



دوام ملات‌های پوششی با پایه سیمانی و ژئوپلیمری در برابر تهاجم اسید سولفوریک

فرامرز مودی*، علی‌اکبر رضانیان‌پور، فرهاد فرهادیان، پوریا دشتی

دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:

دوام
تهاجم اسیدسولفوریک
ملات پوششی پایه سیمانی
ملات ژئوپلیمری
مواد جایگزین سیمان.

خلاصه: حمله اسید سولفوریک یکی از مکانیزم‌های خرابی سازه‌های بتنی شایع در تونل‌های انتقال آب بوده که نیاز به تعمیرات اساسی و پرهزینه برای مقابله با آن را دو چندان کرده است. یکی از راه‌های تعمیر این قبیل سازه‌ها اجرای لایه پوششی محافظ بر روی سطح بتن داخل تونل‌ها می‌باشد. بخش عمده‌ای از پوشش‌های محافظ را ملات‌های با پایه سیمانی تشکیل می‌دهند، اما در چند سال اخیر با توجه به اهمیت آثار زیست محیطی و همچنین در راستای کاهش مصرف انرژی ناشی از تولید سیمان، ملات‌های ژئوپلیمری نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش به منظور مقایسه ملات‌های پایه سیمانی و ژئوپلیمری، ۷ مخلوط شامل ۵ طرح ملات پایه سیمانی با جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی و ۲ طرح ملات ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی حاوی دوده سیلیس، به عنوان طرح‌های مورد استفاده انتخاب شده و جهت بررسی ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها آزمایشات تعیین مقاومت فشاری و مقاومت چسبندگی کششی (Tensile Adhesive Strength) در سنین مختلف صورت پذیرفته است. همچنین جهت ارزیابی دوام آن‌ها نیز آزمایشات جذب آب موئینگی و تغییر طول، افت مقاومت فشاری و افت وزن پس از قرارگیری در محلول اسید سولفوریک با pH برابر با ۱ انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، استفاده از مواد جایگزین سیمان (سرباره و پوزولان طبیعی) سبب کاهش ۲۵ درصدی مقاومت فشاری، افزایش ۵۰ درصدی مقاومت چسبندگی و کاهش تغییر طول و افت وزن و مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در معرض اسید سولفوریک شده است. همچنین استفاده از ملات‌های ژئوپلیمری در سنین اولیه عملکرد مناسب تری در محیط‌های اسیدی نسبت به ملات‌های پایه سیمانی داشته است.

۱- مقدمه

آن در طبیعت به ندرت قابل مشاهده است. به همین جهت، این ماده معمولاً بر اثر نشست یا خرابی در مخازن نگهداری اسید یا انجام واکنش‌های شیمیایی وارد طبیعت می‌شود. از طرفی اسید سولفوریک طی ۲ مکانیزم شیمیایی و بیولوژیکی نیز به وجود می‌آید [۳]. به طور کلی فرآورده‌های اصلی واکنش خوردگی ناشی از اسید سولفوریک در ترکیبات با پایه سیمانی نظیر بتن و ملات‌های پوششی، گچ و اترینگایت می‌باشد که لایه‌ای نرم و نفوذپذیر بر سطح این ترکیبات به وجود می‌آورد. به دلیل افزایش حجم ایجاد شده در زمان تشکیل اترینگایت، تنش داخلی در مواد افزایش یافته و در نهایت ریزترک‌ها و یا حتی ترک‌های بزرگی در بتن به وجود می‌آیند که این عامل می‌تواند سبب تشدید حمله اسید سولفوریک گردد [۴]. آنیون موجود در اسید سولفوریک (یون سولفات) ماهیت متفاوتی با سایر اسیدها داشته لذا مکانیزم خرابی سازه‌های بتنی در اثر حمله آن نیز با سایر اسیدها متفاوت می‌باشد. بر همین اساس مطالعه ویژگی‌های واکنش آن با موادی که در محیط‌های در معرض تهاجم این اسید استفاده می‌شوند از جمله پوشش‌هایی که در تعمیر

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین و بادوام‌ترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود که وجود منابع فراوان تشکیل‌دهنده آن، سازگاری با محیط‌زیست، دوام بالا در شرایط محیطی مختلف و مقرون به صرفه بودن از دلایل مصرف روزافزون این ماده می‌باشد. یکی از عوامل تخریب بتن، حمله اسیدها به آن است. سازه‌هایی نظیر لوله‌های فاضلاب، تأسیسات تصفیه آب و فاضلاب، ساختمان‌های صنعتی و کشاورزی و ... نمونه‌هایی از سازه‌های بتنی در معرض حمله اسیدها هستند. نوع خرابی‌های ایجاد شده در سازه‌های بتنی بستگی به نوع اسید دارد ولی به صورت کلی اسیدها با انحلال اجزای بتن، باعث تخریب آن می‌شوند [۱]. اسیدها به دو دسته اسیدهای آلی و معدنی تقسیم می‌شوند. اسیدهای آلی منشأ طبیعی دارند در حالی که اسیدهای معدنی عمدتاً از حل شدن گازها در آب به وجود می‌آیند [۲]. اسید سولفوریک جزو اسیدهای قوی معدنی به شمار رفته و وجود آزاد

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fmoody@aut.ac.ir



سرباره‌ای در محلول اسید سولفوریک، در ابتدا یک افت اولیه در مقاومت مشاهده شد اما با گذشت زمان و به علت افزایش سن و به بلوغ رسیدن هسته مرکزی نمونه، افزایش مقاومت گزارش شد [۱۷]. راجا مانا و همکارانش^۱ نیز عملکرد بتن ژئوپلیمری ساخته شده با سرباره کوره بلند و محلول‌های قلیا فعال سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات در اسید سولفوریک ۲ و ۱۰ درصد را مورد تحقیق قرار دادند. پس از ۹۰ روز میزان کاهش وزن نمونه‌های ژئوپلیمر ۴/۵ و ۷/۲ درصد به ترتیب برای اسید سولفوریک ۲ و ۱۰ درصد و برای نمونه با سیمان پرتلندی به ترتیب ۸/۷ و ۲۲/۶ درصد بوده است. همچنین درصد کاهش مقاومت فشاری نیز برای نمونه‌های ژئوپلیمری در اسید سولفوریک ۲ و ۱۰ درصد به ترتیب ۱۵/۲ و ۷۲/۱ و برای بتن سیمان پرتلندی به ترتیب ۳۶/۲ و ۸۲/۴ درصد گزارش شده است [۱۸].

تعمیرات سازه‌های بتنی که در اثر عوامل محیطی و بارهای بهره‌برداری دچار مشکل شده‌اند، از مسائل عمده کشورهای مختلف جهان در دهه‌های اخیر بوده است. همان‌طور که گفته شد یکی از علل مهم خرابی سازه‌های بتنی تهاجم اسیدها خصوصاً تهاجم اسید سولفوریک می‌باشد. پس از تشخیص علت خرابی، مهم‌ترین کار انتخاب مواد و مصالح تعمیراتی مناسب است که باید ویژگی‌های خاصی داشته باشند. با توجه به تحقیقات مختلف صورت گرفته، استفاده از ملات پایه سیمانی با جایگزینی درصدهای مختلف سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی به جای سیمان پرتلند و ملات ژئوپلیمری می‌تواند از گزینه‌های مناسب برای کاربرد در تعمیرات سازه‌های آسیب دیده بر اثر تهاجم اسید سولفوریک باشد.

