



بهبود خواص مواد ترمیمی بتن‌های مورد استفاده در پایه‌های موجود در خطوط انتقال و توزیع صنعت برق به کمک فرایندهای نوین و نانومواد

مدیر پروژه: سارا محسنی

واحد مجری: گروه پژوهشی مواد غیر فلزی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بهبود خواص مواد ترمیمی بتن های مورد استفاده در پایه های موجود در خطوط انتقال و توزیع صنعت برق به کمک فرآیندهای نوین و نانومواد

مدیر پروژه: سارا محسنی

گروه پژوهشی پشتیبان: مواد غیرفلزی

همکاران پروژه:

نسترن ریاحی نوری

خانعلی نکویی

اشکان ذوالریاستین

واحد مجری:

گروه مواد غیر فلزی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

دی ۱۴۰۰

کد ثبت گزارش: NRI-ER-890-PCPPN40-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.332

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

بهبود خواص مواد ترمیمی بتن های مورد استفاده در پایه های موجود در خطوط انتقال و توزیع صنعت برق به کمک فرآیندهای نوین و نانومواد/ مدیر پروژه: سارا محسنی. ویراستار: سیما حسینی ماکان. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۱۸۰ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. ذوالریاستین، اشکان، نکویی، خانعلی همکاران پروژه. ۲. ریاحی نوری، نسترن، مدیر واحد مجری. ۳. گروه پژوهشی مواد غیرفلزی.



انتشارات پژوهشگاه نیرو
گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

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

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب سارا محسنی، مدیر پروژه بهبود خواص مواد ترمیمی بتن های مورد استفاده در پایه های موجود در خطوط انتقال و توزیع صنعت برق به کمک فرآیندهای نوین و نانومواد و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

□ گزارش حاصل انجام مرحله از مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. اشکان ذوالریاستین

۲. نسترن ریاحی نوری

۳. حسین کوهانی

۴. پوریا عباسزاده

پیشگفتار

پایه ها و سازه های بتنی استفاده گسترده ای در ساخت زیرساخت های وزارت نیرو از جمله فونداسیون دکل های انتقال برق و سازه های مشابه داشته و عدم توجه به بحث فرسودگی و تخریب آنها، هزینه هنگفتی به صنعت برق وارد می کند. از این رو موضوع ترمیم و ارائه راهکارهای نوین پیشگیری از آسیب و تخریب آنها مانند پوشش دهی بسیار حائز اهمیت است. امروزه راهکار جدیدی جهت ترمیم ترکهای سازه ها و پایه های بتنی مطرح است که استفاده از بتن های خود ترمیم شونده نام دارد. به طور کلی خود ترمیمی به توانایی یک ترک برای کاهش خود به خود عرض ترک در طول زمان اشاره می کند.

گزارش حاضر فاز نهایی پروژه بهبود خواص مواد ترمیمی بتن های مورد استفاده در پایه های موجود در خطوط انتقال و توزیع صنعت برق به کمک فرآیندهای نوین و نانومواد است. فاز اول پروژه مبتنی بر مطالعات یافته هایی است که تاکنون در خصوص ترمیم زیستی ساختارهای سیمانی و بتنی انجام شده است. در فاز دوم این پروژه، پارامترهای مهم در شناسایی و انتخاب میکروارگانیسم، نوع ماده کپسولی و روش کپسوله کردن، نانومواد انتخابی جهت روش هیبریدی و مشخصه یابی و بررسی محصولات تعیین شدند. در این خصوص، آزمایش های مورد نظر با توجه به مراجع و استانداردهای موجود جهت بررسی محصولات ترمیمی مشخص شد. در فاز سوم پروژه در ابتدا ساخت و سنتز مواد کپسولی حاوی باکتری و سایر مواد مناسب مغذی و ترمیمی مورد بررسی قرار گرفت و در بخش های بعدی اعمال محصول خودترمیم بر نمونه های آزمایشگاهی و همچنین مشخصه یابی نمونه ها انجام شد.

در فاز نهایی پروژه که فاز پایلوت می باشد اعمال محصول ترمیمی در یکی از پایه های دکل برق پژوهشگاه نیرو صورت گرفت و بازبینی دوره ای انجام شد.

مدیر این پروژه در پژوهشگاه نیرو خانم دکتر سارا محسنی می باشند و این گزارش با همکاری آقای دکتر اشکان ذوالریاستین و همکار پروژه ای آقای دکتر پوریا عباس زاده و خانم دکتر نسترن ریاحی نوری به عنوان مجری محترم پروژه و همچنین جناب آقای دکتر کوهانی، مدیر محترم گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، تهیه شده است و ناظر محترم پروژه جناب آقای دکتر خانعلی نکویی می باشند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵.....	پیشگفتار.....
۲۰	فصل اول
۲۰.....	۱- فصل اول: فاز مطالعاتی.....
	۱-۱-۱.....
۲۱.....	مقدمه.....
۲۲.....	۱-۲- پایه ها و فونداسیو بیلن بتنی.....
۲۳.....	۱-۲-۱- پایه های بتنی در پست انتقال برق.....
۲۴.....	۱-۲-۳- علل فرسودگی و تخریب پایه های بتنی.....
۲۴.....	۱-۳-۱- نفوذ نمک ها به بتن.....
۲۴.....	۱-۳-۲- اشتباهات طراحی.....
۲۴.....	۱-۳-۳- اشتباهات اجرایی.....
۲۴.....	۱-۳-۴- حملات کلریدی.....
۲۴.....	۱-۳-۵- حملات سولفاتی.....
۲۵.....	۱-۳-۶- حریق.....
۲۵.....	۱-۳-۷- عمل یخ زدگی.....
۲۵.....	۱-۳-۸- واکنش قلیا-سنگ دانه.....
۲۶.....	۱-۳-۹- کریناسیون.....
۲۶.....	۱-۳-۱۰- کنترل دمای بتن.....
۳۰.....	۱-۵- بررسی آخرین مقالات و اختراعات در حوزه ی ترمیم بتن با تاکید بر روش های زیستی.....
۳۰.....	۱-۵-۱- خود ترمیمی طبیعی.....
۳۳.....	۱-۵-۲- میکرو کپسول های پر شده با عامل ترمیمی.....
۳۴.....	۱-۵-۳- انتخابگر ناحیه ی گرمایی.....
۳۴.....	۱-۵-۴- ساخت شبکه مویرگی.....
۳۵.....	۱-۵-۵- بتن خود ترمیم شونده با باکتری.....
۳۶.....	۱-۵-۵-۱- ساز و کار ترمیم خرابی با استفاده از باکتری ها.....

۳۹	۱-۵-۶- فیبر توخالی.....
۴۰	۱-۶- کاربرد نانو فناوری در بتن.....
۴۱	۱-۶-۱- چالش های نانو تکنولوژی در صنعت بتن.....
۴۸	۱-۷- بررسی و شناسایی انواع گونه های زیستی ترمیم کننده بتن و شرایط بهینه رشد آنها.....
۴۹	۱-۷-۱- ترمیم بتن به روش زیستی و باکتریایی.....
۵۲	۱-۷-۲- انواع باکتری های استفاده شده در بازسازی بتن.....
۵۳	۱-۷-۳- مقایسه بتن باکتریایی با روشهای رایج ترمیم ترک.....
۵۴	۱-۷-۴- پیشینه تحقیقات انجام شده در ترمیم بتن به کمک میکروارگانیزم ها.....
۵۷	۱-۷-۵- انواع روش های خود ترمیمی.....
۵۷	۱-۷-۵-۱- روش کپسوله کردن شیمیایی.....
۵۸	۱-۷-۵-۲- روش ترکیبات معدنی.....
۵۸	۱-۷-۵-۳- مواد شیمیایی درون لوله ایی.....
۶۰	۱-۷-۶- بررسی مواد کپسولی مناسب حاوی باکتریها و روش های سنتز و آماده سازی آن.....
۶۰	۱-۷-۶-۱- استفاده از میکروکپسول های پلیمری جهت کپسوله کردن میکروارگانیزم ها.....
۶۰	۱-۷-۶-۲- استفاده از مواد کپسولی ویژه جهت کپسوله کردن باکتریها.....
۶۱	۱-۷-۷- شناسایی مواد ترمیمی مناسب به همراه باکتریهای ترمیم کننده به روش هیبریدی.....
۶۲	۱-۷-۷-۱- نوع مواد کپسولی و افزودنی های موثر در ترمیم بتن.....
۶۷	۱-۷-۸- ارائه راهکار پیشنهادی در این پروژه جهت ترمیم سازه و پایه های بتنی.....
۶۹	نتیجه گیری.....

فصل دوم ۷۱

فصل دوم: فاز خرید و تدارکات ۷۱

۷۲	۲-۱- مقدمه.....
۷۲	۲-۱-۱- ساخت نمونه های بتن.....
۷۵	۲-۱-۲- سنگدانه ها.....
۷۶	۲-۱-۳- آب.....
۷۷	۲-۱-۴- افزودنی های بتن.....
	۲-۲- انتخاب میکروارگانیزم مناسب جهت ترمیم و بهینه سازی شرایط رشد به منظور افزایش مواد

- ۷۷رسوبی ترمیمی
- ۷۸۲-۱-۱- میکرواورگانیزم ها
- ۷۸۲-۱-۱-۱- انتخاب خانواده ای مناسب از باکتری ها برای استفاده در فرآیند بتن خود ترمیم شونده
- ۷۹۲-۱-۱-۲- انتخاب گونه ای مناسب از باکتری های باسیلوس
- ۸۳۲-۳- شناسایی نوع کپسول و انتخاب روش مناسب کپسوله کردن
- ۸۴۲-۳-۱- انتخاب کپسول مناسب جهت کپسوله کردن باکتری ها
- ۸۴۲-۳-۱-۱- خاک دیاتومه
- ۸۴۲-۳-۱-۲- دانه های سبک با ساختار متخلخل
- ۸۴۲-۳-۱-۳- دانه های سبک خاک رس منبسط شده
- ۸۵۲-۳-۱-۴- دانه های سبک سرامسیت
- ۸۵۲-۳-۱-۵- ژئوپلیمرها
- ۸۶۲-۳-۱-۶- پلیمرها
- ۸۶۲-۳-۱-۷- سیلیکاژل
- ۸۶۲-۳-۱-۸- پلی یورتان
- ۸۶۲-۳-۱-۹- هیدروژل ها
- ۸۸۲-۴- انتخاب مواد ترمیمی مناسب به همراه باکتری ترمیم کننده ترک (روش هیبریدی)
- ۹۰۲-۴-۱- استفاده از نانو مواد در ساختار بتن
- ۹۱۲-۴-۱-۱- نانو ذرات سیلیکا
- ۹۲۲-۴-۱-۱-۱- مکانیزم تاثیر نانو ذرات سیلیکا بر بتن
- ۹۳۲-۴-۱-۱-۲- تأثیر نانوسیلیکا بر خواص رئولوژیکی بتن
- ۹۳۲-۴-۱-۱-۳- تأثیر نانوسیلیکا بر مقاومت فشاری بتن
- ۹۳۲-۴-۱-۲- نانو ذرات رس
- ۹۵۲-۴-۱-۳- نانو ذرات کلسیم کربنات
- ۹۵۲-۴-۱-۳-۱- فرآیند هیدراتاسیون
- ۹۵۲-۴-۱-۳-۲- کارایی
- ۹۶۲-۴-۱-۳-۳- خصوصیات مکانیکی
- ۹۶۲-۴-۱-۳-۴- دوام
- ۹۶۲-۵- خرید مواد و تجهیزات آزمایشگاهی لازم برای انجام پروژه

۹۷	۲-۵-۱- مواد آزمایشگاهی.....
۹۷	۲-۵-۲- محیط کشت نوترینت آگار و براس.....
۹۸	۲-۵-۳- عصاره مخمر.....
۹۸	۲-۵-۴- باکتری باسیلوس سوبتیلیس.....
۹۸	۲-۵-۵- تجهیزات مورد نیاز و مشخصه یابی و بررسی ویژگی های بتن ترمیمی.....
۹۸	۲-۵-۵-۱- اتوکلاو.....
۹۹	۲-۵-۵-۲- قالب های فایبرگلاس.....
۹۹	۲-۵-۵-۳- انکوباتور.....
۱۰۰	۲-۶- بررسی مشخصه یابی و ویژگی های بتن ترمیمی.....
۱۰۰	۲-۶-۱- مقاومت فشاری بتن.....
۱۰۳	۲-۶-۲- اندازه گیری مقاومت خمشی بتن.....
۱۰۴	۲-۶-۲-۱- فرآیند آزمایش مقاومت خمشی بتن.....
۱۰۵	۲-۶-۳- آزمایش های جذب آب.....
۱۰۵	۲-۶-۳-۱- آزمون جذب مویینه آب.....
۱۰۶	۲-۶-۳-۲- آزمایش جذب آب کوتاه مدت.....
۱۰۶	۲-۶-۳-۳- آزمایش جذب آب نهایی.....
۱۰۶	۲-۶-۳-۴- آزمایش جذب آب سطحی اولیه.....
۱۰۷	۲-۶-۴- آزمون عمق نفوذ آب و تخلخل.....
۱۰۷	۲-۶-۵- نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT).....
۱۰۸	۲-۶-۶- آزمایش لوله رایلم.....
۱۱۰	۲-۷- آزمون های مشخصه یابی جهت بررسی نمونه های بتن.....
۱۱۰	۲-۷-۱- روشهای آنالیز کلسیم کربنات باکتریایی در بتن.....
۱۱۵	کاربردهای آنالیز XRD.....

نتیجه گیری ۱۲۰

فصل سوم ۱۲۱

فصل سوم: فاز ستر، اعمال و مشخصه یابی محصول ۱۲۱

۳-۱- مقدمه ۱۲۲

- ۱۲۲..... ۱-۳-۱ ساخت نمونه های بتن
- ۱۲۴..... ۲-۱-۳-۳ سنگدانه ها
- ۱۲۵..... ۳-۱-۳ آب
- ۱۲۵..... ۴-۱-۳ افزودنی های بتن
- ۱۲۶..... ۲-۳-۳ روش تهیه نمونه های بتنی با نانوذرات
- ۱۳۰..... ۱-۲-۳-۳ فرآیند ساخت نمونه های بتن با افزودن نانوذرات به ترتیب ذیل می باشد:
- ۱۳۰..... ۲-۲-۳ اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده
- ۱۳۴..... ۳-۳-۳ ساخت مواد کپسولی حاوی باکتری
- ۱۳۷..... ۴-۳-۳ اعمال محصول خودترمیم زیستی و هیبریدی بر نمونه آزمایشگاهی توسط روش انتخابی
- ۱۳۷..... ۱-۴-۳-۳ فرآیند ساخت نمونه های بتن حاوی نانومواد و باکتری
- ۱۳۸..... ۲-۴-۳-۳ روش تهیه نمونه های بتنی بدون نانوذرات حاوی باکتری
- ۱۳۹..... ۴-۳-۳-۳ روش تهیه نمونه های بتنی نانوذرات سیلیکا حاوی باکتری
- ۱۴۰..... ۴-۴-۳-۳ روش تهیه نمونه های بتنی نانوکربنات کلسیم حاوی باکتری
- ۱۴۱..... ۵-۴-۳-۳ روش تهیه نمونه های بتنی نانوذرات سیلیکا و نانوذرات کربنات کلسیم حاوی باکتری
- ۱۴۲..... ۶-۴-۳-۳ بررسی خودترمیمی نمونه ها بعد از گذشت ۱۰ روز
- ۱۴۳..... ۷-۴-۳-۳ بررسی خودترمیمی نمونه ها بعد از گذشت ۲۰ روز
- ۱۴۴..... ۸-۴-۳-۳ بررسی خودترمیمی نمونه ها بعد از گذشت ۲۵ روز
- ۱۴۶..... ۵-۳-۳ بهینه سازی و مشخصه یابی محصولات ترمیمی
- ۱۴۶..... ۲-۳-۳ مشخصه یابی و بررسی ویژگی های بتن ترمیمی
- ۱۴۶..... ۱-۵-۳-۳ بررسی مشخصه یابی و ویژگی های بتن ترمیمی
- ۱۴۶..... ۲-۱-۵-۳ مقاومت فشاری بتن
- ۱۴۹..... ۳-۱-۵-۳ اندازه گیری مقاومت خمشی بتن
- ۱۵۱..... ۶-۳-۳ آزمون های مشخصه یابی جهت بررسی نمونه های بتن

فصل چهارم ۱۶۲

- ۱۶۲..... فاز اجرا و پایلوت
- ۱۶۳..... ۱-۴ اعمال محصولات ترمیمی بر پایه ها و سازه های بتنی دارای ترک
- ۱۶۴..... ۱-۱-۴-۴ فرآیند ساخت ملات ترمیم کننده

۱۶۵.....۲-۴- بازبینی دوره ای عملکرد محصولات خودترمیم زیستی و هیبریدی

۱۶۸.....نتیجه گیری

مراجع ۱۶۹

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

شکل (۱-۱) نمایی از پایه های بتنی برق در سطح شهر [۱]..... ۲۲

شکل (۲-۱) ترمیم پایه های بتنی در پست انتقال از گل..... ۲۲

شکل (۳-۱) نمایی از تیر برق چوبی [۱]..... ۲۳

شکل (۴-۱) تیر برق با پایه کامپوزیتی [۱]..... ۲۴

شکل (۵-۱) انواع تخریب های شناسایی شده در پست از گل..... ۲۷

شکل (۶-۱) خودترمیمی ترک در بتن ECC و گسترش ترک پس از بارگذاری مجدد نمونه در محلی غیر از

موقعیت ترمیم شده [۱۰]..... ۳۲

- شکل (۷-۱) نمونه منحنی تنش-کرنش و عرض ترک ECC تحت اثر کشش یک محوره [۱۱]..... ۳۲
- شکل (۸-۱) مکانیسم ترمیم ترک توسط میکروکپسول [۱۳]..... ۳۳
- شکل (۹-۱) مکانیسم ترمیم خرابی در سیستم انتخابگر ناحیه گرمایی [۱۴]..... ۳۴
- شکل (۱۰-۱) شبکه مویرگی جعت توسعه و تعبیه میکروکپسول ها با الهام از سیستم بیولوژیکی [۱۴]..... ۳۵
- شکل (۱۱-۱) فرآیند ترمیم ترک با استفاده از باکتری ها [۱۶]..... ۳۶
- شکل (۱۲-۱) تعیین میزان نفوذ پذیری نمونه های ترمیم شده توسط باکتری جنس باسیلوس در مقایسه با نمونه شاهد [۱۶]..... ۳۷
- شکل (۱۳-۱) تشکیل رسوبات کربنات کلسیم توسط باکتری باسیلوس پاستوری [۱۶]..... ۳۸
- شکل (۱۴-۱) نمایی از اسپورهای تشکیل شده توسط باکتریها [۱۷]..... ۳۸
- شکل (۱۵-۱) حفاظت اسپور باکتری ها با مواد آلی جهت ترمیم زیستی [۱۷]..... ۳۹
- شکل (۱۶-۱) مکانیزم ترمیم ترک به روش فیبر های توخالی [۲۱]..... ۴۰
- شکل (۱۷-۱) حرکت به سوی بتنی مقاوم با استفاده از نانوتکنولوژی [۲۲]..... ۴۱
- شکل (۱۸-۱) مقایسه اندازه ذرات با سطح ویژه در بتن [۲۴]..... ۴۲
- شکل (۱۹-۱) تاثیر افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن [۲۵]..... ۴۳
- شکل (۲۰-۱) واکنش هیدراتاسیون در بتن سنتی، بتن با عملکرد بالا و بتن با تکنولوژی نانو ذرات [۲۲]..... ۴۴
- شکل (۲۱-۱) مقایسه میزان مقاومت فشاری بتن در دو حالت سیمان نانو کامپوزیت (CN) و سیمان دارای نانوذرات رس (CNC) برای درصدهای وزنی مختلف [۲۴]..... ۴۵
- شکل (۲۲-۱) خاصیت پر کنندگی حفره در هنگام استفاده از نانو رس به میزان ۱ درصد وزنی [۲۷]..... ۴۶
- شکل (۲۳-۱) نمایی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم [۳۱]..... ۴۷
- شکل (۲۴-۱) مطالعه تاثیر افزودن درصدهای مختلف ذرات نانو اکسید تیتانیوم بر ساختار بتن خود تراکم، A: درصد وزنی صفر، B: درصد وزنی چهار [۳۱]..... ۴۷
- شکل (۲۵-۱) تغییرات مقاومت فشاری نسبت مقاومت ترک خوردگی در حضور درصدهای متفاوتی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود تراکم [۳۱]..... ۴۸
- شکل (۲۶-۱) مراحل رسوب کلسیم کربنات بر روی پوسته باکتری از طریق هیدرولیز اوره [۳۲]..... ۴۹
- شکل (۲۷-۱) شماتیکی از رسوب کربنات کلسیم به روش مینرالیزه شدن هسته ای و انتقال غیرفعال کاتیونها در ماتریکس آلی میکروب [۳۴]..... ۵۱
- شکل (۲۸-۱) شماتیکی از ترسیب کربنات کلسیم توسط محصولات فرعی تولید شده توسط باکتری و ترکیبات معدنی موجود در محیط [۳۴]..... ۵۲

- شکل (۱-۲۹) شماتیکی از تشکیل رسوبات کربنات کلسیم با دو مسیر متفاوت توسط آنزیم های اوره آز و کربنیک انهیدراز [۳۴]..... ۵۲
- شکل (۱-۳۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی مقاطع نمایش دهنده لایه های کریستال های کربنات روی نمونه تیمار شده با باکتری و کلرید کلسیم (B)، با باکتری و استات کلسیم (C) و نمونه تیمار نشده (A) [37] [A]..... ۵۴
- شکل (۱-۳۱) مخلوط خود ترمیم حاوی ذرات خاک رس (تصویر چپ) همراه با اسپورهای باکتری و ماده لاکتات کلسیم (تصویر راست) نمونه حاوی ذرات خاک رس توزیع شده در ساختار بتن [۱۷]..... ۵۵
- شکل (۱-۳۲) عملکرد کپسوله کردن شیمیایی برای خود ترمیمی [۵۰]..... ۵۸
- شکل (۱-۳۳) عملکرد ترکیبات معدنی برای خود ترمیمی [۵۱]..... ۵۸
- شکل (۱-۳۴) عملکرد مواد شیمیایی درون لوله ایی برای خود ترمیمی [۵۲]..... ۵۹
- شکل (۱-۳۵) عملکرد خود ترمیمی در بتن (ECC) [۵۳]..... ۶۰
- شکل (۱-۳۶) نمایی کلی از فرآیند انجام پروژه..... ۶۸
- شکل (۲-۱) فراوانی کاربرد باکتری ها در بتن خود ترمیم شونده [۶۱]..... ۷۹
- شکل (۲-۲) تاثیر انواع باکتری ها بر مقاومت فشاری بتن [۶۱]..... ۸۱
- شکل (۲-۳) باکتری های رنگ شده باسیلی شکل گونه سوبتیلیس..... ۸۳
- شکل (۲-۴) دانه های سبک خاک رس منبسط شده..... ۸۵
- شکل (۲-۵) خاک کائولن شیری رنگ و متاکائولین سفید رنگ [۷۵]..... ۸۶
- شکل (۲-۶) دانه های سیلیکاژل [۷۶]..... ۸۶
- شکل (۲-۷) ساختار سدیم آلزینات و جایگزینی یون های کلسیم در ساختار این ماکرو مولکول [۷۷]..... ۸۷
- شکل (۲-۸) فرآیند انکپسوله شدن باکتری ها در دانه های کلسیم آلزینات [۷۸]..... ۸۸
- شکل (۲-۹) کاربرد نانو مواد در بتن [۷۹]..... ۹۱
- شکل (۲-۱۰) تصویر FSSEM ذرات نانو سیلیکا [۸۰]..... ۹۲
- شکل (۲-۱۱) آگار نوترینت در پلیت پلاستیکی [۸۴]..... ۹۸
- شکل (۲-۱۲) اتوکلاو ۱۰ لیتری آزمایشگاهی [۸۷]..... ۹۹
- شکل (۲-۱۳) تصویری از یک انکوباتور ساده [۸۸]..... ۱۰۰
- شکل (۲-۱۴) قالب های دوتکه فایبر گلاس..... ۱۰۱
- شکل (۲-۱۵) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری [۹۱]..... ۱۰۳
- شکل (۲-۱۶) استاندارد اعمال بار در مقاومت خمشی [۹۳]..... ۱۰۵

- شکل (۲-۱۷) دستگاه اندازه گیری عمق نفوذ آب [۹۵]..... ۱۰۷
- شکل (۲-۱۸) فرآیند اندازه گیری نفوذ تسریع شده یون کلراید [۹۷]..... ۱۰۸
- شکل (۲-۱۹) فرآیند اندازه گیری میزان نفوذ آب توسط تست رایلم [۹۸]..... ۱۰۹
- شکل (۲-۲۰) شماتیکی از روش تست لوله رایلم [۹۹]..... ۱۱۰
- شکل (۲-۲۱) A) تصویری از میکروسکوپ الکترونی B) مشاهده رسوبات کریستالی کربنات کلسیم توسط میکروسکوپ الکترونی [۱۰۱]..... ۱۱۱
- شکل (۲-۲۲) شماتیک کلی دستگاه طیف سنجی مادون قرمز [۱۰۲]..... ۱۱۲
- شکل (۲-۲۳) دستگاه FT-IR [۱۰۲]..... ۱۱۳
- شکل (۲-۲۴) دستگاه XRD [۱۰۲]..... ۱۱۴
- شکل (۲-۲۵) پراش اشعه ایکس XRD از صفحات اتمی با فاصله D از یکدیگر [۱۰۲]..... ۱۱۵
- شکل (۲-۲۶) دستگاه SEM [۱۰۲]..... ۱۱۶
- شکل (۲-۲۷) ساختمان دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) [۱۰۲]..... ۱۱۷
- شکل (۲-۲۸) دستگاه EDAX [۱۰۲]..... ۱۱۹
- شکل (۳-۱) قالب های دوتکه فایبر گلاس..... ۱۳۱
- شکل (۳-۲) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری..... ۱۳۲
- شکل (۳-۳) محیط کشت نوترین آگار..... ۱۳۶
- شکل (۳-۴) محیط کشت نوترین براث حاوی باکتری باسیلوس..... ۱۳۶
- شکل (۳-۵) مشاهده نمونه های باکتری رنگ آمیزی شده توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر..... ۱۳۶
- شکل (۳-۶) دستگاه میکسر جهت ساخت نمونه های بتن..... ۱۳۸
- شکل (۳-۷) ایجاد ترک میکرونی توسط دستگاه جک مقاومت فشاری..... ۱۳۹
- شکل (۳-۸) شکاف میکرونی در نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده با اندازه ۱۴۰ و ۲۲۰ میکرون..... ۱۴۰
- شکل (۳-۹) شکاف میکرونی در نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم و باکتری ترمیم کننده با اندازه ۱۰۰ میکرون..... ۱۴۱
- شکل (۳-۱۰) شکاف میکرونی در نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم، نانو سیلیکا و باکتری ترمیم کننده..... ۱۴۲
- شکل (۳-۱۱) نمونه های بتن حاوی مواد ترمیم کننده زیستی در داخل آب..... ۱۴۲
- شکل (۳-۱۲) ترمیم ترک های میکرونی درد نمونه های حاوی نانوسیلیکا و باکتری بعد از گذشت ۱۰ روز..... ۱۴۳
- شکل (۳-۱۳) خودترمیمی در نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری پس از گذشت ۲۰ روز..... ۱۴۳
- شکل (۳-۱۴) رسوب کربنات کلسیم در نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری..... ۱۴۳

- شکل (۳-۱۵) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم و باکتری. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست) نمونه پس از تیمار ۲۰ روزه..... ۱۴۳
- شکل (۳-۱۶) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم، نانوسیلیکا و باکتری. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست) نمونه پس از تیمار ۲۰ روزه..... ۱۴۴
- شکل (۳-۱۷) مقایسه خودترمیمی دو نمونه بدون نانوذرات و باکتری ترمیم کننده. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست) نمونه پس از تیمار ۲۵ روزه..... ۱۴۴
- شکل (۳-۱۸) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده بدون نانوذرات. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست) نمونه پس از تیمار ۲۵ روزه..... ۱۴۵
- شکل (۳-۱۹) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده و نانوسیلیکا. (چپ) نمونه بعد از تیمار ۱۰ روزه داخل آب (راست) نمونه پس از تیمار ۲۵ روزه..... ۱۴۵
- شکل (۳-۲۰) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده و نانوکربنات کلسیم. (چپ) نمونه پیش از تیمار (راست) نمونه پس از تیمار ۲۵ روزه..... ۱۴۵
- شکل (۳-۲۱) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده، نانوسیلیکا و نانوکربنات کلسیم. (چپ) نمونه پیش از تیمار (راست) نمونه پس از تیمار ۲۵ روزه..... ۱۴۶
- شکل (۳-۲۲) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری..... ۱۴۸
- شکل (۳-۲۳) استاندارد اعمال بار در مقاومت خمشی..... ۱۵۰
- شکل (۳-۲۴) نمونه ای از تصاویر SEM و طیف های IR برای مورفولوژی های مختلف رسوب کلسیم کربنات تشکیل شده توسط باکتری ها..... ۱۵۳
- A شکل (۳-۲۵) تصویری از میکروسکوپ الکترونی (B) مشاهده رسوبات کریستالی کربنات کلسیم توسط میکروسکوپ الکترونی..... ۱۵۳
- شکل (۳-۲۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه شاهد..... ۱۵۴
- شکل (۳-۲۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه حاوی نانوکربنات و باکتری ترمیم کننده..... ۱۵۵
- شکل (۳-۲۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه حاوی نانوکربنات و نانوسیلیکا به همراه باکتری..... ۱۵۶
- شکل (۳-۲۹) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری..... ۱۵۶
- شکل (۳-۳۰) تصویر میکروسکوپ الکترونی از باکتریهای ترمیم کننده به صورت کوکوباسیل همراه با رسوبات کریستالی کربنات کلسیم..... ۱۵۷
- شکل (۳-۳۱) دستگاه XRD..... ۱۵۸
- شکل (۳-۳۲) پراش اشعه ایکس XRD از صفحات اتمی با فاصله D از یکدیگر..... ۱۵۸

- شکل (۳-۳۳) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری..... ۱۵۹
- شکل (۳-۳۴) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری و نانوسیلیکا (۱)..... ۱۶۰
- شکل (۳-۳۵) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری و نانوسیلیکا (۲)..... ۱۶۰
- شکل (۳-۳۶) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری و نانوکربنات کلسیم..... ۱۶۱
- شکل (۳-۳۷) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری به همراه نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیکا..... ۱۶۱

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول (۱-۱)	میکروارگانیسم های دخیل در فرآیند رسوبی کربنات کلسیم و مسیرهای متابولیکی آنها [۳۶].....	۵۳
جدول (۱-۲)	انواع گونه های باکتری دخیل در فرآیند خودترمیم زیستی و نوع ماده کپسولی آنها [۵۶].....	۶۱
جدول (۱-۳)	انواع مواد ترمیمی بتن و نوع روش تیمار آنها [۵۶].....	۶۲
جدول (۱-۴)	انواع مواد کپسولی و محتویات آن جهت ترمیم بتن [۵۷].....	۶۳
جدول (۱-۵)	میزان کارایی ترمیم بتن به دو روش زیستی، افزودن عوامل زیستی به تنهایی و با میکروکپسول [۵۶].....	۶۵
جدول (۱-۶)	انواع آنالیزهای تصویری جهت بررسی میزان ترمیم بتن [۵۶].....	۶۵
جدول (۱-۷)	تکنیک های ارزیابی استحکام و کارایی ترمیم بتن [۵۶].....	۶۶
جدول (۱-۸)	روش های بررسی مقاومت مکانیکی بتن ترمیم شده [۵۶].....	۶۶
جدول (۲-۱)	مقادیر تقریبی ترکیبات انواع سیمان پرتلند.....	۷۳
جدول (۲-۲)	اثرات ترکیبات سیمان در خواص مختلف.....	۷۴
جدول (۲-۳)	سیمان های مناسب برای محیط های گوناگون.....	۷۵
جدول (۲-۴)	مقادیر حداکثر مجاز مواد زیان آور در سنگدانه های درشت بتن.....	۷۶
جدول (۲-۵)	حداکثر مجاز مواد زیان آور در آب مصرفی نمونه ها.....	۷۷
جدول (۲-۶)	اهمیت تاثیر هر کدام از گونه ها بر خواص بتن [۶۱].....	۸۲
جدول (۲-۷)	لیست مواد آزمایشگاهی مورد نیاز.....	۹۷
جدول (۲-۸)	میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان [۹۰].....	۱۰۲

- جدول (۲-۹) محدوده پذیرش جذب آب موینه بتن با دوام [۹۵]..... ۱۰۵
- جدول (۲-۱۰) تقسیم بندی جذب سطحی بتن با معیار جذب سطحی اولیه [۹۵]..... ۱۰۶
- جدول (۳-۱) مقادیر تقریبی ترکیبات انواع سیمان پرتلند [۱۰۳]..... ۱۲۳
- جدول (۳-۲) اثرات ترکیبات سیمان در خواص مختلف [۱۰۳]..... ۱۲۳
- جدول (۳-۳) سیمان های مناسب برای محیط های گوناگون [۱۰۳]..... ۱۲۴
- جدول (۳-۴) مقادیر حداکثر مجاز مواد زیان آور در سنگدانه های درشت بتن [۱۰۳]..... ۱۲۵
- جدول (۳-۵) حداکثر مجاز مواد زیان آور در آب مصرفی نمونه ها [۱۰۳]..... ۱۲۵
- جدول (۳-۶) مقادیر بهینه شده نانوذرات کربنات کلسیم و نانوذرات سیلیکا با استفاده از نرم افزار STATGRAPHIC..... ۱۲۶
- جدول (۳-۷) میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان..... ۱۳۱
- جدول (۳-۸) مقادیر و نمودارهای آماری حاصل از نتایج STATGRAPHIC..... ۱۳۳
- جدول (۳-۹) میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان..... ۱۴۷
- جدول (۳-۱۰) اندازه گیری مقاومت فشاری ۹ نمونه ساخته شده پس از گذشت ۱۴ روز تیمار در داخل آب توسط دستگاه جک فشاری..... ۱۴۸
- جدول (۳-۱۱) اندازه گیری مدول گسیختگی ۹ نمونه ساخته شده پس از گذشت ۱۴ روز تیمار در داخل آب..... ۱۵۱

فصل اول

۱- فصل اول: فاز مطالعاتی

۱-۱- مقدمه

- بررسی انواع تخریب و فرسودگی پایه ها و سازه های بتنی و محصولات ترمیمی

تیر های برق به عنوان یک ستون برای نگه داری خطوط انتقال هوایی، کابل برق، فیبر نوری و تجهیزات مرتبط مانند ترانسفورماتورها و چراغهای خیابان است که ممکن است با توجه به کاربرد آن با نامهای ستون تلفن، ستون برق یا تیر تلفن هم شناخته شود.

مزایای تیر برق های بتنی :

- ۱- سبک بودن، حمل و نقل آسان، سهولت در نصب، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد.
- ۲- توانایی تحمل بارهای شدید به علت آئرو دینامیک بودن پایه ها
- ۳- عدم تخریب سطوح خارجی و ترک پایه به دلیل فشردگی شدید بر روی دستگاه های سانتیفریوژ
- ۴- دارا بودن قابلیت تولید در رنگهای متنوع
- ۵- دارا بودن عمر و دوام طولانی
- ۶- عدم امکان بالارفتن پایه به دلیل نداشتن پلکان جهت بالا بردن سطح امنیت شبکه
- ۷- مقاومت بالا در برابر ضربه های شدید به دلیل تحمل فشار ایستایی بالا
- ۸- داشتن زیبایی خاص و همگن در بافت و میلان شهری
- ۹- مقرون به صرفه بودن و داشتن توجیه اقتصادی به دلیل استفاده حدودا یک سوم مواد اولیه در مقایسه با پایه های H

شکل

- ۱۰- قابلیت انتقال شبکه در چهارراه و سه راهها بدلیل نداشتن گوشه و سطوح نرمادگی
- ۱۱- قابلیت نصب انواع دوربین های مدار بسته، فیلم برداری، تابلو فرمان
- ۱۲- به حداقل رساندن خطر برق گرفتگی و عدم سرقت از شبکه به دلیل عبود کابل های برق و فرمان از درون این پایه

ها

- ۱۳- عدم سقوط پایه توسط رانش زمین به دلیل داشتن سطح مقطع مناسب
- ۱۴- مقاوم در برابر یخ زدگی به دلیل عدم وجود ترکهای مویی در سطوح خارجی

۱-۲- انواع پایه های تیر برق

تیرها و پایه های برق به اشکال زیر در صنعت برق استفاده می شوند.

۱-۲-۱- تیر برق با پایه بتنی

پایه های سیمانی مسلح به تیری گفته می شود که میلگردها و سیم های فولادی قبل از ریختن بتن بصورت اسکلت فولادی در قالب قرار گرفته و پس از اینکه بتن ریخته شد مقاومت آن را افزایش دهد. پایه های نوع توپر با مقطع چند ضلعی که از میلگردهای بلند و بتن ساخته می شوند، که بطور معمول بصورت اچ شکل و یا مقطع چهار گوش باشند به اصطلاح بتن مسلح می گویند، زیرا دو ماده آرماتور و بتن در ایجاد نیروی مقاوم پایه بطور مشترک عمل می نمایند.

انواع تیپ پایه های بتنی :

- ۱- پایه ی بتنی مسلح چهار گوش - کلاس آ: نیروی مجاز عرضی معادل ۳ / ۰ تا ۴ / ۰ قدرت اسمی
- ۲- پایه ی بتنی مسلح چهار گوش - کلاس ب: نیروی مجاز عرضی معادل ۴ / ۰ تا ۶ / ۰ قدرت اسمی
- ۳- پایه ی بتنی مسلح چهار گوش - کلاس پ: نیروی مجاز عرضی معادل قدرت اسمی که در استاندارد (وزارت نیرو) ایران فقط تیرهای بتنی کلاس آ. قابل تولید و استفاده می باشند [۱].



شکل (۱-۱) نمایی از پایه های بتنی برق در سطح شهر [۱]

۲-۱- پایه ها و فونداسیون بتنی

پایه ها و فونداسیون ها یکی از اصلی ترین اجزای انتقال دهنده برق توسط دکل های فولادی در پست های انتقال و خط صنعت برق می باشند. چرا که انتقال برق از طریق خطوط انتقال هوایی بدون پایه های انتقال تقریباً غیر ممکن است. انتقال ولتاژهای فشار قوی بسیار بالا از طریق زمینی بسیار سخت، هزینه بر و غیر ممکن است. پس برای انتقال نیروی الکتریکی پایه های انتقال بسیار حائز اهمیت می باشد. تخریب و آسیب دیدگی پایه های انتقال مثل بقیه تجهیزات برقی بنابه گذر زمان از عمر آن ها کاسته، رفته رفته پوسیده و استهلاک های خاص خود را دارد. البته شرایط محیطی و اجتماعی و برخی رفتار ها روند این آسیب و فرسودگی را افزایش داده و برای رفع این مشکل و کاهش آسیب پذیری تجهیزات برقی به خصوص در پایه های انتقال، مهندسين و پژوهشگران راهکار ها و بررسی های خوبی ارائه داده اند. در واقع ترمیم پایه ها و فونداسیون دکل های برق به دلیل سختی و همچنین هزینه بر بودن تعویض آنها، بسیار ضروری است. از عوامل محیطی تخریب کننده پایه های بتنی می توان به رطوبت، آلودگی، حرارت و املاح و مواد خورنده موجود در خاک اشاره کرد.



شکل (۲-۱) ترمیم پایه های بتنی در پست انتقال از گل

۲-۱-۱- پایه های بتنی در پست انتقال برق

• تیربرق با پایه چوبی

در گذشته استفاده از پایه های چوبی مرسوم بوده است و برای کاربرد این نوع پایه ها از گونه های خاصی از درختان استفاده می شد. با توجه به آزمایش های انجام شده بر روی گونه های مختلف درختان پهن برگ و سوزنی برگ کشور، استفاده از درختان زیر برای تهیه پایه های چوبی مناسب است:

سوزنی برگان: کاج تدا، کاج زرین

پهن برگان: راش، ممرز، تبریزی، صنوبر، افرا، اکالیپتوس و انجیلی



شکل (۱-۳) نمایی از تیر برق چوبی [۱]

• تیربرق با پایه های کامپوزیت

تیرهای چراغ برق کامپوزیتی امروزه به دلیل دارا بودن مقاومت فوق العاده در برابر خوردگی و سبک بودن این محصولات از قابلیت کاربرد در مناطق آلوده، مرطوب و راه های صعب العبور برخوردار می باشند و به همین دلیل جایگزین مناسبی برای انواع نمونه های مشابه فولادی، بتنی و چوبی می باشند [۲].



شکل (۱-۴) تیر برق با پایه کامپوزیتی [۱]

۳-۱- علل فرسودگی و تخریب پایه های بتنی

بتن از پرمصرف ترین مواد در ساخت سازه ها و ساختمان ها است. مقاومت کششی بسیار ضعیف و مقاومت اندکی در برابر ترک خوردگی از محدودیت های این ماده ارزشمند ساختمانی است. پایداری یا دوام بتن ساخته شده از سیمان پرتلند به توانایی بتن برای مقابله با عوامل جوی، حملات شیمیایی، سایش، فرسایش و هرگونه فرآیند منجر به اضمحلال و تخریب اطلاق می شود. بنابراین انواع آسیب دیدگی های بتن عبارتند از آسیب دیدگی بر اثر دوره های یخ زدن و آب شدن، حمله سولفاتی، واکنش قلیایی سنگ دانه ها، خوردگی فولاد مدفون در بتن و سایش و فرسایش می باشند. ایجاد ترک یک فرآیند شایع در بتن به دلیل مقاومت کششی ضعیف آن است. پایداری و دوام سازه های بتنی به دلیل این ترک ها و به دنبال آن نفوذ آب و گاز به درون سازه ها کاهش می یابد. اگر این ترک ها توسعه پیدا کند و به آرماتورهای فولادی برسد، موجب خوردگی و کاهش شدید استحکام سازه می شود.

در زیر برخی از عوامل مهم تخریب و فرسایش بتن به طور مختصر شرح داده شده است.

۱-۳-۱- نفوذ نمک ها به بتن

نمک های ته نشین شده که حاصل تبخیر و یا جریان آب های دارای املاح می باشند و همچنین نمک هایی که توسط باد در خلل و فرج و ترک ها جمع می شوند، هنگام کریستالیزه شدن می توانند فشار مخربی به سازه ها وارد کنند. این عمل علاوه بر تسریع و شدت زنگ زدگی و خوردگی آرماتور ها به دلیل تر و خشک شدن متناوب نیز می تواند تمرکز نمک ها را شدت بخشد زیرا آب دارای املاح پس از تبخیر، املاح خود را به جا می گذارد.

۲-۳-۱- اشتباهات طراحی

به کارگیری استاندارد های نامناسب و مشخصات فنی غلط در رابطه با انتخاب مواد، روش های اجرایی و عملکرد خود سازه می تواند به خرابی بتن منجر شود. به عنوان مثال استفاده از استانداردهای اروپایی و آمریکایی جهت اجرای پروژه در مناطق خلیج فارس که آب و هوا و مواد و مصالح ساختمانی و مهارت افراد متفاوت با همه این عوامل در شمال اروپا و آمریکاست، باعث می شود تا دوام و پایداری سازه های بتنی در مناطق یاد شده کاهش یافته و در بهره برداری از سازه نیز با مسائل بسیار جدی مواجه شویم.

۳-۳-۱- اشتباهات اجرایی

کم کاری ها، اشتباهات و نقص هایی که به هنگام اجرای پروژه ها رخ می دهد ممکن است باعث شود تا آسیب هایی چون پدیده ی لانه زنبوری، حفره های آب انداختگی جدا شدگی، ترک های جمع شدگی، فضا های خالی اضافی یا بتن آلوده شده، به وجود آید که همگی آنها به مشکلات جدی می انجامند. این گونه نقص ها و اشکالات را می توان زاینده ی کارایی درجه ی فشردگی سیستم عمل آوری، آب مخلوط آلوده، سنگدانه های آلوده و استفاده غلط از افزودنی ها به صورت فردی و یا گروهی دانست.

۴-۳-۱- حملات کلریدی

وجود کلرید آزاد در بتن می تواند به لایه ی حفاظتی غیر فعالی که در اطراف آرماتور ها قرار دارد آسیب وارد نموده و آن را از بین ببرد. خوردگی کلریدی آرماتور هایی که درون بتن قرار دارند یک عمل الکتروشیمیایی است که جهت انجام این فرآیند عواملی مانند غلظت مورد نیاز یون کلرید، نواحی آندی و کاتدی، وجود الکترولیت و رسیدن اکسیژن به مناطق کاتد در سل ، تاثیرگذار هستند. گفته می شود که خوردگی کلریدی وقتی حاصل می شود که مقدار کلرید موجود در بتن بیش از ۰.۶ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن باشد ولی این مقدار به کیفیت بتن نیز بستگی دارد.

۵-۳-۱- حملات سولفاتی

محلول نمک های سولفاتی از قبیل سولفات های سدیم و منیزیم به دو طریق می توانند بتن را مورد حمله و تخریب قرار دهند. در طریق اول یون سولفات ممکن است آلومینات سیمان را مورد حمله قرار داده و ضمن ترکیب، نمک های دوتایی از

قبیل اترینگایت و تامازیت تولید نماید که در اب محلول می باشند. وجود این گونه نمک ها در حضور هیدروکسید کلسیم، طبیعت کلوئیدی داشته که می تواند منبسط شده و با ازدیاد حجم، تخریب بتن را باعث گردد. روش دومی که محلول های سولفاتی قادر به آسیب رسانی به بتن هستند عبارتست از: تبدیل هیدروکسید کلسیم به نمک های محلول در آب مانند گچ و میرابلیت که باعث تجزیه و نرم شدن سطوح بتن می شود و عمل نشست یا خل و فرج دار شدن بتن به واسطه یک مایع حلال، به وقوع می پیوندد.

۶-۳-۱- حریق

سه عامل اصلی وجود دارد که می توانند مقاومت بتن را در مقابل حرارت بالا تعیین کنند. این عوامل عبارتند از:
الف- توانایی بتن در مقابله با گرما و همچنین عمل آب بندی، بدون اینکه ترک، ریختگی و کاهش مقاومت حاصل گردد.
ب- رسانایی بتن
ج- ظرفیت گرمایی بتن

باید توجه داشت دو مکانیزم انبساط و جمع شدگی مسوول خرابی بتن در مقابل حرارت می باشند. در حالی که سیمان خالص به محض قرار گرفتن در مجاورت حرارتهای بالا، انبساط حجم پیدا می کند، بتن در همین شرایط یعنی در معرض حرارتهای (دمای) بالا، تمایل به جمع شدگی و انقباض نشان می دهد. چون حرارت باعث از دست دادن آب بتن می گردد، نهایتاً اینکه مقدار انقباض در نتیجه عمل خشک شدن از مقدار انبساط فراتر رفته و باعث می شود جمع شدگی حاصل شود و به دنبال آن ترک خوردگی و ریختگی بتن به وجود می آید. به علاوه در درجه حرارت ۴۰۰ درجه سانتی گراد، هیدروکسید کلسیم آزاد بتن که در سیمان پرتلند هیدراته شده موجود است، آب خود را از دست داده و تشکیل اکسید کلسیم می دهد. سپس خنک شدن مجدد و در معرض رطوبت قرار گرفتن باعث می شود تا مجدد عمل هیدراته شدن حاصل شود که این عمل به علت انبساط حجمی موجب بروز تنشهای مخرب می گردد. همچنین انبساط و انقباض ناهمگون و متمایز مواد تشکیل دهنده بتن مسلح مانند آرماتور، شن، ماسه و ... می توانند در ازدیاد تنشهای تخریبی نقش موثری داشته باشند.

۷-۳-۱- عمل یخ زدگی

در بتنهای خیس، عمل یخ زدگی یک عامل تخریب می باشد، چون آب به هنگام یخ زدن ازدیاد حجم پیدا کرده و باعث تولید تنشهای مخرب درونی شده و لذا بتن ترک می خورد. ترکها و درزهایی که نتیجه یخ زدگی و ذوب متناوب می باشند، باعث می گردند سطح بتن به صورت پولکی درآمده و بر اثر فرسایش، خرابی عمق بیشتری یابد. بنابراین عمل یخ زدگی بتن و میزان تخریب حاصله، بستگی به درجه تخلخل و نفوذپذیری بتن دارد.
در صورتی که جهت ذوب نمودن یخ بتن از نمکهای ذوب یخ استفاده شود، علاوه بر خرابیهای حاصله از یخ زدگی، ممکن است همین نمکها نیز باعث خرابی سطحی بتن گردند. زیرا خرابیهای حاصل از نمکهای ذوب یخ در نتیجه یک عمل فیزیکی به وقوع می پیوندد و غلظت نمکها، موجود بودن آبی که قابلیت یخ زدگی داشته باشد و در کل فشارهای هیدرولیکی و غشایی، نقش بسیار مهمی در دامنه و وسعت خرابیها ایفا می کنند.

۸-۳-۱- واکنش قلیا-سنگ دانه

در این قسمت می توان از واکنشهای "قلیا-سیلیکا" و "قلیا-کربنات" نام برد.
واکنش قلیا - سیلیکا با تشکیل محصول ژل مانند که از واکنش بین هیدروکسید پتاسیم و سیلیکای واکنش پذیر موجود در سنگدانه، حاصل می شود. بر اثر جذب آب، این ژل انبساط پیدا کرده و با ایجاد تنشهایی منجر به تشکیل ترکهای درونی در بتن می شود. واکنش قلیا - کربنات، بین قلیاهای موجود در سیمان و گروه مشخصی از سنگهای آهکی که در شرایط مرطوب قرار می گیرند، به وقوع می پیوندد. در اینجا نیز انبساط حاصله باعث می شود تا ترکهایی ایجاد شود یا در مقاطع باریک خمیدگیهایی به وجود آید.

۹-۳-۱- کربناسیون

لایه حفاظتی که در مجاورت آرماتور داخل بتن موجود است، در صورت کاهش pH بتن اطراف، به کلی آسیب دیده و از بین می رود. بنابراین نفوذ دی اکسید کربن از هوا، واکنشی را با بتن آکالین ایجاد می نماید که حاصل آن کربنات خواهد بود و در نتیجه درجه pH بتن کاهش می یابد. همچنان که این عمل از سطح بتن شروع شده و به داخل بتن پیشروی می نماید؛ آرماتور بتن تحت تاثیر این عمل دچار خوردگی می گردد. علاوه بر خوردگی، دی اکسید کربن و بعضی اسیدهای موجود در آب دریا می توانند هیدروکسید کلسیم را در خود حل کرده و باعث فرسایش سطح بتن گردند [۳، ۴ و ۵].

۱۰-۳-۱- کنترل دمای بتن

حرارت زایی بتن به علت واکنش شیمیایی هیدراسیون مواد سیمانی می باشد. بیشترین مقدار حرارت حاصل در روز های اولیه استقرار بتن است و در مقاطع بتنی نازک به سرعت در محیط اطراف پراکنده می شود. اما در مقاطع بتنی ضخیم تر (بتن حجیم) حرارت بسیار آهسته تر از تولید آن در اطراف پراکنده می شود و در نتیجه گرم شدن بتن حجیم را باعث می گردد. مدیریت کنترل دما جهت جلوگیری از صدمات حاصل از ترک خوردگی، به حداقل رساندن تاخیر برنامه کاری و رعایت مشخصات فنی پروژه الزامی می باشد. اغلب اوقات جهت اطمینان بهتر و برنامه ریزی مناسب قبل از استقرار بتن، حداکثر دمای مجاز بتن و اختلاف دمای آن مشخص می شود. از دلایل محدود کننده حداکثر دمای بتن شامل کاهش زمان خنک کردن، تاخیر های مرتبط و به حداقل رساندن پتانسیل ترک خوردگی مربوط به انقباض و انبساط حرارتی است. درجه حرارت بالای ۸۸ سانتی گراد می تواند سبب کاهش مقاوم فشاری شود. حداکثر اختلاف دمای مجاز بتن اغلب مشخص کننده حداقل پتانسیل ترک خوردگی حرارتی می باشد. این اختلاف دما، تفاوت بین دمای گرم ترین بخش بتن و سطح آن می باشد. حداکثر اختلاف دمای مجاز تابعی از خواص مکانیکی بتن همچون انبساط حرارتی، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و نیز اندازه تنش های امان های بتنی می باشد که معمولاً بر استانداردهای ذکر شده ۱۹ درجه سانتیگراد است. البته در زمانیکه بتن به مقاومت طراحی شده خود می رسد، حداکثر اختلاف دمای مجاز محاسبه شده بسیار بیشتر از ۱۹ سانتی گراد می باشد [۶].

بنابراین با توجه به عوامل مخرب بتن که در بالا ذکر شد می توان انواع تخریب در پایه های بتنی را به صورت زیر دسته

بندی کرد:

☐ پایه های بتنی با نرخ تخریب بسیار شدید که نیاز به بازسازی مجدد دارند.

☐ پایه های بتنی با تخریب سطحی عمیق

☐ پایه های بتنی با تخریب سطحی متوسط

☐ پایه های بتنی با تخریب سطحی کم

☐ پایه های بتنی دارای ترک های سطحی و کرمویی شکل

☐ پایه های بتنی سالم و بدون تخریب



شکل (۱-۵) انواع تخریب های شناسایی شده در پست از گل

۴-۱- محصولات ترمیمی بتن

۴-۱-۱- افزودنی های بتن

افزودنی بتن به موادی گفته می شود که به جز آب، مصالح و سیمان هیدرولیکی می باشند و به صورت افزودنی هایی همچون مقاوم کننده فیبری و یا تفاله ای به عنوان بخشی از بتن و یا ملات و یا پوزولان مورد استفاده قرار می گیرد و در جهت قرار دادن و بالا بردن خاصیت های بتن به منظور دستورالعمل های کاربردی در امر بتن و نیز با شرایط خاص مورد کاربرد قرار می گیرد. از افزودنی بتن به منظور اصلاح ویژگی های بتن و در جهت دستیابی به استفاده درست و کارآمد استفاده می شود. همچنین از افزودنی های بتن در مواردی چون نسبت کم آب و همچنین افزایش زمان گیرش بتن برای انتقال بتن در فواصل طولانی استفاده می شود. به همین جهت شناخت خصوصیات افزودنی های بتن و همچنین اطلاع از قیمت و هزینه افزودنی های بتن برای انتخاب بهترین و مناسب ترین و کاربردی ترین افزودنی بتن در امر کار با بتن برای یک مهندس سازه امری مهم و ضروری است.

استفاده از افزودنی های بتن شامل موارد زیر می باشند:

- ☐ ایجاد تاثیر مورد نظر در بتن به صورت اقتصادی تر
- ☐ هر زمان که بهتر شدن بتن ضعیف با مشکل مواجه می شود
- ☐ هر زمان که خصوصیات مورد استفاده در بتن با تغییر دادن ترکیب مواد پایه ایجاد نشود.
- ☐ زمانی که میزان مورد نیاز باید با دقت تهیه و تعیین شود.
- ☐ فوق روان کننده ها که به طور عمومی بر پایه نفتالین فرمالدئید یا ملامین سولفونات می باشند، این گروه از پلیمرها در لحظات اولیه هیدراسیون سیمان، بار منفی ذرات سیمان را افزایش داده، همچنین این توانایی را دارند که بار منفی ذرات سیمان را افزایش دهند و باعث پخش شدن آنها گردند و این می تواند ناشی از خاصیت دفع الکتریسیته ساکن باشد.

انواع فوق روان کننده بتن شامل ۱. فوق روان کننده کربوکسیلاتی، ۲. فوق روان کننده نفتالینی و ۳. فوق روان کننده لیگنو سولفات می باشند که در مورد هر کدام توضیحات مختصری داده خواهد شد.

• فوق روان کننده کربوکسیلاتی

فوق روان کننده کربوکسیلات با فوق روان کننده های متداول دیگر در عمل متفاوت است. پایه فوق روان کننده کربوکسیلیک، اتر است و نیز دارای زنجیره های جانبی مولکولی هستند.

• فوق روان کننده نفتالینی

فوق روان کننده بر پایه نفتالین به عنوان یک ماده ی کاهنده ی آب و دیرگیر شدن بتن است. این فوق روان کننده به منظور استفاده در مناطق معتدل و گرم مناسب است.

• فوق روان کننده لیگنو سولفات

فوق روان کننده لیگنو سولفات یک افزودنی مایع است که بر روی ذرات سیمان تاثیر می گذارد. این فوق روان کننده به صورت عامل روان کنندگی قوی بر روی ذرات سیمان می باشد و تاثیر کندگیری کنترل شده ای دارد.

۲-۴-۱- آب بندی بتن

به کارگیری افزودنی های بتنی به دلیل اهمیت دوام سازه های بتنی و همچنین تاثیر مستقیم و غیر مستقیم کاهش نفوذپذیری بتن بر دوام بتن باعث رواج به کار گیری آن شده است. از مشکلات مهم و اساسی که معمولاً در سازه های بتنی به وجود می آید می توان به مورد نفوذ آب به داخل سازه های بتنی اشاره کرد. این مشکل در ارتباط با سازه هایی که در نگهداری مایعات مورد استفاده قرار می گیرند از اهمیت بیشتر و بالاتری برخوردار هستند. بنابراین استفاده از آب بندی بتن در سازه های بتنی از اهمیت بالایی برخوردار است.

اصولاً آب بندی بتن در سازه های بتنی به دو روش انجام می گیرد:

۱. آب بندی بتن اولیه که نوعی آب بندی است که در حین ساخت و بتن ریزی انجام می گیرد. این مرحله بهترین و اقتصادی ترین روش آب بندی بتن است.

۲. آب بندی بتن ثانویه که پس از بتن ریزی در سازه های بتنی است. اساس آب بندی بتن در این مرحله آب بندی غشایی است.

۱-۲-۴-۱- انواع افزودنی های آب بندی بتن

افزودنی های آب بندی ژل میکروسیلیس الیاف دار که ترکیبی معین از پودر میکروسیلیکا است و نیز فوق روان کننده ملامین و نفتالینی و الیاف بتن است.

افزودنی های آب بندی کریستال شونده که این محصول بر اساس آخرین تکنولوژی آب بندی دنیا است. از مزایای این محصول می توان به آب بندی فعال و شیمیایی درون بتن و حتی پس از گذشت زمان و بستن ترک های ریز موجود در عمق و سطح بتن است.

افزودنی آب بندی چسب بتن لاتکس که بر اساس پایه پلیمرهای اکریلیکی است و با اضافه شدن به بتن و یا ملات باعث ایجاد خواص آب بندی قوی می گردد. این محصول یک محصول گران برای آب بندی قوی به حساب می آید.

۳-۴-۱- مواد ترمیم کننده بتن

تعمیر و ترمیم سازه های بتنی به عنوان جایگزین یا اصلاح مصالح، اعضای خراب شده و یا اجزای معیوب یک سازه است. در واقع به عبارتی دیگر می توان تعمیر را شیوه ای دانست که به طولانی تر شدن عمر مفید و واقعی یک سازه و رسیدن به عمر مفید آن سازه است. ساختارهای بتنی و ترمیم کننده های بتن به مرور زمان و در طول فرآیند بهره برداری دچار آسیب و تخریب می شوند. کارفرمایان به منظور حفظ و نگهداری ویژگی ها و شرایط سازه های بتنی برای کاربرد کامل سازه های بتنی و ترمیم کننده بتن در طول دوره پیش بینی شده اقدام به تعمیرات و ترمیم آنها می کنند.

آسیب هایی که به سازه های بتنی در طول زمان و بنا به علت های مختلف وارد می شود دارای انواع مختلفی است. از عواملی که باعث تخریب سازه های بتنی می شود می توان به دلایلی چون خوردگی، سولفاته شدن، مشکلات اجرایی،

اسیدها، واکنش قلیایی و ... اشاره نمود.

با توجه به شرایط فرآیند اجرایی، بهره برداری، محدودیت های زمانی و اقتصادی و همچنین آسیب مواد، روش های مختلفی مانند ترمیم کننده های بتنی و یا ترمیم سازه های بتنی از جمله ملات های ترمیم کننده وجود دارد که می توان از آنها استفاده نمود.

به طور کلی بتن یک ماده با استحکام بالا است که دارای مقاومت و دوام بالایی می باشد. با این وجود، عوامل متفاوتی می توانند بر روی بتن تاثیر بگذارند و موجب تخریب بتن گردند. ایجاد خرابی در سازه بتنی مقاومت آن را کاهش می دهد. بتن به هر ماده و یا ترکیبی گفته می شود که از یک ماده چسبنده با خاصیت سیمانی شده تشکیل شده باشد. انواع متنوع سیمان، مواد افزودنی، پلیمرها، الیاف و غیره می تواند در ساخت بتن به کار برده شود و میتوان گفت که ترمیم کننده بتن نیز از این مواد بدست می آیند.

برخی از مصالح ترمیم بتن شامل موارد زیر می باشند:

۱. ملات های ترمیم کننده پلیمری
 ۲. ملات های ترمیم کننده نیمه پلیمری
 ۳. ملات های ترمیم کننده پایه سیمانی اصلاح شده با پلیمر و الیاف
 ۴. چسب های لاتکس
 ۵. چسب های اپوکسی
 ۶. رزین های تزریقی
- در ادامه بعضی از موارد ترمیم کننده بتن شرح داده خواهد شد.

□ ملات های ترمیمی سیمانی

ملات تعمیر سیمانی بر پایه سیمان می باشد و پس از افزودن مقدار آب مورد نیاز، خمیر تعمیری دارای الیاف و با مقاومت بالایی بدست می آید. همچنین ملاتی است که بدون انقباض است و از نفوذ پذیری کم و دوام طولانی برخوردار است. ملات های ترمیمی سیمانی فاقد گرانول های فلزی است و عاری از یون کلر است. اینگونه ملات ها به جهت استفاده توسط سیستم ماله کشی طراحی شده و در یک مرحله اجرا می تواند تا ضخامت ۵۰ میلی متری را پوشش دهند.

□ ملات های ترمیم کننده اپوکسی

ملات های تعمیری بتن (ترمیم کننده بتن) اپوکسی دارای سه جز است و بدون حلال و بر پایه رزین های اپوکسی به همراه مصالح معدنی کم وزن است. اینگونه ملات های سه جزئی به منظور کار در سطوح افقی، عمودی و بالاسری مناسب است. این ملات ها علاوه بر مقاومت مکانیکی بالا، در برابر خیلی از مواد شیمیایی و اسیدها مقاوم می باشد. از کاربردهای ملات اپوکسی می توان به استفاده جهت بستر سازی و تعمیرات سازه ای بتن به منظور مقاصد ترمیم، تقویت و مقاوم سازی ساختمان ها اشاره کرد.

□ چسب های پلیمری بتن

موارد استفاده چسب های پلیمری پس از استفاده از بتن است چرا که بتن را سخت و مقاوم می نماید و مانع از نفوذ آب و دیگر املاح به داخل آن می شود .

□ پودر ترمیم کننده بتن

پودر ترمیم کننده بتن مختص ملاتی است که یک جزء آن پایه سیمانی است که با الیاف پلی پروپیلن، رزینهای پودری محلول در آب و لاتکس تقویت شده است و فقط کفایت در زمان مصرف به آن آب اضافه گردد. ملات به دست آمده قدرت چسبندگی فوق العاده زیادی دارد و همچنین در برابر ترک خوردگی، حملات شیمیایی، نمک ها و سیکل های گرما و سرما مقاوم است.

□ ملات پایه سیمانی ریزدانه حاوی پلیمر و نانوذرات clay

این نوع ملات تعمیری با پلیمر مقاوم به فرسودگی اصلاح شده که به صورت یک جزئی پس از افزودن آب با نسبت ۴۰٪

با روش ماله کشی بر روی سطوح تخریب شده و حاوی ترک اعمال می شود. ملات مذکور چسبندگی بسیار خوبی داشته و در برابر نوسانات دمایی و نیز کرناسیون مقاوم است. ملات ریز دانه جهت ترمیم و پوشش دهی سطوح بتنی با ترک کمتر از ۵ میلیمتر مناسب می باشد. پلیمر رزینی ملات مذکور از نوع آکرلیک اسید می باشد که در برابر تابش اشعه UV نور خورشید مقاوم می باشد.

□ ملات پایه سیمانی درشت دانه حاوی نانوذرات clay

ملات سیمانی فوق از نفوذپذیری کم و مقاومت بالایی برخوردار است. به دلیل وجود نانوذرات clay، نسبت به رطوبت و گاز دی اکسیدکربن نفوذپذیر می باشد. از ویژگی های این نوع ملات ترمیمی عدم نیاز به لایه پیوندزا است و قدرت چسبندگی بالایی به سطح زیرین دارد. ملات مذکور جهت پوشش دهی تخریب عمقی سازه بتنی مناسب بوده و به صورت یک جزئی با نسبت ۳۰٪ آب قابل اجرا است. همچنین قابل ذکر است که روش اعمال این نوع ملات به دو صورت ماله کشی و پاششی در پوشش دهی با ضخامت بالا می باشد.

□ نانوپوشش آبگریزکننده محافظ بتن پایه رزینی

ملات پایه اپوکسی به صورت دوجزئی است که چسبندگی بالایی به انواع سطوح دارد. این نوع ملات به عنوان پوشش لایه ی بالایی، از ورود عوامل مهاجم مانند رطوبت و یون های تخریب کننده از جمله کلر به درون بتن جلوگیری می کند. وجود نانوذرات سیلیس باعث مقاومت بتن در برابر تابش UV نور خورشید شده و به شکل لایه ای بسیار نازک بر سطح اعمال می شود.

□ نانوپوشش بیوپلیمری محافظ

ماده بیوپلیمری نانوساختار توسط یک نوع میکروارگانیزم سنتز می شود که به صورت پوشش بر روی سازه اعمال می شود. این نوع پوشش خاصیت آنتی باکتریال داشته و همچنین مانع نفوذ کلر و سایر ترکیبات آسیب رسان به سازه بتنی می شود. از ویژگی های این نوع پلیمرزیستی تولید انبوه با هزینه بسیار پایین تر از سایر پلیمرها می باشد که استفاده از آن برای صنعت برق از نظر اقتصادی به صرفه می باشد.

□ نانوملات پرکننده ترک های سطحی

این نوع نانوملات به دلیل افزودنی های پلیمری و مواد تقویت کننده چسبنده و همچنین پرکننده های معدنی، به منظور پر نمودن خلل و فرج و رفع ترک های ریز سطحی مورد استفاده قرار می گیرد. نانوملات مذکور علاوه بر قابلیت پرکنندگی زیاد، مقاومت بالایی در برابر سیکل های ذوب و یخندان در فصول سال دارد [۷].

۵-۱- بررسی آخرین مقالات و اختراعات در حوزه ی ترمیم بتن با تاکید بر روش های زیستی

۵-۱-۱- خود ترمیمی طبیعی

بسیاری از پدیده های طبیعی میتوانند به طور تقریبی ترک ها را پر کنند. در پروسه های طبیعی چهار مرحله زیر میتواند ترک را پر کند.

۱) تشکیل کلسیم کربنات یا کلسیم هیدروکسید

۲) بسته شدن ترک با ناخالصی موجود در آب

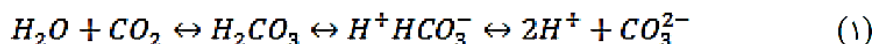
۳) بسته شدن ترک با هیدراته شدن سیمان های هیدراته نشده

۴) بسته شدن ترک با افزایش حجم مواد سیمانی در کناره ی ترک ها

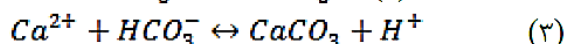
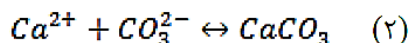
در بسیاری از موارد چند مکانیسم با هم رخ میدهد در حقیقت بسیاری از این مکانیسم ها میتوانند تنها بخشی از ورودی برخی از ترک ها را پر کند و نمیتواند به طور کامل همه ترک ها را پر کند. این امر برای جلوگیری از گسترش عرض ترک ها و نفوذ گسترده به عمق مفید خواهد بود. در میان مکانیسم های ارائه شده در فرایند خود ترمیمی طبیعی، تشکیل کلسیم کربنات و کلسیم هیدروکسید موثر ترین روش برای ترمیم طبیعی بتن می باشد.

