

ارزیابی ریزساختاری تأثیر محیط‌های سولفات‌ها بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری

محمد امیری *

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

پرینسپال

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس.

چکیده

بتن ژئوپلیمری ماده نوینی در صنعت ساخت و ساز با عملکرد و کارایی مطلوب است. از سوی دیگر بتن ژئوپلیمری دارای خصوصیات مکانیکی و دوامی مناسبی در برابر حملات شیمیایی است. تغییرات ریزساختاری بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری در محیط‌های سولفات‌ها می‌تواند به شدت تأثیر گذار باشد. بر این اساس هدف این مقاله بررسی ریزساختاری تأثیر شرایط محیطی سولفات‌ها بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری است. در این راستا برای ساخت بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی و محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۰ مولار و سیلیکات سدیم به عنوان مواد فعال‌ساز استفاده شده است. در این تحقیق ۲۰۰ نمونه به مدت ۳ ماه به صورت مستغرق در دمای محیط در آب و محلول‌های نگهدارنده با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد از اسیدسولفوریک عمل‌آوری شده است. آزمایش‌های مقاومت فشاری، امواج فراصوت و بررسی تغییرات pH محیط نگهدارنده در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی آزمون‌ها انجام شد. همچنین برای بررسی ریزساختاری از آزمایش تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. نتایج مقاله حاضر نشان می‌دهد که مقاومت نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات‌ها با غلظت ۷/۵ درصد اسید سولفوریک بعد از گذشت ۹۰ روز حدود ۴۵٪ کاهش یافته است. در واقع حمله اسید سولفوریک به نمونه منجر به جداسازی شبکه آلومیناسیلیکات موجود در ساختار ژئوپلیمر و تشکیل ساختار زئولیت می‌شود که در نتیجه با کاهش مقاومت فشاری و از دست دادن جرم و همچنین کاهش سرعت امواج فراصوت همراه است.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، ریزساختار، C-S-H، اترینگایت، مقاومت فشاری، امواج فراصوت.

* نویسنده مسئول: amirri@chmail.ir

۱- مقدمه

ترجیح داده شده است [۹، ۱۰]. مصالح غیر آلی آلومیناسیلیکاتی [۵] می‌توانند در یک فرایند شیمیایی [۱۱] گستره وسیعی از پسماندهای صنعتی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی، خاکستر مواد سوختی، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، پوزولان‌های طبیعی و هر منبعی که دارای آلومیناسیلیکات آمورف باشد [۱۲] را به تولیدات ساختمانی تبدیل کند [۱۳].

هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) فاز مهم اتصال در سیمان پرتلند و سرباره‌های فعال قلیایی است. خواص اتصال ژئوپلیمر به طور کلی نتیجه تشکیل یک شبکه آمورف آلومینوسیلیکات سه بعدی است. با توجه به اینکه C-S-H زمانی تشکیل خواهد شد که گونه‌های کلسیم و سیلیکات محلول در محدوده $\text{pH} \geq 12$ حضور داشته باشند، تفاوت عمده بین ژئوپلیمرها و سیمان پرتلند، از لحاظ ساختار شیمیایی و میزان کلسیم موجود در ساختارها است. رسوب هیدروکسید کلسیم تشکیل هر گونه نانوساختار C-S-H ممکن را در یک اتصال دهنده ژئوپلیمری مهار می‌کند، مگر اینکه مقادیر قابل توجهی از کلسیم در ابتدا وجود داشته باشد [۱۴]. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته درباره ساختار محصول فعال‌سازی سرباره کوره آهن‌گدازی یک اجماع بر سر این موضوع وجود دارد که محصول اصلی این واکنش یک نوع نانوساختار (CASH) با جایگزینی آلومینیوم با مقداری ساختار توبرموریت^۲ (سیلیکات کلسیم هیدراته) و شبیه به نانوساختار C-S-H است. سرباره کوره آهن‌گدازی به طور گسترده به عنوان مواد سیمانی مکمل مورد استفاده قرار گرفته است تا مقاومت بتن در برابر سولفات را بهبود بخشد. واکنش هیدراسیون ثانویه می‌تواند مقدار هیدروکسید کلسیم را کاهش داده و C-S-H اضافی را تولید کند که ساختار منافذ را اصلاح می‌کند و در نتیجه مقاومت بتن در برابر حمله سولفاتی افزایش می‌دهد. لاجر^۳ گزارش داد که مقاومت بتن ژئوپلیمری در برابر حمله سولفات بستگی به مقدار و نحوه ترکیب سرباره دارد [۱۵]. به‌عنوان مثال، افزودن سرباره غنی از آلومینا با نسبت‌های ۲۰ تا ۵۰ درصد تاثیر منفی بر مقاومت بتن داشت، زیرا آلومینا در سرباره می‌تواند با محلول اسیدی واکنش دهد و اترینگایت را تشکیل دهد [۱۵، ۱]. ساختار و ترکیب محصول CASH گونه که بر اثر فعال‌سازی سرباره به دست می‌آید به

کارخانه‌های شیمیایی، پتروشیمی، سلولز و نیروگاه‌های حرارتی با مشکل تضمین دوام تجهیزات تکنولوژیکی، ساخت و سازهای محافظتی علیه عملکرد اسید و بخارات آنها مواجه هستند [۱، ۲]. ژئوپلیمرها یک دسته از کانی‌های غیرآلی بوده که شامل آلومینوسیلیکات‌های فعال شده قلیایی است و یک جایگزین مناسب برای بسیاری از انواع سیمان است. ژئوپلیمر بعد از آهک و سیمان پرتلند معمولی به عنوان نسل سوم سیمان در نظر گرفته شده است [۳، ۴، ۵]. مزیت سیمان ژئوپلیمری شامل کاهش انقباض نسبت به بتن معمولی، مقاومت فشاری بهتر در برابر حمله سولفات‌ها و اسیدها و حملات شیمیایی است [۶]. بتن ژئوپلیمری می‌تواند به عنوان ماده جایگزین در مقابل انتشار آلودگی ناشی از تولید سیمان‌های پرتلند برای تولید بتن نیز، مورد استفاده قرار گیرد [۷]. اسید سولفوریک اسید بسیار تهاجمی است که در واکنش با کلسیم آزاد Ca(OH)_2 در خمیر سیمان باعث تشکیل گچ $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ و اترینگایت^۱ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$ می‌شود. این واکنش با افزایش حجم بتن همراه است [۳]. که به مراتب مخرب‌تر از واکنش بین آلومینات کلسیم موجود در خمیر سیمان و بلورهای گچ است [۳].

بر اساس نتایج مطالعات ارائه شده قرار گرفتن سیمان پرتلند معمولی در محیط سولفات باعث تشکیل سنگ گچ و اترینگایت می‌شود. اترینگایت با قرارگیری بتن در محیط سولفات تشکیل شده و باعث افزایش حجم، ترک خوردگی، پوسته انداختن و همچنین کاهش مقاومت بتن می‌شود برخلاف این، در بتن ژئوپلیمری به علت ماتریس انبساط که شامل Ca(OH)_2 و مونوسولفوآلومینات نمی‌شود می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت اسیدی بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن با سیمان پرتلند معمولی بیشتر است [۸].

