

## بررسی دوام ملات‌های ژئوپلیمری در برابر محیط اسیدی بر پایه متاکائولن حاوی میکروسیلیس تحت عمل‌آوری تسریع‌شده

کمیل کریمی مریدانی \*

گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

حسین جاماسبی

گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

وحید رمضانی

گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی احرار، رشت، ایران.

### چکیده

در دهه‌های اخیر به دلیل تأثیرات مخرب زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند، پژوهشگران را به مطالعه بر روی جایگزین‌هایی پایدار و سازگار با محیط زیست نظیر مصالح ژئوپلیمری سوق داده است. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از ملات‌های ژئوپلیمری، ارزیابی رفتار آن‌ها در محیط‌های خورنده، به‌ویژه محیط‌های اسیدی است. در این پژوهش، تأثیر استفاده از میکروسیلیس در درصد‌های جایگزینی وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به‌عنوان جایگزین جزئی برای متاکائولن در ملات ژئوپلیمری بررسی شده است. فعال‌کننده قلیایی هیدروکسید سدیم، با دو غلظت ۶ مولار و ۱۲ مولار، بکار گرفته شده و تمامی نمونه‌ها تحت روش عمل‌آوری تسریع‌شده قرار گرفتند. با هدف ارزیابی دوام، نمونه‌ها پس از عمل‌آوری اولیه به مدت ۲۸ روز در محلول اسید سولفوریک با  $\text{pH}=1$  نگهداری شدند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس و افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، مقاومت ۲۸ روزه را به طور موثری بهبود می‌بخشد. جایگزینی ۲۰٪ میکروسیلیس در غلظت ۱۲ مولار، مقاومت فشاری را بیش از ۵۵٪ و مقاومت خمشی را بیش از ۳۷٪ نسبت به نمونه فاقد میکروسیلیس بهبود بخشید. همچنین، نتایج حاکی از آن است که استفاده از میکروسیلیس در ملات ژئوپلیمری، دوام را به مقدار قابل توجهی افزایش داده و کاهش مقاومت فشاری ناشی از محیط اسیدی را به حداقل می‌رساند. این یافته‌ها، مسیر را برای کاربرد ملات‌های ژئوپلیمری در محیط‌های تهاجمی هموار می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** ملات ژئوپلیمری، میکروسیلیس، محیط اسیدی، متاکائولن، عمل‌آوری تسریع‌شده.

---

\* نویسنده مسئول: karimi.k@srbiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

پاسخگویی به سؤالاتی نظیر تأثیر درصدهای مختلف MS (۵٪ تا ۲۰٪) بر مقاومت مکانیکی (فشاری و خمشی) ملات ژئوپلیمری، نقش افزایش غلظت هیدروکسید سدیم (از ۶ به ۱۲ مولار) در کنار MS بر خواص نهایی ملات و ترکیب بهینه‌ای از درصد MS و غلظت قلیایی در محیط بسیار اسیدی می‌باشد.

با وجود مطالعات بر روی MS، اثر متقابل آن با تغییرات مولاریته ۶ و ۱۲ مولار بر روی پایداری الکتریکی و نفوذپذیری اسیدی ملات‌های متاکائولنی کمتر بررسی شده است. مطالعات پیشین بیشتر بر خواص مکانیکی تمرکز داشتند و کمتر به دوام در محیط‌های بسیار خورنده پرداخته‌اند [۱۴-۱۵].

## ۲- مواد و روش‌ها

متاکائولن (MK) که از کلسیناسیون کائولین در دمای مناسب حاصل شده، به‌عنوان منبع اصلی سیلیس و آلومینا مورد استفاده قرار گرفت. ماده جایگزین جزئی MS با درصد خلوص بالا و سطح ویژه بالا، در درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزین وزنی متاکائولن شد. محلول فعال‌کننده شامل سیلیکات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) با مدول مشخص و محلول هیدروکسید سدیم ( $\text{NaOH}$ ) تهیه شد. غلظت هیدروکسید سدیم در دو سطح ۶ مولار و ۱۲ مولار تنظیم شد تا اثر شدت قلیائی بر فرایند پلیمریزاسیون بررسی شود [۱۶-۱۷].

طرح اختلاط بر اساس نسبت‌های ثابت ماسه به پیش‌ساز، آب به پیش‌ساز و نسبت‌های مشخص  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  به  $\text{NaOH}$  در نظر گرفته شد. در مجموع ۱۰ طرح اختلاط (شامل دو نمونه شاهد فاقد MS در غلظت‌های ۶ و ۱۲ مولار) مورد بررسی قرار گرفت. شکل و ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس نوع آزمایش انتخاب شده است؛ بر این اساس برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه مکعبی با ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  میلیمتر، آزمایش مقاومت خمشی از نمونه مکعب مستطیلی با ابعاد  $160 \times 40 \times 40$  میلیمتر و برای آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و جذب آب از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  میلیمتر استفاده شده است. جدول شماره ۱، متغیرهای مستقل شامل: غلظت  $\text{NaOH}$  (M6 و M12) و درصد جایگزینی MS (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد) را به همراه نسبت‌های وزنی ثابت نشان می‌دهد.

فرایند اختلاط با مخلوط کردن خشک مواد جامد شروع شده و

امروزه صنعت ساخت‌وساز مدرن، با چالش‌های زیست‌محیطی جدی به‌واسطه تولید گسترده سیمان پرتلند روبه‌رو است. هر تن تولید سیمان پرتلند، تقریباً  $0.8$  تا  $1$  تن گاز دی‌اکسید کربن منتشر می‌کند [۱]. این آلاینده‌گی، محققان را به سمت توسعه مصالح با کربن پایین سوق داده است. امروزه ملات‌ها و بتن‌های ژئوپلیمری، به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین جایگزین‌ها، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مصالح از پلیمریزاسیون مواد آلومینوسیلیکاتی در حضور محلول‌های قلیایی قوی حاصل می‌شوند و علاوه بر کاهش قابل ملاحظه انتشار دی‌اکسید کربن، خواص مکانیکی مشابه یا حتی بهتر از سیمان پرتلند از خود نشان می‌دهند [۲].

