

بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی بر مقاومت به خوردگی سازه‌های بتنی صنعت برق در آب دریا



مدیر پروژه: داور رضاخانی

مجری: گروه پژوهشی متالورژی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی بر مقاومت به خوردگی سازه‌های بتنی صنعت برق در آب دریا

مدیر پروژه: داور رضاخانی

همکار پروژه: فاطمه عسگری‌نیا

مجری: گروه پژوهشی متالورژی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

تیرماه ۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-718-PMTPN32-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.307

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی متالورژی

بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی بر مقاومت به خوردگی سازه‌های بتنی صنعت برق در آب دریا /
داور رضاخانی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۲۷۵ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. عسگری‌نیا، فاطمه، همکار پروژه. ۲. فلاح شیخ‌لری، علی‌اکبر، مجری.



انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی متالورژی

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهیددادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.irپست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب داور رضاخانی 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. فاطمه عسگری‌نیا

۲.

۳.

۴.

پیشگفتار

در حال حاضر بتن پرمصرف‌ترین ماده در دنیا پس از آب می‌باشد. امکان دستیابی به ویژگی‌های متنوع بتن نظیر شکل‌پذیری، مقاومت و دوام مناسب و ارزان بودن، سبب تبدیل آن به یکی از پرمصرف‌ترین مواد ساختمانی شده است. خصوصاً وقتی با میلگرد همراه می‌شود و سازه‌های بتن‌آرمه و مسلح را به وجود می‌آورد، خواص مکانیکی آن چندین بار تقویت می‌گردد. با توجه به نیاز روزافزون دنیا به سیمان و اهمیت غیرقابل‌انکار دستیابی به سازه‌های بتنی باکیفیت و دوام بالا در کنار برنامه‌ریزی‌های گسترده در راستای توسعه پایدار، ضرورت افزایش کیفیت و طول عمر سازه‌های بتنی بسیار احساس می‌شود. بتن ماده‌ای متخلخل می‌باشد که ورود آب، اکسیژن و یون‌های مهاجم همانند کلرایدها، می‌توانند منجر به از بین رفتن لایه پسیو روی فولاد تقویت‌کننده داخل بتن شود و باعث زوال بتن گردد. پدیده خوردگی سبب کاهش انواع مقاومت در بتن مسلح شده و طول عمر مفید سازه را به شدت کاهش می‌دهد. اسیدها، نمک‌ها (مانند کلرایدها، سولفات‌ها و نیترات‌ها)، گازها (مانند اکسیژن، دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید کربن) و هیدروکربن‌ها از عوامل اصلی خوردگی بتن می‌باشند. در سواحل دریا که رطوبت و املاح زیاد می‌باشد، خوردگی بتن به مراتب شدیدتر است؛ بنابراین یکی از نقاط ضعف بتن مسلح به‌ویژه در محیط‌های دریایی، خوردگی آرماتور می‌باشد که به علت نفوذ یون کلر موجود در آب و ترکیب با اکسیژن موجود در اتمسفر، لایه محافظ روی آرماتور از میان‌رفته و خوردگی آغاز می‌شود. در دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی و پژوهشی جهان در خصوص بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی بر روی افزایش مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی سازه‌های بتنی صورت گرفته است. به دلیل خوردگی زیاد سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر روی تأثیر مواد افزودنی معدنی بر خواص خوردگی سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا متمرکز شده‌اند. پژوهشگران با استفاده از مواد افزودنی مختلف، رفتار خوردگی آرماتورهای فولادی سازه‌های بتنی موردبررسی قرار داده و با تعیین نوع و میزان بهینه ماده افزودنی مناسب، باعث افزایش مقاومت به خوردگی بتن گردیده‌اند. اغلب این افزودنی‌های معدنی، بومی و یا محصولات جانبی صنایع بوده‌اند. در طول تحقیقات انجام‌گرفته مواد افزودنی مختلف معدنی جهت بررسی مقاومت به خوردگی بتن موردبررسی قرار گرفته‌اند که از این میان به محصولات جانبی کارخانه‌های تولید فولاد، سرباره تولید فولاد، ضایعات کارخانه تولید مس، هیدروتالاسیت، ضایعات معدنی فورستریت، الیوین، انواع پوزولان‌های طبیعی، زئولیت، دیاتومیت، کربن سیاه، اسکوریا، سیلیکات سدیم، متاکائولین، خاکستر بادی، دوده‌ی سیلیس، نیتريت سدیم، نیتريت کلسیم، ورنونیا آمیگدالینا، پالمیتات کلسیم، رمیوم (حاوی خاکستر آتش‌فشانی و پرلیت)، خاکستر سبوس برنج، میکرو سیلیکا، خاکستر تغالله نیشکر، باریت، پومیس، کولمانیت، گابرو، بازالت، سنگ‌آهک و ... می‌توان اشاره نمود. سؤال‌های اصلی تحقیق این است که باوجود خسارت‌های شدید خوردگی سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا (خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر) و نیز باوجود مواد معدنی گسترده در کشور، آیا امکان بهبود مقاومت به خوردگی بتن با استفاده از مواد افزودنی معدنی موجود داخل کشور با حفظ خواص مکانیکی وجود دارد؟ آیا می‌توان بتن تولید کرد که با استفاده از مواد افزودنی معدنی داخل کشور دارای مقاومت به خوردگی بالا در مجاورت آب دریا باشد؟ آیا می‌توان با تولید بتن مقاوم به خوردگی باعث کاهش هزینه‌های خوردگی و مانع از به هدر رفتن سرمایه‌های ملی گردید؟

گزارش حاضر گزارش نهایی پروژه می‌باشد که ابتدا به بررسی و انتخاب افزودنی‌های معدنی مناسب از نقطه نظر فنی و اقتصادی در بتن جهت بهبود مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی در مجاورت آب دریا پرداخته شده

است. بر مبنای مواد افزودنی تعیین شده طرح اختلاط‌های گوناگون از افزودنی‌ها از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته و بر مبنای ویژگی‌های مورد نظر یک ترکیب به عنوان اختلاط بهینه معرفی شده است. در نهایت با ساخت نمونه‌های بتنی با ترکیب بهینه میزان دوام این نمونه‌ها در برابر نفوذ یون کلر و همچنین مقاومت به خوردگی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و پس از تحلیل تمامی نتایج بدست آمده در نهایت پس از یک مقایسه جامع، میزان اثربخش بودن مواد پوزولانی انتخابی در بهبود خواص و ویژگی‌های بتن و دستورالعمل مربوطه ارائه گردیده است.

داور رضاخانی

تیر ماه ۱۴۰۰

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	۲
فصل اول: بررسی کامل منابع اطلاعاتی در خصوص انواع مواد افزودنی معدنی به بتن در مجاورت آب دریا و تأثیر هر کدام بر مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی.....	۲۲
۱-۱ جمع‌آوری و بررسی اطلاعات در خصوص انواع مواد افزودنی معدنی به بتن در مجاورت آب دریا.....	۲
۱-۱-۱ مقدمه.....	۱-۱-۱
۱-۱-۲ خاکستر بادی.....	۱-۱-۲
۱-۱-۳ دوده‌ی سیلیس.....	۱۲
۱-۱-۴ سرباره.....	۲۴
۱-۱-۵ متاکائولن.....	۳۹
۱-۱-۶ استفاده ترکیبی از سرباره، متاکائولن، خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیس.....	۴۳
۱-۱-۷ کاربرد نانوتکنولوژی در بتن.....	۵۵
۱-۱-۸ چالش‌های نانوتکنولوژی در صنعت بتن.....	۵۶
۱-۱-۹ انواع نانو ذرات بکار برده شده در صنعت بتن خود تراکم.....	۵۷
۱-۱-۹-۱ نانو ذرات SiO_2	۵۸
۱-۱-۹-۲ نانو خاک رس.....	۶۴
۱-۱-۹-۳ نانوصفحات اکسید گرافن و گرافن.....	۶۸
۱-۱-۹-۴ نانولوله‌های کربنی.....	۸۳
۱-۱-۹-۵ نانو ذرات اکسید آهن.....	۹۷
۱-۱-۹-۶ نانوذرات اکسید تیتانیوم.....	۹۷
۱-۱-۹-۷ نانوذرات اکسید آلومینیوم.....	۹۸
۱-۲ امکان‌سنجی فنی و اقتصادی مواد افزودنی معدنی بومی کشور جهت افزودن به بتن در مجاورت آب دریا.....	۱۰۰
۱-۳ نقش مواد افزودنی در بتن‌های حاشیه خلیج فارس.....	۱۰۱
۱-۳-۱ نقش مواد پودری معدنی (پوزولان‌ها و روبراه‌ها) در بتن حاشیه خلیج فارس.....	۱۰۱
۱-۳-۱-۱ دوده‌ی سیلیس.....	۱۰۱
۱-۳-۱-۲ خاکستر بادی.....	۱۰۲
۱-۳-۱-۳ سرباره‌ها.....	۱۰۳
۱-۳-۱-۴ متاکائولن.....	۱۰۴
۱-۳-۱-۵ نانوسیلیس.....	۱۰۴
۱-۳-۱-۶ اکسید گرافن.....	۱۰۵
۱-۳-۱-۷ نانولوله‌های کربنی.....	۱۱۰
جمع بندی فصل اول.....	۱۱۱
فصل دوم: انجام آزمون‌های مختلف شامل آزمون‌های غوطه وری، خوردگی، فیزیکی و مکانیکی، آنالیز شیمیایی و ریزساختاری بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی بتنی تهیه شده از مواد افزودنی معدنی منتخب مرحله اول.....	۱۱۷

۲-۱	مقدمه.....	۱۱۸
۲-۱-۱	تأثیر پوزولان سرباره گرانوله بر خواص گوناگون بتن.....	۱۱۹
۲-۱-۲	مروری بر مطالعات صورت گرفته بر اثر اکسیدگرافن.....	۱۲۳
۲-۱-۳	وقوع خوردگی در بتن‌ها.....	۱۲۷
۲-۱-۴	مکانیزم وقوع خوردگی در نمونه‌های بتنی.....	۱۲۸
۲-۱-۵	مدل‌سازی نفوذ یون کلر در بتن.....	۱۲۹
۲-۲	مواد و روش‌ها.....	۱۳۱
۲-۲-۱	تهیه مواد اولیه لازم جهت انجام آزمون‌ها.....	۱۳۱
۲-۲-۲	تهیه نمونه‌های بتنی در شرایط مختلف نوع و میزان افزودنی، درجه حرارت و زمان غوطه‌وری در آب ۳/۵ درصد کلرید سدیم.....	۱۳۲
۲-۲-۲-۱	نحوه بتن ریزی.....	۱۳۹
۲-۲-۲-۲	شرایط عمل‌آوری نمونه‌های بتنی.....	۱۴۰
۲-۲-۳	انجام آزمون‌های خوردگی شامل غوطه‌وری و الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌های بتنی.....	۱۴۱
۲-۲-۳-۱	آزمون الکتروشیمیایی امپدانس.....	۱۴۱
۲-۲-۴	روش انجام آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت فشاری، نفوذپذیری، آزمون تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های بتنی.....	۱۴۳
۲-۲-۴-۱	آزمون‌های استحکام فشاری و خمشی.....	۱۴۳
۲-۲-۴-۲	روش انجام آزمون‌های تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های بتنی.....	۱۴۴
۲-۲-۴-۳	آزمون سنجش هدایت الکتریکی RCPT.....	۱۴۵
۲-۲-۴-۴	آزمون نفوذ فشاری یون کلر.....	۱۴۷
۲-۲-۵	روش انتخاب اختلاط بهینه.....	۱۴۸
۲-۲-۶	ساخت دستگاه آزمون نفوذ فشاری یون کلر.....	۱۴۹
۲-۲-۶-۱	روش انجام آزمون‌های مختلف آنالیز شیمیایی و بررسی‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌های بتنی.....	۱۵۳
۲-۳	نتایج.....	۱۵۴
۲-۳-۱	نتایج آزمون‌های خوردگی شامل غوطه‌وری و الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌های بتنی.....	۱۵۴
۲-۳-۱-۱	نتایج آزمون الکتروشیمیایی امپدانس.....	۱۵۴
۲-۳-۲	نتایج آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت فشاری، نفوذپذیری، آزمون تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های بتنی.....	۱۵۶
۲-۳-۲-۱	نتایج آزمون‌های مکانیکی.....	۱۵۶
۲-۳-۲-۲	نتایج آزمون‌های تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های بتنی.....	۱۵۹
۲-۳-۳	نتایج نفوذ یون کلر به صورت فشاری.....	۱۶۱
۲-۳-۳-۱-۱-۲	تأثیر فشار بر نفوذ یون کلر.....	۱۶۳

۱۶۴.....	۳-۱-۱-۱- اثر دما بر نفوذ یون کلر
۱۶۵.....	۴-۱-۱-۱- اثر زمان بر نفوذ یون کلر
۱۶۷.....	۵-۱-۱-۱- تأثیر همزمان تغییرات فشار و زمان بر نفوذ کلر در دمای ثابت
۱۶۸.....	۶-۱-۱-۱- اثر افزودنی‌های اکسیدگرافن و سرباره گرانوله بر نفوذ یون کلر در شرایط مختلف
۱۶۹.....	۴-۳-۲- نتایج آزمونهای مختلف آنالیز شیمیایی و بررسیهای ریزساختاری بر روی نمونههای بتنی
۱۷۳.....	جمع‌بندی فصل دوم
فصل سوم: تجزیه و تحلیل اطلاعات و تعیین مواد افزودنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه های بتنی در مجاورت آب دریا و تهیه دستورالعمل مربوطه ... ۱۷۴	
۱۷۵.....	۱-۳- تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از مرحله دوم پروژه
۱۷۵.....	۱-۱-۳- تجزیه و تحلیل نتایج تهیه مواد اولیه لازم جهت انجام آزمونها
۱۷۵.....	۱-۱-۱-۳- تحلیل نتایج مشخصه‌یابی نانو اکسیدگرافن
۱۷۷.....	۲-۱-۱-۳- تحلیل نتایج مشخصه‌یابی سرباره گرانوله
۱۷۹.....	۱-۲-۳- تجزیه و تحلیل نتایج آزمونهای فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت فشاری، نفوذپذیری، آزمون تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی
۱۷۹.....	۱-۲-۱-۳- تجزیه و تحلیل نتایج آزمونهای مکانیکی
۱۸۵.....	۲-۱-۲-۳- تجزیه و تحلیل نتایج آزمونهای تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت و هدایت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی
۱۹۰.....	۳-۱-۲-۳- تجزیه و تحلیل نتایج انتخاب ترکیب بهینه
۱۹۱.....	۴-۱-۲-۳- تجزیه و تحلیل نتایج نفوذ یون کلر بصورت فشاری
۲۰۴.....	۵-۱-۲-۳- تجزیه و تحلیل نتایج آزمون الکتروشیمیایی امپدانس بر روی نمونه‌های بتنی
۲۱۳.....	۶-۱-۲-۳- تجزیه و تحلیل نتایج بررسی‌های ریزساختاری
۲۲۰.....	۲-۳- تعیین مواد افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه های بتنی در مجاورت آب دریا و تهیه دستورالعمل مربوطه
۲۲۰.....	۱-۲-۳- تعیین مواد افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)
۲۲۱.....	۲-۲-۳- تعیین مواد افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)
۲۲۱.....	۳-۲-۳- تعیین طرح اختلاط افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)
۲۲۲.....	۴-۲-۳- دستورالعمل افزودن مواد معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)
۲۲۳.....	جمع‌بندی
۲۲۴.....	مراجع و منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های بتنی الف) OPC-۰.۵۰، ب) FA۲۰-۰.۵۰، ج) OPC-۰.۳۵، د) FA۲۰-۰.۳۵، ه) OPC-۰.۳۱ و و) FA۲۰-۰.۳۱ پس از ۲۵۰ ساعت غوطه‌وری ۸
- شکل ۱-۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی (بزرگنمایی ۱۰۰۰) الف) بتن ساخته‌شده از سیمان پرتلند ب) خاکستر بادی فعال نشده، ج) خاکستر بادی فعال‌شده به روش مکانیکی، د) خاکستر بادی فعال‌شده به روش حرارتی و ه) خاکستر بادی فعال‌شده به روش شیمیایی ۱۲
- شکل ۱-۳- اثرات خاکستر بادی و خاکستر بادی فعال بر ذرات سیمان ۱۲
- شکل ۱-۴- طرح‌واره تولید دوده‌ی سیلیس ۱۳
- شکل ۱-۵- تأثیر نوع آگرگات بر استحکام فشاری بتن حاوی ۱۵ درصد دوده‌ی سیلیس ۱۶
- شکل ۱-۶- تأثیر نوع آگرگات بر استحکام کششی بتن حاوی ۱۵ درصد دوده‌ی سیلیس ۱۷
- شکل ۱-۷- رابطه بین استحکام کششی نمونه‌های بتنی با درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان طی دوره ۲۸ روز در نسبت‌های مختلف آب به سیمان ۱۷
- شکل ۱-۸- رابطه بین استحکام خمشی نمونه‌های بتنی با درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان طی دوره ۲۸ روز در نسبت‌های مختلف آب به سیمان ۱۸
- شکل ۱-۹- کرنش خزش فشاری نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف دوده‌ی سیلیس تحت شرایط نیمه آدیاباتیک ۲۱
- شکل ۱-۱۰- تغییرات نفوذپذیری یون کلراید با تغییر درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان در نمونه‌های بتنی ۲۲
- شکل ۱-۱۱- تغییرات مقدار نفوذپذیری با نسبت آب به سیمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف دوده‌ی سیلیس ۲۴
- شکل ۱-۱۲- شماتیک نحوه تولید سرباره گرانوله ۲۴
- شکل ۱-۱۳- دیاگرام فازی سه‌تایی سرباره گرانوله شده و محصولات هیدراسیونی سرباره با سیمان و آب ۲۵
- شکل ۱-۱۴- استحکام گیری ملاتهای با نسبت آب به سیمان مختلف و حاوی درصدهای مختلف سرباره گرانوله شده در دماهای عمل‌آوری متفاوت ۲۶
- شکل ۱-۱۵- تأثیر جایگزینی سرباره گرانوله و شرایط عمل‌آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی [۲۷] ۲۷
- شکل ۱-۱۶- تغییرات استحکام کششی نمونه‌های بتنی حاوی سرباره گرانوله فعال‌شده با سدیم سیلیکات و متاسیلیکات طی دوره‌های زمانی متفاوت ۲۸
- شکل ۱-۱۷- درصد تخلخل نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف سرباره گرانوله فعال‌شده با سدیم سیلیکات و متاسیلیکات طی دوره‌های زمانی متفاوت ۲۹

- شکل ۱۸-۱- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتنی حاوی سرباره گرانوله با طرح اختلاط‌های متفاوت..... ۲۹
- شکل ۱۹-۱- مدول الاستاتیک الاستیکی نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلفی از سرباره گرانوله پس از دوره ۲۸ و ۱۸۰ روز ۳۰
- شکل ۲۰-۱- تغییرات نفوذپذیری یون کلراید در نمونه‌های بتنی با عمل‌آوری متفاوت و مقادیر مختلف جایگزینی سرباره گرانوله با سیمان..... ۳۲
- شکل ۲۱-۱- تأثیر مقدار سرباره گرانوله و نسبت آب به بایندر بر نفوذپذیری گاز در نمونه‌های بتنی (الف) نسبت آب به سیمان $0/3$ و (ب) نسبت آب به بایندر $0/35$ ۳۲
- شکل ۲۲-۱- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده به روش‌های مختلف با مقدار سرباره گرانوله جایگزین سیمان..... ۳۳
- شکل ۲۳-۱- تغییرات پتانسیل نیم‌پیل نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده با روش‌های متفاوت حاوی مقادیر مختلف سرباره گرانوله نسبت به زمان ۳۴
- شکل ۲۴-۱- تغییرات مدت‌زمان سپری‌شده برای شروع خوردگی در نمونه‌های بتنی با نسبت جایگزینی سرباره گرانوله با سیمان ۳۵
- شکل ۲۵-۱- تغییرات مدت‌زمان سپری‌شده برای تخریب نمونه‌های بتنی با نسبت جایگزینی سرباره گرانوله با سیمان..... ۳۵
- شکل ۲۶-۱- تغییرات پتانسیل مدارباز نمونه‌های بتنی با درصدهای جایگزینی مختلف سرباره گرانوله (نمونه‌های بتنی در رطوبت ۱۰۰ درصد نگهداری می‌شود) ۳۶
- شکل ۲۷-۱- مقدار جریان عبوری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف..... ۳۷
- شکل ۲۸-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی بتن ساخته‌شده از (الف) سیمان پرتلند و (ب) سیمان پرتلند + سرباره گرانوله ۳۷
- شکل ۲۹-۱- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف ۳۸
- شکل ۳۰-۱- تغییرات پتانسیل مدارباز تحت شرایط خوردگی تسریع شده برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف..... ۳۸
- شکل ۳۱-۱- تأثیر جایگزینی متاکائولن با سیمان بر تخلخل بتن (نسبت آب به بایندر=۴، عمر بتن=۱۰۰ روز). ۴۰
- شکل ۳۲-۱- پروفیل نفوذ یون کلراید برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف طی غوطه‌وری در محلول سدیم کلراید $3/5$ درصد وزنی به مدت $1/5$ سال ۴۷
- شکل ۳۳-۱- مقدار آب موردنیاز در نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف برای دستیابی به یک پایداری نرمال ۵۰
- شکل ۳۴-۱- تأثیر جایگزینی خاکستر بادی و ترکیب دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی با سیمان بر (الف) زمان گیرش اولیه (ب) زمان گیرش نهایی نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های مختلف..... ۵۰

- شکل ۳۵-۱- تأثیر جایگزینی خاکستر بادی و ترکیب دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی با سیمان بر کارپذیری نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های مختلف..... ۵۰
- شکل ۳۶-۱- نسبت استحکام نمونه‌های بتنی حاوی ترکیبات پوزولانی نسبت به بتن ساخته‌شده از سیمان پرتلند (خط‌چین)..... ۵۱
- شکل ۳۷-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی ریزساختار نمونه بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی جایگزین شده با سیمان در الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ب) بزرگنمایی ۳۰۰۰ ۵۲
- شکل ۳۸-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی ریزساختار نمونه بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس جایگزین شده با سیمان در الف) بزرگنمایی ۴۰۰۰ و ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ ۵۳
- شکل ۳۹-۱- تأثیر درصدهای افزودنی مختلف در بهبود کارپذیری بتن خود تراکم..... ۵۴
- شکل ۴۰-۱- تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف مواد افزودنی معدنی در استحکام فشاری بتن خود تراکم ۵۵
- شکل ۴۱-۱- میزان کاهش استحکام فشاری بتن خود تراکم در برابر حمله سولفات منیزیم برای درصدهای متفاوتی از مواد معدنی مختلف ۵۵
- شکل ۴۲-۱- حرکت به‌سوی بتنی مقاوم با استفاده از نانو تکنولوژی ۵۶
- شکل ۴۳-۱- مقایسه اندازه ذرات با سطح ویژه ذرات برای ذراتی در رابطه با بتن..... ۵۷
- شکل ۴۴-۱- تأثیر نانو سیلیکا روی هیدراسیون اولیه سیستم خاکستر زغال‌سنگ با حجم بالا. الف) دمای هیدراسیون ب) زمان‌گیری اندازه‌گیری شده به‌وسیله Vicat needle ۵۹
- شکل ۴۵-۱- مدول الاستیک خمیر سیمان و خمیر سیمان اصلاح‌شده با نانو سیلیکا..... ۶۰
- شکل ۴۶-۱- مورفولوژی محصولات هیدراسیون پوزولانی CNS و دوده‌ی سیلیس ($5:20 = \text{CNS/SF:CH}$ ؛ $2 = w/b$ ، زمان ۴ ماه) ۶۱
- شکل ۴۷-۱- نانو ذرات تولیدشده SiO_2 با روش سل ژل (الف) بازی (ب) اسیدی..... ۶۲
- شکل ۴۸-۱- کلسیم‌گیری خمیر سیمان سخت‌شده..... ۶۳
- شکل ۴۹-۱- حضور محصول مختلف هیدراسیون در بتن ۱- C-S-H ، ۲- Ca(OH)_2 ، ۳- اترینگایت و ۴- حفره..... ۶۴
- شکل ۵۰-۱- واکنش هیدراسیون در بتن سنتی، بتن با عملکرد بالا و بتن با تکنولوژی نانو ذرات..... ۶۵
- شکل ۵۱-۱- مقایسه استحکام فشاری برای حالات مختلف بتن خود تراکم در سن ۲۸ روز (W = بتن خیس‌انده شده و D = بتن خشک و S = بتن قرار داده‌شده در محلول پنج‌درصدی سولفات منیزیم) ۶۶
- شکل ۵۲-۱- تأثیر نانو خاک رس روی مدول الاستیک بتن بعد از سیکل سرمایش ۶۶
- شکل ۵۳-۱- مقایسه میزان استحکام فشاری بتن در دو حالت سیمان نانو کامپوزیت (NC) و سیمان دارای نانو ذرات رس (CNC) برای درصدهای وزنی متفاوت..... ۶۷
- شکل ۵۴-۱- تغییرات استحکام فشاری بتن در هنگام استفاده از درصدهای مختلفی از نانو رس..... ۶۸

- شکل ۵۵-۱- میزان نفوذ آب در بتن با درصدهای مختلف نانو ذرات رس، در طی دوره ۲۸ روز ۶۸
- شکل ۵۶-۱- خاصیت پرکنندگی حفره در هنگام استفاده از نانو رس به میزان ۱ درصد وزنی ۶۹
- شکل ۵۷-۱- ساختار اکسید گرافن ۷۱
- شکل ۵۸-۱- مقایسه اندازه نانو ذراتی مانند CNTs و GO با دیگر مواد مکمل بتن ۷۱
- شکل ۵۹-۱- شماتیکی از واکنش گرافن و کریستال هیدراته سیمان ۷۲
- شکل ۶۰-۱- تصویر AFM از اکسید گرافن ۷۲
- شکل ۶۱-۱- شماتیکی از واکنش گرافن و سیمان ۷۳
- شکل ۶۲-۱- الف) منحنی تنش-کرنش ب) توزیع اندازه حفرات در حضور و غیاب GO ۷۳
- شکل ۶۳-۱- استحکام خمشی و فشاری سیمان سخت شده با مقادیر مختلف از GO ۷۴
- شکل ۶۴-۱- استحکام خمشی و فشاری ملات با مقادیر مختلف از GO ۷۵
- شکل ۶۵-۱- تصاویر SEM از تأثیر مقادیر مختلف از GO بر سیمان سخت شده ۷۶
- شکل ۶۶-۱- بررسی استحکام فشاری در غلظتهای مختلف از GO ۷۶
- شکل ۶۷-۱- تصاویر SEM از سیمان ترکیب شده با مقادیر مختلف از GO ۷۷
- شکل ۶۸-۱- تصاویر SEM از سیمان ترکیب شده با مقادیر مختلف از GO با گروه عاملی NH_2 ۷۷
- شکل ۶۹-۱- بررسی مقاومت الکتریکی بتن در غلظتهای مختلف از GO ۷۹
- شکل ۷۰-۱- الف) استحکام فشاری ب) استحکام خمشی بتن در غلظتهای مختلف از GO ۷۹
- شکل ۷۱-۱- بررسی استحکام تنشی ملات سیمان در غلظتهای مختلف از GO ۸۰
- شکل ۷۲-۱- تصاویر FESEM از ملات سیمانی شامل ۱/۵ درصد از GO در مقیاس $200\ \mu m$ بعد از گذشت ۲۸ روز از پخت، الف) و ب)، نحوه جوانه زنی C-S-H به وسیله صفحات GO و شکلگیری آن‌ها. ج) میکرو ترک‌های موجود بر صفحه GO تحت تنش کششی ۸۰
- شکل ۷۳-۱- جذب آب ملات سیمانی حاوی ۲/۵ درصد از GNPs مختلف ۸۱
- شکل ۷۴-۱- عمق نفوذ آب در بتن با مقادیر مختلف از GNP ۸۲
- شکل ۷۵-۱- نتایج آزمایش برای بتن با GNP الف) ضریب نفوذ کلراید، ب) عمق نفوذ کلراید، ج) مقدار کلراید ۸۴
- شکل ۷۶-۱- آلوتروپهای مختلف کربن ۸۵
- شکل ۷۷-۱- شکل گیری نانولوله‌ها از صفحات گرافیت ۸۵
- شکل ۷۸-۱- انواع مختلف CNTs ۸۶
- شکل ۷۹-۱- تصاویر SEM از توزیع ضعیف MWCNTs در داخل ماتریس سیمانی ۸۷

- شکل ۸۰-۱- تصاویر SEM از کاهش قطر کلوخه‌های MWCNTs پس از گذشت ۱ ساعت سنگ‌زنی مکانیکی ۸۸
- شکل ۸۱-۱- تصاویر TEM در سمت چپ و تصاویر SEM در سمت راست از الف) p-CNTs ب) a-CNTs ج) f-CNTs ۸۹
- شکل ۸۲-۱- الف) مدول گسیختگی ب) استحکام فشاری بتن در حضور و غیاب MWCNTs ۸۹
- شکل ۸۳-۱- نشست در حضور MWCNTs/cement برابر با ۰/۳۸ درصد (CNT-۱ series) و ۰/۷۵ درصد (CNT-۲ series) ۹۱
- شکل ۸۴-۱- تأثیر مقادیر مختلف از CNT و water/cement بر الف) اندازه‌گیری میزان افت ب) استحکام فشاری ۹۱
- شکل ۸۵-۱- کلوخه‌هایی از CNTs بر روی سطح نمونه (۰/۵، w/c = ۰/۵) درصد از CNTs) ۹۲
- شکل ۸۶-۱- تغییر استحکام فشاری ملات به‌صورت تابعی از درصد CNTs در طی گذشت ۹۰ روز برای الف) ملات ب) بتن ۹۳
- شکل ۸۷-۱- نتایج کرنش نهایی برای نمونه‌هایی با MWCNTs مختلف ۹۴
- شکل ۸۸-۱- تصاویر SEM سطوح شکست خمیر سیمان مسلح شده با نانولوله‌های کربنی چند جداره (الف) پراکنده‌سازی نشده و (ب) پراکنده‌سازی شده ۹۴
- شکل ۸۹-۱- منحنی احتمال برای مدول الاستیک خمیر سیمان در طی ۲۸ روز (w/c=۰/۳) و خمیر سیمان مسلح شده با ۰/۲۵، ۰/۴۸ و ۰/۸ درصد وزنی MWCNT ۹۵
- شکل ۹۰-۱- انقباض خود به خودی خمیر سیمان (w/c=۰/۳) و خمیر سیمانی مسلح شده با ۰/۲۵ و ۰/۴۸ درصد وزنی MWCNT ۹۵
- شکل ۹۱-۱- ترمیم ترک در بتن حاوی نانولوله‌های کربنی ۹۶
- شکل ۹۲-۱: رابطه بین مقدار جذب آب و زمان جذب آب ترکیبات سیمانی در حضور و غیاب MWCNTs ۹۷
- شکل ۹۳-۱- تصویر SEM از نانو ذرات اکسید تیتانیوم ۹۸
- شکل ۹۴-۱- مطالعه تأثیر افزودن درصدهای مختل ذرات نانو اکسید تیتانیوم بر ساختار بتن خود تراکم (a = درصد وزنی صفر و b=چهار درصد وزنی) ۹۹
- شکل ۹۵-۱- تغییرات استحکام فشاری نسبت مقاومت ترک‌خوردگی در حضور درصدهای متفاوتی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود تراکم ۹۹
- شکل ۹۶-۱- تأثیر افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن ۱۰۰
- شکل ۱-۲. اثر افزودن سرباره گرانوله بر زمان پخت بتن برای دستیابی به استحکام کافی ۱۱۹
- شکل ۳-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر تخلخل‌های ساختاری بتن ۱۲۱

- شکل ۴-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر تحرک و ضریب نفوذ کلر در بتن..... ۱۲۱
- شکل ۵-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر مقاومت خمشی بتن..... ۱۲۲
- شکل ۶-۲- تأثیر افزودن درصد‌های مختلف سرباره گرانوله بر استحکام فشاری بتن..... ۱۲۲
- شکل ۷-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر تنش باقیمانده در ساختار بتن..... ۱۲۲
- شکل ۸-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر میزان شار عبوری یون‌ها در آزمون RCPT..... ۱۲۳
- شکل ۹-۲- ساختار اکسیدگرافن..... ۱۲۴
- شکل ۱۰-۲- تأثیر اکسیدگرافن بر استحکام فشاری بتن زمان‌های مختلف عمل‌آوری..... ۱۲۴
- شکل ۱۱-۲- تأثیر اکسید گرافن بر زمان عمل‌آوری بتن..... ۱۲۵
- شکل ۱۲-۲- تأثیر افزودن اکسیدگرافن بر مقاومت خمشی بتن..... ۱۲۵
- شکل ۱۳-۲- تأثیر افزودن اکسیدگرافن بر مقاومت فشاری بتن..... ۱۲۶
- شکل ۱۴-۲- تأثیر اکسیدگرافن بر حفرات انقباضی در عمل‌آوری بتن..... ۱۲۶
- شکل ۱۵-۲- تأثیر اکسیدگرافن بر ساختار تخلخل‌های بتن، ترکیبات G₁ G₂ G₃ به ترتیب شامل ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۶ درصد اکسیدگرافن هستند..... ۱۲۷
- شکل ۱۶-۲- تأثیر نانو گرافن بر غلظت یون کلر نفوذی در بتن..... ۱۲۷
- شکل ۱۷-۲- تأثیر نانوگرافن بر عمق نفوذ کلر در بتن..... ۱۲۸
- شکل ۱۸-۲- شماتیک وقوع خوردگی در بتن‌های مسلح..... ۱۲۹
- شکل ۱۹-۲- آنالیز xrd سرباره گرانوله..... ۱۳۵
- شکل ۲۰-۲- آنالیز عنصری EDS اکسید گرافن..... ۱۳۵
- شکل ۲۱-۲- تصاویر FE-SEM نانوصفحات اکسید گرافنبا ضخامت حدودی ۷/۷ نانومتر..... ۱۳۷
- شکل ۲۲-۲- آنالیز XRD اکسید گرافن قبل از پراکنده‌سازی در آب..... ۱۳۷
- شکل ۲۳-۲- دستگاه آلتروسونیک برای پراکنده‌سازی اکسیدگرافن در آب و ساخت محلول..... ۱۳۸
- شکل ۲۴-۲- محلول‌های تهیه شده از اکسید گرافن به منظور افزودن در ملات سیمانی..... ۱۳۸
- شکل ۲۵-۲- مراحل قالب‌ریزی نمونه‌های بتنی..... ۱۴۰
- شکل ۲۶-۲- عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در حمام آب و آهک..... ۱۴۱
- شکل ۲۷-۲- نمونه‌های بتنی تهیه شده برای آزمون امپدانس الکتروشیمیایی..... ۱۴۲
- شکل ۲۸-۲- غوطه‌وری نمونه‌های بتنی پیش از انجام آزمون امپدانس به مدت ۳ روز..... ۱۴۲
- شکل ۲۹-۲- نحوه انجام آزمون الکتروشیمیایی امپدانس..... ۱۴۳

- شکل ۳۰-۲- آزمون استحکام خمشی بر روی نمونه‌های بتنی..... ۱۴۴
- شکل ۳۱-۲- آزمون استحکام فشاری بر روی نمونه‌های بتنی..... ۱۴۴
- شکل ۳۲-۲- شماتیک انجام آزمون مقاومت الکتریکی و نر بر روی نمونه‌های بتنی..... ۱۴۵
- شکل ۳۳-۲- محفظه انجام آزمون نفوذ تسریع یافته یون کلر..... ۱۴۶
- شکل ۳۴-۲- نحوه انجام آزمون تسریع یافته نفوذ یون کلر RCPT..... ۱۴۶
- شکل ۳۵-۲- نحوه قرار گیری نمونه‌ها در آزمون نفوذ فشاری..... ۱۴۷
- شکل ۳۶-۲- پودرگیری از نمونه‌های بتنی..... ۱۴۸
- شکل ۳۷-۲- آنالیز شیمیایی یون کلر در نمونه‌های پودری بتن..... ۱۴۹
- شکل ۳۸-۲- تأثیر تغییرات GO و GGBFS بر الف) مقاومت فشاری، ب) مقاومت خمشی، ج) نتایج RCPT و د) مقاومت الکتریکی بتن..... ۱۵۱
- شکل ۳۹-۲- شماتیک دستگاه آزمون نفوذ فشاری کلر برای نمونه‌های بتنی..... ۱۵۲
- شکل ۴۰-۲- محفظه نگهداری نمونه بتنی در دستگاه نفوذ فشاری یون کلر..... ۱۵۲
- شکل ۴۱-۲- دستگاه ساخته شده برای انجام آزمون نفوذ فشار یون کلر بر روی نمونه‌های بتنی..... ۱۵۳
- شکل ۴۲-۲- مراحل تهیه نمونه برای بررسی ریزساختاری از نمونه‌های بتنی..... ۱۵۳
- شکل ۴۳-۲- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۱۵۴
- شکل ۴۴-۲- نمودار بد مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۱۵۴
- شکل ۴۵-۲- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۱۵۵
- شکل ۴۶-۲- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز..... ۱۵۵
- شکل ۴۷-۲- نمودار بد مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز..... ۱۵۵
- شکل ۴۸-۲- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز..... ۱۵۶
- شکل ۴۹-۲- نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری..... ۱۵۶
- شکل ۵۰-۲- نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری..... ۱۵۷
- شکل ۵۱-۲- نتایج بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی..... ۱۵۷
- شکل ۵۲-۲- نتایج بررسی اثر اکسیدگرافن در غیاب سرباره بر استحکام فشاری..... ۱۵۸
- شکل ۵۳-۲- نتایج بررسی اثر سرباره گرانوله در غیاب اکسید گرافن بر استحکام فشاری..... ۱۵۸
- شکل ۵۴-۲- نتایج بررسی اثر اکسیدگرافن بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی..... ۱۵۸
- شکل ۵۵-۲- نتایج بررسی اثر سرباره گرانوله بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی در غیاب اکسیدگرافن..... ۱۵۹

- شکل ۵۶-۲- مقایسه نتایج آزمون مقاومت الکتریکی ونر بر روی نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ و ۹۰ روز..... ۱۶۰
- شکل ۵۷-۲- نتایج بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی..... ۱۶۰
- شکل ۵۸-۲- نتایج بررسی تأثیر اکسید گرافن در غیاب سرباره بر مقاومت الکتریکی..... ۱۶۱
- شکل ۵۹-۲- نتایج بررسی تأثیر سرباره گرانوله در غیاب اکسیدگرافن بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی ۱۶۱
- شکل ۶۰-۲- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه..... ۱۶۲
- شکل ۶۱-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان پایین..... ۱۶۳
- شکل ۶۲-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان طولانی..... ۱۶۳
- شکل ۶۳-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان پایین..... ۱۶۳
- شکل ۶۴-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان بالا..... ۱۶۴
- شکل ۶۵-۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه بدون پوزولان در فشار و زمان کم..... ۱۶۴
- شکل ۶۶-۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه های بتنی بدون پوزولان در فشار و زمان بالا..... ۱۶۴
- شکل ۶۷-۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه حاوی پوزولان در فشار و زمان کم..... ۱۶۵
- شکل ۶۸-۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه های بتنی حاوی پوزولان در فشار و زمان بالا..... ۱۶۵
- شکل ۶۹-۲- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای کم در نمونه بدون پوزولان..... ۱۶۵
- شکل ۷۰-۲- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه بدون پوزولان..... ۱۶۶
- شکل ۷۱-۲- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای کم در نمونه حاوی پوزولان..... ۱۶۶
- شکل ۷۲-۲- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه حاوی پوزولان..... ۱۶۶
- شکل ۷۳-۲- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد..... ۱۶۷
- شکل ۷۴-۲- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد ۱۶۷
- شکل ۷۵-۲- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد ۱۶۸
- شکل ۷۶-۲- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای پایین..... ۱۶۸
- شکل ۷۷-۲- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای بالا..... ۱۶۸
- شکل ۷۸-۲- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۳ روز..... ۱۶۹
- شکل ۷۹-۲- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۱ روز..... ۱۶۹
- شکل ۸۰-۲- مقایسه ریزساختار نمونه‌های بتنی (۱) بدون پوزولان و (۲) حاوی پوزولان سرباره و اکسیدگرافن ۱۷۰
- شکل ۸۱-۲- ریزساختار نمونه بتنی بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۱۷۰
- شکل ۸۲-۲- ریزساختار نمونه بتنی حاوی سرباره گرانوله و اکسیدگرافن بعد از ۲۸ روز..... ۱۷۱

- شکل ۸۳-۲- آنالیز عنصری از نقاط مشخص شده A و B در تصاویر ریزساختار نمونه بتنی پوزولانی..... ۱۷۱
- شکل ۸۴-۲- ریزساختار نمونه‌های بتنی بعد از آزمون نفوذ فشاری: ۱-a و ۱-b مربوط به نمونه بدون پوزولان، ۲-a و ۲-b مربوط به نمونه پوزولانی می‌باشند..... ۱۷۲
- شکل ۸۵-۲- آنالیز عنصری از بخش بالا و پایین نمونه‌ها بعد از آزمون نفوذ فشاری: ۱-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه بدون پوزولان، ۱-b مربوط به بخش بالایی نمونه بدون پوزولان، ۲-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه پوزولانی و ۲-b مربوط به بخش بالایی نمونه پوزولانی..... ۱۷۲
- شکل ۱-۳- طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) نانواکسیدگرافن استفاده شده (تولید شده به روش هامر)..... ۱۷۵
- شکل ۲-۳- نمودار پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به نانواکسید گرافن..... ۱۷۶
- شکل ۳-۳- آنالیز عنصری EDS اکسید گرافن..... ۱۷۷
- شکل ۴-۳- تصاویر FE-SEM تهیه شده از نانوصفحات اکسیدگرافن..... ۱۷۸
- شکل ۵-۳- آنالیز XRD سرباره گرانوله..... ۱۷۸
- شکل ۶-۳- نتایج آزمون‌های مکانیکی فشاری و خمشی برای اختلاط‌های گوناگون پس از ۲۸ روز..... ۱۸۱
- شکل ۷-۳- نتایج آزمون‌های مکانیکی فشاری و خمشی برای اختلاط‌های گوناگون پس از ۹۰ روز..... ۱۸۱
- شکل ۸-۳- نتایج بررسی اثر سرباره و اکسیدگرافن به تنهایی بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی..... ۱۸۲
- شکل ۹-۳- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر مبنای مقادیر افزوده شده اکسیدگرافن پس از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز..... ۱۸۳
- شکل ۱۰-۳- اثر اکسیدگرافن بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی..... ۱۸۴
- شکل ۱۱-۳- اثر سرباره گرانوله بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی در غیاب اکسیدگرافن..... ۱۸۴
- شکل ۱۲-۳- تاثیر زمان عمل آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی..... ۱۸۶
- شکل ۱۳-۳- مقایسه نتایج آزمون مقاومت الکتریکی و بر روی نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ و ۹۰ روز..... ۱۸۸
- شکل ۱۴-۳- اثر زمان عمل آوری بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی..... ۱۸۹
- شکل ۱۵-۳- تاثیر اکسید گرافن در غیاب سرباره بر مقاومت الکتریکی..... ۱۹۰
- شکل ۱۶-۳- نتایج بررسی تاثیر سرباره گرانوله در غیاب اکسیدگرافن بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی ۱۹۱
- شکل ۱۷-۳- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه..... ۱۹۲
- شکل ۱۸-۳- تاثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان پایین..... ۱۹۳
- شکل ۱۹-۳- تاثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان طولانی..... ۱۹۴
- شکل ۲۰-۳- تاثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان پایین..... ۱۹۵

- شکل ۳-۲۱- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان بالا..... ۱۹۵
- شکل ۳-۲۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه بدون پوزولان در فشار ۳ بار و زمان ۱ روز..... ۱۹۶
- شکل ۳-۲۳- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه حاوی پوزولان در فشار و زمان کم..... ۱۹۶
- شکل ۳-۲۴- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه های بتنی حاوی پوزولان در فشار و زمان بالا..... ۱۹۷
- شکل ۳-۲۵- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای کم در نمونه بدون پوزولان..... ۱۹۷
- شکل ۳-۲۶- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه بدون پوزولان..... ۱۹۸
- شکل ۳-۲۷- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای کم در نمونه حاوی پوزولان..... ۱۹۹
- شکل ۳-۲۸- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه حاوی پوزولان..... ۱۹۹
- شکل ۳-۲۹- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد..... ۲۰۰
- شکل ۳-۳۰- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد..... ۲۰۱
- شکل ۳-۳۱- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد..... ۲۰۲
- شکل ۳-۳۲- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد..... ۲۰۳
- شکل ۳-۳۳- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای پایین..... ۲۰۳
- شکل ۳-۳۴- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای بالا..... ۲۰۴
- شکل ۳-۳۵- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۳ روز..... ۲۰۴
- شکل ۳-۳۶- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۱ روز..... ۲۰۵
- شکل ۳-۳۷- پارامترهای مختلف در تحلیل طیف امپدانس یک فلز..... ۲۰۶
- شکل ۳-۳۸- مدار معادل رندلر..... ۲۰۷
- شکل ۳-۳۹- یک مدار معادل پیشنهادی برای بتن..... ۲۰۷
- شکل ۳-۴۰- مجموعه از مدارهای معادل برای تحلیل امپدانس نمونه‌های بتنی، R_t مقاومت انتقال بار، R_1 و R_2 مقاومت اهمیک، C_d خازن لایه دوگانه، C_1 و C_2 خازن معمولی، CPE عنصر فاز ثابت، ZD المان نفوذی واربرگ..... ۲۰۸
- شکل ۳-۴۰- مدار معادل آرماتور فولادی درون بتن..... ۲۰۹
- شکل ۳-۴۱- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۰
- شکل ۳-۴۲- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۰
- شکل ۳-۴۳- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۰
- شکل ۳-۴۴- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۱

- شکل ۳-۴۵- مقایسه نمودارهای نایکوئیست نمونه‌های پوزولانی و شاهد..... ۲۱۱
- شکل ۳-۴۶- نمودار بد مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۲
- شکل ۳-۴۷- نمودار بد مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۲
- شکل ۳-۴۸- مقایسه نمودارهای بد-فاز نمونه‌های بتنی شاهد و پوزولانی..... ۲۱۳
- شکل ۱-۲۹- برون‌یابی داده‌های تجربی نمونه حاوی پوزولان با مدار معادل انتخاب شده در نرم افزار Zview..... ۲۱۳
- شکل ۳-۴۹- مقایسه نمودارهای بد نمونه‌های بتنی شاهد و پوزولانی..... ۲۱۴
- شکل ۳-۵۰- مدار معادل اولیه انتخاب شده به منظور تحلیل داده‌های امپدانس..... ۲۱۴
- شکل ۳-۵۱- برون‌یابی داده‌های تجربی نمونه بدون پوزولان با مدار معادل انتخاب شده در نرم افزار Zview..... ۲۱۵
- شکل ۳-۵۲- مقایسه ریزساختار نمونه‌های بتنی (۱) بدون پوزولان و (۲) حاوی پوزولان سرباره و اکسیدگرافن..... ۲۱۶
- شکل ۳-۵۳- ریزساختار نمونه بتنی بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۶
- شکل ۳-۵۴- ریزساختار نمونه بتنی حاوی سرباره گرانوله و اکسیدگرافن بعد از ۲۸ روز..... ۲۱۷
- شکل ۳-۵۵- آنالیز عنصری از نقاط مشخص شده A و B در تصاویر ریزساختار نمونه بتنی پوزولانی..... ۲۱۸
- شکل ۳-۵۶- تصاویر ماکرو از سطوح نمونه‌های (۱) بدون پوزولان و (۲) پوزولانی بعد از انجام آزمون نفوذ فشاری..... ۲۱۸
- شکل ۳-۵۷- ریزساختار نمونه‌های بتنی بعد از آزمون نفوذ فشاری: ۱-a و ۱-b مربوط به نمونه بدون پوزولان، ۲-a و ۲-b مربوط به نمونه پوزولانی می‌باشند..... ۲۱۹
- شکل ۳-۵۸- آنالیز عنصری از بخش بالا و پایین نمونه‌ها بعد از آزمون نفوذ فشاری: ۱-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه بدون پوزولان، ۱-b مربوط به بخش بالایی نمونه بدون پوزولان، ۲-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه پوزولانی و ۲-b مربوط به بخش بالایی نمونه پوزولانی..... ۲۲۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- طرح اختلاط بتن ۵
- جدول ۱-۲- نرخ خوردگی و استحکام فشاری نمونه‌های بتنی ۵
- جدول ۱-۳- ترتیب اختلاط نمونه‌های بتنی ۶
- جدول ۱-۴- ترکیب شیمیایی محلول مورد استفاده برای آزمون‌های پتانسیل نیم‌پیل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی ۶
- جدول ۱-۵- ترتیب اختلاط نمونه‌های بتنی ۶
- جدول ۱-۶- خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی ۷
- جدول ۱-۷- پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از شبیه‌سازی پارامترهای طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با مدار معادل ۷
- جدول ۱-۸- مقادیر تخمینی کمی و کیفی خوردگی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف ۹
- جدول ۱-۹- پارامترهای حاصل از پلاریزاسیون آندی نمونه‌های بتنی مختلف در محلول سدیم کلراید ۳ درصد وزنی ۱۰
- جدول ۱-۱۰- میانگین مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف ۱۰
- جدول ۱-۱۱- مقایسه ضریب جذب آب نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف (حاوی مقادیر مختلفی از خاکستر بادی فعال شده و غیرفعال) ۱۰
- جدول ۱-۱۲- مقایسه جریان عبوری از نمونه‌های بتنی با مقادیر مختلف خاکستر بادی فعال شده و غیرفعال ۱۱
- جدول ۱-۱۳- تخلخل کلی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط متفاوت (نسبت آب به بایندر = ۰/۳) ۱۴
- جدول ۱-۱۴- تغییرات استحکام فشاری بتن (درصدهای مختلف جایگزینی دوده‌ی سیلیس باسیمان) با زمان [۱۴] ۱۴
- جدول ۱-۱۵- تغییرات استحکام فشاری بتن با ترتیب اختلاط مختلف با زمان ۱۵
- جدول ۱-۱۶- تغییرات استحکام فشاری بتن با ترتیب اختلاط مختلف با زمان ۱۵
- جدول ۱-۱۷- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتن با ترتیب اختلاط مختلف با زمان ۱۶
- جدول ۱-۱۸- تأثیر نوع آگرگات بر استحکام خمشی بتن با ۱۵ درصد دوده‌ی سیلیس طی دوره‌های زمانی مختلف ۱۸
- جدول ۱-۱۹- تغییرات مدول الاستیک بتن با درصدهای مختلف دوده‌ی سیلیس طی دوره‌های زمانی متفاوت ۱۹
- جدول ۱-۲۰- تغییرات مدول الاستیک نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلفی از دوده‌ی سیلیس و آگرگاتهای آهک، دولومیت، کوارتزیت و سرباره فولاد ۱۹
- جدول ۱-۲۱- ماکزیمم مقدار کرنش انقباضی پلاستیک نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف ۲۰

- جدول ۲۲-۱- تغییرات انقباض خودبه‌خودی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف ۲۰
- جدول ۲۳-۱- خزش بلوک‌های بتنی ۸۰ mm* ۲۷۰ mm (میکرو کرنش) ۲۱
- جدول ۲۴-۱- ترتیب اختلاط و استحکام کششی نمونه‌های بتنی ۲۸ روز ۲۳
- جدول ۲۵-۱- تأثیر درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان بر استحکام کششی نمونه‌های بتنی طی دوره‌های ۷ و ۲۸ روز ۲۳
- جدول ۲۶-۱- تأثیر درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان بر استحکام خمشی نمونه‌های بتنی طی دوره‌های ۷ و ۲۸ روز ۲۳
- جدول ۲۷-۱- طرح اختلاط نمونه‌های حاوی سرباره گرانوله فعال‌شده با سدیم سیلیکات و متاسیلیکات ۲۸
- جدول ۲۸-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی (مقادیر برای یک مترمربع است) ۳۳
- جدول ۲۹-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی (kg m^{-3}) ۳۶
- جدول ۳۰-۱- مقدار کرنش نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف پس از ۲۰۰ روز ۴۲
- جدول ۳۱-۱- تغییرات نفوذپذیری کلراید برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف ۴۳
- جدول ۳۲-۱- مقادیر pH، مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف و کاهش وزن آرماتور فولادی در آن‌ها ۴۳
- جدول ۳۳-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مختلف ۴۴
- جدول ۳۴-۱- استحکام، وزن واحد خشک و ضریب موینگی نمونه‌های بتنی مختلف ۴۵
- جدول ۳۵-۱- دانسیته جریان خوردگی حاصل از پلاریزاسیون خطی برای نمونه‌های بتنی مختلف ۴۶
- جدول ۳۶-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مختلف ۴۶
- جدول ۳۷-۱- خواص مکانیکی و دانسیته نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط متفاوت پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محفظه بخار ۴۷
- جدول ۳۸-۱- تخمین عمر سازه‌های بتنی با عمق پوشش ۵۰ mm ۴۸
- جدول ۳۹-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مورد مطالعه ۴۸
- جدول ۴۰-۱- استحکام فشاری، نفوذپذیری یون کلراید و قیمت نسبی نمونه‌های بتنی ۴۸
- جدول ۴۱-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی (مقادیر افزودنی‌ها برحسب وزن مقدار وزن سیمان است) ۴۹
- جدول ۴۲-۱- ضریب جذب آب اولیه خمیر سیمان قبل و بعد از عملیات سطحی ($\text{mg/cm}^2\text{s}^{-0.5}$) ۶۳
- جدول ۴۳-۱- اثرات نانو خاک رس روی مقاومت به نفوذ یون کلراید ۶۶
- جدول ۴۴-۱- خواص فیزیکی GNPs مورد استفاده در طی این پژوهش ۸۱
- جدول ۴۵-۱- خواص MWCNTs مختلف پراکنده‌شده در سیمان ۸۸

- جدول ۴۶-۱- نتایج حاصل از استحکام فشاری و مدول گسیختگی در بتن در غیاب و حضور MWCNTs ۹۰
- جدول ۴۷-۱- پارامترهای حاصل از نشست و استحکام فشاری ۹۲
- جدول ۴۸-۱: ضریب نفوذ آب سه نوع کامپوزیت سیمانی ۹۷
- جدول ۴۹-۱- طرح مورد اختلاط در دو سناریو[.....] ۱۰۵
- جدول ۵۰-۱- نتایج ارزیابی اقتصادی سناریوها..... ۱۰۵
- جدول ۵۱-۱- مشخصات ماده ارائه شده توسط شرکتهای سامانه فناوران دانشگاه و مهرگان شیمی..... ۱۰۵
- جدول ۵۲-۱- نتایج ارزیابی اقتصادی اکسید گرافن موجود در شرکت ایران تجارت..... ۱۰۶
- جدول ۵۳-۱- مشخصات GO ارائه شده توسط شرکت پیشروان فناوری..... ۱۰۶
- جدول ۵۴-۱- لیست قیمت GO ارائه شده توسط شرکت پیشروان فناوری..... ۱۰۶
- جدول ۵۵-۱- فهرستی از قیمت‌های GO ارائه شده توسط شرکت NAMAGO..... ۱۰۷
- جدول ۵۶-۱- فهرستی از قیمت‌های GO ارائه شده توسط شرکت تدبیرگران کیمیا..... ۱۰۹
- جدول ۵۷-۱: قیمت فروش نانولوله‌های کربنی در پژوهشگاه صنعت نفت..... ۱۱۰
- جدول ۵۸-۱: مشخصات CNTs ارائه شده توسط شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان..... ۱۱۰
- جدول ۵۹-۱- مشخصات ماده ارائه شده توسط شرکت مهرگان شیمی..... ۱۱۱
- جدول ۶۰-۱- مشخصات انواع نانولوله‌های کربنی چند دیواره ارائه شده توسط شرکت نانوتکنولوژی..... ۱۱۱
- جدول ۲-۱- آنالیز شیمیایی سیمان پورتلند نوع ۲ مطابق با استانداردهای ASTM C۱۱۴ و ASTM C۱۹۱ و زمان هیدراتاسیون مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۲..... ۱۳۳
- جدول ۲-۲- مقاومت فشاری ملات سیمان پرتلند نوع ۲ طبق ASTM C۱۰۹..... ۱۳۳
- جدول ۲-۳- دانه‌بندی شن بر اساس استاندارد ASTM C106 and ASTM C117..... ۱۳۴
- جدول ۲-۴- دانه‌بندی سنگدانه بر اساس استانداردهای ASTM C106 and ASTM C117..... ۱۳۴
- جدول ۲-۵- آنالیز xrd و XRF سرباره گرانوله..... ۱۳۵
- جدول ۲-۶- آنالیز عنصری اکسید گرافن..... ۱۳۶
- جدول ۲-۷- خواص فیزیکی اکسید گرافن..... ۱۳۷
- جدول ۲-۸- مشخصات طرح اختلاط‌های استفاده شده در ساخت نمونه‌های بتنی..... ۱۳۹
- جدول ۲-۹- معیار ارزیابی میزان بار عبوری در آزمون RCPT..... ۱۴۶
- جدول ۲-۱۰- داده‌های وارد شده در نرم‌افزار جهت بهینه سازی..... ۱۵۰

جدول ۲-۱۱	مدل‌های انتخاب شده به منظور برون‌یابی پاسخ‌ها.....	۱۵۰
جدول ۲-۱۲	کد مرتبط با هر طرح اختلاط.....	۱۵۷
جدول ۲-۱۳	نتایج آزمون و نر برای نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ روز.....	۱۵۹
جدول ۲-۱۴	نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT بعد از ۲۸ و ۹۰ روز.....	۱۶۲
جدول ۳-۱	آنالیز XRD و XRF سرباره گرانوله.....	۱۷۹
جدول ۳-۲	بهترین نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی.....	۱۸۵
جدول ۳-۳	نتایج آزمون مقاومت الکتریکی و نر برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های گوناگون.....	۱۸۷
جدول ۳-۴	معیار طبقه‌بندی مقاومت بتن در برابر نفوذ کلر بر اساس مقدار بار عبوری در آزمون RCPT.....	۱۸۷
جدول ۳-۵	نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT بعد از ۲۸ و ۹۰ روز.....	۱۹۳
جدول ۳-۶	پارامترهای محاسبه شده در نرم‌افزار Zview.....	۲۱۴

فصل لول: بررسی کامل منابع اطلاعاتی در خصوص انواع مواد افزودنی معدنی به بتن در مجاورت آب دریا و تأثیر هرکدام بر مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی

۱-۱ جمع‌آوری و بررسی اطلاعات در خصوص انواع مواد افزودنی معدنی به بتن در مجاورت آب دریا در داخل و خارج از کشور

۱-۱-۱ مقدمه

در دو دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از مواد جدید اصلاح‌شده و یا در حال توسعه در سازه‌های بتنی به منظور ممانعت از آغاز خوردگی و یا کاهش سرعت و حتی متوقف کردن پیشروی خوردگی و همین‌طور آگاهی از مکانیزم کاری اساسی آن‌ها صورت گرفته است. در این میان استفاده از افزودنی‌های معدنی در بتن، به‌عنوان روش جدیدی جهت کاهش خوردگی آرماتور بتن مسلح مطرح گردیده است. این مواد افزودنی جدید اگر به درستی اعمال شوند، می‌توانند شروع خوردگی را به تعویق انداخته و یا از آن جلوگیری کنند. بعلاوه انتظار هیچ‌گونه اثرات زیان‌بار بر خواص بتن/ملاط تازه و سخت‌شده نمی‌رود و نیز سازگار با محیط‌زیست بوده و آن را آلوده نمی‌کند. استفاده از افزودنی‌ها به بتن باهدف بهبود خواص مهندسی بتن، افزایش طول عمر مفید سازه و کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی آتی پروژه‌های صنعتی و ساختمانی مهم کشور به‌ویژه در محیط‌های دریایی حاشیه خلیج فارس و دریاهای عمان و خزر اهمیت بسزایی داشته و مقرون به صرفه خواهد بود. افزودنی، ماده‌ای به‌غیراز سیمان پرتلند، سنگ‌دانه و آب است که به‌صورت پودر یا مایع، به‌عنوان یکی از مواد تشکیل‌دهنده بتن و برای اصلاح خواص بتن، کمی قبل از اختلاط، در حین اختلاط و یا قبل از ریختن به آن افزوده می‌شود. به‌عبارت دیگر، افزودنی‌ها اجزایی از بتن به‌غیراز سیمان هیدرولیکی، آب، سنگ‌دانه‌ها و الیاف هستند که برای اصلاح و بهبود خواص بتن و ملاط تازه و سخت‌شده، به بتن افزوده می‌شوند. افزودنی‌های بتن به دو گروه مواد افزودنی شیمیایی و معدنی تقسیم می‌شوند.

افزودنی‌های شیمیایی از فرآوری، ترکیب یا آمیزه کاری مواد آلی و معدنی در یک فرآیند شیمیایی به دست می‌آیند و در حالت‌های پودر یا مایع و در مقادیر کم معمولاً تا حداکثر پنج درصد وزن مواد سیمانی در زمان ساخت و اختلاط و یا درست پیش از ریختن بتن، به مخلوط اضافه می‌شوند. افزودنی‌های معدنی که یا به‌طور طبیعی یافت می‌شوند و یا از محصولات جانبی صنعتی هستند و برای بهبود و اصلاح خواص مخلوط‌های سیمانی در مقادیر مصرف عموماً بیشتر از پنج درصد وزن سیمان و در زمان اختلاط به بتن افزوده می‌شوند. در دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی و پژوهشی جهان در خصوص بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی بر روی افزایش مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی سازه‌های بتنی صورت گرفته است. به دلیل خوردگی زیاد سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر روی تأثیر مواد افزودنی معدنی بر خواص خوردگی سازه‌های بتنی در آب دریا متمرکز شده‌اند. پژوهشگران با استفاده از مواد افزودنی مختلف، رفتار خوردگی آرماتورهای فولادی سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار داده و با تعیین نوع و میزان بهینه ماده افزودنی مناسب، باعث افزایش مقاومت به خوردگی بتن گردیده‌اند. اغلب این افزودنی‌های معدنی، بومی و یا محصولات جانبی صنایع بوده‌اند. در طول تحقیقات انجام‌گرفته مواد افزودنی مختلف معدنی جهت بررسی مقاومت به خوردگی بتن مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از این میان به محصولات جانبی کارخانه‌های تولید فولاد، سرباره تولید فولاد، ضایعات کارخانه تولید مس، هیدروکسید، ضایعات معدنی فورستریت، الیوین، انواع پوزولان‌های طبیعی، زئولیت، دیاتومیت، کربن سیاه، اسکوریا، سیلیکات سدیم، متاکائولین، خاکستر بادی، دوده‌ی سیلیس، نیتريت سدیم، نیتريت کلسیم، ورنونیا

آمیگدالینا، پالمیتات کلسیم، رمیوم (حاوی خاکستر آتش‌فشانی و پرلیت)، خاکستر سبوس برنج، میکرو سیلیکا، خاکستر تفراله نیشکر، باریت، پومیس، کولمانیت، گابرو، بازالت، سنگ‌آهک و ... می‌توان اشاره نمود.

مقدار تخلخل، نوع پراکندگی و اتصال تخلخل‌های موجود در بتن ازجمله عواملی هستند که نفوذپذیری بتن در برابر یون‌های خورنده از قبیل کلراید، اکسیژن و آب و همچنین خواص مکانیکی بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ساختار بتن شامل سه فاز می‌شود که عبارت‌اند از سیمان، آگرگات^۱ و ناحیه انتقالی^۲ (فضای بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه). در سیمان سخت‌شده دو نوع تخلخل وجود دارد که شامل شکاف‌ها و حفرات ژل^۳ است. حفرات ژل که نتیجه فرآیند هیدراسیون^۴ سیمان هستند به‌طور ذاتی در بتن وجود دارند و ۲۸ درصد حجم بتن را در برمی‌گیرند اما اندازه کوچک آن‌ها (کوچک‌تر از ۲ نانومتر) باعث می‌شود تا این حفرات تأثیر بسزایی بر نفوذپذیری کلراید نداشته باشند؛ اما شکاف‌ها زمانی به وجود می‌آیند که حفرات کافی برای پر کردن فضا وجود نداشته باشد و افزایش نسبت آب به سیمان باعث افزایش آن‌ها می‌شود. این شکاف‌ها مسیر مناسبی برای نفوذ فراهم می‌کنند. ناحیه انتقالی بتن نسبت به خمیر سیمان حفرات و شکاف‌های بیشتری دارد و متصل بودن حفرات و شکاف‌ها در این ناحیه نفوذ در بتن را راحت‌تر می‌کند [۱]. با این وجود اتصال کلراید^۵ سبب می‌شود تا مقدار نفوذ کم شده و شروع واکنش‌های خوردگی به تأخیر بیفتد. حتی با شروع واکنش‌های خوردگی، اتصال کلراید باعث می‌شود تا سرعت واکنش‌ها کم باشد. استفاده از افزودنی‌هایی نظیر خاکستر بادی^۶، سرباره^۷ و دوده سیلیسی (دوده‌ی سیلیس^۸) افزایش اتصال کلراید را به دنبال دارد. در این حالت کلراید با تری کلسیم آلومینات (C₃A) وارد واکنش شده و کلسیم کلراید آلومینات تولید می‌شود که تشکیل آن باعث مسدود شدن راه‌های نفوذ آب، کلراید و هوا می‌شود [۱]. عمق به‌کارگیری آرماتور در بتن نیز بر سرعت خوردگی آن تأثیرگذار است. باوجوداینکه امکان نفوذ یون کلراید به عمق‌های مختلف وجود دارد، اما اکسیژن برای نفوذ به عمق بتن نسبت به کلراید قابلیت کمتری دارد؛ که نتیجه آن کاهش سرعت خوردگی با افزایش عمق است [۱]. نفوذ اکسیژن به بتن به نسبت آب به سیمان و رطوبت نسبی بتن بستگی دارد. هر چه میزان رطوبت نسبی بتن بیشتر باشد نفوذپذیری اکسیژن کمتر می‌شود و با توجه به اینکه عمق بتن نسبت به سطح آن رطوبت نسبی بالاتری دارد نفوذ اکسیژن با افزایش عمق کم می‌شود [۱]. نسبت آب به سیمان نیز از دیگر پارامترهای موثر بر خواص بتن است که تأثیر بسزایی بر سرعت خوردگی آرماتورها در بتن مسلح دارد، به‌طوری‌که در مبحث خوردگی نسبت آب به سیمان کمتر ترجیح داده می‌شود. درواقع سرعت خوردگی در بتن با نسبت آب به سیمان کمتر، حتی در حضور غلظت‌های بالای کلراید، نسبت به حالتی که بتن مقدار آب به سیمان بیشتر (با غلظت کلراید کمتر) دارد، بیشتر است. واکنش‌های خوردگی در حالتی که رطوبت نسبی تقریباً ۹۰ درصد باشد کنترل‌کننده سینتیک خوردگی خواهد بود. همچنین مقدار رطوبت آستانه‌ای برای

¹ Aggregate

² Transition zone

³ Gel pore

^۴ ترکیب شیمیایی سیمان با آب را هیدراسیون سیمان می‌نامند. بلافاصله پس از مخلوط شدن سیمان با آب، خمیری تشکیل می‌شود که در آن حفره‌های واقع بین ذرات سیمان مرتبط با یکدیگرند و بوسیله آب پر شده‌اند. این آب که دارای حالت نسبتاً پخش شده ایست بنام آب موئین موسوم است.

^۵ فرآیندی که در آن یون کلراید از محلول جدا شده و با زمینه بتنی وارد واکنش می‌شود

⁶ Fly ash

⁷ Slag

⁸ Silica fume

پیشروی قابل توجه خوردگی ۸۵ درصد در نظر گرفته شده و در رطوبت‌های کمتر از آن سرعت خوردگی محدود است. افزایش رطوبت نسبی بتن کاهش مقاومت الکتریکی را به دنبال دارد و از طرفی کاهش نفوذ اکسیژن را سبب می‌شود. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر خواص بتن نسبت آب به بایندر (سیمان + مواد افزودنی) است. افزایش مقدار آب به بایندر مقدار آستانه‌ای کلراید مورد نیاز برای شروع واکنش‌های انحلال را کاهش می‌دهد. به گونه‌ای که افزایش مقدار آب به بایندر از ۰/۴ به ۰/۶ مقدار آستانه‌ای کلراید را به میزان ۴۰ درصد کاهش می‌دهد [۱]. وجود ترک در بتن نیز شروع واکنش‌های خوردگی را تسریع می‌بخشد اما تأثیری بر سرعت پیشرفت خوردگی ندارد. در ساختارهای غوطه‌ور در محلول کلرایددار پهنای ترک بیش از ۳ میلی‌متر می‌تواند تأثیر منفی بر خواص خوردگی دارد. باین وجود، باید توجه داشت که اثرگذاری نسبت آب به سیمان بر خواص خوردگی از وجود یا عدم وجود ترک در ساختمان بتن بیشتر است. با توجه به مطالب مذکور، تغییر ترکیب بتن می‌تواند سبب ایجاد تغییراتی در ریزساختار آن شود و در نهایت خواص آن را تحت تأثیر قرار دهد. بدین منظور افزودنی‌های مختلف از قبیل خاکستر بادی، دوده‌ی سیلیس، سرباره و متاکائولن^۱ به عنوان مواد جایگزین سیمان (به صورت جزئی) مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه تأثیر به کارگیری هر یک از این افزودنی‌ها بر خواص بتن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۱-۱ خاکستر بادی

خاکستر بادی از استخراج گازهای خروجی کوره‌های آتش با سوخت زغال حاصل می‌شود که جز مصالح زائد و محصولات جانبی نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد. اندازه ذرات خاکستر بادی بین ۱۰ تا ۴۰ میکرون است که انواع ریزتر نیز دارد. سطح ویژه خاکستر بادی معمولی بین ۰/۴ تا ۰/۷ مترمربع در هر گرم است که در انواع ریز ممکن است به شدت افزایش یابد. در کشورهایی که نیروگاه زغال سنگی دارند، خاکستر بادی قابل توجهی تولید می‌گردد و در ساخت سیمان آمیخته و یا به صورت افزودنی بکار می‌رود. استفاده از خاکستر بادی در ترکیب بتن سبب ایجاد ساختاری با تخلخل بیشتر می‌شود؛ اما عدم پیوستگی این تخلخل‌ها کاهش نفوذپذیری در بتن را در پی دارد. یکی از محدودیت‌های استفاده از خاکستر بادی در ترکیب بتن افزایش زمان عمل‌آوری^۲ بتن است، اما صرف نظر از زمان عمل‌آوری بیشتر، نفوذپذیری (اکسیژن و آب) بتن حاوی خاکستر بادی نسبت به بتن فاقد خاکستر بادی کمتر است [۱]. وجود خاکستر بادی با مسدود کردن راه‌های نفوذ، مقدار اکسیژن موجود روی سطح فولاد را کاهش می‌دهد. بررسی‌ها نشان داده که جایگزینی خاکستر بادی با سیمان تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار pH ایجاد نمی‌کند. در برخی از گزارش‌ها عنوان شده که استفاده از خاکستر بادی کاهش مقدار آستانه‌ای کلراید برای شروع واکنش‌های خوردگی را به همراه دارد، هرچند که حضور خاکستر بادی به دلیل کاهش نفوذپذیری کلراید تأثیر مثبتی بر افزایش مقاومت به خوردگی دارد. باید به این نکته توجه داشت که مقدار کلراید آستانه‌ای برای شروع واکنش‌های خوردگی نمی‌تواند به عنوان معیاری برای شروع واکنش‌های خوردگی در نظر گرفته شود؛ چراکه پارامترهایی از قبیل نفوذپذیری بتن نقش اساسی در تعیین شروع واکنش‌های خوردگی خواهند داشت [۱]. ساراواثی^۳ و همکاران تأثیر جایگزینی خاکستر بادی با سیمان بر خواص نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های نشان داده شده در جدول ۱-۱ را مورد بررسی قرار دادند [۲].

¹ Metakaolene

² Curing

³ Saraswathy

جدول ۱-۱- طرح اختلاط بتن [۲]

Ordinary Portland cement (100%)	OPC
OPC + Fly ash (75%:25%)	FA
OPC + FA + sodium hydroxide (1%)	A
OPC + FA + sodium hydroxide (1%)	B
+ sodium citrate (1%)	
OPC + FA + sodium hydroxide (1%)	C
+ sodium citrate (1%) + sodium stannate (1%)	
OPC + FA + sodium hydroxide (1%)	D
+ sodium citrate (1%) + sodium stannate (1%)	
+ calcium oxide (0.5%)	

جدول ۱-۲ نرخ خوردگی و استحکام فشاری نمونه‌های بتنی ساخته شده با طرح اختلاط‌های متفاوت را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از خاکستر بادی به‌تنهایی سطح خورده شده و سرعت خوردگی را کم کرده است. این نکته قابل توجه است که کاهش سرعت خوردگی در حدود ۴۰ درصد است، اما مساحت ناحیه خورده شده به میزان قابل توجهی کمتر شده است که ممکن است به خاطر موضعی بودن خوردگی باشد. همچنین افزودن خاکستر بادی به مقدار ناچیزی کاهش استحکام را به دنبال داشته است و تأثیر آن بر مقدار pH ناچیز بوده است.

جدول ۱-۲- نرخ خوردگی و استحکام فشاری نمونه‌های بتنی [۲]

System	Compressive strength (MPa)	Alkalinity (pH)	Free chloride contents (ppm)	Area rusted (%)	Corrosion rate (mmpy)	Durability factor
OPC	20.5±2	11.6	1500	80	0.229	—
OPC+FA	18.5±1.2	11.6	1560	5	0.154	1.50
A	21±1.5	12.0	1520	2	0.132	1.73
B	22±2.5	12.2	1540	2	0.098	2.34
C	23±2.0	12.2	1545	0.5	0.083	2.76
D	25.5±1.7	12.2	1510	0.5	0.029	7.90

رانگ لیو^۱ و همکاران تأثیر وجود یون‌های کربنات و سولفات بر مقدار کلراید آستانه‌ای برای خوردگی فولاد در بتن حاوی خاکستر بادی و بتن ساخته شده از سیمان پرتلند را مورد بررسی قرار دادند [۳]. جدول ۱-۳ و جدول ۱-۴ به ترتیب طرح اختلاط نمونه‌های بتنی و محلول مورد استفاده برای آزمون‌های پتانسیل نیم‌پیل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی را نشان می‌دهند نتایج نشان داد که وجود یون‌های کربنات و سولفات مقدار آستانه‌ای کلراید برای خوردگی آرماتور در بتن و بتن حاوی خاکستر بادی را کاهش می‌دهد، هرچند که تأثیری در زمان شروع خوردگی آرماتور ندارد. این رفتار به افزایش اندازه تخلخل‌های بتن در حضور یون‌های کربنات و همچنین کاهش مقاومت الکتریکی آن در حضور یون‌های سولفات نسبت داده شده است. در مقایسه با بتن بدون افزودنی، در بتن حاوی خاکستر بادی، نسبت آستانه‌ای کلراید کمتر است؛ اما در حضور خاکستر بادی زمان شروع واکنش‌های خوردگی آرماتور به تأخیر می‌افتد که این رفتار به کاهش نفوذپذیری بتن در حضور خاکستر بادی نسبت داده شد.

¹ Rong Liu

بررسی تأثیر خاکستر بادی بر خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های نشان داده شده در جدول ۱-۵ نشان داد که بتن حاوی خاکستر بادی در ابتدا نسبت به بتن فاقد خاکستر بادی استحکام فشاری کمتری دارد، اما پس از ۹۰ روز استحکام هر دو بتن تقریباً برابر می‌شود [۴]. همچنین در زمان‌های طولانی‌تر بتن حاوی خاکستر بادی استحکام بالاتری نسبت به بتن فاقد خاکستر بادی ارائه داد (جدول ۱-۶). غوطه‌وری نمونه‌های بتنی در محلول سدیم کلراید ۳/۵ درصد و بررسی تغییرات پتانسیل مدارباز^۱ آرماتور نشان داد که در حضور خاکستر بادی تغییرات پتانسیل مدارباز کمتر از حالتی است که خاکستر بادی در بتن استفاده نمی‌شود.

جدول ۱-۳- ترتیب اختلاط نمونه‌های بتنی [۳]

Sample	Mix proportion wt/ %		Binder-sand ratio	Water-binder ratio
	Cement	Fly ash		
B0	100	0	1:3	0.53
F1	85	15	1:3	0.53
F2	70	30	1:3	0.53

جدول ۱-۴- ترکیب شیمیایی محلول مورد استفاده برای آزمون‌های پتانسیل نیم‌پیل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی [۳]

Solution	Concentration of the exposure solution
1	5%NaCl
2	5%NaCl + 2% Na ₂ CO ₃
3	5%NaCl + 4% Na ₂ CO ₃
4	5%NaCl + 2% Na ₂ SO ₄
5	5%NaCl + 5% Na ₂ SO ₄

جدول ۱-۵- ترتیب اختلاط نمونه‌های بتنی [۴]

Concrete type	Water	Cement	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	W/B
OPC-0.50	185	370	—	754	969	0.5
FA20-0.50	185	296	74	744	956	0.5
OPC-0.35	158	450	—	672	1061	0.35
FA20-0.35	158	360	90	661	1043	0.35
OPC-0.31	155	500	—	626	1074	0.31
FA20-0.31	155	400	100	614	1054	0.31

مطابق جدول ۱-۷ که مقاومت انتقال بار آرماتورها را در نمونه‌های بتنی و در مدت‌زمان‌های متفاوت غوطه‌وری نشان می‌دهد، استفاده از خاکستر بادی تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت انتقال بار داشت. کاهش نسبت آب به سیمان نیز باعث افزایش مقاومت انتقال بار شد.

¹ Open circuit potential

حفرات ناشی از خوردگی را که پس از ۲۵۰ روز غوطه‌وری نمونه‌های بتنی در محلول سدیم کلراید ۳/۵ درصد وزنی ایجاد شد را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱-۱، جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی کاهش تعداد حفرات ناشی از خوردگی و همچنین کاهش اندازه حفرات را در پی داشته است. خاکستر بادی با کلسیم هیدروکسید وارد واکنش می‌شود و محصولات هیدراسیونی تولید می‌کند که باعث کاهش تخلخل بتن و افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌شود.

جدول ۶-۱- خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی [۴]

Concrete type	Slump (cm)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)			
			7 days	28 days	90 days	180 days
OPC-0.50	19.0	5.0	25.3	31.1	38.0	40.7
FA20-0.50	19.0	4.7	20.7	29.3	39.5	41.8
OPC-0.35	21.0	4.8	43.0	47.1	49.8	56.7
FA20-0.35	23.5	3.3	37.4	45.9	52.3	56.9
OPC-0.31	22.5	2.4	49.4	55.5	60.7	63.1
FA20-0.31	24.5	2.1	40.7	52.6	59.7	64.8

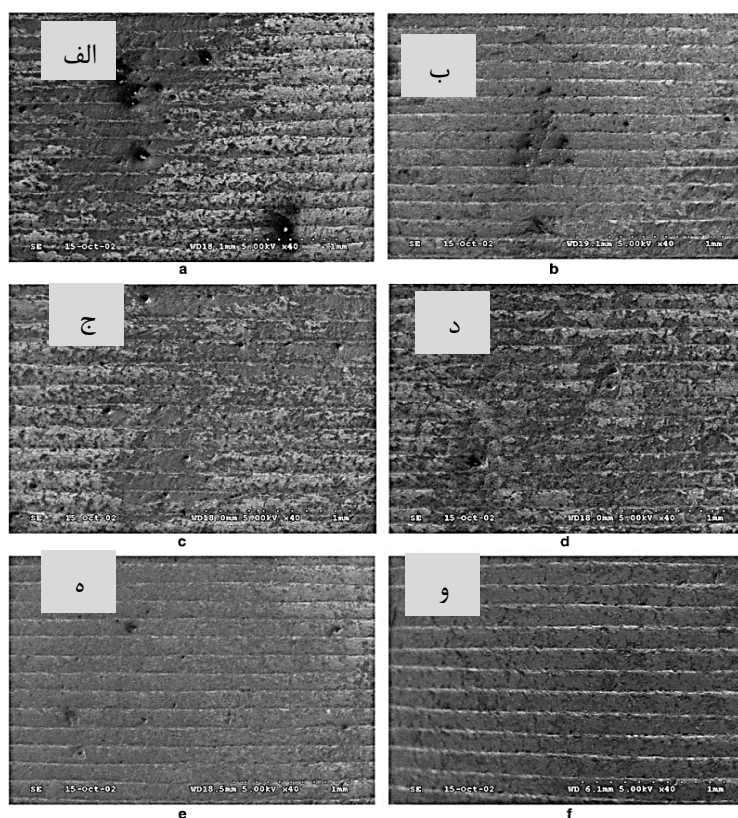
جدول ۷-۱- پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از شبیه‌سازی پارامترهای طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با مدار

معادل [۴]

Immersion time (day)	Mix type	R_s ($\Omega \text{ cm}^2$)	CPE1 ($\times 10^{-6} \text{ F/cm}^2$)	R_{HF} ($\Omega \text{ cm}^2$)	CPE2 ($\times 10^{-6} \text{ F/cm}^2$)	R_{ct} ($\Omega \text{ cm}^2$)
140	OPC-0.50	4172.1	51.3	1154.8	71.21	82,953.3
	FA20-0.50	6465.9	6.6	8340.5	84.9	84,789.6
	OPC-0.35	7261.9	7.5	6339	74.7	438,829.4
	FA20-0.35	10,162.3	4.1	20,127.2	79.8	650,917.7
	OPC-0.31	7942.53	5.8	22,206.8	38.83	$>10^8$
	FA20-0.31	17,926.94	14.9	35,876.9	74.54	$>10^8$
250	OPC-0.50	3934.7	55.3	1482.1	80.6	48,165.1
	FA20-0.50	7210.8	9.0	15,400.5	107.2	60,794.7
	OPC-0.35	11,022.6	9.7	6431.3	108.6	90,961.3
	FA20-0.35	13,542.6	2.7	26,193.1	100.6	374,887.7
	OPC-0.31	9188.4	4.5	38,818.6	33.9	$>10^8$
	FA20-0.31	17,177.1	20.8	43,762.3	52.03	$>10^8$

فعال‌سازی خاکستر بادی که به روش‌های مختلفی انجام می‌شود از عواملی است که باعث افزایش اثربخشی خاصیت پوزولانی آن می‌شود. در پژوهشی تأثیر حضور خاکستر بادی فعال‌شده بر مقاومت به خوردگی و استحکام بتن موردبررسی قرار گرفت [۵، ۶]. به‌منظور فعال‌سازی فیزیکی پس از الک شدن و حذف ذرات درشت، نمونه‌ها به‌صورت مکانیکی آسیاب شدند تا نمونه پودری با ذرات ریز حاصل شود. اندازه ذرات پس از آسیاب کاری مکانیکی در بازه ۴۰ تا ۹۰ میکرومتر بود. در فعال‌سازی حرارتی خاکستر بادی خام به مدت یک ساعت در یک بوته گرافیتی با دمای ۹۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و سپس در دمای اتاق سرد شد. فعال‌سازی حرارتی سبب شد تا کربن، سولفور و دیگر ناخالصی‌ها از نمونه‌های خارج شوند. در صورتی که ساختار خاکستر بادی حاوی کربن و سولفور سوخته نشده باشد، سبب تسریع خوردگی آرماتور در بتن می‌شود. به‌منظور فعال‌سازی شیمیایی، نمونه خام در محلول سدیم هیدروکسید حل شده و پس از عبور از صافی خشک شدند. علاوه بر این، در حین اختلاط کلسیم اکسید به مقدار ۵ درصد وزنی سیمان به مخلوط اضافه شد. پس‌از آن خاکستر بادی غیرفعال و خاکستر بادی فعال‌شده به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی جایگزین سیمان شد. نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بود و در حین

عملیات ملات ریزی، قالب تحت عملیات ویبراسیون قرار گرفت. ۲۴ ساعت بعد از عملیات بتن‌ریزی، نمونه‌ها از قالب خارج شده و برای جلوگیری از هرگونه آلودگی عملیات عمل‌آوری در آب مقطر به مدت ۲۸ روز انجام شد. پس از آن نمونه‌ها در دوره‌های ۱۵ روز در محلول سدیم کلراید ۳ درصد غوطه‌ور و سپس خشک شدند. همچنین بررسی خوردگی تسریع شده و پلاریزاسیون آندی نمونه‌ها در محلول سدیم کلراید ۳ درصد وزنی انجام شد. استحکام مکانیکی نیز پس از ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. خوردگی نمونه‌های بتنی غوطه‌ور شده در محلول سدیم کلراید را نشان می‌دهد. نیز مقدار جریان خوردگی نمونه‌های بتنی را در دو پتانسیل مختلف نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده بیانگر تأثیر مثبت خاکستر بادی بر افزایش مقاومت به خوردگی می‌باشد. حضور خاکستر بادی بدون تأثیرگذاری بر مقدار pH، مقدار کلراید آزاد موجود در بتن را کاهش می‌دهد. بهترین مقاومت به خوردگی مربوط به نمونه‌های فعال شده به روش شیمیایی است.



شکل ۱-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های بتنی الف) OPC-۰.۵۰، ب) FA۲۰-۰.۵۰، ج) OPC-۰.۳۵.

د) FA۲۰-۰.۳۵، ه) OPC-۰.۳۱ و و) FA۲۰-۰.۳۱ پس از ۲۵۰ ساعت غوطه‌وری [۴].

علاوه بر این، در حین اختلاط کلسیم اکسید به مقدار ۵ درصد وزنی سیمان به مخلوط اضافه شد. پس از آن خاکستر بادی غیرفعال و خاکستر بادی فعال شده به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی جایگزین سیمان شد. نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بود و در حین عملیات ملات ریزی، قالب تحت عملیات ویبراسیون قرار گرفت. ۲۴ ساعت بعد از عملیات بتن‌ریزی، نمونه‌ها از قالب خارج شده و برای جلوگیری از هرگونه آلودگی عملیات عمل‌آوری در آب مقطر به مدت ۲۸ روز انجام شد. پس از آن نمونه‌ها در دوره‌های ۱۵ روز در محلول سدیم کلراید ۳ درصد غوطه‌ور و سپس خشک شدند. همچنین بررسی خوردگی تسریع شده و پلاریزاسیون آندی نمونه‌ها در محلول سدیم

کلراید ۳ درصد وزنی انجام شد. استحکام مکانیکی نیز پس از ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار خوردگی نمونه‌های بتنی غوطه‌ور شده در محلول سدیم کلراید را نشان می‌دهد. نیز مقدار جریان خوردگی نمونه‌های بتنی را در دو پتانسیل مختلف نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده بیانگر تأثیر مثبت خاکستر بادی بر افزایش مقاومت به خوردگی می‌باشد. حضور خاکستر بادی بدون تأثیرگذاری بر مقدار pH، مقدار کلراید آزاد موجود در بتن را کاهش می‌دهد. بهترین مقاومت به خوردگی مربوط به نمونه‌های فعال شده به روش شیمیایی است.

جدول ۱۰-۱ مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج حاصل از پلاریزاسیون و غوطه‌وری، مشاهده می‌شود که افزودن خاکستر بادی به بتن افزایش مقاومت الکتریکی بتن را به دنبال داشته است. بیشترین مقاومت الکتریکی را نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر فعال شده به روش شیمیایی دارند. هرچند که افزایش مقدار خاکستر بادی در ترکیب بتن کاهش مقاومت الکتریکی را سبب شده است، اما مقاومت نمونه‌های بتنی حاوی درصد بالای خاکستر فعال شده نسبت به نمونه‌های فاقد خاکستر یا حاوی خاکستر فعال نشده بالاتر است.

جدول ۸-۱- مقادیر تخمینی کمی و کیفی خوردگی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف [۵]

System	Replacement level (%)	Area rusted (%)	Corrosion rate (mmpy)	pH	Free chloride (ppm)
OPC	Control	50	0.0739	12.1	3240
AFA	10	75	0.0788	11.9	4000
	20	80	0.1267	11.9	4720
	30	85	0.1955	11.7	4800
	40	95	0.2102	11.7	5000
PFA	10	25	0.0362	12.2	1320
	20	30	0.0534	12.2	1920
	30	35	0.0681	12.2	1960
	40	40	0.1567	12.2	2360
TFA	10	15	0.0245	12.2	920
	20	20	0.0431	12.2	1200
	30	30	0.0543	12.2	1625
	40	35	0.1235	12.2	1850
CFA	10	10	0.0152	12.5	700
	20	10	0.0362	12.5	760
	30	10	0.0494	12.5	780
	40	20	0.0852	12.5	920

* (AFA = خاکستر بادی فعال نشده؛ PFA = خاکستر بادی فعال شده به روش فیزیکی؛ TFA = خاکستر بادی فعال شده به روش حرارتی و CFA = خاکستر بادی فعال شده به روش شیمیایی)

بررسی مقدار نفوذپذیری آب و کلراید در نمونه‌های بتنی که نتایج آن به ترتیب در جدول ۱۱-۱ و جدول ۱۲-۱ نشان داده شده مشخص کرد حضور خاکستر بادی کاهش نفوذپذیری آب و یون کلراید را سبب می‌شود. نکته قابل توجه این است که استفاده از خاکستر فعال نشده افزایش نفوذپذیری کلراید و آب در بتن را به دنبال داشته است. کمترین میزان نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر فعال شده به روش شیمیایی است و به صورت کلی افزایش درصد جایگزینی خاکسترهای فعال شده با سیمان باعث شده تا نفوذپذیری کاهش یابد. آزمایش‌های الکتروشیمیایی از قبیل طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^۱ و پلاریزاسیون خطی^۲ نتایج حاصل از غوطه‌وری و پلاریزاسیون آندی را تأیید کردند. ذرات فعال شده خاکستر بادی نسبت به سیمان دانه‌های ریزتری دارند و با قرارگیری بین دانه‌های سیمان اتصال بهتری ایجاد می‌کنند. با افزایش مقدار خاکستر بادی فعال شده و

¹ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

² Linear Polarization (LP)

فعال نشده از ۱۰ به ۴۰ درصد سرعت و ناحیه خوردگی افزایش می‌یابد. در حالتی که مقدار خاکستر بادی به بیش از ۴۰ درصد می‌رسد خواص خوردگی بتن حتی از بتن بدون خاکستر بادی نیز ضعیف‌تر می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که خاکستر بادی و سیمان به مقدار مشخصی قابلیت برهمکنش دارند.

جدول ۹-۱ پارامترهای حاصل از پلاریزاسیون آندی نمونه‌های بتنی مختلف در محلول سدیم کلراید ۳ درصد وزنی [۵]

System	AFA		PFA		TFA		CFA	
	+300 mV shift current (mA)	+600 mV shift current (mA)	+300 mV shift current (mA)	+600 mV shift current (mA)	+300 mV shift current (mA)	+600 mV shift current (mA)	+300 mV shift current (mA)	+600 mV shift current (mA)
OPC (100%)	0.43	1.04	0.43	1.04	0.43	1.04	0.43	1.04
OPC + 10% FA	0.24	0.55	0.16	0.40	0.06	0.08	0.05	0.07
OPC + 20% FA	0.27	0.75	0.21	0.62	0.09	0.14	0.07	0.10
OPC + 30% FA	0.34	0.99	0.30	0.83	0.18	0.26	0.11	0.15
OPC + 40% FA	0.46	1.08	0.38	0.99	0.24	0.40	0.19	0.20
OPC + 50% FA	1.26	2.50	1.00	1.50	0.40	0.66	0.40	0.56

جدول ۱۰-۱- میانگین مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف [۵]

System	Replacement level (%)	Average resistivity (kΩ cm)
OPC	Control	79
AFA	10	79
	20	77
	30	72
	40	69
PFA	10	90
	20	88
	30	85
	40	84
TFA	10	131
	20	110
	30	86
	40	86
CFA	10	139
	20	118
	30	101
	40	86

جدول ۱۱-۱- مقایسه ضریب جذب آب نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف (حاوی مقادیر مختلفی از خاکستر بادی فعال شده و غیرفعال) [۶]

Replacement level	Coefficient of water absorption ($10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)			
	Unactivated fly ash	Physically activated fly ash	Thermally activated fly ash	Chemically activated fly ash
Control (OPC)	3.86	3.86	3.86	3.86
10%	5.48	3.82	3.72	3.52
20%	5.52	2.86	2.75	2.82
30%	6.45	2.52	2.40	1.69
40%	7.78	2.45	1.95	1.42

جدول ۱۲-۱ مقایسه جریان عبوری از نمونه‌های بتنی با مقادیر مختلف خاکستر بادی فعال شده و غیرفعال [۶]

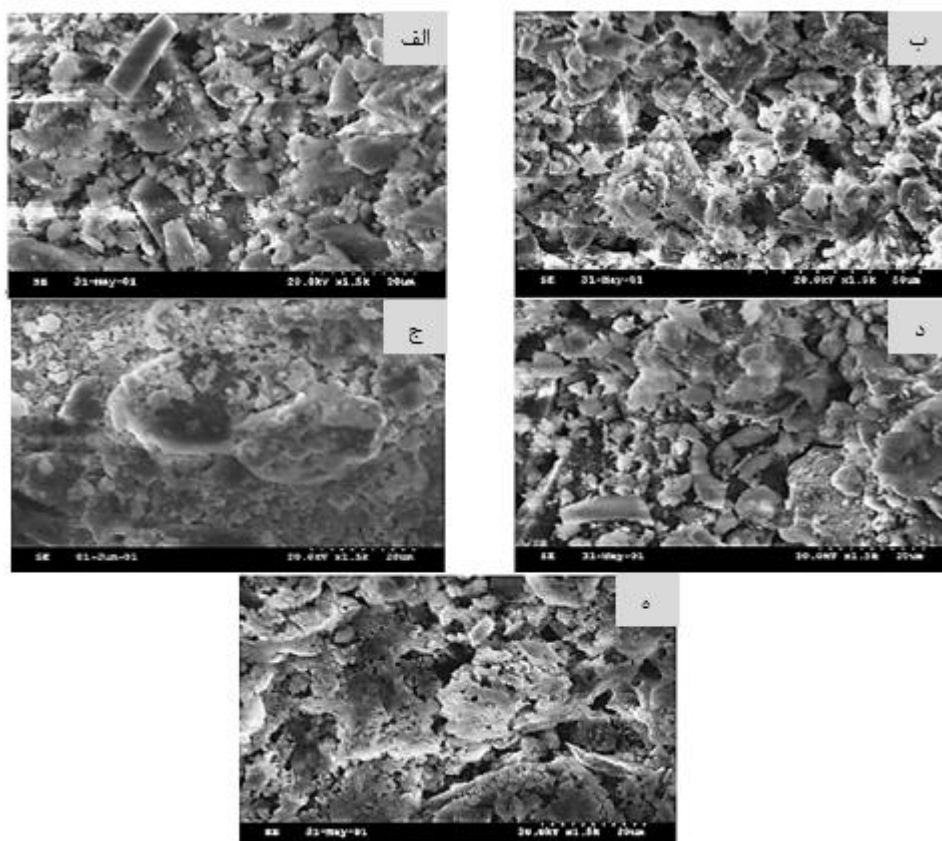
Replacement level	Charge passed in Coulombs			
	Unactivated fly ash	Physically activated fly ash	Thermally activated fly ash	Chemically activated fly ash
Control (OPC)	1235	1235	1235	1235
10%	1487	1240	1225	1134
20%	1424	1234	1152	843
30%	1240	976	990	647
40%	985	872	840	571

شکل ۲-۱ مورفولوژی نمونه‌های بتنی مختلف را پس از ۱۸ ماه غوطه‌وری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین اندازه دانه مربوط به بتن حاوی خاکستر فعال شده با روش شیمیایی است. بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی^۱ (SEM) نشان می‌دهد که خاکستر فعال شده به روش شیمیایی کمترین اندازه دانه را دارد که استفاده از آن باعث ایجاد ساختاری متراکم و با تخلخل کمتر می‌شود. اندازه ذرات نمونه‌های بتنی به این ترتیب افزایش می‌یابد: بتن حاوی خاکستر فعال شده به روش شیمیایی > حرارتی > فیزیکی > بتن حاوی خاکستر غیرفعال > بتن فاقد خاکستر.

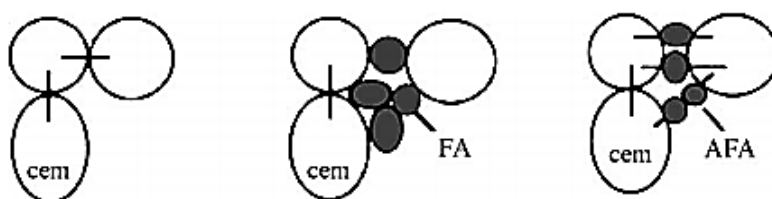
در مورد خاکستر بادی فعال، علاوه بر اینکه دانه‌های ریزتر سبب پرشدگی بهتر فضاهای بین ذرات سیمان می‌شود (شکل ۳-۱)، واکنش هیدراسیون ثانویه نیز منجر به تولید کلسیم سیلیکات هیدراته می‌شود که این محصول ژل‌مانند باعث بهبود خواص خوردگی می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از خاکستر بادی غیرفعال افزایش سرعت خوردگی و مساحت ناحیه خورده شده را به دنبال دارد. بهترین خواص خوردگی مربوط به نمونه‌هایی است که خاکستر بادی فعال شده به روش شیمیایی به میزان ۱۰ درصد اضافه شده است. نتایج کاهش وزن و پلاریزاسیون خطی و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی این موضوع را تأیید کرد.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی خواص مکانیکی و خوردگی بتن‌های حاوی خاکستر بادی، استفاده ۱۰ تا ۲۰ درصدی خاکستر بادی می‌تواند بدون افت خواص مکانیکی سبب افزایش مقاومت به نفوذ یون کلراید شود و خوردگی آرماتورهای فولادی بتن مسلح را کاهش دهد. البته باید توجه داشت که خاکستر مورد استفاده که به مقدار خاصی جایگزین سیمان می‌شود، می‌بایست فعال شده باشد تا باعث بهبود خواص بتن شود. در حضور خاکستر بادی به دلیل کاهش نفوذپذیری بتن زمان شروع واکنش‌های خوردگی آرماتور به تأخیر می‌افتد. خاکستر بادی با کلسیم هیدروکسید وارد واکنش می‌شود و محصولات هیدراسیونی تولید می‌کند که باعث کاهش تخلخل بتن و افزایش مقاومت الکتریکی آن می‌شود.

¹ Scanning Electron Microscopy



شکل ۲-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی (بزرگنمایی ۱۰۰۰) الف) بتن ساخته شده از سیمان پرتلند ب) خاکستر بادی فعال نشده، ج) خاکستر بادی فعال شده به روش مکانیکی، د) خاکستر بادی فعال شده به روش حرارتی و ه) خاکستر بادی فعال شده به روش شیمیایی [۶].



شکل ۳-۱- اثرات خاکستر بادی و خاکستر بادی فعال بر ذرات سیمان [۷]

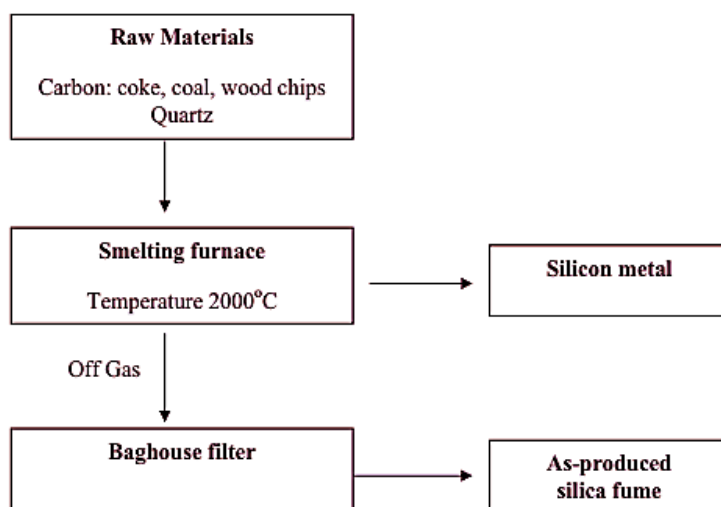
۱-۱-۳ دوده سیلیس

دوده سیلیس یکی از محصولات جانبی صنایع سیلیسی و فرو سیلیس است که شکل ۴-۱ شماتیکی از نحوه تولید آن را نشان می‌دهد. دوده سیلیس به دلیل ساختار دانه ریز و مقدار بالای SiO_2 آمورف در ساختار خود، یک ماده پوزولانی فعال است. دوده سیلیس در بتن با مکانیزم‌های زیر عمل می‌کند:

۱- کاهش اندازه تخلخل و افزایش دانسیته زمینه

۲- واکنش با آهک آزاد

۳- کاهش ضخامت ناحیه انتقالی و در نتیجه کاهش فاصله بین آگرگات و سیمان



شکل ۴-۱- طرح‌واره تولید دوده‌ی سیلیس [۸].

دوده‌ی سیلیس علاوه بر اینکه ضخامت ناحیه انتقالی را کاهش می‌دهد، جهت‌گیری کریستال‌های کلسیم هیدراته (CH) را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که فاصله بین سیمان و آگرگات کم می‌شود. روسیگنولو^۱ [۹] نشان داد که جایگزینی ۱۰ درصدی سیمان با دوده‌ی سیلیس کاهش ۳۶ درصدی ضخامت ناحیه انتقالی را به دنبال دارد. بهبود اتصال فصل مشترک سیمان و آگرگات سبب بهبود خواص مکانیکی و پایداری بتن می‌شود. خیاط و آیتسین^۲ [۱۰] گزارش دادند که جایگزینی ۱۰ درصدی سیمان با دوده‌ی سیلیس مقدار آب مورد نیاز را کاهش می‌دهد. در بتن معمولی و حتی در نمونه‌های بتنی با ۵ درصد دوده‌ی سیلیس نسبت به نمونه‌هایی که ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس در ترکیب خود داشتند، مقدار آب بیشتری نیاز بود تا مقدار اسلامپ^۳ ثابت بماند. برای ثابت نگه داشتن اسلامپ در نمونه‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس استفاده از فوق روان کننده‌ها ضروری بود. مظلوم و همکاران^۴ در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ مقادیر مختلفی از دوده‌ی سیلیس (۶، ۱۰ و ۱۵ درصد) را جایگزین سیمان کردند و مشاهده کردند که افزایش مقدار دوده‌ی سیلیس نیاز به فوق روان کننده در ترکیب ملات را افزایش می‌دهد. افزایش نیاز به فوق روان کننده با افزایش دوده‌ی سیلیس به دلیل ریزدانه بودن دوده‌ی سیلیس است، چون مقداری از فوق روان کننده‌ها به سطح دانه‌های ریز دوده‌ی سیلیس جذب می‌شود. بنا به گزارش ایگاراشی و همکاران^۵ [۱۱] جایگزینی ۱۰ درصدی سیمان با دوده‌ی سیلیس باعث می‌شود تخلخل‌های درشت کمتری در ساختار بتن مشاهده شود. در صورتی که مقدار دوده‌ی سیلیس از ۱۰ درصد بیشتر شود اندازه تخلخل‌ها بزرگ می‌شود. چون و همکاران^۶

^۱ Rossignolo^۲ Aitcin^۳ Slump^۴ Mazloom et al.^۵ Igarashi et al.^۶ Poon et al.

[۱۲] مشاهده کردند که افزایش طول عمر بتن کاهش تخلخل را به دنبال دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند که استفاده از ۵ و ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس کاهش تخلخل بتن را به دنبال دارد (جدول ۱۳-۱).

جدول ۱۳-۱- تخلخل کلی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط متفاوت (نسبت آب به بایندر = ۰/۳) [۱۲]

Mix	MIP measured total porosity (% v/v)			
	3 days	7 days	28 days	90 days
Control	8.69 ± 0.11	8.44 ± 0.13	7.92 ± 0.12	6.97 ± 0.28
5% SF	7.53 ± 0.16	7.24 ± 0.14	6.31 ± 0.11	5.85 ± 0.02
10% SF	7.64 ± 0.15	6.14 ± 0.13	5.66 ± 0.12	5.11 ± 0.41

افزودن دوده‌ی سیلیس به بتن با بهبود اتصال سیمان به آگرگات و بهبود ریزساختار بتن باعث بهبود استحکام فشاری می‌شود. وجود دوده‌ی سیلیس باعث ایجاد ساختاری هموزن با تخلخل کمتر می‌شود. نتایج تحقیقات مظلوم و همکاران [۱۲] نشان داد که نمونه‌های بتنی حاوی دوده‌ی سیلیس در ابتدا استحکام بیشتری نسبت به نمونه بتنی فاقد دوده‌ی سیلیس ارائه می‌دهند، اما زمانی که طول عمر بتن‌ها به یک سال می‌رسد استحکام تمامی نمونه‌ها تقریباً برابر شده است (جدول ۱۴-۱).

جدول ۱۴-۱- تغییرات استحکام فشاری بتن (درصد‌های مختلف جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان) با زمان [۱۲]

Concrete mixes	Silica fume (%)	Compressive strengths (MPa)						
		7 days	14 days	28 days	42 days	90 days	365 days	400 days
OPC	0	46	52	58	62	64	73	74
SF6	6	50.5	58	65	69	71	73	73
SF10	10	52	61	67.5	71	74	73	73
SF15	15	53	63	70	73	76	75	76

وایلد و همکاران^۱ [۱۳] کند شدن افزایش استحکام بتن حاوی دوده‌ی سیلیس با گذشت زمان را به تشکیل یک‌لایه ممانعت کننده نسبت داده‌اند که از واکنش بیشتر دوده‌ی سیلیس با کلسیم هیدروکسید جلوگیری می‌کند. تحقیقات سوبولوف^۲ نشان داد که با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیس استحکام فشاری افزایش می‌یابد (جدول ۱۵-۱) [۱۴]. افزایش مقدار فوق روان کننده از ۸ به ۱۸ درصد نیز کاهش مقدار آب به سیمان از ۰/۳۱ به ۰/۲۶ و افزایش استحکام فشاری از ۸۶ به ۹۷ مگا پاسکال را به دنبال دارد.

¹ Wild

² Sobolev

جدول ۱۵-۱- تغییرات استحکام فشاری بتن با ترتیب اختلاط مختلف با زمان [۱۴]

Proportions (kg/m ³)	SF (5%)	SF (10%)	SF (15%)	SF (20%)
Cement	426	449	468	478
Silica fume	22	50	83	120

Age	Compressive strength (MPa)			
1 day	16.8	24.1	34.4	45.1
3 days	28.6	42.2	63.0	84.9
7 days	50.1	67.2	84.8	102.5
28 days	60.0	80.0	100.0	120.0

وونگ و رازک^۱ [۱۵] اثر جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان را در سه نسبت آب به سیمان مختلف موردبررسی قرار دادند که نتایج نشان داد دوده‌ی سیلیس پس از ۷ روز تأثیر خود بر بهبود استحکام نمونه‌های بتنی را بروز می‌دهد. همچنین افزایش عمر بتن باعث افزایش استحکام بتن می‌شود. کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مقدار دوده‌ی سیلیس استحکام فشاری را سبب شده است. بررسی استحکام فشاری نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد دوده‌ی سیلیس در یک مدت‌زمان ۵ ساله محدودیت دوده‌ی سیلیس در افزایش استحکام فشاری بتن را نشان داد (جدول ۱۷-۱) [۱۶]. اثرگذاری مثبت دوده‌ی سیلیس بر استحکام فشاری پس از ۷ روز مشخص شد. نمونه‌های حاوی دوده‌ی سیلیس تقریباً به مدت یک سال خواص استحکامی بهتر نسبت به نمونه‌های فاقد دوده‌ی سیلیس ارائه می‌دهند و پس از یک سال مقدار استحکام فشاری تمامی نمونه‌ها تقریباً باهم برابر می‌شود. با افزایش عمر بتن، نمونه‌های فاقد دوده‌ی سیلیس خواص استحکامی بهتری ارائه می‌دهند، به‌طوری‌که پس از ۵ سال استحکام فشاری نمونه‌های بدون دوده‌ی سیلیس به‌طور میانگین ۲۰ درصد از استحکام نمونه‌های حاوی دوده‌ی سیلیس بیشتر شد.

جدول ۱۶-۱- تغییرات استحکام فشاری بتن با ترتیب اختلاط مختلف با زمان [۱۵]

Mixture	Compressive strength (MPa)						
	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days	90 days	180 days
w/cm 0.27	39	68	72.5	84	86.5	87.5	90
SF 5	35	63	75.5	88.5	93	96.5	97.5
SF 10	25	61	79	95.5	100	104	107
SF 15	24.5	59.5	76.5	101.	103.5	106	109
w/cm 0.30	48	63.5	72	83.5	84.5	85.5	87.5
SF 5	46	62	81	91	95.5	95.5	97
SF 10	42	61.5	78.5	95	97	99	103
SF 15	38	57.5	74.5	98.5	101.5	104	106.5
w/cm 0.33	41.0	58.0	62.5	75	78	79	81.5
SF 5	35.0	55.0	69.5	83.0	85.0	90.0	90.0
SF 10	32.0	53.0	70.5	89.5	90.5	92.0	93.5
SF 15	31.0	47.5	70.5	88.5	93.0	95.5	100.5

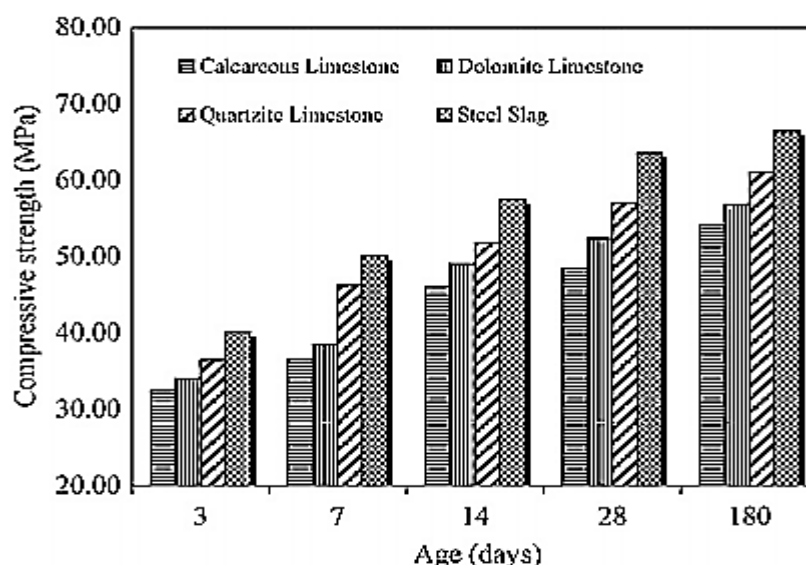
درواقع روند افزایش استحکام فشاری بتن با افزایش طول عمر در بتن‌های حاوی دوده‌ی سیلیس بعد از مدت‌زمان یک سال متوقف شد؛ درحالی‌که در بتن معمولی این روند ادامه می‌یابد. در پژوهشی تأثیر جایگزینی ۱۵ درصدی دوده‌ی سیلیس به‌جای سیمان در بتن تولیدشده با آگرگات‌های مختلف موردبررسی قرار گرفت (شکل‌های ۱-۵ و ۱-۶). نسبت آب به سیمان نمونه‌ها برابر ۰/۳۵ بود نسبت آگرگات درشت به آگرگات ریزدانه برابر با ۱/۶۳

¹ Wong and Razak

بود. مطابق شکل ۵-۱ در طول دوره ۱۸۰ روز افزایش زمان باعث افزایش استحکام فشاری بتن شد. همچنین بیشترین مقدار استحکام فشاری و برشی مربوط به بتن حاوی دوده‌ی سیلیس و سرپاره بود.

جدول ۱۷-۱- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتن با ترتیب اختلاط مختلف با زمان [۱۶]

Testing age	Concrete mixture details				
	Control	10% SF	15% SF	20% SF	10% SF in slurried product
1 day	25.6	25.2	28.0	27.2	33.2
7 days	44.6	59.8	63.2	64.5	69.9
28 days	55.6	70.7	75.2	74.2	85.0
56 days	63.5	74.0	76.4	72.9	82.6
91 days	63.4	77.6	72.9	74.0	83.7
182 days	72.5	73.2	71.4	77.8	82.7
365 days	79.0	76.7	70.0	80.3	80.2
2 years	86.1	81.5	71.4	82.0	-
3 years	88.2	89.7	85.1	88.3	-
5 years	86.0	79.6	68.6	70.3	-

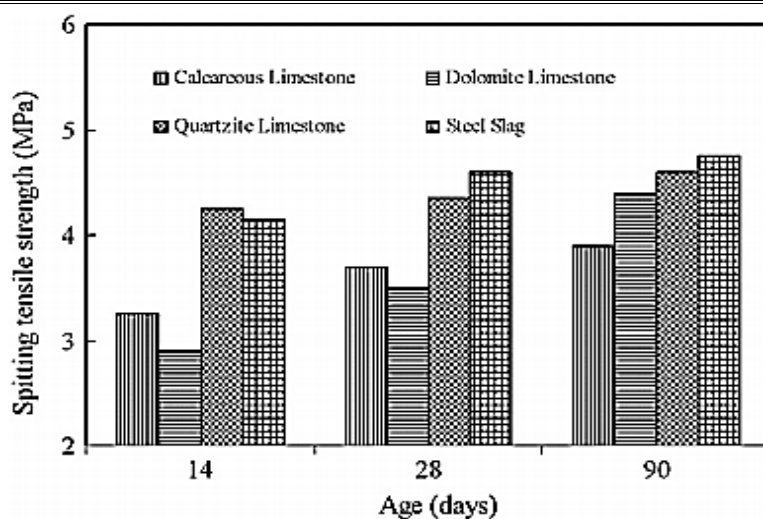


شکل ۵-۱- تأثیر نوع آگرگات بر استحکام فشاری بتن حاوی ۱۵ درصد دوده‌ی سیلیس [۱۷].