با توجه به مسائل ذکر شده و نیاز روزافزون به مصالح تعمیراتی مقرون به صرفه که دوام بالایی در برابر تهاجم اسید سولفوریک داشته باشند، نیاز به مطالعات بیشتر را افزایش داده است. در اکثر پژوهشهایی که تاکنون در زمینه دوام در برابر حمله اسید سولفوریک صورت گرفته است، از نمونه‌های بتنی استفاده شده و ملاتهای ترمیمی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این تا به حال، تاثیر استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی که عملکرد خوبی در بهبود دوام نمونه‌های بتنی داشته‌اند، بر چسبندگی و دوام این ملات‌ها ارزیابی نشده است. مقایسه نتایج این ملات‌ها با ملاتهای ترمیمی ژئوپلیمری با پایه سرباره و حاوی دوده سیلیس می‌تواند گام موثری برای انتخاب نهایی بین این مصالح برای سازه‌های آسیب دیده باشد. لذا در این پژوهش اثر پوزولان‌های طبیعی و سرباره کوره آهن‌گدازی در بهبود دوام ملات‌های پوششی با پایه سیمانی در برابر تهاجم اسید سولفوریک

و نگهداری سازه‌های آسیب دیده مورد استفاده قرار خواهند گرفت، ضروری بوده و می‌تواند تأثیر به‌سزایی در اثر بخشی لایه ترمیم شده و بهبود دوام کل سازه داشته باشد.

در تحقیقاتی که توسط محققین مختلف انجام شده است عوامل زیادی به عنوان فاکتورهای تأثیرگذار بر شدت تهاجم اسید سولفوریک معرفی شده است. نتایج بررسی فتوهی و هیوز^۱ بر روی تأثیر نسبت آب به سیمان بتن در برابر حمله اسید سولفوریک ۲ درصد با pH برابر ۱/۷ نشان می‌دهد که کاهش نسبت آب به سیمان باعث تشدید خرابی‌های ناشی از تهاجم اسید سولفوریک می‌شود [۵]. در تحقیقات هیواید و همکاران^۲ نیز مشخص شد که بتن‌های با نسبت آب به سیمان کمتر، دوام بهتری در برابر حمله اسید سولفوریک داشته‌اند [۶]. در تحقیقات متعدد دیگر نیز افزایش عیار سیمان مصرفی را موجب افزایش میزان کلسیم هیدروکسید و عدم پایداری لایه خورده شده بر اثر اسیدسولفوریک می‌دانند [۷-۱۲]. در مورد نقش مواد جایگزین سیمان در عملکرد ترکیبات پایه سیمانی در برابر تهاجم اسید سولفوریک نیز تحقیقات متعددی صورت گرفته است. در تحقیقات مهتا^۳ تأثیر استفاده از ۱۵ درصد جایگزینی دوده سیلیس به جای سیمان پرتلند سبب بهبود دوام بتن در محلول اسید سولفوریک با غلظت ۱ درصد گزارش شده است [۱۳]. در حالی که در تحقیقی مشابه مونتنی و همکاران^۴ تأثیر استفاده از دوده سیلیس را مثبت ارزیابی نکرده‌اند [۱۴]. نتایج تحقیقات سنه‌اجی و همکاران^۵ که بر روی استفاده از پوزولان طبیعی بر مقاومت بتن در برابر حمله سولفوریک اسید انجام شده است نشان می‌دهد که در صورت عمل‌آوری کافی صورت گیرد، عملکرد نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد بهبود می‌یابد [۱۵]. تحقیقات باخاروف و همکاران^۶ نیز نشان دهنده مقاومت بالاتر بتن حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به بتن معمولی در برابر تهاجم اسید سولفوریک می‌باشد [۱۶].

علاوه بر ترکیبات با پایه سیمانی، محققین بسیاری دوام بالای خمیرهای ژئوپلیمری در برابر اسید را مورد بررسی قرار داده و تأیید نموده‌اند. در بررسی‌ها مشخص شده است که به علت وجود مقادیر پایین‌تر کلسیم هیدروکسید در خمیرهای ژئوپلیمری مکانیزم خوردگی اسیدی نیز در آن‌ها متفاوت است. در تحقیقات برنال و همکارانش^۷ بر روی قرارگیری نمونه‌های ژئوپلیمری

- 1 Fattuhi and Hughes
- 2 Hewayde et al.
- 3 Mehta
- 4 Monteny et al.
- 5 Senhadji et al.
- 6 Bakharev et al.
- 7 Bernal et al.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مصالح سیمانی مورد استفاده

Table 1. Chemical analysis of cementing materials

LOI	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۲/۱	۰/۵۴	۰/۱۸	۲/۷	۶۳/۲۲	۳/۵۱	۴/۱۲	۲۲/۵۷	سیمان (%)
۰/۵	۱/۳۲	۰/۴۲	۰/۸۷	۰/۴۹	۰/۷	۱/۱	۹۴/۳	دوده سیلیس (%)
۰/۰۲	۰/۷	۰/۶۱	۸/۵۲	۳۶/۷۵	۱/۰۱	۱۱/۵۶	۳۷/۲۱	سرباره کوره آهن‌گدازی (%)
۴/۲۹	۲/۹	۲/۴۹	۱/۵۲	۴/۴	۳/۸۲	۱۱/۲	۶۸/۳	پوزولان طبیعی (%)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سیمانی مورد استفاده

Table 2. physical properties of cementing materials

چگالی (gr/cm ³)	ریزی در مقیاس بلین (cm ² /gr)	مصالح سیمانی مصرفی
۳/۱۴	۲۹۶۲	سیمان
۲/۲۱	۱۹۲۰۰۰ (به روش BET)	دوده سیلیس
۲/۷۹	۳۳۸۳	سرباره کوره آهن‌گدازی
۲/۴۲	۵۳۴۹	پوزولان طبیعی

پوزولان طبیعی تعیین و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. از آنجایی که طرح مخلوط‌های در نظر گرفته شده برای این پژوهش به صورت ملات می‌باشند، لذا از ماسه طبیعی که بر اساس استاندارد ASTM C۳۳ [۲۱] دانه‌بندی شده و دانه‌بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است، استفاده شده است. همچنین چگالی سنگدانه مصرفی برابر ۲/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و درصد جذب آب آن در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۲/۸۹ به دست آمده است.

برای ساخت ملات‌های ژئوپلیمری، پتاسیم هیدروکسید و سدیم هیدروکسید (سود سوزآور) به صورت پرک را با آب مقطر ترکیب نموده و محلول‌های با غلظت ۶ مولار که به عنوان ماده فعال ساز شناخته می‌شوند، استفاده شده‌اند. یکی دیگر از مواد فعال‌سازی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، سدیم سیلیکات (آب‌شیشه) با فرمول شیمیایی Na-

مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن با ۲ نوع ملات ژئوپلیمری با طرح مخلوط رایج مقایسه شده است.

۲- برنامه آزمایش‌ها

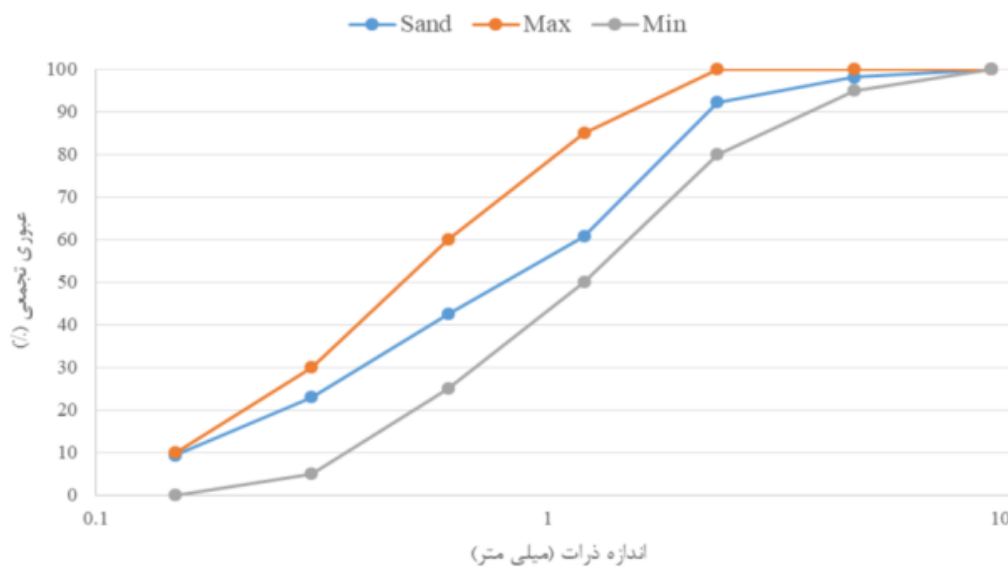
۲-۱- مشخصات مصالح

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ و دوده سیلیس، سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی از جنس پوکه معدنی (اسکریا) به دست آمده از منابع طبیعی موجود در اطراف شهر بیجار در استان کردستان به عنوان مواد جایگزین سیمان در ساخت نمونه‌های ملات استفاده شده است که ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی هر یک از آن‌ها به ترتیب در جداول ۱ و ۲ گزارش شده است. علاوه بر این بر اساس استانداردهای ASTM C۹۸۹ [۱۹] و ASTM C۶۱۸ [۲۰] فعالیت پوزولانی سرباره کوره آهن‌گدازی و

