

بهبودی مارن سبز تبریز با استفاده از زئولیت و متارس فعال شده بازی

افشین دیبامهر^۱، فریبا بهروز سرند^{۲*}، رامین وفایی پور سرخابی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

^۲ استادیار گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

^۳ استادیار گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

چکیده

به فرایند تشکیل پیوندهای سیمانته آلومینو سیلیکاتی در حضور فعال کننده بازی ژئوپلیمریزاسیون (Geopolymerization) اطلاق می‌گردد که به‌عنوان نسل سوم پیوند دهنده‌ها بعد از آهک و سیمان جهت بهسازی خاک‌های مسأله‌دار مطرح شده است. در پژوهش حاضر از این روش برای بهسازی خاک مارن سبز تبریز استفاده شده و خصوصیات مکانیکی نمونه‌های تثبیت شده به کمک آزمایشات تک‌محوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور زئولیت (Zeolite) و متارس (Metaclay) به‌صورت جداگانه به‌عنوان منابع آلومیناسیلیکات (Aluminosilicate) و محلول هیدروکسید سدیم (Sodium hydroxide) به‌عنوان فعال کننده بازی به کار رفته و اثر درصد وزنی زئولیت و متارس، غلظت فعال کننده بازی و زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی شده است. نتایج آزمایشات حاکی از تأثیر مناسب مکانیسم ژئوپلیمریزاسیون در اصلاح مشخصات مقاومتی خاک رسی کربناته بوده به‌طوری که در نمونه‌های بهینه ژئوپلیمری زئولیتی و متارسی مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب ۱۲ و ۷ برابر نمونه مارن سبز خالص می‌باشد. بهینه‌ترین غلظت محلول بازی برای نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی و متارسی ۱۲ مولار (Molar) بوده و افزایش غلظت به بیش از ۱۲ مولار در نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی اثر منفی بر مقاومت نمونه‌ها گذاشته و در نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی نیز تأثیر این عامل چشمگیر نیست. در غلظت‌های بالای ۴ مولار محلول بازی به‌ازای تمامی درصد‌های وزنی زئولیت و یا متارس، مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی بیشتر از نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی می‌باشد. همچنین در نمونه‌های ژئوپلیمری کرنش گسیختگی نسبت به نمونه مارن سبز خالص ۲۵ تا ۵۰ درصد کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: مارن سبز، ژئوپلیمریزاسیون، زئولیت، متارس، آزمایش تک‌محوری، سیمانته‌اسیون.

۱- مقدمه

مهندسی را برآورده نمی‌سازند. تا به امروز روش‌های بهسازی مختلفی برای اصلاح مشخصات مهندسی و به حداقل رساندن اثرات تغییرات حجمی این نوع خاک‌ها مطرح و در پروژه‌های متعدد به کار گرفته شده است (Afrin, ۲۰۰۲). تثبیت خاک‌های رسی توسط آهک، سیمان و یا مصالح دارای پایه کلسیم طی سالیان متمادی توسط مهندسی ژئوتکنیک برای برآورده ساختن اهداف فوق استفاده شده است (Horpibulsukn و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر مواد فوق در مواردی از پوزولان‌های طبیعی (خاکستر آتشفشانی) برای تثبیت مارن استفاده شده که نتایج رضایت‌بخشی به‌دنبال داشته است (Bahadori و همکاران، ۲۰۱۹). تثبیت خاک‌های رسی از جمله مارن‌ها با نانو مواد نیز یک رویکرد دیگر برای اصلاح مشخصات این نوع خاک‌ها مطرح می‌باشد. Alipour و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه آزمایشگاهی اثر

مارن و یا رس‌های مارنی یک اصطلاح کلی برای خاک‌های کربناته بوده که میزان کربنات در آن‌ها بین ۲۰ تا ۵۵ درصد متغیر می‌باشد (Elert و همکاران، ۲۰۱۷). مقدار کربنات موجود در مارن بر روی مشخصات ژئوتکنیکی آن‌ها از جمله تورم، خصوصیات پلاستیسیته، زاویه اصطکاک، چسبندگی و نفوذپذیری تأثیرگذار می‌باشد (Lamas و همکاران، ۲۰۰۲). مقدار کربنات کلسیم در نمونه‌های متعدد مارن تبریز در بازه ۱۰ تا ۳۵ درصد با روش‌های مختلف اندازه‌گیری شده است (ماهوتی و کاتبی، ۱۳۷۳).

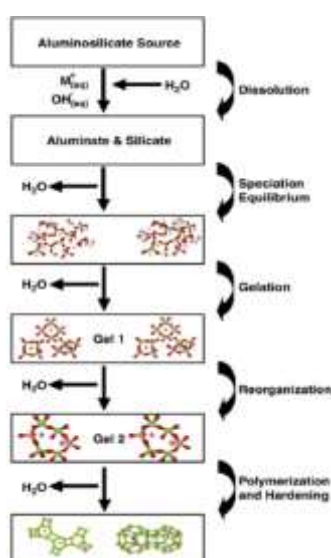
از لحاظ کانی‌شناسی مارن‌ها در گروه اسمکتیت یا ایلیت قرار می‌گیرند (Azarafza و همکاران، ۲۰۱۹). رس‌ها از جمله مهم‌ترین خاک‌های مسأله‌دار می‌باشند که در آن‌ها علاوه بر مشکل تغییرات حجمی، ظرفیت باربری آن‌ها نیز در مقایسه با خاک‌های درشت‌دانه کمتر بوده و از این نظر اهداف مربوط به تحمل بار سازه‌های

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۸۳۰۸۰۱

مهندسی ژئوتکنیک بسیار نوپا بوده و نیاز به مطالعات گسترده‌تر دارد (Phetchuay و همکاران، ۲۰۱۶).