اگر چه بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی ژئوپلیمرهای تهیه شده از منابع مختلف آلومینوسیلیکات ممکن است مشابه به نظر برسد، اما ساختار میکروسکوپی و خواص شیمیایی آنها تا حد زیادی متفاوت است. براساس پژوهش‌های صورت گرفته ساختار متراکم و کریستالی ژئوپلیمرها برای دستیابی به مقاومت مکانیکی بیشتر

³ Locher¹ Ettringite² tobermorite

ساخت بتن ژئوپلیمری در این پژوهش از سیمان ژئوپلیمری با سرباره کوره آهن‌گدازی و محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۰ مولار و سیلیکات سدیم به عنوان مواد فعال‌ساز قلیایی به نسبت ۱:۲ استفاده شده است. با توجه به فعل و انفعالات شیمیایی پوزولان‌ها در بتن، بررسی میزان هر یک از عناصر شیمیایی در آن‌ها بسیار مهم و ضروری است. مقادیر آنالیز شیمیایی سیمان ژئوپلیمری در جدول (۱) ارائه شده است.

جهت بررسی اثرات سولفات و تهیه محلول‌های اسیدی که با استفاده از مخلوط کردن با آب مقطر تهیه شده است از مقادیر ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد اسیدسولفوریک (H_2SO_4) با خلوص ۹۸٪ ساخت شرکت مرک استفاده شد. سنگ‌دانه‌های مصرفی در این پژوهش شامل شن و ماسه بوده است. ماسه رودخانه‌ای با اندازه دانه بین ۰/۰۷۵ تا ۴/۷۶ میلی‌متر و شن مصرفی از نوع شکسته و با اندازه دانه بین ۴/۷۶ تا ۹/۵ میلی‌متر است. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده براساس استاندارد ASTM C33 در شکل (۱) ارائه شده است [۲۰].

جهت رسیدن به اهداف تحقیق از طرح اختلاطی که در جدول (۲) ارائه شده استفاده شده است. برای نمونه برداری از قالب‌های ۵*۵*۵ و ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. در طرح اختلاط مورد استفاده برای نمونه‌های ژئوپلیمری نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. آب استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها، آب شرب شهر بندرعباس با $pH=7/5$ است. اندازه‌گیری pH در همه مراحل با استفاده از دستگاه pH متر قلمی مدل 98127 Hanna hi شرکت سیکاپ انجام شد.

شایان ذکر است در تمام نمونه‌ها نسبت محلول نگهدارنده (محلول اسید سولفوریک با درصدهای مختلف) به نمونه بتن ثابت و به نسبت ۱ به ۳ (وزن نمونه/ محلول نگهدارنده) بوده است. برای اندازه‌گیری pH محیط‌های نگهدارنده pH متر را به مدت ۵ دقیقه درون هر یک از ظرف‌های حاوی درصدهای مختلف سولفات قرار داده شد تا عدد روی صفحه نمایشگر ثابت شود و عدد نمایش داده شده یادداشت شده است. قبل از اندازه‌گیری pH محیط‌های سولفات برای جلوگیری از رسوب سولفات روی سطح نمونه‌ها به‌طور مصنوعی به محلول‌ها جریان داده می‌شود.

شدت تحت تأثیر خواص فعال‌کننده مصرفی قرار دارد. CASH تولید شده از ترکیب واکنش سرباره در محلول NaOH دارای نسبت کلسیم به سیلیس بیشتر بوده و ساختار منظم‌تری نسبت به نانوساختار CASH حاصل از فعال‌سازی سرباره به وسیله سیلیکات‌ها دارد و این موضوع به دلیل افزایش سیلیکات‌های موجود در محلول فعال‌کننده سیلیکاتی است [۱۶، ۱۷]. محلول فعال‌کننده قلیایی - سیلیکاتی شامل یک محلول هیدروکسید قلیایی همچون سدیم هیدروکسید (NaOH) به تنهایی یا یک محلول دو ترکیبی شامل یک هیدروکسید قلیایی به همراه محلول سیلیکاتی مثل سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) یا پتاسیم سیلیکات (K_2SiO_3) با نسبت‌های مولی و وزنی مشخص است [۱۸، ۱۹].

مواد ژئوپلیمری به عنوان ماده نوین با مزیت‌هایی فراوان همچنان نیاز به تحقیقات گسترده دارد چرا که نتایج به دست آمده هنوز قاطع و نهایی نیستند. اگرچه مصرف بتن‌های ژئوپلیمری در کاربری‌های عمومی کم است اما در تولید قطعات پیش ساخته که نیاز به مقاومت و دوام زیاد دارند و در مواد تعمیراتی بتن‌هایی که در معرض خوردگی شدید محیط اسیدی قرار دارند، بسیار مرسوم است. هر چند که پارامترهای مقاومتی و دوام بتن ژئوپلیمری در محیط‌های سولفات در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، اما به‌صورت جامع از دیدگاه ریزساختاری مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از اینرو در مقاله حاضر به بررسی ریز ساختاری بتن ژئوپلیمری و تشکیل نانوساختار C-S-H و C-A-S-H و مونوسولفات کلسیم و اترینگایت در محیط‌های سولفاتی پرداخته شده و نقش این ترکیبات بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری مورد تحلیل قرار گرفته است.

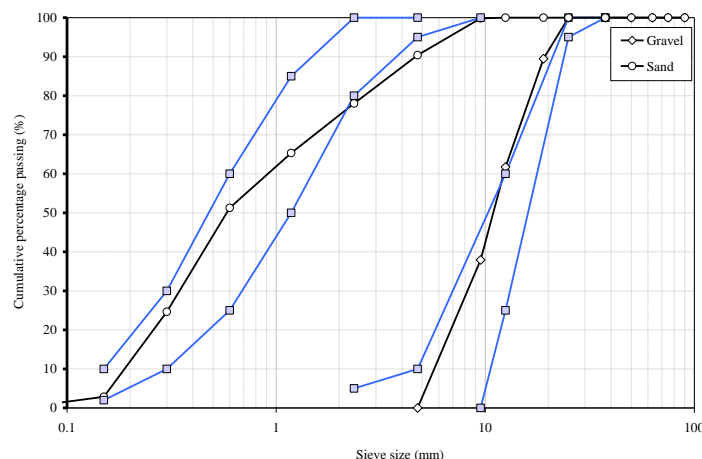
۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های بتن ژئوپلیمری از سیمان سبز یا همان سیمان ژئوپلیمری که توسط شرکت بنا بنیان زیست فناور واقع در شهر همدان تولید می‌شود استفاده شده است. سیمان ژئوپلیمری یا سیمان سبز، سیمان با مقاومت زیاد است که دوام زیادی در برابر حملات اسیدی دارد و برای ساخت مقاطع بتنی پیش ساخته پرمقاومت و تولید سمنت پلاست^۱ ایده‌آل است. برای

¹ Cement plast

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان ژئوپلیمری

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	MnO
Geopolymer	35.7	11.2	1.2	37	11	0.68	0.6	0.002	1.58



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی (شن و ماسه)

در طرح اختلاط نمونه‌های بتن ژئوپلیمری غلظت محلول به سیمان ژئوپلیمر ۰/۳۵ و محلول به فعال کننده ۰/۵۶ در نظر گرفته شده است. در روش ساخت بتن ژئوپلیمری ابتدا ساخت محلول انجام شد که از ترکیب شدن هیدروکسید سدیم جامد با آب به مدت ۳۰ دقیقه و اضافه کردن سیلیکات سدیم حاصل می‌شود و بعد از آن برای ساخت خمیر مصالح خشک شامل سنگ‌دانه‌ها و سیمان را به محلول اضافه و مخلوط حاصل به مدت ۲ دقیقه با میکسر مخلوط شده است. بعد از گذشت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، ۴۰ عدد از آن‌ها را به عنوان نمونه‌های شاهد جهت مقایسه مقاومت فشاری در حوضچه آب و باقی نمونه‌ها را جهت ارزیابی تاثیر درصد های ۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ اسید سولفوریک بر مقاومت فشاری نمونه‌ها طی مدت‌های ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه در محلول‌های اسیدی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و افت وزنی، نمونه‌ها به ترتیب مطابق استاندارد ASTM C39 و ASTM C1792-14 در دمای آزمایشگاهی و بر اساس طرح اختلاط جدول (۲) ساخته شد [۲۰]. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از جک بتن شکن دیجیتالی اتوماتیک شرکت آزمون استفاده شد. سرعت انجام بارگذاری برای تست مقاومت فشاری برای نمونه‌های ۵*۵*۵ سانتی‌متر، ۷۵ kgf/Sec و نمونه‌های ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی‌متر، ۳۰۰ kgf/Sec است.