جدول ۳. فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان

Table 3. pozzolanic activity of supplementary cementing materials

ماده جایگزین سیمان	درصد جایگزینی	فعالیت پوزولانی ۷ روزه	فعالیت پوزولانی ۲۸ روزه
سرباره کوره آهن-گدازی	۵۰	۵۹	۷۷
پوزولان طبیعی	۲۰	۷۶/۵	۸۲



شکل ۱. دانه بندی ماسه مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C33

Fig. 1. sand gradation based on the ASTM C33

می‌باشد. با توجه به مطالعات پیشین و طرح‌های معرفی شده به عنوان بهینه در پژوهش‌های گذشته، ۵ طرح ملات پایه سیمانی به عنوان طرح‌های نهایی انتخاب شده‌اند. در طرح‌های در نظر گرفته شده عیار مواد سیمانی برابر با ۴۵۰ کیلوگرم و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۲ در نظر گرفته شده است. این نسبت آب به سیمان جهت دستیابی به نفوذپذیری کمتر و مقاومت فشاری بیشتر و بر اساس نسبت آب به سیمان بهینه برای انجام کامل فرآیند هیدراسیون سیمان که ۰/۳۲ می‌باشد، انتخاب شده است. همچنین جهت جلوگیری از ایجاد ترک‌های سطحی به علت جمع شدگی ناشی از خشک

SiO_2 می‌باشد.

آب مورد استفاده در بخش‌های مختلف نظیر ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، آب شرب تهران بوده است و از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلات اثر اصلاح شده برای تأمین روانی مورد نیاز نمونه‌ها استفاده شده است.

۲-۲ طرح مخلوط نمونه‌های ملات با پایه سیمانی

همان‌طور که گفته شد در این پژوهش، هدف اصلی مقایسه ویژگی‌های مکانیکی و دوام پوشش‌های ملات تعمیری پایه سیمانی و ژئوپلیمری

جدول ۴. طرح مخلوط نمونه‌های ملات با پایه سیمانی

Table 4. mixture proportion of cement-based mortars

نام طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان (kg/m ³)	سرباره (kg/m ³)	پوزولان			درصد وزنی	
				طبیعی (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	فوق روان کننده نسبت به سیمان	روانی (mm)
OPC	۰/۳۲	۴۵۰	-	-	۱۴۴	۱۸۰۵	۱	۱۵۰
S20	۰/۳۲	۳۶۰	۹۰	-	۱۴۴	۱۷۹۷	۱	۱۶۰
S40	۰/۳۲	۲۷۰	۱۸۰	-	۱۴۴	۱۷۸۹	۱/۲	۱۶۰
N20	۰/۳۲	۳۶۰	-	۹۰	۱۴۴	۱۷۸۵	۱/۲	۱۷۰
N40	۰/۳۲	۲۷۰	-	۱۸۰	۱۴۴	۱۷۶۴	۱/۵	۱۷۰

جدول ۵. طرح مخلوط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری

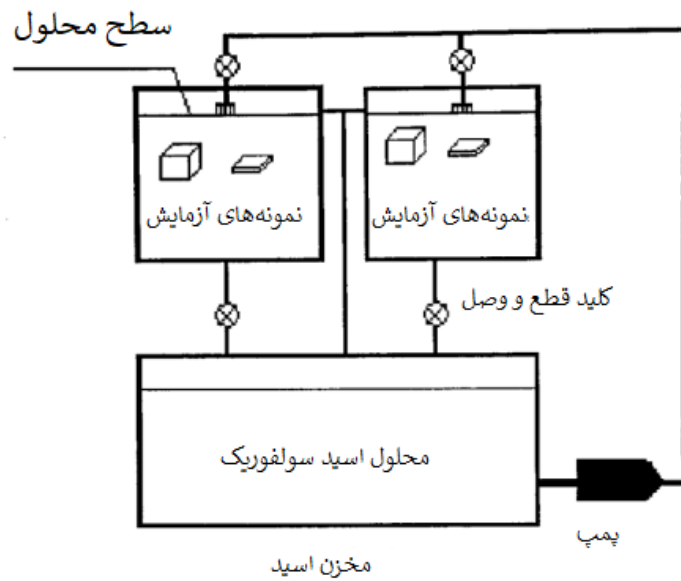
Table 5. mixture proportion of geopolymer based mortars

نام طرح	نوع محلول	غلظت محلول (Mol)	وزن ماده پایه (kg/m ³)	جایگزینی سرباره با دوده سیلیس	مدول سیلیکاتی	نسبت سیلیکات به محلول	درصد		
							نسبت فعال ساز به ماده پایه	نسبت ماسه به مواد پایه	نسبت آب به ذرات جامد
NaOH	هیدروکسید سدیم	۶	۴۶۴	۵	۲/۳۳	۰/۴	۰/۶	۲/۷۵	۰/۴۹
KOH	هیدروکسید پتاسیم	۶	۴۶۴	۵	۲/۳۳	۰/۴	۰/۶	۲/۷۵	۰/۴۹

۲-۳- طرح مخلوط نمونه‌های ملات ژئوپلیمری

علاوه بر طرح مخلوط‌های ملات پایه سیمانی، ۲ طرح مخلوط ملات ژئوپلیمری نیز برای این پژوهش در نظر گرفته شد. ماده پایه در نظر گرفته شده برای این ۲ طرح سرباره کوره آهن‌گدازی به همراه جایگزینی ۵ درصد آن با دوده سیلیس می‌باشد. همچنین از محلول‌های هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم با غلظت ۶ مولار و نیز آب شیشه با مدول سیلیکاتی ۲/۳۳ به عنوان فعال‌ساز ترکیبات ژئوپلیمری استفاده شده است. در نهایت طرح‌های حاوی هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم به ترتیب با نام اختصاری NaOH و KOH نام‌گذاری شدند که جزئیات طرح مخلوط آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

شدن سطح ملات که در بحث اجرایی حائز اهمیت بالایی است، لازم است این نسبت پایین نگه داشته شود. در طرح‌های پوزولانی نیز مقادیر ۲۰ و ۴۰ درصد پوزولان طبیعی و سرباره کوره آهن‌گدازی مورد استفاده قرار گرفت که این مقادیر نیز برای مقایسه سه گروه از ملات‌های بدون مواد پوزولانی، با مقادیر کم (۲۰ درصد) و مقادیر بالای این مواد (۴۰ درصد) انتخاب شده‌اند تا بتوان با دقت بیشتری تاثیر عیار سیمان مصرفی بر خواص ملات‌های تعمیراتی را ارزیابی کرد. علاوه بر این با افزودن درصد مناسب از فوق روان کننده میزان کارایی به دست آمده از آزمایش میز جریان در بازه ۱۵۰ الی ۱۷۰ میلی‌متر نگه داشته شده است. در جدول ۴ طرح مخلوط نهایی نمونه‌های ملات ارائه شده است که در آن حروف N و S به ترتیب نمایانگر ملات‌های حاوی پوزولان طبیعی و سرباره کوره آهن‌گدازی می‌باشد.