مکانیزم های اساسی برای تشکیل کربنات کلسیم و کلسیم هیدروکسید در معادلات ۱ تا ۳ آورده شده است. در گام اول

کربن دی اکسید در آب حل میشود:



یون کلسیم آزاد به عنوان نتیجه هیدراتاسیون سیمان رها میشود و در بتن در سطح ترک پخش میشود و با CO_3^{2-} واکنش می دهد. در نتیجه کلسیم کربنات کریستال تولید میشود. واکنش های ۲ و ۳ فقط در pH بیشتر از ۷.۵ رخ می دهد که کریستال ها در سطح رشد میکنند و در نهایت فضای خالی را پر میکنند .



نویل در سال ۲۰۱۲ ادعا کرد که هیدراتاسیون بیشتر که ناشی از سیمان هیدراته نشده است عمدتاً ناشی از مشخصات خودترمیمی طبیعی در بتن است. اگرچه این فرایند در بتن های جوان رخ میدهد و تشکیل کلسیم کربنات باعث خود ترمیمی در سال های بعدی خواهد شد. خود ترمیمی طبیعی برای ترک های کوچکتر از ۰.۲ میلی متر موثر خواهد بود [۸ و ۹].

۳- کامپوزیت سیمانی مهندسی

بتن سیمانی مهندسی (ECC) از بهبود جراثحت وارده بر موجودات زنده الهام گرفته شده است. بدین ترتیب که با ترمیم مداوم ترکهای ریز حاصله، اجازه ی گسترش ترک و ایجاد شکاف عمیق را نمی دهد، حتی اگر قطعه ی بتنی آسیب دیده بارها تحت بارگذاری قرار گیرد. در واقع مهم ترین مشخصه سیمان مهندسی که با به کارگیری نانو مواد ساخته می شود این است که فقط امکان بروز ترک های مویی با عرض حداکثر ۶۰ میکرومتر نزدیک به هم، به جای ترک های عمیق در بتن حاصله را خواهد داشت. به عبارتی بتن های جدید (ECC) در مقایسه با بتن معمولی انعطاف پذیری بسیار قابل توجهی دارند. عملکرد بتن هایی که با استفاده از کامپوزیت های به صورت حسگر، کرنش جزئی در محل ترک را شناسایی می کند و با فرستادن پیام به بخش ترمیم کننده (مانند عملکرد نرون ها در بدن جانوران) عامل ترمیم کننده آزاد می شود و ترک را ترمیم می کند. مکانیزم فرستادن پیام به صورت قطع قسمتی از جریان در محدوده ی آسیب دیده، افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه افزایش دما و ذوب پوسته ی محتوای عامل ترمیم است.

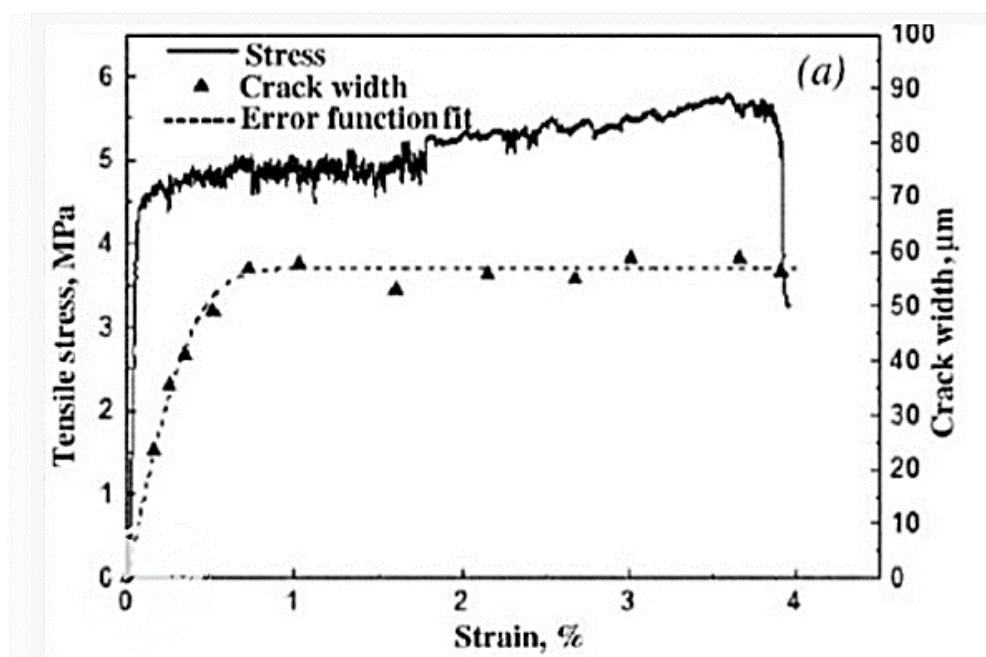
البته طراحی این سیستم که برای ترمیم از انرژی گرمایی جهت آزاد شدن عامل ترمیم محبوس شده در روکش استفاده می شود با حساسیت های زیادی همراه است. به طوریکه افزایش دما در بتن نباید منجر به تبخیر آب درونی و از هم پاشیدن ساختمان آن شود. تحقیقات نشان می دهد استفاده از پوزولان خاکستر بادی در کنار ECC عملکرد آن را بسیار بهبود می بخشد.

خاکستر بادی با هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) از فرآیند هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل سفید رنگی تولید می کند که قادر به دوختن ترک های مویی و خود ترمیمی است. این نوع بتن خود متراکم برای حفاظت بتن های مسلح در محیط های خورنده، نظیر محیط های کلریده که امکان نفوذ یون کلر محلول موجود در آب از طریق ریزترک ها و خوردگی آرماتورها و کاهش مقاومت کلی بتن مسلح وجود دارد، بسیار حائز اهمیت است.

این بتن به گونه ای عمل می کند که به هنگام ایجاد ترک در آن، مقداری از مواد سیمانی هیدراته نشده که در درز ترک ها موجود است در مجاورت دی اکسید کربن و آب واکنش داده و لایه بسیار نازک سفید رنگی از کربنات کلسیم در امتداد ترک ها تشکیل شده و مانع از گسترش ترک می گردد و در واقع ترک ها را ترمیم می کند و در نتیجه دوام، نفوذپذیری و خواص مکانیکی بالقوه بهبود می یابد.



شکل (۶-۱) خودترمیمی ترک در بتن ECC و گسترش ترک پس از بارگذاری مجدد نمونه در محلی غیر از موقعیت ترمیم شده [۱۰] همانگونه که در شکل مشاهده می شود، این بتن ها بر خلاف بتن های معمولی پس از ترک خوردن مقاومت خود را از دست نمی دهد و قادر به تحمل تغییر شکل و کرنش کششی و ارائه رفتار سخت شدگی کرنشی می باشند.



شکل (۷-۱) نمونه منحنی تنش-کرنش و عرض ترک ECC تحت اثر کشش یک محوره [۱۱] ظرفیت کرنش کششی نهایی ECC ها بیش از ۳ درصد (چند صد برابر بتن عادی) می باشد و در عین حال عرض ترک ها را زیر ۶۰ میکرومتر نگه می دارد. عرض بسیار کم ترک ها در نتیجه توانایی مواد ECC در توزیع سطحی ترک می باشد به گونه ای که با ثابت نگه داشتن عرض ترک ، طول آن را افزایش میدهد. بر خلاف بتن معمولی یا بتن الیافی، این ویژگی ECC امکان کنترل عرض ترک را مستقل از نسبت آرماتور و ابعاد سازه فراهم می کند. با توجه به این ویژگی، عرض کم ترک در نمونه های آزمایشگاهی برابر با عرض ترک در سازه های تمام

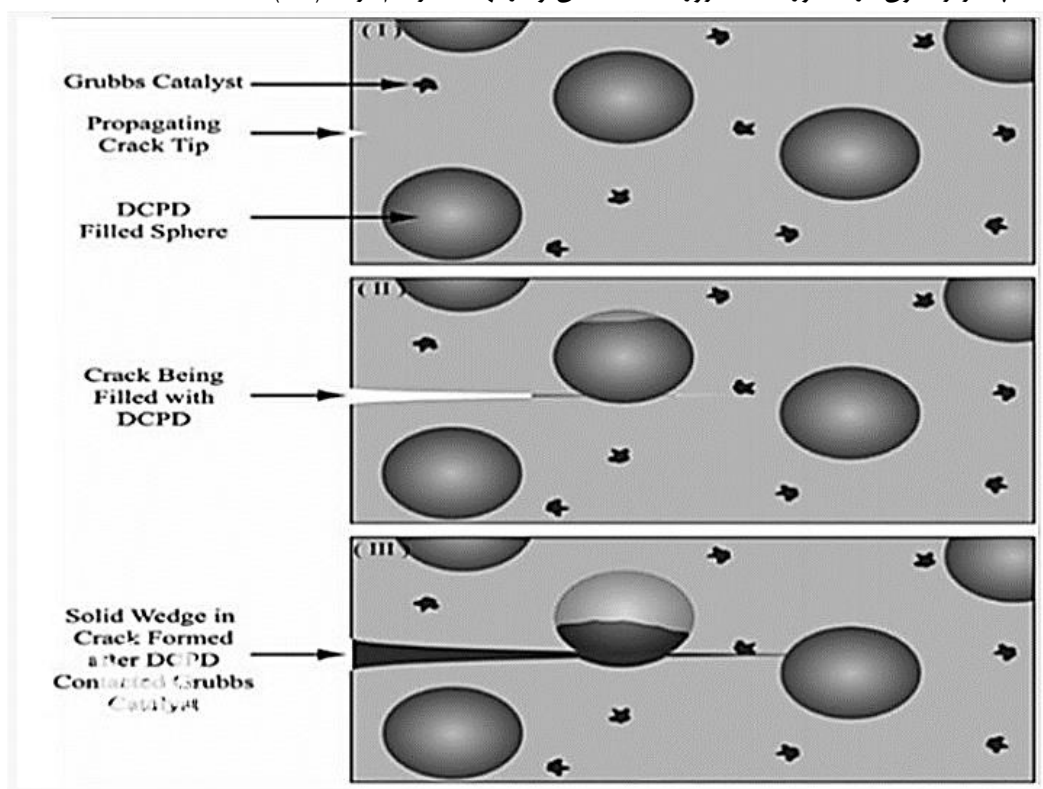
مقیاس می باشد. با این خصوصیت انتظار می رود مواد ECC پتانسیل خوبی برای خود ترمیمی در شرایط محیطی مختلف داشته باشند، حتی زمانی که با چند درصد کرنش کشیده می شود [۱۲].

۲-۵-۱- میکرو کپسول های پر شده با عامل ترمیمی

این روش با الهام گرفتن از نقش گلبول های قرمز در لخته شدن خون و ترمیم، کپسول های حاوی نانو مواد ترمیم کننده به بتن تزریق می شود. این میکرو کپسول های کروی نازک که از مایع ترمیم کننده پر شده اند اصولاً از نوع دیسیکلوپنتادین می باشد.

این میکرو کپسول ها حین برخورد با ترک شکسته شده، عامل ترمیم داخل ترک رها شده و با کاتالیزور برخورد می کند. به این ترتیب عمل پلیمریزاسیون صورت گرفته و با تشکیل ماده ای سخت، ترک ترمیم می شود. عکس العمل شیمیایی بین عامل ترمیمی و کاتالیزور، ماده را ترمیم و از رشد ترک جلوگیری می کند. در واقع فرآیند فوق به صورت سه مرحله انجام می شود.

- آغاز ترک خوردگی مقطع و لوله های محتوی عامل ترمیم (I)
- شکسته شدن پوسته نازک میکرو کپسول در اثر رسیدن ترک، آزاد سازی عامل ترمیم و نفوذ آن به درون ترک (II)
- پلیمریزاسیون در مجاورت کاتالیزور، سخت شدن و در نهایت ترمیم ترک (III)



شکل (۱-۸) مکانیسم ترمیم ترک توسط میکرو کپسول [۱۳]

از آنجایی که خرابی در یک سازه بتنی با تشکیل ترک های ریز، انتشار و عریض شدن آنها صورت پذیرد لازم است از کپسول های کوچکی با ابعاد حدود ۱۰۰ میکرومتر برای ترمیم ترک های ریز اولیه و جلوگیری از گسترش آنها استفاده کرد. علاوه بر آن جداره میکرو کپسول ها باید خیلی نازک باشد تا به محض رسیدن ترک به دیواره، میکرو کپسول به راحتی شکسته و عمل ترمیم آزاد شود. این سیستم مزیت هایی چون عمر مفید طولانی، تکمیل پلیمریزاسیون در چند دقیقه و پر شدن ترکهای عرضی از مواد دارد.

۳-۵-۱- انتخابگر ناحیه ی گرمایی^۱

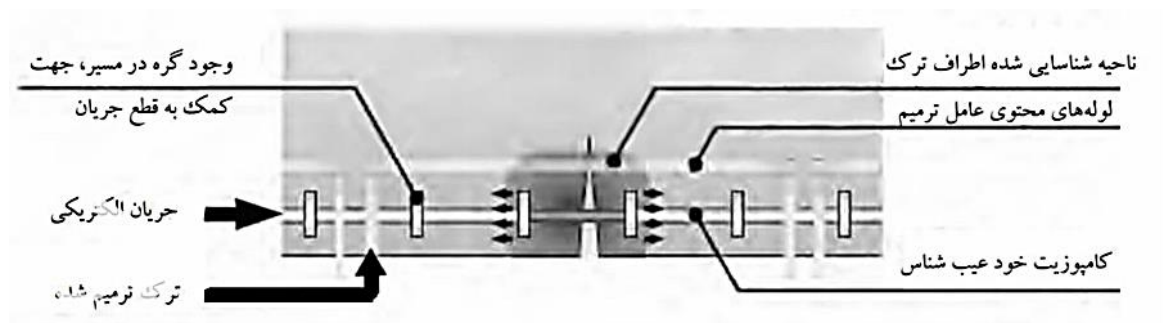
یکی از هوشمند ترین سیستم های خود ترمیم که در نمونه های بتنی مورد توجه قرار گرفته است سیستم انتخابگر ناحیه گرمایی است. این روش به عنوان کاراترین سیستم که در اکثر اوقات ۱۰۰ درصد را برای ترمیم به خود اختصاص می دهد شناخته می شود. این سیستم از دو بخش اصلی تشکیل شده است :

۱ - کامپوزیت های خود عیب شناس^۲ که از فایبرها و مواد هادی جریان الکتریسته ساخته شده اند که هم قابلیت های یک کرنش سنج را دارا هستند و هم به عنوان یک ماده ی عملکردی ، توانایی ثبت تاریخچه ی زمانی خرابی در سازه را دارند. در حقیقت بخش اول به عنوان حسگر یا چشم نمونه ، هر جا ترکی اتفاق بیفتد آن را شناسایی می کند و با فرستادن پیام به جز ترمیم کننده (همانند عملکرد نرون ها در بدن جانوران) این بخش را فعال کرده ، سیستم ترمیم کننده درصدد رفع خرابی برمی آید.

۲ - بخش ترمیم کننده pipe Film Organic Plasticity-Heat که محتوی نانو مواد عامل ترمیم و به صورت لوله هایی از جنس مصالحی با خاصیت پلاستیک شوندگی در برابر گرما است. به گونه ای که تا قبل از گسترش هرگونه ترکی از خروج عامل ترمیم جلوگیری می کند.

زمانی که ترکی در قطعه رخ می دهد ، بخش اول به صورت حسگر ، کرنش جزئی در محل ترک را شناسایی می کند و با فرستادن پیام به بخش ترمیم کننده عامل ترمیم کننده ای آزاد می شود و ترک را ترمیم می کند. مکانیزم فرستادن پیام به صورت قطع قسمتی از جریان در محدوده ی آسیب دیده ، افزایش مقاومت الکتریکی و در نتیجه افزایش دما و ذوب پوسته ی محتوی عامل ترمیم است.

این سیستم به صورت تکمیل شده می تواند با مانیتور کردن اطلاعات عیب شناس ، نمایش و کنترل فرآیند تخریب را در خارج از سازه در اختیار عوامل بیرونی انسانی قرار دهد که خود تحول عظیمی را در صنعت بهسازی و ترمیم بتن در سازه های حساس در پی خواهد داشت.



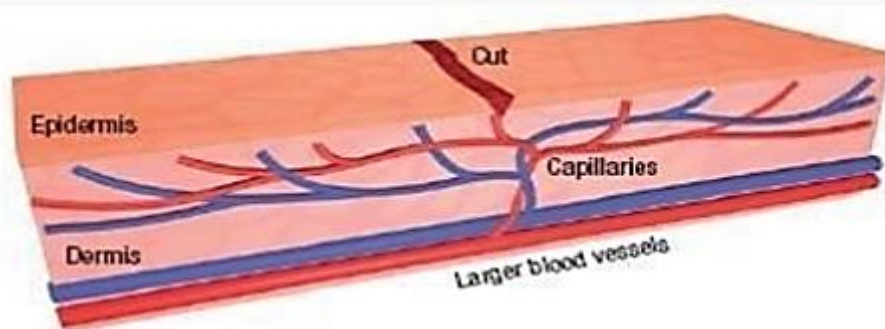
شکل (۱-۹) مکانیزم ترمیم خرابی در سیستم انتخابگر ناحیه گرمایی [۱۴]

۱-۵-۴- ساخت شبکه مویرگی

در ترمیم به روش میکروکپسول ها ، میکروکپسول ها حین برخورد با ترک شکسته می شوند ، در مجاورت کاتالیزور عمل پلیمریزاسیون صورت می گیرد و با تشکیل ماده ای سخت ، ترک ترمیم می گردد.

1 - Selective Heating

2 - Composite Diagnosis-Self

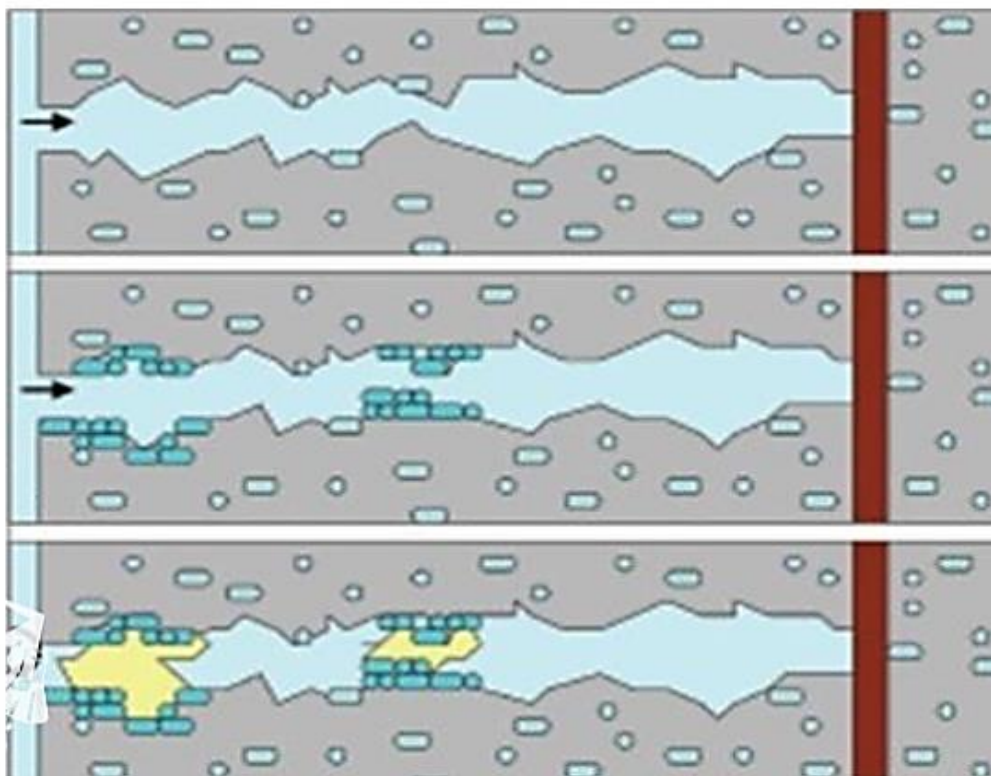


شکل (۱-۱۰) شبکه مویرگی جعت توسعه و تعبیه میکروکپسول ها با الهام از سیستم بیولوژیکی [۱۴]

در این روش ممکن است با افزایش میزان میکروکپسول ها ، همگنی و یکنواختی بتن تحت تأثیر قرار گیرد و کاهش مقاومت و طاقت قطعه ی بتنی را موجب شود. بنابراین جهت بهبود عملکرد ، نیاز به تزریق مایع ترمیم کننده از طریق یک سیستم هوشمند احساس می شود. تحقیقات اخیر بیانگر امکان تعبیه ی شبکه ی مویرگی^۱ به صورت انتقال نانو مواد عامل ترمیم با تکیه بر خاصیت موینگی از منبع به محل خرابی و پلیمریزاسیون در مجاورت کاتالیزور و نتیجتاً تشکیل ماده ای سخت و ترمیم ترک می باشد. تحقیقات آتی درصدد توسعه ی شبکه ی مویرگی در بتن حاوی عامل های ترمیم کننده ، به صورت کاملاً هوشمند همانند سیستم بیولوژیکی است [۱۵].

۱-۵-۵- بتن خود ترمیم شونده با باکتری

روش دیگری به صورت تلفیقی از مواد طبیعی و نانو مواد جهت ترمیم هوشمند بتن ، توسعه یافته است. این روش با کمک نوع خاصی از باکتری های موجود در طبیعت که قادر به زیست در محیط قلیایی بالای بتن هستند برای ساخت بتن خود ترمیم استفاده می شود. این گروه از باکتری ها تشکیل اسپورهای مقاوم به شرایط سخت محیطی را می دهند. نمونه این باکتری موسوم به باسیلوس است که در دریاچه های دارای خاصیت قلیایی در کشورهای روسیه و مصر به مدت طولانی قادر به زیست بوده اند. این باکتری ها به همراه منبع تغذیه شان در گلوله های کوچک از جنس سرامیک تعبیه شده و به صورت سوسپانسیون در آب بتن قرار داده می شوند تا از فعالسازی نا بهنگام در مخلوط بتن خیس جلوگیری شود. این بتن با کمک باکتری موجود در میکروکپسول و در صورت تزریق آب قابلیت خود ترمیمی پیدا می کند. میکروکپسول با در میان گرفتن و محافظت از باکتری، مواد مغذی و لاکتات کلسیم را برای رشد آن تامین می کند. باکتری ها تا زمان شکل گیری ترک ، به صورت پیش فعال یا به اصطلاح خواب در بتن باقی می مانند و سپس در اثر گسترش ترک و نفوذ آب به مقطع ، فعال شده و در اثر واکنش با ترکیبات بتن ، رسوب سخت کربنات کلسیم تولید و به وسیله آن منافذ ترک بسته خواهد شد.



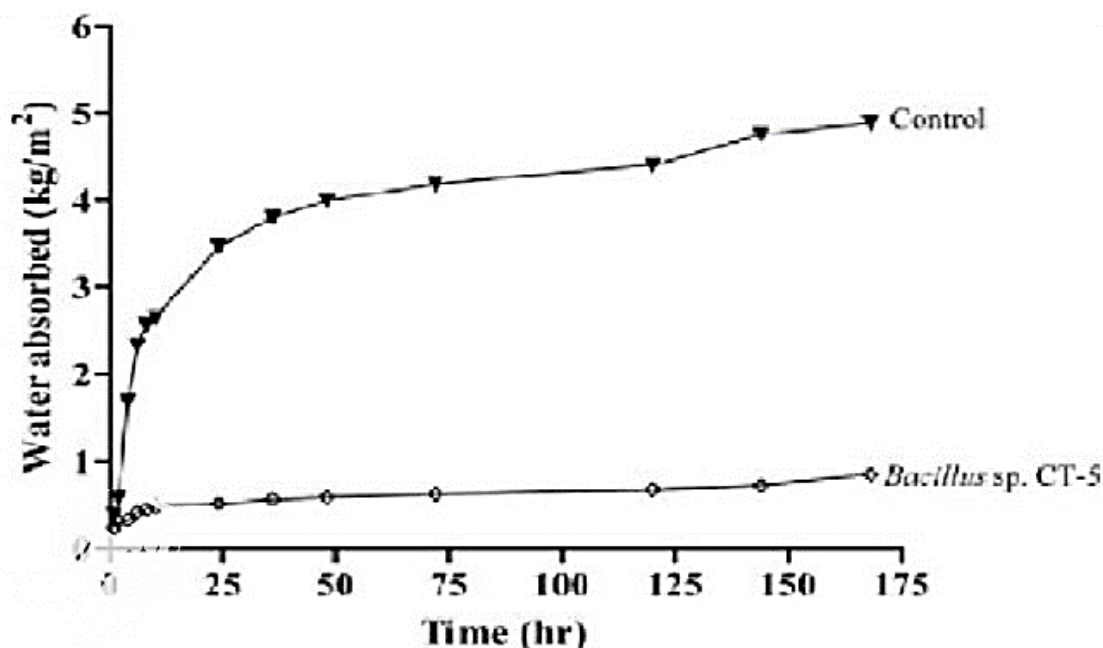
شکل (۱۱-۱) فرآیند ترمیم ترک با استفاده از باکتری ها [۱۶]

۱-۵-۵-۱ ساز و کار ترمیم خرابی با استفاده از باکتری ها

زمانی که باکتریها شروع به تغذیه می کنند آب را حریصانه می بلعند و به مقدار فراوانی سنگ آهک بلورین تولید می کنند که به سرعت باعث پرشدن منافذ و سوراخها می شود. این بتن جدید عمر سازه را تا ۵۰ درصد افزایش داده و نیاز به تعمیرات دوره ای را کاهش می دهد ، همچنین می تواند از زنگ زدگی فولاد داخل بتن جلوگیری بعمل آورد.

- فعال شدن هیدرولیز به دلیل رسیدن آب به باکتری ها در اثر ترک خوردن و نفوذ آب به درون نمونه
 - تشکیل رسوب کربنات کلسیم در صورت وجود یون های Ca^{2+} به مقدار کافی
 - بسته شدن ترک ها توسط رسوب کربنات کلسیم و جلوگیری از نفوذ پذیری
- انتخاب نوع باکتری که به صورت سوسپانسیون در بخشی از بتن وارد می شود مهمترین پارامتر طراحی در این سیستم است. در این راستا ضروری است باکتری منتخب:

- قابلیت زنده ماندن برای مدت زمان طولانی در محیط قلیایی بتن با pH در حدود ۱۱ تا ۱۳ را داشته باشد.
 - از مقاومت مکانیکی کافی برای زمان میکس برخوردار باشد.
 - باعث کاهش مقاومت اولیه و نهایی بتن نشود.
- در یک سری آزمایشات بر روی جذب آب به منظور تعیین میزان نفوذ پذیری نمونه های ترمیم شده توسط باکتری انجام داده است که نتایج آن در شکل زیر ذکر شده است.

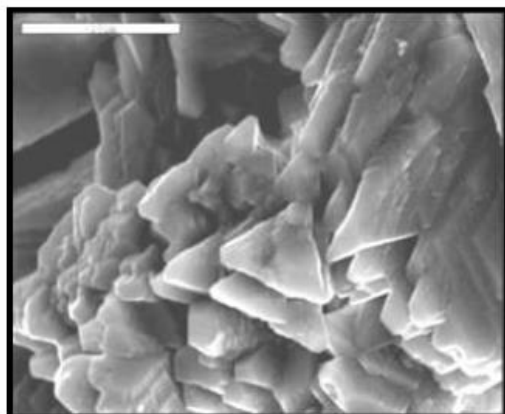


شکل (۱-۱۲) تعیین میزان نفوذ پذیری نمونه های ترمیم شده توسط باکتری جنس باسیلوس در مقایسه با نمونه شاهد [۱۶]

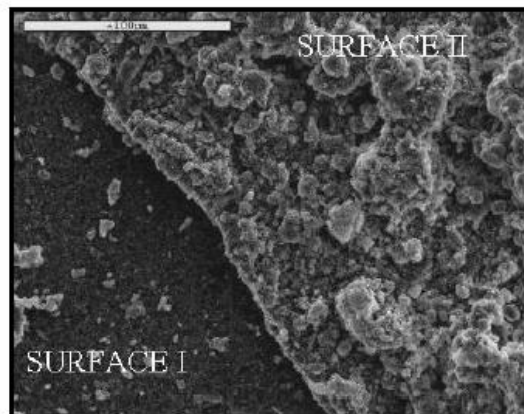
همانگونه که در شکل نشان داده شده تاثیر درمان باکتری در طول دوره زمان ۱۶۸ ساعت برای جذب آب در حدود ۶ برابر نمونه شاهد است که تأیید کننده تشکیل رسوب کلسیم در حضور باکتری می باشد. نقطه قابل توجه سرعت زیاد رسیدن به جذب آب مطلوب و اختلاف کم در میزان جذب آب در زمان های بیش از ۱۰ ساعت برای نمونه های باکتریایی است. این مطلب نشان دهنده تاثیر بالای تشکیل حتی یک لایه کلسیت در برابر میزان جذب آب می باشد.

برای اطمینان از تشکیل لایه های کلسیت از آنالیز طیف سنجی پرتو اشعه ایکس استفاده می شود. برخی از عکس های گرفته شده برای نمونه هایی که تحت درمان باکتری قرار گرفتند، نمایش دهنده دو سطح I و II است. سطح I بیانگر ماتریس سیمانی معمولی و سطح II بیانگر رسوبات برجسته کربنات کلسیم و تشکیل لایه های ضخیم و نفوذ ناپذیر است.

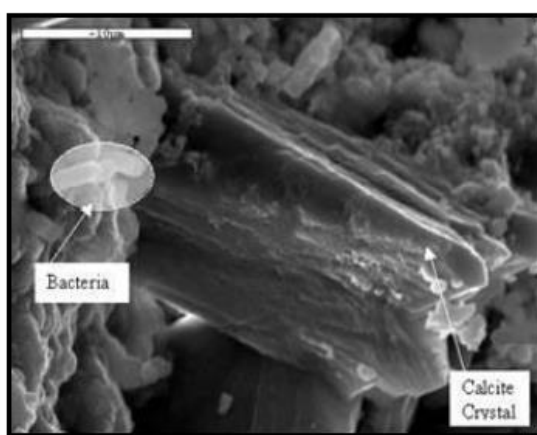
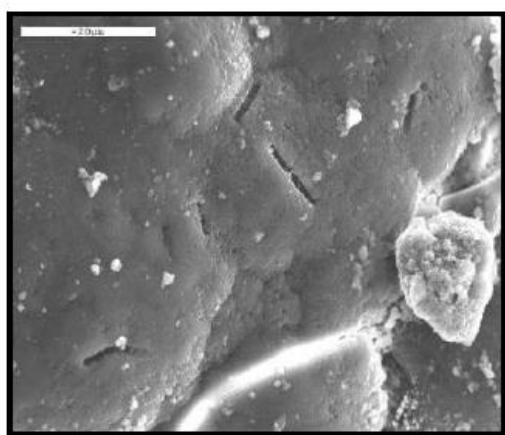
همانطور که در شکل زیر مشاهده می شود، شکل (ب) بزرگنمایی سطح II را نمایش می دهد. در شکل (ج) ساختار میله ای و رسوب کلسیت در ماتریس سیمانی و باکتری باسیلوس پاستوری^۱ در مجاورت رسوبات به خوبی قابل مشاهده است. شکل (د) نیز بزرگنمایی یک لایه کربنات کلسیم را نشان می دهد. ساختارهای میله ای شکلی که در سطح رسوب دیده می شوند تأیید کننده حضور باکتری ها در سراسر لایه ها می باشد.



«ب»

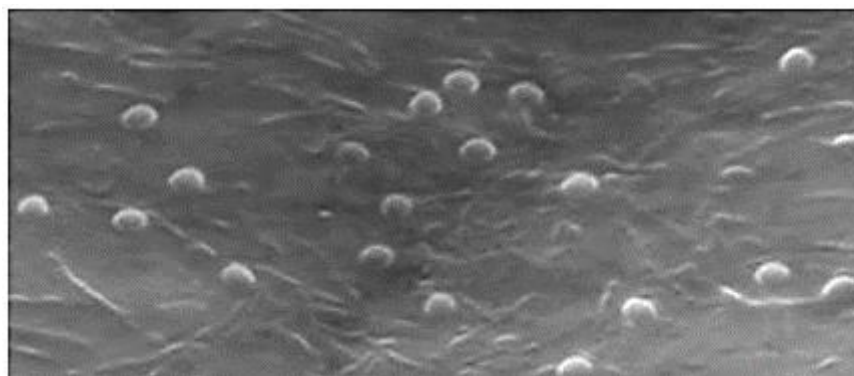


«الف»



شکل (۱-۱۳) تشکیل رسوبات کربنات کلسیم توسط باکتری باسیلوس پاستوری [۱۶]

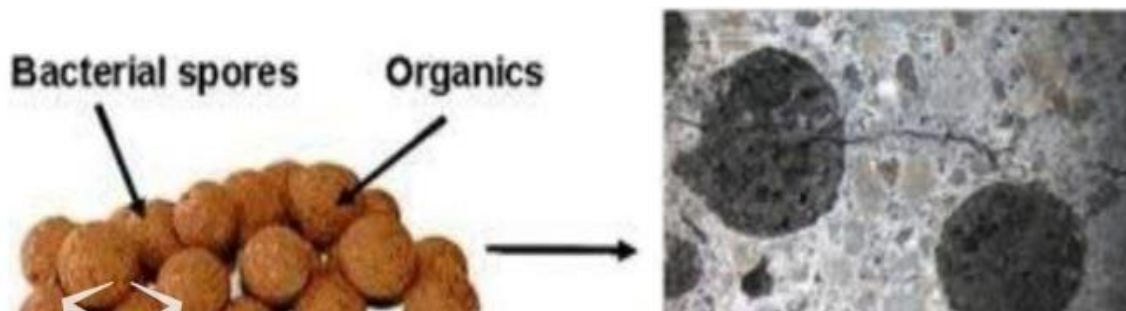
ویژگی جالب این نوع باکتری ها این است که آنها قادر به تشکیل اسپورهایی هستند که این نوع اسپورها سلول های کروی با دیواره ضخیم مشابه با دانه های گیاه هستند. این نوع اسپورها زیست پذیرند اما غیر فعال و قادر به تحمل تنش های مکانیکی و شیمیایی می باشد و می توانند در حالت خشک برای بیش از ۵۰ سال زنده بمانند.



شکل (۱-۱۴) نمایی از اسپورهای تشکیل شده توسط باکتریها [۱۷]

زمانی که اسپورهای باکتری به طور مستقیم به طرح اختلاط بتن اضافه می شوند طول عمر آنها محدود به یک یا دو ماه است. به منظور افزایش اساسی طول عمر و کارایی بتن های حاوی باکتری، تاثیر اسپورهای باکتری و به طور همزمان عدم تحرک ترکیبات ارگانیک زیست معدنی پیشرو (کلسیم لاکتات) در ذرات رس با تخلخل بالا مورد آزمایش قرار گرفت و به

این نتیجه رسیدند که حفاظت و نگهداری اسپور باکتری به وسیله بی حرکت کردن یا عدم تحرک ترکیبات ارگانیک درون ذرات رس با تخلخل بالا قبل از اضافه کردن به اختالط بتن در حقیقت به طرز قابل چشمگیری سبب افزایش طول می شود.



شکل (۱-۱۵) حفاظت اسپور باکتری ها با مواد آلی جهت ترمیم زیستی [۱۷]

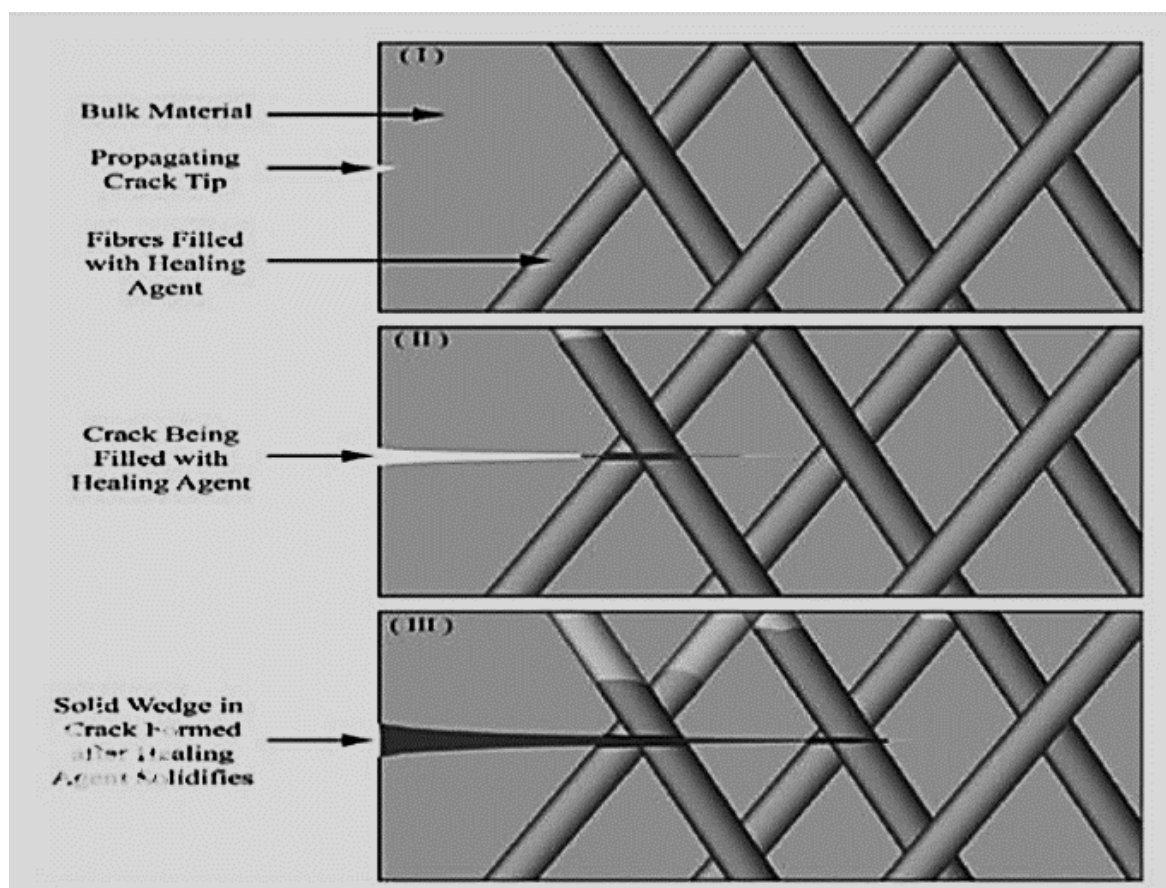
لازم به ذکر است که تا قبل از کشف باکتری مذکور از محصولات باکتری معدنی برای ترمیم ترک در بتن استفاده می شد. که به دلیل لزوم تهویه دستی این باکتریها در محل آسیب دیده توسط نیروی انسانی و تولید ماده سمی آمونیاک در اثر واکنش این باکتری ها با ترکیبات بتن، دوام و توسعه چندان نیافت در مطالعات بعدی به این نتیجه رسیدند که دیگر ترکیبات زیست معدنی پیشرو همچون شیر مخمر، پیتون و کلسیم استات باعث کاهش چشم گیری در مقاومت فشاری می شود. تنها استثنا در این مورد کلسیم لاکتات است که باعث افزایش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری در مقایسه با دیگر نمونه های کنترلی می شود.

جهت تضمین شروع سریع ترمیم ترک ها بکار بردن کلسیم لاکتات و باکتری که میتواند سبب تبدیل متابولیک این ترکیب شود به نظر گزینه مطلوب یا بهترین روش می باشد. آزمایشات حاکی از آن است که زیست پذیری اسپور باکتری از ۲ تا بیش از ۶ ماه وقتی که به صورت محافظت شده به ذرات رس منبسط متخلخل اضافه می شود در مقایسه با اضافه کردن مستقیم (غیر محافظت شده) افزایش پیدا می کند.

تحقیقات بیشتر در این زمینه به منظور انتخاب باکتری مناسب که قابلیت زنده ماندن و فعال شدن را در محیط بتن و در طول زمان بهره وری داشته باشد و نیز کمترین اثر منفی بر خواص رفتاری و مقاومتی بتن اعمال کند همچنان ادامه دارد. نتیجه گیری کلی نشان می دهد که دو نماینده پیشنهادی زیست شیمی بهبود دهنده مرکب از اسپورهای باکتری و ترکیبات پیشرو ارگانیک مناسب، گزینه امید بخش از لحاظ زیستی و مقاومتی هستند؛ به خصوص در مواردی که قسمت هایی از سازه بتنی قابل بازرسی و تعمیر دستی نمی باشند. با این وجود قبل از تحقق هر کاری نیازمند بهینه سازی تکمیلی سیستم پیشنهادی نیز می باشد. مقدار مورد نیاز عامل ترمیم کننده باید به وسیله تکنیک های حاضر کمینه شود؛ هم به جهت صرفه اقتصادی و هم به جهت کاهش عواقبی چون پایین آمدن مقاومت فشاری [۱۸، ۱۹، ۲۰].

۶-۵-۱- فیبر توخالی

درای و سوتوس در سال ۱۹۹۲ روی روش آزادسازی شیمیایی ذخیره شده در فیبرهای میان تهی تحقیق کردند که در ابتدا در مواد سیمانی برای تغییر و بهبود ویژگی هایی مثل نفوذ پذیری، تعمیر ترک ها و جلوگیری از خوردگی و انعطاف پذیری استفاده می شد. در این روش با به کارگیری رنگ های فلورسنت در عامل ترمیم کننده ی جاری در این الیاف ها، پدیده ی کبودشدگی در موجودات زنده شبیه سازی می شود که خود نقش مهمی در تشخیص محل آسیب دیده دارد. به اینصورت که عامل ترمیم از فیبر نازک تو خالی آزاد میشود تا ترک های ایجاد شده را پر کند و ترک ترمیم گردد [۲۱].



شکل (۱-۱۶) مکانیزم ترمیم ترک به روش فیبر های توخالی [۲۱]

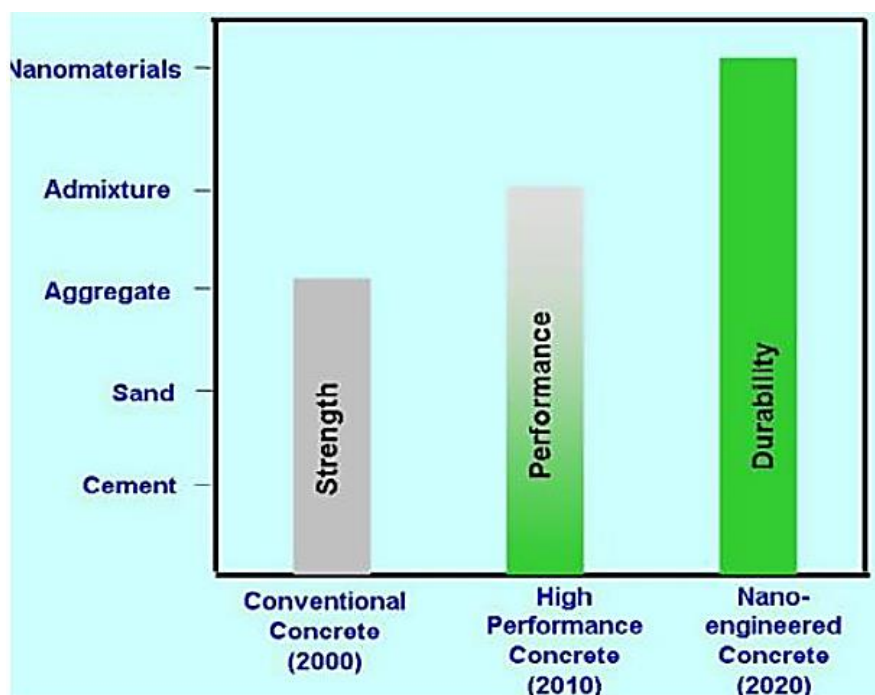
۶-۱- کاربرد نانو فناوری در بتن

افزودنی ها موجود برای بتن همیشه تمامی مشخصات بتن را بهبود نمی بخشد. نانو فناوری نشان داده است که قابلیت بهبود عملکرد بتن را به صورت همه جانبه دارد. ذرات نانو با توجه به ابعادشان می توانند نقش پر کننده حفرات را بازی کنند. همچنین می توانند با تشکیل نانو کریستال ها مشخصات بتن را ارتقا بخشند. میکرو سیلیس از جمله افزودنی های پرمصرف امروزی است با این حال مشاهده شده که استفاده از نانو سیلیس تاثیر بهتری روی رفتار بتن دارد. در ادامه بتن خود تمیز شونده، خود پایش، نانو مسلح کننده های بتن و نانو پوشش های بتنی معرفی می شوند.

به طور کلی کاربرد فناوری نانو در بتن به دو هدف انجام می گیرد:

- اندازه گیری و توصیف ساختار مواد پایه سیمانی در مقیاس نانو و میکرو برای درک بهتر رفتار در مقیاس بزرگ و عملکرد آن از طریق استفاده از تکنیک های پیشرفته توصیف و مدل سازی، مربوط به سطوح اتمی یا مولکولی
- تکنیک های دست کاری ساختار در مقیاس نانومتری به منظور ایجاد نسل جدید و مناسب کامپوزیت های سیمانی با رفتار مکانیکی ایده آل و حتی ایجاد خواص جدیدی مثل مقاومت الکتریکی پایین، هوشمند بودن، خودتمیزشوندگی و خودترمیم کنندگی در بتن

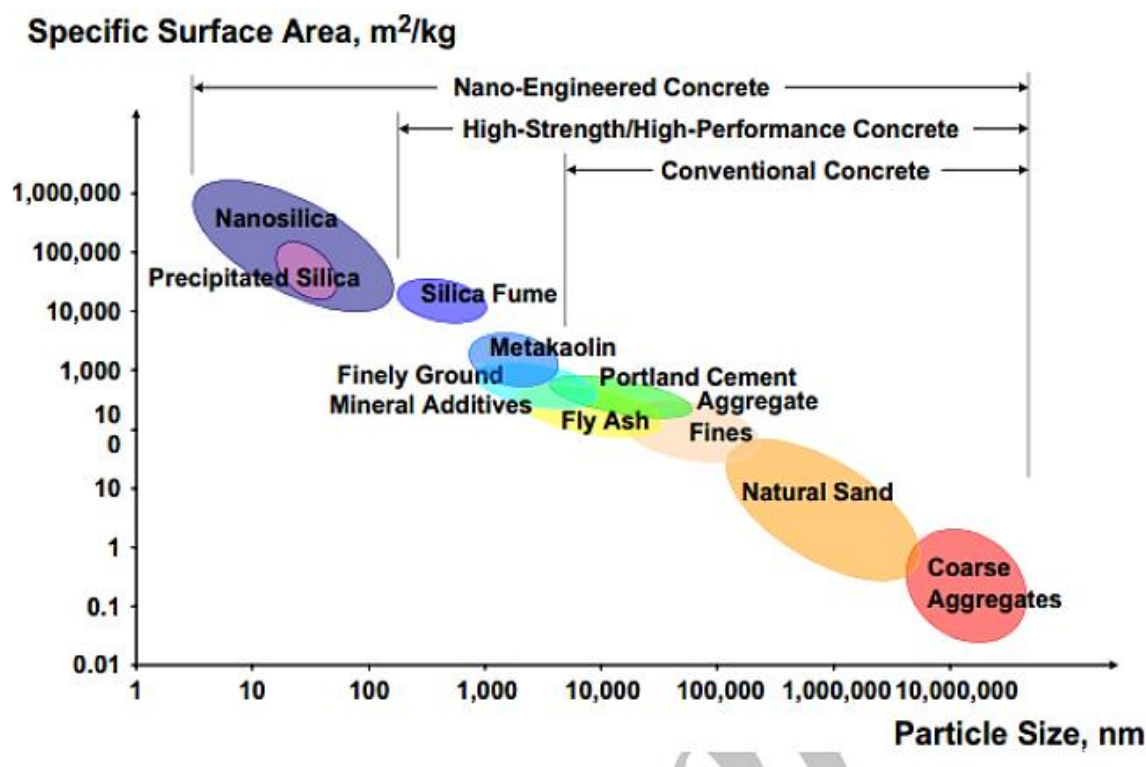
در صنعت سیمان به صورت پودر تولید میگردد که ابعاد آن عموماً در حد میلیمتر و میکرون هستند. اخیراً دو روش برای تولید سیمان در ابعاد نانو پیشنهاد شده است ۱- آسیاب کردن ذرات سیمان (در این روش از خرد کردن ماده اصلی، ترکیبات نانو ساخته میشوند). ۲- استفاده از ترکیبات شیمیایی (در این روش با استفاده از واکنشهای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



شکل (۱-۱۷) حرکت به سوی بتنی مقاوم با استفاده از نانوتکنولوژی [۲۲]

۱-۶-۱- چالش های نانو تکنولوژی در صنعت بتن

نانوتکنولوژی یک حوزه تحقیقاتی وسیع و پویا در سراسر جهان می باشد که این حوزه بعد از ابداع نانولوله های کربنی در زمینه های متعددی همچون الکترونیک، مهندسی پزشکی و کامپوزیتها کاربرد پیدا کرده است. اخیرا محققین مختلفی به استفاده از فناوری نانو در صنعت سیمان روی آورده اند. با استفاده از ذرات نانو در سیمان، و دستیابی به خواصی جدید، سیمان مذکور میتواند به عنوان یک ماده های با فناوری بالا، جایگزین سیمانهای رایج گردد. مانند بسیاری از تکنولوژی های نوین، نانو تکنولوژی نیاز به توجیه اقتصادی داشته ولی در حال حاضر به علت هزینه های 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 می باشد. معمولا این ذرات در حین اضافه شدن به بتن به توده های انباشته تبدیل شده و در مخلوط به خوبی توزیع نمیشوند. البته میتوان برای جبران این نقص از دستگاههای مخلوط کن قوی استفاده کرد. چون ذرات نانو سطح ویژه بزرگی دارند، این امکان وجود دارد که مقدار زیادی آب جذب نمایند و در نتیجه آن، تاثیر منفی بر کارایی بتن بگذارند [۲۳].



شکل (۱-۱۸) مقایسه اندازه ذرات با سطح ویژه در بتن [۲۴]

در ادامه به تاثیر استفاده از انواع نانوذرات بر پایداری و دوام سازه های بتنی پرداخته می شود.

• نانو لوله های کربنی

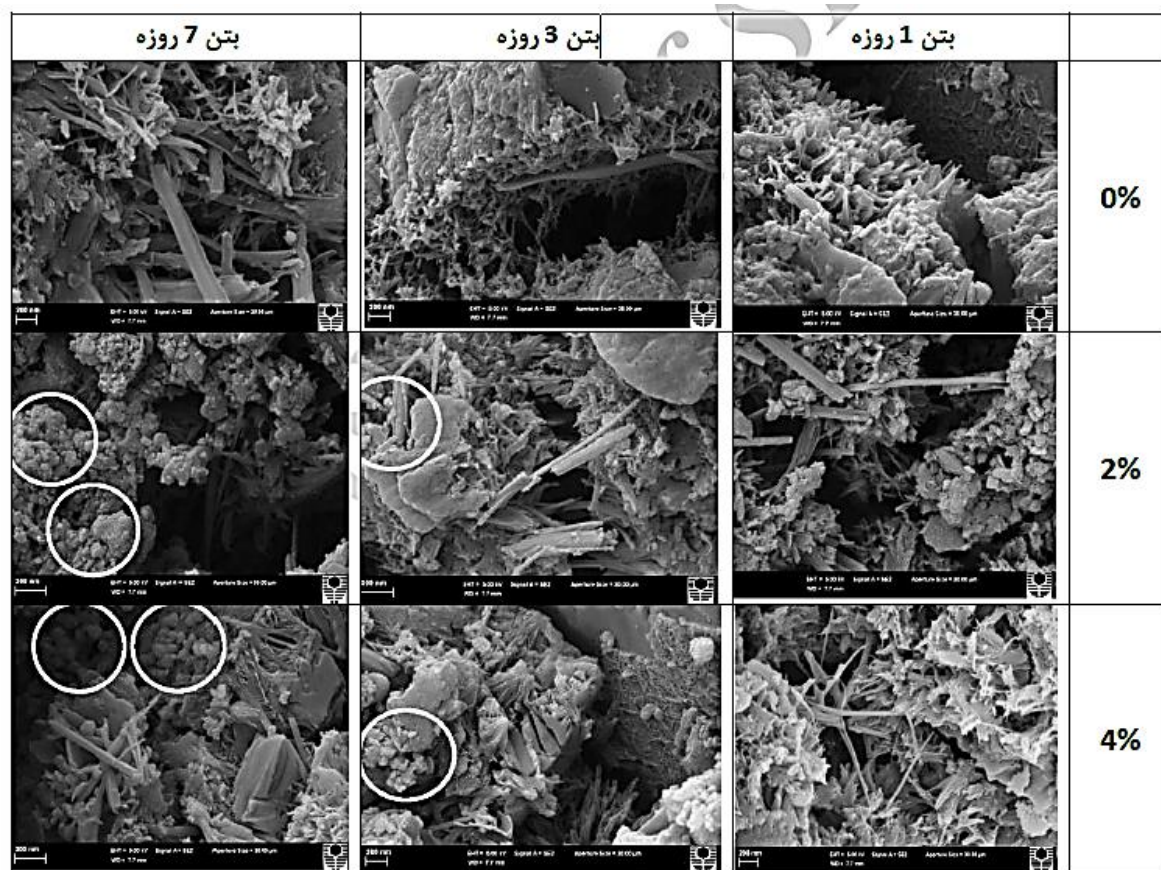
یک نوع از ذرات نانو که خواص قابل اشاره ای دارد نانولوله کربن است و در حال حاضر تحقیقاتی روی تاثیرات مثبت اضافه کردن CNT به بتن برای ایجاد بتن خود ترمیم شونده در دنیا در دست انجام است. اضافه کردن مقادیر کم CNT به سیمان، می تواند خواص مکانیکی نمونه هایی را که از دو فاز اصلی سیمان پرتلند و آب تشکیل شده، بهبود بخشد که یکی از این مهمترین خواص آن خود ترمیمی می باشد. نانو لوله های کربنی نوعی از کربن است که اولین بار در سال ۱۹۵۲ در روسیه کشف، ولی به دست فراموشی سپرده شد. این ماده مجدداً در سال ۱۹۹۰ در حلقه ی تکنولوژی نانو جایگاه ویژه ای پیدا کرد. نانوتیوب ها به فرم استوانه ای و به صورت تک جداره و چند جداره تا طول چند میلیمتر تولید می شوند.

مدول یانگ و نسبت تنش به کرنش، که مصرف مقاومت یک ماده در برابر تغییر شکل برای مواد مختلف از چند Gpa تا 600 Gpa برای سختترین مواد از قبیل الماس تغییر می کند. این کمیت برای نانولوله ها از ۰.۴ تا ۴.۱۵ تغییر می کند. با افزایش قطر نانولوله ها، مقدار کرنش کاهش یافته و مدول یانگ افزایش پیدا می کند. از آنجا که نانولوله های کربنی از کربن گرافیتی ساخته شده اند، مقاومت بسیار خوبی در برابر حملات شیمیایی داشته و نیز پایداری حرارتی خیلی خوبی دارند. نانولوله ها که از فلورین C60 ساخته می شوند می توانند با سیمان در حد نانو درآمیخته شوند و سیمانی با مقاومت بسیار بالا حاصل کنند. بنابراین سیمان حاوی نانولوله کربنی می تواند سیمانی هوشمند و فعال باشد بطوریکه خود را در راستای ترک خوردگی ترمیم نماید.

دسته شدن تیوب ها با هم و دیگری فقدان جاذبه مولکولی بین آنها و تنه اصلی از جمله مشکلات اضافه کردن نانوتیوب های کربن به هر ماده است. به عبارتی اتصال نانو لوله ها به یکدیگر به صورت رشته ای است و این عدم چسبندگی کافی بین آنها و بتن است که از جمله مشکلات این روش به شمار می رود [۲۴].

• نانوسیمان حاوی نانوذرات Al_2O_3

نتایج مختلف آزمایشگاهی نشان داده است که افزودن نانوذرات آلومینا به سیمان، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن را نسبت به سیمان معمولی افزایش می دهد. به طوریکه مدول الاستیسیته حاوی ۵٪ نانوالومینا در طول مدت ۲۸ روز به ۱۴۳٪ افزایش می یابد. همچنین نانوالومینا باعث افزایش مقاومت فشاری سیمان می شود به طوریکه بررسی ها نشان می دهد مقاومت فشاری بتن حاوی نانوالومینا تا ۳۰٪ نسبت به بتن پرتلند معمولی افزایش می یابد.



شکل (۱۹-۱) تاثیر افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن [۲۵]

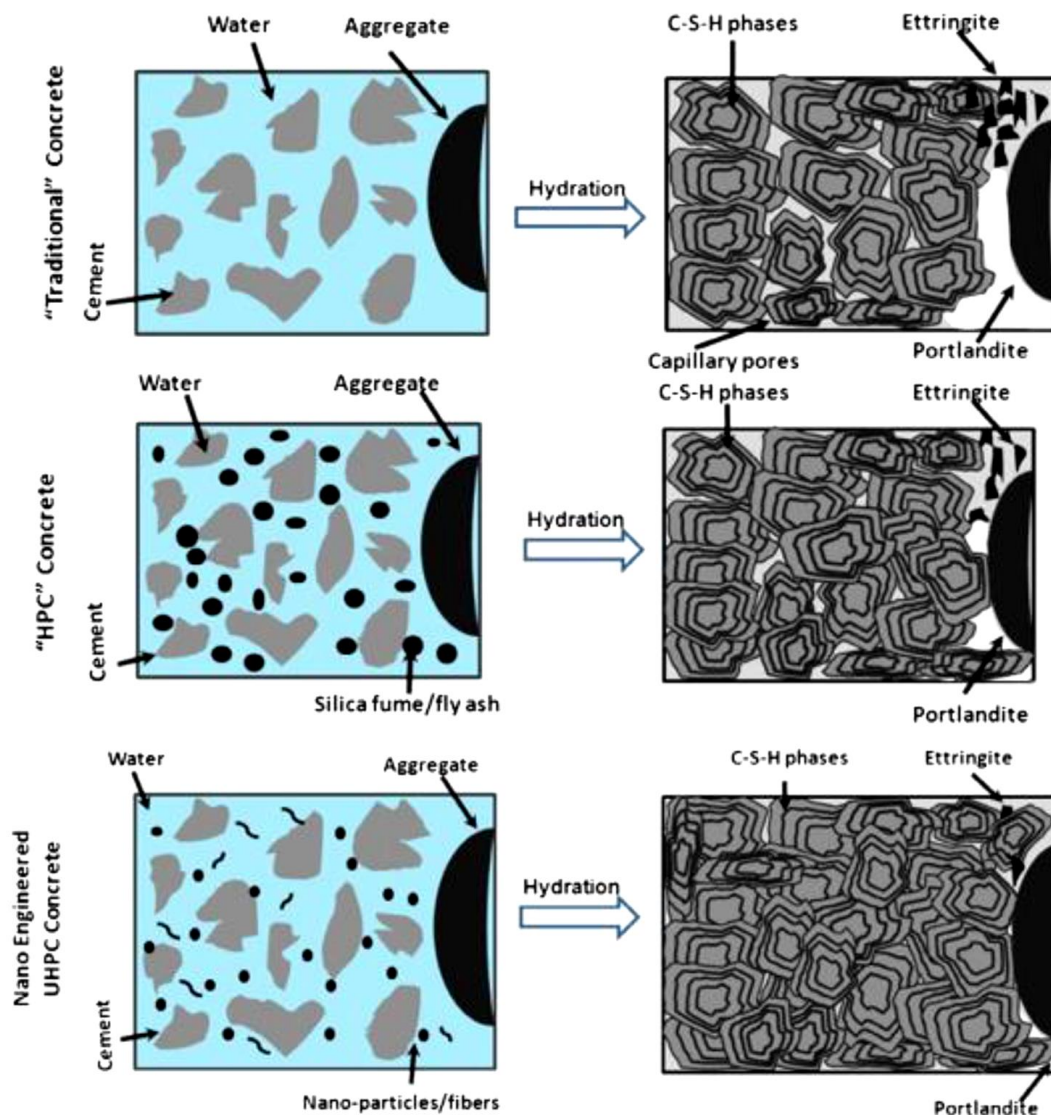
همانطور که در شکل مشاهده می شود افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن باعث تراکم ساختار بتن می گردد [۲۵].

• میکروسیلیس ها و نانو سیلیس ها

جهت بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن استفاده از میکروسیلیس ها در کشورهای پیشرفته رو به افزایش است، استفاده از میکروسیلیس ها در بتن دارای فواید بسیار زیادی میباشد که از آن جمله میتوان به: کاهش ترکهای ناشی از هیدراتاسیون سیمان، دوام بهتر در مقابل حمله سولفاتها، بارانهای اسیدی و دستیابی به مقاومت بالا اشاره کرد. از دیگر مزایای مصرف میکروسیلیس کاهش تحرک یونهای کلر و در نتیجه کاهش عمق نفوذ کلر در بتن بویژه در مناطق ساحلی میباشد. افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومتهای فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان گیرش بتن و کاهش نفوذ پذیری آب داخل بتن و نیز افزایش مقاومت بتن در برابر حملات عوامل شیمیایی است. همچنین افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن موجب کاهش زمان هیدراتاسیون و بالا رفتن پیک دمایی آن میگردد.

دو واکنش مکانیکی محتمل در هنگام هیدراتاسیون بتن در حضور ذرات نانوسیلیکا وجود دارد. هیدراتاسیون سیمان میتواند در حضور ذرات نانوسیلیکا شتاب پیدا کند. هنگامی که نانوسیلیکا به ذرات سیمان اضافه می گردد، H_2SiO_4 شکل

گرفته و با Ca^{2+} موجود شروع به واکنش می کند که موجب تشکیل کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-S-H) اضافی می گردد. سپس این ذرات ایجاد شد C-S-H درون آب بین ذرات سیمان پخش شده نقش منبعی را برای ایجاد فاز فشرده C-S-H ایفا می کنند. تشکیل فاز C-S-H به عنوان عاملی به پر کردن خلل و فرج های بتن کمک میکند. تشکیل تعداد زیادی از این ذرات موجب شتاب بخشیدن در زمان هیدراتاسیون بتن می گردد. همچنین بررسی ها نشان داده است که افزودن توام میکرو و نانو سیلیس در مقایسه با نانوسیلیس به تنهایی، مقاومت فشاری بتن را افزایش می دهد.



شکل (۱-۲۰) واکنش هیدراتاسیون در بتن سنتی، بتن با عملکرد بالا و بتن با تکنولوژی نانو ذرات [۲۲]

مخلوط بتنی که حاوی نانو ساختار فومد سیلیکا هستند به عنوان یک اصلاح کننده بزرگ در دوام ساختار بتنی در معرض نمک خورنده شناخته شده است. بطور کلی با افزودن فومد سیلیکا که نقش افزودنی در مقیاس نانو دارد بتن با دوام ساخته می شود اما اگر به مقدار زیاد افزوده شود بتن را ترد و شکننده می کند. سیلیس یکی از معروفترین موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پرکنندگی بتن با عملکرد بالا دارد. ذرات نانوسیلیس با اندازه کمتر از ۱۰ نانومتر به صورت خشک و مایع موجود هستند به طوری که محلول نانو سیلیس بیشترین کاربرد را در ساخت بتن خودتراکم دارد. ذرات نانوسیلیس دارای چگالی ۰.۱۵ g/cm³ و درجه خلوص ۹۹٪ خاصیت ضدسایش، ضدلغزش و ضدحریق دارند. نتایج بررسی ها نشان می دهد افزودن ۳ درصد نانوسیلیس به ملات سیمان باعث کاهش اندازه کریستال های کلسیم هیدرات می شود و این کریستال ها جمع تر شده حالت چین خوردگی پیدا می کنند و در نتیجه سطح مشترک مواد واکنش دهنده نسبت به سیمان های حاوی

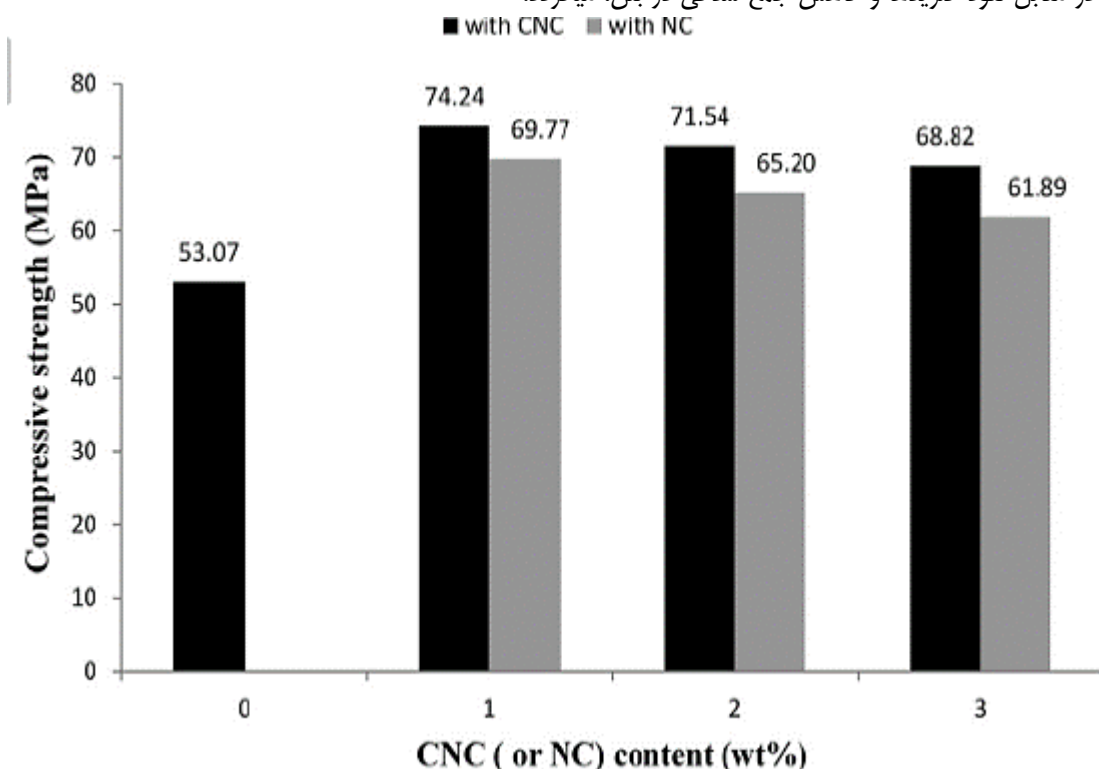
دوده سیلیس بیشتر و از مقاومت بالاتری برخوردار هستند [۲۲].

• نانوسیمان های حاوی نانوذرات Fe_2O_3

در ترکیبات اصلی سیمان تیپ یک با فرمول $CaOAl_2O_3Fe_2O_3$ که ۸ درصد سیمان پرتلند معمولی را این فرمول که حاوی ذرات آهن است را شامل می شود. هنگامی که مقدار نانوذرات آهن به سیمان افزوده می شود، مقاومت آن از سیمان معمولی بیشتر می شود. به طوری که با افزودن ۳ درصد ذرات نانواهن مقاومت نهایی آن در حدود ۲۸ درصد رشد پیدا می کند ولی بایستی متذکر شد که با افزایش ذرات نانواهن مقاومت کاهش می یابد و میزان مناسب آن برای هر طرح اختلاطی متغیر است. علت اصلی آن به دلیل خوب پخش نشدن در سطح سیمان و زیاد بودن ذرات در مناطق به صورت کلوخه است و باعث عدم همگنی بتن می شوند. در نتیجه در بتن خلل و فرج ایجاد می شود و کرموشدگی بتن از مقیاس نانو شروع می شود. بررسی ها نشان می دهد بهترین حالت مصرف افزودن نانوذرات آهن کمتر از ۱۰ درصد می باشد [۲۶].

