

مطالعه امکان‌سنجی تثبیت خاک ماسه‌ای با ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی و پودر شیشه

محمد صباغ‌گل، وحید توفیق*

دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ تیر ۱۳۹۶
بازنگری: ۲۴ دی ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ دی ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۶ دی ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک
ژئوپلیمر
پوزولان طبیعی
پودر شیشه
فعال‌سازی قلیایی

چکیده: در مهندسی ژئوتکنیک، بهسازی خاک‌های مسئله‌دار با افزودنی‌های شیمیایی سابقه طولانی دارد. در سالیان اخیر آثار نامطلوب زیست‌محیطی سیمان پرتلند، به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساخت و متداول‌ترین افزودنی شیمیایی در تثبیت خاک، مورد توجه متخصصان صنعت ساخت جهان قرار گرفته‌است. در این راستا می‌توان، مواد ژئوپلیمری و فعال‌شده قلیایی را بهترین جایگزین سیمان پرتلند مطرح کرد. در این مطالعه از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی^۱ برای تثبیت خاک ماسه‌ای استفاده شده‌است. همچنین تلاش شده‌است تا از خواص شیمیایی پودر شیشه به عنوان یک ماده ضایعاتی برای جایگزینی پوزولان طبیعی استفاده شود. محلول فعال‌کننده دو نوع بوده است. نوع I ترکیب سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات مایع و نوع II شامل غلظت‌های مختلف سدیم هیدروکسید است. علاوه بر آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده که معیار اصلی مقایسه نمونه‌ها بوده است، تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) جهت بررسی ریزساختاری ترکیبات ژئوپلیمری انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پوزولان و فعال‌کننده، مقاومت فشاری محدودنشده افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت فعال‌کننده نوع II، مقاومت فشاری محدودنشده نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان مورد مقایسه قرار گرفته شده‌است. نتایج تحلیل ریزساختاری نشان‌دهنده واکنش شدید افزودنی‌های شیمیایی و تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی در ترکیبات ژئوپلیمری است.

۱- مقدمه

از طرف دیگر استفاده پیوسته از منابع رس و آهک و صرف انرژی زیاد حرارتی در تولید سیمان پرتلند، از عیوب دیگر آن است. مجموع این دلایل موجب کاهش اقبال به استفاده از سیمان پرتلند و تلاش جهت یافتن جایگزینی برای آن شده‌است. در سال‌های اخیر، تکنولوژی ژئوپلیمر^۲ و فعال‌سازی قلیایی توسعه یافته و در آیین‌نامه‌های ساخت چندین کشور وارد شده‌است [۴]. در این تکنولوژی می‌توان از ضایعات صنعتی / پوزولان‌های طبیعی به عنوان ماده پایه استفاده کند. داویدوویچ^۳ با مرور تحقیقات مختلف اظهار داشت که انواعی از سیمان‌های ژئوپلیمری می‌توانند موجب کاهش ۶۲-۹۰ درصدی انتشار کربن‌دی‌اکسید در مقایسه با سیمان پرتلند شوند [۵]. در حوزه ژئوپلیمر و فعال‌سازی قلیایی و بهسازی خاک، تحقیقات بسیار محدود است و اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌است.

از طرفی تنها در سال ۲۰۰۷ حدود ۸۹/۴ Mt شیشه ضایعاتی در جهان تولید شده که ۸۹ درصد آن از نوع سود-آهک^۴ (شامل شیشه‌های ظروف و تخت و...) بوده است [۶]. شیشه ضایعاتی به دلیل شباهت ترکیباتش به ماسه، مورد تحقیق محققان صنعت ساخت قرار گرفته‌است. استفاده از ضایعات

در مهندسی ژئوتکنیک مواجهه با زمین‌های سست و کمبود فضای مناسب برای ساخت و اجرای پروژه‌های مهم، نیاز به بهسازی زمین را افزایش داده است. تثبیت خاک با مواد شیمیایی موجب افزایش مقاومت و بهبود رفتار خاک می‌شود. تاکنون سیمان پرتلند^۲ به‌وفور مورد استفاده قرار گرفته‌است و خواص فیزیکی و شیمیایی آن عمدتاً مشخص شده‌است. سیمان پرتلند (PC) یکی از متداول‌ترین مصالح ساخت در سراسر جهان است که در مهندسی عمران کاربرد گسترده‌ای دارد. در سال ۲۰۰۶ مقدار تولید کل سیمان پرتلند ۲۵۶۰ میلیون تن (Mt) بوده است که پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۵۰ در کمترین مقدار به ۳۶۸۰ Mt و در بیشترین مقدار به ۴۳۸۰ Mt برسد که بخش عمده‌ای از آن را کشورهای درحال توسعه سهم هستند [۱]. تخمین زده می‌شود که به ازای تولید هر تن سیمان پرتلند، حدود ۱ تن کربن‌دی‌اکسید (CO₂) آزاد می‌گردد [۲]. صنعت سیمان به تنهایی ۸-۵٪ کل کربن‌دی‌اکسید تولیدشده در جهان را منتشر می‌کند [۳].

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: v.toufigh@kgut.ac.ir

3 Geopolymer
4 J. Davidovits
5 Soda-lime

1 Natural Pozzolan
2 Portland Cement

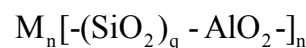
کاتولین تثبیت کردند و آزمایش‌های مقاومت فشاری و ریزساختاری روی نمونه‌ها انجام دادند [۲۳]. نتایج تحقیق حاکی از این بود که با افزایش غلظت ژئوپلیمر مقاومت فشاری محدود نشده، کرنش گسیختگی و مدول یانگ نمونه تثبیت شده افزایش یافته و کرنش انقباضی کاهش یافته است. همچنین کریستلو و همکاران^۱ به تثبیت خاک سست پرداختند که فعال کننده (A.A)^۲ مورد استفاده سدیم هیدروکسید و ماده اولیه خاکستر بادی بوده است. نتیجه جالب این تحقیق مقاومت ۳/۷ برابری ترکیبات فعال شده قلیایی نسبت به سیمانی در بلندمدت است [۲۴]. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری نشان داده است این مواد دارای سختی بالایی هستند و نمونه تثبیت شده در پی کاهش حجم اولیه، افزایش حجم زیادی را داشته است [۲۵]. عموماً پتاسیم هیدروکسید عملکرد بهتری از سدیم هیدروکسید دارد [۲۶]، اما باید به قیمت بیشتر این محلول نسبت به سدیم هیدروکسید توجه داشت. به علت قیمت کمتر سدیم هیدروکسید، اکثر تحقیقات با این ماده انجام شده است.

تاکنون تحقیقات انجام گرفته در تثبیت خاک با افزودنی‌های ژئوپلیمری، عمدتاً بر پایه خاکستر بادی انجام شده است. این مسئله برای برخی کشورها مانند ایران که دارای این ماده نیستند، مطلوب نیست. بنابراین نیاز است تا امکان استفاده از دیگر مواد نیز بررسی شود. پیش از این خواص پوزولانی پوزولان‌های طبیعی به عنوان یک منبع آلومینوسیلیکات آمورف تحقیق شده است [۲۷]. پوزولان‌های طبیعی شامل خاکسترهای آتش‌فشانی، توفها، شیل‌ها و زمین‌های دیاتوماسئوی هستند که در مناطق مختلف دنیا وجود دارند [۲۸]. جعفری و رمضانیان پور، پوزولان طبیعی را به عنوان مکمل در ساخت بتن ژئوپلیمری مورد بررسی قرار دادند [۲۹]. نتایج تحقیقات انجام شده در تولید بتن و سیمان ژئوپلیمری با پوزولان طبیعی ایرانی نتایج مطلوبی را در بر داشته است. همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پنج نوع از پوزولان‌های طبیعی ایران شامل پوزولان‌های سیرجان، رفسنجان، تفتان، شاهین‌دژ و سهند به منظور تولید بتن ژئوپلیمری بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که پوزولان طبیعی تفتان از سایرین واکنش‌پذیری بهتری دارد [۳۰]. همچنین نجفی‌کانی و الله‌وردی نیز با ساخت ملات ژئوپلیمری بر پایه پوزولان تفتان، به بررسی خواص مهندسی آن پرداختند [۳۱].