به‌طور کلی (بسته به طبیعت مؤلفه‌های سیمان‌تاسیون) دو نوع ژئوپلیمر اصلی برای تثبیت خاک مطرح می‌باشد که شامل مدل N-A-S-H (ژئوپلیمر با ساختار شیمیایی هیدرات سیلیکات آلومینات سدیم) و مدل (N-C)-A-S-H (ژئوپلیمر حاصل از ترکیب دو ژل هیدرات سیلیکات آلومینات سدیم و هیدرات سیلیکات آلومینات کلسیم) می‌باشد که هر کدام را می‌توان به‌عنوان محصولات فرایند ژئوپلیمریزاسیون نام‌گذاری کرد. مدل اول معمولاً از مصالح با کلسیم پایین و آلومینوسیلیکای بالا نظیر خاکستر بادی و یا متاکاؤلین حاصل می‌شود ولی برای تشکیل نوع دوم ژئوپلیمر مقدار مشخصی از مواد آلومینوسیلیکاتی (مثل خاکستر بادی) با یک ماده پایه کلسیم (مثل سرباره) باید برای ایجاد واکنش در محیط وجود داشته باشد (Lodeiro و همکاران، ۲۰۱۵).

با مراجعه به منابع فنی موجود می‌توان به مقالاتی که در آن‌ها به بررسی اصلاح خاک‌های رسی با استفاده از ژئوپلیمرها پرداخته شده دست یافت (Cristelo و همکاران، ۲۰۱۲؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۳؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۶؛ Singhi و همکاران، ۲۰۱۵). به‌عنوان مثال Abdollah و همکارانش (Abdollah و همکاران، ۲۰۱۹(a)؛ Abdollah و همکاران، ۲۰۱۸؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۶؛ Abdollah و همکاران، ۲۰۱۹(b)) بر اساس آزمایشات متعدد به این نتیجه رسیده‌اند که رفتار مقاومت محدود نشده، سه‌محوری زهکشی شده و نشده و همچنین دوام در مقابل ذوب و یخبندان، در رس اصلاح شده با استفاده از روش ژئوپلیمریزاسیون بر مبنای خاکستر بادی همراه با سرباره بهبود یافته است.



شکل ۱- مدل مفهومی ژئوپلیمریزاسیون (Li و همکاران، ۲۰۱۰)

نانوسیلیکا و نانوالومینا بر مشخصات مهندسی خاک مارن تبریز پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در مقایسه این دو ماده افزودنی به‌ترتیب اثرنانوالومینا در کنترل تورم و نانوسیلیکا در افزایش مقاومت CBR مشهود می‌باشد.

از بین روش‌های فوق، بهسازی خاک‌های رسی با آهک معمول‌ترین روش اصلاح مشخصات ژئوتکنیکی بسترها می‌باشد (Al- Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۲؛ Obuzor و همکاران، ۲۰۱۲). اما بر اساس مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر، تفاوت واضحی بین مشخصات مکانیکی کوتاه‌مدت و بلندمدت مارن‌های بهسازی شده با آهک در مقایسه با رس‌های اصلاح‌شده با آهک مشاهده شده است. در بررسی‌های انجام شده این نتیجه حاصل شده است که تثبیت در مارن‌ها نسبت به انواع دیگر خاک‌های رسی تأثیر کمتری داشته و برای دستیابی به مشخصات مکانیکی مناسب در خاک‌های مارنی باید درصد آهک بیشتری مورد استفاده قرار گیرد (Ghobadi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Ureña و همکاران، ۲۰۱۵).

از طرفی به‌کارگیری این نوع از روش‌های تثبیت در شرایط کنونی که جهان به‌دنبال راهکارهای دوست‌دار محیط زیست برای تمامی اهداف بشری است قابل‌قبول تلقی نمی‌شود. بنابراین از دهه ۱۹۹۰ و به‌دنبال اخطار عمومی برای تغییرات اقلیمی روش‌های مختلف جدیدی برای رسیدن به هدف فوق، مطرح گردید که یکی از این رویکردها روش ژئوپلیمریزاسیون نام داشت (Pacheco-Torgal و همکاران، ۲۰۰۸). با توجه به تاریخچه موجود برای اصلاح خاک، روش ژئوپلیمریزاسیون را می‌توان به‌عنوان نسل سوم، روش‌های سیمان‌تاسیون^۱ بعد از آهک و سیمان معرفی نمود (Li و همکاران، ۲۰۱۰). ژئوپلیمرها پیوندهای فعال شده بازی با کلسیم پایین و غلظت آلومینیم متوسط تا بالا می‌باشند که از واکنش بین محلول هیدروکسید قلیایی و مصالح حاوی آلومینا سیلیکات تولید می‌شوند (Provis و همکاران، ۲۰۰۹؛ Yung-Ming و همکاران، ۲۰۱۶). مکانیزم ساده‌سازی شده ژئوپلیمریزاسیون به‌صورت شکل (۱) می‌باشد.

استفاده از پیونددهنده‌های آلومیناسیلیکاتی فعال‌شده بازی در دهه‌های اخیر به‌علت مقاومت و کارایی بالا و مقبولیت محیط زیستی مورد توجه صنایع قرار گرفته است. مصالح دارای آلومینات و سیلیکات بالا همچون کائولین و خاکستر بادی به‌عنوان منابع تأمین‌کننده ترکیبات مذکور در فرایند ژئوپلیمریزاسیون می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (Davidovits و همکاران، ۱۹۹۱؛ Buchwald و همکاران، ۲۰۰۲).

اگرچه استفاده از روش مذکور در صنایع ساختمانی نظیر صنعت ساخت سرامیک، کاشی و همچنین تولید بتن در دهه‌های اخیر تاحدودی رواج یافته است ولی استفاده از این روش در

کاتبی، ۱۳۷۳).