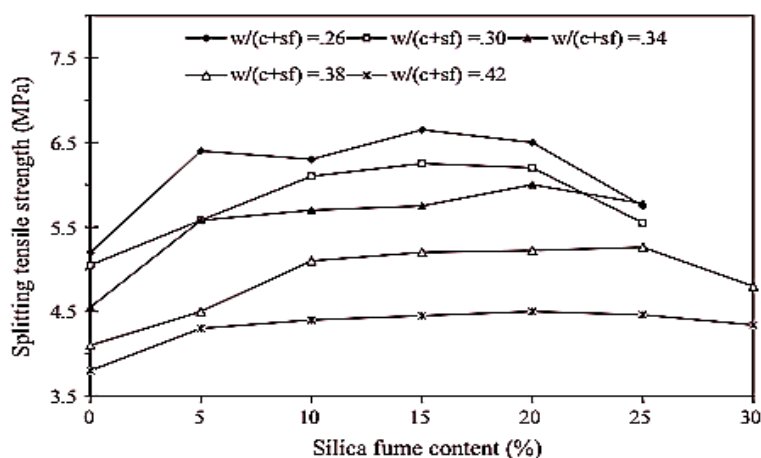
تأثیر نسبت آب به سیمان و همچنین درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان روی خواص مکانیکی^۱ نمونه‌های بتنی طی دوره ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل در شکل ۷-۱ و شکل ۸-۱- نشان داده شده است [۱۸]. بر این اساس، بهترین استحکام کششی^۲ و پیچشی مربوط به نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان، ۰/۲۶ است که در ترکیب خود ۱۵ درصد دوده‌ی سیلیس دارند. به صورت کلی بررسی خواص مکانیکی نشان داد که با جایگزینی ۱۵ درصدی دوده‌ی سیلیس با سیمان بهترین نتایج حاصل می‌شود.

¹ Mechanical Properties

² Tensile Strenght



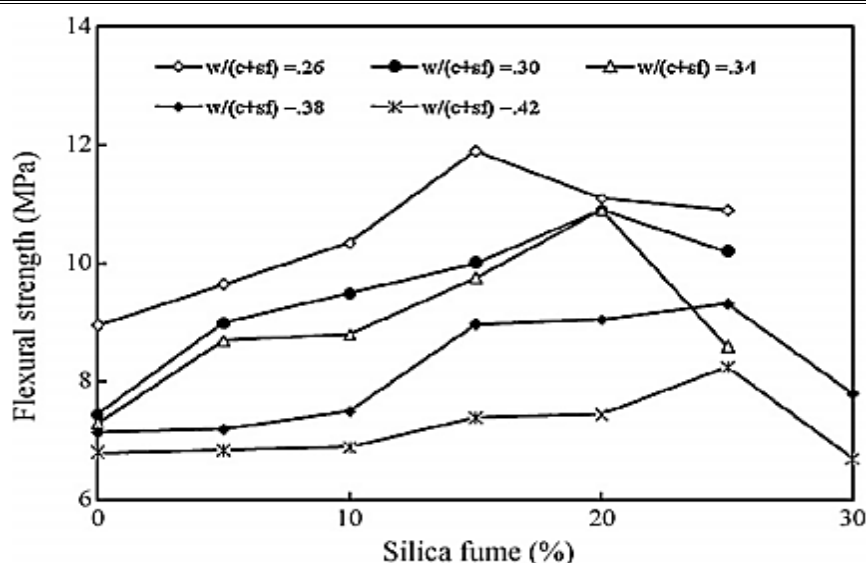
شکل ۶-۱- تأثیر نوع آگرگات بر استحکام کششی بتن حاوی ۱۵ درصد دوده سیلیس [۱۷].



شکل ۷-۱- رابطه بین استحکام کششی نمونه‌های بتنی با درصد جایگزینی دوده سیلیس با سیمان طی دوره ۲۸ روز در نسبت‌های مختلف آب به سیمان [۱۸].

کیلیچ و همکاران^۱ [۱۹] تأثیر استفاده از آگرگات‌های مختلف را بر استحکام خمشی سیمان حاوی دوده سیلیس مورد بررسی قرار دادند. نسبت آب به سیمان نمونه‌ها ۰/۳۵ و درصد جایگزینی سیمان با دوده سیلیس با سیمان برابر با ۱۵ درصد بود. همچنین مقدار فوق روان کننده مورد استفاده در نمونه‌ها ۴ درصد وزنی بایندر بود. با توجه به جدول ۱-۱۸ مشاهده می‌شود که بهترین خواص مربوط به نمونه‌های ساخته شده از آگرگات گابرو بوده و ضعیف‌ترین خواص برای آگرگات سنگ آهک است.

¹ Kilic



شکل ۸-۱- رابطه بین استحکام خمشی نمونه‌های بتنی با درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان طی دوره ۲۸ روز در نسبت‌های مختلف آب به سیمان [۱۸].

جدول ۱۸-۱- تأثیر نوع آگرگات بر استحکام خمشی بتن با ۱۵ درصد دوده‌ی سیلیس طی دوره‌های زمانی مختلف [۱۹]

Curing time (days)	Flexural tensile strength (MPa)				
	Gabbro (247)	Basalt (132)	Quartzite (160)	Limestone (110)	Sandstone (52)
3	12.6	11.4	12.9	7.9	3.2
7	16.1	15.4	14.9	12.5	4.5
28	17.3	16.7	16.2	12.8	5.2
90	18.4	17.9	16.9	13.9	5.6

*اعداد داخل پرانتز بیان‌گر استحکام فشاری تک‌محوره هر آگرگات می‌باشد.

بررسی تأثیر جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان بر مدول الاستیک نشان داد که حضور دوده‌ی سیلیس کاهش مدول الاستیک بتن را به دنبال دارد (جدول ۱۹-۱). هرچند که طی دوره ۲۸ روز مدول الاستیک بتن حاوی دوده‌ی سیلیس از بتن سنتی بیشتر است اما باگذشت زمان مدول الاستیک بتن سنتی بیشتر می‌شود. همچنین نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف دوده‌ی سیلیس مدول الاستیک تقریباً مشابهی دارند و باگذشت زمان این تناسب تغییر نمی‌کند [۱۹].

بررسی تأثیر استفاده از آگرگات‌های آهک، دولومیت، کوارتزیت و سرباره فولاد بر مدول الاستیک بتن‌های ۲۸ روز که حاوی مقادیر مختلفی از دوده‌ی سیلیس در ترکیب خود بودند نشان داد که استفاده از دوده‌ی سیلیس باعث افزایش مدول الاستیک بتن می‌شود و در صورتی که از آگرگات سرباره در ساختار بتن استفاده شود مدول الاستیک بالاتری حاصل می‌شود (جدول ۲۰-۱).

جدول ۱۹-۱- تغییرات مدول الاستیک بتن با درصدهای مختلف دوده‌ی سیلیس طی دوره‌های زمانی متفاوت [۱۹]

Testing age (days)	Concrete mix			
	Control	10% SF	15% SF	20% SF
28 days	43.2	43.7	42.8	43.4
91 days	48.0	46.2	45.0	45.7
182 days	49.2	46.7	46.1	46.1
385 days	51.8	48.4	48.1	48.1

جدول ۲۰-۱- تغییرات مدول الاستیک نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلفی از دوده‌ی سیلیس و آگرگات‌های آهک، دولومیت، کوارتزیت و سرباره فولاد [۱۷]

Aggregate	Modulus of elasticity (GPa)		
	0% SF	10% SF	15% SF
Calcareous limestone	21.6	26	29.3
Dolomitic limestone	24.5	25.9	32.8
Quartzitic limestone	28.8	36.2	38
Steel slag aggregates	29.6	32.9	40.4

تأثیر جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان بر انقباض پلاستیک بتن برای مناطق با آب‌وهوای گرم مورد بررسی قرار گرفت [۲۰]. بدین منظور نمونه‌های بتنی در سرعت باد ۱۵ km/h، مقدار رطوبت ۳۵ درصد و درجه حرارت ۴۵ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند. بیشترین مقدار انقباض پلاستیک نمونه‌ها در ۲۴ ساعت ابتدایی در جدول ۲۱-۱ آورده شده است. نتایج نشان داد که حضور دوده‌ی سیلیس در بتن باعث افزایش انقباض شده و افزایش درصد جایگزینی سیمان با دوده‌ی سیلیس، افزایش بیشتر انقباض را سبب خواهد شد.

ژانگ^۱ و همکاران تأثیر حضور دوده‌ی سیلیس در ترکیب سیمان را بر انقباض خودبه‌خودی نمونه‌های بتنی آماده‌شده با نسبت آب به سیمان متفاوت مورد بررسی قرار دادند. جدول ۲۲-۱ تغییرات انقباض خودبه‌خودی نمونه‌های بتنی را نسبت به مقدار انقباض بتن‌های ۹۸ روز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نسبت آب به سیمان و استفاده از دوده‌ی سیلیس تأثیر بسزایی بر مقدار انقباض خودبه‌خودی دارد. در انقباض خودبه‌خودی آب بتن به علت فرآیند هیدراسیون مصرف‌شده و این امر سبب ایجاد شکاف در بتن می‌شود. با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیس مقدار این انقباض نیز افزایش می‌یابد. در بتن‌هایی که نسبت آب به سیمان کمتری دارند این مسئله حادتر می‌شود. بر این اساس، مقدار انقباض خودبه‌خودی با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مقدار دوده‌ی سیلیس افزایش می‌یابد.

¹ Zhang

جدول ۲۱-۱- ماکزیمم مقدار کرنش انقباضی پلاستیک نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف [۲۰]

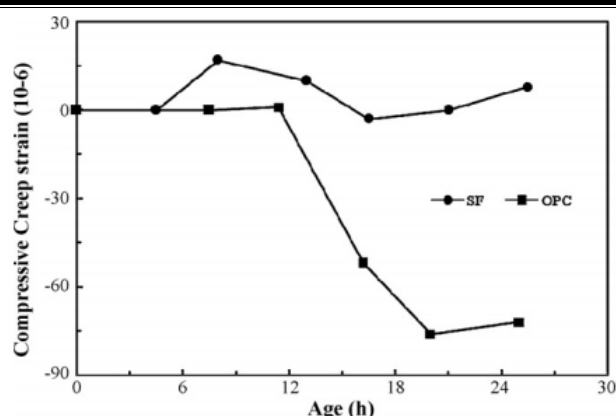
Silica fume type	Replacement (%)	Maximum plastic shrinkage strain (μm)
1	5	1322
	7.5	1645
	10	2348
2	5	1724
	7.5	2794
	10	2924
3	5	1038
	7.5	1370
	10	1656
4	5	1122
	7.5	1183
	10	1224
5	5	783
	7.5	939
	10	1119
Plain cement	0	716

جدول ۲۲-۱- تغییرات انقباض خودبه‌خودی نمونه‌های بتنی با ترتیب اختلاط مختلف [۲۰]

w/c	Autogenous shrinkage (micro strain)/% of 98-day shrinkage											
	SF 0%				SF 5%				SF 10%			
	2 days	7 days	14 days	98 days	2 days	7 days	14 days	98 days	2 days	7 days	14 days	98 days
0.26	49/25	100/51	129/65	197	101/38	170/64	194/73	266	101/36	174/62	221/78	282
0.30	36/20	87/48	115/64	180	77/35	149/68	174/80	218	74/27	161/59	213/64	251
0.35	25/63	34/85	40/100	40	49/22	101/47	128/60	215	41/16	115/46	160/64	251

بررسی تأثیر حضور دوده‌ی سیلیس در ترکیب بتن بر خزش بتن نشان داد که استفاده از دوده‌ی سیلیس کرنش ناشی از خزش بتن (تغییر شکل سازه بر اثر نیرو) را کاهش می‌دهد (شکل ۹-۱). همچنین مشخص شد که با افزایش مقدار دوده‌ی سیلیس مقدار کرنش ناشی از خزش کمتر می‌شود (جدول ۲۳-۱). پراتون^۱ و همکاران [۲۲] تأثیر دوده‌ی سیلیس را بر مقدار نفوذپذیری یون کلراید در بتن موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حضور دوده‌ی سیلیس در ترکیب بتن کاهش قابل توجه نفوذپذیری کلراید را به دنبال دارد (شکل ۱۰-۱). در اثر واکنش هیدراسیون واکنش‌های پوزولانی اتفاق افتاده که نتیجه آن کوچک‌تر شدن اندازه تخلخل‌های بتن است. تشکیل محصولاتی از قبیل کلسیم سیلیکات و کلسیم آلومینات ریزساختار بتن را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که شکاف‌ها و تخلخل‌های کوچک‌تری در بتن به وجود می‌آید. علاوه بر این وجود دوده‌ی سیلیس در ساختار بتن کاهش اندازه ناحیه انتقالی را سبب می‌شود. افزایش درصد سیلیکا در ترکیب بتن نیز افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید را به دنبال دارد.

¹ Perraton



شکل ۹-۱- کرنش خزش فشاری نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف دوده‌ی سیلیس تحت شرایط نیمه آدیاباتیک [۲۰].

جدول ۲۳-۱- خزش بلوک‌های بتنی ۸۰mm*۲۷۰mm (میکرو کرنش) [۲۱]

Age of loading (days)	Concrete mixes			
	OPC	SF6	SF10	SF15
7	595	510	459	417
28	413	407	381	328

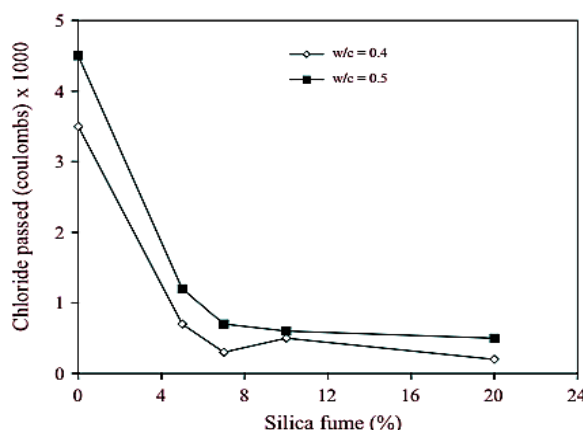
حضور دوده‌ی سیلیس علاوه بر کاهش نفوذپذیری یون کلراید باعث کاهش نفوذپذیری آب نیز می‌شود. جایگزینی ۱۰ درصدی دوده‌ی سیلیس با سیمان در بتن (ساخته‌شده از ۱۰۰ کیلوگرم سیمان) سبب شد تا مقدار نفوذپذیری با بتن ساخته‌شده با ۲۵۰ کیلوگرم بتن برابر شود که علت آن افزایش واکنش‌های پوزولانی در حضور دوده‌ی سیلیس است. نتایج تحقیقات برک^۱ [۲۳] با استفاده از آزمایش‌های الکتروشیمیایی رفتار خوردگی بتن را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که جایگزینی بیش از ۱۵ درصدی دوده‌ی سیلیس با سیمان مقاومت به خوردگی بتن را افزایش می‌دهد. در پژوهشی دیگر مشخص شد که حضور ۱۰ و ۲۰ درصدی دوده‌ی سیلیس در ترکیب بتن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش مقاومت به خوردگی دارد که این رفتار به تأثیر بسزای دوده‌ی سیلیس برای به تأخیر انداختن شروع واکنش‌های خوردگی نسبت داده شد.

بر اساس مشاهدات خیاط و آیتسین^۲ [۱۰] در حالتی که مقدار pH در مجاورت فولاد به کمتر از ۱۰ می‌رسد و همچنین در حضور یون‌های کلراید، لایه اکسیدی سطح فولاد در بتن ناپایدار می‌شود. وقتی که دوده‌ی سیلیس جایگزین سیمان می‌شود مقدار pH کاهش می‌یابد. علاوه بر این، کاهش مقدار کلسیم هیدروکسید به علت واکنش‌های پوزولانی دوده‌ی سیلیس و کاهش غلظت آب در تخلخل‌های بتن نیز بر کاهش pH اثرگذارند. باین وجود، این فاکتورها تأثیر بسیار کمی بر ناپایداری لایه اکسیدی سطح فولاد دارند؛ زیرا در حضور دوده‌ی سیلیس مقدار pH در مجاورت آرماتور به کمتر از ۱۲ نمی‌رسد، حتی در حالتی که ۳۰ درصد وزنی از سیمان با

¹ Berke

² Khayat and Aitcin

دوده‌ی سیلیس جایگزین می‌شود. در حضور دوده‌ی سیلیس ضریب نفوذ و مقدار یون کلراید در بتن کم می‌شود و مقاومت الکتریکی بتن افزایش می‌یابد که در نتیجه باعث می‌شود شروع واکنش‌های خوردگی به تأخیر بیفتد.



شکل ۱۰-۱ تغییرات نفوذپذیری یون کلراید با تغییر درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان در نمونه‌های بتنی [۲۲].

بررسی تأثیر دوده‌ی سیلیس بر رفتار خوردگی آرماتور در نسبت‌های مختلف آب به بایندر (سیمان + دوده‌ی سیلیس) نشان داد که جایگزینی ۶ درصدی دوده‌ی سیلیس با سیمان باعث افزایش ۲/۵ برابری مقاومت الکتریکی بتن می‌شود. همچنین در حالتی که مقدار دوده‌ی سیلیس در ترکیب بتن به ۱۲ درصد رسید مقاومت الکتریکی بتن ۵ برابر شد [۲۴]. لازم به ذکر است که آزمون‌های الکتروشیمیایی برای نمونه‌های فولادی در محلول حاوی مقادیر مختلفی از سیمان، دوده‌ی سیلیس و سدیم کلراید انجام شد. بررسی نمودارهای پلاریزاسیون نشان داد که در حضور دوده‌ی سیلیس دانسیته جریان‌های پسیو افزایش می‌یابد، اما در نهایت ساختار متراکم‌تر و مقاومت الکتریکی بالاتر سیمان حاوی دوده‌ی سیلیس باعث می‌شود تا آرماتور دچار خوردگی کمتری بشود. ایجاد ساختار متراکم‌تر در حضور دوده‌ی سیلیس باعث می‌شود تا زمان شروع واکنش‌های خوردگی روی سطح آرماتور به تأخیر بیفتد. همچنین بررسی تغییرات خواص مکانیکی با درصد دوده‌ی سیلیس و در نسبت‌های آب به سیمان متفاوت نشان داد که افزایش درصد دوده‌ی سیلیس و کاهش نسبت آب به سیمان بهبود خواص مکانیکی بتن‌های ۲۸ روز را به دنبال دارد (جدول ۲۴-۱).

اندازه دانه بسیار کوچک دوده‌ی سیلیس و همچنین فعالیت پذیری بالای آن باعث تشکیل سریع کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) از کلسیم هیدروکسید (CH) می‌شود. ذرات دوده‌ی سیلیس با احاطه کردن دانه‌های سیمان محل‌های جوانه‌زنی کلسیم سیلیکات هیدراته را فراهم کرده و بدین ترتیب باعث تشکیل بتن با ساختار فشرده‌تر می‌شوند. حضور دوده‌ی سیلیس در ترکیب بتن باعث می‌شود تا مقدار تجمع آب آزاد در فصل مشترک سیمان و آگرگات کم شود و مکان مناسب برای جوانه‌زنی CH فراهم آید که در نتیجه‌ی افزایش مکان‌های جوانه‌زنی، اندازه کریستال‌های CH کوچک‌تر می‌شود. استفاده از میکرو سیلیس (۷ درصد وزنی جایگزین سیمان) به‌طور قابل توجهی مقدار کلراید آستانه‌ای را کاهش می‌دهد به‌گونه‌ای که مقدار کلراید آستانه‌ای برای شروع واکنش‌های خوردگی حتی از نصف مقدار کلراید آستانه‌ای در بتن ساخته‌شده از سیمان پرتلند نیز کمتر می‌شود. بررسی خواص مکانیکی لوله‌های بتنی حاوی درصدهای مختلفی از دوده‌ی سیلیس نشان داد که جایگزینی ۵ تا ۷ درصدی دوده‌ی سیلیس با سیمان، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود استحکام فشاری دارد (جدول ۲۵-۱ و جدول ۲۶-۱) [۲۵]. در

نمونه‌هایی که درصد دوده‌ی سیلیس از ۷ درصد بیشتر بود افت خواص مکانیکی مشاهده شد، به گونه‌ای که استحکام فشاری و خمشی نسبت به بتن فاقد دوده‌ی سیلیس نیز کمتر شد.

جدول ۲۴-۱- ترتیب اختلاط و استحکام کششی نمونه‌های بتنی ۲۸ روز [۲۴]

Mix no.	Water-binder ratio	Materials (Kg/m ³)					Slump (mm) ^۲	Compressive strength (MPa) ^۳
		Cement	SF	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water		
1	0.50	373	—	637	1189	187	78	42.3
2		367	22	624	1163	194	75	51.2
3		359	43	624	1163	201	78	56.1
4	0.65	286	—	721	1181	186	105	26.6
5		281	17	708	1160	194	98	35.1
6		273	33	693	1160	200	81	36.5
7	0.80	232	—	772	1178	186	83	19.5
8		218	14	759	1158	193	105	23.7
9		224	27	746	1138	200	92	29.7

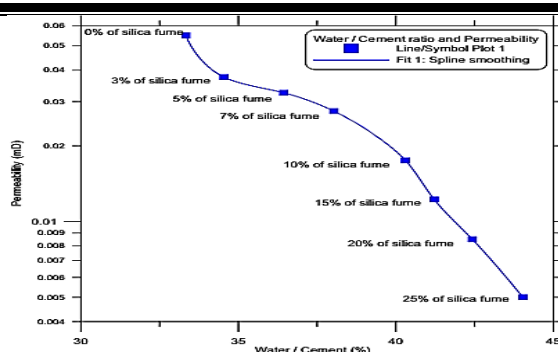
جدول ۲۵-۱- تأثیر درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان بر استحکام کششی نمونه‌های بتنی طی دوره‌های ۷ و ۲۸ روز [۲۵]

No.	Silica % from cement	Compressive at 7 days		Compressive at 28 days	
		Load, KN	Stress, N/mm ²	Load, KN	Stress, N/mm ²
1	0	813.8	36.17	361.0	36.10
2	3	633.8	28.17	734.2	32.63
3	5	820.2	36.45	921.4	40.95
4	7	896.8	39.86	1234.8	54.88
5	10	662.2	29.43	871.6	38.74
6	15	477.8	21.24	477.8	21.24
7	20	645.2	28.68	857.8	38.12
8	25	731.6	32.52	906.0	40.27

جدول ۲۶-۱- تأثیر درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان بر استحکام خمشی نمونه‌های بتنی طی دوره‌های ۷ و ۲۸ روز [۲۵]

No.	Silica % from cement	Flexural strength at 7 days		Flexural strength at 28 days	
		Load, KN	Modulus of rupture, Mpa	Load, KN	Modulus of rupture, Mpa
1	0	10.460	6.404	11.280	6.906
2	3	10.720	6.563	11.530	7.059
3	5	10.980	6.722	11.780	7.212
4	7	10.670	6.533	11.320	6.931
5	10	10.360	6.343	10.940	6.698
6	15	10.400	6.367	10.580	6.478
7	20	10.120	6.196	10.380	6.355
8	25	9.890	5.959	10.330	6.317

بررسی نسبت آب به سیمان و درصد جایگزینی دوده‌ی سیلیس با سیمان بر نفوذپذیری بتن نشان داد که کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مقدار دوده‌ی سیلیس کاهش نفوذپذیری را در پی خواهد داشت (شکل ۱۱-۱) [۲۵]. دوده‌ی سیلیس با افزایش اتصال ذرات سیمان به یکدیگر باعث ایجاد ساختاری متراکم‌تر با تخلخل کمتر می‌شود و به‌طور قابل ملاحظه‌ای نفوذپذیری و میزان تخلخل بتن را کاهش می‌دهد.

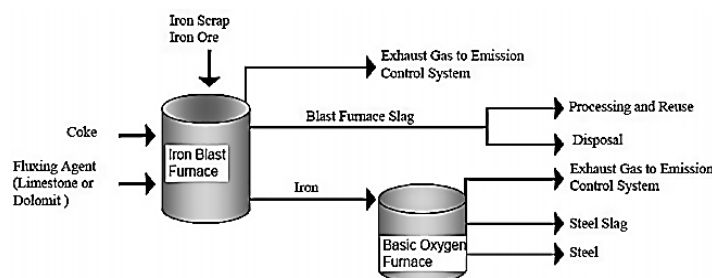


شکل ۱۱-۱- تغییرات مقدار نفوذپذیری با نسبت آب به سیمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف دوده سیلیس
[۲۵].

۴-۱-۱- سرباره

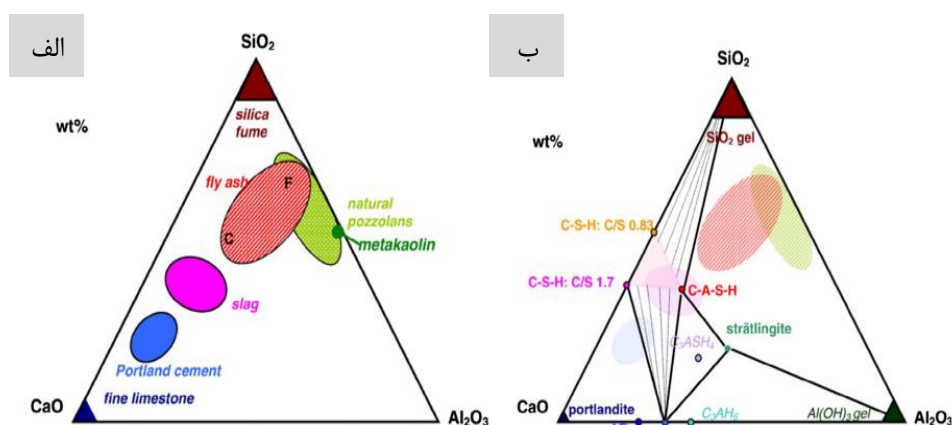
سرباره ذوب آهن یکی از محصولات جانبی کارخانه ذوب آهن است. سرد کردن سریع سرباره مذاب با استفاده از جت آب باعث تشکیل نانو کریستال‌های گرانولی می‌شود. در این روش به ازای هر تن سرباره ۳ مترمکعب آب مصرف می‌شود. روش دیگری که برای تولید استفاده می‌شود سرد کردن اولیه سرباره آذرین با آب و سپس در معرض هوا قرار دادن آن در یک ظرف استوانه‌ای دوار است. مقدار آب مصرفی در این روش ۱ مترمکعب به ازای هر تن سرباره است و مقدار آب باقیمانده در سرباره حدود ۱۰ درصد است. پس از تولید سرباره گرانوله، می‌بایست عملیات آگیری، خشک کردن و آسیاب کاری روی آن انجام شود تا بتوان از آن به عنوان بایندر بتن استفاده کرد. معمولاً قبل و بعد از عملیات آسیاب از آهنربا برای جدا کردن آهن باقیمانده استفاده می‌شود. برای افزایش فعالیت سیمانی سرباره معمولاً آسیاب کاری تا زمانی که دانه‌های سرباره از اندازه دانه‌های سیمان کوچک‌تر شود ادامه می‌یابد. چراکه ریزتر شدن پوزولان‌ها باعث افزایش سرعت واکنش پذیری آن‌ها می‌شود. شکل ۱۲-۱ شماتیکی از نحوه تولید سرباره گرانوله را نشان می‌دهد.

ترکیب شیمیایی سرباره بسته به نوع سنگ معدن، نوع فلاکس و ناخالصی‌های کک تغذیه شده به کوره تغییر می‌کند. معمولاً سیلیس، کلسیم، آلومینیوم، منیزیم و اکسیژن بیش از ۹۵ درصد ترکیب سرباره را تشکیل می‌دهند. یکی از معیارهای سنجش مقدار قلیائیت سرباره نسبت CaO/SiO_2 است. فعالیت هیدرولیکی سرباره به مقدار قلیائیت آن بستگی دارد، به گونه‌ای که مقدار قلیائیت بالاتر سبب می‌شود تا سرباره در حضور فعال کننده‌های قلیایی فعالیت هیدرولیکی بیشتری داشته باشد. در صورتی که مقدار قلیائیت سرباره ثابت باشد،



شکل ۱۲-۱- شماتیک نحوه تولید سرباره گرانوله [۲۶].

افزایش مقدار Al_2O_3 افزایش استحکام را در پی دارد. افزایش مقدار MgO به‌عنوان جایگزین CaO مقدار قلیائیت سرباره را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقدار ۸ تا ۱۰ درصدی MgO تأثیر چندانی بر استحکام ندارد، اما در صورتی که مقدار MgO بیشتر از ۱۰ درصد شود تأثیر منفی بر استحکام خواهد داشت. فعالیت هیدرولیکی با افزایش اکسیدهای کلسیم، آلومینیوم و منیزیم افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار SiO_2 کم می‌شود. بر اساس استاندارد TS EN ۱۹۷-۱ نسبت مجموع جرم CaO و MgO به جرم SiO_2 می‌بایست بیشتر از یک باشد تا قلیائیت بالای سرباره بدون غیرفعال شدن از نظر هیدرولیکی تضمین شود. شکل ۱۳-۱ دیاگرام فازی سه‌تایی سرباره گرانوله و محصولات هیدراسیونی سرباره با سیمان و آب را نشان می‌دهد.

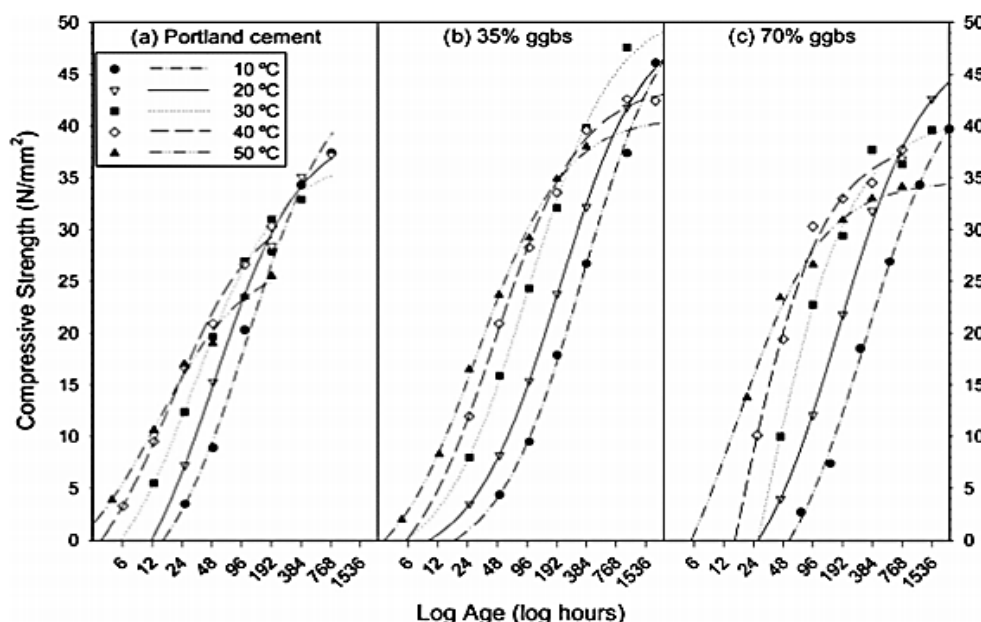


شکل ۱۳-۱- دیاگرام فازی سه‌تایی سرباره گرانوله شده و محصولات هیدراسیونی سرباره با سیمان و آب [۲۶].

در حالتی که سرباره با آب ترکیب شود، واکنش هیدراسیون اولیه آن نسبت به سیمان خیلی کندتر است، بنابراین از سیمان، قلیا یا آهک به‌عنوان فعال‌کننده استفاده می‌شود تا واکنش هیدراسیون را تسریع بخشند. هیدراسیون سیمان سرباره با سیمان پورتلند معمولاً به تجزیه و انحلال ساختار شیشه‌ای سرباره با یون‌های هیدروکسیل که از هیدراسیون سیمان پورتلند تولید می‌شود بستگی دارد. وقتی سیمان سرباره هیدراته می‌شود با سدیم، پتاسیم قلیایی و کلسیم هیدروکسید واکنش می‌دهد تا کلسیم سیلیکات هیدرات تولید شود. هیدراسیون سیمان سرباره در ترکیب با سیمان پورتلند در دمای عادی یک واکنش دوفازی است. در هیدراسیون اولیه، بیشتر هیدروکسید قلیا واکنش می‌دهند و در مرحله بعد بیشتر واکنش با کلسیم هیدروکسید انجام می‌شود؛ که اگر به آن آب اضافه شود واکنشی صورت نمی‌گیرد. این ماده شبه سیمانی برخلاف پوزولان‌ها که با هیدروکسید کلسیم حاصل از آگیری سیمان واکنش نشان می‌دهند و آن را به مصرف می‌رساند، از هیدروکسید کلسیم فقط به‌عنوان کاتالیزور استفاده می‌کنند و در حضور آب واکنشی شبه سیمان دارند با این تفاوت که هیدروکسید کلسیم تولید نمی‌شود. جایگزینی بیش از ۶۰ درصدی سرباره گرانوله شده با سیمان افزایش کارپذیری بتن را در پی دارد. افزایش درصد سرباره نیز بهبود کارپذیری را سبب می‌شود. همچنین عنوان شده که حداقل مقدار سرباره برای بهبود کارپذیری بتن می‌بایست ۲۰ درصد باشد. افزایش کارپذیری بتن در حضور سرباره مقدار آب موردنیاز را کاهش می‌دهد. در این حالت، پخش شدن ذرات سیمان و همچنین صافی و فشردگی ذرات سرباره باعث می‌شود آب کمتری جذب شود. نتیجه‌ی چنین رفتاری کاهش نیاز به ترکیبات کاهنده آب است. جایگزینی بیش از ۶۰ درصدی سرباره گرانوله شده با سیمان باعث می‌شود مقدار اسلامپ بتن با بتن بدون سرباره برابر شود و این در حالی است که مقدار

ترکیبات کاهنده آب در بتن حاوی سرباره ۲۵ درصد کمتر از بتن بدون سرباره است [۲۶]. هیدراسیون ترکیبات اصلی سیمان (C_3S , C_2S , C_3A و C_4AF) با آب باعث آزادسازی گرمای هیدراسیون می‌شود. در سازه‌های بزرگ این حرارت می‌تواند باعث تنش حرارتی شود. به‌منظور کاهش گرمای هیدراسیون از مواد پوزولانی از قبیل سرباره استفاده می‌شود. استفاده از سرباره گرانوله شده مقدار پیک گرمای هیدراسیون و همچنین زمان رسیدن به این پیک را کاهش می‌دهد.

یکی دیگر از پارامترهایی که با افزودن سرباره گرانوله شده به ترکیب بتن دچار تغییر می‌شود زمان گیرش بتن است. به‌کارگیری سرباره در ترکیب بتن افزایش زمان گیرایی را در پی دارد، به‌ویژه زمانی که درصد جایگزینی آن با سیمان به بیش از ۴۰ درصد برسد. گزارش شده که جایگزینی ۶۰ درصدی سرباره با سیمان باعث می‌شود زمان گیرایی اولیه و ثانویه در بتن به ترتیب برابر با ۹۱۳ و ۱۰۲۱ دقیقه شود، درحالی‌که زمان گیرش اولیه و ثانویه بتن بدون سرباره به ترتیب برابر با ۳۳۲ و ۴۴۹ دقیقه به دست آمد. درواقع جایگزین کردن ۶۰ درصد از سیمان با سرباره گرانوله شده زمان گیرش اولیه و ثانویه بتن را ۲/۷۵ و ۲/۲۷ برابر کرد. با توجه به اینکه استفاده از سرباره گرانوله شده باعث افزایش زمان گیرش بتن می‌شود باید مقدار کاهش رطوبت بتن به‌دقت کنترل شود تا ترک‌های انقباضی در آن به وجود نیاید. سرعت هیدراسیون بر ضریب انقباض حرارتی و مقدار انقباض خودبه‌خودی اثرگذار است. استفاده از سرباره گرانوله ممکن است ضریب انقباض حرارتی و انقباض خودبه‌خودی بتن را افزایش دهد که برخی از مطالعات این موضوع را تأیید می‌کند. درواقع افزودن سرباره به ترکیب بتن می‌تواند با افزایش تعریق بتن باعث ترک‌خوردگی بتن تازه تولیدشده شود [۲۶].

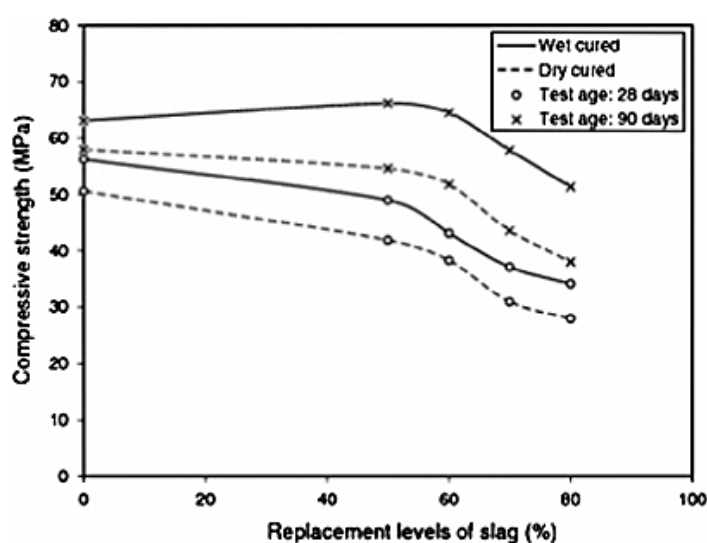


شکل ۱۴-۱- استحکام گیری ملات‌های با نسبت آب به سیمان مختلف و حاوی درصد‌های مختلف سرباره گرانوله شده در دماهای عمل‌آوری متفاوت [۲۷].

خواص مکانیکی بتن حاوی سرباره گرانوله به عواملی از قبیل مقدار جایگزینی سرباره با سیمان، نسبت آب به بایندر و مقدار مواد سیمانی، نوع عمل‌آوری، عمر بتن و ... بستگی دارد. هر چه مقدار سرباره گرانوله در ترکیب بتن افزایش یابد، افزایش استحکام اولیه بتن بیشتر طول می‌کشد. علاوه بر این، افزایش استحکام اولیه به دمای بتن

نیز بستگی دارد. نتایج بررسی‌ها نشان داده که در شرایط عمل‌آوری عادی، استحکام‌گیری بتن حاوی سرباره نسبت به بتن بدون سرباره با سرعت کندتری انجام می‌شود. افزایش دما سبب می‌شود استحکام‌گیری بتن حاوی سرباره افزایش یابد و هرچه مقدار سرباره افزایش یابد افزایش در استحکام اولیه بیشتر می‌شود (شکل ۱۴-۱) [۲۷].

در پژوهشی تأثیر درصد جایگزینی سرباره گرانوله با سیمان (۵۰ و ۸۰ درصد) و نوع فرآیند عمل‌آوری (خشک و تر) بر استحکام فشاری بتن مورد مطالعه قرار گرفت [۲۷]. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار سرباره مقدار استحکام به تدریج کاهش می‌یابد. روند کاهش استحکام با افزایش مقدار سرباره در نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوا واضح‌تر بود. با این وجود در مورد نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب مشاهده شد که پس از ۹۰ روز استحکام بتن حاوی ۵۰ و ۶۰ درصد سرباره از استحکام بتن بدون سرباره بیشتر شد (شکل ۱۵-۱).



شکل ۱۵-۱- تأثیر جایگزینی سرباره گرانوله و شرایط عمل‌آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی [۲۷].

بررسی تأثیر جایگزینی سرباره گرانوله فعال با سیمان نشان داد که نوع ماده فعال‌ساز سرباره تأثیر بسزایی در خواص نهایی بتن ایجاد خواهد کرد [۲۸]. بدین منظور از فعال‌ساز سدیم سیلیکات و سدیم متاسیلیکات استفاده شد. نسبت مولکولی SiO_2 به Na_2O در سدیم سیلیکات برابر با ۱/۶۵ و در متاسیلیکات سدیم برابر ۱ است. از دو مقدار متفاوت Na_2O در هر یک از ترکیبات استفاده شد که برابر با ۴ و ۶ درصد وزنی سرباره بود.

شکل ۱۶-۱ تغییرات استحکام کششی طی دوره‌های زمانی متفاوت را نشان می‌دهد. بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه‌های بتنی است که ۶۰ درصد سرباره فعال‌شده با سیلیکات سدیم (با Na_2O ۴ درصد) در آن جایگزین سیمان پرتلند شده است. در رابطه با فعال‌سازی سرباره با متاسیلیکات سدیم، در صورتی که مقدار Na_2O در فعال‌ساز ۶ درصد وزنی سرباره باشد استحکام بهبود می‌یابد.

جدول ۲۷-۱ طرح اختلاط نمونه‌های حاوی سرباره گرانوله فعال شده با سدیم سیلیکات و متاسیلیکات [۲۸]

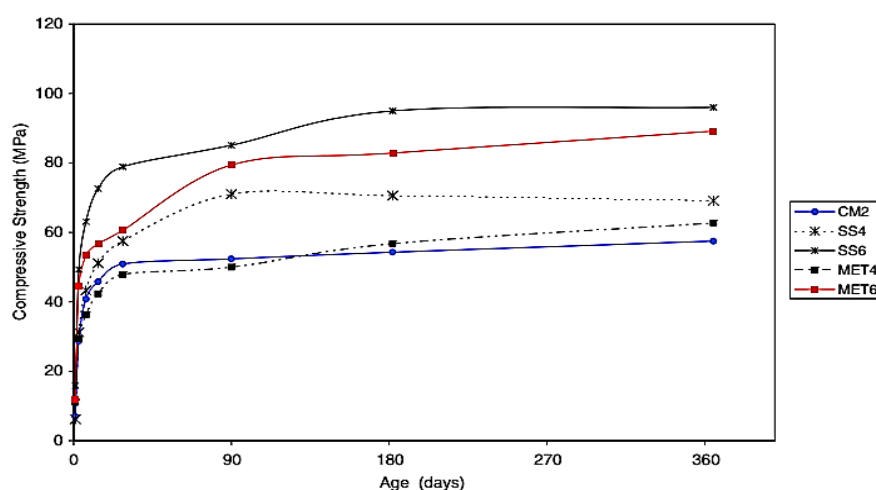
Mix no.	Slag (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	Activator (Na ₂ O %)	Activator (kg/m ³)	Lime (%)	Lime slurry (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Total water (kg/m ³)	Total binder (kg/m ³)	Fine Agg. (kg/m ³)	Coarse Agg. (kg/m ³)	w/b (%)
CM2		375					180	186	375	600	1215	0.48
SLG60	225	150					180	186	375	591	1215	0.48
SS4	326.39	0	4	64.63	4	30	133.97	180	375	591	1215	0.48
SS6	305.34	0	6	90.69	6	45	113.96	180	375	591	1215	0.48
MET4	333.15		4	47.93	4	30	144.38	180	375	591	1215	0.48
MET6	314.49		6	67.87	6	45	128.31	180	375	591	1215	0.48

CM2: PC control mix with w/c = 0.48;

SLG60: 60% GGBS + 40% OPC mixture with w/c = 0.48;

SS4: Sodium silicate alkali-activated slag mixture with Na₂O content of 4% with w/c = 0.48;

SS6: Sodium silicate alkali-activated slag mixture with

Na₂O content of 6% with w/c = 0.48;MET4: Sodium metasilicate alkali-activated slag mixture with Na₂O content of 4% with w/c = 0.48;MET6: Sodium metasilicate alkali-activated slag mixture with Na₂O content of 6% with w/c = 0.48.

شکل ۱۶-۱- تغییرات استحکام کششی نمونه‌های بتنی حاوی سرباره گرانوله فعال شده با سدیم سیلیکات و متاسیلیکات طی دوره‌های زمانی متفاوت [۲۸].

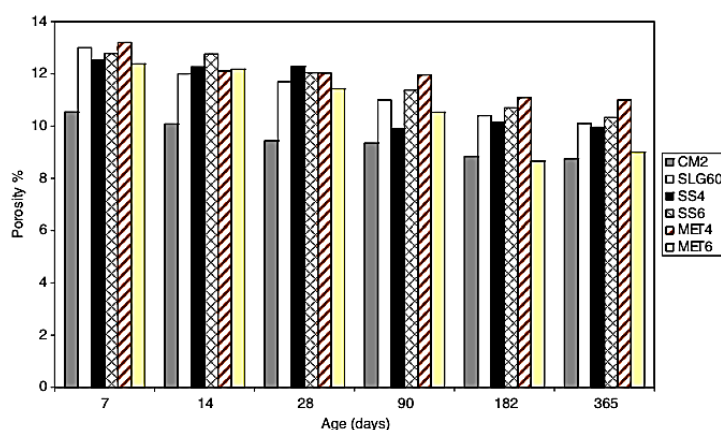
همچنین مشخص شد که استفاده از سرباره تخلخل موجود در بتن را افزایش می‌دهد (شکل ۱۷-۱). با افزایش طول عمر بتن مقدار تخلخل بتن کم می‌شود. نکته قابل توجه این است که معمولاً انتظار می‌رود استفاده از Na₂O بیشتر در ترکیب فعال‌ساز باعث تخلخل کمتر شود اما در مورد نمونه‌های فعال شده با سدیم سیلیکات کاهش تخلخل مشاهده نشد؛ اما باید به این نکته توجه داشت که به کارگیری سرباره در ترکیب بتن هرچند باعث افزایش مقدار تخلخل می‌شود اما اندازه حفرات و پیوستگی بین آن‌ها را کم می‌کند.

آئر و آکیوز^۱ [۲۹] تلاش کردند تا مقدار بهینه سرباره گرانوله شده برای افزایش استحکام بتن را به دست بیاورند. بدین منظور به اندازه ۰ تا ۱۱ درصد وزن سیمان، سرباره با سیمان ترکیب شد و مقدار بایندها ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. قبل از بررسی خواص مکانیکی، تمامی نمونه‌ها در محیط مرطوب عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد سرباره مقدار استحکام افزایش می‌یابد. از ترکیب سرباره به اندازه ۵۵ درصد وزن سیمان با سیمان بهترین خواص مکانیکی حاصل شد و افزودن مقدار بیشتری از سرباره به

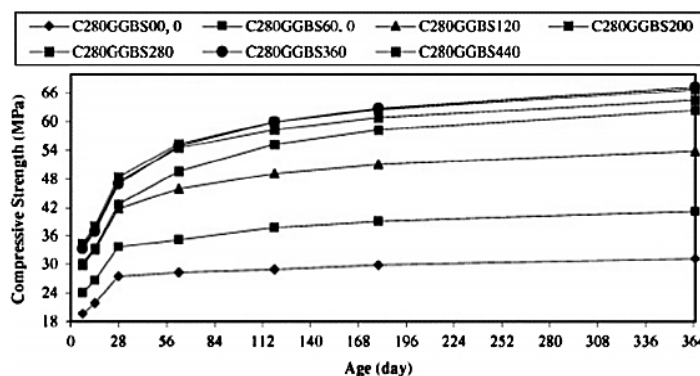
¹ Oner and Akyuz

ترکیب بتن غیرمنطقی بود (شکل ۱۸-۱).

استحکام خمشی سازه‌های بتنی به شدت به وجود میکرو ترک‌ها حساس است و با توجه به اینکه افزودن سرباره باعث بهبود محصولات واکنش‌ها و ساختار تخلخل‌های بتن سخت‌شده می‌شود، انتظار می‌رود که وجود سرباره گرانوله در بتن باگذشت زمان باعث بهبود استحکام خمشی بتن شود. نتایج تحقیقات متعددی نشان داده که بتن‌های حاوی سرباره گرانولی پس از ۷ روز استحکام برشی مشابه یا بالاتری از بتن بدون سرباره ارائه می‌دهند. این رفتار ناشی از افزایش تراکم بتن و بهبود چسبندگی فصل مشترک ملات-مصالح است. جایگزینی ۵۰ تا ۷۵ درصدی سرباره گرانولی باسیمان سبب شد تا استحکام برشی بتن در حدود ۸ MPa از بتن بدون سرباره بیشتر شود. باین وجود در برخی از گزارش‌ها رفتار متفاوتی مشاهده شده است. به عنوان مثال، بررسی تأثیر جایگزینی ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصدی سرباره با سیمان بر استحکام خمشی نشان داد که نمونه حاوی ۶۰ درصد سرباره استحکام بسیار بالاتری نسبت به بتن بدون سرباره دارد، در حالی که جایگزینی ۴۰ و ۸۰ درصدی سرباره با سیمان باعث شد استحکام برشی کمتری نسبت به نمونه بدون سرباره حاصل شود [۲۶].



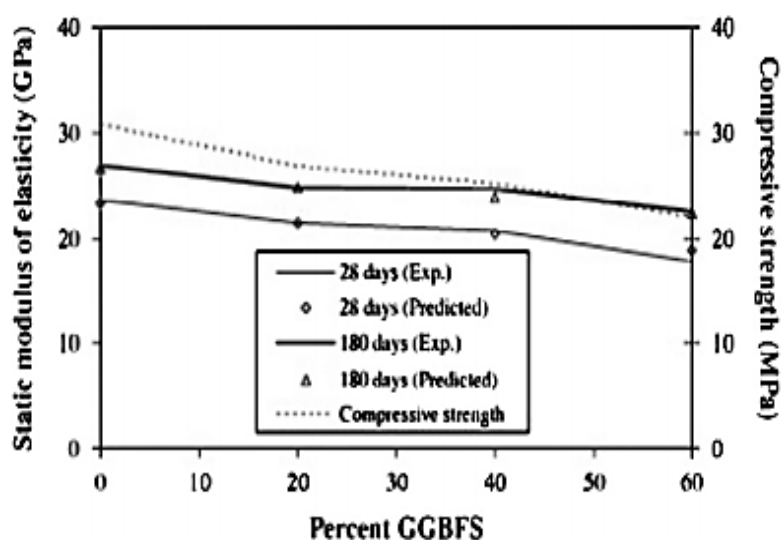
شکل ۱۷-۱- درصد تخلخل نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف سرباره گرانوله فعال شده با سدیم سیلیکات و متاسیلیکات طی دوره‌های زمانی متفاوت [۲۸].



شکل ۱۸-۱- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتنی حاوی سرباره گرانوله با طرح اختلاط‌های متفاوت [۲۹].

کاهش تخلخل بتن به دلیل افزایش واکنش‌های پوزولانی در اثر اضافه شدن سرباره گرانوله شده به ترکیب بتن تغییراتی در مدول الاستیک بتن ایجاد می‌کند. گزارش شده که جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی سرباره با

سیمان در طی یک دوره ۲۸ روز باعث می‌شود تا مدول الاستیک بتن بدون سرباره از ۴۴/۵۸ به ترتیب به ۴۵/۰۲، ۴۴/۸۴ و ۴۳/۰۹ گیگا پاسکال تغییر کند. جایگزینی بیش از ۶۰ درصدی سرباره با سیمان سبب شد تا بتن مدول الاستیکی برابر و تا حدودی بالاتر از بتن بدون سرباره داشته باشد (شکل ۱۹-۱). همچنین استفاده از سرباره‌های تولیدی در ژاپن و آفریقای جنوبی تغییر چشمگیری در مدول الاستیک بتن به وجود نیاورد. در مقابل، در حالتی که درصد بالایی از سرباره تولیدی در انگلستان جایگزین سیمان شد در دوره‌های اولیه باعث کاهش مدول الاستیک بتن شد.



شکل ۱۹-۱- مدول استاتیک الاستیکی نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلفی از سرباره گرانوله پس از دوره ۲۸ و ۱۸۰ روز [۳۰].

ساختار بتن مستقیماً تحت تأثیر خواص وابسته به زمان از قبیل خزش و انقباض در حین خشک شدن قرار می‌گیرد. گزارش شده که جایگزینی بیش از ۷۰ درصدی سرباره گرانوله با سیمان مقدار انقباض بتن را در حین خشک شدن بیش از ۴۵ درصد نسبت به حالتی که سرباره در ترکیب بتن استفاده نمی‌شود کاهش داده است. همچنین در پژوهشی دیگر مشخص شد مقدار انقباض نمونه‌های بتنی که به میزان ۵۰ درصد حجمی بایندر، سرباره در ترکیب خود دارند از انقباض بتن بدون سرباره کمتر است؛ درحالی‌که افزودن مقدار بیشتری از سرباره به ترکیب بتن باعث شد مقدار انقباض هر دو نوع بتن یکسان شود. بروکس^۱ و همکاران [۳۰] تأثیر جایگزینی ۳۰ و ۷۰ درصدی سرباره گرانوله شده با سیمان را بر مقدار انقباض و خزش بتن مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن‌ها نشان داد که بتن حاوی سرباره نسبت به بتن بدون سرباره استحکام بالاتر (درازمدت)، خزش کمتر و مقدار انقباض مشابهی دارد.

لی و یون^۲ [۳۰] نیز خزش نمونه‌های بتنی مختلف که در آن‌ها سرباره گرانوله شده به میزان ۵۰ درصد سیمان و ترکیب سرباره و خاکستر بادی (۳۵ درصد وزنی سیمان سرباره و ۱۵ درصد وزنی سیمان خاکستر بادی)

¹ Brooks

² Lee and Yoon

جایگزین سیمان شده بودند را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که در کوتاه‌مدت مقدار خزش نمونه‌های بتنی حاوی سرباره و خاکستر بادی از بتن بدون سرباره کمتر است، اما در بلندمدت بتن بدون افزودنی خزش کمتری داشت. در مقابل نتایج پژوهشی که مقدار جایگزینی سرباره با سیمان در بتن کمتر از ۵۰ درصد بود نشان داد که بتن حاوی سرباره گرانوله خزش کمتری دارد [۲۶].

تأثیر استفاده از سرباره گرانوله شده بر سایش نمونه‌های بتنی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج یک بررسی نشان داد که جایگزینی بیش از ۴۰ درصدی سرباره گرانوله شده با سیمان افزایش ۲۰ درصدی مقاومت به سایش نمونه‌های بتنی را در پی دارد. نتایج بررسی‌ها مشخص کرد که افزایش مقدار سرباره در ترکیب بتن باعث کاهش عمق ساییدگی و مقدار بتن ساییده شده می‌شود. با این وجود، تأثیر جایگزینی ۲۰ تا ۴۰ درصدی سرباره با سیمان ناچیز بوده است [۲۶].

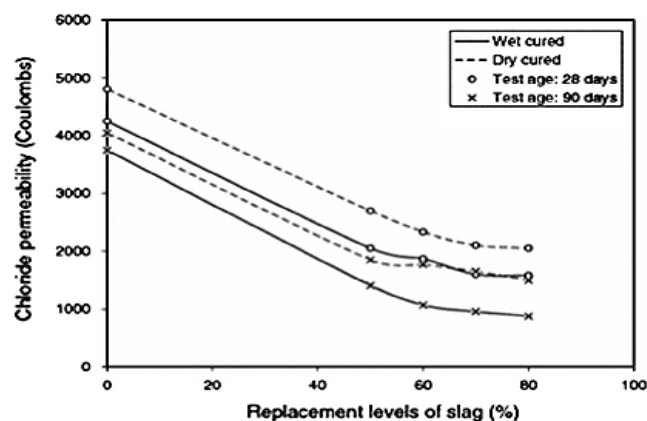
واکنش سرباره گرانوله شده با کلسیم هیدروکسید با کاهش اندازه تخلخل‌ها باعث می‌شود نفوذپذیری بتن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. بررسی تأثیر جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی سرباره گرانوله شده با سیمان باعث شد مقدار جریان عبوری از ۲۰۶۵ کلمب به ترتیب به ۱۰۵۳، ۴۰۳ و ۲۸۲ برسد. کاهش اندازه تخلخل‌ها و همچنین کاهش پیوستگی آن‌ها سبب شد تا نفوذپذیری بتن حاوی سرباره کمتر شود و افزایش مقدار سرباره باعث شد نفوذپذیری کاهش بیشتری داشته باشد. همچنین مشخص شده که به‌کارگیری سرباره گرانوله شده در بتن نفوذپذیری آب در بتن را از ۲۶mm به ۱۴mm می‌رساند. با این وجود افزایش مقدار سرباره از ۲۰ به ۶۰ درصد سبب نشد تا تغییر قابل ملاحظه‌ای در نفوذپذیری بتن حاوی سرباره ایجاد شود.

در پژوهشی تأثیر مقدار سرباره و نوع عمل‌آوری بتن بر نفوذپذیری یون کلراید مورد بررسی قرار گرفت [۳۱]. نمونه‌های بتنی به‌صورت تر (در آب) یا در هوا (در دمای ۲۰ درجه و رطوبت نسبی ۶۵ درصد) عمل‌آوری شدند. مقدار جایگزینی سرباره گرانوله شده با سیمان بین ۵۰ تا ۸۰ درصد وزنی سیمان بود. همچنین مقدار آب به بایندر (سیمان+سرباره) برای تمامی ترکیبات ۰/۴ بود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بر اساس آن مشاهده می‌شود که بتن حاوی سرباره صرف‌نظر از نوع عملیات عمل‌آوری نفوذپذیری کمتری دارد. در تمامی دوره‌های زمانی و برای هر دو نوع عمل‌آوری، نمونه‌های بتنی که ۵۰ درصد یا مقدار بیشتری از سرباره در ترکیب خود داشتند نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن بدون سرباره داشتند. به‌طور مثال نمونه‌های حاوی ۷۰ و ۸۰ درصد سرباره پس از ۹۰ روز عمل‌آوری تر مقدار جریان عبوری کمتر از ۱۰۰۰ کلمب داشتند که نسبت به بتن بدون سرباره (۳۷۵۰ کلمب) بسیار کمتر بود. بر اساس استاندارد ASTM C۱۲۰۲ این نوع بتن‌ها را از لحاظ مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید می‌توان به‌عنوان نمونه‌های بسیار عالی در نظر گرفت. اصلاح ساختار و تخلخل‌های بتن در حضور سرباره گرانوله عامل اصلی کاهش نفوذپذیری یون کلراید بتن بود.

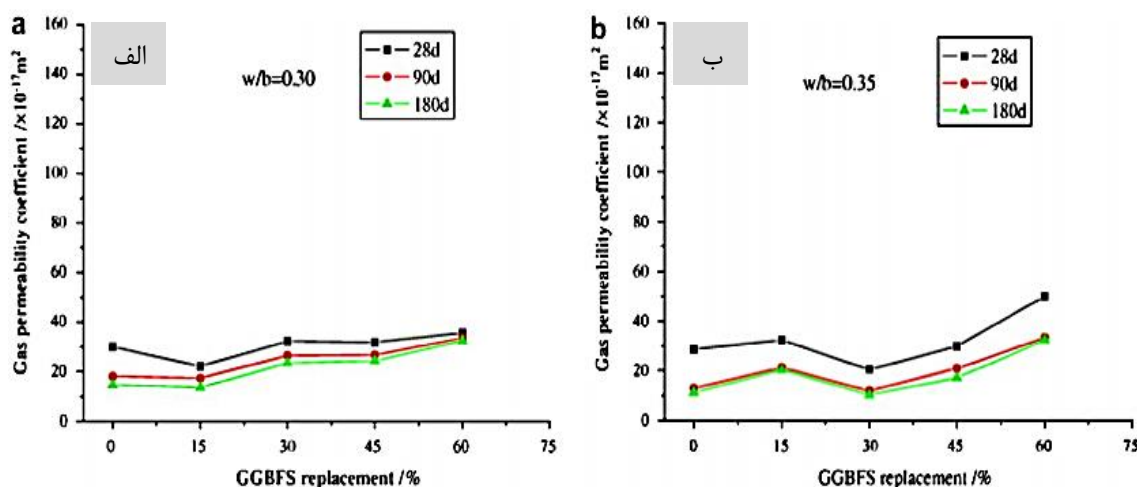
هوی شنگ^۱ و همکاران [۳۱] تأثیر جایگزینی سرباره گرانولی با سیمان را بر مقاومت به نفوذپذیری گاز در بتن مورد مطالعه قرار دادند. همچنین تأثیر نسبت آب به بایندر و عمر نمونه‌های بتنی نیز بررسی شد که نتایج آن در شکل ۲۱-۱ آورده شده است. تغییر نسبت آب به بایندر تأثیر چشمگیری بر مقدار نفوذپذیری گاز در بتن‌های حاوی سرباره نداشت. در نسبت آب به بایندر ۰/۳، افزایش درصد جایگزینی سرباره گرانوله شده با سیمان تا میزان ۶۰ درصد به مقدار ناچیزی ضریب نفوذپذیری گاز را افزایش داد. با توجه به نتایج، مشخص شد که جایگزینی ۳۰

¹ Hui-Sheng

درصدی سرباره با سیمان باعث می‌شود کمترین ضریب نفوذ گاز در نمونه‌های موردبررسی به دست آید. صرف‌نظر از نسبت آب به بایندر افزایش طول عمر بتن کاهش نفوذپذیری گاز را به دنبال داشت.



شکل ۲۰-۱ تغییرات نفوذپذیری یون کلراید در نمونه‌های بتنی با عمل‌آوری متفاوت و مقادیر مختلف جایگزینی سرباره گرانوله با سیمان [۳۲].



شکل ۲۱-۱ تأثیر مقدار سرباره گرانوله و نسبت آب به بایندر بر نفوذپذیری گاز در نمونه‌های بتنی (الف) نسبت آب به سیمان ۰/۳ و (ب) نسبت آب به بایندر ۰/۳۵ [۳۱].

تأثیر جایگزینی سرباره گرانوله بر رفتار خوردگی و خواص مکانیکی فولاد در نمونه‌های بتنی نشان داده‌شده در جدول ۲۸-۱ که عمل‌آوری آن‌ها به دو صورت مختلف انجام شد، موردبررسی قرار دادند [۳۳]. بدین منظور نمونه‌های بتنی ساخته‌شده پس از قالب‌گیری در هوا (C۱) و در آب (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) (C۲) عمل‌آوری شدند. شکل ۲۲-۱ استحکام فشاری^۱ نمونه‌های را طی دوره‌های ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. در هر دو روش عمل‌آوری بیشترین مقدار استحکام کششی مربوط به نمونه‌هایی بود که مقدار جایگزینی سرباره با سیمان در آن‌ها

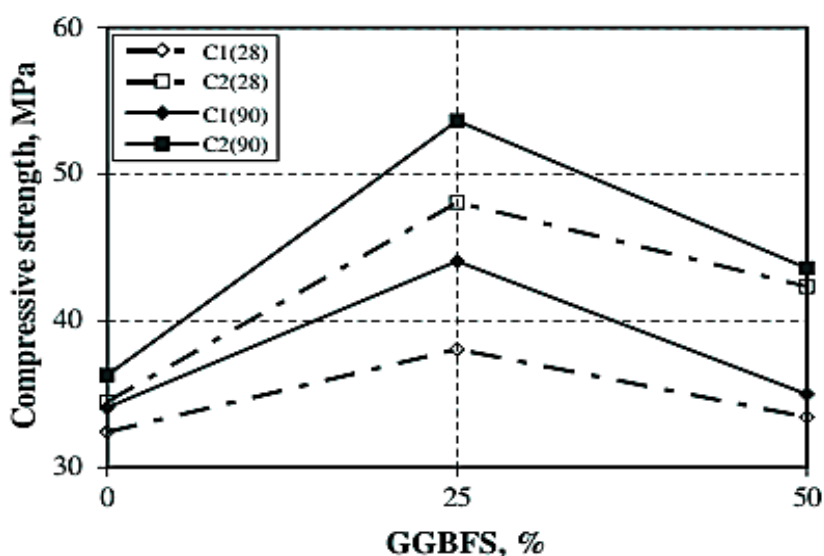
^۱ Compressive Strength

۵۰ درصد بود. طی دوره‌های ۲۸ و ۹۰ روز مقدار استحکام نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوا به ترتیب ۱۷/۴۱ و ۲۹/۲۳ درصد و استحکام نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب به ترتیب ۳۹/۳۷ و ۴۷/۸۳ درصد نسبت به نمونه‌های بدون سرباره افزایش یافت. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عمر بتن مقدار استحکام افزایش می‌یابد که به دلیل تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدرات بیشتر در اثر فرآیند هیدراسیون است.

جدول ۲۸-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی (مقادیر برای یک مترمربع است) [۳۳]

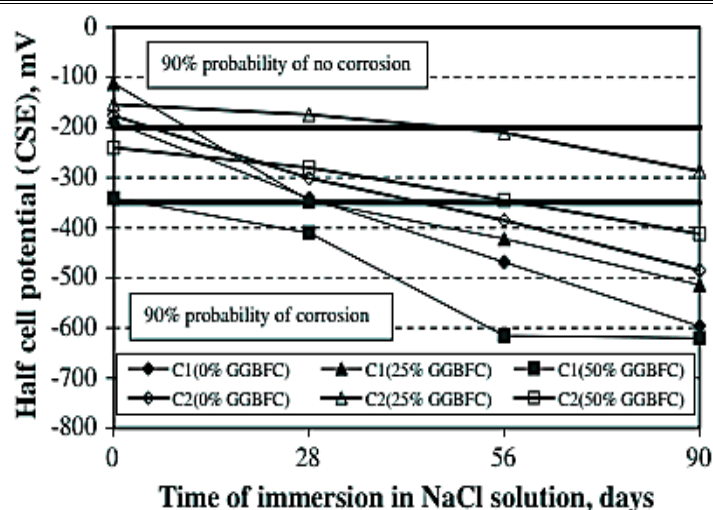
Mixture code	Cement	Sand	Crushed stone I	Crushed stone II	Water	GGBFS
Control	300	790	597	597	150	-
GGBFS-25	225	787	595	595	150	75
GGBFS-50	150	785	593	593	150	150

Superplasticiser (SP) was used 0.5% by weight of binder (cement + GGBFS).



شکل ۲۲-۱- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده به روش‌های مختلف با مقدار سرباره گرانوله جایگزین سیمان [۳۳].

نتایج اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل طی ۹۰ روز غوطه‌وری بلوک‌های بتنی در محلول سدیم کلراید ۴ درصد نشان داد که وجود ۲۵ درصد سرباره گرانوله در ترکیب بتن، پتانسیل خوردگی آرماتورهای بتن عمل‌آوری شده در آب را در منطقه امن نگه می‌دارد. بر اساس استاندارد ASTM C۸۷۶ در حالتی که پتانسیل نیم‌پیل بیشتر از ۲۰۰ mV- باشد احتمال خوردگی نمونه بسیار کم بوده و در پتانسیل‌های فعال‌تر از ۳۵۰ mV- احتمال خوردگی بسیار بالا خواهد بود. بر این اساس نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده در آب حاوی ۲۵ درصد سرباره گرانوله طی دوره ۹۰ روز در محدوده پتانسیل امن قرار دارند.



شکل ۲۳-۱- تغییرات پتانسیل نیم‌پیل نمونه‌های بتنی عمل‌آوری شده با روش‌های متفاوت حاوی مقادیر مختلف سرباره گرانوله نسبت به زمان [۳۳].

استفاده از سرباره گرانوله باعث می‌شود تا جریان‌های شروع خوردگی در دوره‌های کوتاه‌مدت نسبت به بتن بدون سرباره بیشتر باشد که علت آن تکمیل نشدن واکنش‌های پوزولانی طی دوره ۲۸ روز و در نتیجه نفوذپذیری بیشتر آن‌ها طی این دوره است. با افزایش طول عمر بتن جریان خوردگی نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه‌های بتنی بدون سرباره کمتر خواهد بود و با افزایش مقدار سرباره، جریان خوردگی نمونه‌ها کمتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که بتن‌های عمل‌آوری شده در آب جریان خوردگی کمتری نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوا دارند. باگذشت زمان، دانسیته جریان خوردگی آرماتورهای بتن حاوی سرباره نسبت به بتن مرجع کمتر می‌شود و در نتیجه سرعت تخریب آن‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۲۴-۱). نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد سرباره گرانولی بیشترین مقاومت به خوردگی را ارائه می‌دهند (شکل ۲۵-۱) [۳۰].

نتایج تحقیقات اسکات^۱ [۱] نشان داد که استفاده از سرباره در ترکیب بتن باعث می‌شود پتانسیل مدارباز بتن نسبت به حالتی که سرباره در ترکیب بتن وجود ندارد فعال‌تر شود؛ اما افزایش ۷۵ درصدی مقدار سرباره باعث افت شدید پتانسیل پس از ۱۲ روز شد (شکل ۲۶-۱). علاوه بر این مشخص شد که جریان خوردگی در بتن حاوی سرباره در ابتدا از بتن معمولی بیشتر است (در ۲۸ روز نخست) اما پس از آن جریان افت کرده و به جریان خوردگی بتن^۲ معمولی می‌رسد. در حالتی که مقدار سرباره بین ۲۰ تا ۷۰ درصد است افت جریان خوردگی در مدت زمان کمتری اتفاق می‌افتد.

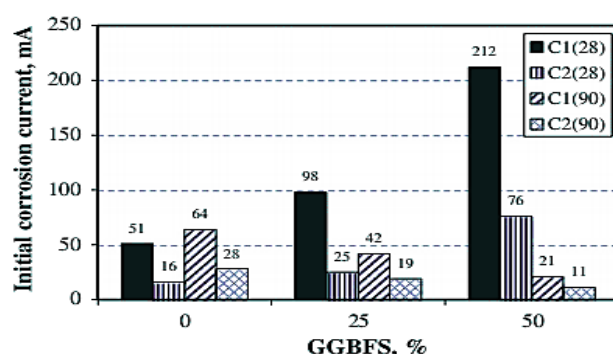
آنالیز محلول شبیه‌سازی تخلخل بتن نشان داد که استفاده از سرباره هیدروکسیل موجود در محلول را کاهش می‌دهد. سرباره علاوه بر کاهش مقدار هیدروکسیل باعث بالا رفتن مقدار سولفیدها نیز می‌شود که نتیجه آن افزایش خوردگی محلول حاوی سرباره فولاد نسبت به محلول حاوی سیمان پرتلند است. علاوه بر این وجود سرباره تأثیر بسزایی بر مقدار کلراید آستانه‌ای که برای شکستن لایه پسیو^۳ تشکیل شده روی آرماتورها ندارد؛ اما

¹ Scott

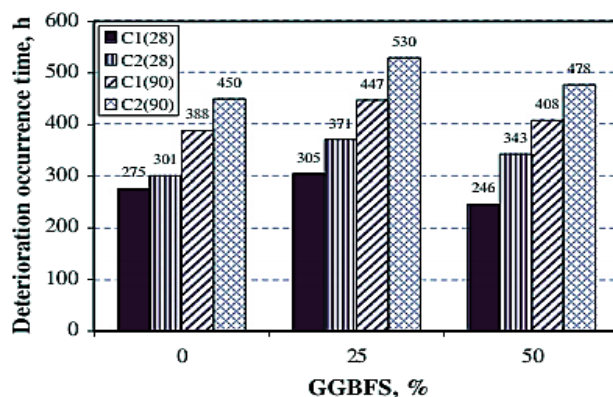
² Corrosion Rate

³ Passive Layer

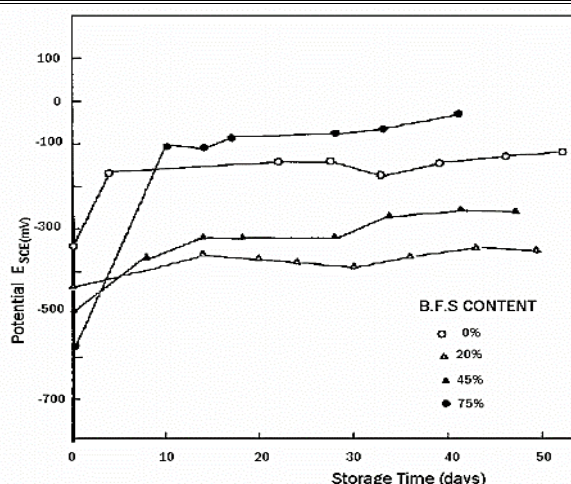
باید به این نکته توجه داشت که تأثیر مثبت سرباره بر بهبود مقاومت به خوردگی بیشتر جنبه فیزیکی دارد و وجود سرباره از طریق کاهش نفوذپذیری بتن تأثیر بسزایی در به تأخیر انداختن شروع واکنش‌های خوردگی دارد. مقدار کلی تخلخل بتن حاوی سرباره با بتن بدون سرباره برابر است، اما وجود سرباره در ترکیب بتن باعث می‌شود تخلخل‌های موجود در بتن اندازه کوچک‌تری داشته باشد. وجود سرباره همچنین پیوستگی بین حفرات و تخلخل‌ها را از بین می‌برد که این امر کاهش نفوذپذیری بتن را در پی دارد. حضور سرباره در ترکیب بتن باعث افزایش ضخامت ناحیه انتقالی می‌شود (۳۰ درصد سرباره باعث افزایش از ۳۷ به ۴۵ میکرومتر) اما با توجه به کاهش CH نسبت به بتن ساخته‌شده از سیمان معمولی، ناحیه انتقالی بتن سرباره‌ای نفوذپذیری کمتری دارد [۱].



شکل ۲۴-۱- تغییرات مدت‌زمان سپری‌شده برای شروع خوردگی در نمونه‌های بتنی با نسبت جایگزینی سرباره گرانوله با سیمان [۳۳].



شکل ۲۵-۱- تغییرات مدت‌زمان سپری‌شده برای تخریب نمونه‌های بتنی با نسبت جایگزینی سرباره گرانوله با سیمان [۳۳].



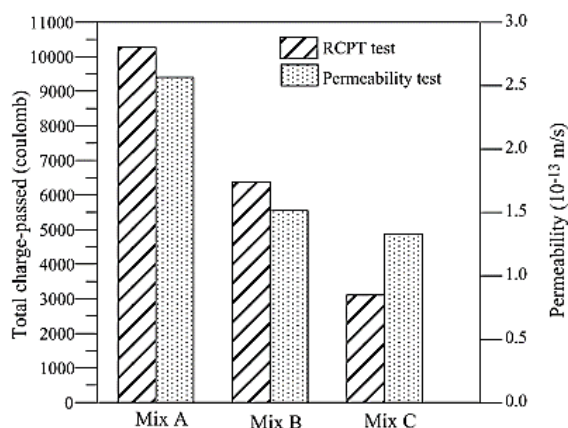
شکل ۱-۰- تغییرات پتانسیل مدار باز نمونه‌های بتنی با درصد‌های جایگزینی مختلف سرباره گرانوله (نمونه‌های بتنی در رطوبت ۱۰۰ درصد نگهداری می‌شود) [۱].

در پژوهشی تأثیر جایگزینی سرباره گرانولی بر رفتار خوردگی آرمان‌ور در نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط نشان داده شده در جدول ۱-۲۹ مورد بررسی قرار گرفت [۳۴]. نسبت آب به سیمان تمامی نمونه‌ها ۰/۵۵ بود. در این پژوهش رفتار خوردگی در حالتی مورد ارزیابی قرار گرفت که نمونه‌های بتنی تحت بار قرار داشتند. مقدار بار اعمالی بر ترکیبات A، B و C به ترتیب ۲۶/۹، ۲۷/۵ و ۲۸/۴ kN بود. همچنین استحکام فشاری نمونه‌ها در طی دوره‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روز مورد بررسی قرار گرفت.

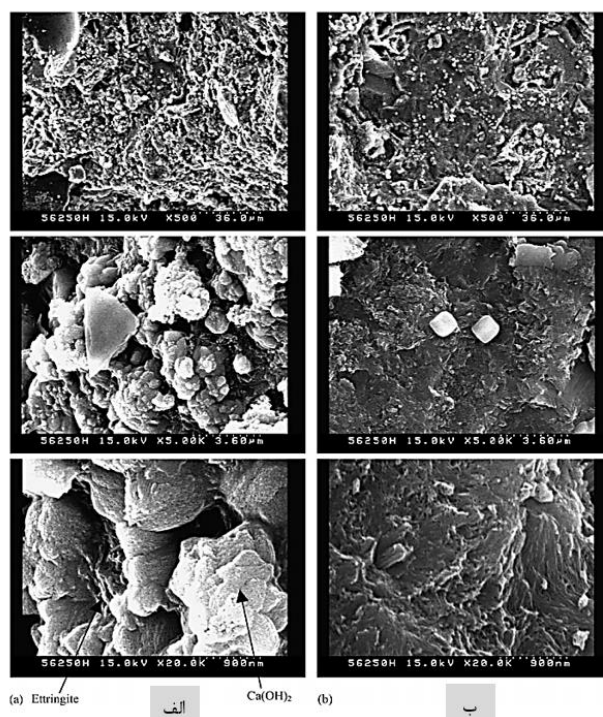
جدول ۱-۲۹- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی (kg m^{-3}) [۳۴]

Mix	Water	Cement	Slag	Fine aggregate	Coarse aggregate
A	235	427	0	780	843
B	235	256	171	761	843
C	235	171	256	752	843

شکل ۱-۲۷ جریان عبوری نمونه‌های بتنی غوطه‌ور در محلول سدیم کلراید ۳ درصد وزنی + NaOH در ۰/۳ را نشان می‌دهد. حضور سرباره گرانوله شده در ترکیب سیمان کاهش نفوذپذیری بتن و در نتیجه کاهش جریان عبوری نمونه را در پی داشت. شکل ۱-۲۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های بتنی حاوی سرباره و بدون سرباره را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی سرباره ساختاری فشرده‌تر با اندازه حفرات کوچک‌تر دارند. سرباره در محیط قلیایی با آب و سپس با هیدروکسید وارد واکنش می‌شود و از طریق واکنش‌های پوزولانی ژل کلسیم سیلیکات هیدراته تولید می‌کند. تولید مقدار بیشتری ژل کلسیم سیلیکات هیدراته باعث ایجاد ساختاری متراکم‌تر با تخلخل کمتر می‌شود و افزایش سرباره گرانولی با افزایش تولید کلسیم سیلیکات هیدراته باعث می‌شود ساختار متراکم‌تر شود. ایجاد ساختار متراکم با تخلخل کمتر نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد که این امر افزایش مقاومت الکتریکی بتن را سبب می‌شود. همچنین، وجود سرباره که گرمای هیدراسیون را کاهش می‌دهد باعث می‌شود تا ترک‌های حرارتی کمتری در ساختار بتن ایجاد شود.



شکل ۲۷-۱- مقدار جریان عبوری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف [۳۴].

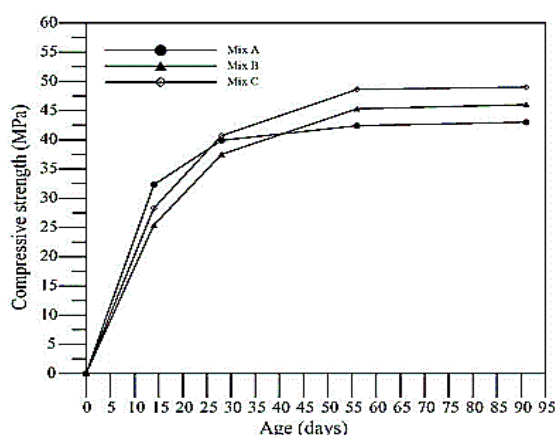


شکل ۲۸-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی بتن ساخته‌شده از الف) سیمان پرتلند و ب) سیمان پرتلند + سرباره گرانوله [۳۴].

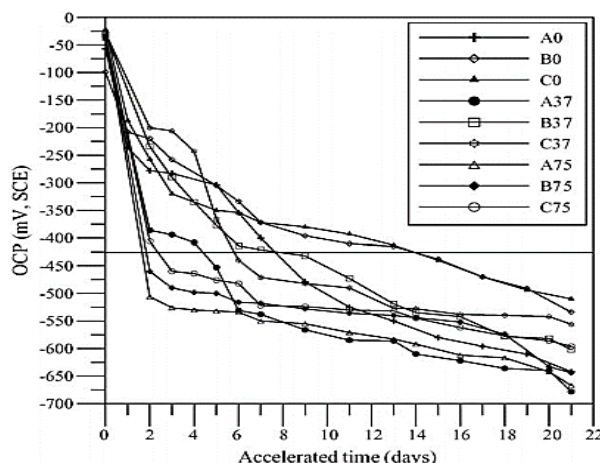
همچنین بررسی خواص استحکامی نمونه‌های بتنی نشان داد که قبل از دوره ۴۰ روز بتن بدون سرباره استحکام فشاری بالاتری دارد اما پس از آن بتن‌های حاوی سرباره استحکام بالاتری ارائه می‌دهند (شکل ۲۹-۱). ترکیبات شیشه‌ای موجود در سرباره با سرعت کمی با آب وارد واکنش می‌شوند که نتیجه آن کاهش سرعت تولید یون هیدروکسید از فرآیند هیدراسیون است.

مطابق استاندارد ASTM C۸۷۶-۹۱، وقتی پتانسیل مدار باز بیشتر از 127mV باشد، (نسبت به الکترود کالومل اشباع)، احتمال خوردگی آرماتور در بتن کمتر از ۱۰ درصد است. در صورتی که پتانسیل مدار باز بین 127mV و 276mV باشد احتمال خوردگی نامشخص و در حالتی که پتانسیل کمتر از 276mV احتمال خوردگی آرماتور

در بتن بیش از ۹۰ درصد است. تغییرات پتانسیل مدارباز نمونه‌های بتنی تحت بار در شکل ۳۰ نشان داده شده است. حین اندازه‌گیری پتانسیل، به نمونه‌های بتنی مختلف مقدار ۰، ۳۷ و ۷۵ درصد مقدار نهایی بار اعمال شد. هرچند که جایگزینی ۴۰ و ۶۰ درصدی سرباره گرانوله با سیمان باعث شد مقدار pH از ۱۳/۲ به ترتیب به مقدار ۱۲/۸ و ۱۲/۴ تقلیل یابد، اما این تغییرات pH تأثیر بر رفتار خوردگی نمونه‌ها ایجاد نکرد. با توجه به شکل، در حالتی که نمونه‌های بتنی تحت بار قرار ندارند، نمونه‌های حاوی سرباره گرانولی در مقایسه با بتن بدون سرباره در مدت‌زمان‌های بیشتری به شرایط خوردگی شدید می‌رسد. همچنین مشاهده شد که اعمال بار تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر تسریع خوردگی نمونه‌ها دارد. اعمال بار باعث می‌شود تا ترک‌های بتن بیشتر و وسیع‌تر شوند که نتیجه‌ی آن افزایش نفوذ یون‌های خورنده است (شکل ۳۰-۱).



شکل ۳۰-۲- تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف [۳۴].



شکل ۳۰-۳- تغییرات پتانسیل مدارباز تحت شرایط خوردگی تسریع شده برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف [۳۴].

مطالعات میدانی در زمینه بررسی دوام بلندمدت بتن حاوی سرباره گرانوله شده نشان داد که وجود سرباره گرانوله در ترکیب بتن کاهش حرارت هیدراسیون، کاهش نفوذپذیری و افزایش استحکام بتن را در بلندمدت در پی خواهد داشت [۳۵]. همچنین مشخص شد که جایگزینی ۷۰ تا ۸۰ درصدی سرباره با سیمان باعث می‌شود مقدار کربناسیون بتن افزایش یابد که این نکته می‌بایست در ساخت سازه‌های بتنی با مقاطع نازک موردتوجه قرار گیرد.

در چنین مواردی، عمل‌آوری بتن در آب می‌تواند خطر کرناسیون بتن را رفع کند. اما در مواردی که امکان عمل‌آوری سازه در آب وجود ندارد برای کاهش کرناسیون بتن می‌بایست مقدار سرباره مورد استفاده کمتر از ۵۰ درصد وزنی سیمان باشد.

میزان خوردگی شش سازه بتنی مختلف در سواحل دریای شمال در هلند مورد بررسی قرار گرفت. عمر این سازه‌ها بین ۱۸ و ۴۱ سال بود و در بیشتر آن‌ها سرباره مورد استفاده قرار گرفته بود. بازرسی‌های چشمی نشان داد که تنها در یک سازه که در آن پوشیدگی آرماتور (عمق کارگذاری آرماتور) کم بود نشانه‌هایی از خوردگی آرماتور مشاهده شد [۳۵].

نتایج بررسی دوام سازه‌های بتنی حاوی سرباره گرانوله نشان داده که جایگزینی ۴۰ درصدی سرباره گرانوله تأثیر چشمگیری بر سرعت خوردگی آرماتور در بتن نداشته، اما جایگزینی ۶۰ درصدی سرباره گرانوله، افت چشمگیر سرعت خوردگی را در پی داشته است. همچنین کاهش مقدار pH بتن در اثر استفاده از سرباره تأثیر مخربی بر مقاومت به خوردگی آرماتور در بتن نداشته است. افزایش درصد سرباره در بتن نیز افزایش مقاومت به خوردگی را سبب می‌شود [۳۵].

۵-۱-۱ متاکائولن

متاکائولن یک سیلیکات آلومینیوم سفیدرنگ و آمورف (بدون شکل و حالت بلوری شکل) می‌باشد که به شدت با هیدروکسید کلسیم (محصول هیدراته شده‌ی سیمان معمولی) واکنش می‌دهد تا ترکیباتی چسبنده و سیمانی شکل بگیرد. مواد خام ورودی در تولید متاکائولن، رس کائولن است. کائولن یک ماده معدنی بسیار ریز سفید و رسی است که به طور سنتی در تولید چینی استفاده می‌شود. کائولینیت به عنوان یک ماده معدنی متداول، به صورت دی سیلیکات آلومینیم هیدراته تعریف می‌شود که اصلی‌ترین جزء کائولن است. در دماهای ۱۰۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مواد رسی بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهند. دمایی که در آن کائولینیت آب خود از دست می‌دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. فرآیند تولید متاکائولن در دمای پایین‌تر از فرآیند تولید سیمان پرتلند انجام شده که سبب کاهش هزینه تولید آن می‌گردد اما به دلیل کمی تولید، قیمت آن بالاست. اما با توجه به اینکه متاکائولن به صورت جزئی جایگزین سیمان می‌شود استفاده از آن در بتن منطقی به نظر می‌رسد چراکه دارای مزیت‌های زیست‌محیطی است و از طرفی اثرات مثبتی را در هر دو حالت تازه و سفت شده بتن می‌گذارد.

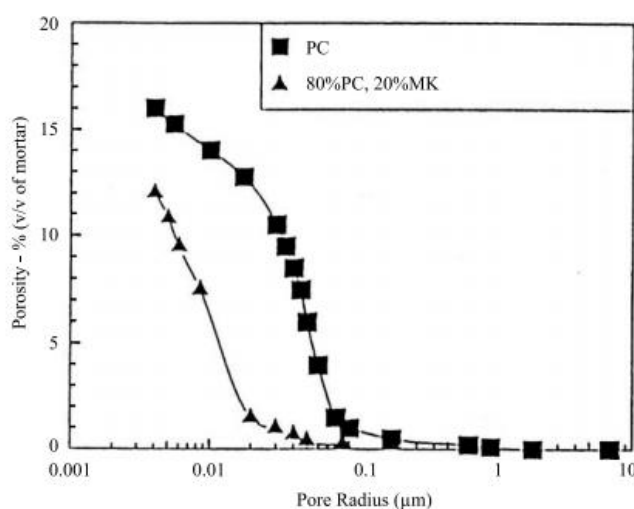
متاکائولن به عنوان یک محصول با پایه سیلیسی می‌باشد که در واکنش با Ca(OH)_2 در دمای معمولی ژل کلسیم سیلیکات هیدراته تولید می‌کند. متاکائولن همچنین دارای آلومینا می‌باشد که با CH واکنش داده و فازهای آلومیناتی که حاوی C_3AH_6 ، C_4AH_8 و C_3ASH_6 است را تولید می‌کند [۳۶].

فرآیند تولید متاکائولن کنترل شده است و در بعضی نتایج به عنوان پوزولان مهندسی شده شناخته می‌شود. این تولید با آلاینده‌گی کمتر و مصرف انرژی محدودتر همراه است. در سال‌های اخیر موضوع مصرف متاکائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در کشورهای مختلف به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و این مطالعات نشان می‌دهد متاکائولن یک پوزولان بسیار فعال است و موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه مدت و درازمدت می‌شود. استفاده از متاکائولن ریزساختار^۱ بتن را بهبود می‌بخشد و مقاومت بتن را در برابر نفوذ سیالات مهاجم (یون کلر و یون‌های سولفات و ...) افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از متاکائولن واکنش‌های کلیایی سنگ‌دانه‌ها را

¹ Micro Structure

کنترل می‌کند. با این حال به دلیل حرارت هیدراسیون نسبتاً زیاد، استفاده از آن در بتن‌ریزی حجیم توصیه نمی‌شود. آزمایش‌های مقایسه‌ای نشان می‌دهد خواص این پوزولان در بهبود ویژگی‌های مکانیکی^۱ و پایداری بتن با دوده سیلیسی قابل رقابت است. علاوه بر آن با توجه به رنگ روشن این ماده، استفاده از بتن حاوی متاکائولن در کاربردهای خاص معماری توصیه می‌شود [۳۷].

مقدار زیادی از آب کائولن در پروسه تبدیل کائولن به متاکائولن تبخیر می‌شود که این امر منجر به افزایش درصد اکسیدها نظیر سیلیس و آلومین در متاکائولن نسبت به کائولن می‌شود. مقایسه ترکیبات متاکائولن با سیمان نشان می‌دهد که مجموع درصد سیلیس و آلومین در متاکائولن بیش از سه برابر سیمان است، درحالی که درصد اکسید کلسیم (CaO) در متاکائولن ناچیز است.



شکل ۴-۰- تأثیر جایگزینی متاکائولن با سیمان بر تخلخل بتن (نسبت آب به بایندر=۴، عمر بتن=۱۰۰ روز) [۳۸].

بررسی تأثیر جایگزینی ۲۰ درصدی متاکائولن با سیمان بر پراکندگی اندازه تخلخل‌های بتن ۱۰۰ روز (با نسبت آب به بایندر برابر با ۰/۴) نشان داد که حضور متاکائولن به‌طور قابل توجهی اندازه تخلخل‌های بتن را کاهش می‌دهد (شکل ۳۱-۱)؛ بنابراین استفاده از متاکائولن در ترکیب بتن کاهش نفوذپذیری^۲ بتن در مقابل آب و یون کلراید را در پی خواهد داشت. جایگزینی ۱۵ و ۳۰ درصدی متاکائولن با سیمان نیز به ترتیب کاهش اندازه حفرات به کمتر از ۰/۰۳ و ۰/۰۲ میکرومتر را به دنبال داشته است. روند کاهش اندازه حفرات^۳ به‌واسطه واکنش‌های پوزولانی ظرف مدت ۱۴ روز اتفاق می‌افتد. هرچند که افزایش زمان عمل‌آوری بتن‌های حاوی ۱۵ درصد متاکائولن کاهش حجم کلی حفرات را در پی داشت، اما افزایش درصد متاکائولن باعث شد تا حجم کلی حفرات افزایش یابد [۳۸].

ارزیابی انقباض خودبه‌خودی و شیمیایی نمونه‌های بتنی حاوی ۵ تا ۲۵ درصد متاکائولن در یک دوره ۴۵ روز نشان داد که افزایش مقدار متاکائولن تا میزان ۱۰ درصد باعث افزایش انقباض شیمیایی می‌شود، درحالی که

¹ Mechanical Properties

² Penetration

³ Voids

جایگزینی بیش از ۱۰ درصدی متاکائولن با سیمان باعث کاهش مجدد انقباض شیمیایی شد. در رابطه با انقباض خودبه‌خودی نیز مشاهده شد که افزایش مقدار متاکائولن تا ۱۵ درصد افزایش انقباض خودبه‌خودی را در پی خواهد داشت، اما جایگزینی بیش از ۱۵ درصدی متاکائولن با سیمان سبب کاهش چشمگیر حفرات انقباضی شد. با افزایش مقدار متاکائولن تشکیل C_2ASH_8 افزایش و تشکیل C_4AH_{13} کاهش می‌یابد که باعث افزایش انبساط نسبی محصولات واکنش می‌شود. با این وجود، بررسی تأثیر جایگزینی ۹ درصدی متاکائولن با سیمان بر انقباض خودبه‌خودی بتن طی ۲۴ ساعت نشان داد که مقدار انقباض نمونه‌های حاوی متاکائولن کمتر از بتن بدون متاکائولن است [۳۸].

بروکس و جوهری^۱ [۳۹] تأثیر جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی متاکائولن با سیمان را بر انقباض و خزش بتن (جدول ۳۰-۱) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در روزای اولیه افزایش مقدار متاکائولن باعث کاهش انقباض خودبه‌خودی می‌شود، اما در طولانی مدت (بیش از ۲۰۰ روز) افزایش مقدار متاکائولن افزایش انقباض را نسبت به بتن بدون متاکائولن به دنبال داشت. علاوه بر این، استفاده از متاکائولن و افزایش مقدار آن باعث کاهش خزش بتن شد.

جایگزینی متاکائولن با سیمان باعث می‌شود استحکام فشاری بتن افزایش یابد اما مقدار بهینه متاکائولن به منظور بهبود استحکام فشاری حدود ۲۰ درصد گزارش شده است [۴۰]. همچنین بهترین استحکام خمشی با جایگزینی ۱۰ درصد متاکائولن با سیمان حاصل می‌شود [۴۰]. بهبود استحکام بتن با استفاده از متاکائولن به سه فاکتور بستگی دارد که عبارت‌اند از: خاصیت پرکنندگی بالا که پر شدن سریع حفرات را در پی دارد، تسریع هیدراسیون سیمان پرتلند که در ۲۴ ساعت اولیه اتفاق می‌افتد و واکنش‌های پوزولانی که طی مدت زمان ۷ تا ۱۴ روز بیشترین تأثیر را دارند [۳۸]. بررسی تأثیر جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی متاکائولن با سیمان بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی طی ۹۰ روز نشان داد که استفاده از متاکائولن افزایش استحکام فشاری را سبب می‌شود و بیشترین مقدار استحکام مربوط به نمونه‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد متاکائولن است.

نتایج تحقیقات کیان و لی^۲ [۴۱] روی نمونه‌های بتنی ۲۸ روز نشان داد که جایگزینی ۵ درصدی متاکائولن با سیمان تأثیر بسزایی در بهبود استحکام کششی بتن ندارد، اما در صورت جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصدی متاکائولن با سیمان به ترتیب بهبود ۳۲ و ۳۸ درصدی استحکام کششی نمونه‌ها را به دنبال داشت.

استفاده از متاکائولن در ترکیب سیمان نفوذپذیری یون کلراید در بتن را کاهش می‌دهد و هر چه زمان عمل‌آوری بتن و مقدار متاکائولن جایگزین افزایش می‌یابد مقدار نفوذ آب و یون‌های خورنده به درون بتن کمتر می‌شود. هرچند متاکائولن مقدار نفوذ کلراید به بتن را کاهش می‌دهد، اما استفاده از کائولن در ترکیب بتن افزایش نفوذ کلراید در بتن را در پی دارد. بررسی مقدار نفوذپذیری کلراید در بتن حاوی متاکائولن در دو نسبت آب به سیمان مختلف (۰/۳ و ۰/۵) نشان داد که تمامی نمونه‌های حاوی متاکائولن نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های بدون متاکائولن دارند (جدول ۳۱-۱). در نسبت آب به سیمان ۰/۳، بهترین مقاومت به نفوذ مربوط به نمونه بتنی

¹ Brooks and Johari² Qian and Li

با جایگزینی ۱۰ درصدی متاکائولن با سیمان بود. درحالی‌که در نسبت آب به سیمان ۰/۵، جایگزینی ۲۰ درصدی متاکائولن بیشترین مقاومت به نفوذ را نشان داد.

جدول ۱-۰- مقدار کرنش نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف پس از ۲۰۰ روز [۳۹]

Concrete mixture	Creep (10^{-6})		Stress (MPa)	Specific Creep ($10^{-6}/\text{MPa}$)		Drying creep ($10^{-6}/\text{MPa}$)
	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

نتایج تحقیقات بتیس^۱ و همکاران [۴۲] نشان داد که با جایگزینی ۱۰ درصدی متاکائولن با سیمان بیشترین مقاومت به خوردگی به دست می‌آید و افزایش مقدار متاکائولن باعث افت مجدد مقاومت به خوردگی می‌شود. در حالتی که از متاکائولن به‌عنوان جایگزین ماسه استفاده شد، بهترین مقاومت به خوردگی مربوط به نمونه‌هایی بود که در آن ۲۰ درصد از ماسه با متاکائولن جایگزین شد.

شکرچی^۲ و همکاران نشان دادند که افزودن متاکائولن، مقاومت الکتریکی ویژه^۳ بتن را تا ۵/۵ برابر افزایش می‌دهد. به‌طوری‌که بتن حاوی متاکائولن به میزان ۱۵ درصد وزنی سیمان، بیشترین مقاومت را در برابر خوردگی دارد [۴۳].

حضور متاکائولن در ترکیب بتن کاهش کارپذیری آن را سبب می‌شود و باعث می‌شود مدت‌زمان گیرش اولیه بتن افزایش یابد. گزارش شده که در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، به بتن حاوی متاکائولن می‌بایست بیش از ۳ درصد فوق روان کننده افزوده شود تا یک مقدار اسلامپ مناسب (۷۵mm) به دست آید. بررسی تأثیر جایگزینی ۰ تا ۱۵ درصدی متاکائولن با سیمان به نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴ (به همراه فوق روان کننده) و ۰/۵ (بدون فوق روان کننده) نشان داد که استفاده از متاکائولن در نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان بیشتر تغییرات بیشتری در کارپذیری ایجاد می‌کند [۳۸].

¹ Batis

² Shekarchi

³ Specific Electrical Resistance

جدول ۲-۰- تغییرات نفوذپذیری کلراید برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف [۱۲]

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
		Control	5312	4054	2971	2789
2	0.50	5% MK	4215	3765	2079	1065
		10% MK	1580	1247	918	752
		20% MK	751	740	640	580

متاکائولن به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان آب بیشتری جذب می‌کند و این باعث کاهش روانی بتن تازه می‌شود. البته نمونه‌هایی از متاکائولن نیز وجود دارند که حتی میزان اسلامپ بتن را افزایش می‌دهند؛ بنابراین به‌منظور یکسان کردن اسلامپ طرح اختلاط‌ها از درصد‌های مختلف روان کننده استفاده می‌شود.

۶-۱-۱ استفاده ترکیبی از سرباره، متاکائولن، خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیس

در پژوهشی تأثیر افزودن ترکیبات مختلفی از دوده‌ی سیلیس، خاکستر بادی و سرباره به بتن بر مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی بتن موردبررسی قرار گرفت [۴۴]. بدین منظور ابتدا هر یک از نمونه‌های ساخته‌شده بعد از قالب‌گیری و عمل‌آوری به مدت ۴ ساعت در محلول ۳/۵ درصد سدیم کلراید غوطه‌ور شدند و پس‌از آن به مدت یک ساعت در دمای ۲۰ درجه خشک شدند. پس از خشک شدن، نمونه‌ها به مدت ۱۹ ساعت در یک محفظه با دمای ۶۰ درجه قرار گرفتند. این سیکل ۲۴ ساعته برای هر یک از نمونه‌های بتنی ۵۰ بار تکرار شد. پس‌از آن آرماتورهای فولادی از بتن خارج شد و سطح آن‌ها با اسید هیدروکلراید یک شست‌وشو داده شد و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد تا کاهش وزن آن‌ها طی ۵۰ سیکل به دست آید (جدول ۳۲-۱).

جدول ۳-۰- مقادیر pH، مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف و کاهش وزن آرماتور فولادی در آن‌ها [۴۴]

No.	Composite of binder pastes (%)				pH values of binder pastes in GHPC				Electrical resistance of concrete $\times 10 \text{ K}\Omega$	50 Immersing–drying cycles		
	Cem	FA	SL	SF	3 days	7 days	28 days	120 days		Mass-to-loss ratio of steel bars (%)	Apparent states of specimens	
											Cracks or not	Crack width
1	100				12.688	12.678	12.965	12.681	12.00	5.92	Yes	Large
2	90			10	11.815	12.188	12.186	12.306	15.00	3.63	Yes	Small
3	90	10			12.025	12.206	12.341	12.144	9.29	6.69	Yes	Large
4	80	20			11.913	12.359	12.304	12.303	7.79	8.7	Yes	Large
5	70	30			11.583	12.471	12.671	12.683	7.29	11.91	Yes	Large
6	70		30		11.923	12.551	12.285	12.616	7.04	5.78	Yes	Medium
7	70	10	20		11.523	12.499	12.236	12.323	10.83	4.14	Yes	Small
8	60	30		10	12.006	12.176	12.268	12.325	37.91	3.73	No	/
9	60		30	10	11.974	12.227	12.337	12.324	45.36	4.53	No	/
10	60	10	20	10	11.020	12.158	12.107	12.077	17.38	2.57	No	/

Cem. denotes cement, FA denotes fly ash, SL denotes slag, SF denotes silica fume.

استفاده از خاکستر بادی به‌صورت منفرد افزایش خوردگی (کاهش وزن) را در پی داشته، هرچند که در مقاومت الکتریکی بتن روند کاهشی مشاهده شد. استفاده از دوده سیلیسی (دوده‌ی سیلیس) کاهش سرعت خوردگی و افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش اندازه ترک بتن را به دنبال دارد. هرچند که در ساختار بتن حاوی سیلیکافیوم نیز همانند بتن فاقد افزودنی ترک مشاهده شد. به‌کارگیری سرباره به‌صورت منفرد تأثیر مخربی بر خوردگی آرماتورها در بتن نداشت و به مقدار جزیی خوردگی را کاهش داد.

ترکیب دوتایی دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت الکتریکی بتن دارد و خوردگی را ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین در این نوع بتن ترک مشاهده نشد. ترکیب دوده‌ی سیلیس و سرباره مقاومت الکتریکی بتن را تقریباً ۴ برابر می‌کند و خوردگی را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد و از تشکیل ترک جلوگیری می‌کند. ترکیب دوده‌ی سیلیس، سرباره و خاکستر بادی مقاومت الکتریکی را دو برابر، خوردگی را نصف و pH را به میزان اندکی کاهش می‌دهد، البته مقدار کاهش pH به اندازه‌ای نیست که وارد منطقه بحرانی شکست لایه پسیو شود. در این نوع بتن نیز ترک مشاهده نشد.

ترکمن^۱ و گواگلی^۲ [۴۶، ۴۵] تأثیر افزودن دوده‌ی سیلیس و سرباره را بر خواص مکانیکی و خوردگی بتن مورد مطالعه قراردادند. طرح اختلاط نمونه‌های مختلف در جدول ۳۳-۱ آورده شده است. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها از سه نسبت آب به بایندر متفاوت استفاده شد. نتایج بررسی‌های خواص مکانیکی و خوردگی نمونه‌های ساخته‌شده به ترتیب در جدول ۳۴-۱ و جدول ۳۵-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۳- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مختلف [۴۵]

Materials	C (water-binder ratio: 0.35)				D (water-binder ratio: 0.40)				E (water-binder ratio: 0.45)			
	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
PC (kg/m ³)	450	405	315	225	450	405	315	225	450	405	315	225
Water (kg/m ³)	186	186	186	186	209	209	209	209	230.5	230.5	230.5	230.5
SF (kg/m ³)	—	45	45	45	—	45	45	45	—	45	45	45
BFS (kg/m ³)	—	—	90	180	—	—	90	180	—	—	90	180
SP (kg/m ³)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Sand (kg/m ³)	798	798	798	798	771	771	771	771	775	775	775	775
Crushed stone (kg/m ³)	770	770	770	770	744	744	744	744	719	719	719	719
Fresh unit weight (kg/m ³)	2583	2576	2565	2586	2554	2539	2523	2496	2478	2470	2468	2464

SP: super plasticizer

جایگزینی ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس با سیمان سبب شده خواص مکانیکی از ۵ تا ۲۰ درصد و خواص خوردگی ۱۰ تا ۳۵ درصد بهبود یابد. بهترین خواص مکانیکی در حالتی به دست آمد که در ترکیب بتن از ۱۰ درصد وزنی دوده‌ی سیلیس و ۲۰ درصد سرباره استفاده شد که باعث شد خواص مکانیکی ۱۰ تا ۲۵ درصد بهبود یابد. در این حالت همچنین دانسیته جریان خوردگی ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش یافته است [۴۵].

در حالتی که ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس و ۴۰ درصد سرباره در ترکیب بتن استفاده شد دانسیته جریان خوردگی ۵۰ تا ۶۰ درصد کاهش یافت. بهبود خواص خوردگی به کاهش نفوذپذیری بتن نسبت داده شده است. این طرح اختلاط در کوتاه‌مدت افت خواص مکانیکی بتن (حدود ۷ درصد) را به دنبال داشته، اما در بلندمدت سبب بهبود خواص مکانیکی به میزان ۶ درصد شده است. همچنین انجام آزمایش‌های خوردگی در استحکام مکانیکی در محیط سدیم سولفات نیز مشابه نتایج فوق بود و نشان داد که افزودن دوده‌ی سیلیس و سرباره گرانوله افزایش استحکام و افزایش مقاومت به خوردگی را سبب می‌شود [۴۶].

¹ Turkmen

² Gavagli

تأثیر استفاده از دوده‌ی سیلیس، خاکستر بادی و سرباره بر رفتار خوردگی آرماتورهای درون بتن در محیط دریایی (دریای شمال، هلند) مورد ارزیابی قرار گرفت [۴۷]. طرح اختلاط هر یک از بتن‌ها در جدول ۱-۳۶ آورده شده است.

جدول ۵-۰- استحکام، وزن واحد خشک و ضریب موینگی نمونه‌های بتنی مختلف [۴۵]

Concrete groups	A (water-binder ratio=0.35)				B (water-binder ratio=0.40)				C (water-binder ratio=0.45)			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
28-day dry unit weight (kg/m^3)	2474	2467	2457	2402	2440	2420	2412	2356	2393	2382	2346	2296
Reduction (-) or increase (+) (%)	0	0	0	-3	-1	-2	-3	-5	-3	-4	-6	-7
250-day capillarity coefficient in lime-saturated water, $\times 10^{-5}$ (cm^3/min)	23.6	18.7	16.4	14.16	26.42	22.47	18.73	15.16	33.72	26.43	20.27	17.73
Reduction (-) or increase (+) (%)	0	-26	-44	-67	+11	-5	-26	-56	+30	+11	-16	-33
250-day capillarity coefficient in 5% Na_2SO_4 solution, $\times 10^{-5}$ (cm^3/min)	16.3	10.1	7.49	6.81	18.45	12.07	6.49	5.96	27.0	13.65	7.04	5.96
Reduction (-) or increase (+) (%)	0	-61	-118	-139	+12	-35	-151	-173	+40	-19	-132	-173
250-day compressive strength in lime-saturated water (MPa)	65.76	72.16	74.47	70.86	61.71	64.47	64.47	64.87	51.41	60.27	56.16	58.46
Reduction (-) or increase (+) (%)	0	+9	+12	+7	-7	-2	+1	-1	-28	-9	-17	-12
250-day compressive strength in 5% Na_2SO_4 solution (MPa)	59.81	70.16	72.43	68.70	57.8	61.7	62.22	61.6	47.22	57.23	55.42	54.47
Reduction (-) or increase (+) (%)	0	+15	+17	+13	-3	+3	+4	+3	-27	-5	-8	-10

جدول ۱-۳۷ خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی ۲۸ روز را نشان می‌دهد. استفاده از سرباره (۷۰ درصد) و همچنین ترکیب خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیس (۱۰ و ۵ درصد) تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش پایداری سازه در محیط دریایی دارد. استفاده از سرباره تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی بتن نداشته، درحالی‌که استفاده از دوده‌ی سیلیس به‌تنهایی و در ترکیب با خاکستر بادی بهبود خواص مکانیکی را به دنبال داشته است. البته باید توجه داشت که در بلندمدت خواص مکانیکی می‌تواند دچار تغییراتی شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد استفاده از سرباره گرانوله نیز می‌تواند در بلندمدت (بیش از ۴۰ روز) بهبود خواص مکانیکی را سبب شود.

جدول ۳۵-۱- دانسیته جریان خوردگی حاصل از پلاریزاسیون خطی برای نمونه‌های بتنی مختلف [۴۵]

Concrete groups	C (water-binder ratio: 0.35)				D (water-binder ratio: 0.40)				E (water-binder ratio: 0.45)			
	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4
28-day corrosion current density in 5% NaCl solution (mA/m ²)	20.2	18.6	15.7	13.3	24.8	21.4	19.8	14.9	28.2	25.1	22.7	16.8
Reduction (–) or increase (+) (%)	0	–9	–29	–52	+19	+7	–2	–36	+28	+20	+11	–20
75-day corrosion current density in 5% NaCl solution (mA/m ²)	12.9	8.3	6.9	5.4	12.3	11.0	7.8	6.1	17.6	13.8	11.5	7
Reduction (–) or increase (+) (%)	0	–36	–47	–58	–5	–15	–40	–53	+36	+7	–11	–46
150-day corrosion current density in 5% NaCl solution (mA/m ²)	13.6	8.6	6.9	5.4	13.6	11.0	7.8	6.1	17.3	13.7	11.6	7.2
Reduction (–) or increase (+) (%)	0	–37	–49	–60	0	–19	–43	–55	+27	+1	–15	–47
250-day corrosion current density in 5% NaCl solution (mA/m ²)	13.3	8.6	6.8	5.2	13.4	10.9	7.8	6.1	16.0	13.4	11.5	7.1
Reduction (–) or increase (+) (%)	0	–35	–49	–62	+1	–18	–41	–54	+20	+1	–14	–47

جدول ۳۶-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مختلف [۴۷]

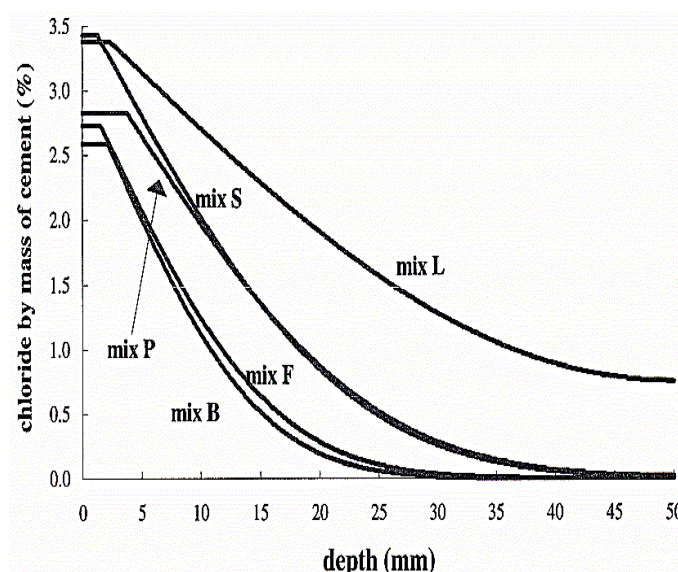
concrete type	mix S	mix L	mix F	mix P	mix B
cement type	OPC (ordinary portland cement CEM I 42.5)	OPC	OPC	OPC	BFSC (Portland blast furnace cement CEM III/B 42.5)
specific features	5% silica fume	-	5% silica fume & 10% fly ash	-	70% slag
coarse aggregate	siliceous, river gravel D 16 mm	Lytag D 12 mm	siliceous, river gravel D 16 mm	same	same
sand	all	siliceous	river	sand	
cement content (kg/m ³)	340	353	337	339	338
water content (kg/m ³)	146	152 ¹	145	146	145
water-to-cement ratio	0.43	0.43 ¹	0.43	0.43	0.43
superplasticiser (% by cement mass)	2.65	2.65	3.06	2.47	2.02
slump (mm)	100	80	100	120	125

¹ exclusive of 10% (m/m) absorbed water with respect to Lytag mass

جدول ۳۷-۱- خواص مکانیکی و دانسیته نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط متفاوت پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محفظه بخار [۴۷]

concrete type	mix S	mix L	mix F	mix P	mix B
compressive cube strength (N/mm ²)	64.1	49.1	68.2	50.4	51.2
% of mix P	127	97	135	100	102
splitting tensile strength (N/mm ²)	5.2	3.5	4.9	3.9	3.9
% of mix P	134	91	127	100	99
density (kg/m ³)	2412	2037	2413	2431	2415
% of mix P	99	84	99	100	99

شکل ۳۲-۱ نیز پروفیل نفوذ یون کلراید را به درون نمونه‌های بتنی در طول مدت ۱/۵ سال نشان می‌دهد. استفاده از دوده‌ی سیلیس، خاکستر بادی و سرباره عمق نفوذ یون کلراید را کاهش می‌دهد و ضریب نفوذ را نسبت به حالتی که در ترکیب بتن سیمان پرتلند به‌صورت منفرد استفاده‌شده است به یک‌سوم کاهش می‌دهد.



شکل ۳۲-۱- پروفیل نفوذ یون کلراید برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف طی غوطه‌وری در محلول سدیم کلراید ۳/۵ درصد وزنی به مدت ۱/۵ سال [۴۷].

همچنین برای نمونه‌های مورد مطالعه طول عمر سازه‌ها بر اساس مدت‌زمان شروع واکنش‌های خوردگی و سرعت پیشرفت خوردگی تخمین زده شد (جدول ۳۸-۱). بر این اساس بیشترین طول عمر را نمونه‌های بتنی حاوی سرباره و پس‌از آن بتن حاوی ترکیب دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی خواهد داشت.

