



## تحلیل آزمایشگاهی دوام و رفتار مکانیکی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در محیط های سولفاتی

## با رویکرد کاهش مصرف سیمان و حفاظت از محیط زیست

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران

کرار عبدالامیر ناهی

استادیار گروه عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران

محمد امیر شرافتی\*

کارشناس ارشد عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران

هادی فاطمی

## چکیده مبسوط

**مقدمه:** در سال های اخیر، صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از بزرگترین مصرف کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه ای شناخته شده است. یکی از مهم ترین مصالح مورد استفاده در این صنعت، سیمان پرتلند است که تولید آن نیازمند مصرف قابل توجهی از انرژی بوده و گاز دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) یکی از اصلی ترین گازهای گلخانه ای را به جو آزاد می کند. این مسئله نه تنها کیفیت هوا و سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می دهد، بلکه باعث تشدید گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی نیز می شود. علاوه بر این، تولید سیمان به شدت به مواد اولیه ای مانند سنگ آهک و خاک رس وابسته است و استخراج بی رویه این مواد منجر به کاهش منابع طبیعی غیرقابل تجدید و تهدید پایداری زیست محیطی می شود.

**مواد و روش ها:** هدف پژوهش بررسی تأثیر جایگزینی جزئی سیمان با متاکائولن در بتن خودتراکم (SCC) و ارزیابی عملکرد این بتن در محیط های خورنده غنی از یون سولفات بود. برای این منظور، نمونه های بتن خودتراکم با سه سطح جایگزینی متاکائولن (۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ وزنی سیمان) تهیه شدند. به منظور شبیه سازی شرایط خورنده محیطی، نمونه ها در معرض چهار محلول سولفات مختلف قرار گرفتند که حاوی یون های سولفات حاصل از سولفات سدیم ( $Na_2SO_4$ )، سولفات منیزیم ( $MgSO_4$ )، سولفات کلسیم ( $CaSO_4$ ) و سولفات آمونیوم ( $(NH_4)_2SO_4$ ) بودند. این یون ها به دلیل اثرات مخربشان بر سازه های بتنی، به ویژه در محیط های صنعتی و دریایی انتخاب تا مقاومت بتن تحت شرایط واقعی تر ارزیابی شود.

**نتایج و بحث:** نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از متاکائولن تأثیر مثبتی بر ویژگی های بتن خودتراکم دارد. در میان نمونه های مورد بررسی، مخلوط حاوی ۱۵٪ متاکائولن بهترین عملکرد را نشان داد. این مخلوط افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد (فاقد متاکائولن) داشت. همچنین جذب آب کاهش یافت که نشان دهنده کاهش تخلخل و افزایش تراکم ریزساختار بتن است. تصاویر SEM پیوستگی بیشتر و خلل و فرج کمتر را در ساختار داخلی بتن تأیید کردند. بتن حاوی ۱۵٪ متاکائولن همچنین مقاومت بیشتری در برابر محیط های سولفاتی، به ویژه در برابر یون های منیزیم و آمونیوم، از خود نشان داد و خرابی سطحی و ترک خوردگی کمتری مشاهده شد. علاوه بر این، جایگزینی جزئی سیمان با متاکائولن باعث کاهش انتشار  $CO_2$  در فرآیند تولید بتن گردید که نقش مؤثری در کاهش تأثیرات زیست محیطی این ماده پرمصرف ساختمانی دارد. آزمایش های مقاومت فشاری در سنین مختلف نشان داد که مخلوط ۱۵٪ متاکائولن نه تنها در سن ۲۸ روزه، بلکه در سنین زود هنگام (۷ روز) و بلندمدت (۹۰ روز) عملکرد بهتری دارد که بیانگر واکنش پذیری پوزولانی مطلوب و توسعه مناسب ریزساختار در بلندمدت است. کاهش جذب آب نیز نشان دهنده نفوذپذیری کمتر به یون های مهاجم و در نتیجه کاهش تخریب در طول زمان می باشد. تحلیل تنش-کرنش نشان داد که نمونه های حاوی متاکائولن دارای سختی (مدول الاستیسیته) بالاتری هستند که نشان دهنده مقاومت بیشتر بتن در برابر تغییر شکل های ناگهانی تحت بارهای متناوب است.

**نتیجه گیری:** بر اساس نتایج به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که استفاده بهینه از ۱۵٪ متاکائولن نه تنها خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم را در برابر حمله یون های سولفات بهبود می بخشد، بلکه نقش مهمی در کاهش آلودگی زیست محیطی از طریق کاهش مصرف سیمان ایفا می کند. استفاده از متاکائولن با رویکردهای توسعه پایدار همسو بوده و می تواند عمر مفید سازه ها را در شرایط محیطی سخت افزایش دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲

## واژه های کلیدی: بتن

خودتراکم، متاکائولن، دوام بتن، کاهش انتشار  $CO_2$ ، توسعه پایدار، خوردگی سولفات

نویسنده مسئول: محمد امیر شرافتی

نشانی: استادیار گروه عمران، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، ایران. تلفن: ۰۹۱۷۳۸۷۰۰۱۴. پست الکترونیکی: MA.Sherafati@iau.ac.ir

استاد: عبدالامیر ناهی کرار، شرافتی محمد امیر، فاطمی هادی. تحلیل آزمایشگاهی دوام و رفتار مکانیکی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در محیط های سولفاتی با رویکرد کاهش مصرف سیمان و حفاظت از محیط زیست. پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست. ۱۴۰۴؛ ۹(۳): ۷۲-۵۲.

حقوق نویسندگان محفوظ است. این مقاله با دسترسی آزاد و تحت مجوز مالکیت خلاقانه <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0> در فصلنامه پژوهش های نوین در مهندسی محیط زیست منتشر شده است. هرگونه استفاده غیرتجاری فقط با استناد و ارجاع به اثر اصلی مجاز است.



## مقدمه

ترکیب می‌تواند کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت فشاری و بهبود رفتار تنش-کرنش بتن را در پی داشته باشد. بتن خودمتراکم نوعی بتن با قابلیت جریان‌پذیری بالا است که بدون نیاز به لرزاننده‌های مکانیکی، قالب را پر کرده و متراکم می‌شود. این بتن دارای خواص رئولوژیکی ویژه‌ای است که از جمله آن‌ها می‌توان به گرانروی مناسب، قابلیت عبور از موانع و حفظ همگنی در طول اجرا اشاره کرد. از مهم‌ترین مزایای بتن خودمتراکم می‌توان به افزایش کیفیت سطحی، کاهش نیروی انسانی، بهبود دوام و کاهش نفوذپذیری اشاره کرد. این بتن در پروژه‌های با تراکم زیاد آرماتور، سازه‌های زیرزمینی و پروژه‌های زیرآبی کاربرد گسترده‌ای دارد. متاکائولن یک نوع پوزولان فعال است که از کلسینه کردن کائولن در دمای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. این ماده به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان در بتن استفاده می‌شود و تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی، دوام و رئولوژی بتن دارد. یکی از چالش‌های مهم در دوام بتن، حملات سولفاتی است. سولفات‌ها به‌طور طبیعی در خاک، آب‌های زیرزمینی، فاضلاب صنعتی و برخی محیط‌های دریایی وجود دارند. تماس مداوم بتن با این ترکیبات می‌تواند موجب تخریب ساختار آن و کاهش مقاومت مکانیکی شود (احمدی و همکاران ۱۳۹۶، ۱۴۰۱).

## فرضیات تحقیق:

- افزودن میزان بهینه پوزولان طبیعی (متاکائولن) به بتن خودمتراکم، باعث کاهش نفوذ یون کلر و میزان جذب آن در بتن می‌شود.
- افزودن متاکائولن در درصد بهینه، مقاومت بتن خودمتراکم را در محیط سولفات افزایش می‌دهد.
- بهبود مقاومت و دوام بتن خودمتراکم با افزودن درصد بهینه متاکائولن در محیط‌های خورنده سولفاتی حاصل می‌شود.
- میزان تنش و کرنش بتن خودمتراکم با افزودن متاکائولن بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند.

## اهداف تحقیق:

- تعیین درصد بهینه جایگزینی متاکائولن طبیعی در بتن خودمتراکم جهت دستیابی به حداکثر مقاومت مکانیکی و دوام در برابر محیط‌های سولفاتی.
- بررسی تأثیر جایگزینی متاکائولن بر کاهش نفوذپذیری و جذب یون‌های کلر در بتن خودمتراکم.

افزایش مصرف مصالح ساختمانی سنتی، به‌ویژه سیمان پرتلند، در دهه‌های اخیر منجر به تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات منفی زیست‌محیطی شده است (ژانگ و همکاران ۲۰۲۴). طبق گزارش IPCC (هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم)، حدود ۷ تا ۸ درصد از کل انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن به صنعت سیمان اختصاص دارد. از منظر زیست‌محیطی، کاهش مصرف سیمان به واسطه جایگزینی آن با متاکائولن، منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه CO<sub>2</sub> و کاهش استخراج منابع غیرتجدیدپذیر می‌شود. این راهکار در راستای اصول توسعه پایدار، به‌ویژه هدف شماره ۹ (زیرساخت‌های مقاوم و پایدار)، هدف شماره ۱۱ (شهرها و جوامع پایدار) و هدف شماره ۱۳ (مقابله با تغییرات اقلیمی) از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد قرار دارد (بخشی و همکاران ۲۰۲۱). علاوه بر این، کاهش عمر سازه‌های بتنی در اثر تأثیرات منفی یون‌های سولفات، موجب تشدید این روند می‌گردد. با توجه به نقش کلیدی صنعت ساخت‌وساز در آلودگی زیست‌محیطی، توسعه مصالح پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست به‌عنوان یک ضرورت جهانی مطرح شده است. یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی بتن، استفاده از مواد پوزولانی جایگزین سیمان است. در این میان، متاکائولن به‌عنوان یک پوزولان فعال، با ساختار ریزدانه و واکنش‌پذیری بالا، قابلیت بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن را داراست. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از سیمان با متاکائولن می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید CO<sub>2</sub> و ارتقاء ریزساختار بتن شود (رمضان‌پور و همکاران ۱۳۹۳). این ویژگی‌ها باعث شده است متاکائولن به‌عنوان یک گزینه مطلوب در تولید بتن پایدار و کم‌کربن شناخته شود. بتن خودتراکم (SCC) نیز به‌دلیل روانی بالا و عدم نیاز به ویبره، علاوه بر کاهش آلودگی صوتی و مصرف انرژی، در افزایش کیفیت ساخت‌وساز نقش مهمی ایفا می‌کند. با این حال، دوام این نوع بتن در محیط‌های مهاجم، به‌ویژه در برابر حملات سولفاتی، یک نگرانی اساسی به‌شمار می‌رود. یون‌های سولفاتی با ترکیبات هیدراته شده سیمان واکنش داده و منجر به تشکیل فازهای مخربی نظیر اترینگایت و ژپیس می‌شوند که در نهایت باعث ترک‌خوردگی، افزایش تخلخل و کاهش عمر مفید سازه می‌گردند (نادری و همکاران ۱۴۰۱). تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از متاکائولن در بتن خودتراکم می‌تواند مقاومت بتن در برابر حملات سولفاتی را به‌طور معناداری افزایش دهد، به‌ویژه هنگامی که درصد بهینه‌ای از جایگزینی لحاظ شود. همچنین، این

تحلیل رفتار تنش-کرنش بتن خودمتراکم حاوی متاکائولن در شرایط حمله سولفاتی. ارزیابی نقش متاکائولن در بهبود ریزساختار و افزایش طول عمر بتن خودمتراکم با رویکردی محیط‌زیستی و توسعه پایدار.