در روش ساخت بتن ژئوپلیمری ابتدا ساخت محلول انجام شد که از ترکیب شدن هیدروکسید سدیم جامد با آب به مدت ۳۰ دقیقه و اضافه کردن سیلیکات سدیم حاصل می‌شود و بعد از آن برای ساخت خمیر مصالح خشک شامل سنگ‌دانه‌ها و سیمان را به محلول اضافه و مخلوط حاصل به مدت ۲ دقیقه با میکسر مخلوط شده است. بعد از گذشت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، ۴۰ عدد از آن‌ها را به عنوان نمونه‌های شاهد جهت مقایسه مقاومت فشاری در حوضچه آب و باقی نمونه‌ها را جهت ارزیابی تاثیر درصد های ۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ اسید سولفوریک بر مقاومت فشاری نمونه‌ها طی مدت‌های ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه در محلول‌های اسیدی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و افت وزنی، نمونه‌ها به ترتیب مطابق استاندارد ASTM C39 و ASTM C1792-14 در دمای آزمایشگاهی و بر اساس طرح اختلاط جدول (۲) ساخته شد [۲۰]. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از جک بتن شکن دیجیتالی اتوماتیک شرکت آزمون استفاده شد. سرعت انجام بارگذاری برای تست مقاومت فشاری برای نمونه‌های ۵*۵*۵ سانتی‌متر، ۷۵ kgf/Sec و نمونه‌های ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی‌متر، ۳۰۰ kgf/Sec است.

جدول ۲- طرح اختلاط بتن با سیمان ژئوپلیمری

Constituents	Cement (kg/m ³)	w/c ratio	Molecular concentration of sodium hydroxide	sodium hydroxide (kg/m ³)	Sodium silicate (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
Geopolymer	400	0.45	10	38.13	121.58	984.9	656.6

جهت انجام آزمایش فراصوت در بتن از استاندارد ASTM C597 استفاده شد [۲۱]، این آزمایش توسط دستگاه متعلق به شرکت Proceq انجام شد [۲۱، ۵]. میزان فرکانس ورودی و خروجی در محدوده ۸۰-۴۰ kHz برای ارزیابی استفاده می‌شود. در این مطالعه میزان این فرکانس برابر ۵۴ kHz تنظیم شد. این دستگاه قابلیت تبدیل به سرعت موج بر حسب متر بر مجذور ثانیه را

جهت انجام آزمایش فراصوت در بتن از استاندارد ASTM C597 استفاده شد [۲۱]، این آزمایش توسط دستگاه متعلق به شرکت Proceq انجام شد [۲۱، ۵]. میزان فرکانس ورودی و خروجی در محدوده ۸۰-۴۰ kHz برای ارزیابی استفاده می‌شود. در این مطالعه میزان این فرکانس برابر ۵۴ kHz تنظیم شد. این دستگاه قابلیت تبدیل به سرعت موج بر حسب متر بر مجذور ثانیه را

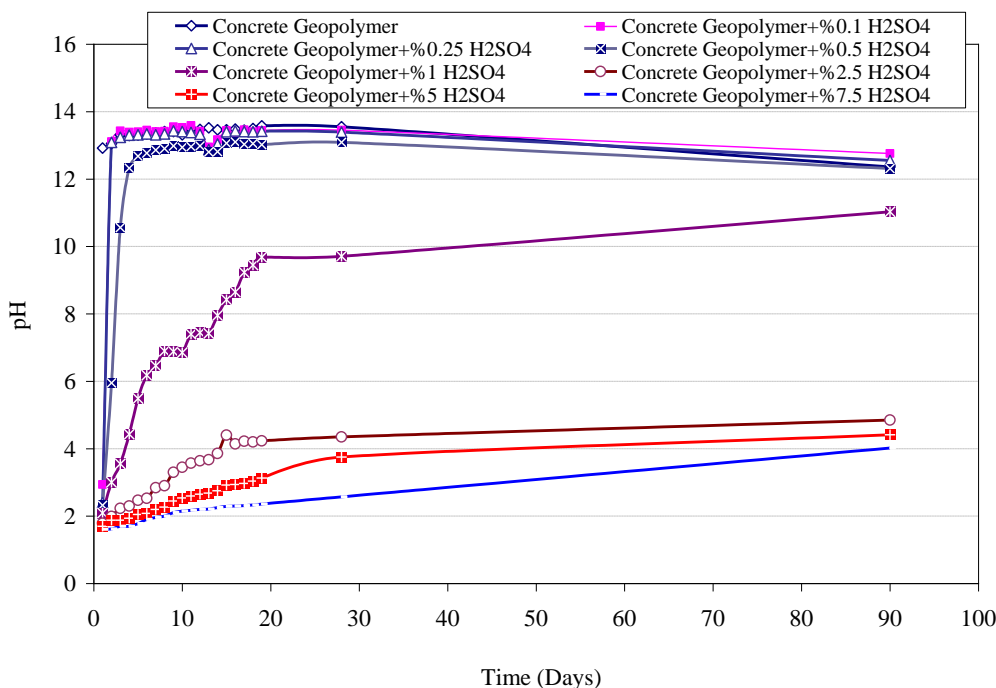
کاملاً مشهود است. در نمونه شاهد pH محیط واکنش همواره بیش از ۱۲/۹ واحد بوده است که نشان دهنده نرخ شدید واکنش‌های پوزولانی در روز اول است. تغییرات pH در محیط سولفات ۰/۱ درصد در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۱۳/۴۳، ۱۳/۴۵ و ۱۲/۵۵ واحد و در محیط سولفات با غلظت ۰/۲۵ درصد در سنین ۳، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۱۳/۲۴، ۱۳/۳۹ و ۱۲/۵۵ واحد رسیده است. افزایش pH محیط‌های نگهدارنده به علت قلیایی شدن محیط به واسطه واکنش‌های پوزولانی ملات ژئوپلیمر است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۲) با گذشت زمان تغییرات pH رو به افزایش است اما در بازه ۱۴ روز تا ۹۰ روز مقدار pH برای محیط‌های نگهدارنده با نرخ بسیار کمتری کاهش پیدا کرده است که این بیانگر کاهش حساسیت و تکمیل فرایند هیدراتاسیون این نمونه‌ها است. pH محلول‌های نگهدارنده با غلظت ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد اسید سولفوریک بعد از گذشت ۹۰ روز همچنان در محدوده اسیدی قرار دارند. نمونه‌هایی که در محیط با غلظت ۵ و ۷/۵ درصد قرار داشتند بعد از گذشت ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز به ترتیب حدود ۱ و ۲ واحد افزایش pH داشته‌اند. مقادیر pH برای محیط نگهدارنده با غلظت ۷/۵ درصد در سنین ۱، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۱/۶۱، ۲/۵۷ و ۴/۰۲ واحد است.

