

مقاله پژوهشی

اثر سولفات سدیم و یون کلر بر خواص بتن‌های حاوی میکروسیلیس و زئولیت و مقایسه آن با بتن معمولی

مهدی حسینی^{۱*}، علیرضا دولتشاهی^۲، اسماعیل رضانی^۳

۱. دانشیار مهندسی معدن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، mehdi_hosseini@ikiu.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، alireza.dolatshahi@aut.ac.ir
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، esmaeelramezani@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸

چکیده

کاربرد روزافزون بتن و دسترسی آسان به این مصالح سبب شده است در محیط‌های متنوعی استفاده شود. سازه‌های بتنی در محیط‌هایی با درصد خوردگی بالا، دچار خسارات‌های غیرقابل جبران می‌شوند. از این رو، مطالعه بر روی بتن و ارتقای قابلیت‌های آن که در این شرایط مساعد باشد، اهمیت بسزایی دارد. این پژوهش با هدف مطالعه تاثیر شرایط خوردگی ناشی از یون کلر و نمک سولفات سدیم بر روی بتن حاوی ماده افزودنی پودر زئولیت و همچنین میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی انجام شده است. پس از ساخت سه نوع بتن شامل بتن معمولی، بتن حاوی پودر زئولیت و بتن حاوی میکروسیلیس، خواص فیزیکی سه نوع بتن شامل تخلخل موثر، درصد افت وزنی، میزان جذب آب و سرعت امواج طولی و همچنین خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی بتن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بتن‌های پوزولانی با میزان جایگزینی ۱۰ درصد پودر زئولیت و یا میکروسیلیس به جای سیمان بتن به مدت ۱۵ روز در محیط خورنده نمک سولفات سدیم و یون کلر قرار گرفت و نتایج حاصل با شرایط آب غیرخورنده مقایسه شد. نتایج حاصل از این مطالعه داد که بتن‌های حاوی پوزولان میکروسیلیس و یا پودر زئولیت در شرایط محیطی خورنده و غیرخورنده نسبت به بتن معمولی عملکرد بهتری داشتند به نحوی که در نمونه‌های حاوی پوزولان اعم از میکروسیلیس و پودر زئولیت، تخلخل موثر و میزان جذب آب کاهش و سرعت امواج طولی، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. در محیط خورنده، کاهش مقاومت کششی برزیلی بتن معمولی، بتن حاوی میکروسیلیس و بتن حاوی زئولیت به ترتیب ۸/۰۷، ۱/۲۹ و ۰/۴۸ درصد و کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری بتن معمولی، بتن حاوی میکروسیلیس و بتن حاوی زئولیت به ترتیب ۱۵/۲۰، ۳/۲۳ و ۱/۲۲ درصد نسبت به شرایط آب غیرخورنده است. نتایج آزمایش حاکی از آن است که عملکرد بتن حاوی زئولیت در شرایط خورنده و غیرخورنده از سایر بتن‌ها بهتر است.

کلمات کلیدی

بتن، میکروسیلیس، پودر زئولیت، خواص فیزیکی - مکانیکی، شرایط خورنده

۱- مقدمه

شرایط محیطی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ و مصالح پایه سیمانی همچون بتن است. یکی از محیط‌های تاثیرگذار بر روی بتن، محیط‌هایی با شرایط خوردگی است. از آنجا که کاربرد و شدت خوردگی بتن‌های مسلح به میلگرد در مقایسه با بتن‌های غیرمسلح بیشتر است، ارزیابی و جلوگیری از خوردگی بتن‌های مسلح به میلگرد اهمیت بیشتری دارد زیرا فولاد در برابر وجود آب و املاح خورنده دارای سرعت خوردگی بالاتر نسبت به مصالح سنگی است. بنابراین کیفیت بتن که در اطراف میلگرد نقشی مانند یک غشا محافظتی دارد باید مناسب باشد تا باعث جلوگیری از خوردگی و تخریب سریع سازه شود [۱]. با توجه به نوع محیط مانند محیط‌های دریایی و املاح نمکی موجود در آن، محیط‌های صنعتی با درصد آلودگی کربن دی‌اکسید و گازهای سمی و باران‌های اسیدی میزان خوردگی و دوام سازه‌های بتنی متفاوت است [۲]. از این روی همواره جلوگیری از تخریب سازه‌های بتنی، یکی از دغدغه‌های هر پروژه محسوب می‌شود. سازه‌های بتنی مانند پوشش بتنی یک تونل انتقال آب و فاضلاب، چاه و ستون‌های بتنی یک پل احداث شده در آب، ممکن است در معرض مواد خورنده باشد.

برای جلوگیری از روند خوردگی و تخریب سازه تحقیقات فراوانی انجام شده که منتج به دستاوردها و پیشنهادات زیادی شده است. برای مثال، بلیزی^۱ و همکاران [۳]، با مطالعه بر روی میلگردهای گالوانیزه در بتن مسلح نشان دادند که میزان آسیب به نمونه‌های بتنی و میزان خوردگی فولاد به کار رفته درون بتن با استفاده از فولادهای گالوانیزه کاهش می‌یابد.

انگلی^۲ و همکاران [۴]، با مطالعه موردی بر روی نمونه‌شن و ماسه‌های نایروبی^۳ برای ساخت بتن نشان دادند که وجود ناخالصی‌های رسی، سیلتی و آلی بیش از حد مجاز، پارامترهای مقاومتی بتن را کاهش می‌دهد و خسارت قابل توجهی بر روی سازه بتنی دارد. کاهش ناخالصی‌ها از طریق شست‌وشوی شن و ماسه مورد استفاده علاوه بر افزایش کیفیت بتن سبب جلوگیری از روند تخریب سازه و فعل و انفعال شیمیایی مواد آلی و ناخالصی‌های موجود درون شن و ماسه با سیالات محیط سازه بتنی می‌شود.

حسن^۴ و همکاران [۵]، با مطالعه بر روی اهمیت کیفیت آب

مورد استفاده در طرح اختلاط بتن نشان دادند که میزان پاکیزگی آب مورد استفاده تاثیر بسیار زیادی در امر خوردگی میلگرد درون بتن مسلح و همچنین کیفیت بتن تولیدی دارد. همچنین رضانیان‌پور و همکاران [۶]، در مطالعه‌ای بر روی آهنگ نفوذ یون کلر داخل بتن بیان کردند که استفاده از آب تمیز در طرح اختلاط بتن با کمترین میزان یون کلر و املاح نمکی سبب کاهش روند خوردگی میلگرد و تخریب بتن می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های پیشنهادی، استفاده از پوزولان‌های مصنوعی و طبیعی است. مطالعات گسترده‌ای بر روی انواع و اقسام پوزولان انجام شده است. برای مثال، لخوا^۵ و همکاران [۷]، نشان دادند که استفاده از زئولیت به عنوان یک پوزولان درون بتن نسبت به سیمان پرتلند واکنش کندتری دارد اما با جایگزینی میزان ۱۵ درصد زئولیت به جای سیمان تشکیل‌دهنده بتن، هنگام شکستن زئولیت در بتن، مقاومت کششی بتن نسبت به نمونه بتن‌های شاهد افزایش می‌یابد. همچنین مارکیو^۶ و همکاران [۸]، پیرامون تاثیر افزودنی پودر زئولیت بر بتن نشان دادند با جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت به عنوان بخشی از سیمان تشکیل‌دهنده بتن، مقاومت فشاری بتن با سن ۱۸۰ روز افزایش می‌یابد. این افزایش در سنین کم بتن اندک است و پس از شکسته شدن زئولیت در بتن به مرور زمان مقاومت فشاری بتن در سنین بالاتر افزایش چشمگیری پیدا می‌کند.