### مواد و روش‌ها

غلظت ۵ درصد قرار داده شد (شکل ۲). آزمایشات در سه بازه زمانی ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه انجام پذیرفت و نتایج استخراج گردید. پس از این مرحله جهت بررسی ریز ساختار از میکروسکوپ الکترونی استفاده می‌شود. در جدول ۱، لیست نمونه‌های بتن خودمتراکم ساخته شده با چهار درصد مختلف متاکائولن (۰٪، ۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪) در چهار محیط سولفاتی مختلف (سولفات سدیم، سولفات منیزیم، سولفات کلسیم و سولفات آمونیوم) ارائه شده است. کد نمونه شامل پیشوند "SC" به همراه درصد متاکائولن و محیط سولفاتی S1 تا S4 است.

در این تحقیق بررسی منحنی تنش و کرنش و بهبود دوام بتن خودمتراکم آزمایشگاهی حاوی پوزولان طبیعی متاکائولن در محیط‌های سولفاتی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا طرح اختلاط بتن خود متراکم تهیه گردید. متاکائولن با درصدهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد وزنی جایگزین سیمان مصرفی جهت ساخت بتن خودمتراکم استفاده گردید. در هر مرحله خواص بتن تازه مورد بررسی قرار گرفته شد. جهت آزمایش تنش و کرنش از نمونه استوانه‌ای  $15 \times 30$  سانتی‌متر، جهت آزمایش تست یون کلر تسریع شده از استوانه  $20 \times 10$  سانتی‌متر و جهت تست جذب آب از نمونه مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  استفاده گردید (شکل ۱). پس از ساخت نمونه‌ها در چهار مخزن با محلول‌های مختلف سولفات با



شکل ۱- نمونه‌ها قبل از قرار گرفتن در محلول سولفات



شکل ۲- نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در محلول سولفات

جدول ۱- معرفی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی درصد‌های مختلف متاکائولن در چهار محیط سولفاتی

| توضیحات                                           | محیط سولفاتی   | درصد متاکائولن<br>(بر حسب درصد سیمان) | کد نمونه |
|---------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------|----------|
| نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات سدیم     | سولفات سدیم    | ٪۰                                    | SC-01-c1 |
| نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات منیزیم   | سولفات منیزیم  | ٪۰                                    | SC-01-m2 |
| نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات کلسیم    | سولفات کلسیم   | ٪۰                                    | SC-01-k3 |
| نمونه مرجع بدون متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم  | سولفات آمونیوم | ٪۰                                    | SC-01-a4 |
| مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات سدیم     | سولفات سدیم    | ٪۵                                    | SC-02-c1 |
| مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات منیزیم   | سولفات منیزیم  | ٪۵                                    | SC-02-m2 |
| مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات کلسیم    | سولفات کلسیم   | ٪۵                                    | SC-02-k3 |
| مخلوط بتن با ٪۵ متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم  | سولفات آمونیوم | ٪۵                                    | SC-02-a4 |
| مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات سدیم    | سولفات سدیم    | ٪۱۵                                   | SC-03-c1 |
| مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات منیزیم  | سولفات منیزیم  | ٪۱۵                                   | SC-03-m2 |
| مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات کلسیم   | سولفات کلسیم   | ٪۱۵                                   | SC-03-k3 |
| مخلوط بتن با ٪۱۵ متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم | سولفات آمونیوم | ٪۱۵                                   | SC-03-a4 |
| مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات سدیم    | سولفات سدیم    | ٪۲۵                                   | SC-04-c1 |
| مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات منیزیم  | سولفات منیزیم  | ٪۲۵                                   | SC-04-m2 |
| مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات کلسیم   | سولفات کلسیم   | ٪۲۵                                   | SC-04-k3 |
| مخلوط بتن با ٪۲۵ متاکائولن در محیط سولفات آمونیوم | سولفات آمونیوم | ٪۲۵                                   | SC-04-a4 |

### آزمایش مقاومت فشاری و میزان تنش و کرنش

آزمایش مقاومت فشاری بتن یکی از مهم‌ترین آزمایشات در ارزیابی کیفیت بتن است. در این آزمایش نمونه‌های بتن به شکل مکعب یا استوانه‌ای ساخته شدند. پس از ریختن بتن در قالب‌ها، نمونه‌ها باید به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شوند. سپس، نمونه‌ها برای عمل‌آوری به مدت ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روز در محلول ۵ درصد سولفات متفاوت نگهداری گردیدند. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، نمونه‌های بتن در دستگاه فشار قرار می‌گیرند. دستگاه فشار نیروی فشاری را به‌طور یکنواخت و با سرعت مشخص به نمونه بتن وارد می‌کند. و پس از شکست نمونه‌ها میزان نهایی نیرو و میزان تغییر طول مشخص گردید.

### آزمایش درصد جذب آب

آزمایش جذب آب یکی از روش‌های مهم برای ارزیابی دوام و نفوذپذیری بتن است. میزان جذب آب در بتن به کیفیت و تراکم ساختار آن بستگی دارد. نمونه‌های بتنی (مکعبی) پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه تهیه می‌شود. نمونه‌ها را در گرم‌خانه با دمای ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار می‌دهند تا رطوبت آن‌ها کاملاً تبخیر شود. سپس نمونه‌ها را وزن کرده و

مقدار آن را به‌عنوان وزن خشک ثبت می‌کنند. سپس نمونه‌ها در یک ظرف حاوی آب مقطر قرار می‌گیرند. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب می‌مانند. پس از این مدت، نمونه‌ها را از آب خارج کرده و با یک پارچه مرطوب سطح آن‌ها را تمیز می‌کنند. وزن نمونه‌ها را مجدداً اندازه‌گیری کرده و مقدار آن را به‌عنوان وزن اشباع ثبت شد.

### آزمایش RCMT (آزمایش تسریع‌شده مهاجرت یون کلر)

آزمایش RCMT<sup>۳</sup> یکی از روش‌های تسریع‌شده برای اندازه‌گیری میزان نفوذ یون کلر در بتن است. نمونه‌های بتنی مطابق استاندارد تهیه شده و در شرایط استاندارد ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه عمل‌آوری می‌شوند. سطح بتن صاف و تمیز شده و برای قرارگیری در سلول آزمایش آماده می‌شود. نمونه استوانه‌ای بتن بین دو مخزن حاوی محلول NaCl و NaOH قرار داده شد. ولتاژ ۱۰ تا ۶۰ ولت بین دو الکترود اعمال می‌شود. پس از ۶ ساعت، نمونه بتن از دستگاه خارج شده و برش داده می‌شود. عمق نفوذ یون کلر با استفاده از محلول نیتрат نقره ( $AgNO_3$ ) مشخص می‌شود. رنگ محلول نیترات نقره نشان‌دهنده مرز نفوذ یون کلر است.

### میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FE-SEM)

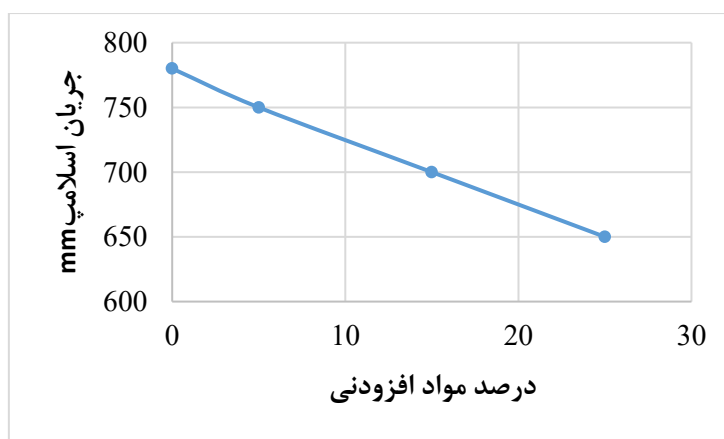
میکروسکوپ الکترونی (رویشی) گسیل میدانی<sup>۴</sup> با ویژگی محفظه بسیار بزرگ و سرعت خلاء بالا یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین دستگاه FESEM موجود در است. اساس کار این میکروسکوپ به این شکل است که از طریق تفنگ الکترونی، باریکه‌ای از الکترون‌ها ساطع می‌شوند و این پرتو با عبور از لنزهای مختلف،

### نتایج و بحث

نتایج آزمایش اسلامپ و کارپذیری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۲ و شکل ۳ استخراج گردید.