دارد. جهت بررسی ریزساختاری نمونه‌ها از آزمایش تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. نمونه‌ها پس از رسیدن به سن ۲۸ روزه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند. سپس تصاویر نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی روبشی مدل TESCAN-Vega3 واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز تهیه شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- بررسی میزان تغییرات pH محیط نگهدارنده

تغییرات pH محیط واکنش بر میزان واکنش‌های پوزولانی و نرخ تشکیل ساختارهای مقاومی در طی زمان تأثیرگذار است، بر این اساس در شکل (۲) منحنی تغییرات pH محلول نگهدارنده برای نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ارائه شده است. شکل (۲) تغییرات pH محلول نگهدارنده برای سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز با اسید سولفوریک با غلظت‌های ۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد را نشان داده شده است. براساس این نتایج pH نمونه‌هایی که در محلول نگهدارنده آب قرار داشتند در سنین ۱، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۱۲/۹۲، ۱۳/۵۵ و ۱۲/۳۶ است که روند افزایشی pH در این محیط



شکل ۲- تغییرات pH محلول نگهدارنده در حضور نمونه بتن ژئوپلیمری

نگهدارنده را بر اساس pH به سه محیط ایمن، خورنده و به شدت خورنده تقسیم بندی کرد. به این صورت که محیط با $pH > 11$

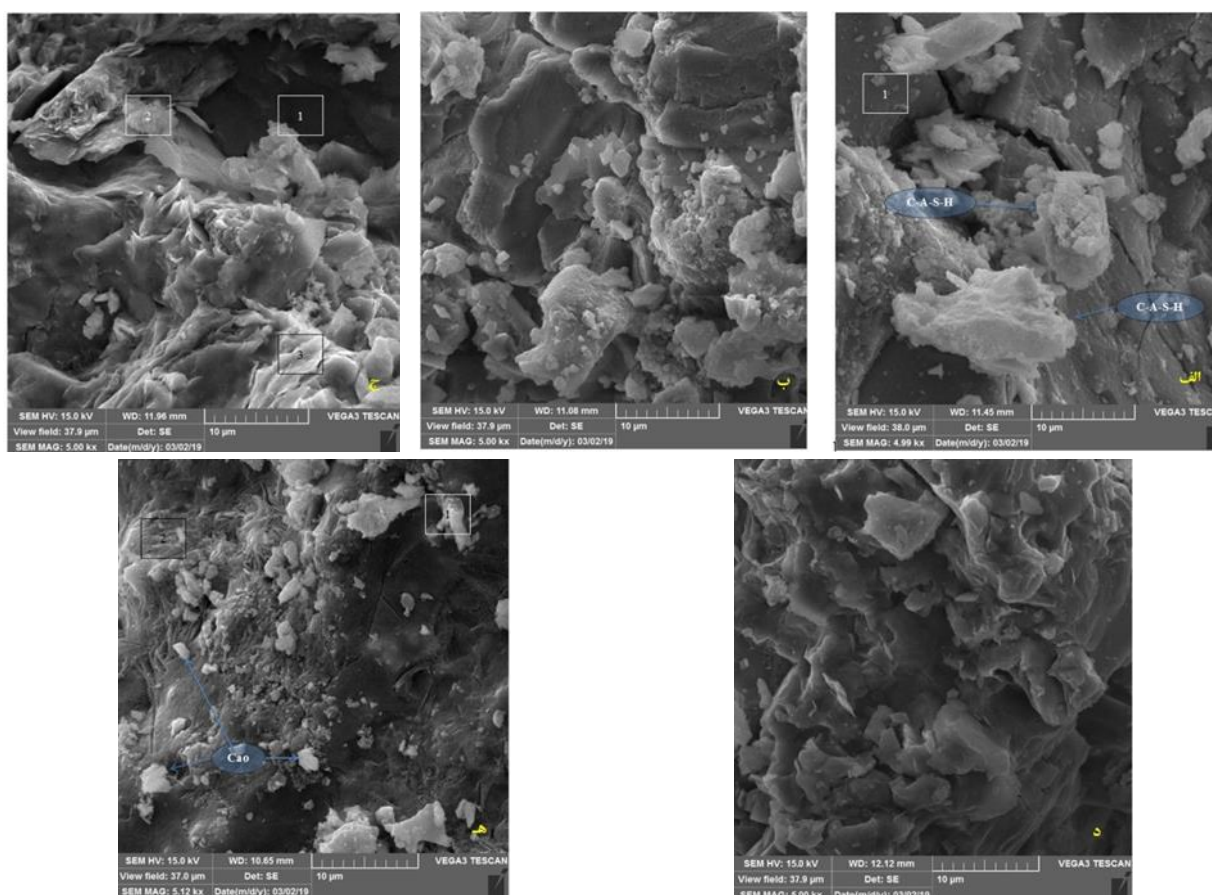
میزان pH محلول بنا بر فرآیند هیدراتاسیون بتن و قلیایی شدن محیط افزایش می‌یابد [۲۲]. به طور کلی می‌توان محیط‌های

۲۸ روز، محیط خورنده ($\text{pH} \leq 11$) است و از انجام و تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمراسیون جلوگیری می‌شود، از اینرو در نمونه‌های نگهداری شده در این محیط‌ها انتظار از هم پاشیدگی و تخریب ساختار بتن می‌رود. شایان ذکر است که در محیط‌های سولفاتی همواره احتمال حضور ترکیبات اترینگایت و گچ نیز وجود دارد، که این ترکیبات نیز باعث کاهش مقاومت بتن می‌شوند.

۳-۲- ریخت‌شناسی نمونه‌ها در محیط سولفات
در شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روشی (SEM) نمونه‌های بتنی که در محلول‌های نگهدارنده با غلظت‌های مختلف اسید سولفوریک و نمونه شاهد ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده می‌توان مشاهده کرد که ریزساختار بتن با افزایش غلظت اسید در محلول‌های نگهدارنده تغییر پیدا می‌کند.

محیط ایمن و محیط نگهدارنده با $7 < \text{pH} < 11$ محیط خورنده و محیط نگهدارنده با $\text{pH} \leq 7$ محیط به شدت خورنده برای نگهداری بتن است. چون محیط نگهداری شده با $\text{pH} \leq 7$ محیط مناسبی برای انجام واکنش فعال کننده‌ها بر پایه کلسیم و انجام واکنش ژئوپلیمراسیون نیست.

بر اساس این تقسیم‌بندی محیط‌های نگهدارنده با میزان اسید سولفوریک کمتر از ۰/۵٪ ($\text{pH} \geq 11$) محیط‌های نسبتاً ایمنی برای نگهداری نمونه‌های بتنی است. از سوی دیگر محیط‌های ۰/۲۵٪، ۰/۵٪ و ۰/۷٪ اسید سولفوریک محیطی به شدت خورنده برای نمونه‌های بتن ژئوپلیمری است و در ۲۸ روز اول اجازه انجام واکنش‌های ژئوپلیمراسیون را نمی‌دهد و نقش ساختار آلومینوسیلیکات را در افزایش مقاومت کاهش دهد. بر اساس نتایج حاصل شده در محیط‌های نگهدارنده با غلظت ۱٪ اسید سولفوریک در سنین ۱ تا



شکل ۳- تصاویر SEM از نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، (الف) بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در حوضچه آب (ب) بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در محیط سولفات با غلظت ۰/۲۵٪ اسید سولفوریک (ج) بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در محیط سولفات با غلظت ۰/۵٪ اسید سولفوریک (د) بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در محیط سولفات با غلظت ۱٪ اسید سولفوریک (ه) بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در محیط سولفات با غلظت ۰/۵٪ اسید سولفوریک