یکی دیگر از پوزولان‌های مصرفی بتن، میکروسیلیس یا دوده سیلیس است. میکروسیلیس به دلیل داشتن سیلیس فعال در خود قادر است، هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان بتن را که یک عامل تضعیف‌کننده بتن محسوب می‌شود، به سیلیکات کلسیم تبدیل کند. همچنین اندازه دانه‌بندی ریز آن قادر به پر کردن خلل و فرج‌های بتن می‌شود. از این رو، نفوذپذیری که یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در زمینه دوام سازه بتنی است، با افزودن میکروسیلیس کاهش می‌یابد و از روند تخریب بتن ناشی از شرایط خورنده سیال جلوگیری می‌کند [۹].

مظلوم^۷ و همکاران [۱۰]، پیرامون تحقیقاتی بر روی میکروسیلیس درون بتن، نشان دادند افزودن میکروسیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن در سنین ۲۸ روزه می‌شود و این امر با افزایش درصد میکروسیلیس افزایش پیدا می‌کند. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد در طرح اختلاط، به ازای افزایش میزان بیش از ۳۰ درصد میکروسیلیس به دلیل

¹ bellezze

^۲ Ngugi

³ Nairobi

⁴ Hassan

⁵ Lekha

⁶ Markiv

جدول ۱- مروری بر مطالعات انجام گرفته در زمینه اثر افزودنی‌های مختلف بر روی خواص بتن

نام محققان	نوع افزودنی	نتایج
دشموخ ^۲ و همکاران [۱۲]	الیاف شیشه	مقاومت کششی: افزایش مقاومت فشاری: افزایش مقاومت خمشی: افزایش
ژانگ ^۳ و همکاران [۱۳]	متاکائولن	مقاومت کششی: افزایش (در صورت جایگزینی بیش از ۱۵ درصد کاهش می‌یابد). مقاومت فشاری: افزایش افت وزنی: کاهش (در صورت جایگزینی بیش از ۱۵ درصد افزایش می‌یابد).
وانخده ^۴ و همکاران [۱۴]	خاکستر بادی	مقاومت فشاری: افزایش (در صورت جایگزینی بیش از ۲۰ درصد کاهش می‌یابد).
یوسمن ^۵ و همکاران [۱۵]	ضایعات لاستیک	مقاومت کششی: افزایش مقاومت خمشی: افزایش مقاومت فشاری: افزایش
اکبرزاده و همکاران [۱۶]	الیاف پلیمری نوع KWB ^۶ و KB ^۷	مقاومت کششی: افزایش مقاومت فشاری: افزایش مدول الاستیسیته: افزایش

مهدیخانی و همکاران [۱۷]، به بررسی اثر باران اسیدی بر روی بتن حاوی نانوسیلیس پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که باران اسیدی در pHهای متفاوت سبب کاهش مقاومت بتن می‌شود و در قیاس دو نوع بتن معمولی و بتن حاوی نانوسیلیس، نمونه‌های حاوی نانوسیلیس مقاومت فشاری و دوام بهتری دارند. حسینی و همکاران [۱۸]، در مطالعه‌ای پیرامون اثر باران اسیدی بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی بتن نشان دادند که افزودن ۵ درصد پودر سنگ آهک و ۱۰ درصد میکروسیلیس به عنوان بخشی از سیمان بتن سبب بهبود پارامترهای مقاومتی، کاهش جذب آب و تخلخل موثر این نوع بتن‌ها نسبت به بتن‌های معمولی در شرایط مواجهه بتن با باران معمولی، اسیدی و شرایط بدون بارندگی می‌شود.

یه^۸ و همکاران [۱۹]، هجوم یون کلرید به بتن را مطالعه کردند و متوجه شدند که واکنش شیمیایی یون با ماتریکس بتن سبب تضعیف ساختاری بتن و کاهش دوام آن می‌شود.

رضانیان‌پور و همکاران [۲۰]، در مطالعه‌ای نشان دادند در محیط خورنده حاوی ۱۰ درصد سولفات سدیم و ۱۰ درصد منیزیم سولفات استفاده از پودر سنگ آهک در بتن، سبب می‌شود در نمونه‌های بتن حاوی پودر آهک با افزایش میزان آهک، مقاومت فشاری بتن کاسته شود و با افزایش غلظت محلول میزان تخریب بتن افزایش یابد. همچنین محققان

کاهش وزن بتن نتایج خواص مکانیکی بتن رویه‌ای عکس دارد. به نحوی که افزودن بیش از ۳۰ درصد میکروسیلیس مقاومت فشاری و کششی بتن را کاهش می‌دهد.

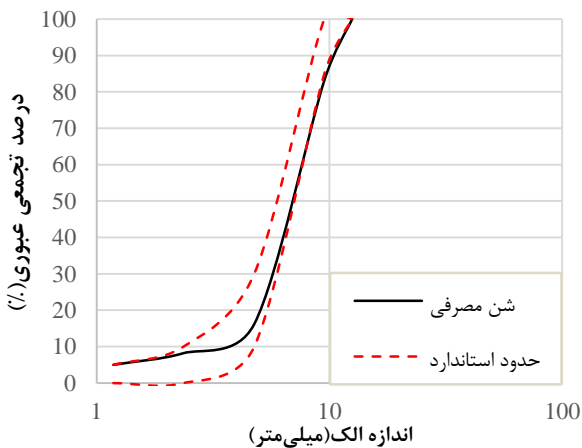
سعد^۱ و همکاران [۱۱]، پیرامون تاثیر درجه حرارت بالا بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی بتن حاوی میکروسیلیس بیان کردند که افزایش میزان درصد میکروسیلیس سبب بهبود کیفیت بتن می‌شود با جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد میکروسیلیس، تخلخل موثر و نفوذپذیری بتن کاهش و میزان مقاومت فشاری و کششی بتن افزایش یافته است.

علاوه بر میکروسیلیس و زئولیت افزودنی‌های بیشتری وجود دارند که سبب ارتقای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن می‌شوند که عبارت‌اند از: متاکائولن، سرباره‌های ذوب آهن، الیاف شیشه و نظایر آن که در جدول ۱ به اختصار مواردی از مطالعات انجام گرفته پیرامون اثر آن‌ها آورده شده است.

