نانوکامپوزیت‌ها تقویت‌کننده‌ها ذراتی در ابعاد نانومتر می‌باشند. با افزودن درصد کمی از نانوذرات به یک پلیمر خالص، استحکام کششی، استحکام تسلیم و مدول یانگ افزایش چشمگیری پیدا می‌کنند[۷۰].



شکل ۱-۳۲: انواع نانو کامپوزیت‌ها [۷۰]



شکل ۱–۳۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانو لوله‌های کربنی[۷۰]

۵-۳-۸-۲-۱- سایر نانو ذرات

سایر نانو ذرات مورد استفاده در بهسازی خاک شامل نانو اکسید آهن، نانو اکسید آلومینیم، نانو اکسید روی، دی اکسید تیتانیوم، زئولیت و ... می‌باشند که در شکل ۱–۳۴ تصاویری از این مواد آورده شده است[۷۱].



(د) (ج) (ب) (الف)

شکل ۱–۳۴: الف) نانو اکسید آهن ب) نانو اکسید آلومینیم ج) زئولیت د) دی اکسید تیتانیوم

نتایج پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون تأثیر نانواکسید روی بر خاک، نشان می‌دهد که این ماده تأثیر چندانی در بهبود مقاومت برشی خاک ندارد. همچنین نانواکسید روی موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با سیمان می‌شود[۷۱].

۳-۱- تاریخچه بکارگیری و استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق

۱-۳-۱ - مقدمه

صنعت برق مجموعه‌ای عظیم از تجهیزات و دستگاه‌ها به منظور تولید، توزیع، انتقال و فروش انرژی الکتریکی به صنعت و عموم را در بر می‌گیرد. توزیع رسمی انرژی برق در سال ۱۸۸۲ در زمان تولید برق برای روشنایی، به شکل رسمی آغاز به کار کرد. از آن زمان تاکنون شرکت‌های زیادی در نواحی گوناگون شروع به تولید و توزیع برق به دلیل ایجاد بازار رقابتی آن شدند. صنعت برق شامل چهار فرآیند اصلی است. تولید، انتقال، توزیع و فروش نیرو چهار فرآیند اصلی این صنعت را تشکیل می‌دهند.

نیروگاه به عنوان رایج‌ترین پایگاه تولید انرژی در سطح وسیع، مجموعه‌ای از تأسیسات صنعتی است که برای تولید انرژی الکتریکی از آن استفاده می‌شود. نیروگاه‌ها بسته به نوع تکنولوژی و منابع انرژی در دسترس، متفاوت هستند. وظیفه اصلی یک نیروگاه تبدیل انرژی از دیگر شکل‌های آن مانند انرژی شیمیایی، انرژی هسته‌ای و انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی الکتریکی است. تقریبا در همه نیروگاه‌ها، مولد یا ژنراتور نقش اصلی و کلیدی را بر عهده دارد؛ ماشین دواری که انرژی جسم سیال را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. امروزه توربین‌های متصل به ژنراتورهای الکتریکی بیشترین حجم انرژی الکتریکی را تولید می‌کنند. به کمک توربین‌ها، انرژی سوخت یا بخار یا آب به ژنراتور منتقل می‌شود تا تبدیل به انرژی الکتریکی شود.

فرآیند جابجایی توان الکتریکی را انتقال انرژی الکتریکی[۱] گویند. این فرآیند معمولا شامل انتقال انرژی الکتریکی از مولد یا تولیدکننده به پست‌های توزیع نزدیک شهرها یا مراکز تجمع صنایع است. در واقع تحویل انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده‌ها در محدوده توزیع انرژی الکتریکی است. انتقال انرژی الکتریکی اجازه می‌دهد تا به سادگی و بدون پذیرفتن هزینه حمل سوخت‌ها و جلوگیری از آلودگی حاصل از سوختن سوخت‌ها در نیروگاه، از انرژی الکتریکی استفاده کرد. حال آنکه در بسیاری موارد انتقال منابع انرژی مانند باد یا آب سدها غیرممکن است و تنها راه ممکن، انتقال انرژی الکتریکی است. به علت زیاد بودن میزان توان مورد بحث، ترانسفورماتورها کمابیش در ولتاژهای بالایی کار می‌کنند(۱۱۰ کیلوولت یا بیشتر). انرژی الکتریکی معمولا در فواصل طویل با استفاده از خطوط انتقال هوایی[۲]یا همان دکل‌های بزرگ فلزی انتقال می‌یابد (شکل ۱-۳۵). از خطوط زیرزمینی فقط در مناطق پرجمعیت شهری استفاده می‌شود و دلیل آن هزینه بالای راه‌اندازی و نگهداری و همچنین تولید توان راکتیو اضافی در این‌گونه خطوط است.

مرحله توزیع انرژی الکتریکی[۳]یکی از مراحل پایانی تحویل انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده‌ها است. این مرحله، انرژی الکتریکی را از سیستم انتقال به مصرف‌کنندگان منفرد انتقال می‌دهد. پست‌های توزیعی که به سیستم انتقال متصل هستند، ولتاژ انتقال را به ولتاژهای متوسط (بین ۲ تا ۳۵ کیلو ولت) با استفاده از ترانسفورماتورها کاهش می‌دهند. به‌طور کلی خطوط ولتاژ متوسط معمولا انرژی کمتر از ۲۰ کیلوولت را با استفاده از پست‌های

[۱] Transmission
[۲] Overhead power line
[۳] Distribution

ترانسفورماتوری که گاهی به‌صورت نصب‌شده بر روی تیرهای انتقال قرار دارند و نیز خطوط ولتاژ پایین (کمتر از ۱۰۰۰ ولت) را شامل می‌شود.



شکل ۱–۳۵: تیر توزیع برق و دکل انتقال هوایی برق

همانطور که گفته شد، نیروگاه مجموعه‌ای از تأسیسات صنعتی است که از آن برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. این مجموعه تولید نیرو، بسته به نوع منبع انرژی و نحوه استحصال انرژی الکتریکی لازم، شامل قسمت‌ها و تجهیزات مختلفی است که از بین آن‌ها می‌توان به توربوژنراتورها، دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده و توربین‌های بادی اشاره کرد. در ادامه هریک از این تجهیزات و کاربرد نانومواد مورد استفاده در آن‌ها مورد بررسی واقع شده است.

۲-۳-۱ - سازه های صنعت برق

۱-۲-۳-۱- دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

دودکش نیروگاهی یک سازه مهم از تجهیزات جانبی بویلرهای نیروگاهی برای خارج سازی مواد آلاینده و محصولات احتراقی کوره‌ها به فضای جو می‌باشد.

گازهای خروجی بعد از خروج از دودکش به دلیل اختلاف دمای گاز خروجی و محیط اطراف به سمت بالاتر منتقل می‌شوند. اختلاف دما باعث ایجاد نیروی شناوری در گاز شده و گاز خروجی به سمت بالا منتقل می‌شود. گازهای خروجی از دودکش همزمان با بالارفتن توسط باد غالب، در جهت وزش آن منتشر شده و حرکت می‌نمایند. حرکت گاز و مواد آلاینده همراه آن تا زمانی که این مواد به زمین یا سطح ساختمان‌های اطراف نیروگاه رسیده و نشت اتفاق بیافتد، ادامه می‌یابد.

وظیفه اصلی دودکش، تخلیه گازهای خروجی از نیروگاه‌های برق به اتمسفر می‌باشد. در این زمینه ارتفاع دودکش و سرعت خروج گازها باید به گونه‌ای باشد که غلظت آلاینده‌ها نظیر دی اکسید گوگرد در سطح زمین‌های اطراف دودکش در حد مجاز باشد. گاز خروجی از بویلر نفت سوز ۳-۴ ٪ گوگرد داشته و دمای آن حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد است که این دما تقریبا نزدیک دمای شبنم اسید سولفوریک است. در نتیجه مقادیری ازمحلول رقیق اسید سولفوریک ایجاد خواهد شد. بنابراین لازم است که یک پوشش محافظ برای نگهدارنده بتنی داخلی به منظور جلوگیری از تاثیر شوک‌های حرارتی و اثر اسید یاد شده ایجاد شود. این پوشش محافظ معمولا به شکل یک میله مستقل عمودی و از جنس آجرهای مقاوم در برابر اسید در اطراف نگهدارنده اصلی ساخته می‌شود. این پوشش به صورت مخروط‌های متوالی ساخته می‌شود که بعد از هر ۱۰ متر، این مخروط‌ها تکرار شده و نگهدارنده‌هایی در داخل پوشش اصلی بتنی جهت نگهداری آن ساخته می‌شود.

برج‌های خنک‌کننده، سازه‌هایی برای دفع حرارت زاید آب مورد استفاده در چگالنده به جو از طریق تبادل حرارتی با هوا هستند. برج‌های خنک‌کن معمولا با تبخیر آب، حرارت ایجاد شده در یک واحد شیمیایی را دفع کرده و سیال سرویس را تا دمای حباب مرطوب هوا پایین می‌آورند. به عبارت ساده‌تر، برج خنک‌کننده سیستمی است که از آن برای خنک‌سازی آبی در فرآیندهای سردسازی سیستم‌های تهویه مطبوع، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و ... استفاده می‌شود. از برج خنک‌کن در سیستم خنک‌کاری واحدهای پالایشگاهی، پتروشیمیایی و سایر واحدهای شیمیایی مشابه، نیروگاه‌های حرارتی و سیستم‌های HVAC برای تهویه مطبوع ساختمان استفاده می‌شود. در شکل ۱-۳۶ تصاویری از برج‌های خنک‌کننده ودودکش‌های نیروگاهی نشان داده شده است.



شکل ۱-۳۶: برج‌های خنک‌کننده و دودکش‌های نیروگاه[۷۲]

از نظر ابعاد و اندازه، برج‌های خنک‌کن در مدل‌های کوچک پشت‌بامی برای ساختمان‌های مسکونی تا سازه‌هایی غول‌پیکر و هذلولی شکل (مانند برج‌های خنک‌کن نیروگاه‌ها) با ارتفاع در حدود ۲۰۰ متر و قطر در حدود ۱۰۰ متر وجود دارند. در بیش‌تر موارد از برج‌های خنک‌کن هذلولی شکل در نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده می‌شود؛ هرچند که در برخی از واحدهای شیمیایی بزرگ و سایر واحدهای صنعتی نیز از آن‌ها استفاده می‌شود. در مقابل این برج‌های خنک‌کن بزرگ که در صنایع خاصی به کار گرفته می‌شوند، بیشتر برج‌های خنک‌کن، تجهیزات کوچکی هستند که در کنار واحدهای مختلف صنعتی یا مسکونی برای تهویه هوا به کار می‌روند.

برج‌های خنک‌کننده سیستم توزیع و پخش آب گرم دارند که آب را به صورت یکنواخت روی شبکه مشبک نزدیک به هم می‌پاشد. این شبکه‌ها آکنه یا پرکننده نامیده می‌شوند. آکنه‌ها آب سرازیر شده از بالای برج را با هوایی که

از میان آن حرکت می‌کند کاملا مخلوط کرده به‌طوری‌که آب به صورت یک قطره از یک آکنه به سطح آکنه دیگر توسط نیروی ثقل خود می‌ریزد. هرچند در این برج‌ها مقداری انتقال حرارت محسوس از آب به هوا وجود دارد ولی تقریبا اثر خنک‌کنندگی از تبخیر قسمتی از آب اسپری شونده در برج حاصل می‌شود. بخار حاصل از فرآیند تبخیر در برج توسط جریان هوایی که یک دمنده ایجاد می‌کند از برج خنک‌کن خارج می‌شود. میزان تأثیر برج خنک کن تا حد زیادی به درجه حرارت مرطوب هوای ورودی بستگی دارد و با کاهش آن افزایش می‌یابد.

تا به امروز به دلیل شرایط محیطی سخت و خورنده سازه‌های دودکش و برج‌های خنک کننده، پوشش‌های حرارتی و رنگ‌های ضد آتشی دارای فناوری نانو کاربردهای زیادی در این گونه سازه‌ها داشته‌اند. با این حال فارغ از این کاربردهای متداول محصولات نانوساختار، اخیرا شرکت‌های دانش بنیان فناوری نانو در اروپا اقدام به ساخت ملات-هایی به منظور ترمیم سازه‌ها کردند که در ساختار خود از نانوذرات بهره می‌برند. استفاده از این مواد علاوه بر افزایش استحکام بندکشی، تراکم و نفوذپذیری را بهبود می‌دهد و با کاهش زمان، کاهش هزینه‌ها را نیز در بر دارد. مقاومت فشاری ملات‌های سخت شده از این نوع به بیش از ۶۰ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین مقاومت چسبندگی آن بیش از ۲ مگاپاسکال بوده و در نمونه‌های خشک شده آن اثری از ترک مشاهده نمی‌گردد[۷۳]. این ملات قابلیت بکارگیری به صورت گروت به منظور ترمیم، تقویت و پایدارسازی بتن‌های استفاده شده در انواع سازه‌های نیروگاهی مانند دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده را دارد[۷۴].

۲-۲-۳-۱- توربین‌های بادی

انرژی‌های پایان‌پذیر و آلاینده محیط زیست مانند نفت، گاز طبیعی، زغال سنگ و انرژی هسته‌ای که در حال حاضر عمده منابع تامین‌کننده انرژی در جهان هستند، همه دارای پیامدهای زیست محیطی، مانند ایجاد آلاینده‌ها، افزایش CO_2، افزایش دمای زمین و در نتیجه ذوب شدن یخ‌ها، از بین بردن لایه ازن و همچنین ریسک‌های بالای ایمنی می‌باشند و بدین ترتیب تامین انرژی جهان در آینده باید به سوی استفاده از انرژی‌های پاک و جانشینی آن با انرژی‌های آلاینده جهت‌گیری نماید. امروزه بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر جهان به سرعت در حال گسترش بوده و در طرح‌های جامع انرژی کلیه کشورها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در چند سال اخیر، تغییرات آب و هوایی بر اثر انباشت گازهای گلخانه‌ای در جو و افزایش تقاضای مصرف انرژی برق در کلیه کشورها، باعث رشد فناوری‌های متفاوت در تولید، ذخیره و توزیع انرژی شده و این نقطه عطفی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به خصوص انرژی باد است[۷۵].

از نظر عملکردی در توربین‌های بادی، انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی و سپس انرژی الکتریکی تبدیل می گردد. امروزه گستره فعالیت و کاربرد توربین‌های بادی، طیف وسیعی از صنایع را تحت پوشش قرار می‌دهد مثلا برای پمپاژ آب یا شارژ باتری از این توربین‌ها استفاده می‌شود. می‌توان این توربین‌ها را جهت استفاده بهینه و تولید بیشتر قدرت با سلول‌های خورشیدی نیز ترکیب نمود. در حال حاضر بیشترین ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در چند دهه گذشته از نوع متصل به شبکه بوده است. البته گاهی اوقات در نواحی دور افتاده از توربین‌های بادی منفصل از شبکه استفاده شده است.

توربین‌ها در دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند؛ توربین‌های بادی با محور عمودی (نظیر ساوینوس، داریوس، صفحه‌ای و کاسه‌ای) و توربین‌های بادی با محور افقی. توربین عمودی دارای دو محور است که یک میله رو به باد قرار می‌گیرد و میله‌های عمودی دیگر، عمود بر جهت باد کار گذاشته می‌شوند. ساخت این توربین ساده بوده اما بازده کمی دارد. در این توربین‌ها یک طرف توربین، باد را بیشتر از طرف دیگر جذب می‌کند و باعث می‌شود سیستم

لنگر پیدا کرده و بچرخد. این نوع توربین در نواحی با سرعت باد کم چندان کارآمد نیست. توربین‌های محور افقی، نسبت به نوع محور عمودی رایج‌ترند؛ با این حال نسبت به نوع قبلی پیچیده‌تر و گران‌تر هستند و ساخت آن‌ها هم مشکل‌تر است ولی راندمان بالایی دارند. این نوع توربین در همه سرعت‌ها کار می‌کنند و در انواع پیچیده‌تر می‌توان جهت آن‌ها را با جهت وزش باد تنظیم کرد. نمای ظاهری این توربین‌ها ۳ یا در مواردی ۲ پره است که روی یک پایه بلند نصب شده‌اند[۷۶].

توربین‌های با محور افقی متداول، به سه بخش اصلی تقسیم می‌شوند:

بخش روتور که تقریبا ۲۰٪ قیمت توربین باد را به خود اختصاص داده و شامل پره‌های تبدیل‌کننده انرژی باد به انرژی جنبشی دورانی با سرعت کم می‌شود؛ بخش ژنراتور که حدودا ۳۴٪ هزینه توربین باد بوده و شامل مولد الکتریکی، تجهیزات کنترلی و جعبه‌دنده برای افزایش سرعت دورانی محور توربین می‌شود و بخش تکیه‌گاهی که در بر گیرنده ۱۵٪ قیمت کل توربین بوده و شامل برج و سازوکار جهت‌دهی روتور نسبت به جهت وزش باد می‌شود.

۱-۲-۲-۳-۱- برج توربین بادی

سرعت باد در ارتفاع افزایش می‌یابد. نحوه تغییرات سرعت با ارتفاع یا همان برش باد، در نزدیکی سطح به بیشترین مقدار خود می‌رسد. معمولا این تغییرات طبق قانون قدرت پروفیل باد عمل می‌کند که طبق آن سرعت باد با نسبت توان ۱/۷ ام ارتفاع افزایش می‌یابد. با دو برابر کردن ارتفاع توربین، سرعت باد در حدود ۱۰ درصد و انرژی حاصل از آن در حدود ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. از این رو اکثر شرکت‌های فعال در این حوزه به دنبال راهکارهایی عملی به منظور افزایش ارتفاع برج توربین بادی به منظور رسیدن به تولید و بازده انرژی بیشتر هستند.

در حال حاضر، اکثر توربین‌های بادی به شکل برج‌های فولادی لوله‌ای شکل مخروطی ساخته می‌شوند. این برج ها ۳۰ تا ۶۵ درصد وزن توربین را تشکیل داده و همچنین درصد بالایی از هزینه‌های حمل‌ونقل قطعات توربین را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین استفاده از مصالح سبک‌تر در ساخت سازه برج می‌تواند هزینه‌های تمام شده ساخت و حمل‌ونقل توربین‌های بادی را به مقدار زیادی کاهش دهد.

با توجه به گسترش اتکا بر انرژی بادی در شبکه‌های تولید برق و رقابت شکل گرفته در تولید مقدار بیشتر انرژی در عین راندمان بالا، نیاز است تا ارتفاع برج‌های توربین‌های بادی افزایش یابد. حال به منظور رسیدن به این هدف و در عین حال برای جلوگیری از خمیدگی سازه برج در ارتفاع‌های بالاتر، نیاز است تا قطر برج نیز افزایش یابد و این خود منجر به چند برابر شدن مصالح مصرفی می‌گردد. موضوع دیگر محدودیت‌های اندازه جاده‌ها است که انتقال برج‌هایی با قطر بیشتر از ۳ یا ۴ متر را دچار مشکل کرده است. مشکل دیگر برج‌های فولادی مخروطی این است که با افزایش ارتفاع توربین‌ها، نیازمندی‌های ساخت این گونه برج‌ها در ارتفاع بیش از ۹۰ متر به شکل اساسی دچار چالش می‌شود. در کنار استفاده از فولاد به عنوان مصالح ساخت برج توربین بادی، نمونه‌های اندکی از جنس بتن و یا ترکیبی از بتن و فولاد معروف به مصالح دوگانه در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال استفاده از بتن در این برج‌ها ایده‌ای نسبتا جدید و نیازمند رسیدن به ارتفاع‌های زیادتر در ساخت برج توربین است. در حال حاضر حداکثر طول قابل جابجایی توسط جاده‌های استاندارد، مربوط به مصالح برج‌های فولادی با ارتفاع ۸۰ متر است. لذا رسیدن به ارتفاعی بیش از این مقدار توسط ظرفیت باربری قطعات فولادی برج‌های مورد نظر محدود می‌گردد.

سریتاران استاد دانشگاه ایالتی آیوا[۷۷]، روشی مبتنی بر مقاطع پیش ساخته بتنی با استفاده از بتن پر مقاومت یا بتن با رده عملکردی بسیار قوی را ارائه داده است. بتن با رده عملکردی بسیار بالا نوعی نسبتا جدید از بتن با خواص

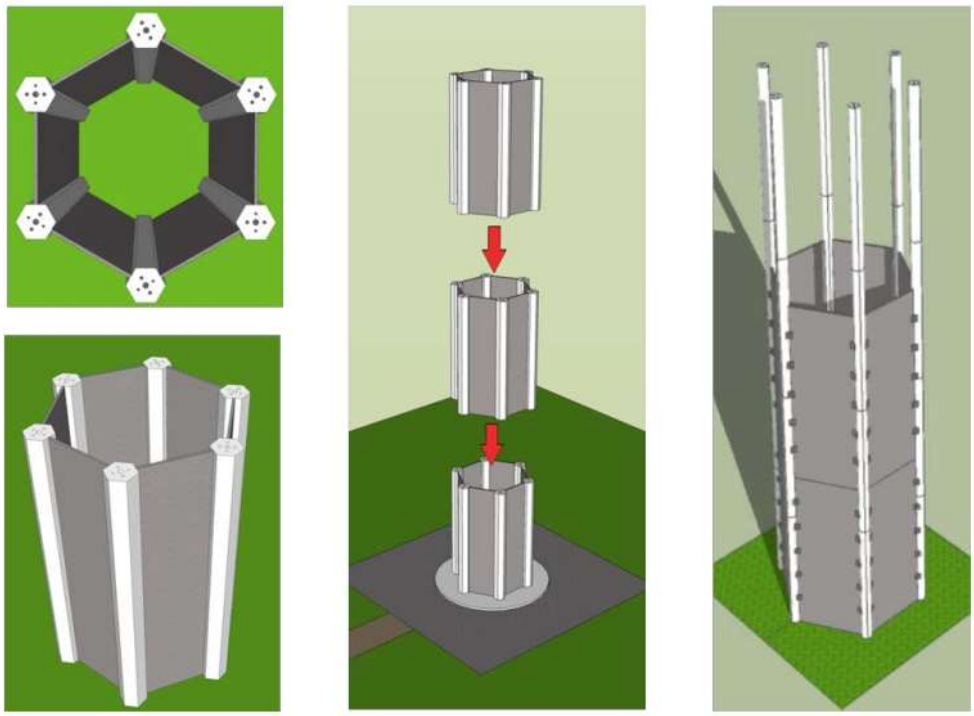
فوق‌العاده ممتاز از جمله دوام بسیار بالا، مقاومت فشاری در حدود ۲۰۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی در حدود ۵۰ مگاپاسکال است. مراحل تحقیقاتی اولیه این بتن در سال ۱۹۹۵ و با هدف دستیابی به رده مقاومتی بیش از ۱۲۰ مگاپاسکال صورت گرفت و دانه‌بندی‌های مختلفی با شرایط عمل‌آوری و افزودنی‌های معدنی و شیمیایی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. آنچه برای پژوهشگران در دو دهه قبل حائز اهمیت بود، ساختار متراکم و مقاومت مکانیکی بسیار بالای این گونه از بتن‌ها بود و به همین دلیل آن را با نام بتن پر مقاومت[۱] می‌شناختند. اصطلاح بتن فراتوانمند[۲] به تدریج با توجه به پررنگ‌تر شدن نقش پوزولان‌ها و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سیمان از اوایل قرن ۲۱ بر سر زبان‌ها افتاد. با گذشت زمان و طی ۱۰ سال گذشته، انتظار مقاومت‌های بالا آنگونه که پژوهشگرانی همچون اچن و همکارانش در تحقیقات خود اشاره داشتند، به تدریج کاهش یافت و در برخی مقالات معتبر نمایه شده، مقاومت ۱۱۰ مگاپاسکال نیز تحت این عنوان، مورد تأیید قرار گرفت[۷۸, ۷۹] . مشخصات دیگری همچون دوام در برابر شرایط دشوار محیطی و عوامل خورنده، میزان حفاظت از عناصر مسلح‌کننده همچون آرماتورهای فولادی و رفتار دینامیکی بهتر، وارد عرصه داوری این‌گونه بتن‌ها گردید و امروزه، انتظارات بیشتری برای اجرای سازه‌های نازک‌تر و با توانمندی‌های بیشتر، از این نسل جدید بتن مطرح می‌گردد.

از نکات قابل توجه در بررسی علمی این نوع بتن، توجه محققان بر استفاده از تکنولوژی نانومواد در ساختار این نوع بتن‌هاست. تحقیقات آزمایشگاهی به منظور بهبود خواص این نوع بتن‌های فراتوانمند به وسیله نانوذرات مانند نانوسیلیس و نانوالیاف مانند نانولوله های کربن در حال انجام است. بکارگیری این نانومواد در بافت بتن می‌تواند برخی نواقص مانند افت بتن را پوشش داده و عملکرد کلی آن را بهبود بخشد.[۸۰]

استفاده از بتن پرمقاومت در ساخت برج توربین، امکان افزایش ارتفاع سازه و بهبود عمر مفید سازه را می‌دهد. بتن پیش‌تنیده و آرماتورهای فولادی برای ارتفاع‌های بیش از ۱۲۰ متر نسبت به برج‌های فولادی استاندارد عملکرد بهتری از خود نشان دادند. مزیت دیگر بتن در امکان بکارگیری مقاطع پیش‌ساخته کوچکی است که حمل‌ونقل و همچنین نصب آسان‌تر در محل احداث برج را ممکن می‌سازد. در واقع قسمت بیشتر بتن استفاده شده در این طرح، در محیطی کنترل شده ساخته شده و به محل نصب برج انتقال داده می‌شود؛ نحوه اتصال و ساخت برج توربین بادی در شکل ۱-**۳۷** نشان داده شده است.

[۱] High Strength Concrete (HSC)

[۲] Ultra-High Performance Concrete (UHPC)



شکل ۱-۳۷: قطعات پیش ساخته برج توربین بادی بتنی از جنس بتن فوق توانمند[۷۷]

۲-۲-۲-۳-۱- پره توربین بادی

چشم انداز بهره‌گیری از انرژی باد در آینده به توسعه و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی بزرگ خارج از آب بستگی دارد. توربین‌های بادی، در معرض بارهای محیطی و مکانیکی چرخه‌ای، بارهای کششی پیچیده و خارج از محور و بارهای فشاری و برشی قرار دارند. ساخت چنین توربین‌هایی نیازمند توسعه مصالح به روز، مستحکم و مقاوم در برابر خستگی است تا بتواند بارهای چرخه‌ای، مکانیکی و بارهای حرارتی و محیطی را طی مدت طولانی سرویس‌دهی توربین تحمل کند. از میان ایده‌های مختلف موجود به منظور ارتقای عملکرد مواد کامپوزیتی در کاربردهای مربوط به انرژی باد، دو رویکرد نظر جامعه تحقیقاتی و صنعتی را به خود جلب کرده است: کامپوزیت‌های دوگانه[۱] و کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو. کامپوزیت‌های دوگانه (برای مثال الیاف کربن و شیشه) باعث شده تا از مزایای هر دو دسته الیاف در قالب یک ماده استفاده شود و همچنین نقایص و ضعف هر دو پوشانده شود.

رویکرد قابل توجه دیگر، بهبود عملکرد کامپوزیت‌ها به وسیله تقویت کردن ماتریس زمینه به کمک نانوذرات می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهند که افزودن مقدار بسیار اندکی از نانوذرات به کامپوزیت‌های تقویت شده به کمک الیاف، خواص کامپوزیت‌ها را بهبود می‌دهد.

طبق تحقیقات دنیز پاسکال و همکاران[۸۱]، خواص تحت کنترل ماتریس زمینه مانند مقاومت خمشی و برشی بین لایه‌ای، با افزودن نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت‌های ترموپلاستیک تقویت شده با الیاف، به شدت بهبود می‌یابد. با این حال، خواص کنترلی توسط الیاف مانند سختی و مقاومت کششی به مقدار کمی افزایش می‌یابد.

[۱] Hybrid

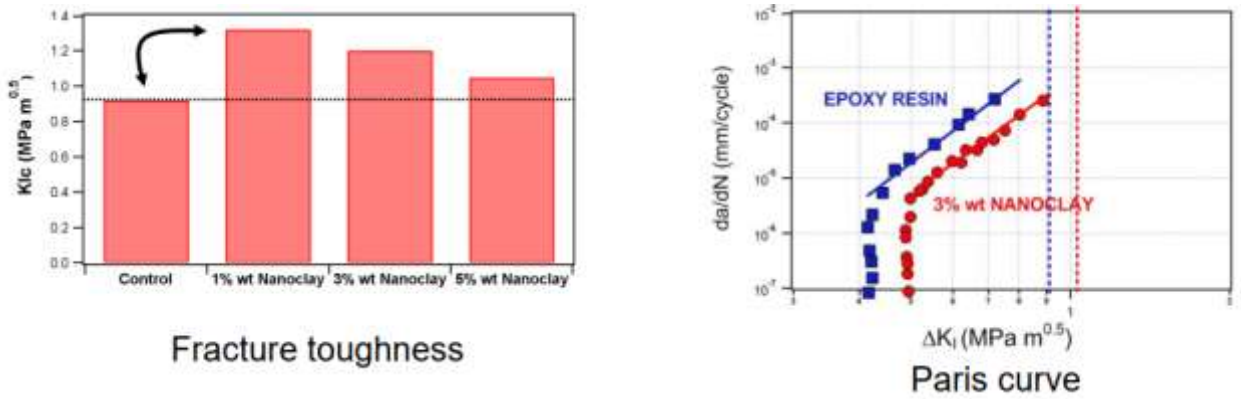
در تحقیقات گودارا و همکاران[۸۲, ۸۳] و همچنین دِ گریف[۸۴]، محققان اثر پخش‌شدگی نانولوله‌های کربن را در ماتریس و یا چسب الیاف کامپوزیت‌ها بررسی کردند و مشخص شد این نانولوله‌ها سختی شروع ترک را افزایش داده و سختی گسترش ترک را کاهش می‌دهند.

در گزارش سیدیکو و همکاران[۸۵]، مشخص شد که مقاومت کششی الیاف شیشه با افزودن نانولوله‌های کربنی بسیار افزایش می‌یابد. مقاومت برشی کامپوزیت‌های ونیل استر حاوی الیاف شیشه در اثر افزودن تنها ۰/۰۱۵٪ وزنی نانولوله‌های کربنی به مقدار ۴۵٪ بهبود داشت. مقاومت برشی بین لایه‌ای الیاف کربنی پارچه با استفاده از نانو لوله‌های تک‌جداره و چندجداره به میزان ۳۰٪ افزایش یافت. بنابراین، تقویت مجدد کامپوزیت (به عنوان مثال توسط نانولوله‌های کربن یا نانورس) اثرات مثبتی بر روی مقاومت برشی و خمشی، سختی شکست و مقاومت خستگی کامپوزیت‌ها دارد. با این حال این پرسش پیش می‌آید که تیغه‌های توربین بادی به عنوان سازه‌هایی که در معرض ترکیبی از بارهای چرخه‌ای مکانیکی، محیطی، خستگی و همچنین رطوبت زیاد هستند، تا چه حد پتانسیل بهبود مصالح آن‌ها وجود دارد.

در گزارش دای و میشنائوسکی [۸۶] دسته‌ای از مطالعات کامپیوتری به منظور روشن‌سازی امکان بکارگیری این مواد در مصالح تیغه‌های بادی انجام گرفته است. آن‌ها در این گزارش بررسی کردند که در چه صورتی سازه‌های ساخته شده توسط نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند به منظور بهبود خواص مکانیکی و دوامی توربین بادی مفید واقع شوند. بر اساس تحقیقات آن‌ها، کامپوزیت‌های کربنی در مقایسه با شیشه دوام خستگی بالاتری از خود نشان می‌دهند. همچنین تقویت مجدد همین کامپوزیت‌ها به کمک نانولوله‌های کربنی، این اطمینان را می‌دهد که کامپوزیت‌ها عمر بسیار بیشتری خواهند داشت. تقویت کامپوزیت‌ها به کمک نانولوله‌های کربنی، حساسیت عمر خستگی آن‌ها نسبت به بارهای خارج از محور را حتی در شرایط رطوبتی شدید کاهش می‌دهد. نانوکامپوزیت‌های الیاف کربنی که نانولوله‌های کربنی آن در چسب الیاف اضافه شدند، بهترین پتانسیل را برای بکارگیری در تیغه‌های بزرگ توربین بادی دارند[۸۶].

میشنائوسکی و همکاران در تحقیقی دیگر[۸۷] اثر افزودن مواد نانوساختار به ماتریس کامپوزیت پلیمری را بررسی کردند. در این تحقیق آن‌ها با استفاده از روش‌های میکرومکانیک، مکانیک کوانتوم و مدل فاز موثر، پتانسیل بکارگیری نانوذرات رس در ماتریس پلیمری را امکان‌سنجی نمودند. طبق مدل‌سازی آن‌ها، نانوساختار کردن کامپوزیت‌های پلیمری توسط نانورس باعث بهبود سختی، مقاومت فشاری، مقاومت تحمل شکست الیاف و مقاومت خستگی کامپوزیت‌ها شده و از این رو گزینه مناسبی برای کاربرد به عنوان مصالح ساخت توربین بادی می‌باشند.

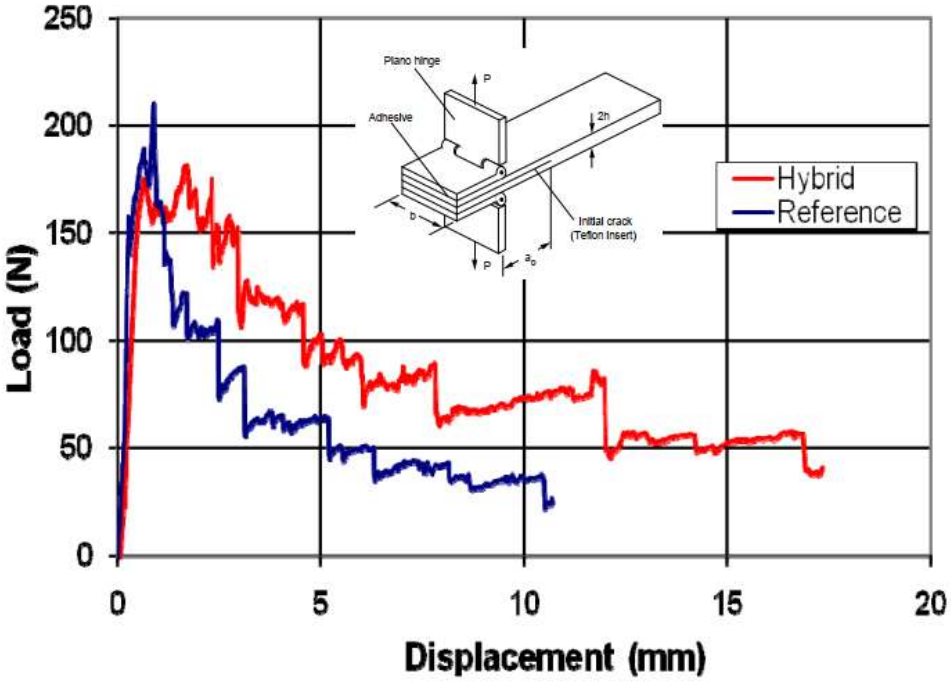
کوارسیمین و همکاران[۸۸] در تحقیقی در راستای کاربرد نانوذرات رس در کامپوزیت‌های پلیمری عنوان کردند که پراکنش ذرات نانورس (صفحاتی با ضخامت ۱ نانومتر) در چسب اپوکسی باعث بهبود خواص شکست خستگی و استاتیک کامپوزیت‌ها می‌گردد (شکل ۱-۳۸).



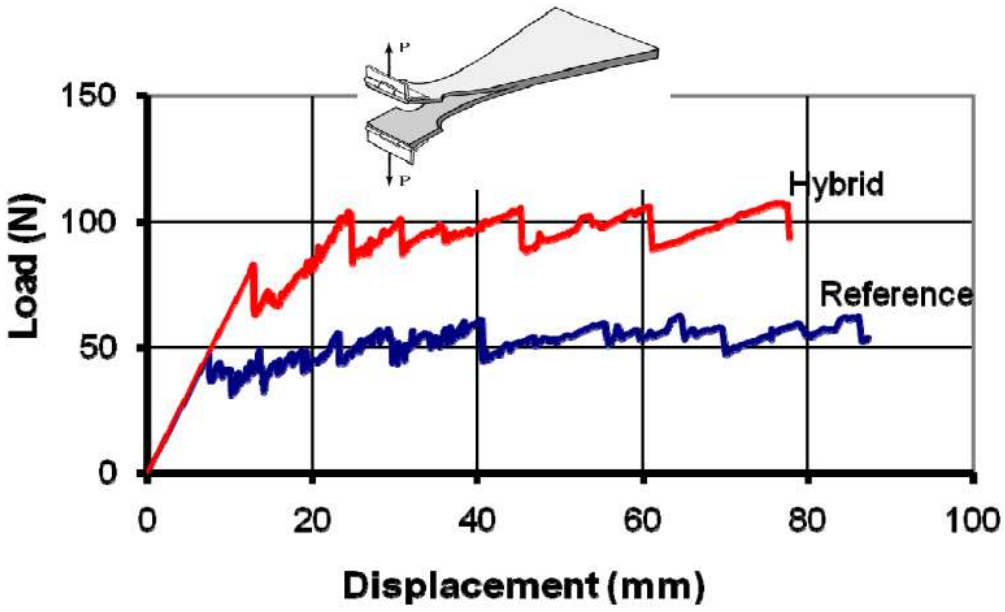
شکل ۱–۳۸: نمودارهای شکست خستگی و سختی شکست کامپوزیت‌های حاوی چسب اپوکسی تقویت شدت با نانورس[۸۸]

ماپنگ چنگ و ژانگ[۸۹] خصوصیات بکارگیری نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های رزینی با درنظرگیری امکان استفاده در صنعت انرژی بادی را بررسی کردند. در این تحقیق، از ماتریس‌های پلیمری و الیاف تقویت کننده مختلف استفاده شد. مشابه آزمایشات دیگر در این حوزه، نانولوله‌های کربنی پتانسیل بالایی از خود به منظور بهبود خواص استحکامی و مقاومت در برابر خستگی در مقابل بارهای مکانیکی نشان دادند. با این حال محققان متذکر شدند پراکنش ضعیف نانولوله‌های کربنی و تعامل ضعیف آن با رزین پلیمر دو مانع مهم در بکارگیری این ماده است و باید تحقیقات بیشتری در زمینه روش‌های موثرتر پخش این نانوذرات در ماتریس زمینه انجام گیرد.

دنیل و فِنِر [۹۰] در آزمایشات خود خصوصیات یک نانوکامپوزیت تقویت شده به کمک نانولوله‌های کربنی چندجداره را مطالعه کردند. این ماده کامپوزیتی از میکرو الیاف کربن به عنوان تقویت‌کننده اصلی و ماتریس اپوکسی تشکیل شده بود. نانولوله‌های کربنی چندجداره به منظور تقویت مجدد کامپوزیت در ماتریس اپوکسی استفاده شد. آزمایشات سختی شکست برای مودهای شکست ۱ و ۲ بر روی نمونه‌های کامپوزیتی در هر دو نوع همراه با نانوالیاف و بدون نانوالیاف انجام گرفت. بر اساس آزمایش نمونه شکافته شده تحت آزمایش خمش سه نقطه و برای مود ۱، نتایج مطابق شکل ۱–۳۹ و شکل ۱–۴۰ نشان می‌دهد که علاوه بر افزایش مقدار مدول یانگ، نرخ انرژی کرنشی آزاد شده اندازه‌گیری شده برای نانوکامپوزیت، ۳۳ درصد نسبت به کامپوزیت مرجع رشد داشته است. همچنین آزمایش مربوط به مود ۲ شکست، نشان‌دهنده افزایش ۳۵درصدی نرخ انرژی آزاد شده برای نانوکامپوزیت نسبت به حالت کامپوزیت اولیه است. تمامی نتایج تنها با بکارگیری ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی بدست آمد و این موضوع نشان می‌دهد با افزایش معقول در هزینه‌های تمام شده، عمر سرویس‌دهی سازه‌هایی مانند پره‌های توربین بادی به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد.



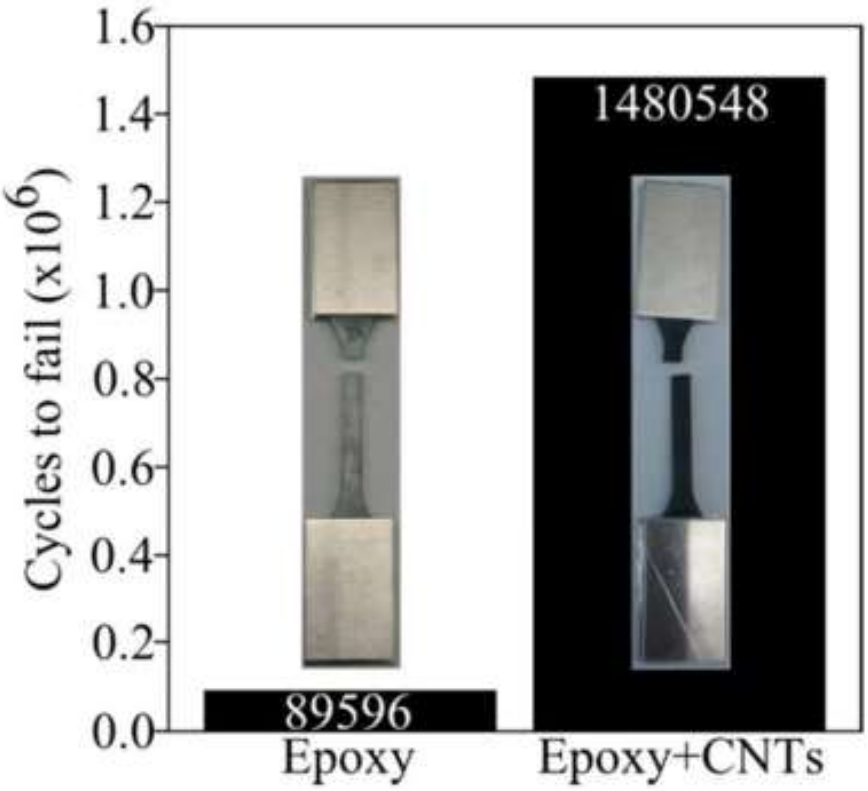
شکل ۱–۳۹: منحنی بار-جابجایی تیر طره‌ای دوبل با عرض ثابت برای تعیین سختی شکست بین لایه‌ای مود یک[۹۰]



شکل ۱–۴۰: منحنی بار-جابجایی تیر طره‌ای دوبل با عرض کم شونده برای تعیین سختی شکست بین لایه‌ای مود یک[۹۰]

مارسیو لووس و همکاران [۹۱] عملکرد اپوکسی متداول در ساخت پره‌های توربین بادی را به همراه افزودن نانولوله‌های کربنی بررسی کردند. نانو لوله‌های کربنی به مقدار ۰/۲ درصد وزنی به اپوکسی افزوده شدند. به منظور جلوگیری از کلوخه‌شدگی و به هم چسبیدن این نانولوله‌ها، از مواد دیسپرس‌کننده و یا مواد بهبوددهنده سطح استفاده شد. هر دو نمونه حاوی نانولوله و نمونه بدون تقویتی، تحت آزمایشات چرخه‌ای مقاومت خستگی در

پیک‌های مختلف تنش‌دهی قرار گرفتند. مقایسه نتایج آزمایش خستگی در نرخ تنش ۲۵ مگاپاسکالی مطابق شکل ۱-۴۱ نشان می‌دهد بکارگیری نانولوله‌های کربنی متوسط عمر خستگی اپوکسی را ۱۵۵۰٪ نسبت به اپوکسی خالص افزایش می‌دهد. در نرخ‌های تنش‌گذاری بالاتر، به نظر می‌رسد اتصال نانولوله‌ها و ماتریس زمینه ضعیف شده و انتقال بار بین این دو بسیار کاهش می‌یابد. به علاوه در تنش‌های بالاتر، نرخ رشد و گسترش ترک‌ها زیاد بوده و به نظر می‌رسد نانولوله‌های کربنی در کنترل گسترش این ترک‌ها کمتر موثرند. با این حال این تحقیق توان بالای نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربنی برای بهبود مقاومت خستگی و دوام سرویس‌دهی اجزای توربین بادی را به خوبی نمایان می‌سازد.



شکل ۱-۴۱: نمودار تنش چرخه‌ای و عمر سازه برای دو اپوکسی خالص و تقویت شده به کمک نانولوله‌های کربنی[۹۱]

همانطور که در مقدمه این بخش بیان شد، مواد نانوساختار علاوه بر کاربردهای مقاومتی و بهسازی، در زمینه‌های دیگری چون حسگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مورد کاربرد این خواص حسگری نانوذرات می‌توان به کاربردهای اخیر نانوحسگرها که به منظور پایش سلامت پره توربین‌های بادی انجام می‌گیرد، اشاره نمود. خواص عالی الکتریکی این حسگرهای نانوساختار می‌تواند به تشخیص سریع نواقص سازه‌ای پره توربین و تخمین عمر سرویس‌دهی آن کمک کند. نانوحسگرها پتانسیل بالایی در تنظیم خروجی انرژی و سرعت پره‌ها به منظور جلوگیری از اضافه بار وارده بر اجزای سازه‌ای دارند[۵۹]. گزارشی از تحقیقات انجام گرفته بر روی این نانوحسگرهای منطبق بر کامپوزیت‌های نانولوله کربنی- پلیمری توسط محققان دانشگاه هیوستون امریکا در مجله Applied Physics چاپ شده است[۹۲].

۱-۴- شناسایی روش‌های استفاده و چالش‌های بکارگیری مواد نانو ساختار

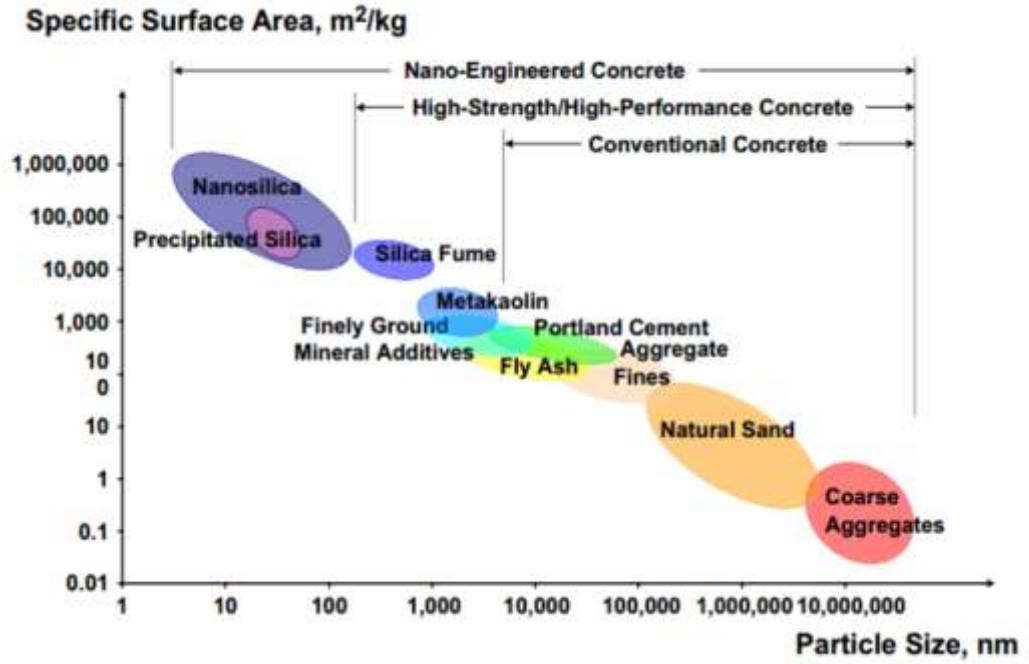
استفاده از مواد نانو ساختار در بتن و خاک بستر با وجود مزایای بسیاری که در بهبود خواص آن‌ها دارد، با چالش‌هایی روبروست که باید در استفاده و بکارگیری این مواد مورد توجه قرار گیرد و تا حد امکان از خطرات و مشکلات آن‌ها جلوگیری به عمل آید.

۱-۴-۱ - چالش‌های استفاده از مواد نانو ساختار در صنعت بتن

نانو تکنولوژی مانند تمامی تکنولوژی‌های نو نیاز به یک توجیه اقتصادی دارد. در حال حاضر هزینه‌های بالای نانو ذرات مانع از توسعه روزافزون این محصولات و استفاده آن‌ها در صنعت می‌گردد. برای همین بهره‌برداری از نانو تکنولوژی در صنعت بتن در مقیاس تجاری همچنان به چند محصول قابل عرضه در بازار محدود گردیده است[۹۳].

مشکل دیگر در زمینه استفاده از نانو مواد، توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس بتن است. معمولا این مواد در حین افزوده شدن به بتن به صورت کلوخه انباشته می‌شوند و در مخلوط به خوبی توزیع نمی‌شوند. البته برای حل این مشکل می توان از دستگاه‌های مخلوط کن قوی استفاده کرد. بنابراین در مرحله میکس بتن ساخته شده از مواد نانو ساختار توصیه می‌شود از مخلوط‌کن‌هایی استفاده شود که دارای قدرت و توان بالا هستند تا مشکل کلوخه شدن یا تمرکز مواد نانو در یک نقطه حل شود[۹۳].

جذب آب بسیار بالای ذرات نانو نیز یکی از مشکلات در ساخت بتن حاوی این ذرات است. این ذرات به علت سطح ویژه بسیار بزرگی که دارند مقدار زیادی آب جذب می کنند و ممکن است بر کارایی بتن تاثیرگذار باشند (شکل ۱-۴۲) [۹۳]. با افزایش درصد نانومواد در بتن، کارایی بتن کاهش می‌یابد. برای جبران کاهش کارایی می‌توان به مخلوط آب اضافه کرد که این کار باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود. برای رفع این مشکل می‌توان از فوق‌روان‌کننده استفاده کرد که با نسبت آب به سیمان کمتر، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد[۹۴].



شکل ۱–۴۲: تفاوت سطح ویژه ذرات نانو و سایر اجزای بتن که منجر به جذب آب بالای نانو مواد می‌گردد

چالش‌های دیگری نیز در زمینه استفاده و بکارگیری مواد نانو در بتن و خاک بستر وجود دارد از جمله توزیع یکنواخت نانو مواد، سازگاری نانو مواد با سیمان، فرآوری، تولید، ایمنی، مسائل مربوط به حمل و نقل، تولید انبوه، هزینه‌ها و ...

۲-۴-۱ - روش‌های اضافه کردن نانومواد به مخلوط بتن

سجادی در سال ۱۳۹۴ به بررسی تاثیر مواد نانوساختار در بتن پرداخت. در این مقاله چند روش اختلاط بتن با اضافه شدن نانو مواد بررسی شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که برای اختلاط بتن از سه روش می‌توان استفاده کرد.

۱) در ابتدا مشابه بتن معمولی درشت‌دانه‌ها به همراه مقداری آب که قبلا با فوق‌روان‌کننده مخلوط شده است، درون مخلوط کن ریخته و پس از آن ماسه، سیمان و بقیه آب به تدریج به مخلوط اضافه می‌شود. این اختلاط به مدت ۳ دقیقه ادامه می‌یابد و پس از آن ۳ دقیقه مخلوط‌کن خاموش و در انتها با ۲ دقیقه اختلاط مجدد، بتن آماده می‌شود.
۲) بتن در دو بخش متفاوت مخلوط می‌شود؛ بخش اول که شامل سیمان، ماسه، افزودنی و حدود دو سوم آب است، مخلوط شده و بخش دوم، درشت‌دانه‌ها به همراه باقی‌مانده آب به مخلوط بخش اول اضافه می‌شود.

۳) مصالح خشک شامل درشت‌دانه، سیمان و ماسه در ابتدا به مدت ۱ دقیقه با هم مخلوط و سپس آب به همراه افزودنی طی ۲ تا ۴ دقیقه به تدریج به مخلوط اضافه و به مدت ۱ دقیقه محتویات مخلوط‌کن با هم مخلوط می‌شوند.

در این مطالعه، پس از اختلاط به سه روش فوق، مشاهده شد که فقط در روش سوم، بتن حاصل طی فرآیند اختلاط کلوخه نمی‌شود و همگنی مناسبی نیز دارد[۹۴].

اسماعیلی و همکاران (سال ۱۳۹۴) در پژوهشی روش صحیح اختلاط نانو لوله‌های کربنی در ملات سیمانی را به شیوه‌ی زیر توصیه کردند؛ مطابق استاندارد ASTM C305 برای اختلاط مواد ابتدا آب، داخل مخلوط‌کن ریخته می‌شود؛ سپس سیمان به آن اضافه شده و برای مدت ۳۰ ثانیه با سرعت پایین مخلوط می‌شود. سپس در حالیکه مخلوط‌کن با سرعت پایین کار می‌کند کل ماسه در ۳۰ ثانیه به مخلوط اضافه می‌شود. بعد از این مرحله مخلوط به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت متوسط مخلوط می‌گردد. مخلوط‌کن به مدت ۱/۵ دقیقه خاموش شده و در ۱۵ ثانیه اول از این زمان، همه ملات‌های کناره مخلوط‌کن به داخل آن منتقل شده و درب مخلوط‌کن پوشانده می‌شود. در انتها مخلوط کن یک دقیقه با سرعت متوسط هم زده می‌شود. در مواقعی که می‌خواهیم نانولوله‌های کربنی را استفاده کنیم این مواد به کل آب مخلوط، اضافه شده و پس از تهیه سوسپانسیون یکنواخت، مطابق توضیح فوق به ملات اضافه می‌شود[۹۵]. برای پخش مناسب نانو لوله‌های کربنی در ملات سیمان و جلوگیری از کلوخه شدن، از روش‌هایی استفاده می‌شود که در بخش بعد به تفصیل بیان می‌گردد.

۳-۴-۱ - خالص‌سازی و عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی به دلیل داشتن سطح آب‌گریز، در مخلوط به حالت توده و تجمعی در می‌آیند؛ به همین دلیل برای استفاده و بکارگیری این مواد در مخلوط بتن باید با استفاده از روش‌هایی این مشکل برطرف گردد وگرنه خواص مورد انتظار را برآورده نخواهند کرد. بنابراین برای پراکندگی مناسب این مواد در محلول‌ها و پلیمرها باید سطح آن‌ها با استفاده از گروه‌های عاملی مختلف اصلاح شود. نانو لوله‌ها پیش از عامل‌دارسازی[۱] باید خالص‌سازی[۲] شوند تا ناخالصی‌های حین سنتز از بین بروند[۹۶].

[۱] Functionalization
[۲] Purification

۱-۳-۴-۱- خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی با دو روش کلی فیزیکی و شیمیایی خالص‌سازی می‌شوند. در روش فیزیکی ناخالصی‌ها بر اساس نسبت ابعاد و اندازه آن‌ها از نانو لوله‌ها جدا می‌شوند؛ از این روش در دفع تجمعات و ورقه‌های گرافیتی استفاده می‌شود. روش شیمیایی برخلاف روش فیزیکی بر پایه اکسیداسیون استوار است[۹۶, ۹۷].

خالص‌سازی فیزیکی

با توجه به تفاوت خواص فیزیکی نانولوله‌های کربنی با ناخالصی‌ها، با استفاده از روش‌های فیزیکی امکان خالص‌سازی این مواد وجود دارد. روش‌های فیزیکی غیر اکسیداسیونی هستند و به ساختار نانولوله‌ها آسیب نمی‌زنند؛ اما روش کافی برای خالص‌سازی نیستند و باید همراه با روش‌های شیمیایی اعمال شوند. روش‌های فیزیکی شامل فیلتراسیون، پخت دما بالا[۱] و سانتریفیوژ هستند[۹۶, ۹۷].

فیلتراسیون

در این روش از یک فیلتر استفاده می‌شود که ذرات ریز از آن عبور کرده و ذرات درشت روی فیلتر باقی می‌مانند. در این روش ذرات فلزی و کربن‌های پلی آروماتیک بر اساس اختلاف ابعاد و یا انحلال جدا می‌شوند. در این روش ذرات چسبیده به جداره نانولوله‌ها جدا نمی‌شوند[۹۶, ۹۸]

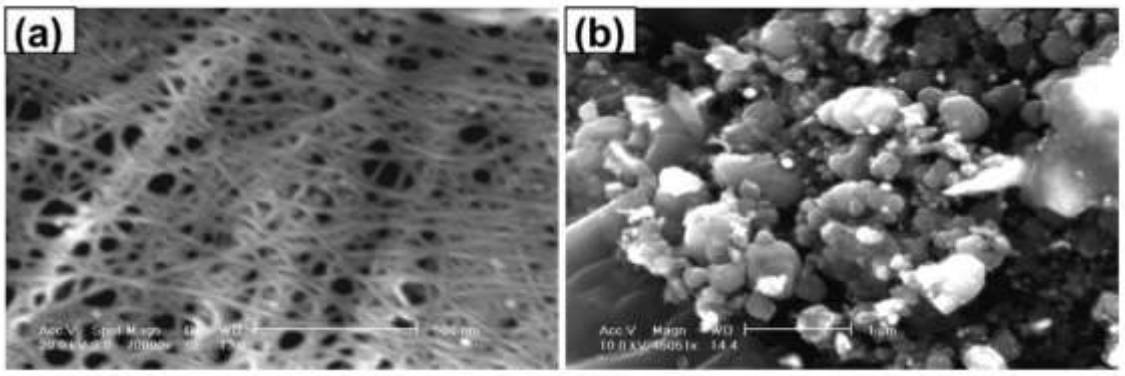
پخت دما بالا

از این روش اغلب برای دفع ناخالصی‌ها و ذرات فلزی استفاده می‌شود. به دلیل تفاوت خواص مواد کربنی و فلزات در دمای بالا، از این روش می‌توان برای دفع ذرات فلزی که قابل حل در اسیدها نیستند استفاده کرد[۹۶, ۹۹].

سانتریفیوژ

در این روش با استفاده از اثر جاذبه بر روی ذرات، اختلاف در بار الکترواستاتیکی و اختلاف در میزان پراکندگی، کربن آمورف و ذرات کربنی و نانولوله‌های کربنی از یکدیگر جدا می‌شوند. در شکل ۱-۴۳ که حاصل کار یو و همکاران (سال ۲۰۰۶) است، نمونه‌ای از ته‌نشینی ناخالصی‌ها و بدست آوردن محلول پایدار از نانولوله‌ها به این روش نشان داده شده است[۹۶, ۱۰۰].

[۱] High temperature annealing



شکل ۱-۴۳: تصاویر SEM a) ناخالصی‌ها و رسوب روی سانتریفیوژ b) محلول روی سانریفیوژ حاوی SWNT خالص[۱۰۰]

خالص‌سازی شیمیایی

این روش مبتنی بر اکسیداسیون است؛ در این روش به دلیل فعالیت اکسیداسیونی متفاوت نانولوله‌های کربنی و ناخالصی‌ها، جداسازی صورت می‌گیرد و آسیب‌هایی هم به ساختار نانولوله‌ها وارد می‌شود. در این روش نانولوله‌ها علاوه بر خالص شدن عامل‌دار هم می‌شوند[۹۶].

۲-۳-۴-۱- عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی

خنثی بودن جداره نانولوله‌ها یکی از مشکلات این مواد است که با روش عامل‌دار کردن قابل حل است [۱۰۱]. سازوکار این روش به این شکل است که پس از عامل‌دار شدن نانولوله‌ها، گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار به سطح نانولوله‌ها می‌چسبند و بار منفی بر روی آن ایجاد می‌کنند و این باعث پایداری سوسپانسیون نانولوله‌ها در حلال می‌شود[۹۶]. عامل‌دار کردن به دو روش کوالانسی و غیر کوالانسی تقسیم می‌شود.

نانولوله‌های کربنی به دلیل داشتن سطح آب گریز، در صورتی که بخواهند به محلول‌ها یا پلیمرها اضافه شوند، باید با استفاده از روش‌های عامل‌دار کردن کووالانسی و غیرکوالانسی با گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار یا پلیمرها اصلاح شوند. عامل‌دار کردن غیر کوالانسی به روش‌های جذب سورفکتانت بر سطح نانولوله‌ها، پیچش پلیمر بر سطح نانولوله‌ها و عامل‌دار کردن داخلی نانولوله‌های کربنی اجرا می‌شوند. در این روش عامل‌دار کردن، نیروی بین سطح نانولوله‌ها و مولکول‌های اصلاح کننده ضعیف است. در روش عامل‌دار کردن کووالانسی علاوه بر ایجاد گروه‌های عاملی، عیوب زیادی در سطح نانولوله‌ها ایجاد شده و نانولوله‌ها کوتاه می‌شوند. اکسیداسیون شیمیایی که از جمله روش‌های عامل‌دار کردن کووالانسی است به دو دسته اکسیداسیون فاز مایع و فاز گاز تقسیم می‌شود. برای ایجاد گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار، اکسیداسیون فاز مایع موثرتر از اکسیداسیون فاز گاز می باشد، اما در روش اکسیداسیون فاز مایع عیوبی نیز روی نانولوله‌ها ایجاد می شوند. بنابراین باید طی استفاده از این روش بتوان با راه‌کارهای مختلف، اثرات مخرب آن را کاهش داد. اکسیداسیون نانولوله‌های کربنی به عواملی از جمله دما، زمان، نوع و غلظت اکسنده‌ها و روش اکسیداسیون بستگی دارد؛ لذا باید با مطالعه منابع معتبر شرایط بهینه برای اکسیداسیون را انتخاب نمود[۹۶].

۵-۱- مراجع

[1] Jones, W., et al., Nanomaterials in construction-what is being used, and where? 2016.
[2] Zhu, W., P.J. Bartos, and A. Porro, Application of nanotechnology in construction. Materials and Structures, 2004. 37(9): p. 649-658.
[3] Oberdörster, G., V. Stone, and K. Donaldson, Toxicology of nanoparticles: a historical perspective. Nanotoxicology, 2007. 1(1): p. 2-25.
[4] Feynman, R.P., There's plenty of room at the bottom. Miniaturization, 1959: p. 282-296.
[5] Olar, R., Nanomaterials and nanotechnologies for civil engineering. Buletinul Institutului Politehnic din lasi. Sectia Constructii, Arhitectura, 2011. 57(4): p. 109.
[6] B. Das, B. and A. Mitra, Nanomaterials for Construction Engineering-A Review. Vol. 2. 2014. 41-46.
[7] Arivalagan, K., et al., Nanomaterials and its potential applications. International journal of chemtech research, 2011. 3(2): p. 534-538.
[۸] کاربرد فناوری نانو در صنعت ساختمان. HightechMonitor.۱۳۹۵
[9] Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali, Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. Construction and Building Materials, 2011. 25(2): p. 582-590.
[10] Merkel, V.W.W. Neuer Ultrahochleistungsbeton ist hart wie Stahl. 2011; Available from: https://www.welt.de/wissenschaft/article13515275/Neuer-Ultrahochleistungsbeton-ist-hart-wie-Stahl.html.
[11] Salvetat, J.-P., et al., Mechanical properties of carbon nanotubes. Applied Physics A, 1999. 69(3): p. 255-260.
[12] Mukhopadhyay, A.K., Next-Generation Nano-based Concrete Construction Products: A Review, in Nanotechnology in Civil Infrastructure: A Paradigm Shift, K. Gopalakrishnan, et al., Editors. 2011, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 207-223.
[13] M. Makar, J., J. C. Margeson, and J. Luh, Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications. 2005.
[14] Siddique, R., Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. Resources, Conservation and Recycling, 2011. 55(11): p. 923-932.
[15] Jo, B.W., et al., Characteristics of cement mortar with nano-SiO2 particles. Construction and building materials, 2007. 21(6): p. 1351-1355.
[16] Qing, Y., et al., Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. Construction and building materials, 2007. 21(3): p. 539-545.
[17] Chang, T.-P., et al., Material properties of Portland cement paste with nano-montmorillonite. Journal of materials science, 2007. 42(17): p. 7478-7487.
[18] Gaucher, E.C. and P. Blanc, Cement/clay interactions–a review: experiments, natural analogues, and modeling. Waste Management, 2006. 26(7): p. 776-788.
[19] Gruber, K., et al., Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. Cement and concrete composites, 2001. 23(6): p. 479-484.
[20] Kuo, W.-T., et al., Effects of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2006. 12(5): p. 702-709.
[21] Siddique, R. and J. Klaus, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Applied Clay Science, 2009. 43(3-4): p. 392-400.
[22] SILVESTRE, J.P.T., NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION: TOWARDS STRUCTURAL APPLICATIONS. 2015, Tecnico Lisboa.

[23] SILVESTRE, J.P.T., NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION. 2015(Tecnico Lisboa).
[24] Konsta-Gdoutos, M.S., Z.S. Metaxa, and S.P. Shah, Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research, 2010. 40(7): p. 1052-1059.
[25] Pradesh, H., Application of nanotechnology in building materials. International Journal of Engineering Research and Applications, 2012: p. 1077-1082.
[26] Rana, A.K., et al., Significance of nanotechnology in construction engineering. International Journal of Recent Trends in Engineering, 2009. 1(4): p. 46-48.
[27] NANOSTRUCTURED AHSS FOR VEHICLE LIGHTWEIGHTING. 2018.
[28] Pents, V. Application of Nanotechnology in Building Materials. 2012.
[29] Team, E., MMFX Microcomposite Steel (MMFX2). 2007.
[30] Taghiyari, H.R., Nanotechnology in wood and wood-composite materials. Journal of Nanomaterials and Molecular Nanotechnology, 2014. 3(1).
[31] Taghiyari, H.R., Nanotechnology in Wood and Wood-Composite Materials. ournal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology, 2014. 3.
[32] Taghiyari, H.R., Fire-retarding properties of nano-silver in solid woods. Wood Science and Technology, 2012. 46(5): p. 939-952.
[33] Taghiyari, H.R., A. Karimi, and P.M.D. Tahir, Nano-Wollastonite in Particleboard: Physical and Mechanical Properties. 2013. Vol. 8. 2013.
[34] Firoozi, A.A., M.R. Taha, and A.A. Firoozi, Nanotechnology in civil engineering. EJGE, 2014. 19: p. 4673-4682.
[35] Sun, Z., et al., Electrical property and characterization of nano-SnO2/wollastonite composite materials. Materials Research Bulletin, 2013. 48(3): p. 1013-1019.
[36] Gudonis, E., et al., FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design. Engineering Structures and Technologies, 2013. 5(4): p. 147-158.
[37] Li, Y., X. Liu, and J. Li, Bond properties of FRP-concrete interface with nano-modified epoxy resin under wet-dry cycles. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017. 21(4): p. 1379-1385.
[38] Irshidat, M.R. and M.H. Al-Saleh, Flexural strength recovery of heat-damaged RC beams using carbon nanotubes modified CFRP. Construction and Building Materials, 2017. 145: p. 474-482.
[39] Irshidat, M.R. and M.H. Al-Saleh, Repair of heat-damaged RC columns using carbon nanotubes modified CFRP. Materials and Structures, 2017. 50(2): p. 162.
[40] Guo, X., et al., Seismic Resistance of GFRP Bolted Joints with Carbon Nanotubes. Journal of Engineering Mechanics, 2018. 144(11): p. 04018106.
[41] Manzur, T., N. Yazdani, and M.A.B. Emon, Potential of carbon nanotube reinforced cement composites as concrete repair material. Journal of Nanomaterials, 2016. 2016: p. 2.
[42] Li, Y., X. Liu, and J. Li, Experimental study of retrofitted cracked concrete with FRP and nanomodified epoxy resin. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016. 29(5): p. 04016275.
[43] Raju, K.R. and D.V. Varma, Developments in vibration control of structures and structural components with magnetorheological fluids. Current Science, 2017. 112(3): p. 499.
[44] Adibi, H., E. Yarali, and A. RamezanShams, Design, fabricate and testing the novel Magnetorheologic damper involving stabilizer nanoparticles of silicone. Modares Mechanical Engineering, 2017. 17(8): p. 252-258.

[45] Sarkar, C. and H. Hirani, Synthesis and Characterisation of Nano Silver Particle-based Magnetorheological Fluids for Brakes. Defence Science Journal, 2015. 65(3).
[46] Sarkar, C. and H. Hirani, Synthesis and characterization of nano-copper-powder based magnetorheological fluids for brake. International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2015. 4(2): p. 76-82.
[47] Liu, X., et al., A study of the effect of nanometer Fe3O4 addition on the properties of silicone oil-based magnetorheological fluids. Materials and Manufacturing Processes, 2015. 30(2): p. 204-209.
[۴۸] نجم‌الدین, ن ,.و دیگران. مواد خود اصلاح شونده و مکانیزم های ترمیم خودبه خودی، ماهنامه مهندسی پزشکی. ۱۳۹۵.
[49] Van Tittelboom, K. and N. De Belie, Self-healing in cementitious materials—A review. Materials, 2013. 6(6): p. 2182-2217.
[۵۰] ویژن, ت.ف.م., کاربردهای فناوری نانو در حسگرهای ساختمانی. ۱۳۹۴.
[51] Structural Health Monitoring (SHM). 2015; Available from: http://www.partsazeco.com/fa/2015-07-27-20-52-04.
[52] Han, B., et al., Nanotip-induced ultrahigh pressure-sensitive composites: principles, properties and applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. 59: p. 105-114.
[53] Loh, K. and D. Ryu, Multifunctional materials and nanotechnology for assessing and monitoring civil infrastructures, in Sensor Technologies for Civil Infrastructures. 2014, Elsevier. p. 295-326.
[54] Chang, P.C., A. Flatau, and S.C. Liu, Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. Structural Health Monitoring, 2003. 2(3): p. 257-267.
[55] Gupta, S., J.G. Gonzalez, and K.J. Loh, Self-sensing concrete enabled by nano-engineered cement-aggregate interfaces. Structural Health Monitoring, 2017. 16(3): p. 309-323.
[56] Yang, S., Health monitoring of pavement systems using smart sensing technologies. 2014.
[57] Saafi, M., Wireless and embedded carbon nanotube networks for damage detection in concrete structures. Nanotechnology, 2009. 20(39): p. 395502.
[58] Dharap, P., et al., Flexural strain sensing using carbon nanotube film. Sensor Review, 2004. 24(3): p. 271-273.
[59] Raj, B., M. Van de Voorde, and Y. Mahajan, Nanotechnology for Energy Sustainability. 2017: Wiley.
[60] Wang, Y., et al., Strain and damage self-sensing of basalt fiber reinforced polymer laminates fabricated with carbon nanofibers/epoxy composites under tension. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018. 113: p. 40-52.
[61] Ubertini, F., et al., Novel nanocomposite technologies for dynamic monitoring of structures: a comparison between cement-based embeddable and soft elastomeric surface sensors. Smart Materials and Structures, 2014. 23(4): p. 045023.
[۶۲] رضایی, پ., م. برادران ,م. صالح, مروری بر تثبیت خاک‌ها با استفاده از نانو مواد ,"" سومین کنفرانس ملی پژوهش های نوین در علوم و مهندسی شیمی. ۱۳۹۶.
[63] Choobbasti, A.J., A. Vafaei, and S.S. Kutanaei, Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica. Open Engineering, 2015. 5(1).
[64] Correia, A.A.S. and M.G. Rasteiro, Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization. Procedia engineering, 2016. 143: p. 1252-1259.

[۶۵] جلیلیان, کوهستانی ,ناقدی،نیا, "مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه بهسازی خاک با استفاده از نانو ذرات "کنفرانس بین المللی نخبگان. ۱۳۹۴: دانشگاه شهید بهشتی تهران.
[66] Huang, Y. and L. Wang, Experimental studies on nanomaterials for soil improvement. Environmental Earth Sciences, 2016. 75(6): p. 497.
[۶۷] جمشیدی, م .م. مخبری, بررسی اثر نانو سیلیس (پرکاربردترین محصول نانو) بر پارامترهای مقاومتی خاک ,اولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی و نمایشگاه "توسعه پایدار در راهسازی با رویکرد حفظ محیط زیست". ۱۳۹۶: شیراز.
[68] Taipodia, J., J. Dutta, and A. Dey. Effect of nano particles on properties of soil. in Proceedings of the Indian Geotechnical Conference. Dec. 2011.
[69] www.nano.ir.
[70] Taha, M.R. and T. Ying, Effects of carbon nanotube on kaolinite: Basic geotechnical behavior. World Journal Of Engineering, 2010. 7(2): p. 472-473.
[۷۱] گلابچی, م., ک. تقی‌زاده ,ا. سروش‌نیا, نانو فناوری در معماری و مهندسی ساختمان. ۱۳۹۱: دانشگاه تهران، موسسه انتشارات.
[72] Aboubakr, S., Epoxy-clay nanocomposite for carbon fiber reinforced polymer applications. 2013.
[73] Acar, V., et al., Strengthening of concrete beams by monolayer prepreg composites with and without graphene reinforcement. 2017. 151: p. 866-880.
[74] Solutions for the Power Generation & Heavy Industry. 2018; Available from: https://www.master-builders-solutions.basf.com/en-basf/solutions/for-the-power-generation-industry.
[75] Services for wind energy projects. 2018, www.tuvnordiran.com.
[76] Burton, T., et al., Wind energy handbook. 2011: John Wiley & Sons.
[77] Sritharan, S. and G.M. Schmitz. Design of tall wind turbine towers utilizing UHPC. in Proceedings of the RILEM-fib-AFGC International Symposium On Ultra-High Performance Reinforced Concrete, Eds: F. Toutlemoude, J. Resplendino, RILEM Publications SARL, Bagneux, France. 2013.
[78] Mosaberpanah, M.A. and O. Eren, Relationship between 28-days Compressive Strength and Compression Toughness Factor of Ultra High Performance Concrete Using Design of Experiments. Procedia Engineering, 2016. 145: p. 1565-1571.
[79] Yu, R., P. Spiesz, and H.J.H. Brouwers, Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. Cement and Concrete Composites, 2015. 55: p. 383-394.
[80] Gu, C., G. Ye, and W. Sun, Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. Science China Technological Sciences, 2015. 58(4): p. 587-599.
[81] Díez-Pascual, A.M., et al., Multiscale fiber-reinforced thermoplastic composites incorporating carbon nanotubes: A review. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2014. 18(2): p. 62-80.
[82] Godara, A., et al., Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites. Carbon, 2009. 47(12): p. 2914-2923.
[83] Godara, A., et al., Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes. Composites Science and Technology, 2010. 70(9): p. 1346-1352.

[84] De Greef, N., et al., The effect of carbon nanotubes on the damage development in carbon fiber/epoxy composites. Carbon, 2011. 49(14): p. 4650-4664.
[85] Siddiqui, N.A., et al., Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube–epoxy nanocomposite coating. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009. 40(10): p. 1606-1614.
[86] Dai, G. and L. Mishnaevsky Jr, Carbon nanotube reinforced hybrid composites: Computational modeling of environmental fatigue and usability for wind blades. Composites Part B: Engineering, 2015. 78: p. 349-360.
[87] Mishnaevsky, J.L., et al., Polymer nanocomposites for wind energy applications: perspectives and computational modeling. 2013, Sumy State University.
[88] Quaresimin, M., M. Salviato, and M. Zappalorto, Fracture and interlaminar properties of clay-modified epoxies and their glass reinforced laminates. Engineering Fracture Mechanics, 2012. 81: p. 80-93.
[89] Ma, P.-C. and Y. Zhang, Perspectives of carbon nanotubes/polymer nanocomposites for wind blade materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. 30: p. 651-660.
[90] Daniel, I.M. and J.S. Fenner, Hybrid Nano/Micro Composite Materials for Greatly Enhanced Fatigue Life of Wind Turbine Blades.
[91] Loos, M., et al., Carbon nanotube-reinforced epoxy composites for wind turbine blades. SPE plastics research online, 2012.
[92] Curran, S.A., et al., Electrical transport measurements of highly conductive carbon nanotube/poly (bisphenol A carbonate) composite. Journal of Applied Physics, 2009. 105(7): p. 073711.
[۹۳] کاشانی, ع.د., استفاده از فناوری نانو در تکنولوژی بتن برای بهبود عملکرد ساختمان‌ها ,چهارمین کنفرانس ملی مدیریت ساخت و پروژه. ۱۳۹۶.
[۹۴] سجادی, ح., تاثیر نانو ذرات آلفا آلومینا در بهبود کیفیت بتن و مقایسه آن با نانو ذرات سیلیس جهت کاربرد در صنعت ساختمان ,دهمین سمپوزیوم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی. دی ماه ۱۳۹۴: مشهد.
[۹۵] صادقی, ج.ا.ع.م., بررسی تأثیر استفاده از نانو تیوب های کربنی چند دیواره در افزایش مقاومت خمشی و قابلیت جذب انرژی ملات‌های سیمانی ,نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر – مهندسی عمران و محیط زیست. بهار ۱۳۹۵.
[۹۶] بابالو, خ.ص.ا.ت.ع.ا., خالص‌سازی و عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی ,فصل‌نامه تخصصی علمی ترویجی شماره ۵. زمستان ۱۳۹۴.
[97] Hou, P.-X., C. Liu, and H.-M. Cheng, Purification of carbon nanotubes. carbon, 2008. 46(15): p. 2003-2025.
[98] Shelimov, K.B., et al., Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration. Chemical Physics Letters, 1998. 282(5-6): p. 429-434.
[99] Huang, W., et al., 99.9% purity multi-walled carbon nanotubes by vacuum high-temperature annealing. Carbon, 2003. 41(13): p. 2585-2590.
[100] Yu, A., et al., Application of centrifugation to the large-scale purification of electric arc-produced single-walled carbon nanotubes. Journal of the American Chemical Society, 2006. 128(30): p. 9902-9908.
[101] Chen, L., H. Xie, and W. Yu, Functionalization methods of carbon nanotubes and its applications, in Carbon nanotubes applications on electron devices. 2011, InTech.

فصل دوم

شناسایی دانش‌ها و فناوری‌های به روز جهانی مواد نانو ساختار در زمینه سازه‌ها



فهرست مطالب

مقدمه ۹۰

۲ شناسایی دانش‌ها و فناوری‌های به روز جهانی مواد نانو ساختار در زمینه سازه‌ها ۹۱

۲-۱ معرفی آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ملی و بین‌المللی مواد نانو ساختار مطرح شده در بند ۲-۱ ..... ۹۱

۲-۱-۱ استانداردهای استفاده از مواد نانوساختار ۹۱

۲-۱-۲ استانداردهای فناوری نانو در ایران و جهان ۹۲

۲-۲ جمع‌آوری مقالات و تحقیقات داخلی و خارجی انجام گرفته و کتب تالیف شده برای موارد مطرح شده در بند ۲-۱ ..... ۹۹

۲-۳ بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای بتن با استفاده از مواد نانوساختار ۱۰۰

۲-۳-۱ مقدمه ۱۰۰

۲-۳-۲ تغییرات کارایی و خواص بتن تازه با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۰۱

۲-۳-۳ تغییرات دوام و نفوذپذیری بتن با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۱۶

۲-۳-۴ تغییرات مقاومت مکانیکی بتن با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۲۴

۲-۳-۵ تاثیر نانو ذرات بر واکنش قلیایی بتن ۱۶۷

۲-۳-۶ خلاصه نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات بتن با استفاده از مواد نانوساختار ۱۶۷

۲-۴ بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۷۷

۲-۴-۱ مطالعات انجام شده در مورد استفاده از مواد نانو ساختار در مقاوم‌سازی سازه‌ها ۱۷۷

۲-۴-۱-۱ استفاده از نانولوله‌های کربن به همراه الیاف کربنی و رزین اپوکسی در مقاوم‌سازی تیرهای بتن آرمه ۱۷۷

۲-۴-۱-۲ اثر استفاده از اپوکسی اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی بر رفتار لغزش باندی بین صفحات FRP و بتن ۱۸۱

۲-۴-۱-۳ بهبود مقاومت لرزه‌ای اتصال پیچی GFRP با نانو لوله‌های کربن ۱۸۴

۲-۴-۱-۳-۱ استفاده از نانولوله‌های کربن چند جداره بمنظور بهبود عملکرد اتصال پیچی GFRPبرشی 184

با استفاده از نانو لوله‌های GFRP ۲-۴-۱-۳-۲ بهبود عملکرد خستگی در کامپوزیت کربنی..... 188

۲-۴-۱-۳-۳ استفاده از نانوکامپوزیت رس-اپوکسی به همراه CFRP۲-۴-۱-۳-۳ 190

۲-۴-۱-۴ افزایش کارایی نانوکامپوزیت پلیمرهای اپوکسی برای تقویت پل‌ها ۱۹۱

۲-۴-۱-۵ آنالیز مودال آزمایشگاهی برای یک قوس غیر مسلح مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت الیافی مسلح شده با نانو صفحات گرافن ۱۹۳

۲-۵ بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بررسی مصالح خود ترمیم‌شونده با بکارگیری مواد نانو ساختار ۱۹۵

۲-۵-۱ کاربرد میکرو-نانو ساختارها در سیستم خود ترمیمی بتن..... ۱۹۵

۲-۶ بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به استفاده از نانو حسگرها و نانو سنسور ها در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها..... ۲۰۰

۲-۶-۱ خاصیت پیزو-مقاومتی مواد کامپوزیت نانو ساختار..... ۲۰۱

۲-۶-۲ انواع روش‌های استفاده از مواد نانو ساختار به عنوان حسگر..... ۲۰۳

۲-۶-۲-۱ رادهای (میله‌های)کامپوزیت خودسنجشگر ۲۰۴

۲-۶-۲-۲ کامپوزیت سیمان و نانو لوله‌های کربنی ۲۰۴

۲-۶-۲-۳ رزین اپوکسی اصلاح شده با نانو لوله‌های کربنی چند جداره با خصوصیت خود-سنجشگری ۲۰۸

۲-۶-۲-۴ حسگر کرنش با استفاده از نانو صفحات گرافن ۲۰۹

۲-۶-۲-۵ حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT تهیه شده برای آزمایش‌های دینامیکی ۲۰۹

۲-۶-۲-۶ حسگر خازنی فیلم نرم الاستومری به همراه نانو ذرات کربن سیاه ۲۱۶

۲-۶-۲-۷ حسگر کامپوزیت سیمان/ نانو صفحات گرافیت ۲۱۸

۲-۶-۲-۸ حسگر سیمان مهندسی شده با استفاده از نانو ذرات کربنی ۲۱۹

۲-۶-۲-۹ استفاده از حسگر خازنی الاستومتری نرم(SECs) در پایش سلامت پره‌های توربین بادی ۲۱۹

۲-۷ بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بهبود شرایط ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار ۲۲۳

۲-۷-۱ تغییرات خواص خمیری خاک‌ها با بهره‌گیری از مواد نانو ساختار..... ۲۲۳

۲-۷-۱-۱ خاک ماسه‌ای رسدار ۲۲۳
۲-۷-۱-۲ خاک‌های ریزدانه ۲۲۵
۲-۷-۲ تغییرات نفوذپذیری خاک‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار ۲۳۱
۲-۷-۳ کاهش پتانسیل تورم خاک با استفاده از مواد نانو ساختار ۲۳۴
۲-۷-۴ تغییرات چگالی، وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک با استفاده از نانو مواد ۲۳۸
۲-۷-۴-۱ خاک‌های ریزدانه ۲۳۸
۲-۷-۴-۲ خاک‌های ماسه‌ای ۲۴۴
۲-۷-۵ بهبود مشکلات واگرایی و رمبندگی خاک‌ها به کمک مواد نانو ساختار ۲۴۵
۲-۷-۵-۱ واگرایی ۲۴۵
۲-۷-۵-۲ رمبندگی ۲۴۶
۲-۷-۶ بهبود خواص مقاومت مکانیکی خاک‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار ۲۵۰
۲-۷-۶-۱ خاک‌های ریزدانه ۲۵۰
۲-۷-۶-۲ خاک‌های ماسه‌ای ۲۷۱
۲-۷-۷ بهبود مقاومت روانگرایی خاک با استفاده از نانو مواد ۲۷۶
۲-۷-۸ خلاصه نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار ۲۷۸
۲-۸ منابع ۲۸۶

فهرست اشکال

شکل ۲-۱: تعداد استانداردهای ملی کشورهای مختلف در حوزه نانو تکنولوژی[۱] ۹۱
شکل ۲-۲: تعدادی از استانداردهای ملی ایران در حوزه نانو تکنولوژی ۹۶
شکل ۲-۳: استاندارد ASTM E2535-2007 ۹۷
شکل ۲-۴: استاندارد ASTM E3001-2015 ۹۷
شکل ۲-۵: استاندارد ISO TS 27687 ۹۸
شکل ۲-۶: استاندارد ISO 10808 ۹۹
شکل ۲-۷: تصاویر SEM از سطح نمونه‌های الیاف PP با بزرگنمایی‌های متفاوت، (a،c،e) تثبیت‌شده توسط ژل نانوسیلیس، (b،d،f) تثبیت‌شده [۱۷] ۱۰۳

شکل ۲-۸: تصاویر SEM از سطح الیاف PP با ذرات بتن عمل‌آوری شده با بزرگنمایی‌های متفاوت (a،b) تثبیت شده توسط ژل نانوسیلیس، (c،d) تثبیت‌نشده [۱۷]..... ۱۰۴
شکل ۲-۹: تصاویر SEM از خمیر سیمان با و بدن نانوسیلیس در سن ۲۸ روز، a) فاقد نانوسیلیس، b) حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، c) فاقد نانوسیلیس، d) حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، e) ماتریس خمیر سیمان، f) خاکستر بادی [۱۸]..... ۱۰۶
شکل ۲-۱۰: کرنش انقباضی برحسب زمان برای نمونه‌ها با درصد نانوسیلیس متفاوت حاوی سنگدانه سبک نوع، a) N و b) Y [۱۸]..... ۱۰۷
شکل ۲-۱۱: نسبت ژل کلسیم سیلیکات هیدرات به مواد سیمانی پرتلندی برای نمونه‌ها حاوی افزودنی و زمان عمل‌آوری گوناگون [۱۹]..... ۱۰۸
شکل ۲-۱۲: تأثیر افزودن نانو کربنات کلسیم بر مقاومت پیوند الیاف و مقاومت فشاری در سنین متفاوت [۲۰] ۱۰۹
شکل ۲-۱۳: تصاویر SEM از سطح تماس الیاف در نمونه با درصدهای گوناگون نانو کربنات کلسیم و سنین متفاوت [۲۰]..... ۱۱۰
شکل ۲-۱۴: تغییرات اسلامپ بتن برای درصدهای متفاوت نانو مواد[۲۱]..... ۱۱۱
شکل ۲-۱۵: تاثیر افزودن نانوآلومینیوم بر گیرش اولیه و نهایی بتن[۲۲]..... ۱۱۲
شکل ۲-۱۶: افت نمونه‌های خمیر سیمانی با درصدهای مختلف گرافن اکساید[۲۷]..... ۱۱۴
شکل ۲-۱۷: تصاویر SEM، الف) نانو افزودنی حاصل از خاکستر سوختن روغن نفت، ب) نانو افزودنی حاصل از خاکستر پوسته برنج [۲۸]..... ۱۱۵
شکل ۲-۱۸: تغییرات گسترش جریان برای نمونه با نسبت‌های جایگزینی CNA به سیمان پرتلند گوناگون [۲۸] ۱۱۶
شکل ۲-۱۹: تغییرات میزان کاهش وزن بتن برای نمونه‌ها با مقادیر متفاوت نانوسیلیس و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون، تحت باران‌های اسیدی با مقادیر PH متفاوت [۳۳]..... ۱۱۷
شکل ۲-۲۰: سطح نمونه‌ها فاقد نانوسیلیس تحت تأثیر باران با PH و مدت متفاوت [۳۳]..... ۱۱۸
شکل ۲-۲۱: سطح نمونه‌ها حاوی ۶ درصد نانوسیلیس تحت تأثیر باران با PH و مدت متفاوت [۳۳]..... ۱۱۹
شکل ۲-۲۲: تغییرات ضریب جذب موئینه برای نمونه‌های حاوی مقادیر میکروسیلیس و نانوسیلیس گوناگون به صورت تنها و توام [۳۴]..... ۱۲۰
شکل ۲-۲۳: میزان جذب امواج برای نمونه‌ها حاوی Bi_2O_3 با ابعاد میکرو و نانو به ازای انرژی‌های متفاوت فوتون ها [۴۸]..... ۱۲۴

شکل ۲-۲۴: روند تغییر مقاومت فشاری بتن‌های حاوی نانوسیلیس؛ نمونه‌های A بدون خاکستر بادی و نمونه‌های B حاوی خاکستر بادی [۱۰]..... ۱۲۵
شکل ۲-۲۵: مقاومت فشاری بتن حاوی مقادیر افزودنی (نانوسیلیس و میکروسیلیس) و زمان عمل‌آوری گوناگون (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) [۱۹]..... ۱۲۷
شکل ۲-۲۶: تاثیر میزان نانو سیلیس بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عمر ۲۸ و ۹۰ روز [۵۸]..... ۱۲۸
شکل ۲-۲۷: تاثیر میزان نانو سیلیس بر درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عمر ۲۸ و ۹۰ روز[۵۸] ۱۲۸
شکل ۲-۲۸: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیس بر میزان نفوذ آب در نمونه‌های بتنی[۵۸]..... ۱۲۹
شکل ۲-۲۹: مقاومت فشاری برحسب درصد نانوسیلیس برای بتن در سنین متفاوت حاوی سنگدانه سبک نوع، Y (b N (a [۱۸]..... ۱۳۰
شکل ۲-۳۰: تغییرات مقاومت فشاری را بر حسب زمان عمل‌آوری برای نمونه با فعال‌ساز قلیایی و مقادیر متفاوت نانوسیلیس[۶۱]..... ۱۳۱
شکل ۲-۳۱: مقاومت فشاری نمونه مکعبی بر حسب درصد خاکستر بادی و درصدهای گوناگون نانوسیلیس در سن ۹۰ روز [۶۲]..... ۱۳۲
شکل ۲-۳۲: تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌ها حاوی سنگدانه‌های طبیعی و ضایعاتی با شیوه‌های متفاوت ترکیب نانوسیلیس [۶۳]..... ۱۳۳
شکل ۲-۳۳: مدول الاستیسیته بر حسب درصد نانوسیلیس و خرده لاستیک برای نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ [۶۴]..... ۱۳۴
شکل ۲-۳۴: تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصد حجمی فولاد برای نمونه با درصدهای متفاوت نانوسیلیس و مقادیر جایگزینی گوناگون سنگدانه‌های بتن و خاکستر بادی دانه‌ای برای بتن با سنین ۲۸ و ۹۰ روز [۶۵]..... ۱۳۵
شکل ۲-۳۵: تاثیر افزون نانوذرات آلومینیوم بر مقاومت فشاری و کششی بتن [۶۷]..... ۱۳۶
شکل ۲-۳۶: مدول یانگ و مقاومت فشاری بتن حاوی درصدهای مختلف نانوذرات آلومینیوم[۶۸]..... ۱۳۶
شکل ۲-۳۷: مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن‌های حاوی نانوذرات آلومینیوم[۶۹]..... ۱۳۷
شکل ۲-۳۸: تاثیر نانو مواد مختلف بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن [۷۰]..... ۱۳۸
شکل ۲-۳۹: تاثیر نانواکسید آهن بر زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های بتنی[۷۱]..... ۱۳۹
شکل ۲-۴۰: کاهش کارایی نمونه‌های حاوی نانو اکسید آهن با افزایش درصد آن در نمونه[۷۲]..... ۱۴۰
شکل ۲-۴۱: مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی نانو اکسید سه ظرفیتی آهن[۷۵]..... ۱۴۱
شکل ۲-۴۲: مقاومت کششی، خمشی و فشاری نمونه‌های حاوی نانو اکسید روی در دو شرایط عمل‌آوری در آب آهک و آب معمولی[۷۷]..... ۱۴۲

شکل ۲-۴۳: مقاومت خمشی و کششی نمونه‌های بتنی حاوی ۱ تا ۵ درصد نانو اکسید زیرکونیم[۸۱]..... ۱۴۴
شکل ۲-۴۴: مقاومت‌های کششی و خمشی نمونه‌های نانو اکسید زیرکونیوم[۸۲]..... ۱۴۵
شکل ۲-۴۵: مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن عمل‌آوری شده در آب O) دمای آزمایشگاه، H) ۲ روز در آب ۹۰ درجه [۸۳]..... ۱۴۶
شکل ۲-۴۶: مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی نانو کربنات کلسیم[۸۸]..... ۱۴۷
شکل ۲-۴۷: مقادیر زمان گیرش اولیه و نهایی ملات‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم[۳۸]..... ۱۴۸
شکل ۲-۴۸: تاثیر نانوذرات تیتانیوم بر روی کارایی ملات‌های سیمان حاوی درصدهای ۰ تا ۲٪[۳۸]..... ۱۴۹
شکل ۲-۴۹: مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم[۹۲]..... ۱۵۰
شکل ۲-۵۰: جریان پذیری نمونه‌های بتن [۹۲]..... ۱۵۰
شکل ۲-۵۱: زمان گیرش نمونه‌های حاوی نانو اکسید منیزیم[۹۴]..... ۱۵۱
شکل ۲-۵۲: مقدار افت خطی همگن نمونه‌ها(بر حسب ۶-۱۰) [۹۴]..... ۱۵۲
شکل ۲-۵۳: مقاومت‌های خمشی و فشاری نمونه‌های بتن در ۲۸ روز[۹۵]..... ۱۵۲
شکل ۲-۵۴: مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌های بتن در ۹۰ روز[۹۵]..... ۱۵۳
شکل ۲-۵۵: مقاومت خمشی نمونه‌ها با ملات سیمانی حاوی متاکائولن[۴۰]..... ۱۵۴
شکل ۲-۵۶: پدیده پل زنی نانولوله کربنی بر روی ترک[۹۹]..... ۱۵۵
شکل ۲-۵۷: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف نانولوله کربنی کوتاه با درصدهای مختلف وزنی[۱۰۳].... ۱۵۶
شکل ۲-۵۸: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف نانولوله کربنی بلند با درصدهای مختلف وزنی[۱۰۳]..... ۱۵۷
شکل ۲-۵۹: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف نانولوله‌های کربنی چندجداره با درصد وزنی و طولی مختلف[۱۰۴]..... ۱۵۸
شکل ۲-۶۰: مدول یانگ(الاستیسیته) نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره با درصد وزنی و طولی مختلف[۱۰۴]..... ۱۵۸
شکل ۲-۶۱: روند تاثیر نانو الیاف سلولز در خمیره سیمان و همچنین نتایج مربوط به مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی نانو الیاف سلولزی برای ۳،۷ و ۲۸ روز عمر بتن [۱۰۵]..... ۱۵۹
شکل ۲-۶۲: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد نانو لوله کربنی و نمونه شاهد الف) مقاومت فشاری ب) مقاومت خمشی[۱۰۷]..... ۱۶۱
شکل ۲-۶۳: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی۲ درصد نانو لوله کربنی و نمونه شاهد الف) مقاومت فشاری ب) مقاومت خمشی [۱۰۷]..... ۱۶۱
شکل ۲-۶۴: مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانو لوله کربنی و نمونه شاهد با سنین۲، ۷ و ۲۸ روز [۱۰۸]..... ۱۶۲

شکل ۲-۶۵ مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی حاوی نانو لوله کربنی و نمونه شاهد با سنین۲، ۷ و ۲۸ روز [۱۰۸]..... ۱۶۲
شکل ۲-۶۶: نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی حاوی گرافن اکساید و نمونه‌های سیمان معمولی[۱۰۹] ۱۶۳
شکل ۲-۶۷: راست: نمودار تنش کرنش نمونه‌های حاوی گرافن اکساید و نمونه‌های سیمان معمولی در اثر اعمال بار فشاری چپ: نمودار تنش کرنش همان نوع نمونه‌ها تحت بار خمشی[۱۰۹]..... ۱۶۳
شکل ۲-۶۸: نحوه شکل‌گیری ترک در بافت سیمانی شکلa یک ترک نسبتا مستقیم در نمونه مرجع (بدون گرافن اکساید) شکلb درهم پیچیدگی و منحرف‌شدگی مسیر ترک‌ها در اثر افزودن صفحات گرافن اکساید[۱۰۹] ۱۶۴
شکل ۲-۶۹: مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی ۰/۰۳ درصد وزنی گرافن اکساید- نسبت آب به سیمان:۰/۵[۱۱۰] ۱۶۴
شکل ۲-۷۰: اسلامپ نمونه‌های خمیر سیمانی حاوی درصدهای مختلف گرافن اکساید[۱۱۱]..... ۱۶۵
شکل ۲-۷۱: مقاومت فشاری خمیرهای سیمانی حاوی درصدهای مختلف گرافن اکساید[۱۱۱]..... ۱۶۶
شکل ۲-۷۲: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیس بر میزان واکنش زایی قلیایی- سیلیسی[۱۱۵]..... ۱۶۷
شکل ۲-۷۳: طرح شماتیک تیر بتن آرمه، و تیر بتن آرمه تقویت شده [۱۱۹]..... ۱۷۹
شکل ۲-۷۴: نتیجه بار تغییر مکان برای تیر شاهد، تیر تقویت شده بدون اصلاح اپوکسی با CNT (B-NE) و تیر تقویت شده با اصلاح اپوکسی (B-CNT) [۱۱۹]..... ۱۸۰
شکل ۲-۷۵: تصاویر SEM سطح تماس الیاف کربن / رزین اپوکسی و بتن / رزین اپوکسی را نشان می‌دهد، (a) نمونه بدون اصلاح اپوکسی با CNT (B-NE)، (b) نمونه اصلاح اپوکسی با CNT (B- CNT) [۱۱۹] ۱۸۰
شکل ۲-۷۶: ساختار نمونه آزمایشی[۱۲۱]..... ۱۸۱
شکل ۲-۷۷: نحوه قرارگیری نمونه برای انجام آزمایش در بین فک‌های جک[۱۲۱]..... ۱۸۲
شکل ۲-۷۸: مودهای شکست نمونه‌ها C-S-N-10-10 (a)، C-B-N-10-10 (b)، G-S-N-10- (c) 10، C-S-CNT-10-10 (d)، C-B-CNT-10-10 (e)، G-S-CNT-10-10 (f) [۱۲۱]..... ۱۸۳
شکل ۲-۷۹: تنش سطح تمام در برابر لغزش (a) اثر نوع الیاف، (b) اثر نوع اپوکسی، (c) اثر طول سطح اتصال، (d) اثر پهنای باند[۱۲۱]..... ۱۸۴
شکل ۲-۸۰: اتصال دو برشه ساخته شده از ورق‌های GFRP[۱۲۲]..... ۱۸۵
شکل ۲-۸۱: متوسط پاسخ‌های نیرو-تغییر مکان اتصال GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده تحت بار لرزه‌ای با مدت زمان بارگذاری متفاوت: ۴۴ (a) ثانیه، ۹۸ (b) ثانیه، ۱۹۹ (c) ثانیه و ۴۸۲ (d) ثانیه [۱۲۲]..... ۱۸۶
شکل ۲-۸۲: گسترش خرابی در اتصال GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده تحت بار لرزه‌ای[۱۲۲]..... ۱۸۶

شکل ۲-۸۳: ورق‌های GFRP پس از آزمون لرزه‌ای، (a) خرابی فیزیکی قابل مشاهده در ورق‌های GFRP اصلاح نشده، (b) ورق‌های GFRP اصلاح شده بدون هیچ گونه خرابی فیزیکی قابل مشاهده[۱۲۲]..... ۱۸۷
شکل ۲-۸۴: مقاومت برشی لرزه‌ای و پسا لرزه‌ای استاتیکی، در اتصال پیچی GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده ورق‌های GFRP پس از آزمون لرزه‌ای، (a) اتصال پیچی GFRP اصلاح نشده، (b) و اتصال پیچی GFRP اصلاح شده[۱۲۲]..... ۱۸۷
شکل ۲-۸۵: خرابی برشی اتصال پیچی GFRP پس از آزمون استاتیکی پسالرزه‌ای، (a) ورق‌های GFRP اصلاح نشده، (b) ورق‌های GFRP اصلاح شده[۱۲۲]..... ۱۸۸
شکل ۲-۸۶: فرآیند تولید GFRP اصلاح شده با MWCNTs[۱۲۳]..... ۱۸۹
شکل ۲-۸۷: نمودار هیسترزیس تنش کرنش برای کامپوزیت GFRP (الف) GFRP بدون MWCNTs، (ب) GFRP با ۰/۵٪ MWCNTs (ج) GFRP با ۱٪ MWCNTs[۱۲۳]..... ۱۹۰
شکل ۲-۸۸: طرح شماتیکی از نتایج استفاده از نانو رس-اپوکسی[۱۲۴]..... ۱۹۱
شکل ۲-۸۹: طرح شماتیک جداشدگی اپوکسی به دلیل ورود رطوبت[۱۲۵]..... ۱۹۲
شکل ۲-۹۰: میکروگراف SEM از سطح داخلی اپوکسی (a) اپوکسی خالص، (b) اپوکسی اصلاح شده[۱۲۵] ۱۹۲
شکل ۲-۹۱: قوس‌های ساخته شده جهت مقاوم‌سازی[۱۲۶]..... ۱۹۳
شکل ۲-۹۲: (a) کامپوزیت GFRP، (b) استفاده از GFRP بر روی سطح قوس[۱۲۶]..... ۱۹۴
شکل ۲-۹۳: تصویری شماتیک از یک سیستم خود ترمیم پذیر[۱۲۸]..... ۱۹۵
شکل ۲-۹۴: سمت چپ: شماتیک عملکرد روش میکرو-نانو کپسول‌ها به منظور خود ترمیمی، سمت راست: عکس میکروسکوپی یک کپسول شکسته شده در اثر ترک[۱۳۰]..... ۱۹۶
شکل ۲-۹۵: شماتیک عملکردی نانومحفظه‌های کربنی با استفاده از مدلسازی دینامیک مولکولی [۱۳۱]..... ۱۹۷
شکل ۲-۹۶: مقاومت مکانیکی بتن فوق توانمند حاوی مواد خودترمیم نانوسیلیس و میکروکپسول‌های سیلیکاتی[۱۳۵]..... ۱۹۹
شکل ۲-۹۷: مقدار جذب آب برای نمونه‌های بدون ترک و ترک‌خورده در دو بازه زمانی ۷ و ۲۸ روزه[۱۳۵].۱۹۹
شکل ۲-۹۸: مقدار ترمیم(میلیمتر) مواد خودترمیم شونده بر پایه باکتری برای ۴ نوع نمونه مرجع، اعمال مستقیم، اعمال با نانوصفحات گرافیت و اعمال با سنگدانه‌های سبک[۱۳۶]..... ۲۰۰
شکل ۲-۹۹: روش‌های مختلف اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در کامپوزیت‌ها [۱۳۷]..... ۲۰۳
شکل ۲-۱۰۰: میله‌های کامپوزیت ترکیبی مبتنی بر نانو ذرات کربن: طرح شماتیک مقطع عرضی، میکروگراف SEM و نمای طولی [۱۳۷]..... ۲۰۵
شکل ۲-۱۰۱: (a) عملکرد خود-پایشی، (b) الگوی ترک‌ها در نمونه بتنی [۱۳۷]..... ۲۰۵

شکل ۲-۱۰۲: (a) کامپوزیت سیمان ترکیبی الیاف کربن – نانو لوله‌های کربنی، (b) توزیع الیاف کربنی در سیمان، (c) نانو لوله‌های کربنی چند جداره در سیمان هیدراته شده[۱۳۷]..... ۲۰۶
شکل ۲-۱۰۳: تغییرات FCR در برابر بار برای حسگر بتنی با الیاف‌های کربن (چپ) و برای حسگر بتنی ترکیبی (راست) [۱۳۷]..... ۲۰۶
شکل ۲-۱۰۴: عملکرد حساسیت حسگر سیمان/CNT [۱۳۷]..... ۲۰۷
شکل ۲-۱۰۵: نصب حسگر سیمان/CNT در روسازی جاده [۱۳۷]..... ۲۰۷
شکل ۲-۱۰۶: (a, b) پاسخ حسگرهای ساخته شده در محل و از پیش ساخته شده، (c, d) پاسخ کرنش سنج‌ها در هنگام عبور کامیون از روی جاده [۱۳۷]..... ۲۰۸
شکل ۲-۱۰۷: طرح شماتیک حسگر نانو ساختار برپایه نانو صفحات گرافن [۱۴۶]..... ۲۰۹
شکل ۲-۱۰۸: حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/ MWCNT [۱۴۷]..... ۲۱۰
شکل ۲-۱۰۹: فرآیند تهیه حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/ MWCNT [۱۴۷]..... ۲۱۰
شکل ۲-۱۱۰: تصاویر SEM از توزیع MWCNT (a) در آب (b) در خمیر سیمان[۱۴۷]..... ۲۱۱
شکل ۲-۱۱۱: نمایش مدل پیشنهادی الکتریکی حسگر CNTCS با استفاده از کابل برای جمع‌آوری داده‌ها [۱۴۷]..... ۲۱۱
شکل ۲-۱۱۲: نمایش سیستم مورد استفاده برای آزمون دینامیکی حسگر CNTCS [۱۴۷]..... ۲۱۲
شکل ۲-۱۱۳: تنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج و مقاومت الکتریکی متناظر اندازه‌گیری شده توسط حسگر CNTCS، (a, c) آزمون دینامیکی با فرکانس بارگذاری از ۰/۱ تا ۵ هرتز، (b, d) آزمون دینامیکی با فرکانس بارگذاری از ۵ تا ۰/۱ هرتز [۱۴۷]..... ۲۱۳
شکل ۲-۱۱۴: طرح شماتیک تیر بتن آرمه به همراه قرارگیری حسگرهای CNCTS، شتاب و کرنش سنج‌ها [۱۴۷]..... ۲۱۴
شکل ۲-۱۱۵: تصویری از تیر بتن آرمه تحت آزمون دینامیکی [۱۴۷]..... ۲۱۴
شکل ۲-۱۱۶: فرکانس‌های شناسایی شده توسط حسگرهای CNTCS و شتاب، PSD نسبت به فرکانس مود اول نرمال شده [۱۴۷]..... ۲۱۵
شکل ۲-۱۱۷: فرآیند ساخت حسگر SEC [۱۴۸]..... ۲۱۶
شکل ۲-۱۱۸: (a) شکل شماتیک حسگر SEC به همراه محورهای اصلی‌اش (b) تصویری از یک حسگر SEC تنها [۱۴۸]..... ۲۱۷
شکل ۲-۱۱۹: آرایش الکترودها در اطراف حسگر توزیع شده از نانو لوله‌های کربنی و یا نانو ذرات کربن سیاه[۱۵۰] ۲۱۷

شکل ۲-۱۲۰: حساسیت به آسیب‌های کوچک. تصاویر به صورت جداگانه توسط حداکثر مقادیر مربوطه خود نرمال می‌شوند، (a) بازسازی نقص از روش EIT برای یک سوراخ به قطر ۱/۵۹ میلیمتر، (b) بازسازی نقص از روش EIT برای یک سوراخ به قطر ۳/۱۸ میلیمتر [۱۵۱]..... ۲۱۸
شکل ۲-۱۲۱: فرآیند تولید حسگر کامپوزیت سیمان/NGP [۱۵۲]..... ۲۱۹
شکل ۲-۱۲۲: فرآیند ساخت سنسور SEC [۱۵۴]..... ۲۲۰
شکل ۲-۱۲۳: شبکه‌ای از سنسورهای SEC قرار گرفته بر روی قطعه‌ای جهت پایش [۱۵۶]..... ۲۲۱
شکل ۲-۱۲۴: شبکه‌ای از سنسورهای SEC قرار گرفته بر روی پره‌های توربین جهت پایش[۱۵۶]..... ۲۲۱
شکل ۲-۱۲۵: نمونه آزمایشگاهی (a) پره یک توربین بادی قرار گرفته در تونل باد، (b) یک قطعه کامپوزیت از پره توربین با طول ترکی برابر با ۲ سانتیمتر بر روی آن [۱۵۷]..... ۲۲۲
شکل ۲-۱۲۶: قرار گیری سنسورهای SEC بر روی قطعه (a) شکل شماتیک قطعه تحت آزمایش (b) نمونه واقعی معادل تحت آزمایش [۱۵۷]..... ۲۲۲
شکل ۲-۱۲۷: نقشه کرنش بازسازی شده (a) حالت سالم، (b) با ترکی به طول ۲ سانتی‌متر، (c) با ترکی به طول ۸ سانتی‌متر، (d) با ترکی به طول ۱۳ سانتی‌متر[۱۵۷]..... ۲۲۳
شکل ۲-۱۲۸: تأثیر نانو رس بر روی خصوصیات خمیری ماسه‌های رس[۱۵۹]..... ۲۲۴
شکل ۲-۱۲۹: بررسی تاثیر نانو رس بر خواص خمیری خاک ماسه رس دار[۱۶۰]..... ۲۲۵
شکل ۲-۱۳۰: تاثیر افزودن نانو رس بر حدود اتربرگ خاک ریزدانه رس لای‌دار [۱۶۱]..... ۲۲۶
شکل ۲-۱۳۱: تاثیر نانو رس بر حدود اتربرگ خاک رسی [۱۶۳]..... ۲۲۷
شکل ۲-۱۳۲: تاثیر نانو رس بر پلاستیسیته خاک لای [۱۶۵]..... ۲۲۷
شکل ۲-۱۳۳: تاثیر نانو سیلیس بر خواص خمیری خاک رس بهسازی شده با سیمان[۱۶۸]..... ۲۲۸
شکل ۲-۱۳۴: تاثیر نانو آلومینا بر دامنه خمیری خاک رس کائولینیت[۱۷۰]..... ۲۲۹
شکل ۲-۱۳۵: تاثیر نانو منیزیم بر دامنه خمیری خاک رس کائولینیت[۱۷۰]..... ۲۳۰
شکل ۲-۱۳۶: تغییرات دامنه خمیری دو نوع خاک رسی در مجاورت نانو زئولیت [۱۷۱]..... ۲۳۰
شکل ۲-۱۳۷: منحنی دانه‌بندی نمونه‌های خاک ریزدانه مورد آزمایش[۱۷۲]..... ۲۳۱
شکل ۲-۱۳۸: تاثیر نانو لوله‌های کربنی بر دامنه خمیری خاک ریزدانه به همراه بنتونیت[۱۷۲]..... ۲۳۱
شکل ۲-۱۳۹: تاثیر نانو رس روی نفوذپذیری خاک رس [۱۷۴]..... ۲۳۲
شکل ۲-۱۴۰: تاثیر میزان نانو آلومینا بر نفوذپذیری خاک رس در زمان [۱۷۵]..... ۲۳۳
شکل ۲-۱۴۱: نتایج آزمایش نفوذپذیری ماسه لای‌دار بهسازی شده با نانو رس [۱۷۶]..... ۲۳۳
شکل ۲-۱۴۲: الف) تأثیر نانو رس بر ضریب تراوایی ماسه رس‌دار، ب) تغییرات ضریب تراوایی ماسه رس‌دار تثبیت شده توسط نانو رس با گذشت زمان [۱۷۷]..... ۲۳۴

شکل ۲-۱۴۳: تاثیر نانو سیلیس بر پتانسیل تورم خاک رس بهسازی شده با آهک طی زمان[۱۷۸]..... ۲۳۵
شکل ۲-۱۴۴: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیکا بر پتانسیل تورم دو نوع خاک رسی CL و CH [۱۷۹]..... ۲۳۵
شکل ۲-۱۴۵: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر پتانسیل تورم دو نوع خاک رسی CL و CH [۱۷۹]..... ۲۳۶
شکل ۲-۱۴۶: تاثیر نانو آلومینا بر پتانسیل تورم خاک رس کائولینیت[۱۷۰]..... ۲۳۶
شکل ۲-۱۴۷: تاثیر نانو اکسید منیزیم بر پتانسیل تورم خاک رس کائولینیت[۱۷۰]..... ۲۳۷
شکل ۲-۱۴۸: بررسی تاثیر نانو آلومینا و لجن بر پتانسیل تورم نمونه‌های خاک رسی [۱۷۵]..... ۲۳۷
شکل ۲-۱۴۹: تاثیر نانو لوله کربنی بر میزان پتانسیل تورم خاک ریزدانه رسی[۱۷۲]..... ۲۳۸
شکل ۲-۱۵۰: تاثیر نانو رس بر رطوبت بهینه خاک ریزدانه [۱۸۱]..... ۲۳۹
شکل ۲-۱۵۱: تاثیر نانو رس بر وزن مخصوص حداکثر خاک ریزدانه [۱۸۱]..... ۲۳۹
شکل ۲-۱۵۲: تاثیر نانو آلومینا بر نتایج آزمایش تراکم خاک رس[۱۸۳]..... ۲۴۰
شکل ۲-۱۵۳: تاثیر نانو آلومینا بر نتایج آزمایش تراکم خاک رس کائولینیت [۱۷۰]..... ۲۴۱
شکل ۲-۱۵۴: تاثیر نانو اکسید منیزیم بر نتایج آزمایش تراکم خاک رس کائولینیت [۱۷۰]..... ۲۴۱
شکل ۲-۱۵۵: نتایج آزمایش تراکم خاک رس به همراه نانو سیلیس [۱۷۹]..... ۲۴۲
شکل ۲-۱۵۶: تایج آزمایش تراکم خاک رس به همراه نانو زئولیت [۱۷۹]..... ۲۴۲
شکل ۲-۱۵۷: رطوبت بهینه خاک ریزدانه رسی با نانو لوله کربنی [۱۷۲]..... ۲۴۳
شکل ۲-۱۵۸: وزن مخصوص خشک حداکثر خاک ریزدانه رسی با نانو لوله کربنی [۱۷۲]..... ۲۴۳
شکل ۲-۱۵۹: تاثیر نانو رس بر نتایج آزمایش تراکم خاک سیلتی [۱۶۱]..... ۲۴۴
شکل ۲-۱۶۰: نتایج آزمایش تراکم نمونه‌های ماسه رس‌دار به همراه سیمان و نانو سیلیس[۱۸۴]..... ۲۴۵
شکل ۲-۱۶۱: شاخص نرخ فرسایش رس واگرا تثبیت شده با نانو سیلیس [۱۸۷]..... ۲۴۶
شکل ۲-۱۶۲: تاثیر نانو رس بر پتانسیل رمبندگی خاک رس لای‌دار [۱۳]..... ۲۴۷
شکل ۲-۱۶۳: تاثیر نانو رس بر خواص رمبندگی خاک [۱۸۹]..... ۲۴۸
شکل ۲-۱۶۴: تاثیر نانو رس بر خواص رمبندگی خاک [۱۹۰]..... ۲۴۸
شکل ۲-۱۶۵: تأثیر نوع و نسبت وزنی نانو مواد بر پتانسیل رمبندگی [۱۹۱]..... ۲۴۹
شکل ۲-۱۶۶: نمودارهای تغییرات نشست قائم برحسب تنش سربار اعمالی حاصل از آزمایش تحکیم مضاعف برای خاک لس، تثبیت‌شده با مقادیر نسبت وزنی نانو رس گوناگون [۱۹۲]..... ۲۵۰
شکل ۲-۱۶۷: تاثیر نانو سیلیس و آهک بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس طی زمان [۱۷۸]..... ۲۵۱
شکل ۲-۱۶۸: تاثیر نانو سیلیس و آهک بر مقاومت CBR خاک رس در زمان [۱۶۲]..... ۲۵۲
شکل ۲-۱۶۹: تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس مخلوط با آهک [۱۹۵]..... ۲۵۳
شکل ۲-۱۷۰: تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری خاک رس بهسازی شده با آهک [۱۹۶]..... ۲۵۳

شکل ۲-۱۷۱: تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری خاک رس بهسازی شده با سیمان[۱۹۶]..... ۲۵۴
شکل ۲-۱۷۲: میزان بهبود در مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه‌های رس سیمانی با نسبت‌های وزنی و ابعاد گوناگون نانوسیلیس [۱۹۷]..... ۲۵۵
شکل ۲-۱۷۳: تاثیر نانو رس بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس [۱۶۳]..... ۲۵۵
شکل ۲-۱۷۴: تاثیر نانو رس بر مقاومت CBR خاک رس [۱۶۳]..... ۲۵۶
شکل ۲-۱۷۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر ترکیب خاک رسی و نانو رس [۱۶۱]..... ۲۵۷
شکل ۲-۱۷۶: نتایج تأثیر افزودن نانو رس بر مدول تغییر شکل نمونه‌های خاک CL-ML [۱۶۱]..... ۲۵۷
شکل ۲-۱۷۷: تاثیر نانو رس بر پارامترهای برشی خاک رس لای‌دار [۱۶۱]..... ۲۵۸
شکل ۲-۱۷۸: تاثیر نانو رس روی مقاومت فشاری و برشی [۱۷۴]..... ۲۵۸
شکل ۲-۱۷۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای خاک ML تثبیت شده و تثبیت نشده با نانو رس[۲۰۱]..... ۲۵۹
شکل ۲-۱۸۰: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای خاک MH تثبیت شده و تثبیت نشده با نانو رس[۲۰۱]..... ۲۶۰
شکل ۲-۱۸۱: تاثیر نانو رس بر خواص مقاومت فشاری تک‌محوری خاک لای [۲۰۱]..... ۲۶۰
شکل ۲-۱۸۲: تاثیر نانو رس بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ریزدانه [۱۸۱]..... ۲۶۱
شکل ۲-۱۸۳: تغییرات مقاومت برشی با اضافه کردن نانو رس به خاک رس [۱۵۹]..... ۲۶۱
شکل ۲-۱۸۴: نتایج آزمایش برش مستقیم بر رس با مقدارثابت نانو سیلیس و افزایش درصد الیاف پلی استر[۲۰۲] ۲۶۲
شکل ۲-۱۸۵: تاثیر میزان نانو سیلیس بر مدول الاستیسیته خاک رس [۲۰۲]..... ۲۶۳
شکل ۲-۱۸۶: تاثیر الیاف پلی استر بر مدول الاستیسیته خاک رس [۲۰۲]..... ۲۶۳
شکل ۲-۱۸۷: تاثیر میزان نانو کامپوزیت پلیمری بر مقاومت خاک رس CH [۲۰۳]..... ۲۶۴
شکل ۲-۱۸۸: تاثیر میزان نانو آلومینا بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس طی زمان[۱۷۵]..... ۲۶۴
شکل ۲-۱۸۹: تاثیر میزان نانو آلومینا بر مقاومت CBR خاک رس طی زمان[۱۷۵]..... ۲۶۵
شکل ۲-۱۹۰: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیکا بر مقاومت برشی خاک رسی CH [۱۷۹]..... ۲۶۷
شکل ۲-۱۹۱: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیکا بر مقاومت برشی خاک رسی CL [۱۷۹]..... ۲۶۷
شکل ۲-۱۹۲: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر مقاومت برشی خاک رسی CH [۱۷۹]..... ۲۶۸
شکل ۲-۱۹۳: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر مقاومت برشی خاک رسی CL [۱۷۹]..... ۲۶۸
شکل ۲-۱۹۴: مقاومت فشاری برحسب نانو اکسید تیتانیوم برای نمونه‌های رسی تثبیت شده با مقادیر گوناگون سیمان و سن عمل‌آوری ۸ روز [۲۰۴]..... ۲۶۹

شکل ۲-۱۹۵: تأثیر نسبت وزنی نانو مواد گوناگون بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک در زمان عمل‌آوری ۱ روزه [۱۹۴]..... ۲۷۰
شکل ۲-۱۹۶: تغییرات مقاومت بیشینه برحسب درصد نانو منیزیم برای فشارهای دورگیر متفاوت [۲۰۶]..... ۲۷۱
شکل ۲-۱۹۷: مقاومت برشی ماسه با درصدهای متفاوت سیلت و سیلیس کلوئیدی تحت فشار دورگیر ۸۰۰ کیلوپاسکال [۲۱۱]..... ۲۷۳
شکل ۲-۱۹۸: تاثیر نانو سیلیس کلوئیدی بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه‌ای [۲۱۲]..... ۲۷۴
شکل ۲-۱۹۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر ماسه رسی بهسازی شده به همراه سیمان و نانو سیلیس[۲۱۳]..... ۲۷۵
شکل ۲-۲۰۰: تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برحسب غلظت سیلیس کلوئیدی [۲۱۵] ۲۷۶

فهرست جداول

جدول ۲-۱: : فهرست استانداردهای ملی در حوزه فناوری نانو..... ۹۲
جدول ۲-۲: خواص سیمان‌های تازه در آزمایشات بادوگیانیس و همکاران[۲۶]..... ۱۱۲
جدول ۲-۳: کارایی و زمان گیرش نمونه‌های حاوی متاکائولن[۲۴]..... ۱۱۳
جدول ۲-۴: جریان‌پذیری و زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان حاوی درصدهای مختلف گرافن اکساید[۲۷] ۱۱۳
جدول ۲-۵: درصد نفوذپذیری بتن‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم در مقایسه با نمونه مرجع[۳۸]..... ۱۲۱
جدول ۲-۶: نفوذ کلراید در بتن‌های حاوی افزودنی و بتن مرجع[۴۱]..... ۱۲۲
جدول ۲-۷: مقدار افت خود به خود و افت کل بتن [۲۴]..... ۱۲۳
جدول ۲-۸: مقدار خزش بتن پس از ۲۰۰ روز[۲۴]..... ۱۲۳
جدول ۲-۹: درصد افزایش مقاوت فشاری ملات همراه با نانو آلومینا [۷۰]..... ۱۳۸
جدول ۲-۱۰: درصد افزایش مقاوت فشاری ملات همراه با نانو اکسید آهن [۷۰]..... ۱۳۹
جدول ۲-۱۱: کاهش درصد جذب آب در نمونه‌های حاوی اکسید آهن پس از ۲۸ و ۹۰ روز[۷۱]..... ۱۳۹
جدول ۲-۱۲: مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانواکسید آهن[۷۲]..... ۱۴۰
جدول ۲-۱۳: مقاومت کششی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانواکسید آهن[۷۴]..... ۱۴۱
جدول ۲-۱۴: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانواکسید آهن[۷۴]..... ۱۴۱
جدول ۲-۱۵: روند تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانواکسید روی[۷۹]..... ۱۴۳

جدول ۲-۱۶: مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی حاوی نانواکسید زیرکونیوم در سه شرایط عمل آوری مختلف W: آب معمولی LW : آب آهک و LW-W : تا ۲۸ روز در آب معمولی و سپس تا ۹۰ روز در آب آهک[۸۰] ۱۴۴
جدول ۲-۱۷: مقادیر زمان گیرش و مقدار جریان‌پذیری مخلوط‌های بتنی حاوی نانو کربنات کلسیم [۸۸].... ۱۴۷
جدول ۲-۱۸: مقدار تخلخل نمونه‌های سیمانی حاوی نانوذرات تیتانیوم در مقایسه با نمونه مرجع[۸۹] ۱۴۸
جدول ۲-۱۹: مقاومت فشاری، خمشی و کششی جداشدگی ملات‌های سیمانی حاوی نانوذرات تیتانیوم[۹۰]. ۱۴۹
جدول ۲-۲۰: نسبت اجزای بتن حاوی نانوذرات تیتانیوم به همراه افزودن فوق روان کننده و پودر سرباره [۹۲] ۱۵۰
جدول ۲-۲۱: مقاومت مکانیکی و نفوذپذیری نمونه‌های حاوی نانواکسید منیزیم[۹۳]..... ۱۵۱
جدول ۲-۲۲: مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های حاوی متاکائولن[۹۸]..... ۱۵۳
جدول ۲-۲۳: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد نانو لوله کربنی [۱۰۷]..... ۱۶۰
جدول ۲-۲۴: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی۲ درصد نانو لوله کربنی [۱۰۷]..... ۱۶۰
جدول ۲-۲۵: مقاومت کششی نمونه‌های حاوی گرافن اکساید[۱۱۰]..... ۱۶۵
جدول ۲-۲۶: مقاومت فشاری و خمشی خمیر سیمان حاوی مقادیر مختلف گرافن اکساید و درصد بهبود این مقادیر نسبت به نمونه مرجع(بدون افزودنی) [۱۱۳]..... ۱۶۶
جدول ۲-۲۷: خلاصه نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات بتن به همراه مواد نانو ساختار..... ۱۶۸
جدول ۲-۲۸: تعداد و نوع نمونه‌ها[۱۲۱]..... ۱۸۲
جدول ۲-۲۹: مقادیر فرکانس بدست آمده از آزمون‌های دینامیکی (Hz) [۱۲۶]..... ۱۹۴
جدول ۲-۳۰: نسبت میرایی بدست آمده از آزمون‌های دینامیکی[۱۲۶]..... ۱۹۴
جدول ۲-۳۱: مقادیر پارامترهای مدل از آزمون قطبش برای نمونه با الکترودهای سیمی و شبکه‌ای [۱۴۷].... ۲۱۲
جدول ۲-۳۲: فرکانس متناظر با هر یک از این مودها از نتایج محاسباتی و نتایج حاصل از دو حسگر شتاب و CNTCS [۱۴۷]..... ۲۱۵
جدول ۲-۳۳: حدود اتربرگ خاک با افزودن نانو سیلیس[۱۶۹]..... ۲۲۹
جدول ۲-۳۴: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (kg/cm^2) [۱۹۳]..... ۲۵۱
جدول ۲-۳۵: بررسی تاثیر ۱٪ نانو سیلیس و الیاف پلی استر بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رس[۲۰۲].. ۲۶۲
جدول ۲-۳۶: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری دو نوع خاک رسی در دوره زمانی ۱۴ روزه [۱۷۹]..... ۲۶۶

جدول ۲-۳۷: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر مقاومت فشاری تک‌محوری دو نوع خاک رسی در دوره زمانی ۱۴ روزه [۱۷۹]..... ۲۶۶
جدول ۲-۳۸: نتایج کلی تحقیقات انجام شده روی تاثیر مواد نانو ساختار بر خواص کیفی و مقاومتی انواع خاک‌ها ۲۷۸

مقدمه

در مرحله‌ی دوم از این پروژه به شناسایی دانش‌ها و فناوری‌های به‌روز جهانی استفاده از مواد نانو ساختار در زمینه‌ی سازه‌ها پرداخته می‌شود.

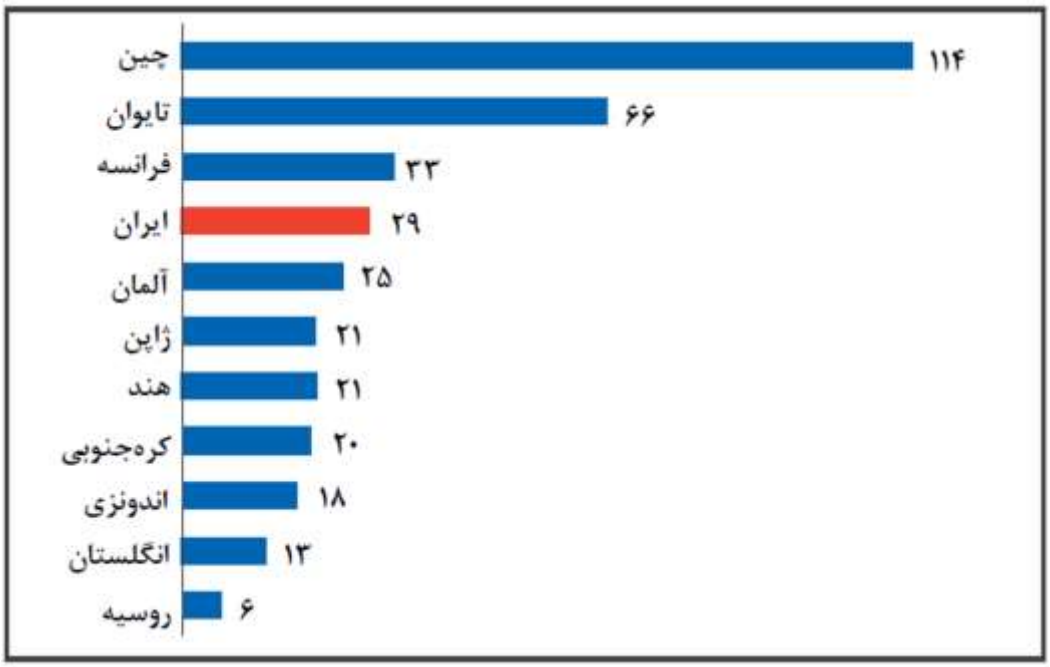
در این راستا در ابتدا آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ملی و بین المللی مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌ها معرفی می‌گردند. سپس به جمع‌آوری مقالات و تحقیقات داخلی و خارجی انجام گرفته در زمینه‌های بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای بتن با استفاده از مواد نانو ساختار (شامل تغییرات کارایی و خواص بتن تازه، تغییرات دوام و نفوذپذیری، تغییرات مقاومت مکانیکی)، بهره‌مندی از تکنولوژی نانو در مقاوم‌سازی سازه‌ها، مواد خودترمیم شونده با به‌کارگیری مواد نانو ساختار، استفاده از نانو حسگرها و نانو سنسورها در پایش عملکرد و سلامت سازه‌ها و بهبود شرایط ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانو ساختار (شامل تغییرات خواص خمیری خاک، تغییرات نفوذپذیری، کاهش پتانسیل تورم، تغییرات چگالی، وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه، بهبود مشکلات واگرایی و رمبندگی خاک و بهبود خواص مقاومت مکانیکی خاک پرداخته می‌شود. در این مرحله، برای موضوعاتی که تعداد تحقیقات انجام شده زیاد بودند سعی بر این شد که جدولی شامل خلاصه‌ی نتایج تحقیقاتی در پایان بخش مربوطه ارائه شود.

۲- شناسایی دانش‌ها و فناوری‌های به روز جهانی مواد نانو ساختار در زمینه سازه‌ها

۲-۱- معرفی آیین نامه‌ها و استانداردهای ملی و بین‌المللی مواد نانو ساختار مطرح شده در بند ۲-۱

۲-۱-۱ - استانداردهای استفاده از مواد نانوساختار

یکی از پیش‌نیازهای تجاری‌سازی محصولات و ورود به بازارهای جهانی، اخذ استانداردهای بین‌المللی و مشارکت در فرآیند تدوین استانداردها و پروتکل‌های جهانی است. از طرفی نبود پروتکل‌ها و استانداردهای ملی و بین‌المللی مربوط به روش‌های اندازه‌گیری کارایی و خواص جدید محصولات نانو و نبود استانداردهای مربوط به جنبه‌های ایمنی این نوع محصولات، موجب شده که کشورهای پیشرو در فناوری نانو، استانداردسازی را یکی از برنامه‌های اصلی توسعه فناوری نانو در کشور خود قرار دهند. با توجه به اهمیت این موضوع، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو با مشارکت سازمان ملی استاندارد ایران در سال ۱۳۸۵، کمیته فنی متناظر استانداردسازی فناوری نانو را تاسیس کرد. این کمیته متناظر با کمیته بین‌المللی استانداردسازی فناوری نانو (ISO/TC229) فعالیت می‌کند. در کمیته بین‌المللی استانداردسازی فناوری نانو، ۳۳ کشور از جمله جمهوری اسلامی ایران عضو اصلی کمیته و ۱۱ کشور عضو فرعی هستند. جمهوری اسلامی ایران با استفاده از توان ملی و متخصصان داخلی، توانسته است یکی از ۹ کشوری باشد که در کمیته بین‌المللی، به عنوان کشور مسئول پروژه، استاندارد بین‌المللی تدوین نماید. در شکل ۲-۱ تعداد استانداردهای ملی کشورهای مختلف در زمینه نانوتکنولوژی آورده شده است [۱].



شکل ۲-۱: تعداد استانداردهای ملی کشورهای مختلف در حوزه نانو تکنولوژی[۱]

۲-۱-۲ - استانداردهای فناوری نانو در ایران و جهان

کمیته استانداردسازی فناوری نانو ایران دارای ۴ کارگروه تخصصی می‌باشد که به صورت متناظر با کمیته بین‌المللی فعالیت می‌کنند. در این کارگروه‌ها حدود ۴۰ نفر از اساتید دانشگاه‌ها، پژوهشگران فعال در مؤسسات تحقیقاتی و شرکت‌های فعال در حوزه نانو عضویت دارند. عناوین و حوزه فعالیت این کارگروه‌ها به شرح زیر است:

کارگروه اول ISIRI/TC229/WG1 با عنوان " اصطلاح شناسی، تعاریف و اصطلاحات"

حوزه کاری این کارگروه شامل تعیین تعاریف و اصطلاحات واحد و نام‌گذاری در ارتباط با فناوری نانو بوده و هدف آن تسهیل در ارتباطات بین‌المللی، ایجاد ادبیات واحد در فناوری نانو و تقسیم‌بندی مناسب و جامع حوزه‌های فناوری نانو می‌باشد.

کارگروه دوم ISIRI/TC229/WG2 با عنوان "اندازه‌گیری و تعیین مشخصات"

حوزه کاری این کارگروه‌ها استانداردسازی روش‌های اندازه‌گیری و تعیین مشخصات نانومواد، نانوساختارها، نانوقطعات و محصولات فناوری نانو می‌باشد.

کارگروه سوم ISIRI/TC229/WG3 با عنوان "سلامتی، ایمنی و محیط زیست"

حوزه کاری این کارگروه، توسعه و تدوین استانداردها در زمینه مسائل زیست‌محیطی، ایمنی و سلامت، تعیین تجهیزات حفاظت شخصی و کنترل‌های مهندسی، تدوین دستورالعمل‌های ایمنی، بررسی و ارزیابی سمیت و خطرات در حوزه فناوری نانو می‌باشد.

کارگروه چهارم ISIRI/TC229/WG4 با عنوان " ویژگی‌های مواد"

حوزه کاری این گروه استانداردسازی ویژگی‌های نانو مواد می باشد.

فهرست استانداردهای ملی در حوزه نانوتکنولوژی در جدول ۱۲-۱ قابل مشاهده است و در شکل ۲-۲ تعدادی از این استانداردها نشان داده شده است:

جدول ۱۲-: فهرست استانداردهای ملی در حوزه فناوری نانو

ردیف	شماره استاندارد	عنوان استاندارد	سال انتشار
1	12098	فناوری نانو- واژه‌ها، اصطلاحات و تعاریف اصلی	1388
2	12325	آیین کار سلامت و ایمنی در محیط‌های کار با نانومواد	1388
3	12963	فناوری نانو- تعیین ویژگی‌های همولیتیک نانوذرات- روش آزمون	1389
4	13566	فناوری نانو- ارزیابی اثر نانوذرات بر تشکیل کلنی‌های گرانولوسیت- ماکروفاژ موش- روش آزمون	1389
5	13731	فناوری نانو- تعیین مشخصات نانولوله‌های کربنی تک‌جداره با استفاده از طیف‌سنجی فتولومینسانس فروسرخ نزدیک	1390
6	13736	فناوری نانو- بسته‌بندی و حمل و نقل ایمن نانومواد- آیین کار	1390

جدول ۲-۱: ادامه

ردیف	شماره استاندارد	عنوان استاندارد	سال انتشار
8	14152	فناوری نانو – تولید نانوذرات فلزی برای آزمون سمیت استنشاقی با استفاده از روش تبخیر – تراکم	1390
9	14153	فناوری نانو – آزمون اندوتوکسین نانومواد در سیستمهای برون تن – روش آزمون Limulus Amebocyte lysate	1390
10	14564	فناوری نانو- تعیین مشخصات نانو لوله‌های کربنی تک جداره به روش آنالیز جرم سنجی حرارتی	1391
11	14743	فناوری نانو-تعیین مشخصات نانو لوله‌های کربنی تک جداره با استفاده از طیف سنجی جذبی فرابنفش –مرئی- فرو سرخ نزدیک	1391
12	14744	فناوری نانو-روش‌شناسی طبقه بندی و رده بندی نانو مواد	1391
13	16463	فناوری نانو –تعیین مشخصات نانو لوله‌های کربنی چند جداره – فاکتورهای شکل مزوسکوپی	1392
14	16464	فناوری نانو –ویژگی‌های مواد –راهکاری برای تعیین ویژگی‌های نانو اشیاء	1392
15	16523	فناوری نانو-راهنمای اثرهای ناخواسته در تصویر مربوط به سوزن و روبش گر در میکروسکوپی تونل زنی روبشی (STM) و میکروسکوپی نیروی اتمی(AFM)	1392
16	17148	فناوری نانو-روش واسنجی بزرگنمایی z میکروسکوپ نیروی اتمی در سطوح جابجائی زیرنانومتربا استفاده از پله های تک اتمی (si۱۱۱)	1392

جدول ۲-۱: ادامه

ردیف	شماره استاندارد	عنوان استاندارد	سال انتشار
17	17149	فناوری نانو-تعیین کمی رهایش نانو شیء از پودرهای ناشی از تولید هواسل‌ها	1392
18	17150	فناوری نانو –راهنما برای توسعه مواد معرف آزمون حاوی نانو اشیاء در حالت پودر خشک	1392

19	17222	فناوری نانو –پودر نانو کلسیم کربنات-مشخصات و اندازه گیری	1392
20	17990	فناوری نانو- پودر تیتانیوم دی اکسید نانو مقیاس-مشخصه‌ها و اندازه‌گیری	1392
21	17991	فناوری نانو- تعیین مشخصات نمونه‌های نانو لوله کربنی چند جداره (MWCNT)	1392
22	17992	فناوری نانو- راهنمای نشانه گذاری تشویقی برای محصولات نهایی حاوی نانو اشیاء تولیدی	1393
23	17993	فناوری نانو- تعیین ناخالصی‌های عنصری در نمونه‌های نانو لوله‌های کربنی با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی	1393
24	18085	فناوری نانو-تعیین مشخصات نانو لوله‌های کربنی تک جداره با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری(TEM)	1393
25	18086	فناوری نانو-راهنمای روش‌هایی برای اندازه گیری نانو و میکروتریبولوژی	1393
26	18392-4	فناوری نانو-واژه نامه –قسمت ۴- مواد نانو ساختار یافته	1393
27	18392-5	فناوری نانو –واژه نامه –قسمت ۵- واژه‌های مشترک نانو-زیست	1393
28	18392-7	فناوری نانو-واژه نامه –قسمت ۷- تشخیص و درمان در مراقبت‌های بهداشتی	1393

جدول ۲-۱: ادامه

ردیف	شماره استاندارد	عنوان استاندارد	سال انتشار
29	19393-2-1	فناوری نانو-ویژگیهای مواد –قسمت ۲-۱-نانو لوله‌های کربنی تک جداره –ویژگی‌های تفصیلی	1393
30	19111	فناوری نانو-تعیین مشخصات نانو ذرات در محفظه های مواجهه استنشاقی برای آزمون سمیت استنشاقی	1393
31	19300	فناوری نانو –تعیین مشخصات اجزای فرار در نمونه های نانو لوله کربنی تک جداره با استفاده از آنالیز گاز خروجی –کروماتوگرافی گازی –طیف سنجی جرمی	1393
32	19544	فناوری نانو-تهیه برگه اطلاعات ایمنی ماده	1394
33	19583	فناوری نانو-ارزیابی کمی فعالیت نانو ذرات نقره از طریق آزاد سازی مورامیک اسید از استافیلوکوکوس اورئوس	1394
34	19758-2-1	فناوری نانو-نانو ساخت –مشخصات کنترلی کلیدی –قسمت ۲-۱ – مواد نانو لوله کربنی –مقاومت الکتریکی فیلم	1394
35	19785	فناوری نانو-نانو ذرات پودری شکل –مشخصه ها و اندازه گیری ها	1394

36	19816-1	فناوری نانو- مدیریت ریسک شغلی نانو مواد مهندسی شده قسمت ۱- اصول و رهیافت ها	1394
37	18392-3	فناوری نانو-واژه نامه –قسمت ۳- نانو اشیای کربنی	1394
38	19852	فناوری نانو –شناسایی نشتی در تجهیزات اسمزمعکوس و نانوفیلتراسیون –روش‌های آزمون	1394
39	19935	فناوری نانو –تعیین مشخصات عملکرد دستگاههای اسمز معکوس و نانو فیلتراسیون –روش آزمون	1394

جدول ۲-۱: ادامه

ردیف	شماره استاندارد	عنوان استاندارد	سال انتشار
40	20746	فناوری نانو- آزمون یکپارچگی سامانه های غشائی تصفیه آب (نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس)-روش آزمون	1395
41	20454	اندازه گیری توزیع اندازه ذرات نانو مواد در سوسپانسیون به روش آنالیز ردیابی مسیر حرکت نانو ذره(NTA)	1395
42	21144	فناوری نانو-مشخصه های سوسپانسیون های کاری نانو اشیاء برای سنجش برون تن به منظور ارزیابی سمیت ذاتی نانو شی	1395
43	21145	فناوری نانو- واژه نامه –شاخص‌های علم، فناوری و نوآوری	1395
44	21195	فناوری نانو-کالای نساجی با خاصیت ضد میکروبی-روش آزمون	1395
45	21196	فناوری نانو-آموزش نیروی کار برای تعیین مشخصات در فناوری نانو –آیین کار	1395
46	21197	سنجش تحرک الکتروفورتیک و پتانسیل زتای نانو مواد زیستی	1395
47	21198	فناوری نانو –آموزش سلامت وایمنی برای نیروی کار –راهنما	1395
48	21206	فناوری نانو-راهنمای مشخصه یابی فیزیکو-شیمیایی مواد نانو مقیاس مهندسی شده برای ارزیابی توکسیکولوژیک	1395



شکل ۲-۲: تعدادی از استانداردهای ملی ایران در حوزه نانو تکنولوژی

مهم‌ترین استانداردهای بین‌المللی تدوین شده در زمینه نانو تکنولوژی استانداردهای ASTM، ISO، CEN/TC 352 و استاندارد IEEE هستند.

استاندارد ASTM

کمیته E56 با هدف استانداردسازی نانوتکنولوژی در سال ۲۰۰۵ توسط انجمن استاندارد ASTM تشکیل شد که ۲ استاندارد زیر خروجی این کمیته است.

- **استاندارد ASTM E2535-2007 [۲]**

این استاندارد راهنمایی برای به حداقل رساندن آلودگی نیروی کار انسانی به مواد مضر نانو است؛ در واقع مدیریت استفاده صحیح از نانو ذراتی که انسان‌ها در هنگام تولید، آزمایش یا تحقیقات با آن‌ها سر و کار دارند در این استاندارد تجمیع شده است؛ در شکل ۲-۳ تصویری از این استاندارد آورده شده است.



شکل ۲–۳: استاندارد ASTM E2535-2007

- **استاندارد ASTM E3001-2015** [۳]

این استاندارد با موضوع آموزش مقدماتی نیروی کار در زمینه ویژگی‌های نانو مواد تدوین شده است (شکل ۲–۴).



شکل ۲–۴: استاندارد ASTM E3001-2015

استاندارد ISO/TC

این استاندارد با تشکیل یک کمیته فنی با موضوع نانوتکنولوژی در سازمان ایزو در سال ۲۰۰۵ تاسیس شد.-

- **استاندارد ISO TS 27687** [۴]

مطابق شکل ۲–۵، این استاندارد با هدف ایجاد دایره واژگان واحد بین‌المللی برای ایجاد ارتباط بهتر و ساده‌تر بین کشورهای مختلف تدوین شد.


TECHNICAL SPECIFICATION
ISO/TS 27687
Nanotechnologies — Terminology and definitions for nano-objects — Nanoparticle, nanofibre and nanoplate

شکل ۲–۵: استاندارد ISO TS 27687

- **استاندارد ISO 10808 [۵]**

این استاندارد در زمینه نکات زیست‌محیطی و سلامت، تجهیزات ایمنی، دستورالعمل‌های ایمنی و خطرات نانوتکنولوژی تدوین شده است. در شکل ۲–۶ این استاندارد نمایش داده شده است.


INTERNATIONAL STANDARD ISO 10808

Nanotechnologies — Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing

شکل ۲-۶: استاندارد ISO 10808

۲-۲- جمع‌آوری مقالات و تحقیقات داخلی و خارجی انجام گرفته و کتب تالیف شده برای موارد مطرح شده در بند ۱-۲

در پژوهش حاضر تلاش شد تمام مقالات و تحقیقات انجام شده در حوزه نانوتکنولوژی مرتبط با صنعت بتن، فولاد، میراگرها و ابزارهای کنترل سازه، مصالح خود ترمیم شونده، نانو حسگرها و نانو سنسورها و در نهایت کاربرد آن در علم ژئوتکنیک و اصلاح خصوصیات خاک بستر، از منابع معتبر داخلی و خارجی استخراج شده و مورد بررسی دقیق قرار گرفت تا ورود به این عرصه با علم و آگاهی کافی همراه باشد.

منابع خارجی مورد استفاده در این پژوهش از ژورنال‌ها و مجلات معتبر از جمله پایگاه Science Direct انتخاب شده است. ژورنال‌هایی مانند ژورنال جهانی مهندسی[۱]، ژورنال علوم و تکنولوژی پیشرفته[۲]، ژورنال مصالح و مهندسی عمران[۳]، ژورنال علوم محیطی و زیست‌شناسی کاربردی[۴]، ژورنال بین‌المللی علوم و فناوری حمل و نقل[۵]، ژورنال

[۱] World Journal of Engineering
[۲] journal of Advanced Science and Technology
[۳] Journal of Materials in Civil Engineering
[۴] Applied Environmental and Biological Sciences
[۵] International Journal of Transportation Science and Technology

مکانیک سنگ و مهندسی ژئوتکنیک[۱]، ژورنال جامعه شیمی آمریکا[۲]، ژورنال بین‌المللی نانو ابعاد[۳]، ژورنال علوم کاربردی[۴]، ژورنال بین‌مللی مهندسی ژئوتکنیک[۵] و ... مورد بررسی واقع شد و مقالاتی مرتبط با موضوع مورد تحقیق از این منابع استخراج شده که در بخش مراجع به طور کامل ذکر گردیده است.

کتب مرتبط با حوزه نانو و کنفرانس‌های معتبر خارجی نیز از دیگر منابع این تحقیق به شمار می‌آیند که در بخش مراجع به طور کامل ذکر شده است.

منابع داخلی نیز شامل کتب مرتبط با این حوزه، مقالات منتشر شده در مجلات دانشگاهی معتبر داخل، همچنین کنفرانس‌های ملی و بین‌المللی برگزار شده در داخل کشور هم از دیگر منابع این تحقیق به شمار می‌روند که مقالاتی شاخص از میان این مجموعه مورد استناد قرار گرفته است.

همچنین آیین‌نامه‌ها و استانداردهای معتبر داخلی و خارجی که مرتبط با موضوع این تحقیق هستند، مورد بررسی قرار گرفت و به آن پراخته شد که مهم‌ترین آن‌ها استاندارد ASTM و ISO هستند. استانداردهای خروجی از کمیته استانداردسازی فناوری نانو ایران نیز مورد استخراج و مورد بررسی قرار گرفت و در جدولی در این تحقیق به آن اشاره گردیده است.

۲-۳- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای بتن با استفاده از مواد نانوساختار

۲-۳-۱ - مقدمه

بتن در مفهوم وسیع، به هر ماده یا ترکیبی که از یک ماده چسبنده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد گفته می‌شود. این ماده چسبنده عموما حاصل فعل و انفعال سیمان‌های هیدرولیکی و آب می باشد. بتن از پر کاربردترین مصالح ساختمانی است. ویژگی اصلی بتن ارزان بودن و در دسترس بودن مواد اولیه آن است. کاربرد بتن را می‌توان در تمامی امور عمرانی از قبیل ساختمان، مخازن و نیروگاه‌ها، سازه‌های دریایی مثل اسکله‌ها، جاده‌ها و راه‌ها، مسیرهای انتقال آب و سدها مشاهده کرد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بهبود کیفیت بتن انجام شده است که اکثر آن‌ها تغییر در ترکیب بتن (که به آن طرح اختلاط بتن گفته می‌شود) را بررسی کرده‌اند؛ با این حال استفاده از افزودنی‌ها و همچنین جایگزین کردن مصالح متداول مورد استفاده در بتن با مصالح جدید همیشه مورد

---

[۱] Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering
[۲] Journal of the American Chemical Society
International Journal of Nano Dimension [۳]
[۴] Research Journal of Applied Sciences
[۵] International Journal of Geotechnical Engineering

توجه بوده است. گروهی از مواد جدید که توانسته‌اند خواص مکانیکی و فیزیکی بتن را ارتقا دهند، نانو مواد هستند. نانو مواد با توجه به خصوصیاتشان، در سطوح بسیار ریز می‌توانند دنیای بتن را کاملا متحول کنند. نانو مهندسی شامل تکنیک‌های دستکاری ساختار در مقیاس نانومتری به منظور ایجاد نسل جدید و مناسب کامپوزیت‌های سیمانی با رفتار مکانیکی ایده‌آل است و حتی می‌توان بتن با خواص جدیدی مثل مقاومت الکتریکی پایین، هوشمند بودن، خود تمیزکننده، خود ترمیم‌کننده، شکل‌پذیری بالا و ... به وجود آورد. فعالیت‌های تحقیقاتی اخیر در زمینه نانو تکنولوژی در بتن شامل بررسی ذاتی هیدراسیون در سیمان، تاثیر اضافه کردن نانو ذرات به سیمان، بتن و پوشش‌های سیمانی و مشاهده تاثیرات آن‌ها بر رفتار و مشخصات ایجاد شده است. در ادامه منابع و مقالات پیرامون کاربرد نانومواد مختلف در ساختار خمیرها، ملات‌ها و یا کامپوزیت‌های بتنی بررسی شده است.

۲-۳-۲ - تغییرات کارایی و خواص بتن تازه با استفاده از مواد نانو ساختار

تحقیقات انجام گرفته توسط کینگ[۶] بر روی کارایی بتن نشان داد افزودن نانوسیلیکا موجب کسب مقاومت سریع‌تر بتن در مقایسه با افزودن سیلیکافوم می‌گردد. همچنین مشاهده شد کارایی بتن حاوی نانوذرات سیلیس در صورتی که مقدار فوق روان‌کننده ملات در کمترین حد ممکن نگه‌داشته شود، کارایی بتن را بهبود می‌دهد. دلیل بهبود کارایی بتن، مربوط به شکل ذرات نانوسیلیکا است که عملکردی مشابه حرکت بلبرینگ در بین ذرات سیمان از خود نشان می‌دهند. نانوذرات سیلیکافوم از لحاظ اندازه ذرات، مشابه پرکننده‌های بسیار قوی عمل می‌کنند. در اثر این عملکرد، حفرات بسیار کوچک بافت بتن پر و متراکم می‌شود و ریزساختار بسیار تمیزی به وجود می‌آید[۷, ۸]. کنترل نسبت آب به سیمان و مقدار مقاومت نهایی، مزیت دیگری است که به کمک افزودن نانوذرات سیلیکا حاصل می‌شود[۹].

انجام آزمایش TG یا همان آزمایش اندازه‌گیری مقدار مصرف پرتلندایت که توسط ساید و همکاران [۱۰] انجام شد، نشان داد افزودن نانوسیلیس باعث افزایش نرخ مصرف CH در اثر افزایش نرخ واکنش‌های پوزولانی می‌شود. با این حال افزایش بین ۳ تا ۶ درصدی این ذرات، تغییری در مصرف پرتلندایت نداشت و به نظر می‌رسد بهبود مقاومت بتن پس از ۳ درصد، ناشی از مکانیزم پرشدگی حفرات و بهبود ساختار بافت بتن باشد.

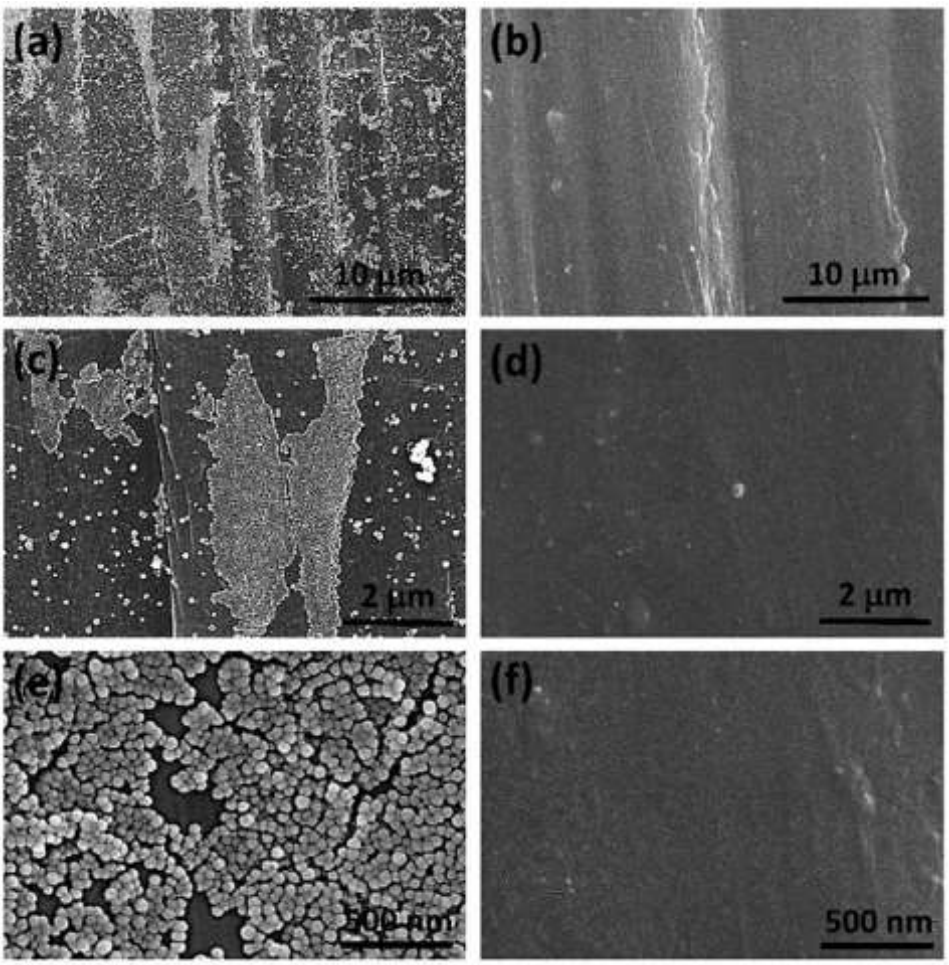
برای آنکه کارایی بتن افت نکند، پس از افزودن نانوسیلیکا به ترکیب بتن نیاز است تا از آب بیشتری استفاده شود. بهادری و حسینی [۱۱]، بِرا و همکاران [۱۲] و کینگ و همکاران [۱۳] در آزمایشات خود در بکارگیری نانوسیلیس با کاهش کارایی زیادی مواجه شدند. در عوض این کاهش کارایی بتن، تنش تسلیم و چسبندگی خمیرهای سیمان افزایش یافت. به منظور بهبود کارایی بتن‌های حاوی نانوسیلیکا از فوق روان‌کننده استفاده می‌شود. با این حال تاثیر مقدار این افزودنی شیمیایی بر واکنش و پراکنش نانوسیلیس به درستی مشخص نیست.

کونگ و همکاران [۱۴] خصوصیات رئولوژیک خمیر سیمان تازه با نسبت آب به سیمان ۰/۴ به همراه ۰/۵٪ نانوسیلیس را بررسی کردند. در این تحقیق پیشنهاد شد که اگر مقدار آب ثابت نگه‌داشته شود، افزودن نانوسیلیس موجب تراکم بهتر ذرات سیمان، کاهش فضای خالی بین آن‌ها و افزایش آب آزاد می‌گردد که این خود منجر به روانی خمیر می‌شود. با این حال، تحقیقات نشان می‌دهند کاهش کارایی، پدیده غالب در اثر افزودن نانوسیلیس است زیرا که تمامی ذرات نانوسیلیس نمی‌توانند حفرات را پر کرده و آب بین حفرات را آزاد کنند. در واقع، علاوه بر جذب آب بالای نانوذرات سیلیس، توده‌های کلوخه شده نانوسیلیس نه تنها به عنوان پر کننده عمل نمی‌کنند بلکه از آب آزاد نیز مصرف می‌کنند.

در همین راستا، سنف و همکاران [۱۵] بر روی خواص ملات تازه سیمانی حاوی نانوسیلیکا آزمایشاتی را انجام دادند. مقادیر نانوسیلیس موجود از ۰ تا ۲/۵ درصد متغیر بود. مشابه نتایج محققان دیگر، نتایج این آزمایش نیز نشان داد که با ثابت نگه داشتن مقدار فوق روان‌کننده و نسبت آب به سیمان، با افزایش درصد نانوسیلیس، مقدار آب روان‌کننده در دسترس مخلوط کاهش می‌یابد. در اثر کاهش این آب، تنش تسلیم به شدت افزایش یافت (۱۵۷٪ افزایش برای ترکیب حاوی ۲/۵ درصد نانوسیلیس) و به دلیل این افزایش چسبندگی ملات، قطر پخش ملات بر روی میز جریان نیز کاهش یافت. با این حال تاثیر این تغییر مقدار آب بر روی ویسکوزیته پلاستیک ملات چندان شدید نبود.

برخی نویسندگان عنوان کردند که کلوخه‌ها ممکن است دانه‌های سیمان را از خود دور کرده و باعث ایجاد فضای خالی شوند. این رفتار، دلیل کاهش کارایی بتن را توضیح می‌دهد. از این رو، تاثیر افزودن نانوسیلیس بر رفتار رئولوژیک بتن تازه، وابسته به آن است که چقدر کلوخه‌ها در پرکنندگی حفرات موثرند. تحقیقات کونگ و همکاران نشان داد در اکثر موارد، کلوخه‌های نانوسیلیس به عنوان پرکننده عمل نمی‌کنند و باعث کاهش کارایی می‌گردند. با این حال برای رفع این مشکل حتی اگر نیاز به آزمایشات بیشتری باشد، احتمالا بکارگیری فوق روان‌کننده در مخلوط‌های بتنی بهترین راه حل خواهد بود. ژانگ و همکاران[۱۶] اثر نانوذرات سیلیس و سیلیکافوم بر خواص کارایی و گیرش بتن‌های حاوی مقادیر بالای سرباره را بررسی کردند. بکارگیری مقادیر کمی از نانوذرات سیلیس توانست با کاهش مدت زمان غیرفعال واکنش سیمانی و شتابدهی نرخ هیدراتاسیون سیمان و سرباره، زمان گیرش بتن‌ها را کاهش دهد. همچنین برای پراکنش بهتر نانوذرات از روش آلتراسونیک به دلیل بازدهی بالاتر نسبت به روش‌های مکانیکی استفاده شد.

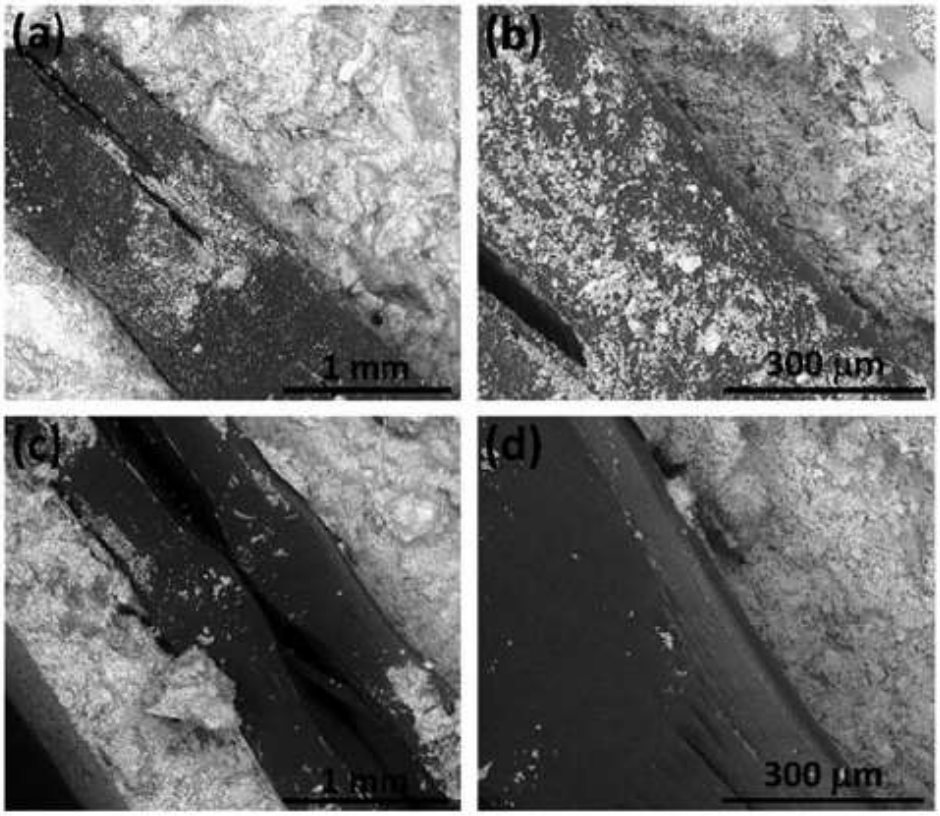
دی مایدا و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۱۷] تأثیر نانوسیلیس بر رفتار خمشی بتن حاوی الیاف را پس از ایجاد ترک بررسی نمودند. در این پژوهش سطح الیاف پلی‌پروپیلن توسط ژل نانوسیلیس پوشش داده شد. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای و تصاویر SEM به‌منظور ارزیابی رفتار انجام پذیرفت. تصاویر SEM از سطح الیاف PP با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت قبل و بعد از پوشش توسط ژل نانوسیلیس در شکل ۲-**۷** نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲-**۷** مشاهده می‌شود الیاف PP تثبیت نشده دارای سطحی صاف می‌باشند. این درحالی است که پوشش الیاف توسط ژل نانوسیلیس به دلیل چسبندگی نانوسیلیس در بدنه الیاف، موجب ایجاد ناهمواری‌هایی در سطح الیاف می‌شود. این پدیده اندرکنش مناسب‌تر الیاف تثبیت‌شده توسط ژل نانوسیلیس را با ماتریس خمیر سیمان نسبت به الیاف تثبیت نشده می‌تواند نشان دهد. همچنین آن‌ها به‌منظور بررسی نقش تثبیت بر اندرکنش الیاف با ماتریس سیمان درون نمونه‌های بتن، تصاویر SEM از سطح الیاف در نمونه بتن عمل‌آوری شده تهیه نمودند. تصاویر SEM با بزرگنمایی‌های متفاوت از سطح تماس الیاف PP تثبیت‌شده و تثبیت نشده توسط نانوسیلیس با ذرات تشکیل-دهنده بتن پس از عمل‌آوری درشکل ۲-**۸** نمایش داده شده است [۱۷].



شکل ۲–۷: تصاویر SEM از سطح نمونه‌های الیاف PP با بزرگنمایی‌های متفاوت، (a،c،e) تثبیت‌شده توسط ژل نانوسیلیس، (b،d،f) تثبیت‌شده [۱۷]

همان‌گونه که در شکل ۲–۸ مشاهده می‌شود سطح الیاف تثبیت نشده، تمیز و پاک می‌باشد و محصولات هیدراسیون اندکی بر روی آن وجود دارد. برخلاف آن، سطح نمونه تثبیت‌شده توسط ژل نانوسیلیس پوشیده از محصولات هیدراسیون می‌باشد که به‌صورت همگن توزیع شده است. این توزیع مناسب، از فرآورده‌های ناشی از واکنش‌های پوزولانی و همچنین عملکرد نانوسیلیس به‌عنوان هسته پایدار می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که به دلیل اندرکنش مناسب‌تر الیاف تثبیت‌شده با سطح بتن، در طول بارگذاری پتانسیل لغزش الیاف کاهش یابد و درنتیجه میزان نیروی بیشتری در الیاف بسیج گردد و درنهایت مشخصات مکانیکی بتن الیافی بهبود یابد[۱۷].

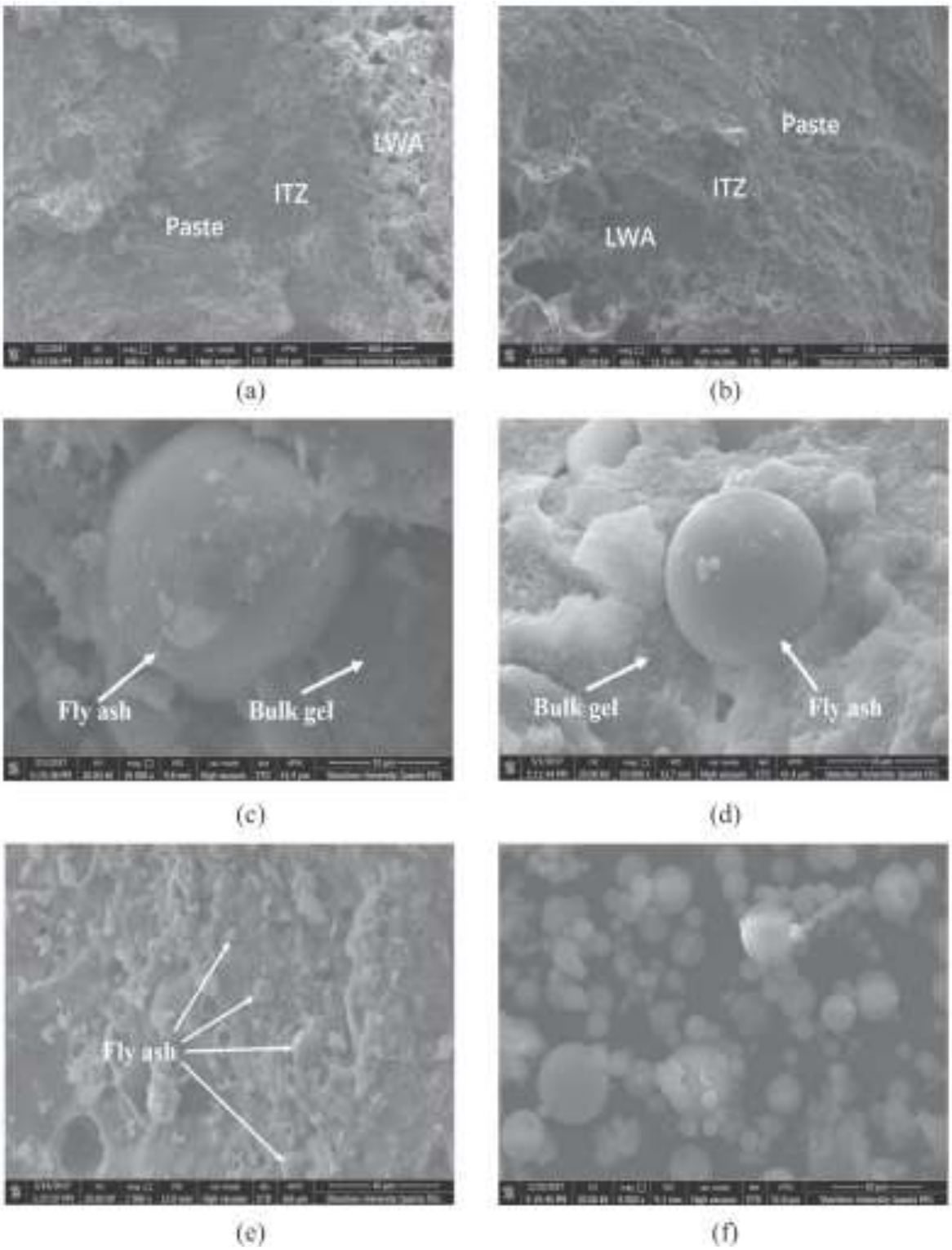
همچنین نتایج آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای نشان داد که مقاومت خمشی تأثیری از پوشش دادن الیاف توسط نانوسیلیس نمی‌پذیرد. این‌درحالی است که مقاومت خمشی پس گسیختگی با پوشش دادن الیاف افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال مقاومت نمونه‌ها حاوی الیاف تثبیت‌شده به ازای عرض ترک بیشتر از ۱/۵ میلیمتر در حدود ۴۰ درصد بیشتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد. این مسئله باعث می‌گردد تا میزان انرژی جذب شده به واسطه پوشش دادن الیاف با ژل نانوسیلیس افزایش چشمگیری یابد. این مسئله به‌ویژه در بارگذاری دینامیکی و مهندسی زلزله با اهمیت می‌باشد و می‌تواند موجب بهبود قابل ملاحظه ایمنی در رفتار لرزه‌ای گردد [۱۷].



شکل ۲–۸: تصاویر SEM از سطح الیاف PP با ذرات بتن عمل‌آوری شده با بزرگنمایی‌های متفاوت (a،b) تثبیت‌شده توسط ژل نانوسیلیس، (c،d) تثبیت‌نشده [۱۷]

وانگ و همکاران (سال ۲۰۱۸) [18] تأثیر افزودن نانوسیلیس بر رفتار بتن حاوی سنگدانه‌های سبک و خاکستر بادی را بررسی نمودند. در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت فشاری، انقباض و حساسیت به تشکیل ترک‌ها صورت پذیرفت. همچنین میزان افزودن نانوسیلیس برابر با ۱، ۲ و ۳ درصد بود. دو نوع سنگدانه سبک (نوع N و Y) با پتانسیل جذب آب متفاوت استفاده شد. به‌منظور ارزیابی تأثیر افزودن نانوسیلیس بر رفتار بتن حاوی سنگدانه‌های سبک، تصاویر SEM از ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه‌های سبک در شکل ۲–۹ نمایش داده شده است. مقایسه تصاویر SEM مشخص می‌سازد که ریزساختار ناحیه انتقال خمیر سیمان حاوی ۳ درصد نانوسیلیس نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس متراکم‌تر می‌باشد. از سوی دیگر برای نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، مرز میان سنگدانه-ها و خمیر سیمان قابل تشخیص نمی‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده اتصال مناسب سنگدانه‌های سبک و خمیر سیمان می‌باشد. از سوی دیگر ریزساختار اطراف خاکستر بادی واکنش نداده است که این موضوع نشان می‌دهد در اثر افزودن ۳ درصد نانوسیلیس، ژل متراکمی پیرامون خاکستر بادی به‌وجود آمده که موجب کاهش حفرات و بهبود مشخصات بتن می‌گردد. بررسی سطح خاکستر بادی برای نمونه‌های حاوی نانوسیلیس مشخص می‌سازد که این سطح نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس صاف‌تر و تمیزتر می‌باشد. این مطلب نشان‌دهنده کاهش واکنش خاکستربادی در اثر افزودن نانوسیلیس می‌باشد. دلیل این رفتار می‌تواند واکنش‌پذیری بالای نانوسیلیس در اثر سطح ویژه بالای آن باشد که موجب می‌گردد تا کریستال‌های کلسیم هیدروکسید به سرعت با نانوسیلیس واکنش داده و دیگر میزان

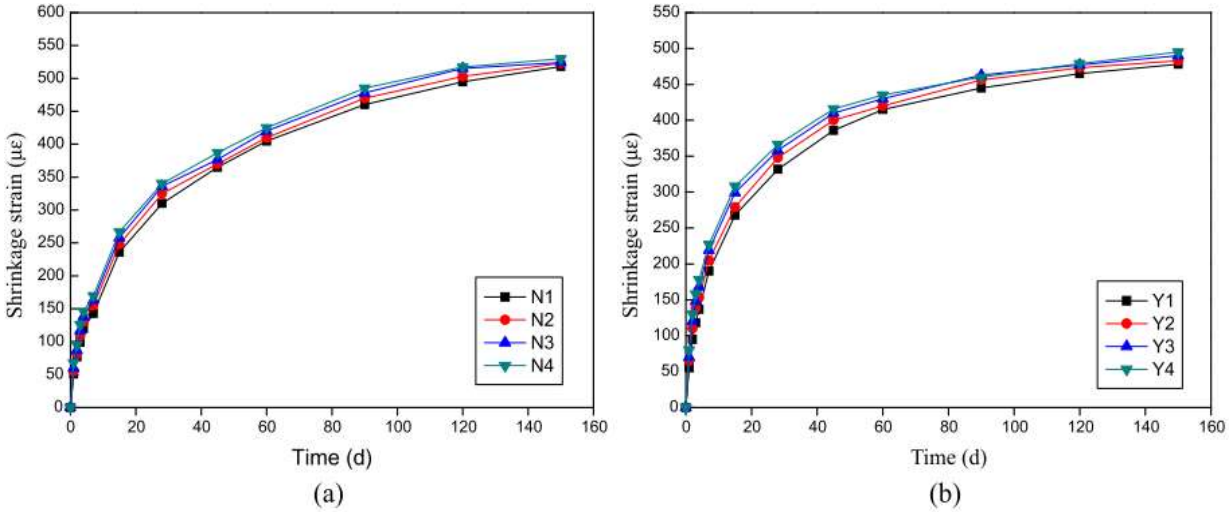
کافی از کریستال‌های کلسیم هیدروکسید به‌منظور واکنش با خاکستر بادی موجود نباشد. ازاین‌رو می‌توان انتظار داشت در اثر افزایش درصد نانوسیلیس میزان ذرات خاکسترِبادی واکنش‌نداده افزایش یابد [18].



شکل ۲–۹: تصاویر SEM از خمیر سیمان با و بدن نانوسیلیس در سن ۲۸ روز، a) فاقد نانوسیلیس، b) حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، c) فاقد نانوسیلیس، d) حاوی ۳ درصد نانوسیلیس، e) ماتریس خمیر سیمان، f) خاکستر بادی [۱۸]

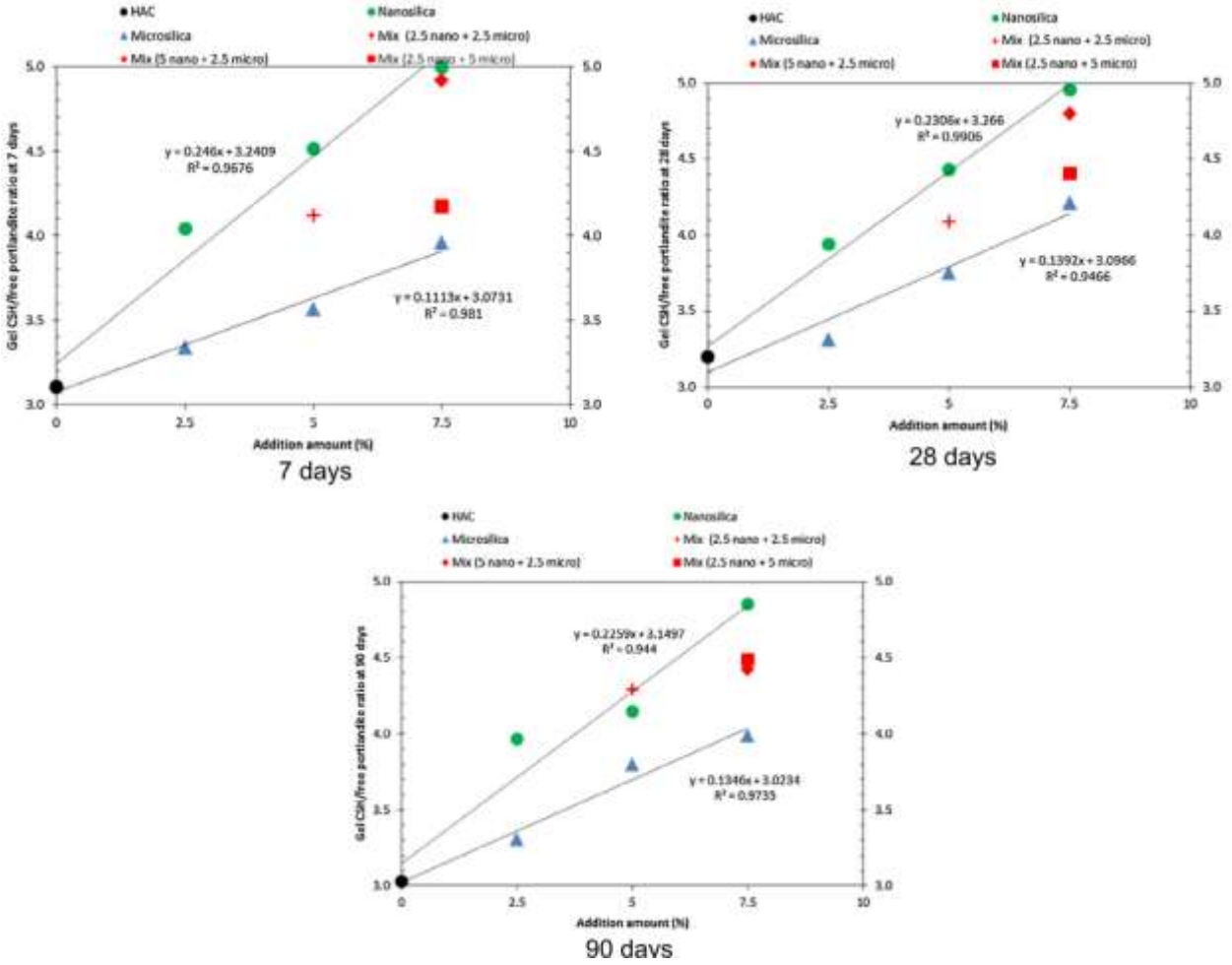
کرنش انقباضی بر حسب زمان برای نمونه با سنگدانه‌های سبک متفاوت و درصدهای گوناگون نانوسیلیس در شکل ۲–۱۰ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲–۱۰ مشاهده می‌شود افزودن نانوسیلیس تأثیر قابل ملاحظه‌ای

بر کرنش انقباضی دراز مدت بتن حاوی سنگدانه‌های سبک نمی‌گذارد. در هر حال افزایش درصد نانوسیلیس موجب افزایش کرنش انقباضی می‌شود. بررسی رفتار بتن از دیدگاه حساسیت تشکیل ترک‌ها در سنین ابتدایی مشخص می‌سازد که افزودن نانوسیلیس موجب کاهش سطح ترک‌ها می‌گردد. به عنوان مثال افزودن ۳ درصد نانوسیلیس موجب کاهش سطح ترک‌ها از ۴۳/۶ به ۳۲/۷ میلیمترمربع می‌گردد [18].



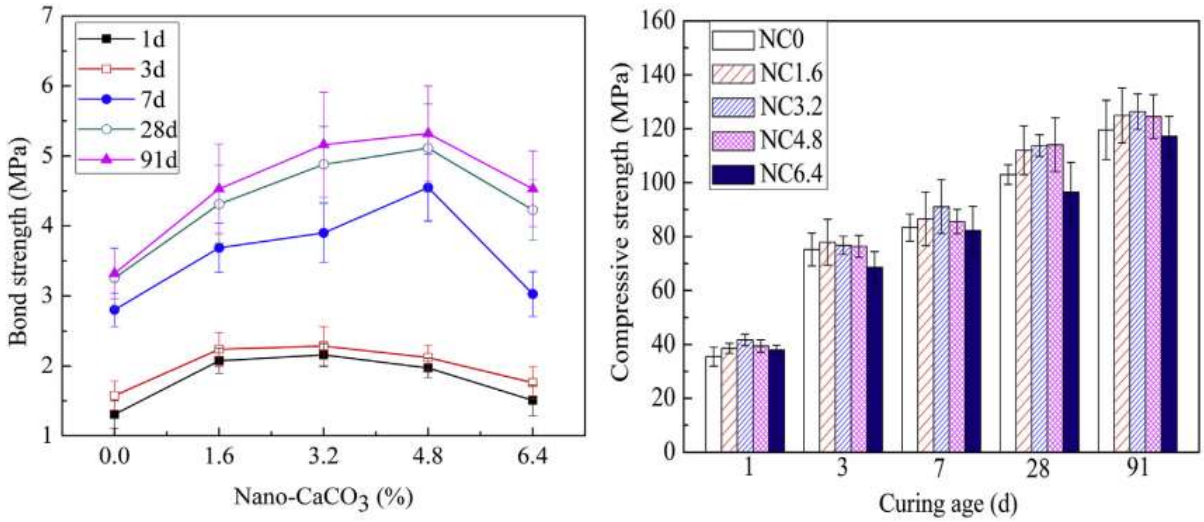
شکل ۲–۱۰: کرنش انقباضی برحسب زمان برای نمونه‌ها با درصد نانوسیلیس متفاوت حاوی سنگدانه سبک نوع، a) N و b) Y [۱۸]

برنال و همکاران (سال ۲۰۱۸) [19] تأثیر افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس به صورت تنها و توام بر رفتار مکانیکی و بتن تازه خودتراکم را ارزیابی نمودند. در این پژوهش آزمایش‌های جریان‌پذیری، قیف، جعبه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و ریزساختاری (مواد هیدراسیون) صورت پذیرفت. درصدهای مواد افزودنی شامل ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد می‌باشد. همچنین نسبت‌های استفاده توام از نانوسیلیس و میکروسیلیس نسبت به یکدیگر برابر با ۰ به ۱۰۰، ۲۵ به ۷۵، ۵۰ به ۵۰، ۷۵ به ۲۵ و ۱۰۰ به ۰ درصد بود. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانوسیلیس موجب کاهش پتانسیل جریان‌پذیری و افزایش لزجت بتن تازه می‌گردد. این موضوع می‌تواند موجب کاهش پتانسیل خودتراکمی بتن شود. این در حالی است که روانی بتن با افزودن میکروسیلیس افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر افزودن توام نانوسیلیس و میکروسیلیس وابسته به نسبت اختلاط این دو ماده می‌باشند. شکل ۲–۱۱ نسبت ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) به مواد سیمانی پرتلندی برای نمونه‌ها حاوی افزودنی و زمان عمل‌آوری گوناگون را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بتن حاوی نانوسیلیس دارای بیشترین مقدار نسبت CSH می‌باشد. این در حالی که بتن حاوی میکروسیلیس دارای کمترین مقدار نسبت CSH است. از سوی دیگر با افزایش درصد مواد افزودنی به دلیل واکنش‌های هیدراسیون نسبت CSH افزایش می‌یابد. بررسی شکل ۲–۱۱ مشخص می‌سازد که نرخ افزایش نسبت CSH بر حسب درصد مواد افزودنی برای نمونه حاوی نانوسیلیس با افزایش زمان کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند وابسته به سطح ویژه قابل ملاحظه نانوسیلیس و در نتیجه واکنش‌پذیری بالای آن در سنین ابتدایی باشد. در نهایت با افزایش زمان عمل‌آوری به دلیل توسعه واکنش‌های هیدراسیون نسبت CSH افزایش می‌یابد. افزودن توام نانوسیلیس و میکروسیلیس در نسبت‌های وزنی گوناگون رفتاری بین افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس به صورت تنها دارند [19].



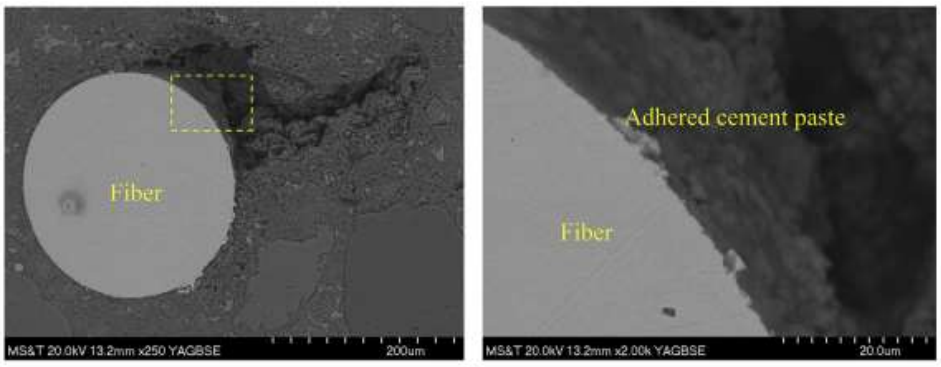
شکل ۲–۱۱: نسبت ژل کلسیم سیلیکات هیدرات به مواد سیمانی پرتلندی برای نمونه‌ها حاوی افزودنی و زمان عمل‌آوری گوناگون [۱۹].

وو و همکارن (سال ۲۰۱۸) [۲۰] با انجام آزمایش‌هایی نقش افزودن نانو کربنات کلسیم را بر مقاومت بیرون‌کشیدگی الیاف در بتن با عملکرد بالا ارزیابی نمودند. مقدار نانو کربنات کلسیم بکار رفته در این پژوهش ۰ تا ۶/۴ درصد (درصد وزنی سیمان) بود. همچنین از الیاف فولاد به‌منظور مسلح‌سازی استفاده شد. شکل ۲–**۱۲** تأثیر افزودن نانو کربنات کلسیم بر مقاومت پیوند میان الیاف و بتن و همچنین مقاومت فشاری بتن مسلح را در سنین متفاوت را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۲–**۱۲** مشخص می‌سازد که افزودن نانو کربنات کلسیم می‌تواند موجب بهبود رفتار بتن با عملکرد بالا گردد. مقدار بهینه نانو کربنات کلسیم به‌منظور دستیابی به بیشینه مقاومت فشاری برابر با ۳/۲ درصد می‌باشد. از سوی دیگر افزایش زمان عمل‌آوری تا ۷ روز موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت پیوند میان الیاف و بتن می‌گردد. از سوی دیگر پس از ۲۸ روز، مقاومت پیوند الیاف افزایش قابل‌ملاحظه‌ای نمی‌یابد. افزودن ۳/۲ درصد نانو کربنات کلسیم به‌طور نسبی می‌تواند به عنوان درصد بهینه از دیدگاه مقاومت پیوند الیاف برای سنین مختلف درنظر گرفته شود. مقاومت پیوند و انرژی بیرون‌کشیدگی الیاف برای بتن در سن ۲۸ روز به ازای افزودن ۳/۲ درصد نانو کربنات کلسیم به ترتیب ۴۵ و ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد.

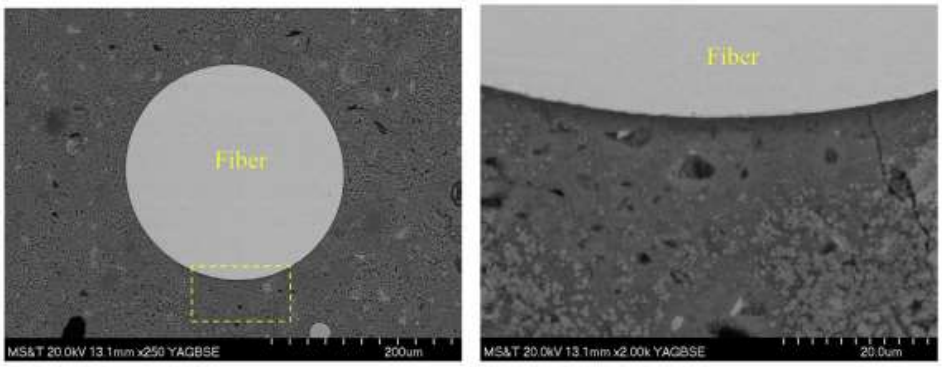


شکل ۲–۱۲: تأثیر افزودن نانو کربنات کلسیم بر مقاومت پیوند الیاف و مقاومت فشاری در سنین متفاوت [۲۰]

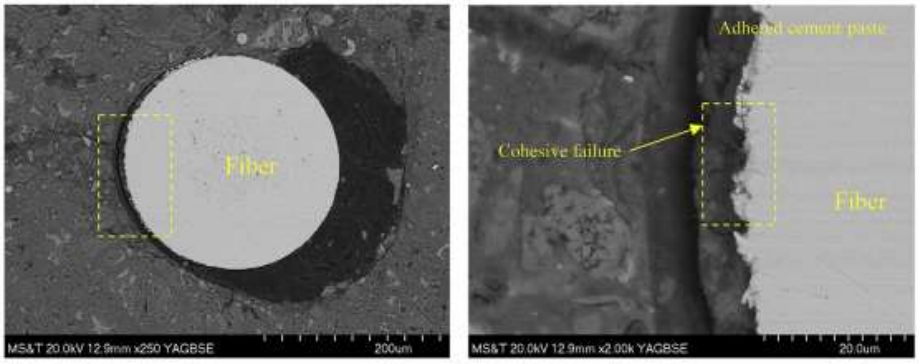
شکل ۲–۱۳تصاویر SEM از سطح تماس الیاف در نمونه با درصدهای گوناگون نانو کربنات کلسیم و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای نمونه حاوی ۳/۲ درصد نانو کربنات کلسیم در سن ۷ روز حفراتی در سطح تماس وجود دارد. این در حالی است که میزان و اندازه حفرات با افزایش سن به ۲۸ روز به دلیل واکنش‌های هیدراسون کاهش می‌یابد. این رویداد دلیل اصلی افزایش مقاومت پیوند در اثر افزایش زمان عمل‌آوری می‌باشد. تصاویر گسیختگی میان الیاف و بتن مشخص می‌سازد که برای نمونه حاوی نانو کلسیم کربنات، خمیری از سیمان با ضخامت ۴ میکرومتر پیرامون الیاف وجود دارد که نشان دهنده وقوع گسیختگی در خمیر سیمان می‌باشد. این درحالی است که برای نمونه فاقد نانو کلسیم کربنات، سطح الیاف و خمیر سیمان دارای فاصله می‌باشد که این مطلب نشان دهنده وقوع گسیختگی در سطح تماس الیاف و خمیر سیمان است. در نتیجه مقاومت بیرون کشیدگی در اثر بهبود مشخصات ناشی از افزودن نانو کربنات کلسیم افزایش می‌یابد [۲۰].



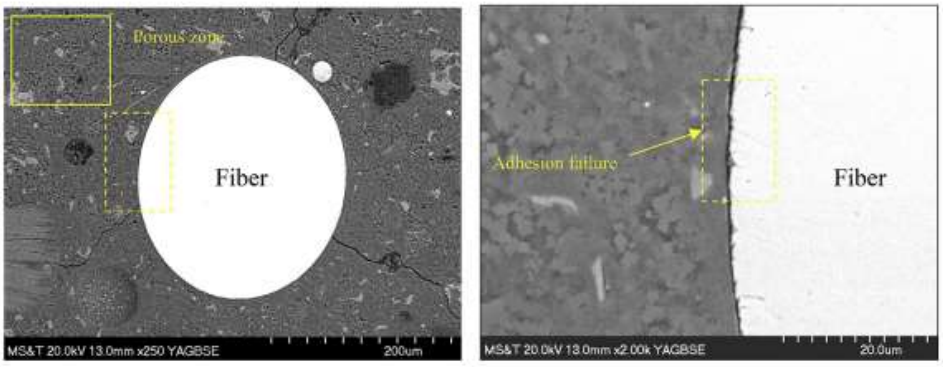
(a) NC3.2 at 7 d



(b) NC3.2 at 28 d



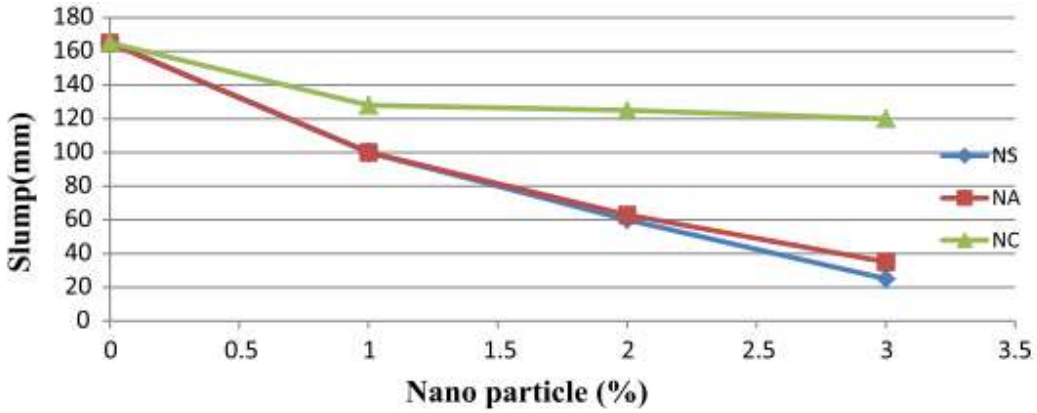
(c) NC6.4 at 28 d



(d) NC0 at 28 d

شکل ۲–۱۳: تصاویر SEM از سطح تماس الیاف در نمونه با درصدهای گوناگون نانو کربنات کلسیم و سنین متفاوت [۲۰]

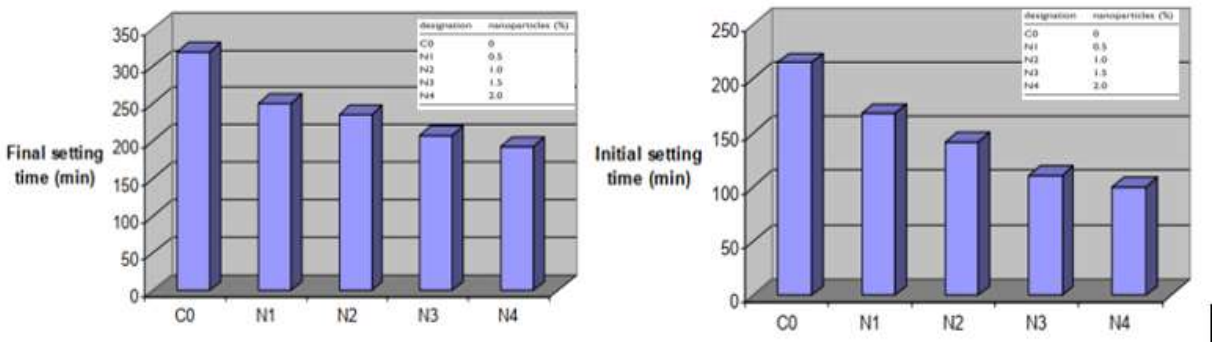
شاه‌رجبیان و بهفرنیا (سال ۲۰۱۸) [21] تأثیر افزودن نانوذرات (نانوسیلیس، نانو آلومینیوم و نانو رس) را بر مقاومت بتن سرباره‌ای تحت سیکل‌های یخبندان و ذوب بررسی نمودند. سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده شد. میزان استفاده نانوذرات ۰، ۱، ۲ و ۳ درصد بود و میزان مقاومت فشاری و کاهش وزن پس از دوره‌های یخبندان و ذوب ارزیابی شد. شکل ۲-۱۴ تغییرات اسلامپ بتن برای درصدهای متفاوت نانو مواد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش میزان نانو مواد به دلیل سطح ویژه بالاتر و ریزدانه‌تر بودن، موجب کاهش کارایی و اسلامپ بتن می‌گردد. همچنین مقایسه تأثیر نانو مواد گوناگون مشخص می‌سازد که میزان کاهش اسلامپ بتن در اثر افزودن نانوسیلیس و نانو آلومینیوم بیشتر از نانو رس می‌باشد. دلیل این رفتار می‌تواند واکنش‌پذیری بالاتر نانوسیلیس و نانو آلومینیم با آب و فعال‌کننده‌های قلیایی باشد که موجب ایجاد یک لایه ضخیم از مواد به دور سنگ‌دانه می‌شود و در نهایت کارایی کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۱۴: تغییرات اسلامپ بتن برای درصدهای متفاوت نانو مواد [۲۱]

مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره به ازای افزودن ۳ درصد نانوسیلیس، ۲ درصد نانورس و ۲ درصد نانو آلومینیوم در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روز بیشینه می‌گردد. از سوی دیگر بهبود مقاومت در اثر افزودن نانوسیلیس بیش از ۱ درصد ناچیز می‌باشد. همچنین افزودن نانورس و نانو آلومینیوم تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارند و به دلیل هزینه بالا استفاده از این مواد توجیه اقتصادی ندارد. بررسی دوام بتن و میزان کاهش وزن در اثر دوره‌های متوالی یخبندان و ذوب مشخص می‌کند که افزودن ۱ درصد نانوسیلیس موجب ارتقاء قابل ملاحظه مشخصات بتن می‌شود. به دلیل مسائل اقتصادی و مقاومتی، افزودن نانوسیلیس به بتن سرباره‌ای حاوی محلول فعال‌کننده قلیایی نسبت به نانورس و نانو آلومینیوم توصیه گردید [21].

نظری و همکاران [۲۲] سه خصوصیت مقاومت خمشی، کششی (جداشدگی) و زمان گیرش بتن را مورد بررسی قرار دادند. نانوذرات آلومینیوم با قطر ۱۵ نانومتر و در۴ درصد مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد در طرح اختلاط بتن بکاربرده شدند. بر اساس نتایج حاصل مطابق شکل ۲-۱۵ بهترین مقاومت خمشی در نمونه حاوی ۱ درصد نانو آلومینا بدست آمد. تمامی نتایج نشانگر بهبود مقاومت‌های خمشی و کششی حاوی نانوذرات نسبت به نمونه‌های مرجع بودند. همچنین در بررسی خواص گیرشی بتن تازه مشخص شد افزودن نانوآلومینیوم زمان گیرش اولیه و نهایی بتن را کاهش می‌دهد (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲–۱۵: تاثیر افزودن نانوآلومینیوم بر گیرش اولیه و نهایی بتن[۲۲]

ساتو و بائودین در بررسی نحوه تاثیر این ماده بر هیدراتاسیون سیمان مشاهده کردند که نانوذرات کربنات کلسیم در حضور مقادیر بالای افزودنی‌های معدنی مانند سرباره کوره انفجاری موجب دیرگیری هیدراتاسیون می‌شود. با این حال بدون حضور مقادیر زیاد افزودنی‌های معدنی، این نانوذره سرعت واکنش را افزایش می‌دهد[۲۳].

بروکس و جوهری [۲۴] با تحقیق بر سیمان‌های حاوی متاکائولن و بررسی خواص بتن تازه مشاهده کردند با افزایش درصد متاکائولن، اسلامپ کمتر شده و زمان گیرش بتن افزایش می‌یابد. همچنین تحقیق لی و همکاران[۲۵]، مقدار جریان‌پذیری خمیرهای سیمانی حاوی متاکائولن در عین نسبت آب به سیمان و مقدار فوق‌روان‌کننده ثابت، در مقایسه با سیمان‌های معمولی ضعیف‌تر شد.

بادوگیانیس و همکاران [۲۶] خواص تازه سیمان‌های معمولی و سیمان‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد متاکائولن را بررسی کردند (جدول ۲–۲). نتایج نشان داد سیمان‌های معمولی به مراتب بیشتر از سیمان‌های متاکائولن‌دار نیاز به آب دارند. همچنین سیمان‌های حاوی ۱۰٪ متاکائولن، خواص جریان‌پذیری مشابه سیمان‌های معمولی داشتند اما در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ متاکائولن، تاخیر قابل توجهی در زمان گیرش در مقایسه با سیمان‌های معمولی رخ داد (جدول ۲–۳).