هدف از انجام این تحقیق بهبود مقاومت خاک ماسه‌ای با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی تفتان است. پوزولان طبیعی تفتان، فعال کننده قلیایی و پودر شیشه مواد مورد استفاده برای تثبیت خاک ماسه‌ای هستند. محلول فعال کننده دو نوع است. نوع I ترکیب سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات مایع و نوع II شامل غلظت‌های مختلف سدیم هیدروکسید است. در ابتدا مقادیر مختلف پوزولان و فعال کننده نوع I با هم ترکیب و مورد آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفته است. سپس غلظت‌های مختلف فعال کننده نوع II و امکان جایگزینی پودر شیشه به عنوان بخشی از پوزولان مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) که روی همه نمونه‌ها انجام شده است، ریزساختار

در صنایع و مصالح ساخت، علاوه بر اینکه به پایداری محیط زیست کمک می‌کند، از هزینه‌های اشغال زمین، حمل‌ونقل، دفع و نگهداری آنها می‌کاهد. استفاده از ضایعات شیشه به عنوان مصالح دانه‌ای و یا مکمل سیمان در ساخت بتن مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج مطلوبی داشته است [۷] و [۸]. شائو و همکاران^۱ با بررسی خواص شیمیایی پودر شیشه (GP)^۲ نتیجه گرفتند پودر شیشه در اندازه کوچک‌تر از ۳۸ میکرون یک ماده پوزولانی است و جایگزین کردن ۳۰٪ سیمان پرتلند با آن، خواص بتن حاوی آن را بهبود می‌بخشد [۹]. همچنین اسوارز^۳ [۱۰] و نثار و سروشیان^۴ [۱۱] به ترتیب ۱۰٪ و ۲۰٪ را مقدار بهینه پودر شیشه در بتن برای جایگزین کردن با سیمان پیشنهاد دادند.

ژئوپلیمر، پلیمری غیر آلی است که طی بسپارش آلومینا (Al₂O₃) و سیلیکا (SiO₂) که با به اشتراک گذاشتن تمام اتم‌های اکسیژن و قرار دادن کاتیون قلیایی / قلیایی خاکی در ساختاری سه‌بعدی همراه است، زنجیره‌های مکرر پلیمری را به وجود آورد [۱۲ و ۱۳]. فرمول کلی پیوندهای ژئوپلیمری به صورت:



است که در آن M کاتیون قلیایی / قلیایی خاکی، n درجه بسپارش و Z نسبت مولی Si/Al است. دوام خوب مواد ژئوپلیمری [۱۴-۱۶] می‌تواند ضعف سیمان پرتلند در دوام را پوشش دهد. نتایج آزمایش‌های محققین در بررسی دوام تثبیت کننده ژئوپلیمری در دوره‌های تر-خشک، ذوب-انجماد [۱۷-۱۹] و زمین‌های خورنده [۲۰ و ۲۱]، نشان دهنده عملکرد قابل رقابت و برتر این مواد نسبت به تثبیت کننده‌های سنتی (سیمان و آهک) است. علاوه بر وجود سیلیکا و آلومینای سرشار، در تاریخچه تولید یا فرآوری ماده خام ژئوپلیمر، تجربه حرارت‌های بسیار بالا، بسیار مهم است. زیرا مواد با قرار گرفتن در دماهای بالا، دچار تغییر ساختار مولکولی می‌شوند. این فرایند ساختار منظم و کریستالی ماده را _ که ماده واکنش‌پذیری اندک دارد _ به حالت آمورف (غیر کریستالی) _ که واکنش‌پذیری به شدت افزایش می‌یابد _ تغییر می‌دهد. حرارت بالا موجب باز چینش یون‌های اکسیژن و آلومینیوم و از بین بردن رطوبت درون ساختاری ماده خام می‌شود [۱۳]. این فرایند برای پوزولان طبیعی (NP)^۵ و خاکستر آتش‌فشانی به صورت طبیعی و برای خاکستر بادی و سرباره‌های صنعتی به شکل مصنوعی اتفاق می‌افتد.

در این راستا، کریستلو و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۱ با بررسی آزمایشگاهی مواد فعال شده قلیایی در تثبیت خاک، چند ترکیب را به صورت اختلاط عمیق اجرا کردند [۲۲]. ژنگ و همکاران^۷ خاک رس را با ژئوپلیمر بر پایه

- 1 Y. Shao et al.
- 2 Glass Powder
- 3 N. Schwarz
- 4 R. Nassar and P. Soroushian
- 5 Natural Pozzolan
- 6 N. Cristelo et al.
- 7 M. Zhang et al.

۲-۲- پوزولان طبیعی

پوزولان طبیعی تفتان از منطقه کوه آتش فشان تفتان در استان سیستان و بلوچستان در ایران تهیه شده است. ترکیبات شیمیایی پوزولان که از طریق طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به دست آمده، در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین دانه‌بندی پوزولان با دستگاه تحلیل اندازه ذرات با لیزر به دست آمده است (شکل ۱). مشاهده می‌شود که بیش از ۹۰٪ ذرات کوچک‌تر از $36 \mu\text{m}$ هستند. بر اساس تحقیقات پیشین، ریز بودن ذرات پوزولان با واکنش‌دهندگی آن رابطه مستقیم دارد و این بر کسب مقاومت نمونه بسیار مؤثر است [۲۷].

۲-۳- پودر شیشه

شیشه مورد استفاده در این مطالعه حاصل از پودر کردن شیشه‌های ساختمانی ضایعاتی است. پودر تهیه شده از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شد و سپس مورد استفاده قرار گرفت. توزیع دانه‌بندی این پودر نیز با دستگاه لیزر به دست آمده است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مطابق این شکل ۹۰٪ ذرات شیشه کوچک‌تر از $80 \mu\text{m}$ هستند. ترکیبات شیمیایی پودر شیشه مورد استفاده با طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس به دست آمده و در جدول ۱ آورده شده است که نکته شاخص آن مقدار زیاد کلسیم (CaO) در آن است.

۲-۴- فعال کننده قلیایی

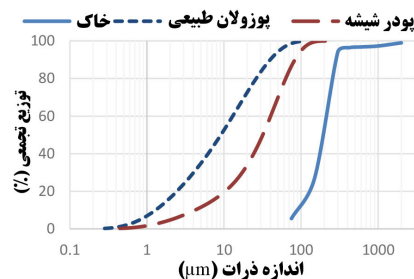
بخش مایع در مواد ژئوپلیمری و فعال شده قلیایی، فعال کننده است. جهت ساخت فعال کننده، سدیم سیلیکات مایع (SS) با خلوص ۹۹-۹۸٪ و مدول (نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) $3/17$ به صورت محلول صنعتی خریداری شده که شامل $58/63$ ٪ آب، $10/07$ ٪ سدیم اکسید (Na_2O)، $31/9$ ٪ سیلیکا (SiO_2) و $0/63$ ٪ ناخالصی شامل اکسید پتاسیم، لیتیم، سرب و منگنز است. همچنین محلول سدیم هیدروکسید (SH) با انحلال پولک‌های سدیم هیدروکسید در آب به دست می‌آید که تا زمان خنک شدن به دمای اتاق نباید از آن استفاده شود. این محلول با خلوص ۹۹٪ و در غلظت‌های ۸ و ۱۰ مولار (M) تهیه شد. با استفاده از این مواد، دو نوع فعال کننده I و II ساخته شد. فعال کننده نوع I از ترکیب SS و SH با نسبت وزنی $\text{SS}/\text{SH} = 1/43$ و نسبت مولی $\text{Si}/\text{Na} = 1/25$ و فعال کننده نوع II، شامل سدیم هیدروکسید در غلظت‌های ۸ و ۱۰ M بوده است.

نمونه‌های ژئوپلیمری منتخب با تحلیل پراش اشعه ایکس^۱ (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) بررسی شده است.