• نانوسیمان حاوی نانومونتموریلونیت

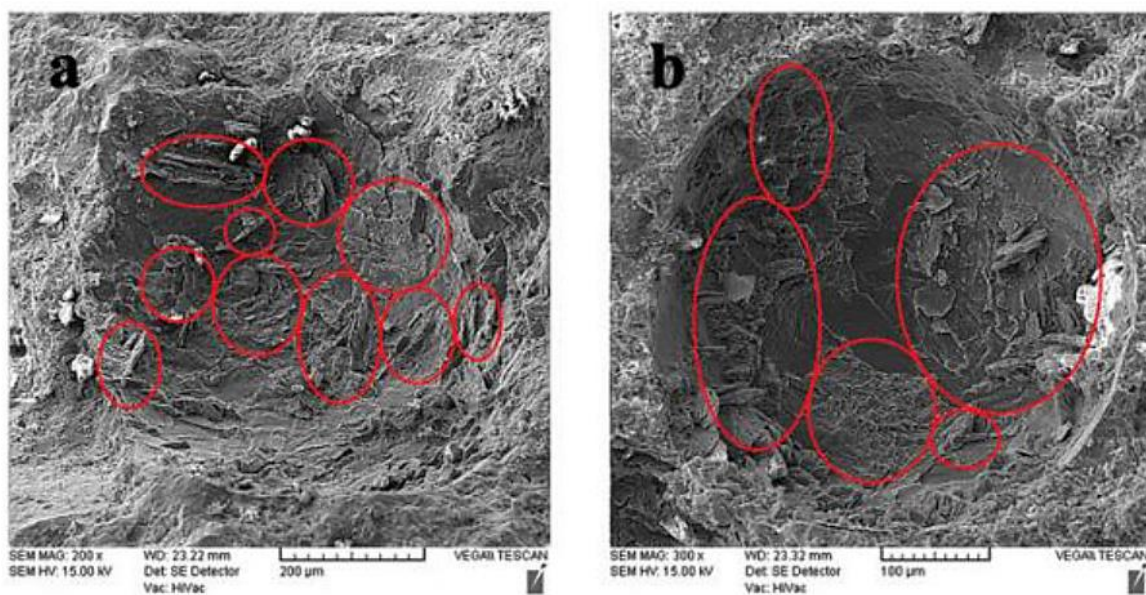
نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که افزودن نانومونتموریلونیت اصلاح شده به سیمان باعث کاهش نفوذپذیری سیمان تا ۱۰۰ مرتبه می شود. نانومونتموریلونیت با مواد آلی سیمان در آمیخته و با همگن و یکنواخت کردن سطوح سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری در حدود ۴۰ درصد و افزایش مقاومت خمشی در حدود ۱۵ درصد می شود. استفاده از ذرات نانو رس موجب بهبود رفتار بتن مثل، ایجاد بتن خود تراکم، افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذ پذیری، مقاومت در مقابل نفوذ کلریدها و کاهش جمع شدگی در بتن، میگردد.



شکل (۱-۲۱) مقایسه میزان مقاومت فشاری بتن در دو حالت سیمان نانوکامپوزیت (CN) و سیمان دارای نانوذرات رس (CNC) برای

درصدهای وزنی مختلف [۲۴]

در بین درصدهای ارایه شده از نانو ذرات رس، میزان یک درصد وزنی نانو ذرات رس بیشترین مقاومت فشاری بتن را دارا میباشد ولی با افزایش درصد وزنی نانو ذرات رس، مقاومت فشاری بتن، به تدریج کاهش می یابد [۲۷ و ۲۳].



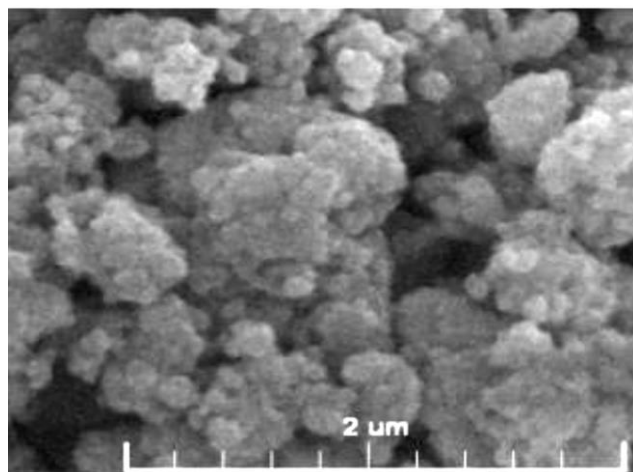
شکل (۱-۲۲) خاصیت پر کنندگی حفره در هنگام استفاده از نانو رس به میزان ۱ درصد وزنی [۲۷]

• نانوسیمان حاوی نانواکسیدروی

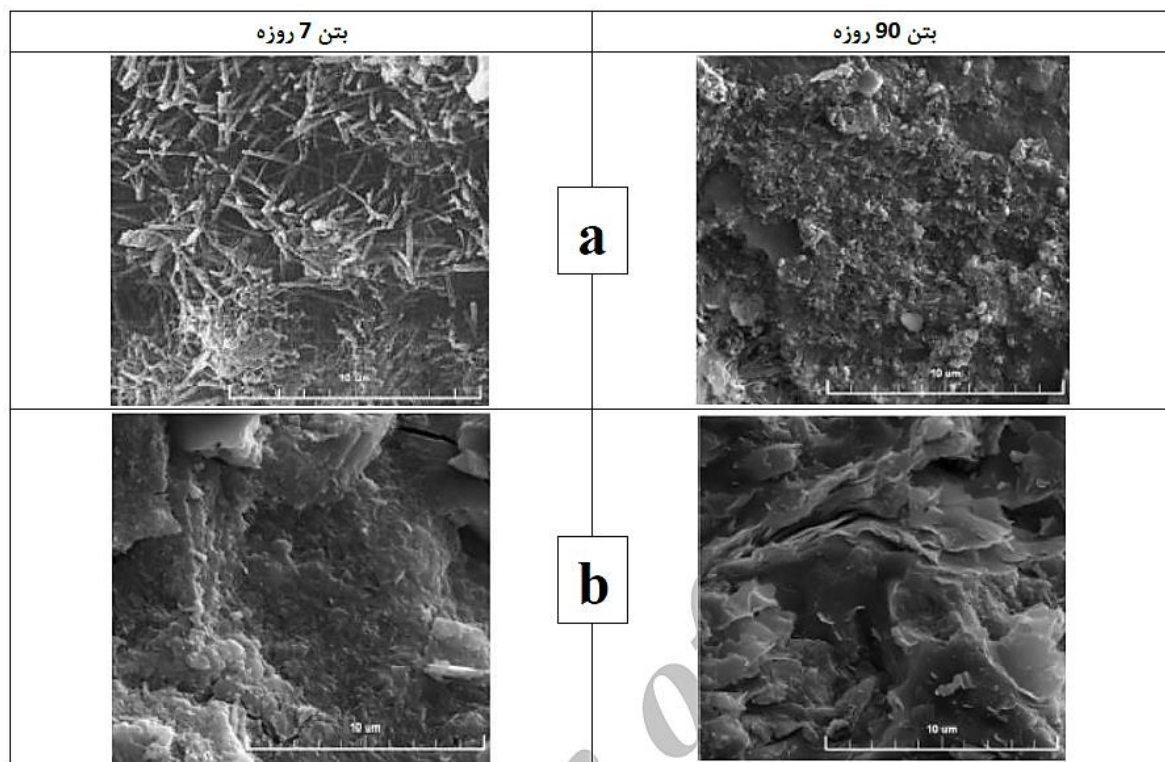
گروهی از نانو ذرات شامل اکسیدهای نیمه هادی است که در خانواده نانو مواد فوتوکاتالیستی قرار میگیرند. در این میان اکسیدهای نیمه هادی مانند TiO_2 ، Fe_2O_3 و ZnO قادرند به عنوان فوتوکاتالیست در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به کار گرفته شوند و بتوان از آنها به عنوان روشی نوین و کارآمد در محیطهای آلوده، بهرهبرداری و استفاده کرد. در این روش الکترونهای موجود در لایه ظرفیت نانو فوتوکاتالیست، تحت تابش نور فرابنفش برانگیخته شده و با گذر از باند انرژی به لایه هدایت انتقال می یابند. در نتیجه این برانگیختگی، جفت الکترون-حفره پدید می آید که قادر است طی یکسری واکنش اکسایش-کاهش، از طریق تولید گونه های اکسیژن فعال و رادیکال هیدروکسیل طیف وسیعی از آلاینده های آلی، باکتریها و قارچها را تخریب و تجزیه نماید. همانطور که پیشتر نیز بیان شد یکی از این اکسیدهای نیمه هادی نانو ذرات اکسیدروی است که دارای باند انرژی در حدود $3/2$ الکترون ولت است که قادر بوده بر اثر تابش فوتونهای نوری به راحتی دچار برانگیختگی الکترونی شود و سبب اضمحلال محدوده وسیعی از عوامل آلاینده گردد. بر همین اساس با توجه به آنکه مصالح پایه سیمانی سطح وسیعی از جوامع شهری از جمله تیرها و پایه های انتقال برق را در بر می گیرند، به نظر می رسد علاوه بر عملکرد محصورکنندگی نانو ذرات توسط ماتریس سیمان، بتوان از آن به عنوان پتانسیلی بالقوه در حذف آلودگیهای محیطی مانند NO_x بهره برد. بررسیهای صورت گرفته بر روی سطوح سیمانی حاوی نانو ذرات دی اکسیدتیتانیوم نشان می دهد، ابتدا گاز آلاینده NO_x در تماس با سطوح مذکور به اسید نیتریک تبدیل شده و سپس در اثر بارش باران شسته و یا در واکنش با ترکیبات قلیایی موجود در محیط سیمان خنثی میگردد [۲۸ و ۲۹].

• نانو اکسید تیتانیوم

تحقیقات ثابت کرده است که استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم علاوه بر خاصیت خود تمیزکنندگی بتن، باعث افزایش سرعت هیدراتاسیون و کاهش زمان گیرش بتن میگردد. همچنین استفاده از این نانو ذرات باعث افزایش مقاومت خمشی و مقاوت فشاری بتن میشود شکل تاثیر اضافه نمودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم به بتن خود تراکم را نشان میدهند. همانطور که مشخص است، با اضافه نمودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم، ریز ساختار بتن بهبود یافته و حفره های داخلی بتن کوچکتر میگردد. این امر موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن میگردد.

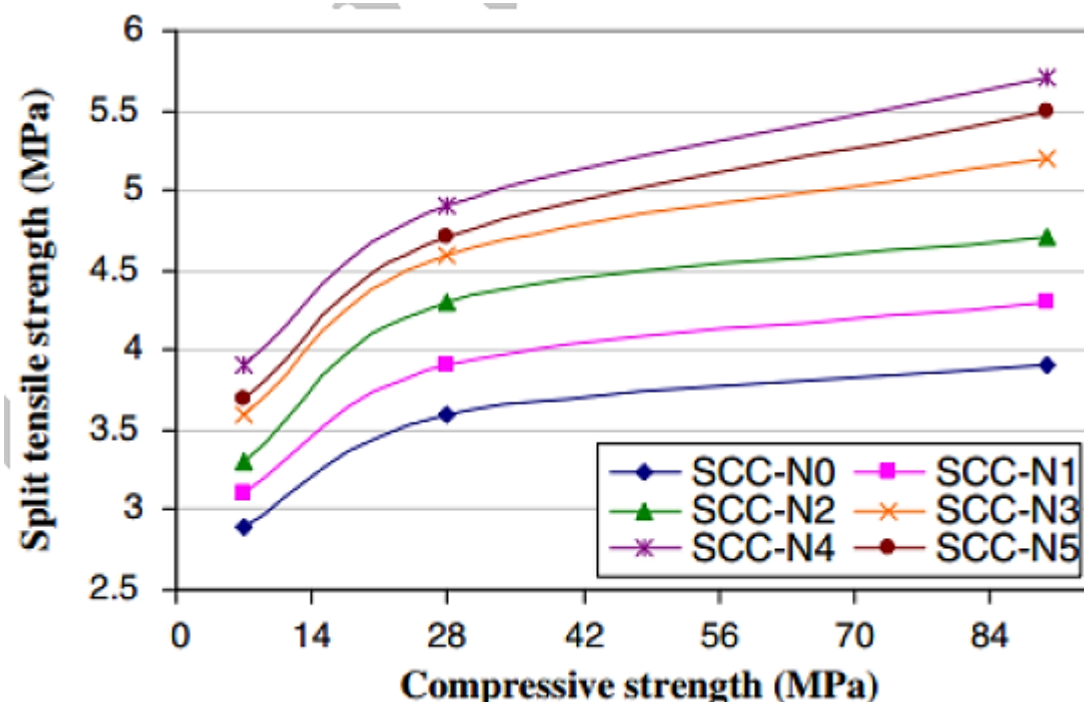


شکل (۲۳-۱) نمایی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم [۳۱]



شکل (۲۴-۱) مطالعه تاثیر افزودن درصدهای مختلف ذرات نانو اکسید تیتانیوم بر ساختار بتن خود تراکم، **A**: درصد وزنی صفر، **B**: درصد

وزنی چهار [۳۱]



شکل (۱-۲۵) تغییرات مقاومت فشاری نسبت مقاومت ترک خوردگی در حضور درصدهای متفاوتی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود

تراکم [۳۱]

بر اساس شکل رابطه بین تغییرات مقاومت ترک خوردگی بتن، با تغییرات مقاومت فشاری بتن را بر اساس درصدهای مختلف نانو ذرات اکسید تیتانیوم از صفر تا پنج درصد نشان می دهد که از آن نتیجه گیری می شود که با افزایش میزان درصد نانو ذرات اکسید تیتانیوم از صفر تا پنج درصد، در ابتدا میزان تنش ترک خوردگی، افزایش میابد ولی بعد از این مقدار افزایش، قدری کاسته میشود. اما در مورد تنشهای فشاری با تغییر درصد نانو ذرات اکسید تیتانیوم، در میزان تنش فشاری تغییری بوجود نمی آید [۳۰ و ۳۱].

به طور کلی با بکار بردن نانوذرات در بتن نتایج زیر حاصل می شود:

- با افزودن نانو ذرات رس به بتن خود تراکم، میزان مقاومت فشاری بتن افزایش، نفوذ پذیری آب در بتن کاهش و مقاومت بتن حاصله در بتن نفوذ کلریدها کاهش مییابد.
- با افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن خود تراکم، میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش، زمان گیرش بتن کاهش و نفوذ پذیری آب داخل بتن کاهش خواهد یافت.
- با اضافه کردن نانو ذرات اکسید آهن به بتن خود تراکم، مقاومت فشاری، خمشی و قابلیت خود ترمیمی بتن افزایش پیدا میکند.
- با کاربرد نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود تراکم، مقاومت فشاری و خمشی بتن افزایش، سرعت هیدراتاسیون افزایش و زمان گیرش بتن کاهش مییابد.
- با افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به بتن خود تراکم، مدول الاستیسیته بتن به میزان قابل توجهی افزایش یافته ولی بر روی مقاومت فشاری بتن اثری ندارد.
- با به کار بردن نانو لوله های کربنی و نانو الیافهای کربنی در بتن خود تراکم، مقاومت در برابر گسترش ترک در بتن بیشتر میگردد.

۷-۱- بررسی و شناسایی انواع گونه های زیستی ترمیم کننده بتن و شرایط بهینه رشد آنها

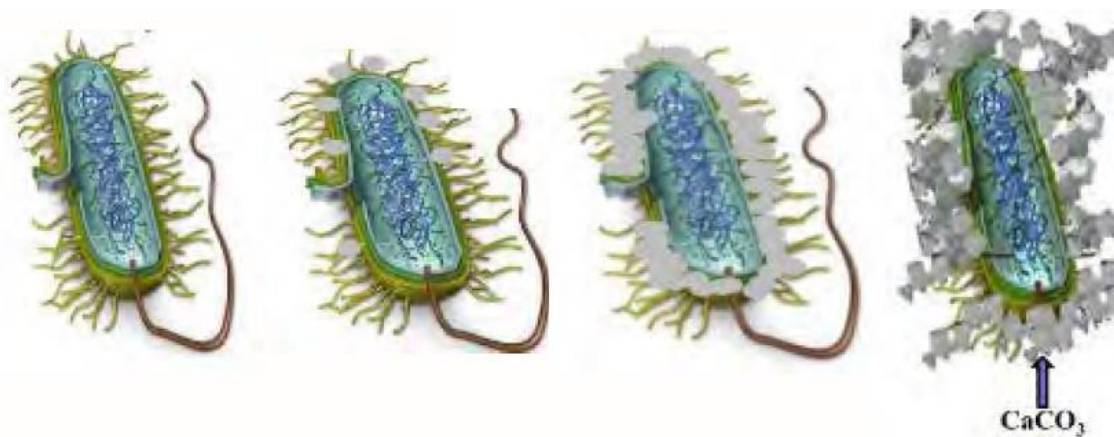
ایجاد ترک یک فرآیند شایع در بتن به دلیل مقاومت کششی ضعیف آن است. پایداری و دوام سازه های بتنی به دلیل

این ترک ها و به دنبال آن نفوذ آب و گاز به درون سازه ها کاهش می یابد. اگر این ترک ها توسعه پیدا کند و به آرماتورهای فولادی برسد، موجب خوردگی و کاهش شدید استحکام سازه می شود. روش های گوناگونی برای ترمیم ترک های بتن تا کنون استفاده شده است. اما هر کدام به دلایلی مانند اختلاف ضریب انبساط ماده ترمیمی و بتن یا خطرات زیست محیطی و ... دارای معایبی است. فناوری های نوین که بر پایه استفاده از رسوب مواد معدنی توسط باکتری ها است، به عنوان یک ساز و کار جدید در مقیاس آزمایشگاهی در حال بررسی و توسعه است. بتن باکتریایی بر اساس قابلیت رسوب دهی کلسیت توسط باکتری ها، طراحی و ساخته می شود. این پدیده رسوب کلسیت تحریک شده با باکتری به اختصار $MICP^1$ نامیده می شود. رسوبات کلسیم کربنات به عنوان درزگیر باکتریایی توانمندی بالایی را در پر کردن ترک ها و شکاف های ریز در گرانیات ها و سنگ ها و ماسه اثبات کرده اند. روش ترمیم ترک در بتن باکتریایی می تواند به عنوان جایگزین مناسب و دوست دار محیط زیست ارائه شود. این فن آوری در حال توسعه، یک روش هوشمند در فرآیند خودترمیمی بتن است.

۱-۷-۱- ترمیم بتن به روش زیستی و باکتریایی

با توجه به هزینه بر بودن روش های رایج ترمیم ترک سازه های بتنی و دشواری مضاعف استفاده از این روش ها در ساختمان های بلند بتنی، روش خودترمیم شونده بتن توسط باکتری های، یک روش هوشمند و پایدار زیستی، پیشنهاد می شود. سیمانی شدن زیستی پدیده ای طبیعی مشابه فرآیند هیدراتاسیون سیمان در بتن است. این فرآیند توسط گونه خاصی از باکتری های میله ای و بی ضرر ساکن در خاک، از خانواده باسیلوس در حضور اوره (منبع تغذیه) و کلسیم (پایه تولید کننده کلسیم کربنات) انجام می شود. رسوبات کربنات کلسیم باکتریایی، بسیار چسبنده است و با بتن سازگاری دارد. تولید کربنات کلسیم زیستی یک فرآیند شایع در میان موجودات زنده از باکتری ها گرفته تا مهره داران است. مانند سایر فرآیندهای زیست معدنی شدن، زیست معدنی شدن کلسیم کربنات می تواند با دو مکانیسم متفاوت انجام شود.

- ☐ معدنی شدن کنترل شده زیستی
- ☐ معدنی شدن القا شده زیستی



شکل (۱-۲۶) مراحل رسوب کلسیم کربنات بر روی پوسته باکتری از طریق هیدرولیز اوره [۳۲]

رسوبات کربنات کلسیم باکتریایی بر خلاف رسوبات کربنات کلسیم با آب آهک، بسیار چسبنده است و سازگاری بیشتری نیز با بتن دارد [۳۲ و ۱۷]. در مجموع بر فرآیند شیمیایی رسوب کربنات کلسیم چهارعامل کلیدی تاثیرگذار است.

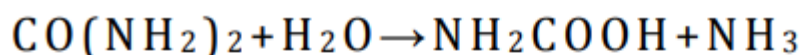
- ۱- غلظت کلسیم
- ۲- غلظت کربن معدنی حل شده (DIC)

۳- میزان قلیایی بودن محیط

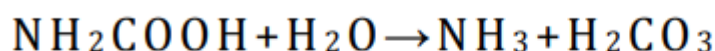
۴- در دسترس بودن مکان هایی برای جوانه زنی رسوب اولیه

سیمان زیستی در واکنشهای بیوشیمیایی پیچیده توسط دو آنزیم مهم، یعنی اوره آز و کربنیک انهدراز، شرکت میکند که توسط میکروبها تولید شده و از اوره به عنوان بستره و منبع کلسیم برای معدنی شدن بهره میگیرد. در طول فعالیت اوره آز، یک مول اوره مصرف شده تا یک مول آمونیاک و یک مول از کاربامات تشکیل شود (معادله ۱) که کاربامات با هیدرولیز خودبه خودی به شکل یک مول آمونیاک اضافی و کربنیک اسید در می آید (معادله ۲)، که به عنوان فعالیت اوره لیتیک شناخته شده است. این محصولات، بیکربنات و دومول آمونیوم و یونهای هیدروکسید را تشکیل میدهند (معادله های ۳ و ۴). پس از ایجاد تعادل در محیط آبی که موجب افزایش pH و درنهایت تعادل دورهای بیکربنات میشود، یونهای کربنات تولید می شود (معادله ۵). با توجه به افزایش pH در سلول، غلظت زیاد یون کلسیم و کم پروتون در خارج از سلول برای ترشح یونهای کربنات مورد نیاز است. شرایط pH بالا به نفع تشکیل CO_3^{2-} از HCO_3^- است. درنهایت، افزایش غلظت کربنات در سطح فوق اشباع منجر به افزایش رسوب کربنات کلسیم در اطراف سلول و در حضور یونهای کلسیم محلول میشود (معادله های ۶ و ۷).

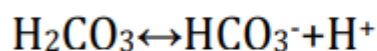
(۱)



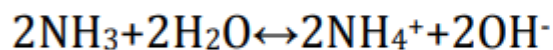
(۲)



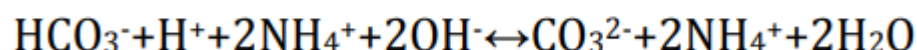
(۳)



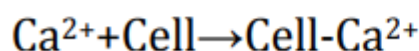
(۴)



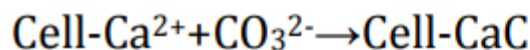
(۵)



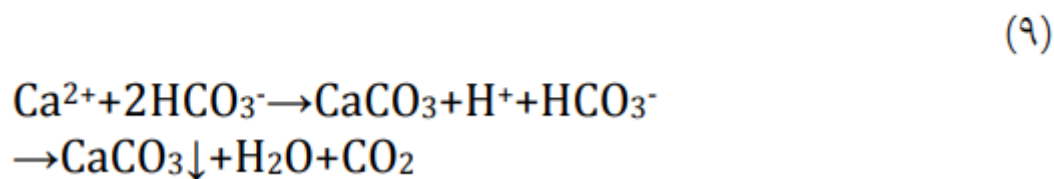
(۶)



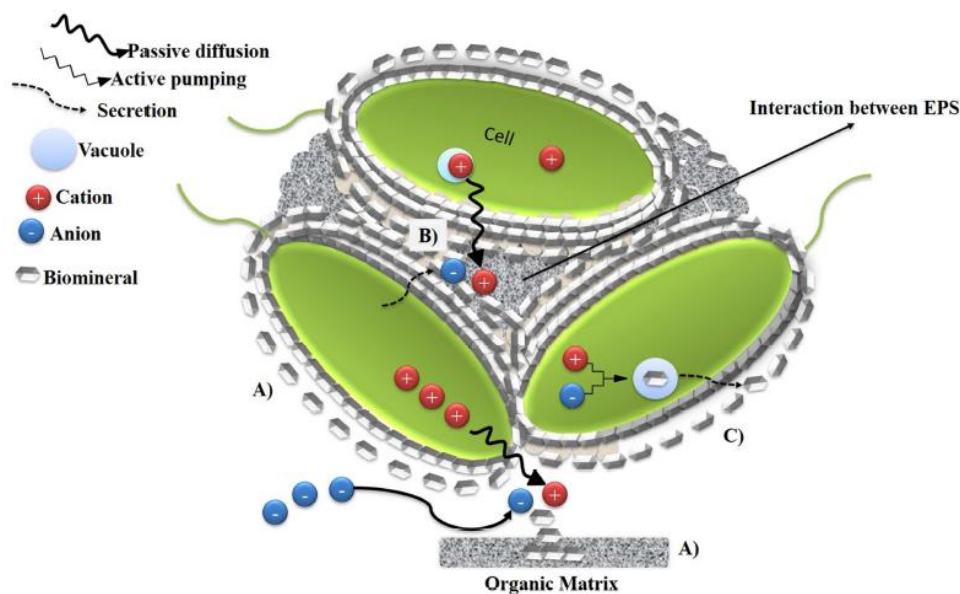
(۷)



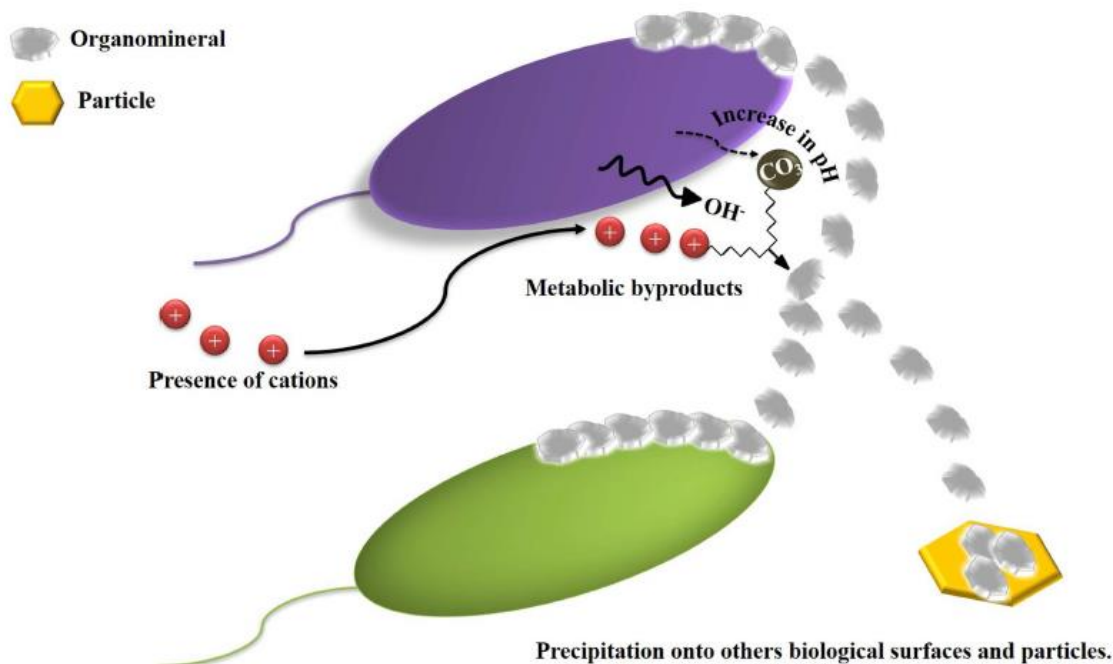
آنزیم دیگری که تبادل بین CO_3^{2-} و HCO_3^- را تسهیل کرده و رسوب کربنات را شدت میبخشد کربنیک انهدراز است. این آنزیم نقش مهمی در تعیین غلظت CO_2 بازی میکند. اگر HCO_3^- منبع کربن غیرآلی محلول باشد، کربنیک انهدراز ممکن است تبدیل آن به CO_2 را کاتالیز کند، و معادله واکنش کلی به صورت زیر است [۳۳].



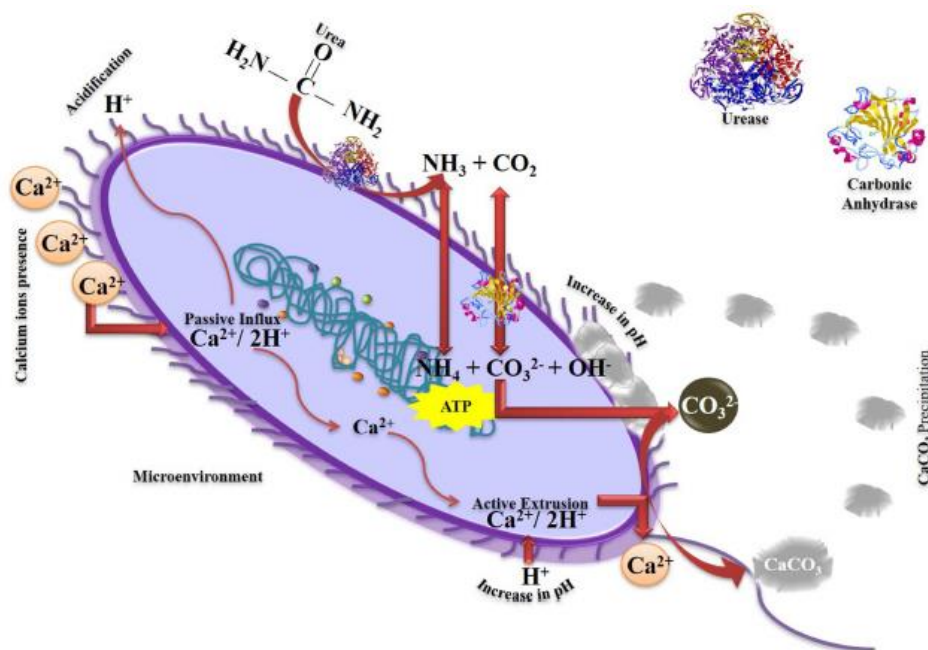
به طور خلاصه، فرآیند تولید سیمان زیستی بستگی به شش عامل کلیدی شامل فعالیت آنزیم اوره آز، کربنیک آنهیدراز، غلظت کلسیم، غلظت کربن محلول غیرآلی، pH و در دسترس بودن مکانهای هسته ای (آغازگر) دارد. در اشکال شماتیک زیر انواع ترسیب کربنات کلسیم میکروبی نشان داده شده است.



شکل (۱-۲۷) شماتیکی از رسوب کربنات کلسیم به روش مینرالیزه شدن هسته ای و انتقال غیرفعال کاتیونها در ماتریکس آلی میکروب [۳۴]



شکل (۱-۲۸) شماتیکی از ترسیب کربنات کلسیم توسط محصولات فرعی تولید شده توسط باکتری و ترکیبات معدنی موجود در محیط [۳۴]



شکل (۱-۲۹) شماتیکی از تشکیل رسوبات کربنات کلسیم با دو مسیر متفاوت توسط آنزیم های اوره آز و کربنیک انهدراز [۳۴]

۷-۱-۲- انواع باکتری های استفاده شده در بازسازی بتن

انواع باکتری هایی که تاکنون در زمینه کاربرد آنها در بتن باکتریایی تحقیق شده، شامل باسیلوس پاستور ی، باسیلوس اسفریکوس، اشیریشیا کلی، باسیلوس سوبتیلیس هستند. از این باکتری ها، در ساخت بتن باکتریایی استفاده شده است. اکثر آنها در فرآیندی که تولید رسوبات کلسیتی می کنند وارد شده و باعث بهبود خواص بتن می شوند [۳۵].

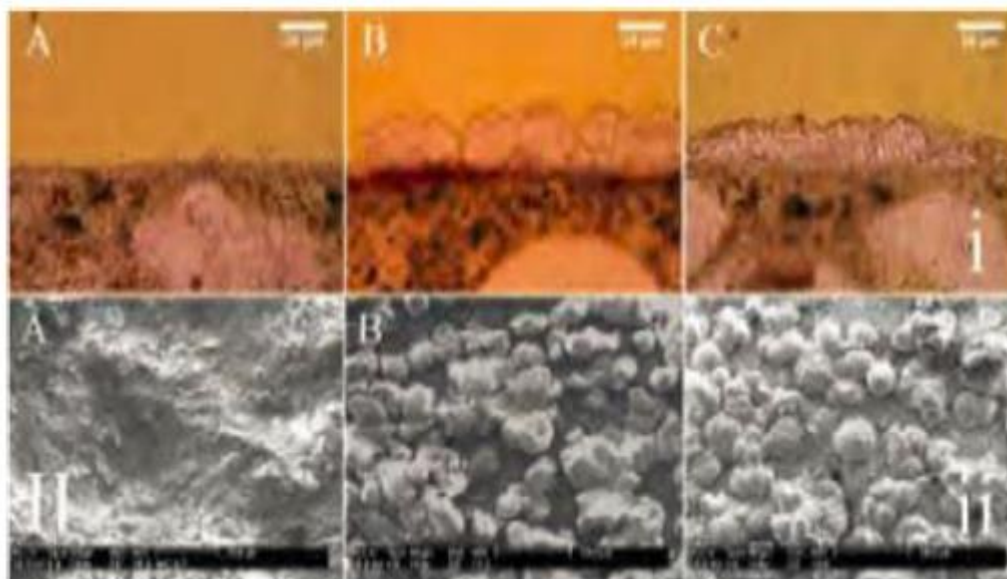
در جدول زیر برخی از میکروارگانیسم های دخیل در فرآیند رسوبی کربنات کلسیم و مسیرهای متابولیکی آنها آورده شده است.

جدول (۱-۱) میکروارگانیسم های دخیل در فرآیند رسوبی کربنات کلسیم و مسیرهای متابولیکی آنها [۳۶]

TABLE 1 Reactions and by-products involved in different metabolic pathways leading to MCP.				
Microbial groups	Metabolism	Reference	Reactions	By-product
Cyanobacteria Algae	Photosynthesis	Baumgartner et al. (2006)	$2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 + \text{O}_2$	O_2 CH_2O
Ureolytic bacteria	Ureolysis	Achal and Mukherjee (2015)	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+} + \text{Cell} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{Cell-CaCO}_3$	NH_4^+
Nitrate-reducing bacteria	Denitrification	Erkan et al. (2015b)	$\text{CH}_3\text{COO}^- + 2.6\text{H}^+ + 1.6\text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{CO}_2 + 0.8\text{N}_2 + 2.8\text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2(\text{aq}) + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}$	Complete reaction: $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ Incomplete reaction: $\text{NO} + \text{N}_2\text{O}$
Myxobacteria	Ammonification	González-Muñoz et al. (2010)	–	NH_3
Sulfate reduction bacteria	Sulfate reduction	Baumgartner et al. (2006)	$\text{SO}_4^{2-} + 2[\text{CH}_2\text{O}] + \text{OH}^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{HS}^-$	CO_2 HS^-
Methanogens	Methane oxidation	Reeburgh (2007)	Anaerobic oxidation: $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$ Aerobic oxidation: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	H_2S

۳-۷-۱- مقایسه بتن باکتریایی با روشهای رایج ترمیم ترک

با ایجاد ترک در بتن، باقیمانده سیمان واکنش نداده، هیدراته شده و هیدروکسید کلسیم تولید می کند. این هیدروکسید کلسیم با کربن دی اکسید محلول در آب و گاز نفوذ کرده به بتن واکنش داده و رسوب کربنات کلسیم تولید میکند. با ادامه فرآیند، این هیدروکسید کلسیم از درون بتن از طریق ترک به بیرون تراوش نموده و رسوب کربنات کلسیم تولید می کند. اگر ترک ها ریز باشند بتن می تواند خود را ترمیم کند. در صورتی که ابعاد ترکها از حد مشخصی بزرگتر باشد، دیگر بتن توانایی ترمیم خود را ندارد و هیدروکسید کلسیم ارزشمند که مشخصه منحصربه فرد بتن است به درون آب نفوذ میکند و با کاهش قلیایی بتن خواص آن از دست میرود. در صورت وجود آرماتورهای فولادی در بتن، این آرماتورها به وسیله قلیایی بتن محافظت میشوند. با کاهش قلیایی بتن این حفاظت از بین رفته و آرماتورها دچار خوردگی می شوند. خوردگی آرماتورها با افزایش حجم همراه بوده و این خود موجب ایجاد ترکهای جدید در بتن و تخریب شدیدتر آن میشود. وجود باکتر یها و ایجاد کربنات کلسیم به دلیل این که این رسوب در داخل ترک ها ایجاد شده و کلسیم موجود در قلیایی بتن را مصرف. نمیکند، بسیار ارزشمند و کارآمد است. در این فرآیند لاکتات کلسیم یا سایر منابع کلسیم در حضور اکسیژن توسط باکتریها به کلسیم کربنات تبدیل میشود. لاکتات کلسیم به عنوان منبع تغذیه باکتری به بتن اضافه میشود. کربن دی اکسید تولیدشده توسط باکتر یها نیز در فرآیند بستن مجدد ترک وارد می شود. کربن دی اکسید با ذرات سیمان واکنش داده و کربنات کلسیم در سطوح داخلی ترک تولید رسوب میکند که منجر به ترمیم ترک می شود. وجود این رسوب باعث تشدید و تقویت رسوب گذار ی کربنات کلسیم از طریق باکتر یها میشود. در برخی از تحقیقات از کلرید کلسیم به عنوان منبع کلسیم استفاده شده است. با توجه به طبیعت مخرب یون کلر برای دوام و پایداری آرماتورهای فولادی در محیط بتن انتخاب مواد جایگزین نظیر استات کلسیم نیز مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین به نظر محققین با توجه به این موضوع و سازگاری بهتر استات کلسیم با محیط بتن و آرماتورهای فولادی بهتر است از استات کلسیم به عنوان منبع کلسیم در بتن استفاده شود.



شکل (۱-۳۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی مقاطع نمایش دهنده لایه های کریستال های کربنات روی نمونه تیمار شده با باکتری و

کلرید کلسیم (B)، با باکتری و استات کلسیم (C) و نمونه تیمار نشده (37) [A]

ذکر این نکته لازم است که باکتری ها در شرایط قلیایی بتن نمی توانند زنده بمانند و در حالتی که در برابر قلیای بتن محافظت نشده باشند، قادر به تولید رسوب کافی کربنات کلسیم برای ترمیم و بستن ترکها نیستند. جهت حل این مشکل در برخی از پژوهش های اخیر از پوشش های حفاظتی به منظور حفاظت باکتری ها در برابر شرایط قلیایی بتن استفاده شده است. به طوری که در یکی از تحقیقات انجام شده، باکتری های زنده درون پوشش سلیکاژل قرار گرفته و ترمیم ترک با تشکیل رسوبات کربنات کلسیم با کارایی بیشتری در مقایسه با باکتری های بدون پوشش صورت گرفته و میزان نفوذ آب به بمانند و از بین می روند. در یک تحقیق برای حل این مشکل از اسپور به جای میکروارگانیسم زنده استفاده شد. اسپورها زنده بوده اما به صورت سلول نهفته هستند و میتوانند در این حالت برای سالیان متمادی تا ۵۰ سال حتی در شرایط نامناسب به حیات خود ادامه دهند. این موضوع به دلیل دیواره های ضخیم خارجی آنها است. به منظور بررسی این که رسوب کربنات کلسیم توسط اسپور زنده انجام میشود از اسپور مرده اتوکلاوی نیز استفاده شده است. علاوه بر این به منظور بررسی این که آیا سلیکاژل نیز میتواند به صورت دائم باعث پایداری و ترمیم خودبه خود ترک شود یا نه آزمایشاتی با این ماده نیز انجام شد. علاوه بر سلیکاژل از فوم پلی یورتان نیز به عنوان پرکننده ترک استفاده شده است. این فوم علاوه بر نقش حفاظت اسپور در برابر محیط قلیایی بتن نقش پرکننده را نیز بر عهده دارد. سلیکاژل به عنوان ماده تثبیت کننده و نگهدارنده باکتری از لوله شیشه ای دو بخشی تشکیل شده است [۳۷].

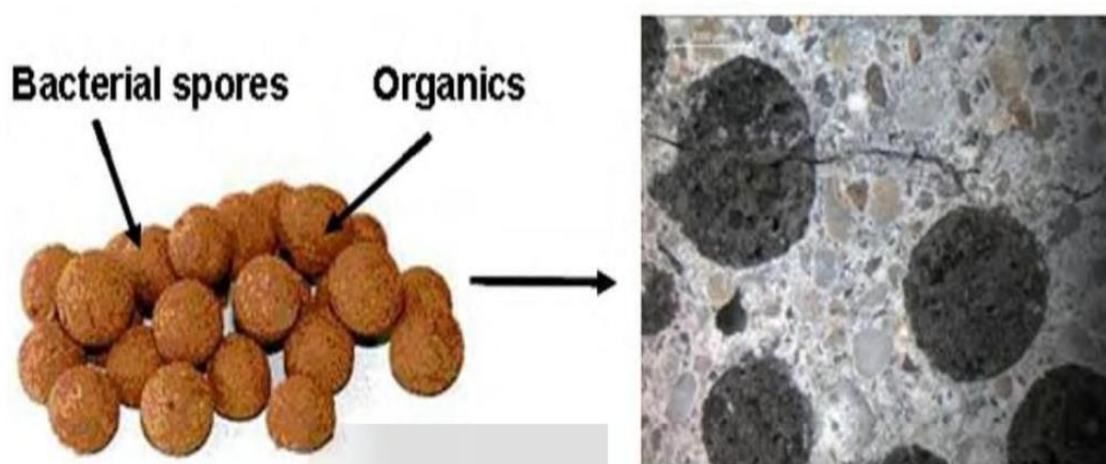
۴-۷-۱- پیشینه تحقیقات انجام شده در ترمیم بتن به کمک میکروارگانیسم ها

از لحاظ اقتصادی محدود کردن ترکها در سن ن اولیه، بسیار مقرون به صرفه تر از ترمیم آنها پس از گذشت زمان و بزرگتر و عمیق تر شدن ترکهاست. رسوبات کلسیم کربنات می توانند برای هدف خود ترمیمی بتن استفاده شوند. با استفاده از باکتریها می توان چنین رسوباتی را تولید و در ساخت بتن استفاده کرد. رسوبات ایجاد شده از باکتریها توانایی خود ترمیمی از عمق ترک تا سطح بتن را دارند. در اکثر تحقیقات صورت گرفته روی اثر خود ترمیم از خانواده های باکتری باسیلوس برای تولید کلسیم کربنات استفاده شده است. این خانواده از باکتریها با اوره، آمونیوم و دی اکسیدکربن تغذیه میشوند و کلسیم کربنات تولید می کنند. خود ترمیمی با استفاده از باکتری، ترکها را در سنین اولیه پوشش داده و با ساختار داخلی بتن سازگاری دارد. گولاپودی و همکاران (۱۹۹۵)، اولین کسانی بودند که به منظور جلوگیری از نفوذ آب و ترک خوردن دیواره ی تونلها و ستونها از باکتری استفاده کردند [۳۸]. دمیونک و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی وجود کلسیم کلرید به عنوان منبع غنی

کلسیم در کنار باکتری پرداختند. آنها نشان دادند حضور کلسیم کلرید، میزان رسوبگذاری کلسیم لاکتات بر روی سطح بتن را افزایش داده و در نتیجه سطح آب موینه و نفوذپذیری در برابر گازها کاهش می یابد [۳۹].

یانکرز و همکاران (۲۰۱۰) در هنگام ساخت بتن، محلول حاوی باکتری را به خمیر سیمان اضافه و از کلسیم لاکتات به عنوان منبع غنی کلسیم در کنار باکتری استفاده کردند. آنها پس از ۷ روز پوشش ۸۰-۲۰ میکرومتری و پس از ۲۸ روز، پوشش ۵-۲ میکرومتری کلسیم کربنات بر روی ترکها مشاهده کردند؛ همچنین نشان دادند باکتری به مدت ۴ ماه در بتن زنده مانده و به فعالیت خود ادامه می دهد [۴۰]. ون تیتلبون و همکاران (۲۰۱۰)، باکتری باسیلوس اسفاریکوس را برای هدف خود ترمیمی در بتن مناسب دانسته و نشان دادند که رسوبات تولید شده توسط این باکتریها تأثیر به سزایی در مقاومت فشاری بتن دارد. ون تیتلبون و همکاران به منظور محافظت از باکتری در برابر محیط خشک و قلیایی بتن از سیلیکا ژل استفاده کرده اند. آنها با ایجاد شیارهای مصنوعی بر روی سطح بتن، به این نتیجه رسیدند که در صورت محافظت از باکتری، میتوان ترکهای با عمق بیشتر را نیز، ترمیم سطحی نمود [۴۱].

ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ باکتری را در هیدروژل به صورت کپسول درآوردند. آنها با استفاده از آزمایش ترموگراویمتریک میزان رسوب کلسیم کربنات را اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد حداکثر عرض ترک ترمیم یافته در نمونه هایی که توسط میکروکپسولها حفاظت شده اند ۰.۵ میلیمتر است این در حالی است که در نمونه های حاوی باکتری، ماکسیمم عرض ترک ترمیم یافته، ۰.۳-۰.۵ میلیمتر است. همچنین در نمونه های حفاظت شده ۶۸ درصد کاهش جذب آب دیده شده این در حالی است که در نمونه های باکتریایی حفاظت نشده، درصد جذب آب ۵۵-۱۵ درصد است [۴۲]. باندر و همکاران برای محافظت از باکتری اسپوروسارسینا پاستوری در ملات، از یک مخلوط هوا دار بر پایه نمک آمونیا استفاده کردند. در این روش سلولهای باکتری با و بدون مواد مغذی مستقیماً به خمیر سیمان اضافه میشوند. نتایج نشان داد استفاده از حباب هوا بر روی ترسیب کلسیم کربنات اثری نمیگذارد؛ همچنین حضور باکتری اسپوروسارسینا پاستوری در ملات میتواند انقباض ترکها را کاهش داده و باعث بهبود میکرو ترکها در سنین اولیه شود [۴۳]. در یکی از تحقیقات انجام شده توسط یانکرز و همکاران (۲۰۱۱) [۱۷]، جهت حفاظت اسپورهای باکتری، آنها را به همراه مواد مغذی در داخل ذرات خاک رس با تخلخل بالا پیش از افزودن به مخلوط بتن قرار دادند.



شکل (۱-۳۱) مخلوط خود ترمیم حاوی ذرات خاک رس (تصویر چپ) همراه با اسپورهای باکتری و ماده لاکتات کلسیم (تصویر راست) نمونه

حاوی ذرات خاک رس توزیع شده در ساختار بتن [۱۷]

گروه تحقیقاتی دیک عوامل کلیدی موثر بر اجرای عملیاتی رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم از جمله روش تعیین پتانسیل زتا را بررسی کردند. پتانسیل زتا یک میزان از پتانسیل لایه الکتریکی سطح سلولی است و بنابراین یک عامل مهم در چسبندگی و جذب سطحی باکتریها میباشد. بدلیل پتانسیل زتای مثبت کربنات کلسیم و پتانسیل بالای زتای منفی باکتری

به راحتی این دو در کنار هم نگه داشته میشوند. فاکتور اساسی دیگر جهت ارزیابی نرخ فساد یا تجزیه اوره میباشد. باکتریها با قابلیت بالایی تجزیه اوره، قابلیت و کارایی بالایی در ترسیب رسوبات کربنات کلسیم دارند.

براساس نظر محققین مذکور اعمال عملیات رسوب بیولوژیکی یا باکتریایی باعث کاهش قابل ملاحظه جذب آب شده و لذا باعث افزایش مقاومت نمونه های بتنی به نفوذ دی اکسید کربن، کلر، یخ زدگی و آب شدن می شود. این موضوع در مورد نمونه های با تخلخل بالا یا نسبت آب به سیمان بالاتر بیشتر مشهود می باشد. علاوه بر آن نتایج مشابهی برای نمونه های حاوی باکتری با سایر روشهای محافظت سطحی مانند اعمال سیلان، سیلوکسان، سیلیکات و آکریلات بدست آمده که نشان دهنده کارایی مناسب این روش می باشد.

بر اساس تحقیقات انجام شده، سیمانی شدن زیستی منجر به تشکیل بتن در مقاومت فشاری بالاتر نسبت به بتن معمولی میشود. گوش و همکاران افزایش ۱۷ و ۲۶ درصدی را در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در ملات بیولوژیک جنس باکتری شوانلا اندازه گیری کردند [۴۴]. یانکر و اسکلوگن از باکتری اسپوروسارسینا پاستوری برای سیمانی شدن زیستی نمونه های بتن آرماتوربندی شده استفاده کردند که تفاوت معنی داری در مقاومت کششی بین نمونه شاهد (۷۸ نیوتن بر میلیمتر مربع) و نمونه های باکتریایی (۴۵.۷ نیوتن بر میلیمتر مربع) وجود نداشت در حالی که مقاومت فشاری تا حدودی بالاتر بود [۴۵]. همچنین محققین افزایش مقاومت فشاری تا میزان ۱۰٪ در بتن ۲۸ روزه با استفاده از کنسرسیون باسیلوس سودوفیرموس و باسیلوس کهنی بدست آوردند [۴۶]. هنگامی کپسول های باکتریایی به مواد سیمانی اضافه میشوند، آنها پس از کسب غذای خود از منافذ مواد سیمانی و اطراف آن شروع به رشد میکنند و کربنات کلسیم را در سطح سلول و همچنین در ماتریس ملات سیمان رسوب میدهند. هنگامی که منافذ در ماتریس بسته می شوند جریان انتقال مواد مغذی و اکسیژن به سلولهای باکتریایی محدود میشود. درنهایت، سلولها از بین رفته یا به حالت اندوسپور تبدیل میشوند و به عنوان الیاف آلی عمل میکنند. بنابراین، علاوه بر رسوب کربنات میکروبی افزایش نهایی مقاومت نهایی مقاومت در ماتریس ناشی از زیست توده میکروبی نیز است.

همانطور که پیشتر ذکر شد، یکی از پارامترهای اساسی برای توصیف دوام طولانی مدت بتن، مقاومت در برابر نفوذ آب است که تعیین کننده میزان نفوذ مواد خورنده مخرب در بتن می باشد. در سال ۱۹۹۳، کلیسای سنت مدارد در تهرارس با استفاده از کربنات کلسیم با منشا میکروبی بازسازی شد که جذب آب از سنگ پنج مرتبه بدون آن که تاثیری بر زیبایی ظاهر آن داشته باشد، کاهش یافت. دی موینک و همکاران کاهش ۶۵ تا ۹۰٪ در جذب آب در نمونه های ملات، به علت رسوب یک لایه از کلسیت در سطح گزارش نموده اند [۴۷]. حضور کریستالهای کربناتی و زیست توده در سطح و همچنین در داخل ماتریس متخلخل بتن منجر به کاهش نفوذپذیری میشود. نمک کلرید کلسیم که به عنوان منبع کلسیم در تولید سیمان زیستی استفاده میشود، حاوی یون کلرید است که امکان دارد باعث خوردگی در میلله های فولادی داخل سازه ها شود. برای جلوگیری از این معضل برخی از محققان جایگزین های کلرید کلسیم به عنوان منبع کلسیم را ارزیابی کرده اند. علاوه بر این، کلرید کلسیم منجر به تولید حجم انبوهی از آمونیاک میشود که خطر خوردگی آرماتور را افزایش میدهد. ژو و همکاران توانایی لاکتات کلسیم و گلوتامات کلسیم برای رسوب دادن کربنات کلسیم توسط باسیلوس کهنی را مقایسه کردند و مشاهده نمودند که ضخامت لایه رسوب یافته توسط گلوتامات کلسیم بیشتر از ضخامت لایه رسوب یافته توسط لاکتات کلسیم است [۴۸].

تاکنون مطالعه همه جانبه ای در زمینه سیمانی شدن از طریق رسوب میکروبی کلسیت در ایران صورت نگرفته است؛ البته استفاده از رسوب میکروبی کلسیت در مقیاس بزرگ در چندین کشور انجام شده و نتایج خوبی نیز گزارش شده است. از جمله در حفظ آثار باستانی در کلیسای سانتا ماریا دی آنجلی در ایتالیا، کاهش جریان آب زیرزمینی آلوده در انتاریوی جنوبی در کانادا، هم رسوبی فلزات سنگین (استرونتیوم - ۹۰) با کربنات کلسیم و با راهبرد تحریک زیستی رسوب میکروبی کلسیت در آزمایشگاه ملی ایداهو در آمریکا و به دنبال آن در کلرادو آمریکا و همچنین در هلند و اتریش به منظور انسداد زیستی و کاهش تراوش آب از سازه نگهدارنده آب از رسوب میکروبی کلسیت استفاده شده است.

۵-۷-۱ - انواع روش های خود ترمیمی

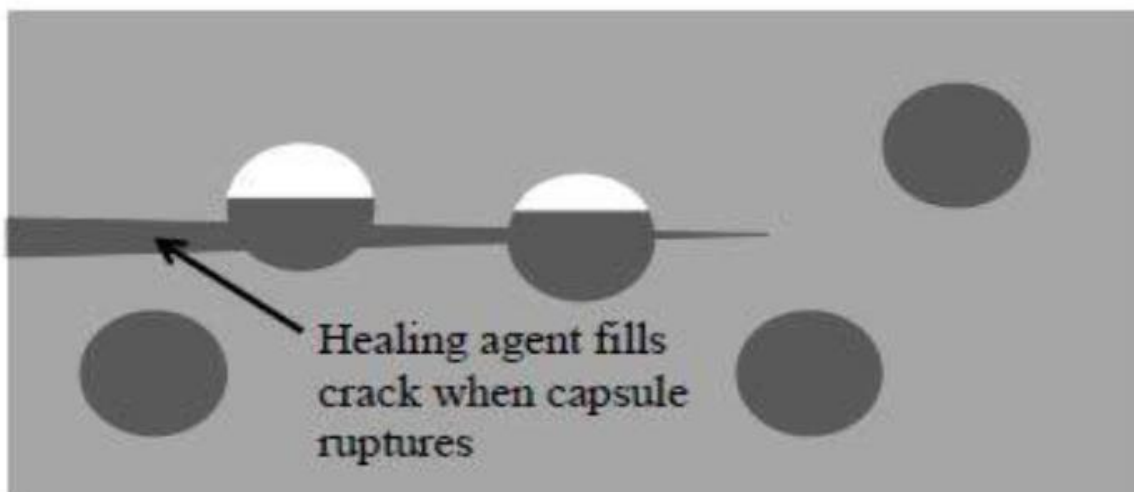
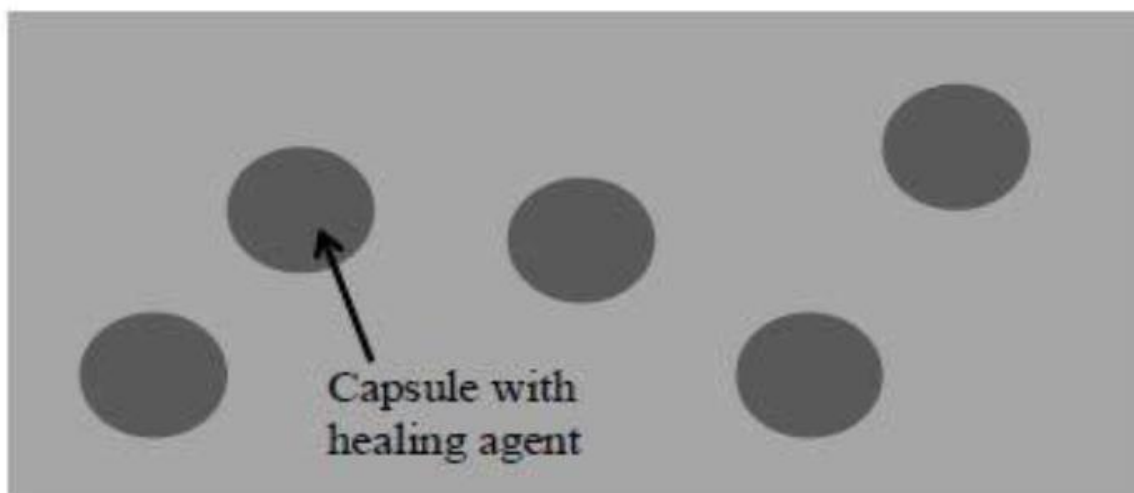
پنج نمونه از انواع روش های خود ترمیمی را می توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود [۴۹]:

- ☐ کپسوله کردن شیمیایی
- ☐ ترکیبات معدنی
- ☐ مواد شیمیایی درون لوله ایی
- ☐ کپسوله کردن باکتریایی
- ☐ ترمیم ذاتی با خود کنترلی عرض ترک

در ادامه به تشریح نحوه عملکرد این روشها پرداخته و مکانیزم این روشها به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

۱-۵-۷-۱ - روش کپسوله کردن شیمیایی

روش کپسوله کردن شیمیایی شامل تمام روشهایی است که مواد شیمیایی خود ترمیم را درون میکروکپسولها، مورد استفاده قرار می دهند. این میکرو کپسولها به صورت یکنواخت در سرتاسر بتن پخش می شوند و حاوی مواد شیمیایی ترمیمی هستند. موضوع مهم این است که جنس میکرو کپسولها به گونه ایی است که میتوانند تا زمانی که بتن ترک بر می دارد، مواد شیمیایی درون خود را در محفظه به صورت کاملاً ایزوله از بتن نگه دارند و بلافاصله در حین برخورد با ترک باز شده و این مواد شیمیایی ترمیمی را درون محیط آزاد کنند. این روش به دلیل اینکه می تواند انواع متنوعی از مواد شیمیایی ترمیمی را در اندازه های کمتر از میکرون کپسوله نماید جذاب و قابل توجه است.

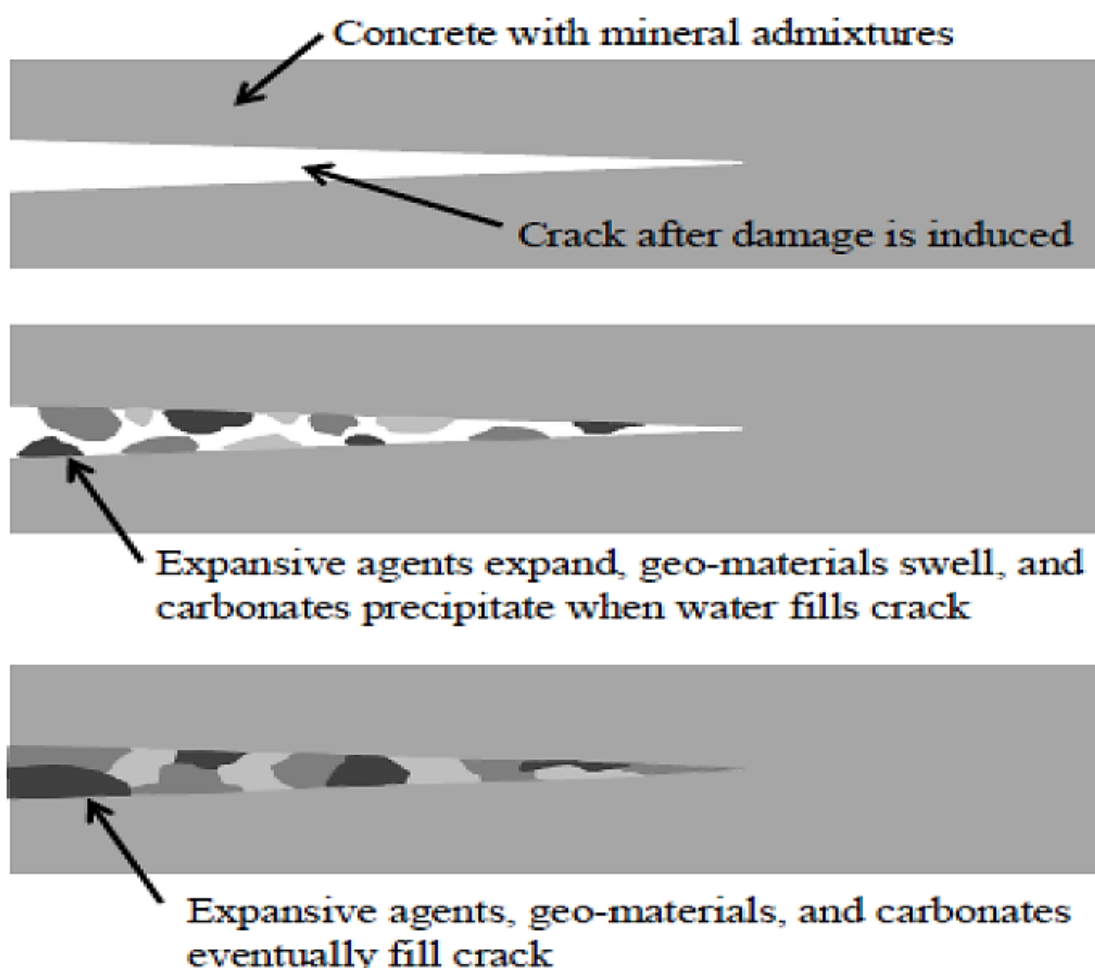


شکل (۱-۳۲) عملکرد کپسوله کردن شیمیایی برای خود ترمیمی [۵۰]

برای مثال هانگ و ای در سال ۲۰۱۱ محلول سیلیکات سدیم را در کپسولهایی به اندازه ۵ سانتیمتر جهت خود ترمیمی در یک ترکیب سیمانی کپسوله کردند که بهبود در خواص مکانیکی مانند سختی خمشی و مقاومت بتن را به همراه داشت [۵۰].

۲-۵-۷-۱- روش ترکیبات معدنی

روش ترکیبات معدنی به عنوان رویکردی برای آب بندی ترک های بتن براساس کاهش نفوذپذیری آب، بعد از ترک خوردگی توسعه یافته است. در این روش ترکیبی از مواد متورم شونده، مواد قابل انبساط و انواع مختلفی از کربناتها به کار برده می شود. زمانی که ترک پدید می آید و آب به درون آن نفوذ می کند، مواد قابل انبساط و متورم شونده ترک را پر می کنند و کربناتها نیز رسوب می کنند و سرانجام ترک کاملاً پر می شود.



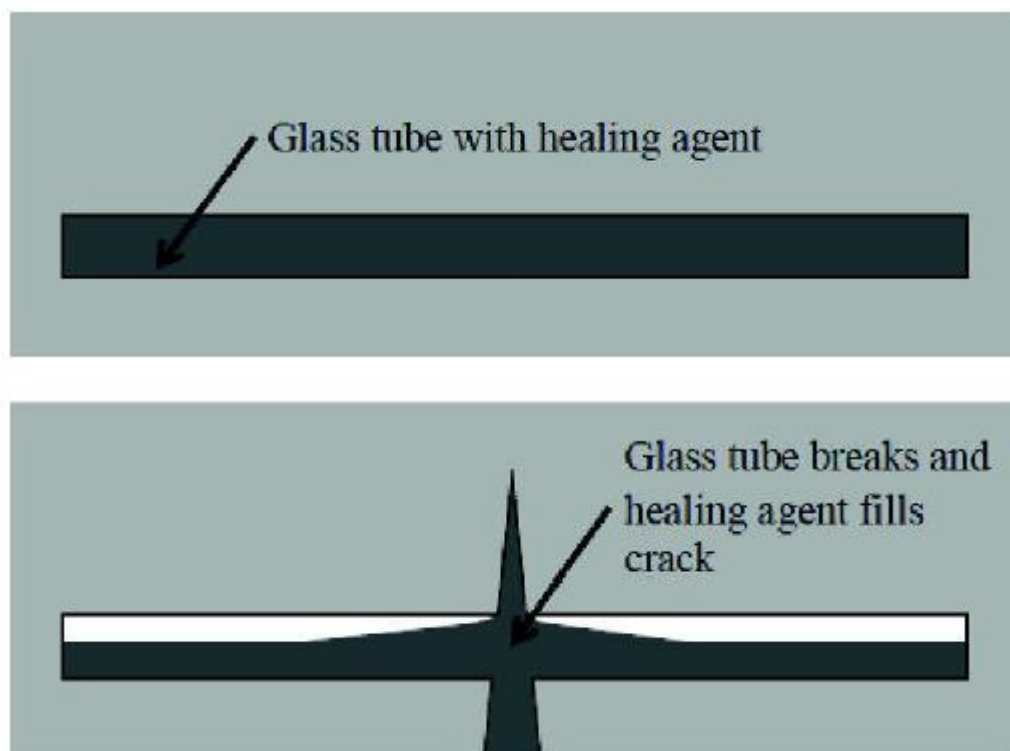
شکل (۱-۳۳) عملکرد ترکیبات معدنی برای خود ترمیمی [۵۱]

کیشی و همکارانش در سال ۲۰۰۷ تو آنستند یک ترکیب مناسب از عناصر قابل انبساط شامل C_4A_3S و $CaSO_4$ و CaO و مواد متورم شونده شامل دی اکسید سیلیکون و هیدروکسید سیلیکات آلومینیوم سدیم و رس مونت موریلونیت و انواع مختلفی از کربناتها را تشکیل دهند و عرض ترک های تا ۰.۲۲ میلیمتر را آبدی نمایند [۵۱].

۲-۵-۷-۳- مواد شیمیایی درون لوله ای

استفاده از لوله های حاوی مواد شیمیایی ترمیمی براساس سیستم هوشمند است. عملکرد این روش به این صورت است که فعالیت این مواد ترمیمی درون لوله زمانی آغاز می شود که بتن ترک می خورد و این ترک ها با لوله برخورد می کنند، در

نتیجه با رسیدن ترک به این لوله شکسته شده و مواد شیمیایی ترمیم کننده درون آزاد میگردند و ترک را پر می کنند و به این طریق ترکها در محل قرار گیری لوله مهار میشوند. این روش می تواند به عنوان یک گزینه دیگر در مقایسه با روش کپسوله کردن شیمیایی به کار رود، با این مزیت که قادر است حجم زیادی از مواد ترمیم کننده شیمیایی را در مقایسه با میکرو کپسولها حمل نماید. این مواد شیمیایی ترمیمی به گونه ایی انتخاب میشوند که دارای ویسکوزیته پایینی باشند تا بتوانند به راحتی از درون لوله شکسته شده به درون ترک نفوذ کنند و عمل ترمیم را انجام دهند. البته این مواد صرفاً شیمیایی نیستند و می توانند بیولوژیکی نیز باشند.

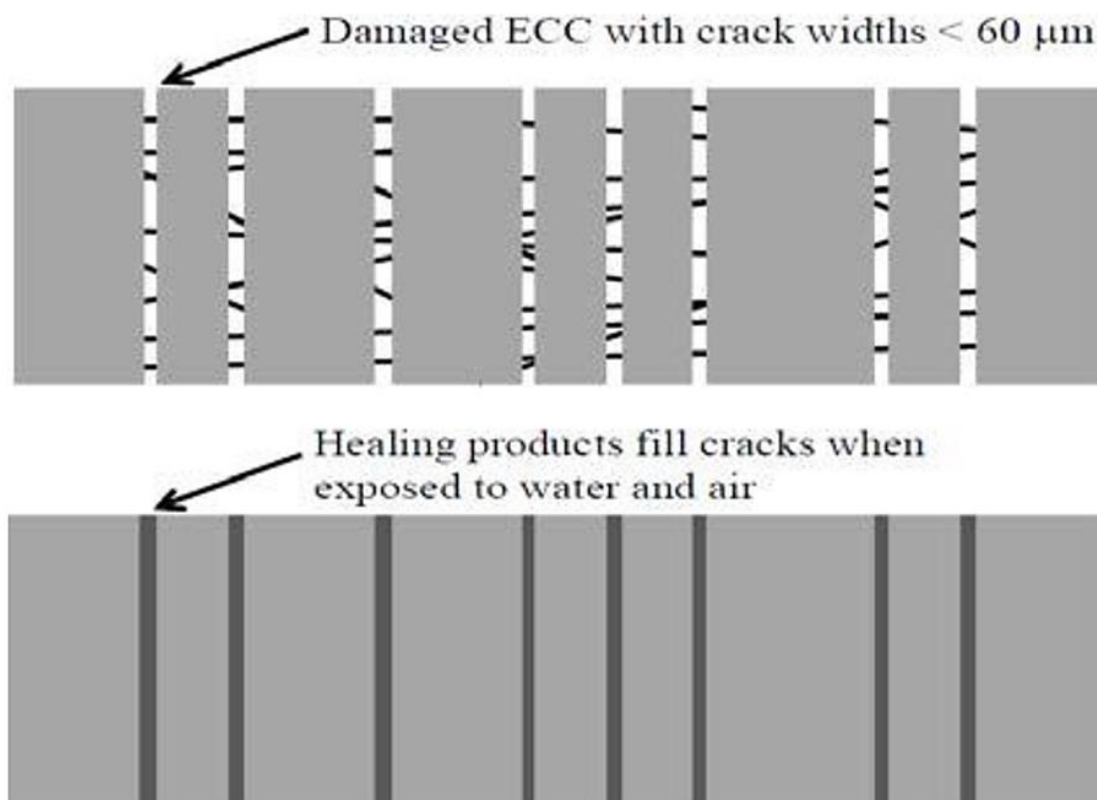


شکل (۱-۳۴) عملکرد مواد شیمیایی درون لوله ایی برای خود ترمیمی [۵۲]

ون تیتل بوم و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با استفاده از ترکیب شیمیایی پلی اورتان در درون این لوله ها ترمیم ترک و بهبود در خواص مکانیکی بتن را نشان دادند [۵۲].