شکل (۳- الف) تصویر ریزساختار نمونه‌های عمل‌آوری شده در مدت ۲۸ روز در آب را نشان می‌دهد. در این تصویر ساختار همگن شبکه آلومینوسیلیکاتی و همچنین گروهی از ترکیبات شیمیایی مختلف قابل مشاهده است. این تصویر نشان دهنده تکامل ژئوپلیمراسیون در نمونه و تشکیل نانو ساختار C-S-H و C-A-S-H است، که باعث پرشدن منافذ در نمونه‌ها شده است. همچنین نتایج حاصل از EDX نسبت Ca/Al و Ca/Si و Ca/Al+Si در این نمونه در نقطه ۱ را به ترتیب برابر با ۳/۹۳، ۱/۲۱ و ۰/۹۱ نشان می‌دهد. این نسبت‌ها بیانگر تکامل ساختار C-A-S-H و C-S-H در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب در طی ۲۸ روز عمل‌آوری است که مساحت سطح ویژه زیادی را ایجاد می‌کنند. نانو ساختارهای هیدرات سیلیکات آلومینیوم (C-A-S-H) و هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) با نسبت‌های متفاوت Ca/Al و Ca/Si، محصولات اصلی از بتن ژئوپلیمری هستند. در بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره محصول اصلی واکنش نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) با نسبت کم Ca/Si است. نانو ساختار C-S-H مشخصه‌های ژئوپلیمر را تنظیم و بهبود می‌بخشد [۲۳]. همچنین میکروترک‌ها، ساختار آمورف آلومینوسیلیکات و ساختار سرامیکی در بتن ژئوپلیمری مشاهده می‌شود. شایان ذکر است در نمونه بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در آب، pH محیط نگهدارنده بعد از ۲۸ روز حدود ۱۳/۵ واحد است که محیط مناسبی برای انجام واکنش‌های پوزولانی است.

شکل (۳- ب) ریخت شناسی نمونه‌های نگهداری شده در محلول با غلظت ۰/۲۵ درصد اسید سولفوریک را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است ساختار آلومینوسیلیکات این آزمون متراکم‌تر و دارای خلل و فرج کمتری است. شایان ذکر است که در مقایسه با شکل (الف) میزان طول، عرض و اندازه ترک‌ها به شدت کاهش یافته است. قابل ذکر است در غلظت ۰/۲۵٪ اسید سولفوریک نیز pH محیط نگهدارنده حدود ۱۳/۴ واحد است. تهاجم سولفاتی در این مرحله به دلیل غلظت کم محلول، باعث تخریب ساختارهای مقاومی بتن به طور کامل نشده است. در شکل (۳- ج) که ریزساختار نمونه نگهداری شده در محلول با غلظت ۰/۵ درصد را نشان می‌دهد. همچنان نانو ساختارهای مقاومی C-

شکل (۳- الف) تصویر ریزساختار نمونه‌های عمل‌آوری شده در مدت ۲۸ روز در آب را نشان می‌دهد. در این تصویر ساختار همگن شبکه آلومینوسیلیکاتی و همچنین گروهی از ترکیبات شیمیایی مختلف قابل مشاهده است. این تصویر نشان دهنده تکامل ژئوپلیمراسیون در نمونه و تشکیل نانو ساختار C-S-H و C-A-S-H است، که باعث پرشدن منافذ در نمونه‌ها شده است. همچنین نتایج حاصل از EDX نسبت Ca/Al و Ca/Si و Ca/Al+Si در این نمونه در نقطه ۱ را به ترتیب برابر با ۳/۹۳، ۱/۲۱ و ۰/۹۱ نشان می‌دهد. این نسبت‌ها بیانگر تکامل ساختار C-A-S-H و C-S-H در نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب در طی ۲۸ روز عمل‌آوری است که مساحت سطح ویژه زیادی را ایجاد می‌کنند. نانو ساختارهای هیدرات سیلیکات آلومینیوم (C-A-S-H) و هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) با نسبت‌های متفاوت Ca/Al و Ca/Si، محصولات اصلی از بتن ژئوپلیمری هستند. در بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره محصول اصلی واکنش نانو ساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) با نسبت کم Ca/Si است. نانو ساختار C-S-H مشخصه‌های ژئوپلیمر را تنظیم و بهبود می‌بخشد [۲۳]. همچنین میکروترک‌ها، ساختار آمورف آلومینوسیلیکات و ساختار سرامیکی در بتن ژئوپلیمری مشاهده می‌شود. شایان ذکر است در نمونه بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در آب، pH محیط نگهدارنده بعد از ۲۸ روز حدود ۱۳/۵ واحد است که محیط مناسبی برای انجام واکنش‌های پوزولانی است.

شکل (۳- ب) ریخت شناسی نمونه‌های نگهداری شده در محلول با غلظت ۰/۲۵ درصد اسید سولفوریک را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است ساختار آلومینوسیلیکات این آزمون متراکم‌تر و دارای خلل و فرج کمتری است. شایان ذکر است که در مقایسه با شکل (الف) میزان طول، عرض و اندازه ترک‌ها به شدت کاهش یافته است. قابل ذکر است در غلظت ۰/۲۵٪ اسید سولفوریک نیز pH محیط نگهدارنده حدود ۱۳/۴ واحد است. تهاجم سولفاتی در این مرحله به دلیل غلظت کم محلول، باعث تخریب ساختارهای مقاومی بتن به طور کامل نشده است. در شکل (۳- ج) که ریزساختار نمونه نگهداری شده در محلول با غلظت ۰/۵ درصد را نشان می‌دهد. همچنان نانو ساختارهای مقاومی C-

¹ Zeolite

تجزیه شده است، همچنین میکروترک‌های ایجاد شده و حفره‌ها سبب افت مقاومت فشاری در درصد‌های زیاد اسید سولفوریک است. نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات‌ها با غلظت ۷/۵٪ اسید سولفوریک در سن ۹۰ روز حدود ۴۵ درصد کاهش مقاومت داشتند. این کاهش مقاومت به علت تشکیل گچ و زئولیت در ساختار ژئوپلیمر مربوط می‌شود. حمله اسید سولفوریک منجر به جداسازی شبکه آلومینوسیلیکات و تشکیل ساختار زئولیت ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Sr}_{96}\text{O}_{384}\cdot 216\text{H}_2\text{O}$) می‌شود که در نتیجه کاهش مقاومت نمونه‌ها را نیز به همراه دارد [۲۴]. در واقع این محیط کاملاً خورنده ($\text{pH} < 5$) و اسیدی با گذشت زمان از انجام واکنش‌های ژئوپلیمرزاسیون جلوگیری کرده و از سوی دیگر باعث تخریب ساختارهای مقاوم بتن از جمله نانو ساختار C-A-S-H شده و در نتیجه باعث کاهش مقاومت نمونه‌های نگهداری شده در این محیط‌ها می‌شود [۲۶].