یکی از مهم‌ترین عواملی که کاربرد گسترده ژئوپلیمرها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد، ارزیابی دوام در محیط‌های تهاجمی است. ساختارهای بتنی و ملاتی سازه‌ها در کاربردهای صنعتی، شهری و زیرزمینی، اغلب در معرض حملات شیمیایی نظیر حملات اسیدی و سولفاتی قرار دارند. در مقایسه با ملات‌های سیمانی که با حضور هیدروکسید کلسیم (CH) آسیب‌پذیرند، ملات‌های ژئوپلیمری مبتنی بر متاکائولن (MK) به‌دلیل محتوای کلسیم کم، مقاومت ذاتی بالاتری در برابر اسید از خود نشان می‌دهند [۳-۷]. با این حال، حملات اسیدی همچنان می‌تواند منجر به انحلال و تخریب فاز پلیمری شده و خواص مکانیکی را کاهش دهد.

برای تقویت شبکه‌ی ژئوپلیمری و کاهش نفوذپذیری، استفاده از افزودنی‌های فعال سیلیسی و آلومینایی مورد توجه قرار گرفته است. میکروسلیس (MS)، به دلیل سطح ویژه بالا و واکنش‌پذیری شدید، به‌عنوان یک جایگزین جزئی مناسب برای مواد اولیه ژئوپلیمری شناخته می‌شود. افزودن MS به مخلوط ژئوپلیمری می‌تواند موجب تراکم بیشتر شبکه پلیمری، کاهش میزان منافذ و در نتیجه افزایش پایداری در برابر نفوذ یون‌های مهاجم شود [۸-۱۳].

با توجه به شکاف موجود در بررسی هم‌زمان تأثیر غلظت فعال‌کننده قلیایی و MS در شرایط عمل‌آوری تسریع شده بر دوام اسیدی ژئوپلیمرهای متاکائولنی، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی عملکرد ملات‌های ژئوپلیمری حاوی MS در برابر حمله اسید سولفوریک با  $\text{pH}=1$  است. به‌طور خاص، این مطالعه به دنبال

به مدت ۳ ساعت در آب با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. پس از فرایند عمل‌آوری تسریع شده، نمونه‌ها از آب خارج شده و در دمای محیط آزمایشگاه برای عمل‌آوری تا سن مورد نظر قرار می‌گیرند [۱۸-۱۹].

با هدف بررسی اثر محیط اسیدی بر نتایج برخی از آزمایش‌ها، پس از خارج نمودن تعدادی از نمونه‌ها از قالب و عمل‌آوری تسریع شده، به حوضچه حاوی محلول اسید سولفوریک با  $\text{PH}=1$  منتقل شده و به مدت ۲۸ روز تحت اثر محیط اسیدی قرار گرفتند [۲۰-۲۱].

سپس محلول قلیایی به آن اضافه و به مدت استاندارد مخلوط گردید. لازم به ذکر است نسبت آب به چسباننده (W/B) برای تمامی طرح‌ها به صورت ثابت برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. تمامی نمونه‌های مکعبی و منشوری برای آزمون فشاری و خمشی پس از ریختن در قالب، در دمای آزمایشگاه تحت استراحت قرار می‌گیرد. این دوره استراحت جهت تکمیل واکنش‌های اولیه و جلوگیری از ترک خوردگی ناشی از خروج سریع رطوبت در نظر گرفته شده است. برای روش تسریع شده نمونه‌های آزمایشگاهی

جدول ۱- جزئیات طرح‌های اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی

| ردیف | نام طرح | BS<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | متاکائولن<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | میکروسیلیس<br>(%) | Si<br>O <sub>3</sub><br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | NaOH<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | SS/SH | مولارته<br>NaOH | ماسه<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|---------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------------------------------|------------------------------|-------|-----------------|------------------------------|
| ۱    | S0M6    | ۷۰۰                        | ۷۰۰                               | ۰                 | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۶               | ۱۲۰۲                         |
| ۲    | S5M6    | ۷۰۰                        | ۶۶۵                               | ۵                 | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۶               | ۱۲۰۲                         |
| ۳    | S10M6   | ۷۰۰                        | ۶۳۰                               | ۱۰                | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۶               | ۱۲۰۲                         |
| ۴    | S15M6   | ۷۰۰                        | ۵۹۵                               | ۱۵                | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۶               | ۱۲۰۲                         |
| ۵    | S20M6   | ۷۰۰                        | ۵۶۰                               | ۲۰                | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۶               | ۱۲۰۲                         |
| ۶    | S0M12   | ۷۰۰                        | ۷۰۰                               | ۰                 | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۱۲              | ۱۲۰۲                         |
| ۷    | S5M12   | ۷۰۰                        | ۶۶۵                               | ۵                 | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۱۲              | ۱۲۰۲                         |
| ۸    | S10M12  | ۷۰۰                        | ۶۳۰                               | ۱۰                | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۱۲              | ۱۲۰۲                         |
| ۹    | S15M12  | ۷۰۰                        | ۵۹۵                               | ۱۵                | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۱۲              | ۱۲۰۲                         |
| ۱۰   | S20M12  | ۷۰۰                        | ۵۶۰                               | ۲۰                | ۲۵۰                                          | ۱۰۰                          | ۲/۵   | ۱۲              | ۱۲۰۲                         |

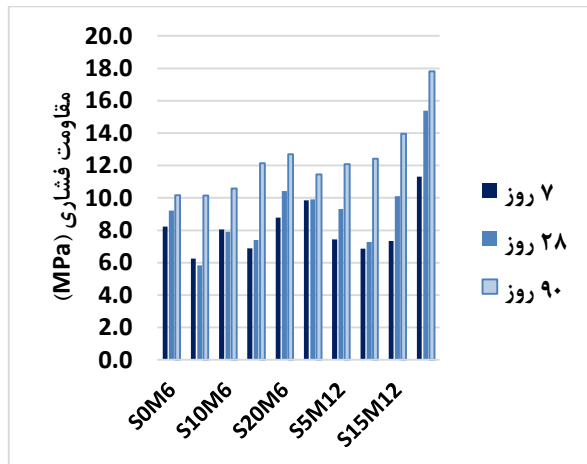
فشاری دستگاه آزمایش قرار گرفته و بارگذاری تا لحظه شکست نمونه ادامه می‌یابد. در این لحظه، حداکثر نیروی فشاری اعمال شده ثبت می‌شود و با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع نمونه، مقاومت فشاری محاسبه می‌گردد. در این پژوهش، آزمایش مقاومت فشاری علاوه بر سنین ذکر شده، برای تمامی نمونه‌ها پس از قرارگیری در محیط اسیدی به مدت ۲۸ روز نیز انجام شده است.