جدول ۳۸-۱- تخمین عمر سازه‌های بتنی با عمق پوشش ۵۰ mm [۴۷]

Concrete type	mix S	mix L	mix F	mix P	mix B
$D_{eff} (*10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	3	8	1.1	2.5	0.8
$t_i (\text{y})$	10	3.7	30	12	37
$f_t (\text{N/mm}^2)$	5.2	3.5	4.9	3.9	3.9
$\rho_{concrete} (\Omega \cdot \text{m})$	250	120-160	650	135	830
$t_p (\text{y})$	16	5-7	40	7	40
$t_1 (\text{y})$	26	9-11	70	19	77

سنگول^۱ و تادسمیر^۲ [۴۸] استحکام فشاری و نفوذپذیری یون کلراید در نمونه‌های بتنی حاوی سرباره و خاکستر بادی جانشین سیمان را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از دو نسبت آب به بایندر ۰/۶ و ۰/۳۸ برای تهیه نمونه‌های بتنی استفاده شد. در طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مقدار جایگزینی سرباره و خاکستر بادی ۵۰ درصد بود و در حالت ترکیبی نیز از هر یک از آن‌ها ۲۵ درصد جایگزین سیمان شد. جدول ۳۹-۱ طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۳۹-۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی مورد مطالعه [۴۸]

Mix code	100PC-60	50S-60	50F-60	25FS-60	100PC-38	50S-38	50F-38	25FS-38
Cement, kg/m ³	348	175	176	176	450	222	221	222
Slag, kg/m ³	0	175	0	88	0	222	0	111
Fly ash, kg/m ³	0	0	176	88	0	0	221	111
Water, kg/m ³	209	210	211	211	167	168	167	168
Water/binder	0.60	0.60	0.60	0.60	0.38	0.38	0.38	0.38
Superplasticizer, kg/m ³	0	0	0	0	4.4	4.5	3.4	4.7
Natural sand, kg/m ³	503	503	497	502	500	499	487	493
Crushed basalt sand, kg/m ³	380	380	375	379	377	377	368	372
Crushed basalt I, kg/m ³	951	952	940	951	946	945	921	933
Slump (mm)	90	130	140	140	80	150	110	160
Unit weight, kg/m ³	2,389	2,394	2,375	2,396	2,436	2,438	2,389	2,415
Air (%)	2.2	1.6	1.1	0.9	3.3	2.7	3.1	2.8

جدول ۴۰-۱ خواص مکانیکی، نفوذپذیری یون کلراید و قیمت نسبی نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های متفاوت را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که نسبت بالاتر آب به بایندر باعث می‌شود بتن حاوی پوزولان خواص مکانیکی ضعیف‌تری نسبت به سیمان ساخته شده از سیمان پورتلند ارائه دهد. در صورتی که درصد جانشینی خاکستر بادی با سیمان در بتن به ۵۰ درصد برسد، باعث افت خواص مکانیکی می‌شود، در حالی که با جایگزینی ۵۰ درصدی سرباره با سیمان افت خواص مکانیکی به شدت کاهش می‌دهد.

جدول ۴۰-۱- استحکام فشاری، نفوذپذیری یون کلراید و قیمت نسبی نمونه‌های بتنی [۴۸]

¹ Sengul² Tadesmir

Water/binder	Mixture code	Cube compressive strength of concrete (MPa)		ASTM C1202 chloride ion penetration test (Coulomb)		Relative costs of concretes
		28 days	90 days	28 days	90 days	
0.60	100PC-60	55.7	57.5	6,813	5,500	348.0
	50S-60	51.3	55.3	703	372	288.8
	50F-60	34.2	43.3	926	161	264.0
	25FS-60	42.9	51.2	660	376	277.2
0.38	100PC-38	86.1	92.2	1,877	1,780	450.0
	50S-38	89.9	91.5	395	206	366.3
	50F-38	72.8	78.2	531	144	331.5
	25FS-38	83.1	86.6	387	217	349.7

با کاهش نسبت آب به بایندر، خواص مکانیکی بتن در حضور و عدم حضور پوزولان‌ها افزایش می‌یابد. استفاده از خاکستر بادی و سرباره به‌تنهایی و به‌صورت ترکیبی (هرکدام ۲۵ درصد) تأثیر بسزایی در کاهش نفوذ یون کلراید دارد. نکته قابل‌توجه این است که در مبحث کاهش نفوذ یون کلراید، تأثیر استفاده از مواد پوزولانی از تأثیر کاهش نسبت آب به بایندر بیشتر بوده است. نوچایا^۱ و همکاران [۴۹] تأثیر جایگزینی خاکستر بادی و دوده سیلیس با سیمان پرتلند بر خواص بتن را مورد مطالعه قرار دادند که طرح اختلاط نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱-۴۱ آورده شده است.

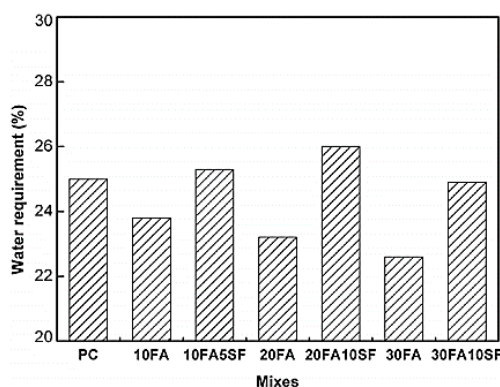
جدول ۱-۴۱- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی (مقادیر افزودنی‌ها برحسب وزن مقدار وزن سیمان است) [۴۹]

Mix	w/c	Mix proportion of the specimens (kg/m ³)					
		PC	FA	SF ^a	Fine aggregate	Coarse aggregate	
						10 mm	20 mm
PC	0.56	360	0	0	616	410	826
10FA	0.56	322	36	0	611	408	820
10FA5SF	0.56	320	36	18	607	404	814
20FA	0.56	284	71	0	607	405	814
20FA10SF	0.56	280	70	35	598	398	802
30FA	0.56	247	106	0	604	402	810
30FA10SF	0.56	243	104	35	594	396	796

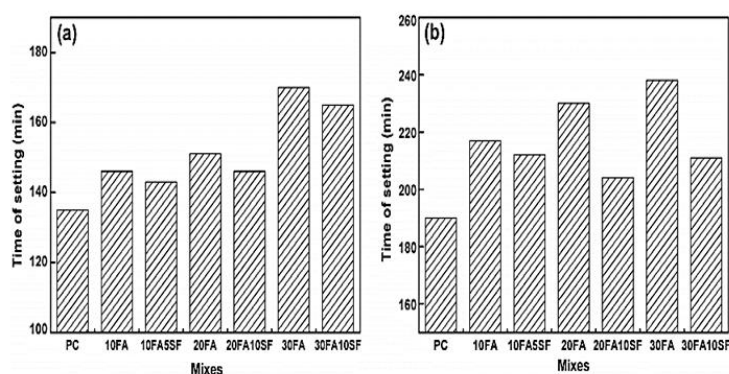
^a Additive material by weight cement.

نتایج نشان داد که برای دستیابی به یک مقدار پایداری نرمال، با جایگزینی خاکستر بادی به‌جای سیمان مقدار آب مورد نیاز کاهش می‌یابد. در حالتی که ترکیبی از خاکستر بادی و دوده سیلیس جایگزین سیمان می‌شود، مقدار آب مورد نیاز تقریباً برابر با حالتی است که فقط سیمان پرتلند استفاده می‌شود. شکل ۳۴-۱ زمان‌گیرش نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳۵-۱، جایگزینی سیمان با خاکستر بادی و ترکیبی از خاکستر بادی و دوده سیلیس زمان‌گیرش بتن را افزایش می‌دهد. نمونه‌های بتنی که در آن‌ها خاکستر بادی جایگزین بخشی از سیمان شده، زمان‌گیرش بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌های بتنی دارد. همچنین این نمونه‌های بتنی با توجه به شکل ۳۵-۱ که کارپذیری نمونه‌های مختلف بتنی را نشان می‌دهد، کمترین مقدار کارپذیری را نیز ارائه می‌دهند. بهترین کارپذیری مربوط به نمونه‌ای است که در آن دوده سیلیس و خاکستر بادی به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین سیمان شده است.

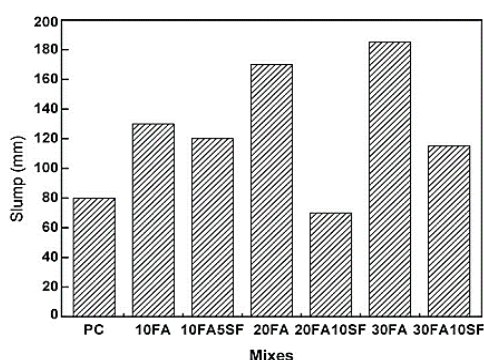
¹ Nochaiya



شکل ۳۳-۱- مقدار آب موردنیاز در نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط مختلف برای دستیابی به یک پایداری نرمال [۴۹]



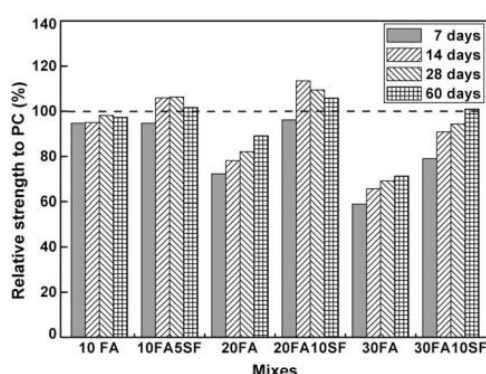
شکل ۳۴-۱- تأثیر جایگزینی خاکستر بادی و ترکیب دوده سیلیس و خاکستر بادی با سیمان بر الف) زمان گیرش اولیه ب) زمان گیرش نهایی نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های مختلف [۴۹].



شکل ۳۵-۱- تأثیر جایگزینی خاکستر بادی و ترکیب دوده سیلیس و خاکستر بادی با سیمان بر کارپذیری نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های مختلف [۴۹].

شکل ۳۶-۱ استحکام نسبی نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های مختلف نسبت به استحکام بتن بدون افزودنی پوزولانی را طی دوره‌های زمانی متفاوت نشان می‌دهد. جایگزینی بیش از ۱۰ درصدی خاکستر بادی با سیمان افت محسوس استحکام را در پی دارد درحالی‌که جایگزین کردن ترکیبی از دوده سیلیس و خاکستر بادی

با سیمان نه تنها از افت استحکام اولیه جلوگیری می‌کند، بلکه در بلندمدت باعث می‌شود استحکام بیشتری نسبت به بتن ساخته شده از سیمان پرتلند حاصل شود. مطابق شکل، بیشترین استحکام مربوط به نمونه‌ای است که در آن دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین سیمان شده است. شکل ۱-۳۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های بتنی حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی جایگزین شده با سیمان را نشان می‌دهد. ساختارهای شش‌گوشه در تصویر کلسیم هیدروکسید می‌باشد. با توجه به شکل ۱-۳۸ که تصویر میکروسکوپی بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس را نشان می‌دهد، جایگزینی بخشی از سیمان با دوده‌ی سیلیس باعث شده تا ساختارهای شش‌گوشه کلسیم هیدروکسید موجود در ریزساختار کاهش یابد. درواقع، افزایش واکنش‌های پوزولانی بین دوده‌ی سیلیس و کلسیم هیدروکسید باعث کاهش کلسیم هیدروکسید موجود در ساختار شده است. همچنین ذرات کروی شکل دوده‌ی سیلیس فضاهای خالی بین کلسیم هیدروکسید و کلسیم سیلیکات هیدراته را پر کرده‌اند. واکنش‌های پوزولانی دوده‌ی سیلیس باعث تولید کلسیم سیلیکات هیدراته می‌شود که پر شدن حفرات بیشتری را در پی دارد، هرچند که آگلومره شدن بخشی از دوده‌ی سیلیس راندمان آن را کاهش داده است. اثر پرکنندگی دوده‌ی سیلیس در نهایت افزایش استحکام بتن را به دنبال دارد؛ بنابراین دوده‌ی سیلیس هم به صورت فیزیکی و هم شیمیایی (واکنش پوزولانی با کلسیم هیدروکسید برای تولید کلسیم سیلیکات هیدراته) بهبود خواص مکانیکی بتن را سبب می‌شود.



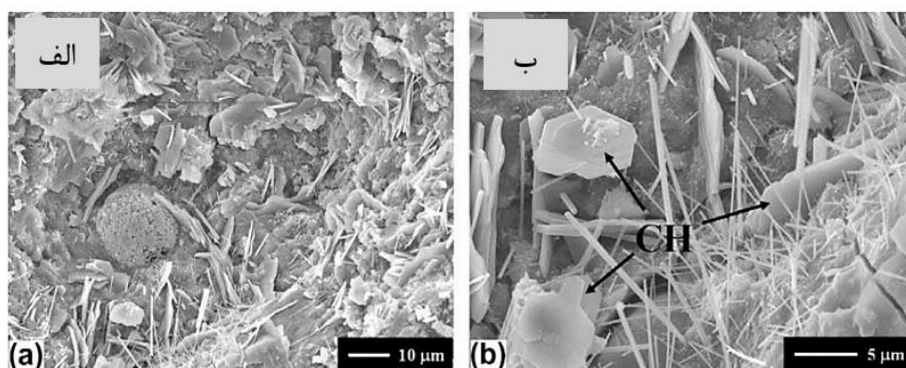
شکل ۱-۳۶- نسبت استحکام نمونه‌های بتنی حاوی ترکیبات پوزولانی نسبت به بتن ساخته شده از سیمان پرتلند (خط چین) [۴۹].

بیجن^۱ [۵۰] در پژوهشی مزایای استفاده از سرباره فولاد و خاکستر بادی در سازه‌های بتنی را بر اساس داده‌های موجود برای برخی سازه‌های دریایی مورد مطالعه قرار داد. نتایج مطالب جمع‌آوری شده در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- استفاده از سرباره کاهش نفوذپذیری کلراید را سبب می‌شود که به طور قابل توجهی باعث تأخیر در شروع واکنش‌های خوردگی می‌شود.

¹ Bijen

- در برخی موارد ادعا شده که استفاده از سرباره و خاکستر بادی در بتن باعث می‌شود تا بافرهای آهکی کمتری در تخلخل‌های بتن وجود داشته باشد که این امر باعث می‌شود مقاومت به خوردگی آرماتور کاهش یابد؛ اما هم نتایج آزمایشگاهی و هم تحقیقات عملی نشان داد که این ادعا صحیح نیست.
- خاکستر بادی در ساختار خود حاوی کربن است و با توجه به اینکه کربن نسبت به آهن نجیب‌تر است امکان دارد که وجود خاکستر بادی در ترکیب بتن باعث کاهش عمر آن شود، اما نتایج بررسی‌ها نشان داد که در صورت بالا بودن pH بتن، حتی در حضور مقادیر بالایی از کربن، مشکلی ایجاد نمی‌شود. در صورتی که مقدار pH کم شود نیز حضور سرباره در کنار خاکستر بادی سبب می‌شود تأثیر مخربی ناشی از کربناسیون بتن به وجود نیاید.
- زمان هیدراسیون برای بتن حاوی سرباره و خاکستر بادی بیشتر از سیمان معمولی است. همچنین وجود این دو نوع افزودنی نرخ کربناسیون را افزایش می‌دهد. نتایج بررسی‌ها در آزمایشگاه نیز این مورد را تأیید می‌کند. با این وجود در موارد عملی نرخ کربناسیون کمتری دیده شد و در برخی موارد اصلاً این موضوع مشاهده نشد. درواقع در هیچ موردی مشاهده نشده که کربناسیون بتن منجر به خوردگی بتن شود.

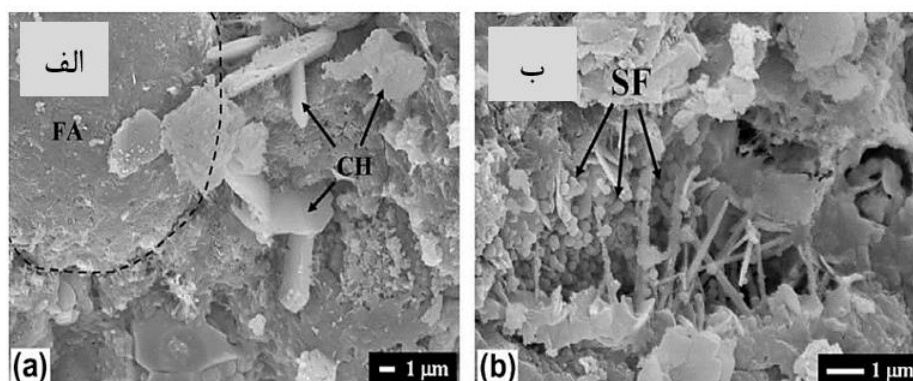


شکل ۳۷-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی ریزساختار نمونه بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی جایگزین شده با سیمان در (الف) بزرگنمایی ۱۰۰۰ و (ب) بزرگنمایی ۳۰۰۰ [۴۹].

پولدر^۱ [۴۷] نیز در پژوهشی تأثیرات استفاده از سرباره و خاکستر بادی در بتن را برشمرد. نتایج نشان داد حضور سرباره و خاکستر بادی از طریق کاهش نفوذپذیری یون کلراید به درون بتن، خوردگی آرماتورهای بتن را به تأخیر می‌اندازند. بر این اساس، جایگزینی ۵۰ تا ۷۰ درصدی سرباره و جایگزینی ۲۰ تا ۳۰ درصدی خاکستر بادی با سیمان تأثیر بسزایی در کاهش نفوذپذیری یون کلراید به درون بتن دارد. همچنین جایگزینی ترکیبی سرباره و خاکستر بادی (هرکدام به میزان ۲۵ درصد) نیز کاهش چشمگیر نفوذپذیری بتن را در پی داشته است؛ اما مشکل آن‌ها افزایش زمان هیدراسیون است. افزایش زمان هیدراسیون بتن باعث می‌شود تا در ابتدا نفوذ کلراید در بتن حاوی سرباره بیشتر از بتن بدون سرباره باشد، اما پس از تکمیل فرآیند هیدراسیون (یک هفته) نفوذپذیری بتن در

¹ Polder

حضور سرباره به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. مدت‌زمان هیدراسیون بتن حاوی خاکستر بادی نسبت به بتن حاوی سرباره و سیمان معمولی بیشتر بوده (در حد چند ماه) و در صورتی که بتن به‌خوبی عمل‌آوری نشود، در معرض کربناسیون و تخریبات ناشی از یخ‌زدگی قرار می‌گیرد. همچنین عنوان شده که جایگزینی ۱۰ درصدی خاکستر بادی و جایگزینی ۵ درصدی دوده‌ی سیلیس با سیمان نیز کاهش نفوذپذیری یون کلراید و افزایش مقاومت الکتریکی بتن را سبب می‌شود.



شکل ۳۸-۱- تصاویر میکروسکوپی الکترونی ریزساختار نمونه بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد دوده‌ی سیلیس جایگزین شده با سیمان در الف) بزرگنمایی ۴۰۰۰ و ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ [۴۹].

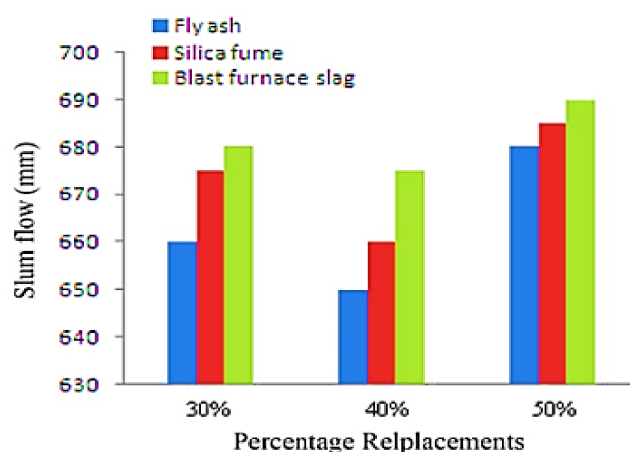
همان‌گونه که ذکر شد، بتن خود تراکم گونه‌ای جدید از بتن محسوب می‌شود که بدون نیاز به ویبراتور، خاصیت پرکنندگی مطلوبی را ارائه می‌دهد. یکی از معایب استفاده از بتن خود تراکم، هزینه‌ی بالای آن است که خود از استفاده کردن حجم زیادی از سیمان پرتلند و ترکیبات شیمیایی ناشی می‌شود. یکی از روش‌های جایگزین برای کاهش هزینه بتن خود تراکم، استفاده از افزودنی‌های معدنی^۱ همچون: دوده‌ی سیلیس، ترکیبات روباله و خاکستر بادی است. هنگامی که مواد مذکور جایگزین بخشی از مخلوط سیمان بتن می‌گردند، هزینه‌های بتن کاهش پیدا می‌کند، بخصوص اگر ماده افزودنی، جزء مواد زائد باشد. علاوه بر مزیت فوق، افزودن این مواد به بتن، نه تنها هزینه تولید بتن خود تراکم را کاهش می‌دهد، بلکه موجب کاهش حرارت هیدراتاسیون بتن و همچنین باعث محدود کردن استفاده از مواد شیمیایی افزایش‌دهنده‌ی لزجت در بتن می‌گردند. در ادامه به ذکر چند مورد از پژوهش‌های اخیر، در رابطه با تأثیر مواد افزودنی در بهبود خواص بتن، پرداخته می‌شود.

شکل ۳۹-۱ و شکل ۴۰-۱ نتایج پژوهش آزمایشگاهی راماناتان^۲ و همکارانش را در استفاده از ترکیبات افزودنی معدنی به بتن خود تراکم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در مشخص است، با استفاده روباره گرانوله، اسلامپ بتن بهتر و کارپذیری آن، مطلوب‌تر می‌شود. هنگامی که سیمان با افزودنی‌های معدنی جایگزین می‌گردد،

^۱ Mineral Additive

^۲ Ramanatan

به مقدار کمتری از ماده فوق روان کننده جهت ایجاد روانی در سیمان نیاز است. هم‌چنین شکل ۱۱-۱ بیانگر آن است که هنگام استفاده از خاکستر در مقایسه با سایر مواد افزودنی مورد مطالعه قرار گرفته به مقدار بیشتری از مواد فوق روان کننده نیاز خواهد بود. در مقایسه با سایر افزودنی‌ها، خاکستر دارای دانه‌هایی درشت‌تر و هندسه‌ی کروی است که این امر موجب کاهش سطح آن می‌گردد. علاوه بر این، با جایگزین کردن خاکستر به جای سیمان، حجم خمیر سیمان به دلیل کاهش چگالی آن، افزایش می‌یابد. این افزایش حجم موجب کاهش اصطکاک بین توده‌های مواد و بهبود انسجام، پلاستیسیته و کارپذیری بتن خود تراکم می‌گردد [۵۱]. شکل ۴۰-۱ تأثیر افزودن درصد‌های مختلفی از مواد معدنی را بر استحکام فشاری بتن ۷ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۴۰-۱ مشخص است، به‌طور عمومی، افزایش درصد هریک از مواد افزودنی فوق، موجب کاهش مقاومت بتن می‌گردد. طبق شکل ۴۰-۱ دوده‌ی سیلیس با نسبت ۱۵ درصدی، بیشترین استحکام فشاری را، هم در مورد بتن ۷ روز و هم بتن ۲۸ روز، دارا می‌باشد و با نسبت ۵۰ درصد، کمترین استحکام فشاری را در برای بتن خود تراکم ۷ روز، ارائه می‌دهد.



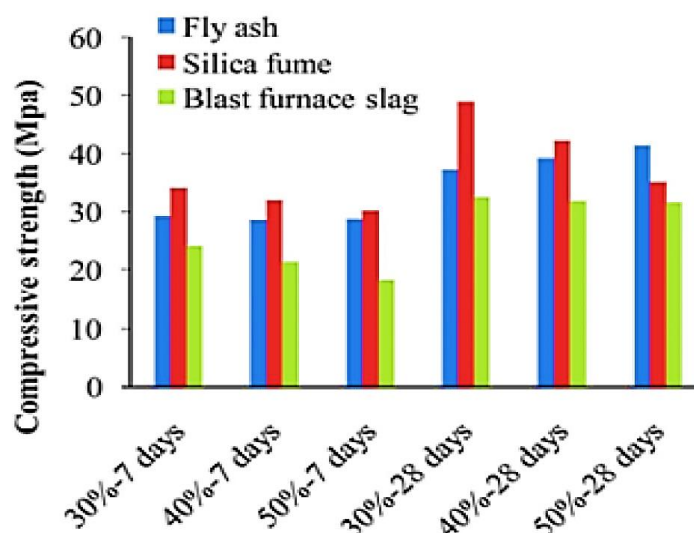
شکل ۳۹-۱ تأثیر درصد‌های افزودنی مختلف در بهبود کارپذیری بتن خود تراکم [۵۱].

وويسال^۱ و سامر^۲ تأثیر افزودن مواد معدنی مختلف را به بتن خود تراکم و تغییر مقاومت آن در برابر سولفات‌هایی همچون سولفات منیزیم، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش بتنی با درصد‌های مختلف از ترکیبات روباره گرانوله، پودر بازالت، پودر سنگ آهن، خاکستر، سیمان پرتلند و پودر سنگ مرمر را در محلول ۱۰ درصدی سولفات منیزیم به مدت ۴۰۰ روز قرار داده و در پایان این مدت، میزان کاهش استحکام فشاری آن را مورد آزمایش قرار دادند (شکل ۴۱-۱). تأثیرات افزودن مواد معدنی متفاوت، با درصد‌های مختلف را بر میزان تغییر استحکام فشاری بتن پس از قرار گرفتن ۴۰۰ روزی بتن در محلول سولفات منیزیم را نشان می‌دهد.

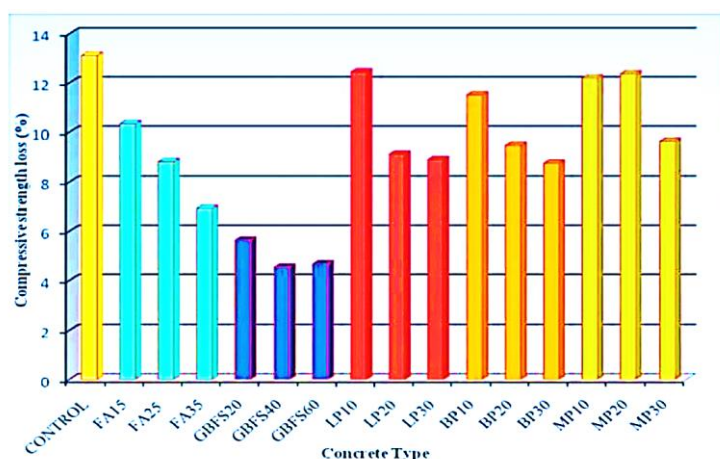
¹ Uysal

² Sumer

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، افزایش میزان درصد مواد معدنی، موجب کاهش کمتری از استحکام فشاری بتن می‌گردد. همان‌طور که از شکل ۴۱-۱ مشخص است، با مقایسه مواد معدنی مختلف، بتن دارای ماده‌ی روباره گرانوله، بیشترین مقاومت را در برابر حمله‌ی سولفات منیزیم نشان می‌دهد [۵۲].



شکل ۴۰-۱- تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف مواد افزودنی معدنی در استحکام فشاری بتن خود تراکم [۵۱].



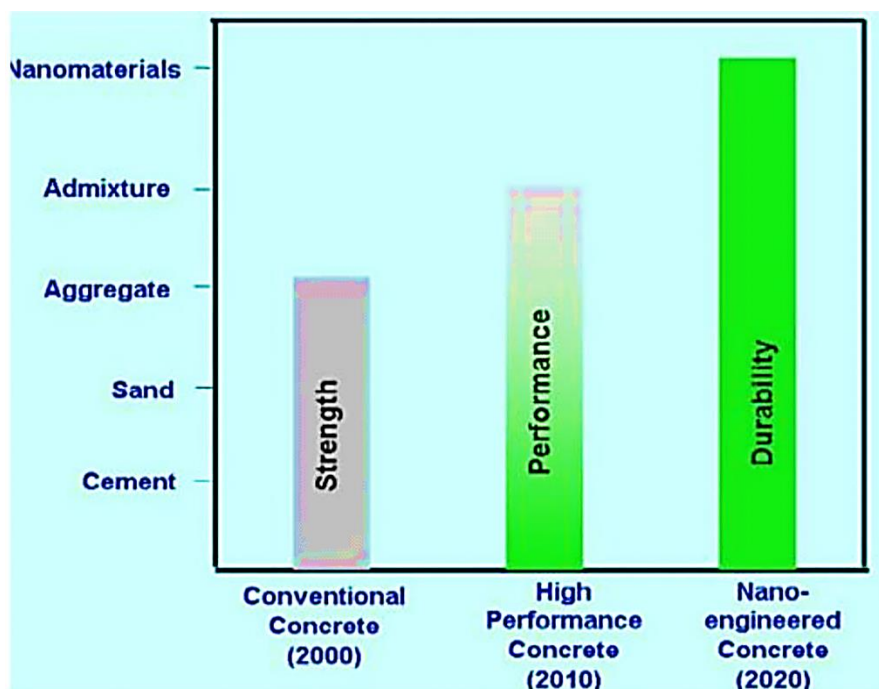
شکل ۴۱-۱- میزان کاهش استحکام فشاری بتن خود تراکم در برابر حمله سولفات منیزیم برای درصدهای متفاوتی از مواد معدنی مختلف [۵۲].

۱-۱-۷ کاربرد نانوتکنولوژی در بتن

یافتن نسلی جدید از مصالح ساختمانی با عملکرد بالا و خواصی متفاوت نسبت به خواص مصالح معمولی، هدف نهایی از بررسی بتن در مقیاس نانو، است. از سال‌های پیش استفاده از ذرات سیلیکا در ابعاد میکرون به‌صورت وسیعی در بتن مورد استفاده قرار گرفته است. به‌تازگی اثبات شده است که استفاده از ذراتی در مقیاس کوچک‌تر از میکرو سیلیس باعث افزایش استحکام فشاری بتن گردیده و از طرفی تمامی ویژگی‌های یک بتن

مربوط به فرآیندهایی است که در مقیاس نانو برای آن اتفاق می‌افتد. درواقع نانو فناوری علمی، مربوط به اندازه‌گیری و توصیف ساختار مولکولی در مقیاس نانو و میکرو، برای درک بهتر رفتار در مقیاس بزرگ (ماکرو) می‌باشد. مهندسی نانو شامل تکنیک‌های تغییر ساختار در مقیاس نانومتری جهت ایجاد نسلی جدید و مناسب از کامپوزیت‌های سیمانی با رفتار ایده آل مکانیکی است که می‌توان با کمک آن، بتنی با خواصی جدید از جمله دارا بودن مقاومت الکتریکی پایین، هوشمند بودن، خود تمیزکنندگی، خودترمیم‌کنندگی، شکل‌پذیری بالا و غیره را به وجود آورد (شکل ۴۲-۱).

در صنعت سیمان به‌صورت پودر تولید می‌گردد که ابعاد آن عموماً در حد میلی‌متر و میکرون هستند. اخیراً دو روش برای تولید سیمان در ابعاد نانو پیشنهاد شده است: ۱- آسیاب کردن ذرات سیمان (در این روش از خرد کردن ماده اصلی، ترکیبات نانو ساخته می‌شوند) ۲- استفاده از ترکیبات شیمیایی (در این روش با استفاده از واکنش‌های شیمیایی، نانو ذرات شکل می‌گیرند) [۵۳].

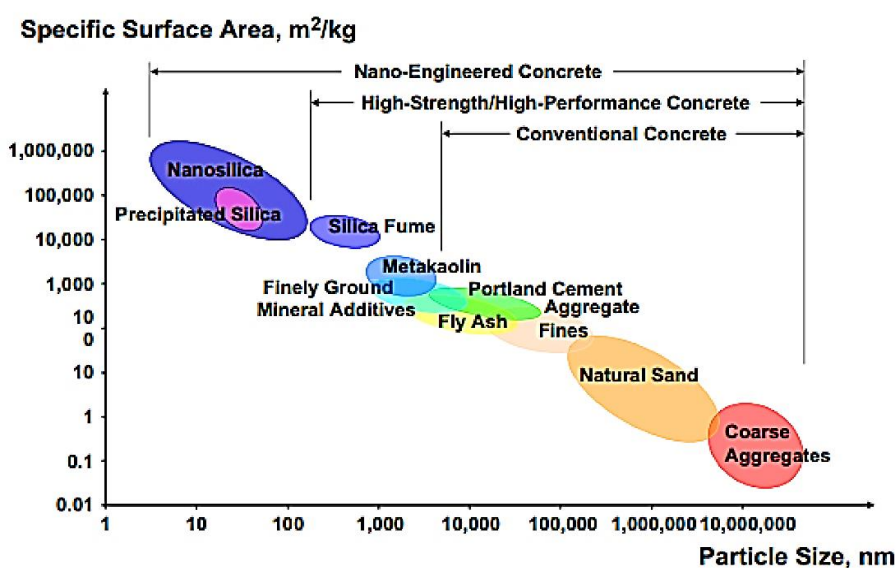


شکل ۴۲-۱- حرکت به‌سوی بتنی مقاوم با استفاده از نانوتکنولوژی [۵۴].

۸-۱-۱ چالش‌های نانوتکنولوژی در صنعت بتن

نانوتکنولوژی یک حوزه تحقیقاتی وسیع و پویا در سراسر جهان هست که این حوزه بعد از ابداع لوله‌های نانو کربنی در زمینه‌های متعددی همچون الکترونیک، مهندسی پزشکی و کامپوزیت‌ها کاربرد پیدا کرده است. اخیراً محققین مختلفی به استفاده از فناوری نانو در صنعت سیمان روی آورده‌اند. با استفاده از ذرات نانو در سیمان و دستیابی به خواصی جدید، سیمان مذکور می‌تواند به‌عنوان یک ماده با فناوری بالا، جایگزین سیمان‌های رایج گردد. مانند بسیاری از فناوری‌های نوین، نانوتکنولوژی نیاز به توجیه اقتصادی داشته ولی در حال حاضر به

علت هزینه‌های بالای این فناوری، توسعه روزافزون این محصولات و استفاده از آن‌ها در صنعت محدود گردیده است. توزیع یکنواخت نانو ذرات در بتن یکی دیگر از چالش‌های استفاده از این ذرات می‌باشد. معمولاً این ذرات در حین اضافه شدن به بتن به توده‌ای انباشته تبدیل شده و در مخلوط به‌خوبی توزیع نمی‌شوند. البته می‌توان برای جبران این نقص از دستگاه‌های مخلوط‌کن قوی استفاده کرد. چون ذرات نانو سطح ویژه بزرگی دارند، این امکان وجود دارد که مقدار زیادی آب جذب نمایند و در نتیجه آن، تأثیر منفی بر کار آبی بتن بگذارند (شکل ۴۳-۵۵).



شکل ۴۳-۱- مقایسه اندازه ذرات با سطح ویژه ذرات برای ذراتی در رابطه با بتن [۵۵].

۹-۱- انواع نانو ذرات بکار برده شده در صنعت بتن خود تراکم

اخیراً محققان نشان داده‌اند که به کار بردن نانو ذرات اثر قابل توجه روی واکنش‌های شیمیایی دارد که در طول هیدراسیون سیمان اتفاق می‌افتد. علاوه بر این روی مشخصه‌های ساختاری هیدراته در مقیاس ماکرو که شامل مشخصه‌های مکانیکی و دوام خمیر سیمان سخت شده است تأثیرات قابل توجهی دارد [۵۶]. نانو ذرات به لحاظ شیمیایی فعال بوده و چون مساحت سطح زیادی را برای واکنش فراهم می‌کنند در نتیجه آن‌ها با کم کردن حفرات با اندازه‌ی نانو (۵ تا ۵۰ نانومتر) در هیدراته‌های کلسیم سیلیکات نانو ساختار را مقاوم می‌کنند [۵۷، ۵۸]. گستره‌ی وسیعی از نانو سیمان‌ها می‌تواند با اضافه شدن نانو ذرات مانند نانو اکسید سیلیسم، نانو خاک رس‌های مونتوریلونیت^۱ و دیگر نانو ذرات ایجاد شود. در این قسمت به بررسی نانو ذرات مونتوریلونیت پرداخته می‌شود. مونتوریلونیت یک ماده‌ی معدنی آب‌دوست بوده که به خانواده خاک رس‌های اسمکتیت^۲ تعلق دارد. این ترکیب در کاربردهای صنعتی متفاوتی به کار گرفته می‌شود که علت آن مساحت سطح ویژه‌ی بالا، واکنش‌پذیری سطحی بالا

^۱ Montrylonite

^۲ Smectite

و نهایتاً ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد می‌باشد. این ترکیب معدنی شامل سه لایه می‌باشد که لایه آن آلومینیوم اکتائدرال بین دولایه اکسید سیلیکون تتراهدرال ساندویچ شده است [۵۹]. نانو ذرات مستقل در حالتی برای واکنش آماده‌اند که اتصال بین لایه‌ها به اندازه‌ای ضعیف شود که از هم جدا شوند. این اتفاق زمانی می‌افتد که یک اصلاح‌کننده به داخل این لایه‌ها فرستاده شود. این اصلاح‌کننده با تغییر دادن بار شبکه موجب جدایش لایه‌ها از هم می‌شود. اگر این اصلاح‌کننده معدنی باشد، به خاک رس حاصله اصلاح‌کننده‌ی معدنی گفته می‌شود که باعث ایجاد ساختار آب‌گریز در خاک رس خواهد شد. یکی از روش‌های فعال‌سازی و اصلاح به‌منظور بهبود کیفیت مشخصه‌های مواد خام عملیات حرارتی^۱ می‌باشد. در ادامه به معرفی این مواد نانو می‌پردازیم:

۱-۹-۱-۱ نانو ذرات SiO_2

با ابداع عامل‌های شیمیایی به کاربرده شده در بتن مانند عمل کاهنده‌ی آب، همچنین اضافه کردن پوزولان‌ها به مواد پایه سیمانی، کیفیت بتن‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. همچنین یکی از راه‌های رسیدن به ساختار بتنی بادوام بالا، میکرو ساختار فشرده و ترکیب بهینه‌شده/ساختار ژلی C-S-H هست. با در نظر گرفتن ابعاد نانو ژل‌های C-S-H، محققان در حال بهبود دوام بتن با به کار بردن نانوتکنولوژی هستند [۶۰-۶۲]. در میان همه‌ی نانو ذرات به کاربرده شده، اشکال مختلف نانو سیلیکا مانند پودر، محلول کلئیدی و حتی پیش ماده‌اش (تترا اتوکسی سیلان) بررسی شده است [۵۴، ۶۳-۶۵]. با در نظر گرفتن این اثرات روی هیدراسیون و خواص سخت سازی مواد سیمانی، بسیاری از محققین بهبود واکنش‌های پوزولانی را گزارش داده‌اند. کونگ^۲ و همکارانش گزارش دادند که نانو سیلیکا در مقایسه با دوده‌ی سیلیس قابلیت مصرف بیشتری از هیدروکسید کلسیم را دارد. محققان دیگر نیز گزارش دادند که استفاده از نانو سیلیکا سرعت واکنش‌های پوزولانی را در مقایسه با دوده‌ی سیلیس چند برابر می‌کند [۵۴]. همچنین دگرگونی هیدراسیون و فرآیند سخت سازی مواد سیمانی در حضور نانو ذرات سیلیکا به‌وسیله‌ی محققان زیادی بررسی شده که نتیجه‌ی آن‌ها بهبود دوام مواد سیمانی می‌باشد. به کار بردن این مواد در کنار محصولات جانبی صنعتی مانند خاکستر زغال سنگ موجب دوام بالاتر مواد پایه سیمانی خواهد شد. همچنین موجب کاهش گرمای هیدراسیون، استحکام‌های بالاتر در درازمدت، مقاومت ویژه بالاتر محیط می‌شود [۶۶]. با در نظر گرفتن امتیازات اثرات شتابنده‌ی ذرات نانو سیلیکا روی هیدراسیون سیمان، محققان مختلفی اثرات نانو سیلیکا را روی سیستم خاکستر زغال سنگ با حجم بالا گزارش دادند [۶۲، ۶۷].

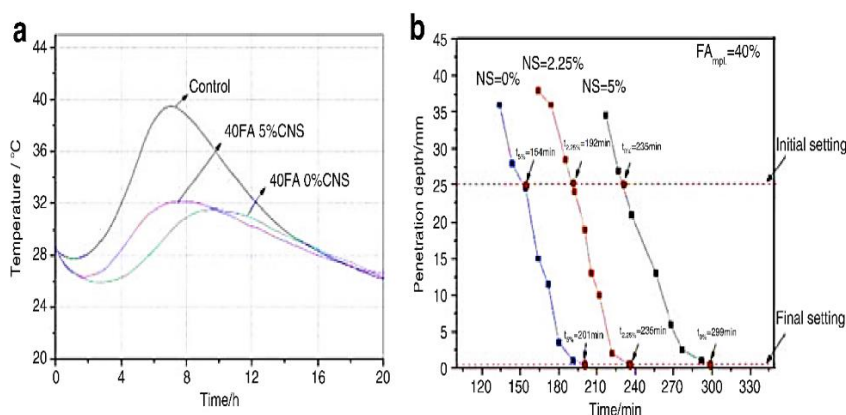
هو^۳ و همکاران گرمای هیدراسیون خاکستر زغال سنگ با حجم بالا را اندازه‌گیری کردند که این موضوع در شکل ۱-۴۴ نشان داده شده است [۶۲]. طبق شکل زمانی که ۵ درصد نانو سیلیکای کلئیدی به سیستم HVFA اضافه می‌شود، دمای هیدراسیون کمتر و سرعت هیدراسیون کندتر شتاب می‌گیرد و زمان گیرش اولیه و نهایی نیز

¹ Heat Treatment

² Kung

³ Hou

به‌طور قابل توجهی کوتاه می‌شود. ژانر^۱ و همکارانش اثرات نانوذره سیلیکا را روی خواص مکانیکی سیستم ترکیبی خاکستر زغال سنگ/سرباره بررسی کرده و نتیجه‌ی کار را افزایش قابل توجه استحکام مکانیکی به‌خصوص در مراحل اولیه دانستند [۶۸]. به‌عنوان یک ماده سیلیکاتی، واکنش‌های پوزولانی نانو سیلیکا با محصولات هیدراسیون هیدروکسید کلسیم، ژل C-S-H بیشتری تولید می‌کند که این از منافع حضور نانو سیلیکا در مواد پایه سیمانی می‌باشد. علاوه بر این، بر طبق گزارش‌ها، دگرگونی خواص فیزیکی و شیمیایی ژل C-S-H بهبود دوام مواد پایه سیمانی را در پی خواهد داشت. گایتر^۲ و همکاران مقاومت لیچینگ کلسیم نانو سیلیکای اضافه‌شده به مواد پایه سیمانی را مورد ارزیابی قرار دادند [۶۹]. آن‌ها مشاهده کردند که اضافه کردن نانو سیلیکا در مقایسه با میکرو سیلیکا، انزوال به‌واسطه‌ی لیچینگ کلسیم را کاهش می‌دهد. آن‌ها گزارش دادند که ذرات نانو سیلیکا متوسط طول زنجیره‌های سیلیکاتی ژل C-S-H را افزایش می‌دهد. به‌علاوه موجب اصلاح نانو ساختار C-S-H اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی نانو دندان^۳ می‌شود. (شکل ۴۵-۱) [۷۰].

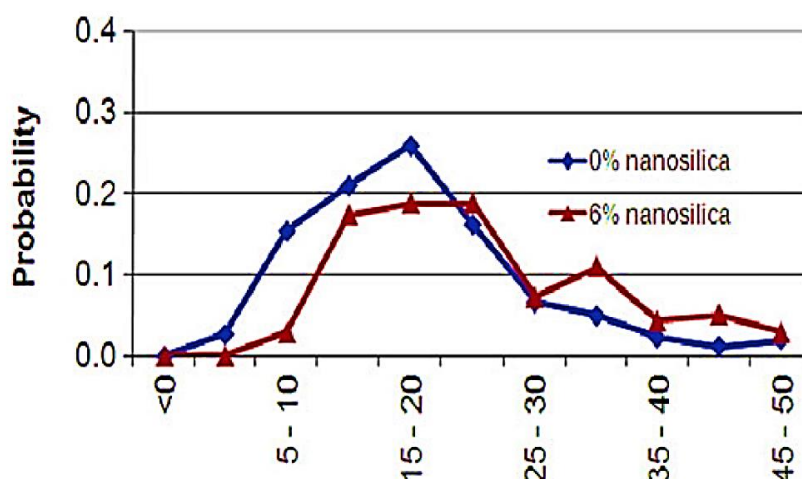


شکل ۴۴-۱- تأثیر نانو سیلیکا روی هیدراسیون اولیه سیستم خاکستر زغال سنگ با حجم بالا. (الف) دمای هیدراسیون (ب) زمان گیرش اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی Vicat needle [۶۲].

¹ Zhang

² Gaitero

³ Nano indentation



شکل ۴۵-۱- مدول الاستیک خمیر سیمان و خمیر سیمان اصلاح شده با نانو سیلیکا [۷۰].

بوسکو^۱ و همکارانش مورفولوژی ژل C-S-H را بعد از اضافه کردن نانو سیلیکا در دماهای مختلف ارزیابی کرد و نتایجش افزایش طول زنجیره‌های سیلیکاتی ژل C-S-H را نشان داد [۷۱]. همین نویسندگان در یک مطالعه‌ای عمیق‌تر، خواص هیدراسیون نانو ذرات سیلیکا را ارزیابی کردند. تصاویر SEM یک میکرو ساختار فشرده‌تر (با نسبت کلسیم به سیلیکا کمتر) محصولات واکنش‌های پوزولانی را در مقایسه با دوده‌ی سیلیس نشان داد (شکل ۴۶-۱). یک ساختار ژلی C-S-H فشرده‌تر شکل گرفته به وسیله‌ی نانو سیلیکا نیز به وسیله‌ی توماس^۲ گزارش شده است [۷۲]. برای سال‌های متمادی محققان در تلاش برای بهینه کردن و بهبود دادن خواص دستگاه‌های تولید سیمان پرتلند در سطوح مختلف می‌باشند. در اندازه‌های ۱۰۰ میکرومتر تا ۵۰ میلی‌متر، محققان به منظور کاهش مصرف مواد سیمانی و همچنین بهبود عملکرد مخلوط بتن، با بهینه‌سازی مخلوط ریزدانه^۳ سروکار دارند [۷۳]. تکنیک‌های فشرده‌سازی متفاوتی به منظور بهبود دوام بتن در مقابل انواع خسارت‌ها به کار گرفته شده است. در گستره‌ی میکرو (۱ تا ۱۰۰ میکرومتر) و زیر میکرو (۱ میکرومتر تا ۱۰۰ نانومتر) مواد سیمانی مکمل به کار گرفته می‌شود تا خواص مکانیکی و دوام مواد پایه سیمانی را افزایش دهند [۷۴، ۷۵] و نهایتاً در گستره‌ی ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، نانو ذراتی مانند SiO_2 و TiO_2 به کار گرفته می‌شود تا واکنش‌پذیری مواد مکمل سیمانی، اصلاح رفتار سیالیت و همچنین استحکام و دوام بتن افزایش یابد [۷۶]. در مقیاس نانو، به منظور افزایش عملکرد مکانیکی و دوام بتن، نانو ذرات سیلیکا به طور وسیعی به کار برده می‌شود. در یک تحقیق اثر سیلیکا کلئوئیدی روی فرآیند هیدراسیون $(\text{Ca}_3\text{SiO}_5)\text{C}_3\text{S}$ و $(\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4)\beta\text{-C}_3\text{S}$ بررسی شد [۷۷]. در این تحقیق ثابت شد که این نانو ذرات در مقادیر کمتر از ۵ درصد فرایند تشکیل ژل C-S-H را در ۲۴۵ ساعت اول تسریع می‌کنند. کلپاردی^۴ و همکارانش با به کار

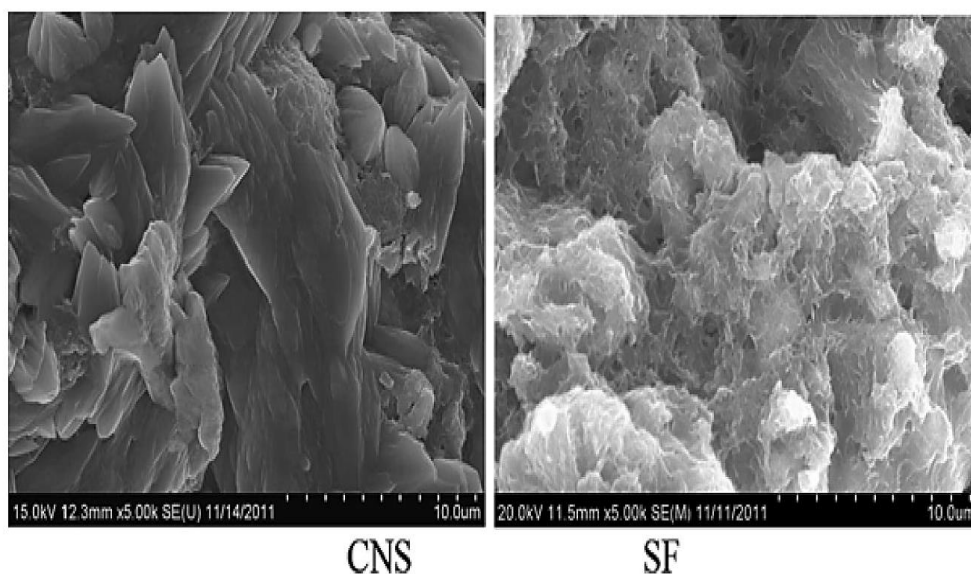
¹ Bosque

² Thomas

³ Aggregates

⁴ Collepardi

بردن ۱ و ۲ درصد وزنی نانو سیلیکای کلئیدی به عنوان اصلاح کننده ویسکوزیته، بتن‌های خود متراکم شونده با گرمای هیدراسیون کم تولید کردند. این نانو ذرات تولید بتن‌های فشرده با جدایش و نشست کم را امکان پذیر ساخت [۷۸]. ژینگ^۱ و همکارانش به بررسی استحاله‌ی فاز Ca(OH)_2 در بتن حاوی دوده‌ی سیلیس و نانو سیلیکا پرداختند. در این بتن، کمیت کریستال‌های Ca(OH)_2 در نواحی فصل مشترک کمتر بوده و عملکرد مکانیکی در ساعات اولیه نسبت به بتن حاوی دوده‌ی سیلیس بهتر می‌باشد [۷۹]. فلور^۲ و همکاران عملکرد نانو سیلیکا سنتز شده را در ملات سیمان پرتلند مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های پراکنده سازی کردن نانو ذرات در زمینه‌ی سیمانی و به کار بردن فوق روان کننده، عملکرد مکانیکی ملات را بهبود دادند [۷۶]. همچنین نانو ذرات^۳ تولید شده در محیط اسیدی به روش سل ژل، سطح ویژه‌ی بالاتری داشته و در سیستم سیمان پرتلند نسبت به نانو ذرات تولید شده در محیط بازی فعال تر می‌باشند. همچنین نانو ذرات تولید شده در محیط اسیدی در ساعات اولیه واکنش سیمان پرتلند را افزایش می‌دهند، در حالی که مواد تولید شده در محیط بازی، هم سطح ویژه‌ی کمتری داشته و مانند یک ماده‌ی پوزولانی معمولی عمل می‌کند [۸۰]. در شکل ۴۷-۱ تصاویر TEM نانو ذرات SiO_2 تولید شده در محیط اسیدی و بازی آورده شده است.

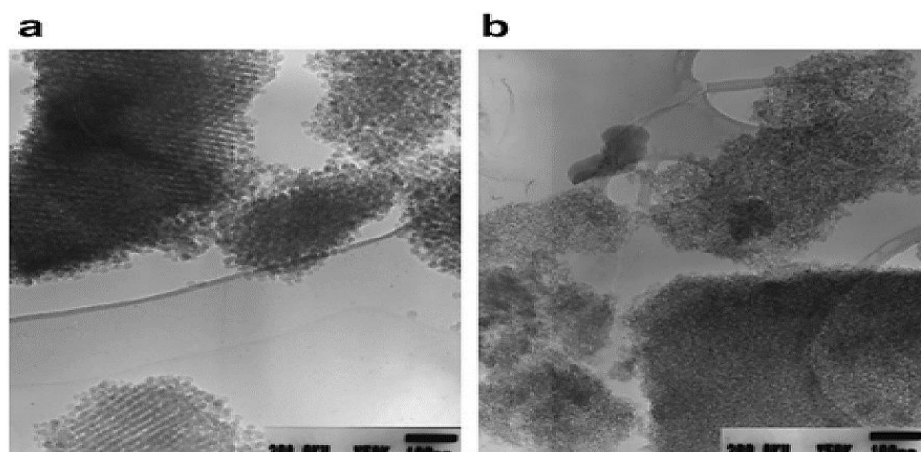


شکل ۴۶-۱- مورفولوژی محصولات هیدراسیون پوزولانی CNS و دوده‌ی سیلیس ($\text{CNS/SF:CH} = ۵:۲$ ؛ $w/b = ۰.۲$ ، زمان ۴ ماه) [۸۱].

¹ Qing

² Flores

³ Nano Particles



شکل ۴۷-۱- نانو ذرات تولیدشده SiO_2 با روش سل ژل (الف) بازی (ب) اسیدی [۸۰].

اخیراً، واکنش‌های پوزولانی بیشتر و ویژگی ابعاد نانو سیلیکا در عملیات سطحی مواد سیمانی سخت شونده به کار گرفته می‌شود [۸۲]. به واسطه‌ی نزدیکی به محیط، سطوح ساختار بتنی خسارت‌پذیرترین قسمت محسوب می‌شود و لذا بهبود سطح برای بهبود دوام بتن مفید تلقی می‌شود. کاردیناس^۱ و همکارانش تأثیر عملیات نانو ذرات را روی خواص بتن مسلح بررسی کردند و نتایج شان کیفیت سطح بتن را در اثر تکنیک الکتروسینتیک نشان داد [۸۳]. فرانزونی^۲ کلونید نانو سیلیکا را برای عملیات سخت سازی بتن استفاده نمود، نتایج شان اثرات مثبتی را بر روی عملیات سخت سازی بتن نشان داد، ولی آن‌ها متوجه شدند که پیش ماده‌ی تولیدکننده‌ی نانو سیلیکا، تترااتیل‌اورتوسیلیکات^۳، در ساختار خفرات هیدرولیز می‌شود و تشکیل سل سیلیکا را می‌دهد و نهایتاً باعث ایجاد یک ساختار فشرده‌تر و بادوام‌تر می‌شود. همین محققان مکانیزم تشکیل نانو سیلیکا را تحت رژیم‌های متفاوت عمل‌آوری به‌منظور سخت سازی ماده بتن انجام دادند [۶۴]. نتایج حاصل نشان داد واکنش‌های پوزولانی نانو سیلیکا در متراکم‌تر شدن سطح میکروساختار مشارکت می‌کنند (کم شدن جذب آب همان‌طور که در جدول ۴۲-۱ نشان داده شده است). در ضمن دگرگونی ژل C-S-H، یعنی افزایش درجه پلیمریزاسیون به بهبود مقاومت لیچینگ کلسیم نسبت داده می‌شود که این موضوع در شکل ۴۸-۱ نشان داده شده است. همه‌ی این نتایج احتمال عملیات سطحی مواد پایه سیمان با نانو ذرات را نشان می‌دهند. علاوه بر این پتانسیل به کار بردن نانو ذرات، در فرم‌های مختلف، به‌منظور بهبود کیفیت سطحی را نشان می‌دهد. با این حال کار روی انتخاب نوع نانوذره، مکانیزم‌های واکنش و تکنیک‌های عملیات سطحی هنوز موردنیاز می‌باشد. برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن استفاده از میکروسیلیس‌ها در کشورهای پیشرفته رو به افزایش است. استفاده از میکرو سیلیس‌ها در بتن دارای فواید بسیار زیادی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به کاهش ترک‌های ناشی از هیدراسیون سیمان، دوام بهتر در مقابل حمله

¹ Cardinas

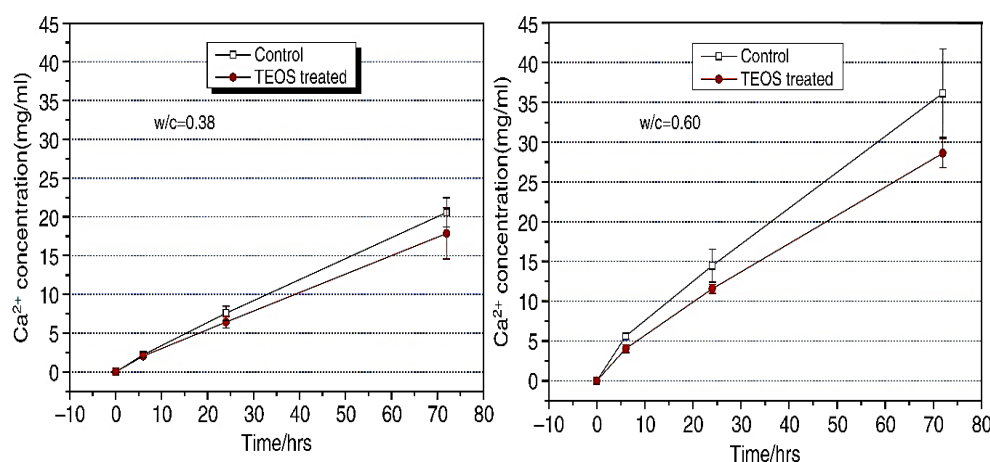
² Franzoni

³ TEOS

سولفات‌ها، باران‌های اسیدی و دستیابی به مقاومت بالا اشاره کرد. از دیگر مزایای مصرف میکرو سیلیس کاهش تحرک یون‌های کلراید و در نتیجه کاهش عمق نفوذ کلراید در بتن به‌ویژه در مناطق ساحلی می‌باشد. از موارد مصرف آن می‌توان در بتن‌ریزی‌های مربوط به ساخت اسکله‌های دریایی، شمع‌ها، ستون‌ها و قطعات پیش‌ساخته، فونداسیون ماشین‌آلات و کلیه سازه‌های بتنی که در معرض حملات شیمیایی به‌ویژه یون کلراید و سولفات‌ها قرار دارند نام برد. افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان‌گیرش بتن و کاهش نفوذپذیری آب داخل بتن و نیز افزایش مقاومت بتن در برابر حملات عوامل شیمیایی است. همچنین افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن موجب کاهش زمان هیدراسیون آن و بالا رفتن پیک دمایی هیدراسیون می‌گردد [۵۴].

جدول ۴۲-۱- ضریب جذب آب اولیه خمیر سیمان قبل و بعد از عملیات سطحی ($\text{mg/cm}^2\text{s}^{0.5}$) [۸۴]

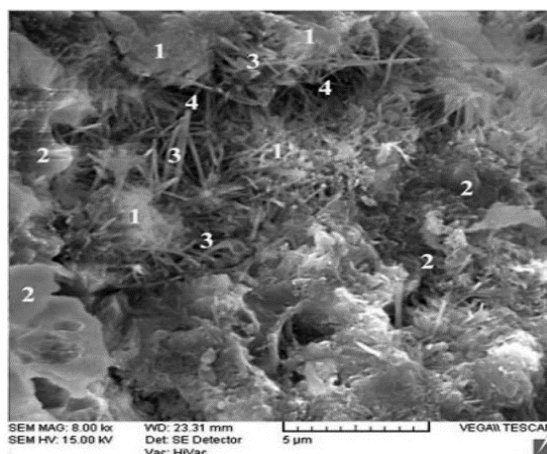
w/c	0.26	0.38	0.6	1.0
Control	2.5(100 %)	5.7(100 %)	6.9(100 %)	8.3(100 %)
CNS	2.5(100 %)	5.7(100 %)	5.7(82.6 %)	6.3(75.9 %)
TEOS	2.5(100 %)	4.2(73.7 %)	5.2(75.4 %)	5.5(66.3 %)



شکل ۴۸-۱- کلسیم گیری خمیر سیمان سخت‌شده [۸۵].

دو واکنش مکانیکی محتمل در هنگام هیدراسیون بتن در حضور ذرات نانو سیلیکا وجود دارد. هیدراسیون سیمان می‌تواند در حضور ذرات نانو سیلیکا شتاب پیدا کند. هنگامی که نانو سیلیکا به ذرات سیمان اضافه می‌گردد، $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ شکل گرفته و با Ca^{2+} موجود شروع به واکنش می‌کند که موجب تولید کلسیم - سیلیکات - هیدرات اضافی می‌گردد. سپس این ذرات ایجاد شده C-S-H درون آب بین ذرات سیمان پخش شده و نقش منبعی را برای ایجاد فاز فشرده C-S-H ایفا می‌کنند. تشکیل فاز C-S-H به‌عنوان عاملی به پر کردن خلل و فرج بتن کمک می‌کند. تشکیل تعداد زیادی از این ذرات موجب شتاب بخشیدن در زمان هیدراسیون بتن می‌گردد (شکل ۴۹-۱ و شکل ۵۰-۱) [۵۴]. با افزودن ۳۵ درصد نانو سیلیس، مقدار استحکام فشاری بتن به میزان ۲۰

درصد افزایش یافته ولی با افزودن همین مقدار سیلیس در مقیاس میکرون، استحکام فشاری بتن به میزان ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. حتی با اضافه کردن نانو سیلیس به مقدار بسیار کمی برابر ۰/۲۵ درصد استحکام فشاری به اندازه ۱۰ درصد و مقاومت خمشی به میزان ۲۵ درصد افزایش می‌یابد [۸۶]. مقایسه‌ای بین تنش فشاری برای بتن خود تراکم را در شرایط مختلف و در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد. در این شکل S بیانگر بتن خود تراکم بدون ماده افزودنی، SN، بیانگر بتن خود تراکم حاوی نانو ذرات سیلیکا، SM بیانگر بتن خود تراکم با ذرات میکروسیلیکا و SMN بیانگر بتن خود متراکم شونده حاوی ذرات میکرو سیلیکا و نانو سیلیکا می‌باشد. مطابق شکل ۵۱-۱ با افزودن ذرات نانوسیلیکا (SN) استحکام فشاری بتن خود متراکم شونده اندکی کاهش می‌یابد در صورتی که با افزودن ذرات میکروسیلیکا (SM) و یا با افزودن توأم ذرات میکروسیلیکا و نانوسیلیکا (SMN) استحکام فشاری بتن خود تراکم افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش استحکام فشاری مربوط به بتن‌های خود تراکم دارای ذرات میکرو و نانوسیلیکا (SMN) می‌باشد [۸۷].



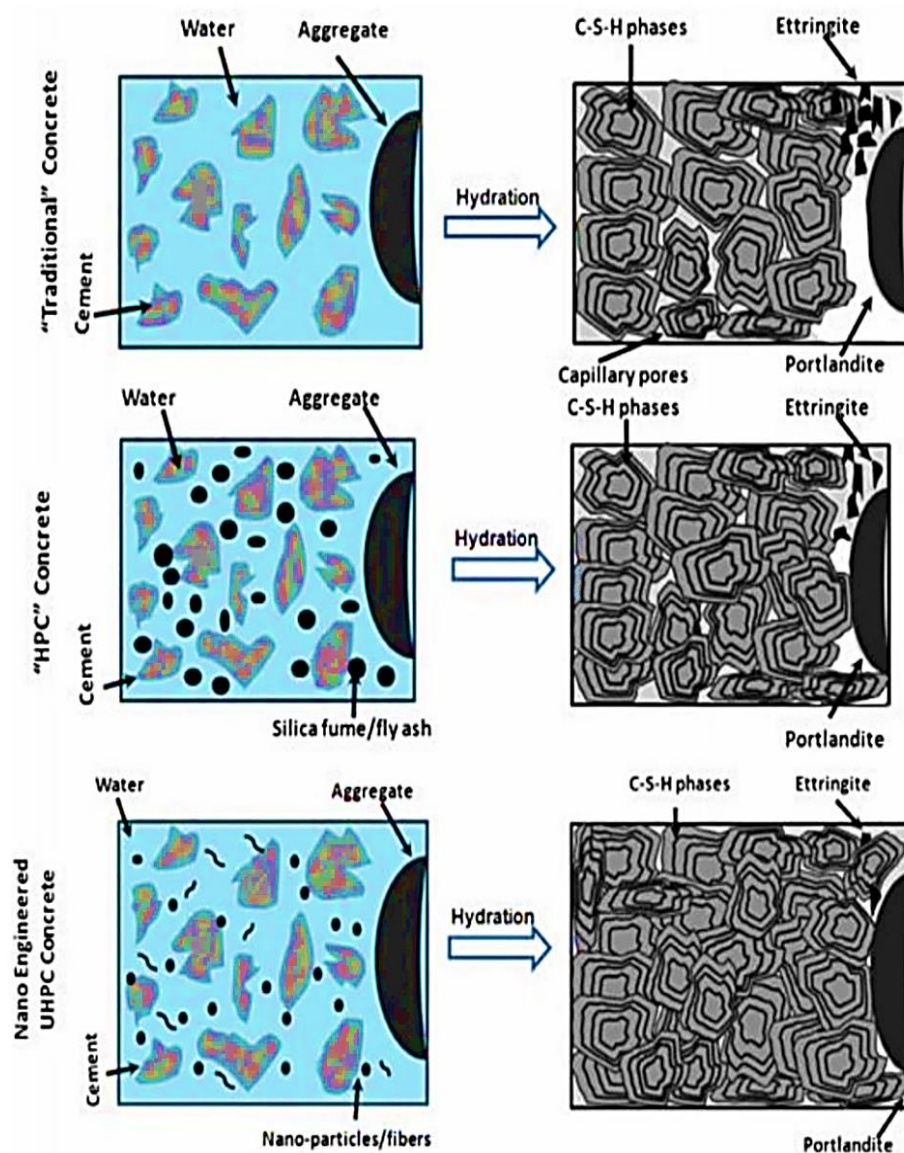
شکل ۴۹-۱- حضور محصولات مختلف هیدراسیون در بتن ۱-C-S-H، ۲-Ca(OH)₂، ۳- اترینگایت و ۴- حفره [۸۸].

۲-۹-۱-۱ نانو خاک رس

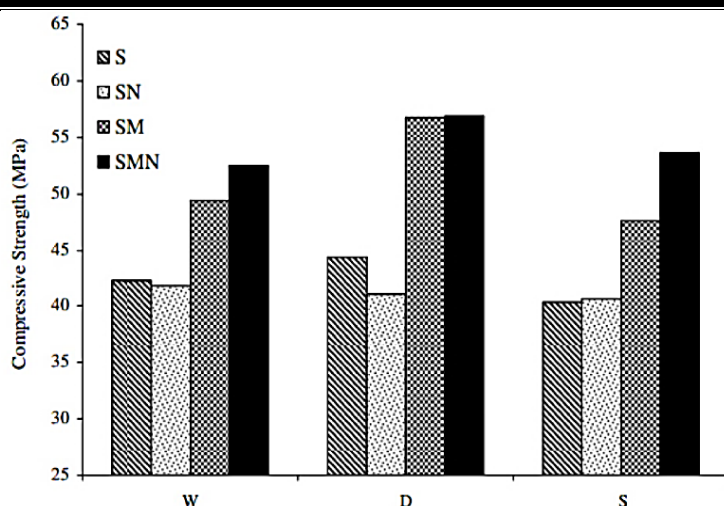
به واسطه‌ی قیمت پایین و همچنین فواید معرفی شده، نانو خاک رس برای اصلاح مواد پایه سیمان استفاده می‌شود. در مقایسه با نمونه کنترل، استحکام پیچشی خمیر سیمان با ۱ درصد کائولینیت بعد از ۱،۳۰۷ و ۹۰ روز به ترتیب ۳۰/۴۱، ۳۹/۰۴، ۳۶/۲۷ و ۳۸/۳۲ درصد افزایش می‌یابد. افزایش در استحکام فشاری بتن سیمانی با ۱۲، ۱۳/۵ و ۲۸/۴ درصد خاک رس قابل مقایسه با ۱، ۳ و ۵ درصد نانوخاک رس می‌باشد [۸۹]. نانو خاک رس یک ساختار دولایه بوده که مولکول‌های آب می‌تواند در بین صفحات بلوکه شده و ضریب نفوذ را در بتن و آرماتور کاهش دهد. فن^۱ و همکارانش اثرات نانو خاک رس را روی ضریب نفوذپذیری یون کلراید و مقاومت به یخ‌زدگی نشان دادند که نتایج آن در جدول ۴۳-۱ و شکل ۵۲-۱ آمده است [۸۹]. طبق جدول ۴۳-۱ کاهش ضریب نفوذ کلی در ۱ و

¹ Fan

۵ درصد نانو خاک رس به ترتیب ۸/۶۸ و ۱۸/۸۷ درصد می‌باشد. بعد از ۱۲۵ روز سیکل سرمایش یخ‌زدگی، کاهش مدول الاستیک دینامیک، ۳۳ درصد بتن بدون افزودنی می‌باشد، درحالی‌که با اضافه کردن ۳ درصد نانو خاک رس این مقدار به ۵ درصد می‌رسد.



شکل ۵۰-۱- واکنش هیدراسیون در بتن سنتی، بتن با عملکرد بالا و بتن با تکنولوژی نانو ذرات [۵۴].

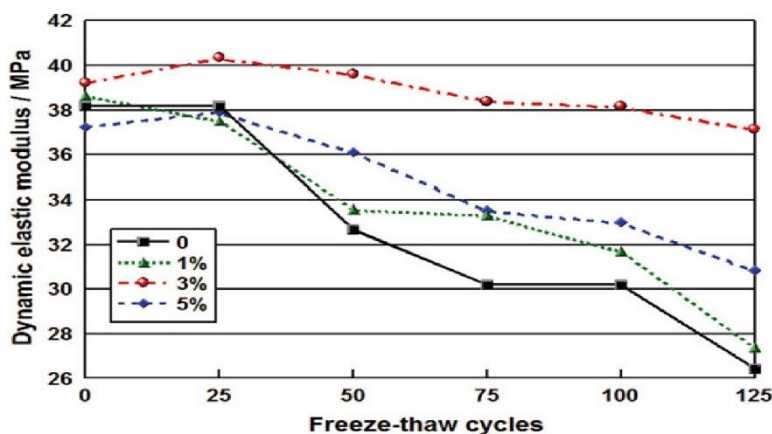


شکل ۵۱-۱- مقایسه استحکام فشاری برای حالات مختلف بتن خود تراکم در سن ۲۸ روز (W= بتن خیس‌انده شده و D = بتن خشک و S = بتن قرار داده شده در محلول پنج درصدی سولفات منیزیم) [۸۷].

جدول ۴۳-۱- اثرات نانو خاک رس روی مقاومت به نفوذ یون کلراید [۸۹]

Series	Clay additive wt/%	Diffusion coefficient/m ² /s	Reduction diffusion coefficient/%
Plain	0	1.98262e-11	0.00
CC1	1	1.81058e-11	8.68
CC2	3	1.81343e-11	8.53
CC3	5	1.60840e-11	18.87

Note: Mix proportion of the concrete mixtures (in kg/m³): cement:water:sand:aggregate = 350:175:619:1,256

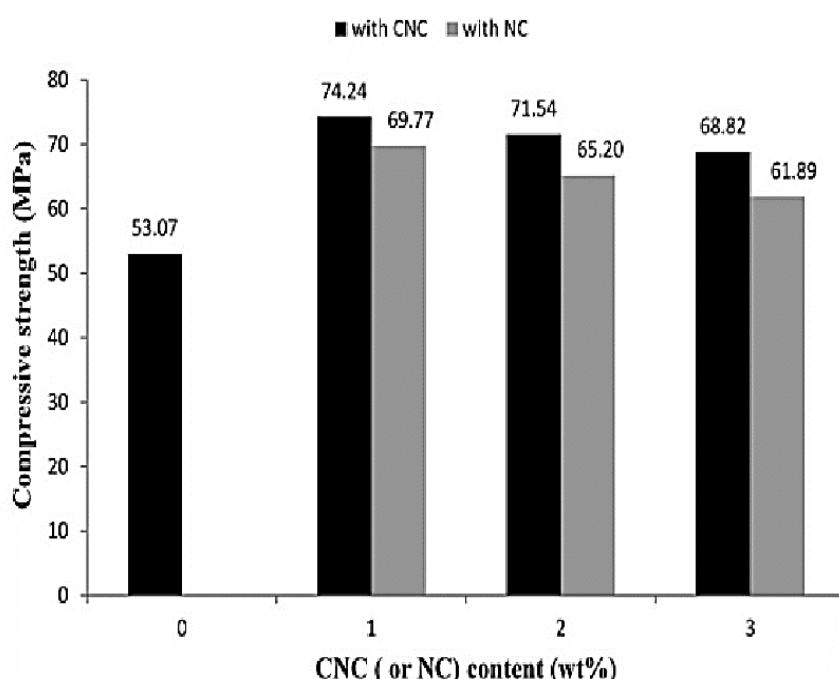


شکل ۵۲-۱- تأثیر نانو خاک رس روی مدول الاستیک بتن بعد از سیکل سرمایش [۸۹].

استفاده از ذرات نانو رس (شکل ۵۳-۱) موجب بهبود رفتار بتن مثل، ایجاد بتن خود تراکم، افزایش استحکام فشاری، کاهش نفوذپذیری، مقاومت در مقابل نفوذ کلرایدها و کاهش جمع شدگی در بتن، می‌گردد. مطابق شکل ۵۳-۱ در بین درصد‌های ارائه شده از نانو ذرات رس، میزان یک درصد وزنی نانو ذرات رس بیشترین

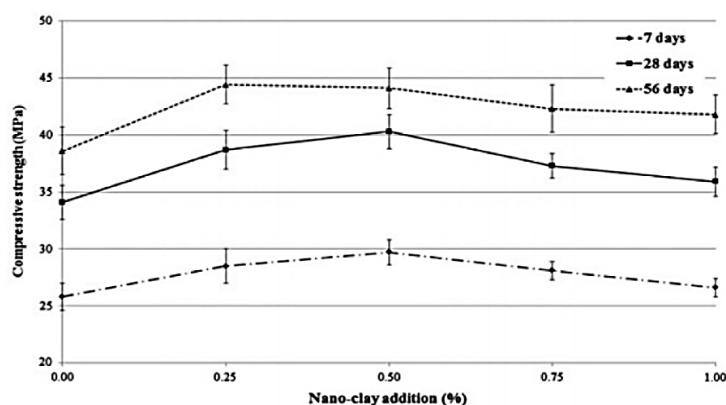
استحکام فشاری بتن را دارا می‌باشد ولی با افزایش درصد وزنی نانو ذرات رس، استحکام فشاری بتن، به تدریج کاهش می‌یابد.

تغییرات استحکام فشاری بتن خود تراکم، در هنگام استفاده از نانو ذرات رس با درصدهای متفاوت برای بتنی با سن‌های ۷، ۲۸ و ۵۶ روز، (شکل ۵۴-۱) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، افزایش سن بتن، موجب افزایش استحکام فشاری آن می‌گردد. از طرفی دیگر، با افزایش درصد نانو ذرات رس در بتن خود تراکم تا حدود ۰/۵ درصد، استحکام فشاری بتن، به تدریج افزایش می‌یابد. ولی برای نانو ذرات با ۰/۵ الی ۱ درصد استحکام فشاری بتن خود تراکم شونده به تدریج کاهش می‌یابد؛ بنابراین بیشترین استحکام فشاری برای بتنی با سن ۷ و ۲۹ روز با نانو ذرات رس برابر ۰/۲۵ درصد می‌باشد [۸۸].



شکل ۵۳-۱- مقایسه میزان استحکام فشاری بتن در دو حالت سیمان نانو کامپوزیت (NC) و سیمان دارای نانو ذرات رس (CNC) برای درصدهای وزنی متفاوت [۹۰].

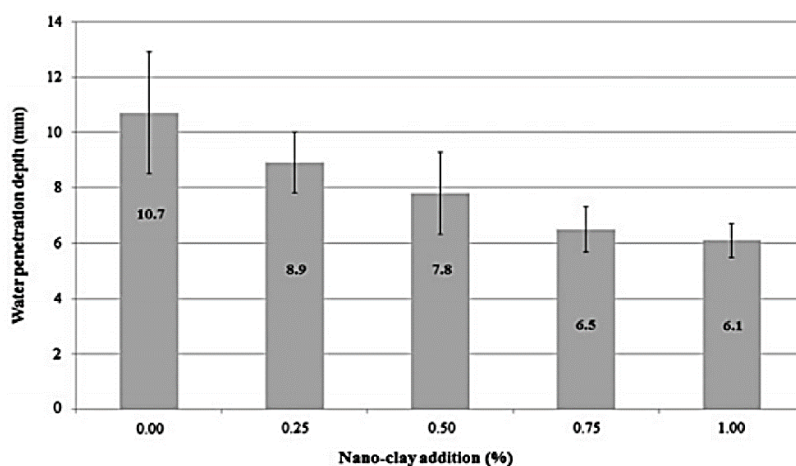
حسینی و همکاران، تأثیر افزایش درصد نانو ذرات رس، بر مقدار نفوذ آب در بتن خود تراکم را مورد مطالعه قرار دادند (شکل ۵۵-۱). آن‌ها دریافتند که افزایش درصد نانو ذرات رس، موجب کاهش نفوذپذیری آب در آن بتن می‌گردد؛ که این امر از عملکرد پوزولانی این ذرات نشأت می‌گیرد. شکل ۵۶-۱ تجمع توده‌های نانو ذرات رس (با میزان یک درصد وزنی) و پرکنندگی حفره توسط آن‌ها را نشان می‌دهد [۸۸].



شکل ۵۴-۱- تغییرات استحکام فشاری بتن در هنگام استفاده از درصدهای مختلفی از نانو رس [۸۸].

۳-۹-۱-۱ نانوصفحات اکسید گرافن^۱ و گرافن

اکسید گرافن دارای ساختاری شبیه به گرافن است با این تفاوت که در بدنه آن مقادیر زیادی اکسیژن وجود دارد. برخلاف گرافن، از آنجایی که اکسید گرافن قابلیت ترکیب شدن با آب را دارا است توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است؛ بنابراین از آن می‌توان به عنوان ماده مورد استفاده در بتن استفاده کرد. اصطلاح گرافن برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ معرفی شد که از ترکیب کلمه‌ی گرافیت و یک پسوند (ان) که به هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای^۲ اشاره دارد، ایجاد شد. این نام برای توصیف یک تک لایه از گرافیت در یک ساختار بزرگ‌تر مانند ترکیبات بین لایه‌ای گرافیت^۳ مورد استفاده قرار گرفت [۹۱].

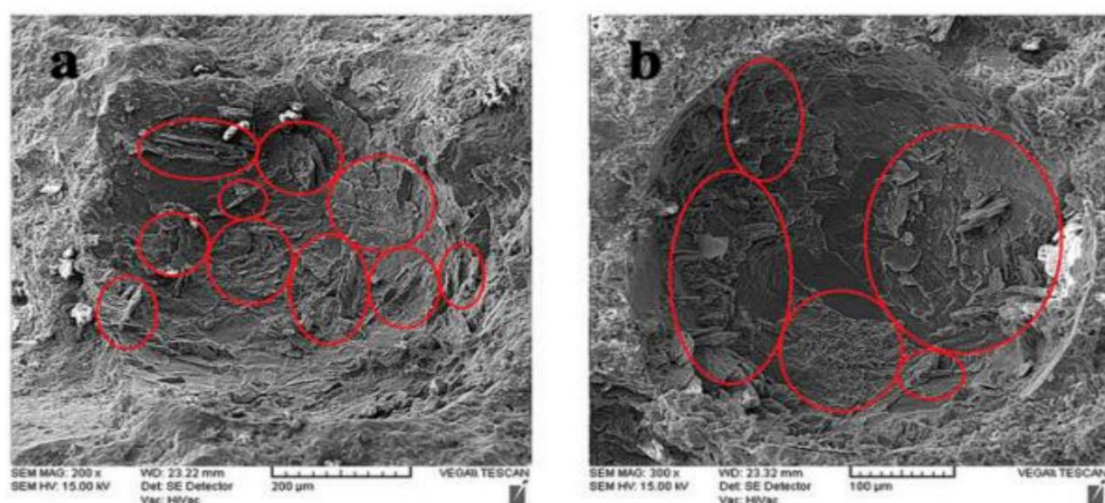


شکل ۵۵-۱- میزان نفوذ آب در بتن با درصدهای مختلف نانو ذرات رس، در طی دوره ۲۸ روز [۸۸].

^۱ Graphene Oxide (GO)

^۲ Polycyclic

^۳ Graphite Intercalation Compounds



شکل ۵۶-۱- خاصیت پرکنندگی حفره در هنگام استفاده از نانو رس به میزان ۱ درصد وزنی [۸۸].

هرچند که این مفهوم به‌طور تئوری نخستین بار در سال ۱۹۴۷ توسط فیلیپ والاس^۱ به‌عنوان یک نقطه شروع برای درک خواص الکترونیکی گرافیت سه‌بعدی مطرح شد. پس‌از آن زمان تلاش‌های زیادی برای ساخت آن، صورت گرفت اما قضیه‌ای به نام قضیه‌ی مرمین-واگنر در مکانیک آماری و نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی (بر اساس علم فیزیک) وجود داشت که ساخت یک ماده‌ی دوبعدی را غیرممکن و چنین ماده‌ای را غیر پایدار و صرفاً یک ماده نظری می‌دانست. همین مسئله باعث شد باوجوداینکه این ماده توسط افرادی ساخته‌شده بود در طی سال‌ها همچنان ناشناخته باقی بماند و تا سال ۲۰۰۴ هیچ‌گونه توجهی به بررسی خصوصیات گرافن نشود. در طی سال‌ها تک لایه‌هایی از گرافیت در یک ساختار بزرگ‌تر مانند ترکیبات بین لایه‌ای گرافیت با میکروسکوپ الکترونی عبوری دیده شدند [۹۲، ۹۳]. ساختارهایی که درواقع اکسید گرافن (ورقه‌ی از گرافن که با گروه‌های هیدروکسیل و اپوکسید پوشیده شده است) بودند که با میکروسکوپ الکترونی عبوری دیده شدند. ساخت اکسید گرافن به سال ۱۸۵۹ برمی‌گردد. با قرار دادن گرافیت در اسیدهای قوی، ماده‌ای به دست آمد که در آن زمان کربونیک اسید نام گرفت. برودی^۲ تصور می‌کرد که فرم جدیدی از کربن با وزن مولکولی ۳۳ به نام گرافون کشف کرده است. ولی درواقع بعدها مشخص شد که او یک سوسپانسیون از بلورهای کوچک اکسید گرافن ساخته است [۹۴]. در سال ۱۹۴۸، روئس^۳ و ووگت^۴ میکروسکوپ الکترونی عبوری را به کار بردند و بعد از خشک‌کردن یک قطره از سوسپانسیون اکسید گرافن بر روی توری مشبک TEM، تکه‌هایی با ضخامت کمتر از چند نانومتر مشاهده کردند [۹۵]. در سال ۱۹۶۲ جستجوی زیادی برای پیدا کردن نازک‌ترین قطعه از اکسید گرافن انجام دادند و تعدادی تک لایه پیدا کردند. ولی این مشاهدات تا سال‌های ۲۰۰۹ الی ۲۰۱۰ توجه زیادی به خود معطوف نکرد [۹۶]. امروزه، مواد بر پایه GO و کاربردهای آن به دلیل خواص منحصر به فرد GO که می‌تواند به‌طور مؤثر خواص کامپوزیتی را بهبود بخشد، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. اکسید گرافن $(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O} + (\text{OH})_x + \text{COOH})$ از طریق

^۱ Philip Wallace

^۲ Brodie

^۳ Ruess

^۴ Vogt

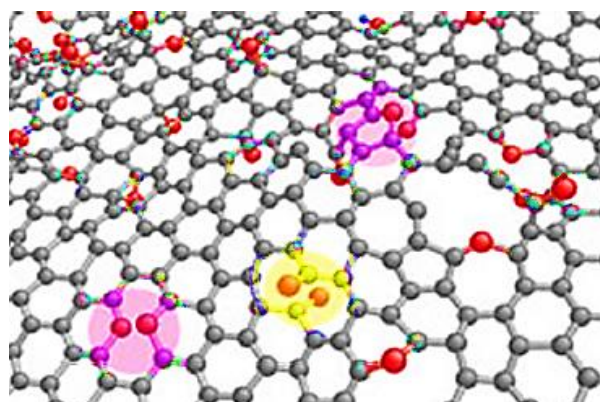
اکسیداسیون گرافیت تولید می‌شود که منجر به تولید اکسید گرافیت شده و می‌تواند به راحتی به لایه‌های GO، ورقه ورقه شود [۹۷، ۹۸]. نانو ورقه‌های GO یک لایه نازک اتمی از گرافیت حاوی گروه‌های اصلی اپوکسی و هیدروکسیل بر روی سطح و گروه‌های اسید کربوکسیلیک در لبه‌ها است [۹۷]. با توجه به حضور گروه‌های عاملی آب‌دوست، نانو ساختارهای GO می‌توانند سوسپانسیون پایدار را در آب ایجاد کنند که به منظور ترکیب GO در مواد سیمانی حائز اهمیت است. به علاوه، GO دارای خواص مکانیکی بسیار خوبی در مقایسه با مواد سیمانی است. استحکام کششی و مدول الاستیک GO بسته به میزان آب و ضخامت نمونه‌ها در حدود ۱۳۰ MPa و ۳۲ GPa است [۹۹]. هدف از به کارگیری اکسید گرافن، پراکندگی خوب آن داخل محلول است و گروه عاملی حاوی اکسیژن بر روی سطح آن به واکنش اکسید گرافن با سیمان کمک می‌کند. GO همان گونه که در شکل ۱-۵۷ مشاهده می‌شود شامل یک شبکه کربنی شش ضلعی حاوی گروه‌های هیدروکسیل، اپوکسی، کربوکسیل و کربونیل است.

تعدادی از محققان بر روی ترکیب GO با مواد سیمانی بررسی انجام داده‌اند. بررسی‌ها نشان داده است که خواص مکانیکی مواد سیمانی در حضور GO به مقدار زیادی بهبود یافته است. همچنین بر اساس مشاهدات زو^۱ و همکاران [۱۰۰]، با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی از GO، استحکام فشاری و خمشی خمیر سیمانی در حدود ۳۳-۱۵ درصد و ۴۱-۵۸ درصد افزایش یافته است. خواص سیمان تقویت شده با GO نشان‌دهنده بهبود در جذب آب و نفوذ یون کلراید است. خواص مکانیکی و ریزساختار، به خصوص در منطقه انتقال بین فاز (ITZ)، ملات سیمان با افزودن مقدار کمی از GO بهبود یافته است [۱۰۱]. اخیراً، لی^۲ و همکاران [۱۰۲] نشان دادند که کلوخه‌های GO در ملات سیمان شکل می‌گیرند که می‌تواند به علت اتصال شیمیایی کاتیون‌های کلسیم دوقطبی باشد. در نتیجه، تأثیر افزودن GO بر خواص مواد سیمانی به ویژگی‌های کلوخه‌های GO در مقایسه با نانو ورقه‌های GO با ضخامت یک اتم بستگی دارد. این ویژگی‌ها شامل توزیع اندازه ذرات، نسبت ابعاد و خواص مکانیکی است. در گذشته، پودر سیمان به عنوان بهترین جز تشکیل‌دهنده برای ساخت بتن معمولی به شمار می‌آمد. افزایش نیاز به بتن با کارآمدی بیشتر منجر به معرفی مواد مکمل از جمله سرباره کوره، خاکستر زغال سنگ، متاکائولین و دوده سیلیس گردید. با پیشرفت فناوری نانو، نانو مواد به سیمان و بتن اضافه شد و عملکرد بهتر ماتریس سیمان در حضور این نانو مواد پیش‌بینی شده است که می‌توان علت آن را نزدیکی اندازه نانو مواد به ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) دانست [۱۰۳]. اندازه نانو ذراتی مانند نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن که قابلیت بهبود استحکام و دوام بتن را دارند در مقایسه با دیگر مواد مکمل بتن در شکل ۱-۵۸ آورده شده است.

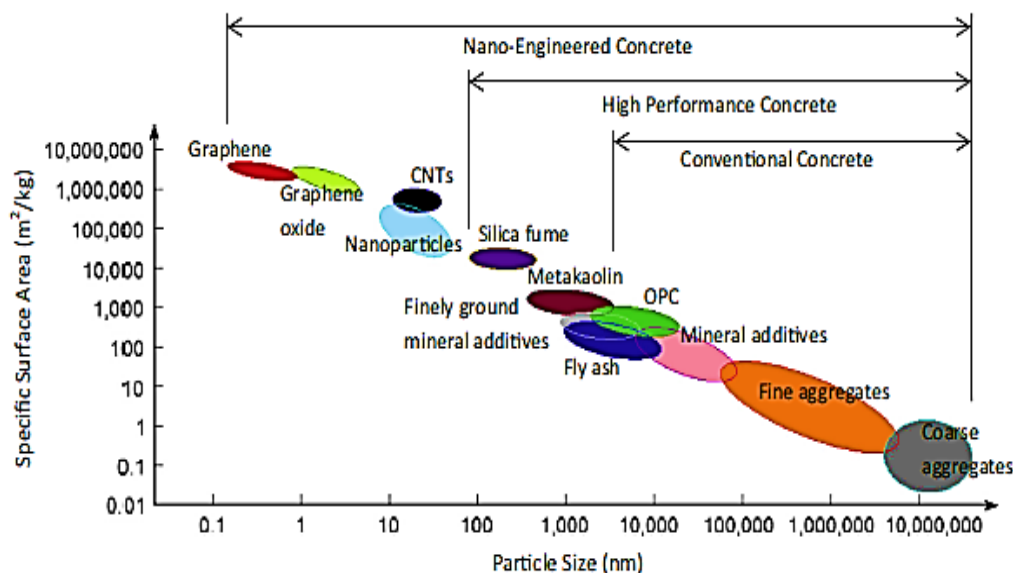
لو^۳ و همکاران [۱۰۶] بر روی اثر نانو ذرات اکسید گرافن در سیمان بررسی انجام داده‌اند. گرافن مورد استفاده در این تحقیق در حدود ۳۰ μm است. آن‌ها بیان کردند هنگامی که مقدار GO برابر ۰/۰۳ درصد بود، کامپوزیت‌های سیمان افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی (۶/۷۸ درصد)، مقاومت خمشی (۷/۶ درصد) و استحکام فشاری (۹/۳۸ درصد) در مقایسه با کامپوزیت‌های معمول سیمان داشته‌اند. همچنین آن‌ها بر اساس آزمون‌های XRD و SEM بیان کردند که تری کلسیم سیلیکات C_3S (Ca_3SiO_5)، دی کلسیم سیلیکات C_2S (Ca_2SiO_4) و تری کلسیم آلومینات C_3A ($Ca_3Al_2O_6$) که از اجزای اصلی سیمان بدون آب هستند، به طور عمده با گروه‌های عاملی (OH، -COOH و -SO₃H) بر روی سطح GO واکنش می‌دهند. شماتیکی از واکنش GO و کریستال هیدراته

¹ Zhu² Li³ Lv

سیمان در شکل ۵۹-۱ نشان داده شده است [۱۰۶].



شکل ۵۷-۱- ساختار اکسید گرافن [۱۰۴].

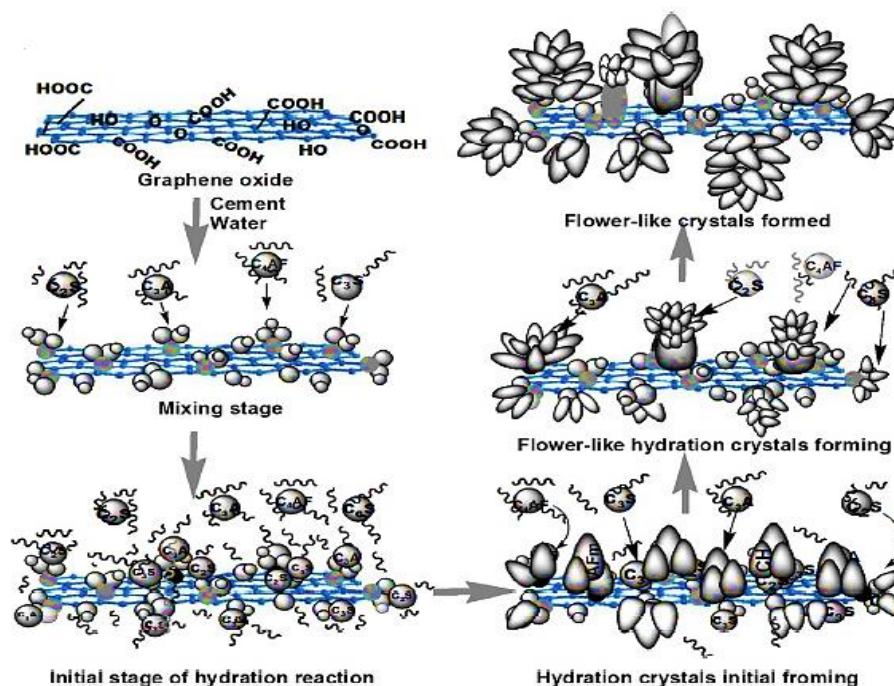


شکل ۵۸-۱- مقایسه اندازه نانو ذراتی مانند CNTs و GO با دیگر مواد مکمل بتن [۱۰۵].

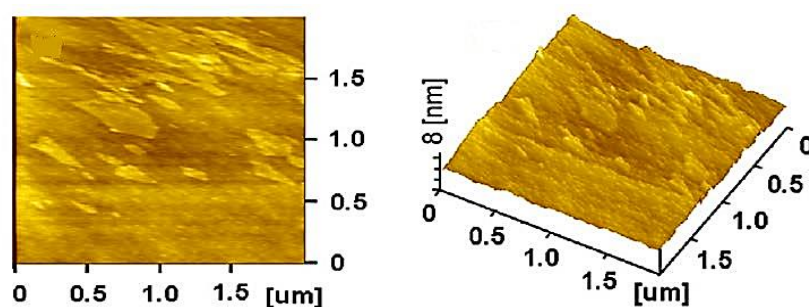
آن‌ها همچنین نشان داده‌اند که از AFM می‌توان برای بررسی محصولات اکسید گرافن استفاده نمود که بر این اساس میزان نانو ورقه‌های GO معلق داخل محلول قابل ارزیابی است. تصویری از GO با اندازه ۸۰-۲۶۰ nm و ضخامت کمتر از ۸ nm در شکل ۶۰-۱ آورده شده است [۱۰۶]. صداقت^۱ و همکاران [۱۰۷] بر روی مکانیسم بهبود ویژگی‌های مواد ناشی از حضور GO بررسی انجام داده و بیان کرده‌اند که گرافن در طی فرآیند هیدراسیون با سیمان پرتلند واکنش می‌دهد. شماتیکی از این واکنش در شکل ۶۱-۱ آورده شده است. آن‌ها همچنین با اندازه‌گیری ضریب نفوذ حرارتی نشان دادند که واکنش بین گرافن و سیمان می‌تواند منجر به کاهش اتلاف گرمای

¹ Sedaghat

بتن در طی فرآیند هیدراسیون شود که در نتیجه آن ترک‌های حرارتی^۱ در نمونه کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزودن گرافن استحکام مصالح سیمانی افزایش می‌یابد.

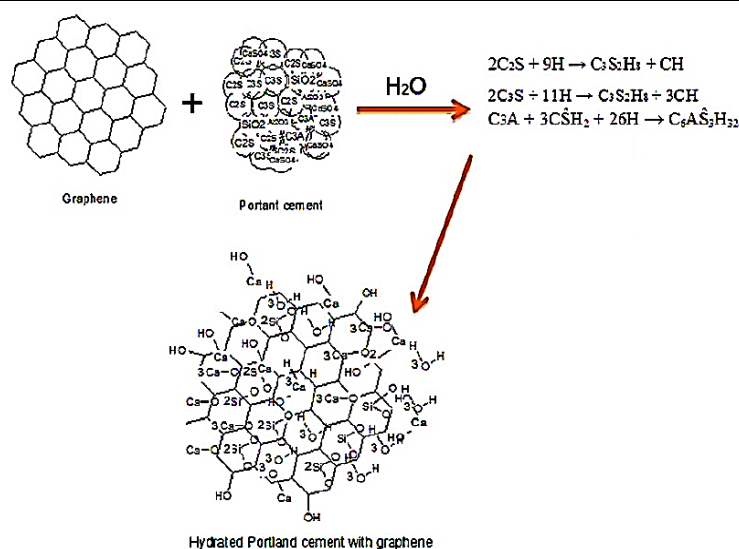


شکل ۵۹-۱- شماتیکی از واکنش گرافن و کریستال هیدراته سیمان [۱۰۶].



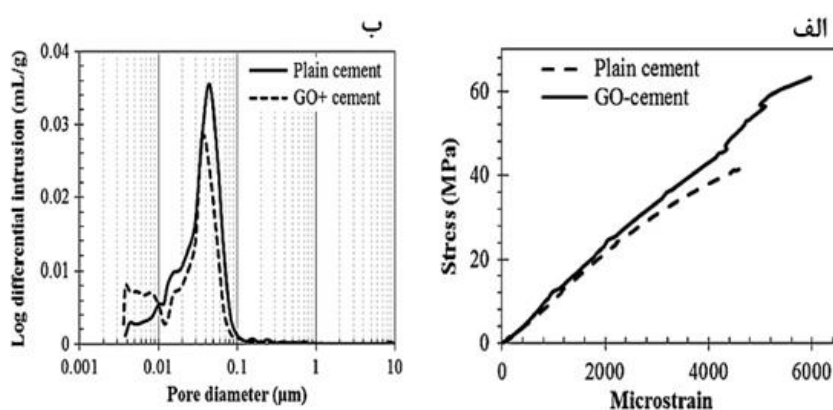
شکل ۶۰-۱- تصویر AFM از اکسید گرافن [۱۰۶].

^۱ Thermal Cracks



شکل ۶۱-۱- شماتیکی از واکنش گرافن و سیمان [۱۰۷].

گانگ^۱ و همکارانش [۱۰۸]، با انجام آزمایش‌های مختلف، تأثیر GO را بر سیمان پرتلند نشان داده‌اند. بر اساس مشاهدات آن‌ها، همان‌گونه که در شکل ۶۲-۱ آمده است، افزودن ۰/۳ درصد وزنی از ورقه‌های GO به سیمان منجر به افزایش استحکام فشاری و استحکام کششی کامپوزیت سیمان به میزان ۴۰ درصد شده که می‌تواند ناشی از کاهش اندازه حفرات^۲ موجود در سیمان باشد. علاوه بر این، ورقه‌های GO نرخ هیدراسیون^۳ سیمان را افزایش داده‌اند.



شکل ۶۲-۱- الف) منحنی تنش-کرنش ب) توزیع اندازه حفرات در حضور و غیاب GO [۱۰۸].

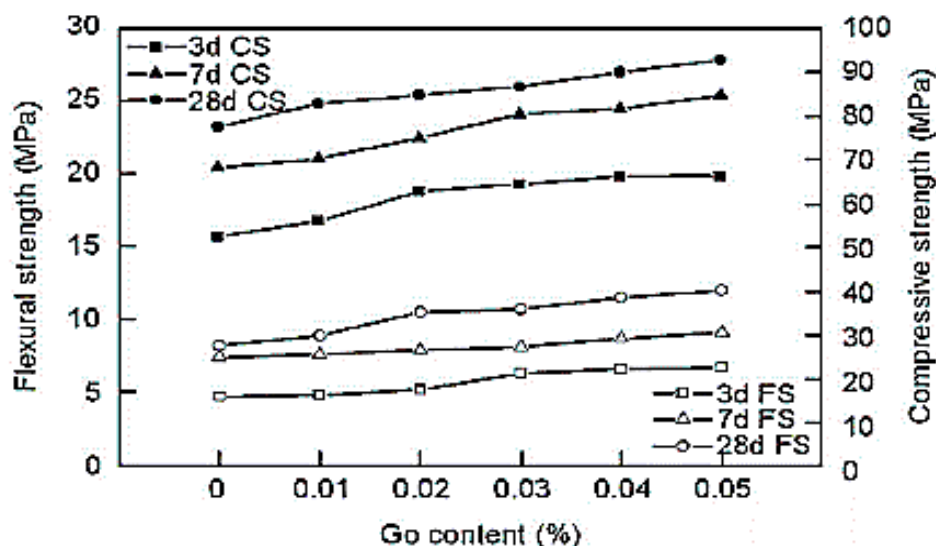
^۱ Gang

^۲ Voids

^۳ Hydration Rate

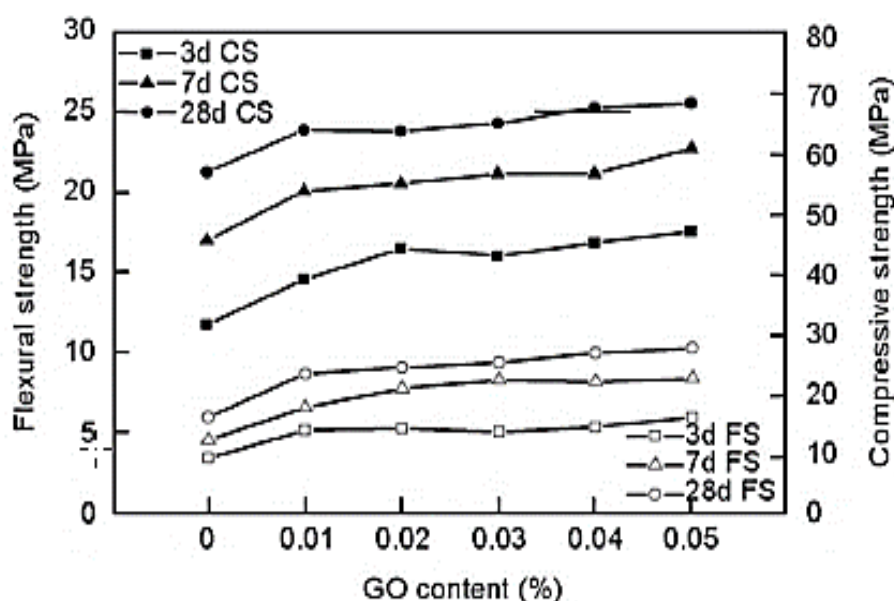
وانگ^۱ و همکارانش [۱۰۹] به بررسی تأثیر افزودن GO به سیمان بر ریزساختار و مقاومت مکانیکی پرداخته‌اند. همچنین در این پژوهش مورفولوژی، ساختار منافذ، استحکام فشاری و خمشی سیمان سخت‌شده و ملات مورد بررسی قرار داده شده است. بر اساس مشاهدات آن‌ها استحکام فشاری و خمشی سیمان سخت‌شده در زمان‌های مختلف با افزودن GO، افزایش یافته است. استحکام خمشی در طی گذشت زمان ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۸۶/۱، ۶۸/۵ و ۹۰/۵ درصد تغییر یافته، و استحکام فشاری به میزان ۵۲/۴، ۴۶/۵ و ۴۰/۴ درصد افزایش یافته است. برای ملات سخت‌شده، افزایشی متناسب با ۶۹/۴، ۱۰۶/۴ و ۷۰/۵ درصد برای استحکام خمشی و ۴۳/۲، ۳۳ و ۲۴/۴ درصد برای استحکام فشاری حاصل شده است. افزودن GO منجر به کاهش حجم منافذ، تسريع تشكيل كريستال شده كه فشردگي و سختي سيمان سخت‌شده و ملات را ايجاد مي‌كند. تأثیر افزودن GO بر استحکام فشاری و خمشی بر سیمان و ملات در زمان‌های مختلف در شکل ۶۳-۱ و شکل ۶۴-۱ ارائه شده است. آن‌ها گزارش کردند که GO یک تأثیر چشمگیر بر استحکام خمشی در مقایسه با استحکام فشاری دارد.

آن‌ها همچنین تصاویر SEM سیمان سخت‌شده با مقادیر مختلف از GO در طی گذشت ۲۸ روز را مورد بررسی قرار داده‌اند. شکل ۶۵-۱ الف مورفولوژی سیمان سخت‌شده بدون GO را نشان می‌دهد. رشد داخلی کریستال‌های اینترگرایت و تعداد زیادی منافذ در غیاب GO مشاهده می‌شود شکل ۶۵-۱ ب تا شکل ۶۵-۱ و مورفولوژی سیمان سخت‌شده با مقادیر مختلف از GO از ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ درصد را نشان می‌دهد. کریستال‌های گل-مانند در تصاویر SEM در حضور GO مشاهده می‌شود. با افزایش مقدار GO، مقدار کریستال‌های گل-مانند افزایش یافته، تعداد حفرات مضر کاهش یافته و بافت ساختار فشرده‌تر می‌شود. این پدیده نشان‌دهنده تسريع هيدراسيون سيمان و توليد كريستال منظم بيشتري بوده كه مي‌تواند نواقص كريستالي را بهبود بخشيده و استحکام فشاری و خمشی را افزایش دهد.



شکل ۶۳-۱- استحکام خمشی و فشاری سیمان سخت‌شده با مقادیر مختلف از GO [۱۰۹].

¹ Wang



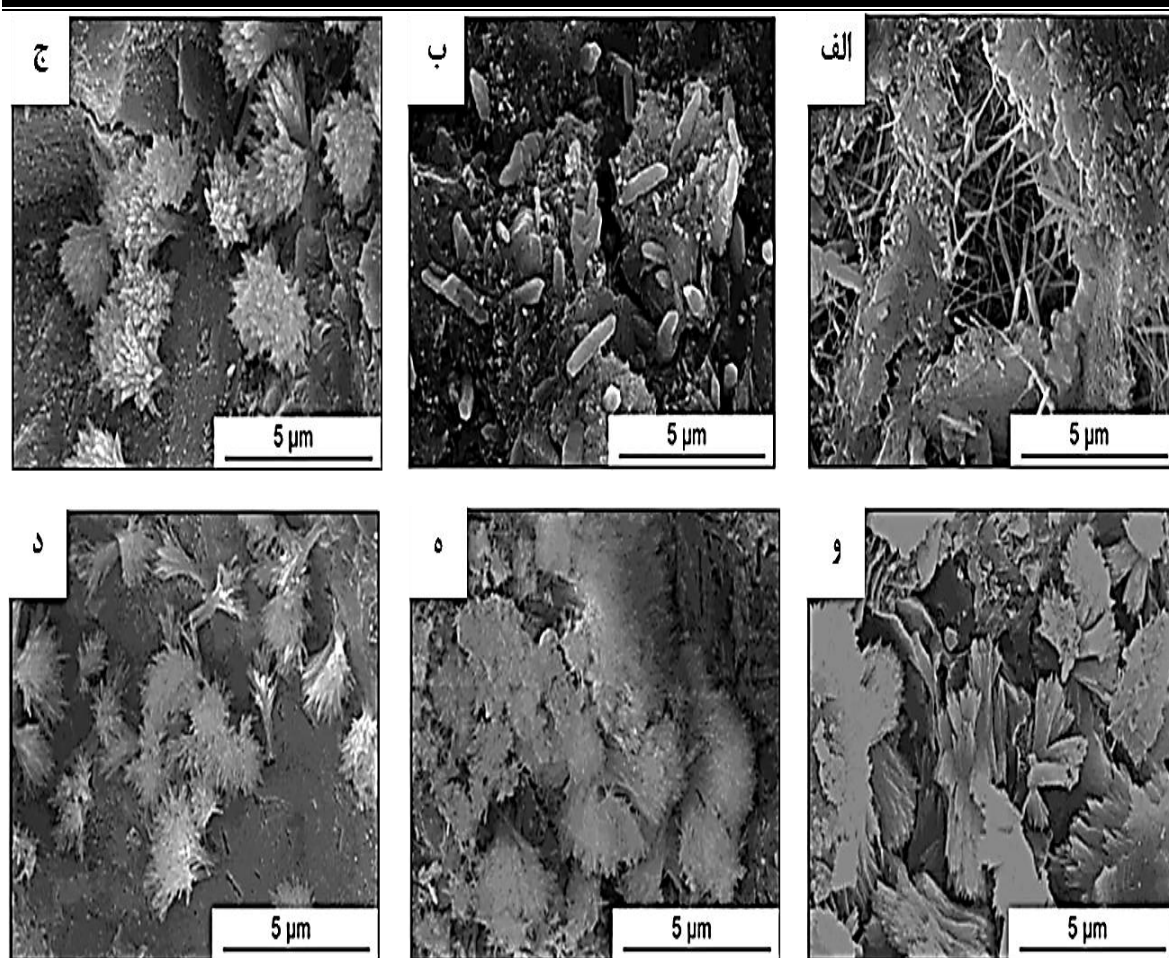
شکل ۶۴-۱- استحکام خمشی و فشاری ملات با مقادیر مختلف از GO [۱۰۹].

پاتل^۱ و برهانی^۲ [۱۱۰] بر روی تأثیر GO بر خواص فیزیکی بتن تحقیق انجام داده‌اند. همچنین در این پژوهش برای به دست آوردن مقدار بهینه GO جهت دستیابی بالاترین استحکام فشاری، کششی و خمشی بتن بررسی‌هایی انجام شده است. بدین منظور GO در غلظت‌های مختلف نسبت به مقدار سیمان افزوده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده افزایش استحکام با افزودن GO بوده و حداکثر افزایش همان گونه که در شکل ۶۶-۱ مشاهده می‌شود در پایان روز ۲۸ و در غلظت ۰/۱۳ درصد وزنی از GO نسبت به سیمان اتفاق افتاده و میزان استحکام فشاری به ۴۸/۰۵ مگاپاسگال رسیده است.

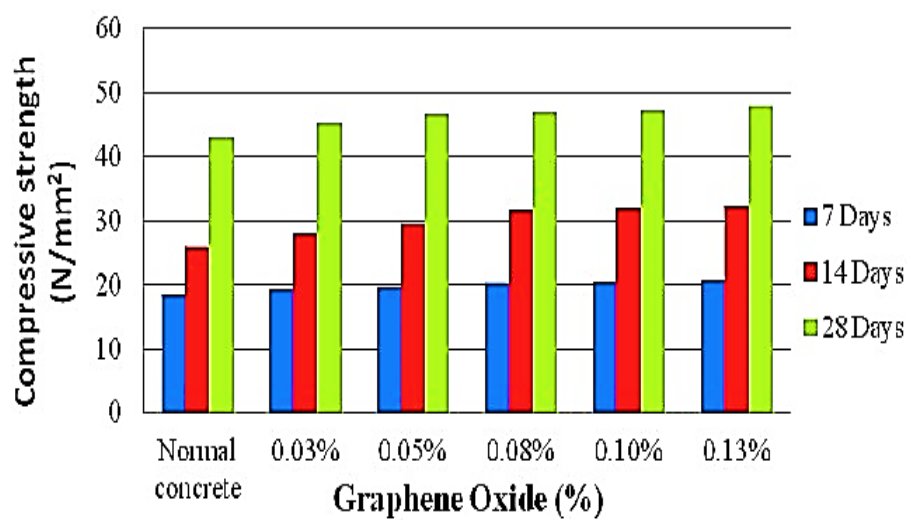
ابراهیمی زاده و ضحابی [۱۱۱] بر روی تأثیر نانو ورقه‌های اکسید گرافن بر سیمان در غلظت‌های مختلف (۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ درصد وزنی) تحقیق انجام داده‌اند. علاوه بر این، آن‌ها اثرات ناشی از GO با گروه عاملی NH_2 بر ریزساختار و خواص مکانیکی (مقاومت خمشی / استحکام فشاری) کامپوزیت سیمان را مورد بررسی قرار دادند. تصاویر SEM نشان داد که GO منافذ را پر می‌کند و به خوبی در بتن پراکنده می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که افزودن GO در غلظت‌های بالاتر از ۰/۱۰ درصد منجر به تشکیل کلوخه و میکرو ترک می‌گردد. آن‌ها همچنین بیان کردند گروه عاملی NH_2 به بهبود چسبندگی نانو ورقه‌های GO و کامپوزیت سیمان کمک می‌کند. بر اساس مشاهدات آن‌ها استحکام فشاری از ۳۹ MPa برای نمونه بدون GO به ۵۴/۲۳ MPa برای کامپوزیت سیمان حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی از GO افزایش یافت. همان گونه که از تصاویر SEM در شکل ۶۷-۱ و شکل ۶۸-۱ مشاهده می‌شود گروه عاملی به طور قابل توجهی خواص مکانیکی کامپوزیت سیمان حاوی GO را افزایش می‌دهد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت گروه عاملی NH_2 کمک به چگال تر شدن ساختار می‌کند.

¹ Patel

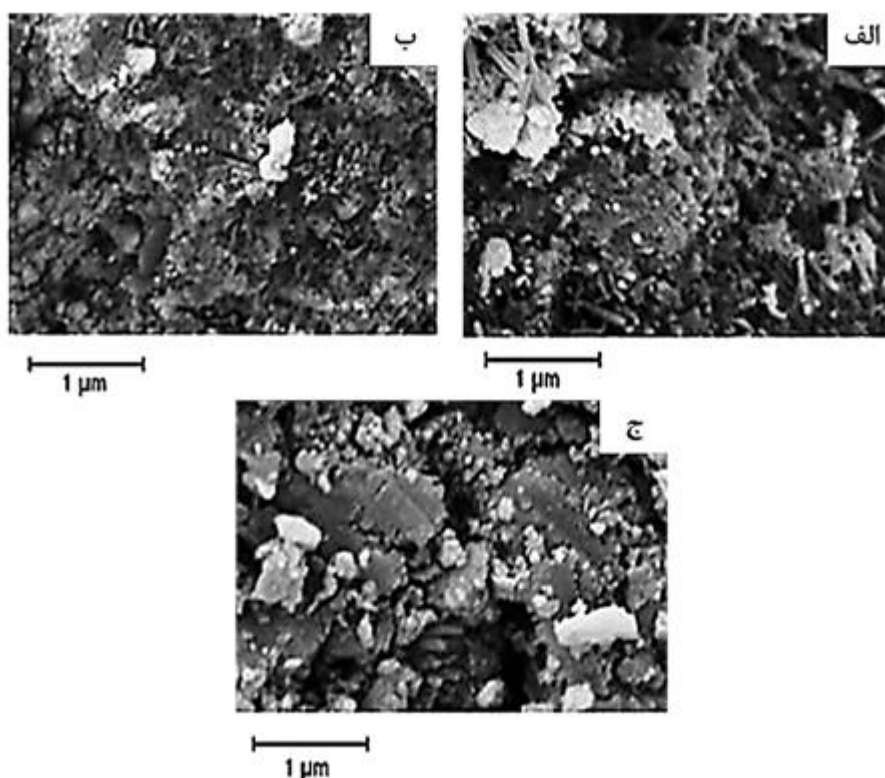
² Bhoraniya



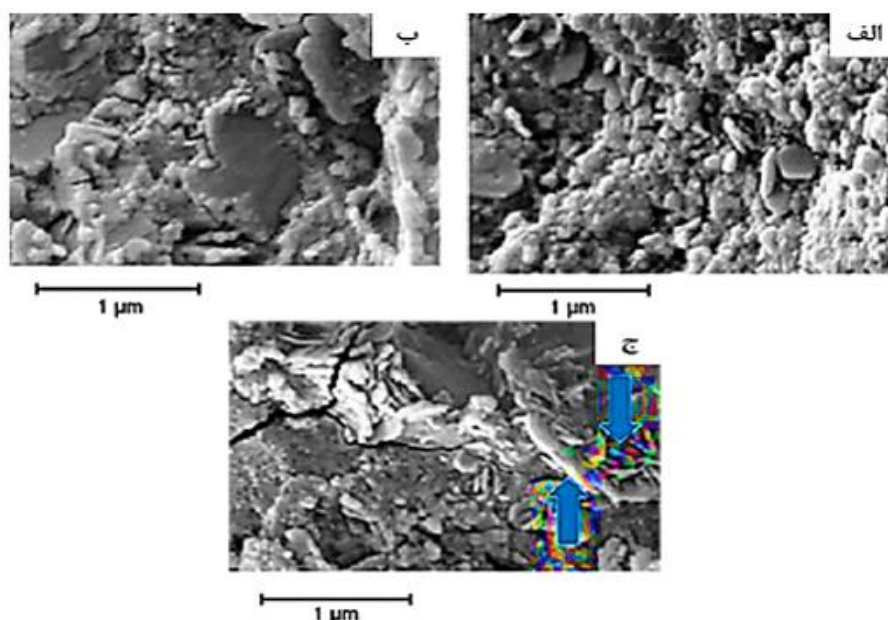
شکل ۶۵-۱- تصاویر SEM از تأثیر مقادیر مختلف از GO بر سیمان سخت شده [۱۰۹].