جدول ۲–۲: خواص سیمان‌های تازه در آزمایشات بادوگیانیس و همکاران[۲۶]

Sample	Metakaolin (% mass)	Water demand (% mass)	Setting time (min)	
			Initial	Final
PC	–	27.5	105	140
MK1-10	10	29.0	75	130
MK2-10	10	29.0	85	130
MK3-10	10	32.0	105	160
MK4-10	10	32.5	155	180
MKC-10	10	31.0	95	130
MK1-20	20	32.0	105	160
MK2-20	20	31.5	110	165
MK3-20	20	38.5	120	160
MK4-20	20	41.0	205	230
MKC-20	20	37.5	140	170

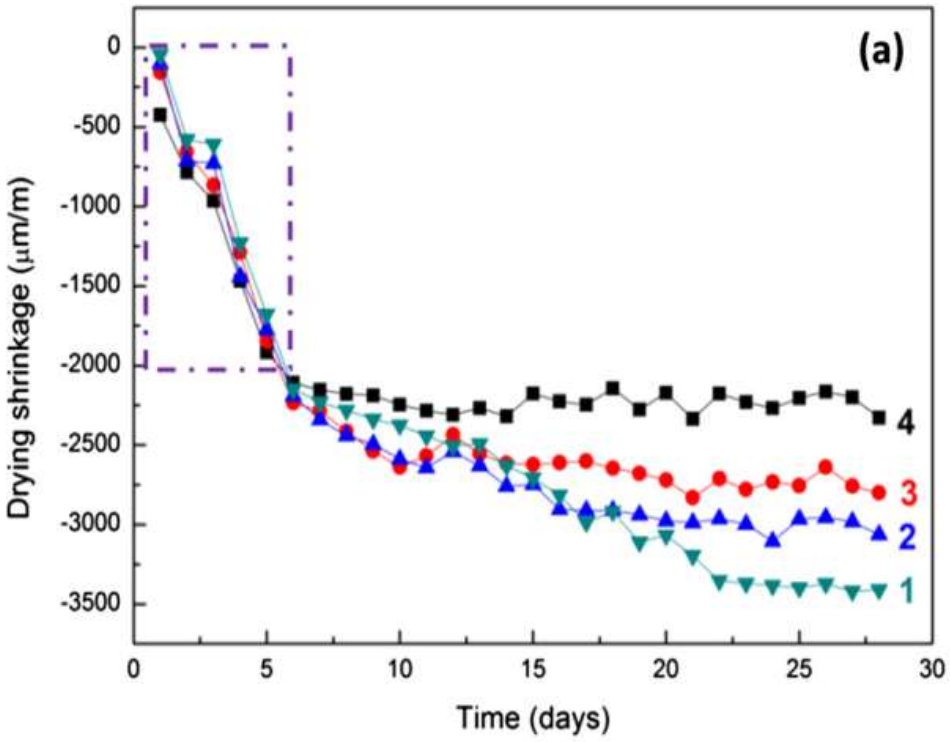
جدول ۲–۳: کارایی و زمان گیرش نمونه‌های حاوی متاکائولن[۲۴]

Concrete mixes	Slump (mm)	Initial setting time (hours)	Final setting time (hours)
OPC	100	5	7.7
MK5	30	6.42	8.82
MK10	20	6.98	9.42
MK15	5	6.45	9.31

لو و همکاران [۲۷] نیز خصوصیات خمیر سیمان در سنین اولیه را بررسی کردند. مشابه تحقیقات سایر محققان، جریان‌پذیری خمیر سیمان با افزایش درصد گرافن اکساید کاهش یافت. در این تحقیق مشخص شد بکارگیری ۰/۰۸ درصد گرافن اکساید موجب بهبود نرخ هیدراتاسیون به گرما می‌شود و این از طریق شتاب یافتن انحلال سیمان رخ داد (جدول ۲–۴). همچنین پایگاه‌های هسته‌زایی بیشتر شده و ریزساختار خمیر سیمان منظم‌تر می‌گردد. به علاوه شکل ۲–۱۶ نشان می‌دهد که، افزودن نانوذرات گرافن اکساید، بافت بتن تازه را متراکم‌تر کرده و افت آن را کاهش می‌دهد.

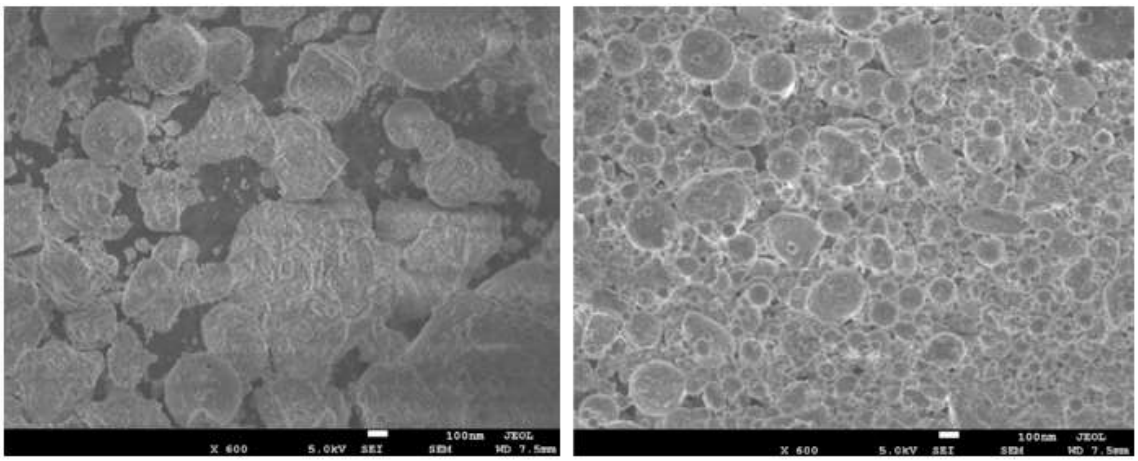
جدول ۲–۴: جریان‌پذیری و زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر سیمان حاوی درصدهای مختلف گرافن اکساید[۲۷]
Fluidity and setting time of GO reinforced cement paste.

No.	GO (wt%)	Fluidity (mm)	Setting time (h.min)	
			initial	final
1	0.00	9.2	3.25	4.45
2	0.02	8.4	2.50	4.28
3	0.04	7.6	2.41	4.01
4	0.08	7.0	2.22	3.44



شکل ۲–۱۶: افت نمونه‌های خمیر سیمانی با درصدهای مختلف گرافن اکساید[۲۷]

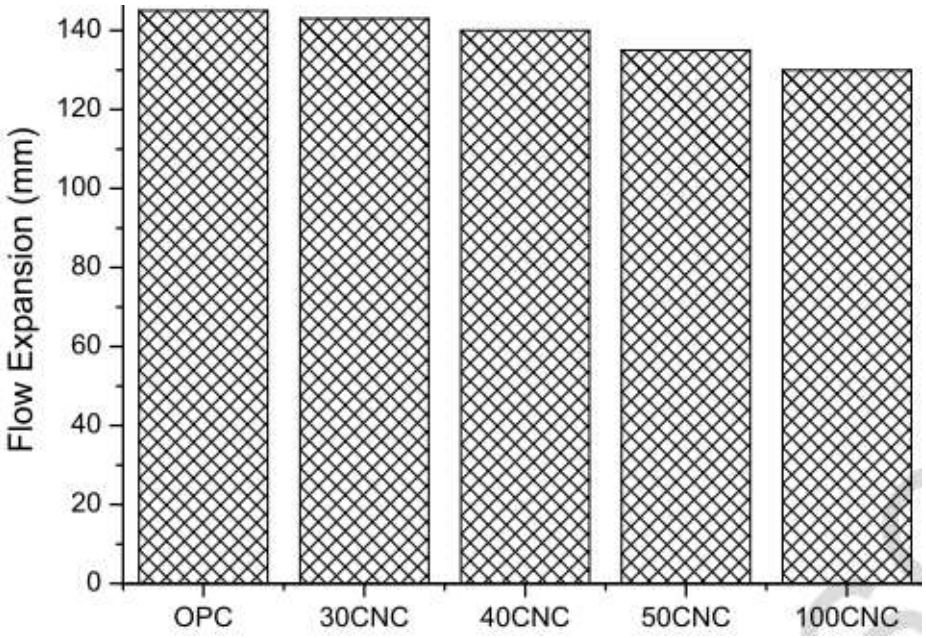
در سال ۲۰۱۸ لیم و همکاران [28] پژوهشی را به‌منظور تولید افزودنی سیمانی در ابعاد نانو با استفاده ضایعات کشاورزی برای تولید بتن پایدار انجام دادند. در این پژوهش از خاکستر سوختن روغن نخل و خاکستر پوسته برنج برای تولید نانومواد کربنی (CNC) استفاده شد. در ادامه تأثیر افزودن CNC به عنوان جایگزین سیمان پرتلند مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش‌هایی به‌منظور بررسی کارایی، واکنش‌های پوزولانی، مقاومت کوتاه‌مدت و بلندمدت صورت پذیرفت. نتایج این پژوهش مشخص ساخت که افزودن ۰/۵ درصد نانو مواد افزودنی سیمانی، موجب افزایش مقاومت کوتاه‌مدت می‌گردد. این در حالی است که افزودن ۱ درصد از این مواد موجب افزایش مقاومت کوتاه‌مدت و نهایی می‌شود. بررسی خصوصیات مقاومتی مشخص ساخت که نمونه حاوی نانو افزودنی حاصل از خاکستر سوختن روغن نفت رفتار مناسب‌تری نسبت نمونه حاوی نانو افزودنی حاصل از خاکستر پوسته برنج دارد. به‌منظور توجیه این نتیجه تصاویر SEM از دو ماده ذکر شده برداشت گردید و در شکل ۲–۱۷ نمایش داده شد. همان گونه که مشاهده می‌شود از دیدگاه ابعاد ذرات و همچنین شکل و گوشه‌دار بودن نانو افزودنی خاکستر پوسته برنج دارای وضعیت مناسب‌تری می‌باشد و در نتیجه واکنش‌پذیری و مقاومت بیشتری را حاصل می‌نماید.



ب الف

شکل ۲–۱۷: تصاویر SEM، الف) نانو افزودنی حاصل از خاکستر سوختن روغن نفت، ب) نانو افزودنی حاصل از خاکستر پوسته برنج [۲۸]

دیگر نتایج این پژوهش مشخص ساخت که جایگزینی سیمان پرتلند با نانومواد کربنی موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود؛ این در حالی است که مقاومت خمشی با جایگزینی سیمان پرتلند با نانومواد کربنی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها گزارش دادند افزودن نانو الیاف به دلیل ایجاد پل‌ها در ابعاد نانو می‌تواند موجب بهبود ریزساختار نمونه حاوی CNA و در نتیجه بهبود مقاومت گردد. نتایج آزمایش‌های روانی بتن به صورت تغییرات گسترش جریان برای نمونه با نسبت‌های جایگزینی CNA به سیمان پرتلند گوناگون درشکل ۲–۱۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲–۱۸ مشاهده می‌گردد، افزایش میزان جایگزینی سیمان توسط CNA، موجب کاهش گسترش جریان می‌شود. دلیل این رویداد می‌تواند کمتر بودن ابعاد CNA در مقایسه با سیمان پرتلند باشد که موجب افزایش واکنش‌پذیری و فعالیت و در نتیجه کاهش کارایی می‌گردد[28].



شکل ۲–۱۸: تغییرات گسترش جریان برای نمونه با نسبت‌های جایگزینی CNA به سیمان پرتلند گوناگون [۲۸]

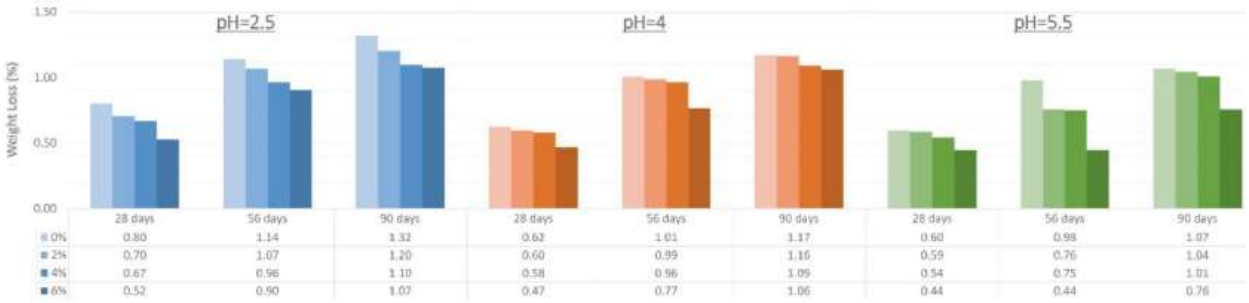
۲-۳-۳ - تغییرات دوام و نفوذپذیری بتن با استفاده از مواد نانو ساختار

برخی از تحقیقات توانسته‌اند با استفاده از روش تزریق الکترومکانیکی نانوذرات بر روی سطح بتن، تراکم بافت آن را افزایش دهند. پنا و همکاران [۲۹] توانستند لایه‌ای به ضخامت ۱/۵ تا ۲ میلیمتر از نانوسیلیکا را به بتن تزریق کنند. فاجاردو و همکاران [۳۰] تاثیر پرکنندگی حفرات و محافظت بتن در برابر کربناسیون یون‌های Si^{+4} را گزارش کرده‌اند. شان و همکاران [۳۱] فرایند تزریق را به کمک یون‌های SiO_3^{-2} انجام دادند؛ زیرا از لحاظ پایداری، بهتر از نانوسیلیکا عمل می‌کنند. بکارگیری چنین موادی و در معرض حوزه الکترومغناطیسی قرار دادن آن‌ها در محل سازه، نیازمند انجام فرایند پیچیده‌ای است. از این رو کلیمنت و همکاران [۳۲]، بهره‌وری این روش را با بکارگیری پوشش گرافیت-خمیر سیمانی به عنوان آنود، افزایش دادند. در عین اینکه بازده این روش ۸۰ درصد در مقایسه با روش‌های معمول بالاتر است، قیمت آن کمتر بوده و دوام آنود[۱] آن بیشتر است. همچنین با هر نوع سطحی از بتن سازگار بوده و نسبت به خصوصیات ناهمگن الکتریکی ناشی از وجود آرماتورها در بافت بتن، کمتر حساسیت از خود نشان می‌دهد.

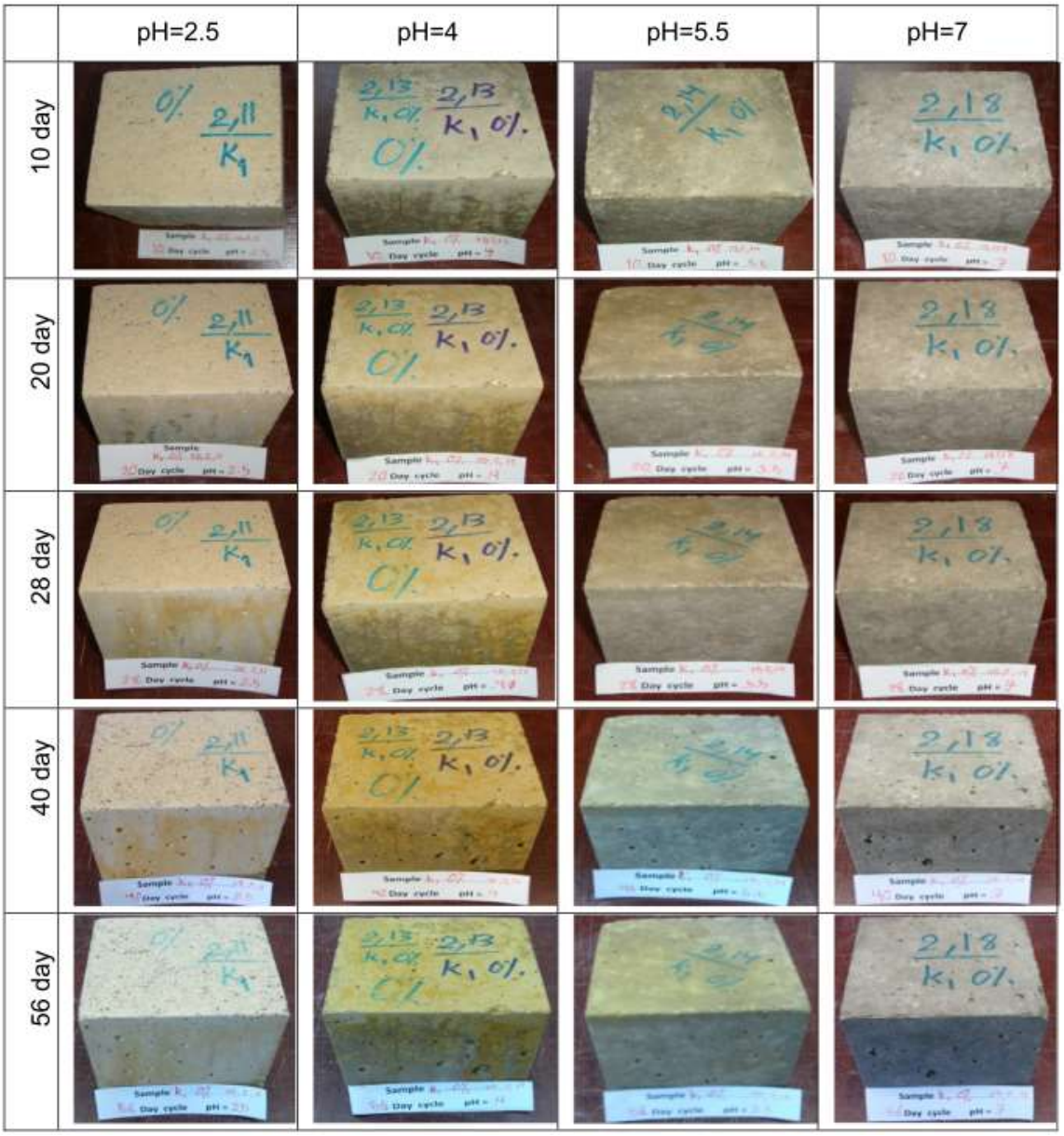
یکی از مشکلات سازه‌های بتنی موجود در نیروگاه‌های تولید برق، قرارگیری در معرض باران‌های اسیدی می‌باشد. مهدی‌خوانی و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۳۳] تأثیر باران اسیدی را بر مقاومت و دوام بتن حاوی نانوسیلیس ارزیابی نمودند. میزان افزودن نانوسیلیس در بتن برابر با ۰ تا ۶ درصد بود. در این پژوهش، کاهش وزن، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن تحت باران‌های اسیدی با PH متفاوت ارزیابی شد. بررسی نتایج مشخص ساخت که در تمامی سنین، بتن حاوی نانوسیلیس در شرایط باران اسیدی، دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس می‌باشد. دلیل این رفتار، بهبود ویژگی‌های ناحیه انتقال و خمیر سیمان و پرشدن حفرات در اثر

[۱] Anode

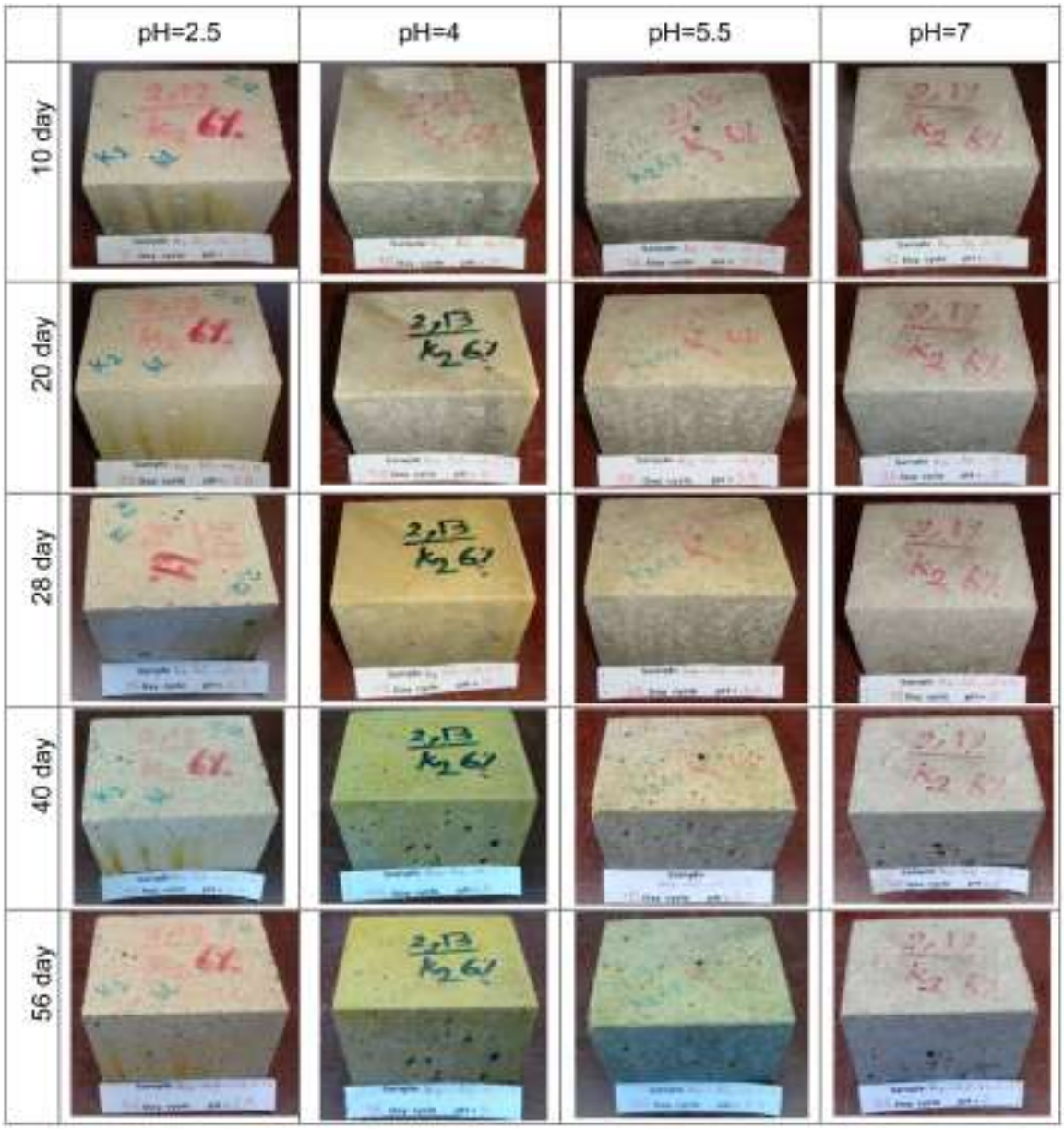
نانوسیلیس می‌باشد. همچنین افزایش PH (در مقادیر پایین) موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. جذب آب نمونه‌ها در اثر افزایش میزان اسیدی شدن باران افزایش می‌یابد. این رفتار به دلیل شسته شدن پیوندها می‌باشد که موجب افزایش منافذ موئینه می‌گردد. از سوی دیگر افزودن نانوسیلیس به دلیل خاصیت ریزپرکنندگی از میزان افزایش جذب آب در اثر افزایش میزان اسیدی بودن باران می‌کاهد. شکل ۲–**۱۹** تغییرات کاهش وزن برای نمونه‌ها با مقادیر متفاوت نانوسیلیس و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون غرق آب شده در محلول‌های اسیدی با PH متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش نسبت وزنی نانوسیلیس به دلیل کاهش نفوذپذیری بتن موجب کاسته شدن از میزان کاهش وزن می‌گردد. باید توجه داشت که افزایش حفرات درون بتن موجب نفوذ راحت‌تر محلول اسیدی به درون ساختار سیمانی می‌شود و در نتیجه میزان شسته‌شدن فرآورده‌های سیمانی افزایش می‌یابد. به‌منظور تأثیر باران با PH متفاوت بر بتن با زمان‌های قرارگیری در شرایط اسیدی گوناگون، تصاویر سطح نمونه‌ها با ۰ و ۶ درصدنانوسیلیس به ترتیب در شکل ۲–**۲۰** و شکل ۲–**۲۱** نمایش داده شده است.



شکل ۲–۱۹: تغییرات میزان کاهش وزن بتن برای نمونه‌ها با مقادیر متفاوت نانوسیلیس و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون، تحت باران‌های اسیدی با مقادیر PH متفاوت [۳۳]



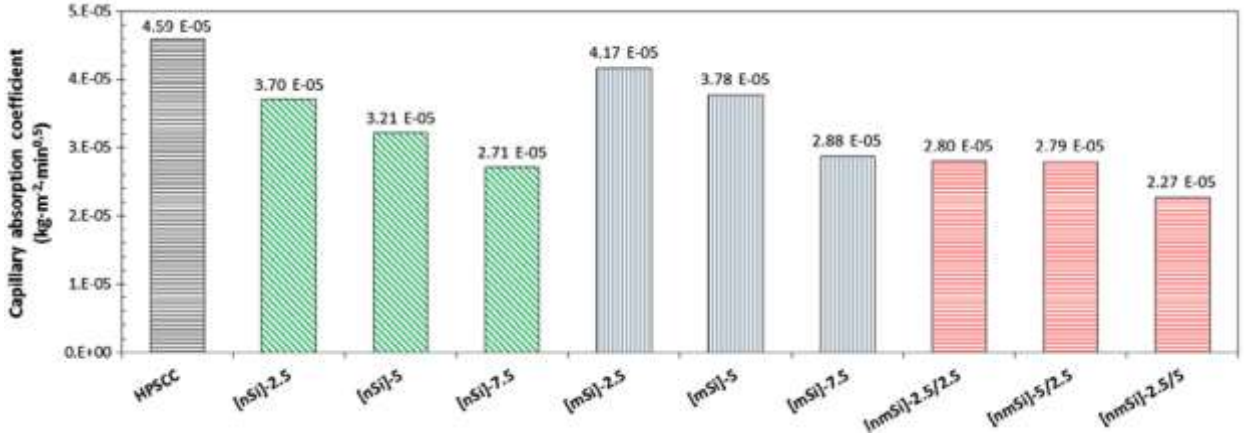
شکل ۲–۲۰: سطح نمونه‌ها فاقد نانوسیلیس تحت تأثیر باران با PH و مدت متفاوت [۳۳]



شکل ۲-۲۱: سطح نمونه‌ها حاوی ۶ درصد نانوسیلیس تحت تأثیر باران با PH و مدت متفاوت [۳۳]

بررسی شکل ۲-۲۰ و شکل ۲-۲۱ مشخص می‌سازد که با افزایش میزان محیط اسیدی، رنگ نمونه‌ها از خاکستری به زرد تغییر می‌کند. از سوی دیگر با افزایش زمان قرارگیری در شرایط اسیدی PH=۲/۵، سطح نمونه‌ها به صورت آشکار دچار فرسایش می‌شود. این در حالی است که برای نمونه قرار گرفته در سایر شرایط، میزان فرسایش نمونه‌ها قابل چشم‌پوشی می‌باشد. مقایسه شکل ۲-۲۰ و شکل ۲-۲۱ مشخص می‌سازد که میزان فرسایش سطحی نمونه‌ها در اثر افزودن ۶ درصد نانوسیلیس کاهش می‌یابد. این رفتار می‌تواند به دلیل بهبود ویژگی‌های ناحیه انتقال باشد که از شسته شدن محصولات سیمانی و خردگی بتن جلوگیری می‌نماید. از سوی دیگر به دلیل کاهش نفوذپذیری بتن حاوی نانوسیلیس، سیال اسیدی به میزان کمتری در نمونه نفوذ کرده و در نتیجه مقاومت خردگی افزایش می‌یابد [۳۳].

ماسانا و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۳۴] تأثیر نانوسیلیس و میکروسیلیس را بر دوام بتن خودتراکم دارای عملکرد بالا ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن مواد پوزولانی موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. بیشینه افزایش مقاومت در اثر افزودن ۲/۵ درصد میکرو سیلیس و نانوسیلیس حاصل می‌شود. به‌منظور دستیابی به مقاومت بیشتر در زمان کوتاه‌تر می‌توان از مقادیر بیشتری از نانوسیلیس در مقایسه با میکروسیلیس استفاده نمود. همچنین میزان تخلخل بتن در اثر افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس کاهش چشمگیری می‌یابد. اما میکروسیلیس تأثیر بیشتری در کاهش حفرات بتن دارد. این در حالی است که میکروسیلیس موجب پرشدن حفرات با اندازه بزرگ می‌گردد و نانوسیلیس بیشتر حفرات با اندازه کوچک را پر می‌نماید. شکل ۲-**۲۲** ضریب جذب موئینه را برای نمونه‌های حاوی مقادیر میکروسیلیس و نانوسیلیس گوناگون نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه-های نانوسیلیس دارای ضریب جذب موئینه کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشند. همچنین ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس به دلیل پر نمودن میکرو حفرات و نانوحفرات موجب کاهش ضریب جذب موئینه می‌گردد. کاهش میزان ضریب جذب موئینه باعث می‌شود تا نمونه در مقابل سیکل‌های یخ‌زدگی مقاومت بهتری از خود نشان دهد. در نهایت می‌توان گفت استفاده توام از نانوسیلیس و میکروسیلیس موجب دستیابی به رفتار بهینه از دیدگاه مقاومت و دوام را نتیجه می‌دهد [۳۴].



شکل ۲-۲۲: تغییرات ضریب جذب موئینه برای نمونه‌های حاوی مقادیر میکروسیلیس و نانوسیلیس گوناگون به صورت تنها و توام [۳۴]

ساید و همکاران[۱۰] با انجام آزمایش نفوذ سریع یون کلر دریافتند نرخ عبور و عمق نفوذ فیزیکی در نمونه‌های بتنی حاوی نانوسیلیس بسیار کاهش می‌یابد. لذا پیشنهاد کردند بکارگیری مقادیر اندکی از نانوسیلیس، هدایت-پذیری را کاهش داده و بافت تخلخل بتن را به خوبی ترمیم می‌کند. نتایج آزمایش MIP در همین تحقیق نشان داد که مجموع حفرات ترکیب‌های حاوی نانوسیلیس به شدت کاهش یافته‌اند. بیشترین تاثیر در بهبود ساختار بافت را بکارگیری ۶ درصد نانوسیلیس به همراه داشت.

در تحقیق محسنی و همکاران [۳۵] بر روی دوام نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی نانوذرات سیلیس و تیتانیوم، نمونه حاوی ۵٪ مجموع نانوسیلیس و تیتانیوم (هر کدام ۲,۵٪ وزنی خمیر سیمان) کمترین مقدار نفوذ یون کلر را داشت. به علاوه، این نمونه به همراه نمونه دیگر حاوی ۳٪ مجموع نانوسیلیس، تیتانیوم و آلومینیوم (هر کدام۱٪ وزنی خمیر سیمان) بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی و در نتیجه کمترین احتمال خوردگی را داشتند.

ژو و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۳۶] تأثیر افزودن درصدهای کم نانو مواد را بر دوام بتن در شرایط محیطی گوناگون ارزیابی نمودند. نانو مواد به کار رفته شامل نانوسیلیس و نانو تیتانیوم بود و رفتار بتن تحت اثر مواد شیمیایی گوناگون و دوره‌های یخبندان-ذوب و خشک-ترشدن بررسی گردید. در این پژوهش آزمایش‌های کاهش وزن، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته دینامیکی انجام شد. نتایج ریزساختاری نشان می‌دهد که محلول‌های سدیم کلرید و استات پتاسیم موجب اثرات زیان‌باری می‌گردد. از سوی دیگر افزودن نانومواد به میزان کم به دلیل خاصیت ریزپرکنندگی و متراکم نمودن ناحیه انتقال و خمیر سیمان، موجب بهبود دوام بتن در شرایط محیطی گوناگون می‌شود. از سوی دیگر تأثیر نانوسیلیس بر بهبود دوام بتن بیشتر از نانو تیتانیوم می‌باشد. مشاهدات این پژوهش نشان داد که افزودن نانوسیلیس و نانو تیتانیوم به اندازه ۰/۱ درصد وزن سیمان، موجب بهبود قابل قبول مقاومت و دوام بتن در شرایط محیطی گوناگون می‌گردد.

آرِل و توماس [۳۷] اثر عوامل خورنده سولفاتی بر دوام نمونه‌های حاوی افزودنی‌های نانوسیلیس، میکروسیلیس، خاکستر بادی و متاکائولن را بررسی کردند. تاثیر سولفات به دو شکلِ داخلی یعنی استفاده از ماسه‌های حاوی یون‌های سولفات و خارجی یعنی قراردادن نمونه‌ها در محلول‌های منیزیم سولفات و سدیم سولفات دیده شد. بررسی نتایج دوام نمونه‌ها نشان داد نانوسیلیس به شکل متوسط بین ۲ تا ۱۰٪ بهتر از نمونه‌های حاوی میکروسیلیس در مقابل عوامل شیمیایی مقاومت می‌کند. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌ها با جایگزینی ۸٪ از سیمان با نانوسیلیس، در مقایسه با جایگزینی سیمان با میکروسیلیس، خاکستر بادی و متاکائولن به ترتیب ۱۵٪، ۹۱٪ و ۳۴٪ بهبود داشتند. در واقع به شکل کلی نانوسیلیس و میکروسیلیس، بسیار موثرتر از سایر مواد در مقابل حملات سولفاتی داخلی و خارجی عمل می‌کنند.

نظری و ریاحی در تحقیقی دیگر میزان جذب آب ملات‌های بتنی حاوی نانوذرات را بررسی کردند. آزمایشات نشان داد افزایش مقدار نانوذرات تیتانیوم و جایگزینی آن با حداکثر ۲٪ سیمان موجب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود (جدول ۲-۵). همانگونه که قبلا نیز در تحقیقات محققان دیگر نیز مشاهده شد، نانوذرات تیتانیوم می‌توانند ریزساختار بافت بتن را متراکم سازند و بستری برای هسته‌زایی بیشتر باشند [۳۸].

جدول ۲-۵: درصد نفوذپذیری بتن‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم در مقایسه با نمونه مرجع[۳۸]

Mix designation	TiO_2 nanoparticles (%)	7 days	28 days	90 days
C0	0	3.30	5.60	4.80
N1	0.5	4.09	2.29	0.88
N2	1.0	4.39	2.57	1.12
N3	1.5	4.69	2.74	1.34
N4	2.0	5.26	2.94	1.63

در بررسی خصوصیات دوام و خوردگی، بای و همکاران [۳۹] در آزمایشات خود مشاهده کردند که نفوذ کلراید در بتن‌های تقویت شده با متاکائولن در مقایسه با بتن‌های معمولی کاهش زیادی داشته‌اند.

کورارد و همکاران [۴۰] نرخ انتشار کلراید ملات‌های حاوی ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد متاکائولن را بررسی کردند. ضریب ظاهری انتشار ملات در بازه ۵ تا ۱۵ درصد افزایش یافت. با این حال، در نمونه حاوی ۲۰ درصد متاکائولن حتی پس از ۱ سال نیز هیچگونه انتشاری رخ نداده است. بنابراین برای نواحی‌ای که فولاد در معرض خوردگی قرار می‌گیرد پوشش بتن حاوی متاکائولن می‌تواند میزان آسیب پذیری را کاهش دهد.
پون و همکاران [۴۱] در آزمایش دیگری نرخ نفوذ یون کلر را برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۵ و برای مقدار ۱۰ و ۲۰ درصد متاکائولن اندازه‌گیری کردند. مطابق نتایج جدول ۲-۶ در هر دو مقدار متاکائولن، نرخ نفوذ کلراید در نمونه‌ها کاهش یافته است. بهترین نتیجه برای نسبت آب به سیمان ۰/۳ در نمونه حاوی ۱۰ درصد متاکائولن و برای نسبت ۰/۵ در نمونه حاوی ۲۰ درصد متاکائولن مشاهده شد. در بحث مقاومت در برابر سولفات، نتایج آزمایشات خطیب و وایلد [۴۲] و همچنین روی و همکاران [۴۳] نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات متاکائولن به ملات سیمانی مقاومت شیمیایی این ترکیب‌ها را در مقایسه با نمونه‌های مرجع بالا می‌برد.

جدول ۲-۶: نفوذ کلراید در بتن‌های حاوی افزودنی و بتن مرجع[۴۱]

Series	w/b ratio	Mix	Total charge passed (Coulombs)			
			3 days	7 days	28 days	90 days
1	0.30	Control	2461	2151	1035	931
		5% MK	1327	1244	862	646
		10% MK	417	347	199	135
		20% MK	406	395	240	124
2	0.50	Control	5312	4054	2971	2789
		5% MK	4215	3765	2079	1065
		10% MK	1580	1247	918	752
		20% MK	751	740	640	580

طبق تحقیقات الاخراس [۴۴] مقاومت بتن در مقابل سولفات با افزایش درصد متاکائولن افزایش می‌یابد. نمونه‌های بتنی ساده برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۶ به ترتیب مقادیر گسترش سولفات ۰/۴ و ۰/۴۵ درصد داشتند. با افزودن متاکائولن به مقدار ۱۰٪، مقدار گسترش سولفات برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۶ به ترتیب به ۰/۱ و ۰/۱۳ درصد و برای ۱۵٪ افزودن متاکائولن، مقدار گسترش سولفات برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۶ به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۱ درصد اندازه گیری شد.
تحقیقات بروکس و همکاران [۲۴] نشان می‌دهد در روزهای اولیه عمر بتن با افزایش متاکائولن، مقدار افت کاهش می‌یابد (جدول ۲-۷). با این حال مطابق جدول ۲-۸، در دراز مدت افت بتن‌ها با افزایش مقدار متاکائولن افزایش می‌یابد. افت ۲۰۰ روزه بتن حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن حدود ۹۱٪، ۸۰٪ و ۵۶٪ افزایش یافته است (جدول ۲-۸). از طرفی متاکائولن خزش بتن را به خصوص در مقادیر جایگزینی زیاد با سیمان معمولی، کاهش می‌دهد. دلیل این اتفاق مربوط به متراکم شدن ساختار بتن در اثر خاصیت پرکنندگی متاکائولن و بهبود ریزساختار فصل مشترک خمیر سیمان و سنگدانه‌ها ناشی از فعالیت پوزولانی متاکائولن و افزایش مقدار فاز هیدراته سیمان است.

جدول ۲–۷: مقدار افت خود به خود و افت کل بتن [۲۴]

	OPC	MK5	MK10	MK15
Total shrinkage from initial set (10^{-6})	861	713	618	516
Total shrinkage from 24 h (10^{-6})	558	499	455	410
Total autogenous shrinkage from initial set (10^{-6})	445	485	419	327
Autogenous shrinkage 24 h (10^{-6})	142	271	256	221
% of A.S. – T.S. from initial set	52	68	68	63
% of A.S. – T.S. from 24 h	25	54	56	54
Weight loss of the exposed specimens (%)	0.85	0.67	0.73	0.76

جدول ۲–۸: مقدار خزش بتن پس از ۲۰۰ روز[۲۴]

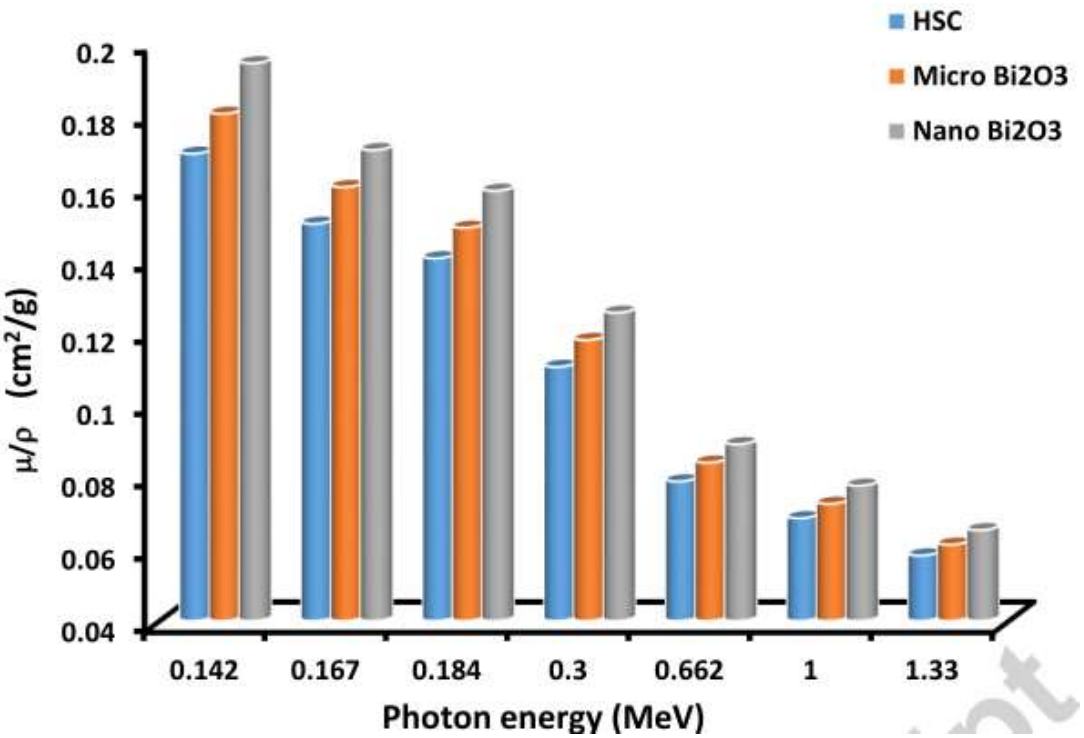
Concrete mixture	Creep (10^{-6})		Stress (MPa)	Specific Creep (10^{-6}/MPa)		Drying creep (10^{-6}/MPa)
	Dry	Sealed		Dry	Sealed	
OPC	358	285	13.9	25.8	20.5	5.3
MK5	312	235	16.8	18.5	14.0	4.5
MK10	201	126	17.7	11.3	7.2	4.1
MK15	171	115	17.9	9.5	6.4	3.1

نوچایا و چاپیاینک [۴۵] در تحقیق خود تخلخل نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی را بررسی کردند. نتایج آزمایش آن‌ها بیانگر آن است که استفاده از نانولوله‌های کربنی چندجداره، تخلخل حجم نمونه سیمانی را کاهش می‌دهد. بکارگیری نانولوله کربنی، تخلخل را از ۲۷/۲ درصد برای نمونه مرجع به اعداد ۲۵/۵ و ۲۲/۷ درصد به ترتیب برای ۰/۵ و ۱ درصد وزنی این الیاف رساند. لازم به ذکر است آزمایشات لی و همکاران [۴۶] بر روی تخلخل خمیرهای سیمانی نتایج مشابهی از نظر کاهش تخلخل به همراه داشته است. در نتیجه حضور این الیاف توانسته حفرات ساختار خمیر سیمان را پر کرده و بافت را متراکم سازد.

یکی از مشکلات نیروگاه‌های اتمی تولید برق، تشعشعات هسته‌ای می‌باشد که باید با ارائه تمهیداتی با آن مقابله نمود. مصباحی و غیاثیان (سال ۲۰۱۸) [47] تأثیر استفاده از میکرو مواد و نانو مواد را بر پتانسیل مقابله بتن در برابر تشعشعات پرتوهای نوترون و گاما ارزیابی نمودند. در این پژوهش نمونه‌های حاوی میکرو مواد، نانو مواد و عادی در معرض تشعشعات قرار گرفت و میزان جذب تشعشعات ارزیابی شد. بررسی نتایج مشخص ساخت که استفاده از میکرو مواد و نانو مواد در بتن موجب افزایش پتانسیل جذب تشعشعات می‌گردد. از سوی دیگر نانو مواد در مقایسه با میکرو مواد به دلیل خصوصیات ریزپرکنندگی و ایجاد هسته‌های پایدار برای فرآورده‌های هیدراسیون موجب کاهش بیشتر جذب تشعشعات می‌گردد.

تکین و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۴۸] تأثیر افزودن WO_3 و Bi_2O_3 در ابعاد میکرو و نانو را بر میزان محافظت در برابر تشعشعات گاما بررسی نمودند. نتایج این پژوهش به صورت میزان جذب امواج برای نمونه‌ها حاوی Bi_2O_3 با ابعاد میکرو و نانو به ازای انرژی‌های متفاوت فوتون در شکل ۲–۲۳ نمایش داده شده است. شکل ۲–۲۳ مشخص می‌سازد که افزودن Bi_2O_3 در ابعاد میکرو و نانو در تمامی انرژی‌های فوتون موجب افزایش جذب امواج می‌گردد.

از سوی دیگر افزودن نانو مواد تأثیر بیشتری بر پتانسیل جذب تشعشعات دارد. دیگر نتایج این پژوهش مشخص ساخت که تأثیر افزودن Bi_2O_3 در میزان جذب تشعشعات گاما بیشتر از افزودن WO_3 می‌باشد.



شکل ۲-۲۳: میزان جذب امواج برای نمونه‌ها حاوی Bi_2O_3 با ابعاد میکرو و نانو به ازای انرژی‌های متفاوت فوتون‌ها [۴۸]

۲-۳-۴ - تغییرات مقاومت مکانیکی بتن با استفاده از مواد نانو ساختار

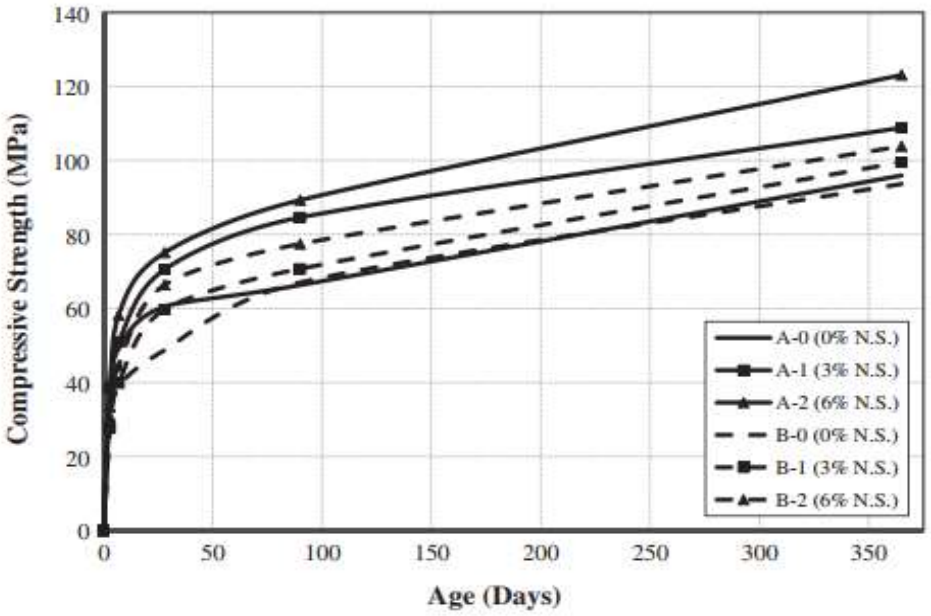
تحقیقات جو و همکاران [۴۹] بر روی مقاومت مکانیکی بتن‌های پر مقاومت حاوی افزودنی‌های سیلیسی نشان داد که مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن‌های حاوی نانوسیلیکا از مقادیر متناظر مقاومت فشاری برای بتن‌های حاوی سیلیکافوم بیشتر است. در واقع مشخص شده که نانوذرات سیلیس در بهبود مقاومت بتن بهتر و به صرفه‌تر از ماده سیلیکافوم عمل می‌کنند. همچنین نحوه رشد و تغییرات ریزساختار بتن توسط میکروسکوپ‌های الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات سیلیکا نه تنها به عنوان پر کننده در بهبود ساختار عمل می‌کنند، بلکه به نوعی شروع‌کننده فعالیت‌های پوزولانی بتن نیز به شمار می‌روند.

استفاده از نانوسیلیکا، بکارگیری مواد بازیافتی در طرح اختلاط بتن را تسهیل می‌کند. محمد و همکاران [۵۰] در تحقیقی بر روی بتن حاوی لاستیک‌های بازیافتی از تایر خودرو، دریافتند مقاومت فشاری این بتن‌ها در اثر استفاده از نانوسیلیکا افزایش می‌یابد و این امکان را می‌دهد تا بدون کاهش مقاومت، مقدار بیشتری از لاستیک در بتن استفاده شود. همچنین مقدار سختی بتن نیز هم‌اندازه بتن عادی باقی خواهد ماند.

لی و همکاران [۵۱] نانوسیلیس و نانوذرات کربنات کلسیم را برای استفاده مجدد از مواد بتنی بازیافتی در طرح اختلاط بتن جدید بکار گرفتند.

هاربک و همکاران [۵۲] با بکارگیری نانوذرات شیشه بازیافتی به دلیل مقادیر بالای سیلیکات آن، توانستند بتنی با مقاومت فشاری و درجه نفوذپذیری مشابه بتن مقاومت بالا حاوی سیلیکافوم دست پیدا کنند. در تحقیقی دیگر، آلی و همکاران [۵۳] ملات‌هایی حاوی نانوسیلیس و میکروذرات تهیه کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد حضور نانوذرات سیلیس در طرح اختلاط، کار با ملات را در حضور مقادیر زیاد ذرات شیشه به عنوان جایگزینی برای سیمان، راحت‌تر می‌کند. نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق، حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه و ۳ درصد نانوسیلیس بودند که در نهایت موجب افزایش ۳۱ درصدی مقاومت فشاری و ۵۵ درصدی مقاومت خمشی ملات‌های سیمانی شد.

در تحقیق ساید وهمکاران [۱۰]، تغییر مقاومت مکانیکی نمونه‌های حاوی سیلیکافوم تا ۶ درصد وزنی سیمان، همگی روند افزایشی داشته است. مطابق شکل ۲-۲۴، مقاومت ۲۸ روزه فشاری نمونه بتنی حاوی نانوسیلیس به همراه ۳۰ درصد خاکستر بادی تیپ F، به شدت افزایش یافت. این موضوع نشان می‌دهد ماهیت نرخ آرام واکنش بتن حاوی خاکستر بادی تیپ F به وسیله افزودن نانوسیلیس قابل کنترل است. ارزیابی BSEM در این گزارش نشان داد درجه هیدراتاسیون نمونه‌های حاوی سیلیکافوم به همراه خاکستر بادی، نسبت به نمونه‌های حاوی خاکستر بادی تنها بالاتر است. این نتیجه بیانگر آن است که تاخیر در رشد ریزساختار و دوام بتن حاوی خاکستر بادی نوع F را می‌توان با افزودن مقادیر اندک نانوسیلیس بی‌اثر کرد. شایان ذکر است که نانو سیلیس به دلیل واکنش‌پذیری بالا و فعالیت زیاد، به سرعت در واکنش‌ها شرکت می‌نماید و موجب تسریع واکنش‌های هیدراتاسیون می‌گردد. بنابراین موجب افزایش دمای هیدراتاسیون می‌گردد؛ از این رو احتمال دارد در پروژه‌های عمرانی بتن حجیم مانند سدسازی مشکلاتی را به وجود آورد. استفاده از خاکستر بادی با کاهش سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون می‌تواند یک حالت بینابینی به وجود آورد؛ از این رو لزوم استفاده توام از این دو ماده توصیه می‌گردد.



شکل ۲-۲۴: روند تغییر مقاومت فشاری بتن‌های حاوی نانوسیلیس؛ نمونه‌های A بدون خاکستر بادی و نمونه‌های B حاوی خاکستر بادی [۱۰]

جلال و همکاران [۵۴] ویژگی‌های مکانیکی، رئولوژیکی، کارایی و ریزساختاری بتن‌های پرمقاومت خود تحکیم‌یافته حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس را به منظور جایگزینی با بخشی از سیمان پرتلند بررسی کردند. مقادیر مختلف ۱۰٪ میکروسیلیس، ۲٪ نانوسیلیس و ترکیبی از این دو تحت آزمایش قرار گرفت. نسبت آب به سیمان ثابت و محتوای خمیرهای چسبنده متفاوت درنظر گرفته شد. آزمایشات نشان دادند که جایگزینی ۲٪ نانوسیلیس در مخلوط‌های دوجزئی، مقاومت فشاری را برای مقدار خمیر ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و برای مقادیر ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۴۵٪، ۵۵٪، ۷۰٪ و ۷۳٪ افزایش می‌دهد. به منظور جلوگیری از وقوع کلوخه‌شدگی در اثر استفاده زیاد از نانوسیلیس، استفاده بیش‌تر از ۱۰٪ آن پیشنهاد نمی‌گردد. کو و همکاران [۵۵] مقدار ۲٪، کینگ و همکاران [۱۳] مقدار ۳٪ و برخی دیگر حتی مقدار ۶٪ را پیشنهاد می‌دهند. با این حال این نتایج متاثر از عوامل زیادی مثل شرایط مراقبت، نسبت آب به سیمان، اندازه نانوذرات، افزودنی‌های شیمیایی و سایر عوامل است که همین موضوع، معرفی یک عدد خاص به عنوان درصد بهینه را دشوار می‌سازد[۵۶].

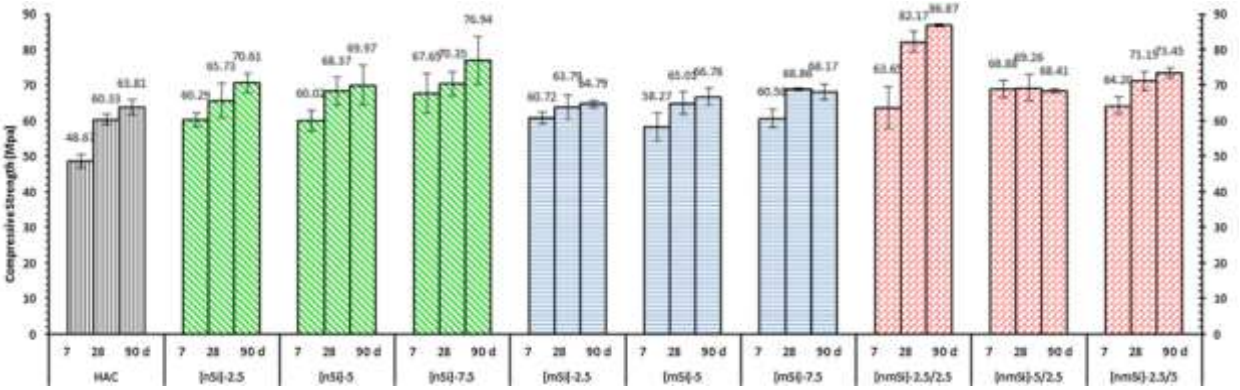
محسنی و همکاران [۳۵] تاثیر افزودن نانوذرات مختلفی از جمله نانوسیلیس را بر خواص مکانیکی و دوام بتن خودمتراکم حاوی خاکستر بادی بررسی کردند. نانوذرات در سه مقدار ۱٪، ۳٪ و ۵٪ وزنی خمیر چسباننده به مخلوط اضافه شدند و درصد خاکستر بادی استفاده شده در تمامی طرح‌های اختلاط مقدار ثابت ۲۵٪ وزنی سیمان بود. نتایج آزمایشات در بخش مقاومت مکانیکی نشان داد بالاترین مقاومت فشاری بتن با افزودن ۳٪ نانوسیلیس حاصل می‌شود. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری برای این نمونه‌ها در زمان‌های اولیه (۷ و ۱۴ روزه) اتفاق افتاد.

برخلاف اکثر تحقیقات که در آن‌ها افزودن نانوسیلیس موجب بهبود مقاومت مکانیکی بتن می‌شد، تحقیقات رائو و همکاران [۵۷] بر روی بتن‌های خودمتراکم نشان می‌دهد با افزودن نانوسیلیس، مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها کاهش می یابد. همچنین این کاهش مقاومت با افزایش مقدار درصد نانوذرات، بیشتر شده است. با این حال، طبق پیشنهاد محققان این طرح، دلیل این کاهش مقاومت را باید در نحوه پراکنش نانوذرات جستجو کرد و از این رو پیشنهاد شده تا تاثیر پراکنش نانوذرات بر مقاومت مکانیکی با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد.

در گزارش آرل و توماس[۳۷] که در آن اثر جایگزینی بخشی از سیمان با نانوسیلیس و میکروسیلیس بر مقاومت مکانیکی بررسی شد، بالاترین مقاومت فشاری بتنی با درنظرگیری ۴٪ نانوسیلیس بدست آمد. همچنین بیشترین مقاومت خمشی با جایگزینی ۱۳٪ از سیمان با میکروسیلیس حاصل شد.

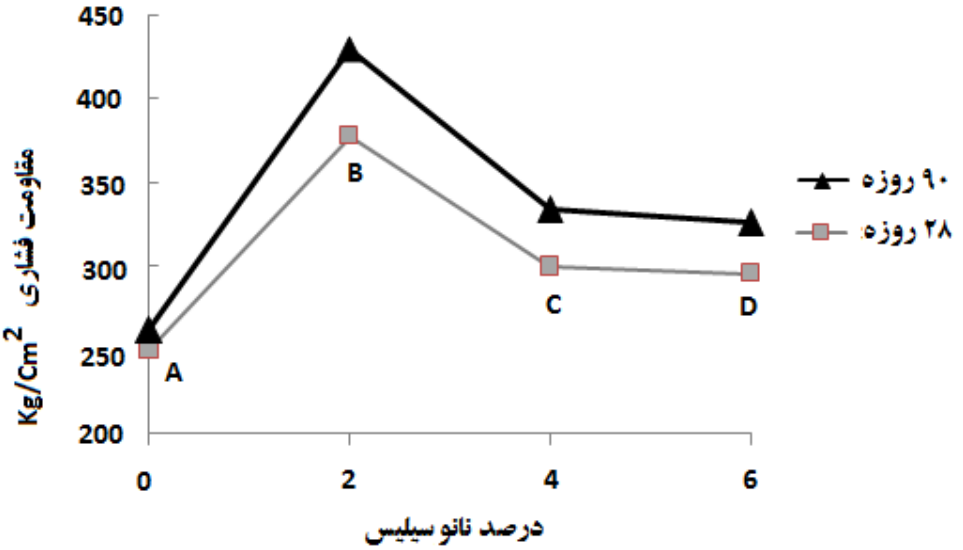
برنال و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۱۹] تأثیر افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس به صورت تنها و توام، بر رفتار مکانیکی و بتن خودتراکم تازه را ارزیابی نمودند. در این پژوهش آزمایش‌های جریان‌پذیری، قیف، جعبه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و ریزساختاری (مواد هیدراسیون) انجام شد. درصدهای مواد افزودنی شامل ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد بود. همچنین نسبت‌های استفاده توام از نانوسیلیس و میکروسیلیس ۰ به ۱۰۰، ۲۵ به ۷۵، ۵۰ به ۵۰، ۷۵ به ۲۵ و ۱۰۰ به ۰ درصد بود. همان‌گونه که در شکل ۲-**۲۵** ملاحظه می‌شود افزودن نانوسیلیس و میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت بتن می‌گردد. همچنین به دلیل کمتر بودن ابعاد نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس و در نتیجه افزایش فعالیت و واکنش‌پذیری آن، بتن حاوی نانوسیلیس دارای مقاومت بیشتری در سنین ابتدایی می‌باشد. همچنین بیشینه مقاومت بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ازای افزودن توام ۲/۵ درصد نانوسیلیس و ۲/۵ درصد میکروسیلیس حاصل شد. این رفتار می‌تواند به دلیل پرشدن میکروحفرات و نانوحفرات در

اثر استفاده توام از این افزودنی‌ها باشد. از سوی دیگر بیشینه مدول الاستیسیته بتن به‌ازای افزودن ۲/۵ درصد نانوسیلیس و ۵ درصد میکروسیلیس حاصل شد.

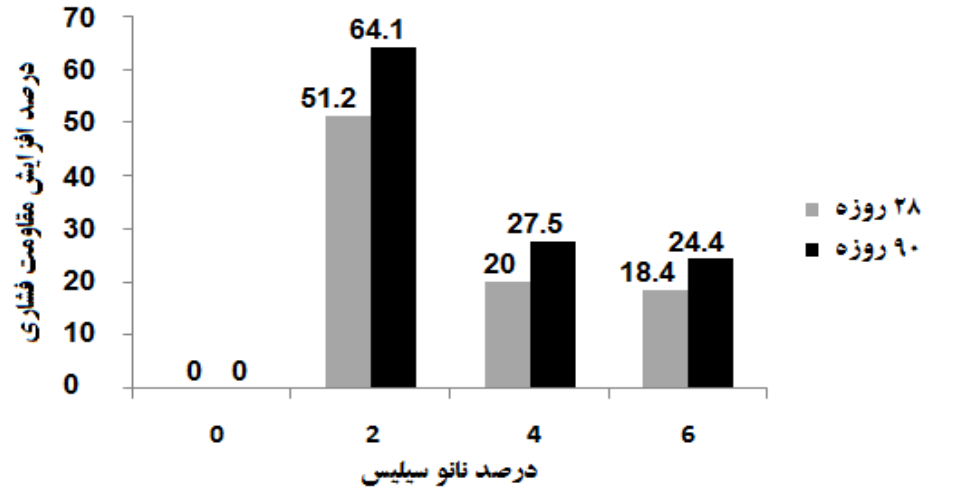


شکل ۲–۲۵: مقاومت فشاری بتن حاوی مقادیر افزودنی (نانوسیلیس و میکروسیلیس) و زمان عمل‌آوری گوناگون (۷، ۲۸ و۹۰ روز) [۱۹]

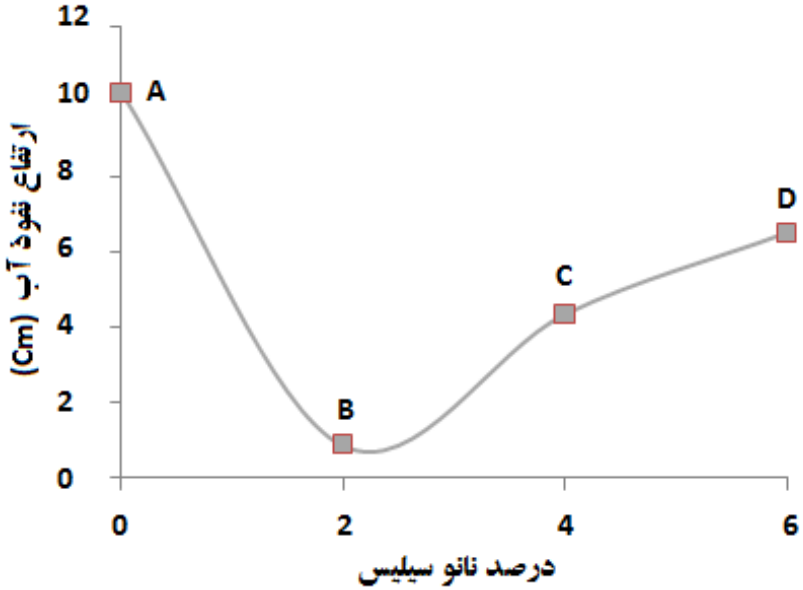
بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن توسط محمدی و سیف اللهی نشان می‌دهد که افزودن نانو سیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه می‌شود. با افزایش نانو سیلیس بیشتر از ۲ درصد، مقاومت فشاری با شیب کمتری افزایش می‌یابد. انتظار می‌رود در نسبت‌های بالاتر از ۶ درصد مقاومت‌های فشاری کاهش یابد. علت این رفتار را می‌توان چنین توجیه نمود که نانو سیلیس به عنوان مکمل ریزدانه‌ها در مخلوط، منافذ سنگدانه‌ها و فضاهای خالی را پرکرده و سبب ایجاد بتنی همگن و متراکم می‌شود. این مسئله موجب کاهش حفره‌ها و افزایش مقاومت فشاری به سبب اتصال بهتر دانه‌های سنگی با ملات و همچنین اتکای سنگدانه‌ها به یکدیگر می‌شود. ضمنا افزایش مقدار نانو سیلیس در مخلوط، منجر به تراکم بهتر نمونه‌ها و بهبود غلتک‌پذیری شده که در نهایت این عوامل سبب می‌شوند وزن مخصوص نیز افزایش یابد. علت کاهش مقاومت فشاری از ۶ درصد به بعد را می‌توان چنین عنوان کرد که با افزایش نانو سیلیس در مخلوط، حفره‌ها و فضاهای خالی بین سنگدانه‌ها پر می‌شود و مقدار نانو سیلیس، اضافه بر حجم فضاهای مذکور در بین سنگدانه‌ها قرار می‌گیرد و به صورت روان‌کننده عمل می‌کند. همچنین از تراکم کامل و نزدیک شدن دانه‌های سنگی به یکدیگر ممانعت می‌کند که عدم تراکم کافی نمونه‌ها در این حالت سبب کاهش وزن مخصوص و به تبع آن کم شدن مقاومت فشاری می‌شود. بنابراین جایگزینی درصدی از نانو سیلیس به جای سیمان در مخلوط‌های بتن غلتکی موجب بهبود خواص مفید بتن مانند مقاومت فشاری و نفوذپذیری می‌شود. برای مثال مصرف دو درصد وزنی نانو سیلیس به جای سیمان در مخلوط، سبب افزایش مقاومت فشاری به میزان ۵۲ درصد و کاهش نفوذپذیری به میزان ۹۰ درصد می‌شود. با استفاده از نانو سیلیس، غلتک‌پذیری بتن غلتکی بهبود یافته و می‌توان به تراکم بهتر و درنتیجه وزن مخصوص و مقاومت فشاری بیشتر رسید. استفاده از نانو سیلیس به جای سیمان در مخلوط‌های بتن غلتکی به میزان بیش از دو درصد، سبب کاهش مقاومت فشاری بتن و افزایش نفوذپذیری آن می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این طرح اختلاط با این مقدار نانوسیلیس هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ خواص مقاومتی بهتر است؛ درصد افزایش در مقاومت فشاری در اکثر نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های ۹۰ روزه بیشتر است (شکل ۲–۲۶ تا شکل ۲–۲۸) [۵۸].



شکل ۲–۲۶: تاثیر میزان نانو سیلیس بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عمر ۲۸ و ۹۰ روز [۵۸]



شکل ۲–۲۷: تاثیر میزان نانو سیلیس بر درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عمر ۲۸ و ۹۰ روز[۵۸]



شکل ۲–۲۸: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیس بر میزان نفوذ آب در نمونه‌های بتنی[۵۸]

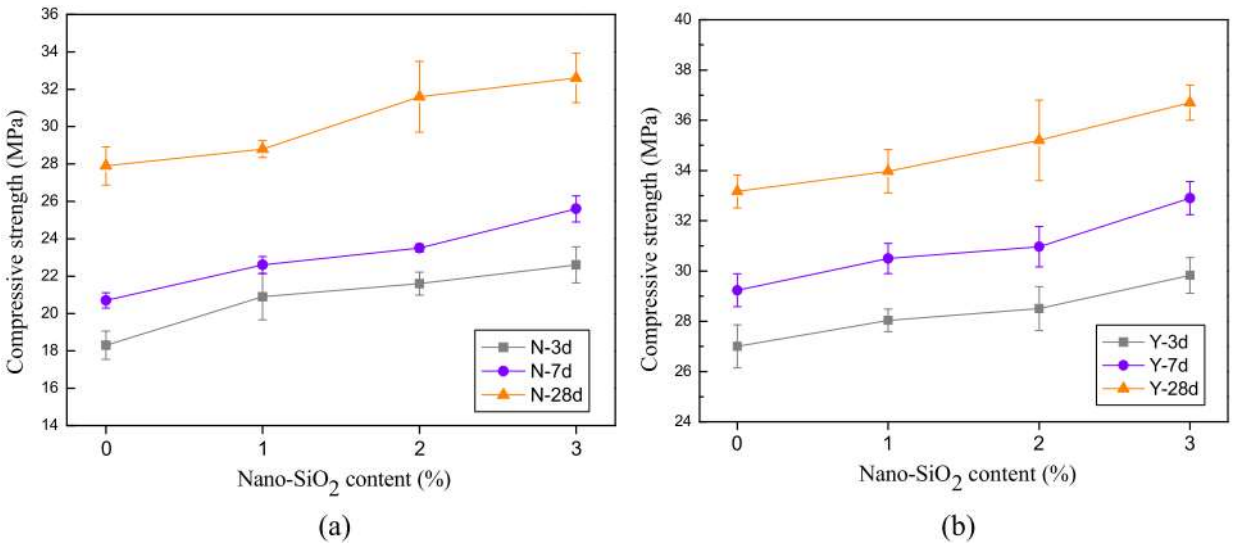
در پژوهشی طریقت و دریجانی به بررسی بهبود خواص مکانیکی بتن پلاستیک و کاهش نفوذپذیری آن با استفاده از نانوسیلیس پرداختند. بتن پلاستیک به عنوان گونه‌ای پر کاربرد درآب‌بندی پی سدهای خاکی و سنگریزه‌ای در بخش دیوار آب‌بند مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌های اصلی این بتن، ضریب ارتجاعی متناسب با خاک اطراف، مقاومت فشاری مناسب جهت تحمل تنش‌ها و نفوذپذیری کم می‌باشد. بنابراین کاهش نفوذپذیری بدون تغییر فاحش در ضریب ارتجاعی یکی از مهم‌ترین زمینه‌های پژوهشی در بتن پلاستیک می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داده است که اضافه کردن نانوسیلیس باعث کاهش نفوذپذیری بتن پلاستیک می‌گردد. همچنین جایگزینی ۱/۵درصد نانوسیلیس به جای سیمان، باعث کاهش نفوذپذیری تا هشت برابر می‌شود. برای بررسی هرچه بیشتر این تغییرات، آزمایش SEM که نحوه قرار گیری ذرات را نشان می‌دهد بر روی ژل سیلیکاتی که سنگدانه‌ها را در بر می‌گیرد انجام شده است تا هر چه بهتر بتوان تغییرات کلان ساختار ایجاد شده در مقاومت و نفوذپذیری و ضریب ارتجاعی بتن پلاستیک را دنبال کرد. این تحقیق نشان می‌دهد که برای کم کردن گذر آب لزوما بالا بردن مقاومت بتن پلاستیک و در پی آن افزایش ضریب ارتجاعی آن تنها راه ممکن نیست. این مطلب همان هدف مطلوبی است که در طراحی پی سدها که به ضریب ارتجاعی پایین و نزدیک به ضریب خاک بستر و گذر آب کم نیاز است بسیار مورد اهمیت قرار می‌گیرد[۵۹].

اردم و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۶۰] گسیختگی ریزساختاری بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی و نانو سیلیس کلوئیدی تحت بارگذاری دینامیکی سریع را ارزیابی نمودند. میزان افزودن نانوسیلیس برابر با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد بوده است. در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، التراسونیک، ضربه، نفوذ آب، SEM و پراش اشعه X انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به دلیل جذب آب، تخلخل بالاتر و پیوند ضعیف‌تر سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان، دارای مقاومت فشاری و خمشی کمتری نسبت به بتن حاوی سنگ‌دانه‌های غیر ضایعاتی می‌باشد. در هر حال افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانوسیلیس به بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به دلیل واکنش‌های پوزولانی و پر نمودن حفرات توسط ژل پرمقاومت کلسیم سیلیکات

هیدرات و همچنین بهبود قابل ملاحظه ویژگی‌های ناحیه انتقال موجب افزایش مقاومت و بهبود رفتار می‌گردد. میزان نفوذپذیری بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به دلیل نفوذپذیری ذاتی این سنگ‌دانه‌ها بالا می‌باشد؛ در نتیجه افزودن نانوسیلیس به دلیل پرنمودن ساختار حفرات، موجب کاهش نفوذپذیری می‌گردد. مدل دینامیکی بتن در اثر استفاده از سنگ‌دانه‌های ضایعاتی (به دلیل ساختار متخلخل و ناپایدار) کاهش می‌یابد، این کاهش را می‌توان به واسطه پر شدن حفرات توسط نانوسیلیس توجیه نمود. افزودن ۱/۵ درصد نانوسیلیس به دلیل بهبود قابل‌ملاحظه مشخصات ناحیه انتقال، موجب افزایش چشمگیر مقاومت در برابر ضربه می‌گردد. در نهایت آن‌ها استفاده از سنگ-دانه‌های بازیافتی به همراه نانوسیلیس را به عنوان یک شیوه مناسب برای حل مسائل زیست‌محیطی و همچنین اقتصادی در صنعت ساخت‌وساز پیشنهاد نمودند.

وانگ و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۱۸] تأثیر افزودن نانوسیلیس بر رفتار بتن حاوی سنگدانه‌های سبک و خاکستر بادی را بررسی نمودند. در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت فشاری، انقباض و حساسیت به تشکیل ترک‌ها صورت پذیرفت. همچنین میزان افزودن نانوسیلیس برابر با ۱، ۲ و ۳ درصد بود. دو نوع سنگدانه سبک (نوع N و Y) با پتانسیل جذب آب متفاوت استفاده شد. شکل ۲-**۲۹** تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصد نانوسیلیس برای بتن حاوی سنگدانه سبک گوناگون و سنین متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود افزایش درصد نانوسیلیس از ۰ تا ۳ درصد، موجب افزایش مقاومت فشاری برای تمامی سنین می‌گردد. به عنوان مثال، افزودن ۳ درصد نانوسیلیس به بتن در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز، حاوی سنگدانه‌های سبک نوع N و Y به ترتیب برابر با ۲۳/۵، ۲۳/۷، ۱۶/۸ و ۱۰، ۹/۱ و ۹/۶ می‌باشد.

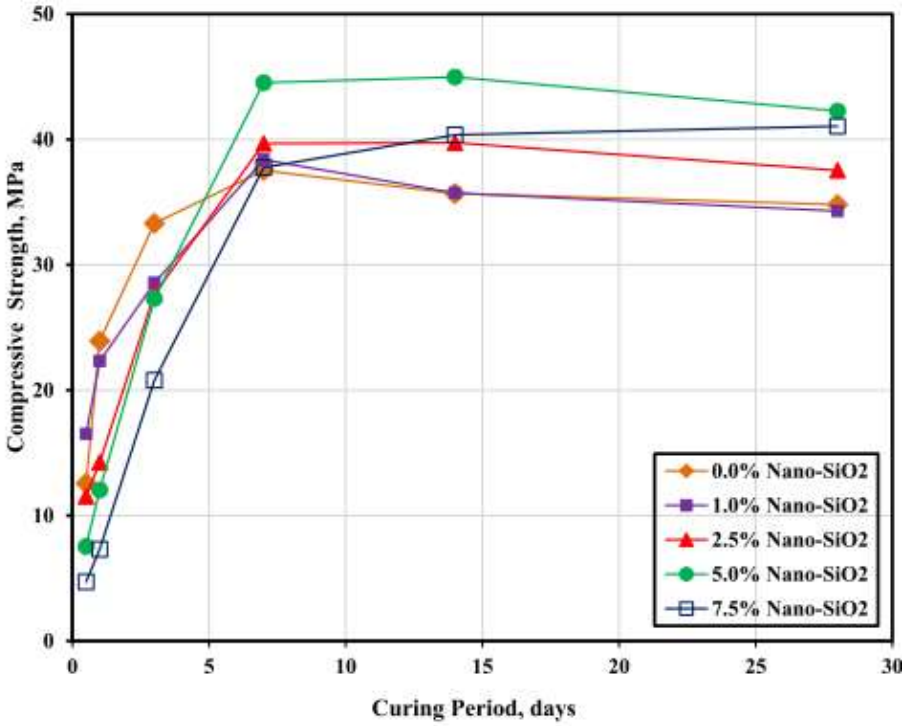
:



شکل ۲-۲۹: مقاومت فشاری برحسب درصد نانوسیلیس برای بتن در سنین متفاوت حاوی سنگدانه سبک نوع، a) N b) Y [۱۸]

ابراهیم و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۶۱] تأثیر افزودن نانوسیلیس بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختاری بتن حاوی مواد پوزولانی طبیعی و فعال‌ساز قلیایی را ارزیابی نمودند. در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت فشاری، روانی، پراش اشعه X و SEM انجام شد. نتایج نشان داد که زمان گیرش اولیه و نهایی بتن حاوی فعال‌کننده قلیایی و نانوسیلیس

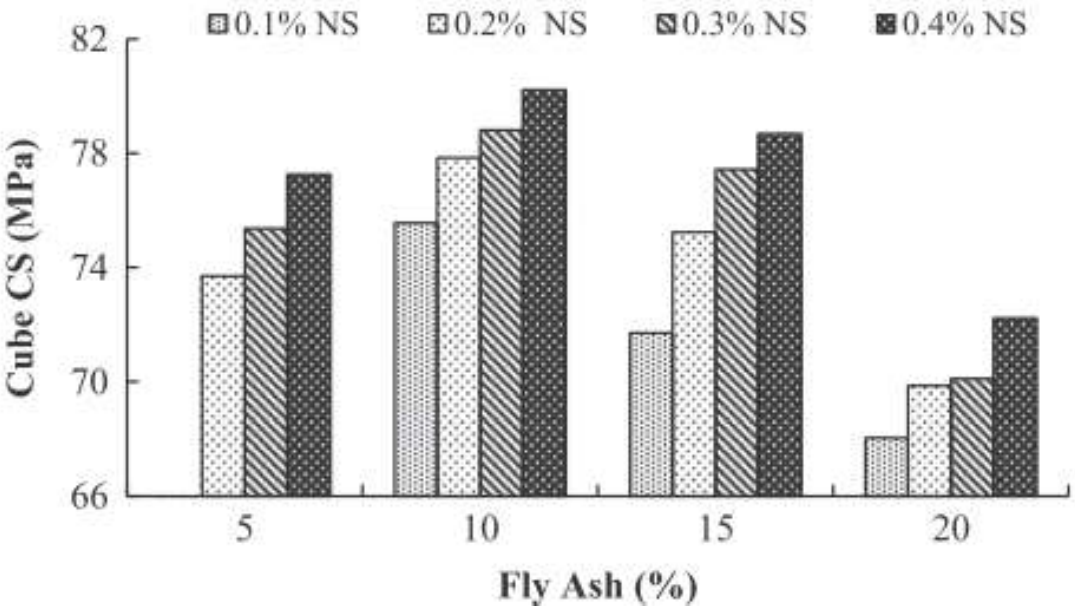
در محدوده مناسب می‌باشد و دارای کارایی قابل قبولی است. نسبت بهینه محلول قلیایی سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید به‌منظور دست‌یابی به بیشینه مقاومت برای نمونه‌های فاقد نانوسیلیس برابر با ۲/۵ می‌باشد. شکل ۲-**۳۰** تغییرات مقاومت فشاری بر حسب زمان عمل‌آوری برای نمونه با فعال‌ساز قلیایی و مقادیر متفاوت نانوسیلیس را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۲-**۳۰** مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی مقادیر بالای نانوسیلیس نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس دارای نرخ کسب مقاومت کمتری است. در هر حال با گذشت زمان، نمونه حاوی نانوسیلیس در مقایسه با نمونه فاقد نانوسیلیس دارای افزایش مقاومت بیشتری می‌باشد. از سوی دیگر افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۵ درصد، موجب افزایش مقاومت فشاری در حدود ۱۸ درصد می‌شود و پس از آن کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده توسط مقاومت فشاری که نشان‌دهنده مقدار بهینه ۵ درصد نانوسیلیس بود توسط آزمایش‌های ریزساختاری نیز تائید شد. تصاویر ریزساختاری نمونه‌ها نشان داد که نمونه حاوی ۵ درصد نانوسیلیس دارای ساختاری متراکم و کمترین میزان مواد واکنش نداده می‌باشد. این نتیجه می‌تواند به دلیل نقش پوزولانی و ایجاد هسته پایدار توسط نانوسیلیس باشد.



شکل ۲-۳۰: تغییرات مقاومت فشاری را بر حسب زمان عمل‌آوری برای نمونه با فعال‌ساز قلیایی و مقادیر متفاوت نانوسیلیس[۶۱]

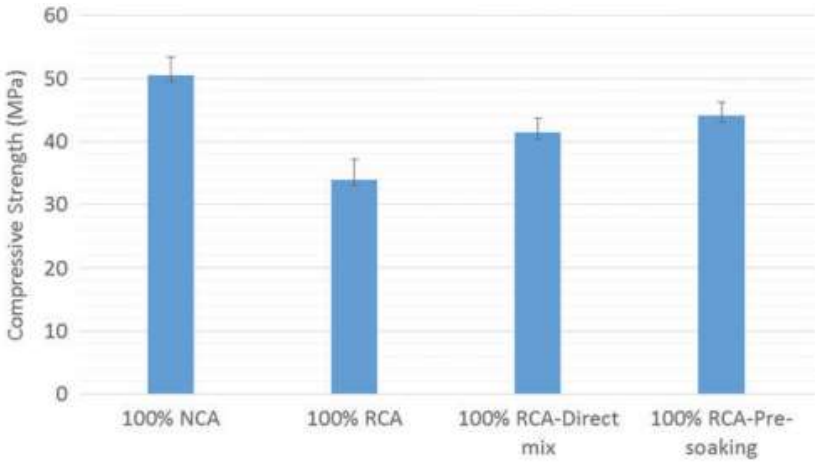
ماهاپاترا و بارایی (سال ۲۰۱۸) [۶۲] تأثیر نانوسیلیس کلوئیدی بر بتن مسلح حاوی الیاف هیبرید (ترکیب الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن) حاوی خاکستر بادی را بررسی نمودند. بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد به دلیل اندرکنش میان الیاف و ذرات بتن، روانی بتن در اثر افزودن الیاف کاهش می‌یابد. شکل ۲-**۳۱** تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بر حسب درصد خاکستر بادی و درصدهای گوناگون نانوسیلیس در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش میزان جایگزینی سیمان توسط خاکستر بادی تا ۱۰

درصد موجب بهبود مقاومت می‌گردد و پس از آن مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر افزایش درصد کلوئیدی تا ۰/۴، موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. از سوی دیگر میزان بیشینه افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح به ازای مقادیر بهینه نانوسیلیس و خاکستر بادی در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز به ترتیب برابر با ۸/۶، ۱۳/۷ و ۲۴/۸ درصد می‌باشد؛ این در حالی است که مقاومت کششی بتن در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز به ازای مقادیر بهینه الیاف، نانوسیلیس و خاکستر بادی، افزایش ۲/۵ برابری نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد. در نهایت افزودن ۱/۲۵ درصد الیاف فولاد و ۰/۱۶ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی شد؛ این در حالی است که افزودن این مقادیر، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خصوصیات بتن تازه ندارد [۶۲].



شکل ۲–۳۱: مقاومت فشاری نمونه مکعبی بر حسب درصد خاکستر بادی و درصدهای گوناگون نانوسیلیس در سن ۹۰ روز [۶۲]

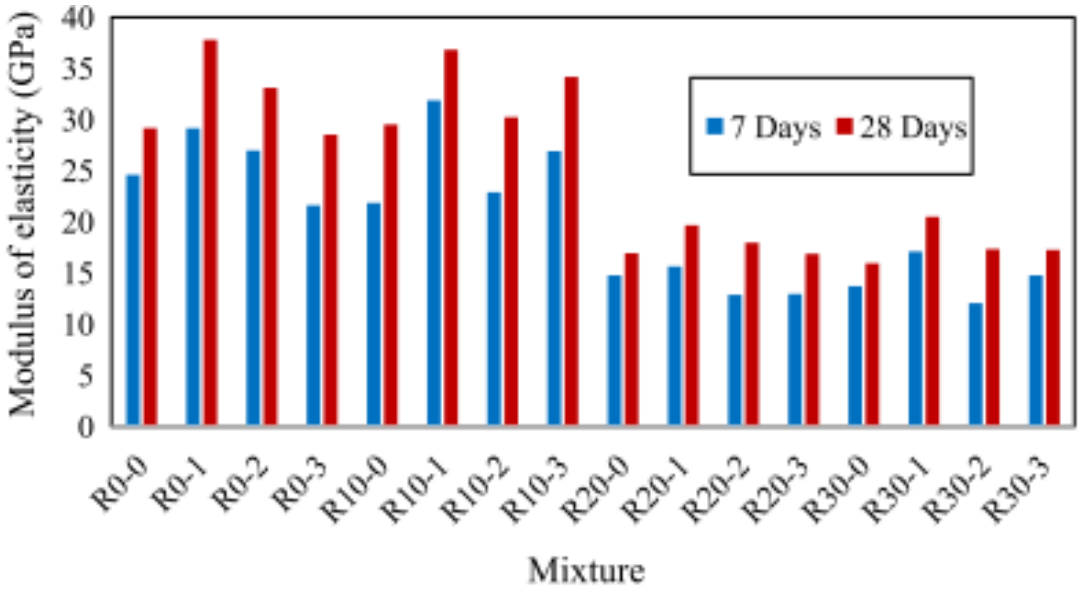
شیخ و همکاران (سال ۲۰۱۸) [63] با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و تصاویر SEM، تأثیر نحوه اختلاط نانوسیلیس را بر مشخصات بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مورد بررسی قرار دادند. شکل ۲–۳۲ تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی با شیوه‌های متفاوت ترکیب نانوسیلیس را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل نفوذپذیری و حفرات بالا موجب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردند. همچنین غرقاب نمودن سنگدانه‌ها در محلول حاوی نانوسیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به افزودن نانوسیلیس به صورت مستقیم در فرایند اختلاط می‌گردد.



شکل ۲–۳۲: تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه‌ها حاوی سنگدانه‌های طبیعی و ضایعاتی با شیوه‌های متفاوت ترکیب نانوسیلیس [۶۳]

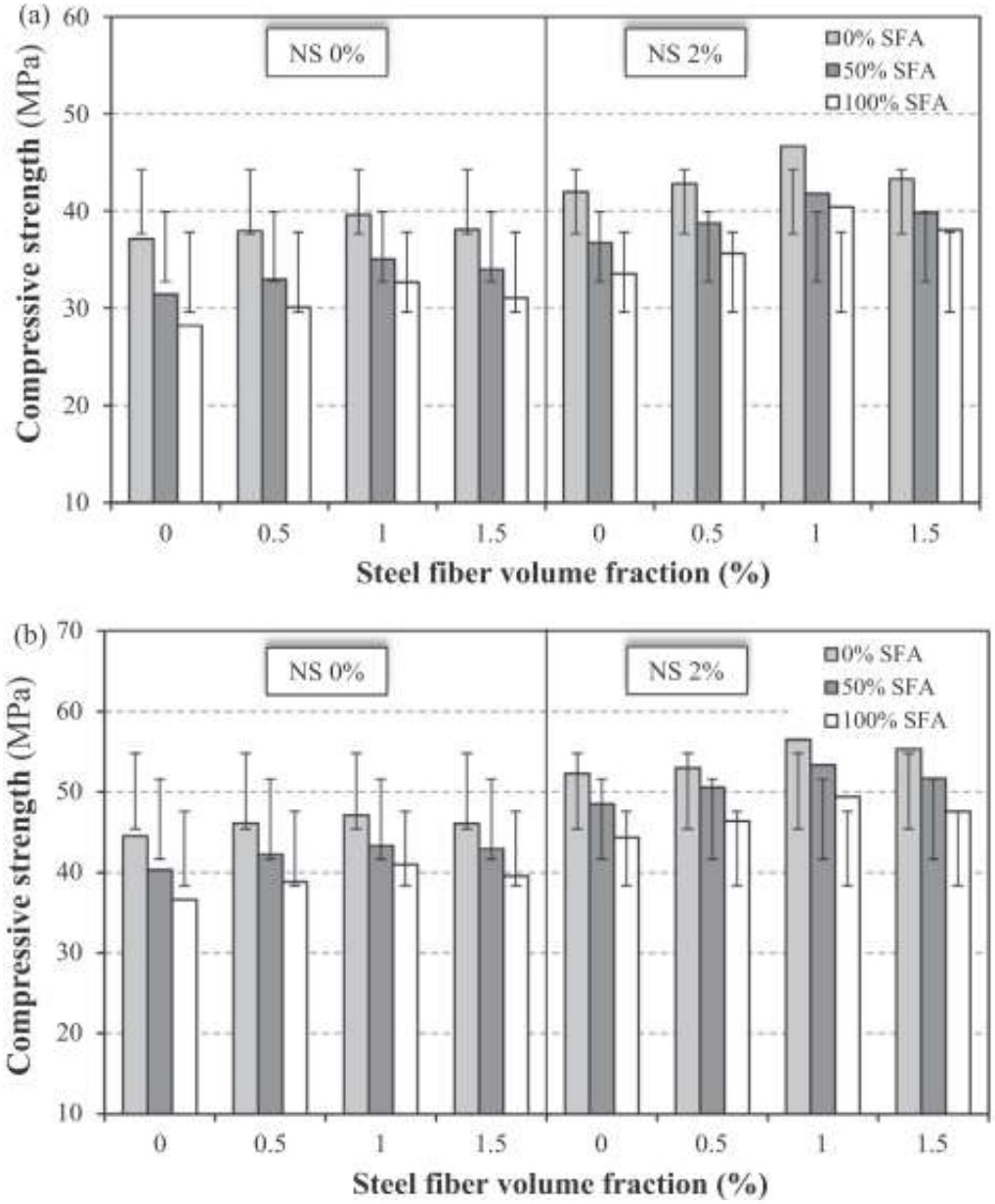
میزان حفرات بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی غرقاب شده در محلول نانوسیلیس در حدود ۲۴ تا ۲۸ درصد کمتر از بتن می‌باشد و نانوسیلیس در فرآیند اختلاط ترکیب می‌شود. مقاومت بتن حاوی سنگدانه‌های ضایعاتی در برابر نفوذ یون کلر با افزودن نانوسیلیس به هر دو شیوه کاهش محسوسی می‌یابد. در هر حال افزودن نانوسیلیس به صورت غرقاب نمودن سنگدانه‌ها از دیدگاه مقاومت در برابر نفوذ یون کلر مانند سایر مشخصات موجب بهبود قابل ملاحظه می‌شود. تصاویر SEM برداشت شده در سطح تماس سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان مشخص می-سازد که افزودن نانوسیلیس به هر دو شیوه موجب متراکم شدن ناحیه انتقال و در نتیجه بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود.

محمد و آدامو (سال ۲۰۱۸) [64] تأثیر نانوسیلیس و خرده‌های لاستیک را بر مشخصات بتن غلتکی بررسی نمودند. در این پژوهش مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خرده الاستیک (به عنوان جایگزین مواد ریزدانه) و ۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس (به عنوان جایگزین سیمان) مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌های صورت گرفته شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، جذب آب و مقاومت کششی بود. نتایج این پژوهش نشان داد افزودن ۱۰ درصد خرده لاستیک موجب دستیابی به مقاومت فشاری بیشینه می‌گردد. این درحالی است که مقدار بهینه به‌منظور دستیابی به مقاومت خمشی بیشینه برابر با ۲۰ درصد بود. شکل **۲–۳۳** تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب درصدها متفاوت نانوسیلیس و خرده لاستیک برای نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل **۲–۳۳** مشاهده می‌شود افزایش درصد نانوسیلیس به دلیل بهبود ناحیه انتقال و متراکم نمودن خمیر سیمان موجب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. این در حالی است که افزودن خرده الاستیک به‌دلیل جایگزینی یک مصالح نرم در بتن موجب کاهش مدول الاستیسیته می‌شود. میزان جذب آب در اثر افزودن نانوسیلیس به‌دلیل کاهش نفوذپذیری بتن کم‌تر می‌شود؛ اما افزودن خرده لاستیک به دلیل افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش نفوذپذیری موجب ازدیاد پتانسیل جذب آب توسط بتن می‌گردد.



شکل ۲-۳۳: مدول الاستیسیته بر حسب درصد نانوسیلیس و خرده لاستیک برای نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ [۶۴]

اوزاکا و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۶۵] تأثیر افزودن نانوسیلیس و الیاف فولادی بر مشخصات عبوردهی و مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره و خاکستربادی با فعال‌کننده قلیایی را مورد ارزیابی قرار دادند. شکل ۲-۳۴ تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصد حجمی فولاد برای نمونه با درصدهای متفاوت نانوسیلیس و مقادیر جایگزینی گوناگون سنگدانه‌های بتن و خاکستر بادی دانه‌ای، برای بتن با سنین ۲۸ و ۹۰ روز را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۲-۳۴، مشخص می‌کند که جایگزینی سنگدانه‌ها با خاکستربادی دانه‌ای در تمامی سنین، موجب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. از سوی دیگر افزودن الیاف فولادی به نمونه فاقد نانوسیلیس تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد. این در حالی است که اضافه نمودن الیاف فولادی به نمونه حاوی ۲ درصد نانوسیلیس موجب تغییر در مقاومت فشاری می‌گردد. بیشینه افزایش در مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره-خاکستر بادی و فعال‌کننده قلیایی (از ۴۰ به ۵۶ مگاپاسگال) به ازای افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی و ۲ درصد نانوسیلیس حاصل می‌شود. افزودن خاکستربادی دانه‌ای موجب افزایش نفوذپذیری در برابر آب می‌گردد. این درحالی است که اضافه نمودن نانو سیلیس به دلیل واکنش‌های پوزولانی موجب کاهش نفوذپذیری در برابر آب می‌شود. همچنین الیاف فولادی تأثیری بر نفوذپذیری در برابر آب ندارند. مشابه با نفوذپذیری در برابر آب، نفوذپذیری در برابر گاز بتن، تحت تأثیر میزان خاکستربادی دانه‌ای و نانوسیلیس می‌باشد. همچنین درصد الیاف بکار رفته در بتن سرباره‌ای تأثیر چندانی بر نفوذپذیری ندارد. میزان نفوذپذیری در برابر گاز بتن در اثر افزودن نانوسیلیس کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد. دلیل این رفتار مرتبط با فعالیت بالای نانوسیلیس می‌باشد که موجب تغییر در اندازه حفرات و عدم یکپارگی حفرات می‌شود. کمینه نفوذپذیری در برابر گاز به ازای درصد نانوسیلیس برابر با ۲ درصد و الیاف فولادی برابر با ۱ درصد حجمی حاصل شد. یافته‌های این پژوهش وجود رابطه‌ای را میان مقاومت فشاری بتن و مشخصات عبوردهی صرف نظر از نوع مواد بکاررفته در بتن سرباره‌ای با فعال‌کننده قلیایی نشان می‌داد.

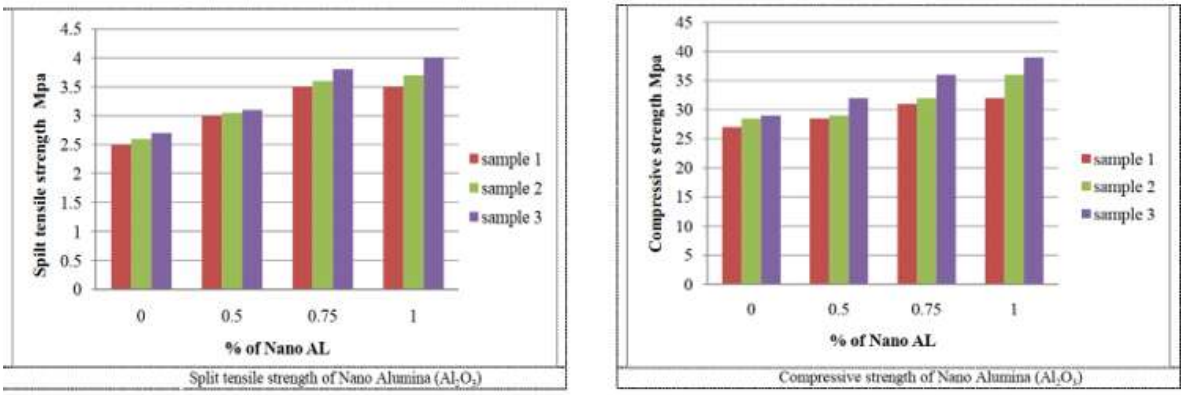


شکل ۲-۳۴: تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصد حجمی فولاد برای نمونه با درصدهای متفاوت نانوسیلیس و مقادیر جایگزینی گوناگون سنگدانه‌های بتن و خاکستر بادی دانه‌ای برای بتن با سنین ۲۸ و ۹۰ روز [۶۵]

بهفرنیا و سالمی [۶۶] نمونه‌های حاوی آلومینات را با درصدهای مختلف ۱٪، ۲٪ و ۳٪ درصد وزنی سیمان و با نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ساختند. نتایج آزمایشات مقاومت فشاری برای ۷ روز، ۲/۶ درصد، برای ۲۸روز، ۶٪ و برای نمونه ۱۲۰روزه، ۹٪ افزایش مقاومت را نشان می‌داد که افزایش محدودی به حساب می‌آید.

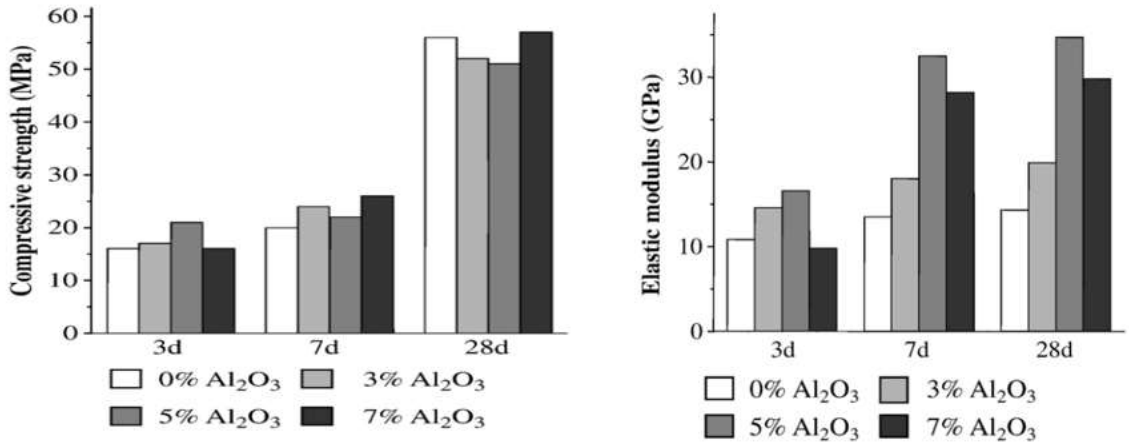
جایشانکار و کارتیکیان [۶۷] اثر نانوذرات آلومینات بر مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های بتنی را بررسی کردند. نمونه‌ها با درصدهای ۰، ۰/۵، ۰/۷۵، و ۱ درصد از نانوذرات تهیه شدند. نتایج در شکل **۲-۳۵** نشان دادد که در تمامی حالات، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوآلومینات از مقاومت نمونه مرجع سیمان ساده بیشتر است. بهترین نتیجه با ۱٪ افزودن نانوآلومینات به دلیل سطح ویژه و واکنش‌پذیری بالا با بهبود ۳۳ درصدی مقاومت فشاری در

۲۸ روز بدست آمده است. علاوه بر آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش کششی (جداشدگی) نیز بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج مشابه آزمایش فشاری بود و در تمامی حالات بهبود مقاومت کششی نسبت به حالت مرجع مشاهده شد. در بررسی خواص کارایی بتن تازه مشاهده شد افزودن آلومینات باعث کاهش زمان گیرش اولیه نمونه‌های بتنی می‌شود. در بررسی ریزساختار بتن نیز عکس‌های میکروسکوپی الکترونی از بافت بتن نشان از پخش‌شدگی یکسان نانوذرات در درصد بهینه و بهبود ریزساختار بتن داشته است.



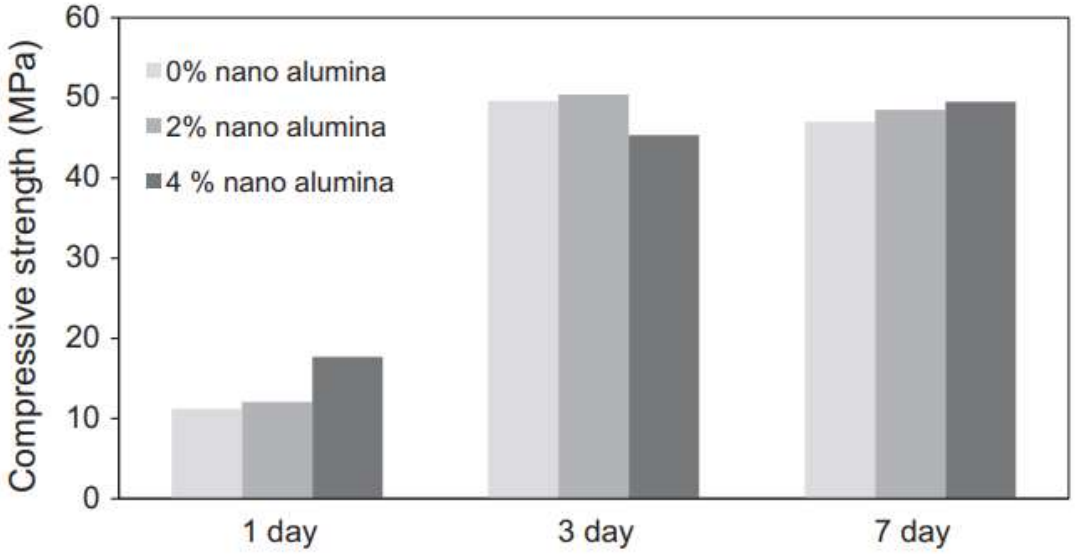
شکل ۲–۳۵: تاثیر افزون نانوذرات آلومینیوم بر مقاومت فشاری و کششی بتن [۶۷]

لی و همکاران [۶۸] بر روی بتن حاوی نانوآلومینیوم آزمایشاتی را به منظور بررسی خواص مکانیکی انجام دادند. مطابق نتایج شکل ۲–۳۶، در تمامی آزمایشات حاوی نانوذرات، مقاومت فشاری و مدول یانگ نمونه‌ها بیشتر از نمونه مرجع (بدون افزودنی) بدست آمده است. در نمونه حاوی ۵٪ نانوآلومینیوم، مدول الاستیسیته ۱۴۳٪ افزایش نشان داده است. همچنین در بررسی ریزساختار بتن و ناحیه بین بافتی سیمان و سنگدانه‌ها، بافت، متراکم‌تر شده بود و تخلخل این ناحیه با افزودن نانوذرات آلومینیوم کاهش یافت. لازم به ذکر است ناحیه انتقالی دارای ساختاری متفاوت با خمیر سیمان است. این ناحیه دارای حفرات بیشتری می‌باشد که محل حضور آب است. از این رو افزودن مواد با ابعادی در حدود نانو می‌تواند با پر نمودن این حفرات موجب بهبود ساختار ناحیه انتقالی گردد.



شکل ۲–۳۶: مدول یانگ و مقاومت فشاری بتن حاوی درصدهای مختلف نانوذرات آلومینیوم[۶۸]

بر خلاف اکثر تحقیقات که نشان از بهبود مقاومت فشاری در سنین مختلف بتن دارد، باربویا و همکاران [۶۹] با جایگزینی ۲ و ۴ درصد وزنی سیمان با نانوذرات آلومینیوم مشاهده کردند این نانوذرات تاثیری در مقاومت فشاری بتن نداشته است (شکل ۲–۳۷). همچنین آنالیزهای XRD انجام گرفته تا ۷ روز اول بتن هیچ نشانه‌ای از شکل‌گیری فاز کریستاله جدیدی در بافت بتن نداشت.

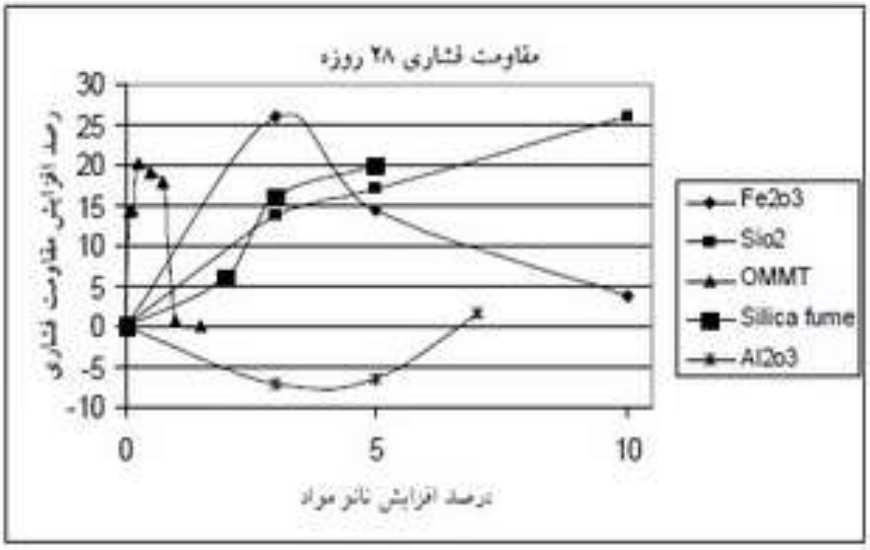


شکل ۲–۳۷: مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن‌های حاوی نانوذرات آلومینیوم[۶۹]

بر اساس تحقیقات دشتی و اسماعیل زاده، اضافه کردن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به مخلوط بتن باعث افزایش قابل ملاحظه در مدول الاستیسیته بتن می‌گردد. در جدول ۲–۹ مشاهده شده است که با افزودن ۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم، مدول الاستیسیته بتن تا ۱۴۳ درصد افزایش پیدا می‌کند ولی تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت بتن نمی‌گذارد. تأثیر مقدار نانو آلومینا بر روی مقاومت فشاری کم است. مقاومت فشاری ملات همراه با ۵,۳ و ۷ درصد نانو آلومینا در روز هفتم به مقدار کمی بیشتر از ملات ساده می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات دارای ۳و ۵ درصد نانو آلومینا کمتر از ملات ساده می‌باشد و ملات حاوی ۷ درصد نانو آلومینا به مقدار کمی افزایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد. سیمان‌های حاوی ۳۰ درصد نانو آلومینا نسبت به سیمان پرتلند معمولی حفرات کمتری دارند و مقاومت فشاری آن‌ها افزایش می‌یابد. برای مثال نتایج در شکل ۲–۳۸ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۷ روزه سیمان‌های حاوی ۳۰ درصد نانو آلومینا نسبت به سیمان پرتلند معمولی بیشتر است [۷۰].

جدول ۲-۹: درصد افزایش مقاوت فشاری ملات همراه با نانو آلومینا [۷۰]

روز	نسبت درصد وزنی نانو آلومینا (٪)			
	۰	۳	۵	۷
۷	۰	۱۶/۵	۱۳/۲	۳۰
۲۸	۰	-۷/۱	-۶/۴	۱/۷



شکل ۲-۳۸: تاثیر نانو مواد مختلف بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن [۷۰]

بر اساس تحقیقات دشتی و اسماعیل زاده مشاهده شده است که استفاده از نانو ذرات اکسید آهن در ملات سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی و همچنین عامل ایجاد قابلیت خودپایش (هوشمند بودن[۱]) بتن می‌گردد. توده ملات سیمان که با نانو ذرات اکسید آهن مخلوط گردیده است، تحت اثر بارگذاری‌های مختلف، مقاومت الکتریکی متفاوتی نشان می‌دهد. وجود این قابلیت فوق‌العاده گرانبهاست و به خصوص برای سازه‌هایی که از حسگرهای مدفون داخل سازه بهره‌مند نیستند قابل استفاده است. با توجه به این خاصیت منحصر به فرد، همچنین می‌توان عملکرد حسگرهای سنجش تنش را بهینه‌سازی کرد. همان‌گونه که در جدول ۲-۱۰ دیده می‌شود، مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها در ۷ و ۲۸ روز بیشتر از ملات سیمان ساده با نسبت آب به سیمان یکسان می باشد. با توجه به نتایج مربوط به مقاومت فشاری در ۲۸ روز، با کاهش نسبت نانو ذره Fe_2O_3 مقاومت فشاری افزایش می‌یابد[۷۰].

[۱] Self-Sensing

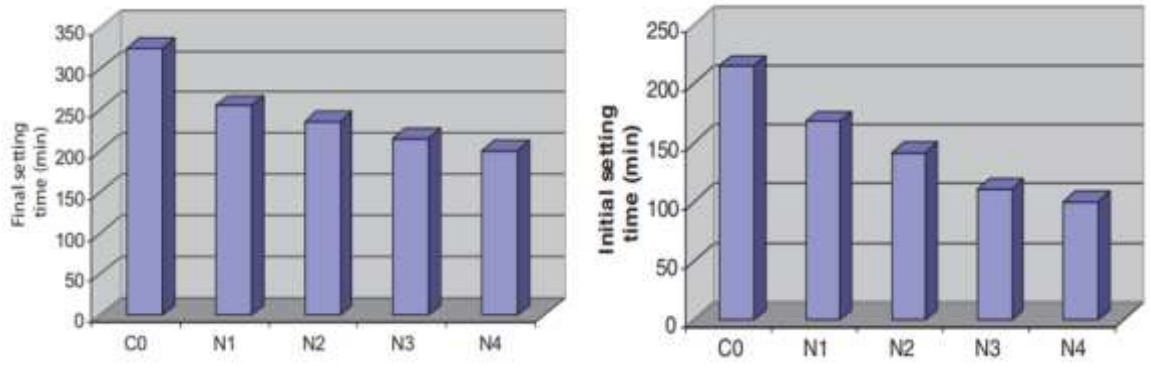
جدول ۲-۱۰: درصد افزایش مقاوت فشاری ملات همراه با نانو اکسید آهن [۷۰]

روز	نسبت درصد وزنی نانو ذره Fe_2O_3 (٪)			
	۰	۳	۵	۱۰
۷	۰	۲۲/۷	۱۶/۷	۲۰/۰
۲۸	۰	۲۶/۰	۱۴/۵	۳/۷

نظری و ریاحی[۷۱] در مجموعه تحقیقات مختلفی اثر افزودن نانوذرات اکسید آهن را بر خواص و ویژگی‌های بتن بررسی کردند. در این آزمایشات، ۰/۵، ۱/۵و ۲ درصد از سیمان مصرفی با نانوذرات اکسید آهن جایگزین شد. در بررسی خواص نفوذپذیری مشخص شد با بکارگیری این نانوذرات، درصد نفوذپذیری آب، سرعت جذب آن و ضرایب جذب آب برای تمامی نمونه‌ها در هر سنی کاهش می‌یابد (جدول ۲-**۱۱**). همچنین با توجه به نتایج شکل ۲-**۳۹** با افزودن مقدار نانو اکسید آهن، میزان کارایی و زمان گیرش بتن تازه کاهش می‌یابد.

جدول ۲-۱۱: کاهش درصد جذب آب در نمونه‌های حاوی اکسید آهن پس از ۲۸ و ۹۰ روز[۷۱]

Mix designation	Fe_2O_3 nanoparticles (%)	7 days	28 days	90 days
C0	0	0.30	5.60	4.80
N1	0.5	4.26	2.38	0.92
N2	1.0	4.58	2.68	1.17
N3	1.5	4.89	2.86	1.40
N4	2.0	5.48	3.06	1.71



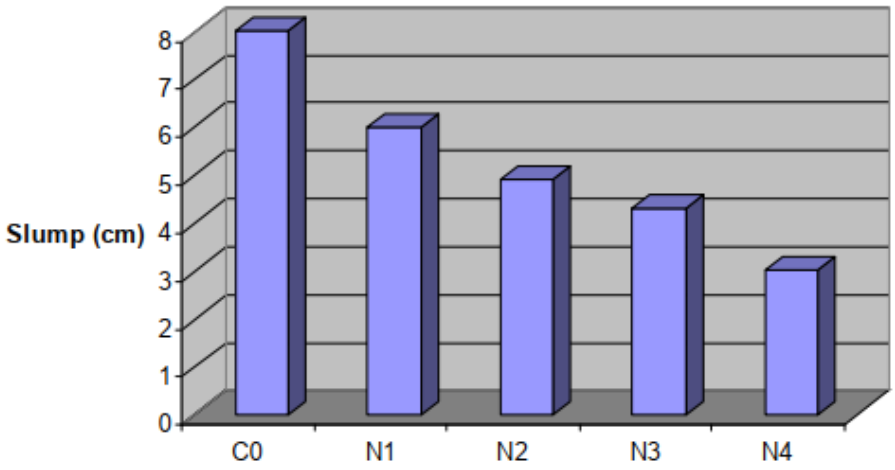
شکل ۲-۳۹: تاثیر نانواکسید آهن بر زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های بتنی[۷۱]

ناظری و همکاران در پژوهشی آزمایشاتی را بر روی مقاومت فشاری انجام دادند. نتایج آزمایشات مطابق جدول ۲-**۱۲** حاکی از آن است که افزایش مقدار نانو ذرات آهن تا سقف ۲٪ باعث بهبود مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع می‌گردد. با این حال حداکثر مقاومت فشاری متناظر با نمونه حاوی ۱٪ نانوذرات آهن بود. همچنین همان‌گونه که

در شکل ۲–۴۰ آمده است، افزودن نانو آهن موجب کاهش کارایی بتن تازه می‌گردد. این تاثیر باید در ساخت بتن‌های خود متراکم مد نظر قرار گیرد [۷۲].

جدول ۲–۱۲: مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانواکسید آهن[۷۲]

		Compressive strength (MPa)		
Sample designation	nano-Fe_2O_3 particle (%)	7 days	28 days	90 days
C0 (control)	0	27.3	36.8	42.3
N1	0.5	30.1	41.0	44.5
N2	1.0	31.2	42.5	46.1
N3	1.5	31.0	41.9	45.2
N4	2.0	28.1	38.9	43.8



شکل ۲–۴۰: کاهش کارایی نمونه‌های حاوی نانو اکسید آهن با افزایش درصد آن در نمونه[۷۲]

در پژوهش دیگری توسط ناظری و همکاران مشخص شد مشابه نتایج بدست آمده برای مقاومت فشاری، نمونه‌های حاوی ۱٪ اکسید آهن بهینه‌ترین نمونه‌ها از دیدگاه مقاومت کششی و خمشی هم هستند[۷۳].
خوش‌اخلاق و همکاران مجموعه آزمایشاتی را به منظور شناخت بهتر خواص نمونه‌های بتن خود تراکم پرمقاومت انجام دادند. نتایج تحقیقات آنان مشخص کرد که افزودن نانو اکسید آهن تا حد ۴٪ از وزن سیمان (دلیل بالا بودن درصد وزنی نانو آهن نسبت به سایر نانو ذرات چگالی بالاتر نانو ذرات آهن می‌باشد)، موجب افزایش مقاومت و بهبود نفوذپذیری آب می‌گردد (جدول ۲–۱۳ و جدول ۲–۱۴). طبق نظر این محققان، نانوذرات آهن به عنوان پایگاه‌های هسته‌زایی خارجی می‌توانند موجب تسریع تشکیل ژل C-S-H گردیده و در نتیجه مقاومت نمونه را بالا ببرد. همچنین این ذرات قادرند تا به شکل نانو پرکننده رفتار کرده و با کاهش حفرات زیان بار، بافت بتن را بهبود دهند[۷۴].

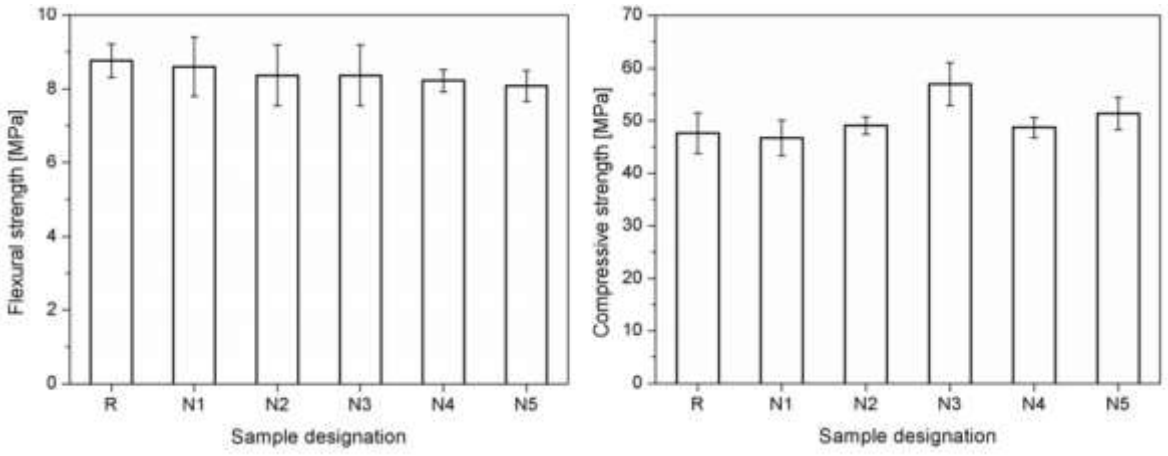
جدول ۲–۱۳: مقاومت کششی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانواکسید آهن[۷۴]

Sample designation	Fe_2O_3 nanoparticles/%	Split tensile strength/MPa		
		2 days	7 days	28 days
C0–SCC1	1.0	0.4	1.2	1.6
N1–SCC1	1	0.8	1.4	1.7
N2–SCC1	2	1.4	1.7	2.1
N3–SCC1	3	1.7	2.1	2.7
N4–SCC1	4	2.0	2.6	3.1
N5–SCC1	5	1.8	2.3	2.8

جدول ۲–۱۴: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانواکسید آهن[۷۴]

Sample designation	Fe_2O_3 nanoparticles/%	Flexural strength/MPa		
		2 days	7 days	28 days
C0–SCC1	0	2.8	3.7	4.2
N1–SCC1	1	3.2	4.3	4.7
N2–SCC1	2	3.5	4.6	5.8
N3–SCC1	3	3.6	5.0	6.7
N4–SCC1	4	3.9	5.7	7.4
N5–SCC1	5	3.7	5.4	7.1

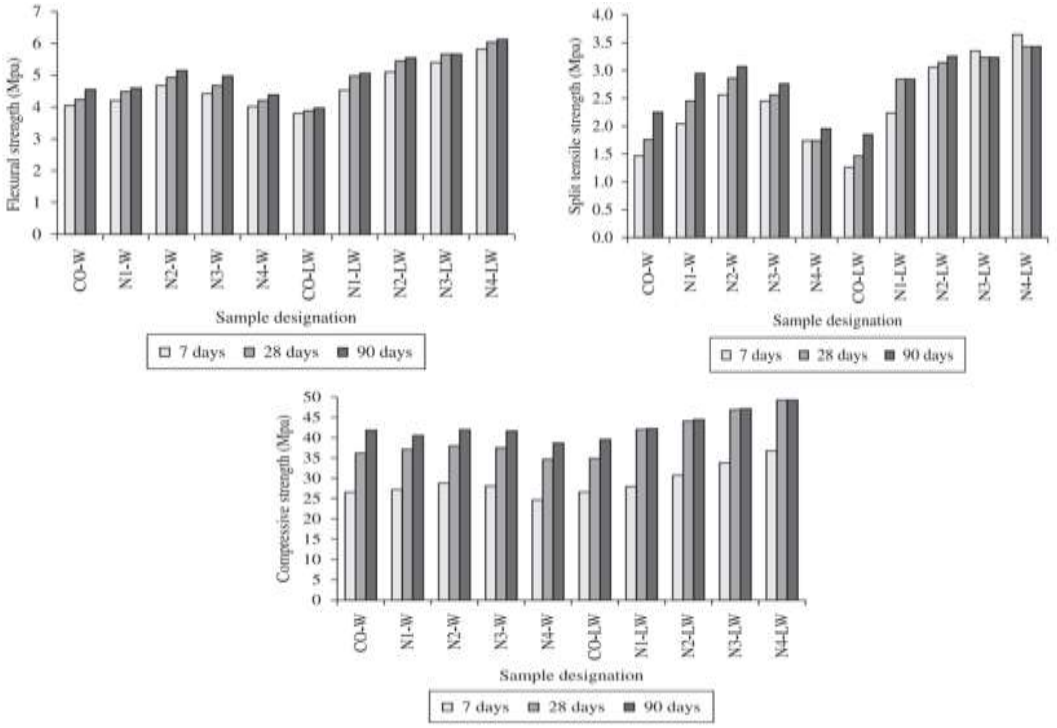
سیکورا و همکاران در آزمایشاتی تاثیر افزودن ۱ تا ۵ درصد نانوذرات اکسید سه ظرفیتی آهن به کامپوزیت‌های سیمانی را بررسی کردند. در اثر بکارگیری این ماده، ریزساختار بافت کامپوزیت متراکم‌تر شده و مقاومت مکانیکی آن نیز افزایش یافت (شکل ۲–۴۱). همچنین مشخص شد این نانوذرات اثر چندانی در نوع محصولات هیدراتاسیون و نرخ واکنش‌ها ندارند. از این رو تاثیر این مواد بیشتر ناشی از خاصیت ریزپراکنندگی و عملکرد این مواد مانند هسته اتم می‌باشد. همچنین در مطالعه آن‌ها نشان داده شد بهینه‌ترین مقاومت مکانیکی و ریزساختاری در بکارگیری ۳٪ وزنی نانو اکسید سه ظرفیتی آهن رخ می‌دهد[۷۵].



شکل ۲–۴۱: مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی نانو اکسید سه ظرفیتی آهن[۷۵]

یزدی و همکاران نیز در تحقیق خود بر روی نانوذرات اکسید آهن، مقدار ۳ درصد را به عنوان درصد بهینه جایگزینی سیمان با نانوذرات معرفی کردند. در این تحقیق نمونه‌های حاوی بیش از ۳ درصد افزودنی با کاهش مقاومت‌های مکانیکی روبرو شدند[۷۶].

مطابق شکل ۲-۴۲ نظری و ریاحی اثر افزودن نانوذرات اکسید روی را بر خواص بتن مطالعه کردند. در آزمایشات آن‌ها، نانو اکسید روی با مقادیر ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪ وزنی از سیمان پرتلند جایگزین شد. دو شرایط عمل‌آوری مختلف در این آزمایش انجام گرفت که شامل عمل‌آوری در آب آهک و دیگری در آب لوله‌کشی بود. در حالت عمل‌آوری بتن در آب آهک، مقدار ۲٪ نانوذرات بهترین نتایج مقاومت و نفوذپذیری را نشان دادند و در شرایط عمل‌آوری در آب لوله‌کشی، ۱٪ نانوذرات بهترین نتایج بدست آمده است. طبق عقیده محققان، نانوذرات اکسیدروی توانستند مانند پایگاه‌های هسته‌زایی عمل کرده، هیدراتاسیون و نرخ گرمادهی واکنش را افزایش دهند و ریزساختار بافت بتن در اثر هسته‌زایی بیشتر، متراکم‌تر شود. باید توجه داشت که افزایش دمای بتن طی واکنش‌های هیدراتاسیون برای کارهای بتنی با حجم بالا نظیر سدها ایجاد مشکل می‌نماید و بایستی این پدیده در طراحی‌ها مد نظر قرار گیرد[۷۷].

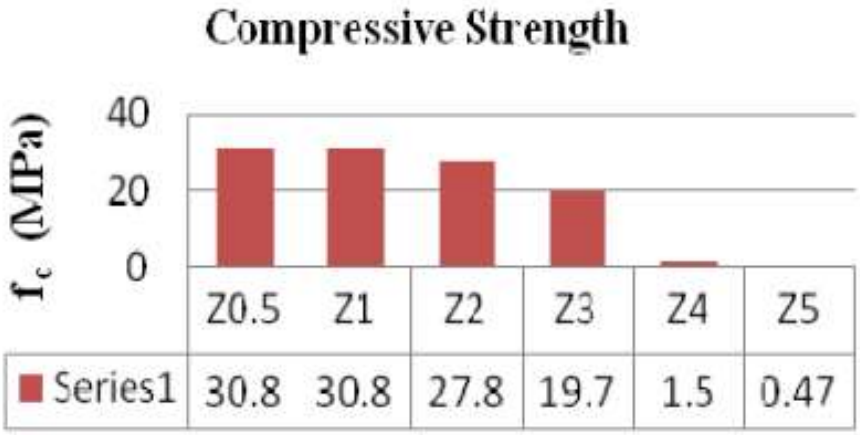


شکل ۲-۴۲: مقاومت کششی، خمشی و فشاری نمونه‌های حاوی نانو اکسید روی در دو شرایط عمل‌آوری در آب آهک و آب معمولی[۷۷]

فرناندز اولمو و همکاران [۷۸] اثر نانوذرات مختلف از جمله نانو اکسید روی را بر خواص گیرشی و مقاومتی سیمان پرتلند بررسی کردند. آزمایشات آنان نشان داد بکارگیری این نانوذره خاص به شدت زمان گیرش خمیر را به تاخیر می‌اندازد. همچنین این نانوساختار، مقاومت فشاری خمیرهای در سنین پایین را دچار کاهش می‌کند؛ با این حال این اثر کاهشی با افزایش سن نمونه‌ها کم‌رنگ‌تر می‌شود.

در تحقیق دیگری بهفرنیا و همکاران [۷۹] با بررسی اثر نانواکسید روی در بتن، مشاهده کردند افزودن این ذرات موجب کندگیری و حتی کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی می‌شود (جدول ۲–۱۵). همچنین با افزایش این مقدار تا ۵ درصد وزنی و بیشتر از آن، هیدراتاسیون به طور کامل متوقف شده و ژل C-S-H تشکیل نمی‌شود. آن‌ها در توجیه این مساله عنوان کردند که به نظر می‌رسد تشکیل لایه‌ای آمورف از هیدروکسید روی، موجب جلوگیری از واکنش دادن فاز C_3S سیمان در هنگام هیدراتاسیون می‌گردد. به علاوه افزودن مقادیر نانواکسید روی، مقاومت فشاری نمونه‌ها را بسیار کاهش می‌دهد. نتایج این تحقیق به یافته‌های مطالعات فرناندز اولمو و همکاران نزدیک است زیرا که هر دو کاهش مقاومت فشاری و کاهش و یا حتی تعلیق گیرش واکنش‌های هیدراتاسیونی را گزارش کرده‌اند.

جدول ۲–۱۵: روند تغییر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانواکسید روی[۷۹]



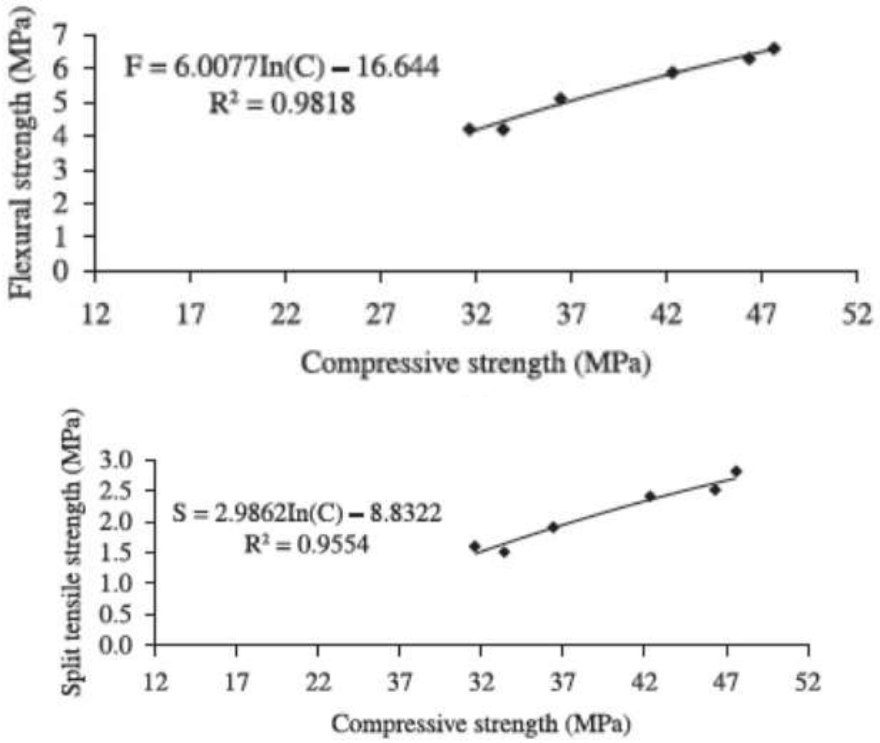
کیخا و سلیمانی [۸۰] اثر نانوذرات اکسید زیرکونیم بر نفوذپذیری و خواص مکانیکی بتن را بررسی کردند. نمونه‌ها در دو شرایط آب معمولی و آب آهک عمل‌آوری شدند. همچنین درصدهای جایگزینی سیمان با نانوذرات ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد انتخاب شد. نتایج مقاومت‌های مکانیکی در جدول ۲–۱۶ نشان می‌دهد که درصد بهینه استفاده از این نانوذرات برای نمونه‌های نگهداری شده در آب برابر ۱ درصد و برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک برابر ۲ درصد است. همچنین نمونه‌هایی که تا ۲۸ روز در آب آهک نگهداشته شده بودند و سپس تا ۹۰ روز در آب معمولی قرار داده شدند، مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌هایی داشتند که در کل مدت ۹۰ روز در آب آهک بودند. تولید بیشتر کریستال‌های کلسیم هیدروکسید در اثر وجود آب آهک موجب تضعیف اثر تقویت‌کنندگی ناشی از تشکیل ژل C-S-H می‌گردد. علاوه بر این نتایج، ریزساختار بتن در اثر افزودن این نانوماده پرتر شده و اثر آب آهک در این اتفاق بهتر از عمل‌آوری در آب معمولی گزارش شده است.

جدول ۲–۱۶: مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی حاوی نانواکسید زیرکونیوم در سه شرایط عمل آوری مختلف W: آب معمولی LW: آب آهک و LW-W: تا ۲۸ روز در آب معمولی و سپس تا ۹۰ روز در آب آهک[۸۰]

Sample designation	nano-ZrO_2 particle (%)	Flexural strength (MPa) 7 days	28 days	90 days
C0-W (control)	0	4.2	4.4	4.7
N1-W	0.5	4.7	5.0	5.2
N2-W	1.0	5.2	5.5	5.8
N3-W	1.5	4.9	5.3	5.6
N4-W	2.0	4.5	4.7	4.9
C0-LW (control)	0	4	4.1	4.2
N1-LW	0.5	5.0	5.6	5.7
N2-LW	1.0	5.7	6.1	6.2
N3-LW	1.5	6.0	6.4	6.4
N4-LW	2.0	6.5	6.8	6.9
C0-LW-W (control)	0	4	4.1	4.3
N1-LW-W	0.5	5.0	5.6	6.0
N2-LW-W	1.0	5.7	6.1	6.5
N3-LW-W	1.5	6.0	6.4	7.1
N4-LW-W	2.0	6.5	6.8	7.6

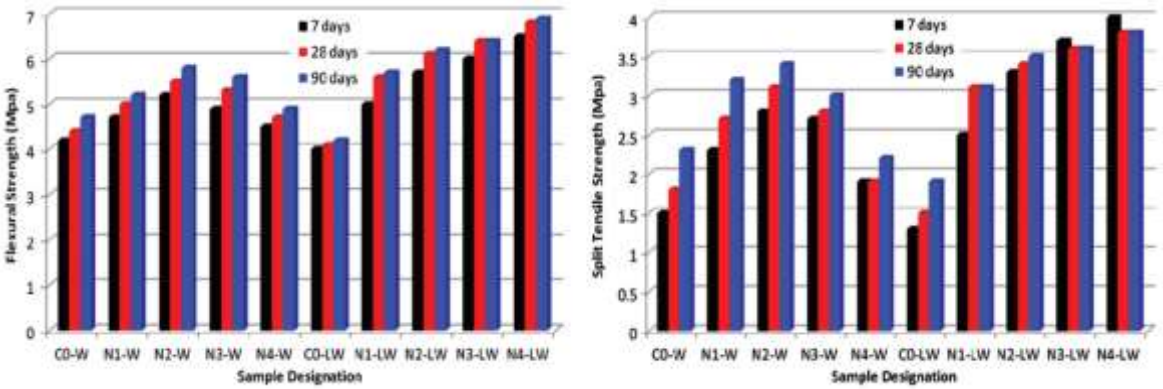
Water to binder [cement + nano-ZrO_2] ratio of 0.40

نظری و ریاحی در تحقیقی بر روی نانواکسید زیرکونیم عنوان کردند که استفاده از این نانوذره تا حد ۴٪ وزنی از سیمان، باعث بهبود مقاومت مکانیکی و متراکم‌شدگی بافت بتن خود تراکم پرمقاومت می‌گردد (شکل ۲–۴۳). همچنین طبق گزارش آن‌ها، گیرش اولیه بتن حاوی نانواکسید زیرکونیوم به دلیل تشکیل بیشتر کریستال‌های کلسیم هیدروکسید، ژل بیشتر تشکیل شده و در نهایت مقاومت بالاتر بدست می‌آید [۸۱].



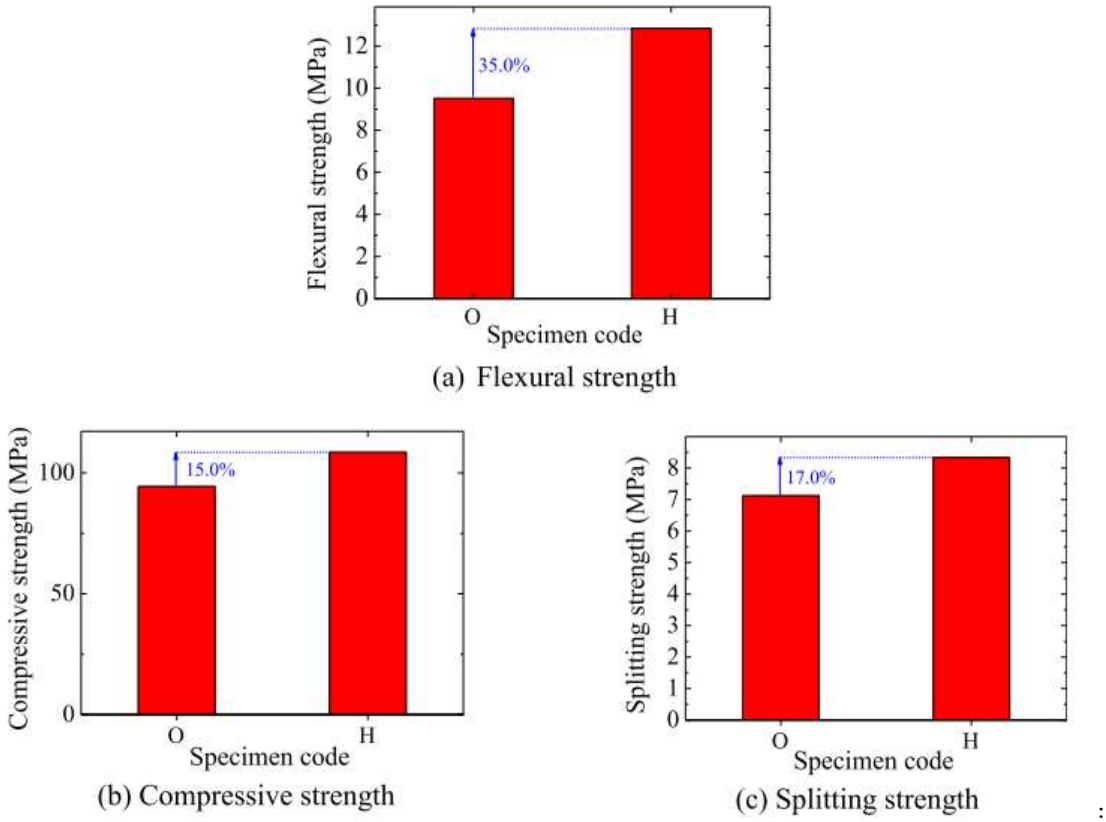
شکل ۲–۴۳: مقاومت خمشی و کششی نمونه‌های بتنی حاوی ۱ تا ۵ درصد نانو اکسید زیرکونیم[۸۱]

در تحقیقی دیگر از نظری و ریاحی در مورد بتن‌های عادی حاوی نانو اکسید زیرکونیوم در شرایط عمل‌آوری گوناگون عنوان شد که بکارگیری ۲٪ نانواکسید زیرکونیوم با عمل‌آوری در آب آهک و بکارگیری ۱٪ از این نانوذره با عمل‌آوری در آب معمولی بهترین مقاومت و بهترین رفتار در برابر جذب آب را در بین تمام نمونه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۲–**۴۴**). همچنین کارایی بتن‌ها با افزایش دادن مقادیر نانوذرات کاهش پیدا می‌کند. اثر پرکنندگی و بهبود ساختار درونی بتن نیز در تمامی تحقیقات انجام گرفته بر روی این نانوذره گزارش شده است[۸۲].



شکل ۲–۴۴: مقاومت‌های کششی و خمشی نمونه‌های نانو اکسید زیرکونیوم[۸۲]

روآن و همکاران (سال ۲۰۱۸) [۸۳] نانو زیرکونیم بر رفتار خمشی و فشاری بتن پودری مسلح با صفحه فولادی را بررسی نمودند. در این پژوهش دو شرایط عمل‌آوری در آب با دمای آزمایشگاه و آب با دمای ۹۰ درجه به مدت دو روز پس از باز نمودن قالب مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۲–**۴۵** مقاومت فشاری، خمشی و کششی برای نمونه‌های حاوی ۳ درصد زیرکونیم عمل‌آوری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲–۴۵: مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن عمل‌آوری شده در آب O) دمای آزمایشگاه، H) ۲ روز در آب ۹۰ درجه [۸۳]

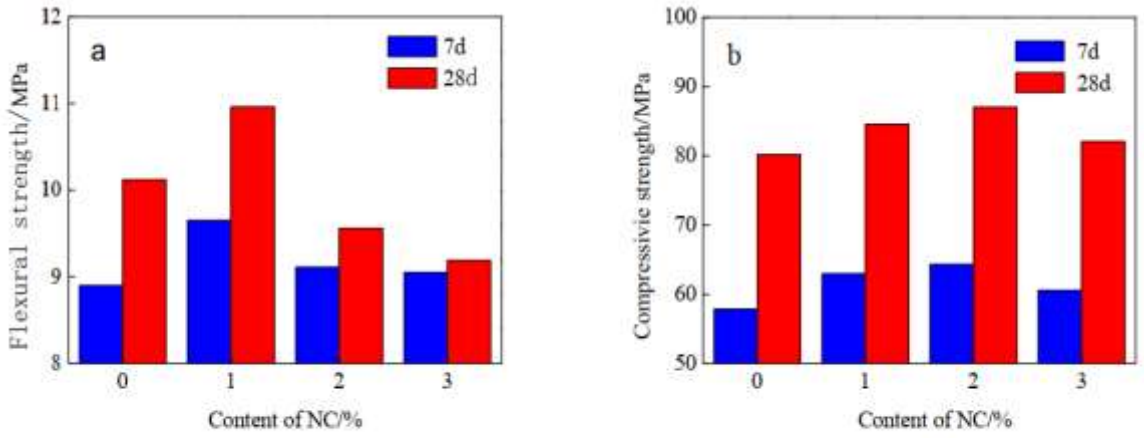
بررسی شکل ۲–۴۵ نشان می‌دهد افزایش مقاومت خمشی، فشاری و کششی به ترتیب برابر با ۳۵، ۱۵ و ۱۷ درصد نسبت به نمونه عمل‌آوری شده در آب به مدت ۲۸ روز می‌گردد. انرژی شکست بتن پودری مسلح با افزودن ۳ درصد نانو زیرکونیم، ۲۵ درصد نسبت به نمونه فاقد نانو زیرکونیم افزایش می‌یابد. این در حالی است که مدول الاستیسیته بتن در اثر افزودن ۳ درصد نانو زیرکونیم به اندازه ۱۲/۷ درصد افت می‌نماید [۸۳].

کامیلتی و همکاران اثر نانوذره کربنات کلسیم را بر خواص کوتاه‌مدت بتن‌های فراتوانمند با درنظرگیری ۰، ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نانو اکسید کربنات کلسیم در بتن بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد این نانوذره جریان‌پذیری بتن فراتوانمند را افزایش می‌دهد و همچنین کارایی آن از کارایی بتن‌های حاوی افزودنی‌های شتا دهنده بهتر است. علاوه بر آن، این ماده تاثیر مثبتی بر گیرش و کسب مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین پایین دارد. با این حال استفاده بیش از ۱۵٪ از این نانوذره، مقاومت را با کاهش روبرو می‌نماید. در این پژوهش با درنظرگیری تمامی شرایط عملکردی و اقتصادی، استفاده از نانو اکسید کربنات کلسیم در بتن در بازه ۵ تا ۱۰ درصد در مخلوط خمیر سیمان توصیه می‌شود[۸۴].

ژو و همکاران [۸۵] تاثیر نانو کربنات کلسیم بر خواص مکانیکی و ریزساختار بافت بتن پرمقاومت را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که در دو شرایط دمایی استاندارد (۲۱ درجه) و شرایط دمایی پایین (۶/۵ درجه)، بکارگیری ۱ و ۲ درصد نانو کربنات کلسیم، مقاومت فشاری سه روزه بتن را به ترتیب ۱۳٪ و ۱۸٪ برای دمای استاندارد و ۱۷٪ و ۱۴٪ برای دمای پایین افزایش می‌دهد.

کاواشیما و همکاران [۸۶] و ساتو و دیالو [۸۷] در تحقیقاتی جداگانه نحوه واکنش‌پذیری نانو کربنات کلسیم با سیمان را بررسی کردند و مشاهده کردند شتاب واکنش‌های سیمانی با حضور این ماده افزایش می‌یابد. همچنین این ماده مدت انفعال واکنشی C_3S را کاهش داده است. آن‌ها بیان کردند دلیل این نوع افزایش سرعت، واکنشی وابسته به شکسته شدن لایه محافظ هیدراتاسیون C_3S و یا افزایش هسته‌زایی محلول پر از یون خمیر سیمان است. در تحقیقات کامیلتی و همکاران [۸۴] بکارگیری تنها ۲/۵ درصد نانو کربنات کلسیم موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۴ ساعته به مقدار ۱۳۲/۵٪ و ۱۶۱/۹٪ برای دو دمای ۱۰ و ۲۰ درجه شد. در گزارش‌های مشابه عنوان شده است که افزودن این ماده موجب متراکم‌سازی بافت ماده و مصرف بیشتر کریستال‌های هیدروکسید کلسیم می‌گردد.

لیو و همکاران [۸۸] تاثیر نانو کربنات کلسیم بر مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن را بررسی کردند. نتایج بدست آمده در شکل ۲-۴۶ نشان داد که بهینه‌ترین درصد بکارگیری این نانوذره برابر ۲٪ وزنی سیمان برای مقاومت فشاری است. مقاومت فشاری بتن حاوی ۲٪ از نانو کربنات کلسیم به ترتیب افزایشی برابر ۱۱۱/۲ و ۱۰۸/۶ درصد برای دو نمونه ۷ و ۲۸ روزه داشته است. همچنین برای مقاومت خمشی مقدار بهینه برابر ۱٪ برای نمونه ۷ و ۲۸ روزه عنوان شد. با این حال مقدار ۲ و ۳ درصد این ماده مقاومت ۲۸ روزه بتن را کاهش می‌دهد.



(a) Flexural strength (b) Compressive strength

شکل ۲-۴۶: مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی نانو کربنات کلسیم[۸۸]

جدول ۲-۱۷: مقادیر زمان گیرش و مقدار جریان‌پذیری مخلوط‌های بتنی حاوی نانو کربنات کلسیم [۸۸]

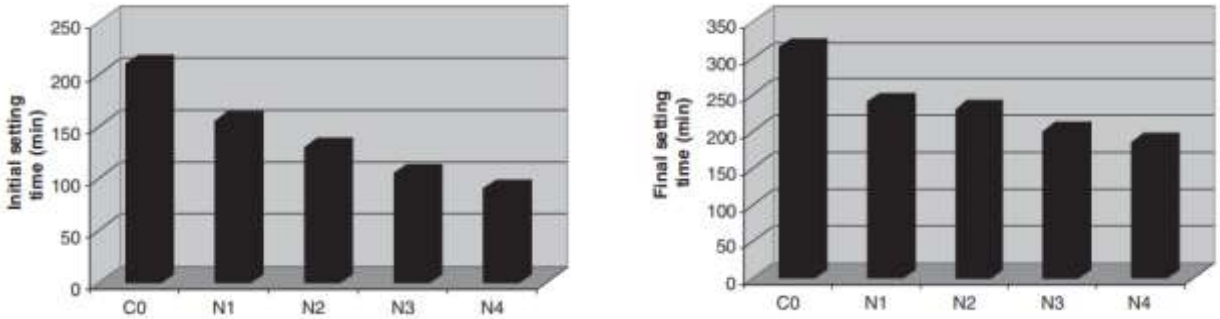
Specimens	NC (%)	Water requirement of normal consistency (ml)	Setting time		Flowability (mm)
			Initial Setting time (min)	Final setting time (min)	
C0	0	132	200	260	163
NC1	1	132	187	232	137
NC2	2	132	139	221	130
NC3	3	132	131	207	120

چن و همکاران اثر افزودن پودر نانو تیتانیوم را بر ملات سیمانی بررسی کردند. طبق نتایج آزمایشات در جدول ۲–۱۸، نانو تیتانیوم در حین فرایند هیدراتاسیون سیمان حالتی ساکن (غیرفعال) و پایدار داشت. با این حال، با افزون مقدار اندکی نانوذرات تیتانیوم، درجه هیدراتاسیون خمیر سیمان به خصوص در سنین اولیه به شدت زیاد شد. این پدیده، به این دلیل است که نانوذرات تیتانیوم، خود در واکنش شرکت نکرده و تنها به دلیل ساختار نانویی خود بافت خمیر سیمان را متراکم کرده و بستری برای هسته‌زایی محصولات هیدراتاسیون ایجاد می‌کنند؛ در نتیجه تخلخل مجموع، با بکارگیری نانو تیتانیوم کاهش می‌یابد. همچنین تاثیرات این ماده بر نرخ هیدراتاسیون سیمان، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات سیمانی را نیز تغییر می‌دهد. علاوه بر این، نانوذرات کوچک‌تر تیتانیوم نیاز به آب را بیشتر و زمان گیرش اولیه را کوتاه‌تر کرده و موجب افزایش مقاومت فشاری ملات به خصوص در سنین اولیه شدند [۸۹].

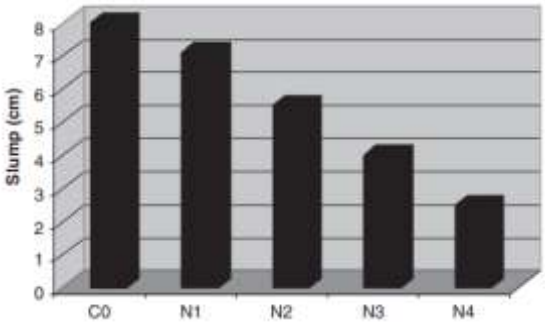
جدول ۲–۱۸: مقدار تخلخل نمونه‌های سیمانی حاوی نانوذرات تیتانیوم در مقایسه با نمونه مرجع[۸۹]

Sample	Porosity (%, v/v)		
	3 days	7 days	28 days
Reference	22.92	22.31	20.55
5% P25	21.56	19.76	18.15
10% P25	20.56	19.31	17.54
5% Anatase	21.63	19.47	16.16
10% Anatase	20.83	17.19	16.10

نظری و ریاحی[90, 91] خصوصیات مختلف ملات‌های سیمانی را در اثر افزودن نانوذرات تیتانیوم بررسی کردند. در این آزمایشات مقادیر۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد از سیمان جایگزین نانوذرات تیتانیوم شد. نتایج آزمایشات آنان نشان داد که مقاومت کششی جداشدگی بتن در تمامی نمونه‌های حاوی نانوذرات با افزایش همراه بوده است. با این حال بالاترین مقاومت کششی با جایگزینی ۱٪ اتفاق افتاد. همچنین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش مقدار نانوذرات، افزایش یافت و این دو مقاومت نیز مشابه مقاومت کششی، بیشترین مقدار خود را در جایگزینی ۱٪ تجربه کردند؛ در ادامه و با بررسی خواص بتن تازه، مشاهده شد بکارگیری نانوذرات تیتانیوم گیرش اولیه بتن را سرعت می‌بخشد (شکل ۲–۴۷ و شکل ۲–۴۸ و جدول ۲–۱۹).



شکل ۲–۴۷: مقادیر زمان گیرش اولیه و نهایی ملات‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم[۳۸]



شکل ۲–۴۸: تاثیر نانوذرات تیتانیوم بر روی کارایی ملات‌های سیمان حاوی درصدهای ۰ تا ۲٪[۳۸]

جدول ۲–۱۹: مقاومت فشاری، خمشی و کششی جداشدگی ملات‌های سیمانی حاوی نانوذرات تیتانیوم[۹۰]

		Split Tensile strength (MPa)		
Sample designation	nano-TiO_2 particle (%)	7 days	28 days	90 days
C0 (control)	0	1.5	1.8	2.3
N1	0.5	2.3	2.6	2.9
N2	1.0	2.8	3.0	3.3
N3	1.5	2.6	2.7	3.0
N4	2.0	1.9	1.9	2.4

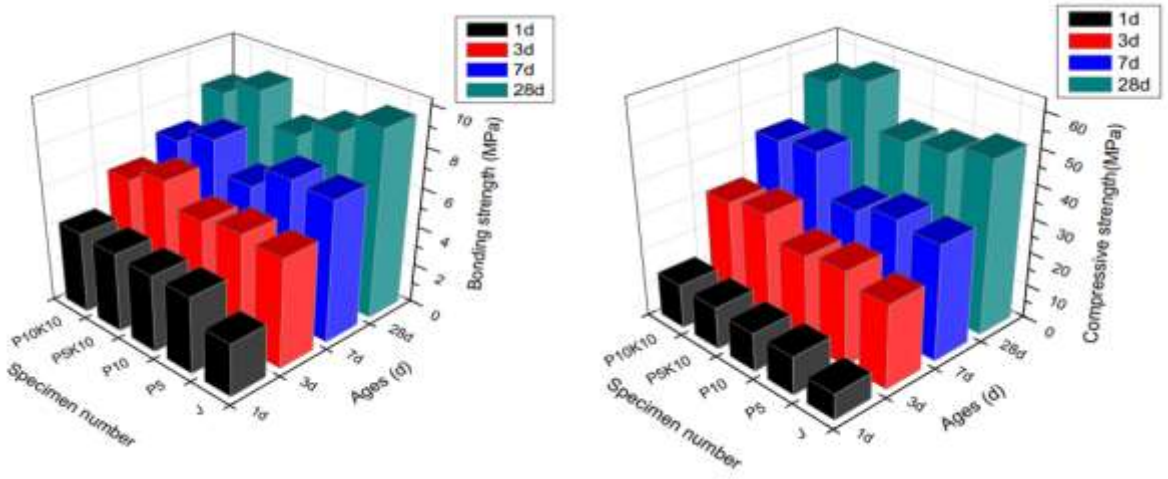
		Flexural strength (MPa)		
Sample designation	nano-TiO_2 particle (%)	7 days	28 days	90 days
C0 (control)	0	4.2	4.4	4.7
N1	0.5	4.9	5.1	5.6
N2	1.0	5.6	5.5	6.1
N3	1.5	5.1	5.4	5.7
N4	2.0	4.5	5.1	5.0

		Compressive strength (MPa)		
Sample designation	nano-TiO_2 particle (%)	7 days	28 days	90 days
C0 (control)	0	27.3	36.8	42.3
N1	0.5	30.8	41.9	45.5
N2	1.0	31.9	43.4	46.9
N3	1.5	31.5	42.5	45.9
N4	2.0	28.7	39.3	44.8

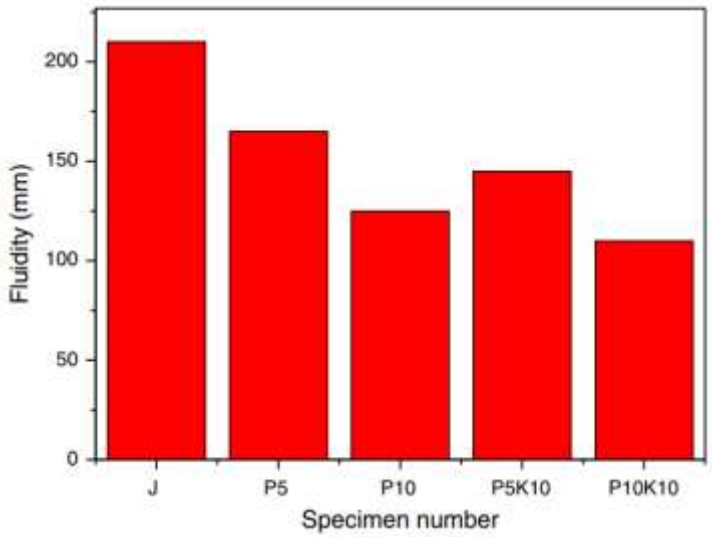
برخلاف شماری از تحقیقات که بهبود مقاومت فشاری بتن و ملات‌های سیمانی حاوی نانوذرات تیتانیوم را ناشی از افزایش هسته‌زایی و هیدراتاسیون سیمان می‌دانستند، نتایج مطالعات مِنگ و همکاران این موضوع را تایید نمی‌کند. این محققان با جایگزینی بخشی از سیمان (۵ و ۱۰ درصد) با نانوذرات تیتانیوم مشاهده کردند مقاومت بتن در سنین اولیه افزایش می‌یابد. با این حال دلیل این اتفاق از نظر آنان، کاهش و تغییر یافتن شاخص جهت‌گیری هسته‌زایی در سیمان بوده و ارتباطی با افزایش مقدار محصولات هیدراتاسیون ندارد. در بخش دیگری از آزمایشات و با بررسی تاثیر افزودن فوق روان‌کننده و پودر سرباره بر خواص بتن، مشخص شد بکارگیری این مواد باعث بهبود روانی بتن در سنین اولیه و همچنین جلوگیری از افت مقاومت آن در سنین بالاتر می‌شود (جدول ۲–**۲۰**، شکل ۲–**۴۹** و شکل ۲–**۵۰**) [۹۲].

جدول ۲–۲۰: نسبت اجزای بتن حاوی نانوذرات تیتانیوم به همراه افزودن فوق روان کننده و پودر سرباره [۹۲]

Sample number	Cement	Nano- TiO_2	Superplasticizer	Slag powder	Water	Sand
J	450	-	-	-	225	1350
P5	427.5	22.5	-	-	225	1350
P10	405	45	-	-	225	1350
P5K10	382.5	22.5	2.25	45	202.5	1350
P10K10	360	45	2.25	45	202.5	1350



شکل ۲–۴۹: مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌های حاوی نانوذرات تیتانیوم[۹۲]



شکل ۲–۵۰: جریان پذیری نمونه‌های بتن [۹۲]

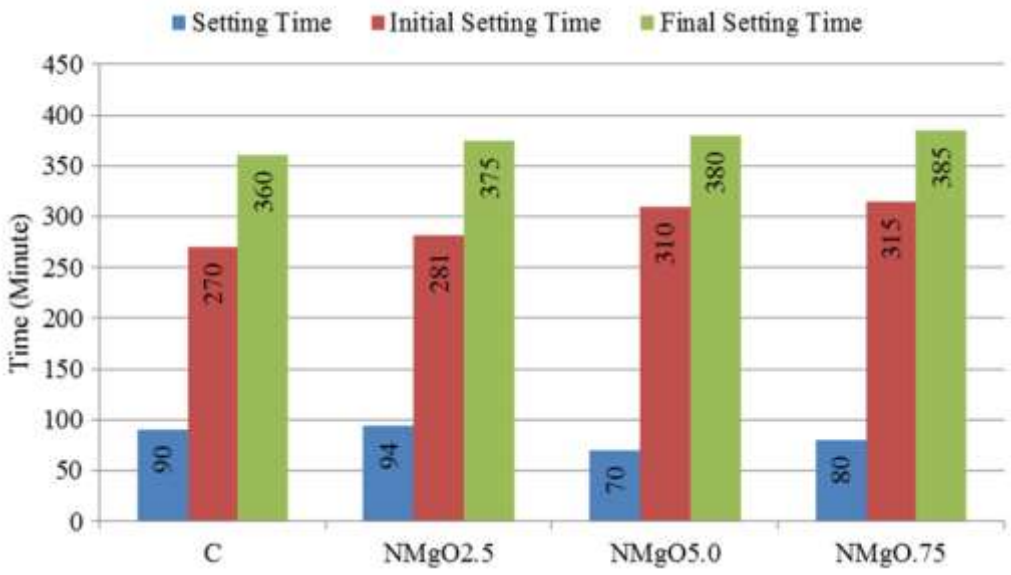
مرادپور و همکاران در تحقیقات خود اثر افزودن نانوذرات منیزیم به کامپوزیت‌های بتنی را بررسی کردند. نتایج آزمایشات مطابق جدول ۲–۲۱ نشان می‌دهد که مقاومت خمشی و فشاری تمامی نمونه‌های سیمانی حاوی ۱٪ نانوذرات منیزیم، از مقاومت‌های متناظر در نمونه‌های مرجع بالاتر است. نمونه‌های حاوی ۱٪ نانواکسید منیزیم، مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌های مقاومت فشاری را به ترتیب ۱۰۳٪ و ۸۰٪ افزایش داده است. همچنین مقاومت خمشی متناظر به ترتیب ۹۵٪ و ۷۰٪ نسبت به نمونه‌های مرجع افزایش داشتند. با این حال، با افزودن این مقدار

به بیش از ۱٪، مقاومت مکانیکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که نانو اکسید منیزیم، پتانسیل بالایی در کاهش نفوذپذیری کامپوزیت‌های سیمانی دارد (جدول ۲-۲۱). از سوی دیگر افزایش مقدار نانواکسید منیزیم، باعث افزایش بیشتر از حد حجم نمونه شده و بنابراین مقاومت در برابر سولفات را کاهش می‌دهد. خروجی عکس‌های میکروسکوپی نشان دادند که بکارگیری این نانوذره، بافت ملات سیمانی را به دلیل اثر انبساطی نانواکسید منیزیم، متراکم‌تر و همگن‌تر کرده است [۹۳].

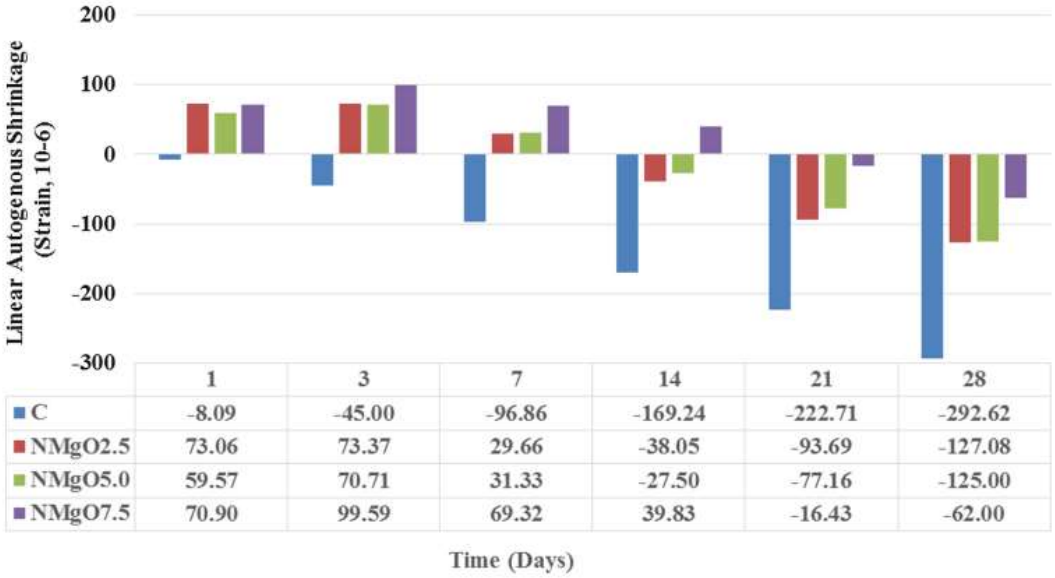
جدول ۲-۲۱: مقاومت مکانیکی و نفوذپذیری نمونه‌های حاوی نانواکسید منیزیم[۹۳]

Mixture type	Compressive strength of 7th (MPa)	Compressive strength of 28th (MPa)	Compressive strength of 90th (MPa)	Flexural strength of 7th (MPa)	Flexural strength of 28th (MPa)	Flexural strength of 90th (MPa)	Mean depth (cm)
PC	25.0	33.1	41.2	2.40	3.00	3.47	1.83
MGC1	50.8	59.53	71.3	4.66	5.10	5.63	1.23
MGC3	32.6	44.20	56.0	3.16	3.47	3.90	1.60
MGC5	27.8	38.40	49.3	2.73	3.17	3.60	1.70

پولات و همکاران [۹۴] اثر نانواکسید منیزیم بر خواص خمیر و ملات تازه سیمانی را مورد آزمایش قرار دادند. همچنین آزمایشات مربوط به مقاومت فشاری نیز تنها بر روی ملات‌های سیمانی انجام گرفت. بکارگیری ۵ و ۷ درصد وزنی از نانوذرات منیزیم گیرش خمیر را به ترتیب ۲۰ و ۱۰ دقیقه کاهش داد(شکل ۲-۵۱). مقدار افت نمونه‌ها با افزایش مقدار نانوذرات، کاهش یافت. شکل ۲-۵۲ نشان می‌دهد که بکارگیری این نانوذرات در ملات سیمانی می‌تواند مقدار افت همگن خطی را برای درصد افزودنی‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ به ترتیب به اندازه ۵۳، ۵۶ و ۸۰ درصد کاهش دهد.



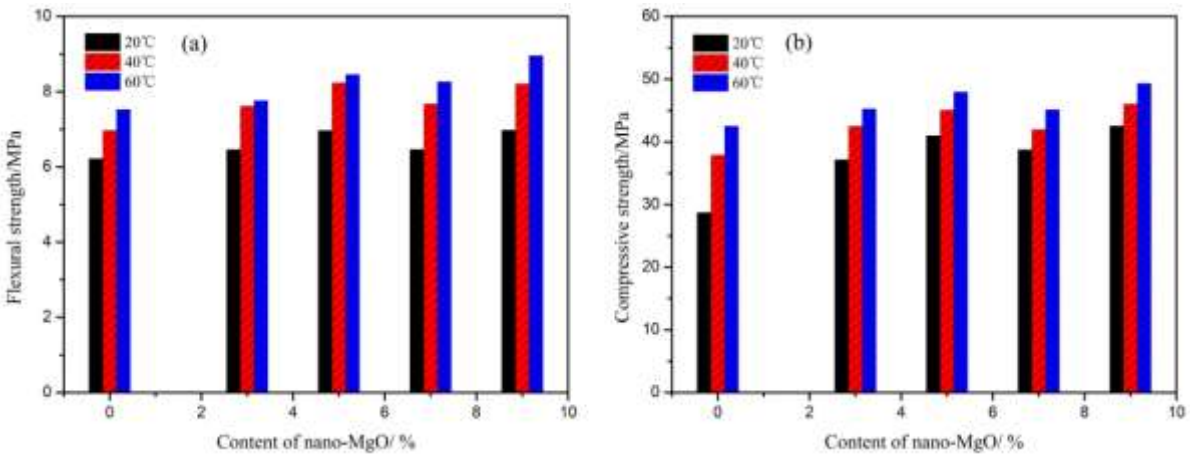
شکل ۲-۵۱: زمان گیرش نمونه‌های حاوی نانو اکسید منیزیم[۹۴]



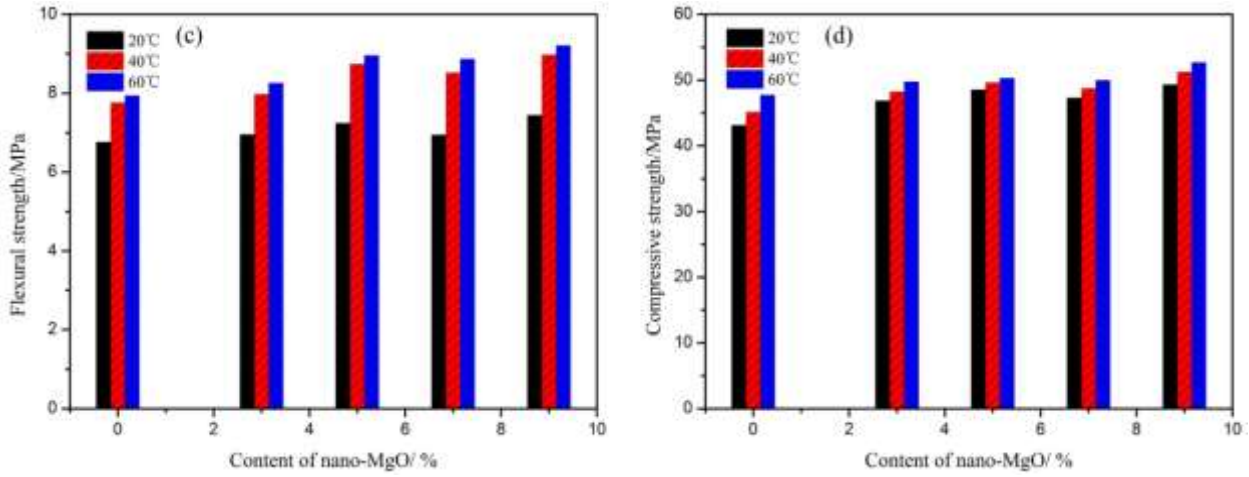
	1	3	7	14	21	28
C	-8.09	-45.00	-96.86	-169.24	-222.71	-292.62
NMgO2.5	73.06	73.37	29.66	-38.05	-93.69	-127.08
NMgO5.0	59.57	70.71	31.33	-27.50	-77.16	-125.00
NMgO7.5	70.90	99.59	69.32	39.83	-16.43	-62.00

شکل ۲-۵۲: مقدار افت خطی همگن نمونه‌ها(بر حسب ۶-۱۰) [۹۴]

سونگ و همکاران [۹۵] خواص نمونه‌های خمیر سیمانی حاوی نانواکسید منیزیم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها مطابق شکل ۲-۵۳ و شکل ۲-۵۴ نشان می‌دهد که افزایش درصد نانو اکسید منیزیم از ۱ تا ۹ درصد سبب رشد تدریجی مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌ها می‌گردد. مقاومت الکترولیتی محلول و مقاومت گذردهی یون نمونه‌ها با افزایش مقادیر نانو اکسید منیزیم، افزایش یافت.



شکل ۲-۵۳: مقاومت‌های خمشی و فشاری نمونه‌های بتن در ۲۸ روز[۹۵]



شکل ۲–۵۴: مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌های بتن در ۹۰ روز[۹۵]

وایلد و همکاران [۹۶] تاثیر افزودن متاکائولن به سیمان در مقاومت فشاری آن را مثبت دانستند. با این حال بهینه‌ترین مقدار جایگزینی سیمان پرتلند با متاکائولن به منظور این افزایش مقاومت در دراز مدت را ۲۰ درصد عنوان کردند. بروکس و همکاران [۲۴] نیز بکارگیری متاکائولن را در مقاومت فشاری موثر ارزیابی کردند. مقدار بهینه در آزمایش آنان ۱۰٪ عنوان شد که البته این نتیجه در آزمایشات بعدی لی و همکاران [۲۵] نیز همین مقدار بهینه را تایید می‌کرد.

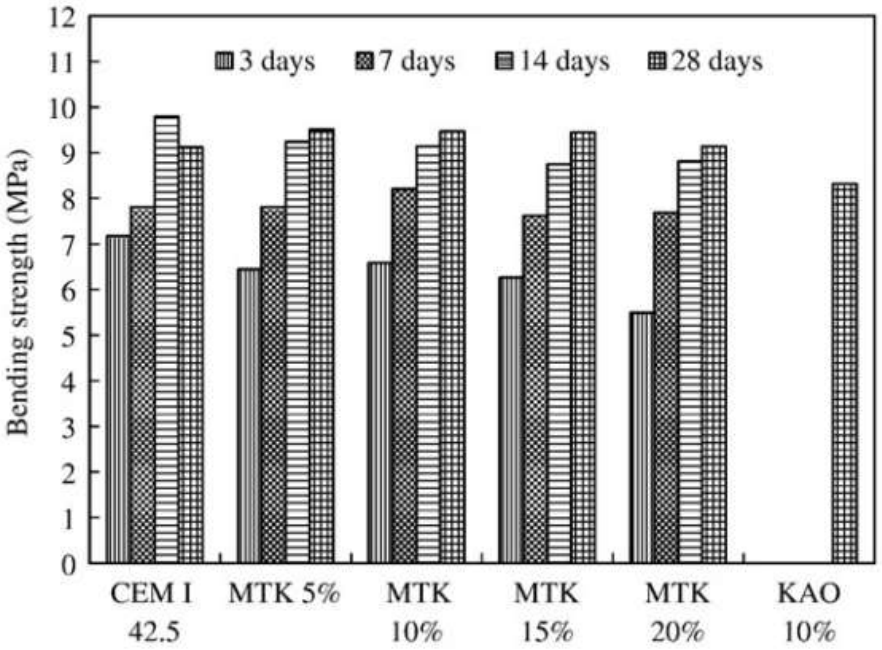
آزمایشات پون و همکاران [۹۷] نشان داد تمامی نمونه‌های حاوی ۵ تا ۲۰ درصد متاکائولن نسبت به نمونه‌های مرجع مقاومت فشاری بیشتری در بازه ۳ تا ۹۰ روزه دارند. همچنین نتایج آزمایشات بادوگیانیس و همکاران[۲۶] نشان داد ۱۰٪ افزودن متاکائولن نتایج مقاومتی بهتری به خصوص در ۲۸ و ۱۸۰ روز پس از ساخت بتن دارد.

کیان و لی [۹۸] در تحقیقی مقاومت‌های خمشی و کششی بتن‌های حاوی متاکائولن را بررسی کردند. متاکائولن در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به جای سیمان پرتلند در ساختار خمیر سیمان بکار رفت. با افزایش درصد متاکائولن، مقاومت کششی به طور منظم افزایش یافت. جایگزینی ۵٪ متاکائولن بر روی مقاومت خمشی چندان موثر نبود. با این حال در ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی متاکائولن، مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌ها به ترتیب ۳۲٪ و ۳۸٪ نسبت به نمونه مرجع بهبود پیدا کرد.

کورارد و همکاران [۴۰] با جایگزینی ۵ تا ۲۰ درصد از سیمان پرتلند با متاکائولن، اثر آن بر مقاومت خمشی ملات‌های سیمانی را بررسی کردند (جدول ۲–**۲۲** و شکل ۲–**۵۵**). مقدار مقاومت ۳ روزه ملات با این جایگزینی، کمی کاهش یافت اما نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه، مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های مرجع داشتند.

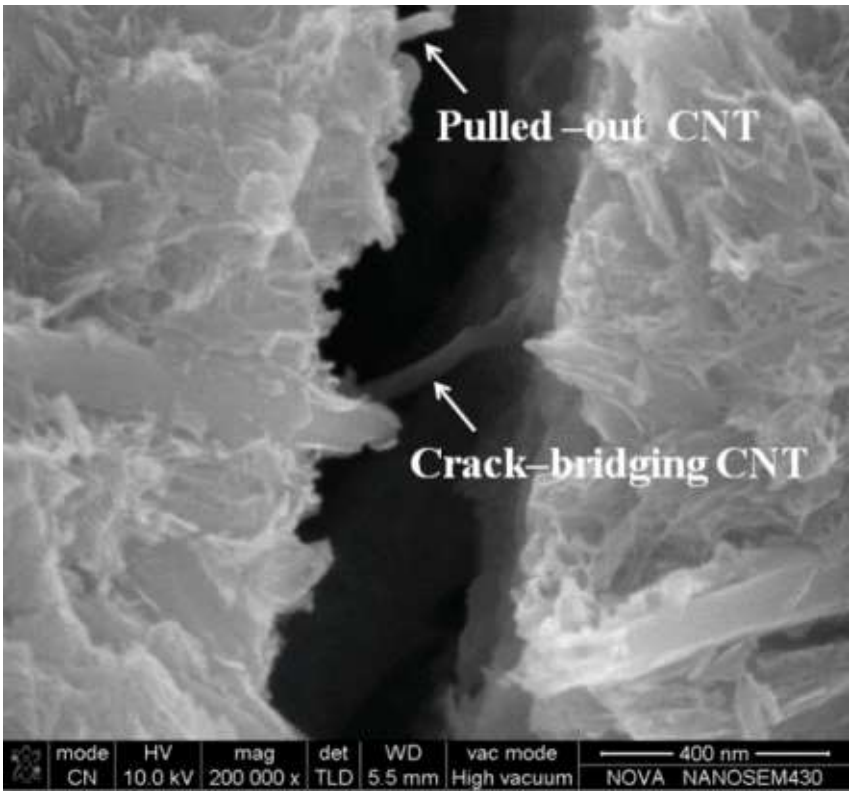
جدول ۲–۲۲: مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های حاوی متاکائولن[۹۸]

	Metakaolin content (% mass)			
	(0%)	(5%)	(10%)	(15%)
Tensile strength (MPa)	3.35	3.58	3.88	4.29
Bending strength (MPa)	4.65	4.74	6.16	6.40



شکل ۲–۵۵: مقاومت خمشی نمونه‌ها با ملات سیمانی حاوی متاکائولن[۴۰]

چاپیانیچ و همکاران [۹۹] تاثیر بکارگیری نانولوله‌های کربن در خمیرها و ملات‌های سیمانی را بررسی کردند. نتایج آزمایشات نشان داد افزودن ۰٫۱ وزنی نانولوله کربنی به سیمان، مقاومت فشاری را تا حدی بهبود می‌دهد. همچنین افزایش مقاومت ناشی از افزودن نانولوله کربنی، افت مقاومتی را که در اثر بکارگیری خاکستر بادی در طرح اختلاط بوجود آورده بود، به کلی برطرف نمود. عکس‌های میکروسکوپی الکترونی از سطح مشترک ماتریس خمیر سیمانی-خاکستر بادی و نانولوله‌های کربنی مطابق شکل **۲–۵۶**، یک اتصال مناسب را نشان می‌دهد و در واقع این نانولوله‌های کربنی به عنوان یک پرکننده، ریزساختار بافت ملات را پر کرده و عامل بهبود مقاومت در مقایسه با نمونه‌های بدون خاکستر بادی هستند.



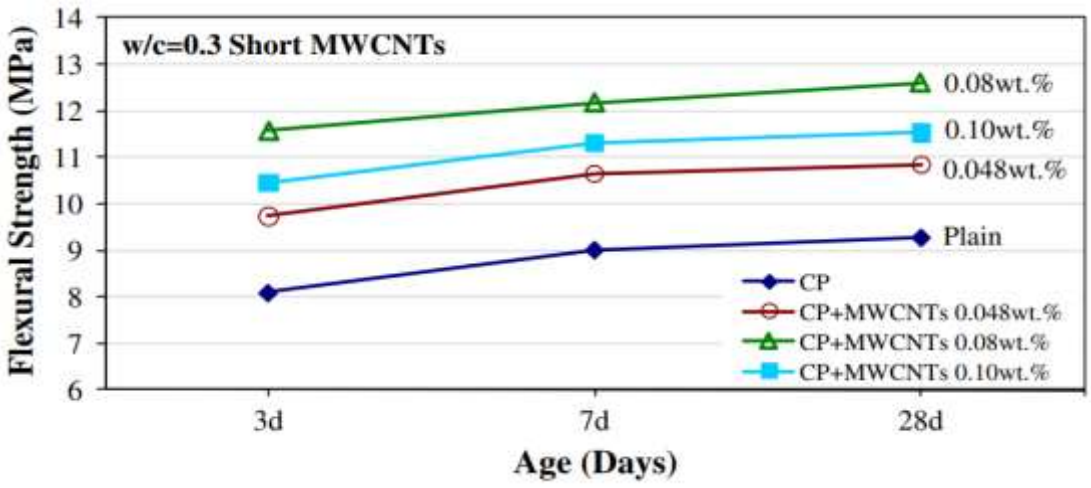
شکل ۲–۵۶: پدیده پل زنی نانولوله کربنی بر روی ترک[۹۹]

مورسی و همکاران [۱۰۰] رفتار ماتریس سیمانی در اثر بکارگیری نانولوله‌های کربنی چندجداره و نانورس را بررسی کردند. با افزایش مقدار نانولوله کربنی تا مقدار ۰/۰۲ درصد وزنی سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافت و پس از آن شروع به افت کرد. دلیل این بهبود مقاومت را می‌توان متراکم شدن ریزساختار ماتریس سیمان به دلیل اثر پرکنندگی نانوذرات رس و همچنین اثر واکنشی پوزولانی عناصر سیلیسی و آلومیناتی رس با کلسیم هیدروکسید سیمان دانست. همچنین اتصال الیاف کربن به محصولات هیدراته سیمان موجب جلوگیری از گسترش ریزترک‌ها شد. با این حال افزایش الیاف کربن به بیش از ۰/۰۲ درصد موجب شد تا الیاف کربنی کلوخه شده و هیدراتاسیون دانه‌های سیمانی به طور کامل انجام نشود. در این صورت محصولات هیداته سیمان نیز اتصال مناسبی به هم پیدا نمی‌کنند. لی و همکاران [۴۶] نیز اثر نانولوله‌های کربنی چندجداره بر مقاومت فشاری را بررسی کردند. نتایج استفاده از این الیاف ۶ میلیمتری نشان از بهبود ۱۹ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی داشت.

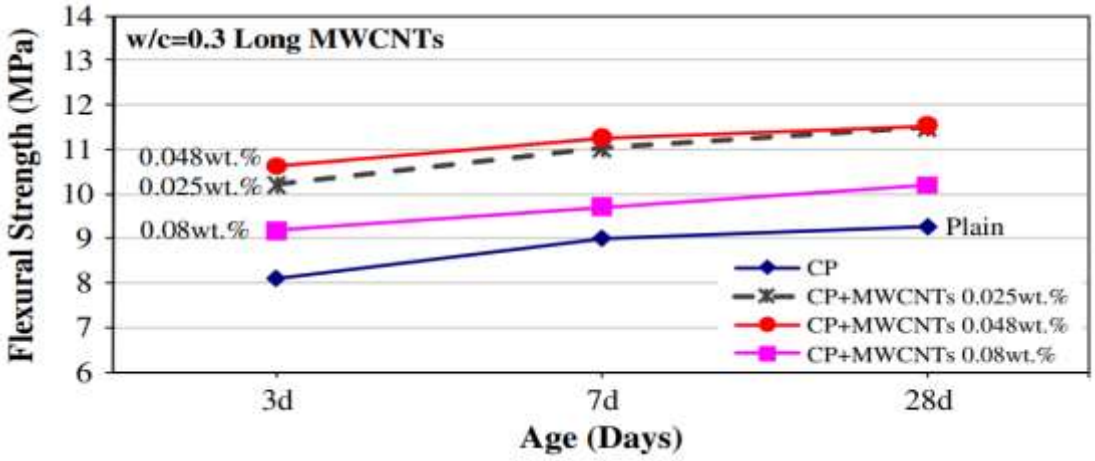
در بررسی مقاومت خمشی، متاکسا و همکاران [۱۰۱] با بکارگیری دو روش مختلف آلتراسونیک، از نانولوله‌های کربنی چندجداره در ماتریس سیمانی استفاده کردند. در هر دو نوع روش، نانولوله‌های کربنی مقاومت خمشی ملات‌های سیمانی را افزایش دادند.

گدوتس و همکاران [۱۰۲] تاثیر الیاف نانولوله کربنی با دو طول مختلف و با دو درصد تمرکز مختلف را در مقاومت خمشی بررسی کردند. در تمامی آزمایشات، مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی الیاف کربنی از نمونه‌های سیمانی ساده بیشتر بود. همچنین در بررسی تاثیر تمرکز الیاف در نمونه‌های کوتاه‌تر، نمونه‌های دارای تمرکز الیافی بیشتر، مقاومت‌های بالاتری کسب کردند.

همین محققان در آزمایش دیگری[۱۰۳]، تاثیر درصدهای مختلف ۰/۰۴۸، ۰/۰۸ و ۰/۱ درصد نانولوله کربنی با نسبت‌های ابعادی مختلف را بر مقاومت خمشی ماتریس سیمانی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد مقاومت خمشی نمونه‌های ۰/۰۸ درصدی نانو الیاف با طول کوتاه، در تمام بازه‌های زمانی ۳، ۷ و ۲۸ روزه نسبت به سایر درصدها، بالاتر است. علاوه بر پتانسیل پراکنش مناسب‌تر الیاف کوتاه، دلیل دیگری که موجب افزایش مقاومت می‌گردد تعداد بیشتر الیاف گذرا از ترک می‌باشد. از شکل ۲–**۵۷** چنین نتیجه می‌شود که پراکنش مناسب الیاف کوتاه با درصدهای بالاتر از ۰/۰۸ درصد امکان‌پذیر نباشد. همچنین الیاف در نمونه‌ها با کمتر از ۰/۰۸ درصد، به خوبی نتوانسته‌اند موجب خنثی سازی اثر ریزترک‌ها شوند. از این رو بهینه‌ترین درصد استفاده از نانوالیاف کربنی برای الیاف کوتاه در حدود ۰/۰۸ درصد وزنی سیمان عنوان شده است. از طرف دیگر، برای الیاف بلند، آزمایشات مشابه تکرار گردید (شکل ۲–۵۸). در آنجا نیز افزودن درصدهای مختلف الیاف بلند باعث بهبود مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به خمیر سیمان ساده شد. با این حال، در بین درصدهای مختلف الیاف، مقاومت نمونه ۰/۰۴۸ درصدی از سایر نمونه‌ها عدد بالاتری را کسب کرد. در این آزمایش به نظر می‌رسد برای بدست آوردن درصد بهینه نانولوله‌های کربنی در ملات‌های سیمانی، علاوه بر مقدار بکارگیری، نسبت ابعادی الیاف نیز اهمیت دارند؛ زیرا این دو همزمان بر روی نحوه پراکنش الیاف سیمانی تاثیرگذار هستند.



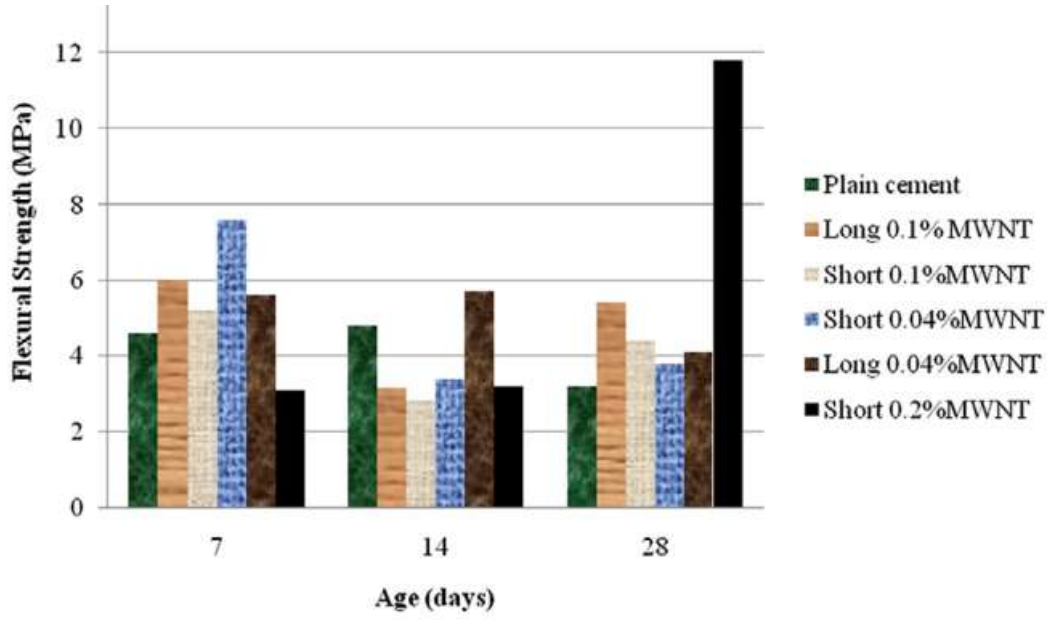
شکل ۲–۵۷: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف نانولوله کربنی کوتاه با درصدهای مختلف وزنی[۱۰۳]



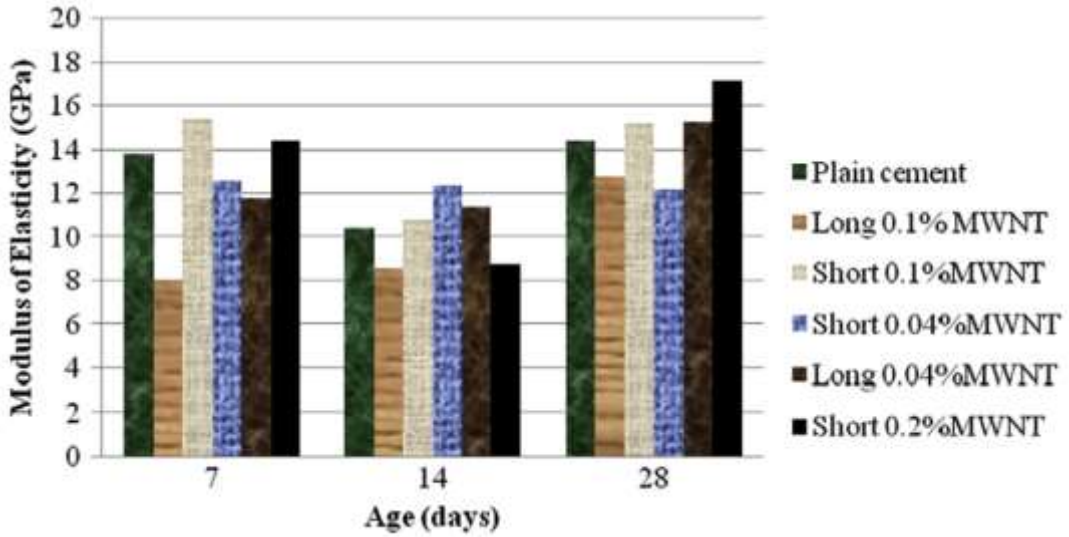
شکل ۲–۵۸: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف نانولوله کربنی بلند با درصدهای مختلف وزنی[۱۰۳]

پارامتر مکانیکی مهم دیگری که مورد بررسی محققان قرار گرفته است، مدول الاستیسیته یا مدول یانگ است. نتایج آزمایشات متاکسا و همکاران [۱۰۱] با درنظرگیری دو روش التراسونیک مختلف، نشان داد افزودن نانوالیاف کربنی چندجداره، مدول الاستیسیته ملات‌های سیمانی را بهبود می‌بخشد. در تحقیقات گدوتس و همکاران [۱۰۲] نیز مشخص شد، نمونه‌های حاوی الیاف نانولوله کربنی کوتاه با مقدار ۰/۰۸ درصد و الیاف بلند با درصد تمرکز ۰/۰۴۵ دارای بیشترین مقدار مدول یانگ هستند.

ابو و همکاران [۱۰۴] نیز مدول یانگ نمونه‌های حاوی الیاف کربنی چندجداره در ماتریس سیمانی را ارزیابی کردند. مدول یانگ نمونه‌ها پس از ۷ روز تقریبا با نمونه‌های مرجع برابر بود. با گذشت زمان تا ۱۴ روز، مدول یانگ نمونه‌ها دچار کاهش شد ولی مدول الاستسیته در نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به زمان ۷ و ۱۴ روزه مقادیر بالاتری داشتند. نکته دیگر آن است که همین محققان در بررسی مقاومت خمشی نمونه‌های سیمانی با درصد نانوالیاف کربنی مختلف به نتایج مشابهی رسیدند. در واقع مقاومت ۷ روزه چندان تغییرات مثبتی را نسبت به نمونه‌های مرجع تجربه نکرده و حتی نمونه‌های ۱۴ روزه، مقاومت‌های کمتری نسبت به نمونه‌های ۷ روزه پیدا می‌کنند. با این حال مشابه مدول یانگ، مقاومت خمشی مجددا نرخ افزایشی به خود می‌گیرد. این نرخ افزایشی برای نمونه حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانولوله کربنی عددی در حدود ۲۷٪ بهبود را در مقاومت خمشی نشان می‌دهد (شکل ۲–۵۹ و شکل ۲–۶۰).



شکل ۲–۵۹: مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف نانولوله‌های کربنی چندجداره با درصد وزنی و طولی مختلف[۱۰۴]

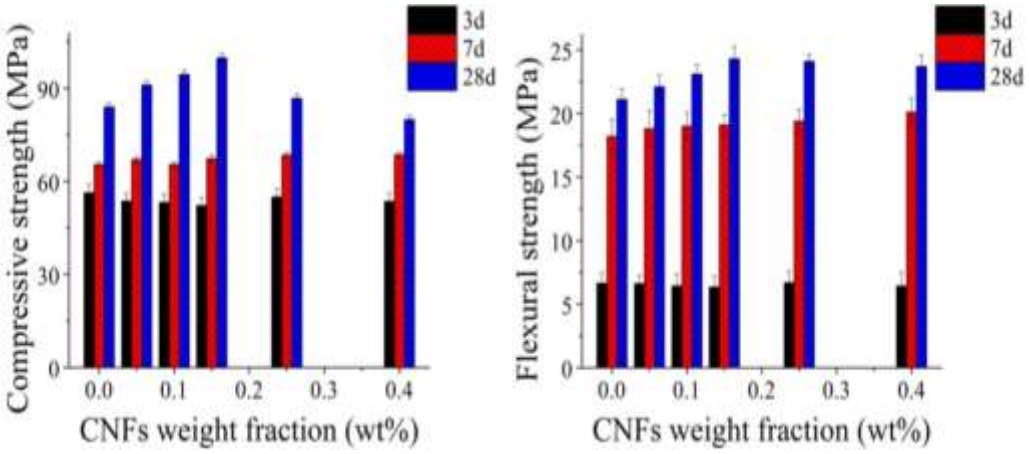


شکل ۲–۶۰: مدول یانگ(الاستیسیته) نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره با درصد وزنی و طولی مختلف[۱۰۴]

از راه‌های بهبود مشکل ضعف بتن در کشش و شکست ترد، مسلح کردن آن با استفاده از نانو الیاف سلولزی(CNF) می‌باشد. دانشمندان دانشگاه‌های نانجینگ فارستی چین و نورسترن آمریکا توانستند با افزودن ۰/۱۵ درصد CNF در خمیره سیمان به ترتیب افزایش ۱۵ و ۲۰ درصد مقاومت خمشی و فشاری را گزارش کنند. نانوالیاف سلولزی قابل استخراج از گیاهان چوبی و غیرچوبی شامل مزایای زیادی همچون دانسیته کم، قابلیت دسترسی بالا، تجدیدپذیری و ویژگی‌های مکانیکی مناسبی در مقایسه با فیبرهای مصنوعی می‌باشند. حضور گروه‌های قطبی هیدروکسیل در نانوالیاف سلولزی سبب ایجاد آب‌دوستی شدید و پراکندگی غیریکنواخت آن‌ها در محیط‌های

غیرقطبی می‌شود. بر خلاف پلیمرهای دارای بنیان نفتی که از منابع نفتی محدود در جهان ساخته می‌شوند، نانوالیاف سلولز یک ماده تجدیدپذیر است [۱۰۵].

سیمان به دلیل دوام بالا و هزینه اندک، به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما ضعف در کشش و شکست ترد همواره یکی از معضلات اصلی آن بوده است. یکی از راه‌های بهبود این مشکل، مسلح کردن بتن با استفاده از نانو الیاف سلولزی (CNF) است. دانشمندان دانشگاه‌های نانجینگ فارستی چین و نورسترن آمریکا تاثیر CNF را بر خصوصیات مکانیکی، درجه هیدراسیون و ریزساختار خمیره سیمان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با افزودن ۰/۱۵ درصد CNF در خمیره سیمان به ترتیب ۱۵ و ۲۰ درصد افزایش مقاومت خمشی و فشاری خمیره سیمان را مشاهده کردند (شکل ۲-۶۱). بهبود در خصوصیات مکانیکی به درجه هیدراسیون بالا و ریزساختار مناسب برای خمیره سیمان حاوی افزودنی CNF نسبت داده می شود. در شکل ۲-۶۱ زیر روند تاثیر نانو الیاف سلولز در خمیره سیمان و همچنین نتایج مربوط به مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی نانو الیاف سلولزی قابل مشاهده است [۱۰۵].



شکل ۲-۶۱: روند تاثیر نانو الیاف سلولز در خمیره سیمان و همچنین نتایج مربوط به مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی نانو الیاف سلولزی برای ۳،۷ و ۲۸ روز عمر بتن [۱۰۵]

یکی از مشکلات اجرای بتن سرریز رویه سدها، خطر ترک‌خوردگی در اثر جمع شدگی خمیری می‌باشد. استفاده از الیاف نانو پلی پروپیلن یکی از راهکارهای کاهش پتانسیل خطر ترک خوردگی خمیری و کاهش عرض ترک‌های محتمل است. در پژوهش محمدی و شهبازی عملکرد الیاف در کاهش ترک‌خوردگی خمیری رویه سرریز سد کارون ۴ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد استفاده از ۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف نانو پلی پروپیلن سبب تقلیل ضریب کاهش ترک CRR تا مرز حذف ترک شده است. این در حالی است که به جهت روان‌کنندگی، از مواد روان کننده ممتاز استفاده شده است. [۱۰۶]

با توجه به اینکه بتن، یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی می‌باشد، بهبود خواص مقاومتی آن با استفاده از انواع افزودنی‌ها، توجه بسیاری از محققان را به خود اختصاص داده است. در پژوهشی، امیر نادی به بررسی اثر وجود افزودنی نانولوله کربنی در ترکیب‌های ۱ تا ۵ درصد وزنی سیمان مصرفی در بتن پرداخته است. تاثیر این مواد در مقاومت بتن توسط دستگاه‌های آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی سنجیده شده است. در جدول

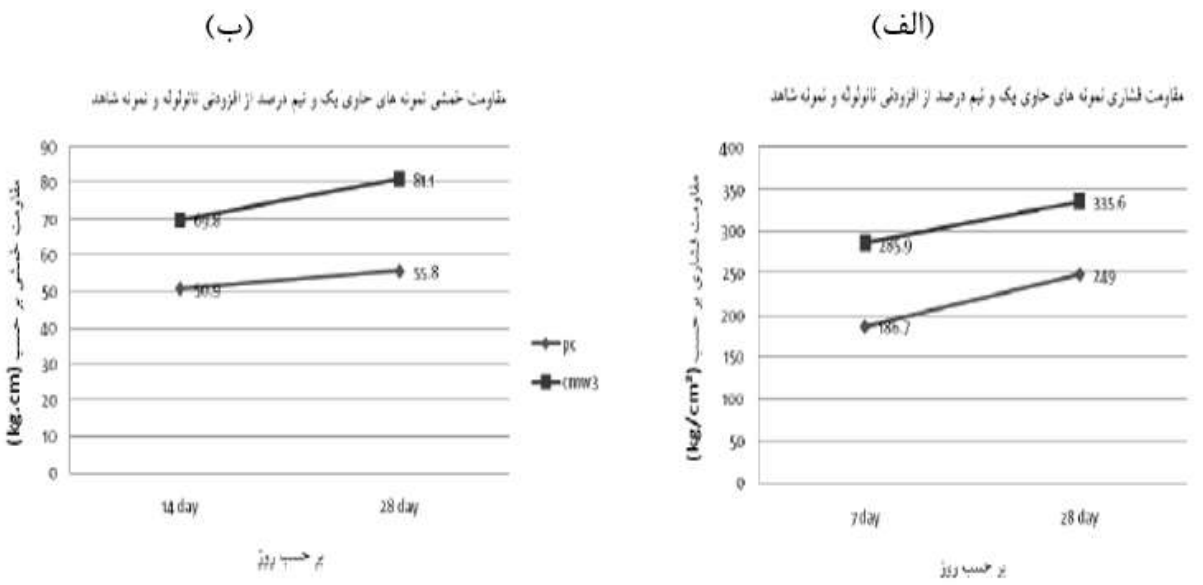
۲-۲۳ و شکل ۲-۶۲ داده شده است که افزودن ۱/۵ درصد وزنی سیمان در بتن، سبب افزایش مقاومت فشاری به میزان ۳۵ درصد و مقاومت خمشی بتن به میزان ۴۵ درصد می‌گردد. افزایش نانولوله کربنی به میزان ۲ درصد وزنی سیمان مطابق جدول ۲-۲۴ و شکل ۲-۶۳ باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی در بتن می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش، وجود نانولوله کربنی در کامپوزیت بتنی، سبب پیوند سطح نانولوله کربنی با ماتریس بتنی پیرامون آن گردیده و درنتیجه موجب انتقال نیروی بیشتر می‌شود همچنین با توجه به افزایش مقاومت خمشی، نانولوله‌های کربنی مانند پلی روی، میکروترک‌های بتن را پوشانده و از پیشرفت ترک‌های بتن جلوگیری می‌کنند و منجر به تقویت قابل ملاحظه مقاومت کامپوزیت بتنی می‌شوند[۱۰۷].

جدول ۲-۲۳: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد نانو لوله کربنی [۱۰۷]

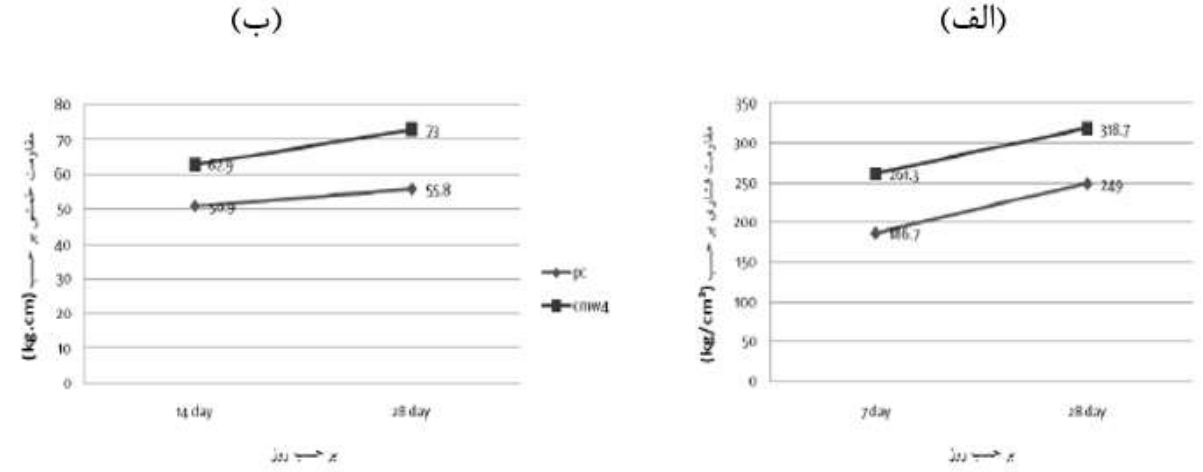
نام نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت خمشی ۱٤ روزه	مقاومت خمشی ۲۸ روزه
CMW3	۲۸۹/۲	۳۳۰/۳	۶۷/۹	۸۰/۶
CMW3	۲۸۳/۳	۳۴۰	۷۱/۱	۸۲/۳
CMW3	۲۸۵/۲	۳۳۶/۵	۷۰/۴	۸۰/۴
میانگین	۲۸۵/۹	۳۳۵/۶	۶۹/۸	۸۱/۱

جدول ۲-۲۴: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی۲ درصد نانو لوله کربنی [۱۰۷]

نام نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت خمشی ۱٤ روزه	مقاومت خمشی ۲۸ روزه
CMW3	۲۵۹	۳۱۴/۷	۶۷/۱	۷۴
CMW3	۲۶۱/۸	۳۲۳/۳	۶۱/۸	۷۲/۳
CMW3	۲۶۳/۱	۳۱۸/۱	۵۹/۸	۷۲/۷
میانگین	۲۶۱/۳	۳۱۸/۷	۶۲/۹	۷۳



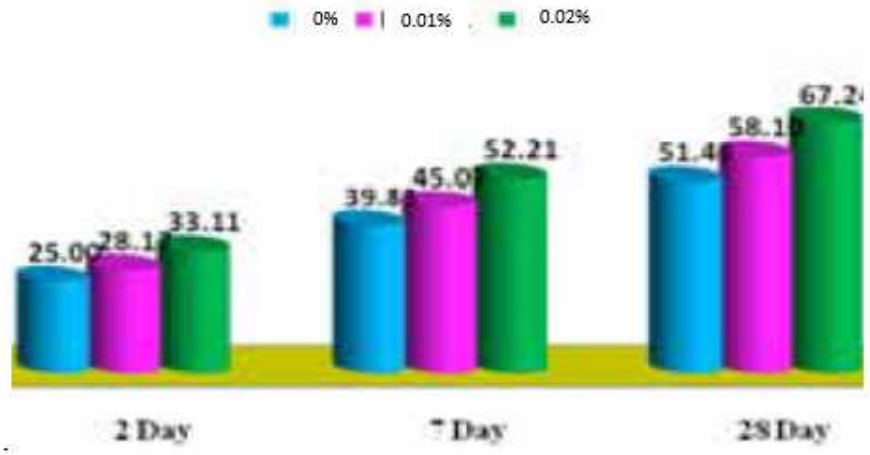
شکل ۲–۶۲: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد نانو لوله کربنی و نمونه شاهد الف) مقاومت فشاری ب) مقاومت خمشی[۱۰۷]



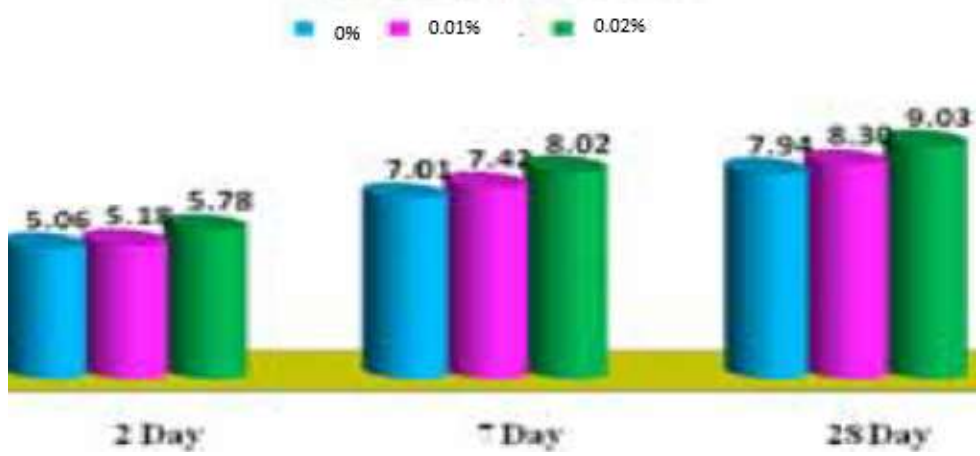
شکل ۲–۶۳: مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های حاوی۲ درصد نانو لوله کربنی و نمونه شاهد الف) مقاومت فشاری ب) مقاومت خمشی [۱۰۷]

در پژوهشی کشاورز و همکاران اثر حضور نانو لوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با عامل کربوکسیلیک در ترکیب درصدهای وزنی ۰/۰۱ و ۰/۰۲ را مطالعه کردند. نمونه‌های نانوکامپوزیت بتنی از توزیع یکنواخت نانولوله‌ها در مخلوط سیمان و ماسه در آب تهیه شدند. تاثیر مکانیکی نانولوله‌های کربنی توسط آنالیزهای فشاری و خمشی و اثرات ریزساختاری و تغییرات مورفولوژیکی آن‌ها توسط آنالیز میکروسکوپ الکترونی مطالعه شد. بر اساس نتایج در شکل ۲–۶۴ و شکل ۲–۶۵ افزودن نانولوله‌های کربنی به بتن، سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب به میزان۳۰ و ۱۳ درصد می‌گردد. همچنین سبب کاهش خلل و فرج نانوکامپوزیت بتنی و در نتیجه ایجاد نانوکامپوزیت بتنی فشرده‌تر و پیوسته‌تر می‌شود. نانولوله اصلاح شده در ماتریس کامپوزیت بتنی، با ایجاد سطح

تماس بیشتر و در نتیجه سطح انتقال نیروی بیشتر، سبب پیوند بهتر نانولوله با ماتریس بتنی پیرامون آن می‌گردد و از پیشرفت نقص‌های توده جلوگیری می‌کند[۱۰۸].