۲- مواد

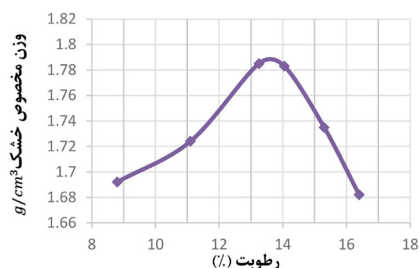
۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده ماسه است که از حاشیه اتوبان هفت باغ علوی در محور کرمان- ماهان برداشته شده و به آزمایشگاه منتقل شده است. نمودار دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM D422-63 [۳۲] مطابق شکل ۱ می‌باشد. بر اساس طبقه‌بندی متحد، خاک مورد نظر در دسته ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) قرار گرفته است و بیش از ۸۰٪ از ذرات خاک در محدوده $0/3-0/1$ mm هستند. نتایج آزمایش تراکم استاندارد خاک بر اساس ASTM D698 [۳۳] در شکل ۲ ارائه شده است که مطابق آن رطوبت بهینه ۱۴٪ است.



شکل ۱. منحنی توزیع دانه‌بندی خاک، پوزولان طبیعی و پودر شیشه

Fig. 1. Particle size distribution of soil, natural pozzolan, and glass powder



شکل ۲. منحنی تراکم استاندارد خاک

Fig. 2. Standard compaction curve of soil

3 X-Ray Fluorescence Spectroscopy

1 X-ray diffraction

2 Scanning Electron Microscopy

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی پوزولان طبیعی و پودر شیشه (درصد وزنی)

%Table. 1. Chemical Composition of natural pozzolan and glass powder (wt)

SO ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب
گوگرد تری اکسید	پتاسیم اکسید	آهن (III) اکسید	منیزیم اکسید	سدیم اکسید	کلسیم اکسید	آلومینا	سیلیکا	نام ترکیب
۰/۲۳	۲/۷	۵/۶	۲	۴/۷	۱۰	۱۴/۹	۵۶/۴	پوزولان طبیعی
۰/۳	۰/۳۹	۰/۴۴	۴/۴	۱۵/۸	۱۱/۵	۰/۶۴	۶۶/۵	پودر شیشه

LOI، کاهش وزن نمونه (%). طی یک ساعت قرارگیری درون کوره در دمای ۱۰۳۰ برای پوزولان ۲/۶۸ و برای پودر شیشه صفر می‌باشد.

۳- روش آزمایش

با توجه به نتایج آزمایش تراکم استاندارد، رطوبت بهینه ۱۴٪ است که با افزودن پوزولان و پودر شیشه به خاک تغییری نمی‌کند. این مسئله توسط محققین دیگر نیز مشاهده و گزارش شده است [۲۳ و ۳۴] و می‌تواند به واسطه یکسان بودن نرخ جذب آب دانه‌های پوزولان و پودر شیشه با خاک باشد. همه نمونه‌ها با انرژی تراکم یکسان و در رطوبت بهینه در قالب استوانه‌ای به قطر ۵ cm و ارتفاع ۱۰ cm متراکم شده‌اند. "آب اضافی" مقدار آب لازم (با کسر آب فعال کننده)، برای رسیدن نمونه به رطوبت بهینه است. جهت ساخت نمونه، "آب اضافی" و فعال کننده به صورت یک محلول یکنواخت به جامدات اضافه شده و پس از قالب‌گیری بلافاصله از قالب خارج و در دمای محیط نگهداری شدند.

با توجه به مبنای هیدراتاسیونی واکنش سیمان پرتلند، تنها نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند به مدت ۳ روز در پلاستیک آب‌بند شده تا از رطوبت آنها دیرتر کاسته شود و مدت بیشتری به رطوبت دسترسی داشته باشند، و سپس از پلاستیک خارج شدند. پس از طی شدن زمان عمل‌آوری روی هر نمونه آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده مطابق استاندارد ASTM D2166 [۳۵] با نرخ بارگذاری ۱/۲ mm/min انجام شد. برای ارزیابی بهتر و امکان بازسازی، هر نمونه با سه بار تکرار ساخته شده و میانگین آنها گزارش شده است.

ترکیبات موردنظر در سه دسته و با اهداف متفاوتی ساخته شده‌اند (جدول ۳). در دسته ۱ (نشان داده شده با حرف A) پوزولان طبیعی (NP) و فعال کننده (A.A) نوع I، در سه نسبت پوزولان به خاک (Xک/خاک) NP/۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴۵ (به ترتیب با ارقام ۲، ۳ و ۴ بعد از A) و سه نسبت فعال کننده به پوزولان (A.A/NP) ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴۵ (به ترتیب با رقم دوم ۱، ۲ و ۳) استفاده شده است. بررسی اثرات تغییر نوع و غلظت فعال کننده و جایگزینی پوزولان با پودر شیشه (GP) در دسته ۲ انجام شده است. B8، B6 و B10 به ترتیب با غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ M فعال کننده نوع II و ترکیبات GP10، GP20 و GP30 با جایگزینی به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ پوزولان با پودر

1 hydration reaction of Portland cement

شیشه طرح شده‌اند. این ترکیبات از نظر مقدار فعال کننده و پوزولان مشابه A ۳۲ هستند. ترکیبات دسته ۳ (کنترل) شامل نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند (نوع II) و پوزولان بدون فعال کننده (NAP) است که برای بررسی و مقایسه عملکرد ترکیبات ژئوپلیمری آزمایش شده‌اند.

۴- نتایج و بررسی

۴-۱- خواص مکانیکی

۴-۱-۱- مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها در نسبت‌های مختلف پوزولان و فعال کننده

مقاومت فشاری محدود نشده خاک بکر در سه دوره عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۰/۳۸۵، ۰/۴۹۵ و ۰/۵۶۰ MPa است که همراه با دیگر نمونه‌ها در شکل ۳- الف آمده است. بر این اساس، مقاومت خاک از ۷ تا ۹۰ روز ۱/۵ برابر شده است. افزایش مقاومت خاک را می‌توان به چسبندگی بیشتر بخش ریزدانه آن نسبت داد. شکل ۳، نتایج مقاومت فشاری محدود نشده ترکیبات دسته ۱ را در ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی نشان می‌دهد. شکل ۳-a-۳ مقادیر مقاومت فشاری ترکیباتی که دارای کمترین میزان پوزولان (یعنی ۰/۲ = خاک/NP) هستند را در سه مقدار متفاوت فعال کننده (۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴۵) نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش دوره عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فعال کننده مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است که این افزایش به دلیل انجام واکنش بیشتر به واسطه فعال کننده بیشتر می‌باشد. به عبارتی فعال کننده بیشتر، انحلال آلومینا و سیلیکا بیشتر و تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی بیشتر و در نتیجه مقاومت بیشتر می‌شود. رفتار نسبتاً مشابه در سری ترکیبات A3 (شکل ۳-ب) و A4 (شکل ۳-ج) دیده می‌شود و همانند سری A2 با افزایش مقدار فعال کننده و افزایش دوره عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته است.

افزایش مقاومت A21 در سنین مختلف کمتر از خاک بکر است. در واقع افزودن این مقدار پوزولان و فعال کننده نه تنها موجب بهبود مقاومت خاک نمی‌شود، بلکه به مانند یک ماده اضافی موجب تضعیف آن شده است. علت

هم‌چنین با مقایسه بیشترین مقاومت‌ها در شکل ۴، نقش مقدار پوزولان را می‌توان مشاهده کرد. کم بودن پوزولان در A23 مانع ادامه واکنش‌ها و تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی می‌شود. افزایش مقدار پوزولان در A33 و A43، موجب افزایش یون‌های سیلیکا و آلومینا و در نتیجه تشکیل زنجیره‌های طولانی‌تر پلیمری و توسعه مقاومت فشاری در ترکیبات شده‌است.

