

تشبیت خاک ماسه‌یی با ژئوپلیمر سر باره‌ی مس و ژئوپلیمر ترکیب سر باره‌ی مس و میکروسیلیس

عادل محمودی کردی (کارشناس ارشد)

وحید توفیق* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۸)
دردی ۲ - ۳۵، شماره ۱/۱، ص. ۱۲۹-۱۳۸، (پادداشت نشی)

امروزه صنعت تولید سیمان، آثار مخربی در محیط زیست ایجاد کرده است لذا در پژوهش حاضر، به منظور بهبود مقاومت فشاری خاک ماسه‌یی، به جای سیمان از ژئوپلیمر سر باره‌ی مس با دو نوع محلول فعال ساز قلیایی استفاده شده است. در نوشتار حاضر، مواردی همچون تأثیر پارامترهای اندازه‌ی ذرات سر باره‌ی مس، تأثیر استفاده از میکروسیلیس به عنوان افزودنی به ماده‌ی خام ژئوپلیمر در مقاومت فشاری و مقایسه‌ی مقاومت فشاری خاک تشبیت شده با ژئوپلیمر و سیمان بررسی شده است. همچنین به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های خاک تشبیت شده، آنالیز XRD و SEM انجام شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از ذرات ریزتر سر باره‌ی مس، باعث افزایش مقاومت فشاری بیشتری می‌شود و با افزودن میکروسیلیس به ماده‌ی خام ژئوپلیمر، مقاومت فشاری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در بعضی از درصدهای ژئوپلیمر، نمونه‌های خاک تشبیت شده ترک می‌خورند که از آهک هیدراته به منظور کنترل ترک استفاده شده است.

واژگان کلیدی: تشبیت خاک، مقاومت فشاری تک محوری، ژئوپلیمر، سر باره‌ی

مس، میکروسیلیس، محلول فعال ساز قلیایی.

adelmahmodi1371@gmail.com
vahiddavis@gmail.com

۱. مقدمه

در بسیاری از کشورها، مناطق زیادی از سطح زمین با خاک‌های نرم و ضعیف پوشیده شده‌اند. ساخت سازه بر روی این گونه خاک‌ها به دلیل ظرفیت باربری نامناسب، انقباض/تورم، نشست و خصوصیات دوام، مسئله ساز است. لذا برای بهبود چنین شرایطی از روش‌های تشبیت استفاده می‌شود.^[۱] تقویت خاک‌های ضعیف و نامناسب جهت ایجاد خاکی با ویژگی‌های مهندسی دلخواه و به کارگیری آن در مهندسی عمران تشبیت نامیده می‌شود.^[۲] یکی از معمول‌ترین روش‌های تشبیت، روش شیمیایی است. در تشبیت شیمیایی، مصالحی که چسبندگی دارند، به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، شامل مقاومت و دوام به خاک‌های نرم و ضعیف اضافه می‌شوند.^[۳] از جمله مصالح با خواص چسبندگی، سیمان است. سیمان از سال ۱۹۵۰ به عنوان رایج‌ترین تشبیت‌کننده برای ساخت بستر، زیرساز و اساس در مهندسی عمران استفاده شده است. تشبیت با سیمان، یک تکنولوژی است که برای بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی انواع وسیعی از خاک‌ها استفاده می‌شود.^[۴] از معایب سیمان می‌توان به مسائل محیط‌زیستی به ویژه مصرف انرژی بالا و انتشار گاز گلخانه‌یی در هنگام تولید آن اشاره کرد.^[۵] به ازاء تولید هر تن سیمان، ۰/۹۵ تن CO₂ تولید می‌شود

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۱۱/۱۳۹۵، اصلاحیه ۲۲/۲/۱۳۹۶، پذیرش ۲۳/۲/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1999.2057

در پژوهشی در سال ۱۹۹۶ نیز از سر باره ای مس به جای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان در بتن سیمانی استفاده و نتیجه گیری شد که پس از ۷ روز عمل آوری، با افزایش سر باره ای مس، مقاومت فشاری به طور قابل توجهی افزایش می یابد.^[۱۵] همچنین در سال ۲۰۱۴، با کاربرد پسماند معدن مس به عنوان ماده ای خام ژئوپلیمر به جای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد پسماند مس، از سر باره ای مس استفاده و نتیجه گیری شد که در صورت به کارگیری ۱۰٪ از سر باره ای مس، بیشترین مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری حاصل می شود.^[۱۶] میکروسیلیس (سیلیکا فیوم) محصول فرعی فرایند ذوب در صنعت سیلیکون و فروسیلیکون است.^[۱۷] همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۰۴) به جای ۶، ۱۰ و ۱۵ درصد سیمان در بتن، از میکروسیلیس استفاده کردند و دریافتند که در دوره ی عمل آوری ۹۰ روز و کمتر از آن، با افزایش درصد میکروسیلیس، مقاومت فشاری بتن بهبود می یابد.^[۱۸]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲ نیز جایگزین ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد سر باره ای کوره ی آهن گدازی، از میکروسیلیس برای ساخت ژئوپلیمر استفاده و نتیجه گیری شد که با افزایش میزان میکروسیلیس، تا ۵۰٪ مقاومت فشاری افزایش می یابد. افزایش میکروسیلیس به میزان ۲۵٪، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری ایجاد می کند.^[۱۹] سوزان و همکاران در همان سال، از میکروسیلیس و سدیم سیلیکات به همراه سدیم هیدروکسید برای فعال سازی قلیایی، از ترکیب سر باره ای کوره ی آهن گدازی و متاکاتولین استفاده کردند و دریافتند که می توان از میکروسیلیس به جای سدیم سیلیکات در محلول فعال ساز ژئوپلیمر متاکاتولین و سر باره استفاده کرد و به مقاومت فشاری قابل مقایسه یی دست یافت.^[۲۰] برخی دیگر از پژوهشگران نیز از ژئوپلیمر مصالح آلومینوسیلیکات مختلف برای تثبیت خاک استفاده کردند. برای نمونه در سال ۲۰۱۲، از ژئوپلیمر خاکستر بادی برای تثبیت خاک استفاده و نتیجه گیری شد که هر اندازه خاک ریزتر و نسبت سدیم اکسید به خاکستر بادی کمتر باشد، مقاومت فشاری بیشتری حاصل می شود.^[۲۱] همچنین در سال ۲۰۱۵، به جای سیمان پرلند از ژئوپلیمر سر باره ای کوره ی آهن گدازی برای تثبیت خاک استفاده و نتیجه گیری شد که مقاومت فشاری بهینه ی خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سر باره ای کوره ی آهن گدازی، چند برابر خاک تثبیت شده با سیمان است.^[۲۲] در سال ۲۰۱۳، نیز از ژئوپلیمر متاکاتولین برای تثبیت خاک استفاده و نتیجه گیری شد که ژئوپلیمر متاکاتولین، تثبیت کننده ی مؤثری برای خاک است.^[۲۳] همچنین در سال ۲۰۱۶، از ژئوپلیمر سر باره ای کوره ی آهن گدازی، خاکستر بادی و ترکیب شان برای تثبیت خاک استفاده شد و نتایج آزمایش ها نشان داد که مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سر باره به طور قابل توجهی بیشتر از خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر خاکستر بادی است.^[۲۴] در سال ۲۰۱۳، نیز از ژئوپلیمر سر باره ای کوره ی آهن گدازی، خاکستر بادی پودر شده و گچ قرمز به صورت جدا و ترکیبی برای تثبیت خاک استفاده و نتیجه گیری شد که در صورت استفاده ی جدا گانه، سر باره ای کوره ی آهن گدازی بیشترین مقاومت فشاری و در صورت استفاده ی ترکیبی، سر باره ای کوره ی آهن گدازی - گچ قرمز، بیشترین مقاومت فشاری را به دست می دهند.^[۱] همان طور که قبلاً اشاره شد، به دلیل اینکه صنعت سیمان آثار مخربی در محیط زیست می گذارد و همچنین باعث انتشار گازهای گلخانه یی می شود، در پژوهش حاضر، به جای استفاده از سیمان، از ژئوپلیمر سر باره ای مس و دو نوع محلول فعال ساز قلیایی A و B برای تثبیت خاک ماسه یی و بهبود مقاومت فشاری آن استفاده شده است.