یکی از ساده ترین روشهای ترمیم ترکها استفاده از این خاصیت ذاتی مواد سیمانی است که وقتی در معرض آب و دی اکسید کربن هوا قرار میگیرند تمایل به هیدراتاسیون و کربناته شدن دارند. علت کارکرد این روش وجود ذرات هیدراته نشده سیمان میباشد که در بتن باقی مانده اند و می توانند تحت شرایطی باعث ترمیم ترک بتن شوند. در بیشتر بتن ها به خصوص آنهایی که نسبت آب به سیمان کمی دارند ذرات هیدراته نشده وجود دارد. وقتی بتن ترک میخورد، سیمان در معرض آب و دی اکسید کربن هوا قرار گرفته و با آنها ترکیب می شود و رسوب کربنات کلسیم را تولید می کند و ترک پر می شود و این موضوع اساس بتن خود ترمیم است.

این روش تا زمانی می تواند کار کند که عرض ترک ها کمتر از ۱۰۰ میکرومتر باشد. در واقع در این روش با ترمیم ترک های ریز اجازه گسترش ترک و ایجاد شکاف های عمیق داده نمی شود. لی و همکارانش توانایی ترمیم شونده گی ترک را در کامپوزیت سیمانی مهندسی با عرض کمتر از ۶۰ میکرومتر نشان دادند [۵۳].



شکل (۱-۳۵) عملکرد خود ترمیمی در بتن (ECC) [۵۳]

۶-۷-۱- بررسی مواد کپسولی مناسب حاوی باکتریها و روش های سنتز و آماده سازی آن

یکی از عوامل مهم در ترمیم خودبخودی سازه های بتنی، دوام و پایداری آنها در شرایط طولانی مدت است. بنابراین زنده بودن باکتریها در بتن جهت روش خودترمیمی بسیار موثر است. افزودن عامل های زیستی به طور مستقیم به بتن بر بقاء آنها تاثیرگذار است. اسپور باکتریها بدون پوشش محافظ در شرایط قلیایی بتن تنها تا ۲ ماه ماندگاری دارد. همچنین شرایط میکس کردن بتن و هیدراتاسیون (به دلیل کاهش تخلخل و منافذ بتن) می تواند بقاء و ماندگاری اسپور باکتریها را با مشکل مواجه کند. از این رو یکی از راهکارهای غلبه بر این محدودیتها و افزایش ترسیب کربنات کلسیم جهت ترمیم بتن، کپسوله کردن باکتریها می باشد. تکنیک های متفاوتی جهت محافظت باکتریها به روش کپسوله کردن وجود دارد که شامل دیاتومه ها، سیلیکاژل و پلی یورتان در تیوپ های شیشه ای، میکروکپسول بر پایه ملامین و هیدروژل ها می باشند.

۱-۶-۷-۱- استفاده از میکروکپسول های پلیمری جهت کپسوله کردن میکروارگانیسم ها

در سال ۲۰۱۲ ونگ و همکاران از میکروکپسول های ملامین به منظور کپسوله کردن اسپورهای باسیلوس اسفریکوس استفاده کردند و کلسیم نیترات به عنوان ماده معدنی پیش ساز همراه با عصاره مخمر و اوره به مخلوط بتن اضافه گردید [۵۴].

در این بررسی میزان ترمیم باکتری ها به صورت نسبت ناحیه ترک ترمیم شده به ناحیه ترک اولیه اندازه گیری شد که حدود ۸۰ درصد در مقایسه با بدون استفاده از اسپور باکتریها (۵۰ درصد) گزارش گردید. بیشترین وسعت ترک ترمیم شده در این روش ۹۷۰ میکرومتر بود و میزان بهینه مقدار میکروکپسول ها در بتن ۳ درصد می باشد. نتایج نشان داده است که افزایش مقدار میکروکپسول های حاوی اسپور به میزان ۵ درصد و بالاتر منجر به کاهش مقاومت بتن می شود.

۷-۱-۲-۶- استفاده از مواد کپسولی ویژه جهت کپسوله کردن باکتریها

یکی دیگر از راهکارهای حفاظت باکتریها استفاده از هیدروژل ها است که محیطی مرطوب جهت رشد و فعالیت باکتریها

با حداقل مواد معدنی را فراهم می کند. بررسی ها نشان داده است که کپسوله کردن با هیدروژل ها، میزان ترمیم تا ۹۰ درصد افزایش و نفوذ آب تا مقدار ۶۸ درصد کاهش می یابد.

هیدروژل ها می توانند ۷۰ و ۳۰ درصد آب را پس از گذشت ۱۲ و ۲۴ ساعت با شرایط محیطی رطوبت ۶۰ درصد و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در خود نگه دارند که می توان نتیجه گرفت که این نوع میکروکپسول ها در مناطق حاره ای بسیار مفید و پرکاربرد می باشند. البته بایستی به این نکته توجه داشت که میزان نگهداری آب به نوع هیدروژل ها، یونی و غیر یونی بودن، بستگی دارد. هیدروژل های یونی معمولاً حساس به pH محیط هستند و میزان جذب آب تحت تاثیر مواد شیمیایی موجود در هوا قرار می گیرد. در مطالعاتی که در سال ۲۰۱۵ توسط ونگ و همکاران انجام شد از سدیم آلزینات بر پایه هیدروژل به عنوان حامل اسپورهای باکتریها استفاده گردید که با افزودن ۰.۵ تا ۱ درصد هیدروژل به بتن مقاومت فشاری و تنش بتن دچار اختلال نمی شود. اضافه کردن بیش از ۱ درصد هیدروژل به دلیل ایجاد حفره در بتن، استحکام آن کاهش می یابد [۵۵]. یکی دیگر از روش های کپسوله کردن باکتریها، استفاده از صفحات clay می باشد که در بررسی ها نشان داده شده است این تکنیک می تواند ترک های تا ۴۶۰ میکرومتر را ترمیم و پس از گذشت ۶ ماه توانایی زنده ماندن باکتریها تغییر نمی کند. همانطور که پیشتر ذکر شد، دیاتومه ها هم به دلیل ساختار متخلخل و غنی از ترکیب سیلیکا انتخاب مناسبی جهت تثبیت باکتری ها می باشند.

در جدول زیر گونه هایی از باکتری و نوع مواد کپسولی جهت ترمیم بتن آورده شده است [۵۶].

جدول (۱-۲) انواع گونه های باکتری دخیل در فرآیند خودترمیم زیستی و نوع ماده کپسولی آنها [۵۶]

Species of bacteria used	Encapsulated (Capsule material)	Directly added	Mechanism	Major findings	Reference
Spore forming bacteria (species not mentioned)		X	Not mentioned in the study	a) High early healing was observed by water curing b) Higher the cracking age, lower is the extent of healing	[13]
Bacillus		X	Decomposition of calcium source to precipitate carbonate	a) Calcium source affects healing ratio- calcium glutamate performs better than lactate b) Bacteria remained viable for 4 months	[14]
Bacillus cohnii	X (Clay aggregates)		Metabolic conversion of calcium lactate	a) Crack width of 0.15 mm with length 8 cm completely sealed b) No loss of viability up to 6 months	[3]
Bacillus Sphaericus	X (immobilized in PU and silica gel inside glass)		Ureolytic decomposition of calcium nitrate	a) PU immobilized bacteria specimens showed lowest permeability b) Higher bacteria activity in silica sol	[5]
Bacillus Sphaericus	X (Diatomaceous earth)		Ureolytic decomposition of calcium nitrate	c) Higher strength recovery in case of PU immobilization a) Highest reduction of water absorption was observed in bacteria containing specimen	[9]
Bacillus Sphaericus	X (Melamine based capsules)		Ureolytic decomposition of calcium nitrate	b) Dosage of DE must be carefully adjusted because it causes loss in concrete workability a) Crack healing ratio of 48% to 80%; highest crack width healed is 970 μ m	[4]
Bacillus Sphaericus	✓ (hydrogel) – one component (only bacteria) and two component (bacteria and nutrient) system		Ureolytic decomposition of calcium nitrate	b) Permeability recorded for bacteria specimen is about 10 times compared to control c) highest reduction in crack area in case of wet-dry cycle a) Maximum crack sealing of 500 μ m under wet-dry cycles	[10]
Bacillus Sphaericus	✓ (Sodium alginate based hydrogel)		Ureolytic decomposition of calcium nitrate	b) Permeability decrease of 68% for specimens containing hydrogel encapsulating both bacteria and nutrients together Bacterial activity was observed only for encapsulated samples at crack face measured by oxygen consumption	[17]
Bacillus Subtilis	✓ (Lightweight aggregates and graphite nano-platelets)		Decomposition of calcium lactate	a) Bacteria can be distributed uniformly in concrete when immobilized in graphite nano-platelets (GNP) due to fine particle size and uniform dispersion of GNP b) Bacteria immobilized in GNP showed high self-healing when samples were pre-cracked at early stages (3 day and 7 day) c) Lightweight aggregates are more effective when samples are pre-damaged at later stage (14 day and 28 day)	[20]

۷-۱-۷- شناسایی مواد ترمیمی مناسب به همراه باکتریهای ترمیم کننده به روش هیبریدی

به طور کلی به منظور افزایش کارایی روش خودترمیمی زیستی نیاز است که به همراه میکروارگانیسم های ترسیب دهنده کربنات کلسیم، سایر عوامل دخیل در فرآیند ترمیم از جمله نوع مواد کپسول و افزودنی های مناسب شناسایی و بررسی شوند. در ادامه برخی از عوامل به طور مختصر شرح داده خواهند شد.

۱-۷-۷-۱- نوع مواد کپسولی و افزودنی های موثر در ترمیم بتن

همانطور که پیشتر ذکر شد طیف وسیعی از مواد از جمله پلیمرها، شیشه، دیاتومه و صفحات رس می توانند به عنوان مواد کپسولی استفاده شوند. شیشه یکی از مواد رایجی است که به عنوان مواد کپسولی کاربرد دارد. در یکی از پژوهش ها، عوامل زیستی ترمیم کننده بتن در پلی یورتان و سیلیکاژل تثبیت شده و سپس در کپسول های شیشه ای کوچک قرار گرفتند. نوع مواد دیواره کپسولی هم یکی از مهمترین عوامل در ترمیم بتن به روش خودترمیمی زیستی است. لایه درونی دیواره کپسول بایستی با عوامل زیستی درون کپسول سازگاری داشته و دیواره بیرونی با ماتریکس بتن به خوبی باندینگ و پیوند برقرار کند. غلاف کپسول می تواند از موادی مانند پلی یورتان، اپوکسی، پلی اولفین و رزین سیلیکون که عمدتاً در آب نامحلول هستند باشد. نکته دیگری که باید به آن توجه داشت، عدم شکست میکرو و نانو کپسول ها در حین مخلوط کردن مواد بتن است. ونگ و همکاران از میکروکپسول بر پایه ملامین با سایز حدود ۵ میکرومتر استفاده کردند که پس از بررسی با میکروسکوپ نوری مشاهده کردند اغلب کپسول ها پس از انجام اختلاط بتن سالم ماندند. در یکی از پژوهش های انجام شده، کپسول های سیلندری شکل حاوی عوامل زیستی ترمیم کننده بتن را توسط چسب محلول در آب به یکدیگر متصل کردند و پس از مخلوط کردن مواد بتنی، چسب حل شده و کپسول ها به طور یکنواخت در ماتریکس پخش شدند. همچنین بررسی ها نشان داده است که افزودن لاکتات کلسیم به عنوان ماده پیش ساز باعث تسریع واکنش هیدراتاسیون شده در صورتی که میکروکپسول ها و عصاره مخمر به دلیل محصور کردن ذرات سیمان و عدم واکنش با آب، منجر به تاخیر در فرآیند هیدراتاسیون می شوند. بنابراین میزان افزودنی ها به مواد بتنی بایستی تحت کنترل و مشخص باشد. در جدول زیر برخی از مواد ترمیم کننده بتن به همراه عامل فعال کننده و مدت زمان عملکرد آنها آورده شده است [۵۶].

جدول (۱-۳) انواع مواد ترمیمی بتن و نوع روش تیمار آنها [۵۶]

عامل ترمیم کننده	روش تیمار	مدت زمان تیمار	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
سیانو آکریلات	رطوبت	در حد ثانیه	۲۰
اپوکسی	جزء تماسی	۴۰ دقیقه	۴۵
متیل متاآکریلات	گرما	-	-
	جزء تماسی	۳۰ دقیقه	۷۵-۵۰
پلی یورتان	رطوبت	۴۰-۱۸۰ دقیقه	-
پلی آکریلات	جزء تماسی	۴۰ ثانیه	-
محلول سیلیکات سدیم	ماتریکس هیدروکسید کلسیم	-	-
سیلیکای قلیایی	هوا	-	-
نترات کلسیم	ماتریکس	-	-

پلی یورتان و محلول باکتریایی	جزء تماسی	-	-
محلول باکتریایی	آب و اکسیژن	۱۰۰ روز	-

یکی از ویژگی های مهم در استفاده از عامل ترمیم کننده، ویسکوزیته می باشد که می بایستی در حد مناسب باشد زیرا اگر ویسکوزیته بالا باشد، عامل ترمیم کننده قادر نیست به خارج از کپسول ها جاری شود و ترک ها را پر کند. همچنین اگر ویسکوزیته از حد معینی پایین تر باشد توسط ماتریکس جذب شده و ترک ها را ترمیم نمی کند. براساس پژوهش های انجام شده بهتر است مقدار ویسکوزیته بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ سانتی پواز باشد. به طور مثال ویسکوزیته متیل متاآکریلات بسیار کمتر از سیانوآکریلات می باشد (۳۰ دقیقه در برابر چند ثانیه در زمان ترمیم و مدت تیمار) که جهت رفع این مشکل پلی متیل متاآکریلات اضافه می شود. همچنین عامل ترمیم کننده اپوکسی دارای ویسکوزیته بالایی است که می بایست یک ماده شیمیایی رقیق کننده همراه آن استفاده شود.

همچنین همانطور که پیشتر ذکر شد به منظور افزایش کارایی و ماندگاری عامل های ترمیم کننده بتن به ویژه در ترمیم زیستی، کپسوله کردن مواد یکی از مهمترین اقدامات می باشد. جهت کپسوله کردن عامل های ترمیم کننده می توان از سه نوع فرم کپسولی کروی، سیلندری و عروقی استفاده کرد. در جدول زیر انواع مواد کپسولی و محتویات آن جهت ترمیم بتن آورده شده است [۵۷].

جدول (۱-۴) انواع مواد کپسولی و محتویات آن جهت ترمیم بتن [۵۷]

مواد کپسولی	محتویات	قطر کپسول (میکرومتر)	ضخامت دیواره (میکرومتر)	طول کپسول (میلیمتر)
صفحات رس	Na_2FPO_3	۴۰۰۰	-	-
صفحات رس	باکتری	۴۰۰۰-۱۰۰۰	-	-
صفحات رس	$\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$	۱۰۰۰-۴۰۰۰	-	-
دیاتومه	باکتری	-	-	-
ژلاتین	رزین آکرلیک	۱۲۵-۲۹۷	-	-
ژلاتین	اپوکسی	۵۰	-	-
ژلاتین	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	۵۰	-	-
پلی یورتان	Na_2SiO_3	۸۰۰-۴۰	-	-
سیلیکاژل	MMA	۴.۱۵	-	-
سیلیکاژل	اپوکسی	-	-	-
سیلیکاژل	Na_2SiO_3	۵۰۰۰	-	-

۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰	سیانوآکریلات	شیشه	سیلندری
۸۰-۲۰	۱۰۰	۳۳۵۰-۲۲۰۰	اپوکسی	شیشه	
۸۰-۲۰	۱۰۰	۲۲۰۰-۳۳۵۰	پلی آکریلات	شیشه	
۸۰-۲۰	۱۰۰	۲۲۰۰-۳۳۵۰	پلی یورتان	شیشه	
۸۰-۲۰	۱۰۰	۲۲۰۰-۳۳۵۰	باکتری	شیشه	
۵۰-۱۵	۲۵۰	۳۰۰۰-۴۰۰۰	پلی یورتان	سرامیک	
-	۶۰۰	۲۰۰۰	سیلیکا قلیایی	شیشه	عروقی و لوله ای
-	۶۰۰	۲۰۰۰	اپوکسی	شیشه	
-	۵۰۰	۴۰۰۰	سیانوآکریلات	شیشه	
-	-	۱۵۰۰	سیلیکون	شیشه	

قابل ذکر می باشد که کپسول های نوع عروقی و لوله ای بایستی پس از فرآیند اختلاط بتن اضافه شوند و همچنین کپسول های کروی در مقایسه با نوع سیلندری در هنگام اختلاط بتن پایداری بهتری دارند. ضخامت مناسب کپسول ها مانع از شکست آنها در حین اختلاط می شود اما باید به این نکته توجه داشت که افزایش ضخامت دیواره کپسول و قطر بر ویژگی مواد بتن تاثیر گذاشته و باعث کاهش استحکام بتن می شود. بررسی ها نشان داده است که نوع کروی کمترین اثر را بر روی مقاومت مکانیکی بتن دارد. همچنین یکی از راهکارهای افزایش پایداری در کپسول های نوع سیلندری چسباندن آنها به صورت خوشه با یک چسب محلول در آب می باشد. نکته دیگر سازگاری مواد غشاء کپسول با ماتریکس بتن است. بدین منظور استفاده از مواد بی اثر و خنثی مانند شیشه ترجیح داده می شود. در یکی از تحقیقات انجام شده از مواد کپسولی از جنس سیلیکا استفاده شده است که نتایج نشان داده است این نوع کپسول در مقایسه با کپسول های پلیمری با ماتریکس بتن سازگارتر است.

در ترمیم زیستی میکروارگانیسم های زنده پس از فعال شدن اسپورها در اثر ایجاد ترک و وجود رطوبت، در استحکام بتن نقش دارند. تولید دی اکسیدکربن به دلیل واکنش های متابلیکی توسط باکتریها و واکنش با مواد سیمان پورتلند باعث ایجاد رسوب کربنات کلسیم شده و با کاهش تخلخل بتن استحکام را افزایش می دهد. همچنین شارژ منفی دیواره سلولی باکتریها به دلیل واکنش هسته زایی در فرآیند هیدراتاسیون نقش مهمی دارد. از طرفی می توان با اضافه کردن نانوذراتی مانند نانوذرات رس و نانوسیلیکا به همراه مواد کپسولی حاوی عوامل زیستی، کیفیت و کارایی فرآیند ترمیم بتن را ارتقاء بخشید. در جدول زیر میزان کارایی ترمیم بتن به دو روش زیستی، افزودن عوامل زیستی به تنهایی و با میکروکپسول مقایسه شده است [۵۶].

جدول (۵-۱) میزان کارایی ترمیم بتن به دو روش زیستی، افزودن عوامل زیستی به تنهایی و با میکروکپسول [۵۶]

	Shelf life	Pervasiveness	Quality	Reliability	Versatility	Repeatability
Direct addition of bio-agents in concrete	Bacteria spores are more stable than live cells but harsh environment of concrete reduce lifetime of spores to only 1-2 months [3]	Uniform dispersion of bio-agents including nutrients is possible [12,13]	Sealing ability depends on crack width. Crack width up to 450 μm has been sealed [15] Inadequate data to comment on recovery of strength although flexural strength recovery of about 25% recorded [14]	Reliable sealing ability and recovery of concrete properties on short term. Long term performance not studied	Highly dependent on crack width, cracking age and presence of moisture and nutrients [13]	Inadequate results to establish healing for multiple loading cycles
Addition of encapsulated bio-agents	Survival period and rate of bacteria is enhanced due to encapsulation. Viability up to 6 months has been studied [3]	Uniform distribution of capsules or immobilization medium containing bacteria possible [3,4]	Sealing ability depends on crack width. Maximum crack width of 970 μm healed [3,4] a) High recovery of durability measured by water permeability or water absorption tests [3,4,9] b) Inadequate data to comment on recovery of strength	Reliable sealing ability and recovery of concrete properties on short term. Long term performance not studied	Effective healing when moisture is presence [3,4,10] and crack width is restricted	Inadequate results to establish healing for multiple loading cycles

پس از انتخاب مواد ترمیمی مناسب و فرآیند ترمیم، ارزیابی خصوصیات بتن ترمیم شده یکی از اقدامات ضروری است. بنابراین ویژگی های بتن ترمیم شده بایستی از نظر استحکام، مقاومت مکانیکی و نفوذ آب مورد بررسی قرار بگیرد. در جداول زیر تکنیک های لازم جهت بررسی کارایی مواد ترمیمی بتن آورده شده است [۵۶].

جدول (۶-۱) انواع آنالیزهای تصویری جهت بررسی میزان ترمیم بتن [۵۶]

تکنیک	ویژگی
آنالیز تصویری visualization and determination	میکروسکوپ نوری و آنالیز تصویری Optical microscopy + image analysis
	میکروسکوپ الکترونی Scanning electron microscopy
	رادیوگرافی اشعه ایکس X-ray radiography
	آنالیز تفرق اشعه ایکس X-ray diffraction analysis
	آنالیز مادون قرمز Infrared analysis
	تعیین میزان ترمیم و تشکیل کریستال
	بررسی تشکیل کریستال شکست کپسول
	بررسی رهاسازی عامل ترمیم کننده از کپسول
	تعیین ساختار مواد کریستالین
	تعیین محصولات رسوبی

جدول (۷-۱) تکنیک های ارزیابی استحکام و کارایی ترمیم بتن [۵۶]

ویژگی	تکنیک
جریان آب در ترک ترمیم شده	نفوذپذیری آب در فشار کم و زیاد Water permeability
جریان هوا در ترک ترمیم شده	نفوذپذیری هوا Air permeability
جذب آب مویرگی در ترک ترمیمی	جذب آب مویرگی Capillary water uptake
میزان مقاومت در برابر خوردگی	تست خوردگی Corrosion test
مقاومت در برابر ورود یون کلرید	انتشار یون کلرید Chloride diffusion
مقاومت در برابر ورود یونها	فشار اسمزی Osmotic pressure
پیوستگی مواد	اندازه گیری امواج عبوری التراسونیک Ultrasonic transmission measurements
	بررسی میزان بازگشت استحکام و سفتی بتن regain tightness

جدول (۸-۱) روش های بررسی مقاومت مکانیکی بتن ترمیم شده [۵۶]

ویژگی	تکنیک
بررسی میزان سفتی و استحکام بتن	تست مقاومت فشاری Compression test
	تست کششی Tensile test
	تست خمشی سه و چهار نقطه ای point bending test
شکست کپسول و بازیابی انرژی	آکوستیک امیشن Acoustic emission analysis
	بررسی مقاومت مکانیکی regain mechanical properties

	آنالیز فرکانس رزونانس Resonance frequency analysis	بازیابی سفتی بتن ترمیمی
--	--	-------------------------

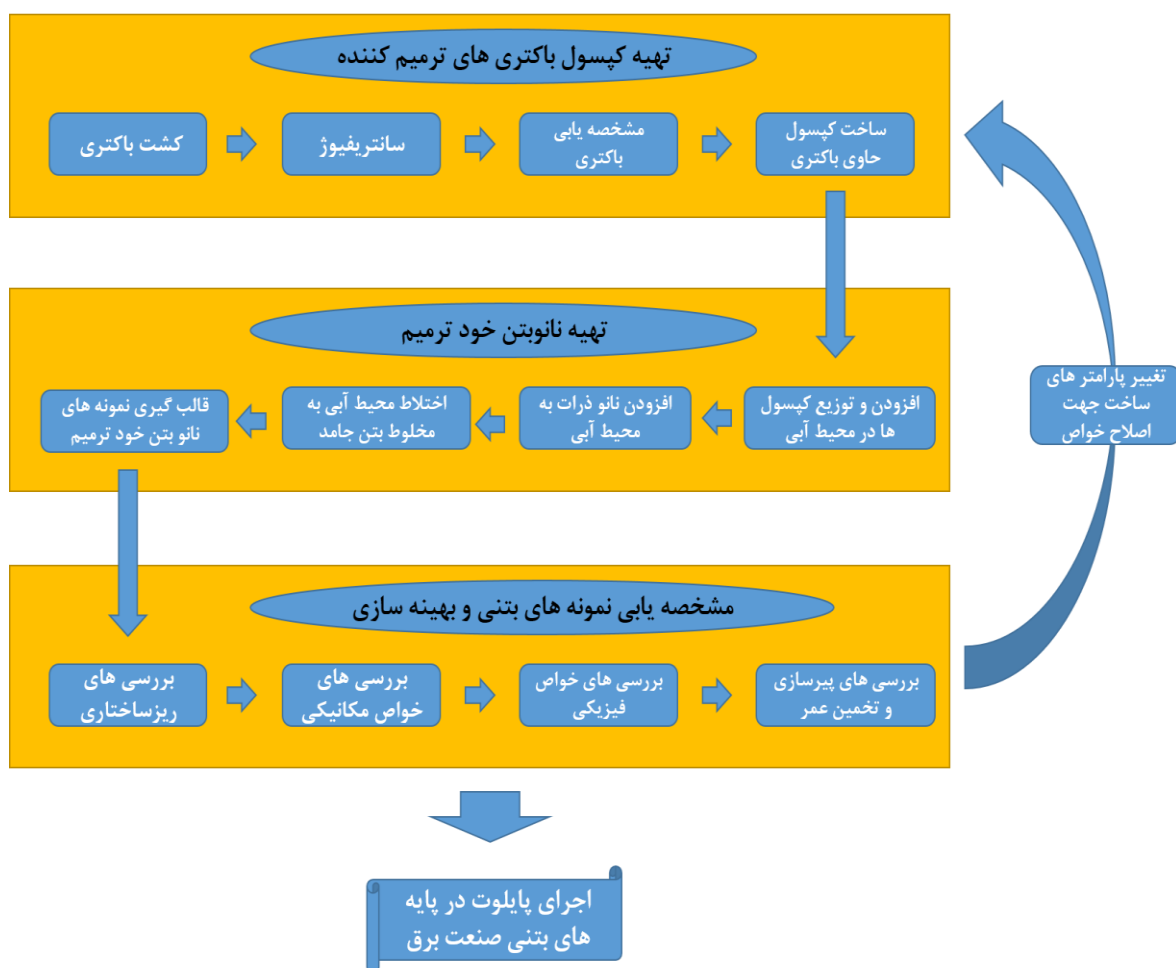
۸-۷-۱- ارائه راهکار پیشنهادی در این پروژه جهت ترمیم سازه و پایه های بتنی

امروزه راهکار جدیدی جهت ترمیم ترکهای سازه ها و پایه های بتنی مطرح است که استفاده از بتن های خود ترمیم شونده نام دارد. به طور کلی خود ترمیمی به تولنایی یک ترک برای کاهش خود به خود عرض ترک در طول زمان اشاره می کند. پدیده خودترمیمی در بتن سال هاست که شناخته شده است. در سال ۱۸۳۶ توانایی خود ترمیمی ترک های کوچک بتن در حضور رطوبت توسط آکادمی علوم فرانسه مشاهده شد. در این تحقیق ترک ها در سازه های بتنی قدیمی با مواد بلورین سفید رنگی پوشانده شدند که اشاره به قابلیت بتن در ترمیم خود به خود ترک ها با تولید مواد شیمیایی توسط خودش را دارد. انواع مکانیسم های خودترمیمی شامل ادامه هیدراتاسیون سیمان واکنش نداده، انبساط بتن در طرفین ترک (تورم C-S-H)، تبلور کربنات کلسیم، بسته شدن ترک ها با ناخالصی های جامد در آب می باشند. موضوع بتن های خود ترمیم توسط میکروارگانیسم ها اولین بار توسط محققان هلندی در سال ۲۰۱۵ با عنوان بتن خود ترمیم شونده یا زیست بتن ارائه شد. این محققان با بهره گرفتن از علوم مهندسی عمران و زیست شناسی دریایی و ترکیب این دو، بتنی را طراحی و تولید کرده اند که به صورت خودکار، در هنگام ترک خوردگی، ترک ها را با تولید آهک پر می کند. این آهک با پر کردن ترک های ایجاد شده در بتن، در واقع باعث ترمیم بتن می شود. در این فرایند از موجودات زنده میکروسکوپی استفاده می شود و تکثیر این موجودات در طبیعت به افزایش ماندگاری و طول عمر آنها کمک شایانی می کند و به نوعی این بتن مادام العمر بقا داشته و در صورت ترک خوردگی مجدداً با فعالیت میکروارگانیسم ها مواد ترمیمی تولید و بازسازی می گردد. بنابراین در این پروژه سعی بر این است از میکروارگانیسم هایی از جنس باسیلوس به منظور ترمیم ترک های بتن به کمک ترسیب کربنات کلسیم استفاده شود. همانطور که پیشتر ذکر شد در پاره ای از پژوهش های انجام شده از باکتریهای زنده استفاده شده است که ماندگاری آنها به دلیل شرایط قلیایی بتن فقط تا چند ماه می باشد. بدین منظور در این پروژه از اسپورهای باکتری به همراه مواد غذایی مورد نیاز که در درون میکروکپسول ها جاسازی شده اند، استفاده می شود. باکتری های جنس باسیلوس دارای مواد مغذی گوناگون مانند اوره، استات کلسیم، نترات کلسیم و لاکتات کلسیم می باشند. از آنجایی که یکی از اهداف پروژه بهینه کردن شرایط رشد باکتری است، دو ماده غذایی اوره و لاکتات کلسیم بررسی می شود.

همچنین نوع ماده کپسولی در میزان کارایی ترمیم بتن بسیار حایز اهمیت است که با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین، کپسول های دارای ویژگی تخلخل به دلیل ورود آب و اکسیژن جهت فعال شدن اسپور باکتریایی ترجیح داده می شود. از این رو در این پروژه کپسول های سیلیکاژل و پلی یورتان مورد بررسی قرار خواهند گرفت. نکته قابل توجه دیگری که بایستی مورد مد نظر قرار بگیرد این است که میزان کپسول های حاوی مواد ترمیمی زیستی درون ماتریکس بتن در محدوده مناسبی باشد (کمتر از ۵ درصد). مطالعات نشان داده است که قرار گرفتن مقدار زیادی از کپسول های حاوی مواد ترمیمی در بتن منجر به کاهش مقاومت و استحکام مکانیکی می شود. بنابراین به منظور افزایش کارایی و راندمان روش مذکور و کسب درصد مقاومت مکانیکی بالا در بتن، پیشنهاد می شود که روش ترمیمی به صورت هیبریدی و با استفاده همزمان از نانوذرات انجام شود. در بسیاری از پژوهش های صورت گرفته از نانوذراتی مانند نانوذرات رس، کربن نانوتیوپ و نانوفایبر، نانواکسید گرافن و نانوسیلیکا جهت افزایش استحکام بتن و جلوگیری از ایجاد ترک، استفاده شده است. در این پژوهش سعی بر آن است که از نانوذرات رس به دلیل کارایی بالا و داشتن صرفه اقتصادی به کار برده شود. در دیاگرام های زیر روش ترمیمی پیشنهادی و به طور مختصر فرآیند انجام کار نشان داده شده است.



روند نمای اجرای پروژه در یک نگاه



شکل (۱-۳۶) نمایی کلی از فرآیند انجام پروژه

نتیجه گیری

صنعت بتن با توجه به کاربرد فراوان و متناسب با پتانسیل های موجود در آن یکی از صنایعی است که از جایگاه ویژه ای برخوردار است و افزایش طول عمر این نوع سازه ها از اهداف مهم این صنعت می باشد. اما ترک خوردگی در سازه های بتنی یکی از معضلاتی است که بنا به دلایل مختلف در طول عمر آنها اتفاق می افتد. این ترک های ایجاد شده و جابجایی مواد مضر از بین فضاهای کوچک بتن، باعث زوال سازه ی بتنی و خوردگی شیمیایی آرماتورها می گردد. این حملات شیمیایی، میلگردهای درون سازه بتنی را اکسید کرده و مقاومت بتن را کاهش می دهد. از این رو در این پژوهش سعی بر این است که با استفاده از روش های نوین در ترمیم سازه های بتنی، میزان مقاومت به فرسودگی های محیطی و خواص مکانیکی آنها را افزایش و در نهایت هزینه های احتمالی بازسازی و تعمیر را کاهش داد. در این گزارش روش های خود ترمیم شونده در سازه های بتنی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. تحقیقات نشان می دهد که با استفاده از نانوذرات می توان مقاومت فشاری و استحکام بتن را افزایش داد. نانوذرات می توانند حفرات بتن را پر کنند و همچنین به عنوان هسته به طور محکم به سیمان هیدراته شده می چسبند و به علت فعالیت شدید، زمان هیدراته شدن را تسریع می کنند. به طور مثال، استفاده از نانوذرات سیلیس در بهسازی و ترمیم سازه هایی که دچار خوردگی و فرسودگی شده اند بسیار مفید است. بطوریکه با افزودن آن، خمیر سیمان دارای کارایی بهتر گردیده و خواص فیزیکی و مکانیکی افزایش می یابد. اغلب گزارش ها نشان می دهد که سیمان های نانویی باعث افزایش مقاومت بتن می شوند که امری حیاتی در مقاوم سازی سازه ها می باشد.

همچنین بتن خودترمیم شونده باکتریایی یکی از مصالح هوشمند زیستی و بدون خطر برای محیط زیست است. ساز و کار اساسی ترمیم ترک ها توسط باکتری بر پایه عملکرد باکتری به عنوان کاتالیزور است. رسوبات کربنات کلسیم تولید شده توسط باکتری به عنوان یک نوع سیمان زیستی عمل کرده و به طور موثری ترک های ایجاد شده را می بندند. برای ایجاد قابلیت خودترمیم کنندگی مناسب، هم باکتری ها و هم ماده آغازگر باید در زمینه بتن وجود داشته باشد. این مواد اضافه شده به بتن نباید خواص مورد نظر بتن را عوض کنند. عمده ترین مشکل در زمینه کاربرد باکتری برای حفاظت بتن مرتبط با نگهداری و زنده نگه داشتن باکتری در قلیای بتن میباشد در این زمینه نیز روش های گوناگونی ابداع شده است که در این بین استفاده از میکرو کپسولهای حاوی باکتری که حاوی اسپورها یا باکتری غیر فعال و ترکیبات مغذی برای فعالیت مجدد باکتری است از اهمیت بیشتری برخوردار است این میکرو کپسولها علاوه بر امکان حفظ باکتری برای دهها سال در قلیای بتن باعث افزایش استحکام و بهبود خواص مکانیکی بتن نیز میشوند.

بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده اهداف کلی پروژه شامل موارد ذیل می باشند:

- شناسایی انواع تخریب و درجه بندی آن ها در سازه ها و پایه های بتنی
- انتخاب روش و محصول ترمیمی مناسب با توجه به بررسی های انجام شده در آخرین مقالات و اختراعات
- سنتز و ساخت محصول ترمیمی با استفاده از افزودنی های مناسب
- مشخصه یابی و بررسی خواص مکانیکی محصول
- اجرای فاز پایلوت و اعمال محصول ترمیمی منتخب در سازه های خطوط انتقال و توزیع

فصل دوم

فصل دوم: فاز خرید و تدارکات

۲-۱- مقدمه

- شناسایی، انتخاب و تعیین مشخصات مواد اولیه مورد نیاز

بتن به دلیل مقاومت فشاری و دوام بالا و ارزان بودن، از پرکاربردترین مصالح برای ساخت سازه‌ها در سراسر جهان است. اما مقاومت کششی پایین این ماده‌ی ارزشمند، آن را در برابر ترک خوردگی آسیب پذیر می‌کند. در ساخت سازه‌ها به منظور تحمل بارهای کششی از آرماتورهای فولادی استفاده می‌شود. با این حال به دلیل عوامل خارج از کنترل، مثل: یخ زدگی، نفوذ نمک‌ها به خلل و فرج بتن، حملات کلریدی و سولفاتی، کربناسیون و ... ترک خوردگی امری اجتناب ناپذیر در ساختار بتن می‌باشد.

ترک‌های ریز در بتن با شکل‌دهی یک شبکه‌ی پیوسته می‌توانند موجب نفوذپذیری بتن در برابر مواد تهاجمی مثل گازها و مایعات مضر شوند و از این طریق بستری برای تخریب بتن و متعاقباً خوردگی آرماتورهای فولادی و کاهش دوام سازه فراهم شود که علاوه بر تحمیل هزینه‌های هنگفت برای تعمیر، خطر آفرین نیز می‌باشد. دو محدودیت عمده برای افزایش طول عمر سازه‌های بتنی از طریق تعمیر و ترمیم با عوامل خارجی، هزینه‌ی زیاد و سازگار نبودن روش‌های ترمیمی با محیط زیست است که می‌توان با به کار گیری مکانیزم‌های نوین مبتنی بر خود ترمیمی بتن این مشکلات را تا حدودی برطرف کرد.

بتن به طور ذاتی دارای ویژگی خودترمیمی می‌باشد که در بتن‌های جوان ناشی از هیدراتاسیون سیمان هیدراته نشده و در سال‌های بعد ناشی از تشکیل رسوب کلسیم کربنات و کلسیم هیدروکسید و پر شدن ترک‌ها با این دو ماده‌ی معدنی است. اما این خودترمیمی ذاتی، تنها قادر به ترمیم ترک‌هایی با عرض کمتر از ۰/۲ میلی‌متر است. [۵۸] برای ترمیم ترک‌هایی با عرض بیشتر باید روش‌هایی مثل خودترمیمی مبتنی بر کپسول و مبتنی بر مجراهای لوله‌ای که حاملان عامل‌های ترمیمی و کاتالیزورهای مربوط به فرآیند هستند، به کار گرفته شوند.

در این میان روش بسیار کارآمدی که تاثیر آن بر فرآیند خود ترمیمی و بهبود خواص بتن به اثبات رسیده است استفاده از میکرواورگانیزم‌ها برای ساخت بتن خود ترمیم شونده است. این روش می‌تواند ترک‌هایی با عرض بیشتر از ۰/۵ میلی‌متر را ترمیم کند و مهمترین ویژگی این فناوری، سازگاری آن با محیط زیست می‌باشد.

هر یک از روش‌های ذکر شده نیاز به مواد اولیه و تجهیزات ویژه ای دارد که در گزارش این فاز از پروژه لیست بندی کلیه مواد اولیه و تجهیزات مورد نیاز جهت تهیه مواد خودترمیمی مناسب انجام شده است و در نهایت سفارش بخش عمده ای از مواد و تجهیزات داده شده اند و موارد کلیدی مورد نیاز طرح نیز خریداری شده اند.

۲-۱-۱- ساخت نمونه های بتن

بتن مصالحی شبیه سنگ است که از مخلوط کردن مقدار متناسبی از سیمان، شن، ماسه و آب و افزودنی‌های دیگر بدست می‌آید. توده اصلی بتن سنگ دانه‌های درشت و زیر (شن و ماسه) است و فعل و انفعال شیمیایی بین آب و سیمان که به صورت شیره ای اطراف سنگدانه‌ها را پوشانده است باعث یکپارچه شدن و چسبیدن سنگدانه‌ها به یکدیگر می‌شود. این سنگدانه‌ها اسکلت اصلی بتن را تشکیل داده و نیروی وارد بر بتن را تحمل می‌کنند. آب نیز در این مخلوط موجب ایجاد واکنش شیمیایی در سیمان می‌شود که سخت شدن مخلوط بتن را طی دوره حدود بیست و هشت روز و رسیدن به مقاومت نهایی بتن به همراه دارد. شن و ماسه حدود ۶۵ درصد مخلوط بتن و مابقی را خمیر سیمان و درصد بسیار کمی هوا تشکیل می‌شود. برای ساخت بتن خودترمیم شونده تمامی مواد مورد استفاده و مراحل ساخت مشابه بتن معمولی است با این تفاوت که درصد بهینه از مواد خودترمیم هیبریدی به ماده بتن افزوده می‌شود.

مواد تشکیل دهنده بتن شامل سیمان، آب، سنگدانه شامل شن و ماسه می‌باشد.

سیمان‌های پرتلند که در کشور استفاده می‌شوند از نظر مقدار ترکیبات متفاوت هستند و در نتیجه عملکرد آنها نیز مختلف است، کاربرد ۵ نوع سیمان پرتلند به شرح زیر است:

نوع ۱ یا معمولی: برای مواردی که نیاز به خواص معینی نیست و شرایط محیط معمولی است.
 نوع ۲ یا تهاجم ضعیف سولفات: در مواردی که مقاومت کم در مقابل تهاجم سولفات یا دمای حاصل از واکنش نسبتاً کم با آب نیاز است.
 نوع ۳ یا مقاومت زیاد زودرس: در مواردی که مقاومت زیاد در اوایل سن بتن نیاز است.
 نوع ۴ یا دمای کم واکنش سیمان با آب: در مواردی که دمای کم گیرش نیاز است.
 نوع ۵ یا مقاوم در مقابل تهاجم سولفات: در مواردی که مقاومت زیاد در مقابل تهاجم سولفات نیاز باشد. در **Error!**
(Reference source not found) مقادیر تقریبی انواع سیمان آمده است.

جدول (۲-۱) مقادیر تقریبی ترکیبات انواع سیمان پرتلند

ترکیبات (%)				انواع سیمان پرتلند
C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	
۱۰	۱۰	۲۰	۵۵	نوع ۱
۱۲	۷	۲۵	۵۰	نوع ۲
۸	۱۲	۱۵	۶۰	نوع ۳
۱۲	۵	۴۵	۳۰	نوع ۴
۱۲	۴	۳۰	۵۰	نوع ۵

چهار ترکیب اصلی سیمان شامل موارد ذیل می باشند:

C ₃ S	3CaO.SiO ₂	سیلیکات تری کلسیم
C ₂ S	2CaO.SiO ₂	سیلیکات دی کلسیم
C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	آلومینات تری کلسیم
C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	آلومینات فریت تترا کلسیم

هریک از ترکیبات نقش مهمی در خواص و رفتار بتن دارد. در **Error! Reference source not found.** اثرات ترکیبات سیمان در خواص مختلف نشان داده شده است.

جدول (۲-۲) اثرات ترکیبات سیمان در خواص مختلف

C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	خصوصیات
متوسط	سریع	آهسته	متوسط	سرعت واکنش
کم	زیاد	کم	متوسط	دمای حاصل از واکنش با آب
ضعیف	ضعیف	ضعیف	خوب	ارزش سیمانی در اوایل سن
ضعیف	ضعیف	خوب	خوب	ارزش سیمانی نهایی

برای تهیه هر متر مکعب بتن تقریباً ۸.۱ الی ۹.۱ تن شن و ماسه (۱۰۰۰ الی ۱۱۰۰ کیلو شن یا همان درشت دانه و ۸۰۰ الی ۹۰۰ کیلو ماسه یا همان ریز دانه) همچنین ۳۰۰ الی ۳۵۰ کیلوگرم (۶ الی ۷ پاکت ۵۰ کیلویی) سیمان و ۱۵۰ الی ۱۷۰ کیلو (۱۷۰ لیتر یا ۱۷۰ متر مکعب) آب استفاده می شود. سنگدانه ها در بتن تقریباً سه چهارم حجم و ملات سیمان و آب یک چهارم آنرا تشکیل می دهند. باید توجه گردد که نسبت آب به سیمان با توجه به رطوبت مصالح متغیر است و مقاومت مشخصه بتن تحت تاثیر درصد شن است. همچنین برای کارایی بهتر بتن می توان از افزودنی ها استفاده کرد. در این تحقیق ۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم در هر ۱۰۰ کیلو سیمان روانساز و بین ۶ تا ۱۰ درصد وزن سیمان از میکروسیلیس استفاده شد. در جدول زیر به انواع سیمان ها جهت استفاده در محیط های مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت اشاره شده است.

جدول (۲-۳) سیمان های مناسب برای محیط های گوناگون

موارد مصرف	نوع سیمان مناسب
سازه های بتنی واقع در محیط های معمولی (بدون یونهای سولفات و یون کلر)	سیمان پرتلند نوع ۱
سازه هایی که در معرض حمله ضعیف سولفات ها قرار دارند	سیمان پرتلند نوع ۲ سیمان پرتلند سرباره ای (با ۱۵ تا ۲۵ درصد سرباره) سیمان پرتلند پوزولانی (با ۱۵ تا ۲۵ درصد پوزولان)
مقابله با حمله سولفات های قوی	سیمان پرتلند نوع ۵ سیمان سوپرسولفات سیمان پرتلند سرباره ای (با بیش از ۲۵ درصد سرباره) سیمان پرتلند پوزولانی (با بیش از ۲۵ درصد پوزولان)
مقابله با سولفات های قوی به همراه یون کلر مقابله با واکنش قلیایی سنگدانه ها و ساخت بتن متراکم با نفوذ پذیری کم	سیمان پرتلند سرباره ای (با بیش از ۵۰ درصد) سیمان پرتلند پوزولانی (با بیش از ۴۰ درصد پوزولان)
مناطق ساحلی خلیج فارس و دریای عمان	سیمان نوع ۲ سیمان نوع ۱ با پوزولان سیمان پرتلند آمیخته پوزولانی یا سرباره ای

۲-۱-۲- سنگدانه ها

سنگدانه های مصرفی در بتن شامل مصالح سنگی درشت دانه و ریز دانه می باشد که این سنگدانه ها باید تمیز، سخت و عاری از مواد شیمیایی، ترکیبات آلی، نمک و پوششهای گچی، رسی و مواد ریز دیگر که بر چسبندگی آنها در خمیر سیمان اثر میگذارد، باشند.

جدول (۲-۴) مقادیر حداکثر مجاز مواد زیان آور در سنگدانه های درشت بتن

نوع ماده زیان آور	روش آزمایش	حداکثر درصد وزنی مجاز در کل نمونه
کلوخه های رسی	دت ۲۲۱	۰/۲۵
دانه های نرم	دت ۲۲۳	۵
چرت به صورت ناخالصی		
- در معرض شرایط محیطی شدید		۱
- در معرض شرایط محیطی متوسط		۳
- در معرض شرایط محیطی ملایم		۵
دانه های گذشته از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلیمتر)	دت ۲۱۸	۱۱
سولفات ها (SO_4^{--})	دت ۲۳۰	۰/۴۲
کلریدها (Cl^-)	دت ۲۳۱	۰/۰۲۳

۳-۱-۲- آب

آب مصرفی برای شستشوی سنگدانه ها، ساخت و عمل آوری بتن باید تمیز، صلافا و روشن باشد. همچنین باید از مصرف آب حاوی مقادیر زیاد از هر نوع ماده از قبیل روغن ها، اسیدها، قلیاییها، املاح، مواد قندی و مواد آلی که قادر به صدمه زدن به بتن یا میلگرد باشد، خودداری کرد. به طور کلی آب آشامیدنی، برای مصرف در ساخت و عمل آوری بتن مناسب می باشد.

جدول (۲-۵) حداکثر مجاز مواد زیان آور در آب مصرفی نمونه ها

نوع ماده زیان آور	شرح	روش آزمایش	حداکثر غلظت مجاز (قسمت در میلیون)
ذرات جامد مطلق	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش تنیده بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم	دت ۳۰۵	۱۰۰۰ ۲۰۰۰
مواد محلول	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش تنیده بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم	دت ۳۰۵	۱۰۰۰ ۲۰۰۰
کلرید (Cl ⁻)	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید، بتن پیش تنیده سایر موارد بتن آرمه، در شرایط مرطوب	دت ۳۰۶	۵۰۰* ۱۰۰۰*
سولفات (SO ₄ ⁻)	بتن آرمه و بتن پیش تنیده	دت ۳۰۷	۱۰۰۰*
قلیایی ها	(Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	دت ۳۰۴	۶۰۰

۴-۱-۲- افزودنی های بتن

مواد افزودنی موادی هستند به غیر از سیمان پرتلند، آب و مصالح سنگی که به مخلوط بتن، اندکی قبل از اختلاط یا در حین اختلاط افزوده میشوند. مواد افزودنی به گروه های مختلفی تقسیم می شوند که مهمترین آنها عبارتند از:

- ✓ مواد افزودنی حباب ساز
- ✓ مواد افزودنی کاهنده آب
- ✓ مواد افزودنی روان ساز
- ✓ مواد افزودنی بازدارنده خوردگی
- ✓ مواد افزودنی پوزولانی

افزودنی های شلیمیایی مانند افزودنی های روان ساز یا کاهنده آب باید مطابق استاندارد ASTM C494، افزودنی های حباب ساز مطابق استاندارد ASTM C260، افزودنی های پوزولانی مطابق با استاندارد ASTM C618، و بازدارنده های خوردگی مطابق با استاندارد ASTM G109 باشند. استفاده هر گونه افزودنی به منظور بهبود خواص بتن در صورتی که مدارک مستند و کافی جهت اطمینان از کارایی آنها وجود داشته باشد، مجاز می باشد. در غیر این صورت انجام آزمایش های لازم تحت نظر دستگاه نظارت الزامی است. در صورت اطمینان از کارایی افزودنی ها، مقدار و نحوه مصرف آنها باید براساس مشخصات فنی و توصیه های سازنده باشد.

۲-۲- انتخاب میکروارگانیزم مناسب جهت ترمیم و بهینه سازی شرایط رشد به منظور افزایش مواد رسوبی ترمیمی

بتن به دلیل مقاومت فشاری و دوام بالا و ارزان بودن، از پرکاربردترین مصالح برای ساخت سازه ها در سراسر جهان است. اما مقاومت کششی پایین این ماده ی ارزشمند، آن را در برابر ترک خوردگی آسیب پذیر می کند. در ساخت سازه ها به منظور تحمل بارهای کششی از آرماتورهای فولادی استفاده می شود. با این حال به دلیل عوامل خارج از کنترل، مثل: یخ زدگی، نفوذ

نمک ها به خلل و فرج بتن، حملات کلریدی و سولفاتی، کربناسیون و ... ترک خوردگی امری اجتناب ناپذیر در ساختار بتن می باشد.

ترک های ریز در بتن با شکل دهی یک شبکه ی پیوسته می توانند موجب نفوذپذیری بتن در برابر مواد تهاجمی مثل گازها و مایعات مضر شوند و از این طریق بستری برای تخریب بتن و متعاقباً خوردگی آرماتورهای فولادی و کاهش دوام سازه فراهم شود که علاوه بر تحمیل هزینه های هنگفت برای تعمیر، خطر آفرین نیز می باشد. دو محدودیت عمده برای افزایش طول عمر سازه های بتنی از طریق تعمیر و ترمیم با عوامل خارجی، هزینه ی زیاد و سازگار نبودن روش های ترمیمی با محیط زیست است که می توان با به کار گیری مکانیزم های نوین مبتنی بر خود ترمیمی بتن این مشکلات را تا حدودی برطرف کرد.

بتن به طور ذاتی دارای ویژگی خودترمیمی می باشد که در بتن های جوان ناشی از هیدراتاسیون سیمان هیدراته نشده و در سال های بعد ناشی از تشکیل رسوب کلسیم کربنات و کلسیم هیدروکسید و پر شدن ترک ها با این دو ماده ی معدنی است. اما این خودترمیمی ذاتی، تنها قادر به ترمیم ترک هایی با عرض کمتر از ۰/۲ میلی متر است. [۵۸] برای ترمیم ترک هایی با عرض بیشتر باید روش هایی مثل خودترمیمی مبتنی بر کپسول و مبتنی بر مجراهای لوله ای که حاملان عامل های ترمیمی و کاتالیزورهای مربوط به فرآیند هستند، به کار گرفته شوند.

در این میان روش بسیار کارآمدی که تاثیر آن بر فرآیند خود ترمیمی و بهبود خواص بتن به اثبات رسیده است استفاده از میکرواورگانیزم ها برای ساخت بتن خود ترمیم شونده است. این روش می تواند ترک هایی با عرض بیشتر از ۰/۵ میلی متر را ترمیم کند و مهمترین ویژگی این فناوری، سازگاری آن با محیط زیست می باشد.

در بخش های بعدی به معرفی نوع میکرواورگانیزم، معرفی خانواده و گونه ی مناسب با توجه به شرایط محیطی بتن، مواد افزودنی مناسب به عنوان کاتالیزور برای فعالیت میکرواورگانیزم ها و مناسب ترین تکنیک برای اجرای این فرآیند با توجه به پژوهش های انجام شده در سالیان اخیر توسط محققان مختلف پرداخته می شود.

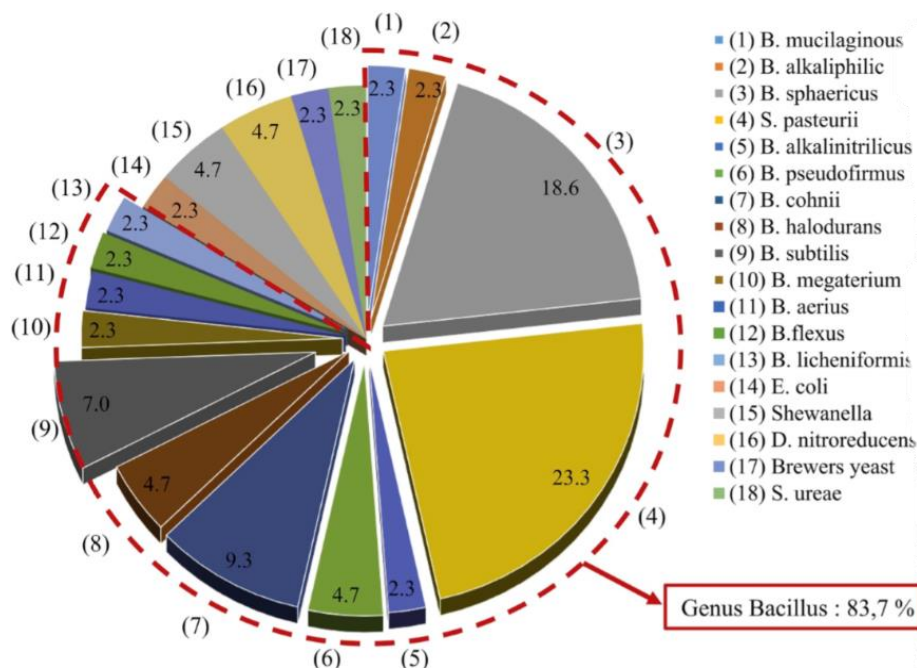
۱-۱-۲- میکرواورگانیزم ها

میکرواورگانیزم ها به چهار دسته ی اصلی باکتری ها، ویروس ها، قارچ ها و مخمرها تقسیم می شوند و معمولاً در اکثر نقاط کره ی زمین رشد می کنند. در این میان باکتری ها و قارچ ها برای استفاده در بتن خود ترمیم شونده مورد توجه قرار گرفته اند. استفاده از قارچ ها در فرآیند خودترمیمی بتن پیچیده تر و گران تر از باکتری ها است و به همین دلیل تحقیقات معدودی در این زمینه انجام شده است. لذا بهترین نوع میکرواورگانیزم برای این فرآیند باکتری ها می باشند. [۵۹]

۱-۱-۱- انتخاب خانواده ای مناسب از باکتری ها برای استفاده در فرآیند بتن خود ترمیم شونده

بتن دارای محیطی قلیایی است و pH آن بین ۹ تا ۱۳ می باشد. همچنین محیط بتن خشک، فاقد آب است و دمای آن تا ۷۰°C می رسد. لذا اولین شرط انتخاب باکتری مناسب، مقاومت آن در محیط قلیایی و سخت و خشک بتن و بقای آن به مدت طولانی در شرایط مذکور است. خود ترمیمی بتن توسط باکتری ها مبتنی بر تولید رسوب کلسیت حین فعالیت نوع خاصی از باکتری های میله ای شکل است که ضروری برای سلامتی انسان ندارند و معمولاً در خاک یافت می شوند و با نام باسیلوس شناخته می شوند. همچنین این باکتری ها دارای اسپورهای مقاوم هستند که از آن ها در مرحله ی اختلاط بتن و همچنین در محیط قلیایی و خشک بتن محافظت می کند. از طرفی این نوع از باکتری ها در حضور اکسیژن و آب شروع به فعالیت کرده و با تولید آنزیمی به نام اوره آز می توانند اوره موجود در محیط را به کمک یک منبع غنی از کلسیم (لاکتات کلسیم، نیترات کلسیم، استات کلسیم و ...) به کلسیم کربنات تبدیل کنند. [۶۰] این نوع از کلسیم کربنات تولید شده توسط باکتری ها، چسبندگی بیشتری دارد و با محیط بتن سازگارتر است و می تواند با پر کردن ترک ها باعث افزایش مقاومت کششی و فشاری بتن و کاهش نفوذ پذیری بتن در برابر آب و مایعات و گازهای مضر دیگر شود و از تخریب بتن و خوردگی آرماتورهای فولادی جلوگیری کند.

در پژوهش های انجام شده در سال های اخیر از انواع دیگری از باکتری ها مثل اشرشیا کلی نیز استفاده شده اما بطور عمده با توجه به مقاومت بالا در برابر شرایط سخت حاکم بر محیط بتن و بقای طولانی مدت باسیلوس ها بهترین گزینه باسیلوس است. همچنین. **Error! Reference source not found.** (نمایان گر یک آمار کلی از فراوانی باکتری های استفاده شده در پژوهش های گذشته می باشد. همانطور که مشهود است باسیلوس ها درصد زیادی از این فراوانی را به خود اختصاص داده اند.



شکل (۱-۲) فراوانی کاربرد باکتری ها در بتن خود ترمیم شونده [۶۱]

۲-۱-۱-۲- انتخاب گونه های مناسب از باکتری های باسیلوس

همان طور که در **Error! Reference source not found.** مشهود است ۴ گونه از پر کاربرد ترین گونه ها به ترتیب فراوانی عبارتند از:

۱. *Sporosarcina pasteurii* (*Bacillus pasteurii*)
۲. *Bacillus sphaericus*
۳. *Bacillus cohnii*
۴. *Bacillus subtilis*

به طور کلی باکتری های که به منظور خودترمیمی بتن به کار می روند باید دارای اسپورهای مقاوم به محیط قلیایی و طول عمر و دوام بالا باشند و همچنین میزان قابل قبولی رسوب کلسیم کربنات برای پر کردن ترک ها تولید کنند. مطالعات نشان می دهد ۴ گونه ی ذکر شده در بالا دارای این خصوصیات می باشند. تفاوت آنها در مواد مغذی مورد نیاز برای فعالیت است. همچنین تاثیرات مختلف آن ها بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، میزان نفوذپذیری بتن در برابر مایعات و گازها و حداکثر عرض ترک ترمیم شده توسط رسوب کلسیت، این گونه ها را از یکدیگر متمایز کرده است.

این باکتری ها برای تولید رسوب کربنات کلسیم به اوره نیاز دارند. اشکال عمده ی این روش تولید یون های آمونیوم (NH_4) از طریق فعالیت *ureolytic* است که منجر به انتشار اکسید نیتروژن در جو می شود. می توان تخمین زد که ترمیم ۱ متر مربع

بتن به ۱۰ گرم در لیتر اوره نیاز دارد که ۴/۷ گرم نیتروژن تولید می کند. این مقدار تقریباً یک سوم از تی است که هر روز توسط هر شخص تولید می شود. [۶۲] آمونیوم تولید شده در مسیر اوره آز برای انسان و ریزموجودات خاک خطرناک است. باکتری ها این آمونیوم را به نیتریک اسید تبدیل می کنند که با کلسیم کربنات موجود واکنش می دهد و ترکیب محلول کلسیم نیترات را تولید می کند که به طور خطرناکی موجب از بین رفتن سازه می شود. [۶۳] گرچه در مقیاس آزمایشگاهی استفاده از مقادیر بیشتر اوره می تواند موجب تولید رسوب کلسیت بیشتر و بهبود بیشتر خواص بتن شود اما با توجه به این نکات، بهتر است برای اجرایی شدن این فرآیند در مقیاس صنعتی استفاده از اوره به حداقل برسد. می توان گفت در این پروژه ترجیح بر استفاده از باکتری هایی است که برای فعالیت به اوره نیازی ندارند یا به عبارتی اوره راندمان تولید کلسیم کربنات رسوبی توسط باکتری ها را تحت تاثیر قرار نمی دهد.

همان طور که در تحقیقات اخیر مشاهده شده است باکتری های زنده نمی توانند برای مدت طولانی در محیط بتن زنده بمانند و به همین دلیل بهتر است از اسپور باکتری ها و مواد مغذی آن ها استفاده کرد. مواد مغذی برای باکتری های باسیلوس عبارتند از اوره و یک منبع غنی از کلسیم مثل: کلسیم لاکتات، کلسیم نیترات و کلسیم فرمات می باشند.

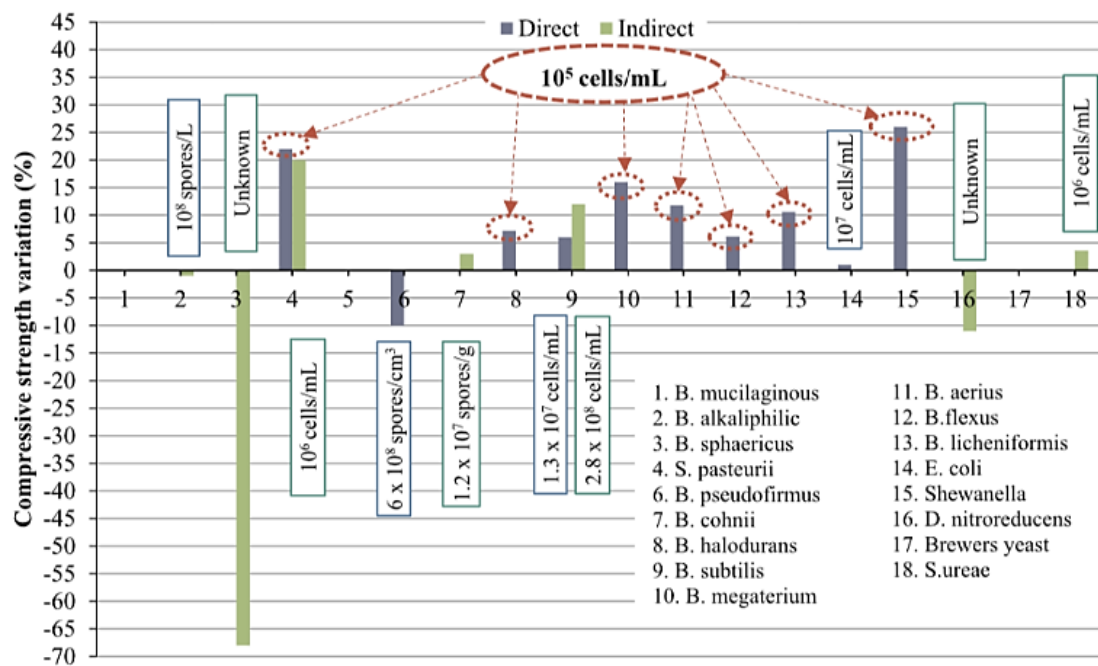
در تحقیقی که بر روی تاثیر باکتری های باسیلوس بر روی میزان خود ترمیمی بتن و بهبود خواص آن انجام شده است، از سه ترکیب باکتری مورد نظر همراه با منابع کلسیم، شامل: کلسیم لاکتات، کلسیم فرمات و کلسیم نیترات در ترکیب بتن استفاده شده است. نتایج نشان داده است که کلسیم لاکتات بعد از مدت زمان ۲۸ روز بیشترین تاثیر و کلسیم نیترات کمترین تاثیر را بر مقاومت فشاری بتن داشته اند [۶۲].

همچنین در تحقیقی دیگر استفاده از ماده مغذی حاوی اوره برای فعالیت گونه ی سابتیلیس تاثیر کمتری بر بهبود خواص بتن داشته است. به طوری که هم مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی در باکتری هایی که در محیط بدون اوره فعالیت داشته اند پس از ۲۸ روز بیشتر از باکتری هایی است که در حضور اوره این فرآیند را طی کرده اند [۶۳].

با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعات با توجه به اینکه گونه ی سابتیلیس برای فعالیت نیازی به اوره ندارد می تواند گزینه ی مناسب تری برای استفاده در بتن خود ترمیم شونده باشد که می تواند در حضور کلسیم لاکتات و بدون نیاز به اوره به فعالیت خود ادامه دهد و نتایج قابل قبولی حاصل کند.

نمودار ۱-۱ نمایان گر بهبود مقاومت فشاری بتن برای گونه های مختلف باسیلوس است که در مقادیر بهینه تنظیم شده است. همان طور که مشاهده می شود گونه ی پاستوری بیشترین تاثیر را مقاومت فشاری دارد اما به دلایل گفته شده بهتر است از باکتری هایی استفاده شود که استفاده از اوره در فعالیت آن ها حیاتی نباشد. این مشاهدات شاهد دیگری بر انتخاب گونه ی سابتیلیس می باشد که بعد از گونه ی پاستوری بیشترین تاثیر را بر مقاومت فشاری دارد و برای تولید رسوب کلسیم کربنات نیازی به اوره ندارد.

جدول ۱-۱ دلیل اهمیت هر گونه ی باسیلوس را در فرآیند خود ترمیمی نشان می دهد. همانطور که مشهود است گونه ی سابتیلیس بر بهبود مقاومت فشاری بتن تاثیر به سزایی دارد.



شکل (۲-۲) تاثیر انواع باکتری ها بر مقاومت فشاری بتن [۶۱]

جدول (۲-۶) اهمیت تاثیر هر کدام از گونه ها بر خواص بتن [۶۱]

	Type of bacteria	Cement replacement	Importance
1	<i>Bacillus aerius</i>	Rice husk	Strength, durability
2	<i>Bacillus megaterium</i>	No replacement	Compressive strength
3	<i>Bacillus sphaericus</i>	Normal concrete	Durability
4	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Fly ash concrete	Strength, durability
5	<i>Sporosarcina pasteurii</i>	Silica fume	Improvement in strength and durability
6	<i>Bacillus sphaericus</i>	No replacement	Alternative surface treatment for concrete
7	<i>Shewanella species</i>	No replacement	Compressive strength
8	<i>Bacillus subtilis</i>		Compressive strength

تحقیقات اخیر نشان داده است که استفاده از گونه‌ی سابتیلیس با غلظت 10^5 cells/ml باعث افزایش ۴۴٪ مقاومت فشاری، کاهش ۴۰٪ نفوذ آب و افزایش ۵۶٪ مقاومت کششی که عامل اصلی دوام بتن در برابر ترک خوردگی است، شده است [۶۴]. همچنین در تحقیق دیگر گونه‌ی سابتیلیس با غلظت 10^5 cells/ml باعث افزایش ۴۲٪ مقاومت فشاری، ۱۷٪ کاهش نفوذ آب و ۶۳٪ افزایش مقاومت کششی شده است [۶۵].

این ارقام در مقایسه با ارقام مربوط به خواص بتن برای گونه‌های دیگر از خانواده‌ی باسیلوس بسیار قابل توجه است. لازم به ذکر است که غلظت باکتری باید بهینه شود تا بهترین بهبود در خواص بتن مشاهده شود که این مقدار بهینه در هر کار تحقیقی، بنا به شیوه‌ی انجام آن متفاوت است.