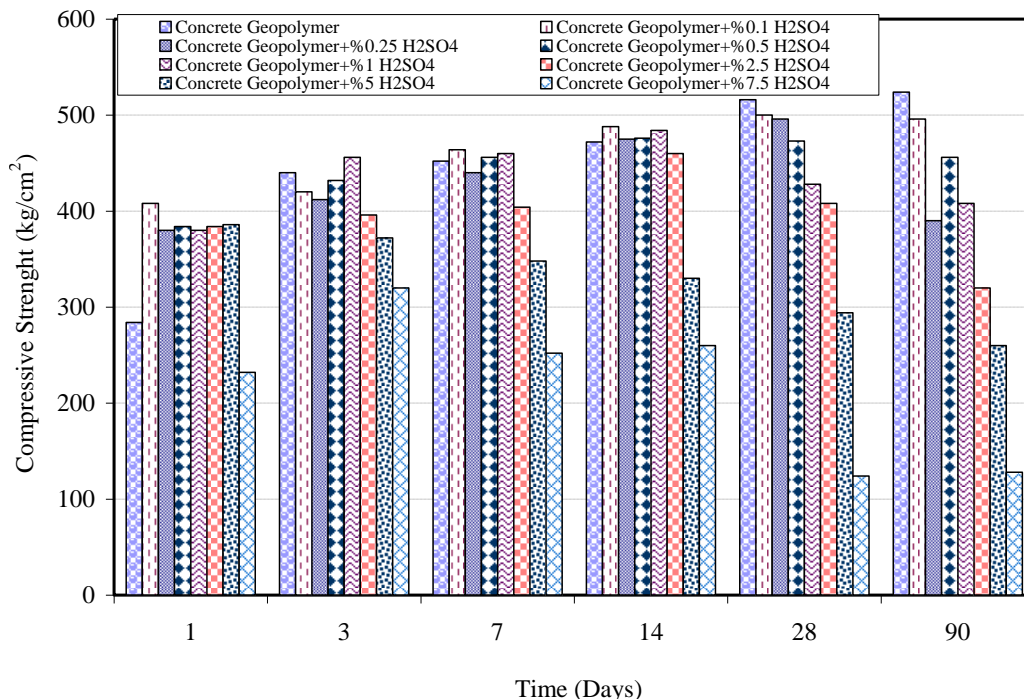
۳-۴- بررسی تغییرات امواج فراصوت در محیط‌های سولفات‌ها

در شکل (۵) منحنی تغییرات امواج فراصوت برای نمونه‌های بتن ژئوپلیمری شاهد و نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات‌ها با غلظت ۵٪ اسید سولفوریک ارائه شده است. بررسی نتایج امواج فراصوت نشان می‌دهد که با افزایش سن آزمون‌ها، سرعت پالس در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری افزایش داشته است. همانطور که در شکل (۵) مشخص است سرعت پالس نمونه‌های شاهد در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب 4450 m/s ، 4369 m/s ، 4663 m/s و 4808 m/s است. افزایش سرعت پالس در همه نمونه‌های شاهد نیز به علت تکامل فرآیند ژئوپلیمرزاسیون در طی دوره عمل‌آوری است. از این رو در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش می‌توان چگالتر شدن را از افزایش سرعت پالس‌ها نتیجه گرفت. افزایش سرعت پالس با افزایش چگالی در بتن‌هایی که دور از محیط سولفات‌ها بوده‌اند را می‌توان در تکمیل شدن واکنش‌های شیمیایی و تشکیل شدن کامل نانو ساختارهای C-S-H و C-A-S-H دانست (شکل ۳)، شایان ذکر است که نتایج با افزایش مقاومت فشاری نیز، رابطه مستقیم دارد (شکل ۴).

$\text{pH} > 12$ محیط نگهدارنده نیز از آسیب رسیدن به ساختار بتن جلوگیری می‌کند. با زیادتر شدن غلظت محلول‌های اسیدی و تاثیر مضر اسید بر روی نانو ساختارهای C-S-H و C-A-S-H مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. به نحوی که در غلظت ۷/۵٪ اسید سولفوریک مقاومت فشاری نمونه یک روزه تقریباً با نمونه شاهد برابر است. چناندا پراسیرت^۱ اشاره کرد که پلی اتیل- آلومینیوم (-Al-Si-O-) موجود در نانو ساختار ژئوپلیمری در محیط اسیدی نابود و منجر به کاهش مقاومت اتصال دهنده‌های فعال قلیایی می‌شود [۲۵].

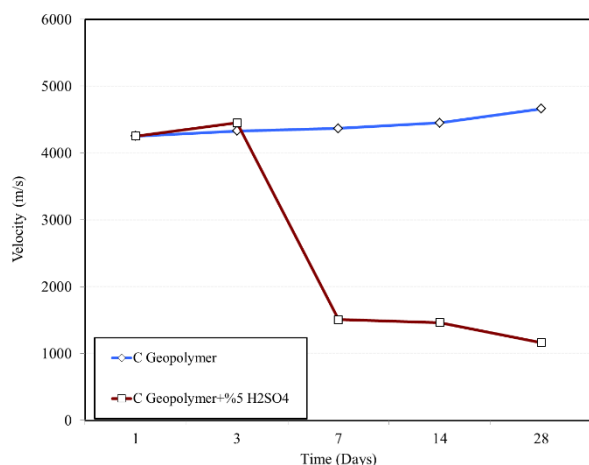
مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات‌ها با غلظت‌های ۰، ۲۵٪ و ۱ درصد اسید سولفوریک در سن ۷ روزه نسبت به ۳ روزه به ترتیب ۲/۷۲، ۶/۸ و ۰/۸ درصد افزایش مقاومت فشاری داشتند. با افزایش سن آزمون‌ها و تکامل یافتن فرآیند ژئوپلیمرزاسیون و همچنین به دلیل اینکه ساختار ژئوپلیمر با افزایش زمان عمل‌آوری متراکم‌تر می‌شود (شکل ۳-الف) مقاومت فشاری در حال رشد است. در سن ۱۴ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات‌ها با غلظت ۰، ۲۵٪، ۱، ۲/۵ و ۵ درصد اسید سولفوریک به ترتیب برابر با 472 kg/cm^2 ، 475 kg/cm^2 ، 484 kg/cm^2 و 460 kg/cm^2 است. با توجه به نتایج تغییرات pH (شکل ۱) علت افزایش مقاومت فشاری در درصد‌های کم مانند ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد، $\text{pH} > 12$ محیط نگهدارنده و به تبع آن تکامل فرآیند ژئوپلیمرزاسیون و افزایش واکنش‌های پوزولانی ایجاد شده بین نمونه‌ها است. مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه با غلظت‌های ۰، ۱، ۵ و ۷/۵ درصد اسید سولفوریک به ترتیب برابر با 516 kg/cm^2 ، 428 kg/cm^2 و 294 kg/cm^2 است. با توجه به شکل (۳) به علت غلظت زیاد اسید سولفوریک که باعث جلوگیری از تشکیل ساختار آلومینوسیلیکات و تکامل نیافتن فرآیند ژئوپلیمرزاسیون و تشکیل گچ و زئولیت در نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات‌ها با غلظت‌های ۷/۵٪ و ۵٪ اسید سولفوریک در سنین ۲۸ و ۹۰ روز شده با کاهش مقاومت مواجه است. با توجه به نتایج تصاویر SEM در شکل (۳) در محلول نگهدارنده با غلظت ۵٪ اسید سولفوریک، ساختار آلومینوسیلیکات ژئوپلیمر تخریب و کربنات کلسیم به گچ

^۱ Chindaprasirt



شکل ۴- منحنی تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در محیط‌های سولفاته در طی زمان

تشکیل اترینگایت نیز افزایش می‌یابد. تشکیل ساختار اترینگایت موجب نرم شدن و آسیب رساندن به ساختار ژئوپلیمر شده است. از این جهت با افزایش سن، کاهش در سرعت امواج فراصوتی و مقاومت فشاری مشاهده شد. به طور کلی نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مقاومت فشاری و نتایج سرعت امواج فراصوت با یکدیگر همخوانی مناسبی دارند.



شکل ۵- منحنی تغییرات امواج فراصوت نمونه‌های بتن

ژئوپلیمری در محیط نگهدارنده ۵ درصد اسید سولفوریک و شاهد در طی زمان

سرعت امواج نمونه‌ها در محیط سولفاته با غلظت ۵٪ اسید سولفوریک در سنین ۱ و ۳ روزه به ترتیب ۴۲۵۴ m/s و ۴۲۵۰ m/s است. با افزایش سن نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفاته با غلظت ۵٪ اسید سولفوریک سرعت امواج فراصوت کاهش پیدا کرده است. سرعت پالس در این محیط در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب ۱۵۰۶ m/s، ۱۱۶۶ m/s و ۱۱۱۸ m/s رسیده است.