شکل ۲. شماتیک دستگاه انجام تهاجم اسیدی

Fig. 2. Schematic image of acid pumping apparatus

سولفوریک، نمونه‌های ملات پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، در محلول اسید سولفوریک با pH برابر با ۱ قرار داده شدند. بدین منظور از دستگاه خاصی که صرفاً برای این آزمایش در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه امیرکبیر موجود است و شماتیک آن در شکل ۲ ارائه شده است، استفاده شد. مکانیزم گردشی محلول اسید سولفوریک بین مخازن حاوی نمونه‌ها و مخزن اصلی اسید سبب می‌شود که محلول اسیدی به طور همگن در اطراف نمونه‌ها قرار بگیرد. از طرفی به دلیل واکنش اسید با نمونه‌ها، قدرت اسیدیته آن کاهش می‌یابد لذا در چنین شرایطی نیاز است که pH محلول به صورت هفتگی کنترل شده و در صورت نیاز با افزودن اسید تنظیم گردد. در شکل ۳ نیز تصویر واقعی محفظه نگهداری نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک و نیز تصویری از وضعیت ظاهری نمونه‌ها پس از قرارگیری در این محلول نشان داده شده است.

۲-۶- آزمایش‌های انجام گرفته

آزمایش‌های پیش‌بینی شده در این تحقیق شامل آزمایشات تعیین مقاومت فشاری و مقاومت چسبندگی کششی برای بررسی خواص مکانیکی و آزمایشات جذب آب موینگی و تغییر طول، افت وزن و افت مقاومت

۲-۴- روش اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

اختلاط مصالح و ساخت ملات توسط مخلوط‌کن ۶۰ لیتری مستقر در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت پذیرفت. در گام اول اختلاط پس از توزین مصالح، ابتدا تمامی ماسه و سیمان به مدت ۱ دقیقه و به صورت خشک با یکدیگر مخلوط شده و پس از آن حدود ۶۰ درصد آب توزین شده به آن‌ها اضافه شده و اختلاط ۲ دقیقه ادامه می‌یابد. در نهایت باقی‌مانده مصالح، یعنی حدود ۴۰ درصد آب، مواد جایگزین سیمان و فوق روان کننده نیز به ترکیب اضافه شده و تا ۶ دقیقه دیگر اختلاط ادامه می‌یابد. سپس با استفاده از دستگاه میز سیلان و مطابق با استاندارد ASTM C۲۳۰ [۲۲] میزان روانی ملات آماده شده اندازه‌گیری می‌شود. در گام بعدی قالب‌هایی که از قبل آماده شده‌اند، با استفاده از ملات آماده شده پر و به مدت ۲۴ ساعت در محیط مرطوب نگه داشته و پس از آن قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها برای عمل‌آوری تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع نگهداری می‌شوند.

۲-۵- شرایط نگهداری نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک

جهت بررسی عملکرد نمونه‌های ساخته شده در برابر تهاجم اسید



شکل ۳. الف) دستگاه نگرهداری و گردش اسید، ب) وضعیت ظاهری نمونه ها پس از قرارگیری در اسید.

Fig. 3. a) Acid pumping apparatus b) condition of samples after exposing to acid

فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در محلول اسید سولفوریک با pH برابر ۱ می‌باشد که در ادامه توضیحات هر یک ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که برای انجام هر یک از آزمایشات ۳ نمونه برای هر طرح مخلوط و در هر سن مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج نهایی به صورت میانگین نتیجه ۳ نمونه می‌باشد.

۲-۶-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C109 [۲۳] انجام گرفته است. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش به صورت مکعب‌های با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب که در زمان ساخت در ۳ لایه ریخته شده و توسط میز ویبره متراکم شده‌اند، می‌باشند. این آزمایش برای همه طرح‌ها و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بر روی ۳ نمونه از هر طرح انجام گرفته است. در نهایت نیز نتیجه مقاومت فشاری برای هر طرح در هر سن به صورت میانگین نتایج به دست آمده از آزمایش ۳ نمونه گزارش شده است.

۲-۶-۲- مقاومت چسبندگی کششی

مقاومت چسبندگی کششی بین سطح بتن و ملات تعمیری اعمال شده بر روی آن از طریق آزمایش بیرون کشیدن^۱ بر اساس استاندارد

ASTM D7234 [۲۴] انجام گرفته است. برای این آزمایش پس از آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌های مکعبی بتن معمولی با رده مقاومتی $C30$ به عنوان بتن بستر، یک لایه ۲ سانتی‌متری ملات برای هر طرح از ملات‌های تعمیری بر روی آن‌ها اعمال شده و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، این آزمایش بر روی آن‌ها انجام گرفته است. لازم به ذکر است که نتایج گزارش شده برای این آزمایش میانگین نتایج آزمایش ۳ نمونه برای هر طرح می‌باشد.

۲-۶-۳- جذب آب موینگی

برای اندازه‌گیری میزان جذب آب موینگی ملات‌های ساخته شده در این پژوهش از نمونه‌های دیسکی شکل با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر که از برش نمونه‌های استوانه‌ای 200×100 میلی‌متری به دست آمده و تمام وجوه آن به غیر از یک وجه با نوار مخصوص آب‌بندی شده، استفاده شده و به منظور انجام آزمایش مطابق با استاندارد EN ۴۸۰-۵ [۲۵] عمل شده است. در واقع نمونه‌های ملات در سنین مربوط به آزمایش از داخل آب خارج و برش داده و در داخل گرم‌خانه با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۴ روز نگرهداری می‌شوند. سپس نمونه‌ها پس از توزین درون ظرف آب قرار داده شده، به گونه‌ای که سطح آب به اندازه 2 ± 1 میلی‌متر از تراز کف نمونه‌ها بالاتر باشد، ضمن آن که آب با کف نمونه در تماس کامل قرار گیرد. پس از توزین نمونه‌ها در زمان‌های مشخص میزان جذب برحسب میلی‌متر

۱ Pull Off Test

از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{mt}{a*d} \quad (۱)$$

که در این رابطه I میزان جذب آب برحسب میلی‌متر، m تغییر در جرم نمونه در مدت زمان آزمایش برحسب گرم، a سطح نمونه برحسب میلی‌متر مربع، d چگالی آب برحسب گرم بر میلی‌متر مکعب می‌باشد.

۲-۶-۴ تغییر طول نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

به دلیل مشابهت آزمایش دوام در محیط سولفاتی و اسید سولفوریک، در این پژوهش از روش استاندارد ASTM C ۱۰۱۲ [۲۶] که مربوط به حمله سولفاتی می‌باشد، به منظور ارزیابی تغییر طول نمونه‌های منشوری ملات که در معرض تهاجم اسید سولفوریک قرار گرفته بودند، استفاده شد. به منظور انجام این آزمایش، نمونه‌های منشوری ملات با ابعاد $۲۵ \times ۲۵ \times ۲۸۵$ میلی‌متر مکعب ساخته شده و برای اندازه‌گیری تغییرات طول، پین‌های مخصوص در انتهای آن‌ها جایگذاری شده است. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت در محفظه رطوبت و پس از آن به مدت ۷ روز در محلول اشباع آب آهک عمل‌آوری شدند. پس از اندازه‌گیری طول اولیه در سن ۷ روز، نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک با pH برابر با ۱ نگهداری شده و تغییر طول آن‌ها تا سن ۹۱ روز به صورت هفتگی اندازه‌گیری و گزارش شده است.

۲-۶-۵ افت وزن نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

به دلیل نبودن مرجعی استاندارد جهت اندازه‌گیری اثر اسید سولفوریک بر افت وزن نمونه‌های ملات ساخته شده، مطابق با روش مورد استفاده مرجع [۲۷]، نمونه‌های ملات مکعبی به ابعاد $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متر مکعب پس از ۲۸ روز عمل‌آوری وارد محلول اسید سولفوریک با pH برابر با ۱ شده و وزن نمونه‌ها در سنین ۵۶ و ۹۰ روز پس از قرارگیری در محلول اسید سولفوریک اندازه‌گیری شدند. در نهایت نیز نتایج این اندازه‌گیری‌ها به صورت نسبت کاهش وزن نمونه به وزن اولیه آن (پیش از قرارگیری در محلول اسیدی) گزارش می‌شود.