۱-۲-۱-۲- اسپوروسارسینا پاستوری

باکتری اسپوروسارسینا پاستوری گرم مثبت، گرم مثبت، دارای اندوسپور و بهترین دمای رشد آن ۳۰ درجه سانتیگراد است. در کلیه استانداردهای شناخته شده در سطح بین المللی، این باکتری در دسته باکتریهای بدون آلودگی قرار گرفته و رسوب کربنات کلسیم ناشی از آن برای محیط زیست خطری ندارد. باکتری مورد استفاده در محیط جامد حاوی نوترینت آگار حاوی اوره دو درصد فعال می باشد [۶۶].

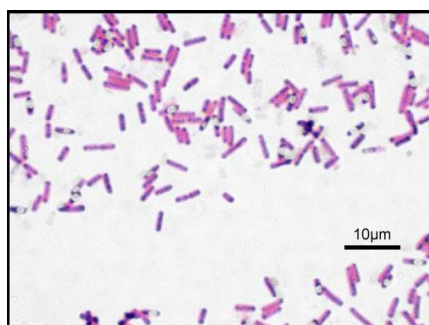
۲-۱-۱-۲- باسیلوس اسفریکوس

باکتری باسیلوس اسفریکوس به صورت ساپروفیت رشد می کند و اسپورهای آن در محیط های خاکی و آب وجود دارد. اسپورهای این باکتری به شکل گرد در قسمت انتهایی قرار دارند. باکتری مذکور دارای فعالیت اوره آز قوی و قادر به تولید رسوب کریستال های کربنات کلسیم هست. همچنین احتمال بیماری انسانی بسیار کم است و ممکن است فقط در تماس با آن باعث التهاب پوستی شود. دمای رشد این باکتری ۲۸ درجه سانتیگراد می باشد [۶۷].

۳-۲-۱-۱-۲- باسیلوس کهنی

باکتری باسیلوس کهنی گرم مثبت و دارای اندوسپور انتهایی است. این باکتری در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد در محیط نوترینت آگار بدون اوره رشد می کند. باکتری مذکور دارای دو آنزیم کاتالاز و سیتوکروم اکسیداز است که می توان جهت شناسایی آن استفاده نمود. باکتری باسیلوس کهنی می تواند با استفاده از لاکتات کلسیم تولید رسوب کربنات کلسیم کند. بنابراین با توجه به تاثیری که ترکیب اوره در مقاومت فشاری بتن دارد نسبت به دو گونه پاستوری و اسفریکوس ارجحیت دارد [۶۸].

باسیلوس سوبتیلیس گرم مثبت و کاتالاز مثبت که در محیط های خاکی وجود دارد. با توجه به تشکیل اندوسپور قادر است در شرایط محیطی سخت زنده بماند. این باکتری در دو شرایط بیهوازی و هوازی قادر به رشد می باشد. این گونه از باکتری می تواند در شرایط قلیایی بتن در حضور مواد غذایی عصاره مخمر و پیتون تولید رسوبات کلسیم کند. همانطور که در شکل (۲-۲) مشاهده می شود، این گونه از باکتری در مقایسه با گونه کهنی که در عدم حضور اوره قادر به تولید رسوبات کلسیم می باشند در افزایش مقاومت فشاری بتن تاثیر بیشتری دارد. استفاده از باسیلوس سوبتیلیس در ترمیم بتن ها روشی مقرون به صرفه می باشد زیرا این گونه از باکتری محیط زیست دوست، دارای صرفه اقتصادی و غیربیماریزا می باشد. بنابراین به دلیل محیط زیست بودن این گونه از باکتری می توان از محیط کشت مایع حاوی باکتری به صورت اسپری در ترک های بتن جهت ترمیم استفاده نمود [۶۹].



شکل (۲-۳) باکتری های رنگ شده باسیلی شکل گونه سوپتیلیس

یکی از روش‌هایی که برای خود ترمیمی بتن به کار گرفته می‌شود استفاده از مواد پلیمری انکپسوله شده در بافت بتن است. با ترک خوردن بتن کپسول‌ها شکسته شده و مواد پلیمری در حضور رطوبت آزاد می‌شوند و ترک‌ها را پر می‌کنند. اما تحقیقات نشان داده که مواد پلیمری بر روی خواص مکانیکی بتن تاثیر منفی دارند. روش‌های خود ترمیمی بیولوژیکی به لطف تحقیقات انجام شده از سال ۲۰۱۱ توسط یک میکروبیولوژیست هلندی با الهام از مکانیسم‌های ترمیم استخوان‌های شکسته شده در بدن انسان است. او بتن خود ترمیم شونده طراحی کرد که حاوی باکتریهای محصور شده از جنس باسیلوس بود که کربنات کلسیم را از طریق زیست معدنی زایی رسوب می‌دهند و بدین ترتیب شکاف‌ها را آب بندی می‌کنند. این تکنیک بر اساس اضافه کردن اسپورهای باکتریایی با مواد مغذی محصور شده در ماتریس بتونی است که در هنگام تماس با آب، رطوبت یا اکسیژن، اسپورها پاره می‌شوند و به بافت بتن وارد شده و باعث فرآیند بیولوژیکی می‌شوند. تحقیقات نشان داده اند که افزودن باکتری‌ها و مواد مغذی به طور مستقیم به ماتریس بتن باعث بهبود خواص مکانیکی آن می‌شود، اما بقای باکتری‌ها بعد از ده روز پس از پخت، به دلیل pH زیاد (بین ۱۲ و ۱۳) و حالت خشک بتن، دشوار می‌شود و ممکن است از بین بروند. به همین دلیل، محصورسازی برای محافظت از باکتری‌ها در محیط بتن ضروری است. در روشهای مختلف انکپسولیشن باکتری‌ها، عواملی مانند مواد، اندازه، توزیع و مقدار کپسول‌های اضافه شده در ماتریس بتن را مورد بررسی قرار داده اند. کپسول‌ها می‌توانند بقای باکتری‌ها را افزایش دهند اما در عین حال باید به اندازه‌ی کافی قوی باشند که در برابر فرایند اختلاط بتن مقاومت کنند و به اندازه‌ی کافی شکننده باشند که با برخورد ترک، شکافته شوند. کپسول‌ها همچنین باید قادر به ایجاد پیوند محکم با ماتریس باشند تا از اثرات منفی بر روی خواص مکانیکی بتن جلوگیری شود [۷۰].

بنابراین به طور کلی نکات مهمی که در انتخاب نوع کیسول بایستی در نظر گرفت موارد زیر می باشند.

۱. استحکام در طم، فرآند اختلاط

۲. مدت زمان و شرایط ترمیم توسط ماده‌ی ترمیمی

۳. برآورد احتمال برخورد ترک به یک کپسول

۴. تاثیر کپسول های خالی بر مقاومت بتن

۵. راندمان آزاد سازی ماده ی ترمیمی از کپسول

۶. پایداری ماده ی ترمیمی در کپسول

۷. بازیابی دوام و پایداری و استحکام بافت بتن حاوی کپسول ها

۸. تکرار پذیری عمل خود ترمیمی

۱-۳-۲- انتخاب کپسول مناسب جهت کپسوله کردن باکتری ها

تاکنون محققان مختلفی از مواد زیادی برای حفاظت از باکتری ها استفاده کرده اند که می توان از این مواد به خاک دیاتومه، خاک رس منبسط شده، ژئوپلیمرها، پلیمرها، هیدروژل ها و ... اشاره کرد.

۱-۳-۲-۱- خاک دیاتومه

خاک دیاتومه یک عامل بی حرکت کننده ی باکتری هاست که از ابتدایی ترین مواد به کار گرفته شده در این تکنیک است. ساختار این ماده، بسیار متخلخل، از نظر شیمیایی پایدار و بی اثر است. این ماده با اندازه ذراتی بین ۴ تا ۲۰ میکرومتر، می تواند به واسطه ی تخلخلی که دارد از باکتری ها در برابر شرایط سخت و قلیایی محافظت کند.

۲-۳-۱-۲- دانه های سبک با ساختار متخلخل

به دانه هایی گفته می شود که به دلیل متخلخل بودن و وجود هوا در خلل و فرج آن ها، سبک و تراکم ناپذیر هستند و این تخلخل ها به عنوان جایگاهی برای حفاظت از باکتری ها در نظر گرفته می شود. در این تکنیک ابتدا سبک دانه ها به عنوان کپسول، با باکتری ها و مواد مغذی آن ها مخلوط و بارگیری می شوند و سپس دانه های حامل باکتری و مواد مغذی با سایر اجزای بتن مخلوط می شود. در ادامه به بررسی دو نمونه از این سبک دانه ها پرداخته می شود.

۳-۳-۱-۳- دانه های سبک خاک رس منبسط شده

در روش تولید این دانه ها ابتدا خاک رس به عنوان ماده اولیه از معادن خاک رس به واحد فرآوری کارخانه حمل شده، پس از نمونه گیری و کنترل دقیق مواد شیمیایی و حصول اطمینان از نداشتن مواد شیمیایی و آهکی پس از آبدهی به صورت گل رس وارد کوره گردان می شوند.

وقتی گل رس در درجه حرارتی حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرد، گازهای ایجاد شده دانه ها را منبسط می کند و هزاران حباب هوای ریز درون آن ها تشکیل می شود. با سرد شدن مصالح، حباب های هوا به صورت فضاهای منفک باقی مانده و سطح آنها سخت می شود. این دانه ها دارای شکل تقریباً گرد و سطح زبر و ناهموارند. رویه میکروسکوپی خارجی دانه ها دارای خلل و فرج ریز است. بخش داخلی دانه ها دارای بافت سلولی سیاه رنگ است. پس از مرحله تولید، محصولات به صورت دانه بندی مخلوط ۰-۲۵ میلی متر وارد سرند شده و به سه رده دانه بندی ۴-، ۱۰-۴ و ۲۰-۱۰ میلی متر تفکیک می شوند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته این ماده تقریباً کاربرد وسیعی در تکنیک خود ترمیمی بتن داشته است. این دانه ها به خاطر سطح خارجی و ساختار داخلی متخلخل می توانند باکتری ها را درون خود محافظت کنند. از دیگر خواص آن ها میتوان به سبک بودن و مقاوم بودن آن ها در برابر فشارهای مکانیکی و بارگذاری های مکرر اشاره کرد. همچنین این دانه ها از نظر شیمیایی بی اثر و خنثی هستند و باعث خوردگی بقیه ی مواد نمی شوند. از طرفی این دانه ها چرخه های متوالی یخبندان را طی می کنند و عمر مفید آن ها بیش از صد سال است. خصوصیت دیگر این دانه ها عدم جذب آب به دلیل داشتن لایه ی خارجی سخت و ساختار بخصوص آن است. (Error! Reference source not found.) تصویری از این دانه ها را با ابعاد ۴-۰ م

یلی متر ارائه می دهد.



شکل (۲-۴) دانه های سبک خاک رس منبسط شده

در مطالعه ای با بکار بردن این ماده با دانه بندی ۴-۱ میلی متر و جایگزین کردن ۵۰ درصد از سنگ دانه های درشت بتن با دانه های رس منبسط شده ی حامل باکتری ها و مواد مغذی آن ها، ترک هایی با عرض ۰/۱۵ میلی متر ترمیم شد اما مقاومت فشاری بتن ۵۰٪ کاهش یافت [۷۱].

در مطالعات بعدی با پوشاندن دانه های کلی با دو لایه ژئوپلیمر متاکائولین و سدیم سیلیکات حداکثر عرض ترک های ترمیم شده به ۰/۷۹ میلی متر رسید [۷۲] و [۷۳].

۴-۱-۳-۲- دانه های سبک سرامسیت

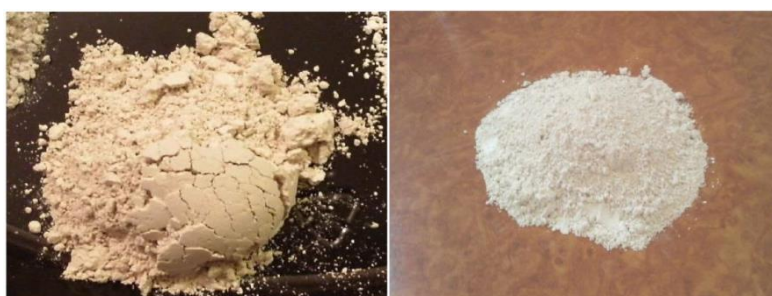
این ماده دارای دانه های سبک و متخلخلی است که به ماسه ی ریخته گری معروف است. عملکرد حفاظت از باکتری ها مانند عملکرد دانه های رس منبسط شده است و خصوصیات و ظاهری مشابه دانه های رس دارد.

در مطالعه ای که از این دانه ها به عنوان کپسول های حامل باکتری ها استفاده شده است ترک هایی با عرض ۰/۵ میلی متر ترمیم شده و خواص بتن بهبود پیدا کرده است [۷۴].

۵-۱-۳-۲- ژئوپلیمرها

ماده ای است که از سنگ های حاصل شده از سخت شدن خاکسترهای آتشفشانی هم ساخته می شود که به سختی گرانیت و عایق بسیار خوبی است. همچنین در برابر حرارت مقاوم است و در دماهای بالا مقاومت آن بیشتر می شود. این مواد به صورت غیر معمولی ساختار متخلخلی دارند که به آن ها اصطلاحاً اجازه ی نفس کشیدن می دهد و می تواند به عنوان حامی برای باکتری ها و مواد مغذی آن ها به کار رود.

یکی از انواع این مواد متاکائولین است. مواد خام اولیه در تولید متاکائولین، رس کائولن می باشد. کائولن یک نوع خاک معدنی بسیار ریز است که عموماً بر اساس تجزیه ی فلدسپارها، گرانیت و آلومینیوم سیلیکات ها شکل می گیرد. برای تولید متاکائولین رس کائولن را تا محدوده ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه ی سانتیگراد حرارت می دهند که محصول نهایی متاکائولین است. این حرارت دادن، آب کائولن را خارج نموده و ساختار کریستالی آن را از بین برده و محصول تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف می شود. اصلی ترین اجزای متاکائولین SiO_2 و Al_2O_3 هستند. در (Error! Reference source not found.) تصاویری از خاک کائولن و متاکائولین مشاهده می شود.



شکل (۲-۵) خاک کائولن شیری رنگ و متاکائولین سفید رنگ [۷۵]

در مطالعه ای از متاکائولین سدیم و سیلیکون برای پوشش دهی باکتری ها و مواد مغذی آن ها (لاکتات کلسیم) استفاده شد. کپسول ها با یک دانه ساز برشی و نازلی با فشار بالا ساخته شدند که قطر آن ها بین ۱ تا ۴ میلی متر بود اما در بررسی های انجام شده مشاهده شد که کپسول ها بعد از ۳ ساعت ۶۵ تا ۱۰۰ درصد از مواد ترمیم را از دست داده اند [۷۵].

۶-۱-۳-۲- پلیمرها

در این تکنیک تا کنون از پلیمرهایی مانند سیلیکاژل، پلی یورتان و هیدروژل ها استفاده شده است که در ادامه به هر کدام پرداخته می شود.

۷-۱-۳-۲- سیلیکاژل

سیلیکاژل یک پلیمر است که از واحدهای دی اکسید سیلیسیم تشکیل شده است. همچنین این ماده یک ماده ی متخلخل و جاذب خوبی برای آب است که به آن این امکان را می دهد که به عنوان حامل باکتری ها و مواد مغذی آن ها به کار گرفته شود. سیلیکاژل خواص مکانیکی و حرارتی خوبی دارد و از نظر بیولوژیکی خنثی است.



شکل (۲-۶) دانه های سیلیکاژل [۷۶]

در پژوهشی که توسط محققان انجام شده است از سیلیکا سل همراه با باکتری ها و مواد مغذی آن ها در تیوب های شیشه ای (طول ۴۰ و قطر داخلی ۳ میلی متر) استفاده شده است. کلئید سیلیکا (سیلیکا سل) سوسپانسیونی از ذرات آمورف، ریز، غیرمتخلخل و نوعاً کروی سیلیکا در یک فاز مایع می باشد. کلئید سیلیکا چگال تر از آب بوده و به روش الکترواستاتیک پایدار شده تا به ذرات اجازه بدهد به صورت معلق در محلول باقی بمانند. با ترک خوردن بتن، تیوب های شیشه ای شکسته شده و سیلیکا سل در مجاورت یون های کلسیم موجود در ساختار بتن بصورت سیلیکا ژل درمی آید و باکتری ها را در بر می گیرد و سپس باکتری ها در مجاورت اوره و مواد مغذی رسوب کلسیم کربنات تولید می کنند. در این تحقیق افزایش ۵ درصدی مقاومت فشاری مشاهده شده است [۷۶].

۸-۱-۳-۲- پلی یورتان

فوم پلی یورتان به عنوان حامل خوبی برای باکتری ها بکار رفته است. این فوم هم بصورت اسپری و هم به صورت جامد موجود است.

در مطالعه ای از پلی یورتان و باکتری ها و مواد مغذی آن ها در تیوب های شیشه ای استفاده شده است. بعد از ایجاد ترک در بتن تیوب شیشه ای شکسته و فوم پلی یورتان در محل ترک شکل گرفته و مواد ترمیمی را در بر می گیرد و در حضور اوره و مواد مغذی می تواند رسوب کلسیم کربنات تولید کند. افزایش ۶۰ درصدی مقاومت فشاری بتن از نتایج این بررسی است [۷۶].

۹-۱-۳-۲- هیدروژل ها

هیدروژل ها شبکه های پلیمری سه بعدی با اتصالات عرضی هستند که قابلیت جذب بسیار زیاد آب یا سیالات زیستی را حتی زیر فشار دارند. این ترکیبات بدون انحلال می توانند مقدار زیادی آب جذب کنند.

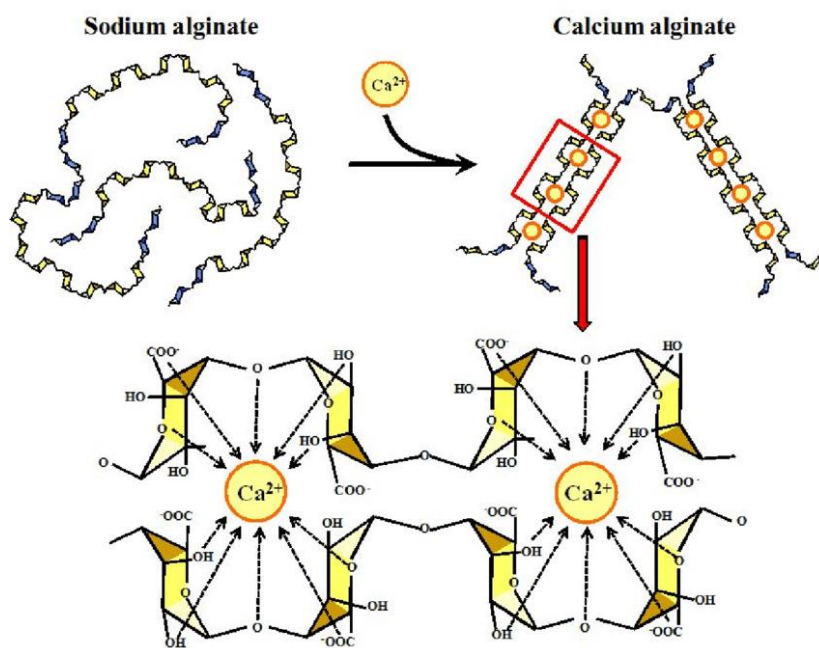
انواع شیمیایی آن به دلیل استحکام مکانیکی خوب مورد توجه هستند. همچنین، هیدروژل های طبیعی به دلیل تنوع، فراوانی، ارزانی، تجدیدپذیری، سمی نبودن و نیز زیست تخریب پذیری و زیست سازگاری نسبت به هیدروژل های سنتزی بسیار جالب توجه هستند. مواد اولیه اصلی برای تهیه هیدروژل ها شامل مونومرهای سنتزی یا طبیعی یا پلیمرها هستند. از پلیمرهای طبیعی می توان کیتوسان، آلژینات، فیبرین، کاژن، ژلاتین، هیارونیک اسید و دکستران را نام برد.

تخلخل زیاد که از مشخصه هیدروژل ها است، امکان بارگذاری مواد ترمیم کننده درون ماتریس ژل و سپس رهایش آن را در سرعتی از پیش طراحی شده فراهم می کند.

ظرفیت نگهداری آب و تراوایی، مهم ترین مشخصه های هیدروژل ها است. هیدروژل های پلیمری شبکه ای شده وقتی در آب یا حلال قرار می گیرند، متورم می شوند، اما حل نمی شوند. خاصیت تورم که معمولاً با عنوان درجه ی تورم برای تعریف هیدروژل به کار می رود، به عوامل زیادی مانند چگالی شبکه، ماهیت حلال و پارامترهای برهم کنش حلال-پلیمر بستگی دارد. ظرفیت جذب آب هیدروژل به تعداد گروه های آب دوست و چگالی شبکه ای شدن وابسته است. ظرفیت نگه داری آب در هیدروژل با افزایش تعداد گروه های آب دوست زیاد و با ازدیاد چگالی شبکه ای شدن کم می شود. درصد تورم هیدروژل ها به طور مستقیم با مقدار آب جذب شده متناسب بوده و از ویژگی مهم این ترکیبات به شمار می رود.

ماکرومولکول کلسیم آلژینات از جمله هیدروژل هایی است که در این تکنیک به صورت کپسول برای حفاظت از باکتری ها به کار رفته است. تهیه کپسول های کلسیم آلژینات حاوی باکتری ها ساده و ارزان است. (شکل ۲-۵) اما یکی از مشکلاتی که ممکن است پدید آید کاهش مقاومت فشاری بتن است. چرا که درصد تورم دانه های کلسیم آلژینات در محیط های قلیایی بیشتر از محیط های اسیدی است. محیط بتن قلیایی است و pH بین ۹ تا ۱۲ دارد. به همین جهت کپسول های کلسیم آلژینات در این محیط به دلیل درصد تورم بالا پاره شده و مواد ترمیمی محافظی نخواهند داشت [۷۷]. همچنین مقدار بهینه ی سدیم آلژینات و کلسیم کلرید برای تولید بیشترین مقدار رسوب کلسیم کربنات گزارش شد.

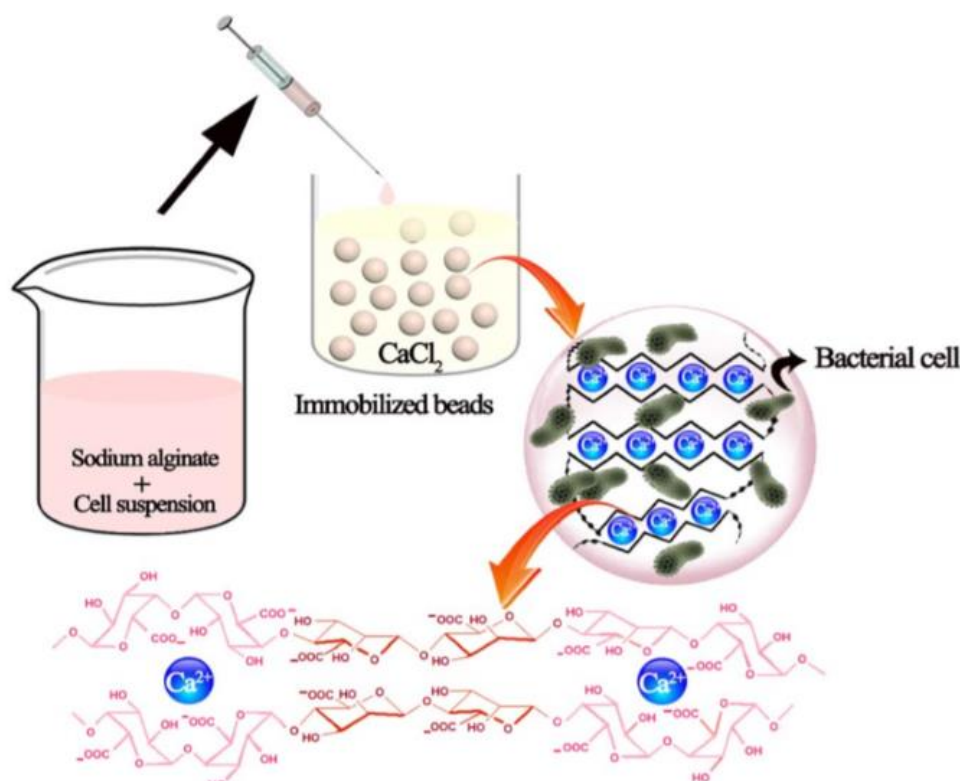
(Error! Reference source not found.) تصویری از ساختار سدیم آلژینات و جایگزینی یون های کلسیم در ساختار این ماکرو مولکول را نشان می دهد.



شکل (۲-۷) ساختار سدیم آلژینات و جایگزینی یون های کلسیم در ساختار این ماکرو مولکول [۷۷]

در مطالعه ای که اخیراً صورت گرفته است سعی بر آن بوده که با اضافه کردن کیتوسان، درصد تورم دانه های کلسیم آلژینات

در pH های مختلف بررسی شود. با اضافه کردن ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ درصد کیتوسان به محلول سدیم آلژینات و باکتری ها و مواد مغذی و اضافه کردن آن به صورت قطره قطره با یک سرنگ به محلول کلسیم کلرید دانه های کلسیم آلژینات تشکیل می شوند که حاملان مواد ترمیم کننده ی بتن هستند. با اندازه گیری درصد تورم دانه ها بدون حضور کیتوسان و در حضور کیتوسان، مقدار بهینه ی کیتوسان مشخص شد. هنگامی که مقدار کیتوسان اضافه شده ۱ درصد باشد، درصد تورم دانه ها در pH=6 بیشترین مقدار و در pH=12 کمترین مقدار است و دانه ها می توانند در محیط بازی با درصد تورم قابل قبولی از مواد ترمیم کننده محافظت کنند. همچنین با بکار بردن مقادیر بهینه از کیتوسان، سدیم آلژینات و کلسیم کلرید مشاهده شد که مقاومت فشاری ۱۰/۲۸٪ و مقاومت خمشی تقریباً ۱۳٪ افزایش یافته است [۷۸].



شکل (۸-۲) فرآیند انکپسوله شدن باکتری ها در دانه های کلسیم آلژینات [۷۸]

۴-۲- انتخاب مواد ترمیمی مناسب به همراه باکتری ترمیم کننده ترک (روش هیبریدی)

سیمان ابتدا توسط یک فرد انگلیسی از پختن مخلوط سنگ آهک و سنگ رس در یک کوره قدیمی تولید شد. سیمان گردی نرم، جاذب آب و چسباننده است و ملات این گرد با آب قادر است به مرور در مجاورت هوا یا در زیر آب سخت شود. به طور کلی ترکیبات اصلی تشکیل دهنده ی سیمان، اکسید کلسیم و اکسید سیلیسیم می باشد که اولی در سنگ آهک و دومی در خاک رس به مقدار زیادی یافت می شود و ترکیب سومی که در کنار این دو از اهمیت ویژه ای برخوردار است اکسید آلومینیوم می باشد که در خاک رس موجود است. اگر سنگ آهک و سنگ رس پودر شوند و سپس پخته شوند، کلینکر یا سیمان تولید می شود. یعنی واکنش بین اکسید کلسیم و اکسید سیلیسیم در مجاورت اکسید آلومینیوم منجر به تشکیل فازهایی می شود که به ماده ی تولید شده خواص سیمانی می بخشد. برای انجام این واکنش ها و تشکیل فازهای مورد نظر دمای کوره باید تا بالاتر از ۲۰۰۰°C افزایش یابد. دستیابی به این دما نیاز به صرف انرژی بسیار زیادی دارد و از طرفی با اضافه نمودن سنگ آهن می توان این دما را کاهش داد. سنگ آهن به عنوان یک روان کننده به ذوب این ترکیبات کمک می کند و باعث می شود دمای مورد نیاز تا حدود ۱۴۵۰°C کاهش یابد. در نتیجه ترکیبات موجود در سیمان حاصل واکنش بین آهک، سیلیس، آلومینا و

اکسید آهن در هنگام پختن می باشد. این اجزا ترکیبات اصلی تشکیل دهنده ی مواد خام هستند که همراه با ترکیبات فرعی دیگر نظیر سولفات ها، قلیایی ها و اکسید منیزیم که درصد آن ها مجموعاً ۵٪ می باشد، پودر سیمان را تشکیل می دهند.

در کوره ی پخت در دمای 800°C به بعد فازهای سیمان شروع به تشکیل شدن می کنند و در دمای حدود 1400°C همه ی فازها تثبیت می شوند. ترکیبات عمده ی موجود در سیمان، پس از پخت اکسیدهای فوق در مجاورت هم که به فازها یا کریستال های کلینکر سیمان موسوم هستند عبارتند از:

- سه کلسیم سیلیکات: C_3S
- دو کلسیم سیلیکات: C_2S
- سه کلسیم آلومینات: C_3A
- آلومینو فریت: C_4AF

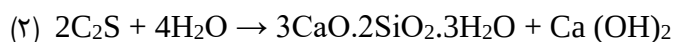
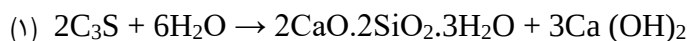
C_3S : فاز اصلی سیمان است و خواص اصلی سیمان ناشی از وجود این کریستال است. این فاز دارای خاصیت گیرش اولیه است و بخش عمده ای از مقاومت فشاری سیمان مربوط به وجود این ترکیب است و در فاصله ی هفت روز به حد عمده ای از مقاومت خود می رسد.

C_2S : این ترکیب نقشی در گیرش ابتدایی سیمان ندارد ولی در دراز مدت هیدراته شده و ایجاد گیرش می نماید. نقش این فاز در مقاومت اولیه ی سیمان ناچیز است ولی در دراز مدت از جمله عوامل موثر در مقاومت سیمان است.

C_3A : این فاز دارای گیرش سریع است و مخلوط کردن پودر آن با آب آنقدر حرارت ایجاد می شود که شکستن آن به صورت انفجار گونه و همراه با تولید بخار آب است و همچنین خمیر حاصله دارای شکل پذیری بالایی است.

C_4AF : سریعاً هیدراته می شود و هنوز نقش آن در مقاومت سیمان مشخص نیست.

به طور کلی می توان گفت C_2S و C_3S تقریباً موجب ایجاد کلیه ی خصوصیات مفید با ایجاد ترکیبات هیدراتاسیون اصلی به صورت ژل C-S-H می گردند. با این حال C_3S بسیار سریع تر از C_2S هیدراته شده و از این رو مسئول ایجاد مقاومت اولیه است. واکنش های (۱) و (۲) نمایان گر نحوه ی هیدراتاسیون این دو ترکیب مهم است.



به صورت تخمینی می توان گفت سالانه یک تن سیمان برای هر انسان تولید می شود و به همین دلیل دومین تولید کننده ی بزرگ گازهای گلخانه ای فرآیند تولید سیمان است. استفاده ی مقدار زیاد سیمان در قسمت ساخت و ساز به دو دلیل اقتصادی و محیط زیستی قابل توجه نیست. به طور تقریبی ۷ درصد از کربن دی اکسید تولیدی در دنیا از تولید سیمان در جو منتشر می شود و به عبارتی هر تن سیمان ۶۵۰ تا ۹۲۰ کیلوگرم کربن دی اکسید وارد جو کند. لذا با مصرف کمتر سیمان می توان تولید کربن دی اکسید را به طور موثری کاهش داد. تاکنون موارد زیادی بعنوان جایگزین درصدی از سیمان توسط محققان مختلف به کار گرفته شده است. محصولات جانبی صنعتی و کشاورزی مثل خاکستر بادی، فوم سیلیکا، خاکستر پوسته ی برنج، خاکستر سوختن نخل و... انتخاب های خوبی به عنوان جایگزین های سیمان بوده اند. این مواد به پوزولان های

صنعتی موسومند. پوزولان سیلیس یا سیلیس آلومینیومی است که به تنهایی خاصیت چسبندگی ندارد و یا چسبندگی کمی دارد. این مصالح در حالت گرد (ذرات ریز) و در مجاورت رطوبت و حرارت معمولی طی واکنش های شیمیایی با هیدروکسید کلسیم ترکیب هایی با خاصیت سیمانی به وجود می آورند. مصرف مواد پوزولانی در بتن می تواند برای تامین یک یا چند خاصیت مشروح زیر باشد:

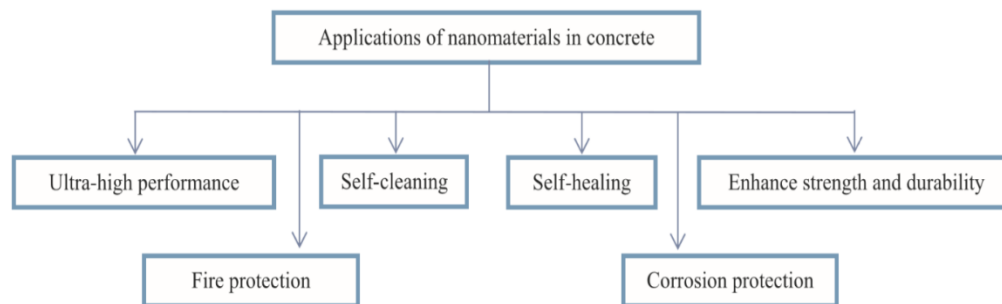
- کاهش میزان سیمان به کار رفته در بتن
 - کاهش سرعت و میزان حرارت حاصل از فرآیند آبگیری سیمان
 - بهبود کارایی بتن
 - افزایش مقاومت دراز مدت بتن
 - افزایش پایایی بتن از طریق کاهش نفوذپذیری و عملکرد مناسب در برابر تهاجم یون کلرید و سولفات
- مواد پوزولانی می توانند به صورت پودر در مواد اولیه جایگزین درصدی از سیمان باشند اما معمولاً استفاده ی بیشتر از ۵۰ درصد از این مواد در پودر سیمان باعث کاهش مقاومت مصالح بتنی می شود. از طرفی وجود ترکیبات شیمیایی و مواد سیلیکاتی در سیمان پوزولانی مقاومت آن را در برابر عواملی که منجر به فرسایش و هوازدگی می شوند، کاهش می دهد. به همین دلیل در پروژه های بتن ریزی که احتمال این آسیب ها وجود دارد سعی می شود از سیمان پوزولانی استفاده نشود. علاوه بر آن مقاومت فشاری این سیمان در روزهای اولیه استفاده بسیار پایین است و بعد از ۲۸ روز به کیفیت لازم دست خواهد یافت. به عبارتی حرارت هیدراتاسیون این سیمان پایین است، از این رو یک ماده ی دیرگیر به شمار می آید. به همین دلیل در بتن ریزی ها باید مدت زمان بیشتری از آن مراقبت شود تا بتوان به نتیجه قابل قبول دست یافت.

واکنش پوزولانی یک واکنش شیمیایی معدنی است که در سیمان های حاوی پوزولان اتفاق می افتد. این واکنش یک نوع واکنش اسید-باز است که طی آن کلسیم هیدروکسید $(Ca(OH)_2)$ و سیلیسیک اسید (H_4SiO_4) یا $(Si(OH)_4)$ با یکدیگر واکنش داده و تولید کلسیم سیلیکات هیدرات $(CaH_2SiO_4 \cdot 2 H_2O)$ می دهد که به طور مخفف در صنعت سیمان به شکل C-S-H شناخته می شود. شکل کلی این واکنش به صورت زیر است:



۱-۴-۲- استفاده از نانو مواد در ساختار بتن

در سال های اخیر رشد در فناوری نانو و دسترسی به نانو مواد مناسب برای استفاده در ساخت و سازها باعث بهبود چشمگیر خواص بتن شده است. به طور کلی مواد نانو به موادی با اندازه ی نانو یا توده ای از مواد که حاوی ذرات نانو باشد گفته می شود. ذرات با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر به عنوان ذرات نانو نامیده می شوند. تحقیقات نشان داده است که خواص مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن از طریق اضافه کردن مقدار کمی نانومواد قابل بهبود هستند. استحکام اولیه ی مصالح بتنی که در حضور نانو مواد ساخته می شوند بسیار بالاتر از آن هایی است که به روش معمولی تهیه شده اند. دستیابی به استحکام بالاتر به هیدراتاسیون سریع تر سیمان، کاهش منافذ و حفره ها، افزایش پیوندهای سطحی بین خمیر سیمان سخت شده و اجزای دیگر بتن نسبت داده شده است. همچنین از نانو مواد برای کاهش تخلخل و افزایش دوام بتن بهره گرفته شده است. کاربردهای دیگر نانو مواد در شکل ۳-۱ قابل مشاهده است که خود ترمیمی بتن از مهم ترین کاربردهای آن است [۷۹].



شکل (۲-۹) کاربرد نانو مواد در بتن [۷۹]

نانو بتن به معنای بتنی است که در آن نانو ذرات با ابعاد کمتر از ۵۰۰ نانومتر در آن به عنوان افزودنی یا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به کار رفته‌اند. نانو ذرات به عنوان یک پر کننده‌ی بسیار خوب برای از بین بردن منافذ خالی بین اجزای بتن عمل می‌کنند و باعث تولید بتنی با چگالی بالا می‌شوند که خواص مکانیکی قابل قبول تر و نفوذ پذیری کمتری در مقابل نفوذ مایعات و گازها دارد.

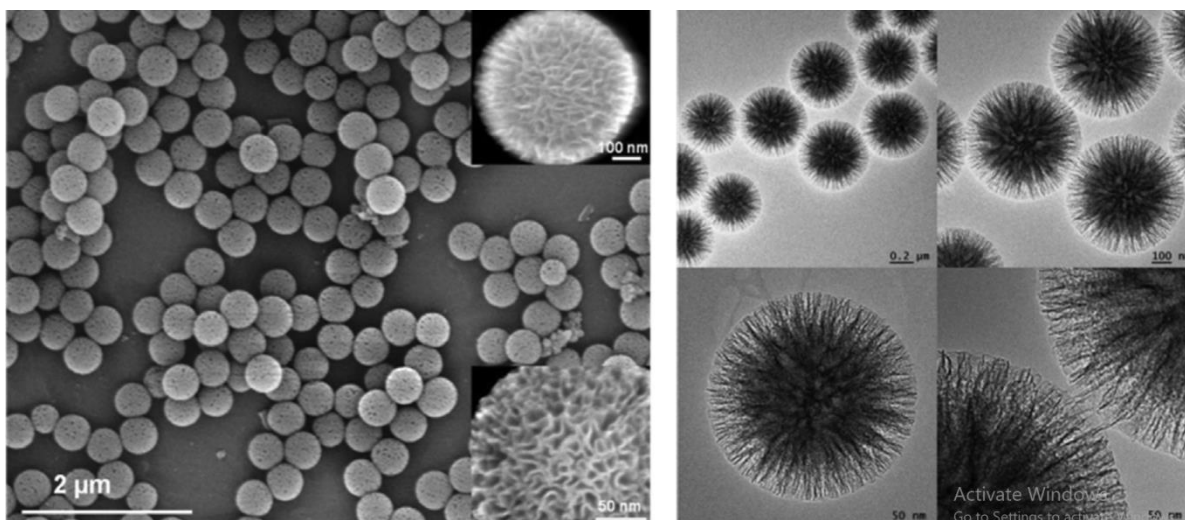
می‌توان گفت نانو ذرات با پر کردن منافذ خالی بین ذرات سیمان باعث بی حرکت شدن آب موجود در این حفره‌ها می‌شوند که اصطلاحاً به این فرآیند اثر پر کنندگی می‌گویند. همچنین نانو ذرات در واکنش‌های پوزولانی شرکت می‌کنند و منجر به تشکیل اضافی ژل کلسیم سیلیکات هیدراته می‌شوند که در نهایت منجر به افزایش خواص مقاومتی بتن می‌شوند. همچنین نانو مواد بعنوان یه نانوفیلر عمل کرده و فضای خالی بین ذرات موجود در ژل C-S-H را پر می‌کنند و در واقع نقش پوزولان‌ها را ایفا می‌کنند. دو اثر پر کنندگی و واکنش‌های پوزولانی ویژگی‌هایی هستند که واکنش‌های مربوط به هیدراتاسیون را تسریع و بهبود بخشیده‌اند. سطح موثر بالای نانوذرات تاثیر زیادی در تسریع و بهبود واکنش‌های هیدراتاسیون دارد و همچنین تشکیل مقدار اضافی از ژل کلسیم سیلیکات هیدراته باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود [۷۹].

سه نمونه از نانو ذرات انتخابی جهت استفاده در این پروژه، نانو سیلیکا، نانوذرات کالی و ذرات نانو کلسیم کربنات هستند که در ادامه به صورت مبسوط به هر کدام پرداخته می‌شود.

۱-۴-۲- نانو ذرات سیلیکا

نانو سیلیکا یک نانو مواد با توانایی بالا برای استفاده در بتن با کارایی بالا است و می‌تواند از میکرو سیلیس تهیه شود. نانو سیلیکا به عنوان یک پر کننده‌ی بسیار خوب عمل می‌کند و می‌توان ۲۰ تا ۳۰ درصد از سیمان را با آن جایگزین کرد. همچنین نانو سیلیکا در کاربرد خود ترمیمی هم بصورت مستقیم و هم به صورت کپسوله شده مورد بررسی قرار گرفته است. [۸۰] (Error! Reference source not found.) تصویری از ذرات نانو سیلیکا ارائه می‌دهد [۸۰].

از اشکالات استفاده از این ماده می‌توان به قیمت بالای آن و در دسترس نبودن برای برخی از کشورها اشاره کرد [۸۰]. تاثیر نانو سیلیکا بر جنبه‌های مختلف بتن در قسمت‌های بعدی به طور مبسوط توضیح داده خواهد شد.



شکل (۲-۱۰) تصویر FSSEM ذرات نانو سیلیکا [۸۰]

۱-۱-۱-۲- مکانیزم تاثیر نانو ذرات سیلیکا بر بتن

در مطالعات صورت گرفته در زمینه ی بهبود خواص مکانیکی بتن با ذرات نانوسیلیکا، مکانیزم های متفاوتی را محققین برای این تاثیر گزارش کرده اند. افزودن نانو سیلیس بر روی گیرش سیمان نیز موثر می باشد و زمان گیرش اولیه را کاهش می دهد. مقدار نانو سیلیس در بتن را بایستی به شدت کنترل کرد. اگر نانو سیلیس به خوبی پخش شود چسبندگی را افزایش می دهد که به معلق شدن ذرات سیمان و سنگدانه کمک می کند و مقاومت تفکیک ذرات بتن را بهبود می بخشد. اکسید سیلیس در مقیاس نانو، نه تنها همچون یک پرکننده برای بهبود ریز ساختار رفتار می کند بلکه شبیه یک فعال کننده برای بالا بردن واکنش های پوزولانی نیز عمل می کند. در ادامه مکانیسم های تاثیر گذار در خواص بتن مورد بررسی قرار می گیرند.

• اثر پر کنندگی

عمده ترین دلیل توسعه مقاومت فشاری بتن با نانوسیلیس را نقش پر کنندگی ذرات نانو در بین منافذ خمیر سیمان می دانند. این مکانیزم اینگونه بیان می شود که ذرات نانو سیلیکا به علت ریزدانه گی بسیار بالا و چسبندگی سطحی ذرات، در بین ذرات ژل H-S-C قرار گرفته و ذرات ژل را پر می کنند. این امر موجب یکپارچگی ژل H-S-C و افزایش دوام آن می گردد. [۲۵] ریزدانه گی این ذرات باعث افزایش دمای واکنش هیدراسیون گردیده و در نتیجه سرعت کسب مقاومت را نیز افزایش می دهند. قرارگیری ذرات نانو باعث جلوگیری از توسعه ی کریستال های Ca(OH)_2 و در نتیجه کاهش حجم کریستال ها و در مقابل افزایش حجم ژل H-S-C در ماتریس سیمانی می گردد [۸۰].

• اثر هسته زایی

علت اصلی بهبود خواص مکانیکی بتن با نانو سیلیکا در مکانیزمی به نام هسته زایی توجیه می شود. ذرات نانوسیلیکا هسته هایی برای توسعه ی محصولات هیدراسیون سیمان در محلول ایجاد می نمایند. این ذرات به مانند سنگدانه ها نقش استخوان را در برابر ژل سیمان ایجاد می کنند. اتصال این نمونه ی استخوان بندی با ژل سیمان، نقش عمده در مقاومت بتن دارد. هسته زایی ذرات نانو سیلیکا موجب بهبود اندازه ی منافذ و کاهش تخلخل بتن، حتی در زمان عمل آوری کوتاه می گردد. مکانیزم هسته زایی ذرات نانو، به علت سطح ویژه بالایی که دارند، هیدراسیون سیمان را نیز سرعت می بخشند [۸۰].

• فعالیت پوزولانی

یکی از دلایل بهبود مقاومت فشاری را ناشی از فعالیت پوزولانیک نانو سیلیکا دانسته اند. بر این اساس ذرات نانوسیلیکا

با درصد خلوص سیلیس آمورف بالای ۹۹ درصد و سطح ویژه‌ی زیاد، با کریستال‌های Ca(OH)_2 حاصل از هیدراتاسیون واکنش داده و تولید ژل H-S-C می‌نماید. در نتیجه، این واکنش احتمالاً اتصال خمیر سنگدانه را بهبود می‌بخشد.

۲-۱-۱-۲- تأثیر نانوسیلیکا بر رئولوژیکی بتن

جایگزینی درصدی از سیمان با نانو سیلیکا نیاز مخلوط‌های سیمانی به آب را به شدت افزایش می‌دهد. دلیل این نیاز بالا به آب، سطح مخصوص بالای نانو سیلیکا است که منجر به کاهش آب آزاد در بتن و در نتیجه افزایش اصطکاک بین اجزای بتن می‌گردد. استفاده از درصد‌های بالای نانو سیلیکا کارایی مخلوط‌های بتنی را کاهش می‌دهد. اگرچه این ماده نیاز به آب را افزایش می‌دهد اما تأثیر مطلوبی بر پایداری مخلوط‌های سیمانی دارد. مقدار سیلیس استفاده شده ۳ درصد و با اندازه ذرات ۱۵ نانومتر گزارش شده است.

۳-۱-۱-۲- تأثیر نانوسیلیکا بر مقاومت فشاری بتن

نمونه حاوی نانوسیلیکا عمده مقاومت خود را در سن قبل از ۱۴ روز کسب می‌کند، در حالی که روند کسب مقاومت برای نمونه حاوی میکروسیلیس تا سن ۶۰ روز ادامه می‌یابد. مشاهده شده که اگر چه مقاومت ۶۰ روزه خمیره‌های حاوی درصد‌های جایگزینی تقریباً برابر میکروسیلیکا و نانو سیلیکا یکسان است، اما مقاومت ۱۴ روزه خمیره دارای میکروسیلیس با مقاومت ۱ روزه خمیره حاوی نانوسیلیس برابر است. به عبارتی تأثیرگذاری نانوسیلیکا در سنین پایین ۳ روز بسیار مشهودتر از سنین بالای ۲۸ روز است.

دو دلیل عمده برای افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی نانو سیلیکا در زیر ذکر شده است:

- نانوسیلیکا عملکرد پرکنندگی داشته، فضاهای داخلی ریز ساختار سخت شده‌ی خمیر سیمان را پرمی کند و بدین ترتیب منجر به افزایش مقاومت می‌شود.
- خصوصیات پوزولانی، که با واکنش نانوسیلیکا و هیدروکسید کلسیم ژل جدید H-S-C تشکیل می‌شود و در نتیجه مقاومت بهبود می‌یابد.

۲-۱-۲-۲- نانو ذرات رس

نانورس‌ها (Nanoclay) کانی‌هایی هستند که حداقل یکی از ابعاد آنها در حد نانومتر باشد. این مواد به دلیل ارزانی و در دسترس بودن، توجه زیادی در زمینه فناوری‌نانو به خود جلب کرده‌اند، همچنین اندازه کوچک این مواد آنها را قادر ساخته تا بتوانند با مواد دیگر که در این زمینه وجود دارند، رقابت کنند. زیرمیکروسکوپ الکترونی با قدرت تفکیک بالا مشاهده می‌شود که نانورس‌ها شامل صفحات کوچک و نامنظم رسی هستند که در حدود ۱ نانومتر ضخامت و ۱۰۰ نانومتر قطر دارند. رس‌های رایج به صورت طبیعی به عنوان مواد معدنی به شمار می‌آیند. بسیاری از آن‌ها سیلیکات‌های آلومینیم می‌باشند که ساختار ورقه‌ای دارند. شایع‌ترین نانو رس، مونت موریلنت (از خانواده اسمکتیت) می‌باشد. انواع دیگر نانو رس‌ها هکتوریت‌ها و رس‌های سنتزی (برای مثال هیدروتالکیت) می‌باشند. نانورس‌ها سطح ویژه‌ای در حدود ۷۵۰ مترمربع بر گرم دارند.

همانطور که گفته شد نانوتکنولوژی به مطالعه مواد با ساختار کوچک در محدوده کمتر از نانومتر تا چند صد نانومتر می‌پردازد. در این محدوده ابعادی، مواد، رفتار ویژه‌ای از خود نشان می‌دهند. نانوذرات از سطح ویژه بسیار بی‌الای برخوردار می‌باشند و این امر واکنش‌پذیری این مواد را به شدت افزایش می‌دهد. هر نانوذره می‌تواند به صورت یک مرکز جاذبه‌زنی در واکنش هیدراتاسیون سیمان تأثیرگذار باشد. برآیند این حضور سبب بهبود ریز ساختار خمیر سیمان به واسطه‌ی افزایش سرعت اولیه واکنش هیدراتاسیون سیمان، افزایش مقدار ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده‌ی حاصل از واکنش‌های پوزولانی، کاهش تخلخل و بهبود مشخصات مکانیکی ساختار ژل به واسطه‌ی افزایش در محتوای آلومینا و افزایش طول زنجیره‌ی سیلیکاتی

می گردد.

کلسیم هیدروکسید علاوه بر اینکه نقش مطلوبی در مشخصات مکانیکی بتن ندارد، سبب کاهش دوام بتن در مقابل محیط های مخرب می گردد. لذا اتخاذ شیوه ای با هدف مصرف هر چه بیشتر آن به منظور دستیابی به افزایش در سطح تولید بلورهای مفید در واکنش های سیمانی بتن می تواند با ایجاد ناحیه انتقال قوی تری بین خمیر سیمان و سنگدانه ها، در بهبود مشخصات مکانیکی و پایداری بتن موثر باشد. یکی از انواع افزودنی ها که می تواند در این خصوص مفید واقع گردد رس می باشد. رس با CH واکنش می دهد که در نتیجه آن مقادیر بیشتری H-S-C تولید می گردد. این امر منجر به متراکم تر شدن ریزساختار بتن حاصل می گردد. واکنش پوزولانی رس با CH به

قرار زیر است:



اساساً سه مکانیزم عمل می تواند سبب بروز بهبود در مشخصات کامپوزیت های سیمانی به علت افزودن نانوذرات رس به ماتریس گردد:

- ✓ نانورس می تواند با توجه به ابعاد بسیار کوچکش، به صورت پرکننده عمل نموده و حفرات خالی ماتریس سیمانی را پر کند.
 - ✓ مقادیر بالای SiO_2 موجود در نانورس می تواند منجر به تولید مقادیر بیشتری H-S-C گردد.
 - ✓ همچنین تورم نانوذرات رس به علت جذب آب مابین لایه های آن می تواند منجر به انبساط رس و در پی آن بهبود بخشیدن به اثر پرکنندگی در حفرات موین ماتریس سیمانی گردد.
- همچنین افزودن نانورس به ساختار سیمان، افزایش در مقاومت فشاری و کششی ملات های حاصل را به همراه داشته است. میزان این افزایش در مقاومت فشاری و کششی برای استفاده از نانورس به میزان ۸٪ وزن مصالح سیمانی به کار رفته در ملات به ترتیب معادل ۹٪ و ۷۷٪ گزارش شده است. لازم به ذکر است که در هر کار تحقیقاتی بسته به اجزای خمیر سیمان مقدار بهینه ی نانو رس برای دستیابی به بهترین نتیجه باید تعیین شود.

به طور کلی نتایج زیر در خصوص به کار بردن نانوذرات رس در ساختار بتن قابل ارائه است:

۱. افزودن نانوذرات رس به خمیر سیمان موجب افزایش تراکم و چگالترا شدن خمیر سیمان می گردد.
۲. افزودن نانورس سبب تسریع و افزایش در شدت واکنش های سیمانی می گردد.
۳. افزودن نانورس به مخلوط خمیر سیمان، میزان آب نرمال را افزایش داده و سبب کاهش زمان گیرش خمیر سیمان می گردد.
۴. خمیرهای سیمان حاوی نانوذرات رس از مشخصات چسبندگی بالاتری نسبت به خمیر سیمان معمولی برخوردار می باشند و در کلیه نمونه های حاوی نانوذرات، زمان رسیدن به بیشینه نیروی چسبندگی کوتاهتر است. به واسطه این ویژگی، به نظر می رسد افزودن نانورس به ماتریس می تواند در کاهش فشار وارده بر قالب بندی در بتن های حاوی این نانوذرات مفید واقع گردد.
۵. افزودن نانورس به اختلاط خمیر و ملات سیمان در کلیه سنین سبب افزایش در میزان مقاومت فشاری می گردد.
۶. با افزایش در میزان محتوای نانورس در اختلاط، ویسکوزیته ی آن افزایش می یابد [۸].

۳-۱-۴-۲- نانو ذرات کلسیم کربنات

کلسیم کربنات به طور گسترده ای در کامپوزیت های سیمانی در مقیاس های مختلف به کار گرفته شده است. اثر ماکرو ذرات، میکرو ذرات و نانو ذرات کلسیم کربنات بر خواص مکانیکی و کارایی بتن بررسی شده است. ذرات ماکرو معمولاً به عنوان یک پر کننده یی اثر عمل می کنند و می توانند در ساختار کامپوزیت های سیمانی برای تامین بخشی از استحکام نقش داشته باشند. ذرات میکرو نه تنها فضای بین دانه ها را پر می کنند بلکه فرآیند هیدراتاسیون را سرعت می بخشند و بر کارایی و خواص مکانیکی و دوام مصالح سیمانی و مابقی خواص شیمیایی تاثیر می گذارند. ذرات نانو به دلیل داشتن سطح موثر بزرگتر و اندازه ذرات ریزتر دارای تاثیر زیادی بر خواص فیزیکی و شیمیایی و علی الخصوص تاثیر زیادی بر فرآیند هیدراتاسیون، کارایی، خواص مکانیکی و دوام هستند که حتی این اثر از تاثیر ذرات میکرو بیشتر می باشد. اما با این حال درصد نانو ذرات باید بهینه شود چرا که با بیشتر شدن درصد نانو ذرات کربنات کلسیم اثر آگلومره شدن ذرات در خمیر سیمان، اثرات تقویت کننده ی آن را به طرز چشمگیری کاهش می دهد.

تأثیر نانو کربنات کلسیم بر فرآیند هیدراتاسیون سیمان به محتوای آن، اندازه ذرات و ساختار کریستالی آن بستگی دارد. روند هیدراتاسیون می تواند از طریق اثر هسته سازی و اثر شیمیایی تسریع شود.

ترکیب کربنات نانو کلسیم در کامپوزیت های سیمانی می تواند در هنگام استفاده از مقدار مناسب، مقاومت بتن های جوان را بهبود بخشد. استفاده ترکیبی از نانو ذرات کربنات کلسیم و ذرات میکرو و ماکرو دارای اثر هم افزایی بر مقاومت اولیه و افزایش مقاومت در بلند مدت است. مقاومت در برابر حمله اسید کامپوزیت های سیمانی حاوی نانوذرات کربنات کلسیم مشخص نیست، اما نانوذرات کربنات کلسیم می توانند ماتریس را متراکم تر کنند [۸۲].

مطالعات نشان می دهد که افزودن مقدار کمی از نانو ذرات کلسیم کربنات می تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد. می توان گفت که ژل هیدراته شده ی کلسیم سیلیکات از نانو ذرات به عنوان یک هسته برای تشکیل شدن استفاده می کند و بر روی سطح نانوذرات یک ساختار شبکه ای تشکیل می دهد و ساختار بتن را متراکم تر می کند.

در ادامه به بررسی نحوه ی تاثیر کلسیم کربنات بر فرآیند هیدراتاسیون، کارایی، دوام و خواص مکانیکی پرداخته می شود [۸۵].

۳-۱-۴-۱- فرآیند هیدراتاسیون

نانو کلسیم کربنات با اندازه ذرات ۵۰ تا ۱۲۰ نانومتر در تسریع فرآیند هیدراتاسیون سیمان و به خصوص در هیدراتاسیون ترکیب C_3S به دلیل پدیده ی هسته زایی بسیار موثر است. با افزایش مقدار کلسیم کربنات اثر تسریع بیشتر می شود و هیدراتاسیون دو فاز C_3A و C_4FA نیز افزایش می یابد.

به عبارتی وقتی فاز C_3S در آب حل می شود، نانو ذرات کلسیم کربنات بدلیل سطح موثر وسیع و انرژی سطحی بالا می توانند یون های کلسیم را روی خود بصورت سطحی جذب کنند و به همین جهت غلظت یون های کلسیم در اطراف ترکیب C_3S کاهش می یابد. این امر موجب تسریع فرآیند هیدراتاسیون فاز مورد نظر می شود. از طرفی یون های کربنات نانو ذرات کلسیم کربنات می توانند در آب حل شوند و با C_3A وارد واکنش شوند و همی کربوآلومینات و مونو کربوآلومینات را تشکیل دهند. همچنین ذرات نانو کلسیم کربنات می توانند با فاز C_3S وارد واکنش شوند و $C-S-H$ و کلسیم هیدروکسید تولید کنند که این فرآیند می تواند دلیل افزایش گرمای هیدراتاسیون باشد.

۳-۱-۴-۲- کارایی

با افزایش در اندازه ی ذرات و مقدار نانوذرات، ویسکوزیته و بازده کششی افزایش می یابد. به طور کلی آب موجود در خمیر سیمان شامل دو بخش است: ۱. آب موجود در خلل و فرج خالی بین اجزای سیمان ۲. آب جذب شده بر روی سطح ذرات

سیمان. مکانیسم عمل نانو ذرات بر روی این دو بخش هم به دو صورت است: ۱. اثر رقیق سازی به این مفهوم که آب موجود در حفره ها توسط نانو ذرات جایگزین می شود ۲. اثر پر کنندگی به این مفهوم که نانو ذرات می توانند حفره ها را پر کنند و آب اضافی بر روی سطح موثر بزرگ آن ها جذب شود.

هر دو مکانیسم از اندازه ذرات و مقدار ذرات تاثیر می گیرند و تغییر در این دو پارامتر می تواند ویسکوزیته و جریان پذیری را تحت تاثیر قرار دهد.

۳-۱-۴-۲- خصوصیات مکانیکی

مقاومت فشاری با افزایش مقدار نانو ذرات ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. به این دلیل که از طرفی نانو ذرات فرآیند هیدراتاسیون را تسریع می بخشند و با C_3S و C_3A وارد واکنش می شود و کربوآلومینات و ژل C-S-H تولید می کند و این فرآیند تحت تاثیر میزان نانو ذرات موجود در مخلوط است. اما هنگامی که مقدار زیادی نانو ذره وارد مخلوط می شود، نانو ذرات بر اثر پدیده ی آگلومره شدن به هم می چسبند و سطح موثر آن ها کاهش می یابد. همچنین ماتریس بتنی متراکم تری شکل می گیرد که نمی تواند فضای قابل دسترسی برای محصولات هیدراتاسیون فراهم کند. می توان گفت نانو ذرات کلسیم کربنات می توانند در مراحل اولیه باعث افزایش مقاومت فشاری شوند. به نظر می رسد میکرو ذرات کلسیم کربنات بتوانند در دراز مدت مقاومت فشاری بتن را افزایش دهند. لذا برای دستیابی به هر دو مورد استفاده همزمان از این دو مقیاس ذره پیشنهاد می شود.

۴-۱-۴-۲- دوام

تست نفوذ پذیری آب و کلرید نشان می دهد که بتن حاوی نانو ذرات کلسیم کربنات نفوذ پذیری بسیار کمی دارد. این اثر به دلیل پر شدن حفره های خالی تولید بتن متراکم تر است. با افزایش مقدار نانو ذرات بتن متراکم تر می شود و نفوذ پذیری کاهش می یابد. همچنین در دماهای بالا نانو ذرات کلسیم کربنات می توانند مقاومت فشاری، خمشی و بطور کلی مقاومت بتن را افزایش دهد و این اثر تحت تاثیر محیط و دما نمی باشد اما در دماهای بالاتر از $800^{\circ}C$ چون ساختار کلسیم کربنات تخریب می شود، مقاومت فشاری نیز کاهش می یابد.

در مطالعه ای مقدار بهینه ی نانو ذرات کربنات کلسیم برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری ۲/۵٪ از کل ترکیبات خمیر سیمان تخمین زده شده است و با افزایش این مقدار مقاومت فشاری کاهش یافته است. با افزایش مقدار نانو ذرات هم اثر آگلومره شدن و هم مصرف آب توسط نانو ذرات بیشتر و عدم هیدراتاسیون کافی سیمان، مقاومت فشاری را کاهش می دهد.

تاثیر نانو ذرات کلسیم کربنات بر مقاومت فشاری بتن یک روزه، مقاومت فشاری طولانی مدت بتن، میزان جریان پذیری و میزان جذب آب بررسی شده است و مشاهده شده است که افزودن ۱٪ نانو ذرات کلسیم کربنات به خمیر سیمان مقاومت فشاری بتن را بیش از ۵۰ درصد افزایش می دهد. اگر این مقدار بین ۱ تا ۲ درصد باشد مقاومت فشاری بتن جوان و میزان جریان پذیری آن به بالاترین میزان میرسد و اگر بیش از ۲ درصد باشد میزان جذب آب به حداقل مقدار خود می رسد [۸۳].

۵-۲- خرید مواد و تجهیزات آزمایشگاهی لازم برای انجام پروژه

لیست مواد و تجهیزات مورد نیاز در این پروژه که نام و مشخصات آنها در فصول پیشین ذکر شده بود، به شرح زیر می باشند. تجهیزات مورد نیاز برای انجام این پروژه شامل دستگاه اتوکلاو، قالب های فایبرگلاس بتن ریزی، همزن مغناطیسی، کوره، آن، ترازو، سانتریفیوژ، حمام سونیکاسیون، انکوباتور و دستگاه جک فشاری که در آزمایشگاه مواد سرامیک و پلیمر و سیم و کابل موجود می باشند.

برخی از تست ها مانند اندازه گیری مقاومت کششی، اندازه گیری جذب رطوبت و نفوذ آب، تست اندازه گیری نفوذ کلر و آزمون

های مشخصه یابی از جمله SEM، FTIR و XRD به صورت خدمات از سایر مراکز تخصصی انجام می شود.

۱-۵-۲- مواد آزمایشگاهی

با توجه به دقت بالای مد نظر در آزمایش ها و لزوم احتراز از ناخالصی ها لازم است مواد شیمیایی مورد نیاز از شرکت های معتبری نظیر مرک، آلدیچ، کیولب و یا سیگما تهیه شوند. نانو ذرات کربنات کلسیم و نانو ذرات سیلیکا و رس از جمله مواردی هستند که در این پروژه تهیه شدند.

مواد آزمایشگاهی مورد نیاز این پروژه در جدول زیر ذکر شده است.

جدول (۲-۷) لیست مواد آزمایشگاهی مورد نیاز

ردیف	نام محصول	نام شرکت
۱	محیط کشت نوترینت آگار و براس	کیولب
۲	عصاره مخمر	
۳	نانوذرات کلی	
۴	نانوذرات کربنات کلسیم	
۵	نانوذرات سیلیکا	
۶	سیلیکات سدیم	
۷	آلژینات سدیم	
۸	کلرید کلسیم	
۹	نمک طعام	
۱۰	سیمان، سنگدانه ها و افزودنی های بتن	
۱۱	باکتری باسیلوس سوبتیلیس	

توضیحات مختصری در خصوص بعضی از دستگاه ها و مواد مورد نیاز پرداخته می شود.

۲-۵-۲- محیط کشت نوترینت آگار و براس

محیط کشت نوترینت نوعی محیط کشت میکروب شناسی است که برای رشد باکتری هایی که مشکل پسند نیستند، بکار می رود. این محیط حتی در دماهای بالا نیز جامد است. باکتری ها بر روی سطح محیط رشد می کنند و کلنی های کوچکی را تشکیل می دهند. در محیط براث نوترینت (محیط مایع نوترینت)، باکتری ها در داخل مایع رشد کرده و سوپی شکل خواهند شد. آگار نوترینت دارای:

- پپتون به میزان ۰/۵٪

- عصاره گوشت و مخمر به میزان ۰/۳٪

- آگار به میزان ۱/۵٪

- کلرید سدیم به میزان ۰/۵٪

- آب مقطر

• pH خنثی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد باشد

براث نوترینت نیز دارای همین ترکیبات بجز آگار است [۸۶].



شکل (۲-۱۱) آگار نوترینت در پلیت پلاستیکی [۸۴]

۳-۵-۲- عصاره مخمر

عصاره مخمر شامل محتویات سلول مخمر بدون دیواره سلولی است. این ماده به عنوان مواد افزودنی غذایی یا طعم دهنده و یا به عنوان ماده مغذی برای محیط کشت باکتریها مورد استفاده قرار می گیرند. پودر عصاره مخمر، بخش محلول در آب مخمر اتولیز شده است. عصاره مخمر محرک بسیار خوبی برای رشد باکتری ها است. فرآیند اتولیز مخمر که برای تولید عصاره مخمر به کار می رود کاملاً کنترل شده انجام می شود به طوری که ویتامین های B آن حفظ شود. عصاره مخمر معمولاً با غلظتی حدود ۰.۳ الی ۰.۵٪ در محیط کشت استفاده می شود و منبعی برای تامین نیتروژن، کربن، ویتامین ها و اسیدهای آمینه است [۸۵].

۴-۵-۲- باکتری باسیلوس سوبتیلیس

همانطور که در فصل پیشین این گزارش ذکر شد، این جنس از باکتری ها در مقایسه با سایر جنس و گونه های دیگر به دلیل تشکیل اسپور و عدم استفاده از اوره و همچنین سازگاری بیشتری با مواد ترکیبی بتن جهت ترسیب رسوب کربنات کلسیم و ترمیم زیستی بتن انتخاب شدند. این باکتری از انستیتوپاستور به شکل رشد کرده در محیط کشت جامد و مایع نوترینت تهیه گردید [۸۶].

۵-۵-۲- تجهیزات مورد نیاز و مشخصه یابی و بررسی ویژگی های بتن ترمیمی

به منظور ساخت محصول ترمیمی و همچنین تعیین وضعیت بتن و سازه های ترمیمی و ارزیابی ویژگی آن ها از تجهیزات گوناگونی در این پروژه استفاده می شود که در مورد برخی از آنها توضیحات مختصری داده می شود.

۱-۵-۵-۲- اتوکلاو

دستگاه اتوکلاو وسیله ای برای استریل کردن ابزار پزشکی و آزمایشگاهی در فشار و دمای بالا و با استفاده از بخار آب است. اتوکلاوها در کاربردهای پزشکی برای انجام استریلیزاسیون و در صنایع شیمیایی برای به عمل آمدن پوشش ها و ولکانش لاستیک و سنتز هیدروترمال مورد استفاده قرار می گیرند. روند استریلیزاسیون با این دستگاه بدین گونه است که در مدت زمان ۱۵ دقیقه از بخار اشباع در دمای ۱۲۱ درجه سانتیگراد و با فشار بسیار بالا استفاده می شود. عملکرد اتوکلاو بدین گونه است که بخاری که توسط دستگاه در دمای بالا تولید می شود از طریق یک لوله به طرف بالا حرکت می کند، این لوله از اطراف محفظه دستگاه حرکت کرده و وارد محفظه اتوکلاو می شود، تمامی تجهیزاتی که در درون محفظه قرار داده شده اند در داخل بخار استریل می شوند و پس از آن به وسیله لوله ای که در قسمت دیگر محفظه قرار دارد و به لوله خروجی معروف است، خارج می شود، این در قسمت پایین واقع شده است. محفظه دستگاه مجهز به قفلی محکم است که سبب می شود بخار دستگاه خارج نشود و در درون آن نیز یک شیر کنترل کننده تعبیه شده است که در هر لحظه فشار داخل محفظه را

بررسی می کند تا حد مجاز آن تغییری نکند. فشار بخاری که وارد دستگاه می شود به طور معمول بیشتر از فشار معمولی اتمسفر است و به همین دلیل دمای آن در حدود ۱۲۰ الی ۱۴۰ درجه سانتیگراد است. مهمترین اجزای اتوکلاو موارد زیر می باشند.