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی مقاومت فشاری نمونه های خاک تثبیت شده، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری انجام شده است. همچنین برای بررسی ریز ساختار

نمونه های خاک تثبیت شده، آزمایش های ریز ساختاری شامل XRD و SEM انجام شده است. در صورت استفاده از محلول A به عنوان جزء قلیایی ژئوپلیمر، پارامترهای مختلفی، از جمله: اندازه ی تأثیر ذرات سر باره ای مس، زمان عمل آوری، و تأثیر افزودن میکروسیلیس به ماده ی خام ژئوپلیمر در مقاومت فشاری بررسی شده است. در صورت استفاده از محلول B به عنوان جزء قلیایی ژئوپلیمر، پارامترهای زمان عمل آوری و استفاده از میکروسیلیس به عنوان افزودنی به ماده ی خام ژئوپلیمر در مقاومت فشاری بررسی شده است. همچنین مقایسه ی مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و سیمان انجام شده است. در بعضی از درصدهای ژئوپلیمر، نمونه های خاک تثبیت شده ترک می خورند، لذا به منظور کنترل ترک از آهک هیدراته استفاده شده است.

۲. مصالح و روش ها

۱.۲. خاک

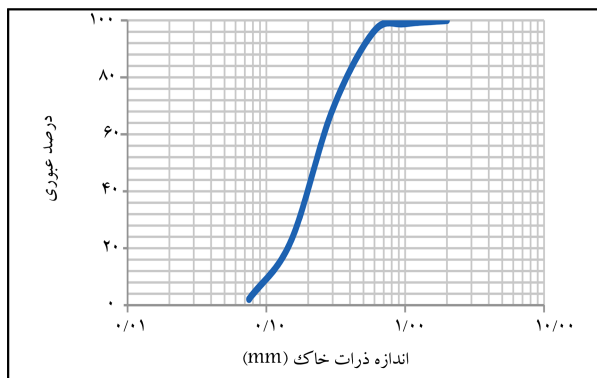
خاک مورد استفاده در نوشتار حاضر از اتوبان هفت باغ کرمان - ایران با موقعیت جغرافیایی: طول جغرافیایی ۳۰/۱۲۳۶ درجه، عرض جغرافیایی ۵۷/۱۶۳۸ درجه و با ارتفاع ۱۸۰۰ متر از سطح آزاد دریا تهیه شده است. آزمایش تراکم بر روی خاک مذکور مطابق با ASTM D۶۹۸،^[۲۴] انجام شده است که رطوبت بهینه ی خاک برابر با ۱۵٪ شده است. آزمایش دانه بندی بر روی خاک مطابق با D۴۲۲ ASTM،^[۲۵] انجام شده است که منحنی دانه بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با سیستم طبقه بندی متحد، نام خاک مورد استفاده ی ماسه ی بد دانه بندی شده (SP) است.

۲.۲. سر باره ای مس

در پژوهش حاضر، از سر باره ای مس به عنوان ماده ی خام اصلی ژئوپلیمر استفاده شده است. سر باره ای مس از معدن مس سرچشمه واقع در استان کرمان - ایران است، ترکیب شیمیایی سر باره ای مس با استفاده از آنالیز XRF به دست آمده است (جدول ۱). از سر باره ای مس با دو نوع دانه بندی شامل ریزدانه و درشت دانه استفاده شده است که دانه بندی آن ها با استفاده از دستگاه لیزر انجام شده است. در شکل ۲، منحنی های دانه بندی سر باره نشان داده شده است.

۳.۲. میکروسیلیس (SF) و سدیم هیدروکسید

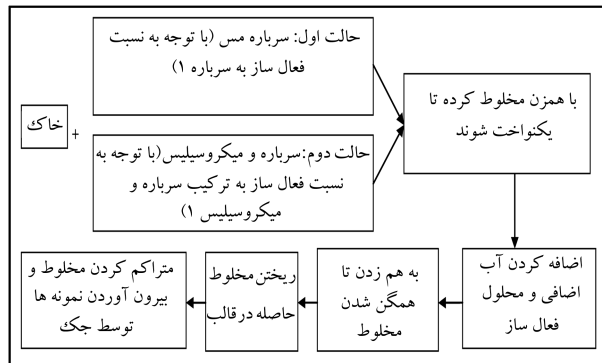
میکروسیلیس استفاده شده در پژوهش حاضر حدود ۹۰٪ سیلیکای آمورف دارد که



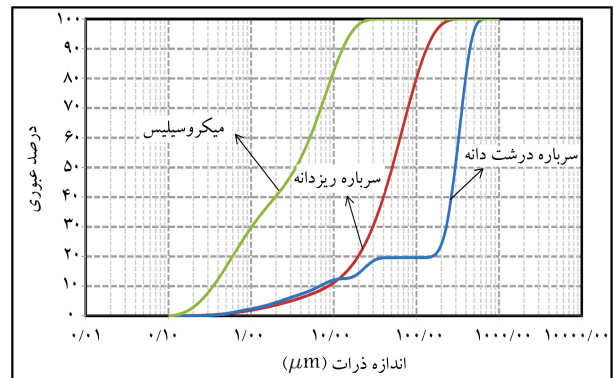
شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) سرباره‌ی مس و میکروسیلیس.

ترکیب‌ها	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CuO	Na ₂ O
سرباره‌ی مس	۳۴	۲	۴۹	۶٫۵	۴	۰٫۷	-
میکروسیلیس	۸۹٫۲۲	۱٫۲	۲٫۱۱	۱٫۸۷	۱٫۶۱	-	۰٫۵۶



شکل ۳. فلوجارت آماده‌سازی نمونه برای حالت‌های اول و دوم.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سرباره‌ی مس ریزدانه، سرباره‌ی مس درشت دانه و میکروسیلیس.

۵.۲. آماده‌سازی نمونه و روش آزمایش

در نوشتار حاضر، تثبیت نمونه‌های خاک با ژئوپلیمر به دو صورت انجام می‌شود: در حالت اول، فقط از سرباره‌ی مس به عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر و در حالت دوم، علاوه بر سرباره‌ی مس از میکروسیلیس به عنوان افزودنی به ماده‌ی خام ژئوپلیمر (سرباره‌ی مس) استفاده می‌شود. در حالت اول، خاک و سرباره‌ی مس به صورت خشک با توجه به نسبت برابر محلول فعال‌ساز (A و B) به سرباره‌ی مس، با همزن مخلوط می‌شوند، تا یکنواخت شوند. سپس محلول فعال‌ساز و آب اضافی به مخلوط اضافه و هم زده می‌شود تا مخلوط کاملاً همگنی حاصل شود. آب اضافی میزان آبی است که به مخلوط باید اضافه شود تا به رطوبت بهینه برسد. در حالت دوم خاک، سرباره‌ی مس و میکروسیلیس به صورت خشک با توجه به نسبت برابر محلول فعال‌ساز به ترکیب سرباره‌ی مس و میکروسیلیس، با همزن مخلوط می‌شوند، تا به صورت یکنواخت درآیند. سپس محلول فعال‌ساز و آب اضافی به مخلوط اضافه و به هم زده می‌شود، تا مخلوط کاملاً همگنی حاصل شود. مخلوط‌های همگن به وجود آمده در دو حالت اول و دوم در قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در ۳ لایه ریخته می‌شود. نمونه‌ها به روش تراکم استاندارد با استفاده از چکش ۴ کیلوگرمی که بر هر لایه ۴ بار از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری رها می‌شود، متراکم می‌شوند. بلافاصله پس از تراکم، نمونه‌ها با استفاده از جک از قالب بیرون آورده و بدون پوشش در دما و رطوبت اتاق عمل‌آوری می‌شوند. پس از گذشت دوره‌ی عمل‌آوری موردنظر براساس دستورالعمل ASTM D2166^[۲۸]، نمونه‌ها ارزیابی می‌شوند. فلوجارت آماده‌سازی نمونه برای دو حالت اول و دوم در شکل ۳ نشان داده شده است. از هر حالت خاک تثبیت‌شده، دو نمونه ساخته و میانگین‌شان به عنوان مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه در نظر گرفته شده است. در نوشتار حاضر، برای ارزیابی ژئوپلیمر به عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده برای خاک، از مقاومت فشاری تک‌محوری به عنوان معیاری برای تثبیت خاک استفاده شده است. نمونه‌های خاک تثبیت‌شده پس از گذشت دوره‌ی عمل‌آوری در دستگاه آزمایش تک‌محوری به نحوی قرار دادند که نیرو بر مرکز نمونه وارد شود. سرعت بارگذاری دستگاه، ۱ میلی‌متر بر دقیقه است.