سه نوع مارن در بستر تبریز قابل شناسایی می‌باشد که عبارتند از مارن زرد، مارن سبز و مارن خاکستری یا سیاه (Hooshmand و همکاران، ۲۰۱۲). هدف از پژوهش اخیر استفاده از تکنیک ژئوپلیمریزاسیون برای تثبیت رس کربناته تبریز با رویکرد کنترل تغییر شکل‌ها و افزایش مقاومت می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مارن سبز تبریز به‌عنوان خاک مبنا و متارس و ژئولیت فعال شده بازی به‌عنوان منابع تأمین‌کننده آلومیناسیلیکات جهت تشکیل پیوندهای سیمانته انجام شده است. فعال‌کننده بازی به‌کار گرفته شده در این پژوهش هیدروکسید سدیم با غلظت‌های مختلف برای رسیدن به نتیجه بهینه می‌باشد. بدین منظور از آزمایشات متعدد مقاومت فشاری تک‌محوری برای ارزیابی مقاومت خاک تثبیت شده استفاده شده است. از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار مورد مطالعه در تحقیق حاضر می‌توان به درصد‌های وزنی مصالح حاوی آلومینا سیلیکات (ژئولیت و متارس)، غلظت محلول بازی مورد استفاده (NaOH) و زمان عمل‌آوری اشاره نمود. با توجه به توضیحات ارائه شده، خاک مورد مطالعه (مارن سبز) و نوع ماده افزودنی به‌کار رفته (ژئولیت و متارس) تا به‌حال با این مکانیسم مورد بررسی قرار نگرفته‌اند و در صورت به‌دست آوردن نتایج مناسب، روش ژئوپلیمریزاسیون می‌تواند به‌عنوان یک روش نوین برای بهسازی خاک‌های مارنی به‌کار برده شود.

۲- روش تحقیق

۱-۲- خاک مورد مطالعه

خاک رسی کربناته (مارن سبز) مورد مطالعه در مقاله حاضر از عمق ۱-۲ متری منطقه نصر واقع در شمال شرق شهر تبریز تهیه شده است. تصاویر مربوط به نمونه‌های استحصالی از حفاری-های انجام یافته در شکل (۲) آورده شده است. بر اساس طبقه‌بندی متحد این خاک در رده رس با خاصیت خمیری بالا (CH) قرار می‌گیرد.



شکل ۲- خاک مارن سبز تهیه شده از منطقه نصر تبریز

در مطالعه انجام یافته توسط Ghadir و همکاران (۲۰۱۸) مشخصات مکانیکی خاک‌های رسی اصلاح شده با استفاده از خاکستر آتشفشانی (VA) به‌روش ژئوپلیمراسیون و سیمان پرتلند معمولی (OPC) مورد مقایسه قرار گرفته است. در پژوهش دیگری نیز به مقایسه رفتار خاک‌های رس بهسازی شده با فعال‌کننده بازی و خاکستر بادی با کلسیم پایین با همان نوع خاک بهسازی شده با پیونددهنده معمول (سیمان و آهک) پرداخته شده است (Corrêa-Silva و همکاران، ۲۰۱۹).

در اکثر تحقیقات انجام شده تا به امروز، کاربرد تکنیک ژئوپلیمریزاسیون به‌عنوان یک رویکرد جدید برای اصلاح انواع مشخصات خاک‌های مسأله‌دار تا حدودی مورد تأیید قرار گرفته است. لازمه دستیابی به نتایج مطلوب انتخاب مناسب منابع حاوی آلومیناسیلیکا، نوع فعال‌کننده بازی و غلظت آن و فراهم نمودن شرایط واکنش متناسب با خاک مبنا می‌باشد. از طرفی بر اساس مرور منابع انجام شده روش ژئوپلیمریزاسیون در برخی کشورها در عمل و در مقیاس واقعی نیز به‌کار رفته و نتایج بسیار مطلوبی به‌دنبال داشته است به‌عنوان مثال در کشور کلمبیا، تثبیت خاک با استفاده از مکانیزم ژئوپلیمریزاسیون برای راه‌های کم‌اهمیت در شبکه راه‌ها به‌کار گرفته شده است. در ترکیبات ژئوپلیمرهای مذکور از خاکستر بادی کلسیم‌دار و محلول بازی ساخته شده از سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم برای تثبیت ماسه سیلت‌دار کلمبیا استفاده و طبق نتایج به‌دست آمده از آزمایشات، مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی افزایش یافته است (Rios و همکاران، ۲۰۱۶).

Cristelo و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای به استفاده از فعال‌سازی بازی خاکستر بادی برای بهسازی خاک‌های نرم (رس ماسه‌دار) به‌روش تثبیت عمیق پرداخته‌اند. نتایج آزمایشات نشان داده که از واکنش بالا ماده‌ای جدید با مقاومت و شکل‌پذیری بسیار بهبود یافته ایجاد می‌کند که این بهسازی وابسته به زمان بوده و بعد از یک سال عمل‌آوری افزایش مقاومت قابل توجه است. هم‌چنین در طولانی مدت مخلوط‌های فعال‌سازی شده بازی در مقایسه با سیمان مقاومت بالاتری نشان می‌دهند، با این وجود در کوتاه‌مدت سیمان نرخ افزایش مقاومت سریع‌تری دارد. علاوه بر موارد فوق، نتیجه اصلی دیگر حاصله از این تحقیق نشان می‌دهد که روش فعال‌سازی بازی برای تثبیت خاک مخصوصاً در صورت استفاده به‌صورت ستون‌های جت گروتینگ^۲ تکنیکی معتبر بوده و با اکثر مصالح سنتی مثل سیمان قابل رقابت می‌باشد. هسته اولیه شهر تبریز بر روی بسترهای آبرفتی قرار گرفته است ولی با رشد و توسعه شهر در جهت شرقی، بخش وسیعی از مناطق جدید بر روی مارن (چه در سطح و چه در عمق) قرار گرفته است (ماهوتی و