- ۱- دریچه ایمنی: این دریچه از فشار بیش از حد مجاز در داخل محفظه جلوگیری بعمل می آورد.
 - ۲- در اتوکلاو: محفظه استریلیزاسیون را از محیط خارجی جدا می کند و مجهز به ابزاری است که در زمان بالا رفتن فشار داخل محفظه از باز شدن آن جلوگیری می کند.
 - ۳- محفظه استریلیزاسیون: به فضایی گفته می شود که وسایلی که نیازمند استریلیزاسیون هستند در آن قرار می گیرند، این اتاقک در زمان استریلیزاسیون با بخار پر می شود.
 - ۴- فشارسنج اتاقک: یک ابزار مکانیکی است که میزان فشار بخار را در محفظه استریلیزاسیون نشان می دهد.
 - ۵- فشارسنج بیرونی: یک ابزار مکانیکی است که میزان فشار بخار را در محفظه بیرونی نشان می دهد.
- دستگاه اتوکلاو مورد استفاده در این پروژه از شرکت کاووش دیان آزما خریداری گردید. اتوکلاو مذکور دارای ابعاد داخلی قطر ۲۱ سانتیمتر و عمق ۲۰ سانتیمتر و ابعاد خارجی قطر ۳۰ سانتیمتر ارتفاع ۶۰ سانتیمتر و دارای مهر استاندارد ایزو ۱۳۴۸۵ و ایزو ۹۰۰۱ می باشد [۸۷].



شکل (۲-۱۲) اتوکلاو ۱۰ لیتری آزمایشگاهی [۸۷]

۵-۲-۲- قالب های فایبرگلاس

قالب های فایبرگلاس با ابعاد ۱۵ سانتیمتر در ۱۵ سانتیمتر از شرکت آزمون ساز مینا خریداری شدند. قالب های مذکور دارای مقاومت بالا در برابر پوسیدگی و یا خوردگی و همچنین عدم چسبندگی بتن به سطوح داخلی به صورت دوتکه می باشند.

۳-۵-۲- انکوباتور

گرمخانه یا انکوباتور ابزاری آزمایشگاهی است که در آزمایشگاه های زیستی برای کشت و رشد دادن نمونه های زنده مانند سلول ها یا میکروب ها به کار می رود. این وسیله با کنترل رطوبت، دما، میزان اکسیژن و دی اکسید کربن شرایطی مناسب برای رشد ارگانیسم های زنده فراهم می کند.

انواع انکوباتور به شرح زیر می باشند.

• انکوباتور ساده:

این نوع انکوباتور فقط قابلیت تنظیم دما را دارد. در این نوع دما بسته به نیاز تنظیم شده و عموماً جهت کشت میکروب ها در محیط های کشت جامد مورد استفاده قرار می گیرد.

• شیکر انکوباتور:

این نوع انکوباتور علاوه بر تنظیم دما، قابلیت لرزاندن نمونه در دور های مختلف و زمان مورد نظر را نیز داراست. به عنوان مثال ممکن است نمونه سلولی ما هوازی بوده و در محیط کشت مایع کشت داده شده است. لذا این سیستم با لرزاندن نمونه بسته به دور در دقیقه و زمان تعریف شده به دستگاه، با لرزاندن نمونه هوا را به بخش های تحتانی محیط کشت برساند و موجب رشد یکنواخت نمونه در سرتاسر محیط کشت شود.

• انکوباتور CO₂:

این نوع انکوباتور بیشتر در زمینه کشت سلول های جانوری کاربرد دارد. این سیستم علاوه بر تأمین دمای مورد نیاز که عموماً ۳۷ درجه سانتی گراد است، به کپسول CO₂ نیز متصل شده و میزان کربن دی اکسید درون محفظه خود را در مقدار مشخصی نگه می دارد [۸۸].



شکل (۲-۱۳) تصویری از یک انکوباتور ساده [۸۸]

۲-۶- بررسی مشخصه یابی و ویژگی های بتن ترمیمی

۱-۲-۶- مقاومت فشاری بتن

آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن یکی از متداول ترین آزمایش هایی است که بر روی بتن انجام می شود. این آزمایش چنان به تغییرات در روش آزمایش حساس است که لازم است دقیقاً بر اساس روش استاندارد انجام پذیرد تا نتایج بدست

آمده در آزمایش های مختلف با یکدیگر قابل مقایسه باشد. به همین دلیل، آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن مطابق با استاندارد جهانی ASTM انجام می شود. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن می تواند با استفاده از هر دستگاه جک فشاری که دارای شرایط مناسب باشند انجام شود. در دستگاه جک فشاری (جک بتن شکن) دو قطعه سخت بارگذاری وجود دارد که یکی از آنها به صورت صلب است و نمونه بتنی روی آن قرار می گیرد و یک قطعه گوی شکل که روی سطح فوقانی نمونه قرار می گیرد. از آنجا که مقاومت بستگی به سرعت بارگذاری دارد؛ نمونه باید با یک سرعت کنترل شده بین ۰.۱۵ تا ۰.۳۵ مگاپاسکال بر ثانیه برای جک های هیدرولیکی و یا سرعت تغییر شکل برابر یک میلیمتر در دقیقه برای جک های مکانیکی بارگذاری شود و این بارگذاری تا نقطه شکست ادامه دارد، که به عنوان حداکثر باری است که نمونه تحمل می کند. آنگاه حداکثر بار و نحوه شکست گزارش می شود. در این تحقیق نیز از نمونه های مکعبی استفاده گردید. بر اساس استاندارد انگلستان (BS) نمونه های مکعبی ۱۵۰ میلیمتر هستند که در سه لایه پر شده اند و هر لایه ۲۵ مرتبه با یک میله سر مربعی ۲۵ میلیمتری کوبیده می شود. همچنین به عنوان یک روش جایگزین، این مکعب بتنی می تواند بوسیله ویبراتور هم متراکم شود. آزمایش نمونه مکعبی بتن در واقع یک ایده ی کلی از تمامی مشخصات بتن به ما ارائه میدهد. با همین آزمایش میتوان تشخیص داد که بتن به حد کافی مناسب کار ما هست یا خیر. مقاومت فشاری بتن بر عوامل مختلفی هم چون نسبت آب به سیمان، مقاومت سیمان، کیفیت مواد بتن، کنترل کیفیت در طول تولید بتن و غیره بستگی دارد. آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی قطعه های مکعب شکل از بتن انجام میشود. به همین دلیل آزمایش نمونه مکعبی نامیده میشود. این آزمایش بر روی قطعه های استوانه ای بتن نیز مرسوم است.



شکل (۲-۱۴) قالب های دوتکه فایبرگلاس

بتن را در قالبهایی که تصویرش را در بالا مشاهده نمودید قرار داده و حرارت می دهیم تا حباب و فضای خالی دیگر در آن باقی نماند. بعد از بیست و چهار ساعت، عمل آوری بتن آغاز می شود. عمل آوری بتن باید به نحوی باشد که سطح خارجی بتن کاملاً صاف باشد. بنابراین معمولاً از چسب سیمان استفاده کرده و آن را بر روی سطح خارجی بتن طوری پخش نموده که کاملاً صاف شود. برای عمل آوری، قطعات بتن را بیست و چهار ساعت در هوای مرطوب قرار داده. سپس آنها را علامت گذاری کرده و در هوای تازه قرار داده می شوند تا زمان انجام آزمایش اصلی بر روی آنها فرا برسد. آب مورد استفاده در عمل آوری بتن باید هر هفت روز یک بار از نظر دمایی چک شود. نمونه های بتن را پس از هفت و بیست و هشت روز عمل آوری در ماشینهای آزمایش مقاومت فشاری قرار داده می شوند. در این ماشینها، بارگذاری به صورت دقیقه ای ۱۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش می یابد تا نمونه شکسته شود. مقدار بارگذاری در لحظه ی شکست بتن، میزان مقاومت فشاری بتن را به ما میگوید. حداقل از هر نمونه و در هر سن، بایستی ۳ نمونه ی بتن آزمایش شود. اگر در نتیجه مشاهده شود که مقاومت آنها بیش از ۱۵ درصد با یکدیگر اختلاف دارد، نتایج آزمایش رد میشود و بایستی آزمایش دوباره انجام شود. در غیر این صورت، میانگین مقاومت فشاری آن سه نمونه، مقاومت فشاری بتن مورد محسوب خواهد شد. مقاومت بتن با افزایش عمر، بیشتر میشود. در جدولی که در ادامه آمده است، نشان داده شده که در هر مقطع زمانی از عمل آوری،

بتن چه مقدار از مقاومت اصلی اش را کسب میکند.

جدول (۲-۸) میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان [۹۰]

سن	درصد مقاومت کسب شده
۱ روز	۱۶ درصد
۳ روز	۴۰ درصد
۷ روز	۶۵ درصد
۱۴ روز	۹۰ درصد
۲۸ روز	۹۹ درصد

همانطور که در **Error! Reference source not found.** مشاهده میکنید، بتن بیشتر مقاومت خود را در سنین اولیه به دست می آورد. بدین ترتیب که ۹۰ درصد مقاومتش در ۱۴ روز کسب میشود. در ۲۸ روز بتن به ۹۹ درصد مقاومتش میرسد و در ادامه روند کسب مقاومت بتن بسیار کند تر دنبال میشود. به همین دلیل است که در آزمایشها معمولاً نتایج ۲۸ روز نمونه های بتنی مورد نظر و مهم هستند. بتن در ۲۸ روزگی مقاومتی تقریباً مساوی با مقاومت نهایی اش دارد. مقاومت بتن با پیشرفت هیدراسیون سیمان افزایش می یابد. روند هیدراسیون سیمان نیز با گذشت زمان و افزایش دما زیاد می شود. در نتیجه مقاومت بتن را میتوان به صورت تابعی از ترکیب دما - زمان بیان کرد. مقاومت بتن معمولاً در عمر های ۳، ۷ و ۲۸ روزه تعیین می شود. مقاومت ۷ روزه تقریباً ۰.۷ یا ۰.۸ مقاومت ۲۸ روزه است. علت اینکه مقاومت نمونه ها در

سن ۲۸ روز ملاک است، یک کار آماری است که با بررسی موارد بسیار متعدد در ساختمان های متعارف، به این نتیجه رسیده اند که روند اجرا و نحوه بارگذاری به گونه ای است که در ۲۸ روز به این مقاومت نیاز پیدا می کند.

در این تحقیق از دستگاه جک فشاری هیدرولیک بتن شکن که در آزمایشگاه پلیمر و سرامیک قرار دارد، استفاده گردید. این دستگاه متعلق به شرکت تک آزما می باشد که جهت انجام تست ها مجدداً سرویس و کالیبره گردید. نمونه های ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر بعد از عمل آوری در دستگاه جک هیدرولیک فشاری بتن شکن قرار گرفته و از تقسیم حداکثر نیروی ثبت شده بر سطح مقطع نمونه مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال بدست می آید [۸۹].



شکل (۲-۱۵) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری [۹۱]

۲-۶-۲- اندازه گیری مقاومت خمشی بتن

در آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت غیر مستقیم به ارزیابی مقاومت کششی بتن پرداخته می شود. این آزمایش، قابلیت تیر یا دال بتنی غیر مسلح را به لحاظ مقاومت در برابر شکست ناشی از خمش مورد ارزیابی قرار می دهد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت یک مدول گسیختگی بیان می شود و با MR و واحد مگاپاسکال یا پوند بر اینچ مربع نشان داده می شود. آزمایش خمشی بتن را می توان با استفاده از آزمایش سه بار نقطه ای (ASTM C78) و یا آزمایش بار نقطه ای مرکزی (ASTM C293) انجام داد. باید توجه شود که مقدار مدول گسیختگی به دست آمده از آزمایش بار نقطه ای مرکزی، حدود ۱۵ درصد از مدول گسیختگی به دست آمده از آزمایش سه بار نقطه ای کوچکتر است. به علاوه مشاهدات نشان داده اند که هر چه نمونه های بتنی بزرگتر باشند؛ مدول گسیختگی کمتر خواهد بود. به علاوه مدول گسیختگی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری بتن است. این مدول تحت تأثیر نسبت های اختلاط، اندازه و مقدار سنگدانه ی درشت استفاده شده برای ساخت نمونه قرار دارد. معادله ی زیر را می توان برای محاسبه ی مدول

گسیختگی استفاده کرد:

$$Fr = 7.5\sqrt{F'c}$$

Fr = مدول گسیختگی

$F'c$ = مقاومت فشاری بتن

بر اساس ASTM عرض، عمق و طول نمونه به ترتیب برابر با ۱۵۰ میلیمتر، ۱۵۰ میلیمتر و حداقل سه برابر عمق نمونه است. همچنین این استاندارد بیان می کند در صورتی که حداکثر اندازه ی سنگدانه بزرگتر از ۱۹ میلی متر نباشد می توان از اندازه ی ۱۰۰ میلی متر عرض، ۱۰۰ میلی متر عمق و ۵۰۰ میلی متر دهانه استفاده کرد. استاندارد بریتانیا سطح مقطع مربعی ۱۰۰ میلی متری یا ۱۵۰ میلی متری و دهانه ی چهار تا پنج برابر عمق نمونه را تعیین کرده است. با این وجود این استاندارد هم اندازه های ۱۵۰ میلی متر در ۱۵۰ میلی متر و دهانه ی ۷۵۰ میلی متر را ترجیح می دهد.

۱-۲-۶-۲- فرآیند آزمایش مقاومت خمشی بتن

آزمایش باید بر روی نمونه بلافاصله بعد از خارج شدن از شرایط عمل آوری انجام داد تا از خشک شدن سطح نمونه که مقاومت خمشی را کاهش می دهد جلوگیری شود. نمونه را در نقاط بارگذاری قرار داده و سطح پرداخت شده با دست نمونه نباید در تماس با نقاط بارگذاری باشد. این کار باعث می شود که نمونه تماس قابل قبولی با نقاط بارگذاری داشته باشد. سیستم بارگذاری را نسبت به نیروی وارده در مرکز قرار داده. بلوک های اعمال کننده ی نیرو را در نقاط بارگذاری با سطح نمونه تماس می دهیم. مقادیر بارهای اعمالی باید بین ۲ تا ۶ درصد بار نهایی باشند.

نرخ بارگذاری طبق استاندارد ASTM را می توان طبق معادله زیر محاسبه کرد:

$$R = \frac{sbd^2}{L}$$

R = نرخ بارگذاری

S = نرخ افزایش

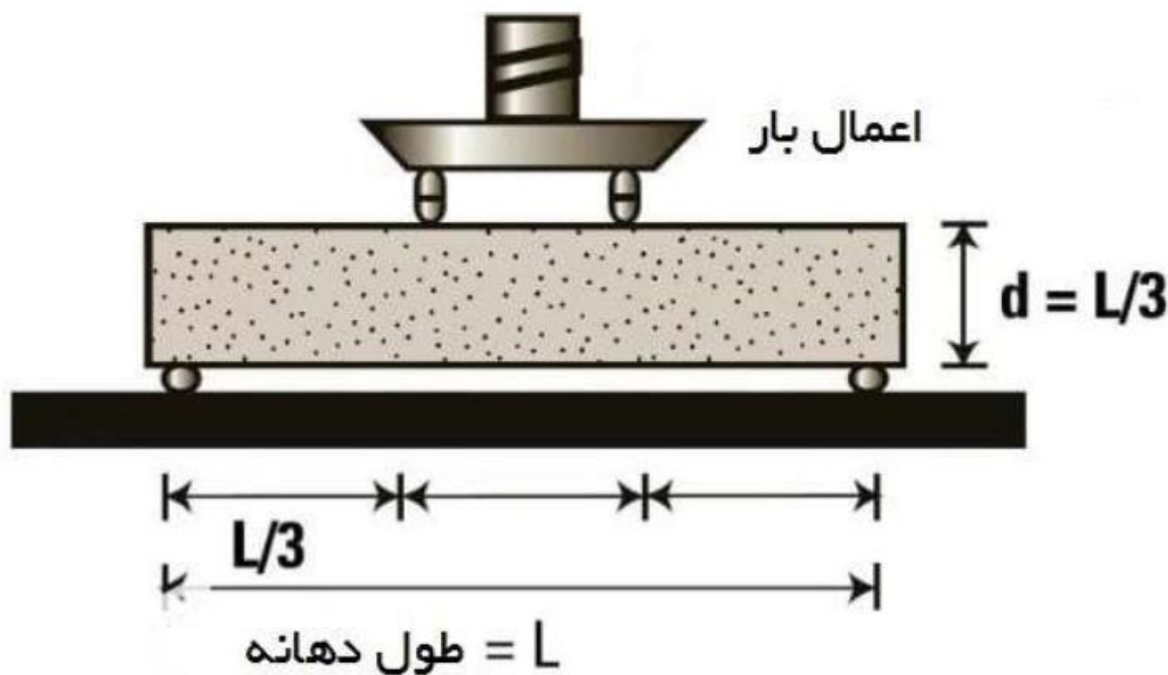
b = عرض میانگین نمونه

d = عمق میانگین

L = طول دهانه

در نهایت سطح مقطع نمونه ی آزمایش شده در هر انتها و مرکز را اندازه گرفته و ارتفاع و عرض میانگین را محاسبه میگرد.

مقدار مدول گسیختگی به ابعاد تیر و بالاتر از همه به شکل بارگذاری بستگی دارد. امروزه بارگذاری لنگر خمشی ثابتی بین نقاط اعمال بار ایجاد می شود طوری که ۱/۳ دهانه در معرض تنش ماکزیمم قرار می گیرد و در نتیجه در این منطقه است که تمایل به ترک خوردن به وجود می آید [۹۲].



شکل (۲-۱۶) استاندارد اعمال بار در مقاومت خمشی [۹۳]

۳-۶-۲- آزمایش های جذب آب

آزمایش های جذب آب به شکل های مختلفی وجود دارد که مهم ترین آنها عبارتند از:

-جذب آب کوتاه مدت نیم یا یک ساعته (Early Water Absorption)

-جذب آب نهایی (بلند مدت) ۲ روزه یا بیشتر در شرایط عادی یا جوشانده شده (Final Water Absorption)

-جذب آب سطحی اولیه (Initial Surface Water Absorption Test) ISAT

-جذب آب موئینه (Capillary Water Absorption و Water Sorptivity)

۱-۳-۶-۲- آزمون جذب موئینه آب

این آزمون میزان آب جذب در بتن را نشان می دهد. بنابراین براساس استاندارد ASTM C1585 نمونه های ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر ساخته شده و مقدار آب جذب شده اندازه گیری می شود. در ابتدا نمونه ها به مدت سه روز در آون ۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده می شوند و وزن خشک آنها توزین می شود (وزن خشک اولیه). سپس نمونه طوری در آب قرار میگیرند که که بخش تحتانی آن ۱ تا ۳ میلیمتر درآب قرار گرفته است و رطوبت محیط اطراف نمونه نیز کنترل می گردد و درنهایت، آهنگ جذب آب موئینه در بازه های زمانی مختلف بدست می آید [۹۴].

جدول (۲-۹) محدوده پذیرش جذب آب موئینه بتن با دوام [۹۵]

کیفیت بتن	عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف
جذب آب (۰.۵ mm/h)	کمتر از ۰.۱	۰.۱ تا ۰.۱۵	۰.۱۵ تا ۰.۲	۰.۲ تا ۰.۲۵	بیشتر از ۰.۲۵

۲-۳-۶-۲- آزمایش جذب آب کوتاه مدت

در BS 1881 در سال های گذشته آزمون مکعبی خشک ۱۰۰ میلی لیتری در آب غرق می شود پس از یک ساعت درصد وزنی آب جذب شده بدست می آید که گزارش می شد. در BS 1881 part 122 این آزمایش عمدتاً برای قطعات بتنی پیش ساخته پس از مغزه گیری به قطر ۷۵ میلیمتر انجام می شود که باید دارای طول معینی باشد و نمونه کاملاً خشک شده در آن غرقاب می شود و درصد جذب آب نیم ساعته بدست می آید. این آزمایش کیفیت سطحی بتن موردنظر را بدست می دهد. در توصیه های CIRIA برای مناطق عربی در حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ و غیره، حداکثر جذب آب کوتاه مدت طبق BS 1881 را ۲ درصد طرح نموده است.

۲-۳-۶-۳- آزمایش جذب آب نهایی

بر اساس استاندارد ASTM C642 مقدار جذب آب نهایی بدست می آید و می توان چگالی و تخلخل را نیز بدست آورد، حتی جوشاندن آب نیز پیش بینی شده است. در این استاندارد در مورد شکل و اندازه نمونه حساسیتی وجود ندارد اما حداقل جرم و حجم مشخص شده است زیرا به جذب نهایی پرداخته است و این آزمایش عمدتاً برای قطعات پیش ساخته بکار می رود. در استاندارد EN 1340 جذب آب نهایی قطعات پیش ساخته ای مانند جداول بتنی به چشم می خورد که حداقل حجم یا جرم نمونه مطرح شده است. در این استاندارد در مواردی که شرایط یخبندان - آب شدگی در برابر نمک های یخزدا وجود ندارد حداکثر جذب آب نهایی ۶ درصد برای جداول بتنی پیش ساخته ارائه شده است.

۲-۳-۶-۴- آزمایش جذب آب سطحی اولیه

این آزمایش عمدتاً در BS 1881 part 5 پیش بینی شده است. در این آزمایش سعی می شود مقدار جذب آب ریخته شده روی سطح افقی نمونه بتنی یا قسمتی از قطعات پیش ساخته درحالی که ارتفاع آب چندان برای اعمال فشار وجود ندارد و به میزان ۲۰۰ میلیمتر محدود شده، اندازه گیری می شود. سپس در فواصل زمانی مختلف مقدار آب جذب شده برحسب گرم یا میلیمتر بر واحد سطح (m^2) گزارش می شود.

به طور مثال در جذب آب ۳۰ دقیقه ای بر اساس استاندارد BS 1881 نمونه ها در ابتدا توزین می شوند و سپس در آب غرقاب می شوند. پس از زمان ۳۰ دقیقه از لحظه غرقاب کردن، از آب خارج شده و سطح آنها با پارچه خشک می شود و مجدداً توزین می گردند و مقدار جذب آب ۳۰ دقیقه آنها بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\text{آب درصد} = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100$$

m = وزن نمونه مرطوب

m_0 = وزن نمونه خشک

جدول (۲-۱۰) تقسیم بندی جذب سطحی بتن با معیار جذب سطحی اولیه [۹۵]

میزان جذب	زمان پس از شروع آزمایش				جذب تجمعی در ساعت (ml/mm^2)
	۱۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۱ ساعت	۲ ساعت	
زیاد	بیشتر از ۰.۵۰	بیشتر از ۰.۳۵	بیشتر از ۰.۲۰	بیشتر از ۰.۱۵	بیشتر از ۲۰۰۰
متوسط	۰.۲۵-۰.۵۰	۰.۱۷-۰.۳۵	۰.۱۰-۰.۲۰	۰.۰۷-۰.۱۵	۱۰۰۰-۲۰۰۰

کمتر از ۰.۲۵	کمتر از ۰.۱۷	کمتر از ۰.۱۰	کمتر از ۰.۰۷	کمتر از ۱۰۰۰
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

۴-۶-۲- آزمون عمق نفوذ آب و تخلخل

آزمایش عمق نفوذ آب روی نمونه های مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی متر تحت فشار ۰/۵ مگاپاسکال به مدت ۷۲ ساعت مطابق استاندارد EN 12390-8 در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام می شود. ابتدا نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در گرم خانه با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت نگه داری می شوند و سپس توزین شده و وزن خشک (B) آن بدست می آید. در مرحله بعد نمونه در آب غوطه ور و جوشانده شده و سپس وزن با سطح خشک (A) آن بدست می آید. در نهایت مطابق با رابطه زیر درصد تخلخل نمونه تعیین می شوند.

$$P = \frac{(A - B)}{\rho Vc} \times 100$$

که در آن P تخلخل کل برحسب درصد، A وزن نمونه غوطه ور و جوشانده شده در آب برحسب گرم، B وزن نمونه خشک برحسب گرم، Vc حجم نمونه بر حسب سانتی متر مکعب و ρ دانسیته آب در دمای ۲۱ درجه سانتیگراد بر حسب گرم بر سانتیمتر مربع می باشد.

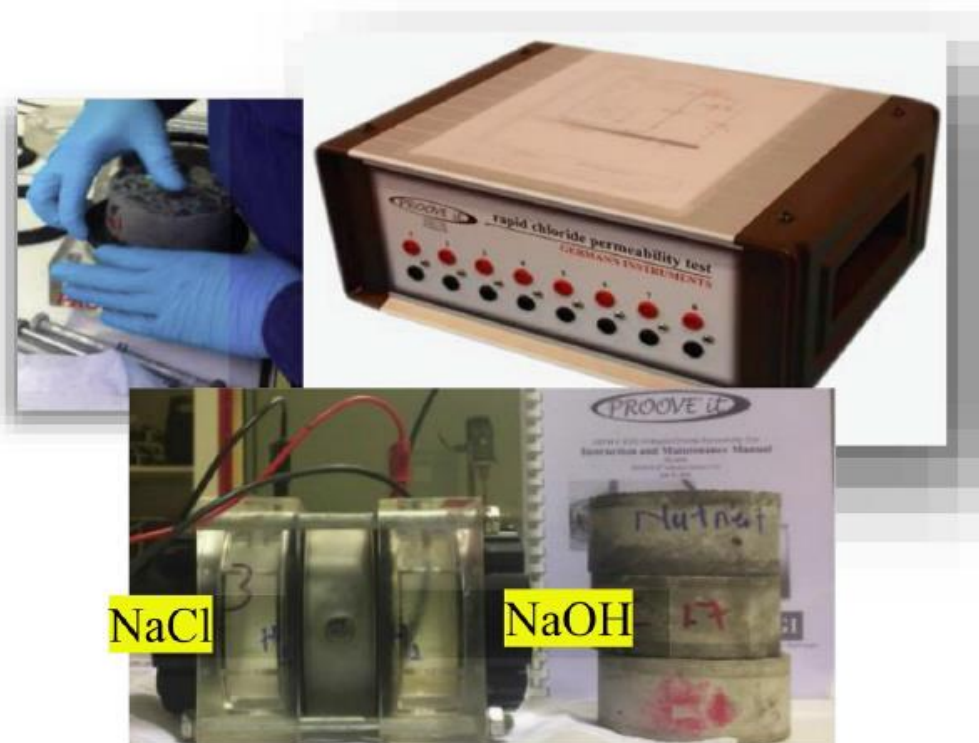


شکل (۲-۱۷) دستگاه اندازه گیری عمق نفوذ آب [۹۵]

۵-۶-۲- نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)^۱

آزمایش نفوذ تسریع شده یون مطابق با استاندارد ASTM C 1202 در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام می شود. جهت انجام این آزمون نمونه های استوانه ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتیمتر نیاز است که از مکعب های جذب آزمون آب مغزه گیری می شوند. سپس نمونه ها در داخل دستگاه قرار گرفته و از یک وجه با محلول سود و از وجه دیگر در تماس با محلول نمک طعام قرار می گیرند. الکتروود طرفی از سلول که محلول سود درون آن است به قطب مثبت و الکتروود طرف دیگر سلول که محلول نمک درون آن است به قطب منفی دستگاه مولد جریان مستقیم متصل شده و با روشن کردن دستگاه اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت به آزمونه از طریق الکتروودها اعمال میگردد. جریان عبوری از نمونه طی ۶ ساعت ثبت میشود. مجموع جریان رد شده برحسب کولمب به عنوان شاخصی برای مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید استفاده می شود [۹۶].

^۱ - Rapid chloride permeability test

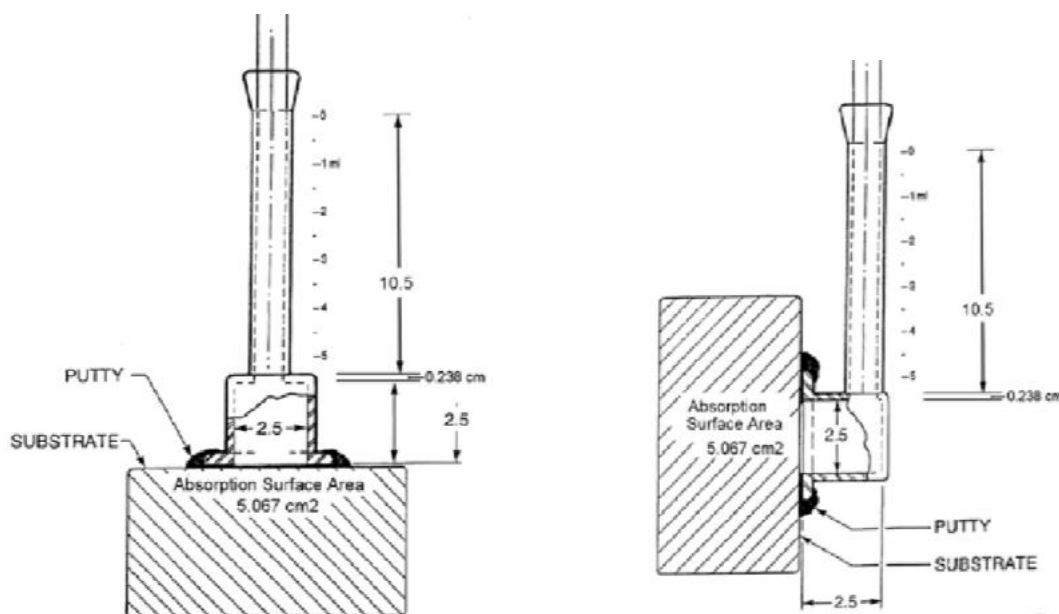


شکل (۲-۱۸) فرآیند اندازه گیری نفوذ تسریع شده یون کلراید [۹۷]

۶-۲-۶- آزمایش لوله رایلم

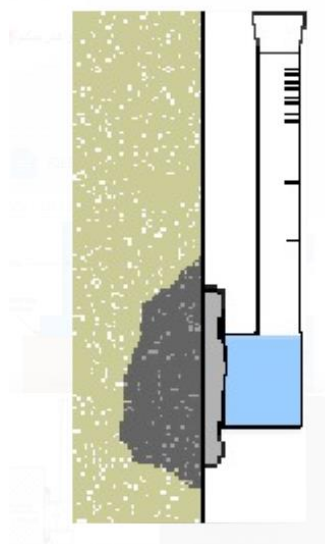
RILEM نام اتحادیه‌ی بین المللی آزمایشگاه های آزمایش و تحقیق در زمینه‌ی مواد و ساختار هاست که از کمیته های فنی برای ایجاد روش های استاندارد برای اندازه گیری خواص و ارزیابی عملکرد و دوام بسیاری از مصالح ساختمانی مختلف تشکیل شده است. کمیسیون PEM-25 آزمایشاتی برای سنجش سنجش اثر بخشی مواد ترمیمی ایجاد کرده است که این آزمایشها در چند دسته قرار میگیرند و یکی از آنها تشخیص حضور و حرکت آب است. در این دسته از آزمایشها، آزمایشی که به آزمایش شماره‌ی 11.4 شناخته میشود، برای اندازه گیری مقدار آب جذب شده توسط سطح مصالح در یک دوره زمانی مشخص طراحی شده است. این تست که به نام تست لوله‌ی رایلم نیز معروف است در فشار کم و توسط یک لوله انجام میگیرد.

پس با این روش میتوان سرعت نفوذ آب از طریق مواد متخلخل به درون آنها را اندازه گیری کرد. این تست را میتوان در محل یا در آزمایشگاه و در دو حالت انتقال آب به صورت افقی یا عمودی انجام داد. به دلیل متخلخل بودن مصالح ساختمانی همه‌ی آنها در برابر آب نفوذپذیرند. ساختار داخلی مصالح مجموعه‌ای از منافذ ریز به هم پیوسته است. هدایت آب به صورت مویرگی از طریق این منافذ صورت میگیرد و در هر دو مسیر افقی و عمودی پیش میرود. برای سطوح عمودی انتقال آب بصورت افقی و برای سطوح افقی انتقال آب بصورت عمودی صورت میگیرد. بسته به نوع سطح و نوع تماس آن با رطوبت این دو تست انجام می شود. نمایی از هر دو تست افقی و عمودی در شکل زیر نمایان است.



شکل (۲-۱۹) فرآیند اندازه گیری میزان نفوذ آب توسط تست رایلم [۹۸]

لوله‌ی رایلم در حدود 0.13 متر بلندی و منطقه سطح جذبی با مساحت $4.91 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ دارد. لوله‌ی صاف و گرد این وسیله که جنس آن از شیشه یا پلاستیک است با استفاده از permanent elastic sealing putty به قسمتی از نمونه چسبانده میشود و توسط یه لوله‌ی مدرج شده با آب پر میشود. سطح آب به دلیل جذب آن توسط سطح مورد نظر در لوله کاهش پیدا میکند. حجم آب جذب شده برای نمونه های بتنی در ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلیمتر بعد از گذشت مدت زمان ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ و ۳۰ دقیقه اندازه گیری میشود. نتایج این اندازه گیری در نمودار حجم آب جذب شده توسط بتن با واحد متر مکعب بر حسب زمان با واحد دقیقه ارائه می شود.



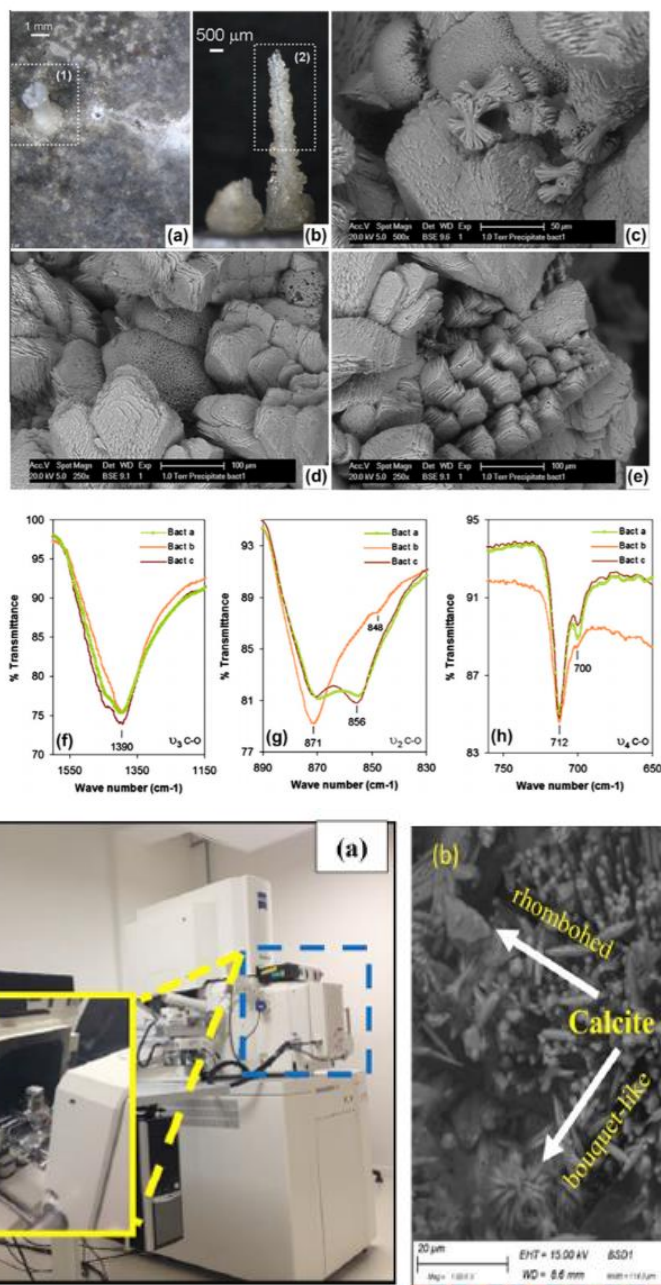


شکل (۲-۲۰) شماتیکی از روش تست لوله رایلم [۹۹]

۷-۲- آزمون های مشخصه یابی جهت بررسی نمونه های بتن

۷-۱- روشهای آنالیز کلسیم کربنات باکتریایی در بتن

در نمونه هایی که از رسوب کلسیم کربنات تولید شده توسط باکتری ها برای ترمیم ترک ها استفاده میشود از روشهای آنالیز برای مشخصه یابی کلسیم کربنات بهره میگیرند. روش EDAX که روشی برای آنالیز عنصری است میتواند ثابت کند که رسوب تشکیل شده توسط باکتری ها از سه عنصر کربن و کلسیم و اکسیژن تشکیل شده است که گواه رسوب کلسیم کربنات میباشد. مورفولوژی های مختلف کریستالی کلسیم کربنات میتوانند با تصویرهای SEM مشاهده شوند و از این طریق میتوان گفت کلسیم کربنات رسوبی موجو در ترک ها حاصل فعالیت باکتریایی میباشد. همچنین تشخیص و تایید ساختار هرکدام از مورفولوژی های کلسیم کربنات با تکنیک FT-IR امکانپذیر میباشد. ساختارهای متفاوت طیف های FT-IR منحصر به خود را دارند که میتواند آنها را از یکدیگر متمایز کند و ساختار هرکدام از مورفولوژی ها را با انطباق طیف آنها بر طیف های موجود، تایید کند [۱۰۰]. همچنین XRD بعنوان تکنیکی برای تعیین ساختار کریستالها، دانه بندی آنها و پی بردن به نقص کریستالی میتواند ابزار مفیدی برای شناسایی ساختار بلورهای کلسیم کربنات باشد. از میکروسکوپ الکترونی جهت بررسی ترک های ترمیم شده و مشاهده رسوب کریستال های کربنات کلسیم استفاده می شود. در این بررسی نمونه های کوچک در حدود ابعاد ۱ سانتیمتر از بتن شکسته شده تهیه و با لایه نازکی از طلا روکش می شوند. پس از اشباع شدن نمونه ها و قرار گیری در محفظه ی خلا، تصویرنگاری الکترونی شروع میشود. در ادامه هرکدام از تکنیک های قابل استفاده برای مشخصه یابی کلسیم کربنات شرح داده شده اند [۱۰۱]. نمونه ای از تصاویر SEM و طیف های IR برای مورفولوژی های مختلف رسوب کلسیم کربنات تشکیل شده توسط باکتری ها در ترک های نمونه ی بتنی در زیر آورده شده است.

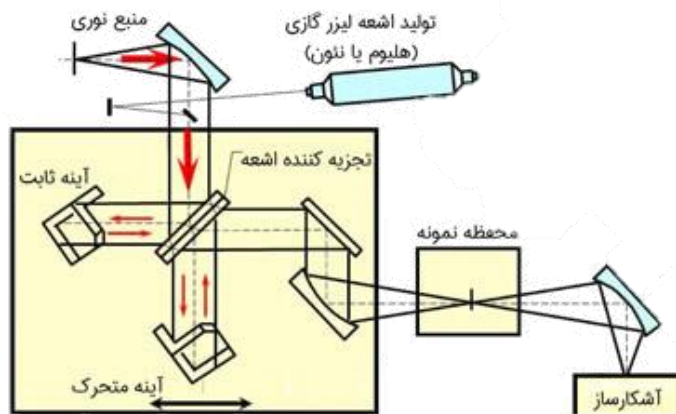


شکل (۲-۲۱) (A) تصویری از میکروسکوپ الکترونی (B) مشاهده رسوبات کریستالی کربنات کلسیم توسط میکروسکوپ الکترونی [۱۰۱]
• روش FT-IR

ناحیه ی طیفی IR در طول موجهایی بین 1000-0.78 میکرومتر گسترده شده است که به سه ناحیه ی IR نزدیک، IR میانه و IR دور تقسیم میشود که گسترده ترین کاربرد را IR میانه دارد. طیف سنجی مادون قرمز یا همان IR یکی از روش های خوب و متداولی است که از سال ها پیش برای بررسی ساختار های مولکولی مورد استفاده قرار گرفته است.

فرکانس تشعشع الکترومغناطیس در ناحیه مادون قرمز، مطابق با فرکانس ارتعاش طبیعی اتم های یک پیوند است. جذب امواج مادون قرمز در یک مولکول، باعث ایجاد یک سری حرکات ارتعاشی در آن میشود که اساس و پایه طیف سنجی مادون قرمز را تشکیل می دهد. هنگامی که مولکول ها، اشعه مادون قرمز را جذب می کنند، به حالت انرژی ارتعاشی بالاتر برانگیخته می شوند. جذب تابش مادون قرمز همانند دیگر فرایندهای جذب، فرایندی کوانتایی است. انرژی جذب شده از نور مادون قرمز

توسط پیوندهای شیمیایی یا گروه های عاملی خاص در طول موج مشخص، منجر به کاهش شدت عبور نور شده و معمولاً به عنوان تابعی از عدد موجی رسم می شود که به طیف IR موسوم است.



شکل (۲- ۲۲) شماتیک کلی دستگاه طیف سنجی مادون قرمز [۱۰۲]

توجه به این نکته مهم است که تمام پیوندهای مولکول قادر به جذب انرژی مادون قرمز نیستند. فقط پیوندهایی که دارای گشتاور دو قطبی هستند قادر به جذب اشعه مادون قرمز میباشند. باید توجه داشت که هر پیوند دارای فرکانس ارتعاش طبیعی خاصی است. یعنی یک پیوند خاص با جذب فرکانسی مشخص قادر به ارتعاش خمشی و کششی است. یک پیوند، به خصوص در دو مولکول مختلف، در محیط های متفاوتی از نظر اتم ها و پیوندهای پیرامونی خود قرار داشته و هیچ گاه دو مولکول با ساختمان های متفاوت، طیف مادون قرمز یکسانی ندارند. با توجه به این مطلب، از طیف مادون قرمز می توان همانند اثر انگشت در انسان، برای شناسایی مولکول ها استفاده کرد. با مقایسه طیف مادون قرمز دو ماده که تصور می شود مشابه باشند، می توان پی برد که آیا واقعا یکی هستند یا خیر. اگر تمام جذب ها در طیف دو نمونه بر یکدیگر منطبق شوند، به احتمال قریب به یقین، دو ماده یکسان هستند. برای شناسایی کیفی یک نمونه مجهول، نوع گروه های عاملی و پیوندهای موجود در مولکول های آن، طیف مادون قرمز نمونه را رسم نموده و با مراجعه به جداول مربوطه که موقعیت ارتعاش پیوندهای مختلف و یا طیف مادون قرمز مولکول ها را نشان میدهند، طول موج یا عدد موج گروه ها و پیوندها را شناسایی می کنند.

سه نوع دستگاه برای اندازه گیری های جذبی در IR مورد استفاده قرار میگیرد. ۱- دستگاه های پاشنده برای اندازه گیری های کیفی ۲- دستگاه های غیر پاشنده برای اندازه گیری های کمی ۳- دستگاه های تبدیل فوریه (FT-IR) برای اندازه گیری های کیفی و کمی.

برای به دست آوردن طیف تابشی در دستگاه طیف سنجی مادون قرمز، باید تابش را در زمان های مختلف داشته باشیم. در این حالت باید از تمام نقاط نمونه تصویر برداری کنیم، اما در این صورت تغییرات فرکانس خیلی زیاد می شود و هیچ آشکارسازی نمی تواند آن را دنبال کند. در دستگاه طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه یا همان FTIR به جای تاباندن یک بیم تک فام به نمونه، یک بیم با هزاران فرکانس یا طول موج مختلف هم- زمان به نمونه تابیده می شود. سپس میزان جذب و چگونگی آن آنالیز می شود. در مرحله بعد بیم دیگری با هزاران طول موج دیگر برای تولید نقطه بعدی به نمونه تابانده می شود و این روند چندین بار تکرار می شود. در پایان تمامی این اطلاعات توسط کامپیوتر گردآوری شده و برای تشخیص جذب نمونه در هر نقطه طول موج تحلیل می شود. ر دستگاه آنالیز FTIR، طیف تابیده شده بر روی یک سیستم اپتیکی متشکل از چندین آینه به نام سیستم «تداخل سنج مایکلسون» که یکی از آینه ها توسط یک موتور در حال حرکت است تابانده می شود. همراه با حرکت این آینه، هر طول موج از نور تابیده شده در آینه، توسط اینترفرومتر متناوباً قطع و وصل می شود. در این

پروسه تداخل طول موجی ایجاد شده و بیم خروجی در هر لحظه برآیند دو بیم از آینه ثابت و متحرک است. بدیهی است که این برآیند در هر لحظه بیانگر طول موج خاصی خواهد بود. این رویه تا تولید تمامی طول موج ها و پیمایش تمام بازه طول موجی ادامه پیدا می کند. در پایان یک سیستم کامپیوتری برای پردازش اطلاعات رسیده برای تبدیل اطلاعات خام (میزان جذب به ازای هر موقعیت آینه متحرک) به اطلاعات قابل استفاده (میزان جذب در ازای هر طول موج) مورد نیاز هست. تداخل طیف ها در این دو آینه متحرک و ثابت باعث می شود تا فرکانس خروجی نسبت به فرکانس اولیه نور کاهش بیابد. سپس این پرتوها به نمونه برخورد کرده و شدت نور خروجی محاسبه می شود. دستگاه تبدیل فوریه فروسرخ نمودار شدت بر حسب زمان را به ما می دهد. اما ما بیشتر علاقمند به نمودار شدت برحسب عدد موج (یا فرکانس) هستیم. به همین دلیل یک عمل ریاضی به نام تبدیل فوریه قادر است تا فرکانس های جذب شده را جدا کرده و طیف شدت بر حسب زمان را به طیف شدت بر حسب فرکانس تبدیل کند. نمودار نهایی می تواند برحسب شدت جذب و یا عبور ترسیم شود.

طیف سنجی مادون قرمز برای هر سه حالت گاز و مایع و جامد کاربرد دارد. جامدات یا در حالالی که در ناحیه ی مادون قرمز جذب نداشته باشد حل میشوند و یا به صورت قرص درمی آیند و در دستگاه قرار داده میشوند. جامد مورد نظر در یک هاون عقیق به یک پودر نرم تبدیل میشود. یک میلیگرم از نمونه با ۱۰۰ میلیگرم گرد پتاسیم برمید خشک مخلوط میشود و در هاون ساییده میشود. سپس در یک قالب فلزی فشار زیادی بر آن وارد میکنند تا یک قرص شفاف بدست بیاید. قرص در دستگاه قرار میگیرد و طیف آن بر روی صفحه ی نمایشگر قابل مشاهده است. با تفسیر طیف میتوان به ساختار نمونه پی برد.



شکل (۲-۲۳) دستگاه FT-IR [۱۰۲]

• روش XRD

طول موجهای بین 0.1-25 آنگستروم مربوط به اشعه ی X میباشد. اسپکتروسکوپی اشعه ی X از سه روش جذب (XRA)، فلورسانس (XRF) و پراش (XRD) تشکیل شده است. روشهای XRA و XRF برای آنالیز کمی و کیفی تمام عناصر در جدول تناوبی با اعداد اتمی بزرگتر از عدد اتمی سدیم به کار میروند. روش XRD یک روش مولکولی و تکنیکی جهت بررسی ساختار کریستالها، دانه بندی آنها و پیدا کردن نقص های کریستالی است. اساس کار XRD پراکندگی راییلی از صفحات کریستال میباشد. اطلاعات در مورد آرایش و فاصله ی اتمها در مواد بلوری مستقیماً از مطالعات پراش به دست می آید. نمونه ها در تکنیک XRD به صورت جامد پودری مورد آنالیز قرار میگیرند. به طور کلی از اطلاعات حاصل از این روش ساختار دقیق کریستال ها به دست می آید.

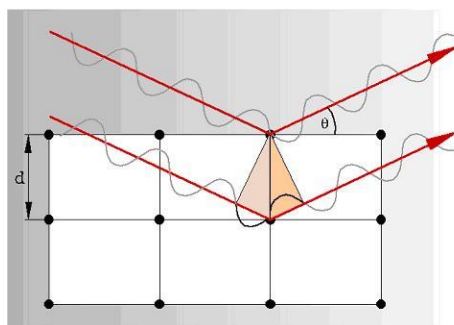


شکل (۲-۲۴) دستگاه XRD [۱۰۲]

پراش (Diffraction) پدیده ای است که در آن اشعه های ایکس پراکنده شده توسط اتم ها در یک ساختار بلورین در جهت های خاص فضایی همدیگر را تقویت کرده و اشعه قوی تری را به وجود آورند. این پدیده که تنها روش مستقیم تعیین ترکیب و ساختار فازی مواد است. و برای تعیین عموم کمیات ساختار کریستالی از قبیل ثابت شبکه، هندسه شبکه، تعیین کیفی مواد ناشناس، تعیین فاز کریستال ها، تعیین اندازه کریستال ها، جهت گیری تک کریستال، استرس، تنش، عیوب شبکه و غیره، قابل استفاده است. کاربرد وسیعی در تعیین ساختار بلورین مواد و فازهای بلوری موجود در نمونه های معدنی دارد.

در اثر برخورد اشعه ایکس به اتم های یک ماده، الکترون های آن تحریک شده و نوسان میکنند و از آنجا که ذرات باردار شتاب دار از خود امواج الکترومغناطیس ساطع می کنند این نوسانات باعث تابش امواج جدیدی می شوند در نتیجه اشعه ایکس ورودی را در اطراف اتم پراکنده می کنند. اشعه های پراکنده شده در صورتی یکدیگر را تقویت می کنند که هم فاز باشند (فاصله طی شده توسط اشعه های پراکنده شده مضرب صحیحی از طول موج اشعه ایکس تابیده شده باشد). در غیر اینصورت اشعه ها یکدیگر را تضعیف و حذف میکنند و اختلاف مسیر ایجاد شده ایجاد اختلاف فاز می کند. تقویت یا تضعیف اشعه ها توسط یکدیگر، بستگی به اختلاف فاز پدید آمده خواهد داشت. در مواد آمورف اشعه ها یکدیگر را تضعیف می کنند و پدیده پراش اتفاق نمی افتد ولی اگر اتم ها به صورت منظم و با فاصله های مشخص کنار هم قرار گیرند (ماده کریستالی باشد)، اختلاف مسیر طی شده مضربی از طول موج اشعه ایکس بوده و پراش صورت می گیرد.

هدف اصلی آزمایش پراش سنجی، تعیین زاویه های مربوط به هر پیک و سپس مشخص کردن فاصله صفحه های اتمی (d) است. با توجه به این که هر ترکیب دارای الگوی منحصر به فردی است، می توان با جدول های مربوط، ماده مجهول را شناسایی کرد. بنابراین نخستین گام پس از به دست آوردن الگوی پراش اشعه ایکس XRD یک ترکیب، تهیه جدولی است که در آن d و شدت نسبی هر پیک، مشخص شده باشد. امروزه دستگاه های پراش اشعه ایکس XRD، مقدار های d و را ارائه می کنند و نیازی به روش های همراه با خطا محاسبه و اندازه گیری آن ها از روی الگوی پراش نیست.



شکل (۲-۲۵) پراش اشعه ایکس XRD از صفحات اتمی با فاصله d از یکدیگر [۱۰۲]

کاربردهای آنالیز XRD

✓ **تعیین فاز:** اساسی ترین کاربرد روش آنالیز XRD ، تعیین فاز است. همانطور که قبلاً گفته شد مکان قله ها (زاویه قله ها و شدت قله ها) حاوی اطلاعاتی از نمونه هستند که با استفاده از این اطلاعات می توان ساختار اتمی و فاز صفحات پراش کننده را تعیین کرد و از این طریق به جنس و ساختار نمونه پی برد.

✓ **بلورینگی:** می دانیم در هیچ ماده ای کریستال کامل نیست و مواد به صورت ترکیبی از مواد کریستالی و آمورف وجود دارند. در نمودار XRD حوزه های آمورف قله های پهن و حوزه های کریستالی قله های دارن. از نسبت شدت این قله ها می توان برای تعیین بلورینگی استفاده کرد .

✓ **اندازه گیری حوزه های کریستالی:** پهنای قله ها حاوی اطلاعاتی از نمونه است. اندازه حوزه کریستالی و میکرو کرنش (کرنش کوتاه برد که در اثر عیوب شبکه ایجاد می شود) عوامل مؤثر در پهنای قله ها هستند. بدیهی است که هرچه حوزه کریستالی بزرگتر و عیوب شبکه کمتر باشد پهنای قله ها کمتر است. با استفاده از روابط موجود و تجزیه و تحلیل نمونه می توان به اندازه حوزه کریستالی پی برد.

✓ **تانسور انبساط:** برای تعیین خصوصیات نمونه به عنوان تابعی از دما و یا فشار می توان نمونه را در معرض دمای فشار کنترل شده قرار داد و همزمان اطلاعات حاصل از پراش اشعه ایکس XRD را بررسی کرد. در این حالت در XRD تجهیزات مورد نظر گرمایی یا تغییر فشار اضافه شده و نمونه در حین پراش و بررسی، تحت گرما یا فشار قرار می گیرد . با بررسی نمونه در زوایا و شرایط متفاوت می توان تانسور انبساط را تعیین کرد .

✓ **تحلیل بافت:** توزیع غیر تصادفی صفحات و ارجحیت جهتی خاص در نمونه باعث تغییر شدت قله ها می شود. به این توزیع غیر تصادفی صفحات، بافت می گویند. با مقایسه شدت قله ها با حالت کاملاً تصادفی می توان به توزیع غیر تصادفی صفحات دست یافت. بافت در خصوصیات مکانیکی همچون کشش و مقاومت تاثیر زیادی دارد .

✓ **تنش پسماند:** یکی از پر کاربرد ترین تکنیکها جهت بررسی تنش پسماند، به علت غیر مخرب بودن، آنالیز XRD است. تنش پسماند باعث تغییر فاصله صفحات و در نتیجه زاویه پراش میشود. اثر تنش هم برروی زاویه پراش و هم پهنای قله هاست. با بررسی و تحلیل نمودار می توان تنش پسماند را تعیین کرد.

• روش SEM

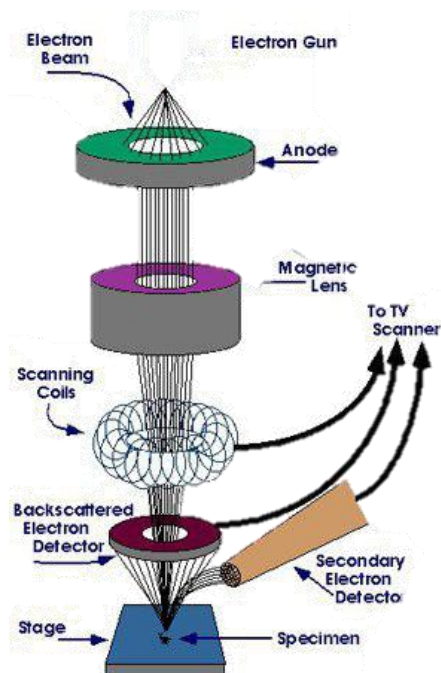
اساس کار دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی به این صورت است که با ایجاد اختلاف پتانسیل در منبع الکترونی، یک

پرتو الکترونی ایجاد می شود. این باریکه ابتدا از لنزهای متمرکزکننده (Condensing Lens) عبور می کند. وظیفه ی این لنزها باریک کردن باریکه اولیه به مقدار مشخصی است. سپس باریکه از میان یک سری سیم پیچ (Scan Coils) عبور می کند که با ایجاد نیروی الکترومغناطیسی باریکه را به چپ و راست جابجا می کند. در نهایت باریکه از لنزهای شیئی (Objective Lens) عبور می کند که وظیفه ی آن متمرکز کردن پرتو بر روی نمونه است.

پس از برخورد باریکه به نمونه یک سری پرتوهای الکترونی از سطح خارج می شود که توسط آشکارگرهایی که بالای نمونه قرار گرفته اند، دریافت می شود. در نهایت با تبدیل این الکترون ها به سیگنال، می توان به شناسایی نمونه پرداخت.



شکل (۲-۲۶) دستگاه SEM [۱۰۲]



شکل (۲-۲۷) ساختمان دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) [۱۰۲]

آنالیز SEM یک روش آنالیز عنصری محسوب می شود. بنابراین یکی از اهداف مهم تست SEM، شناسایی عناصر موجود در نمونه است. یکی دیگر از ویژگی های میکروسکوپ الکترونی روبشی، قدرت تفکیک بالای آن است. هر چه قدرت تفکیک میکروسکوپ بالاتر باشد، شناسایی اجزای سطحی و ناهمواری های آن آسان تر خواهد بود. بنابراین یکی از اهداف تصویربرداری در SEM، بررسی توپوگرافی سطحی نمونه است.

یکی دیگر از اطلاعاتی که می توان از آنالیز SEM به دست آورد، کنتراست عدد اتمی است که با توجه به میانگین عدد اتمی فازها مشخص می شود. در صورتی که دو فاز سبک و سنگین در کنار هم قرار داشته باشند، فازی که عدد اتمی بیشتری داشته باشد، روشن تر دیده خواهد شد و بالعکس.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope) که SEM نیز نامیده می شود، یکی از روش های آنالیز مواد است که در بررسی سطح نمونه ها کاربرد دارد. زمانی که نمونه در معرض تابش یک پرتو الکترونی کوچک که پروب (Probe) نامیده می شود، قرار می گیرد، الکترون های ثانویه از سطح نمونه ساطع می شوند. توپوگرافی سطح را می توان با اسکن دو بعدی پروب الکترونی روی سطح و به دست آوردن یک تصویر از الکترون های ثانویه شناسایی شده، مشاهده کرد. اساس کار میکروسکوپ الکترونی روبشی بر ۳ اصل زیر استوار است:

۱- اندرکنش یا تاثیر متقابل پرتو الکترونی و مواد

۲- امکان تولید و کنترل مشخصه های پرتو الکترونی روبشگر در میدان های الکتریکی و الکترومغناطیسی

۳- امکان آشکارسازی پرتوهای ساطع شده از سوی ماده در اثر اندرکنش آن با پرتو الکترونی ورودی

• روش EDAX

آنالیز EDAX یا EDS (طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس)، یک افزونه در دستگاه های SEM جهت تشخیص درصد عناصر در نمونه های جامد است. این آنالیز می تواند با استفاده از انرژی اشعه ایکس منحصر به فرد ساطع شده از نمونه، نوع عنصر و درصد وزنی یا اتمی آنرا تشخیص بدهد. آنالیز EDAX توانایی های منحصر به فردی در مقایسه با دیگر روش های تعیین عنصری مانند XRF و ICP دارد. این روش می تواند عناصر سبکی همانند اکسیژن و کربن و یا هالوژن ها را تشخیص دهد. در نتیجه امتیاز بزرگی برای تخمین این عناصر در نمونه های به خصوص آلی دارد.

در صورتی که دستگاه آنالیز SEM مجهز به آشکارساز EDS باشد، علاوه بر تصویر برداری از سطح نمونه، داده های مربوط به عناصر تشکیل دهنده نمونه نیز قابل استخراج می باشد. با استفاده از آنالیز EDAX میتوان نه تنها طیف وسیعی از عناصر شیمیایی بلکه توزیع و پراکندگی عناصر در نمونه را نیز تشخیص داد.

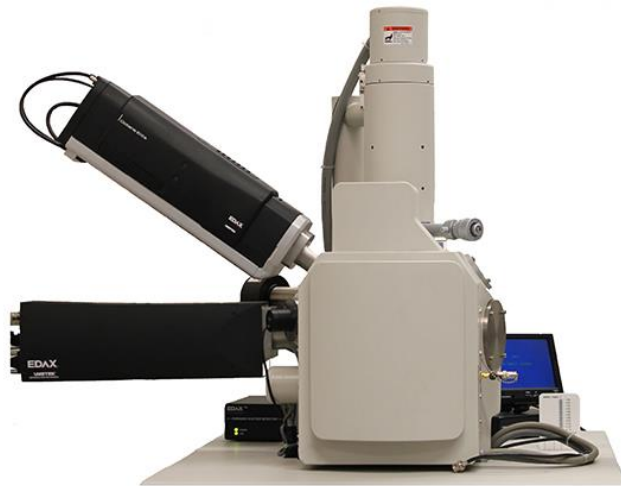
بررسی درصد وزنی و درصد جرمی عناصر سنگین تر از لیتیم در یک نقطه و یا یک منطقه دلخواه از نمونه، بررسی میزان آلودگی، بررسی ترکیب شیمیایی ترکیبات معدنی، بررسی ترکیب شیمیایی آلیاژها، بررسی خلوص مواد شیمیایی و معدنی، بررسی تغییرات درصد عناصر در راستاهای مختلف نمونه، بررسی جدایش غلظتی در فرایندهای ریخته گری، بررسی توزیع یک نواخت مواد در کامپوزیت ها و نانو کامپوزیت ها از توانایی های این روش آنالیز می باشد.

در این روش سطح نمونه توسط یک اشعه الکترونی درون میکروسکوپ تحت بمباران قرار گرفته و با برخورد الکترونی های این اشعه به الکترونی های مربوط به اتمهای نمونه تحت بررسی، برخی از این الکترونها از جای خودشان خارج می شوند. با توجه به اینکه جای اتمها نمی تواند خالی مانده و بایستی به حالت تعادل برسند، الکترونی هایی از لایه های بالاتر اتمی به این جای خالی مهاجرت کرده و جای آن را پر می کنند. برای انجام این عمل الکترونی های لایه های بالاتر که انرژی بیشتری دارند، بایستی بخشی از انرژی خود را از دست بدهند تا به سطح انرژی لایه جدید رسیده و پایدار باشند که این انرژی بصورت اشعه ایکس منتشر می گردد.

مقدار انرژی آزاد شده بستگی نوع لایه ها دارد هم لایه ای که الکترون از آن جدا شده و هم لایه ای که الکترون به آن مهاجرت می کند. از طرفی اشعه ایکس اتمهای هر عنصر مقدار انرژی منحصر بفردی در حین انتقال از لایه ای به لایه دیگر اتمی ساطع از خودشان می کنند. بنابراین با اندازه گیری مقدار انرژی موجود در اشعه ایکس آزاد شده در یک نمونه در حین بمباران توسط اشعه الکترونی می توان نوع اتم موجود را مشخص نمود.

خروجی یک آنالیز EDX طیف EDX است. طیف EDX فقط یک نمودار است که بر اساس دریافت انرژی ایکس از هر سطح انرژی رسم شده است. هر یک از پیک های نشان داده شده در این نمودار مختص یک اتم بوده و بنابراین نشانگر فقط یک عنصر می باشند. پیک های با ارتفاع بیشتر در طیف به معنی غلظت بیشتر عنصر مورد نظر در نمونه است. در خصوص طیف EDAX این نکته را باید ذکر کرد که نوع اشعه X آزاد شده ممکن است متفاوت باشد، بطور مثال اگر الکترون از لایه L به لایه K مهاجرت کند به اشعه آزاد شده پیک K-Alpha و به پیک ناشی از رفتن الکترون از لایه M به لایه K پیک K-Beta می گویند.

آنالیز EDS روشی برای تخمین میزان غلظت عناصری است که می دانیم در نمونه وجود دارد. درصد حدودی این عناصر را می توانیم با این روش تخمین بزنیم. ولی اگر نمی دانید در نمونه چه عناصری وجود دارد بهتر است از دیگر روش های عنصری استفاده شود. به دلیل انرژی نزدیک عناصر امکان خطا در صورتی که دستگاه نوع عنصر را شناسایی کند وجود دارد. مزیت مهم این روش امکان ردیابی عناصر کربن و اکسیژن و نیتروژن است. مشاهده چگونگی پراکندگی عناصر در بزرگنمایی بالا (تصویربرداری مپینگ) و بررسی پروفایل تغییرات غلظت عناصر بین نواحی مختلف نمونه (آنالیز اصطلاحاً خطی) از دیگر امتیازهای منحصر به فرد این روش است [۱۰۲].



شکل (۲-۲۸) دستگاه EDAX [۱۰۲]

نتیجه گیری

گزارش تهیه شده تحت عنوان فاز خرید و تدارکات، در حقیقت بیانگر فعالیت های انجام شده توسط تیم اجرایی پروژه در راستای تهیه و مهیا نمودن مواد و ادوات لازم برای انجام فازهای بعدی پروژه می باشد. این فاز از گزارش شامل لیست بندی مواد و تجهیزات مورد نیاز جهت تهیه بتنی با خاصیت خودترمیمی با هدف بهبود خواص و بهینه سازی مواد ترمیمی می باشد. در همین راستا گزارش شامل تعیین مشخصات مواد اولیه مورد نیاز، تهیه فهرست منابع تامین کننده مواد، تعیین مشخصات فنی و فهرست تجهیزات و در نهایت سفارش خرید مواد و تجهیزات ارائه می باشد. همچنین روش ها و تجهیزات مورد نیاز جهت بررسی ویژگی و مشخصه یابی مواد ترمیمی و بتن های دارای خاصیت خودترمیمی معرفی و ارائه گردید.

فصل سوم

فصل سوم: فاز ستر، اعمال و مشخصه یابی محصول

۱-۳- مقدمه

بتن به دلیل مقاومت فشاری و دوام بالا و ارزان بودن، از پرکاربردترین مصالح برای ساخت سازه‌ها در سراسر جهان است. اما مقاومت کششی پایین این ماده‌ی ارزشمند، آن را در برابر ترک خوردگی آسیب پذیر می‌کند. در ساخت سازه‌ها به منظور تحمل بارهای کششی از آرماتورهای فولادی استفاده می‌شود. با این حال به دلیل عوامل خارج از کنترل، مثل: یخ زدگی، نفوذ نمک‌ها به خلل و فرج بتن، حملات کلریدی و سولفاتی، کربناسیون و ... ترک خوردگی امری اجتناب ناپذیر در ساختار بتن می‌باشد.

ترک‌های ریز در بتن با شکل‌دهی یک شبکه‌ی پیوسته می‌توانند موجب نفوذپذیری بتن در برابر مواد تهاجمی مثل گازها و مایعات مضر شوند و از این طریق بستری برای تخریب بتن و متعاقباً خوردگی آرماتورهای فولادی و کاهش دوام سازه فراهم شود که علاوه بر تحمیل هزینه‌های هنگفت برای تعمیر، خطر آفرین نیز می‌باشد. دو محدودیت عمده برای افزایش طول عمر سازه‌های بتنی از طریق تعمیر و ترمیم با عوامل خارجی، هزینه‌ی زیاد و سازگار نبودن روش‌های ترمیمی با محیط زیست است که می‌توان با به کار گیری مکانیزم‌های نوین مبتنی بر خود ترمیمی بتن این مشکلات را تا حدودی برطرف کرد. بتن به طور ذاتی دارای ویژگی خودترمیمی می‌باشد که در بتن‌های جوان ناشی از هیدراتاسیون سیمان هیدراته نشده و در سال‌های بعد ناشی از تشکیل رسوب کلسیم کربنات و کلسیم هیدروکسید و پر شدن ترک‌ها با این دو ماده‌ی معدنی است. اما این خودترمیمی ذاتی، تنها قادر به ترمیم ترک‌هایی با عرض کمتر از ۰/۲ میلی‌متر است. برای ترمیم ترک‌هایی با عرض بیشتر باید روش‌هایی مثل خودترمیمی مبتنی بر کپسول و مبتنی بر مجراهای لوله‌ای که حاملان عامل‌های ترمیمی و کاتالیزورهای مربوط به فرآیند هستند، به کار گرفته شوند.

در این میان روش بسیار کارآمدی که تاثیر آن بر فرآیند خود ترمیمی و بهبود خواص بتن به اثبات رسیده است استفاده از میکرواورگانیزم‌ها برای ساخت بتن خود ترمیم شونده است. این روش می‌تواند ترک‌هایی با عرض بیشتر از ۰/۵ میلی‌متر را ترمیم کند و مهمترین ویژگی این فناوری، سازگاری آن با محیط زیست می‌باشد.