آزمایش مقاومت خمشی با هدف بررسی حداکثر تنش کششی که نمونه‌های آزمایشگاهی منشوری می‌توانند تحمل کنند، انجام شده است. این آزمایش پس از عمل‌آوری نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز در محیط آزمایشگاه و همچنین عمل‌آوری ۲۸ روزه در محیط اسیدی صورت گرفته است. پس از قرارگیری نمونه بر روی تکیه‌گاه‌ها، بارگذاری از طریق یک تیغه بارگذاری که به صورت عمود بر طول نمونه قرار دارد، در وسط دهانه اعمال می‌شود.

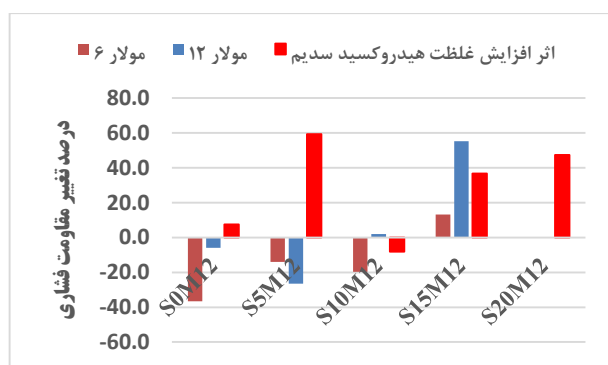
پس از ۲۸ روز عمل‌آوری و کسب مقاومت پایه، نمونه‌ها به دو گروه شاهد، نگهداری در محیط کنترل‌شده (دمای اتاق) و گروه تهاجم اسیدی، انتقال به مخزن حاوی محلول اسید سولفوریک ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) با تنظیم  $\text{pH}=1$ ، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در این محیط بسیار تهاجمی نگهداری شدند. برای ثابت نگهداشتن  $\text{pH}$ ، تغییرات محلول اسیدی به طور منظم کنترل و تنظیم شد. همچنین برای دستیابی به روانی مطلوب و کمک به توزیع بهتر ذرات مخلوط سیمانی از فوق روان کننده با نام تجاری FARCO PLAST P10-3R محصول شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰\*۵۰ میلی‌متر پس از عمل‌آوری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده است. پس از رسیدن نمونه‌ها به سن مورد نظر، آن‌ها زیر جک

تسریع و کامل تر می کند. ملاحظه شد که نمونه با ۲۰٪ MS و ۱۲ مولار NaOH بالاترین مقاومت فشاری را نشان می دهد. مقایسه نتایج سایر پژوهش ها، صحت روند را نیز تایید می کند [۲۷-۲۸].



شکل ۱- نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات های ژئوپلیمری در غلظت های ۶ و ۱۲ مولار NaOH و درصدهای مختلف MS براساس نتایج ارائه شده در نمودار شکل ۲، مشاهده می شود با افزایش درصد جایگزینی MS، مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه در هر دو گروه مخلوط با غلظت ۶ و ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم، افزایش یافته است. در هر دو گروه از طرح اختلاط، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مربوط به مخلوط حاوی ۲۰ درصد MS است. طرح اختلاط حاوی هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۲ مولار به در اثر جایگزینی ۲۰ درصد متاکائولن با MS، بیش از ۵۵ درصد مقاومت فشاری بالاتر نسبت به نمونه شاهد را نتیجه داده است. در مخلوط های با غلظت ۶ مولار هیدروکسید سدیم، جایگزینی ۲۰ درصد متاکائولن با سرباره، مقاومت فشاری ۲۸ روزه را بیش از ۱۳ درصد افزایش می دهد [۲۹].



شکل ۲- تأثیر درصد جایگزینی MS و افزایش غلظت هیدروکسید سدیم بر نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه

آزمایش های جذب آب با غوطه ور کردن نمونه های بتن در آب به مدت ۷۲ ساعت، وزن کردن آن ها پس از خشک شدن سطح، خشک کردن در کوره و سپس وزن کردن مجدد انجام می شود. جدول ۲، استانداردهای آزمایش های بکار رفته را نشان داده است. جذب آب با تقسیم مقدار کاهش وزن به وزن خشک شده در کوره محاسبه می گردد. میزان جذب کل می تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی دوام بتن در نظر گرفته شود. این آزمایش بر روی نمونه های مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰ میلی متر پس از عمل آوری تا سن ۲۸ روز انجام شده است.

جدول ۲- آزمایش ها و استاندارد مربوطه

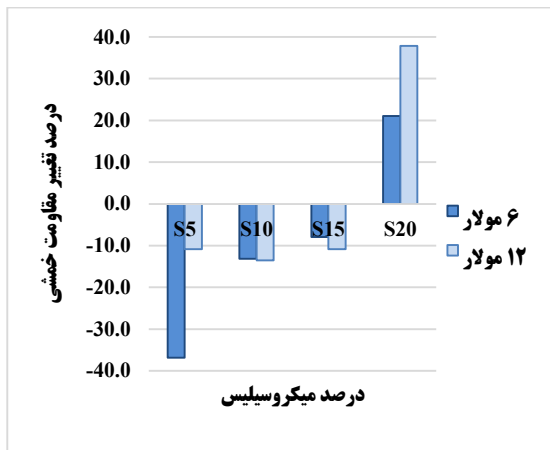
| نام آزمایش       | استاندارد       |
|------------------|-----------------|
| مقاومت فشاری     | ASTM C109 [22]  |
| مقاومت خمشی      | ASTM C348 [23]  |
| جذب آب           | ASTM C642 [24]  |
| مقاومت الکتریکی  | ASTM C1202 [25] |
| تحلیل ریزساختاری | ASTM C1723 [26] |

آزمایش مقاومت الکتریکی بتن، یکی از روش های غیرمخرب برای ارزیابی کیفیت و دوام بتن است. این آزمایش با اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن، اطلاعاتی در مورد تخلخل، رطوبت، تراکم و نفوذپذیری بتن ارائه می دهد. مقاومت الکتریکی بتن معمولاً با واحد اهم-سانتی متر ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) بیان می شود و به عواملی نظیر ترکیب مواد، نسبت آب به سیمان، سن بتن و شرایط محیطی بستگی دارد.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی

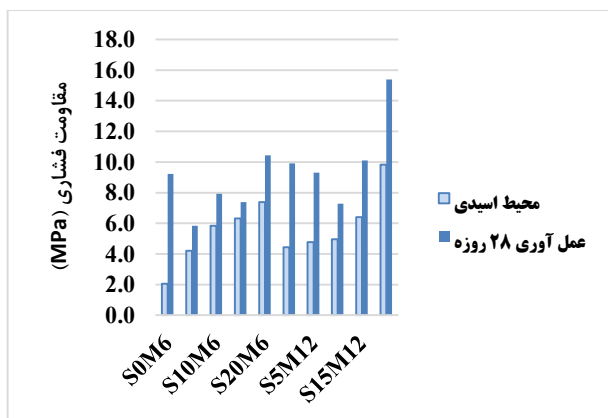
همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود؛ نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان دهنده دو روند قابل تأمل است. نتایج نشان می دهد؛ تأثیر MS با افزایش درصد جایگزینی MS تا سطح ۲۰ درصد، به طور پیوسته افزایش مقاومت فشاری را نشان می دهد. MS با تأمین سیلیکای فعال بیشتر، زمینه را برای تشکیل فازهای ژئوپلیمر متراکم تر فراهم می کند. در تأثیر غلظت قلیایی، افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۶ به ۱۲ مولار، به ویژه در نمونه های حاوی MS، منجر به افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری شد. این امر حاکی از آن است که غلظت قلیایی بالاتر، حلالیت سیلیکای موجود در MS را افزایش داده و واکنش های ژئوپلیمریزاسیون را

بررسی‌ها نتایج نشان، با افزایش درصد جایگزینی MS، مقاومت خمشی افزایش یافته است به طوری که در مخلوط‌های با غلظت ۶ و ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم در جایگزینی ۲۰ درصد MS، مقاومت خمشی به ترتیب ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درصد افزایش یافته است.



شکل ۴- تأثیر افزایش درصد MS بر نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه

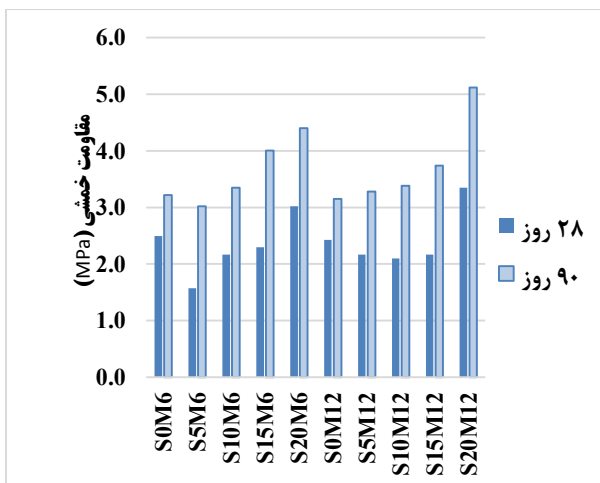
بررسی دوام در محیط اسیدی، مهم‌ترین یافته این پژوهش است. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود؛ نمونه‌های شاهد ۰٪ S بیشترین درصد افت مقاومت فشاری را پس از قرارگیری در اسید تجربه کردند؛ نمونه‌های حاوی MS، به‌طور قابل‌توجهی افت مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد نشان دادند. نمونه بهینه ۲۰٪ MS با ۱۲ مولار NaOH، کمترین درصد افت مقاومت فشاری را در محیط اسیدی به ثبت رساند.



شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری پس از عمل آوری ۲۸ روزه در محیط اسیدی

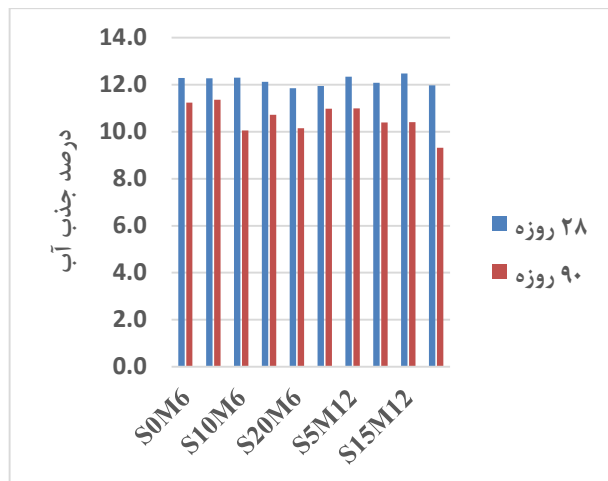
همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود؛ افزودن MS به عنوان جایگزین بخشی از متاکائولن به ویژه در طرح‌های اختلاط با غلظت

از طرفی نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد؛ که افزایش غلظت NaOH، تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی MS در مقایسه با مخلوط‌های فاقد MS و فقط حاوی متاکائولن دارد. در حضور غلظت‌های بالاتر NaOH، MS سریع‌تر و به میزان بیشتری حل می‌شود و یون‌های سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) را برای تشکیل ساختار ژئوپلیمری آزاد می‌کند. این فرایند به تشکیل ژل N-A-S-H (سدیم-آلومینو-سیلیکات-هیدرات) کمک می‌کند که پایه ای مهم برای مقاومت فشاری بالاتر است. افزایش غلظت NaOH باعث فعال‌سازی بیشتر MS می‌شود و در نتیجه، سرعت و میزان واکنش‌های ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان داده است؛ با ثابت در نظر گرفتن غلظت مولار هیدروکسید سدیم، با افزایش درصد جایگزینی MS، مقاومت فشاری ۲۸ روزه افزایش می‌یابد. MS به دلیل اندازه بسیار ریز ذرات، فضای خالی بین ذرات متاکائولن را پر می‌کند و باعث کاهش تخلخل و افزایش تراکم ماتریس ژئوپلیمری می‌شود [۲۹]. در مخلوط‌های حاوی MS، افزایش غلظت NaOH منجر به تولید بیشتر ژل N-A-S-H می‌شود. این ژل به دلیل ساختار سیلیکاتی متراکم و پیوندهای قوی، مقاومت فشاری بالاتری ایجاد می‌کند. نتایج مقاومت خمشی در شکل ۳، روند مشابهی را با مقاومت فشاری دنبال می‌کند. نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد MS، بالاترین مقاومت خمشی را نشان دادند.