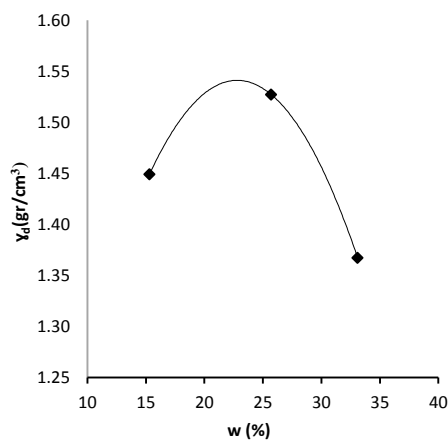
یک ماده با فاز بی شکل با ذخیره انرژی و فعالیت بالا حاصل شده است.

۲-۴- فعال کننده بازی (L)

معمولترین فعال کننده‌های بازی مورد استفاده در فرایند ژئوپلیمریزاسیون هیدروکسیدسیدیم (NaOH)، سیلیکات سدیم و هیدروکسید پتاسیم (KOH) گزارش شده است (Morsy و همکاران، ۲۰۱۴). در مطالعه حاضر، هیدروکسید سدیم به علت ارزان تر بودن و هم چنین کارایی بالاتر در جداسازی مونومرهای سیلیکا و آلومینا به عنوان فعال کننده بازی انتخاب شده است (Zhang, ۲۰۰۳). شکل اولیه NaOH تهیه شده به صورت پولکی بوده و با حل کردن در آب مقطر با درصدهای وزنی مختلف بر اساس غلظت مورد نیاز (M) به صورت محلول فعال کننده بازی درمی آید.

۲-۵- تهیه نمونه و آزمایشات

در این تحقیق، دو سری آزمایشات تعیین مقاومت فشاری تک محوری برای بررسی اثر عواملی همچون نوع ماده افزودنی، درصد ماده افزودنی، غلظت فعال کننده بازی و زمان عمل آوری مطابق جدول (۳) برنامه ریزی و انجام شده است. برای ساخت نمونه‌های بازسازی شده از قالب PVC به ترتیب با قطر و ارتفاع حدود ۳۸ و ۷۶ میلی متر استفاده شده است. نمونه‌های مورد آزمایش مطابق شرایط ارائه شده در جدول (۳) و در درصد رطوبت بهینه خاک مینا (۲۲٪) که از آزمایش تراکم استاندارد حاصل شده است ساخته شده است. نمودار مربوط به آزمایش تراکم انجام شده بر روی مارن سبز در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴- نتایج آزمایش تراکم استاندارد (ASTM D698) خاک مارن سبز

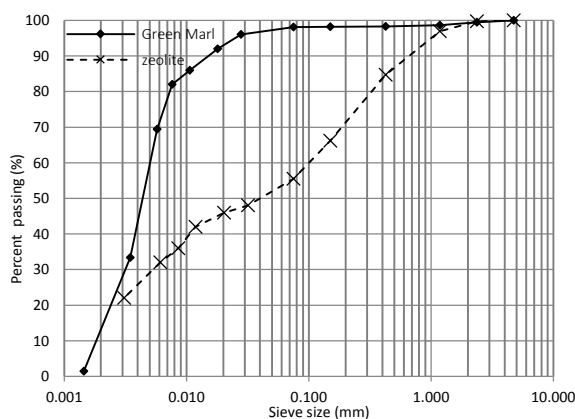
برخی از مشخصات اولیه مارن سبز مورد مطالعه در جدول (۱) و توزیع دانه بندی آن در شکل (۲) آورده شده است. نتایج تحلیل طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) خاک مورد نظر نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مارن سبز

مشخصات	مقادیر
حد روانی، LL (%)	۵۸
حد خمیری، PL (%)	۲۸
شاخص خمیری، PI (%)	۳۰
طبقه بندی خاک	CH
چگالی ویژه، G _s	۲/۵۸

۲-۲- ژئولیت (Z)

ژئولیت طبیعی مورد استفاده در پژوهش اخیر از معدن ژئولیت امیرآباد میانه تهیه شده است. توزیع دانه بندی و ترکیبات شیمیایی این ماده به ترتیب در شکل (۳) و جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۳- توزیع دانه بندی خاک مارن سبز و ژئولیت

۲-۳- متارس (M)

متارس به کار رفته در مطالعه اخیر از فرآیند کلسینه کردن خود رس کربناته (مارن سبز) به دست آمده است. کلسیناسیون (Calcination) یک فرایند تصفیه حرارتی است که در آن مواد بی شکل یا سایر مواد جامد در زیر نقطه ذوب تحت اتمسفر هوا و یا کنترل شده، حرارت داده می شوند. این فرایند برای ایجاد تجزیه گرمایی، حذف فازهای ناپایدار و یا انتقال فاز انجام می شود (Pera و همکاران، ۲۰۰۱). در این پژوهش برای نیل به این هدف خاک مورد نظر بعد از عبور دادن از الک شماره ۴۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد به مدت دو ساعت حرارت داده شده که با توجه به توضیحات داده شده فوق ساختار کریستالی ماده شکسته شده و

نمودار حاصل از این آزمایش در شکل (۵) ارائه شده است. همان-طور که از نمودار قابل مشاهده می‌باشد مقاومت فشاری نمونه مارن سبز حدود ۳/۳۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و کرنش گسیختگی آن در حدود ۴/۹ درصد به دست آمده است.