۲-۶-۶ افت مقاومت نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

کاهش مقاومت نمونه‌های ملات در داخل محیط اسیدی می‌تواند فاکتور مناسبی برای شناسایی و بررسی ملات مقاوم در مقابل تهاجم اسیدی باشد،

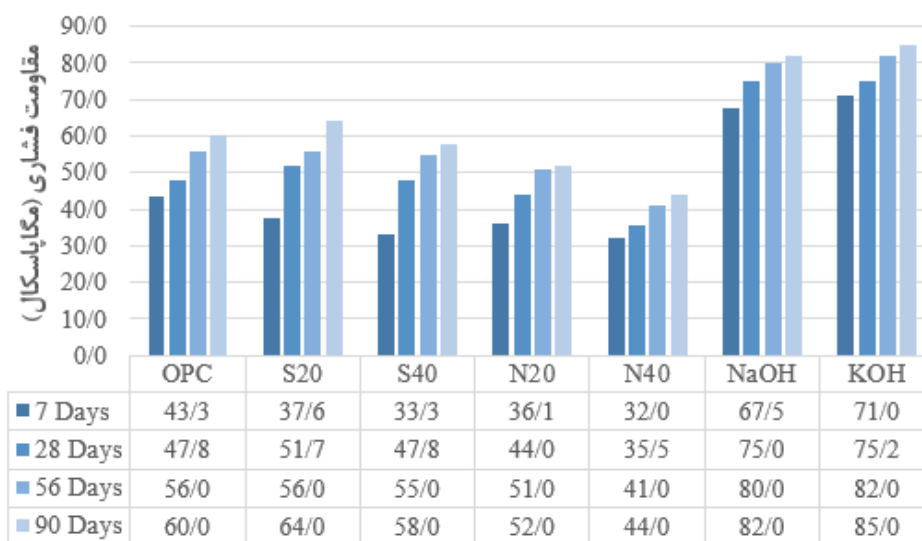
با توجه به مکانیزم تهاجم اسیدی، اسید سولفوریک در تماس با ملات یا بتن، با خمیر سیمانی آن واکنش داده و آن را به رسوب سفید رنگ که همان گچ است، تبدیل می‌کند که این فرآیند باعث از دست رفتن مقاومت فشاری ملات یا بتن شده و در نهایت کل ترکیب را به خمیر سست تبدیل کرده و از هم می‌پاشاند. از آنجاییکه برای اندازه‌گیری افت مقاومت نمونه‌های در معرض محلول اسید سولفوریک نیز مرجع استاندارد وجود ندارد، مطابق با روش مورد استفاده مرجع [۲۷]، نمونه‌های ملات مکعبی با ابعاد $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متر مکعب قرار گرفته در معرض اسید سولفوریک در سنین ۵۶ و ۹۰ روزه تحت انجام آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. ضمناً مقاومت فشاری نمونه‌هایی که هم‌زمان ساخته شده و عمل‌آوری شده‌اند نیز در این سنین اندازه‌گیری شد و در نهایت نتایج به صورت درصد کاهش مقاومت فشاری گزارش شدند.

۳- ارائه و تفسیر نتایج آزمایش‌ها

پس از توضیح در مورد نحوه انجام هر یک از آزمایش‌ها، در این بخش به ارائه نتایج مربوط به هر یک از آن‌ها به صورت مشروح پرداخته خواهد شد.

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ملات ساخته شده، نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ملات‌های ژئوپلیمری مقاومت فشاری بیشتری از سایر نمونه‌ها به دلیل سریع‌تر بودن انجام واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون نسبت به هیدراسیون، داشته است که در همه سنین مقاومت فشاری به دست آمده برای ملات ژئوپلیمری حاوی پتاسیم هیدروکسید به عنوان ماده فعال‌ساز بیشتر بوده است. پتاسیم هیدروکسید به دلیل جرم مولی بیشتر نسبت به سدیم هیدروکسید، مقدار آب کمتری برای ساخت محلول ۶ مولار نیاز دارد که نتیجه آن مقاومت فشاری بیشتر ملات ژئوپلیمری حاوی این ماده می‌باشد [۲۸]. در بین نمونه‌های پایه سیمانی نیز در سنین اولیه مقاومت فشاری نمونه شاهد از نمونه‌های حاوی مواد جایگزین سیمان بیشتر بوده است که این امر می‌تواند به دلیل تأخیر در آغاز فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان باشد. با گذشت زمان نمونه‌های حاوی سرباره و همچنین ملات دارای پوزولان طبیعی مقاومت بیشتری کسب کرده‌اند. از نتایج نیز پیداست که دارا بودن درصد مشخصی از مواد جایگزین سیمان به مرور زمان ویژگی‌های مکانیکی طرح را بهبود بخشیده است و در سن ۹۰ روز طرح حاوی ۲۰ درصد سرباره بیشترین مقاومت فشاری در بین طرح‌های پایه سیمانی را داشته است. در



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 4. Compressive strength test results

نمونه‌های پایه سیمانی داشته‌اند. به عنوان مثال می‌توان از افزایش تقریباً ۱۰۰ و ۱۵۰ درصدی مقاومت چسبندگی کششی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید نسبت به نمونه ملات پایه سیمانی شاهد اشاره کرد. در بین ملات‌های پایه سیمانی نیز نمونه حاوی ۲۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان جایگزین سیمان مصرفی، بیشترین مقدار مقاومت چسبندگی کششی را داشته است. طبق توصیه انجمن بتن آمریکا، حداقل میزان چسبندگی قابل قبول ملات ترمیمی به بتن بستر در سن ۲۸ روز بین ۱/۷ تا ۲ مگاپاسکال می‌باشد. در صورت کم بودن مقاومت چسبندگی کششی در سنین پایین (مانند آنچه برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی ۴۰ درصد پوزولان طبیعی رخ داده است) دیگر نمی‌توان منتظر ماند تا ملات‌های پوششی مقاومت چسبندگی خود را در سنین بالاتر افزایش دهند.

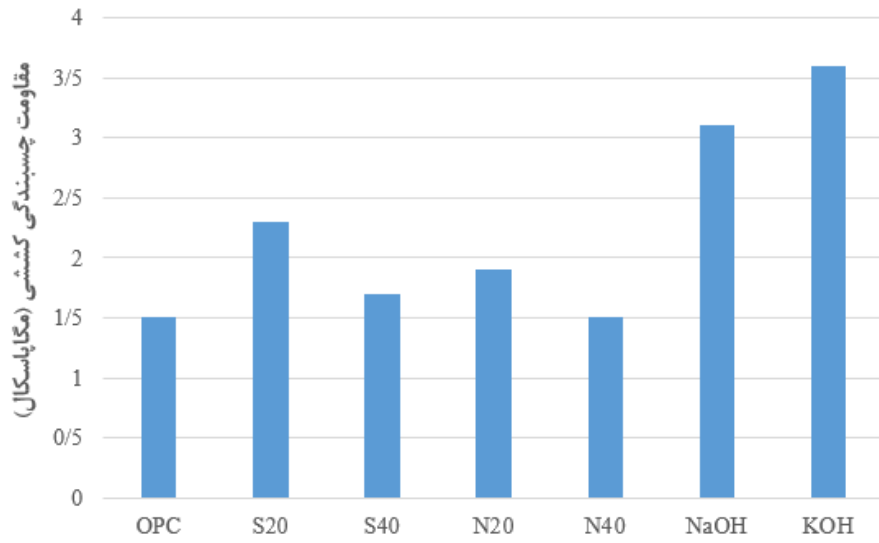
۳-۳- آزمایش جذب آب مویینگی

آزمایش جذب آب مویینگی مطابق با توضیحات استاندارد بر روی نمونه‌های با سن ۲۸ روزه انجام گرفت و نتایج آن در شکل ۶ گزارش

نمونه‌های با ۴۰ درصد جایگزینی مواد جایگزین سیمان، می‌توان پدیده رقیق شوندگی را عامل کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد دانست. پدیده رقیق شوندگی به این موضوع اشاره دارد که مقادیر مشخصی از مواد جایگزین سیمان می‌توانند به عنوان ماده پوزولانی با کلسیم هیدروکسید ناشی از هیدراسیون سیمان واکنش داده و ساختار خمیر را اصلاح کنند و مازاد این مواد به عنوان ماده خنثی عمل کرده که باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی سرباره در هر ۲ حالت ۲۰ درصد و ۴۰ درصد جایگزینی سیمان، مقاومت فشاری بیشتری در قیاس با نمونه‌های حاوی همین درصدهای جایگزینی از پوزولان طبیعی داشته‌اند.