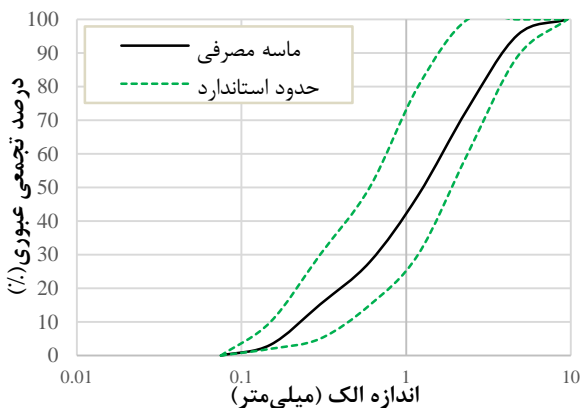
مطالعات دیگری نیز در محیط‌های خورنده و آسیب‌گذار مختلف روی بتن مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال،

^۱ Saad^۲ Deshmukh^۳ Zhang^۴ Wankhede^۵ Usman^۶ Kortta Wave Blend^۷ Kortta Blend^۸ Ye

اساس، پژوهش پیشین پیرامون میزان درصد ژئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بتن می‌توان به مطالعات لخوا و همکاران [۶]، مارکیو و همکاران [۷] و رامش و همکاران [۲۵] اشاره کرد که حداکثر میزان جایگزینی ژئولیت به جای بخشی از سیمان بتن را ۱۵ تا ۲۰ درصد وزن سیمان بتن می‌دانند. از این روی در این پژوهش برای بررسی شرایط یکسان از نظر میزان جایگزینی دو پوزولان پودر ژئولیت و میکروسیلیس میزان جایگزینی هر دو پوزولان ۱۰ درصد وزنی سیمان بتن انتخاب شده است. پودر ژئولیت مصرفی دارای ابعاد ۲۰۰ میکرون از معادن اطراف استان سمنان است. در ادامه نتایج آزمون XRF^۲ شن، ماسه، ژئولیت و میکروسیلیس مصرفی در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. همچنین طرح اختلاط مورد استفاده در این آزمایش مطابق جداول ۳ تا ۵ برای ساخت سه نوع بتن، شامل بتن معمولی، بتن حاوی میکروسیلیس و بتن حاوی پودر ژئولیت برای تولید یک مترمکعب بتن، آورده شده است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی شن مصرفی



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی

دیگری مانند چالا و تالا^۱ [۲۱]، به بررسی اثر حمله کلریدی و نقش الیاف پلی‌پروپیلن در ارتقای خواص مکانیکی بتن پرداختند و نشان دادند استفاده از این الیاف سبب کاهش آهنگ نفوذ یون کلرید در ماتریکس بتن و افزایش پارامترهای مقاومتی آن می‌شود.

با بررسی مطالعات پیشین در این زمینه آشکار شد تاکنون اثر نمک سولفات سدیم و یون کلر به طور همزمان بر روی بتن‌های حاوی ژئولیت و میکروسیلیس بررسی نشده است. این پژوهش می‌کوشد تا تاثیر این شرایط خورنده بر روی سه نوع بتن، شامل معمولی، بتن حاوی میکروسیلیس و بتن حاوی پودر ژئولیت را مورد بررسی قرار دهد. از این رو شبیه‌سازی یک محیط خورنده نمک سولفات سدیم و یون کلر به صورت همزمان تحت شرایط پویا (شرایط آب غیرساکن) برای کاهش ته‌نشست نمک در طول فرآیند آزمایش و کاهش میزان تبلور نمک در خلل و فرج‌های بتن که سبب خطا در نتایج آزمایش می‌شود، انجام گرفته است. همچنین تمام بتن‌ها در هنگام آزمایش بتن ۲۸ روزه بودند و تلاش شده است که متناسب با شرایط خوردگی بالای سولفات سدیم و یون کلر نشان داده شود که کدام بتن پوزولانی عملکرد بهتری در مواجهه با محیط خورنده و غیرخورنده دارد.

۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند تیپ دو با عیار ۳۵۰، شن و ماسه گردگوشه، فوق روان‌کننده از شرکت نامیکاران و از دو نوع پوزولان میکروسیلیس و پودر ژئولیت استفاده شده است. ضریب نرمی ماسه مورد استفاده ۳/۳۴ است. شن مصرفی از الک $\frac{3}{8}$ و ماسه مصرفی از سرند شماره ۴ عبور داده شده است. شن و ماسه مصرفی مطابق الزامات ارایه شده در استاندارد ملی شماره ۳۰۲ سازمان ملی استاندارد ایران است [۲۲]. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. بر اساس پژوهش پیشین پیرامون میزان درصد بهینه میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بتن می‌توان به مطالعات مظلوم و همکاران [۱۰]، زهیری و همکاران [۲۳] و زارعی و همکاران [۲۴] پیرامون درصد جایگزینی میکروسیلیس به عنوان بخشی از سیمان اشاره کرد که حداکثر میزان جایگزینی میکروسیلیس به عنوان بخشی از سیمان بتن در طرح اختلاط بتن را ۳۰ درصد وزنی سیمان بتن می‌دانند. همچنین بر

^۲ X-Ray Fluoresces

^۱ Chalah and Talah

جدول ۲- نتایج آنالیز XRF مصالح مصرفی

ترکیب شیمیایی	ماسه (درصد)	شن (درصد)	میکروسیلیس (درصد)	زئولیت (درصد)
SiO ₂	۴۹٫۶	۷٫۳	۹۹٫۵	۶۷٫۶
Al ₂ O ₃	۱۲٫۲	۱٫۶	۰٫۰۰۸	۱۰٫۲
Fe ₂ O ₃	۷٫۶	۱	۰٫۰۱۹	۰٫۵
Na ₂ O	۲٫۷	۰٫۴	۰٫۰۳	۳
K ₂ O	۳٫۳	۰٫۵	۰٫۰۰۱	۴٫۱
CaO	۱۳٫۱	۴۹٫۳	۰٫۲۳	۰٫۲
MgO	۲٫۱	۰٫۹	۰٫۰۱	۰٫۵۸
SO ₃	<۰٫۱	<۰٫۱	۰٫۰۳	۰٫۲
TiO ₂	۱	<۰٫۱	۰٫۰۰۲	۰٫۸
MnO	۰٫۲	<۰٫۱	-	۰٫۰۳
P ₂ O ₅	۰٫۲	<۰٫۱	-	۰٫۰۲۶
SrO	-	-	-	۰٫۲۴
L.O.I	۷٫۷	۳۸٫۸	۰٫۰۰۸	۱۲٫۵

جدول ۳- طرح اختلاط بتن معمولی (برای یک مترمکعب)

سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	نسبت آب / سیمان	فوق‌روان کننده (کیلوگرم)
۳۵۰	۷۰۰	۱۱۵۰	۰٫۴	۳٫۱۵

جدول ۴- طرح اختلاط بتن حاوی پودر زئولیت (برای یک مترمکعب)

سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	نسبت آب به سیمان	فوق‌روان کننده (کیلوگرم)	زئولیت (کیلوگرم)
۳۱۵	۷۰۰	۱۱۵۰	۰٫۴	۳٫۱۵	۳۵

جدول ۵- طرح اختلاط بتن حاوی میکروسیلیس (برای یک مترمکعب)

سیمان (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	نسبت آب به سیمان	فوق‌روان کننده (کیلوگرم)	میکروسیلیس (کیلوگرم)
۳۱۵	۷۰۰	۱۱۵۰	۰٫۴	۳٫۱۵	۳۵

استاندارد ISRM و طرح اختلاط بیان شده در جدول‌های ۳ تا ۵، نمونه‌های استوانه‌ای بتن به قطر ۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند [۲۶]. پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و داخل حوضچه آب حاوی کلسیم کربنات به مدت ۲۸ روز قرار گرفته تا نمونه‌ها عمل‌آوری شوند [۲۷]. پس از این مدت، تعدادی از نمونه‌ها به دیسک‌هایی با نسبت ضخامت به قطر تقریباً ۰٫۵ برای آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) تهیه شده و ابتدا و انتهای سایر نمونه‌ها صیقل داده می‌شوند [۲۸]. اسلامپ بتن شاهد ۹۰، اسلامپ بتن زئولیت‌دار ۷۳ و اسلامپ بتن میکروسیلیس‌دار ۶۵