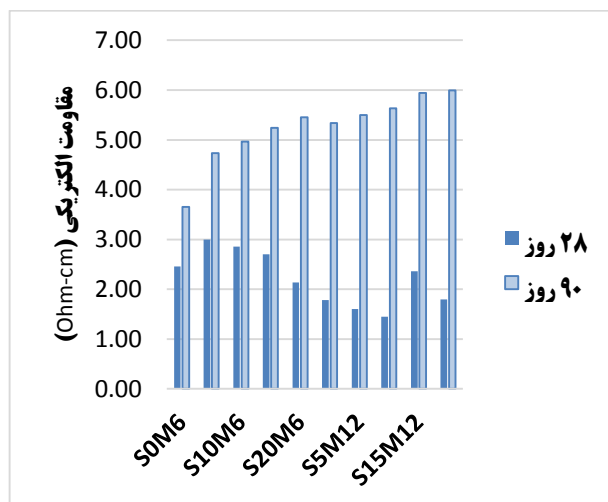
شکل ۳- نتایج آزمایش مقاومت خمشی پس از عمل آوری تا سنین ۲۸ و ۹۰ روز

در نمودار شکل ۴، تأثیر استفاده از MS به عنوان جایگزین بخشی از متاکائولن در مخلوط ملات ژئوپلیمری، نشان داده شده است.



شکل ۷- نتایج جذب آب نمونه های تا سن ۲۸ روز

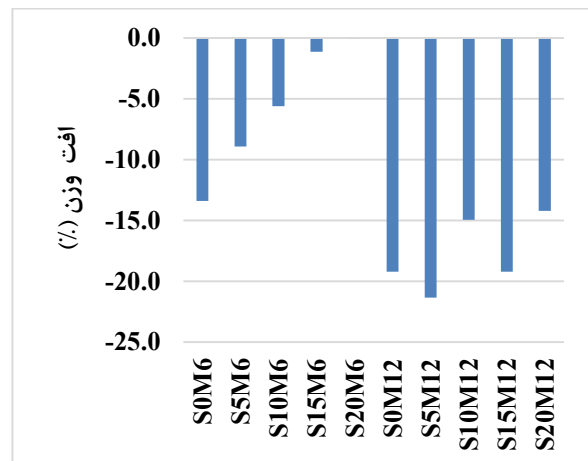
نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی (شکل ۸)، به تفسیر مشخصات دوام بتن و ملات کمک می کند. مقاومت الکتریکی کم تر ممکن است نشان دهنده تخلخل بیشتر، نفوذپذیری بالاتر و احتمالاً وجود ترک های ریز در بتن باشد که می تواند منجر به کاهش دوام و افزایش احتمال خوردگی آرماتورها شود.



شکل ۸- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سنین ۲۸ و ۹۰ روز

از سوی دیگر، مقاومت الکتریکی بالا معمولاً نشان دهنده کیفیت بهتر بتن، تراکم بیشتر و دوام بالاتر در برابر عوامل محیطی است. این آزمایش به ویژه در ارزیابی بتن های قرار گرفته در محیط های خورنده مانند سازه های دریایی یا مناطق دارای نمک های یخزدا بسیار مفید است، زیرا مقاومت الکتریکی بالا نشان دهنده کاهش احتمال نفوذ عوامل مخرب به داخل بتن است. بنابراین، تفسیر نتایج این آزمایش می تواند به مهندسان در ارزیابی عملکرد بتن و تصمیم گیری های مربوط به نگهداری و تعمیر سازه ها کمک کند.

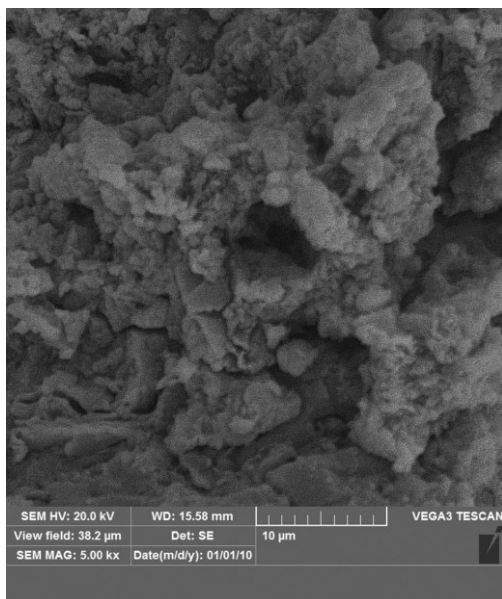
۶ مولار هیدروکسید سدیم باعث کاهش قابل توجه افت وزن ناشی از محیط اسیدی شده است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی MS با متاکائولن، افت وزن ناشی از محیط اسیدی کاهش یافته است. به طوری که کمترین مقدار افت وزن مربوط به طرح اختلاط حاوی ۲۰ درصد MS است. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، میزان افت وزن ناشی از محیط اسیدی افزایش می یابد.



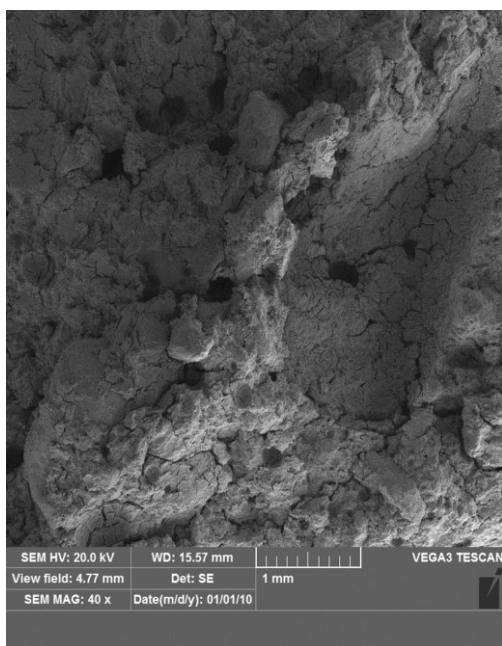
شکل ۹- درصد افت وزن ناشی از محیط اسیدی

براساس نتایج، در مخلوط های با غلظت بالاتر هیدروکسید سدیم نیز، افزایش درصد جایگزینی MS باعث کاهش افت وزن ناشی از محیط اسیدی شده است. مخلوط های ملات ژئوپلیمری حاوی NaOH با غلظت مولار ۱۲ و بالاتر، در معرض محیط اسیدی افت وزن بیشتری نشان می دهند. NaOH یک ماده قلیایی قوی است. در محیط اسیدی، این ترکیب به سرعت با اسید واکنش داده و نمک و آب تشکیل می دهد. هرچه غلظت هیدروکسید سدیم بالاتر باشد، مقدار بیشتری از آن در محیط اسیدی حل شده و از ساختار ملات خارج می شود. این فرایند باعث کاهش وزن ملات می گردد. براساس نتایج شکل ۷، مشاهده می شود افزودن MS به مخلوط ملات ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن باعث کاهش مقدار جذب آب در هر دو گروه مخلوط با غلظت های ۶ و ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم می شود. با افزایش درصد جایگزینی MS مقدار جذب آب کاهش یافته است که این موضوع در مخلوط های عمل آوری شده تا سن ۹۰ روز با شدت بیشتری مشاهده می شود که ناشی از تکمیل فرایند ژئوپلیمرزاسیون و مشارکت مقادیر بیشتر MS در این فرایند و بهبود بیشتر ریزساختار است.