شکل ۶۶-۱- بررسی استحکام فشاری در غلظت‌های مختلف از GO [۱۱۰].



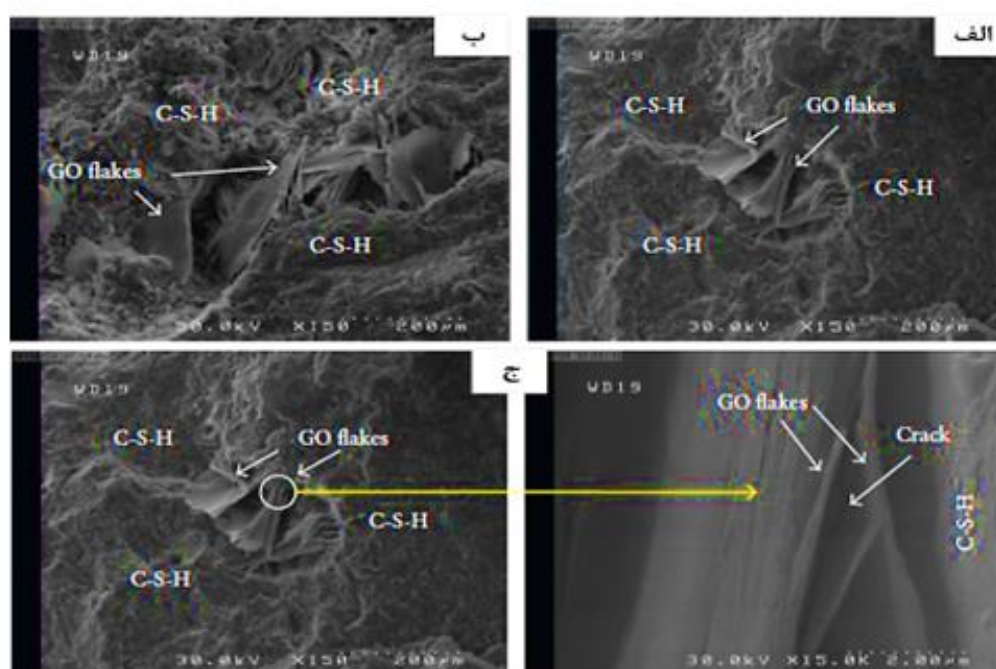
شکل ۶۷-۱- تصاویر SEM از سیمان ترکیب شده با مقادیر مختلف از GO
 (الف) ۰/۰۱ (ب) ۰/۱۵ (ج) ۰/۲۵ درصد وزنی [۱۱۱].



شکل ۶۸-۱- تصاویر SEM از سیمان ترکیب شده با مقادیر مختلف از GO با گروه عاملی NH_2
 (الف) ۰/۰۱ (ب) ۰/۱۵ (ج) ۰/۲۵ درصد وزنی [۱۱۱].

لی^۱ و همکارانش [۱۱۲] نیز مطالعاتی را بر روی تأثیر GO بر نرخ هیدراسیون و خواص مکانیکی سیمان پرتلند انجام داده‌اند. بر طبق نظر آن‌ها، نرخ هیدراسیون^۲ سیمان با افزایش مقدار GO مصرفی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، بهبود مقاومت الکتریکی سیمان حاوی GO به وسیله دستگاهی با مقاومت الکتریکی بدون تماس کنترل شد. همان‌گونه که در شکل ۶۹-۱ مشاهده می‌شود مقاومت الکتریکی در مقدار بیش‌تر از ۰/۰۲ درصد اکسید گرافن به علت نفوذ یونی^۳ شدید کاهش یافته است. همچنین نتایج افزایش قابل توجهی در استحکام فشاری و خمشی سیمان حاوی GO را نشان می‌دهند، اما هنگامی که مقدار GO به بالاتر از ۰/۰۴ درصد تجاوز می‌یابد استحکام فشاری تمایل به کاهش می‌یابد و استحکام خمشی در مقایسه با سیمان مرجع کاهش یافته است و بیشترین کاهش در حضور ۰/۰۸ درصد GO اتفاق افتاده است که می‌توان ناشی از کلوخه شدن GO در مقادیر بالاتر از آن دانست. نتایج حاصل از استحکام فشاری و خمشی در حضور مقادیر مختلف از GO در شکل ۷۰-۱ ارائه شده است.

فخیمی و همکاران [۱۱۳]، بر تأثیر GO بر استحکام تنشی سیمان بررسی انجام داده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۷۱-۱ مشاهده می‌شود، استحکام تنشی سیمان در حضور GO افزایش یافته و وقتی مقدار GO به ۱/۵ درصد می‌رسد استحکام به میزان ۴۸ درصد افزایش یافته، اما در حضور ۲ درصد از GO، یک کاهش در استحکام تنشی مشاهده شده است.



شکل ۷۲-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۴ از سطح شکست نمونه حاوی ۱/۵ درصد GO را نشان می‌دهد. بر طبق نظر آن‌ها نانو ورقه‌های GO به خوبی در ماتریس توزیع شده است و هیچ کلوخه‌ای مشاهده نمی‌شود. همچنین تصاویر FE-SEM نشان‌دهنده پیوند قوی بین سطح GO و سیمان اطراف است که

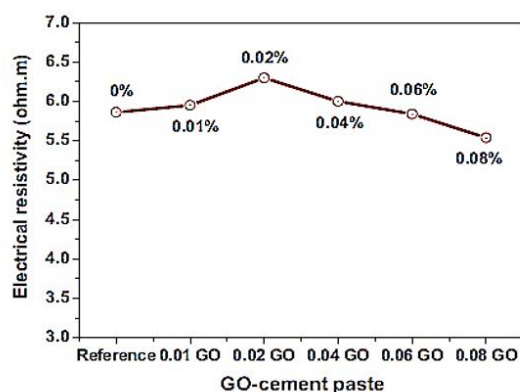
¹ Li

² Hydration Rate

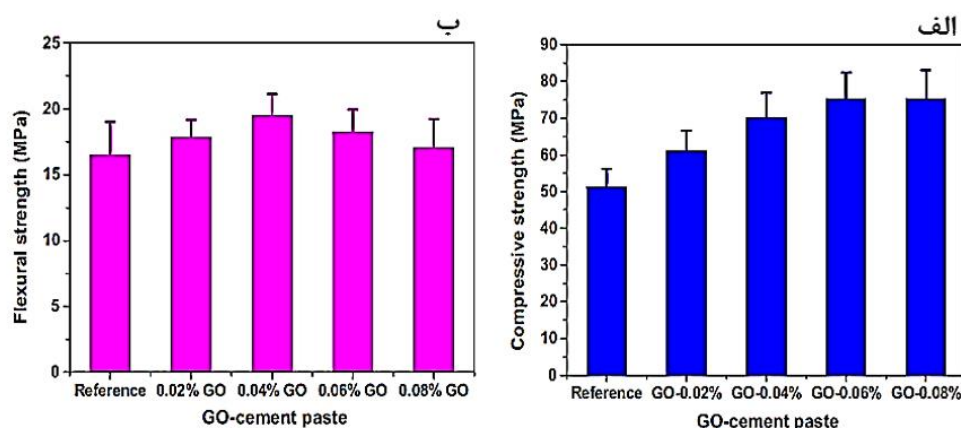
³ Ionic Penetration

⁴ Ultra High-Resolution Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

می‌توان ناشی از جوانه‌زنی C-S-H به وسیله صفحات GO و شکل‌دهی در امتداد آن‌ها دانست. محصولات سیمان هیدراته به علت انرژی سطحی بالا و حضور گروه‌های آب‌دوست بر روی سطوح GO که محل مناسبی برای جوانه‌زنی هستند، رسوب می‌کنند.



شکل ۶۹-۱- بررسی مقاومت الکتریکی بتن در غلظت‌های مختلف از GO [۱۱۲].

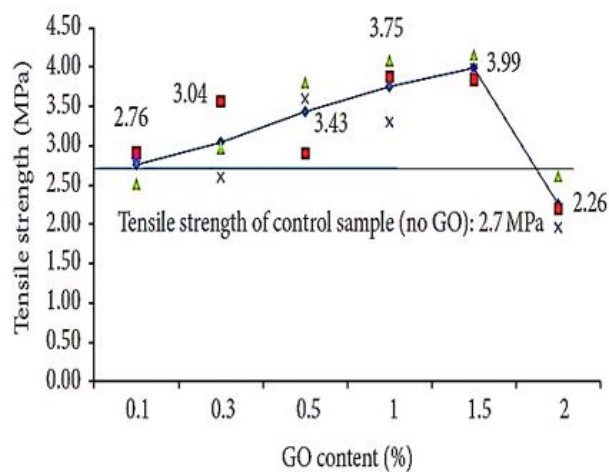


شکل ۷۰-۱- بررسی الف) استحکام فشاری ب) استحکام خمشی بتن در غلظت‌های مختلف از GO [۱۱۲].

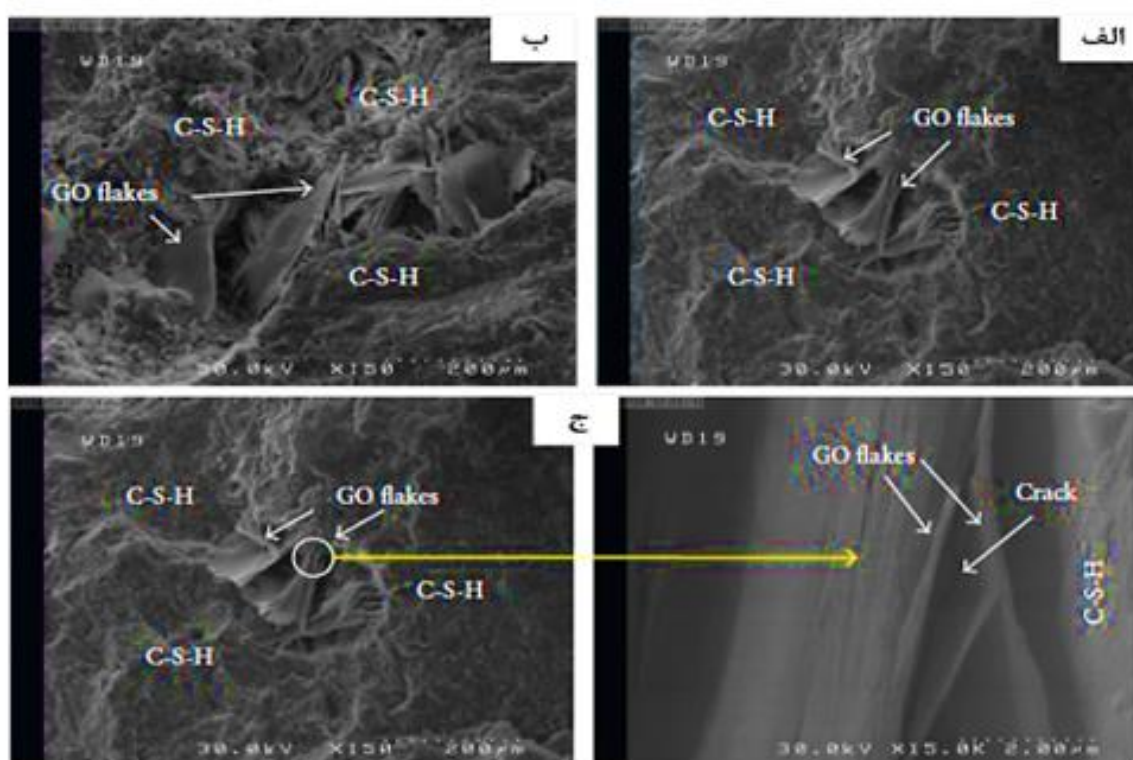
دو^۱ و همکارانش بر روی خواص انتقالی بتن در معرض کلراید و آب تحقیق انجام داده‌اند. بتن حاوی ۱/۵ درصد نانوصفات گرافن^۲ بیشترین کاهش در انتقال را ایجاد نموده؛ عمق نفوذ آب، نفوذ کلراید و ضریب انتقال به ترتیب به میزان ۸۰، ۸۰ و ۳۷ درصد کاهش یافته است. خواص فیزیکی GNPs مورد استفاده در طی این پژوهش در جدو آورده شده است. نحوه عملکرد کامپوزیت‌های سیمانی به خواص فیزیکی GNP وابسته است. در طی این پژوهش تاثیر ممانعت‌کنندگی GNP مشخص گردید، هم‌چنین آن‌ها دریافتند که بیش از ۵۰ درصد بهبود در مقاومت انتقال را می‌توان به حضور ذرات GNP در سیمان نسبت داد که منجر به پیچیدگی طولانی‌تر شدن مسیر حرکت آب نسبت داد و الباقی را به ریز شدن حفرات نسبت داد.

¹ Du

² Graphene Nano Plate (GNP)



شکل ۷۱-۱- بررسی استحکام تنشی ملات سیمان در غلظت‌های مختلف از GO [۱۱۳].

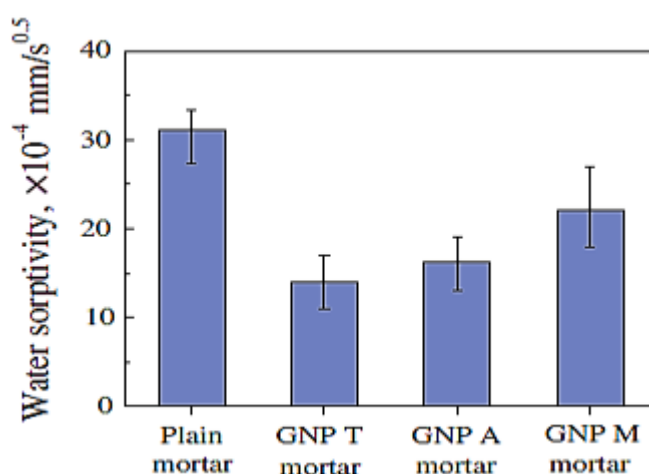


شکل ۷۲-۱- تصاویر FESEM از ملات سیمانی شامل ۱/۵ درصد از GO در مقیاس $200\ \mu\text{m}$ بعد از گذشت ۲۸ روز از پخت، (الف) و (ب)، نحوه جوانه‌زنی C-S-H به وسیله صفحات GO و شکل‌گیری آن‌ها. (ج) میکرو ترک‌های موجود بر صفحه GO تحت تنش کششی [۱۱۳].

دو^۱ و همکارانش بر روی خواص انتقالی بتن در معرض کلراید و آب تحقیق انجام داده‌اند. بتن حاوی ۱/۵ درصد نانوصفحات گرافن^۲ بیشترین کاهش در انتقال را ایجاد نموده؛ عمق نفوذ آب، نفوذ کلراید و ضریب انتقال به ترتیب به میزان ۸۰، ۸۰ و ۳۷ درصد کاهش یافته است. خواص فیزیکی GNPs مورد استفاده در طی این پژوهش در جدول ۱-۴۴ آورده شده است. نحوه عملکرد کامپوزیت‌های سیمانی به خواص فیزیکی GNP وابسته است. در طی این پژوهش تأثیر ممانعت‌کنندگی GNP مشخص گردید، هم‌چنین آن‌ها دریافتند که بیش از ۵۰ درصد بهبود در مقاومت انتقال را می‌توان به حضور ذرات GNP در سیمان نسبت داد که منجر به پیچیدگی طولانی‌تر شدن مسیر حرکت آب نسبت داد و الباقی را به ریز شدن حفرات نسبت داد. با این حال بهبود بیشتر در مقادیر بالاتر از ۱/۵ درصد وزنی GNP اتفاق نمی‌افتد که می‌توان ناشی از محدودیت در پراکندگی دسته صفحات نانو دانست. گزارش‌های انجام شده نشان داد که نرخ جذب آب از طریق افزودن GNP به کامپوزیت‌های سیمانی کاهش خواهد یافت؛ بنابراین میزان جذب آب برای نمونه‌ها در طی گذشت ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱-۷۳ مشاهده می‌شود، جذب آب به‌طور قابل توجهی به میزان ۲۷ تا ۵۰ درصد کاهش یافت و هم‌چنین تأثیر GNP بر میزان جذب آب با افزایش مقدار آن قابل ملاحظه است [۱۱۴].

جدول ۱-۴۴- خواص فیزیکی GNPs مورد استفاده در طی این پژوهش [۱۱۴]

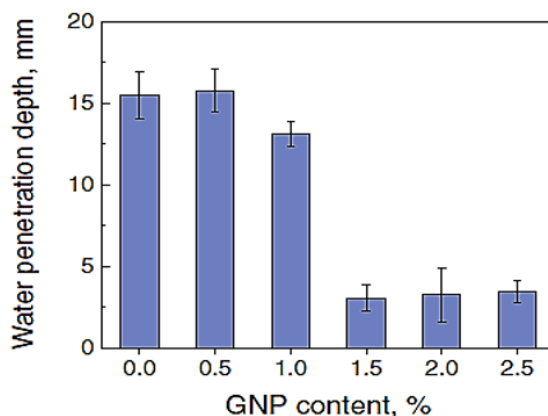
GNP product	Density ^a , ρ (g/cm ³)	Surface area ^a , A (m ² /g)	Diameter ^a , D (μ m)	Thickness ^b , t (nm)	Aspect ratio, λ	Purity, %
A 3775	2.26	23.7	8.0	37	215	98.0
M 850	2.26	13	3.6	71	50	99.5
TC 307	2.16	352	2.6	3	1000	99.9



شکل ۱-۷۳- جذب آب ملات سیمانی حاوی ۲/۵ درصد از GNPs مختلف [۱۱۴]

¹ Du² Graphene Nano Plate (GNP)

تأثیر GNP بر عمق نفوذ آب به داخل بتن در شکل ۷۴-۱ آورده شده است. مشاهده شد که در ۱ درصد GNP و یا کمتر، عمق نفوذ آب تغییر چندانی نکرده است و وقتی که مقدار GNP به ۱/۵ درصد افزایش می‌یابد عمق نفوذ آب به میزان ۸۰ درصد کاهش یافته است. با افزایش GNP به بیش از ۱/۵ درصد تأثیر چشمگیری در عمق نفوذ آب مشاهده نشده است [۱۱۴].



شکل ۷۴-۱- عمق نفوذ آب در بتن با مقادیر مختلف از GNP [۱۱۴]

تأثیر کلراید در بتن حاوی مقادیر مختلف GNP در شکل ۷۵-۱ ارائه شده است. افزودن ۰/۵ درصد وزنی GNP منجر به کاهش ضریب نفوذ کلراید به اندازه ۲۵ وزنی شده است؛ این در حالی است که بتن با ۱/۵ درصد وزنی GNP می‌تواند نفوذ کلراید را به میزان ۳۷ درصد در مقایسه با بتن مرجع کاهش دهد. مقاومت بهتر در مقابل نفوذ کلراید را می‌توان به بهبود ساختار منافذ در سیمان نسبت داد. اگرچه تأثیر بهبود ساختار منافذ بر افزایش استحکام مکانیکی چشمگیر نبوده، اما توانسته خواص ممانعت‌کنندگی را افزایش دهد. همانگونه که در شکل ۷۵-۱ ب- مشاهده می‌شود، عمق نفوذ کلراید با افزایش مقدار GNP تا ۱/۵ درصد به میزان ۶۰-۷۰ درصد در مقایسه با بتن بدون مواد افزودنی کاهش می‌یابد. تحقیقات نشان داد که مسیرهای یون‌های کلراید برای نفوذ به داخل بتن با افزودن GNP مسدود شده است؛ اما در مقادیر بالاتر از ۱/۵ درصد GNP کلوخه‌هایی به صورت خوشه‌های متخلخل ایجاد شده و این منجر به ایجاد مسیرهای بیشتر برای نفوذ یون‌های کلراید می‌شود. منحنی محتوای کلراید برای بتن با GNP در شکل ۷۵-۱ ج نشان داده شده است. نفوذ یون‌های کلراید به داخل بتن به وسیله راه حل کرانک ۱ به قانون دوم فیک ۲ شرح داده می‌شود [۱۱۴].

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad 1-1$$

که $C(x, t)$ مقدار کلراید موجود در عمق x (mm) و زمان t (s) است، C_0 مقدار کلراید در سطح و D_e ضریب نفوذ کلراید، $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ است.

¹ Crank

² Fick's Second Law

۴-۹-۱-۱ نانولوله‌های کربنی^۱

نانولوله‌ها یکی از مستحکم‌ترین مواد به شمار می‌روند. این موضوع، کاربردی بودن نانولوله‌های کربنی را به خوبی روشن می‌سازد. مزیت اصلی استفاده از نانولوله‌ها، افزایش سختی و استحکام می‌باشد که می‌توان ناشی از رفتار الاستیک و انعطاف‌پذیر نانولوله کربنی دانست. کامپوزیت‌های بر پایه نانولوله‌ی کربنی دارای نسبت استحکام به وزن بالا هستند و مصارف گسترده‌ای را در صنعت خواهند داشت. تا سال ۱۹۸۰، سه آلوتروپ کربن (کربن غیر بلوری) به نام‌های الماس، گرافیت و کربن بی‌شکل شناخته شده بودند، اما امروزه همان‌گونه که در شکل ۷۶-۱ دیده می‌شود خانواده کاملی از سایر اشکال کربن نیز وجود دارند. اولین آلوتروپ کربن که در سال ۱۹۸۵ کشف شد، باک مینستر فولرن^۲ نام داشت که به نام‌های دیگر باکی بال و فولرن نیز نام‌گذاری شده است. فولرن‌ها مولکول‌های کروی کربن هستند که به سبب شکل زیبا و خواص شگفت‌انگیز، توجه بسیاری از دانشمندان را به خود معطوف کرده‌اند. آلوتروپ بعدی کربن، CNT نام دارد. در سال ۱۹۹۱ دانشمندی به نام ایجیما^۳ به طور کاملاً اتفاقی، ساختار دیگری از کربن را کشف و تولید کرد که خواص منحصر به فردی دارد. وی در ابتدا این ساختار را نوعی فولرن تصور نمود که در یک جهت کشیده شده است؛ اما بعدها متوجه شد که این ساختار، خواص متفاوتی از فولرن‌ها دارد و به همین دلیل آن را، نانولوله‌ی کربنی نامید [۱۱۵].

در یک CNT، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای (یک لوله‌ی توخالی که جنس دیواره آن از اتم‌های کربن است) آرایش یافته‌اند. آرایش اتم‌های کربن در دیواره‌ی این ساختار استوانه‌ای، دقیقاً مشابه آرایش کربن در صفحات گرافیت است. در گرافیت، شش ضلعی‌های منظم کربنی در کنار یکدیگر صفحات گرافیت را می‌سازند. این صفحات کربنی بر روی یکدیگر انباشته می‌شوند و هر لایه از طریق پیوندهای ضعیف واندروالس به لایه زیرین متصل می‌شود. هنگامی که صفحات گرافیت درهم پیچیده می‌شوند، نانولوله‌های کربنی را تشکیل می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۷۷-۱ دیده می‌شود، درواقع CNT، گرافیتی است که به شکل لوله درآمده باشد

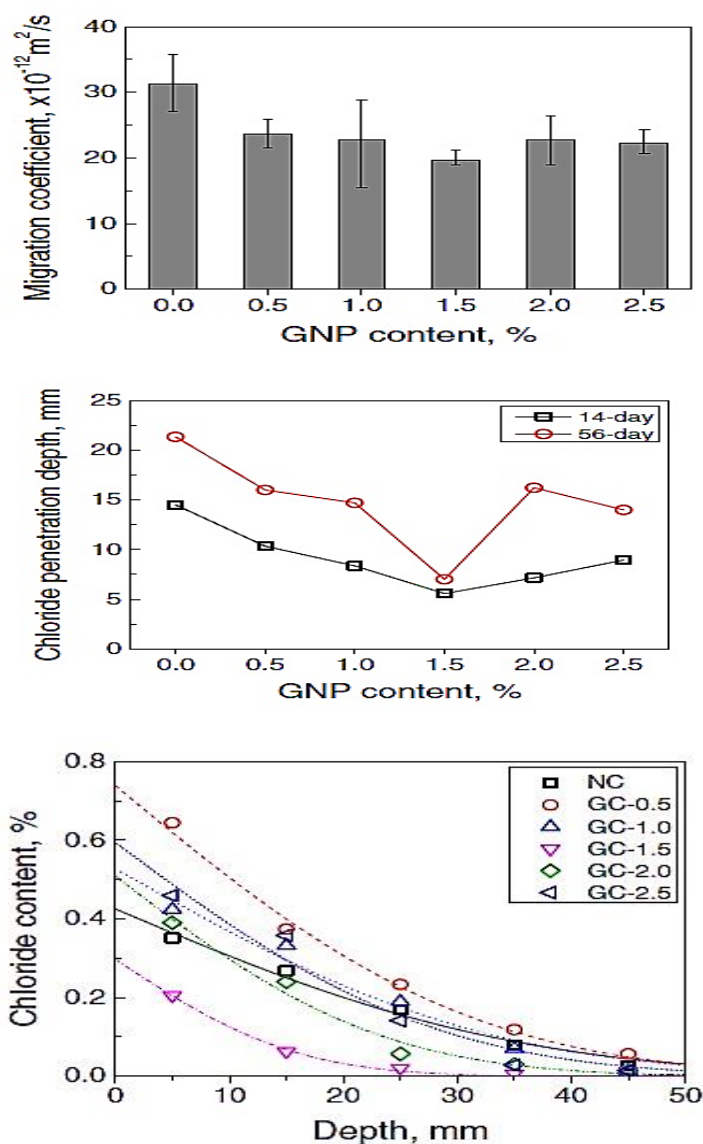
CNTs به دودسته کلی نانولوله‌های کربنی تک دیواره و نانولوله‌های کربنی چند دیواره تقسیم می‌شوند. چنانچه CNTs فقط شامل یک لوله از گرافیت باشد، SWCNT و اگر شامل تعدادی از لوله‌های متحدالمرکز باشد، MWCNT نامیده می‌شود [۱۱۵]. یکی از معایب نانولوله‌های چند جداره نسبت به تک جداره این است که استحکام دهی آن‌ها کمتر می‌باشد زیرا پیوندهای صفحات داخلی ضعیف هستند. اما از آنجاکه در حال حاضر کاربرد CNTs در تقویت پلیمرها باعث بهبود خواص گرمایی و الکتریکی می‌شود تا

^۱ Carbon Nanotubes (CNTs)

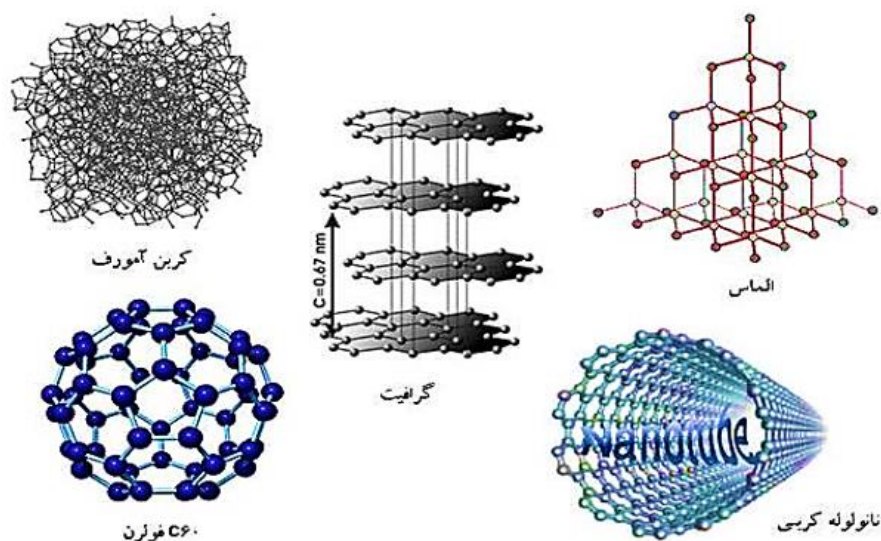
^۲ Fullerene

^۳ Iijima

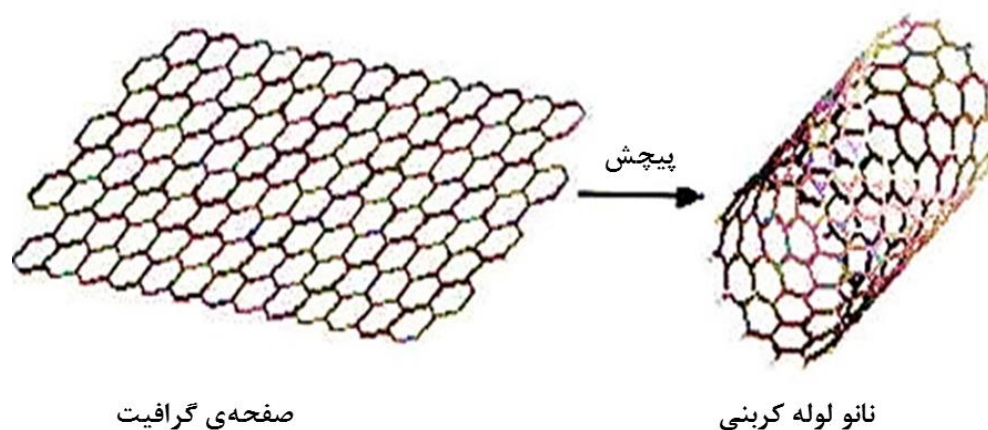
بهبود خواص مکانیکی، کاربرد MWCNTs بسیار زیاد است. از طرفی تکنیک‌های موجود نیز برای تولید SWCNT به اندازه کافی بازدهی ندارد و خلوص لازم را نیز به همراه نمی‌آورد. تخلیص این مواد بسیار زحمت‌آور است و در نهایت ممکن است به ساختار نانولوله صدمه بزند. انواع مختلف CNTs در شکل ۷۸-۱ ارائه شده است [۱۱۶].



شکل ۷۵-۱ نتایج آزمایش برای بتن با GNP (الف) ضریب نفوذ کلراید، (ب) عمق نفوذ کلراید، (ج) مقدار کلراید [۱۱۴]

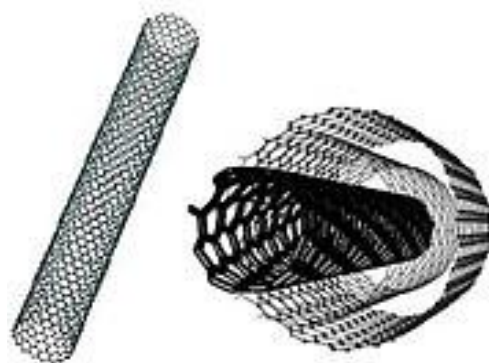


شکل ۷۶-۱- آلوتروپ‌های مختلف کربن [۱۱۴].



شکل ۷۷-۱- شکل‌گیری نانولوله‌ها از صفحات گرافیت [۱۱۴].

خواص ویژه و منحصربه‌فرد CNTs از جمله مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب و طبیعت کربنی بودن نانولوله‌ها (به خاطر این که کربن ماده‌ای است کم‌وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرایندها که نسبت به فلزات برای تولید ارزان‌تر می‌باشد) باعث شده که در دهه گذشته شاهد تحقیقات مهمی در کارایی و پرباری روش‌های رشد نانولوله‌ها باشیم [۱۱۶]. CNTs مدول یانگی در حدود 1 TPa دارا می‌باشد که تقریباً ۵ برابر بیشتر از فولاد است و استحکام کششی آن در حدود 63 GPa می‌باشد که تقریباً ۵۰ برابر بزرگ‌تر از فولاد است [۲۲].



شکل ۷۸-۱- انواع مختلف CNTs [۱۱۶].

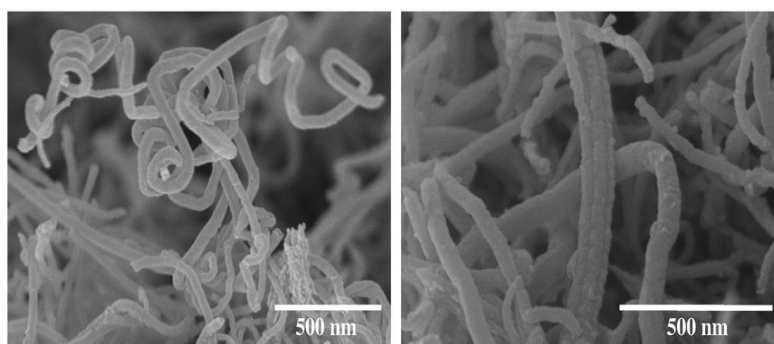
با توجه به رشد روزافزون فناوری نانو در زمینه‌های مختلف از جمله صنعت ساختمان، نانو مواد جدیدی پا به عرصه‌ی ظهور گذاشته‌اند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به نانو کامپوزیت‌های بتن که در آن‌ها موادی مانند CNT استفاده شده، اشاره کرد. افزودن پلیمر به صورت پراکنده به سیمان، خواص مکانیکی بتن را به مقدار قابل توجهی در درازمدت افزایش می‌دهد. به کار بردن نانو مواد در تولید سیمان و بتن می‌تواند منجر به بهبود ریز ساخت بناها شود زیرا مقاومت مکانیکی و عمر بتن وابسته به ساختار میکرو و انتقال جرم و پایداری وابسته به ساختار نانو می‌باشد. CNTs اگر در ملات سیمان به مقدار صحیح استفاده شود، همانند میلگرد در بتن عمل کرده و استحکام فشاری و خمشی بتن را افزایش می‌دهد. به علت انعطاف‌پذیری بالا، CNTs به عنوان جذب‌کننده‌ی شوک عمل کرده و مانع ویرانی ساختمان‌ها و سازه‌های بتنی می‌شود. هدف اصلی استفاده از CNTs در بتن واگذاری نیروهای کششی به وجود آمده در بتن به نانولوله‌ها است. تا بدین طریق نیروهای کششی به بتن وارد نشده و منجر به ترک‌خوردگی و در نهایت تخریب بتن نشود. بتن‌های معمولی مقاومت کمتری نسبت به بتن‌های مسلح با MWCNTs دارند؛ بنابراین استفاده از CNTs در ساختمان برای افزایش مقاومت در برابر زلزله است.

پراکندگی CNTs یکی از چالش‌های اصلی است که به شدت بر خواص کامپوزیت‌های CNTs تأثیر می‌گذارد. CNTs تمایل شدیدی به کلوخه شدن دارند که علت آن را می‌توان ناشی از حضور نیروهای واندروالس^۱ دانست. کلوخه‌ای شدن، منجر به اتصال ناکافی CNTs به ماتریس شده که در نتیجه آن مزایای استفاده از این سیستم را محدود می‌کند. به علاوه، ماهیت آب‌گریزی ماده مانع از یک ترکیب مؤثر و توزیع یکنواخت در ماتریس سیمانی می‌شود [۱۱۷].

بر اساس برخی از مطالعات انجام شده، به علت توزیع ضعیف یا ناکافی از CNTs در ماتریس سیمانی

^۱ Van Der Waals Forces

هیچ بهبودی حاصل نشده است. ایبارا^۱ و همکارانش [۱۱۸] بیان کردند که توزیع ضعیف CNTs در داخل ماتریس منجر به تخریب خواص مکانیکی آن می‌شود. کنستا^۲ و همکارانش [۱۱۹] بر روی توزیع ضعیف CNTs در سیمان تحقیق انجام داده‌اند. بر طبق مشاهدات آن‌ها، در صورت استفاده از CNTs بدون حضور عناصر جاذب سطحی^۳ پراکندگی ضعیف MWCNTs اتفاق می‌افتد و کلوخه‌ها و گره‌های بزرگی در داخل ماتریس قابل مشاهده است. تصاویر SEM از توزیع ضعیف MWCNTs در شکل ۷۹-۱ ارائه شده است. نفوذ کلوخه‌ها در داخل ماتریس بسیار دشوار است و به بسیاری از عوامل من جمله نیروهای جذب، طول CNTs، ویسکوزیته و دانسیته ماتریس بستگی دارد. برای دستیابی به توزیع یکنواخت ترکیبات CNTs روش‌های مختلفی مانند عناصر جاذب سطحی^۴، مایکروویو^۵، سنگ‌زنی^۶، خرد کردن^۷ و غیره استفاده می‌شود [۱۲۰]. تصاویر SEM از کاهش قطر کلوخه‌های MWCNTs پس از گذشت ۱ ساعت سنگ‌زنی مکانیکی در شکل ۸۰-۱ ارائه شده است.



شکل ۷۹-۱- تصاویر SEM از توزیع ضعیف MWCNTs در داخل ماتریس سیمانی [۱۱۹].

موسو^۸ و همکارانش [۱۲۱] با استفاده از پروب اولتراسونیک، MWCNTs را در استون پراکنده ساختند و بیان کردند که این روش منجر می‌شود تا اندازه کلوخه‌های MWCNTs را به حداقل رسانده شود. آن‌ها همچنین بر روی چگونگی تأثیر خواص فیزیکی-شیمیایی CNTs بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها تحقیق انجام داده‌اند. بدین منظور نمونه‌های آماده‌شده با ترکیبی از سیمان یکسان و سه نوع متفاوت از MWCNTs،

¹ Ibarra

² Konsta

³ Surfactant

⁴ Surfactant

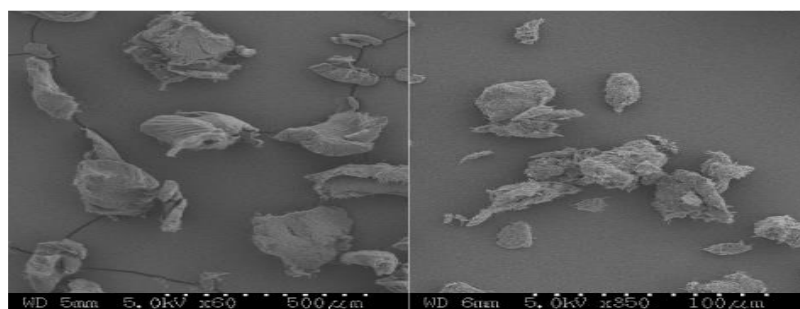
⁵ Microwave

⁶ Grinding

⁷ Rubbing

⁸ Musso

همان‌گونه که در جدول ۱-۴۵ آورده شده است را مورد مقایسه قرار داده‌اند. علاوه بر این، تصاویر SEM و TEM نشان‌دهنده آن بود که p-CNTs بسیار پیچیده‌تر از a-CNTs هستند. این مورفولوژی متفاوت احتمالاً ناشی از مقدار زیادی نقص در شبکه است که در طول رسوب p-CNTs ایجاد می‌شود. در نتیجه فرآیند عامل دار کردن، f-CNTs نیز از بین رفته‌اند. نتایج حاصل از تصاویر SEM و TEM در شکل ۱-۸۰ آورده شده است. در شکل ۱-۸۲ الف می‌توان مشاهده کرد، افزودن MWCNTs با گروه عاملی کربوکسیل ۱ (f-CNT) منجر به کاهش مدول گسیختگی ۲ به اندازه ۲/۵ برابر در مقایسه با سیمان ساده می‌گردد. همچنین با توجه به شکل ۱-۸۲-ب ملاحظه می‌شود که استحکام فشاری سیمان ترکیب‌شده با f-CNTs، ۶ برابر کمتر از بتن بدون CNT است. از سوی دیگر a-CNTs و p-CNT بهبودی به میزان ۲۰-۱۰ درصد نسبت به سیمان ساده ایجاد کرده‌اند. تمام نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی در جدول ۱-۴۶ گزارش شده است..



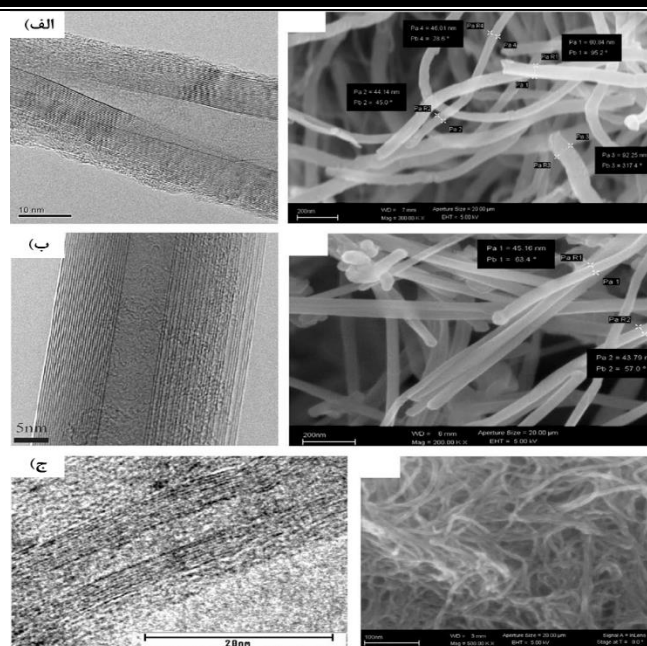
شکل ۱-۸۰- تصاویر SEM از کاهش قطر کلوخه‌های MWCNTs پس از گذشت ۱ ساعت سنگ‌زنی مکانیکی [۱۲۰].

جدول ۱-۴۵- خواص MWCNTs مختلف پراکنده‌شده در سیمان [۱۲۱]

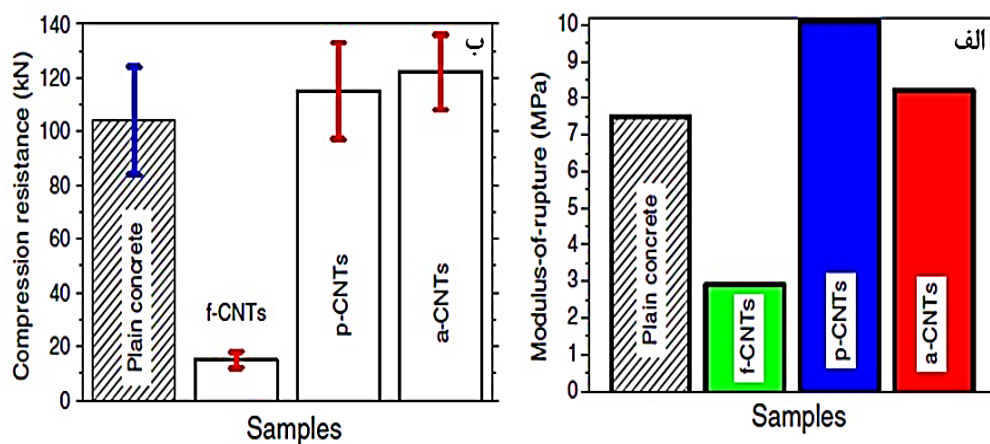
Property	p-CNTs [15]	a-CNTs [16]	f-CNTs ¹
Deposition technique	CVD	CVD	CVD
Average diameter (nm)	40-80	40-80	10-20
Length (average) (μm)	400-1000	200-400	0.1-10
Carbon Purity (wt.%)	>92	>99	>95
Metal Oxide (impurity) (wt.%)	<6	<1	<5
-COOH functionalization (wt.%)	0	0	<4

¹ Carboxyl Functionalized

² Modulus-of-rupture



شکل ۸۱- تصاویر TEM در سمت چپ و تصاویر SEM در سمت راست از الف) p-CNTs ب) a-CNTs ج) f-CNTs [۱۲۱].



شکل ۸۲- الف) مدول گسیختگی ب) استحکام فشاری بتن در حضور و غیاب MWCNTs [۱۲۱].

زو^۱ و همکارانش [۱۲۲] کارپذیری سیمان در حضور ۰/۰۳۸ و ۰/۰۷۵ درصد MWCNTs عامل دار شده نسبت به سیمان (به قطر ۹/۵ nm و طول ۱/۵ μm) را مورد بررسی قرار داده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۸۳-۱ مشاهده می‌شود، نشست بتن با بالاتر رفتن میزان انرژی اولتراسونیک^۲، به صورت پیوسته کاهش یافته است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که این کاهش با افزایش مقدار MWCNTs، افزایش می‌یابد.

¹ Zou

² Ultrasonic Energy (UE)

جدول ۴۶-۱ نتایج حاصل از استحکام فشاری و مدول گسیختگی در بتن در غیاب و حضور MWCNTs [۱۲۱]

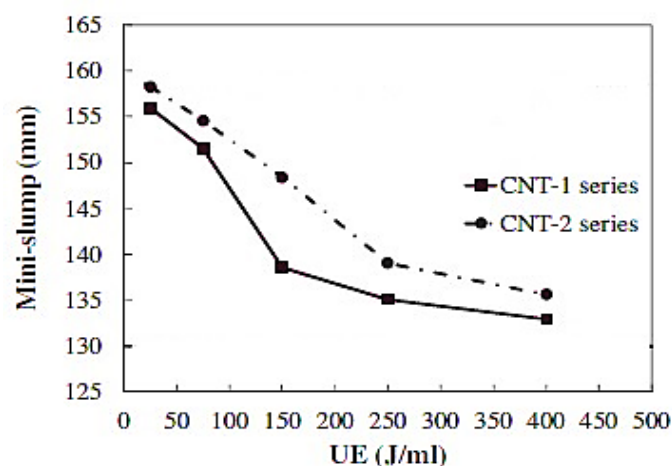
Sample	Modulus-of-rupture, σ_{max} (MPa)	Compression resistance, R_c (kN)
Plain cement	7.5	104 ± 20
Cement w 0.5 wt.% of p-CNTs	10.1	115 ± 18
Cement w 0.5 wt.% of a-CNTs	8.2	122 ± 14
Cement w 0.5 wt.% of f-CNTs	2.9	15 ± 3

کالینز^۱ و همکارانش [۱۲۳] بر روی تأثیر ناشی از CNTs بر توزیع، کارپذیری و استحکام مخلوط سیمان و CNTs را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاصل از آزمون نشست^۲ برای بتن با نسبت آب به سیمان (W/C)، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در شکل ۸۴-۱-الف آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش W/C، نشست افزایش می‌یابد. وقتی که CNTs در مقادیر کوچک ۰/۵، ۱، ۲ درصد نسبت به جرم بتن (اضافه می‌شود، کاهش چشمگیری اتفاق می‌افتد. در W/C = ۰/۴، افزودن ۰/۵ درصد CNT منجر به کاهش استحکام به میزان ۱۹/۵ درصد می‌گردد و در ۱ و ۲ درصد CNT، سیمان نشست کمی را از خود نشان داده است. در W/C = ۰/۵، میزان نشست در حضور ۰/۵ درصد از CNT، ۱۴/۵ درصد بوده است، مقدار قابل توجهی از کاهش استحکام در مقدارهای بالاتر از CNT در این میزان W/C اندازه‌گیری شده است. در W/C = ۰/۶، میزان نشست بالایی مشاهده شده به‌طوری‌که در ۲ از CNT، ۳۸/۳ درصد افت اتفاق افتاده است. نتایج حاصل از تأثیر افزودن مقادیر مختلف از CNTs و نسبت W/C بر استحکام فشاری بتن در شکل ۸۴-۱-ب آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش CNT، استحکام فشاری کاهش یافته و نمونه با W/C = ۰/۴ بیشترین تغییر را نشان داده است که می‌تواند نفوذ حفره‌ها به داخل منجر به این میزان از کاهش استحکام فشاری شده باشد. پارامترهای حاصل از نشست و استحکام فشاری در جدول ۴۷-۱ ارائه شده است. بالاین‌حال، تمام نمونه‌ها، بدون در نظر گرفتن W/C روند مشابهی را نشان می‌دهند و احتمالاً کلوخه‌های CNTs در داخل سیمان سخت‌شده منجر به افزایش تنش‌های موضعی^۳ شده که در نتیجه آن استحکام از بین رفته است. کلوخه‌ها به‌صورت درهم‌رفتگی سیاهی از CNTs در داخل نمونه سیمانی، همان‌طور که در شکل ۸۵-۱ نشان داده شده، قابل مشاهده است.

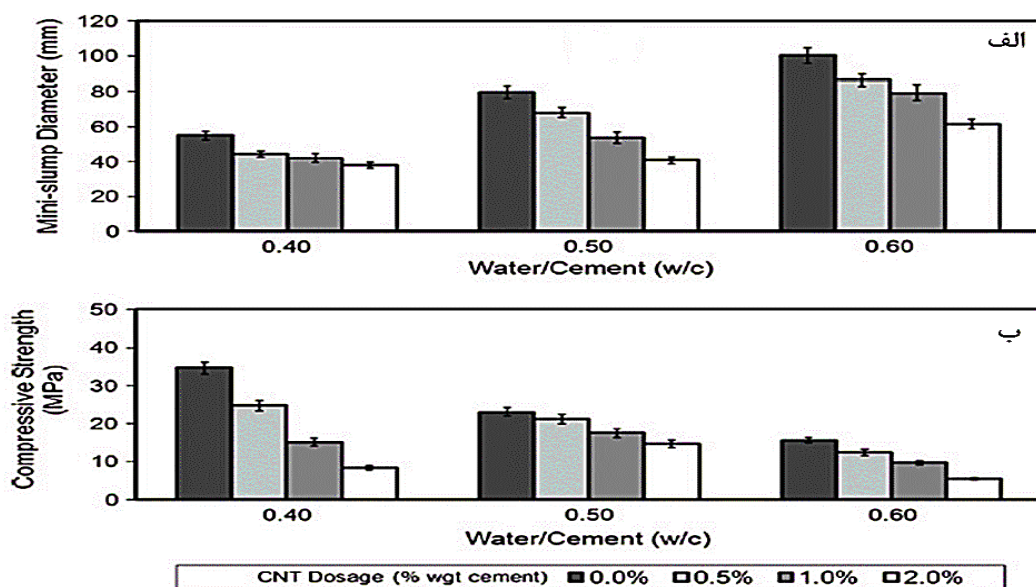
حمزه‌وئی^۴ و همکارانش [۱۲۴] میزان ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۰۱ درصد از CNTs را برای دستیابی به مقدار بهینه، به بتن اضافه کرده‌اند. نتایج نشان داد که با افزودن CNTs استحکام فشاری^۵ در طی گذشت ۹۰ روز افزایش یافته است. بیشترین میزان استحکام فشاری در مقدار ۰/۰۱ و ۰/۰۳ درصد از CNT برای ملات و بتن حاصل شده است. همچنین مشخص شده است که استحکام فشاری برای درصد بهینه CNT ۲۱/۲ درصد بالاتر از ملات مرجع می‌باشد. بالاین‌حال، افزایش بیشتر CNT منجر به کاهش استحکام شده است. در شکل ۸۶-۱-الف

¹ Collins² Slump³ Local Stress⁴ Hamzaoui⁵ Compressive Strength

تغییر استحکام فشاری ملات به صورت تابعی از درصد CNT در طی گذشت ۹۰ روز مشاهده می‌شود. با توجه به تغییر استحکام فشاری بتن در شکل ۸۶-۱-ب، مشاهده می‌شود که حداکثر استحکام فشاری در ۰/۰۰۳ درصد CNT حاصل شده است. افزایش استحکام در این شرایط ۱۷/۶۵ درصد نسبت به نمونه بدون مواد افزودنی بوده است و با افزایش مقدار CNT از مقدار بهینه افت استحکام حاصل می‌شود.



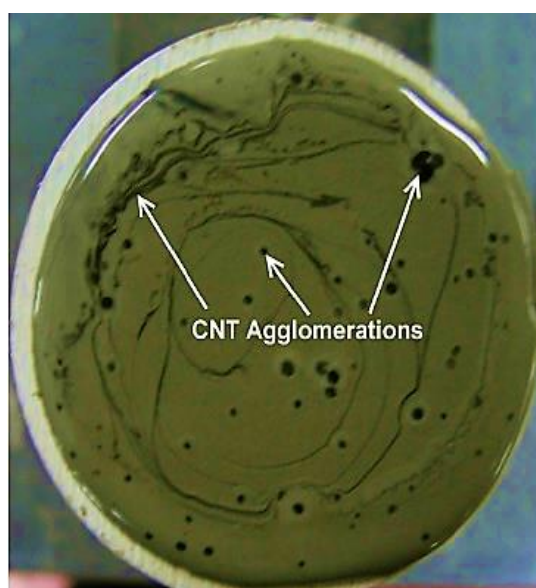
شکل ۸۳-۱- نشست در حضور MWCNTs/cement برابر با ۰/۰۳۸ درصد (CNT-1 series) و ۰/۰۷۵ درصد (CNT-2 series). [۱۲۲]



شکل ۸۴-۱- تأثیر مقادیر مختلف از CNT و water/cement بر (الف) اندازه‌گیری میزان افت (ب) استحکام فشاری [۱۲۳]

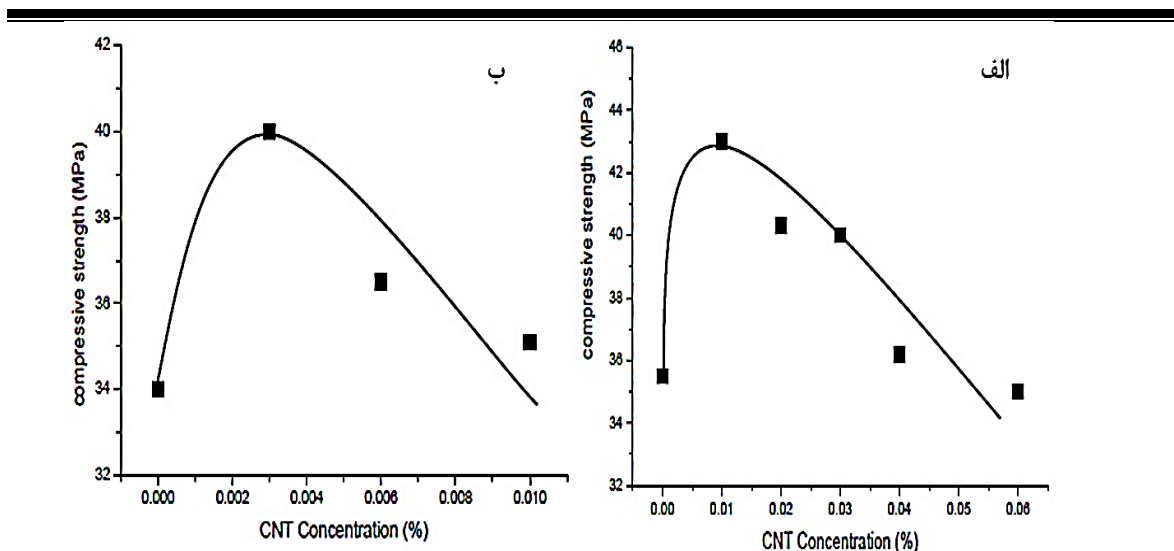
جدول ۴۷-۱ پارامترهای حاصل از نشست و استحکام فشاری [۱۲۳]

Mixture	w/c	% Admixture ^{a,b}	% CNT ^a	l/d (CNT)	Ultrasonication	Minislump diameter (mm) ^c	Compressive strength (MPa) ^c
OPC	0.4	0	0	Control	No	55.1 (5.1)	34.6 (7.3)
OPC	0.5	0	0	Control	No	79.8 (4.6)	23.1 (6.2)
OPC	0.6	0	0	Control	No	100.2 (4.9)	15.6 (6.7)
OPC/CNT	0.5	0	0.5	150-250	No	68.2 (5.3)	21.3 (7.8)
OPC/CNT	0.5	0	0.5	500-1500	No	67.6 (5.0)	21.6 (5.5)
OPC/CNT	0.5	0	0.5	750-1500	No	69.4 (4.5)	20.5 (6.1)
OPC/CNT	0.5	0	0.5	150-250	Yes	70.1 (4.3)	69.4 (5.8)
OPC/AEA	0.5	0.4	0	Control	No	82.0 (5.2)	22.7 (5.3)
OPC/AEA	0.5	0.4	0.5	Control	Yes	75.1 (4.7)	22.5 (6.2)
OPC/CNT/AEA	0.5	0.4	0.5	150-250	No	63.2 (4.0)	20.4 (5.9)
OPC/CNT/AEA	0.5	0.4	0.5	150-250	Yes	56.7 (3.1)	19.4 (6.3)
OPC/WRDA	0.5	0.3	0	Control	No	97.00 (4.5)	24.2 (5.7)
OPC/WRDA	0.5	0.3	0	Control	Yes	108.7 (5.3)	25.1 (4.8)
OPC/CNT/WRDA	0.5	0.3	0.5	150-250	No	55.75 (4.3)	17.3 (5.5)
OPC/CNT/WRDA	0.5	0.3	0.5	150-250	Yes	53.1 (5.8)	16.2 (6.2)
OPC/PC	0.5	0.1	0	Control	No	97.7 (4.5)	22.4 (5.7)
OPC/PC	0.35	0.8	0	Control	No	123.9 (4.1)	42.0 (6.8)
OPC/PC	0.35	0.8	0	Control	Yes	136.3 (4.6)	43.3 (6.5)
OPC/CNT/PC	0.35	0.8	0.5	150-250	No	118.4 (3.5)	52.84 (5.9)
OPC/CNT/PC	0.35	0.8	0.5	150-250	Yes	121.3 (4.7)	53.2 (5.6)



شکل ۸۵-۱- کلوخه‌هایی از CNTs بر روی سطح نمونه (w/c = ۰/۵، درصد از CNTs) [۱۲۳].

با توجه به مراجع ذکر شده در بالا، همان‌طور که در مطالعات متعدد گزارش شده است می‌توان نتیجه گرفت که افزودن CNTs استحکام را افزایش می‌دهد اما این افزایش استحکام به عوامل زیادی از جمله نحوه توزیع CNTs، کیفیت CNTs، قطر CNTs، نسبت ابعاد و غلظت CNTs بستگی دارد. این افزایش در استحکام همان‌طور که در شکل ۸۶-۱ مشاهده می‌شود، می‌تواند مربوط به توانایی CNTs برای ایفای نقش به‌عنوان پل‌ها در میان ترک‌ها و حفره‌ها باشد [۱۲۵].



شکل ۸۶-۱- تغییر استحکام فشاری ملات به صورت تابعی از درصد CNTs در طی گذشت ۹۰ روز برای الف) ملات ب) بتن [۱۲۴].

ابوالربی^۱ و همکارانش [۱۲۶] مقادیر مختلفی از MWCNTs با نسبت‌های ابعاد مختلف (کوتاه و بلند) نسبت به سیمان را مورد بررسی قرار داده‌اند. MWCNTs کوتاه دارای نسبت ابعاد ۱۵۷ (قطر ۹/۵ nm و طول ۳۰- mm) بوده درحالی‌که نوع بلند آن دارای نسبت ابعاد ۱۳۷۵-۱۲۵۰ (قطر کمتر از ۸ nm و طول ۳۰-۱۰ mm) است. برای MWCNTs کوتاه، ۰/۴، ۰/۱ و ۰/۲ درصد افزوده شد، درحالی‌که ۰/۴ و ۰/۱ درصد برای نوع بلند استفاده شد. نتایج نشان داد که داکتیلیته^۲ در طول ۷ روز با افزودن MWCNTs، افزایش یافته است. بیشترین افزایش داکتیلیته در طی ۲۸ روز برای MWCNTs کوتاه در میزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی، ۸۶ و ۸۱ درصد بوده است. بعد از گذشت ۲۸ روز، بیشتر کامپوزیت‌ها کاهش در داکتیلیته را در مقایسه باگذشت ۱۴ روز از خود نشان دادند، اما با این حال بالاتر از مقدار حاصل شده از نمونه بدون مواد افزودنی است. نمونه‌های شامل ۰/۱ و ۰/۲ درصد از MWCNTs کوتاه بیشترین داکتیلیته، درحالی‌که نمونه‌های حاوی ۰/۴ و ۰/۱ درصد از MWCNTs بلند کمترین داکتیلیته را نسبت به نوع کوتاه از خود نشان داده‌اند. نتایج کرنش نهایی برای نمونه‌هایی با MWCNTs مختلف در شکل ۸۷-۱ ارائه شده است. خواص مکانیکی عالی CNT یک کاندید برای بهبود پایداری حجمی مواد پایه سیمانی می‌باشد. یک پراکنده‌سازی^۳ یکنواخت از CNT در مواد سیمانی با کمک التراسونیک^۴ و مواد جاذب سطحی^۵ حاصل می‌شود (شکل ۸۸-۱).

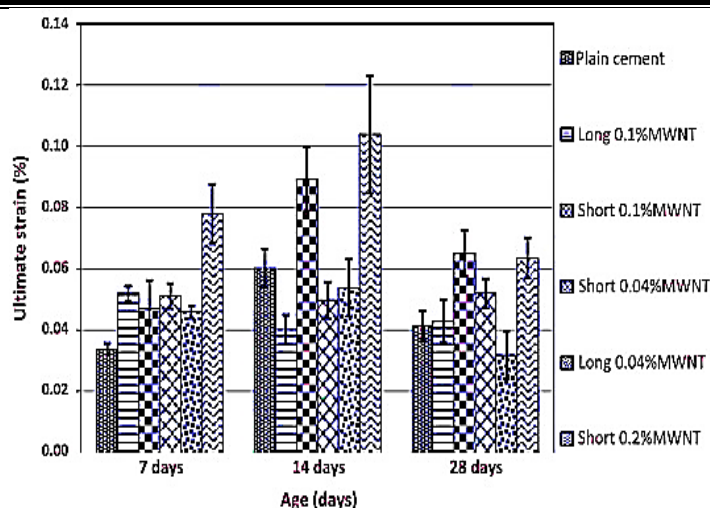
¹ Abu Al-Rub

² Ductility

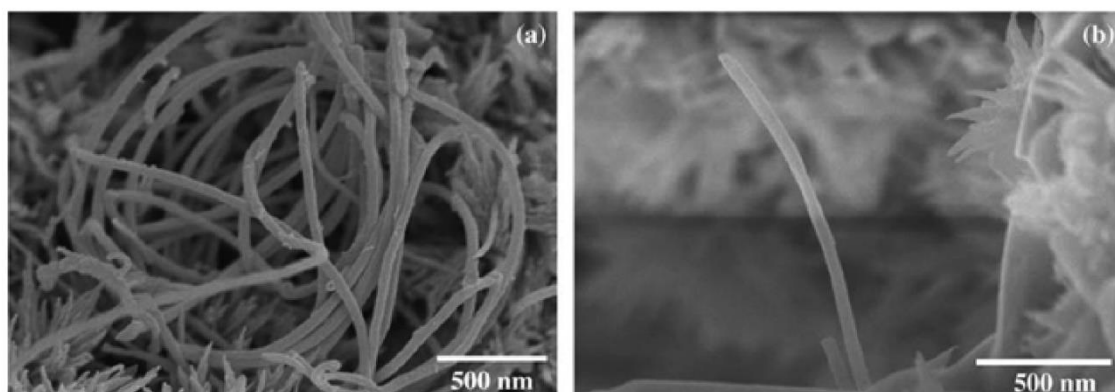
³ Dispersion

⁴ Ultrasonic

⁵ Surfactant



شکل ۸۷-۱- نتایج کرنش نهایی برای نمونه‌هایی با MWCNTs مختلف [۱۲۶].

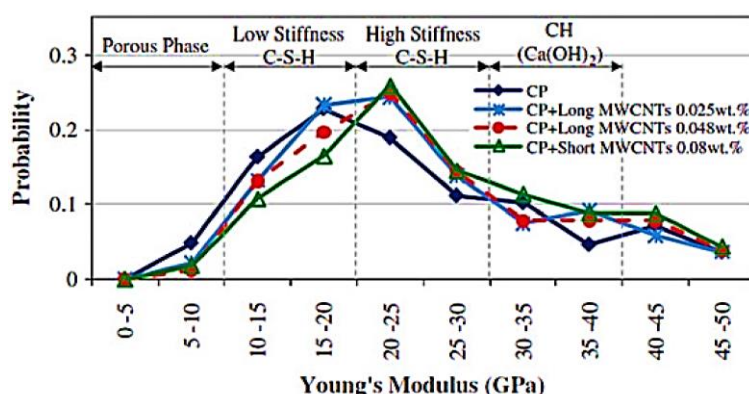


شکل ۸۸-۱- تصاویر SEM سطوح شکست خمیر سیمان مسلح شده با نانولوله‌های کربنی چند جداره (الف) پراکنده‌سازی نشده و (ب) پراکنده‌سازی شده [۱۲۶].

با اضافه کردن مقادیر کمی CNT محققان زیادی بهبود قابل توجه در خواص مکانیکی را گزارش داده‌اند. برای مثال آقای لی^۱ گزارش کرد با اضافه کردن ۰/۵ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی تک جداره به ماتریس سیمان استحکام خمشی و فشاری به ترتیب ۲۵ و ۱۹ درصد افزایش می‌یابد. برخی تحقیقات دیگر نیز افزایش سرعت هیدراسیون را در حضور CNT اعلام نمودند. کنستا^۲ و همکارانش نانو دندانه شدن را در اثر اضافه کردن CNT به خمیر سمیت مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که به کارگیری مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی از MWCNT پراکنده‌سازی شده، مقدار سفتی C-S-H را افزایش داده و باعث کاهش تخلخل‌ها می‌شود (شکل ۸۹-۱) [۱۲۷]. [۱۲۸]

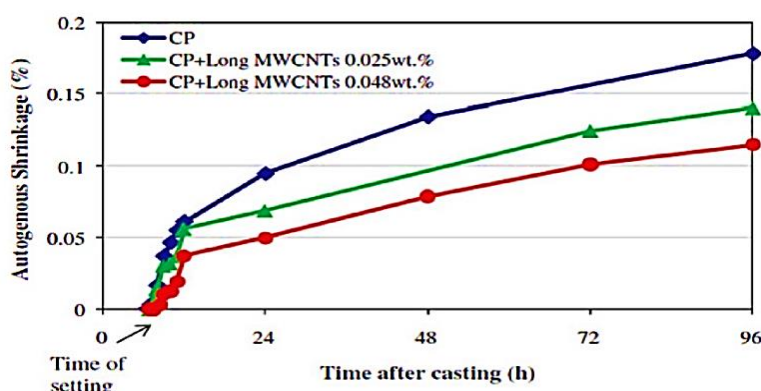
¹ Li

² Konsta



شکل ۸۹-۱- منحنی احتمال برای مدول الاستیک خمیر سیمان در طی ۲۸ روز ($W/C=0/3$) و خمیر سیمان مسلح شده با ۰/۲۵، ۰/۴۸ و ۰/۰۸ درصد وزنی MWCNT [۱۲۷].

دگرگونی نانو ساختار در اثر اضافه کردن نانولوله‌های کربنی موجب بهبود پایداری حجمی مواد پایه سیمانی در مراحل اولیه می‌شود که این مطلب در شکل ۹۰-۱ نشان داده شده است. همچنین انقباض خود به خودی خمیر سیمان تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد که این می‌تواند به کاهش تنش‌های القاشده در اثر کاهش تخلخل‌ها دانست.

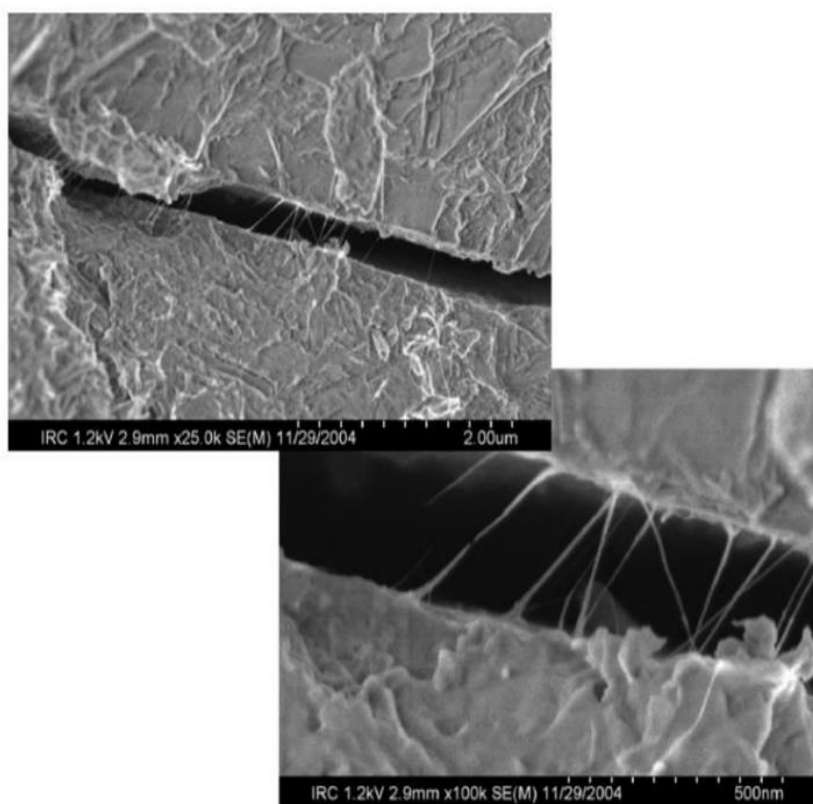


شکل ۹۰-۱- انقباض خود به خودی خمیر سیمان ($W/C=0/3$) و خمیر سیمانی مسلح شده با ۰/۲۵ و ۰/۴۸ درصد وزنی MWCNT [۱۲۷].

نانولوله‌های کربنی (CNTs) و نانو رشته‌های کربنی (CNFs) به‌عنوان گزینه‌های اصلی نانو تکنولوژی برای مسلح کردن سیمان‌ها مطرح می‌شوند. مدول الاستیسیته و مقاومت بسیار بالای این نانو مواد، در کنار مقاومت کششی عالی و مشخصات منحصربه‌فرد الکتریکی و شیمیایی آن‌ها، توانایی مطلوب آن‌ها را برای ایجاد نسل جدیدی از مصالح ساختمانی نشان می‌دهد (شکل ۹۱-۱). نانو رشته‌های کربنی برخلاف نانولوله‌ها بسیار راحت‌تر در مخلوط سیمان توزیع می‌شوند و همچنین فرآوری آن‌ها راحت‌تر بوده و هزینه تمام‌شده آن‌ها برخلاف نانولوله‌ها بسیار پایین‌تر است. استفاده از این نانو مواد به بهبود مشخصات مکانیکی، مقاومت در برابر گسترش

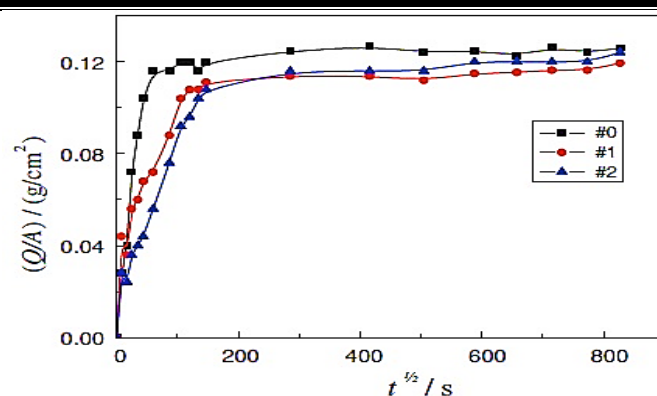
ترک‌ها، محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس و ایجاد قابلیت خود ترمیمی در مصالح سیمانی منجر می‌گردد. یکی از مشکلات اصلی این نانو مواد، عدم امکان توزیع یکنواخت آن‌ها در مخلوط سیمان به دلیل آب‌گریزی بسیار بالای آن‌ها و جاذبه درونی بالای این نانو مواد است و مشکل دیگر این نانو مواد عدم چسبندگی مناسب بین آن‌ها با خمیر سیمان است [۵۵، ۱۲۹].

هان^۱ و همکارانش بر روی نفوذپذیری آب به داخل سیمان در حضور و غیاب CNTs بررسی انجام داده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حتی در حضور مقادیر خیلی کم از MWCNTs کاهش در ضریب جذب آب و هم‌چنین ضریب نفوذ آب به داخل ملات سیمان کاهش می‌یابد. آن‌ها بیان کرده‌اند که CNTs می‌توانند به‌طور موثر خواص استحکامی ترکیبات بر پایه سیمان را بهبود بخشند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار جذب آب هر سه نوع ترکیبات سیمانی ابتدا افزایش یافته و سپس با افزایش در زمان جذب آب پایدار می‌شود. ملاحظه می‌شود که در حضور CNTs مقدار جذب آب کمتری در مقایسه با سیمان ساده اتفاق افتاده است [۱۳۰].



شکل ۹۱-۱- ترمیم ترک در بتن حاوی نانولوله‌های کربنی [۱۲۹].

¹ Han



Overall

شکل ۹۲-۱- رابطه بین مقدار جذب آب و زمان جذب آب ترکیبات سیمانی در حضور و غیاب MWCNTs [۱۳۰]

ضریب نفوذ K_f ، سه نوع کامپوزیت بین ۱۶ تا ۲۶ روز محاسبه شده و نتایج مربوط به آن در جدول ارائه شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که ضریب نفوذپذیری کامپوزیت‌های سیمانی تقویت شده با CNTs به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از کامپوزیت سیمانی ساده است. می‌توان علت آن را ناشی از بهبود محصولات هیدراسیون، ریزساختارها و انقباض خودبه‌خودی مواد سیمانی در حضور CNTs دانست [۱۳۰]

جدول ۴۸-۱: ضریب نفوذ آب سه نوع کامپوزیت سیمانی [۱۳۰]

Samples	#0 (0% CNT)	#1 (0.2% CNT + NaDDBS)	#2 (0.2% CNT + SDS)
k_f , cm/s	9.02×10^{-10}	3.14×10^{-10}	5.16×10^{-10}

۵-۹-۱-۱ نانوذرات اکسید آهن

خوش‌اخلاق و همکاران پژوهشی بر روی افزودن نانوذرات اکسید آهن بر ویژگی بتن خود تراکم انجام دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید آهن، برای مقادیر بیش از ۴ درصدی، موجب افزایش استحکام فشاری، ترک‌خوردگی و پیچشی بتن خود تراکم می‌گردد. آن‌ها همچنین دریافتند که این نانوذرات می‌تواند به‌عنوان پرکننده‌ای عمل کرده و باعث افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ آب شود که این حالت برای درصدهای وزنی بالای ۴ درصد رخ می‌دهد [۱۳۰ و ۱۳۱]

۴-۹-۱-۱ نانوذرات اکسید تیتانیوم

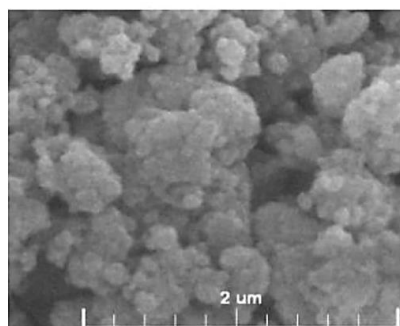
تحقیقات ثابت کرده است که استفاده از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (شکل ۹۳-۱) علاوه بر خاصیت خود تمیزکنندگی بتن، باعث افزایش سرعت هیدراسیون و کاهش زمان گیرش بتن می‌گردد [۱۳۱]. همچنین استفاده از این نانوذرات باعث افزایش مقاومت خمشی و استحکام فشاری بتن می‌شود. (شکل ۹۴-۱) تأثیر اضافه نمودن نانوذرات اکسید تیتانیوم به بتن خود تراکم را نشان می‌دهند [۱۳۲، ۱۳۳] همان‌طور که مشخص است، با اضافه

نمودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم، ریزساختار بتن بهبودیافته و حفره‌های داخلی بتن کوچک‌تر می‌گردد. این امر موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن می‌گردد [۱۳۴].

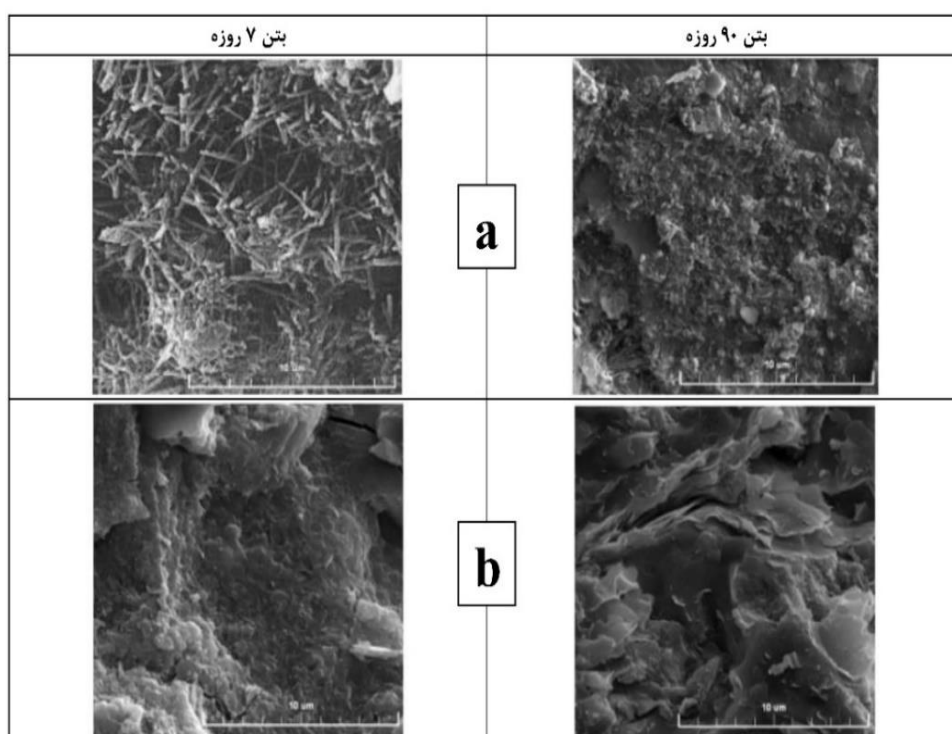
رابطه بین تغییرات مقاومت ترک‌خوردگی بتن، با تغییرات استحکام فشاری بتن را بر اساس درصدهای مختلف نانو ذرات اکسید تیتانیوم از صفر تا پنج درصد نشان می‌دهد که از آن نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش میزان درصد نانو ذرات اکسید تیتانیوم از صفر تا پنج درصد، در ابتدا میزان تنش ترک‌خوردگی، افزایش می‌یابد ولی بعداً از این مقدار افزایش، قدری کاسته می‌شود؛ اما در مورد تنش‌های فشاری با تغییر درصد نانو ذرات اکسید تیتانیوم، در میزان تنش فشاری تغییری به وجود نمی‌آید (شکل ۹۵-۱) [۱۳۴].

۷-۹-۱-۱ نانو ذرات اکسید آلومینیوم

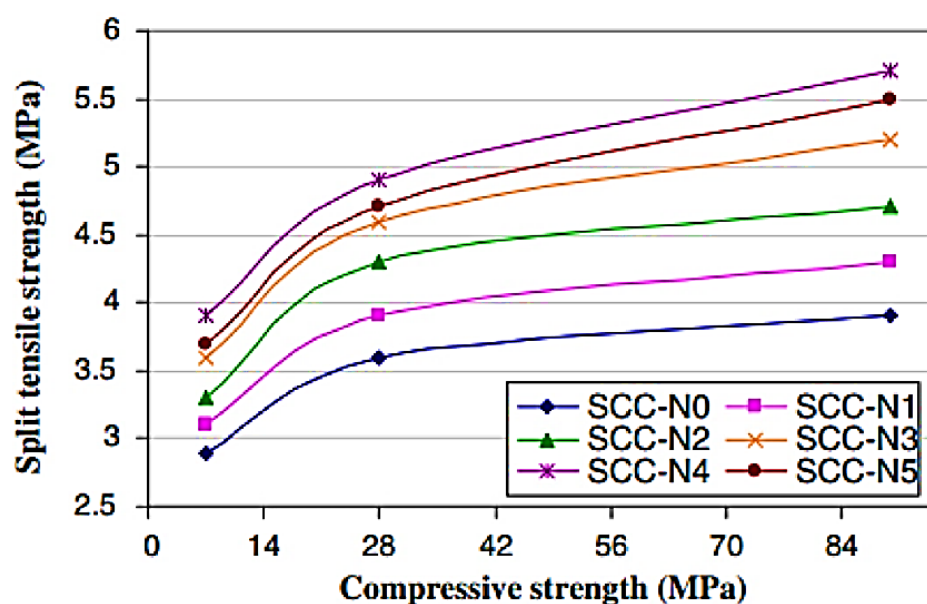
افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به مخلوط بتن باعث افزایش قابل‌ملاحظه‌ای مدول الاستیسیته بتن می‌شود. تجربه ثابت کرده است که با افزودن ۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم، مدول الاستیسیته بتن به‌اندازه ۱۴۳ درصد افزایش پیدا می‌کند ولی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی مقاومت بتن ندارد [۱۳۵، ۱۳۶]. نظری و ریاحی تأثیر اضافه نمودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم را بر هیدراسیون بتن مورد مطالعه قراردادند و مشاهده کردند که اضافه نمودن این ذرات موجب کاهش حرارت آزاد شده و شتاب بخشی به پیک زمانی آزاد شدن این حرارت می‌گردد. به‌طوری‌که با افزودن ۳ درصد وزنی از نانو ذرات اکسید آلومینیوم به بتن، مقدار حرارت آزاد شده بیشترین افت را خواهد داشت. ایشان تأثیر کارپذیری بتن اصلاح‌شده با نانو ذرات اکسید آلومینیوم را برای نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد وزنی مورد مطالعه قراردادند و نتایج حاکی از آن بود که افزایش میزان نانو ذرات اکسید آلومینیوم موجب کاهش کارپذیری بتن می‌گردد. همان‌طور که از شکل مشخص است، استفاده از حداقل میزان استاندارد آب، به میزان اندکی کارپذیری بتن را کاهش می‌دهد [۱۳۶]. شکل ۹۶-۱ تأثیر افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن را نشان می‌دهد، همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم در بتن موجب افزایش تراکم آن می‌گردد [۱۳۷].



شکل ۹۳-۱- تصویر SEM از نانو ذرات اکسید تیتانیوم [۱۳۴].



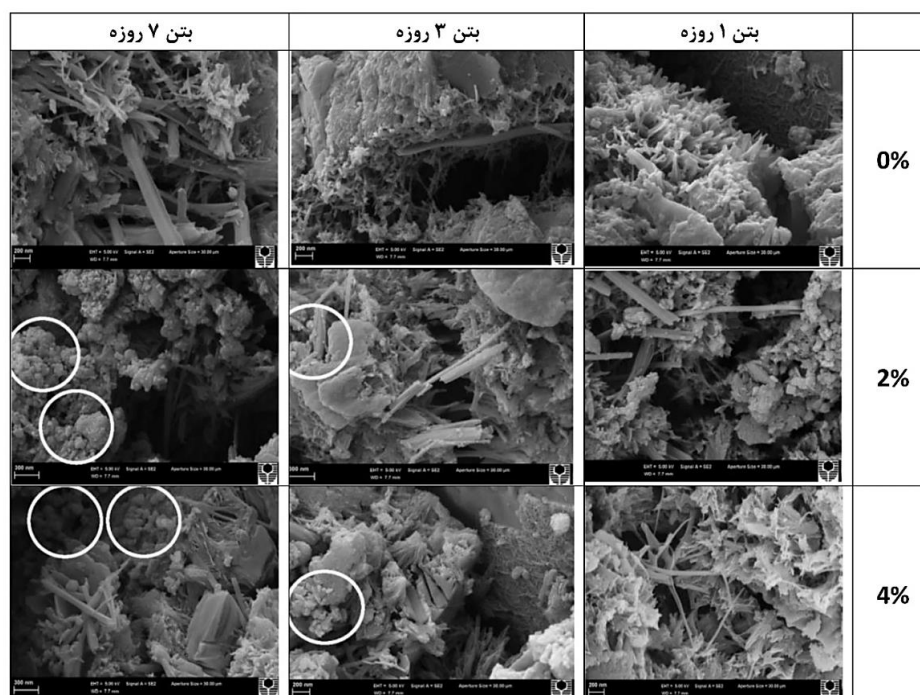
شکل ۹۴-۱- مطالعه تأثیر افزودن درصدهای مختلف ذرات نانو اکسید تیتانیوم بر ساختار بتن خود تراکم (a = درصد وزنی صفر و b=چهار درصد وزنی) [۱۳۴].



شکل ۹۵-۱- تغییرات استحکام فشاری نسبت مقاومت ترک‌خوردگی در حضور درصدهای متفاوتی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود تراکم [۱۳۴].

۲-۱ امکان‌سنجی فنی و اقتصادی مواد افزودنی معدنی بومی کشور جهت افزودن به بتن در مجاورت آب دریا

برای تولید یک تن سیمان پرتلند، ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی، ۱۱۸ کیلووات ساعت برق، بیش از یک لیتر گازوئیل مصرف می‌شود و تولید هر تن سیمان پرتلند یک تن دی اکسید کربن وارد جو زمین می‌کند و هفت درصد اکسید کربن موجود در اتمسفر زمین هم ناشی از تولید سیمان است و سه تا چهار درصد مجموع انرژی الکتریکی مصرفی دنیا هم در کارخانه‌های سیمان مصرف می‌شود. در اروپا و کشورهای پیشرفته ۶۵ درصد میزان مصرف سیمان‌های آن‌ها از نوع آمیخته و تنها ۳۵ درصد سیمان پرتلند است و مواد پوزولانی جایگزین سیمان شده است و با تولید بیش از ۲۷ نوع سیمان با کنترل کیفی آن به محیط زیست هم کمک کرده‌اند اما در کشور ما به دلیل ضرورت کنترل دقیق کیفی مدیران کارخانه‌های سیمان از استفاده از سرباره و پوزولان سرباز می‌زنند. کاربرد پوزولان در سیمان و بتن موجب می‌شود تا کیفیت بتن ارتقاء یافته و دوام آن نیز بیشتر شود و گامی در مسیر صنعت سبز در کشور برداشته شود. نیاز به ساخت سازه‌های بتنی بادوام و نفوذناپذیر در حاشیه خلیج فارس، وجود مشکل خوردگی میلگردهای بتن در حاشیه خلیج فارس، عدم امکان ساخت بتن مطلوب بدون مصرف افزودنی‌های مختلف و ضروری، وجود مشکلات اجرایی مانند گرمی هوا، عدم امکان رفع مشکلات اجرایی بدون مصرف افزودنی‌های لازم، امکان افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی با افزودنی‌ها و همچنین گستردگی استفاده از بتن آماده و مشکلات آن ازجمله عواملی هستند که لزوم به کارگیری مواد افزودنی بتن را آشکار می‌سازند.



شکل ۹۶-۱- تأثیر افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن [۱۳۷].

۳-۱ نقش مواد افزودنی در بتن‌های حاشیه خلیج فارس

نقش مواد پودری معدنی (پوزولان‌ها و روباره‌ها) در بتن حاشیه خلیج فارس

پوزولان‌ها با آهک هیدراته (کلسیم هیدروکسید) ترکیب می‌شوند و ماده پرکننده و چسباننده به وجود می‌آورند که نفوذپذیری را کم کرده و pH خمیر سیمان را نیز کاهش می‌دهند. اغلب پوزولان‌ها دوام در برابر سولفات‌ها را بهبود می‌بخشند. پوزولان‌ها به صورت‌های طبیعی (خام یا کلسینه) و یا مصنوعی هستند. پوزولان‌های طبیعی ایران عمدتاً به صورت توف‌ها یا خاکسترهای آتشفشانی در تولید سیمان بکار می‌روند و کمتر به صورت افزودنی در بتن استفاده می‌شود. سیمان‌های پرتلند پوزولانی ایران حاوی حداکثر ۱۵ درصد از این نوع پوزولان‌ها می‌باشند. وجود حداکثر ۱۵ درصد پوزولان طبیعی در سیمان آمیخته، تأثیر کمی بر کیفیت مقاومتی و دوامی بتن در دراز مدت دارد.

مصرف پوزولان‌های طبیعی می‌تواند مصرف آب بتن را بیشتر کند که تأثیر منفی بر مقاومت و دوام را می‌تواند به همراه داشته باشد. مصرف پوزولان‌های طبیعی می‌تواند افت اسلامپ بیشتری را به وجود آورد که مثبت تلقی نمی‌شود. افزایش پوزولان طبیعی (بیش از ۱۵ درصد) بر مقاومت‌های کوتاه مدت و میان مدت تأثیر منفی می‌گذارد اما ممکن است برای دراز مدت مطلوب باشد. مصرف پوزولان طبیعی بیش از ۳۰ یا ۳۵ درصد ممکن است مفید نباشد و آهکی برای ترکیب یافت نشود و مقاومت‌های دراز مدت نیز افت کند.

۱-۳-۱-۱ دوده سیلیس

مهم‌ترین پوزولان‌های مصنوعی مصرفی در ایران، دوده سیلیسی و خاکستر بادی هستند. دوده سیلیسی در ایران تولید می‌شود اما خاکستر بادی مصرفی از خارج وارد می‌گردد و بیشترین مصرف آن‌ها در حاشیه خلیج فارس می‌باشد. دوده سیلیسی عمدتاً مربوط به غبار کارخانه‌های فرو آلیاژ یا فروسیلیس است که ذرات بسیار ریز تقریباً کروی شکل دارد و از نوع سیلیس آمورف (غیر بلوری) است. باید توجه داشت که در صورت پودر کردن سنگ‌های سیلیسی به صورت خیلی ریز و میکرونیزه، میکروسیلیس حاصل نمی‌شود. اندازه ذرات میکروسیلیس معمولاً در محدوده ۰/۵ تا ۰/۲ میکرون می‌باشد و سطح ویژه آن بین ۱۳ تا ۳۰ مترمربع در هر گرم می‌باشد (ریزی سیمان ۰/۳ مترمربع در هر گرم).

واکنش دوده سیلیسی با آهک خمیر سیمان سریع‌تر از سایر پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی است. بنابراین درگیری در بتن حاوی دوده سیلیسی عملاً دیده نمی‌شود. بتن حاوی دوده سیلیسی چسبنده تر، چسبناک تر و آب انداختن و جداسازی کمتر می‌گردد. امکان ترک خوردگی ناشی از تبخیر در بتن میکروسیلیس دار بیشتر می‌شود و نیاز به حفاظت رطوبتی بیشتری دارد.

مقاومت‌های کوتاه مدت و میان مدت بتن میکروسیلیس دار بیشتر می‌شود اما تأثیر آن در دراز مدت کم می‌شود که در فصل اول مورد بررسی قرار گرفت. نفوذپذیری بتن میکروسیلیس دار کمتر و مقاومت الکتریکی ویژه آن بیشتر می‌گردد و یون کلراید کمتر نفوذ می‌کند. دوام بتن میکروسیلیس دار در برابر برخی سولفات‌ها محل تامل

و اختلاف است. وجود میکروسیلیس، مصرف آب بتن را بشدت بالا می‌برد. امکان به‌کارگیری میکروسیلیس بدون فوق روان کننده امکان‌پذیر نیست. مصرف میکروسیلیس پودری در اختلاط بتن در بسیاری از موارد نتیجه مثبتی را به بار نمی‌آورد. بهتر است دوغاب یا ژل میکروسیلیس را در ساخت بتن بکار برد. به‌کارگیری ۶ تا ۸ درصد دوده سیلیسی (جایگزین سیمان) در بتن توصیه می‌شود. مصرف کمتر از ۵ درصد دوده سیلیسی نتیجه مثبتی به بار نمی‌آورد و مصرف بیش از ۱۰ درصد از نظر فنی و اقتصادی توصیه نمی‌گردد. میکروسیلیس برای جلوگیری یا کنترل انبساط ناشی از واکنش قلیایی با سنگدانه‌های واکنش‌زا مفید است. میکروسیلیسی که به‌خوبی در بتن پخش نشده و به‌صورت کلوخه درآید می‌تواند در اثر واکنش با قلیایی‌ها انبساط مخرب به وجود آورد. میکروسیلیس کار پمپاژ را مشکل می‌کند و موجب سایش وسائل و تجهیزات می‌گردد. برخی معتقدند که غبار میکروسیلیس در کارگاه می‌تواند بر سلامتی افراد تأثیر منفی گذارد. قیمت هر کیلو میکروسیلیس در ایران تقریباً ۳/۵ برابر قیمت سیمان (۱۰۰ تومان) است. البته می‌بایست هزینه بسته‌بندی و حمل‌ونقل را نیز بدان اضافه کرد. همچنین برای تولید هر تن دوده‌ی سیلیس ۱۴ کیلوگرم کربن دی‌اکسید وارد جو می‌شود که این مقدار کربن دی‌اکسید ۱/۵ درصد از میزان کربن دی‌اکسید متصاعد شده برای تولید هر تن سیمان است.

۲-۱-۳-۱ خاکستر بادی

خاکستر سیلیسی آمورف محصول جانبی کوره زغال‌سنگ است که کروی شکل به نظر می‌رسد و از دهانه دودکش کوره خارج می‌شود. اندازه ذرات خاکستر بادی بین ۱۰ تا ۴۰ میکرون است که انواع ریزتر نیز دارد. سطح ویژه خاکستر بادی معمولی بین ۰/۴ تا ۰/۷ مترمربع در هر گرم است که در انواع ریز ممکن است به‌شدت افزایش یابد. در سایر کشورهایی که نیروگاه زغال‌سنگی دارند، خاکستر بادی قابل‌توجهی حاصل می‌گردد و در ساخت سیمان آمیخته و یا به‌صورت افزودنی بکار می‌رود. مصرف خاکستر بادی موجب درگیری بتن، کاهش مقاومت اولیه، کاهش سرعت گرم‌زایی، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام در محیط‌های سولفاتی و حاوی کلراید می‌گردد و انبساط مخرب مربوط به واکنش سنگدانه و قلیایی‌ها را کنترل می‌کند و مقاومت دراز مدت را بالا می‌برد. مصرف ۱۵ تا ۲۵ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان در بتن در حاشیه خلیج فارس توصیه می‌شود اما مصرف بیشتر از ۳۰ درصد نمی‌تواند کمکی به بالا بردن هرچه بیشتر کیفیت بتن نماید. مصرف خاکستر بادی ممکن است به کاهش آب مصرفی بتن نیز منجر گردد. پمپ کردن بتن حاوی خاکستر بادی به‌خوبی انجام می‌شود و سایش وسائل و تجهیزات مشاهده نشده است.

قیمت هر کیلو خاکستر بادی معمولی در مبدأ نصف قیمت سیمان و در حاشیه خلیج فارس برابر با قیمت سیمان می‌باشد. خاکستر بادی خیلی ریز نیز در مبدأ تقریباً هم قیمت سیمان و در جنوب ایران دو برابر قیمت سیمان است. قیمت تولید خاکستر بادی تقریباً ۱۵ درصد قیمت تولید سیمان است، اما با توجه به اینکه خاکستر بادی در نیروگاه‌های زغال‌سنگی تولید می‌شود برای مصارف داخلی نیاز به واردات دارد و بنابراین قیمت تمام‌شده خاکستر بادی برای مصارف داخلی تقریباً معادل قیمت سیمان است. علاوه بر این، مقدار کربن دی‌اکسید تولیدشده به ازای هر تن خاکستر بادی تقریباً ۱۰ درصد مقدار دی‌اکسید کربن متصاعد شده برای تولید هر تن سیمان است.

۳-۱-۳-۱-۳ سرباره‌ها

سرباره‌های اغلب کوره‌های ذوب فلزات می‌تواند به‌عنوان ماده سیمانی جایگزین سیمان بکار رود. معمول‌ترین سرباره مصرفی، سرباره کوره بلند ذوب‌آهن است که در ایران نیز تولید می‌شود. در ایران از سرباره برای ساخت سیمان آمیخته سرباره‌ای استفاده می‌شود و کمتر به‌عنوان افزودنی بکار می‌رود. روبراه‌ها به‌عنوان ماده سیمانی در محیط قلیایی (آهک‌دار) مانند سیمان با آب ترکیب می‌شود و ماده پرکننده و چسباننده ایجاد می‌کند ولی آهک را مصرف نمی‌کند. روبراه‌ها برخلاف پوزولان‌ها، PH و قلیائیت محیط را پایین نمی‌آورد. به‌هرحال سرباره باید آمورف باشد و زود سرد شود. بهتر است مصرف روبراه‌ها به‌عنوان افزودنی جایگزین سیمان بیش‌تر از ۲۵ درصد وزن مواد چسباننده باشد و می‌تواند بیش از ۵۰ درصد نیز بکار رود. ایجاد کندگیری در بتن، کاهش جزیی مقاومت‌های اولیه و بهبود مقاومت‌های دراز مدت، کاهش گرمازایی و سرعت گرمازایی، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام در محیط‌های سولفاتی و کلرایدی و کاهش انبساط مخرب مربوط به واکنش سنگدانه و قلیایی از جمله خواص سرباره در بتن است. سرباره با ریزی ۰/۴ تا ۰/۷ مترمربع در هر گرم بکار می‌رود و اندازه ذرات آن تا حدودی ریزتر از سیمان است. در محیط خلیج فارس وجود سرباره‌ها در بتن مفید بوده است و خوردگی میلگردها را کم کرده است. مصرف آب در بتن حاوی سرباره چندان دستخوش تغییر نمی‌گردد. به‌کارگیری سرباره‌ها به همراه پوزولان‌ها نیز تأثیر مثبتی را در این مناطق نشان داده است.

بر اساس مطالعات به ازای هر تن آهن خام تولیدی، ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ کیلوگرم سرباره نیز تولید می‌گردد. عمده مواد تشکیل‌دهنده سرباره‌های آهن‌گذاری موجود در کشور سیلیکا، آلومینوسیلیکا و کلسیم سیلیکا است. می‌توان گفت سرباره آهن ساختاری شبیه به سیمان معمولی دارد. اما با توجه به ضعف کارخانه‌های داخلی در فراوری سرباره‌های خروجی، عملاً بیشتر این سرباره‌ها غیرقابل استفاده نبوده و در طبیعت دفن می‌شود.

بین ۱۵ تا ۲۰ درصد از تولید صنایع فولاد منجر به ضایعات سرباره‌ای می‌شود که فرآوری و به کارگیری آن‌ها در سیمان‌های پوزولانی می‌تواند آن‌ها را به چرخه بازگرداند و موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های مصرفی تولیدکنندگان فولاد شود. سرباره‌های موجود در کشور در ترکیب با سیمان به‌راحتی قابل استفاده است، به شرطی که بلافاصله پس از خروج از کوره به‌سرعت سرد شده و آسیاب کاری روی آن انجام شود تا اندازه دانه آن به اندازه دانه سیمان و حتی کمتر از سیمان برسد. در این شرایط فعالیت سرباره‌ها افزایش یافته و در واکنش با سیمان به‌سرعت وارد عمل می‌شود. طی همکاری مشترک با کارخانه ذوب‌آهن اصفهان و برخی کارخانه‌های سیمان، پودر سرباره طی یک فرایند خاص از آسیاب سرباره‌های آهن‌گذاری کارخانه ذوب‌آهن اصفهان تولید می‌شود. سرباره‌ها پس از خروج از کوره به‌سرعت سرد شده و تا ریزی سیمان آسیاب می‌گردند که طی این فرایند، واکنش‌پذیری آن افزایش یافته و می‌توان از آن به‌عنوان پوزولان در ساخت بتن استفاده کرد. قیمت تمام شده هر تن سرباره تقریباً ۷ درصد قیمت تمام شده هر تن سیمان می‌باشد. همچنین مقدار انرژی موردنیاز برای تولید یک تن سرباره یک‌پنجم مقدار انرژی مصرفی برای تولید سیمان است. صرف‌نظر از قیمت و هزینه‌های اقتصادی، همان‌طور که در فصل اول اشاره شد، استفاده از سرباره در بتن باعث بهبود خواص مکانیکی آن نیز می‌شود که تمامی این موارد استفاده از سرباره در ترکیب بتن را توجیه‌پذیر می‌کند. در مجتمع فولاد مبارکه، بازیافت سرباره‌های گرم و تبدیل آن به گرانول‌هایی با اندازه ذرات ۳۰۰ میکرون تا ۲/۵ میلی‌متر، سالانه در حدود یک‌میلیون تن سرباره فولاد را به

محصولات مفید و کاربردی تبدیل می‌کند که طبق برآوردها موجب صرفه‌جویی ۳ میلیارد تومان هزینه‌ها می‌گردد. کاربرد این محصولات جدید را در صنایع سیمان برای تولید سیمان‌های خاص تیپ ۲ و ۵ و استفاده در سازه‌های دریایی، فاضلابی، سدسازی، چاه‌های نفت و کارخانه‌های سند پلاست و اکسیدزدایی سطوح اسکلت‌های فلزی اعلام کرد. همچنین برآوردها نشان می‌دهد که میزان دی اکسید کربن تولیدشده برای هر تن سیمان سرباره‌ای یک‌پنجم مقدار کربن دی اکسید تولیدشده برای هر تن سیمان پورتلند است.

۱-۳-۱-۴ متاکائولن

مواد خام ورودی در تولید متاکائولن، رس کائولن است. کائولن یک ماده معدنی بسیار ریز سفید و رسی است که به‌طور سنتی در تولید چینی استفاده می‌شود. کائولینیت به‌عنوان یک ماده معدنی متداول، به‌صورت دی سیلیکات آلومینیم هیدراته تعریف می‌شود که اصلی‌ترین جزء کائولن است. در دماهای ۱۰۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مواد رسی بیشتر آب جذب‌شده خود را از دست می‌دهند. دمایی که در آن کائولینیت به‌واسطه دی هیدراته آب از دست می‌دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دی اکسید کربن منتشرشده از تولید متاکائولن از راه عملیات حرارتی کائولن، در مقایسه بادی اکسید کربنی که طی تولید سیمان منتشر می‌شود خیلی کمتر است. برآورد شده که تولید هر تن سیمان سبب آزاد شدن ۹۴۰ کیلوگرم گاز دی اکسید کربن می‌شود، درحالی‌که به ازای تولید یک تن متاکائولن مقدار دی اکسید کربن آزادشده برابر با ۱۷۵ کیلوگرم است. فرآیند تولید متاکائولن در دمای پایین‌تر از فرآیند تولید سیمان پرتلند انجام‌شده که سبب کاهش هزینه تولید آن می‌گردد اما به دلیل کمی تولید، قیمت آن تقریباً ۵ برابر قیمت سیمان است. همچنین برای دستیابی به خواص مطلوب بتن، میزان استفاده از متاکائولین نباید بیش از ۱۵ درصد باشد. استفاده از دارای مزیت‌های زیست‌محیطی است و از طرفی اثرات مثبتی را در هر دو حالت تازه و سفت شده بتن می‌گذارد و باتوجه به اینکه مقدار جایگزینی آن با سیمان کم است، به کارگیری آن در ترکیب بتن از لحاظ اقتصادی منطقی به نظر می‌رسد.

۱-۳-۱-۵ نانوسیلیس

با استناد به مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته برای درصد جایگزینی نانوسیلیس، درصدی از مصرف نانوسیلیس که جوابگوی الزامات فنی شامل مقاومت فشاری و دوام سازه باشد، انتخاب شده و مبنای محاسبات قرار داده می‌شود. در این راستا طرح اختلاط حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس، مطابق نتایج آزمایش‌های حاوی صورت گرفته ارزیابی خواهد شد [۱۳۹]. جزئیات طرح اختلاط سناریوهای اول و دوم در جدول ۱-۵۰ آورده شده است. برای ارزیابی اقتصادی در ابتدا با توجه به طرح اختلاط بتن مورد مطالعه در دو سناریو که جزئیات آن پیش‌تر در جدول ۱-۵۱ آورده شده است، بر اساس فهرست بهای مصالح ساختمانی در سال ۹۶ به محاسبه ی هزینه‌های دو سناریو در سال مبدأ که تنها شامل هزینه‌ی مورد نیاز برای تولید یک متر مکعب بتن با طرح اختلاط مورد نظر است، پرداخته خواهد شد. در گام بعدی به منظور محاسبه‌ی هزینه‌ها در پایان عمر مفید بتن، هزینه‌های مربوط به تخریب، حمل و دفن نخاله و تولید مجدد بتن به هزینه‌ی به دست آمده در دوره‌ی قبل افزوده می‌گردد. این روند در پایان هر دوره از عمر مفید سازه تا پایان عمر بهره‌برداری ۵۰ ساله تکرار خواهد شد و

هزینه‌ی نهایی به‌عنوان هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سناریو در نظر گرفته خواهد شد. نتایج ارزیابی اقتصادی دو سناریوی مورد مطالعه در جدول ۱-۵۲ آورده شده است:

جدول ۱-۵۰- طرح مورد اختلاط در دو سناریو [۱۳۹].

مقدار آب (kg/m ^۳)	مقدار سنگدانه (kg/m ^۳)	مقدار نانوسیلیس (kg/m ^۳)	مقدار سیمان (kg/m ^۳)	سیمان/آب	کد طرح	
۱۸۰	۱۷۰۳	-	۴۰۰	۰/۴۵	بتن متداول	سناریو اول
۱۸۰	۱۶۹۶	۶	۳۹۴	۰/۴۵	بتن حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس	سناریو دوم

جدول ۱-۵۱- نتایج ارزیابی اقتصادی سناریوها [۱۳۹]

در پایان بهره‌برداری	سال مبدأ	
۱۷۹۱۲۳	۴۷۱۵۰	هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سناریوی اول (تومان)
۱۹۸۳۳۷	۸۸۹۹۳	هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سناریوی دوم (تومان)
۱۰ درصد	۸۸- درصد	درصد کاهش هزینه‌ها

بنابر نتایج ارزیابی اقتصادی، با توجه به قیمت بالای نانوسیلیس، هزینه‌ی یک متر مکعب بتن حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس در سال مبدأ در مقایسه با بتن متعارف به میزان ۸۸ درصد افزایش نشان داد که تولید آن در کوتاه مدت توجیه پذیر نمی‌باشد. این در حالی است که با انجام ارزیابی اقتصادی یک متر مکعب بتن حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس در بلندمدت، هزینه‌ی چرخه‌ی عمر آن در مقایسه با یک مترمکعب بتن متعارف به میزان ۱۰ درصد کاهش یافت.

۱-۳-۱-۶ اکسید گرافن

اکسید گرافن می‌تواند به‌عنوان ماده افزودنی جایگزین سیمان شود. نتایج ارزیابی اقتصادی اکسید گرافن در شرکت-های سامانه فناوران دانشگاه و مهرگان شیمی نشان‌دهنده آن است که این محصول در وزن ۵-۲۰ گرم و به قیمت ۷۶۰-۲۲۰ هزار تومان موجود است. مشخصات ماده ارائه شده توسط شرکت‌های نام برده در جدول ۱-۵۲ گزارش شده است.

جدول ۱-۵۲- مشخصات ماده ارائه شده توسط شرکت‌های سامانه فناوران دانشگاه و مهرگان شیمی

درجه خلوص	ضخامت	لایه‌ها	قطر	میزان مقاومت
۹۹ درصد	۳/۷-۴ نانومتر	۱۰-۶ لایه	۵۰-۱۰ میکرون	

pH	COA	رنگ	سطح مخصوص	دانسیته
۷-۷/۷ در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد	C معادل ۹۲/۷ و O کمتر از ۷/۳ درصد	زرد قهوه‌ای تا سیاه	۳۰۰-۱۰۰ g/m ^۲	۲۰ g/cm ^۲ در ۱ درجه سانتی‌گراد

همان‌طور که در جدول ۱-۵۳ آورده شده است، شرکت ایران تجارت نماینده انحصاری شرکت‌های نانوشل^۱ آمریکا، نانوگرافن ترکیه، HWNANO چین و هند بوده و ارائه‌کننده اکسید گرافن از معتبرترین شرکت‌ها می‌باشد.

جدول ۱-۵۳- نتایج ارزیابی اقتصادی اکسید گرافن موجود در شرکت ایران تجارت

محصول شرکت	کشور	وزن (گرم)	هزینه (تومان)
نانوشل	آمریکا	۱۰	۴۰۰۰۰
US-Research	آمریکا	۱۰	۳۴۰۰۰
XG-Sciences	آمریکا	۱۰	۳۵۰۰۰
Sigma-Aldrich	آمریکا	۱۰	۳۴۰۰۰
HWNANO	چین	۱۰۰	۴۰۰۰۰

گرافن «ماده جادویی» قرن ۲۱ نامیده می‌شود. ماده‌ای سخت‌تر از الماس، رساناتر از مس، انعطاف‌پذیر و با شفافیتی بالا که می‌تواند به بسیاری از عرصه‌های علم و فناوری نفوذ کند. شرکت پیشروان فناوری آذر پودر ایرانیان^۲ با بهره‌گیری از محققین و متخصصین برجسته داخلی و بین‌المللی روشی منحصر به فرد برای تولید انبوه و ارزان قیمت گرافن با کیفیت بالا ارائه نموده است. شرکت API ارائه‌کننده GO احیاشده با مشخصات ارائه شده در جدول ۱-۵۴. هم‌چنین قیمت‌های گزارش شده GO احیاشده توسط این شرکت در وزن‌های مختلف از این محصول در جدول ۱-۵۵ آورده شده است.

جدول ۱-۵۴- مشخصات GO ارائه شده توسط شرکت پیشروان فناوری

رنگ	ضخامت ورقه‌ها	ابعاد ورقه‌ها	نسبت C به O	میزان ناخالصی‌ها
سیاه	۳ nm >	۴۴ μm >	۸	۷۰ ppm >

جدول ۱-۵۵- لیست قیمت GO ارائه شده توسط شرکت پیشروان فناوری

وزن (گرم)	۱	۵	۱۰	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
قیمت (تومان)	۳۷۰۰۰۰	۱۶۵۰۰۰۰	۲۶۰۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰۰	۱۸۵۰۰۰۰۰۰

^۱ Nanoshel

^۲ Azar Powder Iranian (API)

شرکت دانشگاهی نانو مواد گستران پارس^۱ متشکل از اساتید و دانش‌آموختگان دانشگاهی توانسته طیف گسترده‌ای از محصولات گرافنی شامل اکسید گرافن (GO)، اکسید گرافن احیا شده (RGO)، نانو گرافن‌های صفحه‌ای (GNP)، گرافن ناخالص شده (N-doped) را در مجموعه تحقیقات فناوری‌های نوین دانشگاه علم و صنعت تولید نماید. همچنین اولین شرکت برخاسته از دانشگاه در زمینه تولید و فروش گرافن در کشور ایران می‌باشد. فهرستی از قیمت‌های GO ارائه شده توسط شرکت NAMAGO در جدول ۵۵-۱ آورده شده است.

پژوهشگران کشورمان در دانشگاه تبریز موفق به ابداع روشی برای تولید گرافن در مقیاسی کاملاً صنعتی شده‌اند که قیمت محصول نهائی را تا ۹۸ درصد کاهش می‌دهد. در حال حاضر اکسید گرافن احیاء شده پر مصرف‌ترین شکل گرافن است که باوجود تفاوت‌های ساختاری، در بسیاری از موارد بجای گرافن مورد استفاده قرار می‌گیرد و حتی در برخی موارد نظیر جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی بر گرافن ارجحیت دارد. با توجه به کاربردهای متعدد و گسترده‌ی گرافن، تحقیقات فراوانی در زمینه تولید این ماده به روش‌های مختلف انجام شده، اما باوجود پیشرفت‌های حاصل، تا پیش از این، روشی کاملاً صنعتی ابداع نشده بود که قیمت ۱۶۹ دلار به ازای هر گرم گرافن شاهدهی بر این مدعا است. اما حال به کمک روش توسعه داده شده در کشورمان علاوه بر کاهش هزینه‌ی تولید به زیر ۳ دلار در هر گرم، زمان تولید نیز از چندین روز به چند ساعت تقلیل یافته است. نتایج این تحقیق در نشریه Scientific Reports منتشر شده و خلاصه‌ای از مطالب آن در ادامه برای آشنائی آورده شده است.

جدول ۵۶-۱ فهرستی از قیمت‌های GO ارائه شده توسط شرکت NAMAGO

نوع گرافن	غلظت	قیمت (تومان)
پودر گرافن	۱ گرم	۶۰۰۰۰۰
اکسید گرافن تک لایه	۱ گرم بر لیتر (۵۰۰ سی‌سی)	۳۰۰۰۰۰
اکسید گرافن تک لایه	۱ گرم بر لیتر (۱۰۰ سی‌سی)	۱۰۰۰۰۰
کلوئید اکسید گرافن	۱ گرم بر لیتر (۱۰۰۰ سی‌سی)	۵۰۰۰۰۰
کلوئید اکسید چندلایه	۱ گرم بر لیتر (۵۰۰ سی‌سی)	۱۰۰۰۰۰

در سال‌های اخیر گرافن به عنوان آلوتروپی از کربن با خواصی استثنائی نظیر سطح ویژه‌ی بسیار زیاد (۲۶۰۰ مترمربع بر گرم)، خواص مکانیکی مطلوب (ماژول ینگی برابر با یک تراپاسکال) و رسانائی الکتریکی و حرارتی بالا توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است. در همین راستا تلاش‌های گسترده‌ای برای استفاده از گرافن در زمینه‌های متنوعی نظیر ذخیره سازی هیدروژن، پیل‌های سوختی، ابرخازن‌ها، باتری‌ها، سلول‌های خورشیدی، کامپوزیت‌های پلیمری و... صورت پذیرفته است. تاکنون روش‌های متعددی برای تولید گرافن توسعه داده شده‌اند که بطور کلی به دودسته‌ی پائین به بالا و بالا به پائین قابل تفکیک

¹ Nano Material Graphene Oxide (NAMAGO)

هستند. در فرآیندهای پائین به بالا، گرافن از چینش اتم‌های کربن در کنار هم تولید می‌شود، درحالی‌که فرآیندهای بالا به پائین بر پایه تورق گرافیت استوار هستند. محصول تولید شده توسط فرآیندهای پائین به بالا معمولاً کیفیت مطلوبی دارد، اما بسیار هزینه‌بر بوده و فعلاً ظرفیت تولید اندکی دارند. در طرف مقابل، به دلیل هزینه‌ی کمتر و سادگی فرآیندها و تجهیزات موردنیاز و همچنین کیفیت محصول قابل قبول، روش‌های مبتنی بر تورق گرافیت با اقبال بیشتری مواجه شده‌اند.