جدول ۲- نتایج آزمایش جریان اسلامپ

| ردیف | درصد متاکائولن | جریان اسلامپ (mm) | زمان T50 ثانیه | تحلیل نتایج                                              |
|------|----------------|-------------------|----------------|----------------------------------------------------------|
| ۱    | ۰٪             | ۷۸۰               | ۲-۳            | روانی بسیار خوب، بدون افزایش چسبندگی                     |
| ۲    | ۵٪             | ۷۵۰               | ۲/۵-۴          | کمی کاهش روانی، افزایش مقاومت فشاری، کارایی مناسب        |
| ۳    | ۱۵٪            | ۷۰۰               | ۳-۵            | کاهش بیشتر روانی، افزایش گرانروی، نیاز به فوق روان کننده |
| ۴    | ۲۵٪            | ۶۵۰               | ۵-۷            | کاهش شدید روانی، سختی در اجرا، نیاز به اصلاح طرح اختلاط  |



شکل ۳ - نمودار نتایج آزمایش جریان اسلامپ

### تفسیر آزمایش جریان اسلامپ

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار مواد افزودنی از صفر درصد (بتن بدون افزودنی) تا حدود ۲۵ درصد، میزان جریان‌پذیری به صورت خطی و یکنواخت کاهش یافته است. به عبارتی، افزودن مواد باعث کاهش روانی و قابلیت جریان بتن خودتراکم شده است. در حالت بدون افزودنی، جریان‌پذیری حدود ۰/۹۵ میلی‌متر است که نسبتاً بالاترین مقدار است. با افزایش افزودنی‌ها، جریان‌پذیری به حدود ۰/۷ میلی‌متر در ۲۵ درصد مواد می‌رسد که کاهش قابل توجهی است. کاهش جریان‌پذیری با افزایش درصد مواد افزودنی می‌تواند به دلیل افزایش چسبندگی مخلوط، افزایش ریزدانه‌ها، یا

تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی بتن باشد. مواد افزودنی مانند متاکائولن معمولاً باعث افزایش چسبندگی و کاهش روانی می‌شوند که این امر می‌تواند بر قابلیت جریان بتن تاثیر بگذارد. جریان‌پذیری مناسب برای بتن خودتراکم اهمیت حیاتی دارد تا بتن بتواند بدون نیاز به ویبره به راحتی در قالب‌ها جاری شود و تمام فضاهای قالب را پر کند. کاهش زیاد جریان‌پذیری می‌تواند باعث مشکلاتی در اجرای بتن شود، از جمله نیاز به افزودنی‌های روان کننده بیشتر یا تغییر در ترکیب مخلوط شود. در شکل ۴ آزمایش جریان اسلامپ نشان داده شده است.



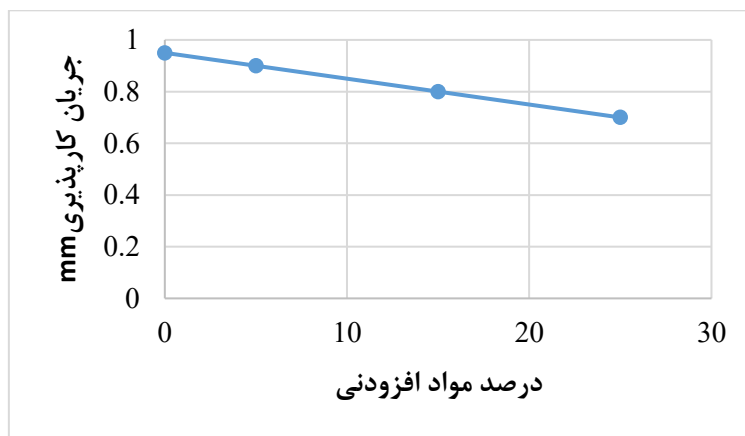
شکل ۴ - آزمایش جریان اسلامپ

## نتایج آزمایش L BOX

نتایج میزان کارپذیری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۳ و شکل ۵ حاصل شده است.

جدول ۳ - نتایج آزمایش L BOX

| ردیف | درصد متاکائولن | نسبت انسداد H2/H1 | تحلیل نتایج                                            |
|------|----------------|-------------------|--------------------------------------------------------|
| ۱    | ۰٪             | ۰/۹۵              | جریان مناسب، انسداد کم                                 |
| ۲    | ۵٪             | ۰/۹۰              | کاهش جزئی روانی، اما هنوز در محدوده استاندارد          |
| ۳    | ۱۵٪            | ۰/۸۰              | افزایش چسبندگی، احتمال انسداد میلگردها                 |
| ۴    | ۲۵٪            | ۰/۷۰              | بتن به سختی از میان میلگردها عبور می‌کند، مشکل در اجرا |



شکل ۵ - نمودار آزمایش L BOX

## تفسیر آزمایش آزمایش L BOX

نمودار بالا تأثیر درصد متاکائولن بر نسبت انسداد (H2/H1) در آزمون L-Box بتن خودتراکم را نشان می‌دهد. این نسبت شاخصی برای قابلیت عبور بتن از میان میلگردهاست و هرچه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده روانی و عبورپذیری بهتر بتن است.

- درصد متاکائولن ۰٪: بتن دارای روانی عالی است و به راحتی از بین میلگردها عبور می‌کند. عملکرد ایده‌آل برای بتن خودتراکم در اجراهای پیچیده.

- درصد متاکائولن ۵٪: کاهش جزئی در روانی دیده می‌شود اما همچنان در محدوده قابل قبول استاندارد (۰/۸-۰/۹) است.

- درصد متاکائولن ۱۵٪: به مرز پایین استاندارد روانی نزدیک شده است. نشانه‌هایی از افزایش چسبندگی و احتمال انسداد مشاهده می‌شود.

– درصد متاکائولن ۲۵٪: افت چشم‌گیر در روانی بتن. بتن. در شکل ۶ آزمایش L BOX نشان داده شده است. به‌سختی از میان میلگردها عبور می‌کند.



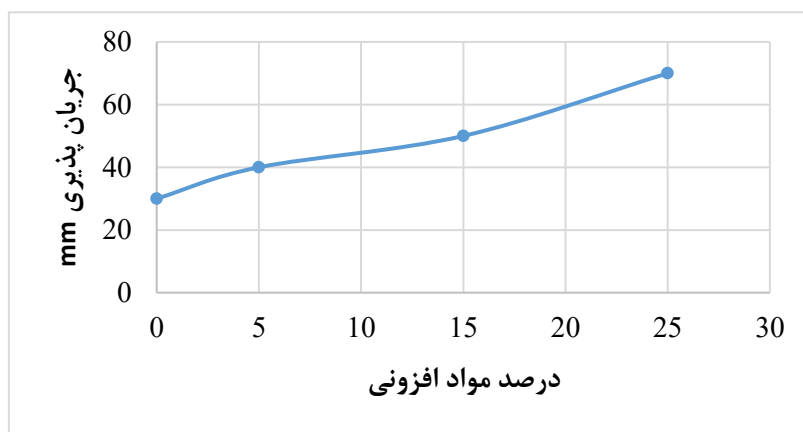
شکل ۶ – آزمایش L BOX

#### نتایج آزمایش U BOX

نتایج میزان کارپذیری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۴ و شکل ۷ می‌باشند.

جدول ۴ – نتایج آزمایش U BOX

| ردیف | درصد متاکائولن | H <sub>fill</sub> (mm) | تحلیل نتایج                                    |
|------|----------------|------------------------|------------------------------------------------|
| ۱    | ۰٪             | ۳۰                     | پرشدگی مناسب                                   |
| ۲    | ۵٪             | ۴۰                     | روانی کمی کمتر، اما پرشدگی خوب                 |
| ۳    | ۱۵٪            | ۵۰                     | افزایش چسبندگی، پرشدگی دشوار                   |
| ۴    | ۲۵٪            | ۷۰                     | بتن کاملاً چسبنده و سخت در عبور، نیاز به اصلاح |



شکل ۷ – نمودار آزمایش U BOX

شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد متاکائولن در بتن خودتراکم، ارتفاع پرشدگی در آزمون U-box نیز به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. افزایش درصد متاکائولن، باعث کاهش روانی و افزایش چسبندگی بتن شده و در نتیجه عبور بتن از میان میلگردها

#### تفسیر آزمایش آزمایش U BOX

جلوگیری شود. درصد بهینه برای استفاده در بتن خودتراکم، در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد توصیه می‌شود. در شکل ۸ آزمایش L BOX نشان داده شده است.

دشوارتر می‌شود. بنابراین، هرچند متاکائولن برای دوام مفید است، اما مصرف آن باید به صورت کنترل شده و با افزودنی مناسب (مانند فوق روان کننده‌ها) تنظیم شود تا از بروز مشکلات اجرایی



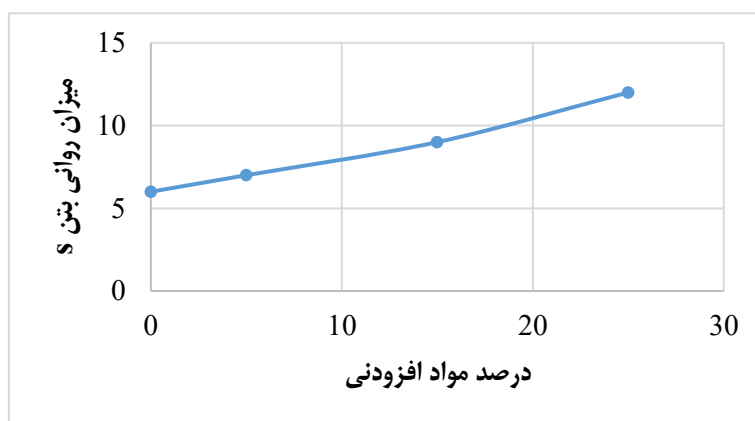
شکل ۸ - آزمایش L BOX

#### نتایج آزمایش V BOX

نتایج میزان روانی بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن مطابق جدول ۵ و شکل ۹ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش V BOX

| نمونه      | درصد متاکائولن | T_flow ثانیه | تحلیل نتایج                             |
|------------|----------------|--------------|-----------------------------------------|
| نمونه شاهد | ۰٪             | ۶            | جریان روان، گرانیروی مناسب              |
| نمونه ۱    | ۵٪             | ۷            | کمی افزایش گرانیروی اما همچنان مطلوب    |
| نمونه ۲    | ۱۵٪            | ۹            | افزایش گرانیروی، احتمال مشکل در پمپ شدن |
| نمونه ۳    | ۲۵٪            | ۱۲           | جریان بسیار کند، احتمال انسداد          |



شکل ۹ - نمودار آزمایش V BOX

#### تفسیر آزمایش آزمایش V BOX

با افزایش درصد متاکائولن، گرانیروی نمونه‌ها افزایش یافته و زمان لازم برای جریان سیال بیشتر می‌شود. این تغییرات باعث کاهش

قابلیت پمپ شدن و احتمال گرفتگی سیستم می‌گردد. بنابراین، درصد متاکائولن باید در حد معقولی نگه داشته شود تا از مشکلات عملکردی جلوگیری شود.

– **نمونه شاهد (۰٪ متاکائولن):** زمان جریان ۶ ثانیه است که نشان‌دهنده جریان روان و گرانروی مناسب می‌باشد. یعنی سیال به راحتی جریان دارد و مشکلی در پمپ شدن ندارد.

– **نمونه ۱ (۵٪ متاکائولن):** زمان جریان به ۷ ثانیه افزایش یافته که کمی گرانروی بیش‌تر را نشان می‌دهد. با این وجود، گرانروی هنوز در حد مطلوب است و جریان سیال بدون مشکل ادامه دارد.

– **نمونه ۲ (۱۵٪ متاکائولن):** زمان جریان به ۹ ثانیه رسیده که افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد دارد. این افزایش گرانروی می‌تواند باعث ایجاد مشکل در پمپ شدن سیال شود و احتمال ایجاد انسداد جزئی وجود دارد.