۴.۲. محلول فعال‌ساز قلیایی

در نوشتار حاضر، از دو نوع محلول قلیایی A و B برای ساخت ژئوپلیمر استفاده شده است. در ساخت محلول A، ابتدا تکه‌های سدیم هیدروکسید در آب داخل یک ظرف پلاستیکی به آرامی حل می‌شود، تا محلول سدیم هیدروکسید یکنواخت با غلظت ۱۲٫۵ مولار حاصل شود. پس از گذشت ۱۲ ساعت مقدار موردنظر میکروسیلیس با توجه به نسبت $SiO_2/Na_2O = 0.75$ سیلیکا به سدیم اکسید برابر با در محلول سدیم هیدروکسید ریخته و با همزن به مدت ۱۰ دقیقه به هم زده می‌شود، تا محلول سیاه رنگ یکنواختی حاصل شود. محلول در ظرف پلاستیکی درب‌داری ریخته و درب ظرف بسته می‌شود، تا محلول با هوا در تماس نباشد؛ زیرا در صورتی که هوا به محلول برسد، به حالت جامد در می‌آید، که برای ساخت نمونه غیرقابل استفاده می‌شود. برای اینکه میکروسیلیس به خوبی در محلول سدیم هیدروکسید حل شود، پس از گذشت ۲۴ ساعت از محلول قلیایی برای ساخت نمونه استفاده می‌شود.^[۲۹] در ساخت محلول B، ابتدا تکه‌های سدیم هیدروکسید در آب داخل ظرف پلاستیکی به آرامی حل می‌شود، تا محلول سدیم هیدروکسید یکنواختی با غلظت ۱۲٫۵ مولار که به رنگ سفید کدر است، حاصل شود. برای رسیدن محلول به دمای محیط و یکنواخت‌تر شدن آن، پس از گذشت یک روز برای ساخت نمونه از آن استفاده می‌شود.^[۱۶]

۳. نتایج و بحث

۱.۱.۳. محلول A

۱.۱.۳.۱. تأثیر اندازه‌ی ذرات سرباره‌ی مس در مقاومت فشاری

به منظور بررسی تأثیر اندازه‌ی ذرات سرباره‌ی مس به‌عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر در مقاومت فشاری، از دو نوع سرباره‌ی مس درشت‌دانه و ریزدانه استفاده شده است. در شکل ۴، تأثیر اندازه‌ی ذرات سرباره‌ی مس در مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر در درصد‌های ژئوپلیمر ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۰ (نسبت وزنی ژئوپلیمر به کل مخلوط) برای ۳ دوره‌ی عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز نشان داده شده است. محدوده‌ی وسیعی از درصد‌های ژئوپلیمر در نظر گرفته شده است، تا تأثیر میزان ژئوپلیمر در مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده بررسی شود. این تذکر لازم است که پس از دو روز عمل‌آوری در نمونه‌ی تثبیت‌شده با سرباره‌ی مس درشت‌دانه با درصد ژئوپلیمر ۲۴ در نمونه، ترک ریز ایجاد می‌شود. در نمونه‌های تثبیت‌شده با سرباره‌ی مس درشت‌دانه و ریزدانه با درصد ژئوپلیمر ۳۰، ترک‌های نسبتاً درشت‌تری به‌صورت طولی و عرضی ایجاد می‌شود. به منظور کنترل ترک در نمونه‌های قیدشده به ترتیب از ۱ و ۲ درصد آهک هیدراته (نسبت وزنی آهک به کل مخلوط) استفاده شده است، که در بخش ۱.۴.۳ در مورد علت ترک و نحوه‌ی کنترل ترک بحث شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که مقاومت فشاری پس از ۷ روز عمل‌آوری در هر دو نوع اندازه‌ی ذرات نزدیک به هم است، اما پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری، تأثیر اندازه‌ی ذرات در مقاومت فشاری محسوس است. در صورت استفاده از سرباره‌ی مس با اندازه‌ی ذرات ریزتر، مقاومت فشاری بیشتری حاصل می‌شود، که دلیل آن در دسترس بودن سطح بیشتر ذرات برای تشکیل ژل ژئوپلیمری است.^[۱۴] با توجه به نتایج به‌دست آمده در بخش حاضر، سرباره‌ی ریزدانه مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به سرباره‌ی درشت‌دانه ایجاد کرده است. لذا در ادامه‌ی پژوهش حاضر، از سرباره‌ی مس ریزدانه به‌عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر استفاده شده است.

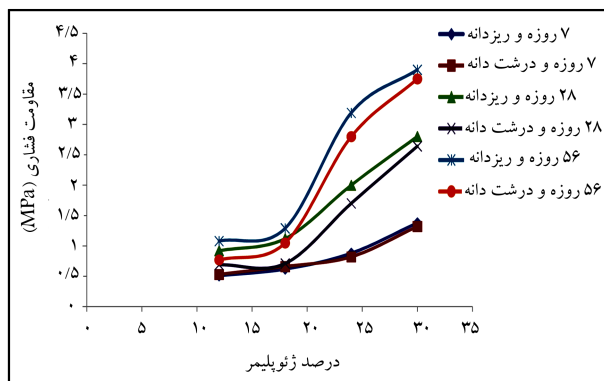
۲.۱.۳. تأثیر زمان عمل‌آوری در مقاومت فشاری

محلول A برای تثبیت خاک با سرباره‌ی مس به‌عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر سرباره‌ی مس در درصد‌های ژئوپلیمر ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۰ استفاده شده است که نتایج حاصل از آن برای سه دوره‌ی عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در شکل ۵ مشاهده می‌شود. مقاومت فشاری خاک بدون تثبیت‌کننده پس از ۷ روز عمل‌آوری، ۰٫۸۵ مگاپاسکال است و پس از دوره‌ی عمل‌آوری مذکور، افزایش مقاومت فشاری در خاک بدون تثبیت‌کننده اتفاق نمی‌افتد. با افزایش درصد ژئوپلیمر در هر ۳ دوره‌ی عمل‌آوری بر مقاومت فشاری افزوده می‌شود. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری نیز بر مقاومت فشاری اضافه می‌شود. افزایش مذکور از ۷ به ۲۸ روز قابل توجه است. افزایش مقاومت خاک پس از ۷ روز عمل‌آوری، فقط در درصد ژئوپلیمر ۳۰ اتفاق می‌افتد که دلیل آن می‌تواند سختی (سفتی) زیاد سرباره‌ی مس باشد که به زمان نسبتاً زیاد و درصد فعال‌ساز بالایی برای تشکیل پیوندهای ژئوپلیمری نیاز است.