(SEM) نمونه‌های شاهد و نمونه بهینه (۲۰٪ MS) قبل و بعد از مواجهه با اسید را نشان می‌دهد. مقایسه تصاویر قبل و بعد، تغییرات چشمگیری در ریزساختار ملات ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن را نشان می‌دهد. در ابتدا (قبل از قرار گرفتن در معرض)، تصویر یک ماتریس نسبتاً متراکم با تخلخل محدود و پراکنده را نشان داد که نشان دهنده پیشرفت خوب فرایند ژئوپلیمریزاسیون و پر شدن مؤثر منافذ توسط ۲۰٪ دوده سیلیس است.



شکل ۹- تصویر SEM طرح S20M6 پیش از قرارگیری در محیط اسیدی با بزرگنمایی ۵ هزار برابر



شکل ۱۰- تصویر SEM طرح S20M6 پیش از قرارگیری در محیط اسیدی با بزرگنمایی ۴۰ برابر

شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی MS، مقاومت الکتریکی ملات‌ها به طور کلی افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت الکتریکی می‌تواند ناشی از کاهش تخلخل و افزایش تراکم ملات‌ها به دلیل حضور MS باشد. همچنین، مشاهده می‌شود که ملات‌های با غلظت بالاتر هیدروکسید سدیم نسبت به ملات‌های با غلظت پایین‌تر مقاومت الکتریکی بالاتری دارند. این موضوع احتمالاً به دلیل بهبود فرایند پلی‌مریزاسیون و تشکیل ساختار متراکم‌تر در حضور غلظت‌های بالاتر هیدروکسید سدیم است.

به طور کلی، نتایج این نمودار نشان می‌دهد که جایگزینی MS و افزایش غلظت هیدروکسید سدیم می‌تواند به بهبود مقاومت الکتریکی و در نتیجه دوام ملات‌های ژئوپلیمری کمک کند. این بهبود می‌تواند منجر به افزایش مقاومت در برابر نفوذ عوامل مخرب و افزایش طول عمر ملات شود.

یکی از چالش‌های اصلی در ساخت ملات‌های ژئوپلیمری متاکائولنی، کنترل کارایی در حضور ریزدانه‌های بسیار فعال مانند MS است. افزایش سطح ویژه و وجود ذرات ریز MS باعث افزایش نیاز آبی و بالا رفتن ویسکوزیته خمیر می‌شود و در نتیجه روانی مخلوط کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش مولاریته تا ۱۲ مولار که به افزایش ویسکوزیته محلول فعال‌کننده و تسریع واکنش‌های ژل‌زایی اولیه منجر می‌شود. همچنین جذب بخشی از آب آزاد توسط ذرات ریز و تشکیل سریع‌تر شبکه ژلی، امکان تراکم و قالب‌گیری یکنواخت را دشوارتر می‌سازد. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود؛ کنترل کارایی از طریق تنظیم نسبت محلول به پیش‌ماده، بهینه‌سازی نسبت سیلیکات به هیدروکسید، یا استفاده محدود از روان‌کننده‌های سازگار با محیط قلیایی انجام شود تا اثرات مثبت MS بر ریزساختار و دوام بدون افت شدید کارایی حاصل گردد.

نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی به‌وضوح نشان می‌دهد که استفاده از MS به‌عنوان جایگزین جزئی، پایداری شیمیایی ملات ژئوپلیمری را در برابر اسید سولفوریک به‌شدت افزایش می‌دهد. تخریب ملات‌های ژئوپلیمری در محیط اسیدی به دلیل شکستن زنجیره‌های پلیمری سیلوکسو و شستشوی یون‌های قلیایی (مانند سدیم) رخ می‌دهد [۳۱-۳۳].

شکل شماره ۹ تا ۱۲، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

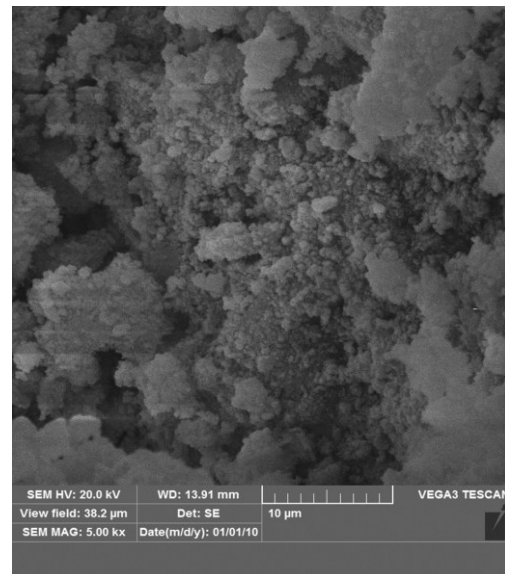
می گردد. افزایش تخلخل و ترک‌هایی که پس از قرار گرفتن در معرض محیط اسیدی مشاهده می‌شود، نشان دهنده کاهش در انسجام و به طور بالقوه کاهش در خواص مکانیکی است. بافت سطح نیز تغییر کرده و ناپایدارتر و پوسته‌ای به نظر می‌رسد، که احتمالاً به دلیل رسوب سولفات‌ها است. مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که این نتایج با نتایج سایر پژوهش‌ها یافته‌های [۳۴]، که افزایش مقاومت در برابر اسید را در اثر کاهش نفوذپذیری گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. با این حال، مطالعه حاضر تأثیر هم‌افزایی غلظت بالای NaOH و MS را به طور خاص برجسته می‌کند. در مطالعات پیشین، که عموماً از غلظت‌های پایین‌تر فعال‌کننده استفاده شده، این میزان از بهبود دوام اسیدی مشاهده نشده است. این امر نشان می‌دهد که فعال‌سازی مؤثر سیلیکای موجود در MS، نیازمند شرایط قلیایی شدیدتر برای دستیابی به بالاترین دوام در محیط‌های تهاجمی است. در نتیجه، تراکم ساختار، کاهش تخلخل و تثبیت یون‌های سدیم در شبکه پلیمری متراکم شده توسط MS، عامل اصلی افزایش دوام ملات‌های ژئوپلیمری در برابر اسید است.