– **نمونه ۳ (۲۵٪ متاکائولن):** زمان جریان به ۱۲ ثانیه افزایش یافته که نشان‌دهنده جریان بسیار کند و گرانروی بالا است. این وضعیت احتمال انسداد و مشکلات جدی در پمپ شدن را بسیار زیاد می‌کند. در شکل ۱۰ آزمایش V BOX نشان داده شده است.



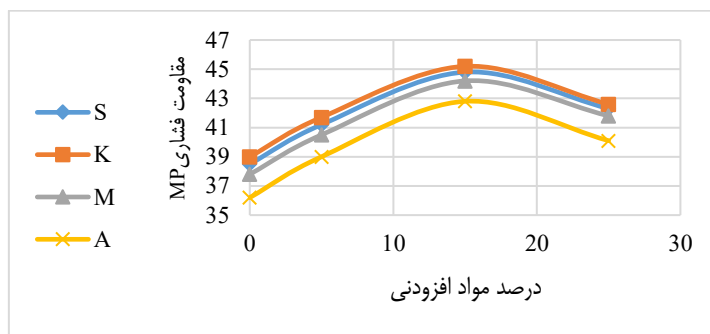
شکل ۱۰ – آزمایش V BOX

#### آزمایش مقاومت فشاری

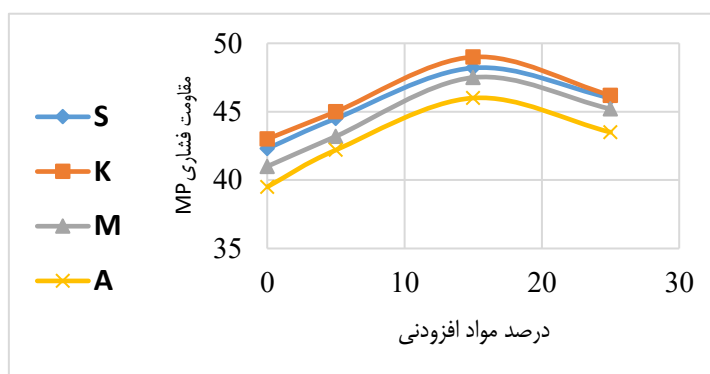
نتایج مقاومت فشاری بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵ و ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در سه بازه زمانی ۲۸ و ۹۰ و ۱۲۰ روزه در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۶ و اشکال ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ آرایه می‌گردند.

جدول ۶ – نتایج آزمایش مقاومت فشاری (MPa)

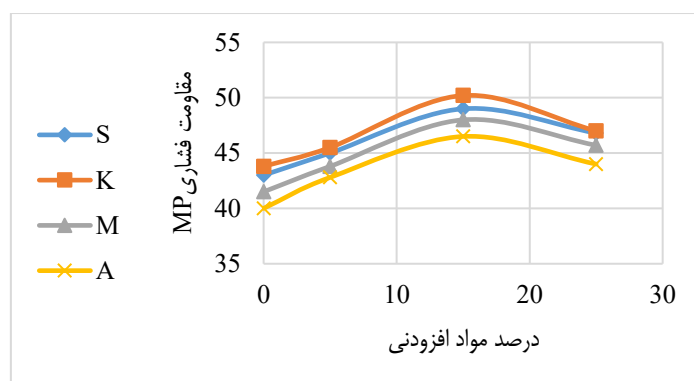
| ردیف | محیط سولفاتی   | درصد متاکائولن | روز ۲۸ | روز ۹۰ | روز ۱۲۰ |
|------|----------------|----------------|--------|--------|---------|
| ۱    | سولفات سدیم    | ۰٪             | ۳۸/۵   | ۴۲/۳   | ۴۳      |
| ۲    |                | ۵٪             | ۴۱/۲   | ۴۴/۵   | ۴۵      |
| ۳    |                | ۱۵٪            | ۴۴/۸   | ۴۸/۲   | ۴۹      |
| ۴    |                | ۲۵٪            | ۴۲/۳   | ۴۶     | ۴۶/۸    |
| ۵    | سولفات کلسیم   | ۰٪             | ۳۹     | ۴۳     | ۴۳/۸    |
| ۶    |                | ۵٪             | ۴۱/۷   | ۴۵     | ۴۵/۵    |
| ۷    |                | ۱۵٪            | ۴۵/۲   | ۴۹     | ۵۰/۲    |
| ۸    |                | ۲۵٪            | ۴۲/۶   | ۴۶/۲   | ۴۷      |
| ۹    | سولفات منیزیم  | ۰٪             | ۳۷/۸   | ۴۱     | ۴۱/۵    |
| ۱۰   |                | ۵٪             | ۴۰/۵   | ۴۳/۲   | ۴۳/۸    |
| ۱۱   |                | ۱۵٪            | ۴۴/۲   | ۴۷/۵   | ۴۸      |
| ۱۲   |                | ۲۵٪            | ۴۱/۸   | ۴۵/۲   | ۴۵/۷    |
| ۱۳   | سولفات آمونیوم | ۰٪             | ۳۶/۲   | ۳۹/۵   | ۴۰      |
| ۱۴   |                | ۵٪             | ۳۹     | ۴۲/۲   | ۴۲/۸    |
| ۱۵   |                | ۱۵٪            | ۴۲/۸   | ۴۶     | ۴۶/۵    |
| ۱۶   |                | ۲۵٪            | ۴۰/۱   | ۴۳/۵   | ۴۴      |



شکل ۱۱ - نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه



شکل ۱۲ - نمودار مقاومت فشاری ۹۰ روزه



شکل ۱۳ - نمودار مقاومت فشاری ۱۲۰ روزه

- کاهش متوسط در محیط سولفات منیزیم به دلیل تخریب بتن به دلیل جایگزینی یون‌های کلسیم با منیزیم و تشکیل ترکیباتی که باعث کاهش چسبندگی و مقاومت بتن می‌شود.  
- کم‌ترین تأثیر مخرب و کم‌ترین کاهش مقاومت در محیط سولفات کلسیم مشاهده شد، در نتیجه سولفات کلسیم برخلاف سایر سولفات‌ها واکنش‌های تخریبی کم‌تری با بتن دارد.  
همچنین تغییرات مقاومت در بازه‌های زمانی مختلف به شرح زیر است:

نتایج حاصل از مقاومت فشاری را به صورت زیر می‌توان تفسیر نمود:

- بیش‌ترین کاهش مقاومت در محیط سولفات آمونیوم اتفاق می‌افتد. این موضوع می‌تواند به دلیل تخریب شدید و واکنش سولفات آمونیوم با محصولات هیدراتاسیونی، ایجاد ترکیبات ناپایدار و افزایش انبساط داخلی باشد.  
- کاهش قابل توجه مقاومت در محیط سولفات سدیم ناشی از تشکیل اترینگایت<sup>۵</sup> اضافی و گسترش ریزترک‌ها در بتن، که به مرور موجب کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری شد.

## آزمایش درصد جذب آب

نتایج درصد جذب آب در بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در سه بازه زمانی ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۷ و اشکال ۱۴، ۱۵ و ۱۶ می‌باشد.

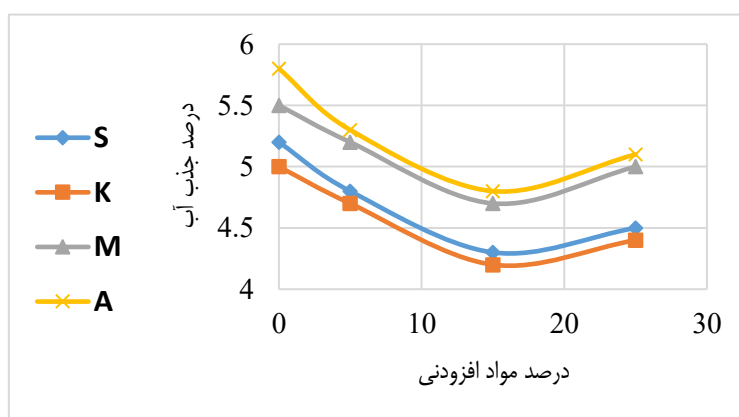
– در سن ۲۸ روزه: مقاومت فشاری اولیه در تمامی نمونه‌ها بالا بود و تأثیر سولفات‌ها هنوز محسوس نبود.

– در سن ۹۰ روزه: اثر مخرب سولفات‌ها، به‌ویژه سولفات آمونیوم و سولفات سدیم، آشکار شد و مقاومت در این محیط‌ها کاهش یافت.

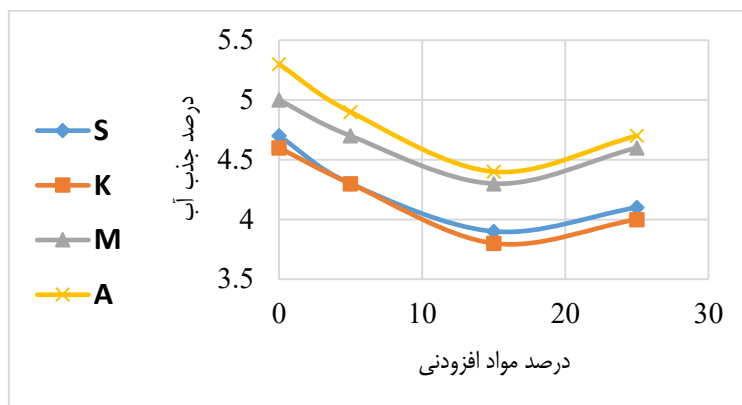
– در سن ۱۲۰ روزه: کاهش مقاومت ادامه یافت، اما نرخ کاهش در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن کمتر از بقیه موارد بود.