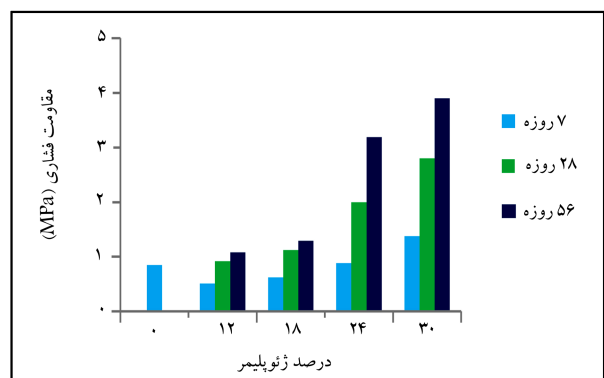
۳.۱.۳. تأثیر استفاده از میکروسیلیس افزوده به ماده‌ی خام ژئوپلیمر در

مقاومت فشاری

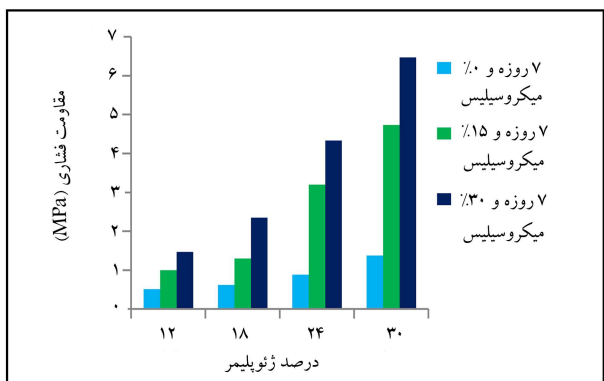
به منظور بررسی تأثیر افزودن میکروسیلیس به ماده‌ی خام ژئوپلیمر (سرباره‌ی مس) در مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده، درصد‌های مختلف میکروسیلیس بررسی شده است. در نوشتار حاضر، از ماده‌ی خام ژئوپلیمر (سرباره‌ی مس) ۸۵٪ و افزودن ۱۵٪ میکروسیلیس به آن (SF (۱۵٪)) و همچنین از ۷۰٪ ماده‌ی خام (سرباره) و ۳۰٪ میکروسیلیس (SF (۳۰٪)) استفاده شده است. در شکل‌های ۶ الی ۸،



شکل ۴. تأثیر اندازه‌ی ذرات سرباره‌ی مس در مقاومت فشاری پس از ۷، ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری.

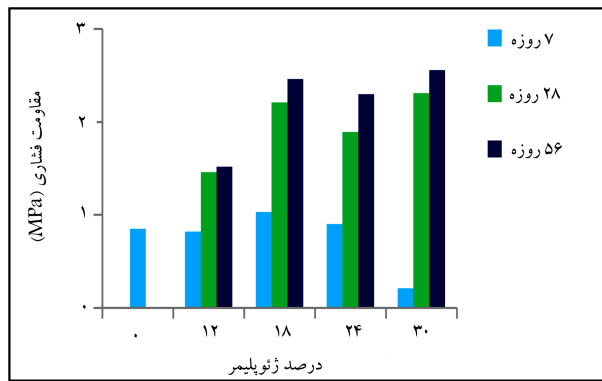


شکل ۵. خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر سرباره‌ی مس پس از گذشت دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز.

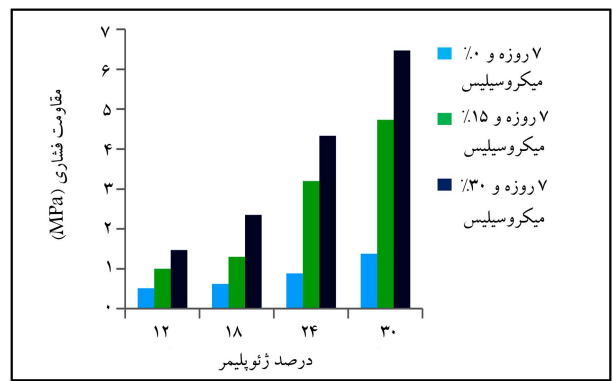


شکل ۶. تأثیر استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس افزوده به ماده‌ی خام ژئوپلیمر پس از ۷ روز عمل‌آوری.

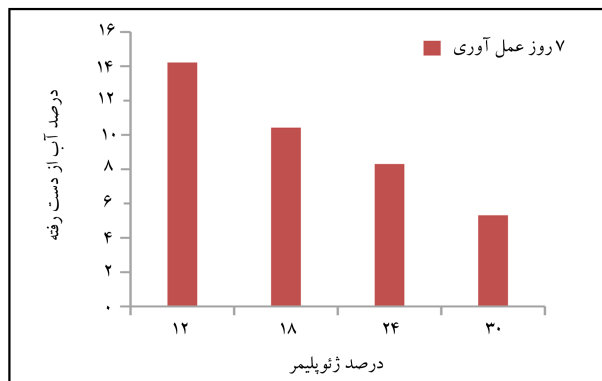
SF (۰٪) (قسمت ۲.۱.۳)، SF (۱۵٪) و SF (۳۰٪) به ترتیب پس از ۷، ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری نشان داده شده است. با افزایش مقدار میکروسیلیس در ماده‌ی خام ژئوپلیمر، مقاومت فشاری به طور قابل توجهی در هر ۳ دوره‌ی عمل‌آوری افزایش می‌یابد که علت آن می‌تواند درصد بالای سیلیکای آمورف در میکروسیلیس و اندازه‌ی ذرات ریزتر میکروسیلیس نسبت به سرباره‌ی مس باشد. این نتیجه با نتایج پژوهشی در سال ۲۰۱۲، برای ساخت ژئوپلیمر مطابقت دارد.^[۱۹] بنابراین استفاده از ترکیب سرباره و میکروسیلیس به‌عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر برای تثبیت خاک



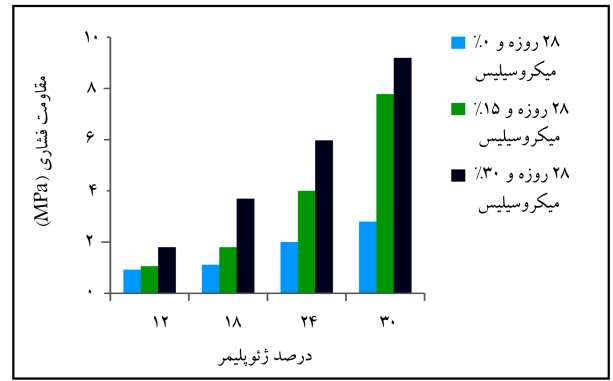
شکل ۹. خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سربراره‌ی مس و محلول فعال ساز B پس از گذشت دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز.



شکل ۷. تأثیر استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس افزوده به ماده‌ی خام ژئوپلیمر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری.



شکل ۱۰. درصد آب از دست رفته برای خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سربراره‌ی مس پس از ۷ روز عمل‌آوری.



شکل ۸. تأثیر استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس افزوده به ماده‌ی خام ژئوپلیمر پس از ۵۶ روز عمل‌آوری.

پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده در درصد‌های ژئوپلیمر ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۰ بیشتر از مقاومت فشاری خاک بدون تثبیت‌کننده است. به نحوی که پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ۳۰٪ ژئوپلیمر، ۳ برابر خاک بدون تثبیت‌کننده می‌شود. در پژوهشی در سال ۱۲۰۲، همین نتیجه برای خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر خاکستر بادی به دست آمده است.^[۲۹]

۲.۲.۳. تأثیر استفاده از میکروسیلیس به عنوان افزودنی به ماده‌ی خام ژئوپلیمر در مقاومت فشاری

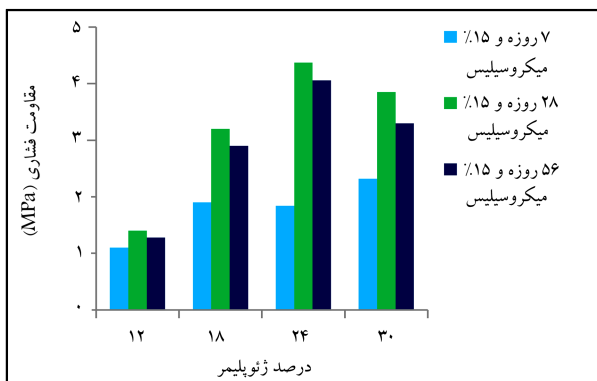
به منظور بررسی تأثیر افزودن میکروسیلیس به ماده‌ی خام ژئوپلیمر (سربراره‌ی مس) در مقاومت فشاری خاک تثبیت شده، از ۸۵٪ سربراره‌ی مس و ۱۵٪ میکروسیلیس (SF (۱۵٪)) و همچنین از ۷۰٪ سربراره و ۳۰٪ میکروسیلیس (SF (۳۰٪)) استفاده شده است. با توجه به اینکه در صورت استفاده از فقط سربراره‌ی مس به عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر، افزایش مقاومت فشاری قابل توجهی حاصل نمی‌شود (بخش ۱.۰.۲.۳)، لذا میکروسیلیس به ماده‌ی خام ژئوپلیمر افزوده می‌شود. این تذکر لازم است که در صورت استفاده از ۲۴٪ ژئوپلیمر در حالت (SF (۳۰٪)) و استفاده از ۳۰٪ ژئوپلیمر در حالت‌های SF (۱۵٪) و SF (۳۰٪)، نمونه‌ها ترک می‌خورند، که به ترتیب از ۱ و ۲ درصد آهک جهت کنترل ترک استفاده شده است. در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳، SF (۰٪) (بخش ۱.۰.۲.۳)، SF (۱۵٪) و SF (۳۰٪) به ترتیب پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری نشان داده شده است. پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ۲۴٪ ژئوپلیمر در حالت SF (۳۰٪) برابر خاک بدون تثبیت‌کننده و ۳/۵ برابر خاک تثبیت شده با ۲۴٪ ژئوپلیمر در حالت SF (۰٪)

می‌تواند سبب افزایش قابل ملاحظه‌ی در مقاومت فشاری شود. پس از ۵۶ روز عمل‌آوری مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ۳۰٪ ژئوپلیمر در حالت SF (۳۰٪)، برابر خاک بدون تثبیت‌کننده و ۳ برابر خاک تثبیت شده با ۳۰٪ ژئوپلیمر در حالت SF (۰٪) است. این تذکر لازم است که در صورت استفاده از ۲۴٪ ژئوپلیمر در حالت SF (۱۵٪)، نمونه‌ها ترک‌های ریزی می‌خورند که از ۱٪ آهک برای کنترل ترک استفاده شده است.

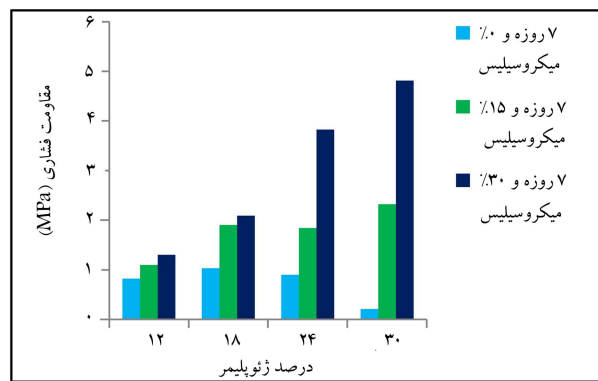
۲.۳. محلول B

۱.۲.۳. تأثیر زمان عمل‌آوری در مقاومت فشاری

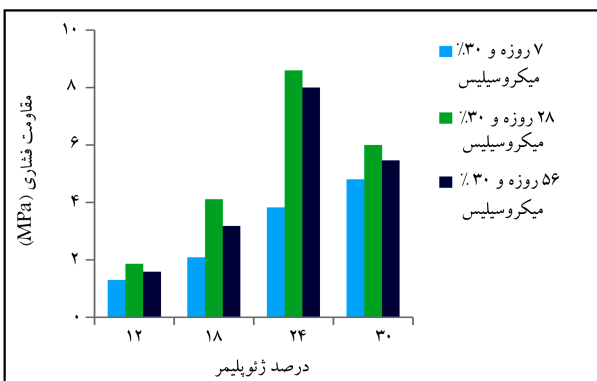
به منظور بررسی تأثیر نوع محلول قلیایی در مقاومت فشاری، از محلول B استفاده شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سربراره‌ی مس (سربراره‌ی فعال‌سازی شده با محلول B) برای ۳ دوره‌ی عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در شکل ۹ نشان داده شده است. پس از گذشت ۷ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده در درصد‌های ژئوپلیمر ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۰ برابر یا کمتر از مقاومت فشاری خاک بدون تثبیت‌کننده (۰٪ ژئوپلیمر) است که می‌توان نتیجه گرفت پس از ۷ روز عمل‌آوری، فعال‌سازی قلیایی سربراره‌ی مس صورت نمی‌گیرد. همچنین با افزایش درصد ژئوپلیمر از مقاومت فشاری کاسته می‌شود، زیرا با افزایش درصد ژئوپلیمر، نمونه‌ی خاک تثبیت شده رطوبت کمتری از دست می‌دهد، در نتیجه نمونه‌ی خاک مرطوب‌تر است، بنابراین مقاومت کمتری حاصل می‌شود. درصد آب از دست رفته از نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



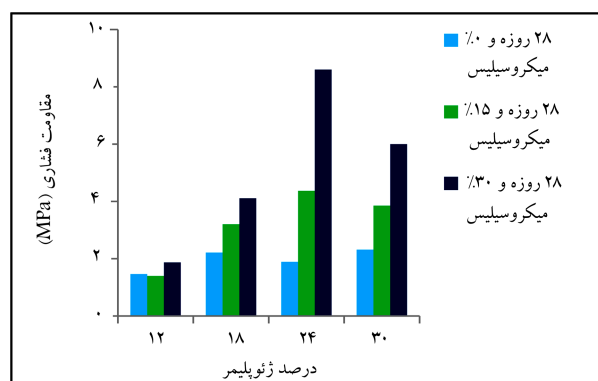
شکل ۱۴. تأثیر زمان عمل‌آوری در مقاومت فشاری در حالت SF (۱۵٪).



شکل ۱۱. تأثیر استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس افزوده به ماده‌ی خام ژئوپلیمر پس از ۷ روز عمل‌آوری.



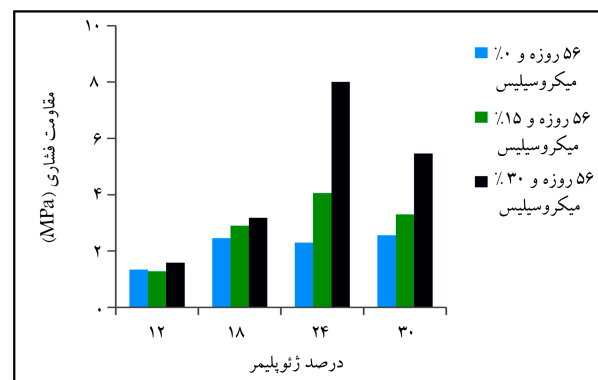
شکل ۱۵. تأثیر زمان عمل‌آوری در مقاومت فشاری در حالت SF (۳۰٪).