۱-۳-۱- ساخت نمونه های بتن

بتن مصالحی شبیه سنگ است که از مخلوط کردن مقدار متناسبی از سیمان، شن، ماسه و آب و افزودنی‌های دیگر بدست می‌آید. توده اصلی بتن سنگ دانه‌های درشت و زیر (شن و ماسه) است و فعل و انفعال شیمیایی بین آب و سیمان که به صورت شیره‌ای اطراف سنگدانه‌ها را پوشانده است باعث یکپارچه شدن و چسبیدن سنگدانه‌ها به یکدیگر می‌شود. این سنگدانه‌ها اسکلت اصلی بتن را تشکیل داده و نیروی وارد بر بتن را تحمل می‌کنند. آب نیز در این مخلوط موجب ایجاد واکنش شیمیایی در سیمان می‌شود که سخت شدن مخلوط بتن را طی دوره حدود بیست و هشت روز و رسیدن به مقاومت نهایی بتن به همراه دارد. شن و ماسه حدود ۶۵ درصد مخلوط بتن و مابقی را خمیر سیمان و درصد بسیار کمی هوا تشکیل می‌شود. برای ساخت بتن خودترمیم شونده تمامی مواد مورد استفاده و مراحل ساخت مشابه بتن معمولی است با این تفاوت که درصد بهینه از مواد خودترمیم هیبریدی به ماده بتن افزوده می‌شود.

مواد تشکیل دهنده بتن شامل سیمان، آب، سنگدانه شامل شن و ماسه می‌باشد.

سیمان‌های پرتلند که در کشور استفاده می‌شوند از نظر مقدار ترکیبات متفاوت هستند و در نتیجه عملکرد آنها نیز مختلف است، کاربرد ۵ نوع سیمان پرتلند به شرح زیر است:

نوع ۱ یا معمولی: برای مواردی که نیاز به خواص معینی نیست و شرایط محیط معمولی است.

نوع ۲ یا تهاجم ضعیف سولفات: در مواردی که مقاومت کم در مقابل تهاجم سولفات یا دمای حاصل از واکنش نسبتاً کم با آب نیاز است.

نوع ۳ یا مقاومت زیاد زودرس: در مواردی که مقاومت زیاد در اوایل سن بتن نیاز است.

نوع ۴ یا دمای کم واکنش سیمان با آب: در مواردی که دمای کم گیرش نیاز است.

نوع ۵ یا مقاوم در مقابل تهاجم سولفات: در مواردی که مقاومت زیاد در مقابل تهاجم سولفات نیاز باشد. در **Error!**
(Reference source not found) مقادیر تقریبی انواع سیمان آمده است.

جدول (۱-۳) مقادیر تقریبی ترکیبات انواع سیمان پرتلند [۱۰۳]

ترکیبات (%)				انواع سیمان پرتلند
C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	
۱۰	۱۰	۲۰	۵۵	نوع ۱
۱۲	۷	۲۵	۵۰	نوع ۲
۸	۱۲	۱۵	۶۰	نوع ۳
۱۲	۵	۴۵	۳۰	نوع ۴
۱۲	۴	۳۰	۵۰	نوع ۵

چهار ترکیب اصلی سیمان شامل موارد ذیل می باشند:

C ₃ S	3CaO.SiO ₂	سیلیکات تری کلسیم
C ₂ S	2CaO.SiO ₂	سیلیکات دی کلسیم
C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	آلومینات تری کلسیم
C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	آلومینات فریت تترا کلسیم

هریک از ترکیبات نقش مهمی در خواص و رفتار بتن دارد. در **Error! Reference source not found.**
ثرات ترکیبات سیمان در خواص مختلف نشان داده شده است [۱۰۳].

جدول (۲-۳) اثرات ترکیبات سیمان در خواص مختلف [۱۰۳]

C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	خصوصیات
متوسط	سریع	آهسته	متوسط	سرعت واکنش
کم	زیاد	کم	متوسط	دمای حاصل از واکنش با آب
ضعیف	ضعیف	ضعیف	خوب	ارزش سیمانی در اوایل سن
ضعیف	ضعیف	خوب	خوب	ارزش سیمانی نهایی

برای تهیه هر متر مکعب بتن تقریباً ۸.۱ الی ۹.۱ تن شن و ماسه (۱۰۰۰ الی ۱۱۰۰ کیلو شن یا همان درشت دانه و ۸۰۰ الی ۹۰۰ کیلو ماسه یا همان ریز دانه) همچنین ۳۰۰ الی ۳۵۰ کیلوگرم (۶ الی ۷ پاکت ۵۰ کیلویی) سیمان و ۱۵۰ الی ۱۷۰ کیلو (۱۷۰ لیتر یا ۱۷۰ متر مکعب) آب استفاده می شود. سنگدانه ها در بتن تقریباً سه چهارم حجم و ملات سیمان و آب یک چهارم آنرا تشکیل می دهند. باید توجه گردد که نسبت آب به سیمان با توجه به رطوبت مصالح متغیر است و مقاومت مشخصه بتن تحت تاثیر درصد شن است. همچنین برای کارایی بهتر بتن می توان از افزودنی ها استفاده کرد. در این تحقیق ۲۰۰ تا ۲۰۰ گرم در هر ۱۰۰ کیلو سیمان روانساز و بین ۶ تا ۱۰ درصد وزن سیمان از میکروسیلیس استفاده شد. در جدول زیر به انواع سیمان ها جهت استفاده در محیط های مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت اشاره شده است.

جدول (۳-۳) سیمان های مناسب برای محیط های گوناگون [۱۰۳]

موارد مصرف	نوع سیمان مناسب
سازه های بتنی واقع در محیط های معمولی (بدون یونهای سولفات و یون کلر)	سیمان پرتلند نوع ۱
سازه هایی که در معرض حمله ضعیف سولفات ها قرار دارند	سیمان پرتلند نوع ۲ سیمان پرتلند سرباره ای (با ۱۵ تا ۲۵ درصد سرباره) سیمان پرتلند پوزولانی (با ۱۵ تا ۲۵ درصد پوزولان)
مقابله با حمله سولفات های قوی	سیمان پرتلند نوع ۵ سیمان سوپرسولفات سیمان پرتلند سرباره ای (با بیش از ۲۵ درصد سرباره) سیمان پرتلند پوزولانی (با بیش از ۲۵ درصد پوزولان)
مقابله با سولفات های قوی به همراه یون کلر مقابله با واکنش قلیایی سنگدانه ها و ساخت بتن متراکم با نفوذ پذیری کم	سیمان پرتلند سرباره ای (با بیش از ۵۰ درصد) سیمان پرتلند پوزولانی (با بیش از ۴۰ درصد پوزولان)
مناطق ساحلی خلیج فارس و دریای عمان	سیمان نوع ۲ سیمان نوع ۱ با پوزولان سیمان پرتلند آمیخته پوزولانی یا سرباره ای

۲-۱-۳- سنگدانه ها

سنگدانه های مصرفی در بتن شامل مصالح سنگی درشت دانه و ریز دانه می باشد که این سنگدانه ها باید تمیز، سخت و عاری از مواد شیمیایی، ترکیبات آلی، نمک و پوششهای گچی، رسی و مواد ریز دیگر که بر چسبندگی آنها در خمیر سیمان اثر میگذارد، باشند.

جدول (۳-۴) مقادیر حداکثر مجاز مواد زیان آور در سنگدانه های درشت بتن [۱۰۳]

نوع ماده زیان آور	روش آزمایش	حداکثر درصد وزنی مجاز در کل نمونه
کلوخه های رسی	دت ۲۲۱	۰/۲۵
دانه های نرم	دت ۲۲۳	۵
چرت به صورت ناخالصی		
- در معرض شرایط محیطی شدید		۱
- در معرض شرایط محیطی متوسط		۳
- در معرض شرایط محیطی ملایم		۵
دانه های گذشته از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلیمتر)	دت ۲۱۸	۱۱
سولفات ها (SO_4^{2-})	دت ۲۳۰	۰/۴۲
کلریدها (Cl^-)	دت ۲۳۱	۰/۰۲۲

۳-۱-۳ آب

آب مصرفی برای شستشوی سنگدانه ها، ساخت و عمل آوری بتن باید تمیز، صلاف و روشن باشد. همچنین باید از مصرف آب حاوی مقادیر زیاد از هر نوع ماده از قبیل روغن ها، اسیدها، قلیاها، املاح، مواد قندی و مواد آلی که قادر به صدمه زدن به بتن یا میلگرد باشد، خودداری کرد. به طور کلی آب آشامیدنی، برای مصرف در ساخت و عمل آوری بتن مناسب می باشد.

جدول (۳-۵) حداکثر مجاز مواد زیان آور در آب مصرفی نمونه ها [۱۰۳]

نوع ماده زیان آور	شرح	روش آزمایش	حداکثر غلظت مجاز (قسمت در میلیون)
ذرات جامد مطلق	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش تنیده بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم	دت ۳۰۵	۱۰۰۰ ۲۰۰۰
مواد محلول	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش تنیده بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم	دت ۳۰۵	۱۰۰۰ ۲۰۰۰
کلرید (Cl^-)	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید، بتن پیش تنیده سایر موارد بتن آرمه، در شرایط مرطوب	دت ۳۰۶	۵۰۰* ۱۰۰۰*
سولفات (SO_4^{2-})	بتن آرمه و بتن پیش تنیده	دت ۳۰۷	۱۰۰۰*
قلیایی ها	($Na_2O + 0.658 K_2O$)	دت ۳۰۴	۶۰۰

۳-۱-۴ افزودنی های بتن

مواد افزودنی موادی هستند به غیر از سیمان پرتلند، آب و مصالح سنگی که به مخلوط بتن، اندکی قبل از اختلاط یا در حین اختلاط افزوده میشوند. مواد افزودنی به گروه های مختلفی تقسیم می شوند که مهمترین آنها عبارتند از:

✓ مواد افزودنی حباب ساز

- ✓ مواد افزودنی کاهنده آب
- ✓ مواد افزودنی روان ساز
- ✓ مواد افزودنی بازدارنده خوردگی
- ✓ مواد افزودنی پوزولانی

افزودنی های شیمیایی مانند افزودنی های روان ساز یا کاهنده آب باید مطابق استاندارد ASTM C494، افزودنی های حباب ساز مطابق استاندارد ASTM C260، افزودنی های پوزولانی مطابق با استاندارد ASTM C618، و بازدارنده های خوردگی مطابق با استاندارد ASTM G109 باشند. استفاده هر گونه افزودنی به منظور بهبود خواص بتن در صورتی که مدارک مستند و کافی جهت اطمینان از کارایی آنها وجود داشته باشد، مجاز می باشد. در غیر این صورت انجام آزمایش های لازم تحت نظر دستگاه نظارت الزامی است. در صورت اطمینان از کارایی افزودنی ها، مقدار و نحوه مصرف آنها باید براساس مشخصات فنی و توصیه های سازنده باشد [۱۰۳-۱۰۴].

۲-۳- روش تهیه نمونه های بتنی با نانوذرات

جهت ساخت نمونه های بتن حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و نانوذرات سیلیکا، از نرم افزار statgraphic به منظور طراحی آزمایش استفاده گردید.

جدول زیر مقادیر تعیین شده برای دو نانوذره ذکر شده را نشان میدهد.

جدول (۳-۶) مقادیر بهینه شده نانوذرات کربنات کلسیم و نانوذرات سیلیکا با استفاده از نرم افزار STATGRAPHIC

BLOCK	Nano Silica gr	Nano Calcium Carbonate gr	Compressive strength kg/cm ²
1	0.0	35.15	246
۲	34.15	60.0	251
۳	34.15	10.3	235
۴	116.5	0.0	217
۵	116.5	35.15	238
۶	199.0	60.0	227
۷	199.0	10.3	200
۸	116.5	70.29	241.5
۹	116.5	35.15	238
۱۰	233	35.15	205

در پژوهش هایی که تاکنون گزارش شده است مقادیر بهینه نانوسیلیکا جهت مقاوم سازی نمونه های بتن ۵ الی ۶ درصد و نانوکربنات کلسیم ۱ تا ۲ درصد ذکر شده است. لذا در این گزارش جهت طراحی آزمون ها مقادیر کمینه و بیشینه نانوذرات به ترتیب برای نانوسیلیکا حدود ۱.۷۳ و ۱۰ درصد و نانوکربنات کلسیم ۰.۵۱ و ۳ درصد می باشد. فرمول نمونه های بتن ساخته شده به صورت جداول زیر می باشد:

فرمول ۱: (نانوکربنات کلسیم: ۳۵.۱۵ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۸۳۵.۵
نانوکربنات	۳۵.۱۵
آب	۷۹۵+۳۰۰
میکروسیلیس	۷۷

فرمول ۲: (نانوسیلیکا: ۳۴.۱۵ گرم، نانوکربنات کلسیم: ۶۰ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۹۴۳
نانوسیلیس	۳۴.۱۵
نانوکربنات	۶۰
آب	۷۹۵+۱۵۰
میکروسیلیس	۷۷

فرمول ۳: (نانوسیلیکا: ۳۴.۱۵ گرم، نانوکربنات: ۱۰.۳ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۸۹۳
نانوسیلیس	۳۴.۱۵
نانوکربنات	۱۰.۳
آب	۷۹۵+۱۵۰
میکروسیلیس	۷۷

فرمول ۴: (نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)

وزن (گرم)	ماده
۲۶۵۵	شن
۲۵۶۳	ماسه
۱۸۷۰.۵	سیمان
۱۱۶.۵	نانوسیلیس
۷۹۵+۳۰۰	آب
۷۷	میکروسیلیس

فرمول ۵: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵.۱۵ گرم، نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)

وزن (گرم)	ماده
۲۶۵۵	شن
۲۵۶۳	ماسه
۱۸۰۰.۵	سیمان
۱۱۶.۵	نانوسیلیس
۳۵.۱۵	نانوکلسیم
۷۹۵+۳۰۰	آب
۷۷	میکروسیلیس

فرمول ۶: (نانوکلسیم کربنات: ۶۰ گرم، نانوسیلیکا: ۱۹۹)

وزن (گرم)	ماده
۲۶۵۵	شن
۲۵۶۳	ماسه
۱۹۵۲	سیمان
۶۰	نانوکلسیم
۱۹۹	نانوسیلیکا

آب	۷۹۵+۱۰۰
میکروسیلیس	۷۷

فرمول ۷: (نانوکلسیم کربنات: ۱۰.۳ گرم، نانوسیلیکا: ۱۹۹ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۷۷۸
نانوسیلیس	۱۹۹
نانوکلسیم	۱۰.۳
آب	۷۹۵+۳۰۰
میکروسیلیس	۷۷

فرمول ۸: (نانوکلسیم کربنات: ۷۰.۲۹ گرم، نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۷۱۹
نانوسیلیس	۱۱۶.۵
نانوکلسیم	۷۰.۲۹
آب	۷۹۵+۳۰۰
میکروسیلیس	۷۷

فرمول ۹: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵.۱۵ گرم، نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۷۲۸

نانوسیلیکا	۱۱۶.۵
نانوکلسیم	۳۵.۱۵
آب	۷۹۵+۲۵۰
میکروسیلیس	۷۷

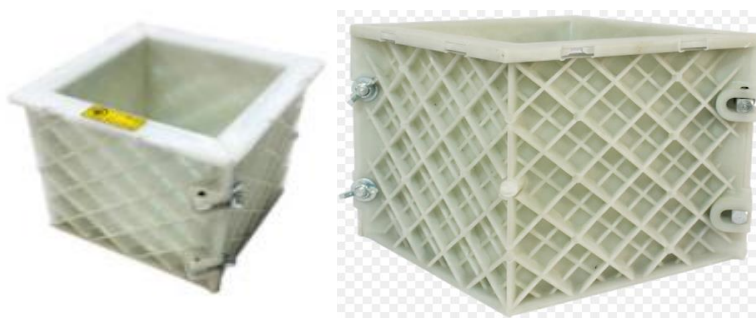
۱-۲-۳- فرآیند ساخت نمونه های بتن با افزودن نانوذرات به ترتیب ذیل می باشد:

- (۱) کل شن و ماسه با دو سوم سیمان را داخل بال میل ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه میکس می شوند
- (۲) بقیه سیمان و موادنانواضافه شده و به مدت ۲ دقیقه میکس می شوند
- (۳) نصف مقدار آب و میکروسیلیس به بال میل اضافه می شود. بعد از اضافه نمودن آب باید با استفاده از یک میله فلزی آن را با مواد دیگر مخلوط کرد، در غیراین صورت آب درهنگام کاربال میل بیرون خواهد ریخت. مخلوط نهایی به مدت ۲ دقیقه میکس می شود
- (۴) مواد داخل بال میل را در یک استانبولی ریخته و بقیه آب را اضافه کرده و با کاردک مخلوط نموده تا بتن یک دستی ایجاد شود. بتن حاصل را به صورت چهارلایه در داخل قالب ریخته و بعد ازهر لایه بیست بار میله فلزی را داخل لایه زده تا حبابهای هوا خارج شود.
- (۵) بعد از یک روز بتن قالبگیری شده درآورده شده و داخل حمام آب قرارداده می شود

۲-۲-۳- اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده

جهت اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه های بتن از دستگاه جک فشاری استفاده گردید. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن یکی از متداول ترین آزمایش هایی است که بر روی بتن انجام می شود. این آزمایش چنان به تغییرات در روش آزمایش حساس است که لازم است دقیقاً بر اساس روش استاندارد انجام پذیرد تا نتایج بدست آمده در آزمایش های مختلف با یکدیگر قابل مقایسه باشد. به همین دلیل، آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن مطابق با استاندارد جهانی ASTM انجام می شود. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن می تواند با استفاده از هر دستگاه جک فشاری که دارای شرایط مناسب باشند انجام شود. در دستگاه جک فشاری (جک بتن شکن) دو قطعه سخت بارگذاری وجود دارد که یکی از آنها به صورت صلب است و نمونه بتنی روی آن قرار می گیرد و یک قطعه گوی شکل که روی سطح فوقانی نمونه قرار می گیرد. از آنجا که مقاومت بستگی به سرعت بارگذاری دارد؛ نمونه باید با یک سرعت کنترل شده بین ۰.۱۵ تا ۰.۳۵ مگاپاسکال بر ثانیه برای جک های هیدرولیکی و یا سرعت تغییر شکل برابر یک میلیمتر در دقیقه برای جک های مکانیکی بارگذاری شود و این بارگذاری تا نقطه شکست ادامه دارد، که به عنوان حداکثر باری است که نمونه تحمل می کند. آنگاه حداکثر بار و نحوه شکست گزارش می شود.

در این تحقیق نیز از نمونه های مکعبی استفاده گردید. بر اساس استاندارد انگلستان (BS) نمونه های مکعبی ۱۵۰ میلیمتر هستند که در سه لایه پر شده اند و هر لایه ۲۵ مرتبه با یک میله سر مربعی ۲۵ میلیمتری کوبیده می شود. همچنین به عنوان یک روش جایگزین، این مکعب بتنی می تواند بوسیله ویبراتور هم متراکم شود. آزمایش نمونه مکعبی بتن در واقع یک ایده ی کلی از تمامی مشخصات بتن به ما ارائه میدهد. با همین آزمایش میتوان تشخیص داد که بتن به حد کافی مناسب کار ما هست یا خیر. مقاومت فشاری بتن بر عوامل مختلفی هم چون نسبت آب به سیمان، مقاومت سیمان، کیفیت مواد بتن، کنترل کیفیت در طول تولید بتن و غیره بستگی دارد. آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی قطعه های مکعب شکل از بتن انجام میشود. به همین دلیل آزمایش نمونه مکعبی نامیده میشود. این آزمایش بر روی قطعه های استوانه ای بتن نیز مرسوم است.



شکل (۳-۱) قالب های دوتکه فایبرگلاس

بتن را در قالبهایی که تصویرش را در بالا مشاهده نمودید قرار داده و حرارت می دهیم تا حباب و فضای خالی دیگر در آن باقی نماند. بعد از بیست و چهار ساعت، عمل آوری بتن آغاز می شود. عمل آوری بتن باید به نحوی باشد که سطح خارجی بتن کاملاً صاف باشد. بنابراین معمولاً از چسب سیمان استفاده کرده و آن را بر روی سطح خارجی بتن طوری پخش نموده که کاملاً صاف شود. برای عمل آوری، قطعات بتن را بیست و چهار ساعت در هوای مرطوب قرار داده. سپس آنها را علامت گذاری کرده و در هوای تازه قرار داده می شوند تا زمان انجام آزمایش اصلی بر روی آنها فرا برسد. آب مورد استفاده در عمل آوری بتن باید هر هفت روز یک بار از نظر دمایی چک شود. نمونه های بتن را پس از هفت و بیست و هشت روز عمل آوری در ماشینهای آزمایش مقاومت فشاری قرار داده می شوند. در این ماشینها، بارگذاری به صورت دقیقه ای ۱۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش می یابد تا نمونه شکسته شود. مقدار بارگذاری در لحظه ی شکست بتن، میزان مقاومت فشاری بتن را به ما میگوید. حداقل از هر نمونه و در هر سن، بایستی ۳ نمونه ی بتن آزمایش شود. اگر در نتیجه مشاهده شود که مقاومت آنها بیش از ۱۵ درصد با یکدیگر اختلاف دارد، نتایج آزمایش رد میشود و بایستی آزمایش دوباره انجام شود. در غیر این صورت، میانگین مقاومت فشاری آن سه نمونه، مقاومت فشاری بتن مورد محسوب خواهد شد. مقاومت بتن با افزایش عمر، بیشتر میشود. در جدولی که در ادامه آمده است، نشان داده شده که در هر مقطع زمانی از عمل آوری، بتن چه مقدار از مقاومت اصلی اش را کسب میکند.

جدول (۳-۷) میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان

سن	درصد مقاومت کسب شده
۱ روز	۱۶ درصد
۳ روز	۴۰ درصد
۷ روز	۶۵ درصد
۱۴ روز	۹۰ درصد
۲۸ روز	۹۹ درصد

همانطور که در جدول بالا مشاهده می شود، بتن بیشتر مقاومت خود را در سنین اولیه به دست می آورد. بدین ترتیب که ۹۰ درصد مقاومتش در ۱۴ روز کسب میشود. در ۲۸ روز بتن به ۹۹ درصد مقاومتش میرسد و در ادامه روند کسب مقاومت بتن بسیار کند تر دنبال میشود. به همین دلیل است که در آزمایشها معمولاً نتایج ۲۸ روز نمونه های بتنی مورد نظر و مهم هستند. بتن در ۲۸ روزگی مقاومتی تقریباً مساوی با مقاومت نهایی اش دارد.

مقاومت بتن با پیشرفت هیدراسیون سیمان افزایش می یابد. روند هیدراسیون سیمان نیز با گذشت زمان و افزایش دما زیاد می شود. در نتیجه مقاومت بتن را میتوان به صورت تابعی از ترکیب دما - زمان بیان کرد. مقاومت بتن معمولاً در عمر های ۳، ۷ و ۲۸ روزه تعیین می شود. مقاومت ۷ روزه تقریباً ۰.۷ یا ۰.۸ مقاومت ۲۸ روزه است. علت اینکه مقاومت نمونه ها در سن ۲۸ روز ملاک است، یک کار آماری است که با بررسی موارد بسیار متعدد در ساختمان های متعارف، به این نتیجه رسیده اند که روند اجرا و نحوه بارگذاری به گونه ای است که در ۲۸ روز به این مقاومت نیاز پیدا می کند. در این تحقیق از دستگاه جک فشاری هیدرولیک بتن شکن که در آزمایشگاه پلیمر و سرامیک قرار دارد، استفاده گردید. این دستگاه متعلق به شرکت تک آزما می باشد که جهت انجام تست ها مجدداً سرویس و کالیبره گردید. نمونه های ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر بعد از عمل آوری در دستگاه جک هیدرولیک فشاری بتن شکن قرار گرفته و از تقسیم حداکثر نیروی ثبت شده بر سطح مقطع نمونه مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال بدست می آید.



شکل (۳-۲) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری

نمونه های بتن در این دستگاه بر حسب تن اندازه گیری شدند. میانگین مقاومت فشاری نمونه ها قبل افزودن نانوذرات ۳۲ تن گزارش گردید.

جدول (۳-۸) مقادیر و نمودارهای آماری حاصل از نتایج STATGRAPHIC

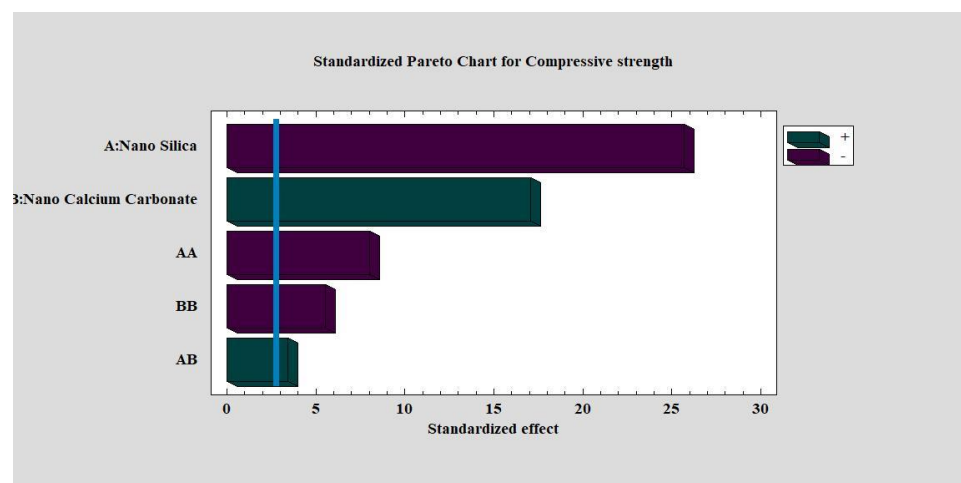
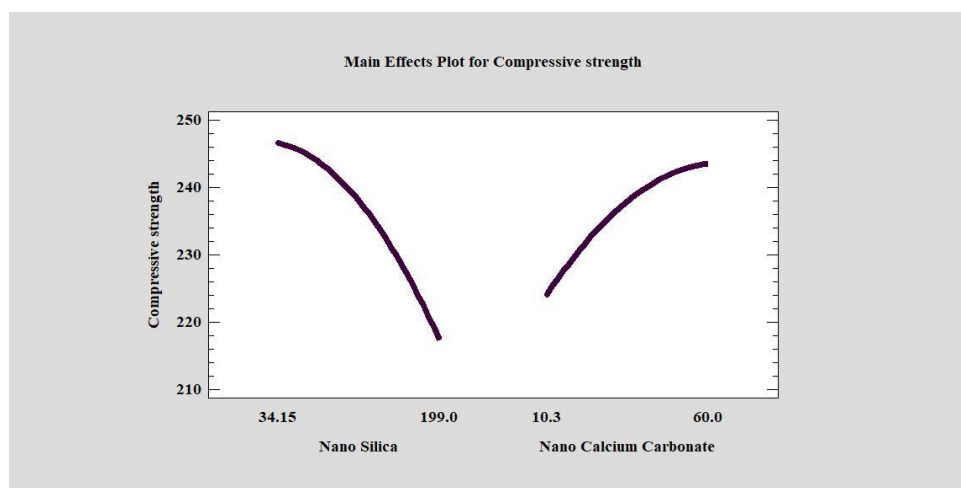
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Nano Silica	1710.62	1	1710.62	659.23	0.0000
B:Nano Calcium Carbonate	753.656	1	753.656	290.44	0.0001
AA	166.289	1	166.289	64.08	0.0013
AB	30.25	1	30.25	11.66	0.0269
BB	78.9691	1	78.9691	30.43	0.0053
Total error	10.3795	4	2.59488		
Total (corr.)	2685.03	9			

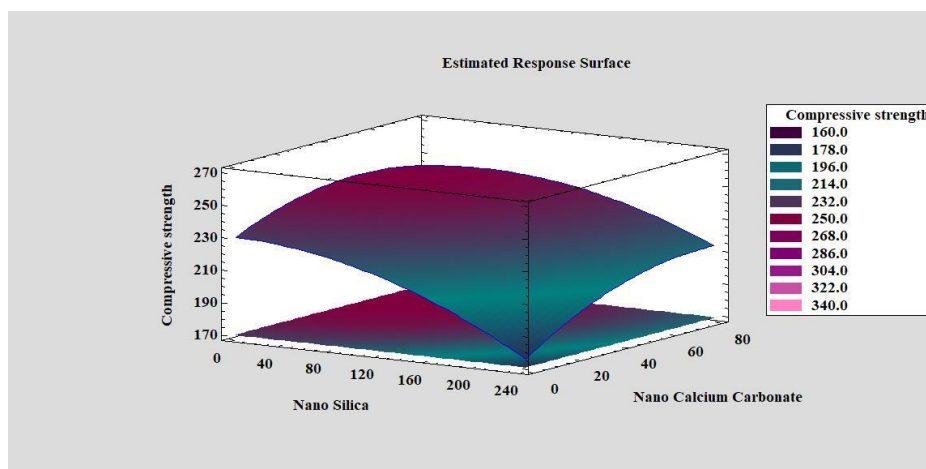
R-squared = 99.6134 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99.1302 percent

Optimum value = 249.5

Factor	Low	High	Optimum
Nano Silica	0	233	33
Nano Calcium Carbonate	0	70	56





۳-۳- ساخت مواد کپسولی حاوی باکتری

تحقیقات نشان داده اند که افزودن باکتری ها و مواد مغذی به طور مستقیم به ماتریس بتن باعث بهبود خواص مکانیکی آن می شود، اما بقای باکتری ها بعد از ده روز پس از پخت، به دلیل pH زیاد (بین ۱۲ و ۱۳) و حالت خشک بتن، دشوار می شود و ممکن است از بین بروند. به همین دلیل، محصورسازی برای محافظت از باکتری ها در محیط بتن ضروری است. در روشهای مختلف انکپسوله کردن باکتری ها، عواملی مانند مواد، اندازه، توزیع و مقدار کپسول های اضافه شده در ماتریس بتن مورد بررسی قرار گرفته است. کپسول ها می توانند بقای باکتری ها را افزایش دهند اما در عین حال باید به اندازه ی کافی قوی باشند که در برابر فرایند اختلاط بتن مقاومت کنند و به اندازه ی کافی شکننده باشند که با برخورد ترک، شکافته شوند. کپسول ها همچنین باید قادر به ایجاد پیوند محکم با ماتریس باشند تا از اثرات منفی بر روی خواص مکانیکی بتن جلوگیری شود.

تاکنون بسیاری از محققان مواد زیادی جهت حفاظت از باکتری ها استفاده کرده اند که می توان از این مواد به خاک دیاتومه، خاک رس منبسط شده، ژئوپلیمرها، پلیمرها، هیدروژل ها و ... اشاره کرد.

در این پژوهش از چسب شیشه به عنوان ماده تشکیل دهنده کپسول استفاده گردید. ماده ذکر شده در مقایسه با سایر مواد اولیه تشکیل دهنده کپسول که در بسیاری از پژوهش ها استفاده شده است، مقرون به صرفه می باشد و تاثیری بر خواص زیستی باکتریهای ترمیم کننده بتن ندارند. مراحل ساخت ماده کپسولی به شرح زیر می باشد:

۱ گرم سدیم سیلیکات در ۶ میلی لیتر آب حل می شود. سپس توسط هیتر به دمای ۸۰ درجه سانتیگراد رسیده تا یک محلول سوسپانسیون تشکیل شود. در مرحله ی بعد دمای آن کاهش می یابد و در دمای اتاق سرد می شود و با اسید سیتریک ۰.۷۵ مولار به pH برابر ۶.۵ می رسد. در مرحله ی بعد سوسپانسیون باکتری هم حجم آن سوسپانسیون قبلی تهیه گردیده و به محلول قبلی اضافه شده که در نهایت بعد از ۲ دقیقه ژل تشکیل می شود.

در این پژوهش از ۶ گرم سدیم سیلیکات استفاده شد که به آن ۳۶ میلی لیتر آب افزوده گردید. همچنین مقدار اسید سیتریک ۰.۷۵ مولار مورد نیاز با فرمول زیر بدست آمد و سپس به حجم ۵۰ میلی لیتر رسید.

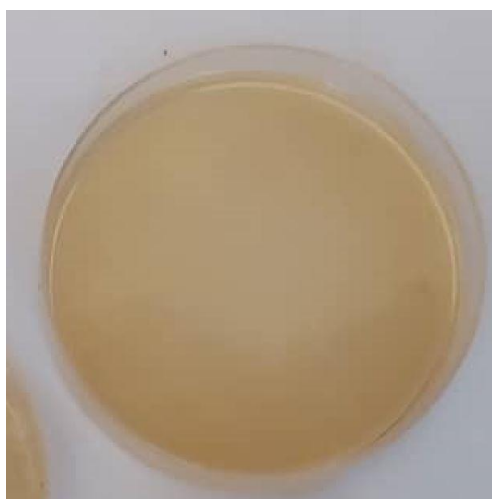
$$C = \frac{a.d.v2}{v1.100.fw} \quad 0.75 = \frac{50.1.66.v2}{v1.100.192.13} \quad V_2 = 8.68 \text{ ml}$$

همانطور که در گزارش فاز دوم ذکر شد باکتریهای جنس باسیلوس به دلیل سنتز ماده کریستالی کربنات کلسیم قادرند ترکهای ایجاد شده در بتن را ترمیم کنند. بتن دارای محیطی قلیایی است و pH آن بین ۹ تا ۱۳ می باشد. همچنین محیط بتن خشک، فاقد آب است و دمای آن تا ۷۰°C می رسد. لذا اولین شرط انتخاب باکتری مناسب، مقاومت آن در محیط قلیایی و

سخت و خشک بتن و بقای آن به مدت طولانی در شرایط مذکور است. باسیلوس ها دارای اسپورهای مقاوم هستند که از آن ها در مرحله ی اختلاط بتن و همچنین در محیط قلیایی و خشک بتن محافظت می کنند. از طرفی این نوع از باکتری ها در حضور اکسیژن و آب شروع به فعالیت کرده و با تولید آنزیمی به نام اوره آز می توانند اوره موجود در محیط را به کمک یک منبع غنی از کلسیم (لاکتات کلسیم، نترات کلسیم، استات کلسیم و ...) به کلسیم کربنات تبدیل کنند [۸]. این نوع از کلسیم کربنات تولید شده توسط باکتری ها، چسبندگی بیشتری دارد و با محیط بتن سازگارتر است و می تواند با پر کردن ترک ها باعث افزایش مقاومت کششی و فشاری بتن و کاهش نفوذ پذیری بتن در برابر آب و مایعات و گازهای مضر دیگر شود و از تخریب بتن و خوردگی آرماتورهای فولادی جلوگیری کند. همچنین در تحقیقی دیگر استفاده از ماده مغذی بدون اوره برای فعالیت گونه ی سوبتیلیس تاثیر کمتری بر بهبود خواص بتن داشته است. به طوری که هم مقاومت فشاری و هم مقاومت کششی در باکتری هایی که در محیط بدون اوره فعالیت داشته اند پس از ۲۸ روز بیشتر از باکتری هایی است که در حضور اوره این فرآیند را طی کرده اند [۶]. گونه ی سوبتیلیس برای فعالیت نیازی به اوره ندارد می تواند گزینه ی مناسب تری برای استفاده در بتن خود ترمیم شونده باشد که می تواند در حضور کلسیم لاکتات و بدون نیاز به اوره به فعالیت خود ادامه دهد و نتایج قابل قبولی حاصل کند. در ابتدا کلنی تشکیل شده بر روی محیط نوترینت آگار به محیط نوترینت براس که حاوی مواد غذایی می باشد تلقیح شد و سپس در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور انکوبه شد.

محیط کشت نوترینت نوعی محیط کشت میکروب شناسی است که برای رشد باکتری هایی که مشکل پسند نیستند، بکار می رود. این محیط حتی در دماهای بالا نیز جامد است. باکتری ها بر روی سطح محیط رشد می کنند و کلنی های کوچکی را تشکیل می دهند. در محیط براث نوترینت (محیط مایع نوترینت)، باکتری ها در داخل مایع رشد کرده و سوپی شکل خواهند شد. آگار نوترینت دارای:

- پپتون به میزان ۰/۵٪
 - عصاره گوشت و مخمر به میزان ۰/۳٪
 - آگار به میزان ۱/۵٪
 - کلرید سدیم به میزان ۰/۵٪
 - آب مقطر
 - pH خنثی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد باشد
- براث نوترینت نیز دارای همین ترکیبات بجز آگار است.

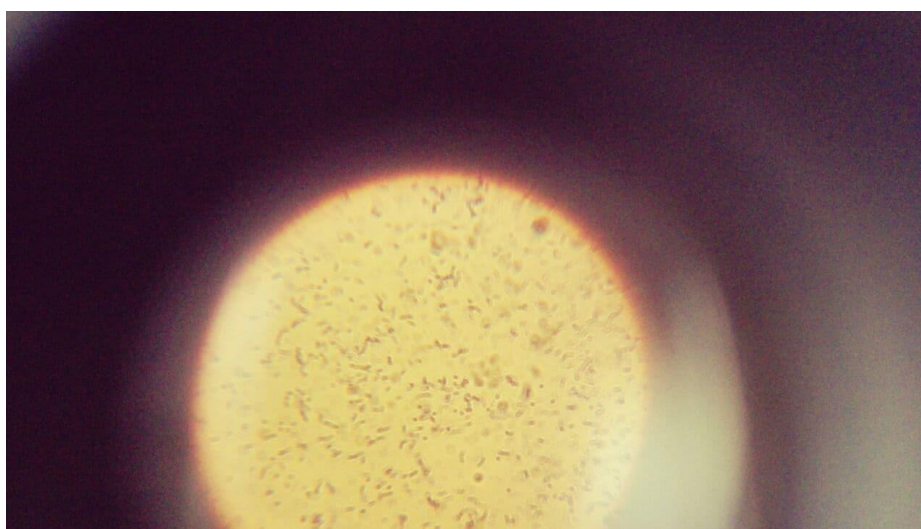


شکل (۳-۳) محیط کشت نوترین آگار



شکل (۳-۴) محیط کشت نوترین براث حاوی باکتری باسیلوس

جهت شناسایی باکتری ها از رنگ آمیزی گرم استفاده گردید. ابتدا توسط لوپ تلقیح باکتری مقداری از کلنی باکتری بر روی یک لام توسط مقدار کمی آب حل و اسمیر تهیه شد. سپس نمونه های لام در محیط خشک گردید و به آن رنگ کریستال ویوله اضافه شد. بعد از ۱ دقیقه رنگ توسط آب شستشو و لوگل اضافه گردید و مجددا پس از گذشت ۱ دقیقه شستشو انجام شد. رنگ کریستال ویوله و لوگل باعث تشکیل کمپلکس رنگ آبی در غشا باکتری می شوند. در مرحله بعد به منظور تشخیص باکتریهای گرم مثبت و منفی، حلال است اضافه و بعد از ۳۰ ثانیه شستشوی مجدد و در نهایت رنگ سافرانین افزوده شد. پس از خالی کردن رنگ و خشک شدن لام ها، توسط میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۴۰۰ برابر نمونه های رنگ شده مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل زیر باسیل های به رنگ آبی که نشان دهنده وجود باکتریهای باسیلوس می باشد، مشاهده می شود.



شکل (۳-۵) مشاهده نمونه های باکتری رنگ آمیزی شده توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر جهت ساخت ماده کپسولی حدود ۶ گرم از چسب سیلیکات سدیم توزین گردید و سپس به آن ۶ برابر وزنی آب اضافه شد. ترکیب حاصله در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد انکوبه شد تا یک ماده سوسپانسیون کلوتیدال تشکیل شود. سپس در دمای اتاق خنک گردید و به آن اسید سیتریک ۰.۷۵ مولار افزوده شد تا به pH حدود ۶.۵ برسد. قبل از ژل شدن ترکیب، سوسپانسیون

باکتری باسیلوس سوبتیلیس حاوی مواد مغذی به میزان مساوی از حجم ماده اولیه اضافه شد.

۴-۳- اعمال محصول خودترمیم زیستی و هیبریدی بر نمونه آزمایشگاهی توسط روش انتخابی

بتن به دلیل مقاومت فشاری و دوام بالا و ارزان بودن، از پرکاربردترین مصالح برای ساخت سازه‌ها در سراسر جهان است. اما مقاومت کششی پایین این ماده‌ی ارزشمند، آن را در برابر ترک خوردگی آسیب پذیر می‌کند. در ساخت سازه‌ها به منظور تحمل بارهای کششی از آرماتورهای فولادی استفاده می‌شود. با این حال به دلیل عوامل خارج از کنترل، مثل: یخ زدگی، نفوذ نمک‌ها به خلل و فرج بتن، حملات کلریدی و سولفاتی، کربناسیون و ... ترک خوردگی امری اجتناب ناپذیر در ساختار بتن می‌باشد.

ترک‌های ریز در بتن با شکل‌دهی یک شبکه‌ی پیوسته می‌توانند موجب نفوذپذیری بتن در برابر مواد تهاجمی مثل گازها و مایعات مضر شوند و از این طریق بستری برای تخریب بتن و متعاقباً خوردگی آرماتورهای فولادی و کاهش دوام سازه فراهم شود که علاوه بر تحمیل هزینه‌های هنگفت برای تعمیر، خطر آفرین نیز می‌باشد. دو محدودیت عمده برای افزایش طول عمر سازه‌های بتنی از طریق تعمیر و ترمیم با عوامل خارجی، هزینه‌ی زیاد و سازگار نبودن روش‌های ترمیمی با محیط زیست است که می‌توان با به کارگیری مکانیزم‌های نوین مبتنی بر خود ترمیمی بتن این مشکلات را تا حدودی برطرف کرد.

بتن به طور ذاتی دارای ویژگی خودترمیمی می‌باشد که در بتن‌های جوان ناشی از هیدراتاسیون سیمان هیدراته نشده و در سال‌های بعد ناشی از تشکیل رسوب کلسیم کربنات و کلسیم هیدروکسید و پر شدن ترک‌ها با این دو ماده‌ی معدنی است. اما این خودترمیمی ذاتی، تنها قادر به ترمیم ترک‌هایی با عرض کمتر از ۰/۲ میلی‌متر است. برای ترمیم ترک‌هایی با عرض بیشتر باید روش‌هایی مثل خودترمیمی مبتنی بر کپسول و مبتنی بر مجراهای لوله‌ای که حاملان عامل‌های ترمیمی و کاتالیزورهای مربوط به فرآیند هستند، به کار گرفته شوند.

در این میان روش بسیار کارآمدی که تاثیر آن بر فرآیند خود ترمیمی و بهبود خواص بتن به اثبات رسیده است استفاده از میکرواورگانیزم‌ها برای ساخت بتن خود ترمیم شونده است. این روش می‌تواند ترک‌هایی با عرض بیشتر از ۰/۵ میلی‌متر را ترمیم کند و مهمترین ویژگی این فناوری، سازگاری آن با محیط زیست می‌باشد.

۱-۴-۳- فرآیند ساخت نمونه های بتن حاوی نانومواد و باکتری

نمونه های بتن با فرمول های ۱، ۲ و ۴ که پیشتر در جدول بالا ذکر شده بود جهت ساخت نمونه های خودترمیم زیستی انتخاب شدند. نمونه با فرمول ۱ مقاومت فشاری را با میزان ۲۴۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع داشت که حاوی نانوذرات کربنات کلسیم می باشد. مقدار این نانومواد ۳۵ گرم در ۸ کیلوگرم مقدار نمونه بتن در قالب های ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر مربع می باشد. نمونه ۴ حاوی ۱۱۶.۵ گرم نانوذرات سیلیکا با مقاومت فشاری ۲۱۷ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و نمونه ۲ داری نانوذرات کربنات کلسیم و نانوسیلیکا به ترتیب ۶۰ و ۳۴ گرم با بیشترین مقاومت فشاری ۲۵۱ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می باشند. قابل ذکر است که نمونه های بتن بدون نانومواد و باکتری و با باکتری به عنوان شاهد سنتز شدند.

جهت ساخت نمونه های بتن از میکسر و مخلوط کن ملات بتن که از شرکت آزمان تجهیز مهمام خریداری شده بود استفاده گردید.



شکل (۳-۶) دستگاه میکسر جهت ساخت نمونه های بتن

۲-۴-۳- روش تهیه نمونه های بتنی بدون نانوذرات حاوی باکتری

(۱) کل مقدار شن و ماسه با نصف مقدار سیمان داخل میکسر ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه همزده می شود.

(۲) بقیه مقادیر سیمان اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه میکس می شوند

(۳) نصف مقدار آب (۶۹۷.۵ گرم) و ۷۷ گرم میکروسیلیس به میکسر اضافه می شود. سپس به مدت ۲ دقیقه با دور بالا همزده می شود.

(۴) در مرحله بعد بقیه آب را اضافه کرده و به مدت ۲ دقیقه دیگر همزده می شود. بتن حاصل را به صورت چهارلایه در داخل قالب پلی آمیدی ریخته و و محلول حاوی باکتری باکتری در هر لایه ریخته می شود. بعد از هر لایه بیست بار میله فلزی را داخل لایه زده تا حبابهای هوا خارج شود.

(۵) بعد از ۱۴ روز تیمار بتن در داخل آب، نمونه ها خارج شده و با استفاده از دستگاه فشار (۷۰-۹۰ بار)، شکاف های میکرونی در مقاطع طولی و عرضی قطعه داده می شود. قطعه ی بتنی در داخل نایلون قرار داده و داخل آب قرار داده می شود. بمنظور ارزیابی های خود ترمیمی و اینکه چند درصد از شکاف های میکرونی ترمیم شده است، بار اول بعد از ۱۰ روز و سپس بار دوم بعد از ۲۰ روز از آب بیرون آورده می شود تا ارزیابی های ماکروسکوپی خود ترمیم مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۳-۷) ایجاد ترک میکرونی توسط دستگاه چک مقاومت فشاری

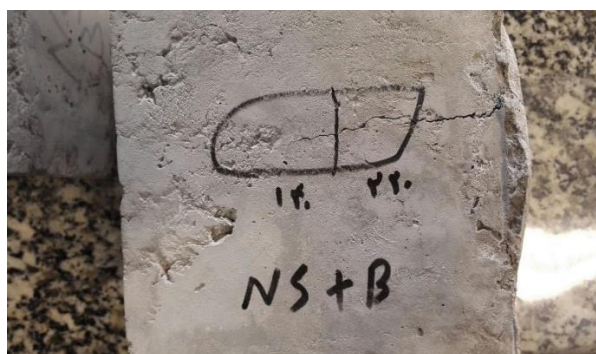
۳-۳-۴- روش تهیه نمونه های بتنی نانوذرات سیلیکا حاوی باکتری فرمول ۴: (نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)

وزن (گرم)	ماده
۲۶۵۵	شن
۲۵۶۳	ماسه
۱۸۷۰.۵	سیمان
۱۱۶.۵	نانوسیلیس
۷۹۵+۳۰۰	آب
۷۷	میکروسیلیس

(۱) مقدار ۲۶۵۵ گرم شن و مقدار ۲۵۶۳ گرم ماسه با دو سوم سیمان را داخل میکسر ریخته و به مدت ۳ دقیقه همزده می شود
(۲) بقیه سیمان و مواد نانوسیلیس اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه میکس می شوند
(۳) نصف مقدار آب و ۷۷ گرم میکروسیلیس به داخل میکسر اضافه می شود و سپس با دور بالا به مدت ۲ دقیقه همزده می شود.

(۴) نصف دیگر آب را اضافه کرده و با کاردک مخلوط نموده تا بتن یک دستی ایجاد شود. بتن حاصل را به صورت چهارلایه در داخل قالب ریخته و محلول حاوی باکتری باکتری در هر لایه ریخته می شود. بعد از هر لایه بیست بار میله فلزی را داخل لایه زده تا حبابهای هوا خارج شود.

(۵) بعد از ۱۴ روز تیمار در داخل آب، نمونه ها با استفاده از دستگاه تست فشار، شکاف های میکرونی در مقاطع طولی و عرضی قطعه داده می شود و سپس در داخل نایلون قرار داده و داخل آب قرار داده می شود. بار اول بعد از ۱۰ روز و سپس بار دوم بعد از ۲۰ روز از آب بیرون آورده می شود و ارزیابی های ماکروسکوپی خود ترمیم شوندگی بر روی نمونه ها مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل (۳-۸) شکاف میکرونی در نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده با اندازه ۱۴۰ و ۲۲۰ میکرون

۴-۳- روش تهیه نمونه های بتنی نانوکربنات کلسیم حاوی باکتری

فرمول ۱: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۹۵۲
نانوکلسیم	۳۵.۱۵
آب	۷۹۵+۱۰۰
میکروسیلیس	۷۷

(۱) کل شن و ماسه با دو سوم سیمان را داخل میکسر ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه میکس می شوند

(۲) بقیه سیمان و مواد نانو کربنات کلسیم به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه میکس می شوند

(۳) نصف مقدار آب و میکروسیلیس به میکسر اضافه می شود. مخلوط بتنی به مدت ۲ دقیقه همزده می شود

(۴) در مرحله بعد، نصف دیگر آب را اضافه کرده و بتن نهایی در اثر همزدن به مدت ۳ دقیقه آماده می گردد. بتن حاصل را به صورت چهارلایه در داخل قالب ریخته و محلول حاوی باکتری باکتری در هر لایه ریخته می شود. بعد از هر لایه بیست بار میله فلزی را داخل لایه زده تا حبابهای هوا خارج شود.

(۵) بعد از ۱۴ روز تیمار در داخل آب، نمونه ها با استفاده از دستگاه تست فشار، شکاف های میکرونی در مقاطع طولی و عرضی قطعه داده می شود و سپس در داخل نایلون قرار داده و داخل آب قرار داده می شود. بار اول بعد از ۱۰ روز و سپس بار

دوم بعد از ۲۰ روز از آب بیرون آورده می شود و ارزیابی های ماکروسکوپی خود ترمیم شوندگی بر روی نمونه ها مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل (۳-۹) شکاف میکرونی در نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم و باکتری ترمیم کننده با اندازه ۱۰۰ میکرون

۵-۴-۳- روش تهیه نمونه های بتنی نانوذرات سیلیکا و نانو ذرات کربنات کلسیم حاوی باکتری
فرمول ۲: (نانوسیلیکا: ۳۴ گرم ، نانوکربنات کلسیم: ۶۰ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۸۳۵.۵
نانوسیلیکا	۳۴
نانوکربنات کلسیم	۶۰
آب	۷۹۵+۳۰۰
میکروسلیس	۷۷

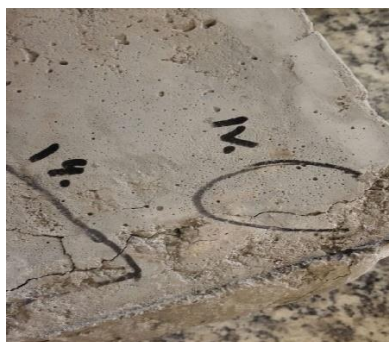
۱) مقدار ۲۶۵۵ گرم شن و مقدار ۲۵۶۳ گرم ماسه با نصف سیمان داخل میکسر ریخته شده و به مدت ۳ دقیقه میکس می شوند

۲) بقیه سیمان اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه میکس می شود.

۳) نصف مقدار آب (۶۹۷.۵ گرم)، مقدار ۳۴ گرم از نانوسیلیکا و مقدار ۶۰ گرم نانو کربنات کلسیم به میکسر اضافه می شود. مخلوط نهایی به مدت ۲ دقیقه با دور بالا میکس می شود.

(۴) نصف دیگر آب اضافه می شود و مخلوط بتن به مدت ۳ دقیقه دیگر همزده می شود. بتن حاصل را به صورت چهارلایه در داخل قالب ریخته و بعد از هر لایه محلول حاوی باکتری به مخلوط بتن اضافه می گردد. بیست بار میله فلزی را داخل لایه زده تا حبابهای هوا خارج شود.

(۵) بعد از ۱۴ روز تیمار در داخل آب، نمونه ها تحت فشار (۷۰-۹۰ بار)، شکاف های میکرونی در مقاطع طولی و عرضی قطعه داده می شود و سپس در داخل نایلون قرار داده و داخل آب قرار داده می شود. بار اول بعد از ۱۰ روز و سپس بار دوم بعد از ۲۰ روز از آب بیرون آورده می شود و ارزیابی های ماکروسکوپی خود ترمیم شوندگی بر روی نمونه ها مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل (۳-۱۰) شکاف میکرونی در نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم، نانو سیلیکا و باکتری ترمیم کننده

۶-۴-۳- بررسی خودترمیمی نمونه ها بعد از گذشت ۱۰ روز

همانطور که پیشتر ذکر شد از هر نمونه (باکتری بدون نانوذرات، باکتری+نانوسیلیکا، باکتری+نانوکربنات کلسیم و باکتری+نانوسیلیکا و نانوکربنات کلسیم) ۳ مورد ساخته شد که دوتا از نمونه ها در کیسه نایلونی داخل آب گذاشته شدند و یکی از نمونه در محیط قرار گرفتند.



شکل (۳-۱۱) نمونه های بتن حاوی مواد ترمیم کننده زیستی در داخل آب

بعد از گذشت ۱۰ روز نمونه ها از آب خارج شدند و از جهت ترمیم به کمک باکتریهای رسوب دهنده کربنات کلسیم مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که در شکل زیر مشاهده می شود، نمونه های حاوی نانوسیلیکا و باکتریهای ترمیم کننده بیشتر از نمونه های دیگر خاصیت خودترمیمی را نشان داده اند.



شکل (۳-۱۲) ترمیم ترک های میکرونی درد نمونه های حاوی نانوسیلیکا و باکتری بعد از گذشت ۱۰ روز

۷-۴-۳- بررسی خودترمیمی نمونه ها بعد از گذشت ۲۰ روز

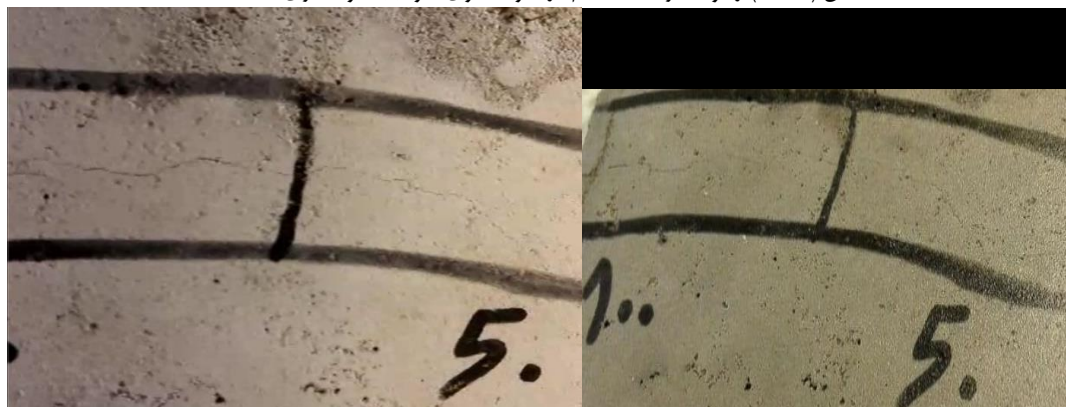
بعد از گذشت حدود ۲۰ روز نمونه ها مجدد از آب خارج شدند و ترمیم ها مورد بررسی قرار گرفتند. در این مدت نمونه های حاوی نانوسیلیکا و باکتری تقریباً کامل ترمیم شده بودند. نمونه های حاوی نانوکربنات کلسیم و باکتری و همچنین نمونه های دارای باکتری به همراه نانوسیلیکا و نانوکربنات کلسیم هم تا حدودی خاصیت خودترمیمی نشان دادند.



شکل (۳-۱۳) خودترمیمی در نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری پس از گذشت ۲۰ روز شکل



شکل (۳-۱۴) رسوب کربنات کلسیم در نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری



شکل (۳-۱۵) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم و باکتری. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست) نمونه پس از

تیمار ۲۰ روزه



شکل (۳-۱۶) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی نانوکربنات کلسیم، نانوسیلیکا و باکتری. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست)

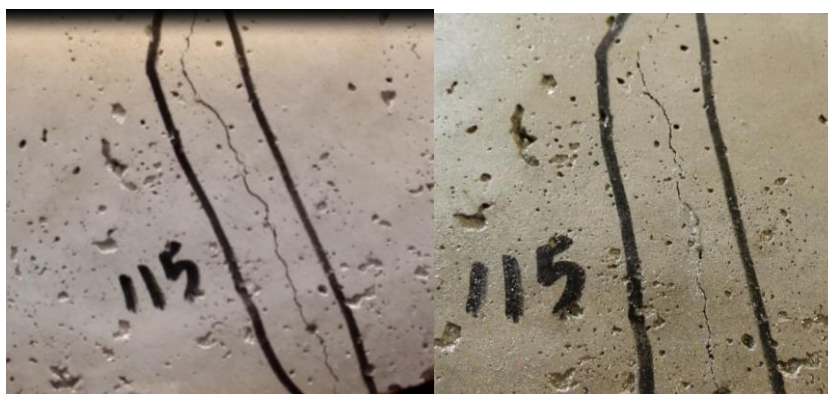
نمونه پس از تیمار ۲۰ روزه

همانطور که در تصاویر مشاهده گردید هر سه نمونه بتن پس از گذشت ۲۰ روز تیمار در داخل آب، خاصیت خودترمیمی داشتند. در مقایسه هر سه نمونه، نمونه های حاوی نانوسیلیکا و باکتری خودترمیمی بیشتری نسبت به بقیه نمونه ها داشتند.

۸-۴-۳- بررسی خودترمیمی نمونه ها بعد از گذشت ۲۵ روز

پس از گذشت حدود ۲۰ روز تمام نمونه های بتن از نظر وضعیت خودترمیمی مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به بررسی های انجام شده، نمونه های حاوی نانوسیلیکا و باکتری خودترمیم بیشترین میزان خودترمیمی را نشان دادند که در تصاویر زیر مشاهده می شوند.

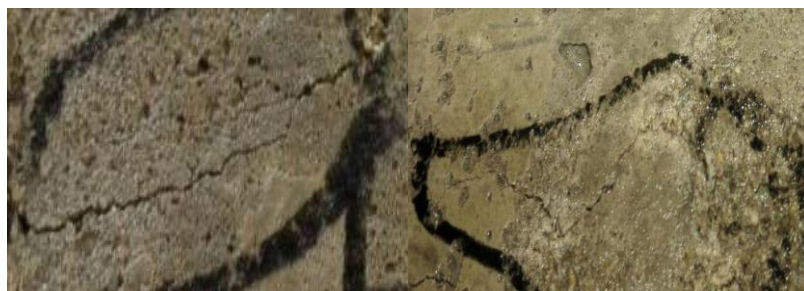
✓ نمونه های بدون نانوذرات و باکتری ترمیم کننده:



شکل (۳-۱۷) مقایسه خودترمیمی دو نمونه بدون نانوذرات و باکتری ترمیم کننده. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست) نمونه پس

از تیمار ۲۵ روزه

نمونه های حاوی باکتری بدون نانوذرات:



شکل (۳-۱۸) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده بدون نانوذرات. (چپ) نمونه پیش از تیمار در داخل آب (راست) نمونه

پس از تیمار ۲۵ روزه

نمونه های حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده:



شکل (۳-۱۹) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده و نانوسیلیکا. (چپ) نمونه بعد از تیمار ۱۰ روزه داخل آب (راست) نمونه

پس از تیمار ۲۵ روزه

نمونه های حاوی نانوکربنات کلسیم و باکتری ترمیم کننده:



شکل (۳-۲۰) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده و نانوکربنات کلسیم. (چپ) نمونه پیش از تیمار (راست) نمونه پس از

تیمار ۲۵ روزه

نمونه های حاوی نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیکا به همراه باکتری ترمیم کننده:



شکل (۳-۲۱) مقایسه خودترمیمی دو نمونه حاوی باکتری ترمیم کننده، نانوسیلیکا و نانوکربنات کلسیم. (چپ) نمونه پیش از تیمار (راست)

نمونه پس از تیمار ۲۵ روزه

۳-۵- بهینه سازی و مشخصه یابی محصولات ترمیمی

تجهیزات مورد استفاده جهت انجام این پروژه شامل دستگاه اتوکلاو، قالب های فایبرگلاس بتن ریزی، همزن مغناطیسی، ترازو، سانتریفیوژ، انکوباتور، مخلوط کن سیمان و بتن و دستگاه جک فشاری که در آزمایشگاه مواد سرامیک و پلیمر و سیم و کابل موجود می باشند.

برخی از تست ها مانند اندازه گیری مقاومت کششی، اندازه گیری جذب رطوبت و نفوذ آب، تست اندازه گیری نفوذ کلر و آزمون های مشخصه یابی از جمله SEM، FTIR، XRD به صورت خدمات از سایر مراکز تخصصی انجام گردید.

۳-۲- مشخصه یابی و بررسی ویژگی های بتن ترمیمی

جهت بررسی ساختار و استحکام نمونه های بتن خودترمیم از تست های مشخصه یابی و مقاومت فشاری استفاده گردید که نتایج آن به تفصیل گزارش خواهد شد.

۳-۵-۱- بررسی مشخصه یابی و ویژگی های بتن ترمیمی

۳-۵-۱-۲- مقاومت فشاری بتن

آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن یکی از متداول ترین آزمایش هایی است که بر روی بتن انجام می شود. این آزمایش چنان به تغییرات در روش آزمایش حساس است که لازم است دقیقاً بر اساس روش استاندارد انجام پذیرد تا نتایج بدست آمده در آزمایش های مختلف با یکدیگر قابل مقایسه باشد. به همین دلیل، آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن مطابق با استاندارد جهانی ASTM انجام می شود. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن می تواند با استفاده از هر دستگاه جک فشاری که دارای شرایط مناسب باشند انجام شود. در دستگاه جک فشاری (جک بتن شکن) دو قطعه سخت بارگذاری وجود دارد که یکی از آنها به صورت صلب است و نمونه بتنی روی آن قرار می گیرد و یک قطعه گوی شکل که روی سطح فوقانی نمونه قرار می گیرد. از آنجا که مقاومت بستگی به سرعت بارگذاری دارد؛ نمونه باید با یک سرعت کنترل شده بین ۰.۱۵ تا ۰.۳۵ مگاپاسکال بر ثانیه برای جک های هیدرولیکی و یا سرعت تغییر شکل برابر یک میلیمتر در دقیقه برای جک های مکانیکی بارگذاری شود و این بارگذاری تا نقطه شکست ادامه دارد، که به عنوان حداکثر باری است که نمونه تحمل می کند. آنگاه حداکثر بار و نحوه شکست گزارش می شود.

در این ماشینها، بارگذاری به صورت دقیقه ای ۱۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع افزایش می یابد تا نمونه شکسته شود. مقدار بارگذاری در لحظه ی شکست بتن، میزان مقاومت فشاری بتن را به ما میگوید. حداقل از هر نمونه و در هر سن، بایستی ۳ نمونه ی بتن آزمایش شود. اگر در نتیجه مشاهده شود که مقاومت آنها بیش از ۱۵ درصد با یکدیگر اختلاف دارد،

نتایج آزمایش رد میشود و بایستی آزمایش دوباره انجام شود. در غیر این صورت، میانگین مقاومت فشاری آن سه نمونه، مقاومت فشاری بتن مورد محسوب خواهد شد. مقاومت بتن با افزایش عمر، بیشتر میشود. در جدولی که در ادامه آمده است، نشان داده شده که در هر مقطع زمانی از عمل آوری، بتن چه مقدار از مقاومت اصلی اش را کسب میکند.

جدول (۳-۹) میزان افزایش مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان

سن	درصد مقاومت کسب شده
۱ روز	۱۶ درصد
۳ روز	۴۰ درصد
۷ روز	۶۵ درصد
۱۴ روز	۹۰ درصد
۲۸ روز	۹۹ درصد

همانطور که در جدول بالا مشاهده می شود، بتن بیشتر مقاومت خود را در سنین اولیه به دست می آورد. بدین ترتیب که ۹۰ درصد مقاومتش در ۱۴ روز کسب میشود. در ۲۸ روز بتن به ۹۹ درصد مقاومتش میرسد و در ادامه روند کسب مقاومت بتن بسیار کند تر دنبال میشود. به همین دلیل است که در آزمایشها معمولاً نتایج ۲۸ روز نمونه های بتنی مورد نظر و مهم هستند. بتن در ۲۸ روزگی مقاومتی تقریباً مساوی با مقاومت نهایی اش دارد.

مقاومت بتن با پیشرفت هیدراسیون سیمان افزایش می یابد. روند هیدراسیون سیمان نیز با گذشت زمان و افزایش دما زیاد می شود. در نتیجه مقاومت بتن را میتوان به صورت تابعی از ترکیب دما - زمان بیان کرد. مقاومت بتن معمولاً در عمر های ۳، ۷ و ۲۸ روزه تعیین می شود. مقاومت ۷ روزه تقریباً ۰.۷ یا ۰.۸ مقاومت ۲۸ روزه است. علت اینکه مقاومت نمونه ها در سن ۲۸ روز ملاک است، یک کار آماری است که با بررسی موارد بسیار متعدد در ساختمان های متعارف، به این نتیجه رسیده اند که روند اجرا و نحوه بارگذاری به گونه ای است که در ۲۸ روز به این مقاومت نیاز پیدا می کند.

در این تحقیق از دستگاه جک فشاری هیدرولیک بتن شکن که در آزمایشگاه پلیمر و سرامیک قرار دارد، استفاده گردید. این دستگاه متعلق به شرکت تک آزما می باشد که جهت انجام تست ها مجدداً سرویس و کالیبره گردید. نمونه های ۱۵ سانتیمتر بعد از عمل آوری در دستگاه جک هیدرولیک فشاری بتن شکن قرار گرفته و از تقسیم حداکثر نیروی ثبت شده بر سطح مقطع نمونه مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال بدست می آید.



شکل (۳-۲۲) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری

همانطور که در جدول زیر مشاهده می شود، ۹ فرمول ساخت نمونه های بتن که توسط نرم افزار statgraphic طراحی شده بودند پس از گذشت ۱۴ روز تیمار در داخل آب جهت انجام فرآیند هیدراتاسیون، مقاومت فشاری آنها با کمک دستگاه چک فشاری اندازه گیری شد.