#### ۴- نتیجه گیری

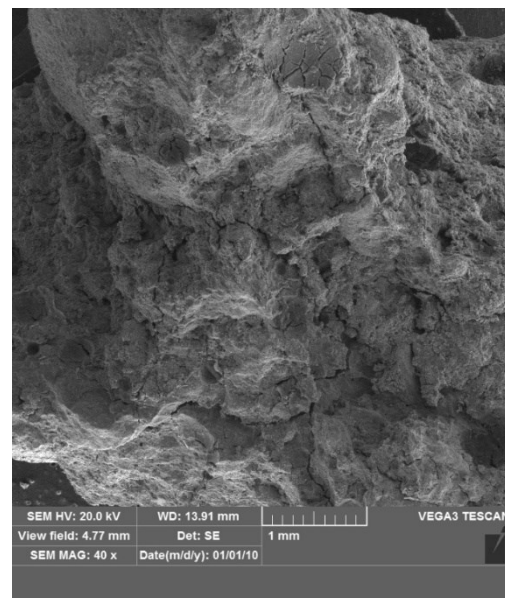
این پژوهش به طور موفقیت‌آمیز تأثیر جایگزینی MS بر خواص مکانیکی و دوام ملات‌های ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن در شرایط تهاجم اسیدی را نشان داده است. نتایج نهایی این پژوهش به شرح زیر خلاصه شده است.

- براساس نتایج در سن عمل آوری ۲۸ روزه، در هر دو گروه مخلوط حاوی ۶ و ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم، جایگزینی ۲۰ درصد وزن متاکائولن با MS باعث افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد می‌شود. در مخلوط‌های با غلظت ۶ و ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم در جایگزینی ۲۰ درصد MS، مقاومت خمشی به ترتیب ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درصد افزایش یافته است.

- استفاده از MS در مخلوط ملات ژئوپلیمری به عنوان جایگزین بخشی از متاکائولن تأثیر قابل توجهی بر افزایش دوام و کاهش مقدار افت مقاومت فشاری ناشی از محیط اسیدی دارد. در غلظت ۶ مولار هیدروکسید سدیم پس از قرارگیری در محیط اسیدی ۷۷/۷ درصد افت مقاومت فشاری نتیجه داده است در حالی که این مقدار برای مخلوط حاوی ۲۰ درصد MS، ۲۹/۳ درصد است.



شکل ۱۱- تصویر SEM طرح S20M6 پس از قرارگیری در محیط اسیدی با بزرگنمایی ۵ هزار برابر



شکل ۱۲- تصویر SEM طرح S20M6 پس از قرارگیری در محیط اسیدی با بزرگنمایی ۴۰ برابر

ماتریس دارای بافتی منسجم است که نشان‌دهنده شبکه قوی محصولات واکنش است. با این حال، پس از قرار گرفتن در معرض اسید سولفوریک، تخریب قابل توجهی در ریزساختار مشهود است. ماتریس به طور قابل توجهی متخلخل‌تر و قطعه قطعه شده و با افزایش در اندازه و تعداد حفرات به نظر می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که اسید سولفوریک با ماتریس ژئوپلیمر واکنش داده و منجر به تجزیه فازهای ژل پیوندی (شامل C-S-H و آلومین سیلیکات‌ها) شده و تشکیل محصولات واکنش انبساطی، مانند گچ



این پژوهش با بررسی هم‌زمان اثر غلظت قلیایی بالا و درصد بالای MS تحت عمل‌آوری تسریع‌شده در محیط اسیدی، یک طرح اختلاط بهینه (۲۰٪ MS، ۱۲ مولار NaOH)، را معرفی می‌کند که عملکرد دوام ملات‌های ژئوپلیمری مبتنی بر متاکائولن را به‌طور چشمگیری نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود می‌بخشد و خلأ موجود در دانش مرتبط با مقاومت در برابر محیط‌های تهاجمی را پر می‌کند.

## ۵- مراجع

- [1] Chaudhury, R., Sharma, U., Thapliyal, P. C., & Singh, L. P. (2023). Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector. *Journal of Cleaner Production*, 417, 137466.
- [2] Wojtacha-Rychter, K., Kucharski, P., & Smolinski, A. (2021). Conventional and alternative sources of thermal energy in the production of cement—An impact on CO2 emission. *Energies*, 14(6), 1539.
- [3] Wong, L. S. (2022). Durability performance of geopolymers: A review. *Polymers*, 14(5), 868.
- [4] Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, 35(6), 1233-1246.
- [5] Davidovits, J. (1994, October). Properties of geopolymer cements. In *First international conference on alkaline cements and concretes* (Vol. 1, pp. 131-149).
- [6] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.
- [7] Okoye, F. N., Prakash, S., & Singh, N. B. (2017). Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *Journal of cleaner Production*, 149, 1062-1067.
- [8] Jindal, B. B., Alomayri, T., Hasan, A., & Kaze, C. R. (2022). Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-26.
- [9] Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and concrete research*, 37(12), 1583-1589.
- [10] Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic

افزودن MS به عنوان جایگزین بخشی از متاکائولن به‌ویژه در طرح‌های اختلاط با غلظت ۶ مولار هیدروکسید سدیم باعث کاهش قابل توجه افت وزن ناشی از محیط اسیدی شده است همچنین با افزایش درصد جایگزینی MS با متاکائولن، افت وزن ناشی از محیط اسیدی کاهش یافته است.

نتایج تحلیل کمی نتایج نشان می‌دهد که ترکیب هم‌زمان درصد بالاتر میکروسیلیس و غلظت بیشتر هیدروکسید سدیم، منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری شده است. در میان طرح‌های مورد بررسی، نمونه حاوی ۲۰ درصد میکروسیلیس در حضور محلول هیدروکسید سدیم ۱۲ مولار بالاترین مقادیر مقاومت فشاری و خمشی را از خود نشان داده و بنابراین به عنوان طرح اختلاط بهینه از نظر عملکرد مکانیکی معرفی می‌شود.

گروه نمونه‌های با هیدروکسید سدیم شش مولار، با افزایش درصد MS از ۰ تا ۲۰ درصد، افت وزن نمونه‌ها به‌طور پیوسته کاهش یافته است؛ که بیانگر نقش مؤثر ذرات بسیار ریز MS در پر کردن حفرات، کاهش تخلخل و افزایش تراکم ماتریس ژئوپلیمری است. در نمونه‌های با هیدروکسید سدیم دوازده مولار رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود. با این حال، افزودن MS در این گروه نیز تا حدودی موجب بهبود مقاومت در برابر محیط اسیدی شده است.