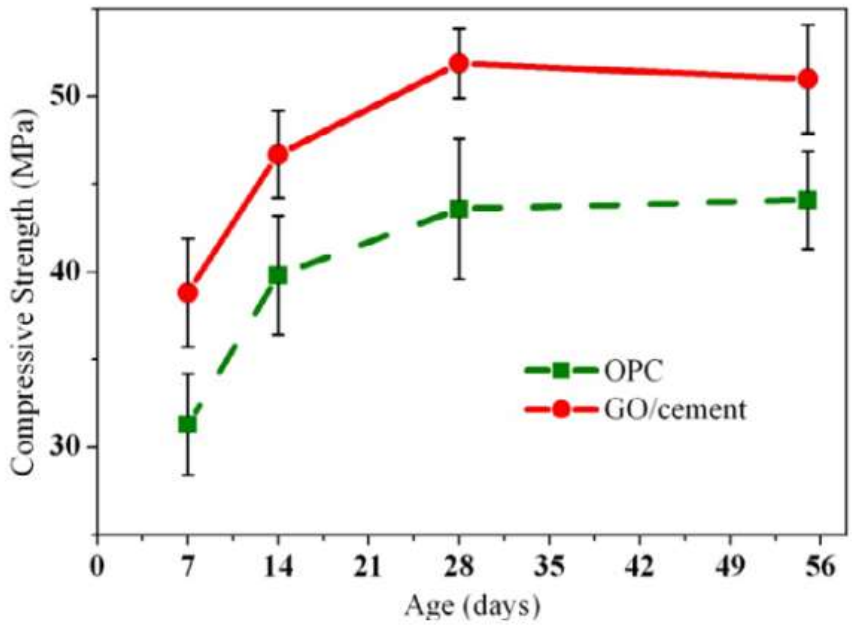


شکل ۲–۶۴: مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی نانو لوله کربنی و نمونه شاهد با سنین۲، ۷ و ۲۸ روز [۱۰۸]

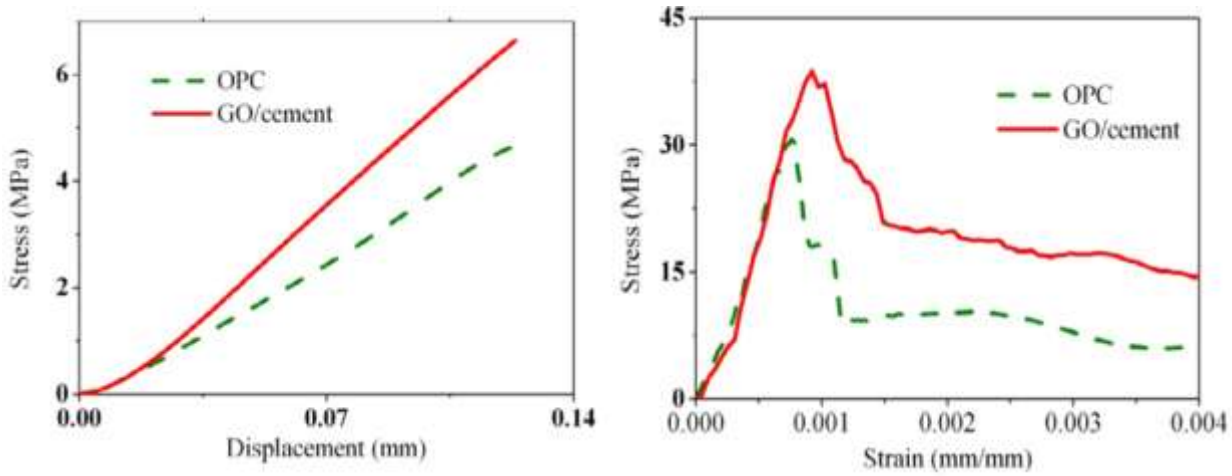


شکل ۲–۶۵ مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی حاوی نانو لوله کربنی و نمونه شاهد با سنین۲، ۷ و ۲۸ روز [۱۰۸]

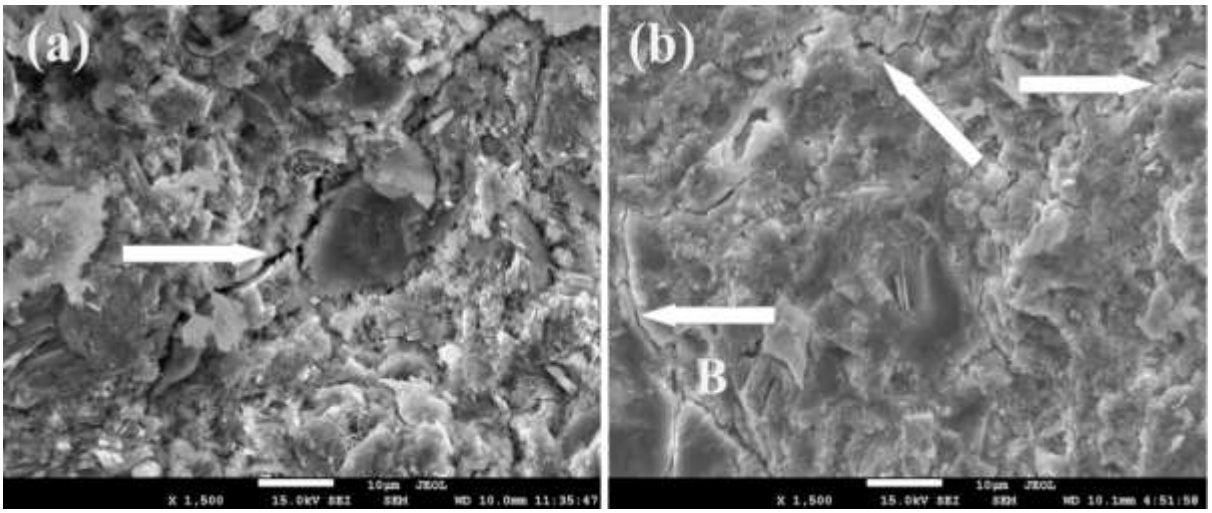
دووان و همکاران[۱۰۹]در دانشگاه موناش استرالیا روش جدیدی را در تقویت ساختار مواد ساختمانی با بکارگیری گرافن اکساید در ماتریس سیمانی توسعه دادند. با استفاده از این ماده و افزودن آن به مقدار ۰/۰۵٪ وزنی، مقاومت خمشی ماتریس سیمانی در حدود ۵۰٪ و مقاومت فشاری این سیمان در بازه ۱۵ تا ۳۳٪ افزایش داشتند (شکل ۲–۶۶ و شکل ۲–۶۷). عکس‌های میکروسکوپی از بافت نمونه‌ها در شکل ۲–۶۸ نشان می‌دهد که ساختار صفحه‌ای شکل گرافن اکساید به احتمال زیاد موجب جلوگیری از گسترش ترک شده است. در نمودار تنش کرنش شکل ۲–۶۷، کامپوزیت‌های حاوی گرافن اکساید، منحنی سختی وسیع‌تر شده و خود باعث کمتر شدن احتمال شکست ناگهانی نمونه می‌شود.



شکل ۲–۶۶: نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی حاوی گرافن اکساید و نمونه‌های سیمان معمولی[۱۰۹]

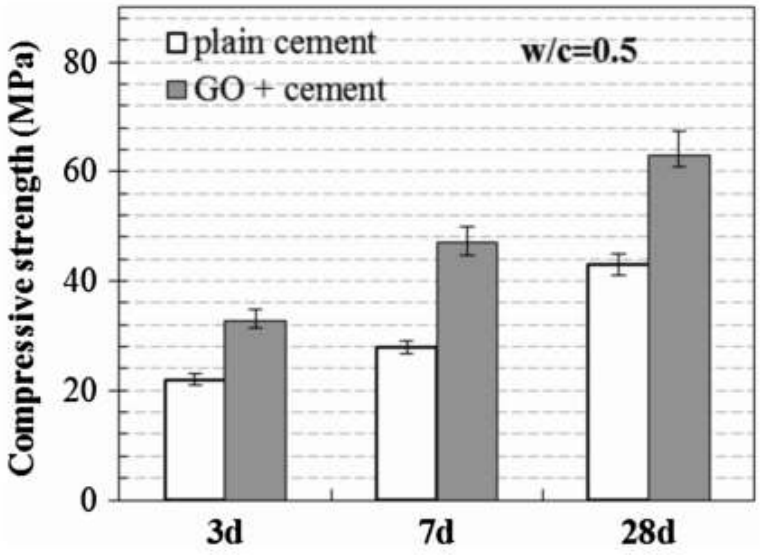


شکل ۲–۶۷: راست: نمودار تنش کرنش نمونه‌های حاوی گرافن اکساید و نمونه‌های سیمان معمولی در اثر اعمال بار فشاری چپ: نمودار تنش کرنش همان نوع نمونه‌ها تحت بار خمشی[۱۰۹]



شکل ۲–۶۸: نحوه شکل‌گیری ترک در بافت سیمانی شکل‌a یک ترک نسبتا مستقیم در نمونه مرجع (بدون گرافن اکساید) شکل‌b درهم پیچیدگی و منحرف‌شدگی مسیر ترک‌ها در اثر افزودن صفحات گرافن اکساید[۱۰۹]

گانگ و همکاران [۱۱۰] تاثیر گرافن اکساید بر خصوصیات بتن تازه و سخت شده سیمانی را بررسی کردند. مشابه افزودن سایر مواد نانوساختار به ملات سیمانی، در اینجا نیز کارایی ملات با افزودن گرافن اکساید کاهش می‌یابد. در بررسی ریزساختار بتن، تخلخل نمونه‌های حاوی گرافن اکساید ۱۳/۵درصد و منافذ مویرگی آن‌ها ۲۷/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین مقاومت فشاری و کششی بتن‌ها با افزودن ۰/۰۳ گرافن اکساید به بیش از ۴۰٪ افزایش یافتند (شکل ۲–۶۹ و جدول ۲–۲۵).

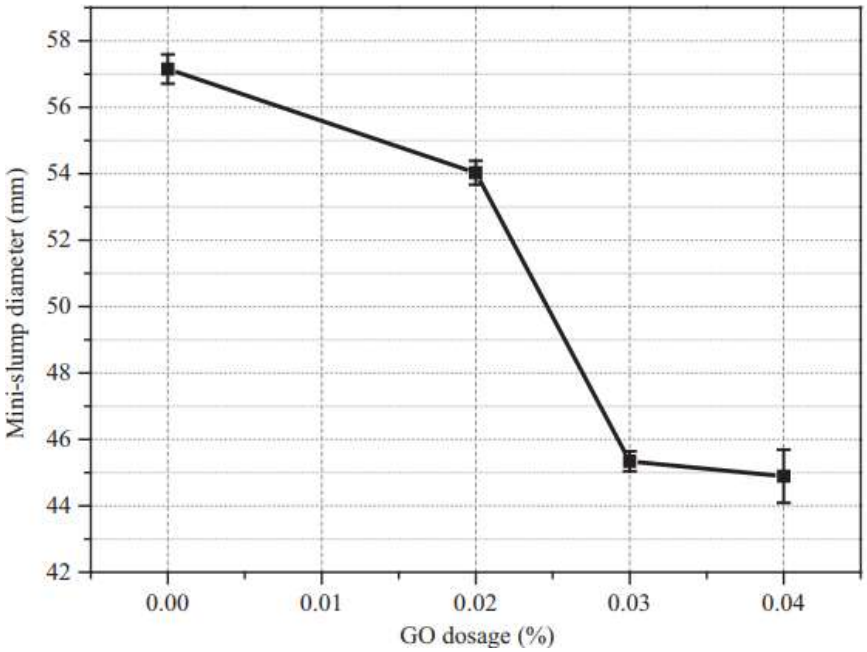


شکل ۲–۶۹: مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی ۰/۰۳ درصد وزنی گرافن اکساید- نسبت آب به سیمان:۰/۵[۱۱۰]

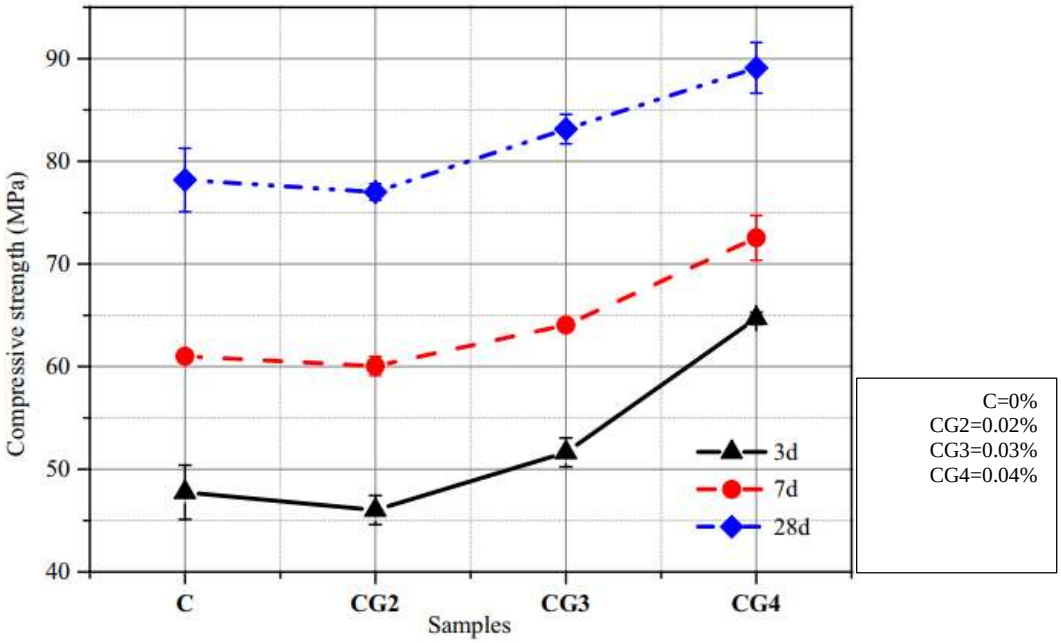
جدول ۲–۲۵: مقاومت کششی نمونه‌های حاوی گرافن اکساید[۱۱۰]

Mixes	Tensile strength (MPa)
Plain cement	4.5 ± 0.3
GO-cement	6.9 ± 0.4

لی و همکاران [۱۱۱] تحقیقی بر روی خواص مهم خمیر سیمان تقویت شده با گرافن اکساید انجام دادند. نسبت آب به سیمان در تمامی نمونه‌های ساخته شده برابر۰/۴ بود. آزمایشات نشان داد افزودن گرافن اکساید، کارایی سیمان را به دلیل تشکیل کلوخه‌های گرافن اکساید ناشی از ایجاد پیوند شیمیایی بین نانوصفحات و کاتیون‌های کلسیم، کاهش می‌دهد. مطابق شکل ۲–**۷۰** عدد مینی اسلامپ برای نمونه حاوی ۰/۰۳ درصد افزودنی، نسبت به نمونه مرجع بدون گرافن اکساید حدود ۲۱٪ کاهش یافت. همچنین آب آزاد به دلیل همین کلوخه‌شدگی کاهش می‌یابد زیرا که صفحات نانوگرافن ظرفیت بالایی در به دام انداختن آب دارند. در بحث هیدراتاسیون مشخص شد به دلیل سطح جانبی بالا و اندازه ذرات فوق‌العاده کوچک، صفحات گرافن توانسته‌اند بستری مناسب برای فرایند هسته‌زایی و هیدراتاسیون ذرات سیمان فراهم نمایند. در بررسی مقاومت نمونه‌ها و با افزودن گرافن اکساید، در شکل ۲–**۷۱**، مقاومت فشاری ملات‌ها افزایش یافت. تاثیر این افزایش تا قبل از ۰/۰۳ درصد، چندان قابل توجه نبود. با این حال با اضافه کردن این مقدار به بیش از ۰/۰۳٪، افزایش مقاومت موثر به نظر می‌رسید. نمونه ۲۸ روزه خمیر سیمان حاوی ۰/۰۴ درصد گرافن اکساید، ۱۴٪ افزایش در مقدار مقاومت فشاری داشت.



شکل ۲–۷۰: اسلامپ نمونه‌های خمیر سیمانی حاوی درصدهای مختلف گرافن اکساید[۱۱۱]



شکل ۲–۷۱: مقاومت فشاری خمیرهای سیمانی حاوی درصدهای مختلف گرافن اکساید[۱۱۱]

لِو و همکاران [۱۱۲, ۱۱۳] ریزساختار و خصوصیات مکانیکی خمیر سیمانی حاوی گرافن اکساید را به دقت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات آن‌ها در جدول ۲–۲۶ نشان می‌دهد که نانوصفحات گرافن اکساید می‌توانند تشکیل محصولات هیدراته میله‌ای و سوزنی شکل، تبدیل آن‌ها به ساختارهای منظم چندوجهی و همچنین متراکم‌سازی نهایی بافت خمیر را بهبود بخشند. علاوه بر آن، خصوصیات مکانیکی مثل مقاومت خمشی و فشاری و خواص مدول یانگ و خصوصیات دینامیکی خمیرهای سیمانی در اثر بکارگیری این نانوساختار به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داشت.

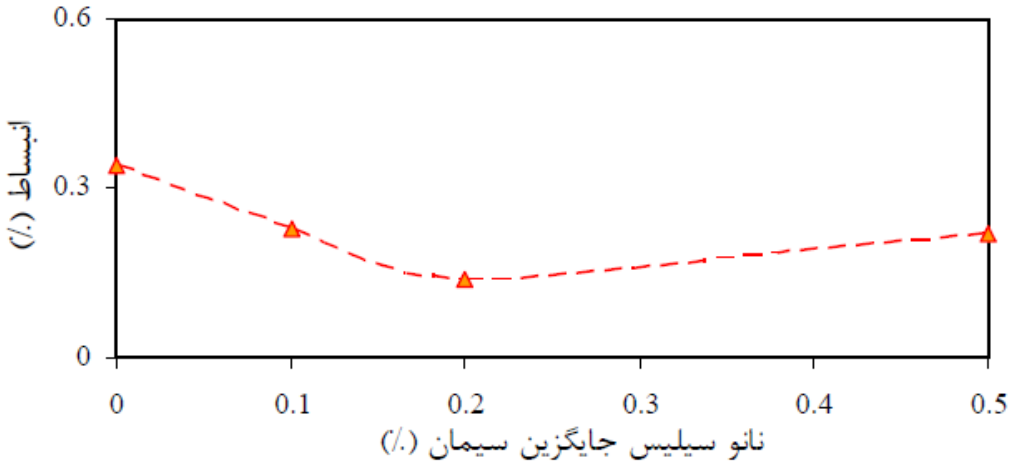
جدول ۲–۲۶: مقاومت فشاری و خمشی خمیر سیمان حاوی مقادیر مختلف گرافن اکساید و درصد بهبود این مقادیر نسبت به نمونه مرجع(بدون افزودنی) [۱۱۳]

GO content (wt/wt%)	Compressive strength (MPa)/rate of increase (%)		Flexural strength (MPa)/rate of increase (%)	
	7 days	28 days	7 days	28 days
0 (control sample)	36.74/0	59.31/0	5.63/0	8.84/0
0.01	45.31/23.3	69.65/17.4	8.85/57.2	12.34/39.6
0.02	49.51/34.75	77.82/31.2	9.21/63.6	13.68/54.8
0.03	55.56/51.22	86.62/46.1	9.93/76.4	14.72/66.5
0.04	58.61/59.5	92.36/55.7	9.88/75.5	14.74/67.1
0.05	62.25/69.4	93.38/57.4	9.37/66.4	13.53/53.1
0.06	63.27/72.7	94.26/58.5	9.19/63.2	12.63/42.9

۲-۳-۵ - تاثیر نانو ذرات بر واکنش قلیایی بتن

واکنش بین سیمان موجود در بتن و مقداری از مصالح فعال سیلیسی از مشکلات اصلی بتن‌های حجیم نظیر سدها می‌باشد. این واکنش سبب ایجاد یک انبساط قابل توجه در بتن شده و میزان این انبساط وابسته به مصالح بکار رفته در بتن و همچنین شرایط آن هنگام واکنش است. این فرایند که به عنوان واکنش قلیایی سیلیسی شناخته می‌شود، تاکنون به تعداد زیادی از سازه‌های بتنی جهان مانند سدهای بزرگ و پل‌ها آسیب رسانده است. واکنش قلیایی سیلیسی، رایج‌ترین نوع واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در بتن است. واکنش قلیایی سیلیسی در اثر واکنش بین یون‌های هیدروکسیل در محلول سیمان قلیایی با سنگدانه‌های فعال سیلیسی در سنگدانه بتن رخ می‌دهد. در نتیجه این واکنش، یک ژل تولید می‌شود که با جذب آب، متراکم و حجم آن زیاد شده و سبب افزایش فشار به بتن و در نتیجه شکست آن می‌شود[۱۱۴].

در پژوهشی دلنواز و همکاران به بررسی تاثیر نانو سیلیس و سایر افزودنی‌های بتن بر واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی پرداختند. در روند بررسی‌ها از آزمایش نمونه‌های ملات منشوری تسریع شده به روش ASTM-C1260 بر نمونه-های مختلف حاوی افزودنی‌های نانو سیلیس، دوده سیلیسی و متاکائولن استفاده شده است. نتایج نشان داده است که بهترین نتیجه جهت کاهش میزان واکنش قلیایی سیلیسی بتن مربوط به افزودن ۰/۲ درصد نانو سیلیس بوده که تا ۶۷ درصد میزان واکنش‌زایی را کاهش داده است (شکل ۲-۷۲). هرچند که مابقی افزودنی‌ها نیز تاثیرات مثبتی را در کاهش میزان انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بتن داشته‌اند[۱۱۵].



شکل ۲-۷۲: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیس بر میزان واکنش زایی قلیایی- سیلیسی[۱۱۵]

۲-۳-۶ - خلاصه نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات بتن با استفاده از مواد نانوساختار

در جدول ۲-۲۷ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در راستای بررسی تاثیرات استفاده از مواد نانوساختار بر خواص بتن به صورت دسته‌بندی شده جمع‌آوری شده است.

جدول ۲-۲۷: خلاصه نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات بتن به همراه مواد نانو ساختار

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه [1]	تاثیر و توضیحات	مرجع
کارایی و گیرش	نانو اکسید سیلیس	٪۰,۵	افزایش کارایی (در صورت ثابت نگاه داشتن نسبت آب به سیمان)	[۱۴]
		٪۳	افزایش کارایی (در صورت حداقل نگاه داشتن فوق روان‌کننده)	[۶]، [18] و [21]
		٪۵	به همراه ۵ درصد میکروسیلیس	[19]
	نانو اکسید آهن	٪۰,۵ تا ٪۲	کاهش زمان گیرش با افزودن مقدار نانومواد	[۷۱]، [۷۲]
	نانو اکسید زیرکونیوم	٪۱ تا ٪۴	افزایش سرعت گیرش اولیه	[۸۱]
	نانو کربنات کلسیم	٪ ۳/۲	افزایش کارایی و مقاومت	[۲۰]
		درصد بهینه بین ٪۵ تا ٪۱۰	افزایش کارایی و تسریع در گیرش، استفاده بیش از ٪۱۵ توصیه نشده	[۸۴]
	نانو اکسید تیتانیوم	۰/۵ تا ٪۲	تسریع در گیرش بتن	[۹۱]
	نانو اکسید گرافن	٪۰ تا ٪۰,۰۸	تسریع در گیرش اولیه و ثانویه بتن	[۲۷]
مقاومت فشاری	نانو اکسید سیلیس	۰/٪۴	به همراه ۱۰ درصد خاکستر بادی ۰/۱۶ ٪ الیاف پروپیلن و ۱/۲۵ ٪ الیاف فولادی مقاومت فشاری ٪۲۴ افزایش یافته	[۶۲]
		٪۱	٪۱۳ افزایش مقاومت فشاری	[۱۱۶]
		٪۲	به همراه ۱درصد حجمی الیاف فولادی	[۶۵]
		٪۲	٪۷۰ افزایش مقاومت فشاری ۲۸روزه (استفاده بیش از ٪۱۰ پیشنهاد نشد)	[۵۴]

جدول ۲-۲۷: ادامه

[1] منظور از درصد، نسبت وزنی نانوماده مورد نظر به سیمان یا کل مواد چسبنده در داخل یک ملات یا بتن است.

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
مقاومت فشاری	نانو اکسید سیلیس	٪۲	٪۵۲ افزایش مقاومت فشاری	[۵۸]
		٪۲	٪۴۹ افزایش مقاومت فشاری	[۱۱۷]
		٪۲	٪۸ افزایش مقاومت فشاری	[۱۱۸]
		٪۳	٪۳۱ افزایش مقاومت فشاری	[۵۳]
		٪ ۲/۵	به همراه ۲/۵ درصد میکرو سیلیس افزایش مقاومت فشاری	[۱۹]
		٪۳	به همراه خاکستر بادی در بتن سبک افزایش مقاومت فشاری	[18]
		٪۳	افزایش مقاومت فشاری	[۳۵]
		٪۴	افزایش مقاومت فشاری	[۳۷]
		٪۱-٪۶	افزایش مقاومت فشاری	[۱۰]
		٪۵	٪۱۸ افزایش مقاومت فشاری	[۶۱]
		٪۶	٪۱۴۲ مقاومت فشاری	[۴۹]
	نانو اکسید آلومینیوم	٪۱-٪۲-٪۳	٪۹ افزایش مقاومت فشاری ۱۲۰ روزه	[۶۶]
		٪۳	۳۰ درصد افزایش مقاومت فشاری	[۷۰]
		٪۱	٪۳۳ افزایش مقاومت فشاری	[۶۷]
		٪۱	افزایش مقاومت فشاری	[۲۲]
	نانو اکسید آهن	٪۱	افزایش مقاومت فشاری	[۷۱]، [۷۲]
		٪۳	بهبود مقاومت مکانیکی	[۷۵]
		٪۳	بهبود مقاومت فشاری	[۷۶] و [۷۰]
	نانو اکسید روی	٪۱	عمل‌آوری در آب	[۷۷]
		٪۲	عمل‌آوری در آهک	
	نانو اکسید زیرکونیوم	٪۱ تا ٪۴	بهبود مقاومت مکانیکی	[۸۱]
		٪۳	۱۵ ٪ افزایش مقاومت فشاری	[۸۳]
	نانو کربنات کلسیم	٪۱	٪۱۳ افزایش مقاومت فشاری در ۲۱ درجه سانتیگراد- ٪۱۷ افزایش مقاومت فشاری در ۶ درجه سانتیگراد	[۸۵]

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع

		٪۲	٪۱۱۱,۲ افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه – ٪۱۰۸,۶ افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه	[۸۸]
	نانو کربنات کلسیم	٪۲	٪۱۸ و ٪۱۴ افزایش مقاومت فشاری به ترتیب برای دماهای ۲۱ و ۶ درجه سانتیگراد	[۸۵]
		٪۲/۵	٪۱۶۹ افزایش مقاومت فشاری	[۸۴]
		۵ تا ۱۰٪	افزایش مقاومت فشاری در کوتاه مدت	[۸۴]
	نانو اکسید تیتانیوم	٪۱	افزایش مقاومت فشاری	[۹۰]، [۹۱]
		٪۵ و ۱۰٪	افزایش مقاومت فشاری	[۹۲]
	نانو اکسید منیزیم	٪۱	٪۱۰۳ افزایش مقاومت فشاری ۷روزه، ٪۸۰ افزایش مقاومت فشاری ۲۸روزه	[۹۳]
		۱٪ تا ۹٪	افزایش مقاومت فشاری	[۹۵]
مقاومت فشاری	نانو رس[1]	٪۱۰	افزایش مقاومت فشاری درازمدت	[۲۴]
		٪۱۰	افزایش مقاومت فشاری	[۲۵]
		٪۱۰	افزاش مقاومت مکانیکی بخصوص در ۲۸ روز و ۱۸۰ روز	[۲۶]
		٪۵ تا ٪۲۰	افزایش مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸روزه	[۴۰]
	نانو نانولوله کربن	٪۰,۰۲	افزایش مقاومت فشاری افت مقاومت پس از افزودن بیش از این مقدار	[۱۰۰]
		٪ ۰/۰۲	٪۳۰ افزایش مقاومت فشاری	[۱۰۸]
		٪۲	٪۳۵ افزایش مقاومت فشاری	[۱۰۷]
		مختلف	٪۱۹ افزایش مقاومت فشاری	[۴۶]
	نانو الیاف سلولزی	٪ ۰/۱۵	٪۲۰ افزایش مقاومت فشاری	[۱۰۵]
	نانو اکسید گرافن	٪۰,۰۵	افزایش مقاوت فشاری در حدود ٪۱۵ تا ٪۳۳	[۱۰۹]

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
		٪۰,۰۳	بیش از ٪۴۰ افزایش مقاومت فشاری	[۱۱۰]

[1] منظور از نانو رس عموما یکی از شاخه‌های مهم آن یعنی نانوذرات متاکائولن است.

مقاومت فشاری	نانو اکسید گرافن	٪۰ تا ٪۰,۰۴	تاثیر در مقاومت فشاری به ازای ٪۰ تا ٪۰,۰۳ اندک اما با افزودن ٪۰,۰۴ گرافن، ٪۱۴ افزایش مقاومت فشاری رخ داد.	[۱۱۱]
		٪۰ تا ٪۰,۰۶	٪۷۲ افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه و ٪۵۹ مقاومت فشاری ۲۸ روزه با افزودن ٪۰,۰۶ گرافن	[۱۱۳]
مقاومت خمشی	نانو اکسید سیلیس	٪۲	٪۱۶ افزایش مقاومت خمشی	[۱۱۷]
		٪۳	٪۵۵ افزایش مقاومت خمشی	[۵۳]
		٪۴	افزایش مقاومت خمشی	[۳۷]
	نانو اکسید آلومینیوم	٪۱	افزایش مقاومت خمشی	[۲۲]
	نانو اکسید آهن	٪۱	افزایش مقاومت خمشی	[۷۳]
	نانو اکسید روی	٪۲	عمل‌آوری در آهک	[۷۷]
		٪۱	عمل‌آوری در آب	
		٪۲	عمل‌آوری در آهک: بالاترین مقاومت خمشی	[۸۰]
		٪۱	عمل‌آوری در آب: بالاترین مقاومت خمشی	
		٪۲	عمل‌آوری در آب آهک و سپس آب معمولی: بالاترین مقاومت خمشی	
	نانو اکسید زیرکونیوم	٪۳	٪۳۵ افزایش مقاومت خمشی	[۸۳]
		٪۰ تا ٪۵	افزایش مقاومت خمشی با افزودن نانوذرات تا ٪۴ و کاهش مقاومت پس از آن.	[۸۱]

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
مقاومت خمشی	نانو کربنات کلسیم	٪۱	افزایش مقاومت خمشی نمونه های ۷ و ۲۸ روزه با افزودن ٪۱ کربنات کلسیم و افزودن بیش از ٪۱ از این ماده غیرموثر است.	[۸۸]
	نانو اکسید تیتانیوم	٪۱	افزایش مقاومت خمشی	[۹۰]

		٪۱	٪۹۵ افزایش مقاومت خمشی ۷ روزه ٪۷۰ افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه	[۹۳]
	نانو اکسید منیزیم	٪۱ تا ٪۹	افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های عمل‌آوری شده در دماهای بالاتر(۴۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد)، اثر افزودن نانومواد به نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۲۰ درجه، کمتر بود.	[۹۵]
	نانو رس	٪۵، ٪۱۰، ٪۱۵	افزودن ٪۵ چندان موثر نبود با این حال مقاومت خمشی ۲۸ روزه برای ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب ۳۲ و ۳۸ درصد افزوده شد.	[۹۸]
	نانو لوله کربن	-	افزایش مقاومت خمشی	[۱۰۱]
		درصد ها و طول های مختلف	افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه (برای دو نوع طول الیاف مختلف، در درصد تمرکز بیشتر، مقاومت خمشی الیاف کوتاه تر بالاتر است)	[۱۰۲]
		٪۰/۰۴۸، ٪۰/۰۸، ٪۰,۱	بالاترین مقاومت خمشی با افزودن ٪۰/۰۸ و برای الیاف کوتاه‌تر، استفاده بیش از ٪۰/۰۸ در مقاومت خمشی موثر نمی‌باشد.	[۱۰۳]
		٪ ۰/۰۲	٪۱۳ افزایش مقاومت خمشی	[۱۰۸]
		٪۲	٪۴۵ افزایش مقاومت خمشی	[۱۰۷]

جدول ۲-۲۷: ادامه

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
مقاومت خمشی	نانو لوله کربن	٪۰,۲	٪۲۷۰ افزایش مقاومت خمشی در ۲۸ روز	[۱۰۴]
	نانو الیاف سلولزی	٪ ۰/۱۵	۱۵ ٪ افزایش مقاومت خمشی	[۱۰۵]
	نانو اکسید گرافن	٪۰/۰۵	٪۵۰ افزایش مقاومت خمشی	[۱۰۹]
		٪۰ تا ٪۰/۰۶	٪۷۶ افزایش مقاومت خمشی ۷روزه با افزودن ٪۰/۰۳ ٪۶۷ افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه با افزودن ٪۰/۰۴	[۱۱۳]

مقاومت کششی	نانو اکسید سیلیس	٪۲	٪۳۷/۵ افزایش مقاومت کششی	[۱۱۸]
	نانو اکسید آلومینیوم	٪۱	افزایش مقاومت کششی	[۶۷]
		٪۱	افزایش مقاومت کششی	[۲۲]
	نانو اکسید آهن	٪۱ تا ٪۴	افزایش مقاومت کششی	[۷۴]
	نانو اکسید زیرکونیوم	٪۳	٪۱۷ افزایش مقاومت کششی	[۸۳]
	نانو اکسید تیتانیوم	٪۰/۵ تا ٪۲	افزایش مقاومت کششی	[۹۰]، [۹۱]
	نانو اکسید گرافن	٪۰/۰۳	افزایش ۴۰٪ مقاومت کششی	[۱۱۰]
نفوذپذیری و ریزساختار	نانو اکسید سیلیس	٪۱	به همراه ۱٪ تیتانیوم و ۱٪ آلومینیوم، نمونه بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی و کمترین احتمال خوردگی را دارد.	[۳۵]

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
نفوذپذیری و ریزساختار	نانو اکسید سیلیس	٪۲	٪۹۰ کاهش نفوذپذیری	[۵۸]
		٪ ۲/۵	به همراه ۲/۵ درصد میکرو سیلیس افزایش مقاومت در برابر یخبندان	[۳۴]
		٪۲/۵	به همراه ۲/۵٪ نانواکسید تیتانیوم، نمونه حداقل مقدار نفوذ یون کلر را داشت.	[۳۵]

		٪۶	بهبود ریزساختار و پرشدگی بافت بتن	[۱۰]
		٪۶	افزایش مقاومت در برابر باران اسیدی	[۳۳]
		٪۸	تاثیر بسیار زیاد در مقاومت در برابر حمله سولفاتی (۲ تا ۱۰ درصد موثر تر از تاثیر میکروسیلیس)	[۳۷]
	نانو اکسید آلومینیوم	٪۱	بهبود ریزساختار بافت بتن	[۶۷]
		٪۵	افزایش تراکم بافت بتن و کاهش تخلخل	[۶۸]
	نانو اکسید آهن	۰/۵ تا ۲٪	کاهش نفوذپذیری آب، کاهش سرعت جذب و کاهش ضرایب جذب آب در تمامی سنین بتن	[۷۱]

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
نفوذپذیری و ریزساختار	نانو اکسید آهن	٪۰ تا ٪۴	کاهش نفوذپذیری بتن و متراکم شدن بافت آن	[۷۴]
		٪۳	بهینه‌ترین مقدار برای بهبود ریزساختار و مقاومت کامپوزیت سیمانی	[۷۵]
	نانو اکسید روی	٪۰/۵، ٪۱، ٪۱/۵، ٪۲	افزایش تراکم بافت بتن-کاهش نفوذپذیری	[۷۷]

	نانو اکسید زیرکونیم	۰/۵ تا ۲ ٪	افزایش تراکم بافت بتن-کاهش نفوذپذیری	[۸۰]
		٪۴	بهبود ریزساختار بتن	[۸۲]
	نانو کربنات کلسیم	٪۲/۵	متراکم شدن بافت بتن و مصرف بیشتر کریستال های هیدروکسی کلسیم	[۸۴]
	نانو اکسید تیتانیوم	مختلف	بهبود ریزساختار بافت ملات های سیمانی	[۸۹]
		٪۰ تا ٪۲	بهبود ریزساختار بتن	[۳۸]
	نانو اکسید منیزیم	٪۱	افزایش تراکم بافت کامپوزیت‌های سیمانی	[۹۳]

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
نفوذپذیری و ریزساختار	نانو اکسید منیزیم	٪۱ تا ٪۹	افزایش مقاومت محلول و مقاومت گذردهی یون	[۹۵]
	نانو رس	٪۲۰	عدم مشاهده انتشار یون کلراید حتی پس از ۱ سال	[۴۰]
		٪۱۰، ٪۲۰	کاهش نرخ نفوذ یون کلر	[۴۱]

		٪۱۰	افزایش مقاومت سولفاتی بتن برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۶	[۴۴]
		۵ تا ۱۵٪	کاهش خزش بتن و کاهش افت کوتاه مدت، افت در بلند مدت در اثر افزودن این ماده افزایش می یابد.	[۲۴]
	نانو لوله کربنی	٪۰/۰۲	بهبود ریرساختار و افزایش تراکم (افزودن بیش از ٪۰/۰۲ موجب کلوخه شدگی الیاف شد)	[۱۰۰]
		٪۰/۵	کاهش ٪۲ تخلخل ملات سیمانی	[۴۵]
		٪۱	افزایش تراکم بافت بتنی	[۹۹]
		٪۱	کاهش ٪۵ تخلخل ملات سیمانی	[۴۵]

جدول ۲-۲۷: ادامه

خاصیت	نانو ماده	درصد بهینه	تاثیر و توضیحات	مرجع
نفوذپذیری و ریزساختار	نانو اکسید گرافن	٪۰/۰۳	٪۱۳/۵ کاهش تخلخل ٪۲۷/۷ کاهش حجم منافذ مویرگی	[۱۱۰]
		٪۰/۰۸	کاهش افت بتن و افزایش تراکم	[۲۷]

۲-۴- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی با استفاده از مواد نانو ساختار

مقاوم‌سازی و ارتقاء عناصر سازه‌ای برای افزایش دوره خدمت و غلبه بر محدودیت‌های اولیه طراحی و به حداقل رساندن تاثیر نقص‌های ناشی از ساخت و یا طراحی، ضروری می‌باشد. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای مقاوم‌سازی یک عضو بتن آرمه استفاده از پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) می‌باشد که به سطح خارجی عضو چسبانده می‌شود. این روش از مقاوم‌سازی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد FRP، مانند نسبت مقاومت به وزن بالا، سختی بالا، مقاوت عالی نسبت به خوردگی، راحتی استفاده و کمترین تغییر در هندسه عضو، بسیار مورد استفاده واقع می‌شود. در تیرهایی که با استفاده از صفحات CFRP تقویت شده‌اند، افزایش چشمگیر مقاومت و شکل‌پذیری گزارش شده است. میزان این افزایش به عوامل متعددی نظیر نوع، طول، عرض و ضخامت ورق‌های FRP، تعداد لایه‌های FRP، اندازه تیر، ضخامت پوشش بتن، و نوع رزین مصرفی بستگی دارد. در کنار همه مزایای استفاده از FRP، به دلیل عدم عملکرد صحیح لایه انتقال بین FRP و بتن، معایبی نیز به همراه دارد. این معایب شامل جداشدگی ورق‌های FRP و عدم سازگازی بتن و رزین اپوکسی می‌باشد. این ضعف جدا شدن ورق‌های FRP معمول‌ترین مورد خرابی در اعضای تقویت شده می‌باشد که سبب می‌شود نتوان از کل ظرفیت ورق‌های FRP استفاده کرد. یک راه حل ممکن برای رفع این مشکل، اصلاح خواص رزین اپوکسی است که سبب بالا بردن سطح آغشته‌سازی بتن و الیاف FRP توسط رزین اپوکسی می‌شود. استفاده از مواد نانو ساختار به حل این مشکل کمک شایانی نموده است و مطالعات متعددی در ارتباط با استفاده از مواد نانوساختار مختلف و تاثیر آن بر خصوصیات مختلف آن صورت پذیرفته که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است[۱۱۹, ۱۲۰].

۲-۴-۱ - مطالعات انجام شده در مورد استفاده از مواد نانو ساختار در مقاوم‌سازی سازه‌ها

همانطور که در مقدمه فوق ذکر شد، عمده مطالعات انجام شده، در مورد استفاده از مواد نانو ساختار در بهبود عملکرد رزین اپوکسی می‌باشد. البته مطالعاتی در مورد استفاده از مواد نانو ساختار بر رفتار کامپوزیت‌های الیافی[۱] نیز در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

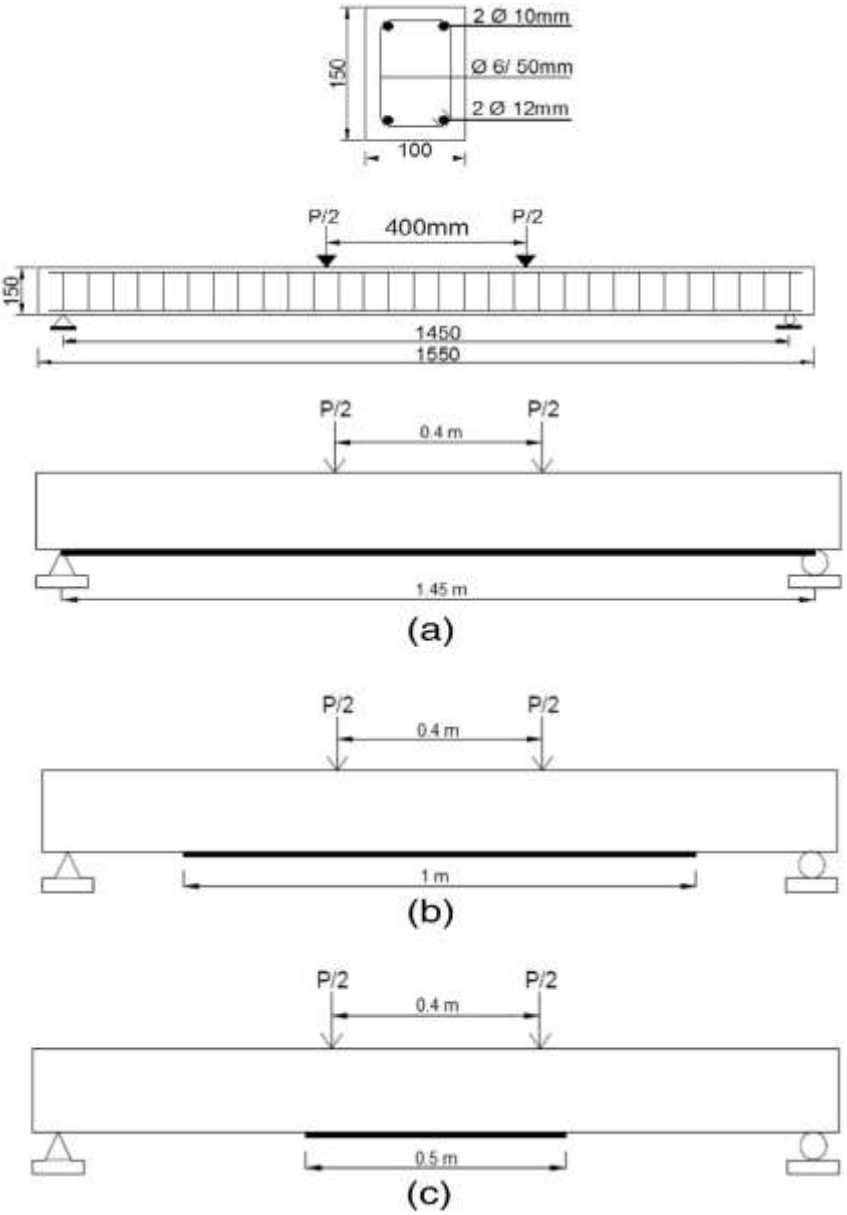
۲-۴-۱-۱- استفاده از نانولوله‌های کربن به همراه الیاف کربنی و رزین اپوکسی در مقاوم‌سازی تیرهای بتن آرمه

در این مطالعه تاثیر نانو لوله‌های کربن (CNTs) در بهبود عملکرد مقاوم‌سازی با استفاده از الیاف کربنی و رزین اپوکسی بر روی تیر بتن آرمه تقویت شده بررسی شد[۱۱۹] (شکل ۲-۷۳). الحاق CNTs بصورت اصلاح رزین

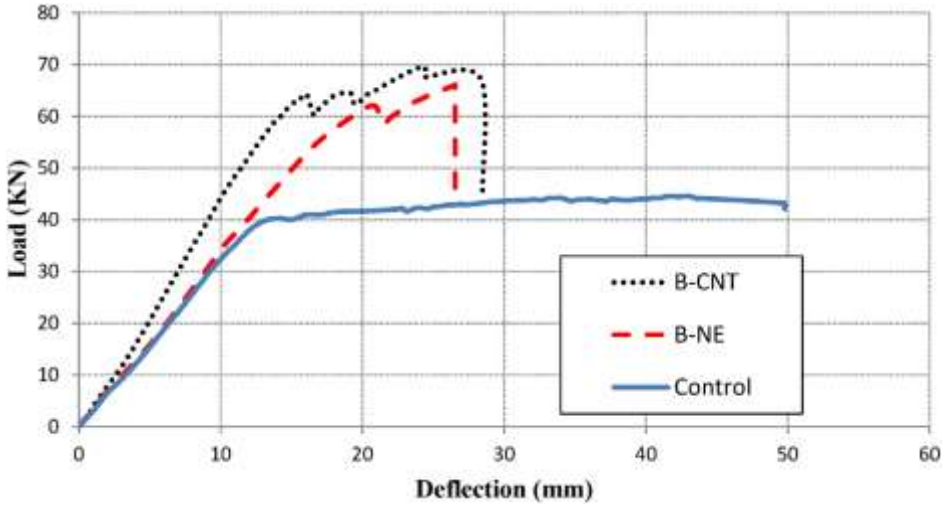
[۱] Prepreg composites

اپوکسی و پوشش دادن ورق‌های الیاف کربنی برای افزایش عامل انعقاد[۱] می‌باشد. اثر این اصلاحات برای تیرهای بتن آرمه با طول گیرایی مختلف و تعداد لایه‌های مختلف تقویت، بر روی الگوی ترک، مودهای خرابی، منحنی بار-تغییرمکان و میکروگراف‌های SEM تهیه شده از ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج استفاده از رزین اپوکسی اصلاح شده، افزایش در بار نهایی و سختی تیرهای تقویت شده را نشان داد (شکل ۲-**۷۴**). این افزایش به شدت به میزان توزیع CNT، طول گیرایی و تعداد لایه‌های تقویتی بستگی دارد. خصوصیات SEM نشان داد که CNTs می‌توانند سبب افزایش باند چسبیدن بتن و اپوکسی و همچنین الیاف و اپوکسی گردند که این خود سبب افزایش انتقال بار و بار نهایی تیر تقویت شده می‌شود (شکل ۲-**۷۵**).

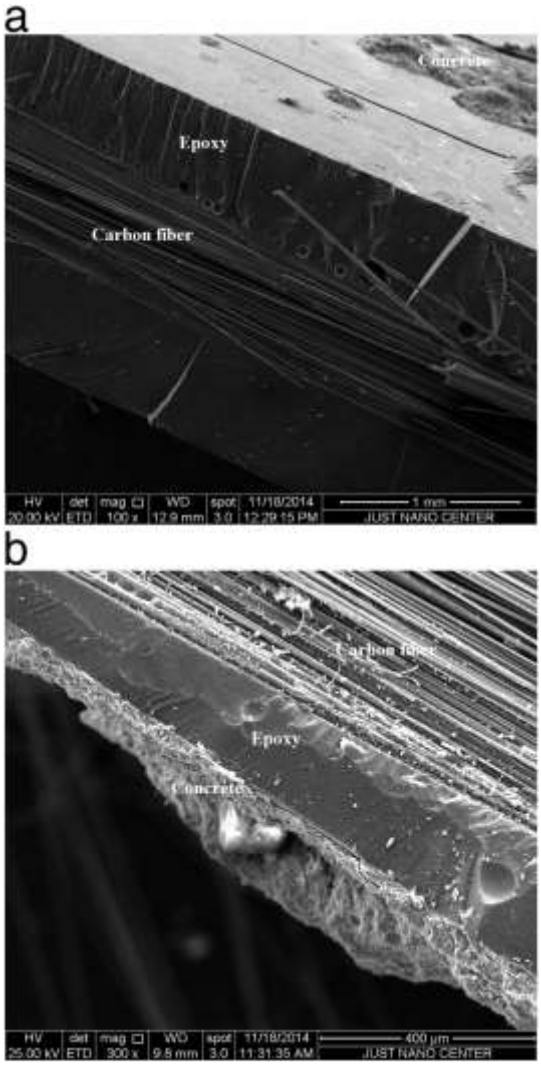
[۱] enriched sizing agent



شکل ۲–۷۳: طرح شماتیک تیر بتن آرمه، و تیر بتن آرمه تقویت شده [۱۱۹]



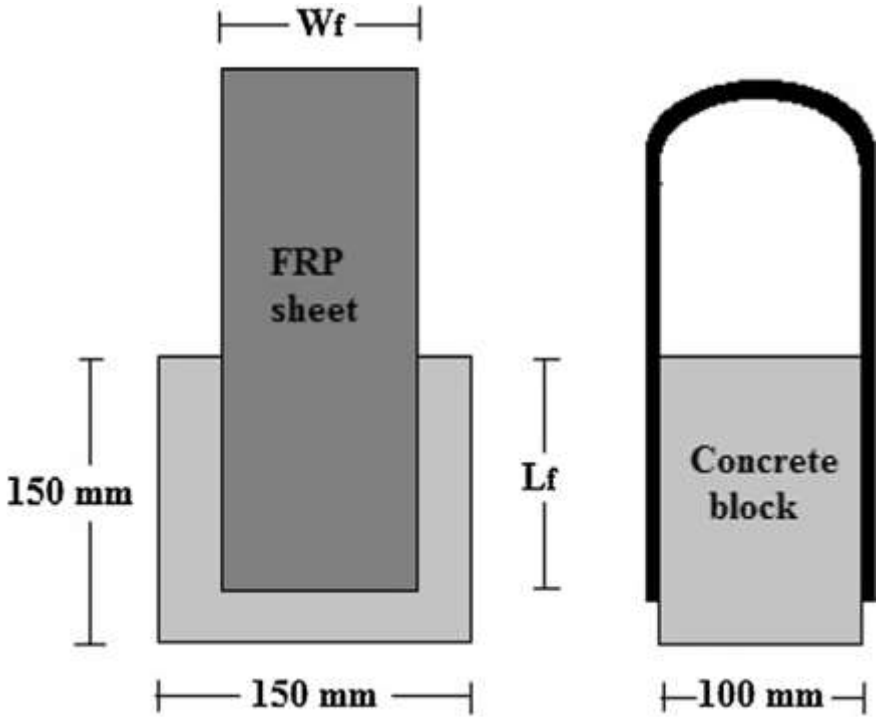
شکل ۲–۷۴: نتیجه بار تغییر مکان برای تیر شاهد، تیر تقویت شده بدون اصلاح اپوکسی با CNT (B-NE) و تیر تقویت شده با اصلاح اپوکسی (B-CNT) [۱۱۹]



شکل ۲–۷۵: تصاویر SEM سطح تماس الیاف کربن / رزین اپوکسی و بتن / رزین اپوکسی را نشان می‌دهد، (a) نمونه بدون اصلاح اپوکسی با CNT (B-NE)، (b) نمونه اصلاح اپوکسی با CNT (B- CNT) [۱۱۹]

۲-۱-۴-۲- اثر استفاده از اپوکسی اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی بر رفتار لغزش باندی بین صفحات FRP و بتن

در این مطالعه اثر استفاده از اپوکسی اصلاح شده با CNT بر رفتار لغزش باند بین سطوح بتونی و صفحات FRP مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مطابق شکل ۲-**۷۶** منشورهای بتنی تقویت شده با FRP تحت آزمون برش دوطرفه قرار گرفتند. شکل ۲-**۷۷** نحوه قرارگیری نمونه آزمایشی را برای انجام آزمایش برش دو طرفه نمایش می‌دهد. جدول ۲-**۲۸** انواع نمونه‌های ساخته شده را به همراه نوع اپوکسی مورد استفاده نشان می‌دهد. اپوکسی اصلاح شده از ترکیب CNT با ۳/۴٪ وزنی اپوکسی تهیه شد[۱۲۱].



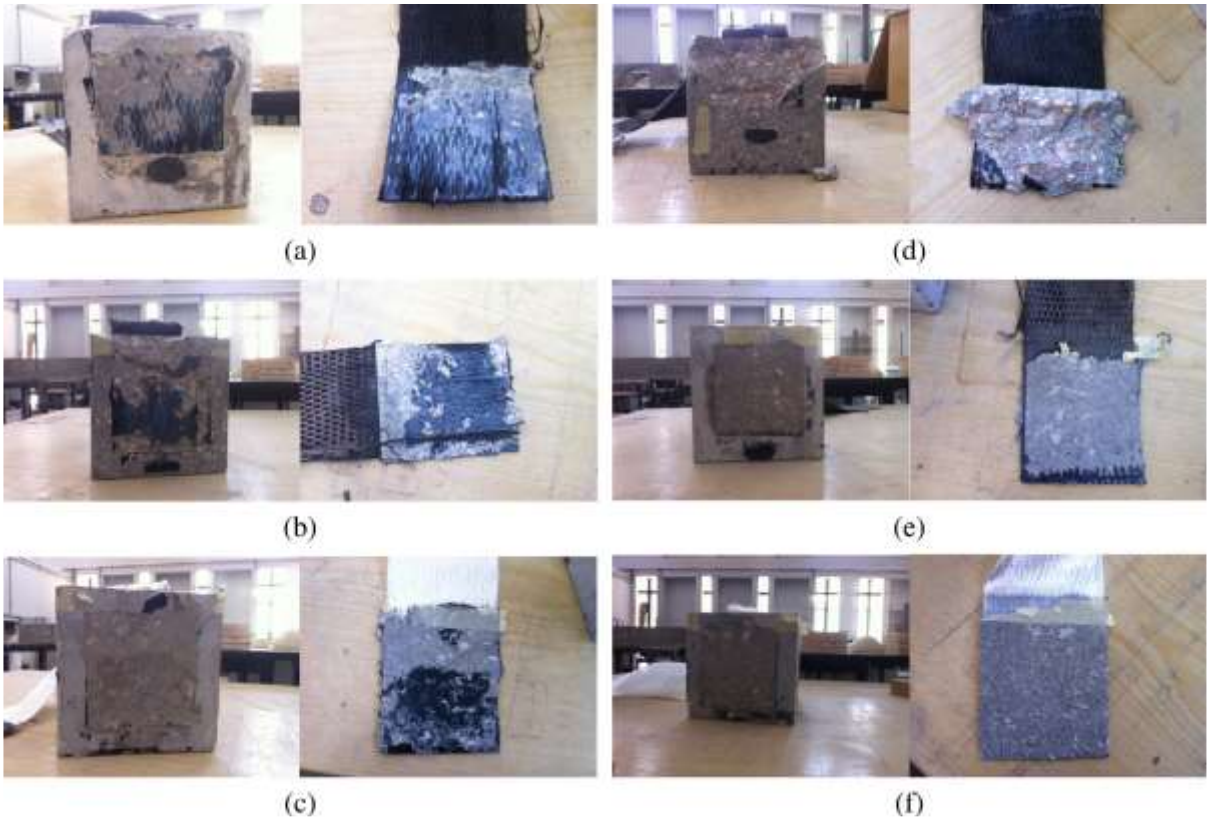
شکل ۲-۷۶: ساختار نمونه آزمایشی[۱۲۱]



شکل ۲–۷۷: نحوه قرارگیری نمونه برای انجام آزمایش در بین فک‌های جک[۱۲۱]

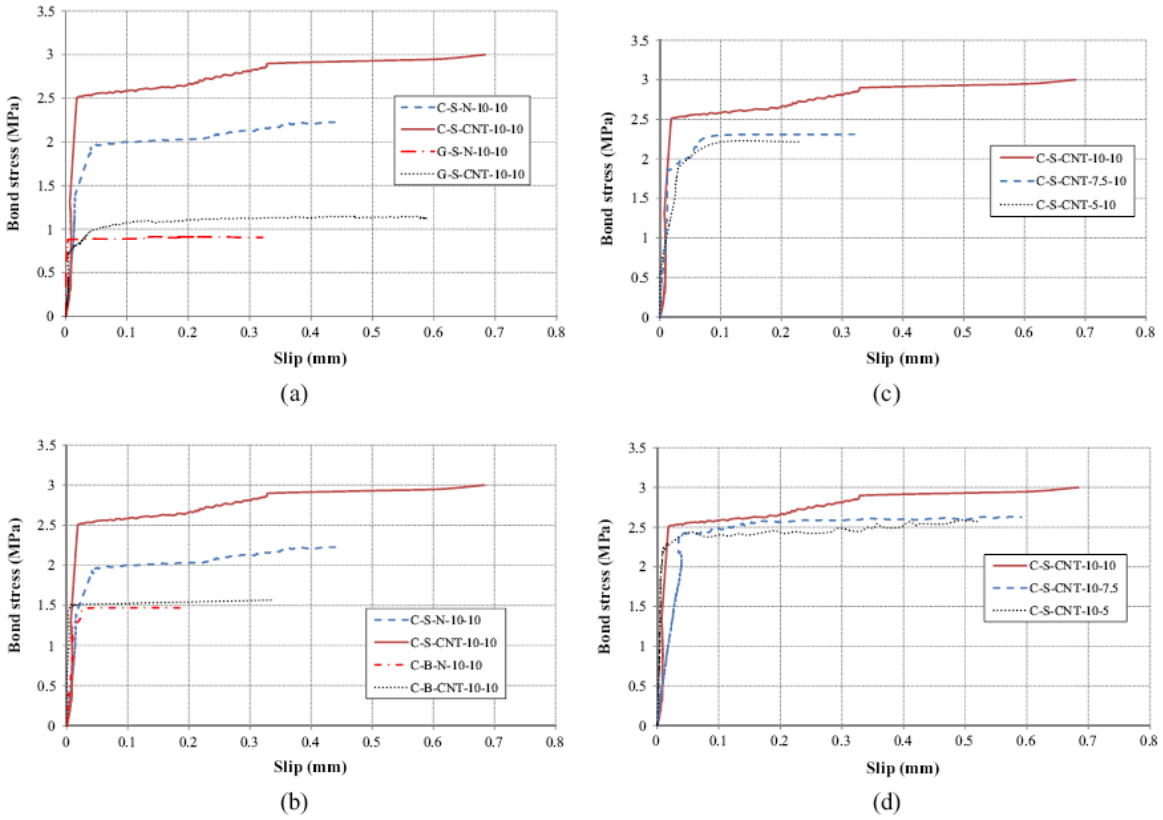
جدول ۲–۲۸: تعداد و نوع نمونه‌ها[۱۲۱]

Designation	No. of specimen	Fiber type	Fiber bond length (cm)	Fiber bond width (cm)	Epoxy type	CNT modification
C-S-N-10-10	3	Carbon	10	10	Type I	No
C-S-CNT-10-10	3	Carbon	10	10	Type I	Yes
G-S-N-10-10	3	Glass	10	10	Type I	No
G-S-CNT-10-10	3	Glass	10	10	Type I	Yes
C-B-N-10-10	3	Carbon	10	10	Type II	No
C-B-CNT-10-10	3	Carbon	10	10	Type II	Yes
C-S-CNT-7.5-10	3	Carbon	7.5	10	Type I	Yes
C-S-CNT-5-10	3	Carbon	5	10	Type I	Yes
C-S-CNT-10-7.5	3	Carbon	10	7.5	Type I	Yes
C-S-CNT-10-5	3	Carbon	10	5	Type I	Yes



شکل ۲–۷۸: مودهای شکست نمونه‌ها C-S-N-10-10 (a)، C-B-N-10-10 (b)، G-S-N-10-10 (c)، C-S-CNT-10-10، C-B-CNT-10-10 (e)، G-S-CNT-10-10 (f) [۱۲۱]

همانطور که در شکل ۲–**۷۸** مشاهده می‌شود، در نمونه‌های با اپوکسی اصلاح نشده، مودهای شکست در باند اتصال بتن و FRP اتفاق افتاده است (شکل ۲–**۷۸**، (a)، (b) و (c)). این در حالی است که در نمونه‌های با اپوکسی اصلاح شده، مودهای شکست با شکست بتن همراه می‌باشد؛ یعنی اپوکسی اصلاح شده توانسته وظیفه خود را در انتقال نیرو به درستی انجام دهد (شکل ۲–**۷۸**، (d)، (e) و (f)). شکل ۲–**۷۹** تنش سطح تمام در برابر لغزش را برای اثر نوع الیاف، اثر نوع اپوکسی، اثر طول سطح اتصال و اثر پهنای باند مورد بررسی قرار می‌دهد.



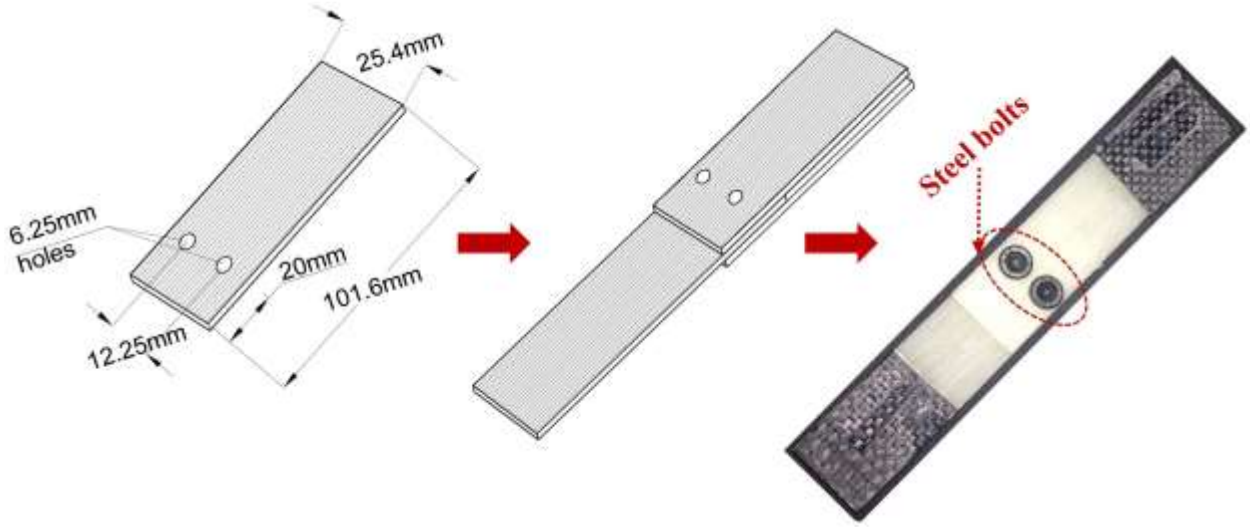
شکل ۲-۷۹: تنش سطح تمام در برابر لغزش (a) اثر نوع الیاف، (b) اثر نوع اپوکسی، (c) اثر طول سطح اتصال، (d) اثر پهنای باند[۱۲۱]

۳-۱-۴-۲- بهبود مقاومت لرزه‌ای اتصال پیچی GFRP با نانو لوله‌های کربن

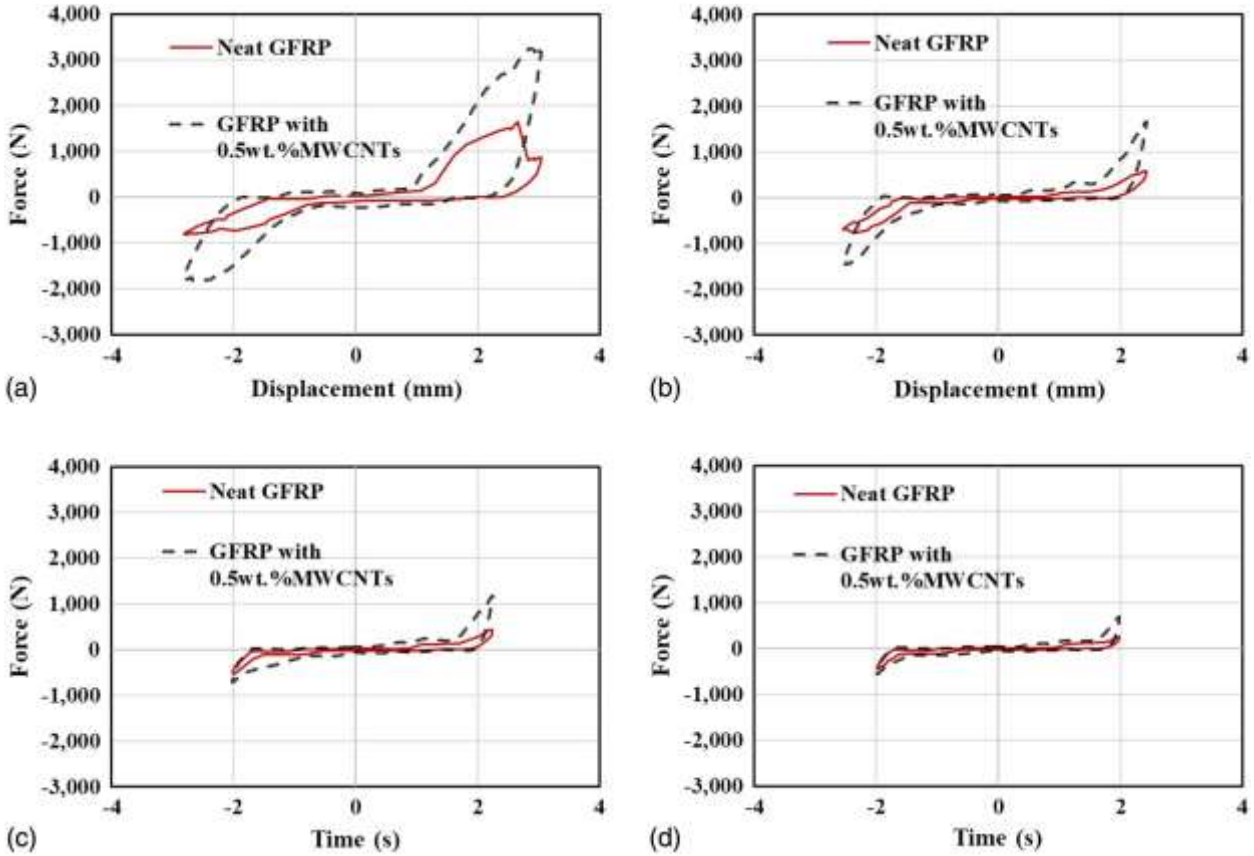
۱-۳-۱-۴-۲- استفاده از نانولوله‌های کربن چند جداره بمنظور بهبود عملکرد اتصال پیچی برشی GFRP

اتصالات پیچی یکی از المان‌های بحرانی در مهاربندها تحت بار لرزه‌ای می‌باشند و زمانی که با مصالح GFRP ساخته می‌شوند، ظرفیت اتصال با مقاومت برشی GFRP محدود می‌گردد (شکل ۲-۸۰). در این مطالعه اثر اضافه شدن نانو لوله‌های کربن چند جداره (MWCNTs) به رزین اپوکسی برای چسباندن ورق‌های GFRP بر روی مقاومت لرزه‌ای اتصال پیچی GFRP مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور اتصال GFRP به دو صورت با اپوکسی خالص و با اپوکسی به همراه MWCNTs به اندازه ۰/۵٪ وزنی اپوکسی ساخته شد. سپس اتصالات ساخته شده تحت بار لرزه‌ای قرار گرفتند و همچنین برای بررسی ظرفیت استاتیکی پسالرزه‌ای، تحت بار استاتیکی تا خرابی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد اتصال اصلاح شده با MWCNTs نسبت به اتصال ابتدایی ۴۴٪ افزایش مقاومت لرزه‌ای داشت. شکل ۲-۸۱ متوسط پاسخ‌های نیرو-تغییر مکان اتصال GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده را تحت بار لرزه‌ای برای مدت زمان بارگذاری متفاوت (۴۴ ثانیه، ۹۸ ثانیه، ۱۹۹ ثانیه و ۴۸۲ ثانیه) نشان می‌دهد.

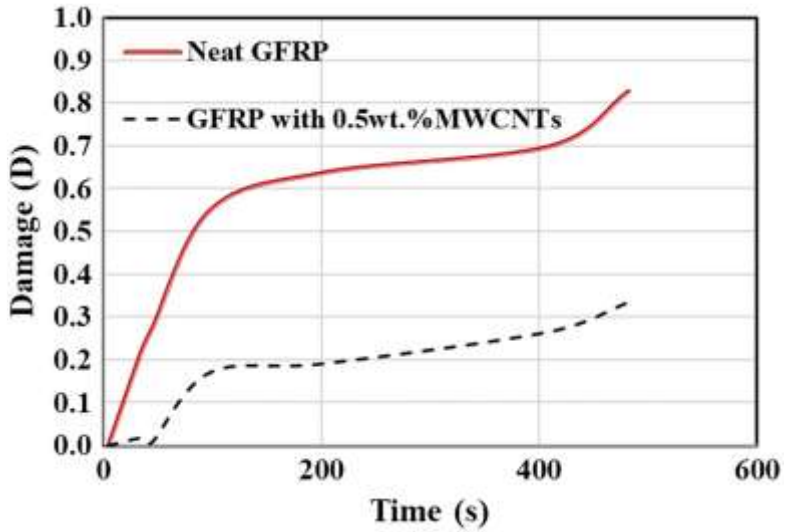
شکل ۲-**۸۲** گسترش خرابی در اتصال GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده تحت بار لرزه‌ای نشان می‌دهد. شکل ۲-**۸۳** خرابی فیزیکی ایجاد شده در ورق‌های GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده تحت بار لرزه‌ای نشان می‌دهد. همچنین اتصال GFRP اصلاح شده با MWCNTs به اندازه ۲۵۰٪ ظرفیت استاتیکی پسالرزه‌ای بیشتری از خود نشان داد (شکل ۲-**۸۴**) و هیچگونه سخت شدگی کرنشی در اتصال اصلاح نشده GFRP مشاهده نشد. شکل ۲-**۸۵** خرابی ایجاد شده در ورق‌های GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده را پس از آزمون استاتیکی پسالرزه‌ای نشان می‌دهد [۱۲۲].



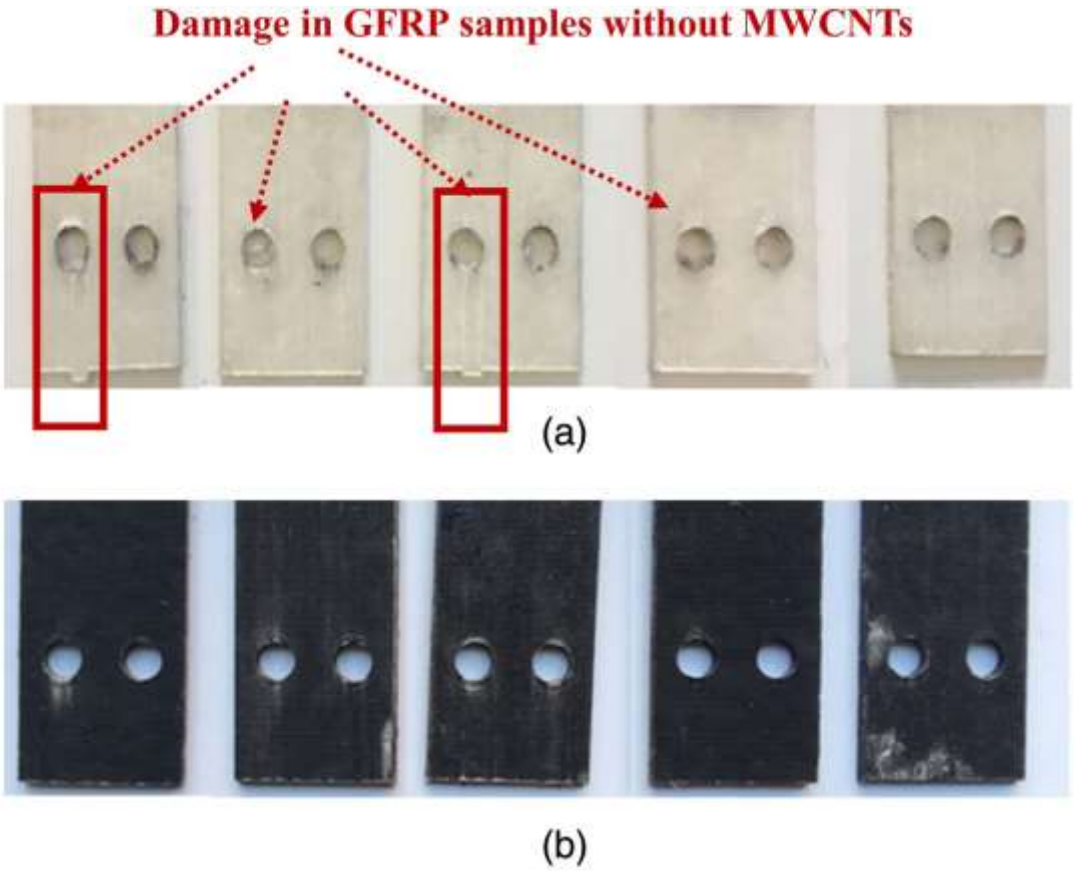
شکل ۲-۸۰: اتصال دو برشه ساخته شده از ورق‌های GFRP[۱۲۲]



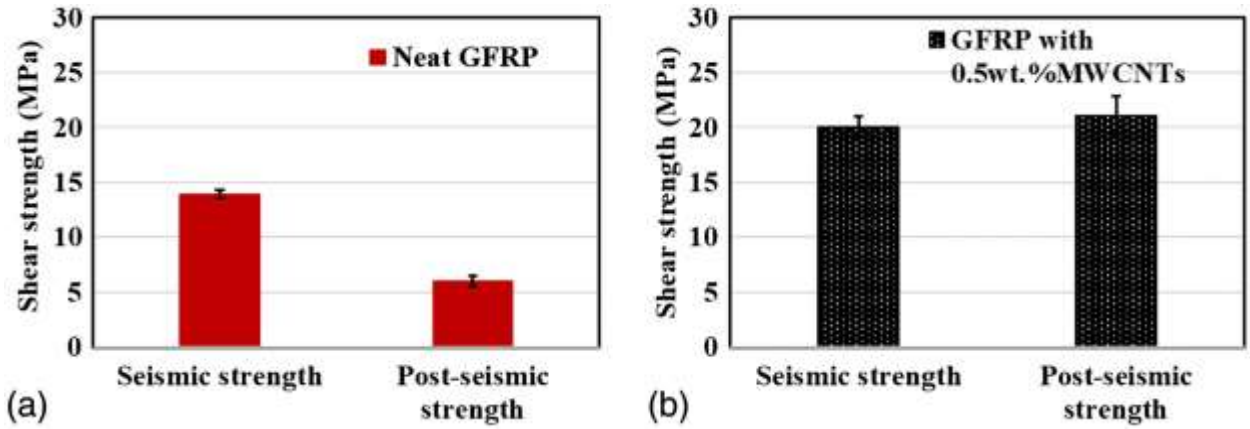
شکل ۲–۸۱: متوسط پاسخ‌های نیرو–تغییر مکان اتصال GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده تحت بار لرزه‌ای با مدت زمان بارگذاری متفاوت: ۴۴ (a) ثانیه، ۹۸ (b) ثانیه، ۱۹۹ (c) ثانیه و ۴۸۲ (d) ثانیه [۱۲۲]



شکل ۲–۸۲: گسترش خرابی در اتصال GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده تحت بار لرزه‌ای[۱۲۲]



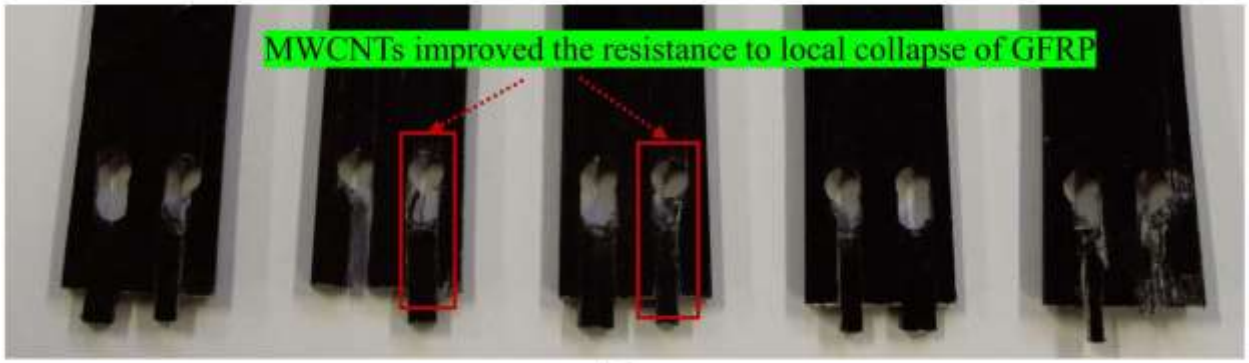
شکل ۲–۸۳: ورق‌های GFRP پس از آزمون لرزه‌ای، (a) خرابی فیزیکی قابل مشاهده در ورق‌های GFRP اصلاح نشده، (b) ورق‌های GFRP اصلاح شده بدون هیچ گونه خرابی فیزیکی قابل مشاهده[۱۲۲]



شکل ۲–۸۴: مقاومت برشی لرزه‌ای و پسا لرزه‌ای استاتیکی، در اتصال پیچی GFRP اصلاح شده و اصلاح نشده ورق‌های GFRP پس از آزمون لرزه‌ای، (a) اتصال پیچی GFRP اصلاح نشده، (b) و اتصال پیچی GFRP اصلاح شده[۱۲۲]



(a)



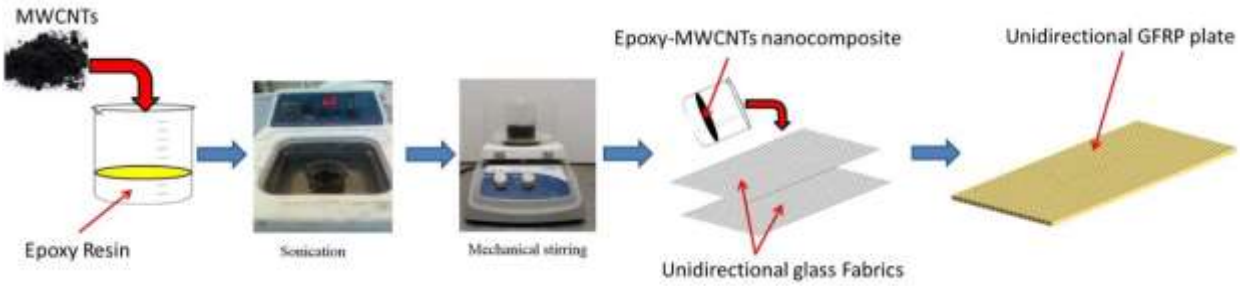
(b)

شکل ۲–۸۵: خرابی برشی اتصال پیچی GFRP پس از آزمون استاتیکی پسالرزه‌ای، (a) ورق‌های GFRP اصلاح نشده، (b) ورق‌های GFRP اصلاح شده[۱۲۲]

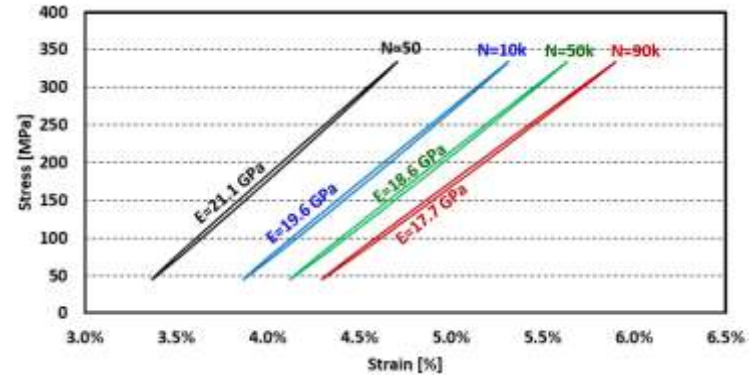
۲-۳-۱-۴-۲- بهبود عملکرد خستگی در کامپوزیت GFRP با استفاده از نانو لوله‌های کربنی

پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) به دلیل مقاومت آن‌ها به خوردگی، نسبت مقاومت به وزن بالا، و قیمت مناسب در مقایسه با CFRP ها برای استفاده به عنوان آرماتور در بتن و یا تقویت سازه‌های بتنی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال محدودیت آن‌ها به دلیل خستگی، استفاده از آن‌ها در سازه‌های زیرساختی را محدود کرده است. به همین دلیل آیین نامه‌های طراحی (سازه‌های زیر ساختی نظیر پل) حدود تنش مجاز آن‌ها را محدود نمودند و این امر استفاده از آن‌ها را غیر اقتصادی کرده است. در این مطالعه نشان داده شد که استفاده از نانو لوله‌های کربنی چند جداره در تولید GFRP ها سبب بهبود عملکرد آن‌ها در ارتباط با خستگی می‌گردد. GFRP های اصلاح نشده که تحت آزمون استاتیکی و دینامیکی قرار گرفتند بطور متوسط تنش خستگی‌ای برابر با ۴۰٪ تنش کششی GFRP از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از MWCNTs به اندازه ۰/۵٪ و ۱٪ وزنی رزین اپوکسی در تولید GFRP می‌تواند عمر ناشی از خستگی GFRP اصلاح شده را به ترتیب نسبت به حالت اصلاح نشده به اندازه ۱۱۴۳٪ و ۹۸۶٪ افزایش دهد. شکل ۲–۸۶ فرآیند تولید GFRP اصلاح شده با MWCNTs را نشان می‌دهد. شکل ۲–۸۶ نمودار هیسترزیس تنش کرنش برای کامپوزیت GFRP بدون

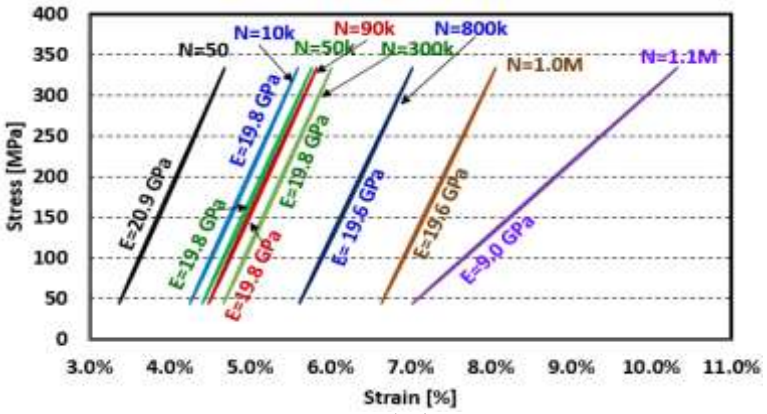
MWCNTs برای GFRP با ۰/۵٪ MWCNTs و برای GFRP با ۱٪ MWCNTs تحت تعداد سیکل‌های مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد [۱۲۳].



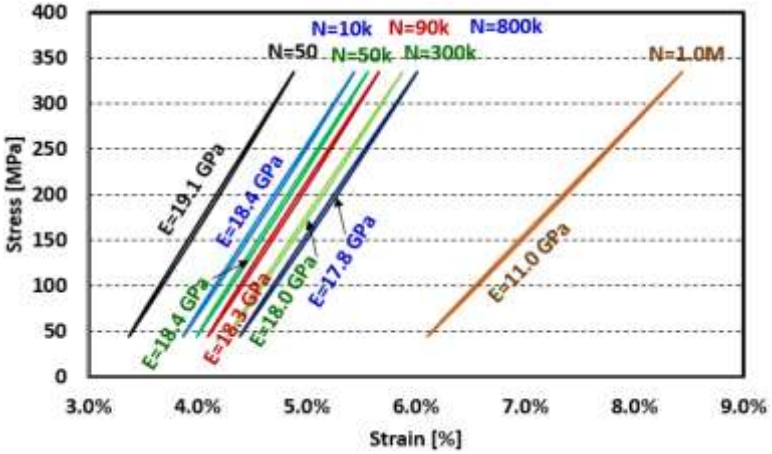
شکل ۲–۸۶: فرآیند تولید GFRP اصلاح شده با MWCNTs[۱۲۳]



(الف)



(ب)

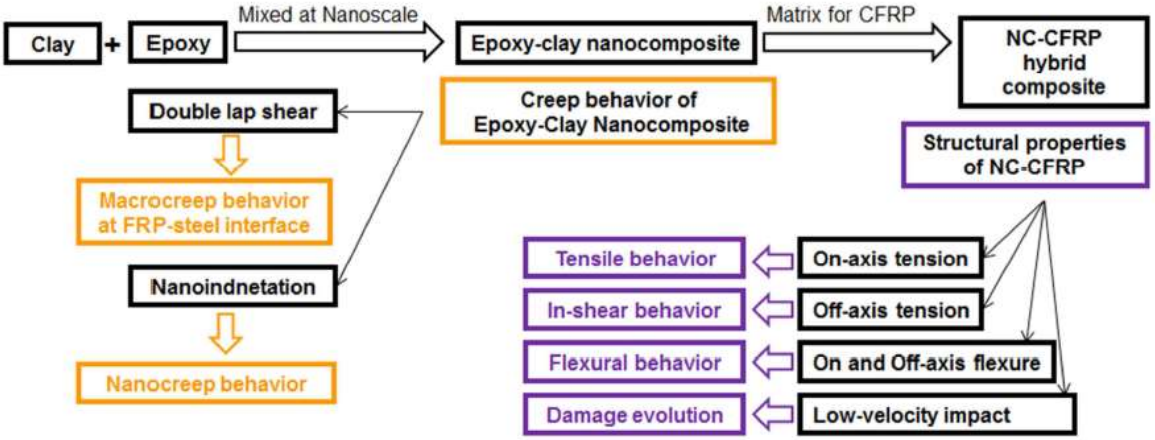


(ج)

شکل ۲–۸۷: نمودار هیسترزیس تنش کرنش برای کامپوزیت GFRP (الف) GFRP بدون MWCNTs، (ب) GFRP با ۰/۵٪ MWCNTs (ج) GFRP با ۱٪ MWCNTs[۱۲۳]

۳-۳-۱-۴-۲- استفاده از نانوکامپوزیت رس-اپوکسی به همراه CFRP

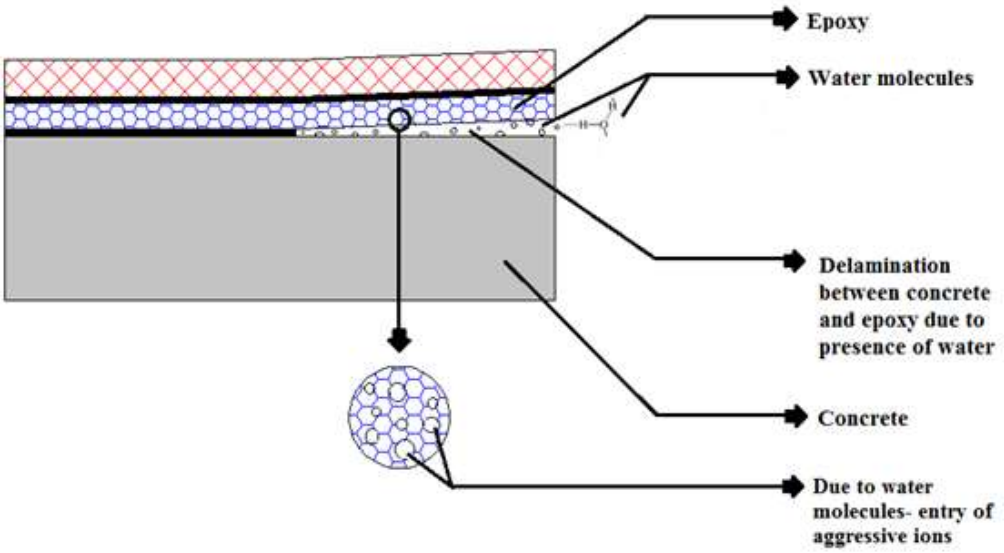
استفاده از CFRP در مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌های عمرانی، زیرساختی و هوا فضا بسیار متداول است. با تمام مزایایی که در مورد این روش مقاوم‌سازی ذکر شد، خزش چسب‌های اپوکسی در لایه‌های مختلف CFRP در سطح اتصال‌های CFRP می‌تواند سبب از زیر بار خارج شدن لایه‌های CFRP و عدم کفایت مقاوم‌سازی گردد. پس زمانی که که مقاوم‌سازی با CFRP تحت بارهای دائمی انجام می‌گردد، باید خزش در اپوکسی درنظرگرفته شود و کنترل گردد. در این مطالعه تاثیر استفاده از نانو رس در کنترل خزش اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه کامپوزیت ترکیبی CFRP به همراه نانوکامپوزیت رس اپوکسی (NC-CFRP) تولید شد. نتایج آزمایشات نشان داد نانو رس تاثیر قابل توجهی بر روی خزش اپوکسی دارد و خصوصیات کششی، برش در صفحه و خمش NC-CFRP را بطور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۲۴]. شکل ۲–۸۸ طرح شماتیکی از نتایج مثبت کامپوزیت نانو رس- اپوکسی را ارائه می‌دهد.



شکل ۲–۸۸: طرح شماتیکی از نتایج استفاده از نانو رس-اپوکسی[۱۲۴]

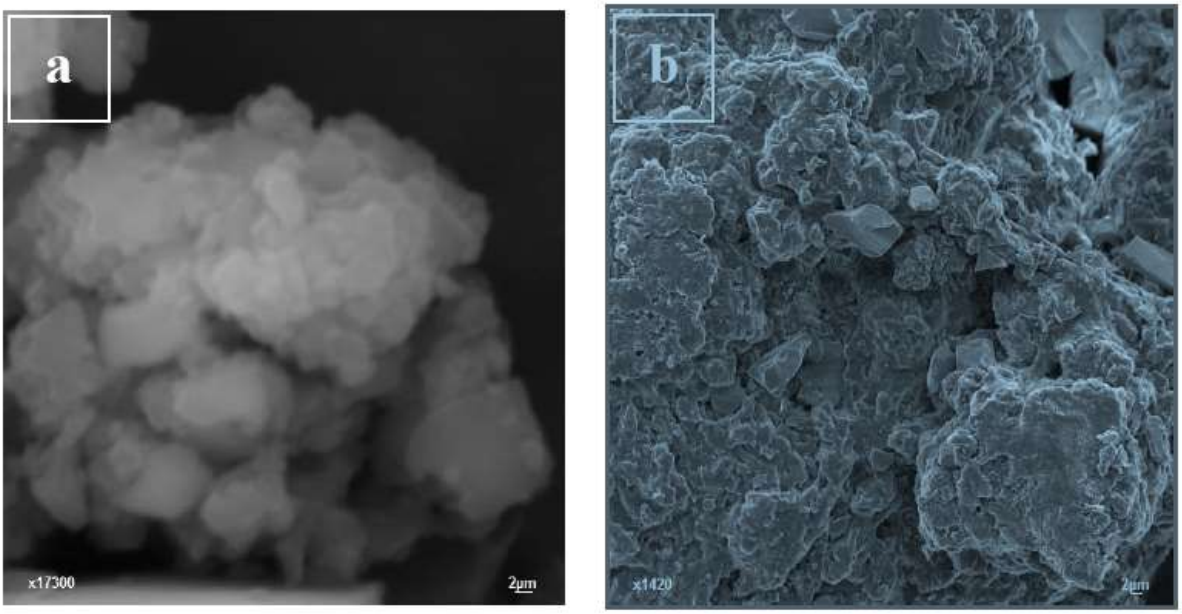
۴-۱-۴-۲- افزایش کارایی نانوکامپوزیت پلیمرهای اپوکسی برای تقویت پل‌ها

از آنجایی که اپوکسی‌ها نسبت به رطوبت حساس هستند (شکل ۲–۸۹)، ضدآب ساختن آن‌ها بسیار ضروری است تا از ایجاد جداشدگی در سطوح اتصال اپوکسی جلوگیری گردد. در این مطالعه بهبود عملکرد اپوکسی در مواجهه با رطوبت با استفاده از نانو ذره SiO_2 انجام شده است [۱۲۵].



شکل ۲–۸۹: طرح شماتیک جداشدگی اپوکسی به دلیل ورود رطوبت[۱۲۵]

در این روش ذرات نانو سیلیس به اندازه ۵٪ وزنی اپوکسی با اپوکسی مخلوط گشت. آنالیزهای میکرو برای مطالعه خصوصیات این کامپوزیت صورت گرفت و نتایج حاصل نشان داد که کامپوزیت نانو سیلیس و اپوکسی، توانایی حفاظت از سازه مقاوم‌سازی شده در برابر نفوذ رطوبت را دارند (شکل ۲–۹۰) [۱۲۵].



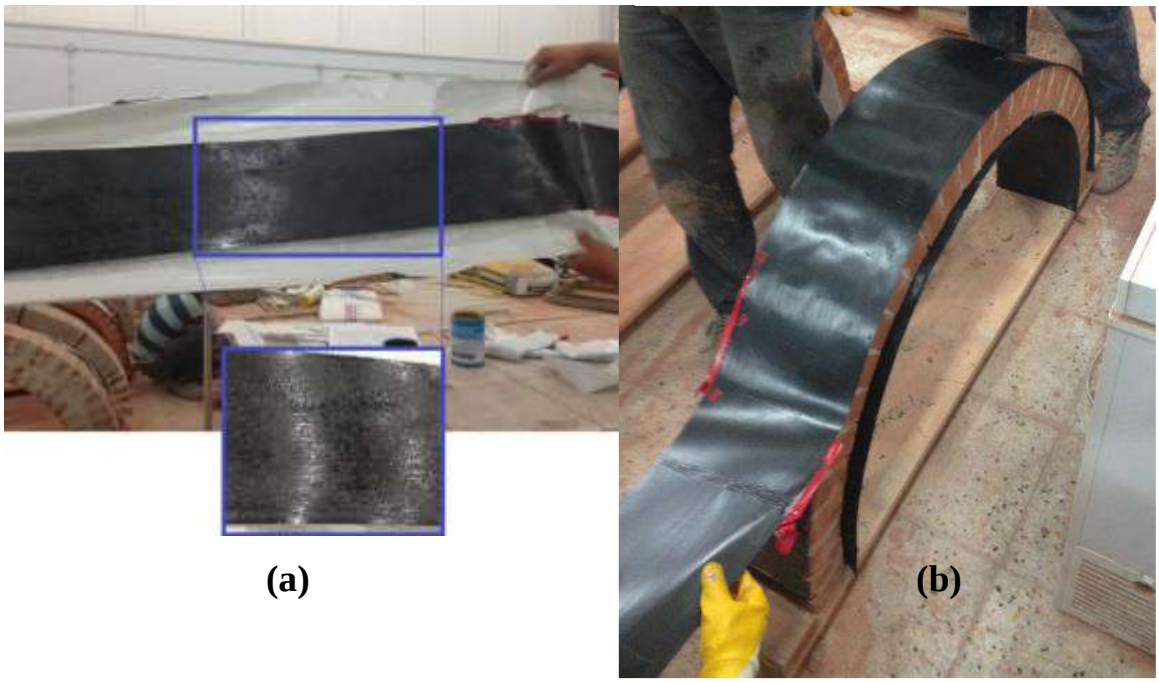
شکل ۲–۹۰: میکروگراف SEM از سطح داخلی اپوکسی (a) اپوکسی خالص، (b) اپوکسی اصلاح شده[۱۲۵]

۵-۱-۴-۲- آنالیز مودال آزمایشگاهی برای یک قوس غیر مسلح مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت الیافی مسلح شده با نانو صفحات گرافن

در این مطالعه به بررسی خصوصیات دینامیکی قوس غیر مسلح مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت الیافی مسلح شده با نانو صفحات گرافن پرداخته شده است. برای این منظور صفحات کامپوزیت از ترکیب FRP و اپوکسی اصلاح شده تهیه شد. اپوکسی اصلاح شده از ترکیب اپوکسی و نانو صفحات گرافن که به اندازه ۱٪ وزنی اپوکسی به آن اضافه شده بدست آمد. سپس با حالت‌های مختلفی قوس مقاوم‌سازی شده و خصوصیات دینامیکی آن از طریق آنالیز مودال آزمایشگاهی و آنالیز دینامیکی محاسبه شد. شکل ۲-۹۱ قوس‌های ساخته شده جهت مقاوم‌سازی را نشان می‌دهد. شکل ۲-**۹۲** نمونه‌ای از GFRP بکار گرفته شده جهت مقاوم‌سازی به همراه نحوه مقاوم‌سازی یکی از قوس‌ها را نشان می‌دهد [۱۲۶].



شکل ۲-۹۱: قوس‌های ساخته شده جهت مقاوم‌سازی[۱۲۶]



شکل ۲–۹۲: (a) کامپوزیت GFRP، (b) استفاده از GFRP بر روی سطح قوس[۱۲۶]

چهار حالت مقاوم‌سازی برای قوس درنظر گرفته شد، CSI، CSE، CSEI و LSIE. در حالت CSI، کامپوزیت بطور پیوسته در سطح داخلی قوس بکار گرفته شد. در CSE کامپوزیت بطور پیوسته در سطح خارجی قوس بکار گرفته شد؛ در CSEI کامپوزیت بطور پیوسته در سطح خارجی و داخلی قوس بکار گرفته شد و در LSIE کامپوزیت بصورت مقطعی در داخل و خارج قوس استفاده شد که بطور خلاصه نتایج خصوصیات دینامیکی حاصل از این چهار حالت مقاوم‌سازی در **Error! Reference source not found.** و جدول ۲–۳۰ آمده است.

جدول ۲–۲۹:مقادیر فرکانس بدست آمده از آزمون‌های دینامیکی (Hz) [۱۲۶]

Mode Shapes	Unstrengthen Arch	CSI	CSE	CSIE	LSIE
1	5.00	6.50	7.50	9.00	6.00
2	7.00	10.00	11.50	14.00	8.00
3	16.00	20.42	24.25	26.50	18.30
4	19.20	25.10	27.80	29.20	21.00
5	26.00	34.00	37.50	43.33	23.00

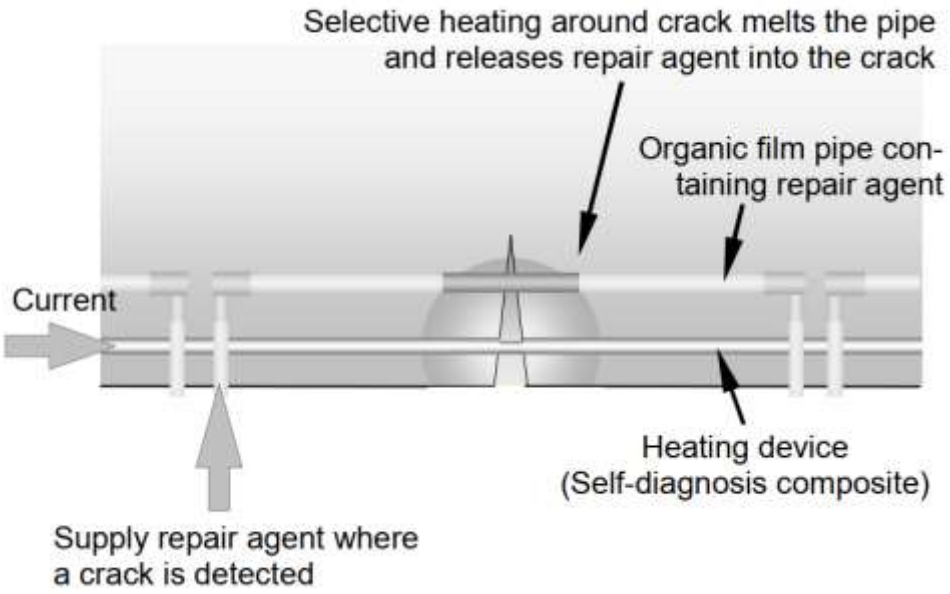
جدول ۲–۳۰: نسبت میرایی بدست آمده از آزمون‌های دینامیکی[۱۲۶]

Mode Shapes	Unstrengthen Arch	CSI	CSE	CSIE	LSIE
1	5.10	8.05	8.32	10.76	6.98
2	1.50	2.71	3.03	3.63	1.95
3	1.45	3.15	3.26	4.90	2.05
4	1.60	4.67	4.87	7.55	2.60
5	1.12	3.15	3.21	5.18	2.05

۲-۵- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بررسی مصالح خود ترمیم‌شونده با بکارگیری مواد نانو ساختار

۲-۵-۱ - کاربرد میکرو-نانو ساختارها در سیستم خود ترمیمی بتن

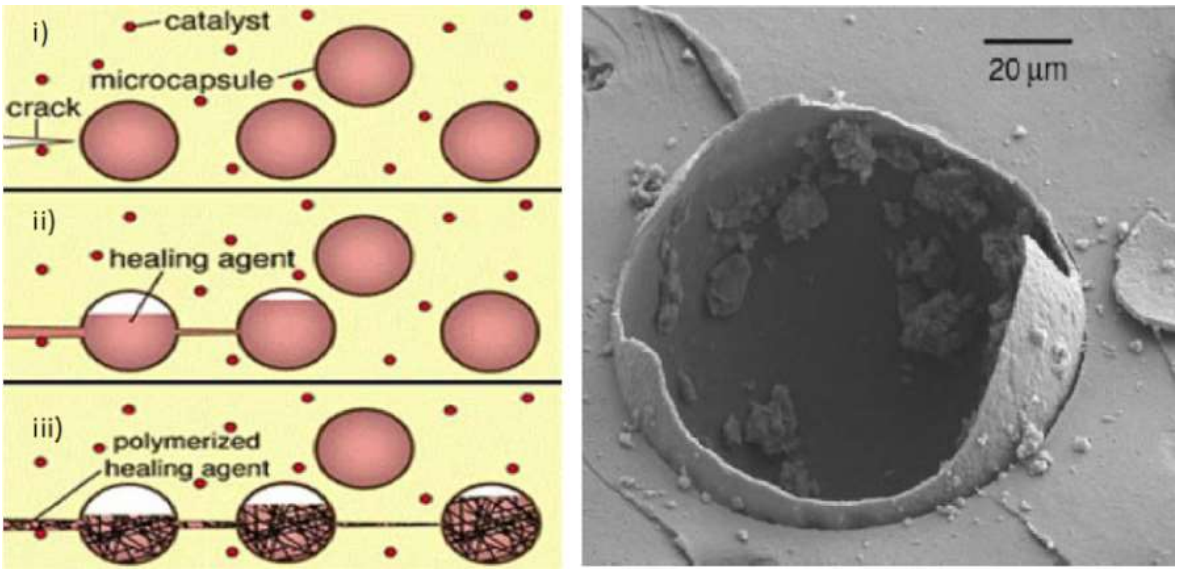
یکی از رویکردهای تولید مواد و مصالح هوشمند خودترمیم کننده، قرار دادن کپسول‌های کوچکی در ساختار مواد است که به هنگام بروز ترک در ماده، این کپسول‌ها شکسته شده و با آزاد شدن نانومواد درون کپسول‌ها، ترک بسته شده و از رشد و گسترش آن جلوگیری می‌شود. میکروکپسول‌های حاوی عامل ترمیمی، معمولا از نوع نانوذرات پلیمری هستند که به همراه ذرات کاتالیزور در بتن استفاده می‌شوند. بنابراین محتویات درون کپسول‌های نهفته در ماده و کاتالیزور توزیع شده در سرتاسر ماتریس، می‌توانند عملیات ترمیم ترک را انجام دهند. زمانی که ترک به بدنه یکی از این کپسول‌ها برسد، مواد آزاد شده از کپسول با ذرات کاتالیزور پراکنده در ماتریس پلیمر، واکنش انجام داده و فضای ترک را پر می‌کنند. در مطالعات صورت گرفته، نانوکامپوزیت‌های مختلفی مانند پلی‌اتیلن- کربن سیاه، سیلیکا- متاکریلات بوتیل، اپوکسی پلی آنیلین-کامفورسولفونات و اپوکسی-نانورس به عنوان عامل ترمیم‌کننده در بتن استفاده شده‌اند. این پوشش‌های هوشمند با قابلیت خودترمیم شوندگی از سطح در برابر خوردگی و ترک محافظت می‌کنند و در صورت آسیب دیدن، موجب ترمیم ترک می‌شوند[۱۲۷]. در شکل ۲-**۹۳** نحوه عملکرد یک سیستم خود ترمیم‌پذیر نمایش داده شده است.



شکل ۲-۹۳: تصویری شماتیک از یک سیستم خود ترمیم پذیر[۱۲۸]

یکی دیگر از روش‌های خودترمیم شوندگی بتن، استفاده از شبکه مویرگی در بتن است. در این روش با تکیه بر خاصیت موئینگی، از یک شبکه مویرگی برای انتقال نانومواد عامل ترمیم، از منبع به محل ترک‌خورده و پلیمریزاسیون در مجاورت کاتالیزور استفاده می‌شود. در طراحی شبکه مویرگی، پوشش اپوکسی بر روی زیرلایه‌های انعطاف‌پذیر با شبکه‌های مویرگی پوشش داده شده و مایع خودترمیم و ذرات ریز کاتالیزور در سراسر شبکه مویرگی داخل پوشش قرار می‌گیرند. زمانی که ترک در سطح پوشش ایجاد می شود، تنش کششی در شبکه افزایش یافته و عامل خودترمیم از طریق عمل مویرگی و بدون هیچ‌گونه فشار خارجی، از میکروکانال‌ها به ترک می‌رسد و باعث ترمیم ترک می‌شود.

در مواد خودترمیم شونده کپسولی، ماده ترمیمی درون مغزه کپسول‌های جداگانه قرار گرفته‌اند. این کپسول‌ها در اثر آسیب و یا هر نوع تحریک دیگری باز می‌شوند و مواد خودترمیم رها شده و ترک‌ها را ترمیم می‌کنند (شکل ۲–**۹۴**). برخلاف خود ترمیمی داخلی و لوله‌ای، در این جا ترمیم‌های چندگانه رخ نمی‌دهد زیرا مواد ترمیمی، قبل اعمال کپسول‌ها به داخل ماتریس در داخل کپسول‌ها قرار داده شدند؛ بنابراین پس از واکنش دادن این مواد و انجام عمل ترمیمی، واکنش ترمیمی مجدد امکان‌پذیر نیست[۱۲۹].

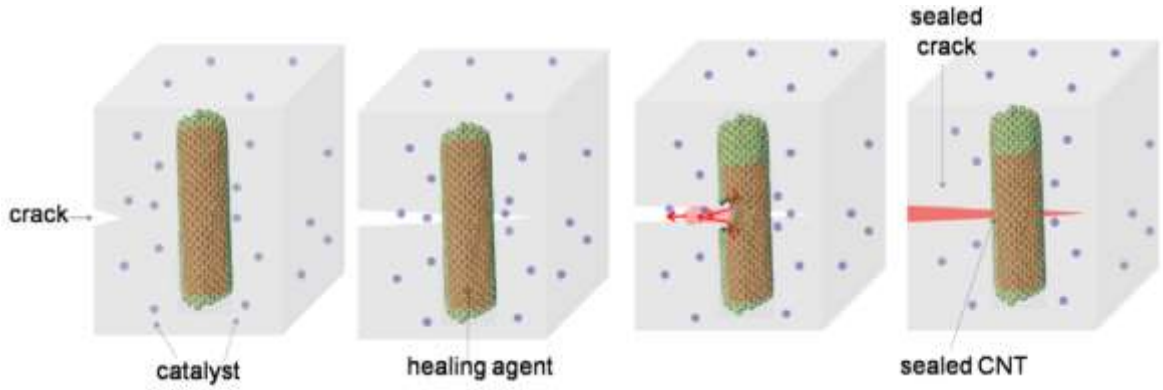


شکل ۲–۹۴: سمت چپ: شماتیک عملکرد روش میکرو–نانو کپسول‌ها به منظور خود ترمیمی، سمت راست: عکس میکروسکوپی یک کپسول شکسته شده در اثر ترک[۱۳۰]

نانولوله‌های کربنی به دلیل سطح تماس زیاد و خصوصیات مکانیکی بسیار مناسب دسته قابل توجهی از نانومحفظه‌های حاوی مواد خودترمیم را تشکیل می‌دهند. بنابراین این نانوالیاف هر دو خواص خودترمیم شوندگی و بهبود خواص مکانیکی را همزمان در خود دارند. چالش بکارگیری آن‌ها در این است که ترک‌ها بتوانند به دیواره نانولوله‌ها رسیده و اینکه مواد خودترمیم بتوانند هنگام تشکیل ترک آزاد شوند.

لانزارو و همکاران [۱۳۱] بکارگیری نانولوله‌های کربنی به عنوان نانومحفظه‌های بتن را از طریق روش دینامیک مولکولی بررسی کردند. شماتیک عملکرد نانولوله‌های کربنی در شکل ۲–**۹۵** نشان داده شده است. ترمیم ترک به

وسیله شکل‌گیری واکنش شیمیایی بین مولکول‌های ترمیم کننده و کاتالیست‌های تحریک شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که مقدار مولکول‌های آزاد شده، به ابعاد ترک شکل گرفته بر دیواره نانولوله کربنی بستگی دارد.



شکل ۲–۹۵: شماتیک عملکردی نانومحفظه‌های کربنی با استفاده از مدلسازی دینامیک مولکولی [۱۳۱]

دلیل اصلی خود ترمیمی بتن مربوط به تشکیل کربنات کلسیم است که در نتیجه واکنش بین یون کلسیم و دی‌اکسید کربن محلول در آب رخ می‌دهد. هیدراتاسیون پیوسته مواد سیمانی هیدراته نشده، مکانیزم دیگری برای خود ترمیمی بتن است[۱۳۲].

با اینکه در بیشتر تحقیقات بتن خودمتراکم، عموما فرض می‌شود که آب کافی در بتن وجود دارد، با این حال این فرضیه الزاما در تمامی حالات صحیح نیست. برخی محققان تلاش کردند تا از منابع آب داخلی بتن به جای تکیه بر تامین آب از منبع خارجی به منظور ارتقای رفتار خود ترمیمی بتن استفاده کنند. به عنوان مثال، دی رویج و همکاران [۱۳۳] بهره‌گیری از الیاف چوبی از قبل مرطوب شده و پوشش یافته را به عنوان منبع تامین آب در مواد سیمانی به منظور بهبود خواص خود ترمیمی بررسی کردند.

ولکه و همکاران [۱۳۴] تلاش کردند تا از ذرات نانورس به عنوان منابع آب داخلی برای ترمیم پیش ترک‌های ملات‌های نمونه استفاده کنند. طبق تحقیق آن‌ها، در یک مخلوط همگن از آب و رس، این ماده ۹۵ تا ۹۸ درصد جرم خود را به نگهداری آب بین لایه‌ای اختصاص می‌دهد و می‌تواند به اندازه چندین برابر جرم خود، آب را برای پراکنده شدن ذرات یا پراکنش و جلوگیری از کلوخه‌شدگی در ساختار خود جای دهد. مقدار زیادی از آب اضافه که به عنوان آب آزاد بوده می‌تواند برای هیدراتاسیون سیمان بکار رود.

در این تحقیق اثر شرایط مراقبت و مدت زمان پیش ترک بر روی رفتار خود ترمیمی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده بررسی شده است. چهار نوع شرایط مراقبتی مختلف شامل مراقبت در هوا، مراقبت با ۳ درصد کربن دی اکسید، چرخه‌های تر و خشک شدگی و مراقبت با آب درنظر گرفته شد.

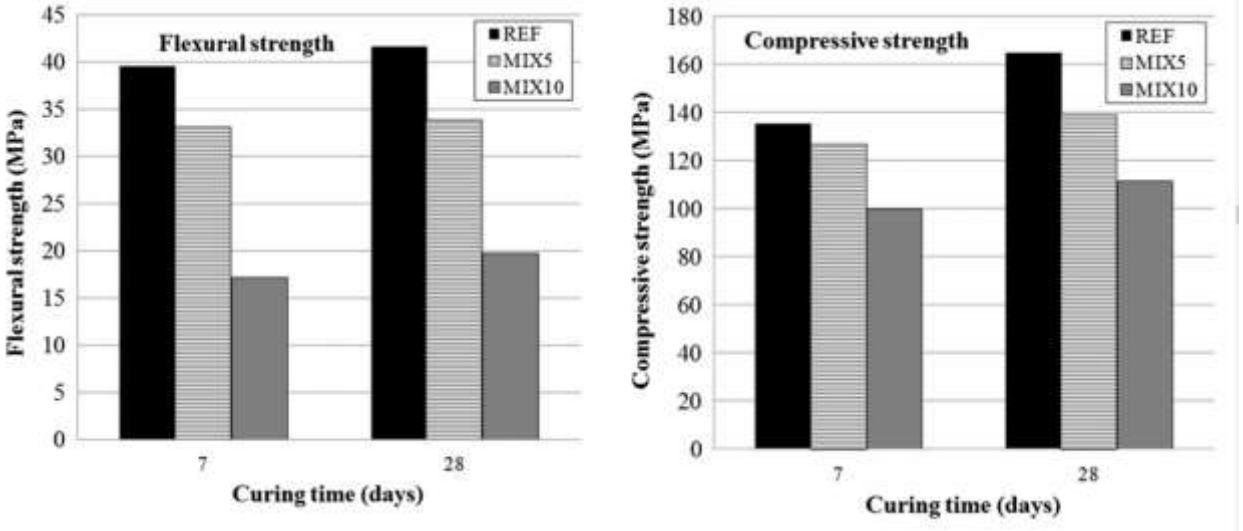
همچنین نانورس به ترکیبات افزوده شد تا تاثیر بکارگیری آن به عنوان منبع آب داخلی به منظور ارتقای رفتار خود ترمیمی کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده و عدم نیاز به تامین آب از منبع خارجی بررسی گردد. نانو رس استفاده شده در این تحقیق یک سدیم مونتموریلونیت خالص با ابعاد ریز(۵۰۰ نانومتر) است. مقصود استفاده از چنین ابعاد کوچکی بررسی امکان بکارگیری پتانسیل نگاه‌داشت آب آن برای بهبود خواص خود ترمیمی بوده است.

در بررسی نمونه‌های از پیش ترک خورده نگهداری شده در هوا، کربن دی اکسید، تر و خشک شدگی و آب، مشخص شد به دلیل خاصیت خود ترمیمی کامپوزیت بتنی، ظرفیت بازیابی خمش این نمونه‌ها حتی از نمونه‌های مرجع

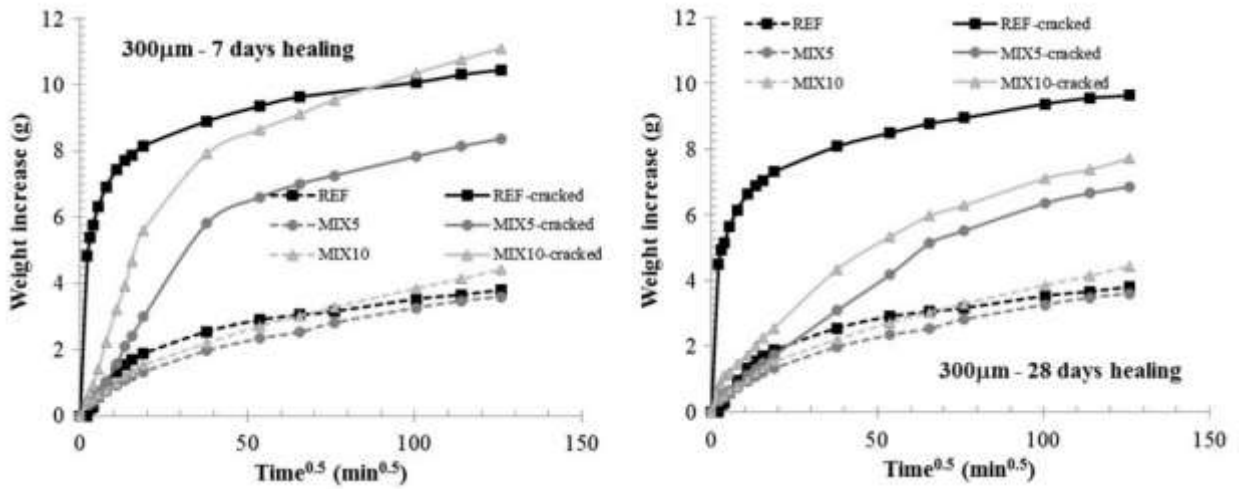
بدون سابقه ترک‌خوردگی بیشتر است. همچنین این ظرفیت بازیابی خمشی در نمونه‌های حاوی نانو رس و سیمان بیشتر در مقایسه با نمونه‌های بدون این نانوذره بهبود قابل توجهی یافته است.

کیان و همکاران [۱۳۲] در بررسی خواص خود ترمیم‌شوندگی کامپوزیت‌های سیمانی دریافتند نانورس، توانایی بالایی در ترمیم ترک‌های با ساختار کامپوزیت از خود نشان می‌دهد. در این آزمایش، نمونه‌های مختلفی از این کامپوزیت‌های سیمانی تحت آزمایش خمش چهار محوره قرار داده شد و پیش ترک در آن‌ها رخ داد. همچنین در این آزمایش از چهار روش عمل‌آوری هوا، ۳٪ تمرکز دی اکسید کربن، چرخه آب و خشکی و عمل‌آوری در آب استفاده گردید. تقریبا در تمامی نمونه‌ها با افزایش مقدار نانورس، پس از ترمیم ترک میزان بازیابی مقاومت خمشی نمونه‌ها بالا گزارش شده است. محققان دلیل این بازیابی سختی و مقاومت خمشی نمونه‌ها را در پتانسیل بالای نگهداری آب لایه‌های نانورس می‌دانند. در واقع نانورس‌ها به عنوان یک محفظه نگهداری آب مورد نیاز به منظور واکنش‌دهندگی و انجام عمل هیدراتاسیون پس از ترک‌خوردگی در بافت کامپوزیت عمل کردند و بدین ترتیب ترک‌های سازه ترمیم شده است.

گارسیا کالوو و همکاران [۱۳۵] اثر دو سیستم خود ترمیمی جدید بر پایه افزودنی‌های نانو-میکرو را سنجیدند. این دو سیستم، میکروکپسول‌های سیلیس حاوی ترکیبات اپوکسی آب بند (CAP) و نانوذرات سیلیکای عامل‌دار شده هستند. با اینکه CAP به خوبی درون ماتریس سیمانی پخش می‌شوند، افزودن آن‌ها موجب کاهش عملکرد مکانیکی می‌شود و به عنوان یک نقطه ضعف محسوب می‌شوند. با این حال، بکارگیری این مواد باعث بهبود پخش حفرات بافت سیمانی‌شده و در نهایت عمر مفید سازه را افزایش می‌دهد. محققان در این طرح از یک نمونه مرجع و دو نمونه حاوی درصدهای مختلف نانوذرات سیلیکا و سیلیکافوم استفاده کردند. نتایج آزمایشات در شکل ۲-**۹۶** و شکل ۲-**۹۷** نشان می‌دهد که عملکرد مکانیکی نمونه‌های حاوی مواد ترمیم‌کننده، پایین‌تر از نمونه مرجع بودند. در این آزمایشات، MIX5 و MIX10 معرف مقدار میکروکپسول‌های سیلیکات هستند (مقدار نانوسیلیس در MIX10 از MIX5 بیشتر است). همچنین این کاهش مقاومت با افزایش درصد مواد افزودنی، بیشتر می‌شد. از آنجایی که استفاده از مواد دیگر غیر از سیلیکا موجب کاهش خیلی بیشتر مقاومت مکانیکی شده است، لذا به نظر می‌رسد سازگاری بیشتر نانوسیلیس و میکروکپسول‌های سیلیکاتی با طبیعت ماتریس سیمانی بکاررفته، قادر است اثرات منفی این افزودنی‌ها را بکاهد. در بخش دیگری از این آزمایشات، مشخص شد با اینکه نمونه‌های حاوی مواد خودترمیم مقدار تخلخل یکسانی با نمونه مرجع دارند، ریزساختار بافت سیمانی، در این ترکیبات بهبود یافته و بنابراین تحمل بالای این مواد در برابر نفوذ عوامل خورنده مشاهده می‌گردد. تحقیقات گارسیا و همکاران نشان داد که خاصیت خودترمیمی این بتن‌های فوق توانمند با افزایش مقدار افزودنی‌های نانوسیلیس و میکروکپسول‌ها کاهش می‌یابد. این محققان همچنین تاثیر بازشدگی دهانه ترک در بازده مکانیزم خود ترمیمی را بررسی کردند و مشخص شد بازده خود ترمیمی این مواد سیلیکاتی در بازشدگی‌های ترک‌های کوچکتر بیشتر است.



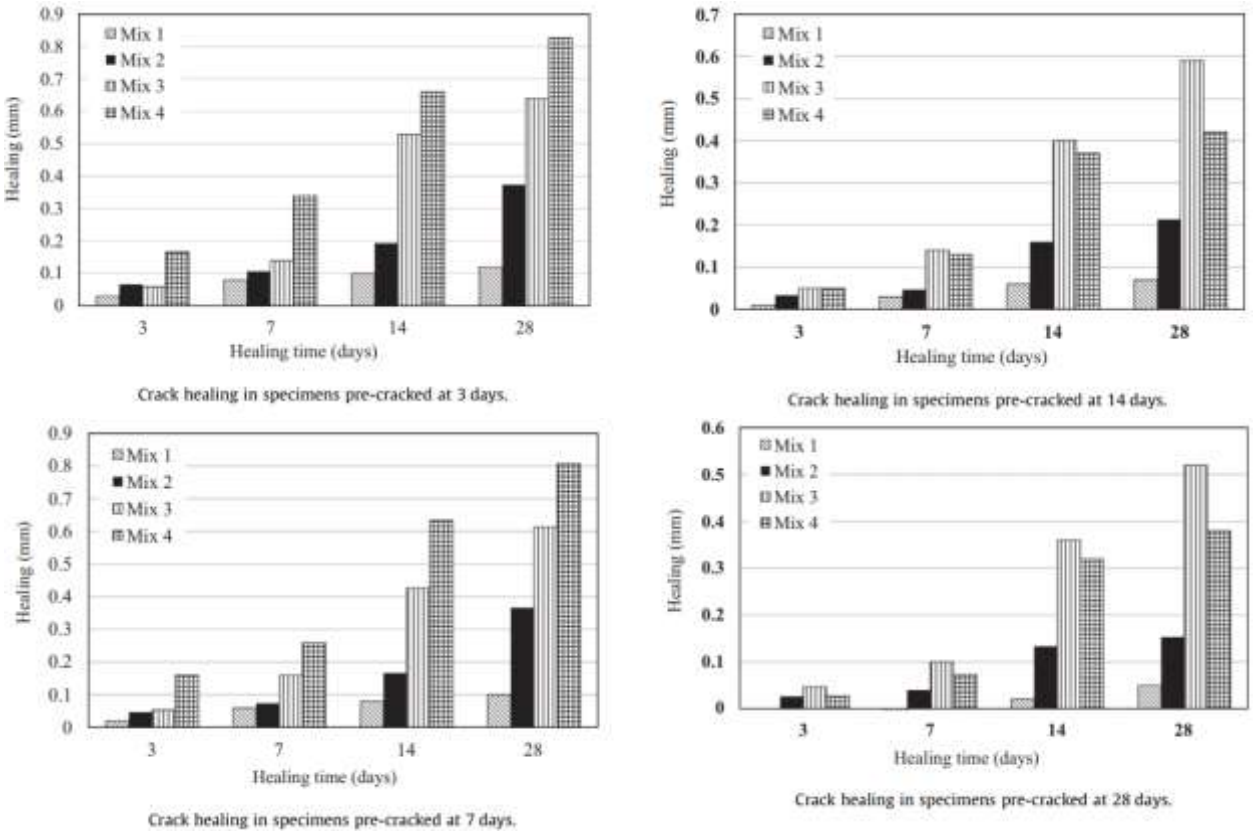
شکل ۲–۹۶: مقاومت مکانیکی بتن فوق توانمند حاوی مواد خودترمیم نانوسیلیس و میکروکپسول‌های سیلیکاتی[۱۳۵]



شکل ۲–۹۷: مقدار جذب آب برای نمونه‌های بدون ترک و ترک‌خورده در دو بازه زمانی ۷ و ۲۸ روزه[۱۳۵]

خلیق و احسان [۱۳۶] در آزمایشات خود اثر مواد خودترمیمی در بتن را به کمک مواد ارگانیک بررسی کردند. در این آزمایشات، از یک باکتری به نام باکیلوس سابتیلیس به عنوام ماده محرکه واکنش استفاده شد و به سه شکل مستقیم، استفاده از دانه‌های سبک وزن و استفاده از نانوصفحات گرافیت به عنوان حمل‌کننده این ماده ترمیمی استفاده شد. نمونه‌های مختلفی از این مواد خودترمیم و انتقال دهنده‌های آن‌ها به منظور بررسی روند کسب مقاومت فشاری بتن ساخته شدند. نتایج کار این دو محقق نشان داد نانوصفحات گرافیت توانسته‌اند باکتری عامل خودترمیمی را به شکل یکنواخت‌تری در ماتریس پخش کرده و از آن محافظت نماید. همچنین بیشترین مقدار ترمیم در دو دوره کوتاه مدت ۳ و ۷ روزه برای نمونه‌های ترک خورده در بین تمام حالات، با بکارگیری این نانوصفحات گرافیت بدست آمد. طبق آنالیز آزمایشات در شکل ۲–**۹۸**، نمونه‌های حاوی نانوصفحات گرافیت، مقاومت فشاری را ۹/۸٪ افزایش داده‌اند. بهبود این مقاومت، ناشی از اثر پرکنندگی این نانوصفحات است. همچنین نانوصفحات با ابعاد

کوچک‌تر، وقوع ترک در فصل مشترک خمیر سیمان و سنگدانه‌ها را کاهش می‌دهد. با این حال، مقدار این ترمیم شوندگی در بلندمدت کاهش یافت و از سوی دیگر، دانه‌های سبک‌وزن عملکرد بهتری در بازه‌های بلندمدت‌تر دارند.



شکل ۲–۹۸: مقدار ترمیم(میلیمتر) مواد خودترمیم شونده بر پایه باکتری برای ۴ نوع نمونه مرجع، اعمال مستقیم، اعمال با نانوصفحات گرافیت و اعمال با سنگدانه‌های سبک[۱۳۶]

۶-۲- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به استفاده از نانو حسگرها و نانو سنسورها در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها

با توجه به اهمیت پایش سلامت سازه‌ها، خود سنجشی[۱] مواد نانوکامپوزیت، مورد توجه محققان زیادی در این حوزه قرار گرفته است. این گونه مواد نانوکامپوزیت وقتی تحت تنش یا کرنش قرار می‌گیرند، تغییراتی در مقاومت الکتریکی

[۱] Self-sensing

و یا ظرفیت خازنی آن‌ها بوجود می‌آید. این خصوصیت منحصر به فرد، مواد کامپوزیت را به صورت سنسورهای گسترده و یا منفرد برای پایش سازه‌های عمرانی تبدیل کرده است. تاکنون شکل‌های مختلف کامپوزیت کربن مانند: الیاف کوتاه، الیاف پیوسته، ذرات کربنی، الیاف نانو، نانو لوله‌های کربنی، کربن سیاه، نانو صفحات گرافن و ... برای این منظور بکارگرفته شده است [۱۳۷-۱۳۹]. البته علاوه بر کربن، مواد نانو ساختار دیگری نیز وجود دارند که دارای خصوصیت خود سنجشی هستند؛ به عنوان مثال پودر نیکل کروی با نانو دانه‌های تیز روی سطح آن به عنوان یک پرکننده ممتاز در مواد کامپوزیت از جهت حساسیت به فشار به حساب می‌آید [۱۴۰]. هرچند این مواد نانو ساختار در ابتدا در مهندسی سازه برای افزایش خصوصیت‌های مکانیکی کامپوزیت‌ها معرفی شدند اما با شناخته شدن خصوصیت الکترومکانیکی آن‌ها از آن پس به عنوان مواد چندکاره[۱] معرفی شدند [۱۳۹].

با توجه به خصوصیت خود سنجشی این گونه از مواد نانو کامپوزیت، بکارگیری آن‌ها در المان‌های سازه در حقیقت شبکه‌ای از سنسورهای نانو ساختار را بر روی المان‌های سازه بوجود می‌آورد که این موضوع امکان سنجش دائم، با تعداد نقاط بیشتر بر روی سازه را فراهم می‌آورد. همچنین امکان تعیین نقاطی با کرنش بیشتر را می‌دهد که این نقاط می‌توانند پتانسیل شروع ترک باشند؛ و یا می‌توان کرنش‌های اندازه‌گیری شده را بطور مستقیم به میدان تنش در المان‌های سازه تبدیل نمود [۱۳۹]. از جمله خصوصیات منحصر به فرد دیگر اینگونه مواد خود سنجشگر، توانایی آن در ثبت دینامیکی تغییرات ایجاد شده در آن‌ها می‌باشد، با استفاده از این خصوصیت، می‌توان پایش سلامت سازه را بصورت دینامیکی نیز به انجام رساند و در شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه از آن استفاده کرد. در ادامه، انواع روش‌های استفاده از مواد نانو ساختار در پایش سلامت سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۶-۲ - خاصیت پیزو-مقاومتی[۲] مواد کامپوزیت نانو ساختار

سنسورهایی که براساس خاصیت پیزو مقاومتی تولید می‌شوند دارای مزایایی از قبیل چندکاره بودن، حساسیت بالا، هزینه کمتر، دوام بالا و روند ساخت بسیار آسان که این ویژگی‌ها این سنسورها را از سنسورهای معمول پایش سلامت سازه‌ها متمایز می‌سازد. تئوری ساخت چنین سنسورهایی بصورت ساده بر مبنای تغییر مقاومت الکتریکی در پاسخ به کرنش‌های مکانیکی اعمالی می‌باشد [۱۴۱]. یک روش معمول در ساخت سنسورهای پیزو مقاومتی، ترکیب کردن پرکننده‌های رسانای الکتریکی (مانند نانو لوله‌های کربنی، نانو الیاف کربنی، نانو صفحات گرافن، کربن سیاه و پودر نیکل) در مصالح پایه می‌باشد تا ماده کامپوزیت حاصل به یک ماده نیمه رسانا یا عایق تبدیل شود (مانند آرماتورها، اپوکسی‌ها و سیمان) [۱۴۱].
زمانی که مقدار مواد نانو ساختار ذکر شده در فوق به درصد مشخصی در ترکیب کامپوزیت برسد، نفوذ شروع شده و مواد کامپوزیت به یک هادی تبدیل می‌شود. برای رسیدن به یک هادی، بسیار مهم است که ذرات رسانا در داخل ماتریس کامپوزیت به درستی پراکنده گردد. ماده کامپوزیت حاصل یک ماده حساس به کرنش می‌باشد که به نام خود- سنجشگر شناخته می‌شود و کرنش‌های مکانیکی حاصل را به خصوصیات الکتریکی نظیر مقاومت الکتریکی

[۱] Multifunction Materials
[۲] Piezoresistive

و ظرفیت خازنی تبدیل می‌کند. بنابراین خود-سنجش‌گری با بدست آوردن ارتباط تغییرات مقاومت الکتریکی و یا ظرفیت خازنی با کرنش‌های مکانیکی بدست خواهد آمد. به این ترتیب با اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی، می‌توان تغییرشکل‌های سازه‌ای و شروع آسیب‌هایی نظیر میکروترک‌ها را تشخیص داد. از مزایای قابل ذکر این روش می‌توان به سادگی ابزار مورد نیاز برای سنجش تغییرات مقاومتی، فراهم آوردن اطلاعاتی در مورد کرنش اندازه‌گیری شده و توانایی تشخیص تغییرات میکرو سازه‌ای اتفاق افتاده اشاره کرد [۱۴۲].

به عنوان مثال، یک ماده نانو کامپوزیت که حاوی حدود ۱ درصد نانولوله‌های تک جداره (SWNTs) است، اگر الکترودی در سطح ماده کامپوزیت قرار داده شود، می‌تواند یک سازه خود-سنجشگر باشد [۱۴۳]، روش دیگر چسباندن فیلم نازکی از پلیمر CNT بر روی سطح سازه برای پایش خرابی سازه می‌باشد.

با توجه به توضیحات داده شده، خصوصیت پیزو- مقاومتی مواد کامپوزیت، آن‌ها را به یک ماده خودسنجش تبدیل می‌کند. بطور معمول ویژگی خود-سنجشی و یا پیزو-مقاومتی از طریق اندازه‌گیری نسبت تغییرات مقاومت الکتریکی کمیتش مشخص می‌شود که بصورت رابطه ۱ بیان می‌گردد:

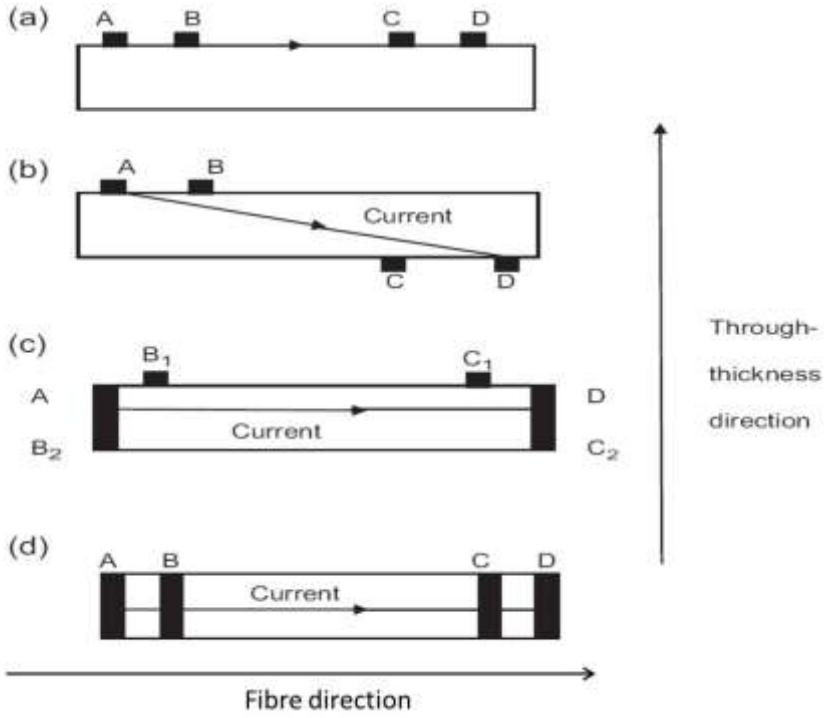
$$Fractional\ change\ in\ resistance\ (FCR) = \frac{(R-R_0)}{R_0}$$ (رابطه ۲-۱)

که R_0 و R مقاومت الکتریکی اولیه و مقاومت الکتریکی نهایی ماده کامپوزیت می‌باشند. همچنین معیار سنجش[۱] یکی از پارامترهای متداول برای اندازه‌گیری خصوصیت خود-سنجشی و یا پیزو مقامتی می‌باشد که بصورت رابطه ۲ بیان می‌گردد:

$$Gauge\ Factor\ (GF) = \frac{(FCR)}{\varepsilon} \times 100$$ (رابطه ۲-۲)

که ε کرنش اتفاق افتاده در کامپوزیت می‌باشد. مقاومت الکتریکی در یک کامپوزیت خود-سنجش می تواند با روش های مختلف اندازه گیری شود (شکل ۲-**۹۹**).

[۱] gauge factor



شکل ۲–۹۹: روش‌های مختلف اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در کامپوزیت‌ها [۱۳۷]

چنانچه محل اتصال جریان در همان سطحی از کامپوزیت واقع گردد که اندازه‌گیری‌ها اتفاق می‌افتد (شکل ۲–**۹۹** a) نفوذ جریان تنها در ناحیه‌ای نزدیک به سطح اتفاق می‌افتد. زمانی که محل اتصال جریان در دو سطح مخالف از صفحه کامپوزیت قرار داشته باشد ولی نه دقیقا روبروی هم، نفوذ جریان مورب خواهد بود (شکل ۲–**۹۹** b). زمانی که محل اتصال جریان در مقطع عضو کامپوزیت قرار گیرد یا در حفره‌ای که به عمق کامپوزیت ارتباط دارد، جریان از کل مقطع عضو کامپوزیت عبور می‌کند (شکل ۲–**۹۹** c و شکل ۲–**۹۹** d). زمانی که مقاومت الکتریکی به موازات الیاف اندازه‌گیری می‌شود، تغییرات در آن نشانگر شکستن الیاف می‌باشد. از سوی دیگر زمانی که مقاومت الکتریکی از جهت ضخامت اندازه‌گیری می‌شود، بیانگر آسیب بین لایه‌ای می‌باشد. مقاومت الکتریکی که به صورت مورب اندازه‌گیری می‌شود، بیانگر هر دوی این آسیب‌ها می‌باشد و به همین دلیل یکی از بهترین روش‌ها برای اندازه‌گیری آسیب است.

۲-۶-۲ - انواع روش‌های استفاده از مواد نانو ساختار به عنوان حسگر

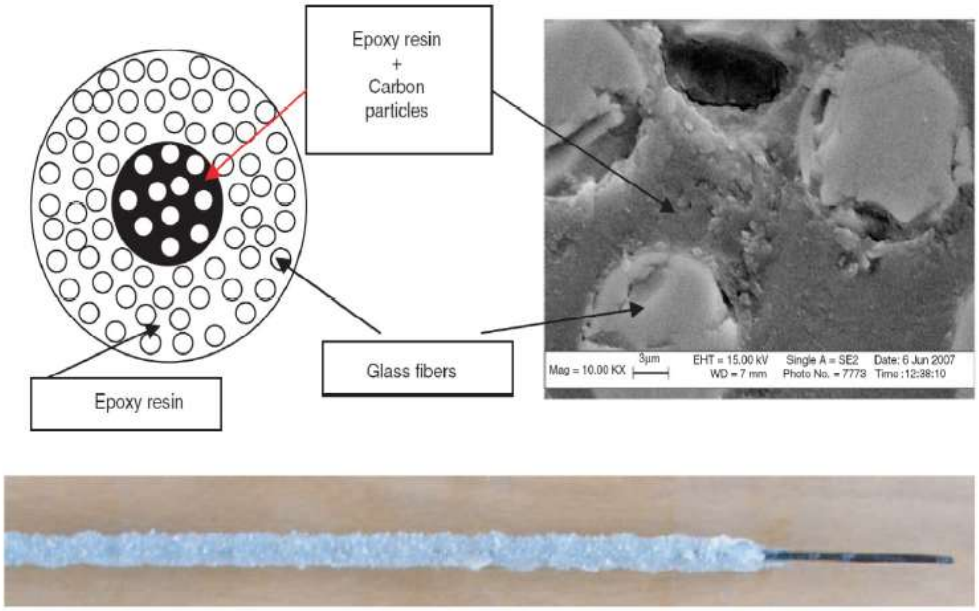
مواد نانوکامپوزیت خود-سنجشگر بطور کلی به دو صورت کامپوزیت‌های سیمانی و کامپوزیت‌های پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند. حسگرهای مکانیکی مختلفی نیز تاکنون با استفاده از نانو لوله‌های کربنی و نانوالیاف کربنی و یا دیگر نانو ذرات کربن بر پایه مواد کامپوزیت برای اندازه‌گیری تنش، کرنش، فشار و .... توسعه داده شده است. در میان آن‌ها، بسیاری برای کاربردهای عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه مثال‌هایی از کاربرد اینگونه سنسورها ارائه می‌گردد.

۱-۲-۶-۲- رادهای (میله‌های)کامپوزیت خودسنجشگر

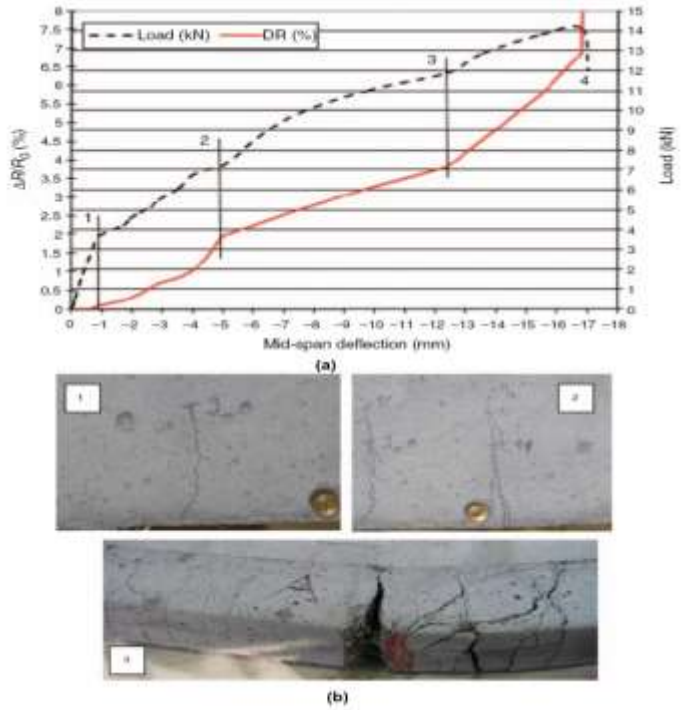
به عنوان مثال، توسعه رادهای کامپوزیت خود-سنجشگر شامل یک هسته رسانای داخلی احاطه شده با یک پوسته عایق خارجی می‌باشد (شکل ۲-۱۰۰). هسته رسانا ساخته شده از الیاف شیشه آغشته با ترکیب ذرات نانو کربن و اپوکسی می‌باشد. این بخش خود-سنجشگر توسط پوسته خارجی از GFRP که هم سبب افزایش مقاومت مکانیکی راد شده و هم سبب عایق‌سازی الکتریکی می‌شود پوشانده شده است [۱۳۷].
نانو ذرات کربن استفاده شده، به شکل کروی و با متوسط قطر ۳۰ نانومتر می‌باشند و با اپوکسی با نسبت ۰.۵٪ ترکیب شده‌اند تا یک کامپوزیت ترکیبی با رسانایی الکتریکی خوب را تشکیل دهند. عضو بتنی که این میله کامپوزیت در آن قرار گرفته رفتار خود-سنجشی خوبی را از خود نشان می‌دهد (شکل ۲-۱۰۱). ناپیوستگی در منحنی تغییرات مقاومت در نقاط ۱، ۲ و ۳ نمایانگر تغییرات مختلفی در نمونه بتنی می‌باشد؛ مانند شروع ترک‌خوردگی نمونه بتنی در نقطه ۱، تشکیل و گسترش ترک‌های بیشتر در نقطه ۲ و ترک‌های شدید و شکست نمونه بتنی در نقطه ۳.

۲-۲-۶-۲- کامپوزیت سیمان و نانو لوله‌های کربنی

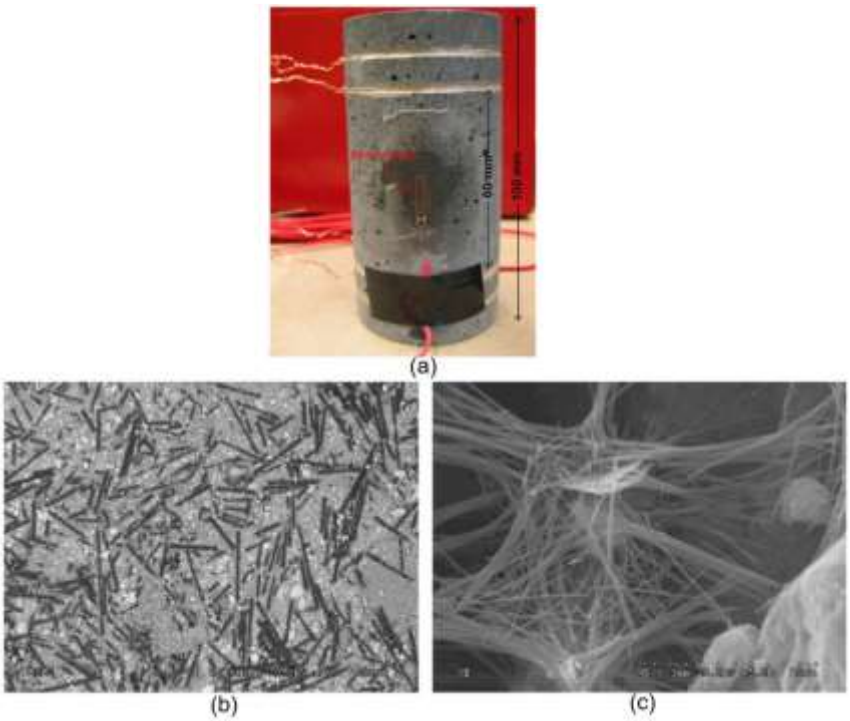
مثال دیگری در این رابطه کامپوزیت ترکیبی سیمان، نانو لوله‌های کربن و الیاف کربنی می‌باشد که رفتار خود-سنجشی خوبی از خود نشان می‌دهد [۱۳۷, ۱۴۴]. در این کامپوزیت، ۱ درصد حجمی از نانو لوله‌های چند جداره به همراه ۱۵ درصد حجمی الیاف کربنی در ترکیب با سیمان استفاده شد (شکل ۲-۱۰۲). تحت بارگذاری چرخه‌ای فشاری، تغییرات در مقاومت الکتریکی نمایانگر تغییرات بار و کرنش با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. پاسخ‌ها غیر خطی و وابسته به سرعت می‌باشند؛ با این وجود برای سرعت بارگذاری کاربردی، کرنش در مصالح توسعه داده شده از تغییرات کوچک در مقاومت الکتریکی با استفاده از یک منحنی کالیبراسیون غیر خطی قابل پیش بینی می‌باشد. در مقایسه با حسگر فیبر کربن، حسگر ترکیبی نتایج بهتری را با تکرارپذیری بالا از خود نشان داد. این موضوع را می‌توان از پراکندگی کمتر مقادیر FCR در مورد سنسورهای ترکیبی نسبت به سنسور فیبر کربن برداشت کرد (شکل ۲-۱۰۳).



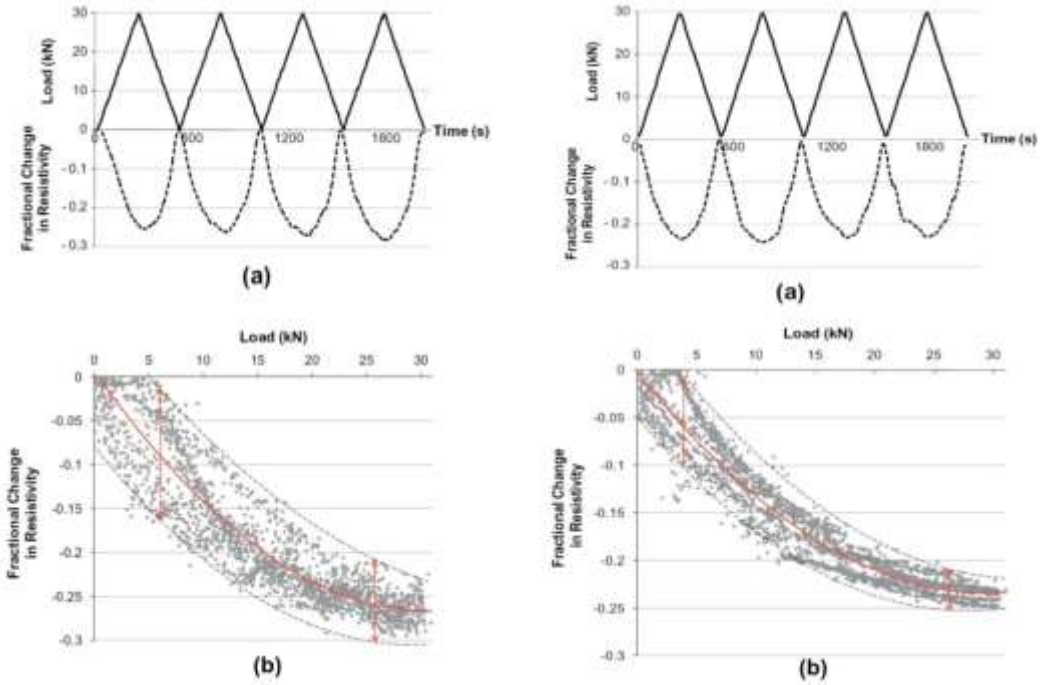
شکل ۲–۱۰۰: میله‌های کامپوزیت ترکیبی مبتنی بر نانو ذرات کربن: طرح شماتیک مقطع عرضی، میکروگراف SEM و نمای طولی [۱۳۷]



شکل ۲–۱۰۱: (a) عملکرد خود-پایشی، (b) الگوی ترک‌ها در نمونه بتنی [۱۳۷]

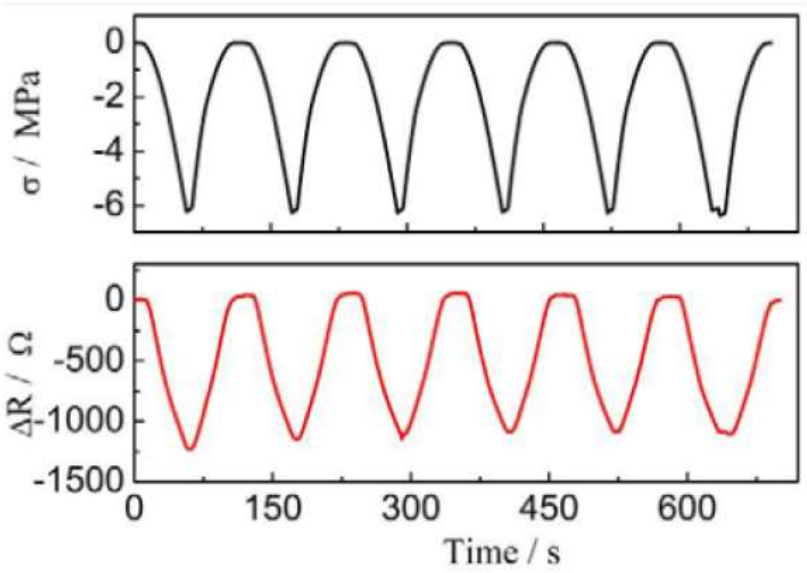


شکل ۲–۱۰۲: (a) کامپوزیت سیمان ترکیبی الیاف کربن – نانو لوله‌های کربنی، (b) توزیع الیاف کربنی در سیمان، (c) نانو لوله‌های کربنی چند جداره در سیمان هیدراته شده[۱۳۷]



شکل ۲–۱۰۳: تغییرات FCR در برابر بار برای حسگر بتنی با الیاف‌های کربن (چپ) و برای حسگر بتنی ترکیبی (راست) [۱۳۷]

نمونه دیگری از کاربرد مواد نانو ساختار در پایش سلامت سازها، استفاده از حسگر کامپوزیت CNT/سیمانی برای پایش روسازی جاده‌ها می‌باشد، [۱۳۷, ۱۴۵]. برای این منظور کربوکسیل‌های[۱] کاربردی شده CNT در سیمان با استفاده از فرآیند آلتراسونیک و با کمک سورفاکتانت[۲] (سدیم دودکیل بنزن سولفونات[۳]) پراکنده شدند. همانطور که در شکل ۲-**۱۰۳** دیده می‌شود، در درصد حجمی ۰/۱، MWCNT توانایی خود-سنجشی بسیار خوبی از خود نشان دادند.



شکل ۲-۱۰۴: عملکرد حساسیت حسگر سیمان/CNT [۱۳۷]

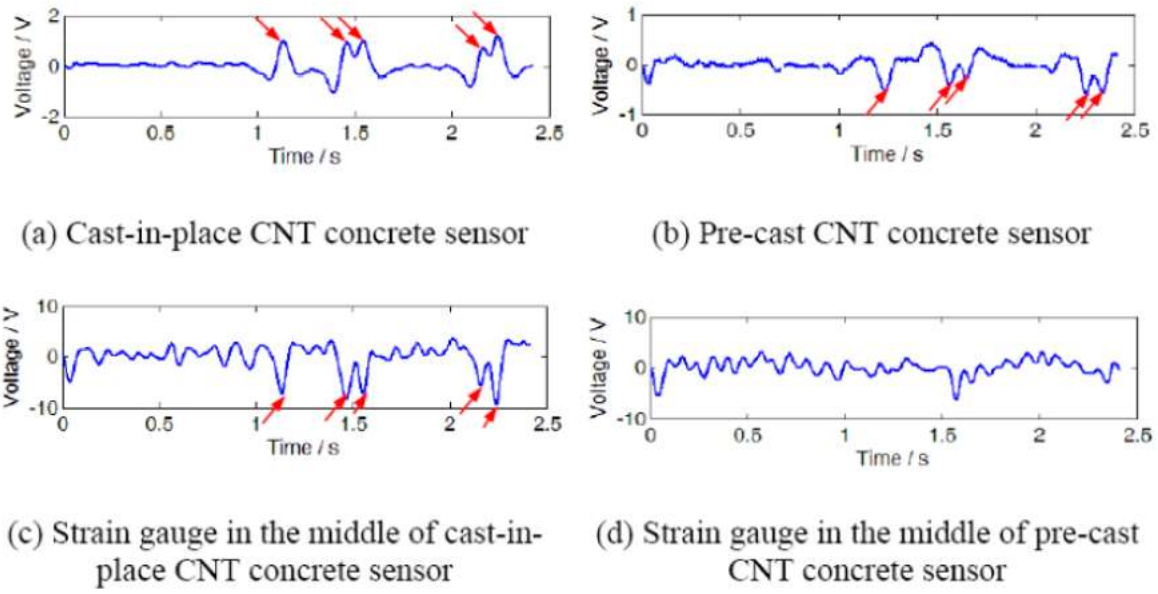
مطابق شکل ۲-**۱۰۵** این حسگرهای CNT در روسازی جاده برای تست توانایی آن‌ها در پایش روسازی نصب شدند.



شکل ۲-۱۰۵: نصب حسگر سیمان/CNT در روسازی جاده [۱۳۷]

[۱] carboxyl
[۲] surfactant
[۳] sodium dodecyl benzene sulfonate

شکل ۲-۱۰۶ پاسخ حسگرهای CNT را برای دو حالت حسگر ایجاد شده با بتن‌ریزی درجا و حسگر از پیش ساخته، به همراه کرنش‌سنج[۱] در میان آن‌ها نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که یک تغییر ناگهانی در ولتاژ هنگامی رخ می دهد که یک چرخ عبور می‌کند و هر پیک سیگنال، عبور یک چرخ را نشان می دهد. در مقایسه سیگنال‌های بدست آمده از کرنش‌سنج، حسگر CNT/سیمانی دقت بیشتری از خود نشان می‌دهد زیرا برخی از سیگنال‌ها در خروجی کرنش‌سنج از دست رفته است [۱۳۷].



شکل ۲-۱۰۶: (a, b) پاسخ حسگرهای ساخته شده در محل و از پیش ساخته شده، (c, d) پاسخ کرنش سنج‌ها در هنگام عبور کامیون از روی جاده [۱۳۷]

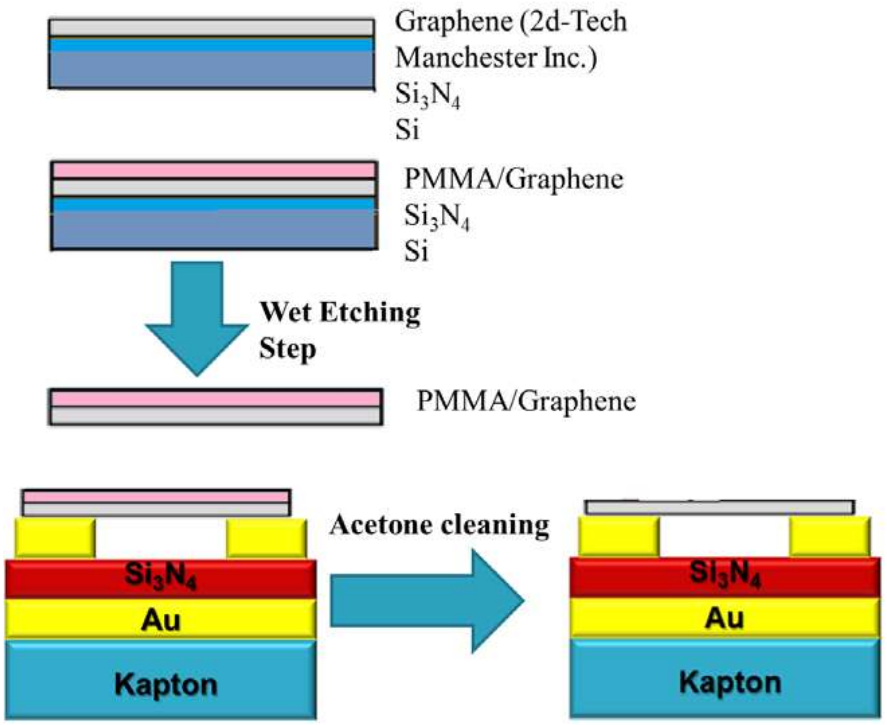
۳-۲-۶-۲- رزین اپوکسی اصلاح شده با نانو لوله‌های کربنی چند جداره با خصوصیت خود-سنجشگری

نمونه دیگری از کاربرد مواد نانو کامپوزیت، استفاده از پوشش اپوکسی اصلاح شده بر روی عرشه تقویت شده پل‌ها با FRP می‌باشد [۱۴۴]. برای این منظور رزین اپوکسی به وسیله نانولوله‌های چند جداره کربنی (MWCNT) به یک ماده نانو کامپوزیت رسانای الکتریکی تبدیل شد و ارتباط بین مقاومت الکتریکی و کرنش این ماده نانو کامپوزیت بدست آمد. سپس مقاوت الکتریکی این پوشش الکتریکی بر روی FRP های نصب شده بر عرشه پل توسط یک اهم متر ساده اندازه‌گیری شد. از ارتباط بین مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده و کرنش، مقادیر کرنش عرشه تقویت شده پل محاسبه شد. در مجموع چنین پوشش‌هایی برای پایش سلامت سازه بخصوص در اندازه‌گیری کرنش/تنش به دلیل کاربرد و داده‌برداری آسان، ظرفیت بالایی در کاربردی شدن بیشتر آن وجود دارد.

[۱] Strain gauge

۴-۲-۶-۲- حسگر کرنش با استفاده از نانو صفحات گرافن

نمونه دیگری از کاربرد مواد نانو ساختار در تولید حسگر، حسگری است که محققین مرکز علوم نانو و نانوتکنولوژی دانشگاه شریف با استفاده از نانو صفحات گرافن برای اندازه‌گیری کرنش تولید کرده‌اند[۱۴۶]. این حسگر قادر به اندازه‌گیری کرنش‌های در صفحه و خارج از صفحه می‌باشد، کرنش‌هایی که ناشی از خم شدن صفحه حسگر باشد و همچنین کرنش‌هایی که ناشی از افزایش ابعاد صفحه حسگر است. در حقیقت این حسگر یک سیستم نانو الکترومکانیکال بر پایه صفحات گرافن[۱] برای اندازه‌گیری کرنش می‌باشد. شکل ۲-۱۰۷ طرح شماتیک این حسگر GNEMS را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰۷: طرح شماتیک حسگر نانو ساختار برپایه نانو صفحات گرافن [۱۴۶]

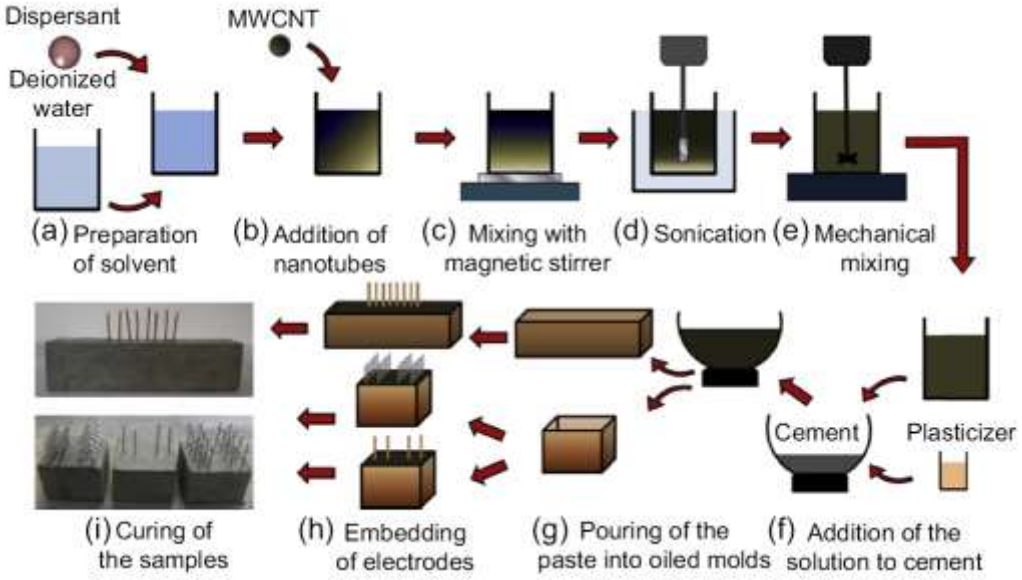
۵-۲-۶-۲- حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT تهیه شده برای آزمایش‌های دینامیکی

[۱] graphene-based flexible nanoelectromechanical systems (GNEMS)

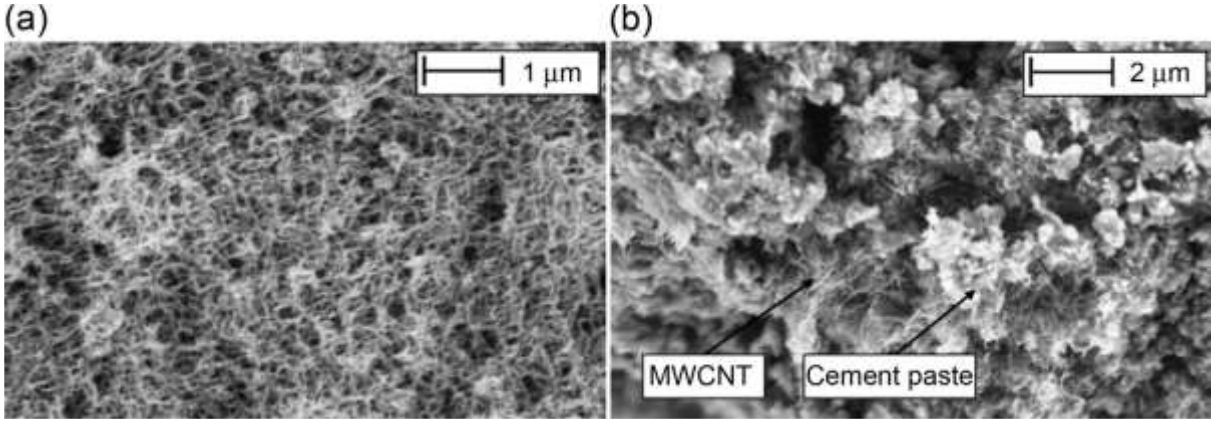
نمونه دیگری از کاربرد مواد نانو ساختار در تولید حسگرها، حسگرهای خمیر سیمان به همراه نانو لوله‌های کربنی می‌باشد که می‌توان از آن برای شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه نیز استفاده کرد [۱۴۷]. در این حسگر نانو کامپوزیت، نانولوله‌هایی که در آن توزیع شده از نوع نانولوله‌های کربنی چند جداره Arkema از کلاس Graphistrength C100 می‌باشد. MWCNT های بکار برده شده در این نانو کامپوزیت سیمانی به اندازه ۰.۲٪ وزنی سیمان می‌باشد. فوق‌روان‌کننده Sky 521، که بر اساس نسل دوم پلی کربوکسیلات پلیمرهای اتر می‌باشد، به اندازه ۰.۱٪ وزنی سیمان برای افزایش کارایی به طرح اختلاط کامپوزیت اضافه شد. پراکنده کننده‌های فیزیکی برای توزیع بهتر نانو لوله‌های کربنی نیز استفاده شد. سپس مطابق شکل ۲–۱۰۸، در ابعاد مختلف منشوری با قرار دادن الکترودهایی از جنس فولاد ضد زنگ و یا سیم‌های مسی، حسگرهای کامپوزیت آماده استفاده شد. فرآیند تهیه حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/ MWCNT در شکل ۲–۱۰۹، نشان داده شده است. شکل ۲–۱۱۰ تصاویر SEM از توزیع MWCNT در آب و در خمیر سیمان را برای تولید حسگر نانو کامپوزیت سیمانی/ MWCNT نشان می‌دهد.



شکل ۲–۱۰۸: حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/ MWCNT [۱۴۷]

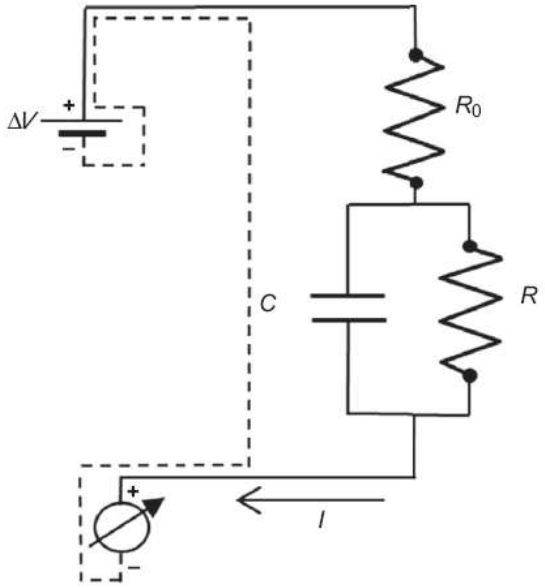


شکل ۲–۱۰۹: فرآیند تهیه حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/ MWCNT [۱۴۷]



شکل ۲–۱۱۰: تصاویر SEM از توزیع MWCNT (a) در آب (b) در خمیر سیمان[۱۴۷]

مدل الکتریکی که این گونه حسگرهای نانو کامپوزیت ایجاد می‌کنند بصورت شکل ۲–۱۱۱ می‌باشد که یک خازن و یک مقاومت الکتریکی می‌باشد که به موازات نمونه قرار می‌گیرند.



شکل ۲–۱۱۱: نمایش مدل پیشنهادی الکتریکی حسگر CNTCS با استفاده از کابل برای جمع‌آوری داده‌ها [۱۴۷]

در شکل ۲–۱۱۱، R_0 مقاومت الکتریکی الکترودها، R و C به ترتیب مقاومت الکتریکی و ظرفیت خازنی حسگر CNTCS می‌باشند. این مقادیر برای فاصله الکترودهای مختلف در حسگر CNTCS بررسی شد و در جدول ۲–**۳۱** ارائه شد.

جدول ۲-۳۱: مقادیر پارامترهای مدل از آزمون قطبش برای نمونه با الکترودهای سیمی و شبکه‌ای [۱۴۷]

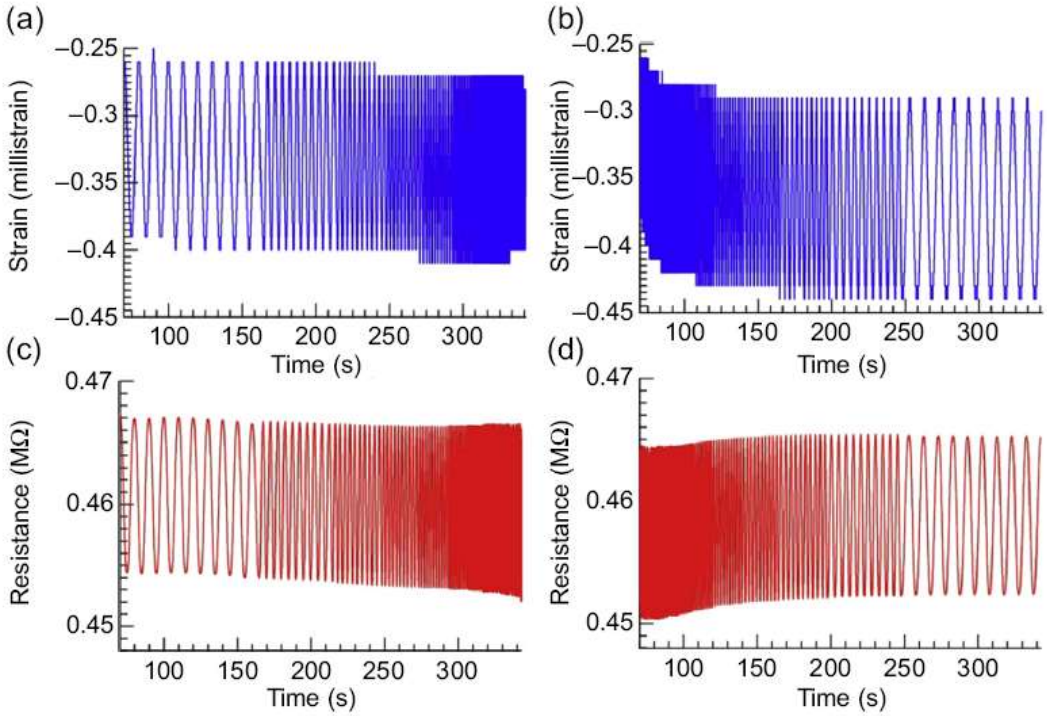
	Wire electrodes			Net electrodes		
	1 cm	2 cm	4 cm	1 cm	2 cm	4 cm
R_0 (kΩ)	101.8	83.4	56.7	85.6	79.2	95.1
R (kΩ)	17.7	31.7	128.8	27.0	30.9	14.6
C (μF)	53,600	39,400	3900	19,755	11,260	7125
Correlation	0.9996	0.9989	0.9764	0.9998	0.9990	0.9717

برای استفاده از حسگر CNTCS در تست‌های دینامیکی، خصوصیات و رفتار دینامیکی حسگر ابتدا تحت تست دینامیکی تعیین شد و با فرکانس ثابت و با فرکانس متغییر تعیین گردید (شکل ۲-۱۱۲). هر بار آزمایش دینامیکی شامل اعمال نیروی ۲ کیلو نیوتن در ۲۴۰ ثانیه و سپس بار هارمونیک در محدوده ۲ تا ۴ کیلو نیوتن که مطابق با تنش محوری به ترتیب ۱/۲۵ و ۲/۵ مگاپاسکال می‌باشد، در محدوده فرکانسی مشخص به سنسور اعمال شد.



شکل ۲-۱۱۲: نمایش سیستم مورد استفاده برای آزمون دینامیکی حسگر CNTCS [۱۴۷]

به عنوان مثالی از آزمون‌های دینامیکی انجام شده بر روی حسگر CNTCS، نتایج آزمون دینامیکی حسگر CNTCS تحت بار دینامیکی فشاری با فرکانس بارگذاری بین ۵ تا ۰/۱ هرتز مطابقت خوبی بین تنش اندازه‌گیری شده و مقاومت الکتریکی نشان داد (شکل ۲-۱۱۳).

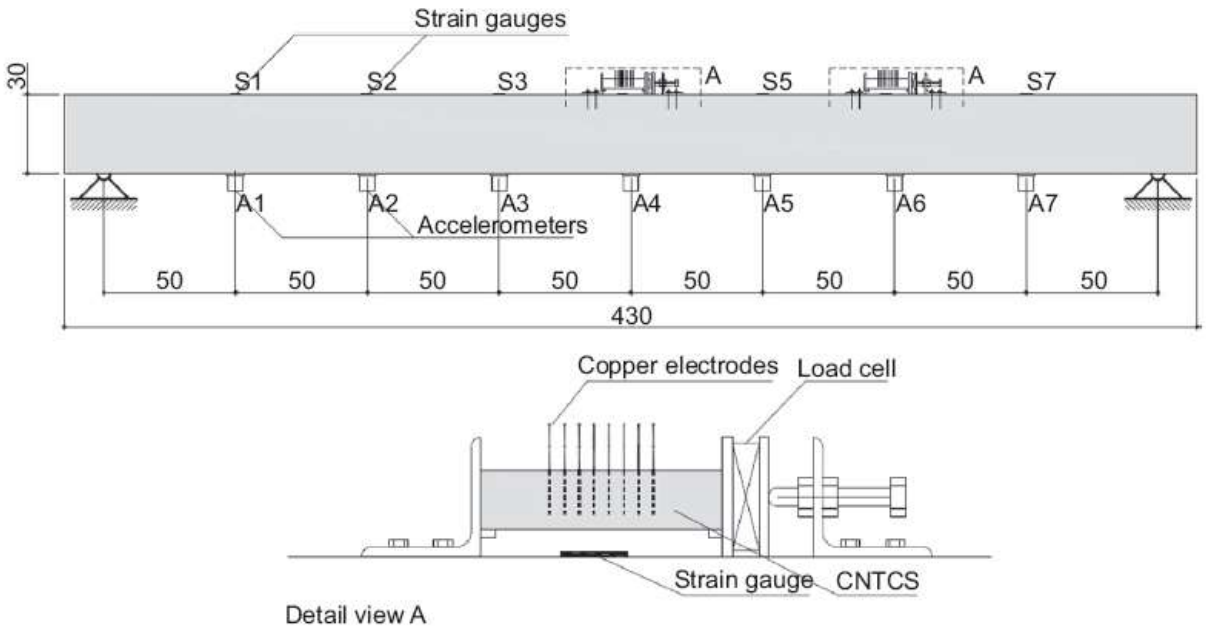


شکل ۲–۱۱۳: تنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج و مقاومت الکتریکی متناظر اندازه‌گیری شده توسط حسگر CNTCS، (a, c) آزمون دینامیکی با فرکانس بارگذاری از ۰/۱ تا ۵ هرتز، (b, d) آزمون دینامیکی با فرکانس بارگذاری از ۵ تا ۰/۱ هرتز [۱۴۷]

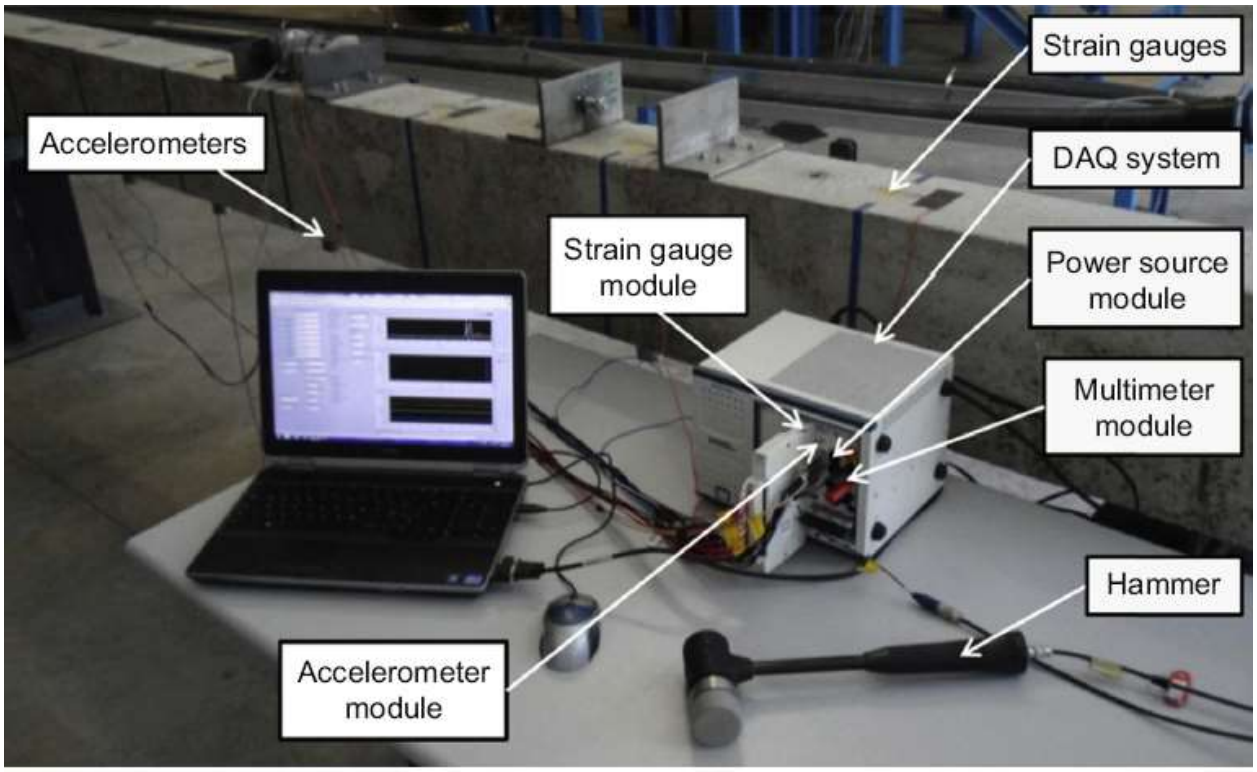
پس از بررسی مشخصات دینامیکی حسگر CNTCS، یک آزمون پایش دینامیکی بر روی یک تیر بتن آرمه در مقیاس واقعی مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج حسگر شتاب بر روی همان تیر مقایسه شد. شکل ۲–۱۱۴ طرح شماتیک تیر مورد بررسی را به همراه محل و نحوه قرارگیری حسگرها برروی آن نشان می‌دهد. شکل ۲–۱۱۵ تصویری از تیر بتن آرمه به همراه تمامی ابزار مورد نیاز برای انجام آزمون دینامیکی را نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده از آزمون دینامیکی، برای شناسایی خصوصیات مودال از طریق روش تجزیه در حوزه فرکانس[۱] مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده با استفاده از داده‌های شتاب، امکان شناسایی ۱۲ مود ارتعاشی را بین محدوده ۰ تا ۵۰۰ هرتز فراهم می‌کند که این ۱۲ مود شامل ۵ مود قائم (V1، V2A، V2B، V3 و V4)، ۵ مود عرضی (L1 تا L5) و ۲ مود عرضی اضافه دیگر که LS1 و LS2 می‌باشند. تمامی این مودها از نتایج کرنش بدست آمده از حسگر CNTCS نیز قابل دستیابی می‌باشند. جدول ۲–۳۲ فرکانس متناظر با هر یک از این مودها که از نتایج محاسباتی و نتایج حاصل از دو حسگر شتاب و CNTCS بدست آمده‌اند را نمایش می‌دهد.

[۱] Frequency Domain Decomposition (FDD)



شکل ۲–۱۱۴: طرح شماتیک تیر بتن آرمه به همراه قرارگیری حسگرهای CNCTS، شتاب و کرنش سنج‌ها [۱۴۷]

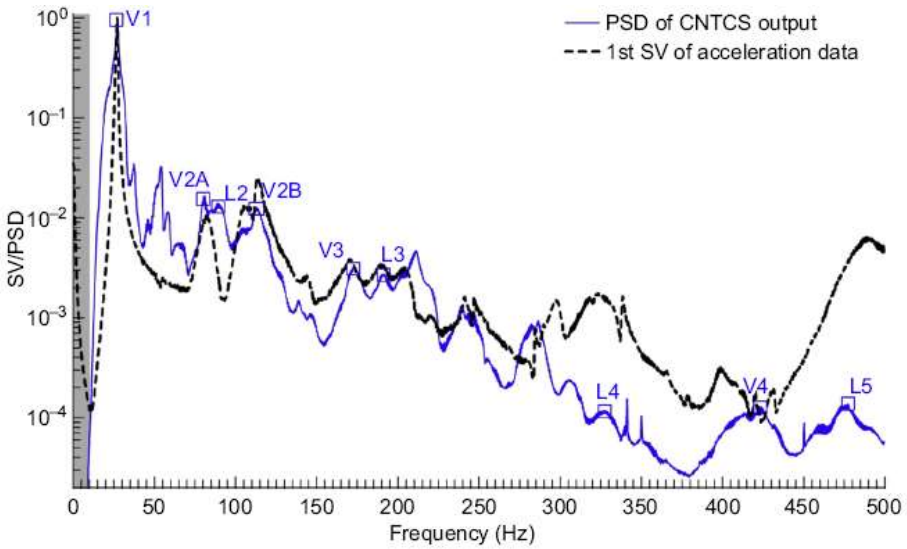


شکل ۲–۱۱۵: تصویری از تیر بتن آرمه تحت آزمون دینامیکی [۱۴۷]

جدول ۲-۳۲: فرکانس متناظر با هر یک از این مودها از نتایج محاسباتی و نتایج حاصل از دو حسگر شتاب و CNTCS [۱۴۷]

Mode	Analytical	ID (accel.)	ID (strain)	Δ (%)
LS1	–	5.13	–	–
LS2	–	19.78	19.78	–
V1	25.22	27.10	27.10	7.4
L1	38.11	32.71	37.35	14.2
V2A	100.9	82.52	81.79	18.2
L2	105.1	93.75	93.75	10.8
V2B	100.9	113.5	113.5	12.5
V3	227.0	171.1	171.1	24.6
L3	206.0	192.1	192.6	6.7
L4	340.5	322.8	–	5.2
V4	403.5	431.4	–	6.9
L5	508.6	477.3	–	6.1

شکل ۲-۱۱۶ مقادیر ویژه متناظر با هر مود را بر روی تابع چگالی طیفی[۱] نمایش می‌دهد؛ این تابع نسبت به مود اول نرمال شده است. برخی از مودها به دلیل قرارگیری در بازه فیلتر نمایش داده نشده است.

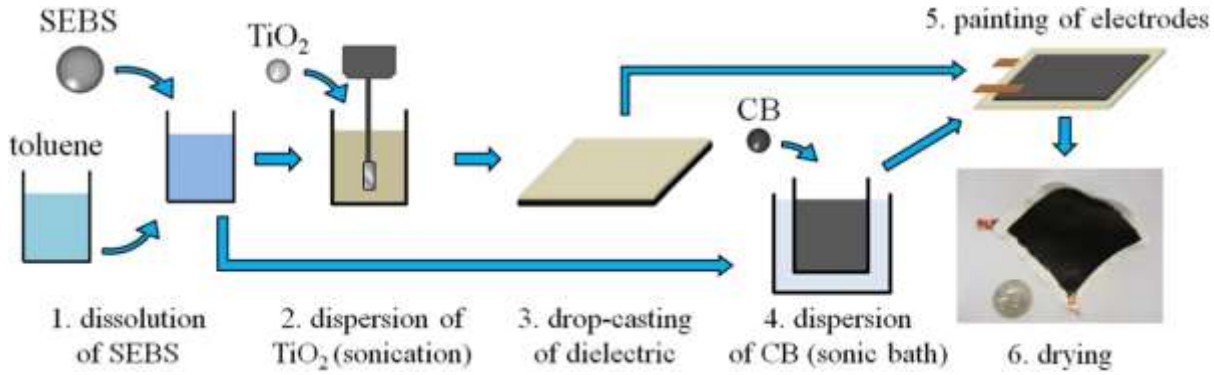


شکل ۲-۱۱۶: فرکانس‌های شناسایی شده توسط حسگرهای CNTCS و شتاب، PSD نسبت به فرکانس مود اول نرمال شده [۱۴۷]

[۱] power spectral density (PSD) function

۶-۲-۶-۲- حسگر خازنی فیلم نرم الاستومری به همراه نانو ذرات کربن سیاه

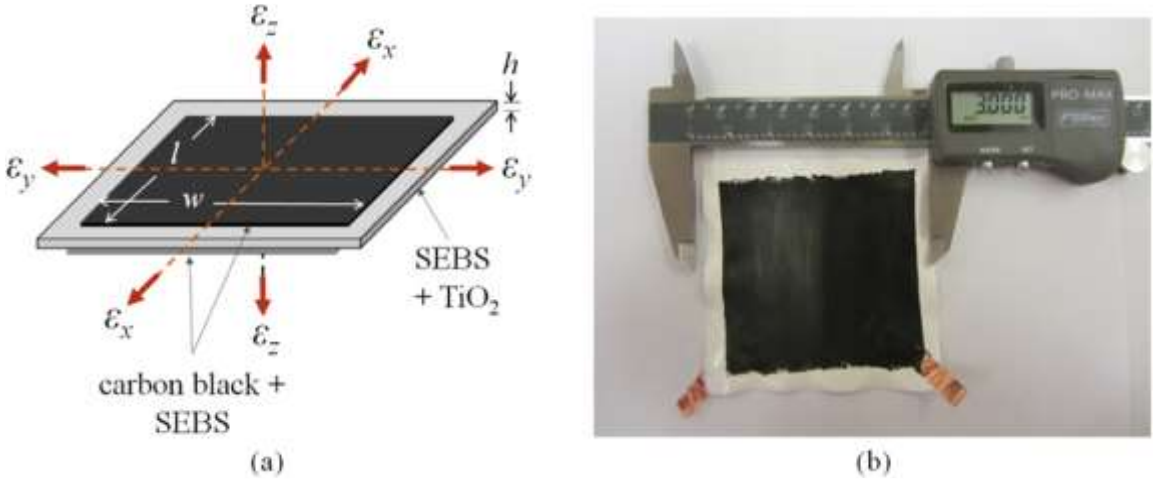
نمونه‌ای دیگر از حسگرهای نانو کامپوزیت خازنی از فیلم نرم الاستومتری می‌باشند که در تشخیص ترک‌های ناشی از خستگی سازه‌های فلزی بسیار می‌توانند موثر باشند[۱۴۸, ۱۴۹]. این حسگرهای خازنی در حقیقت فیلم نازکی از الاستومتر نرم[۱] به همراه نانو ذرات کربن سیاه می‌باشند که اندازه‌گیری‌های کرنشی را به ظرفیت خازنی تبدیل می‌کنند. با قرار دادن حسگرهای SEC به صورت شبکه‌ای از حسگرها، می‌توان با تعیین محل تغییر شکل‌ها، آسیب‌ها را تشخیص داد و محل آن را مشخص کرد. چنین عملکردی مشابه عملکرد یک پوست بیولوژیکی می‌باشد. استفاده از حسگرهای SEC امکان شناسایی ترک‌های ناشی از خستگی را در مراحل اولیه فراهم می‌آورد. شکل ۲-**۱۱۷** فرآیند تولید حسگر SEC را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱۷: فرآیند ساخت حسگر SEC [۱۴۸]

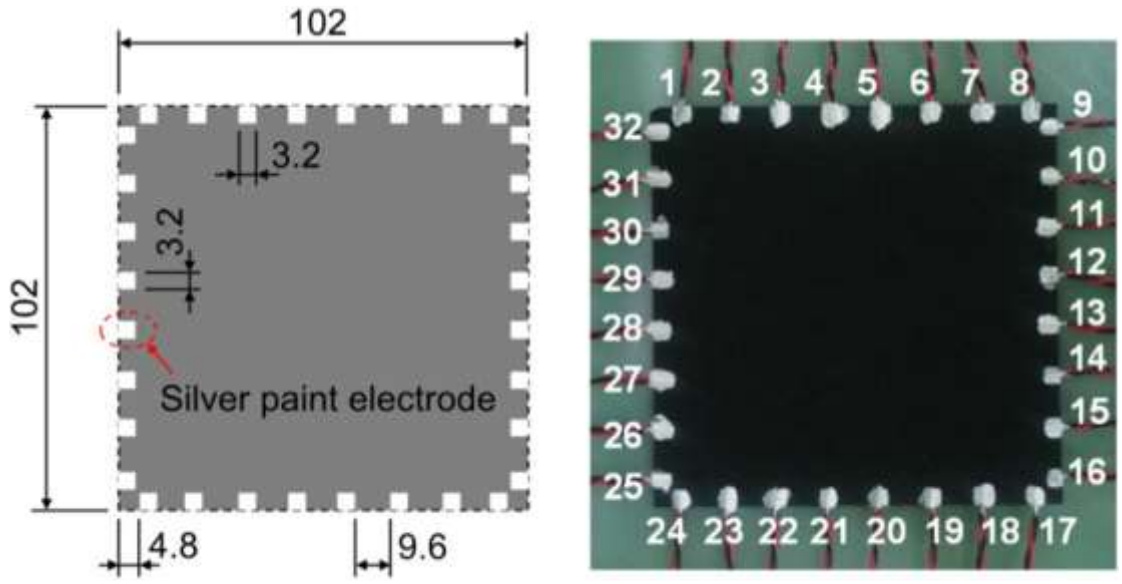
شکل ۲-**۱۱۸** تصویری از حسگر SEC را نشان می‌دهد که لایه نرم و نازک الاستومری در وسط قرار گرفته و در دو سمت آن، لایه‌های کربن سیاه به همراه لایه نرم و نازک الاستومر می‌باشد.

[۱] soft elastomeric capacitor (SEC)



شکل ۲–۱۱۸: (a) شکل شماتیک حسگر SEC به همراه محورهای اصلی‌اش (b) تصویری از یک حسگر SEC تنها [۱۴۸]

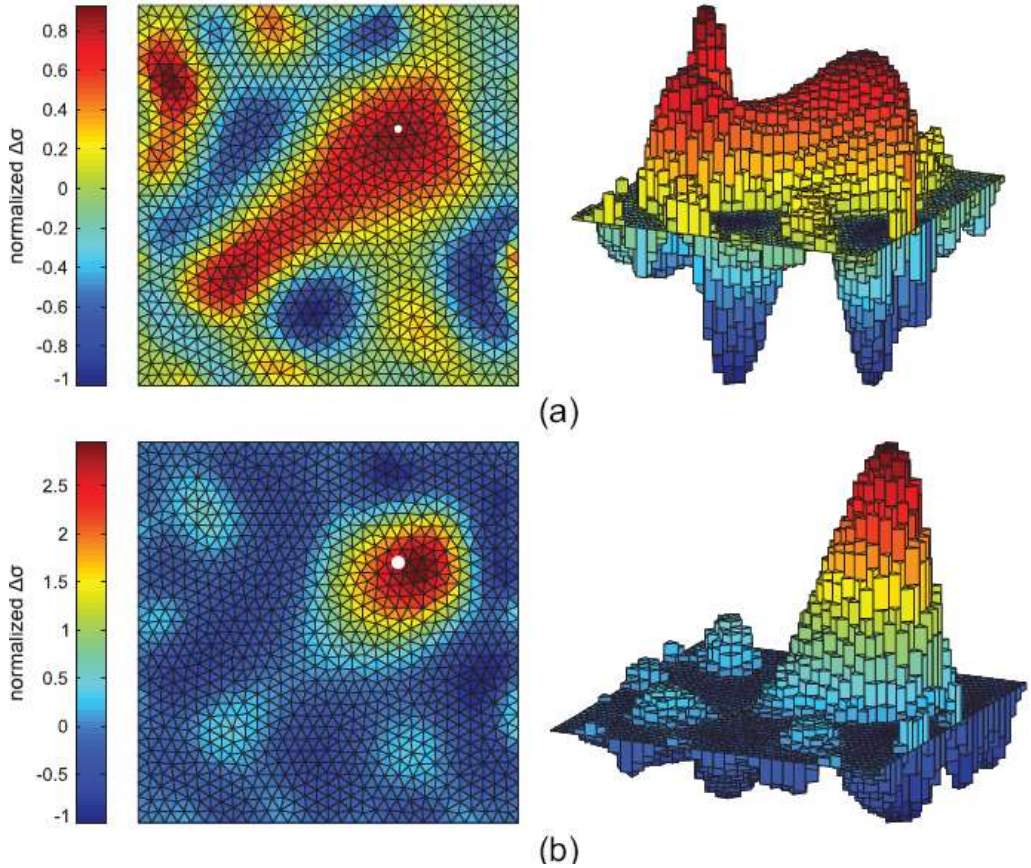
یکی دیگر از نمونه‌های استفاده از مواد نانو کامپوزیت در حسگرهای کامپوزیت توزیع شده بر پایه نانو لوله‌های کربن و یا نانو ذرات کربن سیاه به همراه رزین اپوکسی و گاهی الیاف آرامید می‌باشد. استفاده از این گونه حسگرهای سطحی به همراه تکنیک پرتو نگاری مقطعی امپدانس الکتریکی[۱] در تعیین محل آسیب و شدت آن استفاده می‌شود [۱۵۰, ۱۵۱]. در این روش مطابق شکل ۲–۱۱۹، آرایش الکترودها در اطراف حسگر توزیع شده از نانو لوله‌های کربنی و یا نانو ذرات کربن سیاه نمایش داده شده است.



شکل ۲–۱۱۹: آرایش الکترودها در اطراف حسگر توزیع شده از نانو لوله‌های کربنی و یا نانو ذرات کربن سیاه[۱۵۰]

[۱] electrical impedance tomography (EIT)

با فرض اینکه آسیب بر روی حسگرها به طور مستقیم بر هدایت الکتریکی آن‌ها تاثیر می‌گذارد، الگوریتم EIT که مبتنی بر تغییرات در تصویربرداری می‌باشد بر اساس نقشه‌های دو بعدی تغییرات هدایت الکتریکی، مکان و اندازه آسیب را تخمین می‌زند (شکل ۲-۱۲۰).



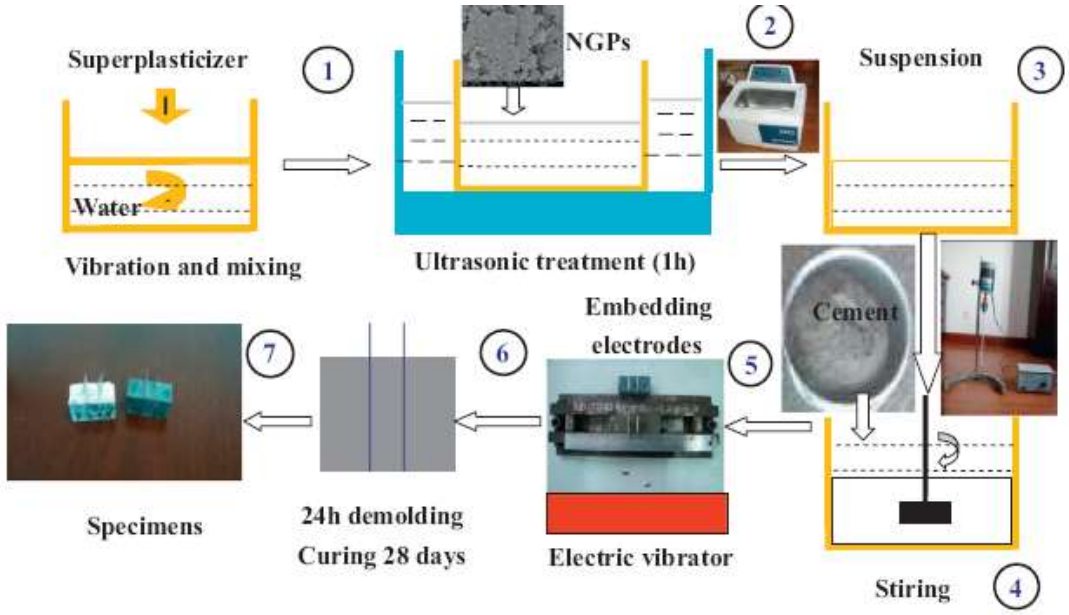
شکل ۲-۱۲۰: حساسیت به آسیب‌های کوچک. تصاویر به صورت جداگانه توسط حداکثر مقادیر مربوطه خود نرمال می‌شوند، (a) بازسازی نقص از روش EIT برای یک سوراخ به قطر ۱/۵۹ میلیمتر، (b) بازسازی نقص از روش EIT برای یک سوراخ به قطر ۳/۱۸ میلیمتر [۱۵۱]

۷-۲-۶-۲- حسگر کامپوزیت سیمان/ نانو صفحات گرافیت[۱]

نمونه دیگری از کاربردهای مواد نانو ساختار در تولید حسگرها، حسگر کامپوزیت سیمان/ نانو صفحات گرافیت می‌باشد. آزمایشات انجام شده برای بررسی پاسخ‌های مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌های سیمانی پر شده با NGP ها در مواجهه با تنش فشاری سیکلی تحت بارگذاری استاتیک و بارگذاری دینامیکی در حالات مختلف مانند دامنه‌های بارگذاری مختلف، سرعت‌های مختلف بارگذاری و بار ثابت در محدوده الاستیک این کامپوزیت‌ها انجام می شود و از این طریق رابطه بین کرنش‌های مکانیکی اعمالی و پاسخ تغییرات مقاومت الکتریکی آن بدست می‌آید. شکل ۲-

[۱] Nano graphite platelets (NGPs)

۱۲۱ فرآیند تهیه حسگر کامپوزیت سیمان/NGP را نمایش می‌دهد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، حسگر کامپوزیت سیمان/NGP قابلیت استفاده در پایش دینامیکی سازه‌ها را نیز دارد [۱۵۲].



شکل ۲-۱۲۱: فرآیند تولید حسگر کامپوزیت سیمان/NGP [۱۵۲]

۲-۶-۲-۸- حسگر سیمان مهندسی شده با استفاده از نانو ذرات کربنی

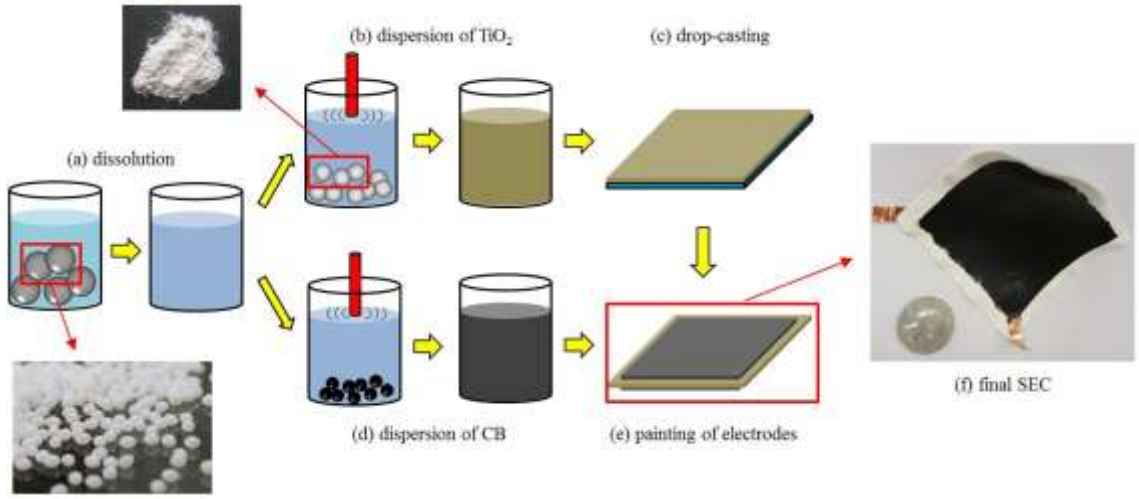
استفاده از مواد نانو ساختار در تولید حسگرها بر پایه ایجاد کامپوزیت‌هایی با رسانایی الکتریکی می‌باشد که اعمال کرنش مکانیکی سبب تغییرات مقاومت الکتریکی آن‌ها و یا تغییرات ظرفیت خازنی آن‌ها می‌گردد. آشکار است امکان استفاده از این مصالح نانو کامپوزیت با طرح اختلاط‌های متفاوت و کاربردهای متفاوت به عنوان حسگرهایی برای پایش سلامت سازه بسیار وسیع و گسترده باشد. به عنوان مثال، یکی دیگر از این نوع مصالح نانو کامپوزیت، کامپوزیت مهندسی شده سیمان[۱] است که با توجه به مواد نانو کربنی که در آن بکار برده می‌شود دارای این خصوصیت پیزو-مقاومتی بوده و می‌تواند به عنوان مصالح خود سنجشگر مورد استفاده قرار گیرد [۱۵۳].