جدول ۷- نتایج درصد جذب آب

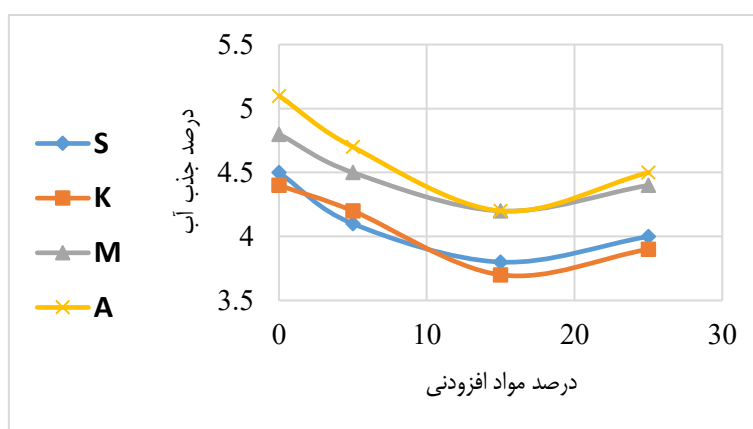
| ردیف | محیط سولفاتی   | درصد متاکائولن | روز ۲۸ | روز ۹۰ | روز ۱۲۰ |
|------|----------------|----------------|--------|--------|---------|
| ۱    | سولفات سدیم    | ٪۰             | ٪۵/۲   | ٪۴/۷   | ٪۴/۷    |
| ۲    |                | ٪۵             | ٪۴/۸   | ٪۴/۳   | ٪۴/۱    |
| ۳    |                | ٪۱۵            | ٪۴/۳   | ٪۳/۹   | ٪۳/۸    |
| ۴    |                | ٪۲۵            | ٪۴/۵   | ٪۴/۱   | ٪۴      |
| ۵    | سولفات کلسیم   | ٪۰             | ٪۵     | ٪۴/۶   | ٪۴/۴    |
| ۶    |                | ٪۵             | ٪۴/۷   | ٪۴/۳   | ٪۴/۲۲   |
| ۷    |                | ٪۱۵            | ٪۴/۲   | ٪۳/۸   | ٪۳/۷    |
| ۸    |                | ٪۲۵            | ٪۴/۴   | ٪۴     | ٪۳/۹    |
| ۹    | سولفات منیزیم  | ٪۰             | ٪۵/۵   | ٪۴     | ٪۴/۸    |
| ۱۰   |                | ٪۵             | ٪۵/۲   | ٪۴/۷   | ٪۴/۵    |
| ۱۱   |                | ٪۱۵            | ٪۴/۷   | ٪۴/۳   | ٪۴/۲    |
| ۱۲   |                | ٪۲۵            | ٪۵     | ٪۴/۶   | ٪۴/۴    |
| ۱۳   | سولفات آمونیوم | ٪۰             | ٪۵/۸   | ٪۵/۳۳  | ٪۵/۱    |
| ۱۴   |                | ٪۵             | ٪۵/۳   | ٪۴/۹   | ٪۴/۷    |
| ۱۵   |                | ٪۱۵            | ٪۴/۸   | ٪۴/۴   | ٪۴/۲    |
| ۱۶   |                | ٪۲۵            | ٪۵/۱   | ٪۴/۷   | ٪۴/۵    |



شکل ۱۴- نمودار درصد جذب آب ۲۸ روزه



شکل ۱۵- نمودار درصد جذب آب ۹۰ روزه



شکل ۱۶- نمودار درصد جذب آب ۱۲۰ روزه

سولفاتى كم‌تر است. سولفات كلسيم اثر مخرب كم‌ترى داشته و ساختار بتن را كم‌تر تخریب می‌نماید. هم‌چنین تغییرات درصد جذب آب در بازه‌های زمانی مختلف این گونه بوده است.

- در سن ۲۸ روزه: جذب آب در تمامی نمونه‌ها نسبتاً پایین بود و تأثیر محیط‌های سولفاتى هنوز شدید نبود.

- در سن ۹۰ روزه: افزایش جذب آب در محیط‌های سولفات آمونیوم و سولفات سدیم مشاهده شد. نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن هم‌چنان جذب آب پایین‌تری داشتند.

- در سن ۱۲۰ روزه: جذب آب در تمامی نمونه‌ها افزایش یافت، اما این افزایش در نمونه‌های دارای ۱۵٪ متاکائولن، كم‌تر از سایر نمونه‌ها بود. بیشترین افزایش جذب آب در نمونه‌های ۲۵٪ متاکائولن و محیط سولفات آمونیوم مشاهده شد.

#### نتایج درصد نفوذ تسريع شده يون كلر

نتایج درصد جذب آب در بتن خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در سه بازه زمانی ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه در چهار محیط سولفاتى متفاوت مطابق جدول ۸ و اشکال ۱۷، ۱۸ و ۱۹ می‌باشد.

تأثیر محیط‌های سولفاتى بر درصد جذب آب به شرح زیر بوده است.

- بیش‌ترین میزان جذب آب در محیط سولفات آمونیوم بود. این موضوع بیش‌ترین آسیب را به ساختار بتن وارد کرد و خود منجر به افزایش جذب آب در طول زمان شد. دلیل این افزایش واکنش شدید یون‌های آمونیوم با ترکیبات سیمانی که باعث انبساط و ترک‌خوردگی شده و تخلخل بتن را افزایش داده است.

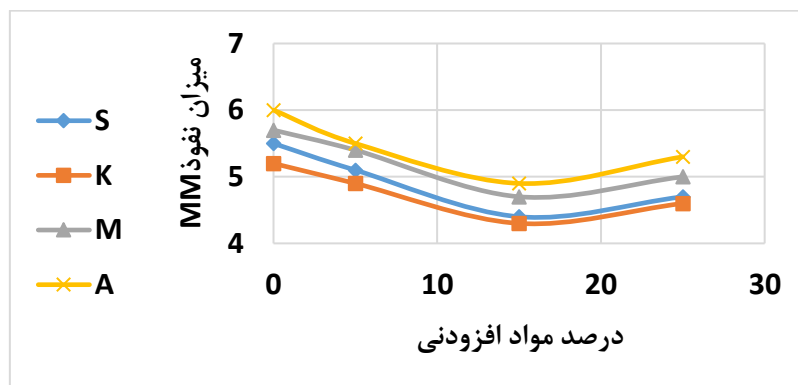
- افزایش جذب آب در محیط سولفات سدیم به دلیل واکنش‌های سولفاتى و تشکیل اترینگایت که خود باعث افزایش تخلخل شده و جذب آب را افزایش داد. میزان افزایش جذب آب كم‌تر از سولفات آمونیوم بوده اما بیش‌تر از سایر محیط‌های سولفاتى است.

- جذب آب متوسط در محیط سولفات منیزیم مشاهده گردید. جذب آب در نمونه‌های حاوی متاکائولن كم‌تر از نمونه شاهد بود، اما هم‌چنان نسبت به سایر محیط‌ها زیاد است. واکنش منیزیم با فازهای سیمانی و تشکیل محصولات ضعیف می‌تواند باعث افزایش جذب آب باشد.

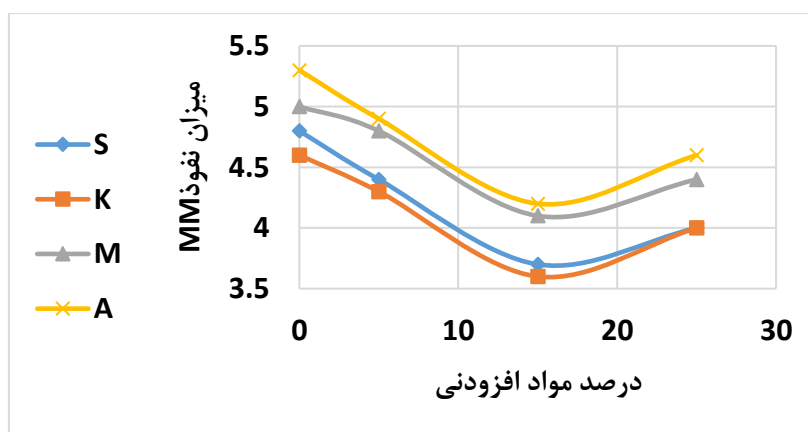
- كم‌ترین افزایش جذب آب در محیط سولفات كلسيم مشاهده شد. در این محیط، تغییرات جذب آب نسبت به سایر محیط‌های

جدول ۸ - نتایج درصد نفوذ یون کلر تسریع شده

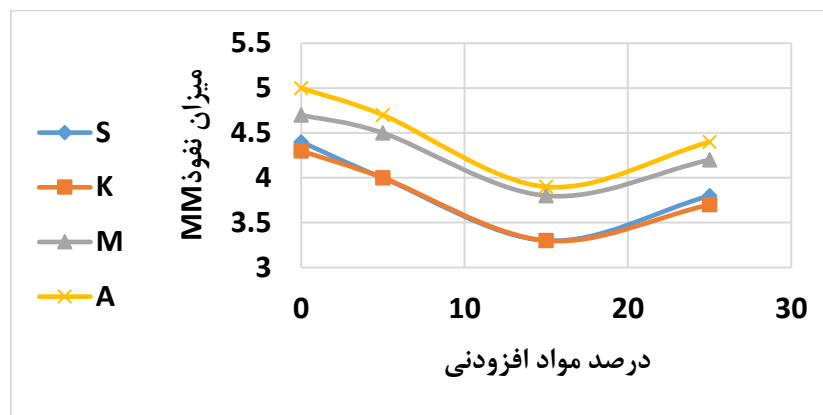
| ردیف | محیط سولفاتی   | درصد متاکائولن | روز ۲۸ (mm) | روز ۹۰ (mm) | روز ۱۲۰ (mm) |
|------|----------------|----------------|-------------|-------------|--------------|
| ۱    | سولفات سدیم    | ٪۰             | ۵/۵         | ۴/۸         | ۴/۴          |
| ۲    |                | ٪۵             | ۵/۱         | ۴/۴         | ۴            |
| ۳    |                | ٪۱۵            | ۴/۴         | ۳/۷         | ۳/۳          |
| ۴    |                | ٪۲۵            | ۴/۷         | ۴           | ۳/۸          |
| ۵    | سولفات کلسیم   | ٪۰             | ۵/۲         | ۴/۶         | ۴/۳          |
| ۶    |                | ٪۵             | ۴/۹         | ۴/۳         | ۴            |
| ۷    |                | ٪۱۵            | ۴/۳         | ۳/۶         | ۳/۳          |
| ۸    |                | ٪۲۵            | ۴/۶         | ۴           | ۳/۷          |
| ۹    | سولفات منیزیم  | ٪۰             | ۵/۷         | ۵           | ۴/۷          |
| ۱۰   |                | ٪۵             | ۵/۴         | ۴/۸         | ۴/۵          |
| ۱۱   |                | ٪۱۵            | ۴/۷         | ۴/۱         | ۳/۸          |
| ۱۲   |                | ٪۲۵            | ۵           | ۴/۴         | ۴/۲          |
| ۱۳   | سولفات آمونیوم | ٪۰             | ۶           | ۵/۳         | ۵            |
| ۱۴   |                | ٪۵             | ۵/۵         | ۴/۹         | ۴/۷          |
| ۱۵   |                | ٪۱۵            | ۴/۹         | ۴/۲         | ۳/۹          |
| ۱۶   |                | ٪۲۵            | ۵/۳         | ۴/۶         | ۴/۴          |



شکل ۱۷ - نمودار درصد نفوذ یون کلر ۲۸ روزه



شکل ۱۸ - نمودار درصد نفوذ یون کلر ۹۰ روزه



شکل ۱۹- نمودار درصد نفوذ یون کلر ۱۲۰ روزه

- کمترین میزان نفوذ یون کلر در محیط سولفات کلسیم مشاهده گردید. سولفات کلسیم اثر تخریبی کمتری داشته و ساختار بتن را کمتر آسیب زده است. در این محیط، نفوذ یون کلر کمترین مقدار را در بین چهار محیط سولفاتی داشت. علاوه بر این تغییرات نفوذ یون کلر در بازه‌های زمانی مختلف چنین می باشد.