دلیل کاهش سرعت امواج آزمونه‌های ژئوپلیمری با افزایش سن به تاثیر محیط سولفاته بر روی نانو ساختار آن مربوط می‌شود. بر اساس نتایج SEM ارائه شده پس از گذشت حدود ۲۸ روز کربنات کلسیم بوجود آمده در ساختار نمونه‌های بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در محیط اسید سولفوریک با غلظت زیاد به گچ تجزیه شده است (شکل-۳). نابودی ساختار درونی ژئوپلیمر و متخلخل شدن آن بر اثر نفوذ اسید سبب شده است که سرعت امواج کاهش یابد. با کاهش سرعت امواج مشاهده می‌شود نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ تا ۹۰ روزه نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفاته با غلظت ۵٪ اسید سولفوریک رو به کاهش است (شکل-۴).

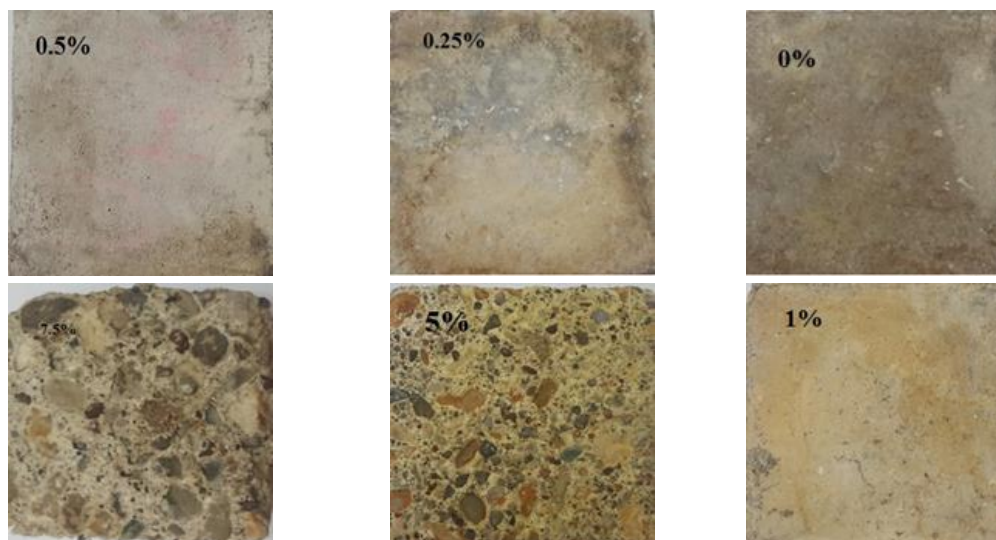
بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه شده در شکل (۳) با افزایش سن بتن نگهداری شده در محیط سولفاته،

۳-۵- بررسی ظاهری نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات

شکل (۶) ظاهر بصری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری را پس از ۹۰ روز قرارگیری در محیط‌های سولفات با غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۵ و ۷/۵ درصد و همچنین نمونه شاهد را نشان می‌دهد. با بررسی تصاویر سطح نمونه‌ها بعد از قرارگیری در معرض سولفات، نمونه‌هایی که در محیط سولفات با غلظت کم یعنی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد ($\text{pH} \geq 11$) به مدت ۹۰ روز قرار داشتند تغییر قابل توجهی در ظاهر خود ندارند. همانطور که در شکل (۶) مشخص است خرابی سطح نمونه‌ها و از بین رفتن لایه‌های سطحی آنها با افزایش غلظت محلول نگهدارنده افزایش پیدا می‌کند. این افزایش خرابی‌ها با افزایش غلظت محلول نگهدارنده با نتایج آزمایش ریزساختاری و کاهش مقاومت آنها رابطه مستقیم دارد. ظاهر نمونه‌های نگهداری شده در محیط‌های سولفات با غلظت ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد، نتایج بدست آمده از تغییرات pH محیط نگهدارنده که روند صعودی ناشی از انجام واکنش‌های پوزولانی در محیط نگهدارنده این نمونه‌ها را دارد (شکل (۲)) و آزمایش ریزساختاری

مبنی بر موجود بودن نانوساختارهای مقاومی از جمله C-S-H و C-A-S-H که باعث افزایش مقاومت در نمونه‌ها می‌شوند را تأیید می‌کند.

با توجه به شکل (۶) نمونه‌های نگهداری شده در محیط‌های سولفات با غلظت ۱، ۵ و ۷/۵ درصد که دارای pH محیط واکنش کمتر از ۵ است، میزان خرابی بیشتری نسبت به نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات با غلظت کم را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۶) تخریب شدید نمونه نگهداری شده در محیط با غلظت ۷/۵ درصد مشاهده می‌شود بطوریکه لایه سطحی نمونه کاملاً از بین رفته و دانه‌های شن و ماسه مشخص است. در واقع این بیانگر حمله شدید اسیدسولفوریک به این نمونه و تشکیل زیاد گچ، زئولیت و اترینگایت است، که با نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) که در شکل (۳) نشان داده شده منطبق است. این حمله باعث تخریب شدید نانوساختار C-S-H و C-A-S-H و کاهش ۴۵٪ مقاومت فشاری نمونه می‌شود. تغییر رنگ موجود در نمونه‌ها ناشی از رسوبات محلول اسید سولفوریک طی ۹۰ روز است.



شکل ۶- تغییرات ظاهری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری در محیط‌های سولفات

۴- نتیجه‌گیری

ساختار C-S-H و C-A-S-H باعث پرشدن منافذ در نمونه‌ها و افزایش مقاومت در این آزمون‌ها شده است. - بر اساس نتایج EDX و SEM با افزایش غلظت اسید سولفوریک در محلول نگهدارنده نسبت Ca/Si به شدت کاهش

بر اساس مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته مهم‌ترین نتایج به شرح ذیل است. - بر اساس نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در نمونه‌ها پس از ۲۸ روز ژئوپلیمراسیون و تکامل تشکیل نانو

در واقع این بیانگر حمله شدید اسیدسولفوریک به این نمونه و تشکیل زیاد گچ، زئولیت و اترینگایت است.

۵- منابع

[1] Yan, X., L. Jiang, M. Guo, Y. Chen, Z. Song, and R. Bian, Evaluation of sulfate resistance of slag contained concrete under steam curing. *Construction and Building Materials*, 2019. 195: p. 231-237.

[2] Yang, Y., Y. Zhang, W. She, N. Liu, and Z. Liu, In situ observing the erosion process of cement pastes exposed to different sulfate solutions with X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 2018. 176: p. 556-565.

[3] Aydın, S., H. Yazıcı, H. Yiğiter, and B. Baradan, Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment*, 2007. 42(2): p. 717-721.

[4] Davidovits, J., Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 1991. 37(8): p. 1633-1656.

[5] Davidovits, J., Geopolymer chemistry and applications. 2008: Geopolymer Institute.

[6] Singh, B., G. Ishwarya, M. Gupta, and S. Bhattacharyya, Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 2015. 85: p. 78-90.

[7] Kwasny, J., T.A. Aiken, M.N. Soutsos, J.A. McIntosh, and D.J. Cleland, Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 2018. 166: p. 537-553.

[8] Rajamane, N., M. Nataraja, J. Dattatreya, N. Lakshmanan, and D. Sabitha, Sulphate resistance and eco-friendliness of geopolymer concretes. *Indian Concrete Journal*, 2012. 86(1): p. 13.

[9] De Silva, P., K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 2007. 37(4): p. 512-518.