این رخداد، کم بودن فعال‌کننده و به تبع آن زیاد شدن آب اضافی، و در نتیجه کاهش pH جزء مایع است. زیرا pH یک عامل مهم در شکسته شدن پیوند بین عناصر در مواد اولیه است [۱۲]. از طرف دیگر، از آنجاکه واکنش بین پوزولان و فعال‌کننده محتمل است، مطلب دیگری نیز می‌توان مطرح کرد. به نحوی که افزودن این مقدار افزودنی قادر نیست دانه‌های بزرگ خاک را به هم بچسباند و تنها با چسباندن دانه‌های ریز رسی و سیلتی، دانه‌بندی کلی خاک را درشت‌تر کرده و دانه‌بندی ماسه درشت‌تر و در نتیجه بدتر از قبل می‌شود. در واقع تغییر دانه‌بندی خاک یک عامل مؤثر در تثبیت خاک است [۳۶] که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

جدول ۲. طرح کلی مخلوط‌ها

Table. 2. Mixture design

دسته	نام طرح	خاک/ NP ^۱	افزودنی* / A.A ^۲	G.P ^۳ /NP	خاک / P.C ^۴	نوع A.A
۱	A21	۰/۲	۰/۲	-	-	نوع I
	A22	۰/۲	۰/۳	-	-	نوع I
	A23	۰/۲	۰/۴۵	-	-	نوع I
	A31	۰/۳	۰/۲	-	-	نوع I
	A32	۰/۳	۰/۳	-	-	نوع I
	A33	۰/۳	۰/۴۵	-	-	نوع I
	A41	۰/۴۵	۰/۲	-	-	نوع I
	A42	۰/۴۵	۰/۳	-	-	نوع I
	A43	۰/۴۵	۰/۴۵	-	-	نوع I
	۲	B6	۰/۳	۰/۳	-	-
B8		۰/۳	۰/۳	-	-	نوع Π - M8
B10		۰/۳	۰/۳	-	-	نوع Π - M10
GP10		۰/۲۷	۰/۳	۰/۰۳	-	نوع Π - M10
GP20		۰/۲۴	۰/۳	۰/۰۶	-	نوع Π - M10
GP30		۰/۲۱	۰/۳	۰/۰۹	-	نوع Π - M10
PC7		-	-	-	۰/۰۷	-
۳	PC15	-	-	-	۰/۱۵	-
	PC30	-	-	-	۰/۳	-
	NAP1	۰/۳	-	-	-	-
	NAP2	۰/۴۵	-	-	-	-

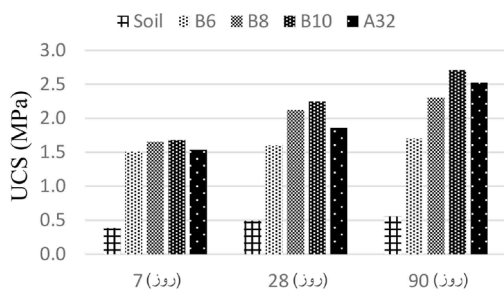
۱- پوزولان طبیعی، ۲- فعال‌کننده، ۳- پودر شیشه، ۴- سیمان پرتلند، * افزودنی با توجه به نوع نمونه پوزولان طبیعی یا پوزولان طبیعی + پودر شیشه است.

۴-۱-۲- تأثیر نوع و غلظت فعال کننده بر مقاومت فشاری محدود نشده

به منظور بررسی اثر نوع فعال کننده در تثبیت خاک، ترکیب A32 انتخاب شده است. سه دلیل برای این انتخاب وجود دارد.

۱. ترکیبات حاوی نسبت فعال کننده (نوع I) به پوزولان ۰/۴۵ کارایی مطلوبی ندارند و در عمل اجرای آنها دشوار است.
۲. همواره استفاده از مقدار کمتر مواد موجب اقتصادی تر شدن طرح می شود.
۳. مقاومت مکانیکی به دست آمده توسط این نمونه در ۹۰ روز ۴/۵ برابر مقاومت خاک بکر است.

مقاومت این نمونه با فعال کننده نوع I، ۲/۵۲۵ MPa به دست آمد. این بار این نمونه با فعال کننده نوع II (سدیم هیدروکسید) و در سه غلظت ۶ و ۸ و ۱۰ M ساخته شده است. شکل ۵ نتایج مقاومت فشاری ترکیبات A32، B6، B8 و B10 را نشان می دهد. با افزایش غلظت محلول فعال کننده از ۶ به ۸ M و ۸ به ۱۰ M، مقاومت فشاری در هر سه دوره عمل آوری افزایش یافته است. در ۷ و ۲۸ روز مقدار مقاومت فشاری ترکیب A32 به ترتیب ۷ و ۱۴٪ کمتر از B8 است، اما در ۹۰ روز ۱۰٪ بیشتر می شود. همچنین، در مقایسه A32 و B10 مشخص می شود که استفاده از فعال کننده نوع II با غلظت ۱۰ M موجب افزایش ۷ درصدی مقاومت شده است. به این ترتیب، محلول نوع II با غلظت ۱۰ M نتیجه بهتری از بین فعال کننده های موجود نشان داد. لذا در ساخت نمونه های GP (حاوی پودر شیشه) از فعال کننده نوع II و با غلظت ۱۰ M استفاده شده است.

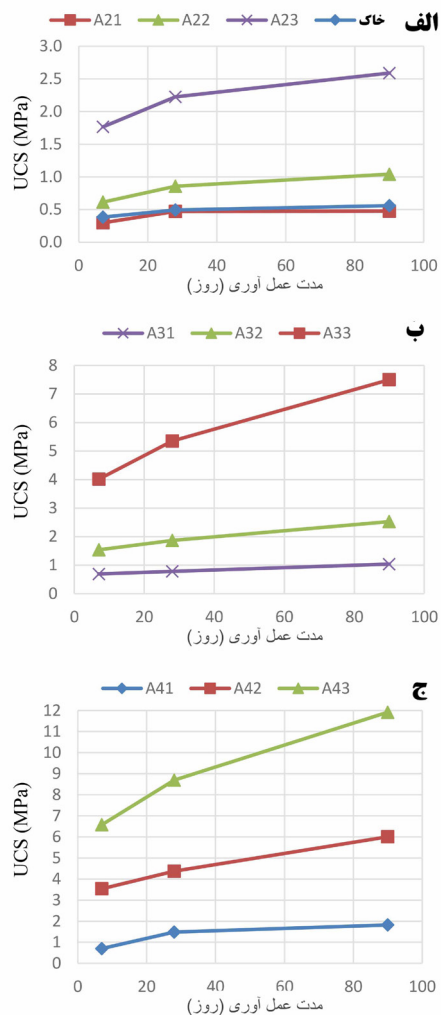


شکل ۵. اثر نوع و غلظت فعال کننده بر مقاومت فشاری محدود نشده

Fig. 5. Effect of type and concentration of activator on compressive strength

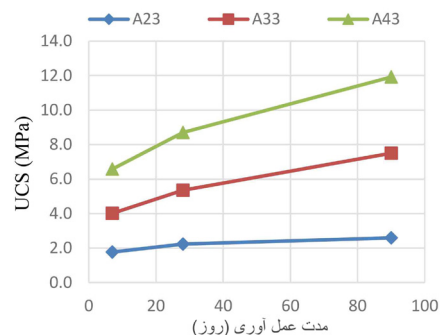
۴-۱-۳- جایگزین کردن پوزولان با پودر شیشه

شکل ۶، تأثیر پودر شیشه بر مقاومت فشاری نمونه B10 را نشان می دهد. مطابق مقادیر به دست آمده، مشاهده می شود که جایگزینی ۱۰٪ پوزولان با پودر شیشه تقریباً تأثیری بر مقاومت فشاری نمونه نداشته است.



شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده با زمان عمل آوری برای ترکیبات الف (A2، ب (A3 و ج (A4

Fig. 3. UCS variations for a) A2, b) A3 and c) A4

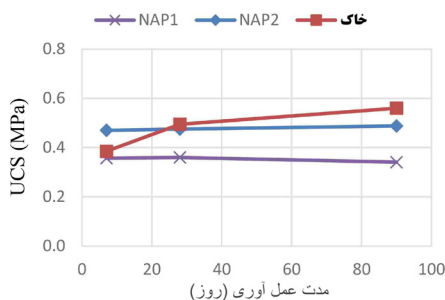


شکل ۴. مقاومت فشاری محدود نشده در مقادیر مختلف پوزولان و با نسبت ثابت A.A/NP = ۰/۴۵

Fig. 4. UCS in A.A/NP= 0.45 and different NP content

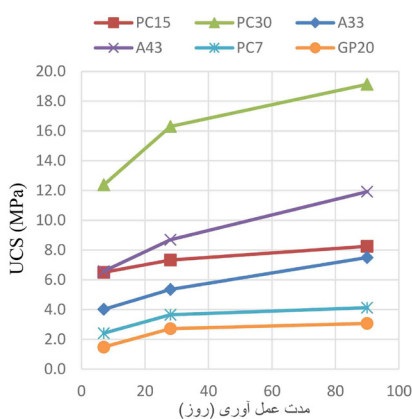
افزایش مقاومت NAP2 در ۷ روزگی، می‌تواند تنها به خاصیت پرکنندگی پوزولان در ماسه بد دانه‌بندی نسبت داده شود.