پس از آماده‌سازی مصالح مورد نیاز برای ساخت بتن‌ها مطابق جدول‌های طرح اختلاط برای ساخت بتن معمولی، شن، ماسه، سیمان و برای نمونه‌های بتن حاوی زئولیت علاوه بر شن، ماسه و سیمان، زئولیت نیز به داخل مخلوط‌کن (میکسر^۱) موجود در آزمایشگاه اضافه و در ادامه آب و فوق‌روان‌کننده اضافه می‌شود اما در تهیه نمونه بتن‌های حاوی میکروسیلیس، پوزولان میکروسیلیس ابتدا به آب اضافه شده سپس به صورت لجن (آب حاوی میکروسیلیس) به مصالح داخل مخلوط‌کن که شامل شن، ماسه و سیمان است اضافه می‌شود. بر اساس

¹ Mixer

بین‌المللی مکانیک‌سنگ^۱ انجام گرفته است. بر اساس محدودیت آزمایشگاه و پروژه، میزان تکرار آزمایش برای تعیین خواص فیزیکی ۶ بار، مقاومت فشاری تک‌محوری ۵ بار و برای مقاومت کششی ۹ بار بوده است.

۴- خواص فیزیکی و مکانیکی

۴-۱- تخلخل موثر

تخلخل موثر شامل حفره‌های متصل به یکدیگر است که قادر است سیالات را از خود عبور دهد. عوامل بسیاری از جمله فرسایش و خوردگی سبب افزایش تخلخل موثر در نمونه می‌شوند. تخلخل موثر از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$n_e = \frac{V_{ve}}{V_{total}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن:

n_e : تخلخل موثر (درصد)

V_{ve} : حجم منافذ موثر (مترمکعب)

V_{total} : حجم کل نمونه (مترمکعب)

برای محاسبه میزان تخلخل موثر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون آب قرار گرفته و پس از این مدت جرم غوطه‌وری و اشباع نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و برای اندازه‌گیری جرم خشک نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت درون گرمخانه در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند [۳۰]. میانگین تخلخل موثر برای نمونه بتن‌های معمولی و حاوی پودر زئولیت و میکروسیلیس در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است.

بازنت^۲ و همکاران [۳۱] با بررسی میکروسکوپی اثر زئولیت بر عملکرد بتن نشان دادند، زئولیت در بتن به صورت کریستال‌های کوچک و منظم‌تری نسبت به کریستال سیمان مصرفی در منافذ موجود در بتن قرار می‌گیرد. همچنین پاتیل^۳ و همکاران [۳۲] با مطالعه تصاویر میکروسکوپی بتن حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس نشان دادند، میکروسیلیس و نانوسیلیس به صورت بلورهای کوچک و تقریباً کروی سبب افزایش تماس ذرات بتن با یکدیگر و کاهش منافذ موجود در بتن می‌شود.

نتایج آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از پودر زئولیت و میکروسیلیس سبب کاهش تخلخل موثر بتن نسبت به بتن معمولی در تمامی شرایط اعم از حالت اولیه (نمونه در محیط

میلی‌متر است. افزودن میکروسیلیس و زئولیت باعث کاهش اسلامپ بتن می‌شود.

۳- روش تحقیق

برای ثابت نگه‌داشتن عامل زمان در این مطالعه، سه نوع بتن با سن ۲۸ در محیط خورنده و غیرخورنده قرار گرفتند تا بتوان فهمید کدام بتن در شرایط محیط خورنده عملکرد بهتری دارد که اثر مهلت شکستن زئولیت در مقابل میکروسیلیس بررسی شود و نشان داده شود، بتن حاوی پودر زئولیت در سنین کمتر در مقابل بتن حاوی پوزولانی مانند میکروسیلیس چگونه عملکردی دارد.

در این پژوهش، دو مخزن شامل آب معمولی و آب حاوی نمک سولفات سدیم ۱۰ و سدیم کلرید ۵ درصد مجهز به مولد موج برای ایجاد شرایط کاهش ته‌نشست نمک روی بستر مخزن و بر روی نمونه‌ها و ایجاد شرایطی نسبتاً یکسان با شرایط محیطی با خوردگی بالا ایجاد شده است. میزان درصد نمک موجود براساس طرح آزمایش محمودی و همکاران [۲۹]، انتخاب شده است. پس از اتمام مدت زمان ۲۸ روز از استقرار نمونه‌ها درون آب حاوی کربنات کلسیم برای رسیدن به مقاومت حداکثری آن‌ها، نمونه‌ها به سه دسته تقسیم شد و به طور همزمان یک دسته از آن‌ها به مدت ۱۵ روز داخل مخزن آب خورنده، دسته دوم به مدت ۱۵ روز درون آب معمولی و دسته سوم نمونه‌ها به مدت ۱۵ روز در محیط خشک (معرف حالت اولیه در آزمایش‌ها) قرار گرفتند. تصویر مخزن مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳- مخزن سیال خورنده و دستگاه مولد موج

پس از اتمام مهلت ۱۵ روزه به منزله بررسی اثر شرایط خورنده بر خواص بتن‌های تعبیه شده، نمونه‌ها از مخزن خارج شده و برای انجام آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی آماده می‌شوند. تمامی آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه بر اساس استانداردهای پیشنهاد شده توسط انجمن

¹ International Society for Rock mechanics (ISRM)

² Basnett

³ Patil

خشک نمونه است، این پارامتر بر حسب درصد و از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$M = \frac{m_{water}}{m_{dry}} \times 100 \quad (2)$$

که در آن:

M : میزان جذب آب (درصد)

m_{water} : جرم آب موجود (گرم)

m_{dry} : جرم خشک نمونه (گرم)

جرم آب از تفاضل جرم اشباع نمونه و جرم خشک نمونه به دست می‌آید. میانگین میزان جذب آب برای نمونه بتن‌های معمولی و حاوی پودر زئولیت و میکروسیلیس در جدول‌های ۸ و ۹ آورده شده است.

خشک)، حالت غیرخورنده و خورنده شده است. تخلخل موثر بتن‌های حاوی میکروسیلیس و زئولیت نسبت به بتن شاهد در محیط خورنده به ترتیب ۴۶٫۱۵ و ۸٫۶۸ درصد کاهش داشته است. همچنین شرایط خورنده سبب افزایش تخلخل می‌شود. در شرایط خورنده عملکرد بتن‌های حاوی زئولیت بهتر از سایر نمونه‌ها است. همانطور که رضوی و همکاران [۳۳]، در مطالعات بر روی ساختار زئولیت در بتن نشان دادند، زئولیت در برابر هجوم یون کلر عملکرد بهتری نسبت به بتن معمولی دارد و وجود زئولیت سبب کاهش میزان نفوذ حاصل از حمله یون کلر در بتن می‌شود.