در میان روش‌های متعدد تورق گرافیت، فرآیندهای مبتنی بر اکسیداسیون گرافیت بیشترین بازده و ظرفیت تولید را ارائه می‌کنند. در این فرآیندها گرافیت در محیط‌های اکسیدکننده بسیار شدیدی قرار می‌گیرد که در اثر آن گروه‌های عاملی متعددی (عمدتاً حاوی اکسیژن) به لایه‌های سازنده‌ی آن الحاق می‌شوند که باعث می‌شود فاصله‌ی صفحات گرافیت به شکل قابل توجهی افزایش یابد. در اثر الحاق گروه‌های عاملی یاد شده و افزایش فاصله‌ی صفحات گرافیت، نیروهای واندروالسی که لایه‌های گرافن را در ساختار گرافیت روی هم نگه داشته‌اند تضعیف شده و با صرف انرژی اندکی می‌توان این لایه‌ها را از هم جدا کرد. محصول این مرحله گرافیت اکساید است که باید پس از شستشو و جداسازی عوامل شیمیایی اکسیدکننده، توسط امواج فراصوت متورق شود که در نتیجه‌ی آن سوسپانسیونی پایدار از اکسید گرافن بدست می‌آید. در مرحله‌ی بعد با افزودن عوامل شیمیایی احیا کننده نظیر هیدرازین هیدرات به سوسپانسیون اکسید گرافن، بخش عمده‌ای از گروه‌های عاملی متصل شده به لایه‌های گرافن از آن جدا می‌شوند که به محصول این مرحله اکسید گرافن احیا شده گفته می‌شود. اکسید گرافن احیا شده در بسیاری خواص شباهت فراوانی با گرافن دارد، ولی به دلیل وجود برخی عیوب ساختاری ناشی از فرایند اکسیداسیون و باقی ماندن بخشی از گروه‌های عاملی حتی پس از احیا، اختلاف‌های قابل توجهی در مقایسه بعضی از خواص آن‌ها نظیر رسانایی الکتریکی مشاهده می‌شود. با وجود این مسائل روش‌های تورق مبتنی بر اکسیداسیون و احیا جزو اصلی‌ترین و پرکاربردترین فرایندهای تولید گرافن هستند و بخش عمده‌ای از نیاز بازار به گرافن از این مجاری تامین می‌شود.

با وجود سادگی نسبی فرایندهای تورق اکسیداسیونی گرافیت، گلوگاه‌هایی در پروسه‌ی تولید وجود دارند که ظرفیت تولید را کاهش و زمان فرایند را به شدت افزایش می‌دهند. شستشوی اکسید گرافیت و جداسازی مواد اکسیدکننده از آن شاید در ظاهر مسئله‌ی ساده‌ای به نظر برسد، اما در عمل به‌عنوان مهم‌ترین مانع بر سر راه تولید انبوه گرافن مطرح است. هرچند اتصال گروه‌های عاملی به گرافن باعث تسهیل فرایند تورق گرافیت می‌شود، اما به محصولی منجر می‌شود که شدیداً آب‌دوست است و همین مسئله باعث می‌شود تا فرایند شستشوی آن بسیار زمان‌بر شده و به تجهیزات خاصی نظیر سانتریفیوژهایی با سرعت و ظرفیت بالا نیاز باشد. روش‌های مبتنی بر فیلتراسیون نیز برای شستشوی اکسید گرافیت پاسخگو نیستند، زیرا همین گروه‌های عاملی نوعی چسبندگی بین ذرات اکسید گرافن ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود حفره‌های فیلترها به‌سرعت مسدود شوند. تأثیر فرایند شستشو در بازده تولید زمانی مشخص‌تر می‌شود که بدانیم در برخی موارد (بسته به فرایند اکسیداسیونی مورد استفاده) بیش از ۹۰ درصد زمان تولید به فرایند شستشو اختصاص داده می‌شود. علاوه بر این، سانتریفیوژهایی با سرعت چرخش بالا که توانایی جداسازی نانوذرات اکسید گرافن از آب را داشته باشند، بسیار گران قیمت هستند و ظرفیتشان به‌قدری محدود است که حتی با افزایش تعداد آن‌ها ظرفیت تولید روزانه نمی‌تواند از چند صد گرم فراتر رود. مشکل

دیگری که در تولید گرافن با استفاده از روش‌های مرسوم مطرح است، چندین مرحله‌ای بودن فرآیند تولید است، به عبارت دیگر انجام فرایندهای اکسیداسیون و احیا طی دو واکنش مجزا علاوه بر افزایش هزینه‌ها باعث طولانی شدن فرایند تولید می‌شود. اما در روش ابداع شده توسط محققان دانشگاه تبریز، پودر گرافیت در محلولی از پرمنگنات پتاسیوم و اسید سولفوریک غلیظ اکسید و در بازه‌های زمانی مشخصی با استفاده از امواج فراصوت متورق می‌شود. اکسیداسیون و تورق توأم باعث می‌شود تا نه تنها گرافیت بطور کامل تری اکسید شود بلکه زمان فرایند اکسیداسیون نیز کاهش یابد. در ادامه‌ی فرایند و پیش از هرگونه اقدامی برای جداسازی مواد اکسیدکننده از اکسید گرافن، با افزودن اسکوربیک اسید، اکسید گرافن در حضور مواد اکسیدکننده احیا می‌شود. احیای اکسید گرافن به معنی جدا شدن گروه‌های عاملی و از بین رفتن آب‌دوستی اکسید گرافن است که شستشوی آن را به شکل قابل توجهی تسهیل می‌کند. مزیت دیگر این روش در ادغام دو فرآیند جداگانه‌ی اکسیداسیون و احیا است که باعث می‌شود زمان فرایند کلی کاهش یابد. علاوه بر این میزان مصرف آب نیز به دلیل حذف یک مرحله شستشو کاهش می‌یابد. به دلیل آب‌گریز بودن اکسید گرافن احیا شده می‌توان از روش‌های متنوعی برای شستشوی آن استفاده کرد اما صنعتی‌ترین روش که کمترین میزان مصرف آب را نیز به همراه دارد، استفاده از روش‌های فیلتراسیون است، زیرا با حذف گروه‌های عاملی، دیگر حفره‌های فیلتر به‌وسیله‌ی ذرات گرافن مسدود نمی‌شوند و بدین ترتیب با حذف گلوگاه‌های یاد شده، فرآیند تولید قابلیت صنعتی سازی پیدا می‌کند.

محصولات شرکت تدبیرگران کیمیا پیش‌تاز که با برند گرافنیکس عرضه می‌گردد، ساخت ایران بوده و از لحاظ کیفیت مشابه نمونه‌های آمریکایی و اروپایی می‌باشد. این شرکت با تجربه‌ای ۵ ساله در عرصه تولید اکسید گرافن و مشتقات آن و همچنین استفاده از آن در نانوکامپوزیت‌های مختلف با کاربردهای متنوع، توانسته است محصولاتی باکیفیت تضمینی و قابل رقابت با نمونه‌های خارجی به مشتریان متعدد ارائه دهد. لازم به توضیح است که اکسید گرافن قابل عرضه توسط این شرکت به‌صورت پراکنده‌سازی آبی، پراکنده‌سازی آلی و یا پودر می‌باشد. در حالت پراکنده‌سازی، حداقل ۸۰ درصد اکسید گرافن به‌صورت تک لایه است. اندازه صفحات بین ۵ تا ۱۰۰ میکرون بوده که میانگین آن در حدود ۲۰ تا ۳۰ میکرون است. فهرستی از قیمت‌های GO ارائه شده توسط شرکت تدبیرگران کیمیا پیش‌تاز در جدول ۱-۵۷ آورده شده است.

جدول ۱-۵۷- فهرستی از قیمت‌های GO ارائه شده توسط شرکت تدبیرگران کیمیا

میزان (گرم)	قیمت هر گرم (هزار تومان)
۰.۱	۱,۰۰۰
۰.۵	۵۴۰
۱	۴۰۰
۵	۳۵۰
۱۰	۳۰۰

از آنجاکه میزان GO جهت استفاده در بتن، به میزان ۰/۱-۰/۳ درصد وزنی سیمان برای افزایش خواص

خوردگی و مکانیکی موردنیاز است، بنابراین با توجه به مطالب ارائه شده در بالا استفاده از آن توجیه‌پذیر می‌باشد.

۱-۳-۱-۷ نانولوله‌های کربنی

(نانولوله کربنی) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد حاصل از نانوتکنولوژی تأثیر چشمگیری بر توسعه فناوری نانو در رشته‌های مختلف این فن آوری نوین داشته است. پژوهشگاه صنعت نفت در راستای برآورده کردن نیاز محققان به نانولوله‌های کربنی تک دیواره و چند دیواره، نانولوله‌های تولیدی خود با خلوص مختلف را در اختیار متقاضیان قرار می‌دهد. مشخصات محصولات، قیمت فروش این نانولوله‌های کربنی در جدول ۵۸-۱ زیر گزارش شده است.

جدول ۵۸-۱: قیمت فروش نانولوله‌های کربنی در پژوهشگاه صنعت نفت

CARBON NANOTUBES	PURITY	Catalyst residue	PRICE (\$/g)
SWNT (1-2nm)	90%<	5%>	60
SWNT(1-2nm)	70%<	5%>	30
DWNT (1-4nm)	90%<	5%>	60
DWNT (1-4nm)	70%<	5%>	30
MWNT (<10nm)	95%<	2%>	10
MWNT (>10nm)	95%<	2%>	5

شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان، پودر کربن نانو تیوپ کربنی عامل دار را ارائه می‌نماید. این شرکت نانومواد ارائه شده را تضمین ۱۰۰ درصد می‌نماید بطوریکه در صورت مشاهده کمترین ضعف در کیفیت نانو ماده، تمامی مبلغ آن به خریدار برگردانده خواهد شد. هم‌چنین به همراه نانو ماده ارائه شده، نتایج آنالیز موجود از جمله: عکس SEM، TEM و آنالیز X-Ray و ... را در اختیار خریدار قرار می‌دهد. مشخصات CNTs ارائه شده توسط این شرکت در جدول ۵۹-۱ آورده شده است.

جدول ۵۹-۱- مشخصات CNTs ارائه شده توسط شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان

نوع عامل	قطر داخلی	قطر بیرونی	درصد خلوص
کربوکسیل	۲-۱ nm	۲-۱ nm	۹۹ درصد >
هیدروکسیل	۰/۱-۸/۶ nm	۰/۱-۸/۶ nm	۹۹ درصد >

نتایج ارزیابی اقتصادی CNTs در شرکت مهرگان شیمی نشان‌دهنده آن است که این محصول در وزن ۵-۱۰۰ گرم و به قیمت ۱۵۰۰-۱۳۰ هزار تومان موجود است. مشخصات ماده ارائه شده توسط این شرکت در جدول ۶۰-۱ گزارش شده است.

جدول ۶۰-۱- مشخصات ماده ارائه شده توسط شرکت مهرگان شیمی

درجه خلوص	قطر داخلی	قطر خارجی	طول	اندازه ذرات در حالت خاکستر
۹۵ درصد >	۵-۱۰ نانومتر	۲۰-۳۰ نانومتر	۱۰-۳۰ میکرون	کمتر از ۱/۵ درصد وزنی
دانسیتته فله	دانسیتته نمونه	رنگ	هدایت الکتریکی	روش تولید
۰/۲۲ g/cm ^۳	۱/۲ g/cm ^۳	سیاه	> ۱۰۰ s/cm	CVD

همان‌طور که در جدول ۶۱-۱ آورده شده است، شرکت نانوتکنولوژی ارائه کننده انواع CNTs با خلوص ۹۵ درصد در وزن ۵۰۰-۱۰ گرم و به قیمت ۱۹۵۰-۱۱۳ هزار تومان می‌باشد. نانو تکنولوژی نامی آشنا بین پژوهشگران حوزه‌ی نانو کشور است که در این سال‌ها به‌صورت خودجوش و داوطلبانه و بدون حمایت هیچ سازمان و نهادی، علاوه بر ارائه محصولات و خدمات حوزه‌ی نانو با بهترین کیفیت و قیمت مناسب، به حمایت‌های مالی و معنوی از این پژوهشگران، و همچنین به برخی فعالیت‌های ترویجی در سطح مدارس و دانشگاه‌ها نیز پرداخته است.

جدول ۶۱-۱- مشخصات انواع نانولوله‌های کربنی چند دیواره ارائه شده توسط شرکت نانوتکنولوژی

قطر خارجی	۲۰-۱۰ nm	۲۰-۱۰ nm	۳۰-۱۰ nm	۳۰-۱۰ nm	۴۰-۲۰ nm
طول	۱۵-۵ μm	۲-۱ μm	۱۵-۵ μm	۲-۱ μm	۱۵-۵ μm
سطح مخصوص	۳۰۰-۴۰ m ^۲ /g				

جمع بندی فصل اول

در این گزارش تاثیر استفاده از افزودنی‌های مختلف بر خواص بتن موردبررسی قرار گرفت که نتایج را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

- خاکستر بادی

حضور خاکستر بادی در طرح اختلاط بتن باعث کاهش درصد مصرف آب و بهبود توزیع دانه‌بندی بتن می‌گردد. یک بتن معمولی نمی‌تواند توزیع دانه‌بندی خوبی داشته باشد. درواقع خاکستر بادی پرکننده‌ی خوبی در سایزهای ۱ تا ۴۵ میکرون در ذرات بتن است و به علت دانسیته ی کمتر و حجم بیشتر در واحد حجم بسته به کیفیت آن و مقدار سیمان جایگزین شده تا ۲۰ درصد می‌تواند میزان آب را کاهش دهد. می‌توان گفت که خاکستر

بادی به‌عنوان یک فوق روان کننده نیز عمل می‌کند. ذرات ریز خاکستر بادی بارهای منفی (سطحی) سیمان را جذب کرده و از پدیده‌ی فلوکولاسیون (کلوخه‌ای شدن ضعیف) جلوگیری می‌کند بنابراین ذرات سیمان به‌طور مؤثری در بین ذرات بتن پراکنده شده و مولکول‌های آب را جذب می‌کنند. این بدین معنی است که سیستم جهت دستیابی به پایداری بیشتر به میزان آب کمتری نیاز دارد. شکل کروی و سطح صاف ذرات خاکستر بادی باعث کاهش اصطکاک ذرات بتن و در نتیجه سهولت در روانی آن می‌شود. ترک خوردگی بتن یکی از معضلات عمده در کسورهای جهان می‌باشد و یکی از عوامل تخریب و تغییر شکل ساختار بتن است. به‌طور واضح کاهش مقدار آب در بتن می‌تواند این مشکل را به میزان قابل توجهی کاهش دهد یکی از رهیافت‌ها استفاده از خاکستر بادی به‌جای سیمان در بتن است. استفاده از خاکستر بادی موجب کاهش گرمازایی و در نتیجه کاهش سرعت هیدراسیون می‌شود و همچنین موجب دیر کنندگی نسبی می‌شود که احتمالاً به دلیل آزاد کردن یون سولفات از سطح ذرات خاکستر بادی می‌باشد. همچنین جایگزینی سیمان با خاکستر بادی یکی از راه‌حل‌های مناسب در مقابل واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها است.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی خواص مکانیکی و خوردگی بتن‌های حاوی خاکستر بادی، استفاده ۱۰ تا ۲۰ درصدی خاکستر بادی می‌تواند بدون افت خواص مکانیکی سبب افزایش مقاومت به نفوذ یون کلراید شود و خوردگی آرماتورهای فولادی بتن مسلح را کاهش دهد. همچنین قیمت مناسب خاکستر بادی در مقایسه با سیمان، جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی را از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر می‌کند.

- دوده‌ی سیلیس (دوده سیلیس)

ذرات ریز دوده‌ی سیلیس اتصال بهتری بین سیمان و آگرگات ایجاد می‌کنند و فاصله بین آگرگات و سیمان را کاهش می‌دهند که نتیجه آن تشکیل ساختاری متراکم‌تر با تخلخل کمتر است. در رابطه با فواید استفاده از دوده‌ی سیلیسی در طرح اختلاط بتن می‌توان به‌به مواردی از قبیل دستیابی به استحکام اولیه بالاتر، دستیابی به استحکام کششی، خمشی و مدول الاستیک بالاتر در طی روزهای اولیه، افزایش چقرمگی، کاهش نفوذپذیری یون کلراید و آب و افزایش مقاومت الکتریکی بتن اشاره کرد. هرچند که استفاده از دوده‌ی سیلیس اثرات مثبتی بر خواص مکانیکی و خوردگی بتن دارد اما به‌کارگیری دوده‌ی سیلیس در بتن محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. در صورتی که مقدار دوده‌ی سیلیس از ۱۰ درصد بیشتر شود استفاده از فوق روان کننده الزامی می‌باشد. بهبود خواص مکانیکی بتن حاوی دوده‌ی سیلیس در حالتی حاصل می‌شود که مقدار بهینه‌ای از دوده‌ی سیلیس جایگزین سیمان شود. در صورتی که مقدار دوده‌ی سیلیس از این مقدار بهینه بیشتر و کمتر شود خواص مکانیکی افت می‌کند. حتی در مواردی مشاهده شده که استفاده از دوده‌ی سیلیس باعث می‌شود تا بتن نسبت به بتن فاقد دوده‌ی سیلیس خواص مکانیکی ضعیف‌تری ارائه دهد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته این مقدار بهینه در حدود ۱۰ درصدوزنی سیمان است. هرچند که در چند ماه اولیه وجود دوده‌ی سیلیس در ترکیب بتن افزایش استحکام را به دنبال دارد، اما در درازمدت حتی نسبت به بتن بدون دوده‌ی سیلیس استحکام ضعیف‌تری ارائه می‌دهد و هرچه

مقدار دوده‌ی سیلیس بیشتر باشد مقدار افت خواص بیشتر خواهد بود. کند شدن افزایش استحکام بتن حاوی دوده‌ی سیلیس با گذشت زمان به تشکیل یک‌لایه ممانعت کننده نسبت داده شده که این لایه از واکنش بیشتر دوده‌ی سیلیس با کلسیم هیدروکسید جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، استفاده از دوده‌ی سیلیس کاهش الاستیسته و افزایش انقباض خودبه‌خودی را در پی خواهد داشت. دوده‌ی سیلیس مقدار pH را در تخلخل‌های بتن کاهش می‌دهد، اما مقدار کاهش pH به حدی نیست که بتواند تأثیر مخربی بر لایه پسیو روی سطح آرماتور ایجاد کند. در حالتی که از سرباره فولاد، دولومیت، کوارتزیت و سنگ‌آهک در بتن حاوی دوده‌ی سیلیس استفاده شود، بهترین خواص مکانیکی را ترکیب دوده‌ی سیلیس و سرباره ارائه می‌دهد. بررسی تأثیر آگرگات‌های مختلف (گابرو، بازالت، کوارتزیت، سنگ‌آهک و ماسه) در بتن حاوی ۱۵ درصد دوده‌ی سیلیس نشان داد بیشترین استحکام را بتن حاوی گابرو ارائه می‌دهد.

در رابطه با به کارگیری دوده‌ی سیلیس در ترکیب بتن، بهبود خواص مکانیکی در کوتاه مدت بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه استفاده از دوده‌ی سیلیس در بلند مدت باعث افت خواص مکانیکی می‌شود، این ترکیب باید به‌صورت مخلوط با افزودنی‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین باید توجه داشت که مقدار مورد استفاده نباید از ۱۵ درصد وزنی سیمان بیشتر شود، چراکه باعث افت خواص می‌شود.

- سرباره گرانوله

سرباره در محیط قلیایی با آب و سپس با هیدروکسید وارد واکنش می‌شود و از طریق واکنش‌های پوزولانی ژل C-S-H تولید می‌کند. تولید مقدار بیشتری ژل C-S-H باعث ایجاد ساختاری متراکم‌تر با تخلخل کمتر می‌شود و افزایش سرباره گرانولی با افزایش تولید C-S-H باعث می‌شود ساختار متراکم‌تر شود. ایجاد ساختار متراکم با تخلخل کمتر نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد که این امر افزایش مقاومت الکتریکی بتن را سبب می‌شود. هرچند استفاده از سرباره مقدار تخلخل کلی بتن را افزایش می‌دهد اما سبب کوچک شدن اندازه حفرات و عدم پیوستگی حفرات می‌شود که این امر نفوذ آب و یون کلراید به درون بتن را کاهش می‌دهد. همچنین، وجود سرباره که گرمای هیدراسیون را کاهش می‌دهد باعث می‌شود تا ترک‌های حرارتی کمتری در ساختار بتن ایجاد شود. تأثیر مثبت سرباره بر افزایش استحکام سازه‌های بتنی تقریباً پس از ۴۰ روز مشخص می‌شود و قبل از آن بتن بدون سرباره استحکام بالاتری ارائه می‌دهد؛ اما استحکام خمشی بتن‌های حاوی سرباره هم در کوتاه‌مدت و هم در بلندمدت از استحکام خمشی بتن‌های بدون سرباره بیشتر است. وجود سرباره گرانولی در بتن تأثیر چشمگیری بر انقباض بتن ندارد اما میزان خزش بتن را کم می‌کند. همچنین بتن حاوی سرباره نسبت به بتن بدون سرباره مقاومت به سایش بیشتری نشان می‌دهد. جایگزینی ۴۰ درصدی سرباره گرانوله شده تأثیر چشمگیری بر سرعت خوردگی آرماتور در بتن نداشته، اما جایگزینی ۶۰ درصدی سرباره گرانوله شد افت چشمگیر سرعت خوردگی را در پی داشته است.

با توجه به اینکه افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی بدون افت خواص مکانیکی مد نظر است، به کارگیری ۵۰ درصدی سرباره گرانوله شده در ترکیب بتن پیشنهاد می‌شود. علاوه بر بهبود پایداری بتن در محیط‌های کلرایدی، استفاده از سرباره گرانوله در ترکیب بتن به دلیل قیمت پایین آن از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است.

- متاکائولن

استفاده از متاکائولن باعث بهبود استحکام اولیه و همچنین استحکام بلندمدت بتن می‌شود. حضور متاکائولن در ترکیب بتن با ایجاد تغییراتی در ساختار بتن باعث کاهش نفوذپذیری آب به بتن می‌شود. متاکائولن به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان آب بیشتری جذب می‌کنند و این باعث کاهش روانی بتن تازه می‌شود که نیاز به فوق روان کننده‌ها را افزایش می‌دهد. افزایش قابل ملاحظه مقاومت الکتریکی بتن حاوی متاکائولن، سرعت گسترش خوردگی را در سازه‌های بتنی که در معرض نفوذ یون کلر هستند را تا حدود زیادی کاهش خواهد داد.

با توجه به اینکه تأثیر متاکائولن بر خواص مکانیکی بتن در بلندمدت (بیش از یک سال) مورد مطالعه قرار نگرفته و همچنین کم بودن میزان تولید آن در کشور، توصیه می‌شود برای امکان‌سنجی استفاده از متاکائولن در بتن مطالعات و آزمایش‌های بلندمدتی صورت گیرد.

همان‌طور که در فصل اول بدان اشاره شد استفاده ترکیبی از افزودنی‌ها می‌تواند نتایج مطلوبی در رابطه با بهبود خواص مکانیکی و خوردگی بتن ارائه دهد. در این حالت تأثیر متقابل هر یک از پوزولان‌ها می‌تواند ضعف‌های آن‌ها را برطرف کند. بنابراین توصیه می‌شود که اثر ترکیبی افزودنی‌ها مورد مطالعه قرار گیرد.

با بررسی جنبه‌های اقتصادی و عملی توصیه می‌شود که مطالعه بر روی تأثیر سرباره گرانوله و خاکستر بادی در اولویت قرار گیرد. به کارگیری متاکائولن در ترکیب بتن نیز نیازمند مطالعه بیشتر و دقیق‌تر است تا اثرات بلندمدت و همچنین تأثیر آن بر خواص خوردگی بتن مشخص گردد. با توجه به اینکه در بلندمدت، اثرات مطلوب استفاده از دوده سیلیس بر خواص مکانیکی از بین می‌رود و با توجه به اینکه بهبود مقاومت به خوردگی اولویت پژوهش حاضر است، بررسی اثر سیلیکافیوم بر خواص بتن از اولویت‌ها نخواهد بود.

- استفاده از نانو مواد در بتن

در نهایت استفاده از مواد نانو این نتایج را به دنبال داشت:

- با افزودن نانو ذرات رس به بتن خود تراکم، میزان استحکام فشاری بتن افزایش، نفوذپذیری آب در بتن کاهش و مقاومت بتن حاصله در بتن نفوذ کلرایدها کاهش می‌یابد.

- با افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن خود تراکم، میزان استحکام فشاری، کششی و خمشی افزایش، زمان‌گیری بتن کاهش و نفوذپذیری آب داخل بتن کاهش خواهد یافت.
 - با اضافه کردن نانو ذرات اکسید آهن به بتن خود تراکم، استحکام فشاری، خمشی و قابلیت خودترمیم بتن افزایش پیدا می‌کند.
 - با کاربرد نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود تراکم، استحکام فشاری و خمشی بتن افزایش، سرعت هیدراسیون افزایش و زمان‌گیری بتن کاهش می‌یابد.
 - با افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به بتن خود تراکم، مدول الاستیسیته بتن به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته ولی بر روی استحکام فشاری بتن اثری ندارد.
 - با به کار بردن نانولوله‌های کربنی و نانو الیاف‌های کربنی در بتن خود تراکم، مقاومت در برابر گسترش ترک در بتن بیشتر می‌گردد.
- امروزه، مواد بر پایه اکسید گرافن و کاربردهای آن به دلیل خواص منحصر به فرد GO که می‌تواند به‌طور مؤثر خواص مواد کامپوزیتی را بهبود بخشد، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. GO قابلیت ترکیب شدن با آب را دارا است؛ بنابراین از آن می‌توان به‌عنوان ماده مورد استفاده در بتن استفاده کرد. هدف از به‌کارگیری اکسید گرافن، پراکندگی خوب آن داخل محلول است و گروه عاملی حاوی اکسیژن بر روی سطح آن به واکنش اکسید گرافن با سیمان کمک می‌کند. همچنین محققین با اندازه‌گیری ضریب نفوذ حرارتی نشان دادند که واکنش بین گرافن و سیمان می‌تواند منجر به کاهش اتلاف گرمای بتن در طی فرآیند هیدراسیون شود که در نتیجه آن ترک‌های حرارتی در نمونه کاهش می‌یابد. بر اساس مطالب ذکر شده فواید استفاده از GO در ترکیب بتن شامل موارد زیر خواهد بود:
- بهبود خواص مکانیکی و ریزساختار مواد سیمانی در حضور GO
 - دستیابی به استحکام کششی، خمشی و مدول الاستیک بالاتر
 - افزایش چقرمگی بتن
 - کاهش نفوذپذیری یون کلراید و آب
 - افزایش استحکام و دوام بتن
- نانولوله‌ها یکی از مستحکم‌ترین مواد به شمار می‌روند. این موضوع، کاربردی بودن نانولوله‌های کربنی را به‌خوبی روشن می‌سازد. مزیت اصلی استفاده از نانولوله‌ها، افزایش سختی و استحکام می‌باشد که می‌توان ناشی از رفتار الاستیک و انعطاف‌پذیر نانولوله کربنی دانست. استفاده از CNTs در ترکیب بتن این نتایج زیر را به دنبال داشت:
- درواقع وجود CNTs مانند پل‌هایی روی حفرات و ترک‌های موجود در بسته کامپوزیت بتنی است که مانع رشد و گسترش آن‌ها می‌شود.

- افزودن نانو لوله کربنی به بتن سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای استحکام فشاری و خمشی آن می‌شود به‌طوری‌که استحکام فشاری کامپوزیت بتنی در حضور نانولوله کربنی بیش از ۳۰ درصد و مقاومت خمشی آن بیش از ۱۳ درصد، نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی است.
 - اضافه کردن نانولوله کربنی به صورت پراکنده به کامپوزیت بتنی، خلل و فرج کامپوزیت بتنی را کاهش می‌دهد و باعث ایجاد کامپوزیت بتنی فشرده‌تر و پیوسته‌تر می‌شود.
 - نانولوله کربنی اصلاح شده در ماتریس نانو کامپوزیت بتنی، با ایجاد سطح تماس بیشتر و در نتیجه سطح انتقال نیروی بیشتر سبب پیوند بهتر نانو لوله با ماتریس بتنی می‌شود. و از پیشرفت نقص‌ها و شکاف‌های توده جلوگیری می‌کند.
 - نانولوله‌ها درون ماتریس بتن، روی حفره‌ها و ترک‌ها را همانند پل‌هایی می‌پوشانند و با انتقال نیرو از یک‌سوی این حفره‌ها و ترک‌ها به‌سوی دیگر آن از رشد آن‌ها جلوگیری می‌کند. با این کار انتقال بار اطراف ترک‌ها و حفره‌ها بهبود می‌یابد و بتن نانو کامپوزیتی حاصل، دارای استحکام بسیار بالایی نسبت به نمونه بتن معمولی خواهد بود.
 - افزودن CNTs حتی در حضور مقادیر خیلی کم منجر به کاهش ضریب جذب آب و هم‌چنین ضریب نفوذ آب به داخل ملات سیمان می‌شود.
- با حضور نانولوله‌های کربنی در بتن، نیروهای کششی به بتن وارد نشده و منجر به ترک‌خوردگی و درنهایت تخریب بتن نمی‌شود. بتن‌های معمولی مقاومت کمتری نسبت به بتن‌های مسلح با نانولوله کربنی چند جداره دارند.

۲ فصل دوم: انجام آزمون‌های مختلف شامل آزمون‌های غوطه وری، خوردگی، فیزیکی و مکانیکی، آنالیز شیمیایی و ریزساختاری بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی بتنی تهیه شده از مواد افزودنی معدنی منتخب مرحله اول

۱-۲ مقدمه

بتن یکی از با قدمت‌ترین مصالح ساختمانی است و جزء پرمصرف‌ترین مواد صنعتی به شمار می‌آید. این ماده مهم صنعتی در ساخت سازه‌های مقاومی همچون سدها، اسکله‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها و سکوه‌های نفتی ساحلی نقش مهمی دارد. ترکیب بتن شامل شن (سنگدانه با اندازه بالای ۴ میلی متر)، ماسه (سنگدانه با اندازه زیر ۴ میلی متر)، سیمان، آب و مواد افزودنی از قبیل مواد پوزولانی و روان ساز می‌شود. یکی از مهمترین نقاط ضعف بتن‌ها استحکام کششی و خمشی پایین است که به منظور حل این مشکل از آرماتورهای فولادی در تولید آن‌ها استفاده می‌شود. آن‌چه کاربرد بتن را تا این حد گسترده می‌کند این است که می‌توان با اصلاح ترکیب آن طول عمر، خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی آن را بهبود بخشید [۱۳۸، ۱۳۹]. یکی از مسائل بسیار مهمی که در خصوص سازه‌های بتنی دریایی با آن مواجه هستیم، نفوذ یون مهاجم کلر در بتن هاست که باعث سرعت گرفتن وقوع خوردگی آرماتور فولادی در سازه‌های بتنی مسلح می‌گردد [۱۴۰-۱۴۴]. خوردگی آرماتورهای فولادی همواره یکی از دلایل اصلی کاهش دوام عمر سازه‌های بتنی به شمار می‌آید. طبق مطالعات قبلی هزینه ناشی از خوردگی آرماتورهای فولادی در سال ۱۹۹۰ در ایالات متحده آمریکا بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ بلیون دلار در هر سال گزارش شده است. بنابراین با توجه به هزینه‌های اقتصادی بسیار بالا، توجه به موضوع خوردگی در سازه‌های بتنی به منظور کاهش میزان خسارت وارده اهمیت بسیار زیادی دارد.

تلاش‌های زیادی برای کاهش خسارات خوردگی در سازه‌های بتنی صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به حفاظت کاتدی سازه‌ها، پوشش‌دهی، بازدارنده‌ها و افزودن مواد جایگزین سیمان اشاره کرد. خوردگی آرماتورهای فولادی به خاطر نفوذ یون کلر اصلی‌ترین عامل در کاهش دوام و طول عمر سازه‌های بتنی در تمام دنیا شناخته شده است [۱۴۴]. تغییرات دما و رطوبت محیط هم از عوامل دیگری هستند که می‌توانند باعث تحمیل چرخه انقباض انبساط و هیدراتاسیون کم آبی شود که منجر به شروع و انتشار ترک در بتن می‌شود. این تغییرات باعث وقوع خوردگی در آرماتورهای فولادی شده که ظرفیت تحمل بار سازه بتنی را کاهش می‌دهند.

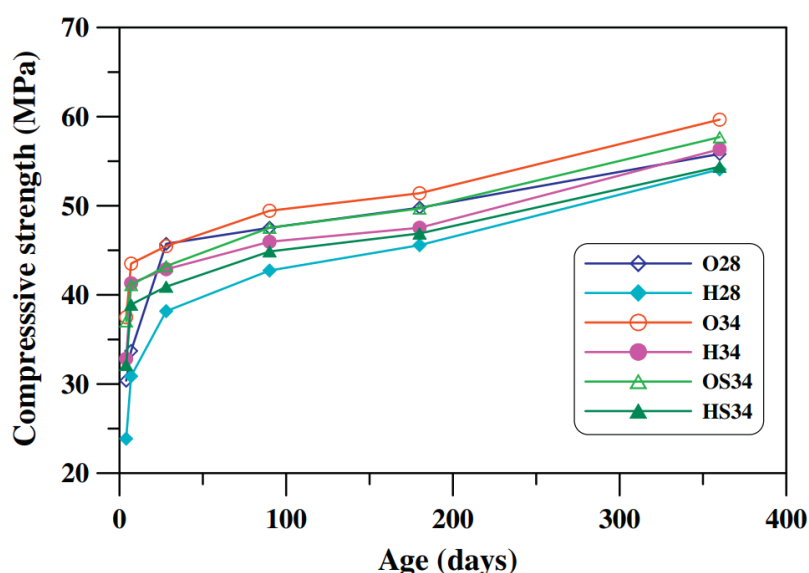
در یک محیط کلریدی نفوذ کلر هم از طریق نفوذ کلر از محیط به داخل بتن از طریق منافذ و تخلخل‌های پر شده با محلول صورت می‌گیرد و هم ممکن است از قبل درون سیمان یا آبی که بتن با آن ساخته شده آلوده به کلر باشد. مقدار کل کلر در بتن را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد؛ کلر پیوند داده با زمینه و کلر آزاد که با زمینه پیوندی تشکیل نداده است. از بین این دو یون‌های کلری که با زمینه سیمانی بتن پیوندی تشکیل نداده و می‌توانند آزادانه از طریق منافذ و تخلخل‌های درونی سیمان به داخل بتن پیشروی کنند و به لایه پسیو و غیرفعال بر روی آرماتور فولادی آسیب بزنند، نقش اصلی را در تخریب سازه‌های بتنی دارند [۱۴۵، ۱۴۶]. بنابراین میزان طولنایی زمینه سیمانی در به دام انداختن کلر و برقراری پیوند با آن یک عامل بسیار مهم در دوام و طول عمر سازه‌های بتنی دریایی می‌باشد [۱۴۷، ۱۴۸].

میزان نفوذ یون کلر به درون بتن تا حد بسیار زیادی به ساختار متخلخل بتن مربوط می‌شود. میزان تخلخل‌هایی نهایی یک نمونه بتنی به مشخصات مواد اولیه مصرفی و پارامترهای تولیدی مانند نسبت آب به سیمان، میزان جایگزینی سیمان با سایر مواد افزودنی و درجه هیدراتاسیون (عمل‌آوری) بستگی دارد [۱۴۹]. افزودنی‌های بسیار زیادی تا کنون توسط محققین به منظور کاهش نفوذ کلر در بتن از طریق به دام انداختن آن در زمینه سیمانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱۴، ۱۵۰-۱۵۳]. این مواد پوزولانی در حضور آهک قابلیت اتصال دهنده‌گی خوبی از خود نشان می‌دهند و پیوندهای قوی را با زمینه سیمانی برقرار می‌کنند و باعث تشکیل

محصول هیدراسیون، مشابه آنچه که در سیمان پرتلند اتفاق می‌افتد، می‌شوند. در سیمانهای حاوی مواد افزودنی پوزولانی، آهک مورد نیاز برای واکنش با پوزولان، توسط هیدراسیون سیمان پرتلند تامین می‌شود. خمیر سیمان سخت شده (در مقایسه با آنچه که از سیمان پرتلند معمولی بدست می‌آید) دارای میزان آهک کمتر و مقدار بالاتر $(H-S-C)$ ترکیبات ژلهای سیلیکات هیدروکسی ۱۲ کلسیم هیدراته) است. عموماً مقدار پوزولان افزوده شده به سیمان پرتلند، از ۲۰٪-۴۰٪ میزان کل سیمان تغییر می‌کند؛ که باید با میزان آهک تولیدی از محصول هیدراسیون سیمان، تنظیم شود. مقدار اضافی پوزولان واکنش نمی‌دهد و مثل یک افزودنی خنثی خواهد بود.

۲-۱-۱ تأثیر پوزولان سرباره گرانوله بر خواص گوناگون بتن

سرباره گرانوله یکی از محصولات جانبی تولید آهن در کوره بلند است که با آب و بخار کوئنچ شده و پس از خشک کردن به ذرات پودری ریز تبدیل می‌شوند [۱۵۴]. محققین متعددی گزارش کرده اند که افزودن سرباره گرانوله استحکام چسبندگی را بهبود می‌بخشد ولی سرعت فرآیند عمل آوری و پخت بتن را برای دستیابی به استحکام کافی طولانی‌تر می‌کند [۲۶، ۱۵۵، ۱۵۶]. شکل ۲-۱ اثر افزودن سرباره گرانوله بر مدت زمان لازم برای رسیدن بتن به استحکام کافی را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان بیشتر (مانند H_{28}) در مقایسه با نمونه‌ها بتنی بدون افزودنی (O_{34}) نیاز به زمان پخت بیشتری دارند تا به استحکامی معادل با نمونه‌های بدون پوزولان در زمان‌های پخت کمتر برسند. این عمدتاً به این خاطر است که افزودنی‌هایی همچون سرباره گرانوله باعث کند شدن سرعت واکنش‌ها در فرآیند هیدراسیون بتن می‌شوند [۲۶، ۱۵۵].



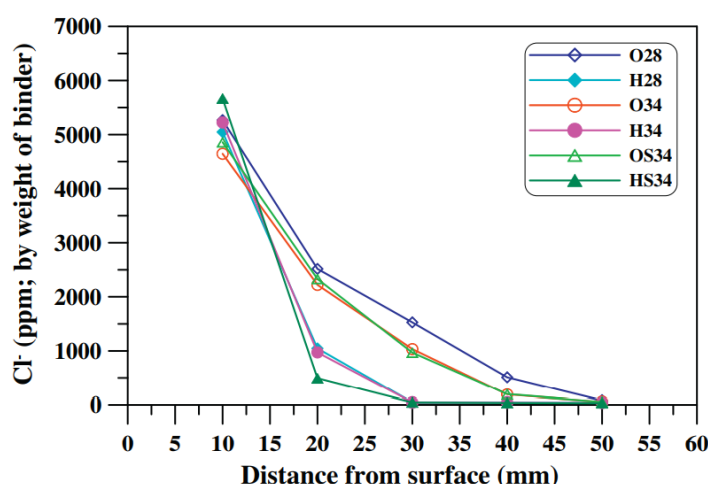
شکل ۲-۱. اثر افزودن سرباره گرانوله بر زمان پخت بتن برای دستیابی به استحکام کافی.

چن و همکارانش گزارش کرده اند که افزودن ۴۵٪ سرباره گرانوله کوره بلند به ترکیب بتن باعث کاهش نفوذ یون کلر در بتن می‌گردد (شکل ۲-۲) [۱۵۷]. دلیل این امر هم به اثر سرباره بر ساختار تخلخل‌های بتن مربوط می‌شود و هم به خاطر واکنش‌های پوزولانی است که در اثر حضور سرباره اتفاق می‌افتند و به دنبال آن یک پیوند

بسیار قوی در زمینه سیمانی برقرار شده که می‌تواند تا حد بسیار خوبی یون‌های کلر را به دام انداخته و از پیشروی آن‌ها جلوگیری کند.

افزودن سرباره گرانوله به بتن باعث می‌شود ساختار نهایی بتن بعد از فرآیند هیدراسیون و عمل‌آوری شبکه‌ای با تخلخل‌های به هم پیوسته کمتری داشته باشد (شکل ۳-۲). از آنجایی نفوذ یون‌های مهاجمی همچون کلر از طریق منافذ و تخلخل‌های ساختاری ساختاری در بتن‌ها صورت می‌گیرد، کاهش میزان این تخلخل‌های ساختاری به واسطه افزودن سرباره گرانوله منجر به کاهش تحرک و ضریب نفوذ کلر در بتن می‌گردد (شکل ۴-۲).

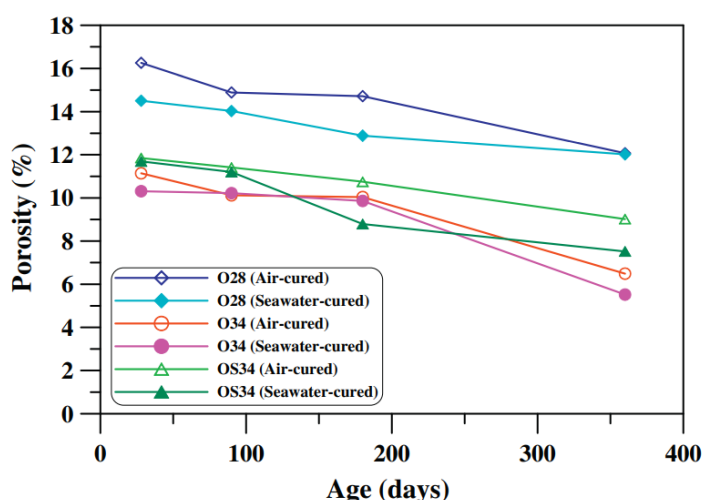
خیاط و همکارانش هم در پژوهش دیگری نشان دادند که افزایش مقدار سرباره گرانوله در محتوای سیمان باعث می‌شود مقدار هیدروالکیدی‌های ایجاد شده در ساختار بتن افزایش یابد که خود منجر به بالا رفتن توانایی زمینه سیمانی در بهدام انداختن کلر با ایجاد پیوند می‌گردد [۱۵۸]. خطیب و هیبرت هم نشان دادند که مقاومت خمشی بتن زمانی محتوای سیمانی آن با ۶۰ درصد سرباره گرانوله جایگزین شده باشد، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد اما زمانی که محتوای سرباره به بیش از ۶۰ درصد برسد خواص مکانیکی افت خواهند کرد (شکل ۲-۵ و ۲-۶) [۱۵۹].



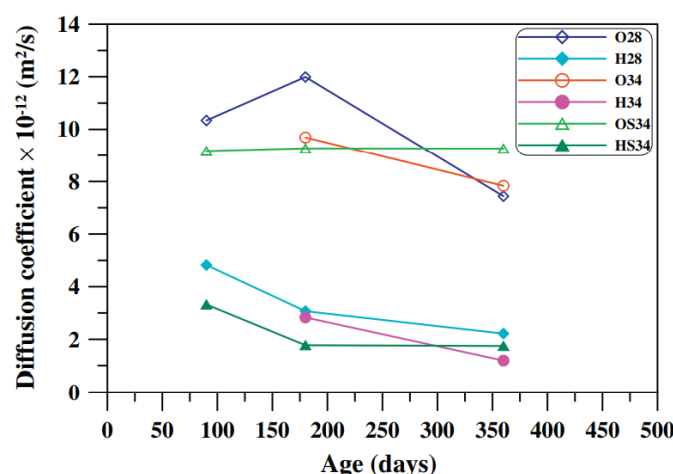
شکل ۲-۲. اثر سرباره گرانوله بر نفوذ یون کلر در نمونه‌های بتنی.

دجیان شن و همکارانش بر روی تأثیر سرباره گرانوله تا مقدار ۵۰ درصد بر میزان تنش‌های کششی باقی مانده ساختاری و تمایل بتن‌های پوزولانی به ترک خوردن در پی این تنش‌ها مطالعه کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که هم تنش‌های باقی مانده ساختاری و هم تمایل به ترک خوردن با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با سرباره گرانوله کاهش می‌یابد (شکل ۷-۲) [۱۶۰]. همچنین در بسیاری از منابع دیگر آمده است که افزودن سرباره گرانوله به بتن می‌تواند بدر پی واکنش با محصولات هیدراتاسیون باعث اصلاح ابعاد تخلخل‌های ساختاری شود که در نتیجه آن مقاومت بتن در برابر نفوذ گونه‌های مهاجم افزایش خواهد یافت [۲۶]. گسگلو و همکارانش به بررسی اثر افزودن درصدهای مختلف سرباره گرانوله شامل ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان انتقال بار در آزمون RCPT که نشان دهنده میزان نفوذ یون کلر در بتن است در بتن‌های حاوی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد سرباره از ۲۰۶۵ کولن (در بتن بدون پوزولان) به ترتیب به ۱۰۵۳، ۴۰۳ و ۲۸۲ کولن کاهش

می‌یابد که نشان دهنده بالا رفتن مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر می‌باشد [۱۶۱].



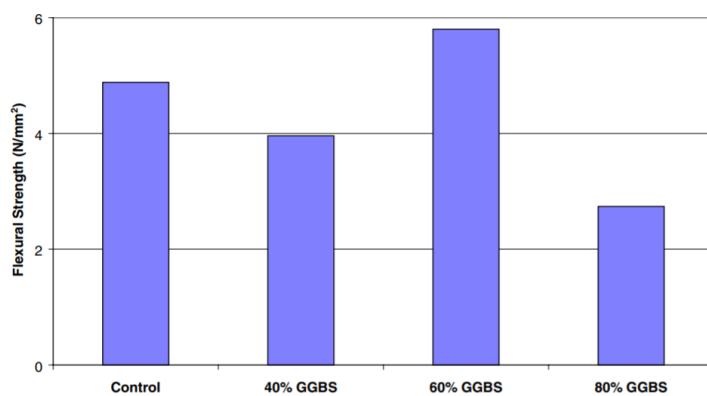
شکل ۲-۳- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر تخلخل‌های ساختاری بتن



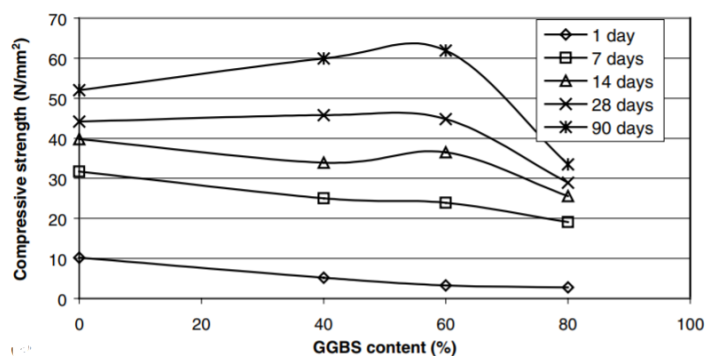
شکل ۲-۴- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر تحرک و ضریب نفوذ کلر در بتن.

در مطالعه‌ای دیگر گونیسی و همکارانش نشان دادند که بتن‌های حاوی ۵۰٪ و بیشتر سرباره گرانوله در شرایط مختلف عمل‌آوری به میزان بسیار زیادی در برابر نفوذ یون کلر مقاومت می‌کنند (شکل ۸-۲). به عنوان مثال در مقادیر ۷۰ و ۸۰ درصد جایگزینی سیمان با سرباره، بتن‌های ۹۰ روزه شار عبوری کمتر از ۱۰۰۰ کولن داشتند (برای بتن PC این مقدار ۳۷۵۰ کولن بود). این بتن‌ها را می‌توان از نظر نفوذ یون کلر بر اساس رده‌بندی استاندارد ASTM C ۱۲۰۲ در سطح عالی تعریف کرد. اصلاح ساختار منافذ و تخلخل بتن‌ها در اثر افزودن سرباره عامل اصلی کاهش شدید نفوذ یون کلر در بتن‌ها گزارش شده است [۱۶۲].

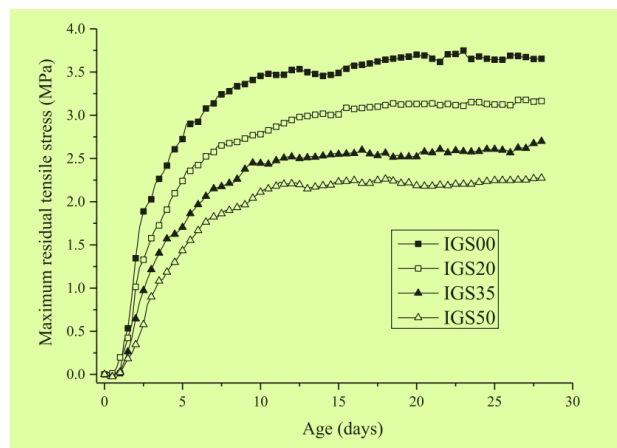
در مطالعات دیگر نشان داده شده است که در نمونه‌های بتنی حاوی ۵۰ تا ۸۰ درصد سرباره گرانوله، هدایت الکتریکی بسیار کم حتی کمتر از ۱۰۰۰ کولن خواهد بود [۱۶۲]. همچنین گزارش شده است که ضریب نفوذ کلر در زمینه بتن با جایگزینی سیمان با سرباره گرانوله کاهش می‌یابد. این کاهش برای زمانی که ۵۰ درصد از سیمان با سرباره جایگزین شده باشد چیزی در حدود ۲۹ درصد است [۱۶۳، ۱۶۴].



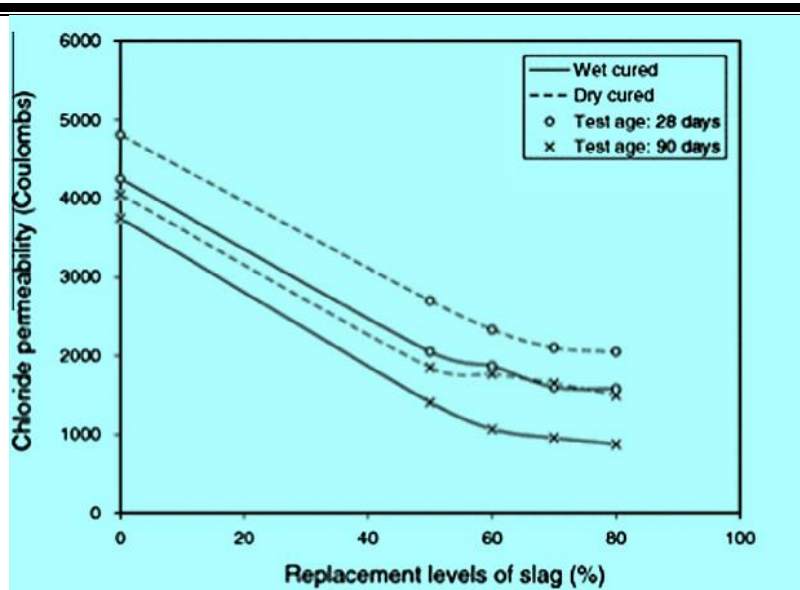
شکل ۵-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر مقاومت خمشی بتن [۱۵۹].



شکل ۶-۲- تأثیر افزودن درصدهای مختلف سرباره گرانوله بر استحکام فشاری بتن [۱۵۹].



شکل ۷-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر تنش باقیمانده در ساختار بتن [۱۶۰].



شکل ۸-۲- تأثیر افزودن سرباره گرانوله بر میزان شار عبوری یون‌ها در آزمون RCPT [۱۶۲].

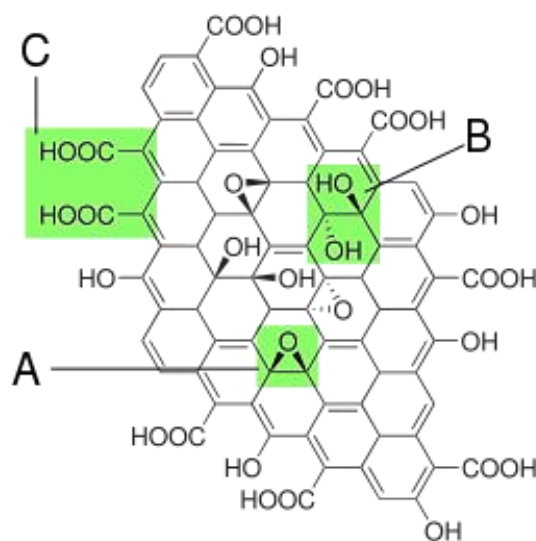
۲-۱-۲ مروری بر مطالعات صورت گرفته بر اثر اکسیدگرافن

اکسید گرافن به دلیل خاصیت آبگریزی که دارد به عنوان یکی از افزودنی‌های بتنی در غلظت‌های پایین اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱۶۵-۱۶۹]. چالشی که در استفاده از نانومواد به ویژه نانولوله‌های کربنی به عنوان افزودنی بتنی با آن روبرو هستیم، پراکندگی کم و دشوار آن‌ها در زمینه سیمانی است. اکسیدگرافن ساختاری لایه‌ای شکل شامل گروه‌های عاملی اکسیژن دار است که باعث افزایش فاصله بین صفحات آن شده و بنابراین می‌تواند در آب پراکنده شود (شکل ۹-۲).

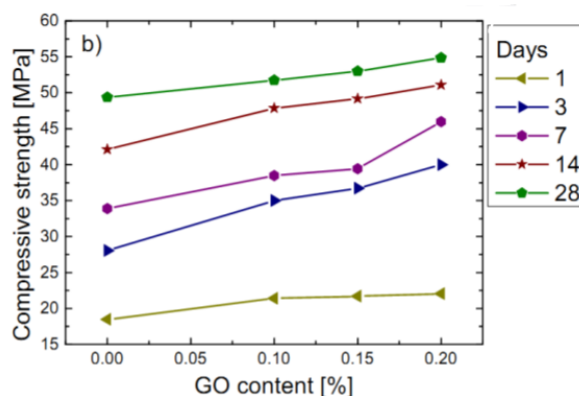
بر اساس گزارش منابع قبلی افزودن اکسید گرافن با کاهش مقدار مقدار کلینکر هیدراته نشده و افزایش کل مقدار محصولات هیدراتاسیون بر خلاف سرباره گرانوله باعث سرعت گرفتن فرآیند عمل آوری در بتن می‌گردد [۱۷۰]. علاوه بر این به دلیل انرژی سطحی زیاد اکسیدگرافن، مولکول‌های آب و یون‌هایی که در فرآیند عمل آوری بتن تولید می‌شوند، می‌توانند توسط اکسید گرافن جذب شوند که منجر به پیدایش مناطق مناسب جوانه‌زنی برای واکنش‌های هیدراتاسیون شده و بنابراین فرآیند عمل آوری بتن در حضور اکسیدگرافن راحت‌تر و سریعتر اتفاق می‌افتد [۱۶۸]. همانطور که در شکل‌های ۱۰-۲ و ۱۱-۲ نشان داده شده است افزودن اکسیدگرافن به زمینه سیمانی باعث افزایش استحکام فشاری نمونه‌های بتنی به ویژه در سنین کمتر می‌شود. بنابراین به طور کلی نقش اکسیدگرافن در بهبود استحکام بتن بیشتر در سنین پایین قابل توجه خواهد بود [۱۶۸]. یانگ و همکارانش با افزودن ۰/۱ درصد وزنی اکسیدگرافن به مخلوط سیمان نشان دادند که مقدار هیدراته شدن سیمان پس از ۲۸ روز به میزان ۱۰/۴ درصد افزایش خواهد یافت [۱۶۹].

لو و همکارانش در پژوهشی دیگر گزارش کرده‌اند که با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی ورقه‌های نانو اکسیدگرافن به سیمان استحکام فشاری و خمشی بتن پس از ۲۸ روز به مقدار ۱۰/۴ و ۱۲/۶ درصد افزایش خواهد یافت [۱۷۱]. این در حالی است که برخی محققان دیگر افزایش ۶/۷۸، ۷/۶۰ و ۹/۳۸ درصدی را به ترتیب در استحکام کششی، خمشی و فشاری بتن در اثر افزودن ۰/۰۳ درصد اکسیدگرافن به زمینه سیمانی گزارش کرده‌اند [۱۰۶]. گنگ و همکارانش نشان دادند که استحکام فشاری بتن پس از ۲۸ روز با افزودن ۰/۰۲ درصد اکسیدگرافن

به مقدار ۲۹ درصد افزایش خواهد یافت [۱۵۱]. هیوپینگ و همکارانش در مطالعه‌ای دیگر افزایشی ۲۱/۸۶ درصدی را در استحکام خمشی بتن پس از افزودن ۰/۰۳ درصد اکسیدگرافن گزارش کرده‌اند [۱۶۸]. آن‌ها همچنین نشان دادند که اکسیدگرافن تأثیر بیشتری بر استحکام خمشی داشته که نشان دهنده اثربخش بودن آن بر بهبود چقرمگی سیمان است. به عبارتی نقش کمکی اکسید گرافن در فرآیند هیدراتاسیون سیمان منجر به کاهش مقدار نهایی تخلخل‌های بتن می‌شود که منجر به افزایش استحکام و چقرمگی بتن می‌گردد. کای گو و همکارانش تأثیر افزودن ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ درصد وزنی اکسیدگرافن را بر مقاومت بتن به نفوذ یون کلر مورد بررسی قرار دادند.



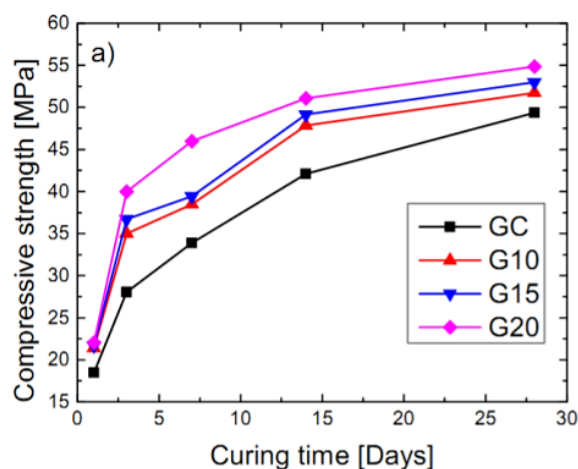
شکل ۹-۲- ساختار اکسیدگرافن.



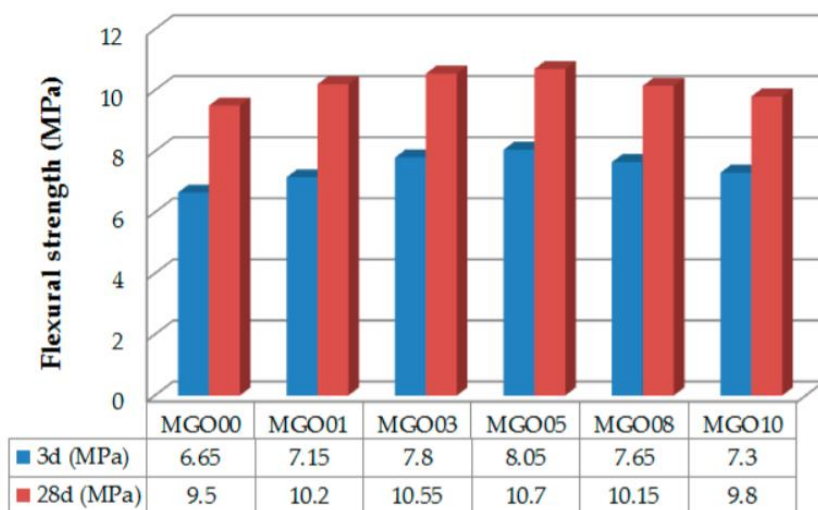
شکل ۱۰-۲- تأثیر اکسیدگرافن بر استحکام فشاری بتن زمان‌های مختلف عمل‌آوری [۱۶۸].

آن‌ها نشان دادند که مقدار افزودن بهینه اکسیدگرافن به سیمان ۰/۰۶ درصد است چرا که بالاترین مقاومت را در برابر نفوذ یون کلر از خود نشان می‌دهد [۱۶۶]. آن‌ها همچنین نشان دادند که افزایش مقدار اکسید گرافن در ساختار سیمانی بتن منجر به کاهش مقدار خلل و فرج در اثر انقباض و انقباض در فرآیند عمل‌آوری بتن می‌گردد که کاهش تنش‌های باقی‌مانده داخلی در ساختار بتن را در پس دارد. بسیاری از محققین بر این باورند که افزودن نانو موادی همچون نانو اکسیدگرافن به میزان بهینه در ساختار سیمانی بتن، رشد و پیشروی ترک‌ها را در مقیاس

نانو و میکرو کنترل می‌کند و به همین خاطر است که بهبود چشمگیری در خواص مکانیکی ایجاد می‌کند.

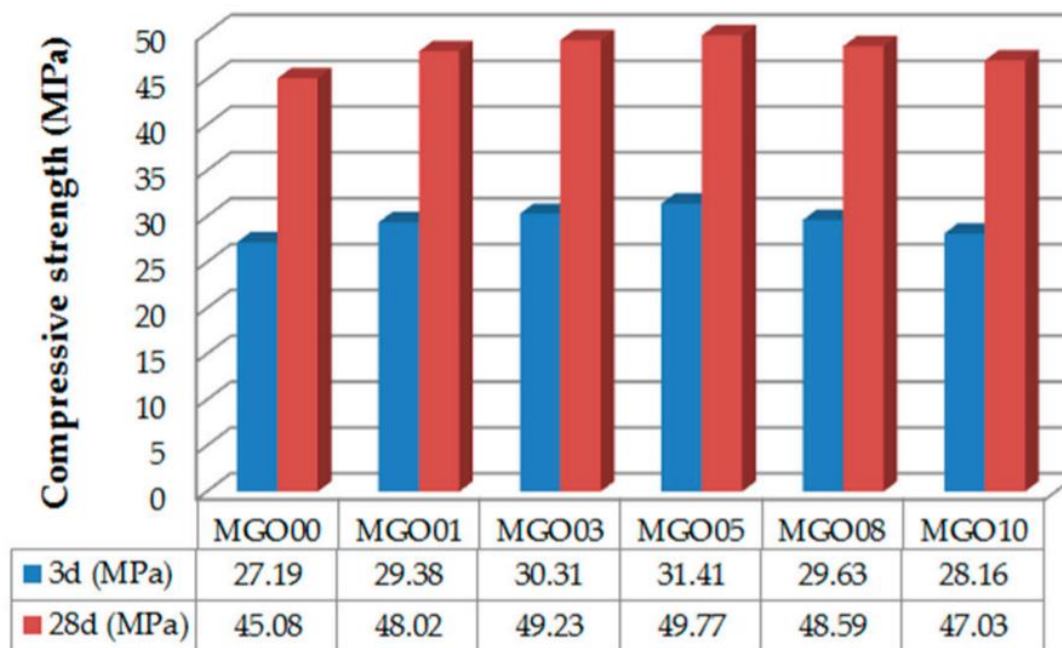


شکل ۱۱-۲- تأثیر اکسید گرافن بر زمان عمل‌آوری بتن [۱۶۸].

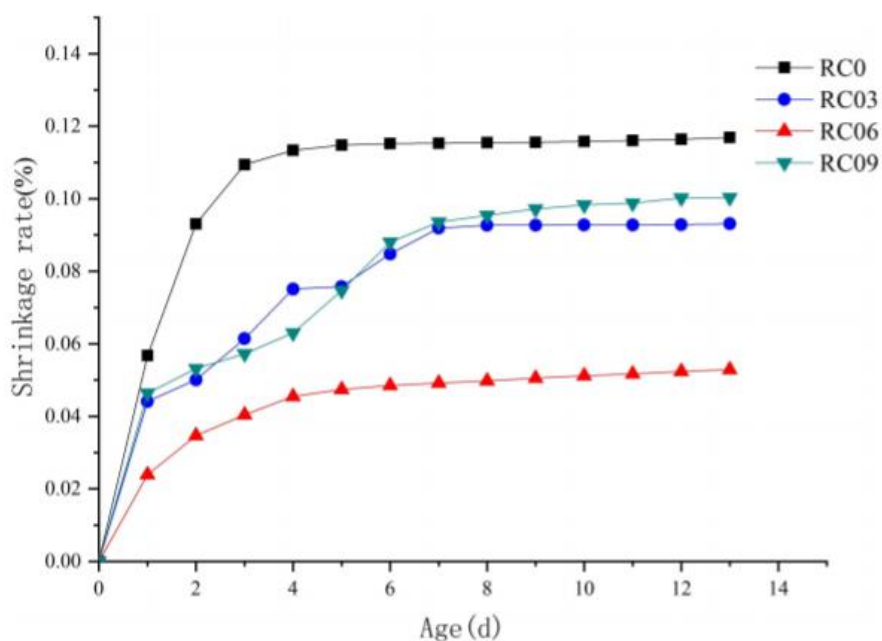


شکل ۱۲-۲- تأثیر افزودن اکسید گرافن بر مقاومت خمشی بتن [۱۷۱].

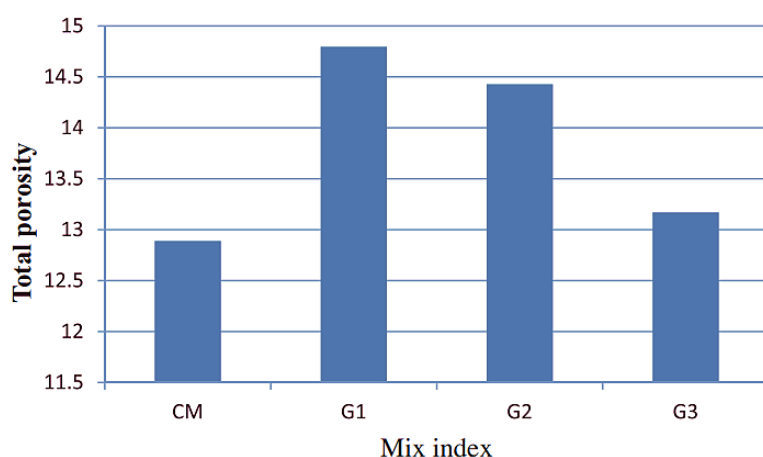
در مطالعه‌ای دیگر محققان نشان دادند که افزودن ورقه‌های نانوغرافن در ساختار سیمان تا ۱/۵ درصد می‌تواند منجر به کاهش ۸۰ درصدی ضریب نفوذ کلر گردد. با افزایش مقدار نانوغرافن در ساختار بتن تا ۱/۵ درصد میزان عمق نفوذ آب و همچنین غلظت یون کلر نفوذ کرده در بتن کاهش چشمگیری می‌یابد (شکل ۱۶-۲ و ۱۷-۱) [۱۱۴]. افزودن اکسید گرافن در بتن بر اساس منابع قبلی باعث کاهش درصد تخلخل‌های ساختاری شده و به طور کلی ساختار سیمانی حاوی اکسید گرافن ساختاری متراکم‌تر از بتن‌های معمولی خواهد بود [۱۷۲، ۱۷۳]. از طرفی در منابع دیگری گزارش شده است که تأثیر اکسید گرافن بر ساختار تخلخل‌های بتن کاملاً وابسته به مقدار آن و همچنین میزان پراکندگی آن در زمینه سیمانی و آب موجود درون بتن است (شکل ۱۵-۲) [۱۷۴]. در صورتی که مقدار اکسید گرافن درون بتن به مقداری باشد که آب موجود برای پراکنده شدن خوب در بتن را در اختیار نداشته باشند به خاطر ازدحام و برخورد صفحات با یکدیگر تخلخل نهایی در ساختار کاهش خواهد یافت.



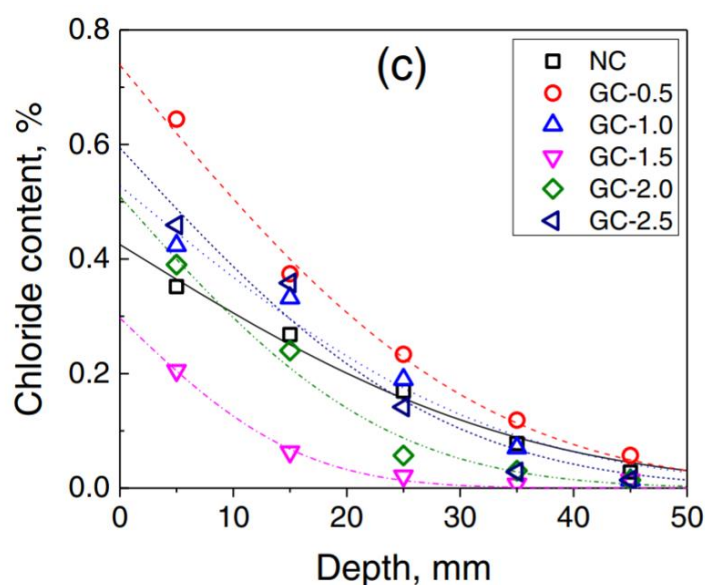
شکل ۱۳-۲- تأثیر افزودن اکسیدگرافن بر مقاومت فشاری بتن [۱۷۱].



شکل ۱۴-۲- تأثیر اکسیدگرافن بر حفرات انقباضی در عمل‌آوری بتن [۱۶۶].



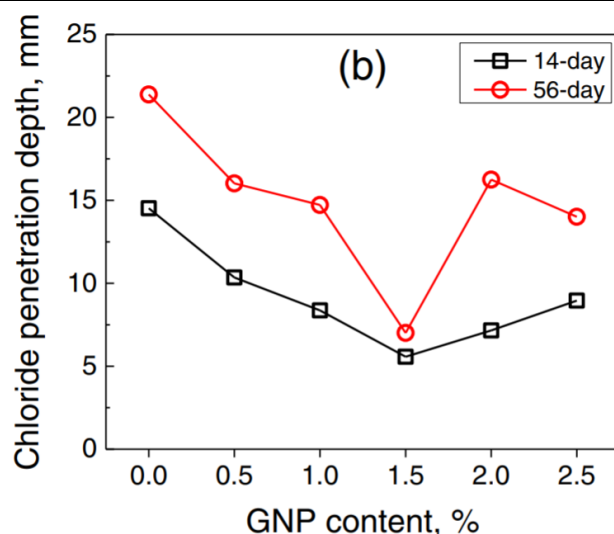
شکل ۱۵-۲- تأثیر اکسیدگرافن بر ساختار تخلخل‌های بتن، ترکیبات G1 G2 G3 به ترتیب شامل ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۶ درصد اکسیدگرافن هستند [۱۷۴].



شکل ۱۶-۲- تأثیر نانو گرافن بر غلظت یون کلر نفوذی در بتن [۱۱۴].

۳-۱-۲ وقوع خوردگی در بتن‌ها

منظور از خوردگی در بتن، خوردگی آرماتور فولادی در طی واکنش‌های الکتروشیمیایی است که طی آن آرماتور فولادی به صورت یون‌های آهن با دو بار مثبت در محیط حل می‌شود. یون‌های آهن اولیه به صورت یون‌های فرو هستند اما با ادامه فرآیند خوردگی در بتن این یون‌ها به یون‌های سه بار مثبت آهن تبدیل شده و در نتیجه آن و در اثر واکنش این یون‌های سه ظرفیتی با سایر یون‌های موجود از جمله یون‌های هیدروکسید، محصولات ناشی از آن‌ها منافذ بتن را پر کرده که باعث افزایش تنش‌های باقی مانده در بتن شده و استحکام و خواص خود را به راحتی از دست خواهد داد [۱۴۵].



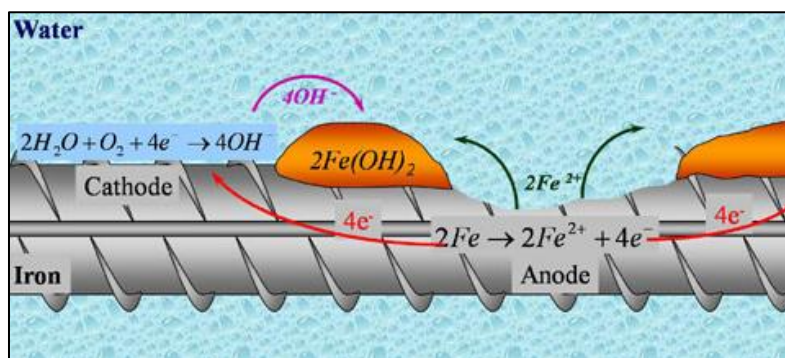
شکل ۱۷-۲- تأثیر نانوگرافن بر عمق نفوذ کلر در بتن [۱۱۴].

از آنجایی که محیط بتن یک محیط بسیار قلیایی (پی اچ ۱۲) به شمار می‌آید بر اساس دیاگرام پوربه آرماتور فولادی در چنین شرایطی شامل یک لایه روئین محافظ از اکسید آهن خواهد بود که تا حدی آرماتور را از خورده شدن حفظ می‌کند. در صورتی که غلظت یون کلر در بتن از حدی بیشتر باشد، این لایه اکسیدی دیگر نقش محافظت کننده خود را از دست خواهد داد [۱۷۵]. در چنین شرایطی آرماتور فولادی در حالت فعال خود از نظر خوردگی قرار می‌گیرد با سرعت گرفتن خوردگی در آرماتور فولادی به تدریج بتن استحکام و سایر خواص مکانیکی خود را تا حد زیادی از دست می‌دهد و نفوذ یون‌های مهاجمی مانند کلر و همچنین فرآیند کربناسیون در سطح فولاد منجر وقوع ترک در آرماتور و نهایتاً انهدام سازه بتنی می‌گردد [۱۷۶].

۴-۱-۲ مکانیزم وقوع خوردگی در نمونه‌های بتنی

خوردگی آرماتور فولادی در بتن مانند بسیاری از انواع دیگر خوردگی نتیجه مجموعه‌ای از واکنش‌های الکتروشیمیایی است. هر پیل الکتروشیمیایی خوردگی شامل واکنش آندی، واکنش کاتدی است که به در سطح فلز و به واسطه حضور یک الکترولیت که هادی یون است اتفاق می‌افتند. واکنش آندی در یک بتن انحلال آهن به صورت یون‌های با دو بار مثبت یا همان فرو است. این واکنش در نواحی آندی انجام شده و طی آن الکترون‌های آزاد شده از طریق آرماتور که رسانای الکتریکی است به مناطق کاتدی برای انجام واکنش کاتدی منتقل می‌شوند. از آنجایی که محیط درون بتن به دلیل وجود هیدروکسیدهای کلسیم و پتاسیم و سدیم طی واکنش‌های آب با سیمان یک محیط بسیار قلیایی محسوب می‌شود، واکنش اصلی کاتدی در آن واکنش احیای یون اکسیژن یا همان ORR خواهد بود که طی آن الکترون‌های تولید شده در واکنش آندی انحلال آهن توسط آب و اکسیژن مصرف شده و یون‌های هیدروکسید OH^- تولید می‌شوند (شکل ۱۸-۲) [۱۷۷]. در ادامه یون‌های هیدروکسید با یون‌های آهن وارد واکنش شده و طی آن اکسید هیدروکسید که یک لایه محافظ بر روی آهن به شمار می‌آید سطح آرماتور فولادی را می‌پوشاند. در ادامه در اثر نفوذ یون‌های کلر و همچنین گاز کربن دی‌اکسید واکنش‌های صورت می‌گیرد که این لایه محافظ صدمه دیده و بنابراین خوردگی در آرماتور رخ می‌دهد. به عنوان مثال زمانی که کلر از طرق نفوذ خود را به سطح آرماتور می‌رساند با محصولات واکنش‌های هیدراسیون ترکیب می‌شود که

طی آن نمک‌های فریدیلز یا کلروآلومینات کلسیم تشکیل می‌شوند و تخریب لایه محافظ آغاز می‌گردد. به طور کلی فرایند خوردگی آرماتور در بتن مطابق با معادله تابعی از غلظت اکسیژن، یون‌های آهن و میزان pH می‌باشد [۱۷۸].



شکل ۱۸-۲- شماتیک وقوع خوردگی در بتن‌های مسلح.

۵-۱-۲ مدل سازی نفوذ یون کلر در بتن

با توجه به نقش اساسی یون کلر در تخریب سازه‌های بتنی، درک مکانیزم نفوذ آن و ارائه مدل‌های ریاضی که بتوانند با دقت هر چه بیشتری دوام و طول عمر بتن را تخمین بزنند و همچنین نحوه پیشروی کلر در بتن را شبیه‌سازی کند بسیار کارساز خواهد بود. در این زمینه مطالعات گوناگونی صورت گرفته است و محققان مدل‌های ریاضی را جهت تخمین طول عمر بتن بر مبنای روش‌های گوناگون ارائه داده‌اند [۱۴۲، ۱۴۴، ۱۷۹-۱۸۲]. در اغلب مدل‌هایی که تاکنون توسط محققین ارائه شده‌اند، پارامترهای زمان و تغییرات غلظت کلر در بتن به منظور تخمین طول عمر بتن در زمانی که غلظت کلر به حد بحرانی می‌رسد در نظر گرفته شده است [۱۸۳]. پارامترهای حاکم در این روابط که بر زمان شروع خوردگی موثرند عبارتند از فاصله بین آرماتورهای درون بتن، ضریب نفوذ یون کلراید در بتن، غلظت کلرید سطحی و غلظت آستانه‌ای کلر می‌باشند [۱۷۹]. پیشروی یون کلر در بتن فرآیندی پیچیده است و شامل مکانیزم‌های مختلفی می‌گردد. ولی در این بین غالب‌ترین و کنترل کننده‌ترین فرآیند انتشار قانون دوم فیک (معادله ۱) می‌باشد که نیرو محرکه آن تفاوت غلظت کلر در نواحی مختلف می‌باشد [۱۸۴]. برخی اثر زمان، ترکیب، پیوند کلر با زمینه سیمانی را نیز در نظر گرفته‌اند و پارامترهای جدیدی را در محاسبات خود وارد کرده‌اند [۱۷۹، ۱۸۵، ۱۸۶]. بر اساس منابع قبلی پیشروی یون کلر در سطح بتن تاحدی به جذب موئینگی بستگی دارد، ولی پیشروی یون کلر در داخل بتن ناشی از مکانیزم نفوذ است [۱۸۷]. بنابراین در بسیاری از مطالعات قبلی روابط و مدل‌ها صرفاً با اصلاح و به کارگیری روابط حاکم در زمینه نفوذ بدست آمده‌اند. یکی از پایه‌ای‌ترین مدل‌های موجود در زمینه نفوذ یون کلر که غلظت آن را به زمان وابسته می‌کند قانون دوم فیک می‌باشد (معادله ۱) که حل متداول آن به صورت معادله ۲ محاسبه شده است [۱۸۸، ۱۸۹]. بر اساس حل صورت گرفته این معادله تنها برای نفوذ یک بعدی قابل استفاده می‌باشد و منابع بسیاری هم‌چنان از آن برای برون‌یابی داده‌های تجربی و محاسبه ضریب نفوذ یون کلر در بتن استفاده می‌کنند [۱۹۰، ۱۹۱]. در این معادله D بیانگر ضریب نفوذ، x فاصله از سطح، C غلظت کلر، C_s غلظت سطحی و t زمان سپری شده می‌باشد.

معادله ۱:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

معادله ۲:

$$C_{x,t} = C_s \left(1 - \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right)$$

در برخی مدل‌ها اثر زمان بر ضریب نفوذ بررسی شده است به عنوان مثال در مدل ارائه شده توسط ماجی و همکاران [۲۱] می‌توان تغییرات ضریب نفوذ با زمان را تخمین زد و در هر زمان آن را محاسبه نمود (معادله ۳). در این رابطه D_t ضریب انتشار کلرید در زمان t است، D_{28} ضریب انتشار کلرید در زمان ۲۸ روز و m ثابت است و وابسته به ترکیب و مواد به کار رفته در بتن می‌باشد.

معادله ۳:

$$D_t = D_{28} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m$$

در مطالعات دیگری بین کلر آزاد و کلر پیوند داده شده با زمینه تمایز قائل شده است. در مدل ارائه شده توسط مارتون و همکارانش [۱۳]، با اصلاح قانون دوم فیک در نهایت رابطه جدیدی برای ضریب نفوذ بدست آمد که در آن D_c^* ضریب نفوذ ظاهری، $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ بیانگر ظرفیت پیوند دادن کلر با زمینه که از نسبت بین غلظت کلرید پیوند داده شده C_b و غلظت کلر آزاد C_f بدست می‌آید.

معادله ۴:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c^* \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \quad D_c^* = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}}$$

در مطالعه‌ای دیگر نیز با ورود یک ترم سینتیکی-واکنشی از درجه یک در معادله فیک و اصلاح آن همزمان هم پیوند کلر با زمینه و هم نفوذ آن در نظر گرفته شده است [۲۲]. در این رابطه k سرعت واکنش پیوند کلر با زمینه، C_t غلظت کلرید کل و D_t^* ضریب انتشار کلرید کل است.

معادله ۵:

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_t^* \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) - k C_t$$

در مطالعه‌ی دیگری حل معادله ۵ توسط دانکوتر به صورت معادله ۶ بدست آمد [۲۳].

معادله ۶:

$$C_{t(x,t)} = \frac{1}{2} C \left[\exp \exp \left(-x \sqrt{\frac{k}{D}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} - \sqrt{kt} \right) + \exp \exp \left(x \sqrt{\frac{k}{D}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} + \sqrt{kt} \right) \right]$$

در خصوص حل معادله فیک برای سه بعد و محاسبه روابطی که بتوان رفتار نفوذی یون کلر در سه بعد را مورد مطالعه قرار داد منابع بسیار محدودی موجود است. از محدود مطالعات موجود می‌توان به تلاش صورت گرفته توسط ژانگ و همکاران اشاره کرد که با قرار دادن نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر بادی در محلول حاوی کلر و پودرگیری از جهات گوناگون به طور تجربی نفوذ چندبعدی کلر را مطالعه کردند [۲۴]. نتایج آن‌ها نشان داده است در در نفوذ چندبعدی به مراتب ضریب نفوذ بیشتر از نفوذ یک بعدی خواهد بود. بهره‌گیری از نرم‌افزارهای موجود در زمینه تحلیل نفوذ یون کلر نیز از راه‌های دیگری بوده است که توسط برخی از محققان به کار گرفته شده است. به عنوان مثال می‌توان به نرم افزارهای COMSOL ، life۳۶۵ و STADIUM اشاره کرد. این نرم‌افزارها با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر، واکنش‌های شیمیایی و نفوذ همزمان قادرند طول عمر نمونه‌های بتنی را تخمین بزنند. گزارش شده است که در اکثر موارد طول عمرهای پیش بینی شده مبتنی بر راه حل‌های قانون دوم فیک کمتر از طول عمری که توسط نرم افزارها پیش‌بینی شده است بوده است [۲۵]. با وجود تمامی تلاش‌های صورت گرفته ولی همواره منابع در زمینه مطالعه سه بعدی نفوذ یون کلر در بتن بسیار محدود هستند و به همین خاطر در پژوهش حاضر ارائه راه حلی بر مبنای قانون دوم فیک که شامل مختصات سه بعدی یون کلر در نمونه بتنی شود هدف قرار داده شده است. با وجود مطالعات گسترده‌ای که در زمینه افزودنی‌های سرباره گرانوله و اکسیدگرافن صورت گرفته است اما هیچ مطالعه‌ای در خصوص تأثیر همزمان این دو افزودنی بر خواص فیزیکی، مکانیکی و رفتار خوردگی بتن وجود ندارد. به همین منظور هدف این پژوهش بررسی تأثیر افزودن همزمان اکسیدگرافن و سرباره گرانوله بر خواص مکانیکی، فیزیکی، خوردگی و نفوذپذیری کلر در بتن می‌باشد. شازنده طرح اختلاط گوناگون به منظور بررسی این خواص طرح ریزی شدند و بر مبنای انجام آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت فشاری، خمشی و آزمون‌های هدایت و مقاومت الکتریکی از میان این اختلاط‌ها یک اختلاط به عنوان اختلاط بهینه با استفاده از نرم‌افزار Design Expert و به کارگیری روش بهینه‌سازی RSM انتخاب گردید. در ادامه با ساخت نمونه‌های بتنی با اختلاط بهینه، مقاومت به خوردگی و مقاومت نمونه‌ها در برابر نفوذ یون کلر به ترتیب با آزمون‌های امپدانس الکتروشیمی و آزمون نفوذ فشاری مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲ مواد و روش‌ها

۲-۲-۱ تهیه مواد اولیه لازم جهت انجام آزمون‌ها

در این پژوهش به منظور ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند نوع ۲ استفاده شده شد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی سیمان استفاده شده در جداول ۱-۲ و ۲-۲ بر اساس استاندارد ASTM C۱۰۹ ارائه گردیده

است. از دیگر مواد اصلی که در ساخت نمونه‌های بتنی کاربرد دارد شن و ماسه است که مشخصات کامل آن‌ها بر مبنای استاندارد ASTM C136 و ASTM C117 در جداول ۲-۳ و ۲-۴ ارائه شده است. مواد افزودنی که در این پژوهش به منظور جایگزینی با سیمان انتخاب شدند، سرباره گرانوله کوره بلند و اکسید گرافن بودند. سرباره گرانوله از یکی از شرکت‌های دانش‌بنیان داخلی در کشور خریداری گردید که مشخصه بلین آن ۳۵۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم بود. یکی از مشخصات مهم در سرباره گرانوله نسبت درصد اکسید کلسیم CaO به اکسید سیلیسیم SiO_۲ است که این نسبت بعد از انجام آزمون‌های XRD و XRF بر اساس استاندارد ASTM E16۲۱ ۱/۴ تعیین گردید. نتایج آنالیز فازی و عنصری سرباره گرانوله در شکل ۲۹-۲ و جدول ۱-۲ نشان داده شده است.

نانو اکسید گرافن صفحه‌ای به عنوان افزودنی ثانویه در این پژوهش از شرکت ایندیا تک خریداری شد. تصاویر FE-SEM تهیه شده از میکروساختار نمونه پودری اولیه در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است. بر اساس تصاویر تهیه شده میانگین طول صفحات اکسید گرافن بین ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر می‌باشند. ضخامت متوسط صفحات نیز در حدود ۷/۷ نانومتر تعیین شد. مورفولوژی چین خورده نانو ورق‌های اکسید گرافن در تصاویر FE-SEM تا حدودی قابل تشخیص است. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که اکسید گرافن ارائه شده شامل لایه‌های لایه ای بسیار نازک است و برخی از آنها یک ساختار سه بعدی بهم پیوسته و متعاقباً یک ساختار شبکه متخلخل ایجاد کرده اند که توسط دیگران مشاهده شده است [۱۷۴، ۱۹۲، ۱۹۳].

بر اساس مطالعات قبلی فاصله بین صفحات در ساختار کریستالی اکسید گرافن را می‌توان از الگوی پراش اشعه ایکس و با به کارگیری قانون براگ محاسبه کرد: $\lambda = 2d \sin(\theta)$ که در آن منظور از λ طول موج پرتوی اشعه ایکس است ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$)، d فاصله بین صفحات اکسید گرافیت یا صفحات مجاور اکسید گرافن کاهش یافته و θ هم زاویه پراش است. با بررسی پراش پرتو ایکس بدست آمده و با در نظر گرفتن اینکه طول موج پرتو ایکس ۱/۵۴ آنگستروم است با بکارگیری قانون براگ برای اولین پیک مشخصه‌ای که در نمودار قابل مشاهده است، فاصله بین صفحات ۶/۸ آنگستروم محاسبه گردید.

آنالیز عنصری و برخی از خواص ظاهری و فیزیکی اکسید گرافن استفاده شده در این پژوهش در جداول ۲-۶ و ۲-۷ نشان داده شده است. در اکسید گرافن تک لایه طیف پراش اشعه ایکس تنها شامل یک پیک مشخص و نوک تیز خواهد بود که نمایانگر ساختار تک کریستالی آن است اما در این پژوهش اکسید گرافن استفاده شده از نوع چندلایه و از درجه‌بندی صنعتی بوده و بنابراین پیک‌های ضعیف‌تری هم علاوه بر یک پیک بزرگ به چشم می‌خورند.

۲-۲-۲ تهیه نمونه‌های بتنی در شرایط مختلف نوع و میزان افزودنی، درجه حرارت و زمان غوطه

وری در آب ۳/۵ درصد کلرید سدیم

هدف در این پروژه ساخت بتن‌های پوزولانی با خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی بالاتر در مقایسه با بتن‌های بدون پوزولان می‌باشد. از آنجایی که تا کنون اثر همزمان دو افزودنی سرباره گرانوله و اکسید گرافن در هیچ منبعی در نظر گرفته نشده است، برای بررسی کامل اثر این دو پوزولان تمامی طرح اختلاط‌های ممکن از سه درصد مختلف اکسید گرافن و سرباره گرانوله در نظر گرفته شدند. برای انتخاب درصدهای گوناگون از اکسید گرافن و سرباره گرانوله به منابع قبلی استناد شد. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته تا به حال افزودن اکسید گرافن در بین ۰/۱ تا ۰/۱ درصد و افزودن سرباره گرانوله تا ۵۰ درصد به ملات سیمانی می‌تواند در بهبود خواص بتن موثر باشد.

جدول ۱-۲- آنالیز شیمیایی سیمان پورتلند نوع ۲ مطابق با استانداردهای ASTM C114 و ASTM C191 و زمان هیدراتاسیون مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۲.

ترکیبات اکسیدی	درصد %
SiO ₂	۲۱
Al ₂ O ₃	۴/۵
Fe ₂ O ₃	۴
CaO	۶۵/۶
MgO	۲/۳
NaO	۰/۲۵
KO	۰/۴۱
معادل قلیایی	۰/۵۲
SO ₃	۱/۲
Cl	۰/۰۲
باقیمانده نامحلول	۰/۲
3CaO.SiO ₂	۶۶/۹
2CaO.SiO ₂	۹/۸
3CaO.Al ₂ O ₃	۶/۲
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	۱۲/۲
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۰۴
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۲۲۵

جدول ۲-۲ - مقاومت فشاری ملات سیمان پرتلند نوع ۲ طبق ASTM C109.

زمان عمل‌آوری (days)	استحکام فشاری (N.mm ⁻²)
۳	۲۰/۶۰
۷	۲۳/۴۰
۲۸	۲۵/۸۶
۹۰	۳۱/۰۳

جدول ۳-۲ دانه‌بندی شن بر اساس استاندارد ASTM C106 and ASTM C117.

اندازه مش مربع (میلی متر)	۹/۵۰۰	۴/۷۵۰	۲/۳۶۰	۱/۱۸۰	۰/۶۰۰	۰/۳۰۰	۰/۱۵۰	۰/۰۷۵
شماره الک	۳/۸	۴/۰	۸/۰	۱۶/۰	۳۰/۰	۵۰/۰	۱۰۰/۰	۲۰۰/۰
درصد باقی مانده شن بر روی الک (%)	۰/۰	۹/۶	۳۵/۳	۵۸/۰	۷۵/۰	۸۴/۹	۹۵/۱	۹۷/۷

جدول ۴-۲ دانه‌بندی سنگدانه بر اساس استانداردهای ASTM C106 and ASTM C117.

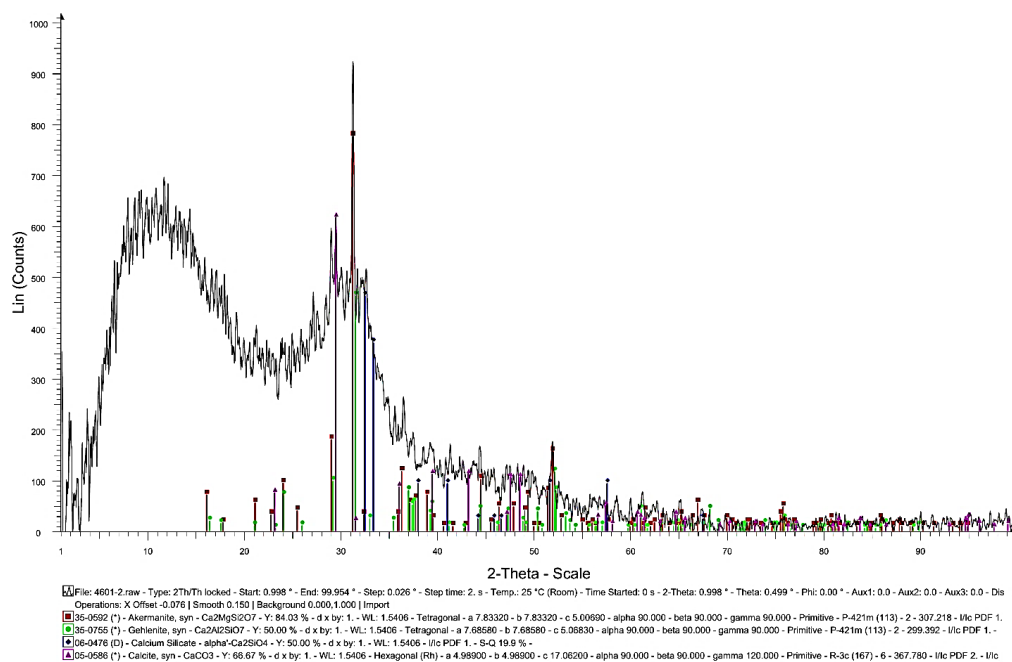
اندازه مش مربع (میلی متر)	۵۰/۰۰	۳۷/۵۰	۲۵/۰۰	۱۹/۰۰	۱۲/۵۰	۹/۵۰	۴/۷۵	۲/۳۶
شماره الک	۲	۱/۵	۱	۳/۴	۱/۲	۳/۸	۴	۸
درصد باقی مانده سنگدانه بر روی الک (%)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵/۳	۶۵/۷	۹۳/۶	۹۹/۹	۹۹/۹
درصد باقی مانده سنگدانه نخودی روی الک (%)	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳۱/۳	۶۲/۸	۹۶/۶	۹۹/۹

به منظور بررسی اولیه اثر افزودنی‌های اکسیدگرافن و سرباره گرانوله بر خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی به طور کلی ۱۶ طرح اختلاط در نظر گرفته شد که شامل سه درصد مختلف اکسید گرافن (۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد) و سه درصد مختلف سرباره گرانوله (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) بود. یکی از مشکلات اصلی در کاربرد اکسیدگرافن در نمونه‌های بتنی پراکنده سازی همگن و یکنواخت آن در زمینه سیمانی بتن است بدین منظور برای جلوگیری از وقوع این مشکل پیش از تهیه ملات سیمانی مقادیر مورد نظر اکسید گرافن برای هر اختلاط درون مقدار معینی آب تحت فرآیند پراکنده‌سازی آلتروسونیک قرار گرفت. مقادیر مورد نیاز اکسیدگرافن بر حسب گرم برای هر کدام از اختلاط‌ها به شرح زیر بودند:

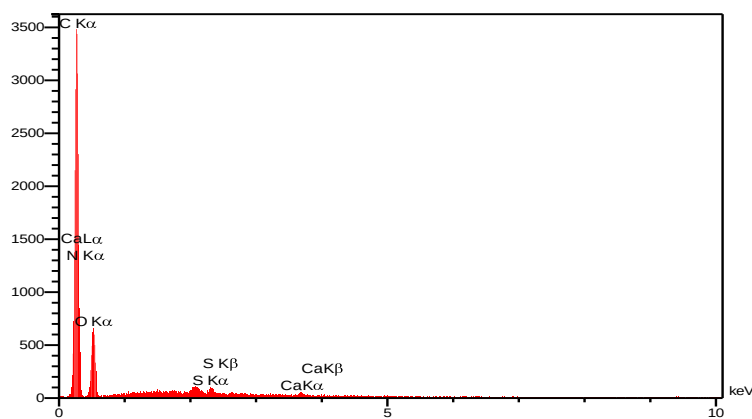
(۱) برای اختلاط شامل ۰/۰۱٪ اکسید گرافن، مقدار ۰/۸۵ گرم پودر به مقدار ۱۷۰ گرم آب و ۴۲/۵ گرم پلی کربوکسیلات به عنوان روان کننده اضافه شد.

(۲) برای اختلاط شامل ۰/۰۵٪ اکسید گرافن، مقدار ۴/۵ گرم پودر اکسیدگرافن نیاز بود که به دلیل محدودیت در ابعاد دستگاه آلتروسونیک به دو قسمت مساوی تقسیم شد و در دو مرحله هر قسمت به مقدار ۵۰/۸ گرم آب و ۲۱/۲۵ گرم پلی کربوکسیلات اضافه شد.

(۳) برای اختلاط شامل ۰/۱٪ اکسید گرافن، مقدار ۸/۵ گرم پودر اکسید گرافن در کل نیاز بود که این بار مجدداً به دلیل محدودیت حجمی دستگاه آلتروسونیک به قسمت مساوی تقسیم و در هر مرحله به مقدار ۶۹/۳ گرم آب و ۱۴/۱۶ گرم پلی کربوکسیلات اضافه شد.



شکل ۱۹-۲- آنالیز xrd سرباره گرانوله.



شکل ۲۰-۲- آنالیز عنصری EDS اکسید گرافن .

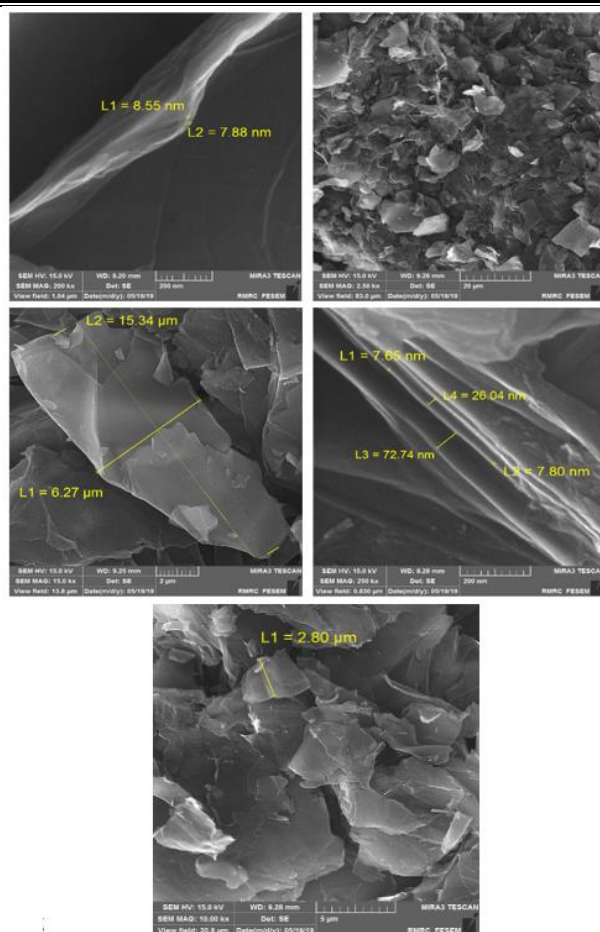
جدول ۵-۲- آنالیز xrd و XRF سرباره گرانوله

ترکیبات	%
Na ₂ O	۰/۵۵
P ₂ O ₅	۰/۰۶
CaO	۴۳/۶۴

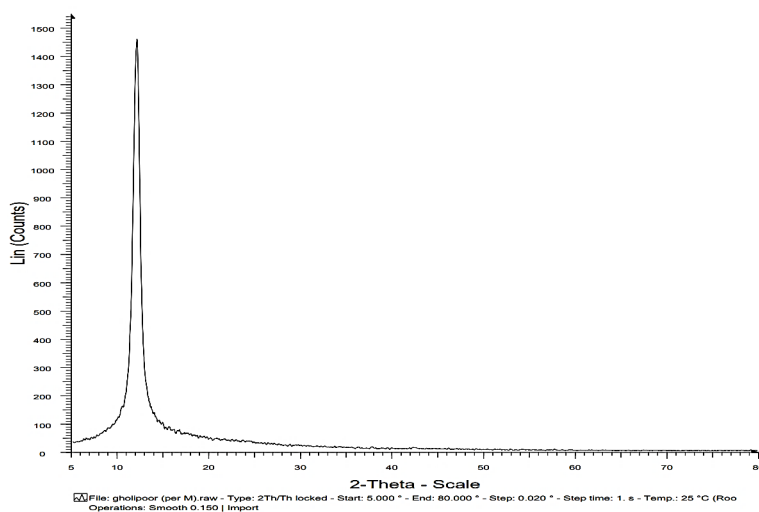
SrO	۰/۱۸
MgO	۶/۱۷
S	۱/۲۵
TiO ₂	۱/۸۱
BaO	۰/۳۲
Al ₂ O ₃	۹/۱۶
Cl	۰/۰۲
MnO	۱/۹۶
L.O.I	۱/۵۰
SiO ₂	۳۱/۱۰
K ₂ O	۱/۱۱
Fe ₂ O ₃	۱/۱۷
مجموع	۱۰۰/۰

جدول ۶-۲- آنالیز عنصری اکسید گرافن

عنصر	%
C	۷۰/۸۷
N	۰/۸۸
O	۲۷/۸۱
S	۰/۲۸
Ca	۰/۱۶



شکل ۲۱-۲- تصاویر FE-SEM نانوصفحات اکسید گرافنا ضخامت حدودی ۷/۷ نانومتر.



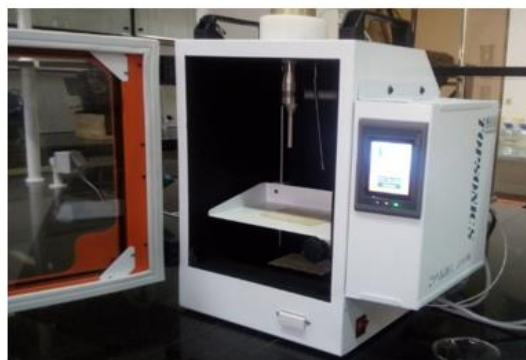
شکل ۲۲-۲- آنالیز XRD اکسید گرافن قبل از پراکنده‌سازی در آب.

جدول ۷-۲- خواص فیزیکی اکسید گرافن

رنگ	تعداد لایه ها	ضخامت (nm)	اندازه (μm)	خلوص (%)
-----	---------------	------------	-------------	----------

۹۹>	۱۶-۲	۷/۸-۵/۵	۸-۵	پودر سیاه
-----	------	---------	-----	-----------

مقادیر دقیق حجم نمونه‌ها و مواد افزودنی در تهیه اختلاط‌ها در جدول ۸-۲ نشان داده شده است. درصد وزنی اکسیدگرافن در تمامی محلول‌های ساخته شده ۰/۴ درصد ثابت نگه داشته شد زیرا در درصد وزنی‌های بالا به دلیل غلظت بالای گرافن فرآیند پراکنده سازی با مشکل مواجه خواهد شد. کل فرآیند پراکنده سازی اکسید گرافن در آب در مدت ۳۰ دقیقه با دستگاه آلتراسونیک با توان ۳۰۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز انجام شد (شکل ۲-۴). محلول‌های تهیه شده از اکسید گرافن (شکل ۲-۲۴) در هنگام اختلاط ریزی به مخلوط سیمانی اضافه شدند و به منظور ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان که ۰/۴ در نظر گرفته شد، مقدار آبی که جهت ساخت محلول‌های اکسید گرافن مورد استفاده قرار گرفت از کل آب مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های بتنی کرده و تا این مقدار آب در هنگام ساخت به ملات سیمانی اضافه شود.



شکل ۲-۲۳- دستگاه آلتراسونیک برای پراکنده‌سازی اکسیدگرافن در آب و ساخت محلول.



شکل ۲-۲۴- محلول‌های تهیه شده از اکسید گرافن به منظور افزودن در ملات سیمانی.

جدول ۸-۲- مشخصات طرح اختلاط‌های استفاده شده در ساخت نمونه‌های بتنی

Mix Design Number	GGBF S (wt%)	Lubricant by weight of cement (wt%)	GO (wt%)	Water/cement ratio	Kg of GGBFS per m3 of concrete	Kg of GO per m3 of concrete	Total sample volume (lit)	GO (g)	GGBF S (kg)
۱	۰	۰.۵	۰.۰۰	۰.۴	۰.۰	۰.۰۰۰۰	۲۰	۰.۰۰	۰.۰۰
۲	۳۰	۰.۵	۰.۰۰	۰.۴	۱۲۷.۵	۰.۰۰۰۰	۲۰	۰.۰۰	۲.۵۵
۳	۴۰	۰.۵	۰.۰۰	۰.۴	۱۷۰.۰	۰.۰۰۰۰	۲۰	۰.۰۰	۳.۴۰
۴	۵۰	۰.۵	۰.۰۰	۰.۴	۲۱۲.۵	۰.۰۰۰۰	۲۰	۰.۰۰	۴.۲۵
۵	۳۰	۰.۵	۰.۰۱	۰.۴	۱۲۷.۵	۰.۰۴۲۵	۲۰	۰.۸۵	۲.۵۵
۶	۳۰	۰.۵	۰.۰۵	۰.۴	۱۲۷.۵	۰.۲۱۲۵	۲۰	۴.۲۵	۲.۵۵
۷	۳۰	۰.۵	۰.۱۰	۰.۴	۱۲۷.۵	۰.۴۲۵۰	۲۰	۸.۵۰	۲.۵۵
۸	۴۰	۰.۵	۰.۰۱	۰.۴	۱۷۰.۰	۰.۰۴۲۵	۲۰	۰.۸۵	۳.۴۰
۹	۴۰	۰.۵	۰.۰۵	۰.۴	۱۷۰.۰	۰.۲۱۲۵	۲۰	۴.۲۵	۳.۴۰
۱۰	۴۰	۰.۵	۰.۱۰	۰.۴	۱۷۰.۰	۰.۴۲۵۰	۲۰	۸.۵۰	۳.۴۰
۱۱	۵۰	۰.۵	۰.۰۱	۰.۴	۲۱۲.۵	۰.۰۴۲۵	۲۰	۰.۸۵	۴.۲۵
۱۲	۵۰	۰.۵	۰.۰۵	۰.۴	۲۱۲.۵	۰.۲۱۲۵	۲۰	۴.۲۵	۴.۲۵
۱۳	۵۰	۰.۵	۰.۱۰	۰.۴	۲۱۲.۵	۰.۴۲۵۰	۲۰	۸.۵۰	۴.۲۵
۱۴	۰	۰.۵	۰.۰۱	۰.۴	۰.۰	۰.۰۴۲۵	۲۰	۰.۸۵	۰.۰۰
۱۵	۰	۰.۵	۰.۰۵	۰.۴	۰.۰	۰.۲۱۲۵	۲۰	۴.۲۵	۰.۰۰
۱۶	۰	۰.۵	۰.۱۰	۰.۴	۰.۰	۰.۴۲۵۰	۲۰	۸.۵۰	۰.۰۰

۱-۲-۲- نحوه بتن ریزی

جهت تهیه نمونه‌های بتنی در هر طرح اختلاط شن و ماسه به مدت دو دقیقه توسط میکسر همزده شد و بعد از آن سیمان به صورت تدریجی به مخلوط سنگدانه اضافه شد. ملات سیمان شامل سنگدانه، شن و ماسه و سرباره و اکسید گرافن اضافه شده به مدت ۳ دقیقه توسط مخلوط کن کاملاً یکدست گردید تا ملات همگنی بدست آید. سپس به صورت تدریجی محلول تهیه شده از اکسید گرافن که حاوی مقدار مورد نظر اکسید گرافن

حل شده بود به مخلوط قبلی اضافه شد. از آنجایی که برای تسهیل پراکندگی ذرات اکسیدگرافن در محلول مقدار مورد نیاز روان‌کننده نیز در مرحله محلول‌سازی به هر کدام اضافه شده بود در مرحله ساخت ملات دیگر نیازی به افزودن جداگانه روان‌ساز نبود. پس از تهیه بتن حداکثر نیم ساعت فرصت وجود دارد تا مرحله قالب ریزی انجام شود در غیر اینصورت ملات سیمانی سفت شده و نمی‌توان قالب را به راحتی پر نمود. در مدت ۱۰ دقیقه تمام قالب‌ها از ملات تهیه شده پر شده و پس از آن قالب‌ها به مدت ۳۰ ثانیه بر روی یک صفحه لرزاننده قرار داده شدند تا تمام قالب به صورت بک‌نواخت کاملاً از ملات تهیه شده پر شده و حباب‌های محبوس در نمونه‌های بتنی تماماً خارج شوند (شکل ۲۵-۲). استفاده از میز لرزاننده یکی از روش‌های بالابردن تراکم در ساخت بتن‌هاست و به طور کلی انتخاب روش تراکم مبتنی بر اسلامپ بتن است مگر این که در استانداردها بر اساس کار مورد نظر، روش تراکم مشخص شود. معمولاً بتن‌هایی با اسلامپ مساوی یا بزرگتر از ۲۵ میلی متر، میل زنی یا لرزاننده می‌شوند و بتن‌هایی با اسلامپ کمتر از ۲۵ لرزاننده می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی مراحل آماده‌سازی و ساخت نمونه‌های بتنی بر اساس استاندارد ASTM C192M-16 انجام گردید.



شکل ۲۵-۲- مراحل قالب‌ریزی نمونه‌های بتنی.

۲-۲-۲-۲ شرایط عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن دو زمان ۲۸ و ۹۰ روز برای انجام این مرحله انتخاب شدند. عمل‌آوری نمونه‌های بتنی بر اساس استاندارد ASTM C192M-16 انجام گردید و طی آن نمونه‌های ساخته شده پس از گذشت ۲۴ ساعت در دمای محیط به مدت ۲۸ و ۹۰ روز درون حمام آب و آهک با رطوبت نسبی بیش از $95 \pm 5\%$ و دمای ۲۵ درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شدند (شکل ۲۶-۲). عمل‌آوری روندی است که جهت حفظ رطوبت و حرارت بتن در مدت زمان معین بلافاصله پس از جاگذاری و پرداخت بتن انجام می‌گردد. هنگامی که سیمان پرتلند با آب مخلوط می‌شود، فعل و انفعالات شیمیایی که به آن هیدراتاسیون می‌گویند، آغاز می‌گردد. پیشرفت و وسعت این واکنش شیمیایی در دوام، مقاومت و وزن مخصوص بتن اثر می‌گذارد. معمولاً مقدار آب موجود در مخلوط‌های بتن، بیش از آب مورد نیاز برای تکمیل هیدراتاسیون است، اما به هر حال کاهش آب به علت تبخیر، باعث تأخیر و یا توقف فرآیند هیدراتاسیون می‌گردد.



شکل ۲۶-۲- عمل آوری نمونه‌های بتنی در حمام آب و آهک.

۲-۲-۳-۲- انجام آزمون‌های خوردگی شامل غوطه‌وری و الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌های بتنی

۲-۲-۳-۱- آزمون الکتروشیمیایی امپدانس

برای بررسی رفتار خوردگی در بتن‌ها آزمون‌های متفاوتی وجود دارد. اما از آنجایی که محیط بتن از نظر الکتروشیمیایی یک محیط با مقاومت بالا محسوب می‌شود در به کارگیری برخی از آزمون‌های الکتروشیمیایی سرعت یافته هم‌چون آزمون پلاریزاسیون با محدودیت روبرو هستیم. در میان آزمون‌های دیگر طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی یک ابزار بسیار قدرتمند به منظور مطالعه خوردگی مواد است و در گروه آزمون‌های غیر مخرب قرار می‌گیرد. اصول انجام آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی به این صورت است که با اعمال یک ولتاژ محرک با دامنه ثابت در گستره ی ۵-۲۰ میلی‌ولت و دریافت پاسخ جریان متناوب در فرکانس متغیر بین ۱۰mHz تا ۱۰MHz اطلاعات مفیدی در خصوص نرخ خوردگی آرماتور فولادی، مقاومت الکتریکی بتن، مقاومت الکتریکی محلول، مقاومت انتقال بار و ظرفیت دو گانه الکتریکی بدست می‌آید. نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی را معمولاً به صورت نمودارهای نایکویست، بد و بدفاز نمایش می‌دهند و برای تحلیل این نمودارها نیاز به طراحی یک مدار معادل مناسب برای سیستم است. یکی از معروف‌ترین ساده‌ترین مدارهای معادل برای بررسی رفتار خوردگی در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی مدار رندلز است اما تاکنون مدارهای معادل متنوع دیگری هم جهت بررسی رفتار خوردگی بتن‌ها با مشخصات مختلف ارائه شده‌اند.

در این پژوهش پس از انجام آزمون‌های مکانیکی، RCPT و مقاومت الکتریکی و نر با تعیین اختلاط بهینه و زمان عمل آوری مناسب‌تر، آزمون امپدانس به منظور بررسی رفتار خوردگی نمونه بتنی با اختلاط بهینه انجام گردید. جهت انجام آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌هایی استوانه‌ای با قطر ۸/۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر تهیه شدند (شکل ۲۷-۲). برای ساخت نمونه‌های مورد نظر از لوله پلیکا به عنوان قالب استفاده شد و آرماتور فولادی با استفاده از یک نگهدارنده دقیقاً در مرکز قالب استوانه‌ای ساخته شده قرار داده شد. پیش از قرار دادن آرماتور فولادی درون نمونه بتنی ارتفاع ۶ سانتی‌متر از آن به عنوان سطح انجام آزمایش انتخاب شد و مابقی آرماتور توسط رنگ اپوکسی آستری و بر روی آن نوار تفلون برای جلوگیری از نفوذ یون کلر و تخریب آرماتور آبدی گردید.