مقاومت فشاری محدودنشده ترکیبات حاوی سیمان پرتلند با ترکیبات ژئوپلیمری منتخب در شکل ۸ کنار هم قرار داده شده‌است. با توجه به نتایج با استفاده از مقدار کمتر ماده خام اولیه، ترکیبات سیمانی عملکرد بهتری از ترکیبات ژئوپلیمری داشته‌اند. اما باید توجه داشت که سیمان مراحل فرآوری کاملی که پس از تحقیقات گوناگون به بهینه‌ترین حالت خود رسیده است را طی کرده است. اما همان‌طور که در مقدمه گفته شد، هدف استفاده از این ترکیبات، تولید کمتر گاز کربن‌دی‌اکسید و مصرف کمتر آهک و رس به عنوان منبعی که موارد مصرف مهم‌تری دارد، است. در تولید هر تن سیمان پرتلند، ۵۰۰۰ MJ انرژی (که عمدتاً صرف ساخت کلینکر می‌شود) و ۱/۵ ton از منابع تمام‌شدنی شامل سنگ‌آهک و رس مصرف می‌شود [۳۹]. استفاده از سنگ‌های طبیعی، به علاوه امکان به کار بردن مواد ضایعاتی همچون پودر شیشه، مزایایی است که این ماده جدید می‌تواند آن را محقق کند.



شکل ۷. مقاومت فشاری محدودنشده ترکیبات فعال نشده

Fig. 7. UCS of non-activated samples

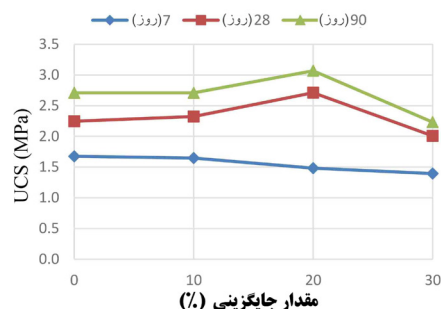


شکل ۸. مقایسه مقاومت فشاری ترکیبات ژئوپلیمری با ترکیبات حاوی سیمان پرتلند

Fig. 8. Comparison of compressive strength of geopolymeric samples with Portland cement samples

هم‌چنین جایگزینی ۲۰٪ آن مقاومت ۷ روزه نمونه را کاهش داده است، اما مقاومت بلندمدت نمونه (۲۸ و ۹۰ روز) افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری محدودنشده ۲۸ روزه ۲۰٪ و ۹۰ روزه ۱۳٪ افزایش داشته‌است. اما از طرفی، استفاده از ۳۰٪ پودر شیشه بجای پوزولان در نمونه B10 باعث کاهش مقاومت نمونه در هر سه دوره عمل‌آوری شده‌است.

استفاده از پودر شیشه به همراه سدیم هیدروکسید می‌تواند موجب تشکیل سدیم سیلیکات شود [۳۷ و ۳۸]. دستگاه اندازه‌گیری تغییر شکل نمونه‌ها در ۷ روز، تغییر شکل حدوداً دو برابری را برای نمونه‌های GP10، GP20 و GP30 نشان داد، اما در ۲۸ و ۹۰ روز این چنین نبود. بنابراین، افزایش تغییر شکل در نمونه ۷ روزه موجب کاهش مقاومت آن شده‌است. اما بعد از ۷ روز، شیشه‌ی حل‌شده سخت شده و با گیرش کامل، شرایط کسب مقاومت متفاوت می‌شود. روند مقاومت‌های ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد، انحلال پودر شیشه و گیرش آن در بلندمدت تا ۲۰٪ جایگزینی، اثر مثبتی داشته است اما در ۳۰٪ (GP30) موجب کاهش ۲۱ درصدی مقاومت شده‌است. تحقیقات در حوزه سیمان و بتن نیز عمدتاً درصد بهینه جایگزینی سیمان با پودر شیشه را ۲۰-۱۰٪ گزارش کرده‌اند [۷].



شکل ۶. تأثیر جایگزینی پوزولان با پودر شیشه بر مقاومت فشاری محدودنشده

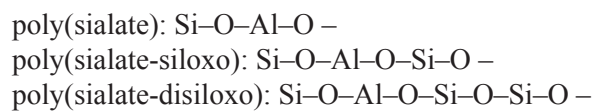
Fig. 6. Effects of the replacement of natural pozzolan with glass powder on UCS

۴-۱-۴- مقایسه مقاومت فشاری با نمونه فعال نشده و سیمان پرتلند:

ترکیبات NAP1 و NAP2 جهت تعیین تفاوت نقش فعال‌کننده و آب در واکنش‌پذیری پوزولان طبیعی آزمایش شده‌است. بر اساس شکل ۷، ترکیب پوزولان و آب در نمونه NAP1 نه‌تنها موجب بهبود مقاومت خاک نشده، بلکه از مقاومت خاک اولیه نیز کمتر شده‌است. اما مقدار بیشتر پوزولان (NAP2)، مقاومت ۷ روزه خاک را ۱/۳ برابر کرده است. مقایسه مقاومت‌های به‌دست آمده در اینجا با ترکیبات ژئوپلیمری، به‌وضوح نشان‌دهنده نقش فعال‌کننده در واکنش است. پوزولان در صورت عدم حضور فعال‌کننده، تنها با واکنش پوزولانی قادر به کسب مقاومت است. از آنجاکه رخ دادن واکنش پوزولانی نیازمند آهک است [۲۸]، لذا واکنش پوزولانی نیز رخ نمی‌دهد. بنابراین

۴-۲- تحلیل شیمیایی

ماهیت واکنش‌های سیمان پرتلند شناخته شده است. اما لزوم شناخت دقیق تر واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون و محصولات واکنش جهت درک تفاوت در خواص مواد ژئوپلیمری مهم است. با مروری جامع از منابع موجود، می‌توان مکانیزم کلی فعال‌سازی قلیایی و واکنش‌های ژئوپلیمری را به اجمال بیان کرد. افزایش PH سطح دانه‌های ماده خام را برای واکنش آماده می‌کند. همچنین وجود در محیط قلیایی، تمایل دارد تا پیوندهای کوالانت Si-O-Al-O-Si و Al-O-Si و Si و همچنین زمان کاتیون‌های قلیایی Na^+ ، K^+ و Ca^{+2} بار منفی اضافی مربوط به اصلاح موقعیت آلومینیوم را خنثی می‌کنند. این یون‌ها، با باز چینش پیوندهای Si-O و کاهش ظرفیت تکمیل یونی مواد خام و انباشتن محصولات تولیدی روی هم، انباشته‌ای از یون‌های به شدت فعال را ایجاد می‌کنند. در این مرحله حرارت‌زایی زیادی رخ می‌دهد. در ادامه این مرحله، بسپارش^۱ ژل‌های حل شده همراه با ته‌نشینی یون‌های Si و Al پیرامون نقاط هسته‌ای^۲ به همراه اشتراک همه یون‌های اکسیژن و شکل‌گیری پیوندهای پایدار آلومینوسیلیکاتی رخ می‌دهد. تشکیل ژل به‌واسطه آبکافت^۳ و بسپارش سیلیکا و آلومینا است. این ژل‌ها از جزءهای اصلی پلیمری گرد با قطرهای ۰/۸-۲ μm ساخته شده است. داویدوویچ تعدادی از این پیوندها را نام‌گذاری کرد [۴۰ و ۴۱]:



همچنین اگر در ترکیب به مقدار قابل توجهی کلسیم وجود داشته باشد، ترکیب کلسیم و جزءهای حل شده Si و Al که از سطح ماده اولیه منتشر شده است، فاز ژلی C-S-H غالب را شکل می‌دهند. مواد خام مورد استفاده دارای مقدار زیادی کلسیم نیستند، لذا تشکیل ژل CSH غالب محتمل نیست. اما به دلیل وجود ۱۰٪ کلسیم در پوزولان، تشکیل آن شدنی است و اساساً به خاطر سریع انجام شدن این واکنش، بخشی از مقاومت اولیه نمونه‌ها به این محصول مربوط است. اما بخش عمده محصولات تولیدی واکنش‌ها، ژل‌های آلومینوسیلیکاتی گفته شده هستند [۲۴ و ۴۲]. از آنجا که سیمان پرتلند که کلسیم فراوان دارد به دوام کم در زمین‌های خورنده مشهور است، استفاده از تثبیت‌کننده‌های ژئوپلیمری که کلسیم کمی دارد، این نوید را می‌دهد که بتوان به تثبیت‌کننده‌های بادوام بالا دست یافت.