جهت مقایسه نتایج، نمونه بازسازی شده مارن سبز در رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه بدون مواد افزودنی تهیه شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفته است که

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی خاک مارن زرد و زئولیت

عنوان	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	TiO ₂ %	MnO%	P ₂ O ₅
مارن سبز	۵۰/۳۵	۱۴/۱	۵/۰۱	۸/۰۹	۴/۲۳	۱/۰۶	۲/۷۴	۰/۷۳	۰/۰۷۶	۰/۱۲۱
زئولیت	۶۵/۷۸	۱۱/۲۵	۱/۷۶	۱/۵۴	۱/۰۸	۲/۸۷	۱/۷۲	۰/۲۳۴	۰/۰۲۲	۰/۰۱۵

جدول ۳- برنامه آزمایشات

واحد	سری اول	سری دوم
زئولیت (Z)	۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵	-
متارس (M)	-	۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵
فعال کننده بازی (L)	۱۶، ۱۲، ۶، ۴	۱۶، ۱۲، ۶، ۴
زمان عمل‌آوری	۲۸، ۱۴، ۷، ۳	۲۸، ۱۴، ۷، ۳

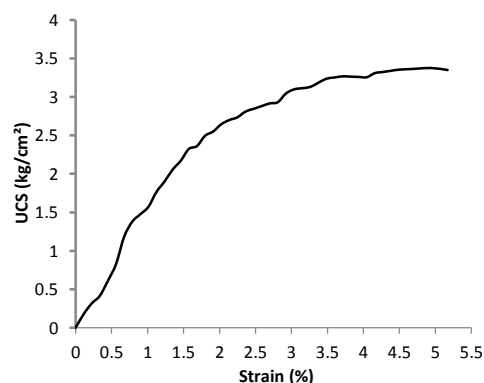


شکل ۶- بخشی از نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش تک‌محوری و یک نمونه تحت آزمایش

۳- نتایج و بحث

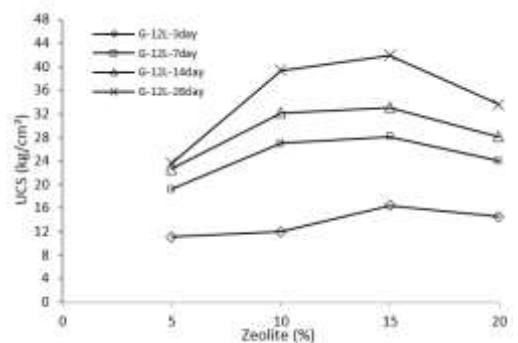
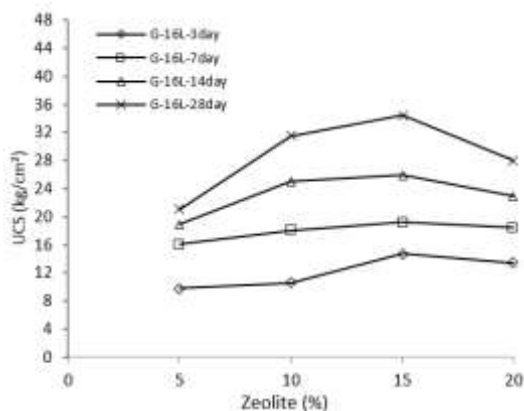
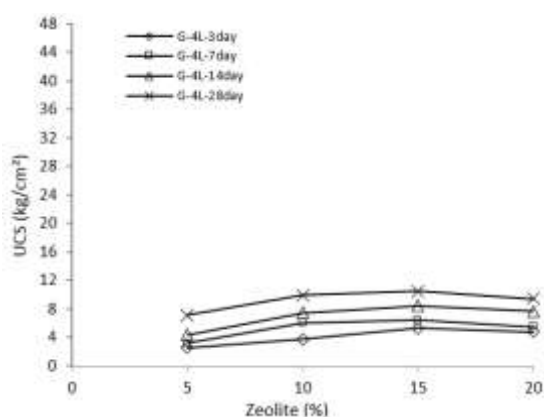
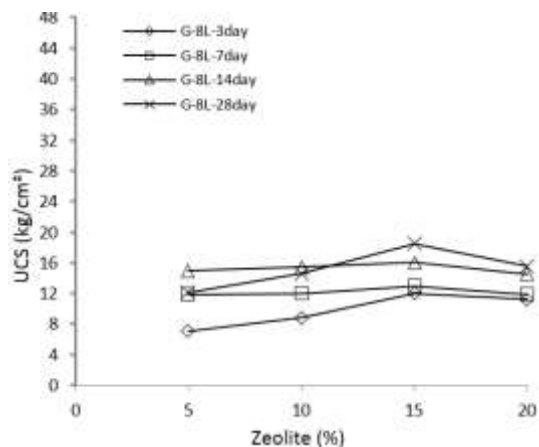
۳-۱- مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی

در شکل (۷) نمودارهای تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های ژئوپلیمری در برابر درصدهای زئولیت، زمان‌های عمل‌آوری و غلظت‌های مختلف فعال کننده بازی آورده شده است. همان‌طور که در تمامی نمودارهای ارائه شده در این شکل دیده می‌شود برای تمامی غلظت‌های محلول بازی با افزایش درصد وزنی زئولیت تا ۱۵٪ مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته و مقدار زئولیت ۱۵٪ را می‌توان به عنوان درصد بهینه معرفی نمود. در تفسیر نتایج فوق می‌توان چنین گفت که مقدار آلومینا سیلیکات موجود در ماده افزودنی (زئولیت) تأثیر عمده‌ای در کسب مقاومت خاک اصلاح شده ژئوپلیمری دارد. افزایش مقدار زئولیت فعال شده بازی به دلیل آزادسازی بیشتر کانی‌های سیلیکات و آلومینات منجر به ساخت محصولات سیمانته N-A-S-H (هیدرات سیلیکات آلومینات سدیم) در خاک بهسازی شده می‌گردد. این مطلب قبلاً توسط محققین دیگری که از خاکستر بادی به عنوان منبع آلومینا سیلیکات استفاده کرده‌اند نیز گزارش شده است (Phummiphan و همکاران، ۲۰۱۶). از طرفی هر اندازه مقدار محصولات سیمانته افزایش می‌یابد سطح پیوند بین دانه‌ها نیز افزایش یافته و این عامل منجر به افزایش مقاومت می‌شود (Liu و همکاران، ۲۰۰۹؛