- در سن ۲۸ روزه: تأثیر سولفات‌ها هنوز محسوس نبود و نفوذ یون کلر در تمامی نمونه‌ها کمتر بود.

- در سن ۹۰ روزه: اثر مخرب سولفات‌ها به‌ویژه در محیط سولفات آمونیوم و سولفات سدیم افزایش یافت. نمونه‌های دارای ۱۵٪ متاکائولن مقاومت بهتری در برابر نفوذ کلریدها نشان دادند.

- در سن ۱۲۰ روزه: نفوذ کلرید در تمامی نمونه‌ها افزایش یافت، اما این افزایش در نمونه‌های دارای ۱۵٪ متاکائولن کمتر از سایر نمونه‌ها بود. بیشترین نفوذ یون کلر در نمونه‌های ۲۵٪ متاکائولن و محیط سولفات آمونیوم مشاهده شد.

درصد متاکائولن در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۹ می‌باشد.

همانگونه که مشاهده گردید تأثیر محیط‌های سولفاتی بر نفوذ یون کلر این گونه بود.

- بیشترین میزان نفوذ کلریدها در محیط سولفات آمونیوم مشاهده گردید. واکنش شدید سولفات آمونیوم با ترکیبات سیمانی باعث گسترش ترک‌های داخلی و افزایش نفوذپذیری بوده است. نمونه‌های قرار گرفته در این محیط، بیشترین میزان نفوذ یون کلر را نشان دادند.

- افزایش نفوذ کلریدها در محیط سولفات سدیم ناشی از تشکیل اترینگیت اضافی و افزایش ریزترک‌ها است. این موضوع باعث افزایش نفوذ یون کلر شد. میزان نفوذ در این محیط کمتر از سولفات آمونیوم بوده اما بیشتر از سایر محیط‌ها است.

- نفوذ متوسط کلرید در محیط سولفات منیزیم ناشی از واکنش‌های مخرب با ترکیبات سیمانی و باعث جایگزینی یون‌های کلسیم با منیزیم شد، که نهایتاً منجر به افزایش میزان نفوذ یون کلر گردید.

#### آزمایش‌های تنش و کرنش نهایی

نتایج آزمایش‌های تنش و کرنش نهایی در بازه زمانی ۲۸ روزه بتن خود متراکم در نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵

جدول ۹- نتایج تنش و کرنش نهایی ۲۸ روزه

| ردیف | محیط سولفاتی  | تنش (MPa) | کرنش (mm/mm) |
|------|---------------|-----------|--------------|
| ۱    | شاهد          | ۲۱/۲      | ۰/۰۰۳۸       |
| ۲    | ۵٪ متاکائولن  | ۲۳/۱      | ۰/۰۰۴۳       |
| ۳    | ۱۵٪ متاکائولن | ۲۵/۳      | ۰/۰۰۶۵       |
| ۴    | ۲۵٪ متاکائولن | ۲۳/۹      | ۰/۰۰۵۷       |
| ۵    | شاهد          | ۲۲        | ۰/۰۰۰۴       |
| ۶    | ۵٪ متاکائولن  | ۲۳/۶      | ۰/۰۰۴۷       |
| ۷    | ۱۵٪ متاکائولن | ۲۵/۵      | ۰/۰۰۶۹       |
| ۸    | ۲۵٪ متاکائولن | ۲۴/۱      | ۰/۰۰۶۲       |

|        |      |                |               |    |
|--------|------|----------------|---------------|----|
| ۰/۰۰۳۹ | ۲۱/۴ | سولفات منیزیم  | شاهد          | ۹  |
| ۰/۰۰۴۱ | ۲۲/۹ |                | ۵٪ متاکائولن  | ۱۰ |
| ۰/۰۰۶۵ | ۲۵   |                | ۱۵٪ متاکائولن | ۱۱ |
| ۰/۰۰۵۴ | ۲۳/۶ |                | ۲۵٪ متاکائولن | ۱۲ |
| ۰/۰۰۳۵ | ۲۰/۴ | سولفات آمونیوم | شاهد          | ۱۳ |
| ۰/۰۰۴۱ | ۲۲   |                | ۵٪ متاکائولن  | ۱۴ |
| ۰/۰۰۶۱ | ۲۴/۲ |                | ۱۵٪ متاکائولن | ۱۵ |
| ۰/۰۰۴۴ | ۲۲/۷ |                | ۲۵٪ متاکائولن | ۱۶ |

نتایج تنش و کرنش نهایی بتن خود متراکم در نمونه شاهد و روزه و در چهار محیط سولفاتی متفاوت مطابق جدول ۱۰ نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در بازه زمانی ۹۰ می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج تنش و کرنش نهایی ۹۰ روزه

| ردیف | نمونه         | محیط سولفاتی   | تنش (MPa) | کرنش (mm/mm) |
|------|---------------|----------------|-----------|--------------|
| ۱    | شاهد          | سولفات سدیم    | ۲۳/۹      | ۰/۰۰۵۷       |
| ۲    | ۵٪ متاکائولن  |                | ۲۵/۱      | ۰/۰۰۶۶       |
| ۳    | ۱۵٪ متاکائولن |                | ۲۷/۲      | ۰/۰۰۷۸       |
| ۴    | ۲۵٪ متاکائولن |                | ۲۶        | ۰/۰۰۷        |
| ۵    | شاهد          | سولفات کلسیم   | ۲۴/۳      | ۰/۰۰۶۲       |
| ۶    | ۵٪ متاکائولن  |                | ۲۵/۴      | ۰/۰۰۶۵       |
| ۷    | ۱۵٪ متاکائولن |                | ۲۷/۷      | ۰/۰۰۸۱       |
| ۸    | ۲۵٪ متاکائولن |                | ۲۶/۱      | ۰/۰۰۷        |
| ۹    | شاهد          | سولفات منیزیم  | ۲۳/۲      | ۰/۰۰۴۳       |
| ۱۰   | ۵٪ متاکائولن  |                | ۲۴/۴      | ۰/۰۰۶۱       |
| ۱۱   | ۱۵٪ متاکائولن |                | ۲۶/۸      | ۰/۰۰۷۶       |
| ۱۲   | ۲۵٪ متاکائولن |                | ۲۵/۵      | ۰/۰۰۶۹       |
| ۱۳   | شاهد          | سولفات آمونیوم | ۲۲/۳      | ۰/۰۰۴۲       |
| ۱۴   | ۵٪ متاکائولن  |                | ۲۳/۸      | ۰/۰۰۴۹       |
| ۱۵   | ۱۵٪ متاکائولن |                | ۲۶        | ۰/۰۰۷        |
| ۱۶   | ۲۵٪ متاکائولن |                | ۲۴/۶      | ۰/۰۰۶۱       |

نتایج تنش و کرنش نهایی خود متراکم نمونه شاهد و نمونه‌ها با افزودن ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در بازه زمانی ۱۲۰ روزه و در چهار محیط سولفاتی متفاوت در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱- نتایج تنش و کرنش نهایی ۱۲۰ روزه

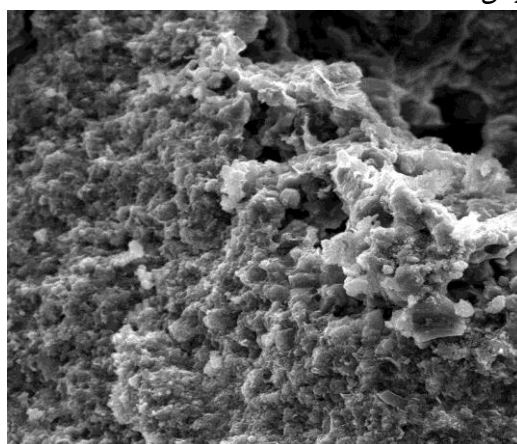
| ردیف | نمونه         | محیط سولفاتی | تنش (MPa) | کرنش (mm/mm) |
|------|---------------|--------------|-----------|--------------|
| ۱    | شاهد          | سولفات سدیم  | ۲۴/۳      | ۰/۰۰۶۲       |
| ۲    | ۵٪ متاکائولن  |              | ۲۵/۴      | ۰/۰۰۶۹       |
| ۳    | ۱۵٪ متاکائولن |              | ۲۷/۷      | ۰/۰۰۸۱       |
| ۴    | ۲۵٪ متاکائولن |              | ۲۶/۴      | ۰/۰۰۷۶       |
| ۵    | شاهد          | سولفات کلسیم | ۲۴/۷      | ۰/۰۰۶۱       |
| ۶    | ۵٪ متاکائولن  |              | ۲۵/۷      | ۰/۰۰۶۹       |

|        |      |                     |    |
|--------|------|---------------------|----|
| ۰/۰۰۸۸ | ۲۸/۴ | ۱۵٪ متاکائولن       | ۷  |
| ۰/۰۰۷۶ | ۲۶/۶ | ۲۵٪ متاکائولن       | ۸  |
| ۰/۰۰۴۳ | ۲۳/۴ | شاهد سولفات منیزیم  | ۹  |
| ۰/۰۰۶۱ | ۲۴/۷ | ۵٪ متاکائولن        | ۱۰ |
| ۰/۰۰۷۸ | ۲۷/۱ | ۱۵٪ متاکائولن       | ۱۱ |
| ۰/۰۰۶۹ | ۲۵/۸ | ۲۵٪ متاکائولن       | ۱۲ |
| ۰/۰۰۴۲ | ۲۲/۶ | شاهد سولفات آمونیوم | ۱۳ |
| ۰/۰۰۶۲ | ۲۴/۲ | ۵٪ متاکائولن        | ۱۴ |
| ۰/۰۰۰۷ | ۲۶/۳ | ۱۵٪ متاکائولن       | ۱۵ |
| ۰/۰۰۶۱ | ۲۴/۹ | ۲۵٪ متاکائولن       | ۱۶ |

رابطه بین تنش و کرنش در محیط‌های خورنده سولفاتی نشان می‌دهد که بتن‌هایی که مقاومت فشاری بالاتری داشتند (خصوصاً نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن)، کرنش کم‌تری را تجربه کردند. اما افزایش کرنش در نمونه‌های با ۲۵٪ متاکائولن نشان‌دهنده کاهش سختی بتن و افزایش تغییرشکل در بارگذاری است.