شکل ۱۲. تأثیر استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس افزوده به ماده‌ی خام ژئوپلیمر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب تأثیر زمان عمل‌آوری در مقاومت فشاری نمونه‌های خاک تشبیت‌شده در حالت‌های SF (۱۵٪) و SF (۳۰٪) را نشان می‌دهند. مقاومت فشاری نمونه‌ها از ۷ به ۲۸ روز افزایش می‌یابد، ولی نکته‌ی قابل توجه برای محلول B این است که بر خلاف محلول A، مقاومت فشاری نمونه‌ها از ۲۸ به ۵۶ روز، مقدار کمی کاهش می‌یابد. از آنجا که میکروسیلیس نسبت به مواد خام معمولی ژئوپلیمر سریع‌تر واکنش می‌دهد،^[۳۰] ژل ژئوپلیمری پس از ۲۸ روز کاملاً شکل می‌گیرد، که علت کاهش مقاومت فشاری از ۲۸ به ۵۶ روز می‌تواند واکنش سریع میکروسیلیس با محلول B باشد.^[۳۳] اما در حالت SF (۰٪)، مقاومت فشاری از ۲۸ به ۵۶ روز افزایش می‌یابد (بخش ۱.۲.۳).

۳.۳. مقایسه‌ی مقاومت فشاری خاک تشبیت‌شده با سیمان و ژئوپلیمر
 بیشترین مقاومت فشاری برای خاک تشبیت‌شده با ژئوپلیمر زمانی اتفاق می‌افتد که ۳۰٪ میکروسیلیس به ماده‌ی خام ژئوپلیمر افزوده شود. بنابراین در نوشتار حاضر، مقایسه‌ی مقاومت فشاری خاک تشبیت‌شده با سیمان با این حالت انجام می‌شود. مقایسه بین تشبیت خاک با ژئوپلیمر در درصدهای ژئوپلیمر ۲۴ و ۳۰ برای هر دو نوع محلول A و B (AS و BS) و سیمان (PC) در درصدهای ۱۱/۴ و ۱۴/۶ (نسبت وزنی سیمان به کل مخلوط) در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. برای محلول A، افزایش مقاومت خاک با ۲۴ و ۳۰ درصد ژئوپلیمر به ترتیب نسبت به ۱۱/۴ و ۱۴/۶ درصد سیمان بیشتر است. برای محلول B، پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری، افزایش مقاومت فشاری خاک با ۲۴٪ ژئوپلیمر نسبت به ۱۴/۶٪ سیمان بیشتر است. با توجه به شکل ۱۶، با مقایسه‌ی محلول‌های قلیایی A و B می‌توان پی برد که پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری در درصد ژئوپلیمر ۲۴ محلول B و برای هر



شکل ۱۳. تأثیر استفاده از ۱۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس افزوده به ماده‌ی خام ژئوپلیمر پس از ۵۶ روز عمل‌آوری.

است. پس از ۲۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری و در حالت‌های SF (۱۵٪) و SF (۳۰٪)، مقاومت فشاری از ۲۴٪ به ۳۰٪ ژئوپلیمر کاهش می‌یابد، که دلیل آن می‌تواند وجود میکروتکرک‌ها در نمونه با ۳۰٪ ژئوپلیمر باشد. با توجه به اینکه در صورت استفاده نکردن از آهک جهت کنترل ترک، تعداد ترک‌ها در نمونه با ۳۰٪ ژئوپلیمر خیلی بیشتر از نمونه با ۲۴٪ ژئوپلیمر هستند، بنابراین در صورت استفاده از آهک هم، میکروتکرک‌ها در نمونه با ۳۰٪ ژئوپلیمر بیشتر است که سبب کاهش مقاومت با ۳۰٪ ژئوپلیمر است.

آنورتیت ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)، کلسیم اکسید (CaO) و کزندم (Al_2O_3) دارد. با توجه به شکل ۱۷، با مقایسه فازهای کریستالی سربراره‌ی مس (CS) و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سربراره (G) می‌توان مشاهده کرد که فازهای کریستالی سربراره‌ی مس در خاک تثبیت شده وجود ندارند که می‌تواند دلیل آن حل شدن کریستال‌های مذکور در محلول قلیایی باشد. با مقایسه فازهای کریستالی خاک و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سربراره (G و Soil) مشاهده می‌شود که پیک واقع در زاویه 2θ برابر با 21° درجه یعنی کوارتز در خاک تثبیت شده، شدت کمتری دارد؛ که نشان می‌دهد مقداری از کوارتز موجود در خاک نیز توسط محلول، قلیایی حل شده است. فازهای کریستالی دو نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر G و GL (شکل ۱۷) با هم مشابه هستند، فقط تعدادی از پیک‌ها از نظر شدت با هم متفاوت هستند.

۱.۴.۳. بررسی ترک و نحوه‌ی کنترل ترک

برای بررسی علت ترک خوردن نمونه‌ی خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر، الگوی XRD نمونه‌ی GNL (ترک خورده) با GL (ترک نخورده) مقایسه شده است. از مقایسه الگوی XRD دو نمونه مشاهده می‌شود که نمونه‌ی ترک خورده، دو فاز کریستالی واقع در زوایای 2θ برابر با $13/6^\circ$ و $16/5^\circ$ به ترتیب به نام‌های هیدنبرگیت (H) و مالیت (Mu) دارد که دو فاز مذکور در نمونه‌های G و GL وجود ندارد و H و Mu دو فاز کریستالی CS هستند که در نمونه‌ی ترک خورده هم با شدت کمتری نسبت به CS وجود دارند. وجود دو فاز کریستالی H و Mu می‌تواند علت ترک خوردن نمونه باشد. با توجه به اینکه ساختار مالیت (Mu)، $\text{Al}_2(\text{Al}_{2.8}\text{Si}_{1.2})\text{O}_{9.6}$ است و در ساختار مذکور، آلومینیوم (Al) به نسبت زیادی وجود دارد، انتظار می‌رود حضور یا عدم حضور عنصر آلومینیوم در ساختار Mu، بر روی فرایند جذب آب که باعث ترک می‌شود، تأثیر به‌سزایی بگذارد. براساس بررسی‌های انجام شده‌ی در سال ۱۹۷۰^[۲۱]، آلومینیوم حدود $10^{-6} \times 3/6$ متر مربع بر ثانیه قابلیت جذب آب دارد. از طرفی گزارش‌های متعددی وجود دارد که Mu ساختاری از آلومینیوم است و می‌تواند جذب حلال‌های قطبی مانند آب را در یک سیستم کامپوزیتی افزایش دهند. به‌عنوان مثال در گزارش ارائه شده‌ی در سال ۲۰۱۷^[۲۲]، کامپوزیت تشکیل شده از Mu حدود $11/25$ آب جذب کرده است. یا در گزارش ارائه شده‌ی دیگری در سال ۲۰۰۸^[۲۳]، ایزوترم‌های جذب در مورد حلال قطبی که بر روی سطح مالیت قرار گرفته‌اند، رشد اولیه‌ی زیادی را نشان می‌دهند که این موضوع آب دوست بودن Mu را تأیید می‌کند. لذا، اگر Mu در سیستم حذف شود، میزان جذب آب توسط آن‌ها در ژل ژئوپلیمر کاهش می‌یابد و در ادامه، همین اتفاق در مورد هیدنبرگ (H) می‌افتد زیرا ساختار آن آهن (Fe) دارد که عنصری آب دوست است و با حذف Mu و H، میزان جذب آب در ژل ژئوپلیمر کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث ترک نخوردن نمونه‌ها می‌شود، بنابراین از دست رفتن آب، دلیل ترک خوردن نمونه‌هاست. با توجه به برخی مطالعات در سال‌های ۱۹۸۱ و ۱۹۸۷ از دست رفتن آب در بتن هم در مراحل اولیه‌ی اجرا، باعث ایجاد ترک در آن است.^[۲۴،۲۵] در صورت استفاده از آهک در نمونه‌ی GNL، خاصیت قلیایی محیط خاک بیشتر می‌شود و در نتیجه دو فاز کریستالی مذکور در محلول قلیایی حل می‌شود، که باعث ترک نخوردن نمونه می‌شود.