استفاده از MS، نفوذپذیری ملات را بهبود بخشیده و افت مقاومت فشاری ناشی از قرارگیری ۲۸ روزه در اسید سولفوریک با pH=1 را به حداقل رساند. این امر نشان‌دهنده قابلیت ملات‌های ژئوپلیمری حاوی MS برای استفاده در محیط‌های خورنده است. تحلیل‌های ریزساختاری (SEM) نیز مؤید این امر است که بهبود خواص دوام، مستقیماً با تشکیل یک ساختار پلیمری متراکم‌تر و همگن‌تر در اثر حضور MS و غلظت قلیایی مناسب مرتبط است. تصاویر قبل از اسید برای نمونه در سیلیس ۲۰ درصد و NaOH تا ۶ مولار نشان‌دهنده ماتریسی نسبتاً متراکم با تخلخل محدود است؛ اما پس از قرارگیری در اسید، افزایش تخلخل، قطعه‌قطعه شدن ماتریس و تخریب فازهای ژلی مشاهده شده است. با این حال، مقدار بسیار کم افت وزن در سیلیس ۲۰ درصد و NaOH تا ۱۲ مولار نشان می‌دهد که تراکم اولیه ناشی از حضور ۲۰٪ MS توانسته است شدت تخریب اسیدی را تا حد زیادی کنترل کند.

- (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- [22] ASTM, A. (2013). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). *Annual Book of ASTM Standards* Annual Book of ASTM Standards, 4(1), 1-9.
- [23] ASTM, C. (2008). Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. In *American Society of Testing Materials* (Vol. 348).
- [24] ASTM, C. (2006). 642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *Annual book of ASTM standards*, 4(2).
- [25] Annually, R. I. (1995). *Astm standards. International Standards Worldwide*.
- [26] Davis, P. (2025). Evaluation of Chloride Diffusion in Concrete Using Bulk Diffusion Test and Scanning Electron Microscopy.
- [27] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and concrete research*, 114, 40-48.
- [28] Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. *Cement and concrete research*, 40(9), 1341-1349.
- [29] Falah, M., Ohenoja, K., Obenaus-Emler, R., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2020). Improvement of mechanical strength of alkali-activated materials using micro low-alumina mine tailings. *Construction and Building Materials*, 248, 118659.
- [30] Sajedi, S. F. and Heidari, E. (2024). Investigation and comparison of the effect of microsilica and nanosilica on the rheological and mechanical properties of concrete. *Concrete Research*, 17(3), 113-133. (in persian) doi: 10.22124/jcr.2024.21928.1567
- [31] Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670.
- [32] Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., & De Gutierrez, R. M. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 46-54.
- [33] Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. (2008). Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. *Journal of Materials Science*, 43(3), 824-831.
- [34] Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2014). Durability of alkali- activated materials: progress and perspectives. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(4), 997-1008.
- polymer technology in the development of 'green concrete'. *cement and concrete research*, 37(12), 1590-1597.
- [11] Okoye, F. N., Durgaprasad, J., & Singh, N. B. (2016). Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceramics International*, 42(2), 3000-3006.
- [12] Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, 91, 1-8.
- [13] Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design* (1980-2015), 62, 32-39.
- [14] Hossein, H. A., El-Kheshen, A. A., & Zawrah, M. F. (2025). Influence of silica-fume's addition technique and curing conditions on microstructure, physical and mechanical properties of geopolymer. *Scientific Reports*, 15(1), 38486.
- [15] Vogt, O., Ukrainczyk, N., & Koenders, E. (2021). Effect of silica fume on metakaolin geopolymers' sulfuric acid resistance. *Materials*, 14(18), 5396.
- [16] Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and concrete research*, 114, 40-48.
- [17] Longhi, M. A., Rodriguez, E. D., Walkley, B., Eckhard, D., Zhang, Z., Provis, J. L., & Kirchheim, A. P. (2022). Metakaolin-based geopolymers: Efflorescence and its effect on microstructure and mechanical properties. *Ceramics International*, 48(2), 2212-2229.
- [18]. Amooie, M. , Sadrmtazi, A. and Neshaei, S. A. (2025). Investigation of the Effect of Micro-Silica Replacement on the Mechanical Behavior of Slag-Based Geopolymer Concrete. *Concrete Research*, 18(1), 21-32. doi: 10.22124/jcr.2025.29870.1693.
- [19]. Amooie, M and Sadrmtazi, A . (2026). Mechanical Performance of Slag-Based HPFRGC with Varying Silica Fume Replacement and Fiber Types. (e2318). *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 14(2), e2318 doi: 10.22075/jrce.2025.2318.
- [20] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.
- [21] Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T.

## **Durability Assessment of Metakaolin-Based Geopolymer Mortars Incorporating Microsilica under Accelerated Curing in Acidic Environments**

**Komeyl Karimi-Moridani \***

**Department of Civil Engineering, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.**

**Hossein Jamasbi**

**Department of Civil Engineering, La.C., Islamic Azad University, Lahijan, Iran.**

**Vahid Ramzani**

**Department of Civil Engineering, Ahrar Institute of Technology and Higher Education, Rash, Iran.**

### **Abstract**

In recent decades, the adverse environmental impacts associated with Ordinary Portland Cement (OPC) production have encouraged researchers to investigate sustainable and environmentally friendly alternatives such as geopolymer materials. One of the main challenges in the application of geopolymer mortars is the evaluation of their performance in aggressive environments, particularly acidic conditions. In this study, the effect of incorporating microsilica at weight replacement levels of 5%, 10%, 15%, and 20% as a partial substitute for metakaolin in geopolymer mortar was investigated. Sodium hydroxide was employed as the alkaline activator at two molar concentrations of 6 M and 12 M, and all specimens were subjected to an accelerated curing regime. To assess durability, the specimens were immersed in a sulfuric acid solution with a pH of 1 for 28 days after the initial curing period. The compressive strength test results indicated that increasing the microsilica replacement level and the sodium hydroxide concentration effectively enhanced the 28-day compressive strength. Replacing 20% of the binder with microsilica at a molarity of 12 M increased the compressive strength by more than 55% and the flexural strength by more than 37% compared with the sample without microsilica. Furthermore, the results demonstrated that the incorporation of microsilica significantly improves the durability of geopolymer mortars and minimizes the reduction in compressive strength caused by acidic exposure. These findings highlight the potential application of geopolymer mortars in aggressive environments.

**Keywords:** Geopolymer mortar; Microsilica; Acidic environment; Metakaolin; Accelerated curing.

---

\* Corresponding Author: karimi.k@srbiau.ac.ir