#### نتایج ریز ساختار

شکل ۲۰ ریز ساختار بتن با افزودن ۱۵ درصد متاکائولن جایگزین سیمان در شکل ۱۸ شده است.



شکل ۲۰- تصویر ریز ساختار بتن با افزودن ۱۵ درصد متاکائولن

سیمانی شده است. این عامل موجب کاهش مقاومت بتن در طول زمان شده است.

**محیط سولفات کلسیم:** نسبت به سایر محیط‌ها تأثیر مخرب کم‌تری داشته و ساختار بتن کم‌تر دچار تغییر شده است.

**محیط سولفات آمونیوم:** بیش‌ترین آسیب را ایجاد کرده و در تصاویر میکروسکوپی، مناطق دارای فازهای ضعیف شده و حفره‌های ریز میکروسکوپی به وضوح دیده می‌شوند.

همان‌گونه که مشاهده شد تأثیر محیط‌های سولفاتی بر تنش و کرنش نهایی این‌گونه است.

- محیط سولفات کلسیم کم‌ترین اثر تخریبی را بر بتن داشت، زیرا نمونه‌ها در این محیط نمونه‌ها بالاترین مقدار حفظ مقاومت را در طول زمان داشتند.

- در مقابل، محیط سولفات آمونیوم بیش‌ترین تخریب را ایجاد کرد، به‌طوری‌که نمونه‌های بتن در این محیط بیش‌ترین کاهش مقاومت و افزایش کرنش را نشان دادند.

- سولفات منیزیم و سولفات سدیم اثرات تخریبی متوسطی داشتند، اما همچنان باعث افت مقاومت در طول زمان مشاهده شد.

تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهند که نمونه‌های بتنی حاوی متاکائولن ۱۵٪ دارای ساختاری متراکم‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. این به دلیل واکنش‌های پوزولانی متاکائولن با هیدروکسید کلسیم آزاد در بتن است که منجر به تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) بیش‌تر و کاهش فضای خالی می‌شود. در هر محیط جداگانه می‌توان این‌گونه گفت:

**محیط سولفات سدیم:** باعث تشکیل ژپس در داخل ساختار بتن شده که منجر به افزایش حجم و ترک‌های ریز در ماتریس

محیط سولفات منیزیم: باعث تخریب شدیدتر خمیر سیمان و انحلال فاز C-S-H شده که منجر به تضعیف اتصال بین سنگدانه‌ها و ماتریس سیمانی شده است. درخصوص تأثیر مقدار متاکائولن مشاهده گردید که در نمونه‌های با ۵٪ متاکائولن، بهبود در ساختار بتن نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد، اما میزان واکنش پوزولانی به اندازه کافی نبود که

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در دهه‌های اخیر، دغدغه‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بیش از حد انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی، به‌ویژه در صنعت سیمان، موجب شده است تا پژوهشگران و مهندسان به دنبال راهکارهایی جهت توسعه مصالح ساختمانی پایدار باشند. یکی از مهم‌ترین اهداف در این زمینه، کاهش مصرف سیمان پرتلند از طریق استفاده از مواد جایگزین پوزولانی است که هم عملکرد فنی مناسبی داشته باشند و هم از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی توجیه‌پذیر باشند. در همین راستا، متاکائولن به‌عنوان یک پوزولان طبیعی فعال، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با متاکائولن در بتن خودتراکم (SCC) انجام شد تا عملکرد بتن از نظر مقاومت مکانیکی، دوام در برابر محیط‌های خورنده سولفاتی، خواص بتن تازه و ملاحظات زیست‌محیطی ارزیابی شود. بتن خودتراکم، به‌دلیل ویژگی‌های ممتاز در کارایی، کاهش نیروی انسانی در اجرا و افزایش کیفیت سطحی، در پروژه‌های عمرانی بزرگ و پیچیده به‌طور گسترده استفاده می‌شود. با این حال، افزودن مواد جایگزین به این نوع بتن ممکن است خواص تازه و سخت‌شده آن را تحت تأثیر قرار دهد که بررسی هم‌زمان این ویژگی‌ها ضرورت دارد. یکی از جنبه‌های مهم بررسی‌شده در این تحقیق، تأثیر متاکائولن بر خواص بتن تازه بود. نتایج نشان داد که افزودن متاکائولن با درصدهای مختلف بر اسلامپ جریان، زمان جریان، پایداری در برابر جداسدگی و ویسکوزیته بتن تازه تأثیرگذار است. درصدهای پایین متاکائولن (۵ تا ۱۵ درصد) منجر به بهبود یکنواختی، کاهش جداسدگی و بهبود پایداری بتن تازه شد. دلیل این امر، ذرات بسیار ریز متاکائولن است که مانند یک فیلر عمل کرده و فضای خالی بین ذرات را پر می‌کند. همچنین، سطح ویژه بالای متاکائولن موجب جذب بیشتر آب آزاد شده و در نتیجه ویسکوزیته بتن افزایش می‌یابد. این افزایش ویسکوزیته، پایداری بتن تازه را در برابر جداسدگی بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، در درصدهای بالاتر (۲۵ درصد)، به‌دلیل افزایش شدید سطح جذب آب، میزان روانی

بهبود قابل توجهی در دوام ایجاد کند. نمونه‌های ۱۵٪ متاکائولن بیشترین تراکم و کمترین تخلخل را نشان دادند، که باعث افزایش دوام بتن شد. در نمونه‌های ۲۵٪ متاکائولن، با وجود تراکم بیشتر، میزان فضاهای خالی ناشی از کاهش سیمان افزایش یافته و در برخی مناطق، میکروتکرک‌ها و افت چسبندگی بین سنگدانه و خمیر سیمان مشاهده شده است.

بتن کاهش پیدا کرد و نیاز به فوق روان‌کننده بیشتر شد. قابلیت پرکنندگی و عبورپذیری بتن خودتراکم نیز تحت تأثیر حضور متاکائولن بهبود یافت، به‌ویژه در درصد ۱۵٪ که به‌عنوان مقدار بهینه در این پژوهش شناخته شد. در این مقدار، بتن توانست بدون انسداد در میان میلگردها جریان یابد و سطحی یکنواخت و بدون حفره ایجاد کند. زمان گیرش اولیه و نهایی نیز با افزایش درصد متاکائولن اندکی کاهش یافت، که این امر به فعالیت پوزولانی بالای متاکائولن و واکنش سریع آن با هیدروکسید کلسیم تولیدشده در فرآیند هیدراتاسیون سیمان بازمی‌گردد. این ویژگی می‌تواند در شرایط سرد یا برای بتن‌ریزی سریع مفید باشد. از نظر خواص مکانیکی، نتایج نشان داد که جایگزینی ۱۵٪ سیمان با متاکائولن بیشترین افزایش مقاومت فشاری را در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۲۰ روزه فراهم کرد. این افزایش مقاومت به واکنش‌های پوزولانی فعال و تشکیل ترکیبات ثانویه ژل C-S-H نسبت داده می‌شود که موجب انسجام بیشتر خمیر سیمان و کاهش فضای خالی در بتن می‌شود. در بررسی دوام بتن در محیط‌های حاوی یون‌های سولفات مختلف (سدیم، منیزیم، کلسیم و آمونیوم)، مشخص شد که نمونه‌های حاوی متاکائولن مقاومت بالاتری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند. به‌ویژه در مواجهه با سولفات آمونیوم که بیشترین اثر مخرب را داشت، بتن‌های اصلاح‌شده با متاکائولن ترک‌خوردگی، تورم و تخریب سطحی بسیار کمتری داشتند. ریزساختار متراکم این نمونه‌ها در تصاویر SEM نیز تأیید شد. کاهش تخلخل و افزایش تراکم مانع از نفوذ یون‌های مهاجم به عمق بتن گردید. از نظر رفتار تنش-کرنش نیز مشخص شد که نمونه‌های دارای متاکائولن، به‌ویژه در درصد ۱۵٪، مدول الاستیسیته بالاتری داشته و مقاومت به تغییر شکل‌های ناگهانی بیشتری دارند. این خاصیت در افزایش مقاومت سازه در برابر بارهای لرزه‌ای یا ضربه‌ای اهمیت زیادی دارد. از منظر زیست‌محیطی، استفاده از متاکائولن موجب کاهش مصرف سیمان پرتلند و در نتیجه کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن گردید. با توجه به این‌که هر تن سیمان حدود یک تن CO<sub>2</sub> منتشر می‌کند، جایگزینی ۱۵٪ از سیمان با متاکائولن تأثیر مستقیمی بر

کاهش اثرات گلخانه‌ای دارد. همچنین این جایگزینی به حفظ منابع طبیعی نظیر سنگ آهک و خاک رس کمک می‌کند و از استخراج بی‌رویه این مواد جلوگیری می‌نماید. از نظر اقتصادی نیز، گرچه قیمت متاکائولن نسبت به سیمان ممکن است بالاتر باشد، اما به دلیل افزایش دوام، کاهش نیاز به تعمیرات و افزایش عمر مفید سازه، هزینه چرخه عمر سازه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در پروژه‌های زیربنایی مانند پل‌ها، مترو، سدها و سازه‌های دریایی، این صرفه‌جویی مالی بسیار قابل توجه خواهد

بود. با توجه به نتایج حاصل شده در این پژوهش، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جایگزینی بهینه‌ی ۱۵ درصد سیمان با متاکائولن در بتن خودتراکم، نه تنها موجب بهبود خواص بتن تازه (روانی، پایداری، زمان گیرش) و سخت شده (مقاومت فشاری، دوام، ریزساختار) می‌گردد، بلکه نقش بسیار مؤثری در کاهش اثرات زیست محیطی و افزایش پایداری در صنعت ساخت و ساز دارد.