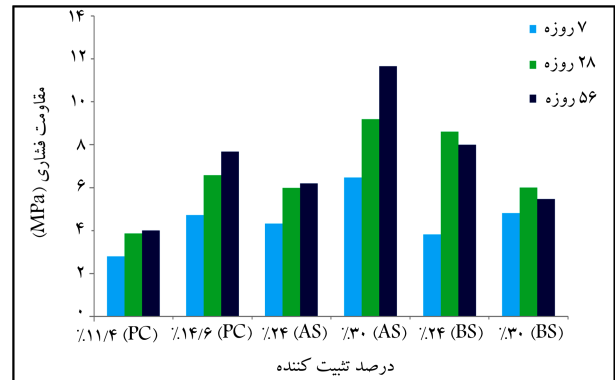
۵.۳. آنالیز SEM

از دو نمونه‌ی G و GL عکس SEM گرفته شده است که در بزرگ‌نمایی $500\times$ ، $250\times$ و $50\times$ به ترتیب در شکل‌های ۱۸ الی ۲۰ مشاهده می‌شود. با توجه به بخش‌های پیشین، نمونه‌ی GL به طور قابل توجهی مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌ی G دارد که با توجه به عکس‌های SEM می‌تواند به این دلایل باشد:

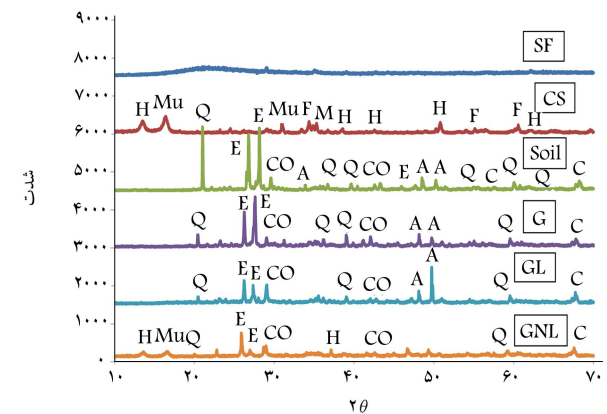
سه دوره‌ی عمل‌آوری در درصد ژئوپلیمر 30% ، محلول A مقاومت فشاری بیشتری دارد. عیب محلول B این است که برخلاف محلول A در درصد‌های ژئوپلیمر ۲۴ و 30% ، نمونه‌های خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر ترک می‌خورند. همچنین برای محلول B مقاومت فشاری از ۲۸ به ۵۶ روز کاهش می‌یابد. مزیت محلول B این است که از لحاظ استفاده در کارهای اجرایی نسبت به محلول A، کار با محلول B آسان‌تر است.

۴.۳. آنالیز XRD

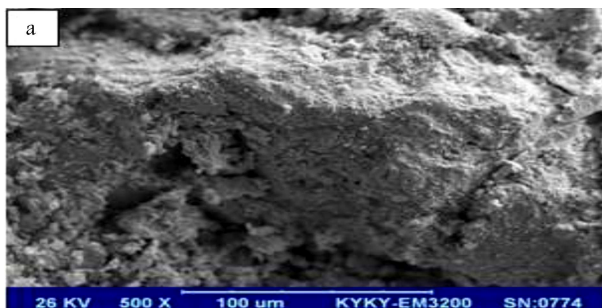
در پژوهش حاضر، الگوهای XRD موارد مختلفی، از جمله: میکروسیلیس (SF)، سربراره‌ی مس (CS)، خاک مورد استفاده (Soil)، خاک تثبیت شده با 24% ژئوپلیمر با محلول فعال‌ساز B در حالت SF (30%) و استفاده از 1% آهک جهت کنترل ترک (GL) (شکل ۱۳)، GL بدون استفاده از آهک (GNL) و خاک تثبیت شده با 24% ژئوپلیمر با محلول فعال‌ساز B در حالت SF (30%) (G) (شکل ۱۷) نشان داده شده است. الگوهای XRD نشان می‌دهند که میکروسیلیس تقریباً هیچ‌گونه فاز کریستالی ندارد و کاملاً آمورف است. سربراره‌ی مس، فازهای کریستالی اصلی، شامل: هیدنبرگیت ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$)، مالیت ($\text{Al}_2(\text{Al}_{2.8}\text{Si}_{1.2})\text{O}_{9.6}$)، فیالیت (Fe_2SiO_4) و مگنتیت (Fe_3O_4) و خاک با فازهای کریستالی کوارتز (SiO_2)، انستاتیت ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$)



شکل ۱۶. مقایسه‌ی مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با سیمان و ژئوپلیمر.



شکل ۱۷. الگوهای XRD میکروسیلیس (SF)، سربراره‌ی مس (CS)، خاک (Soil)، خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و استفاده از آهک جهت کنترل ترک (GL)، خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر (G) و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و ترک خورده (GNL) (M: Magnetite, F: Fayalite, Mu: Mullite, H: Hedenbergite, A: Anorthite, CO: Calcium Oxide, E: Enstatite, Q: Quartz, C: Corundum).



(a) نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و استفاده از آهک جهت کنترل ترک (GL)؛



(b) نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر (G).

شکل ۲۰. عکس‌های SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰۰.

(شکل‌های ۱۸ و ۱۹). که علت آن می‌تواند سطح جانبی و درصد سیلیکای آمورف بیشتر میکروسیلیس نسبت به سرپاره‌ی مس باشد که سبب می‌شود ژل ژئوپلیمری بهتر شکل گیرد. [۳۰] ج) در نمونه‌ی G کریستال‌های سوزنی‌شکل تشکیل شده است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹) در عکس SEM نمونه‌ی GL، ترک‌های بسیار ریزی مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد در صورت استفاده از آهک، باز هم میکروتکرک‌هایی در نمونه وجود دارد (شکل ۱۸).

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از دو محلول سدیم هیدروکسید و میکروسیلیس (محلول A) و محلول سدیم هیدروکسید (محلول B) به‌عنوان جزء فعال‌ساز ژئوپلیمر سرپاره‌ی مس برای بهبود مقاومت فشاری خاک ماسه‌ی بد دانه‌بندی (SP) استفاده شده است. با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ی تثبیت شده با ژئوپلیمر، این نتایج به‌دست آمده است:

- استفاده از سرپاره‌ی مس با اندازه‌ی ذرات ریزتر به علت وجود سطح جانبی بیشتر، منجر به مقاومت فشاری بیشتر در خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر می‌شود.
- با افزودن مقدار میکروسیلیس به ماده‌ی خام ژئوپلیمر (سرپاره‌ی مس) به علت تشکیل بیشتر ژل ژئوپلیمری، مقاومت فشاری به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.
- در محلول A با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و استفاده از محلول A به‌عنوان جزء فعال‌ساز ژئوپلیمر، بیشترین مقاومت فشاری را دارد.
- در صورت استفاده از سرپاره‌ی مس به‌عنوان ماده‌ی خام ژئوپلیمر و محلول فعال‌ساز قلیایی B، با افزایش زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری اضافه می‌شود، ولی در صورتی که از میکروسیلیس به‌عنوان افزودنی در ماده‌ی خام ژئوپلیمر استفاده شود، محلول فعال‌ساز B با میکروسیلیس سریع‌تر واکنش می‌دهد و ژل



(a) نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و استفاده از آهک جهت کنترل ترک (GL)؛



(b) نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر (G).

شکل ۱۸. عکس‌های SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰.



(a) نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و استفاده از آهک جهت کنترل ترک (GL)؛



(b) نمونه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر (G).