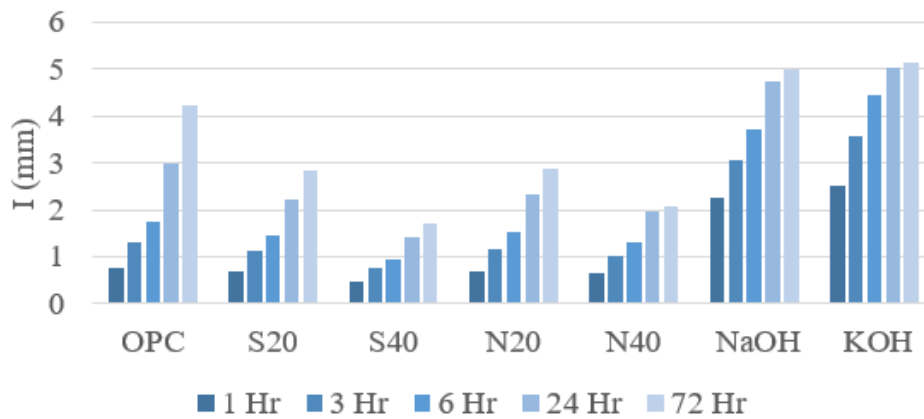
۳-۲- آزمایش مقاومت چسبندگی کششی

همان‌طور که گفته شد برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی ملات‌های تعمیری ساخته شده در این پژوهش به بتن بستر، از آزمایش بیرون کشیدن استفاده شد که نتایج آن در شکل ۵ قابل مشاهده است. بر اساس آنچه از نتایج می‌توان استنتاج کرد، استفاده از ملات‌های ژئوپلیمری به دلیل ماهیت



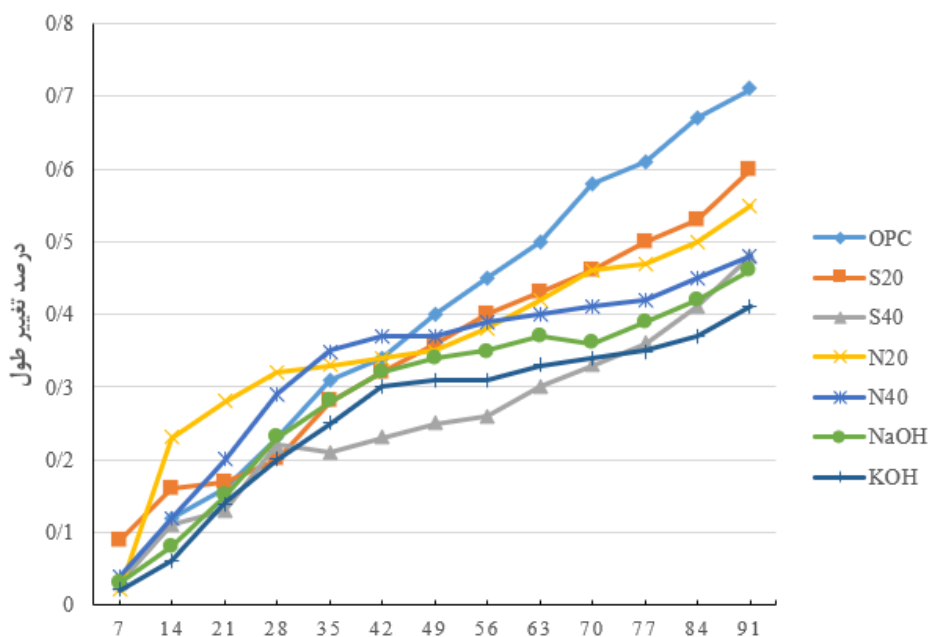
شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت چسبندگی کششی به روش بیرون کشیدن در سن ۲۸ روز

Fig. 5. Adhesion resistance test results at the age of 28 days



شکل ۶. نتایج آزمایش جذب آب موئینگی در سن ۲۸ روز

Fig. 6. Capillary water absorption test results at the age of 28 days

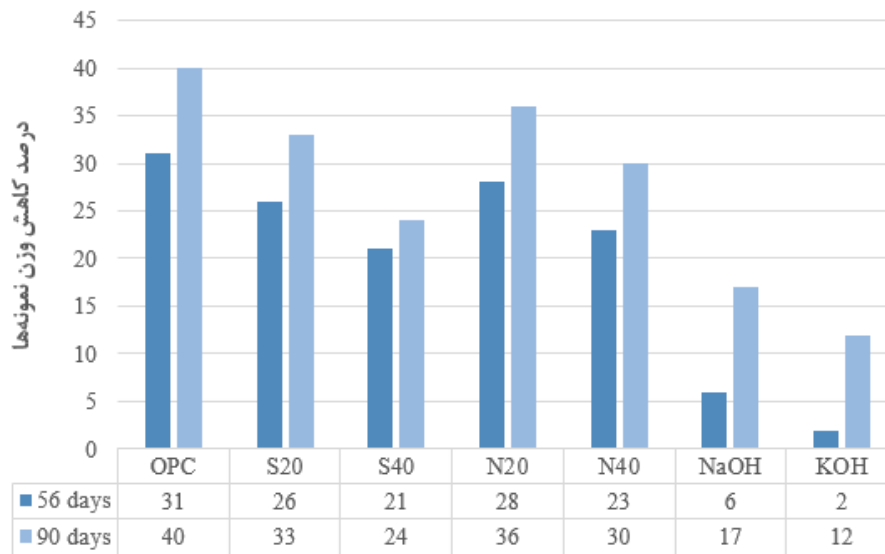


شکل ۷. نتایج آزمایش تغییر طول نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

Fig. 7. Length change of sulfuric acid cured mortars

۳-۴- آزمایش تغییر طول نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک
 نتایج آزمایش تغییر طول نمونه‌های ملات تا سن ۹۰ روز قرارگیری در محلول اسید سولفوریک در شکل ۷ مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده از این آزمایش حاکی از کاهش تغییر طول نسبی با استفاده از مواد جایگزین سیمان است. با افزایش درصد جایگزینی سرباره و پوزولان طبیعی به جای سیمان، افزایش طول نمونه‌ها کاهش یافته و به صورت کلی عملکرد سرباره و پوزولان طبیعی مشابه یکدیگر می‌باشد. مهمترین عامل این پدیده را میتوان کاهش مقدار آهک حاصل از هیدراسیون سیمان در نمونه‌های پوزولانی دانست. در این صورت مقدار آهک کمتری برای واکنش با اسید سولفوریک وجود داشته که نهایتاً تغییر طول کمتری در این نمونه‌ها مشاهده شده است [۲۷]. تنها تفاوت موجود در این مورد به بیشتر بودن تغییر طول نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در سنین اولیه نسبت به بتن شاهد باز می‌گردد که ناشی از فعالیت کم پوزولان طبیعی می‌باشد. همچنین نمونه‌های ملات ژئوپلیمری به طور کلی تغییر طول کمتری نسبت به طرح‌های پایه سیمانی داشته‌اند، به نحوی که ملات ژئوپلیمری با فعال‌ساز پتاسیم هیدروکسید تا ۴۳