۲-۶-۲-۹- استفاده از حسگر خازنی الاستومتری نرم(SECs) در پایش سلامت پره‌های توربین بادی

یکی دیگر از کاربردهای مواد نانو ساختار، در پایش سلامت پره‌های توربین‌های بادی است. پایش دائم پره‌های توربین‌های بادی همواره با دو مشکل فقدان مقیاس‌پذیری و ارتباط مشخص بین سیگنال و تشخیص زود هنگام نقص همراه است. با پیشرفت‌هایی که در علم پلیمر صورت پذیرفته، می‌توان شبکه‌ای از سنسورهای فیلم نازک را در ناحیه‌ای وسیع نصب کرد که امکان پایش یک سیستم بزرگ‌مقیاس را با هزینه کم فراهم می‌آورد[۱۵۴, ۱۵۵].

[۱] Engineered Cementitious Composites (ECC)

یکی از انواع سنسورهای فیلم نازک، سنسورهای خازنی الاستومتری نرم (SECs) است که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد. هر SECs به عنوان یک کرنش‌سنج، کرنش‌های اعمالی را به ظرفیت خازنی در آن نقطه تبدیل می‌کند. استفاده از این سنسورهای خازنی نرم بصورت شبکه‌ای از سنسورها امکان تغییر شکل محلی را نسبت به یک ناحیه کلی فراهم می‌آورد. هر SEC از یک دیود الکتریک نانوکامپوزیت با انعطاف‌پذیری بالا ساخته شده است که بین دو لایه الکترود قرار دارد. هرگونه تغییر در شکل هندسی سبب تغییر در ظرفیت خازنی می‌گردد. در سنسورهای SECs به طور معمول، کامپوزیت نانوذره‌ها نقش دی الکتریک خازن ایفا می‌کنند. بصورت ترکیبی از ماتریس استایرن اتیلن/ بوتلن استایرن[۱] با TiO_2 هستند که سبب انعطاف‌پذیری و استحکام مواد تحت اثرات مکانیکی می‌گردند. لایه دی‌الکتریک بین الکترودهای سازگاری که با همان SEBS و با ذرات کربن سیاه (CB) و یا نانو لوله‌های کربن مخلوط شده است قرار می‌گیرد. شکل ۲-**۱۲۰** فرآیند ساخت سنسور SEC را نشان می‌دهد [۱۵۴].

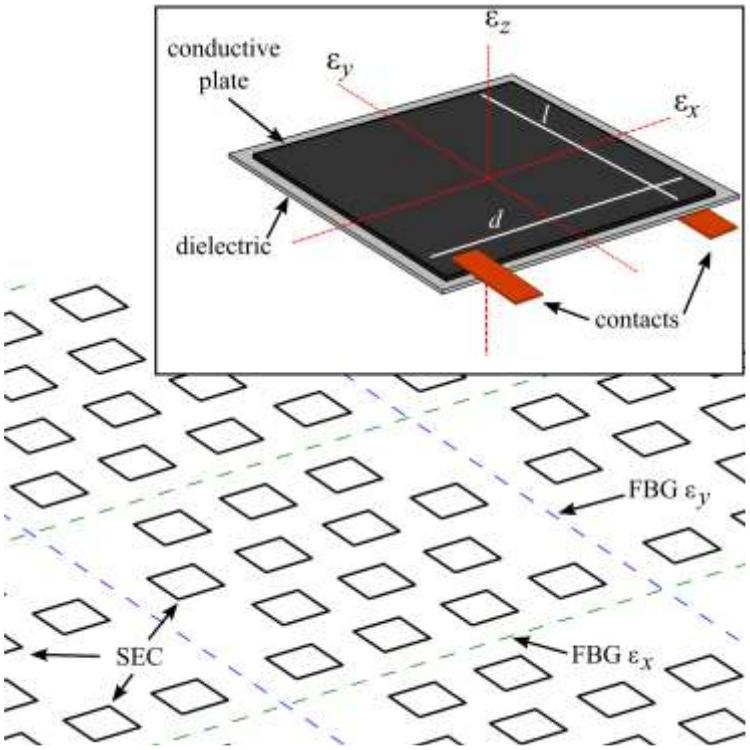


شکل ۲-۱۲۲: فرآیند ساخت سنسور SEC [۱۵۴]

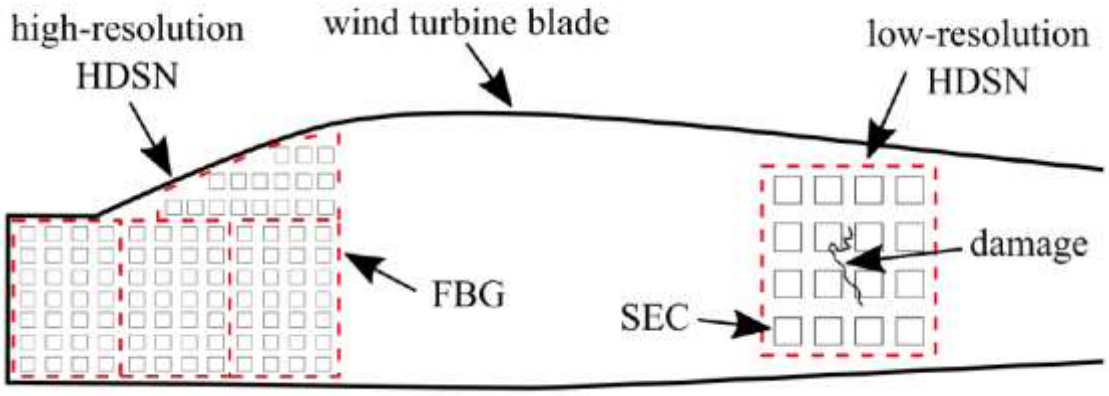
سنسورهای SEC به سطح مصالح پایه توسط اپوکسی چسبانده می‌شوند و امکان اندازه‌گیری کرنش را در هر دو حالت فشار و یا کشش فراهم می‌آورند[۱۵۵]. با استفاده از شبکه‌ای از سنسورهای SEC می‌توان کرنش محلی را نسبت به کرنش کلی اتفاق افتاده اندازه گرفت و محل آسیب را با دقت مناسب تشخیص داد (شکل ۲-**۱۲۳**). شبکه سنسورها می‌تواند شبکه‌ای متراکم از سنسورهای کوچک‌تر برای دقت بیشتر و یا شبکه‌ای از سنسورهای با ابعاد بزرگتر باشد. شکل ۲-**۱۲۴** نمونه‌ای از قرار گیری شبکه سنسورهای SEC بر روی پره توربین با دقت‌های متفاوت را نمایش می‌دهد [۱۵۶]. شکل ۲-**۱۲۵** نمونه‌ای واقعی از پره یک توربین بادی است که برای آزمایش در تونل باد مورد استفاده قرار گرفته و در آن ترکی به طول ۲ سانتی‌متر ایجاد شده است [۱۵۷]. شکل ۲-**۱۲۶** نحوه قرارگیری سنسورهای SEC را بر روی قطعه مورد آزمایش در تونل باد نشان می‌دهد. نتایج کرنش‌های اندازه‌گیری شده برای زمانی که لبه‌ها بیشترین تغییر شکل را داشته در شکل ۲-**۱۲۷** بصورت نقشه کرنش بازسازی شده نشان داده شده

[۱] styreneethylene/butylene-styrene (SEBS)

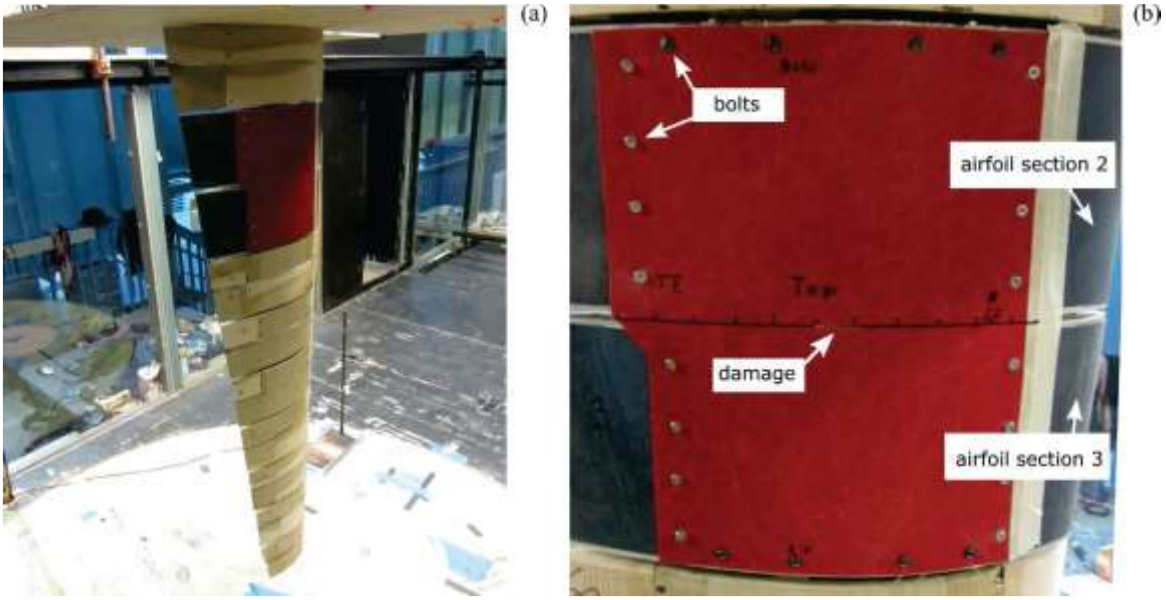
است. در شکل ۲–۱۲۷ (a) حالت سالم کرنش حداکثر در وسط قطعه اتفاق افتاده؛ این در حالی است که در حالات دیگر محل کرنش حداکثر تغییر کرده است.



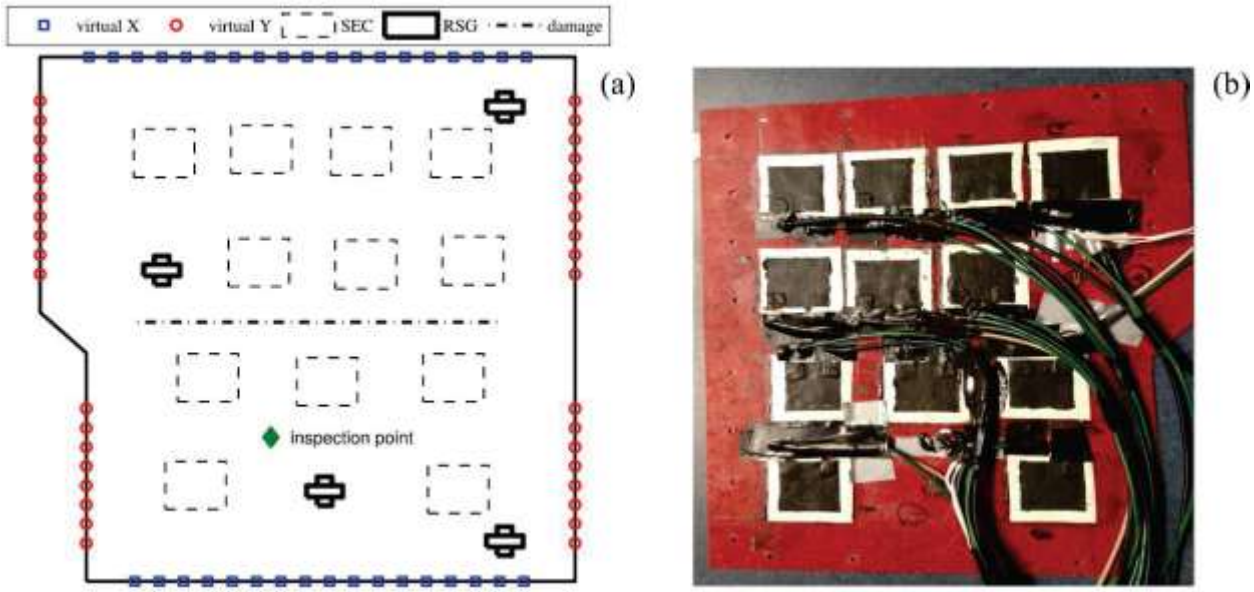
شکل ۲–۱۲۳: شبکه‌ای از سنسورهای SEC قرار گرفته بر روی قطعه‌ای جهت پایش [۱۵۶]



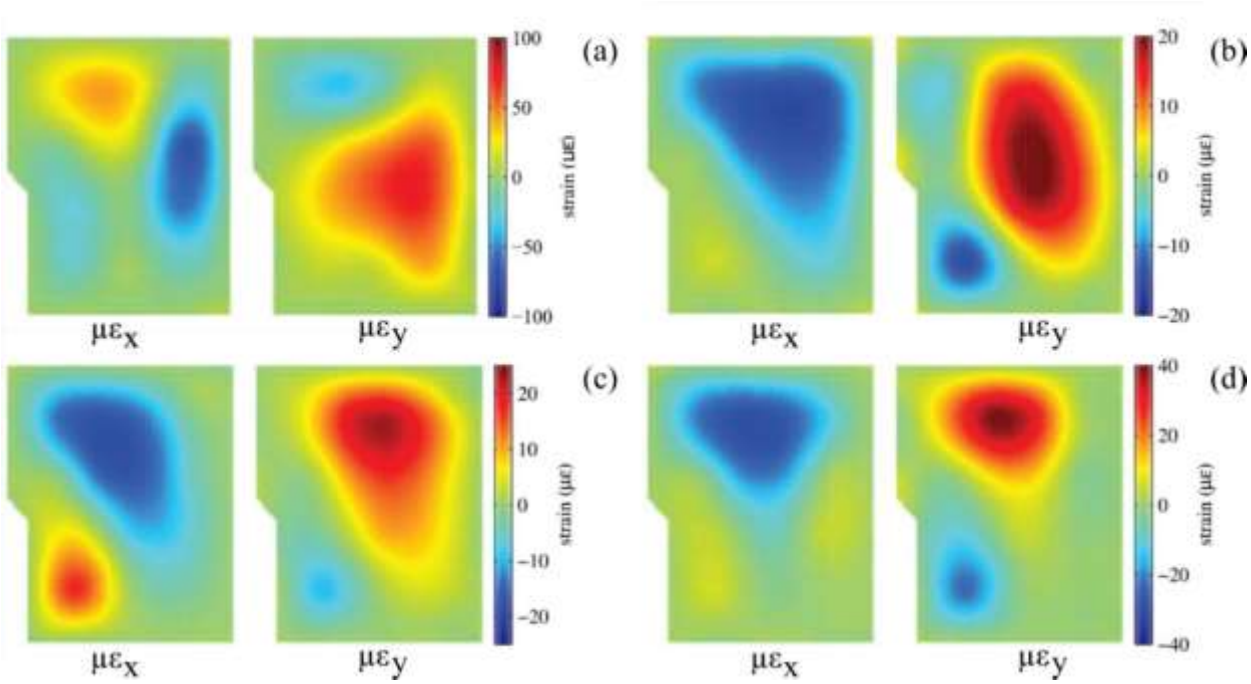
شکل ۲–۱۲۴: شبکه‌ای از سنسورهای SEC قرار گرفته بر روی پره‌های توربین جهت پایش[۱۵۶]



شکل ۲–۱۲۵: نمونه آزمایشگاهی (a) پره یک توربین بادی قرار گرفته در تونل باد، (b) یک قطعه کامپوزیت از پره توربین با طول ترکی برابر با ۲ سانتیمتر بر روی آن [۱۵۷]



شکل ۲–۱۲۶: قرار گیری سنسورهای SEC بر روی قطعه (a) شکل شماتیک قطعه تحت آزمایش (b) نمونه واقعی معادل تحت آزمایش [۱۵۷]



شکل ۲–۱۲۷: نقشه کرنش بازسازی شده (a) حالت سالم، (b) با ترکی به طول ۲ سانتی‌متر، (c) با ترکی به طول ۸ سانتی‌متر، (d) با ترکی به طول ۱۳ سانتی‌متر[۱۵۷]

۲-۷- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بهبود شرایط ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار

۲-۷-۱ - تغییرات خواص خمیری خاک‌ها با بهره‌گیری از مواد نانو ساختار

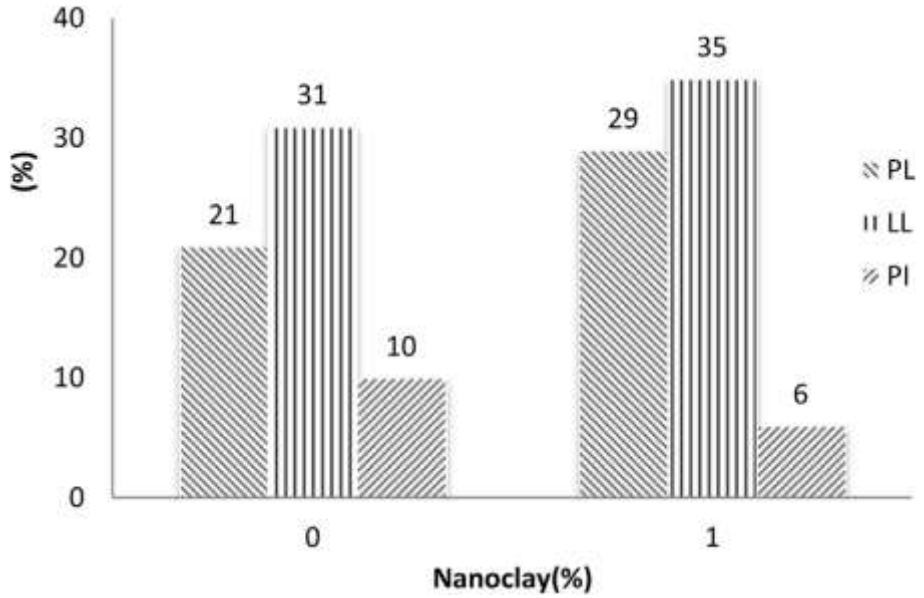
فضاهای خالی بین ذرات خاک از چند میکرومتر تا چند نانومتر در تغییر است. چنین انتظار می‌رود که در صورت پر شدن این فضاهای خالی با نانو ذرات، ویژگی‌های خاک نیز تغییر کند. به همین دلیل خواص فیزیکی انواع خاک‌ها در مجاورت با مواد نانو ساختار، تغییرات قابل توجهی از خود نشان خواهند داد. در ادامه تغییر خواص خمیری خاک بر اساس نتایج آزمایشات حدود اتربرگ مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۷-۱-۱- خاک ماسه‌ای رس‌دار

این نوع خاک‌ها از ماسه ریزدانه به همراه مواد ریزدانه رسی دارای خواص خمیری متوسط تا زیاد تشکیل شده‌اند و مشکل ظرفیت باربری تحت بارگذاری سازه دارند. از این جهت در بسیاری از طرح‌های عمرانی به خصوص پروژه‌های ژئوتکنیکی، خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار به عنوان خاک‌های مسئله‌دار مطرح می‌شوند. یکی از راهکارهای کاهش مشکلات مربوط به این نوع خاک‌ها، استفاده از روش‌های نوین بهسازی به کمک مواد نانو ساختار می‌باشد. جلیلیان و همکاران (سال ۲۰۱۵) از نانو رس مونت‌موریلونیت جهت بررسی تغییر خواص خمیری خاک ماسه‌ای رس‌دار

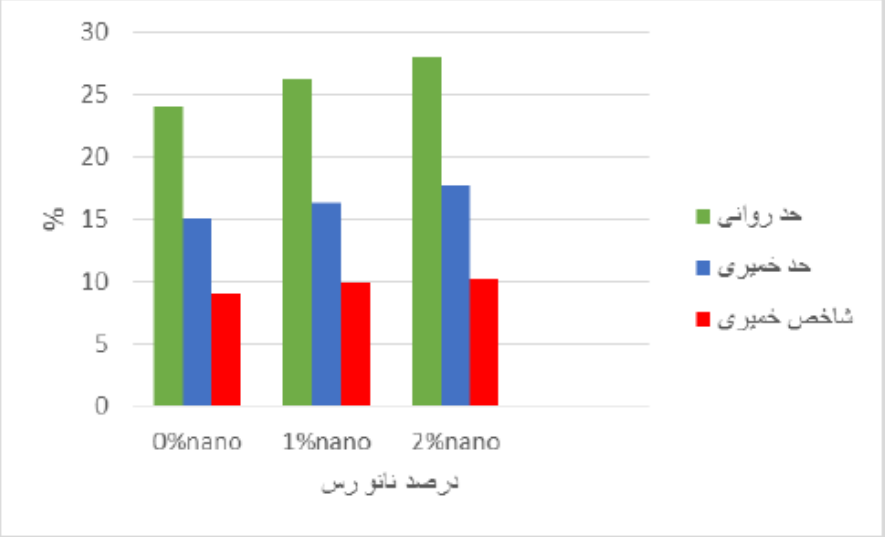
استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که حد روانی و حد خمیری خاک ماسه‌ای رس‌دار به همراه نانو ذرات رس در مقایسه با خاک اصلی افزایش یافته و این افزایش به گونه‌ای است که باعث کاهش نشانه خمیری خاک ماسه‌ای رس دار می‌شود[۱۵۸].

عربانی و همکاران (سال ۱۳۸۹) تأثیر نانو رس بر خواص خمیری خاک ماسه‌ای رس‌دار را بررسی کردند. در این مطالعه آزمایشگاهی از درصدهای مختلف نانو رس استفاده شد تا میزان تغییرات به وجود آمده در خواص ماسه‌های رس‌دار با افزایش نانو رس بررسی شود. به منظور دستیابی به رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه، آزمایش تراکم بر روی خاک مورد مطالعه انجام گرفت؛ سپس آزمایشات حدود اتربرگ بر روی خاک مورد نظر انجام شد. آزمایشات در دو حالت استفاده و عدم استفاده از نانو ذرات بر روی خاک مورد نظر برنامه‌ریزی شد. نتایج آزمایشات مطابق شکل ۲–**۱۲۸**، حاکی از کاهش دامنه خمیری خاک ماسه‌ای با وجود افزایش ۱ درصد نانو رس می‌باشد[۱۵۹].



شکل ۲–۱۲۸: تأثیر نانو رس بر روی خصوصیات خمیری ماسه‌های رس[۱۵۹]

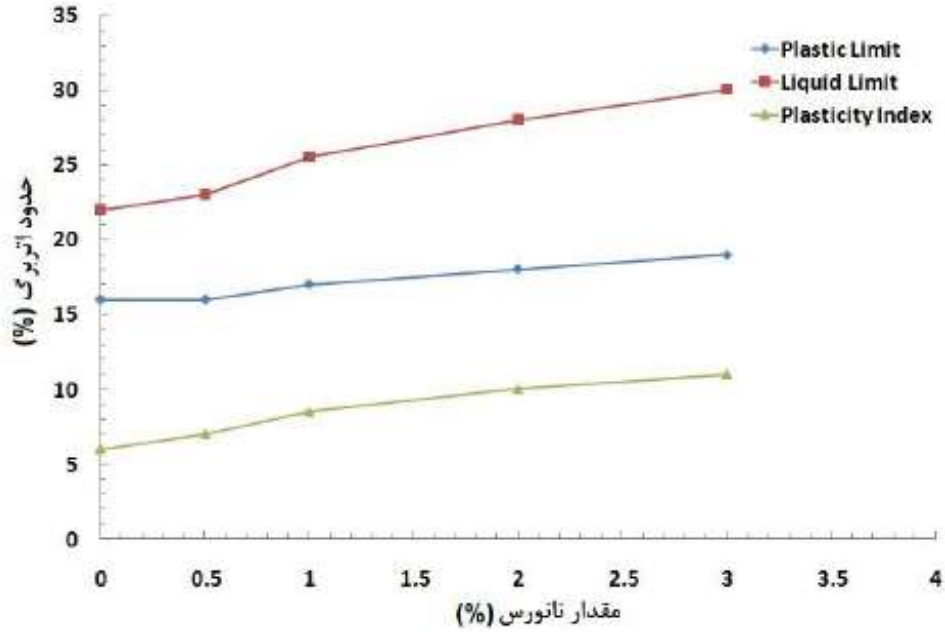
صادقیان و لوئیان (سال ۱۳۹۵) از نانو رس مونت‌موریلونیت جهت بررسی تغییر خواص خمیری ماسه رس‌دار استفاده نمودند. در این پژوهش آزمایش حدود اتربرگ بر روی خاک در دو حالت بدون نانو رس و با یک تا دو درصد نانو رس انجام شد. افزودن نانو رس به خاک باعث افزایش حد روانی و حد خمیری شده که این افزایش در حد روانی بیشتر از حد خمیری بوده و باعث افزایش دامنه خمیری خاک (PI) نیز شده است (شکل ۲–**۱۲۹**) [۱۶۰].



شکل ۲-۱۲۹: بررسی تاثیر نانو رس بر خواص خمیری خاک ماسه رس دار[۱۶۰]

۲-۱-۷-۲- خاک‌های ریزدانه

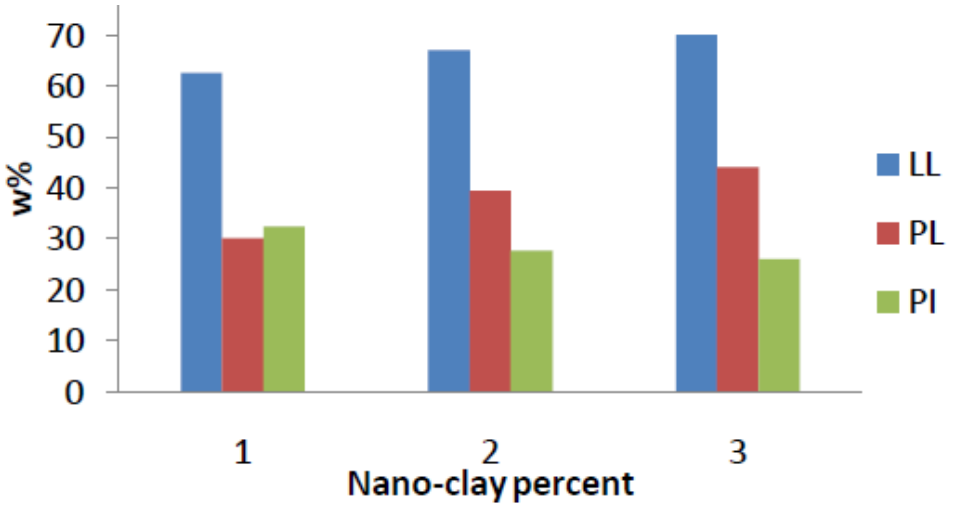
طبرسا (سال ۱۳۹۶) تغییرات حدود اتربرگ خاک ریزدانه رس لای‌دار (CL-ML) را به همراه نانو رس مونت‌موریلونیت بررسی نموده است. نتایج آزمایشات حدود اتربرگ نشان می‌دهد که با افزودن نانو رس به خاک، حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها مطابق شکل ۲-۱۳۰ به تدریج زیاد می‌شود که نتیجه آن افزایش شاخص خمیری نمونه‌های بهسازی شده با نانو رس است. به عنوان نمونه با افزودن ۲ درصد نانو رس به خاک، شاخص خمیری نمونه‌ها حدود ۸۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که در مقادیر بیش‌تر از ۲ درصد نانو رس، میزان تغییرات شاخص خمیری آنچنان محسوس و چشم‌گیر نیست و مقدار بهینه نانو رس ۲ درصد برای این نوع خاک می‌باشد (شکل ۲-۱۳۰) [۱۶۱].



شکل ۲–۱۳۰: تاثیر افزودن نانو رس بر حدود اتربرگ خاک ریزدانه رس لای‌دار [۱۶۱]

بازیار (سال ۱۳۸۹) به بررسی اثر نانو رس بر خواص پایه‌ای مهندسی ژئوتکنیکی خاک ریزدانه رسی پرداخت. در این پژوهش مجموعه‌ای از آزمایش‌های حدود اتربرگ بر روی خاک رسی با دامنه خمیری کم که از منابع قرضه سد خاکی ماملو (واقع در استان تهران) با هسته رسی به دست آمده بود و مخلوط آن با درصدهای مختلف نانو رس مونت‌موریلونیت اصلاح شده، انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد که دامنه خمیری خاک مورد نظر با اضافه کردن مقدار کمی نانو رس به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ این امر سبب انعطاف‌پذیری بیشتر در نشست بدنه سد و بهبود عملکرد لرزه‌ای آن و نیز آب‌بندی بیشتر هسته و استفاده از هسته لاغر به جای هسته عریض سد و در نهایت صرفه‌جویی در ابعاد سازه سدها خواهد بود[۱۶۲].

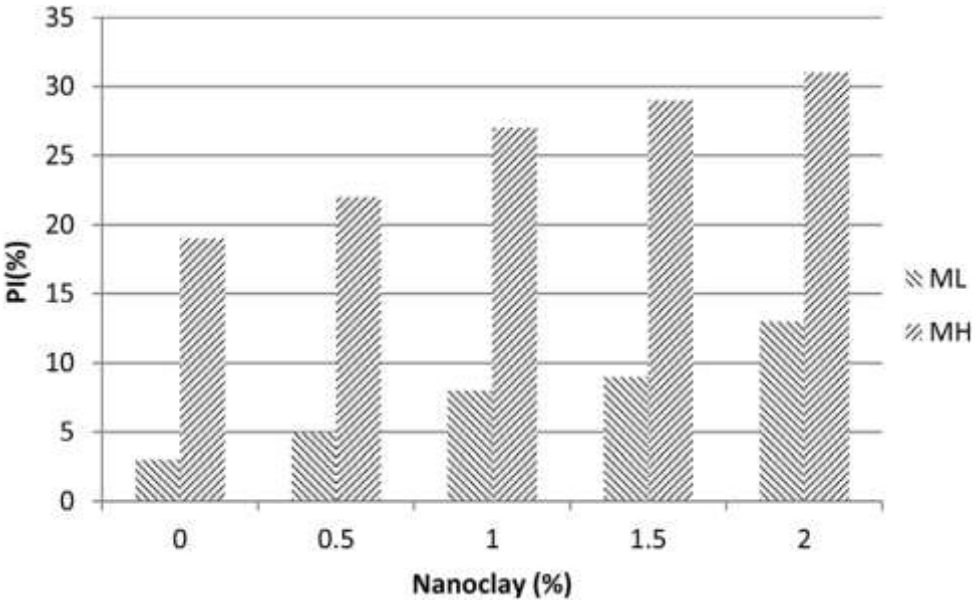
طبق تحقیقات محمدی و نیازیان (سال ۲۰۱۳) روی خاک رسی رشت مطابق شکل ۲–**۱۳۱**، با افزایش نانو رس از صفر تا ۳ درصد، حد روانی و خمیری زیاد می‌شود ولی دامنه خمیری کاهش می‌یابد[۱۶۳].



شکل ۲–۱۳۱: تاثیر نانو رس بر حدود اتربرگ خاک رسی [۱۶۳]

طاها و همکاران (سال ۲۰۱۲) نشان دادند که افزودن نانو رس به خاک ریزدانه باعث افزایش دامنه خمیری و کرنش انبساطی و انقباضی می‌شود. در صورت استفاده از نانو آلومینا، دامنه خمیری تا میزان کمتری کاهش می‌یابد. وجود نانوروی در خاک باعث کاهش بیشتر در دامنه خمیری می‌شود. این تفاوت ناشی از چگالی بیشتر ذرات نانوروی است[۱۶۴].

بهاری، عربانی و همکاران (سال ۲۰۱۳) در پژوهشی نشان دادند که نانو رس سبب افزایش دامنه خمیری دو نوع خاک لای با افزایش درصد افزودنی می‌شود. نتایج این پژوهش در شکل ۲–۱۳۲ آمده است[۱۶۵].

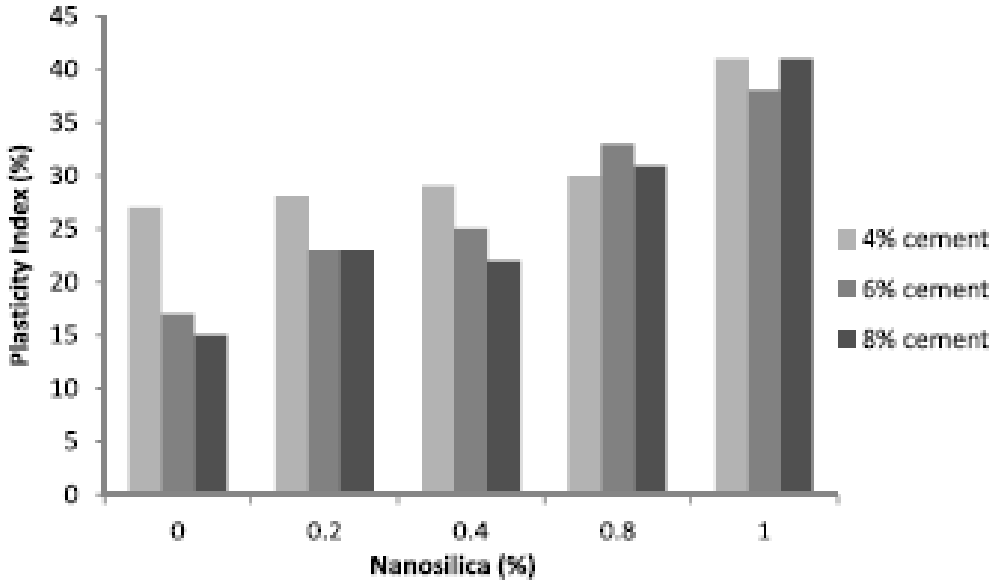


شکل ۲–۱۳۲: تاثیر نانو رس بر پلاستیسیته خاک لای [۱۶۵]

برخورداریان و کدیور (سال ۱۳۹۰) با انجام آزمایشاتی اثر نانو سیلیس بر خواص خمیری خاک ریزدانه رسی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های حدود اتربرگ برای دو حالت استفاده و عدم استفاده از نانو سیلیس انجام شده است. نتایج نشان دادند که نانو سیلیس حد خمیری را اندکی و حد روانی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و این امر سبب افزایش قابل توجه دامنه خمیری خاک ریزدانه رسی می‌شود. همچنین عملیات تزریق نانوسیلیس در خاک و انجام تست CPT در محل به عنوان بخش اجرایی پروژه انجام شده است. نتایج آزمایشات صحرایی CPT در محدوده تزریق نانو سیلیس و بدون آن نشان می‌دهد که با توجه به سیمانی شدن سیلیکات موجود بین ذرات خاک محل، تزریق نانو سیلیس منجر به افزایش قابل توجه مقاومت بستر سازه‌ها می‌گردد و این امر با گذر زمان اثرات قابل توجهی از خود نشان می‌دهد[۱۶۶].

مرادی و روحی پور (سال ۱۳۹۱) از خاک مارن با خصوصیات خمیری زیاد استفاده کردند. ابتدا این خاک با درصدهای مختلف آهک تثبیت و مشخص شد درصد بهینه آهک در حدود ۳ درصد می‌باشد؛ سپس به مخلوط خاک و درصد بهینه آهک، درصدهای مختلفی از نانو سیلیس اضافه شده و تحت آزمایشات حدود اتربرگ قرار گرفتند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو سیلیس باعث افزایش حد روانی و حد خمیری و کاهش دامنه خمیری خاک مارنی می‌گردد که این امر بیانگر بهبود خواص خمیری خاک مارنی می‌باشد. خاک‌های مارنی با دارا بودن دامنه خمیری بسیار بالا بسیار چسبنده و تورم پذیرند و در ساخت سازه‌هایی نظیر سدها استفاده از این خاک‌ها سبب کاهش کارایی سازه و محدودیت اجرایی می‌گردد؛ لذا کاهش دامنه خمیری برای این نوع خاک‌ها بسیار کارآمد و مناسب ارزیابی می‌شود[۱۶۷].

بهمنی و همکاران (سال ۲۰۱۴) به تاثیر نانو سیلیس بر خواص خمیری خاک رس بهسازی شده با سیمان پرداختند. مطابق شکل ۲-۱۳۳، نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد نانو سیلیس سبب افزایش دامنه خمیری خاک رس در مجاورت سیمان می‌شود[۱۶۸].



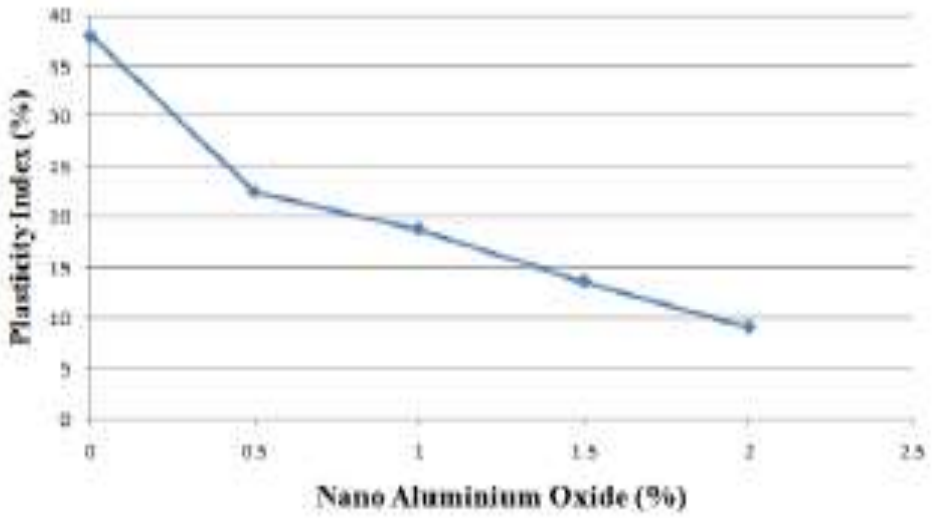
شکل ۲-۱۳۳: تاثیر نانو سیلیس بر خواص خمیری خاک رس بهسازی شده با سیمان[۱۶۸]

نتایج آزمایش‌های افزودن نانو سیلیس به خاک رسی توسط جمشیدی و مخبری (سال ۱۳۹۶) نشان داد که نانو سیلیس، حد خمیری را اندکی و حد روانی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. درنتیجه افزودن نانو سیلیس موجب افزایش دامنه خمیری خاک می‌شود. با توجه به جدول **۲-۳۳**، افزودن ۲٪ نانو سیلیس به خاک رسی، دامنه خمیری خاک را حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد[۱۶۹].

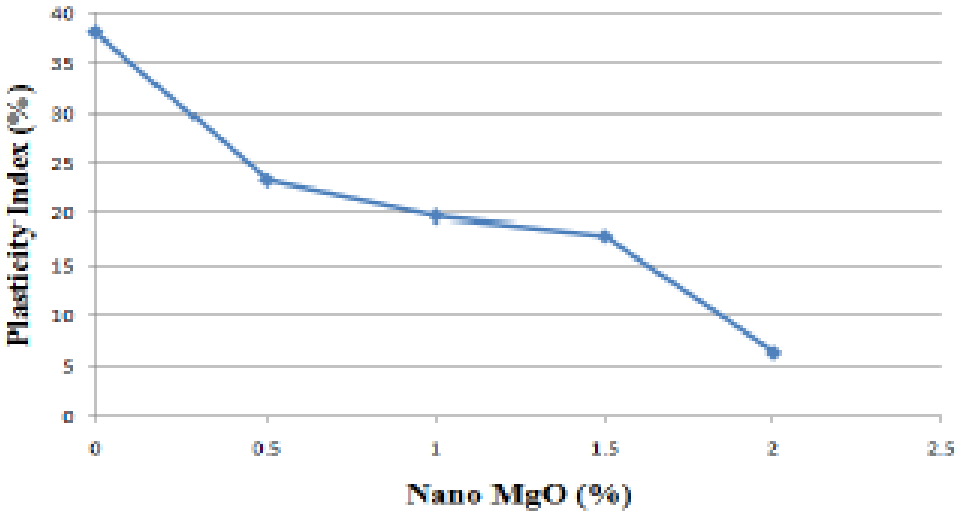
جدول ۲-۳۳: حدود اتربرگ خاک با افزودن نانو سیلیس[۱۶۹]

PI (%)	LL (%)	PL (%)	درصد نانوسیلیس
۱۲/۴۹	۳۱/۵۵	۱۹/۰۶	۰
۱۴/۲	۳۳/۵	۱۹/۳	۰/۵
۱۷/۰۲	۳۶/۵	۱۹/۴۸	۱
۱۹/۱۸	۳۹/۲	۲۰/۰۲	۱/۵
۲۰/۴	۴۰/۴	۲۰	۲
۲۰/۲	۴۱/۹	۲۱/۷	۳

ناوال و همکاران (سال ۲۰۱۷) با انجام آزمایشاتی به این نتیجه رسیدند که افزودن نانو آلومینا (Al_2O_3) به خاک رس کائولینیت متورم شونده، دامنه خمیری خاک را کاهش می‌دهد (شکل **۲-۱۳۴**). همچنین مطابق شکل **۲-۱۳۵** افزودن نانو منیزیم اکسید به خاک رس کائولینیت تاثیری مشابه با افزودن نانو آلومینا به این نوع خاک داشته و دامنه خمیری را کاهش می‌دهد[۱۷۰].

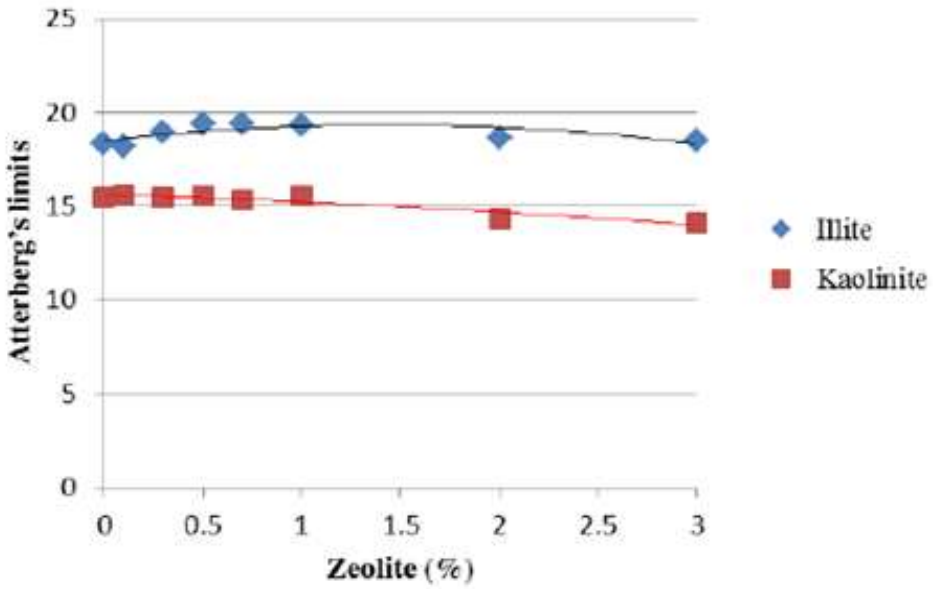


شکل ۲-۱۳۴: تاثیر نانو آلومینا بر دامنه خمیری خاک رس کائولینیت[۱۷۰]



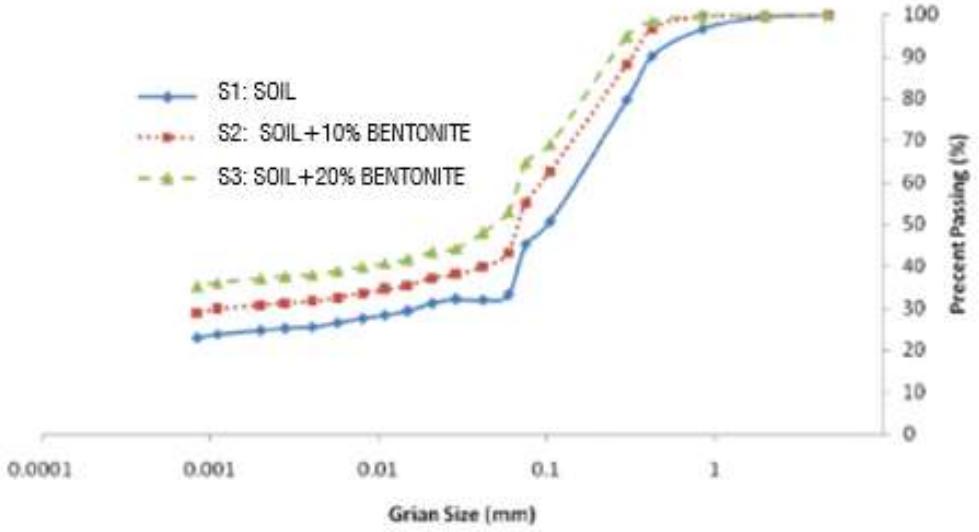
شکل ۲–۱۳۵: تاثیر نانو منیزیم بر دامنه خمیری خاک رس کائولینیت[۱۷۰]

فیروزی و طاها (سال ۲۰۱۲) تأثیر افزودن نانو زئولیت را بر خصوصیات دو نوع خاک رسی بررسی کردند. نانو زئولیت یک آلومینوسیلیکات کریستاله طبیعی و جزو کانی‌های غالب در سنگ‌های رسوبی است. هدف آن‌ها از کاربرد درصدهای مختلف، تعیین مقدار بهینه نانو زئولیت برای ترکیب با انواع خاک‌های رسی بوده است. پس از آن آزمایش‌های حد روانی و حد خمیری بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج مطابق شکل ۲–۱۳۶ نشان داد که حد روانی با درصدهای مختلف صفر تا ۳ درصد نانو زئولیت برای هر دو نوع خاک رسی ایلیت و کائولینیت افزایش می‌یابد اما حد خمیری نمونه‌ها تا ۰/۵ درصد نانو زئولیت افزایش و سپس روند کاهشی می‌گیرد. این در حالی است که دامنه خمیری تا مقدار افزودن ۱/۵ درصد نانو زئولیت افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد[۱۷۱].

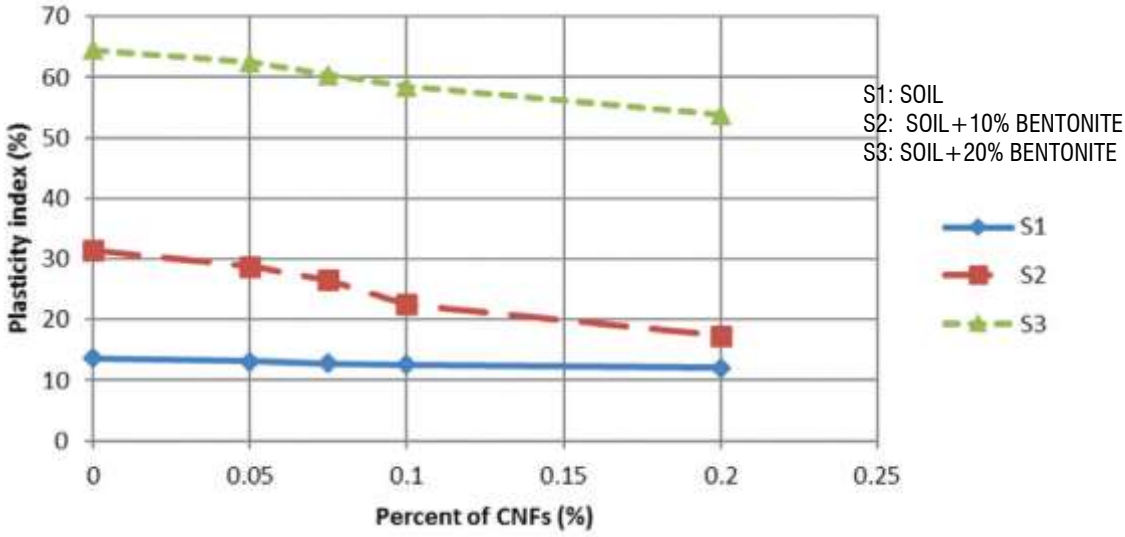


شکل ۲–۱۳۶: تغییرات دامنه خمیری دو نوع خاک رسی در مجاورت نانو زئولیت [۱۷۱]

همچنین ریحان طاها و همکاران (سال ۲۰۱۸) در تحقیق دیگری به بررسی تاثیر نانو کربن بر خواص خمیری خاک رسی با دانه‌بندی مطابق شکل ۲-۱۳۷ با درصدهای مختلف بنتونیت پرداختند. نتایج در شکل ۲-۱۳۸ نشان می‌دهد که افزودن نانو لوله‌های کربنی به خاک ریزدانه سبب کاهش دامنه خمیری می‌شود[۱۷۲].



شکل ۲-۱۳۷: منحنی دانه‌بندی نمونه‌های خاک ریزدانه مورد آزمایش[۱۷۲]



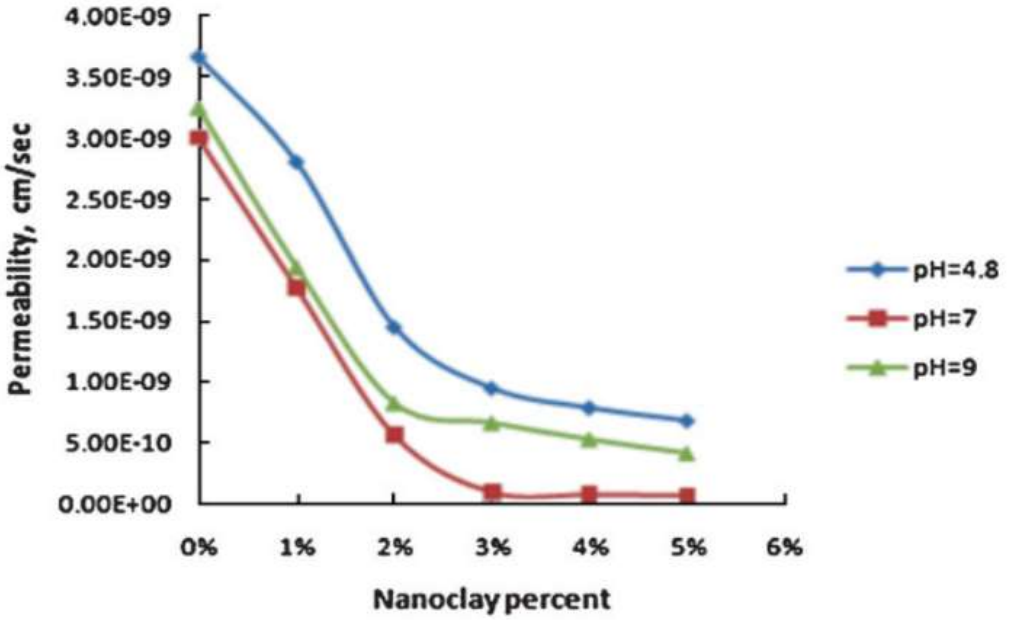
شکل ۲-۱۳۸: تاثیر نانو لوله‌های کربنی بر دامنه خمیری خاک ریزدانه به همراه بنتونیت[۱۷۲]

۲-۷-۲ - تغییرات نفوذپذیری خاک‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار

فخری و همکاران (سال ۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های خاک رس کائولینیت با افزودن نانو رس به میزان ۱٪، ۲٪، ۴٪ و ۸٪ پرداختند. نتایج نشان داد که وجود درصدهای مختلف نانو رس در خاک رس کائولینیت، موجب

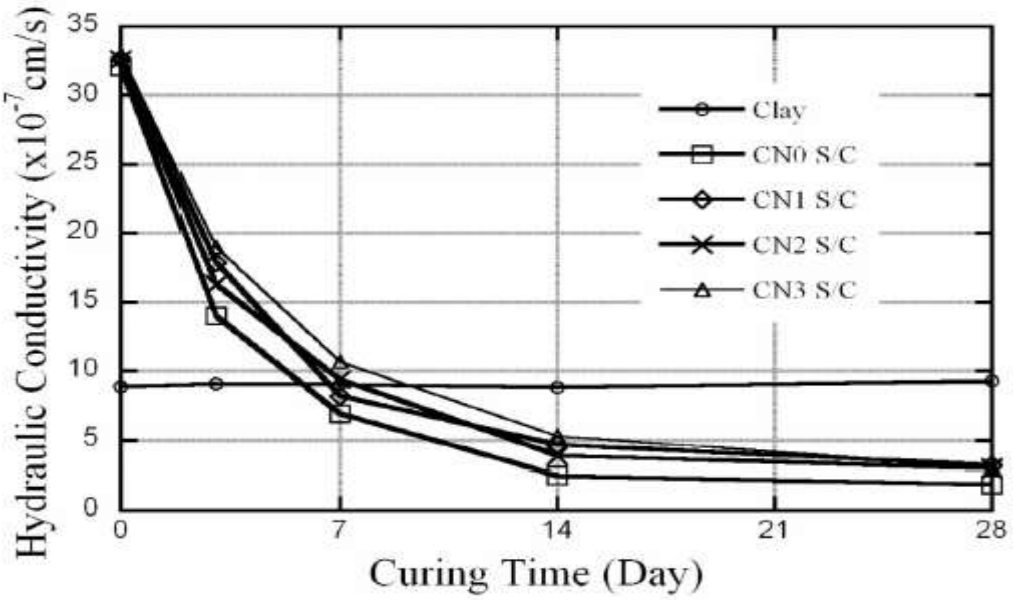
کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود؛ به طوری که هر قدر میزان نانو رس موجود در نمونه بیشتر باشد، این کاهش در ضریب نفوذپذیری بیشتر است[۱۷۳].

کنعانی‌زاده و همکاران (سال ۲۰۱۱) تاثیر نانو رس روی ضریب نفوذپذیری خاک رس متراکم شده کهریزک با نفوذ شیره خاک‌چال (لندفیل) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزودن ۴٪ نانو رس، نفوذپذیری را تا میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. تاثیر نانو ذرات رس روی نفوذپذیری خاک در شکل ۲-**۱۳۹** مشاهده می‌شود[۱۷۴].



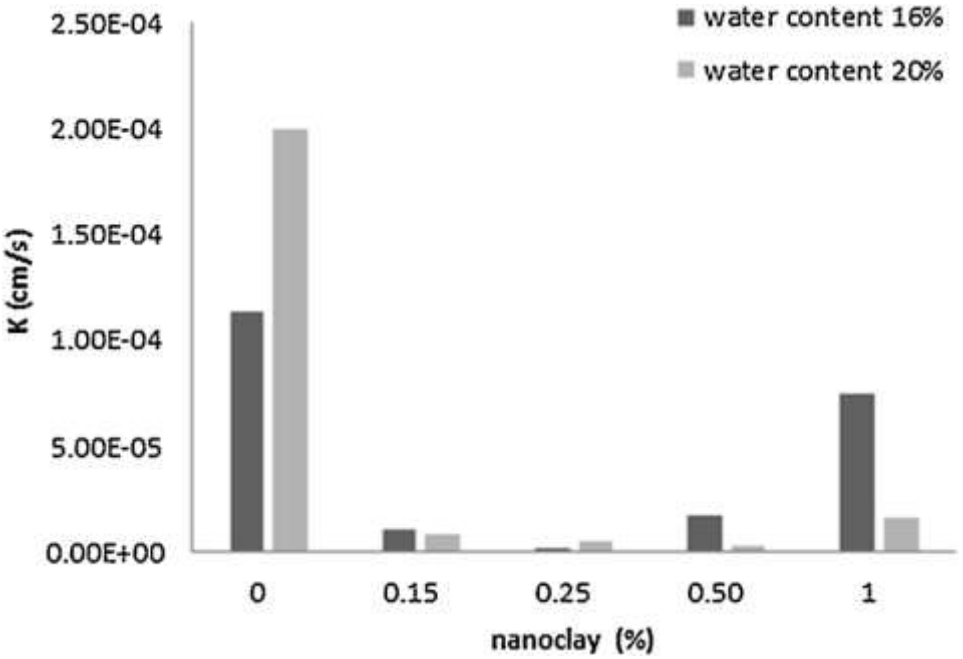
شکل ۲-۱۳۹: تاثیر نانو رس روی نفوذپذیری خاک رس [۱۷۴]

هونگ و وانگ (سال ۲۰۱۶) در پژوهشی تاثیر خاکستر لجن فاضلاب SSA و سیمان با نسبت ۱ به ۳ به میزان ۱۵ درصد در نمونه‌های رسی با درصدهای مختلف صفر تا ۳ درصد نانو آلومینا (AL_2O_3) را بررسی نمودند. آزمایشات تراکم، اتربرگ، PH، تک‌محوری، CBR، تورم و نفوذپذیری برای تمامی نمونه‌ها تکرار شده است. نتایج حاصل در شکل ۲-**۱۴۰** نشان می‌دهد که میزان بهینه نانو آلومینا در نمونه‌ها ۱ درصد بوده و با گذر زمان پتانسیل تورم و نفوذپذیری نمونه‌ها به شدت کاهش یافته است[۱۷۵].



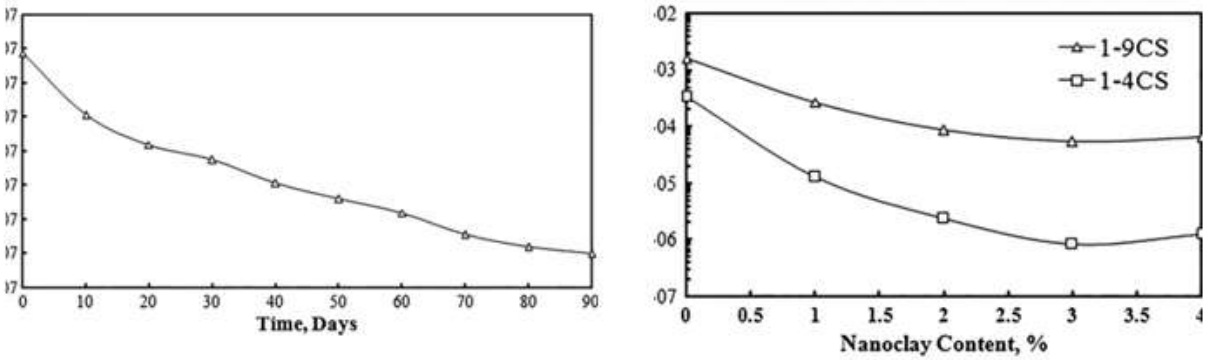
شکل ۲–۱۴۰: تاثیر میزان نانو آلومینا بر نفوذپذیری خاک رس در زمان [۱۷۵]

جانعلی‌زاده و همکاران (سال ۲۰۱۴) روی خواص نفوذپذیری ماسه لای‌دار بهسازی شده با نانو رس آزمایش‌های نفوذپذیری انجام دادند. نتایج مطابق شکل ۲–۱۴۱ نشان داد که کمترین میزان نفوذپذیری ماسه لای‌دار مربوط به بهسازی آن با میزان بهینه ۰/۲۵ درصد افزودنی نانو رس است[۱۷۶].



شکل ۲–۱۴۱: نتایج آزمایش نفوذپذیری ماسه لای‌دار بهسازی شده با نانو رس [۱۷۶]

بازیار و همکاران (سال ۲۰۱۸) بررسی جامعی را به منظور ارزیابی ویژگی‌های ماسه رس‌دار تثبیت‌شده توسط نانو رس، به‌عنوان هسته سدهای خاکی انجام دادند. آزمایشات نفوذپذیری از ترکیب ماسه و رس با نسبت‌های وزنی ۹۰ به ۱۰ و ۷۵ به ۲۵ انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن ۳ درصد نانو رس موجب کاهش ضریب تراوایی ماسه رس‌دار در حدود ۹۹ درصد می‌شود (شکل ۲-**۱۴۲**-الف). از سوی دیگر با گذشت زمان، ضریب تراوایی کاهش یافته و در۹۰ روز به حالت پایا می‌رسد (شکل ۲-**۱۴۲**-ب). این در حالی است که میزان تورم نمونه در اثر افزودن نانو رس افزایش می‌یابد[۱۷۷].



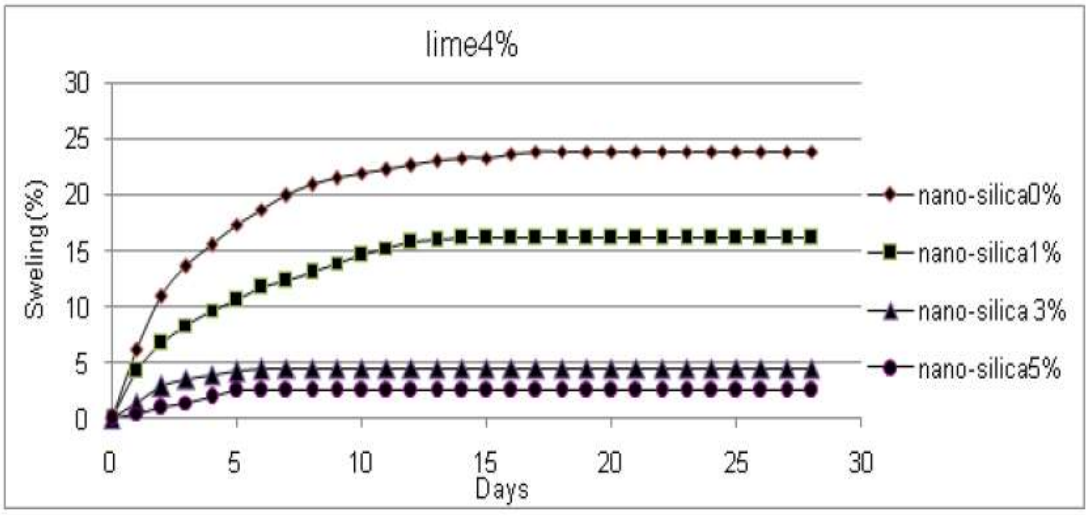
الف ب

شکل ۲-۱۴۲: الف) تأثیر نانو رس بر ضریب تراوایی ماسه رس‌دار، ب) تغییرات ضریب تراوایی ماسه رس‌دار تثبیت‌شده توسط نانو رس با گذشت زمان [۱۷۷]

۳-۷-۲ - کاهش پتانسیل تورم خاک با استفاده از مواد نانو ساختار

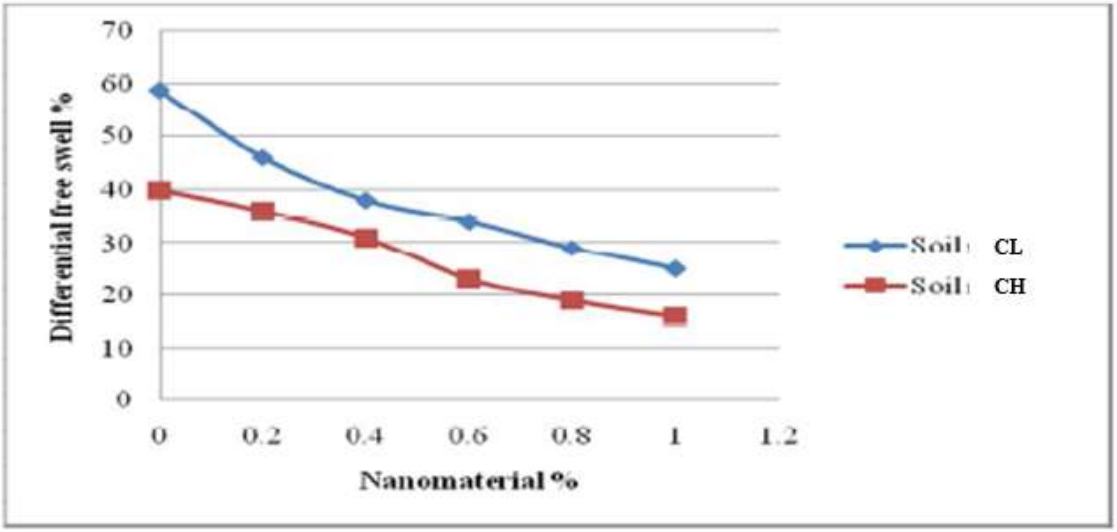
تورم در خاک‌های ریزدانه با تغییر تنش داخلی در اثر تغییر رطوبت بوجود می‌آید. از آنجا که قرارگیری سازه‌های عظیم صنعت برق روی انواع خاک‌ها از جمله خاک‌های تورم‌پذیر غیر قابل اجتناب است و تغییر رطوبت و ایجاد تورم در این نوع خاک‌ها سبب ایجاد نشست‌های نامتقارن و بروز آسیب جدی به خطوط انتقال می‌گردد، لذا بهسازی خاک‌های تورم‌پذیر در این حوزه موضوع مهمی است.

باوندپوری و جهانگیری (سال ۲۰۱۵) تاثیر افزودن آهک و نانو سیلیس را به خاک رسی بررسی کردند. آزمایش‌های تورم برای نسبت‌های نانو سیلیس ۰ تا ۵ درصد و آهک ۰ تا ۴ درصد در زمان عمل‌آوری ۱ تا ۱۴ روز انجام شده است. مطابق شکل ۲-**۱۴۳** پتانسیل تورم خاک با افزودن درصد بهینه آهک معادل ۴ درصد و افزایش نانو سیلیس تا میزان ۵ درصد به کمترین مقدار خود می‌رسد؛ این در حالی است که نمونه‌ها حداقل زمان ۱۰ روز را برای عمل‌آوری نیاز دارند[۱۷۸].

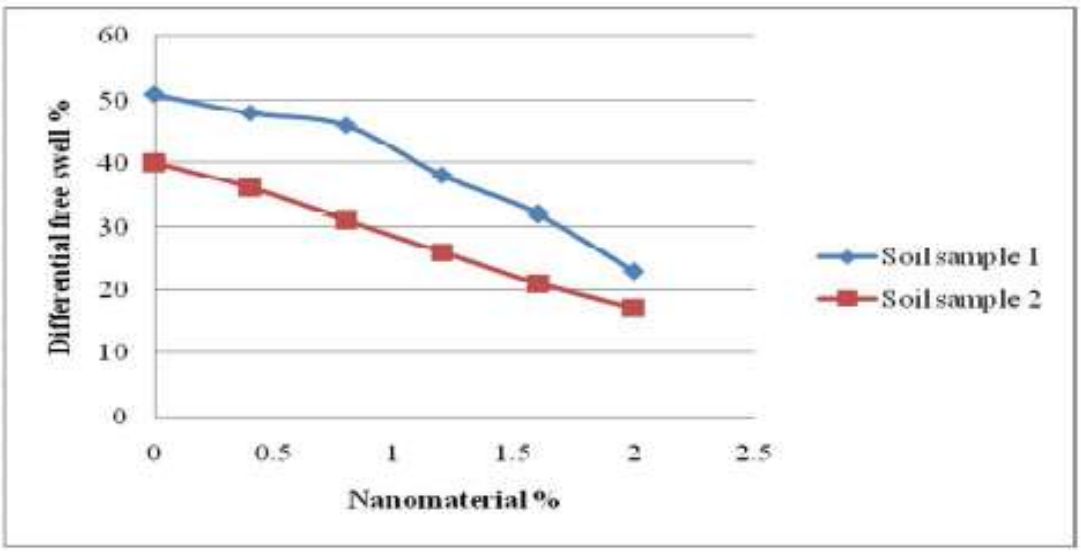


شکل ۲–۱۴۳: تاثیر نانو سیلیس بر پتانسیل تورم خاک رس بهسازی شده با آهک طی زمان[۱۷۸]

هارش و وینوت کومار (سال ۲۰۱۶) از نانو سیلیس و نانو زئولیت جهت بهسازی رس ضعیف از گروه CL و CH در دوره زمانی ۱۴ روزه با درصدهای مختلف ۰/۲ تا ۲ درصد استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های تورم در شکل ۲–۱۴۴ و شکل ۲–۱۴۵ نشان می‌دهد که پتانسیل تورم خاک با افزایش درصد نانو سیلیس کاهش قابل توجهی یافته است. در مجموع می‌توان گفت که نانو زئولیت، مقاومت بیشتری به خاک ضعیف می‌بخشد و این به دلیل دارا بودن مواد معدنی بیشتر نسبت به نانو سیلیس می‌باشد. نانو زئولیت حاوی ذرات معدنی SiO_2, Al_2O_3, CaO و ... می‌باشد اما نانو سیلیس تنها حاوی SiO_2 است[۱۷۹].

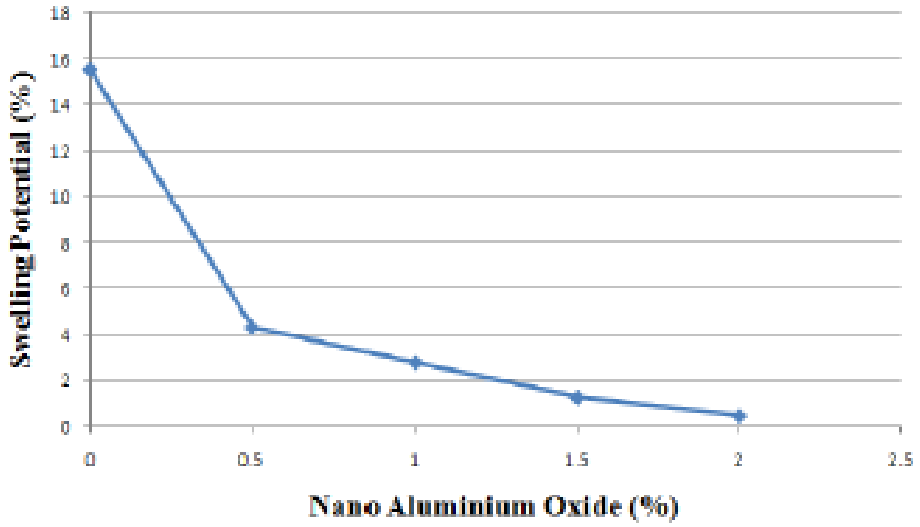


شکل ۲–۱۴۴: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیکا بر پتانسیل تورم دو نوع خاک رسی CL و CH [۱۷۹]

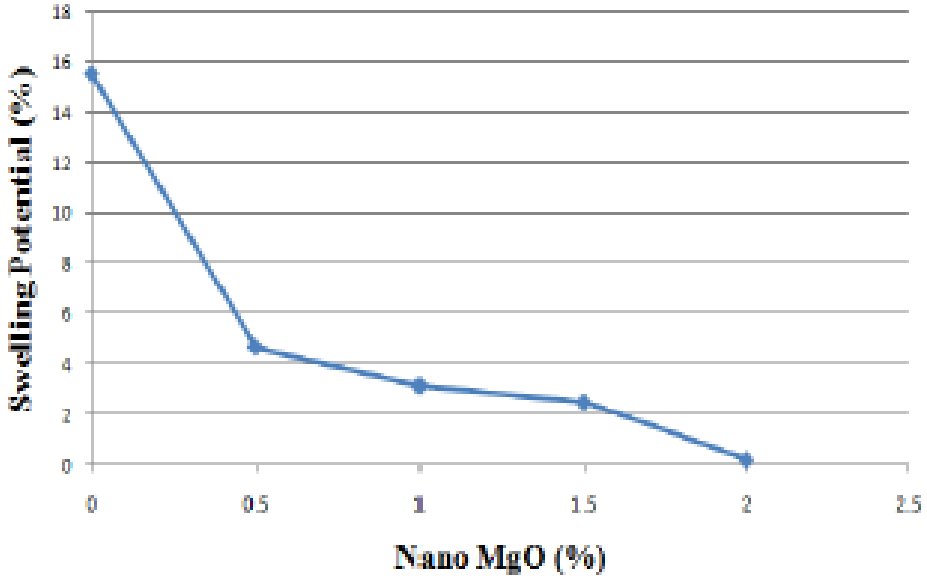


شکل ۲–۱۴۵: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر پتانسیل تورم دو نوع خاک رسی CL و CH [۱۷۹]

ناوال و همکاران (سال ۲۰۱۷) با انجام آزمایش‌هایی به این نتیجه رسیدند که افزودن نانو آلومینا Al_2O_3 به خاک رس کائولینیت، پتانسیل تورم را کاهش می‌دهد (شکل ۲–۱۴۶). همچنین افزودن نانو منیزیم اکسید به خاک رس کائولینیت مطابق شکل ۲–۱۴۷ تاثیری مشابه با افزودن Al_2O_3 به این نوع خاک داشته و پتانسیل تورم را کاهش می‌دهد[۱۷۰].

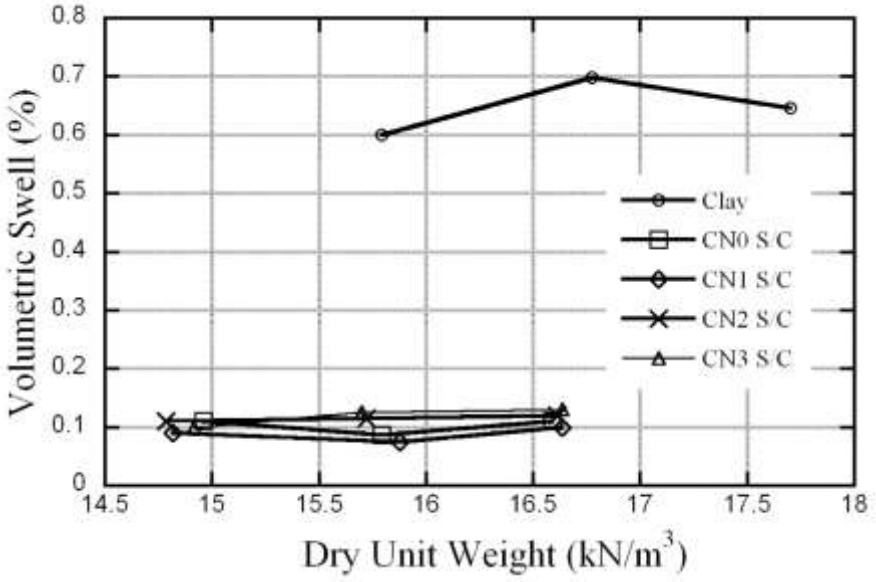


شکل ۲–۱۴۶: تاثیر نانو آلومینا بر پتانسیل تورم خاک رس کائولینیت[۱۷۰]



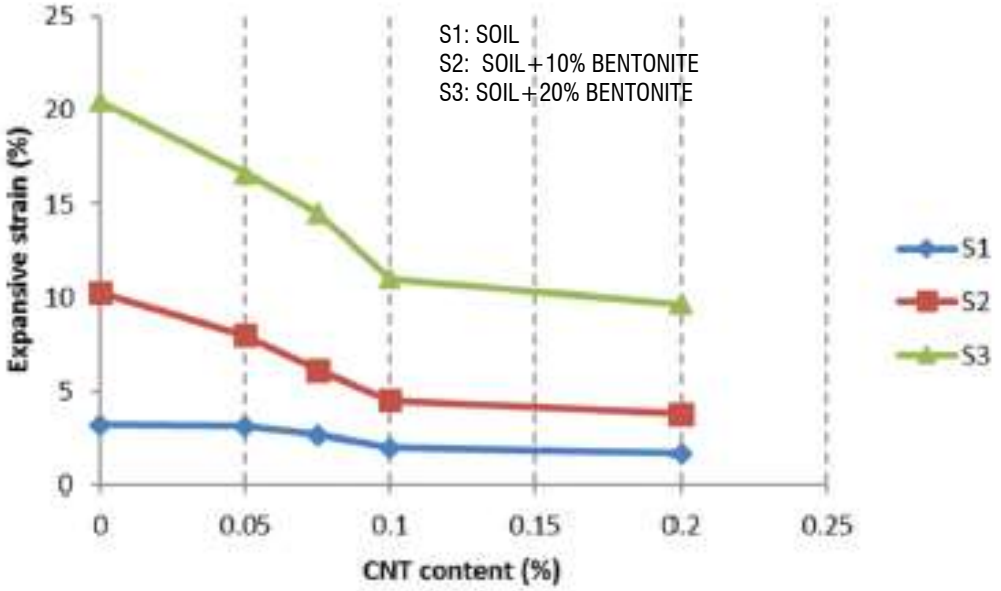
شکل ۲–۱۴۷: تاثیر نانو اکسید منیزیم بر پتانسیل تورم خاک رس کائولینیت[۱۷۰]

هونگ و ونگ در پژوهشی تاثیر خاکستر لجن SSA و سیمان با نسبت ۱ به ۳ به میزان ۱۵ درصد در نمونه‌های رسی با درصدهای مختلف صفر تا ۳ درصد نانو آلومینا Al_2O_3 را بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های تورم بر نمونه‌ها در شکل ۲–۱۴۸ نشان می‌دهد که میزان بهینه نانو آلومینا در نمونه‌ها ۱ درصد بوده و با گذر زمان پتانسیل تورم نمونه‌ها به شدت کاهش می‌یابد[۱۷۵].



شکل ۲–۱۴۸: بررسی تاثیر نانو آلومینا و لجن بر پتانسیل تورم نمونه‌های خاک رسی [۱۷۵]

رجبی و عبدالهی تأثیر افزودن نانو سیلیس و نانو اکسید آهن بر پتانسیل تورم نمونه‌های خاک رس را بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیس و نانو اکسید آهن به خاک رسی تا مقدار بهینه ۲ درصد، کمترین مقدار ضرایب فشردگی و تورم را موجب می‌شود. در مقایسه دو نوع افزودنی مورد مطالعه، به ازای درصد ثابت افزودنی، نانو اکسید آهن باعث بهبود بیشتری در شاخص تورم خاک نسبت به نانو سیلیس شده است[۱۸۰]. همچنین ریحان طاها و همکاران (سال ۲۰۱۸) در تحقیق دیگری به بررسی تاثیر نانو لوله و الیاف کربن بر پتانسیل تورم خاک رسی با درصدهای مختلف بنتونیت پرداختند. نتایج طبق شکل ۲-**۱۴۹** نشان می‌دهد که افزودن نانو لوله‌های کربنی به خاک ریزدانه سبب کاهش پتانسیل تورم خاک می‌گردد[۱۷۲].



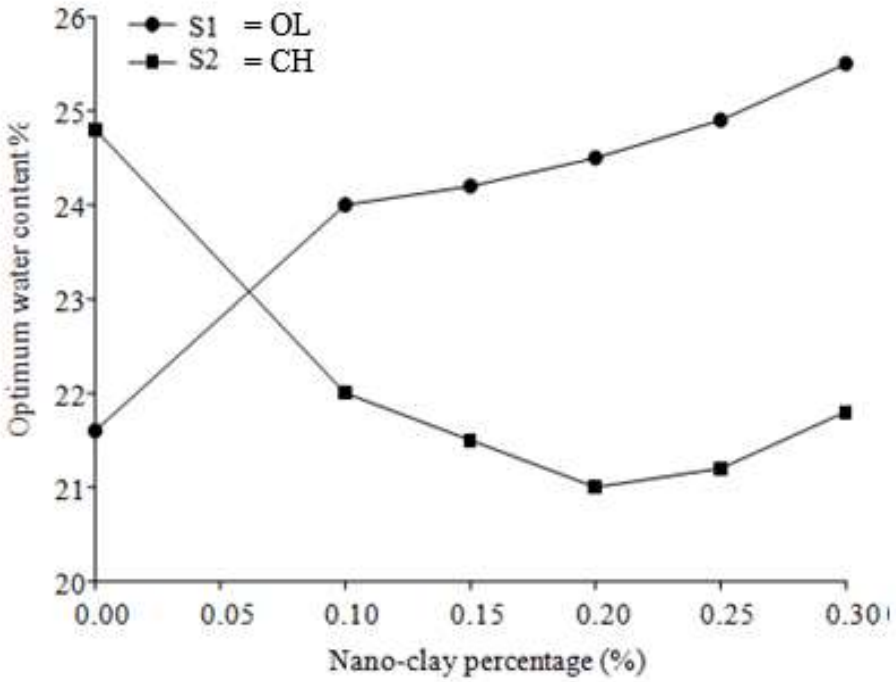
شکل ۲-۱۴۹: تاثیر نانو لوله کربنی بر میزان پتانسیل تورم خاک ریزدانه رسی[۱۷۲]

۲-۷-۴ - تغییرات چگالی، وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک با استفاده از نانو مواد

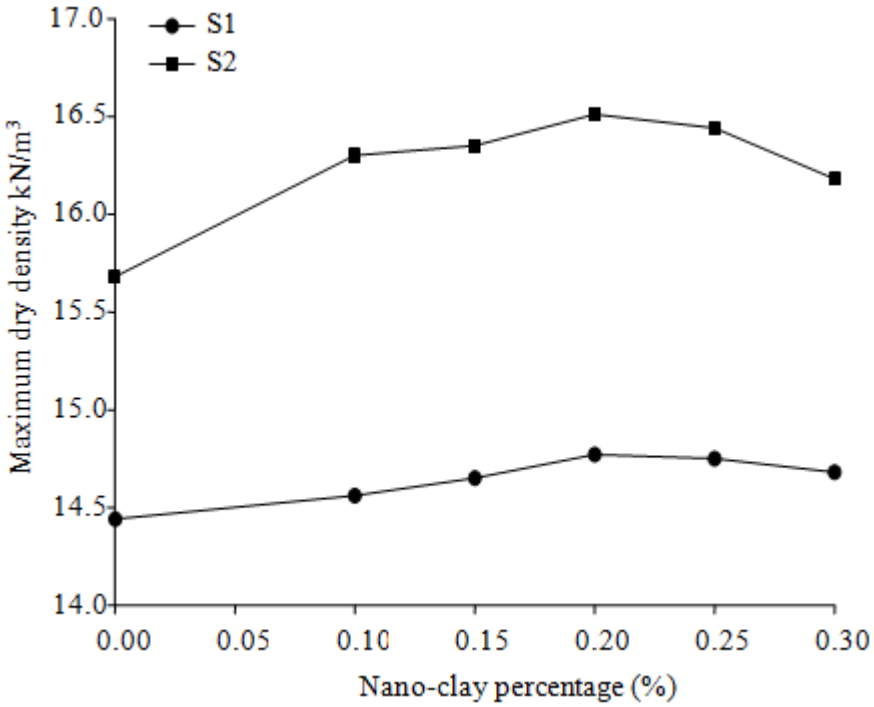
۲-۷-۴-۱- خاک‌های ریزدانه

تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط فخری و همکاران روی خاک رس کائولینیت نشان داد که در صورت افزودن نانو رس، حداکثر وزن مخصوص خاک کاهش و رطوبت بهینه خاک افزایش می‌یابد [۱۷۳].

ریحان طاها و همکاران (سال ۲۰۱۴) تاثیر افزودنی‌های مختلف نانو بر خاک رس نرم و خاک آلی را بررسی نمودند؛ مطابق شکل ۲-**۱۵۰** می‌توان دریافت افزودن مقدار کمی نانو رس، رطوبت بهینه خاک آلی را افزایش و رطوبت بهینه خاک رس با پلاستیسیته زیاد را تا مقدار بهینه ۰/۲ درصد کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به شکل ۲-**۱۵۱** میزان وزن مخصوص خشک حداکثر هر دو نوع خاک تا میزان بهینه ۰/۲ درصد نانو رس افزایش و سپس کاهش می‌یابد[۱۸۱].



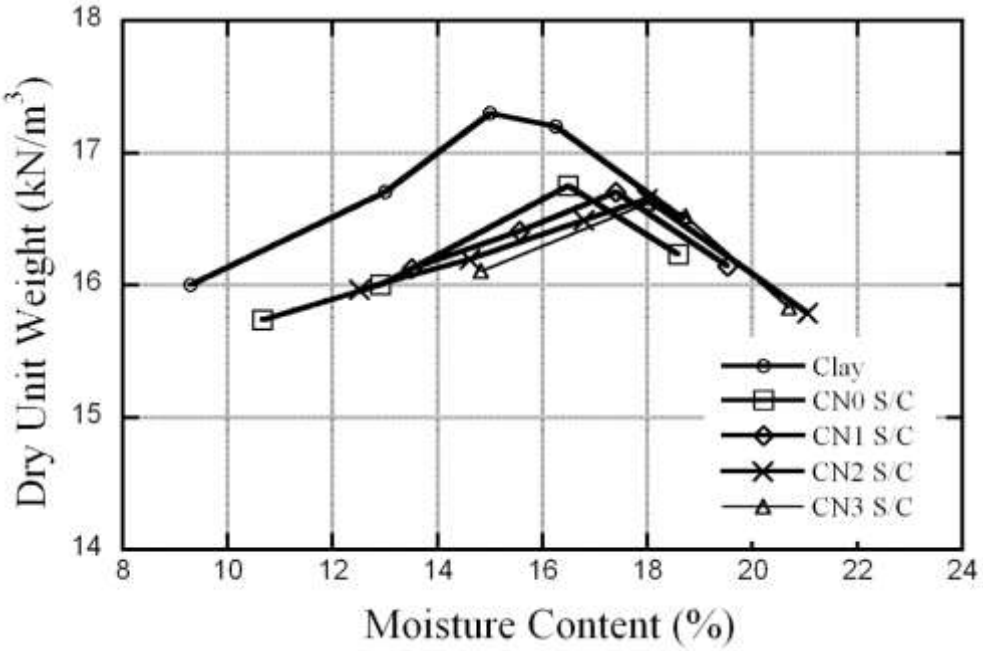
شکل ۲–۱۵۰: تاثیر نانو رس بر رطوبت بهینه خاک ریزدانه [۱۸۱]



شکل ۲–۱۵۱: تاثیر نانو رس بر وزن مخصوص حداکثر خاک ریزدانه [۱۸۱]

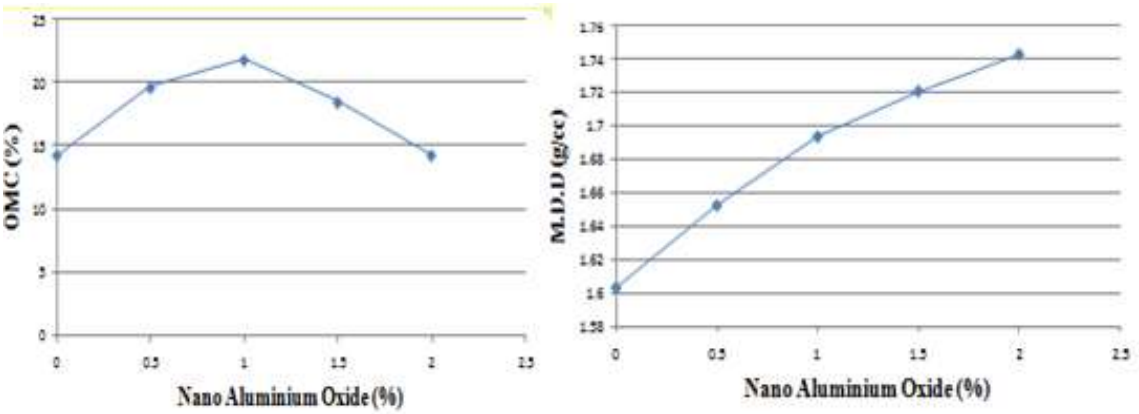
طبق تحقیقات انجام شده توسط طاها روی خاک منطقه بنگی در کشور مالزی، افزودن نانو رس باعث کاهش اندک رطوبت بهینه و افزایش اندک حداکثر وزن مخصوص خشک می‌شود[۱۸۲].

جان‌علیزاده و همکاران (سال ۱۳۹۳) در پژوهشی بر اساس نتایج آزمایش تراکم نشان دادند که با افزودن نانو رس به خاک رس، درصد رطوبت بهینه خاک، کاهش و وزن مخصوص بیشینه افزایش می‌یابد[۱۷۶].
لوو و همکاران (سال ۲۰۱۲) با انجام آزمایش‌های تراکم، به بررسی تاثیر افزودن نانو آلومینا به خاک رس پرداختند. نتایج این پژوهش در شکل ۲-**۱۵۲** نشان می‌دهد که افزایش Al_2O_3 باعث افزایش حداکثر وزن مخصوص خشک و کاهش مقدار رطوبت بهینه خاک می‌شود[۱۸۳].

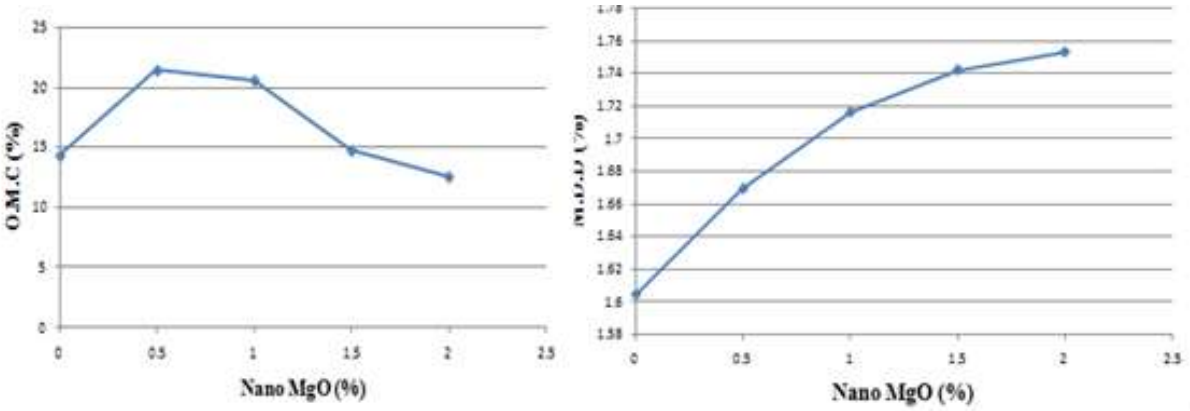


شکل ۲-۱۵۲: تاثیر نانو آلومینا بر نتایج آزمایش تراکم خاک رس[۱۸۳]

ناوال و همکاران (سال ۲۰۱۷) با انجام آزمایش‌های تراکم به این نتیجه رسیدند که افزودن نانو آلومینا Al_2O_3 به خاک رس کائولینیت، رطوبت بهینه خاک را تا میزان یک درصد افزودنی افزایش و سپس کاهش می‌دهد. همچنین وزن مخصوص حداکثر خاک تا ۲ درصد نانو آلومینا همواره افزایش می‌یابد (شکل ۲-**۱۵۳**). همچنین مطابق شکل ۲-**۱۵۴** افزودن نانو اکسید منیزیم به خاک رس کائولینیت تاثیری مشابه با افزودن Al_2O_3 به این نوع خاک دارد[۱۷۰].

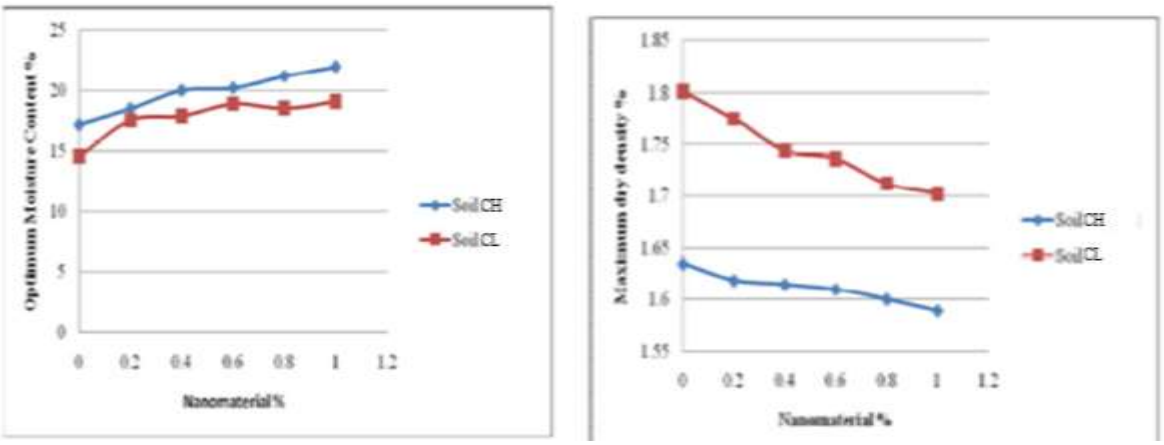


شکل ۲–۱۵۳: تاثیر نانو آلومینا بر نتایج آزمایش تراکم خاک رس کائولینیت [۱۷۰]

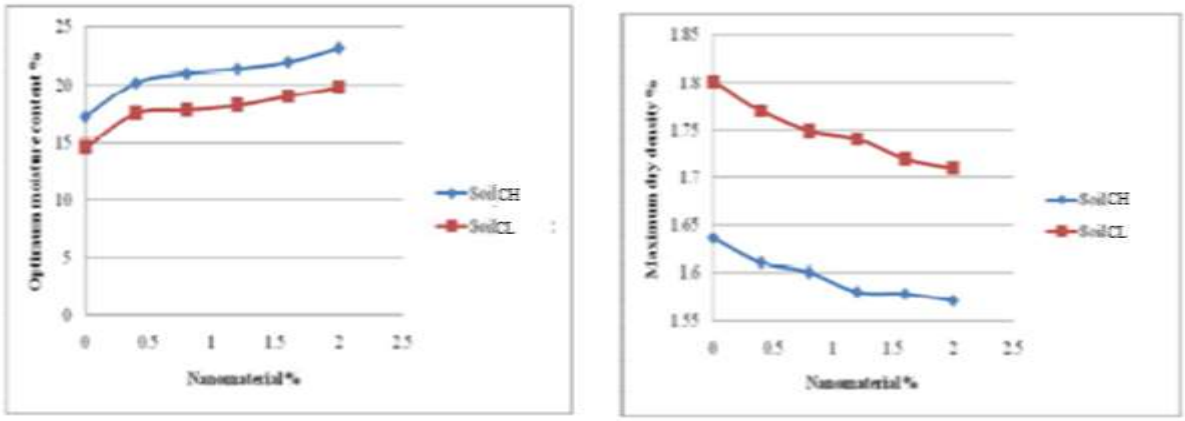


شکل ۲–۱۵۴: تاثیر نانو اکسید منیزیم بر نتایج آزمایش تراکم خاک رس کائولینیت [۱۷۰]

در پژوهشی هارش و وینوت کومار (سال ۲۰۱۶) از نانو سیلیس و نانو زئولیت جهت بهسازی رس ضعیف از گروه CL و CH در دوره زمانی ۱۴روزه با درصدهای مختلف ۰/۲ تا ۲ درصد در آزمایشگاه استفاده کردند. نتایج حاصل از آزمایشات تراکم برای دو نوع ماده افزودنی در شکل ۲–**۱۵۵** و شکل ۲–**۱۵۶** نشان می‌دهد که میزان رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص حداکثر خاک در هر دو نوع ماده افزودنی به یک میزان کاهش یافته است[۱۷۹].

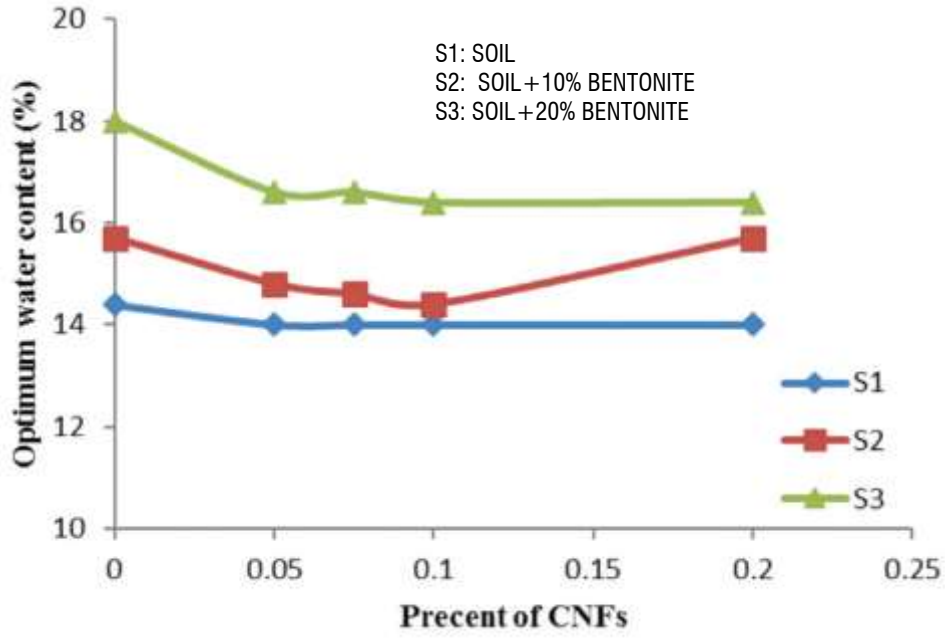


شکل ۲–۱۵۵: نتایج آزمایش تراکم خاک رس به همراه نانو سیلیس [۱۷۹]

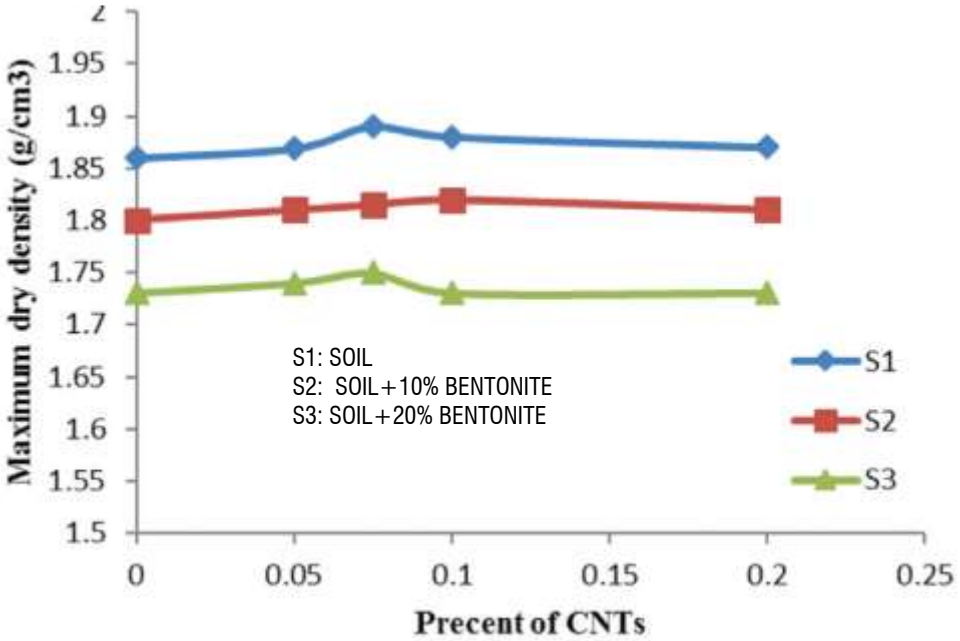


شکل ۲–۱۵۶: تایج آزمایش تراکم خاک رس به همراه نانو زئولیت [۱۷۹]

ریحان طاها و همکاران در تحقیق دیگری به بررسی تاثیر نانو لوله و الیاف کربن بر نتایج تراکم خاک رسی با درصدهای مختلف صفر تا ۲۰ درصد بنتونیت پرداختند. نتایج در شکل ۲–**۱۵۷** و شکل ۲–**۱۵۸** نشان می‌دهد که افزودن نانو الیاف و نانو لوله‌های کربنی به میزان ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد به خاک ریزدانه سبب کاهش رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک تا میزان بهینه ۰/۰۷ درصد نانو لوله کربنی در خاک می-گردد[۱۷۲].

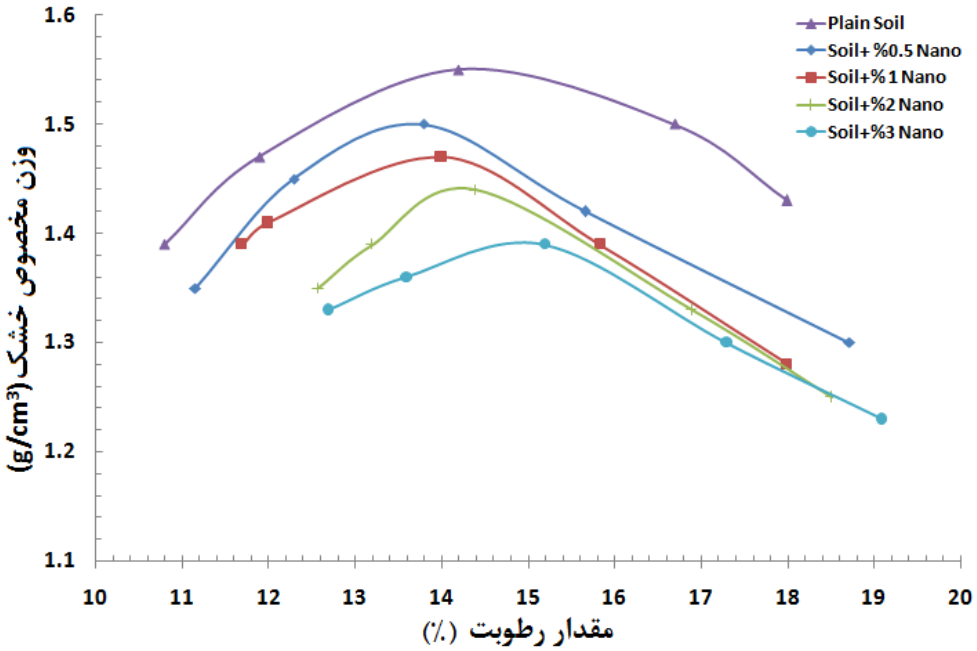


شکل ۲–۱۵۷: رطوبت بهینه خاک ریزدانه رسی با نانو لوله کربنی [۱۷۲]



شکل ۲–۱۵۸: وزن مخصوص خشک حداکثر خاک ریزدانه رسی با نانو لوله کربنی [۱۷۲]

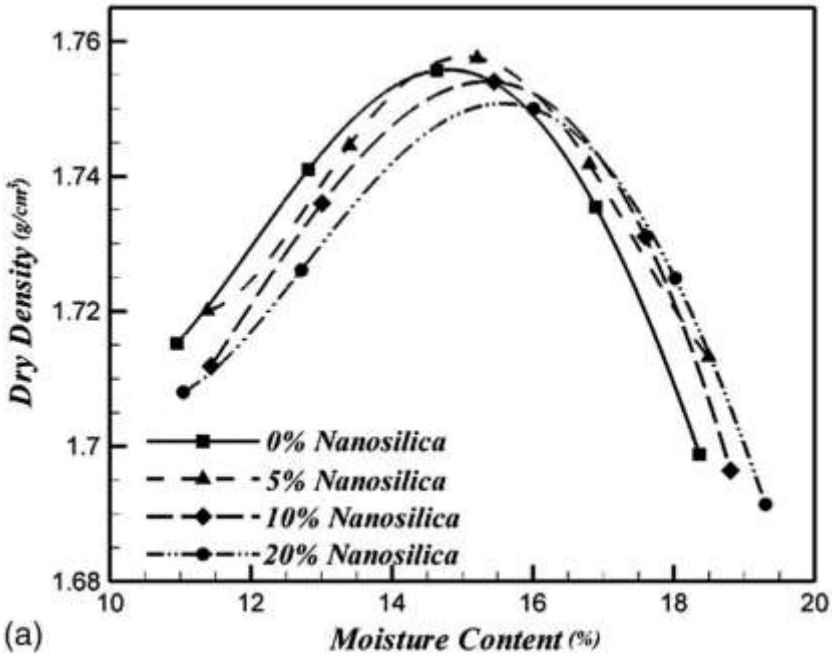
طبق نتایج آزمایشگاهی و تحقیقات میدانی انجام شده توسط طبرسا روی خاک سیلتی بادرفتی سد گنبد، مطابق شکل ۲–**۱۵۹** مشاهده گردید که افزودن نانو رس باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش حداکثر چگالی خشک خاک می‌شود[۱۶۱].



شکل ۲-۱۵۹: تاثیر نانو رس بر نتایج آزمایش تراکم خاک سیلتی [۱۶۱]

۲-۴-۷-۲- خاک‌های ماسه‌ای

جانعلی‌زاده و همکاران (سال ۲۰۱۵) تاثیر همزمان سیمان و نانو سیلیس روی خواص مهندسی ماسه سواحل دریای خزر را بررسی کردند. این محققان دریافتند که با افزایش مقدار سیمان، حداکثر وزن مخصوص خشک ماسه نیز افزایش می‌یابد. افزودن نانوسیلیس به مخلوط ماسه سیمان موجب افزایش درصد رطوبت بهینه می‌شود. تأثیر نانوسیلیس بر وزن مخصوص خشک بیشینه وابسته به نسبت وزنی سیمان است. در نسبت‌های وزنی کم سیمان (دو درصد)، افزودن نانوسیلیس موجب افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد اما در نسبت‌های وزنی بالای سیمان (شش درصد) افزودن نانوسیلیس موجب کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد (شکل ۲-۱۶۰)[۱۸۴].



شکل ۲–۱۶۰: نتایج آزمایش تراکم نمونه‌های ماسه رس‌دار به همراه سیمان و نانو سیلیس[۱۸۴]

شوش‌پاشا و همکاران (سال ۱۳۹۴) با استفاده از آزمایش برش مستقیم به بررسی تاثیر مخلوط سیمان و نانو سیلیس پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن نانو سیلیس به مخلوط ماسه‌سیمان سبب کاهش وزن مخصوص به میزان ۲/۴ درصد و افزایش رطوبت بهینه به میزان ۸/۸ درصد نسبت به نمونه ماسه‌سیمان می‌گردد[۱۸۵].

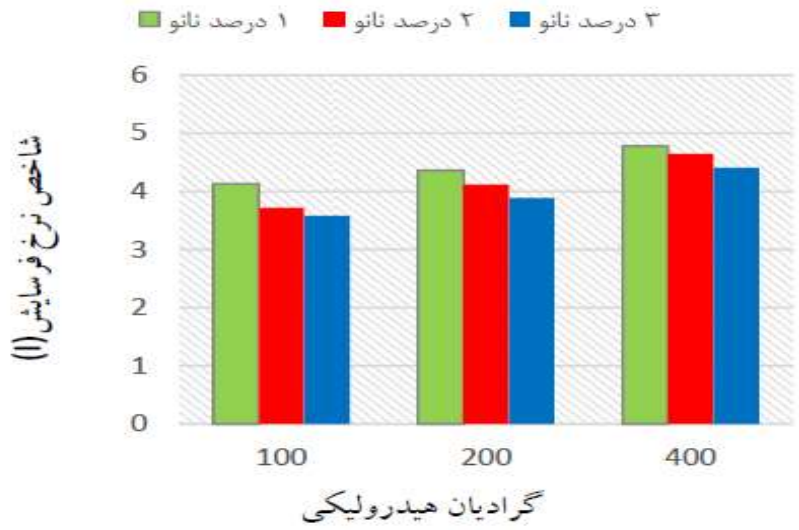
۲-۷-۵ - بهبود مشکلات واگرایی و رمبندگی خاک‌ها به کمک مواد نانو ساختار

۲-۷-۵-۱- واگرایی

پدیده واگرایی باعث شکل‌گیری پدیده پایپینگ یا فرسایش داخلی در خاک گردیده که در نهایت منجر به تخریب سازه‌های فوقانی می‌شود. گستره وسیع خاک‌های واگرا و همچنین غیراقتصادی بودن جایگزینی خاک‌های واگرا با مصالح غیر واگرا، بهسازی این نوع خاک را ضروری می‌نماید. در ساخت پی سازه‌های صنعت برق و نیز ساخت سدهای وابسته به این صنعت، کاهش پتانسیل واگرایی یکی از مسائل رایج و اساسی می‌باشد.

عباسی و همکاران (سال ۱۳۹۶) ابتدا آزمایش‌های شناسایی دانه‌بندی و حدود اتربرگ را بر روی دو نوع خاک رس و نانو رس انجام دادند. سپس آزمایش‌های پین هول بر روی نمونه‌های خاک با مقادیر مختلف نانو رس شامل ۰، ۰/۲۵ ، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد و در دوره‌های زمانی ۱، ۳ و ۷ روزه انجام گردید. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که افزودن نانو رس به خاک رس واگرا به طور کلی موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌گردد. در بررسی تأثیر این ذرات بر روی دو نوع خاک با خواص خمیری مختلف مشخص شد که تأثیر آن بر هر دو نوع خاک یکسان بوده و دامنه خمیری خاک نقش مهمی در تأثیر این ذرات بر پتانسیل واگرایی ندارند. همچنین مشخص گردید

زمان عمل‌آوری نقش قابل ملاحظه‌ای در تثبیت خاک با نانوذرات رس داشته و برای انجام واکنش شیمیایی مورد نیاز برای تثبیت بیشتر، حداقل حدود سه روز زمان با میزان بهینه ۱ درصد نانو رس لازم است[۱۸۶].
نانو سیلیس از جمله افزودنی‌های شیمیایی جهت تثبیت خاک واگرا است. زمردیان و مومن (سال ۱۳۹۰) از آزمایش پین‌هول استفاده نمودند. با افزودن نانو سیلیس به نمونه خاک واگرا، فرسایش‌پذیری خاک دردوره‌های ۱، ۷ و ۱۴ روزه و نسبت وزنی ۱، ۲ و ۳ درصد نانو سیلیس ارزیابی شد. طبق نتایج در شکل ۲-۱۶۱، شاخص فرسایش‌پذیری خاک‌های واگرا با نانو سیلیس در نسبت‌های ۲ و ۳ درصد نسبت به ۱ درصد، ۲ تا ۱۴ درصد افزایش یافته است و افزایش دوره زمانی باعث عملکرد بهتر نانو سیلیس و افزایش۴ تا ۷ درصدی شاخص نرخ فرسایش در خاک‌های واگرا می‌شود[۱۸۷].



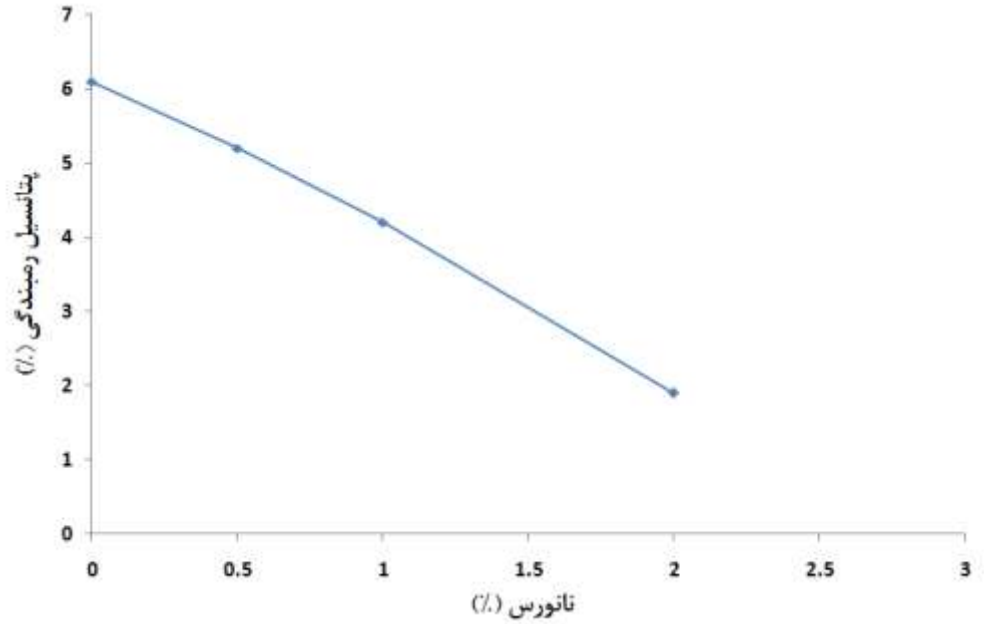
شکل ۲-۱۶۱: شاخص نرخ فرسایش رس واگرا تثبیت شده با نانو سیلیس [۱۸۷]

عساکره و آوازه (سال ۱۳۹۶) تاثیر نانو رس روی خاک رسی واگرا را مورد بررسی قرار دادند. خاک این پژوهش از سه نقطه واقع در تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان میناب در استان هرمزگان تهیه شد. نانو رس مصرفی نیز از نوع مونت‌موریلونیت بوده است. با توجه به بررسی‌های صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی روی نمونه خاک مورد استفاده در این تحقیق، مشخص شد که افزودن درصدهای پایین نانو رس به خاک، میزان واگرایی خاک را اندکی بهبود می‌بخشد؛ درحالی که هرچه میزان نانو رس مصرفی افزایش پیدا می‌کند خاک به سمت واگرایی بیشتر می‌رود[۱۸۸].

۲-۵-۷-۲- رمبندگی

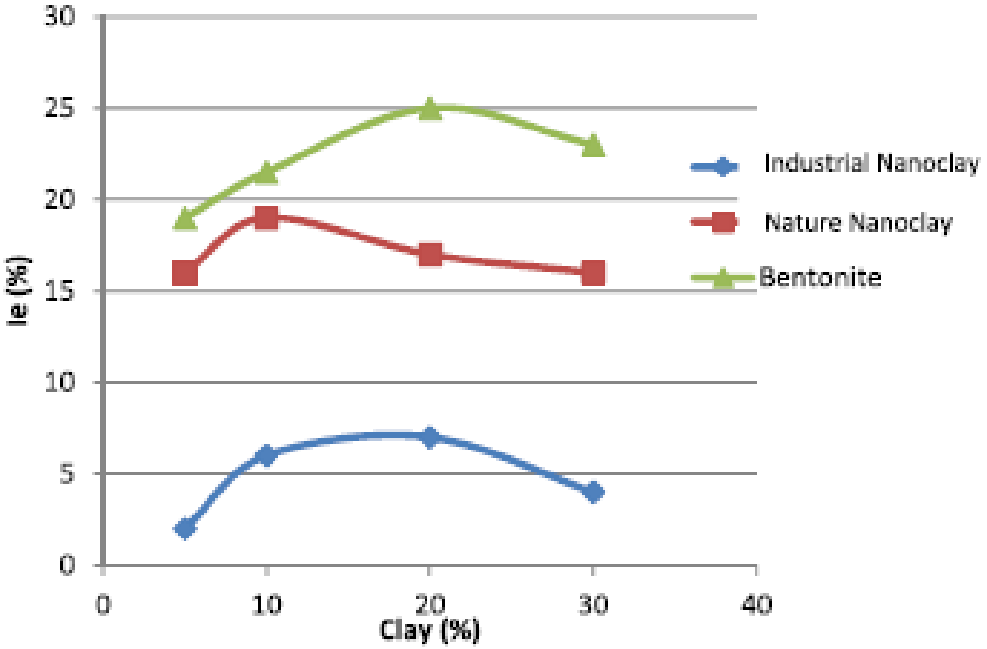
در طبیعت خاک‌هایی یافت می‌شود که تحت تنش یکسان، با افزایش درصد رطوبت، میزان کاهش حجم بسیار زیادی از خود نشان می‌دهند؛ این‌گونه خاک‌ها به خاک‌های رمبنده موسوم‌اند. رمبندگی، ریزش ناگهانی خاک در اثر از دست رفتن مقاومتِ عاملِ پیونددهنده ذرات خاک است. خاک‌های رمبنده بیشتر در نواحی گرم و خشک یافت می‌شوند. خصوصیات مهم این نوع خاک‌ها تخلخل زیاد، وزن مخصوص کم و چسبندگی صفر و یا ناچیز است. کشور ایران در زمره کشورهایی قرار گرفته که دارای خاک‌های رمبنده است. در صورت عدم شناسایی این نوع خاک‌ها، اگر سازه‌ای روی آن احداث شود، سازه احداث شده در صورت به اشباع در آمدن خاک، بنا به دلایل مختلف

دچار مشکلات و خسارت خواهد شد. این نوع خاک‌ها به رطوبت حساس هستند و در اثر افزایش رطوبت، محتوی اولیه دچار کاهش حجم شده و ساز و کار ریزش آن‌ها آغاز می‌شود. پدیده‌ای که تقریبا در تمام توده‌های فروریزشی دیده می‌شود، شامل جریان یافتن خرده سنگ‌ها، حرکت توده‌های آبرفتی و رمبندگی توده‌ها (ریزش) است.
طبرسا (سال ۱۳۹۵) جهت بررسی تأثیر نانو رس بر پتانسیل رمبندگی خاک رس لای‌دار ضعیف، آزمایش‌های تحکیم مضاعف به منظور تعیین تغییر شکل‌پذیری نمونه‌های معمولی و تثبیت شده با نانو رس تحت فشارهای مختلف را انجام داد. نتایج آزمایش‌ها مطابق شکل ۲-**۱۶۲** نشان می‌دهند به دلیل تغییر ماهیت ساختار خاک و پرشدن منافذ موجود نمونه‌ها با ذرات ریز نانو و امکان قفل و بست بهتر بین ذرات، افزودن نانو رس باعث کاهش پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها می‌گردد. به عنوان نمونه در اثر افزودن ۲ درصد نانو رس به خاک، پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد[۱۶۱].



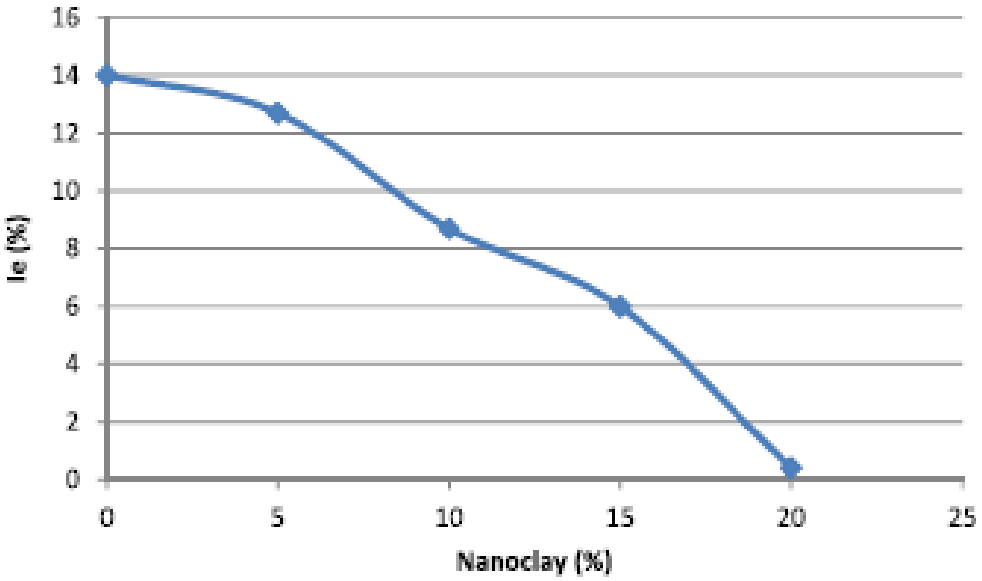
شکل ۲-۱۶۲: تاثیر نانو رس بر پتانسیل رمبندگی خاک رس لای‌دار [۱۳]

اوهادی و بخشعلی‌پور در پژوهشی به بررسی تاثیر نانو رس بر خواص رمبندگی خاک پرداختند. مطابق شکل ۲-**۱۶۳** برای سه نوع ماده افزودنی شامل بنتونیت، نانو رس طبیعی و نانو رس صنعتی بیشترین میزان تاثیر در کاهش پتانسیل رمبندگی نانو رس صنعتی مشاهده می‌شود[۱۸۹].



شکل ۲-۱۶۳: تاثیر نانو رس بر خواص رمبندگی خاک [۱۸۹]

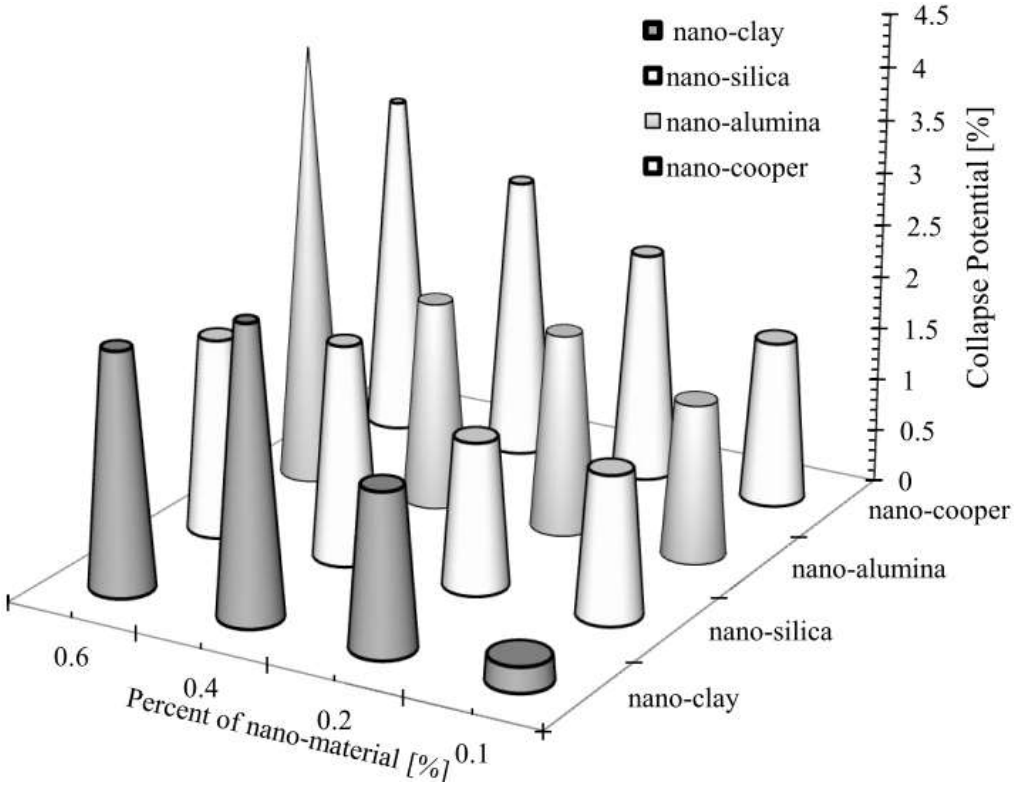
فاضلی و همکاران به بررسی تاثیر نانو رس بر خواص رمبندگی خاک با میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نانو رس پرداختند؛ مطابق شکل ۲-۱۶۴ مشاهده می‌شود نانو رس سبب کاهش پتانسیل رمبندگی شده و برای میزان ۲۰ درصد نانو رس، رمبندگی خاک کاملا از بین رفته است[۱۹۰].



شکل ۲-۱۶۴: تاثیر نانو رس بر خواص رمبندگی خاک [۱۹۰]

ایرانپور و حداد (سال ۲۰۱۶) با انجام آزمایش‌های تحکیم مضاعف، تأثیر تثبیت با نانو مواد گوناگون (نانوآلومینیوم، نانو رس، نانومس و نانوسیلیس) را بر بهبود رفتار خاک‌های رمبنده ارزیابی نمودند. تأثیر نوع و نسبت وزنی نانو مواد

بر پتانسیل رمبندگی در شکل ۲–۱۶۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کمینه پتانسیل رمبندگی در اثر افزودن نانو رس به خاک حاصل می‌شود. این رفتار می‌تواند به دلیل سطح ویژه نانو مواد گوناگون باشد. هرچه سطح ویژه نانو مواد بیشتر باشد، پتانسیل واکنش‌پذیری آن افزایش می‌یابد. از این رو به نحو مناسب‌تری بین ذرات خاک پیوند ایجاد می‌نماید. نانو رس نسبت به سایر مواد از سطح ویژه بالاتری برخوردار است و در نتیجه بیشترین کاهش را در پتانسیل رمبندگی سبب می‌شود. از سوی دیگر همان‌طور که در شکل ۲–۱۶۵ مشاهده می‌شود، افزایش نسبت وزنی نانو مواد موجب کاهش تأثیر آن در بهبود رفتار می‌گردد. این رفتار نیز می‌تواند با توجه به سطح ویژه توجیه گردد. سطح ویژه بسیار بالای نانو مواد و در نتیجه واکنش‌پذیری زیاد باعث می‌شود تا اگر نسبت‌های بالا از این مواد مورد استفاده قرار گیرد، این مواد به جای ایجاد پیوند با ذرات خاک، با یکدیگر واکنش دهند و کلوخه‌های ناپایدار ایجاد نمایند. این کلوخه‌ها در اثر بارگذاری و تغییر شرایط رطوبتی می‌شکنند؛ از این رو توصیه می‌شود به جای استفاده از نانو مواد به‌صورت جامد، کلوئید این مواد به‌منظور توزیع همگن به‌کار گرفته شود[۱۹۱].

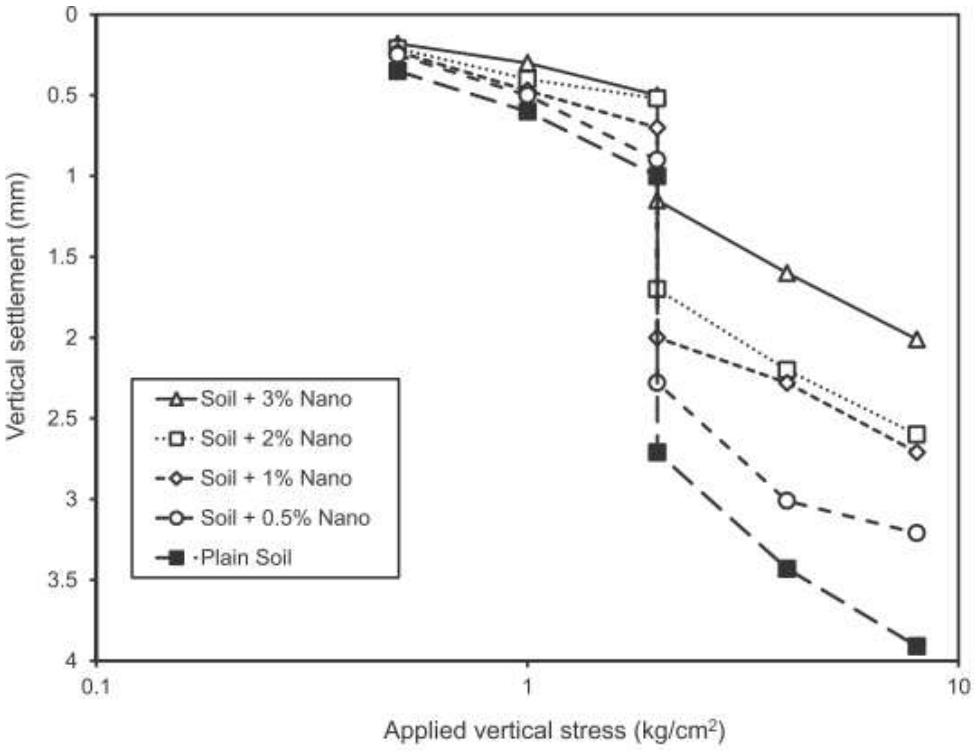


شکل ۲–۱۶۵: تأثیر نوع و نسبت وزنی نانو مواد بر پتانسیل رمبندگی [۱۹۱]

طبرسا و همکاران (سال ۲۰۱۸) با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و در محل، نقش نانو رس را در بهبود ویژگی لس ارزیابی نمودند. درصد نانو رس به‌کار رفته در این پژوهش از ۰ تا ۳ درصد تغییر می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد به دلیل واکنش‌های آنی رخ داده و ایجاد ساختار مجتمع ذرات خاک، بیشینه وزن مخصوص خشک خاک تثبیت‌شده، با افزایش میزان نانو رس کاهش می‌یابد. از سوی دیگر افزودن نانو رس موجب افزایش شاخص خمیری و رطوبت بهینه شد. نمودار تغییرات نشست قائم برحسب تنش سربار حاصل از آزمایش تحکیم مضاعف برای

خاک‌های تثبیت‌شده با مقادیر گوناگون نانو رس در شکل ۲-۱۶۶ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲-۱۶۶ ملاحظه می‌شود، میزان نشست قائم در قبل و بعد اشباع شدن در اثر افزایش درصد نانو رس، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد. بیشینه کاهش در میزان نشست قائم به‌ازای افزودن نانو رس به نسبت ۳ درصد وزنی حاصل شد[۱۹۲].

آزمایش‌های پتانسیل واگرایی نشان داد که میزان شفافیت آب خروجی از نمونه در اثر افزودن نانو رس، افزایش چشمگیری می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود قابل‌ملاحظه ویژگی‌های فرسایشی می‌باشد. مشاهدات انجام شده در محل بر روی خاک کانال انتقال آب تثبیت‌شده با نانو رس با نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نشان داد که میزان فرسایش خاک تثبیت‌شده با ۲ درصد نانو رس در حد قابل قبولی می‌باشد[۱۹۲].



شکل ۲-۱۶۶: نمودارهای تغییرات نشست قائم برحسب تنش سربار اعمالی حاصل از آزمایش تحکیم مضاعف برای خاک لس، تثبیت‌شده با مقادیر نسبت وزنی نانو رس گوناگون [۱۹۲]

۲-۷-۶ - بهبود خواص مقاومت مکانیکی خاک‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار

۲-۷-۶-۱- خاک‌های ریزدانه

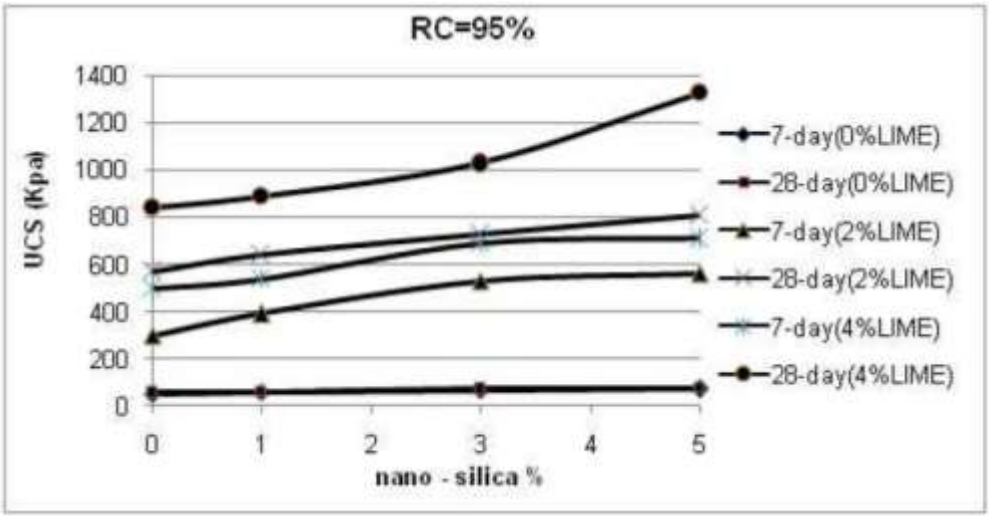
جمشیدی و مخبری (سال ۱۳۹۶) به بررسی تاثیر افزودن نانو سیلیس بر خواص مکانیکی خاک رسی پرداختند. از این ماده هنگامی که دسترسی به منابع قرضه مناسب برای هسته رسی سدهای خاکی نیاز به صرف وقت و هزینه بالایی دارد می‌توان استفاده نمود. با توجه به جدول ۲-۳۴ حاصل از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری تحت زمان‌های عمل‌آوری مختلف، با افزایش نانو سیلیس مقاومت فشاری تک‌محوری خاک افزایش می‌یابد[۱۹۳].

جدول ۲–۳۴: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (kg/cm^2) [۱۹۳]

نمونه	مقاومت در ۷ روز	مقاومت در ۱۴ روز	مقاومت در ۲۸ روز
C0	۵/۵	۵/۹	۶/۳
Cn0/5	۸/۳	۱۳/۸	۱۹/۵
Cn1	۱۰	۱۷/۵	۲۲/۹
Cn1/5	۱۱/۵	۳۰/۹	۳۸/۶
Cn2	۱۲/۲	۳۳/۱	۴۲
Cn3	۱۴/۷	۲۷	۴۷/۴

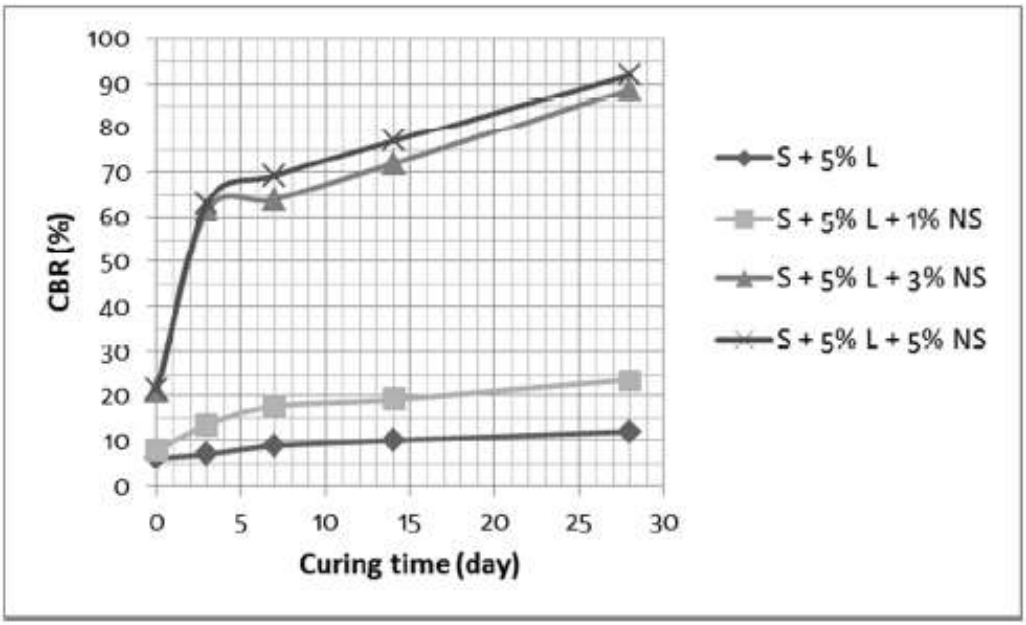
مرادی و روحی پور (سال ۱۳۹۱) از خاک مارن با خصوصیات خمیری زیاد استفاده نمودند. ابتدا این خاک با درصدهای مختلف آهک، تثبیت شده و مشخص گردید درصد بهینه آهک در حدود ۳ درصد می‌باشد. سپس به مخلوط خاک و درصد بهینه آهک، درصدهای مختلفی از نانو سیلیس اضافه شده و تحت آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفته است. برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، نمونه‌های ۲، ۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شده‌اند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری خاک مارنی می‌گردد[۱۶۷].

جهانگیری و باوندپوری (سال ۲۰۱۵) تاثیر درصدهای مختلف افزودنی آهک و نانو سیلیس به خاک رسی و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها بر خواص کیفی و مقاومتی خاک رس را بررسی نمودند. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری برای درصدهای نانو سیلیس ۰ تا ۵ درصد و آهک ۰ تا ۴ درصد در زمان عمل‌آوری ۱ تا ۱۴ روز انجام شده است. بر اساس نتایج حاصل در شکل ۲–۱۶۷ میزان مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها با افزایش درصد افزودنی‌ها و گذشت زمان بیشتر می‌گردد[۱۷۸].



شکل ۲–۱۶۷: تاثیر نانو سیلیس و آهک بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس طی زمان [۱۷۸]

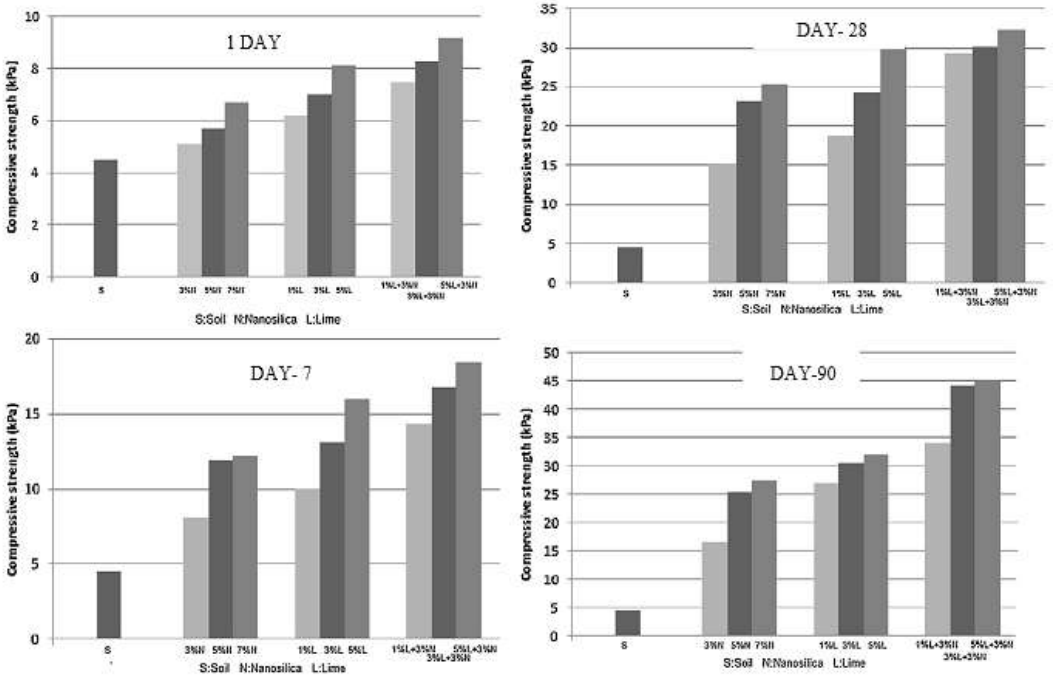
بازیار (سال ۲۰۱۳) جهت افزایش مقاومت خاک رسی ضعیف با افزودن آهک و نانو سیلیس با درصدهای مختلف، میزان تغییر مقاومت خاک در آزمایش CBR را بررسی کرد. بر اساس نتایج حاصل در شکل ۲-۱۶۸ میزان ۵ درصد آهک و ۳ درصد نانو سیلیس به عنوان درصد بهینه مواد افزودنی، تاثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت نمونه‌های رسی با گذشت زمان خواهد داشت[۱۶۲].



شکل ۲-۱۶۸: تاثیر نانو سیلیس و آهک بر مقاومت CBR خاک رس در زمان [۱۶۲]

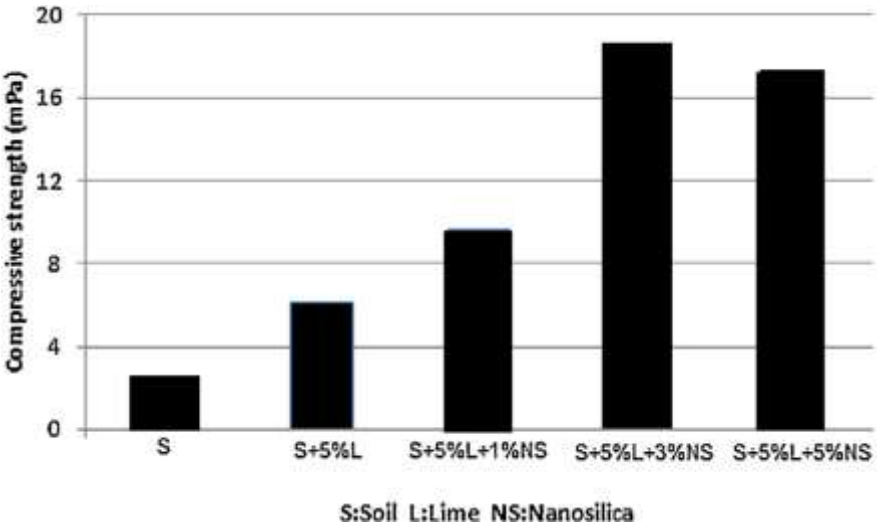
طبق تحقیقات انجام شده توسط زمردیان و همکاران، در صورت استفاده همزمان نانو رس و نانو سیلیس، این دو ماده تاثیر یکدیگر را کامل می‌کنند و افزودن ۰/۵ تا ۲/۵ درصد نانو رس یا نانو سیلیس باعث افزایش سختی خاک رس می‌شود[۱۹۴].

قضاوی و بوالحسنی (سال۲۰۱۰) به بررسی تاثیر افزودن نانو سیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس مخلوط با آهک پرداختند. نتایج در شکل ۲-۱۶۹ نشان می‌دهد نانو سیلیس به تنهایی در زمان کوتاه تاثیری بر خواص مقاومتی خاک رس ندارد اما در مجاورت آهک با گذشت زمان تاثیر قابل توجهی بر خواص مقاومتی خاک گذاشته است[۱۹۵].



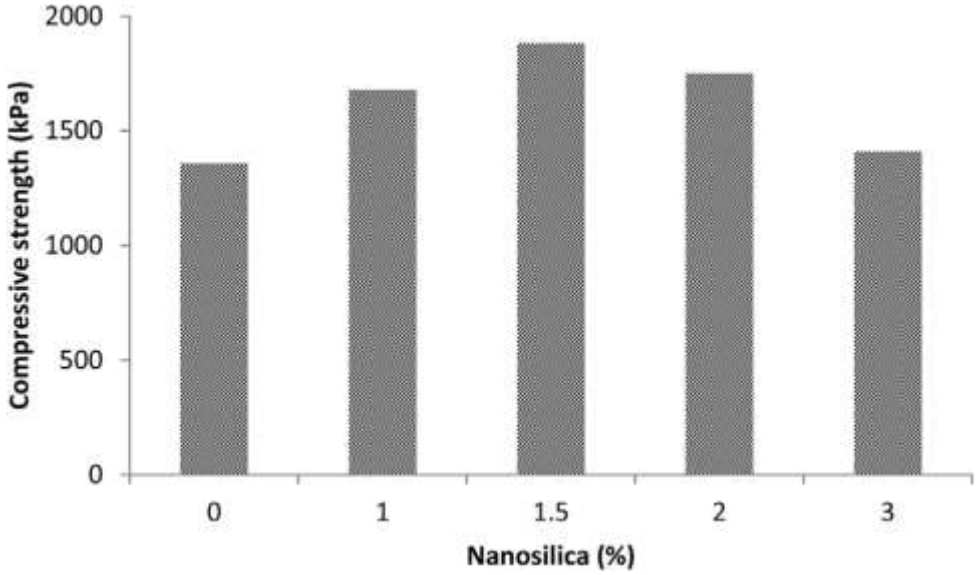
شکل ۲–۱۶۹: تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس مخلوط با آهک [۱۹۵]

قصابکلایی و جانعلی‌زاده در بررسی مقاله گل‌سفیدی و ممغانیان به تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری رس بهسازی شده با آهک پی برده‌اند. نتایج در شکل ۲–۱۷۰ نشان می‌دهد که میزان بهینه ۵ درصد آهک و ۳ درصد نانو رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رسی به میزان ۲۰ درصد می‌شود. افزودن بیشتر نانو سیلیس سبب کاهش میزان مقاومت فشاری خاک می‌گردد[۱۹۶].



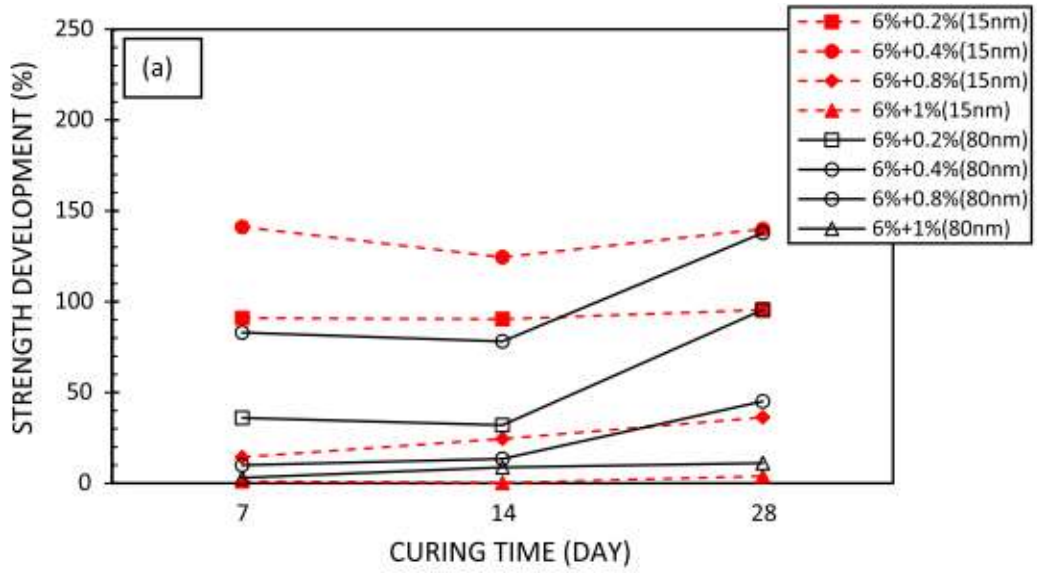
شکل ۲–۱۷۰: تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری خاک رس بهسازی شده با آهک [۱۹۶]

قصابکلایی و جانعلی‌زاده در پژوهشی نشان دادند که نانو سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری خاک رس بهسازی شده با سیمان می‌گردد. مطابق شکل ۲-**۱۷۱** میزان بهینه افزودنی نانو سیلیس معادل ۱/۵ درصد بوده است[۱۹۶].



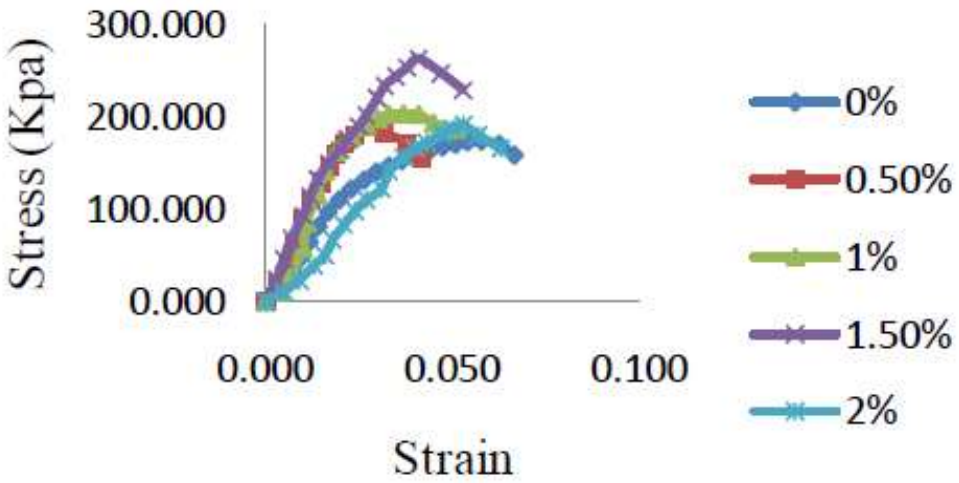
شکل ۲-۱۷۱: تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری خاک رس بهسازی شده با سیمان[۱۹۶]

بهمنی و همکاران (سال ۲۰۱۶) تأثیر اندازه و نسبت وزنی جایگزینی نانوسیلیس با سیمان را بر ویژگی‌های مکانیکی، شیمیایی و ریزساختاری خاک رس بررسی نمودند. نسبت‌های جایگزینی نانوسیلیس برابر با ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ درصد انتخاب گردید. همچنین نانوسیلیس مورد استفاده دارای ابعاد ۱۵ و ۸۰ نانومتر بود. زمان عمل‌آوری در این پژوهش برابر با ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در نظر گرفته شد. میزان بهبود در مقاومت فشاری تک‌محوری (نسبت مقاومت نمونه حاوی نانوسیلیس به نمونه فاقد نانوسیلیس) برحسب زمان عمل‌آوری برای نمونه‌ها با نسبت‌های وزنی و ابعاد گوناگون نانوسیلیس در شکل ۲-**۱۷۲** نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد بهینه برای جایگزینی نانوسیلیس با سیمان برابر با ٪۰/۴ می‌باشد. از سوی دیگر در روزهای ابتدایی، نانو سیلیس با ابعاد کمتر (۱۵ نانومتر) عملکرد مناسب‌تری دارد. این درحالی است که در زمان عمل‌آوری بالا، میزان رشد مقاومت در اثر افزودن نانوسیلیس با اندازه ۸۰ نانومتر بیشتر می‌گردد. نتایج آزمایش‌های ریزساختاری انجام شده نشان‌دهنده حفرات کمتر خمیر سیمان حاوی نانوسیلیس می‌باشد. از سوی دیگر افزودن نانوسیلیس موجب تبدیل کریستال‌های کم‌مقاومت کلسیم هیدروکسید به ژل پرمقاومت کلسیم سیلیکات هیدرات می‌شود. این پدیده موجب بهبود قابل‌ملاحظه پیوندها در ناحیه انتقالی ذرات می‌شود که در نهایت دلیل مناسبی برای افزایش مقاومت رس سیمانی حاوی ذرات نانوسیلیس می‌باشد[۱۹۷].

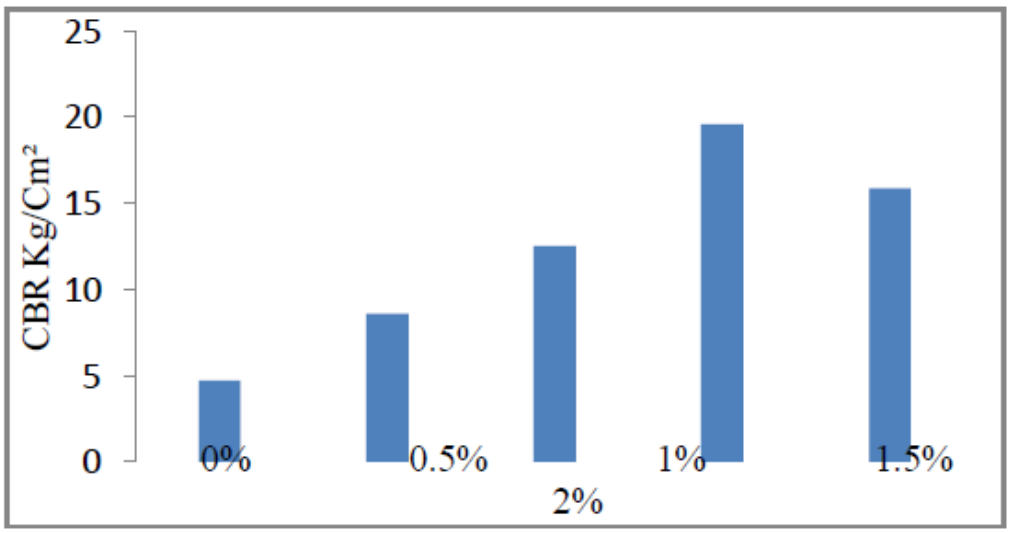


شکل ۲–۱۷۲: میزان بهبود در مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه‌های رس سیمانی با نسبت‌های وزنی و ابعاد گوناگون نانوسیلیس [۱۹۷]

طبق تحقیقات محمدی و نیازیان (سال ۲۰۱۳) که به کمک آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR روی خاک رسی رشت برای درصدهای مختلف صفر تا ۲ درصد افزودنی نانو رس انجام شده است، با افزایش نانو رس به دلیل افزایش چسبندگی خاک، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (شکل ۲–**۱۷۳**) و آزمایش CBR (شکل ۲–**۱۷۴**)، با افزایش درصد نانو رس تا ۱/۵٪، مقاومت نهایی خاک رس رشت افزایش می‌یابد؛ اما زمانی که مقدار نانو رس بیش از ۱/۵٪ شده و به ۲٪ برسد، مقاومت بیشینه خاک کاهش می‌یابد[۱۶۳].



شکل ۲–۱۷۳: تاثیر نانو رس بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس [۱۶۳]

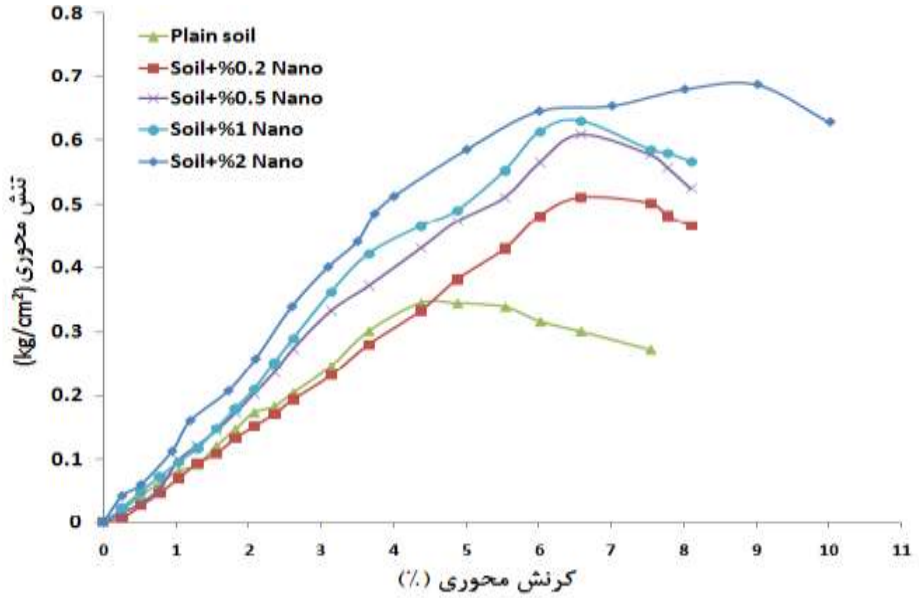


شکل ۲-۱۷۴: تاثیر نانو رس بر مقاومت CBR خاک رس [۱۶۳]

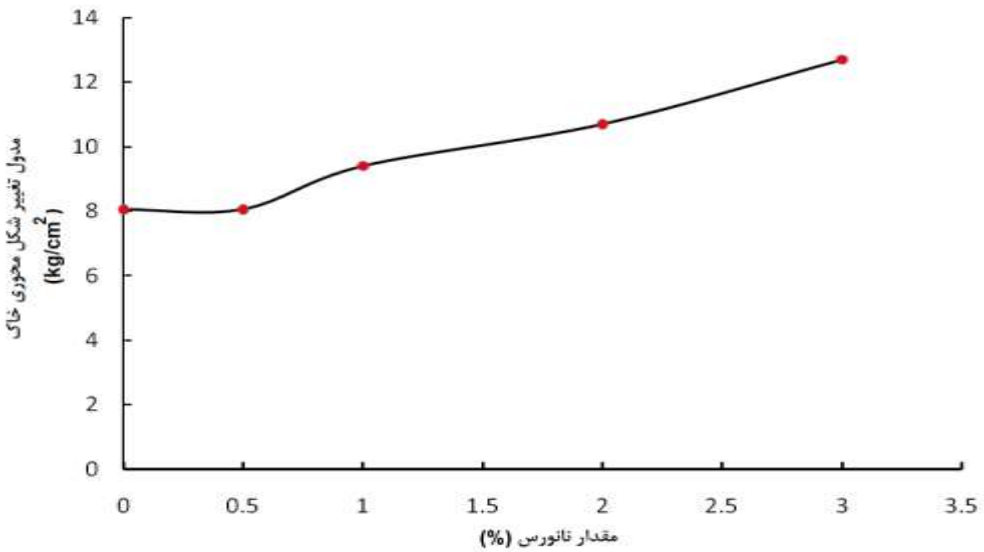
محمدی و جان‌علیزاده (سال ۲۰۱۸) با انجام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و میکروسکوپ الکترونی، نقش افزودن نانو رس بر خصوصیات خودترمیمی رس با پلاستیسیته پایین را مورد ارزیابی قرار دادند. شیوه ساخت نمونه در این تحقیق شامل ترکیب خاک و نانو مواد بصورت خشک و سپس افزودن آب و ادامه فرآیند اختلاط است. در این آزمایش، نمونه‌ها پس از گسیختگی و تشکیل ترک، به مدت ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز در کاور پلاستیکی در شرایط آزمایشگاه نگهداری شدند و پس از آن آزمایش فشاری تک‌محوری روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد افزایش درصد نانو رس موجب بهبود مقاومت ناشی از خودترمیمی می‌گردد. به طور مثال افزودن ۵ درصد نانو رس موجب افزایش حدودا دو برابری مقاومت نمونه‌ها شد. از سوی دیگر افزایش حدود اتربرگ خاک در اثر افزودن نانو رس می‌تواند دلیلی برای کاربرد این ماده به عنوان تثبت‌کننده هسته سدهای خاکی باشد. زمان عمل‌آوری تاثیر قابل-ملاحظه‌ای بر میزان بهبود مقاومت ناشی از خاصیت خودترمیمی دارد. تاثیر زمان عمل‌آوری وابسته به میزان نانو رس می‌باشد. روند کسب مقاومت خودترمیم برای نمونه‌های با درصدهای پایین نانو رس (تا ۲/۵ درصد) تا ۲۸ روز تقریبا متوقف می‌شود. این در حالی است که برای نمونه‌های حاوی ۵ درصد نانو رس، روند کسب مقاومت ناشی از خصوصیت خودترمیمی پس از ۲۸ روز نیز ادامه می‌یابد. بررسی تصاویر SEM گرفته شده از سطح ترک‌های شکل گرفته مشخص می‌سازد که ماتریس جدیدی برای نمونه‌های حاوی نانو رس با گذشت زمان تشکیل می‌شود و ریزساختار آن بهبود می‌یابد که این موضوع می‌تواند دلیلی مناسب برای افزایش مقاومت ناشی از ویژگی خودترمیمی باشد[۱۹۸].

طبرسا (سال ۱۳۹۶) تاثیر افزودن نانو رس بر رفتار ژئوتکنیکی خاک ریزدانه رس ضعیف CL-ML را مورد بررسی قرار داد. به منظور بررسی رفتار خاک، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی‌نشده UU روی خاک رس لای‌دار انجام گرفت. نتایج پژوهش انجام شده در شکل **۲-۱۷۵** نشان می‌دهد در اثر افزودن ۱ درصد نانو رس به خاک ریزدانه رس لای‌دار، مقاومت فشاری تک‌محوری ماکزیمم نمونه‌ها حدود ۷۷ درصد افزایش یافته است و با افزایش مقادیر بیشتر نانو رس، میزان تغییرات مقاومت شیب ملایمی دارد. در شکل **۲-۱۷۶** تاثیر افزودن نانو رس بر مدول تغییر شکل نمونه‌های خاک CL-ML نشان داده شده است. نتایج حاکی از افزایش مدول تغییر شکل به دست آمده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف نانو رس در مقایسه با خاک معمولی است. شایان ذکر است میزان تغییرات مدول تغییر شکل در نمونه‌های خاک با نسبت‌های کمتر از ۱ درصد نانو رس قابل توجه نمی‌باشد[۱۶۱].

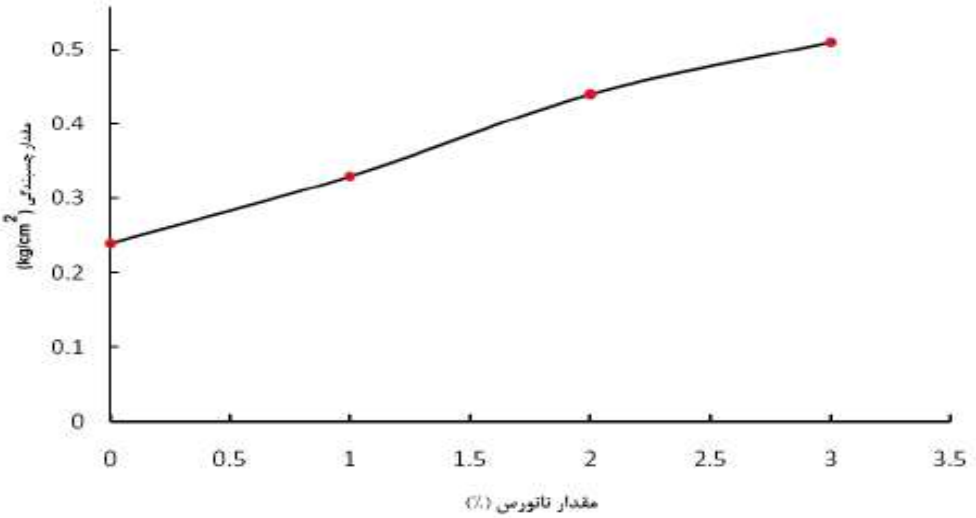


شکل ۲–۱۷۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر ترکیب خاک رسی و نانو رس [۱۶۱]



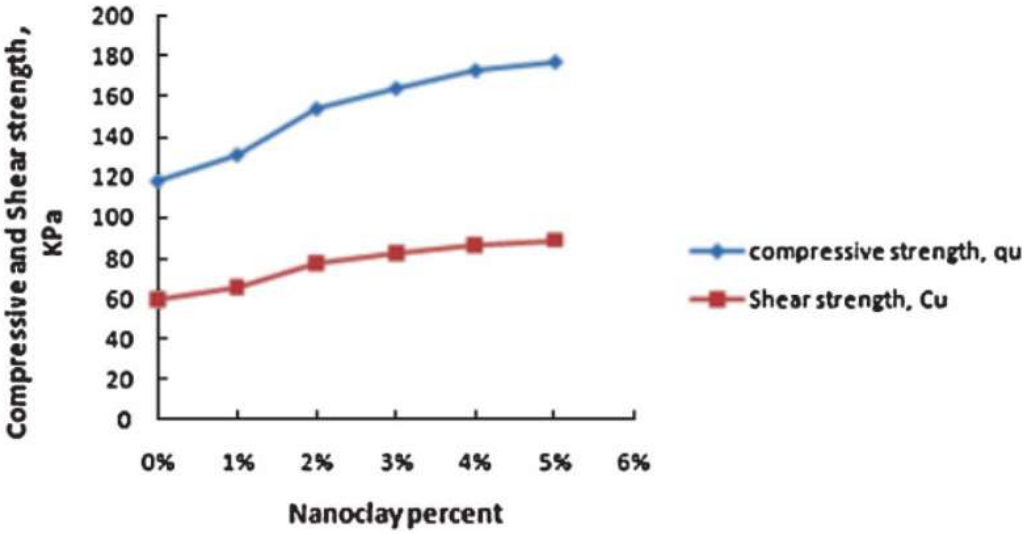
شکل ۲–۱۷۶: نتایج تأثیر افزودن نانو رس بر مدول تغییر شکل نمونه‌های خاک CL-ML [۱۶۱]

در شکل ۲–**۱۷۷** نتایج آزمایش سه محوری UU نمونه‌های رس لای‌دار بهسازی شده با ۱ تا ۳ درصد نانو رس آمده است. نتایج حاکی از افزایش محسوس مقدار چسبندگی خاک است که این موضوع با نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری نیز تطابق خوبی دارد[۱۶۱].



شکل ۲–۱۷۷: تاثیر نانو رس بر پارامترهای برشی خاک رس لای‌دار [۱۶۱]

کنعانی‌زاده و همکاران (سال ۲۰۱۱) تاثیر نانو رس روی مقاومت فشاری و برشی خاک رس متراکم شده کهریزک، با نفوذ شیره لندفیل را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج در شکل ۲–**۱۷۸** نشان می‌دهد که افزودن ۴٪ نانو رس، مقاومت فشاری را به اندازه ۳۶٪ افزایش می‌دهد[۱۷۴].



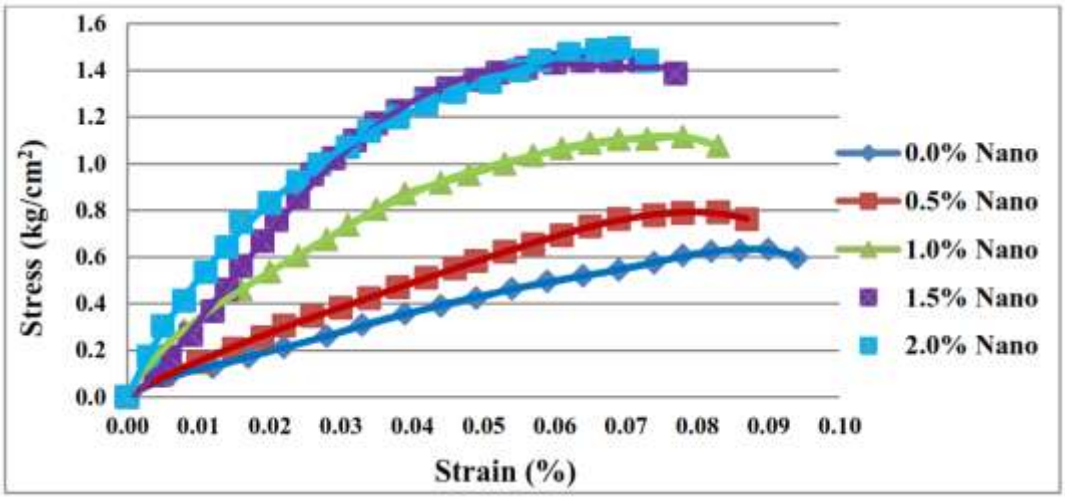
شکل ۲–۱۷۸: تاثیر نانو رس روی مقاومت فشاری و برشی [۱۷۴]

بهاری و شاه‌نظری (سال ۱۳۹۴) به بررسی تاثیر نانو رس روی خاک ریزدانه رسی پرداختند. خاک مورد بررسی از بستر کانال در مازندران برداشت شده و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم روی آن انجام گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، افزایش نانو رس باعث بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک بستر کانال شد. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه با افزودن نانو رس افزایش یافته که این امر باعث کاهش زاویه شکست، افزایش چسبندگی و تغییرشکل‌پذیری کمتر خاک گردید. نتایج حاصل از آزمایش تحکیم در این پژوهش نشان می‌دهد که وجود این

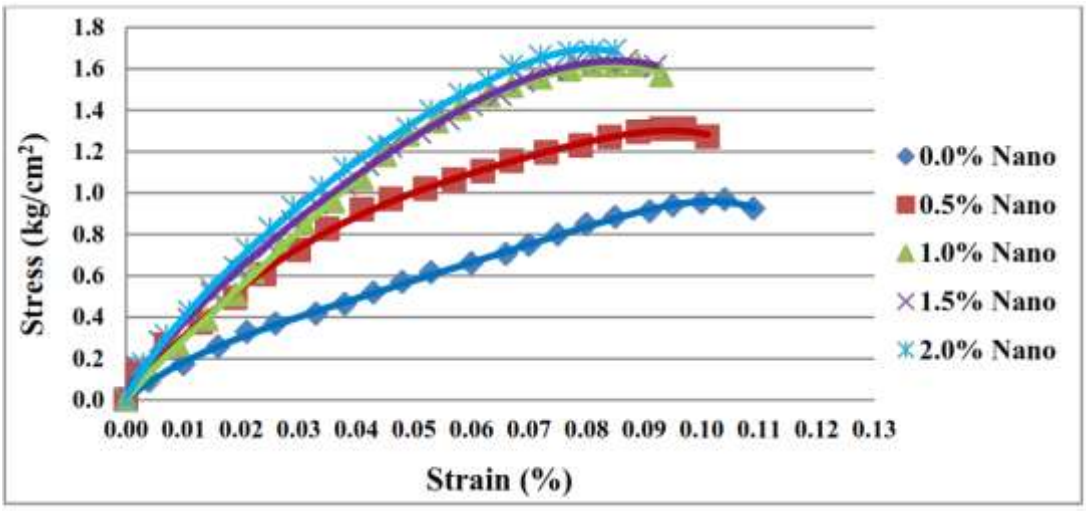
کانی در ساختار و اسکلت خاک تغییراتی ایجاد نموده که سبب کاهش نسبت تخلخل نهایی و افزایش شاخص فشردگی شده است. در نتیجه با تزریق نانو رس، پایداری و استحکام خاک افزایش می‌یابد[۱۹۹].

چنگیزی و حداد (سال ۲۰۱۶) با انجام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و برش مستقیم، نقش افزودن همزمان نانو رس و الیاف شیشه را بر رفتار رس با پلاستیسته کم بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانو رس به دلیل ایجاد پیوند میان ذرات خاک و الیاف، موجب افزایش مقاومت نمونه‌های مسلح می‌شود. به طور مثال افزودن ۱ درصد به نمونه‌های مسلح موجب افزایش مقاومت در حدود ۸۶ درصد می‌گردد. افزودن همزمان الیاف شیشه و نانو رس به میزان ۱ درصد موجب افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به میزان ۲ و ۱/۶ برابر شد. از سوی دیگر مقاومت بیشینه و پسماند حاصل از آزمایش فشاری تک‌محوری در اثر افزودن الیاف و نانو رس به میزان ۱ درصد، افزایش چشمگیری می‌یابد. همچنین در گزارش آن‌ها آمده است که طول و عرض‌های ترک‌های تشکیل شده در زمان گسیختگی در نمونه‌های مسلح نسبت به نمونه‌های غیر مسلح کمتر بوده و می‌تواند موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت پسماند گردد [۲۰۰].

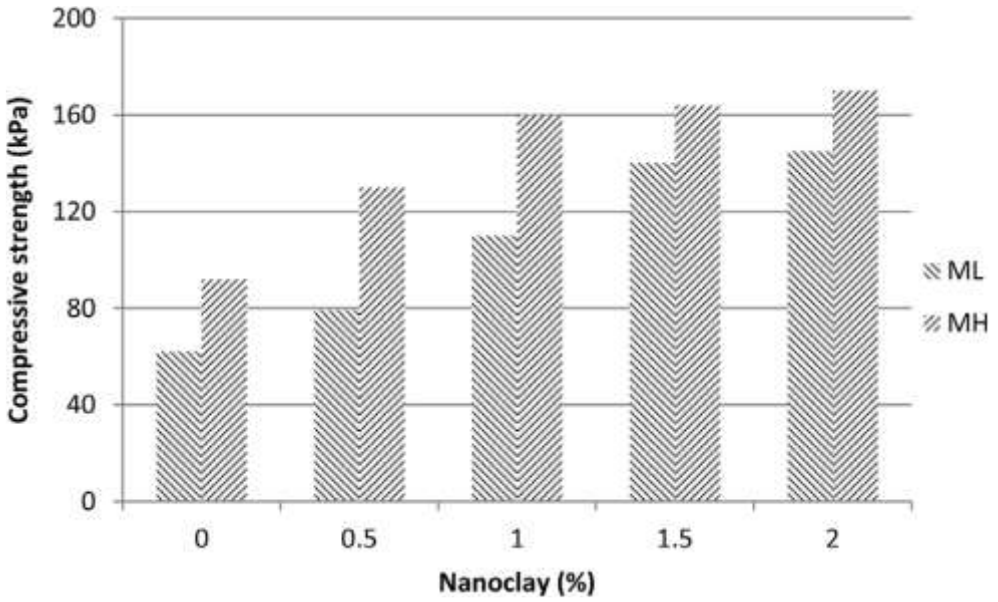
نیکوکار و همکاران (سال ۲۰۱۳) تاثیر افزودن نانو رس روی مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR خاک سیلتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش نانو رس، مقاومت فشاری تک‌محوری لای بهبود می‌یابد. عامل تاثیرگذار بر مقاومت خاک تثبیت شده، یکنواختی در پخش نانو ذرات رس است. با توجه به شکل ۲-۱۷۹ تا شکل ۲-۱۸۱ میزان بهینه نانو رس برای خاک ML حدود ۱/۵٪ وزن خاک و برای خاک MH حدود ۱٪ وزن خاک است. همچنین با افزودن نانو رس مقدار CBR در این نوع خاک افزایش یافته است[۲۰۱].



شکل ۲-۱۷۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای خاک ML تثبیت شده و تثبیت نشده با نانو رس[۲۰۱]

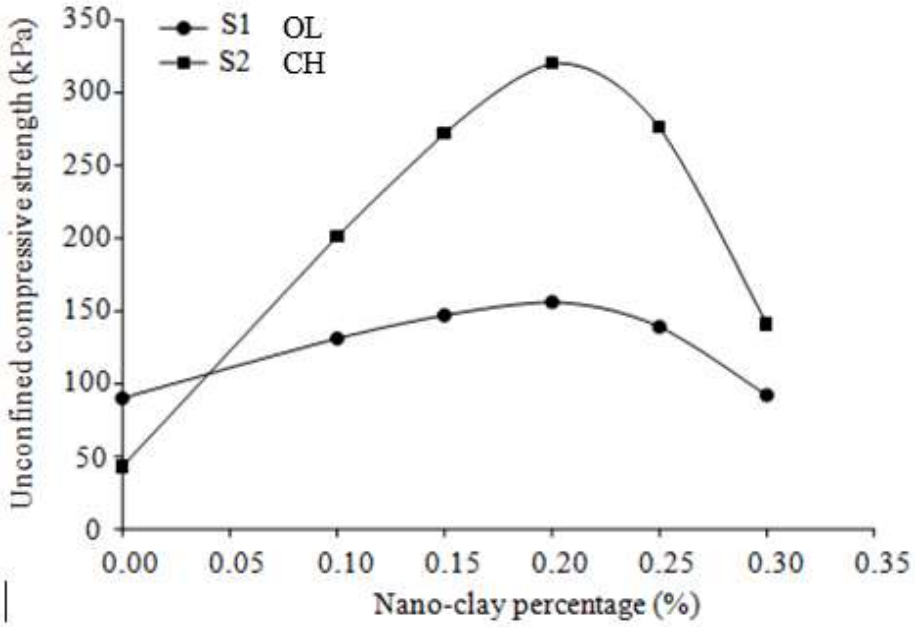


شکل ۲–۱۸۰: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای خاک MH تثبیت شده و تثبیت نشده با نانو رس[۲۰۱]



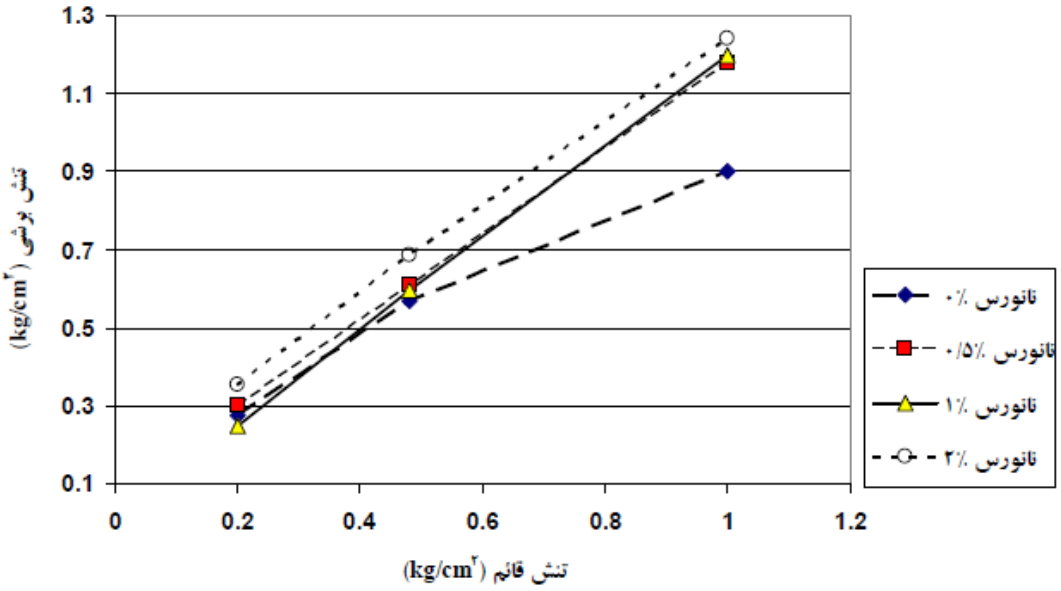
شکل ۲–۱۸۱: تاثیر نانو رس بر خواص مقاومت فشاری تک‌محوری خاک لای [۲۰۱]

زاید حمید و ریحان طاها (سال ۲۰۱۴) به بررسی تاثیر افزودنی‌های مختلف نانو به خاک رس نرم و خاک آلی پرداختند. نتایج در شکل ۲–۱۸۲ نشان می‌دهد افزودن مقدار کمی نانو رس تا مقدار بهینه ۰/۲ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری دو نوع خاک آلی و خاک رس را افزایش و پس از ۰/۲ درصد، مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که این تاثیر در خاک رس CH به میزان بیشتری مشاهده می‌شود[۱۸۱].



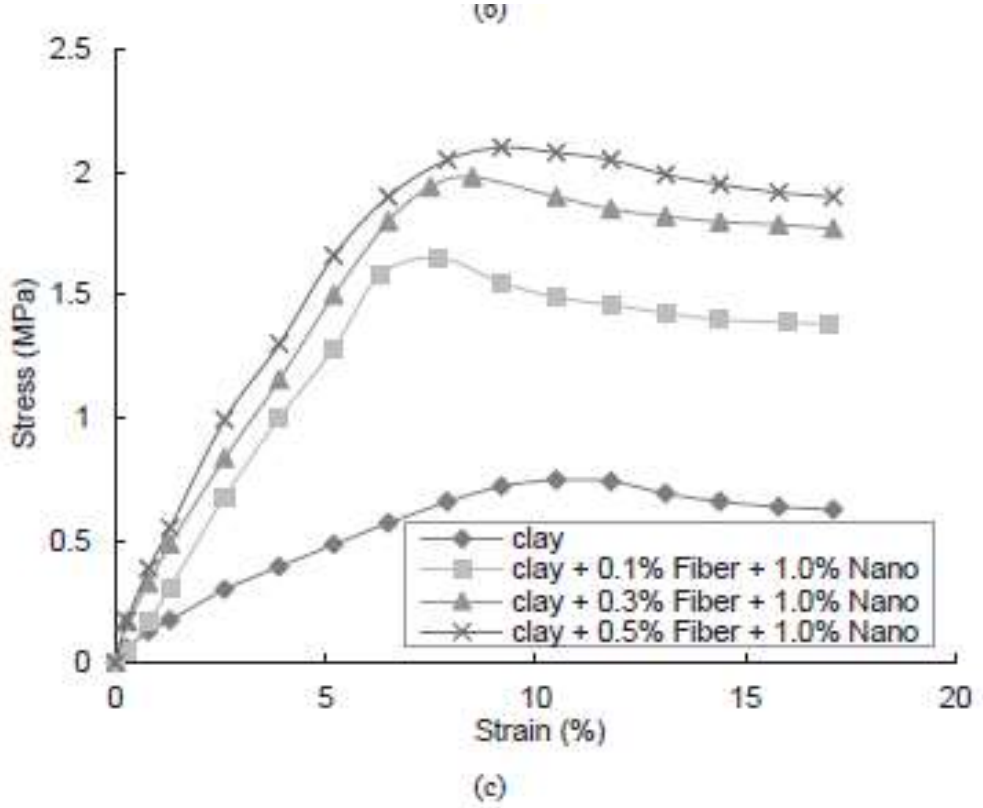
شکل ۲–۱۸۲: تاثیر نانو رس بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ریزدانه [۱۸۱]

مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی انواع رس‌ها و مخلوط آن‌ها با نانو ذرات توسط عربانی و همکاران (سال ۱۳۸۹) نشان می‌دهد که استفاده از نانو رس سبب تغییرات مقاومت برشی می شود. آزمایشات برش مستقیم در دو حالت استفاده و عدم استفاده از نانو ذرات بر روی خاک مورد نظر انجام گرفت. مقایسه نتایج آزمایشات انجام شده در این پژوهش مطابق شکل ۲–۱۸۳، افزایشی اندک در میزان نانو رس، موجب بهبود خواص خاک شده است [۱۵۹].



شکل ۲–۱۸۳: تغییرات مقاومت برشی با اضافه کردن نانو رس به خاک رس [۱۵۹]

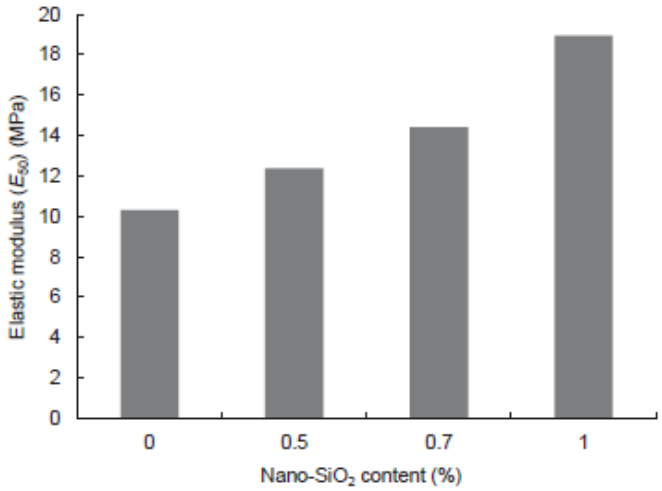
حداد و چنگیزی در پژوهشی تاثیر الیاف پلی استر و نانو سیلیس بر خواص مقاومتی رس با پلاستیسیته کم (CL) را بررسی نمودند. پس از اختلاط خاک با الیاف پلی استر به میزان ۰/۱ تا ۰/۵ درصد و افزودن نانو سیلیس به میزان ۰/۵ تا ۱ درصد، آزمایشات گوناگون برش مستقیم و تک‌محوری روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهد افزودن مقادیر مختلف مواد مورد نظر سبب افزایش قابل توجه مقاومت برشی، مدول الاستیسیته و کرنش برشی و بهبود کیفیت می‌گردد. در شکل ۲-۱۸۴ تاثیر افزایش درصد الیاف با ۱ درصد نانو سیلیس بر خاک رسی در آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. همان‌طورکه در جدول ۲-۳۵ مشاهده می‌شود هر دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک رس با افزایش درصد الیاف پلی استر به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج آزمایش تک‌محوری (شکل ۲-۱۸۵ و شکل ۲-۱۸۶) هر دو ماده نانو ساختار شامل نانو سیلیس و نانو الیاف سبب افزایش مدول الاستیسیته (مدول تغییر شکل نظیر ۵۰ درصد مقاومت خاک) شده‌اند[۲۰۲].



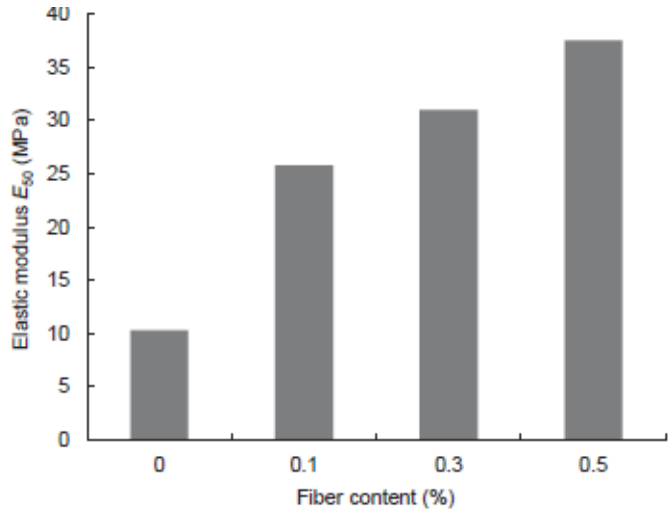
شکل ۲-۱۸۴: نتایج آزمایش برش مستقیم بر رس با مقدارثابت نانو سیلیس و افزایش درصد الیاف پلی استر[۲۰۲]

جدول ۲-۳۵: بررسی تاثیر ۱٪ نانو سیلیس و الیاف پلی استر بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رس[۲۰۲]

Specimens No.	Fiber content (%)	Cohesion, c (kPa)	Angle of internal friction, φ (°)
1	0	38	13.5
2	0.1	93	33.8
3	0.3	107	36.8
4	0.5	113	38.5

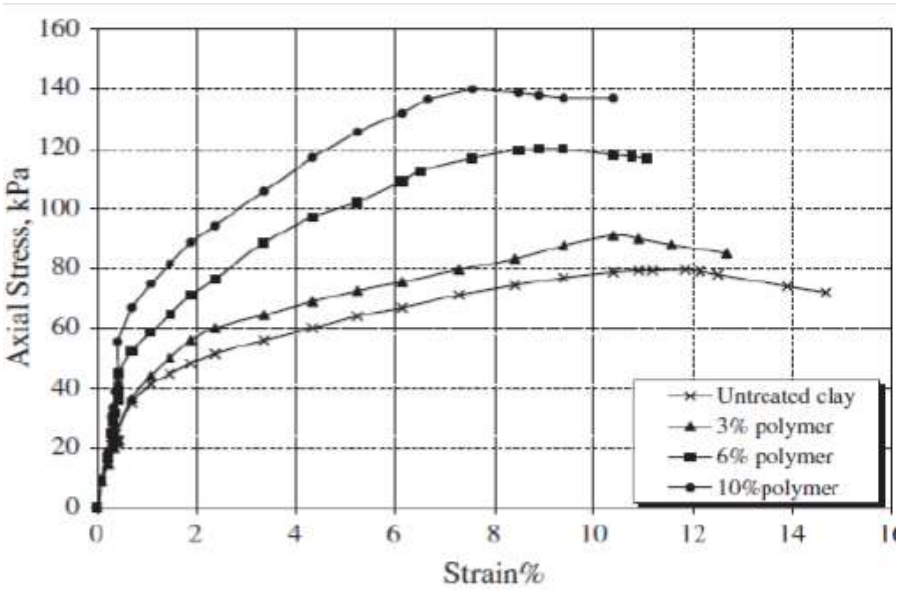


شکل ۲–۱۸۵: تاثیر میزان نانو سیلیس بر مدول الاستیسیته خاک رس [۲۰۲]



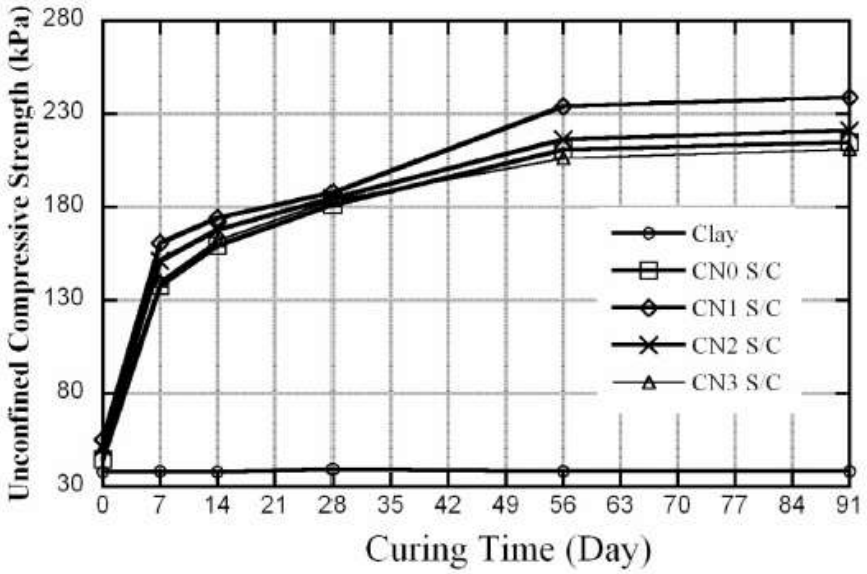
شکل ۲–۱۸۶: تاثیر الیاف پلی استر بر مدول الاستیسیته خاک رس [۲۰۲]

علیان و سیاوش‌نیا در پژوهشی از مصالح نانو کامپوزیت جهت بهسازی خاک رس با پلاستیسیته بالا استفاده کردند. شکل ۲–**۱۸۷** تغییرات تنش محوری بر حسب کرنش را برای مقادیر مختلف نانو پلیمر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش درصد نانو مواد پلیمری سبب افزایش مقاومت خاک شده که این موضوع به دلیل کاهش تخلخل در اثر پر شدن حفرات خاک به کمک نانو مواد و افزایش دانسیته خاک می‌باشد. از سوی دیگر نتایج آزمایشات برش مستقیم انجام شده نشان داد به دلیل خاصیت ریزپرکنندگی نانو مواد، مقاومت برشی در اثر افزودن نانو مواد پلیمری افزایش یافته است[۲۰۳].

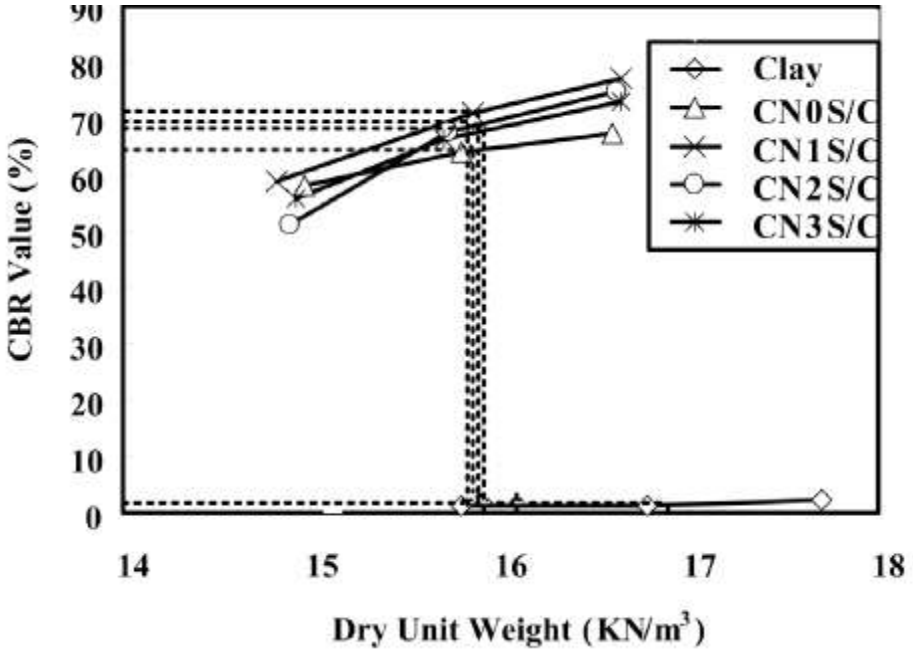


شکل ۲–۱۸۷: تاثیر میزان نانو کامپوزیت پلیمری بر مقاومت خاک رس CH [۲۰۳]

هونگ و همکاران در پژوهشی تاثیر خاکستر لجن فاضلاب SSA و سیمان با نسبت ۱ به ۳ به میزان ۱۵ درصد در نمونه‌های رسی با درصدهای مختلف صفر تا ۳ درصد نانو آلومینا (Al_2O_3) را بررسی نمودند. در این پژوهش آزمایشات تک‌محوری و CBR بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج حاصل در شکل ۲–۱۸۸ و شکل ۲–۱۸۹ نشان می‌دهد که میزان بهینه نانو آلومینا در نمونه‌ها ۱ درصد بوده و با گذر زمان مقادیر مقاومت CBR و مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش یافته است[۱۷۵].



شکل ۲–۱۸۸: تاثیر میزان نانو آلومینا بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس طی زمان[۱۷۵]



شکل ۲-۱۸۹: تاثیر میزان نانو آلومینا بر مقاومت CBR خاک رس طی زمان[۱۷۵]

رجبی و عبدالهی جهت بررسی نتایج تأثیر افزودن نانو سیلیس و نانو اکسید آهن، آزمایش‌های برش مستقیم، مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم روی نمونه‌هایی از خاک رسی طبیعی و همچنین خاک رسی با درصدهای مختلف هر یک از افزودنی‌های نانو، انجام دادند و تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک و همچنین پارامترهای تحکیمی و تراکم‌پذیری خاک ناشی از این افزودنی‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیس و نانو اکسید آهن به خاک رسی تا نسبت بهینه ۲ درصد، موجب افزایش پارامترهای مقاومتی و تحکیمی خاک شده و بعد از آن کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار پارامترهای مقاومتی و کمترین مقدار ضرایب فشردگی و تورم، در خاک تثبیت شده با ۲ درصد نانوذرات مشاهده شد که همان درصد بهینه افزودنی می‌باشد. در مقایسه دو نوع افزودنی مورد مطالعه، به ازای درصد ثابت افزودنی، نانو اکسید آهن باعث بهبود بیشتری در پارامترهای مقاومتی و ضرایب فشردگی و تورم خاک نسبت به نانو سیلیس شده است[۱۸۰].

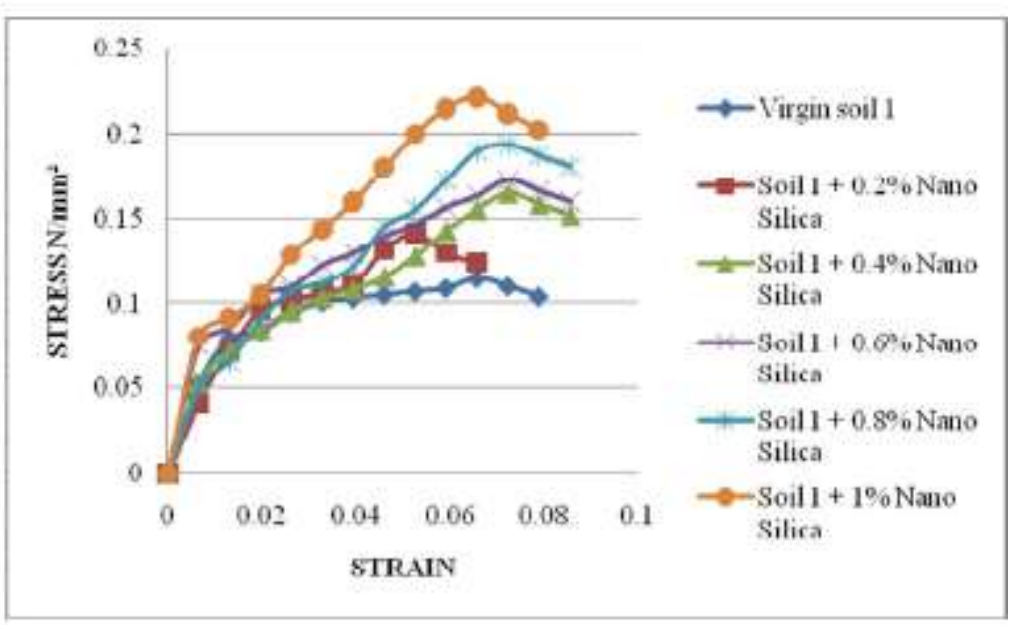
در پژوهشی هارش و وینوت‌کومار (سال ۲۰۱۶) از نانو سیلیس و نانو زئولیت جهت بهسازی رس ضعیف از گروه CL و CH در دوره زمانی ۱۴ روزه با نسبت‌های مختلف ۰/۲ تا ۲ درصد در آزمایشگاه استفاده کردند. نتایج حاصل از آزمایشات تک‌محوری برای دو نوع خاک رس به همراه نانو سیلیس در جدول ۲-۳۶ و نانو زئولیت در جدول ۲-۳۷ و شکل ۲-۱۹۰ تا شکل ۲-۱۹۳ نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانو سیلیس و نانو زئولیت، مقاومت فشاری تک‌محوری هر دو نوع خاک رس با پلاستیسیته کم و زیاد افزایش می‌یابد. اما می‌توان گفت که نانو زئولیت مقاومت بیشتری به خاک ضعیف می‌بخشد و دلیل آن دارا بودن مواد معدنی بیشتر نسبت به نانو سیلیس است. نانو زئولیت حاوی ذرات معدنی SiO_2, Al_2O_3, CaO و .... می‌باشد اما نانو سیلیس تنها حاوی SiO_2 است[۱۷۹].

جدول ۲–۳۶: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری دو نوع خاک رسی در دوره زمانی ۱۴ روزه [۱۷۹]

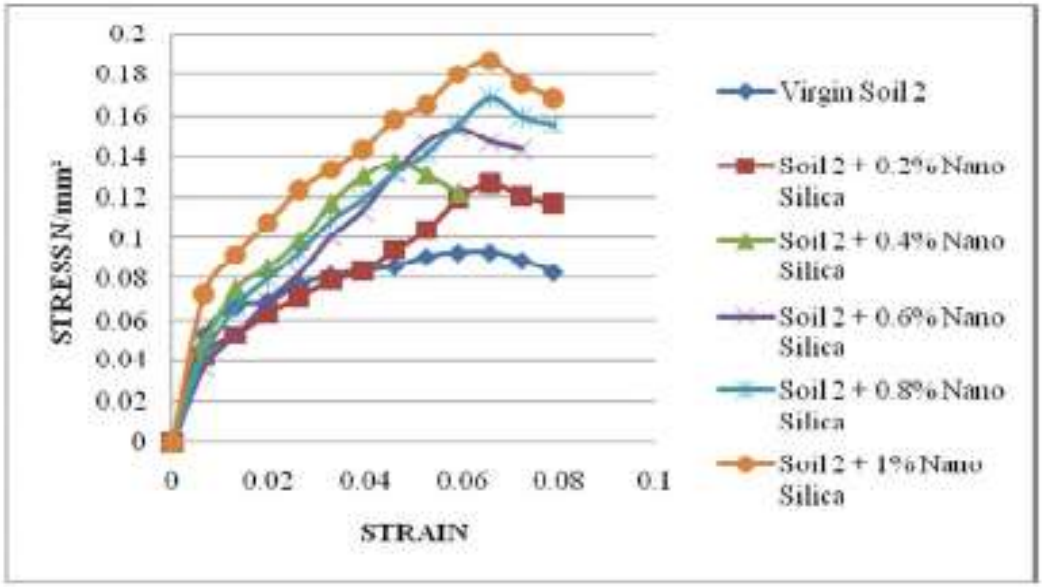
S.No	% of Nano silica	(14 days curing) (N/mm²)	
		Soil sample 1 CH	Soil sample 2 CL
1	0.2	0.141	0.126
2	0.4	0.164	0.137
3	0.6	0.172	0.157
4	0.8	0.193	0.168
5	1	0.221	0.187

جدول ۲–۳۷: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر مقاومت فشاری تک‌محوری دو نوع خاک رسی در دوره زمانی ۱۴ روزه [۱۷۹]

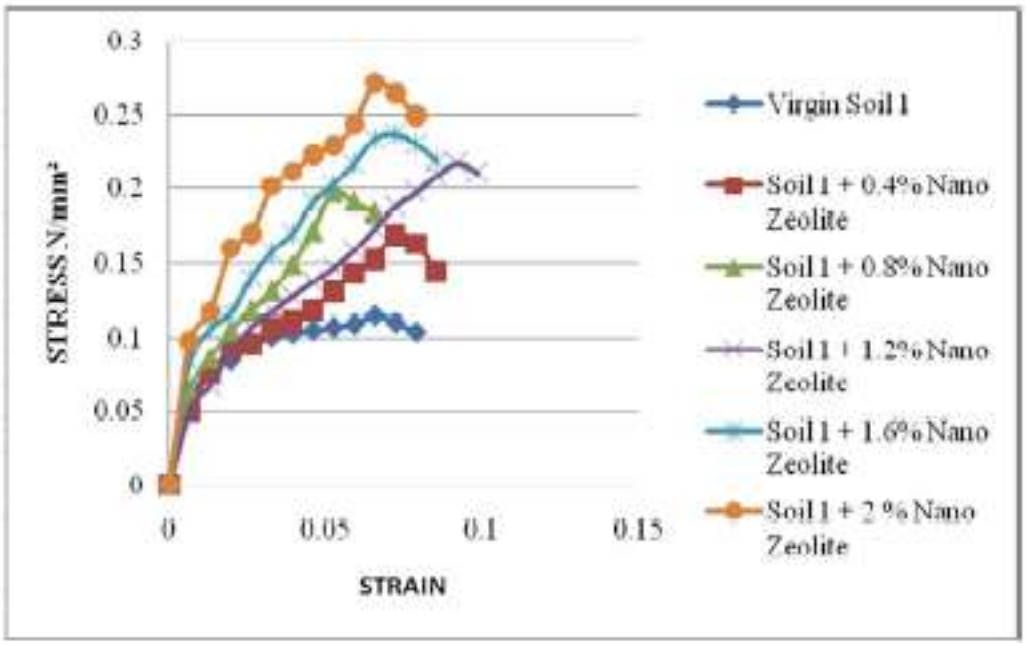
S.No	% of Nano zeolite	(14 days curing) (N/mm²)	
		Soil sample 1 CH	Soil sample 2 CL
1	0.4	0.170	0.145
2	0.8	0.197	0.168
3	1.2	0.217	0.187
4	1.6	0.238	0.207
5	2	0.271	0.230



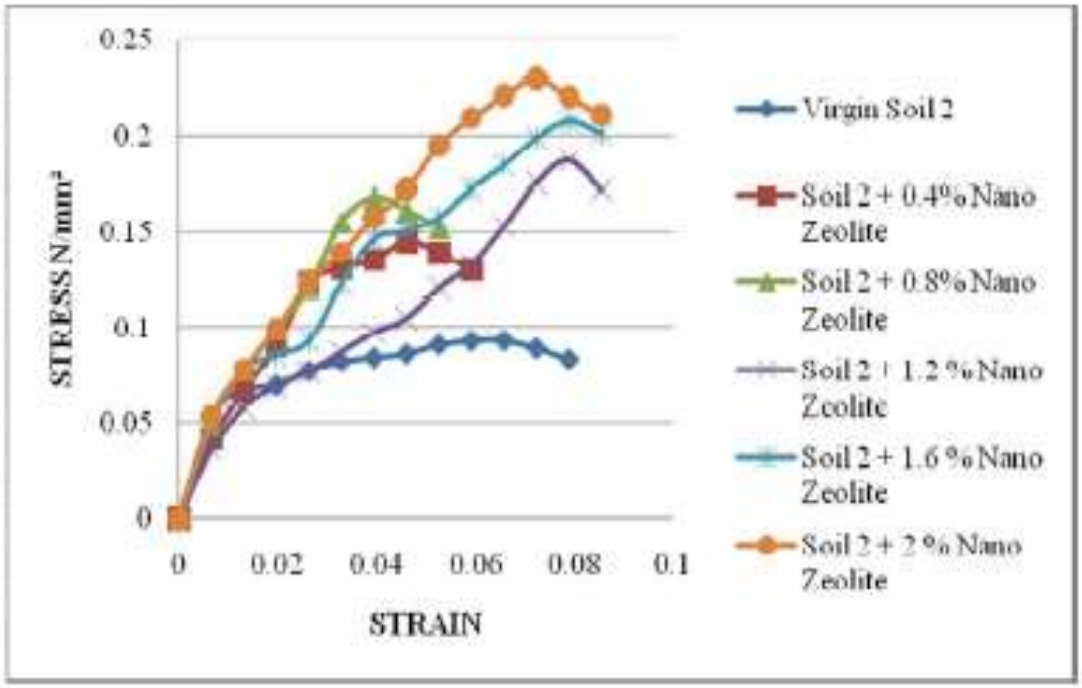
شکل ۲–۱۹۰: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیکا بر مقاومت برشی خاک رسی CH [۱۷۹]



شکل ۲–۱۹۱: بررسی تاثیر میزان نانو سیلیکا بر مقاومت برشی خاک رسی CL [۱۷۹]



شکل ۲–۱۹۲: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر مقاومت برشی خاک رسی CH [۱۷۹]

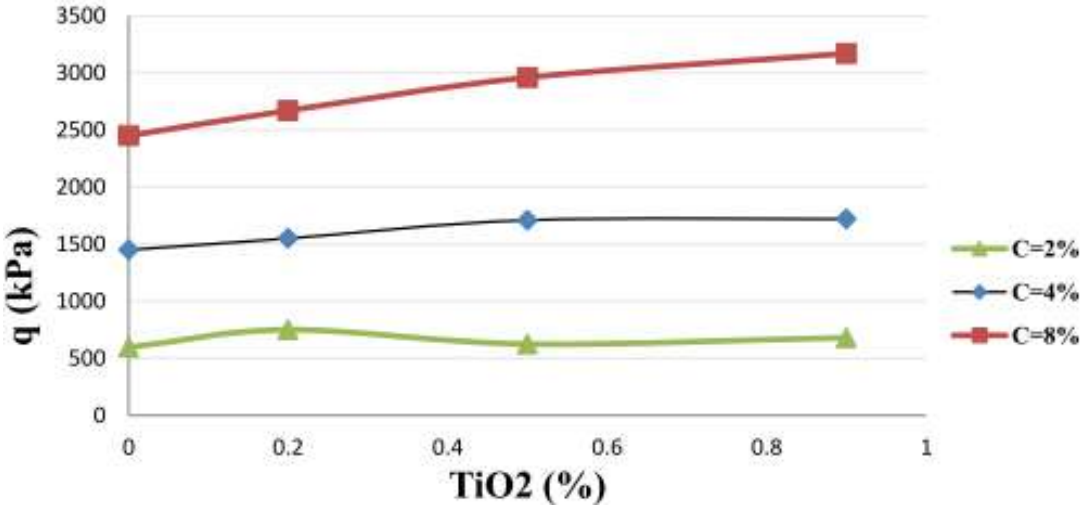


شکل ۲–۱۹۳: بررسی تاثیر میزان نانو زئولیت بر مقاومت برشی خاک رسی CL [۱۷۹]

جلیلیان و همکاران (سال۱۳۹۴) با بررسی مقالات مختلف بیان نمودند که کمتر از ۰/۵ درصد نانو رس مونت‌موریلونیت سبب افزایش مقاومت برشی خاک می‌گردد[۱۵۸].