شکل ۵- آزمایش تک‌محوری نمونه مارن سبز بازسازی شده

برای ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری، خاک مارن سبز عبوری از الک شماره ۴۰ با ماده افزودنی حاوی آلومینا سیلیکا (زئولیت و یا متارس) در درصدهای وزنی مورد نظر به صورت خشک به مدت ۵ دقیقه کاملاً مخلوط شده و سپس فعال کننده بازی (L) با مولاریته مشخص با درصد رطوبت بهینه به مواد اضافه شده و این مخلوط توسط هم‌زن تا جایی به هم زده می‌شود که یک بافت همگن حاصل گردد زمان مورد نیاز برای رسیدن به بافت مورد نظر در حدود ۵ دقیقه است. ترکیب به دست آمده در داخل قالب استوانه‌ای در سه لایه تا رسیدن به وزن مخصوص خشک بیشینه متراکم می‌گردد. نمونه‌های ساخته شده از درون قالب‌ها خارج شده و داخل پوشش‌های پلاستیکی قرار گرفته و در دمای آزمایشگاهی (۲۵±۲°C) تا زمان مورد نظر عمل‌آوری می‌گردد. تصویر بخشی از نمونه‌های ساخته شده در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۷- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری برای درصدهای ژئولیت، زمان‌های عمل‌آوری و غلظت‌های مختلف محلول بازی

Abdullah و همکاران، ۲۰۱۹). البته تا به امروز بر اساس مطالعات انجام شده مقدار بهینه مشخصی برای منابع آلومیناسیلیکات در بهسازی خاک‌های ژئوپلیمری گزارش نشده است (Abdullah و همکاران، ۲۰۱۹).

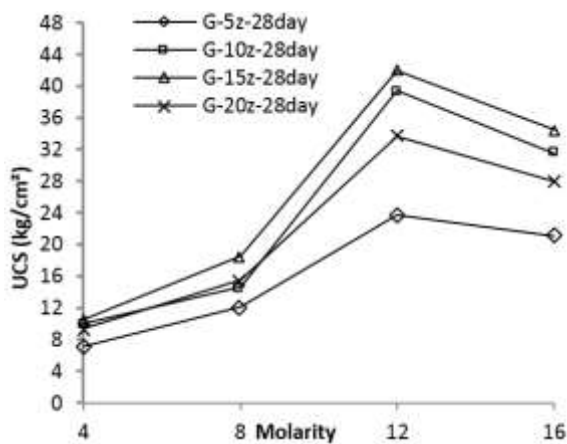
Cristelo و همکاران (۲۰۱۱) بر اساس نتایج آزمایشات تک-محوری انجام شده افزایش مقاومت حدود ۱۲۰ درصدی برای نمونه‌های خاک بهسازی شده ژئوپلیمری با خاکستر بادی کلاس F با ۲۸ روز عمل‌آوری نسبت به خاک مبنأ گزارش کرده‌اند. در پژوهش اخیر نیز برای نمونه بهینه ژئوپلیمری (15٪، 12M و 28day) مقاومت تک‌محوری در حدود ۴۲ kg/cm² به دست آمده است که مقاومتی حدود ۱۲ برابر مقاومت تک‌محوری نمونه مارن سبز خالص می‌باشد. لذا با مقایسه نتایج این کار با نتایج ارائه شده در مقاله Cristelo و همکاران (۲۰۱۱) بر افزایش مقاومت به دست آمده دور از انتظار نیست.

از طرفی با مراجعه به شکل (۷) ملاحظه می‌شود که در غلظت‌های بالای محلول بازی با افزایش درصد ژئولیت از ۱۵٪ به ۲۰٪ مقاومت کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر برای کسب مقاومت بالاتر در غلظت‌های پایین محلول بازی، درصد وزنی بالای ژئولیت مناسب‌تر بوده و هر چه غلظت افزایش می‌یابد در درصد وزنی پایین‌تر مقاومت مناسب کسب می‌گردد. نتیجه دیگری که از نمودارها حاصل می‌شود نشان می‌دهد که در تمامی غلظت‌های محلول بازی با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت برای تمامی درصدها افزایش یافته ولی در غلظت‌های ۱۲ و ۱۶ مولار نقش زمان در کسب مقاومت پررنگ‌تر می‌باشد. افزایش زمان عمل‌آوری منجر به تشکیل محصولات سیمان‌تاسیون بیشتری در خاک اصلاح شده گردیده و این پدیده بهبود رفتار مکانیکی خاک ژئوپلیمری را به دنبال دارد (Phummiphan و همکاران، ۲۰۱۶). نرخ کسب مقاومت خاک‌های اصلاح شده ژئوپلیمری با زمان ثابت نبوده و با افزایش زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد. کاهش تدریجی در میزان افزایش مقاومت را می‌توان به کاهش تدریجی واکنش ژئوپلیمریزاسیون به دلیل انزوال اجزای مختلف در محیط واکنش نسبت داد که این نتیجه در کارهای مشابه که بر روی رس نرم دریایی انجام شده است نیز گزارش گردیده است (Phetchuay و همکاران، ۲۰۱۶).