شکل ۱۹. عکس‌های SEM با بزرگ‌نمایی ۲۵۰۰.

الف) نمونه‌ی GL، منافذ کمتری نسبت به نمونه‌ی G دارد و در واقع نمونه‌ی GL، ساختار متراکم‌تر و ذرات به هم چسبیده‌تری نسبت به نمونه‌ی G دارد که علت آن می‌تواند وجود افزودنی میکروسیلیس به ماده‌ی خام ژئوپلیمر در نمونه‌ی GL باشد (شکل‌های ۱۸ الی ۲۰). زیرا میکروسیلیس به علت وزن مخصوص پایین و ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سرپاره‌ی مس می‌تواند فضای بین ذرات خاک را پرکند، [۳۰] و نقش پرکنندگی داشته باشد. ب) در نمونه‌ی GL نسبت به نمونه‌ی G، ژل ژئوپلیمری در داخل ذرات خاک گسترده‌تر و یکنواخت‌تر پخش شده است

منابع تمام‌شدنی و انتشار گاز گلخانه‌یی به طور قابل توجهی نسبت به سیمان کاهش یابد. همچنین مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر نسبت به سیمان بیشتر است. به طوری که مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با ۳۰٪ ژئوپلیمر و محلول A به ترتیب ۱٫۵ و ۲٫۹ برابر خاک تثبیت‌شده با ۱٫۴ و ۱۴٫۶ درصد سیمان به دست آمده است. بنابراین استفاده از ژئوپلیمر با مواد خام سرباره‌ی مس و میکروسیلیس به جای سیمان می‌تواند برای تثبیت خاک بسیار مناسب باشد.

ژئوپلیمری سریع‌تر کامل می‌شود، لذا مقاومت فشاری از ۲۸ به ۵۶ روز افزایش نمی‌یابد.

- به منظور کنترل ترک می‌توان از آهک استفاده کرد، زیرا آهک کریستال‌هایی (H و Mu) را که باعث ترک می‌شود، در خود حل می‌کند.
- استفاده از محصولات فرعی صنعت، شامل سرباره‌ی مس و میکروسیلیس در ژئوپلیمر سبب می‌شود که مسائل محیط‌زیستی به ویژه مصرف انرژی، مصرف

منابع (References)

1. Sargent, P., Hughes, P.N., Rouainia, M. and et al. "The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils", *Engineering Geology*, **152**(1), pp. 96-108 (2013).
2. Mohammadi, M. and Toufigh, V. "Experimental investigation of sand consolidation and reinforcement using fiber and epoxy resin", *Transport Infrastructure Engineering*, **1**, pp. 103-118 (2016).
3. Sargent, P., *In book: Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, pp. 555-604 (2015).
4. Singhi, B., Laskar A.I. and Ahmed, M.A. "Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**(2), pp. 393-400 (2016).
5. Higgins, D. "GGBS and sustainability", *Construction Materials*, **160**(3), pp. 99-101 (2007).
6. Meyer, C. "The greening of the concrete industry", *Cement and Concrete Composites*, **31**(8), pp. 601-605 (2009).
7. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Proviz, J.L. and et al. "Geopolymer technology: The current state of the art", *Journal of Materials Science*, **42**(9), pp. 2917-2933 (2006).
8. Komnitsas, K. and Zaharaki, D. "Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry", *Minerals Engineering*, **20**(14), pp. 1261-1277 (2007).
9. Davidovits, J., *Soft Mineralurgy and Geopolymers*, In: Davidovits, J. and Orlinski, J. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer' 88*, Compiegne, France, 1, pp. 19-23 (1988).
10. McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J. and et al. "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement", *Journal of Cleaner Production*, **19**(9-10), pp. 1080-1090 (2011).
11. Gorai, B., Jana, R.K. and Premchand, "Characteristics and utilisation of copper slag/a review", *Resources, Conservation and Recycling*, **39**(4), pp. 299-313 (2003).
12. Khalifa, S.A., Makoto, H., Salem, K.A. and et al. "Copper slag as sand replacement for high performance concrete", *Cement and Concrete Composites*, **31**(7), pp. 483-488 (2009).
13. Khalifa, S.A., Abdullah, H.A. and Ramzi, T. "Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete", *Construction and Building Materials*, **25**(2), pp. 933-938 (2011).
14. Mahendran, K. and Arunachalam, N. "Performance of fly ash and copper slag based geopolymer concrete", *Indian Journal of Science and Technology*, **9**(2), pp. 1-6 (2016).
15. Mobasher, B., Devaguptapu, R. and Arino, A.M. "Effect of copper slag on the hydration of blended cementitious mixtures", *Proc., ASCE Materials Engineering Conference, Materials for the New Millenium*, K. Chong, ed., ASCE, New York, pp. 1677-1686 (1996).
16. Ahmari, S., Parameswaran, K. and Zhang, L. "Alkali activation of copper mine tailings and low-calcium flash-furnace copper smelter slag", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**(6), pp. 6-16 (2014).
17. Siddique, R. and Iqbal Khan, M. "Supplementary cementing materials", *Engineering Materials, Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 67-119 (2011).
18. Mazloom, M., Ramezaniapour, A.A. and Brooks, J.J. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", *Cement & Concrete Composites*, **26**(4), pp. 347-357 (2004).
19. Mohamad, S. and Sayeda, R.Z. "Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume", *Housing and Building National Research Centre (HBNRC)*, **8**(3), pp. 177-184 (2012).
20. Susan, A.B., Erich, D.R., Ruby, M.G. and et al. "Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash", *Waste Biomass Valor*, **3**(1), pp. 99-108 (2012).
21. Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T. and et al. "Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self-compacting rammed earth construction", *Construction and Building Materials*, **36**, pp. 727-735 (2012).
22. Yi, Y., Zheng, X., Liu, S. and Al-Tabbaa, A. "Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil", *Applied Clay Science*, **111**, pp. 21-26 (2015).
23. Zhang, M., Guo, H., El-Korchi T. and et al. "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation

- soil stabilizer”, *Construction and Building Materials*, **47**, pp. 1468-1478 (2013).
24. ASTM D698., *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 04.08 (2012).
 25. ASTM D422., *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 04.08 (2007).
 26. Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V. and Zhang, L. “Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash”, *Construction and Building Materials*, **35**, pp. 718-729 (2012).
 27. Yi Yaolin, L., Cheng, L. and Liu, S. “Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**(4), pp. 1-7 (2014).
 28. ASTM D2166., *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 04.08 (2016).
 29. Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L. and et al. “Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation”, *Construction and Building Materials*, **29**, pp. 167-174 (2012).
 30. Srivastava, V., Kumar, R., Agarwal, V.C. and Mehta, P.K. “Effect of silica fume on workability and compressive strength of OPC concrete”, *Journal of Environmental Nanotechnology*, **3**(3), pp. 32-35 (2014).
 31. Marcussen, L. “The kinetics of water adsorption on porous alumina”, *Chemical Engineering Science*, **25**(9), pp. 1487-1499 (1970).
 32. Xu, X., Zhang, Y., Wu, J. and et al. “Preparation and performance study of cordierite/mullite composite ceramics for solar thermal energy storage”, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, **14**(2), pp. 162-172 (2017).
 33. Uemura, K., Komagawa, Y., Yamasaki, Y. and et al. “Characterization of organic solvents adsorption/desorption on hydrophobic porous coordination polymers and their micro-crystals aggregation on mullite support”, *Desalination*, **234**(1-3), pp 1-8 (2008).
 34. Bazant, Z.P. and Raftshol, J. “Effect of cracking in drying and shrinkage specimens”, *Cement and Concrete Research*, **12**(3), pp. 209-226 (1982).
 35. Bazant, Z.P., Sener, S. and Kim, J.K. “Effect of cracking on drying permeability and diffusivity of concrete”, *ACI Materials Journal*, **85**(5), pp. 351-357 (1987).