۴-۲- میزان جذب آب و افت وزنی

میزان جذب آب عبارت از نسبت جرم آب جذب شده به وسیله نمونه بعد از ۴۸ ساعت قرار گرفتن در آب به جرم

جدول ۶- میانگین تخلخل موثر نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب معمولی

نوع بتن	میانگین تخلخل موثر (درصد)		انحراف معیار (درصد)		افزایش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب معمولی	حالت اولیه	آب معمولی	
شاهد	۳٫۷۶	۳٫۹۷	۰٫۵۹	۰٫۶۲	۵٫۵۸
میکروسیلیس‌دار	۳٫۱۵	۳٫۲۶	۰٫۲۵	۰٫۳۱	۳٫۴۹
پودر زئولیت‌دار	۳٫۱۲	۳٫۲۳	۰٫۴۳	۰٫۴۲	۳٫۵۲

جدول ۷- میانگین تخلخل موثر نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب خورنده

نوع بتن	میانگین تخلخل موثر (درصد)		انحراف معیار (درصد)		افزایش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب خورنده	حالت اولیه	آب خورنده	
شاهد	۳٫۷۹	۴٫۰۳	۰٫۴۷	۰٫۵۸	۶٫۳۳
میکروسیلیس‌دار	۲٫۰۸	۲٫۱۷	۰٫۳۵	۰٫۲۶	۴٫۳۲
پودر زئولیت‌دار	۳٫۵۷	۳٫۶۸	۰٫۱۸	۰٫۲۴	۳٫۰۸

جدول ۸- میانگین میزان جذب آب نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب معمولی

نوع بتن	میانگین جذب آب (درصد)		انحراف معیار (درصد)		افزایش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب معمولی	حالت اولیه	آب معمولی	
شاهد	۱٫۷۳	۱٫۸۵	۰٫۵۳	۰٫۴۲	۶٫۹۴
میکروسیلیس‌دار	۱٫۴۵	۱٫۵۴	۰٫۳۹	۰٫۲۱	۶٫۲۱
پودر زئولیت‌دار	۱٫۶۹	۱٫۸۰	۰٫۴۳	۰٫۴۸	۶٫۵۰

جدول ۹- میانگین میزان جذب آب نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب خورنده

نوع بتن	میانگین جذب آب (درصد)		انحراف معیار (درصد)		افزایش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب خورنده	حالت اولیه	آب خورنده	
شاهد	۱٫۷۳	۱٫۸۴	۰٫۵۳	۰٫۶۲	۶٫۳۵
میکروسیلیس‌دار	۰٫۹۷	۱٫۰۱	۰٫۳۳	۰٫۲۷	۴٫۱۲
پودر زئولیت‌دار	۱٫۶۸	۱٫۷۵	۰٫۵۲	۰٫۴۶	۴٫۱۶

زئولیت و میکروسیلیس سبب کاهش میزان جذب آب بتن نسبت به بتن معمولی شده است اما در مقایسه دو بتن پوزولانی، عملکرد بتن میکروسیلیس بهتر است زیرا زئولیت به علت داشتن ساختار شبکه‌ای بخشی از آب را در ساختار خود محبوس می‌کند [۳۴].

افت وزنی نمونه‌های بتن پس از قرارگیری در آب معمولی و آب خورنده در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۰- میانگین افت وزنی نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب معمولی

نوع بتن	میانگین جرم خشک (گرم)		انحراف معیار (گرم)		افت وزنی نسبت به حالت اولیه (گرم)
	حالت اولیه	آب معمولی	حالت اولیه	آب معمولی	
شاهد	۶۶۰٫۶	۶۶۰٫۲	۳۹٫۶۸	۴۹٫۴۷	۰٫۴
میکروسیلیس‌دار	۶۹۴٫۹	۶۹۴٫۷	۴۰٫۳۲	۳۹٫۲۴	۰٫۲
پودر زئولیت‌دار	۷۰۹٫۳	۷۰۹٫۲	۵۷٫۵۵	۴۷٫۶۹	۰٫۱

جدول ۱۱- میانگین افت وزنی نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب خورنده

نوع بتن	میانگین جرم خشک (گرم)		انحراف معیار (گرم)		افت وزنی نسبت به حالت اولیه (گرم)
	حالت اولیه	آب خورنده	حالت اولیه	آب خورنده	
شاهد	۶۶۶٫۶	۶۶۵٫۲	۴۷٫۳۲	۵۲٫۹۱	۱٫۴
میکروسیلیس‌دار	۷۳۷٫۲	۷۳۶٫۴	۳۳٫۸۴	۴۳٫۲۳	۱٫۲
پودر زئولیت‌دار	۷۲۲٫۵	۷۲۱٫۹	۵۱٫۹۶	۴۷٫۱۲	۰٫۶

انتهای نمونه است که باید به نحوی باشد که با محور اصلی مرکز نمونه حداکثر تا ۲ درجه اختلاف داشته باشد [۳۵]. سرعت امواج طولی از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$V = \frac{L}{t} \quad (3)$$

که در آن:

V: سرعت موج طولی (متر بر ثانیه)

L: طول نمونه (متر)

t: مدت زمان طی شدن موج طولی (ثانیه)

میانگین سرعت امواج طولی برای نمونه بتن‌های معمولی و حاوی پودر زئولیت و میکروسیلیس در جدول‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

جدول ۱۲- میانگین سرعت امواج طولی نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب معمولی

نوع بتن	میانگین سرعت امواج طولی (متر / ثانیه)		انحراف معیار (متر / ثانیه)		کاهش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب معمولی	حالت اولیه	آب معمولی	
شاهد	۴۱۹۷٫۲	۴۱۷۶٫۲	۷۵٫۲۱	۶۹٫۹۰	۰٫۵۰
میکروسیلیس‌دار	۴۳۷۹٫۸	۴۳۶۱٫۷	۶۱٫۹۹	۶۵٫۳۴	۰٫۴۱
پودر زئولیت‌دار	۴۱۹۴٫۷	۴۱۷۹٫۸	۶۰٫۱۲	۵۸٫۱۸	۰٫۳۶

با توجه به جدول ۹ می‌توان دریافت که با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس و پودر زئولیت به جای بخشی از سیمان میزان جذب آب بتن‌های حاوی میکروسیلیس و زئولیت نسبت به بتن شاهد در محیط خورنده به ترتیب ۴۵٫۱ و ۴۸٫۹ درصد کاهش داشته است که می‌توان علت آن را کاهش تخلخل موثر دانست. خوردگی حاصل از نمک سدیم‌سولفات و یون کلر سبب افزایش میزان جذب آب در تمامی بتن‌ها شده است. گرچه استفاده از پودر

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۱ می‌توان گفت با افزایش میزان خوردگی آب، میزان افت وزنی بتن افزایش می‌یابد. همچنین در بین نمونه بتن‌های ساخته شده، بتن‌های زئولیت عملکرد بهتری در مواجهه با یون کلر و نمک سولفات سدیم دارند و دچار افت وزنی کمتری نسبت به بتن معمولی و بتن حاوی میکروسیلیس شده‌اند.