در شکل (۸) به عنوان نمونه نمودار مربوط به نرخ تغییرات مقاومت تک‌محوری برای نمونه بهینه ژئوپلیمری (15٪، 12M) در برابر زمان عمل‌آوری ارائه شده است. نتایج مطالعات ارائه شده تا به امروز در مورد زمان مورد نیاز برای پایان واکنش‌های سم‌تاسیون ژئوپلیمری یکسان نیست به عنوان مثال در مقاله‌ای اشاره شده که در واکنش‌های ژئوپلیمری افزایش مقاومت برای بیش از ۴۸ روز چشمگیر نبوده و این رفتار برعکس رفتار OPC می‌باشد (Khale و همکاران، ۲۰۰۷).

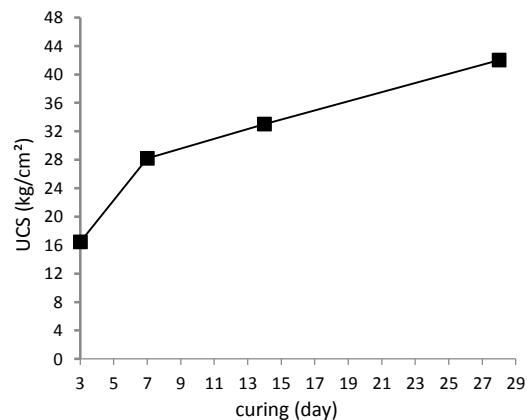
بهسازی شده ژئوپلیمری وجود دارد.

افزایش غلظت فعال کننده ممکن است منجر به افزایش شرایط بازی محیط واکنش (pH) شده و این مسأله امکان تولید محصولات سمنته را بهبود می بخشد (Abdullah و همکاران، ۲۰۲۰). البته مطالعات موجود نشان می دهد که مقدار غلظت بالا ضرورتاً نمی تواند مقدار بهینه محسوب شود. این نتیجه توسط Cristelo و همکاران (۲۰۱۱) که محلول هیدروکسید سدیم با غلظت های ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ مولار برای ساخت نمونه های تک-محوری ژئوپلیمری به کار برده اند تأیید شده است به طوری که در بلندمدت نمونه های ساخته شده با غلظت ۱۲/۵ مولار مقاومت بالاتری نسبت به نمونه های ساخته شده با غلظت ۱۵ مولار از خود نشان داده اند. این مسأله می تواند به نسبت اکسیدهای سیلیکا به سدیم در محلول بازی مرتبط باشد که منجر به ناپایدار شدن محلول بازی (کریستالی شدن) گردیده و اثر منفی بر واکنش ژئوپلیمری می گذارد (Xu و همکاران، ۲۰۰۰). با این وجود در برخی مطالعات از جمله مقاله Xu و Van Deventer (۲۰۱۱) اشاره شده که مقاومت تک محوری نمونه ها با غلظت فعال کننده بازی رابطه مستقیم دارد. این مسأله زمانی می تواند صحیح باشد که رطوبت نمونه ها به اندازه کافی بالا باشد. در مقاله حاضر از آنجا که نمونه ها در رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم (۲۲٪) ساخته شده اند لذا با افزایش غلظت محلول بازی بالاتر از ۱۲ مولار، ویسکوزیته فعال کننده افزایش یافته و روی رفتار نمونه های ساخته شده اثر منفی می گذارد و برای تأثیرگذاری مؤثر مولاریته های بالا بایستی در صد رطوبت نمونه ها افزایش یابد که در این مقاله این مسأله بررسی نشده است. افزایش کم مقاومت تک محوری مابین غلظت های ۴ تا ۸ مولار می تواند به علت ناکافی بودن غلظت فعال کننده بازی در محیط جهت انحلال بیشتر Si و Al زئولیت باشد.



شکل ۹- محلول بازی تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری در مقابل غلظت برای درصدهای مختلف زئولیت

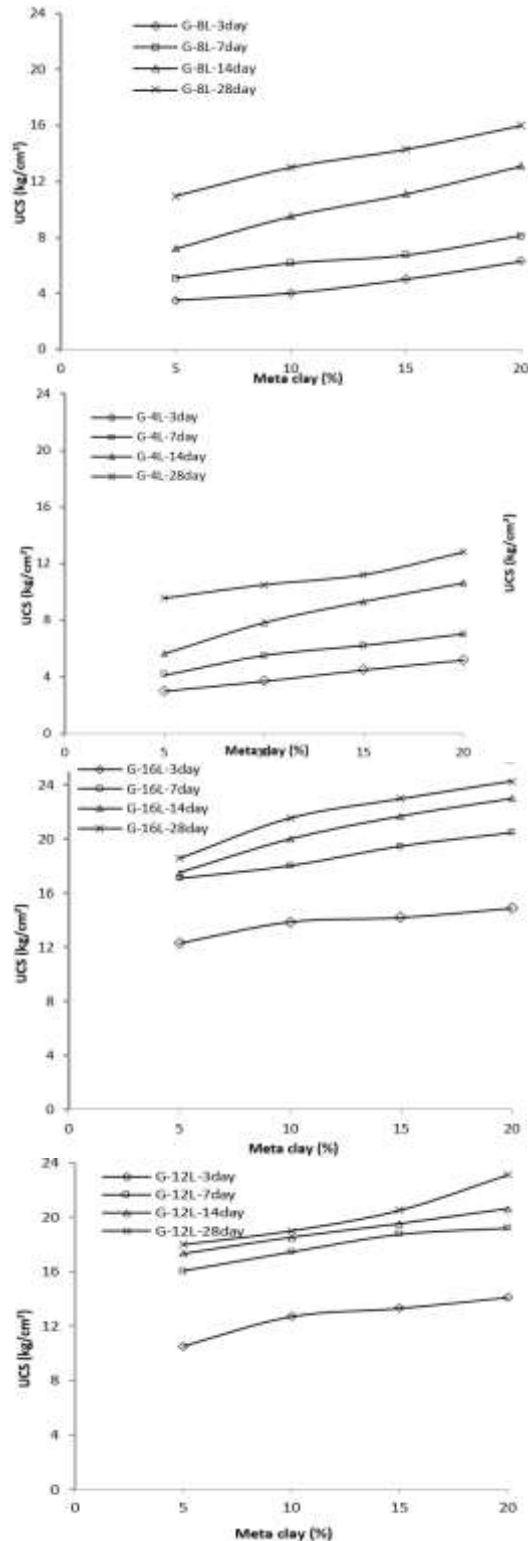
این در حالی است که در مقاله دیگری که به تثبیت عمیق خاک نرم با فعال کننده بازی پرداخته شده این نتیجه حاصل شده که در مقایسه نتایج مقاومتی ستون های تثبیت شده با فعال کننده بازی برخلاف سیمان که بعد از ۲۸ روز تقریباً به ۸۰٪ تا ۸۵٪ مقاومت نهایی می رسد، مقاومت خاکستر بادی فعال سازی شده بازی بعد از سه ماه تنها ۴۰ تا ۶۰ درصد مقاومت یک ساله آن می باشد. با این وجود آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه های به دست آمده از مقاطع برداشته شده از ستون های سیمانی و فعال شده بازی نشان داد که در سه ماه عمل آوری سطح مقاومت ستون های ساخته شده با دوغاب بازی، بیشتر از ستون های سیمانی می باشد (Cristelo و همکاران، ۲۰۱۱). با مراجعه به نمودارهای ۸ مقاله حاضر که به تأثیر زمان عمل آوری در کسب مقاومت ۲۸ روزه نمونه های بهینه پرداخته شده این مسأله قابل استنباط است که با وجود این که نرخ کسب مقاومت با زمان کاهش یافته ولی انتظار افزایش مقاومت (ادامه واکنش های سیمان تاسیون) با زمان وجود دارد.