اصغری (سال ۱۳۹۵) تأثیر نانو اکسید تیتانیوم بر رفتار مقاومتی رس تثبیت‌شده با سیمان را ارزیابی نمود. مقدار سیمان در این پژوهش برابر با ۲، ۴ و ۸ درصد انتخاب شد. همچنین از نانو اکسید تیتانیوم با نسبت‌های وزنی ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۹ استفاده گردید. آزمایش‌های صورت پذیرفته در این پژوهش شامل فشاری تک‌محوری، حدود اتربرگ،

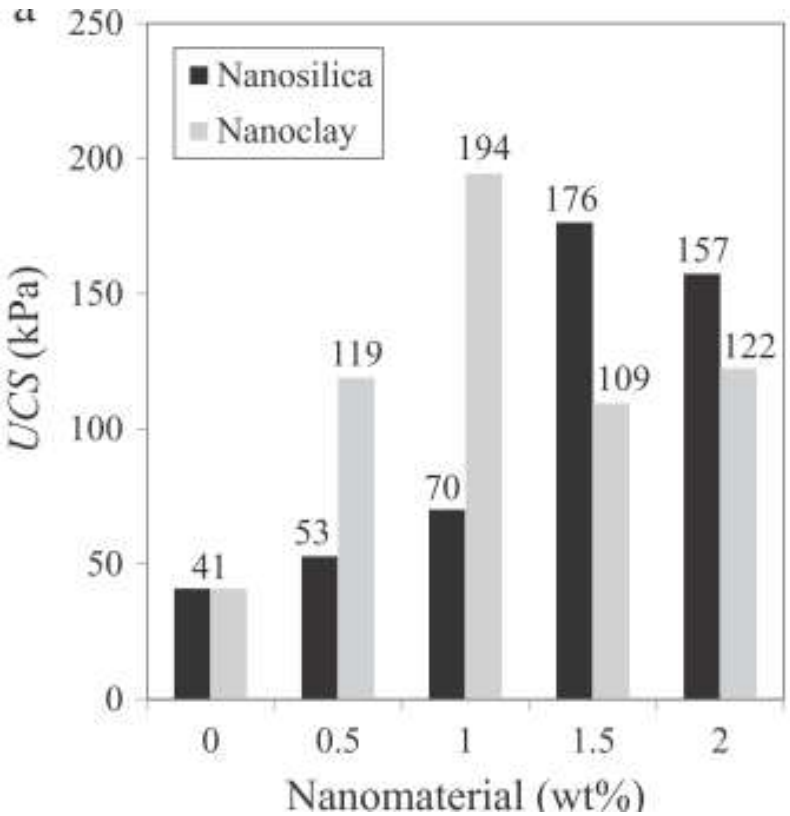
برش مستقیم و SEM بود. نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ نشان داد که افزودن نانو اکسید تیتانیوم موجب افزایش شاخص خمیری رس تثبیت‌شده با سیمان می‌شود. همچنین نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که نانو اکسید تیتانیوم تأثیر چندانی بر چسبندگی رس تثبیت‌شده با سیمان ندارد، اما موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب نانو اکسید تیتانیوم برای نمونه‌ها با مقادیر گوناگون سیمان و سن عمل‌آوری ۸ روز در شکل ۲-**۱۹۴** نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲-**۱۹۴** مشاهده می‌شود میزان تأثیر نانو اکسید تیتانیوم بر مقاومت فشاری تک‌محوری، وابسته به نسبت وزنی سیمان می‌باشد. به‌عنوان مثال مقدار بهینه نسبت وزنی نانو اکسید تیتانیوم برای نمونه حاوی ۲ درصد سیمان برابر با ۰/۵ درصد است. این در حالی است که برای نمونه‌ها حاوی ۴ و ۸ درصد سیمان، افزودن نانو اکسید تیتانیوم تا مقدار ۰/۹ درصد موجب افزایش مقاومت می‌گردد. از سوی دیگر نرخ افزایش مقاومت در اثر افزودن نانو اکسید تیتانیوم برای نمونه‌های حاوی ۸ درصد سیمان بیشتر می‌باشد[۲۰۴].



شکل ۲-۱۹۴: مقاومت فشاری برحسب نانو اکسید تیتانیوم برای نمونه‌های رسی تثبیت شده با مقادیر گوناگون سیمان و سن عمل‌آوری ۸ روز [۲۰۴]

سماکوش (سال ۱۳۹۶) تأثیر افزودن همزمان الیاف ضایعات فرش و نانو آهک (نانو کربنات کلسیم) را روی ویژگی-های رفتاری خاک رس ارزیابی نمود. بدین منظور آزمایش‌های حدود اتربرگ، فشاری تک‌محوری، سرعت امواج فراصوتی و سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی‌نشده بر روی رس با درصدهای متفاوت نانو آهک (۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ درصد) و الیاف ضایعات فرش انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن نانو آهک موجب کاهش نشانه خمیری می‌شود. از سوی دیگر بیشینه مقاومت فشاری تک‌محوری به ازای ۱/۲ درصد نانو آهک و در سن ۴۲ روز اتفاق افتاد که در حدود ۲ برابر مقاومت خاک بود. از سوی دیگر با افزایش نسبت وزنی نانو آهک تا ۱/۲ درصد و افزایش سن عمل‌آوری، سرعت امواج فراصوتی عبوری بهبود یافت. همچنین نتایج حاصله امکان برقراری رابطه میان سرعت امواج فراصوتی (به عنوان یک آزمون غیرتخریبی) و مقاومت فشاری تک‌محوری را نشان می‌داد. بیشینه افزایش در چسبندگی زهکشی‌نشده حاصل از آزمایش سه‌محوری به ازای افزودن۱/۲ درصد نانو آهک و ۰/۶ درصد الیاف ضایعات فرش، در حدود ۲ برابر بود[۲۰۵].

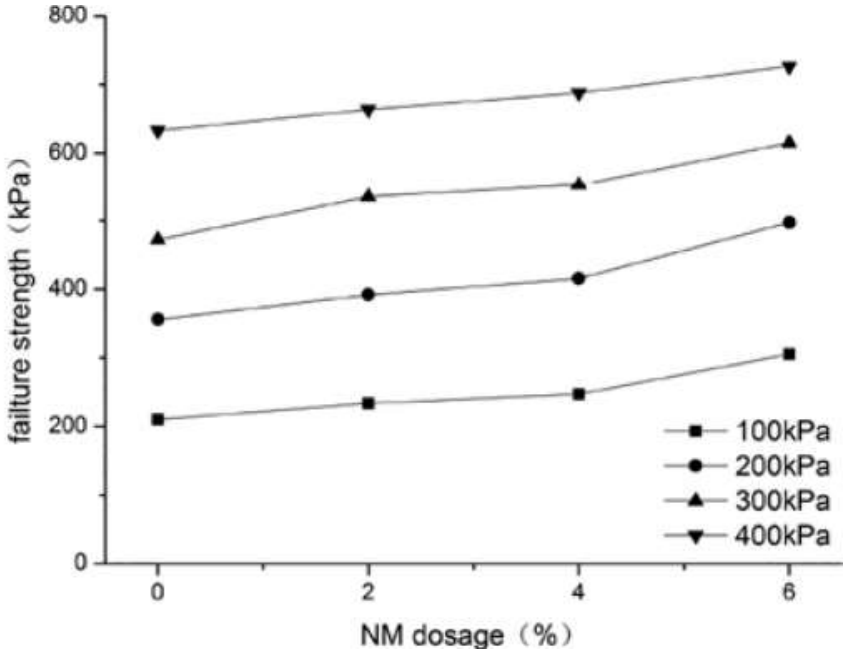
زمردیان و همکاران (سال ۲۰۱۷) با انجام پژوهشی نقش افزودن نانو رس و نانوسیلیس بر مقاومت رس ماسه‌دار آلوده به نفت سفید را بررسی نمودند. در این پژوهش به کمک آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری تأثیر نسبت وزنی نانو مواد (۰ تا ۳ درصد) و زمان عمل‌آوری (۲ تا ۲۸ روز) ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش نسبت وزنی نفت سفید تا ۴ درصد، تأثیر محسوسی بر مقاومت رس ماسه‌دار ندارد. این درحالی است که افزودن نفت سفید تا ۱۲ درصد موجب کاهش مقاومت در حدود ۶۱ درصد می‌شود. نسبت وزنی بهینه برای نانو رس و نانو سیلیس به‌منظور تثبیت رس آلوده با ۱۲ درصد نفت سفید به ترتیب برابر ۲ و ۲/۵ درصد می‌باشد. این در حالی است که برای خاک تمیز این مقادیر به ترتیب برابر با ۱ و ۱/۵ درصد است. تأثیر ترکیب نانو رس و نانو سیلیس در بهبود مقاومت خاک، بیشتر از اثر هرکدام از این مواد به‌تنهایی است. بیشینه مقاومت خاک در اثر تثبیت خاک با ۱ درصد نانو رس و ۱/۵ درصد نانوسیلیس حاصل شد. از سوی دیگر افزایش زمان عمل‌آوری موجب بهبود مقاومت خاک تثبیت‌شده گردید. شکل ۲–**۱۹۵** تأثیر نسبت وزنی نانو مواد گوناگون بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک را در زمان عمل‌آوری ۱ روز نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تأثیر نانو رس بر بهبود مقاومت خاک بیشتر از نانو سیلیس می‌باشد و در کارهای عملی توصیه می‌شود از این مواد استفاده گردد[۱۹۴].



شکل ۲–۱۹۵: تأثیر نسبت وزنی نانو مواد گوناگون بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک در زمان عمل‌آوری ۱ روزه [۱۹۴]

گوو و همکاران (سال ۲۰۱۸) با انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی شده نقش نسبت وزنی نانو منیزیم (۰، ۲، ۴ و ۶ درصد) و فشار دورگیر (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال) را بر رفتار برشی خاک سیلتی ارزیابی نمودند. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت تغییرات مقاومت بیشینه برحسب درصد نانو منیزیم برای فشارهای دورگیر متفاوت در شکل ۲–**۱۹۶** نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۲–**۱۹۶** مشاهده می‌شود

افزایش نسبت وزنی نانو منیزیم موجب افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها می‌گردد. میزان تأثیر نانو منیزیم در افزایش مقاومت برشی در فشارهای دورگیر پایین چشمگیرتر می‌باشد. به‌طور مثال افزودن ۶ درصد نانو منیزیم در فشار دورگیر ۱۰۰ کیلوپاسکال موجب افزایش مقاومت در حدود ۵۰ درصد می‌شود. این درحالی است که میزان افزایش برای فشار دورگیر ۴۰۰ کیلوپاسکال برابر با ۱۶ درصد می‌باشد. این نتیجه لزوم کارایی تثبیت توسط نانو مواد را در اعماق سطحی اثبات می‌نماید. بررسی نتایج حاصله پیرامون پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های متفاوت نشان داد که تثبیت به‌وسیله نانو منیزیم تأثیر چندانی بر زاویه اصطکاک داخلی ندارد. این در حالی است که چسبندگی به نحو قابل‌ملاحظه‌ای در اثر افزودن نانو منیزیم افزایش می‌یابد. به‌طور مثال افزودن ۶ درصد نانو منیزیم موجب افزایش چسبندگی به میزان ۲۳۷ درصد می‌شود. بررسی تصاویر SEM نشان داد که نانو منیزیم با سازوکار کاهش حفرات و همچنین ایجاد پیوندهای سیمانی بین ذرات خاک موجب بهبود رفتار خاک می‌شود. از سوی دیگر تصاویر SEM نشان داد که با کاهش ضخامت لایه دوگانه پیرامون ذرات توسط نانومنیزیم، چسبندگی افزایش یافت[۲۰۶].



شکل ۲-۱۹۶: تغییرات مقاومت بیشینه برحسب درصد نانو منیزیم برای فشارهای دورگیر متفاوت [۲۰۶]

۲-۶-۷-۲- خاک‌های ماسه‌ای

زمردیان و سلیمانی (سال ۱۳۹۶) به منظور بررسی تاثیر ماده افزودنی نانو سیلیس در کنترل فرسایش ماسه، از دستگاه تابع فرسایش (EFA) استفاده کرده‌اند. در این پژوهش نمونه‌های حاوی نانو سیلیس با مقادیر صفر، ۱، ۱/۵، ۲ و ۴ درصد وزنی خاک خشک مورد آزمایش قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل مشخص گردید ذرات نانو سیلیس در ترکیب با آب به شکل ذرات با مقاومت بالا درآمده و با جذب آب سطحی موجب ایجاد خاصیت سیمانی در خاک می‌شوند. همچنین سطح ویژه بالای این ذرات که ناشی از ریز بودن آن‌ها است باعث چسبندگی بیشتر ذرات خاک به یکدیگر، کاهش فضای خالی خاک، ایجاد ساختار متراکم‌تر و در نتیجه افزایش تنش برشی بحرانی و مقاومت خاک در برابر فرسایش می‌گردد؛ لذا افزودن این ماده به خاک در کاهش فرسایش خاک موثر

است. با افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانوسیلیس به خاک، فرسایش‌پذیری نسبت به نمونه شاهد، ۹۲ درصد کاهش یافته است. افزودن مقادیر بیش از حد ذرات نانو سیلیس به دلیل عدم امکان پخش همگن ذرات و ایجاد کلوخه‌های ناپایدار، تاثیر منفی روی خواص مکانیکی خاک دارد[۲۰۷].

چوب‌بستی و همکاران (سال ۲۰۱۵) تاثیر همزمان سیمان و نانو سیلیس روی خواص مهندسی (تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری) ماسه سواحل دریای خزر را مورد بررسی قرار دادند. در آزمایشات انجام شده ۳ درصد متفاوت سیمان (۵٪، ۹٪ و ۱۴٪ وزنی ماسه خشک) با چهار درصد مختلف نانو سلیس (۰، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) ترکیب شدند. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن نانو سیلیس و سیمان، خواص مهندسی خاک بهبود می‌یابند. افزایش مقدار نانو سیلیس تا ۱۰٪ مقدار سیمان، مقاومت تک‌محوری نمونه را به‌شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. در صورت افزایش بیش از این میزان نانو سیلیکا، مقاومت تک‌محوری خاک کاهش می‌یابد. طبق نتایج به‌دست آمده از آزمایش فشاری تک‌محوری، درصد بهینه نانوسیلیکا برای ماسه سیمانی، ۱۰٪ مقدار سیمان است[۱۸۴].

سلیمانی (سال ۱۳۹۶) به بررسی مخلوط ماسه بابلسر، سیمان، نانو سیلیس و الیاف با استفاده از آزمایش‌های تراکم استاندارد، تراکم نسبی و تک‌محوری پرداخت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، در آزمایش مقاومت تک‌محوری، افزایش زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها شد. اما نمونه‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه‌های فاقد نانوسیلیس به دلیل فعالیت و واکنش‌پذیری بالای نانوسیلیس، در زمان کمتری به مقاومت نهایی خود دست یافتند. همچنین مشاهدات نشان می‌دهند که با افزودن نانوسیلیس تا مقدار بهینه، ضریب تغییر شکل‌پذیری به دلیل کاهش تخلخل خمیر سیمان افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده از تصاویر پویش ذره‌بینی الکترونی و میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد که سطح نمونه‌های حاوی نانو ذرات، یکنواخت‌تر و متراکم‌تر از سطح نمونه‌های حاوی صفر درصد نانو است. افزودن نانوسیلیس باعث می‌شود که از خلل و فرج موجود در ژل C-S-H کاسته و خمیر سیمان چگال‌تر شود. این ساختار همگن موجب بهبود مقاومت نمونه‌های سیمانی حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه‌های فاقد نانوسیلیس می‌شود. افزودن ۱۲٪ نانوسیلیس به نمونه سیمانی، به دلیل واکنش پذیری بالا و عدم امکان توزیع مناسب نانو ذرات، موجب ایجاد کلوخه‌های ناپایدار می‌گردد[۲۰۸].

آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده روی مخلوط سیمان، نانو سیلیس و خاک ماسه‌ای بابلسر توسط شوش پاشا و همکاران با زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز نشان داد که افزودن نانو سیلیس به ترکیب ماسه سیمان باعث افزایش دو برابری مقاومت برشی نمونه‌ها می‌شود. همچنین ترکیب نانو سیلیس و سیمان باعث افزایش ۲/۵ برابری پارامتر چسبندگی در مقایسه با شرایط سیمان تنها می‌شود. همچنین افزایش نانو ذرات موجب نرم‌تر شدن رفتار نمونه‌ها می‌گردد[۱۸۵].

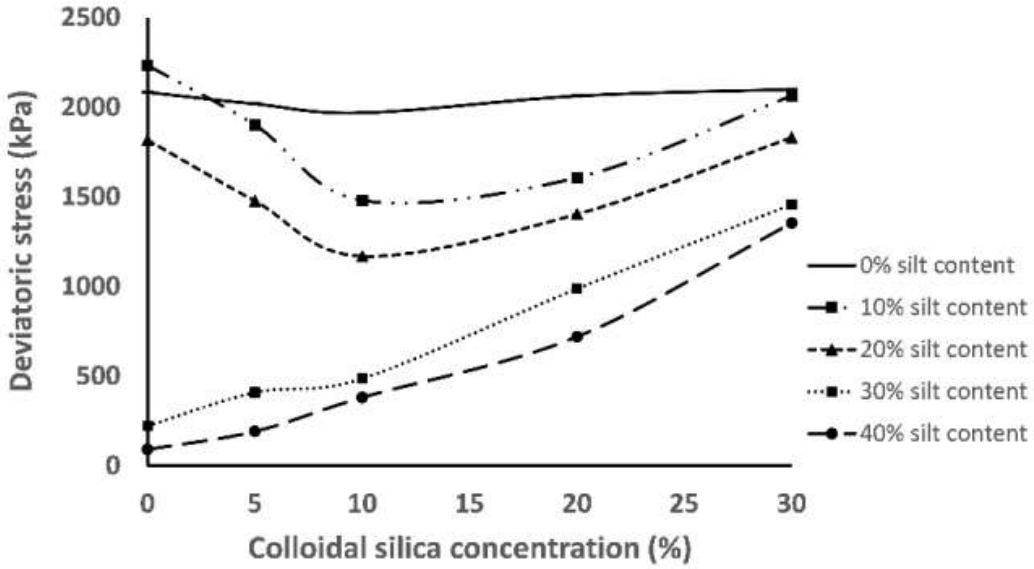
عربانی و خداپرست برای افزایش مقاومت فشاری ماسه از نانوذرات سیلیس استفاده نمودند؛ به نحوی که با افزودن ۷ درصد وزنی نانو سیلیس در آزمایشگاه، مقاومت فشاری خاک ۷ برابر شده است[۱۵۹].

منگ و همکاران (سال ۲۰۱۷) با انجام آزمایش‌های ریزساختاری و مقاومت فشاری تک‌محوری، تأثیر نانو کربنات کلسیم را بر رفتار خاک تثبیت‌شده با سیمان تحت شرایط محیطی دریا بررسی نمودند. نتایج آزمایش دوام مشخص ساخت که نرخ زوال پیوندهای خاک سیمانی در اثر افزودن نانو کربنات کلسیم کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نشان داد که افزودن نانو کربنات کلسیم موجب افزایش مقاومت کوتاه‌مدت می‌شود. این افزایش در سن ۳۰ و ۱۰ روز به ترتیب برابر ۱۴/۲ و ۲۲/۸ درصد می‌باشد. میزان بهبود رفتار در اثر افزودن کربنات کلسیم با میزان سیمان کمتر، بیشتر است. آزمایش‌های ریزساختاری، تصاویر میکروسکوپی و طیف‌سنجی نشان داد که تأثیر

ریز پرکنندگی و جمع‌کنندگی اتمی نانو کربنات کلسیم، دلیل اصلی بهبود رفتار مقاومتی و کاهش فرسایش نمونه در اثر شرایط محیطی دریایی می‌باشد. از سوی دیگر تبدیل کریستال‌های ناپایدار کلسیم هیدروکسید و تشکیل ژل پرمقاومت کلسیم-سیلیکات-هیدرات و قرارگیری محصولات مناسب واکنش‌های هیدراسیون در ناحیه انتقال، می‌تواند دلیل دیگر بهبود رفتار مقاومتی و کاهش زوال خاک سیمانی در شرایط نامناسب محیطی باشد[۲۰۹].

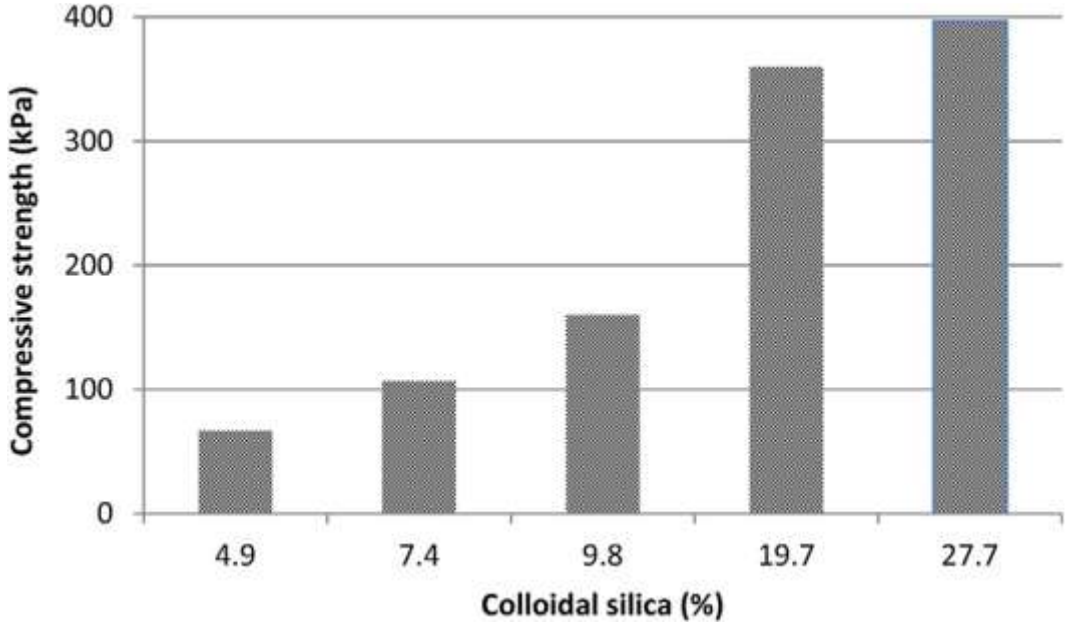
خالید و همکاران (سال ۲۰۱۵) با افزودن ۳٪ نانو رس به خاک ماسه‌ای رس‌دار با پلاستیسیته متوسط، مشاهده کردند که مقاومت فشاری خاک و زاویه اصطکاک داخلی موثر به ترتیب تا ۱۵٪ و ۱۰٪ افزایش یافتند[۲۱۰].

نورزاد و دلاور (سال۲۰۱۷) با انجام آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده تأثیر افزودن سیلیس کلوئیدی بر رفتار کوتاه‌مدت ماسه سیلت‌دار را بررسی نمودند. بر اساس نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوری زمان گیرش سیلیس کلوئیدی ۲ ساعت می‌باشد. همچنین افزایش مقاومت ماسه تثبیت‌شده با سیلیس کلوئیدی پس از ۳ روز متوقف شد. مقاومت برشی ماسه با درصدهای مختلف سیلت و غلظت‌های گوناگون سیلیس کلوئیدی تحت فشار دورگیر ۸۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۲-**۱۹۷** نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد برای ماسه تمیز افزودن سیلیس کلوئیدی تأثیری بر مقاومت برشی زهکشی نشده ندارد. این در حالی است که برای ماسه به همراه ۱۰ و ۲۰ درصد سیلت، افزایش غلظت سیلیس کلوئیدی ابتدا موجب کاهش مقاومت و سپس موجب افزایش آن می‌گردد. البته برای ماسه حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد سیلت، افزودن سیلیس کلوئیدی همواره موجب افزایش مقاومت برشی زهکشی‌نشده می‌شود. افزایش غلظت سیلیس کلوئیدی تا ۳۰ درصد، موجب افزایش چسبندگی زهکشی‌نشده ماسه سیلت‌دار (۰تا ۴۰ درصد سیلت) می‌شود. برای ماسه حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد سیلت، افزودن سیلیس کلوئیدی به دلیل پوشش دانه‌ها و کاهش زبری موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد. برای ماسه حاوی سیلت بیشتر از ۲۰ درصد، از آن‌جا که زاویه اصطکاک داخلی خاک پایین می‌باشد، افزایش غلظت سیلیس کلوئیدی به‌دلیل ایجاد پیوند میان ذرات ریزدانه و تشکیل ذراتی با اندازه دانه‌های بزرگ، زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد[۲۱۱].



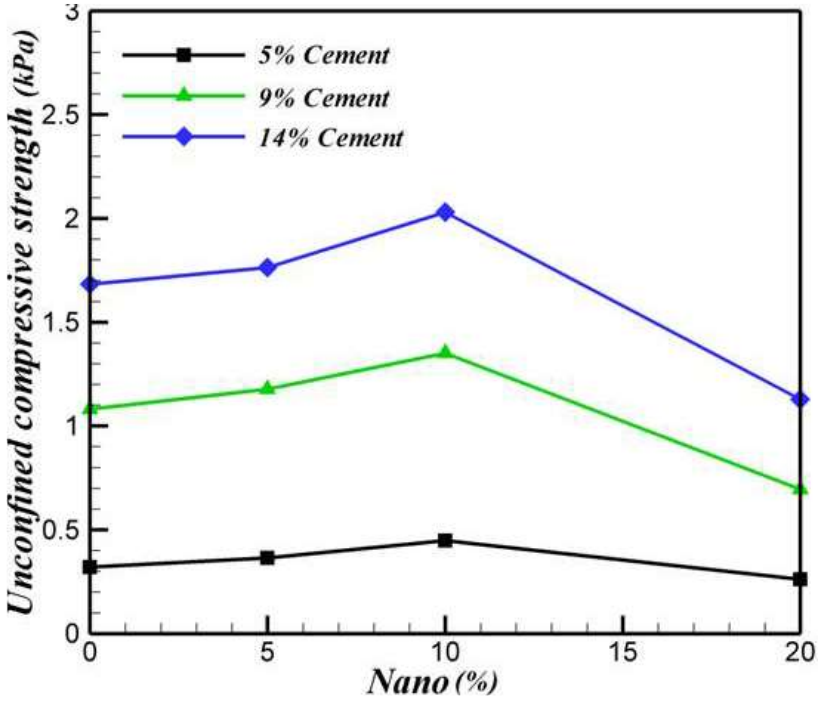
شکل ۲-۱۹۷: مقاومت برشی ماسه با درصدهای متفاوت سیلت و سیلیس کلوئیدی تحت فشار دورگیر ۸۰۰ کیلوپاسکال [۲۱۱]

پرسوف و همکاران (سال ۱۹۹۹) مطابق شکل ۲–**۱۹۸** نشان دادند که نانو سیلیس کلوئیدی سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه‌ای می‌گردد[۲۱۲].



شکل ۲–۱۹۸: تاثیر نانو سیلیس کلوئیدی بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه‌ای [۲۱۲]

چوب‌بستی و همکاران (سال ۲۰۱۸) به بررسی تاثیر همزمان سیمان و نانو سیلیس روی خواص ماسه سواحل دریای خزر پرداختند. این محققان با انجام آزمایشات تک‌محوری مطابق شکل ۲–**۱۹۹** بر نمونه‌های مختلف با درصدهای مختلف سیمان و نانو سیلیس دریافتند که با افزایش مقدار سیمان، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۱۰ درصد برای مقادیر بالای سیمان میزان مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش و سپس کاهش می‌یابد[۲۱۳].

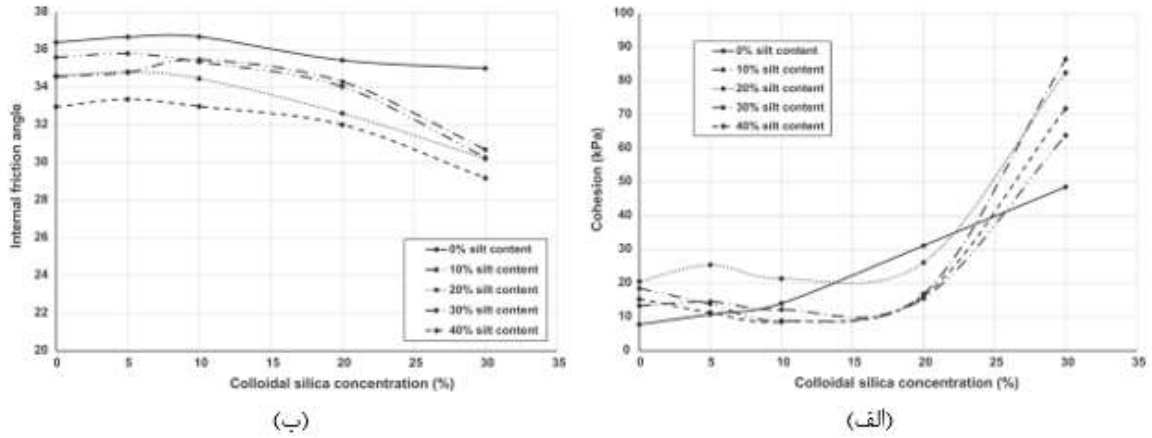


شکل ۲–۱۹۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر ماسه رسی بهسازی شده به همراه سیمان و نانو سیلیس[۲۱۳]

بازیار و همکاران (سال ۲۰۱۸) بررسی جامعی را به منظور ارزیابی ویژگی‌های ماسه رس‌دار تثبیت‌شده توسط نانو رس، به‌عنوان هسته سدهای خاکی انجام دادند. آزمایش انجام شده در این پژوهش شامل سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی شده و زهکشی‌نشده و همچنین سه‌محوری دینامیکی بود. خاک مورد استفاده از ترکیب ماسه و رس با نسبت‌های وزنی ۹۰ به ۱۰ و ۷۵ به ۲۵ بدست آمد. نتایج آزمایش‌های خودترمیمی انجام پذیرفته به کمک دستگاه برش مستقیم نشان داد که افزودن ۳ درصد نانو رس پس از ۱۰ روز موجب افزایش مقاومت برشی خاک گسیخته شده در حدود ۳۰ درصد شد. این درحالی است که خاک تثبیت‌نشده تنها افزایشی در حدود ۱۱ درصد در مقاومت داشت. از سوی دیگر نتایج آزمایش‌های سه‌محوری استاتیک در حالت زهکشی شده نشان داد که مقاومت برشی زهکشی شده در اثر افزودن ۳ درصد نانو رس افزایش یافته است. این درحالی است که برای حالت زهکشی نشده به علت رطوبت و جذب آب بالای نانو رس، مقاومت برشی کاهش یافت[۱۷۷].

دلاور و نورزاد (سال ۲۰۱۷) با انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده نقش سیلیس کلوئیدی را بر پارامترهای مقاومت برشی ماسه سیلت‌دار بررسی نمودند. به کمک ۴۲ آزمایش فشاری تک‌محوری و ۷۵ آزمایش سه‌محوری تأثیر نسبت وزنی سیلت (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد)، نسبت وزنی سیلیس کلوئیدی (۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) و فشار دورگیر (۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال) ارزیابی شد. بر اساس آزمایش‌های فشاری تک‌محوری، زمان عمل‌آوری مناسب (دستیابی به حدود ۸۵ درصد مقاومت نهایی) برای نمونه‌های تثبیت‌شده با سیلیس کلوئیدی برابر با ۳ روز بود. نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برحسب غلظت سیلیس کلوئیدی برای نمونه‌ها با مقادیر گوناگون در شکل **۲–۲۰۰** نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل **۲–۲۰۰** مشاهده می‌شود افزایش غلظت سیلیس کلوئیدی تا ۱۰ درصد موجب تأثیرات منفی بر پارامترهای مقاومت برشی می‌شود. به‌طورکلی برای تمامی درصدهای سیلت، افزایش غلظت محلول سیلیس کلوئیدی بیش از ۱۰ درصد

موجب افزایش چسبندگی می‌گردد. این در حالی است که زاویه اصطکاک داخلی به دلیل پوشش سطحی دانه‌ها توسط سیلیس کلوئیدی، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر بررسی رفتار حجمی در حین بارگذاری برشی مشخص می‌سازد که فشارهای دورگیر پایین (۱۰۰ کیلوپاسکال)، افزایش در غلظت سیلیس کلوئیدی موجب افزایش در میزان اتساع و افزایش مقاومت انحرافی می‌گردد. این در حالی است که افزایش غلظت کلوئیدی در فشارهای دورگیر بالا (۵۰۰ کیلوپاسکال) موجب کاهش اتساع و مقاومت برشی می‌شود[۲۱۴].



شکل ۲–۲۰۰: تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برحسب غلظت سیلیس کلوئیدی [۲۱۵]

۲-۷-۷ - بهبود مقاومت روانگرایی خاک با استفاده از نانو مواد

یکی از روش‌های مقابله با روانگرایی خاک ماسه‌ای زیر سازه‌های موجود، تزریق محلول سلیس کلوئیدی است. این روش با استفاده از آزمایش سیلندر توخالی مورد بررسی قرار گرفت. خاک مورد استفاده در پژوهش کوداکا (سال ۲۰۰۵)، ماسه بد دانه‌بندی شده با اندازه متوسط ذرات $D_{50}=0.2mm$ و تراکم نسبی ۴۰٪ بود. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت برشی دوره‌ای خاک به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد[۲۱۶].

آزمایش صحرایی تزریق سیلیس کلوئیدی به‌منظور بررسی نقش تزریق بر مقاومت روانگرایی و نشست حاصل از آن به داخل لایه ماسه‌ی روانگرا به ضخامت ۲ متر، توسط گالاقر (سال ۲۰۰۷) انجام شد. خاک مورد بررسی شامل ماسه و ماسه سیلتی با تراکم نسبی ۴۰ تا ۴۵ درصد بود که در فاصله ۵ تا ۱۵ متری شامل خاکی با پتانسیل روانگرایی بالا بود. تثبیت خاک به وسیله تزریق از دو دیواره با فاصله ۹ متر از محل اندازه‌گیری، صورت پذیرفته است. محدوده هدف برای بهسازی به ضخامت ۲ متر و در عمق ۶/۵ تا ۸/۵ متر قرار داشت. به‌منظور ایجاد بارگذاری لرزه‌ای از انفجار استفاده گردید. نتایج نشان داد که با وجود تثبیت خاک، میزان نسبت اضافه فشار حفره‌ای برابر ۱ شد. در هر حال میزان نشست در محدود تثبیت‌شده کمتر از دیگر مناطق بوده به‌طوری که در منطقه تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده مقدار نشست به ترتیب ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. میزان بالای نشست در محدوده روانگرا، در ارتباط با لایه‌ای در عمق ۸ متری از محدوده تزریق بود[۲۱۷].

گالاقر و همکاران (سال ۲۰۰۷) آزمایش‌های سانتریفیوژ روی ماسه با تراکم ۴۵ درصد و تثبیت‌شده به وسیله سیلیس کلوئیدی انجام دادند. مدل آزمایشگاهی با شتاب $۵۰g$ شبیه‌ساز ماسه‌ای به ضخامت ۱۰ متر و شتابی با ۲۰ دوره معادل بارگذاری و دامنه $۰/۲g$ و $۰/۲۵g$ بود. برای ماسه تثبیت‌شده، روانگرایی تحت بارگذاری‌های انجام

شده مشاهده نشده است. میزان نشست در سطح برای شتاب ورودی با دامنه $0/2g$ و $0/25g$ به ترتیب برابر ۱ و ۲ سانتی‌متر بود در حالی‌که میزان نشست برای نمونه‌های تثبیت‌شده به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. همچنین برای نمونه‌های تثبیت‌شده در عمق‌های ۲ و ۴ متری، بزرگنمایی در شتاب رخ داده است. این بزرگنمایی می‌تواند ناشی از کاهش میزان جابه‌جایی ایجاد شده در ذرات خاک به علت تثبیت باشد[۲۱۸].

برای بررسی تاثیر دوغاب سیلیس کلوئیدی بر مقاومت روانگرایی ماسه سست اشباع، آزمایش‌های سه‌محوری توسط گالاقر و میتشل انجام شد. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل نسبت وزنی سیلیس، زمان ژل‌شدگی و عمل‌آوری و فشار دورگیر بود. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که به طور کلی نمونه‌های دارای درصد بیشتر سیلیس کلوئیدی کرنش کمتری را در حین بارگذاری دوره‌ای از خود نشان داده و واژگون نشدند. محققان بر اساس نتایج به‌دست آمده پیشنهاد کردند که برای عملکرد مناسب ماسه تثبیت شده با سیلیس کلوئیدی، سن عمل‌آوری حداقل ۱۰ برابر زمان ژل‌شدگی باید باشد. همچنین به‌منظور کاهش بیشتر کرنش‌ها از محلول با غلظت ۱۰ درصد می‌توان استفاده کرد اما باید توجه داشت که محلول‌های با غلظت بیش از ۱۰ درصد دارای مشکلاتی در فرآیند ساخت بوده و استفاده از آن‌ها از دیدگاه اقتصادی به صرفه نمی‌باشد[۲۱۹].

لیاو و همکاران (سال ۲۰۰۳) مقاومت روانگرایی ماسه تثبیت شده با سیلیس کلوئیدی را ارزیابی نمودند و برای این منظور آزمایش‌های سه‌محوری دوره‌ای را روی نمونه‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده انجام دادند. غلظت محلول برابر با ۵۰ درصد بود. نتایج نشان داد که افزودن سیلیس کلوئیدی، موجب افزایش مقاومت روانگرایی به میزان ۴ تا ۶ برابر مقاومت روانگرایی ماسه تثبیت نشده می‌شود. همچنین تعداد دوره‌های مسبب روانگرایی برای نمونه تثبیت شده در مقایسه با نمونه تثبیت‌نشده بیشتر است. نمونه تثبیت‌نشده پیش از وقوع روانگرایی اولیه دارای نرخ بالای رشد کرنش محوری می‌باشد اما در نمونه تثبیت‌شده کرنش محوری به آرامی افزایش می‌یابد[۲۲۰].

مرادی و سیدی (سال ۲۰۱۴) به بررسی تاثیر نانوذرات سیلیس کلوئیدی بر مخلوط ماسه سست روانگرای فیروزکوه با مقادیر مختلف لای فیروزکوه از ۰ تا ۳۰٪ پرداختند. نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز عمل‌آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، سیلیس کلوئیدی خطر روانگرایی این خاک را به میزان کافی کاهش می‌دهد[۲۲۱].

نانو رس بنتونیت، درصد خلوص بالاتری نسبت به بنتونیت طبیعی دارد و دارای ویژگی‌های تورمی و جاذب رطوبتی بهتری نسبت به بنتونیت معمولی است و باعث افزایش مقاومت روانگرایی خاک می‌شود[۲۲۲].

کنلی و همکاران (سال ۲۰۱۰) تعدادی آزمایش سانتریفیوژ را روی ماسه تثبیت‌شده با سیلیس کلوئیدی (با نسبت‌های وزنی ۰، ۴٪، ۷٪ و ۹٪) انجام دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزایش نسبت وزنی سیلیس کلوئیدی موجب افزایش ضریب برشی می‌گردد. همچنین برای ماسه متراکم، افزودن سیلیس کلوئیدی باعث افزایش نسبت میرایی می‌شود. نشست سطح زمین و جابه‌جایی جانبی نمونه‌های تثبیت‌شده کمتر از ماسه تثبیت‌نشده بود. در این پژوهش میزان شتاب در اعماق مختلف نیز اندازه‌گیری شد. محاسبه ضریب بزرگنمایی شتاب نشان داد که ضریب بزرگنمایی ماسه با افزایش نسبت وزنی سیلیس کلوئیدی بیشتر می‌گردد. دلیل این موضوع آن است که در اثر تزریق، ضریب برشی افزایش می‌یابد و در نتیجه جابه‌جایی خاک کمتر می‌شود بنابراین حرکت ورودی تقویت می‌شود[۲۲۳].

۸-۷-۲- خلاصه نتایج پژوهش‌های انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار

بر اساس بررسی‌های انجام شده که غالب آن‌ها تحقیقات آزمایشگاهی بودند مشخص گردید که انواع مواد نانو ساختار که جهت بهسازی خاک، مورد استفاده قرار می‌گیرند به طور معمول شامل نانو سیلیس، نانو رس، نانو ذرات اکسید آهن و آلومینیم، زئولیت و مواد نانو ساختار پلیمری هستند. سه نوع خاک رس، لای و ماسه با درصدهای مختلف مواد نانو ساختار ترکیب شده و تحت آزمایش‌های ژئوتکنیکی حدود اتربرگ، تراکم، تورم، واگرایی، CBR، تک‌محوری، برش و سه محوری استاتیک و دوره‌ای قرار گرفته‌اند. نتایج تمامی آزمایش‌ها بیانگر بهبود کیفیت خاک و پارامترهای مقاومتی آن نسبت به حالت طبیعی بوده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، افزودن تا ۵ درصد نانو رس و نانو سیلیس به خاک رس سبب بهبود خواص خمیری خاک، کاهش نفوذپذیری، کاهش پتانسیل تورم، واگرایی، کرنش انبساطی و انقباضی و افزایش پارامترهای مقاومتی شده و به دلیل حذف پتانسیل رمبندگی خاک رس، تا ۲۰ درصد نانو رس به خاک افزوده شده است. همچنین مقدار بهینه نانو آلومینا و نانو منیزیم اکساید جهت بهسازی خاک رس تا ۲ درصد گزارش شده است. میزان نانو لوله‌های کربنی و نانو کامپوزیت‌ها جهت بهسازی خاک رس نیز کمتر از ۱۰ درصد تعیین شده است.

جهت بهسازی خاک‌های آلی و بادرفت‌ها، تا مقدار بهینه ۳ درصد نانو رس و کمتر از یک درصد نانو لوله‌های کربنی قابل استفاده است. جهت بهسازی ماسه‌های ریزدانه، تا مقدار بهینه ۳ درصد نانو رس و نانو سیلیس استفاده شده که این مقدار افزودنی سبب کاهش نفوذپذیری و افزایش پارامترهای مقاومت فشاری و برشی ماسه‌ها شده است. همچنین استفاده از نانو سیلیس تا ۱۰ درصد در خاک‌های ماسه‌ای سبب افزایش دانسیته، کاهش فرسایش‌پذیری خاک، کاهش نشست خاک، رشد پارامترهای دینامیکی خاک و کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای می‌گردد.

لازم به ذکر است که میزان بهینه دقیق افزودنی‌های نانو جهت بهسازی انواع خاک‌ها، بسته به پارامترهای کیفی و نوع دانه‌بندی خاک‌ها متغیر است و به کمک آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی ساده ژئوتکنیکی به راحتی قابل تعیین می‌باشد.

در جدول ۲-**۳۸** نتایج کلی تحقیقات انجام شده روی تاثیر مواد نانو ساختار بر خواص کیفی و مقاومتی انواع خاک‌ها ارائه شده است.

جدول ۲-۳۸: نتایج کلی تحقیقات انجام شده روی تاثیر مواد نانو ساختار بر خواص کیفی و مقاومتی انواع خاک‌ها

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
پلاستیسته خاک (دامنه خمیری)	ماسه (کاهش)	نانو رس	۱	ماسه رس دار	عربانی، خداپرست، ثانی	[۱۵۹]
			۱	ماسه رس دار	صادقیان و لوئیان	[۱۶۰]
		نانو رس	۳	-	محمدی و نیازیان	[۱۶۳]

	رس با خمیری زیاد (کاهش)		۱		اوزین و آرسلونت	[224]
		نانو سیلیس+آه ک	۳	رس مارنی	مرادی و روحی پور	[167]
		نانو آلومینا	۲	رس کائولینیت	ناوال و همکاران	[۱۷۰]
			۲		تیپودا و دی	[۲۲۵]
		نانو منیزیم	۲		ناوال و همکاران	[۱۷۰]
			۲		تیپودا و دی	[۲۲۵]
		نانو لوله کربن	۰/۲	با بنتونیت ٪۱۰	ریحان طاها و همکاران	[۱۷۲]
	رس با خمیری کم (افزایش)	نانو سیلیس	۲		برخورداریان و کدیوردر	[۱۶۶]
			۱		بهمنی و همکاران	[۱۶۸]
			۲		جمشیدی و مخبری	[۱۶۹]
		نانو آلومینا	۱	رس کائولینیت	مجید و طاها	[۲۲۶]
	لای فاقد خمیری (افزایش)	نانو رس	۲	رس لای دار	طبرسا	[۱۶۱]
			۰/۵		حداد و چنگیزی	[۲۰۲]
			۳		هونگ ونگ	[۱۷۵]
			۲	لای ML , MH	بهاری	[۱۶۵]
نفوذپذیری (کاهش)	رس	نانو رس	۸	رس کائولینیت	فخری و همکاران	[۱۷۳]
			۴	رس متراکم	کنعانی‌زاده و همکاران	[۱۷۴]

جدول ۲-۳۸: ادامه

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
نفوذپذیری (کاهش)	رس	نانو رس	۴		چوب بستی و وفایی	[۲۲۷]
			۸		کوریرا	[۲۲۸]
		نانو آلومینا	۱	-	هونگ و همکاران	[۱۷۵]
	ماسه	نانو رس	۰/۲۵	ماسه لای دار	جانعلی زاده و همکاران	[۱۷۶]
			۳	ماسه رس دار	بازیار و همکاران	[۱۷۷]
تورم خاک ریزدانه	رس	نانو سیلیس	۵	به همراه ۴٪ آهک	جهانگیری و باوندپوری در سال	[۱۷۸]

(کاهش)			۱		هارش و وینوت کومار	[۱۷۹]
			۲		رجبی وعبدالهی	[۱۸۰]
			۰/۵	نانو رس	شریف نسب و عباسی نادر	[۲۲۹]
			۲	نانو زئولیت	هارش و وینوت کومار	[۱۷۹]
			۲	نانو آلومینا	ناوال و همکاران	[۱۷۰]
			۱		هونگ و همکاران	[۱۷۵]
			۲	نانو منیزیم	ناوال و همکاران	[۱۷۰]
			۲	نانو اکسید آهن	رجبی وعبدالهی	[۱۸۰]
			۰/۲	نانو لوله کربنی	ریحان طاها و همکاران	[۱۷۲]
وزن مخصوص حداکثر	خاک رس افزایش		۰/۲	نانو رس	زاید حمید و محدریحان طاها	[۱۸۱]
		به همراه ۱ درصد نانو سیمان	۱		اوزین و آرسلونت	[۲۲۴]
			۲	نانو آلومینا	ناوال و همکاران	[۱۷۰]
			2		تیپودا و دی	[۲۲۵]
			۲	نانو منیزیم اکسید	تیپودا و دی	[۲۲۵]

جدول ۲-۳۸: ادامه

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
وزن مخصوص حداکثر	خاک رس افزایش	نانو کربن	۰/۰۷		ریحان طاها و همکاران در	[۱۷۲]
			۰/۷۵		جمشیدی و مخبری	[۱۹۳]
	خاک آلی کاهش	نانو رس	۲	OL	زاید حمید و محدریحان طاها	[۱۸۱]
			۳	لای	طبرسا	[۱۶۱]
		نانو آلومینا	۲		ناوال و همکاران	[۱۷۰]
		نانو کربن	۰/۰۷		ریحان طاها و همکاران در	[۱۷۲]

رطوبت بهینه	خاک رس کاهش	نانو رس	۰/۲	CH خاک رس	زاید حمید و محدریحان طاها	[۱۸۱]
			۰/۲		حداد و چنگیزی	[۲۰۲]
		نانو آلومینا	۲		ناوال و همکاران	[۱۷۰]
			۱<		تیپودا و دی	[۲۲۵]
		نانو اکسید منیزیم	>۰/۵		تیپودا و دی	[۲۲۵]
		نانو کربن	۰/۰۷		ریحان طاها و همکاران	[۱۷۲]
	خاک آلی افزایش	نانو رس	۲	OL	زاید حمید و محدریحان طاها	[۱۸۱]
			۳	لای	طبرسا	[۱۶۱]
			۰/۵		پدیدار و همکاران	[۲۳۰]
		نانو آلومینا	۲		ناوال و همکاران	[۱۷۰]
		نانو کربن	۰/۰۷		ریحان طاها و همکاران در	[۱۷۲]
واگرایی (کاهش)	رس	نانو رس	٪۰,۵		شریف نسب و عباسی	[۲۲۹]
			٪۰,۵		بهاری و شاهنظری	[231]
			۱		عباسی، فرجاد	[۱۸۶]
			۲		طبرسا	[۱۶۱]

جدول ۲-۳۸: ادامه

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
واگرایی (کاهش)	رس	نانو سیلیس	۳		زمردیان و مومن	[۱۸۷]
رمبندگی (کاهش)	رس	نانو رس	۳	رس لای دار	طبرسا	[۱۶۱]
			۲۰		اوهادی و بخشعلی	[۱۸۹]
			۲۰		فاضلی وهمکاران	[۱۹۰]
کرنش انبساطی و انقباضی (افزایش)	رس	نانو رس	٪۰,۵		پدیدار و همکاران	[۲۳۰]
		نانو آلومینا	٪۰,۱		پدیدار و همکاران	[۲۳۰]
		نانو لوله‌های کربنی	٪۲		جمشیدی و مخبری	[۱۹۳]
مقاومت فشاری	رس	نانو سیلیس	۰/۴	سیمان	بهمنی و همکاران	[۱۹۷]
			۳		جمشیدی و مخبری	[۱۹۳]

تک‌محوری			۲		رجبی و عبدالهی	[۱۸۰]
			۱		هارش و وینوتکومار	[۱۷۹]
			۱/۵	۱ درصد نانو رس	زمردیان و همکاران	[۱۹۴]
			۳	۳درصد آهک	مرادی و روحی پور	[۱۶۷]
			۵	۴ درصد آهک	جهانگیری و باوندپوری	[۱۷۸]
			۳	۵ درصد آهک	بازیار وهمکاران	[۱۶۲]
			۳	۳درصد آهک	*قضاوی* و بوالحسنی	[۱۹۵]
			۳	۵ درصد آهک	گلسفیدی و ممغانیان	[۱۹۶]
			۱	۰/۵ درصد نانو فیبر پلی استر	حداد و چنگیزی	[۲۰۲]
			۰/۷		نادر عباس و فرجاد	[۱۸۶]
			۱/۵		آرش فرجاد	[۱۸۶]
			۰/۵	به همراه ۱ درصد الیاف پلی استر	هوچلا	[۲۳۲]
		نانو رس	۱/۵		محمدی و نیازیان	[۱۶۳]

جدول ۲-۳۸: ادامه

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
مقاومت فشاری تک‌محوری	رس	نانو رس	۱	رس ضعیف CL-ML	طبرسا	[۱۶۱]
			۱	به همراه ۱ درصد الیاف شیشه	چنگیزی و حداد	[۲۰۰]
			۴		کنعانی زاده و همکاران	[۱۷۴]
			۱	به همراه ۱ درصد نانو سیمان	اوزین و آرسلانت	[۲۲۴]
			۴		چوبستی و وفایی	[۲۲۷]
			۵		محمدی و چوبستی	[۱۹۸]
		نانو آلومینا	۱		لین لو و همکاران	[۱۸۳]
		نانو اکسید آهن	۲		رجبی و عبدالهی	[۱۸۰]

		نانو اکسید تیتانیوم	۰/۵ تا ۰/۹	سیمان ۲ تا ۸ درصد	اصغری	[۲۰۴]
		نانو آهک	۱/۲	۰/۶ ضایعات فرش	سماکوش	[۲۰۵]
		نانو زئولیت	۲		هارش و وینوتکومار در سال	[۱۷۹]
		نانو لوله کربنی	/۰۰۱ ۰		حداد و چنگیزی	[۲۰۲]
	خاک لای	نانو رس	۱- ۱/۵	خاک ML , MH	نیکوکار و همکاران	[۲۰۱]
			۲		طاها	[۲۳۳]
			۰/۲	رس ضعیف ولای	زاید حمید و محدریحان طاها	[۱۸۱]
		نانو منیزیم	۶-۱۶		گو و همکاران	[۲۰۶]

جدول ۲-۳۸: ادامه

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
مقاومت فشاری تک‌محوری	ماسه	نانو سیلیس	۱/۵		زمردیان و سلیمانی	[۲۰۷]
			۱۰		چوب‌بستی و همکاران	[۱۸۴]
			۱۴		سلیمانی	[۲۰۸]
			۷	ماسه رس دار	عربانی و خداپرست	[۱۵۹]
			۲۷	کلوئیدی	پرسوف و همکاران	[۲۱۲]
			۳۰	ماسه سیلتی	نورزاد و دلاور	[۲۱۱]
			۱۰	۱۴ درصد سیمان	چوب‌بستی و همکاران	[۲۲۷]
		نانو رس	۳	ماسه رس دار	سردیوی و سوبرامانی	[۲۳۴]
			۲	ماسه رس دار	عربانی و خداپرست	[۱۵۹]
			۳	ماسه رس دار	بازیار و همکاران	[۱۷۷]
پارامترهای مقاومت برشی (افزایش)	خاک رس	نانو سیلیس	۱	۰/۵ درصد نانو فیبر پلی استر	حداد و چنگیزی	[۲۰۲]
			۰/۷		ژنگ	[۲۳۵]
			۰/۷	الیاف پلی استر ۰/۵	هوچلا	[۲۳۲]

		نانو پلیمر	CC۴		رفیروزی و همکاران	[۲۰۳]
		نانو کامپوزیت پلیمری	۱۰		علیان و سیاوش	[۲۰۳]
	لای یا بادرفت	نانو رس	۲		هونگ و همکاران	[۱۷۵]
	ماسه	نانو سیلیس	۱/۵		سلیمانی	[۲۰۸]
			۳		شوش پاشا و همکاران	[۱۸۵]

جدول ۲-۳۸: ادامه

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
چسبندگی (افزایش)	رس	نانو سیلیس	۱	با۳ درصد الیاف پلی استر	مرادی و سیدی	[۲۳۶]
	ماسه	نانو سیلیس	٪۱,۵		سلیمانی	[۲۰۸]
چسبندگی (افزایش)	لای یا بادرفت	نانو رس	٪۲		جمشیدی و مخبری	[۱۹۳]
زاویه اصطکاک داخلی (افزایش)	رس	نانو سیلیس	۱	با۳ درصد الیاف پلی استر	مرادی و سیدی	[۲۳۶]
	ماسه	نانو رس	٪۳	ماسه رس‌دار	سردیوی و سوبرامانی	[۲۳۴]
نسبت تخلخل (کاهش)	رس	SiO_2	٪۰,۷	رس با حد روانی کم	ژنگ	[۲۳۵]
	ماسه	SiO_2	٪۱,۵		زمردیان و سلیمانی	[۲۰۷]
دانسیته (افزایش)	ماسه	سیمان، نانو سیلیس و الیاف	٪۸		زمردیان و سلیمانی	[۲۰۷]

فرسایش پذیری (کاهش)	ماسه	SiO_2	٪۱,۵		سلیمانی	[۲۰۸]
میزان نشست (کاهش)	ماسه	سیلیس کلوئیدی	۹		طاها وطاها	[۱۸۲]
			۵		طاها و ییینگ	[۲۳۳]
کرنش در حین بارگذاری دوره‌ای (کاهش)	ماسه	سیلیس کلوئیدی	٪۲۰		بلو	[۲۳۷]

جدول ۲-۳۸: ادامه

خصوصیات	نوع خاک	نوع نانو ماده	درصد بهینه	توضیحات	نویسندگان	مراجع
سرعت جریان آب در خاک (کاهش)	ماسه	سیلیس کلوئیدی	٪۱		علی و یوسف	[۲۳۸]
میرایی	ماسه	سیلیس کلوئیدی	۹		طاها و طاها	[۱۸۲]
		نانو سیلیس	۱۰	به همراه سیمان	وفایی وچوببستی	[۲۱۳]
مدول برشی	ماسه	سیلیس کلوئیدی	۹		طاها و طاها	[۱۸۲]
		نانو سیلیس	۱۰	به همراه سیمان	وفایی وچوببستی	[۲۱۳]
ضریب بزرگنمایی (افزایش)	ماسه	سیلیس کلوئیدی	٪۹		طاها و طاها	[۱۸۲]
		نانو سیلیس	۱۰	به همراه سیمان	وفایی وچوببستی	[۲۱۳]
پتانسیل جذب انرژی (افزایش)	ماسه	سیمان، نانو سیلیس و الیاف	٪۸		زمردیان و سلیمانی	[۲۰۷]

		نانو سیلیس	۱۰	به همراه سیمان	وفایی وچوبستی	[۲۱۳]
سرعت امواج فراصوتی (افزایش)	ماسه	سیمان، نانو سیلیس و الیاف	٪۸		زمردیان و سلیمانی	[۲۰۷]
مقاومت روانگرایی (افزایش)	ماسه	سیلیس کلوئیدی	۸		محمدی و نیازیان	[۱۶۳]
			۴		موسوی و بهرامی	[۲۳۹]
			۵		فخری و همکاران	[۱۷۳]

۸-۲- منابع

[۱] ماهنامه فناوری نانو، سال چهاردهم، شماره ۷، صفحه ۳۵. مهر ۹۴.
[2] (ASTM), A.S.f.T.a.M., ASTM E2535 - 07 (Standard Guide for Handling Unbound Engineered Nanoscale Particles in Occupational Settings). 2013.
[3] Materials, A.S.f.T.A., ASTM E3001 (Standard Practice for Workforce Education in Nanotechnology Characterization). 2015.
[4] International Organization for Standardization,ISO/TS 27687:2008 (Nanotechnologies Terminology and definitions for nano-objects-Nanoparticle,nanofibre and nanoplate). 2008.
[5] International Organization for Standardization, ISO 10808 (Nanotechnologies Characterization of nanoparticles in inhalation exposure chambers for inhalation toxicity testing). 2010.
[6] Qing, Y., et al., Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. Construction and building materials, 2007. 21(3): p. 539-545.
[7] Lindgreen, H., et al., Microstructure engineering of Portland cement pastes and mortars through addition of ultrafine layer silicates. Cement and Concrete Composites, 2008. 30(8): p. 686-699.
[8] Armentrout, D. and J. Belkowitz, AN INVESTIGATION OF NANO SILICA (SiO2) IN THE CEMENT HYDRATION PROCESS.
[9] Norhasri, M.M., M. Hamidah, and A.M. Fadzil, Applications of using nano material in concrete :A review. Construction and Building Materials, 2017. 133: p. 91-97.
[10] Said, A.M., et al., Properties of concrete incorporating nano-silica. Construction and Building Materials, 2012. 36: p. 838-844.
[11] Bahadori, H. and P. Hosseini, Reduction of cement consumption by the aid of silica nano-particles (investigation on concrete properties). Journal of Civil Engineering and Management, 2012. 18(3): p. 416-425.
[12] Berra, M., et al., Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. Construction and Building Materials, 2012. 35: p. 666-675.

[13] Qing, Y., et al., A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO 2 and silica fume. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2006. 21 *:(۳)* p. 153-157.
[14] Kong, D., et al., Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. Construction and Building Materials, 2013. 43: p. 557-562.
[15] Senff, L., et al., Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. Construction and Building Materials, 2009. 23(7): p. 2487-2491.
[16] Zhang, M.-H., J. Islam, and S. Peethamparan, Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. Cement and Concrete Composites, 2012. 34(5): p. 650-662.
[17] Di Maida, P., et al., Effects of nano-silica treatment on the flexural post cracking behaviour of polypropylene macro-synthetic fibre reinforced concrete. Mechanics Research Communications, 2018. 88 .p. 12-18.
[18] Wang, X.F., et al., Effect of nano-SiO 2 on strength, shrinkage and cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2018. 175: p. 115-125.
[19] Bernal, J., et al., Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures. Construction and Building Materials, 2018. 160: p. 196-210.
[20] Wu, Z., C. Shi, and K.H. Khayat, Multi-scale investigation of microstructure, fiber pullout behavior, and mechanical properties of ultra-high performance concrete with nano-CaCO3 particles. Cement and Concrete Composites, 2018. 86: p. 255-265.
[21] Shahrajabian, F. and K. Behfarnia, The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete. Construction and Building Materials, 2018. 176: p. 172-178.
[22] Nazari, A., et al., Mechanical properties of cement mortar with Al2O3 nanoparticles. Vol. 6. 2010.
[23] Sato, T. and J.J. Beaudoin. The Effect of nano-sized CaCO3 addition on the hydration of OPC containing high volumes of ground granulated blast-furnace slag. in 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. 2006. RILEM Publications SARL.
[24] Brooks, J. and M.M. Johari, Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. Cement and Concrete Composites, 2001. 23(6): p. 495-502.
[25] Li, Z. and Z. Ding, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. Cement and concrete research, 2003. 3 *:(٤)*۳p. 579-584.
[26] Badogiannis, E., et al., Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. Cement and Concrete Composites, 2005. 27(2): p. 197-203.
[27] Lu, Z., et al., Early-age interaction mechanism between the graphene oxide and cement hydrates. Construction and Building Materials, 2017. 152: p. 232-239.
[28] Lim, J.L.G., et al., Synthesis of nano cementitious additives from agricultural wastes for the production of sustainable concrete. Journal of Cleaner Production, 201 *:۱۷۱ .۸*p. 1150-1160.
[29] Díaz-Peña, I., et al., Effect of the electrochemical migration of colloidal nano-SiO2 on the durability performance of hardened cement mortar. Int. J. Electrochem. Sci, 2015. 10: p. 10261-10271.
[30] Fajardo, G., et al., Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials. Construction and Building Materials, 2015. 76: p. 158-167.

[31] Shan, H., et al., Electrochemical chloride removal in reinforced concrete structures: improvement of effectiveness by simultaneous migration of silicate ion. Construction and Building Materials, 2016. 127: p. 344-352.
[32] Climent, M.-Á., J. Carmona, and P. Garcés, Graphite–Cement Paste: A New Coating of Reinforced Concrete Structural Elements for the Application of Electrochemical Anti-Corrosion Treatments. Coatings, 2016. 6(3): p. 32.
[33] Mahdikhani, M., O. Bamshad, and M.F. Shirvani, Mechanical properties and durability of concrete specimens containing nano silica in sulfuric acid rain condition. Construction and Building Materials, 2018. 167: p. 929-935.
[34] Massana, J., et al., Influence of nano-and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 2018. 165: p. 93-103.
[35] Mohseni, E., et al., Single and combined effects of nano-SiO2, nano-Al2O3 and nano-TiO2 on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. Construction and Building Materials, 2015. 84: p. 331-340.
[36] Xu, S., et al., Environmental resistance of cement concrete modified with low dosage nano particles. Construction and Building Materials, 2018. 164: p. 535-553.
[37] Arel, H.Ş. and B.S. Thomas, The effects of nano-and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks. Results in physics, 2017. 7: p. 843-851.
[38] Nazari, A. and S. Riahi, The effects of TiO2 nanoparticles on properties of binary blended concrete. Journal of Composite Materials, 2011. 45(11): p. 1181-1188.
[39] Bai, J., S. Wild, and B. Sabir, Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater. Cement and Concrete Research, 2003. 33(3): p. 353-362.
[40] Courard, L., et al., Durability of mortars modified with metakaolin. Cement and Concrete Research, 2003. 33(9): p. 1473-1479.
[41] Poon, C.-S., S. Kou, and L. Lam, Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. Construction and building materials, 2006. 20(10): p. 858-865.
[42] Khatib, J. and S. Wild, Sulphate resistance of metakaolin mortar. Cement and Concrete Research, 1998. 28(1): p. 83-92.
[43] Roy, D., P. Arjunan, and M. Silsbee, Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. Cement and Concrete Research, 2001. 31(12): p. 1809-1813.
[44] Al-Akhras, N.M., Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cement and concrete research, 2006. 36(9): p. 1727-1734.
[45] Nochaiya, T. and A. Chaipanich, Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. Applied Surface Science, 2011. 257(6): p. 1941-194.٥
[46] Li, G.Y., P.M. Wang, and X. Zhao, Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. Carbon, 2005. 43(6): p. 1239-1245.
[47] Mesbahi, A. and H. Ghiasi, Shielding properties of the ordinary concrete loaded with micro-and nano-particles against neutron and gamma radiations. Applied Radiation and Isotopes, 2018. 136: p. 27-31.

[48] Tekin, H.O., M.I. Sayyed, and S.A. Issa, Gamma radiation shielding properties of the hematite-serpentine concrete blended with WO3 and Bi2O3 micro and nano particles using MCNPX code. Radiation Physics and Chemistry, 2018. 150: p. 95-100.
[49] Jo, B.-W., et al., Characteristics of cement mortar with nano-SiO2 particles. Construction and Building Materials, 2 :(٦)٢١ .٠٠١p. 1351-1355.
[50] Mohammed, B.S., et al., Properties of nano silica modified rubbercrete. Journal of cleaner production, 2016. 119: p. 66-75.
[51] Li, W., et al., Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading. Materials & Design, 2016. 112: p. 58-66.
[52] Harbec, D., et al., New silica fume from recycled glass, in Nanotechnology in Construction. 2015, Springer. p. 407-414.
[53] Aly, M., et al., Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar. Materials & Design, 2012. 33: p. 127-135.
[54] Jalal, M., et al., Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO2 micro and nanoparticles. Materials & Design, 2012. 34: p. 389-400.
[55] Kuo, W.-Y., J.-S. Huang, and C.-H. Lin, Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars. Cement and Concrete Research, 2006. 36(5): p. 886-895.
[56] SILVESTRE, J.P.T., NANOTECHNOLOGY IN CONSTRUCTION:

TOWARDS STRUCTURAL APPLICATIONS. 2015, Tecnico Lisboa.
[57] Rao, S., P. Silva, and J. De Brito, Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO2 and TiO2). Construction and Building Materials, 2015. 96: p. 508-517.
[۵۸] محمدی، صیف‌اللهی. بررسی تأثیر نانو سیلیس بر خواص مکانیکی مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن غلتکی در سدها. نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی, ۱۳۹۴.
[۵۹] طریقت، درجانی. بررسی تاثیر استفاده از نانو سیلیس بر روی مشخصات مکانیکی و نفوذپذیری بتن رسی پلاستیک, عمران ۱۳۹۱, دانشگاه شهید رجایی.
[60] Erdem, S., S. Hanbay, and Z. Güler, Micromechanical damage analysis and engineering performance of concrete with colloidal nano-silica and demolished concrete aggregates. Construction and Building Materials, 2018. 171: p. 634-642.
[61] Ibrahim, M., et al., Influence of nano-SiO 2 on the strength and microstructure of natural pozzolan based alkali activated concrete. Construction and Building Materials, 2018. 173: p. 573-585.
[62] Mahapatra, C.K. and S.V. Barai, Hybrid fiber reinforced self compacting concrete with fly ash and colloidal nano silica: A systematic study. Construction and Building Materials, 2018. 160: p. 828-838.
[63] Shaikh, F., et al., Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete. Structural Concrete, 2018. 19(2): p. 387-399.
[64] Mohammed, B.S. and M. Adamu, Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. Construction and Building Materials, 2018. 159: p. 234-251.
[65] Their, J.M. and M. Özakça, Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber. Construction and Building Materials, 2018. 180: p. 12-22.

[66] Behfarnia, K. and N. Salemi, The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. Construction and Building Materials, 2013. 48: p. 580-584.
[67] Jaishankar, P. and C. Karthikeyan. Characteristics of Cement Concrete with Nano Alumina Particles. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. IOP Publishing.
[68] Li, Z., et al., Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. Materials Letters, 2006. 60(3): p. 356-359.
[69] Barbhuiya, S., S. Mukherjee, and H. Nikraz, Effects of nano-Al2O3 on early-age microstructural properties of cement paste. Construction and Building Materials, 2014. 52: p. 189-193.
[۷۰] اسماعیلی‌زاده، دشتی. اثرنانو ذرات بر ویژگی‌های بتن، وب سایت بتن ایران.
[71] Nazari, A. and S. Riahi, Assessment of the effects of Fe2O3 nanoparticles on water permeability, workability, and setting time of concrete. Journal of Composite Materials, 2011 .p. 923-930.
[72] Nazari, A., et al., Benefits of Fe2O3 nanoparticles in concrete mixing matrix. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 102-106.
[73] Nazari, A., et al., The effects of incorporation Fe2O3 nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 90-93.
[74] Khoshakhlagh, A., A. Nazari, and G. Khalaj, Effects of Fe2O3 nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete. Journal of Materials Science & Technology, 2012. 28(1): p. 73-82.
[75] Sikora, P., et al., The Influence of Nano-Fe 3 O 4 on the Microstructure and Mechanical Properties of Cementitious Composites. Nanoscale research letters, 2016. 11(1): p. 182.
[76] Yazdi, N.A., et al ,.To study the effect of adding Fe2O3 nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. Life Science Journal, 2011. 8(4): p. 550-554.
[77] Nazari, A. and S. Riahi, The effects of Zno2 nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media. Materials Research, 2011. 14(2): p. 178-188.
[78] Olmo, I.F., E. Chacon, and A. Irabien, Influence of lead, zinc, iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement. Cement and Concrete Research, 2001. 31(8): p. 1213-1219.
[79] Behfarnia, K., A. AZARKEIVAN, and A. Keivan, The effects of TiO2 and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete. 2013.
[80] Kaykha, M.M. and F. Soleymani, Assessments of the effects of ZrO2 nanopowders on porosimetry and mechanical properties of concrete. Journal of American Science, 2012. 8.
[81] Nazari, A. and S. Riahi, The effects of ZrO2 nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength self compacting concrete. Materials Research, 2010. 13(4): p. 551-556.
[82] Nazari, A. and S. Riahi, The effects of ZrO2 nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media. Journal of Experimental Nanoscience, 2013. 8(4): p. 413-433.
[83] Ruan, Y., et al., Mechanical behaviors of nano-zirconia reinforced reactive powder concrete under compression and flexure. Construction and Building Materials, 2018. 162: p. 663-673.

[84] Camiletti, J., A. Soliman, and M. Nehdi, Effects of nano-and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete. Materials and structures, 2013. 46(6): p. 881-898.
[85] Xu, Q.L., T. Meng, and M.Z. Huang. Effects of nano-CaCO3 on the compressive strength and microstructure of high strength concrete in different curing temperature. in Applied Mechanics and Materials. 2012. Trans Tech Publ.
[86] Kawashima, S., et al., Modification of cement-based materials with nanoparticles. Cement and Concrete Composites, 2013. 36: p. 8-15.
[87] Sato, T. and F. Diallo, Seeding effect of nano-CaCO3 on the hydration of tricalcium silicate. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010(2141): p. 61-67.
[88] Liu, X., et al., Effect of nano-CaCO3 on properties of cement paste. Energy Procedia, 2012. 16: p. 991-996.
[89] Chen, J., S.-c. Kou, and C.-s. Poon, Hydration and properties of nano-TiO2 blended cement composites. Cement and Concrete Composites, 2012. 34(5): p. 642-649.
[90] Nazari ,A., et al., Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using TiO2 nanoparticles. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 98-101.
[91] Nazari, A., et al., Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO2 nanoparticles. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 43-46.
[92] Meng, T., et al., Effect of nano-TiO2 on the mechanical properties of cement mortar. Construction and Building Materials, 2012. 29: p. 241-245.
[93] Moradpour, R., et al., The effects of nanoscale expansive agents on the mechanical properties of non-shrink cement-based composites: The influence of nano-MgO addition. Composites Part B: Engineering, 2013. 55: p. 193-202.
[94] Polat, R., R. Demirboğa, and F. Karagöl, The effect of nano-MgO on the setting time, autogenous shrinkage, microstructure and mechanical properties of high performance cement paste and mortar. Construction and Building Materials, 2017. 156: p. 208-218.
[95] Song, S., et al., The mechanical properties and electrochemical behavior of cement paste containing nano-MgO at different curing temperature. Construction and Building Materials, 2018. 164: p. 663-671.
[96] Wild, S., J.M. Khatib, and A. Jones, Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. Cement and concrete research, 1996. 26(10): p. 1537-1544.
[97] Poon, C.-S., et al., Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. Cement and Concrete Research, 2001. 31(9): p. 1301-1306.
[98] Qian ,X. and Z. Li, The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. Cement and Concrete Research, 2001. 31(11): p. 1607-1611.
[99] Chaipanich, A., et al., Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. Materials Science and Engineering: A, 2010. 527(4-5): p. 1063-1067.
[100] Morsy, M., S. Alsayed, and M. Aqel, Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. Construction and Building Materials, 2011. 25(1): p. 145-149.
[101] Metaxa, Z.S., et al., Highly concentrated carbon nanotube admixture for nano-fiber reinforced cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 2012. 34(5): p. 612-617.

[102] Konsta-Gdoutos, M.S., Z.S. Metaxa, and S.P. Shah, Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research, 2010. 40(7): p. 1052-1059.
[103] Konsta-Gdoutos, M.S., Z.S. Metaxa, and S.P. Shah, Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. Cement and Concrete Composites, 2010. 32(2): p. 110-115.
[104] Al-Rub, R.K.A., A.I. Ashour, and B.M. Tyson, On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites. Construction and Building Materials, 2012. 35: p. 647-655.
[105] Li, H. and h. Zhang, Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement. Ou J-p.. Wear, 2006. 260(11 :(۱۲-p. 1262-6.
[۱۰۶] محمدی، شهبازی, بررسی تاثیر نانوسیلیس بر ذوب و انجماد بتن حاوی الیاف شیشه‌ای. ۱۳۹۱, دانشگاه محقق اردبیلی.
[۱۰۷] امیرنادی, کاربرد نانولوله ها ی کربنی به عنوان مواد افزودنی در مقاوم سازی ساختمان های بتنی. ۱۳۹۴: فصلنامه علمی تخصصی پژوهشی.
[۱۰۸]. کشاورز, ر., ا. محبی, ج. مرشدیان, " مطالعه رفتار مکانیکی و میکروساختار کامپوزیت بتن - نانولوله کربنی چند دیواره", مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی.
[109] Pan, Z., et al., Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. Cement and Concrete Composites, 2015. 58: p. 140-147.
[110] Gong, K., et al., Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015. 27(2): p. A4014010.
[111] Li, X., et al., Effects of graphene oxide agglomerates on workability, hydration, microstructure and compressive strength of cement paste. Construction and Building Materials, 2017. 145: p. 402-410.
[112] Lv, S., et al., Use of graphene oxide nanosheets to regulate the microstructure of hardened cement paste to increase its strength and toughness. CrystEngComm, 2014. 16(36): p. 8508-8516.
[113] Lv, S., et al., Effect of GO nanosheets on shapes of cement hydration crystals and their formation process. Construction and Building Materials, 2 :٦٤ . ٠١٤p. 231-239.
[۱۱۴] قاسمعلی, س., ع. رمضانیانپور, و. لطفی, " بررسی اثر واکنش قلیایی-سیلیسی بر رفتار سازه‌ای تیرهای بتنی مسلح با استفاده از روش المان محدود" نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۱۳۹۶.
[۱۱۵] دلنواز و دیگران " بررسی تاثیر استفاده از نانو سیلیس، دوده سیلیسی و متاکائولن درکاهش واکنش‌های قلیایی سیلیسی سنگدانه های بتن" دومین کنفرانس ملی بتن ۱۳۸۹.
[116] Kumar, D. and N. Sharma, Study of Compressive Strength of Concrete Using Nano Silica. Journal of Ceramics and Concrete Sciences, 2016. 1.(۲)
[117] Zhang, L., et al., Study on the reinforcing mechanisms of nano silica to cement-based materials with theoretical calculation and experimental evidence. Journal of Composite Materials, 2016. 50(29): p. 4135-4146.
[118] Gesoglu, M., et al., Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica. Construction and Building Materials, 2016. 102: p. 706-713.

[119] Irshidat, M.R., et al., Effect of carbon nanotubes on strengthening of RC beams retrofitted with carbon fiber/epoxy composites. 2016. 89: p. 225-234.
[120] Li, Y., X. Liu, and J.J.J.o.M.i.C.E. Li, Experimental study of retrofitted cracked concrete with FRP and nanomodified epoxy resin. 2016. 29(5): p. 04016275.
[121] Irshidat, M.R., M.H.J.C. Al-Saleh, and B. Materials, Effect of using carbon nanotube modified epoxy on bond–slip behavior between concrete and FRP sheets. 2016. 105: p. 511-518.
[122] Guo, X., et al., Seismic Resistance of GFRP Bolted Joints with Carbon Nanotubes. 2018. 144(11 :(p. 04018106.
[123] Genedy, M., et al., Improving fatigue performance of GFRP composite using carbon nanotubes. 2015. **3**(1): p. 13-29.
[124] Aboubakr, S., Epoxy-clay nanocomposite for carbon fiber reinforced polymer applications. 2013.
[125] Bhuvaneshwari ,B., et al., Functional enhancement of epoxy polymer nanocomposite: A nano blended binder for retrofitting of bridges. 2014.
[126] Cakir, F., H. Uysal, and V.J.M. Acar, Experimental modal analysis of masonry arches strengthened with graphene nanoplatelets reinforced prepreg composites. 2016. 90: p. 233-241.
[۱۲۷] افشار, ش.ت.ن., کاربرد فناوری نانو در سازه های بتنی هوشمند با قابلیت خود ترمیم شوندگی.
[128] Nishiwaki, T., et al., Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack .Journal of Advanced Concrete Technology, 2006. 4(2): p. 267-275.
[129] Fickert, J., Nanocapsules for self-healing materials. 2013, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
[130] Wu, M., B. Johannesson, and M. Geiker, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Construction and Building Materials, 2012. 28(1): p. 571-583.
[131] Lanzara, G., et al., Carbon nanotube reservoirs for self-healing materials. Nanotechnology, 2009. 20(33): p. 335704.
[132] Qian, S.Z., J. Zhou, and E. Schlangen, Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. Cement and Concrete Composites, 2010. 32(9): p. 686-693.
[133] De Rooij, M., et al., Using natural wood fibers to self heal concrete. 2009.
[134] Valcke, S., et al., Carriers of self-healing agents in concrete and their effect on the microstructure. 2009, TNO report No. TNO-034-DTM-2009-04262 for IOP project of healing built-in building materials.
[135] Calvo, J.G., et al., Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions. Construction and Building Materials, 2017. 138: p. 306-315.
[136] Khaliq, W. and M.B. Ehsan, Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. Construction and Building Materials, 2016. 102: p. 349-357.
[137] Rana, S., et al., A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications. AIMS Materials Science, 2016. 3(2): p. 357-379.
[138] Pisello, A.L., et al., Multipurpose experimental characterization of smart nanocomposite cement-based materials for thermal-energy efficiency and strain-sensing capability. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017. 161: p. 77-88.
[139] Loh, K. and D .Ryu, Multifunctional materials and nanotechnology for assessing and monitoring civil infrastructures, in Sensor Technologies for Civil Infrastructures. 2014, Elsevier. p. 295-326.

[140] Han, B., et al., Nanotip-induced ultrahigh pressure-sensitive composites: principles, properties and applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. 59: p. 105-114.
[141] Wang, Y., et al., Strain monitoring of concrete components using embedded carbon nanofibers/epoxy sensors. Construction and Building Materials, 2018. 186: p. 367-378.
[142] Ubertini, F., et al., Novel nanocomposite technologies for dynamic monitoring of structures: a comparison between cement-based embeddable and soft elastomeric surface sensors. Smart Materials and Structures, 201 .:(٤)٢٣ .٤p. 045023.
[143] Kang, I., et al., A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring. Smart materials and structures, 2006. 15(3): p. 737.
[144] Luo, J., H. Li, and G. Xian, Electrically Conductive Nanocomposite Coating for Strain and Health Monitoring, in Advances in FRP Composites in Civil Engineering. 2011, Springer. p. 260-263.
[145] Han, B., et al., Electrostatic self-assembled carbon nanotube/nano carbon black composite fillers reinforced cement-based materials with multifunctionality. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015. 79: p. 103-115.
[146] Fardindoost, S., et al., Flexible strain sensors based on electrostatically actuated graphene flakes. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015. 25(7): p.٠٧٥٠١۶ .
[147] Ubertini, F., S. Laflamme, and A. D'Alessandro, Smart cement paste with carbon nanotubes, in Innovative developments of advanced multifunctional nanocomposites in civil and structural engineering. 2016, Elsevier. p. 97-120.
[148] Kharroub, S ,.et al., Smart sensing skin for detection and localization of fatigue cracks. Smart Materials and Structures, 2015. 24(6): p. 065004.
[149] Kong, X., et al. A robust signal processing method for quantitative high-cycle fatigue crack monitoring using soft elastomeric capacitor sensors. in Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2017. 2017. International Society for Optics and Photonics.
[150] Dai, H., et al., A novel methodology for spatial damage detection and imaging using a distributed carbon nanotube-based composite sensor combined with electrical impedance tomography. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016. 35(2): p. 26.
[151] Tallman, T.N., et al., Damage detection via electrical impedance tomography in glass fiber/epoxy laminates with carbon black filler. Structural Health Monitoring, 2015. 14(1): p. 100-109.
[152] Sun, S., et al., Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring. Construction and Building Materials, 2017. 136: p. 314-328.
[153] Huang, Y., H. Li, and S. Qian, Self-sensing properties of Engineered Cementitious Composites. Construction and Building Materials, 2018. 174: p. 253-262.
[154] Laflamme, S., et al. Thin film sensor network for condition assessment of wind turbine blades. in Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014. 2014. International Society for Optics and Photonics.
[155] Loyola, B.R., et al., The electrical response of carbon nanotube-based thin film sensors subjected to mechanical and environmental effects. Smart Materials and Structures, 2012. 22(2): p. 025010.
[156] Downey, A., F. Ubertini, and S. Laflamme, Algorithm for damage detection in wind turbine blades using a hybrid dense sensor network with feature level data fusion. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017. 168: p. 288-296.

[157] Downey, A., et al. Experimental study of thin film sensor networks for wind turbine blade damage detection. in AIP Conference Proceedings. 2017. AIP Publishing.

[۱۵۸] جلیلیان, کوهستانی, ناقدی،نیا, "مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه بهسازی خاک با استفاده از نانو ذرات" کنفرانس بین المللی نخبگان. ۱۳۹۴: دانشگاه شهید بهشتی تهران.

[۱۵۹] عربانی, م., خداپرست, م.ز. ثانی, " تأثیر نانو رس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه های رس دار" چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. ۱۳۸۹: دانشگاه گیلان رشت.

[۱۶۰] صادقیان لوئیان, " مروری بر نانو تکنولوژی و کاربرد آن در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک", کنفرانس بین المللی نخبگان,. ۱۳۹۵: دانشگاه شهید بهشتی.

[۱۶۱] طبرسا, ع., تأثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک های ریزدانه نرم, نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد یازدهم. ۱۳۹۶.

[162] BAZYAR, "Application of Nanomaterial to Stabilize a WeakSoil", in International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2013.

[163] Mohammadi, M. and M. Niazian, Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. journal of Advanced Science and Technology, 2013. 3(3): p. 37-46.

[164] Taha, M.R. and O.M.E. Taha, Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. Journal of Nanoparticle Research, 2012. 14(10): p. 1190.

[165] Bahari, M., et al., Stabilization of silt by nanoclay, in 7th National Congress on Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan. 2013: Zahedan, Iran.

[۱۶۶] برخورداریان, مهرنهاد, م.کدیور, " اثر نانو مواد بر پارامترهای مقاومتی خاک", گروه خاک و پی. ۱۳۹۰, دانشگاه یزد: دانشگاه یزد.

[۱۶۷] مرادی ب.روحی،پور, " بررسی تاثیر نانو سیلیس بر خاک تثبیت شده با آهک" خاک و پی. ۱۳۹۱, دانشگاه تبریز: دانشگاه تبریز.

[168] Bahmani, S.H., et al., Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement. Construction and Building Material, 2014: p. 350-359.

[۱۶۹] م.جمشیدی م. مخبری, بررسی اثر نانو سیلیس (پرکاربردترین محصول نانو) بر پارامترهای مقاومتی خاک, ولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی و نمایشگاه "توسعه پایدار در راهسازی با رویکرد حفظ محیط زیست. ۱۳۹۶.

[170] Naval, S., k. Chandan, and D. Sharma, Stabilization of Expansive Soil Using Nanomaterials, in International Interdisciplinary Conference on Science Technology Engineering Management Pharmacy and Humanities. 2017. Singapore. 2017.

[۱۷۱] فیروزی و همکاران, " تاثیر نانو ذرات زئولیت بر بهبود کیفیت خاک رسی" ۲۰۱۱.

[172] TAHA, M.R., et al., Effects of Nano-Carbon Reinforcement on the Swelling and Shrinkage Behaviour of Soil. Sains Malaysiana, 2018. 47(1): p. 195–205.

[۱۷۳] فخری, ز., ر. پورحسینی, ت. عبادی, بهبود خواص هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانو رس. مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر, ۱۳۹۴. سال چهل و هفتم(۳): p. 39-46.

[174] Kananizadeh, N., et al., The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate. Clean–Soil, Air, Water, 2011. **39**(7): p. 605-611.
[175] Huang, Y. and L. Wang, Experimental studies on nanomaterials for soil improvement. Environmental Earth Sciences, 2016. 75(6***)***: p. 497.
[176] Janalizadeh, A., H. Nazarpoor, and M. Ebrahimi, Effect of nanoclay on permeability of silty sand, in 8th National Congress on Civil Engineering. 7-8 May 2014: Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaranan, Iran.
[177] Baziar, M.H., J. Saeidaskari, and M. Alibolandi, Effects of Nanoclay on the Treatment of Core Material in Earth Dams. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. 30(10): p. 04018250.
[178] bavandpouri, P. and Jahangiri, "EFFECTIVE OF NANO SILICA ON CLAY Behavior ". Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 2015.
[179] HARESH, P. and R.R. VINOTH KUMAR, " Assessment of nano materials on Geotechnical properties of Clayey soil" in International Conference on Engineering Innovations and Solutions(ICEIS –2016). 2016. p. 66.
[۱۸۰] رجبی, م., حیدری, عبدالهی, "بررسی آزمایشگاهی اثر نانو سیلیس و نانو اکسیدآهن بر روی پارامترهای مقاومتی و تحکیم خاک‌های رسی کرج" خاک وپی. ۱۳۹۵, دانشگاه قم.
[181] Zaid Hameed, m., m. Raihan Taha, and i. Ibtehaj Taha, Stabilization of Soft Soil Using Nanomaterials. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014. 8-4: p. 503-509.
[182] Taha, M.R. and O.M.E. Taha, Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. Journal of Nanoparticle Research, 2012. 14(10): p. 1190.
[183] Lin Luo, H., et al., "Cohesive Soil Stabilized Using Sewage Sludge Ash/Cement and Nano Aluminum Oxide". International Journal of Transportation Science and Technology 2012 1: p. 83.
[184] Choobbasti, A.J., A. Vafaei, and S.S. Kutanaei, Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica. Open Engineering, 2015. 5.(۱)
[۱۸۵] شوش پاشا, ع., م. عباسی, ه. نجف نیا, بررسی اثر ترکیب سیمان و نانوسیلیس بر روی مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلسر. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر, ۱۳۹۴. ۵۰(۱): 179-188 .p.
[۱۸۶] عباسی, ن. آ. فرجاد, " بررسی امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی ". نشریه تحقیقات آب و خاک ایران, ۱۳۹۶. ۴۸(۳).
[۱۸۷] زمردیان, محمدعلی, مومن, " مطالعه آزمایشگاهی تاثیرافزودنی نانو سیلیس برفرسایش داخلی خاک های واگرا", گروه خاک و پی. ۱۳۹۰, دانشگاه شیراز.
[۱۸۸] عساکره, ع. ا. آوازه, بررسی تاثیر نانو رس بر رفتار خاک های واگرا (مطالعه موردی: شهرستان میناب در استان هرمزگان). مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر, ۱۳۹۶. سال چهل و نهم: 512-503 .p.
[189] Ouhadi, V.R. and H. Bakhshalipour, Impact of nano clays on the behavior properties of collapsible soils, in ۹ th International Congress on Advanced in Civil Engineerin. 2010: Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.,
[190] Fazeli, A., A. Johari, and F. Davoodi, Rehabilitation of collapsible soil with nanoclay,, in 8th National Congress on Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology,. 2014: Mazandaranan, Iran.

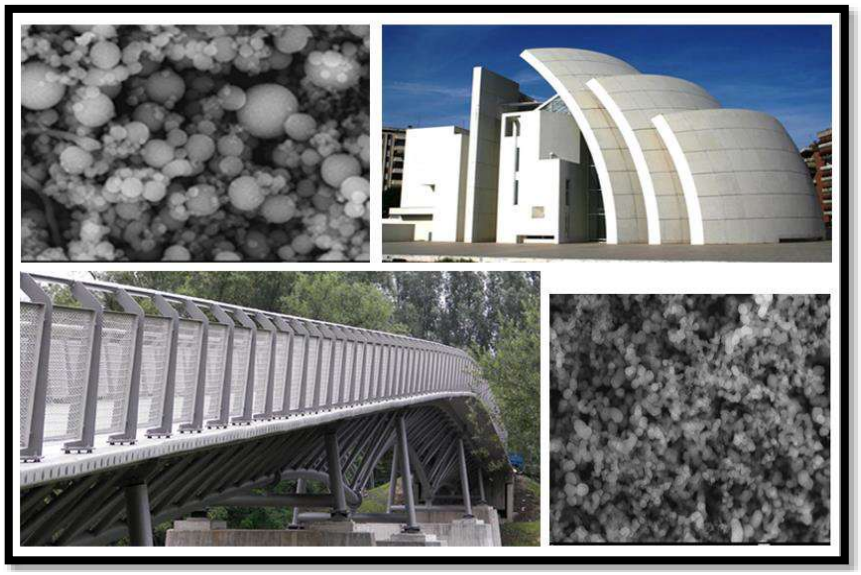
[191] Iranpour and hadad, The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment. Engineering Geology, 2016. 205: p. 40-53.
[192] Tabarsa, A., et al., Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay-A sustainable material for construction. Construction and Building Materials, 2018. 158: p. 454-463.
[۱۹۳] جمشیدی, م. م. مخبری, بررسی اثر نانو سیلیس (پرکاربردترین محصول نانو) بر پارامترهای مقاومتی خاک, اولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی و نمایشگاه "توسعه پایدار در راهسازی با رویکرد حفظ محیط زیست". ۱۳۹۶: شیراز.
[194] Zomorodian, S.A., et al., Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives. Applied Clay Science, 2017. 140: p. 140-147.
[195] Ghazavi, M. and M. Bolhasani, Unconfined compression strength of clay improvement with lime and nano-silica, in 6th International Congress on Environmental Geotechnics. 8-10 November 2010 :New Delhi, India. p. 1490-1495.
[196] Ghasabkolaei, n. and a. Janalizadeh Choobbasti, Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review. elsevier archives of civil and mechanical engineering 2017. 1 7 p. 6 3 9 - 6 5 0.
[197] Bahmani, S.H., et al., The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil. Construction and Building Materials, 2016. 118.(۳۰۶-۲۹٤)
[198] Mohammadi, M. and A.j. Choobbasti, The effect of self-healing process on the strength increase in clay. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018. 32(16): p. 1750-1772.
[۱۹۹] بهاری, م. ع. شاه نظری, بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک, ۱۳۹۴. سال نوزدهم(۲): 114-107 .p.
[200] Changizi, F. and A. Haddad, Effect of nanocomposite on the strength parameters of soil. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017. 21(3): p. 676-686.
[201] Nikookar, M., et al. The Strength Characteristics of Silty Soil Stabilized Using Nano-Clay. in Proc. of 7th Symposium on Advances in Science & Technology (7thsastech). 2013.
[202] changizi and haddad, ”Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO2 and recycled polyester fiber” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015.
[۲۰۳] سیاوشنیا علیان, " ارزیابی رفتار خاک رس تثبیت شده با نانو پلیمر سی بی آر پلاس" ۱۳۹۴, دانشگاه تهران مرکز
[۲۰۴] اصغری, بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید تیتانیوم بر خواص مهندسی-ژئوتکنیکی خاک. ۱۳۹۵, دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل: دانشکده مهندسی عمران.
[۲۰۵] سماکوش, بررسی تاثیر افزودن نانوذرات و الیاف ضایعات فرش در بهبود رفتار مقاومتی خاک رس. ۱۳۹۶, دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل: دانشکده مهندسی عمران.
[206] Gao, L., et al., Study on the shear property of nano-MgO-modified soil. Marine Georesources & Geotechnology, 2018. 36(4): p. 465-470.

[۲۰۷] زمردیان, س. آ. سلیمانی, تاثیر ماده افزودنی نانوسیلیس بر فرسایش پذیری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک, ۱۳۹۶. سال بیست و یکم: p. 217 .۲۲۷-
[۲۰۸] سیمانی, س., تأثیر مسلح سازی با الیاف بر رفتار ماسه سیمانی حاوی نانوسیلیس. ۱۳۹۶, دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل: دانشکده مهندسی عمران.
[209] Meng, T., et al., Effect of compound nano-CaCO3 addition on strength development and microstructure of cement-stabilized soil in the marine environment. Construction and Building Materials, 2017. 151: p. 775-781.
[210] Khalid, N., et al., Effect of nanoclay in soft soil stabilization, in InCIEC 2014. 2015, Springer. p. 905-914.
[211] Noorzad, R. and I. Nouri Delavar, Investigation of the short-term behaviour of silty sand stabilized by colloidal silica. Scientia iranica, 2017(DOI: 10.24200/SC): p. 4583.
[212] Persoff, P., et al., Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering ASCE 1999. 125 (6): p. 461-469.
[213] Janalizadeh Choobbasti, A., A. Vafaei, and S. Soleimani Kutanaei, Static and Cyclic Triaxial Behavior of Cemented Sand with Nanosilica. ASCE. J. Mater. Civ. Eng., 2018. 30.(۱۰)
[214] Nouri Delavar, I. and R. Noorzad, Drained shear strength parameters of silty sand grouted by colloidal silica. International Journal of Geotechnical Engineering, 2017: p. 1-8.
[215] Taha, M.R. and T. Ying, Effects of carbon nanotube on kaolinite: basic geotechnical behavior. ICCE-18, Anchorage, Alaska, USA, 2010.
[216] Kodaka, T., Y. Ohno, and T. Takyu. Cyclic shear characteristics of treated sand with colloidal silica grout. in Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2005. Aa Balkema Publishers.
[217] Gallagher, P.M., C.T. Conlee, and K.M. Rollins, Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007. 133(2): p. 186-196.
[218] Gallagher, P.M., A. Pamuk, and T. Abdoun, Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007. 19(1): p. 33-40.
[219] Gallagher, P.M. and J.K. Mitchell, Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002. 22(9-12): p. 1017-1026.
[220] Liao, H., C. Huang, and B. Chao, Liquefaction resistance of a colloid silica grouted sand, in Grouting and ground treatment. 2003. p. 1305-1313.
[221] Moradi, G. and S. Seyedi, Evaluation of uniform delivery of colloidal nano-Silica stabilizer to liquefiable silty sands. International Journal of Nano Dimension, 2015. 6(5): p. 501-508.
[222] Huang, Y. and L. Wang, Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review. Environmental Earth Sciences, 2016. 75(6): p. 497.
[223] Conlee, C.T., et al., Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012. 138(11): p. 1334-1345.
[224] Ozin, G., A. Arsenault, and L. Cademartiri, Nanochemistry: a chemical approach to nanomaterials. Royal Society of Chemistry, 2009.
[225] Taipodia, J., J. Dutta, and A. Dey, Effect of nano particles on properties of soil, in Proceedings of the Indian Geotechnical Conference. 2011.

[226] Majeed, Z., M.R. Taha, and I. Jawad, Stabilization of soft soil using nanomaterials. Research Journal of Applied Sciences. Engineering and Technology, 2014. 8(4): p. 503-509.
[227] Janalizadeh Choobbasti, a., a. Vafaei, and s. Soleimani Kutanaei, Mechanical Properties of Sandy Soil Improved with Cement and Nanosilica. Open Eng., 2015. 5: p. 1.116-11.
[228] Correia, A. and M.G. Rasteiro, Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization. Procedia engineering, 2016. 143: p. 1252-1259.
[۲۲۹] شریف‌نسب عباسی, ارزیابی تاثیر ذرات نانو رس بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک ها, ماشین‌های کشاورزی. ۱۳۹۵.
[230] Padidar, M., et al. , Effect of nanoclay on soil erosion control., in 6th International Conference on Nanomaterials. 2014: Brno, Czech.
[۲۳۱] بهاری, م. ع. شاه‌نظری, بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس., علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۳۹۴. 114-107 .p.
[232] Hochella, M., Nanoscience and technology: the next revolution in the Earth sciences. Earth and Planetary Science Letters, 2002. 203(2): p. 593-605.
[233] taha, M.R. and T. Ying, Effects of carbon nanotube on kaolinite: Basic geotechnical behavior. World Journal Of Engineering, 2010. 7(2): p. 472-473.
[204] Subramani, V. and S. Sridevi, Soil Stabilization using Nano Materials. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2013. 4(3): p. 641-645.
[235] Zhang, G., Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils. Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, 2007: p. 1-13.
[236] Moradi, G. and S. Seyedi, Evaluation of uniform delivery of colloidal nano-Silica stabilizer to liquefiable silty sands. International Journal of Nano Dimension, 2015. 6(5): p. 501-508.
[237] Bello, A., Influence of compaction delay on CBR and UCS of cement stabilized lateritic soil. Pacific Journal of Science and Technology, 2011. 12(2): p. 87-98.
[238] Ali, G. and A. Youssef, Stabilization of silt: a case study for low-volume roads, in in Saudi Arabia. 1983.
[۲۳۹] موسوی, ن., ص. صادقی, ح. بهرامی, تاثیر کاربرد جداگانه و ترکیبی ورمی کمپوست و نانو ذرات سیلیکا بر نفوذپذیری خاک, حفاظت منابع آب و خاک. ۱۳۹۶. 60-49 .p.

فصل سوم

بررسی و امکان‌سنجی تولید و استفاده از مواد نانو ساختار در کشور



فهرست مطالب

مقدمه ۳۰۳

۳ بررسی و امکان‌سنجی تولید و استفاده از مواد نانو ساختار در کشور ۳۰۴

۳-۱ شرکت‌های برتر جهان در فناوری مواد نانو ساختار در زمینه بهسازی خاک و سازه ۳۰۴

۳-۱-۱ شرکت Cabot ۳۰۷

۳-۱-۲ شرکت Degussa- evonik ۳۰۸

۳-۱-۳ شرکت SOLVAY ۳۰۸

۳-۱-۴ شرکت MKNANO ۳۰۸

۳-۱-۵ شرکت Wacker ۳۰۸

۳-۱-۶ شرکت GRACE ۳۰۹

۳-۱-۷ شرکت Merck آلمان ۳۰۹

۳-۱-۸ شرکت Sigma-Aldrich ۳۰۹

۳-۱-۹ شرکت آمریکایی US Research Nanomaterials, Inc ۳۰۹

۳-۱-۱۰ شرکت‌های نیپون و اوجی ۳۰۹

۳-۲ شرکت‌های فعال ایرانی در تکنولوژی مواد نانو ساختار در زمینه بهسازی خاک و سازه ۳۱۰

۳-۲-۱ شرکت فناوران نانو مقیاس ۳۱۱

۳-۲-۲ مجتمع فناوری‌های نوین فدک ۳۱۱

۳-۲-۳ شرکت صنعت آوران ویستا ۳۱۱

۳-۲-۴ شرکت صنایع نانو سیلیس ایساتیس ۳۱۲

۳-۲-۵ شرکت شیمیایی بتن پلاست ۳۱۲

۳-۲-۶ شرکت نانو مواد پارس ۳۱۲

۳-۲-۷ شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان ۳۱۲

۳-۲-۸ شرکت مهرگان شیمی ۳۱۲

۳-۲-۹ شرکت ستاره مواد سرا ۳۱۳

۳-۲-۱۰ شرکت هایتک سیلیکات ۳۱۳

۳-۲-۱۱ شرکت نانو رنگدانه شریف ۳۱۳

۳-۲-۱۲ شرکت برج و بارو فارس ۳۱۳

۳-۲-۱۳ شرکت نانو زاک ۳۱۴

۳-۳ منابع ۳۱۴

فهرست اشکال

شکل ۳-۱: بررسی شرکت‌های فعال در زمینه تولید مواد نانو ساختار مورد استفاده در بتن و خاک در دنیا..... ۱۰

فهرست جداول

جدول ۳-۱: بررسی شرکت‌های فعال در زمینه تولید مواد نانو ساختار در دنیا (WWW.NANO WERK.COM).... ۳۰۴
جدول ۳-۲: بررسی شرکت‌های فعال در زمینه تولید و تامین مواد نانو ساختار در ایران..... ۳۱۰
جدول ۳-۳: قیمت اولیه اعلام شده محصولات نانو در بازار داخلی[۲۴]..... ۳۱۴

مقدمه

در مرحله‌ی سوم از این پروژه به بررسی و امکان‌سنجی تولید و استفاده از مواد نانو ساختار در کشور پرداخته می‌شود. در این قسمت با شناسایی شرکت‌های فعال خارجی و همچنین داخل کشور، پتانسیل تولید و بکارگیری مواد نانو ساختار مورد استفاده در سازه‌ها در کشور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از آنجا که این پروژه در خصوص بهبود عملکرد سازه‌های صنعت برق با استفاده از مواد نانو ساختار می‌باشد لذا در این مرحله به امکان‌سنجی تولید و تهیه محصولات نانو در بازار ایران پرداخته می‌شود. در این راستا ابتدا کلیه شرکت‌های فعال در زمینه تولید مواد نانو مطرح شده در مراحل اول و دوم پروژه، شناسایی شده و کشورهای مختلف از جهت میزان فعالیت و سهم بازار جهانی رده‌بندی و معرفی گردیده‌اند. در ادامه مهمترین شرکت‌های تولیدکننده مواد نانو ساختار در جهان که سهمی در بازار ایران نیز دارند معرفی شده و سپس کلیه شرکت‌های داخلی که در زمینه تولید مواد نانو ساختار مرتبط با بهبود عملکرد سازه‌ها فعالیت دارند بررسی و شناسایی شده‌اند. در انتها قیمت اولیه برخی از مواد نانو ساختار مهم که در بازار ایران موجود هستند ارائه شده است.

۳- بررسی و امکان‌سنجی تولید و استفاده از مواد نانو ساختار در کشور

۳-۱- شرکت‌های برتر جهان در فناوری مواد نانو ساختار در زمینه بهسازی خاک و سازه

با بررسی شرکت‌های تامین‌کننده مواد نانو تکنولوژی جهت بهسازی در صنعت ساختمان در جهان، ۱۳۰ شرکت برتر در این راستا شناسایی شد و در جدول ۳-۱ نام آن‌ها، نام کشور و محصول مرتبط به پژوهش حاضر بیان شد. با مشاهده شکل ۳-۱، سهم کشورهای مختلف از شرکت‌های فعال در زمینه تولید مواد نانو مورد استفاده در بتن و خاک شناسایی شده که طبق آن تعداد شرکت‌های فعال در آمریکا با داشتن بیش از ۴۰ درصد سهم بازار در رتبه اول قرار دارد؛ پس از آن هند و آلمان و سپس چین و کره دارای بیشترین شرکت فعال در این عرصه هستند[۱].

جدول ۳-۱: بررسی شرکت‌های فعال در زمینه تولید مواد نانو ساختار در دنیا (www.nano werk.com)

ردیف	نام شرکت	کشور	محصول
1	Reade Advanced Materials	USA	nanomaterial
2	Advanced Fibers & Powders	USA	nanoparticle
3	Advano	USA	nanoparticle
4	ALB Materials	USA	micro- and nanomaterials.
5	Alfa Aesar	USA	nanomaterials
6	AMAG Pharmaceuticals	USA	nanoparticles
7	American Elements	USA	nanoparticles
8	Argonide Corporation	USA	nano materials
9	Aveka Group	USA	nanoparticle
10	CABOT	USA	nanoparticle
11	Chemat Technology	USA	Nan osize powders
12	Cospheric Nano	USA	nanoparticles
13	HUBER	USA	nanoparticles

جدول ۳-۱: ادامه

ردیف	نام شرکت	کشور	محصول
14	Inframat Advanced Materials	USA	Nanoparticles
15	Ishihara Corporation USA	USA	titanium dioxide
16	GRACE	USA	nanomaterials
17	Mach 1, Inc.	USA	nanomaterials
18	Marketech International	USA	Nano powders
19	Meliorum Technologies	USA	nanomaterials
20	Microspheres-Nanospheres	USA	Micro particles
21	MTI Corporation	USA	nanoparticles
22	Nanocerox	USA	Nano powders
23	nanoComposix	USA	nanoparticles
24	Nanoeclat	USA	Nano powders

25	NanoHybrids	USA	nanoparticle
26	Nano-Oxides	USA	Nano powders
27	NanoTechLabs	USA	nanotechnology
28	Nanotek Instruments	USA	Nanoparticle
29	NEI Corporation	USA	nanoscale materials
30	nGimat Co.	USA	nanomaterials
31	Nissan Chemical America Corporation	USA	Nano silica
32	Pacific Industrial Development Corporation	USA	nanomaterials
33	Primet Precision Materials	USA	Nano powders
34	PPG INDUSTERIALS	USA	Nano particles
35	PQ Corporation	USA	Nano particles
36	Saint-Gobain Grains & Powders	USA	Nano powders
37	Seashell Technology, LLC	USA	nanoparticles
38	Sep-All	USA	nanomaterials

جدول ۳-۱: ادامه

ردیف	نام شرکت	کشور	محصول
39	Sigma-Aldrich	USA	Nanomaterials
40	SkySpring Nanomaterials	USA	Nanomaterials
41	Specialty Materials	USA	nano- microparticles
42	Spherotech	USA	Nanoparticle
43	Stanford Advanced Materials	USA	Nanoparticle
44	Stanford Materials	USA	Nanoparticle
45	Sun Innovations Nanomaterial Store	USA	nanomaterials
46	Sun Nano	USA	Nano powders
47	.Sustainable Carbon NanoTechnology eng.	USA	nanocomposite
48	Texas Biochemicals	USA	Nano powders
49	ULVAC Technologies USA	USA	Nano particulate
50	UT Dots	USA	nanoparticles
51	US NANO	USA	nanoparticles
52	Goodfellow	UK	Nano powders
53	Keeling & Walker	UK	Nano particulate
54	QinetiQ Nanomaterials Ltd.	UK	Nano powders
55	Roar Particles	UK	nanoparticles
56	Strem Chemicals UK	UK	Nanoparticle
57	Advanced Nano Products Co., Ltd.	South Korea)	Nanoparticle
58	Nano Technology Inc.	South Korea	Nano powders
59	Nanux	South Korea	nanocomposite
60	NTbase	South Korea	Nano powders
61	Sukgyung	South Korea	Nanoparticle
62	ABC Nanotech	South Korea	silica nanoparticles and nano coatings
63	Beijing Goodwill Metal Tech	PR China	nanoparticles

جدول ۳-۱: ادامه

ردیف	نام شرکت	کشور	محصول
64	Yichang Hifull Silicon Material Co	PR China	Nano silica
65	Arry International Group Limited	PR China	nano materials
66	Chengdu Alpha Nano Technology	PR China	Nano powders
67	EPRUI Nanoparticles & Microspheres	PR China	nanoparticles, nano composites
68	FCC	PR China	bentonite nano clay

69	Hongwu International Group	PR China	nanoparticles
70	Qingdao Huagao Energy Technology	PR China	nanoparticles
71	Scientz	PR China	microscopes
72	Shanghai Huzheng Nano Technology	PR China	nanoparticles
73	Zhejiang Fenghong Clay Chemicals	PR China	ornanoclay
74	AVANSA Technology & Services	India	nanoparticles
75	Auto Fibre Craf	India	nanomaterials
76	Bee Chems	India	Nano Silica
77	Dabur Pharma	India	nanoparticle
78	Egoma Technologies	India	Nano powders
79	Kerala Minerals & Metals (KMML)	India	nanoparticles
80	Nano Cutting Edge Technology NanoCET	India	nanoparticle
81	Nanomics Technologies	India	nanomaterials
82	NanoResearch Elements	India	nanomaterials
83	Nanoshel	India	nanomaterials
84	NanoXpert Technologies	India	nanoparticle
85	Neo-Ecosystems	India	Nano powders
86	Quantum Corporation	India	Nanomaterials and Nanocomposites
87	Reinste Nano Ventures	India	nanomaterials
88	Sisco Research Laboratories (SRL)	India	nanoparticles

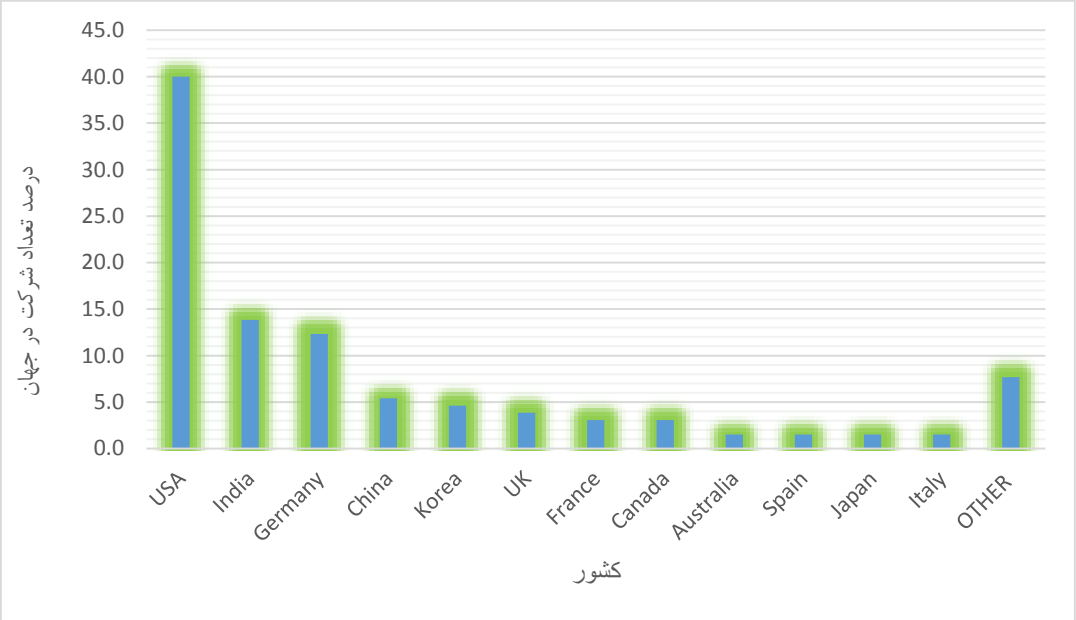
جدول ۳-۱: ادامه

ردیف	نام شرکت	کشور	محصول
89	Smart Nanoz	India	nanoparticles
90	Ultrananotech	India	nanoparticles
91	zydex	India	nanoparticles
92	ABCR	Germany	nanomaterials
93	Bühler PARTEC GmbH	Germany	nanoparticles
94	CAN GmbH	Germany	Nano scaled materials
95	DEGUSAA	Germany	nanoparticles
96	Evonik Industries Advanced Nanomaterials	Germany	nanoparticles
97	IBU-tec advanced materials	Germany	Nano powders
98	IoLiTec Ionic Liquids Technologies	Germany	nanoparticles
99	micromod Partikeltechnologie	Germany	nano- and microparticles
100	Microparticles GmbH	Germany	nanoparticles
101	MERK	Germany	nanoparticles
102	Particular	Germany	nanoparticle
103	Pinfire	Germany	Silica Particles
104	Polytech & Net GmbH	Germany	nanoparticles
105	Synthesechemie	Germany	nanoparticles
106	Sigma Aldrich	Germany	nanoparticles
107	Wacker	Germany	Nano partices
108	Baikowski	France	Nano powders
109	Nanoe	France	Nano powders
110	Nanomakers	France	nanoparticles
111	Neollia	France	nanoparticles
112	American Dye Source, Inc.	Canada	nanoparticles
113	Applied Quantum Materials	Canada	nanoparticles

جدول ۳-۱: ادامه

ردیف	نام شرکت	کشور	محصول
114	Mk nano	Canada	Nano powders

115	nFluids	Canada	nanoparticles
116	Antaria	Australia	nanomaterials
117	Micronisers	Australia	nanoparticles
118	Entekno	Turkey	inorganic powders
119	Prime Nano	Thailand	nanoparticles
120	Nanograde	Switzerland	nanoparticles
121	Nanogap	Spain	nanoparticles
122	Tecnan	Spain	nanomaterials
123	Innovnano	Portugal	nanoparticles
124	SACHEM	Netherlands	Nano powders
125	Hosokawa Micron Group	japan	composite particles
126	Fuso Chemical	Japan	silica nanoparticles.
127	Comar Chemicals	South Africa	nanoparticle
128	HiQ-Nano	Italy	nanoparticles
129	MBN Nanomaterialia S.p.A.	Italy	nanocomposites
130	SOLVAY	BRUSSELS	nanoparticle
130	Nanotek	Argentina	nanomaterials



شکل ۳-۱: بررسی شرکت‌های فعال در زمینه تولید مواد نانو ساختار مورد استفاده در بتن و خاک در دنیا

در ادامه به شناسایی چند شرکت معتبر و فعال در زمینه تامین مواد نانو ساختار که در دنیا فعالیت دارند و به نحوی سهمی از بازار ایران را نیز در دست دارند پرداخته شده است.

۳-۱-۱ - شرکت Cabot

شرکت Cabot در صنعت شیمی و پلا ستیک و تولید مواد افزودنی نانو شیمی بیش از ۱۳۰ سال فعالیت دارد. شعبه مرکزی این شرکت در بوستون آمریکا می‌باشد. این شرکت طیف وسیعی از مواد نانو ساختار مورد استفاده در بهسازی سازه و خاک را تولید می‌کند[۲].

۳-۱-۲ - شرکت Degussa- evonik

این شرکت ۱۷۰ سال قبل در شهر برلین تاسیس شد و در سال ۱۸۹۰ به شهر ESSEN آلمان تغییر مکان داد. این شرکت در زمینه‌های مختلف نانوتکنولوژی و تولید مواد و ذرات نانو ساختار فعالیت دارد. شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان نمایندگی محصولات این شرکت را داراست[۳-۵].

۳-۱-۳ - شرکت SOLVAY

SOLVAY یک شرکت شیمیایی بلژیکی است که در سال ۱۸۶۳ تاسیس شد. دفتر مرکزی این شرکت در شهر بروکسل بلژیک قرار دارد. این شرکت علاوه بر تولید مواد نانو ساختار مختلف یکی از تولیدکنندگان اصلی نانو ذرات رس می‌باشد[۶].

۳-۱-۴ - شرکت MKNANO

این شرکت در سال ۲۰۰۷ با تکیه بر تکنولوژی نانو در تورنتو کانادا تاسیس شد و اکثر افزودنی‌های نانو برای بتن را تولید می‌نماید و هم‌اکنون در بیش از ۳۵ کشور نمایندگی دارد[۷].

۳-۱-۵ - شرکت Wacker

شرکت Wacker آلمان در سال ۱۹۱۴ توسط دکتر الکساندر ویکر تاسیس شد و در کشورهایی از جمله آمریکا، انگلیس، چین، کره جنوبی و ترکیه فعال است. شرکت Wacker با سابقه ۱۰۰ ساله به عنوان بزرگترین تولیدکننده سیلیکون در رده دوم جهان است. محصولات این شرکت توسط نمایندگی آن، شرکت کیان تجارت وارد ایران می‌گردد[۷, ۸].

در نمایشگاه European Coatings Show (ECS) 2017 که در آپریل گذشته در نورنبرگ برگزار شد، گروه شیمیایی Wacker سری جدیدی از محصولات پیونده (Binder) خود با نام SILRES® REN70M را معرفی کرد. این محصولات در پوشش‌های با دمای بالا کاربرد دارد. در واقع این شرکت ادعا می‌کند زمانیکه از این محصولات در پوشش‌ها استفاده می شود تحمل دمایی آن تا ۶۰۰ درجه‌ی سلسیوس افزایش پیدا می‌کند. برای پوشش‌های مقاوم در برابر تغییرات آب و هوایی (weathering-resistant)، شرکت Wacker یک سیلیکون جدید واسطه به نام SILRES® IC 235 را معرفی کرده است. این محصول جدید به هیچ وجه حاوی ترکیبات آروماتیک نیست. این محصول در پوشش‌دهی پل‌ها، توربین‌های بادی و یا تجهیزات صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. برای کاربردهای مقاوم در برابر آتش نیز شرکت Wacker محصول جدیدی با نام VINNAPAS®EZ3067 را تولید کرده است. این محصول نیز در نمایشگاه به علاقمندان این حوزه معرفی شد. محصول SILRES®REN70-M تقریبا عاری از هرگونه ترکیبات آروماتیک بوده و جایگزین مناسبی برای چسباننده‌های معمول در کاربردهای مقاوم در برابر حرارت و شرایط آب و هوایی محسوب می‌شود. این نوع چسباننده‌های رزین سیلیکونی معمولا به صورت محلول در حلال‌هایی نظیر زایلن به فروش می‌رسند. این درحالی است که محصول SILRES®REN70-M از ماده‌ای به عنوان حلال استفاده کرده که محصولی زیست‌تخریب‌پذیر نیز هست. محصول SILRES®REN70-M تلفیق مناسبی از انعطاف‌پذیری و سفتی را ایجاد نموده و زمانی که از آن در پوشش فلزات استفاده شود، از خوردگی (Corrosion) جلوگیری نموده و حتی در دماهای بسیار زیاد یا افت و خیزهای شدید دمایی نیز بسیار مقاوم است[۹].

۳-۱-۶ - شرکت GRACE

این شرکت در سال ۱۸۴۵ در کلمبیا تاسیس شد و انواع مواد نانو ساختار را تولید می‌نماید. شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان نمایندگی محصولات این شرکت را داراست [۳, ۱۰].

۳-۱-۷ - شرکت Merck آلمان

شرکت مرک در سال ۱۶۶۸ توسط یاکوب مرک تاسیس شد. در سال ۱۸۱۶ امانوئل مرک نوه او و همکارانش کارخانه شیمیایی دارویی تاسیس کردند که علاوه بر مواد اولیه داروها، مواد شیمیایی خاص دیگری را نیز در برنامه تولید داشت. بیش از ۸۰۰ محصول اختصاصی در کاتالوگ ۱۸۶۰ به چشم می‌خورد که طی گذر به قرن بعد به ۱۰ هزار محصول رسید. گروه‌های تولیدی مرک در بخش‌های مختلف بیش از ۲۰ هزار محصول تخصصی درحیطه دارویی، مواد شیمیایی خاص و محصولات آزمایشگاهی به کمک نانو تکنولوژی را تولید می‌کنند. شرکت مرک آلمان در سال ۱۳۴۷ شرکت بازرگانی مرک را با هدف بازاریابی و فروش مواد شیمیایی آزمایشگاهی و دارویی در تهران ساختمان مرک تاسیس نمود. شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان نمایندگی محصولات این شرکت را داراست [۳, ۱۱, ۱۲].

۳-۱-۸ - شرکت Sigma-Aldrich

شرکت سیگما آلدریچ یک شرکت شیمیایی، علوم زیستی و بیوتکنولوژی آمریکایی است که در سال ۱۹۷۵ با ادغام شرکت شیمیایی سیگما و شرکت شیمی صنعتی آلدریچ تاسیس شد. این شرکت در سنت لوئیس اداره می شود و در حدود ۴۰ کشور مختلف فعالیت دارد. در سپتامبر ۲۰۱۴، شرکت آلمانیMerck KGaA اعلام کرد که شرکت Sigma-Aldrichرا به مبلغ ۱۷ میلیارد دلار خریداری خواهد کرد. این فرایند خرید در ماه نوامبر سال ۲۰۱۵ تکمیل شد و سیگما آلدریچ به یکی از شرکت‌های فرعی Merck KGA تبدیل شد. این شرکت در حال حاضر بخشی از کسب و کار و تجارت علمی و بیولوژیک شرکت Merck است و پس از ادغام با شرکت Millipore که قبلا توسط Merck خریداری شده بود، به عنوانMilliporesSigma کار می‌کند. امروزه محصولات تولیدی نانو ساختار مختلفی از این شرکت از قبیل نانو سیلیس و نانو ذرات رس و دیگر افزودنی‌های نانو ساختار خاک و بتن وجود دارد. شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان نمایندگی محصولات این شرکت را داراست [۳, ۱۳].

۳-۱-۹ - شرکت آمریکایی US Research Nanomaterials, Inc

این شرکت در هیوستن آمریکا تاسیس شد و انواع نانو مواد را در بسیاری از کشورها به فروش می‌رساند. شرکت نانو پاسارگاد نوین تنها دارنده نمایندگی این شرکت در خاورمیانه می‌باشد[۱۰, ۱۱].

۳-۱-۱۰ - شرکت‌های نیپون و اوجی

تولیدکنندگان اصلی نانوالیاف سلولزی قابل استفاده در بهسازی بتن در چین، شرکت‌های نیپون و اوجی بوده که قرار است تولید خود را در سال‌های آینده افزایش دهند. شرکت اوجی قادر به تولید سالانه بیش از ۴۰ تن نانوالیاف سلولزی می‌باشد [۱۲, ۱۳].

۲-۳- شرکت‌های فعال ایرانی در تکنولوژی مواد نانو ساختار در زمینه بهسازی خاک و سازه

در ادامه به بررسی شرکت‌های ایرانی که در زمینه تامین و یا تولید مواد نانو جهت بهسازی خاک و سازه فعالیت دارند پرداخته می شود. در جدول ۳-۲ شرکت‌های فعال در زمینه تولید و تامین مواد نانو ساختار در ایران آورده شده است.

جدول ۳-۲: بررسی شرکت‌های فعال در زمینه تولید و تامین مواد نانو ساختار در ایران

نام شرکت	محصول	نحوه فعالیت	سال تاسیس
مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن	نانو ذرات	تولید کننده	۱۳۵۲
فناوران نانو مقیاس	نانو الیاف پلیمری	تولید کننده	۱۳۸۳
مجتمع فناوری نوین فدک	نانو اکسید سیلیس	تولید کننده	۱۳۸۳
شرکت صنعت آوران ویستا	نانو پلیمر و نانو سیلیس	تولید کننده	۱۳۸۱
شرکت صنایع نانو سیلیس ایساتیس	نانو سیلیس	تولید کننده	۱۳۹۱
شرکت شیمیایی بتن پلاست	افزودنی های بتن	تولید کننده	۱۳۸۷
شرکت نانو مواد پارس	افزودنی های نانو بتن	تولید کننده	۱۳۹۵
شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان	الیاف نانوکاپوزیتی	تولید کننده	۱۳۸۵
مهرگان شیمی	نانو رس مونتموریولینیت	تولید کننده	۱۳۸۹
پژوهشکده صنایع رنگ ایران	نانو پودرها	تولید کننده	۱۳۸۴
شرکت ستاره مواد سرا	افزودنی های نانو بتن	تولید کننده	۱۳۷۷
شرکت هایتک سیلیکات	نانو سیلیس	تولید کننده	۱۳۸۳
آرا پلیمر نگین فن آور	نانو سیلیکا	آزمایشگاهی	۱۳۸۴
پوشش های نانو ساختار	نانو اکسید تیتانیوم	تولید کننده	۱۳۸۵
پیام آوران نانو فناوری فردا نگر	نانو آلومینا	تولید کننده	۱۳۸۶
شرکت تامین نانوساختار آویژه (نانو ساو)	مواد نانو	تولید کننده	۱۳۸۹
شرکت نانو رنگدانه شریف	نانو سیلیس	تولید کننده	۱۳۸۶
شرکت نانو نصب پارس	مواد نانو	تولید کننده	۱۳۸۳
برج و بارو فارس	نانو سیلیس و افزودنیهای نانو	تولید کننده	۱۳۹۳
گروه نانو الیاف دانشگاه صنعتی اصفهان	نانوالیاف	تولید کننده	۱۳۸۳
شرکت فن آوران راسخون	نانوذرات و نانو ذرات فلزی	تولید کننده	۱۳۹۳
فناوری نانو ساختار آسیا	دستگاههای خطوط تولید نانو الیاف	تولید کننده	۱۳۸۷
شرکت نانو زاک	نانو ذرات و نانو لوله های کربنی	تولید کننده	۱۳۶۵
نانو پاسارگاد نوین- نماینده شرکت آمریکایی US Research	افزودنی های نانو بتن	نمایندگی	۱۳۸۳

نمایندگی شرکت‌های USnano,Merck,Degussa, Aldrich Sigma	افزودنی های نانو	نمایندگی	۱۳۹۰
شرکت اکسیر شرق - نماینده شرکتZydex هندوستان	افزودنی های نانو و زایکوسل	نمایندگی	۱۳۷۷

در ادامه به شناسایی تعدادی از شرکت‌های تولید کننده مواد نانو ساختار که بیشتر در صنعت بهسازی بتن و خاک فعالیت دارند پرداخته شده است.

۳-۲-۱ - شرکت فناوران نانو مقیاس

شواهد و مستندات نشان می‌دهند شرکت فناوران نانومقیاس که در سال ۱۳۸۳ تاسیس شد در حال حاضر یکی از شرکت‌های مطرح در زمینه تجهیزات و محصولات مرتبط با این فناوری در دنیاست. محصولات این شرکت تاکنون به کشورهای مالزی، کره جنوبی، پاکستان، نیجریه، چین و آلمان صادر شده و انتظار می‌رود در آینده نزدیک رشد قابل توجهی در زمینه صادرات داشته باشد [۱۴].

۳-۲-۲ - مجتمع فناوری‌های نوین فدک

مجتمع فناوری‌های نوین فدک مجموعه‌ای از گروه‌های تحقیقاتی، تولیدی و اجرایی است که از سال ۱۳۸۳ فعالیت خود را در زمینه تولید مواد اولیه شیمیایی پیشرفته و خاص آغاز نموده است. تولید ۸ نوع محصول با فرمولاسیون خاص برای اولین بار در کشور، نتیجه فعالیت‌های اصلی این مجتمع فناوری تا به امروز است. یکی از اصلی‌ترین فعالیت‌های این مجتمع، تولید دانش فنی محصولات پیشرفته است. اولین دانش فنی تولید شده در این شرکت، دانش فنی تولید آلومینیوم سیلیکات سنتزی برای اولین بار درکشور می‌باشد. این محصول هم‌اکنون در شرکت هایتک سیلیکات با نام تجاری Desica در حال تولید صنعتی می‌باشد. علاوه بر محصول آلومینیوم سیلیکات، افزودنی‌های پودر شوینده، سیلیکای سنتزی و نانو سیلیکا جزء محصولات بومی سازی شده در این شرکت است که در شرکت‌های وابسته به مجتمع فدک تحت عناوین نیکوپاک فدک، نانو پویان فدک و گروه سبزاندیشان فدک در حال تولید می‌باشد. مجتمع فناوری‌های نوین فدک با کسب ۶ جایزه ملی بر روی روش‌های تولید نانو پودرها و سیلیکاهای پیشرفته تنها دارنده دانش فنی تولید این مواد ویژه در خاورمیانه است[۱۵].

۳-۲-۳ - شرکت صنعت آوران ویستا

شرکت فنی و مهندسی صنعت آوران ویستا در سال ۸۸ با هدف ارائه خدمات فنی و مهندسی در زمینه مهندسی مواد و فرآیندهای تولید تاسیس گردید. در این راستا هدف اصلی اعضای موسس شرکت با توجه به تخصص و تجربیات خود در زمینه مهندسی مواد و فرآیندهای تولید، کمک به ارتقاء کیفیت محصولات تولیدی صنایع مختلف فلزی، پلیمری و سرامیکی کشور و همچنین انتقال دانش لازم در زمینه فناوری‌های نوین به صنعتگران محترم جهت افزایش کیفیت تولیدات داخلی، افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات به منظور دستیابی به محصولات در حد استانداردهای جهانی می‌باشد. پس از ارائه طرح تولید نانو کامپوزیت و آلیاژهای پلیمری و همچنین نانو سیلیکا کلوئیدی به شورای بررسی صلاحیت علمی پارک علم و فناوری فارس در سال ۹۱، شرکت ویستا توانست مجوز حضور در مرکز رشد نفت، گاز و پتروشیمی پارک علم و فناوری فارس را به عنوان یک شرکت دانش بنیان

اخذ نماید. در این راستا با حمایت مالی و معنوی مرکز مذکور، این شرکت در سال ۹۲ موفق به تولید نیمه صنعتی این نوع مواد نوین شد [۱۶].

۳-۲-۴ - شرکت صنایع نانو سیلیس ایساتیس

شرکت صنایع نانو سیلیس ایساتیس یک شرکت تحقیقاتی تولیدی است که از سال ۱۳۹۱ فعالیت خود را در زمینه تولید محصولات نانو سیلیکا آغاز نموده است. تولید ۴ نوع محصول ژل نانو سیلیس، پودر نانو سیلیس، سیلیس آمورف سنتزی و کود پتاسیم سیلیکات ماحصل فعالیت‌های اصلی این شرکت تاکنون می‌باشد[۱۷].

۳-۲-۵ - شرکت شیمیایی بتن پلاست

شرکت شیمیایی بتن پلاست فعالیت خود را در سال ۱۳۸۷ با هدف تولید و ایجاد ارزش‌آفرینی از طریق تولید محصولات با کیفیت شاخص، پایدار و واجد ارزش‌های زیست‌محیطی و با رعایت قوانین ملی و استانداردهای فنی آغاز نمود. بتن پلاست با تولید انواع اسپیسرهای پلاستیکی بتن و کاشی، تجهیزات پلاستیکی مورد استفاده در قالب‌بندی بتن، نوارهای واتراستاپ، مواد شیمیایی مورد استفاده در بتن، چسب‌های ساختمانی، گروت‌ها و سایر محصولات پایه بتن سهمی مناسب در نیازهای پایه بتن دارد. در زمینه بازرگانی علاوه بر داشتن سهمی در بازار داخلی تاکنون با بسیاری از پروژه‌های مهم در کشورهای همسایه نظیر افغانستان، عراق و ترکمنستان همکاری داشته است[۱۸].

۳-۲-۶ - شرکت نانو مواد پارس

شرکت نانو مواد پارس در سال ۱۳۸۶ تاسیس شد. این شرکت در زمینه تولید مواد پیشرفته نظیر نانو پودرها، سوپرآلیاژها، پوشش‌های سخت، نمونه‌سازی قطعات پیشرفته، بریزینگ، سینترینگ و عملیات حرارتی پیشرفته در خلا فعالیت می‌نماید[۱۹].

۳-۲-۷ - شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان

این شرکت در سال ۱۳۸۵ تاسیس شده و کارخانه و دفتر مرکزی این شرکت در سیرجان قرار دارد. این شرکت تولیدکننده الیاف مرکب پلیمری دارای گواهینامه فنی از مرکز راه، مسکن و شهرسازی (وزارت راه و شهرسازی) است. انواع نانوگرانول، کامپاند پلیمری پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی استر، پلی آمید نانو نخ و الیاف پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی استر، پلی آمید با مقاومت و مدول بالا، میکرو و ماکرو الیاف به صورت شبکه مش، ماکرو الیاف مصنوعی، نخ کابل پوششی، الیاف تک‌رشته‌ای متشکل از ریز رشته‌های به هم چسپیده پلی اتیلن از تولیدات این شرکت هستند. الیاف تولیدی این شرکت در بهسازی بتن و سیمان هم مصرف می‌شوند[۱۴].

۳-۲-۸ - شرکت مهرگان شیمی

گروه مهرگان شیمی در سال ۱۳۸۹ در حوزه تولید کالاهای فناور در زمینه شیمی فعالیت خود را آغاز کرد. مهرگان شیمی توانست بخش عمده‌ای از بازار داخلی را تامین و وارد صادرات شود. این شرکت شامل تولیدی فناوران مهرگان شیمی سامان و واردات مواد مهرگان می‌باشد که قصد تامین مواد شیمیایی بازار ایران را دارا دارد. از جمله محصول عمده تولیدی این شرکت نانو رس می‌باشد[۲۰].

۹-۲-۳ - شرکت ستاره مواد سرا

شرکت ستاره مواد سرا تولیدکننده واتر ا ستاپ P.V.C ا ستاندارد و افزودنی‌های کمکی بتن با بیش از ۲۰ سال سابقه در این زمینه می‌با شد. مح صولات این شرکت در پروژه‌های سد سازی مختلف مورد ا ستفاده قرار گرفته است[۲۱].

۱۰-۲-۳ - شرکت هایتک سیلیکات

شرکت هایتک سیلیکات اولین و تنها تولیدکننده سیلیکات آلومینیوم سنتزی در خاورمیانه می‌باشد. این شرکت به پشتوانه توان علمی و فنی کارشناسان خود پس از ۵ سال تلاش تحقیقاتی و اجرایی توانست برای اولین بار در ایران و خاورمیانه، خط تولید سیلیکات آلومینیوم با نام تجاری د سیکا و در دو گرید تخ ص صی د سیکا P120 و دسیکا AC130 را با کیفیتی قابل رقابت با محصولات معتبرترین تولیدکنندگان جهانی در سال ۱۳۹۰ راه اندازی کند و توان پاسخگویی کامل به نیاز بازار داخلی ایران را فراهم آورد. این خط با سرمایه‌گذاری بخش خصوصی با ظرفیت تولید بیش از ۱۵۰۰ تن سیلیکات آلومینیوم سنتزی در سال راه‌اندازی شد و توان پاسخگویی کامل به نیاز بازار داخل را دارد. سیلیکات آلومینیوم تولیدی شرکت هایتک با نام تجاری دسیکا (DESICA) می‌باشد که دارای چند گرید است و در صنایع مختلف کاربرد فراوانی دارد. شرکت هایتک سیلیکات از سال ۱۳۹۳ تاکنون به عنوان اولین صادرکننده سیلیکاهای پیشرفته در ایران، صادرات به کشورهای همسایه را نیز آغاز نموده و هر سال حوزه جغرافیایی و حجم صادرات خود را افزایش داده است[۱۷].

۱۱-۲-۳ - شرکت نانو رنگدانه شریف

شرکت نانو رنگدانه شریف، ابتدا در سال۱۳۸۶ با ایده محوری تولید ذرات نانو اکسید روی جهت استفاده در صنایع دارویی و پزشکی در مرکز رشد صنایع رنگ شروع به فعالیت نمود و با گذشت زمان و به نتیجه رسیدن تولید نمونه آزمایشگاهی ایده محوری، فعالیت خود را معطوف به تولید نیمه‌صنعتی این محصول کرد. در سال ۸۷ نمونه نیمه صنعتی این محصول نیز تولید شد. با توجه به مطالعات و تحقیقات انجام شده توسط تیم این شرکت، فعالیت‌ها متمرکز در تولید دیگر مواد نانویی گردید که در ابتدا تولید نانو ذرات کلوئیدی سیلیس و سپس نانو ذرات نقره مدنظر قرار گرفت. در ادامه، نانو پلیمر کامپوزیتی آنتی باکتریال و چندین محصول دیگر به تولید آزمایشگاهی رسید. در سال ۸۸ این هسته فناور تبدیل به شرکت شد و در خرداد سال ۹۰ موفق به دریافت پروانه بهره‌برداری Hightechبرای هفت محصول نانویی از وزارت صنایع گردید[۲۲].

۱۲-۲-۳ - شرکت برج و بارو فارس

این شرکت در زمینه تولید محصولات نانو ساختار در زمینه‌های مختلف از سال ۱۳۹۳ شروع به فعالیت کرد. محصولات این شرکت با کیفیتی به مراتب بالاتر و قیمتی پایین‌تر از نمونه‌های وارداتی به بازار ساختمان، ابرساختمان‌های تجاری و اداری، مسکونی و خدماتی ارائه می‌شود. تکنولوژی نانو و اجرای مطلوب آن موجب افزایش کیفیت فضاهای زندگی و افزایش طول عمر سازه‌ها می‌گردد. ارتباط مستقیم فعالین حوزه ساخت و ساز از جمله سازندگان، مهندسین و تولیدکنندگان مصالح و تبادل اطلاعات آن‌ها در خصوص نیازها، توانایی‌ها و محدودیت‌ها می‌تواند زمینه ارتقای صنعت ساختمان، احساس امنیت اجتماعی و اقتصادی جامعه و در نهایت ساخت شهرهای

زنده، پویا و با هویت را فراهم سازد. از محصولات این شرکت می‌توان به افزودنی‌های نانو سیلیس و ضد یخ بتن و انواع آب‌بندهای پودری و نانوژل آب‌بند و خاک‌های متخلخل آب‌گریز اشاره نمود[۲۳].

۱۳-۲-۳ - شرکت نانو زاک

این شرکت با همکاری تنی چند در سال ۱۳۶۵ تاسیس شد. کارخانه تولید مواد نانو در یکی از مناطق محروم کشور قرار دارد و طی این سال‌ها توانسته سهم اندکی در عرصه تولید محصولات جدید و های‌تک داشته باشد. این شرکت تولیدی انواع محصولات نانوساختار را با دانش داخلی تولید می‌نماید. قیمت به روز شده چند نوع از مواد نانو مورد بحث در این پژوهش بر اساس نرخ‌های به روز شده از کارخانه به شرح جدول ۳-۳ استعلام شده است[۲۴].

جدول ۳-۳: قیمت اولیه اعلام شده محصولات نانو در بازار داخلی[24]

ردیف	مشخصات	محتوی	قیمت «تومان»	کد کالا
1	پودر نانو رس خالص (بدون افزودنی)	کیلوگرم	50000	3014
2	محلول نانو رس (تثبیت‌کننده شن‌های روان و ...)	لیتر	55000	3015
3	محلول نانو سیلیس کلوئیدی	لیتر	35000	3021
4	پودر نانو سیلیکا خالص	(۱۰۰گرم)	30000	3025
5	پودر نانو اکسید روی	کیلوگرم	45000	3051
6	محلول ژله‌ای نانو ذرات آهن	لیتر	40000	2770

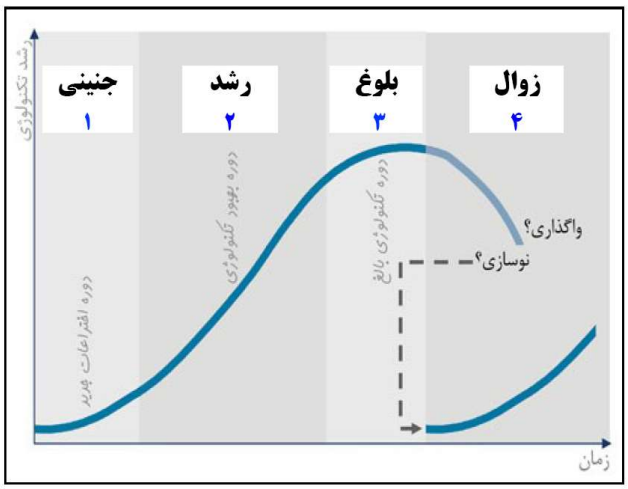
۳-۳- منابع

[1] *www.nanowerk.com*.
[2] *www.cabotcorp.com*.
[3] *www.corporate.evonik.com*.
[4] *www.nanoproduct.ir*.
[5] *www.naftkala.com*.
[6] *www.solvay.com*.
[7] *www.wacker.com*.
[8] *www.kiantrade.ir*.
[9] *www.iranpolymer.com*.
[10] *www.us-nano.com*.
[11] *www.pasargadnovinco.com*.

[12] *www.nipponpapergroup.com*.
[13] *www.ojiholdings.co*.
[14] *www.sirjannano.com*.
[15] *www.fadakgroup.ir*.
[16] *www.savista.ir*.
[17] *www.hitechsilicate.com*.
[18] *www.betonplast.com*.
[19] *www.parsnanomaterials.com*.
[20] *www.nano.mehreganchem.com*.
[21] *www.setarehmavadsara.com*.
[22] *www.sharifnanopigment.com*.
[23] *www.bbf.co.ir*.
[24] *www.nanozuk.com*.

فصل چهارم

تطبیق دانش‌های فنی و فناوری‌های نوین جهانی در ارتباط با مواد نانو ساختار با اسناد بالادستی کشور و نیازهای آتی صنعت برق و انرژی و ارزیابی چرخه عمر فناوری و بازار استفاده از مواد نانو در سازه‌های صنعت برق



فهرست مطالب

مقدمه ۹۰

۲- شناسایی دانش‌ها و فناوری‌های به روز جهانی مواد نانو ساختار در زمینه سازه‌ها ۹۱

۲-۱- معرفی آیین نامه‌ها و استانداردهای ملی و بین‌المللی مواد نانو ساختار مطرح شده در بند ۲-۱ ..... ۹۱

۲-۱-۱ - استانداردهای استفاده از مواد نانوساختار ۹۱

۲-۱-۲ - استانداردهای فناوری نانو در ایران و جهان ۹۲

۲-۲- جمع‌آوری مقالات و تحقیقات داخلی و خارجی انجام گرفته و کتب تالیف شده برای موارد مطرح شده در بند ۲-۱ ۹۹

۲-۳- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بهبود خواص و عملکرد سازه‌ای بتن با استفاده از مواد نانوساختار ۱۰۰

۲-۳-۱ - مقدمه ۱۰۰

۲-۳-۲ - تغییرات کارایی و خواص بتن تازه با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۰۱

۲-۳-۳ - تغییرات دوام و نفوذپذیری بتن با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۱۶

۲-۳-۴ - تغییرات مقاومت مکانیکی بتن با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۲۴

۱۶۰

۲-۳-۵ - تاثیر نانو ذرات بر واکنش قلیایی بتن ۱۶۷

۲-۳-۶ - خلاصه نتایج پژوهشهای انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات بتن با استفاده از مواد نانوساختار ۱۶۷

۲-۴- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی با استفاده از مواد نانو ساختار ۱۷۷

۲-۴-۱ - مطالعات انجام شده در مورد استفاده از مواد نانو ساختار در مقاوم‌سازی سازهها ۱۷۷

۲-۴-۱-۱- استفاده از نانولولههای کربن به همراه الیاف کربنی و رزین اپوکسی در مقاوم‌سازی تیرهای بتن آرمه ۱۷۷

۲-۴-۱-۲- اثر استفاده از اپوکسی اصلاح شده با نانولولههای کربنی بر رفتار لغزش باندی بین صفحات FRP و بتن ۱۸۱

۲-۴-۱-3- بهبود مقاومت لرزهای اتصال پیچی GFRP با نانو لولههای کربن ۱۸۴

۲-۴-۱-3-1- استفاده از نانولولههای کربن چند جداره بمنظور بهبود عملکرد اتصال پیچی برشی GFRP ۱۸٤

۲-۴-۱-3-2- بهبود عملکرد خستگی در کامپوزیت GFRP با استفاده از نانو لولههای کربنی ۱۸۸

۳-۳-۱-۴-۲- استفاده از نانوکامپوزیت رس-اپوکسی به همراه CFRP ۱۹۰

۴-۱-۴-۲- افزایش کارایی نانوکامپوزیت پلیمرهای اپوکسی برای تقویت پل‌ها..... ۱۹۱

۵-۱-۴-۲- آنالیز مودال آزمایشگاهی برای یک قوس غیر مسلح مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت الیافی مسلح شده با نانو صفحات گرافن..... ۱۹۳

۵-۲- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بررسی مصالح خود ترمیم‌شونده با بکارگیری مواد نانو ساختار ۱۹۵

۱-۵-۲ - کاربرد میکرو-نانو ساختارها در سیستم خود ترمیمی بتن..... ۱۹۵

۶-۲- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به استفاده از نانو حسگرها و نانو سنسورها در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها ۲۰۰

۱-۶-۲ - خاصیت پیزو-مقاومتی مواد کامپوزیت نانو ساختار..... ۲۰۱

۲-۶-۲ - انواع روشهای استفاده از مواد نانو ساختار به عنوان حسگر..... ۲۰۳

۱-۲-۶-۲- رادهای (میلههای)کامپوزیت خودسنجشگر..... ۲۰۴

۲-۲-۶-۲- کامپوزیت سیمان و نانو لولههای کربنی..... ۲۰۴

۳-۲-۶-۲- رزین اپوکسی اصلاح شده با نانو لولههای کربنی چند جداره با خصوصیت خود-سنجشگری ۲۰۸

۴-۲-۶-۲- حسگر کرنش با استفاده از نانو صفحات گرافن..... ۲۰۹

۵-۲-۶-۲- حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT تهیه شده برای آزمایش‌های دینامیکی... ۲۰۹

۶-۲-۶-۲- حسگر خازنی فیلم نرم الاستومری به همراه نانو ذرات کربن سیاه..... ۲۱۶

۷-۲-۶-۲- حسگر کامپوزیت سیمان/ نانو صفحات گرافیت..... ۲۱۸

۸-۲-۶-۲- حسگر سیمان مهندسی شده با استفاده از نانو ذرات کربنی..... ۲۱۹

۹-۲-۶-۲- استفاده از حسگر خازنی الاستومتری نرم(SECs) در پایش سلامت پره‌های توربین بادی ۲۱۹

۷-۲- بررسی پیشرفت‌های علمی و رویکرد جهانی به بهبود شرایط ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار ۲۲۳

۱-۷-۲ - تغییرات خواص خمیری خاک‌ها با بهره‌گیری از مواد نانو ساختار..... ۲۲۳

۱-۱-۷-۲- خاک ماسه‌ای رسدار..... ۲۲۳

۲-۱-۷-۲- خاک‌های ریزدانه..... ۲۲۵

۲-۷-۲ - تغییرات نفوذپذیری خاک‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار..... ۲۳۱

۳-۷-۲ - کاهش پتانسیل تورم خاک با استفاده از مواد نانو ساختار..... ۲۳۴

۲-۷-۴ - تغییرات چگالی، وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک با استفاده از نانو مواد..... ۲۳۸
۲-۷-۴-۱- خاک‌های ریزدانه..... ۲۳۸
۲-۷-۴-۲- خاک‌های ماسهای..... ۲۴۴
۲-۷-۵ - بهبود مشکلات واگرایی و رمبندگی خاک‌ها به کمک مواد نانو ساختار..... ۲۴۵
۲-۷-۵-۱- واگرایی..... ۲۴۵
۲-۷-۵-۲- رمبندگی..... ۲۴۶
۲-۷-۶ - بهبود خواص مقاومت مکانیکی خاک‌ها با استفاده از مواد نانو ساختار..... ۲۵۰
۲-۷-۶-۱- خاک‌های ریزدانه..... ۲۵۰
۲-۷-۶-۲- خاک‌های ماسهای..... ۲۷۱
۲-۷-۷ - بهبود مقاومت روانگرایی خاک با استفاده از نانو مواد..... ۲۷۶
۲-۷-۸ - خلاصه نتایج پژوهشهای انجام شده در خصوص تغییر خواص و مشخصات ژئوتکنیکی با استفاده از مواد نانوساختار..... ۲۷۸
۲-۸- منابع ۲۸۶

مقدمه..... ۳۰۳

۳- بررسی و امکان‌سنجی تولید و استفاده از مواد نانو ساختار در کشور..... ۳۰۴
۳-۱- شرکت‌های برتر جهان در فناوری مواد نانو ساختار در زمینه بهسازی خاک و سازه..... ۳۰۴
۳-۱-۱ شرکت Cabot - ۳۰۷
۳-۱-۲ شرکت Degussa- evonik - ۳۰۸
۳-۱-۳ شرکت SOLVAY - ۳۰۸
۳-۱-۴ شرکت MKNANO - ۳۰۸
۳-۱-۵ - شرکت Wacker ۳۰۸
۳-۱-۶ شرکت GRACE - ۳۰۹
۳-۱-۷ - شرکت Merck آلمان..... ۳۰۹
۳-۱-۸ - شرکت Sigma-Aldrich..... ۳۰۹
۳-۱-۹ - شرکت آمریکایی US Research Nanomaterials, Inc ۳۰۹
۳-۱-۱۰ - شرکت‌های نیپون و اوجی..... ۳۰۹
۳-۲- شرکت‌های فعال ایرانی در تکنولوژی مواد نانو ساختار در زمینه بهسازی خاک و سازه..... ۳۱۰
۳-۲-۱ - شرکت فناوران نانو مقیاس..... ۳۱۱
۳-۲-۲ - مجتمع فناوری‌های نوین فدک..... ۳۱۱
۳-۲-۳ شرکت صنعت آوران ویستا - ۳۱۱
۳-۲-۴ - شرکت صنایع نانو سیلیس ایساتیس..... ۳۱۲

- ۳-۲-۵ شرکت شیمیایی بتن پلاست ۳۱۲
۳-۲-۶ - شرکت نانو مواد پارس ۳۱۲
- ۳-۲-۷ شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان ۳۱۲
- ۳-۲-۸ شرکت مهرگان شیمی ۳۱۲
- ۳-۲-۹ شرکت ستاره مواد سرا ۳۱۳
۳-۲-۱۰ - شرکت هایتک سیلیکات ۳۱۳
- ۳-۲-۱۱ شرکت نانو رنگدانه شریف ۳۱۳
۳-۲-۱۲ - شرکت برج و بارو فارس ۳۱۳
۳-۲-۱۳ - شرکت نانو زاک ۳۱۴
۳-۳- منابع ۳۱۴

مقدمه ۳۲۹

Error! Bookmark not defined. -۴

Error! Bookmark not defined. ۵-

Error! Bookmark not defined. ۶-

۷- تطبیق دانش‌های فنی و فناوری‌های نوین جهانی در ارتباط با مواد نانو ساختار با اسناد بالادستی کشور و نیازهای آتی صنعت برق و انرژی و ارزیابی چرخه عمر فناوری و بازار استفاده از مواد نانو در سازه‌های صنعت برق ۳۳۰
۷-۱- مطالعه و بررسی سیاست‌های کلان استاد بالادستی کشور مرتبط با صنعت برق ۳۳۰
۷-۱-۱ - قانون برنامه پنج ساله پنجم توسعه کشور [۱] ۳۳۰
۷-۱-۲ - قانون برنامه پنج ساله ششم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران (۱۴۰۰-۱۳۹۶) [۲] ۳۳۱
۷-۱-۳ - سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ کشور[۳] ۳۳۳
۷-۱-۴ - بیانیه گام دوم انقلاب خطاب به ملت ایران [۴] ۳۳۳
۷-۱-۵ - سند چشم‌انداز و برنامهٔ راهبردی بلند مدت وزارت نیرو [۵] ۳۳۴
۷-۱-۶ - مجموعه مقاصد و اهداف فناورانه کلان در صنعت برق کشور [۶] ۳۳۶
۷-۱-۷ - سیاست‌های کلی ابلاغی توسط مقام معظم رهبری در بخش پدافند غیرعامل [۷] ۳۳۶
۷-۱-۸ - سیاست‌های کلی تولید ملی، حمایت از کار و سرمایه ایرانی [۸] ۳۳۶
۷-۱-۹ - سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی ابلاغی مقام معظم رهبری [۹] ۳۳۷
۷-۱-۱۰ - سند «اولویت‌های تحقیقاتی و فناوری مصوب کمیسیون‌های تخصصی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری» مصوبه‌ی سال ۱۳۹۰[۱۰] ۳۳۷

-۷-۲ بررسی الزامات به‌کارگیری مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق با توجه به رویکرد و اهداف اسناد بالادستی کشور و نیازهای آتی صنعت برق و انرژی ۳۳۷
۳-۷- ارزیابی چرخه عمر فناوری و بازار استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق ۳۴۰
۱-۳-۷ - طبقه‌بندی فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق از منظر چرخه عمر ۳۴۰
۱-۱-۳-۷- چرخه عمر فناوری ۳۴۰
۲-۱-۳-۷- چرخه عمر محصول- بازار ۳۴۴
۴-۷- اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو از سال ۹۵ تا ۹۷ ..... ۳۴۵
۱-۴-۷ - اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو سال ۱۳۹۵[۱۲] ۳۴۶
۲-۴-۷ - اولویتهای تحقیقاتی وزارت نیرو سال ۱۳۹۶ [۱۳] ۳۵۴
۳-۴-۷ - اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو ۱۳۹۷ [۱۴] ۳۷۸
۵-۷- منابع ۴۱۳

۸- ارائه فهرست و دسته‌بندی مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق و ارائه روش‌های توسعه‌ی به‌کارگیری آن‌ها در کشور ۴۲۰
-۸-۱ ارائه فهرست انواع مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق ۴۲۰
۱-۱-۸ - معرفی اجمالی سازههای بتنی صنعت برق ۴۲۰
۱-۱-۱-۸- استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات بتن در سازههای بتنی صنعت برق ... ۴۲۰
۲-۱-۱-۸- استفاده از مواد نانو ساختار برای ایجاد خصوصیت خود ترمیمی در سازههای بتنی صنعت برق ۴۲۴
- ۸-۱-۲ معرفی اجمالی سازههای فلزی صنعت برق ۴۲۶
-۸-۱-۲-۱ استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات فلز در سازههای فلزی صنعت برق ۴۲۶
- ۸-۱-۳ استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی در بستر سازههای صنعت برق۴۲۷
- ۸-۱-۴ استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور پایش سلامت سازههای صنعت برق ۴۳۰
۸-۱-۵ - استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور مقاوم‌سازی سازههای بتنی و فولادی صنعت برق ۴۳۲
- ۸-۱-۶ فهرست کلی از مواد نانو ساختار مورد استفاده در سازههای صنعت برق: ۴۳۳
۲-۸- ارائه مزایا و معایب و همچنین محدودیت‌های به‌کارگیری مواد معرفی‌شده در بند (۵-۱) ۴۴۴
- ۸-۲-۱ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار ۴۴۴
۱-۱-۲-۸- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در بتن ۴۴۴
۱-۱-۱-۲-۸- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در کارایی و زمان گیرش بتن ٤٤٤
2-1-1-2-8- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در دوام و نفوذپذیری بتن ٤٤٦
۳-۱-۱-۲-۸- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مقاومت مکانیکی بتن ٤٥٠

۸-۲-۱-۲- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی..... ۴۵۳
۸-۲-۱-۳- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مصالح خودترمیم شونده..... ۴۵۴
۸-۲-۱-۴- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در نانو حسگرها مورد استفاده در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها..... ۴۵۶
۸-۲-۱-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار جهت بهبود شرایط ژئوتکنیکی..... ۴۵۸
۸-۲-۱-۵-۱- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر پلاستیسته خاک (دامنه خمیری) ٤٥٨
8-2-1-5-2- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر نفوذپذیری ٤٥٩
۸-۲-۱-۵-۳- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر تورم خاک ریزدانه ٤٥٩
۸-۲-۱-۵-۴- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر وزن مخصوص حداکثر ٤٦٠
8-2-1-5-5- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر رطوبت بهینه ٤٦٠
۸-۲-۱-۵-۶- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر واگرایی ٤٦١
۸-۲-۱-۵-۷- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر رمبندگی ٤٦١
8-2-1-5-8- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر کرنش انبساطی و انقباضی ٤٦١
۸-۲-۱-۵-۹- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر مقاومت فشاری تک‌محوری ٤٦١
۸-۲-۱-۵-۱۰- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر پارامترهای مقاومت برشی ٤٦٣
8-2-1-5-11- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر چسبندگی خاک ٤٦٣
۸-۲-۱-۵-۱۲- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ٤٦٣
۸-۲-۱-۵-۱۳- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر نسبت تخلخل خاک ٤٦٤
8-2-1-5-14- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر خصوصیات دیگر خاک ماسهای ٤٦٤
۸-۲-۱-۶- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در فولاد سازهای..... ۴۶۵
۸-۲-۱-۷- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در سازههای چوبی..... ۴۶۵
۸-۲-۲ - معایب و محدودیتهای استفاده از نانو ذرات بر انسان و محیطزیست..... ۴۶۶
۸-۲-۲-۱- نانو ذرات در محیط زیست..... ۴۶۶
۸-۲-۲-۲- اساس سمیت نانو ذرات..... ۴۶۷
۸-۲-۲-۳- راههای ورود نانو ذرات به بدن انسان..... ۴۶۹
۸-۲-۲-۴- فاکتورهای محیطی مؤثر بر سمیت نانو ذرات..... ۴۷۱
۸-۲-۲-۵- اثرات نانو ذرات بر محیط آبزیان..... ۴۷۲

۶-۲-۲-۸- تأثیرات نانو ذرات بر محیط خاک ۴۷۲
-۸-۲-۲-۷ تدوین استانداردهای حوزه نانو در ارتباط با سلامتی، ایمنی و محیطزیست ۴۷۲
۳-۸- مطالعه موردی اقتصادی به‌کارگیری از این مواد در سازه‌ها ۴۷۳
- ۸-۳-۱ برآوردهای کمّی بازار نانوتکنولوژی و میزان توجه دولت‌ها به این بازار ۴۷۳
۲-۳-۸ - مطالعه موردی توجیه اقتصادی استفاده از نانوتکنولوژی در مهندسی عمران و صنعت ساخت ۴۷۶
۱-۲-۳-۸- مطالعه امکان‌سنجی اقتصادی راه‌اندازی خط تولید سیمان نانو در عراق (کارخانه سیمان شهر کوفه)[188] ۴۷۶
-8-3-2-2 بررسی تأثیرات اقتصادی استفاده از نانو سیلیس در بتن [189] ۴۷۸
۱-۲-۲-۳-۸- ارزیابی هزینه‌ای چرخه عمر (LCC) ٤٧٩
۳-۲-۳-۸- بررسی صرفه اقتصادی بتن سبک با مقاومت بالا با استفاده از مواد نانو ۴۷۹
۴-۲-۳-۸- مطالعه امکان‌سنجی بتن خود حرارت دهنده با استفاده از المان‌های حرارت دهنده نانو فیبر کربن ۴۸۴
۵-۲-۳-۸- طرح توجیهی تولید پودر نانو سیلیس [193] ۴۸۵
-8-3-2-5-1 معرفی محصول ٤٨٥
۲-۵-۲-۳-۸- نام و کد محصول (آیسیک ۳): ٤٨٦
-8-3-2-5-3 قوانین صادرات و واردات محصول ٤٨٧
۴-۵-۲-۳-۸- بررسی اقتصادی طرح ٤٨٧
۶-۲-۳-۸- مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی تولید مواد ترمیم‌کننده بتن با نانو ذرات[۱۹۴] ۴۸۷
-8-3-2-6-1 شرایط واردات ٤٨٨
-8-3-2-6-2 بررسی و ارائه اطلاعات لازم در زمینه قیمت تولید داخلی و جهانی محصول ٤٨٨
۳-۶-۲-۳-۸- اهمیت استراتژیکی کالا در دنیای امروز ٤٨٩
۴-۶-۲-۳-۸- کشورهای عمده تولیدکننده و مصرف‌کننده محصول ٤٨٩
-8-3-2-6-5 وضعیت عرضه و تقاضا ٤٩٤
-8-3-2-6-6 تجزیه و تحلیل و ارائه جمع‌بندی و پیشنهاد نهایی در مورد احداث واحدهای جدید ٤٩٤
۳-۳-۸ - مروری بر اظهارنظرها حول هزینه-فایده نانو مواد در صنعت ساخت ۴۹۵
- ۸-۳-۴ نانوتکنولوژی و تأثیر آن در صنعت ساخت، از تحقیقات تا فضای فعالیت‌های حرفه‌ای ۴۹۶
۱-۴-۳-۸- هدف و روش انجام نظرسنجی ۴۹۶

۲-۴-۳-۸- فواید اقتصادی در صنعت ساخت و برای جامعه..... ۴۹۷
۳-۴-۳-۸- نتایج نظرسنجی در میان متخصصان و افراد پیشرو در صنعت ساخت‌وساز..... ۴۹۸
۴-۴-۳-۸- خطای تلقی هزینه معادل صرفه اقتصادی..... ۵۰۰
۴-۸- مراجع ۵۰۱
۹- ارائه فهرست پیشنهادی پروژه‌های مرتبط با به‌کارگیری مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق..... ۵۱۹
۱-۹- پروژه‌های پیشنهادی ۵۱۹
۱-۱-۹ - بخش تولید:..... ۵۲۰
1-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در مخازن بتنی آب و سوخت..... ۵۲۰
2-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در دودکشها و برجهای خنک‌کننده..... ۵۲۱
3-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در رآکتور و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی..... ۵۲۲
4-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در برج‌های توربین بادی..... ۵۲۲
5-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازههای بتنی بخش تولید که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند..... ۵۲۳
6-1-1-9- تدوین دستورالعمل ساخت و بهره‌برداری از بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازههای بتنی صنعت برق..... ۵۲۴
7-1-1-9- انجام مطالعات اقتصادی و امکان‌سنجی اقتصادی جهت استفاده از بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار در سازههای بتنی صنعت برق..... ۵۲۵
8-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با زمان گیرش اولیه و نهایی کم با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در سازههای پوستهای بخش تولید..... ۵۲۶
9-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با زمان گیرش اولیه طولانی و دمای هیدراسیون کمتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در بتنریزیهای حجیم مانند سدها..... ۵۲۶
10-1-1-9- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون سازههای بخش تولید که در شرایط سخت محیطی قرار دارند ۵۲۷

-9-1-1-11 طراحی، ساخت و آزمایش بتن با کمترین میزان خزش با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون مخازن، توربینهای بادی، سازه و فونداسیون رآکتور، و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی ۵۲۸

-9-1-1-12 طراحی، ساخت و آزمایش بتنهای پر مقاومت با استفاده از مواد نانو ساختار طبیعی برای کاهش ابعاد سازهای برجهای توربین بادی..... ۵۲۸

-9-1-1-13 طراحی، ساخت و آزمایش بتن با استفاده از مواد نانو ساختار با بیشترین پتانسیل جذب تشعشعات به منظور استفاده در پوسته رآکتورها..... ۵۲۹

-9-1-1-14 طراحی، ساخت و آزمایش بتن حاوی نانو الیاف پلی‌پروپیلن برای سرریز سدها..... ۵۳۰

-9-1-1-15 تدوین دستورالعمل اجرایی برای بتنهای تقویت‌شده با مواد نانو ساختار به‌منظور استفاده حداکثری از خصوصیات نانو ذرات در سازههای بتنی بخش تولید..... ۵۳۰

-9-1-1-16 بررسی فنی و آزمایشگاهی تزریق نانو ذرات سیلیکا به‌عنوان پوشش محافظ بتن در برابر عوامل مخرب در مخازن، دودکشها و برجهای خنک‌کننده..... ۵۳۱

-9-1-1-17 طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده با نانولوله‌های کربن برای مقاوم‌سازی برجهای توربین بادی..... ۵۳۲

-9-1-1-18 طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده برای مقاوم‌سازی مخازن، دودکشها و برجهای خنک‌کننده در شرایط بد محیطی..... ۵۳۲

-9-1-1-19 طراحی، ساخت و آزمایش پلیمرهای تقویت‌شده الیافی شیشه (GFRPs) اصلاح‌شده با مواد نانو ساختار برای استفاده در مقاوم‌سازی سازههای بخش تولید..... ۵۳۳

-9-1-1-20 طراحی، ساخت و آزمایش رزینهای اپوکسی اصلاح‌شده برای تعمیر و تزریق ترکهای مخازن، دودکشها و برجهای خنک‌کننده..... ۵۳۴

-9-1-1-21 طراحی، ساخت و آزمایش حسگر کامپوزیت بتنی/CNT مدفون در بتن برای پوسته و فونداسیون راکتورها، برجهای توربینهای بادی، دودکشها، برجهای خنک‌کننده و بدنه سدها..... ۵۳۴

-9-1-1-22 طراحی، ساخت و آزمایش آرماتورهای کامپوزیت/CNT خود سنجشگر برای مخازن، دودکشها، برجهای خنک‌کننده، برج توربینهای بادی و پوسته راکتورها..... ۵۳۵

-9-1-1-23 طراحی، ساخت و آزمایش حسگر نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT برای پایش دینامیکی سازههای بتنی صنعت برق..... ۵۳۶

-9-1-1-24 طراحی، ساخت و آزمایش حسگر نانو کامپوزیت فیلم نرم الاستومری /کربن سیاه برای پایش دینامیکی سازههای صنعت برق ۵۳۷

-9-1-1-25 انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بدنه سدهای خاکی به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن..... ۵۳۸

-9-1-1-26 انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بستر سازه‌های صنعت برق به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن..... ۵۳۸

-9-1-1-27 بررسی و مقایسه اثرات اضافه شدن نانو رس مونت موریلونیت و نانو سیلیس به خاک ریزدانه رسی و میزان تغییرات حدود خمیری و روانی و شاخص خمیری خاک بهسازی شده و سنجش کارایی اضافه شدن ترکیبی این دو ماده به خاک ریزدانه رسی بخصوص در بستر توربین‌های بادی و سازه‌های نگهدارنده ماشین‌های دوار مکانیکی بخش تولید برق..... ۵۳۹

-9-1-1-28 بررسی و مقایسه تأثیر افزودن نانو رس و نانو سیلیس به خاک رس واگرا به منظور کاهش پتانسیل واگرایی در بستر سازه‌های صنعت برق و سدهای بتنی و بدنه سدهای خاکی..... ۵۴۰

۲۹-۱-۱-۹- تثبیت خاکهای رسی واگرا در سدهای خاکی و بستر سدهای بتنی با افزودن نانو رس و نانو سیلیس..... ۵۴۱

۲-۱-۹ - بخش انتقال: ۵۴۲

-9-1-2-1 طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در دکل تلسکوپی انتقال برق..... ۵۴۲

-9-1-2-2 طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازههای بتنی بخش انتقال که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند..... ۵۴۳

-9-1-2-3 طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون پستهای انتقال، فونداسیون خطوط هوایی انتقال و منهولهای خطوط زیرزمینی..... ۵۴۴

-9-1-2-4 استفاده از مواد نانو ساختار در بتن فونداسیون برجهای انتقال نیرو جهت جلوگیری از خوردگی و پوک شدگی در مناطق گرم و مرطوب..... ۵۴۴

-9-1-2-5 امکان‌سنجی استفاده از مواد نانو ساختار در بتن جهت کاهش نرخ خوردگی فولاد در بتن ۵۴۵

-9-1-2-6 طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح شده با نانو لوله‌های کربن برای مقاومسازی دکلهای تلسکوپی..... ۵۴۶

-9-1-2-7 طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده برای مقاومسازی فونداسیون سازههای بخش انتقال در شرایط بد محیطی..... ۵۴۷

-9-1-2-8 طراحی، ساخت و آزمایش پلیمرهای تقویت شده الیافی شیشه (GFRPs) اصلاح شده با مواد نانو ساختار برای استفاده در مقاومسازی دکلهای تلسکوپی..... ۵۴۷

-9-1-2-9 طراحی، ساخت و آزمایش حسگر کامپوزیت بتنی/CNT مدفون در بتن برای فونداسیون دکلهای انتقال و در سازه دکلهای تلسکوپی..... ۵۴۸

-9-1-2-10 طراحی، ساخت و آزمایش آرماتورهای کامپوزیت/CNT خود سنجشگر برای المانهای دکلهای تلسکوپی ۵۴۹
-9-1-2-11 عایق سازی فونداسیون‌های بتنی تأسیسات صنعت برق در بخش انتقال و توزیع به منظور کاهش خوردگی با استفاده از روش تزریق نانو ذرات ۵۵۰
-9-1-2-12 استفاده از بتن فراتوانمند نانو ساختار در پایه‌های بتنی پیشتنیده جهت احداث خطوط انتقال و همچنین مقایسه فنی و اقتصادی آن ۵۵۰
-9-1-2-13 استفاده از مواد نانو ساختار برای مقابله با فرسایش بتن در دکلهای تلسکوپی بتنی تحت اثر ریزگردها ۵۵۱
-9-1-2-14 بررسی فنی و اقتصادی ساخت و اجرای برجهای مشبک انتقال با استفاده از مواد غیر هادی کامپوزیتی اصلاح‌شده با مواد نانو ساختار ۵۵۲
-9-1-2-15 انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ماسه‌ای شل با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بستر دکل‌های انتقال نیروی صنعت برق در مناطق ساحلی و کویری به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن ۵۵۳
۹-۱-۳ - بخش توزیع ۵۵۴
-9-1-3-1 طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در پایه‌های پست و خطوط هوایی توزیع نیرو ۵۵۴
-9-1-3-2 طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون پستهای هوایی توزیع و پایه‌های خطوط هوایی توزیع نیرو. ۵۵۵
-9-1-3-3 استفاده از مواد نانو ساختار در ساخت پایههای بتنی برای پیشگیری از فرسودگی پایه‌های بتنی در شرایط مختلف اقلیمی و شورهزارها ۵۵۶
-9-1-3-4 استفاده از مواد نانو ساختار در تولید بهینه تیرهای مورد نیاز در شبکه‌های توزیع هوایی نیرو با توجه به وجود ریزگردها که سبب خوردگی بتن میگردند ۵۵۶
-9-1-3-5 بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و موادی تیر انتقال و توزیع برق کامپوزیتی FRP اصلاح شده با مواد نانو ساختار ۵۵۷
-9-1-3-6 امکان‌سنجی و تولید نمونه حسگر الیاف نانو کربن برای شناسایی و ردیابی خوردگی در تیرهای بتنی ۵۵۸

فهرست اشکال

شکل ۴-۱: چرخه عمر فناوری ۳۴۱
شکل ۴-۲: ارتباط چرخه عمر فناوری با چرخه عمر زیر فناوری‌ها ۳۴۲

شکل ۴-۳: معیار تنوع مدل‌های موجود فناوری در تخمین چرخه عمر..... ۳۴۲
شکل ۴-۴: معیار نوع بهبود در تعیین چرخه عمر فناوری..... ۳۴۳
شکل ۴-۵: معیار نوع چیرگی در صنعت در تعیین چرخه عمر فناوری..... ۳۴۴

فهرست جداول

جدول ۴-۱: اولویت‌های وزارت نیرو سال ۱۳۹۵..... ۳۴۶
جدول ۴-۲: اولویت‌های وزارت نیرو سال ۱۳۹۶..... ۳۵۴
جدول ۴-۳: اولویت‌های وزارت نیرو سال ۱۳۹۷..... ۳۷۸

مقدمه

در مرحله‌ی چهارم از این پروژه اسناد بالادستی مرتبط با صنعت برق کشور مورد مطالعه قرار می‌گیرد و با توجه به رویکرد و اهداف این اسناد و نیازهای صنعت برق و انرژی کشور، الزامات بکارگیری از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین به منظور شناسایی جایگاه کنونی استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق، چرخه‌ی عمر فناوری و بازار استفاده از این مواد در سازه‌های صنعت برق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها، از میان عناوین اولویت های تحقیقاتی وزارت نیرو از سال ۹۵ تا ۹۷، عناوین پروژه‌هایی که می‌توانند با موضوع این پروژه مرتبط باشند استخراج و جمع‌آوری می‌شوند.

۴- تطبیق دانش‌های فنی و فناوری‌های نوین جهانی در ارتباط با مواد نانو ساختار با اسناد بالادستی کشور و نیازهای آتی صنعت برق و انرژی و ارزیابی چرخه عمر فناوری و بازار استفاده از مواد نانو در سازه‌های صنعت برق

۴-۱- مطالعه و بررسی سیاست‌های کلان استاد بالادستی کشور مرتبط با صنعت برق

در این قسمت به بررسی بخش‌هایی از قوانین، اسناد و سیاست‌های جمهوری اسلامی ایران که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم با صنعت برق مرتبط هستند، پرداخته شده است.

۴-۱-۱ - قانون برنامه پنج ساله پنجم توسعه کشور [۱]

موارد زیر در ارتباط با توسعه علم و فناوری در کشور و صنعت برق، در مجموعه برنامه پنج ساله پنجم توسعه جمهوری اسلامی ایران مصوب اسفند سال ۱۳۸۹ هجری شمسی مورد توجه قرار گرفته است:

حمایت مالی از پژوهش‌های تقاضا محور مشترک با دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی، پژوهشی و فناوری و حوزه‌های علمیه در موارد ناظر به حل مشکلات موجود کشور.

حمایت‌های قانونی لازم در راستای تشویق طرف‌های خارجی قراردادهای بین‌المللی و سرمایه‌گذاری خارجی برای انتقال دانش فنی و بخشی از فعالیت‌های تحقیق و توسعه مربوط به داخل کشور و انجام آن با مشارکت شرکت‌های داخلی.

حمایت مالی از ایجاد و توسعه بورس ایده و بازار فناوری به منظور استفاده از ظرفیت‌های علمی در جهت پاسخ‌گویی به نیاز بخش‌های صنعت، کشاورزی و خدمات.

حمایت مالی از پایان‌نامه‌ها و رساله‌های دانشجویی در راستای ارتقاء بهره‌وری و حل مشکلات کشور.

به منظور زمینه‌سازی برای تربیت نیروی انسانی متخصص و متعهد، دانش‌مدار، خلاق و کارآفرین، منطبق با نیازهای نهضت نرم‌افزاری، با هدف توسعه کمی و کیفی، دولت مجاز است هزینه سرانه تربیت نیروی انسانی متخصص مورد تقاضای کشور بر اساس هزینه‌های آموزشی و هزینه‌های خدمات پژوهشی، تحقیقاتی و فناوری مورد حمایت را در چهارچوب بودجه‌ریزی عملیاتی برای هر دانشگاه و مؤسسه آموزشی، تحقیقاتی و فناوری دولتی محاسبه و به‌طور سالانه تأمین کند.

دولت مکلف است به منظور گسترش شایستگی حرفه‌ای از طریق افزایش دانش و مهارت با نگرش به انجام کار واقعی در محیط، اصلاح هرم تحصیلی نیروی کار و ارتقاء و توانمندسازی سرمایه‌های انسانی، کاهش فاصله سطح شایستگی نیروی کار کشور با سطح استاندارد جهانی و ایجاد فرصت‌های جدید شغلی و حرفه‌ای برای جوانان و ارتقاء جایگاه آموزش‌های فنی و حرفه‌ای برای نظام آموزش فنی و حرفه‌ای و علمی-کاربردی کشور اعم از رسمی، غیررسمی و سازمان نایافته، ظرف یک سال از تاریخ تصویب این قانون در محورهای زیر، سازوکارهای لازم را تهیه و با پیش‌بینی الزامات مناسب اجرا کند:

فراهم‌سازی ارتقاء مهارت در کشور از طریق اعطاء تسهیلات مالی با نرخ ترجیحی و تأمین فضاهای فیزیکی و کالبدی با شرایط سهل و زمینه‌سازی حضور فعال و مؤثر بخش غیردولتی در توسعه آموزش‌های رسمی و غیررسمی مهارتی و علمی-کاربردی کشور.

هماهنگی در سیاست‌گذاری و مدیریت در برنامه‌ریزی آموزش‌های فنی و حرفه‌ای کشور به عنوان یک نظام منسجم و پویا متناسب با نیاز کشور.

نیازسنجی و برآورد نیروی انسانی کاردان مورد نیاز و صدور مجوز لازم و حمایت به منظور تأسیس و توسعه مراکز آموزش دوره‌های کاردانی در بخش خصوصی و تعاونی و ایجاد ظرفیت‌های مورد نیاز تا سال چهارم برنامه.

به منظور تنوع در عرضه انرژی کشور، بهینه‌سازی تولید و افزایش راندمان نیروگاه‌ها، کاهش اتلاف و توسعه تولید هم‌زمان برق و حرارت، شرکت توانیر و شرکت‌های وابسته و تابعه وزارت نیرو موظف‌اند:

وزارت نیرو مجاز است در طول برنامه نسبت به افزایش توان تولیدی برق تا بیست و پنج هزار مگاوات از طریق سرمایه‌گذاری بخش‌های عمومی، تعاونی و خصوصی اعم از داخلی و خارجی و یا منابع داخلی شرکت‌های تابعه و یا به‌صورت روش‌های متداول سرمایه‌گذاری از جمله ساخت، بهره‌برداری، تصرف و انتقال اقدام نماید.

به منظور اعمال صرفه‌جویی، تشویق و حمایت از مصرف‌کنندگان در راستای منطقی کردن و اصلاح الگوی مصرف انرژی و برق، حفظ ذخایر انرژی کشور و حفاظت از محیط‌زیست، به وزارتخانه‌های نیرو، نفت و صنایع و معادن اجازه داده می‌شود بر اساس دستورالعملی که حداکثر تا پایان سال اول برنامه به تصویب شورای اقتصاد می‌رسد نسبت به اعمال مشوق‌های مالی جهت رعایت الگوی مصرف و بهینه‌سازی مصرف انرژی، تولید محصولات کم‌مصرف و با استاندارد بالا اقدام نمایند. منابع مالی مورد نیاز اجرای این ماده از محل وجوه حاصل از اجرای قانون هدفمند کردن یارانه‌ها، منابع داخلی شرکت‌های تابعه وزارتخانه‌های نفت، نیرو و صنایع و معادن و یا فروش نیروگاه‌ها و سایر دارایی‌ها از جمله اموال منقول و غیرمنقول، سهام و سهم‌الشراکه وزارت نیرو و سایر شرکت‌های تابعه و وابسته و بنگاه‌ها در قالب بودجه سنواتی تأمین می‌شود.

طرح جامع صیانت از نیروگاه‌های هسته‌ای توسط سازمان انرژی اتمی با همکاری وزارت کشور، وزارت امور خارجه، معاونت و سایر دستگاه‌های ذی‌ربط حداکثر تا پایان سال اول برنامه، تهیه و به تصویب هیئت‌وزیران می‌رسد.

الزامات، مقررات و مصوبات نظام ایمنی هسته‌ای کشور که توسط مرکز نظام ایمنی سازمان انرژی اتمی ایران درزمینه فناوری هسته‌ای و پرتوی ابلاغ می‌شود، برای کلیه دستگاه‌های اجرایی و اشخاص حقیقی و حقوقی غیردولتی مرتبط، لازم‌الاجرا است.

به منظور ایجاد زیرساخت‌های تولید تجهیزات نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و توسعه کاربرد انرژی‌های پاک و افزایش سهم تولید این نوع انرژی‌ها در سبد تولید انرژی کشور، دولت مجاز است با حمایت از بخش‌های خصوصی و تعاونی از طریق وجوه اداره شده و یارانه سود تسهیلات، زمینه تولید تا پنج هزار مگاوات انرژی بادی و خورشیدی در طول برنامه متناسب با تحقق تولید را فراهم سازد.

۲-۱-۴ - قانون برنامه پنج ساله ششم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران (۱۳۹۶-۱۴۰۰) [۲]

موارد زیر در ارتباط با توسعه علم و فناوری در کشور، در مجموعه برنامه پنج ساله ششم توسعه جمهوری اسلامی ایران مصوب اسفند سال ۱۳۹۵ هجری شمسی مورد توجه قرار گرفته است:

در بخش ۱۲ این قانون به موضوع آموزش عمومی، آموزش عالی و علم و فناوری اشاره شده است.
ماده ۶۴- به منظور تحقق اقتصاد دانش‌بنیان، افزایش بهره‌وری، تنظیم رابطه متقابل تحصیل و اشتغال، گسترش همکاری و تعاملات فعال بین‌المللی و افزایش نقش مردم در مدیریت علمی و فناوری کشور:
بند الف- به دولت اجازه داده می‌شود به منظور ارتقای علمی و رقابت بین دانشگاه‌های کشور و تعاملات بین‌المللی در طی اجرای قانون برنامه نسبت به ایجاد واحدها و شعب آموزش عالی با مشارکت دانشگاه‌های معتبر بین‌المللی و دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی و پژوهشی و فنی و حرفه‌ای و دانشگاه جامع علمی-کاربردی در داخل کشور در چهارچوب سیاست‌های شورای عالی انقلاب فرهنگی اقدام نماید. نحوه سرمایه‌گذاری مشترک، تسهیل تعاملات ارزی و تردد اعضای هیات علمی و دانشجویان در آیین‌نامه اجرائی که با پیشنهاد سازمان، سازمان اداری و استخدامی کشور و دستگاه‌های اجرائی ذی‌ربط به تصویب هیات وزیران می‌رسد، مشخص می‌شود.
بند ب- کلیه دستگاه‌های اجرایی موضوع ماده (۵) قانون خدمات کشوری و دستگاه‌های موضوع ماده (۵۰) قانون الحاق موادی به قانون تنظیم بخشی از مقررات مالی دولت (۱) مصوب ۱۳۸۴/۸/۱۵ مکلف‌اند علاوه بر اعتبارات پژوهشی که ذیل دستگاه در قوانین بودجه سالانه منظور شده است، یک درصد (۱٪) از اعتبارات تخصیص‌یافته هزینه‌ای به استثنای فصول (۱) و (۶) و در مورد شرکت‌های دولتی از هزینه‌های غیرعملیاتی را برای امور پژوهشی و توسعه فناوری هزینه کنند.
بند پ- کلیه شرکت‌های دولتی و نهادهای عمومی غیردولتی و شرکت‌های وابسته و تابعه به استثنای صندوق‌های بیمه و بازنشستگی موظف‌اند به منظور حمایت از پژوهش‌های مسئله محور و تجاری‌سازی پژوهش و نوآوری، در اجرای سیاست‌های کلی برنامه ششم معادل حداقل سه درصد (۳٪) از سود قابل تقسیم سال قبل خود را برای مصرف در امور تحقیقاتی و توسعه فناوری در بودجه سالانه، زیر نظر شورای عالی علوم، تحقیقات و فناوری منظور نمایند.
بند ت- دستگاه‌های اجرایی موظف‌اند به منظور افزایش بهره‌وری نظام ملی نوآوری، اجتناب از اجرای پژوهش‌های تکراری و انتشار اطلاعات و ایجاد شفافیت در انجام طرح‌های (پروژه‌های) تحقیقاتی و با هدف شناسایی و به‌کارگیری و تجاری‌سازی دستاوردهای حاصل از پژوهش و توسعه، فهرست طرح‌های پژوهشی و فناوری و پایان‌نامه‌ها و رساله‌های خود را در سامانه «سمات» ثبت کنند. سازمان و وزارت علوم، تحقیقات و فناوری موظف‌اند ظرف مدت یک سال از تاریخ لازم الاجرا شدن این قانون، سازوکار اجرائی مورد نیاز را تهیه کنند و به تصویب هیات وزیران برسانند.
بند ج- دولت مجاز است به منظور پیشتازی در اقتصاد دانش‌بنیان و افزایش تولید و صادرات محصولات و خدمات دانش‌بنیان سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی، برای توسعه و انتشار فناوری و حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان مطابق قانون بودجه سنواتی نسبت به حمایت مالی از پژوهش‌های تقاضا محور مشترک با دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالی، پژوهشی و فناوری و حوزه‌های علمیه در موارد ناظر به حل مشکلات کشور، مشروط به اینکه حداقل پنجاه و یک درصد (۵۱٪) از هزینه‌های آن را کارفرما و یا بهره‌بردار تأمین و تعهد کرده باشد، اقدام نماید.

۳-۱-۴ - سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ کشور[۳]

در سند چشم‌انداز ۲۰ ساله جمهوری اسلامی ایران که در آذر سال ۱۳۸۲ هجری شمسی ابلاغ شد، در راستای چشم‌انداز افق، به موارد زیر اشاره شده که می‌تواند به سازه‌های صنعت برق در حوزه دانش فنی مورد نیاز مربوط باشد:

سازمان‌دهی و بسیج امکانات و ظرفیت‌های کشور در جهت افزایش سهم کشور در تولیدات علمی جهان از طریق:

تقویت نهضت نرم‌افزاری و ترویج پژوهش

کسب فناوری، به ویژه فناوری‌های نو شامل: ریز فناوری و فناوری‌های زیستی، زیست‌محیطی، هوافضا و هسته‌ای.

۴-۱-۴ - بیانیه گام دوم انقلاب خطاب به ملت ایران [۴]

در این بیانیه که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۲۲ به مناسبت چهلمین سالگرد پیروزی انقلاب اسلامی منتشر شده است، در بخش توصیه‌ها، اولین توصیه رهبر معظم انقلاب، علم و پژوهش بوده که متن این بخش در ادامه آورده شده است.

علم و پژوهش: دانش آشکارترین وسیله‌ی عزت و قدرت یک کشور است. روی دیگر دانایی، توانایی است. دنیای غرب به برکت دانش خود بود که توانست برای خود ثروت و نفوذ و قدرت دویست ساله فراهم کند و با وجود تهی‌دستی در بنیان‌های اخلاقی و اعتقادی، با تحمیل سبک زندگی غربی به جوامع عقب‌مانده از کاروان علم، اختیار سیاست و اقتصاد آن‌ها را به دست بگیرد. ما به سوءاستفاده از دانش مانند آنچه غرب کرد، توصیه نمی‌کنیم، اما موکداً به نیاز کشور به جوشاندن چشمه‌ی دانش در میان خود اصرار می‌ورزیم. بحمدالله استعداد علم و تحقیق در ملت ما از متوسط جهان بالاتر است. اکنون نزدیک به دو دهه است که رستاخیز علمی در کشور آغاز شده و با سرعتی که برای ناظران جهانی غافلگیرکننده بود-یعنی یازده برابر شتاب رشد متوسط علم در جهان-به پیش رفته است. دستاوردهای دانش و فناوری ما در این مدت که ما را به رتبه شانزدهم در میان بیش از دویست کشور جهان رسانید و مایه‌ی شگفتی ناظران جهانی شد و در برخی از رشته‌های حساس و نوپدید به رتبه‌های نخستین ارتقاء داد، همه و همه در حالی اتفاق افتاده که کشور دچار تحریم مالی و تحریم علمی بوده است. ما با وجود شنا در جهت مخالف جریان دشمن ساز، به رکوردهای بزرگ دست یافته‌ایم و این نعمت بزرگی است که به خاطر آن باید روز و شب خدا را سپاس گفت.

اما آنچه من می‌خواهم بگویم این است که این راه طی شده، با همه‌ی اهمیتش فقط یک آغاز بوده است و نه بیشتر. ما هنوز از قله‌های دانش جهان بسیار عقبیم؛ باید به قله‌ها دست یابیم. باید از مرزهای کنونی دانش در مهم‌ترین رشته‌ها عبور کنیم. ما از این مرحله هنوز بسیار عقبیم؛ ما از صفر شروع کرده‌ایم. عقب‌ماندگی شرم‌آور علمی در دوران پهلوی‌ها و قاجارها در هنگامی که مسابقه‌ی علمی دنیا تازه شروع شده بود، ضربه‌ی سختی بر ما وارد کرده و ما را از این کاروان شتابان، فرسنگ‌ها عقب نگه داشته بود. ما اکنون حرکت را آغاز کرده و با شتاب پیش می‌رویم ولی این شتاب باید سال‌ها با شدت بالا ادامه یابد تا آن عقب‌افتادگی جبران شود. این‌جانب همواره به دانشگاه‌ها و دانشگاهیان و مراکز پژوهش و پژوهندگان، گرم و قاطع و جدی در این باره تذکر و هشدار و فراخوان داده‌ام، ولی اینک مطالبه عمومی من از شما جوانان آن است که این راه را با احساس مسئولیت بیشتر و همچون یک جهاد در پیش گیرید. سنگ بنای یک انقلاب علمی در کشور گذاشته شده و این انقلاب، شهیدانی از قبیل شهدای هسته‌ای نیز داده است. به پا خیزید و دشمن بدخواه و کینه‌توز را که از جهاد علمی شما بشدت بیمناک است ناکام سازید.

با توجه به متن فوق می‌توان نتیجه گرفت تلاش برای دستیابی به علوم نوپدید دنیا از توصیه‌های اکید رهبر معظم انقلاب است. این پروژه با توجه به محوریت قرار دادن استفاده از نانوتکنولوژی در سازه‌های صنعت برق، کاملا در جهت اهداف گام دوم انقلاب بوده و امید است در این مسیر گامی بلند برداشته شود.

۵-۱-۴ - سند چشم‌انداز و برنامهٔ راهبردی بلند مدت وزارت نیرو [۵]

طی سال‌های اخیر طرح تدوین این سند در دستور کار این وزارتخانه قرار گرفته است. تحقق آرمان و اهداف سند چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران، انسجام بخشی به برنامه‌ها و فعالیت‌ها و مستندسازی نگاه به افق‌های دوردست صنعت آب و برق از اهداف تدوین این سند به شمار می‌روند. اسناد خروجی این طرح به عنوان سند بالادستی مجموعه اجزای وزارت نیرو در نظر گرفته شده و با توجه به ابلاغ توسط وزیر محترم نیرو مبنای کلیه سیاست‌گذاری‌ها، برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های صنعت آب و برق قرار می‌گیرد.

مجموعه حاضر برنامهٔ راهبردی وزارت نیرو در افق ۱۴۰۴ را مشخص نموده و مشتمل بر اسناد مأموریت، چشم‌انداز، ارزش‌ها و راهبردهای وزارت نیرو و بخش‌های پنج‌گانه‌ی «آب و آبفا»، «برق و انرژی»، «آموزش، پژوهش و فناوری» و «پشتیبانی صنعت آب و برق» است. این مجموعه نتیجه مشارکت ارزشمند حدود ۲۸۰ نفر از مدیران، صاحب نظران، خبرگان و کارشناسان ارشد صنعت آب و برق در قالب انجام فعالیت‌های پشتیبانی و حضور فعال در جلسات کمیته‌های تخصصی، کمیته راهبری و هماهنگی و شورای عالی طرح است. این اسناد با شناخت فرصت‌ها و تهدیدها در پیشروی صنعت آب و برق به‌دست‌آمده و افق حرکتی آینده وزارت نیرو را تعیین نموده و نگاه بلند مدت را در تمامی سطوح این وزارتخانه نهادینه می‌نمایند.

با بررسی این سند می‌توان دریافت بخش‌هایی از مأموریت وزارت نیرو که می‌تواند با توسعه فناوری نانو در سازه‌ها مرتبط گردد، به شرح زیر است:

وزارت نیرو با بهره‌گیری از آخرین دستاوردهای علمی، پژوهشی و روش‌های پیشرفته مدیریت و همچنین توسعه فناوری‌های نوین سازگار با محیط‌زیست، علاوه بر توسعه و ارتقای بهره‌وری و کیفیت ارائه خدمات در سطح ملی، بازار صنعت آب و برق کشور را به سطح جهانی، به ویژه کشورهای منطقه گسترش می‌دهد.

وزارت نیرو رشد پایدار بخش آب و برق کشور را با ایجاد تعادل بین منابع و مصارف، ارتقای بهره‌وری و مشارکت منابع انسانی به عنوان ارزشمندترین سرمایه محقق می‌سازد.

بخش برق و انرژی:

وزارت نیرو در این بخش با ارتقاء بهره‌وری و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، سازگار با محیط‌زیست و متناسب با زیرساخت‌های حال و آینده و توسعه مشارکت و بهره‌وری منابع انسانی متخصص و خلاق به عنوان ارزشمندترین دارایی، نقشی مؤثر در رفاه اجتماعی و تبادل برق با کشورهای منطقه ایفا نموده و در راستای کاهش شدت انرژی، افزایش خوداتکایی و توسعه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر اقدام می‌کند.

وزارت نیرو در بخش آموزش، پژوهش و فناوری، عهده‌دار ارتقای دانش و مهارت‌های منابع انسانی، توسعه پژوهش و فناوری، افزایش آگاهی‌های عمومی و خلاقیت و نوآوری در راستای تأمین نیازهای صنعت آب و برق است.

بخش آموزش، پژوهش و فناوری با سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی، سازمان‌دهی، هدایت، نظارت و تکیه بر منابع انسانی توانمند و متعهد به عنوان اصلی‌ترین سرمایه و با توسعه و به‌کارگیری روش‌های نوین در فعالیت‌های علمی، نظام مدیریت دانش و تعامل شبکه‌ای با نهادهای فعال در صنعت آب و برق، به ویژه در حوزه‌های فنی، مدیریتی و اقتصادی، در راستای توسعه پایدار اقدام می‌نماید.

بخش پشتیبانی صنعت آب و برق با بهره‌گیری از دانش و فناوری‌های روز دنیا عهده‌دار مدیریت تأمین و توسعه بازار کالاها، تجهیزات، خدمات مشاوره‌ای و پیمانکاری در این صنعت می‌باشد.

در راستای مأموریت‌های بیان‌شده، راهبردهای وزارت نیرو در بخش‌های مختلف، تدوین و ارائه شده که از میان آن‌ها به بندهای زیر که می‌توانند مرتبط با توسعه فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق باشند اشاره می‌گردد:

۷-۲- افزایش بهره‌وری تولید برق و ارتقاء بازده نیروگاه‌ها

۷-۴- ارتقاء توانمندی در تولید برق از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر

۷-۵- سازگاری زیست‌محیطی و ارتقاء ایمنی در فعالیت‌های صنعت برق

۱۰-۲- گسترش پژوهش‌های کاربردی و توسعه‌ای و ارتقاء سطح تحقیق و توسعه

۱۰-۷- شناسایی فناوری‌های نوین و انتقال و بومی‌سازی فناوری‌های دارای مزیت نسبی

۱۰-۸- ارتقاء نظام آموزش‌های عمومی، تخصصی و مدیریتی

۱۰-۹- توسعه شبکه خبرگان، نخبگان و متخصصین

۱۱-۱- ظرفیت‌سازی، آموزش و توسعه توانمندی‌های منابع انسانی

۵-۳- شناسایی، انتقال و بومی‌سازی فناوری‌های نوین و سازگار با محیط‌زیست

۵-۴- افزایش سطح تعامل بخش برق و انرژی با مراکز علمی و تحقیقاتی داخلی و خارجی توانمند و نهادینه‌سازی آن

۷-۴- استفاده از فناوری نوین و تجهیزات با راندمان بالا

۷-۵- مدیریت بهینه بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق‌آبی و افزایش هماهنگی آن‌ها با تولید نیروگاه‌های حرارتی

۸-۳- ارتقاء و توسعه نظام یادگیری فردی و سازمانی، با رویکرد مستندسازی و انتقال دانش و تجارب صنعت برق و استقرار و توسعهٔ نظام مدیریت دانش

۸-۴- ارتقاء و توسعهٔ نظام جذب، توانمندسازی و نگه‌داشت منابع انسانی متناسب با اهداف صنعت برق

۹-۱- تمرکز بر تحقیق و پژوهش و بومی‌سازی فناوری در فعالیت‌های مربوط به تولید برق از انرژی خورشیدی و بادی در کشور

بخش آموزش، پژوهش و فناوری:

ح) استقرار و ارتقاء نهاد و نظام سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و راهبری مؤثر آموزش، پژوهش و فناوری صنعت آب و برق و ایفای نقش مؤثر در مراجع مرتبط

۸- به هنگام‌سازی آموزش‌های مرتبط با فناوری‌های جدید

۱۸- توسعه شبکه خبرگان، نخبگان و متخصصین (حقیقی و حقوقی)

بخش پشتیبانی صنعت آب و برق:

۱۰- حمایت از انتقال و بومی‌سازی فناوری‌های نو مورد نیاز و به‌کارگیری فناوری‌های دارای مزیت نسبی بالا

بخش مدیریت بحران و پدافند غیرعامل:

نهادینه‌سازی و اجرای اصول و ضوابط پدافند غیرعامل و مدیریت بحران در صنعت آب و برق به منظور افزایش بازدارندگی، تداوم ارائه خدمات در شرایط اضطراری، کاهش آسیب‌پذیری و ارتقاء پایداری در کلیه تأسیسات و فرآیندهای صنعت با تأکید بر شناسایی و طبقه‌بندی تأسیسات و فرآیندهای حیاتی، حساس و مهم و آسیب‌پذیر و

تدوین و اجرای برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت و انجام پژوهش‌های مورد نیاز در جهت دستیابی به راهکارهای جدید کم‌هزینه، مؤثر و عملیاتی در عرصهٔ پدافند غیرعامل.