به منظور جلوگیری از نشت آب درون بتن از قالب، اطراف آن ابتدا با چسب مایع و سپس با چسب آکواریوم آبدی گردید. درون هر قالب نیز به منظور خروج راحت‌تر نمونه‌ها پیش از بتن ریزی با روغن چرب شد. پیش از

انجام آزمون امپدانس الکتروشیمیایی به اندازه ۲ سانتی متر از سطح پایین و بالایی نمونه‌ها به وسیله چسب آکواریوم آببندی شدند تا اثرات ناشی از لبه و خطای نفوذ غیر شعاعی به حداقل برسند. از آنجایی که صحت نتایج این آزمون تا حد زیادی به میزان اشباع نمونه‌های بتنی از محلول خورنده وابسته است، تمامی نمونه‌ها به مدت ۳ روز پیش از انجام آزمایش درون محلول ۳/۵ درصد آب نمک (NaCl) قرار داده شده بودند تا به حد مطلوبی از آن اشباع برسند (شکل ۲۸-۲).

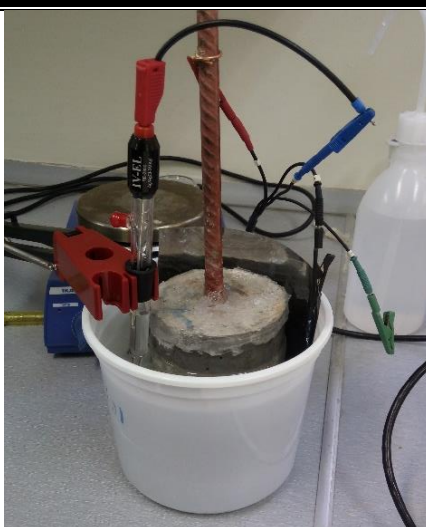
جهت ایجاد اتصال الکتریکی مطلوب با سوسماری در آزمون امپدانس انتهای میلگرد فولادی سوراخ گردید و یک سیم مسی از طریق این سوراخ به میلگرد متصل شد. برای انجام این آزمون از الکتروود نقره کلرید (Ag/AgCl) به عنوان الکتروود مرجع و از یک ورقه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به صورت نیم‌دایره اطراف نمونه بتنی به عنوان الکتروود شاهد (کمکی) استفاده شد. فاصله الکتروودهای مرجع و کمکی باید تا حد امکان نزدیک به نمونه باشند تا مقاومت اهمیک به حداقل مقدار خود برسد بنابراین ورقه‌ی فولادی و الکتروود مرجع در فاصله‌ای کمتر از ۲ سانتی‌متر از نمونه بتنی قرار داده شدند. به منظور انجام آزمون امپدانس فرکانس انجام آزمون از ۱۰Mh تا ۱MH و دامنه ولتاژ ۱۰ mV در نظر گرفته شد (شکل ۲۹-۲).



شکل ۲۷-۲- نمونه‌های بتنی تهیه شده برای آزمون امپدانس الکتروشیمیایی.



شکل ۲۸-۲- غوطه‌وری نمونه‌های بتنی پیش از انجام آزمون امپدانس به مدت ۳ روز.



شکل ۲۹-۲- نحوه انجام آزمون الکتروشیمیایی امپدانس .

۲-۲-۴ روش انجام آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت فشاری، نفوذپذیری، آزمون تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی

به منظور تعیین اختلاط بهینه از بین شانزده طرح اختلاط ساخته شده در ساخت نمونه‌های بتنی، آزمون‌های مکانیکی استحکام فشاری و استحکام خمشی و همچنین آزمون‌های سنجش مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی (RCPT) انجام شدند. در گام بعد اختلاط و زمان عمل آوری بهینه بر مبنای نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی و آزمون مقاومت و هدایت الکتریکی با استفاده از نرم افزار Design Expert تعیین گردید و نمونه‌های مورد نظر جهت انجام آزمون نفوذ فشاری با اختلاط بهینه ساخته شدند.

۱-۲-۲-۴ آزمون‌های استحکام فشاری و خمشی

آزمون استحکام فشاری به منظور سنجش استحکام فشاری نمونه‌های بتنی به کار می‌رود و در طبق آن یک نمونه‌ی مکعبی در اثر فشار محوری که به آن اعمال می‌شود از یک نقطه می‌شکند. نیرویی که باعث شکست نمونه‌ی بتنی می‌شود با تقسیم بر سطح در معرض فشار به عنوان استحکام فشاری نمونه بتنی بر حسب مگاپاسکال گزارش می‌شود. نتایج این آزمون به عنوان پایه ای برای کنترل کیفیت نسبت اجزاء بتن، نحوه‌ی مخلوط نمودن، روش بتن ریزی و مطابقت مخلوط بتن با مشخصات فنی و ارزیابی تأثیر افزودنیها میباشد. این آزمایش به طور معمول برای سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام میگردد و طبق استاندارد ASTM C۳۹ انجام می‌گیرد.

آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت غیر مستقیم استحکام کششی بتن را ارزیابی می کند. این آزمون مقاومت به شکست تیر یا دال بتنی غیر مسلح را مورد ارزیابی قرار می دهد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن به عنوان مدول از هم گسیختگی بیان می شود و با نماد MR در واحد MPa یا psi نشان داده می شود. آزمون خمش بتن را می توان هم به صورت خمش چهار نقطه ای (ASTM C۷۸) و هم به صورت خمش سه نقطه (ASTM C۲۹۳) انجام داد. درجه گسیختگی یا مقاومت خمشی بتن معمولاً ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری بتن است. مواد مخلوطی در بتن، کیفیت و اندازه‌ی سنگدانه‌ها از عوامل تأثیرگذار در میزان مقاومت خمشی بتن

هستند.

در این پژوهش آزمون‌های استحکام فشاری و استحکام خمشی بر اساس استانداردهای ASTM C۳۹M-۱۸ و ASTM C۷۸M-۱۸ بعد از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران انجام شدند (شکل ۲-۳۰ و ۲-۳۱). به منظور انجام آزمون استحکام فشاری ۳۲ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵*۱۵*۱۵ سانتی‌متر قالب ریزی شدند. برای انجام آزمون استحکام خمشی نیز نمونه‌هایی به صورت مکعب مستطیل به ابعاد ۵۰*۱۰*۱۰ ساخته شدند. آزمون استحکام فشاری با نرخ بارگذاری $5 \frac{kN}{s}$ انجام گرفت.



شکل ۲-۳۰- آزمون استحکام خمشی بر روی نمونه‌های بتنی

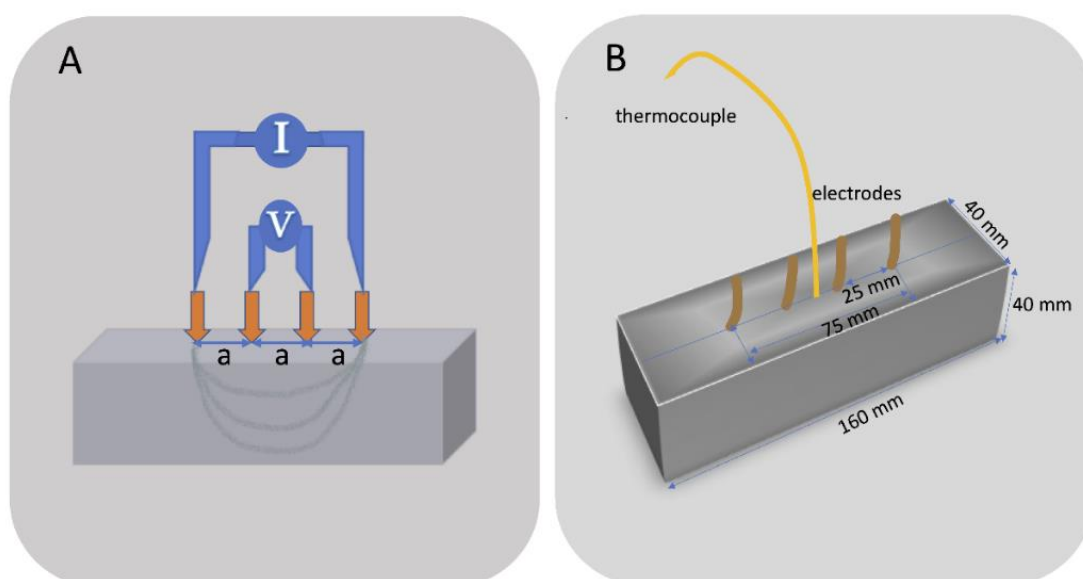


شکل ۲-۳۱- آزمون استحکام فشاری بر روی نمونه‌های بتنی

۲-۲-۴-۲ روش انجام آزمون‌های تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی

آزمون چهار نقطه‌ای و نر یک روش متداول برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی محیط‌هایی همچون خاک،

بتن و سایر محیط‌های نیمه رسانا است. برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن، این آزمون بر اساس استاندارد AASTHO TP ۹۵-۱۱ انجام گردید. در این آزمون، چهار الکتروود با فاصله برابر به صورت خطی به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بر روی سطح نمونه قرار داده می‌شوند. با اعمال جریان AC به دو الکتروود خارجی، اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود داخلی اندازه‌گیری می‌شود. یکی دیگر از روش‌های قراردادی الکتروودها در این آزمون به صورت مربعی است که در آن هر الکتروود در کنج این مربع با فاصله‌ای در ۵۰ تا ۱۰۰ میلی متر قرار می‌گیرند [۴۵، ۴۶].

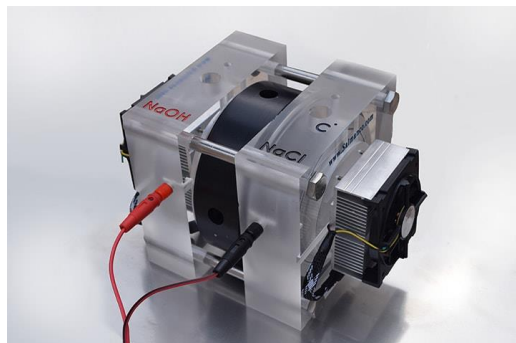


شکل ۳۲-۲- شماتیک انجام آزمون مقاومت الکتریکی و نر بر روی نمونه‌های بتنی.

۳-۲-۴-۲ آزمون سنجش هدایت الکتریکی RCPT

یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی سریع نفوذپذیری یون کلر در بتن آزمون RCPT می‌باشد. این آزمون بر مبنای استاندارد ASTM C۱۲۰۲ انجام می‌شود و در حال حاضر به عنوان یکی از روش‌های کنترل کیفی بتن در شرایط میدانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. از جمله دلایلی که این روش را تا این حد گسترده می‌کند، زمان کوتاه لازم برای انجام این آزمایش است. در این آزمایش مقدار کل جریان عبوری از یک نمونه اشباع شده بتن تحت اختلاف ولتاژ ۶۰ ولت در طی مدت ۶ ساعت اندازه‌گیری می‌شود. فرض بر این است که عبور جریان از نمونه و از طریق محلول منفذی بتن که به عنوان الکترولیت عمل می‌کند، صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه مقدار و پیوستگی منافذ نمونه‌های بتنی روی عبور یون‌ها و در نتیجه مقدار جریان عبوری تأثیرگذار می‌باشند. انتظار می‌رود که نمونه‌های متخلخل با منافذ پیوسته دارای جریان عبور زیاد و نمونه‌های با تخلخل و پیوستگی منافذ کم دارای جریان عبور کم باشند. در این پروژه مقاومت به نفوذپذیری یون کلر با استفاده از تست تسریع شده RCPT و بر اساس استاندارد ASTM C۱۲۰۲ بر روی نمونه‌هایی استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر که از نمونه‌های تخریب شده بعد از آزمون مقاومت خمشی تهیه شدند. سپس نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش داخل سل دستگاه قرار داده

شدند (شکل ۳۳-۲).



شکل ۳۳-۲- محفظه انجام آزمون نفوذ تسریع یافته یون کلر

نمونه بتنی در داخل سل از یک وجهش با محلول سود (NaOH) و از وجه دیگر با محلول آب نمک (NaCl) در تماس قرار گرفت. الکتروود طرفی از سلول که محلول سود درون آن است به قطب مثبت و الکتروود طرف دیگر سلول که محلول آب نمک درون آن است به قطب منفی دستگاه مولد جریان مستقیم متصل شد و با روشن کردن دستگاه ولتاژ ۶۰ ولت به نمونه بتنی از طریق الکتروودها اعمال گردید. جریان عبوری از نمونه طی مدت زمان ۶ ساعت ثبت گردید و در نهایت با محاسبه سطح زیر نمودار جریان-زمان، بار الکتریکی عبوری از هر نمونه بتنی (شار عبوری) محاسبه شد. این آزمون برای نمونه‌های تهیه شده از ۱۶ طرح اختلاط متفاوت بعد از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. شار عبوری از نمونه در این آزمون، متناسب با مقاومت الکتریکی نمونه است که با مقاومت در برابر نفوذ یون کلر رابطه عکس دارد. بنابراین هرچه بار الکتریکی عبوری از یک نمونه کمتر باشد، نشان دهنده مقاومت بیشتر در برابر نفوذ یون کلر است. معیار ارزیابی میزان نفوذ یون کلر در نمونه‌های بتنی بر مبنای نتایج بدست آمده از آزمون RCPT در جدول ۹-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳۴-۲- نحوه انجام آزمون تسریع یافته نفوذ یون کلر RCPT

جدول ۹-۲- معیار ارزیابی میزان بار عبوری در آزمون RCPT

میزان نفوذ یون کلر	میزان بار عبوری بر حسب کولن
زیاد	$4000 >$
متوسط	$2000 - 4000$
کم	$1000 - 2000$

۱۰۰-۱۰۰۰	خیلی کم
۱۰۰۰ <	قابل چشم پوشی

۴-۲-۴-۲ آزمون نفوذ فشاری یون کلر

به منظور بررسی رفتار نفوذ یون کلر و مقاومت نمونه بتنی ساخته شده با اختلاط بهینه از اکسید گزافن و سرباره گرانوله، آزمون نفوذ فشاری یون کلر بر اساس استاندارد انجام شد. در این آزمون محلول NaCl با غلظت ۳/۵ درصد با یک فشار مشخص در مدت زمان معینی به نمونه بتنی اعمال می‌شود. به منظور انجام این آزمون ۲۴ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵*۱۵*۱۵ با بهینه ساخته شدند. برای بررسی بیشتر و در نظر گرفتن اثرات دما، زمان و فشار اعمالی این آزمون در دو دمای مختلف ۲۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد، دو زمان متفاوت یک روز و سه روز و سه فشار متفاوت ۳، ۵ و ۷ بار انجام شد. در این آزمون نمونه بتنی بر روی یک صفحه قرار می‌گیرد که بر روی آن حفره‌ای با قطر تقریبی ۱ سانتی‌متر وجود دارد. همچنین به منظور جلوگیری از نشت محلول به خارج در زیر نمونه یک واشر پلاستیکی با قطر ۶ سانتی‌متر قرار داده شد. محلول آب نمک پس از خروج از حفره موجود در داخل فضای بین واشر پلاستیکی و نمونه بتنی جمع شده و با فشار به داخل نمونه نفوذ می‌کرد (شکل ۳۵-۲).



شکل ۳۵-۲ نحوه قرار گیری نمونه‌ها در آزمون نفوذ فشاری

۱-۴-۲-۲ یودرگیری

بعد از اتمام آزمون نفوذ فشاری برای هر نمونه به منظور تعیین غلظت یون کلر در عمق‌های مختلف از نمونه بتنی عملیات پودرگیری در شش عمق مختلف انجام شد. پودرگیری با کمک یک مته با قطر ۲/۵ سانتی‌متر انجام گردید (شکل ۳۶-۲). بر اساس منابع قبلی حداقل ۵ تا ۸ گام پودرگیری برای دستیابی به پروفیل کلر (غلظت بر حسب عمق نفوذ) ضروری است و معمولاً فاصله بین گام‌ها در هر ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۳۶-۲- پودرگیری از نمونه‌های بتنی.

۲-۲-۴-۲- تیتراسیون به منظور تعیین غلظت یون کلر

برای تهیه پودر بتن و آماده‌سازی آن از دستور ASTM C ۱۱۵۲ (یون کلر محلول در اسید) و یا ASTM C ۱۲۱۸ (یون کلر محلول در آب) استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش تیتراسیون پتانسیومتری برای تعیین غلظت یون کلر در نمونه‌های پودری بتن استفاده شد (شکل ۳۷-۲). این روش بسیار دقیق است و تا کنون روش دیگری با این دقت ابداع نشده است. در تیتراسیون پتانسیومتری همان عمل تیتراژ کردن انجام می‌گیرد اما به جای شناساگر شیمیایی از یک الکتروود شناساگر استفاده می‌شود. این سیستم شامل دو الکتروود است: ۱- الکتروود مرجع ۲- الکتروود شناساگر. الکتروود شناساگر به ماده‌ی مجهول مورد که در این پژوهش کلر است، حساس بوده و غلظت آن را در محلول مورد نظر نشان می‌دهد. در تیتراسیون پتانسیومتری تغییرات پتانسیل الکتروود شناساگر نسبت به الکتروود مرجع به ازای افزایش حجم‌های معینی از تیتراژ کننده، سنجیده می‌شود.

الکتروود مرجع در تمام تیتراسیون‌ها معمولاً یکی از الکتروودهای مرجع آزمایشگاهی مانند الکتروود کالومل اشباع یا نقره - نقره کلرید اشباع است. در این روش نمونه‌های پودری مجهول حاوی یون کلر در بالن‌های ۱۰۰ میلی لیتری ریخته شده و با آب مقطر به حجم رسانده می‌شوند. ۲۵ میلی لیتر از مجهول در یک بشر ۱۵۰ میلی لیتری منتقل گردید و به آن تقریباً ۵۰ می لیتر آب مقطر و ۵ قطره اسید نیتریک ۶ موالر اضافه شد. در ادامه محلول به وسیله همزن مغناطیسی همزده شد. در این مرحله الکتروود شناساگر و مرجع درون بشر قرار داده شدند و سپس به وسیله نقره نیترات تیتراژ گردید. در این مرحله تغییرات پتانسیل ثبت گردید و در نهایت نمودار پتانسیل بر حسب حجم نقره نیترات رسم شد. و بر اساس روابط موجود نهایتاً غلظت یون کلر بر اساس تغییرات پتانسیل محاسبه می‌شود.

۲-۲-۵- روش انتخاب اختلاط بهینه

انتخاب بهینه ترین ترکیب از نظر بالاترین مقاومت الکتریکی و خواص مکانیکی توسط روش سطح پاسخ (RSM) انجام شد. داده‌های تجربی بدست آمده از آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی، هدایت و مقاومت الکتریکی در نرم افزار Design Expert ورژن ۷.۰.۱۰ وارد شدند و درصد وزنی اکسیدگرافن و سرباره گرانوله به عنوان متغیرهای مستقل تعریف شدند. متغیرهای پاسخ هم نتایج بدست آمده از استحکام فشاری، استحکام خمشی، هدایت الکتریکی و مقاومت الکتریکی بودند. از آنجایی که این نرم افزار یک نرم افزار طراحی آزمایش

است با ورود متغیرها و تعدادها خود نرم‌افزار تعدادی آزمایش تعیین می‌کند که در اینجا نرم‌افزار ۱۳ آزمایش را طراحی کرد (جدول ۱۰-۲).



شکل ۳۷-۲- آنالیز شیمیایی یون کلر در نمونه‌های پودری بتن.

از آنجایی که تمامی آزمون‌ها برای ۱۶ طرح اختلاط انجام شده بودند، باید از ۳ مورد صرف نظر می‌شد. به همین منظور از سه آزمایشی که نسبت به سایر نتایج دورترین داده‌ها را داشتند از نتایج حذف شده و بهینه‌سازی با خطای کمتری بر روی ۱۳ حالت دیگر صورت گرفت. تمامی داده‌های مکانیکی و غیرمکانیکی با استفاده از مدل‌های چند جمله‌ای درجه دو توسط نرم‌افزار برون‌یابی شدند. پس از برون‌یابی پاسخ‌ها، عملکرد نرم‌افزار برای تعیین اختلاط بهینه به این صورت است که باید ابتدا اولویت هر پاسخ در نتیجه نهایی مشخص گردد. در این پروژه اولویت و اهمیت داده شده به هر پاسخ مطابق زیر بود:

(۱) RCPT (*****)

(۲) مقاومت الکتریکی (ونر) (*****)

(۳) مقاومت فشاری (**)

(۴) مقاومت خمشی (*)

بنابراین برای هر پاسخ، تابعی تعیین شد که آن را به دو متغیر وابسته یعنی درصد وزنی اکسید گرافن و سرباره گرانوله مرتبط می‌کرد (جدول ۱۱-۲). در نهایت نیز یک تابع هدف تعیین شد که میزان مطلوبیت کلی چهار پاسخ متفاوت را بر اساس اهمیت و وزن داده شده به آن‌ها مشخص می‌کند (شکل ۳۸-۲).

۲-۲-۶ ساخت دستگاه آزمون نفوذ فشاری یون کلر

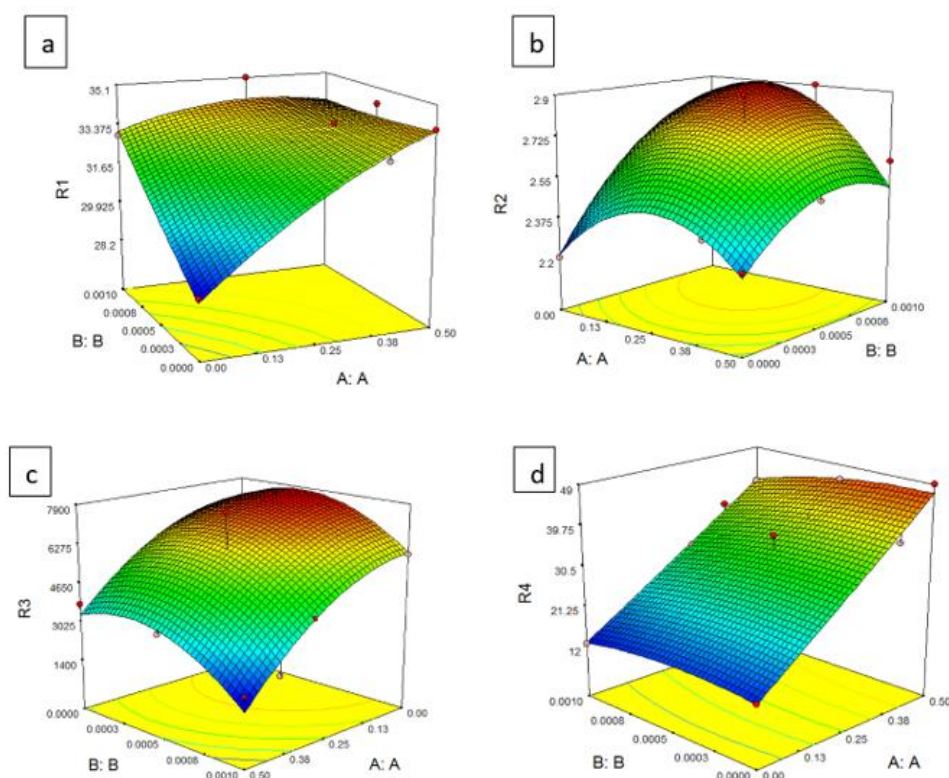
یکی از اهداف این پروژه پژوهشی طراحی و ساخت دستگاه انجام آزمون نفوذ فشاری بر روی نمونه‌های بتنی بود. آزمون نفوذ فشاری این امکان را می‌دهد تا بتوان در بازه زمانی کوتاهی رفتار نفوذ یون کلر را که همواره یکی از دلایل اصلی تخریب سازه‌های بتنی محسوب می‌شود، بررسی نمود.

جدول ۱۰-۲- داده‌های وارد شده در نرم‌افزار جهت بهینه سازی

Run	Block	Factor 1 A:A	Factor 2 B:B	Response 1 R1	Response 2 R2	Response 3 R3	Response 4 R4
1	Block 1	0.00	0.0000	28.4	2.2	7008.46	14
2	Block 1	0.40	0.0000	33	2.4	4352.14	38.1
3	Block 1	0.50	0.0000	34.1	2.3	3788.19	49
4	Block 1	0.30	0.0005	32.4	2.9	7702.52	36.6
5	Block 1	0.30	0.0010	35.1	2.9	4250.64	28.9
6	Block 1	0.40	0.0005	33.7	2.6	3766.93	36.3
7	Block 1	0.40	0.0010	33.8	2.5	2428.01	36.8
8	Block 1	0.50	0.0005	34.4	2.5	3460.95	45.6
9	Block 1	0.50	0.0010	33.4	2.6	2058.18	40.8
10	Block 1	0.00	0.0010	32.9	2.8	5862.41	12.4

جدول ۱۱-۲- مدل‌های انتخاب شده به منظور برون‌یابی پاسخ‌ها

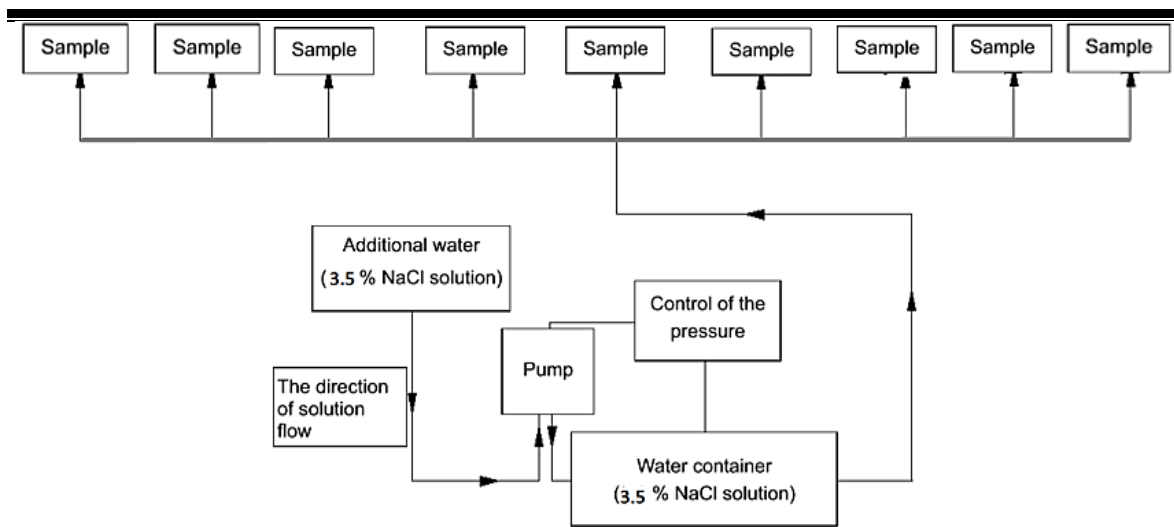
پاسخ	مدل	معادله نهایی برای هر پاسخ	R ²
استحکام فشاری (R1)	Quadratic	$R1 = +28.22493 + 16.35659 * A + 4444.14506 * B - 10071.42857 * A * B - 9.50178 * A^2 + 4.33096E+005 * B^2$	0.9273
استحکام خمشی (R2)	Quadratic	$R2 = +2.21221 + 1.89760 * A + 1164.36197 * B - 785.71429 * A * B - 3.52313 * A^2 + 5.69751E+005 * B^2$	0.8515
هدایت الکتریکی RCPT (R3)	Quadratic	$R3 = +7096.35542 + 528.13747 * A + 3.71687E+006 * B - 1.39000E+006 * A * B - 16135.60973 * A^2 - 4.88790E+009 * B^2$	0.8388
مقاومت الکتریکی وئر (R4)	Quadratic	$R4 = +13.91885 + 64.69156 * A + 5545.50359 * B - 9214.28571 * A * B + 2.73428 * A^2 - 6.72432E+006 * B^2$	0.9755



شکل ۳۸-۲- تأثیر تغییرات GO و GGBFS بر (الف) مقاومت فشاری، (ب) مقاومت خمشی، (ج) نتایج RCPT و (د) مقاومت الکتریکی بتن.

با وجود اهمیت این آزمون و داده‌های ارزشمندی که در زمینه مقاومت بتن‌ها در اختیار قرار می‌دهد اما مراکز محدودی در حال حاضر قادر به انجام این آزمون می‌باشند. بسیاری از مراکز موجود نیز تنها قادر به انجام آزمون نفوذ فشاری آب می‌باشند و تجهیزات مقاومت در برابر کلر به منظور انجام آزمون نفوذ فشاری یون کلر را ندارند. بنابراین با وجود محدودیت‌های فعلی طراحی یک دستگاه مستقل که قابلیت انجام همزمان آزمون نفوذ فشاری را برای چندین نمونه بتنی فراهم کند جزء اهداف مهم این پژوهش قرار گرفت. در گام اول با کمک منابع موجود یک شماتیک کلی از عملکرد دستگاه طراحی شد (شکل ۳۹-۲).

بر اساس طراحی صورت گرفته، یک مخزن به منظور نگهداری محلول آب نمک در این دستگاه طراحی شد و یک پمپ و یک سیستم کنترل فشار مسئول انتقال محلول آب نمک با فشار مشخص به سمت نمونه‌های بتنی هستند. وجود سیستم کنترل فشار این امکان را می‌دهد تا بتوان آزمون نفوذ فشاری را با توجه به شرایط میدانی مورد نظر در فشارهای متفاوتی انجام داد. علاوه بر سیستم کنترل فشار یک سیستم گرمایشی و یک ترموکوپل به منظور کنترل دمای محلول در مخزن طراحی شد تا علاوه بر قابلیت کنترل فشار قابلیت کنترل دمای نیز حین آزمون وجود داشته باشد. این دستگاه به گونه‌ای طراحی شده است که امکان انجام آزمون نفوذ فشاری به طور همزمان برای نه نمونه بتنی مکعبی با ابعاد ۱۵*۱۵*۱۵ وجود دارد. به منظور ثلث نگه داشتن نمونه‌های بتنی حین آزمون بر روی هر نمونه یک تسمه فولادی نگهدارنده طراحی شد که با پیچ و مهره‌های تعبیه شده کاملاً بر روی نمونه محکم می‌شود (شکل ۳۹-۲).



شکل ۳۹-۲- شماتیک دستگاه آزمون نفوذ فشاری کلر برای نمونه‌های بتنی

برای اعمال فشار به صورت یکنواخت به سطح زیرین نمونه‌های بتنی در زیر جایگاه قرارگیری هر نمونه یک محفظه خالی طراحی شده است که محلول آب نمک با فشار مشخص ابتدا وارد این محفظه شده و سپس به صورت یکنواخت به کل سطح زیرین نمونه وارد می‌شود. همچنین به منظور جلوگیری از هرگونه نشتی محلول به خارج از نمونه و اشکریایی برای آبند کردن منطقه بین نمونه و محفظه ورود محلول آب نمک تعبیه شده است. تمامی قالب‌ها و نگهدارنده نمونه‌ها که احتمال آسیب دیدن با یون کلر را داشتند بوسیله رنگ‌های ضد خوردگی پوشش داده شدند تا آسیب‌های احتمالی به حداقل برسند. بر اساس طراحی صورت گرفته و قرار دادن شیرهای مستقل در مسیر محلول به سمت محفظه زیر هر نمونه، ورود محلول به هر نمونه به صورت جداگانه قابل کنترل است. بنابراین می‌توان آزمون نفوذ فشاری را برای نمونه‌های بتنی در بازه‌های زمانی متفاوت انجام داد و با اتمام زمان آزمون برای هر نمونه ورود محلول به محفظه آن را به طور مستقل متوقف نمود (شکل ۴۰-۲)



شکل ۴۰-۲- محفظه نگهداری نمونه بتنی در دستگاه نفوذ فشاری یون کلر.



شکل ۴۱-۲- دستگاه ساخته شده برای انجام آزمون نفوذ فشار یون کلر بر روی نمونه‌های بتنی

۱-۶-۲- روش انجام آزمون‌های مختلف آنالیز شیمیایی و بررسی‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌های بتنی

به منظور بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌های بتنی بعد از آزمون نفوذ فشاری، شرایط فشار ۵ بار در بازه زمانی ۳ روزه به عنوان شرایط انتخابی مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور از بخش انتهایی بتن‌هایی که در معرض آزمون نفوذ فشاری با شرایط انتخابی بودند، نمونه‌های کوچکی با ابعاد تقریبی $2 \times 2 \times 1$ تهیه شدند. ابتدا هر کدام از نمونه‌های اصلی به دو بخش کوچک‌تر تقسیم شده و از انتهای یکی از نیمه‌ها در راستای نفوذ کلر نمونه‌های کوچک جدا شد (شکل ۴۲-۲). از آنجایی که هدف بررسی ریزساختار سطح شکست بود این نمونه‌ها بدون هرگونه عملیات پولیش کردن برای آنالیز FESEM و آنالیز عنصری EDS فرستاده شدند.



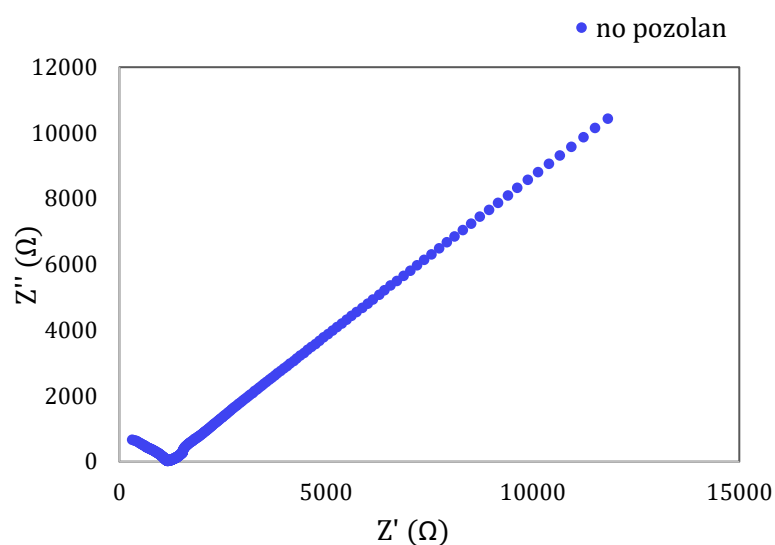
شکل ۴۲-۲- مراحل تهیه نمونه برای بررسی ریزساختاری از نمونه‌های بتنی.

۲-۳ نتایج

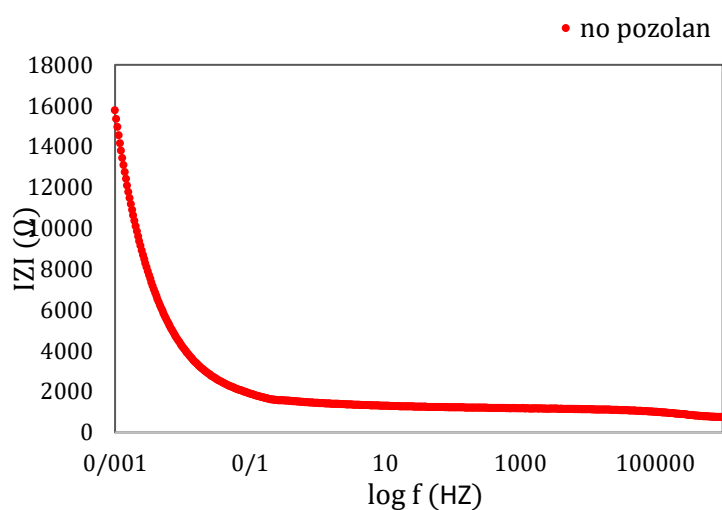
۲-۳-۱ نتایج آزمون‌های خوردگی شامل غوطه‌وری و الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌های بتنی

۲-۳-۱-۱ نتایج آزمون الکتروشیمیایی امپدانس

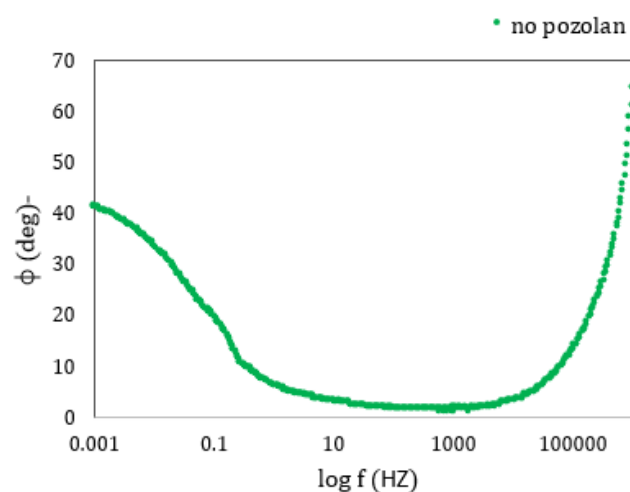
شکل‌های ۲-۴۳ الی ۲-۴۹ منحنی‌های نایکوئیست، بد و بد - فاز بدست آمده از نتایج آزمون الکتروشیمیایی امپدانس مربوط به نمونه‌های بتنی بدون پوزولان و با پوزولان را بعد از ۲۸ روز عمل آوری را نشان می‌دهند.



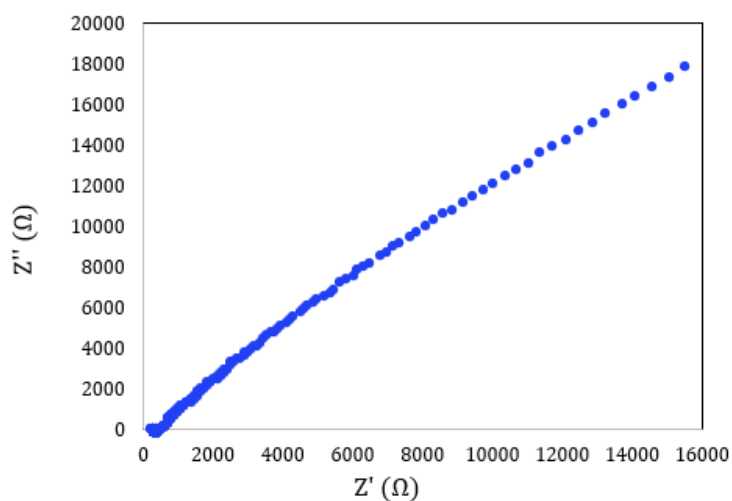
شکل ۲-۴۳- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز



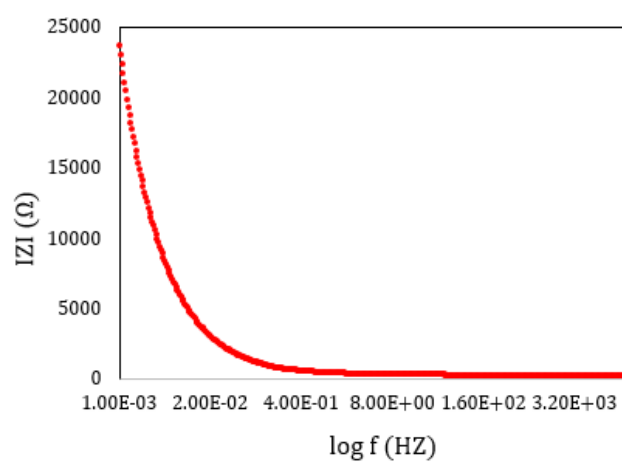
شکل ۲-۴۴- نمودار بد مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز



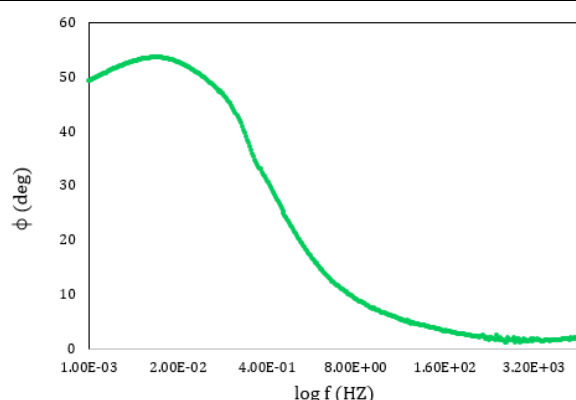
شکل ۴۵-۲- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز



شکل ۴۶-۲- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز



شکل ۴۷-۲- نمودار بد مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز



شکل ۲-۴۸- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز

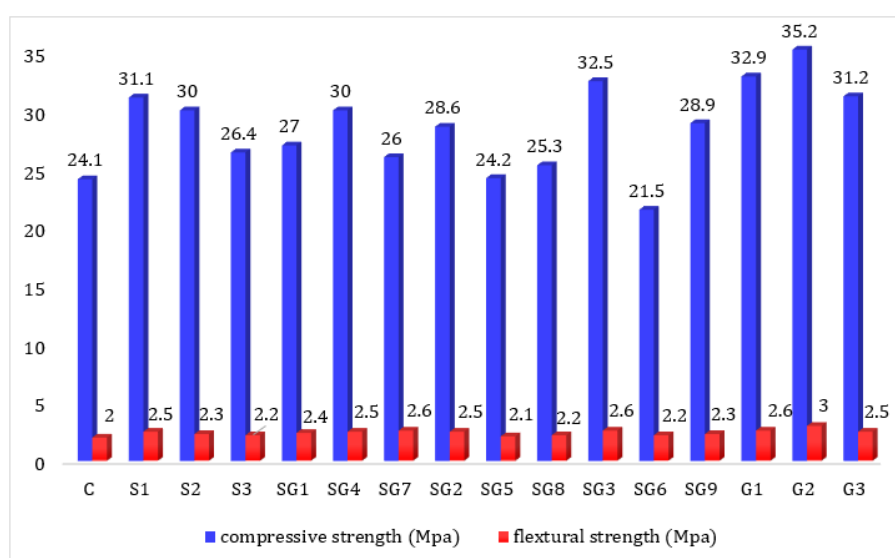
۲-۳-۲ نتایج آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت فشاری، نفوذپذیری، آزمون تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی

۲-۳-۲-۱ نتایج آزمون‌های مکانیکی

نتایج آزمون‌های استحکام فشاری و خمشی ۲۸ روزه و ۹۰ روزه هر شانزده طرح اختلاط در شکل ۲-۴۹ و ۲-۵۰ نشان داده شده است. به منظور ارائه بهتر داده‌ها در نمودارهای رسم شده، هر اختلاط با یک کد نشان داده شده است که در جدول ۲-۱۲ مرتبط با هر کد نشان داده شده است.

۲-۳-۲-۱-۱ نتایج تاثیر زمان عمل‌آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی

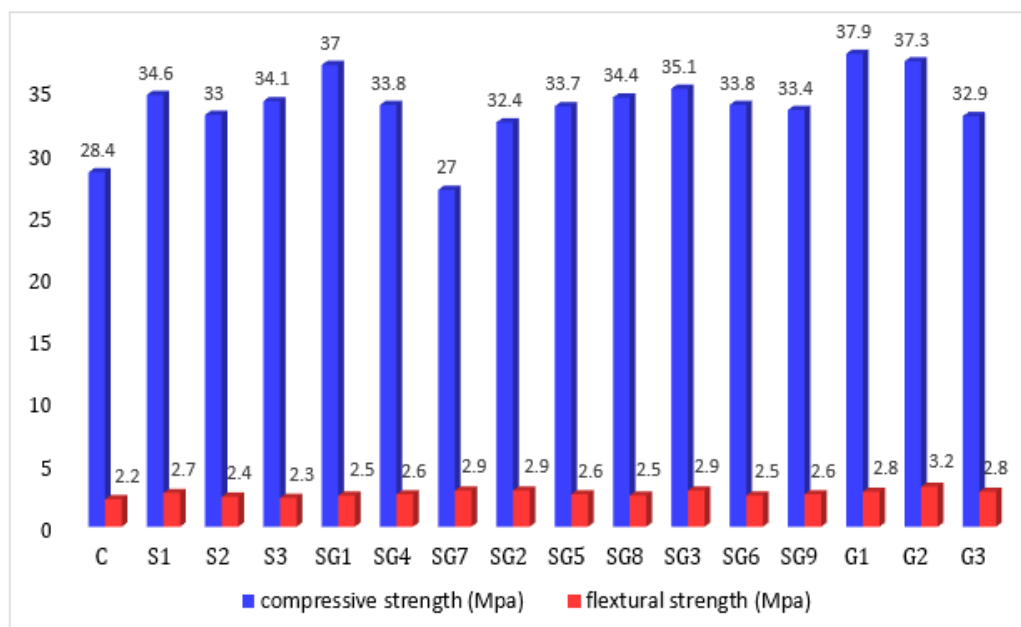
به منظور بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر خواص مکانیکی نهایی نمونه‌های بتنی در شکل ۲-۵۱ نتایج آزمون استحکام فشاری برای هر اختلاط معین در دو زمان ۲۸ و ۹۰ روز در کنار هم نشان داده شده است.



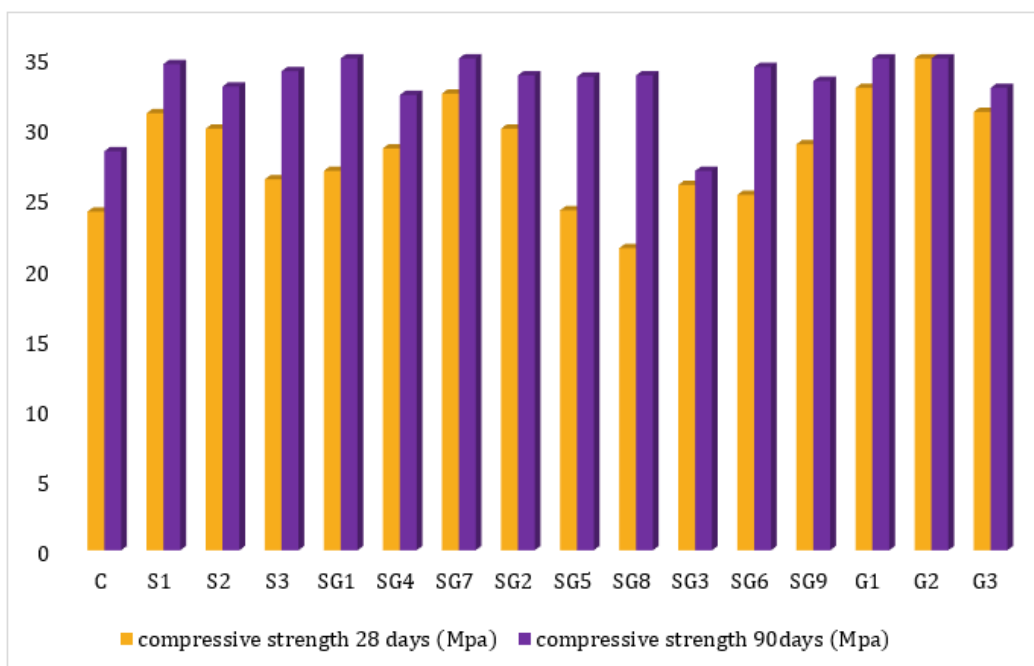
شکل ۲-۴۹- نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری

جدول ۱۲-۲- کد مرتبط با هر طرح اختلاط

Sample	C	S1	S2	S3	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	G1	G2	G3
GO	0	0	0	0	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1
GGBFS	0	30	40	50	30	30	30	40	40	40	50	50	50	0	0	0

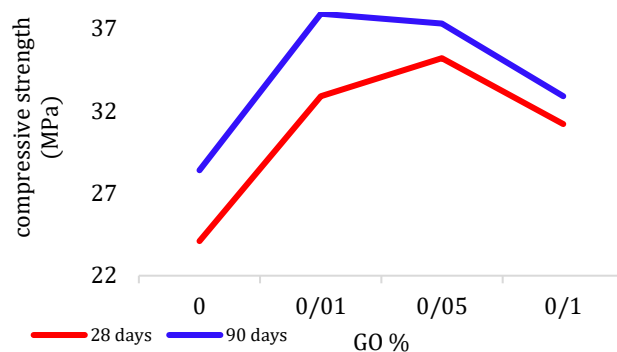


شکل ۵۰-۲- نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری

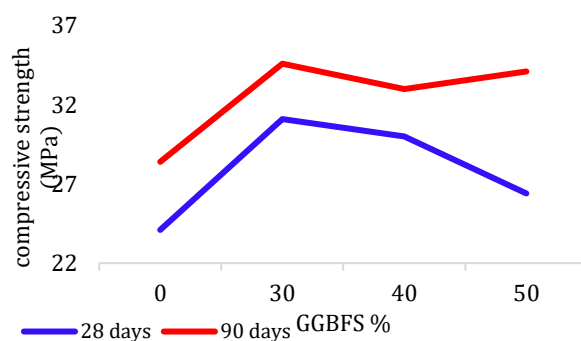


شکل ۵۱-۲- نتایج بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی.

۲-۳-۲-۱-۲ نتایج بررسی اثر اکسید گرافن و سرباره بر استحکام فشاری

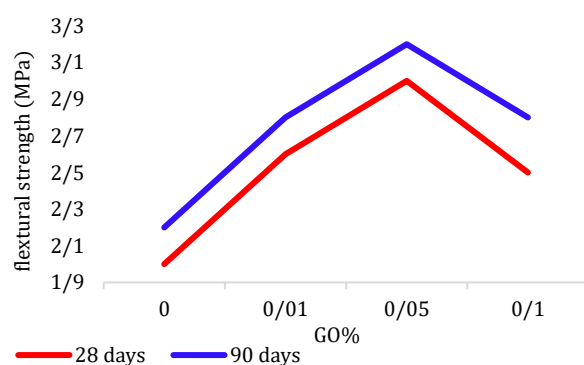


شکل ۵۲-۲- نتایج بررسی اثر اکسید گرافن در غیاب سرباره بر استحکام فشاری

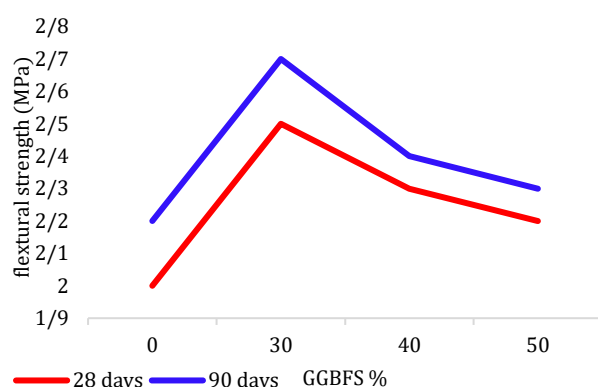


شکل ۵۳-۲- نتایج بررسی اثر سرباره گرانوله در غیاب اکسید گرافن بر استحکام فشاری

۲-۳-۲-۱-۳ نتایج بررسی اثر اکسید گرافن و سرباره د بر استحکام خمشی



شکل ۵۴-۲- نتایج بررسی اثر اکسید گرافن بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی.



شکل ۵۵- ۲- نتایج بررسی اثر سرباره گرانوله بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی در غیاب اکسیدگرافن

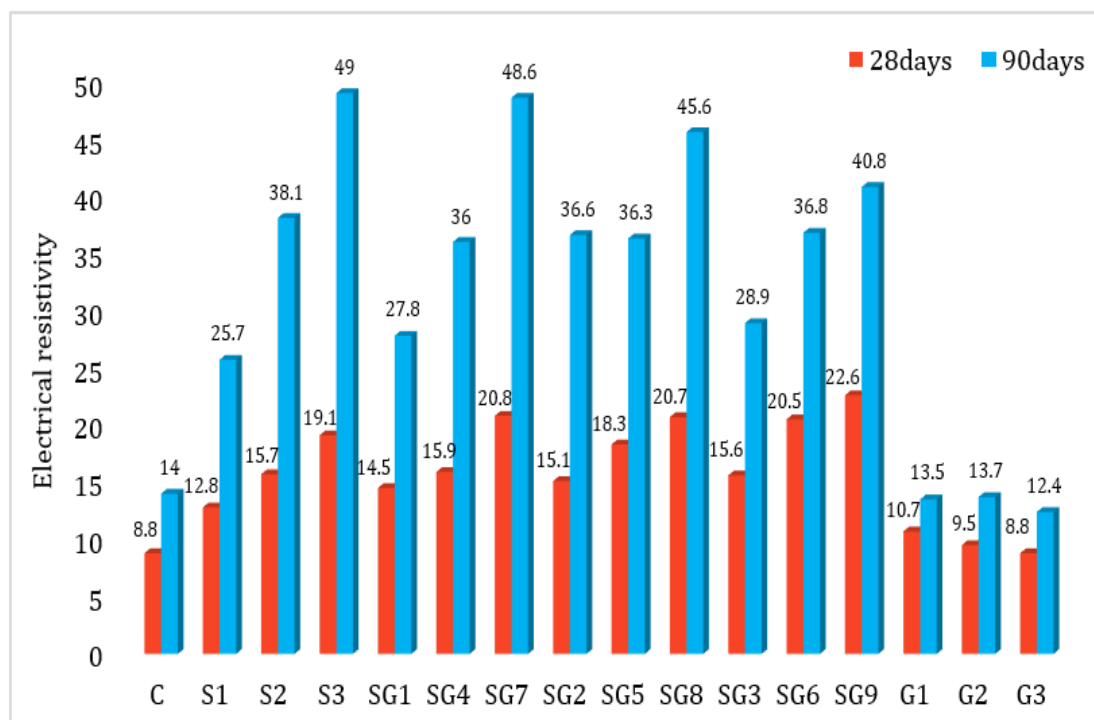
۲-۳-۲-۲ نتایج آزمون‌های تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی

نتایج بدست آمده از آزمون مقاومت الکتریکی و نر بر روی نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ و ۹۰ روز در جدول ۱۳-۲ و همچنین به منظور مقایسه بهتر به صورت یک نمودار در شکل ۵۶-۲ نشان داده شده است.

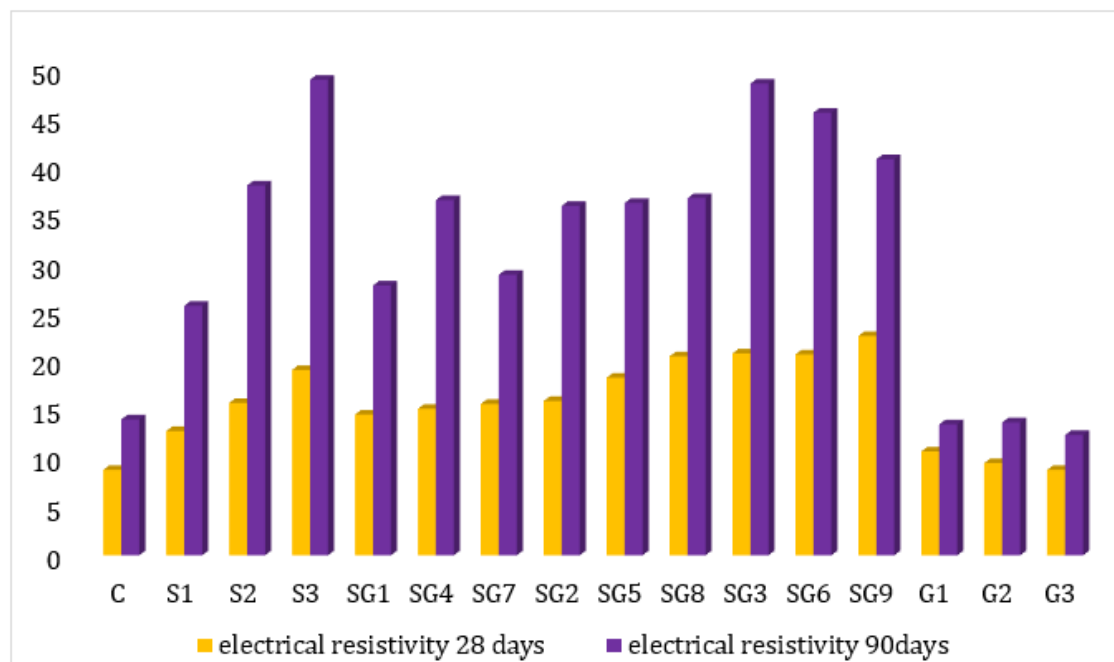
جدول ۱۳-۲- نتایج آزمون و نر برای نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ روز

مقاومت الکتریکی		سرباره	اکسیدگرافن
۹۰ روزه	۲۸ روزه		
۱۴	۸.۸	۰	۰
۲۵.۷	۱۲.۸	۳۰	۰
۳۸.۱	۱۵.۷	۴۰	۰
۴۹	۱۹.۱	۵۰	۰
۲۷.۸	۱۴.۵	۳۰	۰.۰۱
۳۶.۶	۱۵.۱	۳۰	۰.۰۵
۲۸.۹	۱۵.۶	۳۰	۰.۱
۳۶	۱۵.۹	۴۰	۰.۰۱
۳۶.۳	۱۸.۳	۴۰	۰.۰۵
۳۶.۸	۲۰.۵	۴۰	۰.۱
۴۸.۶	۲۰.۸	۵۰	۰.۰۱
۴۵.۶	۲۰.۷	۵۰	۰.۰۵
۴۰.۸	۲۲.۶	۵۰	۰.۱
۱۳.۵	۱۰.۷	۰	۰.۰۱
۱۳.۷	۹.۵	۰	۰.۰۵
۱۲.۴	۸.۸	۰	۰.۱

۲-۳-۲-۲-۱ نتایج بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی

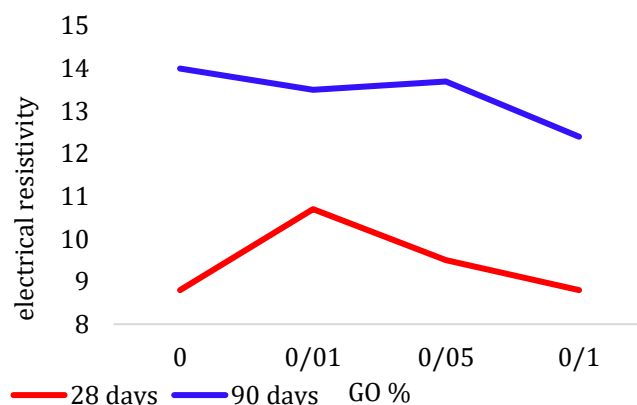


شکل ۵۶-۲- مقایسه نتایج آزمون مقاومت الکتریکی ونر بر روی نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ و ۹۰ روز

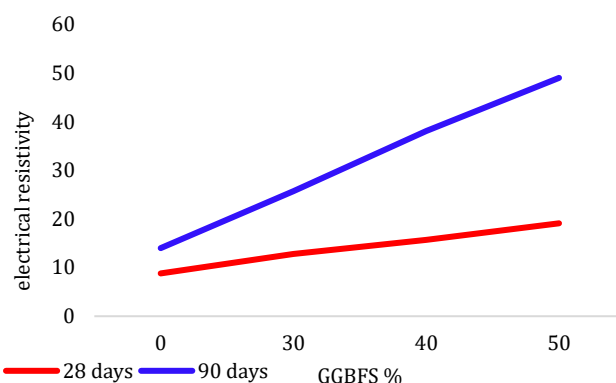


شکل ۵۷-۲- نتایج بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی.

۲-۳-۲-۲-۲ نتایج بررسی تأثیر اکسید گرافن و سرباره گرانوله بر مقاومت الکتریکی



شکل ۵۸-۲- نتایج بررسی تأثیر اکسید گرافن در غیاب سرباره بر مقاومت الکتریکی



شکل ۵۹-۲- نتایج بررسی تأثیر سرباره گرانوله در غیاب اکسید گرافن بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی

۲-۳-۲-۳ نتایج آزمون سنجش هدایت الکتریکی RCPT

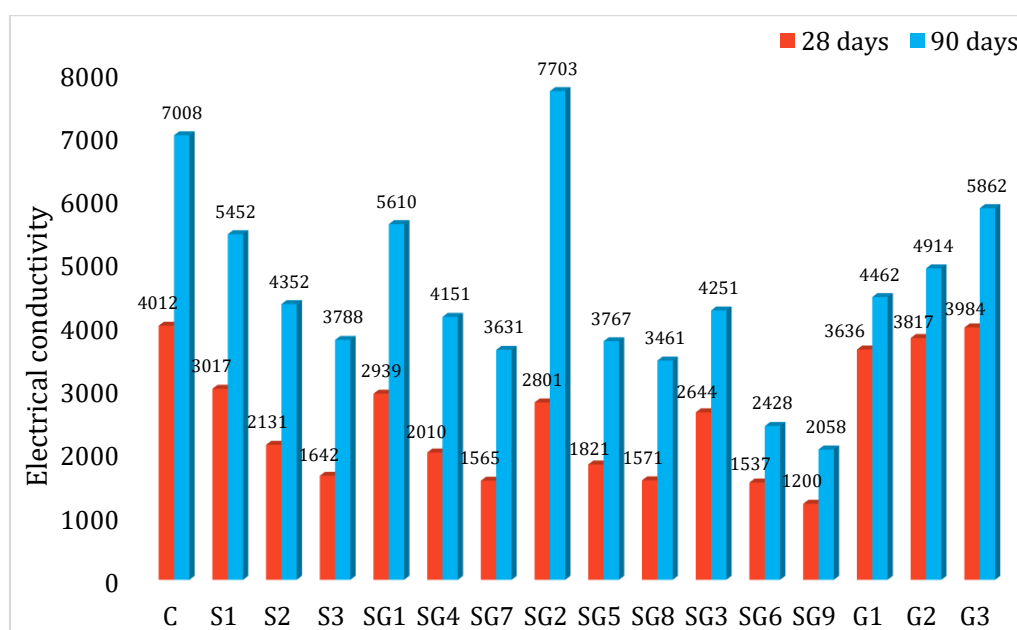
نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT بر روی نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ و ۹۰ روز در جدول ۲-۱۴ و همچنین به منظور مقایسه بهتر به صورت یک نمودار در شکل ۲-۵۹ نشان داده شده است.

۲-۳-۳ نتایج نفوذ یون کلر به صورت فشاری

نتایج بدست آمده از آزمون نفوذ فشاری یون کلر در شکل‌های ۲-۶۰ تا ۲-۷۹ نشان داده شده است. از آنجایی که این آزمون در شرایط مختلف فشار، دما و زمان انجام گردید به منظور مقایسه اثر پارامترهای محیطی نتایج در تصاویر ۲-۶۰ تا ۲-۷۱ به صورت جداگانه برای فشار و زمان و دما ترسیم شده‌اند. در تصاویر ۲-۲۴ تا ۲-۳۷ نیز نتایج برای نمونه‌های بدون پوزولان و با پوزولان در شرایط مختلف آزمون رسم شده‌اند تا امکان مقایسه اثر تغییر پارامترها به صورت همزمان ممکن باشد. در تصاویر ۳-۲۸ تا ۳-۳۱ نیز به منظور بررسی اثر افزودنی‌های اکسید گرافن و سرباره داده‌های بدست آمده از آزمون نفوذ فشاری در شرایط مختلف برای نمونه‌های با و بدون پوزولان در یک نمودار رسم شده‌اند تا امکان مقایسه آن‌ها وجود داشته باشد.

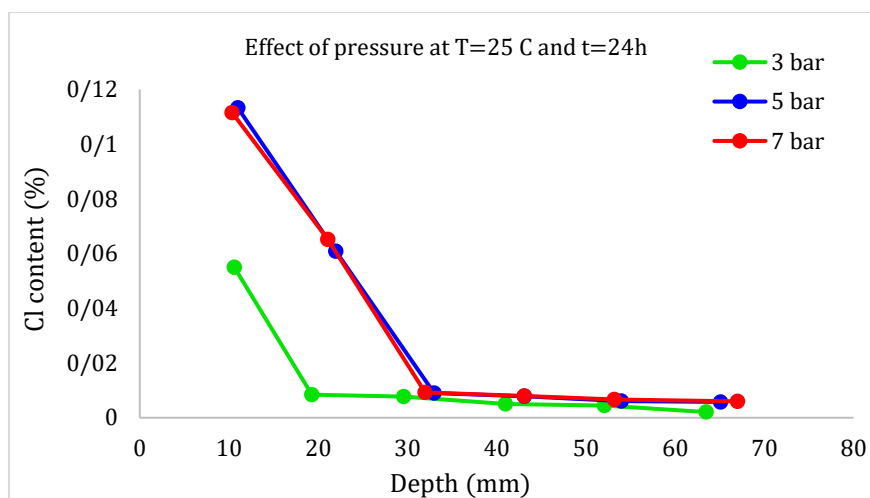
جدول ۱۴-۲- نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT بعد از ۲۸ و ۹۰ روز

بار الکتریکی عبوری (کولن)		سرباره	اکسیدگرافن
روزه ۹۰	روزه ۲۸		
۷۰۰۸	۴۰۱۲	۰	۰
۵۴۵۲	۳۰۱۷	۳۰	۰
۴۳۵۲	۲۱۳۱	۴۰	۰
۳۷۸۸	۱۶۴۲	۵۰	۰
۵۶۱۰	۲۹۳۹	۳۰	۰.۰۱
۷۷۰۳	۲۸۰۱	۳۰	۰.۰۵
۴۲۵۱	۲۶۴۴	۳۰	۰.۱
۴۱۵۱	۲۰۱۰	۴۰	۰.۰۱
۳۷۶۷	۱۸۲۱	۴۰	۰.۰۵
۲۴۲۸	۱۵۳۷	۴۰	۰.۱
۳۶۳۱	۱۵۶۵	۵۰	۰.۰۱
۳۴۶۱	۱۵۷۱	۵۰	۰.۰۵
۲۰۵۸	۱۲۰۰	۵۰	۰.۱
۴۴۶۲	۳۶۳۶	۰	۰.۰۱
۴۹۱۴	۳۸۱۷	۰	۰.۰۵
	۳۹۸۴	۰	۰.۱

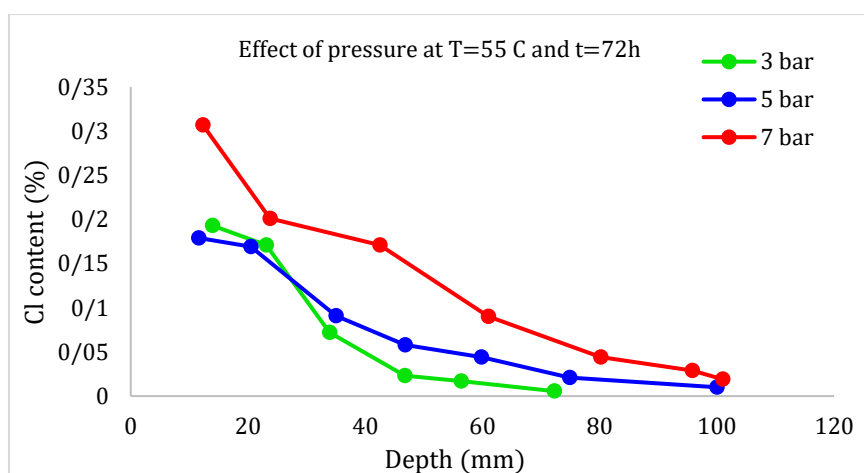


شکل ۵۹-۲- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه

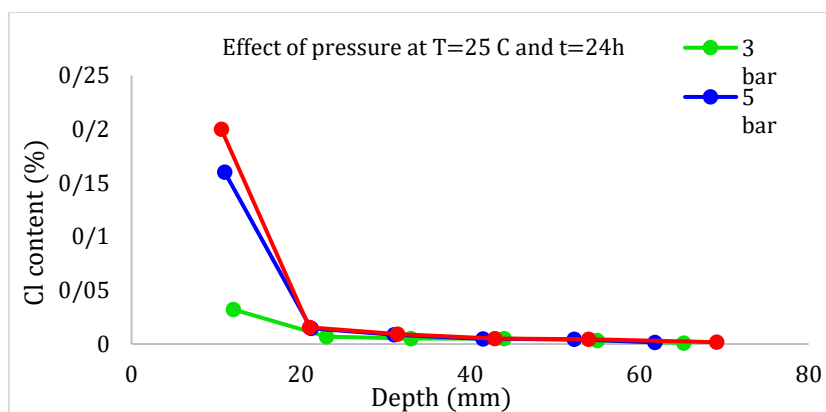
۱-۱-۱-۱- تأثیر فشار بر نفوذ یون کلر



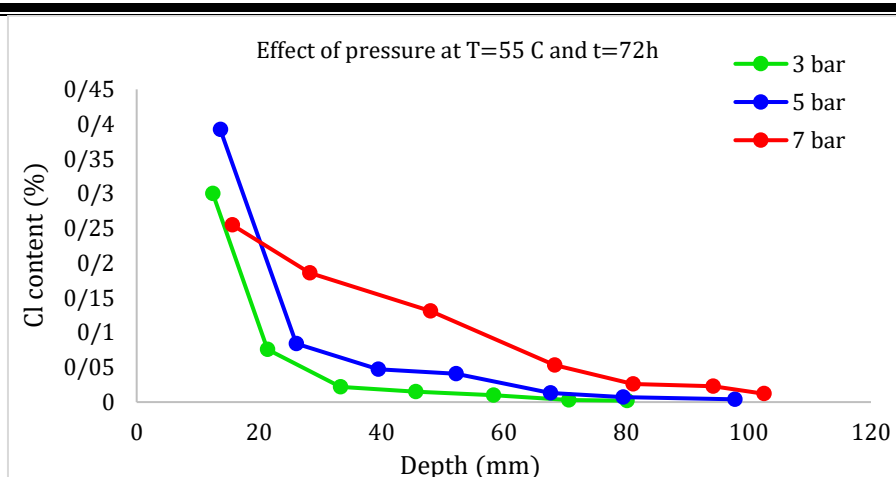
شکل ۶۰-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان پایین



شکل ۶۱-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان طولانی

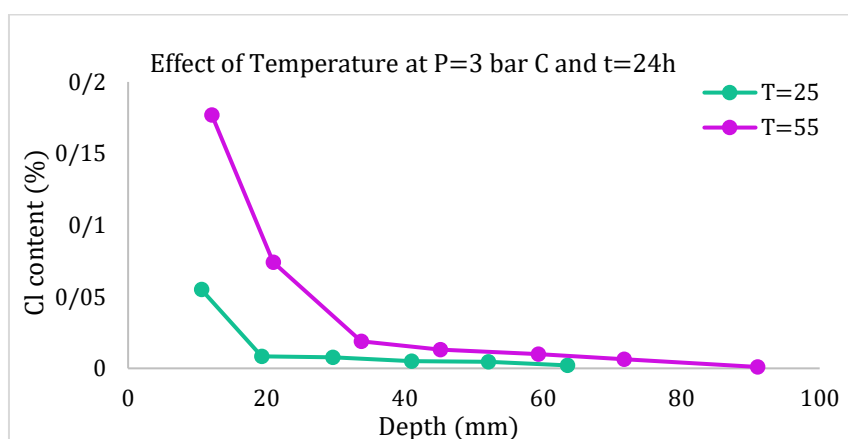


شکل ۶۲-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان پایین

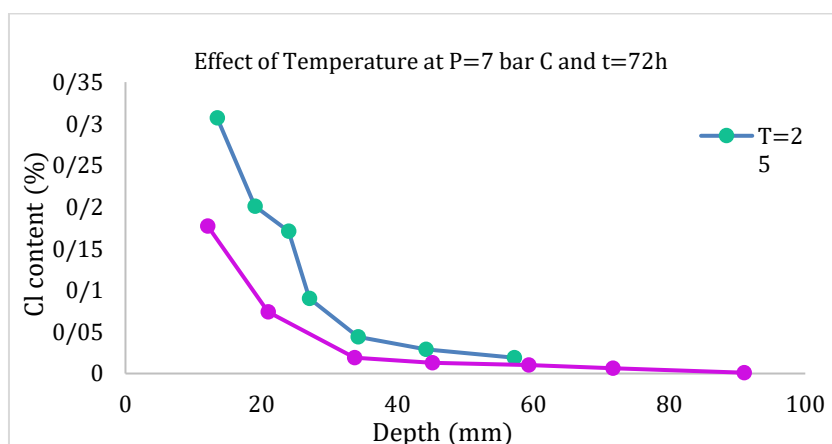


شکل ۶۳-۲- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان بالا

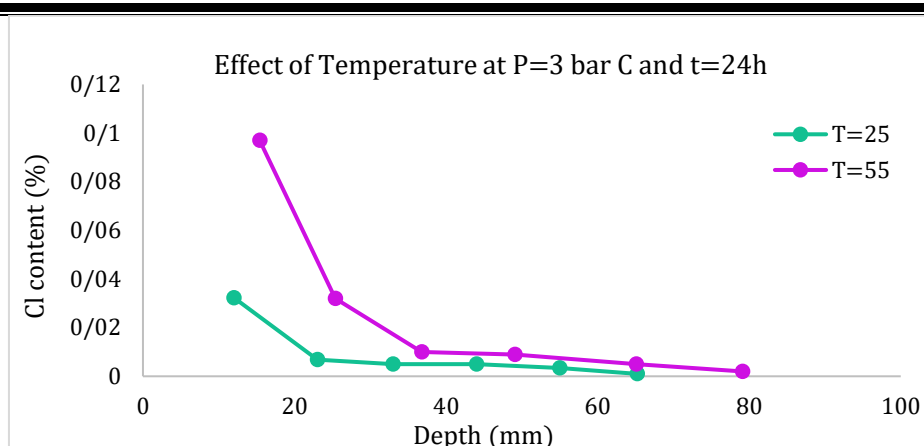
۱-۱-۱-۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر



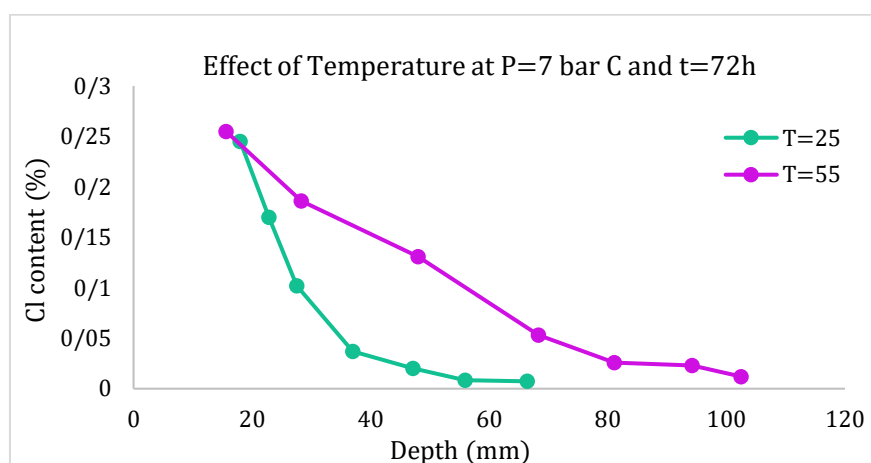
شکل ۶۴-۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه بدون پوزولان در فشار و زمان کم



شکل ۶۵-۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه های بتنی بدون پوزولان در فشار و زمان بالا

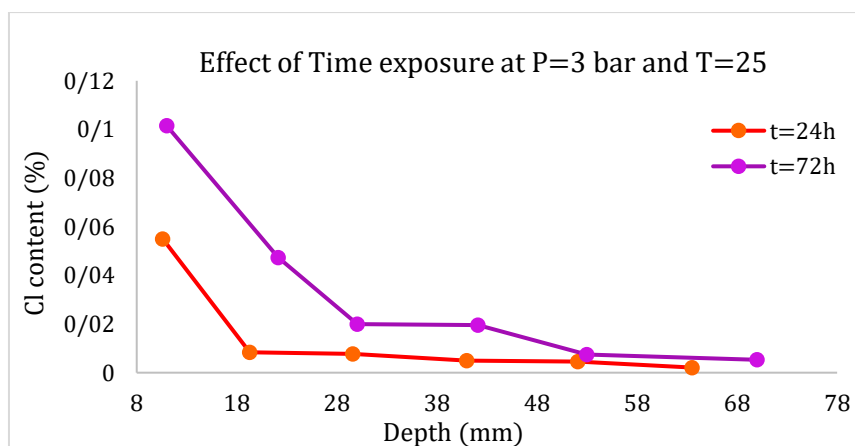


شکل ۶۶-۲ اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه حاوی پوزولان در فشار و زمان کم

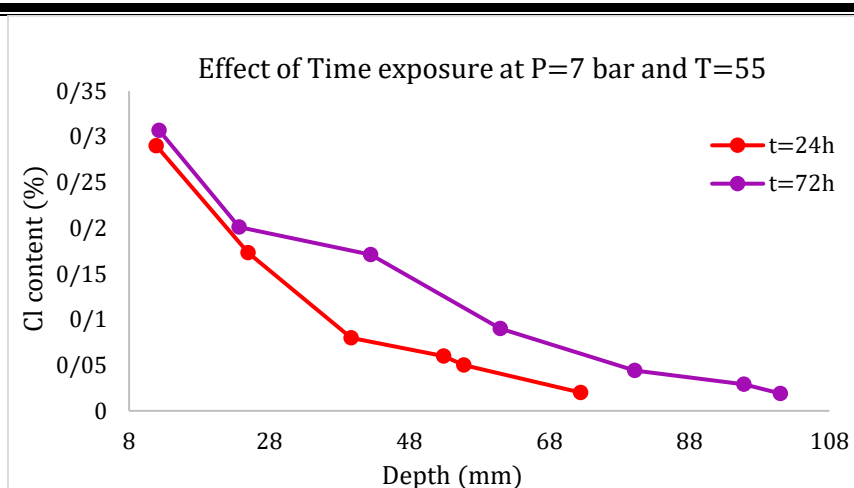


شکل ۶۷-۲ اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه های بتنی حاوی پوزولان در فشار و زمان بالا

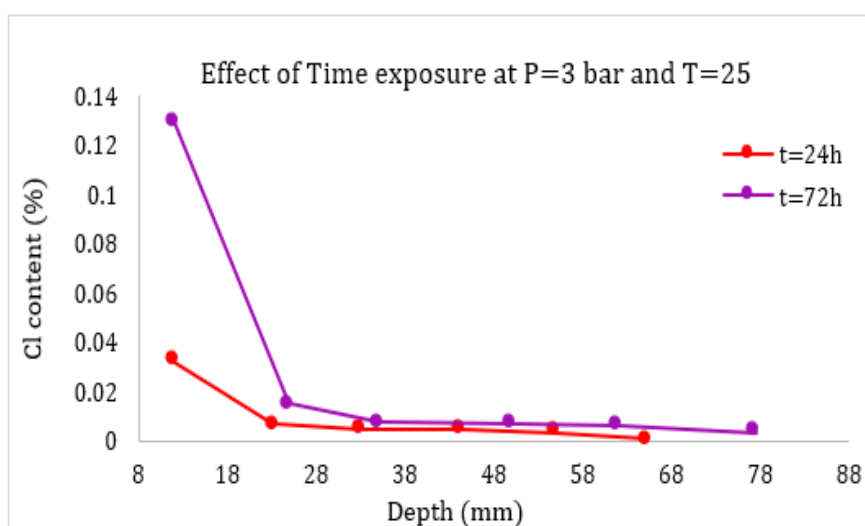
۱-۱-۳- اثر زمان بر نفوذ یون کلر



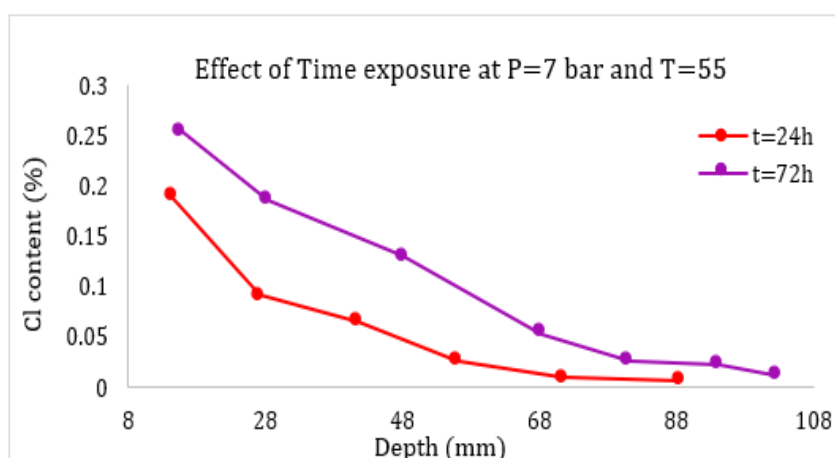
شکل ۶۸-۲ اثر زمان بر نفوذ کلر در دمای کم در فشار و بدون پوزولان



شکل ۶۹-۲- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه بدون پوزولان

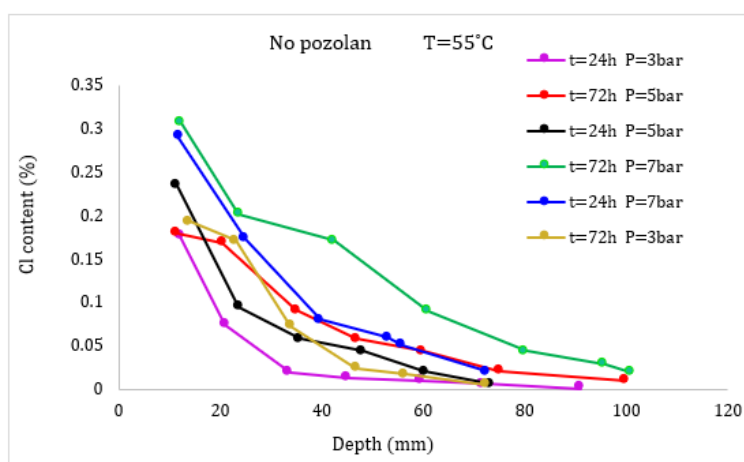


شکل ۷۰-۲- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای کم در نمونه حاوی پوزولان

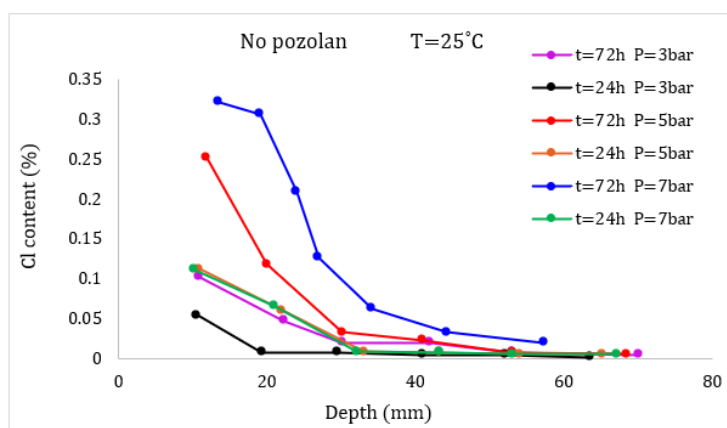


شکل ۷۱-۲- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه حاوی پوزولان

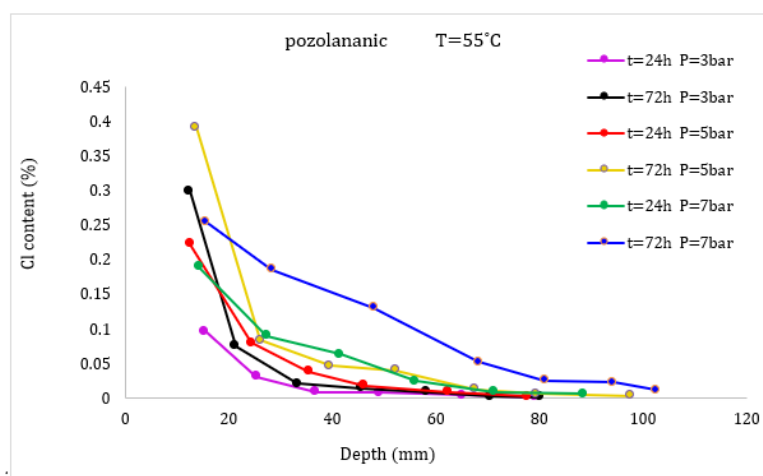
۱-۱-۴- تأثیر همزمان تغییرات فشار و زمان بر نفوذ کلر در دمای ثابت



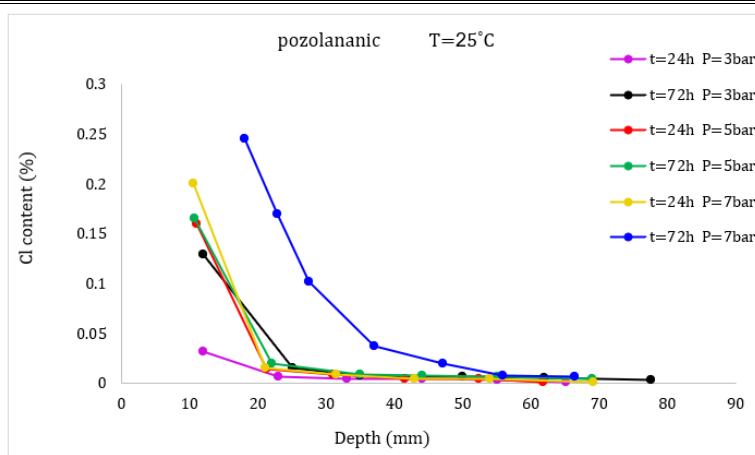
شکل ۲-۷۲- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد



شکل ۲-۷۳- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد

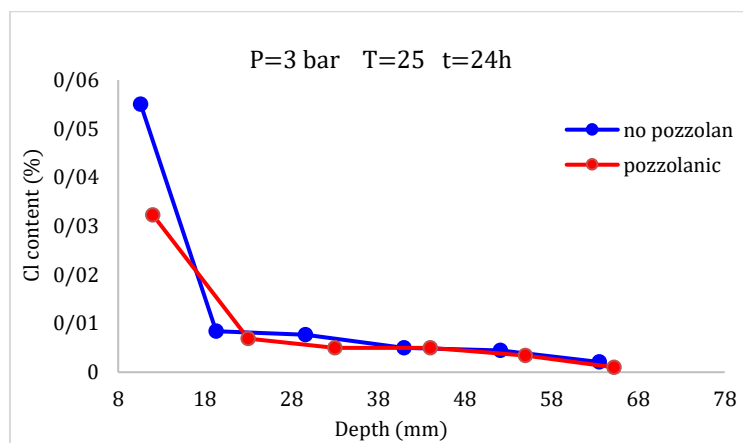


شکل ۲-۷۴- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد

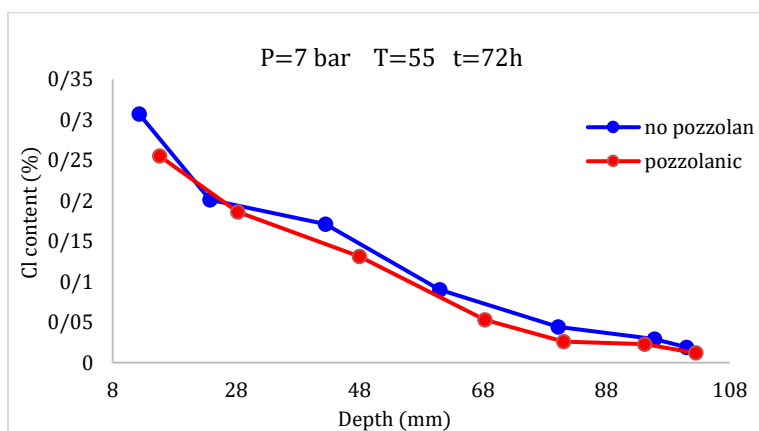


شکل ۲-۷۵- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد

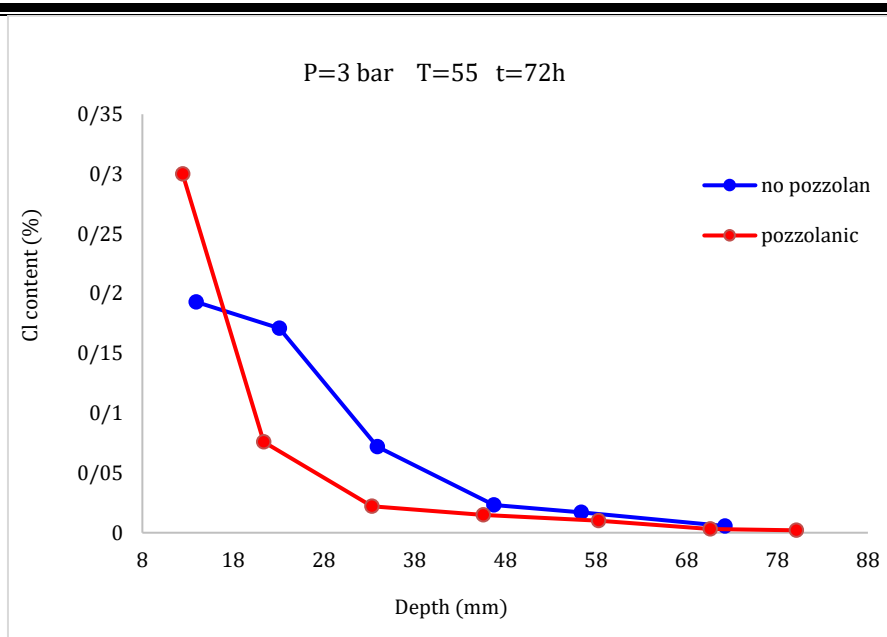
۱-۱-۵- اثر افزودنی‌های اکسیدگرافن و سرباره گرانوله بر نفوذ یون کلر در شرایط مختلف



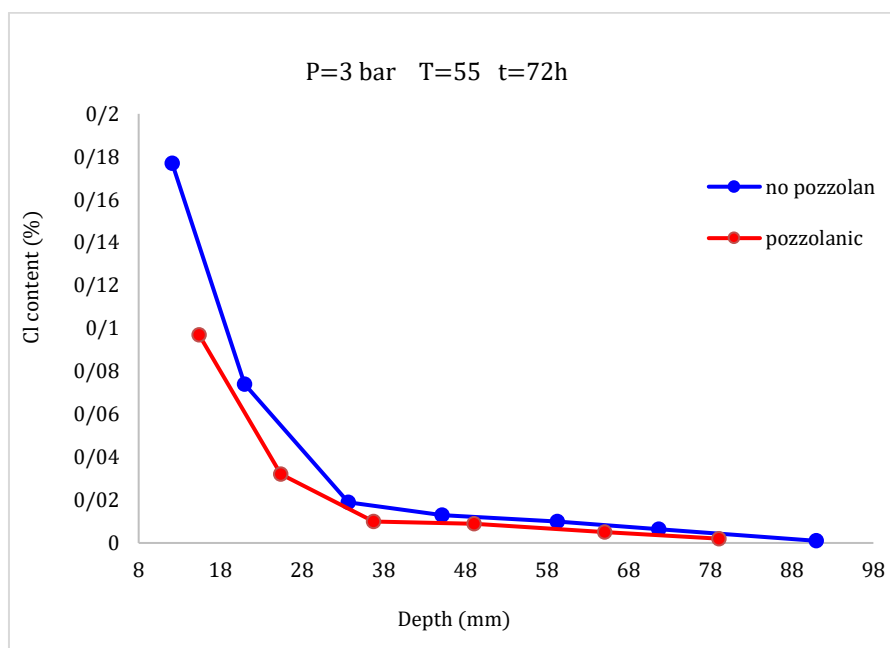
شکل ۲-۷۶- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای پایین



شکل ۲-۷۷- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای بالا



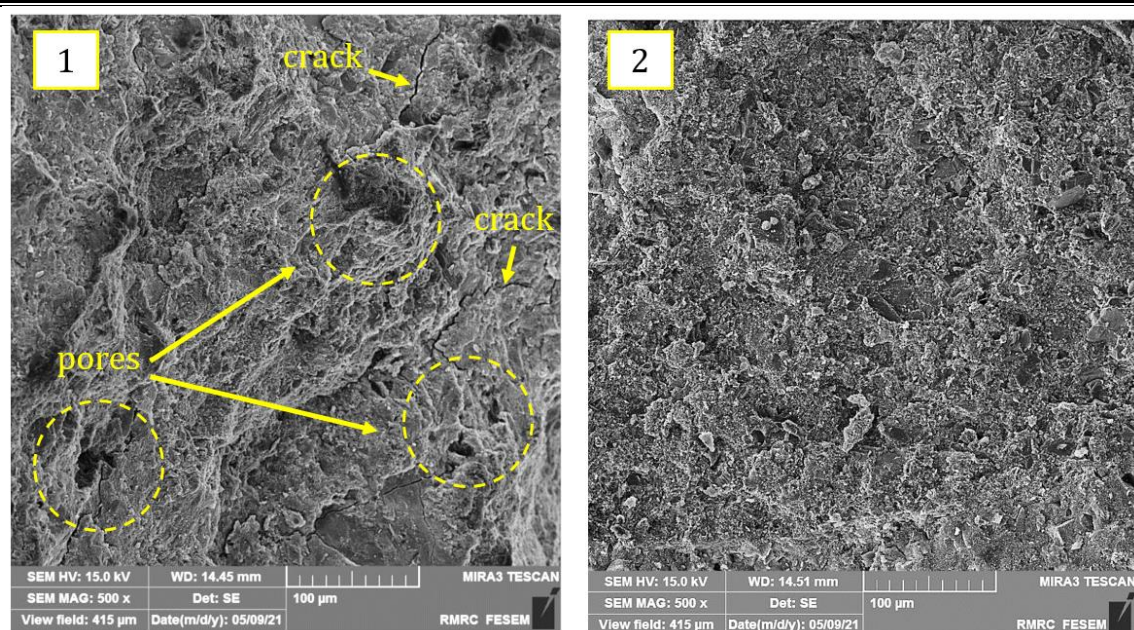
شکل ۲-۷۸- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۳ روز



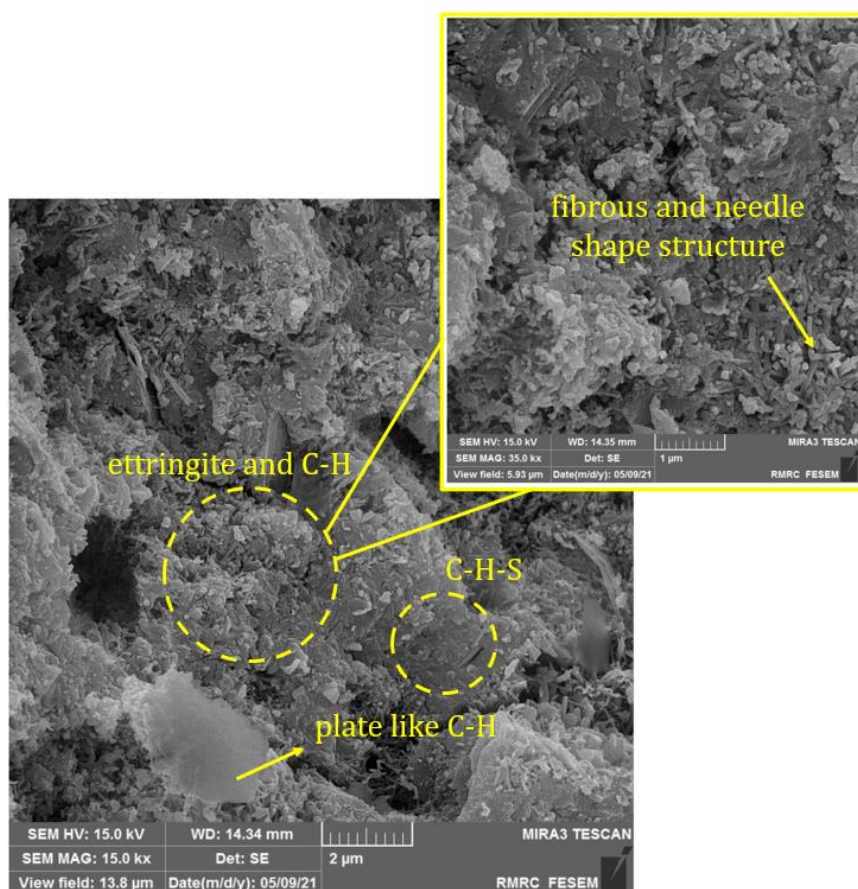
شکل ۲-۷۹- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۱ روز

۲-۳-۴ نتایج آزمون‌های مختلف آنالیز شیمیایی و بررسی‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌های بتنی

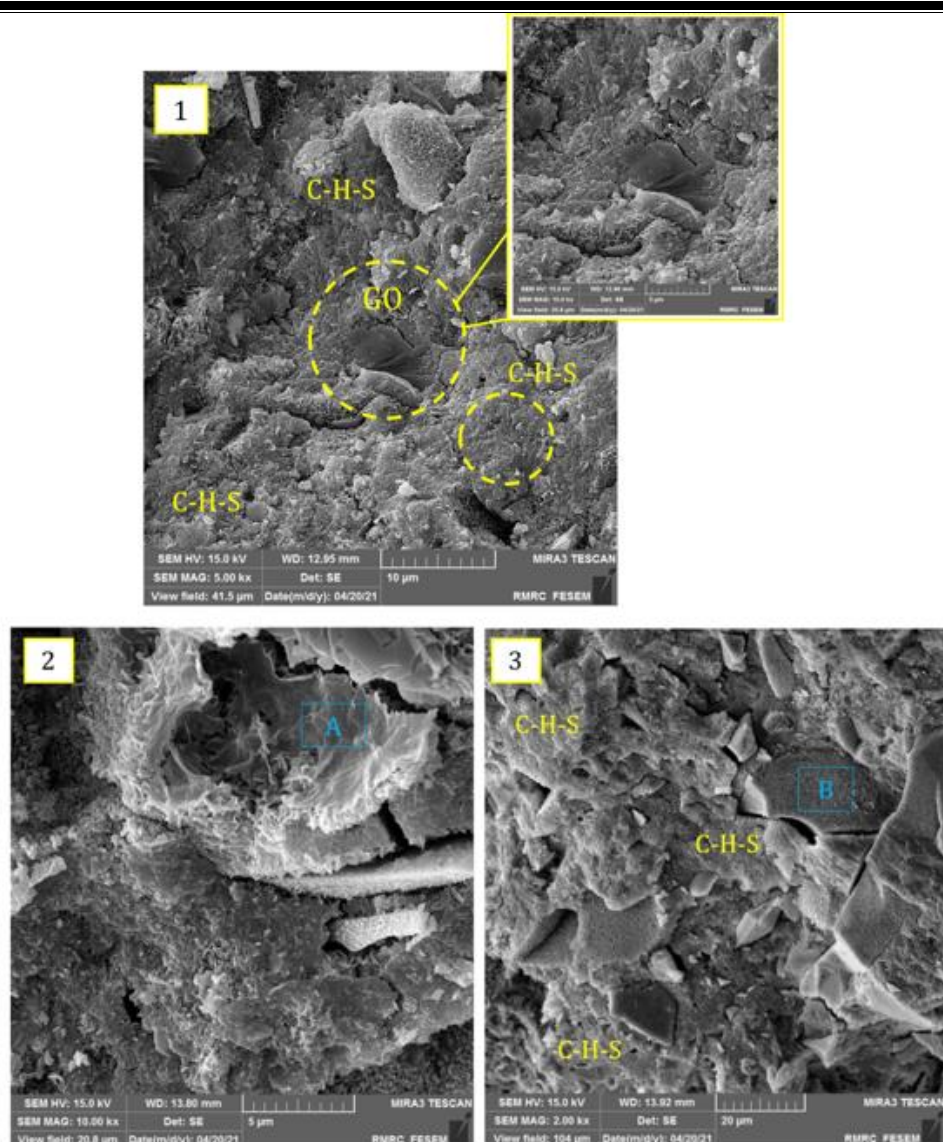
نتایج بدست آمده از آنالیز FESEM و آنالیز عنصری نمونه‌های بتنی در شکل‌های ۲-۸۰ الی ۲-۸۴ نشان داده شده است.



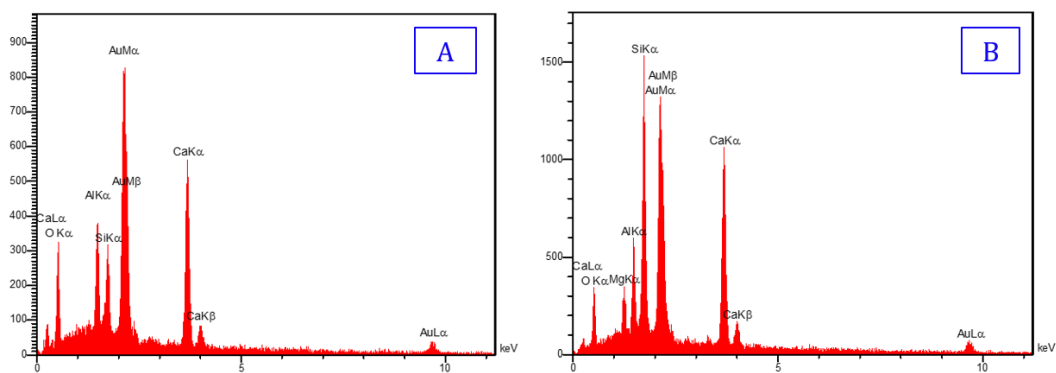
شکل ۸۰-۲- مقایسه ریزساختار نمونه‌های بتنی (۱) بدون پوزولان و (۲) حاوی پوزولان سرباره و اکسیدگرافن



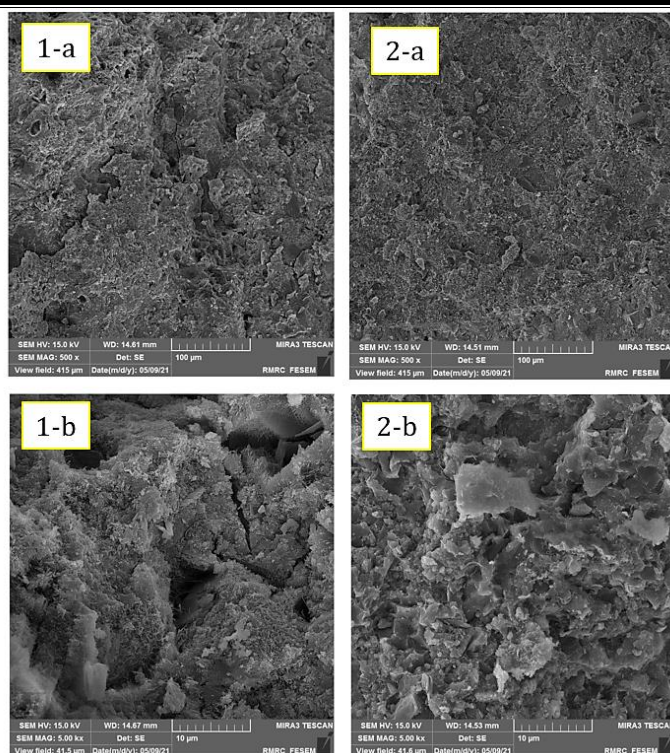
شکل ۸۱-۲- ریزساختار نمونه بتنی بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز



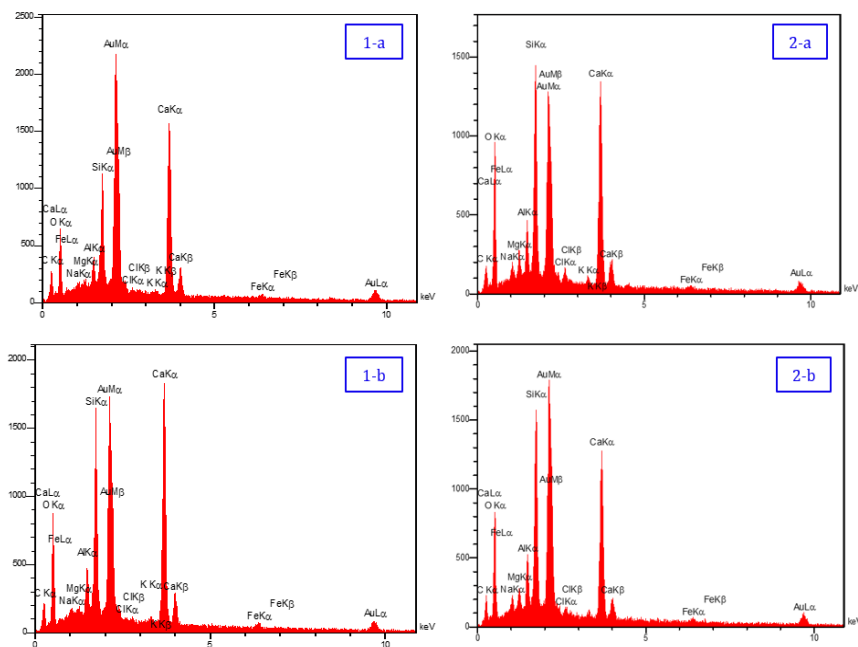
شکل ۸۲-۲- ریزساختار نمونه بتنی حاوی سرباره گرانوله و اکسیدگرافن بعد از ۲۸ روز



شکل ۸۳-۲- آنالیز عنصری از نقاط مشخص شده A و B در تصاویر ریزساختار نمونه بتنی پوزولانی.



شکل ۸۴-۲- ریزساختار نمونه‌های بتنی بعد از آزمون نفوذ فشاری: 1-a و 1-b مربوط به نمونه بدون پوزولان، 2-a و 2-b مربوط به نمونه پوزولانی می‌باشند.



شکل ۸۵-۲- آنالیز عنصری از بخش بالا و پایین نمونه‌ها بعد از آزمون نفوذ فشاری: 1-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه بدون پوزولان، 1-b مربوط به بخش بالایی نمونه بدون پوزولان، 2-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه پوزولانی و 2-b مربوط به بخش بالایی نمونه پوزولانی.

جمع‌بندی فصل دوم

در این مرحله از پروژه نمونه‌های بتنی با ۱۶ طرح اختلاط مختلف از سرباره گرانوله و اکسید گرافن تهیه گردید. برای مشخص نمودن ترکیب بهینه از اختلاط این دو افزودنی آزمون‌های مکانیکی و فیزیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی معیار قرار داده شدند. بر مبنای انجام نتایج بدست آمده از این آزمون‌ها اختلاط حاوی ۰/۰۸ درصد وزنی اکسیدگرافن و ۵۰ درصد وزنی سرباره به عنوان اختلاط بهینه برای ساخت نمونه‌های بتنی جهت آزمون نفوذ فشاری انتخاب گردید. آزمون نفوذ فشاری در شرایط مختلف شامل سه فشار مختلف (۳ بار، ۵ بار و ۷ بار)، دو دمای مختلف (۲۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد) و دو زمان مختلف (۱ روز و ۳ روز) بر روی نمونه‌های پوزولانی و غیر پوزولانی انجام گردید و در نهایت پروفیل غلظت کلر در آن‌ها بدست آمد. همچنین نمونه‌ها بعد از انجام آزمون نفوذ فشاری مورد بررسی‌های ریزساختاری نیز قرار گرفتند. کلیه نتایج بدست آمده در گزارش مرحله سوم مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت.

۳ فصل سوم: تجزیه و تحلیل اطلاعات و تعیین مواد افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه های بتنی در مجاورت آب دریا و تهیه دستورالعمل مربوطه

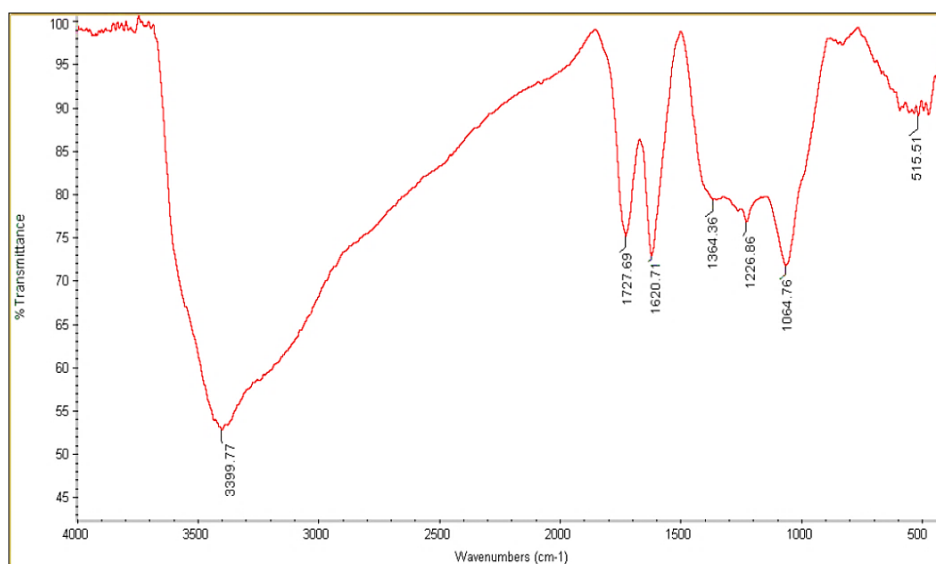
۳-۱ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از مرحله دوم پروژه

۳-۱-۱ تجزیه و تحلیل نتایج تهیه مواد اولیه لازم جهت انجام آزمون‌ها

۳-۱-۱-۱ تحلیل نتایج مشخصه‌یابی نانو اکسید گرافن

۳-۱-۱-۱-۱ طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) اکسید گرافن

طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) از آزمون‌های مشخصه‌یابی است که قادر است مقدار حضور و نوع گروه‌های عاملی موجود در اکسید گرافن را تعیین کند (شکل ۱-۱). اکسید گرافن دارای گروه‌های عاملی مختلفی از جمله هیدروکسیل، اپوکسی، کربوکسیل، فنول، اتر و آلدهید است. همانطور که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود، یک نوار ارتعاش قوی در ناحیه $3379/77 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به پیوند O-H یعنی گروه هیدروکسیل وجود دارد که ناشی از جذب رطوبت و حضور مولکول‌های آب است. همچنین دو نوار ارتعاش کششی در ناحیه‌های $1727/69 \text{ cm}^{-1}$ و $1620/71 \text{ cm}^{-1}$ مشاهده می‌شوند که به ترتیب مربوط به پیوندهای کربونیل C=O و پیوند C=C می‌شوند که نشان دهنده‌ی کربن‌های اکسید نشده است. نوار ارتعاش کششی در ناحیه $1364/36 \text{ cm}^{-1}$ و $1226/86 \text{ cm}^{-1}$ متعلق به پیوند C-OH می‌باشد. در ناحیه $1064/76 \text{ cm}^{-1}$ و $1064/76 \text{ cm}^{-1}$ نوارهای ارتعاش کششی مربوط به پیوند C-O گروه اپوکسی قابل مشاهده است. نوار ارتعاشی در ناحیه $515/51 \text{ cm}^{-1}$ نیز نشان دهنده پیوند C-H است. شدت بالای پیک‌ها، نشان دهنده‌ی وجود این گروه‌های عاملی به عنوان گروه‌های اصلی در نانو اکسید گرافن خریداری شده بعد از فرایند اکسیداسیون است که با منابع مطابقت خوبی دارد [۱۷۱].

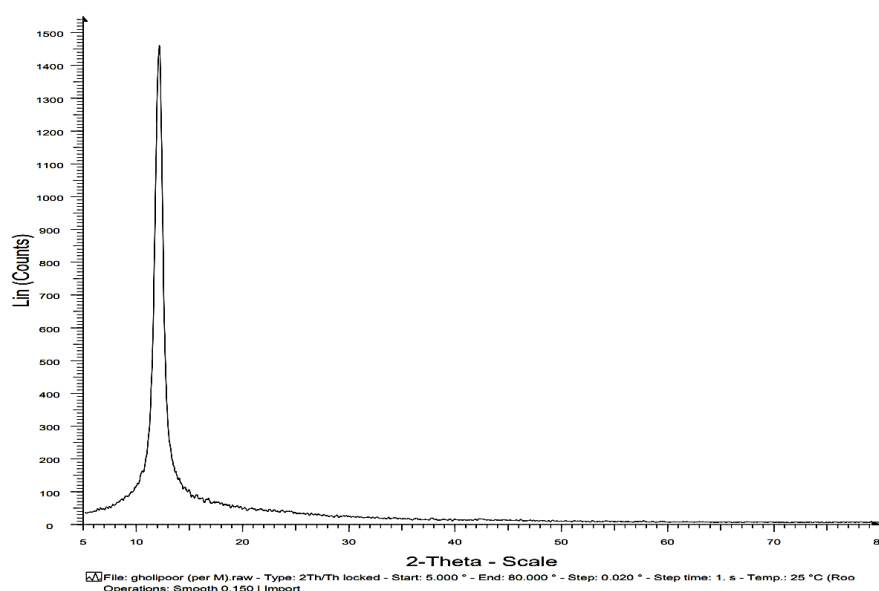


شکل ۳-۱- طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) نانو اکسید گرافن استفاده شده (تولید شده به روش هامر).

۳-۱-۱-۱-۲ تفرق اشعه ایکس /XRD اکسید گرافن

پیک ظاهر شده در الگوی پراش شکل ۳-۲ در زاویه‌ی تفرق $2\theta = 12^\circ$ مربوط به صفحه (۰۰۱) اکسید گرافن است. بر مبنای طیف پراش بدست آمده، کلیه پیک‌های مربوط به گرافیت اولیه حذف شده‌اند و تک

پیک ظاهر شده در طیف XRD مربوط به به نانو صفحات اکسید گرافن می‌باشد که با منابع قبلی کاملاً مطابقت دارد [۱۹۴، ۱۹۵]. مشاهده هرگونه پیک دیگری در نمودار XRD اکسیدگرافن نشان دهنده اکسیداسیون ناقص گرافیت و وجود ناخالصی باقی مانده در اکسیدگرافن می‌باشد. نتایج بدست آمده از الگوی پراش اکسیدگرافن تایید می‌کند که گروه‌های عاملی اکسیژن در میان صفحات گرافیت اولیه وارد شده‌اند و برهم کنش میان صفحات را ضعیف کرده‌اند. این امر به پراکندگی راحت‌تر ورقه‌های اکسیدگرافن در محلول‌های آبی کمک می‌کند و بنابراین می‌توان از آن یک سوسپانسیون پایدار تهیه نمود. بر اساس مطالعات قبلی فاصله بین صفحات در ساختار کرسیتالی اکسید گرافن را می‌توان از الگوی پراش اشعه ایکس و با به کارگیری قانون براگ محاسبه کرد: بر اساس این قانون $\lambda = 2d \sin\theta$ که در آن منظور از λ طول موج پرتوی اشعه ایکس مشخصه ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$)، d فاصله بین صفحات اکسید گرافیت یا صفحات مجاور اکسید گرافن کاهش یافته و θ زاویه پراش است. با بررسی الگوی پراش پرتو ایکس بدست آمده و با در نظر گرفتن زاویه مربوط به پیک اصلی بر فاصله میان صفحات اکسیدگرافن $7/3$ آنگستروم خواهد بود.