شده است. همان‌طور که پیداست، ضریب جذب آب نهایی در نمونه ملات شاهد در مقایسه با ملات‌های پایه سیمانی پوزولانی که در آن‌ها از سرباره و پوزولان طبیعی به عنوان مواد جایگزین سیمان استفاده شده است، بیشتر است. یکی از مهم‌ترین دلایل این اتفاق می‌تواند تولید ژل ثانویه توسط مواد جایگزین سیمان باشد که در طی این فرآیند فضاهای مویینه پر شده و فضای کمتری برای نفوذ آب وجود خواهد داشت. نکته قابل ملاحظه دیگر بالا بودن ضریب جذب آب مویینگی در نمونه‌های ژئوپلیمری می‌باشد. علت این امر می‌تواند ایجاد ریز ترک‌ها در نمونه‌های ژئوپلیمری در اثر قرار گرفتن در دمای بالا، در مرحله خشک کردن نمونه‌ها در گرم‌خانه باشد. جعفری ندوشن و همکاران نیز نتیجه‌گیری مشابهی داشته‌اند که علت اصلی آن را ترک خوردگی خمیر سرباره به دلیل تبدیل هیدرات‌های شش وجهی CAH_{10} و $C4AH_{13}$ به هیدرات‌های مکعبی $C3AH_6$ بر اثر حرارت ذکر کرده‌اند [۲۹]. یکی دیگر از نتایجی که با دقت در نمودارها به دست می‌آید این نکته است که نمونه‌های ملات ژئوپلیمری اکثر جذب آب خود را در همان ساعات اولیه انجام می‌دهند که این می‌تواند شهادی بر وجود ریز ترک‌ها باشد.



شکل ۸. نتایج آزمایش کاهش وزن نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

Fig. 8. Weight loss of mixtures in sulfuric acid

ملات ژئوپلیمری در مقایسه با ملات‌های پایه سیمانی درصد کاهش وزن کمتری داشته‌اند و عملکرد بهتری از خود در برابر اسید سولفوریک نشان داده‌اند که از دلایل اصلی آن می‌توان به نفوذپذیری کمتر و مقدار کلسیم هیدروکسید کمتر ماتریس ژئوپلیمر دانست که سبب مقاومت بیشتر در برابر حمله اسید سولفوریک شده است. همچنین در مقایسه ملات‌های ژئوپلیمری، نمونه با فعال‌ساز پتاسیم هیدروکسید عملکرد بهتری نسبت به نمونه با فعال‌ساز سدیم هیدروکسید در برابر اسید سولفوریک داشته است که دلیل آن ساختار متراکم‌تر نمونه‌های ساخته شده با پتاسیم هیدروکسید است که نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی فعال‌ساز سدیم هیدروکسید دارند.

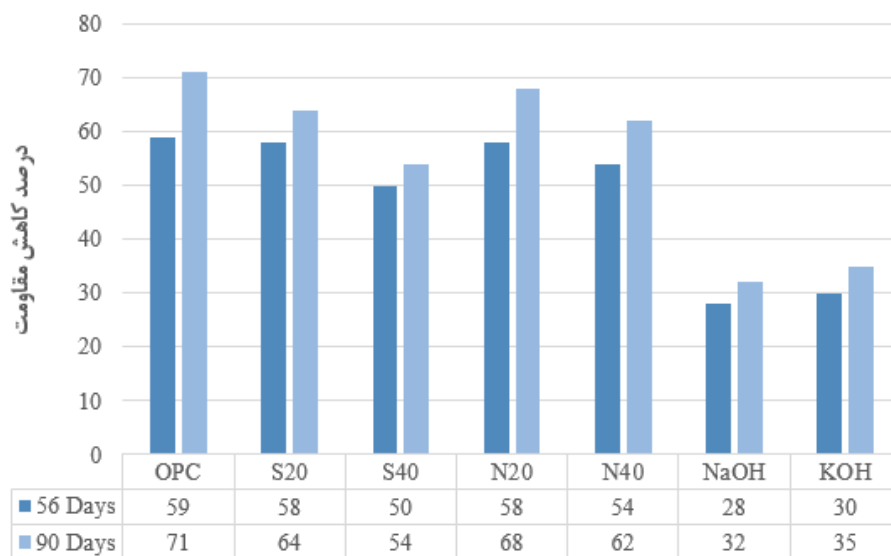
۳-۶- آزمایش کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

نتایج آزمایش کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات پس از قرارگیری در معرض تهاجم اسید سولفوریک به صورت درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌هایی که در حالت عادی عمل‌آوری شده‌اند در شکل ۹ گزارش شده است. همان‌طور که نتایج ارائه شده نشان می‌دهند، روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک مشابه روند

درصد میزان افزایش طول کمتری از نمونه ملات پایه سیمانی شاهد در طول ۹۰ روز از خود نشان داده است. دلیل عملکرد مناسب ملات‌های ژئوپلیمری مقدار کم آهک موجود در ساختار آنها می‌باشد که واکنش اسید سولفوریک در این نمونه‌ها را محدود می‌سازد.

۳-۵- آزمایش کاهش وزن نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

پس از قرارگیری نمونه‌ها در معرض تهاجم اسیدی و اندازه‌گیری وزن آن‌ها در سنین ۵۶ و ۹۰ روزه مطابق با آنچه توضیح داده شد، نتایج این اندازه‌گیری‌ها به صورت نسبت کاهش وزن نمونه به وزن اولیه آن در شکل ۸ آورده شده است. با بررسی نتایج می‌توان به این نتیجه دست یافت که اثر مواد جایگزین سیمان بر شدت خوردگی و کاهش وزن نمونه‌ها در محیط اسید سولفوریک مثبت بوده و استفاده از این مواد عملکرد ملات را در برابر تهاجم اسید سولفوریک بهبود می‌بخشد. این اثر مثبت را می‌توان ناشی از کاهش نفوذپذیری به علت کاهش حجم و از بین رفتن پیوستگی ریز حفرات و نیز مصرف شدن آهک به دلیل واکنش پوزولانی دانست. همچنین مقایسه اثر پوزولان طبیعی و سرپاره در جایگزینی برابر ۲۰ درصد، نشان دهنده عملکرد تقریباً یکسان این دو ماده جایگزین سیمان در بهبود مقاومت ملات پایه سیمانی در برابر تهاجم اسید سولفوریک می‌باشد. علاوه بر این نمونه‌های



شکل ۹. نتایج آزمایش کاهش مقاومت نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

Fig. 9. Compressive strength loss of mixtures in sulfuric acid

نتایجی که در این پژوهش به دست آمده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- از منظر مقاومت فشاری تا سن ۹۰ روز بیشترین مقاومت را ملات‌های ژئوپلیمری داشته و در بین ملات‌های پایه سیمانی استفاده از مواد جایگزین سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شده است، به جز طرح دارای ۲۰ درصد سرباره که در سن ۹۰ روز مقاومت فشاری بیشتر از طرح شاهد از خود نشان داده است.
- از نقطه نظر چسبندگی ملات ترمیمی به بتن بستر، نتایج مقاومت چسبندگی کششی ملات‌های ژئوپلیمری بیش از ۱۰۰ درصد بیشتر از نمونه طرح شاهد پایه سیمانی به دست آمد. همچنین افزودن ۲۰ درصد سرباره به عنوان جایگزین سیمان باعث بهبود مقاومت چسبندگی کششی شده است. اما در سایر درصدهای جایگزینی سرباره و پوزولان طبیعی، مقادیر به دست آمده تفاوت زیادی با نمونه شاهد از خود نشان نداده‌اند.
- به دلیل ایجاد ریز ترک‌ها در زمان خشک کردن ملات‌های ژئوپلیمری برای آزمایش جذب آب مویینگی، نتایج ملات‌های ژئوپلیمری ضعیف‌تر از نمونه‌های پایه سیمانی گزارش شده است. همچنین در بین ملات‌های پایه سیمانی استفاده از مواد جایگزین سیمان سبب کاهش مقدار