پیش از این (با استفاده از شبکه عصبی) عوامل مؤثر در پیش‌بینی مقاومت فشاری محدود نشده خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر بررسی شده است [۴۳] و نتایج نشان داده است که نسبت‌های Si/Al و Na/Al بعد از مقدار مواد اولیه، مهم‌ترین پارامترها برای پیش‌بینی مقاومت فشاری محدود نشده خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر بوده است. با توجه به مشخصات مواد و با یک

- 1 Polycondensation
- 2 Nuclei point
- 3 Hydrolysis

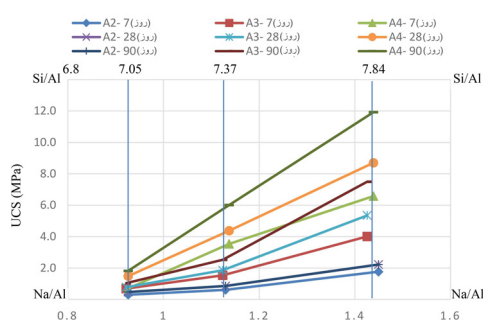
تحلیل شیمیایی، نسبت‌های مولی Na/Al و Si/Al محاسبه شده است، که این مقادیر برای دسته ۱ در جدول ۳ ارائه شده است. سدیم اکسید و سیلیکا به شکل مونومر در SS وجود دارند. بخش دیگر سیلیکا و سدیم اکسید از طریق انحلال پوزولان در فعال‌کننده به وجود می‌آید. اما آلومینیوم تنها از طریق پوزولان تأمین می‌شود.

در شکل ۹، تغییرات مقاومت فشاری در برابر Na/Al و Si/Al ترکیبات دسته ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹، مشاهده می‌شود که با افزایش Si/Al و Na/Al، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. کریستلو و همکاران و سینقی و همکاران^۴ نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند [۴۴ و ۴۵]. در یک مقدار ثابت پوزولان، افزایش فعال‌کننده در ترکیب، موجب افزایش هر دو نسبت می‌شود. در واقع دسترسی به سدیم اکسید و سیلیسیم اکسید آماده واکنش (به صورت مونومر)، به تولید ژل آلومینوسیلیکاتی بیشتر کمک می‌کند.

جدول ۳. نسبت شیمیایی عناصر

Table. 3. Chemical ratios

ترکیب	Na/Al	Si/Al
A21	۰/۹۳	۷/۰۵
A31	۰/۹۲	۷/۰۵
A41	۰/۹۳	۷/۰۵
A22	۱/۱۳	۷/۳۷
A32	۱/۱۲	۷/۳۶
A42	۱/۱۴	۷/۳۸
A23	۱/۴۵	۷/۸۶
A33	۱/۴۳	۷/۸۲
A43	۱/۴۴	۷/۸۴



شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده با تغییر نسبت Na/Al (محور پایین) و Si/Al (محور بالا)

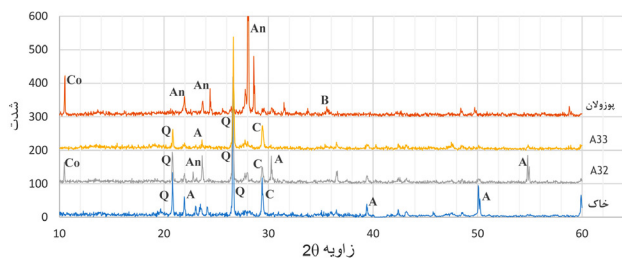
Fig. 9. UCS variations with change in ratios Na/Al (top axis) and Si/Al (down axis)

نداشتند. با توجه به اینکه تحلیل XRD در ۹۰ روزگی انجام شده است، بنابراین امکان تشکیل ماده‌ی کریستالی جدید وجود دارد. همچنین ممکن است این کانی مربوط به خاک بوده باشد، که در طی تحلیل شناخته نشده باشد. همچنین فلچر و همکاران^۲ با بررسی نسبت‌های مختلف Si/Al ترکیبات ژئوپلیمری مشاهده کردند که ترکیبات با سیلیکای بیشتر، مقادیر کمتری فاز کریستالی نشان دادند [۴۶]. همان‌طور که پیش‌ازین نشان داده شد، نسبت Si/Al نمونه A32 کمتر از A33 است (جدول ۳). لذا عدم تشکیل قله مشابه در A33 می‌تواند به خاطر سیلیکای بیشتر آن، و برعکس تشکیل یک قله جدید در A32 به خاطر سیلیکای کمتر آن باشد.

جدول ۴. فرمول شیمیایی ترکیبات شناسایی شده (فرمول تجربی)

Table 4. Empirical chemical formulas

Quartz	O ₂ Si
Calcite	CCaO ₃
Cordierite	Al _{4.17} K _{0.17} Mg ₂ O ₁₈ Si _{4.83}
Anorthite	Al ₂ CaO ₈ Si ₂
Biotite	Al ₂ H ₄ K ₂ Mg ₆ O ₂₄ Si ₆
Albite	AlNaO ₈ Si ₃



شکل ۱۰. الگوهای تحلیل شده XRD خاک، پوزولان، A32 و A33
 Fig. 10. Analyzed XRD patterns of Soil, NP, A32 and A33

۳-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) عکس‌برداری الکترونی روبشی از نمونه‌های A32 و A33 انجام شده است. این دو نمونه به ترتیب دارای مقاومت فشاری محدود نشده ۲/۵۲۵ و ۷/۵۰۰ MPa هستند. شکل ۱۱ تصاویر عکس‌برداری الکترونی از این دو نمونه را در بزرگنمایی‌های ۲۰۰ X، ۵۰۰ X نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود

2 R. A. Fletcher et al.

۴-۳- تحلیل ریزساختاری

۴-۳-۱- پراش اشعه ایکس (XRD)

تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) جهت شناسایی ترکیبات مواد به کار می‌رود. این تحلیل برخلاف طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) که فقط کمیت عناصر را بدون توجه به ساختار آنها ارائه می‌کند، نحوه قرارگیری عناصر کنار یکدیگر را نشان می‌دهد. شکل ۱۰، الگوهای پراش خاک، پوزولان طبیعی تفتان، نمونه‌های A32 و A33 که به ترتیب حاوی (NP / خاک = ۰/۳ و A.A/NP = ۰/۳) و (خاک / NP = ۰/۳ و A.A/NP = ۰/۴۵) هستند بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری را نشان می‌دهد. الگوهای به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار X'Pert HighScore و با اعمال پایگاه اطلاعاتی PDF2 به آن تحلیل شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، خاک مورد استفاده دارای کوارتز (Q)، کلسیت (C) و آلبایت (A) است. پوزولان تفتان دارای آنورتایت (An)، کوردرایت (Co) و بیوتایت (B) می‌باشد. همچنین در نمونه A32 کوارتز (Q)، کلسیت (C)، آلبایت (A) و کوردرایت (Co) مشاهده شدند و در A33 نیز کوارتز (Q)، کلسیت (C)، آلبایت (A) شناسایی شدند. فرمول تجربی این ترکیبات در جدول ۴ آورده شده است.