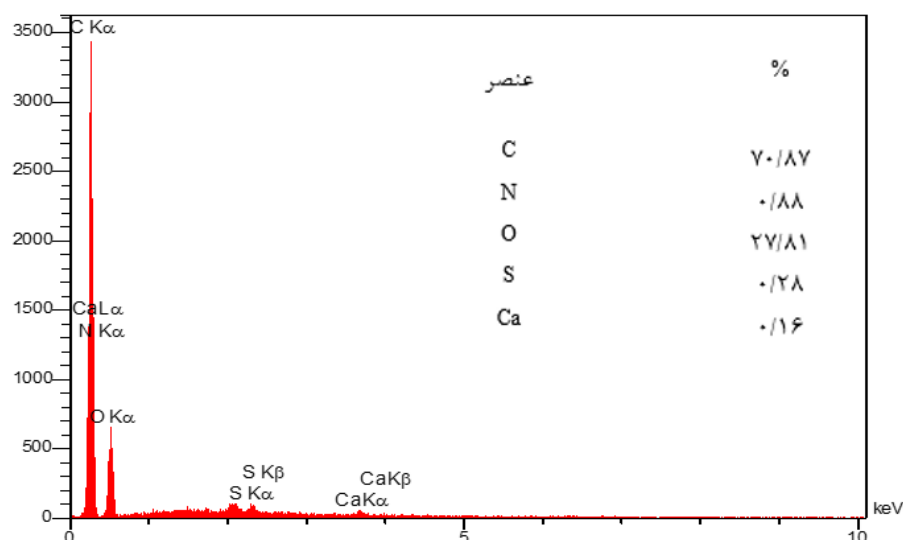
شکل ۲-۳- نمودار پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به نانو اکسید گرافن

بر اساس منابع دیگر صفحات گرافیت در محدوده 2θ بین ۲۵ تا ۳۰ درجه پراش می‌دهند [۱۹۶]. بنابراین با استفاده از قانون براگ فاصله صفحات در ساختار گرافیت حدوداً بین $2/9$ تا $3/6$ آنگستروم محاسبه می‌شود. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که در فرآیند تولید اکسیدگرافن فاصله میان صفحات گرافیت اولیه افزایش یافته که این امر تایید کننده ورود گروه‌های عاملی در بین صفحات اکسیدگرافن است [۱۹۴].

۳-۱-۱-۱-۳ مشخصه یابی اکسیدگرافن با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM)

تصاویر FE-SEM تهیه شده از نمونه پودری اولیه در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. بر اساس تصاویر تهیه شده، میانگین ابعاد صفحات اکسیدگرافن بین ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر می‌باشند. ضخامت متوسط صفحات نیز در حدود $7/7$ نانومتر تعیین شد. مورفولوژی چین خورده نانو صفحات اکسیدگرافن در تصاویر FE-SEM تهیه

شده تا حدودی قابل تشخیص است که از ویژگی‌های بارز این ماده به شمار می‌آید [۱۹۷]. ساختار اکسیدگرافن تهیه شده شامل لایه‌های بسیار نازک بوده و برخی از آن‌ها یک ساختار سه بعدی به هم پیوسته و متعاقباً یک ساختار شبکه‌ای متخلخل ایجاد کرده‌اند. چنین ساختاری توسط سایر محققین نیز مشاهده شده است [۱۷۴، ۱۹۲، ۱۹۳].

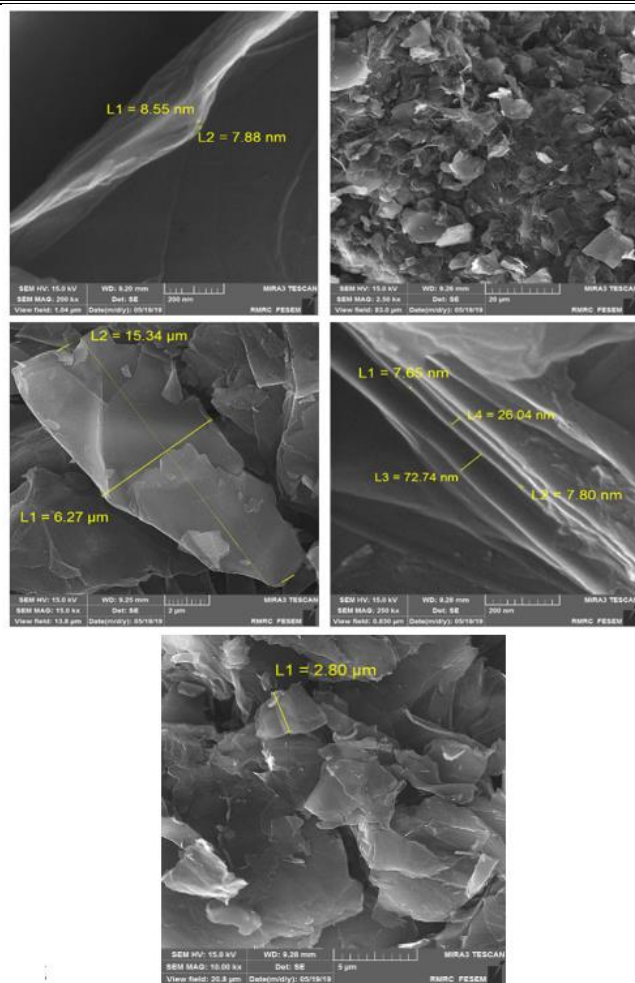


شکل ۳-۳- آنالیز عنصری EDS اکسید گرافن .

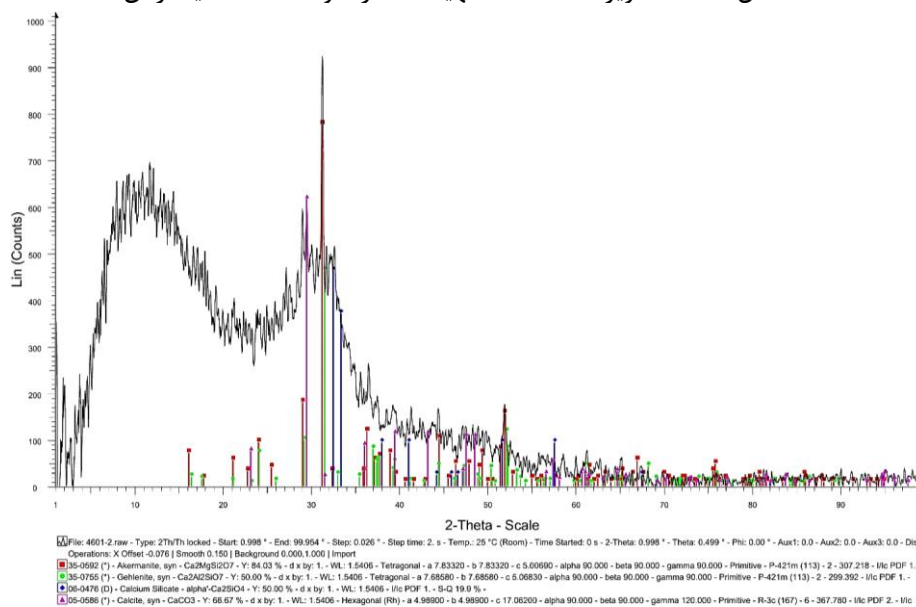
در شکل ۳-۳ آنالیز عنصری اکسیدگرافن استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. بر اساس آنالیز عنصری حضور عناصری چون نیتروژن، کربن و سولفور در ترکیب اکسیدگرافن تشخیص داده شده است. نسبت مقدار کربن به اکسیژن در گرافیت بر اساس منابع معمولاً در حدود ۲۵ می‌باشد در حالی که این نسبت با تبدیل گرافیت به اکسیدگرافن به نسبتی در حدود ۱ تا ۲ کاهش می‌یابد [۱۹۸]. نسبت کربن به اکسیژن در اکسیدگرافن استفاده شده در این پژوهش ۲/۵ می‌باشد.

۲-۱-۱-۳ تحلیل نتایج مشخصه‌یابی سرباره گرانوله

نتایج آنالیز فاز XRD و عنصری XRF سرباره گرانوله در شکل ۳-۵ و جدول ۳-۱ نشان داده شده است. یکی از مشخصات مهم در سرباره گرانوله نسبت درصد اکسید کلسیم CaO به اکسید سیلیسیم SiO_2 است که این نسبت بعد از انجام آزمون‌های XRD و XRF بر اساس استاندارد ASTM E1621، ۱/۴ تعیین گردید. بر اساس نتایج آنالیز فاز و عنصری، ترکیبات اصلی در سرباره استفاده شده در این پژوهش CaO و SiO_2 می‌باشند و بعد از آن‌ها ترکیبات Al_2O_3 و MgO بیشترین مقادیر را به خود اختصاص می‌دهند. بر اساس الگوی پراش بدست آمده تعداد پیک‌های ظاهر شده در طیف چندان زیاد نبوده و این امر نشان دهنده آن است فازهای زیاد کریستالی در آن موجود نمی‌باشد. در محدوده 2θ ۳۰ الی ۵۰ درجه پیک‌های اصلی مربوط به ترکیبات $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ و همچنین Ca_2SiO_4 به چشم می‌خورند که مطابق با منابع قبلی هستند [۱۹۹].



شکل ۴-۳- تصاویر FE-SEM تهیه شده از نانوصفحات اکسیدگرافن.



شکل ۵-۳- آنالیز XRD سرباره گرانوله

۳-۱-۲ تجزیه و تحلیل نتایج آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل مقاومت فشاری، نفوذپذیری، آزمون تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی

۳-۱-۲-۱ تجزیه و تحلیل نتایج آزمون‌های مکانیکی

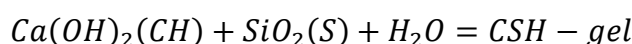
شکل‌های ۳-۷ و ۳-۸ نتایج آزمون‌های مکانیکی برای نمونه‌های بتنی با اختلاط‌های گوناگون را پس از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن سرباره گرانوله و اکسیدگرافن در زمینه سیمانی، نقش موثری در بهبود خواص مکانیکی بتن‌ها به ویژه در نمونه‌های G1، G2، S1، SG1، SG3 داشته است. به منظور نامگذاری راحت‌تر نمونه‌های بتنی، هر کدام از اختلاط‌ها با یک کد مشخص گردیده است و اختلاط مربوط به هر کدام از نمونه‌ها در قالب یک جدول در زیر هر نمودار ارائه شده است.

جدول ۳-۱- آنالیز XRD و XRF سرباره گرانوله

درصد وزنی	ترکیبات
۰/۵۵	Na ₂ O
۰/۰۶	P ₂ O ₅
۴۳/۶۴	CaO
۰/۱۸	SrO
۶/۱۷	MgO
۱/۲۵	S
۱/۸۱	TiO ₂
۰/۳۲	BaO
۹/۱۶	Al ₂ O ₃
۰/۰۲	Cl
۱/۹۶	MnO
۱/۵۰	L.O.I
۳۱/۱۰	SiO ₂
۱/۱۱	K ₂ O
۱/۱۷	Fe ₂ O ₃
۱۰۰/۰	مجموع

بر اساس نتایج بدست آمده، افزودن ۳۰ درصد وزنی سرباره گرانوله در نمونه‌های فاقد اکسیدگرافن منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به میزان ۲۱/۸ و ۲۹/۰ درصد به ترتیب پس از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز می‌گردند. بر اساس منابع قبلی، با افزایش مقدار سرباره گرانوله در زمینه سیمانی بتن‌ها، زمان بیشتری نیز برای کامل شدن مرحله عمل‌آوری بتن نیاز است تا به بیشینه مقدار استحکام برسند [۲۶، ۲۹، ۱۵۵، ۱۵۶، ۱۵۸، ۲۰۰]. این امر به دلیل واکنش‌های پوزولانی سرباره در زمینه سیمان است که در رابطه ۱-۱ نشان داده شده

است:



این واکنش‌های پوزولانی اساساً واکنش‌های بسیار آهسته‌ای هستند و تا حد زیادی به مقدار کلسیم هیدروکسید در دسترس بستگی دارند. بنابراین نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان سرپاره به مدت زمان بیشتری نیاز دارند تا به بیشینه مقدار استحکام خود برسند. از طرفی طولانی‌تر شدن فرآیند عمل‌آوری، خود مشکلاتی را در پی دارد زیرا سیمان پرتلند به دلیل هیدراسیون این فازها، به ویژه فازهای آلایت و بلیت، به تدریج سخت‌تر شده و در نتیجه آن کلسیم هیدروکسید آزاد می‌شود. کلسیم هیدروکسید به دلیل انحلال‌پذیری زیادی که دارد به راحتی شسته می‌شود و باعث تخریب نمونه‌های بتنی می‌گردد. هنگامی که سرپاره گرانوله به سیمان اضافه می‌شود به جای تشکیل کلسیم هیدروکسید، کلسیم سیلیکات هیدراته در ساختار ایجاد می‌گردد [۱۵۸، ۲۹]. کلسیم سیلیکات یک ترکیب چسبنده است و باعث بهبود خواص مکانیکی در بتن می‌گردد.

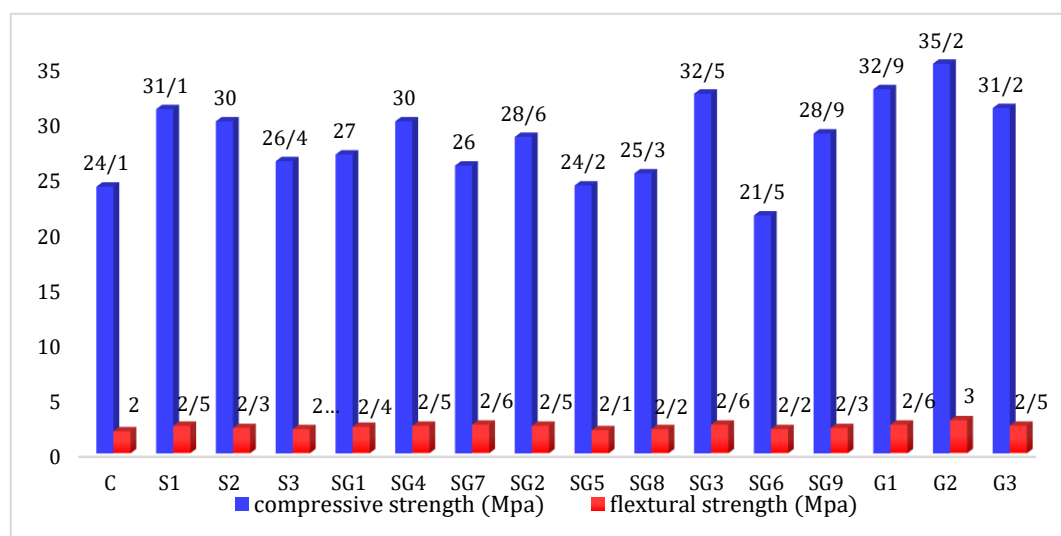
۱-۱-۲-۳ بررسی اثر اکسید گرافن و سرپاره بر استحکام فشاری

شکل ۸-۱ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی که تنها حاوی پوزولان سرپاره بوده‌اند را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده شد که افزودن سرپاره تا ۳۰ درصد وزنی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد اکسید گرافن موثر بوده است اما افزودن مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد وزنی می‌تواند حتی منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شود. برای مثال زمانی که مقدار سرپاره در نمونه‌های ۲۸ روزه فاقد اکسید گرافن از ۳۰ درصد وزنی به ۵۰ درصد وزنی افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری بتن به میزان ۱۷/۸ درصد افت می‌کند. بنابراین در نمونه‌های فاقد اکسید گرافن ۳۰ درصد وزنی به عنوان مقدار بهینه بدست آمد.

همچنین مشاهده شد که در اغلب اختلاط‌ها حاوی هر دو پوزولان سرپاره و اکسید گرافن، بعد از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری افزودن مقدار ۳۰ درصد وزنی برای اینکه بتن به بیشینه مقادیر مقاومت فشاری برسد کافی بوده است. برای مثال در نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی ۰/۰۵ درصد وزنی اکسید گرافن (SG۲، SG۵، SG۸) بالاترین مقاومت فشاری در اختلاط شامل ۳۰ درصد وزنی سرپاره بدست آمده است (SG۲). این مورد در نمونه‌های دیگری همچون نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه اختلاط SG۳ و ۹۰ روزه اختلاط SG۱ هم مشاهده شده است. در منابع پژوهشی قبلی نیز گزارش شده است که در نمونه‌های بتنی در سنین اولیه، مقاومت فشاری با افزایش مقدار سرپاره از یک حد معینی کاهش می‌یابد [۱۵۸، ۳۲].

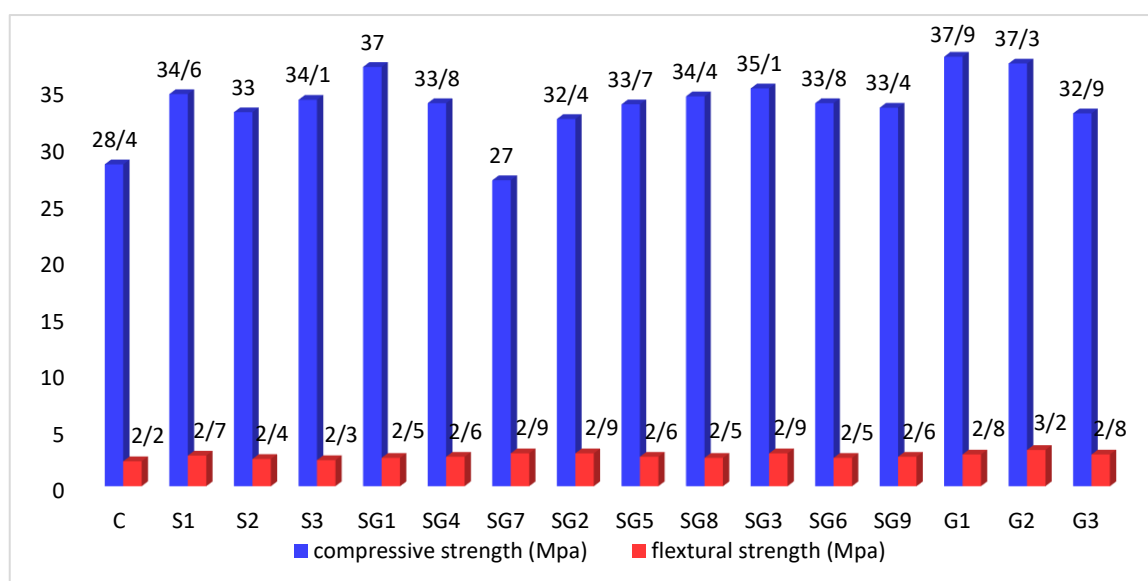
کاهش مقاومت فشاری بتن به میزان ۱۱/۷ درصد از ۷۷ مگاپاسکال به ۶۸ مگاپاسکال زمانی که مقدار سرپاره به ۵۰ درصد وزنی افزایش می‌یابد در منابع قبلی نیز گزارش شده است [۱۵۸]. اگرچه برخی موارد استثنا هم در این بین به چشم می‌خورد. برای مثال در برخی از اختلاط‌ها دیده می‌شود که افزایش مقدار سرپاره تا ۴۰ درصد وزنی هم موثر بوده و سطوح بالاتری از مقاومت فشاری نسبت به اختلاط‌های شامل ۳۰ درصد وزنی سرپاره بدست آمده است. در نمونه بتنی ۲۸ روزه با اختلاط ۰/۰۱ درصد وزنی اکسید گرافن و ۴۰ درصد وزنی سرپاره (SG۴) مقاومت فشاری نسبت به اختلاط ۰/۰۱ درصد وزنی اکسید گرافن و ۳۰ درصد وزنی سرپاره (SG۱) در حدود ۱۱ درصد افزایش داشته است. همچنین در نمونه‌های بتنی ۹۰ روزه با اختلاط ۰/۰۵ درصد وزنی اکسید گرافن و ۵۰ درصد وزنی سرپاره (SG۸) مقاومت فشاری ۳۴/۴ مگاپاسکال بوده است که نسبت به اختلاط ۰/۰۵ درصد وزنی

اکسیدگرافن و ۳۰ درصد وزنی (SG۲) سرباره ۶ درصد افزایش داشته است.



شکل ۶-۳- نتایج آزمون‌های مکانیکی فشاری و خمشی برای اختلاط‌های گوناگون پس از ۲۸ روز.

Sample	C	S1	S2	S3	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	G1	G2	G3
GO	0	0	0	0	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1
GGBFS	0	30	40	50	30	30	30	40	40	40	50	50	50	0	0	0

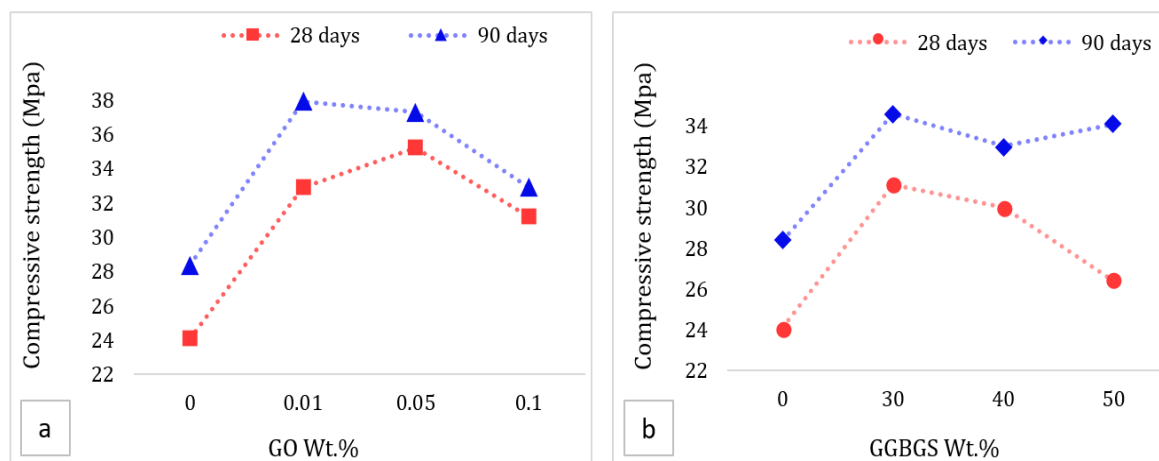


Sample	C	S1	S2	S3	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	G1	G2	G3
GO	0	0	0	0	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1	0.01	0.05	0.1
GGBFS	0	30	40	50	30	30	30	40	40	40	50	50	50	0	0	0

شکل ۷-۳- نتایج آزمون‌های مکانیکی فشاری و خمشی برای اختلاط‌های گوناگون پس از ۹۰ روز.

بر اساس تمام آنچه گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که اگر هدف تنها بهبود خواص مکانیکی باشد، افزودن ۳۰ درصد وزنی سرباره گرانوله مقداری مناسب و کافی برای دستیابی به سطوح بالایی از مقاومت فشاری است. بسیاری از منابع قبلی نیز مقدار ۳۰ درصد وزنی سرباره را به عنوان یک اختلاط بهینه برای دستیابی به

استحکام‌های فشاری بالا گزارش کرده‌اند [۱۵۸, ۲۰۱]. به عنوان مثال در یکی از مطالعات اخیر گزارش شده است که با افزودن ۳۰ درصد وزنی سرباره، مقاومت فشاری بتن حتی تا ۶۱ مگاپاسکال هم افزایش می‌یابد [۲۰۱]. در این پژوهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد وزنی سرباره، ۵۸/۶ مگاپاسکال نیز بدست آمده است. در نمونه‌های فاقد سرباره گرانوله مشاهده شد که افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی اکسیدگرافن منجر به افزایش ۳۰ الی ۴۰ درصدی مقاومت فشاری بتن بعد از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز می‌گردد. اگرچه با افزودن مقادیر بیشتر اکسید گرافن تا ۰/۱ درصد وزنی، مشاهده شد که مقاومت فشاری بتن افت می‌کند. چنین روندی می‌تواند به این خاطر باشد که هر چه مقدار اکسیدگرافن در زمینه سیمان بیشتر شود، امکان آگلومره شدن ذرات نیز بیشتر خواهد شد و بنابراین توزیع همگن آن‌ها در تمام زمینه سیمانی کار دشواری خواهد بود. از آنجایی که نقش بهبود دهنده‌گی اکسیدگرافن در خصوص خواص مکانیکی تا حد زیادی وابسته به میزان توزیع یکنواخت آن در زمینه سیمان است، بنابراین در مقادیر بالای آن احتمالاً پدیده آگلومره شدن در نمونه‌ها رخ داده است و در نتیجه خواص مکانیکی افت کرده‌اند.

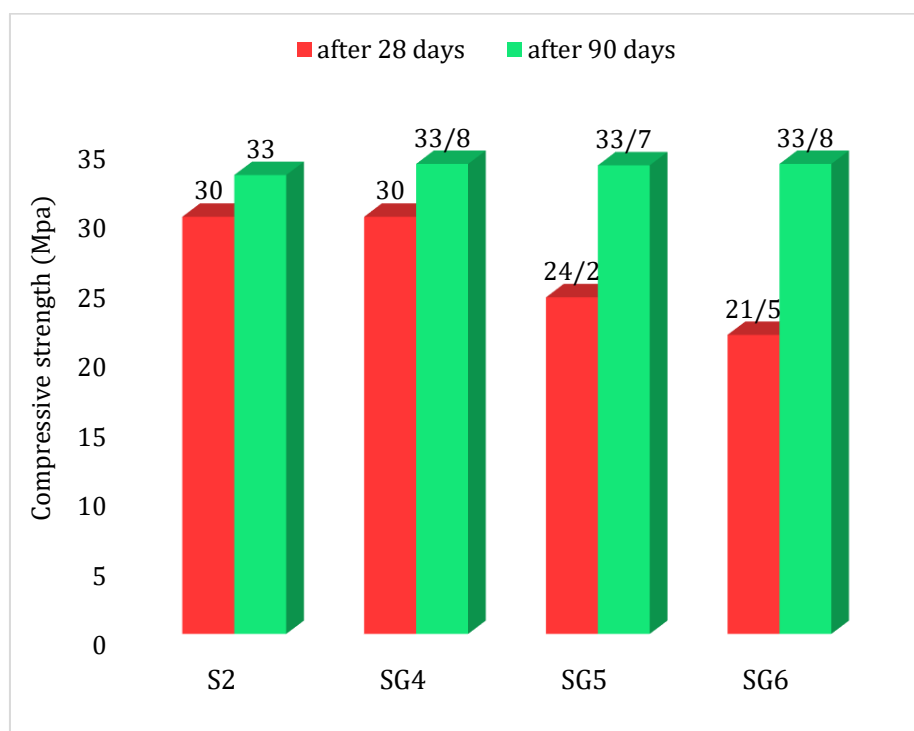


شکل ۸-۳- نتایج بررسی اثر سرباره و اکسیدگرافن به تنهایی بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی

بر خلاف نمونه‌هایی که تنها حاوی اکسید گرافن بودند، در نمونه‌های حاوی سرباره و اکسیدگرافن به طور همزمان، تأثیر افزودن اکسیدگرافن بر روی خواص مکانیکی روند مشخصی ندارد. برای مثال در نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی ۳۰ درصد وزنی سرباره، افزایش مقدار گرافن از ۰/۰۱ درصد وزنی تا ۰/۱ درصد وزنی باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب به میزان ۲۰/۳۷ و ۸/۳۳ درصد شده است. اگرچه زمانی که مقدار سرباره در سیمان ۴۰ درصد بوده است با افزایش مقدار گرافن تا ۰/۱ درصد وزنی، مقاومت فشاری کاهش یافته است. به عنوان مثال در اثر افزودن اکسیدگرافن تا ۰/۱ درصد وزنی، مقاومت فشاری به مقدار ۲۸/۳۳ درصد در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافته است.

شکل ۹-۱ تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را نسبت به مقادیر افزوده شده اکسیدگرافن پس از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد (SG_6 , SG_5 , SG_4 , S_2). به نظر می‌رسد که نمونه‌هایی که حاوی مقادیر بالاتری اکسیدگرافن بوده‌اند در مدت زمان‌های بیشتری به استحکام فشاری می‌رسند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حضور مقادیر بالاتر اکسیدگرافن در زمینه سیمانی، مدت زمان لازم برای اتمام فرآیند عمل‌آوری بتن

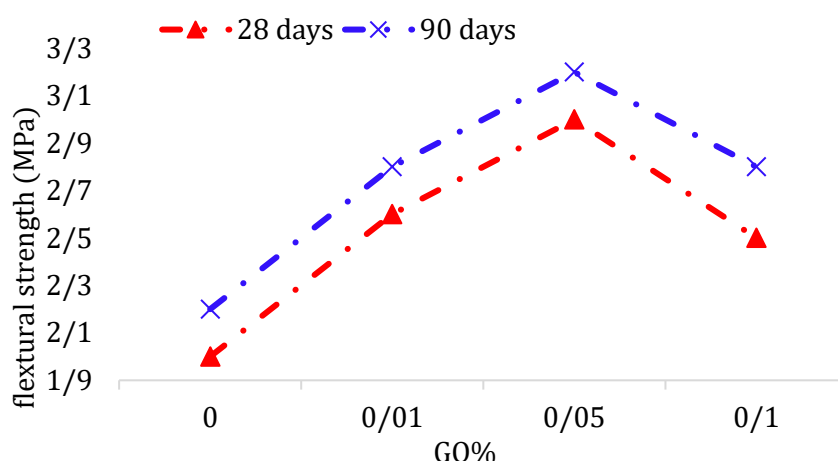
طولانی‌تر خواهد شد. و در صورتی این زمان طولانی‌تر در فرآیند ساخت بتن‌ها لحاظ نشود، افزودن مقادیر بالاتر اکسید گرافن نه تنها منجر به خواص مکانیکی بالاتر نمی‌شود بلکه باعث افت آن نیز می‌گردد. این امر در منابع قبلی نیز گزارش شده است که با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌های بتنی حاوی اکسید گرافن، استحکام فشاری آن‌ها افزایش خواهد یافت [۲۰۲].



شکل ۹-۳- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر مبنای مقادیر افزوده شده اکسید گرافن پس از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز.

۳-۱-۲-۱-۲- بررسی اثر اکسید گرافن و سرباره د بر استحکام خمشی

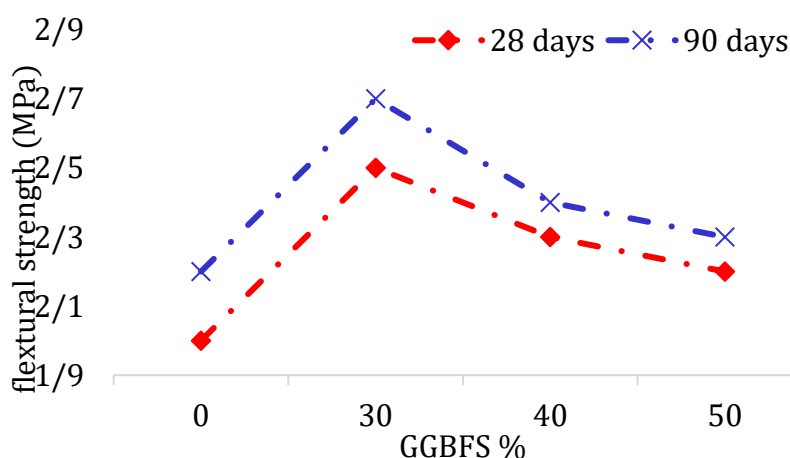
در شکل‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱ تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی که تنها حاوی یکی از پوزولان‌های بوده‌اند، نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳-۱۰ دیده می‌شود، مقدار بهینه افزودن اکسید گرافن در نمونه‌هایی که فاقد سرباره بوده‌اند برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه، ۰/۰۵ درصد وزنی می‌باشد. این در حالی است که مقدار بهینه برای استحکام فشاری ۰/۰۱ درصد وزنی بدست آمد. به نظر می‌رسد مقادیر بالاتر اکسید گرافن در بهبود مقاومت خمشی نقش موثرتری ایفا می‌کنند. بر اساس شکل ۳-۱۱ مقدار بهینه سرباره در نمونه‌های فاقد اکسید گرافن برای دستیابی به بالاترین حد مقاومت فشاری ۳۰ درصد وزنی بوده است. بنابراین با افزودن ۳۰ درصد وزنی سرباره به نمونه‌های بتنی می‌توان هم به بیشینه مقاومت فشاری و هم به بیشینه مقاومت خمشی دست یافت.



شکل ۱۰-۳- اثر اکسیدگرافن بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی.

بر اساس نتایج بدست آمده، اکسید گرافن در اختلاط‌های فاقد سرباره گرانوله، نقش موثرتری نسبت به اختلاط‌های حاوی سرباره داشته است. بهترین نتایج بدست آمده از مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی مربوط به نمونه‌هایی است که به مدت ۹۰ روز عمل‌آوری شده‌اند. از میان نمونه‌های ۹۰ روزه بهترین و بالاترین نتایج خواص مکانیکی مربوط به نمونه‌های G1، G2، و SG1 بوده است (جدول ۱-۲).

در یک مطالعه قبلی افزایش ۱۵ الی ۳۳ درصدی در مقاومت فشاری بتن با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی اکسیدگرافن گزارش شده است [۱۰۰]. در یک مطالعه‌ی دیگر میزان بهبود بیشتر در حدود ۴۸ درصد تا ۸۷/۶۹ مگاپاسکال هم با همین میزان افزودن اکسید گرافن گزارش شده است [۱۰۶]. در پژوهشی دیگر مشاهده شد که با افزودن ۰/۰۳ درصد اکسیدگرافن به زمینه سیمانی مقاومت فشاری بتن از ۴۳ مگاپاسکال به ۶۳ مگاپاسکال افزایش می‌یابد [۲۰۳]. مقدار ۱۶ درصد افزایش مقاومت فشاری از ۴۳ مگاپاسکال به ۵۱ مگاپاسکال در اثر افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی اکسیدگرافن توسط محققان دیگر گزارش شده است [۱۰۰].



شکل ۱۱-۳- اثر سرباره گرانوله بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی در غیاب اکسیدگرافن.

در پروژه حاضر بیشترین مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بدست آمده بعد از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز با افزودن ۰/۰۵ درصد اکسیدگرافن به ترتیب تا حدود ۴۶ درصد (تا ۳۵/۲ مگاپاسکال) و ۳۱ درصد (تا ۳۷/۳

مگاپاسکال) افزایش یافته است. اگرچه در مطالعه‌ی مشابه دیگری توسط مائولی و همکارانش، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه با افزودن ۰/۰۵ درصد اکسیدگرافن در حضور ۲۵ درصد سرباره به میزان ۱۶ درصد افت کرده است [۲۰۴]. به نظر می‌رسد که میزان استحکام بخشی اکسید گرافن در بتن تا حد بسیار زیادی به کیفیت تولید آن بستگی دارد. به عنوان مثال پارامترهای همچون خلوص آن و پراکنده‌سازی یکنواخت آن در زمینه سیمان از جمله پارامترهای بسیار مهمی و تاثیرگذاری هستند که باعث اختلاف موجود در نتایج پژوهش‌های گوناگون می‌گردند.

جدول ۲-۳- بهترین نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی

sample	mixture	Curing duration	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Improvement (%)
G1	0.01 GO- 0 GGBFS	90 days	37.9	2.8	33.4
G2	0.05 GO- 0 GGBFS	90 days	37.3	3.2	31.3
SG1	0.01 GO- 30GGBFS	90 days	37.0	2.5	30.2

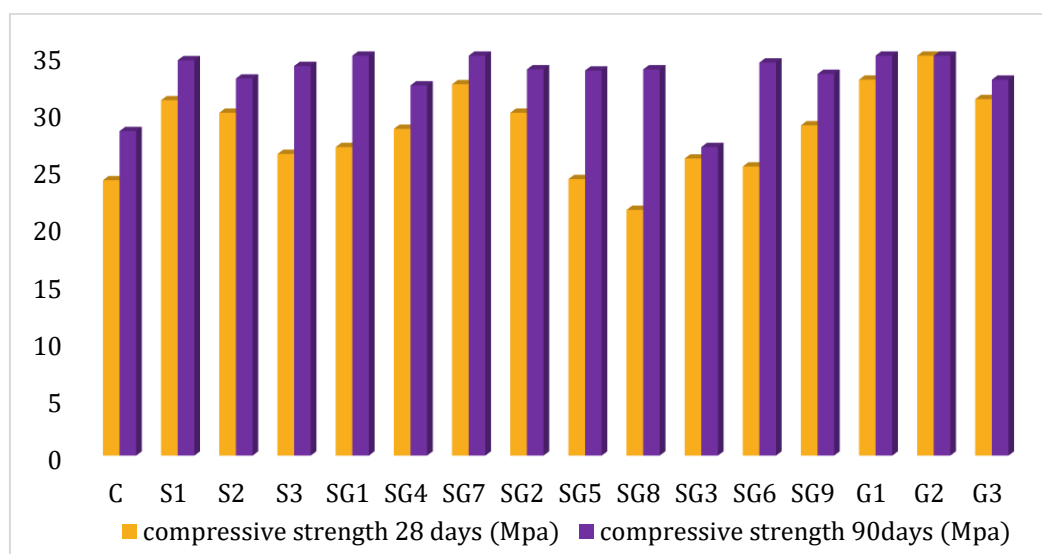
۳-۱-۲-۱-۳- تأثیر زمان عمل‌آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی

به منظور بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر خواص مکانیکی نهایی نمونه‌های بتنی در شکل ۱۲-۳ نتایج آزمون استحکام فشاری برای هر اخلاط معین در دو زمان ۲۸ و ۹۰ روز در کنار هم نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری بتن در حضور و عدم حضور مواد پوزولانی با طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲-۳ نمودارهای بنفش رنگ استحکام فشاری بتن بعد از گذشت ۹۰ روز و نمودارهای زرد رنگ استحکام فشاری بتن بعد از گذشت ۲۸ روز را نشان می‌دهند. کاملاً مشهود است که مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه به طور قابل توجهی در سطوح بالاتری در مقایسه با نمونه‌های ۲۸ روزه قرار دارند. دلیل این امر این است که با گذشت زمان، واکنش‌های هیدراسیون به میزان بیشتر و کامل‌تر صورت می‌گیرند و بنابراین ساختار نهایی بتن تولید شده یک ساختار بی عیب و نقص‌تر خواهد بود [۲۰۵].

۳-۱-۲-۲- تجزیه و تحلیل نتایج آزمون‌های تسریع شده نفوذ یون کلر، آزمون مقاومت و هدایت الکتریکی بر روی نمونه‌های بتنی

نتایج بدست آمده از آزمون مقاومت الکتریکی چهار نقطه‌ای و نر بر روی نمونه‌های بتنی بعد از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز در جدول ۱-۳ ارائه شده است. همچنین به منظور تسهیل امر مقایسه تمامی داده‌ها در یک نمودار ستونی در شکل ۱۳-۳ نیز نشان داده شده‌اند. یکی از مهمترین مزایای جایگزینی سیمان در بتن با پوزولان سرباره گرانوله، کاهش نفوذپذیری بتن به ویژه در برابر یون مهاجم کلر می‌باشد. سرباره گرانوله در واقع با به دام انداختن یون‌های کلر ورود کرده به زمینه سیمانی باعث کاهش یون‌های کلر آزاد می‌گردد. این یون‌ها در صورتی که در زمینه سیمانی آزاد باقی بمانند، قادر به نفوذ و پیشروی بیشتر در بتن بوده و در نهایت با رسیدن غلظت کلر در سطح آرماتور به غلظت بحرانی، خوردگی آرماتور به طور ناگهانی شدت می‌گیرد. با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از آزمون و نر برای نمونه‌های بتنی، بالاترین مقاومت الکتریکی بدست

آمده مربوط به نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه SG۹ با اختلاط ۰/۱ درصد وزنی اکسیدگرافن و ۵۰ درصد وزنی سرباره گرانوله بوده است. بعلاوه این نمونه‌ها پایین‌ترین میزان عبور بارالکتریکی در آزمون هدایت الکتریکی RCPT (۲۰۵۸-۱۲۰۰ کولن) را داشته‌لند (جدول ۳-۵ و شکل ۳-۱۷). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های ساخته شده با چنین اختلاطی بالاترین مقاومت را در برابر نفوذ آب و یون کلر از خود نشان خواهند داد. بر اساس مشاهدات و نتایج بدست آمده، افزودن سرباره در نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه، بارالکتریکی عبوری در آزمایش RCPT را به طور قابل توجهی کاهش داده است. این امر نشان دهنده مقاومت بالای این نمونه‌های پوزولانی بتنی در برابر نفوذ یون کلر است.



شکل ۳-۱۲- تأثیر زمان عمل آوری بر استحکام فشاری نمونه‌های بتنی

بر اساس مقدار بارالکتریکی عبوری محاسبه شده در آزمون RCPT می‌توان میزان نفوذ کلر را در چندید سطح طبقه‌بندی نمود. این طبقه‌بندی در منابع قبلی توسط محققین صورت گرفته است و نتایج آن در جدول ۴-۱ ارائه شده است. بر اساس آن در صورتی که بار عبوری از یک نمونه بتنی در آزمون هدایت الکتریکی بیش از ۴۰۰۰ کولن باشد می‌توان چنین نتیجه گرفت که مقاومت آن در برابر نفوذ کلر بسیار پایین بوده و کلر به راحتی و به مقدار زیادی در آن نفوذ خواهد کرد. در مقابل اگر بار عبوری اندازه گیری شده در آزمون کمتر از ۱۰۰۰ کولن باشد نشان دهنده مقاومت عالی یک نمونه بتنی در برابر نفوذ یون کلر خواهد بود [۲۰۶].

در مطالعات قبلی میزان بار الکتریکی عبوری در بتن زمانی که به آن ۳۰ درصد وزنی سرباره گرانوله اضافه شده باشد، ۱۶۵۹/۶ کولن گزارش شده است [۲۰۷]. بعلاوه در پژوهش دیگری توسط مائوچی و همکارانش، بار عبوری از نمونه‌ها بتنی ۹۰ روزه حاوی مقادیر ۴۰ و ۶۰ درصد وزنی سرباره گرانوله به ترتیب ۱۳۹۴ و ۱۸۸۳ کولن گزارش شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش، بار الکتریکی عبوری در آزمون RCPT به طور قابل توجهی با افزایش مقدار سرباره در زمینه سیمانی کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۳-۳- نتایج آزمون مقاومت الکتریکی و نر برای نمونه‌های بتنی با طرح اختلاط‌های گوناگون

مقاومت الکتریکی		درصد سر باره	درصد اکسیدگرافن
۹۰ روزه	۲۸ روزه		
۱۴	۸.۸	۰	۰
۲۵.۷	۱۲.۸	۳۰	۰
۳۸.۱	۱۵.۷	۴۰	۰
۴۹	۱۹.۱	۵۰	۰
۲۷.۸	۱۴.۵	۳۰	۰.۰۱
۳۶.۶	۱۵.۱	۳۰	۰.۰۵
۲۸.۹	۱۵.۶	۳۰	۰.۱
۳۶	۱۵.۹	۴۰	۰.۰۱
۳۶.۳	۱۸.۳	۴۰	۰.۰۵
۳۶.۸	۲۰.۵	۴۰	۰.۱
۴۸.۶	۲۰.۸	۵۰	۰.۰۱
۴۵.۶	۲۰.۷	۵۰	۰.۰۵
۴۰.۸	۲۲.۶	۵۰	۰.۱
۱۳.۵	۱۰.۷	۰	۰.۰۱
۱۳.۷	۹.۵	۰	۰.۰۵
۱۲.۴	۸.۸	۰	۰.۱

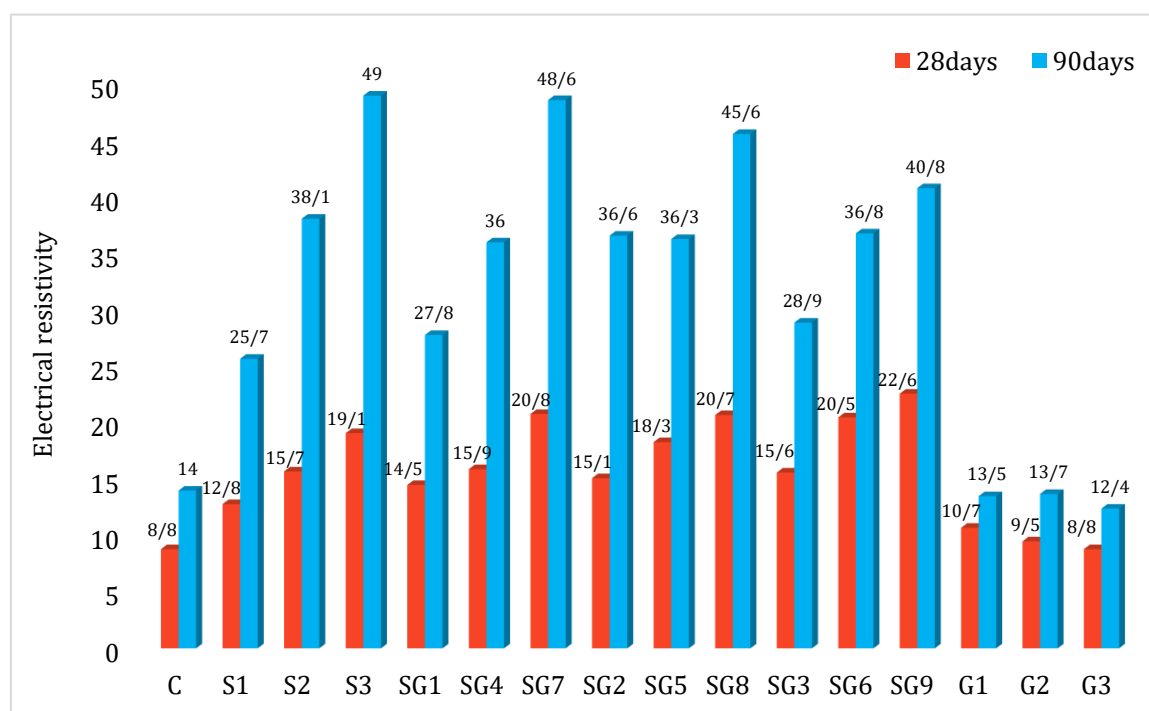
جدول ۳-۴- معیار طبقه‌بندی مقاومت بتن در برابر نفوذ کلر بر اساس مقدار بار عبوری در آزمون RCPT

میزان نفوذپذیری یون کلر	مقدار بار عبوری بر حسب کولن
بالا	$4000 <$
متوسط	$4000 - 2000$
کم	$2000 - 1000$
خیلی کم	$1000 - 100$
ناچیز	$100 >$

این نشان دهنده نقش بسیار موثر پوزولان سر باره در کاهش نفوذ یون کلر در بتن است که به واسطه محدود کردن حرکت آن در زمینه سیمانی به وقوع می‌پیوندد. به عبارتی سر باره یون‌های کلری را که آزادانه در اعماق بتن

پیشروی می‌کنند، بی حرکت و تا حد زیادی غیر فعال می‌سازد. در پژوهش حاضر بالاترین مقاومت الکتریکی بدست آمده برای بتن‌های ساخته شده ۴۹ کیلو اهم-سانتی متر بود که مربوط به نمونه ۹۰ روزه حاوی ۵۰ درصد سرباره گرانوله بوده است. این در حالی است که در تحقیقات قبلی، مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی ۹۱ روزه که حاوی ۶۰ درصد وزنی سرباره بوده‌اند ۳۴/۸ کیلو اهم-سانتی متر گزارش شده است [۲۰۸].

در پژوهش دیگری که اخیراً انجام شده است، بار الکتریکی عبوری در نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه بتن که حاوی ۳۰ درصد وزنی سرباره گرانوله بوده‌اند، حدود ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ کولن گزارش شده است [۲۰۹]. در این پژوهش نیز نمونه‌های ۲۸ روزه که حاوی ۳۰ درصد سرباره بودند، میزان بار الکتریکی تقریباً مشابهی را از خود عبور داده‌اند (۳۰۱۷ کولن). اگرچه نمونه‌های ۹۰ روزه با همین میزان سرباره باری در حدود ۵۴۵۲ کولن از خود عبور داده‌اند که با در نظر گرفتن جدول ۱-۴ میزان نفوذ کلر در آن‌ها زیاد بوده و بنابراین چنین بتنی از نظر مقاومت در برابر نفوذ کلر وضعیت مناسب و مطلوبی نخواهند داشت.

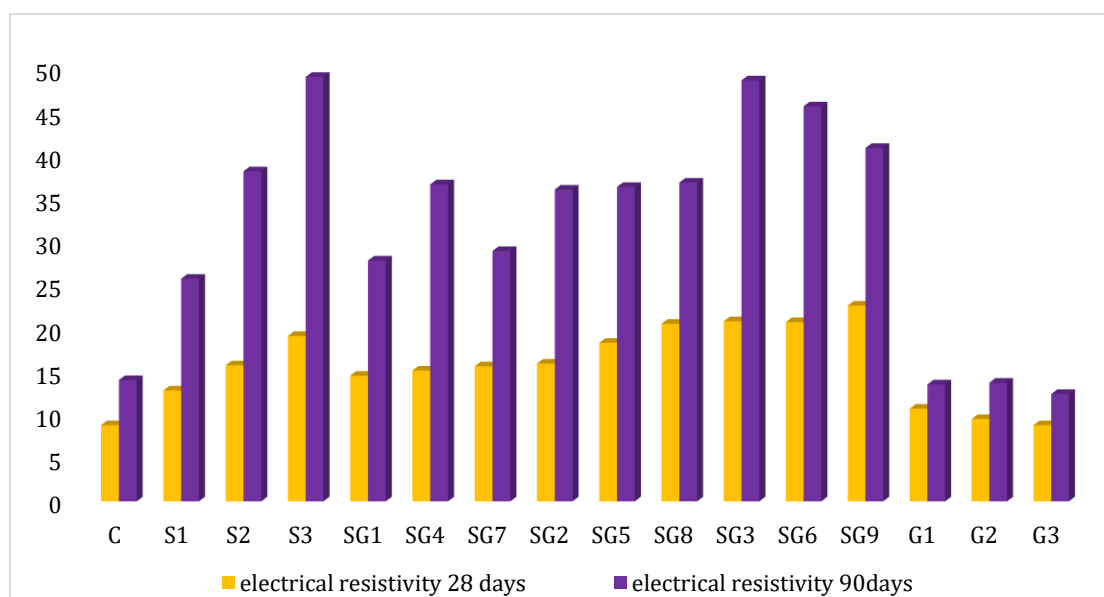


شکل ۱۳-۳- مقایسه نتایج آزمون مقاومت الکتریکی و نر بر روی نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ و ۹۰ روز

۱-۲-۳- اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی

شکل ۱۴-۱ نتایج بدست آمده از آزمون و نر را برا نمونه‌های بتنی پس از گذشت مدت زمان ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. همانطور که به وضوح مشهود است، افزایش زمان عمل‌آوری منجر به افزایش چشمگیری در مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی شده است. به عنوان مثال در نمونه S۳ دیده می‌شود که گذشت زمان از ۲۸ روز به ۹۰ روز، مقاومت الکتریکی بتن از ۱۹/۱ به ۴۰ کیلو اهم-سانتی متر افزایش یافته است. با مقایسه میزان افزایش رخ داده در مقاومت الکتریکی نمونه‌های مختلف، به نظر می‌رسد که تأثیر زمان در نمونه‌های حاوی سرباره قبل توجه‌تر بوده است. به عنوان مثال در نمونه‌هایی که فاقد سرباره بوده و تنها اکسیدگرافن با سیمان جایگزین شده،

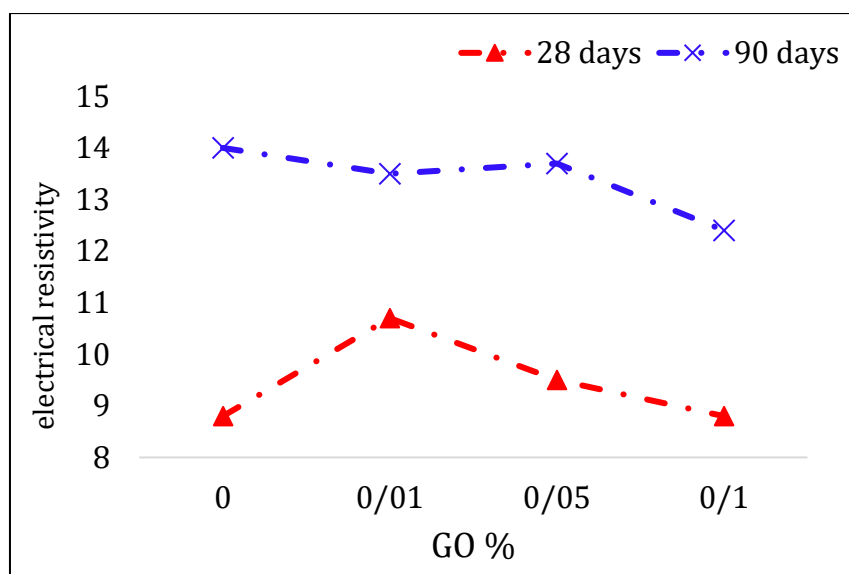
می‌بینیم که بیشترین اختلاف نتایج مقاومت الکتریکی بین ۲۸ روز و ۹۰ روز در نمونه G۲ (حاوی ۰/۰۵ درصد اکسیدگرافن) و در حدود ۴۴ درصد بوده است. این در حالی است که در نمونه‌های حاوی سرباره، افزایش مقاومت الکتریکی بیش از ۱۰۰ درصد هم به چشم می‌خورد. دلیل این امر زمانبر و کند بودن واکنش‌های پوزولانی است که در حضور این مواد افزودنی اتفاق می‌افتد. همانطور که نمونه‌های حاوی پوزولان برای رسیدن به بیشینه استحکام و خواص مکانیکی نیاز به زمان بیشتری داشتند، در اینجا نیز می‌توان نتیجه مشابهی گرفت. بنابراین برای ساخت بتن‌هایی که بتوانند بیشینه مقاومت الکتریکی و در نتیجه بالاترین مقاومت را در برابر نفوذ کلر داشته باشند باید زمان کافی برای کامل شدن واکنش‌های پوزولانی را به آن‌ها داد.



شکل ۱۴-۳- اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی.

۲-۲-۱-۳- تأثیر اکسیدگرافن و سرباره گرانوله بر مقاومت الکتریکی

شکل ۱۵-۱ نتایج آزمون و نر را برای نمونه‌های فاقد سرباره و بر حسب تابعی از درصد اکسیدگرافن نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است در نمونه‌های فاقد سرباره گرانوله، افزایش مقدار اکسیدگرافن باعث افزایش هدایت الکتریکی و کاهش مقاومت الکتریکی بتن می‌گردد. اگرچه برای نمونه G۱ با اختلاط ۰/۰۱ درصد اکسیدگرافن کاهشی در حدود ۹/۳ درصد در هدایت الکتریکی در مقایسه با نمونه شاهد به چشم می‌خورد. بر اساس نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد اکسیدگرافن به تنهایی نقش مطلوب و موثری در نفوذ یون کلر نخواهد داشت اما با در نظر گرفتن شکل‌های ۱۳-۱ و ۱۷-۱ پایین‌ترین میزان بار الکتریکی عبوری در نمونه‌های بتنی حاوی هر دو پوزولان بدست آمده است. برای مثال با افزودن ۰/۱ درصد اکسیدگرافن و ۵۰ درصد سرباره گرانوله بار الکتریکی عبوری حدوداً به میزان ۲۷ درصد کاهش یافته است (از ۱۶۴۲ به ۱۲۰۰ کولن). کاهش قابل توجه هدایت الکتریکی نیز در حدود ۷۰ درصد (از ۷۰۰۸ به ۲۰۵۸ کولن) در نمونه ۹۰ روزه SG۹ با اختلاط ۰/۱ اکسیدگرافن-۵۰ سرباره به چشم می‌خورد. به عنوان یک نتیجه کلی، افزودن ۰/۱ درصد اکسیدگرافن و ۵۰ درصد وزنی سرباره گرانوله می‌تواند در کاهش بار الکتریکی عبوری و افزایش مقاومت الکتریکی بتن و در نتیجه مقاومت قابل توجه آن در برابر نفوذ کلر بسیار موثر باشد.

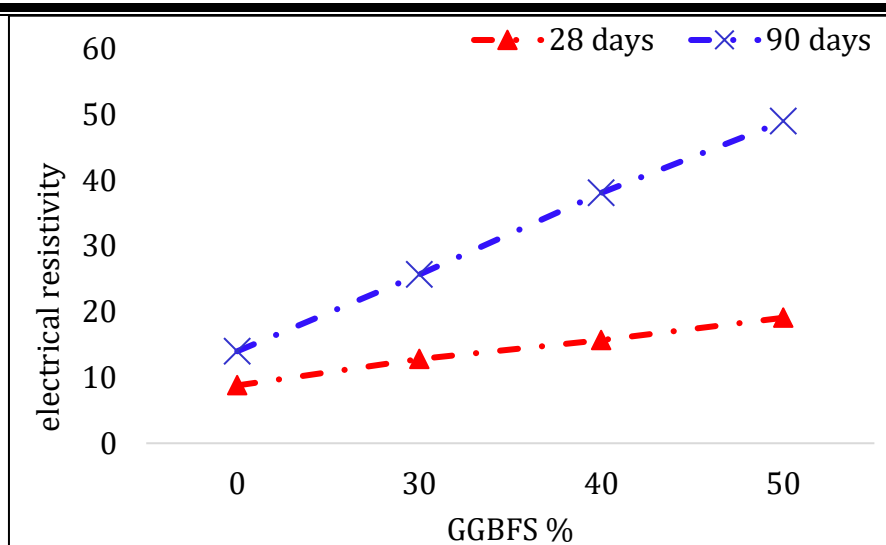


شکل ۱۵-۳- تأثیر اکسید گرافن در غیاب سرباره بر مقاومت الکتریکی

شکل ۱۶-۱ نتایج آزمون و نر را برای نمونه های بتنی فاقد اکسید گرافن بر حسب تابعی از درصد سرباره نشان می دهد. همانطور که مشخص است افزودن سرباره و افزایش مقدار آن تا ۵۰ درصد نقش بسیار موثری در افزایش مقاومت الکتریکی بتن دارد. از طرفی می توان مشاهده کرد که میزان این افزایش در نمونه های ۹۰ روزه بیشتر نیز بوده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار سرباره در بتن، زمان نفش قابل توجه تری در رسیدن به خواص مطلوب خواهد داشت. به عبارت دیگر می بینیم که در نمونه های بتنی ۲۸ و ۹۰ روزه حاوی ۳۰ درصد سرباره، اختلاف میان مقاومت الکتریکی در مقایسه با نمونه های ۲۸ و ۹۰ روزه حاوی ۵۰ درصد سرباره بسیار کمتر است.

۳-۲-۱-۳ تجزیه و تحلیل نتایج انتخاب ترکیب بهینه

بهینه سازی داده های تجربی بدست آمده از آزمون های مقاومت فشاری، خمشی، هدایت و مقاومت الکتریکی به کمک نرم افزار Design Expert صورت گرفت و در مراحل بهینه سازی درصد وزنی اکسید گرافن و سرباره گرانوله به عنوان متغیرهای مستقل تعریف شدند. جزئیات بیشتر در خصوص نحوه انجام مراحل بهینه سازی در نرم افزار در گزارش مرحله دوم ارائه گردیده شده است. بر اساس توابع انتخاب شده برای هر کدام از پاسخ ها که نتایج آزمون های مکانیکی و فیزیکی هستند و همچنین تعیین اولیت مورد نظر برای هر کدام از پاسخ ها در نهایت یک تابع هدف توسط نرم افزار تعیین شد که میزان مطلوبیت کلی چهار پاسخ متفاوت را بر اساس اهمیت و وزن داده شده به آن ها مشخص می کند. بر مبنای تابع هدف بدست آمده نهایتا اختلاط بهینه ترکیب شامل ۰/۰۸ درصد وزنی اکسید گرافن و ۵۰ درصد وزنی سرباره بدست آمد. برای انجام آزمون های نفوذ فشاری نمونه های بتنی با این ترکیب بهینه ساخته شدند.



شکل ۱۶-۳- نتایج بررسی تأثیر سرباره گرانوله در غیاب اکسیدگرافن بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی

۴-۲-۱-۳ تجزیه و تحلیل نتایج نفوذ یون کلر بصورت فشاری

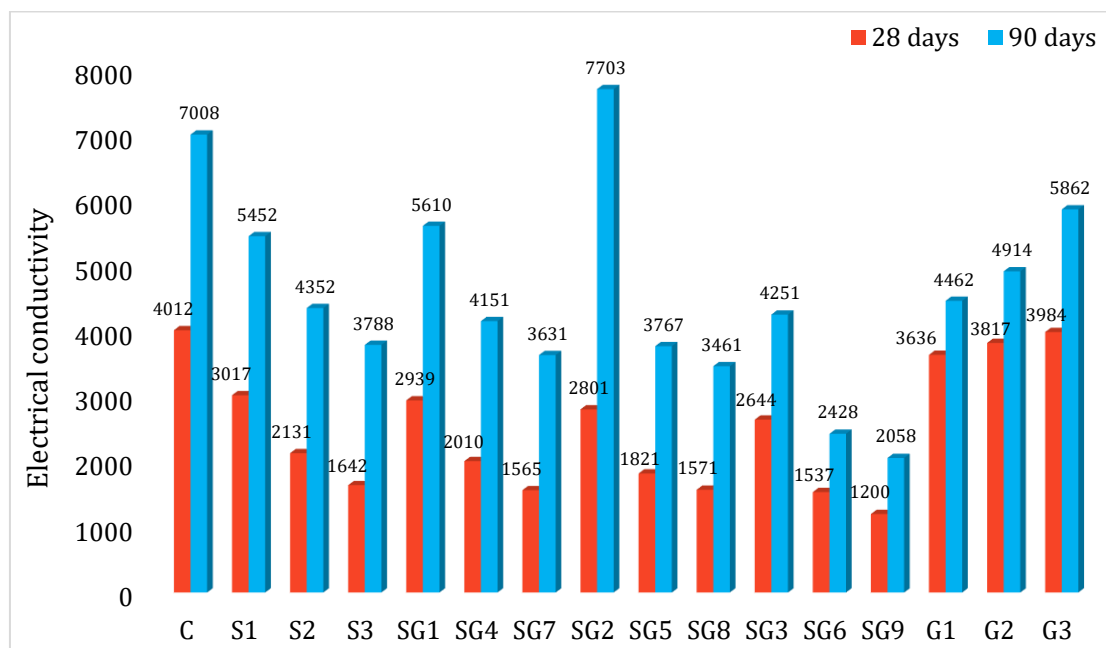
نتایج بدست آمده از آزمون نفوذ فشاری یون کلر در شکل‌های ۱۸-۱ تا ۳۶-۱ نشان داده شده است. از آنجایی که این آزمون تسریع شده در چندین شرایط مختلف فشار، دما و زمان انجام گردید، به منظور مقایسه اثر پارامترهای محیطی بر رفتار نفوذ کلر در بتن، نتایج آزمون در شکل‌های ۲۲-۱ تا ۲۸-۱ به صورت جداگانه برای پارامترهای فشار و زمان و دما ترسیم شده‌اند. در شکل‌های ۲۹-۱ تا ۳۲-۱ نیز نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بدون پوزولان و با پوزولان در شرایط مختلف آزمون رسم شده‌اند تا امکان مقایسه اثر تغییر پارامترها به صورت همزمان ممکن باشد. در تصاویر ۳۳-۱ تا ۳۶-۱ نیز به منظور بررسی اثر افزودنی‌های اکسیدگرافن و سرباره، داده‌های بدست آمده از آزمون نفوذ فشاری در شرایط مختلف برای نمونه‌های حاوی پوزولان و بدون پوزولان در یک نمودار رسم شده‌اند تا امکان مقایسه آن‌ها وجود داشته باشد.

۴-۲-۱-۴-۱ بررسی تأثیر فشار بر نفوذ یون کلر

نتایج مربوطه به غلظت و عمق نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی در بازه زمانی ۲۴ ساعته و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل ۱۸-۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار از ۳ بار به ۵ بار و ۷ بار، یون کلر تا اعماق بیشتری در نمونه‌های بتنی نفوذ کرده و غلظت نفوذی آن در یک عمق یکسان بالاتر می‌باشد. به عبارت دیگر همانطور که نمودار نشان می‌دهد در نمونه بتنی تحت فشار ۳ بار، کلر تا عمق ۲۰ میلی‌متری در نمونه بتنی نفوذ کرده و از آن به بعد همانطور که دیده می‌شود، غلظت کلر در اعماق بیشتر ثابت مانده است که این مقدار ثابت مربوط به مقدار کلر اولیه موجود در ملات سیمانی (به دلیل استفاده از آب شهری) می‌باشد. از طرفی در نمونه‌ای که تحت فشارهای بالاتر یعنی ۵ بار و ۷ بار بوده است، مشاهده می‌شود که یون کلر تا اعماقی در حدود ۳۲ الی ۳۳ میلی‌متر توانسته نفوذ کند.

همچنین با مقایسه غلظت یون کلر در نمونه‌های بتنی تحت فشارهای مختلف مشاهده می‌شود که در یک عمق معین، به عنوان مثال ۲۰ میلی‌متر، غلظت کلر در نمونه‌ای که تحت فشار ۳ بار بوده است، ۰/۰۸۴ درصد و در نمونه‌ای که تحت فشار ۷ بار بوده است، ۰/۰۶۵۲ درصد می‌باشد. بنابراین افزایش فشار در بازه زمانی ۲۴

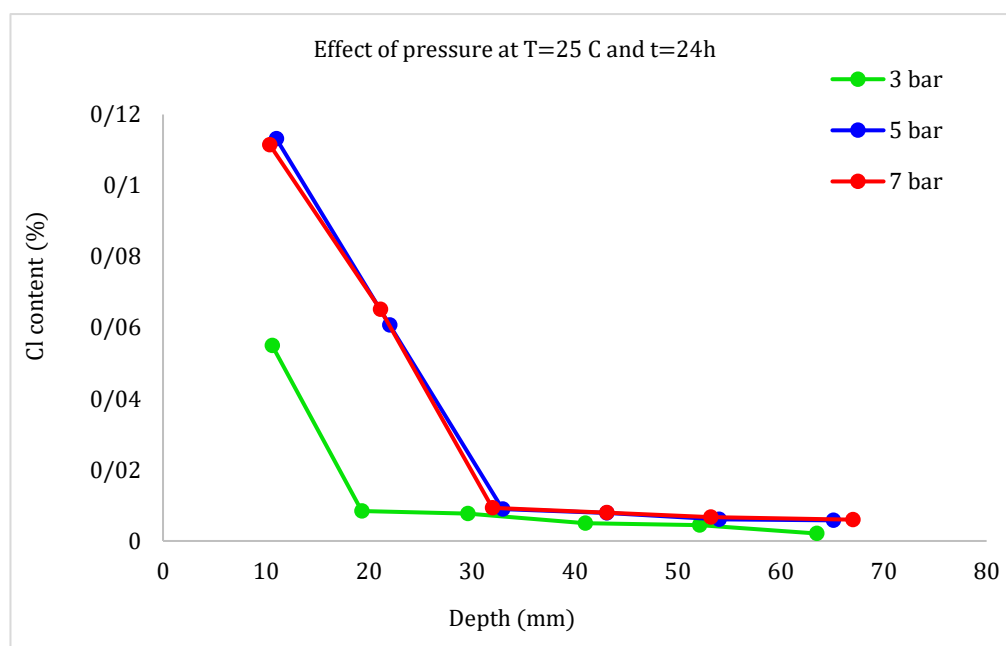
ساعته در دمای پایین نقش موثری در میزان پیشروی نفوذ یون کلر در بتن داشته است. اگرچه ابهامی نیز در اینجا وارد است که با افزایش فشار از ۵ بار به ۷ بار تغییر قابل توجهی در رفتار نفوذ کلر در بتن به چشم نمی‌خورد. دلیل این امر می‌تواند یا به خاطر خطاهای آزمایشی باشد و یا اینگونه آن را توجیه کرد که در دمای پایین افزایش فشار تا بیش از ۵ بار نمی‌تواند تاثیر چندانی بر میزان نفوذ کلر داشته باشد، چراکه بر اساس بسیاری از منابع قبلی، ضریب نفوذ کلر در بتن به رابطه‌ای از دما و فشار وابسته است و همواره شرایط بهینه‌ای برای آن وجود دارد. بنابراین برای نفوذ بیشتر باید از هر دو نیروی محرکه افزایش همزمان دما و فشار بهره جست.



شکل ۱۷-۳- مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT برای نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روزه

در شکل ۱۹-۳ تاثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه بدون پوزولان در دمای بالا یعنی ۵۵ درجه سانتی‌گراد و در بازه زمانی طولانی‌تر یعنی ۳ روز نشان داده شده است. همانطور که از نمودار مشخص است، با افزایش فشار از ۳ بار به ۵ بار و از ۵ بار به ۷ بار، هم غلظت کلر و هم عمق نفوذ آن در بتن به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در فشار ۳ بار همانطور که دیده می‌شود، کلر تا عمقی حدودا برابر با ۷۰ میلی‌متر در نمونه بدون پوزولان نفوذ کرده است. با افزایش فشار از ۳ بار به ۵ بار، کلر تا عمق ۱۰۰ میلی‌متری نیز توانسته در نمونه بتنی نفوذ کند. این عمق بالای نفوذ کلر در اثر همکاری همزمان دمای بالا و فشار زیاد ایجاد شده است زیرا آزمون نفوذ فشاری یک آزمون تسریع یافته و تشدید یافته است. با افزایش فشار از ۵ بار به ۷ بار، غلظت یون کلر پیشروی کرده در داخل بتن در مقایسه با فشارهای پایین‌تر به طور قابل توجهی بالاتر است. به عنوان مثال در یک عمق حدودا برابر ۴۶ میلی‌متر در بتن، غلظت یون کلر در فشارهای ۳، ۵ و ۷ بار به ترتیب برابر با ۰/۲۳۲، ۰/۰۵۸ و ۰/۱۶ درصد است. به نظر می‌رسد تاثیر فشار در دماهای بالاتر قابل توجه‌تر از تاثیر آن در دماهای پایین‌تر بوده است.

شکل ۲۰-۱ تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی اکسید گرافن و سرباره را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار بدست آمده مشاهده می‌شود، افزایش فشار در نمونه‌های حاوی پوزولان در دما و زمان‌های کم تأثیر قابل توجهی بر رفتار نفوذ یون کلر ندارد. در تمامی نمونه‌ها، کلر تا عمقی حدوداً برابر با ۲۱ الی ۲۳ میلی متر نفوذ کرده است و در اعماق بیشتر مقدار آن به یک مقدار ثابت که همان کلر اولیه در ملات سیمانی است، رسیده است.



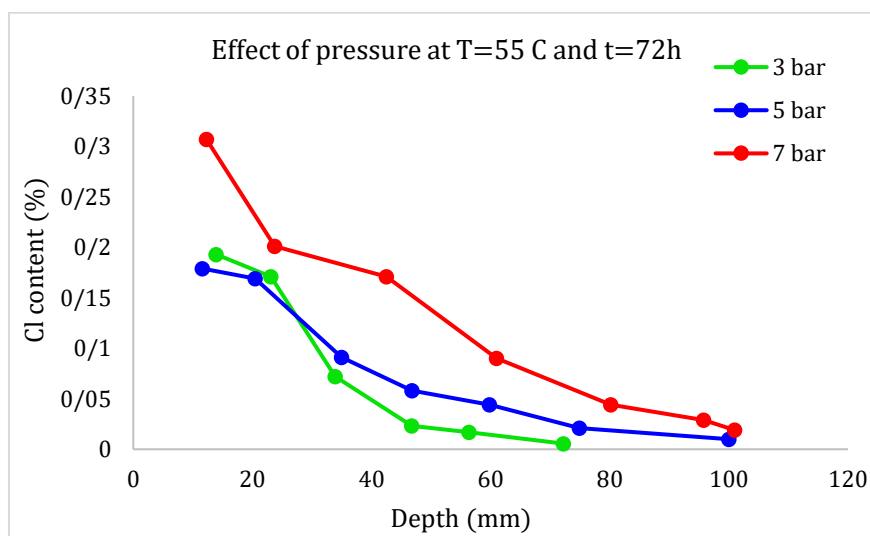
شکل ۱۸-۳- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان پایین

تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های پوزولانی در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد و در بازه ۳ روزه در شکل ۲۱-۳ نشان داده شده است. بر خلاف آنچه از نتایج افزایش فشار در زمان و دمای کم بدست آمد، در این شرایط افزایش فشار تأثیر قابل توجهی بر میزان پیشروی یون کلر در بتن داشته است. در نمونه‌هایی که تحت فشار ۳ بار بوده‌اند، کلر تا عمق حدودی برابر با ۷۰ میلی‌متر نفوذ کرده است اما در نمونه‌ای که تحت فشار ۵ بار بوده عمق نفوذ کلر حدوداً برابر با ۸۰ میلی‌متر و در نمونه‌ای که تحت فشار ۷ بار بوده حتی تا اعماقی بیشتر از ۱۰۰ میلی‌متر هم توانسته است نفوذ کند. همانطور که انتظار می‌رفت، افزایش فشار در این شرایط آزمایش باعث شده است تا غلظت کلر در عمق‌های مختلف نیز بیشتر باشد. به عنوان مثال در نمونه‌ای که تحت فشار ۳ بار بوده غلظت کلر در عمقی برابر با ۲۳ میلی‌متر ۰/۰۲۲ درصد بوده است در حالی که در همین عمق غلظت کلر تحت فشار ۷ بار حدوداً برابر با ۰/۱۷ درصد بوده است.

جدول ۵-۳- نتایج بدست آمده از آزمون هدایت الکتریکی RCPT بعد از ۲۸ و ۹۰ روز

بار الکتریکی عبوری (کولن)		درصد سرباره	درصد اکسید گرافن
۹۰ روزه	۲۸ روزه		
۷۰۰۸	۴۰۱۲	.	.

۵۴۵۲	۳۰۱۷	۳۰	۰
۴۳۵۲	۲۱۳۱	۴۰	۰
۳۷۸۸	۱۶۴۲	۵۰	۰
۵۶۱۰	۲۹۳۹	۳۰	۰.۰۱
۷۷۰۳	۲۸۰۱	۳۰	۰.۰۵
۴۲۵۱	۲۶۴۴	۳۰	۰.۱
۴۱۵۱	۲۰۱۰	۴۰	۰.۰۱
۳۷۶۷	۱۸۲۱	۴۰	۰.۰۵
۲۴۲۸	۱۵۳۷	۴۰	۰.۱
۳۶۳۱	۱۵۶۵	۵۰	۰.۰۱
۳۴۶۱	۱۵۷۱	۵۰	۰.۰۵
۲۰۵۸	۱۲۰۰	۵۰	۰.۱
۴۴۶۲	۳۶۳۶	۰	۰.۰۱
۴۹۱۴	۳۸۱۷	۰	۰.۰۵
	۳۹۸۴	۰	۰.۱



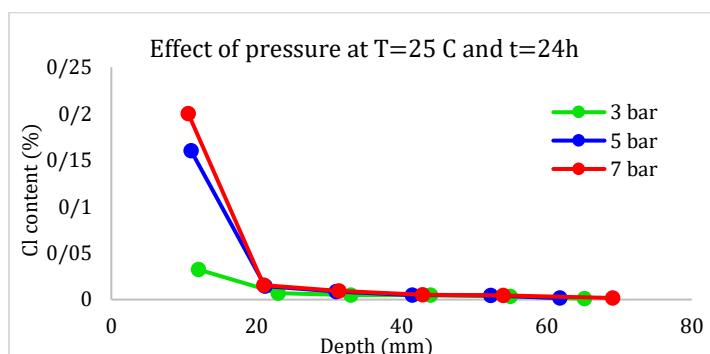
شکل ۱۹-۳-تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دما و زمان طولانی

با مقایسه نمودارهای ۱-۲۰ و ۱-۲۱ باز هم می‌توان اینگونه استنباط کرد که در دماها و زمان‌های بالاتر، تغییر فشار تأثیر قابل توجه‌تری بر روی رفتار نفوذ یون کلر دارد.

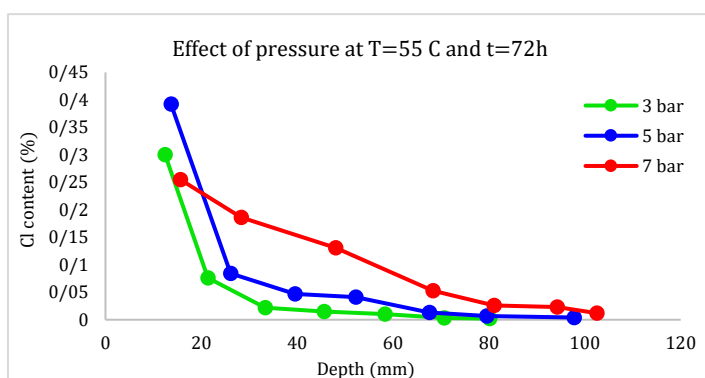
۳-۱-۲-۴-۲ بررسی اثر دما بر نفوذ یون کلر

به منظور بررسی تأثیر دما بر نفوذ کلر در شکل ۲۲-۳ پروفیل غلظت کلر بر حسب عمق نفوذ در نمونه بتنی بدون پوزولان در فشار ۳ بار در یک بازه ۱ روزه در دو دمای ۲۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. از مقایسه نمودارها کاملاً مشخص است که با افزایش دما کلر تا اعماق بیشتری توانسته است در بتن نفوذ کند. عمق

نفوذ کلر برای نمونه‌ای که تحت فشار ۳ بار در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد بوده است به ۹۰ میلی‌متر هم می‌رسد در حالی که در نمونه‌ای که در شرایط دمای ۲۵ درجه سانتی گراد قرار داشته عمق نفوذ ۶۰ میلی‌متر بوده است. شکل‌های ۱-۲۳ و ۱-۲۴ تأثیر دما برای نمونه‌های حاوی اکسیدگرافن و سرباره را به ترتیب در شرایط فشار و زمان پایین (۳ بار و ۱ روز) و فشار و زمان بالا (۷ بار و ۳ روز) نشان می‌دهند. همانطور که از نمودارها مشخص است در نمونه‌های حاوی پوزولان نیز همانطور که انتظار می‌رفت، با افزایش دما یون کلر قادر بوده در اعماق بیشتر و در غلظت‌های بالاتری به داخل بتن پیشروی کند. به عنوان مثال در شرایط فشار ۳ بار در بازه زمانی ۱ روزه کلر توانسته است تا عمقی حدوداً برابر با ۶۵ میلی‌متر نفوذ کند در حالی که با افزایش دمای آزمایش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۵۵ درجه سانتی‌گراد، عمق نفوذ کلر به ۸۰ میلی‌متر هم رسیده است. در نمونه‌های پوزولانی که تحت فشار و زمان بیشتر یعنی ۷ بار و ۷۲ ساعت در معرض آزمون نفوذ فشاری یون کلر قرار داشته اند هم رفتار مشابهی به چشم می‌خورد. همانطور که از نمودار مشخص است در نمونه‌ای که در دمای بالاتر تحت آزمون قرار داشته کلر توانسته است تا عمق ۱۰۰ میلی‌متر در بتن نفوذ کند.

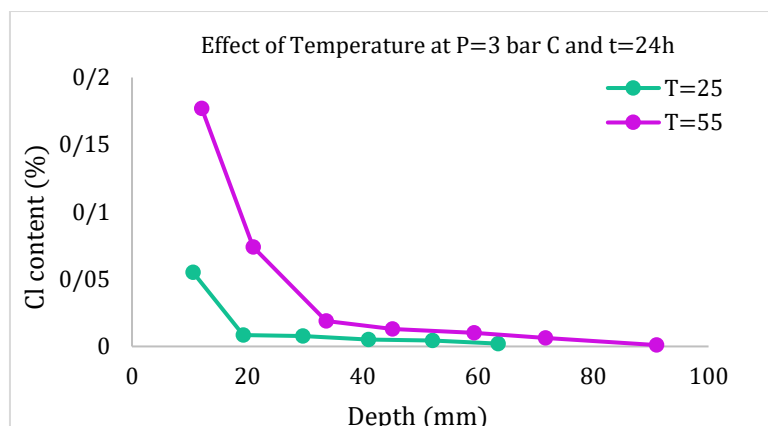


شکل ۲۰-۳- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان پایین

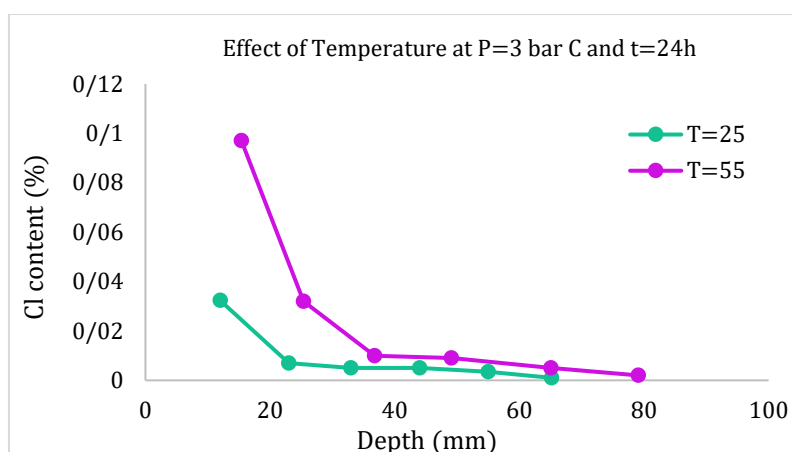


شکل ۲۱-۳- تأثیر فشار بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دما و زمان بالا

در محدوده عمق ۴۷ الی ۴۸ میلی‌متر دیده می‌شود که غلظت یون کلر در دمای ۲۵ درجه در این نمونه ۰/۰۲ درصد و در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد برابر با ۰/۱۳ درصد بوده است. اختلاف بین این مقادیر تأثیر قابل توجه دما بر ضریب نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی حتی زمانی که در آن‌ها پوزولان وجود داشته را نشان می‌دهد.



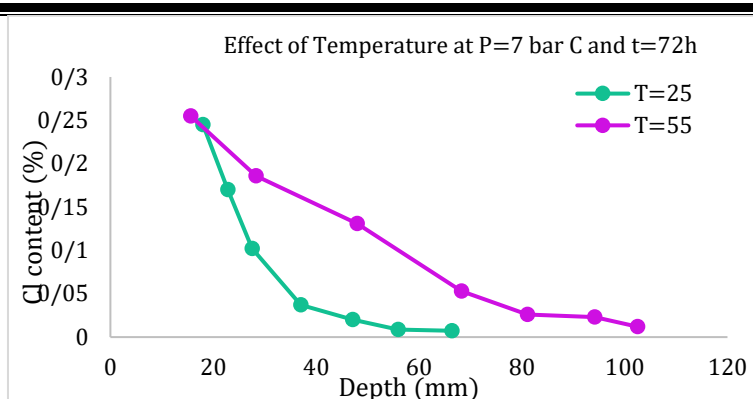
شکل ۳-۲۲- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه بدون پوزولان در فشار ۳ بار و زمان ۱ روز



شکل ۳-۲۳- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه حاوی پوزولان در فشار و زمان کم

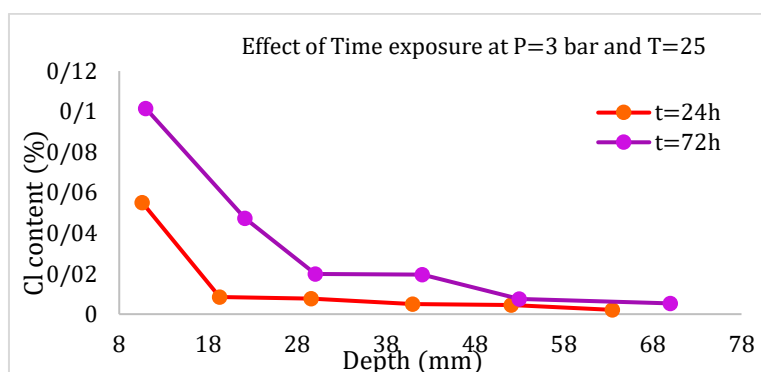
۳-۴-۱-۲-۳ اثر زمان بر نفوذ یون کلر

به منظور بررسی تأثیر زمان، نتایج بدست آمده از آزمون نفوذ فشاری یون کلر در شکل‌های ۱-۲۵ تا ۱-۲۸ در زمان‌های متفاوت در یک نمودار نشان داده شده‌اند. همانطور که در تصویر ۱-۲۵ برای نمونه بدون پوزولان دیده می‌شود، افزایش زمان آزمون از ۱ روز به ۳ روز در نمونه‌های بتنی تحت فشار ۳ بار و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد موجب نفوذ بیشتر کلر در بتن شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب نفوذ کلر در زمان‌های مختلف متفاوت است و با افزایش زمان افزایش می‌یابد. این امری کاملاً بدیهی بوده و بر اساس بسیاری از منابع قبلی نیز می‌دانیم که ضریب نفوذ کلر همواره تابعی از زمان، دما و فشار می‌باشد. با افزایش زمان کلر فرصت بیشتری پیدا می‌کند تا در اعماق بیشتر و همچنین در غلظت‌های بالاتر داخل نمونه‌های بتنی نفوذ کند.



شکل ۳-۲۴- اثر دما بر نفوذ یون کلر در نمونه های بتنی حاوی پوزولان در فشار و زمان بالا

در نمودار شکل ۳-۲۶ نیز تاثیر زمان آزمون در شرایط متفاوت دیگری یعنی فشار بالاتر ۷ بار و دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. با یک مقایسه و نگاه کلی به این نمودار و نمودار شکل ۳-۲۵ می‌توان به وضوح مشاهده کرد که رنج غلظت کلر نفوذ کرده به داخل بتن (محور عمودی) در دما و فشارهای بالاتر بیشتر از مقادیر کلر نفوذی در حالت قبل می‌باشد. همچنین در دما و فشار بالاتر مشاهده می‌شود که طولانی شدن زمان آزمون نقش موثرتری در بالارفتن توانایی کلر برای نفوذ در نمونه بتنی داشته است. در یک بازه زمانی ۳ روزه کلر توانسته است تا اعماق حدودی ۱۰۰ میلی‌متر درون نمونه بدون پوزولان نفوذ کند. این مقدار نفوذ کلر به درون بتن ممکن است زیاد به نظر برسد اما همواره باید در نظر داشت که شرایط انجام این آزمون به گونه‌ای است که نفوذ کلر تحت فشار و دمای بالا به صورت بسیار تسریع یافته اتفاق می‌افتد و در شرایط محیطی طبیعتاً عمق نفوذ کلر در چنین بازه زمانی تا این حد نخواهد بود. همانطور که قابل مشاهده است، غلظت یون کلر در بازه زمانی ۳ روزه در مقایسه با بازه زمانی ۱ روزه در سطوح بالاتری قرار گرفته‌است که امر کاملاً قابل انتظاری است. به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر زمان، نتایج آزمون نفوذ فشاری در شرایط مختلف برای نمونه‌های حاوی اکسیدگرافن و سرباره نیز در شکل‌های ۳-۲۷ و ۳-۲۸ نشان داده شده است.

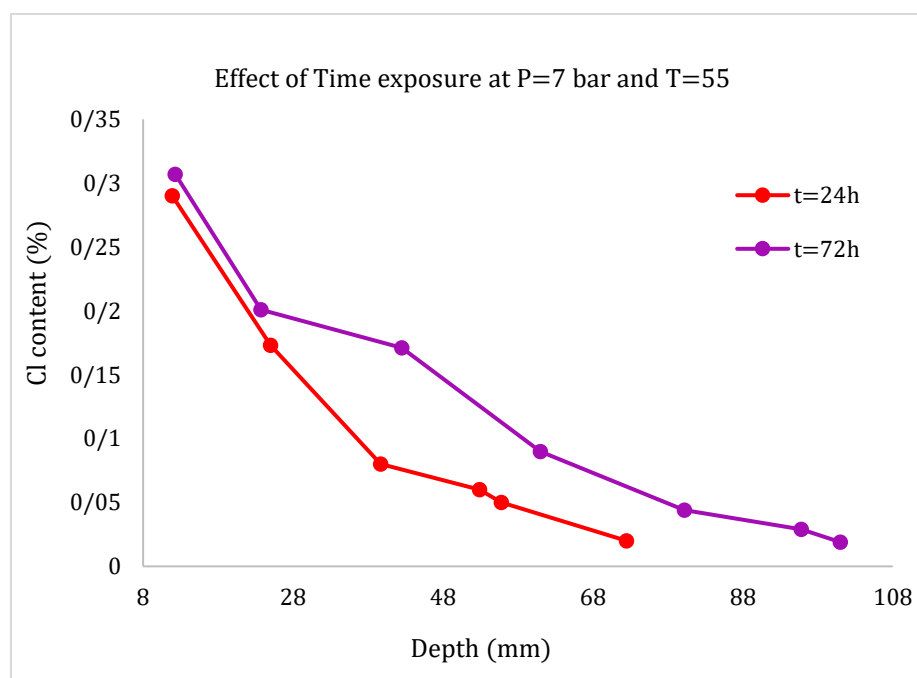


شکل ۳-۲۵- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای کم در نمونه بدون پوزولان

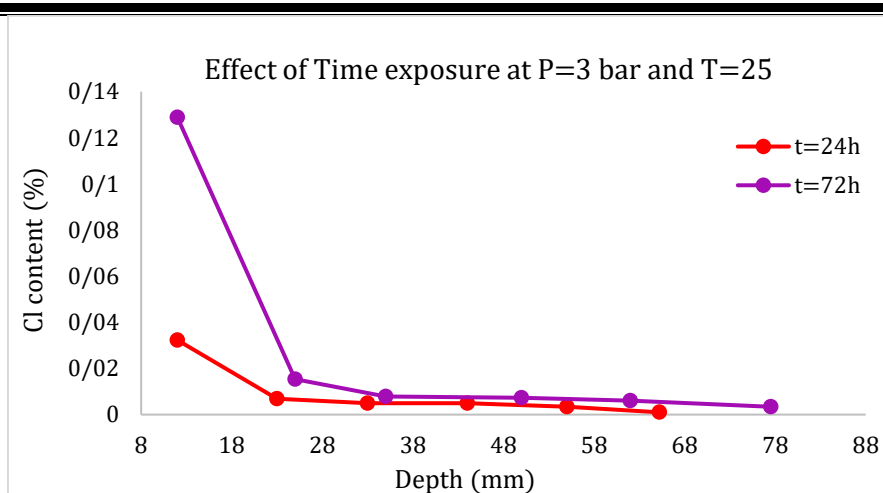
با در نظر گرفتن پروفیل غلظت کلر در زمان‌های مختلف برای نمونه‌هایی که تحت دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳ بار بوده‌اند، دیده می‌شود که میزان پیشروی کلر در بازه زمانی ۳ روزه به مراتب به میزان بیشتری صورت گرفته است و همانطور که از نمودار شکل ۳-۲۸ مشخص است، در بازه زمانی ۳ روزه کلر تا اعماق

۷۸ میلی‌متری نیز توانسته است در بتن پیشروی کند. این در حالی است که پس از گذشت بازه زمانی ۱ روزه، کلر در اعماق کمتر و حدوداً برابر با ۶۵ میلی‌متر در بتن نفوذ کرده است. بنابراین با طولانی کردن زمان آزمون، پیشروی کلر در نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان تا به طور قابل توجهی زیاد شده است. از مقایسه شکل‌های ۱-۲۷ و ۱-۲۸ مشهود است که غلظت کلر نفوذ کرده در نمونه‌های حاوی پوزولان نیز زمانی که دما و فشار بالاتر بوده (شکل ۱-۲۸) در مقایسه با دما و فشار پایین‌تر (۱-۲۷) در سطوح بالاتری می‌باشد.

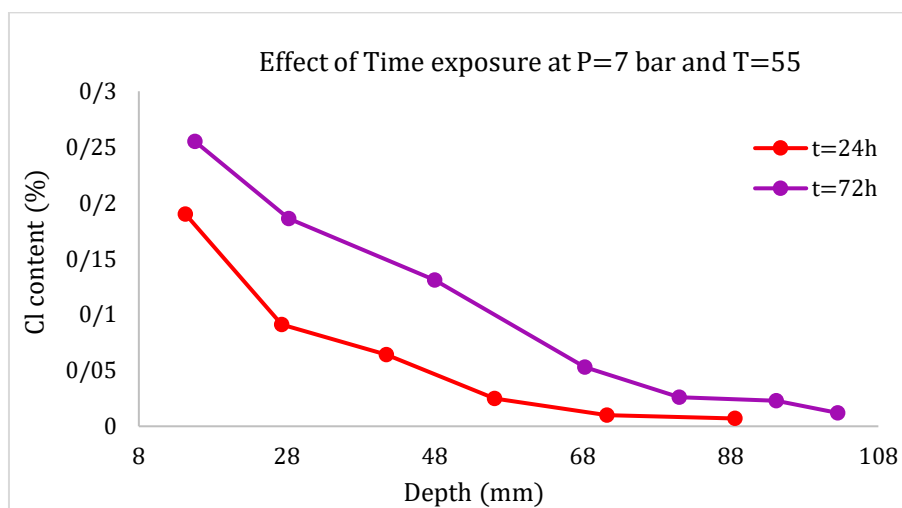
در نمونه‌های پودری تهیه شده در اعماق نزدیک به کف نمونه‌های بتنی (۱۸ میلی‌متری)، زمانی که فشار و دما به ترتیب ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۳ بار بوده است، غلظت کلر برای بازه‌های زمانی ۱ روزه و ۳ روزه به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۱۲ درصد و در شرایط فشار و دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و ۵ بار برابر با ۰/۱۹ و ۰/۲۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین دیده می‌شود که در نمونه‌های حاوی پوزولان نیز تأثیر زمان آزمون در دما و فشار بالاتر قابل توجه‌تر است. به عنوان مثال مشاهده می‌شود که غلظت کلر نفوذ کرده در دو زمان مختلف (۱ روز و ۳ روز) در تمامی عمق‌های بررسی شده، زمانی که فشار و دما بالاتر بوده اختلاف بسیار قابل توجه‌تری دارد. همانطور که قبلاً نیز گفته شد دلیل این امر را می‌توان تأثیر متقابل و غیرخطی فشار و دما و زمان بر روی ضریب نفوذ کلر دانست. بدین صورت که با افزایش دما و فشار، تأثیر زمان به صورت غیرخطی و به طور فزاینده‌ای بیشتر می‌گردد. به عنوان نتیجه کلی، تأثیر زمان بر نفوذ کلر در نمونه‌های بتنی چه در نمونه‌های حاوی پوزولان و چه در نمونه‌های بدون پوزولان کاملاً یکسان بوده است.



شکل ۲۶-۳- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه بدون پوزولان



شکل ۲۷-۳- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای کم در نمونه حاوی پیروزولان



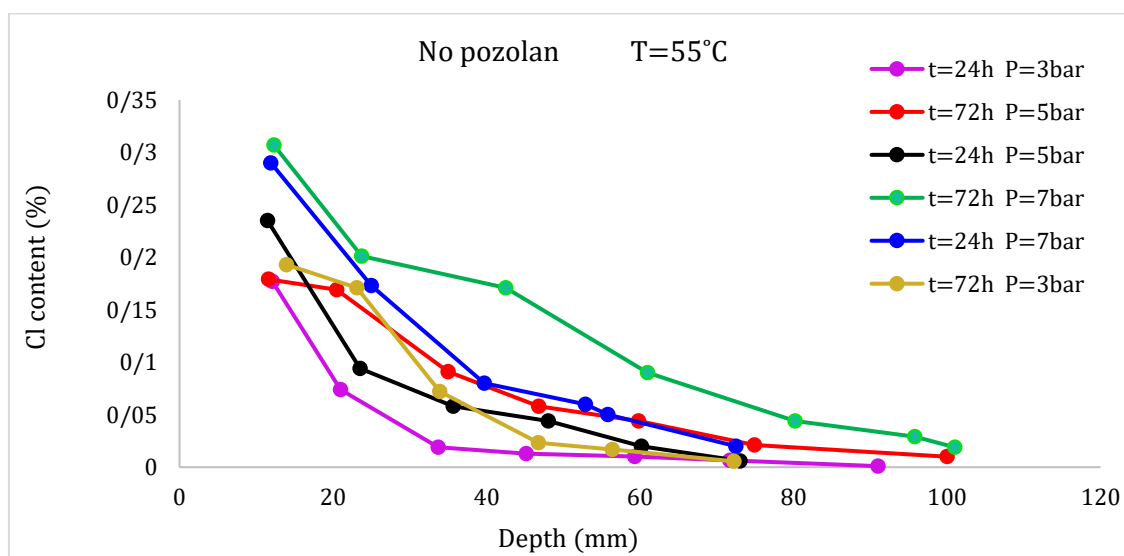
شکل ۲۸-۳- اثر زمان بر نفوذ کلر در فشار و دمای بالا در نمونه حاوی پوزولان

۴-۲-۱-۳-۴ تاثیر همزمان تغییرات فشار و زمان بر نفوذ کلر در دمای ثابت

شکل ۲۹-۱ نتایج بدست آمده از آزمون نفوذ فشاری را به منظور بررسی تاثیر متقابل و همزمان پارامترها برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ثابت ۵۵ درجه سانتی‌گراد و تحت مجموعه‌ای از شرایط مختلف فشار و زمان نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده بیشترین میزان پیشروی کلر در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد مربوط به بازه زمانی ۱ روزه و فشار ۳ بار بوده است. در مقابل کمترین میزان پیشروی و نفوذ یون کلر نیز تحت شرایط زمان ۱ روز و فشار ۳ بار صورت گرفته است. چنین رفتاری کاملاً مطابق با انتظار بوده است و در سایر نمودارها نیز مشاهده می‌شود که با افزایش زمان و فشار به عنوان مثال از ۳ بار و ۱ روز به ۵ بار و ۳ روز (نمودارهای بنفش و قرمز) میزان کلر نفوذ کرده به درون نمونه بتنی افزایش یافته است. به عنوان مثالی دیگر با افزایش فشار و زمان از ۵ بار و ۱ روز به ۷ بار و ۳ روز (نمودارهای سبز و مشکی) مشاهده می‌شود که میزان کلر نفوذ کرده از نظر غلظت در سطوح بالاتری قرار گرفته و در اعماق بیشتری هم پیشروی کرده است. همچنین با مقایسه نمودارهای مربوط به شرایط ۱ روز و ۷ بار و ۳ روز و ۳ بار می‌توان مشاهده کرد که تاثیر افزایش زمان بر

کاهش فشار انجام آزمون تا حدی غالب بوده است. اگرچه چنین نتیجه‌گیری به طور مطلق صحیح نبوده چراکه به عنوان یک مثال نقص با مقایسه نمودارهای مربوط به شرایط ۱ روز و ۵ بار و ۳ روز و ۳ بار (نمودارهای مشکی و طلایی) می‌توان مشاهده کرد که یک روند ثابت بین آن‌ها وجود نداشته و در برخی از قسمت‌ها غلظت کلر در شرایط اول و در در برخی از بخش‌ها غلظت کلر در شرایط دوم در سطوح بالاتری قرار گرفته است. همچنین می‌توان دید که در هر دوی این نمونه‌ها عمق نفوذ کلر تقریباً یکسان بوده است. به عنوان یک نتیجه کلی می‌توان چنین بیان نمود که در شرایطی که تمامی پارامترها جز یکی ثابت در نظر گرفته شوند، با افزایش هر کدام از پارامترهای فشار، دما و زمان، عمق و میزان نفوذ کلر چه در نمونه‌های پوزولانی و چه در نمونه‌های بدون پوزولان افزایش می‌یابد. از میان تمامی این پارامترها مشاهده شد که تأثیر افزایش زمان در نفوذ کلر در دماهای بالاتر به طور قابل توجهی بیشتر می‌باشد. همچنین در خصوص تأثیر همزمان پارامترها نمی‌توان چندان اظهار نظر قطعی نمود که تأثیر کدام پارامتر نهایتاً بر رفتار نفوذ یون کلر غالب خواهد بود.

در شکل ۳-۳۰ نیز نتایج مشابه با نمودارهای شکل ۲۹-۳ اما مربوط به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است، کمترین و بیشترین میزان نفوذ یون کلر در دمای محیط همانطور که انتظار می‌رفت به ترتیب در شرایط زمانی ۱ روزه و فشار ۳ بار و بازه زمانی ۳ روزه و فشار ۷ بار صورت گرفته است. با مقایسه دو به دوی نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش فشار و زمان آزمون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نیز میزان پیشروی کلر در بتن بیشتر شده است. به عنوان مثال با افزایش زمان و فشار از ۱ روز و ۳ بار به ۳ روز و ۵ بار یا از ۱ روز و ۵ بار به ۳ روز و ۷ بار، افزایش بسیار قابل توجهی در نفوذ کلر اتفاق افتاده است.

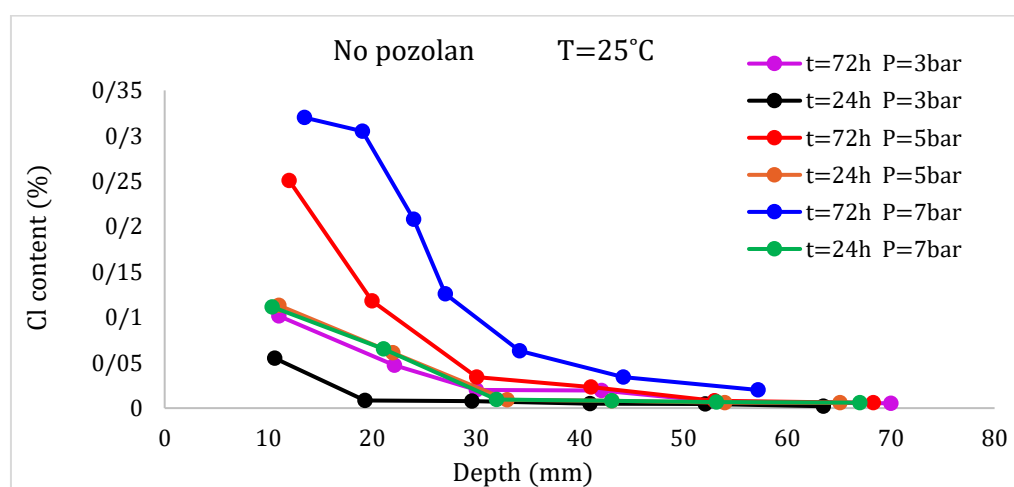


شکل ۲۹-۳- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد

اما آنچه توجه را به خود جلب کرد این است که اختلاف قابل توجهی بین سه شرایط فشار ۳ بار و زمان ۳ روز (نمودار بنفش)، فشار ۷ بار و زمان ۱ روز (نمودار سبز) و فشار ۵ بار و زمان ۱ روز به چشم نمی‌خورد. به عنوان مثال انتظار می‌رفت با افزایش فشار از ۵ بار به ۷ بار در بازه زمانی ۳ روزه (نمودارهای سبز و نارنجی)، میزان پیشروی کلر در بتن بیشتر شود اما در عمل چنین نتیجه‌ای بدست نیامد و میزان پیشروی کلر چندان تغییری نکرد. به هر حال یکی از محدودیت‌ها در انجام آزمون نفوذ فشاری تکرارناپذیری داده‌ها به دلایلی همچون هزینه

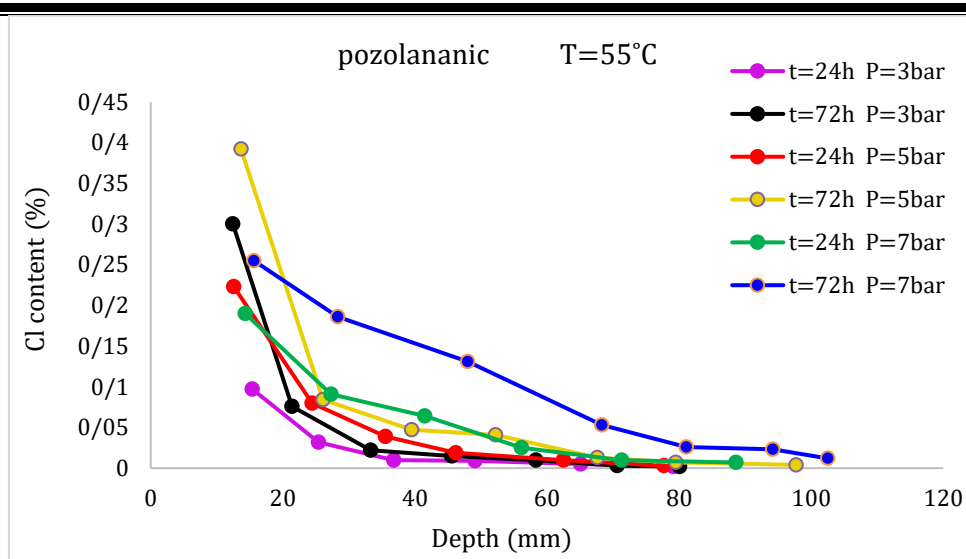
بالای انجام آزمون و آنالیزهای بعدی (تیتراسیون) می‌باشد. به همین دلیل می‌توان چنین انحرافات را ناشی از وقوع خطای آزمایش دانست.

در شکل‌های ۱-۳۱ و ۱-۳۲ نیز به منظور بررسی تأثیر همزمان پارامترهای فشار و زمان در دمای ثابت، نتایج بدست آمده از آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های حاوی پوزولان در مجموعه‌ای از شرایط مختلف فشار و زمان نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای بدست آمده مشاهده می‌شود که کمترین و بیشترین میزان پیشروی کلر در نمونه‌های حاوی پوزولان در دماهای ۲۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب مربوط به شرایط آزمون ۱ روز و فشار ۳ بار و ۳ روز و ۷ بار بوده است. همانطور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، در دماهای بالاتر تأثیر پارامترهای فشار و زمان بیشتر خود را نمایان می‌کند. با مقایسه شکل‌های ۱-۳۱ و ۱-۳۲ نیز می‌توان مشاهده کرد که اختلاف بین پروفیل کلر در شرایط مختلف فشار و زمان در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر بوده است.



شکل ۳-۳۰- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی بدون پوزولان در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

در نمونه‌های پوزولانی نیز دیده می‌شود که با افزایش زمان و فشار در یک دمای ثابت میزان پیشروی کلر در نمونه‌ها بیشتر می‌گردد. به عنوان مثال در هر دو دمای ۲۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد با افزایش فشار و زمان از ۵ بار و ۱ روز به ۷ بار و ۳ روز، میزان نفوذ یون کلر به حد چشمگیری افزایش یافته است. اگرچه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که با افزایش زمان در شرایط فشار ۵ بار از ۱ روز به ۳ روز خیلی اختلاف قابل توجهی در میزان کلر نفوذ کرده ایجاد نمی‌شود. با مقایسه شکل‌های ۱-۳۰ و ۱-۳۲ که به ترتیب مربوط به نمونه‌های بدون پوزولان و حاوی پوزولان هستند می‌توان مشاهده کرد که در محدوده دماهای پایین در نمونه‌های بدون پوزولان، تغییر پارامترهای فشار و زمان تأثیر بیشتری بر نفوذ کلر داشته است. این در حالی است که در نمونه‌های حاوی پوزولان اختلاف کمتری به چشم می‌خورد و این نشان دهنده آن است که مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر نفوذ کلر تا حدی بیشتر بوده و حتی با افزایش فشار و زمان تا حد مشخصی نیز مقاومت خود را در برابر پیشروی کلر حفظ می‌کنند.



شکل ۳-۳۱- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۵۵ درجه سانتی گراد.

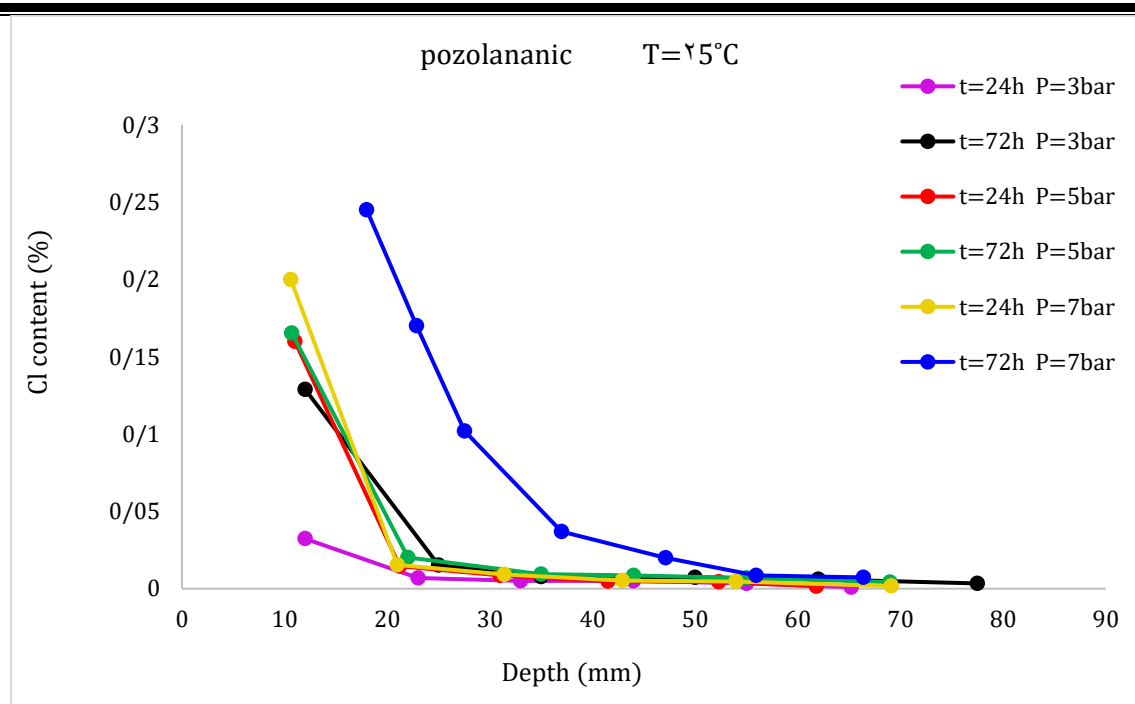
بنابراین افزودن اکسیدگرافن و سرباره علاوه بر اینکه باعث شده مقادیر کمتری کلر در داخل بسیاری از نمونه‌ها نفوذ کند، همچنین موجب گردیده تا بتن رفتار پایداری در برابر تغییرات شرایط محیطی از خود نشان دهد و سریعاً مقاومت خود را از دست ندهد.

۴-۵-۳-۱-۲-۴-۵ اثر افزودنی‌های اکسیدگرافن و سرباره گرانوله بر نفوذ یون کلر در شرایط مختلف

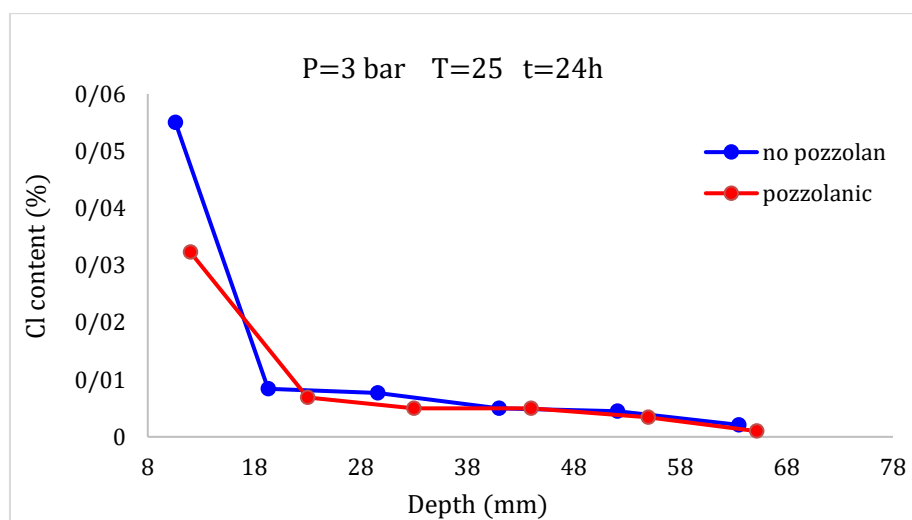
نمونه‌های ۱-۳۳ تا ۱-۳۶ به منظور بررسی تأثیر افزودن سرباره و اکسیدگرافن بر میزان پیشروی یون کلر در نمونه‌های بتنی تحت مجموعه‌ای از شرایط و پارامترهای معین رسم شده‌اند. به عنوان مثال شکل ۳-۳۳ اثر افزودن پوزولان را در فشار، زمان و دمای پایین نشان می‌دهد. تا حدودی قابل مشاهده است که غلظت کلر نفوذ کرده در نمونه بدون پوزولان در اعماق اولیه پودرگیری بیشتر بوده است. اما بر خلاف آنچه انتظار می‌رفت میزان پیشروی کلر در گام‌های بعدی با نمونه پوزولانی اختلاف چندانی ندارد.

دلیل این امر را چنین می‌توان توجیه نمود که به دلیل محدودیت‌های زمانی در انجام این پروژه پژوهشی، زمان عمل‌آوری تمامی نمونه‌های بتنی برای انجام آزمون نفوذ فشاری ۲۸ روز در نظر گرفته شد. این در حالی است که نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان به مراتب به مدت زمان طولانی‌تری برای اتمام واکنش‌های پوزولانی نیاز دارند. بنابراین تا زمانی که واکنش‌های پوزولانی به طور کامل انجام نشوند شاهد تأثیر صد در صدی پوزولان‌ها بر روی ویژگی‌های مختلف بتن به ویژه مقاومت در برابر نفوذ کلر و خوردگی نخواهیم بود.

همانطور که در بخش ۲-۲-۱ نیز بررسی شد، مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با افزایش زمان عمل‌آوری بتن از ۲۸ به ۹۰ روز به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که با طولانی‌تر کردن زمان عمل‌آوری نمونه‌های پوزولانی شاهد اختلاف مشهودتری در نفوذ یون کلر در بتن باشیم. چراکه اگر افزودن این مواد پوزولانی بر افزایش مقاومت بتن در برابر کلر بی تأثیر بود شاهد چنین افزایش چشمگیری در مقاومت الکتریکی و همچنین کاهش هدایت الکتریکی در نمونه‌های پوزولانی ۹۰ روزه نبودیم.



شکل ۳-۳۲- نتایج آزمون نفوذ فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد.