۳-۴- سرعت امواج طولی

آزمون تعیین سرعت امواج طولی، یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های غیرمخرب برای توجیه کیفیت بتن محسوب می‌شود. بدین منظور، به کمک دستگاه اولتراسونیک مدت زمان طی شدن موج در نمونه با دستگاه ثبت می‌شود. نکته مهم محل قرار گرفتن سنسورهای فرستنده و گیرنده در ابتدا و

جدول ۱۳- میانگین سرعت امواج طولی نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب خورنده

نوع بتن	میانگین سرعت امواج طولی (متر / ثانیه)		انحراف معیار (متر / ثانیه)		کاهش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب خورنده	حالت اولیه	آب خورنده	
شاهد	۴۱۴۱٫۸	۴۰۵۷٫۷	۵۷٫۴۱	۶۲٫۱۷	۲٫۰۳
میکروسیلیس‌دار	۴۳۶۰٫۳	۴۲۷۵٫۱	۴۸٫۱۴	۵۹٫۲۵	۱٫۹۵
پودر زئولیت‌دار	۴۱۹۹٫۲	۴۱۱۸٫۳	۴۲٫۱۰	۴۸٫۲۵	۱٫۹۳

که در آن:

σ_t : مقاومت کششی برزیلی (مگاپاسکال)

P: بار در لحظه شکست (نیوتن)

D: قطر نمونه (میلی‌متر)

t: ضخامت نمونه (میلی‌متر)



شکل ۴- نمونه برزیلی زیر دستگاه بارگذاری

میانگین مقاومت کششی برای نمونه بتن‌های معمولی و حاوی پودر زئولیت و میکروسیلیس در دو حالت آب معمولی و حالت شرایط خورنده در جدول‌های ۱۴ و ۱۵ آورده شده است.

با توجه به جدول ۱۳ می‌توان گفت که با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس و پودر زئولیت به جای بخشی از سیمان، سرعت امواج طولی بتن‌های حاوی میکروسیلیس و زئولیت نسبت به بتن شاهد در محیط خورنده به ترتیب ۵/۳۵٪ و ۱۵۰ درصد افزایش داشته است. مطالعات آزمایشگاهی گذشته نشان می‌دهد که رابطه بین دو پارامتر تخلخل و سرعت امواج طولی در یک نمونه سنگی و شبه‌سنگی مانند بتن یک رابطه معکوس است [۳۶]. نتایج آزمایش سرعت امواج طولی بیانگر آن است که استفاده از پوزولان سبب افزایش سرعت طولی به سبب پر شدن خلل و فرج‌های نمونه بتن با ذرات ریز پوزولان مصرفی شده است به دلیل کاهش تخلخل موجود درون نمونه امواج با سرعت بیشتری از نمونه عبور می‌کند و در نهایت حاکی از کیفیت بهتر بتن است. در شرایط خورنده، سرعت امواج طولی نمونه‌ها فارغ از هر نوع بتن رویه‌ای کاهشی به خود گرفته است اما به دلیل آن که زئولیت در مواجهه با یون کلر عملکرد بهتری دارد و تغییرات تخلخل موثر آن نیز در مواجهه با نمک سدیم کلرید و سولفات سدیم نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر بود، کیفیت بهتری دارد.

۴-۴- مقاومت کششی برزیلی

برای تعیین مقاومت کششی بتن، از روش برزیلی استفاده شده است. بدین منظور برای محاسبه مقاومت کششی، نمونه دیسک‌های بتنی با نسبت ضخامت به قطر، معادل ۰٫۵ آماده شده است [۲۸]. برای آزمایش، فک آزمایش برزیلی در حالی که نمونه را در بر گرفته است مانند شکل ۴، زیر دستگاه اعمال‌کننده بار محوری قرار گرفته‌اند. پس از شکست قابل قبول نمونه (یعنی ترک در راستای اعمال بار باشد)، به کمک رابطه ۴ مقاومت کششی برزیلی نمونه قابل محاسبه است:

$$\sigma_t = 0.636 \times \frac{P}{Dt} \quad (4)$$

جدول ۱۴- میانگین مقاومت کششی نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب معمولی

نوع بتن	میانگین مقاومت کششی (مگاپاسکال)		انحراف معیار (مگاپاسکال)		کاهش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب معمولی	حالت اولیه	آب معمولی	
شاهد	۴٫۲۲	۴٫۰۹	۰٫۲۶	۰٫۳۹	۳٫۰۸
میکروسیلیس‌دار	۴٫۷۸	۴٫۶۵	۰٫۵۲	۰٫۳۴	۲٫۷۲
پودر زئولیت‌دار	۴٫۲۳	۴٫۱۷	۰٫۳۶	۰٫۴۱	۱٫۴۲

جدول ۱۵- میانگین مقاومت کششی نمونه های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب خورنده

نوع بتن	میانگین مقاومت کششی (مگاپاسکال)		انحراف معیار (مگاپاسکال)		کاهش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب خورنده	حالت اولیه	آب خورنده	
شاهد	۴,۲۲	۳,۷۶	۰,۲۶	۰,۳۴	۱۰,۹۰
میکروسیلیس‌دار	۴,۷۸	۴,۵۹	۰,۵۲	۰,۴۶	۳,۹۷
پودر زئولیت‌دار	۴,۲۳	۴,۱۵	۰,۳۶	۰,۵۲	۱,۸۹

با بررسی حالت اولیه می‌توان دریافت که با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس و پودر زئولیت به جای بخشی از سیمان، مقاومت کششی برزلی بتن حاوی میکروسیلیس و زئولیت‌دار به ترتیب ۱۳,۲۷ و ۰,۲۳ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به مقادیر مقاومت کششی محاسبه شده، سدیم سولفات و یون کلر سبب کاهش مقاومت کششی بتن می‌شود. همچنین شرایط خورنده، به ترتیب سبب کاهش ۸,۰۷، ۱,۲۹ و ۰,۴۸ درصد مقاومت کششی بتن معمولی، بتن حاوی میکروسیلیس و بتن حاوی زئولیت نسبت به شرایط آب غیرخورنده شده است. در مقایسه دو نوع بتن میکروسیلیس‌دار و زئولیت‌دار، بتن حاوی پودر زئولیت عملکرد بهتری داشته است. به علت آن که تغییرات تخلخل موثر بتن حاوی پودر زئولیت در مواجهه با هجوم یون کلر از سایر بتن‌ها کمتر است در نتیجه کاهش مقاومت کششی بتن حاوی پودر زئولیت نیز از همه کمتر است.

۴-۵- مقاومت فشاری تک‌محوری

مقاومت فشاری تک‌محوری، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی بتن محسوب می‌شود بدین منظور برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری، نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر، معادل ۲ تهیه شده است [۲۶]. با داشتن قطر و محاسبه سطح مقطع اولیه نمونه‌ها پس از اعمال بار محوری به وسیله دستگاه بارگذاری با ثبت بار محوری در لحظه شکست نمونه بتن (شکل ۵)، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (5)$$

جدول ۱۶- میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب معمولی

نوع بتن	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		انحراف معیار (مگاپاسکال)		کاهش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب معمولی	حالت اولیه	آب معمولی	
شاهد	۳۰,۹	۲۹,۶	۱,۵۲	۲,۳۱	۴,۲۱
میکروسیلیس‌دار	۳۸,۳	۳۷,۱	۲,۴۲	۲,۳۴	۳,۱۳
پودر زئولیت‌دار	۳۳,۷	۳۲,۹	۱,۰۷	۲,۳۰	۲,۳۷

که در آن:

σ_c : مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

P: بار در لحظه شکست (نیوتن)

A: قطر نمونه (میلی متر مربع)



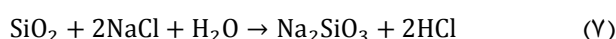
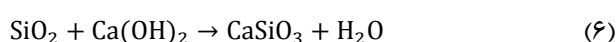
شکل ۵- نمونه بتن برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری زیر دستگاه بارگذاری محوری

میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه بتن‌های معمولی و حاوی پودر زئولیت و میکروسیلیس در دو حالت آب معمولی و حالت شرایط خورنده در جدول‌های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است.