[10] De Vargas, A.S., D.C. Dal Molin, A.C. Vilela, F.J. Da Silva, B. Pavao, and H. Veit, The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement and concrete composites*, 2011. 33(6): p. 653-660.

و به کمتر از ۱ می‌رسد. این کاهش و نتایج تصاویر SEM بیانگر نفوذ شدید اسید سولفوریک به نمونه‌ها و تشکیل ساختار مخرب اترینگایت و گچ و از بین رفتن نانوساختارهای C-S-H و C-A-S-H است. در حقیقت حمله اسید سولفوریک منجر به فروپاشی شبکه آلومیناسیلیکات و تشکیل ساختار زئولیت می‌شود که در نتیجه باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود.

- مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۵ و ۲/۵ درصد اسید سولفوریک در سن ۷ روزه نسبت به ۳ روزه به ترتیب ۱۰/۴۷، ۵/۵۵ و ۲/۰۲ درصد افزایش مقاومت فشاری داشتند. با افزایش سن نمونه‌ها و تکامل یافتن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و همچنین به علت اینکه ساختار ژئوپلیمر با افزایش زمان عمل‌آوری متراکم‌تر می‌شود که می‌توان با نتایج به دست آمده از آزمایش SEM مقاومت فشاری در حال رشد این نمونه‌ها را توجیه کرد.

- نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات با غلظت ۷/۵٪ اسید سولفوریک در سن ۹۰ روز حدود ۴۵ درصد کاهش مقاومت داشتند. این کاهش مقاومت به علت تشکیل گچ و زئولیت در ساختار ژئوپلیمر مربوط می‌شود. حمله اسید سولفوریک منجر به جداسازی شبکه آلومیناسیلیکات و تشکیل ساختار زئولیت می‌شود که در نتیجه کاهش مقاومت نمونه‌ها را نیز به همراه دارد.

- در تمام نمونه‌های بتن ژئوپلیمری نگهداری شده در محیط ۱۱ pH \geq به علت تکامل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون در طی دوره عمل‌آوری، سرعت امواج فراصوت افزایش یافته است. در حقیقت افزایش چگالی در بتن‌هایی و تکمیل شدن واکنش‌های شیمیایی و تشکیل شدن کامل نانوساختارهای C-S-H و C-A-S-H علت افزایش سرعت است.

- از سوی دیگر در نمونه‌های نگهداری شده در محیط سولفات، تشکیل ساختار اترینگایت موجب نرم شدن و آسیب رساندن به ساختار ژئوپلیمر شده است. از این جهت با افزایش سن، کاهش در سرعت امواج فراصوتی و مقاومت فشاری مشاهده شد. همچنین تخریب ساختار آلومیناسیلیکات و نانوساختارهای C-S-H و C-A-S-H نیز در این کاهش اثرگذار است.

- با بررسی ظاهری نمونه‌ها، نمونه‌های نگهداری شده در محیط با غلظت ۷/۵ درصد اسید سولفوریک (pH \leq ۵) بطوریکه لایه سطحی آن کاملاً از بین رفته و دانه‌های شن و ماسه مشخص است.

- [22] FAROKHZAD, R., S. YASERI, M.H. ENTEZARIAN, and A. YAVARI, Investigating Effects of Sulfates on Compressive Strength of Different Types of Pozzolan Concrete and Measuring Penetration Rate by Ultrasound Tests at Different Ages. 2016.
- [23] Kumar, S., R. Kumar, and S. Mehrotra, Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of materials science*, 2010. 45(3): p. 607-615.
- [24] Bakharev, T., Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 2005. 35(4): p. 658-670.
- [25] Phoo-ngernkham, T., P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan, and S. Hatanaka, The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Materials & Design*, 2014. 55: p. 58-65.
- [26] Ouhadi, V., Microstructural assessment of lime consumption rate and pozzolanic reaction progress of a lime-stabilized dispersive soil. *Modares Civil Engineering journal*, 2016. 16 (1) p. 11-22.
- [11] Pan, Z., J.G. Sanjayan, and F. Collins, Effect of transient creep on compressive strength of geopolymer concrete for elevated temperature exposure. *Cement and concrete research*, 2014. 56: p. 182-189.
- [12] Wang, S.-D., X.-C. Pu, K. Scrivener, and P. Pratt, Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in cement research*, 1995. 7(27): p. 93-102.
- [13] Xu, H., W. Gong, L. Syltebo, W. Lutze, and I.L. Pegg, DuraLith geopolymer waste form for Hanford secondary waste: Correlating setting behavior to hydration heat evolution. *Journal of hazardous materials*, 2014. 278: p. 34-39.
- [14] Richardson, I. and J. Cabrera, The nature of C-S-H in model slag-cements. *Cement and Concrete composites*, 2000. 22(4): p. 259-266.
- [15] Locher, F., The problem of the sulphate resistance of slag cements. *Zement-Kalk-Gips*, 1966.
- [16] Escalante-García, J.I., A.F. Fuentes, A. Gorokhovskiy, P.E. Fraire-Luna, and G. Mendoza-Suarez, Hydration Products and Reactivity of Blast-Furnace Slag Activated by Various Alkalis. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003. 86(12): p. 2148-2153.
- [17] Fernández-Jiménez, A., F. Puertas, I. Sobrados, and J. Sanz, Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: influence of the type of alkaline activator. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003. 86(8): p. 1389-1394.
- [18] Behzad Nematollah, J., Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer. *Materials & Design*, 2014. 57: p. 667-672.
- [19] Morsy, M., S. Alsayed, Y. Al-Salloum, and T. Almusallam, Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder. *Arabian journal for science and engineering*, 2014. 39(6): p. 4333-4339.
- [20] ASTM, American Society for Testing and Materials. 1984.
- [21] ASTM, C., 597, Standard test method for pulse velocity through concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

Microstructural Assessment of the Effect of Sulfate Environments on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete

M. Amiri *

Assistant Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

P. Tanideh

Master Student, Islamic Azad University of Bandar Abbas, Faculty of Engineering.

Abstract

Geopolymer concrete is a new material in the construction industry with optimal performance and efficiency. On the other hand, geopolymer concrete has mechanical characteristics and durability against chemical attacks. Microstructural changes on the mechanical properties of geopolymer concrete in sulfate environments can be strongly affected. Accordingly the present study is a microstructural analysis of the influence of sulfate environmental condition on the mechanical properties of geopolymer concrete. In this regard, for the production of geopolymer concrete-based slurry, a sodium bicarbonate solution with sodium concentration of 10 M and sodium silicate as activating material have been used. This study evaluated about 200 concrete samples. The samples were preserved for 3 months in simulated environments with 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1%, 2.5%, 5% and 7.5% sulfuric acid concentrations. Compressive strength, weight percentage, ultrasonic wave, permeability and pH change tests were then performed after 1, 3, 7, 14, 28 and 90 days on all the samples in the preserving environment. Images from the scanning electronic microscope (SEM) test were used for microstructural analysis. The results indicate that the strength of samples preserved in the sulfate environment compared to the control sample depended on the amount of sulfate. After 90 days, the compressive strength of samples preserved in the 7.5% concentration sulfuric acid sulfate environment was reduced by about 45% compared to control samples. This reduction in compressive strength is inversely related to the results from the ultrasonic test of samples preserved in the 7.5% percent concentration sulfate environment. In fact, the sulfuric acid attack on the sample results in the separation of the aluminosilicate network in the geopolymer structure and the formation of the zeolite structure, which results in decreasing compressive strength and loss of mass, as well as the reduction of ultrasonic velocity.

Keywords: Geopolymer Concrete, Microstructural, C-S-H, Compressive Strength, SEM.

* Corresponding Author: amirii@chmail.ir