۴-۱-۶ - مجموعه مقاصد و اهداف فناورانه کلان در صنعت برق کشور [۶]

مجموعه مقاصد و اهداف فناورانه کلان در صنعت برق کشور در افق زمانی ۱۴۰۴ هجری شمسی، طی نامه شماره ۹۱/۴۷۵۵۸/۳۰/۱۰۰ مورخ ۱۳۹۱/۱۲/۲۰ وزیر نیرو (با موضوع ابلاغ مقاصد و اهداف فناورانه صنعت برق) ابلاغ گردیده است. بر اساس سند مذکور، به‌کارگیری فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق را می‌توان در راستای هدف فناورانه افزایش امنیت انرژی (پدافندی-فنی و قابلیت اطمینان) جهت تحقق مقصد کلان سرآمد کشورهای منطقه در عرضه برق پاک، مطمئن، پایا با کیفیت مناسب از مجموعه مقاصد و اهداف فناورانه کلان ابلاغ شده صنعت برق منظور نمود.

۴-۱-۷ - سیاست‌های کلی ابلاغی توسط مقام معظم رهبری در بخش پدافند غیرعامل [۷]

سیاست‌های کلی نظام در ارتباط با ایجاد و توسعه پدافند غیرعامل در بخش‌های مختلف کشور در اسفند ۱۳۸۹ هجری شمسی تهیه و ابلاغ شد. توسعه فناوری نانو در صنعت برق را می‌توان در راستای بندهای زیر از سیاست‌های مذکور منظور نمود:

بند ۱: تأکید بر پدافند غیرعامل که عبارت است از مجموعه اقدامات غیرمسلحانه که موجب افزایش بازدارندگی، کاهش آسیب‌پذیری، تداوم فعالیت‌های ضروری، ارتقاء پایداری ملی و تسهیل مدیریت بحران در مقابل تهدیدات و اقدامات نظامی دشمن می‌گردد.

بند ۴: تهیه و اجرای طرح‌های پدافند غیرعامل (با رعایت اصل هزینه – فایده) در مورد مراکز، اماکن و تأسیسات حائز اهمیت (نظامی و غیرنظامی) موجود و در دست اجرا بر اساس اولویت‌بندی و امکانات حداکثر تا پایان برنامه ششم و تأمین اعتبار مورد نیاز .

بند ۱۰: حمایت لازم از توسعه فناوری و صنایع مرتبط مورد نیاز کشور در پدافند غیرعامل با تأکید بر طراحی و تولید داخلی.

۴-۱-۸ - سیاست‌های کلی تولید ملی، حمایت از کار و سرمایه ایرانی [۸]

سیاست‌های کلی تولید ملی، حمایت از کار و سرمایه ایرانی در اسفندماه ۱۳۹۱ هجری شمسی توسط مقام معظم رهبری ابلاغ گردید. بندهای زیر از سیاست‌های کلی مذکور را می‌توان به توسعه فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق مرتبط دانست:

بند ۱: بالا بردن قدرت رقابت و افزایش بهره‌وری عوامل تولید با:

کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت تولید

بند ۲: هدایت و تقویت تحقیق و توسعه و نوآوری‌ها و زیربناهای آن‌ها و بهره‌گیری از آن‌ها، باهدف:

ارتقاء کیفی و افزایش کمّی تولید ملّی

بالا بردن درجه ساخت داخل تا محصول نهایی

۹-۱-۴ - سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی ابلاغی مقام معظم رهبری [۹]

با هدف تأمین رشد پویا و بهبود شاخص‌های مقاومت اقتصادی و دستیابی به اهداف سند چشم‌انداز بیست‌ساله، سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی با رویکردی جهادی، انعطاف‌پذیر، فرصت ساز، مولد، درون‌زا، پیشرو و برون‌گرا، در بهمن سال ۱۳۹۲ هجری شمسی توسط مقام معظم رهبری ابلاغ گردید.

در جلسه شورای عالی اقتصاد، ۹ تیر ۱۳۹۳ در خصوص برنامه‌های وزارت نیرو برای تحقق اقتصاد مقاومتی، اعلام شد که بندهای ۳، ۸ و ۹ از سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی مربوط به وزارت نیرو است. برخی اهداف و سیاست‌های این وزارتخانه برای تحقق بخشیدن به این سیاست‌ها در حوزه برق که در این جلسه اعلام شد و می‌تواند با ضرورت توسعه فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق ارتباط داشته باشد بدین شرح است:

- افزایش بهره‌وری برق در کلیه مراحل زنجیره تولید تا مصرف
- توسعه زیرساخت‌های تولید و انتقال برق و تلاش برای تأمین ملزومات تبدیل کشور به قطب تأمین و تبادل برق منطقه
- پایداری و بهبود کیفیت و کمیت خدمات آب و برق در بخش‌های مختلف مصرف

۱۰-۱-۴ - سند «اولویت‌های تحقیقاتی و فناوری مصوب کمیسیون‌های تخصصی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری» مصوبه‌ی سال ۱۳۹۰[۱۰]

شورای عالی علوم، تحقیقات و فناوری در راستای انجام وظایف قانونی و با هدف بهره‌گیری حداکثری از توان علمی و دانش تخصصی صاحب‌نظران و خبرگان دانشگاهی و دستگاه‌های اجرایی کشور در حوزه‌های مختلف، اقدام به تشکیل ۱۱ کمیسیون تخصصی در زمینه‌های موضوعی نموده است که هرکدام از آن‌ها بر اساس وظایف قانونی شورا در حوزه تخصصی مرتبط فعالیت می‌کنند. کمیسیون‌های تخصصی شورای عالی با بررسی و مطالعه حوزه‌های تخصصی مربوطه، اولویت‌های تحقیقاتی و فناوری و طرح‌های کلان ملی را تعیین کرده‌اند. با توجه به اسناد قانونی مذکور (جزء ۱ بند م ماده ۲۲۴ قانون برنامه پنجم توسعه، جزء الف بند ۱۰۸ قانون بودجه سال ۱۳۹۰ کشور) اولویت‌های تحقیقاتی و فناوری کمیسیون‌های تخصصی مربوطه، برای استفاده دستگاه‌های مشمول اسناد قانونی مذکور، در این سند ارائه شده است.

۲-۴- بررسی الزامات به‌کارگیری مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق با توجه به رویکرد و اهداف اسناد بالادستی کشور و نیازهای آتی صنعت برق و انرژی

با توجه به قوانین، اسناد و سیاست‌های مطرح‌شده در بخش ۴-۱، در این بخش میزان مطابقت، تأثیرپذیری و هم‌راستایی کلی توسعه فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق، با اهداف و سیاست‌های کلان کشور مورد بررسی قرار گرفته است.

در قانون برنامه پنج ساله پنجم توسعه کشور بر موضوع حمایت مالی از پژوهش‌های ناظر به حل مشکلات موجود کشور و همچنین حمایت مالی از پایان‌نامه‌ها و رساله‌های دانشجویی در راستای ارتقاء بهره‌وری و حل مشکلات

کشور تأکید شده است. با توجه به ماهیت علم نانو و ایجاد خواص جدید در مواد مختلف که قادر به بهبود قابل توجه ویژگی‌های ساختاری آن‌ها است، در پروژه‌های مرتبط با صنعت برق از جمله سازه‌های نیروگاهی و خطوط انتقال، می‌توان انتظار داشت با به‌کارگیری این مواد، شاهد بهبود در عملکرد و عمر سازه‌های مذکور باشیم و از این طریق بهره‌وری در این پروژه‌ها رشد قابل توجهی خواهد داشت؛ پر واضح است رسیدن به این هدف نیازمند دستیابی به دانش کافی از این حوزه است. در سیاست‌های کلی تولید ملی، حمایت از کار و سرمایه ایرانی ابلاغ شده توسط مقام معظم رهبری، در بند ۱ به موضوع افزایش بهره‌وری عوامل تولید با کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت تولید اشاره شده است. همچنین در سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ بر موضوع تقویت نهضت نرم‌افزاری و ترویج پژوهش اشاره شده که نشان‌دهنده اهمیت این موضوع است؛ بنابراین سیاست‌های ناظر به فعالیت‌های دانشگاهی و پژوهش‌های این حوزه باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد و با حمایت مالی از پایان‌نامه‌ها و رساله‌های دانشجویی، ارتباط صنعت و دانشگاه بیش از پیش تقویت شود. در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا، مقالات و پژوهش‌های انجام‌شده در دانشگاه‌ها هم‌راستا با نیازهای جامعه است. درواقع دولت‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که برای رسیدن به رشد بیشتر باید از توان و استعداد دانشگاه‌ها بهره گرفته شود.

مطابق بند ۱۰ سند چشم‌انداز و برنامه راهبردی بلندمدت وزارت نیرو، شناسایی فناوری‌های نوین و انتقال و بومی‌سازی فناوری‌های دارای مزیت نسبی باید مورد توجه قرار گیرد. همان‌طور که می‌دانیم علم نانو امروزه مورد توجه ویژه کشورهای پیشرفته دنیا قرار گرفته است و در ابعاد گوناگون از ظرفیت این حوزه استفاده می‌گردد؛ جمهوری اسلامی ایران نیز به منظور انتقال و بومی‌سازی این فناوری باید تسهیلات لازم برای انجام تحقیقات و پژوهش‌های کاربردی این حوزه را فراهم کرده تا کشور از مزایای این فناوری بیش از پیش بهره‌مند شود؛ بنابراین تعریف و پیگیری پروژه‌های مرتبط با حوزه نانوتکنولوژی در سازه‌های صنعت برق در راستای سند مذکور بوده و توجیه قانونی آن مشهود است.

بر اساس سند ۱۴۰۴، به‌کارگیری فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق را می‌توان در راستای هدف فناورانه افزایش امنیت انرژی (پدافندی-فنی و قابلیت اطمینان) جهت تحقق مقصد کلان سرآمد کشورهای منطقه در عرضه برق پاک، مطمئن، پایا باکیفیت مناسب از مجموعه مقاصد و اهداف فناورانه کلان ابلاغ شده صنعت برق منظور نمود. برخی ویژگی‌های مواد نانو از جمله خود ترمیمی موجب می‌گردد تا نیاز به تعمیر و نگهداری در بسیاری از سازه‌ها کاهش‌یافته و سیستمی مطمئن و پایدار برای ارائه خدمات ساخته شود.

با مطالعه و بررسی سیاست‌های کلی ابلاغی توسط مقام معظم رهبری در بخش پدافند غیرعامل می‌توان دریافت هر اقدامی در جهت کاهش آسیب‌پذیری، تداوم فعالیت‌های ضروری و تسهیل مدیریت بحران در مقابل تهدیدات، از نیازهای اصلی و ضروری کشور است و باید مورد توجه و حمایت قرار گیرد. همان‌طور که می‌دانیم یکی از ویژگی‌های اصلی مواد نانو ساختار، بهبود خواص مکانیکی مصالح و مخلوط‌های مختلف سازه‌ای است که یکی از این خواص، بهبود قابل توجه در مقاومت است. با مطالعه دقیق‌تر می‌توان دریافت استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری آن‌ها کمک شایانی کند؛ همان‌طور که می‌دانیم سازه‌های صنعت برق و انرژی جزء مراکز حساس هستند و آسیب آن‌ها در زمان بحران می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد؛ بنابراین تقویت این سازه‌ها می‌تواند در راستای بند ۱، ۴ و ۱۰ سیاست‌های کلی ابلاغی توسط مقام معظم رهبری در بخش پدافند غیرعامل قرار گیرد.

در سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی ابلاغی مقام معظم رهبری در بهمن سال ۱۳۹۲ بر موضوع افزایش بهره‌وری برق در کلیه مراحل زنجیره تولید تا مصرف، توسعه زیرساخت‌های تولید و انتقال برق و تلاش برای تأمین ملزومات تبدیل کشور به قطب تأمین و تبادل برق منطقه و همچنین پایداری و بهبود کیفیت و کمیت خدمات آب و برق در بخش‌های مختلف مصرف تأکید شده است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، رشد بهره‌وری در صنعت برق می‌تواند به‌طور مستقیم به ورود فناوری نانو در این صنعت مرتبط باشد. تأثیرات و قدرت ایجاد تغییرات ساختاری در ویژگی‌های مواد می‌تواند این امکان را فراهم آورد که عمر مفید سازه‌ها افزایش یابد، سازه‌ها قدرت خودترمیمی داشته باشند و نیاز به تعمیرات و ترمیم مداوم را به حداقل برساند. این صرفه‌جویی در وقت، هزینه و نیروی انسانی، خود موجب افزایش بهره‌وری می‌گردد.

با مطالعه سند «اولویت‌های تحقیقاتی و فناوری مصوب کمیسیون‌های تخصصی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری» مصوبه‌ی سال ۱۳۹۰، مطابق اولویت‌های کمیسیون تخصصی انرژی، بند ۹، بایستی «فناوری‌های نوین و کارای شبکه‌های انتقال و توزیع برق» در دستور کار قرار گیرد که می‌توان بر این اساس، توسعه فناوری نانو در سازه‌ها را که در راستای نگهداری بهینه شبکه برق است، توجیه نمود.

علاوه بر آن در جدول سایر اولویت‌های تحقیقاتی کشور در این سند، بایستی اولویت‌های زیر در دستور کار قرار گیرند:

- استفاده از فناوری‌های جدید و انتقال تکنولوژی
- دستیابی به روش‌ها و فناوری‌های نوین جهانی (انتقال فناوری و دانش فنی به کشور) و همگام‌سازی با روند سریع پیشرفت جهانی
- به‌روز سازی آموزش‌های مرتبط با فناوری‌های جدید
- انتقال فناوری و دانش فنی به کشور در عرصه‌هایی که هنوز نیاز به ورود فناوری خارجی می‌باشد
- ارتقاء و انتقال دانش فنی در بخش طراحی و مهندسی

بر اساس این اولویت‌ها، توسعه فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق، از آنجا که هم با موضوع انتقال دانش در این حوزه ارتباط مستقیم دارد و در عین حال دانش فنی و فناوریِ مربوط به بهره‌برداری و نگهداری از سازه‌های شبکه برق را ارتقاء خواهد بخشید توجیه قانونی خواهد داشت.

با توجه به رویکرد و اهداف اسناد بالادستی، می‌توان دریافت موضوع کاربرد نانوتکنولوژی در سازه‌ها علاوه بر اینکه هیچ‌گونه مغایرت و تعارضی با هیچ یک از اسناد و مقررات بالادستی و سیاست‌های کلان کشور ندارد بلکه برای هر چه نزدیک شدن به اهداف این اسناد و قوانین، باید به این علم توجه ویژه گردد؛ بنابراین ضرورت پرداختن به مبحث کاربرد نانوتکنولوژی در سازه‌ها به‌ویژه سازه‌های با اهمیت بالا مانند سازه‌های صنعت برق با استفاده از رویکردهای نوین فناورانه روشن می‌گردد.

۴-۳- ارزیابی چرخه عمر فناوری و بازار استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق

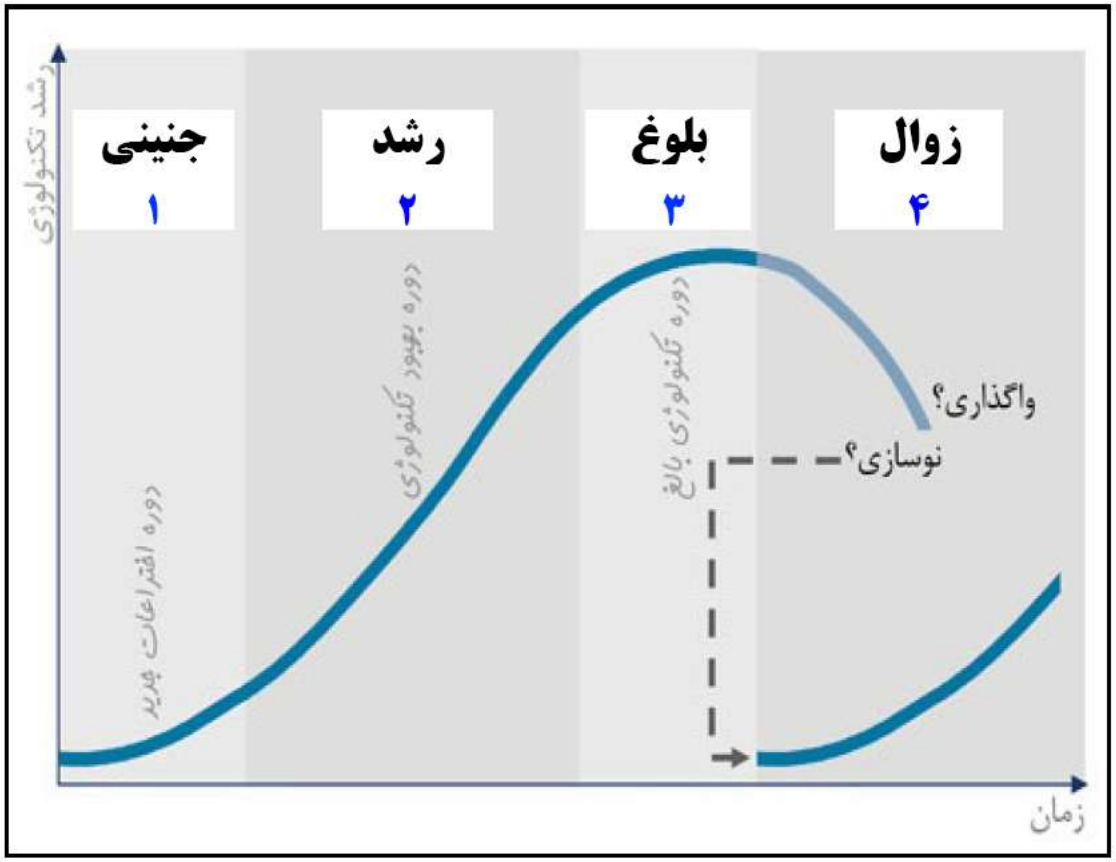
۴-۳-۱ - طبقه‌بندی فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق از منظر چرخه عمر

فناوری‌ها دارای ویژگی‌های عملکردی متفاوتی هستند و به شکل‌های مختلفی با بازار در تعامل‌اند. چرخه عمر را می‌توان در دو دسته طبقه‌بندی کرد؛ چرخه عمر فناوری که به معنی تغییر ویژگی های عملکردی فناوری و رسیدن به بلوغ فنی در طول زمان برای آن فناوری می‌باشد و دسته دوم چرخه عمر محصول-بازار که تغییر حجم ارائه فناوری در بازار برحسب زمان را نشان می‌دهد.

۴-۳-۱-۱- چرخه عمر فناوری

بررسی چگونگی رشد و پیشرفت بسیاری از فناوری‌ها نشان داده است که آن‌ها به‌صورت اتفاقی و بدون قاعده رشد نمی‌کنند، بلکه دنباله‌رو یک الگوی خاص هستند. روش‌ها و الگوهای متفاوتی از رشد یک فناوری ارائه شده‌اند که معروف‌ترین این الگوها، الگویی موسوم به «منحنی S» است. در این الگو چرخه عمر یک فناوری از تولد تا زوال توصیف شده است. شناخت الگوی رشد یک فناوری می‌تواند ما را در شناسایی عوامل مؤثر بر هر فناوری و برنامه‌ریزی برای مدیریت فناوری یاری رساند، [۱۱].

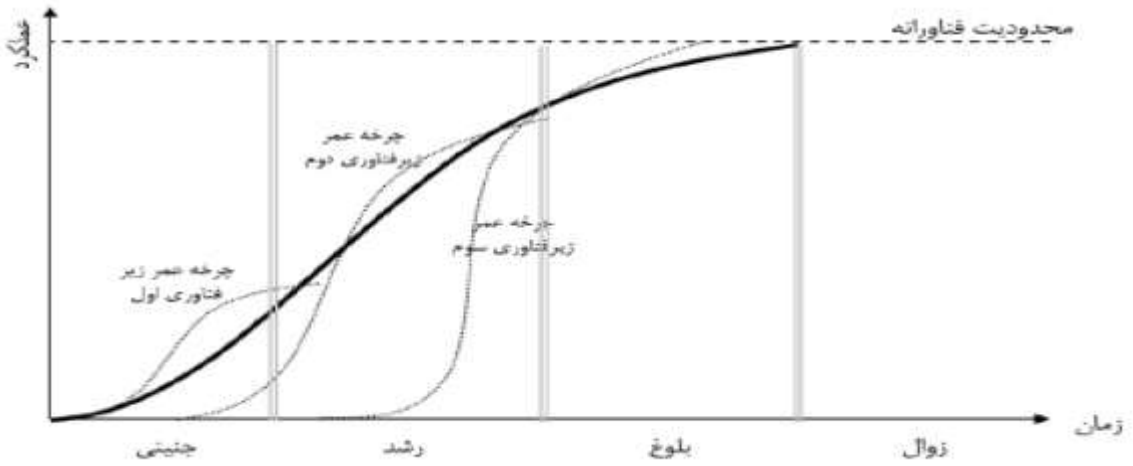
فناوری‌ها دارای عمر محدودی هستند. مطالعات تاریخی نشان می‌دهد که می‌توان چرخه عمر فناوری‌ها را در چهار مرحله «جنینی»، «رشد»، «بلوغ» و «زوال» توصیف کرد. همچنان که در شکل ۴-۱ دیده می‌شود، فرآیند توسعه و افول فناوری‌ها فرآیندی شبیه به حرف S خمیده را به وجود می‌آورد. به همین علت نمودار چرخه عمر فناوری به چرخه S شکل نیز مشهور است، [۱۱].



شکل ۴-۱: چرخه عمر فناوری [۱۱]

محل قرارگیری یک فناوری در چرخه عمر، متأثر از منحنی‌های چرخه عمر فناوری‌های وابسته به آن می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم فناوری‌های پیچیده غالباً از فناوری‌های دیگری در سطوح پایین‌تر تشکیل شده‌اند؛ طبیعتاً چرخه عمر آن‌ها نیز مرکب از چرخه عمر اجزای تشکیل دهنده آن است. شکل ۴-۲ ارتباط چرخه عمر فناوری با چرخه عمر زیر فناوری‌ها را نشان می‌دهد. این منحنی شامل چهار مرحله جنینی، رشد، بلوغ و زوال است. در انتخاب فناوری باید توجه داشت فناوری‌هایی برای توسعه انتخاب شوند که در مرحله زوال خود قرار نداشته باشند؛ زیرا زمانی که یک فناوری به محدودیت طبیعی خودش برسد، جایی برای بهبود نداشته و به سمت زوال و جایگزینی با فناوری‌های دیگر حرکت می‌کند. برنامه‌ریزی برای توسعه قطعات موجود در مرحله زوال منجر به هدر رفت سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته و از دست دادن رقابت‌پذیری می‌گردد.

در این بخش، چرخه عمر فناوری با دو رویکرد مورد بررسی قرار گرفته است: نگرش به اجزای فناوری (زیر فناوری‌ها) و نگرش به کل فناوری.

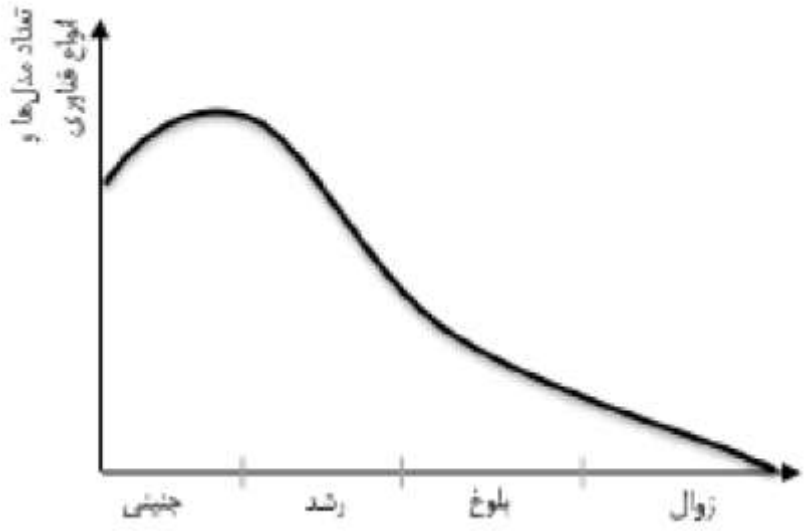


شکل ۴-۲: ارتباط چرخه عمر فناوری با چرخه عمر زیر فناوری‌ها

با رویکرد نگرش به اجزای فناوری، با ا ستفاده از سه معیار می‌توان به صورت کیفی جایگاه هر فناوری را در چرخه عمر تعیین کرد. این سه معیار در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

تنوع مدل‌های موجود فناوری:

در سال‌های اخیر فناوری نانو در ایران بیش از پیش مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است و این روند رو به افزایش است. همان‌طور که از شکل ۴-۳ مشخص است، تنوع مدل‌های فناوری می‌تواند شاخصی برای تعیین چرخه عمر باشد. با توجه به مطالب مذکور به نظر می‌رسد که فناوری نانو از منظر تنوع مدل‌ها در مرحله رشد چرخه عمر قرار دارد.

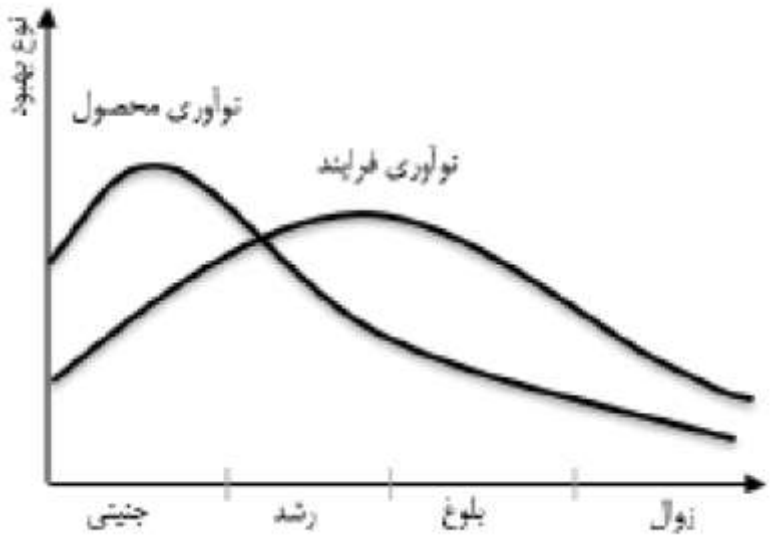


شکل ۴-۳: معیار تنوع مدل‌های موجود فناوری در تخمین چرخه عمر

نوع بهبود:

در فناوری نانو، روند رو به ر شد اقتصادی کردن این فناوری در کشورهای پیشرفته مشاهده می شود. ورود تعداد بیشتری از شرکت‌های مرتبط با این فناوری در صنعت طی سال‌های اخیر نشان‌دهنده مرحله رشد این فناوری در

کشورهای پیشرفته می‌باشد؛ اما در کشور ایران، این فناوری هم از نظر نوآوری در محصول و هم از نظر نوآوری در فرآیند در مرحله جنینی قرار دارد.

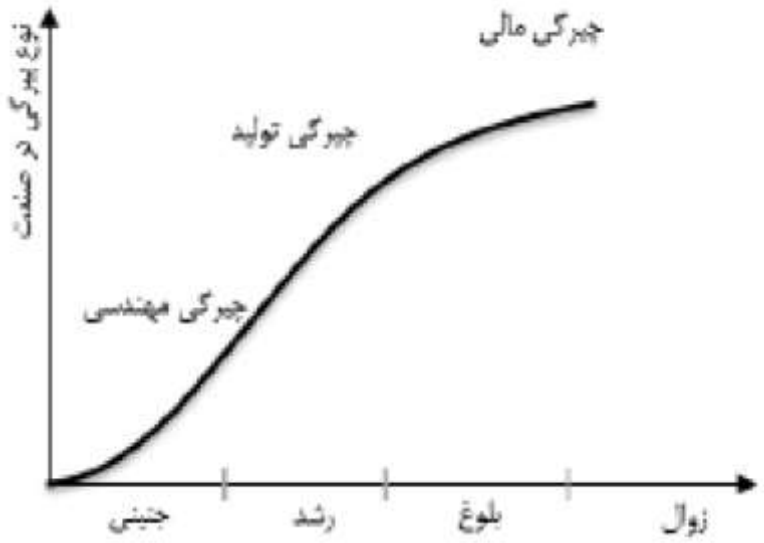


شکل ۴-۴: معیار نوع بهبود در تعیین چرخه عمر فناوری

نوع چیرگی در صنعت:

با پیشـــرفت علم نانوتکنولوژی از ســـال‌های ۱۹۹۰ تاکنون، گزارش‌ها نشـــان می‌دهند قیمت مواد نانو رو به کاهش است. به عنوان مثال قیمت کربن نانو تیوب[۱] طی سال‌های گذشته کاهش جدی داشته و انتظار می‌رود این کاهش ادامه داشـــته باشـــد. قیمت این مواد از ســـال ۱۹۹۰ تاکنون حدود ۱۰۰ برابر کاهش یافته اســـت. همان‌طور که در بخش مربوط به مطالعات اقتصادی این پروژه اشاره شده است، یکی از چالش‌های اصلی استفاده از مواد نانو، قیمت و توجیه‌پذیری اقتصادی این مواد است. به همین دلیل مطالعات زیادی در ارتباط با بهینه کردن میزان مصرف این مواد در سازه و کاهش هزینه آن در حال انجام است. به نظر می‌رسد از آنجا که بررسی امکان تولید انبوه نانو مواد و اقتصادی کردن نانوتکنولوژی موضوع بحث مطالعات جدید می‌باشد، از نظر چیرگی در صنعت، فناوری نانو در کشورهای صنعتی در مرحله ابتدایی رشد در چرخه عمر باشد.

[۱] Carbon nanotubes (CNTs)



شکل ۴–۵: معیار نوع چیرگی در صنعت در تعیین چرخه عمر فناوری

فناوری نانو در بسیاری از حوزه‌ها چه در داخل کشور و چه در کشورهای توسعه یافته در مرحله تحقیق و توسعه (R&D) می‌باشد.

با رویکرد نگرش به کل فناوری می‌توان گفت کاربرد فناوری نانو در سازه‌ها در کشورهای توسعه یافته در مرحله رشد قرار دارد؛ اما با توجه به کاربرد کمتر این مواد در سازه‌ها در ایران، می‌توان گفت که فناوری نانو در سازه‌های صنعت برق در ایران، در مرحله جنینی قرار دارد.

۲-۱-۳-۴- چرخه عمر محصول- بازار

به منظور کاهش ریسک و افزایش موفقیت یک فناوری لازم است که چرخه عمر محصول- بازار به عنوان ابزار مفهومی برای تحلیل رفتار فروش فناوری مورد بررسی قرار گیرد. بسیاری از محققین از چرخه عمر محصول- بازار به عنوان ابزاری برای شناسایی راهبردها و سیاست‌های ورود به بازار یا تولید یک کالا استفاده می‌کنند. طبق پارامترهایی که در ادامه بررسی می‌شوند، می‌توان جایگاه نانوتکنولوژی در سازه‌ها را در بین مراحل چرخه عمر (جنینی، رشد، بلوغ و زوال) تعیین کرد.

ساختار بازار:

ساختار بازار در واقع نشان‌دهنده تولیدکنندگان محصول است. در سال‌های اخیر بسیاری از تولیدکنندگان و سرمایه‌گذاران به سمت تجارت در زمینه علم نانو در صنعت ساخت روی آورده‌اند. همان‌طور که در گزارش مرحله سوم این پروژه به لیست بسیاری از شرکت‌های خارجی و داخلی در این زمینه اشاره گردید، می‌توان دریافت بیشترین فعالیت‌ها در زمینه تولید و تأمین مواد نانو ساختار در ایران از دهه ۸۰ به بعد بوده است؛ یعنی کمتر از ۲۰ سال. البته در سال‌های قبل‌تر هم شرکت‌هایی در این زمینه فعالیت‌هایی داشته‌اند؛ اما می‌توان گفت اهمیت و جایگاه این علم به‌تازگی کشف شده است.

همان‌طور که در گزارش مرحله سوم این پروژه بیان شد، پس از بررسی شرکت‌های تأمین‌کننده مواد نانو به منظور بهسازی در صنعت ساختمان در جهان، ۱۳۰ شرکت برتر در این زمینه شناسایی شد و لیست این شرکت‌ها نیز ارائه شد. با تحقیقات صورت گرفته مشخص شد شرکت‌های فعال در آمریکا با داشتن بیش از ۴۰ درصد سهم بازار، بیشترین اثرگذاری در این بازار را دارند؛ هند و آلمان و سپس چین و کره در رتبه‌های بعدی این لیست قرار دارند. کشور ما برای پیشرفت در زمینه کاربرد نانوتکنولوژی در صنعت ساخت و استفاده از مزایای آن و بالطبع داشتن نقشی تأثیرگذار در این بازار، باید به سمت سرمایه‌گذاری بیشتر و حمایت‌های هدف‌دار از فعالین این حوزه روی آورد. قطعاً پیشرفت بدون برنامه‌ریزی و حمایت مداوم از تولیدکننده میسر نخواهد بود.

نوع تحول فناورانه:

همان‌طور که می‌دانیم در حال حاضر تحقیقات زیادی درزمینه کاربرد نانوتکنولوژی در صنعت سازه در سراسر دنیا در حال انجام است و در هر زمانی ممکن است تحولات بنیادین و تأثیرگذاری در این زمینه اتفاق افتد. به همین دلیل از این نظر می‌توان نتیجه گرفت که همچنان انتظار تحول در محصولات نهایی وجود دارد و این فناوری در مرحله رشد خود در جهان قرار دارد.

نوع اکتساب فناوری:

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، فناوری نانو در سازه‌ها در کشورهای پیشرفته در مرحله رشد خود قرار دارد و شرکت‌های فعال در این زمینه در انتشار نتایج تحقیقات فناوری خود محتاط هستند و نمی‌توان انتظار ورود این فناوری با همکاری و خرید فناوری را داشت؛ به همین دلیل بهترین راه برای رسیدن به رشد و پیشرفت در این حوزه، استفاده از پتانسیل و توانایی درون کشور بوده و با حمایت از محققان و شرکت‌های نوآور در این زمینه، می‌توان انتظار داشت به‌زودی شاهد شکوفایی بیشتر این علم و صنعت در کشور باشیم.

نقش دولت:

همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره گردید، کشور ما در حوزه استفاده از نانوتکنولوژی در سازه‌ها در مراحل ابتدایی قرار دارد. بسیاری از شرکت‌ها و سرمایه‌گذاران با ورود به این عرصه احتمالاً در بلند مدت به سوددهی و بازگشت سرمایه خواهند رسید؛ بنابراین دولت به عنوان سیاست‌گذار باید با در نظر گرفتن حمایت‌های مادی و حقوقی از این شرکت‌ها، سیر ورود محققان و شرکت‌ها در این حوزه را تسهیل کند. به عنوان مثال می‌توان به حمایت از استارتاپ‌های حوزه نانو و یا شرکت‌های دانش‌بنیان اشاره کرد.

در مجموع با تحلیل صورت گرفته می‌توان گفت چرخه عمر محصول-بازار فناوری نانو در سازه‌ها در کشور ایران در مرحله جنینی قرار دارد.

۴-۴- اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو از سال ۹۵ تا ۹۷

هر ساله نهادها و ارگان‌های دولتی و حتی خصوصی اقدام به انتشار فهرستی از ضروری‌ترین موضوعات پژوهشی تحت عنوان اولویت‌های پژوهشی می‌کنند که سازمان یا نهاد مربوطه بیشترین نیاز به بررسی و تحقیق را برای آنها احساس کرده است. در این بخش به بررسی مسائل و موضوعاتی پرداخته شده که در سال‌های اخیر به عنوان

اولویت‌های پژوهشی وزارت نیرو مطرح شده‌اند و از میان اولویت‌های پژوهشی وزارت نیرو در سال‌های ۹۵ تا ۹۷، عناوینی که می‌توانند با موضـــوع این پژوهش مرتبط باشـــند در جدول ۴-۱ تا جدول ۴-۳ اســـتخراج و جمع‌آوری‌شده‌اند.

۴-۴-۱ - اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو سال ۱۳۹۵[۱۲]

جدول ۴-۱: اولویت‌های وزارت نیرو سال ۱۳۹۵

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۱	کاهش مقاومت سیستم زمین برای دکل‌های خطوط انتقال در مناطق صخره‌ای (ارائه روش‌های جدید)	شرکت برق منطقه‌ای کرمان	انتقال و فوق توزیع	قابلیت اطمینان سیستم‌های انتقال نیرو	مدل‌سازی انواع سیستم زمین خطوط انتقال نیرو- شبیه‌سازی انواع مدل‌های سیستم زمین- تهیه دستورالعمل طراحی، اجرا، تست و نگهداری سیستم زمین دکل‌های خطوط انتقال نیرو	اهمیت مقاومت سیستم زمین دکل‌های خطوط انتقال و عملکرد خطوط (خطاها، وقفه‌ها، کیفیت توان خطوط) - نرخ زیاد خروج هم‌زمان خطوط فوق توزیع دومداره در مناطق صخره‌ای با شرایط جوی نامناسب
۲	طراحی شیوه مناسب برای عایق‌سازی فونداسیون‌های بتنی تأسیسات صنعت برق به منظور کاهش خوردگی با استفاده از مواد نانو عایق	شرکت برق منطقه‌ای یزد	انتقال و فوق توزیع	تکنولوژی پیشرفته و بهینه در انتقال نیرو	۱. انتخاب مواد نانو عایق متناسب با شرایط منطقه استان یزد ۲. انتخاب الگوی مناسب برای عایق‌کاری فونداسیون‌های بتنی ۳. بررسی و ارزیابی عواید اقتصادی ناشی از اجرای راهکارها	هزینه‌های بالای خوردگی تأسیسات بتنی صنعت برق استان یزد با توجه به شرایط اقلیمی و عوامل خردگی موجود در خاک
۳	ارائه طرح بهینه دکل‌های انتقال برق سطح ۶۳	شرکت برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان	انتقال و فوق توزیع	تکنولوژی پیشرفته و بهینه در انتقال نیرو	۱- یافتن بهینه‌ترین فاصله پایه‌های دکل‌های انتقال نیرو ۲- راهکار مناسب برای بهینه کردن فاصله بین هادی‌های انتقال ۳- راهکار اساسی برای بهینه کردن فاصله بین بازوهای نگهدارنده ۴-	دکل‌های انتقال نیرو برای سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت بسیار پرکاربرد هستند. این نوع دکل‌ها بر اساس شرایط آب و هوایی منطقه، دارای تیپ بندی‌های گوناگونی می‌باشند. در این طرح تحقیقاتی هدف، ارائه طرح بهینه برای این دسته از دکل‌ها با معیار قرار دادن وزن کل دکل است.

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					یافتن راهکاری برای کاهش سایز قطعات مورداستفاده در دکل انتقال نیرو ۵- راهکار مناسب برای تغییر در الگوهای اصلی طراحی	
۴	بررسی فنی و اقتصادی امکان استفاده از فونداسیون طرح مشبک grillage footing foundation در خطوط در حال احداث	شرکت برق منطقه‌ای خراسان	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	بررسی فنی و اقتصادی امکان استفاده از فونداسیون طرح مشبک	۱- عدم دسترسی به جاده در مناطق کوهستانی جهت حمل بتن و افزایش زمان احداث پروژه ۲- کاهش هزینه احداث خط با توجه به عدم نیاز به بتن و فقط استفاده از سیستم مشبک فلزی و کوبیده شدن خاک پای دکل
۵	طراحی و ساخت هادی‌ها و پیاده‌سازی تکنولوژی نانو بر روی عایق تجهیزات باهدف کاهش آلودگی پذیری	شرکت برق منطقه‌ای سمنان	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	کاهش تلفات در شبکه جلوگیری از اعمال خاموشی‌های مرتبط با تجهیزات آلوده کاهش انرژی توزیع نشده	با توجه به اینکه اکثر تجهیزات شبکه انتقال و فوق توزیع در محیط آزاد قرار دارند لذا در معرض آلودگی می‌باشند لذا با استفاده از پوشش‌های نانویی می‌توان در حد زیادی از پدیده مذکور جلوگیری نمود
۶	بررسی و مدل‌سازی عایقی کلیه تجهیزات خطوط و پست‌های انتقال و فوق توزیع برق غرب در شرایط حضور ریز گردها و ارائه روش‌ها و راهکارهای کاهش و یا حذف آثار مخرب ناشی از آن‌ها	شرکت برق منطقه‌ای غرب	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	در این تحقیق ضمن مطالعه و بررسی در خصوص شدت و میزان ریز گردها در حوزه برق غرب و مشخصات فنی تجهیزات و عایق‌های به‌کارگیری شده نسبت به مدل‌سازی نرم‌افزاری عایق تجهیزات در شرایط انباشت ریز گردها و همچنین بررسی ترکیبات ایجادشده با توجه به نوع	حفظ امنیت و پایداری شبکه و تداوم انتقال انرژی

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					عایق و شرایط آب و هوایی اقدام گردیده و ضمن انجام کلیه بررسی‌های فنی و اقتصادی لازم متعاقباً روش‌ها و راهکارهای علمی و عملی متناسب جهت مقابله با آثار مخرب ناشی از آن‌ها ارائه‌شده و ضمن تشریح، راهکارها اولویت‌بندی می‌گردند.	
۷	بررسی فنی و اقتصادی به‌کارگیری شمع‌های مارپیچ به عنوان فونداسیون برج‌های خطوط برق منطقه‌ای گیلان	شرکت برق منطقه‌ای گیلان	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	دستیابی به روشی جهت حل مشکلات احداث خطوط انتقال نیرو که ضمن افزایش سرعت اجرا و قابلیت اطمینان خط، کاهش هزینه‌های اجرایی را به همراه داشته باشد.	با توجه به افزایش روزافزون نیاز کشور به برق و درنتیجه نیاز به توسعه صنعت برق در کشور، استفاده از تکنولوژی پیشرفته و به‌روز در این صنعت اهمیت بسیاری دارد. ازآنجاکه توسعه خطوط انتقال و توزیع نیرو از ضروریات توسعه این صنعت می‌باشد، استفاده از تکنولوژی‌های جدید در این بخش حائز اهمیت است. فونداسیون برج‌های خطوط انتقال نیرو به روش‌های مختلفی اجرا می‌شوند. در زمین‌هایی که خاک ضعیف و سست دارند مثل مناطق شمالی کشور از جمله منطقه گیلان، درصد بالایی از هزینه احداث خطوط مربوط به فونداسیون می‌باشد، بنابراین استفاده از فونداسیون‌هایی که با سرعت بیشتر و هزینه کمتر احداث می‌شوند و همچنین برای استفاده در خاک‌های ضعیف نیز مناسب باشند اهمیت ویژه‌ای دارد و هزینه‌های ناشی از احداث خطوط را به‌مراتب کاهش می‌دهد.

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۸	بررسی و امکان‌سنجی استفاده از پوشش‌های نانوتکنولوژی برای جلوگیری از خوردگی و فرسودگی یراق‌آلات	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	تولید و یا استفاده از مواد این‌گونه به منظور جلوگیری از خوردگی یراق‌آلات	میزان شدید خوردگی در منطقه هرمزگان و هزینه‌های بالای مقابله با این پدیده
۹	بررسی روش‌های نوین در اجرای فونداسیون برج‌های خطوط انتقال و فوق توزیع نیروی برق با توجه به شرایط کار در اراضی استان گیلان و تجارب مشابه در سایر نقاط دنیا	شرکت برق منطقه‌ای گیلان	انتقال و فوق توزیع	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع	شناسایی روش‌ها و تکنولوژی‌های جدید جهت اجرای فونداسیون خطوط انتقال استان گیلان باهدف کاهش هزینه و زمان احداث فونداسیون	با توجه به این‌که به دلیل شرایط خاص استان گیلان که عمدتاً خطوط انتقال از شالیزارها یا مناطق کوهستانی با پوشش طبیعی عبور می‌کند و به دلیل عدم وجود جاده دسترسی و همچنین عدم امکان عبور ماشین‌آلات سنگین، دسترسی به محل فونداسیون‌ها و اجرای فونداسیون‌ها با مشکلات عدیده‌ای مواجه است و موجب طولانی شدن زمان اجرا، تخریب گسترده اراضی مسیر برای انتقال ماشین‌آلات و مصالح به پای‌کار و بروز ممانعت‌های اجرایی متعدد گردیده و علاوه بر هزینه‌های معمول اجرای فونداسیون، هزینه‌های اضافی زیادی را در قالب پرداخت خسارت‌ها، رسیدگی به دعاوی و طرح شکایت‌ها در محاکم قضایی و... به شرکت تحمیل می‌نماید. لذا بازنگری در روش‌های اجرای فونداسیون‌ها در استان گیلان ضروری به نظر می‌رسد. نظر به این‌که شرایط اقلیمی و جغرافیایی مشابه استان گیلان در سایر نقاط جهان نیز وجود دارد، لذا فارغ از نوع طرح فونداسیون، استفاده از تجربیات سایر کشورها

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						برای شناسایی روش‌های نوین اجرایی و ارائه راهکارها و دستورالعمل‌های بومی قابل‌اجرا برای کاهش زمان و هزینه‌های اجرایی با لحاظ نمودن نظرات مشاورین شاغل در سطح کشور از بعد اجرایی بودن طرح‌های فونداسیون‌های برج‌های خطوط انتقال و فوق توزیع نیروی برق مورد انتظار می‌باشد.
۱۰	بررسی و امکان‌سنجی فنی و اقتصادی تقویت خطوط تک مداره ۶۳ کیلوولت موجود به دو مداره، شامل تقویت برج و فونداسیون	شرکت برق منطقه‌ای گیلان	انتقال و فوق توزیع	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع	۱ ارائه روش‌های تقویت فونداسیون و مقایسه فنی و اقتصادی تقویت فونداسیون موجود با احداث فونداسیون جدید ۲ ارائه طرح دکل تقویت‌شده جهت تبدیل خط تک مداره به دو مداره بدون افزایش باند حریم ۳ ارائه طرح دکل جدید بر روی فونداسیون تقویت‌شده برای تبدیل خط تک مداره به ۲، ۳ و ۴ مداره بدون افزایش باند حریم ۴ مقایسه فنی و اقتصادی تقویت چهارمداره بدون برج و دکل با احداث خط جدید ۵ مقایسه زمانی تقویت خط موجود با احداث خط جدید	با توجه به شرایط خاص منطقه‌ای نظیر ارزشمند بودن اراضی، خاک سست منطقه و شرایط خاص احداث خطوط انتقال و ...، احداث خطوط جدید فوق توزیع و انتقال نیرو از مسائل و معضلات اساسی صنعت برق استان بوده، لذا با توجه به رشد بار و پر شدن ظرفیت خطوط موجود، یکی از بهترین روش‌ها به منظور توسعه شبکه استفاده از امکانات و حریم خطوط موجود می‌باشد. در این راستا تبدیل خطوط موجود تک مداره به دو مداره (یا بیشتر) از طریق روش‌هایی نظیر تقویت فونداسیون (به عنوان مثال با استفاده از میکروپایل) و تقویت برج‌های موجود و یا طراحی برج جدید با شرط استفاده از فونداسیون تقویت‌شده یکی از کارگشاترین روش‌ها در کاهش هزینه و زمان احداث خطوط است و ازآنجایی‌که طرحی مشابه در سطح ملی انجام نگرفته است، با استفاده از توان فنی و مهندسی داخل می‌توان نسبت به انجام مطالعات مرتبط با موضوع پرداخت.

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۱۱	بررسی میزان خوردگی و زنگ‌زدگی تجهیزات جدید (دکل‌ها و استراکچرهای فلزی) در مقایسه با تجهیزات فلزی قدیمی‌تر	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	انتقال و فوق توزیع	پایش خطوط و تجهیزات سیستم انتقال و فوق توزیع	با توجه به اینکه زنگ‌زدگی و خوردگی در خطوط و تجهیزات جدید نمایش بیشتری در مقایسه با استراکچرهای قدیمی‌تر مشابه در شرایط آب و هوایی یکسان دارد، لازم است بررسی‌ها و آزمایش‌ها و محاسبات علمی انجام‌شده و راهکارهای علمی و عملی جهت اصلاح و جلوگیری از خوردگی بیشتر صورت پذیرد.	خوردگی شدید در منطقه هرمزگان و هزینه‌های بالای مقابله با این پدیده
۱۲	بررسی، مدل‌سازی و روش‌های پیشگیری و رفع اثرات ریز گردها بر روی شبکه‌های توزیع برق	شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان	توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	کاهش اثرات آن روی شبکه	مطالعه اثرات آن روی شبکه برق لرستان
۱۳	تحلیل و بررسی شکستگی پایه کات اوت‌های ۲۳ کیلوولت در شبکه‌های توزیع برق غرب مازندران	شرکت توزیع نیروی برق غرب مازندران	توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	ارائه گزارش تحلیلی دلایل ایراد و پیشنهاد قابل‌اجرایی و کاربردی برای ساخت و نصب و...	با توجه به کثرت کات اوت در شبکه‌های توزیع و قیمت مناسب آن‌که همچنان استفاده از آن را توجیه‌پذیر نموده یکی از عوامل خاموشی بالا در شبکه‌های توزیع برق غرب مازندران اشکالات وایرار در کات اوت و به‌ویژه شکستگی پایه کات اوت می‌باشد تحلیل و بررسی این موضوع سبب بهبود قابلیت اطمینان شبکه خواهد شد.
۱۴	بررسی استفاده از فناوری نانو جهت جلوگیری از خوردگی یراق‌آلات بکار برده	شرکت توزیع نیروی برق استان خوزستان	توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	کاهش زنگ‌زدگی و خوردگی یراق‌آلات با تولید رزین‌های ارتقاءیافته به کمک نانو ذرات	ایجاد خوردگی در یراق‌آلات و تحمیل هزینه‌های قابل‌توجهی باوجود شرایط محیطی خاص منطقه مانند گرما، رطوبت، گازهای H_2S به علت عملیات نفتی

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	شده در شبکه‌های توزیع برق					
۱۵	مطالعه، بررسی و تعیین روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی، انبارها و ساختمان‌های اداری در برابر حوادث غیرمترقبه	شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان	توزیع	مطالعات، بهبود و بهینه‌سازی ترانسفورماتورهای شبکه توزیع	مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی، انبارها و ساختمان‌های اداری	مطالعه بهبود و بهینه‌سازی
۱۶	طراحی و ساخت پایه‌های فلزی مناسب جهت نصب موقت مخصوص شرایط بحرانی و مناطق صعب‌العبور	شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان	توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	پایداری شبکه توزیع برق در شرایط بحرانی	داشتن شرایط بحرانی و مناطق صعب‌العبور
۱۷	بررسی علل فرسودگی پایه‌های بتنی در شرایط مختلف اقلیمی استان گلستان و ارائه راهکارهایی جهت پیشگیری از آن	شرکت توزیع نیروی برق استان گلستان	توزیع	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق	ارائه دستورالعمل برای ۱- ساخت پایه‌های بتنی جدید بسته به مناطق اقلیمی ۲- پیش‌بینی راهکاری جهت حفظ و کاهش سرعت فرسودگی در تیرهای موجود ۳- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری	جلوگیری از فرسودگی پایه‌های بتنی در مناطق ۱- شوره‌زار ۲- کاهش هزینه‌های تعویض پایه‌های بتنی ۳-افزایش ایمنی
۱۸	بررسی اثرات پدیده گردوغبار بر تجهیزات شبکه توزیع برق اهواز و نحوه انتخاب تجهیزات متناسب با میزان آلودگی محاسبه‌شده	شرکت توزیع نیروی برق اهواز	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	ارائه راهکارهای عملی در راستای انتخاب بهینه تجهیزات	با توجه به اینکه پدیده گردوغبار در سال‌های اخیر به‌کرات در حال وقوع است لزوم بررسی تأثیر این پدیده بر تجهیزات بکار رفته در شبکه توزیع برق اهواز بشدت احساس می‌شود. بررسی‌های کلی در سال اخیر نشان می‌دهد که با بروز پدیده گردوغبار میزان مصرف افزایش‌یافته تلفات در

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						شبکه بیشتر شده و بروز حوادث در شبکه افزایش زیادی داشته است. لذا انجام پژوهشی مدون در راستای بررسی پدیده گردوغبار روی تجهیزات به انتخاب این تجهیزات برای شبکه کمک شایانی خواهد داشت.
۱۹	ارزیابی سیستم زمین با در نظر گرفتن آلودگی‌های خاک و عوامل محیطی تأثیرگذار در نقاط مختلف تحت پوشش شرکت توزیع نیروی برق اهواز	شرکت توزیع نیروی برق اهواز	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	ارائه پهنه‌بندی جنس خاک شهر اهواز و تعیین نوع مقاومت استفاده‌شده برای مقاومت زمین	با توجه به آلودگی آب‌وخاک در شهرستان اهواز، همچنین بالا بودن رطوبت به دلیل وجود رودخانه کارون و تنوع جنس خاک در مناطق مختلف اهواز پهنه‌بندی جنس خاک و مسائل مربوط به مقاومت زمین ضروری می‌باشد.
۲۰	امکان‌سنجی و تولید نمونه آزمایشگاهی نشانگر شیمیایی هوشمند برای شناسایی و ردیابی خوردگی در تیرهای بتنی	شرکت توزیع نیروی برق استان یزد	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	تولید نمونه آزمایشگاهی نشانگر شیمیایی جهت تعیین موقعیت آستانه خوردگی تیرهای بتنی	در بسیاری از صنایع اتفاقاتی که حاصل فعل‌وانفعالات تدریجی شیمیایی هستند با استفاده از شناساگرها یا نشانگرها ردیابی می‌شوند در صنعت برق نیز خوردگی تیرها براثر خوردگی میلگردها و درنتیجه کاهش مقاومت تیر اتفاق می‌افتد لذا این پژوهش بر اساس مرور مراجع علمی پژوهشی صنعت بتن سعی دارد نشانگر شیمیایی جهت تعیین موقعیت آستانه خطر طراحی و به‌صورت آزمایشگاهی تولید کند.
۲۱	بررسی آسیب‌پذیری کلی شبکه برق منطقه‌ای یزد از نظر حوادث طبیعی با تأکید بر زلزله و طوفان	شرکت برق منطقه‌ای یزد	عمومی	امنیت اطلاعات	تحلیل آسیب‌های ناشی از حوادث طبیعی بر روی عملکرد شبکه برق یزد (رده‌بندی خطوط و پست‌ها از نظر آسیب‌پذیری) همراه با تدوین و ارائه راهکار	تأمین برق مطمئن

ردیف	عنوان تحقیق	نام شرکت	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					برای کاهش یا حذف آسیب‌ها	

۲-۴-۴ - اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو سال ۱۳۹۶ [۱۳]

جدول ۴-۲: اولویت‌های وزارت نیرو سال ۱۳۹۶

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
۱	ارائه طرح بهینه دکل‌های انتقال برق سطح ۶۱ کیلوولت با معیار قرار دادن وزن کل	شرکت برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان	محور توزیع و انتقال	تکنولوژی پیشرفته و بهینه در انتقال نیرو	دکل‌های انتقال نیرو برای سطح ولتاژ ۶۱ کیلوولت بسیار پرکاربرد هستند. این نوع دکل‌ها بر اساس شرایط آب و هوایی منطقه، دارای تیپ بندی‌های گوناگونی می‌باشند. در این طرح تحقیقاتی هدف ارائه طرح بهینه برای این دسته از دکل‌ها با معیار قرار دادن وزن کل دکل است.	۱- یافتن بهینه‌ترین فاصله‌ی پایه‌های دکل‌های انتقال نیرو ۲- راهکار مناسب برای بهینه کردن فاصله بین هادی‌های انتقال ۳- راهکار اساسی برای بهینه کردن فاصله بین بازوهای نگهدارنده ۴- یافتن راهکاری برای کاهش سایز قطعات مورد استفاده در دکل انتقال نیرو ۵- راهکار مناسب برای تغییر در الگوهای اصلی طراحی
۲	طراحی شیوه مناسب برای عایق سازی فونداسیون‌های بتنی تأسیسات صنعت برق به منظور کاهش خوردگی با استفاده از مواد نانو عایق	شرکت برق منطقه‌ای یزد	محور توزیع و انتقال	تکنولوژی پیشرفته و بهینه در انتقال نیرو	هزینه‌های بالای خوردگی تأسیسات بتنی صنعت برق استان یزد با توجه به شرایط اقلیمی و عوامل خوردگی موجود در خاک	۱- انتخاب مواد نانو عایق متناسب با شرایط منطقه استان یزد ۲- انتخاب الگوی مناسب برای عایق‌کاری فونداسیون‌های بتنی ۳- بررسی و ارزیابی عواید اقتصادی ناشی از اجرای راهکارها
۳	بررسی روش‌های نوین کاهش مقاومت سیستم زمین برای دکل‌های خطوط فوق توزیع و انتقال	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	محور توزیع و انتقال	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	با توجه به اهمیت مقاومت سیستم زمین دکل‌های خطوط فوق توزیع و انتقال بر عملکرد خطوط از منظر نوع خطاها، ایجاد زمان وقفه، کیفیت توان	مدل‌سازی انواع سیستم زمین خطوط انتقال نیرو و شبیه‌سازی انواع مدل‌های سیستم زمین به منظور تهیه دستورالعمل طراحی، اجرا، تست و نگهداری سیستم

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
	در مناطق صخره‌ای استان هرمزگان				انرژی خطوط فوق توزیع و انتقال و همچنین نرخ زیاد خروج هم‌زمان خطوط فوق توزیع و انتقال در مناطق صخره‌ای با شرایط جوی نامناسب مطالعه این پروژه ضروری است.	زمین دکل‌های خطوط انتقال نیرو و شبکه برق هرمزگان
۴	طراحی و ساخت مواد نانو عایق به منظور کاهش خوردگی فونداسیون‌های بتنی تأسیسات صنعت برق مختص نوار ساحلی جنوب کشور	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	محور توزیع و انتقال	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	هزینه‌های بالای خوردگی تأسیسات بتنی صنعت برق در نوار ساحلی کشور و همچنین شرایط اقلیمی و عوامل خوردگی موجود در سه عامل خاک، هوا و آب ضرورت این تحقیق را بسیار بارز می‌نماید.	یکی از مؤثرترین روش‌ها برای جلوگیری از خوردگی اعمال پوشش پلیمری بر روی سازه‌های بتنی می‌باشد. پوشش‌های پلیمری آلی می‌توانند به‌طور قابل‌قبول زیرلایه را در برابر خوردگی محافظت کنند. پوشش‌های پلیمری کاربرد بسیار زیادی در حفاظت زیرایندهای گوناگون داشته و نرخ خوردگی را در محیط‌های خورنده کاهش می‌دهند. شرایط خاص خورندگی در نوار ساحلی جنوب کشور که در مجاورت دریا قرار گرفته است بسیار حاد می‌باشد. استفاده از پوشش‌های آلی با خواص ضد خوردگی مختلف به عنوان یک روش کاربردی و مؤثر در راستای حفاظت از سازه‌های بتنی مؤثر می‌باشند. با توجه به اینکه در استان هرمزگان اتمسفر موجود علاوه بر اتمسفر دریایی دارای المان‌های اتمسفر یون موجود در خاک می‌باشد، ضرورت طراحی پوشش‌های کامپوزیتی پلیمری مناسب و متناسب با پارامترهای مؤثر در خوردگی سازه‌های بتنی در اتمسفر

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
						موجود از اهمیت خاصی برخوردار است. از جمله پوشش‌های قابل توسعه در چنین محیط‌هایی پوشش‌های نانو می‌باشند که با توجه به مشخصات منحصربه‌فرد می‌توانند عمر سرویس‌دهی قطعات و تجهیزات بتنی را افزایش و تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های تعمیراتی و تعویض ناشی از خوردگی داشته باشند. با استفاده از پوشش‌های جدید حاوی ذرات میکرومتری و نانومتری می‌توان عمر سازه بتنی را به‌طور قابل‌توجه ای افزایش داد؛ و همچنین نانو ذرات به دلیل سطح تماس بالا، اندازه ذرات پایین و نیز اتصالات محکم‌تر با ماتریس پوشش در مقایسه با میکرو ذرات، خواص ضد خوردگی، خواص نوری و مکانیکی را نیز بهبود می‌دهند. انتخاب الگوی مناسب برای به‌کارگیری مواد نانو عایق متناسب با شرایط آب و هوایی نوار ساحلی جنوب کشور و از آن جمله استان هرمزگان برای عایق‌کاری فونداسیون‌های بتنی دکل‌ها و تجهیزات شبکه و ارزیابی اقتصادی ناشی از اجرای راهکارهای پیشنهادی تحقیق به منظور دستیابی به پارامترهایی نظیر مقاومت به خوردگی، خواص مکانیکی، شیمیایی و نوری یک پوشش اپوکسی یا پلی یورتانی می‌تواند با استفاده از این ذرات

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
						بهبودیافته و افزایش عمر سازه‌های بتنی را محقق سازد.
۵	بررسی میزان خوردگی دکل عبور از دریا و ارائه راهکارهای علمی و عملی جهت جلوگیری و یا کاهش سرعت خوردگی	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	محور توزیع و انتقال	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	با توجه به اینکه امکان تهیه و نصب این نوع دکل‌ها به سهولت امکان‌پذیر نیست و نیازمند مسیریابی جدید و بسترشناسی دریا و دیگر محاسبات فنی و اجرایی دارد لذا کاهش میزان خوردگی این دکل‌ها موجب افزایش طول عمر و پایداری و استقامت مکانیکی آن خواهد شد. بنابراین بررسی میزان خوردگی دکل عبور از دریا یک ضرورت مهم می‌باشد چراکه تنها مسیر نیرورسانی به شبکه مهم و استراتژیک جزیره قشم با بیش از ۱۱۱ مگاوات مصرف انرژی می‌باشد. با در نظر داشتن ضرورت استمرار جریان انرژی و برق‌رسانی جزیره استراتژیک قشم و با توجه به اینکه دکل عبور از دریا نزدیک به دو دهه از عمر و نصب آن بر روی پایه‌های سیمانی کیسون می‌گذرد و مستقیماً در معرض فعل‌وانفعالات شیمیایی ناشی از تبخیر آب دریا، بادهای فصلی و تندبادهای از سمت دریا، همچنین وجود بادهای سهیلی از سمت خشکی به سمت دریا و حمل ذرات نمک موجود در خاک باعث تشدید خوردگی سطحی دکل عبور از دریا شده است. همچنین وجود طوفان‌های فصلی و پرتاب	با توجه به اینکه امکان تهیه و نصب این نوع دکل‌ها به سهولت امکان‌پذیر نمی‌باشد و نیازمند مسیریابی جدید و بستر شناسی دریا و دیگر محاسبات فنی و اجرایی دارد، لذا کاهش میزان خوردگی این دکل‌ها موجب افزایش طول عمر و پایابی و استقامت مکانیکی آن خواهد شد. بنابراین بررسی میزان خوردگی دکل عبور از دریا یک ضرورت مهم می‌باشد چراکه تنها مسیر نیرورسانی به شبکه مهم و استراتژیک جزیره قشم با بیش از ۱۸۰ مگاوات مصرف انرژی می‌باشد. با در نظر داشتن ضرورت استمرار جریان انرژی و برق‌رسانی به جزیره استراتژیک قشم و با توجه به اینکه دکل عبور از دریا نزدیک به دو دهه از عمر و نصب آن بر روی پایه‌های سیمانی کیسون می‌گذرد و مستقیماً در معرض فعل‌وانفعالات شیمیایی ناشی از تبخیر آب دریا، بادهای فصلی و تندبادهای از سمت دریا، همچنین وجود بادهای سهیلی از سمت خشکی به سمت دریا و حمل ذرات نمک موجود در خاک که موجب تشدید خوردگی سطحی دکل عبور از دریا شده است، همچنین وجود طوفان‌های فصلی و پرتاب امواج بلند به پایه‌های دکل، تماس مستقیم با آب شور دریا نیز موجب تشدید

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					امواج بلند به پایه‌های دکل، تماس مستقیم با آب شور دریا خوردگی از ابتدای لگ تا انتهای گوشواره‌ها متفاوت اما شدید می‌باشد.	میزان خوردگی از ابتدای لگ تا انتهای گوشواره‌ها دبه میزان و درجه متفاوت اما شدید می‌باشد و علیرغم این‌که شرکت توانیر در حال حاضر پروژه‌ای مشابه را در دست اجرا ندارد و تنها نوع رنگی که باعث کاهش زنگ‌زدگی لگ ها را موجب شود در دست بررسی دارد و تنها به یک گزارش مشاوره‌ای در خصوص رنگ بسنده شده است، ضرورت بررسی میزان خوردگی دکل عبور از دریا و ارائه راهکارهای علمی و عملی جهت جلوگیری و یا کاهش سرعت خوردگی را به‌شدت در کانون توجه قرار داده است. نظر به اینکه در جزیره استراتژیک قشم که در حال حاضر بالغبر ۲۰۰ مگاوات مصرف لحظه‌ای آن می‌باشد هیچ نیروگاه قابل‌اطمینانی که برق جزیره از آن تأمین شود وجود ندارد لذا ضرورت حفظ و نگهداری پایه‌های دکل عبور از دریا جهت تأمین برق مطمئن و پایدار حتی در مواقع اضطراری مانند بروز بلایای طبیعی و یا شرایط ناخواسته دیگر بسیار حیاتی می‌باشد. لذا اتخاذ راهکارهای علمی جهت جلوگیری از شدت خوردگی و حتی متوقف نمودن آن بسیار ضروری است.
۶	کاهش مقاومت سیستم زمین برای دکل‌های خطوط	شرکت برق منطقه‌ای کرمان	محور توزیع و انتقال	قابلیت اطمینان سیستم‌های انتقال نیرو	اهمیت مقاومت سیستم زمین دکل‌های خطوط انتقال بر عملکرد خطوط	مدل‌سازی انواع سیستم زمین خطوط انتقال نیرو شبیه‌سازی انواع مدل‌های سیستم زمین تهیه

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
	انتقال در مناطق صخره‌ای و ارائه روش‌های جدید				(خطاها، وقفه‌ها، کیفیت توان خطوط) نرخ زیاد خروج هم‌زمان خطوط فوق توزیع دومداره در مناطق صخره‌ای با شرایط جوی نامناسب	دستورالعمل طراحی، اجرا، تست و نگهداری سیستم زمین دکل‌های خطوط انتقال نیرو
۷	بررسی روش‌های نوین در اجرای فونداسیون‌های برج‌های خطوط انتقال و فوق توزیع نیروی برق با توجه به شرایط کار در اراضی استان گیلان و تجارب مشابه در سایر نقاط دنیا	شرکت برق منطقه‌ای گیلان	محور توزیع و انتقال	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع	با توجه به این‌که به دلیل شرایط خاص استان گیلان که عمدتاً خطوط انتقال از شالیزارها یا مناطق کوهستانی با پوشش طبیعی عبور می‌کند و به دلیل عدم وجود جاده دسترسی و همچنین عدم امکان عبور ماشین‌آلات سنگین، دسترسی به محل فونداسیون‌ها و اجرای فونداسیون‌ها با مشکلات عدیده‌ای مواجه است و موجب طولانی شدن زمان اجرا، تخریب گسترده اراضی مسیر برای انتقال ماشین‌آلات و مصالح به پای کار و بروز ممانعت‌های اجرایی متعدد گردیده و علاوه بر هزینه‌های معمول اجرای فونداسیون، هزینه‌های اضافی زیادی را در قالب پرداخت خسارت‌ها، رسیدگی به دعاوی و طرح شکایت‌ها در محاکم قضایی و ... به شرکت تحمیل می‌نماید. لذا بازنگری در روش‌های اجرای فونداسیون‌ها در استان گیلان ضروری به نظر می‌رسد. نظر به این‌که شرایط اقلیمی و جغرافیایی مشابه استان گیلان	شناسایی روش‌ها و تکنولوژی‌های جدید جهت اجرای فونداسیون خطوط انتقال استان گیلان باهدف کاهش هزینه و زمان احداث فونداسیون

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					در سایر نقاط جهان نیز وجود دارد، لذا فارغ از نوع طرح فونداسیون، استفاده از تجربیات سایر کشورها برای شناسایی روش‌های نوین اجرایی و ارائه راهکارها و دستورالعمل‌های بومی قابل‌اجرا برای کاهش زمان و هزینه‌های اجرایی (با لحاظ نمودن نظرات مشاورین شاغل در سطح کشور از بعد اجرایی بودن) طرح‌های فونداسیون‌های برج‌های خطوط انتقال و فوق توزیع نیروی برق مورد انتظار می‌باشد.	
۸	بررسی فنی و اقتصادی به‌کارگیری شمع‌های مارپیچ به عنوان فونداسیون برج‌های خطوط فوق توزیع و انتقال شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	محور توزیع و انتقال	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع	با توجه به افزایش روزافزون نیاز استان هرمزگان به برق بیش از متوسط کشوری و درنتیجه نیاز به توسعه صنعت برق در استان، استفاده از تکنولوژی پیشرفته و به‌روز در این صنعت اهمیت بسیار بیشتری پیدا می‌نماید. ازآنجایی‌که توسعه خطوط انتقال و توزیع نیرو از ضروریات توسعه این صنعت در استان هرمزگان می‌باشد، استفاده از تکنولوژی‌های جدید در این بخش نیز حائز اهمیت بیشتری است. در زمین‌هایی که مانند بسیاری از نقاط سرزمین مادری در استان هرمزگان خاک ضعیف و سست دارند، فونداسیون برج‌های خطوط انتقال نیرو به روش‌های مختلفی اجرا می‌شوند که	دستیابی به روشی جهت حل مشکلات احداث خطوط فوق توزیع و انتقال نیرو که ضمن افزایش سرعت اجرا و قابلیت اطمینان در پایداری مکانیکی خطوط انتقال نیرو، کاهش هزینه‌های اجرایی را نیز به همراه داشته باشد.

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					درصد بالایی از هزینه احداث خطوط مربوط به فونداسیون می‌باشد، بنابراین استفاده از فونداسیون‌هایی که با سرعت بیشتر و هزینه کمتر احداث شوند و همچنین برای استفاده در خاک‌های ضعیف نیز مناسب باشند اهمیت ویژه‌ای دارد و هزینه‌های ناشی از احداث خطوط را به‌مراتب کاهش می‌دهد.	
۹	بررسی روش‌های نوین در اجرای فونداسیون‌های برج-های خطوط انتقال و فوق توزیع شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	محور توزیع و انتقال	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع	به دلیل شرایط خاص استان هرمزگان و عبور خطوط فوق توزیع و انتقال از مسیرهای دور از دسترس و یا دامنه کوه‌ها و مناطق کوهستانی با پوشش طبیعی عبور می‌کند و به دلیل عدم وجود جاده دسترسی در بسیاری از مسیرهای عبور شبکه و همچنین عدم امکان عبور ماشین‌آلات سنگین، دسترسی به محل فونداسیون‌ها و اجرای فونداسیون‌ها با مشکلات عدیده‌ای مواجه است و موجب طولانی شدن زمان اجرا، تخریب گسترده اراضی مسیر برای انتقال ماشین‌آلات و مصالح به پای کار و بروز ممانعت‌های اجرایی متعدد می‌گردد و علاوه بر هزینه‌های معمول اجرای فونداسیون، هزینه‌های اضافی زیادی را در قالب پرداخت خسارت‌ها، رسیدگی به دعاوی و طرح شکایت‌ها در محاکم	شناسایی روش‌ها و تکنولوژی‌های جدید جهت اجرای فونداسیون خطوط انتقال استان هرمزگان باهدف کاهش هزینه و زمان احداث فونداسیون با استفاده از تجارب سایر کشورها

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					قضایی و ... به شرکت تحمیل می‌نماید. لذا بازنگری در روش‌های اجرای فونداسیون‌ها در استان هرمزگان ضروری به نظر می‌رسد. نظر به این‌که شرایط اقلیمی و جغرافیایی مشابه استان هرمزگان در نوار ساحلی جنوب کشور و سایر نقاط جهان نیز وجود دارد، لذا فارغ از نوع طرح فونداسیون، استفاده از تجربیات سایر کشورها برای شناسایی روش‌های نوین اجرایی و ارائه راهکارها و دستورالعمل‌های بومی قابل‌اجرا برای کاهش زمان و هزینه‌های اجرایی) با لحاظ نمودن نظرات مشاورین شاغل در سطح کشور از بعد اجرایی بودن (طرح‌های فونداسیون‌های برج‌های خطوط انتقال و فوق توزیع نیروی برق مورد انتظار می‌باشد.	
۱۰	بررسی رفتار سایش و مقاومت به خوردگی پوشش‌های گالوانیزه کامپوزیتی	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	محور توزیع و انتقال	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع	پوشش روی (Zn) بر روی سطح فولاد جزو قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و درعین‌حال ارزان‌ترین پوشش‌های مورداستفاده جهت محافظت از خوردگی فولاد در صنایع مختلف می‌باشد. پوشش گالوانیزه توسط حفاظت از تماس فولاد با محیط خورنده و نیز حفاظت کاتدی در موقع تماس فولاد با محیط خورنده، از خوردگی فولاد جلوگیری	با توجه به مطالب مذکور و با توجه به اینکه در دکل‌های انتقال و توزیع نیرو و به‌ویژه در نواحی بیابانی، پوشش‌های گالوانیزه معمولی در معرض وزش باد به همراه مواد ساینده (ریز گردها) قرار می‌گیرند توسعه دانش فنی اعمال پوشش‌های گالوانیزه کامپوزیتی می‌تواند به افزایش سختی و درنتیجه بهبود خواص سایشی و همچنین مقاومت به خوردگی سازه‌های مورداستفاده

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					می‌کند. در مکانیزم حفاظت کاتدی روی توسط مکانیسم فداشوندگی (Scarification) به دلیل داشتن تمایل شیمیایی بیشتر به ترکیب با اکسیژن، اکسیدشده و با رسوب محصولات خوردگی ناشی از خوردگی روی، از ادامه خوردگی فولاد جلوگیری به عمل می‌آورد. در دهه‌های گذشته کادمیم نقش روی را ایفا می‌کرد و پوشش کادمیم به‌طور وسیعی در صنایع مورد بهره‌برداری بود. اما به دلیل بارز شدن مشکلات مربوط به آلودگی و سمی بودن کادمیم، به‌تدریج پوشش روی خالص جایگزین کادمیم گردید و به عنوان یک عملیات رایج صنعتی در پوشش دادن قطعات متعدد صنعتی و نظامی بکار گرفته شد. پوشش فلز روی (Zn) برای محافظت فولاد از چند روش اعمال می‌گردند: ۱- به‌وسیله تجهیزات الکتریکی شیمیایی: پوشش دهی الکتریکی(Electroplating) ۲- از یک حمام فلزی مذاب: گالوانیزه غوطه‌وری گرم (Hot dip galvanizing) ۳- از پاشش یک فلز مذاب: فلز پاشی	منجر شده و علاوه بر مزایای اقتصادی ناشی از افزایش طول عمر سرویس‌دهی سازه، هزینه‌های مربوط به تعمیرات را نیز به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					۴- در شکل پودری: پوشش مکانیکی ۵- در قالب پوشش‌های حاوی ذرات روی رفتار خوردگی پوشش‌های گالوانیزه تحت تأثیر عوامل مختلف مثل ریزساختار، فازهای موجود، ضخامت پوشش، ترکیب شیمیایی و ضخامت پوشش روی اعمالی می‌باشد. از جمله پیشرفت‌های ایجادشده در استفاده از پوشش‌های گالوانیزه ورود ذرات سرامیکی به درون پوشش روی و بهبود خواص خوردگی و مقاومت به سایش پوشش می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که ورود ذرات اکسیدی (Sio2, Tio2) به درون پوشش روی به دلیل کاهش میکرو ترک‌های موجود و بهبود چسبندگی و فشردگی پوشش، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش پوشش‌های مذکور را افزایش می‌دهد. با توجه به مطالب مذکور و با توجه به اینکه در دکل‌های انتقال و توزیع نیرو و به‌ویژه در نواحی بیابانی، پوشش‌های گالوانیزه معمولی در معرض وزش باد به همراه مواد ساینده(ریز گردها) قرار می‌گیرند توسعه دانش فنی اعمال پوشش‌های گالوانیزه کامپوزیتی اعمالی با روش	

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					آبکاری الکتریکی حاوی ذرات اکسیدی و کاربیدی (Sio2, Tio2 , SiC) می‌تواند به افزایش سختی و درنتیجه بهبود خواص سایشی و همچنین مقاومت به خوردگی سازه‌های مورداستفاده منجر شده و علاوه بر مزایای اقتصادی ناشی از افزایش طول عمر سرویس‌دهی سازه، هزینه‌های مربوط به تعمیرات را نیز به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.	
۱۱	بررسی جامع و بازبینی طراحی پایه‌های بتنی و بررسی و بازبینی در ساختار بتن و استراکچر فلزی پایه‌ها برای شبکه ۱۱ کیلووات و شرایط اقلیمی خوزستان	شرکت توزیع نیروی برق استان خوزستان	محور توزیع	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق	با توجه به عدم تطابق سوراخ پایه‌ها با آرایش الکتریکی و محل بسته شدن پیچ‌ها و الزام در استفاده از یراق‌آلات اضافی همچون کرپی و... به جهت ایجاد و نگهداری برخی از آرایش‌ها و همچنین خوردگی پایه‌ها و عمر کوتاه آن‌ها در اکثر شهرستان‌های جنوبی و مباحث مکانیکی و بهبود مقاومت کششی پایه‌ها و تغییر نمودار شکست پایه‌ها و ایجاد پایداری پایه و شبکه در هنگام بروز حوادث غیرمترقبه، لزوم انجام تحقیقات در این زمینه را موجب می‌گردد و آن را در اولویت قرار می‌دهد.	کلیه دیتل‌های اجرایی، نقشه‌های فنی، شرح ساختار شیمیایی بتن و یک نمونه پایه ساخته‌شده به همراه نتیجه آزمایش‌ها صورت گرفته در زمینه کشش و شکست پایه
۱۲	بررسی، مدل‌سازی و روش‌های پیشگیری و رفع اثرات ریز گردها بر روی	شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان	محور توزیع	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق	کاهش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق در استان‌های غربی براثر ورود ریز گردها	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
	شبکه‌های توزیع برق					
۱۳	بررسی علل فرسودگی پایه‌های بتنی در شرایط مختلف اقلیمی استان گلستان و ارائه راهکارهایی جهت پیشگیری از آن	شرکت توزیع نیروی برق استان گلستان	محور توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	۱- جلوگیری از فرسودگی پایه‌های بتنی در مناطق شوره‌زار ۲- کاهش هزینه‌های تعویض پایه‌های بتنی ۳- افزایش ایمنی	۱- ارائه دستورالعمل برای ساخت پایه‌های بتنی جدید بسته به مناطق اقلیمی ۲- پیش‌بینی راهکاری جهت حفظ و کاهش سرعت فرسودگی در تیرهای موجود ۳- کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری
۱۴	امکان‌سنجی و تولید نمونه آزمایشگاهی نشانگر شیمیایی هوشمند برای شناسایی و ردیابی خوردگی در تیرهای بتنی	شرکت توزیع نیروی برق استان یزد			در بسیاری از صنایع اتفاقاتی که حاصل فعل‌وانفعالات تدریجی شیمیایی هستند با استفاده از شناساگرها یا نشانگرها ردیابی می‌شوند در صنعت برق نیز خوردگی تیرها براثر خوردگی میلگردها و درنتیجه کاهش مقاومت تیر اتفاق می‌افتد لذا این پژوهش بر اساس مرور مراجع علمی پژوهشی صنعت بتن سعی دارد نشانگر شیمیایی جهت تعیین موقعیت آستانه خطر طراحی و به‌صورت آزمایشگاهی تولید کند.	تولید نمونه آزمایشگاهی نشانگر شیمیایی جهت تعیین موقعیت آستانه خوردگی تیرهای بتنی
۱۵	ارزیابی سیستم زمین با در نظر گرفتن آلودگی‌های خاک و عوامل محیطی تأثیرگذار در نقاط مختلف تحت پوشش شرکت توزیع نیروی برق اهواز	شرکت توزیع نیروی برق اهواز	محور توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	با توجه به آلودگی آب‌وخاک در شهرستان اهواز، همچنین بالا بودن رطوبت به دلیل وجود رودخانه کارون و تنوع جنس خاک در مناطق مختلف اهواز پهنه‌بندی جنس خاک و مسائل مربوط به مقاومت زمین ضروری می‌باشد.	ارائه پهنه‌بندی جنس خاک شهر اهواز و تعیین نوع مقاومت استفاده‌شده برای مقاومت زمین

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
۱۶	ارزیابی خوردگی در پایه‌های بتنی موجود در شبکه توزیع نیروی برق اهواز و ارائه راهکار(با توجه به شرایط آب‌وخاک و رطوبت هوای اهواز)	شرکت توزیع نیروی برق اهواز	محور توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	مشاهده می‌شود که پایه‌های بتنی پس از نصب و گذشت زمان از پایین دچار خوردگی می‌شوند. مدنظر است ضمن انجام آزمایش‌های لازم خاک زمین در مناطق مختلف بررسی‌شده و علت پدیده فوق بررسی و راهکار لازم جهت انتخاب ترکیب مواد تشکیل‌دهنده بتن پایه‌ها ارائه گردد. با این کار عمر پایه‌های بتنی افزایش‌یافته و هزینه‌های حوادث ناشی از سقوط پایه‌ها نیز به حداقل می‌رسد.	ارائه نتیجه بررسی‌ها و راهکار
۱۷	بررسی جدایش کاتدیک پوشش‌های آلی اعمال‌شده بر روی سازه‌های فلزی تحت حفاظت کاتدی واقع‌شده در دریا و یا خاک مورداستفاده در شرکت برق منطقه‌ای استان هرمزگان	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	محور توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	حفاظت کاتدی به عنوان مؤثرترین روش حفاظتی به منظور جلوگیری از خوردگی سازه‌های مدفون در خاک و آب شناخته‌شده و به‌طور گسترده در حفاظت از خوردگی لوله‌های توزیع و انتقال گاز، مواد نفتی و آب مورداستفاده قرار می‌گیرد. حفاظت کاتدی عبارت است از جلوگیری یا کاهش سرعت خوردگی فلزات توسط اعمال یک جریان الکتریکی خارجی (یکسو) و یا تماس آن با یک آند از بین رونده، روی سطح فلز موردنظر که دارای مناطق کاتدی و آندی باشد. با اجرای این روش می‌توان فلزات را به مدتی طولانی در محیط‌های خورنده نگهداری نمود. عملیات	مقاومت به خوردگی پوشش‌های سطوح و یا پرایمرهایی پرداخته شود که در ۱۱ سال گذشته در شرکت برق منطقه‌ای استان هرمزگان مورداستفاده بوده و تحت حفاظت کاتدیک قرار گرفته و یا اینکه بدون حفاظت کاتدی در بعضی از قسمت‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفته اند. این پوشش‌ها می‌توانند با توجه به موارد کاربرد خاصی که دارند در انواع مختلفی استفاده‌شده باشند. متغیرهای ضخامت پوشش، نوع و غلظت الکترولیت و pH، دما، نوع آماده‌سازی سطح، مقدار پتانسیل اعمالی می‌توانند از پارامترهای موردتحقیق باشند گرچه متغیرهای دیگری که کارشناسان محترم برق منطقه‌ای در نظر داشته باشند را نیز می‌توان در نظر گرفت.

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					حفاظت کاتدی را می‌توان در مورد خوردگی فلزاتی از قبیل فولاد، مس، سرب و برنج در زمین (خاک) و محلول‌های مختلف آبی به کار برد. حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی دارای پوشش‌های آلی به‌طور وسیعی در صنعت مورداستفاده قرار می‌گیرد. سیستم مذکور علاوه بر مزایای ارزشمند محدودیت‌هایی هم دارد که مهم‌ترین و شایع‌ترین آن‌ها جدایش کاتدی است. عموماً در هنگام اعمال پوشش، حمل‌ونقل، انبارداری، نصب و یا در اثر تنش‌های حاصل از محیط نظیر دریا و یا خاک ، ممکن است نقایصی در پوشش ایجاد شود. این نقایص بر روی پوشش‌های سطح می‌توانند به‌صورت حفره (Holiday) بر روی پوشش وجود داشته و منشا مشکلات مختلف شوند. حذف تمام نقایص مذکور هزینه پوشش دهی سطوح را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد، لذا در بسیاری از کاربردها ضمن پذیرش درصد قابل‌قبولی از عیوب تلاش می‌شود تا با اعمال حفاظت کاتدی به همراه پوشش نرخ درعین‌حال این دو فرایند توجیه اقتصادی داشته باشند. برای اثرگذار بودن عمل حفاظتی پوشش‌ها به همراه	بررسی هریک از این عوامل با توجه به سرمایه‌گذاری‌های ملی که در صنعت برق انجام‌شده است می‌تواند به تعیین بهترین سیستم‌های مقاوم در برابر جدایش کاتدی و مقاوم در برابر خوردگی دست پیدا نمود

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					حفاظت کاتدی ، حفظ پیوندهای بین پلیمر و سطح زمینه الزامی است. تخریب پیوند مذکور عموماً در لبه عیوب و تخلخل اتفاق می‌افتد. این مناطق، قسمت‌هایی از فلز هستند که در فرایند خوردگی به عنوان کاتد عمل می‌کنند به‌طوری‌که اعمال پتانسیل کاتدی باعث فعال‌تر شدن واکنش‌های کاتدی در قسمت‌های حفره و به‌طورکلی فصل مشترک پوشش/ فلز می‌شود. این واکنش‌ها می‌توانند منجر به کاهش چسبندگی پوشش به سطح فلز شوند و در این صورت جدایش کاتدی و یا تاول‌زدگی به وقوع می‌پیوندد. نیروی محرکه برای فرایند جدایش کاتدی از طریق واکنش‌های ذیل و با توجه به پتانسیل‌های اعمال‌شده فراهم می‌شود.	
۱۸	محاسبات ریسک زلزله و سیل بر تأسیسات شبکه توزیع برق استان ایلام مبتنی بر اطلاعاتGIS	شرکت توزیع نیروی برق استان ایلام	محور توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	در حال حاضر هیچ اطلاعاتی از میزان خطر سیل و زلزله برای شبکه توزیع برق استان ایلام موجود نمی‌باشد که اگر این اطلاعات در دسترس باشد می‌توان اقدامات پیشگیرانه برای مواجهه با این تهدیدها به عمل آورد. و همچنین در توسعه شبکه نیز این ریسک‌ها را مدنظر قرار داد	شناسایی نقاط حادثه‌خیز شبکه توزیع برق استان ایلام و همچنین تهیه نقشه جغرافیایی

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
۱۹	بررسی استفاده از فناوری نانو جهت جلوگیری از خوردگی یراق‌آلات بکار برده شده در شبکه‌های توزیع برق	شرکت توزیع نیروی برق استان خوزستان	محور توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	ایجاد خوردگی در یراق‌آلات و تحمیل هزینه‌های قابل‌توجه باوجود شرایط محیطی خاص منطقه مانند گرما، رطوبت،گازهای H2S به علت عملیات نفتی	کاهش زنگ‌زدگی و خوردگی یراق‌آلات با تولید رزین‌های ارتقاءیافته به کمک نانو ذرات
۲۰	بررسی ، مدل‌سازی و روش‌های پیشگیری و رفع اثرات ریز گردها بر روی شبکه‌های توزیع برق	شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه	محور توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	اثرات ریز گردها بر روی شبکه‌های توزیع برق	مدل‌سازی و روش‌های پیشگیری و رفع اثرات ریز گردها بر روی شبکه‌های توزیع برق
۲۱	بررسی امکان استفاده از پایه‌های بتنی به عنوان سیستم مولتی ارتینگ	شرکت توزیع نیروی برق استان گلستان	محور توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	صرفه‌جویی در اتصال ارت	افزایش قابلیت اطمینان شبکه
۲۲	بررسی فنی اقتصادی استفاده از فناوری‌های نانو در تجهیزات توزیع	شرکت توزیع نیروی برق استان بوشهر	محور توزیع	سیستم‌های پیشرفته و بهینه توزیع نیروی برق	با توجه به گستردگی شبکه و معضلات مربوط به شبکه‌های توزیع از بعد تجهیزات و خطاهای مربوطه، دانشمندان را بر آن داشته تا نسبت به نفوذ نانو در علم قدرت کنکاش لازم و کاربرد لازم را ارائه نمایند با توجه به نو بودن این علم، شرکت را برای باز کردن مبحثی که شاید بتواند در افق آینده کاربرد وسیع در این صنعت داشته باشد را بررسی و نسبت به دیدگاه آینده قدم‌های روشن بردارد	استخراج موارد کاربردی جدید در صنعت توزیع برق
۲۳	استفاده از فناوری نانو در شبکه‌های توزیع	شرکت توزیع نیروی برق	محور توزیع	سیستم‌های پیشرفته و بهینه توزیع نیروی برق	استفاده از فناوری نانو در شبکه‌های توزیع (با توجه به مشکلات تجهیزات شبکه و	استفاده از فناوری نانو در شبکه‌های توزیع

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
		استان کرمانشاه			عدم مقاومت مناسب در مورد تهدیدها از قبیل ریز گردها، صاعقه و سایر عوامل نیاز استفاده از تکنولوژی نانو در ساخت تجهیزات ضروری به نظر می‌رسد)	
۲۴	کاربرد و به‌کارگیری نانوتکنولوژی در تجهیزات توزیع نیروی برق	شرکت توزیع نیروی برق استان مرکزی	محور توزیع	سیستم‌های پیشرفته و بهینه توزیع نیروی برق	ازآنجاکه فناوری نانو (nanotechnology)، زیست فناوری (Biotechnology) و فناوری اطلاعات(IT) سه قلمرو علمی هستند که می‌توانند انقلاب سوم صنعتی را تشکیل دهند، نانوتکنولوژی می‌تواند به عنوان ادامه دانش کنونی، ابعاد نانو یا طرح‌ریزی دانش کنونی بر پایه‌های جدیدتر و امروزی باشد. فناوری نانو یا نانوتکنولوژی، گستره‌ی زیادی از دانش را تحت سیطره قرار داده و دارای تاریخچه زیادی در صنایع نفت، دریایی، خودرو و برق می‌باشد، نانو در صنعت برق و در بخش‌های تولید انرژی، انتقال، توزیع، الکترونیکی و مهندسی مواد، کاربرد زیادی دارد.که می‌توان پروژه‌های زیادی را برای کاربرد آن در توزیع نیروی برق تعریف نمود، نقش نانو در افزایش سطح عایقی کابل‌ها، تأثیر پوشش نانو بر روی کاهش جذب آلودگی مقره ها و یا چراغ‌های روشنایی، بررسی تأثیر استفاده از پوشش نانو بر روی ترانسفورماتور از جمله	ازآنجاکه مقره‌ها همواره در معرض آلودگی‌های محیطی قرار دارند؛ با توجه به ویژگی‌های خاصی که مقره ها باید داشته باشند؛ آلودگی‌ها می‌تواند باعث ایجاد مشکلات زیادی در کارکرد مقره ها شود. با تعریف پروژه و با بررسی وضعیت عملکرد مقره های مختلف در مناطق مختلف و معایب و مزایای مقره های سرامیکی، سیلیکونی و شیشه‌ای و نتایج به‌دست‌آمده، به طرح ایده استفاده از پوشش‌های ضد غبار نانو در روکش مقره ها و ویژگی‌ها و خواص آن پرداخته خواهد شد. همچنین با استفاده از نانوتکنولوژی به بررسی مواد مختلف برای کاهش اثر ریز گردها و گردوغبار بر چراغ‌های معابر می‌پردازیم و به تأثیرپذیری این نوع مواد خواهیم پرداخت، تا علاوه بر حفظ نوردهی مناسب چراغ‌ها، کاهش هزینه‌های تعمیرات و سرویس دوره‌ای آن‌ها را موجب خواهیم شد.

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					مواردی هستند که نیازمند تعریف پروژه‌های تحقیقاتی و اجرای آن به‌صورت پایلوت برای بررسی تأثیر آن در تأسیسات و تجهیزات می‌باشد. عیوب و نواقص خطوط انتقال ولتاژ بالا می‌تواند منجر به قطع گسترده برق شود و درنتیجه صدمات سنگین اقتصادی به وجود خواهد آمد، صنایع انتقال و توزیع نیرو باید به میزان اطمینان عملکرد سیستم انتقال توجه نمایند، یک بحث کلیدی در ایجاد سیستم توزیع مطمئن، عملکرد درست مقره ها می‌باشد چون در حقیقت، بسیاری از دلایل قطعی برق ناگهانی سیستم انتقال مربوط به معایب مقره ها است. ازآنجاکه مقره ها همواره در معرض آلودگی‌های محیطی قرار دارند؛ با توجه به ویژگی‌های خاصی که مقره ها باید داشته باشند؛ آلودگی‌ها می‌تواند باعث ایجاد مشکلات زیادی در کارکرد مقره ها شود. با تعریف پروژه و با بررسی وضعیت عملکرد مقره های مختلف در مناطق مختلف و معایب و مزایای مقره های سرامیکی، سیلیکونی و شیشه‌ای و نتایج به‌دست‌آمده، به طرح ایده استفاده از پوشش‌های ضد غبار نانو در روکش مقره ها و ویژگی‌ها و	

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					خواص آن پرداخته خواهد شد. آلاینده‌ها و ریز گردها - وجود و افزایش روزافزون آن در آلودگی شهرها و روستاها و به‌تبع آن معابر عمومی، فرودگاهی، جاده‌ها و خیابان‌های شهری می‌باشد، که موجب کاهش نوردهی چراغ‌ها خواهد گردید، با استفاده از نانوتکنولوژی به بررسی مواد مختلف برای کاهش اثر ریز گردها و گردوغبار بر چراغ‌های معابر می‌پردازیم و به تأثیرپذیری این نوع مواد خواهیم پرداخت، تا علاوه بر حفظ نوردهی مناسب چراغ‌ها، کاهش هزینه‌های تعمیرات و سرویس دوره‌ای آن‌ها را موجب خواهیم شد.	
۲۵	مطالعه ارزیابی لرزه‌ای تأسیسات استان چهارمحال و بختیاری و تهیه اطلس جامع شبکه برق‌رسانی از منظر زلزله‌خیزی	شرکت توزیع نیروی برق استان چهارمحال و بختیاری	محور توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	استان چهارمحال و بختیاری به دلیل واقع‌شدن در کمربند لرزه‌ای و با عنایت به اینکه دو شهر استان شهرهای اردل و بروجن در سنوات قبل از زمین‌لرزه آسیب‌های فراوانی دیده‌اند به همین دلیل ارزیابی تأسیسات و ایجاد امکانات مدیریت بحران و تشکیل ساختار پدافند غیرعامل و تجهیزات مورد نیاز در این حوزه از اهمیت شایان توجهی برخوردار است به این دلیل تعریف و تکمیل پروژه تحقیقاتی در این حوزه علاوه بر رفع مخاطرات ایجاد	استان چهارمحال و بختیاری به‌واسطه قرار گرفتن در کمربند زلزله‌خیزی کشور در خصوص شبکه‌های زیرساختی خصوصاً برق باید مورد پایش ویژه قرار گیرد ازاین‌رو تهیه بانک اطلاعاتی آسیب‌پذیری تجهیزات و اطلس کامل زلزله‌خیزی استان و تأثیر سایر شبکه‌های زیرساختی نظیر بسترهای مخابراتی در حالت وقوع بحران مسئله‌ای بااهمیت است.

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					ظرفیت‌های علمی در حوزه پدافند غیرعامل و مدیریت بحران می‌نماید.	
۲۶	طراحی و ساخت پایه‌های فلزی مناسب جهت نصب موقت مخصوص شرایط بحرانی و مناطق صعب‌العبور	شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه	محور توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	نصب پایه موقت مخصوص در شرایط بحرانی و مناطق صعب‌العبور	طراحی و ساخت پایه‌های فلزی مناسب جهت نصب موقت مخصوص شرایط بحرانی و مناطق صعب‌العبور
۲۷	استفاده از تکنولوژی نانو جهت جلوگیری از خوردگی یراق‌آلات مورداستفاده در شبکه توزیع نیروی برق استان گیلان	شرکت توزیع نیروی برق استان گیلان	محور توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	خوردگی بالای تجهیزات با توجه به رطوبت بالای استان گیلان	ساخت یراق‌آلات نمونه با استفاده از تکنولوژی نانو و ارائه راهکارهای عملی
۲۸	طراحی و آنالیز سیستم نوین سازه نگهدارنده برای پنل‌های نیروگاه خورشیدی با استفاده از بتن پیش‌ساخته	شرکت توزیع نیروی برق استان مرکزی	محور توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	کشور ایران روی کمربند خورشیدی جهان واقع است و از نظر مکانی دسترسی مطلوبی به نور خورشید با توان بالا دارد. میزان تابش متوسط روزانه در ایران ۱ کیلووات ساعت بر مترمربع است. مطالعات توجیهی درباره ارزیابی اقتصادی اجرای نیروگاه خورشیدی در ایران توسط پژوهشگران انجام‌شده است. با توجه به این توان بالقوه و با توجه به سیاست‌های دولت محترم در حمایت از انرژی‌های پاک و تجدید پذیر می‌توان گفت نیروگاه‌های خورشیدی یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تولید انرژی الکتریکی می‌باشند. به‌عبارت‌دیگر	قسمت قابل‌توجهی از هزینه استقرار یک نیروگاه خورشیدی مربوط به سیستم سازه‌ای نگهدارنده و فونداسیون آن می‌باشد. بنابراین، این مطالعه به بازطراحی سازه‌های نگهدارنده موجود مذکور از طریق روش‌هایی چون یافتن سیستم‌های سازه‌ای جایگزین با فناوری‌های ساخت نوین و استفاده از مصالح جایگزین می‌پردازد. هدف این مطالعه یافتن سیستم نگه‌دارنده‌ای است که با بهره‌گیری از بتن پیش‌ساخته، بتواند در عین تأمین پایداری و مقاومت این سازه، هزینه و زمان ساخت و نصب پنل‌های فوق را به حداقل برساند.

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					نیروگاه‌های خورشیدی به دلیل دوستدار محیط‌زیست بودن عملکردشان، ازلحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی بسیار مورد توجه هستند. بهینه‌سازی و ساخت سازه نگهدارنده پنل های فتوولتائیک در نیروگاه خورشیدی با استفاده از فناوری‌ها و مصالح نوینی مانند بتن پیش‌ساخته باعث کاهش هزینه اجرای این نیروگاه‌ها خواهد شد و به توجیه‌پذیری اقتصادی اجرای آن‌ها کمک خواهد کرد.	کاهش هزینه‌های نصب یک نیروگاه خورشیدی که معمولاً نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه و متمرکز قابل‌توجهی دارد به فراگیر شدن استفاده از این انرژی پاک و کاهش مصرف سوخت‌های ارزشمند فسیلی کمک خواهد کرد
۲۹	بررسی عوامل خوردگی پایه‌های بتنی با توجه به آنالیز خاک شهرستان طبس و ارائه راهکارهای افزایش مقاومت و طول عمر پایه‌ها در برابر خوردگی خاک منطقه	شرکت توزیع نیروی برق خراسان جنوبی	محور توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	ویژگی‌های اقلیمی شهرستان طبس موجب شده است که تیرهای بتنی عمر بسیار کمتری نسبت به مقدار متوسط منطقه داشته باشند و موجب تحمیل هزینه‌های قابل‌توجه به شرکت توزیع خراسان جنوبی گردد. بررسی عوامل خوردگی تیرهای بتنی و یافتن راهکار مقابله با آن ضمن حفظ پیوستگی تأمین برق و افزایش رضایت مشترکین موجب کاهش هزینه‌ها نیز خواهد گردید.	تعیین عوامل خوردگی تیرهای بتنی از طریق آنالیز دقیق خاک منطقه، ارائه راهکارهای اجرایی و مقرون‌به‌صرفه برای افزایش عمر پایه‌ها
۳۰	طراحی و ساخت پایه چراغ روشنایی معابر فایبرگلاس باقابلیت ایمنی در هنگام تصادفات	شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد	محور توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	چراغ‌های روشنایی دارای تنوع بسیار زیادی می‌باشد، چراغ‌های روشنایی تزئینی، چراغ‌های روشنایی پارکی، چراغ‌های روشنایی معابر و .... از انواع چراغ‌های روشنایی به‌حساب می‌آیند. نگاه اصلی در	انجام مطالعات اولیه بر روی سیستم‌های روشنایی معابر مروری بر انواع پایه چراغ‌های روشنایی معابر بررسی پیشینه تحقیقاتی تجهیز پیشنهادی در کشورهای پیشرفته صنعتی مطالعه انواع روش‌های افزایش ایمنی پایه‌های

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					طرح تحقیقاتی پیش رو چراغ‌های روشنایی معابر پارکی و فضای سبز و همچنین چراغ‌های روشنایی معابر می‌باشد. طرح پیشنهادی دو نوآوری را جهت بهبود سیستم‌های روشنایی فعلی مطرح می‌نماید، نوآوری اول استفاده از جنس کامپوزیت برای پایه چراغ‌های روشنایی پارکی به منظور حذف خطرات برق‌گرفتگی ناشی از اتصال هادی به بدنه پایه چراغ می‌باشد. لازم به توضیح است بر اساس بررسی‌های اولیه امکان ساخت این پایه چراغ‌ها در درون استان و شهر مشهد امکان‌پذیر می‌باشد و همچنین ازلحاظ قیمتی نیز می‌توان پیش‌بینی نمود تا حد زیادی امکان رقابت با پایه چراغ‌های فعلی را دارند. پایه چراغ‌های کامپوزیت علاوه بر حذف خطر برق‌گرفتگی مزایای دیگری مانند سبکی، سادگی نصب، مقاومت در مقابل خوردگی، استحکام بیشتر و سهولت در حمل‌ونقل را نیز دارند. نوآوری دوم و به بیان بهتر پیشنهاد دوم در این طرح تحقیقاتی استفاده از پایه چراغ روشنایی معابر کامپوزیت با رویکرد حداقل نمودن شدت خسارات براثر تصادفات و برخورد وسایل نقلیه	برق در مقابل تصادفات جاده‌ای طراحی و محاسبات مکانیکی پایه چراغ پیشنهادی طراحی و ساخت نمونه اولیه پایه چراغ روشنایی اجرا طرح پایلوت و نصب در شبکه و رفع نواقص احتمالی نتیجه‌گیری، ارائه پیشنهاد و گزارش نهایی) هدف اصلی آن است که پایه‌های توزیع که بر روی آن‌ها روشنایی معابر نیز جایابی شده، طراحی و ساخته شود)

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					به آن‌ها می‌باشد. طبق آمار موجود در شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد به‌طور متوسط هرروز یک برخورد خودرو با تیرهای شبکه گزارش‌شده است که گاه باعث تلفات جانی و یا خسارات جبران‌ناپذیر به سرنشینان خودرو گردیده است و علاوه بر آن باعث بی‌برقی در سطحی از شبکه و وارد آمدن خسارت به تجهیزات شبکه و تعویض آن‌ها شده است. هدف در این پروژه بررسی این مسئله از دید ایمنی برای شرکت‌های توزیع برق بوده است و مسائل مربوط به صنعت خودروسازی و یا راه‌سازی مورد بررسی قرار نخواهد گرفت. لازم به ذکر است که برای داشتن جاده‌هایی امن و بدون حادثه این مسئله می‌بایست با همکاری کارگروه‌های مختلفی شامل شرکت‌های برق، وزارت راه و شهرسازی و شهرداری‌ها مورد بررسی قرار گیرد تا از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی دقیق فنی و ایمنی قرار گیرد و دستورالعمل‌های جامع تهیه گردد. در ابعاد این طرح تحقیقاتی صرفاً راهکار استفاده از پایه چراغ‌های کامپوزیت و تأثیر آن‌ها در کاهش خسارات	

ردیف	عنوان تحقیق	عنوان شرکت	محور اصلی	زیر محور	دلایل اولویت داشتن	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح
					ناشی از برخورد با پایه چراغ‌ها موردمطالعه قرار خواهد گرفت.	
۳۱	تعویض پایه فونداسیون جعبه چدنی به‌صورت برق‌دار	شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد	محور توزیع	کنترل شبکه‌های توزیع نیروی برق	عدم اعمال خاموشی جهت تعویض پایه فونداسیون	جلوگیری از اعمال خاموشی خواسته و رسیدن به هدف ۱۱ که از اهداف سند چشم‌انداز شرکت می‌باشد
۳۲	تجدید مهندسی در طراحی و اجرای پایه‌های بتنی با توجه به اهمیت آن‌ها در شبکه‌های توزیع برق	شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی	محور توزیع	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های توزیع برق	لزوم طراحی و اجرای پایه‌های جدید بتنی با توجه به اهمیت آن‌ها در شبکه‌های توزیع برق	ارائه راهکارهای طراحی و اجرای پایه‌های جدید بتنی با توجه به اهمیت آن‌ها در شبکه‌های توزیع برق
۳۳	مطالعه، بررسی و تعیین روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی، انبارها و ساختمان‌های اداری در برابر حوادث غیرمترقبه	شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه	محور توزیع	مطالعات، بهبود و بهینه‌سازی ترانسفورماتورهای شبکه توزیع	مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی، انبارها و ساختمان‌های اداری در برابر حوادث غیرمترقبه	بدست آوردن روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی، انبارها و ساختمان‌های اداری در برابر حوادث غیرمترقبه

۳-۴-۴ - اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو ۱۳۹۷ [۱۴]

جدول ۴-۳: اولویت‌های وزارت نیرو سال ۱۳۹۷

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۱	مطالعات آسیب‌پذیری و بهسازی لرزه‌ای شبکه‌های توزیع برق(شرکت توزیع	شرکت توزیع نیروی برق استان بوشهر	تولید	مطالعات فنی استفاده از تولید پراکنده برای تولید برق	۱-کاهش خسارت وارده به تأسیسات توزیع برق براثر زلزله ۲- پایداری شبکه‌های برق استان در زمان بحران که یکی	لزوم انجام مطالعات بهسازی لرزه‌ای در میان بلایای طبیعی، زلزله از ویژگی‌های خاصی برخوردار بوده و در قرن گذشته با توجه به عوامل زیر،

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	نیروی برق استان بوشهر)				از الزامات خروج از شرایط بحران است	اهمیت بیشتری به مدیریت بحران زلزله داده‌شده است: • افزایش تعداد شهرها در نقاط مختلف که بسیاری از آن‌ها در مناطق فعال لرزه‌خیز واقع‌اند. • گسترش و توسعه شهرها به‌گونه‌ای که گسل‌های زیادی در داخل شهرها قرار گرفته اند. • افزایش تراکم جمعیت شهرها که باعث افزایش تعداد قربانیان زلزله گردیده است. • افزایش کمی و کیفی تأسیسات و امکانات مختلف شهری، که باعث افزایش سرمایه‌گذاری انسان در شهرها و گسترش خسارات مالی ناشی از زلزله شده است. • پیشرفت دانش لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله، که بشر را قادر به ثبت اطلاعات زلزله‌های گذشته و تجزیه‌وتحلیل هر چه دقیق‌تر آن‌ها نموده است. ایران از نظر لرزه‌خیزی در منطقه فعال جهان قرار دارد و به گواهی اطلاعات مستند علمی و مشاهدات قرن بیستم، از خطرپذیرترین مناطق جهان در اثر زمین‌لرزه‌های پرقدرت محسوب می‌شود .در سال‌های اخیر به‌طور متوسط هر پنج سال یک زمین‌لرزه با صدمات جانی و مالی بسیار بالا در نقطه‌ای از کشور رخ‌داده است و در حال حاضر ایران در صدر کشورهایی است که وقوع زلزله در آن با تلفات جانی بالا همراه است. گرچه جلوگیری کامل از خسارات ناشی از زلزله‌های شدید بسیار دشوار است، لیکن با

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						افزایش سطح اطلاعات در رابطه با لرزه‌خیزی کشور، آموزش همگانی و ترویج فرهنگ ایمنی، شناسایی و مطالعه دقیق وضعیت آسیب‌پذیری مستحدثات (ساختم آن‌ها، تأسیسات زیربنایی و شریان‌های حیاتی) و ایمن‌سازی و مقاوم‌سازی صحیح و اصولی آن‌ها، می‌توان تا حد مطلوب تلفات و خسارات ناشی از زلزله‌های آتی را کاهش داد. یکی از برنامه‌های مهم در دست اقدام دولت برای کاهش خطرپذیری کشور در برابر زلزله که راهبری و مدیریت آن را سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور بر عهده دارد، برنامه مطالعه و اجرای مقاوم‌سازی ساختمان‌های دولتی مهم، تأسیسات زیربنایی و شریان‌های حیاتی کشور است و این برنامه در قالب طرح‌های تملک دارایی‌های سرمایه‌ای از سال ۱۳۸۱، موضوع در دست اقدام می‌باشد که شامل مستحدثات زیر است : • بیمارستان‌های بزرگ و مراکز امدادرسانی و آتش‌نشانی • ساختمان‌های استراتژیک و مراکز مهم دفاعی • مراکز آموزش عالی و مدارس • پله‌ای مهم شهر تهران و پله‌ای مهم راه‌آهن • تأسیسات مهم نفت و گاز و پالایشگاه‌های اصلی کشور • مراکز مهم مخابراتی، اطلاع‌رسانی و صداوسیما • تأسیسات مهم تولید و توزیع برق و شبکه آب‌رسانی شهری از جمله نیازها

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						و ملزومات مهم این برنامه، لزوم تدوین ضوابط، دستورالعمل‌ها و معیارهای فنی بهسازی لرزه‌ای مستحدثات موجود می‌باشد که این امر در سیاست‌های ابلاغی مقام معظم رهبری در خصوص پیشگیری و مدیریت بحران‌های طبیعی و نیز در سند توسعه فرابخشی کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله مورد تأکید قرار گرفته است. ۲- دلایل نیاز به انجام مطالعات بهسازی لرزه‌ای شبکه‌های توزیع برق در استان بوشهر با توجه به نقشه موقعیت جغرافیایی و گسترش گسل‌های زلزله‌خیز در سطح استان بوشهر، مناطق زیادی از شهرستان‌های استان بوشهر بر روی گسل‌های زلزله قرار گرفته است. نتایج بررسی زلزله های اخیر در استان بوشهر نشان می دهد که نه‌تنها قرارگیری بر روی گسل ها در استان بوشهر، بلکه تأثیرپذیری فراوان از زلزله‌های ناشی از گسل‌ها در استان‌های همسایه از جمله فارس و کهگیلویه و بویر احمد، احتمال وقوع رخداد زلزله را در استان بوشهر افزایش داده است. از طرفی خشک‌سالی‌های اخیر در سطح استان و افزایش وسیع کشاورزی در بخش‌های مرکزی و جنوبی استان، باعث کاهش سطح آب‌های زیرزمینی به میزان قابل‌توجهی گردیده که این عامل، از دلایل اصلی فرونشست منطقه‌ای زمین یا رانش و ایجاد زلزله و درنتیجه ایجاد شرایط بحرانی و آسیب‌رسانی به تأسیسات توزیع برق و سایر مستحدثات می‌باشد. استان بوشهر در

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						مقایسه با سایر استان‌های کشور، دارای شرایط خشک‌سالی قابل‌توجهی می‌باشد. بررسی چند سال اخیر سوابق زلزله در استان بوشهر و میزان خسارات وارده به تأسیسات شبکه‌های توزیع برق، ازیک‌طرف و لزوم پایداری شبکه‌های توزیع برق در زمان بحران که یکی از الزامات خروج از شرایط بحران، دسترسی به تأسیسات توزیع برق می‌باشد، الزام برای انجام مطالعات بهسازی لرزه‌ای در شبکه‌های توزیع برق را ایجاب می‌نماید.
۲	طراحی، ساخت و آزمایش جداساز لرزه‌ای ترانسفورماتور۱۳۲ کیلوولت (مطالعه موردی)	شرکت برق منطقه‌ای کرمان	انتقال و فوق توزیع	کنترل و مدیریت شبکه در سیستم‌های انتقال نیرو	ارتقای عملکرد لرزه‌ای به‌طوری‌که قابلیت اطمینان و سطح عملکرد خدمت‌رسانی بی‌وقفه در زلزله‌های بزرگ و مخرب حفظ شود. همچنین با این روش می‌توان در سطوح بالاتر لرزه‌ای ایمنی را افزایش داده و آسیب‌پذیری و خسارات مالی را کاهش داد. البته در فاز اولیه مطالعات از بعد آماری، فنی و اقتصادی در مورد تجهیزات آسیب‌دیده/ زمان خاموشی‌ها و ... بررسی‌شده و سپس در مورد ساخت جداساز اقدام می‌شود.	هدف اصلی این پروژه ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ترانسفورماتور۱۳۲ کیلوولت و طراحی و ساخت جداساز لرزه‌ای خاص این ترانس به منظور ارتقای عملکرد لرزه‌ای می‌باشد. که بنا به شرایط منطقه و با توجه به ارتفاع, توزیع نامتقارن جرم و خصوصیات عملکردی هر نوع ترانسفورماتور، جداسازی خاص آن طراحی و ساخته شود.
۳	بررسی خطر فرونشست دشت‌های استان زنجان و قزوین بر خطوط انتقال فشارقوی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سیستم‌های اطلاعات مکانی	شرکت برق منطقه‌ای زنجان	انتقال و فوق توزیع	برنامه‌ریزی و امنیت شبکه در سیستم‌های انتقال نیرو	در این پروژه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سایر روش‌های موجود نسبت به شناسایی محل‌های فرونشست اقدام خواهد شد و با استفاده از نتایج پروژه جهت تغییر مسیر خطوط موجود و یا جلوگیری از توسعه شبکه در مناطق	با عنایت به استفاده بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در چند سال آینده با پدیده فرونشست دشت‌ها مواجه خواهیم شد

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					شناسایی‌شده به منظور جلوگیری از بروز حادثه و خسارت اقدام خواهد شد.	
۴	بررسی اثرات مخرب زلزله بر روی ترانس‌های قدرت فیکس شده و ارائه راهکار مناسب	شرکت برق منطقه‌ای خراسان	انتقال و فوق توزیع	برنامه‌ریزی و امنیت شبکه در سیستم‌های انتقال نیرو	هدف حفظ گران‌قیمت‌ترین تجهیز در پست‌های فشارقوی می‌باشد که در زمان زلزله بتوان از قطع برق و آسیب به ترانس جلوگیری کرد	تعریف مسئله: در حال حاضر ترانس‌های قدرت در پست‌های برق یا روی ریل با چرخ نصب می‌شوند و یا روی زمین با یک نگه‌دارنده فیکس بتنی روی زمین مهار می‌شود که در هر دو حالت در زمان زلزله‌های شدید یا ترانس از روی ریل جدا می‌شود و یا به علت فیکس بودن روی زمین ممکن است به اکتیو پارت داخل ترانس آسیب برسد. دلایل اولویت داشتن تحقیق: با توجه به زلزله‌خیز بودن کل کشور ایران، بهتر است در مورد تجهیز مهم و گران‌قیمتی همچون ترانس‌های قدرت که دارای اینرسی سکون بالایی هستند تمهیدی اندیشه گردد تا در زمان زلزله به آن آسیبی نرسد. در کشورهای پیشرفته همچون ژاپن در زیر ساختمان‌های بلند با استفاده از یک جداساز آونگی ساختمان را ایمن می‌کنند بدین‌صورت که این وسیله تکان‌های شدید حاصل از زلزله را دمپ کرده و ساختمان تکان شدید نمی‌خورد. در مورد ترانس‌های قدرت نیز می‌توان از این تکنولوژی استفاده کرد. در تعدادی از کشورهای دنیا در اروپا و ژاپن از این تکنولوژی برای ترانس‌های قدرت استفاده‌شده است. لذا با توجه به اینکه این تکنولوژی در ایران بومی‌سازی شده است بهتر است در مورد نصب این تجهیزات در پست‌ها مطالعه و عملیاتی گردد.

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۵	بررسی اثرات مخرب زلزله بر روی تجهیزات پست و ارائه راهکار مناسب	شرکت برق منطقه‌ای خراسان	انتقال و فوق توزیع	برنامه‌ریزی و امنیت شبکه در سیستم‌های انتقال نیرو	هدف حفظ گران‌قیمت‌ترین تجهیزات در پست‌های فشارقوی می‌باشد که در زمان زلزله بتوان از قطع برق و آسیب به آن‌ها جلوگیری کرد	تعریف مسئله: در حال حاضر تجهیزات پست‌های برق در زمان زلزله‌های شدید جابجا می‌شوند که برخی از موارد در زلزله‌های اخیر مشاهده‌شده است که ضروری است راهکارهایی برای آن اندیشیده شود دلایل اولویت داشتن تحقیق: کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله‌های شدید
۶	بررسی وضعیت تجهیزات و تأسیسات شبکه انتقال و فوق توزیع برق گیلان و میزان آسیب‌پذیری و شناسایی نقاط ریسک‌پذیر شبکه با رویکرد پدافند غیرعامل و ارائه سناریوها و راهکارهای مقابله با آن	شرکت برق منطقه‌ای گیلان	انتقال و فوق توزیع	برنامه‌ریزی و امنیت شبکه در سیستم‌های انتقال نیرو	این پروژه با انجام فازهای چهارگانه مطالعاتی (مکان‌یابی –طراحی- احداث – بهره‌برداری)با روش‌های مبتنی بر مدیریت ریسک (شناسایی –ارزیابی-کاهش ریسک – پایش و کنترل) منجر به استخراج مجموعه‌ای از ارزیابی‌ها که منجر به ضوابط و دستورالعمل‌ها و تغییر در رویکرد مکان‌یابی، طراحی، احداث و بهره‌برداری پست‌های انتقال خواهد شد.	۱-لزوم کسب آمادگی برای احیای شبکه‌های برق‌رسانی و تأمین شرایط امنیتی و کاهش آسیب‌پذیری تأسیسات برق ۲- ضرورت تقویت پدافند غیرعامل در برابر حوادث غیرمترقبه و تهاجم دشمن و کاهش خسارات ناشی از تهدیدها و اقدامات دشمن ۳- کاهش آسیب‌پذیری و ارتقای پایداری بخش انتقال صنعت برق
۷	شناسایی و ارزیابی آثار ریز گردهای ناشی از خشک‌سالی دریاچه ارومیه بر تاب‌آوری شبکه انتقال و فوق توزیع	شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان	انتقال و فوق توزیع	برنامه‌ریزی و امنیت شبکه در سیستم‌های انتقال نیرو	شناسایی کانون‌های ریز گرد دریاچه ارومیه شناسایی خطوط و پست‌های انتقال و فوق توزیع در معرض آسیب ناشی از ریز گردها ارائه راهکارهای توجیهی و اجرایی جهت ارتقاء تاب‌آوری شبکه	خشک‌سالی دریاچه ارومیه و ریز گردهای ناشی از آن
۸	ارتقا تاب‌آوری شبکه سراسری برق کشور در برابر حوادث شدید با استفاده از جزیره‌سازی کنترل‌شده شبکه در قالب طرح‌های دفاعی	شرکت مدیریت شبکه برق ایران	انتقال و فوق توزیع	قابلیت اطمینان سیستم‌های انتقال نیرو	در طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت فرض بر این است که با رخداد تک پیشامدها (N-1)، شبکه باید بتواند در حالت عادی به کار خود ادامه دهد. اگرچه امکان بروز پیشامدهای دوگانه و	با توجه به شرایط سرزمینی کشور ایران و وجود تهدیدات بالقوه طبیعی (زلزله، ریز گردها، سیل و ...) و غیرطبیعی که می‌تواند پایداری شبکه برق را با مخاطره مواجه کند، به‌کارگیری اقداماتی جهت افزایش تاب‌آوری شبکه در برابر این تهدیدات

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					چندگانه بسیار محتمل می‌باشد، اما طراحی شبکه برای کار در حالت عادی باوجود خارج شدن هم‌زمان یا زنجیره‌ای بیش از چند تجهیز به‌شدت هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری را افزایش می‌دهد. با توجه به این شرایط و جهت استفاده حداکثری از ظرفیت تجهیزات نصب‌شده و همچنین به منظور جلوگیری از گسترش تبعات پیشامدهای چندگانه، استفاده از طرح‌های حفاظت ویژه در شبکه‌های قدرت رو به توسعه می‌باشد. اما ممکن است حوادث بسیار شدیدی ناشی از عوامل طبیعی و غیرطبیعی در شبکه قدرت به وقوع بپیوندد که طرح‌های مرسوم حذف بار و قطع تولید نتوانند در برابر گسترش حادثه مقاومت کنند و این شرایط ممکن است به خاموشی سراسری نیز ختم شود. در چنین شرایطی جهت افزایش تاب‌آوری شبکه از طرح‌های دفاعی استفاده می‌شود که هدف از طراحی آن‌ها مواجه با حوادث بسیار شدید می‌باشد. در بسیاری از موارد شدت حادثه به حدی است که امکان کنترل آن وجود ندارد و بهترین راه جزیره‌سازی کنترل‌شده شبکه می‌باشد تا از سرایت اغتشاش به سایر نواحی شبکه	ضروری می‌باشد. ازآنجاکه طرح‌های حفاظت ویژه متداول در برابر حوادث بسیار شدید کارایی ندارند و نمی‌توانند از گسترش حادثه جلوگیری نمایند و همچنین با توجه به این موضوع که بروز خاموشی‌های سراسری تبعات منفی امنیتی، اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و ... را در بر خواهد داشت، بنابراین باید با توجه به مبحث بسیار مهم پدافند غیرعامل در صنعت برق، راهکارهایی متناسب با تهدیدات اتخاذ نمود. با توجه به عوامل ذکرشده تعریف پروژه فوق ازنقطه‌نظر جلوگیری از خاموشی سراسری در صورت رخداد حوادث شدید با توجه به تبعات مخرب آن، حائز اهمیت می‌باشد.

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					جلوگیری کرد. در این روش تقسیم شبکه به دو یا چند جزیره پایدار با کمترین حذف بار و قطع تولید به شکلی که در سریع‌ترین زمان ممکن بتوان جزایر ایجادشده را با یکدیگر سنکرون نمود، به عنوان آخرین ابزار کنترلی جهت جلوگیری از گسترش تبعات مخرب حادثه شدید مورداستفاده قرار می‌گیرد.	
۹	استفاده از تکنولوژی نانو برای بهینه‌سازی خطوط و پست‌های انتقال و فوق توزیع شبکه برق آذربایجان مطابق با اقلیم آذربایجان	شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان	انتقال و فوق توزیع	تکنولوژی پیشرفته و بهینه در انتقال نیرو	صرفه‌جویی پیشنهاد مواد و مصالح با استفاده از تکنولوژی نانو مطابق با اقلیم آذربایجان	هزینه کرد بالا بر روی خطوط و پست‌های انتقال و فوق توزیع شبکه برق آذربایجان
۱۰	مطالعه مکان‌یابی و بررسی نصب دمپرهای استاک بریج	شرکت برق منطقه‌ای تهران	انتقال و فوق توزیع	تکنولوژی پیشرفته و بهینه در انتقال نیرو	دلایل و مزایای طرح: - بررسی و مطالعه مکان‌یابی نصب دمپرهای استاک بریج به منظور افزایش میرایی نواسانات - کاهش نرخ خرابی خطوط	دلایل و مزایای طرح: - به منظور افزایش میرایی نواسانات بدین که دمپرهایی که در حالت عدم تعادل نیز می‌توانند عملکرد داشته باشند و نیاز به تعادل ندارد و در این حالت نیز بتوانند نوسانات را میرا نمایند. همچنین برخی از دمپرها به دلیل عدم مکان‌یابی مناسب قابلیت میرایی و کارایی مناسب را ندارند. - عدم کارایی دمپرها باعث قطع شدن خطوط می‌شود و صدمات اقتصادی به دنبال می‌آورد انرژی توزیع نشده در اثر قطع خطوط باعث به وجود آمدن آثار زیان‌بار سیاسی، امنیتی می‌شود و همچنین باعث کاهش تولیدشده و از تمام ظرفیت نیروگاه استفاده نمی‌گردد.

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۱۱	امکان‌سنجی، مطالعه و ساخت سامانه یا دستگاه جهت پایش وضعیت پایه‌های دکل خطوط انتقال و فوق توزیع با رویکرد جلوگیری از سرقت نبشی دکل‌ها	شرکت برق منطقه‌ای تهران	انتقال و فوق توزیع	تکنولوژی پیشرفته و بهینه در انتقال نیرو	امکان‌سنجی، مطالعه و ساخت سامانه یا دستگاه جهت پایش وضعیت پایه‌های دکل خطوط انتقال و فوق توزیع در صورت مثبت بودن مطالعات امکان‌سنجی	-سرقت تجهیزات پایه‌های دکل خطوط انتقال -ایجاد چندین مورد حادثه منجر به خاموشی در شبکه - تکرارپذیری این حوادث از طرف افراد سودجو و بی‌اطلاع -ایراد خسارت‌های هنگفت سرمایه‌ای و خسارت ناشی از عدم توزیع انرژی
۱۲	طراحی، نمونه‌سازی و تست سرکابل و مفصل ۶۳ کیلوولت	شرکت برق منطقه‌ای یزد	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	طراحی، نمونه‌سازی و تست سرکابل و مفصل ۶۳ کیلوولت، به وجود آوردن زمینه لازم برای تولید صنعتی و انبوه این دو محصول در داخل کشور می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر همان‌گونه که در بقیه تجهیزات پرکاربرد صنعت برق مانند ترانسفورماتور، بریکر و سکسیونر سازنده/سازندگان داخلی وجود دارند در زمینه لوازم و ملحقات کابل فشارقوی نیز بتوانیم نیاز کشور را تأمین نماییم. سرکابل و مفصل نمونه‌سازی و تست‌شده محصول نهایی این تحقیق می‌باشد. این محصول قابل‌واگذاری به سرمایه‌گذار برای تولید انبوه و فاز صنعتی آن خواهد بود. البته کیفیت محصول نیز بایستی در حد قابل‌رقابت با سازندگان خارجی تعیین گردد.	خطوط انتقال و فوق توزیع به‌صورت هوایی و زمینی احداث می‌گردد. در خطوط زمینی از کابل‌های فشارقوی برای انتقال انرژی الکتریکی استفاده می‌گردد. با توجه به محدودیت موجود در ساخت کابل فشارقوی با متراژ بالا (در حد کیلومتر) و در محل اتصال کابل فشارقوی به پست استفاده از سرکابل و مفصل اجتناب‌ناپذیر است. کابل فشارقوی در حال حاضر در کشور ساخته می‌شود ولی سرکابل و مفصل از خارج کشور وارد می‌شود. با توجه به هزینه بالای تأمین این دو تجهیز و مدت‌زمان بالای سفارش تا مرحله تحویل (بخصوص در پروژه‌هایی که با محدودیت زمان روبرو هستیم.) طراحی و نمونه‌سازی در کشور، می‌تواند به پیشرفت پروژه‌ها و افزایش تولید ملی کمک نماید.
۱۳	مقایسه فنی و اقتصادی استفاده از پایه‌های بتنی	شرکت برق منطقه‌ای خراسان	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	- بررسی اقدامات انجام‌شده در کشور و دنیا - مقایسه فنی شامل حمل، نصب، ساخت، نگهداری و طراحی یک نمونه	تعریف مسئله: به علت وارداتی بودن بتن‌های سایز بالا در برج‌های لتیس و وجود کسری یا خطا دربسته بندی قطعات برج‌های لتیس و همچنین

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	پیش‌تنیده جهت احداث خطوط انتقال				پایه بتن با بارگزاری منطقه خراسان - برآورد و مقایسه هزینه و نیازمندی‌های ساخت با برج‌های لتیس در این پژوهش یک طرح پایه بتن برای خط ۱۳۲ کیلوولت دومداره با شرایط آب و هوایی خراسان به همراه مقایسه فنی و اقتصادی با برج‌های لتیس موجود ارائه خواهد شد.	سرقت قطعات، استفاده از پایه‌های بتنی پیش‌تنیده شده ضروری به نظر می‌رسد. دلایل اولویت داشتن تحقیق: - افزایش نرخ سرقت در شبکه - وجود مشکلات نصب و ساخت و طراحی در برج‌های تحقیقاتی - افزایش شدید قیمت فولاد در حال حاضر
۱۴	بررسی و مطالعه فرونشست و تعیین تأثیر آن بر اجزاء شبکه برق	شرکت برق منطقه‌ای خراسان	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	می‌توان اهمّ اهداف پژوهش پیشنهادی را به‌صورت زیر برشمرد: ۱) تعیین میزان فرونشست شهر مشهد و حومه: ابتدا باید میزان و نرخ فرونشست تعیین شود تا بتوان بر اساس آن به سایر اهداف این پژوهش دست‌یافت. روش‌های مختلفی برای تعیین فرونشست وجود دارد که در تحقیق پیشنهادی، تأکید بر روش جدید تداخل‌سنجی راداری (تکنیک سنجش از دور) است تا بتوان با کمترین هزینه و بیشترین سرعت و با دقت بسیار بالا، میزان فرونشست را تعیین نمود. همچنین منطقه مورد بررسی به‌گونه‌ای انتخاب خواهد شد که فرونشست و جابجایی سطح زمین در محل کلیه‌ی نیروگاه‌ها و تأسیسات شبکه برق، تعیین گردد. ۲) تعیین مناطق در معرض فرونشست در شهر مشهد و حومه: پس از تعیین میزان	تعریف مسئله: یکی از مخاطرات ژئوتکنیکی، مسئله جابجایی و فرونشست سطح زمین است. استخراج آب از اعماق زمین و عدم جایگزینی آن در طول زمان، یکی از دلایل اصلی وقوع فرونشست در نقاط مختلف ایران است. در دشت مشهد در حدفاصل مشهد تا گلمکان (بخصوص اطراف توس)، فرونشست با نرخ بیش از ۲۰ سانتیمتر در سال گزارش‌شده است. طبق مطالعات اخیر، این فرونشست به نواحی شمال غربی مشهد نیز گسترش‌یافته است و در آینده‌ای نزدیک، مناطق وسیع‌تری از شهر را در بر خواهد گرفت. بر اساس شواهد صحرائی، فرونشست شهر مشهد و حومه منجر به خسارات سازه‌ای متعددی در این نواحی شده و باعث شکل‌گیری ترک‌ها و شکاف‌ها در سطح زمین شده است. گسترش فرونشست می‌تواند علاوه بر خسارات سازه‌ای بر ساختم آن‌ها و جاده‌ها، منجر به خسارات تأسیساتی شود و شبکه‌های آب و فاضلاب، شبکه‌های توزیع برق، دکل‌های برق و لوله‌های

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					فرونشست می‌توان مناطقی که در معرض این پدیده هستند را مشخص نمود. بدیهی است که میزان فرونشست آستانه بحران تعیین می‌گردد و بر اساس مناطقی که اکنون از پدیده متأثر شده‌اند و مناطقی که در آینده نزدیک متأثر خواهند شد، معلوم می‌شوند. بدین ترتیب حوزه مسئله شناخته‌شده و محدود می‌گردد. ۳) بازدید میدانی و تعیین اثرات ظاهری فرونشست بر اجزاء شبکه برق در مناطق متأثر: پس از مشخص شدن نواحی بحرانی، بازدیدهای میدانی از اجزاء شبکه برق در این مناطق صورت خواهد گرفت و اثرات فرونشست و خساراتِ احتمالیِ وارده ثبت خواهد شد تا بدین ترتیب نوع خسارات و چگونگی وقوع آن‌ها شناسایی شود. ۴) مطالعه علل و عوامل و شدت اثرات هر یک بر فرونشست شهر مشهد و حومه: اطلاعات ژئولوژیکی و ژئوتکنیکی منطقه از سازمان‌ها و نهادهای مختلف جمع‌آوری خواهد شد. سپس تحلیل این اطلاعات و تطابق آن‌ها با میزان فرونشست رخ‌داده، منجر به شناخت علل و عوامل وقوع فرونشست و خسارات ناشی از آن و تعیین شدت اثر هر یک خواهد شد. ۵) ارائه راهکارهای	گاز را تخریب نماید و یا بهره‌برداری از آن‌ها را مختل سازد. پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که مخاطرات و خسارات ناشی از فرونشست بخصوص برای مناطق شهری و سازه‌های حساسی نظیر نیروگاه‌ها، ایستگاه‌های تقویت، دکل‌ها و تیرهای برق، نیازمند پایش دقیق و مداوم فرونشست در چنین مناطقی است تا بدین ترتیب بتوان اولاً نواحی تحت تأثیر فرونشست را شناخت و شدت فرونشست در این نواحی را تعیین نمود و ثانیاً با بازدیدهای دقیق‌تر و فشرده‌تر از این مناطق، نسبت به پیشگیری از خسارات یا تعمیر و ترمیم خسارت‌های وارده اقدام نمود. از طرفی، باید به مطالعه علل و عوامل و شدت اثرات هر یک پرداخت تا بتوان با استفاده از نتایج پایش فرونشست، نسبت به مدیریت مسئله اقدام نمود و با استفاده از راهکارهای مهندسی، مانع از گسترش این پدیده شد و یا از خسارات ناشی از آن جلوگیری نمود. دلایل اولویت داشتن تحقیق: مخاطرات و خسارات ناشی از فرونشست بخصوص برای سازه‌های حساسی نظیر نیروگاه‌ها، ایستگاه‌های تقویت، دکل‌های فشارقوی و تیرهای برق، می‌تواند باعث اختلال در شبکه و قطع برق شود. موارد متعددی از کج شدگی و تغییر ارتفاع دکل‌ها و تیرهای برق در مناطق با فرونشست گزارش‌شده است. خطر فرونشست برای شبکه برق توسط وزیر نیروی دولت یازدهم (جناب آقای مهندس چیت چیان) نیز مورد تأکید

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					مهندسی برای جلوگیری یا محدود ساختن توسعه و پیشرفت پدیده فرونشست: با مشخص شدن علل و عوامل فرونشست می‌توان در خصوص روش‌های مقابله با آن اظهارنظر نمود. طبق پیشینه تحقیق و مطالعات مشابه‌صورت گرفته در نقاط مختلف ایران، در غالب موارد راهکار در انتخاب شیوه مدیریتی صحیحی است که هماهنگی ارگان‌های مختلف را می‌طلبد. ۶) ارائه راهکارهای مهندسی برای جلوگیری یا محدود ساختن خسارات ناشی از فرونشست بر اجزاء شبکه برق: راهکارهای مختلفی برای مقابله با چنین خساراتی وجود دارد که انتخاب راهکار صحیح بستگی به ارزش و اهمیت جزء موردنظر و چگونگی توسعه و رخداد پدیده دارد. این راهکارها شامل پیشگیری و ترمیم و تقویت می‌باشد. مشاهدات میدانی به پیش‌بینی خسارات آتی و اصلاح روش‌های ساخت‌وساز کمک خواهد کرد، ضمن اینکه به شناخت مکانیزم‌های خسارات برای تقویت اجزاء اجراشده نیز کمک خواهد کرد.	قرار گرفته است و توجه به مسئله فرونشست در برنامه ششم توسعه گنجانده شده است. لذا با توجه به گزارش‌های رسیده از وقوع فرونشست در دشت مشهد و گسترش آن به برخی نواحی شهر و پیش‌بینی تداوم این گسترش و درگیر شدن نواحی بیشتری از شهر با مسئله فرونشست، عدم توجه به این مسئله و پیامد آن، اختلال در شبکه برق می‌تواند باعث خدشه‌دار شدن وجهه شهر مقدس مشهد به عنوان پایتخت مذهبی ایران شود.
۱۵	بررسی فنی و اقتصادی و مدل‌سازی عایقی تجهیزات خطوط و پست‌های انتقال و فوق	شرکت برق منطقه‌ای غرب	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	در این تحقیق ضمن مطالعه و بررسی در خصوص شدت و میزان ریز گردها در حوزه برق غرب و مشخصات فنی	حفظ امنیت و پایداری شبکه و تداوم انتقال انرژی

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	توزیع برق غرب در شرایط حضور ریز گردها و ارائه روش‌ها و راهکارهای کاهش و یا حذف آثار مخرب ناشی از آن‌ها				تجهیزات و عایق‌های بکار گیری شده و جمع‌آوری سوابق تحقیقات انجام‌شده در این حوزه نسبت به مدل‌سازی نرم‌افزاری عایق تجهیزات در شرایط انباشت ریز گردها و همچنین بررسی ترکیبات ایجادشده با توجه به نوع عایق و شرایط آب و هوایی اقدام گردیده و ضمن انجام کلیه بررسی‌های فنی و اقتصادی لازم متعاقباً روش‌ها و راهکارهای علمی و عملی متناسب جهت مقابله با آثار مخرب ناشی از آن‌ها بامطالعه و بررسی موردی حادثه خط و پست ۶۳ کیلوولت آبدانان در استان ایلام ارائه‌شده و ضمن تشریح آن‌ها، راهکارها اولویت‌بندی می‌گردند	
۱۶	بررسی فنی و اقتصادی و ارائه طرح نوین برای ساخت و اجرای کراس آرم برج‌های انتقال تیپ مشبک لتیس با استفاده از مواد غیر هاری کامپوزیتی	شرکت برق منطقه‌ای غرب	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	ارائه طرح نوین با مواد کامپوزیتی جهت افزایش فاصله عایقی و عدم وقوع شکست عایقی در شرایط ریز گردها و آلودگی سنگین و امکان حذف فلش و بک فلش آور	جلوگیری از امکان وقوع شکست عایقی
۱۷	بهینه‌سازی وزن دکل‌های انتقال برق سطح ۲۳۰ کیلوولت با معیار قرار دادن متغیرهای مربوط به فاصله پایه، نوع پانل‌ها و نمره نبشی اعضاء	شرکت برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	نتایج تحقیق حاضر منجر به بهینه‌سازی وزن دکل‌های انتقال برق سطح ۲۳۰ کیلوولت با در نظر گرفتن متغیرهای مربوط به فاصله پایه دکل، نوع پانل‌ها و نمره نبشی اعضاء خواهد گردید. این بهینه‌سازی با معیار قرار دادن وزن دکل به	دکل‌های انتقال نیرو یکی از مهم‌ترین و هزینه‌برترین زیرساخت‌های صنعت برق هستند. این هزینه‌ها مربوط به ساخت و نگه‌داری دکل‌ها می‌باشد. هم‌اکنون در کشور ایران طراحی دکل‌های انتقال برق اکثراً بر اساس طراحی‌های سنتی و به‌اصطلاح دسته بالایی صورت می‌گیرد که علاوه بر

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					عنوان تابع هدف صورت می‌پذیرد که در صورت اجرایی کردن این طرح‌های بهینه، می‌توان صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در هزینه‌های ساخت دکل‌ها صورت داد. لازم به ذکر است که دکل‌های ۲۳۰ نقش اساسی را در شبکه توزیع کشور ایفاء می‌نمایند. در طرح پیشنهادی حاضر از نرم‌افزار MSTOWER که مورد تائید کارفرمایان و مشاورین حوزه صنعت برق می‌باشد جهت تحلیل و طراحی دکل‌ها استفاده خواهد گردید. محصول نهایی و مورد انتظار طرح شامل تعدادی طرح بهینه دکل سطح ۲۳۰ کیلوولت است که با وزن کمتر در مقایسه با نمونه‌های فعلی مورداستفاده، کلیه ضوابط طراحی آئین‌نامه‌های معتبر را نیز اغناء نموده است.	تحمیل هزینه‌های بالای ساخت بر صنعت برق کشور، عمدتاً در مواجهه با سطوح بالای خطر نیروهای محیطی، دارای مقاومت کافی نبوده و منجر به خرابی دکل و تحمیل هزینه‌های بالای تعمیر و راه‌اندازی مجدد خط می‌گردد. مورد دیگری که می‌بایست مدنظر قرار داد، صنعتی ساز بودن دکل‌های انتقال نیرو است بدین معنا که یک طرح از دکل در تعداد بالا سفارش و ساخته می‌شود. این مزیت ساخت دکل‌های انتقال برق سبب می‌شود تا اگر طرح جدیدی با وزنی پایین‌تر را بتوان جایگزین طرح‌های فعلی نمود مطمئناً مزایای عمده‌ای را برای کارفرما و متصدی صنعت برق کشور به همراه خواهد داشت. نتایج تحقیق حاضر منجر به بهینه‌سازی وزن دکل‌های انتقال برق سطح ۲۳۰ کیلوولت با در نظر گرفتن متغیرهای مربوط به فاصله پایه دکل، نوع پانل‌ها و نمره نبشی اعضاء خواهد گردید. همچنین، اخیراً در استان سیستان و بلوچستان، دکل‌های ۲۳۰ کیلوولت بیشتر از دیگر دکل‌ها مورداستفاده قرار گرفته است. این بهینه‌سازی با معیار قرار دادن وزن دکل به عنوان تابع هدف صورت می‌پذیرد که در صورت اجرایی کردن این طرح‌های بهینه می‌توان صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در هزینه‌های ساخت دکل‌ها صورت داد. در طرح پیشنهادی حاضر از نرم‌افزار MSTOWER که مورد تائید کارفرمایان و مشاورین حوزه صنعت برق می‌باشد جهت تحلیل و طراحی

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						دکل‌ها استفاده خواهد گردید. محصول نهایی و مورد انتظار طرح شامل تعدادی طرح بهینه دکل سطح ۲۳۰ کیلوولت است که با وزن کمتر در مقایسه با نمونه‌های فعلی مورداستفاده، کلیه ضوابط طراحی آئین‌نامه‌های معتبر را نیز اغناء نموده است.
۱۸	روش‌های نوین احداث فونداسیون برج‌های انتقال نیرو جهت جلوگیری از خوردگی و پوک شدگی	شرکت توانیر	انتقال و فوق توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات پست‌ها و انتقال نیرو	۱- ارائه راهکارهای مقابله با مسئله خوردگی ۲-تدوین دستورالعمل‌های متناسب با طرح‌های گوناگون خطوط متناسب با اقلیم و شرایط بهره‌برداری	۱- نبود روش‌های جدید در راستای مقابله با مسئله خوردگی جهت فونداسیون خطوط انتقال ۲-شیوع بالای مسئله خوردگی فونداسیون در نواحی مرطوب یا شرجی
۱۹	مطالعه و بررسی تعیین مشخصات فیزیکی خاک و حداقل عمق دفن مناسب کابل‌ها به همراه تهیه دستورالعمل مربوطه جهت ایجاد رویه واحد در طراحی سیستم‌های کابلی زمینی در استان گیلان	شرکت برق منطقه‌ای گیلان	انتقال و فوق توزیع	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های انتقال و فوق توزیع	- تعریف ادبیات موضوع - انجام مطالعات و بررسی‌های مقدماتی - بررسی استانداردهای بین‌المللی موجود - تدوین روش اندازه‌گیری پارامترهای مربوطه - اندازه‌گیری‌های میدانی و تهیه پهنه‌بندی با مقادیر حدی برای استان گیلان - تدوین دستورالعمل جهت ابلاغ به مشاورین به منظور ایجاد رویه واحد در طراحی سیستم‌های کابلی در سطح استان گیلان باهدف انتخاب بهینه سطح مقطع نهایی کابل ازلحاظ رعایت دیدگاه‌های فنی و اقتصادی و به‌تبع آن تعدیل هزینه‌های خرید، اجرا و بهره‌برداری	- عدم انجام مطالعاتی مدون در سطح کشور جهت تهیه مشخصات فیزیکی خاک از قبیل: مقاومت ویژه حرارتی خاک، دمای خاک و همچنین تعیین حداقل عمق دفن مناسب باهدف ایجاد رویه واحد در طراحی خطوط کابلی انتقال، فوق توزیع و توزیع نیروی برق - عدم وجود دستورالعمل ملی یا محلی با توجه به استاندارد IEC60827 درزمینه تهیه مشخصات فیزیکی خاک از قبیل: مقاومت ویژه حرارتی خاک، دمای خاک و همچنین تعیین حداقل عمق دفن مناسب باهدف ایجاد رویه واحد در طراحی خطوط کابلی انتقال، فوق توزیع و توزیع نیروی برق - پارامترهای فوق‌الذکر به عنوان عوامل تعیین‌کننده سطح مقطع بهینه کابل قدرت مطرح می‌باشد.

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۲۰	استفاده هم‌زمان از برنامه‌های تعمیر و نگهداری دوره‌ای و تعمیر و نگهداری مبتنی بر نیاز با نصب حس‌گر هوشمند بر روی تجهیزات پست (مطالعه موردی بریکر)	شرکت برق منطقه‌ای خراسان	انتقال و فوق توزیع	پایش خطوط و تجهیزات سیستم انتقال و فوق توزیع	هدف از این پروژه بررسی تحلیلی اثر نصب حس‌گر هوشمند بر برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری یک تجهیز می‌باشد. برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری تجهیز می‌تواند به‌صورت دوره‌ای انجام پذیرد. با نصب حس‌گر هوشمند و تشخیص زودهنگام خرابی‌های جزئی، می‌توان برنامه‌ریزی‌های مبتنی بر نیاز را نیز به برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری دوره‌ای تجهیز اضافه نمود. نصب سانسورهای هوشمند به معنای حذف برنامه‌ریزی‌های دوره‌ای نمی‌باشد، بلکه می‌تواند زمان انجام سرویس‌های دوره‌ای را تغییر دهد.	با ایجاد بازارهای برق، شرکت‌های برق منطقه‌ای برای سود بیشتر و حفظ قدرت رقابت‌پذیری در جهت کاهش هزینه‌های جاری خود تلاش می‌کنند. در این راستا کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری که بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های بهره‌برداری شبکه انتقال را تشکیل می‌دهد، اهمیت مضاعفی دارد. از طرف دیگر تجهیزات شبکه برق مانند ترانسفورماتور، خطوط انتقال و کلیدهای قدرت که در طول چند دهه گذشته مورد بهره‌برداری قرار گرفته اند به‌طور طبیعی با افزایش طول عمر دچار فرسودگی شده‌اند. درنتیجه در حال حاضر شرکت‌های برق منطقه‌ای با چالش بزرگی همچون تجهیزات فرسوده مواجه هستند که برای حفظ قابلیت اطمینان سیستم در حد قابل‌قبول و فرار از هزینه‌های سنگین مربوط به خاموشی‌ها، برنامه‌ریزی منسجمی برای تعمیرات در شبکه را تقاضا می‌کنند. همچنین در فضای رقابتی جدید شرکت‌های برق منطقه‌ای ترجیح می‌دهند به‌جای جایگزینی تجهیزات فرسوده با هزینه‌های بسیار بالا با انجام تعمیرات مناسب، بهره‌برداری از آن‌ها را تا حد ممکن ادامه دهند. بسیاری از تجهیزات از قبیل ترانسفورماتورها، ژنراتورها و بریکرها در محدوده‌ی طول عمرشان در معرض خرابی(بدتر شدن) هستند. خرابی‌های فاجعه‌بار این تجهیزات در سیستم‌های قدرت، ضرر و زیان اقتصادی قابل‌توجهی به دلیل

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						از دست دادن بار و همچنین بالا بودن هزینه‌ی جایگزینی تجهیزات منجر می‌شود. تعمیر و نگهداری به منظور کاهش خرابی‌های فاجعه‌بار انجام می‌شود. به‌طور خلاصه خرابی تجهیز به ۴ نوع خرابی، دسته‌بندی می‌شود: ۱ - خرابی‌هایی که در خروج‌های برنامه‌ریزی‌شده اصلاح می‌شوند. ۲- خرابی‌هایی که به‌صورت برق‌دار اصلاح می‌شوند. ۳- خرابی‌هایی که نیاز به خروج اضطراری و اعزام فوری تیم تعمیر و نگهداری جهت تعمیر دارند. ۴- خرابی‌هایی که باعث خروج خودکار تجهیز (Trip) می‌شوند. با نصب سنسور هوشمند بر روی تجهیزات مجموعه خرابی‌های نوع چهارم قبل از خروج خودکار تجهیز در مرحله دوم یا سوم تشخیص داده می‌شوند. با نصب سنسور هوشمند رویکرد تعمیرات از پیشگیرانه (Maintenance Preventive) به پیش‌بینانه (Maintenance Predictive) تغییر می‌کند. تعمیر و نگهداری پیشبینانه به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌گردد که جهت تعیین شرایط فنی کارکرد سیستم پست در حین بهره‌برداری انجام گردیده و بر اساس نتایج حاصل از آن، زمان و نوع فعالیت تعمیر و نگهداری مورد نیاز پیش‌بینی می‌گردد. سنسورهای هوشمند نصب‌شده در پست خطاهای جزئی تجهیزات را شناسایی و قبل از تبدیل‌شدن به عیوب حادثه‌ساز اپراتور را مطلع می‌کنند. با اعزام نیروهای تعمیر و

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						نگهداری و رفع مشکل، از خروج خودکار تجهیز جلوگیری می‌شود، بر عمر تجهیز افزوده‌شده، از پیری و به Fail رفتن تجهیز جلوگیری می‌کند. در برنامه‌ریزی تعمیرات پیشگیرانه که بر مبنای برنامه‌ریزی زمانی انجام می‌گیرد، تعمیر تجهیزات بدون در نظر گرفتن وضعیت هر تجهیز، مطابق با برنامه‌های از پیش تعریف‌شده انجام می‌شود. این امر به دلیل افزایش احتمال خرابی تجهیزات، باعث صرف هزینه زیادی در بخش تعمیر و نگهداری از پست‌ها می‌شود. بنابراین با نصب سنسورهای هوشمند و انجام تعمیرات پیش‌بینانه بر اساس نیاز تجهیزات می‌توان هزینه‌های تعمیرات را کاهش و قابلیت اطمینان را افزایش داد. دلایل اولویت داشتن: استفاده از سنسورهای هوشمند در پست‌های برق فشارقوی نقش مهمی را در بهبود بهره‌برداری، مانیتورینگ زمان واقعی، جلوگیری از خرابی‌های اساسی در تجهیزات و به طبع آن افزایش قابلیت اطمینان شبکه قدرت ایفا می‌کند. اندازه‌گیری پارامترها و کمیت‌های ویژه در تجهیزات قدرت توسط سنسورهای هوشمند، امکان پیش‌بینی خطاهای ممکن در تجهیزات را میسر می‌شود. با نصب سنسور هوشمند بر یک تجهیز مجموعه‌ای از عوامل خرابی تجهیز قبل از تبدیل به خرابی کلی در مرحله خرابی جزئی توسط سنسور هوشمند تشخیص داده می‌شود. با تشخیص خرابی در مرحله جزئی و با خروج برنامه‌ریزی‌شده توسط تعمیر و

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						نگهداری پیشبینانه خرابی اصلاح می‌گردد. این موضوع مسلماً باعث کاهش خرابی‌های کلی که منجر به خاموشی ناخواسته می‌شود، خواهد شد. از طرفی می‌تواند باعث افزایش طول عمر تجهیز و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری ناشی از خرابی‌های اساسی گردد.
۲۱	بررسی وضعیت تجهیزات و تأسیسات شبکه انتقال و فوق توزیع استان در شرایط بحران و میزان آسیب‌پذیری و شناسایی نقاط ریسک‌پذیر شبکه و ارائه سناریوها یا طرح‌های لازم جهت مقابله با آن	شرکت برق منطقه‌ای سمنان	انتقال و فوق توزیع	پایش خطوط و تجهیزات سیستم انتقال و فوق توزیع	گزارش نهایی بررسی در خصوص وضعیت تجهیزات و تأسیسات شبکه انتقال و فوق توزیع	شناسایی و تعیین نقاط ریسک‌پذیر در تجهیزات و تأسیسات شبکه در زمان وقوع حوادث طبیعی در شرایط بحرانی و برآورد میزان آسیب‌پذیری آن‌ها و ارائه راهکارها و سناریوهای لازم
۲۲	آلیاژسازی پوشش گالوانیزه جهت دستیابی به مقاومت به خوردگی بالاتر نسبت به پوشش گالوانیزه سنتی	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	انتقال و فوق توزیع	پایش خطوط و تجهیزات سیستم انتقال و فوق توزیع	هدف از تحقیق حاضر توسعه پوشش‌های گالوانیزه آلیاژی حاوی آلومینیوم و عناصر آلیاژی مناسب و بررسی رفتار خوردگی غوطه‌وری و اتمسفری این پوشش‌ها از طریق انجام آزمون‌های استاندارد خوردگی شامل آزمون‌های پلاریزاسیون، امپدانس الکتروشیمیایی، مه نمکی، آزمون‌های خوردگی در شرایط واقعی از طریق نمونه گذاری در محیط، بررسی میکرو ساختار و سختی پوشش‌های توسعه داده‌شده، بررسی محصولات خوردگی	پوشش روی (Zn) بر روی سطح فولاد جزو قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و درعین‌حال ارزان‌ترین پوشش‌های مورداستفاده جهت محافظت از خوردگی فولاد در صنایع مختلف می‌باشد. پوشش گالوانیزه توسط حفاظت از تماس فولاد با محیط خورنده و نیز حفاظت کاتدی در موقع تماس فولاد با محیط خورنده، از خوردگی فولاد جلوگیری می‌کند. در مکانیزم حفاظت کاتدی روی توسط مکانیسم فداشوندگی (Scarification) به دلیل داشتن تمایل شیمیایی بیشتر روی به ترکیب با اکسیژن، روی اکسیدشده و با رسوب محصولات خوردگی ناشی از خوردگی

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					پوشش‌ها و تعیین پوشش بهینه جهت دستیابی به پوششی با مقاومت به خوردگی بیشتر از پوشش‌های گالوانیزه معمول می‌باشد.	روی، از ادامه خوردگی فولاد جلوگیری به عمل می‌آورد. در دهه‌های گذشته کادمیم نقش روی را ایفا می‌کرد و پوشش کادمیم به‌طور وسیعی در صنایع مورد بهره‌برداری بود. اما به دلیل بارز شدن مشکلات مربوط به آلودگی و سمی بودن کادمیم، به‌تدریج پوشش روی خالص جایگزین کادمیم گردید و به عنوان یک عملیات رایج صنعتی در پوشش دادن قطعات متعدد صنعتی و نظامی بکار گرفته شد. با توجه به مطالب مذکور و با توجه به اینکه در دکل‌های انتقال و توزیع نیرو در کشور و به‌ویژه در استان هرمزگان که دارای یکی از خورنده‌ترین اتمسفرهای کشور همراه با المان‌های اتمسفر دریایی و صنعتی می‌باشد، اعمال و تعیین ترکیب شیمیایی بهینه پوشش‌های گالوانیزه گرم آلیاژی می‌تواند به افزایش سختی و درنتیجه بهبود خواص سایشی و همچنین مقاومت به خوردگی سازه‌های مورداستفاده منجر شده و علاوه بر مزایای اقتصادی ناشی از افزایش طول عمر سرویس‌دهی سازه، هزینه‌های مربوط به تعمیرات را نیز به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.
۲۳	بررسی احتمالاتی وابسته به زمان تحت تأثیر پدیده خوردگی برسازه‌های بتن مسلح با توجه به شرایط محیطی مهاجم، جهت فونداسیون‌های خطوط انتقال و فوق توزیع	شرکت برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان	انتقال و فوق توزیع	پایش خطوط و تجهیزات سیستم انتقال و فوق توزیع	اهداف موردنظر این تحقیق به شرح زیر است. - بررسی تحقیقات انجام‌شده درباره اثرات خوردگی بر مشخصات سازه بتنی - تعیین مدل‌های کاهش مقاومت سازه بتنی در طی زمان برای مدل‌های مختلف خوردگی - معرفی	سازه‌های بتنی در طی عمر خود تحت اثر عوامل مخرب بیرونی و درونی قرار دارند که به‌مرور بر قابلیت بهره‌برداری آن‌ها از جمله مقاومت در برابر بارهای وارده اثر می‌گذارد. یکی از مهم‌ترین این عوامل مخرب، نفوذ یون‌های مختلف مانند یون کلر می‌باشد که موجب خوردگی میلگرد، کاهش باند،

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					پارامترهای آماری مدل کاهش مقاومت در طی زمان -برآورد اثر عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه خوردگی بر مدل کاهش مقاومت -تعیین تغییرات ایمنی قطعه بتنی در طی زمان - ارزیابی اثر عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه خوردگی و اثرات آن بر مقاومت و احتمال خرابی. همچنین محصول نهایی این تحقیق می‌تواند نرم‌افزاری باقابلیت تعیین عمر مفید قطعه با برآورده کردن شرایط ایمنی با توجه به شرایط محیطی باشد.	ایجاد ترک‌های سطحی و درنهایت پوسته‌شدن بتن می‌گردد که بایستی مقدار این خوردگی تعیین گردد. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ارزیابی این سازه‌ها استفاده از قابلیت اطمینان وابسته به زمان می‌باشد که با در نظر گرفتن وضعیت مقاومت سازه در هر زمان به همراه تاریخچه بارگذاری وارد بر آن، احتمال عملکرد صحیح سازه در هر زمان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد
۲۴	پژوهش و امکان‌سنجی استفاده از ممانعت کننده‌های خوردگی جهت کاهش نرخ خوردگی فولاد در بتن	شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان	انتقال و فوق توزیع	پایش خطوط و تجهیزات سیستم انتقال و فوق توزیع	با توجه به استفاده فراوان از سازه‌های بتنی مسلح (با آرماتور فولادی) در ساخت زیرساخت‌های مورداستفاده در شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان از جمله فونداسیون دکل‌های انتقال برق و سازه‌های مشابه، خوردگی باعث تخریب و کاهش عمر سرویس‌دهی این سازه‌ها و درنتیجه ایجاد هزینه‌های اضافی جهت بازسازی می‌شود. می‌توان با اضافه نمودن ممانعت کننده‌های مناسب به بتن مورداستفاده در چنین سازه‌هایی عمر سرویس‌دهی این زیرساخت‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده و هزینه‌های بازسازی را حذف نمود. لذا بررسی جهت تعیین	خوردگی طبق تعریف، واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً یک فلز و محیط اطراف آن می‌باشد که به تغییر خواص کاربردی ماده منجر خواهد شد. پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد، اما وقوع آن در فلزات آن‌قدر شایع و فراگیر بوده، که هرگاه صحبت از خوردگی به میان می‌آید، ناخودآگاه خوردگی یک فلز به ذهن متبادر می‌شود. خسارات ناشی از خوردگی بخش عمده‌ای از خسارات اقتصادی را در کشورهای مختلف تشکیل می‌دهد. این خسارات شامل مواردی همچون هزینه‌های تعویض قطعات، دستگاه‌ها و ماشین‌آلات، هزینه‌های اعمال روش‌های حفاظت نظیر پوشش دهی، تعمیرات و نگهداری، نصب

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					بازدارنده مناسب و شرایط بهینه استفاده از این بازدارنده با توجه به شرایط سرویس‌دهی سازه‌های بتنی مورداستفاده در برق منطقه‌ای هرمزگان می‌تواند در افزایش عمر و کاهش هزینه‌های ناشی از بازسازی تأثیر بسزایی داشته باشد. از جمله مزایای دیگر استفاده از بازدارنده خوردگی بتن هزینه پایین این روش در مقایسه با سایر روش‌های حفاظتی می‌باشد.	سیستم‌های حفاظت کاتدی و موارد دیگر است که می‌توان آن‌ها را تحت عنوان هزینه‌های مستقیم دسته‌بندی کرد. هزینه‌های غیرمستقیم شامل مواردی همانند کاهش بازدهی سیستم‌ها، از دست رفتن شکل ظاهری، اتلاف محصولات و ازکارافتادن کارخانه‌ها می‌باشد. فولاد در بتن تازه ریخته شده به‌واسطه شرایط قلیایی موجود در بتن (pH>۱۲) معمولاً توسط یک‌لایه اکسید محافظ از خوردگی محافظت می‌گردد. نقش حفاظتی این فیلم اکسیدی تحت تأثیر فاکتورهای محیطی مثل نفوذ یون‌های کلر، کربناته شدن درنتیجه‌ی دی‌اکسید کربن موجود در هوا، باران‌های اسیدی و آلودگی‌های صنعتی مانند سولفات می‌باشد. در این شرایط فیلم محافظ شکسته شده و با ایجاد پیل‌های خوردگی، فولاد دچار خوردگی می‌شود. نرخ خوردگی توسط پارامترهایی مثل مقاومت الکتریکی بتن، میزان رطوبت بتن و سرعت نفوذ اکسیژن به سمت فولاد کنترل می‌گردد. درنتیجه خورده شدن فولاد، حجم محصولات خوردگی ایجادشده بیش از چهار برابر حجم فولاد اولیه بوده؛ به‌طوری‌که می‌تواند تنش زیادی را به بتن اطراف وارد نموده و باعث ترک خوردن و یا کندگی بتن از سطح گردد.
۲۵	مطالعه و طراحی افزایش ظرفیت خط ۲۳۰ کیلوولت با	شرکت برق	انتقال و فوق توزیع	پایش و کاهش تلفات شبکه‌های	در این پروژه مطالعات امکان‌سنجی روی خط موردنظر انجام می‌شود.	با توجه به انواع مشکلات ناشی از پرشدگی خطوط انتقال موجود مانند قطع بار، بهره‌برداری با عدم قطعیت در

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	استفاده از افزایش سطح ولتاژ	منطقه‌ای خوزستان		انتقال و فوق توزیع	پارامترها و عوامل تأثیرگذار، ضرورت‌ها و محدودیت‌ها و تمامی چالش‌ها (از قبیل فواصل الکتریکی، جنس زمین و خاک، عوارض و حریم، انتخاب انواع روش‌ها، تغییرات پست) در روند انجام پروژه تعیین و مورد بررسی قرار گیرد. پس از بررسی‌های فنی و اقتصادی مورد نیاز برای افزایش ظرفیت خطوط موجود با استفاده از ارتقاء سطح ولتاژی، طراحی نهایی خط تغییریافته انجام شود.	هنگام افزایش بار عبوری از خط، استرس‌های واردشده به بهره‌برداران خط و همچنین مشکلات و چالش‌های احداث خط جدید از قبیل مشکلات تصاحب زمین، مدت‌زمان زیاد احداث خط، هزینه‌های احداث خط جدید از قبیل هزینه‌های دکل‌ها، هادی‌های زمین و مشکلات زیست‌محیطی ایجاد خط جدید نیاز به استفاده و بهره‌گیری از خط موجود و دستیابی به ظرفیت بالاتر با استفاده از روش ارتقاء ولتاژی وجود دارد. از مهم‌ترین فرصت‌ها و مزیت‌هایی که استفاده از روش ارتقاء ولتاژی خط برای شبکه فراهم می‌آورد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. استفاده از روش ارتقاء ولتاژ در شبکه-های دارای بارهای چگال و یا پرتراکم و نیز با محدودیت تملک حریم مناسب است. هزینه افزایش ظرفیت با ارتقاء ولتاژی کمتر از احداث خط جدید است. مدت‌زمان این روش نسبت به احداث خط کوتاه‌تر می‌باشد. امکان بهره‌گیری بیشتر از ظرفیت خطوط موجود فراهم می‌شود. افزایش ظرفیت استاتیکی به منظور بارگیری در ساعات پیک بار در عمل با ارتقاء ولتاژ، امکان اصلاح و بهینه‌سازی خط فرسوده به وجود می‌آید.
۲۶	ارائه راه‌های افزایش تاب‌آوری شبکه‌های توزیع برق استان فارس جهت مدیریت بلایای طبیعی و کاهش هزینه‌های خاموشی ناشی از آن در شبکه	شرکت توزیع نیروی برق استان فارس	توزیع	کنترل شبکه‌های توزیع نیروی برق	مدیریت بحران در شبکه توزیع فارس در هنگام وقوع حوادث	وقوع زلزله و حوادث طبیعی در استان باعث افزایش خاموشی و عدم رضایت مشترکین می‌شود

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	توزیع نیروی برق فارس					
۲۷	بررسی اثرات گردوغبار و ریز گردها در منطقه‌ی گمیشان و گنبد بر پایداری خطوط توزیع انرژی الکتریکی و قابلیت اطمینان شبکه و ارائه راهکارهای عملی و اقتصادی جهت مقابله با این پدیده	شرکت توزیع نیروی برق استان گلستان	توزیع	حفاظت شبکه‌های توزیع نیروی برق	همراهی دفتر تحقیقات جهت ارائه راهکارها و شیوه‌های نوین در طراحی و استفاده از تجهیزات متناسب با میزان آلودگی منطقه	با عنایت به شروع دوره کم‌آبی دریاچه خزر و پسرفت آب و درنتیجه بیابانی شدن منطقه متأسفانه با پدیده نشست گردوغبار بر روی تجهیزات و فراوانی خاموشی‌های ناخواسته مواجه هستیم درنتیجه از اهمیت خاصی برخوردار است
۲۸	مطالعه، بررسی و تعیین روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی ، انبارها و ساختمان‌های اداری در برابر حوادث غیرمترقبه	شرکت توزیع نیروی برق استان کرمانشاه	توزیع	مطالعات، بهبود و بهینه‌سازی ترانسفورماتورهای شبکه توزیع	بدست آوردن روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی، انبارها و ساختمان‌های اداری در برابر حوادث غیرمترقبه	مقاوم‌سازی ساختمان پست‌های زمینی، انبارها و ساختمان‌های اداری در برابر حوادث غیرمترقبه
۲۹	طراحی تیر سبک به منظور حمل در نقاط صعب‌العبور	شرکت توزیع نیروی برق استان چهارمحال و بختیاری	توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	طراحی تیر سبک ارائه مشخصات فنی استاندارد	در نقاط صعب‌العبور حمل تجهیزاتی که وزن زیادی دارند با مشکلاتی مواجه است. استفاده از تیرهای سبک هم هزینه شبکه را کاهش می‌دهند و هم حمل‌ونقل را آسان می‌نماید. این تیرها باید مشخصات فنی استاندارد شبکه‌های توزیع را نیز داشته باشند.
۳۰	بررسی و مطالعه و توسعه مدل‌های شکنندگی(Fragility Curve) تیرهای بتنی برق با در نظر گرفتن عوامل مختلف (نوع تیر، جنس، جنس زمین، سازنده و ...) در برابر عوامل و بارهای	شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی	توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	بررسی و مطالعه و توسعه مدل‌های شکنندگی(Fragility Curve) تیرهای بتنی برق با در نظر گرفتن عوامل مختلف (نوع تیر، جنس، جنس زمین،سازنده و ...) در برابر عوامل و بارهای محیطی و ارزیابی ریسک‌پذیری پایه‌ها در برابر	مشکلات ناشی از شکنندگی(Fragility Curve) تیرهای بتنی برق

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	محیطی و ارزیابی ریسک‌پذیری پایه‌ها در برابر حوادث طبیعی (طوفان، زلزله،باد، برف شدید و ...)				حوادث طبیعی(طوفان، زلزله،باد، برف شدید و ...)	
۳۱	تهیه مدل آزمایشگاهی بتن هادی جهت استفاده در سیستم‌های زمین	شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی	توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	تهیه مدل آزمایشگاهی بتن هادی جهت استفاده در سیستم‌های زمین	بهبود وضعیت سیستم‌های زمین
۳۲	تحقیق و تغییر دستورالعمل و روش اجرایی نصب پایه‌های بتنی گرد با حذف استفاده از سنگ لاشه و تخریب حداقلی زمین و استقرار عمودی کامل	شرکت توزیع نیروی برق استان اصفهان	توزیع	طراحی، ساخت و بهینه‌سازی تجهیزات الکتریکی شبکه‌های توزیع نیروی برق	دستورالعمل نحوه اجرای گود و استقرار پایه با تخریب حداقلی زمین	روش چاله کنی و ریختن قلوه‌سنگ و استقرار پایه‌های شبکه از سالیان پیش به همین روال ادامه داشته است ولی هم‌اکنون با توجه به به‌کارگیری پایه‌های گرد و بی‌تأثیر بودن سنگ لاشه در استحکام آن و عدم نیاز به گود کنی با ابعاد زیاد، می‌توان طی تحقیقی روش اصولی گود زنی و کاشت پایه بدون تخریب زیاد زمین و با بهترین استحکام را استخراج و مدون نمود.
۳۳	بررسی فنی و اقتصادی استفاده از تکنولوژی‌های نوین در شرکت توزیع نیروی برق شیراز	شرکت توزیع نیروی برق شیراز	توزیع	سیستم‌های پیشرفته و بهینه توزیع نیروی برق	شناسایی تجهیزات و تکنولوژی‌های نوین قابل پیاده‌سازی در شرکت توزیع نیروی برق شیراز به همراه ارائه مطالعات فنی و اقتصادی و نحوه به‌کارگیری	لزوم شناسایی تجهیزات و تکنولوژی‌های نوین مورداستفاده در کشورهای پیشرفته و توسعه یافته و انجام مقایسه تطبیقی آن‌ها با شرایط استفاده در ایران
۳۴	مطالعات آسیب‌پذیری و تاب‌آوری شبکه توزیع مازندران در برابر حوادث غیرمترقبه و وزش بادهای شدید	شرکت توزیع نیروی برق مازندران	توزیع	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق	۱. بدست آوردن منحنی شکنندگی (Fragility curve) تیرها و خطوط موجود در شبکه توزیع استان مازندران در وزش‌های مختلف باد ۲. انجام مطالعات آسیب‌پذیری بر اساس منحنی‌های شکنندگی حاصله	بدست آوردن روالی علمی و منطقی برای اخذ بودجه از توانیر در رابطه با پیاده‌سازی راهکارهای استحکام در شبکه توزیع استان مازندران و تعیین محل‌های هزینه کرد آن مبتنی بر مطالعات آسیب‌پذیری و در راستای تقویت پدافند غیرعامل

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					در نقاط مختلف شبکه؛ ۳. تخمین خسارات وارد بر شبکه توزیع و انجام مطالعات آسیب‌پذیری با شبیه‌سازی سرعت باد در سال ۱۳۹۸ ۴. تخمین هزینه‌ای که برای تعمیر یا جبران خسارات پیش‌بینی‌شده لازم است	
۳۵	بررسی راهکارهای افزایش مقاومت (تاب‌آوری) شبکه‌های برق استان در برابر بلایای طبیعی و کاهش خاموشی مشترکین	شرکت توزیع نیروی برق استان کهگیلویه و بویر احمد	توزیع	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق	کاهش خاموشی	قرار گرفتن استان بر روی گسل‌ها و وقوع حوادث طبیعی در استان
۳۶	بررسی آثار ریز گردهای دریاچه ارومیه بر فرسودگی تجهیزات شبکه شرکت توزیع نیرو برق آذربایجان غربی	شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان غربی	توزیع	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق	-پیشگیری از فرسودگی تجهیزات شبکه و افزایش طول عمر تجهیزات شبکه با دستیابی به روش علمی و کارآمد -گزارش مدون تحقیقاتی	خشک شدن دریاچه شور ارومیه و پخش ریز گردهای نمکی بر روی شبکه توزیع برق و تجهیزات آن‌که موجب فرسودگی تجهیزات و بروز اتصالات شبکه می‌شود
۳۷	بررسی پایداری تأسیسات شبکه شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان غربی در مقابل زلزله و حوادث غیرمترقبه و ارائه پیشنهاد برای افزایش سطح پایداری	شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان غربی	توزیع	افزایش قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برق	-افزایش پایداری استاتیکی و دینامیکی تأسیسات شبکه در مقابل بروز حوادث غیرمترقبه -تهیه گزارش مدون تحقیقاتی	-در معرض خطر بودن شبکه‌های توزیع برق و ساختمان‌های پست‌های توزیع-نیاز به بررسی پایداری تجهیزات برق و ارائه الگوی مناسب
۳۸	بررسی اثرات پدیده گردوغبار بر تجهیزات شبکه توزیع برق اهواز و نحوه انتخاب تجهیزات متناسب با	شرکت توزیع نیروی برق اهواز	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	ارائه راهکارهای عملی در راستای انتخاب بهینه تجهیزات	با توجه به اینکه پدیده گردوغبار در سال‌های اخیر به‌کرات در حال وقوع است لزوم بررسی تأثیر این پدیده بر تجهیزات بکار رفته در شبکه توزیع برق اهواز به‌شدت احساس می‌شود. بررسی‌های کلی در سال اخیر نشان

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
	میزان آلودگی محاسبه‌شده					می‌دهد که با بروز پدیده گردوغبار میزان مصرف افزایش‌یافته تلفات در شبکه بیشتر شده و بروز حوادث در شبکه افزایش زیادی داشته است. لذا انجام پژوهشی مدون در راستای بررسی پدیده گردوغبار روی تجهیزات به انتخاب این تجهیزات برای شبکه کمک شایانی خواهد داشت.
۳۹	بررسی تاب‌آوری شبکه توزیع برق خراسان رضوی و ارائه راه‌حل‌های نوین و بهینه اجرایی جهت مقاوم‌سازی در مخاطرات و حوادث طبیعی مانند طوفان سیل و زلزله	شرکت توزیع نیروی برق خراسان رضوی	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش شعاع آسیب‌های اجتماعی، اقتصادی، مدیریتی وارده در اثر بحران به‌ویژه مخاطرات طبیعی مانند زلزله، سیل و طوفان به شبکه توزیع که حاصل فرآیند همکاری صنعت توزیع برق و دانشگاه خواهد بود. این مهم با دستورالعمل‌های تغییر برخی از فرآیندها همچنین ورود تجهیزات نوین و آموزش‌های پیشنهادی به پرسنل و معرفی آن‌ها به سایر شرکت‌ها را در بر خواهد داشت.	پراکندگی روش‌های فعلی و حضور صنعت توزیع و دانشگاه و معرفی روش‌های بهینه و کاربردی مبتنی بر تکنولوژی و فرآیندهای بروز و اقتصادی در راستای برتری منافع نسبت به روش‌های جاری در مواجهه با عوامل طبیعی مانند طوفان، سیل، زلزله و ... مورد توجه قرار گرفته است. پایداری شبکه توزیع در برابر مخاطرات طبیعی و عوامل پدافند غیرعامل، امری بسیار مهم می‌باشد که این امر نیاز به انجام مطالعات جامع در خصوص مسائل اجتماعی، اقتصادی، مدیریتی علاوه بر مسائل فنی نقاط آسیب‌پذیر شبکه و راهکارهای جلوگیری از بروز خاموشی‌های گسترده می‌باشد. با افزایش تاب‌آوری سیستم عملاً با بروز خطا در ساختار شبکه توزیع، می‌توان دامنه بحران را کاهش داده و با فرآیندهای بهینه، مشکلات ایجادشده را مرتفع کرد که لازمه این امر داشتن شناخت جامع از خطرات شبکه توزیع و راهکارهای نوین و آمادگی رفع آن می‌باشد.
۴۰	ارائه راهکاری برای تشخیص پوسیدگی پایه‌های چوبی	شرکت توزیع نیروی	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات	بررسی راهکارها و ارائه راهکار بهینه و مناسب برای استان	با توجه به اینکه تعداد زیادی از پایه‌های شبکه چوبی می‌باشند و همکاران جهت انجام تعمیرات از این

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
		برق استان کردستان		شبکه‌های توزیع نیروی برق	کردستان جهت ایجاد شبکه ایمن‌تر و پایدارتر	پایه‌ها صعود می‌نمایند و متأسفانه حوادثی هم در این خصوص داشته‌ایم انجام مطالعه و بررسی پوسیدگی پایه‌های چوبی از اهمیت بالایی برخوردار است.
۴۱	مطالعه روی جنس و شکل بهینه تیرهای مورد نیاز در شبکه‌های هوایی	شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان غربی	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	پیشنهاد جنس و شکل بهینه تیرهای مورد نیاز در شبکه ۱- بررسی ترکیبات خاک و هوای منطقه موردمطالعه ۲- بررسی ترکیبات به‌کاررفته در تیرهای فعلی ۳- بررسی فعل‌وانفعالات بین تیرها و محیط ۴- پیشنهاد ترکیبات و یا شکل جدید احتمالی برای تیرها	در حال حاضر به دلیل تغییر شرایط محیطی استفاده هر تجهیز برای هر منطقه خاصی ممکن است مناسب نباشد در برخی مناطق ترکیب جنس خاک و حضور ریز گردها ممکن است باعث فرسودگی و از بین رفتن سریع پایه‌های بتنی شود که همه این موارد نیاز به بررسی و تحقیق جهت جلوگیری از غافلگیری در اثر بروز خطاهای شبکه شود لذا این پروژه در راستای افزایش پایداری و کاهش هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری اولویت دارد
۴۲	بررسی علل خوردگی پایه‌های بتنی انتقال نیرو و طراحی میکرو مکانیکی و ساخت بتن پایا ویژه خطوط انتقال	شرکت توزیع نیروی برق استان بوشهر	توزیع	پایش خطوط و تجهیزات شبکه‌های توزیع نیروی برق	ساخت بتن	گزارش توجیهی پروژه و مزایای فنی، اقتصادی، اجتماعی بتن‌های مورداستفاده در پایه‌های برق به دلیل شرایط خورندگی شدید در محیط‌های نزدیک دریا مانند استان بوشهر به‌سرعت دچار زوال می‌گردند. عوامل اصلی شامل عدم ساخت بتن مناسب و پایا از دیدگاه میکرو مکانیک از یک‌سو و از سوی دیگر وجود بیش‌ازاندازه یون کلر و سولفات در این مناطق نام برد. هدف از انجام این پژوهش مشخص نمودن دو ابهام زیر است ۱- عامل اصلی خرابی پایه‌های برق که عموماً در ناحیه پایین این پایه‌ها رخ می‌دهد چیست و بتن‌های مورداستفاده در این پایه‌ها چه ضعف‌هایی دارند ۲- طراحی، ساخت و بهینه‌سازی بتن پایا

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						برای استفاده در این پایه‌ها انجام این پژوهش که منجر به ساخت بتن بهینه برای این مناطق (از دیدگاه اقتصادی و غیره) می‌شود، سبب سودآوری اقتصادی برای اداره برق خواهد شد. بدیهی است جایگزین نمودن پایه‌ها به دلیل خرابی بتن علاوه بر آنکه هزینه‌های ساخت پایه‌های جدید را بر روی آن سازمان اعمال می‌کند، سبب صرف هزینه‌های هنگفت ناشی از احتمال شکست پایه‌ها و آسیب‌رسانی به خطوط انتقال و همچنین اتلاف نیروی انسانی خواهد شد. این پژوهش به‌صورت کاملاً آزمایشگاهی انجام خواهد شد و منجر به پیشنهاد طرح اختلاط‌های مشخصی برای بتن در این نواحی خواهد شد.
۴۳	بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و موادی یک نمونه تیر انتقال برق کامپوزیتی FRP	شرکت توزیع نیروی برق استان فارس	توزیع	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های توزیع برق	علیرغم مزیت‌های فوق هنوز دانش ساخت بهینه تیرهای کامپوزیتی در کشور مکتوب نشده است. بحث آزمون‌های استاندارد برای تعیین خواص موادی و فیزیکی باید تدوین گردد. لذا هدف این تحقیق با توجه به بعضی ضعف‌های کامپوزیت نظیر سطح مقاومت این مواد در برابر محیط خورنده نمکی، اشعه ماوراءبنفش UV، مقاومت در برابر آتش، طراحی و تدوین تست‌های آزمایشگاهی جهت بررسی این رفتارهای ماده می‌باشد. پس از بررسی نتایج، راه‌حل‌های بهینه نمودن ساخت جهت ارتقای ضعف‌های مذکور ارائه	تیرهای انتقال برق ولتاژ متوسط در بحث انتقال و توزیع علاوه بر نقش بسیار مهم، به تعداد زیادی نیز مورداستفاده قرار می‌گیرند. وزن زیاد، شرایط حمل‌ونقل و نصب را مشکل می‌سازد ضمن این‌که در صورت سقوط سازه، خرابی زیادی را نیز ایجاد خواهد کرد. مشکل عمومی دیگر، نشت و اتلاف جریان از این نوع تیرها می‌باشد که ظاهراً در ایران موردمحاسبه قرار نگرفته است. لازم به ذکر است که در سازه بتنی، از میلگرد جهت تقویت سیمان استفاده می‌گردد. مورد مهم دیگر که مجدد در ایران مورد غفلت قرار گرفته است آلودگی محیط‌زیست و ورود موارد سنگین به خاک و منابع آبی باگذشت زمان است. چوب باوجود سبکی بیشتر، دارای مشکلاتی از جمله

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					می‌گردد. لازم به ذکر است به توجه به عدم امکان ساخت یک نمونه با ابعاد واقعی در آزمایشگاه، ترجیحاً قطعه‌ای از تیرهای کامپوزیتی قبلی تحویل داده‌شده به صنعت برق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. یا با توافق صنعت می‌تواند قطعاتی با ابعاد کوچک جهت آزمون‌های فوق ساخته شود. از دیگر موارد مورد ارائه در پایان پروژه، مدل‌سازی یک نمونه تیر با ابعاد واقعی در نرم‌افزار شبیه‌سازی برای تعیین رفتار مکانیکی سازه می‌باشد. درنهایت، آنالیز هزینه استفاده از این نوع تیرها با توجه به طول دوره کارکرد (Overall cost analysis life cycle) ارائه می‌گردد. بدیهی است که تدوین دانش فنی در این زمینه یک شرط اصلی برای به‌کارگیری و گسترش استفاده از سازه‌های کامپوزیتی در صنعت برق می‌باشد.	کاهش شدید طول عمر به لحاظ شرایط محیطی و آب و هوایی، خطرات طبیعی مثل جوندگان و آتش می‌باشد. همچنین منابع تأمین آن بسیار محدود می‌باشد. لذا لوله‌های فلزی و فولادی با پیشرفت پروسه‌های متالورژی مورد توجه قرار گرفتند. علاوه بر زمان پروسه تولید بالا، ضعف در برابر خوردگی و عوامل شیمیایی، اما نقطه‌ضعف مهم دیگر فولاد آن است که به لحاظ الکتریکی هادی است و القای ایجادی در سازه می‌تواند سبب تولید جریان شود. این عامل علاوه بر اتلاف جریان، خطرات ایمنی را نیز در بردارد. باوجود قیمت مناسب سیمان در تیرهای بتنی، اما میلگرد قابل‌ملاحظه‌ای جهت تقویت استفاده می‌شود. سیمان در اثر شرایط محیطی به‌سرعت دچار ترک می‌گردد و وجود ترک باعث خورندگی میلگرد خواهد شد. طبق تحقیقات، پس از مدت کوتاه حجم زنگ‌زدگی با حجم آهن اولیه برابری می‌کند که این خود باعث ایجاد شکاف‌های عمیق‌تر در سیمان به دلیل عدم تحمل تنش کششی در سیمان می‌گردد. لذا این نوع تیر باوجود سنگینی زیاد از عمر چندانی نیز برخوردار نمی‌باشد. جهت رفع عیوب بالا، امروزه رویکرد استفاده از تیرهای کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته است. کامپوزیت از جمله مواد پیشرفته محسوب می‌شود که نسبت استحکام به وزنی بسیار بالاتر از فولاد دارد. در مورد تیرهای انتقال برق

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
						کامپوزیتی مزایای زیر را می‌توان نام برد: • سبکی جهت حمل و نصب • سرعت تولید بالا و جایگزینی تیرهای صدمه‌دیده در هنگام وقوع بلایای طبیعی • تنوع ساخت به لحاظ شکل، نوع مواد و زیبایی • عایق بودن • مقاومت در برابر خوردگی • عدم آلودگی محیط‌زیست • امکان طراحی برای قرارگیری در معرض بارهای بزرگ ناشی از باد • عموماً عدم در هم پاشی کامل حتی در صورت شکست سازه لذا نیاز است در جهت رفع موانع عملی استفاده از تیرهای کامپوزیتی با تکیه‌بر دانش روز گام برداشت
۴۴	ساخت و بررسی خواص مکانیکی یک نمونه کراس آرم کامپوزیتی FRP	شرکت توزیع نیروی برق استان فارس	توزیع	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های توزیع برق	علیرغم مزیت‌های فوق، هنوز دانش ساخت بهینه تیرهای عرضی کامپوزیتی در کشور مکتوب نشده است. بحث تست‌های استاندارد برای تعیین خواص مکانیکی باید تدوین گردد. لذا هدف این پروژه با توجه به ضعف عمومی تیرهای کامپوزیتی در برابر بارهای عرضی، طراحی و تدوین تست‌های آزمایشگاهی جهت بررسی رفتارهای ماده در حالت بارهای استاتیکی و شبه استاتیکی می‌باشد. برای این منظور ابتدا لازم است خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته‌شده توسط دستگاه‌های آزمایشگاهی مشخص گردد. از دیگر موارد مورد ارائه در پایان پروژه، مدل‌سازی یک نمونه تیر عرضی با ابعاد واقعی در نرم‌افزار	تیرهای عرضی یا کراس‌آرم‌ها یکی از اجزای بسیار مهم در تیرهای انتقال برق ولتاژ متوسط جهت انتقال و توزیع برق می‌باشند. تا دهه گذشته این تیرها عموماً از دو جنس فلز و چوب ساخته می‌شدند. اما این مواد مشکلاتی را در کاربرد ایجاد می‌کنند. وزن زیاد تیرهای ساخته‌شده از این مواد شرایط حمل‌ونقل و نصب را مشکل می‌سازد ضمن این‌که در صورت سقوط سازه، خرابی زیادی را نیز ایجاد خواهد کرد. مشکل عمومی دیگر، نشت و اتلاف جریان از این نوع تیرها می‌باشد. چوب باوجود سبکی بیشتر، دارای مشکلاتی از جمله کاهش شدید طول عمر به لحاظ شرایط محیطی و آب و هوایی و خطرات طبیعی مثل آتش می‌باشد. همچنین منابع تأمین آن بسیار محدود می‌باشد. اما فولاد علاوه بر زمان پروسه تولید بالا، ضعف در برابر

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
					شبیه‌سازی برای تعیین رفتار مکانیکی سازه در حالت بارگذاری‌های مختلف و تعیین مقاومت سازه می‌باشد. لازم به ذکر است این بررسی‌ها می‌تواند روی نمونه ساخته‌شده قبلی و تحویل داده‌شده به صنعت برق انجام پذیرد یا با توافق طرفین یک نمونه جدید در آزمایشگاه ساخته شود. همچنین ارتقای دوام سازه در مقابل اشعه ماوراءبنفش و مقاومت به آتش با اضافه کردن افزودنی‌ها یا بهره‌گیری از پوشش‌ها می‌تواند بر اساس نیاز صنعت مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است که تدوین دانش فنی در این زمینه یک شرط اصلی برای به‌کارگیری و گسترش استفاده از سازه‌های کامپوزیتی در صنعت برق می‌باشد.	خوردگی و همچنین عوامل شیمیایی، ضعف مهم دیگری دارد که به لحاظ الکتریکی هادی است و در آن القای ایجادی می‌تواند سبب تولید جریان شود. این عامل علاوه بر اتلاف جریان، خطرات ایمنی را نیز در بردارد. جهت رفع عیوب بالا، امروزه رویکرد استفاده از تیرهای کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته است. کامپوزیت از جمله مواد پیشرفته محسوب می‌شود. نسبت بالای استحکام و سفتی به وزنِ مواد مرکب که افزون‌تر از فولاد است، باعث رشد چشمگیر استفاده از آن‌ها در صنایع مختلف شده است و در حقیقت آن‌ها را تبدیل به‌نوعی ماده بی‌بدیل کرده است. در مورد تیرهای عرضی انتقال برق کامپوزیتی مزایای زیر را می‌توان نام برد: • سبکی جهت حمل و نصب • سرعت تولید بالا و جایگزینی قطعات صدمه‌دیده در هنگام وقوع بلایای طبیعی • امکان طراحی اتصالات آسان‌تر برای نصب • تنوع ساخت به لحاظ شکل، ابعاد و نوع مواد • عایق بودن • مقاومت در برابر خوردگی • عدم آلودگی محیط‌زیست • امکان طراحی برای قرارگیری در معرض بارهای بزرگ ناشی از باد • عموماً عدم در هم پاشی کامل حتی در صورت شکست سازه لذا نیاز است در جهت رفع موانع عملی استفاده از کراس آرم-های کامپوزیتی با تکیه‌بر دانش روز گام برداشت.

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۴۵	طراحی و ساخت پایه‌های بتنی جهت استفاده در مناطق با محدودیت طراحی خاص به منظور رفع حریم شبکه در مناطق با تراکم بالای ساخت‌وساز و معابر کم‌عرض و ناشی از وجود سیم‌های با وزن بالای لینکس	شرکت توزیع نیروی برق اهواز	توزیع	مطالعات و توسعه بهینه شبکه‌های توزیع برق	طراحی و ساخت پایه بتنی جهت استفاده در مناطق خاص	در بسیاری از مناطق اهواز برای توسعه شبکه مشکلاتی نظیر محدویت‌های حریم، تراکم بالای شبکه و عرض معبر کم وجود داشته و استفاده از پایه‌های بتنی با شکل متفاوت در این مناطق ضروری می‌باشد.
۴۶	تهیه اطلس آلودگی‌ها در استان	شرکت برق منطقه‌ای سیستان و بلوچستان	مطالعات کلان انرژی، اقتصادی و مدیریتی	مطالعات مدیریتی و راهبری شرکت‌های برق	کتابچه گزارش نهایی	با توجه به تغییرات محیطی ایجادشده در سال‌های اخیر، مباحثی همچون ریز گردها و گرم شدن زمین، پدیده‌هایی همچون ال نینو و ... و قدیمی شدن پهنه‌بندی‌های سابق نیاز به انجام این مطالعات احساس می‌شود
۴۷	مطالعه و ارائه راهکارهای مقاوم‌سازی شبکه‌های توزیع قدرت در برابر رخدادها و حوادث طبیعی	شرکت توانیر	مطالعات کلان انرژی، اقتصادی و مدیریتی	مطالعات مدیریتی و راهبری شرکت‌های برق	ارائه راهکارهای: - مقاوم‌سازی شبکه‌های هوایی در برابر مخاطرات طبیعی - مقاوم‌سازی شبکه‌های قدرت در برابر خوردگی پایه‌ها و تجهیزات الکتریکی -O مقاوم‌سازی شبکه‌های قدرت در برابر ریز گردها - تهیه طرح‌های اضطراری برای برق‌رسانی پس از رخدادهای طبیعی از طریق تشکیل ریز شبکه‌ها	-عدم وجود راهکارهای مقاوم‌سازی و مقابله مناسب در صورت بروز رخدادها و حوادث طبیعی همانند زلزله و ریز گردها و یا خوردگی پایه‌ها
۴۸	روش‌های نوین برای مقابله با ریز گردها و تأثیر آن بر تجهیزات خطوط و پست‌های انتقال و فوق توزیع	شرکت توانیر	مطالعات کلان انرژی، اقتصادی و مدیریتی	ارزیابی فنی و اقتصادی به‌کارگیری تکنولوژی‌ها و یا راهکارهای مختلف در	روش‌های نوین برای مقابله با ریز گردها و تأثیر آن بر تجهیزات خطوط و پست‌های انتقال و فوق توزیع	- به حداقل رساندن خسارات وارده به تأسیسات و تجهیزات شبکه تحت تأثیر تنش‌های ناشی از آلودگی و بهینه‌سازی هزینه‌های تعمیر و نگهداری خطوط -تأثیر رطوبت همراه با ریز گرد بر قطعی و خاموشی خطوط

ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
				بخش‌های تولید، انتقال و توزیع		و پست‌های برق کشور و جلوگیری یا به حداقل رساندن حوزه رخداد حوادثی مشابه آنچه در زمستان ۹۵ در استان خوزستان اتفاق افتاد.
۴۹	کسب دانش فنی و ساخت مفصل استاتیکی مقاوم در برابر زلزله به منظور پایدار نگه‌داشتن ترانس‌های قدرت با توجه به بحث امنیت و پایایی شبکه	شرکت توانیر	عمومی	مطالعات ایمنی، بهداشت و زیست‌محیطی	۱-مطالعات میدانی با نظر پژوهشگاه زلزله و نیرو در دستور کار قرار گرفته و نمونه اولیه به همراه مشخصات فنی و تدابیر کنترلی طراحی و آماده خواهد شد. ۲- پس از ساخت نمونه موردمطالعه، دمپرهای مورد نیاز بررسی و در صورت لزوم و اهمیت تجهیز رفتار مفصل شبیه‌سازی و مانیتور خواهد شد و برای پردازش اطلاعات به سرور مرکزی تحلیل زلزله ارسال خواهد شد. ۳-کسب دانش فنی و ساخت مفصل استاتیکی مقاوم در برابر زلزله به منظور پایدار نگه‌داشتن ترانس‌های قدرت با توجه به بحث امینت و پایایی شبکه و ساخت چند نمونه	با توجه به گسل‌های وسیع موجود در کلیه استان‌های کشور و آسیب‌هایی که به ترانس‌های قدرت پست۲۳۰ کیلوولت شهید عزیزی وارد آمد، طراحی و ساخت مفصل ضد زلزله با ۵ یا ۶ درجه آزادی که می‌تواند بسته به وزن و نوع ترانس قدرت و اهمیت بحث قابلیت اطمینان، از درجه اهمیت بسیار بسزایی برخوردار باشد و لذا باید به فکر طراحی المان مقاوم در مقابل زلزله برای ترانس‌ها حساس پست‌های انتقال و خصوصاً نیروگاه‌های حساس شبکه برق کشور بوده و لذا باید امکان‌سنجی ساخت و طراحی این المان بااهمیت را در دستور کار قرار داد. مزایای فنی: ـ ایمنی در مقابل زلزله ـ حفظ منابع و دارایی‌های کشور ـ پایداری و بحث امنیت شبکه ـ جلوگیری از آسیب‌های استراتژیک، جانی و مالی مزایای اجتماعی: ـ تداوم خدمت برق‌رسانی و کاهش خاموشی‌ها ـ اطمینان خاطر پرسنل مستقر در پست‌های برق و نیروگاه از پایدار بودن ترانس‌های فشارقوی ـ کاهش تبعات اجتماعی در پی استمرار توزیع انرژی، مزایای اقتصادی: ـ کاهش آسیب به تجهیزات ـ کاهش انرژی‌های توزیع نشده مزایای زیست‌محیطی: کاهش آسیب به تجهیزات مستقیماً سبب کاهش آسیب به محیط‌زیست و حفظ آن خواهد شد.

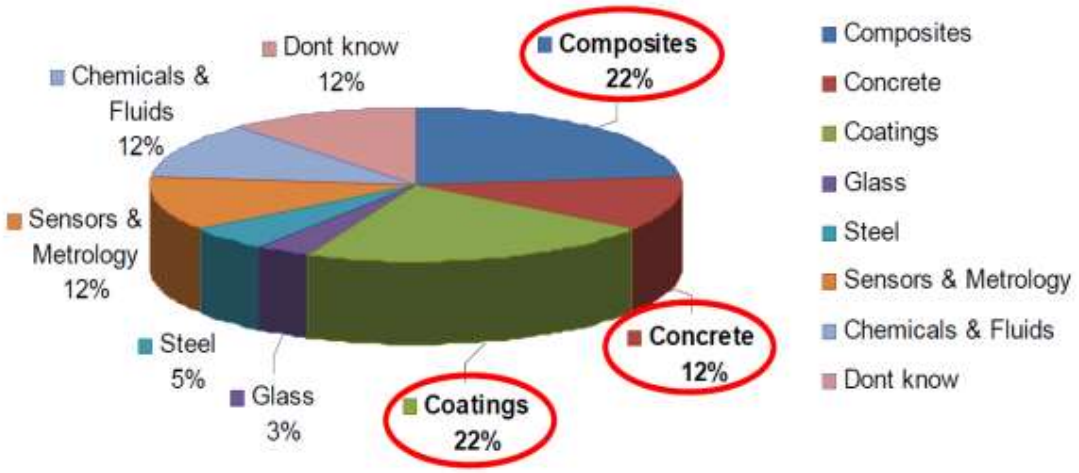
ردیف	عنوان تحقیق	شرکت هدف	محور اصلی	زیر محور	اهداف مورد انتظار و محصول نهایی طرح	دلایل اولویت داشتن
۵۰	بررسی و مطالعه مقاوم‌سازی ساختمانی پست‌های انتقال و فوق توزیع احداث‌شده و احداث نشده در برابر زلزله با شدت تخریب بالا	شرکت برق منطقه‌ای تهران	عمومی	مطالعات ایمنی، بهداشت و زیست‌محیطی	بررسی و مطالعه مقاوم‌سازی ساختمانی پست‌های انتقال و فوق توزیع احداث‌شده و احداث نشده در برابر زلزله با شدت تخریب بالا و اجرای چند نمونه در مناطق زلزله‌خیز همانند ملارد، فیروزکوه و ورامین یا پاکدشت	دلایل و مزایای طرح: - تجهیزات و ابنیه موجود در برابر زلزله با قدرت‌های بالا از استحکام کافی برخوردار نیستند فلذا می‌بایست در قالب یک پروژه تحقیقاتی، مجموعه اقداماتی که منجر به مستحکم سازی آن‌ها می‌شود را پیاده‌سازی نمود و استانداردهایی فراتر از آیین‌نامه ۲۸۲۲ پیاده‌سازی شود. - جلوگیری از خاموشی برق در مناطق زلزله‌زده که باعث عدم کاهش امنیت اجتماعی و حفظ مسائل پدافندی در زمان بحران را ایجاد می‌نماید.

۵-۴- منابع

[۱] قانون برنامه پنج ساله پنجم توسعه کشور
[۲] قانون برنامه پنج ساله ششم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران
[۳] بیانیه گام دوم انقلاب خطاب به ملت ایران
[۴] سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ کشور
[۵] سند چشم‌انداز و برنامهٔ راهبردی بلند مدت وزارت نیرو
[۶] مجموعه مقاصد و اهداف فناورانه کلان در صنعت برق کشور
[۷] سیاست‌های کلی ابلاغی توسط مقام معظم رهبری در بخش پدافند غیرعامل
[۸] سیاست‌های کلی تولید ملی، حمایت از کار و سرمایه ایرانی
[۹] سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی ابلاغی مقام معظم رهبری
[۱۰] سند "اولویت‌های تحقیقاتی و فناوری مصوب کمیسیون‌های تخصصی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری"
[۱۱] محمدامین کاتب صابر، یاسر خوشنویس، چرخه عمر فناوری، از مجموعه مقالات ستاد توسعه فناوری نانو.
[۱۲] اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو سال ۱۳۹۵
[۱۳] اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو سال ۱۳۹۶
[۱۴] اولویت‌های تحقیقاتی وزارت نیرو سال ۱۳۹۷

فصل پنجم

ارائه فهرست و دسته‌بندی مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق و ارائه روش‌های توسعه‌ی به‌کارگیری آن‌ها در کشور



فهرست مطالب

مقدمه

Error! Bookmark not defined......