کاهش وزن آن‌ها بوده است. در مورد نمونه‌های ملات پایه سیمانی اثر کلی استفاده از مواد جایگزین سیمان به دلیل مصرف کلسیم هیدروکسید موجود در ماتریس خمیری مثبت ارزیابی می‌شود. همچنین مقایسه نتایج استفاده از درصدهای مشابه سرباره و پوزولان طبیعی به جای سیمان بیانگر افت مقاومت فشاری تقریباً برابر در درصد جایگزینی ۲۰ درصد نمونه‌های حاوی سرباره و پوزولان طبیعی و افت مقاومت فشاری بیشتر نمونه‌های حاوی سرباره در مقایسه با جایگزینی پوزولان طبیعی در درصد جایگزینی ۴۰ درصد می‌باشد. در خصوص نتایج ملات‌های ژئوپلیمری نیز کاملاً مطابق با آن چه که در آزمایش کاهش وزن نمونه‌ها در محیط اسید سولفوریک ذکر شد، مشخص است که استفاده از هر دو نوع ملات ژئوپلیمری در این تحقیق به دلیل نفوذپذیری بالا و مقادیر اندک کلسیم هیدروکسید سبب کاهش کمتر مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های ملات پایه سیمانی شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی دوام ملات‌های پوششی ژئوپلیمری و ملات‌های پایه سیمانی حاوی مقادیر مختلف جایگزینی سیمان با مواد جایگزین سیمان پوزولان طبیعی و سرباره کوره آهن‌گدازی پرداخته شده است. از مهم‌ترین

- Concrete Research, 18(4) (1988) 545-553.
- [6] E. Hewayde, M. Nehdi, E. Allouche, G. Nakhla, Effect of mixture design parameters and wetting-drying cycles on resistance of concrete to sulfuric acid attack, *Journal of materials in Civil Engineering*, 19(2) (2007) 155-163
- [7] H.L. Kong, J.G. Orbison, Concrete deterioration due to acid precipitation, *Materials Journal*, 84(2) (1987) 110-116
- [8] N.I. Fattuhi, B.P. Hughes, Ordinary Portland cement mixes with selected admixtures subjected to sulfuric acid attack, *Materials Journal*, 85(6) (1988) 512-518
- [9]. V. Boel, K. Audenaert, G. De Schutter, Acid attack of self compacting concrete, *Concrete Repair, Rehabilitation Retrofitting*, (2006) 37.
- [10] R. Sersale, G. Frigione, L. Bonavita, Acid depositions and concrete attack :main influences, *Cement concrete research*, 28(1) (1998) 19-24
- [11] K. Kawai, S. Yamaji, T. Shinmi, Concrete deterioration caused by sulfuric acid attack, in: *International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 2005, pp. 17e20
- [12] H. Rahmani, A. Ramazanianpour, Effect of binary cement replacement materials on sulfuric acid resistance of dense concretes, *Magazine of concrete research*, 60(2) (2008) 145-155.
- [13] P. Mehta, Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes, *Cement concrete research*, 15(6) (1985) 969-978
- [14] J. Monteny, N. De Belie, L. Taerwe, Resistance of different types of concrete mixtures to sulfuric acid, *Materials structures*, 36(4) (2003) 242-249
- [15] Y. Senhadji, G. Escadeillas, M. Mouli, H. Khelafi, Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar, *Powder technology*, 254 (2014) 314-323.
- [16] T. Bakharev, J.G. Sanjayan, Y.-B. Cheng, Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack, *Cement Concrete Research*, 33(10) (2003) 1607-1611.

آب جذب شده نمونه‌ها شده است.

- در مورد کاهش مقاومت فشاری و کاهش وزن نمونه‌های قرارگرفته در معرض تهاجم اسید سولفوریک، استفاده از مواد جایگزین سیمان اثر مثبتی از خود نشان داده‌اند. در این میان در بین نمونه‌های ملات با پایه سیمانی، طرح دارای ۴۰ درصد سرباره بهترین عملکرد را در محیط اسیدی از خود نشان داده است. هر چند که در مجموع عملکرد ملات‌های ژئوپلیمری به مراتب بهتر از ملات‌های پایه سیمانی بوده است.
 - با افزایش مقدار استفاده از مواد جایگزین سیمان در نمونه‌های ملات با پایه سیمانی در معرض تهاجم اسید سولفوریک، افزایش طول نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. همچنین استفاده از ملات‌های ژئوپلیمری توانسته است تا مقدار افزایش طول را تا ۴۳ درصد نسبت به نمونه شاهد پایه سیمانی کاهش دهد.
- در مجموع و با بررسی کلیه نتایج به دست آمده می‌توان گفت که ملات‌های ژئوپلیمری می‌توانند گزینه بهتری نسبت به ملات‌های پایه سیمانی برای تعمیر سازه‌های بتنی آسیب دیده در معرض اسید سولفوریک باشند اگر بتوان کنترل کافی بر مشکلات اجرایی که در استفاده از این مواد وجود دارد، فائق آمد. همچنین در بین ملات‌های پایه سیمانی، استفاده از نمونه‌های پوزولانی نیز عملکرد بهتری خواهند داشت. البته نتیجه گیری ذکر شده بر اساس مصالح و طرح مخلوط‌های این پژوهش بوده و پیشنهاد می‌گردد برای انتخاب مصالح و طرح مخلوط‌های جدید، برنامه آزمایشگاهی مشابهی طراحی و اجرا گردد.

منابع

- [1] ACI 201.2R-01; Guide to durable concrete, American Concrete Institute (ACI), (2001).
- [2] R.E. Beddoe, H.W. Dorner, Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms, *Cement concrete research*, 35(12) (2005) 2333-2339
- [3] R. Tixier, B. Mobasher, Modeling of damage in cement-based materials subjected to external sulfate attack. I: Formulation, *Journal of materials in civil engineering*, 15(4) (2003) 305-313
- [4] P. Hewlett, M. Liska, *Lea's chemistry of cement and concrete*, Butterworth-Heinemann, 2019
- [5] N. Fattuhi, B. Hughes, The performance of cement paste and concrete subjected to sulphuric acid attack, *Cement*

- Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [25] EN 480-5, Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of capillary absorption, European Standard (EN), (1997).
- [26] ASTM C1012 / C1012M-18b, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [27] A. Ramezani pour, A. Zolfagharnasab, F. Bahmanzadeh, A. Ramezani pour, Assessment of high performance concrete containing mineral admixtures under sulfuric acid attack, Amirkabir J Civil Eng, 50 (2018) 121-138.
- [28] M. J. Nadoushan and A. A. Ramezani pour, The Effect of Type and Concentration of Activators on Flowability and Compressive Strength of Natural Pozzolan and Slag-based Geopolymers, Construction and Building Materials 111 (2016): 337-347.
- [29] M. J. Nadoushan, A. A. Ramezani pour, S. M. Kheirandish, Mechanical and Durability Properties of Alkali Activated Slag for Sustainable Concrete, Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4), The University of Nevada, Las Vegas, USA 7-11 August 2016
- [17] S.A. Bernal, E.D. Rodríguez, R. Mejía de Gutiérrez, J.L. Provis, Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 1(3) (2012) 138-151
- [18] N. Rajamane, M. Nataraja, N. Lakshmanan, J. Dattatreya, D. Sabitha, Sulphuric acid resistant ecofriendly concrete from geopolymerisation of blast furnace slag (2012).
- [19] ASTM C989 / C989M-18a, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018
- [20] ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [21] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002
- [22] ASTM C230, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
- [23] ASTM C109 / C109M-20a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020
- [24] ASTM D7234-19, Standard Test Method for Pull-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Moodi, A. A. Ramezani pour, F. Farhadian, P. Dashti, Durability of cementitious and geopolymer coating mortars against sulfuric acid attack, Amirkabir J. Civil Eng., 53(9) (2021) 3693-3708.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18068.6757