جدول ۱۷- میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های بتن در حالت اولیه و بعد از قرارگیری در مخزن آب خورنده

نوع بتن	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		انحراف معیار (مگاپاسکال)		کاهش نسبت به حالت اولیه (درصد)
	حالت اولیه	آب خورنده	حالت اولیه	آب خورنده	
شاهد	۳۰٫۹	۲۵٫۱	۱٫۵۲	۱٫۳۴	۱۸٫۷۷
میکروسیلیس‌دار	۳۸٫۳	۳۵٫۹	۲٫۴۲	۲٫۴۶	۶٫۲۷
پودر ژئولیت‌دار	۳۳٫۷	۳۲٫۵	۱٫۰۷	۲٫۱۷	۳٫۵۶

خوردگی سیلیکات کلسیم ساخته شده در سنین پایین بتن می‌شود [۳۷]. این درحالی است که اکسید آلومینیوم موجود در ژئولیت با وجود یون کلر، مطابق با رابطه ۸ سدیم هیدروکسید (NaOH) را به عنوان فرآورده ایجاد می‌کند که سبب بازی شدن محیط می‌شود که از این روی فرصت شکفته شدن سیلیکات کلسیم برای پوزولان مصرفی محیا می‌شود [۳۷-۳۸]. همچنین وجود سولفات سدیم و سیلیس فعال یک فرآیند گرم‌زاست که قادر است پیوند موجود در سیلیکات کلسیم را از بین ببرد اما وجود اکسید آلومینیوم سبب کاهش گرما تولیدی واکنش شیمیایی و دوام بیشتر سیلیکات کلسیم می‌شود [۳۹].



۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تاثیر شرایط خورنده نمک سولفات سدیم و یون کلر بر روی دو نوع بتن حاوی میکروسیلیس و پودر ژئولیت و مقایسه این دو بتن با بتن شاهد انجام شد. نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی عبارت است از:

- جایگزینی ۱۰ درصد ژئولیت یا میکروسیلیس در بتن سبب کاهش تخلخل موثر، میزان جذب آب و افزایش سرعت امواج طولی، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوره بتن در مقایسه با بتن شاهد می‌شود.
- شرایط خورنده نمک سولفات سدیم و یون کلر، سبب افزایش تخلخل موثر و میزان جذب آب و کاهش سرعت امواج طولی، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوره بتن معمولی، بتن حاوی پودر ژئولیت و بتن حاوی میکروسیلیس می‌شود.
- در محیط خورنده، تخلخل موثر، جذب آب، سرعت امواج طولی، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوری بتن حاوی میکروسیلیس نسبت به حالت اولیه به ترتیب ۴٫۳۲ درصد افزایش، ۴٫۱۲ درصد افزایش، ۱٫۹۵

با بررسی حالت اولیه می‌توان دریافت که با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس و پودر ژئولیت به جای بخشی از سیمان، مقاومت فشاری تک محوری بتن حاوی میکروسیلیس و ژئولیت‌دار به ترتیب ۲۳٫۹۴ و ۹٫۰۶ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش می‌یابد که علت آن را کاهش تخلخل موثر می‌توان دانست. همچنین با توجه به مقادیر مقاومت کششی محاسبه شده واضح است سدیم سولفات و یون کلر سبب کاهش مقاومت کششی بتن می‌شود. همچنین شرایط خورنده، به ترتیب سبب کاهش ۱۵٫۲۰، ۳٫۲۳ و ۱٫۲۲ درصد مقاومت فشاری تک‌محوری بتن معمولی، بتن حاوی میکروسیلیس و بتن حاوی ژئولیت نسبت به شرایط آب غیرخورنده شده است. در مقایسه دو نوع بتن پوزولانی، تاثیر شرایط خورنده بر روی نمونه بتن‌های حاوی ژئولیت کمتر است.

برای بررسی دلیل عملکرد بهتر بتن حاوی ژئولیت در مقابل سایر بتن‌ها در محیط خورنده می‌توان به واکنش‌های شیمیایی که اتفاق می‌افتد اشاره کرد.

سیلیس فعال قادر است مطابق با رابطه ۶، هیدروکسید کلسیم $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ موجود در سیمان بتن را که یک عامل تضعیف‌کننده بتن محسوب می‌شود، به سیلیکات کلسیم (CaSiO_3) تبدیل کند [۹]. عمده ترکیب شیمیایی ژئولیت‌ها را سیلیس فعال و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) تشکیل می‌دهد این در حالی است که میزان اکسید آلومینیوم در میکروسیلیس بسیار ناچیز است و درصد کلی آن را سیلیس فعال تشکیل داده است [۳۷]. درصد بالای سیلیس فعال در پوزولان مصرفی یکی از عمده‌ترین دلایلی است که سبب می‌شود پوزولان مصرفی در سنین پایین‌تر شکفته شود. از این روی ژئولیت عمدتاً در سنین بالای ۹۰ روز اثر بهبودبخش خود را بر روی پارامترهای مقاومتی بتن نشان می‌دهد [۶-۷]. از طرفی در محیط‌های حاوی املاح خورنده طی یک فرآیند شیمیایی مطابق با رابطه ۷ سیلیس فعال در مجاورت سدیم کلرید (NaCl) و آب و آزادسازی یون کلر در محلول، هیدروکلریک اسید (HCl) را تولید می‌کند که سبب افزایش

8. Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., & Franus, W. (2016). "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite". Archives of civil and mechanical engineering, 16(4), 554-562.
9. رمضانپور، علی اکبر؛ پیدایش، منصور (۱۳۹۴)، «بتن در محیط دریایی»، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۹۷-۱۹۹.
10. Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete". Cement and Concrete Composites, 26(4), 347-357.
11. Saad, M., Abo-El-Enain, S. A., Hanna, G. B., & Kotkata, M. F. (1996). "Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume". Cement and concrete research, 26(5), 669-675.
12. Deshmukh, S. H., Bhusari, J. P., & Zende, A. M. (2012). "Effect of glass fibers on ordinary Portland cement concrete". IOSR journal of engineering, 2(6), 1308-1312.
13. Zhang, J., Yang, J., & Ying, Z. (2020). "Study on Mechanical Properties of Metakaolin-Based Concretes and Corrosion of Carbon Steel Reinforcement in 3.5% NaCl". Int. J. Electrochem. Sci, 15, 2883-2893.
14. Wankhede, P. R., & Fulari, V. A. (2014). "Effect of fly ash on properties of concrete". International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4(7), 284-289.
15. Usman, A., Sutanto, M. H., & Napiyah, M. (2018). "Effect of recycled plastic in mortar and concrete and the application of gamma irradiation-a review". In E3S Web of Conferences (Vol. 65, p. 05027). EDP Sciences.
16. علی اکبرزاده، محمدرضا؛ کریمی نسب، سعید؛ جلالی فر، حسین؛ بهالالدینی، مجتبی. (۱۴۰۰). «بررسی تاثیر الیاف پلیمری نوع KWB و KB ساخت شرکت نانونخ سیرجان بر خواص مکانیکی بتن ریزدانه»، نشریه مهندسی معدن ایران ۱۶ (۵۰)، ۱۵-۲۶.
17. Mahdikhani, M., Bamshad, O., & Shirvani, M. F. (2018). "Mechanical properties and durability of concrete specimens containing nano silica in sulfuric acid rain condition". Construction and building materials, 167, 929-935.
18. Hosseini, M., Dolatshahi, A., Ramezani, E. (2022). "Effect of Acid Rain on Physical and Mechanical Properties of Concrete Containing Micro-Silica and Limestone Powder". Journal of Mining and
- درصد کاهش، ۳/۹۷ درصد کاهش و ۶/۲۷ درصد کاهش می‌یابد. این درحالی است که برای بتن ژئولیت‌دار در محیط خورنده، تخلخل موثر، جذب آب، سرعت امواج طولی، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوری نسبت به حالت اولیه به ترتیب ۳/۰۸ درصد افزایش، ۴/۱۶ افزایش، ۱/۹۳ درصد کاهش، ۱/۸۹ درصد کاهش و ۳/۵۶ درصد کاهش می‌یابد.
- تاثیر نمک سولفات سدیم و یون کلر روی بتن حاوی پودر ژئولیت کمتر است که این می‌تواند به دلیل عملکرد بهتر ژئولیت در مواجهه با هجوم یون کلر باشد.
 - ساختار ژئولیت، شبکه‌ای است از این رو در مقایسه تمامی شرایط، میزان تغییرات جذب آب نمونه‌های حاوی ژئولیت از سایر بتن‌ها بیشتر است.
- ### منابع
1. Niş , A., & Çevik, A. (2022). "Seawater resistance of alkali-activated concrete". In Handbook of Advances in Alkali-Activated Concrete (pp. 451-469). Woodhead Publishing.
 2. Bazli, M., Zhao, X. L., Bai, Y., Raman, R. S., Al-Saadi, S., & Haque, A. (2020). "Durability of pultruded GFRP tubes subjected to seawater sea sand concrete and seawater environments". Construction and Building Materials, 245, 118399.
 3. Bellezze, T., Malavolta, M., Quaranta, A., Ruffini, N., & Roventi, G. (2006). "Corrosion behaviour in concrete of three differently galvanized steel bars". Cement and Concrete Composites, 28(3), 246-255.
 4. Ngugi, H. N., Mutuku, R. N., & Gariy, Z. A. (2014). "Effects of sand quality on compressive strength of concrete: A case of Nairobi County and its environs", Kenya. Open Journal of Civil Engineering, 4, 255-273.
 5. Hassan, I. H., Abdul-Kareem, O. M., & Shihab, A. Y. (2014). "Effect of using well water as mixing water in concrete". Al-Rafidain Eng J, 22(5), 17-28.
 6. Ramezani-pour, A. A., & Malhotra, V. M. (1995). "Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume". Cement and concrete composites, 17(2), 125-133.
 7. Lekha, K., & Vanreyk, A. J. (2017). "Zeolite Addition on Concrete Sustainability-a Review". Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ, 3(2), 5578-5582.

- دریایی خورنده شدید بر حسب موقعیت قرارگیری بتن نسبت به تراز آب‌دریا». نشریه علمی- پژوهشی مهندسی دریا ۵ (۱۰)، ۷۷-۸۷.
30. ISRM (1979). "Suggested method for determining water content, porosity, density, absorption and related prop/erties, and swelling and slake durability index properties", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 16, 141-156.
31. Basnett, A., Sharma, P., Krishnaraj, L., & Ravichandran, P. T. (2020, August). "Characterization of zeolite influence to improve the performance of concrete". In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 912, No. 6, p. 062054). IOP Publishing.
32. Patil, J., & Pendharkar, U. (2016). "Study of effect of nanomaterials as cement replacement on physical properties of concrete". Int. Res. J. Eng. Technol, 3, 300-308.
۳۳. سعیدی رضوی، بهزاد؛ روحانی، سیدمحمد؛ شیری، مجتبی و مهدی‌خانی، بهزاد. (۱۳۹۹). «تاثیر زئولیت بر مقاومت تراکمی، نفوذپذیری و مقاومت در برابر حملات یون کلر در بتن»، نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران ۱۳ (۳)، ۳۵-۴۹.
34. Gren, W., Parker, S. C., Slater, B., & Lewis, D. W. (2010). "Structure of zeolite A (LTA) surfaces and the zeolite A/water interface". The Journal of Physical Chemistry C, 114(21), 9739-9747.
35. ISRM (1978). "Suggested methods for determining sound velocity", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15, 53-58.
۳۶. حسینی، مهدی. (۱۳۸۶) «مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ»، انتشارات ایده گستر، قم، ۱۰-۲۵.
37. Li, X., He, J., Meng, M., Yoneyama, Y., & Tsubaki, N. (2009). "One-step synthesis of H-β zeolite-enwrapped Co/Al₂O₃ Fischer-Tropsch catalyst with high spatial selectivity". Journal of Catalysis, 265(1), 26-34.
38. Yang, S., Vlessidis, A. G., & Evmiridis, N. P. (1997). "Synthesis of zeolites in the system Na₂O-SiO₂-Al₂O₃-H₂O-glycerol". Microporous materials, 9(5-6), 273-286.
39. Nazari, A., & Riahi, S. (2011). "RETRACTED: Al₂O₃ nanoparticles in concrete and different curing media". Journal enery and buildings, 43(6), 1480-1488.
- Environment, 13(1), 185-200.
19. Ye, H., Jin, X., Fu, C., Jin, N., Xu, Y., & Huang, T. (2016). "Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation". Construction and Building Materials, 112, 457-463.
20. Ramezaniapour, A. M., & Hooton, R. D. (2013). "Thaumasite sulfate attack in Portland and Portland-limestone cement mortars exposed to sulfate solution". Construction and Building Materials, 40, 162-173.
21. Chalah, L., & Talah, A. (2022). "Permeability of High-Performance Fiber Reinforced Concrete Immersed in High Concentration Sodium Chloride Solution". Periodica Polytechnica Civil Engineering, 66(2), 541-552.
۲۲. سازمان ملی استاندارد ایران، (۱۳۹۴). «سنگدانه های بتن-ویژگی ها»، استاندارد شماره ۳۰۲.
23. Zahiri, F., & Eskandari-Naddaf, H. (2019). "Optimizing the compressive strength of concrete containing micro-silica, nano-silica, and polypropylene fibers using extreme vertices mixture design". Frontiers of Structural and Civil Engineering, 13(4), 821-830.
24. Zareei, S. A., Ameri, F., Shoaee, P., & Bahrami, N. (2019). "Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study". Construction and Building Materials, 201, 11-32.
25. Ramesh, B. A., & Kondraivendhan, B. (2020). "Effect of accelerated carbonation on the performance of concrete containing natural zeolite". Journal of Materials in Civil Engineering, 32(4), 04020037
26. ISRM (1979). "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 16, 138-140.
۲۷. سازمان ملی استاندارد ایران، (۱۳۹۲). «اتاق اختلاط، محفظه رطوبت، اتاق رطوبت و حوضچه‌های آب مورد استفاده در آزمون سیمان هیدرولیکی و بتن‌ها»، استاندارد شماره ۱۷۰۴۰.
28. ISRM (1978). "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 15, 99-103.
۲۹. محمودی، امین؛ افشین، حسن؛ حکیم‌زاده، حبیب؛ جلالی و حید، داود. (۱۳۸۸). «بررسی دوام بتن مسلح در محیط