شکل ۳-۳۳- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای پایین

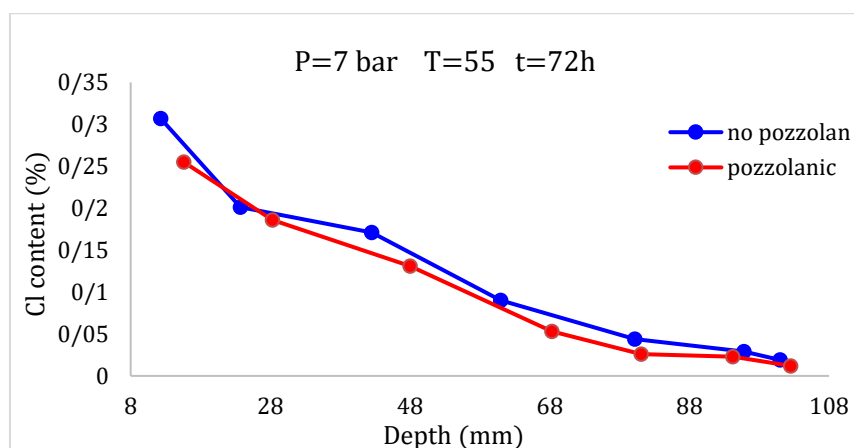
در شکل ۳-۳۴ داده‌های آزمون نفوذ فشاری برای شرایط فشار، دما و زمان بالا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان پیشروی کلر در نمونه بدون پوزولان تا حدودی بیشتر از نمونه حاوی پوزولان بوده است اما همانطور که اشاره شد، اختلافی بیش از این انتظار می‌رفت که به احتمال زیاد با طولانی کردن زمان عمل‌آوری نمونه‌های پوزولانی این اختلاف به طور ناگهانی و فزاینده‌ای بیشتر خواهد شد.

شکل‌های ۱-۳۵ و ۱-۳۶ داده‌های آزمون نفوذ فشاری در نمونه‌های پوزولانی و بدون پوزولان را در شرایطی که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، نشان می‌دهند. بر اساس نتایج بدست آمده در هر دو شرایط محیطی در نظر

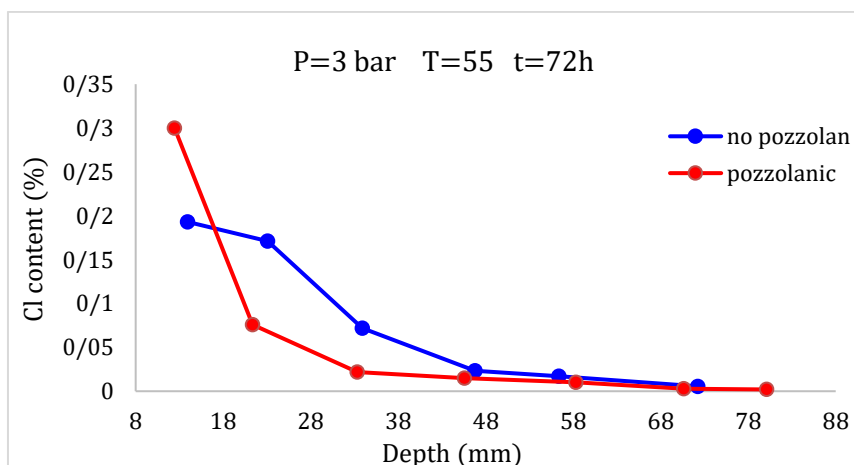
گرفته شده، پروفیل غلظت-زمان نمونه‌های حاوی پوزولان بالاتر از پروفیل مربوط به نمونه‌های بدون پوزولان قرار گرفته است که نشان دهنده مقاومت بیشتر نمونه‌های پوزولانی در برابر نفوذ کلر است.

۳-۱-۲-۵ تجزیه و تحلیل نتایج آزمون الکتروشیمیایی امپدانس بر روی نمونه‌های بتنی

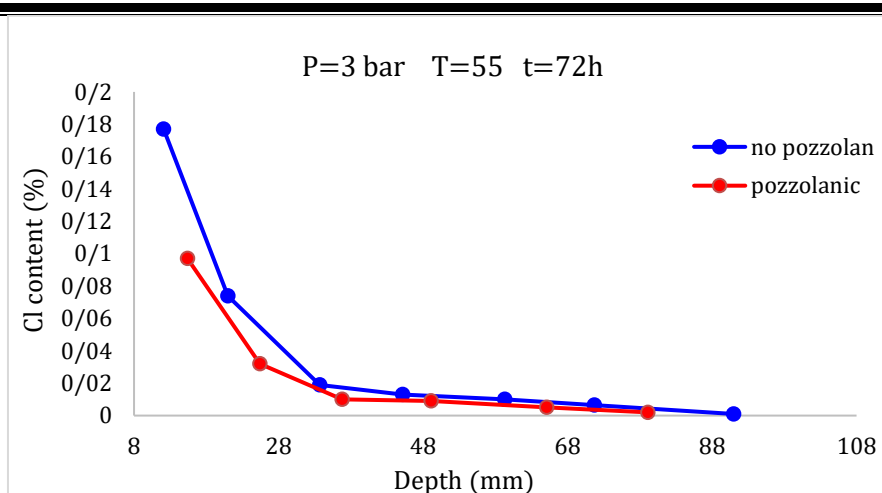
رسم نمودار قسمت موهومی امپدانس بر حسب قسمت حقیقی امپدانس، منحنی نایکوئیست را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است، قطر نیم دایره‌ای که در نمودار نایکوئیست ایجاد می‌شود، نمایانگر مقاومت آن جزء می‌باشد. با محاسبه فرکانس مربوط به نقطه ماکزیمم این نیم دایره نیز می‌توان ظرفیت خازنی آن جز را محاسبه نمود.



شکل ۳-۳۴- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار، زمان و دمای بالا.



شکل ۳-۳۵- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۳ روز



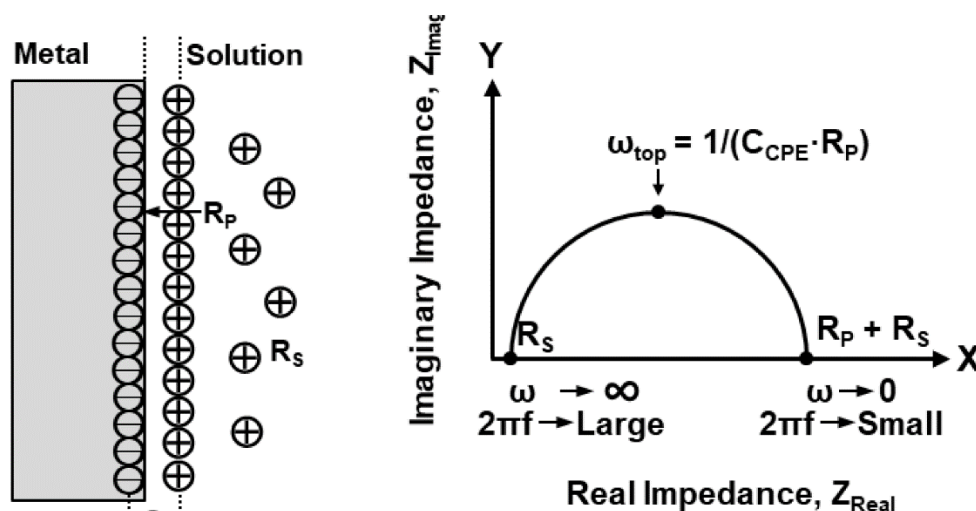
شکل ۳۶-۳- اثر افزودنی‌های پوزولانی بر نفوذ یون کلر در فشار ۳ بار، دمای ۵۵ درجه در مدت ۱ روز

رابطه کلی که در منحنی نایکوئیست برقرار است معادله یک دایره بوده که به صورت معادله ۱ بیان می‌شود. این معادله دایره‌ای را نشان می‌دهد که قطر آن برابر R_p که نشان دهنده مقاومت در برابر انتقال بار است و فاصله آن تا محور مختصات برابر با R_s که نشان دهنده مقاومت اهمیک یا همان مقاومت ناشی از الکترولیت است.

$$[Z' - (R_s + \frac{R_p}{2})]^2 + (Z'')^2 = (\frac{R_p}{2})^2 \quad \text{معادله ۱}$$

با رسم نمودارهای امپدانس بر حسب فرکانس نمودار بد و با رسم نمودار زاویه امپدانس بر حسب فرکانس نمودار بد فاز حاصل می‌شود. مزیت نمودارهای بد و بدفاز در تحلیل نتایج امپدانس نسبت به نمودار نایکوئیست این است که در بازه فرکانس‌های بالا، قدر مطلق امپدانس در نمودار بد به سمت مقاومت اهمیک میل کرده و در بازه فرکانس‌های پایین، مقدار امپدانس نشان‌دهنده مجموع کلیه مقاومت‌های موجود در سیستم خواهد بود. بنابراین با رسم نمودار بد قادر خواهیم بود تا مقدار کلی مقاومت چندین سیستم را به راحتی با یکدیگر مقایسه کنیم. شیب خطوط بدست آمده در نمودار بد عموماً نمایانگر میزان رفتار خازنی یک جزء است. در صورتی که شیب یک خط در نمودار بد برابر با ۱ باشد نشان دهنده این است که آن جزء رفتار خازنی مطلق دارد و هر چه جزء مربوطه از رفتار خازنی فاصله بگیرد، شیب آن خط نیز تغییر کرده و از مقدار ۱ فاصله می‌گیرد. ظرفیت خازنی لایه دوگانه (C_{dl}) در واقع تفسیری است از انباشت الکترواستاتیک بارهای غیر همنام در نزدیکی فصل مشترک فلز-محلول که تابعی از مشخصات و ساختار ماده می‌باشد.

زاویه صفر در منحنی بد-فاز نشان‌دهنده یک رفتار مقاومتی خالص و هرچه مقدار این زاویه از صفر منحرف شود نشان‌دهنده یک رفتار خازنی است. پیدایش زاویه ۹۰ درجه برای یک جزء نشان دهنده این است که آن جزء در سیستم رفتار خازنی خالص دارد. عموماً در یک مدار الکتریکی اجزا از حالت ایده‌آل فاصله دارند و این باعث می‌شود تا مجبور باشیم به جای عنصر خازن از یک المان دیگر تحت عنوان المان فاز ثابت یا CPE استفاده کنیم که با رابطه ۲ بیان می‌شود. اگر در رابطه زیر مقدار ضریب n برابر با ۱ باشد، رفتار خازنی از نوع خازن مطلق است و هرچه مقدار آن از ۱ کمتر شده و به ۰/۵ نزدیک شود، نشان دهنده انحراف جزء از خازن مطلق و بنابراین رفتار غیرایده‌آل‌تر است.



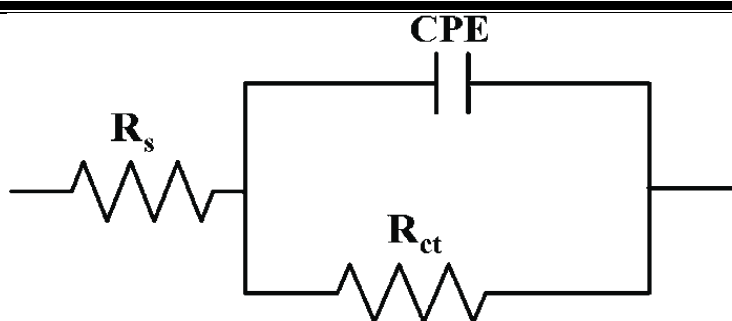
شکل ۳۷-۳- پارامترهای مختلف در تحلیل طیف امپدانس یک فلز

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q(j\omega)^n}$$

معادله ۲

بتن معمولاً به دلیل ساختار غیریکنواخت و غیرهمگنی که دارد عموماً یک رفتار غیرایده‌آل از خود نشان می‌دهد و در مواردی ممکن است اصلاً به صورت خازن عمل نکرده و صرفاً خود را به صورت یک جزء نفوذی واربرگ در آزمون طیف سنجی امپدانس نشان دهد. انحراف از حالت خازنی در بتن ناشی از لایه اکسیدی غیریکنواخت روی سطح آرماتور و همچنین توزیع غیریکنواخت انواع عیوب و تخلخل‌ها در ساختار بتن است. در آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای تعیین پارامترها و مجهولات و نهایتاً بررسی دقیق رفتار الکتروشیمیایی، طراحی یک مدار معادل که بتواند داده‌های تجربی را تا حد نزدیکی توصیف کند، ضروری است. ابتدایی‌ترین و ساده‌ترین مداری که تا به حال برای توصیف داده‌های امپدانس در زمینه بتن و بسیاری از موارد دیگر به کار گرفته شده است، مداری است که نخستین بار توسط رندلز پیشنهاد گردید (شکل ۳۸-۱). در این مدار معادل منظور از R_s مقاومت اهمیک محلول است که در نتیجه مقاومت بین آرماتور و الکتروود مرجع ایجاد می‌شود، CPE المان فاز ثابت و R_{ct} مقاومت در برابر انتقال بار است. عموماً در تحلیل مدار معادل مربوط به بتن به دلیل ماهیت و مقاومت الکتریکی بالای بتن می‌توان از مقاومت R_s صرف نظر کرد چرا که در مقایسه با مقاومت بتن مقداری بسیار ناچیز است [۲۱۰].

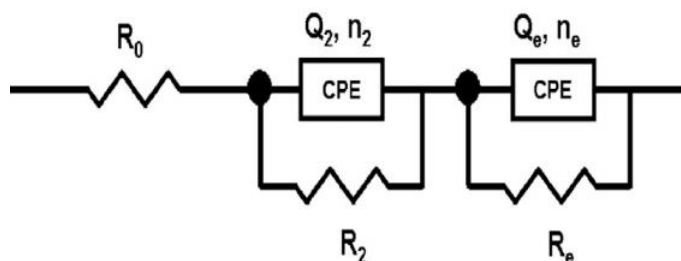
مدار معادل‌های دیگری نیز برای توصیف دقیق‌تر رفتار الکتروشیمیایی بتن در منابع صورت گرفته است که نمونه‌ای از آن در شکل ۳۹-۳ نشان داده شده است. در این مدار R_e نشان دهنده مقاومت پلاریزاسیون آرماتور فولادی و ناشی از وجود لایه پسیوی است که بر روی سطح آن وجود دارد. با افزایش این مقاومت بدیهی است که مقاومت در برابر خوردگی افزایش پیدا می‌کند. R_2 و CPE_2 نیز به ترتیب نشان دهنده مقاومت و عنصر فاز ثابت بتن هستند. در شکل ۴۰-۳ مجموعه دیگری از مدارهای معادل که در زمینه تحلیل داده‌های امپدانس بتن توسط محققین دیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است [۲۱۱].



شکل ۳۸-۳- مدار معادل رندلز

برخی از محققین بتن را مجموعه‌ای از دو بخش موازی در نظر می‌گیرند که هر کدام شامل یک المان فاز ثابت و مقاومت است [۲۱۱]. در این صورت یکی از این بخش‌ها نمایانگر ویژگی‌های آرماتور فولادی و دیگری مربوط به خود ساختار بتن خواهد بود. این در حالی است که برخی دیگر بر این باورند که مدار معادل بتن به شامل دو مدار جزئی‌تر است که یکی در زیر مجموعه دیگری قرار دارد. در این صورت مدار بیرونی مربوط به بتن و مدار داخلی مربوط به ویژگی‌های آرماتور فولادی خواهد بود (شکل ۴۱-۱).

R_{ct} مقاومت انتقال بار بر سطح آرماتور که نشان دهنده مقاومت پلاریزاسیون و معیاری از مقاومت به خوردگی می‌باشد. CPE_{dl} خازن ایجاد شده بر روی سطح آرماتور و CPE_{pn} مربوط به انباشت بارها در ساختار بتن می‌باشد. R_{pn} نیز نشان دهنده مقاومت ایجاد شده در بتن است که به ساختار متخلخل آن مربوط می‌شود.



شکل ۳۹-۳- یک مدار معادل پیشنهادی برای بتن [۲۱۱].

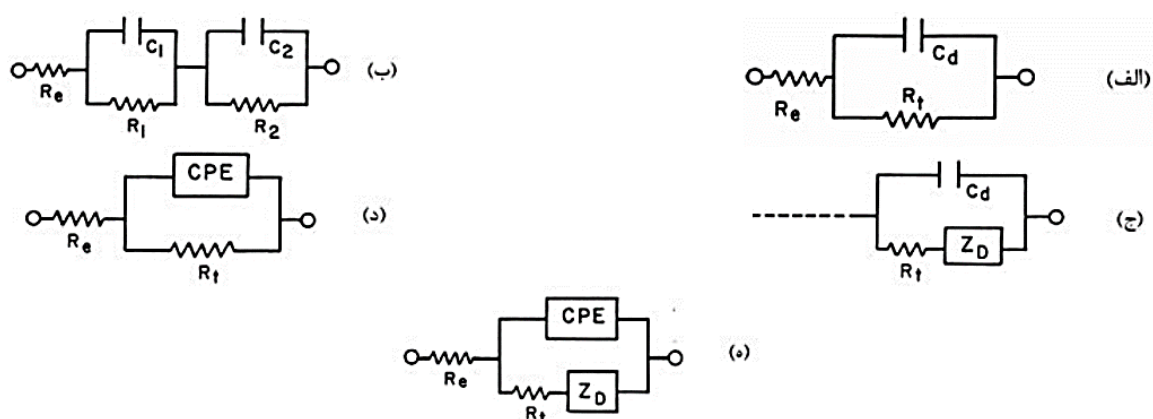
المان فاز ثابت CPE همواره با دو پارامتر P و T بر اساس رابطه فیزوری تعریف می‌شود (معادله ۳). اگر در این رابطه پارامتر P برابر با ۱ باشد، نشان‌دهنده یک رفتار خازنی ایده‌آل بوده و چنانچه این عدد برابر ۰/۵ باشد، المان خازن فاز ثابت در نمودار نایکوئیست یک خط مورب با زاویه ۴۵ را نشان خواهد داد. در این صورت مکانیزم غالب در بتن مربوط به پدیده نفوذ خواهد بود که می‌توان آن را المان واربرگ شبیه‌سازی نمود.

شکل‌های ۴۲-۱ و ۴۳-۱ منحنی‌های نایکوئیست بدست آمده از نتایج آزمون الکتروشیمیایی امپدانس مربوط به نمونه‌های بتنی شاهد و پوزولانی را بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که برای هر دو نمونه دو ثابت زمانی در سیستم وجود داشته و بنابراین به ازای هر کدام یک مقاومت در مدار معادل وجود خواهد داشت. برای بررسی دقیق‌تر نمودارهای بد-فاز دو نمونه نیز رسم شدند (شکل‌های ۴۳-۱ و ۴۴-۱) و مشاهده شد که در هر دوی نمودارها دو تقعر وجود دارد که تاییدی دیگر بر وجود دو ثابت زمانی در مدار معادل نمونه‌های بتنی است. البته ممکن است در نگاه اول به نمودار بد-فاز مربوط به نمونه

پوزولانی به نظر برسد که یک ثابت زمانی در سیستم وجود دارد اما دلیل این امر محدود بودن بازه فرکانس انجام آزمون بوده و در صورتی که آزمون تا فرکانس‌های بالاتر ادامه داده می‌شد تقعر ثانویه نیز کاملاً نمایان می‌شد.

$$Z = \frac{1}{T} (jW^p) \quad \text{معادله ۳}$$

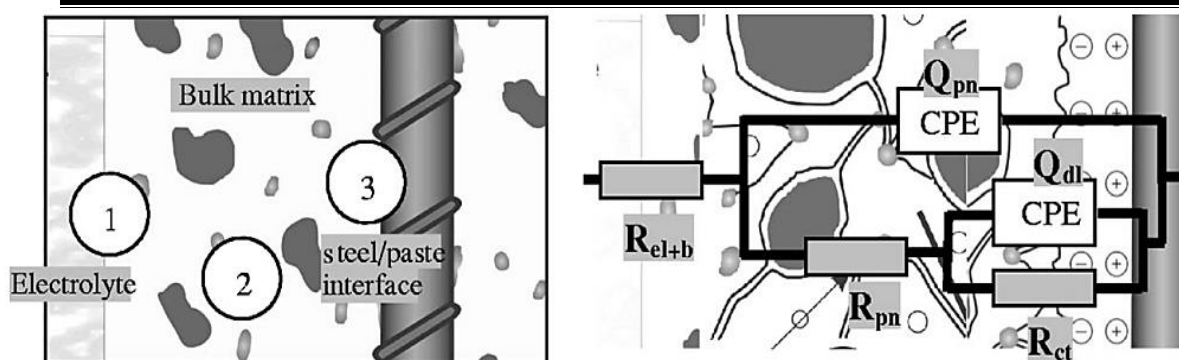
باتوجه به اینکه مقاومت بتن مقدار بسیار بالایی است، بنابراین وجود تقعر در فرکانس‌های بالا را می‌توان ناشی از پارامترهای بتن یعنی مقاومت و المان فاز ثابت آن و تقعر در محدوده فرکانس‌های پایین‌تر را ناشی از پارامترهای مربوط به لایه اکسیدی پسیو بر روی سطح آرماتور شامل مقاومت پلاریزاسیون و ظرفیت خازنی لایه دوگانه آن دانست.



شکل ۳-۴۰- مجموعه از مدارهای معادل برای تحلیل امپدانس نمونه‌های بتنی، R_t مقاومت انتقال بار، R_1 و R_2 مقاومت اهمیک، C_d خازن لایه دوگانه، C_1 و C_2 خازن معمولی، CPE عنصر فاز ثابت، Z_D المان نفوذی واربرگ [۲۱۲].

یکی از تفاوت‌های مهم بین نمونه‌های بتنی شاهد و پوزولانی، قطر نیم دایره‌ها در منحنی نایکوئیست است. در شکل ۳-۴۸ به منظور مقایسه بهتر هر دو نمودار در یک شکل رسم شده‌اند. همانطور که مشهود است با افزودن پوزولان‌های سرباره و اکسید گرافن، شعاع نیم‌دایره مربوط به بتن (در فرکانس‌های بالاتر) به طور قابل توجهی افزایش یافته است. بر اساس منابع قبلی قطر این نیم دایره با میزان تخلخل‌های ساختاری بتن رابطه عکس دارد [۲۱۰، ۲۱۳]. بدین ترتیب افزایش شعاع نیم‌دایره نمودار نایکوئیست در نمونه پوزولانی را می‌توان حاکی از کاهش تخلخل‌های ساختاری درون بتن دانست. چنین نتیجه‌ای از قبل نیز انتظار می‌رفت زیرا در بسیاری از منابع قبلاً اشاره شده است که یکی از مهمترین نقش‌های افزودنی‌های پوزولانی در نمونه‌های بتنی، کمک به فرآیند هیدراسیون برای کامل‌تر انجام شدن آن و در نتیجه دستیابی به یک ساختار متراکم‌تر می‌باشد [۲۱۰].

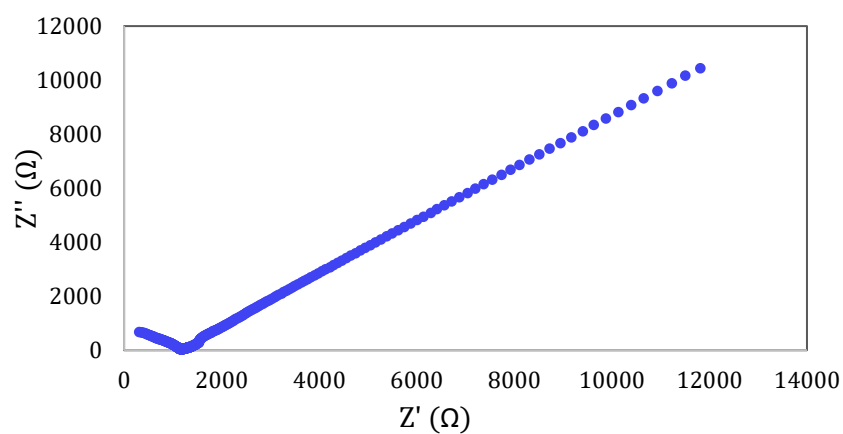
علاوه بر تاثیرات میکروساختاری، اکسیدگرافن می‌تواند یون‌های کلسیم محلول در تخلخل‌های بتن را توسط گروه‌های عاملی خود جذب کند و بنابراین از فرآیند شسته شدن کلسیم و کاهش مقدار آن در بتن که یکی از مکانیزم‌های متداول در تخریب سازه‌های بتنی است جلوگیری می‌کند.



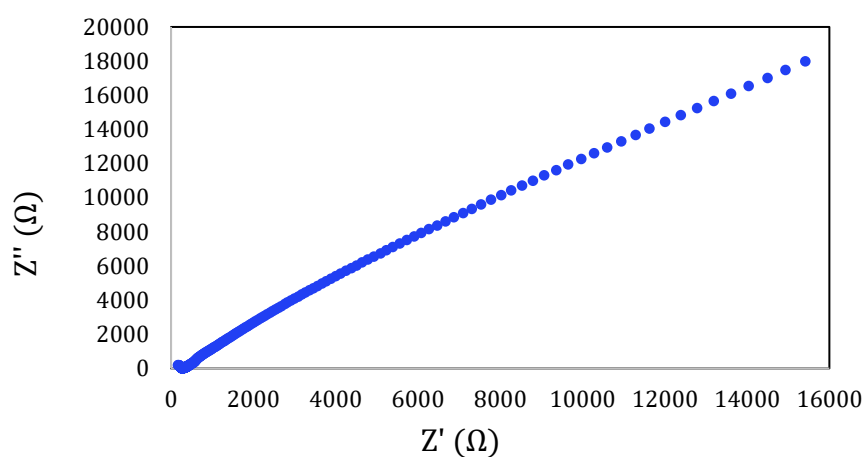
شکل ۳-۴۰- مدار معادل آرماتور فولادی درون بتن

همانطور که اشاره شد برای هر دو نمونه شاهد و پوزولانی در نمودارهای بد-فاز دو تقعر وجود مشاهده گردید. در شکل‌های ۱-۴۵ و ۱-۴۶ مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه یکی از این تقعرها مربوط به محدوده زوایای کمتر (زیر ۹۰ درجه) و پیک پهن است و تقعر دیگر در زوایای بالاتر و یک پیک شدیدتر را به خود اختصاص داده است.

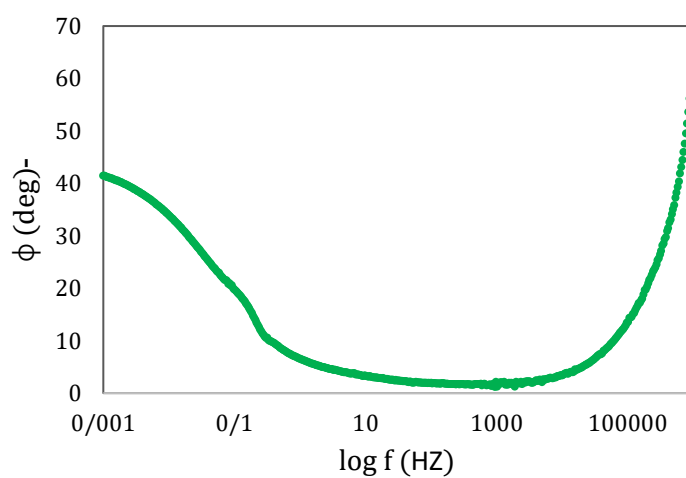
از بین این دو تقعر برای هر دو نمونه شاهد و پوزولانی، تقعر بدست آمده در زوایای کمتر مربوط به ساختار بتن و تقعر بدست آمده در زوایای بالاتر نشان دهنده ویژگی‌های آرماتور فولادی می‌باشد. بنابراین از آنجایی که برای هر دو نمونه بدون پوزولان و با پوزولان تقعر مربوط به بتن در محدوده زوایای زیر ۹۰ می‌باشد، رفتار بتن‌ها از رفتار خازنی خالص انحراف دارد چراکه هرچه مقدار این زاویه برای یک المان به ۹۰ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده رفتار خازنی خالص‌تر خواهد بود. محدوده دقیق‌تر زوایای مربوط به این تقعر برای نمونه شاهد در محدوده ۴۰ تا ۵۰ و برای نمونه پوزولانی در محدوده ۵۰ تا ۶۰ درجه می‌باشد (شکل ۱-۴۹). بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که رفتار نمونه بتنی پوزولانی تا حدی به رفتار خازنی نزدیک‌تر شده اما همچنان مکانیزم نفوذ در آن غالب است. به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار الکتروشیمیایی و خوردگی در نمونه‌های بتنی، منحنی‌های بد (شکل‌های ۳-۴۷ و ۱-۴۸) نیز رسم شدند. تقاطع این منحنی‌ها با محور عمودی نمایانگر مقاومت کلی در هر سیستم شامل $R_p + R_s + R_{con}$ می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، در هر دو نمودار بد خطوطی با شیب منفی ۱ به چشم می‌خورند. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد ظاهر شدن خط با شیب منفی ۱ در نمودار بد نشان دهنده انحراف سیستم از رفتار خازنی ایده‌آل است. با مطابقت نمودارهای بد در شکل ۳-۵۰ مشاهده می‌شود که مقاومت کلی سیستم در نمونه بتنی پوزولانی به میزان قابل توجهی بیشتر از نمونه بدون پوزولان بوده است که کاملاً منطبق بر نتیجه‌ای است که از نمودارهای نایکوئیست گرفته شد. بنابراین افزودن پوزولان‌ها در بهبود مقاومت بتن به نفوذ کلر موثر بوده است.



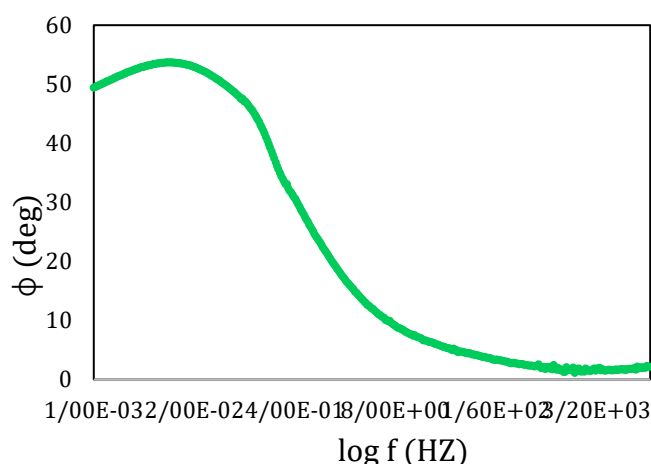
شکل ۴۱-۳- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز



شکل ۴۲-۳- نمودار نایکوئیست مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز

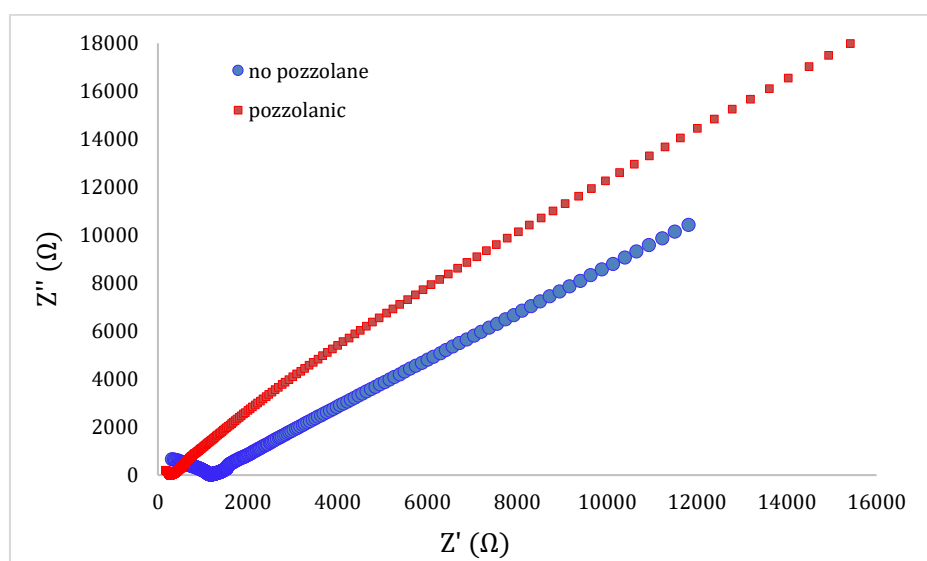


شکل ۴۳-۳- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز



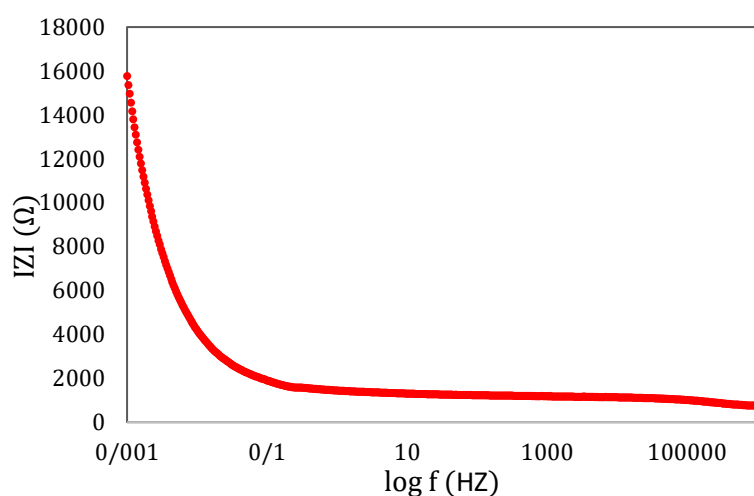
شکل ۳-۴۴- نمودار بد- فاز مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز

به منظور بررسی کمی پارامترهای الکتروشیمیایی داده‌های بدست آمده از آزمون امپدانس در نرم افزار *Zview* وارد و به کمک آن تحلیل گردید. بر مبنای مروری که بر مطالعات قبلی صورت گرفت چندین مدار پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت که از بین این مدارها بهترین مداری که داده‌های تجربی را توجیه نمود مداری است که در شکل ۳-۵۱ نشان داده شده است. نتایج برون‌یابی داده‌ها و نمودارهای تجربی در محیط نرم‌افزار در شکل‌های ۳-۵۲ و ۳-۵۳ نشان داده شده است. در این مدار برای هر کدام از آرماتور و بتن به صورت جداگانه مقاومت و المان فاز ثابت در نظر گرفته شده است. منظور از R_p مقاومت آرماتور در برابر پلاریزه شدن، R_s مقاومت اهمیک در الکترولیت که با توجه به اینکه محلول استفاده شده سدیم کلرید ۳/۵ درصد است بسیار ناچیز می‌باشد، R_{con} مقاومت ساختاری بتن که به ساختار متخلخل آن مربوط می‌شود و CPE_{dl} و CPE_{con} به ترتیب مقادیر المان فاز ثلثت آرماتور و بتن می‌باشند. مقادیر پارامترهای مجهول با توجه به مدار انتخاب شده مطابق با جدول ۲-۱ بدست آمد.

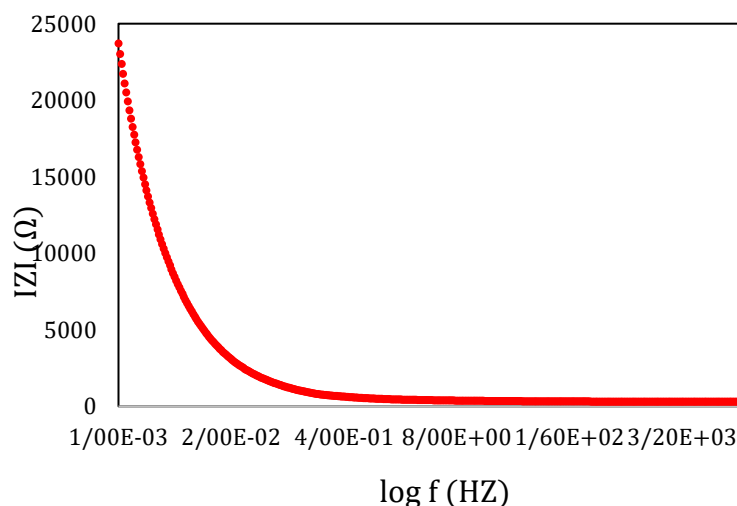


شکل ۳-۴۵- مقایسه نمودارهای نایکوئیست نمونه‌های پوزولانی و شاهد.

نتایج بدست آمده به وضوح نشان می‌دهد که مقاومت نمونه بتنی حاوی پوزولان به مراتب بیشتر از نمونه بدون پوزولان بوده است. مقدار مقاومت پلاریزاسیون بدست آمده برای نمونه بدون پوزولان در گستره کیلو اهم و ظرفیت خازنی لایه اکسیدی متخلخل محافظ آرماتور و بتن به ترتیب در گستره نانوفاراد و میلی فاراد بر سانتی‌متر مربع بدست آمده است. بر اساس پارامترهای بدست آمده در نمونه‌های پوزولانی به نظر می‌رسد که مقاومت پلاریزاسیون آرماتور کاهش یافته است. از آنجایی که مقاومت پلاریزاسیون با خوردگی رابطه عکس دارد چنین به نظر می‌رسد که مقاومت به خوردگی آرماتور فولادی در نمونه‌های بتنی پوزولانی کاهش یافته باشد. اما همواره باید در نظر داشت که در تحلیل نتایج آزمون امپدانس یکی از بهترین معیارهای ارزیابی و نتیجه‌گیری مقاومت کل مدار معادل می‌باشد.



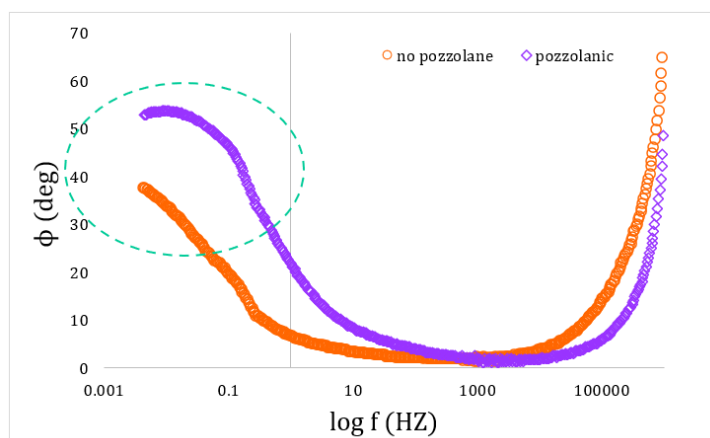
شکل ۴۶-۳- نمودار بد مربوط به نمونه بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز



شکل ۴۷-۳- نمودار بد مربوط به نمونه پوزولانی بعد از ۲۸ روز

با در نظر گرفتن منحنی‌های بد که در شکل ۵۰-۳ ارائه گردید، برآیند مقاومت در نمونه‌های پوزولانی تا حد

زیادی در مقایسه با نمونه‌های بدون پوزولان افزایش یافته است که این امر نقش بهبود دهنده افزودنی‌ها را در جهت افزایش مقاومت به خوردگی نشان می‌دهد. همچنین ممکن است در نتیجه افزودن پوزولان‌ها به دلیل فعالیت شیمیایی بالای آنها در سنین اولیه و واکنش‌های احتمالی که در داخل بتن انجام می‌گیرد، لایه پسیو روی میلگرد فولادی تحت تأثیر قرار گرفته و بنابراین باعث کاهش مقاومت پلاریزاسیون آن شده باشد.



شکل ۳-۴۸- مقایسه نمودارهای بد-فاز نمونه‌های بتنی شاهد و پوزولانی.

زمانی که ترکیبات پوزولانی همچون سرباره به بتن افزوده می‌شود مطابق با واکنش زیر با سیمان وارد واکنش شده و در نهایت ترکیب عمده CSH و هیدروکسید کلسیم (به همراه برخی کمپلکس‌های دیگر) ایجاد شده که ترکیبی ژله‌ای است و قادر به پر کردن تخلخل بتن می‌باشد. در نتیجه این فرآیند تخلخل‌های بتن بسته شده و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد.

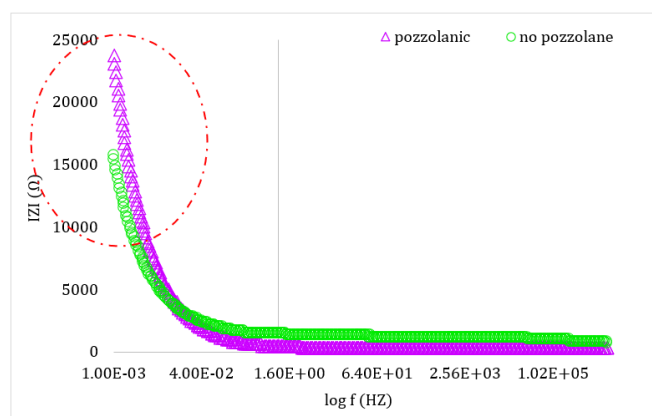
۳-۱-۲-۶ تجزیه و تحلیل نتایج بررسی‌های ریزساختاری

شکل ۱-۵۴ ریزساختار نمونه‌های بتنی بدست آمده قبل و بعد از افزودن سرباره گرانوله و اکسیدگرافن را نشان می‌دهد. همانطور که قابل به وضوح قابل مشاهده است بعد از افزودن پوزولان، تخلخل‌های ساختاری بتن به میزان چشمگیری کاهش یافته و یک ساختار متراکم‌تر بدست آمده است. این امر کاملاً منطبق بر نتایج بدست آمده از آزمون امپدانس اکتروشیمیایی می‌باشد. زیرا این کاهش درصد حجمی تخلخل‌های در ریزساختار بتن باعث شده بود مقاومت کلی سیستم بیشتر شود. از طرفی در نمونه بدون پوزولان مقادیر بیشتری ترک‌های ساختاری به چشم می‌خورند که بعد از اضافه شده سرباره و اکسیدگرافن به ساختار بتن تا حد بسیار زیادی کاهش یافته‌اند.

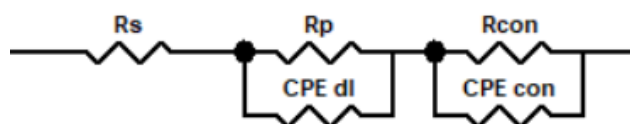
شکل ۱-۲-۱- برون‌یابی داده‌های تجربی نمونه حاوی پوزولان با مدار معادل انتخاب شده در نرم افزار Zview. این امر نیز تأییدی است بر نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی چرا که بالاترین خواص مکانیکی در بتن‌های ساخته شده مربوط به نمونه‌های پوزولانی بود. بنابراین افزایش سرباره و اکسیدگرافن نقش بسیار موثری در به حداقل رساندن میزان تخلخل و ترک‌های ساختاری در نمونه‌های بتنی داشته‌اند.

جدول ۳-۶- پارامترهای محاسبه شده در نرم‌افزار Zview.

نمونه	$R_p (\Omega)$	CPEdl-T (F)	CPEdl-P (n)	Rcon (Ω)	CPEcon-T	CPEcon-P (n)	Chi-squared
نمونه شاهد	۱۱۱۹	$1/15E-9$	۰/۹۰	۶۶۵۵۰	۰/۰۰۱۳	۰/۵۶	۰/۰۴
نمونه پوزولانی	۲۸۰	$2/90E-9$	۰/۹۰	۹۴۵۱۰	۰/۰۰۱۳	۰/۶۷	۰/۰۴

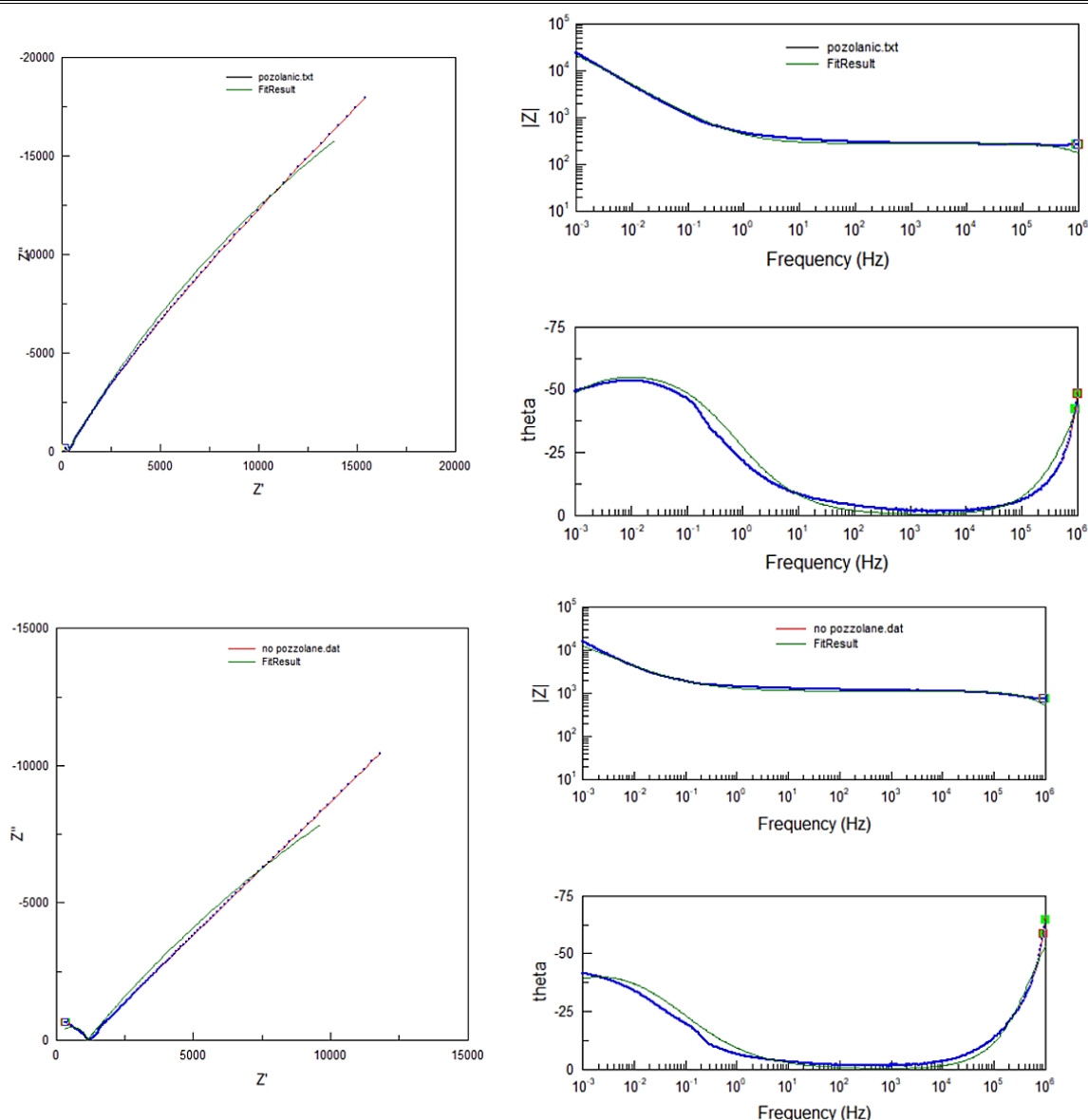


شکل ۳-۴۹- مقایسه نمودارهای بد نمونه‌های بتنی شاهد و پوزولانی



شکل ۳-۵۰- مدار معادل اولیه انتخاب شده به منظور تحلیل داده‌های امپدانس

به منظور بررسی‌های دقیق‌تر ریزساختار نمونه‌های بتنی پوزولانی و بدون پوزولان، در بزرگنمایی‌های متفاوت از آن‌ها تصاویر ریزساختاری تهیه گردید. تصاویر ارائه شده در شکل ۳-۵۵ ریزساختار نمونه بتنی بدون پوزولان بعد از گذشت ۲۸ روز را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، ریزساختار آن به طور کلی شامل کریستال‌های صفحه‌ای شکل C-H، ترکیبات هیدراته سوزنی شکل و همچنین ترکیب C-H-S می‌باشد. تمامی این ترکیبات در نتیجه واکنش‌های بین سیمان و آب در فرآیند هیدراسیون در ساختار بتن ایجاد می‌گردند و با متابع قبلی نیز مطابقت دارند. در اثربک واکنش ثانویه کریستال‌های هگزاگونال کلسیم هیدروکسید (C-H) به C-H-S تبدیل می‌شوند و از آنجایی که عموماً این ترکیب یک ساختار متراکم دارد، هر چه به میزان بیشتری در ساختار بتن ایجاد گردد منجر به پر شدن حفرات و تخلخل‌ها و در نتیجه بهبود بسیاری از خواص بتن می‌گردد.

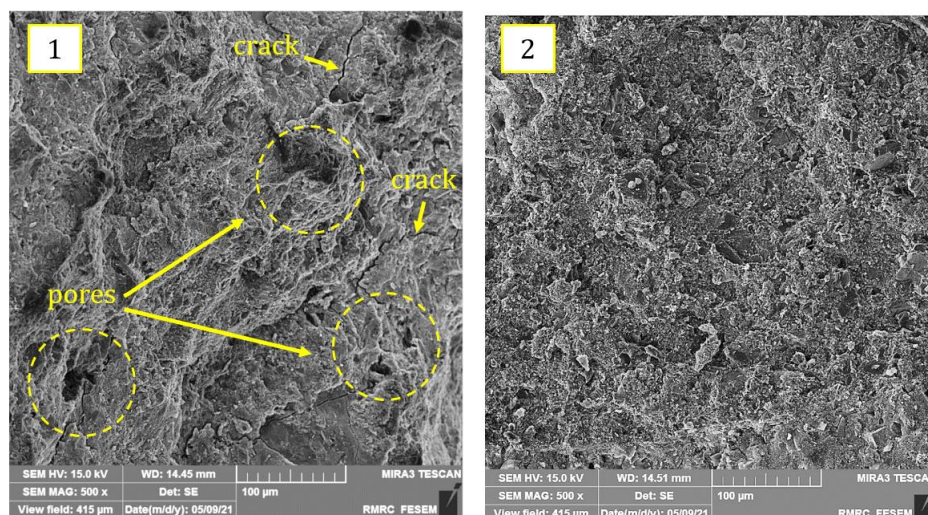


شکل ۵۱-۳- برون‌یابی داده‌های تجربی نمونه بدون پوزولان با مدار معادل انتخاب شده در نرم افزار Zview.

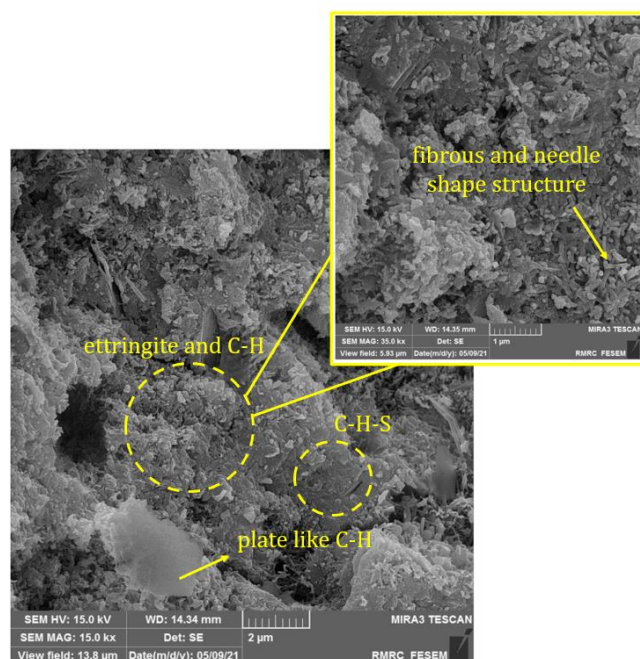
ریزساختار نمونه‌های بتنی بدون پوزولان تا حد زیادی متشکل از ترکیبات سوزنی و کریستال‌های صفحه‌ای شکل و هگزاگونال کلسیم هیدروکسید C-H می‌باشد. اگرچه تا حدودی ترکیبات هدراته سیلیکاتی نیز در آن‌ها شکل گرفته اما میزان آن‌ها به حدی نبوده است که بتواند تاثیری بر تخلخل‌های ساختاری بتن داشته باشد. این امری کاملاً طبیعی و قابل انتظار است چرا که هدف اصلی از افزودن مواد پوزولانی نیز افزایش مقدار C-H-S در مقایسه با نمونه بدون پوزولان بوده است.

تصاویر ارائه شده در شکل ۵۶-۳ مربوط به نمونه‌های حاوی پوزولان است که ورقه‌های اکسیدگرافن در ریزساختار آن یافت شده است. در پیدا کردن مواد پوزولانی همچون اکسیدگرافن در ریزساختار که در مقادیر بسیار کم به بتن افزوده می‌شود با محدودیت‌هایی روبرو هستیم. یکی از این محدودیت‌ها ضخامت بسیار کم آنها است که در آنالیز عنصری EDS به منظور اطمینان از ترکیب عنصری آن خطا ایجاد می‌کند. محدودیت دیگر مربوط به مقدار کم آن در ساختار بتن است که در برخی موارد حتی ناممکن می‌شود. با توجه به اینکه در این

پروژه پژوهشی نیز مقدار بسیار کمی اکسید گرافن یعنی 0.08% درصد وزنی به بتن افزوده شده بود، پیدا کردن گرافن در ساختار بسیار چالش برانگیز بود. با این حال با بررسی‌های زیاد صورت گرفته و وقت زیادی که برای تهیه تصاویر ریزساختاری صرف شد در نهایت مناطقی مشابه با مورفولوژی چروکیده ورقه‌های اکسیدگرافن یافت شد که در شکل ۵۶-۳ نشان داده شده است.



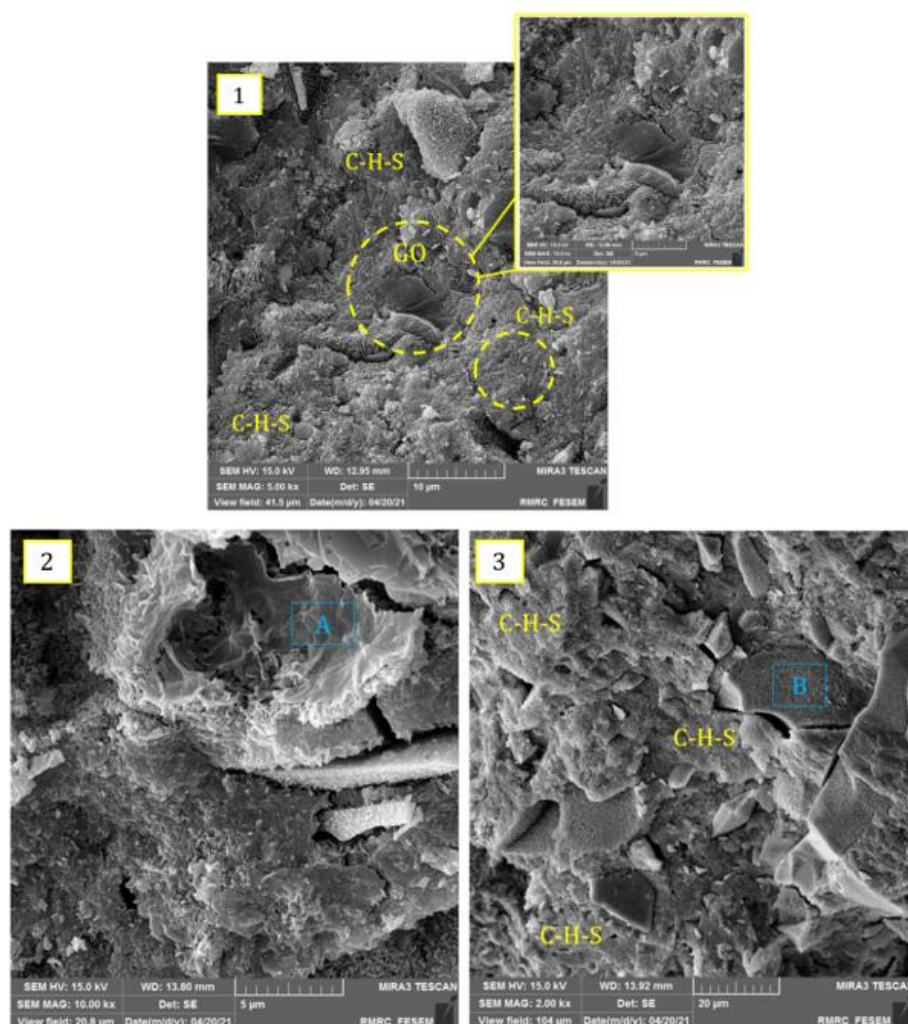
شکل ۵۲-۳- مقایسه ریزساختار نمونه‌های بتنی (۱) بدون پوزولان و (۲) حاوی پوزولان سرباره و اکسیدگرافن



شکل ۵۳-۳- ریزساختار نمونه بتنی بدون پوزولان بعد از ۲۸ روز

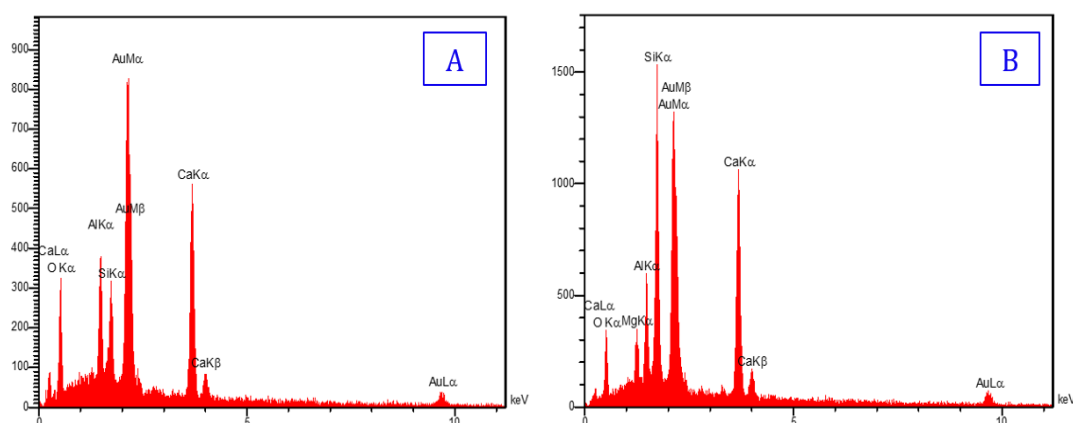
در ریزساختار نمونه‌های بتنی مشخص است که سیمان به میزان بیشتری هیدراته شده است و مقدار بیشتری از ترکیب C-H-S در ساختار بتن ایجاد شده است. در این نمونه‌ها نیز کریستال‌های هگزاگونال شکل

C-H به چشم می‌خورند اما کسر حجمی قابل توجهی از ریزساختار در تصاویر نشان داده شده شامل C-H-S می‌گردد. به منظور بررسی دقیق‌تر آنالیز عنصری نقاط A و B در شکل ۵۷-۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده افزودن سرباره و اکسیدگرافن در بتن باعث تشکیل این ترکیبات ثانویه با نسبت Ca به Si کمتر شده‌اند.



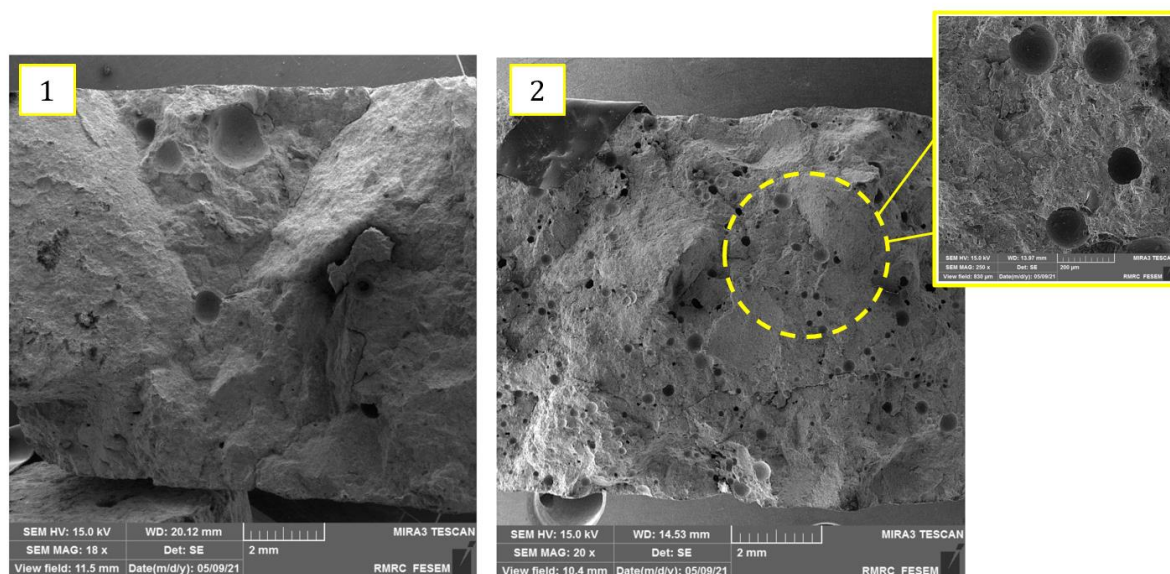
شکل ۵۴-۳- ریزساختار نمونه بتنی حاوی سرباره گرانوله و اکسیدگرافن بعد از ۲۸ روز

این نسبت در سیمان معمولی در حدود ۲ است در حالیکه با تشکیل این ترکیبات یعنی کلسیم سیلیکات هیدراته در بسیاری از بخش‌های زمینه سیمانی این نسبت کاهش می‌یابد. در تصویر شماره ۲ در شکل ۵۶-۳ یک ترک بزرگ به چشم می‌خورد که به احتمال زیاد در حین تهیه نمونه‌ها و شکست آن‌ها به منظور بررسی سطح شکست ایجاد شده است.



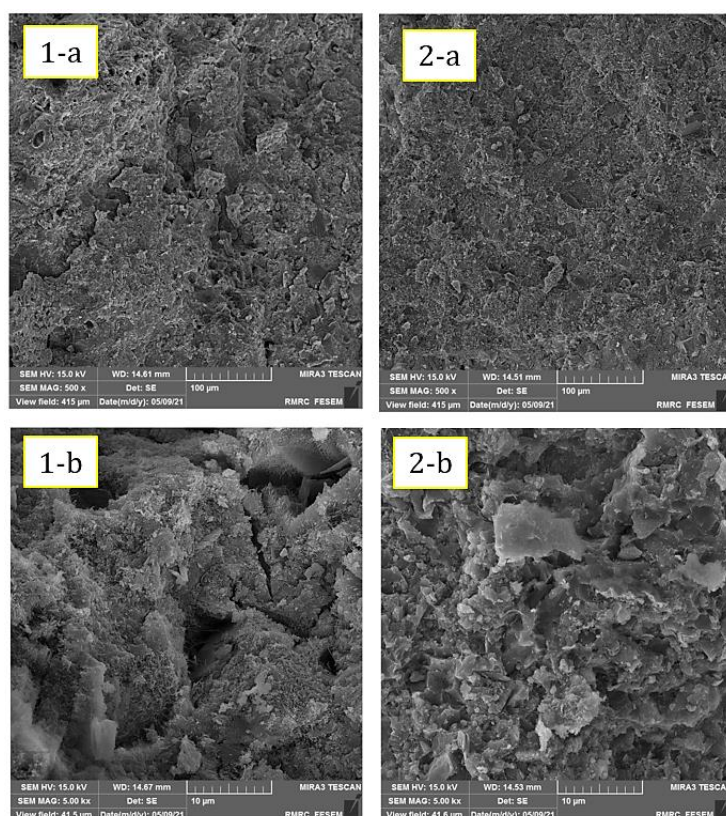
شکل ۳-۵۵- آنالیز عنصری از نقاط مشخص شده A و B در تصاویر ریزساختار نمونه بتنی پوزولانی.

به منظور بررسی بیشتر رفتار نمونه‌های بتنی پوزولانی در برابر نفوذ یون کلر، بعد از انجام آزمون نفوذ فشاری یون کلر در یک شرایط انتخابی (فشار ۵ بار و بازه زمانی ۳ روزه در دمای محیط) مورد بررسی قرار گرفتند. به این ترتیب از کف هر نمونه به صورت عمودی نمونه‌هایی جدا گردید تا امکان بررسی عنصری کلر در اعماق مختلف ممکن باشد. وضعیت سطح نمونه‌ها در بزرگنمایی کم در شکل ۳-۵۸ و نتایج ریزساختاری نمونه‌ها بعد از آزمون نفوذ فشاری در شکل ۳-۵۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳-۵۸ مشاهده می‌شود سطح نمونه‌ها بعد از آزمون نفوذ فشاری به ویژه در نمونه‌های پوزولانی دچار حفره‌هایی شده که با نتایج قبلی همخوانی چندانی ندارد چراکه انتظار می‌رفت تغییرات ساختاری نمونه‌های پوزولانی در آزمون نفوذ فشاری بسیار کمتر از نمونه‌های بدون پوزولان باشد. به منظور مقایسه میزان کلر ورود کرده در نمونه‌های بتنی در هر کدام از نمونه‌ها بعد از انجام آزمون نفوذ فشاری در محدوده‌ای از بالا و پایین نمونه‌ها که به ترتیب در معرض نفوذ کلر کمتر و بیشتر بوده‌اند، آنالیز EDS گرفته شد.

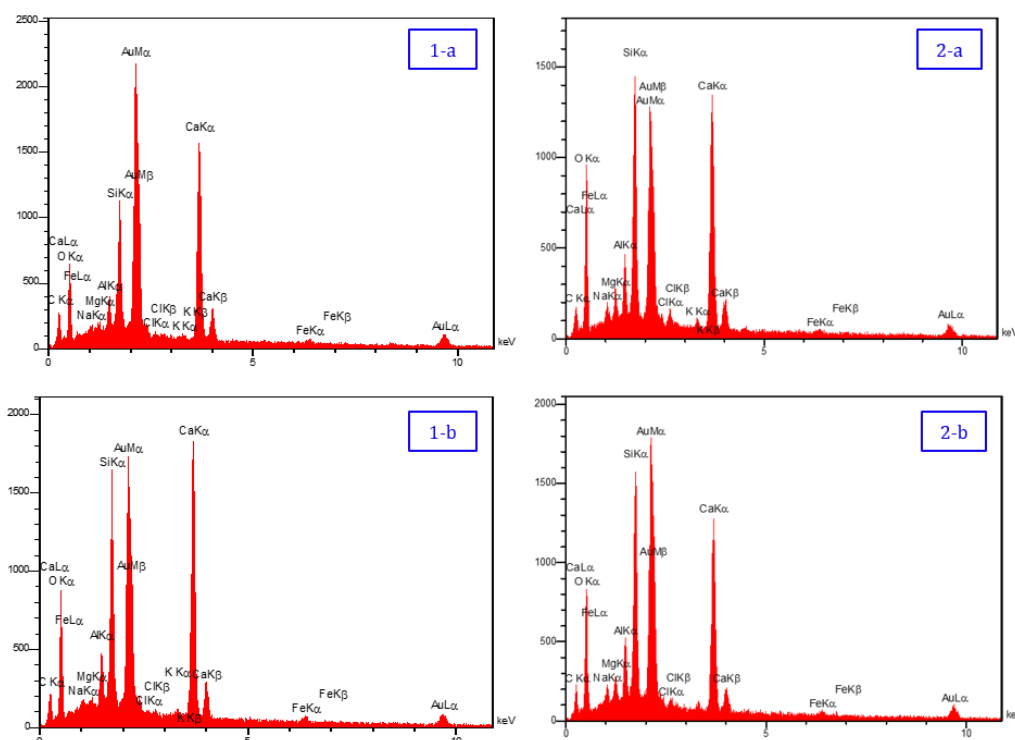


شکل ۳-۵۶- تصاویر ماکرو از سطوح نمونه‌های (۱) بدون پوزولان و (۲) پوزولانی بعد از انجام آزمون نفوذ فشاری. نتایج آن‌ها در شکل ۳-۶۰ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از آنالیز نمونه‌های بتنی بعد از

نفوذ کلر در آنها درصد وزنی کلر در بخش بالایی و کف نمونه تهیه شده از بتن بدون پوزولان به ترتیب ۲/۸ و ۵/۷ درصد بدست آمد در حالی که این مقادیر برای نمونه پوزولانی به ترتیب برابر با ۱۵ و ۲۰ درصد بودند. آن چه نتیجه گیری را چالش برانگیز می‌کند این است که بر اساس نتایج اولیه ریزساختاری و نتایج بدست آمده از آزمون امیدانس الکتروشیمیایی انتظار می‌رفت که مقادیر کلر نفوذ کرده در نمونه‌های پوزولانی به مراتب کمتر از نمونه‌های بتنی معمولی باشد. اما نتایج آنالیز عنصری کلر نشان می‌دهد که با وجود ریزساختار متراکم‌تر در نمونه‌های پوزولانی اما کلر به میزان بیشتری توانسته در آن‌ها نفوذ کند. دلیل این امر را شاید اینگونه بتوان توجیه نمود که به دلیل زمان عمل آوری به نسبت کوتاه این نمونه‌ها که ۲۸ روز بوده است واکنش‌های پوزولایی به تا یک حد نیمه پایدار پیشرفته‌اند به طوری که شاید در ظاهر ترکیبات جدید ایجاد شده باشد و ساختار بتن متراکم‌تر به نظر برسد اما این ترکیبات به خاطر زمان کم هنوز به یک حالت کاملاً پایدار برای اینکه بتوانند مقاومت خود را در برابر نفوذ یون مهاجم کلر حفظ کنند نرسیدند. به منظور اطمینان از صحت چنین نتیجه‌گیری می‌بایست در پژوهش‌های آینده نمونه‌های بتنی پوزولانی در مدت زمان‌ها بسیار طولانی‌تر عمل‌آوری شده و مورد بررسی قرار گیرند. البته باید این نکته را نیز در نظر داشت که نمی‌توان صرفاً بر اساس نتیجه آنالیز EDS که یک منطقه کوچک را آنالیز می‌کند چنین نتیجه‌گیری کلی نمود. روش دقیق‌تر آنالیز تیتراسیون در اعماق مختلف نمونه‌های بتنی است که در بخش‌های قبل در خصوص آن به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵۷-۳- ریزساختار نمونه‌های بتنی بعد از آزمون نفوذ فشاری: 1-a و 1-b مربوط به نمونه بدون پوزولان، 2-a و 2-b مربوط به نمونه پوزولانی می‌باشند.



شکل ۵۸-۳- آنالیز عنصری از بخش بالا و پایین نمونه‌ها بعد از آزمون نفوذ فشاری: 1-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه بدون پوزولان، 1-b مربوط به بخش بالایی نمونه بدون پوزولان، 2-a مربوط به کف (محل ورود کلر) نمونه پوزولانی و 2-b مربوط به بخش بالایی نمونه پوزولانی.

۲-۳ تعیین مواد افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا و تهیه دستورالعمل مربوطه

۲-۳-۱ تعیین مواد افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)

بر اساس نتایج بدست آمده از این پروژه پژوهشی اکسیدگرافن و سرباره گرانوله افزودنی‌های پوزولانی مناسبی جهت به حداقل رساندن میزان عیوب ساختاری همچون تخلخل‌ها، حفرات و ترک‌ها می‌باشند. اهمیت این مواد پوزولانی از آن جهت است که با انجام واکنش‌های پوزولانی مقادیر کلی تخلخل‌های ساختاری بتن را کاهش داده و بنابراین آن را در برابر نفوذ گونه‌های مهاجم همچون کلر مقاوم می‌سازند. یکی از مسائلی که کاربرد پوزولان اکسیدگرافن را در ساخت بتن‌های مقاوم چالش برانگیز می‌کند، پدیده آگلومراسیون و تجمع ورقه‌های ریزساختار بتن است. به منظور پیشگیری از این مشکل احتمالی باید پیش از افزودن آن به ملات سیمانی به کمک فرآیند سوسپانسیون سازی آلترسونیک از آن محلولی با غلظت مورد نظر تهیه نمود و حین ساخت بتن آن

را به صورت محلول به ملات سیمانی اضافه نمود. انجام چنین فرآیندی ممکن است در حجم یک کار آزمایشگاهی ساده باشد اما برای ساخت بتن در مقیاس صنعتی نیازمند صرف زمان و هزینه زیادی است. اگرچه بهبودی که در خواص نهایی بتن بدست می‌آید در طولانی مدت می‌تواند چنین هزینه‌هایی را کاملاً جبران نماید.

بر اساس نتایج بدست آمده در این پروژه پژوهشی، سسرباره گرانوله و اکسیدگرافن هر دو چه به تنهایی و چه به صورت ترکیبی نقش به سزایی در افزایش خواص مکانیکی بتن به ویژه مقاومت فشاری آن دارند. حتی گاهی مشاهده گردید که حضور آن‌ها به تنهایی در ساختار بتن می‌تواند منجر به خواص مکانیکی بالاتری در مقایسه با شرایطی که با هم به طور همزمان اضافه شوند، گردد. اگرچه همواره باید این نکته را در نظر داشت که افزودن این پوزولان‌ها در مقادیری بیش از حد بهینه می‌تواند منجر به افول خواص گردد.

در صورتی که هدف از کاربرد این پوزولان‌ها صرفاً بهبود خواص مکانیکی نباشد و جنبه‌های دیگر همچون مقاومت بتن در برابر نفوذ عوامل مهاجم خارجی نیز مورد نظر باشد، افزودن همزمان این پوزولان‌ها و جایگزینی آن‌ها با سیمان در بتن می‌تواند موثر واقع شود. بالاترین میزان مقاومت زمانی حاصل خواهد شد که این پوزولان‌ها در مقادیر نسبتاً بالایی با سیمان معمولی جایگزین می‌شوند. بنابراین به منظور بهبود مقاومت به خوردگی و اصلاح ریزساختار بتن برای کاهش نفوذ یون‌های مهاجم و در عین حال حفظ خواص مکانیکی می‌بایست یک اختلاط همزمان و بهینه از سرباره و اکسیدگرافن را با سیمان جایگزین کرده. یک امر بسیار مهم در فرآیند ساخت بتن‌های اصلاح شده پوزولانی، در نظر گرفتن مدت زمان عمل‌آوری طولانی برای آن‌ها می‌باشد. به منظور دستیابی به بیشینه خواص و ویژگی‌های مورد نظر حتماً باید بتن‌های تولیدی حداقل به مدت ۹۰ روز تحت فرآیند هیدراسیون قرار بگیرند. در غیر اینصورت ممکن است بتن‌های نهایی استحکام کافی را کسب نکرده و یا رفتاری نامطلوب را در شرایط محیطی خورنده از خود نشان دهند.

۲-۳-۳ تعیین مواد افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان خوردگی

سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)

بر مبنای مطالعات صورت گرفته افزودن مقادیر زیر ۰/۱ درصد اکسیدگرافن و افزودن سرباره گرانوله تا ۵۰ درصد وزنی می‌تواند جهت بهبود خواص عملکردی بتن موثر باشد. در این پروژه مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد اکسیدگرافن و ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی سرباره گرانوله به بتن جهت بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی افزوده شدند. بر اساس نتایج بدست آمده افزودن مقادیر بالاتر سرباره گرانوله از جهت بهبود مقاومت الکتریکی بتن و بنابراین مقاومت آن‌ها در برابر کلر بسیار موثر خواهد بود. همچنین افزودن اکسیدگرافن در بتن می‌تواند بیشتر در زمینه بهبود خواص مکانیکی موثر باشد و افزودن مقادیر حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ درصد وزنی از آن به بتن توصیه می‌شود.

۳-۲-۳ تعیین طرح اختلاط افزودنی معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان

خوردگی سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)

انتخاب یک ترکیب بهینه از اکسیدگرافن و سرباره گرانوله به منظور مقاوم‌سازی بتن در برابر نفوذ یون کلر و همچنین بهبود خواص مکانیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورتی که یک اختلاط بهینه از این دو افزودنی مورد استفاده قرار نگیرد ممکن است نتایج نامطلوب و خلاف آن چه مورد انتظار است بدست آید. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، افزودن مقادیر بالای اکسید گرافن به بتن می‌تواند زمینه ساز وقوع پدیده

آگلومراسیون و در نتیجه ناکارآمدی آن در بهبود خواص بتن گردد. بنابراین انتخاب مقدار اکسیدگرافن به خصوص با توجه به اینکه در مقادیر بسیار کم به بتن اضافه می‌شود از حساسیت و اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار اکسیدگرافن باید به مقداری باشد که بتواند در ملات سیمانی در حین ساخت بتن کاملاً پراکنده شده و بنابراین امکان دستیابی به یک ساختار همگن را ایجاد کند.

مقدار افزودن سرباره گرانوله در ساخت بتن‌های پوزولانی اهمیت داشته اما در خصوص سرباره با محدودیت‌هایی که در کاربرد اکسیدگرافن با آن مواجه هستیم روبرو نمی‌باشیم. سرباره رفتار کاملاً مشابهی با سیمان معمولی که در ساخت بتن کاربرد دارد داشته و بنابراین جایگزینی سیمان با سرباره منجر به اختلاف قابل توجهی در فرآیند ساخت بتن نمی‌گردد.

افزودن مقادیر بالای سرباره گرانوله از جنبه بهبود مقاومت الکتریکی بتن‌ها و بنابراین مقاومت آن‌ها در برابر کلر بسیار موثر خواهد بود. اگرچه با افزودن مقدار بیش از ۳۰ درصد وزنی سرباره در ساختار بتن خواص مکانیکی بتن شدیداً افت خواهند کرد. بر اساس یافته‌های این پروژه پژوهشی کاربرد اکسیدگرافن در بتن می‌تواند بیشتر در زمینه بهبود خواص مکانیکی موثر باشد و افزودن مقادیر حدود ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی از آن به بتن می‌تواند موثر باشد. بر اساس یافته‌های این پروژه پژوهشی به منظور دستیابی به بتن‌های مقاوم چه از نظر خواص مکانیکی و چه از نظر خواص غیرمکانیکی نظیر مقاومت به خوردگی و نفوذ کلر، افزودن مقادیر ۰/۸ درصد وزنی اکسیدگرافن و ۵۰ درصد وزنی سرباره به بتن می‌تواند موثر واقع گردد. با جایگزینی سیمان معمولی با چنین اختلاط بهینه‌ای از اکسیدگرافن و سرباره در بتن می‌توان در درجه اول به بالاترین میزان مقاومت در برابر نفوذ کلر و در وهله بعد به خواص مکانیکی بهبود یافته‌ای دست یافت.

۴-۲-۳ دستورالعمل افزودن مواد معدنی مناسب جهت استفاده در بتن به منظور کاهش میزان

خوردگی سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا (با حداقل حفظ خواص مکانیکی)

جایگزین سیمان با مقدار ۰/۸ درصد وزنی اکسیدگرافن و ۵۰ درصد وزنی سرباره گرانوله یک اختلاط بهینه به منظور ساخت بتن‌های مقاوم در برابر نفوذ کلر با حفظ خواص مکانیکی می‌باشد. این اختلاط بهینه بر مبنای آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی و همچنین آزمون‌های غیرمکانیکی شامل مقاومت الکتریکی، هدایت الکتریکی در این پروژه پژوهشی بدست آمده است. تهیه بتن‌های پوزولانی ممکن است نیازمند صرف هزینه و زمان بیشتری در فرآیند ساخت گردد، اما باید در نظر داشت که مقاومت سازه‌های بتنی ساخته شده از آن‌ها در بلند مدت می‌تواند جبران کننده تمامی این هزینه‌های اضافی باشد.

به منظور ساخت نمونه‌های بتنی پوزولانی حاوی سرباره گرانوله و اکسیدگرافن با اختلاط بهینه لازم است تا قبل از فرآیند ساخت بتن از اکسیدگرافن محلولی با غلظت مشخص تهیه نمود. غلظت اکسیدگرافن در محلول ایجاد شده هر چه کمتر باشد فرآیند پراکنده سازی آن در آب بهتر صورت می‌گیرد. در غلظت‌های بالا به دلیل فرآیند پراکنده سازی به دلیل آگلومره شده ذرات پودری با مشکل مواجه خواهد شد. غلظت ۰/۴ غلظت مناسبی برای تهیه محلول از اکسیدگرافن محلول در آب است. به منظور دستیابی به یک محلول همگن حداقل به مدت زمان ۳۰ دقیقه برای انجام عملیات آلترسونیک نیاز است. یک دستگاه با مشخصات کاری توان ۳۰۰ وات و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز نیز برای انجام این مرحله کافی است.

در حین فرآیند ساخت بتن می‌بایست نسبت آب به سیمان همواره مقداری ثابت باشد. به این منظور لازم است تا مقدار آب مورد استفاده قرار گرفته در فرآیند محلول سازی اکسیدگرافن از آب کلی در ساخت بتن کسر

شده و آن مقدار در حین ساخت به بتن اضافه گردد. در فرآیند ساخت بتن‌های پوزولانی حاوی اکسیدگرافن هر چه ملات سیمانی در فرآیند ساخت بیشتر همزده شود، نتایج بهتری حاصل خواهند شد چراکه توزیع همگن‌تر و یکنواخت‌تر اکسیدگرافن در زمینه سیمانی، دستیابی به بیشینه خواص مطلوب را ممکن‌تر می‌سازد. بعد از فرآیند ساخت بتن‌های پوزولانی مدت زمانی حداقل برابر با ۹۰ روز نیاز است تا تمامی واکنش‌های پوزولانی در آن‌ها تکمیل شده و یک ساختار پایدار از محصولات جدید در ریزساختار آن‌ها بدست آید. چنین ساختاری به مراتب متراکم‌تر و بی‌عیب‌تر از بتن‌های معمولی خواهد بود.

جمع‌بندی

بر اساس نتایج بدست آمده در این پروژه تحقیقاتی، اکسیدگرافن و سرباره گرانوله دو افزودنی مناسب برای بهبود مقاومت بتن‌ها در برابر نفوذ کلر و در نهایت خوردگی می‌باشند. افزودن مقادیر ۰/۰۸ درصد وزنی

اکسیدگرافن و ۵۰ درصد وزنی سرباره گرانوله منجر به افزایش چشمگیری در مقاومت بتن در اثر کاهش تخلخل‌های ساختاری آن می‌گردد. آنچه در کاربرد این دو افزودنی اهمیت دارد، افزودن مقادیر مشخص و بهینه از آن‌ها در بتن است. در صورت افزودن مقادیر ناکافی یا بیش از حد از این دو افزودنی، ممکن است خواص عملکردی بتن به ویژه خواص مکانیکی دچار افت شود. در صورتی که از این مواد افزودنی در ساخت بتن‌های مقاوم استفاده می‌شود باید حتماً زمان عمل‌آوری کافی در نظر گرفته شود تا بیشینه خواص حاصل گردند.

مراجع و منابع

1. Scott, A.N., *The influence of binder type and cracking on reinforcing steel corrosion in concrete*. 2004, University of Cape Town.

2. Saraswathy, V., et al., *Evaluation of a composite corrosion-inhibiting admixture and its performance in concrete under macrocell corrosion conditions*. Cement and Concrete Research, 2001. **31**(5): p. 789-794.
3. Liu, R., et al., *The effect of carbonate and sulfate ions on chloride threshold level of reinforcement corrosion in mortar with/without fly ash*. Construction and Building Materials, 2016. **113**: p. 90-95.
4. Choi, Y.-S., J.-G. Kim, and K.-M. Lee, *Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete*. Corrosion Science, 2006. **48**(7): p. 1733-1745.
5. Saraswathy, V., et al., *Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete*. Cement and Concrete Composites, 2003. **25**(7): p. 673-680.
6. Saraswathy, V. and H.-W. Song, *Electrochemical studies on the corrosion performance of steel embedded in activated fly ash blended concrete*. Electrochimica acta, 2006. **51**(22): p. 4601-4611.
7. Fan, Y., et al., *Activation of fly ash and its effects on cement properties*. Cement and Concrete Research, 1999. **29**(4): p. 467-472.
8. Siddique, R., *Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties*. Resources, Conservation and Recycling, 2011. **55**(11): p. 923-932.
9. Rossignolo, J.A., *Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(2): p. 817-821.
10. Khayat, K. and P. Aitcin, *Silica fume: a unique supplementary cementitious material*. Mineral admixtures in cement and concrete, 1993. **4**: p. 227-265.
11. Igarashi, S.-i., A. Watanabe, and M. Kawamura, *Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages*. Cement and Concrete Research, 2005. **35**(3): p. 513-519.
12. 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.
13. Wild, S., B. Sabir, and J. Khatib, *Factors influencing strength development of concrete containing silica fume*. Cement and concrete research, 1995. **25**(7): p. 1567-1580.
14. Sobolev, K., *The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures*. Cement and Concrete Composites, 2004. **26**(7): p. 901-907.
15. Wong, H. and H.A. Razak, *Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance*. Cement and Concrete Research, 2005. **35**(4): p. 696-702.

-
- Hooton, R., *Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity.* materials Journal, 1993. **90**(2): p. 143-151. 16.
 - Almusallam, A.A., et al., *Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete.* Cement and Concrete Composites, 2004. **26**(7): p. 891-900. 17.
 - Bhanja, S. and B. Sengupta, *Influence of silica fume on the tensile strength of concrete.* Cement and Concrete Research, 2005. **35**(4): p. 743-747. 18.
 - Kılıç, A., et al., *The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete.* Cement and Concrete Composites, 2008. **30**(4): p. 290-296. 19.
 - Al-Amoudi, O.S.B., M. Maslehuddin, and T.O. Abiola, *Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather.* Construction and Building materials, 2004. **18**(10): p. 737-743. 20.
 - Mazloom, M., A. Ramezaniapour, and J. Brooks, *Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete.* Cement and Concrete Composites, 2004. **26**(4): p. 347-357. 21.
 - Perraton, D., P. Aitcin, and D. Vezina, *Permeabilities of silica fume concrete.* Special Publication, 1988. **108**: p. 63-84. 22.
 - Berke, N.S., *Resistance of Microsilica Concrete to Steel Corrosion Erosion and Chemical Attack.* Special Publication, 1989. **114**: p. 861-886. 23.
 - Dotto, J., et al., *Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars.* Cement and Concrete Composites, 2004. **26**(1): p. 31-39. 24.
 - Abdou, M. and H. Abuseda, *Upgrading offshore pipelines concrete coated by silica fume additive against aggressive mechanical laying and environmental impact.* Egyptian Journal of Petroleum, 2016. **25**(2): p. 193-199. 25.
 - Özbay, E., M. Erdemir, and H.İ. Durmuş, *Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties–A review.* Construction and Building Materials, 2016. **105**: p. 423-434. 26.
 - Gesoğlu, M. and E. Özbay, *Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems.* Materials and Structures, 2007. **40**(9): p. 923-937. 27.
 - Al-Otaibi, S., *Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass.* Construction and Building materials, 2008. **22**(10): p. 2059-2067. 28.

- Oner, A. and S. Akyuz, *An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(6): p. 505-514. 29.
- Wainwright, P. and N. Rey, *The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete*. Cement and Concrete Composites, 2000. **22**(4): p. 253-257. 30.
- Shi, H.-s., B.-w. Xu, and X.-c. Zhou, *Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(5): p. 1980-1985. 31.
- Zhao, H., et al., *The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures*. Journal of Cleaner Production, 2015. **95**: p. 66-74. 32.
- Topçu, İ.B. and A.R. Boğa, *Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete*. Materials & Design, 2010. **31**(7): p. 3358-3365. 33.
- Cheng, A., et al., *Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete*. Materials Chemistry and Physics, 2005. **93**(2): p. 404-411. 34.
- Song, H.-W. and V. Saraswathy, *Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview*. Journal of Hazardous Materials, 2006. **138**(2): p. 226-233. 35.
- Zhang, M. and V.M. Malhotra, *Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete*. Cement and Concrete Research, 1995. **25**(8): p. 1713-1725. 36.
- Justice, J.M., *Evaluation of metakaolins for use as supplementary cementitious materials*. 2005, Georgia Institute of Technology. 37.
- Sabir, B., S. Wild, and J. Bai, *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, 2001. **23**(6): p. 441-454. 38.
- 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. 39.
- Siddique, R. and J. Klaus, *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. Applied Clay Science, 2009. **43**(3): p. 392-400. 40.
- 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. 41.
- Batis, G., et al., *The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars*. Cement and Concrete Composites, 2005. **27**(1): p. 125-130. 42.

-
- Shekarchi, M., et al., *Transport properties in metakaolin blended concrete*. Construction and Building Materials, 2010. **24**(11): p. 2217-2223. 43.
- Sun, W., et al., *The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete*. Cement and Concrete Research, 2004. **34**(10): p. 1781-1785. 44.
- Türkmen, İ. and M. Gavgalı, *Influence of mineral admixtures on the some properties and corrosion of steel embedded in sodium sulfate solution of concrete*. Materials Letters, 2003. **57**(21): p. 3222-3233. 45.
- Türkmen, İ., M. Gavgalı, and R. Gül, *Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete*. Materials Letters, 2003. **57**(13): p. 2037-2043. 46.
- Polder, R.B., *Effects of slag and fly ash on reinforcement corrosion in concrete in chloride environment: Research from the Netherlands*. Heron, 57 (2012) 3, 2012. 47.
- Sengul, O. and M.A. Tasdemir, *Compressive strength and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash and slag*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009. **21**(9): p. 494-501. 48.
- Nochaiya, T., W. Wongkeo, and A. Chaipanich, *Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete*. Fuel, 2010. **89**(3): p. 768-774. 49.
- Bijen, J., *Benefits of slag and fly ash*. Construction and building materials, 1996. **10**(5): p. 309-314. 50.
- Ramanathan, P., et al., *Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures*. KSCE journal of Civil Engineering, 2013. **17**(2): p. 465. 51.
- Uysal, M. and M. Sumer, *Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures*. Construction and Building materials, 2011. **25**(11): p. 4112-4120. 52.
- Balaguru, P. and K. Chong, *Nanotechnology and concrete: research opportunities*. Proceedings of the ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, 2006. 53.
- Singh, L., et al., *Beneficial role of nanosilica in cement based materials-A review*. Construction and Building Materials, 2013. **47**: p. 1069-1077. 54.
- Sanchez, F. and K. Sobolev, *Nanotechnology in concrete-a review*. Construction and building materials, 2010. **24**(11): p. 2060-2071. 55.
- Papatzani, S., *Effect of nanosilica and montmorillonite nanoclay particles on cement hydration and microstructure*. Materials Science and Technology, 2016. **32**(2): p. 138-153. 56.

-
- Sobolev, K. and F. Sanchez, *The application of nanoparticles to improve the performance of concrete*. NICOM, 2012. **4**: p. 4th. 57.
- Papatzani, S., K. Paine, and J. Calabria-Holley, *A comprehensive review of the models on the nanostructure of calcium silicate hydrates*. Construction and Building Materials, 2015. **74**: p. 219-234. 58.
- Uddin, F., *Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008. **39**(12): p. 2804-2814. 59.
- Yu, R., P. Spiesz, and H. Brouwers, *Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount*. Construction and Building Materials, 2014. **65**: p. 140-150. 60.
- Shekari, A. and M. Razzaghi, *Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete*. Procedia Engineering, 2011. **14**: p. 3036-3041. 61.
- Hou, P., et al., *Effects of colloidal nanoSiO₂ on fly ash hydration*. Cement and Concrete Composites, 2012. **34**(10): p. 1095-1103. 62.
- Sánchez, M., M. Alonso, and R. González, *Preliminary attempt of hardened mortar sealing by colloidal nanosilica migration*. Construction and Building Materials, 2014. **66**: p. 306-312. 63.
- Hou, P., et al., *Effects and mechanisms of surface treatment of hardened cement-based materials with colloidal nanoSiO₂ and its precursor*. Construction and Building Materials, 2014. **53**: p. 66-73. 64.
- Kim, K.-M., et al., *Effect of sodium silicate-and ethyl silicate-based nano-silica on pore structure of cement composites*. Cement and Concrete Composites, 2014. **49**: p. 84-91. 65.
- Hou, P.-k., et al., *Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash–cement mortar*. Cement and Concrete Composites, 2013. **35**(1): p. 12-22. 66.
- Shaikh, F., S. Supit, and P. Sarker, *A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes*. Materials & Design, 2014. **60**: p. 433-442. 67.
- 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. 68.
- Gaitero, J., I. Campillo, and A. Guerrero, *Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles*. Cement and Concrete Research, 2008. **38**(8): p. 1112-1118. 69.

-
- Mondal, P., *Nanomechanical properties of cementitious materials*. 2008, Northwestern University. 70.
- del Bosque, I.F.S., et al., *Effect of temperature on C 3 S and C 3 S+ nanosilica hydration and C-S-H structure*. Journal of the American Ceramic Society, 2013. 3(96): p. 957-965. 71.
- Thomas, J.J., H.M. Jennings, and J.J. Chen, *Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement*. The Journal of Physical Chemistry C, 2009. 113(11): p. 4327-4334. 72.
- Kutepov, A. and V. Potapov, *Movement and mass exchange of liquid drop in spinned flow of geothermal medium*. Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii, 2000. 34(2). 73.
- Langan, B., K. Weng, and M. Ward, *Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement*. Cement and Concrete research, 2002. 32(7): p. 1045-1051. 74.
- Flores-Vivian, I., et al. *The use of nanoparticles to improve the performance of concrete*. in *Nano Conference*. 2013. 75.
- Flores, I., et al., *Performance of cement systems with nano-SiO₂ particles produced by using the sol-gel method*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010(2141): p. 10-14. 76.
- Björnström, J. and I. Panas, *Antagonistic effect of superplasticizer and colloidal nano-silica in the hydration of Alite and Belite pastes*. Journal of materials science, 2007. 42(11): p. 3901-3907. 77.
- Colleparidi, M., et al. *Influence of amorphous colloidal silica on the properties of self-compacting concretes*. in *Proceedings of the International Conference" Challenges in Concrete Construction-Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction"*, Dundee, Scotland, UK. 2002. 78.
- 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. 79.
- Flores-Vivián, I. and K. Sobolev, *The Effect of Nano-SiO₂ on Cement Hydration*, in *Nanotechnology in Construction*. 2015, Springer. p. 167-172. 80.
- Hou, P., et al., *Effects of the pozzolanic reactivity of nanoSiO₂ on cement-based materials*. Cement and Concrete Composites, 2015. 55: p. 250-258. 81.
- Franzoni, E., B. Pigino, and C. Pistolesi, *Ethyl silicate for surface protection of concrete: performance in comparison with other inorganic surface treatments*. Cement and Concrete Composites, 2013. 44: p. 69-76. 82.

-
- Cardenas, H.E. and L.J. Struble, *Electrokinetic nanoparticle treatment of hardened cement paste for reduction of permeability*. Journal of materials in civil engineering, 2006. **18**(4): p. 554-560. 83.
 - Hou, P., et al., *Characteristics of surface-treatment of nano-SiO₂ on the transport properties of hardened cement pastes with different water-to-cement ratios*. Cement and Concrete Composites, 2015. **55**: p. 26-33. 84.
 - Hou, P., et al., *In situ Ca (OH)₂ consumption of TEOS on the surface of hardened cement-based materials and its improving effects on the Ca-leaching and sulfate-attack resistivity*. Construction and Building Materials, 2016. **113**: p. 890-896. 85.
 - Sobolev, K., et al., *Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials*. Nanotechnology in construction 3, 2009: p. 139-148. 86.
 - Maghsoudi, A. and F.A. Dahooei, *Application of nanotechnology in self compacting concrete design*. IJE Transactions B: Applications, 2009. **22**(5): p. 229-244. 87.
 - Hosseini, P., et al., *Effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017. **21**(2): p. 127-147. 88.
 - Fan, Y., et al., *Influence of kaolinite clay on the chloride diffusion property of cement-based materials*. Cement and Concrete Composites, 2014. **45**: p. 117-124. 89.
 - 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. 90.
 - Boehm, H., R. Setton, and E. Stumpp, *Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds*. Carbon, 1986. **24**(2): p. 241-245. 91.
 - Katsnelson, M.I., *Graphene: carbon in two dimensions*. Materials today, 2007. **10**(1): p. 20-27. 92.
 - Heyrovska, R., *Atomic structures of graphene, benzene and methane with bond lengths as sums of the single, double and resonance bond radii of carbon*. arXiv preprint arXiv:0804.4086, 2008. 93.
 - Brodie, B.C., *On the atomic weight of graphite*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1859. **149**: p. 249-259. 94.
 - Ruess, G. and F. Vogt, *Höchstlamellarer Kohlenstoff aus Graphitoxhydroxyd*. Monatshefte für Chemie/Chemical Monthly, 1948. **78**(3): p. 222-242. 95.
 - Geim, A., *Graphene prehistory*. Physica Scripta, 2012. **2012**(T146): p. 014003. 96.
 - Rosas, J.H., et al., *First principles calculations of the electronic and chemical properties of graphene, graphane, and graphene oxide*. Journal of molecular modeling, 2011. **17**(5): p. 1133-1139. 97.

-
- Mohammed, A., et al., *Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties*. Construction and Building Materials, 2015. **84**: p. 341-347. 98.
- Zhu, Y., et al., *Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications*. Advanced materials, 2010. **22**(35): p. 3906-3924. 99.
- Pan, Z., et al., *Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite*. Cement and Concrete Composites, 2015. **58**: p. 140-147. 100.
- Li, X., et al., *Improvement of mechanical properties by incorporating graphene oxide into cement mortar*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2016. 101.
- Li, X., et al., *Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: A study of dispersion and compressive strength*. Construction and Building Materials, 2016. **123**: p. 327-335. 102.
- Raki, L., et al., *Cement and concrete nanoscience and nanotechnology*. Materials, 2010. **3**(2): p. 918-942. 103.
- Bagri, A., et al., *Structural evolution during the reduction of chemically derived graphene oxide*. Nature chemistry, 2010. **2**(7): p. 581-587. 104.
- Sobolev, K. and M.F. Gutiérrez, *How nanotechnology can change the concrete world*. American Ceramic Society Bulletin, 2005. **84**(10): p. 14. 105.
- Lv, S., et al., *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites*. Construction and building materials, 2013. **49**: p. 121-127. 106.
- Sedaghat, A., et al., *Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications*. Open journal of composite materials, 2014. **4**(01): p. 12. 107.
- Gong, K., et al., *Reinforcing effects of graphene oxide on portland cement paste*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014. **27**(2): p. A4014010. 108.
- Wang, Q., et al., *Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement*. New Carbon Materials, 2015. **30**(4): p. 349-356. 109.
- Patel, B. and A. Bhoraniya, *EVALUATION OF STRENGTH PROPERTY OF CONCRETE BY USING GRAPHENE OXIDE AS A NANO ADDITIVE*. 110.
- Abrishami, M.E. and V. Zahabi, *Reinforcing graphene oxide/cement composite with NH₂ functionalizing group*. Bulletin of Materials Science, 2016. **39**(4): p. 1073-1078. 111.
- Li, W., et al., *Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste*. Construction and Building Materials, 2017. **136**: p. 506-514. 112.

-
- Babak, F., et al., *Preparation and mechanical properties of graphene oxide: cement nanocomposites*. The Scientific World Journal, 2014. **2014**. 113.
- Du, H., H.J. Gao, and S. Dai Pang, *Improvement in concrete resistance against water and chloride ingress by adding graphene nanoplatelet*. Cement and Concrete Research, 2016. **83**: p. 114-123. 114.
- Iijima, S., *Helical microtubules of graphitic carbon*. nature, 1991. **354**(6348): p. 56. 115.
- Popov, V.N., *Carbon nanotubes: properties and application*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2004. **43**(3): p. 61-102. 116.
- Rashad, A.M., *Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials*. Construction and Building Materials, 2017. **153**: p. 81-101. 117.
- Saez de Ibarra, Y., et al., *Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions*. Physica Status solidi (a), 2006. **203**(6): p. 1076-1081. 118.
- 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. 119.
- Hilding, J., et al., *Dispersion of carbon nanotubes in liquids*. Journal of dispersion science and technology, 2003. **24**(1): p. 1-41. 120.
- Musso, S., et al., *Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(11): p. 1985-1990. 121.
- Zou, B., et al., *Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes*. Carbon, 2015. **85**: p. 212-220. 122.
- Collins, F., J. Lambert, and W.H. Duan, *The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube-OPC paste mixtures*. Cement and Concrete Composites, 2012. **34**(2): p. 201-207. 123.
- Hamzaoui, R., et al. *Optimal Carbon NanoTubes concentration incorporated in mortar and concrete*. in *Advanced Materials Research*. 2012. Trans Tech Publ. 124.
- Gopalakrishnan, K., et al., *Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift*. 2011: Springer. 125.
- 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. 126.
- 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* 127.

-
- nanotube/cement nanocomposites*. Cement and Concrete Composites, 2010. **32**(2): p. 110-115.
- Li, G.Y., P.M. Wang, and X. Zhao, *Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(5): p. 377-382. 128.
- Makar, J., J. Margeson, and J. Luh. *Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications*. 2005. CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS. 129.
- Kim, H.-K., *Chloride penetration monitoring in reinforced concrete structure using carbon nanotube/cement composite*. Construction and Building Materials, 2015. **96**: p. 29-36. 130.
- Jayapalan, A., B. Lee, and K. Kurtis, *Effect of nano-sized titanium dioxide on early age hydration of Portland cement*, in *Nanotechnology in Construction 3*. 2009, Springer. p. 267-273. 131.
- Li, H., M.-h. Zhang, and J.-p. Ou, *Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement*. Wear, 2006. **260**(11): p. 1262-1266. 132.
- Li, H., M.-h. Zhang, and J.-p. Ou, *Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement*. International Journal of fatigue, 2007. **29**(7): p. 1292-1301. 133.
- Jalal, M., M. Fathi, and M. Farzad, *Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete*. Mechanics of Materials, 2013. **61**: p. 11-27. 134.
- 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. 135.
- Rashad, A.M., *A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on some properties of cementitious materials—a short guide for Civil Engineer*. Materials & Design, 2013. **52**: p. 143-157. 136.
- 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. 137.
- Cao, V.D., et al., *Thermal analysis of geopolymers concrete walls containing microencapsulated phase change materials for building applications*. Solar Energy, 2019. **178**: p. 295-307. 138.
- Bouaissi, A., et al., *Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete*. Construction and Building Materials, 2019. **210**: p. 198-209. 139.

-
- Chess, P.M., *Cathodic Protection for Reinforced Concrete Structures*. 2018: CRC Press. 140.
- Climent, M.Á., J. Carmona, and P. Garcés, *Application of combined electrochemical treatments to reinforced concrete: Electrochemical chloride extraction plus cathodic protection*. Hormigón y Acero, 2018. **69**: p. 43-51. 141.
- Ramezaniapour, A.A., et al., *Modeling of chloride ions penetration in cracked concrete structures exposed to marine environments*. Structural Concrete, 2018. **19**(5): p. 1460-1471. 142.
- Balestra, C.E.T., T.A. Reichert, and G. Savaris, *Contribution for durability studies based on chloride profiles analysis of real marine structures in different marine aggressive zones*. Construction and Building Materials, 2019. **206**: p. 140-150. 143.
- Khan, M.U., S. Ahmad, and H.J. Al-Gahtani, *Chloride-induced corrosion of steel in concrete: an overview on chloride diffusion and prediction of corrosion initiation time*. International journal of corrosion, 2017. **2017**. 144.
- Tuutti, K., *Corrosion of steel in concrete*. 1982: Cement-och betonginst. 145.
- Zhang, D. and Y. Shao, *Enhancing Chloride Corrosion Resistance of Precast Reinforced Concrete by Carbonation Curing*. ACI Materials Journal, 2019. **116**(3). 146.
- Tang, L. and L. Nilsson, *Service life prediction for concrete structures under seawater by a numerical approach*. Durability of building materials and components, 1996. **7**(1): p. 97-106. 147.
- Jung, M.S., et al., *Risk of chloride-induced corrosion of steel in SF concrete exposed to a chloride-bearing environment*. Construction and Building Materials, 2018. **166**: p. 413-422. 148.
- Stanish, K., R.D. Hooton, and M.D. Thomas, *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*. 2001, United States. Federal Highway Administration. 149.
- Bondar, D., et al. *Suitability of alkali activated ggbs/fly ash concrete for chloride environments*. in *ACI Special Publications*. 2017. American Concrete Institute. 150.
- Xu, Y. and Y. Fan. *Effect Of On Graphene Oxide the Concrete Resistance to Chloride Ion Permeability*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing. 151.
- Karri, S.K., G.R. Rao, and P.M. Raju, *Strength and durability studies on GGBS concrete*. SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE), 2015. **2**(10): p. 34-41. 152.
- Dalla, P.T., et al., *Effect of Carbon Nanotubes on Chloride Penetration in Cement Mortars*. Applied Sciences, 2019. **9**(5): p. 1032. 153.

-
- Richardson, D.N., *Strength and durability characteristics of a 70% ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete mix*. 2006. 154.
- Kumar, V.P., K. Gunasekaran, and T. Shyamala, *Characterization study on coconut shell concrete with partial replacement of cement by GGBS*. Journal of Building Engineering, 2019. **26**: p. 100830. 155.
- Woo, H.-M., C.-Y. Kim, and J.H. Yeon, *Heat of hydration and mechanical properties of mass concrete with high-volume GGBFS replacements*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018. **132**(1): p. 599-609. 156.
- Chen, H.-J., et al., *Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: A construction site study*. Construction and Building Materials, 2012. **35**: p. 1063-1070. 157.
- Samad, S., A. Shah, and M.C. Limbachiya, *Strength development characteristics of concrete produced with blended cement using ground granulated blast furnace slag (GGBS) under various curing conditions*. Sādhanā, 2017. **42**(7): p. 1203-1213. 158.
- Khatib, J. and J. Hibbert, *Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin*. Construction and building materials, 2005. **19**(6): p. 460-472. 159.
- Shen, D., et al., *Influence of ground granulated blast furnace slag on early-age cracking potential of internally cured high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2020. **233**: p. 117083. 160.
- Gesoğlu, M., E. Güneyisi, and E. Özbay, *Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(5): p. 1847-1854. 161.
- Güneyisi, E. and M. Gesoğlu, *A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag*. Materials and Structures, 2008. **41**(3): p. 479-493. 162.
- Park, J.-S., Y.-S. Yoon, and S.-J. Kwon, *Strength and Resistance to Chloride Penetration in Concrete Containing GGBFS with Ages*. Journal of the Korea Concrete Institute, 2017. **29**(3): p. 307-314. 163.
- Yoon, Y.-S., S.-J. Cho, and S.-J. Kwon, *Prediction equation for chloride diffusion in concrete containing GGBFS based on 2-Year cured results*. Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection, 2019. **23**(2): p. 1-9. 164.
- Saleem, H., M. Haneef, and H.Y. Abbasi, *Synthesis route of reduced graphene oxide via thermal reduction of chemically exfoliated graphene oxide*. Materials Chemistry and Physics, 2018. **204**: p. 1-7. 165.
- Guo, K., et al., *Effect of graphene oxide on chloride penetration resistance of recycled concrete*. Nanotechnology Reviews, 2019. **8**(1): p. 681-689. 166.

-
- Birenboim, M., et al., *Reinforcement and workability aspects of graphene-oxide-reinforced cement nanocomposites*. Composites Part B: Engineering, 2019. **161**: p. 68-76. 167.
- Peng, H., et al., *Mechanical properties and microstructure of graphene oxide cement-based composites*. Construction and Building Materials, 2019. **194**: p. 102-109. 168.
- Yang, H., et al., *Experimental study of the effects of graphene oxide on microstructure and properties of cement paste composite*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017. **102**: p. 263-272. 169.
- Xu, G., et al., *The role of admixed graphene oxide in a cement hydration system*. Carbon, 2019. **148**: p. 141-150. 170.
- Lu, L. and D. Ouyang, *Properties of cement mortar and ultra-high strength concrete incorporating graphene oxide nanosheets*. Nanomaterials, 2017. **7**(7): p. 187. 171.
- Hou, D., et al., *Reactive molecular dynamics and experimental study of graphene-cement composites: Structure, dynamics and reinforcement mechanisms*. Carbon, 2017. **115**: p. 188-208. 172.
- Yuan, X., J. Zeng, and J. Niu, *Effect of different water-reducing agents on mechanical properties and microstructure of graphite oxide-blended cement mortar*. J. Funct. Mater, 2018. **49**: p. 10184-10189. 173.
- Mohammed, A., et al., *Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties*. Construction and Building Materials, 2015. **84**: p. 341-347. 174.
- Montemor, M., et al., *Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides*. Cement and Concrete Composites, 2002. **24**(1): p. 45-53. 175.
- Montemor, M., A. Simoes, and M. Ferreira, *Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques*. Cement and Concrete Composites, 2003. **25**(4-5): p. 491-502. 176.
- Ahmad, S., *Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review*. Cement and concrete composites, 2003. **25**(4-5): p. 459-471. 177.
- Vera, R., et al., *Corrosion products of reinforcement in concrete in marine and industrial environments*. Materials Chemistry and Physics, 2009. **114**(1): p. 467-474. 178.
- Hodhod, O. and H. Ahmed, *Modeling the corrosion initiation time of slag concrete using the artificial neural network*. HBRC Journal, 2014. **10**(3): p. 231-234. 179.
- Srubar III, W.V., *Stochastic service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete*. Cement and Concrete Composites, 2015. **55**: p. 103-111. 180.

-
- Petcherdchoo, A., *Closed-form solutions for modeling chloride transport in unsaturated concrete under wet-dry cycles of chloride attack*. Construction and Building Materials, 2018. **176**: p. 638-651. 181.
 - Stambaugh, N.D., T.L. Bergman, and W.V. Srubar III, *Numerical service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2018. **161**: p. 236-245. 182.
 - Zhang, J. and Z. Lounis, *Sensitivity analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides*. Cement and concrete research, 2006. **36**(7): p. 1312-1323. 183.
 - Abbaslou, H., E. Delnavaz, and A.R. Ghanizadeh, *Analysis of Chloride diffusivity in green concrete based on Fick's second law*. AUT Journal of Civil Engineering, 2019. **3**(2): p. 167-178. 184.
 - Van der Zanden, A., A. Taher, and T. Arends, *Modelling of water and chloride transport in concrete during yearly wetting/drying cycles*. Construction and Building Materials, 2015. **81**: p. 120-129. 185.
 - Bioubakhsh, S., *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*. 2011, UCL (University College London). 186.
 - Zhang, J., J. Wang, and D. Kong, *Chloride diffusivity analysis of existing concrete based on Fick's second law*. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2010. **25**(1): p. 142-146. 187.
 - Que, N.S., *History and development of prediction models of time-to-initiate-corrosion in reinforced concrete structures in marine environment*. Philippine Engineering Journal, 2007. **28**(2). 188.
 - Crank, J., *The mathematics of diffusion*. 1979: Oxford university press. 189.
 - Zhao, Y., et al., *Penetration of Water and Chloride Dissolved in Water into Concrete under Hydraulic Pressure*. Restoration of Buildings and Monuments, 2014. **20**(2): p. 117-126. 190.
 - Zenunovic, D., N. Residbegovis, and R. Folic, *CHLORIDE PENETRATION THROUGH CONCRETE COVER UNDER PRESSURE OF SALTY WATER*. 191.
 - Mahendran, R., et al., *Graphene oxide reinforced polycarbonate nanocomposite films with antibacterial properties*. Indian Journal of Materials Science, 2016. **2016**. 192.
 - Eigler, S. and A. Hirsch, *Chemistry with graphene and graphene oxide—challenges for synthetic chemists*. Angewandte Chemie International Edition, 2014. **53**(30): p. 7720-7738. 193.
 - Siburian, R., et al., *New route to synthesize of graphene nano sheets*. Oriental Journal of Chemistry, 2018. **34**(1): p. 182. 194.

-
- Storm, M.M., R.E. Johnsen, and P. Norby, *In situ X-ray powder diffraction studies of the synthesis of graphene oxide and formation of reduced graphene oxide*. Journal of Solid State Chemistry, 2016. **240**: p. 49-54. 195.
- Ahmad, A., et al., *Graphene oxide selenium nanorod composite as a stable electrode material for energy storage devices*. Applied Nanoscience, 2020. **10**(4): p. 1243-1255. 196.
- Liu, L., C. Wang, and G. Wang, *Novel cysteic acid/reduced graphene oxide composite film modified electrode for the selective detection of trace silver ions in natural waters*. Analytical Methods, 2013. **5**(20): p. 5812-5822. 197.
- Al-Gaashani, R., et al., *XPS and structural studies of high quality graphene oxide and reduced graphene oxide prepared by different chemical oxidation methods*. Ceramics International, 2019. **45**(11): p. 14439-14448. 198.
- Dai, J., et al., *The effect of fineness on the hydration activity index of ground granulated blast furnace slag*. Materials, 2019. **12**(18): p. 2984. 199.
- Yang, H.-M., et al., *Evaluation of strength development in concrete with ground granulated blast furnace slag using apparent activation energy*. Materials, 2020. **13**(2): p. 442. 200.
- Muhmood, L., S. Vitta, and D. Venkateswaran, *Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags*. Cement and Concrete Research, 2009. **39**(2): p. 102-109. 201.
- 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. 202.
- Gong, K., et al., *Reinforcing effects of graphene oxide on portland cement paste*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015. **27**(2): p. A4014010. 203.
- Li, M. and J.-m. Kim. *Strength properties and micro-structure of steel slag based hardened cementitious composite with graphene oxide*. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences. 204.
- Yazıcı, H., *The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures*. Building and environment, 2007. **42**(5): p. 2083-2089. 205.
- ASTM, C., *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. Annual Book of ASTM Standards, 2012. 206.
- Khan, M. and O. Kayali, *Chloride binding ability and the onset corrosion threat on alkali-activated GGBFS and binary blend pastes*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018. **22**(8): p. 1023-1039. 207.

-
- Chi, M.C., J.H. Chi, and C.H. Wu. *Effect of GGBFS on compressive strength and durability of concrete*. in *Advanced Materials Research*. 2018. Trans Tech Publ. 208.
- DEVI, M., *INFLUENCE OF GGBFS ON STRENGTH AND PERMEABILITY PROPERTIES OF CONCRETE WITH M SAND*. Recent Trends in Arts, Science, Engineering and Technology, 2018: p. 73. 209.
- Long, W.-J., et al., *Electrochemical characterization and inhibiting mechanism on calcium leaching of graphene oxide reinforced cement composites*. *Nanomaterials*, 2019. **9**(2): p. 288. 210.
- Ribeiro, D. and J. Abrantes, *Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach*. *Construction and Building Materials*, 2016. **111**: p. 98-104. 211.
- احمدی, ج.س.م.ن.ع.پ.ب., بررسی طیف امپدانس و ارائه مدار الکتریکی معادل برای بتن های سه جزئی و دو جزئی حاوی زئولیت طبیعی و سرباره مس. کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران, ۱۳۹۱. 212.
- Long, W.-J., et al., *Microstructure development and mechanism of hardened cement paste incorporating graphene oxide during carbonation*. *Cement and Concrete Composites*, 2018. **94**: p. 72-84. 213.