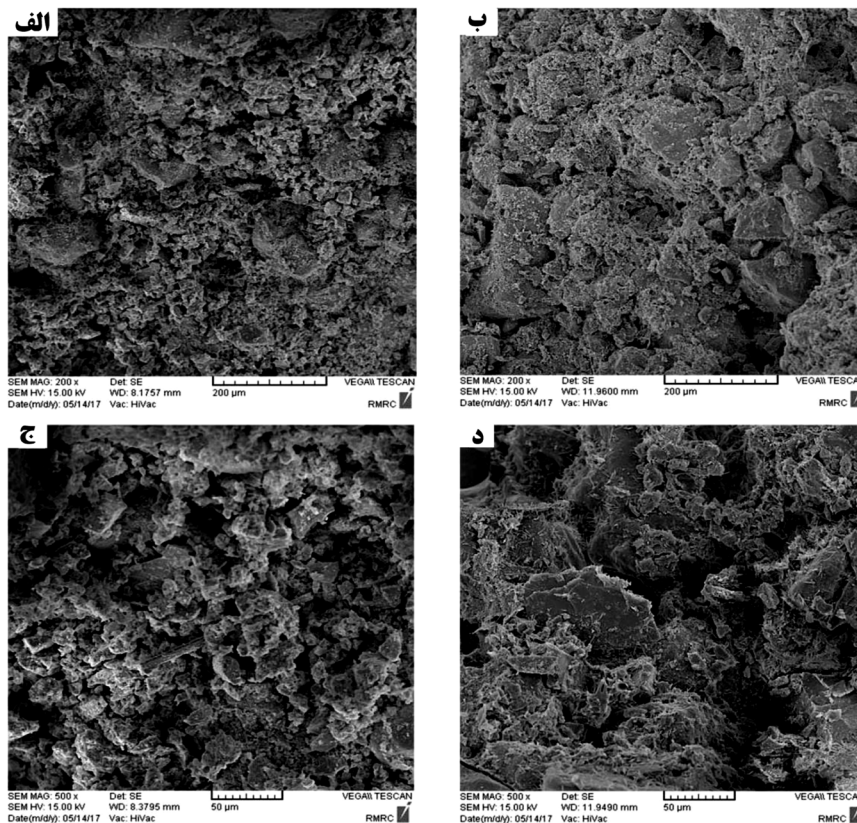
در تحلیل پراش اشعه ایکس، مکان، شدت قله‌ها و تغییرات آنها در طی واکنش مبنای تحلیل نتایج قرار می‌گیرد. به‌نحوی که حذف یک قله یا کاهش شدید آن، بیانگر واکنش دادن و از بین رفتن کانی مربوطه است. از آنجاکه شدت‌ها به صورت نسبی باهم مقایسه می‌شوند، برای مقایسه بهتر، الگوها زیر هم قرار داده شده‌اند. همچنین جایابی مکان هر قله نشان‌دهنده تغییر کانی است. که مشخص شدن این تغییرات تنها با نرم‌افزار ممکن است. مطابق الگوهای به‌دست‌آمده، قله‌های خاک در نمونه‌های تثبیت‌شده مشاهده می‌شود. اما از شدت برخی، در نمونه‌های تثبیت‌شده کاسته شده است، که در ۲۰ برابر ۵۰ و ۶۰ درجه این اتفاق به وضوح دیده می‌شود. این مسئله بیانگر مصرف شدن مقداری از خاک طی فرآیند فعال‌سازی قلیایی است. از آنجا که رس (موجود در ریزدانه خاک) می‌تواند خاصیت پوزولانی داشته باشد، به نظر می‌رسد بخشی از ریزدانه خاک با فعال‌کننده واکنش داده است. در رابطه با عملکرد پوزولان نیز می‌توان گفت که این ماده به مقدار زیادی واکنش داده است. آنورتایت دارای منشأ ماگمایی و دگرگونی است و از بین رفتن قله‌های شدید آن در ۳۰-۲۶ درجه، نشان‌دهنده مشارکت آن در واکنش‌ها است. بیوتایت نیز در A32 و A33 به راحتی مصرف شده است. همچنین کوردرایت در A32 از بین نرفته است، اما در نمونه A33 با فعال‌کننده بیشتر کاملاً واکنش داده است. بنابراین فعال‌کننده بیشتر در A33، علاوه بر انحلال مقدار بیشتری از پوزولان، کوردرایت را نیز وادار به انجام واکنش می‌کند.

بر اساس الگوهای A32 و A33، همه محصولات واکنش‌ها (به‌جز یک استثنا در A32)، آمورف هستند. در نمونه A32 و در ۲۰ برابر ۳۰/۳ و ۵۵ درجه دو قله جدید دیده می‌شوند که نه در پوزولان و نه در خاک وجود

1 Peak

مقاومت مصالح هرچه تعداد حفرات در سطح بیشتر شود تمرکز تنش روی قسمت همگن و پیوسته بیشتر شده و مقاومت کمتر می‌شود. مقدار بیشتر فعال‌کننده موجب تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی بیشتر و در نتیجه چسبیدن تعداد بیشتری دانه‌های خاک به هم شده‌است (توده‌های به هم چسبیده بزرگ‌تر که در شکل ۱۱-د واضح است).

که ظاهر ماده تولیدشده دارای ساختار آمورف است. تصاویر مربوط به نمونه A33 (۱۱-ب و ۱۱-د)، ساختاری متراکم‌تر و دارای حفرات کمتر از تصاویر مربوط به نمونه A32 (۱۱-الف و ۱۱-ج) را نشان می‌دهند. در واقع این خود بیانگر علت اختلاف مقاومت فشاری این دو نمونه است. زیرا بر اساس اصول



شکل ۱۱. تصاویر عکس‌برداری الکترونی: الف) نمونه A32 در بزرگنمایی، ب) نمونه A33 در بزرگنمایی، ج) 200X نمونه A32 در بزرگنمایی 500X و د) نمونه A33 در بزرگنمایی 500X

Fig. 11. SEM images of a) A32 in 200x, b) A33 in 200x, c) A32 in 500x and d) A33 in 500x

نوع II: سدیم هیدروکسید در غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ مولار مورد استفاده قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:
 - ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی می‌تواند به عنوان یک تثبیت‌کننده مؤثر برای ماسه استفاده شود. نسبت‌های مختلف پوزولان طبیعی و فعال‌کننده نوع I استفاده شد و مشاهده شد که با افزایش مقدار پوزولان طبیعی و فعال‌کننده، مقاومت فشاری محدود نشده خاک تثبیت‌شده، افزایش می‌یابد.
 - با استفاده از مقادیر مختلف پوزولان و فعال‌کننده، می‌توان مقاومت‌های متفاوت ۱۲-۱ MPa را به دست آورد. مثلاً ترکیب A43، مقاومت فشاری

۵- نتیجه‌گیری

امروزه مواد ژئوپلیمری به عنوان مهم‌ترین ماده جایگزین سیمان در جهان مورد قبول قرار گرفته‌است و تحقیقات بر روی این مواد در صنایع ساخت رو به افزایش است. لیکن استفاده از این مواد در بهسازی خاک، اخیراً مورد توجه قرار گرفته‌است. در این تحقیق از پوزولان طبیعی تفتان به عنوان ماده اولیه تولید ژئوپلیمر استفاده شده‌است. به علاوه امکان استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین پوزولان طبیعی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. دو نوع فعال‌کننده نوع I: ترکیب سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات مایع و

- [3] K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick, Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 38(2) (2008) 128-136.
- [4] J.L. Provis, Alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*. 114 (2018) 40-48.
- [5] J. Davidovits, False Values on CO₂ Emission For Geopolymer Cement/Concrete published In Scientific Papers, Technical Paper #24, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org, (2015).
- [6]
- [7] A. Schmitz, J. Kaminski, B. Scalet, A. Soria, Energy consumption and CO₂ emissions of the European glass industry, *Energy policy*, 39 (2011) 142-155.
- [8] Y. Jani, W. Hogland, Waste glass in the production of cement and concrete – A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3) (2014) 1767-1775.
- [9] R. Madandoust, R. Ghavidel, Mechanical properties of concrete containing waste glass powder and rice husk ash, *Biosystems Engineering*, 116(2) (2013) 113-119.
- [10] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and concrete research*, 30 (2000) 91-100.
- [11] N. Schwarz, H. Cam, N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement and concrete and composites*, 30 (2008) 486-496.
- [12] R. Nassar, P. Soroushian, Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement, *Construction and Building Materials*, 29 (2012) 368-377.
- [13] D. Khale, R. Chaudhary, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, *Journal of Materials Science*, 42(3) (2007) 729-746.
- [14] J. Davidovits, GEOPOLYMERS: Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37 (1991) 1633-1656.
- [15] A. Fernandez-Jimenez, I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials, *Journal of Materials Science*, 42(9) (2007) 3055-3065.
- [16] J. Blaakmeer, Diabind: An alkali-activated slag fly ash binder for acid-resistant concrete, *Advanced Cement Based Materials*, 1(6) (1994) 275-276.
- [17] A. Allahverdi, F. Škvara, Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements PART 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations, *Ceramics – Silikáty* 49(4) (2006) 225-229.