۵ ارائه فهرست و دسته‌بندی مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق و ارائه روش‌های توسعه‌ی به‌کارگیری آن‌ها در کشور..... ۴۲۰

۵-۱ ارائه فهرست انواع مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق..... ۴۲۰

۵-۱-۱ معرفی اجمالی سازه‌های بتنی صنعت برق..... ۴۲۰

۵-۱-۱-۱ استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات بتن در سازه‌های بتنی صنعت برق ۴۲۰

۵-۱-۱-۲ استفاده از مواد نانو ساختار برای ایجاد خصوصیت خود ترمیمی در سازه‌های بتنی صنعت برق ۴۲۴

۵-۱-۲ معرفی اجمالی سازه‌های فلزی صنعت برق..... ۴۲۶

۵-۱-۲-۱ استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات فلز در سازه‌های فلزی صنعت برق ۴۲۶

۵-۱-۳ استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی در بستر سازه‌های صنعت برق..... ۴۲۷

۵-۱-۴ استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور پایش سلامت سازه‌های صنعت برق..... ۴۳۰

۵-۱-۵ استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی صنعت برق..... ۴۳۲

۵-۱-۶ فهرست کلی از مواد نانو ساختار مورد استفاده در سازه‌های صنعت برق:..... ۴۳۳

۵-۲ ارائه مزایا و معایب و همچنین محدودیت‌های به‌کارگیری مواد معرفی شده در بند (۵-۱)..... ۴۴۴

۵-۲-۱ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار..... ۴۴۴

۵-۲-۱-۱ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در بتن ۴۴۴

٥-٢-١-١-١ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در کارایی و زمان گیرش بتن ٤٤٤

٥-٢-١-١-٢ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در دوام و نفوذپذیری بتن ٤٤٦

٥-٢-١-١-٣ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مقاومت مکانیکی بتن ٤٥٠

۵-۲-۱-۲ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی ۴۵۳

۵-۲-۱-۳ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مصالح خودترمیم شونده ۴۵۴

۵-۲-۱-۴ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در نانو حسگرها مورد استفاده در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها ۴۵۶

۵-۲-۱-۵ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار جهت بهبود شرایط ژئوتکنیکی ۴۵۸

۵-۲-۱-۵-۱ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر پلاستیسته خاک (دامنه خمیری) ٤٥٨
۵-۲-۱-۵-۲ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر نفوذپذیری ٤٥٩
۵-۲-۱-۵-۳ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر تورم خاک ریزدانه ٤٥٩
۵-۲-۱-۵-٤ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر وزن مخصوص حداکثر ٤٦٠
۵-۲-۱-۵-۵ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر رطوبت بهینه ٤٦٠
۵-۲-۱-۵-٦ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر واگرایی ٤٦١
۵-۲-۱-۵-۷ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر رمبندگی ٤٦١
۵-۲-۱-۵-۸ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر کرنش انبساطی و انقباضی ٤٦١
۵-۲-۱-۵-۹ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر مقاومت فشاری تک‌محوری ٤٦١
۵-۲-۱-۵-۱۰ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر پارامترهای مقاومت برشی ٤٦٣
۵-۲-۱-۵-۱۱ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر چسبندگی خاک ٤٦٣
۵-۲-۱-۵-۱۲ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ٤٦٣
۵-۲-۱-۵-۱۳ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر نسبت تخلخل خاک ٤٦٤
۵-۲-۱-۵-۱٤ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر خصوصیات دیگر خاک ماسه‌ای ٤٦٤
۵-۲-۱-۶ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در فولاد سازه‌ای ۴۶۵
۵-۲-۱-۷ مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های چوبی ۴۶۵
۵-۲-۲ معایب و محدودیت‌های استفاده از نانو ذرات بر انسان و محیط‌زیست..... ۴۶۶
۵-۲-۲-۱ نانو ذرات در محیط‌زیست ۴۶۶
۵-۲-۲-۲ اساس سمیت نانو ذرات ۴۶۷
۵-۲-۲-۳ راه‌های ورود نانو ذرات به بدن انسان ۴۶۹
۵-۲-۲-4 فاکتورهای محیطی مؤثر بر سمیت نانو ذرات ۴۷۱
۵-۲-۲-۵ اثرات نانو ذرات بر محیط آبزیان ۴۷۲
۵-۲-۲-۶ تأثیرات نانو ذرات بر محیط خاک ۴۷۲
۵-۲-۲-۷ تدوین استانداردهای حوزه نانو در ارتباط با سلامتی، ایمنی و محیط‌زیست ۴۷۲
۵-۳ مطالعه موردی اقتصادی به‌کارگیری از این مواد در سازه‌ها..... ۴۷۳
۵-۳-۱ برآوردهای کمّی بازار نانوتکنولوژی و میزان توجه دولت‌ها به این بازار..... ۴۷۳
۵-۳-۲ مطالعه موردی توجیه اقتصادی استفاده از نانوتکنولوژی در مهندسی عمران و صنعت ساخت ۴۷۶
۵-۳-۲-۱ مطالعه امکان‌سنجی اقتصادی راه‌اندازی خط تولید سیمان نانو در عراق (کارخانه سیمان شهر کوفه) ۴۷۶
۵-۳-۲-5 بررسی تأثیرات اقتصادی استفاده از نانو سیلیس در بتن ۴۷۸
۱-۱-۱-۱-۱ ارزیابي هزینه‌اي چرخه عمر (LCC) ٤٧٩

۵-۳-۲-۳ بررسی صرفه اقتصادی بتن سبک با مقاومت بالا با استفاده از مواد نانو ۴۷۹
۵-۳-۲-۴ مطالعه امکان‌سنجی بتن خود حرارت دهنده با استفاده از المان‌های حرارت دهنده نانو فیبر کربن ۴۸۴
۵-۳-۲-۵ طرح توجیهی تولید پودر نانو سیلیس ۴۸۵
5-۳-۲-۵-۱ معرفی محصول ٤٨٥
5-۳-۲-۵-۲ نام و کد محصول (آیسیک ۳): ٤٨٦
۵-۳-۲-۵-۳ قوانین صادرات و واردات محصول ٤٨٧
۵-۳-۲-۵-٤ بررسی اقتصادی طرح ٤٨٧
5-۳-۲-۶ مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی تولید مواد ترمیم‌کننده بتن با نانو ذرات ۴۸۷
۵-۳-۲-۶-۱ شرایط واردات ٤٨٨
5-۳-۲-۶-۲ بررسی و ارائه اطلاعات لازم در زمینه قیمت تولید داخلی و جهانی محصول ٤٨٨
۵-۳-۲-۶-۳ اهمیت استراتژیکی کالا در دنیاي امروز ٤٨٩
۵-۳-۲-۶-٤ کشورهاي عمده تولیدکننده و مصرف‌کننده محصول ٤٨٩
5-۳-۲-۶-۵ وضعیت عرضه و تقاضا ٤٩٤
5-۳-۲-۶-۶ تجزیه و تحلیل و ارائه جمع‌بندي و پیشنهاد نهایی در مورد احداث واحدهاي جدید ٤٩٤
۵-۳-۳ مروری بر اظهارنظرها حول هزینه-فایده نانو مواد در صنعت ساخت..... ۴۹۵
۵-۳-۴ نانوتکنولوژی و تأثیر آن در صنعت ساخت، از تحقیقات تا فضای فعالیت‌های حرفه‌ای ۴۹۶
۵-۳-۴-۱ هدف و روش انجام نظرسنجی ۴۹۶
۵-۳-۴-۲ فواید اقتصادی در صنعت ساخت و برای جامعه ۴۹۷
5-۳-۴-۳ نتایج نظرسنجی در میان متخصصان و افراد پیشرو در صنعت ساخت و ساز ۴۹۸
۵-۳-۴-۴ خطای تلقی هزینه معادل صرفه اقتصادی ۵۰۰
۵-۴ مراجع ۵۰۱

فهرست اشکال

شکل ۵-۱: سرنوشت نانو ذرات جذب‌شده توسط یک سلول شش..... ۴۷۱
شکل ۵-۲: هزینه کشورهای مختلف در بخش R&D نانوتکنولوژی در سال ۲۰۱۲ (مقدار کل ۷/۹ میلیارد دلار بوده است.)..... ۴۷۶

شکل ۵-۳: نمودار هزینه و درآمد پروژه در ۵ سال نخست و تعیین نقطه سر به سر..... ۴۷۸
شکل ۵-۴: رابطه مساحت ساختمان و صرفه اقتصادی..... ۴۸۴
شکل ۵-۵: رابطه تعداد طبقات ساختمان و صرفه اقتصادی..... ۴۸۴
شکل ۵-۶: پودر نانو سیلیس..... ۴۸۶
شکل ۵-۷: نمودار رشد مصرف سیمان ایران در سالیان اخیر (میلیون تن)..... ۴۹۳
شکل ۵-۸: نتایج نظرسنجی از تعدادی متخصص و فعال حوزه نانوتکنولوژی در پاسخ به سؤال " نانوتکنولوژی در کدام حوزه‌ها بیشترین اثر را بر روی ساخت دارد؟"..... ۴۹۹
شکل ۵-۹: نتایج نظرسنجی از تعدادی متخصص و فعال حوزه نانوتکنولوژی در پاسخ به سؤال " بزرگ‌ترین چالش و ریسک کاربرد نانوتکنولوژی در ساخت چیست؟"..... ۴۹۹
شکل ۵-۱۰: ارائه چارچوب کلی توسعه محصول مبتنی بر نانوتکنولوژی..... ۵۰۱

فهرست جداول

جدول ۵-۱: مواد نانو ساختار مختلف که در سازه‌های بتنی صنعت برق می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند..... ۴۲۱
جدول ۵-۲: مواد نانو ساختار مورد استفاده در روند خود ترمیمی سازه‌های بتنی صنعت برق..... ۴۲۵
جدول ۵-۳: مواد نانو ساختار مورد استفاده در روند تولید فولاد مصرفی در سازه‌های صنعت برق..... ۴۲۶
جدول ۵-۴: مواد نانو ساختار مورد استفاده جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی بستر سازه‌های صنعت برق و همچنین سازه‌های خاکی صنعت برق..... ۴۲۷
جدول ۵-۵: مواد نانو ساختار استفاده شده در ساخت حسگرهای مناسب برای پایش سلامت سازه‌ها..... ۴۳۱
جدول ۵-۶: مواد نانو ساختار مورد استفاده شده در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی صنعت برق..... ۴۳۲
جدول ۵-۷: پیشنهادات استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های مختلف بخش تولید صنعت برق..... ۴۳۴
جدول ۵-۸: : پیشنهادات استفاده از مواد هوشمند در سازه‌های مختلف بخش انتقال صنعت برق..... ۴۴۱
جدول ۵-۹: پیشنهادات استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های مختلف بخش توزیع صنعت برق..... ۴۴۳
جدول ۵-۱۰: مقایسه شاخص‌های توسعه فناوری نانو در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰..... ۴۷۵
جدول ۵-۱۱: تجربه کشورهای مختلف در تولید بتن سبک..... ۴۸۰
جدول ۵-۱۲: نتایج محاسبات مثال صرفه اقتصادی بتن پرمقامت سبک (HSSLWC)..... ۴۸۳
جدول ۵-۱۳: کد آیسیک مرتبط با صنعت تولید نانو سیلیس..... ۴۸۷
جدول ۵-۱۴: مقایسه خصوصیات و قیمت نانو سیلیس، دوده سیلیس و خاکستر بادی..... ۴۸۸
جدول ۵-۱۵: مقدار تولید سیمان در بزرگ‌ترین کشورهای تولیدکننده از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۳ (میلیون تن در سال)..... ۴۹۰
جدول ۵-۱۶: مقادیر مصرف بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سیمان در جهان از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۳ (میلیون تن در سال)..... ۴۹۲
جدول ۵-۱۷: وضعیت تولید و مصرف سیمان ایران..... ۴۹۳

جدول ۵-۱۸: میزان تقاضای بازار برای نانو پودرهای اکسید فلزی..... ۴۹۴

۵- ارائه فهرست و دسته‌بندی مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق و ارائه روش‌های توسعه‌ی به‌کارگیری آن‌ها در کشور

۵-۱- ارائه فهرست انواع مواد نانو ساختار کاربردی در سازه‌های صنعت برق

با توجه به اهمیت استراتژیک صنعت برق در کلیه کشورها در نظر گرفتن سازه‌هایی که از لحاظ توسعه پایدار و عملکردی قابلیت اطمینان بالاتری را تأمین کنند حائز اهمیت است. سازه‌های صنعت برق گستره وسیعی از سازه‌های مختلف نیروگاهی، انتقال و توزیع است، که بسیاری از آن‌ها در حوزه سازه‌های بزرگ مقیاس قرار دارند. مواد نانو ساختار با کاربردهای چندگانه خود در فرآیند ساخت، پایش سلامت و مقاوم‌سازی می‌توانند اهداف فوق را در سازه‌های صنعت برق تأمین کنند و همچنین سبب ایجاد سازه‌هایی باصرفه اقتصادی بیشتر گردند. هرچند علم نانوتکنولوژی در حوزه سازه‌های عمرانی و سازه‌های صنعت برق نسبتاً جوان بوده، اما استفاده از آن در این حوزه می‌تواند بسیار وسیع باشد، نانوتکنولوژی عملکرد تمامی سازه‌های موجود در صنعت برق را می‌تواند به نوعی بهبود بخشد که در ادامه این بخش، فهرستی از مواد نانو ساختار که در این خصوص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، ارائه شده است.

۵-۱-۱ - معرفی اجمالی سازه‌های بتنی صنعت برق

در اکثر سازه‌های صنعت برق چه فولادی و چه بتنی، بتن جزء اجتناب‌ناپذیر آن‌ها است. عمده سازه‌های بتنی صنعت برق شامل فونداسیون‌ها، سازه برج‌های خنک‌کننده، سازه دودکش‌های نیروگاه‌های حرارتی، مخازن، فونداسیون‌ها، پوسته محافظ بتنی، سازه‌های ساختمانی و کنترلی نیروگاه‌های هسته‌ای، سدهای بتنی و سدهای خاکی، لوله‌های انتقال آب بتنی در نیروگاه‌های برق‌آبی و فونداسیون توربین‌های بادی و برج توربین‌های بادی نیروگاه‌های بادی، فونداسیون دکل‌های انتقال نیرو خطوط انتقال برق هوایی، گالری‌های بتنی و منهول‌های خطوط انتقال برق زیرزمینی، ساختمان‌های کنترل، فونداسیون‌های جهت مهارها و نگه‌دارنده‌های پست‌های انتقال و فونداسیون پایه‌های خطوط توزیع می‌گردد.

۵-۱-۱-۱- استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات بتن در سازه‌های بتنی صنعت برق

با توجه به استفاده گسترده از بتن در سازه‌های صنعت برق، نانوتکنولوژی با بهبود ویژگی‌های مهم بتن تازه و خصوصیات مختلف بتن پس از گیرش می‌تواند سبب تأمین قابلیت اطمینان بالاتری در سازه‌های بتنی صنعت برق گردد. نانو ذرات پتانسیل واکنش‌پذیری بسیار زیادی دارند و به شکل هسته‌هایی در کنار فاز سیمانی در نقش تقویت‌کنندگی بافت بتنی عمل کرده و به عنوان پرکننده باعث متراکم سازی ماتریس سیمانی شده و در نهایت تخلخل بتن را کاهش می‌دهند. با استفاده از نانو ذرات می‌توان بتن فراتوانمند تولید کرد که دارای مقاومت بالا و طول عمر مفید بیشتری نسبت به بتن‌ها دیگر است. مواد نانو ساختار در بتن می‌توانند سبب سرعت بخشیدن به هیدراتاسیون و یا به تأخیر انداختن زمان گیرش، بهبود خصوصیات مقاومتی بتن، افزایش تراکم بافت بتن و کاهش

منافذ نانو، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن، بهبود خواص خود تحکیمی، کاهش افت بتن، افزایش حجم بتن و خاصیت خود تمیز شوندگی بتن گردند. استفاده از نانو الیاف‌ها می‌تواند سبب جلوگیری از ایجاد و گسترش ترک در بتن گردد. در جدول ۵-۱ فهرستی از مواد نانو ساختار مختلف که در سازه‌های بتنی صنعت برق می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند ارائه می‌گردد.

جدول ۵-۱: مواد نانو ساختار مختلف که در سازه‌های بتنی صنعت برق می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند

مواد نانو ساختار	هدف از به کارگیری	مواد نانو ساختار مکمل	مواد مکمل	موارد استفاده	محدودیت‌ها
۱- نانو اکسید سیلیس	کاهش زمان گیرش بتن تازه	-	به همراه سیمان و سرباره	-	-
	افزایش روانی و کارایی در بتن تازه	-	به‌تنهایی و یا به همراه میکرو سیلیس	فشردگی آرماتور	کاهش کارایی در حضور آب و فعال‌کننده‌های قلیایی
	مقاومت در برابر سیکل‌های یخ‌بندان	-	-	در مناطق سرد	-
	کاهش نفوذپذیری	-	-	-	-
	کاهش هدایت‌پذیری یون کلر	به‌تنهایی و یا به همراه نانو اکسید تیتانیوم	-	در محیط‌هایی که سازه در معرض یون کلر قرار دارد	-
	افزایش دوام	-	-	سازه‌های صنعت برق نیروگاهی که در معرض بارش باران اسیدی قرار دارند	-
	افزایش دوام	-	-	سازه‌های بتنی صنعت برق که در معرض حمله سولفات‌ها قرار دارند.	-

	افزایش مقاومت الکتریکی و کم شدن احتمال خوردگی	به همراه نانو اکسید تیتانیوم و نانو اکسید آلومینیوم	-	-	-
	بهبود مقاومت فشاری، خمشی و کششی	به‌تنهایی و یا به همراه خاکستر بادی یا الیاف پروپیلن، الیاف فولادی	-	-	-
۲- نانو اکسید آلومینیوم	کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن	-	-	-	-
	بهبود ریزساختار بافت بتن، افزایش تراکم بافت بتن و کاهش تخلخل و نفوذپذیری	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی	-	-	-	-
۳- نانو ذرات کربنات کلسیم	افزایش سرعت هیدراتاسیون	-	-	-	-
	متراکم شدن بافت بتن و مصرف بیشتر کریستال‌های هیدروکسی کلسیم (کاهش نفوذپذیری)	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری و خمشی	-	-	-	مصرف بیش از یک درصد آن مؤثر است
۴- نانو ذرات متاکائولن	افزایش زمان گیرش	-	-	در موارد که زمان حمل طولانی باشد	با افزایش مصرف کارایی کاهش می‌یابد
۵- نانو ذرات اکسید گرافن	کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه بتن	-	-	-	کاهش جریان پذیری خمیر سیمان
	کاهش افت بتن	-	-	-	کاهش جریان پذیری خمیر سیمان

	کاهش تخلخل و منافذ موئینه (کاهش نفوذپذیری)	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی	-	-	-	-
۶- نانو مواد کربنی (CNA) تولید شده از خاکستر سوختن روغن نخل و خاکستر پوسته برنج	افزایش مقاومت کوتاه مدت و نهایی	-	-	-	افزایش میزان مصرف، موجب افزایش واکنش‌پذیری و فعالیت و در نتیجه کاهش کارایی
۷- نانو ذرات اکسید آهن	کاهش زمان گیرش	-	-	-	-
	کاهش نفوذپذیری آب، کاهش سرعت جذب و کاهش ضرایب جذب آب	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی	-	-	-	-
۸- نانو اکسید زیرکونیوم	افزایش سرعت گیرش اولیه	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی	-	-	-	کاهش مقاومت درصدهای بالاتر از ۴
۹- نانو اکسید تیتانیوم	تسریع گیرش بتن	-	-	-	-
	بهبود ریزساختار بتن و همچنین ملات‌های سیمانی (کاهش نفوذپذیری)	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی	-	-	-	-
۱۰- نانو اکسید روی	افزایش تراکم بافت بتن و کاهش نفوذپذیری	-	-	-	کاهش مقاومت فشاری
	افزایش تراکم بافت کامپوزیت‌های سیمانی و کاهش نفوذپذیری	-	-	-	-
	افزایش مقاومت گذردهی یون	-	-	-	افزایش مصرف سبب افزایش

					نفوذپذیری می‌شود
	افزایش مقاومت فشاری و خمشی	-	-	-	مصرف بیش از ۱٪، کاهش مقاومت مکانیکی
۱۱- نانو رس	سبب عدم و یا کاهش انتشار یون کلراید	-	-	-	-
	افزایش مقاومت سولفاتی بتن	-	-	-	-
	کاهش خزش بتن و کاهش افت کوتاه مدت	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری دراز مدت و افزایش مقاومت خمشی	-	-	-	-
۱۲- نانو لوله‌های کربنی	بهبود ریزساختار، افزایش تراکم بتن و کاهش تخلخل	-	-	-	-
	افزایش مقاومت فشاری و خمشی	-	-	-	-
۱۳- نانو الیاف سلولزی	افزایش مقاومت فشاری و خمشی	-	-	-	-

۲-۱-۱-۵- استفاده از مواد نانو ساختار برای ایجاد خصوصیت خود ترمیمی در سازه‌های بتنی صنعت برق

سازه‌های بتنی و کامپوزیت‌های بتنی صنعت برق که در معرض بارگذاری ترمومکانیکی پی در پی قرار دارند، مستعد ایجاد میکرو ترک می‌باشند. با گسترش این میکرو ترک‌ها و به هم پیوستن آن‌ها ترک‌های عمیق و عریض‌تری ایجاد می‌گردد که زمینه نفوذ مایعات و گازهای خورنده به عمق سازه را ایجاد می‌کنند، این موضوع سبب شروع خوردگی در آرماتورها می‌گردد و به همین نحو سازه به سرعت به سمت زوال و فروپاشی پیش خواهد رفت. عملکرد سازه‌های مختلف بتنی صنعت برق که تحت بارهای دینامیکی، حرارتی قرار دارند به شدت تحت اثر این نوع خرابی پیش‌رونده در بتن هست و کنترل این میکرو ترک‌ها می‌تواند سبب بهبود قابلیت اطمینان آن‌ها، کاهش هزینه‌های ترمیم، مقاوم‌سازی و یا بازسازی و در مجموع افزایش عمر مفید سازه گردد. خصوصیت خود ترمیمی با استفاده از مواد نانو ساختار سبب شده تا ترک‌ها با اندازه میکرو پیش از گسترش ترمیم گشته و به این نحو اهداف ذکر شده تأمین گردد. رویکردها متفاوتی برای تولید بتن خودترمیم وجود دارد که به گروه‌های کپسول‌های خودترمیم، استفاده از

شبکه مویرگی، هیدراتاسیون پیوسته مواد سیمانی هیدراته نشده، استفاده از باکتری‌های عامل خود ترمیمی تقسیم می‌گردد. در تمام این رویکردها هیدراتاسیون پیوسته مواد معدنی کلینکر یا کربناسیون کلسیم هیدروکسید، سبب ترمیم ترک‌ها بعد از گذشت مدتی می‌شوند. در جدول ۵-**۲** مواد نانو ساختار مختلفی که در روند خود ترمیمی سازه‌های بتنی صنعت برق می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند ارائه می‌گردد.

جدول ۵-۲: مواد نانو ساختار مورد استفاده در روند خود ترمیمی سازه‌های بتنی صنعت برق

مواد نانو ساختار	هدف از به کارگیری	مواد نانو ساختار مکمل	مواد مکمل	رویکرد مورد استفاده	محدودیت‌ها/ مزایا
نانو لوله‌های کربنی	به عنوان نانو محفظه‌های جهت حفظ نانو مواد عامل خودترمیمی	-	نانو ذرات پلیمری و ذرات کاتالیزور	میکرو کپسول‌های حاوی عامل خودترمیمی	بهبود خواص مکانیکی
نانو سیلیس	شرکت در هیدراتاسیون	-	به همراه میکرو کپسول‌های سیلیکاتی	میکرو کپسول‌های حاوی عامل خودترمیمی	کاهش اثرات منفی عملکرد مکانیکی ناشی افزودنی‌ها/ کاهش نفوذپذیری/ افزایش خاصیت خودترمیمی بتن‌های فوق توانمند
نانو رس	به عنوان آب‌رسان (جذب آب بالا، چندین برابر جرم خود)	-	-	هیدراتاسیون پیوسته مواد سیمانی هیدراته نشده بتن و ملات-های سیمانی	افزایش مقاومت خمشی پس از ترمیم
نانو صفحات گرافیت	به عنوان حمل‌کننده ماده ترمیمی	-	-	باکتری‌های عامل خودترمیمی	پخش یکنواخت‌تر باکتری‌ها در ماتریس سیمانی
نانو صفحات گرافن	به عنوان حمل‌کننده ماده ترمیمی	-	-	باکتری‌های عامل خودترمیمی	کاهش وقوع ترک در فصل مشترک خمیر

					سیمان و سنگ‌دانه‌ها/ عملکرد بهتر در بازه‌های بلند مدت‌تر در ترمی

۲-۱-۵ - معرفی اجمالی سازه‌های فلزی صنعت برق

بسیاری از سازه‌های صنعت برق به دلایلی نظیر سرعت مونتاژ، دسترسی به محل نصب، وزن کمتر در مقایسه با سازه بتنی متناظر و آرایش سازه‌ای خاص آن‌ها فولادی ساخته می‌گردند. عمده سازه‌های فولادی صنعت برق شامل اجزای اصلی و نگهدارنده نیروگاه‌های حرارتی، نظیر سازه نگهدارنده بویلر و لوله‌های انتقال، مخازن ذخیره سوخت و مخازن سوخت و سازه‌های نگهدارنده نیروگاه‌های هسته‌ای، برج‌های توربین‌های بادی، سازه‌های نگهدارنده نیروگاه‌های خورشیدی، دکل‌های انتقال برق، سازه‌های مختلف در پست‌های انتقال برق، پایه‌های توزیع و پست‌های توزیع هوایی می‌گردد.

۱-۲-۱-۵- استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات فلز در سازه‌های فلزی صنعت برق

عمده ضعف‌هایی که در سازه‌های فولادی دیده می شود، ناشی از پدیده خستگی سازه‌های فولادی تحت بارهای دائم دینامیکی، ترد شکن شدن ناحیه جوشکاری شده تحت اثر حرارت و خوردگی فلز می‌باشد. نانوتکنولوژی با استفاده از خواص ویژه مواد نانو ساختار توانسته این ضعف‌ها را بهبود بخشد و سبب افزایش عمر مفید سازه و سطح عملکرد بالاتری در سازه گردد. در جدول ۵-۳ مواد نانو ساختار مختلفی که در فرآیند تولید فولاد می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند را ارائه می‌کند.

جدول ۵-۳: مواد نانو ساختار مورد استفاده در روند تولید فولاد مصرفی در سازه‌های صنعت برق

مواد نانو ساختار	هدف از به کارگیری	محدودیت‌ها/ مزایا
نانو ذرات مس	افزایش مقاومت خستگی فلز	کاهش ناهمواری‌های سطح فولاد و کاهش نقاط تمرکز تنش
نانو ذرات منیزیم و کلسیم	کاهش ناحیه متأثر از حرارت جوش	افزایش سختی ناحیه اتصال (در نتیجه کاهش مصرف فولاد)
نانو ذرات کروم، نیکل و مس	مقاومت فولاد در برابر خوردگی و افزایش کیفیت سطح و شکل‌پذیری	افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته فولاد
نانو صفحات آستنتیت	بهبود مقاومت مکانیکی، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی	-

نانو ذرات وانادیم و مولیبدن	کاهش ترک‌های ناشی از خستگی، کاهش اثرات تردی هیدروژنی	بهبود ریزساختار پیچ‌های پر مقاومت فولادی

۳-۱-۵ - استفاده از مواد نانو ساختار برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی در بستر سازه‌های صنعت برق

همان‌طور که بیان شد سازه‌های صنعت برق گستره وسیعی از سازه‌های مختلف را در بر می‌گیرند که هر یک از این سازه‌ها به عنوان بخشی از زنجیره تولید، انتقال و توزیع اهمیت ویژه‌ای از لحاظ استراتژیک دارند. بر این اساس خصوصیات ژئوتکنیکی بستر سازه‌های صنعت برق و سازه‌های خاکی صنعت برق یکی از مهم‌ترین حوزه‌ها و با اهمیت‌ترین مسائلی است که در توسعه پایدار و قابلیت اطمینان سازه‌های صنعت برق باید مورد توجه قرار گیرد. مواد نانو ساختار با خصوصیات ویژه‌ای که دارند می‌توانند جهت بهسازی خاک بستر و یا معادن قرضه ساخت سدها و سازه‌های خاکی و پی‌سازی در انواع خاک‌ها برای سازه‌های وابسته به صنعت برق مورد استفاده قرار گیرند. در جدول ۵-۴ مواد نانو ساختار مختلفی که در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی بستر سازه‌های صنعت برق و همچنین سازه‌های خاکی صنعت برق می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند را ارائه می‌دهد.

جدول ۵-۴: مواد نانو ساختار مورد استفاده جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی بستر سازه‌های صنعت برق و همچنین سازه‌های خاکی صنعت برق

مواد نانو ساختار	نوع خاک	هدف از به کارگیری	مواد نانو ساختار مکمل	مواد مکمل	محدودیت‌ها/ مزایا
نانو رس	ماسه‌ای رس دار	افزایش دامنه خمیری	-	-	-
	ماسه‌ای لای‌دار/ رس دار	کاهش نفوذپذیری	-	-	-
	ماسه‌ای رس دار	افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک	-	-	-
	ماسه‌ای	افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری	-	-	-
	لای فاقد خصوصیات خمیری	افزایش دامنه خمیری	-	-	-
	لای بادرفت	افزایش مقاومت برشی	-	-	-
	لای بادرفت	افزایش چسبندگی	-	-	-
	رس	کاهش نفوذپذیری	-	-	-
	رس	کاهش تورم	-	-	-

	رس	افزایش وزن مخصوص حداکثر	-	-	-
	رس	کاهش رطوبت بهینه	-	-	-
	رس/ رس لای‌دار	کاهش واگرایی	-	-	-
	رس/ رس لای‌دار	کاهش رمبندگی	-	-	-
	رس	افزایش کرنش انبساطی و انقباضی	-	-	-
	رس	افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری	بدون و یا به همراه نانو سیمان	بدون و یا به همراه الیاف شیشه	
	آلی	کاهش وزن مخصوص	-	-	-
	آلی	افزایش درصد رطوبت بهینه	-	-	-
	لای	افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری	-	-	-
نانو سیلیس	ماسه‌ای	افزایش مقاومت برشی	-	-	-
	ماسه‌ای	افزایش چسبندگی	-	-	-
	ماسه‌ای	افزایش دانسیته		سیمان و الیاف	
	ماسه‌ای	کاهش فرسایش‌پذیری	-	-	-
	ماسه‌ای	کاهش میزان نشست	-	-	-
	ماسه‌ای	کاهش کرنش در حین بارگذاری دوره‌ای	-	-	-
	ماسه‌ای	افزایش میرایی	-	-	-
	ماسه‌ای	افزایش مدول برشی	-	بدون یا به همراه سیمان	-
	ماسه‌ای	افزایش پتانسیل جذب انرژی	-	سیمان و الیاف	-
	ماسه‌ای	افزایش سرعت امواج فراصوتی	-	سیمان و الیاف	-
	ماسه‌ای	افزایش مقاومت در برابر روانگرایی	-	-	-
	رس با خصوصیات خمیری زیاد	کاهش دامنه خمیری	-	بدون و یا به همراه آهک	-
	رس با خصوصیات خمیری کم	افزایش دامنه خمیری	-	بدون و یا به همراه سیمان	-
	رس	کاهش تورم	بدون و یا به همراه نانو زئولیت	بدون و یا به همراه آهک	-
	رس	کاهش واگرایی	-	-	-

	رس	افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری	بدون و یا به همراه نانو رس/ نانو فیبر پلی‌استر	بدون و یا به همراه سیمان/ الیاف پلی‌استر	-
	ماسه‌ای یا ماسه‌ای رس دار/ سیلتی	افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری	-	بدون و یا به همراه سیمان	-
	رس با پلاستیسیته کم	افزایش مقاومت برشی، مدول الاستیسیته و کرنش برشی	نانو فیبر پلی‌استر	-	-
	رس	افزایش مقاومت برشی	-	با یا بدون الیاف پلی‌استر	-
	رس	افزایش چسبندگی	-	الیاف پلی‌استر	-
	رس	افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک	-	الیاف پلی‌استر	-
	خاک رسی با خصوصیات خمیری زیاد	کاهش دامنه خمیری خاک	-	-	-
نانو آلومینا	خاک رسی با خصوصیات خمیری کم	افزایش دامنه خمیری خاک	-	-	-
	رس	کاهش نفوذپذیری	-	خاکستر لجن فاضلاب SSA و سیمان	-
	رس	کاهش تورم خاک	-	-	-
	رس	افزایش وزن مخصوص	-	-	-
	رس	کاهش رطوبت بهینه خاک	-	-	-
	رس	افزایش کرنش انبساطی و انقباضی	-	-	-
	رس	افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	-	-
	خاک رسی با خصوصیات خمیری زیاد	کاهش دامنه خمیری	-	-	-
نانو منیزیم	رس	کاهش تورم	-	-	-
	لای	افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	-	-

	رس	کاهش دامنه خمیری		بنتونیت	
نانو لوله‌های کربنی	رس	کاهش تورم خاک	-	-	-
	رس	افزایش وزن مخصوص حداکثر	-	الیاف کربنی	-
	رس	کاهش رطوبت بهینه	-	-	-
	رس	افزایش کرنش انبساطی و انقباضی خاک	-	-	-
		افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	-	-
	رس	افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	-	-
نانو اکسید آهن	رس	کاهش تورم خاک رسی	نانو سیلیس	-	تأثیر نانو اکسید آهن به تنهایی از نانو سیلیس بیشتر است
	رس	افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	-	-
نانو اکسید تیتانیوم	رس	افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	ضایعات فرش	-
نانو آهک	رس	افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	-	-
نانو زئولیت	رس	افزایش مقاومت فشاری تک محوری	-	-	-
نانو پلیمر	رس با پلاستیسیته بالا	افزایش مقاومت برشی	-	-	-

۴-۱-۵ - استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور پایش سلامت سازه‌های صنعت برق

وقوع خرابی و آسیب در هر سازه‌ای از جمله سازه‌های صنعت برق امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد، عواملی نظیر عمر مصالح، شرایط سخت محیطی، بارگذاری‌های خارج از محدوده طراحی، خستگی در اعضای سازه، موجب شروع ایجاد خرابی و آسیب در سازه‌ها می‌گردد. پایش سلامت سازه‌ها با بررسی وجود و یا عدم وجود آسیب در سازه‌ها امکان پیشگیری از گسترش خرابی را فراهم می‌آورد. پایش سلامت سازه‌ها با ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های صنعت برق، می‌تواند اهداف مهم استراتژیکی اقتصادی و توسعه پایدار سازه‌های صنعت برق، را تأمین کند. علم نانوتکنولوژی با تولید حسگرهایی از مواد نانو ساختار می‌تواند سبب تحولی عظیم در پایش سلامت سازه‌ها و همچنین سازه‌های صنعت برق گردد. مواد نانو ساختار با رویکردهای مختلفی در تولید حسگرها استفاده می‌گردند

که جدول ۵–۵ مواد نانو ساختار مختلف استفاده شده در ساخت حسگرهای مناسب برای پایش سلامت سازه‌ها را ارائه می‌دهد.

جدول ۵–۵: مواد نانو ساختار استفاده شده در ساخت حسگرهای مناسب برای پایش سلامت سازه‌ها

مواد نانو ساختار	رویکرد ساخت	هدف از به کارگیری	مزایا
نانو ذرات کربن کروی	کامپوزیت بتنی	تعیین شروع ترک‌خوردگی و سنجش کرنش در بتن	-
نانو لوله‌های کربنی	کامپوزیت سیمان	سنجش کرنش	پاسخ پیوسته و بدون از دست دادن داده فراهم می‌آورد
نانو لوله‌های کربنی چند جداره	در رزین اپوکسی	اندازه‌گیری کرنش و تنش المان تقویت‌شده توسط FRP در باند اتصال	داده‌برداری آسان، امکان استفاده آسان از آن در نقاط مختلف سازه
نانو صفحات گرافن	حسگر سیستم نانو الکترومکانیکال بر پایه نانو صفحات گرافن	اندازه‌گیری کرنش‌های در صفحه و خارج از صفحه	-
نانو لوله‌های کربنی چند جداره	حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT	شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه	امکان قرارگیری حسگر در المان‌های بتنی در هنگام بتن‌ریزی
نانو ذرات کربن سیاه	حسگر خازنی فیلم نرم الاستومری	تشخیص ترک‌های ناشی از خستگی سازه‌های فلزی در مراحل اولیه،	نصب آسان، امکان استفاده از آن به صورت شبکه‌ای از سنسورها
نانو لوله‌های کربن	حسگرهای کامپوزیت توزیع شده به همراه رزین اپوکسی و الیاف آرامید	تعیین محل آسیب و شدت آن	-
نانو ذرات کربن سیاه	حسگرهای کامپوزیت توزیع شده به همراه رزین اپوکسی و الیاف آرامید	تعیین محل آسیب و شدت آن	-
نانو صفحات گرافیت	حسگر کامپوزیت سیمان/ نانو صفحات گرافیت	سنجش تنش فشاری سیکلی تحت بارگذاری استاتیک و بارگذاری دینامیکی،	دامنه بارگذاری متفاوت، سرعت مختلف بارگذاری (در محدوده الاستیک کامپوزیت)

مواد نانو ساختار	رویکرد ساخت	هدف از به کارگیری	مزایا
نانو ذرات کربنی	حسگر سیمان مهندسی شده	سنجش کرنش و تعیین شروع ترک‌خوردگی	پایش سلامت سازه در ابعاد بسیار وسیع و گسترده

۵-۱-۵ - استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی صنعت برق

تغییرات در شرایط بارگذاری و سطح عملکردی، عدم طراحی صحیح سازه، اعمال بارهای ناخواسته، عمر مصالح و خستگی المان‌های سازه‌ای از جمله عواملی است که می‌تواند سبب روی آوردن به یکی از روش‌های مقاوم‌سازی برای حفظ قابلیت اطمینان در سازه‌های صنعت برق گردد. نانوتکنولوژی با استفاده از مواد نانو ساختار مختلف توانسته رزین‌های اپوکسی برای چسباندن ورق‌های FRP و یا تهیه کامپوزیت FRP مورد استفاده در مقاوم‌سازی را اصلاح کند. در جدول ۵-۶ مواد نانو ساختاری که در اصلاح رزین اپوکسی مورد استفاده قرار می‌گیرند را ارائه می‌دهد.

جدول ۵-۶: مواد نانو ساختار استفاده شده در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی صنعت برق

مواد نانو ساختار	رویکرد ساخت	هدف از به کارگیری	مزایا
نانو لوله‌های کربنی	اصلاح اپوکسی	جلوگیری از ایجاد مودهای شکست در باند اتصال FRP و بتن	استفاده از ظرفیت حداکثری FRP به دلیل عدم لغزش در باند اتصال FRP و بتن
نانو لوله‌های کربن چند جداره	اصلاح رزین اپوکسی مورد استفاده در ساخت GFRPها	بهبود رفتار برشی لرزه‌ای کامپوزیت GFRP در اتصال برشی	افزایش ظرفیت برشی استاتیکی پسالرزه‌ای، افزایش عمر ناشی از خستگی در GFRP
نانو رس	نانو کامپوزیت رس-اپوکسی به همراه CFRP	جلوگیری از خزش رزین اپوکسی	افزایش خصوصیات کششی، برش در صفحه و خمش NC-CFRP
نانو سیلیس	کامپوزیت نانو سیلیس و اپوکسی	بهبود ضعف اپوکسی در برابر نفوذ رطوبت	-

۶-۱-۵ - فهرست کلی از مواد نانو ساختار مورد استفاده در سازه‌های صنعت برق:

در ادامه فهرستی از مواد نانو ساختار معرفی شده که می‌تواند با اهداف مختلف در سازه‌های صنعت برق مورد استفاده قرار گیرد، ارائه می‌گردد.

- مواد نانو ساختاری که برای بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف بکار می‌رود:

(۱) نانو اکسید سیلیس،
(۲) نانو اکسید آلومینیوم،
(۳) نانو ذرات کربنات کلسیم،
(۴) نانو ذرات متاکائولن،
(۵) نانو ذرات اکسید گرافن،
(۶) نانو مواد کربنی (CNA) تولید شده از خاکستر سوختن روغن نخل و خاکستر پوسته برنج،
(۷) نانو ذرات اکسید آهن،
(۸) نانو اکسید زیرکونیوم،
(۹) نانو اکسید تیتانیوم،
(۱۰) نانو اکسید روی،
(۱۱) نانو رس،
(۱۲) نانو لوله‌های کربنی،
(۱۳) نانو الیاف سلولزی.

- مواد نانو ساختار مورد استفاده در روند خود ترمیمی سازه‌های بتنی صنعت برق:

(۱۴) نانو لوله‌های کربنی،
(۱۵) نانو اکسید سیلیس،
(۱۶) نانو رس،
(۱۷) نانو صفحات گرافیت،
(۱۸) نانو صفحات گرافن.

- مواد نانو ساختار مورد استفاده در روند تولید فولاد مصرفی در سازه‌های صنعت برق:

(۱۹) نانو ذرات مس،
(۲۰) نانو ذرات منیزیم و کلسیم،
(۲۱) نانو ذرات کروم، نیکل و مس،
(۲۲) نانو صفحات آستنتیت،
(۲۳) نانو ذرات وانادیم و مولیبدن،

- مواد نانو ساختار مورد استفاده جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی بستر سازه‌های صنعت برق و همچنین سازه‌های خاکی صنعت برق:

(۲۴) نانو رس،
(۲۵) نانو سیلیس،
(۲۶) نانو آلومینا،
(۲۷) نانو منیزیم،
(۲۸) نانو لوله‌های کربنی،
(۲۹) نانو اکسید آهن،
(۳۰) نانو اکسید تیتانیوم،
(۳۱) نانو آهک،
(۳۲) نانو آلومینا،
(۳۳) نانو زئولیت،
(۳۴) نانو پلیمر،

- مواد نانو ساختار استفاده شده در ساخت حسگرهای مناسب برای پایش سلامت سازه‌ها:

(۳۵) نانو ذرات کربن کروی،
(۳۶) نانو لوله‌های کربنی،
(۳۷) نانو لوله‌های کربنی چند جداره،
(۳۸) نانو صفحات گرافن،
(۳۹) نانو ذرات کربن سیاه،

- مواد نانو ساختار مورد استفاده شده در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی صنعت برق:

(۴۰) نانو لوله‌های کربن،
(۴۱) نانو لوله‌های کربن چند جداره،
(۴۲) نانو رس،
(۴۳) نانو سیلیس،

با استفاده از این فهرست کلی معرفی‌شده جدول ۵-**۷** موارد استفاده از مواد نانو ساختار را در سازه‌های مختلف بخش تولید صنعت برق ارائه می‌دهد، جدول ۵-۸ موارد استفاده از مواد نانو ساختار را در سازه‌های مختلف بخش انتقال صنعت برق ارائه می‌دهد و جدول ۵-۹ موارد استفاده از مواد نانو ساختار را در سازه‌های مختلف بخش توزیع صنعت برق ارائه می‌دهد.

جدول ۵-۷: پیشنهادات استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های مختلف بخش تولید صنعت برق

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
۱- نیروگاه حرارتی (بخار، گازی، هسته‌ای)	۱- دودکش و سازه نگهدارنده	۱- بتنی	(۱ –۹) و (۱۱-۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری،

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
				خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
		۲- فولادی	(۲۳-۱۹)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۷ و ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۲- مخزن زمینی و هوایی	۱- مخازن سوخت و آب بتنی	(۱ –۹) و (۱۱-۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
		۲- مخازن سوخت و آب فولادی	(۲۳-۱۹)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۷ و ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۳- سازه نگهدارنده بویلر	-	(۲۳-۱۹)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۷ و ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۴- برج خنک‌کننده	۱- بتنی	(۱ –۹) و (۱۱-۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
		۲- فولادی	(۲۳-۱۹)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۷ و ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۵- رآکتور هسته‌ای	-	(۲۳-۱۹)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۷ و ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۶- پوسته محافظ راکتور	-	(۱ –۹) و (۱۱-۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۷- فونداسیون سازه‌ها و تجهیزات	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۸- سازه‌های ساختمانی و نگهدارنده		(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری،

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
		۱- ساختمان کنترل		خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۲۳-۱۹)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
		۲- سازه نگهدارنده تجهیزات	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۲۳-۱۹)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۹- بستر سازه‌ها	-	(۲۴- ۳۴)	بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی
۲- نیروگاه برق‌آبی و تلمبه ذخیره‌ای	۱- سد	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
			(۲۴- ۳۴)	بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی
	۲- مخزن		(۱ –۹) و (۱۱-۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۸-۱۴)	خود ترمیمی بتن

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
			(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۳- سازه‌های ساختمانی و نگهدارنده	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۴- بستر سازه سد		(۲۴- ۳۴)	بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی
۳- نیروگاه (توربین) بادی	۱- پره‌ها و هاب	-	(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۲- اتاقک ناسل	-	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۳- برج نگهدارنده	۱- مشبک	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
		۲- لوله‌ای	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۷ و ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
		۳- بتنی	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۴- فونداسیون توربین	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۵- بستر سازه توربین	-	(۲۴- ۳۴)	بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی
۴- نیروگاه خورشیدی	۱- سازه‌های نگهدارنده پنل ها	-	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۷ و ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۲- سازه‌های ساختمانی	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
			(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
۵- نیروگاه زمین‌گرمایی	۱- دودکش	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۲- سازه‌های ساختمانی و نگهدارنده	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۳- فونداسیون سازه‌ها	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۴-بستر سازه	-	(۲۴- ۳۴)	بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی

جدول ۵-۸: : پیشنهادات استفاده از مواد هوشمند در سازه‌های مختلف بخش انتقال صنعت برق

سامانه	مؤلفه	توضیحات	مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
۱- پست	۱- سازه‌های نگهدارنده	-	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۲- فونداسیون سازه‌های نگهدارنده	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۳- بستر سازه‌های نگهدارنده	-	(۲۴- ۳۴)	بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی
۲- خط هوایی	۱- دکل	۱- مشبک	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد

سامانه	مؤلفه	توضیحات		مواد نانو ساختار	هدف از استفاده
				(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
				(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
		۲- تلسکوپی	۱- فولادی	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
				(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
				(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
			۲-بتنی	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
				(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
				(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
				(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۲- فونداسیون	-		(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
				(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
				(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
				(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
	۳- بستر سازه‌ها	-		(۲۴- ۳۴)	بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی
۳- خط زمینی	۱- منهول			(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
				(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن

جدول ۵–۹: پیشنهادات استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های مختلف بخش توزیع صنعت برق

سامانه	مؤلفه	توضیحات	پیشنهادات	هدف از استفاده
۱- پست زمینی و زیرزمینی	۱-ساختمان پست	-	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
۲-پست هوایی	۱- پایه[1]	-	-	-
	۲- سازه نگهدارنده ترانس	۱-اتصالات فلزی	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
۳- خط هوایی	۱- پایه	۱-بتنی	(۱ - ۱۳)	بهبود خصوصیات بتن تازه و خصوصیات دوام، نفوذپذیری، خزش و مقاومتی بتن در سنین مختلف
			(۱۴-۱۸)	خود ترمیمی بتن
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی
		۲- فولادی	(۱۹-۲۳)	بهبود مقاومت در برابر خستگی فولاد، کم شدن تأثیر کاهش سختی در اثر جوشکاری، و مقاومت در برابر خوردگی فولاد
			(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی

[1] پایه در پست و خطوط هوایی مشترک می‌باشد.

سامانه	مؤلفه	توضیحات	پیشنهادات	هدف از استفاده
		۴-کامپوزیت	(۳۵- ۳۹)	ساخت حسگر و پایش سلامت
			(۴۰- ۴۳)	مقاوم‌سازی

۵-۲- ارائه مزایا و معایب و همچنین محدودیت‌های به‌کارگیری مواد معرفی‌شده در بند (۵-۱)

ورود مواد نانو ساختار به کاربردهای مختلف مهندسی عمران نظیر تکنولوژی بتن، بهسازی خاک، مقاوم‌سازی سازه‌ها، مصالح خودترمیم، پایش سلامت سازه‌ها، فولاد و چوب مزایا، معایب و محدودیت‌هایی را به همراه داشته است. در فصل دوم کاربرد مواد نانو ساختار در هر یک از این زمینه‌ها به تفصیل بیان شده است، در ادامه مزایا، معایب و محدودیت‌های استفاده از این مواد را در هر یک از کاربردهای نام‌برده شده بیان می‌گردد.

۵-۲-۱ - مزایای استفاده از مواد نانو ساختار

۵-۲-۱-۱- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در بتن

افزودن مواد نانو در ساختار بتن، خمیرها، ملات‌ها و یا کامپوزیت‌های بتنی سبب رفتار مکانیکی ایده‌آل در آن‌ها شده‌اند و همچنین توانسته‌اند بتن با خواص جدیدی مثل مقاومت الکتریکی پایین، هوشمند بودن، خود تمیزکننده، خود ترمیم‌کننده و شکل‌پذیری بالا به وجود آورند. در ادامه مزایای به کاربرد بردن نانو مواد مختلف در ساختار خمیرها، ملات‌ها و یا کامپوزیت‌های بتنی بررسی ارائه می‌شود.

۵-۲-۱-۱-۱- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در کارایی و زمان گیرش بتن

افزایش میزان استفاده از نانو مواد (نانو سیلیس، نانو آلومینیوم و نانو رس) به دلیل سطح ویژه بالاتر و ریزدانه‌تر بودن، موجب کاهش کارایی و اسلامپ بتن و افزایش مصرف آب می‌گردد. البته در برخی از نانو مواد به دلیل کاهش فضای خالی بین ذرات سبب افزایش آب آزاد می‌گردند که این خود منجر به روانی خمیر می‌شود، در ادامه خصوصیات برتر هر از نانو مواد یا ترکیب آن‌ها در کارایی و زمان گیرش بتن شرح داده شده است.

کارایی بتن حاوی نانو ذرات سیلیس در صورتی‌که مقدار فوق روان‌کننده ملات در کمترین حد ممکن نگه داشته شود، کارایی بتن را بهبود می‌دهد. دلیل بهبود کارایی بتن، مربوط به شکل ذرات نانو سیلیکا است که عملکردی مشابه حرکت بلبرینگ در بین ذرات سیمان از خود نشان می‌دهند [۱, ۲]. افزودن نانو سیلیس تا ۳ درصد باعث افزایش نرخ مصرف CH در اثر افزایش نرخ واکنش‌های پوزولانی می‌شود [۳].

در خمیر سیمان تازه با نسبت آب به سیمان ۰/۴، افزودن ۰/۵ درصد نانو سیلیس موجب تراکم بهتر ذرات سیمان، کاهش فضای خالی بین آن‌ها و افزایش آب آزاد می‌گردد که این خود منجر به روانی خمیر می‌شود [۴].

بتن‌های حاوی مقادیر بالای سرباره به همراه مقادیر کم نانو ذرات سیلیس، کاهش مدت زمان غیرفعال واکنش سیمانی و شتاب‌دهی نرخ هیدراتاسیون سیمان و سرباره و در نتیجه کاهش زمان گیرش بتن‌ها را به همراه خواهند داشت [۵].

میزان کاهش اسلامپ بتن در اثر افزودن نانو سیلیس و نانو آلومینیوم بیشتر از نانو رس می‌باشد. دلیل این رفتار می‌تواند واکنش‌پذیری بالاتر نانو سیلیس و نانو آلومینیم با آب و فعال‌کننده‌های قلیایی باشد که موجب ایجاد یک لایه ضخیم از مواد به دور سنگ‌دانه می‌شود و در نهایت کارایی کاهش می‌یابد [۶]. افزودن نانو آلومینیوم زمان گیرش اولیه و نهایی بتن را کاهش می‌دهد، [۶] .

نانو ذرات کربنات کلسیم در حضور مقادیر بالای افزودنی‌های معدنی مانند سرباره کوره انفجاری موجب دیرگیری هیدراتاسیون می‌شود. با این حال بدون حضور مقادیر زیاد افزودنی‌های معدنی، این نانوذره سرعت واکنش را افزایش می‌دهد، [۷].

در سیمان‌های حاوی متاکائولن، با افزایش درصد متاکائولن، اسلامپ کمتر شده و زمان گیرش بتن افزایش می‌یابد، [۸] و [۹]. سیمان‌های معمولی به مراتب بیشتر از سیمان‌های متاکائولن‌دار نیاز به آب دارند، [۱۰].

جریان پذیری خمیر سیمان با افزایش درصد گرافن اکساید کاهش می‌یابد. به‌کارگیری ۰/۰۸ درصد گرافن اکساید موجب بهبود نرخ هیدراتاسیون می‌شود و این از طریق شتاب یافتن انحلال سیمان رخ می‌دهد در نتیجه کاهش زمان گیرش را به همراه خواهد داشت. همچنین پایگاه‌های هسته‌زایی بیشتر شده و ریزساختار خمیر سیمان منظم‌تر می‌گردد. افزودن نانو ذرات گرافن اکساید، بافت بتن تازه را متراکم‌تر کرده و افت آن را کاهش می‌دهد، [۱۱].

نانو مواد کربنی (CNA) تولید شده از خاکستر سوختن روغن نخل و خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین سیمان پرتلند تا ۰/۵ درصد، موجب افزایش مقاومت کوتاه مدت می‌گردد. این در حالی است که افزودن ۱ درصد از این مواد موجب افزایش مقاومت کوتاه مدت و نهایی می‌شود. افزایش میزان جایگزینی سیمان توسط CNA، موجب کاهش گسترش جریان می‌شود. دلیل این رویداد می‌تواند کمتر بودن ابعاد CNA در مقایسه با سیمان پرتلند باشد که موجب افزایش واکنش‌پذیری و فعالیت و در نتیجه کاهش کارایی می‌گردد، [۱۲].

- خلاصه‌ای از مهم‌ترین مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در کارایی و زمان گیرش بتن:

✓ حرکت بلبرینگی نانو سیلیس بین ذرات سیمان که سبب افزایش کارایی می‌گردد، (به‌اندازه ۰/۵ درصد وزنی سیمان) [۱, ۲].

✓ نانو سیلیس سبب کاهش فضای خالی بین ذرات و به تبع آن افزایش آب آزاد می‌شود که منجر به روانی خمیر سیمان می‌گردد، [۴].

✓ نانو سیلیس در بتن‌های حاوی مقادیر بالای سرباره سبب کاهش مدت زمان غیرفعال واکنش سیمانی و شتاب دهی نرخ هیدراتاسیون سیمان و سرباره و کاهش زمان گیرش می‌گردد، [۵].

✓ نانو سیلیس سبب افزایش کارایی بتن در صورت استفاده شدن به همراه میکرو سیلیس می‌شود، (هر دو به میزان ۵ درصد وزنی سیمان) [۱۳].

✓ افزودن نانو سیلیس تا ۳ درصد باعث افزایش نرخ مصرف CH در اثر افزایش نرخ واکنش‌های پوزولانی می‌شود، [۳].

✓ افزودن نانو آلومینیوم زمان گیرش اولیه و نهایی بتن را کاهش می‌دهد، [۶].

- ✓ نانو ذرات کربنات کلسیم در حضور مقادیر بالای افزودنی‌های معدنی مانند سرباره کوره انفجاری موجب دیرگیری هیدراتاسیون می‌شود (استفاده به میزان ۳/۲ ٪ وزنی سیمان، استفاده بیش از ۱۵٪ توصیه نشده است) [۷،۱۴].
- ✓ نانو ذرات کربنات کلسیم بدون حضور مقادیر زیاد افزودنی‌های معدنی، این نانوذره سرعت واکنش را افزایش می‌دهد (استفاده به میزان ۳/۲ ٪ وزنی سیمان)[۷،۱۴].
- ✓ با افزایش درصد متاکائولن در سیمان زمان گیرش بتن افزایش می‌یابد، [۸-۹].
- ✓ کاهش نیاز به آب سیمان‌های متاکائولن‌دار نسبت به سیمان‌های معمولی، [۱۰].
- ✓ به‌کارگیری ۰/۰۸ درصد گرافن اکساید موجب بهبود نرخ هیدراتاسیون می‌شود و این از طریق شتاب یافتن انحلال سیمان رخ می‌دهد در نتیجه کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه بتن را به همراه خواهد داشت، [۱۱].
- ✓ گرافن اکساید موجب پایگاه‌های هسته‌زایی بیشتر شده و ریزساختار خمیر سیمان منظم‌تر می‌گردد، [۱۱].
- ✓ افزودن نانو ذرات گرافن اکساید، بافت بتن تازه را متراکم‌تر کرده و افت آن را کاهش می‌دهد، [۱۱].
- ✓ نانو مواد کربنی (CNA) تولید شده از خاکستر سوختن روغن نخل و خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین ۱ درصد سیمان پرتلند موجب افزایش مقاومت کوتاه مدت و نهایی می‌گردد، [۱۲].
- ✓ استفاده ۰/۵ تا ۲ درصد نانو ذرات اکسید آهن سبب کاهش زمان گیرش می‌گردد، [۱۵-۱۶].
- ✓ استفاده ۱ تا ۴٪ نانو اکسید زیرکونیوم سبب افزایش سرعت گیرش اولیه می‌گردد، [۱۷].
- ✓ استفاده ۰/۵ تا ۲ درصد نانو اکسید تیتانیوم سبب تسریع گیرش بتن می‌گردد، [۱۸].

- محدودیت‌های استفاده از مواد نانو ساختار در کارایی و زمان گیرش بتن:

- ✓ واکنش‌پذیری بالای نانو سیلیس و یا نانو آلومینیوم با آب و فعال‌کننده‌های قلیایی موجب ایجاد یک‌لایه ضخیم از مواد به دور سنگ‌دانه می‌شود و در نهایت کارایی کاهش می‌یابد.
- ✓ افزایش میزان استفاده از نانو سیلیس به دلیل سطح ویژه بالاتر و ریزدانه‌تر بودن، موجب کاهش کارایی و اسلامپ بتن و افزایش مصرف آب می‌گردد.
- ✓ با افزایش درصد متاکائولن در سیمان، اسلامپ کمتر می‌شود، [۸-۹].
- ✓ افزایش درصد گرافن اکساید کاهش جریان‌پذیری خمیر سیمان را درپی خواهد داشت، [۱۱].
- ✓ به دلیل کمتر بودن ابعاد CNA در مقایسه با سیمان پرتلند، افزایش به‌کارگیری آن موجب افزایش واکنش‌پذیری و فعالیت و در نتیجه کاهش کارایی می‌گردد، [۱۲].

۲-۱-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در دوام و نفوذپذیری بتن

مواد نانو ساختار با بهبود تراکم بافت بتن می‌توانند سبب افزایش دوام و کاهش نفوذپذیری بتن در برابر عوامل مخرب گردند. استفاده از مواد نانو ساختار در مورد بهبود مسئله دوام و نفوذپذیری بتن به روش‌های مختلفی انجام می‌پذیرند، استفاده از نانو ذرات به روش مستقیم در طرح اختلاط بتن و یا به روش تزریق الکترومکانیکی نانو ذرات سیلیکا و یا روش کاربردی‌تری مانند تزریق یون‌های SiO_3^{-2} به روش پوشش گرافیت-خمیر سیمانی به عنوان آنود،

که با نفوذ نانو ذرات در سطح بتن، لایه‌ای محافظ به ضخامت ۱/۵ تا ۲ میلی‌متر تشکیل می‌دهند [۱۹-۲۱]. کاهش نفوذپذیری بتن در محیط‌های اسیدی، قلیایی و یا محیط‌هایی که یون کلر وجود دارد و یا در برابر سیکل‌های یخ‌زدگی سبب افزایش دوام بتن می‌گردد. که در ادامه تأثیر استفاده هر یک از مواد نانو ساختار بر نفوذپذیری و دوام بتن ارائه می‌گردد.

چنانچه در محیط‌هایی که باران اسیدی وجود دارد، از نانو سیلیس تا ۶ درصد وزنی سیمان در بتن استفاده شود علاوه بر اینکه سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد، به دلیل خاصیت ریز پرکنندگی از میزان افزایش جذب آب در اثر افزایش میزان اسیدی بودن باران می‌کاهد.

نانو سیلیس با بهبود ویژگی‌های ناحیه انتقال از شسته شدن محصولات سیمانی و خردگی بتن جلوگیری می‌نماید. از سوی دیگر به دلیل کاهش نفوذپذیری بتن حاوی نانو سیلیس، سیال اسیدی به میزان کمتری در نمونه نفوذ کرده و در نتیجه مقاومت خردگی افزایش می‌یابد، [۲۲]. تخلخل بتن در اثر افزودن نانو سیلیس و میکرو سیلیس کاهش چشمگیری می‌یابد. ترکیب میکرو سیلیس و نانو سیلیس به دلیل پر نمودن میکرو حفرات و نانو حفرات موجب کاهش ضریب جذب موئینه می‌گردد، تأثیر استفاده از نانو سیلیس در کاهش جذب موئینه بیشتر می‌باشد. کاهش میزان ضریب جذب موئینه باعث می‌شود تا نمونه در مقابل سیکل‌های یخ‌زدگی مقاومت بهتری از خود نشان دهد. در نهایت می‌توان گفت استفاده توأم از نانو سیلیس و میکرو سیلیس موجب دستیابی به رفتار بهینه از دیدگاه مقاومت و دوام را نتیجه می‌دهد، [۲۳].

در محیط‌هایی که یون کلر وجود دارد، نرخ عبور و عمق نفوذ فیزیکی در نمونه‌های بتنی حاوی نانو سیلیس بسیار کاهش می‌یابد، [۳]. به‌کارگیری مقادیر اندکی از نانو سیلیس، هدایت‌پذیری را کاهش داده و بافت تخلخل بتن را به خوبی ترمیم می‌کند. بیشترین تأثیر در بهبود ساختار بافت را به‌کارگیری ۶ درصد نانو سیلیس به همراه دارد.

دوام نمونه‌های بتنی خودتراکم حاوی نانو ذرات سیلیس و تیتانیوم، نمونه حاوی ۵٪ مجموع نانو سیلیس و تیتانیوم (هرکدام ۲,۵٪ وزنی خمیر سیمان) کمترین مقدار نفوذ یون کلر را دارد. به‌علاوه نمونه‌های حاوی ۳٪ مجموع نانو سیلیس، تیتانیوم و آلومینیوم (هرکدام ۱٪ وزنی خمیر سیمان) بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی و در نتیجه کمترین احتمال خوردگی را دارند، [۲۴].

در محیط‌هایی که سولفات به دو شکلِ داخلی و خارجی (داخلی یعنی استفاده از ماسه‌های حاوی یون‌های سولفات و خارجی یعنی قرارگیری در محلول‌های منیزیم سولفات و سدیم سولفات) وجود دارد، دوام نمونه‌های حاوی نانو سیلیس بسیار بیشتر از نمونه‌های حاوی میکرو سیلیس، خاکستر بادی و متاکائولن است [۲۵].

میزان جذب آب ملات‌های بتنی حاوی نانو ذرات تیتانیوم با حداکثر جایگزینی ۲٪ سیمان موجب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود، نانو ذرات تیتانیوم می‌توانند ریزساختار بافت بتن را متراکم سازند و بستری برای هسته‌زایی بیشتر باشند، [۲۶].

نفوذ کلراید در بتن‌های تقویت شده با متاکائولن در مقایسه با بتن‌های معمولی کاهش زیادی می‌یابد، [۲۷]. با افزایش درصد استفاده متاکائولن از ۰ تا ۲۰ درصد در بتن، نرخ انتشار کلراید در بتن کاهش می‌یابد به طوری‌که در تحقیقات نشان داده شده است که در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد متاکائولن حتی پس از ۱ سال نیز هیچ‌گونه انتشاری رخ نداده است، [۲۷-۲۸].

افزودن نانو ذرات متاکائولن به ملات سیمانی مقاومت شیمیایی این ترکیب‌ها را در مقایسه با نمونه‌های مرجع نسبت به سولفات بالا می‌برد[۲۹-۳۱].

در روزهای اولیه عمر بتن با افزایش متاکائولن، مقدار افت کاهش می‌یابد، [۸]. از طرفی متاکائولن خزش بتن را به‌خصوص در مقادیر جایگزینی زیاد با سیمان معمولی، کاهش می‌دهد. دلیل این اتفاق مربوط به متراکم شدن ساختار بتن در اثر خاصیت پرکنندگی متاکائولن و بهبود ریزساختار فصل مشترک خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها ناشی از فعالیت پوزولانی متاکائولن و افزایش مقدار فاز هیدراته سیمان است، [۸].
استفاده از نانو لوله‌های کربنی چند جداره، تخلخل حجم نمونه سیمانی را کاهش می‌دهد، [۳۲]. در نتیجه حضور این الیاف توانسته حفرات ساختار خمیر سیمان را پر کرده و بافت را متراکم سازد، [۳۳].
در خصوص جذب تشعشعات پرتوهای نوترون و گاما میکرو مواد و نانو مواد در بتن موجب افزایش پتانسیل جذب تشعشعات می‌گردد. از سوی دیگر نانو مواد در مقایسه با میکرو مواد به دلیل خصوصیات ریز پرکنندگی و ایجاد هسته‌های پایدار برای فرآورده‌های هیدراسیون موجب افزایش بیشتر جذب تشعشعات می‌گردد، [۳۴].
در جذب تشعشعات گاما افزودن WO_3 و Bi_2O_3 در ابعاد میکرو و نانو در تمامی انرژی‌های فوتون موجب افزایش جذب امواج می‌گردد. همچنین افزودن نانو مواد تأثیر بیشتری بر پتانسیل جذب تشعشعات دارد، تأثیر افزودن Bi_2O_3 در میزان جذب تشعشعات گاما بیشتر از افزودن WO_3 می‌باشد، [۳۵].

- خلاصه‌ای از مهمترین مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در دوام و نفوذپذیری بتن:

✓ استفاده از نانو اکسید سیلیس سبب کاهش میزان ضریب جذب موئینه می‌شود و نمونه در مقابل سیکل‌های یخزدگی مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد، [۲۲].
✓ استفاده ۶٪ نانو اکسید سیلیس هدایت‌پذیری یون کلر را کاهش داده و بافت تخلخل بتن را به خوبی ترمیم می‌کند، [۳].
✓ استفاده ۶٪ نانو اکسید سیلیس سبب بهبود ریزساختار و پرشدگی بافت بتن می‌گردد، [۳].
✓ استفاده ۶٪ نانو اکسید سیلیس سبب افزایش مقاومت در برابر باران اسیدی می‌گردد، [۲۲].
✓ استفاده ۸٪ نانو اکسید سیلیس تأثیر بسیار زیاد در مقاومت در برابر حمله سولفاتی (۲ تا ۱۰ درصد مؤثرتر از تأثیر میکرو سیلیس) دارد، [۲۵].
✓ بتن ساخته شده با استفاده از نانو اکسید سیلیس به همراه ۱٪ تیتانیوم و ۱٪ آلومینیوم، بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی و کمترین احتمال خوردگی را میتواند داشته باشد، [۲۴].
✓ استفاده ۲٪ وزنی نانو اکسید سیلیس جایگزین سیمان، ۹۰٪ کاهش نفوذپذیری را در پی خواهد داشت، [۳۶].
✓ استفاده ۲/۵ ٪ وزنی نانو اکسید سیلیس به همراه ۲/۵ ٪ نانواکسید تیتانیوم در بتن، حداقل مقدار نفوذ یون کلر را درپی خواهد داشت [۲۳-۲۴].
✓ با افزودن ۰/۲ درصد نانو سیلیس میزان واکنش قلیایی سیلیسی بتن تا ۶۷ درصد کاهش می‌یابد [۳۷].
✓ استفاده از ۱٪ نانو اکسید آلومینیوم سبب بهبود ریزساختار بافت بتن خواهد شد، [۳۸].
✓ استفاده از ۵٪ نانو اکسید آلومینیوم سبب افزایش تراکم بافت بتن و کاهش تخلخل خواهد شد [۳۸].
✓ استفاده از ۰/۵ تا ۲٪ نانو اکسید آهن سبب کاهش نفوذپذیری آب، کاهش سرعت جذب و کاهش ضرایب جذب آب در تمامی سنین بتن می‌گردد، [۱۵].

- ✓ افزایش ۰٪ تا ۴٪ نانو اکسید آهن در بتن کاهش نفوذپذیری بتن و متراکم شدن بافت آن را در پی خواهد داشت، [۳۹].
- ✓ بهینه‌ترین مقدار نانو اکسید آهن برای بهبود ریزساختار و مقاومت کامپوزیت سیمانی ۳٪ می‌باشد،
- ✓ همان‌طور که در جدول ۵ ۱۲ مشاهده می‌شود بتن سنگین پرمقاومت هم هزینه بیشتری دارد و هم در عین حال درآمد حاصل از فروش ساختمان ساخته‌شده با این نوع بتن بیشتر است و در نهایت مشاهده می‌شود که در این مثال صرفه اقتصادی آن ۴۴/۵ درصد است.
- ✓ در شکل ۵ ۴ و شکل ۵ ۵ به ترتیب رابطه بین صرفه اقتصادی و مساحت ساختمان و همچنین رابطه بین صرفه اقتصادی و تعداد طبقات محاسبه و نمایش داده شده است، [۴۰].
- ✓ با افزایش میزان استفاده نانو اکسید روی از ۰/۵ تا ۲٪ تراکم بافت بتن افزایش و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد، [۴۱].
- ✓ با افزایش میزان استفاده نانو اکسید زیرکونیم از ۰/۵ تا ۲٪ تراکم بافت بتن افزایش و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد، [۴۲].
- ✓ استفاده ۴ درصدی از نانو اکسید زیرکونیم سبب بهبود ریزساختار بتن می‌گردد، [۴۳].
- ✓ استفاده ۲/۵ درصدی از نانو کربنات کلسیم سبب متراکم شدن بافت بتن و مصرف بیشتر کریستال‌های هیدروکسی کلسیم می‌گردد، [۱۴].
- ✓ استفاده تا ۲٪ از نانو اکسید تیتانیوم سبب بهبود ریزساختار بتن و همچنین ملات‌های سیمانی می‌گردد، [۲۶،۴۴].
- ✓ استفاده ۱ درصدی از نانو اکسید منیزیم سبب افزایش تراکم بافت کامپوزیت‌های سیمانی می‌گردد، [۴۵].
- ✓ استفاده ۱ تا ۹ درصدی نانو اکسید منیزیم سبب افزایش مقاومت محلول و مقاومت گذردهی یون می‌گردد، [۴۶].
- ✓ استفاده ۲۰ درصدی نانو رس سبب عدم مشاهده انتشار یون کلراید حتی پس از یک سال گشته و برای نرخ‌های پایین‌تر مصرف نانو رس کاهش نرخ نفوذ یون کلر مشاهده می‌شود، [۴۷].
- ✓ استفاده ۱۰ درصدی نانو رس سبب افزایش مقاومت سولفاتی بتن می‌گردد، [۳۱].
- ✓ استفاده ۵ تا ۱۵ درصدی نانو رس سبب کاهش خزش بتن و کاهش افت کوتاه مدت خواهد شد [۸].
- ✓ نانو لوله‌های کربنی با درصد وزنی ۰/۰۲ سیمان سبب بهبود ریزساختار و افزایش تراکم بتن می‌گردد، [۴۸]. (افزودن بیش از ۰/۰۲ ٪ موجب کلوخه شدگی الیاف شد).
- ✓ استفاده ۰/۵ درصدی نانو لوله کربنی سبب کاهش ۲ درصدی تخلخل سیمانی می‌گردد، [۳۲].
- ✓ استفاده ۱ درصدی نانو لوله کربنی سبب افزایش تراکم بافت بتن و کاهش ۵ درصدی تخلخل بتن می‌گردد، [۴۹].
- ✓ استفاده نانو اکسید گرافن به میزان ۰/۰۳ درصد وزنی سیمان سبب ۱۳/۵ درصد کاهش تخلخل و ۲۷/۷ درصد کاهش منافض موئینه می‌گردد، [۵۰].
- ✓ استفاده نانو اکسید گرافن به میزان ۰/۰۸ درصد وزنی سیمان سبب کاهش افت بتن و افزایش تراکم می‌گردد، [۱۱].

۳-۱-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مقاومت مکانیکی بتن

نانو ذرات مختلف تأثیر متفاوتی را بر مقاومت مکانیکی بتن می‌گذارند، آن‌ها با ویژگی پرکنندگی نانو حفرات بتن، ورود به واکنش‌های هیدراتاسیون و تسریع آن، و یا ایجاد پایگاه‌های هسته‌زایی سبب بهبود مقاومت مکانیکی بتن می‌گردند. در ادامه تأثیر هر یک از نانو ذرات را بر مقاومت مکانیکی بتن شرح داده‌شده است.

نانو ذرات سیلیکا نه‌تنها به عنوان پرکننده در بهبود ساختار عمل می‌کنند، بلکه به نوعی شروع‌کننده فعالیت‌های پوزولانی بتن نیز به شمار می‌رود، [۵۱]. نانو سیلیس به دلیل واکنش‌پذیری بالا و فعالیت زیاد، به سرعت در واکنش‌ها شرکت می‌نماید و موجب تسریع واکنش‌های هیدراتاسیون می‌گردد، [۳]. البته چنانچه نحوه پراکنش نانو ذرات سیلیکا به درستی صورت نپذیرد سبب کاهش مقاومت مکانیکی بتن می‌گردد، [۵۲]. افزودن درصدهای بهینه نانو ذرات سیلیکا سبب افزایش مقاومت فشاری بتن تا ۴۹٪، مقاومت خمشی تا ۵۵٪ و مقاومت کششی بتن تا ۳۷٪ می‌گردد.

نانو ذرات آلومینات با پخش‌شدگی یکسان نانو ذرات در درصد بهینه‌ای سبب بهبود ریزساختار بتن می‌شود، [۳۸]. با افزودن نانو ذرات آلومینیوم ریزساختار بتن و ناحیه بین بافتی سیمان و سنگ‌دانه‌ها، متراکم‌تر شده و تخلخل این ناحیه کاهش می‌یابد، [۵۳]. نانو ذرات اکسید آلومینیوم در مخلوط بتن باعث افزایش قابل‌ملاحظه در مدول الاستیسیته بتن می‌گردد، با افزودن ۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم، مدول الاستیسیته بتن تا ۱۴۳ درصد افزایش پیدا می‌کند ولی تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت فشاری بتن نمی‌گذارد، [۵۴].

استفاده از نانو ذرات اکسید آهن در ملات سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی و همچنین عامل ایجاد قابلیت خودپایش (هوشمند بودن[۱]) بتن می‌گردد، [۵۴]. نانو ذرات آهن به عنوان پایگاه‌های هسته‌زایی خارجی می‌توانند موجب تسریع تشکیل ژل C-S-H گردیده و در نتیجه مقاومت نمونه را بالا ببرد. همچنین این ذرات قادرند تا به شکل نانو پرکننده رفتار کرده و با کاهش حفرات، بافت بتن را بهبود دهند، [۳۹].

اثر نانواکسید روی در بتن، موجب کندگیری و حتی کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی می‌شود، [۵۵- ۵۶]. این نانو ساختار، مقاومت فشاری خمیرها را در سنین پایین دچار کاهش می‌کند؛ با این حال این اثر کاهشی با افزایش سن نمونه‌ها کم رنگ‌تر می‌شود. همچنین با افزایش این مقدار تا ۵ درصد وزنی و بیشتر از آن، هیدراتاسیون به طور کامل متوقف شده و ژل C-S-H تشکیل نمی‌شود.

استفاده از نانواکسید زیرکونیم تا حد ۴٪ وزنی از سیمان، باعث بهبود مقاومت مکانیکی و متراکم‌شدگی بافت بتن خود تراکم پرمقاومت می‌گردد. همچنین گیرش اولیه بتن حاوی نانواکسید زیرکونیوم به دلیل تشکیل بیشتر کریستال‌های کلسیم هیدروکسید، ژل بیشتر تشکیل‌شده و در نهایت مقاومت بالاتر به دست می‌آید [۱۷].

شتاب واکنش‌های سیمانی با حضور نانو کربنات کلسیم افزایش می‌یابد. همچنین این ماده مدت انفعال واکنشی C_3S را کاهش می‌دهد. دلیل این نوع افزایش سرعت، واکنشی وابسته به شکسته شدن لایه محافظ هیدراتاسیون C_3S و یا افزایش هسته‌زایی محلول پر از یون خمیر سیمان است. افزودن این ماده موجب متراکم‌سازی بافت ماده و مصرف بیشتر کریستال‌های هیدروکسید کلسیم می‌گردد، [۵۷-۵۸].

نانو تیتانیوم در حین فرایند هیدراتاسیون سیمان حالتی ساکن (غیرفعال) و پایدار دارد. با این حال، با افزون مقدار اندکی نانو ذرات تیتانیوم، درجه هیدراتاسیون خمیر سیمان به‌خصوص در سنین اولیه به‌شدت زیاد می‌شود. نانو

[۱] Self-Sensing

ذرات تیتانیوم، خود در واکنش شرکت نکرده و تنها به دلیل ساختار نانویی خود بافت خمیر سیمان را متراکم کرده و بستری برای هسته‌زایی محصولات هیدراتاسیون ایجاد می‌کند؛ در نتیجه تخلخل مجموع، با به‌کارگیری نانو تیتانیوم کاهش می‌یابد. همچنین تأثیرات این ماده بر نرخ هیدراتاسیون سیمان، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات سیمانی را نیز تغییر می‌دهد. علاوه بر این، نانو ذرات کوچک‌تر تیتانیوم نیاز به آب را بیشتر و زمان گیرش اولیه را کوتاه‌تر کرده و موجب افزایش مقاومت فشاری ملات به‌خصوص در سنین اولیه می‌شوند، [۴۴]. استفاده از نانو ذرات تیتانیوم سبب افزایش مقاومت کششی جداشدگی بتن می‌گردد، [۱۸, ۵۹].

اثر افزودن نانو ذرات منیزیم به کامپوزیت‌های بتنی سبب افزایش مقاومت خمشی و فشاری تمامی نمونه‌های سیمانی حاوی ۱٪ نانو ذرات منیزیم، می‌گردد. افزودن نانو ذرات منیزیم بیش از ۱٪، مقاومت مکانیکی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. نانو اکسید منیزیم، پتانسیل بالایی در کاهش نفوذپذیری کامپوزیت‌های سیمانی دارد. از سوی دیگر افزایش مقدار نانواکسید منیزیم، باعث افزایش بیشتر از حد حجم نمونه شده و بنابراین مقاومت در برابر سولفات را کاهش می‌دهد. عکس‌های میکروسکوپی نشان دادند که به‌کارگیری این نانوذره، بافت ملات سیمانی را به دلیل اثر انبساطی نانواکسید منیزیم، متراکم‌تر و همگن‌تر کرده است، [۴۵].

مقاومت‌های خمشی و کششی بتن‌های حاوی متاکائولن با افزایش درصد متاکائولن افزایش می‌یابد، [۶۰].

افزودن نانو لوله‌های کربنی تک جداره و یا چند جداره به سیمان، مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی را تا حدی بهبود می‌دهند، [۴۹،۳۳]. همچنین افزایش مقاومت ناشی از افزودن نانو لوله‌های کربنی، افت مقاومتی را که در اثر به‌کارگیری خاکستر بادی در طرح اختلاط ایجاد می‌کند، را به کلی برطرف می‌نماید.

افزودن هم‌زمان نانو لوله‌های کربنی چند جداره و نانو رس، سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها ماتریس سیمانی می‌گردد البته با افزایش مقدار نانو لوله‌های کربنی تا مقدار ۰/۰۲ درصد وزنی سیمان، روند افزایشی در مقاومت فشاری حفظ می‌شود و پس از آن شروع به افت می‌کند. دلیل این بهبود مقاومت را می‌توان متراکم شدن ریزساختار ماتریس سیمان به دلیل اثر پرکنندگی نانو ذرات رس و همچنین اثر واکنشی پوزولانی عناصر سیلیسی و آلومیناتی رس با کلسیم هیدروکسید سیمان دانست. همچنین اتصال الیاف کربن به محصولات هیدراته سیمان موجب جلوگیری از گسترش ریزترک‌ها شد. با این حال افزایش الیاف کربن به بیش از ۰/۰۲ درصد موجب شد تا الیاف کربنی کلوخه شده و هیدراتاسیون دانه‌های سیمانی به طور کامل انجام نشود. در این صورت محصولات هیدراته سیمان نیز اتصال مناسبی به هم پیدا نمی‌کنند.

افزودن نانو الیاف کربنی چند جداره، همچنین سبب بهبود مدول الاستیسیته ملات‌های سیمانی می‌گردند[۶۱-۶۲].

نانو الیاف سلولزی قابل استخراج از گیاهان چوبی و غیرچوبی شامل مزایای زیادی همچون دانسیته کم، قابلیت دسترسی بالا، تجدید پذیری و ویژگی‌های مکانیکی مناسبی در مقایسه با فیبرهای مصنوعی می‌باشند. حضور گروه‌های قطبی هیدروکسیل در نانو الیاف سلولزی سبب ایجاد آب‌دوستی شدید و پراکندگی غیریکنواخت آن‌ها در محیط‌های غیر قطبی می‌شود. برخلاف پلیمرهای دارای بنیان نفتی که از منابع نفتی محدود در جهان ساخته می‌شوند، نانو الیاف سلولز یک ماده تجدیدپذیر است. مسلح شدن بتن با نانو الیاف سلولزی سبب بهبود ضعف بتن در مقاومت کششی و شکست ترد می‌شود، [۶۳].

استفاده از الیاف نانو پلی‌پروپیلن یکی از راه کارهای کاهش پتانسیل خطر ترک‌خوردگی خمیری و کاهش عرض ترک‌های محتمل (بخصوص در سرریز سدها) می‌باشد، [۶۴].

استفاده از گرافن اکساید در ماتریس سیمانی به مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی سبب افزایش مقاومت خمشی در حدود ۵۰٪ و افزایش مقاومت فشاری در بازه ۱۵ تا ۳۳٪ می‌شود، [۶۵،۵۰]. در رفتار تنش کرنشی کامپوزیت‌های حاوی گرافن اکساید، منحنی سختی وسیع‌تر شده و خود باعث کمتر شدن احتمال شکست ناگهانی نمونه می‌شود. همچنین نمونه‌های خمیر سیمانی با عمر ۲۸ روز و حاوی ۰/۰۴ درصد گرافن اکساید، ۱۴٪ افزایش در مقدار مقاومت فشاری از خود نشان می‌دهند، [۶۶]. نانو صفحات گرافن اکساید می‌توانند با تشکیل محصولات هیدراته میله‌ای و سوزنی شکل و تبدیل آن‌ها به ساختارهای منظم چندوجهی و همچنین متراکم‌سازی نهایی بافت خمیر را بهبود بخشند. که این خود سبب می‌شود تا خصوصیات مکانیکی مثل مقاومت خمشی و فشاری و خواص مدول یانگ و خصوصیات دینامیکی خمیرهای سیمانی در اثر به‌کارگیری این نانو ساختار به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داشته باشد، [۶۷، ۶۸].

- خلاصه‌ای از مهمترین مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در بهبود مقاومت فشاری بتن:

✓افزودن نانو اکسید سیلیس به میزان ۰/۴ درصد وزنی به همراه ۱۰ درصد خاکستر بادی و ۰/۱۶ درصد الیاف پروپیلن و ۱/۲۵ درصد الیاف فولادی سبب افزایش ۲۴ درصدی مقاومت فشاری می‌گردد، [۶۹].

✓افزودن ۱ تا ۶٪ وزنی نانو اکسید سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری بین ۸ تا ۱۴۲٪ می‌گردد [۷۰-۵۱،۷۴].

✓افزودن ۱ تا ۳٪ وزنی نانو اکسید آلومینیوم سبب افزایش مقاومت ۹ تا ۳۳٪ می‌گردد [۷۵،۵۴،۳۸].

✓افزودن ۱ تا ۳٪ وزنی نانو اکسید آهن سبب بهبود مقاومت فشاری می‌شود [۱۵،۱۶،۴۰،۷۶،۵۴].

✓افزودن ۱ تا ۴٪ نانو اکسید زیرکونیوم سبب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد [۱۷]، (۱۵٪ افزایش مقاومت فشاری برای ۳٪ وزنی [۷۷]).

✓افزودن ۱ تا ۱۰٪ وزنی نانو کربنات کلسیم سبب افزایش مقاومت کوتاه مدت و همچنین افزایش مقاومت در بازه ۱۳ تا ۱۶۹٪ می‌شود.

✓افزودن ۱ تا ۱۰٪ وزنی نانو اکسید تیتانیوم سبب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد، [۵۹،۱۸، ۷۸].

✓افزودن ۱ درصد وزنی نانو اکسید منیزیم سبب افزایش ۸۰ تا ۱۰۳٪ مقاومت فشاری می‌گردد، [۴۵].

✓افزودن نانو رس سبب افزایش مقاومت فشاری دراز مدت می‌شود (درصد وزنی ۵ تا ۲۰٪ مورد استفاده قرارگرفته است) [۸-۱۰] و [۴۷].

✓افزودن ۰/۰۲ تا ۲ درصدی نانو لوله‌های کربنی سبب افزایش ۱۹ تا ۳۵٪ مقاومت فشاری می‌شود [۷۹،۸۰،۳۳].

✓افزودن ۰/۱۵ درصدی نانو الیاف سلولزی سبب افزایش ۲۰٪ مقاومت فشاری می‌شود [۶۳].

✓افزودن ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ درصد نانو اکسید گرافن سبب افزایش ۱۵ تا ۵۹ درصدی مقاومت فشاری می‌گردد، [۶۵-۶۸].

- خلاصه‌ای از مهمترین مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در بهبود مقاومت خمشی بتن:

✓ افزودن ۲ تا ۴ درصدی نانو اکسید سیلیس سبب افزایش ۲ تا ۴ درصدی مقاومت خمشی می‌گردد، [۷۲،۷۴،۲۵].

✓ افزودن نانو اکسید آلومینیوم سبب افزایش مقاومت خمشی می‌گردد، [۶].

- ✓ افزودن نانو اکسید آهن سبب افزایش مقاومت خمشی می‌گردد، [۸۱].
- ✓ افزودن ۰ تا ۴ درصد نانو اکسید زیرکونیوم سبب افزایش مقاومت خمشی تا ۳۵٪ می‌گردد و با استفاده درصدهای بالاتر از ۴ از نانو ذرات کاهش مقاومت خمشی مشاهده می‌گردد، [۷۷،۱۷].
- ✓ افزودن ۱٪ نانو کربنات کلسیم سبب افزایش مقاومت خمشی می‌شود و افزودن بیش از ۱٪ از این نانوذره غیر مؤثر است، [۸۲].
- ✓ افزودن ۱٪ نانو اکسید تیتانیوم سبب افزایش مقاومت خمشی می‌گردد [۵۹].
- ✓ افزودن ۱٪ نانو اکسید منیزیم سبب افزایش ۷۰٪ مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن می‌شود [۴۵].
- ✓ افزودن نانو مقادیر ۱۰ و ۱۵٪ نانو رس سبب افزایش ۳۲ و ۳۸ درصدی مقاومت خمشی بتن می‌گردد، افزودن ۵٪ نانو رس در مقاومت خمشی بتن چندان مؤثر نمی‌باشد.
- ✓ افزودن ۰/۰۲ تا ۲٪ نانو لوله‌های کربنی سبب افزایش ۱۳ تا ۲۷۰٪ مقاومت خمشی بتن می‌گردد (افزودن ۰/۲ درصد نانو لوله کربنی ۲۷۰ درصد مقاومت خمشی نمونه بتنی ۲۸ روزه را افزایش داد [۸۳].) [۶۲ ،۸۰،۷۹،۸۴،۶۱].
- ✓ افزودن ۰/۱۵ درصدی نانو الیاف سلولزی سبب افزایش ۱۵٪ مقاومت خمشی بتن می‌گردد، [۶۳].
- ✓ افزودن ۰/۰۶ درصدی نانو اکسید گرافن سبب افزایش ۶۸٪ مقاومت خمشی بتن می‌گردد، [۶۸].

- خلاصه‌ای از مهمترین مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در بهبود مقاومت کششی بتن:
- ✓ افزودن ۲٪ نانو اکسید سیلیس سبب افزایش ۳۷/۵ درصد مقاومت کششی بتن می‌شود، [۷۳].
- ✓ افزودن ۱٪ نانو اکسید آلومینیوم سبب افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود، [۳۸،۶].
- ✓ افزودن ۱ تا ۴٪ نانو اکسید آهن سبب افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود، [۳۹].
- ✓ افزودن ۳٪ نانو اکسید زیرکونیوم سبب افزایش ۱۷٪ مقاومت کششی بتن می‌شود، [۷۷].
- ✓ افزودن ۰/۵ تا ۲٪ نانو اکسید تیتانیوم سبب افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود، [۵۹،۱۸].
- ✓ افزودن ۰/۰۳ درصدی نانو اکسید گرافن سبب افزایش ۴۰٪ مقاومت کششی بتن می‌شود، [۵۰].

- محدودیت‌های استفاده از مواد نانو ساختار بر خصوصیات مقاومتی:
- ✓ افزودن نانو ذرات منیزیم بیش از ۱٪، مقاومت مکانیکی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.
- ✓ افزایش مقدار نانواکسید منیزیم به‌منظور افزایش مقاومت مکانیکی، باعث افزایش بیشتر از حد حجم نمونه شده و بنابراین مقاومت در برابر سولفات را کاهش می‌دهد.
- ✓افزودن ۱ تا ۲٪ وزنی نانو اکسید روی کندگیری کاهش مقاومت فشاری را به همراه دارد، [۴۱].
- ✓ افزایش الیاف کربن به بیش از ۰/۰۲ درصد به منظور افزایش مقاومت مکانیکی موجب می‌شود تا الیاف کربنی کلوخه شده و هیدراتاسیون دانه‌های سیمانی به طور کامل انجام نشود.

۲-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی

اغلب استفاده مواد نانو ساختار در مقاوم‌سازی سازه‌ها جهت بهبود عملکرد باند اتصال بین ورق‌های کامپوزیت FRP و یا کامپوزیت FRP با مصالح پایه می‌باشد، که این عمل با ترکیب یکی از انواع مواد نانو ساختار با رزین اپوکسی صورت می‌پذیرد. در ادامه مهمترین مزایایی که هر یک از مواد نانو ساختار در این زمینه ارائه می‌گردد.

- مزایای استفاده از نانو لوله‌های کربن به همراه الیاف کربنی و رزین اپوکسی در مقاوم‌سازی
  - ✓ استفاده از رزین اپوکسی اصلاح‌شده، سبب افزایش در بار نهایی و سختی المان‌های تقویت شده می‌شود، [۸۵].
  - ✓ CNTs سبب افزایش باند چسبیدن بتن و اپوکسی و همچنین الیاف و اپوکسی می‌گردند که این خود سبب افزایش انتقال بار و بار نهایی تیر تقویت شده می‌شود، [۸۵].

- اثر استفاده از اپوکسی اصلاح‌شده با نانو لوله‌های کربنی بر رفتار لغزش باندی بین صفحات FRP و بتن
  - ✓ اپوکسی اصلاح شده سبب می‌شود تا مودهای شکست بجای آنکه در باند اتصال FRP و بتن ایجاد دیده شوند با شکست بتن ایجاد به وجود آیند، [۸۶].
  - ✓ به دلیل عدم لغزش در باند اتصال FRP و بتن عملکرد انتقال بار بین این دو مصالح بدون هیچ‌گونه ضعفی صورت می‌پذیرد، و از ظرفیت حداکثری FRP می‌توان استفاده کرد، [۸۶].
- استفاده از نانو لوله‌های کربن چند جداره به‌منظور بهبود عملکرد اتصال پیچی برشی GFRP (کامپوزیت GFRP توسط رزین اپوکسی اصلاح‌شده با MWCNTs ساخته شد)
  - ✓ بهبود رفتار برشی لرزه‌ای کامپوزیت GFRP اصلاحی تا ۴۴٪ [۸۷]
  - ✓ افزایش ظرفیت برشی استاتیکی پسالرزه‌ای تا ۲۵۰٪ [۸۷]
- بهبود عملکرد خستگی در کامپوزیت GFRP با استفاده از نانو لوله‌های کربنی
  - ✓ افزایش عمر ناشی از خستگی در GFRP اصلاح‌شده را نسبت به حالت اصلاح نشده در حدود ۱۰۰۰٪ می‌باشد [۸۸].
- جلوگیری از خزش رزین اپوکسی در نانو کامپوزیت رس-اپوکسی به همراه CFRP
  - ✓ نانو رس تأثیر قابل توجهی بر روی خزش اپوکسی دارد و خصوصیات کششی، برش در صفحه و خمش NC-CFRP را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۸۹]
- افزایش کارایی نانو کامپوزیت پلیمرهای اپوکسی برای تقویت پل‌ها
  - ✓ کامپوزیت نانو سیلیس و اپوکسی، ضعف اپوکسی را در برابر نفوذ رطوبت از میان برمی‌دارد، [۹۰].

۳-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در مصالح خودترمیم شونده

تولید مواد و مصالح هوشمند خودترمیم کننده به طورکلی به چهار رویکرد استفاده از کپسول‌های خودترمیمی، استفاده از شبکه مویرگی، هیدراتاسیون پیوسته مواد سیمانی هیدراته نشده، استفاده از باکتری‌های عامل خود ترمیمی تقسیم می‌گردد. در ادامه مزایای هر یک از این رویکردها ارائه می‌گردد.

- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در روش میکرو کپسول‌های حاوی عامل خودترمیمی

- ✓ فعال شدن میکرو کپسول‌ها به محض رسیدن ترک به کپسول و آزادسازی نانو ذرات پلیمری و ذرات کاتالیزور، [۹۱].
- ✓ محافظت از سطح در برابر خوردگی و ترک، [۹۱].
- ✓ استفاده از نانو لوله‌های کربنی به عنوان نانو محفظه‌های جهت نانو مواد عامل خودترمیمی
- ✓ نانو لوله‌های کربنی خصوصیت خودترمیمی و بهبود خواص مکانیکی را هم‌زمان تأمین می‌کند، [۹۲].
- ✓ سازگاری بیشتر نانو سیلیس و میکرو کپسول‌های سیلیکاتی با طبیعت ماتریس سیمانی به‌کاررفته، قادر است اثرات منفی کاهش عملکرد مکانیکی این افزودنی‌ها را بکاهد، [۹۳].
- ✓ ریزساختار بافت سیمانی حاوی نانو مواد خودترمیم بهبود می‌یابد و بنابراین تحمل بالایی در کامپوزیت بتنی در برابر نفوذ عوامل خورنده ایجاد می‌کنند، [۹۳].
- ✓ بازده بیشتر مواد خود ترمیمی سیلیکاتی در بازشدگی‌های ترک‌های کوچک‌تر، [۹۳].

- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در روش شبکه مویرگی

- ✓ جریان عامل خودترمیمی با اندازه نانو از طریق شبکه مویرگی به محل ترک در هنگام وقوع ترک بدون هیچ‌گونه فشار خارجی، (خاصیت موئینگی، سبب انتقال نانو مواد عامل‌ترمیم به محل ترک می‌گردد)

- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در روش هیدراتاسیون پیوسته مواد سیمانی هیدراته نشده بتن و ملات‌های سیمانی

- ✓ استفاده از ذرات نانو رس به دلیل جذب آب بالا، چندین برابر جرم خود، به عنوان منابع آب داخلی برای ترمیم پیش ترک‌های ملات‌ها استفاده می‌شود، [۹۴].
- ✓ با افزایش درصد استفاده نانو رس مقاومت خمشی پس از ترمیم افزایش می‌یابد، [۹۵].

- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در روش استفاده از باکتری‌های عامل خودترمیمی

- ✓ استفاده از نانو صفحات گرافیت به عنوان حمل‌کننده ماده ترمیمی، [۹۶].
- ✓ نانو صفحات گرافیت می‌تواند باکتری عامل خودترمیمی را به شکل یکنواخت‌تری در ماتریس سیمانی پخش کرده و از آن محافظت نماید، [۹۶].
- ✓ بیشترین مقدار ترمیم در دو دوره کوتاه مدت ۳ و ۷ روزه با استفاده از نانو صفحات گرافیت نسبت به مواد نانو ساختار دیگر به دست می‌آید، [۹۶].
- ✓ نانو صفحات گرافن با ابعاد کوچک‌تر، وقوع ترک را در فصل مشترک خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها کاهش می‌دهند، [۹۶].
- ✓ نانو صفحات گرافن سبک‌وزن عملکرد بهتری در بازه‌های بلند مدت در ترمیم دارند، [۹۶].

- محدودیت‌های استفاده از مواد نانو ساختار در مواد خودترمیم

- ✓ عدم امکان ترمیم مجدد توسط کپسول‌های شکسته شده، [۹۷].
- ✓ خاصیت خودترمیمی بتن‌های فراتوانمند با افزایش مقدار افزودنی‌های نانو سیلیس و میکرو کپسول‌ها کاهش می‌یابد، [۹۳].

۴-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در نانو حسگرها مورد استفاده در پایش سلامت و عملکرد سازه‌ها

مواد نانو کامپوزیت وقتی تحت تنش یا کرنش قرار می‌گیرند، تغییراتی در مقاومت الکتریکی و یا ظرفیت خازنی آن‌ها به وجود می‌آید. این خصوصیت منحصر به فرد در مواد نانو کامپوزیت، آن‌ها را به صورت سنسورهای گسترده و یا منفرد برای پایش سازه‌های عمرانی تبدیل کرده است. مواد نانو ساختاری که این خصوصیت را ایجاد می‌کنند شامل ، نانو الیاف کربن، نانو لوله‌های کربنی، کربن سیاه، نانو صفحات گرافن، پودر نیکل کروی با نانو دانه‌های تیز روی سطح آن و نانو اکسید آهن می‌باشند [۹۸-۱۰۱]. ساختارهای متفاوتی در تولید حسگرهای نانو کامپوزیت وجود دارد، که هر یک از این ساختارها مزایایی را به همراه دارند. ساختارهای مختلف حسگرهای نانو کامپوزیت عبارت‌اند از، رادهای (میلگردهای) نانو کامپوزیت، نانو کامپوزیت‌های سیمانی یا بتنی (که از ترکیب مواد نانو ساختار مختلف با خمیر سیمان یا بتن به دست می‌آید)، رزین‌های اپوکسی اصلاح‌شده با مواد نانو ساختار، نانو الکترومکانیکال بر پایه مواد نانو ساختار، حسگر خازنی فیلم نرم الاستومری به همراه مواد نانو ساختار کربنی، در ادامه مزایای هر یک از این حسگرها ارائه شده است.

- مهمترین مزایایی که حسگرهای نانو کامپوزیت به همراه دارند عبارت‌اند از:
  - ✓ ایجاد مواد کامپوزیت خود حسگر
  - ✓ در کنار خصوصیت خود حسگری مزایایی نظیر بهبود خصوصیات مکانیکی و خصوصیاتی نظیر نفوذپذیری را به همراه دارند [۱۰۰].
  - ✓ امکان ایجاد شبکه‌ای از حسگرها بر روی المان‌های سازه
  - ✓ امکان سنجش دائم با تعداد و محل نقاط اختیاری
  - ✓ امکان تبدیل کرنش‌های اندازه‌گیری شده به میدان تنش با توجه به شبکه حسگرهای ایجاد شده
  - ✓ امکان تعیین نقاط با شدت کرنش و یا تنش بیشتر
  - ✓ توانایی ثبت تاریخچه زمانی تغییرات ایجاد شده و استفاده در شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه
  - ✓ حساسیت بالا
  - ✓ هزینه کم [۱۰۲]
  - ✓ دوام بالا [۱۰۲]
  - ✓ روند ساخت بسیار آسان [۱۰۲]
  - ✓ سادگی ابزار موردنیاز برای سنجش تغییرات مقاومتی [۱۰۳]
  - ✓ توانایی ثبت تغییر شکل‌های سازه‌ای و شروع آسیب‌هایی نظیر میکرو ترک‌ها [۱۰۳]

- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در رادهای نانو کامپوزیت خود سنجش‌گر (استفاده از نانو ذرات کربن کروی)
  - ✓ تعیین شروع ترک‌خوردگی در بتن
  - ✓ تعیین کرنش در بتن

- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در کامپوزیت سیمان و نانو لوله‌های کربنی (کامپوزیت ترکیبی سیمان، نانو لوله‌های کربن و الیاف کربنی)
  - ✓ در مقایسه با حسگر فیبر کربن، حسگر ترکیبی نتایج بهتری را در تکرارپذیری بالا از خود نشان داد [۹۸, ۱۰۴].
  - ✓ مصالح کامپوزیت با خصوصیت خود سنجشی
  - ✓ حسگرهای کامپوزیت سیمان/CNT نصب‌شده در جاده در مقایسه با کرنش‌سنج‌ها پاسخ پیوسته و بدون از دست دادن داده فراهم می‌آورد، [۹۸].

- مزایای استفاده از نانو لوله‌های کربنی چند جداره در رزین اپوکسی با خصوصیت خود-سنجشگری
  - ✓ امکان اندازه‌گیری کرنش و تنش المان تقویت‌شده توسط FRP در باند اتصال
  - ✓ ثبت داده آسان
  - ✓ امکان استفاده آسان از آن در نقاط مختلف سازه

- مزایای حسگر کرنش با استفاده از نانو صفحات گرافن (حسگر سیستم نانو الکترومکانیکال بر پایه صفحات گرافن)
  - ✓ اندازه‌گیری کرنش‌های در صفحه و خارج از صفحه می‌باشد، کرنش‌هایی که ناشی از خم شدن صفحه حسگر باشد و همچنین کرنش‌هایی که ناشی از افزایش ابعاد صفحه حسگر است، [۱۰۵].

- مزایای حسگرهای نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT
  - ✓ شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه [۱۰۶]
  - ✓ امکان قرارگیری حسگر در المان‌های بتنی در هنگام بتن‌ریزی [۴۷]
  - ✓ بازه فرکانسی مناسب حسگر برای کاربردهای عمرانی (۰ تا ۵۰۰ هرتز) [۴۷]

- مزایای حسگر خازنی فیلم نرم الاستومری به همراه نانو ذرات کربن سیاه
  - ✓ فراهم آوردن امکان تشخیص ترک‌های ناشی از خستگی سازه‌های فلزی در مراحل اولیه
  - ✓ نصب آسان
  - ✓ امکان استفاده از آن به صورت شبکه‌ای از سنسورهای (عملکردی مشابه پوست بیولوژیکی) [۱۰۷, ۱۰۸].
- مزایای حسگرهای کامپوزیت توزیع‌شده بر پایه نانو لوله‌های کربن و یا نانو ذرات کربن سیاه به همراه رزین اپوکسی و الیاف آرامید
  - ✓ امکان استفاده از روش تکنیک پرتونگاری مقطعی امپدانس الکتریکی[۱] در تعیین محل آسیب و شدت، بر اساس نقشه‌های دوبعدی تغییرات هدایت الکتریکی، مکان و اندازه آسیب را تخمین می‌زند.

[۱] electrical impedance tomography (EIT)

- مزایای حسگر کامپوزیت سیمان/ نانو صفحات گرافیت
  - ✓ امکان استفاده برای تنش فشاری سیکلی تحت بارگذاری استاتیک و بارگذاری دینامیکی
  - ✓ دامنه بارگذاری متفاوت (در محدوده الاستیک کامپوزیت)
  - ✓ سرعت مختلف بارگذاری (در محدوده الاستیک کامپوزیت)

- مزایای حسگر سیمان مهندسی‌شده با استفاده از نانو ذرات کربنی
  - ✓ به عنوان حسگرهایی برای پایش سلامت سازه در ابعاد بسیار وسیع و گسترده

۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار جهت بهبود شرایط ژئوتکنیکی

فضاهای خالی بین ذرات خاک از چند میکرومتر تا چند نانومتر در تغییر است. در صورت پر شدن این فضاهای خالی با نانو ذرات، به دلیل بی‌نهایت بزرگ بودن خصوصیاتی نظیر سطح ویژه، ریخت‌شناسی ذرات، نانو حفرات و بار سطحی که در مقیاس نانو وجود دارد، ویژگی‌های خاک نیز تغییر می‌کند. به همین دلیل درحالی‌که ویژگی‌هایی مانند مقاومت برشی، چگالی نسبی و مقاومت روانگرایی می‌تواند بهبود یابد، ویژگی‌هایی چون تراکم‌پذیری، نفوذپذیری و شاخص پلاستیسیته نیز تأثیرپذیر است. بنابراین مواد نانو ساختار مختلف جهت بهسازی کیفی خاک و صرفه‌جویی اقتصادی در پروژه‌ها می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در خاک‌های مختلف و ویژگی‌های مختلف آن‌ها ارائه می‌گردد.

انواع مواد نانو ساختار که جهت بهسازی خاک، مورد استفاده قرار می‌گیرند به طورمعمول شامل نانو سیلیس، نانو رس، نانو ذرات اکسید آهن و آلومینیم، زئولیت و مواد نانو ساختار پلیمری هستند. میزان بهینه دقیق افزودنی‌های نانو جهت بهسازی انواع خاک‌ها، بسته به پارامترهای کیفی و نوع دانه‌بندی خاک‌ها متغیر است و به کمک آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی ساده ژئوتکنیکی به راحتی قابل تعیین می‌باشد. در ادامه مزایای استفاده هر یک از مواد نانو ساختار بر خصوصیات مختلف خاک‌های متفاوت ارائه می‌گردد.

۱-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر پلاستیسته خاک (دامنه خمیری)

- خاک ماسه‌ای رس دار
  - ✓ استفاده از ۱درصد نانو رس سبب کاهش دامنه خمیری خاک ماسه‌ای رس‌دار می‌گردد [۱۰۹-۱۱۰].
- خاک رسی با خصوصیات خمیری زیاد
  - ✓ استفاده از ۱ تا ۳ درصد نانو سیلیس سبب کاهش دامنه خمیری خاک رسی با خصوصیات خمیری زیاد می‌شود [۱۱۱-۱۱۲].
  - ✓ استفاده از ۳ درصد نانو سیلیس به همراه آهک سبب کاهش دامنه خمیری خاک رس مارنی می‌شود [۱۱۳].
  - ✓ افزودن ۲ درصد نانو آلومینا سبب کاهش دامنه خمیری خاک رسی کائولینیت می‌شود، [۱۱۴].
  - ✓ افزودن ۲ درصد نانو آلومینا سبب کاهش دامنه خمیری خاک رسی با خصوصیات خمیری زیاد می‌شود [۱۱۵].

- ✓ افزودن ۲ درصد نانو منیزیم سبب کاهش دامنه خمیری خاک رسی با خصوصیات خمیری زیاد می‌شود [۱۱۴-۱۱۵].
- ✓ افزودن ۰/۲ درصد نانو لوله‌های کربنی با ۱۰ درصد بنتونیت سبب کاهش دامنه خمیری خاک رسی با خصوصیات خمیری زیاد می‌شود، [۱۱۶].

- خاک رسی با خصوصیات خمیری کم

- ✓ افزودن ۲ درصد نانو سیلیس سبب افزایش دامنه خمیری خاک رسی با خصوصیات خمیری کم می‌شود، [۱۱۷-۱۱۸].
- ✓ افزودن ۱ درصد نانو سیلیس سبب افزایش دامنه خمیری خاک رسی با خصوصیات خمیری کم در مجاورت سیمان می‌شود، [۱۱۹].
- ✓ افزودن ۱ درصد نانو آلومینا سبب افزایش دامنه خمیری خاک رسی با خصوصیات خمیری کم می‌شود، [۱۲۰].

- خاک لای فاقد خصوصیات خمیری

- ✓ افزودن ۲ درصد نانو رس مونت‌موریلونیت به خاک ریزدانه رس لای دار سبب افزایش دامنه خمیری می‌شود، [۱۲۱].
- ✓ افزودن ۰/۵ تا ۳ درصد نانو رس به خاک لای فاقد خصوصیات خمیری سبب افزایش دامنه خمیری می‌شود، [۱۲۳-۱۲۲].
- ✓ افزودن ۲ درصد نانو رس به دو نوع خاک لای MH و ML سبب افزایش دامنه خمیری می‌شود، [۱۲۴].

۲-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر نفوذپذیری

- خاک رس

- ✓ استفاده از ۸ درصد نانو رس سبب کاهش نفوذپذیری خاک رس کائولینیت می‌شود [۱۲۵].
- ✓ استفاده از ۴ درصد نانو رس سبب کاهش نفوذپذیری خاک رس متراکم می‌شود [۱۲۶].
- ✓ افزودن ۴ تا ۸ درصد نانو رس سبب کاهش نفوذپذیری خاک رس می‌شود [۱۲۷- ۱۲۸].

- خاک ماسه

- ✓ افزودن ۰/۲۵ درصد نانو رس سبب کاهش نفوذپذیری خاک ماسه‌ای لای‌دار می‌شود [۱۲۹].
- ✓ افزودن ۳ درصد نانو رس سبب کاهش نفوذپذیری خاک ماسه‌ای رس دار می‌شود [۱۳۰].

۳-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر تورم خاک ریزدانه

- خاک رس

- ✓ افزودن ۵ درصد نانو سیلیس سبب کاهش تورم خاک رس به همراه ۴ درصد آهک می‌شود [۱۳۱].
- ✓ افزودن ۱ درصد نانو سیلیس و نانو زئولیت سبب کاهش تورم خاک رسی از نوع ضعیف گروه CL و CH می‌شود [۱۳۲].

- ✓افزودن ۲ درصد نانو سیلیس و نانو اکسید آهن سبب کاهش تورم خاک رسی می‌شود که میزان تأثیر نانو اکسید آهن به تنهایی از نانو سیلیس بیشتر می‌باشد [۱۳۳].
- ✓افزودن ۰/۵ درصد نانو رس سبب کاهش تورم خاک رسی می‌شود [۱۳۴].
- ✓افزودن ۲ درصد نانو آلومینا سبب کاهش تورم خاک رسی کائولینیت می‌شود [۱۱۴].
- ✓افزودن ۱ درصد نانو آلومینا سبب کاهش تورم خاک رس با ۱۵ درصد خاکستر لجن فاضلاب SSA و سیمان با نسبت ۱ به ۳ می‌شود [۱۲۳].
- ✓افزودن ۲ درصد نانو منیزیم سبب کاهش تورم خاک رسی کائولینیت می‌شود [۱۱۴].
- ✓افزودن ۰/۲ درصد نانو لوله‌های کربنی سبب کاهش تورم خاک رسی می‌شود [۱۱۶].

۴-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر وزن مخصوص حداکثر

- خاک رس

- ✓افزودن ۰/۲ درصد نانو رس سبب افزایش وزن مخصوص حداکثر خاک رس CH می‌شود [۱۳۵].
- ✓افزودن ۱ درصد نانو رس سبب افزایش وزن مخصوص حداکثر خاک رس به همراه ۱ درصد نانو سیمان می‌شود، [۱۱۲].
- ✓افزودن ۲ درصد نانو آلومینا سبب افزایش وزن مخصوص حداکثر خاک رسی کائولینیت می‌شود [۱۱۴].
- ✓افزودن ۲ درصد نانو آلومینا و نانو اکسید منیزیم سبب افزایش وزن مخصوص حداکثر خاک رس می‌شود، [۱۱۵].
- ✓افزودن ۰/۰۷ درصد نانو لوله و الیاف کربنی سبب افزایش وزن مخصوص حداکثر خاک رس می‌شود[۱۱۶].

- خاک آلی

- ✓افزودن ۲ درصد نانو رس سبب کاهش وزن مخصوص حداکثر خاک آلی (OL) می‌شود [۱۳۵].
- ✓افزودن ۳ درصد نانو رس سبب کاهش وزن مخصوص حداکثر خاک سیلتی بادرفتی می‌شود [۱۲۱].

۵-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر رطوبت بهینه

- خاک رس

- ✓افزودن ۰/۲ درصد نانو رس سبب کاهش رطوبت بهینه خاک رس CH می‌شود [۱۳۵].
- ✓افزودن ۰/۲ درصد نانو رس سبب کاهش رطوبت بهینه خاک رس می‌شود [۱۲۲].
- ✓افزودن ۲ درصد نانو آلومینا سبب کاهش رطوبت بهینه خاک رس کائولینیت می‌شود [۱۱۴].
- ✓افزودن بیشتر از ۱ درصد نانو آلومینا سبب کاهش رطوبت بهینه خاک رس می‌شود [۱۱۵].
- ✓افزودن کمتر از ۰/۵ درصد نانو اکسید منیزیم سبب کاهش رطوبت بهینه خاک رس می‌شود [۱۱۵].
- ✓افزودن ۰/۰۷ درصد نانو لوله و الیاف کربنی سبب کاهش رطوبت بهینه خاک رس می‌شود [۱۱۶].

- خاک آلی

- ✓افزودن ۲ درصد نانو رس سبب افزایش درصد رطوبت بهینه خاک آلی (OL) می‌شود [۱۳۵].
- ✓افزودن ۳ درصد نانو رس سبب افزایش درصد رطوبت بهینه خاک سیلتی بادرفتی می‌شود [۱۲۱].
- ✓افزودن ۰/۵ درصد نانو رس سبب افزایش درصد رطوبت بهینه خاک آلی می‌شود [۱۳۶].

۶-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر واگرایی

- خاک رس

✓افزودن ۰/۵ تا ۱ درصد نانو رس سبب کاهش واگرایی خاک رس می‌شود[۱۳۸،۱۳۴،۱۳۷]
✓افزودن ۲ درصد نانو رس سبب کاهش واگرایی خاک رس لای دار می‌شود [۱۲۱].
✓افزودن ۳ درصد نانو سیلیس سبب کاهش واگرایی خاک رس می‌شود [۱۳۹].

۷-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر رمبندگی

- خاک رس

✓افزودن ۲ درصد نانو رس سبب کاهش رمبندگی خاک رس لای دار می‌شود[۱۲۱].
✓افزودن ۲۰ درصد نانو رس سبب کاهش رمبندگی خاک رس می‌شود [۱۴۰-۱۴۱].

۸-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر کرنش انبساطی و انقباضی

- خاک رس

✓افزودن ۰/۵ درصد نانو رس سبب افزایش کرنش انبساطی و انقباضی خاک رس می‌شود [۱۳۶].
✓افزودن ۰/۱ درصد نانو آلومینا سبب افزایش کرنش انبساطی و انقباضی خاک رس می‌شود [۱۳۶].
✓افزودن ۲ درصد نانو لوله‌های کربنی سبب افزایش کرنش انبساطی و انقباضی خاک رس می‌شود [۱۴۲].

۹-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر مقاومت فشاری تک‌محوری

- خاک رس

✓افزودن ۰/۴ درصد نانو سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس به همراه سیمان می‌شود [۱۴۳].
✓افزودن ۰/۷ تا۳ درصد نانو سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس می‌شود [۱۴۲،۱۳۳،۱۳۲].
✓افزودن ۱/۵ درصد نانو سیلیس به همراه ۱ درصد نانو رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس می‌شود [۱۴۴].
✓افزودن ۳ تا ۵ درصد نانو سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس به همراه ۳ تا ۵ درصد آهک می‌شود [۱۱۳،۱۳۱،۱۴۵،۱۴۶،۱۴۷].
✓افزودن ۱ درصد نانو سیلیس به همراه ۰/۵ درصد نانو فیبر پلی‌استر سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس می‌شود [۱۲۲].
✓افزودن ۰/۵ درصد نانو سیلیس به همراه ۱ درصد الیاف پلی‌استر سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس می‌شود [۱۴۸].
✓افزودن ۱/۵ تا ۵ درصد نانو رس به خاک رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۱۱،۱۲۶، ۱۲۷، ۱۴۹].

- ✓افزودن ۱ درصد نانو رس به خاک رس ضعیف CL-ML سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۲۱].
- ✓افزودن ۱ درصد نانو رس به همراه ۱ درصد الیاف شیشه به خاک رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۰].
- ✓افزودن ۱ درصد نانو رس به همراه ۱ نانو سیمان به خاک رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۱۲].
- ✓افزودن ۱ درصد نانو آلومینا به خاک رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۱].
- ✓افزودن ۲ درصد نانو اکسید آهن به خاک رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۱].
- ✓افزودن ۰,۵ تا ۹/. درصد نانو اکسید تیتانیوم به خاک رس به همراه ۲ تا ۸ درصد سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۲].
- ✓افزودن ۱/۲ درصد نانو آهک به خاک رس به همراه ۰/۶ درصد ضایعات فرش سبب افزایش مقاومت تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۳].
- ✓افزودن ۲ درصد نانو زئولیت به خاک رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۳۲].
- ✓افزودن ۰/۰۰۱ درصد نانو لوله‌های کربنی به خاک رس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۲۲].

- خاک لای

- ✓افزودن ۱ تا ۱/۵درصد نانو رس به خاک لای ML و MH و یا ۲ درصد نانو رس به خاک لای سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۴- ۱۵۵].
- ✓افزودن ۰/۲ درصد نانو رس به خاک رس ضعیف و لای سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۳۵].
- ✓افزودن ۶ تا ۱۶ درصد نانو منیزیم به خاک لای سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۶].

- خاک ماسه‌ای

- ✓افزودن ۱/۵ تا ۱۴ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۵۷- ۱۵۹].
- ✓افزودن ۷ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای رس دار سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۰۹].
- ✓افزودن ۲۷ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۶۰].
- ✓در خاک ماسه‌ای سیلتی افزودن ۳۰ درصد نانو سیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۶۱].
- ✓افزودن ۱۰ درصد نانو سیلیس به همراه ۱۴ درصد سیمان به خاک ماسه‌ای سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۲۷].

✓افزودن ۲ تا ۳ درصد نانو رس به خاک ماسه‌ای سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری آن می‌شود [۱۰۹،۱۳۰،۱۶۲].

۱۰-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر پارامترهای مقاومت برشی

- خاک رس

✓افزودن ۱درصد نانو سیلیس به همراه ۰/۵ درصد نانو فیبر پلی‌استر به خاک رس با پلاستیسیته کم (CL) سبب افزایش قابل‌توجه مقاومت برشی، مدول الاستیسیته و کرنش برشی آن می‌شود، [۱۲۲].

✓افزودن ۰/۷ درصد نانو سیلیس به‌تنهایی و یا به همراه ۰/۵ درصد الیاف پلی‌استر سبب افزایش مقاومت برشی آن می‌شود [۱۴۸، ۱۶۳].

✓افزودن ۱۰درصد نانو پلیمر به خاک رس با پلاستیسیته بالا سبب افزایش مقاومت برشی آن می‌شود [۱۶۴].

- خاک لای یا بادرفت

✓افزودن ۲ درصد نانو رس به خاک لای سبب افزایش مقاومت برشی آن می‌شود [۱۲۳]

- خاک ماسه‌ای

✓افزودن ۱/۵ تا ۳ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای سبب افزایش مقاومت برشی آن می‌شود [۱۶۵،۱۵۹].

۱۱-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر چسبندگی خاک

- خاک رس

✓افزودن ۱ درصد نانو سیلیس به همراه ۳ درصد الیاف پلی‌استر به خاک رسی سبب افزایش چسبندگی آن می‌شود [۱۶۶].

- خاک ماسه‌ای

✓افزودن ۱/۵ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای سبب افزایش چسبندگی آن می‌شود [۱۵۹].

- خاک لای و بادرفت

✓افزودن ۲ درصد نانو رس به خاک لای سبب افزایش چسبندگی آن می‌شود [۱۴۲].

۱۲-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر زاویه اصطکاک داخلی خاک

- خاک رس

✓افزودن ۱ درصد نانو سیلیس به همراه ۳ درصد الیاف پلی‌استر به خاک رسی سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود، [۱۶۶].

- خاک ماسه‌ای

✓افزودن ۳ درصد نانو رس به خاک ماسه رس دار سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود [۱۶۲].

۱۳-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر نسبت تخلخل خاک

- خاک رس

✓ افزودن ۰/۷ درصد نانو به خاک رسی با حد روانی کم سبب کاهش نسبت تخلخل آن می‌شود [۱۶۳].

- خاک ماسه‌ای

✓افزودن ۱/۵ درصد نانو SiO_2 به خاک ماسه‌ای سبب کاهش نسبت تخلخل آن می‌شود [۱۵۷].

۱۴-۵-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار بر خصوصیات دیگر خاک ماسه‌ای

✓افزودن ۸ درصد نانو سیلیس، سیمان و الیاف به خاک ماسه‌ای سبب افزایش دانسیته آن می‌شود [۱۵۷].

✓افزودن ۱/۵ درصد نانو SiO_2 به خاک ماسه‌ای سبب کاهش فرسایش‌پذیری آن می‌شود [۱۵۹].

✓افزودن ۵ تا ۹ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب کاهش میزان نشست آن می‌شود [۱۶۷، ۱۵۵].

✓افزودن ۲۰ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب کاهش کرنش در حین بارگذاری دوره‌ای می‌گردد [۱۶۸].

✓افزودن ۱ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب کاهش سرعت جریان آب در خاک می‌شود [۱۶۹].

✓افزودن ۹ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب افزایش میرایی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۶۷].

✓افزودن ۱۰ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای به همراه سیمان سبب افزایش میرایی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۷۰].

✓افزودن ۹ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب افزایش مدول برشی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۶۷].

✓افزودن ۱۰ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای به همراه سیمان سبب افزایش مدول برشی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۷۰].

✓افزودن ۹ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب افزایش ضریب بزرگنمایی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۶۷].

✓افزودن ۱۰ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای به همراه سیمان سبب افزایش ضریب بزرگنمایی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۷۰].

✓افزودن ۸ درصد سیمان، نانو سیلیس و الیاف به خاک ماسه‌ای سبب افزایش پتانسیل جذب انرژی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۵۷].

✓افزودن ۱۰ درصد نانو سیلیس به خاک ماسه‌ای به همراه سیمان سبب افزایش پتانسیل جذب انرژی خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۷۰].

✓افزودن ۸ درصد سیمان، نانو سیلیس و الیاف به خاک ماسه‌ای سبب افزایش سرعت امواج فراصوتی در خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۵۷].

- ✓افزودن ۴ تا ۸ درصد نانو سیلیس کلوئیدی به خاک ماسه‌ای سبب افزایش مقاومت در برابر روانگرایی در خاک ماسه‌ای می‌شود [۱۱۱، ۱۲۵،۱۷۱].

۶-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در فولاد سازه‌ای

استفاده فراگیر فولاد در صنعت ساخت و ساز سبب شده تا علم نانوتکنولوژی برای بهبود خصوصیات مهم فولاد وارد حوزه تولید فولاد سازه‌ای گردد. خصوصیاتی نظیر پدیده خستگی، تردشدگی ناشی از جوش‌کاری، خوردگی، اثرات تردی هیدروژنی را با استفاده از علم نانو توانسته‌اند بهبود بخشند. در ادامه مهمترین مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در تولید فولاد سازه‌ای ارائه‌شده است:

- ✓ افزودن نانو ذرات مس، ناهمواری‌های سطح فولاد را کاهش داده و موجب کاهش نقاط تمرکز تنش و افزایش مقاومت خستگی فلز می‌گردد، [۱۷۲].
- ✓ افزودن نانو ذرات منیزیم و کلسیم، ذرات موجود در ناحیه متأثر از حرارت جوش را در ورق‌های فولادی کوچک‌تر کرده و لذا سختی فلز افزایش می‌یابد، با افزایش سختی اتصال برای محدود کردن تنش‌ها به فولاد کمتری نیاز می‌باشد.
- ✓ نانو ذرات کروم، نیکل و مس، مقاومت فولاد را در برابر خوردگی افزایش داده و کیفیت سطح و شکل‌پذیری مناسبی در فولاد ایجاد می‌کنند مقاومت و مدول الاستیسیته فولاد را نیز افزایش می‌دهند.
- ✓ استفاده از ساختار ورقه‌ای شکل نانو صفحات آستنتیت که در بین لایه‌های جابجا نشده فاز مارتنزیت قرار می‌گیرند موجب ایجاد خصوصیات منحصر به فردی نظیر مقاومت مکانیکی، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی در فولاد می‌شود.
- ✓ استفاده از نانو ذرات وانادیم و مولیبدن در پیچ‌های فولادی موجب به تأخیر افتادن وقوع ترک‌های ناشی از خستگی، کاهش اثرات تردی هیدروژنی و بهبود ریزساختار پیچ‌های پرمقاومت فولادی می‌گردد.

۷-۱-۲-۵- مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های چوبی

به کار بردن علم نانوتکنولوژی در صنعت تولید چوب‌های سازه‌ای به مانند تمامی حوزه‌های دیگر موجب بهبود خصوصیات مهم سازه‌ای و غیر سازه‌ای آن شده است. خصوصیاتی مانند مقاومت در برابر دما، حفاظت در برابر عوامل مهاجم بیولوژیکی با استفاده از علم نانوتکنولوژی بهبودیافته است. در ادامه مهمترین مزایای استفاده از مواد نانو ساختار در چوب‌های سازه‌ای ارائه شده است:

- ✓ افزودن نانو ذرات نقره و نانو ذرات مس به چوب مانع ایجاد گرمای زیاد بر روی سطح چوب شده و از کاهش مقاومت مکانیکی آن در اثر افزایش دما جلوگیری می‌کند، [۱۷۳].
- ✓ افزودن برخی نانو الیاف مانند ولاستونیت[۱] به چوب صنوبر باعث افزایش دوام در مقابل عوامل بیولوژیکی مهاجم می‌گردد.
- ✓ خصوصیات ضد آتشی چوب‌ها و سایر کامپوزیت‌های چوبی در اثر به‌کارگیری نانو ذرات نقره و نانو الیاف ولاستونیت بهبود یافته است، [۱۷۴، ۱۷۵]

[۱] Wollastonite

۲-۲-۵ - معایب و محدودیت‌های استفاده از نانو ذرات بر انسان و محیط‌زیست

همان‌طور که پیشتر بیان شد، فناوری نانو ذرات نیز به عنوان پایه و اساس فناوری نانو در بسیاری از زمینه‌های مهندسی و حتی پزشکی سبب پیشرفت شده است. نانو ذرات جدای از مفید بودن می‌توانند از بدو تولید تا دور ریزش پسماند مخاطراتی برای محیط‌زیست، انسان و حیوانات ایجاد کنند، [۱۷۶]. به این دلیل ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی نانو ذرات در طول چرخه عمر نانو ذرات امری لازم و ضروری می‌باشد. در ادامه بعضی از مهم‌ترین ویژگی‌های زیست‌محیطی نانو ذرات از قبیل مکانیسم حرکت و انتقال در محیط زیست، تسهیل انتقال مواد سمی دیگر توسط نانو ذرات، زیست سمیت میکروبی نانو ذرات، تجزیه بیولوژیک نانو ذرات، دسترسی زیستی، تجمع زیستی، تراکم در محیط‌زیست و جذب نانو ذرات بررسی‌شده است. سپس مخاطرات زیست‌محیطی نانو ذرات، نحوه تولید سمیت در محیط‌زیست، مکانیسم‌های سمیت نانو ذرات و مخاطرات زیست محیطی آن‌ها مورد بررسی قرارگرفته است، [۱۷۷].

۱-۲-۲-۵- نانو ذرات در محیط زیست

منشأ نانو ذرات در محیط‌زیست می‌تواند طبیعی یا مصنوعی و دست ساخته بشر باشد. منابع انسانی به دو دسته آگاهانه و تصادفی تقسیم می‌شوند.

الف) نانو ذرات طبیعی

ب) نانو ذرات انسانی

ج) نانو ذرات مصنوعی (ساخته دست بشر)

دسته اول (نانو ذرات طبیعی) از طرق مختلف مانند آتش‌سوزی جنگل‌ها و یا فوران آتش‌فشان‌ها ساخته می‌شوند. دسته دوم (نانو ذرات انسانی) اغلب به عنوان محصول جانبی فعالیت‌های انسانی در صنعت تولید می‌شوند مانند نانو ذراتی که در حین جوشکاری به وجود می‌آید و یا از اگزوز ماشین‌ها خارج می‌شود. دسته سوم (نانو ذرات مصنوعی یا ساخته دست بشر) شامل نانو ذرات مهندسی‌شده می‌باشد. این نانو ذرات عمدتاً به علت ویژگی‌های مطلوبشان مانند خواص جدید فیزیکی و شیمیایی و واکنش‌پذیری بالاتر تهیه می‌شوند. این ویژگی‌های جدید مواد معمولی که فقط در مقیاس نانو مشاهده می‌شود دارای کاربردهای تجاری می‌باشد، [۱۷۶].

نانو ذرات به ۴ گونه زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

نانو ذرات غیر آلی: که شامل تمامی نانو ذرات فلزی و اکسید فلزی می‌باشند.

نانو ذرات آلی: که شامل نانو ذرات پلیمری و بیولوژیکی هستند.

نانو ذرات کربن محور: که شامل نانو لوله‌ها، گرافن، نانو الیاف کربن، دوده کربن، نانو فوم کربن و میله‌های کربنی و غیره می‌باشند.

نانو ذرات هیبریدی آلی – غیر آلی

۲-۲-۲-۵- اساس سمیت نانو ذرات

سمیت نانو ذرات، در ارتباط مستقیم با خصوصیات منحصر به فرد شیمیایی و فیزیکی آن‌ها است، که شیوه تعامل این ذرات با بدن انسان و محیط‌زیست، اثرات آن‌ها را مشخص می‌کند. در ادامه، به اختصار به معرفی خصوصیاتی از نانو ذرات که بر سمیت آن‌ها تأثیر می‌گذارد، پرداخته می‌شود، [۱۷۶].

الف) اندازه و توزیع

مهمترین مشخصه نانو ذرات اندازه آن‌ها است. وقتی مواد در مقیاس نانو تبدیل شوند در خواص شیمیایی ، بیولوژیکی و فعالیت‌های کاتالیتکی آن‌ها تغییراتی ایجاد می‌شود. بنابراین موادی که در حالت بالک (توده‌ای) بی‌خطر هستند وقتی به حالت نانو تبدیل شوند می‌توانند سمی و خطرناک باشند. کوچک‌تر شدن اندازه نانو ذرات، نسبت سطح به حجم آن‌ها به طور نمایی افزایش می‌یابد که باعث فعال‌تر شدن و سمی‌تر شدن این ذرات می‌شود. همچنین با کاهش اندازه آن‌ها، امکان نفوذشان در بافت‌های گیاهی و جانوری افزایش می‌یابد. حتی برخی از مواد که رسانای برق نیستند یا شکننده هستند، وقتی به اندازه کافی کوچک شوند، رساناهای خوبی می‌شوند. نفوذ نانو ذرات از موانع سلولی بستگی بالایی به اندازه آن‌ها دارد. گفته می‌شود که ذراتی با اندازه کمتر از ۳۵ نانومتر، می‌توانند به سد محافظ خونی مغزی[۱] نفوذ کنند و ذرات با اندازه کمتر از ۴۱ نانومتر می‌توانند وارد هسته سلول‌ها شوند درحالی‌که ذرات با اندازه کمتر از ۱۱۱ نانومتر می‌توانند با عبور از غشای سلولی وارد سلول شوند. پایداری پیوند و قوام پس از پیوند ساختارهای پروتئینی نیز به اندازه نانو ذرات بستگی دارد، [۱۷۸].

ب) شکل و نوع سطح

شکل نانو ذرات نیز بر اثرات سمیت آن‌ها تأثیر می‌گذارد. زمانی که اندازه و مساحت برای یک گونه از نانو ذرات مشابه نگه داشته شود، آنگاه تأثیر شکل آن‌ها در ارزیابی میزان سمیت آن‌ها، برجسته‌تر می‌شود. برای مثال نانو ذرات اکسید روی با شکل لوله‌ای سمیت بیشتری را برای تنفس انسان (سلول‌های اپی تلیوم ریه) در مقایسه با نانو ذرات کروی ایجاد می‌کنند، [۱۷۶].

پ) ماهیت نانو ذرات

ماهیت نانو ذرات از دیگر فاکتورهای کلیدی است که در سمیت آن‌ها نقش دارد. این یک حقیقت شناخته شده است که همه مواد به شکل توده و بزرگ‌تر، اثرات سمی متفاوتی در مقایسه با ذرات با اندازه نانو دارند. این تفاوت می‌تواند در حد اغماض و قابل چشم پوشی تا تفاوت‌های بسیار زیاد باشد. بسیاری از مطالعات به این عامل توجه کرده‌اند، برای مثال نانو ذرات نقره با آزمایش‌های متعدد اندازه‌گیری میزان سمیت، سمی‌تر از نانو ذرات اکسید مس بوده‌اند، [۱۷۶].

ث) واکنش‌پذیری نانو ذرات

[۱] Blood–brain barrier

از جمله ویژگی‌های اصلی نانو ذرات، واکنش‌پذیری سریع آن‌ها در مقایسه با سایر مواد است که باعث شده از آن‌ها به عنوان کاتالیزگر استفاده شود. از آنجا که در فرآیندهای کاتالیستی ذرات دچار تخریب نمی‌شوند، بنابراین زنجیره-ای از واکنش‌ها در سیستم‌های بیولوژیکی مورد انتظار است. چنین واکنش‌پذیری غیرمعمول، باعث سمی شدن بیشتر نانو ذرات می‌شود. بار الکتریکی نانو ذرات باعث واکنش‌پذیرتر شدن آن‌ها در سلول‌ها و پروتئین‌ها در مقایسه با نمونه‌های خنثی آن‌ها می‌شود، [۱۷۶].

ت) توانایی تحرک و جابجایی نانو ذرات

نانو ذرات، ذرات جامدی هستند که توانایی جابجا شدن به شیوه گازها و مایعات را نیز دارند. هنگام تعیین اثرات سمی نانو ذرات بر انسان و محیط‌زیست، عوامل مرتبط با حرکت و جابجایی آن‌ها بایستی مورد توجه قرار گیرد. به دلیل توانایی تحرک بالا و اندازه کوچک، نانو ذرات می‌توانند به‌آسانی در سلول‌های گیاهی و جانوری منتشر شوند. انتشار ذرات با کاهش اندازه آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین جابجایی نانو ذرات عاملی است که با نزدیک شدن آن‌ها به هم باعث تجمع آن‌ها می‌شود.

ج) پایداری نانو ذرات

پایداری نانو ذرات در سیستم بیولوژیکی به ماهیت، اندازه و غلظت آن‌ها بستگی دارد. در pH معمول سیستم بیولوژیکی، اکثر نانو ذرات آلی و غیر آلی قابل‌حل شدن هستند. در مورد فلزات و نانو ذرات اکسید فلزات، غلظت یون‌های فلزی در سلول‌ها افزایش می‌یابد که باعث افزایش استرس در سلول‌ها می‌شود. حضور یون‌های فلزی سنگین می‌تواند بر گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن تأثیرگذار باشد. حل شدن نانو ذرات در یک محیط، پارامتر اساسی است که به پایداری و سمیت آن‌ها بستگی دارد. ذراتی که حلالیت کمی دارند مانند اکسید روی، باعث مرگ برخی از سلول‌ها در غلظت‌های بالاتر از ۱۵ پی‌پی‌ام می‌شوند. اما در مورد نانو ذرات اکسید آهن بدون پوشش، واکنش به نوع سلول بستگی دارد. در مورد نانو ذرات حل ناشدنی مانند زیرکونیا و تیتانیا در غلظت‌های بالا، باعث کاهش فعالیت سلولی و مقدار DNA می‌شوند، [۱۷۹].

ح) بار و شیمی سطح نانو ذرات

نانو ذرات از بخش‌های ارگانیک مختلف به‌منظور کاربرد در جنبه‌های مختلف، ساخته می‌شوند. مطالعات نشان داده است که عملکردهای مختلف، بارهای متفاوتی را بر سطوح نانو ذرات ایجاد می‌کند. بر اساس نوع بار نانو ذرات ممکن است سبب سمیت شدید و مزمن می‌شوند و شیوه عملکرد سیستم‌های بیولوژیک را نیز تغییر می‌دهند، [۱۷۶].

د) تجمع نانو ذرات

نانو ذرات توانایی متراکم شدن در محلول‌ها را دارند. میزان تراکم و تجمع نانو ذرات به اندازه، شکل، غلظت، بار الکتریکی، دما و نوع نانو ذره بستگی دارد. نانو ذرات تجمیع شده بیشتر به دلیل تغییرات در ویژگی‌های مربوط به سطحشان، رفتار متفاوتی نسبت به ذرات پراکنده و منفرد دارند. بنابراین نحوه تعامل آن‌ها با سلول‌ها و تمایل آن‌ها

در جذب پروتئین تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تجمع تا حد زیادی بر جذب سلولی تأثیر می‌گذارد و نتیجتاً بر میزان سمیت آن‌ها نیز اثر می‌گذارد، [۱۷۹].

ذ) محیط و زمان ذخیره

محیطی که در آن نانو ذرات سنتز شده یا ذخیره می‌شوند نیز در تعیین اثرات سمی آن‌ها نقش ایفا می‌کند. تغییر در قدرت یونی ممکن است اندازه و نتیجتاً میزان سمیت نانو ذرات را تغییر دهد. مطالعات بیانگر این است که سمیت نانو ذرات با ذخیره شدن آن‌ها برای زمان طولانی در هر محیطی که باشد تغییر می‌کند.

۳-۲-۲-۵- راه‌های ورود نانو ذرات به بدن انسان

در روند سنتز تا مرحله استفاده مواد نانو ساختار انسان درخطر مواجهه با نانو ذرات می‌باشد. ورود نانو ذرات به بدن انسان از طریق مسیرهای زیر صورت می‌گیرد:

- نفوذ در غدد پوستی
- ورود به سیستم تنفسی از طریق تنفس
- ورود به سیستم گوارشی از طریق بلعیدن
- در حال حاضر، درک مکانیسم انتشار نانو ذرات در سیستم بدن انسان، جذب توسط سلول‌ها و بافت‌ها، شیوه پخش و توزیع آن‌ها مبهم و غیر دقیق بوده و در سرتاسر جهان در مرحله بررسی و پژوهش قرار دارد. شیوه‌های اصلی مواجهه بدن انسان در برابر نانو ذرات، جذب از طریق پوست، بلعیدن از طریق مواد غذایی و تنفس از طریق سیستم تنفسی است. نانو ذرات، از طریق سیستم تنفسی و گردش خون، به سایر ارگان‌های بدن نفوذ می‌کنند[۱۸۰].

الف) جذب توسط پوست

با توسعه زمینه‌های مرتبط با ترکیبات نانو احتمال مواجهه انسان از طریق ورود نانو ذرات از راه پوست و سپس ورود به گردش خون افزایش پیداکرده است. دو مکانیسم محتمل در مورد نفوذ نانو ذرات به پوست وجود دارد: (۱) مکانیسم بین سلولی اپیدرمال یا انتشار از طریق روزنه‌های پوستی و (۲) حفره‌های مو. جذب اصلی نانو ذرات ممکن است با شیوه‌های مختلف انجام شود. ذرات قابل حل در چربی که می‌توانند از طریق مکانیسم چربی بین سلولی و سلول‌های استراتوکورنیوم نفوذ کنند، مسیرهای سلول‌های ترانس سلولار، فولیکول مو و مجاری عروق از جمله مکانیسم‌های نفوذ نانو ذرات در پوست می‌باشند، از جمله خطرات نانو ذرات می‌توان به سمیت نانو ذرات برای سلول‌های پوست در حین تجمع در پوست برای مدت زمان طولانی، متابولیسم با پتانسیل سمیت بالا و فعالیت نوری نانو ذرات اشاره کرد. پوست انسان یک مانع مؤثر در برابر نانو ذرات و سایر مواد شیمیایی سمی است. با این وجود حفره‌های مو و غدد عرق این مانع را در برابر نفوذ نانو ذرات کوچک آسیب‌پذیر می‌کنند. بیشترین نفوذ نانو ذرات از طریق حفره‌های مو زمانی محتمل‌تر است که لایه محافظتی پوست از بین رفته، دچار صدمه و یا جراحت شده است، [۱۸۰].

ذراتی که اندازه ۱۰۰۰ نانومتر یا کوچک‌تر دارند می‌توانند از طریق پوست یک شخص نرمال نفوذ کنند و این موضوع مورد توافق پژوهشگران می‌باشد.

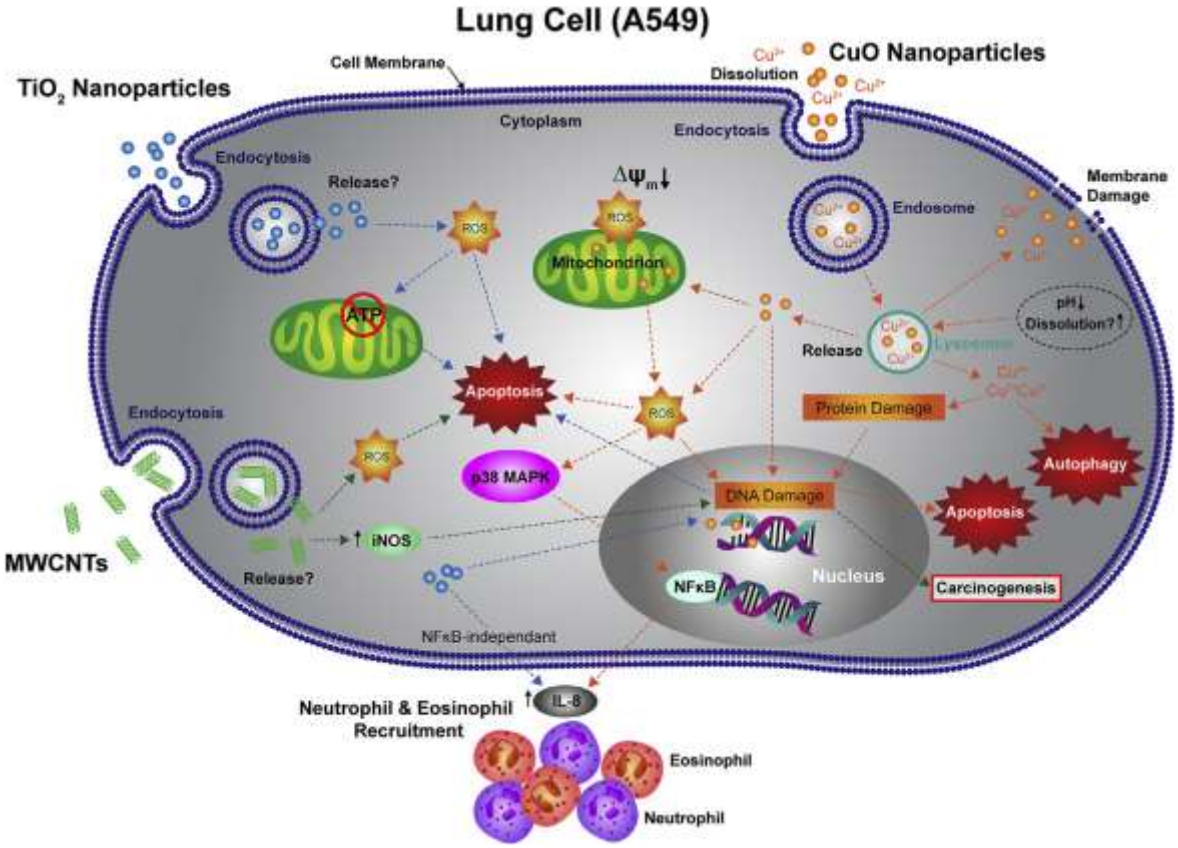
زمانی که این ذرات راهی برای ورود به پوست پیدا کنند، شکل‌های مختلف سمیت خود را می‌توانند نشان دهند. ممکن است حساسیت‌زا یا محرک باشند و یا ممکن است بخش‌های سلولی یا زیر سلولی بدن را مورد صدمه قرار دهند، همچنین ممکن است واکنش‌های شیمیایی را ایجاد کنند که باعث اکسیداسیون ترکیبات موجود در بدن انسان شوند. به طور مثال نانو لوله‌های کربن سبب اختلال بیولوژیکی و تولید فسفوریالسیون اکسیداتیو و تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن می‌شود، [۱۸۰].

ب) جذب از طریق تنفس

نانو ذرات می‌توانند از طریق تنفس، وارد عمق ریه‌ها شوند. این امر می‌تواند التهاب و اثرات مزمنی را با نفوذ به بافت ریه ایجاد کند و نهایتاً ممکن است به غدد لنفاوی نیز نفوذ کند.

رفتار مواد ریز جذب شده از طریق تنفس با رفتار گازها یا مایعات فرار متفاوت است، این امر به آئرودینامیک مشخصات فیزیکی و شیمیایی ذرات، سیستم تنفسی، وضعیت سلامت ارگان یا محل قرار گرفتن این ذرات بستگی دارد. حرکت مواد به سمت ریه‌ها و تجمع در سیستم تنفسی به ۳ فاکتور اصلی، ساختار آناتومی دستگاه تنفسی، الگوهای جریان هوا و خصوصیات حرکتی ذره‌ها بستگی دارد. زمان پاک‌سازی ذره‌ها بستگی به میزان عمقی دارد که جذب ریه‌ها شده‌اند. به طور مشابه، واکنش ذرات با سلول و بافت با افزایش عمق نفوذ، افزایش می‌یابد. این ذرات کوچک وقتی انباشته می‌شوند، می‌توانند از موانع بافتی خون-هوا عبور کرده و جذب گردش خون شوند و به سایر اعضا بدن وارد شوند. با این وجود ذرات حل نشدنی برای مدت طولانی در ریه‌ها می‌مانند و باعث تخریب سلولی و اختلال بیولوژیکی بافت‌ها می‌شود. به طور مثال سمیت نانو کربن‌های لوله‌ای در صورت ورود از طریق تنفس، التهاب شدیدتر و اثرات نامطلوب‌تری در مقایسه با ورود از طریق دهانی یا پوستی ایجاد می‌کنند. پس از تنفس نانو کربن‌های لوله‌ای این ذرات با سلول‌ها، پروتئین‌ها، و بافت‌های ارگان‌های زیستی ارتباط برقرار می‌کنند و ممکن است ساختار خود را حفظ کنند یا با توجه به خواص فیزیک و شیمیایی خود متابولیزه شده و توسط گردش خون در بخش‌های مختلف بدن جابجا شوند. از عوامل تأثیرگذار و تعیین‌کننده در سمیت نانو کربن‌های لوله‌ای می‌توان به ابعاد، خلوص مواد، عامل اتصال، شیوه‌های تولید و تغییرات این عوامل اشاره کرد. نانو ذرات می‌توانند باعث تحریک و آسیب به بینی نیز شوند. قدرت حس بویایی و مرطوب نگه داشتن کاهش می‌یابد و این اثرات با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات برجسته‌تر می‌شوند.

اثرات تنفسی نانو ذرات بر ریه‌ها به عواملی چون۱- غلظت آن‌ها، ۲- جذب در ریه‌ها، ۳-ابعاد ذرات، ۴- مقاومت ذرات و ۵- مکانیسم مقاومت و پاک‌سازی سلول‌ها، بستگی دارد. ماهیت واکنش‌پذیر این ذرات ممکن است به ماکروفاژها و سلول‌های اپی تلیال آسیب برساند و منجر به التهاب ریه‌ها شود. تنفس نانو ذرات و انتقال آن‌ها و سرنوشتشان در ریه‌ها در جذب توسط یک سلول ششی به طور شماتیک در شکل ۵-۱ توصیف‌شده است، [۱۷۷].



شکل ۵–۱: سرنوشت نانو ذرات جذب‌شده توسط یک سلول شش [۱۷۷]

ب) جذب از طریق بلعیدن

بلعیدن نانو ذرات از راه‌های اصلی ورد آن‌ها به بدن انسان می‌باشد. نانو ذرات بلعیده شده با توجه به ماهیتشان اگر ناپایدار باشند دفع می‌شوند و یا توسط تغییرات فیزیکی یا شیمیایی به هم پیوسته شده و بزرگ شده و باعث انسداد دستگاه گوارش و مرگ می‌شوند. نانو ذرات ممکن است به خاطر زباله‌هایی که در آب‌ها رها می‌شوند در منابع غذایی دریایی واردشده و تجمع یابند و ازآنجا این منابع غذایی ممکن است توسط انسان خورده شده و وارد بدن انسان شوند. نانو ذرات وقتی وارد گردش خون کبدی می‌شوند ممکن است رفتار متفاوتی از خود نشان دهند. آن‌ها می‌توانند هپاتوکسیک باشند یا در مجاری صفراوی و مجاری پانکراس رسوب‌کرده و باعث انسداد و یا فیبروزیس تدریجی شوند. آن‌ها ممکن است باعث تغییر نفوذپذیری سیستم گوارشی و ایجاد زخم، ضعیف شدن سلول‌های اپیتلیال، ایجاد متاپالزیا یا دیسپالزیا، سوء جذب مواد و یا در موارد حاد ممکن است باعث خونریزی مزمن شوند، [۱۷۹].

۴-۲-۵-۲- فاکتورهای محیطی مؤثر بر سمیت نانو ذرات

عوامل زیست‌محیطی می‌توانند در سمیت نانو ذرات نقش داشته باشند. شرایط آب و هوایی مانند رطوبت، دما، سرعت جریان باد، ارتفاع جغرافیایی و ماهیت نور می‌توانند بر ویژگی‌های خاصی از نانو ذرات که باعث سمیت آن‌ها می‌شوند تأثیر بگذارند. در دماهای بالاتر، نانو ذرات می‌توانند با سرعت بالاتری نسبت به دماهای پایین‌تر یا معمولی

پراکنده شوند. کاملاً مشخص‌شده است که نانو ذرات در نورهای مختلف مانند نور مرئی و فرابنفش رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. سرعت باد می‌تواند در نفوذ این ذرات بسیار ریز در بافت‌های گیاهی و جانوری نقش داشته باشد. برخی از بیماری‌ها در یک محل جغرافیایی خاص میزان بروز بالایی دارند و در مورد سمیت نانو ذرات هم می‌توان چنین رفتاری را انتظار داشت، [۱۷۹].

۵-۲-۲-۵- اثرات نانو ذرات بر محیط آبزیان

میزان تأثیرپذیری در برابر سمیت نانو ذرات در گونه‌های مختلف موجودات آبزی با هم متفاوت است. تعیین میزان دقیق نانو ذرات در محیط آبزیان هنوز چالش برانگیز است. علاوه بر اندازه ذره که نسبت سطح بالایی را نسبت به حجم نانو ذرات ایجاد می‌کند، سازگاری زیستی نانو ذرات با ارگانیسم به بار سطحی و واکنش‌پذیری شیمیایی آن‌ها نیز بستگی دارد. اندازه ذره و تجزیه زیستی ذرات ممکن است اثرات بیولوژیکی خطرناکی بر موجودات دریایی داشته باشد. ذرات کوچک به دلیل مساحت سطحی بالا می‌توانند گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن را تولید کنند که بسیار مضر بوده و آسیب‌های جدی به پروتئین‌ها، DNA و غشاها وارد می‌کنند. نانو ذرات ممکن است از طریق آب‌شش‌ها و یا سیستم گوارشی و یا از طریق بلعیدن وارد بدن موجودات دریایی شوند. در برخی از گونه‌های آبزی برخی از ارگان‌ها بیشتر از دیگر ارگان‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. انتقال نانو ذرات در زنجیره غذایی یک موضوع بسیار جدی می‌باشد، [۱۷۹].

۶-۲-۲-۵- تأثیرات نانو ذرات بر محیط خاک

خاک زیستگاه بسیاری از باکتری‌ها، میکروب‌ها، کرم‌ها و حشرات است که تغییر در جمعیت آن‌ها می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیر زیست محیطی ایجاد کند. نانو ذرات می‌توانند اثر مستقیم بر میزان رشد و جمعیت آن‌ها داشته باشند. با تعیین میزان فعالیت آنزیم‌ها در خاک می‌توان اثرات فعالیت انسانی بر محیط خاک را پیش‌بینی کرد. به طور مثال مواجهه با غلظت‌های بالای نانو ذراتی مانند نقره برای یک مدت طولانی ممکن است رشد جمعیت میکروبی را به صفر برساند. این ذرات همچنین بر سیستم ایمنی کرم‌های خاکی نیز تأثیر می‌گذارند. نانو ذرات ZnO، تأثیرات نامطلوب بر باروری کرم‌های خاکی می‌گذراند، [۱۷۹].

۷-۲-۲-۵- تدوین استانداردهای حوزه نانو در ارتباط با سلامتی، ایمنی و محیط‌زیست

با توجه به اهمیت تأثیر فناوری نانو بر سلامتی، ایمنی و محیط‌زیست، همان‌طور که در فصل دوم بیان‌شده کمیته فنی متناظر استانداردسازی فناوری نانو با مشارکت سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، با عنوان کمیته فنی ISIRI/TC229 در تیرماه ۱۳۸۵ با هدف استانداردسازی فناوری نانو تشکیل شد. این کمیته به صورت متناظر با کمیته بین‌المللی استانداردسازی فناوری نانو (ISO/TC229) فعالیت می‌کند. همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، این کمیته شامل چهار کارگروه می‌باشد که کارگروه سوم "ISIRI/TC229/WG3" با عنوان "سلامتی، ایمنی و محیط‌زیست" حوزه کاری این کارگروه، توسعه و تدوین استانداردها در زمینه مسائل زیست‌محیطی، ایمنی و سلامت، تعیین تجهیزات حفاظت شخصی و کنترل‌های

مهندسی، تدوین دستورالعمل‌های ایمنی، بررسی و ارزیابی سمیت و خطرات در حوزه فناوری نانو می‌باشد که تا حال چندین استاندارد با عنوان زیر در این کارگروه تدوین‌شده است:

۱. آیین کار سلامت و ایمنی در محیط‌های کار با نانو مواد (سال تدوین: ۱۳۸۸)
۲. فناوری نانو- بسته‌بندی و حمل‌ونقل ایمن نانو مواد- آیین کار (سال تدوین: ۱۳۹۰)
۳. فناوری نانو - تولید نانو ذرات فلزی برای آزمون سمیت استنشاقی با استفاده از روش تبخیر – تراکم (سال تدوین: ۱۳۹۰)
۴. فناوری نانو-تعیین مشخصات نانو ذرات در محفظه‌های مواجهه استنشاقی برای آزمون سمیت استنشاقی (سال تدوین: ۱۳۹۳)
۵. فناوری نانو-مشخصه‌های سوسپانسیون‌های کاری نانو اشیاء برای سنجش برون تن به منظور ارزیابی سمیت ذاتی نانو شی (سال تدوین: ۱۳۹۵)
۶. فناوری نانو -آموزش سلامت و ایمنی برای نیروی کار -راهنما (سال تدوین: ۱۳۹۵)

همچنین همان‌طور که در فصل دوم شرح داده شد استاندارد ASTM نیز در کمیته E56 باهدف استانداردسازی نانوتکنولوژی در سال ۲۰۰۵ توسط انجمن استاندارد ASTM تشکیل شد که استاندارد ASTM E2535-2007 را برای به حداقل رساندن آلودگی نیروی کار انسانی به مواد مضر نانو است؛ در واقع مدیریت استفاده صحیح از نانو ذراتی که انسان‌ها در هنگام تولید، آزمایش یا تحقیقات با آن‌ها سر و کار دارند در این استاندارد تجمیع شده است.

همچنین در میان استانداردهای ملی کشورهای مختلف در زمینه نانو، کشور انگلستان دو استاندارد ایمنی " PD 6699-2:2007" و "PAS 130:2007" که به ترتیب با عناوین "راهنمای ایمنی، هندلینگ و مصرف نانو مواد تولید شده" و "راهنمای برچسب‌گذاری نانو مواد تولیدی و محصولات نانو ساختار حاوی نانو ذرات" منتشر نموده است.

۳-۵- مطالعه موردی اقتصادی به‌کارگیری از این مواد در سازه‌ها

۱-۳-۵ - برآوردهای کمّی بازار نانوتکنولوژی[۱] و میزان توجه دولت‌ها به این بازار

کمّی کردن تأثیرات اقتصادی نوآوری‌های مختلف در زمینه نانوتکنولوژی همواره یک چالش بزرگ برای فعالان این عرصه بوده است. سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[۲] (OECD) و بنیاد نوآوری‌های ملی نانوتکنولوژی آمریکا[۳]

[۱] Nanotechnology Market
[۲] Organization for Economic Cooperation and Development
[۳] U.S. National Nanotechnology Initiative

(NNI) نشستی را در سال ۲۰۱۲ با تمرکز بر این موضوع برگزار کردند که چگونه می‌توان تأثیرات اقتصادی پیشرفت‌های نانوتکنولوژی را ارزیابی کرد. البته این نشست بیش از آنکه پاسخی برای این پرسش بیابد، سؤالات دیگری را در ذهن‌ها ایجاد کرد، [۱۸۱]. نکته قابل توجهی که در ابتدا باید مورد توجه قرار گیرد این است که اطلاعات و داده‌های مرتبط با برآورد اقتصادی و مطالعات امکان‌سنجی[۱] در بازار نانوتکنولوژی با توجه به حساسیت بالا و تازه ظهور بودن این علم، در بسیاری از شرکت‌های خصوصی یا حتی دولتی به صورت محرمانه نگهداری می‌شود و در دسترس عموم قرار ندارد. البته این محرمانگی در حوزه‌های دیگر هم مطرح است اما به دلیل احتمال سودآوری بالا و رقابت شرکت‌های تحقیقاتی در حوزه نانو، دسترسی به این اطلاعات دشوارتر است. با این وجود با فرض دسترسی به داده‌های کامل، چالش‌های دیگری مطرح می‌گردد که حل آن‌ها در برآورد دقیق اقتصادی راهگشا خواهد بود.

۱) تعیین درآمدهایی که به صورت مستقیم و غیرمستقیم از استفاده از تکنولوژی نانو حاصل می‌شود و اندازه‌گیری آن‌ها کار سهلی به نظر نمی‌رسد.
۲) چگونگی ارزیابی ارزش یک نوآوری در صنعت نانو که جزء کوچک اما اساسی یک محصول یا فرآیند است.
۳) در حصار نانوتکنولوژی، چه محصول یا خدماتی کنار زده می‌شوند، [۱۸۲].

سرمایه‌گذاری دولت‌ها در حوزه نانو در سال‌های اخیر شتاب بیشتری گرفته است. با مشاهده نتایج و تجارب کشورهای پیشتاز در این حوزه، سایر دولت‌ها هم وارد این حوزه شدند و رقابت علمی و صنعتی در موضوع نانوتکنولوژی شدت گرفته است. برآورد میزان تأثیرگذاری سرمایه‌گذاری دولت‌ها در حوزه نانو با استفاده از معیارهایی صورت می‌گیرد که در اینجا به چند مورداشاره می‌گردد؛ اول خروجی‌های مستقیم شامل تعداد مقالات چاپ‌شده در نشریات معتبر دنیا و تعداد ثبت اختراع در این حوزه، دوم نتایج کوتاه مدت مانند دریافت جوایز و اعتبارات شرکت‌های کوچک به جهت کمک به رشد تکنولوژی و سوم نتایج بلند مدت مانند اشتغال‌زایی، افزایش تولید، افزایش فروش و تأسیس شرکت‌های بزرگ در این حوزه، [۱۸۳].

اما مهم‌تر از همه موارد ذکر شده، بررسی فواید اجتماعی پیشرفت صنایع مرتبط با نانو در یک کشور است. یک معیار خوب برای بررسی فواید اجتماعی، تأثیر آن در اقتصاد کشور است. البته واضح است که نباید تأثیرات اجتماعی را به حوزه اقتصاد محدود کرد؛ با این وجود اگر تأثیرات اجتماعی را فقط به حوزه اقتصاد محدود کنیم ارزیابی ارزشی که نانوتکنولوژی به یک پروسه یا خط تولید اضافه می‌کند کار نسبتاً سختی است، [۱۸۴].

دپارتمان محیط‌زیست، غذا و امور روستایی بریتانیا[۲] طی مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۲ تأثیر اقتصادی استفاده از علم نانو در تولید یک محصول را مورد ارزیابی قرار داد. آن‌ها در یک حالت بدون استفاده از نانوتکنولوژی و در یک حالت با استفاده از آن، عایدی حاصل از تولید این محصول را بررسی کردند. ارزیابی آن‌ها نشان داد ارزشی که در اثر استفاده از نانوتکنولوژی به اقتصاد بریتانیا اضافه شده چشمگیر نبوده است؛ البته جزئیات این برآوردها در دسترس عموم قرار نگرفت، [۱۸۵].

---

[۱] feasibility study

[۲] The United Kingdom Department for Environment, Food, and Rural Affairs

بر اساس گزارشی که دولت روسیه از اطلاعات جمع‌آوری‌شده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ منتشر کرد، سالانه ۶ میلیارد دلار ارزش ایجاد شده ناشی از فروش محصولات نانو را برآورد کرده است، [۱۸۱].

گزارشی از شرکت مشاوره لوکس ریسرچ[۱] در سال ۲۰۱۴ منتشر شد که نشان داد فروش کل محصولات و خدمات مرتبط با نانو در سال ۲۰۱۰، ۳۳۹ میلیارد دلار بوده و در سال ۲۰۱۲ این رقم به ۷۳۱ میلیارد دلار رسیده است که رشد چشمگیر فروش محصولات این حوزه را نشان می‌دهد، [۱۸۶].

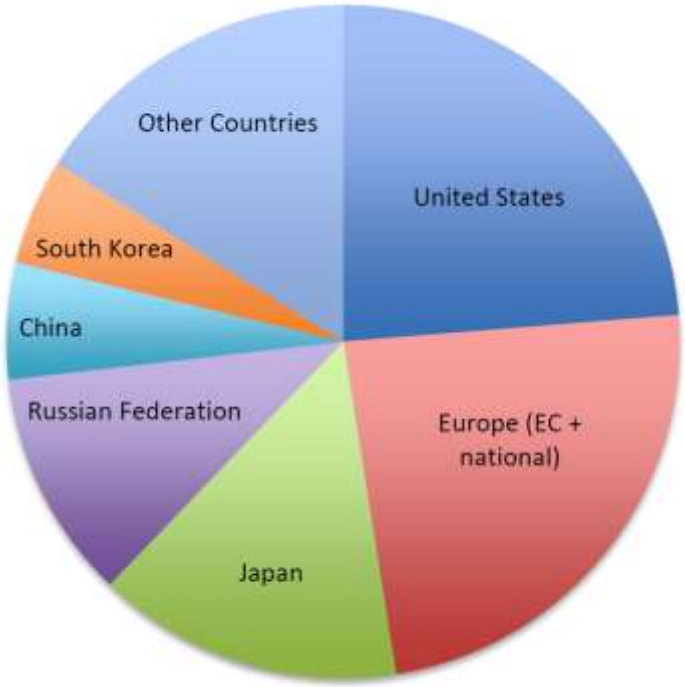
میهیل روکو[۲]، مشاور عالی بنیاد ملی علوم آمریکا و رئیس زیرکمیته علوم، مهندسی و فناوری نانو از کمیته علوم و فناوری ملی این کشور، ارزش بازار نانو را با شاخص‌های جدول ۵–۱۰ در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ تخمین زده است، [۱۸۷]. این مشاهده نشان می‌دهد در طی ۱۰ سال با افزایش بودجه تحقیقات در زمینه نانوتکنولوژی از ۱/۲ میلیارد دلار به ۱۸ میلیارد دلار، ارزش بازار تولیدات نهایی ۱۰ برابر شده است.

جدول ۵–۱۰: مقایسه شاخص‌های توسعه فناوری نانو در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰، [۱۸۷]

	Primary Workforce	Papers in SCI-Indexed Journals	Patent Applications	Market Value of Final Products	Public & Private R&D Funding	Venture Capital
2000	60,000	18,000	1,200	$30B	$1.2B	$0.21B
2010	600,000	80,000	20,000	$300B	$18B	$1.3B

سرمایه‌گذاری روی تحقیق و توسعه نانوتکنولوژی در کشورهای پیشرفته در سال‌های گذشته در اولویت قرارگرفته است، چراکه ارزش‌افزوده ناشی از این بازار می‌تواند به رقم‌های بالایی برسد. در سال ۲۰۱۲ مجموع سرمایه‌گذاری دولت‌ها در بخش تحقیق و توسعه نانو ۷/۹ میلیارد دلار بوده است. در شکل ۵–۲ به تفکیک، سهم کشورهای مختلف از این رقم آورده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده‌شده است، ایالات متحده آمریکا، اروپا، ژاپن و روسیه بیشترین سرمایه‌گذاری را در این حوزه داشته‌اند، [۱۸۶].

[۱] Lux Research
[۲] Mihail Roco



شکل ۵–۲: هزینه کشورهای مختلف در بخش R&D نانوتکنولوژی در سال ۲۰۱۲ (مقدار کل ۷/۹ میلیارد دلار بوده است.)[۱۸۶]

۲-۳-۵ - مطالعه موردی توجیه اقتصادی استفاده از نانوتکنولوژی در مهندسی عمران و صنعت ساخت

ازآنجاکه بررسی توجیه اقتصادی هر طرحی مختص خود آن طرح است و انواع مواد نانو قابلیت استفاده شدن در بخش‌های سازه‌ای مختلفی را دارند، در این پژوهش، مقالاتی که به برآورد اقتصادی بهسازی خواص بتن و خاک بستر با استفاده از نانو مواد پرداخته‌اند، به صورت جداگانه بررسی‌شده و در نهایت یک نتیجه‌گیری از مجموع مشاهدات این حوزه ارائه می‌گردد.

۱-۲-۳-۵- مطالعه امکان‌سنجی اقتصادی[۱] راه‌اندازی خط تولید سیمان نانو در عراق (کارخانه سیمان شهر کوفه)[188]

این برآورد که در سال ۲۰۱۷ در قالب یک مقاله انجام شده است، به بررسی توجیه اقتصادی اضافه شدن خط تولید سیمان نانو در یک کارخانه سیمان در عراق پرداخته است. به این منظور ابتدا با استخراج کلیه هزینه‌ها اعم از هزینه‌های ثابت[۲] و متغیر[۳] و سپس تخمین درآمد[۴] ناشی از فروش این محصول، با استفاده از سه معیار ارزش فعلی

[۱] economic feasibility study
[۲] fixed costs
[۳] Variable costs
[۴] Revenue

خالص[۱](NPV)، نرخ بازده داخلی[۲] (IRR) و نقطه سر به سر[۳] (BEP) توجیه اقتصادی طرح مورد بررسی قرارگرفته است. در ادامه سه شاخص مذکور تعریف شده است.

ارزش فعلی خالص(NPV): این پارامتر تفاضل ارزش فعلی تمام هزینه‌ها و درآمدهای پروژه در سال‌های مختلف است. درواقع برای محاسبه NPV ابتدا همه هزینه‌ها و درآمدها در سال‌های مختلف بر اساس نرخ تنزیل به ارزش زمان حال تبدیل می‌گردد و در نهایت اختلاف این دو، ارزش فعلی خالص را نشان می‌دهد. این معیار طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{NPV}=\sum_{i=0}^{n}\left(\frac{Ri-Ci}{(1+r)^{i}}\right) \quad (۱)$$

در این رابطه R_i درآمد سال i، C_i هزینه سال i، r نرخ تنزیل و n عمر طرح است. پس از محاسبه مقدارNPV، این شاخص اگر مثبت باشد یعنی طرح توجیه اقتصادی دارد و اگر منفی باشد یعنی طرح قابل قبول نیست. صفر بودن این شاخص هم یعنی طرح، حداقل نرخ جذب‌کننده برای سرمایه‌گذاری را تأمین می‌کند.

نرخ بازده داخلی(IRR): نرخ بازده داخلی در واقع نرخ تنزیلی است که مقدار ارزش فعلی خالص را صفر می‌کند. به عبارت‌دیگر IRR نرخ سودی است که سرمایه‌گذار از سرمایه‌گذاری در آن طرح به دست می‌آورد.

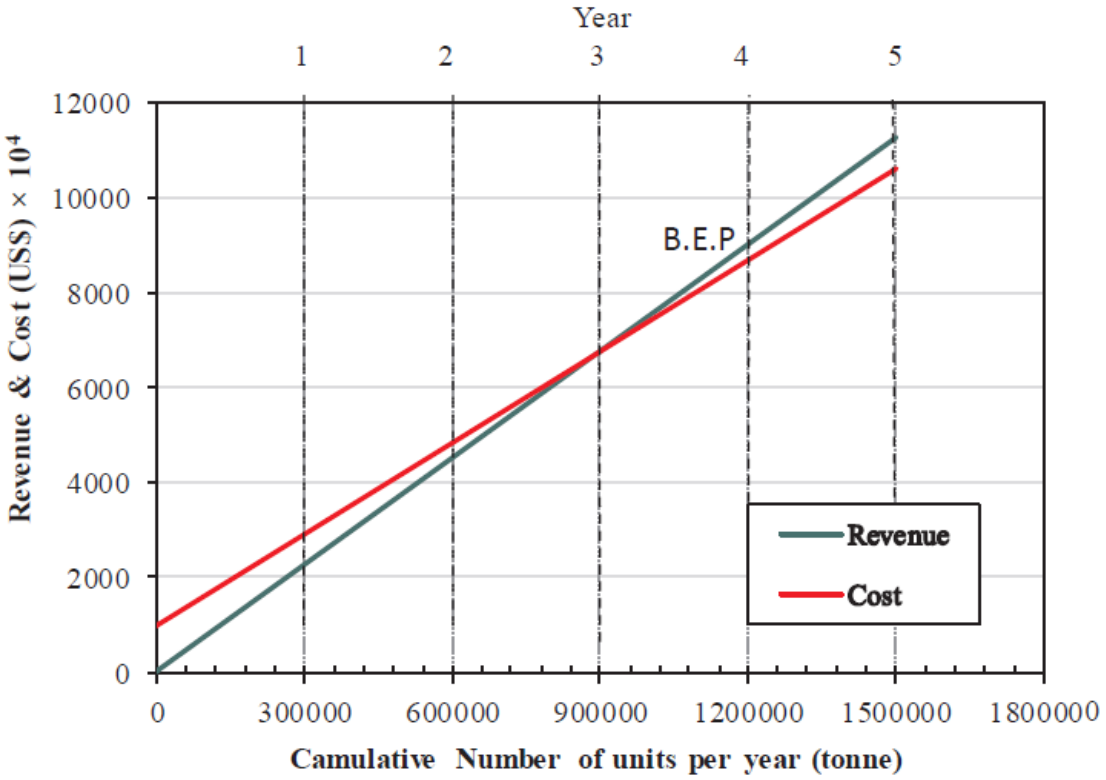
$$\sum_{i=0}^{n}\left(\frac{Ri-Ci}{(1+IRR)^{i}}\right)=0 \quad (۲)$$

با استفاده از این شاخص، یک پروژه زمانی توجیه اقتصادی دارد که مقدار IRR بزرگ‌تر یا مساوی حداقل نرخ بازگشت جذب‌کننده[۴](MARR) باشد.

نقطه سر به سر (BEP): زمانی که مجموع هزینه‌های پروژه با مجموع درآمدهای آن برابر گردد.

در کارخانه سیمان مورد مطالعه نرخ بازده داخلی ۲۶/۸٪ به دست آمد که از حداقل نرخ جذب‌کننده با توجه به نرخ سود و بهره در عراق بالاتر است؛ NVP مثبت و نقطه سر به سر مطابق شکل ۵-۳ در سال سوم است. این پژوهش در نهایت نشان داد که در این کارخانه، تولید سیمان نانو نسبت به تولید سیمان عادی درخط تولید قبلی هم قیمت تمام شده کمتر و هم کیفیت بالاتری را نتیجه می‌دهد؛ بنابراین از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است، [۱۸۸].

[۱] Net present value
[۲] Internal rate of return
[۳] Break − even point
[۴] Minimum attractive rate of return



شکل ۵–۳: نمودار هزینه و درآمد پروژه در ۵ سال نخست و تعیین نقطه سر به سر[۱۸۸]

۲-۲-۳-۵- بررسی تأثیرات اقتصادی استفاده از نانو سیلیس در بتن [189]

در این قسمت، اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی اضافه شدن نانو سیلیس به سیمان مورد بررسی قرارگرفته که با صرف‌نظر از بخش زیست‌محیطی، در این بخش به بررسی اثرات اقتصادی می‌پردازیم. برای ارزیابی اقتصادی، طبق توصیه ASTM[۱] از روش ارزیابی چرخه عمر[۲](LCA) استفاده شده است.

در این روش با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های بالادستی و پایین‌دستی، یک سیستم را بر اساس چرخه عمر محصولات یا فرآیندها ارزیابی می‌کنند. به طورکلی LCA از ۴ مرحله تشکیل می‌شود: ۱) تعریف اهداف و محدودیت‌ها ۲) تهیه فهرست چرخه عمر ۳) ارزیابی اثرات سیستم ۴) تفسیر نتایج به‌دست‌آمده، [۱۹۰]. برای مقایسه اثرات اقتصادی، دو سناریو در نظر گرفته‌شده است. سناریوی اول بتن ساخته‌شده با سیمان پرتلند و فاقد نانو سیلیس است و سناریوی دوم بتن حاوی ۱/۵ درصد نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان در نظر گرفته‌شده است.

[۱] American Society for Testing and Materials
[۲] Life Cycle Assessment

۱-۲-۳-۵- ارزیابی هزینه‌ای چرخه عمر (LCC)[۱]

همواره برای انبوه‌سازی تولید یک محصول، بررسی توجیه اقتصادی، مرحله مهم و تعیین‌کننده‌ای است. طبق استاندارد ASTM (E917) از روش LCC برای برآورد اثرات اقتصادی استفاده شده است. در این روش طبق رابطه ۳ هزینه‌ها بر اساس ارزش حال محاسبه می‌شوند.

$$LCC_j=\sum_{t=0}^{N}\frac{Ct}{(1+d)\hat{}t} \qquad (۳)$$

در این رابطه LCC_j کل هزینه چرخه عمر، N تعداد سال موردمطالعه، C_t هزینه سال t و d نرخ تنزیل پول است که در این مقاله با توجه به آمار بانک مرکزی ۰/۱۲ در نظر گرفته شده است.

در ابتدا با توجه به فهرست بهای سال ۸۹، هزینه‌های مربوط به تولید ۱ مترمکعب بتن با توجه به دو سناریوی مطرح شده برآورد شده است. هزینه‌های پایان عمر مفید بتن شامل هزینه‌های تخریب، حمل و دفن نخاله و هزینه تولید مجدد برآورد شده و برای هر دو سناریو مورد مقایسه قرارگرفته است. نتایج نشان می‌دهند با توجه به قیمت نانو سیلیس در بازار، هزینه تولید یک مترمکعب بتن حاوی ٪۱/۵ نانو سیلیس، ۱/۸۸ برابر هزینه تولید یک مترمکعب بتن معمولی است و این نشان می‌دهد در کوتاه مدت استفاده از این مصالح صرف اقتصادی ندارد؛ اما در بلند مدت، با ارزیابی اقتصادی یک مترمکعب بتن حاوی ٪۱/۵ نانو سیلیس به این نتیجه می‌توان رسید که هزینه چرخه عمر آن در مقایسه با بتن معمولی ۱۰ درصد کاهش می‌یابد، [۱۸۹]. در ادامه، اثرات تلفیقی زیست‌محیطی-اقتصادی در نظر گرفته شده و در انتها با ارزیابی نمرات به‌دست‌آمده از دو سناریو در بخش اقتصادی و زیست‌محیطی، نتیجه می‌شود که بتن حاوی ۱/۵ درصد نانو سیلیس در مقایسه با بتن معمولی، عملکرد بهتری را در دراز مدت از خود نشان می‌دهد، [۱۸۹].

۲-۳-۵- بررسی صرفه اقتصادی بتن سبک با مقاومت بالا با استفاده از مواد نانو

بتن‌های ساخته‌شده از این طریق دارای مقاومت نهایی بالا و وزن پایین هستند. برای تولید این نوع بتن از شیشه‌های توخالی و میکروسفرهای آلومینوسیلیکات[۲] استفاده می‌شود. استفاده از این نوع بتن به‌ویژه برای ساختمان‌های بلند پیشنهاد می‌شود. همچنین برای سازه‌های پیش‌ساخته، پل‌ها و سازه‌های خاص این نوع بتن قابل‌استفاده است. با استفاده از این نوع بتن، وزن سازه تا ۴۰ درصد می‌تواند کمتر شود و این می‌تواند نیروی وارده به فونداسیون را کاهش دهد. تعداد طبقات سازه می‌تواند افزایش یابد و علاوه بر این، ساخت سازه در مناطق با خاک ضعیف هم ممکن می‌شود. این نوع بتن ضریب هدایت حرارتی پایینی دارد و طبیعتاً هزینه‌های مربوط به عایق‌کاری را کاهش داده و از اتلاف انرژی جلوگیری به عمل می‌آورد، [۱۹۲]. پیاده‌سازی فنّاوری‌های ساخت و توسعه و دستاوردهای علمی در علم مواد که به طور مستقیم بر سرعت و اثربخشی پروسه‌های ساخت اثرگذارند، بدون صرفه اقتصادی غیرممکن است.

---

[۱] Life-Cycle Cost

[۲] Hollow Microspheres

جدول ۵–۱۱: تجربه کشورهای مختلف در تولید بتن سبک [۱۹۱]

سال	کشور	مقاومت فشاری MPa	چگالی متوسط Kg/m^3
۱۹۹۷	کویت	۵۰–۴۵	۱۸۵۰–۱۸۰۰
۱۹۹۹	نروژ	۷۰–۶۵	۱۹۳۰–۱۹۰۰
۱۹۹۹	کویت	۲۲–۲۰	۱۵۲۰–۱۵۰۰
۲۰۰۲	آلمان	۲۵–۱۴	۱۸۵۰–۱۸۰۰
۲۰۰۳	برزیل	۵۰–۴۰	۱۶۰۰–۱۴۵۰
۲۰۰۳	ترکیه	۴۰–۳۰	۱۸۶۰–۱۸۰۰
۲۰۰۴	ژاپن	۵۴–۴۷	۱۸۵۰–۱۸۰۰
۲۰۰۷	روسیه	۶۱–۴۶	۱۸۵۰–۱۸۰۰
۲۰۰۷	روسیه	۴۸–۴۲	۱۶۵۰–۱۶۰۰
۲۰۱۰	مالزی	۴۸–۴۳	۱۹۹۰–۱۸۷۰
۲۰۱۱	ترکیه	۶۰–۴۲	۱۹۶۰–۱۸۴۰
۲۰۱۱	پرتقال	۸۰–۴۰	۲۰۰۰–۱۵۰۰

تولید بتن سبک و با مقاومت بالا به دلیل مزایای زیادی که برای آن می‌توان برشمرد، از حدود سال‌های ۱۹۹۷ به بعد در بسیاری از کشورها دنبال می‌شود. همان‌طور که در جدول ۵-۱۱ مشاهده می‌شود مقاومت فشاری این نوع بتن در حدود ۴۰ تا ۶۰ مگا پاسکال و میانگین جرم مخصوص ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در بسیاری از کشورها تجربه شده است. اما استفاده از این نوع بتن در سازه، قطعاً باید با بررسی صرفه اقتصادی آن عملیاتی شود. در ادامه، محاسبات بررسی صرفه اقتصادی این نوع بتن آمده است.

برآورد صرفه اقتصادی برای طراحی سازه می‌تواند با روابطی بررسی شود. سبک شدن بتن می‌تواند باعث کاهش بار روی فونداسیون و ستون‌ها شده و به افزایش تعداد طبقات و کاهش هزینه ساخت هر مترمربع بیانجامد. جرم کل ساختمان با استفاده از بتن سنگین معمول، طبق رابطه ۴ به دست می‌آید. در این فرمول N_c تعداد طبقات ساختمان، m_{fl}^c جرم هر طبقه است که طبق رابطه ۵ به دست می‌آید و به هندسه طبقه وابسته است. S مساحت طبقه که از رابطه ۶ به دست می‌آید و ρ_{av}^c میانگین چگالی بتن سنگین است. در رابطه ۶، a، b و h ابعاد طبقه هستند. همچنین در رابطه ۵، $\bar{\delta}$ ضخامت اعضا است، [۱۹۱].

$$M_b^c = m_{fl}^c \, N_c \qquad (۴)$$

$$m_{fl}^c = S \; \bar{\delta} \; \rho_{av}^c \qquad (۵)$$

$$S = 2ah + 2bh + ab \qquad (۶)$$

$\bar{\delta}$ از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن δ_i ضخامت هر جزء بتنی بوده و α_i ضریب وزنی المان i ام.

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^{z} (\alpha_i \delta_i) \qquad (۷)$$

برای بتن سبک پرمقاومت وزن هر طبقه m_{fl}^{nc} طبق رابطه ۸ وابسته به مساحت، ضخامت اعضا و چگالی این نوع بتن است.

$$m_{fl}^{nc} = S \; \bar{\delta} \; \rho_{av}^{nc} \qquad (۸)$$

چگالی پایین بتن می‌تواند اجازه کاهش ضخامت دیوار برای رسیدن به مقاومت و توان انتقال حرارتی مورد نظر را به طراح دهد. در مثال موردنظر، ضخامت کاهش داده‌شده پنل دیوار (δ_i) می‌تواند اجازه کاهش ضخامت بتن و کاهش وزن طبقه را دهد.

$$\delta_{wp} = \delta_{wp0} \frac{\lambda_c}{\lambda_{nc}} \qquad (۹)$$

در رابطه ۹، λ_i هدایت گرمایی است. با استفاده از مقادیر تجربی از وزن بتن معمولی و بتن سبک پر مقاومت[۱] می‌توان نشان داد استفاده از بتن سنگین مساحت کل طبقات را می‌تواند تا ۴۴ درصد افزایش دهد؛ یا از سوی دیگر می‌توان نشان داد سطح زمین موردنیاز می‌تواند با ضریب ۱/۷۱ کاهش یابد. افزایش مساحت کل طبقات به دلیل

[۱] high-strength structural lightweight concretes

کاهش وزن آن‌ها می‌تواند منجر به کاهش هزینه هر مترمربع ساختمان شده در نتیجه صرفه اقتصادی بیشتری داشته باشد.

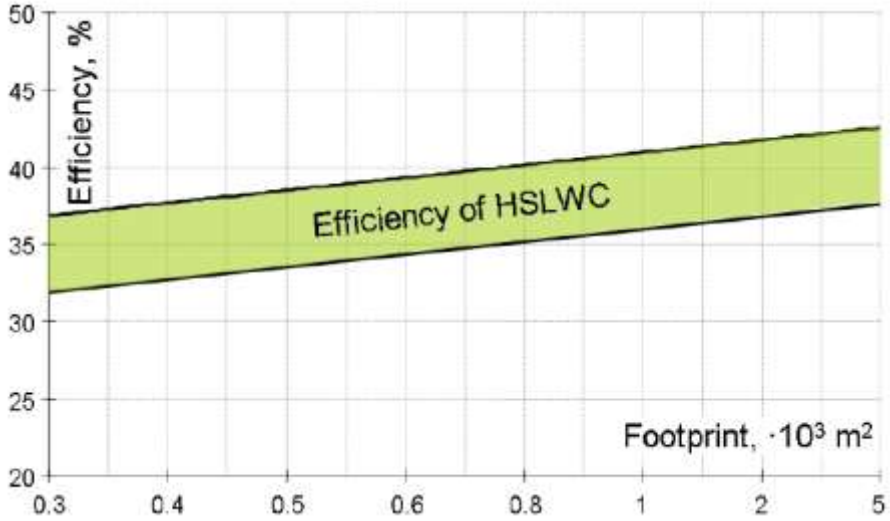
علاوه بر موارد ذکر شده، ویژگی‌های حرارتی بهتر این نوع بتن، اجازه صرفه‌جویی در هزینه عایق‌کاری حرارتی را می‌دهد؛ هدایت حرارتی این نوع بتن دو برابر کمتر از هدایت حرارتی بتن سنگین معمول است. بیشترین صرفه اقتصادی زمانی حاصل می‌شود که از این نوع بتن در دال‌ها و پانل‌های کناری استفاده گردد. در جدول ۵-۱۲ مثالی از محاسبات صرفه اقتصادی بتن پر مقاومت سبک، اصلاح‌شده با مواد نانو آمده است.

همان‌طور که در جدول ۵-۱۲ مشاهده می‌شود بتن سنگین پرمقاومت هم هزینه بیشتری دارد و هم در عین حال درآمد حاصل از فروش ساختمان ساخته‌شده با این نوع بتن بیشتر است و در نهایت مشاهده می‌شود که در این مثال صرفه اقتصادی آن ۴۴/۵ درصد است.

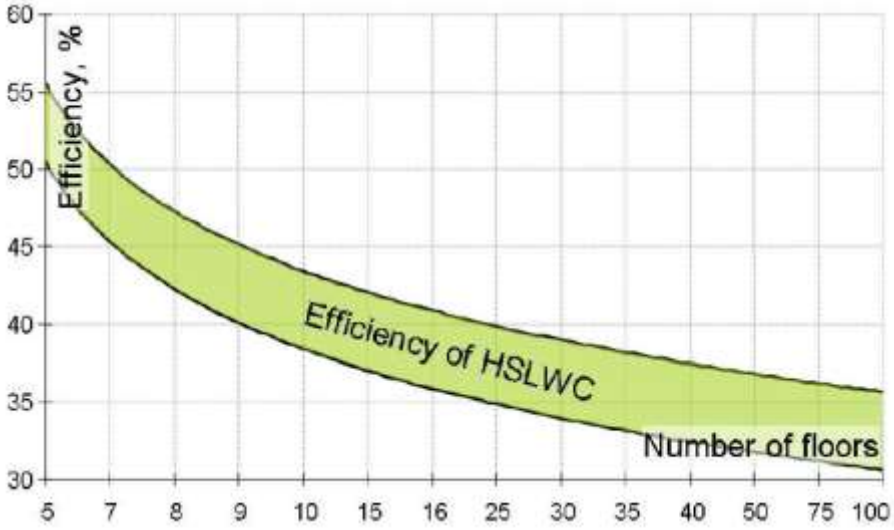
در شکل ۵-۴ و شکل ۵-۵ به ترتیب رابطه بین صرفه اقتصادی و مساحت ساختمان و همچنین رابطه بین صرفه اقتصادی و تعداد طبقات محاسبه و نمایش داده شده است.

جدول ۵–۱۲: نتایج محاسبات مثال صرفه اقتصادی بتن پرمقامت سبک [۱۹۱]

ردیف	شاخص	مقدار برای:	
		بتن سنگین	بتن پرمقامت سبک
شرایط اولیه			
۱	نوع ساختمان	ساخته شده	
۲	زیربنا (m^2)	۱۰۰۰	
۳	طبقات اصلی ساختمان	۱۶	-
۴	نوع بتن	B40	
۵	جرم مخصوص متوسط بتن (kg/m^3)	۲۴۰۰	۱۴۰۰
۶	قیمت یک متر مکعب از بتن	$۱۳۵	$۲۶۰
۷	قیمت یک متر مربع از ساختمان	$۱۵۳۵	
نتایج محاسبات			
۸	وزن کل ساخت (M_t)	۱۳/۲	
۹	ضریب تغییر جرم مخصوص	۱/۷۴	
۱۰	حجم بتن (10^3M^3)	۵/۵۳	۹/۴۸
۱۱	مساحت کل کف‌ها (10^3M^2)	۱۶	۲۸
۱۲	قیمت مصالح	$۵۶۰۰۰۰	$۲۴۸۰۰۰۰
۱۳	قیمت یک متر مربع از کف	$۳۵	$۹۰
۱۴	هزینه ایزولاسیون گرمایی	$۱۲۳۵۰۰	$۱۱۱۰۰۰
۱۵	صرفه جویی اقتصادی ایزولاسیون گرمایی (%)	۱۳/۴۵	
۱۶	درآمد کل از فروش ساختمان	$۱۸۷۷۰۰۰۰	$۳۳۸۴۵۰۰۰
۱۷	بهره‌وری اقتصادی (%)	۴۴/۵	



شکل ۵–۴: رابطه مساحت ساختمان و صرفه اقتصادی [۱۹۱]



شکل ۵–۵: رابطه تعداد طبقات ساختمان و صرفه اقتصادی[۱۹۱]

با بررسی نمودارهای بالا مشاهده می‌شود افزایش مساحت ساختمان منجر به افزایش سودآوری می‌گردد و دلیل آن کاهش هزینه کلی هر واحد سطح است. افزایش تعداد طبقات منجر به کاهش صرفه اقتصادی می‌گردد و دلیل آن بالا رفتن هزینه ساخت و نصب است. اما در نهایت مشاهده می‌شود صرف نظر از تعداد طبقات و مساحت ساختمان، صرفه اقتصادی سازه ساخته شده با نانو بتن سبک و پرمقاومت، از ۳۵ درصد کمتر نمی‌شود، [۱۹۱].

۴-۲-۳-۵- مطالعه امکان‌سنجی بتن خود حرارت دهنده با استفاده از المان‌های حرارت دهنده نانو فیبر کربن

در مناطق با دمای پایین و نزدیک به انجماد، خرابی بتن بیشتر از مناطق با دمای بالاتر گزارش می‌شود. استفاده از مخلوط نمک برای جلوگیری از یخزدگی روسازی در راه‌ها یکی از دلایل تخریب زودهنگام روسازی بوده و این

موضوع در مناطق سردسیر شایع‌تر است. به عنوان‌مثال در آمریکا در مناطق با دمای پایین به‌خصوص شمال شرق و سواحل آتلانتیک، پس از ۲۰ سال حدود ۷۵ درصد پل‌ها در شرایط استاندارد و ایمن بودند؛ درحالی‌که در مناطق پست و دمای بالاتر، این عدد تقریباً ۸۸ درصد گزارش‌شده است. منزیس[۱] هزینه تعمیر عرشه پل‌ها در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ را رقمی در حدود ۵۰ تا ۲۰۰ میلیون دلار در سال تخمین زده است، [۱۹۲]. با توجه به اهمیت این موضوع، راه‌حل‌هایی که به رفع این مشکل کمک می‌کنند و بتن را نسبت به شرایط مختلف آب و هوایی مقاوم می‌کنند، از اهمیت بالایی برخوردارند؛ در این بخش به امکان‌سنجی استفاده از ورق‌های نانو فیبر کربن به عنوان المان‌های حرارت دهنده بتن پرداخته شده است.

برآوردهای اولیه نشان می‌دهند با توجه به هزینه‌های اجرایی و نصب، هزینه عرشه پل ساخته شده با نانو فیبر کربن خود حرارت دهنده، کمتر از عرشه پل‌های قبلی است.

کورولف و همکاران (سال ۲۰۱۳) استفاده از کاغذهای کربن نانو فیبر در بتن را توجیه‌پذیر دانسته و مزایای زیادی برای آن ذکر کرده‌اند. استفاده از این مواد، هزینه نگهداری را کم کرده و از خوردگی بتن ناشی از نفوذ آب نمک جلوگیری می‌کند، [۱۹۲].

۵-۲-۳-۵- طرح توجیهی تولید پودر نانو سیلیس [193]

در این بخش، طرح توجیهی تولید پودر نانو سیلیس قرارگرفته در بخش طرح‌های توجیهی صنایع شیمیایی سایت ایران صنعت مورد بررسی قرارگرفته است. در طرح توجیهی تولید پودر نانو سیلیس سعی شده است تا با معرفی این صنعت، اطلاعات بیشتری در زمینه این طرح، میزان سرمایه‌گذاری، سودآوری و نرخ‌های بازده سرمایه‌گذاری آن ارائه شود.

۱-۵-۲-۳-۵- معرفی محصول

با توجه به رشد سریع تحقیقات علمی و عملی علوم و فنون نانو در کلیه علوم و صنایع، توجه بسیار کمی به کاربردهای این پدیده در صنعت ساختمان و به طور عام در ساخت و ساز شده است؛ ولی اخیراً با توجه به تقویت‌کننده‌ها و استحکام دهنده‌های نانویی در مصالح ساخت و ساز، موج جدیدی با شتاب فزاینده، صنعت ساخت و ساز را در برگرفته است. سیلیسیم دی‌اکسید یا سیلیکا فراوان‌ترین ماده سازنده پوسته زمین است. این ترکیب با فرمول شیمیایی SiO_2 ساختارش شبیه الماس و ماده‌ای بلوری و سفید رنگ است؛ دمای ذوب و جوش آن نسبتاً بالا بوده و در طبیعت به دو شکل بلوری و آمورف (بی‌شکل) یافت می‌شود. کاربرد مهم نانو سیلیس در تولید انواع بتن است که کیفیت و خواص محصول تولید شده آن بستگی زیادی به نوع و اندازه ذرات سیلیکا دارد (شکل ۵-۶) [۱۹۳].

[۱] Menzies



شکل ۵–۶: پودر نانو سیلیس [۱۹۳]

آزمایش نشان می‌دهند که واکنش محلول نانو سیلیس با هیدرو اکسید کلسیم در مقایسه با میکرو سیلیکا بسیار سریع‌تر انجام گرفته و مقدار بسیار کم این مواد همان تأثیر پوزولانی مقدار بسیار بالای میکرو سیلیکا را در سنین اولیه دارا می‌باشد. این خاصیت ماده، به دلیل ریز بودن ذرات محلول نانو سیلیس معلق است. تحقیقات کاربردی انجام شده شامل کاربرد نانو سیلیس به شکل محلول آن در گروت می‌باشد. آزمایش‌های خواص ریولوژی فرمول گروت در مقایسه با گروت میکرو سیلیکا، هیچ جداشدگی و آب اندازی از خود نشان نداده و نیز مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از ۱۵۵ مگا پاسکال را به دست می‌دهد.

به ملات سیمان ماده پراکننده ذرات نانو (UNF) و حباب‌زدا برای کاهش حباب‌های هوا در داخل بتن اضافه می‌شود، [۱۹۳].

۲-۵-۲-۳-۵- نام و کد محصول (آیسیک ۳):

کدهای ISIC از چهار رقم تشکیل شده که مشخص کننده طبقه صنعت مورد نظر است. دو رقم سمت چپ، نشانگر بخش و دو رقم بعدی نشانگر گروه و طبقه صنعت است. چهار رقم هم توسط کشور به رقم‌های قبلی اضافه می‌شود که به شناسایی دقیق محصول کمک می‌کند، [۱۹۳].

چهار رقم اول (شامل بخش، گروه و طبقه) منشاء بین‌المللی دارد و از جامعیت لازم برخوردار است. برای تعیین چهار رقم دوم نیز کمیته‌ای در وزارت صنایع و معادن وجود دارد که نسبت به تهیه کدهای جدید هشت‌رقمی محصول اقدام می‌کند.

با توجه به اینکه برای نانو سیلیس کد ایسیک منحصر به فردی وجود ندارد می‌توان از کد ایسیک جدول ۵-۱۳ با عنوان نانو پودرهای غیرفلزی برای نانو سیلیس استفاده نمود، [۱۹۳].

جدول ۵-۱۳: کد آیسیک مرتبط با صنعت تولید نانو سیلیس [۱۹۳]

ردیف	کد آیسیک	نام کالا
۱	۲۶۹۹۱۴۴۵	نانو سیلیس

۵-۳-۲-۵-۳- قوانین صادرات و واردات محصول

قوانین صادرات و واردات کالا در ایران بر اساس مقررات صادرات و واردات ایران مصوب هیئت وزیران در تاریخ ۱۳۷۲/۰۷/۰۴ می‌باشد. عمده سیلیس وارداتی کشور بیشتر به صورت پودری و خشک شده و از ناخالصی‌ها پاک شده است که قسمت بیشتر آن در صنعت شیشه و ریخته‌گری استفاده می‌شود. چون برای نانو سیلیس هیچ شرایط خاصی در نظر گرفته نشده، بر اساس قوانین و مقررات هیئت وزیران در تاریخ ۱۳۷۲/۰۷/۰۴، کانی سیلیس و فراورده‌های آن از کالاهای مجاز محسوب می‌شوند و لذا واردات آن با رعایت قوانین گمرکی و بازرگانی هیچ منع قانونی ندارد، [۱۹۳].

۵-۳-۲-۵-۴- بررسی اقتصادی طرح

- ✓ ظرفیت تولید: ۵،۰۰۰ تن
- ✓ مساحت زمین: ۴۰،۰۰۰ مترمربع
- ✓ سرمایه‌گذاری کل: ۱۷۹/۲۳۸ میلیارد ریال
- ✓ نرخ بازده: ۲۷ درصد
- ✓ اشتغال‌زایی: ۴۵ نفر به طور مستقیم [۱۹۳]

در ادامه، مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی تولید مواد ترمیم‌کننده بتن با نانو ذرات مورد بررسی قرارگرفته است.

۵-۳-۲-۶- مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی تولید مواد ترمیم‌کننده بتن با نانو ذرات[۱۹۴]

در ابتدا لازم به ذکر است این مطالعه در زمستان سال ۱۳۸۹ توسط معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده و تمام اعداد و ارقام این بخش مربوط به همان سال است.

به نظر می‌رسد به لحاظ فناوری تولید و مسائل اقتصادی، استفاده از نانو ذرات و بخصوص نانو سیلیس، از اولین کاربردهای نانو فناوری در عرصه صنعت بتن باشد. در این مطالعه تمرکز بر نانو سیلیس و بررسی تأثیر استفاده از آن در صنعت سیمان و بتن است.

در این مطالعه، امکان‌سنجی تولید نانو سیلیس به عنوان یکی از اصلی‌ترین افزودنی‌های نانو مواد ترمیم‌کننده بتن مورد بررسی قرارگرفته است، [۱۹۴].

۱-۶-۲-۳-۵- شرایط واردات

سیلیکافیوم هم اکنون به عنوان سیلیس وارد می‌شود و مشکلی نیز برای آن وجود ندارد و شرایطی در مورد واردات آن تعریف نشده است. واردات این محصول بیشتر از شرکت‌های آلمانی به ویژه دگوسا انجام می‌شود، [۱۹۴].

۲-۶-۲-۳-۵- بررسی و ارائه اطلاعات لازم در زمینه قیمت تولید داخلی و جهانی محصول

قیمت نانو ذرات سیلیس بسته به مشخصات نانوذره، توزیع ذرات، سطح ذرات، مورفولوژی آن‌ها و حتی گاهی روش تولید، متفاوت است. از این رو مقایسه قیمت‌های شرکت‌های تولیدی مختلف با یکدیگر بستگی به هر یک از عوامل فوق داشته و لذا به‌سادگی محصولات معمولی نیست. در ابتدا مقایسه‌ای بین قیمت افزودنی نانو سیلیس و دیگر افزودنی‌ها در

جدول ۵-۱۴ انجام‌شده است. سپس قیمت محصول احتمالی داخلی و خارجی مقایسه شده است (همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ارقام مربوط به مطالعه سال ۱۳۸۹ است)، [۱۹۴].

جدول ۵-۱۴: مقایسه خصوصیات و قیمت نانو سیلیس، دوده سیلیس و خاکستر بادی

ماده	ابعاد ذرات، نانو متر	درصد سیلیس بی‌شکل	قیمت (یورو)
نانوسیلیس	۱-۵۰	بیش از ۹۹ درصد	۰/۴۵ بر لیتر امولوسیون حاوی ۲۵٪ ماده خشک
دوده سیلیس	۱۰-۱۰۰۰	حدود ۹۰ درصد	۰/۲۵ تا ۰/۵ برای هر کیلوگرم
خاکستر بادی	۱۰۰-۴۰۰۰۰	حدود ۴۰ درصد	۰/۰۲ تا ۰/۰۳ برای هر کیلوگرم

استفاده از نانو سیلیس در بتن می‌تواند موجب کاهش مصرف دوده سیلیس گردد. نانو سیلیس از دوده سیلیس و یا خاکستر بادی گران‌تر است، اما درعین‌حال میزان مصرف آن در بتن نیز کمتر می‌شود. از سوی دیگر در بلند مدت به نظر می‌رسد که بتن حاوی نانو سیلیس خواص مناسب‌تری از خود نشان دهد. با توجه به نتایج تحقیقات، نمی‌توان درباره صرفه اقتصادی ناشی از کاهش هزینه‌های نگهداری سازه‌ها و یا افزایش طول عمر آن‌ها در شرایط محیطی سخت مانند خلیج فارس، اظهارنظر دقیقی نمود ولی استفاده از نانو سیلیس در کشور می‌تواند باصرفه اقتصادی فراوانی همراه باشد.

اظهارنظر دقیق‌تر در مورد آن مستلزم انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های تکمیلی است. در هر صورت مقایسه قیمت با موارد مشابه نشان دهنده صرفه اقتصادی نانو سیلیس است.

قیمت محصول صنعتی آلمانی شرکت دگوسا نانو سیلیس (فیوم) ۶۰۰۰ تومان هر کیلوگرم است (سال ۱۳۸۹). پیش‌بینی شرکت‌های ایرانی به ویژه مجتمع فناوری‌های نوین فدک که یکی از مجموعه‌های موفق در این حوزه به شمار می‌رود، این است که قیمت نهایی تولید صنعتی آن‌ها حدود ٪۲۰ از نمونه خارجی ارزان‌تر خواهد شد، [۱۹۴].

۳-۶-۲-۳-۵- اهمیت استراتژیکی کالا در دنیای امروز

نانو سیلیس جزء محصولات استراتژیک به حساب نمی‌آید اما با توجه به توان تولید و میزان مصرف بتن و سیمان در کشور، می‌تواند ارزش‌افزوده بسیاری برای کشور به همراه آورد و به همین دلیل می‌توان آن را جزء محصولات ضروری به حساب آورد. اقتصاد کشور با توجه به میزان پایداری بتن می‌تواند تغییر کند و این نشان‌دهنده اهمیت فوق‌العاده این محصول است، [۱۹۴].

۴-۶-۲-۳-۵- کشورهای عمده تولیدکننده و مصرف‌کننده محصول

آمار تولید و مصرف سیمان عملاً به عنوان نمادی از مصرف بتن است و هر تولیدکننده یا مصرف‌کننده بتن به عنوان یک بازار بالقوه برای مواد ترمیم‌کننده به شمار می‌رود.