جدول (۳-۱۰) اندازه گیری مقاومت فشاری ۹ نمونه ساخته شده پس از گذشت ۱۴ روز تیمار در داخل آب توسط دستگاه چک فشاری

نام نمونه	مقاومت فشاری بعد از ۱۴ روز تیمار در آب (کیلوگرم بر سانتی مترمربع)
فرمول ۱: (نانوکربنات کلسیم: ۳۵.۱۵ گرم)	۲۴۶
فرمول ۲: (نانوسیلیکا: ۳۴.۱۵ گرم، نانوکربنات: ۶۰ گرم)	۲۵۱

۲۳۵	فرمول ۳: (نانوسیلیکا: ۳۴.۱۵ گرم، نانوکربنات: ۱۰.۳ گرم)
۲۱۷	فرمول ۴: (نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)
۲۳۸	فرمول ۵: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵.۱۵ گرم، نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)
۲۲۷	فرمول ۶: (نانوکلسیم کربنات: ۶۰ گرم، نانوسیلیکا: ۱۹۹)
۲۰۰	فرمول ۷: (نانوکلسیم کربنات: ۱۰.۳ گرم، نانوسیلیکا: ۱۹۹ گرم)
۲۴۱.۵	فرمول ۸: (نانوکلسیم کربنات: ۷۰.۲۹ گرم، نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)
۲۳۸	فرمول ۹: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵.۱۵ گرم، نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)
۲۰۵	فرمول ۱۰: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵.۱۵ گرم، نانوسیلیکا: ۲۳۳ گرم)

۳-۵-۱-۳- اندازه گیری مقاومت خمشی بتن

در آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت غیر مستقیم به ارزیابی مقاومت کششی بتن پرداخته می شود. این آزمایش، قابلیت تیر یا دال بتنی غیر مسلح را به لحاظ مقاومت در برابر شکست ناشی از خمش مورد ارزیابی قرار می دهد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت یک مدول گسیختگی بیان می شود و با MR و واحد مگاپاسکال یا پوند بر اینچ مربع نشان داده می شود. آزمایش خمشی بتن را می توان با استفاده از آزمایش سه بار نقطه ای (ASTM C78) و یا آزمایش بار نقطه ای مرکزی (ASTM C293) انجام داد. باید توجه شود که مقدار مدول گسیختگی به دست آمده از آزمایش بار نقطه ای مرکزی، حدود ۱۵ درصد از مدول گسیختگی به دست آمده از آزمایش با سه بار نقطه ای کوچکتر است. به علاوه مشاهدات نشان داده اند که هر چه نمونه های بتنی بزرگتر باشند؛ مدول گسیختگی کمتر خواهد بود. به علاوه مدول گسیختگی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری بتن است. این مدول تحت تأثیر نسبت های اختلاط، اندازه

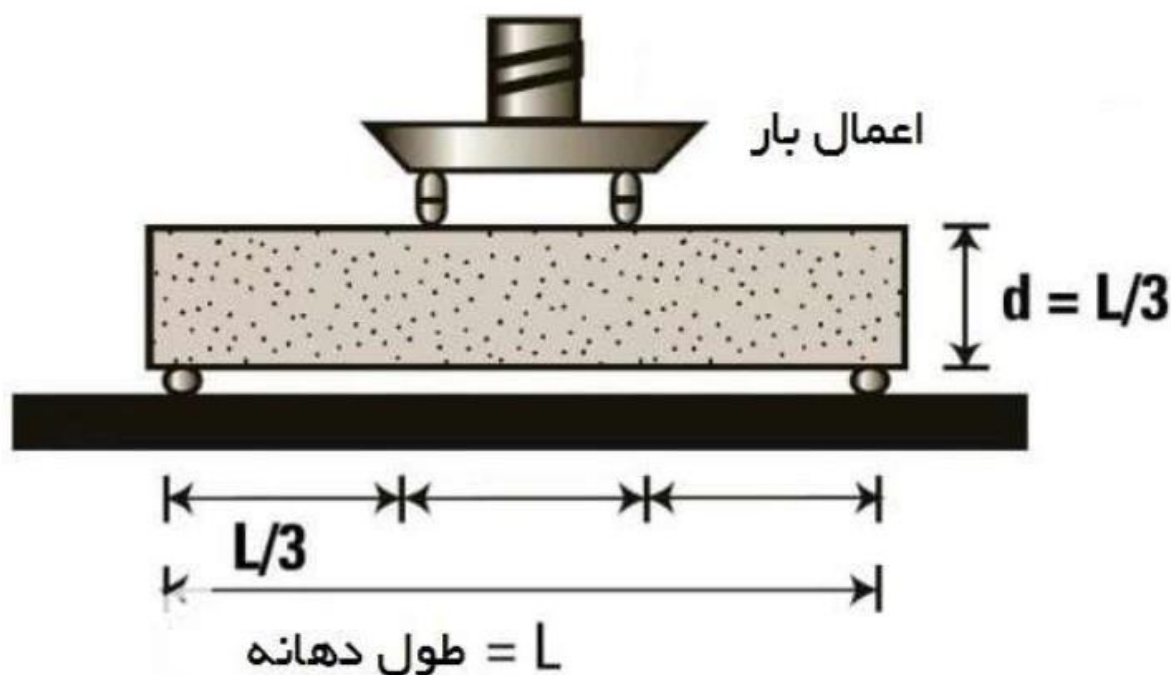
و مقدار سنگدانه ی درشت استفاده شده برای ساخت نمونه قرار دارد. معادله ی زیر را می توان برای محاسبه ی مدول گسیختگی استفاده کرد:

$$Fr = 7.5\sqrt{F'c}$$

Fr = مدول گسیختگی

$F'c$ = مقاومت فشاری بتن

بر اساس ASTM عرض، عمق و طول نمونه به ترتیب برابر با ۱۵۰ میلیمتر، ۱۵۰ میلیمتر و حداقل سه برابر عمق نمونه است. همچنین این استاندارد بیان می کند در صورتی که حداکثر اندازه ی سنگدانه بزرگتر از ۱۹ میلی متر نباشد می توان از اندازه ی ۱۰۰ میلی متر عرض، ۱۰۰ میلی متر عمق و ۵۰۰ میلی متر دهانه استفاده کرد. استاندارد بریتانیا سطح مقطع مربعی ۱۰۰ میلی متری یا ۱۵۰ میلی متری و دهانه ی چهار تا پنج برابر عمق نمونه را تعیین کرده است. با این وجود این استاندارد هم اندازه های ۱۵۰ میلی متر در ۱۵۰ میلی متر و دهانه ی ۷۵۰ میلی متر را ترجیح می دهد.



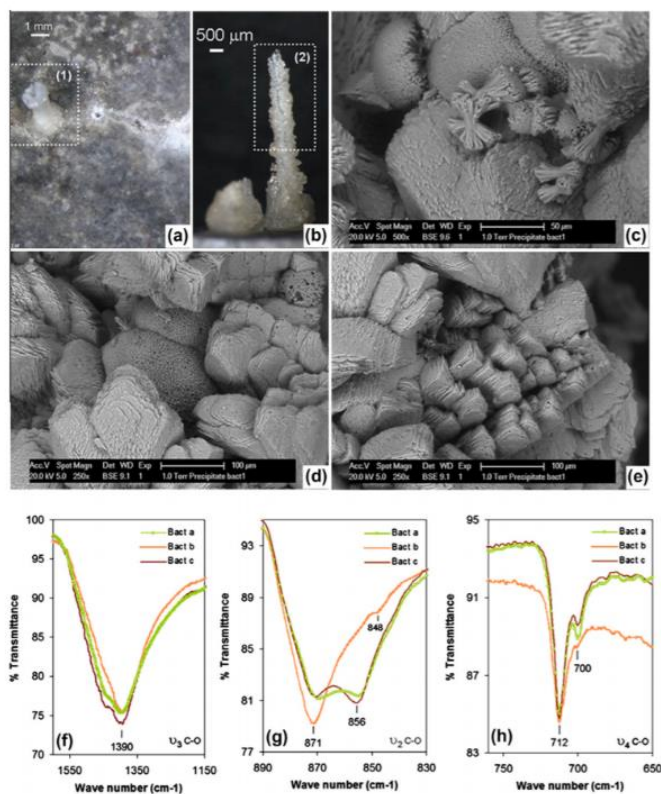
شکل (۳-۲۳) استاندارد اعمال بار در مقاومت خمشی

جدول (۳-۱۱) اندازه گیری مدول گسیختگی ۹ نمونه ساخته شده پس از گذشت ۱۴ روز تیمار در داخل آب

نام نمونه	مدول گسیختگی بعد از ۱۴ روز تیمار در آب (مگاپاسکال)
فرمول ۱: (نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم ، نانوکربنات کلسیم: ۳۵ گرم)	۰.۳۳۲۱
فرمول ۲: (نانوسیلیکا: ۳۴ گرم، نانوکربنات: ۱۰ گرم)	۰.۳۵۰۱
فرمول ۳: (نانوسیلیکا: ۳۴ گرم، نانوکربنات: ۶۰ گرم)	۰.۳۷۷۰
فرمول ۴: (نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)	۰.۳۳۲۱
فرمول ۵: (نانوکلسیم کربنات: ۷۰ گرم، نانوسیلیکا: ۱۱۶.۵ گرم)	۰.۳۵۰۱
فرمول ۶: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵ گرم)	۰.۳۸۳۵
فرمول ۷: (نانوکلسیم کربنات: ۱۰ گرم، نانوسیلیکا: ۱۹۹ گرم)	۰.۳۳۲۱
فرمول ۸: (نانوکلسیم کربنات: ۳۵ گرم، نانوسیلیکا: ۲۳۳ گرم)	۰.۳۰۵۲
فرمول ۹: (نانوکلسیم کربنات: ۶۰ گرم، نانوسیلیکا: ۱۹۹ گرم)	۰.۲۶۲۰

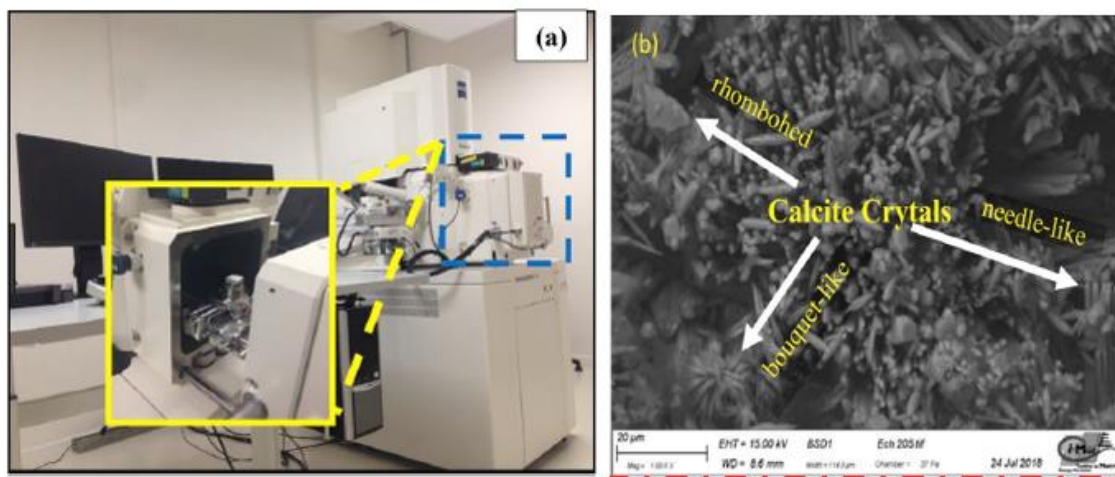
۶-۳- آزمون های مشخصه یابی جهت بررسی نمونه های بتن
۳-۶-۱- روشهای آنالیز کلسیم کربنات باکتریایی در بتن

در نمونه هایی که از رسوب کلسیم کربنات تولید شده توسط باکتری ها برای ترمیم ترک ها استفاده میشود از روشهای آنالیز برای مشخصه یابی کلسیم کربنات بهره میگیرند. روش EDAX که روشی برای آنالیز عنصری است میتواند ثابت کند که رسوب تشکیل شده توسط باکتری ها از سه عنصر کربن و کلسیم و اکسیژن تشکیل شده است که گواه رسوب کلسیم کربنات میباشد. مورفولوژی های مختلف کریستالی کلسیم کربنات میتوانند با تصویرهای SEM مشاهده شوند و از این طریق میتوان گفت کلسیم کربنات رسوبی موجود در ترک ها حاصل فعالیت باکتریایی میباشد. همچنین تشخیص و تایید ساختار هرکدام از مورفولوژی های کلسیم کربنات با تکنیک FT-IR امکانپذیر میباشد. ساختارهای متفاوت طیف های FT-IR منحصر به خود را دارند که میتواند آنها را از یکدیگر متمایز کند و ساختار هرکدام از مورفولوژی ها را با انطباق طیف آنها بر طیف های موجود، تایید کند. همچنین XRD بعنوان تکنیکی برای تعیین ساختار کریستالها، دانه بندی آنها و پی بردن به نقص کریستالی میتواند ابزار مفیدی برای شناسایی ساختار بلورهای کلسیم کربنات باشد. از میکروسکوپ الکترونی جهت بررسی ترک های ترمیم شده و مشاهده رسوب کریستال های کربنات کلسیم استفاده می شود. در این بررسی نمونه های کوچک در حدود ابعاد ۱ سانتیمتر از بتن شکسته شده تهیه و با لایه نازکی از طلا روکش می شوند. پس از اشباع شدن نمونه ها و قرار گیری در محفظه ی خلا، تصویرنگاری الکترونی شروع میشود. در ادامه هرکدام از تکنیک های قابل استفاده برای مشخصه یابی کلسیم کربنات شرح داده شده اند. نمونه ای از تصاویر SEM و طیف های IR برای مورفولوژی های مختلف رسوب کلسیم کربنات تشکیل شده توسط باکتری ها در ترک های نمونه ی بتنی در زیر آورده شده است.



شکل (۳-۲۴) نمونه ای از تصاویر SEM و طیف های IR برای مورفولوژی های مختلف رسوب کلسیم کربنات تشکیل شده توسط

باکتری ها



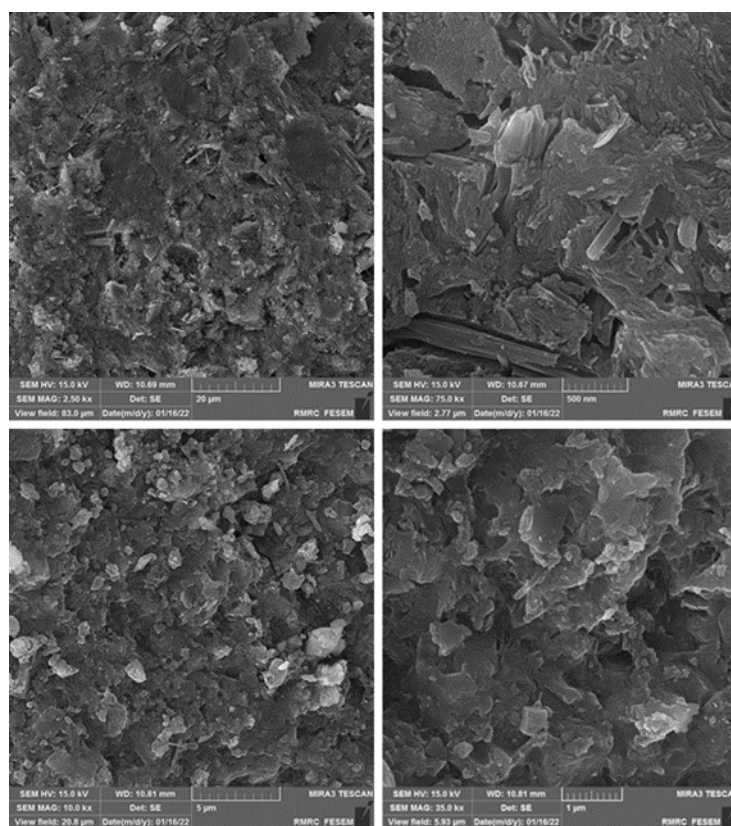
A شکل (۳-۲۵) تصویری از میکروسکوپ الکترونی (B) مشاهده رسوبات کریستالی کربنات کلسیم توسط میکروسکوپ الکترونی

شرح تصاویر میکروسکوپ الکترونی در ۴ نمونه بلانک، نانوسیلیکا و باکتری، نانوکربنات کلسیم

و باکتری و همچنین نانوسیلیکا و نانوکربنات کلسیم به همراه باکتری به صورت زیر می باشد.

● بلانک:

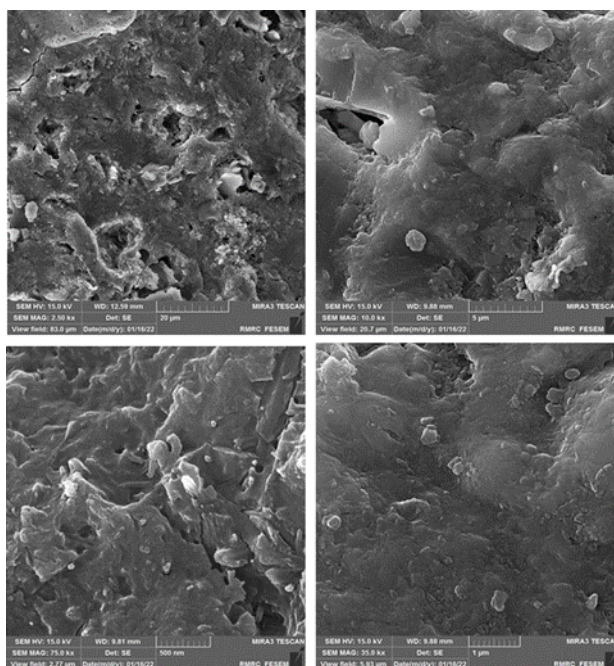
تصاویر SEM برای نمونه‌ی خالص نشانگر عدم پیوستگی ساختاری یا به عبارتی جدایش میکروفازی در ماتریکس نمونه است. همچنین آنچه که میتوان دید این است که نمونه های بتن بصورت لایه به لایه بر روی همدیگر در مقیاس میکروسکوپی قرار گرفته‌اند.



شکل (۳-۲۶) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه شاهد

● نانوکربنات و باکتری ترمیم کننده:

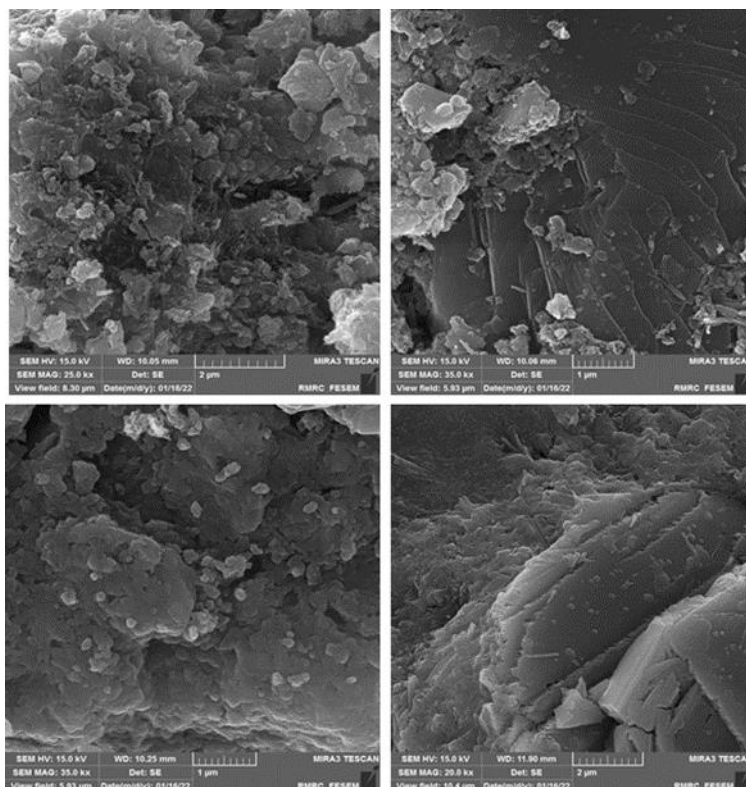
تصاویر SEM از سطح این بتن ایجاد ماکروفازها را در اثر افزودن نانو ذرات کربنات نشان می‌دهد. در اثر افزودن این ترکیب، یک بهم پیوستگی ساختاری همراه با ایجاد حفره های میکرونی مشاهده می شود. همچنین در این تصاویر فشرده شدن ماتریس بتن در اثر اضافه کردن این افزودنی را می‌توان مشاهده کرد.



شکل (۳-۲۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه حاوی نانوکربنات و باکتری ترمیم کننده

• نانوکربنات و نانوسیلیکا به همراه باکتری:

آنچه که از تصاویر می توان دید این است که به وسیله ی افزودن نانوذرات کربنات و سیلیکا به همراه محلول باکتری، جدایش فازی همراه با پیوستگی در سطح و همچنین درون توده ماتریس مشاهده می شود. وجود نانوذرات سیلیکا و باکتری باعث افزایش چسبندگی و بالا رفتن فاکتور فشردگی در لایه های میکرونی می شود.

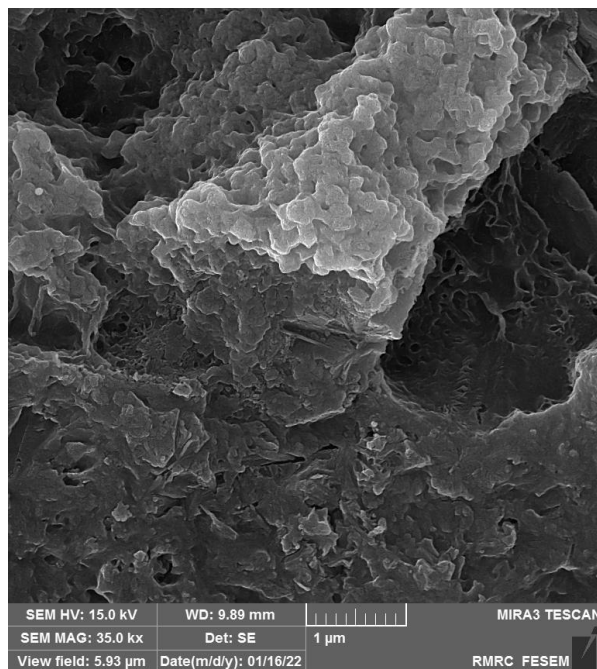


شکل (۳-۲۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه حاوی نانوکربنات و نانوسیلیکا به همراه باکتری

• نانوسیلیکا و باکتری:

فشرده‌گی و تجمع ذرات درون ماتریس بتن به همراه چسبندگی ساختاری به وضوح در تصاویر دیده می شود.

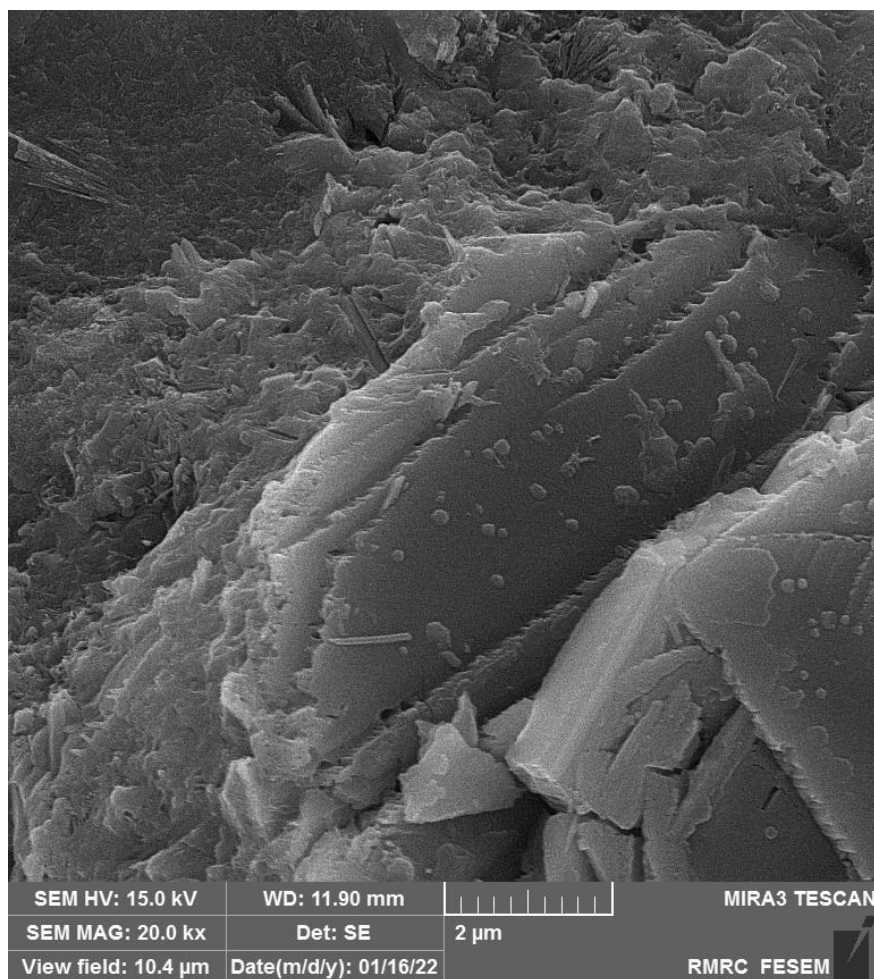
همچنین در حضور نانوذرات سیلیکا پیوستگی بین مواد تشکیل دهنده بتن کاملاً مشهود است.



شکل (۳-۲۹) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری

در تصویر زیر حضور باکتریهای ترمیم کننده که به صورت کوکوباسیل می باشند و همچنین رسوبات کریستالی

کربنات کلسیم به وضوح مشاهده می شود.



شکل (۳-۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی از باکتریهای ترمیم کننده به صورت کوکوباسیل همراه با رسوبات کریستالی کربنات کلسیم

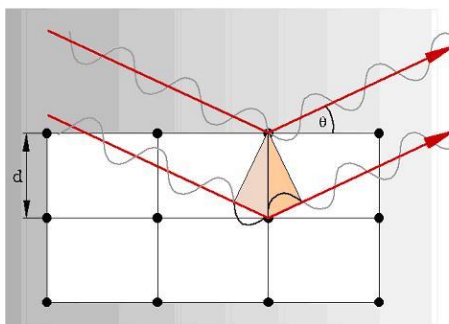
• روش XRD

طول موجهای بین ۰.۱-۲۵ آنگستروم مربوط به اشعه ی X میباشند. اسپکتروسکوپی اشعه ی X از سه روش جذب (XRA)، فلورسانس (XRF) و پراش (XRD) تشکیل شده است. روشهای XRA و XRF برای آنالیز کمی و کیفی تمام عناصر در جدول تناوبی با اعداد اتمی بزرگتر از عدد اتمی سدیم به کار میروند. روش XRD یک روش مولکولی و تکنیکی جهت بررسی ساختار کریستالها، دانه بندی آنها و پیدا کردن نقص های کریستالی است. اساس کار XRD پراکندگی راییلی از صفحات کریستال میباشد. اطلاعات در مورد آرایش و فاصله ی اتمها در مواد بلوری مستقیماً از مطالعات پراش به دست می آید. نمونه ها در تکنیک XRD به صورت جامد پودری مورد آنالیز قرار میگیرند. به طور کلی از اطلاعات حاصل از این روش ساختار دقیق کریستال ها به دست می آید.



شکل (۳-۳۱) دستگاه XRD

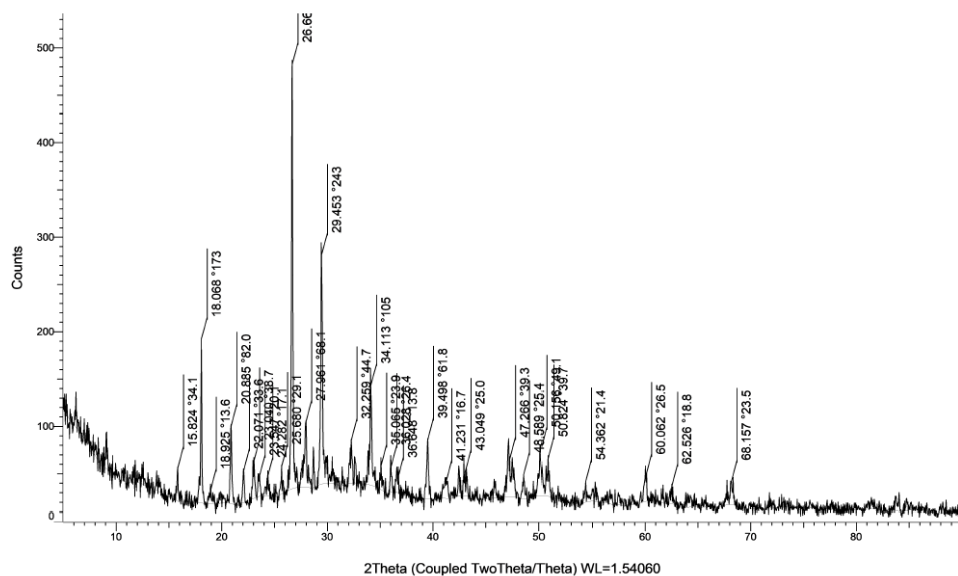
پراش^۱ پدیده ای است که در آن اشعه های ایکس پراکنده شده توسط اتم ها در یک ساختار بلورین در جهت های خاص فضایی همدیگر را تقویت کرده و اشعه قوی تری را به وجود آورند. این پدیده که تنها روش مستقیم تعیین ترکیب و ساختار فازی مواد است و برای تعیین عموم کمیات ساختار کریستالی از قبیل ثابت شبکه، هندسه شبکه، تعیین کیفی مواد ناشناس، تعیین فاز کریستال ها، تعیین اندازه کریستال ها، جهت گیری تک کریستال، استرس، تنش، عیوب شبکه و غیره، قابل استفاده است. کاربرد وسیعی در تعیین ساختار بلورین مواد و فازهای بلوری موجود در نمونه های معدنی دارد. هدف اصلی آزمایش پراش سنجی، تعیین زاویه های مربوط به هر پیک و سپس مشخص کردن فاصله صفحه های اتمی (d) است. با توجه به این که هر ترکیب دارای الگوی منحصر به فردی است، می توان با جدول های مربوط، ماده مجهول را شناسایی کرد.



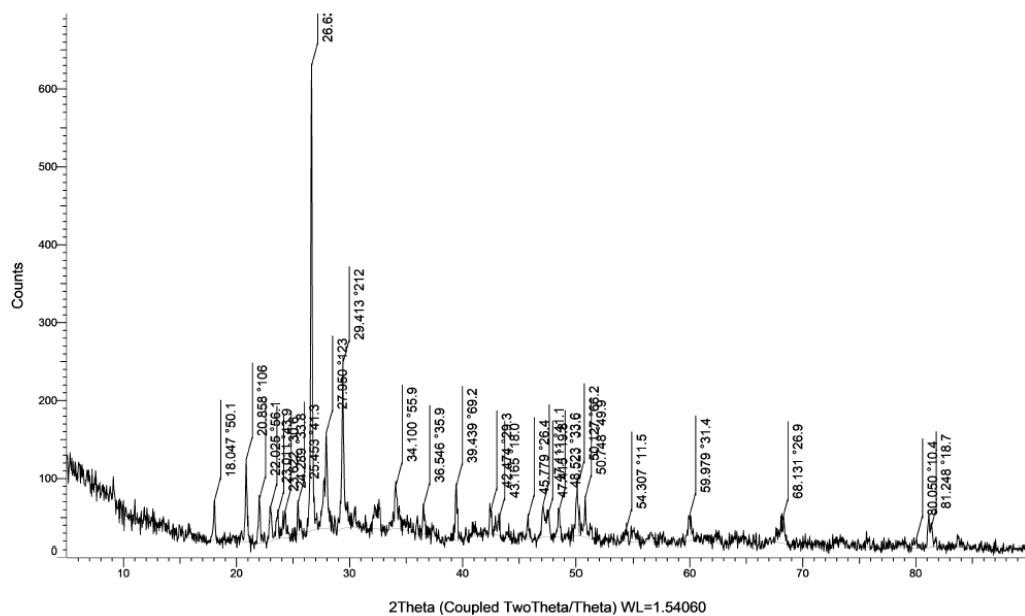
شکل (۳-۳۲) پراش اشعه ایکس XRD از صفحات اتمی با فاصله **D** از یکدیگر

در این پژوهش نمونه های بتن آزمایشگاهی خودترمیم در قالب های ۱۵ در ۱۵ سانتی متر جهت بررسی رسوبات کربنات کلسیم توسط XRD مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه ها شامل نمونه خودترمیم حاوی باکتری، باکتری و نانوسیلیکا، باکتری و نانوکربنات کلسیم و باکتری به همراه نانوسیلیکا و نانوکربنات کلسیم می باشند.

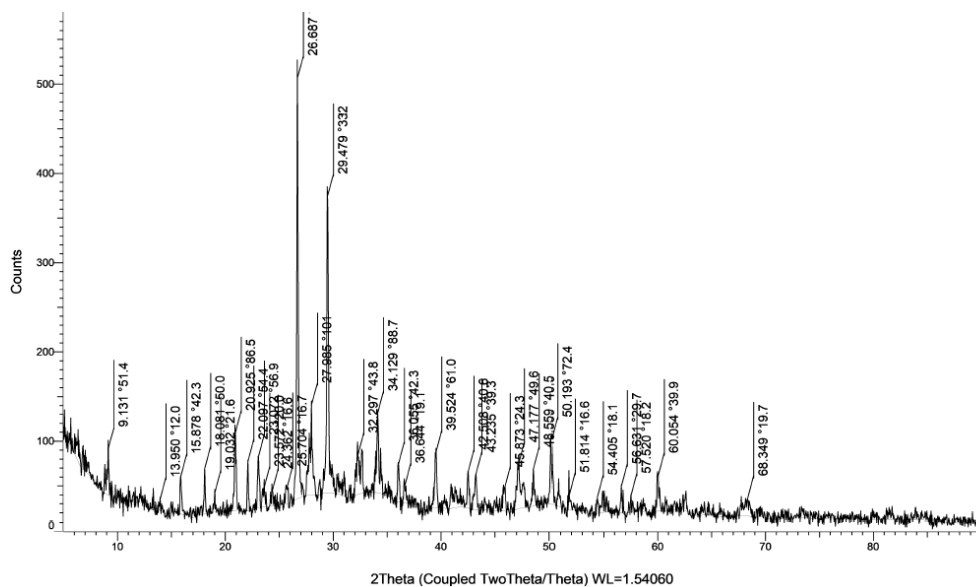
نتایج حاصل از XRD به شرح زیر می باشند:



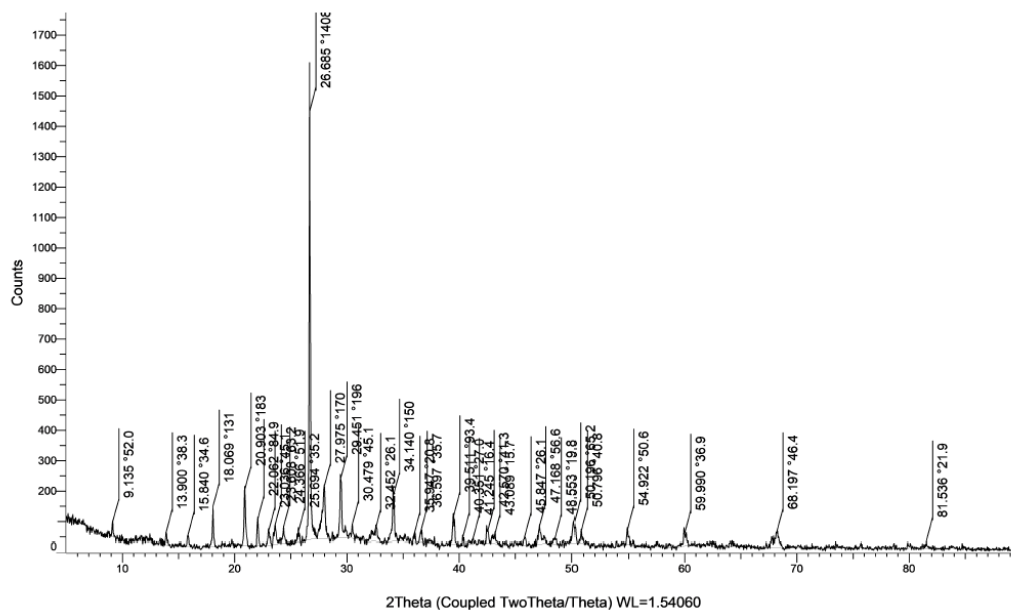
شکل (۳-۳۳) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری



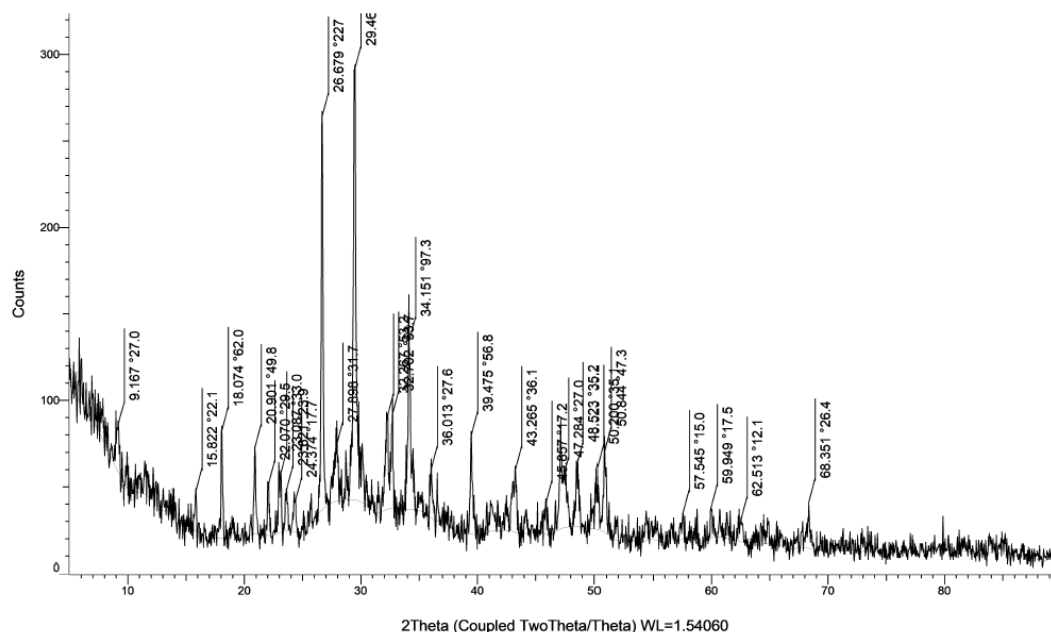
شکل (۳-۳۴) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری و نانوسیلیکا (۱)



شکل (۳-۳۵) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری و نانوسیلیکا (۲)



شکل (۳-۳۶) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری و نانوکربنات کلسیم



شکل (۳-۳۷) پراش اشعه ایکس از نمونه بتن حاوی باکتری به همراه نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیکا

مطالعه و آنالیز طیف بتن بدون افزودنی نشان می‌دهد که ناحیه کریستالی آن ۲۶/۶۸ و ۲۹/۴۵ می‌باشد. این دو ناحیه مربوط به CaCO_3 ترشح شده از باکتری می‌باشد. همچنین با آنالیز طیف‌های بتن نانوسیلیکا و نانوکربنات می‌توان چنین استنباط کرد که ناحیه کریستالی در آنها ۲۶/۶ و ۲۹/۴ تقریباً ثابت مانده است. از طرفی میانگین فاصله‌ی بین مولکولی در بتن و همچنین مقادیر 2θ به وسیله‌ی افزودن نانوسیلیکا و نانو کربنات تقریباً بدون تغییر مانده است.

شدت پیک‌ها در ناحیه ۲۹/۴ برای نانو سیلیکا نسبت به نمونه‌ی خالص افزایش یافته است. این در حالی است که برای نانوکربنات در ناحیه ۲۶/۶ شدت پیک یک افزایش ناگهانی را داشته است. برای نمونه‌ی حاوی نانو سیلیکا و نانو کربنات شدت پیک در ناحیه‌ی ۲۶/۶ نسبت به نمونه‌ی بدون افزودنی کاهش داشته است و این در حالی است که در ناحیه ۲۹/۴ شدت پیک یک افزایش ناگهانی داشته است. لازم به ذکر است که هر چه شدت پیک افزایش یابد، مقدار کریستالینیت آن نمونه نیز بیشتر است. با توجه به ارزیابی‌های انجام گرفته می‌توان چنین نتیجه گرفت که نمونه‌ی حاوی نانوسیلیکا دارای خواص بهینه می‌باشد. با ارزیابی FWHM می‌توان چنین استنباط کرد که این مقدار در نمونه‌ی بدون افزودنی در ناحیه‌ی کریستالی ۲۶/۶۸ برابر ۰.۱۳۲ می‌باشد و همچنین در ناحیه کریستالی ۲۹/۴ این مقدار برابر ۰.۱۵۱ می‌باشد. مقایسه FWHM برای نمونه‌ی بتنی نانو سیلیکا نشان می‌دهد که این مقادیر به ۰.۱۳۷ و ۰.۱۵۸ افزایش یافته است. همچنین زمانی که نانوکربنات درون ماتریس بتن افزوده می‌شود می‌توان چنین ارزیابی کرد که مقادیر FWHM برابر ۰.۱۱۹ و ۰.۱۶۷ می‌باشد. بیشترین مقدار FWHM، برای نمونه‌ی حاوی نانوسیلیکا و نانو کربنات می‌باشد که دارای مقادیر ۰.۱۶۷ و ۰.۲۱۲ می‌باشد.

با ارزیابی کلی نتایج می‌توان چنین استنباط کرد که در نمونه‌ی بتنی حاوی نانو سیلیکا به دلیل برهمکنش‌های بین مولکولی و اثرات متقابلی که ترکیبات بر روی همدیگر دارند، شاهد بروز خواص خود ترمیمی مناسب هستیم. در واقع برهمکنش‌های مولکولی از نوع پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی، تاثیر مستقیم در بروز ویژگیهای خود ترمیمی دارد و می‌تواند خواص مکانیکی مناسبی را نیز تامین نماید. پیوندهای هیدروژنی تحت تاثیر محیط مرطوب و از طریق اثرات الکترونی فضایی می‌توانند با یکدیگر واکنش داده و شکاف را در بتن رفته رفته ترمیم نمایند.

فصل چهارم

فاز اجرا و پایلوت

۱-۴ اعمال محصولات ترمیمی بر پایه ها و سازه های بتنی دارای ترک

جهت انجام فاز اجرایی و اعمال ملات خودترمیم از نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده بر پایه بتنی دکل برق درب ورودی پژوهشگاه استفاده گردید. همانطور که پیشتر ذکر شد نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده بیشترین خاصیت خودترمیم را در نمونه های آزمایشگاهی ۱۵*۱۵ داشتند، به همین جهت این نوع ملات ترمیمی بکار برده شد.



شکل (۴-۱) اعمال ملات خودترمیم بر پایه بتنی



شکل (۴-۲) استفاده از ملات خودترمیم حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده جهت ترمیم پایه بتنی

۱-۱-۴- فرآیند ساخت ملات ترمیم کننده

جهت ترمیم قسمتی از پایه بتنی که تقریباً تخریب شده بود از ملات حاوی سنگدانه استفاده گردید. همانطور که پیشتر ذکر شد از ملات حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده که فرایند ساخت آن به ترتیب زیر می باشد مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله پایلوت بدین جهت از نمونه های حاوی باکتری ترمیم کننده و نانوذرات سیلیکا استفاده گردید زیرا نتایج خودترمیمی از نمونه های آزمایشگاهی و همچنین تست های مشخصه یابی نشان داد که این نوع ملات بیشترین عملکرد را در خاصیت خودترمیمی دارد.

✓ روش تهیه نمونه های بتنی نانوذرات سیلیکا حاوی باکتری

فرمول ۴: (نانوسیلیکا: ۱۱۶،۵ گرم)

ماده	وزن (گرم)
شن	۲۶۵۵
ماسه	۲۵۶۳
سیمان	۱۸۷۰.۵
نانوسیلیس	۱۱۶.۵
آب	۷۹۵+۳۰۰
میکروسیلیس	۷۷

(۱) مقدار ۲۶۵۵ گرم شن و مقدار ۲۵۶۳ گرم ماسه با دو سوم سیمان را داخل میکسر ریخته و به مدت ۳ دقیقه همزده می شود

(۲) بقیه سیمان و موادنانوسیلیس اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه میکس می شوند

(۳) نصف مقدار آب و ۷۷ گرم میکروسیلیس به داخل میکسر اضافه می شود و سپس با دور بالا به مدت ۲ دقیقه همزده می شود.

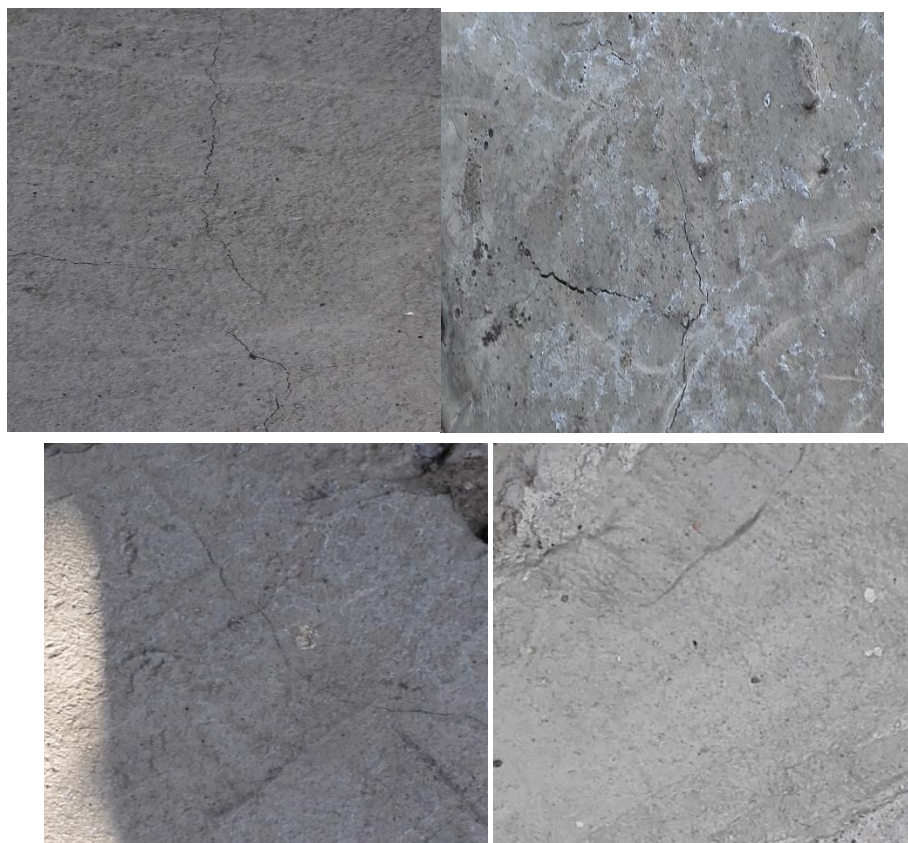
(۴) نصف دیگر آب را اضافه کرده و با کاردک مخلوط نموده تا بتن یک دستی ایجاد شود و سپس محلول حاوی باکتری باکتری اضافه شد و به آرامی کاملاً مخلوط گردید. پس از تهیه ملات بر روی پایه بتنی اعمال گردید.

قابل ذکر است از ملات خودترمیم حاوی نانوسیلیکا و باکتری خودترمیم بدون استفاده از درشت دانه (شن) به جهت ساخت ملات با ساختار یکنواخت جهت ترمیم ترک در پایه بتنی استفاده گردید.

۲-۱-۴- بازبینی دوره ای عملکرد محصولات خودترمیم زیستی و هیبریدی

جهت بررسی ترمیم ترک ها بازبینی های مکرر از پایه بتن انجام شد. پس از گذشت ۴ روز از اعمال ملات ترمیمی، طی بازدید انجام شده ملاحظه گردید ترکهایی مویینه در ملات ها ایجاد شده است. همچنین به جهت بررسی خواص ترمیم کننده زیستی، در برخی از قسمت ها به طور دستی ترکهای ریز ایجاد شد.

تصاویر زیر ترکهای مویینه در نمونه های اولیه را نشان می دهد.



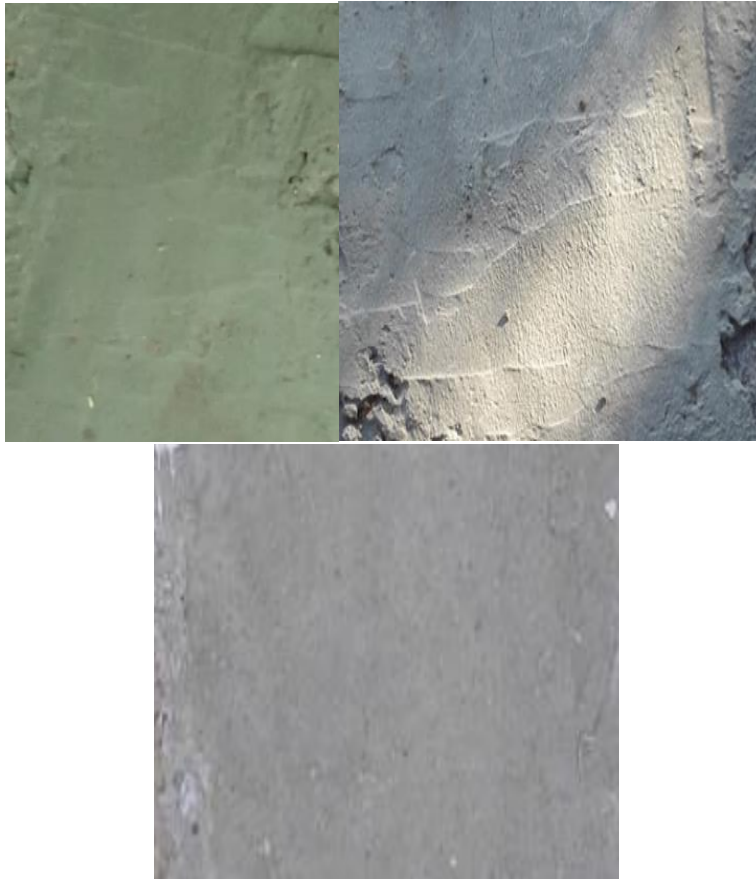
شکل (۳-۴) مشاهده ترکهای مویینه در ملات های ترمیم اعمال شده در پایه بتنی

پس از گذشت حدود ۱ هفته مجدد از نمونه های اعمال شده بازدید و مشاهده شد که ملات خودترمیم زیستی دارای خطوط سفید رنگ می باشد که احتمالاً ناشی از فعالیت باکتری خودترمیم است.



شکل (۴-۴) بازدید اولیه از ملات خودترمیم پس از گذشت ۱ هفته از ایجاد ترکها

بازدید های انجام شده از پایه ی بتنی که توسط ملات خودترمیم زیستی حاوی نانوذرات سیلیکا ترمیم شده بود به طور مکرر در فاصله های ۵ روز به تعداد ۵ بار صورت گرفت که همانطور که در تصاویر زیر مشاهده می شود، رسوبات کریستالی مترشحه از باکتری باسیلوس توانسته است ترکها را ترمیم نماید.



شکل (۴-۵) ترمیم ترکها توسط ملات خودترمیم زیستی حاوی نانوسیلیکا در بازدیدهای انجام شده

نتیجه گیری

در ابتدا نمونه های بتن در قالب های ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر بر طبق استاندارد موجود در دستوالعمل برق توزیع ساخته شد. سپس جهت تعیین مقدار نانوافزودنی های نانوکربنات کلسیم و نانوسیلیکا با استفاده از نرم افزار statgraphic طراحی آزمون انجام شد. بر طبق برنامه ارائه شده، نمونه های بتن با ۱۰ فرمول ساخته و پس از ۱۴ روز تیمار در داخل آب، مقاومت فشاری توسط دستگاه جک فشاری موجود در آزمایشگاه پلیمر و سرامیک اندازه گیری گردید. نمونه های بتن با فرمول های ۱، ۲ و ۴ جهت ساخت نمونه های خودترمیم زیستی (حاوی باکتری تولید کننده کربنات کلسیم انکپسوله در کپسول ژله ای سیلیکا) انتخاب شدند. نمونه با فرمول ۲ بیشترین مقاومت فشاری را با میزان ۲۵۱ کیلوگرم بر سانتیمترمربع داشت که حاوی نانوذرات کربنات کلسیم و نانوسیلیکا می باشد. مقدار این نانومواد به ترتیب ۳۴ و ۶۰ گرم در ۸ کیلوگرم مقدار نمونه بتن در قالب های ۱۵ در ۱۵ سانتیمتر مربع می باشد. نمونه ۴ حاوی ۱۱۶.۵ گرم نانوذرات سیلیکا با مقاومت فشاری ۲۱۷ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و نمونه ۱ داری نانوذرات کربنات کلسیم ۳۵ گرم با مقاومت فشاری ۲۴۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می باشند. قابل ذکر است که نمونه های بتن بدون نانومواد و باکتری و با باکتری به عنوان شاهد سنتز شدند. پس از ۱۴ روز تیمار در آب، نمونه ها از آب خارج شده و توسط دستگاه جک فشاری در آنها ترکهای میکرونی ایجاد و سپس نمونه ها در داخل پلاستیک و محیط آب قرار گرفتند. از سه نمونه ساخته شده یکی از هر فرمول ذکر شده در محیط خشکی قرار گرفتند. نمونه ها در بازهای زمانی ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ روزه جهت مشاهده ترمیم ترکها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از ترمیم زیستی نمونه های بتن نشان داد که در وهله اول نمونه های قرار گرفته در محیط آبی به دلیل رطوبت و فعال شدن باکتریهای ترمیم کننده بهتر از نمونه های خشکی توانایی ترمیم دارند. از طرفی نمونه های حاوی نانوذرات سیلیکا و باکتری قدرت ترمیم کنندگی بیشتر در مقایسه با نمونه های حاوی نانوکربنات کلسیم و همچنین نانوسیلیکا به همراه نانوکربنات کلسیم داشتند. در نهایت جهت بررسی ساختاری از تست های مشخصه یابی XRD و SEM استفاده شد که نتایج حضور موثر نانوسیلیکا به همراه باکتریهای ترمیم کننده را تایید کرد. در واقع تصاویر حاصله از میکروسکوپ الکترونی گویای این است که وجود نانوذرات سیلیکا و باکتری باعث افزایش چسبندگی و بالا رفتن فاکتور فشردگی در لایه های میکرونی می شود و فشردگی و تجمع ذرات درون ماتریس بتن به همراه چسبندگی ساختاری به وضوح در تصاویر دیده می شود. در گراف های حاصله از بررسی توسط XRD این نتیجه بدست آمد که نمونه ی بتنی حاوی نانو سیلیکا به دلیل برهمکنش های بین مولکولی و اثرات متقابلی که ترکیبات بر روی همدیگر دارند، شاهد بروز خواص خود ترمیمی مناسب هستیم.

در فاز چهارم جهت انجام فاز اجرایی و اعمال ملات خودترمیم از نمونه حاوی نانوسیلیکا و باکتری ترمیم کننده به عنوان نمونه بهینه، بر پایه بتنی دکل برق درب ورودی پژوهشگاه استفاده گردید. پس از بررسی های دوره ای مشاهده گردید که ترکهای مویی ایجاد شده به ویژه در ملات استفاده قدرت ترمیم کنندگی وجود داشته است.

مراجع

- ۱- /استاندارد خطوط هوایی توزیع. شرکت سهامی تولید و انتقال نیروی برق ایران توانیر ۱۳۷۸
- ۲- <https://www.sazeafzar.com>
- 3- Bonic, Z. Curcic, T. G. Davidovic, N. Savic, J. Damage of concrete and reinforcement of Reinforced-Concrete foundations caused by environmental effects. Procedia Engineering 117 (2015) 411 – 418.
- 4- Bjegovic, D. Serdar, M. Kozoman, E. The influence of controlled permeability formworks on the mechanical and durability properties of concrete cover (2012) e-GFOS, PP.62-73.
- 5- HUET, B. L'HOSTIS, V. IDRISSE, H. TOVENA, I. A REVIEW ON CORROSION MECHANISMS OF REINFORCED CONCRETE DEGRADATION. Environmental Degradation of Engineering Materials, EDEM 2003.
- 6- <http://www.clinicbetonsabz.ir/BlogDetails.aspx?id=258>
- 7- <https://www.clinicbeton.ir/Products/14/> ترمیم کننده بتن
- 8- Wu, M., B. Johannesson, and M. Geiker, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. Construction and Building Materials, 2012. 28(1): p. 571-583.
- 9- Li, V.C. and E.-H. Yang, Self healing in concrete materials, in Self Healing Materials. 2007, Springer .p. 161-193.
- 10- Yang Y.Z., Lepech M., Yang E.H., and Li V.C., "Autogenous Healing of Engineered Cementitious Composites under Wet-Dry Cycles", Cement and Concrete Research, V. 39, 2009, pp. 382-390.
- 11- Li V.C., Wang S., Wu C., "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)", ACI Materials Journal, V. 98, 2001, pp. 483-492.
- 12- Li, V. C. (2008). Engineered cementitious composites (ECC)–material,

- structural, and durability performance. *Concrete construction engineering handbook*, 1-78.
- 13- Kessler, M.R. and Sottos, N.R, and White, S.R. (2003), “Self Healing Structural Composite Materials” Comp. A34, PP 743-753.
- 14- Nishiwaki, T. and Mihashi, H., (2007), “Development of Smart Concrete With Selective Heating System Using Selective Heating Device,” Environment , loading, france
- 15- Victor C. Li and Emily Herbert. Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2012. 207-218.
- 16- Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S., (2010) “Microbial Concrete: A Way to Enhance Durability of Building Structures”, Second International Conference on Sustainable Construction Material and Technology. ISBN 978-1-4507-1490-7
- 17- Jonkers H. M. ‘Bacteria-based self-healing concrete’, *HERON* Vol. 56, No. 1, 2011
- 18- Achal, V., et al,(2011), Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation, *Ecological Engineering*, Volume 37, Issue 4, Pages 554–559.
- 19- Dhama, N.K., et al, (2012), Improvement in strength properties of ash bricks by bacterial calcite, *Ecological Engineering*, Volume 39, February 2012, Pages 31–35.
- 20- Reddy V., A. Satya K., S. Rao M. V. and Azmatunnisa M.,(2012) “ A biological approach to enhance strength and durability in concrete structures,” *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Vol. 4, Issue 2, pp. 392-399.
- 21- Dry C M 1992 Smart Materials which sense, activate and repair damage; hollow porous fibres in composites release chemicals from fibers for self-healing, damage prevention and /or dynamic control. Proc 1st European Conf on Smart Struct and Mats, Glasgow, UK 367-370.
- 22- Singh, L., Karade, S., Bhattacharyya, S., Yousuf, M., & Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials–A review. *Construction*

- and building materials*, 47, 1069-1077.
- 23- کاربرد فناوری نانو در بتن، مجموعه گزارش های صنعتی فناوری نانو، گزارش شماره ۲۸، ۱۳۹۴.
- 24- Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and building materials*, 24(11), 2060-2071.
- 25- Barbhuiya, S., Mukherjee, S., & Nikraz, H. (2014). Effects of nano-Al₂O₃ on early-age microstructural properties of cement paste. *Construction and building materials*, 52, 189-193.
- 26- Khoshakhlagh, A., Nazari, A., & Khalaj, G. (2012). Effects of Fe₂O₃ nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 73-82.
- 27- Hosseini, P., Afshar, A., Vafaei, B., Booshehrian, A., Molaei Raisi, E., & Esrafil, A. (2015). Effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-21.
- 28- C. Lizama, J. Freer, J. Baeza, H. D. Mansilla, Optimized photodegradation of Reactive Blue 19 on TiO₂ and ZnO suspensions, *Catalysis Today*, 76 (2002) 235–246.
- 29- D. Spasiano, R. Marotta, S. Malato, P. Fernandez-Ibañez, I. Di Somma, Solar photocatalysis: materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach, *Applied Catalysis B: Environmental*, 170 (2015) 90–123.
- 30- Li, H., Zhang, M.-h., & Ou, J.-p. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292-1301.
- 31- Jalal, M., Fathi, M., & Farzad, M. (2013). Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials*, 61, 11-27.
- 32- Sunil Pratapreddy, S., A study on the performance of the bacterial concrete

- embedded with *bacillus subtilis*, PH.D theseis, Jawaher lal Nehru Technology University, Kukatpally, Hyderabad, India, .۲۰۱۰
- 33- Mobley HL, Hausinger RP. Microbial ureases :significance, regulation, and molecular characterization .Microbiol Rev. 1989; 53(1):85-108.
- 34- María José Castro-Alonso et al, Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Its Potential in Bioconcrete: Microbiological and Molecular Concepts. Frontiers in Materials. 2019.
- 35- Song HW, Saraswathy V. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-a review. Int J Electrochem Sci. 2007; 2:1-28.
- 36- Zhu T and Dittrich M (2016) Carbonate Precipitation through Microbial Activities in Natural Environment, and Their Potential in Biotechnology: A Review. Front. Bioeng. Biotechnol. 4:4. doi: 10.3389/fbioe.2016.00004.
- 37- Van Tittelboom K, De Muynck W, De Belie N, Verstraete W. Bacteria protect and heal concrete and stone. WTA Schriftenreihe. 2009; 33:439-57.
- 38- U. Gollapudi, C. Knutson, S. Bang, M. Islam, A new method for controlling leaching through permeable channels, Chemosphere, 30(4) (1995) 695-705.
- 39- W. De Muynck, K. Cox, N.D. Belie, W. Verstraete, Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete, Construction and Building Materials, 22(5) (2008) 875-885.
- 40- H.M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, E. Schlangen, Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, Ecological Engineering, 36(2) (2010) 230-235.
- 41- K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. De Muynck, W. Verstraete, Use of bacteria to repair cracks in concrete, Cement and Concrete Research, 40(1) (2010) 157-166.
- 42- J.Y. Wang, D. Snoeck, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, N. De Belie, Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, Construction and Building Materials, 68 (2014) 110-119.

- 43- Z.B. Bundur, A. Amiri, Y.Ç. Erşan, N. Boon, N. De Belie, Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability, *Cement and Concrete Research*, 98 (2017) 44-49.
- 44- Ghosh P, Mandal S, Chattopadhyay BD, Pal S. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar .*Cem Concr Res*. 2005; 35(10):1980-3.
- 45- Jonkers HM, Schlangen E. Crack repair by concrete immobilized bacteria. In: Schmetz AJM, van der Zwaag S ,editors. *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*; 2007 Apr 18-20; Delft University of Technology. Noordwijk Aan Zee ,Netherlands. Berline: Springer; 2007. p. 1-7.
- 46- -Jonkers HM, Schlangen E. Development of a bacteriabased self-healing concrete. In: Walraven JC, Stoelhorst D ,editors. *Tailor made concrete structures*. London: CRC Press; 2008. p. 425-30.
- 47- De Muynck W, Cox K, De Belie N, Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Constr Build Mater*. 2008; 22(5):875-85.
- 48- Xu J, Yao W, Jiang Z. Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials. *J Mater Civil Eng* .2014; 26(5):983-91.
- 49- Victor C. Li and Emily Herbert, (2012) “Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 10, 207-218.
- 50- Huang, H., and Ye, G.,(2011), “Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials,” *International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering*, Hong Kong, China, September 5-7.
- 51- Kishi, T., Ahn, T., Hosoda, A., Suzuki, S. and Takaoka H., (2007) “Self-healing behaviour by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent,” In: *5th International Conference on Self-Healing Materials*, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, and April 18-20.

- 52- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D. and Jacobs, P.,(2011) "Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent," *Cement and Concrete Composites*, 33, 497-505.
- 53- Li, M., and Li, V. C., (2011) "Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment," *ACI Materials J.*, 108(3), pp. 333-340.
- 54- J. Wang, H. Soens, W. Verstraete, N. De Belie, Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores, *Cem. Concr. Res.* 56 (2014) 139–152.
- 55- J. Wang, D. Snoeck, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, N. De Belie, Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 110–119.
- 56- Gupta Souradeep, Pang Sze Dai, Kua Harn Wei, Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review, *Construction and Building Materials* 146 (2017) 419–428.
- 57- Kim Van Tittelboom and Nele De Belie, Self-Healing in Cementitious Materials-A Review, *Materials* 2013, 6, 2182-2217.
- 58 - concrete. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- 59 - Fulazzaky, M.A., et al., Identification of gaps to conduct a study on biological self-healing concrete. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2013. 1(2): p. 62-68.
- 60- Dadhich, P., et al., The Review Paper on Self-Healing Concrete. Tathapi with ISSN 2320-0693 is an UGC CARE Journal, 2020. 19(22): p. 1-4.
- 61- Nguyen, T.H., et al., Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. *Cement and Concrete Composites*, 2019. 104: p. 103340.
- 62- Luo, M. and C. Qian, Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 2016. 121: p. 659-663.
- 63- Singla, N., S.K. Sharma, and J.S. Rattan, An Experimental Investigation on Properties of High Strength Bacterial Concrete (*Bacillus Subtilis*). *International*

Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2016. 3.

- 64- Senthilkumar, V., T. Palanisamy, and V.N. Vijayakumar, Enrichment of compressive strength in microbial cement mortar. *Advances in cement research*, 2014. 26(6): p. 353-360.
- 65- Meera, C. and V. Subha, Strength and Durability Assessment of Bacteria Based Self-Healing Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, (IOSR-JMCE), 2016: p. 1-7. Wu, M., B. Johannesson, and M. Geiker, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 2012. 28(1): p. 571-583.
- 66- Willem De Muynck, Dieter Debrouwer, Nele De Belie, Willy Verstraete, Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 38 (2008) 1005–1014.
- 67- Jianguang Zhang, Yuanzhen Liu, Tao Feng, Mengjun Zhou, Lin Zhao, Aijuan Zhou, Zhu Li, Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete, *Construction and Building Materials* 148 (2017) 610–617.
- 68- Rathnayaka, I. R, Manjaree H. S B, REVIEW ON SELF-HEALING CONCRETE WITH BACILLUS SUBTILIS, *Engineering and Construction*, 2018.
- 69- Li, V.C. and E.-H. Yang, Self healing in concrete materials, in *Self Healing Materials*. 2007, Springer. p. 161-193.
- 70- Chen, H., C. Qian, and H. Huang, Self-healing cementitious materials based on bacteria and nutrients immobilized respectively. *Construction and Building Materials*, 2016. 126: p. 297-303.
- 71- Jonkers, H.M., Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 56 (1/2), 2011.
- 72- Zhang, J., et al., Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 2017. 148: p. 610-617.
- 73- Alazhari, M., et al., Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 2018. 160: p. 610-619.
- 74- Chen, H., C. Qian, and H. Huang, Self-healing cementitious materials based on

bacteria and nutrients immobilized respectively. *Construction and Building Materials*, 2016. 126: p. 297-303.

75- De Koster, S., et al., Geopolymer coating of bacteria-containing granules for use in self-healing concrete. *Procedia Engineering*, 2015. 102: p. 475-484.

76- Wang, J., et al., Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and building materials*, 2012. 26(1): p. 532-540

77- Seifan, M., et al., The effect of cell immobilization by calcium alginate on bacterially induced calcium carbonate precipitation. *Fermentation*, 2017. 3(4): p. 57

78- Gao, M., et al., Immobilized bacteria with pH-response hydrogel for self-healing of concrete. *Journal of Environmental Management*, 2020. 261.

79- Norhasri, M.M., M. Hamidah, and A.M. Fadzil, Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2017. 133: p. 91-97.

80- Huseien, G.F., K.W. Shah, and A.R.M. Sam, Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight. *Journal of Building Engineering*, 2019. 23: p. 155-171.

81- Ji, T., Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and concrete Research*, 2005. 35(10): p. 1943-1947.

82- Cao, M., et al., Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review. *Materials*, 2019. 12(5): p. 781.

83- Yang, J. Effect of Nano-CaCO₃ on Concrete Compressive Strength. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. IOP Publishing.

84- American Public Health Association, American Chemical Society, Association of Official Agricultural Chemists (1920). *Standard Methods for the Examination of Water and Sewage*. American public health association. pp. p. 95.

85- Baines, D.; Seal, R. (2012). *Natural Food Additives, Ingredients and Flavours*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Elsevier Science. p. 296. ISBN 978-0-85709-572-5. Retrieved September

27, 2018.

86- Euzéby JP (2008). "Bacillus". List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature. Retrieved 2008-11-18.

87- <https://www.ktglabgroup.com/>

88- "Improvements in CO2 Incubators for Cell Cultures". www.biocompare.com. Retrieved 2019-12-02.

89- ASTM C39, "standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens," Annual book of ASTM standards, vol. 04.02, pp.19-21 (1988).

90- <https://www.clinicbeton.ir/ArticleDetail/> افزایش-مقاومت-بتن-با-عمل-آوری

91- <https://azmanco.com/> آزمایش-تعیین-مقاومت-فشاری-بتن

92- Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).

93- <https://www.clinicbeton.ir/> آزمایش-مقاومت-خمشی-بتن-چگونه-انجام-می-شود

94- Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.

95- <https://www.clinicbetonsabz.ir/BlogDetails.aspx?id=256>

96- "Standard Method for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials", (T260-94), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A, 1994

97- Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review. K.D. Stanish, R.D. Hooton and M.D.A. Thomas Department of Civil Engineering University of Toronto Toronto, Ontario, Canada.

98- MEASUREMENT OF WATER ABSORPTION UNDER LOW PRESSURE RILEM TEST METHOD NO. 11.4.

99- Water-Absorption-Measurement instrument for masonry façades, M. Stelzmann & U. Möller, Conference Paper · May 2015.

100- Wiktor, V. and H.M. Jonkers, *Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete*. Cement and Concrete Composites, 2011. **33**(7): p. 763

101- Thanh Ha Nguyen, Elhem Ghorbel, Hanaa Fares, Bacterial self-healing of

concrete and durability assessment, Annelise Cousture, Cement and Concrete Composites, (104).2019.

- ۱۰۲- کتاب روش های شناسایی و آنالیز مواد، فرهاد گلستانی فرد، دانشگاه علم و صنعت ایران ۱۳۹۶
- ۱۰۳- استاندارد ملی و ویژگی های انواع سیمان، کاظم آشوری
- ۱۰۴- دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمونهای پلیه های بتنی مسلح چهارگوش، شرکت مدیریت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران (توانیر)