محدود نشده خاک را تا ۲۱ برابر افزایش داده است.

- استفاده از فعال کننده نوع II در غلظت‌های مختلف نشان داد که با افزایش غلظت محلول، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه ژئوپلیمری بیشتر می‌شود که علت آن توانایی بیشتر در انحلال عناصر ماده اولیه است. در مقایسه بین محلول نوع I و II مشخص شد که در مقدار برابر، فعال کننده نوع II مقاومت بیشتری را کسب می‌کند (۷٪ افزایش در ۹۰ روزگی).

- پودر شیشه در اندازه بسیار ریز می‌تواند به خوبی به کمک محلول قلیایی شدید واکنش بدهد. جایگزین کردن ۱۰٪ پودر شیشه بجای پوزولان طبیعی هیچ کاهش در مقاومت به وجود نیاورده است. در ۲۰٪ جایگزینی مقاومت‌های ۲۸ و ۹۰ روزگی به ترتیب ۲۰٪ و ۱۳٪ افزایش می‌یابند. بنابراین حتی استفاده از ۱۰٪ پودر شیشه در پروژه‌های تثبیت بجای ماده اولیه آن، با توجه به حجم بالای تولید شیشه، کمک زیادی به دفع مطلوب شیشه از محیط‌زیست می‌کند.

- نتایج XRD نشان دهنده از بین رفتن کامل ساختار پوزولان طبیعی در فعال کننده بیشتر است. در مقایسه دو نمونه با مقدار متفاوت فعال کننده، نمونه با مقدار بیشتر فعال کننده با مقدار بیشتری خاک و پوزولان واکنش می‌دهد و این، با افزایش مقاومت رابطه مستقیم دارد. در عکس برداری الکترونی روبشی (SEM) نیز مشاهده شد که نمونه دارای فعال کننده بیشتر، توده‌های بزرگ‌تری از دانه‌های خاک را به هم چسبانده و سطح یکنواخت‌تری را به وجود آورده است.

کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای، صرف انرژی کمتر و امکان‌پذیری استفاده از مواد طبیعی فراوانی که در ایران به وفور وجود دارند، نشان دهنده فرصت‌های جدید ایجاد شده توسط مواد ژئوپلیمری و فعال شده قلیایی برای کمک به محیط‌زیست و تغییر روند افزایشی برداشت آهک و رس از معادن است. شاید ژئوپلیمرها را نتوان هم‌تراز با سیمان پرتلند (به عنوان ماده مرجع صنعت ساخت) دانست، اما شواهد به دست آمده نشان دهنده عملکرد قابل توجه آن‌ها است. بنابراین، با توجه به مزایای زیست‌محیطی این مواد و ارائه ویژگی‌های مکانیکی قابل قبول، تلاش برای توسعه تحقیقات نظری و عملی در این زمینه توصیه می‌شود. بررسی خصوصیات دوام، تغییر ماده خام اولیه (دیگر مواد طبیعی و ضایعاتی) و بررسی جنبه‌های اقتصادی استفاده از آنها، به عنوان موضوعات پیشنهادی قابل طرح می‌باشند.

مراجع

- [1] Tech report, 2009. Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA).
- [2] R. Rehan, M. Nehdi, Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry, *Environmental Science & Policy*, 8(2) (2005) 105-114.

- [30] M. Jafari Nadoushan, A.A. Ramezaniapour, 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.
- [31] D. Bondar, J. Cyril, N. Lynsdale, B. Milestone, Alkali-Activated Natural Pozzolan Concrete as New Construction Material, *Materials Journal*, 110(3) (2013).
- [32] E. Najafi Kani, A. Allahverdi, Effect of chemical composition on basic engineering properties of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan, *Ceramics – Silikáty* 53(3) (2009) 195-204.
- [33] ASTM D422-63, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, in: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [34] ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort in: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [35] S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon, A. Suddeepong, Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations, *Construction and Building Materials*, 24(10) (2010) 2011-2021.
- [36] ASTM D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, in: ASTM International West Conshohocken, PA, 2016.
- [37] M. Sol-Sánchez, J. Castro, C.G. Ureña, J.M. Azañón, Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators, *Engineering Geology*, 200 (2016) 10-17.
- [38] F. Puertas, C. Varga, M. Torres, J.J. Torres, E. Moreno, J.G. Palomo, Re-use of urban and industrial glass waste to prepare alkaline cements, in: 4th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Porto, Portugal, 2012.
- [39] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, Waste glass in the geopolymer preparation: Mechanical and microstructural characterisation, *Journal of Cleaner Production*, 90 (2015) 397-408.
- [40] D. Higgins, GGBS and sustainability, *Construction Materials*, 160(3) (2007) 99-101.
- [41] N. Cristelo, 2009, Deep Soft Soil Improvement by Alkaline Activation, PhD thesis, Newcastle University.
- [42] B. Majidi, Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review, *Materials Technology*, 24(2) (2009) 79-87.
- [18] S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, W. Samingthong, R. Rachan, A. Arulrajah, Durability against Wetting–Drying Cycles of Water Treatment Sludge–Fly Ash Geopolymer and Water Treatment Sludge–Cement and Silty Clay–Cement Systems, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1) (2016).
- [19] P. Sargent, P.N. Hughes, M. Rouainia, M.L. White, The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils, *Engineering Geology*, 152(1) (2013) 96-108.
- [20] S. Rios, C. Ramos, A. Viana da Fonseca, N. Cruz, C. Rodrigues, Mechanical and durability properties of a soil stabilised with an alkali-activated cement, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(2) (2019) 245-267.
- [21] M. Zhang, M. Zhao, G. Zhang, P. Nowak, A. Coen, M. Tao, Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils, *Applied Clay Science*, 108 (2015) 199-207.
- [22] S. Horpibulsuk, P. Chindaprasirt, P.D. Silva, P. Sukmak, Sulfate Resistance of Clay-Portland Cement and Clay High-Calcium Fly Ash Geopolymer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5) (2015).
- [23] N. Cristelo, S. Glendinning, A.T. Pinto, Deep soft soil improvement by alkaline activation, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 164(2) (2011) 73-82.
- [24] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1468-1478.
- [25] N. Cristelo, S. Glendinning, L. Fernandes, A.T. Pinto, Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation, *Construction and Building Materials*, 29 (2012) 167-174.
- [26] S. Rios, N. Cristelo, T. Miranda, E. Lucas, E. Soares, J. Oliveira, Structural Performance of Alkali-Activated Soil Ash versus Soil Cement, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2) (2016).
- [27] Z. Liu, C.S. Cai, F. Liu, F. Fan, Feasibility Study of Loess Stabilization with Fly Ash Based Geopolymer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5) (2016).
- [28] C. Shi, R.L. Day, Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans, *Cement and Concrete Research*, 23(6) (1993) 1389-1396.
- [29] A.A. Ramezaniapour, *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

- [45] N. Cristelo, S. Glendinning, L. Fernandes, A.T. Pinto, Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation, *Acta Geotechnica*, 8(4) (2013) 395-405.
- [46] B. Singhi, A.I. Laskar, M.A. Ahmed, Investigation on Soil-Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(2) (2016) 393-400.
- [47] R.A. Fletcher, K. MacKenzie, C.L. Nicholson, S. Shimada, The Composition Range of Aluminosilicate Geopolymers, *Journal of the European Ceramic Society*, 5(9) (2005), 1471-1477.
- [43] I. Phummiphan, S. Horpibulsuk, P. Sukmak, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, S.-L. Shen, Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer, *Road Materials and Pavement Design*, 17(4) (2016) 877-891.
- [44] R.A. Mozumder, A.I. Laskar, Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using Artificial Neural Network, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 291-300.

Please cite this article using:

M. Sabbagh Gol, V. Toufigh, Feasibility Study of Sandy Soil Stabilization with Glass Powder and Natural Pozzolan Based Geopolymer, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 169-182.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13086.5325

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