در جدول ۵-**۱۵** مقادیر تولید سیمان کشورهای تولیدکننده عمده این محصول در جهان طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۳ جمع‌آوری شده است. سپس در ادامه در جدول ۵-**۱۶** مقادیر مصرف کشورهای مصرف‌کننده عمده سیمان جهان نشان داده‌شده است. کشورهای تولیدکننده و مصرف‌کننده هر دو مشتریان این محصول به شمار می‌آیند، [۱۹۴].

جدول ۵–۱۵: مقدار تولید سیمان در بزرگ‌ترین کشورهای تولیدکننده از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۳ (میلیون تن در سال)[۱۹۴]

	نام کشور	۱۹۹۵	۱۹۹۶	۱۹۹۷	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳
۱	چین	۴۷۵	۴۹۱	۵۱۱	۵۳۶	۵۷۳	۵۸۶	۶۲۰	۶۴۰	۶۶۰
۲	آمریکا	۸۷	۹۰	۹۴	۹۶	۹۸	۸۳/۵	۸۸/۸	۹۰/۳	۹۲/۶
۳	هند	۶۶	۷۶	۸۱	۸۶	۹۸	۹۴/۲	۹۳/۶	۱۰۲	۱۱۲
۴	ژاپن	۶۰	۶۳	۶۲	۸۱	۸۲	۸۳/۳	۷۹/۵	۷۶/۵	۶۹
۵	کره	۵۵	۵۷	۶۰	۴۷	۴۸	۵۱/۲	۵۲/۰۵	۵۵/۵	۵۶
۶	برزیل	۲۸	۳۴	۳۸	۴۰	۴۰	۳۹/۶	۳۸/۹	۳۹/۹	۴۱
۷	ایتالیا	۳۴	۳۴	۳۴	۳۶	۳۷	۳۹	۳۹/۸	۴۰	۴۰/۷
۸	اسپانیا	۲۸	۲۸	۳۰	۳۳	۳۶	۵۱/۳	۵۲	۵۵/۵	۵۷
۹	آلمان	۳۳	۳۱	۳۱	۳۴	۳۶	۳۵/۶	۳۱/۸	۳۰/۶	۳۰/۳

	نام کشور	۱۹۹۵	۱۹۹۶	۱۹۹۷	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳
۱۰	ترکیه	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۵	۳۵/۹	۳۹/۹۶	۳۰/۳	۳۲/۵
۱۱	مکزیک	۱۴	۲۹	۳۰	۳۰	۳۱	۳۱/۷	۳۰/۴	۳۱/۳	۳۴/۵
۱۲	روسیه	۳۶	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵	۳۲/۴	۳۵/۳	۳۷	۳۹
۱۳	تایلند	۱۱	۲۸	۲۷	۲۳	۲۵	۳۲/۲	۳۴/۵	۳۹/۲	۴۱/۴
۱۴	اندونزی	۲۱	۲۵	۲۷	۲۲	۲۴	۳۰/۷	۳۳/۶	۳۴/۶	۳۴/۴
۱۵	ایران	۱۶	۱۸	۱۹	۲۰	۲۲	۲۳/۹	۲۶/۶	۲۸/۴	۳۰/۴
۱۶	مصر	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱	۲۱	۲۴/۱	۲۵/۷	۲۸/۵	۲۹
۱۷	فرانسه	۲۱	۱۹	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰/۰۴	۲۰/۴۳	۲۰/۲	۲۰/۲
۱۸	تایوان	۱۱	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۸	۱۸	۱۸

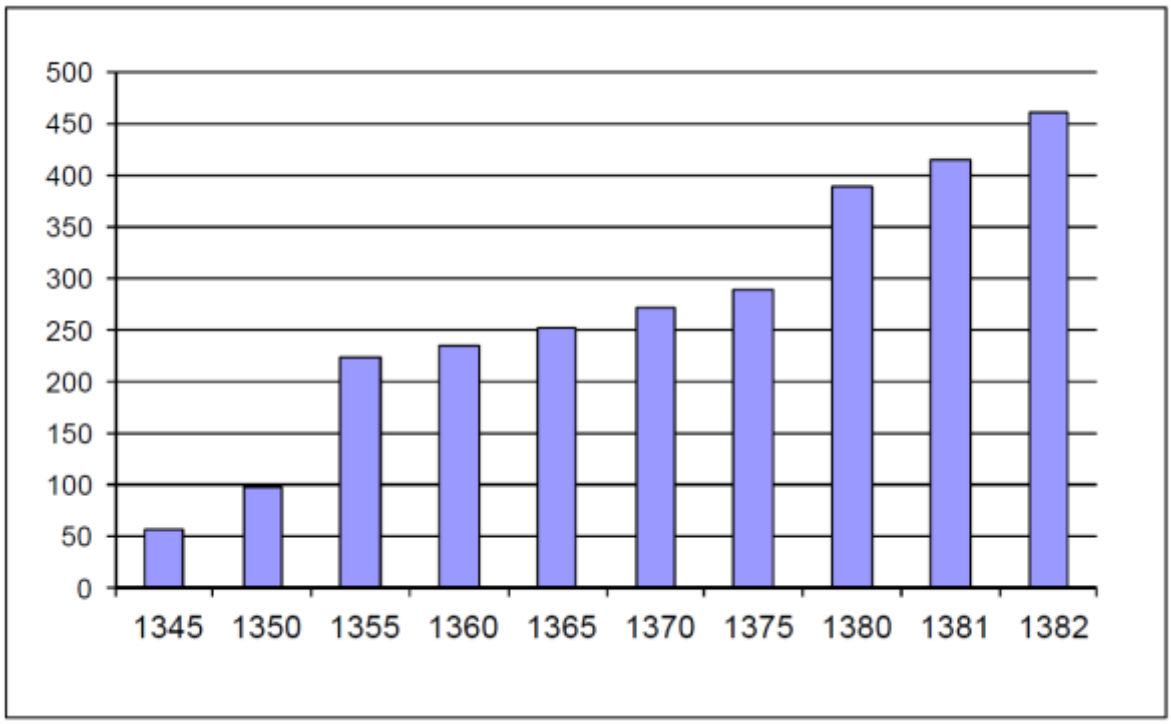
جدول ۵–۱۶: مقادیر مصرف بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سیمان در جهان از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۳ (میلیون تن در سال) [۱۹۴]

	نام کشور	۱۹۹۵	۱۹۹۷	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲
۱	چین	۴۳۰	۴۹۳	۵۱۱	۵۵۷	۵۶۰	۶۲۰	۶۴۰
۲	آمریکا	۸۷/۹	۹۰/۹	۱۰۲/۵	۱۰۸/۱	۱۱۵/۵	۱۱۶/۵	۱۱۱/۳
۳	هند	۶۰/۶	۷۳/۵	۸۳/۵	۵۹/۹	۱۰۵/۵	۹۰/۳	۹۹
۴	ژاپن	۷۹/۶	۷۸/۶	۷۱/۶	۷۰/۸	۷۰	۶۸/۶	۶۵
۶	برزیل	۲۸	۳۸/۱	۳۹/۷	۴۰/۲	۳۹/۴	۳۸/۵	۳۹/۵
۷	ایتالیا	۳۲/۵	۳۳/۷	۳۴/۷	۳۶/۱	۳۸	۳۹/۵	۴۰/۳
۸	اسپانیا	۲۵/۵	۲۶/۷	۳۱	۳۴/۶	۳۷/۷	۴۲/۲	۴۴/۸
۹	آلمان	۳۸	۳۴/۲	۳۷/۳	۳۸/۳	۳۵/۵	۳۰/۵	۲۸/۷
۱۰	روسیه	۳۵/۳	۲۵/۹	۲۶	۲۸/۴	۳۲/۲	۳۳/۳	۳۵
۱۱	ترکیه	۲۸/۵	۳۲/۶	۳۴/۱	۳۱/۵	۳۲	۲۵/۳	۲۵
۱۲	مکزیک	۲۱	۲۴/۳	۲۶/۲	۲۷/۵	۲۹/۴	۲۸/۳	۲۹
۱۳	مصر	۱۸/۴	۲۱/۶	۲۳/۸	۲۷/۲	۲۶/۸	۲۶/۷	۲۷/۴
۱۴	فرانسه	۱۸/۷	۱۸/۷	۱۹	۲۰/۲	۲۱	۲۰/۷	۲۰/۴
۱۵	ایران	۱۶/۳	۱۸/۶	۱۹/۶	۲۰/۵	۲۲/۴	۲۵/۴	۲۷/۶
۱۶	اندونزی	۲۴	۲۷/۵	۱۹/۱	۱۸/۱	۲۲/۳	۲۵/۶	۲۷/۱
۱۷	تایوان	۲۶/۲	۲۱	۲۰/۷	۱۸/۹	۲۰	۱۶/۷	۱۶
۱۸	تایلند	۳۳/۶	۳۵/۳	۲۱/۵	۱۸/۸	۱۷/۹	۱۸/۵	۲۲/۶

همان‌طور که مشاهده می‌شود، چین با اختلاف نسبتاً زیادی با سایر کشورها، بیشترین تولید و مصرف سیمان را در جهان دارد. اما به هر حال بازار بسیار بزرگی در این حوزه وجود دارد. جدول ۵–۱۷ و شکل ۵–۷ وضعیت تولید و مصرف سیمان در ایران را نشان می‌دهند.

جدول ۵–۱۷: وضعیت تولید و مصرف سیمان ایران[۱۹۴]

سال	تولید سیمان (تن)	مصرف (تن)	مصرف سرانه(kg)
۱۳۵۰	۲۸۳۱۰۰۰	۲۸۸۶۰۰۰	۹۸
۱۳۵۵	۷۳۷۵۰۰۰	۸۶۷۵۰۰۰	۲۲۳
۱۳۶۰	۹۲۳۱۰۰۰	۹۳۳۱۰۰۰	۲۳۵
۱۳۶۵	۱۲۴۳۹۰۰۰	۱۲۴۴۱۰۰۰	۲۵۱
۱۳۷۰	۱۵۱۵۱۰۰۰	۱۵۰۶۳۰۰۰	۲۷۱
۱۳۷۵	۱۸۴۹۰۰۰۰	۱۷۵۴۶۰۰۰	۲۹۰
۱۳۸۰	۲۶۶۴۰۰۰۰	۲۲۵۰۰۰۰۰	۳۹۰
۱۳۸۱	۲۸۶۰۰۰۰۰	۲۷۵۰۰۰۰۰	۴۱۶
۱۳۸۲	۳۰۴۶۰۰۰۰	۲۹۷۷۰۰۰۰	۴۶۰



شکل ۵–۷: نمودار رشد مصرف سیمان ایران در سالیان اخیر (میلیون تن)[۱۹۴]

با بررسی جدول ۵–۱۷ و شکل ۵–۷ مشاهده می‌شود وضعیت تولید سیمان ایران روند کاملاً رو به رشدی دارد. آمار نشان می‌دهد سهم تولید سیمان ایران در جهان از ۰/۰۴ درصد در سال ۱۹۵۰ به ۱/۷ درصد در سال ۲۰۰۳ رسیده است و این روند در سالیان اخیر نیز رشد بیشتری را تجربه کرده است.

تولید سیمان در ایران مزیت‌های مختلفی از جمله مواد اولیه مناسب، انرژی ارزان، موقعیت جغرافیایی مناسب، تجربه نیروی انسانی متخصص، امکانات طراحی، ساخت و نصب ماشین‌آلات و تجهیزات فرآیند تولید دارد. از این رو سرمایه‌گذاری در این حوزه فراگیرتر شده است.

۵-۶-۲-۳-۵- وضعیت عرضه و تقاضا

فناوری‌های جدید در کشورهای در حال توسعه مانند ایران موقعیت خاصی دارد. با توجه به نوپا بودن بسیاری از تکنولوژی‌ها و فناوری‌های نوظهور، چالش‌های متعددی پیش روی این حوزه‌ها وجود دارد. از طرف دیگر اکثر شرکت‌های نانو معمولاً کوچک و یا در حد شرکت‌های مرکز رشدی هستند و بیشتر آن‌ها فاقد تجارب کسب وکاری برای رشد و توسعه هستند. از طرف دیگر بازار نانو در حال رشد بوده و میزان تقاضای بازار هرسال بیشتر از سال و در حال رشد است. جدول ۵-۱۸ میزان تقاضای بازار برای نانو پودرهای اکسید فلزی از جمله نانو سیلیکا را نشان می‌دهد، [۱۹۴].

جدول ۵-۱۸: میزان تقاضای بازار برای نانو پودرهای اکسید فلزی [۱۹۴]

	سال				
	۲۰۲۰	۲۰۱۲	۲۰۰۷	۲۰۰۲	۲۰۰۰
کل تقاضاهای پودرهای اکسید فلزی ($B)	۲۰	۱۵	۱۳	۱۱	۱۰
درصد نانو پودرها	۳۳/۵	۱۱/۳	۴/۷	۱/۳	۰/۹
تقاضاهای نانو پودرهای اکسید فلزی($M)	۱۱۵۰۰	۲۱۰۰	۶۷۵	۱۴۰	۸۸
دی اکسید سیلیکون ($M)	۱۵۰۰	۵۲۵	۲۲۵	۷۳	۵۹
اکسید و هیدروکسید آلومینیوم ($M)	۸۵۰	۲۶۰	۱۰۰	۲۰	۱۲
اکسید تیتانیوم ($M)	۱۰۰۰	۳۲۵	۱۱۰	۱۵	۵
اکسید روی ($M)	۳۰۰	۱۶۰	۹۰	۱۲	۴
اکسید آهن	۱۵۰	۷۵	۳۵	۱۲	۴
سایر نانو پودرها ($M)، Li، Co، Mn، In، Sb، Sn، Ni، Fe، Sr، Ti، Ba، Zr، Cu، Bi، Mg	۲۹۰۰	۳۵۵	۵۵	۸	۴

نتایج نشان می‌دهند در کشور ما بازار بزرگی برای محصولات نانو وجود دارد اما عرضه‌کننده نانو مواد یعنی بخش اول زنجیره ارزش وجود ندارد. به‌عبارت‌دیگر استفاده از نانو سیلیس در بتن، هنوز فرمولاسیون تجاری مشخصی ندارد و کسی در این حوزه فعالیت نکرده است، [۱۹۴].

۶-۶-۲-۳-۵- تجزیه و تحلیل و ارائه جمع‌بندی و پیشنهاد نهایی در مورد احداث واحدهای جدید

نانو سیلیس و افزودنی‌های دیگر نانویی به بتن و سیمان مزایای زیادی دارند که به تفضیل به آن‌ها پرداخته شده است. با توجه به مصرف روزافزون سیمان در کشور، بازار بزرگی در انتظار نانو سیلیس و سایر افزودنی‌های نانو پیش‌بینی می‌شود. نکته مهم فرمولاسیون تجاری‌سازی افزودنی نانو سیلیس به سیمان ایران است. فرآیندی که هنوز اهتمام جدی به آن نشده است. بدون توجه به این موضوع، تولید این ماده از یک بازار بزرگ محروم خواهد ماند. به‌علاوه اگر دولت به وظایف قانونی مطرح در قانون شرکت‌های دانش‌بنیان عمل نکند، عملاً امکان رشد و توسعه این شرکت‌ها وجود ندارد. در کشورهای توسعه‌یافته که همه زیرساخت‌های مورد نیاز توسعه فراهم است، دولت نیز حمایت‌های ویژه از توسعه فناوری‌های جدید می‌نماید. اگر در ایران این نوع حمایت‌ها نباشد، درحالی‌که بخش زیادی از زیرساخت‌های کشور نیز برای این فعالیت‌ها مساعد نیست، امکانی برای توسعه این فعالیت‌ها وجود نخواهد داشت، [۱۹۴].

۳-۳-۵ - مروری بر اظهارنظرها حول هزینه-فایده[۱] نانو مواد در صنعت ساخت

هزینه اکثر مصالح و تجهیزات نانوتکنولوژی نسبتاً بالا است. این تا حدی به دلیل نوپا بودن این علم و همچنین به دلیل پیچیدگی آن است. در مورد مصالح نانو، مشاهده می‌شود با پیشرفت علم نانوتکنولوژی، قیمت این مواد در حال کاهش است. به عنوان مثال می‌توان به کاهش قیمت کربن نانو تیوب[۲] طی سال‌های گذشته اشاره کرد و می‌توان انتظار داشت این کاهش ادامه داشته باشد. از سال ۱۹۹۰ تاکنون قیمت CNTها ۱۰۰ برابر کمتر شده است. اینکه این کاهش‌ها می‌تواند جایگزینی این مواد را توجیه کند یا خیر نیاز به بررسی بیشتر دارد. در بعضی موارد، این مصالح مشکلات و مسائل مهمی را حل می‌کنند که همین موضوع موجب به‌صرفه شدن و گسترش استفاده از آن‌ها می‌گردد. در بعضی موارد هم ممکن است روش‌های قدیمی از لحاظ هزینه‌ای به‌صرفه‌تر باشند. در مجموع انتظار می‌رود استفاده از CNTها نرخ هزینه‌ای بالا و هزینه چرخه عمر پایین‌تر داشته باشند؛ بنابراین هزینه CNTها نباید موضوع بحرانی‌ای باشد، [۱۹۵].

در راه‌سازی، قیر یکی از اجزای اصلی تولید است که از نفت خام به دست می‌آید. در روسازی معمولاً قیر حدود ۰/۵ درصد جرم و ۵ تا ۱۷ درصد هزینه را به خود اختصاص می‌دهد. گزارش‌ها نشان می‌دهند ذخایر نفتی در دنیا درحال کاهش است و این کاهش قطعاً بر روی قیمت نفت و مشتقات آن از جمله قیر اثرگذار خواهد بود. عدم دسترسی به این منابع موجب بالا رفتن قیمت آن‌ها خواهد شد و آنجاست که نقش نانوتکنولوژی پررنگ‌تر می‌شود، [۱۹۶].

در بسیاری از مقالاتی که در زمینه استفاده از نانو لوله‌های کربنی برای بهبود خواص بتن کار کرده‌اند، در بخش چالش‌ها بحث بالا بودن قیمت این مواد مطرح‌شده است. صادقی و همکاران (سال ۱۳۹۵) در مقاله‌ای چاپ‌شده در نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط‌زیست، بیان کردند که قیمت نانو لوله‌های کربنی بالا بوده و اگر تحقیقات در این زمینه به نتایج قابل توجهی در افزایش قابلیت‌های کامپوزیت‌های سیمانی و بتنی منجر شود و اقتصاد پروژه را تحت تأثیر قرار دهد، کاربرد آن‌ها توجیه خواهد داشت. به‌علاوه نتایج ارائه‌شده در آزمایش‌های سال‌های اخیر پراکندگی قابل توجهی در نتایج را نشان می‌دهند که نیاز به تحقیقات بیشتر را نمایان می‌سازد. همچنین به دلیل قیمت بالای نانو لوله‌های کربنی، قبل از کاربرد آن‌ها در مقیاس بزرگ باید ابتدا برآوردها در مقیاس کوچک انجام شود، [۱۹۷].

حکمی و همکاران (سال ۲۰۱۵) تحقیقاتی را بر روی نانو رس‌ها و مخلوط نانورس-سیمان کلسینه شده انجام دادند. در بخش ۴ این مقاله در مورد آنالیز هزینه-فایده نکاتی مطرح‌شده است که در ادامه این نکات نقل می‌شود.

اگرچه گران بودن مواد نانو می‌تواند کاربرد آن‌ها در ساخت را محدود کند اما به استفاده گسترده از نانو مواد در سازه و ساختمان در آینده می‌توان خوش‌بین بود. با این وجود نانو مواد ویژگی‌های منحصر به فردی دارند که می‌توانند مقاومت و دوام بتن را بهبود بخشند. با رشد تکنولوژی، امید است قیمت نانو مواد در آینده کاهش یابد. نکته قابل توجه این است که نانو مواد در بتن یا سایر تولیدات، به مقدار بسیار کم اضافه می‌شود. به عنوان مثال در مقاله مذکور مشاهده شد که اضافه شدن ۱٪ وزنی نانو رس کلسینه شده به سیمان، به مقدار قابل توجهی موجب

---

[۱] Cost-Benefit

[۲] Carbon nanotubes (CNTs)

بهبود خواص مکانیکی مخلوط شده است. از نقطه نظر اقتصادی اضافه شدن ۱٪ نانو رس کلسینه شده به مخلوط سیمان هزینه قابل توجهی را به پروژه تحمیل نمی‌کند اما خواص مکانیکی آن را تا ۴۰ درصد بهبود می‌دهد، [۱۹۸].

۴-۳-۵- نانوتکنولوژی و تأثیر آن در صنعت ساخت، از تحقیقات تا فضای فعالیت‌های حرفه‌ای

نانوتکنولوژی این امکان را فراهم می‌آورد تا موادی با ویژگی‌های خاص و جدید مانند خاصیت واکنش شیمیایی بالا، مقاومت و دوام بالا تولید و استفاده گردد. این ویژگی‌ها سبب شده است تا این مواد نظر مهندسان و افراد این صنعت را به خود جلب کند. به عنوان‌مثال ثابت شده است تقویت بتن با استفاده از نانو فیبرها، نیاز به فولاد در بتن را کاهش می‌دهد و در نتیجه نیاز به نیروی کار برای میلگرد گذاری و جوشکاری را کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از ذرات نانو در بتن برنامه زمانی پروژه ساخت را کوتاه‌تر می‌کند که دلیل اصلی آن کاهش زمان‌های نصب است.

به طورکلی دنیای حرفه‌ای ساخت‌وساز مزایای ورود نانوتکنولوژی به این حرفه را انکار نمی‌کند؛ با این حال عمده فعالین این صنعت، دانش استفاده از آن را ندارند. در این بخش به بررسی نانوتکنولوژی در ساخت، موانع و فواید پیاده‌سازی آن پرداخته شده و همچنین نتایج تحقیقات گسترده صنعت و مصاحبه‌های شخصی ارائه‌شده است. چارچوب آنالیز تصمیم‌گیری چند معیاره[۱] برای شناسایی زمینه‌های مفید استفاده از نانوتکنولوژی در ساخت‌وساز مورد استفاده قرارگرفته است. سناریوهای اقتصادی و موقعیت‌های بازاری برای تولیدات مؤثر نانوتکنولوژی در ساخت‌وساز در این بخش بررسی‌شده است، [۱۹۹].

۱-۴-۳-۵- هدف و روش انجام نظرسنجی

هدف این بخش، بررسی فواید و موانع استفاده از نانوتکنولوژی در ساخت و شناسایی مؤثرترین حوزه‌های ساخت برای استفاده از نانوتکنولوژی است. رویکرد این مقاله بر پایه یک مرور ادبیات کامل، یک نظرسنجی از صنعت و مصاحبه‌هایی با فعالین صنعت نانوتکنولوژی در آزمایشگاه‌های دولتی و خصوصی است. همچنین از چارچوب آنالیز تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDA) برای معرفی بهترین حوزه‌هایی که نانوتکنولوژی می‌تواند در صنعت ساخت ورود کند استفاده شده است، [۱۹۹].

۳۰ سؤال مهم برای ارزیابی میزان تأثیر نانوتکنولوژی در صنعت ساخت طراحی‌شده است. نظرسنجی برای ۱۴۹ نفر از اعضای انستیتو صنعت ساخت آمریکا[۲] فرستاده شده است. اعضای CII از جمله فعالین به روز و آگاه از تحقیقات علمی هستند و لازم به ذکر است که این پرسشنامه را نمی‌توان به همه فعالین صنعت ساخت بسط داد. محتوای نظرسنجی در ابتدا توسط کارشناسان فناوری نانو طراحی شد. این نظرسنجی شامل ۶ بخش بود:

بخش اول: میزان تجربه افراد در صنعت نانو

[۱] multi-criteria decision analysis (MCDA)

[۲] Construction Industry Institute(CII)

بخش دوم: میزان درگیری کنونی آن‌ها با موضوع نانو

بخش سوم: نوع پروژه‌های نانوتکنولوژی که هر فرد تجربه کرده

بخش چهارم: تأثیرات کنونی نانوتکنولوژی در صنعت ساخت

بخش پنجم: مزایا، موانع و خطراتی که کاربرد نانوتکنولوژی در صنعت ساخت در حال حاضر دارد.

بخش ششم: حوزه‌های موفقیت نانوتکنولوژی

بخش هفتم: توضیحات اضافه

همچنین علاوه بر نظرسنجی فوق، مصاحبه‌های تلفنی و شخصی با افراد مختلف صورت گرفته تا داده‌های نظرسنجی مورد صحت‌سنجی قرار گیرد، [۱۹۹].

۲-۴-۳-۵- فواید اقتصادی در صنعت ساخت و برای جامعه

تأکید تحقیقات گذشته و متخصصان این حوزه بر شناسایی فواید و موانع کلیدی استفاده از نانوتکنولوژی در صنعت ساخت است. سازه‌های بلندی که نیاز به نگهداری در آن‌ها کمتر است، هم از لحاظ اقتصادی و هم زیست‌محیطی به‌صرفه‌تر هستند. در ادامه برای درک بهتر تأثیر نانوتکنولوژی بر صنعت ساخت از لحاظ اقتصادی و اینکه چگونه شرکت‌های مختلف می‌توانند با ورود به این حوزه مزیت رقابتی به دست آورند، چند کاربرد سودآور این مواد مورد بررسی قرار گرفته است.

بتن اصلاح شده با مواد نانو نسبت مقاومت به وزن بالاتری دارد و این باعث می‌شود مصرف کلی بتن کاهش یابد. همچنین این مواد می‌توانند کارایی بتن را افزایش دهند و نیاز به کارگر را به دلیل خود تحکیمی کاهش دهد. تحقیقات نشان می‌دهند زمان گیرش بتن با اضافه شدن نانو مواد به آن کمتر می‌شود. به‌علاوه با کاهش نیروی کار متمرکز و دلایل ذکر شده، امکان کاهش زمان اجرای پروژه وجود دارد. برخی کارشناسان معتقدند استفاده از نانو مواد در بتن نیاز به میلگرد در بتن را کاهش می‌دهد.

یک تأثیر بزرگ نانو مواد را می‌توان در برطرف کردن نیاز به ترمیم حدود ۱۶۰ هزار پل (۲۷٪کل) ناکارآمد از لحاظ عملکردی و سازه‌ای در ایالات‌متحده آمریکا مشاهده کرد؛ زیرا هزینه ترمیم چیزی بیش از ۲ تریلیون دلار برآورد می‌شود، [۲۰۰]. بتن نانو می‌تواند عمر بسیاری از امکانات موجود را بالاتر برده و هزینه گزاف نگهداری و ترمیم را به طرز چشمگیری کاهش دهد.

صنعت رنگ و پوشش‌ها شامل حدود ۱۴۰۰ کمپانی با فروش سالانه ۲۰ میلیارد دلار می‌باشد. اضافه شدن مقادیر کمی مواد نانو به این ترکیبات، ویژگی‌های قابل توجهی از جمله مقاومت در برابر سایش و خوردگی، جلوگیری از تجمع میکروب‌ها، خواص الکتریکی و زیبایی بیشتر را به آن‌ها اضافه کند. بازار کلی نانو کامپوزیت‌ها در دو دهه آینده تقریباً ۳۴۰ میلیارد دلار برآورد می‌شود، [۲۰۱].

تجهیزات سخت‌افزاری و چند منظوره مبتنی بر فناوری نانو می‌توانند به صنعت انرژی کمک کنند؛ زیرا می‌توانند تجهیزات حفاری بهتر و خطوط لوله بادوام‌تری را وارد این صنعت کنند. استفاده از کاتالیزورهای نانو[۱] می‌تواند فرآیند تولید بی‌کیفیت نفت خام را بهبود بخشد و موجب کاهش آلودگی و افزایش بازدهی این فرآیند شود، [۲۰۲].

گزارش‌های تحقیقاتی بر روی نانوتکنولوژی در صنعت انرژی، بازار انرژی وابسته به نانوتکنولوژی را در حدود ۷/۱۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۲ برآورد کرده‌اند، [۲۰۳].

در بسیاری از پروژه‌های ساخت و ساز، حدود ۵۵ درصد هزینه کل پروژه به نیروی کار اختصاص می‌یابد. با معرفی مصالحی که سریع‌تر، آسان‌تر و ایمن‌تر حمل و جایگذاری می‌شوند، نیاز به افراد و اپراتورهای مختلف برای انجام کارهای مختلف کاهش می‌یابد و این نشان می‌دهد که استفاده از نانو مواد هزینه کلی ساخت، عمل‌آوری و نگهداری را کاهش می‌دهد، [۲۰۴].

افزایش مصرف مواد خام در صنعت ساخت، بر روی محیط‌زیست، اقتصاد و جامعه اثرگذار است. کاهش این مواد موجب افزایش قیمت آن می‌شود. استفاده از مواد نانو می‌تواند موجب کاهش نیاز به مواد اولیه برای رسیدن به مقاومت یا دوام مورد نظر گردد.

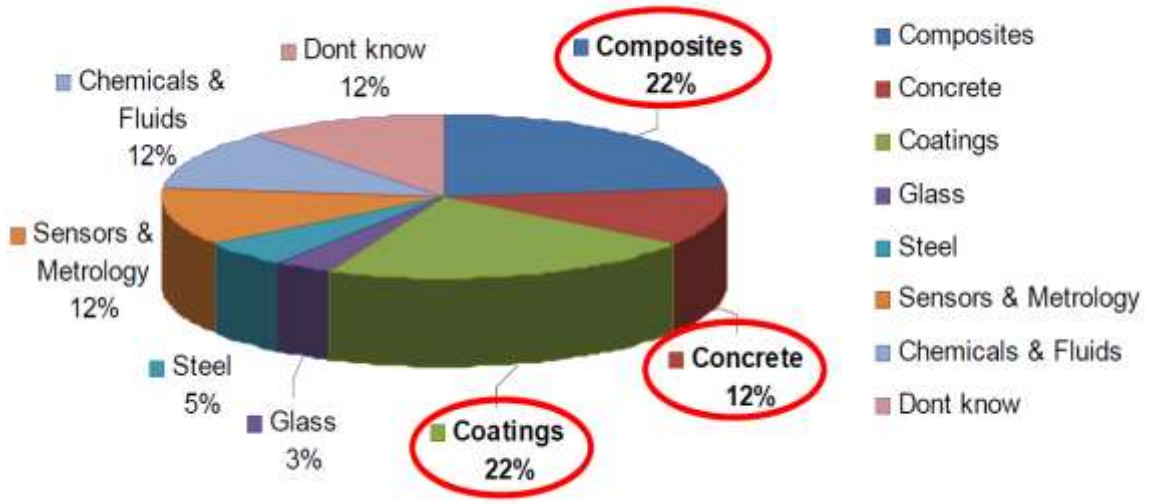
یک مثال خوب برای نشان دادن تأثیر نانوتکنولوژی بر محیط‌زیست، پروسه تولید سیمان است. کارخانه‌های تولید سیمان سهم قابل توجهی از CO_2 تولیدی در دنیا را به خود اختصاص داده‌اند و استفاده از ذرات نانو می‌تواند تولید CO_2 در این کارخانه‌ها را تا ۲۵ درصد کاهش دهد، [۲۰۵].

به عنوان مثالی دیگر می‌توان به دیوارهای اصلاح‌شده با نانو اشاره کرد که در فصل سرما می‌توانند به طور بالقوه مانند یک عایق عمل کرده و از هدر رفت انرژی جلوگیری به عمل آوردند و این به نوعی صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها را در پی دارد. موارد مذکور گوشه‌ای از کاربرد نانوتکنولوژی در صنعت ساخت است که فواید اقتصادی استفاده از این مواد را متذکر می‌شود.

۳-۴-۳-۵- نتایج نظرسنجی در میان متخصصان و افراد پیشرو در صنعت ساخت‌وساز

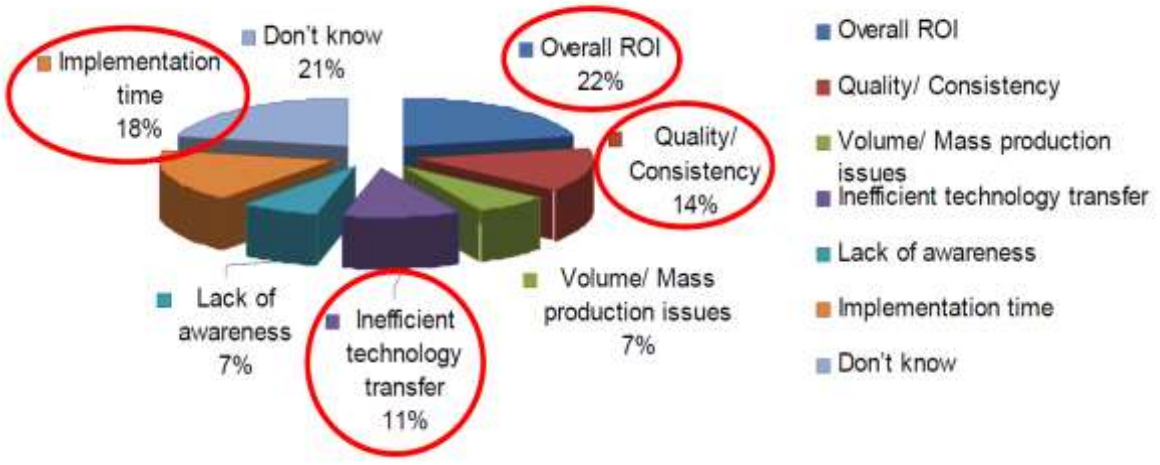
نتایج کلی به‌دست‌آمده در این نظرسنجی مطابق شکل ۵-۸ نشان می‌دهد متخصصین و افراد پیشرو در صنعت ساخت، عمدتاً از فواید و محدودیت‌های نانوتکنولوژی در این صنعت اطلاع زیادی ندارند. حدود ۳۵ درصد از پاسخ‌دهندگان اذعان داشتند که اطلاعات محدودی در این زمینه دارند. ۳۰ درصد اظهار کردند که خیلی کم یا هیچ اطلاعاتی در مورد کاربرد نانوتکنولوژی در صنعت ساخت ندارند. تنها ۸ درصد اظهار کردند که اطلاعات کافی در این زمینه دارند. نکته جالب اینکه تنها ۲۳ درصد توانستند یک یا تعداد بیشتری از تولیدات نانوتکنولوژی در صنعت ساخت را بشمارند.

[۱] nano catalysts



شکل ۵–۸: نتایج نظرسنجی از تعدادی متخصص و فعال حوزه نانوتکنولوژی در پاسخ به سؤال " نانوتکنولوژی در کدام حوزه‌ها بیشترین اثر را بر روی ساخت دارد؟"[۱۹۹]

طبق این نظرسنجی تأثیر نانوتکنولوژی در موضوعات کامپوزیت‌ها، پوشش‌ها و بتن بیشتر از سایر بخش‌های ساخت بوده است. در سؤالی دیگر از مخاطبین در مورد بزرگ‌ترین چالش‌ها و ریسک نانوتکنولوژی در ساخت پرسیده شده است.



شکل ۵–۹: نتایج نظرسنجی از تعدادی متخصص و فعال حوزه نانوتکنولوژی در پاسخ به سؤال " بزرگ‌ترین چالش و ریسک کاربرد نانوتکنولوژی در ساخت چیست؟"[۱۹۹]

همان‌طور که در شکل ۵-۹ مشاهده می‌شود، چالش‌های اصلی موضوع نانوتکنولوژی در مهندسی عمران و ساخت شامل ROI[۱] (بازگشت سرمایه)، زمان اجرا، کیفیت و استحکام است. ۲۲ درصد در این نظرسنجی چالش اصلی را بازگشت سرمایه دانسته و بر آن تأکید کرده‌اند، [۱۹۹].

نرخ بازگشت سرمایه شاخصی است که برای برآورد کارا بودن یک سرمایه‌گذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرخ بازگشت سرمایه از رابطه زیر به دست می‌آید:

ROI=(درآمد حاصل از سرمایه‌گذاری-هزینه سرمایه‌گذاری)/ هزینه سرمایه‌گذاری (۱۰)

ROI درواقع معیاری است برای تصمیم‌گیری راجع به سرمایه‌گذاری یا عدم سرمایه‌گذاری روی یک پروژه؛ اگر یک پروژه ROI مثبت نداشته باشد نباید روی آن سرمایه‌گذاری کرد. با مقایسه این شاخص برای چند پروژه یا ایده می‌توان بهینه‌ترین مسیر را با ROI بیشتر انتخاب کرد.

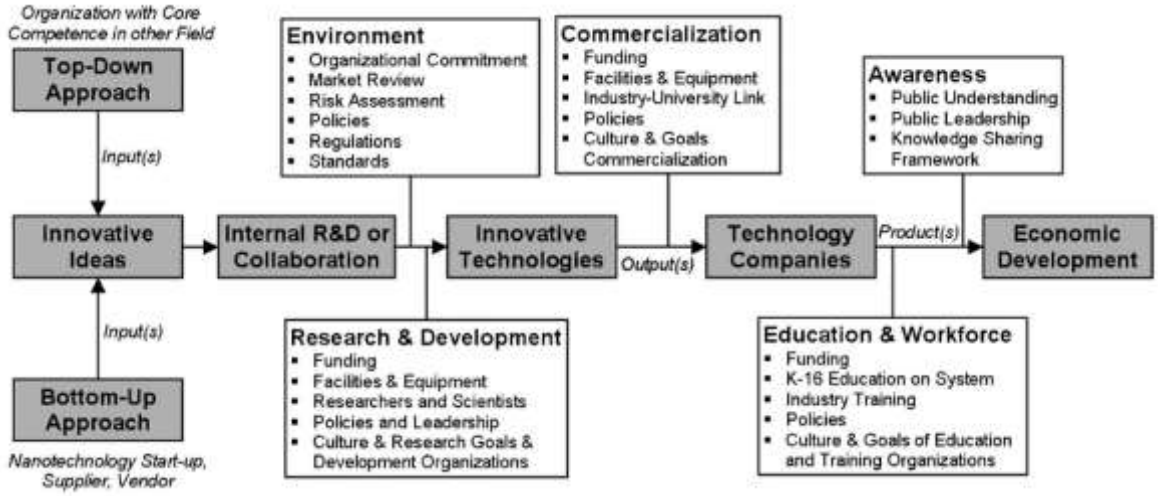
این نظرسنجی نشان می‌دهد غالب فعالین این حوزه از بازگشت سرمایه یا در واقع توجیه‌پذیری اقتصادی استفاده از صنعت نانو در مهندسی عمران و ساخت، اطمینان نداشته و دچار تردید هستند.

۵-۳-۴-۴- خطای تلقی هزینه معادل صرفه اقتصادی

پاچکو و همکاران (۲۰۱۱) در مورد مزایا و معایب نانوتکنولوژی در رشته مهندسی عمران و ساخت پژوهش‌هایی انجام دادند و در آن به تأثیرات نانو مواد بر مخلوط سیمانی از جمله افزایش دوام، مقاومت و بهبود هیدراسیون پرداختند. آن‌ها بر این موضوع اذعان داشتند که علیرغم تأثیرات فوق‌العاده‌ای که نانوتکنولوژی در مهندسی عمران و ساخت دارد، قیمت بالای مواد نانو یکی از موانع گسترش و تجاری‌سازی آن‌ها است و پیش‌بینی می‌شود حداقل در آینده نزدیک استفاده از آن‌ها فراگیر نشود. اما نکته دیگری که باید به آن توجه نمود این است که شاید در کوتاه مدت برای یک پروژه استفاده از نانوتکنولوژی پرهزینه به چشم بیاید، اما هزینه واقعی را باید در بلندمدت بررسی کرد. زیرا استفاده از این مواد ممکن است هزینه‌های ترمیم و نگهداری در آینده را کاهش دهد و در نهایت استفاده از این مواد صرفه اقتصادی داشته باشد، [۲۰۶].

در چارچوب ارائه‌شده در شکل ۵-۱۰ مراحل تولید یک محصول مبتنی بر نانوتکنولوژی تا رسیدن به رشد اقتصادی در قالب یک چارت مشخص ارائه شده است؛ در واقع این نمودار نحوه صحیح ورود نانوتکنولوژی به صنعت را تا رسیدن به رشد اقتصادی نمایش می‌دهد، [۱۹۹].

[۱] Return on investment



شکل ۵–۱۰: ارائه چارچوب کلی توسعه محصول مبتنی بر نانوتکنولوژی[۱۹۹]

۵-۴- مراجع

[۱] Lindgreen, H., et al., Microstructure engineering of Portland cement pastes and mortars through addition of ultrafine layer silicates. Cement and Concrete Composites, 2008. 30(8): p. 686-699.

[۲] Armentrout, D. and J. Belkowitz, AN INVESTIGATION OF NANO SILICA (SiO2) IN THE CEMENT HYDRATION PROCESS.

[۳] Said, A.M., et al., Properties of concrete incorporating nano-silica. Construction and Building Materials, 2012. 36: p. 838-844.

[٤] Kong, D., et al., Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. Construction and Building Materials, 2013. 43: p. 557-562.

[٥] Zhang, M.-H., J. Islam, and S. Peethamparan, Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. Cement and Concrete Composites, 2012. 34(5): p. 650-662.

[٦] Nazari, A., et al., Mechanical properties of cement mortar with Al2O3 nanoparticles. Vol. 6. 2010.

[۷] Sato, T. and J.J. Beaudoin. The Effect of nano-sized CaCO3 addition on the hydration of OPC containing high volumes of ground granulated blast-furnace slag. in 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. 2006. RILEM Publications SARL.

[۸] Brooks, J. and M.M. Johari, Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. Cement and Concrete Composites, 2001. 23(6): p. 495-502.

[۹] Li, Z. and Z. Ding, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. Cement and concrete research, 2003. 33(4): p. 579-584.

[۱۰] Badogiannis, E ,.et al., Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins. Cement and Concrete Composites, 2005. 27(2): p. 197-203.
[۱۱] Lu, Z., et al., Early-age interaction mechanism between the graphene oxide and cement hydrates. Construction and Building Materials, 2017. 152: p. 232-239.
[۱۲] Lim, J.L.G., et al., Synthesis of nano cementitious additives from agricultural wastes for the production of sustainable concrete. Journal of Cleaner Production, 2018. 171: p. 1150-1160.
[۱۳] Bernal, J ,.et al., Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures. Construction and Building Materials, 2018. 160: p. 196-210.
[۱٤] Camiletti, J., A. Soliman, and M. Nehdi, Effects of nano-and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete. Materials and structures, 2013. 46(6): p. 881-898.
[۱٥] Nazari, A. and S. Riahi, Assessment of the effects of Fe2O3 nanoparticles on water permeability, workability, and setting time of concrete. Journal of Composite Materials, 2011. 45(8): p. 923-930.
[۱٦] Nazari, A., et al., Benefits of Fe2O3 nanoparticles in concrete mixing matrix. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 102-106.
[۱۷] Nazari, A. and S. Riahi ,The effects of ZrO2 nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength self compacting concrete. Materials Research, 2010. 13(4): p. 551-556.
[۱۸] Nazari, A., et al., Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO2 nanoparticles. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 43-46.
[۱۹] Díaz-Peña, I., et al., Effect of the electrochemical migration of colloidal nano-SiO2 on the durability performance of hardened cement mortar. Int. J. Electrochem. Sci, 2015. 10 :p. 10261-10271.
[۲۰] Shan, H., et al., Electrochemical chloride removal in reinforced concrete structures: improvement of effectiveness by simultaneous migration of silicate ion. Construction and Building Materials, 2016. 127: p. 344-352.
[۲۱] Climent, M-.Á., J. Carmona, and P. Garcés, Graphite–Cement Paste: A New Coating of Reinforced Concrete Structural Elements for the Application of Electrochemical Anti-Corrosion Treatments. Coatings, 2016. 6(3): p. 32.
[۲۲] Mahdikhani, M., O. Bamshad, and M.F. Shirvani, Mechanical properties and durability of concrete specimens containing nano silica in sulfuric acid rain condition. Construction and Building Materials, 2018. 167: p. 929-935.
[۲۳] Massana, J., et al., Influence of nano-and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 2018. 165: p. 93-103.
[۲٤] Mohseni, E., et al., Single and combined effects of nano-SiO2, nano-Al2O3 and nano-TiO2 on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. Construction and Building Materials, 2015. 84: p. 331-340.
[۲٥] Arel, H.Ş. and B.S. Thomas, The effects of nano-and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks. Results in physics, 2017. 7: p. 843-851.
[۲٦] Nazari, A. and S. Riahi, The effects of TiO2 nanoparticles on properties of binary blended concrete. Journal of Composite Materials, 2011. 45(11): p. 1181-11.۸۸

[۲۷] Bai, J., S. Wild, and B. Sabir, Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater. Cement and Concrete Research, 2003. 33(3): p. 353-362.

[۲۸] Poon, C.-S., S. Kou, and L. Lam ,Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. Construction and building materials, 2006. 20(10): p. 858-865.

[۲۹] Khatib, J. and S. Wild, Sulphate resistance of metakaolin mortar .Cement and Concrete Research, 1998. 28(1): p. 83-92.

[۳۰] Roy, D., P. Arjunan, and M. Silsbee, Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. Cement and Concrete Research, 2001. 31(12): p. 1809-1813.

[۳۱] Al-Akhras, N.M., Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cement and concrete research, 2006. 36(9): p. 1727-1734.

[۳۲] Nochaiya, T. and A. Chaipanich, Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. Applied Surface Science, 2011. 257(6): p. 1941-1945.

[۳۳] Li, G.Y., P.M. Wang, and X. Zhao, Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. Carbon, 2005. 43(6): p. 1239-12.٤٥

[۳٤] Mesbahi, A. and H. Ghiasi, Shielding properties of the ordinary concrete loaded with micro- and nano-particles against neutron and gamma radiations. Applied Radiation and Isotopes, 2018. 136: p. 27-31.

[۳٥] Tekin, H.O., M.I. Sayyed, and S.A. Issa ,Gamma radiation shielding properties of the hematite-serpentine concrete blended with WO3 and Bi2O3 micro and nano particles using MCNPX code. Radiation Physics and Chemistry, 2018. 150: p. 95-100.

[۳۶] سیف اللهی و محمدی, بررسی تأثیر نانو سیلیس بر خواص مکانیکی مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن غلتکی در سدها. نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی, ۱۳۹۴.

[۳۷] دلنواز, م., همکاران, " بررسی تاثیر استفاده از نانو سیلیس، دوده سیلیسی و متاکائولن درکاهش واکنشهای قلیایی سیلیسی سنگدانه های بتن" در دومین کنفرانس ملی بتن ۱۳۸۹.

[۳۸] Jaishankar, P. and C. Karthikeyan. Characteristics of Cement Concrete with Nano Alumina Particles. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. IOP Publishing.

[۳۹] Khoshakhlagh, A., A. Nazari, and G. Khalaj, Effects of Fe2O3 nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete. Journal of Materials Science & Technology, 2012. 28(1): p. 73-82.

[٤۰] Sikora, P., et al., The Influence of Nano-Fe 3 O 4 on the Microstructure and Mechanical Properties of Cementitious Composites. Nanoscale research letters, 2016. 11(1): p. 182.

[٤۱] Nazari, A. and S. Riahi, The effects of Zno2 nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media. Materials Research, 2011. 14(2): p. 178-188.

[٤۲] Kaykha, M.M. and F. Soleymani, Assessments of the effects of ZrO2 nanopowders on porosimetry and mechanical properties of concrete. Journal of American Science, 2012. 8.(۱)

[٤۳] Nazari, A. and S. Riahi ,The effects of ZrO2 nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media. Journal of Experimental Nanoscience, 2013. 8(4): p. 413-433.

[٤٤] Chen, J., S.-c. Kou, and C.-s. Poon, Hydration and properties of nano-TiO2 blended cement composites. Cement and Concrete Composites, 2012. 34(5): p. 642-649.
[٤٥] Moradpour, R., et al., The effects of nanoscale expansive agents on the mechanical properties of non-shrink cement-based composites: The influence of nano-MgO addition. Composites Part B: Engineering, 2013. 55: p. 193-202.
[٤٦] Song, S., et al., The mechanical properties and electrochemical behavior of cement paste containing nano-MgO at different curing temperature. Construction and Building Materials, 2018 :١٦٤ .p. 663-671.
[٤٧] Courard, L., et al., Durability of mortars modified with metakaolin. Cement and Concrete Research, 2003. 33(9): p. 1473-1479.
[٤٨] Morsy, M., S. Alsayed, and M. Aqel, Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. Construction and Building Materials, 2011. 25(1): p. 145-149.
[٤٩] Chaipanich, A., et al., Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. Materials Science and Engineering: A, 2010. 5 :(٥-٤)٢٧p. 1063-1067.
[٥٠] Gong, K., et al., Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015. 27(2): p. A4014010.
[٥١] Jo, B.-W., et al., Characteristics of cement mortar with nano-SiO2 particles. Construction and Building Materials, 2007. 21(6): p. 1351-1355.
[٥٢] Rao, S., P. Silva, and J. De Brito, Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO2 and TiO2). Construction and Building Materials, 2015. 96: p. 508-517.
[٥٣] Li, Z., et al., Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. Materials Letters, 2006. 60(3): p. 356-359.
[٥٤] Dashti, m.e. and r. Esmaeilzadeh ,Influence of Nanoparticle on Concrete, BetonIran Website.
[٥٥] Olmo, I.F., E. Chacon, and A. Irabien, Influence of lead, zinc, iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement. Cement and Concrete Research, 2001 :(٨)٣١ .p. 1213-1219.
[٥٦] Behfarnia, K., A. AZARKEIVAN, and A. Keivan, The effects of TiO2 and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete. 2013.
[٥٧] Kawashima, S., et al., Modification of cement-based materials with nanoparticles. Cement and Concrete Composites, 2013. 36: p. 8-15.
[٥٨] Sato, T. and F. Diallo, Seeding effect of nano-CaCO3 on the hydration of tricalcium silicate. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010(2141): p. 6.٦٧-١
[٥٩] Nazari, A., et al., Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using TiO2 nanoparticles. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 98-101.
[٦٠] Qian, X. and Z. Li, The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. Cement and Concrete Research, 2001. 31(11): p. 1607-1611.
[٦١] Metaxa, Z.S., et al., Highly concentrated carbon nanotube admixture for nano-fiber reinforced cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 2 :(٥)٣٤ .٠١٢p. 612-617.
[٦٢] Konsta-Gdoutos, M.S., Z.S. Metaxa, and S.P. Shah, Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement and Concrete Research, 2010. 40(7): p. 1052-1059.

[۶۳] Li, H. and h. Zhang, Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement. Ou J-p.. Wear, 2006. 260(11-12): p. 1262-6.

[۶۴] محمدی و شهبازی, بررسی تاثیر نانوسیلیس بر ذوب و انجماد بتن حاوی الیاف شیشه ای. ۱۳۹۱, دانشگاه محقق اردبیلی.

[۶۵] Pan, Z., et al., Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. Cement and Concrete Composites, 2015. 58: p. 140-147.

[۶۶] Li, X., et al., Effects of graphene oxide agglomerates on workability, hydration, microstructure and compressive strength of cement paste. Construction and Building Materials, 2017. 145: p. 402-410.

[۶۷] Lv, S., et al., Use of graphene oxide nanosheets to regulate the microstructure of hardened cement paste to increase its strength and toughness. CrystEngComm, 2014. 16(36): p. 8508-8516.

[۶۸] Lv, S ,.et al., Effect of GO nanosheets on shapes of cement hydration crystals and their formation process. Construction and Building Materials, 2014. 64: p. 231-239.

[۶۹] Mahapatra, C.K. and S.V. Barai, Hybrid fiber reinforced self compacting concrete with fly ash and colloidal nano silica: A systematic study. Construction and Building Materials, 2018. 160: p. 828-838.

[۷۰] Kumar, D. and N. Sharma, Study of Compressive Strength of Concrete Using Nano Silica. Journal of Ceramics and Concrete Sciences, 2016. 1(2.(

[۷۱] Jalal, M., et al., Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO2 micro and nanoparticles. Materials & Design, 2012. 34: p. 389-400.

[۷۲] Zhang, L., et al., Study on the reinforcing mechanisms of nano silica to cement-based materials with theoretical calculation and experimental evidence. Journal of Composite Materials, 2016. 50(29): p. 4135-4146.

[۷۳] Gesoglu, M., et al., Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica. Construction and Building Materials, 2016. 102: p. 706-713.

[۷۴] Aly, M., et al., Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar .Materials & Design, 2012. 33: p. 127-135.

[۷۵] Behfarnia, K. and N. Salemi, The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. Construction and Building Materials, 2013. 48: p. 580-584.

[۷۶] Yazdi, N.A., et al., To study the effect of adding Fe2O3 nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. Life Science Journal, 2011. 8(4): p. 550-554.

[۷۷] Ruan, Y., et al., Mechanical behaviors of nano-zirconia reinforced reactive powder concrete under compression and flexure. Construction and Building Materials, 2018. 162: p. 663-673.

[۷۸] Meng, T., et al., Effect of nano-TiO2 on the mechanical properties of cement mortar. Construction and Building Materials, 2012. 29: p. 241-245.

[۷۹] کشاورز, ر., ا. محبی, و ج. مرشدیان, " مطالعه رفتار مکانیکی و میکروساختار کامپوزیت بتن - نانولوله کربنی چند دیواره", در مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی.

[۸۰] امیرنادی, کاربرد نانولوله ها ی کربنی به عنوان مواد افزودنی در مقاوم سازی ساختمان های بتنی. ۱۳۹۴: فصلنامه علمی تخصصی پژوهشی.

[۸۱] Nazari, A., et al., The effects of incorporation Fe2O3 nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete. Journal of American Science, 2010. 6(4): p. 90-93.
[۸۲] Liu, X., et al., Effect of nano-CaCO3 on properties of cement paste .Energy Procedia, 2012. 16: p. 991-996.
[۸۳] Al-Rub, R.K.A., A.I. Ashour, and B.M. Tyson, On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites. Construction and Building Materials, 2012. 35: p. 647-655.
[۸٤] Konsta-Gdoutos, M.S., Z.S. Metaxa, and S.P. Shah, Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. Cement and Concrete Composites :(۲)۳۲ .۲۰۱۰ ,p. 110-115.
[۸۵] Irshidat, M.R., et al., Effect of carbon nanotubes on strengthening of RC beams retrofitted with carbon fiber/epoxy composites. 2016. 89: p. 225-234.
[۸٦] Irshidat, M.R., M.H.J.C. Al-Saleh, and B. Materials, Effect of using carbon nanotube modified epoxy on bond–slip behavior between concrete and FRP sheets. 2016. 105: p. 511-518.
[۸۷] Guo, X., et al., Seismic Resistance of GFRP Bolted Joints with Carbon Nanotubes. 2018. 144(11): p. 04018106.
[۸۸] Genedy, M., et al., Improving fatigue performance of GFRP composite using carbon nanotubes. 2015. 3(1): p. 13-29.
[۸۹] Aboubakr, S., Epoxy-clay nanocomposite for carbon fiber reinforced polymer applications. 2013.
[۹۰] Bhuvaneshwari, B., et al., Functional enhancement of epoxy polymer nanocomposite: A nano blended binder for retrofitting of bridges. 2014.
[۹۱] افشار, ش.ت.ن., کاربرد فناوری نانو در سازه های بتنی هوشمند با قابلیت خود ترمیم شوندگی.
[۹۲] Lanzara, G., et al., Carbon nanotube reservoirs for self-healing materials. Nanotechnology, 2009. 20(33): p. 335704.
[۹۳] Calvo, J.G., et al., Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions. Construction and Building Materials, 2017. 138: p. 306-315.
[۹٤] Valcke, S., et al., Carriers of self-healing agents in concrete and their effect on the microstructure. 2009, TNO report No. TNO-034-DTM-2009-04262 for IOP project of healing built-in building materials.
[۹۵] Qian, S.Z., J. Zhou, and E. Schlangen, Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. Cement and Concrete Composites, 2010. 32(9): p. 686-693.
[۹٦] Khaliq, W. and M.B. Ehsan, Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. Construction and Building Materials, 2016. 102: p. 349-357.
[۹۷] Fickert, J., Nanocapsules for self-healing materials. 2013, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
[۹۸] Rana, S., et al., A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications. AIMS Materials Science, 2016. 3(2): p. 357-379.
[۹۹] Pisello, A.L., et al., Multipurpose experimental characterization of smart nanocomposite cement-based materials for thermal-energy efficiency and strain-sensing capability. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017. 161: p. 77-88.
[۱۰۰] Loh, K. and D. Ryu, Multifunctional materials and nanotechnology for assessing and monitoring civil infrastructures, in Sensor Technologies for Civil Infrastructures. 2014, Elsevier. p. 295-326.

[۱۰۱] Han, B., et al., Nanotip-induced ultrahigh pressure-sensitive composites: principles, properties and applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. 59: p. 105-114.
[۱۰۲] Wang, Y., et al., Strain monitoring of concrete components using embedded carbon nanofibers/epoxy sensors. Construction and Building Materials, 2018. 186: p. 367-378.
[۱۰۳] Ubertini, F., et al., Novel nanocomposite technologies for dynamic monitoring of structures: a comparison between cement-based embeddable and soft elastomeric surface sensors. Smart Materials and Structures, 2014. 23(4): p. 045023.
[۱۰٤] Luo, J., H. Li, and G. Xian, Electrically Conductive Nanocomposite Coating for Strain and Health Monitoring, in Advances in FRP Composites in Civil Engineering. 2011, Springer. p. 260-263.
[۱۰٥] Fardindoost, S., et al., Flexible strain sensors based on electrostatically actuated graphene flakes. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015. 25(7): p. 075016.
[۱۰٦] Ubertini, F., S. Laflamme, and A. D'Alessandro, Smart cement paste with carbon nanotubes, in Innovative developments of advanced multifunctional nanocomposites in civil and structural engineering. 2016, Elsevier. p. 97-120.
[۱۰۷] Kharroub, S., et al., Smart sensing skin for detection and localization of fatigue cracks. Smart Materials and Structures, 2015. 24(6): p. 065004.
[۱۰۸] Kong, X., et al. A robust signal processing method for quantitative high-cycle fatigue crack monitoring using soft elastomeric capacitor sensors. in Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2017. 2017. International Society for Optics and Photonics.
[۱۰۹] عربانی, م., خداپرست, و م.ز. ثانی, " تأثیر نانو رس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه های رس دار" در چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. ۱۳۸۹: دانشگاه گیلان رشت.
[۱۱۰] صادقیان و لوئیان, " مروری بر نانو تکنولوژی و کاربرد آن در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک", در کنفرانس بین المللی نخبگان,. ۱۳۹۵: دانشگاه شهید بهشتی.
[۱۱۱] Mohammadi, M. and M. Niazian, Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. journal of Advanced Science and Technology, 2013. 3(3): p. 37-46.
[۱۱۲] Ozin, G., A. Arsenault, and L. Cademartiri, Nanochemistry: a chemical approach to nanomaterials. Royal Society of Chemistry.۲۰۰۹ ,
[۱۱۳] مرادی و ب.روحی،پور, " بررسی تاثیر نانو سیلیس بر خاک تثبیت شده با آهک" در خاک و پی. ۱۳۹۱, دانشگاه تبریز: دانشگاه تبریز.
[۱۱٤] Naval, S., k. Chandan, and D. Sharma, Stabilization of Expansive Soil Using Nanomaterials, in International Interdisciplinary Conference on Science Technology Engineering Management Pharmacy and Humanities. 2017. Singapore. 2017.
[۱۱٥] Taipodia, J., J. Dutta, and A. Dey, Effect of nano particles on properties of soil, in Proceedings of the Indian Geotechnical Conference. 2011.
[۱۱٦] TAHA, M.R., et al., Effects of Nano-Carbon Reinforcement on the Swelling and Shrinkage Behaviour of Soil. Sains Malaysiana, 2018. 47(1): p. 195–205.
[۱۱۷] برخورداریان, مهرنهاد, و م.کدیور, " اثر نانو مواد بر پارامترهای مقاومتی خاک", در گروه خاک و پی. ۱۳۹۰, دانشگاه یزد: دانشگاه یزد.

[۱۱۸] م.جمشیدی و م. مخبری, بررسی اثر نانو سیلیس (پرکاربردترین محصول نانو) بر پارامترهای مقاومتی خاک, در ولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی و نمایشگاه "توسعه پایدار در راهسازی با رویکرد حفظ محیط زیست. ۱۳۹۶.

[۱۱۹] Bahmani, S.H., et al., Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement. Construction and Building Material, 2014: p. 350-359.

[۱۲۰] Majeed, Z., M.R. Taha, and I. Jawad, Stabilization of soft soil using nanomaterials. Research Journal of Applied Sciences. Engineering and Technology, 2014. 8(4): p. 503-509.

[۱۲۱] طبرسا, ع., تأثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک های ریزدانه نرم, در نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد یازدهم. ۱۳۹۶.

[۱۲۲] changizi and haddad, "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO2 and recycled polyester fiber" Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015.

[۱۲۳] Huang, Y. and L. Wang, Experimental studies on nanomaterials for soil improvement. Environmental Earth Sciences :(٦)٧٥ .٢٠١٦ ,p. 497.

[۱۲٤] Bahari, M., et al., Stabilization of silt by nanoclay, in 7th National Congress on Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan. 2013: Zahedan, Iran.

[۱۲۵] فخری, ز., ر. پورحسینی, و ت. عبادی, بهبود خواص هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانو رس. مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر, ۱۳۹۴. سال چهل و هفتم(۳): ص. ۴۶-۳۹ .

[۱۲٦] Kananizadeh, N., et al., The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate. Clean–Soil, Air, Water, 2011. 39(7): p. 605-611.

[۱۲۷] Janalizadeh Choobbasti, a., a. Vafaei, and s. Soleimani Kutanaei, Mechanical Properties of Sandy Soil Improved with Cement and Nanosilica. Open Eng., 2015. 5: p. 111-116.

[۱۲۸] Correia, A. and M.G. Rasteiro, Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization. Procedia engineering, 2016. 143: p. 1252-1259.

[۱۲۹] Janalizadeh, A., H. Nazarpoor, and M. Ebrahimi, Effect of nanoclay on permeability of silty sand, in 8th National Congress on Civil Engineering. 7-8 May 2014: Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaranan, Iran.

[۱۳۰] Baziar, M.H., J. Saeidaskari, and M. Alibolandi, Effects of Nanoclay on the Treatment of Core Material in Earth Dams. Journal of Materials in Civil Engineering :(١٠)٣٠ .٢٠١٨ ,p. 04018250.

[۱۳۱] bavandpouri, P. and Jahangiri, "EFFECTIVE OF NANO SILICA ON CLAY Behavior ". Journal of Applied Environmental and Biological Sciences, 2015.

[۱۳۲] HARESH, P. and R.R. VINOTH KUMAR, " Assessment of nano materials on Geotechnical properties of Clayey soil" in International Conference on Engineering Innovations and Solutions(ICEIS –2016). 2016. p. 66.

[۱۳۳] رجبی, م., حیدری, و عبدالهی, "بررسی آزمایشگاهی اثر نانو سیلیس و نانو اکسیدآهن بر روی پارامترهای مقاومتی و تحکیم خاکهای رسی کرج" i n خاک وپی. ۱۳۹۵, دانشگاه قم.

[۱۳۴] شریفنسب و عباسی, ارزیابی تاثیر ذرات نانو رس بر برخی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک ها, در ماشین های کشاورزی. ۱۳۹۵.

[۱۳۵] Zaid Hameed, m., m. Raihan Taha, and i. Ibtehaj Taha, Stabilization of Soft Soil Using Nanomaterials. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014. 8-4: p. 503-509.

[۱۳٦] Padidar, M., et al. , Effect of nanoclay on soil erosion control., in 6th International Conference on Nanomaterials. 2014: Brno, Czech.

[۱۳۷] عباسی, ن. و آ. فرجاد, " بررسی امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاکهای رسی ". نشریه تحقیقات آب و خاک ایران, ۱۳۹۶. ۴۸(۳).

[۱۳۸] بهاری, م. و ع. شاهنظری, بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس., در علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۳۹۴. ص. ۱۱۴-۱۰۷ .

[۱۳۹] زمردیان, محمدعلی, و مومن, " مطالعه آزمایشگاهی تاثیرافزودنی نانو سیلیس برفرسایش داخلی خاک های واگرا", در گروه خاک و پی. ۱۳۹۰, دانشگاه شیراز.

[۱٤۰] Ouhadi, V.R. and H. Bakhshalipour, Impact of nano clays on the behavior properties of collapsible soils, in 9th International Congress on Advanced in Civil Engineerin. 2010: Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.,

[۱٤۱] Fazeli, A., A. Johari, and F. Davoodi, Rehabilitation of collapsible soil with nanoclay,, in 8th National Congress on Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology,. 2014: Mazandaranan, Iran.

[۱۴۲] جمشیدی, م.، و م. مخبری, بررسی اثر نانو سیلیس (پرکاربردترین محصول نانو) بر پارامترهای مقاومتی خاک, در اولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی و نمایشگاه "توسعه پایدار در راهسازی با رویکرد حفظ محیط زیست". ۱۳۹۶: شیراز.

[۱٤۳] Bahmani, S.H., et al., The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil. Construction and Building Materials, 2016. 118.(۳۰٦-۲۹٤)

[۱٤٤] Zomorodian, S.A., et al., Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives. Applied Clay Science, 2017. 140: p. 140-147.

[۱٤٥] BAZYAR, “Application of Nanomaterial to Stabilize a WeakSoil”, in International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2013.

[۱٤٦] Ghazavi, M. and M. Bolhasani, Unconfined compression strength of clay improvement with lime and nano-silica ,in 6th International Congress on Environmental Geotechnics. 8-10 November 2010: New Delhi, India. p. 1490-1495.

[۱٤۷] Ghasabkolaei, n. and a. Janalizadeh Choobbasti, Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review .elsevier archives of civil and mechanical engineering 2017. 1 7 p. 6 3 9 - 6 5 0.

[۱٤۸] Hochella, M., Nanoscience and technology: the next revolution in the Earth sciences. Earth and Planetary Science Letters, 2002. 203(2): p. 593-605.

[۱٤۹] Mohammadi, M .and A.j. Choobbasti, The effect of self-healing process on the strength increase in clay. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018. 32(16): p. 1750-1772.

[۱٥۰] Changizi, F. and A. Haddad, Effect of nanocomposite on the strength parameters of soil. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017. 21(3): p. 676-686.

[۱٥۱] Lin Luo, H., et al., “Cohesive Soil Stabilized Using Sewage Sludge Ash/Cement and Nano Aluminum Oxide”. International Journal of Transportation Science and Technology 2012 1: p. 83.

[۱۵۲] اصغری, بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید تیتانیوم بر خواص مهندسی-ژئوتکنیکی خاک. ۱۳۹۵, دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل: دانشکده مهندسی عمران.

[۱۵۳] سماکوش, بررسی تاثیر افزودن نانوذرات و الیاف ضایعات فرش در بهبود رفتار مقاومتی خاک رس. ۱۳۹۶, دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل: دانشکده مهندسی عمران.

[۱۵٤] Nikookar, M., et al. The Strength Characteristics of Silty Soil Stabilized Using Nano-Clay. in Proc. of 7th Symposium on Advances in Science & Technology (7thsastech). 2013.

[۱۵۵] taha, M.R. and T. Ying, Effects of carbon nanotube on kaolinite: Basic geotechnical behavior. World Journal Of Engineering, 2010. 7(2): p. 472-473.

[۱۵٦] Gao, L., et al., Study on the shear property of nano-MgO-modified soil. Marine Georesources & Geotechnology, 2018. 36(4): p. 465-470.

[۱۵۷] زمردیان, س., و آ. سلیمانی, تاثیر ماده افزودنی نانوسیلیس بر فرسایش پذیری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک, ۱۳۹۶. سال بیست و یکم: ص. ۲۲۷-۲۱۷ .

[۱۵۸] Choobbasti, A.J., A. Vafaei, and S.S. Kutanaei, Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica. Open Engineering, 2015. 5.(۱)

[۱۵۹] سیمانی, س., تأثیر مسلح سازی با الیاف بر رفتار ماسه سیمانی حاوی نانوسیلیس. ۱۳۹۶, دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل: دانشکده مهندسی عمران.

[۱٦۰] Persoff, P., et al., Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering ASCE 1999. 125 (6): p. 461-469.

[۱٦۱] Noorzad, R. and I. Nouri Delavar, Investigation of the short-term behaviour of silty sand stabilized by colloidal silica. Scientia iranica, 2017(DOI: 10.24200/SC): p. 4583.

[۱٦۲] Subramani, V. and S. Sridevi, Soil Stabilization using Nano Materials. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2013. 4(3): p. 641-645.

[۱٦۳] Zhang, G., Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils. Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, 2007: p. 1-13.

[۱۶۴] سیاوشنیا و علیان, " ارزیابی رفتار خاک رس تثبیت شده با نانو پلیمر سی بی آر پلاس" ۱۳۹۴, دانشگاه تهران مرکز

[۱۶۵] شوش پاشا, ع., م. عباسی, و ه. نجف نیا, بررسی اثر ترکیب سیمان و نانوسیلیس بر روی مقاومت برشی خاک ماسه ای بابلسر. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر, ۱۳۹۴. ۵۰(۱): ص. ۱۷۹-۱۸۸ .

[۱٦٦] Moradi, G. and S .Seyedi, Evaluation of uniform delivery of colloidal nano-Silica stabilizer to liquefiable silty sands. International Journal of Nano Dimension, 2015. 6(5): p. 501-508.

[۱٦۷] Taha, M.R. and O.M.E. Taha, Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. Journal of Nanoparticle Research, 2012. 14(10): p. 1190.

[۱٦۸] Bello, A., Influence of compaction delay on CBR and UCS of cement stabilized lateritic soil. Pacific Journal of Science and Technology, 2011. 12(2): p. 87-98.

[۱٦۹] Ali, G .and A. Youssef, Stabilization of silt: a case study for low-volume roads, in in Saudi Arabia. 1983.

[۱۷۰] Janalizadeh Choobbasti, A., A. Vafaei, and S. Soleimani Kutanaei, Static and Cyclic Triaxial Behavior of Cemented Sand with Nanosilica. ASCE. J. Mater. Civ. Eng., 2018. 30.(۱۰)

[۱۷۱] موسوی, ن., ص. صادقی, و ح. بهرامی, تاثیر کاربرد جداگانه و ترکیبی ورمی کمپوست و نانو ذرات سیلیکا بر نفوذپذیری خاک, در منابع آب و خاک. ۱۳۹۶.ص.۶۰-۴۹ .

[۱۷۲] Pradesh, H., Application of nanotechnology in building materials. International Journal of Engineering Research and Applications, 2012: p. 1077-1082.

[۱۷۳] Taghiyari, H.R., Nanotechnology in Wood and Wood-Composite Materials. ournal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology, 2014. 3.

[۱۷٤] Taghiyari, H.R., Fire-retarding properties of nano-silver in solid woods. Wood Science and Technology, 2012. 46(5): p. 939-952.

[۱۷٥] Taghiyari, H.R., A. Karimi, and P.M.D. Tahir, Nano-Wollastonite in Particleboard: Physical and Mechanical Properties. 2013. Vol. 8. 2013.

[۱۷٦] Soleimani, F., et al., NANOPARTICLES IMPACT ON HUMAN AND ENVIRONMENT: A REVIEW OF TOXICITY, EXPOSURE, CONTROL STRATEGIES, AND FUTURE PROSPECTS PRINT. 2015.

[۱۷۷] Molins, R.J.C.M., Opportunities and Threats from Nanotechnology in Health, Food, Agriculture, and the Environment. 2008. 2008.(۷٤۳۳۸-۲۰۱٦-۹۳٦)

[۱۷۸] Gilbertson, L.M., et al., Designing nanomaterials to maximize performance and minimize undesirable implications guided by the Principles of Green Chemistry. 2015. 44(16): p. 5758-5777.

[۱۷۹] Geary ,S.M., et al., Assessing the effect of engineered nanomaterials on the environment and human health. 2016. 138(2): p. 405-408.

[۱۸۰] Pietroiusti, A., et al., Nanomaterial exposure, toxicity, and impact on human health. 2018. 10(5): p. e1513.

[۱۸۱] Baucher, M.-A., et al., Symposium on Assessing the Economic Impact of Nanotechnology: Synthesis Report. 2013.

[۱۸۲] Ouellette, L.L., Economic growth and breakthrough innovations: a case study of nanotechnology. 2015.

[۱۸۳] Council, N.R., Triennial review of the national nanotechnology initiative. 2014: National Academies Press.

[۱۸٤] Hemel, D.J. and L.L. Ouellette, Beyond the Patents-Prizes Debate. Tex. L. Rev., 2013. 92: p. 303.

[۱۸٥] Walsh, K.B.B., Models, Tools and Metrics Available To Assess the Economic Impact of Nanotechnology. OECD/NNI Int'l Symposium on Assessing the Economic Impact of Nanotechnology, 16 Mar. 2012.

[۱۸٦] Flynn, H., D. Hwang, and M. Holman, Nanotechnology update: corporations up their spending as revenues for nano-enabled products increase. Lux Research, Boston, MA, USA, 2014.

[۱۸۷] Roco, M.C., Nanotechnology: from discovery to innovation and socioeconomic projects. Chemical Engineering Progress, 2011. 107(5): p. 21-27.

[۱۸۸] Alyasri, S.A.H., I.S. Alkroosh, and P.K. Sarker, Feasibility of producing nano cement in a traditional cement factory in Iraq. Case studies in construction materials, 2017. 7: p. 91-101.

[۱۸۹] نیکروان, م., بررسی نقش مصرف نانوسیلیس در بتن بر عملکرد زیست محیطی و اقتصادی آن. نشریه مهندسی عمران فردوسی, ۱۳۹۳.

[۱۹۰] Rebitzer, G., et al., *Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.* Environment international, 2004. **30**(5): p. 701-720.

[۱۹۱] Inozemtcev, A.S. and E.V. Korolev. Technical and economical efficiency for application of nanomodified high-strength lightweight concretes. in Advanced Materials Research. 2014. Trans Tech Publ.

[۱۹۲] Korolev, E.V. and A.S. Inozemtcev. Preparation and research of the high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres. in Advanced materials research. 2013. Trans Tech Publ.

[۱۹۳] سایت کلینیک فنی و تخصصی بتن ایران.

[۱۹۴] تهران, م.پ.د.ت.م.ش.پ.ش.ه.ص., مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی تولید مواد ترمیم‌کننده بتن با نانو ذرات. زمستان ۱۳۸۹.

[۱۹۵] Gopalakrishnan, K., et al., Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift. 2011: Springer.

[۱۹۶] Faruqi, M., L. Castillo, and J. Sai, State-of-the-Art Review of the Applications of Nanotechnology in Pavement Materials. Journal of Civil Engineering Research, 2015. 5 :(۲)p. 21-27.

[۱۹۷] صادقی, ج.ا.ع.م., بررسی تأثیر استفاده از نانو تیوب های کربنی چند دیواره در افزایش مقاومت خمشی و قابلیت جذب انرژی ملا تهای سیمانی. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست, ۱۳۹۵.

[۱۹۸] Hakamy, A., F. Shaikh, and I.M. Low, Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites. Composites Part B: Engineering, 2015. 78: p. 174-184.

[۱۹۹] Teizer, J., Nanotechnology and its impact on construction. 2009.

[۲۰۰] Council, N.R., Investments in Federal Facilities: Asset Management Strategies for the 21st Century. 2004: National Academies Press.

[۲۰۱] Bainbridge, W.S., Societal implications of nanoscience and nanotechnology. 2001: Springer.

[۲۰۲] Gillett, S.L., Nanotechnolgy: Clean Energy and Resources for the Future :۲۰۰۲ .Foresight.

[۲۰۳] http://www.bccresearch.com/nanotechnology, Nanotechnology reports and reviews. 2008, BCC Research.

[۲۰۴] Jachimovicz, F. and A. Bentur. The future of concrete. in AFN15T Workshop on the Promise of Nanotechnology for Concrete at the۸۷ th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, DC. 2008.

[۲۰۵] Gartner, E., Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements. Cement and Concrete research, 2004. 34(9): p. 1489-1498.

[۲۰۶] Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali, Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. Construction and building materials, 2011. 25(2): p. 582-590.

فصل ششم

ارائه فهرست پیشنهادی طرح‌ها و پروژه‌های مرتبط با به‌کارگیری مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق



فهرست مطالب

Error! Bookmark not defined...... مقدمه

۶ ارائه فهرست پیشنهادی پروژه‌های مرتبط با به‌کارگیری مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق..... ۵۱۹

۶-۱ پروژه‌های پیشنهادی ۵۱۹

۶-۱-۱ بخش تولید:..... ۵۲۰

۶-۱-۱-۱ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در مخازن بتنی آب و سوخت ۵۲۰

۶-۱-۱-۲ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده ۵۲۱

۶-۱-۱-۳ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در رآکتور و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی ۵۲۲

۶-۱-۱-۴ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در برج‌های توربین بادی ۵۲۲

۶-۱-۱-۵ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازه‌های بتنی بخش تولید که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند ۵۲۳

۶-۱-۱-۶ تدوین دستورالعمل ساخت و بهره‌برداری از بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازه‌های بتنی صنعت برق ۵۲۴

۶-۱-۱-۷ انجام مطالعات اقتصادی و امکان‌سنجی اقتصادی جهت استفاده از بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های بتنی صنعت برق۵۲۵

۶-۱-۱-۸ طراحی، ساخت و آزمایش بتن با زمان گیرش اولیه و نهایی کم با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در سازه‌های پوسته‌ای بخش تولید ۵۲۶

۶-۱-۱-۹ طراحی، ساخت و آزمایش بتن با زمان گیرش اولیه طولانی و دمای هیدراسیون کمتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در بتن‌ریزی‌های حجیم مانند سدها ۵۲۶

۶-۱-۱-۱۰ طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون سازه‌های بخش تولید که در شرایط سخت محیطی قرار دارند ۵۲۷

۶-۱-۱-۱۱ طراحی، ساخت و آزمایش بتن با کمترین میزان خزش با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون مخازن، توربین‌های بادی، سازه و فونداسیون رآکتور، و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی ۵۲۸

۶-۱-۱-۱۲ طراحی، ساخت و آزمایش بتن‌های پر مقاومت با استفاده از مواد نانو ساختار طبیعی برای کاهش ابعاد سازهای برج‌های توربین بادی ۵۲۸

۶-۱-۱-۱۳ طراحی، ساخت و آزمایش بتن با استفاده از مواد نانو ساختار با بیشترین پتانسیل جذب تشعشعات به منظور استفاده در پوسته رآکتورها ۵۲۹

۶-۱-۱-۱۴ طراحی، ساخت و آزمایش بتن حاوی نانو الیاف پلی‌پروپیلن برای سرریز سدها ۵۳۰

۶-۱-۱-۱۵ تدوین دستورالعمل اجرایی برای بتن‌های تقویت‌شده با مواد نانو ساختار به‌منظور استفاده حداکثری از خصوصیات نانو ذرات در سازه‌های بتنی بخش تولید ۵۳۰

۶-۱-۱-۱۶ بررسی فنی و آزمایشگاهی تزریق نانو ذرات سیلیکا به‌عنوان پوشش محافظ بتن در برابر عوامل مخرب در مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده ۵۳۱

۶-۱-۱-۱۷ طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده با نانولوله‌های کربن برای مقاوم‌سازی برج‌های توربین بادی ۵۳۲

۶-۱-۱-۱۸ طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده برای مقاوم‌سازی مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده در شرایط بد محیطی ۵۳۲

۶-۱-۱-۱۹ طراحی، ساخت و آزمایش پلیمرهای تقویت‌شده الیافی شیشه (GFRPs) اصلاح‌شده با مواد نانو ساختار برای استفاده در مقاوم‌سازی سازه‌های بخش تولید ۵۳۳

۶-۱-۱-۲۰ طراحی، ساخت و آزمایش رزین‌های اپوکسی اصلاح‌شده برای تعمیر و تزریق ترک‌های مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده ۵۳۴

۶-۱-۱-۲۱ طراحی، ساخت و آزمایش حسگر کامپوزیت بتنی/CNT مدفون در بتن برای پوسته و فونداسیون راکتورها، برج‌های توربین‌های بادی، دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده و بدنه سدها۵۳۴

۶-۱-۱-۲۲ طراحی، ساخت و آزمایش آرماتورهای کامپوزیت/CNT خود سنجشگر برای مخازن، دودکش ها، برج‌های خنک‌کننده، برج توربین‌های بادی و پوسته راکتورها ۵۳۵

۶-۱-۱-۲۳ طراحی، ساخت و آزمایش حسگر نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT برای پایش دینامیکی سازه‌های بتنی صنعت برق ۵۳۶

۶-۱-۱-۲۴ طراحی، ساخت و آزمایش حسگر نانو کامپوزیت فیلم نرم الاستومری /کربن سیاه برای پایش دینامیکی سازه‌های صنعت برق ۵۳۷

۶-۱-۱-۲۵ انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بدنه سدهای خاکی به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن ۵۳۸

۶-۱-۱-۲۶ انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بستر سازه‌های صنعت برق به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن۵۳۸

۶-۱-۱-۲۷ بررسی و مقایسه اثرات اضافه شدن نانو رس مونت موریلونیت و نانو سیلیس به خاک ریزدانه رسی و میزان تغییرات حدود خمیری و روانی و شاخص خمیری خاک بهسازی شده و سنجش کارایی اضافه شدن ترکیبی این دو ماده به خاک ریزدانه رسی بخصوص در بستر توربین‌های بادی و سازه‌های نگهدارنده ماشین‌های دوار مکانیکی بخش تولید برق ۵۳۹

۶-۱-۱-۲۸ بررسی و مقایسه تأثیر افزودن نانو رس و نانو سیلیس به خاک رس واگرا به منظور کاهش پتانسیل واگرایی در بستر سازه‌های صنعت برق ۵۴۰

۶-۱-۱-۲۹ تثبیت خاک‌های رسی واگرا در سدهای خاکی و بستر سدهای بتنی با افزودن نانو رس و نانو سیلیس ۵۴۱

۶-۱-۲ بخش انتقال: ۵۴۲

۶-۱-۲-۱ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در دکل تلسکوپی انتقال برق ۵۴۲

۶-۱-۲-۲ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازه‌های بتنی بخش انتقال که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند ۵۴۳

۶-۱-۲-۳ طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون پست‌های انتقال، فونداسیون خطوط هوایی انتقال و منهول‌های خطوط زیرزمینی ۵۴۴

۶-۱-۲-۴ استفاده از مواد نانو ساختار در بتن فونداسیون برج‌های انتقال نیرو جهت جلوگیری از خوردگی و پوک شدگی در مناطق گرم و مرطوب ۵۴۴

۶-۱-۲-۵ امکان‌سنجی استفاده از مواد نانو ساختار در بتن جهت کاهش نرخ خوردگی فولاد در بتن ۵۴۵

۶-۱-۲-۶ طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح شده با نانو لوله‌های کربن برای مقاومسازی دکلهای تلسکوپی ۵۴۶

۶-۱-۲-۷ طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده برای مقاومسازی فونداسیون سازه‌های بخش انتقال در شرایط بد محیطی ۵۴۷

۶-۱-۲-۸ طراحی، ساخت و آزمایش پلیمرهای تقویت شده الیافی شیشه (GFRPs) اصلاح شده با مواد نانو ساختار برای استفاده در مقاومسازی دکل‌های تلسکوپی ۵۴۷

۶-۱-۲-۹ طراحی، ساخت و آزمایش حسگر کامپوزیت بتنی/CNT مدفون در بتن برای فونداسیون دکل های انتقال و در سازه دکل‌های تلسکوپی ۵۴۸

۶-۱-۲-۱۰ طراحی، ساخت و آزمایش آرماتورهای کامپوزیت/CNT خود سنجشگر برای المان‌های دکل های تلسکوپی ۵۴۹

۶-۱-۲-۱۱ عایق سازی فونداسیون‌های بتنی تأسیسات صنعت برق در بخش انتقال و توزیع به منظور کاهش خوردگی با استفاده از روش تزریق نانو ذرات ۵۵۰

۶-۱-۲-۱۲ استفاده از بتن فراتوانمند نانو ساختار در پایه‌های بتنی پیشتنیده جهت احداث خطوط انتقال و همچنین مقایسه فنی و اقتصادی آن ۵۵۰

۶-۱-۲-۱۳ استفاده از مواد نانو ساختار برای مقابله با فرسایش بتن در دکل‌های تلسکوپی بتنی تحت اثر ریزگردها ۵۵۱

۶-۱-۲-۱۴ بررسی فنی و اقتصادی ساخت و اجرای برج‌های مشبک انتقال با استفاده از مواد غیر هادی کامپوزیتی اصلاح‌شده با مواد نانو ساختار ۵۵۲

۶-۱-۲-۱۵ انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ماسه‌ای شل با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بستر دکل‌های انتقال نیروی صنعت برق در مناطق ساحلی و کویری به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن ۵۵۳

۶-۱-۲-۱۶ بررسی کاهش پتانسیل تورمی خاک رسی بستر دکل‌های انتقال نیرو با استفاده از مواد نانو ساختار ۵۵۳

۶-۱-۳ بخش توزیع ۵۵۴

۶-۱-۳-۱ طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در پایه‌های پست و خطوط هوایی توزیع نیرو ۵۵۴

۶-۱-۳-۲ طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون پست‌های هوایی توزیع و پایه‌های خطوط هوایی توزیع نیرو ۵۵۵

۶-۱-۳-۳ استفاده از مواد نانو ساختار در ساخت پایه‌های بتنی برای پیشگیری از فرسودگی پایه‌های بتنی در شرایط مختلف اقلیمی و شوره‌زارها ۵۵۶

۶-۱-۳-۴ استفاده از مواد نانو ساختار در تولید بهینه تیرهای مورد نیاز در شبکه‌های توزیع هوایی نیرو با توجه به وجود ریزگردها که سبب خوردگی بتن میگردند ۵۵۶

۶-۱-۳-۵ بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و موادی تیر انتقال و توزیع برق کامپوزیتی FRP اصلاح شده با مواد نانو ساختار ۵۵۷

۶-۱-۳-۶ امکان‌سنجی و تولید نمونه حسگر الیاف نانو کربن برای شناسایی و ردیابی خوردگی در تیرهای بتنی ۵۵۸

۶- ارائه فهرست پیشنهادی پروژه‌های مرتبط با به‌کارگیری مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق

۱-۶- پروژه‌های پیشنهادی

صنعت برق یکی از صنایعی است که نیاز به قابلیت اطمینان و تاب‌آوری بالا در تمامی اجزای آن دارد چراکه خرابی یا عملکرد نامطلوب هرکدام از بخش‌های آن هرچند به مدت محدود خسارات زیادی می‌تواند به کشور وارد نماید لذا تشخیص زودهنگام انحراف یا مشکل در صنعت برق بسیار حیاتی است. بر این اساس، یکی از راه‌های بالاتر بردن قابلیت اطمینان این صنعت به کار بردن مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق می‌باشد. درواقع تأثیر مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق سبب افزایش قابلیت اطمینان و تاب‌آوری آن‌ها و در نتیجه‌ی آن افزایش قابلیت اطمینان و بازدهی این صنعت می‌گردد. با توجه به اینکه سازه‌های صنعت برق تحت شرایط محیطی سخت‌تری نسبت به سایر صنایع مانند درجه حرارت، فشار، مواد شیمیایی تهاجمی و به‌ویژه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی قوی عمل می‌کنند مواد نانو ساختار با اصلاح ویژگی‌های تاب‌آوری در سازه‌های این صنعت، آن‌ها را نسبت به این شرایط محیطی مقاوم و تاب‌آور می‌سازند.

سوابق موضوعی اشاره شده در سایر صنایع و کاربردهای مواد نانو ساختار در مهندسی عمران تأثیر استفاده از مواد نانو ساختار را در بهبود عملکرد سازه‌های عمرانی به خوبی نشان داده است. این نتایج توجیه سرمایه‌گذاری در مورد استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق چه در حوزه مطالعاتی و چه در حوزه ساخت و اجرا را به خوبی مشخص می‌کند.

در این فصل پیشنهاداتی جهت استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های صنعت برق برای بهبود عملکرد و افزایش تاب‌آوری آن‌ها ارائه می‌گردد. طرح‌های پیشنهادی در سه بخش تولید، انتقال و توزیع به صورت مجزا ارائه شده است، برای هر طرح پیشنهادی هدف، شرح طرح، مشکلات و چالش‌های طرح، مزایای طرح و پیش زمینه‌های لازم ارائه می‌گردد.

۱-۱-۶ - بخش تولید:

۱-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در مخازن بتنی آب و سوخت

هدف: تولید بتنی با مقاومت مکانیکی و دوام بالا، مقاوم در برابر نفوذپذیری عوامل مخرب بتن و قابلیت خودترمیمی ترک‌ها به‌منظور استفاده در مخازن بتنی آب و سوخت هدف این پروژه می‌باشد.

شرح پروژه: مخزن‌های بتنی هوایی و زمینی در طول عمر خود تحت تنش‌های مختلف و نفوذ عوامل مخرب قرار دارند و ایجاد ترک در آن‌ها سبب گسترش سریع آن به سبب نفوذ عوامل مخرب و تنش‌های وارده می‌گردد و نتیجه آن تبدیل ترک‌های مویرگی به ترک‌های سازه‌ای است، لذا استفاده از بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با هدف افزایش مقاومت بتن، کاهش ابعاد سازه‌ای، کاهش نفوذپذیری عوامل خورنده، افزایش عمر بتن، ترمیم ترک‌های مویرگی، و در نتیجه آن‌ها کاهش هزینه ساخت، نگهداری، تعمیر و تقویت مخازن، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ فنّاوری و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت نمونه‌های بتنی با مصالح مختلف، این نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع خصوصیات مکانیکی و شیمیایی مصالح محلی متناسب با جغرافیای ایران
۲. تنوع شرایط بد محیطی متناسب با جغرافیای ایران
۳. ایجاد شرایطی مشابه شرایط واقعی جهت انجام تست‌ها

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای
۳. افزایش طول عمر سازه

۴. ترمیم ترک‌های مویرگی و کاهش نفوذپذیری
۵. افزایش قابلیت اطمینان در مخازن آب و سوخت

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن فراتوانمند خودترمیم شونده

۲-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

هدف: تولید بتنی با مقاومت مکانیکی و دوام بالا، مقاوم در برابر نفوذپذیری عوامل مخرب بتن به منظور افزایش عمر مفید دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده، هدف این پروژه می‌باشد.

شرح پروژه: ساخت دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده بسیار پرهزینه می‌باشد و با توجه به فرآیندهایی که در آن‌ها صورت می‌پذیرد مواجهه آن‌ها با عوامل مخرب بسیار بیشتر از سازه‌های دیگر می‌باشد و ایجاد ترک در آن‌ها سبب گسترش سریع آن به سبب نفوذ عوامل مخرب و تنش‌های وارده می‌گردد لذا استفاده از بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با هدف افزایش مقاومت بتن، کاهش ابعاد سازه‌ای، کاهش نفوذپذیری عوامل خورنده، افزایش عمر بتن، ترمیم ترک‌های مویرگی که منتج به کاهش هزینه ساخت، نگهداری، تعمیر و تقویت این نوع سازه‌ها می‌شود، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین بتنی با مصالح مختلف، نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع خصوصیات مکانیکی و شیمیایی مصالح محلی متناسب با جغرافیای ایران
۲. انجام تست‌ها با توجه به وجود عوامل مخرب در دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری به دلیل سبک سازی سازه و خصوصیت خودترمیمی
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای
۳. افزایش طول عمر سازه
۴. ترمیم ترک‌های مویرگی و کاهش نفوذپذیری
۵. افزایش قابلیت اطمینان در دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن فراتوانمند خودترمیم شونده

۳-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در رآکتور و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی

هدف: افزایش قابلیت اطمینان در رآکتورها و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی با استفاده از بتنی با مقاومت مکانیکی بالا، مقاوم در برابر نفوذ و دارای قابلیت خودترمیمی، از اهداف این پروژه می‌باشد.

شرح پروژه: در سازه‌های رآکتورهای هسته‌ای وقوع ترک و گسترش آن می‌تواند باعث بروز حوادث غیرقابل‌جبران گردد، لذا استفاده از بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با هدف افزایش مقاومت بتن، کاهش ابعاد سازه‌ای، کاهش نفوذپذیری عوامل خورنده و افزایش عمر بتن، ترمیم ترک‌های مویرگی و افزایش قابلیت اطمینان سازه، می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه‌یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین بتنی با مصالح مختلف، نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع خصوصیات مکانیکی و شیمیایی مصالح محلی متناسب با جغرافیای ایران
۲. تنوع شرایط بد محیلی متناسب با جغرافیای ایران
۳. در نظر گرفتن اثر مخرب تشعشعات رآکتورها بر روی سازه رآکتور و پوسته آن

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری به دلیل سبک سازی سازه و خصوصیت خودترمیمی
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای
۳. افزایش طول عمر سازه
۴. ترمیم ترک‌های مویرگی و کاهش نفوذپذیری
۵. افزایش قابلیت اطمینان در رآکتورها و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن فراتوانمند خودترمیم شونده

۴-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در برج‌های توربین بادی

هدف: افزایش قابلیت اطمینان در برج‌های نگهدارنده توربین بادی که همواره تحت بار دینامیکی قرار دارند، با استفاده از بتن پر مقاومت، مقاوم در برابر نفوذ و دارای قابلیت خودترمیمی از اهداف این پروژه می‌باشد.

شرح پروژه: در برج‌های نگهدارنده توربین بادی با توجه به عملکرد آن‌ها که همواره تحت بار دینامیکی قرار دارند، استفاده از بتنی پر مقاومت سبب کاهش ابعاد سازه شده، که سبب کاهش تنش‌های وارده به برج می‌گردد و از سوی دیگر با توجه به مقاوم بودن در برابر نفوذ عوامل خورنده و خصوصیت خودترمیم شوندگی عمر سازه افزایش می‌یابد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین بتنی با مصالح مختلف، نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع خصوصیات مکانیکی و شیمیایی مصالح محلی متناسب با جغرافیای ایران
۲. تنوع شرایط بد محیلی متناسب با جغرافیای ایران
۳. درنظر گرفتن اثر بار دینامیکی توربین بادی بر ارزیابی و تست‌های بتن فراتوانمند

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای و تسهیل حمل و نقل و ساخت پایه‌های برج
۳. افزایش طول عمر سازه
۴. ترمیم ترک‌های مویرگی و کاهش نفوذپذیری

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن فراتوانمند خودترمیم شونده

۵-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازه‌های بتنی بخش تولید که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند

هدف: تولید بتنی با مقاومت مکانیکی و دوام بالا، مقاوم در برابر نفوذپذیری عوامل مخرب بتن و دارای خصوصیت خودمتراکمی برای سازه‌های بتنی بخش تولید که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند

شرح پروژه: تمرکز آرماتور در فونداسیون‌های بخش تولید، المان‌هایی پوسته‌ای و برج‌های توربین‌های بادی همواره سبب شده تا پوشش دهی کامل تمامی فضاها با بتن‌های معمولی کاری غیرممکن گردد و از کیفیت نهایی سازه به شدت کاسته گردد. بتن فراتوانمند خودمتراکم به‌راحتی در بین شبکه متراکم آرماتورهای موجود جریان پیدا می‌کند و تمام فضاها را پوشش می‌دهد و با خصوصیت پر مقاومت بودن سبب کاهش ابعاد سازه‌ای می‌گردد و با کاهش نفوذپذیری بتن سبب افزایش عمر سازه می‌گردد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه‌یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ فنی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین

بتنی با مصالح مختلف، نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی آزمایشگاهی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند خودمتراکم برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع خصوصیات مکانیکی و شیمیایی مصالح محلی متناسب با جغرافیای ایران
۲. تنوع شرایط بد محیلی متناسب با جغرافیای ایران
۳. تولید بتنی با خصوصیت هم‌زمان فراتوانمندی و خودمتراکمی

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای
۳. افزایش طول عمر سازه
۴. افزایش قابلیت اطمینان در سازه مورد نظر
۵. امکان بتن‌ریزی در شبکه‌های متراکم آرماتور

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن فراتوانمند خودمتراکم

۶-۱-۱-۶- تدوین دستورالعمل ساخت و بهره‌برداری از بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازه‌های بتنی صنعت برق

هدف: تعیین نکات فنی که در روند تولید بتن فراتوانمند مؤثر است و بر کیفیت نهایی محصول تأثیر می‌گذارد. همچنین ارائه نکات مربوط به طراحی، ساخت، تست و بهره‌برداری از سازه‌های ساخته شده با بتن فراتوانمند

شرح پروژه: همواره استفاده از مواد نانو ساختار به دلیل خصوصیات فیزیکی خاص آن‌ها با مشکلاتی نظیر پراکنش نامناسب در طرح اختلاط و در نتیجه کاهش کارایی بتن همراه می‌باشد که این موضوع سبب اختلال در تولید محصول موردنظر از لحاظ کیفیت محصول نهایی می‌شود. بر همین اساس در تولید بتن فراتوانمند تعیین ملاحظات اجرایی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. علاوه بر آن ملاحظات فنی که برای حفظ سلامتی افرادی که با این محصول در تماس می‌باشند بسیار حائز اهمیت است. در این طرح در ابتدا مطالعات جامع اولیه در خصوص نکات فنی و ایمنی در تولید بتن فراتوانمند با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه‌یافته انجام می‌گیرد و تمامی چالش‌هایی که در روند تولید چنین بتنی با آن مواجه هستیم تعیین می‌شود و سپس دستورالعمل فنی جامعی برای رفع این موانع، ساخت و بهره‌برداری از این این نوع بتن در سازه‌های صنعت برق تهیه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. متغیر بودن موانع و چالش‌های موجود برای سازه‌های مختلف و شرایط اجرایی متفاوت
۲. عدم آگاهی از شرایط مواد نانو ساختار در دراز مدت

۳. عدم دسترسی به تجهیزات خاص مورد نیاز برای اختلاط ذرات نانو

مزایای طرح:

۱. قابلیت اطمینان بالاتر در تولید بتن فراتوانمند
۲. حفظ سلامتی افرادی که در فرآیند تولید با این محصول در تماس می‌باشند.
۳. افزایش طول عمر سازه و کاهش هزینه تعمیر و نگهداری

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت مواد نانو ساختار و خصوصیات آن در طرح اختلاط

۷-۱-۱-۶- انجام مطالعات اقتصادی و امکان‌سنجی اقتصادی جهت استفاده از بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار در سازه‌های بتنی صنعت برق

هدف: ارزیابی اقتصادی استفاده از بتن فراتوانمند در فرآیند ساخت، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری در طول عمر سازه‌های صنعت برق

شرح پروژه: چالشی که همواره در مورد سازه‌های مختلف از جمله سازه‌های بتنی مطرح می‌باشد ارزیابی اقتصادی ساخت و بهره‌برداری از آن‌ها می‌باشد. در ارزیابی اقتصادی سازه علاوه بر هزینه ابتدایی ساخت می‌بایست، عمر مفید سازه، هزینه‌های تعمیر، تقویت و مقاوم‌سازی و هزینه مدت زمانی که در عملکرد آن سازه به جهت تعمیر، تقویت و مقاوم‌سازی اختلال ایجاد می‌گردد، در نظر گرفته شود. سازه‌هایی که با بتن فراتوانمند ساخته می‌شوند از لحاظ مصالح مصرفی مشخصاً هزینه بالاتری را شامل می‌گردند، اما با توجه به پر مقاومت بودن این نوع بتن، ابعاد سازه کاهش می‌یابد که در نتیجه آن هزینه ساخت را می‌تواند کاهش دهد، از سوی دیگر با توجه به عمر مفید بیشتر، هزینه تعمیر، تقویت و مقاوم‌سازی کمتری را در بازه زمانی مشخص در مقایسه با سازه‌های با بتن معمولی شامل می‌گردد که باید مورد ارزیابی اقتصادی قرار گیرد. در این طرح لازم است تمامی مواردی که در ارزیابی اقتصادی یک سازه بتنی مطرح می‌باشد از روند تولید بتن تا اجرای سازه و در طول عمر مفید سازه در نظر گرفته شود و در نهایت نتایج این ارزیابی برای سازه‌های صنعت برق با بتن معمولی و فراتوانمند مورد مقایسه قرار گیرد و نتایج مربوطه ارائه گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. شرایط محیطی می‌تواند در نتایج ارزیابی تأثیر زیادی بگذارد، لذا لازم است برای شرایط محیطی مختلف این ارزیابی انجام پذیرد.
۲. نوسان شدید اقتصادی و ایجاد مشکل در روند تخمین هزینه‌ها

مزایای طرح:

۱. انتخاب صحیح نوع بتن برای شرایط محیطی مختلف با توجه به ارزیابی اقتصادی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. امکان تخمین صحیح عمر مفید سازه‌ها، و هزینه‌هایی که سازه بتنی در طول عمر خود به همراه دارد.

۸-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با زمان گیرش اولیه و نهایی کم با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در سازه‌های پوسته‌ای بخش تولید

هدف: تولید بتن با زمان گیرش اولیه و نهایی کم با استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور استفاده در سازه‌هایی که مدت زمان اجرا تا بهره‌برداری برای آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

شرح پروژه: در بسیاری از موارد، مانند مقاوم‌سازی سازه‌های صنعت برق، مدت زمان اجرا تا بهره‌برداری برای سازه‌های بتنی صنعت برق بسیار مدت زمان کوتاهی است که به همین جهت می‌بایست از بتنی استفاده گردد که زمان گیرش نهایی کوتاهی دارد. همچنین، در مواردی که ارتفاع قالب‌بندی شده جهت بتن‌ریزی زیاد می‌باشد (مانند دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده، مخازن)، لازم است از بتنی استفاده گردد که زمان گیرش اولیه کمتری دارد تا از فشار بتن بر قالب به دلیل ارتفاع زیاد قالب کاسته گردد. به همین منظور لازم است تا از مواد نانو ساختاری در طرح اختلاط بتن استفاده گردد تا در کمترین زمان ممکن، بتن به مقاومت مورد نظر برسد. در این طرح ابتدا تمام مواد نانو ساختاری که در گیرش ابتدایی و نهایی بتن تأثیر دارند شناسایی می‌شوند، سپس تأثیر هر یک از این مواد نانو ساختار بر گیرش ابتدایی و نهایی بتن مورد تست و بررسی قرار می‌گیرد. جهت ارزیابی کیفی این نوع بتن نمونه‌های آزمایشگاهی از آنها تهیه می‌گردد که تحت آزمایش قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای بتن با زمان گیرش اولیه و نهایی کم ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تأثیر منفی کاهش زمان گیرش ابتدایی و نهایی بر مقاومت نهایی بتن

مزایای طرح:

۱. سهولت اجرای سازه‌های بتنی با شرایط خاص

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفضیلی در مورد تأثیر این‌گونه مواد نانو ساختار بر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بتن

۹-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با زمان گیرش اولیه طولانی و دمای هیدراسیون کمتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در بتن‌ریزی‌های حجیم مانند سدها

هدف: تولید بتن با زمان گیرش اولیه طولانی و دمای هیدراسیون کمتر با استفاده از مواد نانو ساختار به‌منظور استفاده در سازه‌هایی که حجم بتن‌ریزی در آن‌ها بالاست نظیر بتن‌ریزی سدها

شرح پروژه: در بتن ریزی سدها و قطعات حجیم بتنی همواره حبس گرما و افزایش دمای بخش‌های مرکزی مشکلاتی را در طرح اختلاط و اجرا ایجاد می‌کند. این افزایش دما سبب ایجاد ترک‌های حرارتی و کاهش مقاومت نهایی می‌گردد. اجرای چنین سازه‌هایی عموماً اتخاذ تدابیری جهت جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی را ضروری می‌کند. بر این اساس رعایت حد تعیین شده روی دمای اولیه بتن حایز اهمیت است که به منظور نیل به این هدف کاربرد روش‌های پیش سرمایش و پس سرمایش غیر قابل اجتناب است و هزینه بسیاری ایجاد می‌کند. یکی از روش‌های کاهش دمای هیدراسیون بتن تازه، کاهش سرعت گیرش اولیه است، چنانچه بتوان با کاهش سرعت هیدراسیون بتن تازه، دمای هیدراسیون بتن را کاهش داد هزینه‌های پیش سرمایش و پس

سرمایش کاهش می‌یابد و همچنین اجرای چنین بتن‌ریزی‌های آسان‌تر خواهد شد. در این طرح به مطالعه تاثیر دو ماده نانو ساختار متاکائولن و نانواکسید روی بر سرعت گیرش اولیه بتن و کاهش حرارت هیدراسیون پرداخته می‌شود. جهت ارزیابی کیفی این نوع از بتن، نمونه‌های آزمایشگاهی از آن تهیه می‌گردد که تحت آزمایش قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای بتن با سرعت گیرش اولیه و دمای هیدراسیون کمتر جهت استفاده در بتن‌ریزی‌های حجیم با استفاده از دو ماده نانو ساختار متاکائولن و نانو اکسید روی ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تأثیر منفی افزایش زمان گیرش ابتدایی و نهایی بر مقاومت نهایی بتن

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های بتن‌ریزی‌های حجیم
۲. تسهیل اجرای بتن‌ریزی‌های حجیم

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفضیلی در مورد تأثیر این‌گونه مواد نانو ساختار بر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بتن

۱۰-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون سازه‌های بخش تولید که در شرایط سخت محیطی قرار دارند

هدف: کاهش آسیب‌پذیری فونداسیون سازه‌های بخش تولید نسبت به عوامل خورنده محیطی

شرح پروژه: فونداسیون‌های سازه‌های بخش تولید (مانند: فونداسیون مخازن، دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده و توربین‌های بادی) که در شرایط اقلیمی و عوامل خوردگی مختلف موجود در خاک و شرایط سخت محیط قرار دارند همواره تحت تأثیر خوردگی می‌باشند، با زوال فونداسیون، سازه در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد که رفع این موضوع هزینه‌های بالایی را برای بخش تولید صنعت برق در سطح کشور در پی خواهد داشت. همین امر سبب شده تا استفاده از بتن‌های با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر مورد توجه واقع گردد، استفاده مواد نانو ساختار سبب بهبود این خصوصیات بتن می‌گردد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تأثیر مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات ذکرشده بتن، مقایسه‌ای دقیق بین تأثیر مواد نانو ساختار مختلف بر تراکم بافت بتن، نفوذپذیری، دوام و مقاومت مکانیکی بتن به صورت آزمایشگاهی صورت می‌پذیرد، سپس امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و در نهایت دستورالعملی برای تولید بتنی با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. گستره شرایط اقلمی و مواد خورنده مختلف در هر اقلیم
۲. نحوه پراکنش ماده نانو ساختار در طرح اختلاط بتن

مزایای طرح:

۱. افزایش عمر مفید بتن و مقاومت در برابر خوردگی

۲. کاهش هزینه‌های ترمیم و تعمیر

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت کامل اثرات مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات نفوذپذیری و دوام بتن

۱۱-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با کمترین میزان خزش با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون مخازن، توربین‌های بادی، سازه و فونداسیون رآکتور، و پوسته رآکتور نیروگاه اتمی

هدف: تولید بتنی با کمترین مقدار خزش تحت وزن سازه و بارهای سرویس می‌باشد که منجر به کمترین میزان تغییرات در هندسه سازه و موقعیت قرارگیری تأسیسات حساس می‌گردد.

شرح پروژه: خزش در بتن تحت وزن سازه و بارهای سرویس یکی از مواردی است که بخصوص در بخش‌هایی از سازه که تحت بارهای بزرگ‌تری قرار دارند بیشتر مشاهده می‌گردد. سازه‌هایی مانند فونداسیون مخازن، توربین‌های بادی، سازه و فونداسیون راکتور، و پوسته راکتور نیروگاه اتمی از جمله سازه‌هایی هستند که وجود خزش در آنها محتمل و در عملکرد سازه تأثیرگذار است. خزش به وجود آمده طی زمان ممکن است سبب تغییر مکان‌های دائمی ناخواسته در سازه گردد که چه در سازه و چه در عملکرد آن می‌تواند سبب اختلال گردد. افزودن مواد نانو ساختاری مانند گرافن می‌تواند خزش بتن را به شدت کاهش دهد. در این طرح تأثیر استفاده از مواد نانو ساختار مختلف در خزش بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و پس از آن با ساخت این نوع بتن با استفاده از مواد نانو ساختار، تمامی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن مورد تست و بررسی قرار می‌گیرد، همچنین مطالعات امکان سنجی تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ فنی و اقتصادی انجام می‌شود. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن با کمترین خزش با استفاده از مواد نانو ساختار ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. انجام آزمایش‌های مرتبط که تابع زمان می‌باشد.

مزایای طرح:

۱. کاهش خزش و تغییر ابعادی در سازه و فونداسیون سازه‌ها

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد تأثیر مواد نانو ساختار مختلف بر خزش بتن

۱۲-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن‌های پر مقاومت با استفاده از مواد نانو ساختار طبیعی برای کاهش ابعاد سازه‌ای برج‌های توربین بادی

هدف: تولید بتنی با مقاومت مکانیکی و دوام بالا که سبب کاهش ابعاد سازه‌ای برج توربین بادی گردد.

شرح پروژه: یکی از مشکلاتی که سازه‌های بتنی برج‌های توربین بادی با آن مواجه هستند ابعاد سازه‌ای بزرگ می‌باشد که به سبب آن‌ها حمل حجم بالای مصالح به نقاط صعب‌العبور مشکل‌ساز می‌گردد و از طرفی سبب وزن زیاد سازه می‌گردند که خود مشکلات بسیاری در پی خواهد داشت. استفاده از مواد نانو ساختار طبیعی نظیر خاکستر روغن نخل و خاکستر پوسته برنج سبب افزایش مقاومت مکانیکی بتن می‌گردد که در نتیجه آن

ابعاد سازه‌ای کاهش می‌یابد و سبب سبک شدن سازه می‌گردد و از سوی دیگر مواد نانو ساختار طبیعی به‌راحتی قابل دسترس و تجدیدپذیر می‌باشند. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن پر مقاومت با استفاده از مواد نانو ساختار طبیعی و تأثیر استفاده از مواد نانو ساختار طبیعی بر تمامی خصوصیات فیزیکی نظیر مقاومت، نفوذپذیری، دوام و همچنین خصوصیات شیمیایی بتن، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ فنی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین بتنی با مواد نانو ساختار مختلف تمامی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن مورد تست و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن با استفاده از مواد نانو ساختار طبیعی می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. میزان تولید مواد نانو ساختار طبیعی در حد نیاز سازه‌های صنعت برق
۲. تولید مواد نانو ساختار طبیعی و طرز اختلاط آنها

مزایای طرح:

۱. کاهش ابعاد سازه‌ای
۲. افزایش طول عمر سازه
۳. افزایش قابلیت اطمینان در سازه مورد نظر
۴. قابلیت تجدید پذیر بودن منابع نانو ساختار طبیعی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد روند تولید مواد نانو ساختار طبیعی

۱۳-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با استفاده از مواد نانو ساختار با بیشترین پتانسیل جذب تشعشعات به منظور استفاده در پوسته رآکتورها

هدف: استفاده از مواد نانو ساختار در بتن پوسته رآکتورهای هسته‌ای که سبب افزایش پتانسیل جذب تشعشعات هسته‌ای می‌گردند.

شرح پروژه: همواره تشعشع راکتورهای هسته‌ای مسئله‌ای نگران‌کننده از لحاظ سلامت برای انسان است. بهترین روش برای حفظ سلامتی در برابر تشعشعات هسته‌ای کاهش در معرض قرار گرفتن این تشعشعات می‌باشد، به همین منظور از پوسته‌ای بتنی برای جذب این تشعشعات در رآکتورها استفاده می‌گردد. نانو مواد سبب افزایش پتانسیل مقابله بتن در برابر تشعشعات پرتوهای نوترون و گاما می‌گردد. در این طرح نمونه‌هایی حاوی نانو مواد و عادی در معرض تشعشعات قرار می‌گیرند و میزان جذب تشعشعات در آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تأثیر مواد نانو ساختار مختلف در جذب تشعشعات هسته‌ای ارزیابی گردیده و سپس مواد نانو ساختاری که سبب جذب بیشتر تشعشعات هسته‌ای می‌شوند مشخص می‌گردند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن پوسته رآکتورها با بیشترین پتانسیل جذب تشعشعات ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. مخاطره‌آمیز بودن انجام آزمایش‌های جذب تشعشعات هسته‌ای برای افراد

مزایای طرح:

۱. کاهش ساطع شدن تشعشعات هسته‌ای در نیروگاه‌های هسته‌ای

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد تشعشعات هسته‌ای و مواد جاذب آن‌ها

۱۴-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن حاوی نانو الیاف پلی‌پروپیلن برای سرریز سدها

هدف: جلوگیری از ترک‌خوردگی در اثر جمع شدگی خمیری در سرریز رویه سدها

شرح پروژه: یکی از مشکلات اجرای بتن سرریز رویه سدها، خطر ترک‌خوردگی در اثر جمع شدگی خمیری می‌باشد. استفاده از الیاف نانو پلی‌پروپیلن یکی از راهکارهای کاهش پتانسیل خطر ترک‌خوردگی خمیری و کاهش عرض ترک‌های محتمل است. در این طرح عملکرد الیاف در کاهش ترک‌خوردگی خمیری رویه سرریز سدها مورد تست و بررسی قرار خواهد گرفت و وزن بهینه الیاف نانو پلی‌پروپیلن جهت حذف ترک‌ها تعیین می‌گردد. در نهایت دستورالعملی جهت استفاده از الیاف نانو پلی‌پروپیلن در بتن سرریز سدها ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. شبیه‌سازی شرایط سرریز سدها جهت بررسی و آزمایش طرح پیشنهادی
۲. افت روانی بتن با افزودن الیاف نانو پلی‌پروپیلن

مزایای طرح:

۱. جلوگیری از ایجاد ترک‌های خمیری در سطح سرریزها
۲. کاهش هزینه‌های ترمیم و تقویت
۳. افزایش طول عمر سازه

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. آشنایی با شرایط هیدرودینامیکی سرریز سدها

۱۵-۱-۱-۶- تدوین دستورالعمل اجرایی برای بتن‌های تقویت‌شده با مواد نانو ساختار به‌منظور استفاده حداکثری از خصوصیات نانو ذرات در سازه‌های بتنی بخش تولید

هدف: ارائه روشی اجرایی جهت اختلاط نانو ذرات مختلف در طرح اختلاط بتن به‌طوری‌که تأثیر استفاده از نانو ذرات حداکثری گردد.

شرح پروژه: یکی از مشکلات استفاده مواد نانو ساختار در بتن، عدم توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس بتن است. معمولاً این مواد در حین افزوده شدن به بتن به صورت کلوخه انباشته می‌شوند و در مخلوط به خوبی توزیع نمی‌شوند. در این طرح به بررسی روش‌های مختلف اضافه کردن مواد نانو ساختار به طرح اختلاط بتن در حجم بالا و شرایط اجرایی مختلف پرداخته خواهد شد. تمامی چالش‌هایی که برای اختلاط مواد نانو ساختار مختلف در بتن وجود خواهد داشت شناسایی‌شده و راه‌حل مناسب برای آن‌ها ارائه خواهد گشت. در نهایت رویکردهای مناسب جهت اختلاط مواد نانو ساختار مختلف به صورت دستورالعملی ارائه خواهد شد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. کاهش روانی بتن با افزودن مواد نانو ساختار به طرح اختلاط، کلوخه شدن مواد نانو ساختار.
۲. شناسایی درصد بهینه مواد نانو ساختار مختلف

مزایای طرح:

۱. بهینه شدن تأثیر مواد نانو ساختار در محصول نهایی و کاهش چالش‌های استفاده از مواد نانو ساختار در بتن.
۲. ارائه روشی اجرایی برای استفاده از مواد نانو ساختار در بتن

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناسایی تمامی مشکلاتی که افزودن مواد نانو ساختار در طرح اختلاط بتن ایجاد می‌کند.

۱۶-۱-۱-۶- بررسی فنی و آزمایشگاهی تزریق نانو ذرات سیلیکا به‌عنوان پوشش محافظ بتن در برابر عوامل مخرب در مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

هدف: پر کردن ترک‌های موئینه با استفاده از ذرات نانو سیلیکا به منظور جلوگیری نفوذ عوامل مخرب در مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

شرح پروژه: قابلیت اطمینان و عملکرد پیوسته سازه‌های بتنی نظیر مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده همواره مورد توجه بوده است، از آنجایی‌که مواجهه این‌گونه از سازه‌ها با عوامل مخرب بسیار بیشتر از سازه‌های دیگر می‌باشد و ایجاد ترک در آن‌ها سبب گسترش سریع آن به سبب نفوذ عوامل مخرب می‌گردد، لذا تزریق ذرات نانو سیلیکا در ترک‌های موئینه می‌تواند سبب ایجاد پوششی محافظ در برابر عوامل مخرب گردد. در این طرح به بررسی روش‌های تزریق ذرات نانو سیلیکا در ترک‌های موئینه سازه‌های ذکرشده پرداخته می‌شود، و بررسی بر روی زمان مناسب برای تزریق ذرات نانو سیلیکا از لحاظ گستردگی ترک‌های موئینه انجام می‌گیرد. در نهایت دستورالعملی برای فرآیند تزریق ذرات نانو سیلیکا در سازه‌های بتنی ذکرشده ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. شرایط مختلف برای تزریق در سازه‌های مختلف از لحاظ ابعاد ترک، عمق ترک و شرایط محیطی

مزایای طرح:

۱. ترمیم ترک‌های مویرگی و کاهش نفوذپذیری
۲. کاهش هزینه‌های مقاوم‌سازی و نوسازی
۳. افزایش طول عمر سازه
۴. افزایش قابلیت اطمینان در مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی روش‌های بهینه تزریق مواد نانو ساختار در بتن
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط بررسی تزریق مواد نانو ساختار در بتن

۱۷-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده با نانولوله‌های کربن برای مقاوم‌سازی برج‌های توربین بادی

هدف: اصلاح رزین اپوکسی به‌منظور افزایش باند اتصال بین سازه و المان مرکب استفاده شده به جهت مقاوم‌سازی برج توربین بادی

شرح پروژه: یکی از چالش‌هایی که همواره در مقاوم‌سازی سازه‌ها وجود دارد انتقال کامل نیرو از سازه به المان اضافه شده جهت مقاوم‌سازی می‌باشد. چنانچه رزین اپوکسی به‌درستی نتواند به دلیل عدم اتصال کامل این انتقال را انجام دهد سبب می‌شود تا شکست در باند اتصال رخ دهد و از حداکثر مقاومت مکانیکی المان اضافه شده برای مقاوم‌سازی استفاده نگردد، این موضوع در سازه‌هایی که تحت بار دینامیکی قرار دارند نظیر برج توربین‌های بادی محتمل‌تر می‌باشد. چنانچه شکست در باند اتصال رخ ندهد اتصال توانسته نقش انتقال نیرو را به‌درستی ایفا کند. در این طرح به جهت بهبود عملکرد رزین اپوکسی در انتقال نیرو از نانولوله‌های کربن استفاده می‌گردد، و با توجه به شرایط دینامیکی برج توربین بادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، و درصد بهینه ماده نانو ساختار برای اصلاح رزین اپوکسی مشخص خواهد شد. در نهایت دستورالعملی برای اصلاح رزین اپوکسی با نانولوله‌های کربن ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. کاهش روانی رزین اپوکسی با افزودن نانولوله‌های کربن
۲. کلوخه شدن نانولوله‌های کربن در ترکیب با رزین اپوکسی

مزایای طرح:

۱. افزایش قابلیت اطمینان سازه مقاوم‌سازی شده
۲. افزایش باند انتقال نیرو بین سازه پایه و المان مرکب افزوده شده

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت انواع رزین‌های اپوکسی مورد استفاده در مقاوم‌سازی و عملکرد مکانیکی آن‌ها.

۱۸-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده برای مقاوم‌سازی مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده در شرایط بد محیطی

هدف: مقاوم ساختن رزین نسبت به رطوبت و محیط‌های خورنده با افزودن مواد نانو ساختار

شرح پروژه: رزین‌های اپوکسی نسبت به رطوبت و مواد خورنده حساس هستند. در مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده که دائماً تحت اثر رطوبت و مواد خورنده قرار دارند، رزین‌های اپوکسی قابلیت خود را از دست می‌دهند، به همین جهت اصلاح و مقاوم ساختن آن‌ها نسبت به رطوبت و مواد خورنده بسیار ضروری است تا از ایجاد جداشدگی در سطوح اتصال اپوکسی جلوگیری گردد و قابلیت انتقال نیرو به خوبی جهت مقاوم‌سازی صورت پذیرد. در این طرح به جهت بهبود عملکرد رزین اپوکسی در مواجهه با رطوبت و مواد خورنده از نانوذره SiO_2 استفاده می‌گردد، و عملکرد آن با توجه به شرایط محیطی مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، و درصد بهینه ماده نانو ساختار برای اصلاح رزین اپوکسی مشخص

خواهد شد. در نهایت دستورالعملی برای اصلاح رزین اپوکسی‌های متنوع در شرایط محیطی مختلف ارائه می-گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. کاهش روانی رزین اپوکسی با افزودن ماده نانو ساختار و مشکلات اختلاط رزین و ماده نانو ساختار
۲. شرایط محیطی مختلف

مزایای طرح:

۱. افزایش قابلیت اطمینان سازه مقاوم‌سازی شده
۲. افزایش دوام و طول عمر رزین
۳. افزایش باند انتقال نیرو بین سازه پایه و المان مرکب افزوده شده

پیش‌زمینه‌های لازم:

۲. شناخت انواع رزین‌های اپوکسی و چالش‌های آن‌ها در مواجهه با شرایط محیطی بد.

۱۹-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش پلیمرهای تقویت‌شده الیافی شیشه (GFRPs) اصلاح‌شده با مواد نانو ساختار برای استفاده در مقاوم‌سازی سازه‌های بخش تولید

هدف: اصلاح خصوصیات مقاومتی GFRP تحت بارهای استاتیک و سیکلی با افزودن نانولوله‌های کربن

شرح پروژه: پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) به دلیل مقاومت آن‌ها به خوردگی، نسبت مقاومت به وزن بالا، و قیمت مناسب در مقایسه با CFRP برای استفاده به عنوان آرماتور در بتن و یا تقویت سازه‌های بتنی بسیار مورد توجه قرارگرفته‌اند. با این حال محدودیت آن‌ها به دلیل خستگی، استفاده از آن‌ها در سازه‌هایی که تحت بار سیکلی (نظیر برج توربین‌های بادی) قرار دارند را محدود کرده است. به همین دلیل حدود تنش مجاز آن‌ها در این‌گونه سازه‌ها بسیار کوچک‌تر از حالت معمول در نظر گرفته می‌شود و این امر استفاده از آن‌ها را غیراقتصادی کرده است. در این طرح برای اصلاح خصوصیات مرتبط با خستگی GFRP، نانولوله‌های کربنی چند جداره در تولید آن‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت و تمامی خصوصیات مکانیکی و دینامیکی آن‌ها به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی خواهد گرفت، در نهایت دستورالعملی برای تولید GFRP اصلاح‌شده ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تولید GFRP صنعتی مشابه آزمایشگاهی

مزایای طرح:

۱. استفاده از توان بیشتر GFRP پس از اصلاح تحت بارهای سیکلی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناسایی تمامی مشکلاتی که افزودن مواد نانو ساختار در تولید GFRP اصلاح‌شده ایجاد می‌کند.

۲۰-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش رزین‌های اپوکسی اصلاح‌شده برای تعمیر و تزریق ترک-های مخازن، دودکش‌ها و برج‌های خنک‌کننده

هدف: اصلاح رزین اپوکسی با استفاده از نانو سیلیس به جهت افزایش شکل‌پذیری، مقاومت و کارآیی در تزریق ترک‌های سازه‌های بتنی

شرح پروژه: از جمله چالش‌هایی که در تزریق رزین اپوکسی در ترک‌های سازه‌های بتنی نظیر مخازن، دودکش-ها و برج‌های خنک‌کننده وجود دارد کارایی کم رزین اپوکسی پیش از گیرش، اتصال ناکامل رزین اپوکسی به وجوه ترک، مقاومت رزین اپوکسی در ضخامت‌های بسیار پایین و شکل‌پذیری آن می‌باشد، اصلاح رزین اپوکسی توسط نانو سیلیس می‌تواند ضعف‌های ذکرشده را برطرف نماید.، در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه چالش‌های ترمیم و تزریق ترک‌ها با استفاده از رزین اپوکسی، به بررسی اصلاح رزین اپوکسی با استفاده از نانو سیلیس پرداخته می‌شود و تمامی آزمایش‌های مرتبط با ارزیابی رزین اصلاح‌شده به تفصیل صورت می‌پذیرد. در نهایت دستورالعملی جهت اصلاح رزین اپوکسی برای تزریق در ترک‌ها و نحوه تزریق و ارزیابی ترک‌های ترمیم شده ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. ارائه روشی مناسب برای تزریق رزین اپوکسی در ترک‌های سازه‌های بتنی
۲. نحوه ارزیابی پر شدن ترک‌ها پس از تزریق

مزایای طرح:

۱. ترمیم ترک‌های ایجاد شده در سازه، حفظ مقاومت سازه
۲. افزایش عمر سازه

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناسایی روش‌های موجود ترمیم و تزریق ترک‌ها در دنیا

۲۱-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش حسگر کامپوزیت بتنی/CNT مدفون در بتن برای پوسته و فونداسیون راکتورها، برج‌های توربین‌های بادی، دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده و بدنه سدها

هدف: ساخت حسگر مدفون در بتن جهت اندازه‌گیری کرنش‌ها و تنش‌های ایجاد شده در بتن

شرح پروژه: پایش کرنش‌ها و تنش‌های ایجاد شده در سازه‌های بتنی مهم بخش تولید نظیر راکتورها، دودکش-ها، برج‌های خنک‌کننده و بدنه سدها به جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ای و پایش سلامت آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. حسگرهای مدفون در بتن در حقیقت قطعات بتنی پیش‌ساخته‌ای می‌باشند که در آن‌ها از مواد نانو نظیر نانو لوله‌های کربن، نانو ذرات گرافن، و یا کربن سیاه استفاده می‌گردد، در این قطعات بتنی الکترودهایی قرار دارند که یک سر آن‌ها مدفون در کامپوزیت بتنی و سر دیگر آن‌ها آزاد می‌باشد، این حسگرها وقتی تحت کرنش مکانیکی قرار می‌گیرند مقاومت الکتریکی آن‌ها تغییر می‌کند، که این تغییرات توسط الکترودها قابل

اندازه‌گیری می‌باشد. با داشتن رابطه بین تغییرات مقاومت الکتریکی ثبت شده و کرنش مکانیکی اعمالی، تنش (و یا کرنش) اعمالی در محل قرار گیری سنسور قابل محاسبه می‌باشد. با قراردهی این قطعات در بتن می‌توان کرنش‌های استاتیکی و دینامیکی اتفاق افتاده در نقطه قرارگیری را پایش نمود و چنانچه تعداد این حسگرها به صورت شبکه‌ای مدفون در بتن افزایش داده شوند می‌توان میدان‌های تنش در سازه را مشاهده کرد و نقاط تضعیف شده در سازه را تشخیص داد. در این طرح پس از مطالعات جامع اولیه در مورد نحوه عملکرد و ساخت این‌گونه حسگرها، اقدام به ساخت و ارزیابی این گونه حسگرها خواهد شد و نحوه اندازه‌گیری داده‌ها و روابط حاکم بین تغییرات مقاومت الکتریکی و کرنش اعمالی به تفصیل بررسی می‌گردد. در نهایت دستورالعملی برای ساخت حسگر کامپوزیت بتنی/CNT مدفون در بتن و نحوه پایش با استفاده از آن‌ها ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. به دست آوردن رابطه بین تنش و مقاومت الکتریکی در کامپوزیت بتنی/CNT

مزایای طرح:

۱. هزینه پایین حسگرهای مدفون در بتن
۲. امکان پایش دائم سازه و افزایش قابلیت اطمینان سازه
۳. سهولت اندازه‌گیری تنش

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. جمع‌آوری اطلاعات کامل از نحوه ساخت حسگر کامپوزیت بتنی/CNT و مواد نانو ساختار مناسب برای ساخت این نوع حسگرها

۲۲-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش آرماتورهای کامپوزیت/CNT خود سنجشگر برای مخازن، دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده، برج توربین‌های بادی و پوسته راکتورها

هدف: تولید آرماتور کامپوزیت/CNT جهت اندازه‌گیری تنش و کرنش در راستای آرماتور در المان‌های بتنی

شرح پروژه: پایش تنش و کرنش در راستایی معین در عمق مشخصی از المان‌های سازه‌های بتنی یکی از موارد مهمی است که به پایش سلامت آن‌ها می‌تواند کمک بسیاری کند، این مورد در سازه‌های پوسته‌ای مانند دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کننده، مخازن و پوسته محافظ راکتورها و یا انواع دیگرسازه‌ها مانند برج توربین‌های بادی بسیار مهم می‌باشد. آرماتورهای کامپوزیت ترکیب شده با نانولوله‌های کربنی قابلیت اندازه‌گیری تنش در راستای آرماتور را فراهم می‌کنند و کرنش‌های مکانیکی در آن‌ها به صورت تغییرات مقاومت الکتریکی قابل ثبت است. در این طرح پس از مطالعات جامع در مورد خصوصیات رسانایی و مقاومتی آرماتورهای کامپوزیت/CNT و نحوه ساخت آن‌ها، به تولید این گونه از آرماتورها پرداخته می‌شود و سپس عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی و آزمایش قرار می‌گیرد. در نهایت دستورالعملی برای ساخت و نحوه استفاده از آن‌ها ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. به دست آوردن روابط تنش و مقاومت الکتریکی در آرماتورهای کامپوزیت

مزایای طرح:

۱. ثبت تنش و کرنش در عمق مشخص و راستای مشخص

۲. امکان پایش دائم سازه و افزایش قابلیت اطمینان سازه
۳. سهولت در ثبت داده‌ها
۴. دقت مناسب داده‌ها

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. جمع‌آوری اطلاعات کامل از نحوه ساخت آرماتورهای کامپوزیت/CNT و روابط حاکم بین تنش و مقاومت الکتریکی در انواع مختلف این‌گونه حسگرها.

۲۳-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش حسگر نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT برای پایش دینامیکی سازه‌های بتنی صنعت برق

هدف: ساخت حسگر نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT مدفون و غیر مدفون در بتن جهت شناسایی و پایش سلامت سازه به روش دینامیکی

شرح پروژه: شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه‌ها گام اول در پایش سلامت آن‌ها می‌باشد و برای این منظور به‌طور معمول از حسگر شتاب و انحراف سنج استفاده می‌گردد که هزینه بالایی برای تهیه آن‌ها باید صرف گردد. برای حل این چالش می‌توان از حسگرهای کامپوزیت سیمان به همراه نانولوله‌های کربنی استفاده نمود که قابلیت شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه را دارند. این نوع از حسگرها هم به صورت مدفون و هم به صورت غیر مدفون در بتن می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. در این حسگر سیمانی نانو لوله‌های چند جداره کربن سبب ایجاد خصوصیت رسانایی الکتریکی می‌گردد و به سبب آن مقاومت الکتریکی این حسگر متناسب با تغییرات کرنش مکانیکی تغییر می‌کند و این تغییرات با محدوده فرکانسی مناسبی که شامل فرکانس‌های ارتعاشی سازه‌ها می‌گردد قابل‌اندازه‌گیری می‌باشند. با اندازه‌گیری این تغییرات مقاومتی به صورت تاریخچه زمانی که قابل تبدیل به تنش می‌باشند می‌توان خصوصیات دینامیکی سازه را به دست آورد. در این طرح پس از مطالعات جامع در ارتباط با ساخت حسگرهای کامپوزیت سیمانی مناسب برای پایش دینامیکی سازه‌ها، تولید حسگر نانو کامپوزیت سیمانی/MWCNT بررسی و انجام می‌پذیرد و با انجام آزمایش‌های مختلف استاتیکی و دینامیکی، عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها دستورالعملی جهت نحوه ساخت این نوع حسگر و نحوه داده‌برداری از آن ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. به دست آوردن روابط تنش و مقاومت الکتریکی در کامپوزیت سیمانی/MWCNT
۲. کالیبره کردن حسگرهای کامپوزیت سیمانی/MWCNT

مزایای طرح:

۱. هزینه پایین حسگرهای کامپوزیت سیمانی/MWCNT
۲. امکان پایش دینامیکی سازه و شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه
۳. سهولت اندازه‌گیری

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. جمع‌آوری اطلاعات کامل از نحوه ساخت حسگرهای کامپوزیت سیمانی/MWCNT و روابط حاکم بین تنش و مقاومت الکتریکی در انواع مختلف این‌گونه حسگرها

۲۴-۱-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش حسگر نانو کامپوزیت فیلم نرم الاستومری /کربن سیاه برای پایش دینامیکی سازه‌های صنعت برق

هدف: ساخت حسگر نانو کامپوزیت فیلم نرم الاستومری/کربن سیاه جهت شناسایی و پایش سلامت سازه به روش دینامیکی

شرح پروژه: شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه‌ها گام اول در پایش سلامت آن‌ها می‌باشد و برای این منظور به طور معمول از حسگر شتاب و انحراف سنج استفاده می‌گردد که هزینه بالایی برای تهیه آن‌ها باید صرف گردد. برای حل این چالش می‌توان از حسگر نانو کامپوزیت فیلم نرم الاستومری/کربن سیاه استفاده نمود که قابلیت شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه را دارند.، این نوع از حسگرها را می‌توان توسط رزین اپوکسی بر روی سطح هر نوع سازه بتنی و فلزی چسباند. این حسگرهای خازنی در حقیقت فیلم نازکی از الاستومتر نرم به همراه نانو ذرات کربن سیاه می‌باشند که تغییرات کرنشی را به ظرفیت خازنی تبدیل می‌کنند. تغییرات ظرفیت خازنی با محدوده فرکانسی مناسبی که شامل فرکانس‌های ارتعاشی سازه‌ها می‌گردد قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد. با اندازه‌گیری و ثبت این تغییرات خازنی به صورت تاریخچه زمانی که قابل تبدیل به تنش می‌باشند می‌توان خصوصیات دینامیکی سازه را به دست آورد. در این طرح در ابتدا مطالعات جامعی در ارتباط با ساخت حسگرهای کامپوزیت فیلم نرم الاستومری/کربن سیاه مناسب برای پایش دینامیکی سازه‌ها صورت می‌پذیرد، و پس از تولید این نوع از حسگرها، توسط آزمایش‌های مختلف استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در انتها دستورالعملی جهت نحوه ساخت این نوع حسگر و نحوه داده‌برداری از آن ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. به دست آوردن رابطه تنش و ظرفیت خازنی در حسگر کامپوزیت فیلم نرم الاستومری/کربن سیاه
۲. دست یابی به فرآیند دقیق تولید حسگر نانو کامپوزیت فیلم نرم الاستومری /کربن سیاه

مزایای طرح:

۱. هزینه پایین حسگرها
۲. امکان پایش دائم سازه و افزایش قابلیت اطمینان سازه
۳. سهولت نصب و اندازه‌گیری
۴. امکان پایش سلامت دینامیکی سازه

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. جمع‌آوری اطلاعات کامل از نحوه ساخت حسگر کامپوزیت فیلم نرم الاستومری/کربن سیاه و روابط حاکم بین تنش و مقاومت الکتریکی در انواع مختلف این‌گونه حسگرها

۲۵-۱-۱-۶- انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بدنه سدهای خاکی به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن

هدف: انتخاب بهترین نانو ذرات جهت بهبود خواص کیفی و مقاومتی خاک بدنه سدهای خاکی و درصد بهینه استفاده از این مواد

شرح پروژه: خاک‌های ریزدانه یکی از ارکان اصلی منابع قرضه ساخت بدنه سدهای خاکی می‌باشند؛ این نوع خاک‌ها معمولاً دارای مقاومت و ظرفیت باربری کم و مشکلات تورمی هستند. یکی از راه‌های مقابله با مشکلات این نوع خاک‌ها تثبیت خاک ریزدانه است. تثبیت خاک به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که موجب بهبود مشخصات مهندسی خاک از جمله افزایش مقاومت، کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی و اثرات سودمند دیگر شود. مواد نانو ساختار، به دلیل ویژگی‌هایی از جمله اندازه بسیار کوچک، سطح ویژه بالا و بارهای سطحی به صورت فعال با دیگر ذرات خاک واکنش می‌دهند. در نتیجه حتی در صورت استفاده بسیار کم از این ذرات در محیط‌های خاکی، خصوصیات مهندسی خاک را به صورت ویژه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهند. بهسازی خواص کیفی و مقاومتی خاک به کمک مواد نانو ساختار از جهات مختلف در مقاوم‌سازی سدهای خاکی مؤثر خواهد بود. به همین دلیل در این پروژه از چند نوع ماده نانو ساختار و درصدهای مختلف استفاده می‌شود تا میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر مشخصات خاک بدنه سدها، مورد ارزیابی قرار گیرد تا تأثیرگذارترین ماده نانو ساختار با درصد بهینه آن ماده به دست آید و در پروژه‌های آینده صنعت برق مورد استفاده قرار گیرند.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. یکسان بودن شرایط آزمایش برای تمام نمونه‌ها در این تحقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. به عبارت دیگر باید تنها متغیر این آزمایش نوع ماده نانو ساختار و درصدهای مورد استفاده از آن باشد.
۲. تنوع خاک بدنه سدها و نیاز به بررسی جامع مواد نانو ساختار مختلف برای خاک‌های متفاوت

مزایای طرح:

۱. خروجی این پژوهش انتخاب بهترین ماده نانو ساختار و درصد بهینه آن برای بهسازی خواص منابع قرضه ساخت سدهای خاکی می‌باشد

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. دسترسی به منبع خاک تقریباً همگن برای انجام آزمایشات
۲. شناخت انواع مواد نانو ساختار مورد استفاده برای بهسازی خاک

۲۶-۱-۱-۶- انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ریزدانه با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بستر سازه‌های صنعت برق به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن

هدف: انتخاب بهترین نانو ذرات جهت بهبود خواص کیفی و مقاومتی خاک بستر سازه و درصد بهینه استفاده از این مواد

شرح پروژه: بسیاری از سازه‌های صنعت برق بر روی خاک‌های ریزدانه بنا می‌شوند. به همین دلیل توجه به بهسازی خاک‌های ریزدانه و برطرف نمودن مشکلاتی از جمله مقاومت پایین و ظرفیت باربری کم این نوع خاک‌ها ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از آهک و سیمان در تثبیت خاک بسیار متداول است. اما مواد نانو ساختار، به

دلیل ویژگی‌هایی از جمله اندازه بسیار کوچک، سطح ویژه بالا و بارهای سطحی به صورت فعال با دیگر ذرات خاک واکنش می‌دهند؛ در نتیجه حتی در صورت استفاده بسیار کم از این ذرات در محیط‌های خاکی، خصوصیات مهندسی خاک را به صورت ویژه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهند. به همین دلیل در این پروژه از چند نوع ماده نانو ساختار و درصدهای مختلف استفاده می‌شود تا میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر مشخصات خاک مورد ارزیابی قرار گیرد تا تأثیرگذارترین ماده نانو ساختار با درصد بهینه آن ماده به دست آید و در پروژه‌های آینده صنعت برق مورد استفاده قرار گیرند.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. یکسان بودن شرایط آزمایش برای تمام نمونه‌ها در این تحقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. به عبارت دیگر باید تنها متغیر این آزمایش نوع ماده نانو ساختار و درصدهای مورد استفاده از آن برای یک نوع خاک بستر باشد

۲. در نظر گرفتن شرایط محیطی متفاوتی در ارزیابی مواد نانو ساختار متفاوت

۳. تنوع خاک بستر سازه‌های صنعت برق که نیاز به تثبیت دارند

مزایای طرح:

۱. خروجی این پژوهش انتخاب بهترین ماده نانو ساختار و درصد بهینه آن برای بهسازی خواص خاک بستر سازه‌های مختلف صنعت برق با شرایط محیطی متفاوت می‌باشد.

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. دسترسی به منبع خاک تقریباً همگن برای انجام آزمایشات

۲. شناخت انواع مواد نانو ساختار مورد استفاده برای بهسازی خاک

۲۷-۱-۱-۶- بررسی و مقایسه اثرات اضافه شدن نانو رس مونت موریلونیت و نانو سیلیس به خاک ریزدانه رسی و میزان تغییرات حدود خمیری و روانی و شاخص خمیری خاک بهسازی شده و سنجش کارایی اضافه شدن ترکیبی این دو ماده به خاک ریزدانه رسی بخصوص در بستر توربین‌های بادی و سازه‌های نگهدارنده ماشین‌های دوار مکانیکی بخش تولید برق

هدف: رسیدن به بهینه‌ترین طرح اختلاط نانو رس و نانو سیلیس در خاک ریزدانه رسی به منظور بهبود خواص کیفی این نوع خاک در پروژه‌های مرتبط با صنعت برق

شرح پروژه: مطابق بخش ۲-۷-۱-۲ این پژوهش، تحقیقات دانشمندان نشان می‌دهد که با افزودن نانو رس به خاک، حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها به‌تدریج زیاد می‌شود که نتیجه آن افزایش شاخص خمیری نمونه‌های بهسازی شده با نانو رس است. از طرفی آزمایش‌های حدود اتربرگ برای حالت‌های استفاده و عدم استفاده از نانو سیلیس نشان داد که نانو سیلیس حد خمیری را اندکی و حد روانی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد

و این باعث تغییر قابل توجه دامنه خمیری خاک ریزدانه رسی می‌شود. خصوصیات حد روانی و حد خمیری در مورد فونداسیون سازه‌هایی که تحت بارهای دائم دینامیکی قرار دارند مانند توربین‌های بادی بسیار حائز اهمیت است.

در این پیشنهاد پژوهشی اثرات توأمان استفاده از نانو رس مونت موریلونیت و نانو سیلیس و تأثیر استفاده هم‌زمان از این دو ماده در بهبود خواص کیفی خاک ریزدانه رسی و رصد تغییراتی که در حدود خمیری و روانی و شاخص خمیری این نوع خاک ایجاد می‌کنند مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای استفاده از این مواد نانو ساختار به منظور بهبود حدود خمیری، روانی و شاخص خمیری خاک‌های ریزانه بستر سازه‌های صنعت برق تحت بار دینامیکی ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. برای بررسی استفاده هم‌زمان از نانو رس مونت موریلونیت و نانو سیلیس در این پروژه، احتمالاً باید تعداد نمونه‌های مورد تست و بررسی بالا باشد تا روند افزایش درصد هر ماده در خواص کیفی خاک قابل‌سنجش باشد.
۲. ایجاد شرایط آزمایشگاهی مشابه شرایط واقعی بستر سازه‌های صنعت برق تحت بار دینامیکی، از لحاظ شدت، دامنه و زمان تناوب بارهای وارده

مزایای طرح:

۱. دستیابی به طرح اختلاط بهینه از مواد نانو ساختار برای بهبود خواص کیفی خاک رسی
۲. افزایش قابلیت اطمینان در مورد خاک بستر سازه‌های صنعت برق که تحت بار دینامیکی قرار دارند.

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تهیه نانو رس مونت موریلونیت به مقدار موردنیاز در نمونه‌ها
۲. تهیه نانو سیلیس به مقدار موردنیاز در نمونه‌ها

۲۸-۱-۱-۶- بررسی و مقایسه تأثیر افزودن نانو رس و نانو سیلیس به خاک رس واگرا به منظور کاهش پتانسیل واگرایی در بستر سازه‌های صنعت برق و سدهای بتنی و بدنه سدهای خاکی

هدف: هدف این پروژه مقایسه تأثیر نانو رس و نانو سیلیس بر کاهش پتانسیل واگرایی خاک است.

شرح پروژه: پدیده واگرایی موجب ایجاد پدیده پایپینگ یا به عبارتی فرسایش داخلی در خاک شده که در نهایت منجر به تخریب سازه‌های فوقانی می‌شود. خاک‌های واگرا گستره وسیعی دارند و در بسیاری از پروژه‌های صنعت برق ممکن است با این نوع خاک مواجه شویم. از طرفی جایگزینی خاک‌های واگرا با مصالح غیر واگرا، غیراقتصادی بوده و بهتر است برای اجرای یک پروژه روی این نوع خاک ابتدا خاک موردنظر بهسازی شود. کاهش پتانسیل واگرایی یکی از موضوعات اساسی در ساخت پی سازه‌های عظیم صنعت برق مانند مخازن، برج‌های خنک‌کننده، دودکش‌ها و نیز ساخت سدهای وابسته به این صنعت می‌باشد.

در بخش ۲-۷-۵-۱ این پروژه، به محققانی اشاره گردید که بر روی تأثیرات نانو رس و نانو سیلیس در کاهش پتانسیل واگرایی خاک رس تحقیقاتی را انجام داده‌اند. در پروژه پیشنهادی در این بخش موضوع مقایسه این دو

ماده نانو ساختار در عملکرد موردنظر مدنظر بوده تا برای پروژه‌های وابسته به صنعت برق که بر روی این نوع خاک بنا می‌گردند، انتخابی صحیح و بهینه برای نوع ماده نانو ساختار صورت پذیرد. به همین منظور با در نظر گرفتن شرایط محیطی و مکانیکی بستر سازه‌های عظیم صنعت برق، خاک‌های واگرای بهسازی شده با مواد نانو ساختار مورد تست و ارزیابی قرار خواهند گرفت. در نهایت دستورالعملی برای بهسازی خاک‌های واگرای بستر سازه‌های صنعت برق و سدهای بتنی و بدنه سدهای خاکی ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. نوع خاک رس واگرایی که برای این پروژه به منظور آزمایش انتخاب می‌گردد، باید برای نمونه‌های مورد استفاده برای نانو رس و نانو سیلیس یکسان باشد که سایر مؤلفه‌های تأثیرگذار، بر روی نتایج آزمایش اثرگذار نباشند.

مزایای طرح:

۱. از آنجا که در برخی از پروژه‌های وابسته به صنعت برق ممکن است با خاک‌های واگرا مواجه باشیم، نتیجه این پروژه تصمیم‌گیری صحیح در هنگام مواجهه با این نوع خاک را سبب خواهد شد.

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تهیه خاک رس واگرا برای انجام آزمایشات

۲۹-۱-۱-۶- تثبیت خاک‌های رسی واگرا در سدهای خاکی و بستر سدهای بتنی با افزودن نانو رس و نانو سیلیس

هدف: هدف این پروژه تثبیت خاک بستر سدهای بتنی با افزودن نانو رس و نانو سیلیس می‌باشد.

شرح پروژه: خاک واگرا به خاکی اطلاق می‌شود که حالت فیزیکی-شیمیایی دانه‌های آن به گونه‌ای است که در تماس با آب، ذرات منفرد رس پراکنده و از یک دیگر جدا می‌شوند. در این حالت خاک رس به شدت فرسایش‌پذیر است، به‌طوری که حتی تحت تأثیر تنش‌های بسیار کوچک و با گرادیان هیدرولیکی کم روان می‌شود. وقتی خاک واگرا در تقابل با آب قرار می‌گیرد، ذرات رس متفرق شده و به صورت سوسپانسیون ته نشین می‌شوند. رس‌های واگرا در مقایسه با رس‌های معمولی دارای درصد سدیم محلول در آب بالاتری هستند. شیب‌ها، سدهای خاکی و بستر سدهای بتنی بسیاری در اثر بروز پدیدهٔ واگرایی تخریب شدند. ایجاد واگرایی مستلزم وجود یک مجرای نشت (مثلاً یک ترک) در خاک ریز یا تودهٔ خاک است. سپس فرسایش دیواره‌های سرتاسر مجرا به طور هم زمان اتفاق می‌افتد. رفتار خاک های واگرا متأثر از هر دو جنبه کانی شناسی و شیمیایی است که به علت حضور کانی‌های فعال رس همانند مونت موریونیت و حضور کاتیون‌های سدیم است. تفاوت شرایط پدیده واگرایی درسدها با سایر سازه‌ها صنعت وجود فشار بالای آب و احتمال وقوع بالاتری از ایجاد جریان ذکر شده می‌باشد.

در بخش ۲-۷-۵-۱ این پروژه، به محققانی اشاره گردید که بر روی تأثیرات نانو رس و نانو سیلیس در کاهش پتانسیل واگرایی خاک رس تحقیقاتی را انجام داده‌اند. در این طرح به بررسی تثبیت خاک‌های رسی بستر و بدنه سدهای خاکی و بستر سدهای بتنی با استفاده از این دو ماده نانو ساختار در مقابل پدیده واگرایی پرداخته

می‌شود، و عملکرد هر یک از این دو ماده نانو ساختار و یا ترکیبی از آن‌ها برای شرایط واگرایی خاک‌های رسی تحت فشارهای بالای هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. ایجاد شرایط مشابه‌ای با بستر سدها از لحاظ فشار هیدرولیکی

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه مقابله و تثبیت خاک‌های واگرا در بستر سدها خاکی و بتنی
۲. افزایش قابلیت اطمینان سدها در مقابل پدیده واگرایی خاک

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تهیه خاک رس واگرا برای انجام آزمایشات

۲-۱-۶ - بخش انتقال:

۱-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در دکل تلسکوپی انتقال برق

هدف: استفاده از بتن فراتوانمند خودترمیم با خصوصیات مقاومت بالا، نفوذپذیری کم به منظور سبک سازی و افزایش عمر دکل‌های تلسکوپی انتقال.

شرح پروژه: اجرای دکل‌های تلسکوپی در نقاطی که دسترسی مناسبی ندارند و از خاک مناسبی برخوردار نیستند سبب شده تا سبک‌سازی دکل حائز اهمیت واقع گردد. از سوی دیگر شرایط محیطی بد، نفوذ عوامل مخرب در بتن سبب تخریب زود هنگام دکل‌ها می‌گردد. تعویض، یا تعمیر و یا تقویت آن‌ها کاری بسیار هزینه‌بر و چالش برانگیز می‌باشد. به همین جهت استفاده از بتن فراتوانمند خودترمیم با خصوصیت مقاومت بالا که سبک سازی را در پی خواهد داشت، نفوذپذیری بسیار کم که سبب افزایش دوام دکل می‌گردد و در نهایت خصوصیت خودترمیمی که از گسترش ترک‌های موئینه و تبدیل آن به ترک‌های سازه‌ای جلوگیری می‌کند، دارای اهمیت است. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین بتنی با مصالح مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع خصوصیات مکانیکی و شیمیایی مصالح محلی متناسب با جغرافیای ایران
۲. تنوع شرایط بد محیلی متناسب با جغرافیای ایران

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای و سبک شدن آن
۳. کاهش هزینه‌های حمل مصالح و المان‌ها به دلیل سبک شدن

۴. افزایش طول عمر سازه
۵. ترمیم ترک‌های مویرگی و کاهش نفوذپذیری
۶. افزایش قابلیت اطمینان در دکل‌های تلسکوپی انتقال برق

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به فراتوانمند خودترمیم شونده

۲-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در سازه‌های بتنی بخش انتقال که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند

هدف: تولید بتنی با مقاومت مکانیکی و دوام بالا، مقاوم در برابر نفوذپذیری عوامل مخرب بتن و دارای خصوصیت خود متراکمی برای سازه‌های بتنی بخش انتقال که از تراکم بالای آرماتور برخوردارند

شرح پروژه: تمرکز آرماتور در دکل‌های تلسکوپی انتقال برق همواره سبب شده تا پوشش دهی کامل تمامی فضاها با بتن‌های معمولی کاری غیرممکن گردد و از کیفیت نهایی سازه به شدت کاسته گردد. بتن فراتوانمند خودمتراکم به راحتی در بین شبکه متراکم آرماتورهای موجود جریان پیدا می‌کند و تمام فضاها را پوشش می‌دهد و با خصوصیت پر مقاومت بودن سبب کاهش ابعاد سازه‌ای می‌گردد و با کاهش نفوذپذیری بتن سبب افزایش عمر سازه می‌گردد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه‌یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ فنی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین بتنی با مصالح مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند خودمتراکم برای استفاده در دکل‌های انتقال برق و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. هزینه بیشتر تولید این نوع بتن، که نیازمند به ارزیابی اقتصادی تولید و استفاده از این نوع بتن، در بتن ریزی‌های حجیم می‌باشد.
۲. فنآوری تولید و اجرای این نوع بتن برای استفاده در سازه‌های صنعت برق

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای و سبک شدن سازه
۳. افزایش طول عمر سازه
۴. افزایش قابلیت اطمینان در سازه موردنظر
۵. امکان بتن‌ریزی شبکه‌های متراکم آرماتور

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند خودمتراکم با استفاده از مواد نانو ساختار

۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن فراتوانمند

۳-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون پست‌های انتقال، فونداسیون خطوط هوایی انتقال و منهول‌های خطوط زیرزمینی

هدف: کاهش آسیب‌پذیری فونداسیون و منهول‌های سازه‌های بخش انتقال نسبت به عوامل خورنده محیطی

شرح پروژه: فونداسیون‌های سازه‌های بخش انتقال (مانند: فونداسیون پست‌های انتقال و فونداسیون دکل‌های انتقال) و همچنین منهول‌ها که در شرایط اقلیمی و عوامل خوردگی مختلف موجود در خاک و شرایط سخت محیط قرار دارند همواره تحت اثر خوردگی می‌باشند، با زوال فونداسیون، سازه در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد که رفع این موضوع هزینه‌های بالایی را برای بخش انتقال صنعت برق در سطح کشور در پی خواهد داشت. همین امر سبب شده تا استفاده از بتن‌های با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر مورد توجه واقع گردد، استفاده مواد نانو ساختار سبب بهبود این خصوصیات بتن می‌گردد، در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تأثیر مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات ذکرشده بتن، مقایسه‌ای دقیق بین تأثیر مواد نانو ساختار مختلف بر تراکم بافت بتن، نفوذپذیری، دوام و مقاومت مکانیکی بتن به صورت آزمایشگاهی صورت می‌پذیرد، سپس امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و در نهایت دستورالعملی برای تولید بتنی با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. گستره شرایط اقلمی و مواد خورنده مختلف در هر اقلیم
۲. نحوه پراکنش ماده نانو ساختار در طرح اختلاط بتن

مزایای طرح:

۱. افزایش عمر مفید بتن و مقاومت در برابر خوردگی
۲. کاهش هزینه‌های ترمیم و تعمیر
۳. افزایش مقاومت مکانیکی بتن

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت کامل اثرات مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات نفوذپذیری و دوام بتن

۴-۲-۱-۶- استفاده از مواد نانو ساختار در بتن فونداسیون برج‌های انتقال نیرو جهت جلوگیری از خوردگی و پوک شدگی در مناطق گرم و مرطوب

هدف: کاهش آسیب‌پذیری فونداسیون برج‌های انتقال نسبت به محیطی و پوک شدگی در مناطق گرم و مرطوب

شرح پروژه: فونداسیون‌های برج‌های انتقال که در شرایط اقلیمی گرم و مرطوب و تحت اثر عوامل خوردگی مختلف موجود در خاک قرار دارند سرعت زوال بتن در آن‌ها بسیار بالا می‌باشد، که به جهت آن سازه را می‌تواند

در شرایط بحرانی قرار دهد، برای رفع این معضل هزینه‌های بالایی در بخش انتقال صنعت برق در سطح کشور صرف می‌گردد. همین امر سبب شده تا استفاده از بتن‌های با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر مورد توجه واقع گردد، استفاده مواد نانو ساختار سبب بهبود این خصوصیات بتن می‌گردد، در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تأثیر مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات ذکر شده بتن، مقایسه‌ای دقیق بین تأثیر مواد نانو ساختار مختلف بر تراکم بافت بتن، نفوذپذیری، دوام و مقاومت مکانیکی بتن به صورت آزمایشگاهی صورت می‌پذیرد، سپس امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی فنی و اقتصادی بررسی شده و در نهایت دستورالعملی برای تولید بتنی با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر برای شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. گستره شرایط اقلمی و مواد خورنده مختلف در هر اقلیم
۲. توجیه اقتصادی استفاده از این نوع بتن
۳. فرآیند متفاوت تولید این نوع بتن

مزایای طرح:

۱. افزایش عمر مفید بتن و مقاومت در برابر خوردگی
۲. کاهش هزینه‌های ترمیم و تقویت و همچنین مقاوم‌سازی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت کامل اثرات مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات نفوذپذیری و دوام بتن
۲. شناسایی عوامل خورنده محیطی در نواحی گرم و مرطوب

۵-۲-۱-۶- امکان‌سنجی استفاده از مواد نانو ساختار در بتن جهت کاهش نرخ خوردگی فولاد در بتن

هدف: افزایش عمر سرویس‌دهی سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده، کاهش هزینه‌های اضافی جهت بازسازی، هزینه پایین استفاده از مواد نانو ساختار در بتن در مقایسه با دیگر انواع روش‌های حفاظتی

شرح پروژه: با توجه به استفاده فراوان از سازه‌های بتنی مسلح (با آرماتور فولادی) در ساخت زیرساخت‌های مورد استفاده در کشور از جمله فونداسیون دکل‌های انتقال برق و سازه‌های مشابه، خوردگی باعث تخریب و کاهش عمر سرویس‌دهی این سازه‌ها و در نتیجه ایجاد هزینه‌های اضافی جهت بازسازی می‌شود. فولاد در بتن تازه ریخته شده به‌واسطه‌ی شرایط قلیایی موجود در بتن ($pH>12$) معمولاً توسط یک‌لایه اکسید محافظ از خوردگی محافظت می‌گردد. نقش حفاظتی این فیلم اکسیدی تحت تأثیر فاکتورهای محیطی مثل نفوذ یون‌های کلر، کربناته شدن در نتیجه دی‌اکسید کربن موجود در هوا، باران‌های اسیدی و آلودگی‌های صنعتی مانند سولفات می‌باشد. در این شرایط فیلم محافظ شکسته شده و با ایجاد پیل‌های خوردگی، فولاد دچار خوردگی می‌شود. نرخ خوردگی توسط پارامترهایی مثل مقاومت الکتریکی بتن، میزان رطوبت بتن و سرعت نفوذ اکسیژن به سمت فولاد کنترل می‌گردد. در نتیجه‌ی خورده شدن فولاد، حجم محصولات خوردگی ایجاد شده بیش از چهار برابر حجم فولاد اولیه بوده؛ به‌طوری‌که می‌تواند تنش زیادی را به بتن اطراف وارد نموده و باعث ترک

خوردن و یا کندگی بتن از سطح گردد. می‌توان با اضافه نمودن ممانعت کننده‌های مناسب به بتن مورد استفاده در چنین سازه‌هایی عمر سرویس دهه این زیرساخت‌ها را به طور قابل توجهی افزایش داده و هزینه‌های بازسازی را حذف نمود. لذا بررسی جهت تعیین بازدارنده مناسب و شرایط بهینه استفاده از این بازدارنده با توجه به شرایط سرویس‌دهی سازه‌های بتنی مورد استفاده در صنعت برق می‌تواند در افزایش عمر و کاهش هزینه‌های ناشی از بازسازی تأثیر بسزایی داشته باشد. از جمله مزایای دیگر استفاده از بازدارنده خوردگی بتن هزینه پایین این روش در مقایسه با سایر روش‌های حفاظتی می‌باشد. در این طرح پس از مطالعات جامع در مورد عوامل خورنده محیطی موجود در هر منطقه و تأثیر آن بر خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن، به بررسی استفاده از مواد نانو ساختار مناسب جهت مقابله با این پدیده پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از استفاده مواد نانو ساختار مختلف در برابر عوامل مختلف خوردگی آرماتورها با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در نهایت دستورالعملی برای جلوگیری خوردگی آرماتورها در بتن با استفاده از مواد نانو ساختار تحت شرایط محیطی مختلف ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. گستره شرایط اقلمی و مواد خورنده مختلف در هر اقلیم

مزایای طرح:

۱. افزایش عمر مفید سازه و مقاومت در برابر خوردگی
۲. کاهش هزینه‌های ترمیم و تقویت و همچنین مقاوم‌سازی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت کامل اثرات مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات نفوذپذیری و دوام بتن و همچنین خوردگی آرماتورها

۶-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح شده با نانو لوله‌های کربن برای مقاوم‌سازی دکل‌های تلسکوپی

هدف: اصلاح رزین اپوکسی به منظور افزایش باند اتصال بین سازه و المان مرکب استفاده شده به جهت مقاوم-سازی دکل‌های تلسکوپی

شرح پروژه: یکی از چالش‌هایی که همواره در مقاوم‌سازی سازه‌ها وجود دارد انتقال کامل نیرو از سازه به المان اضافه شده جهت مقاوم‌سازی می‌باشد، چنانچه رزین اپوکسی به درستی نتواند به دلیل عدم اتصال کامل این انتقال را انجام دهد سبب می‌شود تا شکست در باند اتصال رخ دهد و از حداکثر مقاومت مکانیکی المان اضافه شده برای مقاوم‌سازی استفاده نگردد، این موضوع در سازه‌هایی که تحت بار دینامیکی قرار دارند نظیر دکل‌های تلسکوپی محتمل‌تر می‌باشد. چنانچه شکست در باند اتصال رخ ندهد اتصال توانسته نقش انتقال نیرو را به‌درستی ایفا کند. در این طرح به جهت بهبود عملکرد رزین اپوکسی در مقاوم سازی دکل‌های انتقال نیرو از نانو لوله‌های کربن استفاده می‌گردد و با توجه به شرایط این نوع سازه‌ها، عملکرد این نوع رزین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و درصد بهینه ماده نانو ساختار برای اصلاح رزین اپوکسی مشخص می‌گردد. در نهایت دستورالعملی برای اصلاح رزین اپوکسی با نانو لوله‌های کربن ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. کاهش روانی رزین اپوکسی با افزودن نانو لوله‌های کربن
۲. کلوخه شدن نانو لوله‌های کربن در ترکیب با رزین اپوکسی

مزایای طرح:

۱. افزایش قابلیت اطمینان سازه مقاوم‌سازی شده
۲. افزایش باند انتقال نیرو بین سازه پایه و المان مرکب افزوده شده

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت انواع رزین‌های اپوکسی مورد استفاده در مقاوم‌سازی و عملکرد مکانیکی آن‌ها

۷-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش رزین اصلاح‌شده برای مقاوم‌سازی فونداسیون سازه‌های بخش انتقال در شرایط بد محیطی

هدف: مقاوم ساختن رزین نسبت به رطوبت و محیط‌های خورنده با افزودن مواد نانو ساختار

شرح پروژه: رزین‌های اپوکسی نسبت به رطوبت و مواد خورنده حساس هستند. در فونداسیون سازه‌های بخش انتقالی که در مناطق خورنده ساخته می‌شوند که دائماً تحت اثر رطوبت و مواد خورنده قرار دارند قابلیت خود را از دست می‌دهند. به همین جهت اصلاح و مقاوم ساختن آن‌ها نسبت به رطوبت و مواد خورنده بسیار ضروری است تا از ایجاد جداشدگی در سطوح اتصال اپوکسی جلوگیری گردد و قابلیت انتقال نیرو به خوبی جهت مقاوم‌سازی صورت پذیرد. در این طرح به جهت بهبود عملکرد رزین اپوکسی در مواجهه با رطوبت و مواد خورنده از نانوذر SiO_2 استفاده می‌گردد و با توجه به شرایط محیطی فونداسیون سازه‌های بخش انتقال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، و درصد بهینه ماده نانو ساختار برای اصلاح رزین اپوکسی مشخص خواهد شد. در نهایت دستورالعملی برای اصلاح رزین اپوکسی‌های مختلف در شرایط محیطی مختلف ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. کاهش روانی رزین اپوکسی با افزودن ماده نانو ساختار و مشکلات اختلاط رزین و ماده نانو ساختار
۲. شرایط محیطی مختلف از نظر خوردگی و وجود مواد شیمیایی

مزایای طرح:

۱. افزایش قابلیت اطمینان سازه مقاوم‌سازی شده
۲. افزایش باند انتقال نیرو بین سازه پایه و المان مرکب افزوده شده

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت انواع رزین‌های اپوکسی و چالش‌های آن‌ها در مواجهه با شرایط محیطی بد

۸-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش پلیمرهای تقویت شده الیافی شیشه (GFRPs) اصلاح شده با مواد نانو ساختار برای استفاده در مقاوم‌سازی دکل‌های تلسکوپی

هدف: اصلاح خصوصیات مقاومتی GFRPها تحت بارهای استاتیک و سیکلی با افزودن نانو لوله‌های کربن

شرح پروژه: پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) به دلیل مقاومت آن‌ها به خوردگی، نسبت مقاومت به وزن بالا، و قیمت مناسب در مقایسه با CFRP ها برای استفاده به عنوان آرماتور در بتن و یا تقویت سازه‌های بتنی بسیار مورد توجه قرارگرفته‌اند. با این حال محدودیت آن‌ها به دلیل خستگی، استفاده از آن‌ها را در سازه‌هایی که تحت بار سیکلی قرار دارند، (سازه‌هایی مانند دکل‌های تلسکوپی تحت اثر بار باد)، محدود کرده است. به همین دلیل حدود تنش مجاز آن‌ها در این‌گونه سازه‌ها بسیار کوچک‌تر از حالت معمول در نظر گرفته می‌شود و این امر استفاده از آن‌ها را غیر اقتصادی کرده است. در این طرح برای اصلاح خصوصیات مرتبط با خستگی GFRP ها نانو لوله‌های کربنی چند جداره در تولید آن‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت و تمامی خصوصیات مکانیکی و دینامیکی آن به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی خواهد گرفت، در نهایت دستورالعملی برای تولید GFRP اصلاح شده ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تولید GFRP صنعتی مشابه آزمایشگاهی

مزایای طرح:

۱. استفاده از توان بیشتر GFRP ها پس از اصلاح تحت بارهای سیکلی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناسایی تمامی مشکلاتی که افزودن مواد نانو ساختار در تولید GFRP اصلاح‌شده ایجاد می‌کند.

۹-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش حسگر کامپوزیت بتنی/CNT مدفون در بتن برای فونداسیون دکل‌های انتقال و در سازه دکل‌های تلسکوپی

هدف: ساخت حسگر مدفون در بتن جهت اندازه‌گیری کرنش‌ها و تنش‌های ایجاد شده در بتن

شرح پروژه: پایش کرنش‌ها و تنش‌های ایجاد شده در سازه‌های بتنی مهم بخش انتقال نظیر فونداسیون دکل‌های انتقال و سازه دکل‌های تلسکوپی به جهت ارزیابی عملکرد سازه‌ای و پایش سلامت آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. حسگرهای مدفون در بتن در حقیقت از قطعات بتنی پیش ساخته‌ای تشکیل می‌شوند که در آن‌ها از مواد نانو نظیر نانو لوله‌های کربنی، گرافن، و یا کربن سیاه استفاده شده، و شامل الکترودهایی می‌باشند که یک سر آن‌ها مدفون در قطعه و سر دیگر آن‌ها آزاد می‌باشد. این حسگرها وقتی تحت کرنش مکانیکی قرار می‌گیرند مقاومت الکتریکی آن‌ها تغییر می‌کند که این تغییرات مقاومت الکتریکی از طریق الکترودها قابل‌اندازه‌گیری است و با توجه به روابط موجود بین تغییرات مقاومت الکتریکی و کرنش اعمالی، تنش ایجاد شده در المان قابل محاسبه می‌باشد. با قرار دادن این قطعات در بتن می‌توان کرنش‌های استاتیکی و دینامیکی اتفاق افتاده در نقطه قرارگیری را پایش نمود و چنانچه تعداد این حسگرها به صورت شبکه‌ای مدفون در بتن افزایش داده شود می‌توان میدان‌های تنش در سازه را مشاهده کرد و نقاط تضعیف شده در سازه را تشخیص داد. در این طرح پس از مطالعات جامع اولیه در مورد نحوه عملکرد و ساخت این‌گونه حسگرها، اقدام به ساخت و ارزیابی حسگرهای مدفون در بتن با استفاده از مواد نانو ساختار ذکرشده می‌شود. در نهایت دستورالعملی برای ساخت حسگرهای مدفون در بتن و نحوه پایش با استفاده از آن‌ها ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. به دست آوردن رابطه بین تنش و مقاومت الکتریکی در حسگر کامپوزیت بتنی/CNT

مزایای طرح:

۱. هزینه پایین حسگرهای مدفون در بتن
۲. امکان پایش دائم سازه و افزایش قابلیت اطمینان سازه
۳. سهولت اندازه‌گیری

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. جمع‌آوری اطلاعات کامل از نحوه ساخت این‌گونه حسگرها و روابط حاکم بین تنش و مقاومت الکتریکی در انواع مختلف این‌گونه حسگرها

۱۰-۲-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش آرماتورهای کامپوزیت/CNT خود سنجشگر برای المان‌های دکل‌های تلسکوپی

هدف: تولید آرماتور کامپوزیت/CNT جهت اندازه‌گیری تنش و کرنش در راستای آرماتور در المان‌های بتنی

شرح پروژه: پایش تنش و کرنش در راستایی معین در عمق مشخصی از المان‌های سازه‌های بتنی یکی از موارد مهمی است که به پایش سلامت آن‌ها می‌تواند کمک بسیاری کند. این مورد در المان دکل‌های تلسکوپی بسیار مهم می‌باشد. آرماتورهای کامپوزیت ترکیب شده با نانو لوله‌های کربنی قابلیت اندازه‌گیری تنش در راستای آرماتور را دارند و کرنش‌های مکانیکی در آن‌ها به صورت تغییرات مقاومت الکتریکی قابل ثبت است. در این طرح پس از مطالعات جامع در مورد خصوصیات رسانایی و مقاومتی آرماتورهای کامپوزیت/CNT و نحوه ساخت آن‌ها، به تولید این‌گونه از آرماتورها پرداخته می‌شود و سپس عملکرد آن مورد ارزیابی و آزمایش قرار می‌گیرد. در نهایت دستورالعملی برای ساخت، و نحوه استفاده از آن‌ها ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. به دست آوردن روابط تنش و مقاومت الکتریکی در آرماتورهای کامپوزیت

مزایای طرح:

۱. امکان پایش دائم سازه و افزایش قابلیت اطمینان سازه
۲. امکان اندازه‌گیری تنش و کرنش در عمق مشخص از المان
۳. سهولت ثبت داده‌ها
۴. دقت مناسب داده‌ها

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. جمع‌آوری اطلاعات کامل از نحوه ساخت این‌گونه حسگرها و روابط حاکم بین تنش و مقاومت الکتریکی در انواع مختلف این‌گونه حسگرها

۱۱-۲-۱-۶- عایق سازی فونداسیون‌های بتنی تأسیسات صنعت برق در بخش انتقال و توزیع به منظور کاهش خوردگی با استفاده از روش تزریق نانو ذرات

هدف: افزایش تراکم بافت بتن به منظور جلوگیری از نفوذ عوامل مخرب محیطی در فونداسیون‌های بتنی با استفاده از تزریق نانو ذرات

شرح پروژه: با توجه به شرایط اقلیمی و عوامل خوردگی موجود در خاک، خوردگی فونداسیون‌های صنعت برق در بخش انتقال و توزیع هزینه‌های بالایی را به همراه دارد، که انتخاب مواد عایق متناسب با شرایط محیطی، الگوی مناسب برای عایق‌کاری فونداسیون‌های بتنی و بررسی و ارزیابی عواید اقتصادی ناشی از اجرای راهکارها از چالش‌های اصلی این موضوع می‌باشند. تزریق نانو ذرات بر روی سطح بتن، تراکم بافت آن را افزایش می‌دهد و به صورت پوششی محافظ در برابر عوامل خورنده عمل می‌کند. در این طرح نحوه مناسب تزریق نانو ذرات مختلف در سطح بتن ارزیابی می‌گردد و تأثیر هر یک از نانو ذرات و نحوه تزریق بر میزان محافظت از بتن در برابر عوامل خورنده ارزیابی می‌گردد. در انتها دستورالعملی برای نحوه تزریق نانو ذره مناسب با توجه به شرایط محیطی و عوامل خورنده ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. شرایط محیطی و عوامل خورنده مختلف
۲. ارزیابی نحوه تزریق مناسب نانو ذرات

مزایای طرح:

۱. افزایش تراکم بتن و کاهش نفوذپذیری
۲. کاهش هزینه‌های مقاوم‌سازی و نوسازی
۳. افزایش طول عمر سازه

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی روش‌های بهینه تزریق مواد نانو ساختار در بتن
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط بررسی تزریق مواد نانو ساختار در بتن

۱۲-۲-۱-۶- استفاده از بتن فراتوانمند نانو ساختار در پایه‌های بتنی پیش‌تنیده جهت احداث خطوط انتقال و همچنین مقایسه فنی و اقتصادی آن

هدف: کاهش نرخ سرقت در شبکه، رفع مشکلات نصب و ساخت و طراحی در برج‌های خطوط انتقال و کاهش هزینه‌های اقتصادی

شرح پروژه: به علت وارداتی بودن، ابعاد بزرگ برج‌های مشبک و وجود کسری یا خطا در بسته‌بندی قطعات برج‌های مشبک و همچنین سرقت قطعات، استفاده از پایه‌های بتنی پیش‌تنیده شده ضروری به نظر می‌رسد. استفاده از بتن فراتوانمند نانو ساختار سبب کاهش ابعاد مقاطع پایه‌های بتنی پیش‌تنیده می‌گردد و همچنین خصوصیت نفوذپذیری کم بتن فراتوانمند سبب افزایش دوام آن می‌گردد. در این پژوهش پایه‌های بتنی پیش‌تنیده جهت احداث خطوط انتقال با استفاده از بتن فراتوانمند نانو ساختار طراحی گشته، سپس مقایسه

فنی و اقتصادی استفاده از پایه‌های بتنی پیش‌تنیده به‌جای مشبک جهت احداث خطوط انتقال انجام می‌پذیرد. در نهایت در صورت موفق بودن طرح از لحاظ فنی و اقتصادی دستورالعملی جهت تولید پایه‌های بتنی پیش‌تنیده با استفاده از بتن فراتوانمند نانو ساختار ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. مختلف بودن بار در خطوط مختلف

مزایای طرح:

۱. حل مشکل سرقت اجزای دکل‌های مشبک

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. مطالعه در مورد فناوری پایه‌های بتنی پیش‌تنیده

۱۳-۲-۱-۶- استفاده از مواد نانو ساختار برای مقابله با فرسایش بتن در دکل‌های تلسکوپی بتنی تحت اثر ریزگردها

هدف: جلوگیری از فرسودگی دکل‌های بتنی در مناطقی که تحت اثر ریزگردها قرار دارند، با هدف کاهش هزینه‌های تعویض، تعمیر و مقاوم‌سازی دکل‌های بتنی و افزایش ایمنی

شرح پروژه: تأثیر فرسایشی ریزگردها بر روی دکل‌های تلسکوپی بتنی سبب افزایش هزینه‌های تعویض، تعمیر و یا تقویت آن‌ها می‌گردد و از سویی کاری بسیار چالش برانگیز می‌باشد. به همین جهت استفاده از بتنی با مقاومت بالا نسبت به فرسایش تحت اثر ریزگردها در دکل‌های بتنی می‌تواند بهترین روش برای کاهش هزینه‌ها در شبکه انتقال و توزیع باشد. یکی از رویکردهایی که می‌تواند سبب افزایش دوام دکل‌های بتنی تحت اثر ریزگردها گردد افزایش تراکم بتن می‌باشد. استفاده از نانو ذرات در طرح اختلاط بتن می‌توان سبب افزایش تراکم بتن، افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری آن گردد، که نتیجه آن کاهش خوردگی و فرسایش دکل‌های بتنی است، که در نتیجه کاهش هزینه‌های نگهداری و تعویض دکل‌های بتنی در شبکه انتقال را به همراه دارد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص شناسایی ریزگردها از لحاظ جنس و تأثیر فرسایشی آن‌ها بر روی بتن، به ارزیابی استفاده از نانو ذراتی نظیر نانو سیلیکا و نانو تیتانیوم در بتن برای کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن پرداخته می‌گردد، سپس تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی فنی و اقتصادی بررسی خواهد شد. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا برای مقابله با اثر فرسایشی ریزگردها بر روی بتن ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. شناسایی جنس ریزگردها در مناطق مختلف تحت اثر ریزگرد و تأثیر فرسایشی آن‌ها

مزایای طرح:

۱. افزایش طول عمر دکل‌های بتنی
۲. کاهش هزینه‌های تعویض، تعمیر و مقاوم‌سازی

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد تولید بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا

۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا

۱۴-۲-۱-۶- بررسی فنی و اقتصادی ساخت و اجرای برج‌های مشبک انتقال با استفاده از مواد غیر هادی کامپوزیتی اصلاح‌شده با مواد نانو ساختار

هدف: اصلاح خصوصیات مقاومتی پروفیل‌های GFRP تحت بارهای، استاتیکی، شبه استاتیکی و سیکلی با افزودن نانولوله‌های کربن در هنگام تولید آن‌ها و استفاده از رزین اپوکسی اصلاح‌شده جهت افزایش عملکرد اتصالات، و تدوین دستورالعمل‌ها و آزمایش‌های مربوطه

شرح پروژه: المان‌های برج‌های انتقال مشبک به طورکلی از جنس پروفیل‌های فلزی می‌باشد. وزن زیاد المان-های فلزی شرایط حمل و نقل و نصب آن‌ها را مشکل می‌سازد، از طرفی این قطعات دائماً مورد سرقت قرار می‌گیرند. مشکل عمومی دیگر، نشت و اتلاف جریان از این نوع المان‌ها می‌باشد. جهت رفع عیوب ذکر شده، امروزه رویکرد استفاده از المان‌های کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته است. کامپوزیت از جمله مواد پیشرفته محسوب می‌شود. نسبت بالای استحکام و سفتی به وزنِ مواد مرکب که افزون‌تر از فولاد است، باعث رشد چشمگیر استفاده از آن‌ها در صنایع مختلف شده است و در حقیقت آن‌ها را تبدیل به نوعی ماده بی بدیل کرده است. در مورد المان‌های کامپوزیتی مشبک مزایای مختلفی را می‌توان برای آن‌ها نام برد. سبکی جهت حمل و نصب، سرعت تولید بالا، جایگزینی قطعات صدمه دیده در هنگام وقوع بلایای طبیعی، امکان طراحی اتصالات آسان‌تر برای نصب، تنوع ساخت به لحاظ شکل، ابعاد و نوع مواد، عایق بودن، مقاومت در برابر خوردگی، عدم آلودگی محیط‌زیست و امکان طراحی برای قرارگیری در معرض بارهای بزرگ ناشی از باد، عدم در هم پاشی کامل حتی در صورت شکست سازه از مزایای استفاده از این نوع مواد هستند. علی رغم مزیت‌های فوق، هنوز دانش فنی و اجرایی ساخت بهینه تیرهای عرضی کامپوزیتی در کشور تدوبن نشده است و ضعف آن‌ها به دلیل خستگی، استفاده از آن‌ها را در سازه‌هایی که تحت بار سیکلی (مانند باد) قرار دارند، محدود کرده است. به همین دلیل حدود تنش مجاز آن‌ها در این‌گونه سازه‌ها بسیار کوچک‌تر از حالت معمول در نظر گرفته می‌شود و این امر استفاده از آن‌ها را غیر اقتصادی کرده است. در این طرح برای اصلاح خصوصیات مرتبط با کامپوزیت‌ها در تولید آن‌ها مواد نانو ساختار مورد استفاده قرار خواهد گرفت و تمامی خصوصیات مکانیکی و دینامیکی آن به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی خواهد گرفت. همچنین ارتقای دوام اجزای برج مشبک تولید شده در مقابل اشعه ماوراءبنفش و مقاومت به آتش با اضافه کردن افزودنی‌ها یا بهره‌گیری از پوشش‌ها نانو ساختار می‌تواند بر اساس نیاز صنعت مورد تست و بررسی قرار گیرد در نهایت دستورالعملی برای تولید و آزمایش‌های کامپوزیت اصلاح‌شده ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تولید و ساخت کامپوزیت‌ها

مزایای طرح:

۱. استفاده از توان بیشتر کامپوزیت‌ها پس از اصلاح تحت بارهای سیکلی
۲. بهینه شدن اتصالات با اصلاح رزین اپوکسی
۳. ارتقای دوام سازه برج‌های مشبک

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناسایی تمامی مشکلاتی که کامپوزیت‌های معمول با آن مواجه می‌باشند.

۱۵-۲-۱-۶- انجام آزمایشات بهسازی خاک‌های ماسه‌ای شل با استفاده از نانو ذرات جهت استفاده در بستر دکل‌های انتقال نیروی صنعت برق در مناطق ساحلی و کویری به منظور بهبود خواص کیفی و مقاومتی آن

هدف: انتخاب بهترین نانو ذرات جهت بهبود خواص کیفی و مقاومتی خاک‌های درشت‌دانه بستر سازه در مناطق ساحلی و کویری و درصد بهینه استفاده از این مواد

شرح پروژه: با توجه به اینکه سازه‌های صنعت برق در مناطق مختلف کشور ممکن است اجرا شود، باید نحوه بهسازی انواع خاک‌های مناطق مختلف را مورد توجه قرار داد. یکی از این مناطق، سواحل و مناطق کویری است که دارای خاک‌های ماسه‌ای هستند. این خاک‌ها ظرفیت باربری پایینی دارند و با مشکلاتی از جمله نشست آنی و نیز بروز پدیده روانگرایی در زمان وقوع زلزله همراه می‌باشند. استفاده از مواد نانو ساختار برای بهسازی این نوع خاک‌ها می‌تواند نقایص این گروه از خاک‌ها را برطرف کرده و امنیت سازه‌های بنا شده روی آن را تأمین کند. در این پروژه پیشنهاد می‌گردد از چند نوع ماده نانو ساختار و درصدهای مختلف استفاده شود تا میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر مشخصات خاک ماسه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد تا تأثیرگذارترین ماده نانو ساختار با درصد بهینه آن ماده به دست آید و در پروژه‌های آینده صنعت برق مورد استفاده قرار گیرند.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. شرایط آزمایش تأثیر انواع مواد نانو ساختار بر روی این نوع خاک‌های باید ثابت بوده و تنها متغیر آزمایش‌ها نوع ماده نانو ساختار و درصد آن باشد.

مزایای طرح:

۱. انتخاب بهترین ماده نانو ساختار برای بهسازی خاک‌های ماسه‌ای و درصد بهینه آن به‌منظور استفاده در پروژه‌هایی که با این نوع خاک مواجه هستند.
۲. افزایش امنیت سازه‌های بنا شده در این مناطق با افزایش مقاومت و مشخصات کیفی آن

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تأمین منبعی از خاک‌های ماسه‌ای همگن برای انجام آزمایش
۲. شناسایی و تهیه انواع مواد نانو ساختار مورد استفاده در این نوع خاک‌ها

بررسی کاهش پتانسیل تورمی خاک رسی بستر دکل‌های انتقال نیرو با استفاده از مواد نانو ساختار

هدف: هدف این پروژه معرفی تأثیرگذارترین ماده نانو ساختار در کاهش پتانسیل تورمی خاک‌های ریزدانه است.

شرح پروژه: تورم خاک‌های ریزدانه یکی از مشکلات اصلی کار با این نوع خاک است که با تغییر تنش داخلی در اثر تغییر رطوبت به وجود می‌آید. با توجه به اینکه دکل‌های انتقال نیرو با توجه به مسیر انتقال ممکن است روی انواع خاک‌ها از جمله خاک‌های تورم‌پذیر قرار گیرند و تغییر رطوبت و ایجاد تورم در این نوع خاک‌ها سبب

ایجاد نشست‌های نامتقارن و وارد آمدن آسیب جدی به خطوط انتقال گردد، بنابراین بهسازی خاک‌های تورم‌پذیر در این حوزه موضوع مهمی است.

در این پروژه، به مواد نانو ساختار مختلفی برای رفع مشکل تورم خاک‌های ریزدانه اشاره خواهد گردید. از جمله این مواد نانو سیلیس، نانوزئولیت، نانو آلومینا، نانومنیزیم اکسید، نانواکسید آهن، خاکستر لجن، نانولوله و الیاف کربن است که تأثیر هرکدام در مطالعات مختلفی مورد تست و بررسی قرارگرفته و نتایج قابل‌دسترس است. در موضوع پژوهشی پیشنهادی شیوه کار مقایسه اثرات این نانو مواد بر پتانسیل تورمی خاک ریزدانه بوده و پیدا کردن این موضوع که کدام یک از مواد مذکور بهترین تأثیر را بر تورم خاک‌های ریزدانه دارند.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنها متغیر این آزمایش نوع ماده نانو ساختار و درصدهای مورد استفاده از آن باشد.

مزایای طرح:

۱. انتخاب بهترین ماده نانو ساختار و درصد بهینه آن برای رفع مشکل تورم خاک‌های ریزدانه

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تهیه مواد نانو ساختار اشاره شده

۳-۱-۶ - بخش توزیع

۱-۳-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از مواد نانو ساختار برای استفاده در پایه‌های پست و خطوط هوایی توزیع نیرو

هدف: تولید بتن فراتوانمند خودترمیم با خصوصیات مقاومت بالا، نفوذپذیری کم و خودترمیم شوندگی به منظور سبک سازی و افزایش عمر پایه‌های پست و خط هوای توزیع

شرح پروژه: اجرای پایه‌های پست و خط هوای توزیع در نقاطی که دسترسی مناسبی ندارند و از خاک مناسبی برخوردار نیستند سبب شده تا سبک سازی دکل حائز اهمیت واقع گردد، از سوی دیگر شرایط محیطی بد، نفوذ عوامل مخرب در بتن سبب تخریب زودهنگام پایه‌ها می‌گردد. تعویض، یا تعمیر و یا تقویت آن‌ها کاری بسیار هزینه‌بر و چالش برانگیز می‌باشد، به همین جهت استفاده از بتن فراتوانمند خودترمیم با خصوصیت مقاومت بالا که سبک سازی را در پی خواهد داشت، نفوذپذیری بسیار کم که سبب افزایش دوام دکل می‌گردد و در نهایت خصوصیت خودترمیمی که از گسترش ترک‌های موئینه و تبدیل آن به ترک‌های سازه‌ای جلوگیری می‌کند، دارای اهمیت است. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن فراتوانمند خودترمیم شونده با استفاده از فناوری نانو در کشورهای توسعه یافته، در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و پس از آن با ساخت چنین بتنی با مصالح مختلف نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد تست و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن فراتوانمند برای مصالح مختلف و شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع خصوصیات مکانیکی و شیمیایی مصالح محلی متناسب با جغرافیای ایران

۲. تنوع شرایط بد محیلی متناسب با جغرافیای ایران

مزایای طرح:

۱. کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری
۲. کاهش ابعاد سازه‌ای
۳. افزایش طول عمر سازه
۴. ترمیم ترک‌های مویرگی و کاهش نفوذپذیری
۵. افزایش قابلیت اطمینان در پایه‌های پست و خط هوای توزیع

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد ساخت بتن فراتوانمند با استفاده از مواد نانو ساختار
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به فراتوانمند خودترمیم شونده

۲-۳-۱-۶- طراحی، ساخت و آزمایش بتن با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر با استفاده از مواد نانو ساختار جهت استفاده در فونداسیون پست‌های هوایی توزیع و پایه‌های خطوط هوایی توزیع نیرو

هدف: کاهش آسیب‌پذیری پایه‌ها و فونداسیون سازه‌های بخش توزیع نسبت به عوامل خورنده محیطی می‌باشد.

شرح پروژه: پایه‌ها و فونداسیون‌های سازه‌های بخش توزیع که در شرایط اقلیمی و عوامل خوردگی مختلف موجود در خاک و شرایط سخت محیط قرار دارند همواره تحت اثر خوردگی می‌باشند، با زوال فونداسیون، سازه در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد که رفع این موضوع هزینه‌های بالایی را برای بخش انتقال و توزیع صنعت برق در سطح کشور در پی خواهد داشت. همین امر سبب شده تا استفاده از بتن‌های با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر مورد توجه واقع گردد. استفاده مواد نانو ساختار سبب بهبود این خصوصیات بتن می‌گردد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تأثیر مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات ذکرشده بتن، مقایسه‌ای دقیق بین تأثیر مواد نانو ساختار مختلف بر تراکم بافت بتن، نفوذپذیری، دوام و مقاومت مکانیکی بتن به صورت آزمایشگاهی صورت می‌پذیرد، سپس امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی فنی و اقتصادی بررسی شده و در نهایت دستورالعملی برای تولید بتنی با بافت متراکم، نفوذپذیری کم و دوام بیشتر برای استفاده در شبکه‌ی توزیع صنعت برق در شرایط محیطی مختلف متناسب با جغرافیای ایران ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. گستره شرایط اقلمی و مواد خورنده مختلف در هر اقلیم
۲. نحوه پراکنش ماده نانو ساختار در طرح اختلاط بتن

مزایای طرح:

۱. افزایش عمر مفید بتن و مقاومت در برابر خوردگی
۲. کاهش هزینه‌های ترمیم و تعمیر

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت کامل اثرات مواد نانو ساختار بر روی خصوصیات نفوذپذیری و دوام بتن

۳-۳-۱-۶- استفاده از مواد نانو ساختار در ساخت پایه‌های بتنی برای پیشگیری از فرسودگی پایه‌های بتنی در شرایط مختلف اقلیمی و شوره‌زارها

هدف: جلوگیری از فرسودگی پایه‌های بتنی در مناطق شوره‌زار، کاهش هزینه‌های تعویض پایه‌های بتنی و افزایش ایمنی

شرح پروژه: شرایط سخت اقلیمی مختلف، عوامل خورنده محیطی و شوره‌زارها سبب فرسودگی سریع پایه‌های بتنی در شبکه توزیع شده، تعویض، یا تعمیر و یا تقویت آن‌ها کاری بسیار هزینه‌بر و چالش برانگیز می‌باشد، به همین جهت استفاده از بتنی با خصوصیت نفوذپذیری کم و دوام بالا می‌تواند بهترین روش برای کاهش هزینه‌ها در شبکه توزیع باشد، نفوذپذیری بسیار کم که سبب افزایش دوام پایه‌های بتنی می‌گردد. با استفاده از نانو ذرات در طرح اختلاط بتن می‌تواند سبب افزایش تراکم بتن، افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری در آن شود، که این امر در نهایت با کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری پایه‌های بتنی و یا تعویض آن‌ها سبب کاهش هزینه‌ها در بخش توزیع خواهد شد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص تولید بتن با افزودن نانو ذراتی، نظیر نانو سیلیکا و نانو تیتانیوم، که سبب کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام می‌گردند در مرحله نخست امکان تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی و اقتصادی بررسی شده و سپس با ساخت آن با افزودن نانو ذرات مناسب، تحت شرایط بد محیطی مختلف مورد آزمایش و ارزیابی قرار خواهند گرفت. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تنوع شرایط بد محیلی متناسب با جغرافیای ایران

مزایای طرح:

۱. افزایش طول عمر پایه‌های بتنی
۲. کاهش هزینه‌های تعمیر و تعویض

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد تولید بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا

۴-۳-۱-۶- استفاده از مواد نانو ساختار در تولید بهینه تیرهای مورد نیاز در شبکه‌های توزیع هوایی نیرو با توجه به وجود ریزگردها که سبب خوردگی بتن می‌گردند

هدف: جلوگیری از فرسودگی پایه‌های بتنی در مناطقی است که تحت اثر ریزگردها قرار دارند، با هدف کاهش هزینه‌های تعویض پایه‌های بتنی و افزایش ایمنی

شرح پروژه: تأثیر فرسایشی ریزگردها بر روی پایه‌های بتنی سبب افزایش هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری می-گردد، تعویض، تعمیر و یا تقویت پایه‌های بتنی در شبکه توزیع کاری بسیار هزینه‌بر و چالش برانگیز می‌باشد، به همین جهت استفاده از بتنی با مقاومت بالا نسبت به فرسایش تحت اثر ریزگردها می‌تواند بهترین روش برای کاهش هزینه‌ها در شبکه توزیع باشد. یکی از رویکردهایی که می‌تواند سبب افزایش دوام پایه‌های بتنی تحت

اثر ریزگردها گردد، افزایش تراکم بتن می‌باشد. استفاده از نانو ذرات در طرح اختلاط بتن می‌توان سبب افزایش تراکم بتن، افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری آن گردد، که نتیجه آن کاهش خوردگی و فرسایش پایه‌های بتنی است، که کاهش هزینه‌های نگهداری و تعویض پایه‌های بتنی را در شبکه توزیع به همراه دارد. در این طرح بعد از مطالعات جامع اولیه در خصوص شناسایی ریزگردها از لحاظ جنس و تأثیر فرسایشی آن‌ها بر روی بتن، به ارزیابی استفاده از نانو ذراتی نظیر نانو سیلیکا و نانو تیتانیوم در بتن برای کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن پرداخته می‌گردد، سپس تولید چنین بتنی در کشور از لحاظ تکنولوژی فنی و اقتصادی بررسی خواهد شد. در نهایت دستورالعملی برای تولید بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا برای مقابله با اثر فرسایشی ریزگردها بر روی بتن ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. شناسایی جنس ریزگردها در مناطق مختلف تحت اثر ریزگرد و تأثیر فرسایشی آن‌ها.

مزایای طرح:

۱. افزایش طول عمر پایه‌های بتنی
۲. کاهش هزینه‌های تعمیر و تعویض

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. تحقیقات تفصیلی در مورد تولید بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا
۲. مشخص نمودن آزمایش‌های مربوط به بتن با نفوذپذیری کم و دوام بالا

۵-۳-۱-۶- بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و موادی تیر انتقال و توزیع برق کامپوزیتی FRP اصلاح شده با مواد نانو ساختار

هدف: استفاده از مواد نانو ساختار در تیر انتقال برق کامپوزیت FRP، جهت بهبود ضعف‌هایی نظیر سطح مقاومت این مواد در برابر محیط خورنده نمکی، اشعه ماوراءبنفش UV، مقاومت در برابر آتش، طراحی و تدوین تست‌های آزمایشگاهی جهت بررسی این رفتارهای ماده می‌باشد

شرح پروژه: تیرهای انتقال و توزیع برق نقش بسیار مهمی در بحث انتقال و توزیع ایفا می‌کنند، و به تعداد زیادی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور معمول از جنس بتن مسلح، چوب و فولاد می‌باشند که هر یک معایبی دارند. تیرهای بتنی به دلیل وزن زیاد شرایط حمل‌ونقل و نصب را مشکل می‌سازند ضمن این‌که در صورت سقوط سازه، خرابی زیادی را نیز ایجاد خواهند کرد، حساسیت تیرهای بتنی به خوردگی و عمر کوتاه آن‌ها از دیگر معایب آن‌ها می‌باشد. تیرهای چوبی با وجود وزن نسبی کمتر، دارای معایبی نظیر کاهش شدید طول عمر به لحاظ شرایط محیطی و آب و هوایی، خطرات طبیعی مثل جوندگان و آتش می‌باشند، همچنین منابع تأمین آن‌ها بسیار محدود می‌باشد. تیرهای فولادی نیز علاوه بر زمان فرآیند تولید بالا، ضعف در برابر خوردگی و همچنین عوامل شیمیایی، ضعف مهم دیگری دارند که به لحاظ الکتریکی هادی می‌باشند و در آن القای ایجادی می‌تواند سبب تولید جریان شود، این عامل علاوه بر اتلاف جریان، خطرات ایمنی را نیز در بر دارد. جهت رفع عیوب بالا، امروزه رویکرد استفاده از تیرهای کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد توجه کشورهای مختلف قرارگرفته است. کامپوزیت از جمله مواد پیشرفته محسوب می‌شود. نسبت بالای استحکام و

سختی به وزنِ مواد مرکب که افزون‌تر از فولاد است، باعث رشد چشمگیر استفاده از آن‌ها در صنایع مختلف شده است و در حقیقت آن‌ها را تبدیل به نوعی ماده بی بدیل کرده است. در مورد تیرهای انتقال برق کامپوزیتی مزایای مختلفی از جمله سبکی جهت حمل و نصب، سرعت تولید بالا، جایگزینی قطعات صدمه‌دیده در هنگام وقوع بلایای طبیعی، امکان طراحی اتصالات آسان‌تر برای نصب، تنوع ساخت به لحاظ شکل، ابعاد و نوع مواد، عایق بودن، مقاومت در برابر خوردگی، عدم آلودگی محیط‌زیست و امکان طراحی برای قرارگیری در معرض بارهای بزرگ ناشی از باد، عموماً عدم در هم پاشی کامل حتی در صورت شکست سازه را می‌توان نام برد.
در این طرح برای اصلاح خصوصیات مرتبط با خستگی کامپوزیت‌ها، مواد اصلاح کننده نانو ساختار در تولید آن‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت و تمامی خصوصیات مکانیکی، استاتیکی و سیکلی آن به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی خواهد گرفت. همچنین ارتقای دوام تیرهای کامپوزیتی تولیدشده در مقابل اشعه ماوراء بنفش و مقاومت به آتش بر اساس نیاز صنعت مورد تست و بررسی قرار می‌گیرد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. ساخت و تولید مواد کامپوزیت

مزایای طرح:

۱. استفاده از توان بیشتر کامپوزیت‌ها پس از اصلاح تحت بارهای سیکلی
۲. بهینه شدن اتصالات با اصلاح رزین اپوکسی
۳. ارتقای دوام پایه‌های انتقال

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. شناخت کامل مواد کامپوزیت، روش‌های اصلاح آن با مواد نانو ساختار

۶-۳-۱-۶- امکان‌سنجی و تولید نمونه حسگر الیاف نانو کربن برای شناسایی و ردیابی خوردگی در تیرهای بتنی

هدف: تولید حسگری برای مقابله با خوردگی در تیرهای بتنی

شرح پروژه: منافذ و میکرو ترک‌های موجود در سطح بتن سبب نفوذ مواد خورنده به بتن و سبب خوردگی آرماتورها شده، و شروع خوردگی در آرماتورها با افزایش حجم آن‌ها همراه بوده و سبب افزایش بعد ترک‌ها می‌گردد و این موضوع به زوال زودهنگام سازه‌های بتنی که در معرض محیط‌های خورنده می‌باشند می‌انجامد. کاهش مقاومت تیرهای بتنی انتقال و توزیع صنعت برق و همچنین دکل‌های بتنی انتقال نیز به شدت تحت اثر این موضوع قرار دارند. شناسایی و ردیابی زود هنگام خوردگی در تیرها و دکل‌های بتنی می‌تواند به حفظ آن‌ها کمک کند. در این طرح پس از مطالعات جامع روش‌های تشخیص زود هنگام خوردگی در تیرهای بتنی، به امکان‌سنجی تولید حسگر الیاف نانو کربن برای تشخیص شروع خوردگی در تیرهای بتنی با استفاده از پایش پیوسته کرنش‌های پرداخته می‌شود. در نهایت دستورالعملی برای ساخت حسگرهای الیاف نانو کربن و روش پایش با آن ارائه می‌گردد.

مشکلات و چالش‌های طرح:

۱. تعیین روش مناسب بابت تحلیل داده‌های پایش برای تشخیص شروع خوردگی در شرایط مختلف ایجاد خوردگی

مزایای طرح:

۱. تشخیص شروع خوردگی و اقدام برای جلوگیری از پیشرفت آن
۲. افزایش دوام تیرها و دکل‌های بتنی بخش انتقال و توزیع
۳. هزینه پایین حسگر تولیدی
۴. پایش دائم

پیش‌زمینه‌های لازم:

۱. مطالعه جامع در مورد انواع حسگرهای مورد استفاده برای تشخیص خوردگی

تهران - شهرک قدس - انتهای بلوار شهید دادمان (پونک پاختری) - صندوق پستی ۵۱۷-۱۴۶۶۵
تلفن : ۸۸۰۷۹۴۰۰ - فاکس : ۸۸۰۷۸۲۹۶