## References

1. John O. Eze, Chika A. Nwosu, Ifeanyi M. Obi, Performance of Concrete Using Metakaolin as Cement Partial Replacement Material, ARID ZONE JOURNAL OF ENGINEERING, TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT, 2025
2. Chuheng Zhong, Dongping Wang, Lijuan Zhang, WeiQi Mao, Sijia Xing, Jinhui Chen & Yuan Xiao, Durability analysis of metakaolin recycled concrete under sulphate dry and wet cycle Scientific Reports 2024
3. Shweta Patel, Ravi Kumar, Meenakshi Singh, Experimental Investigation of Mechanical and Durability Performances of Self-Compacting Concrete Blended with Bagasse Ash, Metakaolin, and Glass Fiber, Frontiers in Materials, 2024
4. Irfan Majeed, Mir Suhail Ahmed, Experimental Study and Analysis of Strength Properties and Sulfate Resistance of Self-Compacting Concrete Using Different Admixtures, IJRASET Journal, 2024
5. Mohammadyan-Yasouj, Seyed Saeid Rahimian Koloor, Utilization of metakaolin on the properties of self-consolidating concrete: A review, Seyed Esmaeil Construction and Building Materials Volume 389, 31 July 2023, 131605
6. Ali R. Rajabi, Saeed Yousefi, Mohammad A. Sadeghi, Experimental Investigation on the Durability of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete in Aggressive Environments, Asian Journal of Civil Engineering, 2023
7. Abdollahzadeh, M., & Hosseini, S. A.. Metakaolin-based SCC: Resistance to sulfate environments and long-term performance. *Journal of Cleaner Production*, (2023) 381, 135188.
8. Ming Li, Yifan Zhao, Hao Chen, Jun Wang, Investigation on the Sulfate Attack of Metakaolin Blended Recycled Concrete Based on Percolation Theory, Journal of Materials Research and Technology, 2023
9. Kamyar Nabighods, Ashkan Sarada, Mohammad Mohtasham Moein, Mir Alimohammad Mirgozar Langaroudi, Juliana Byzyka, Moses Karakouzian, Evaluation of self-compacting concrete containing pozzolan (zeolite, metakaolin & silica fume) and polypropylene fiber against sulfate attacks with different PH: an experimental study, Practice-Oriented Paper, 2023,
10. Wei Zhang, Jiawei Liu, Xiaolong Wang, Qiang Li, Performance of Alkali-Activated Self-Compacting Concrete with Incorporation of Nanosilica and Metakaolin, Sustainability, 2022
11. Fatemeh Khodabakhshian, Zahra Sadeghi, Ali Rezaei, Cement with Fly Ash and Metakaolin Blend—Drive towards a More Sustainable Construction, Energies, 2022
12. IPCC.. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022)
13. Zhang, Y., & Shi, C.. Influence of supplementary cementitious materials on the stress-strain behavior of concrete under compression. *Construction and Building Materials*, (2022) 314, 125677.
14. Bakhshi, M., & Allahverdi, A.. Sulfate attack on concrete: Mechanisms, effects and preventive strategies. *Cement and Concrete Research*, (2021) 146, 106449.
15. Wang, Y., Zhang, M., & Long, W.. Toward sustainable concrete: The role of supplementary cementitious materials in reducing carbon footprint. *Construction and Building Materials*, (2021) 270, 121371.
16. Okamura, H., & Ouchi, M.. Self-compacting concrete: development, present use and future. *Journal of Advanced Concrete Technology*, (2020), 18(4), 141–150
17. Ghasemi, T., & Ramezani-pour, A. A.. Influence of metakaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting concrete under aggressive environments. *Journal of Building Engineering*, (2020) 32, 101586.
18. Soutsos, M. N., & Le, T. T.. Effect of metakaolin on concrete durability and performance. *Materials and Structures*, (2019) 52(1), 1–13.
19. Hocine Siad, Siham Kamali-Bernard, H.A. Mesbah, G. Escadeillas, Mohamed Mouli, H. Khelafi, Characterization of the degradation of self-compacting concretes in sodium sulfate environment: Influence of different mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 2013, Volume 47, Pages 1188-1200

۲۰. آتش‌بند، شهام، صابر ماهانی، محسن، الهی حمیدرضا، بررسی آزمایشگاهی اثرات سیمان ضد سولفات و ترکیبات باریم بر مقاومت خاک-سیمان در محیط سولفات، نشریه زمین شناسی مهندسی ۱۴۰۰، جلد پانزدهم، شماره ۲
۲۱. آدرسی، مصطفی، مرادی باصری، حامد، مروری بر روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی درخصوص بررسی رفتار بتن تحت حملات سولفات و اسیدی، فصلنامه علمی جاده، ۱۴۰۲، سال بیست و یکم، دوره چهارم، شماره ۱۱۷
۲۲. امیری، محمد، تنیده، پریسا، ارزیابی ریز ساختمانی تأثیر محیط‌های سولفات بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری، تحقیقات بتن، سال ۹۹، سال سیزدهم شماره ۲
۲۳. احمدی، جمال، بیگدلو، احمد، سلیمانی‌راد، مهدی، تأثیر استفاده از ژئولیت، میکروسیلیس و متاکائولن بر کارایی و مقاومت بتن خود متراکم، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست ۱۳۹۶، جلد ۷۴، شماره ۳
۲۴. انتظاری، علیرضا، اسماعیلی، جمشید، بررسی منحنی تنش و کرنش بتن سبک سازه ای غیر محصور، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، سال ۱۳۸۹، جلد ۴۰ شماره ۳.
۲۵. حسن زاده، محسن، کیاچهر، بهفرنیا، ربانی، شهاب، بررسی تأثیر محیط سولفات بر مقاومت فشاری ملات‌های حاوی پوزولان میکروسیلیس، اولین همایش ملی سازه زلزله ژئوتکنیک، سال ۱۳۸۹.
۲۶. رمضانپور، علی‌اکبر، میرولد سید سجاده، آرامون، احسان، پیدایش، منصور، بررسی اثر چهار نوع از پوزولان‌های طبیعی ایران بر دوام بتن‌های سازه‌ای در برابر حمله سولفاتی، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط‌زیست)، سال ۱۳۹۳، دوره چهل ششم، شماره ۲
۲۷. ربانی، شهاب، حسن زاده، محسن، کیاچهر، بهفرنیا، بررسی اثر پوزولان‌های مختلف بر عملکرد ملات در محیط سولفات، چهارمین کنفرانس ملی ایران، ۱۳۹۱
۲۸. فرخ زاد، رضا، یاسری، سجاده، انتظاریان، محمد حسین، یآوری، امیر، بررسی تأثیرات سولفات‌ها بر مقاومت فشاری انواع بتن‌های پوزولانی و اندازه گیری میزان نفوذ با آزمون فراصوت در سنین مختلف، تحقیقات بتن ۱۳۹۵، سال نهم شماره اول
۲۹. نادری، محمود، رشوند آوه، ابولفضل، صابری ورزنده، علی، بررسی پایایی بتن‌های خود متراکم ساخته شده از سنگ دانه‌های مختلف تحت اثر محیط سولفات با استفاده از آزمون پیچش، مهندسی عمران، ۱۴۰۱، شماره ۱.



## Experimental Analysis of Durability and Mechanical Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Metakaolin in Sulfate Environments in order to Reduce Cement Consumption and Protect Environment

Karrar AbdulAmir Nahi

Master's Student of Civil Engineering, Faculty of Building Industry and Environment, Islamic Azad University, Shiraz Branch, Iran

MohammadAmir  
Sherafati\*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Hadi Fatemi

M.Sc. in Civil Engineering, Faculty of Building Industry and Environment, Islamic Azad University, Shiraz Branch, Iran

Received: 6 May 2025

Accepted: 12 June 2025

**Keywords:** Self-Compacting Concrete, Metakolin, CO<sub>2</sub> Emission Reduction, Concrete Durability, Sustainable Development, Corrosion Sulfate

### Extended Abstract

**Introduction:** In recent years, the construction industry has been recognized as one of the largest consumers of natural resources and producers of greenhouse gases. One of the most important materials used in this industry is Portland cement, the production of which consumes significant amounts of energy and emits carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) one of the main greenhouse gases into the atmosphere. This issue not only affects air quality and human health but also accelerates global warming and climate change. Moreover, cement production relies heavily on raw materials such as limestone and clay, and excessive extraction of these materials leads to depletion of non-renewable natural resources and threatens environmental sustainability.

**Materials and Methods:** This study aimed to investigate the effect of partially replacing cement with metakaolin in self-compacting concrete (SCC) and to evaluate the performance of this concrete in sulfate-rich corrosive environments. For this purpose, SCC samples were prepared with three different metakaolin replacement levels: 5%, 15%, and 25% by weight of cement. To simulate corrosive environmental conditions, samples were exposed to four sulfate solutions containing sulfate ions from sodium sulfate (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), magnesium sulfate (MgSO<sub>4</sub>), calcium sulfate (CaSO<sub>4</sub>), and ammonium sulfate ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). These sulfate ions were selected due to their destructive effects on concrete structures, particularly in industrial and marine environments, to accurately assess the concrete's resistance under realistic conditions.

**Results and Discussion:** Laboratory results demonstrated that incorporating metakaolin significantly improved the characteristics of self-compacting concrete. Among the tested samples, the mixture containing 15% metakaolin exhibited the best performance. This mixture showed a notable increase in compressive strength compared to the control sample (without metakaolin). Additionally, water absorption decreased, indicating reduced porosity and increased density of the concrete microstructure. SEM images confirmed greater cohesion and fewer voids within the internal structure of the concrete. The 15% metakaolin concrete also exhibited higher resistance to sulfate environments, particularly against magnesium and ammonium ions, with less surface deterioration and cracking observed. Furthermore, the partial replacement of cement with metakaolin reduced the CO<sub>2</sub> emissions associated with concrete production, contributing effectively to minimizing the environmental impact of this widely used construction material. Compressive strength tests at various ages showed that the 15% metakaolin mixture performed better not only at 28 days but also at early (7 days) and late (90 days) stages, indicating good pozzolanic reactivity and long-term microstructural development. Reduced water absorption also implies lower permeability to aggressive ions, thereby decreasing long-term degradation. Stress-strain analysis showed that metakaolin-containing samples had higher stiffness (elastic modulus), reflecting increased concrete hardness and resistance to sudden deformations under cyclic loads.

**Conclusion:** Based on the obtained results, it can be concluded that the optimal use of 15% metakaolin not only enhances the mechanical properties and durability of self-compacting concrete against sulfate ion attack but also plays a significant role in reducing environmental pollution by lowering cement consumption. The use of metakaolin aligns with sustainable development approaches, potentially extending the service life of structures under harsh environmental conditions.

**Corresponding author:** MohammadAmir Sherafati

**Address:** Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

**Tel:** +989173870014 **Email:** MA.Sherafati@iau.ac.ir

**Citation:** AbdulAmir Nahi K, Sherafati MA, Fatemi H. Experimental Analysis of Durability and Mechanical Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Metakaolin in Sulfate Environments in order to Reduce Cement Consumption and Protect Environment. Journal of New Researches in Environmental Engineering. 2025; 3(9): 52-72.



© 2024, This article published in Journal of New Researches in Environmental Engineering (JNREE) as an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>). Non-commercial use, distribution and reproduction of this article is permitted in any medium, provided the original work is properly cited.