شکل ۸- تأثیر زمان عمل آوری بر مقاومت تک محوری فشاری نمونه بهینه ژئوپلیمری زئولیتی (12M, 15%z)

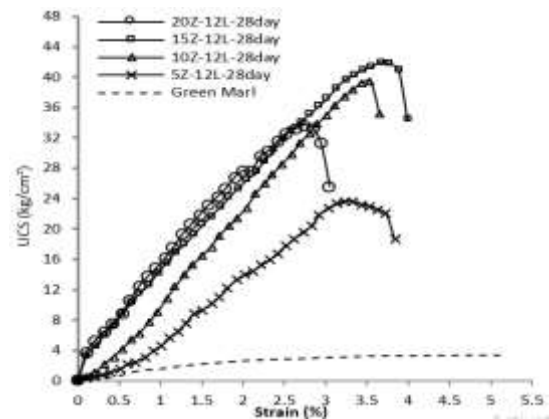
در شکل (۹) نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری برای غلظت های مختلف فعال کننده بازی برای زمان عمل آوری ۲۸ روزه آورده شده است. همان طور که در این نمودارها مشاهده می شود برای تمامی درصدهای زئولیت مقدار غلظت ۱۲ مولار به عنوان غلظت بهینه محسوب می شود. نتیجه مهم دیگری که از این نمودار حاصل می شود این است که در غلظت های ۴ تا ۸ مولار افزایش مقاومت تک محوری برای تمامی درصدهای زئولیت کم بوده ولی بین غلظت های ۸ تا ۱۲ مولار افزایش مقاومت به صورت چشمگیر رخ داده است از طرفی بعد از غلظت ۱۲ مولار با افزایش غلظت مقاومت کاهش می یابد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در منابع فنی موجود، ارتباط قوی بین نسبت وزنی فعال کننده به منبع آلومیناسیلیکات و افزایش مشخصات مقاومتی خاک های

کرده و با گذشت زمان مقاومت در تمامی نمونه‌ها افزایش یافته است ولی نرخ تغییرات مقاومت برای تمامی شرایط نسبت به زمان ثابت نیست.



شکل ۱۱- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری برای درصد‌های متارس، زمان‌های عمل‌آوری و غلظت‌های مختلف محلول بازی

در شکل (۱۰) تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ۲۸ روزه با درصد‌های مختلف ژئولیت در غلظت ۱۲ مولار آورده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود کوچک‌ترین مقدار کرنش گسیختگی نمونه در مقدار ژئولیت ۲۰ درصد به دست آمده است به عبارت دیگر ثابت نگه داشتن غلظت محلول بازی و افزایش درصد ژئولیت به ساخت نمونه‌های تردتر می‌انجامد به طوری که کرنش گسیختگی نمونه مارن سبز حدود ۵/۰ درصد بوده ولی در نمونه بهینه ژئوپلیمری (12M, 15Z, 28day) مقدار کرنش گسیختگی به ۴/۰ درصد کاهش یافته است.

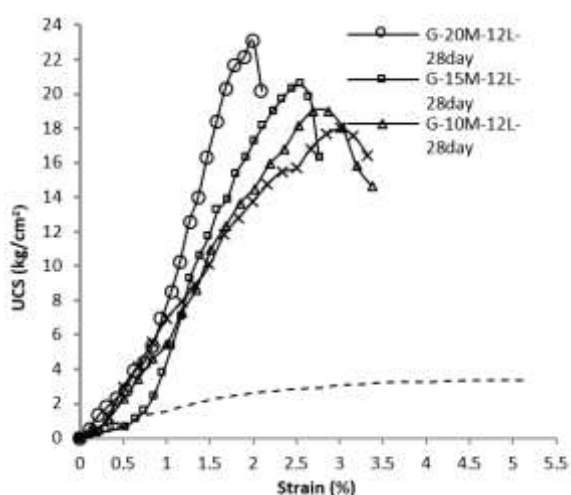


شکل ۱۰- تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ۲۸ روزه با درصد‌های مختلف ژئولیت در غلظت ۱۲ مولار

۲-۳- مقاومت تک نمونه‌های محوری نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی

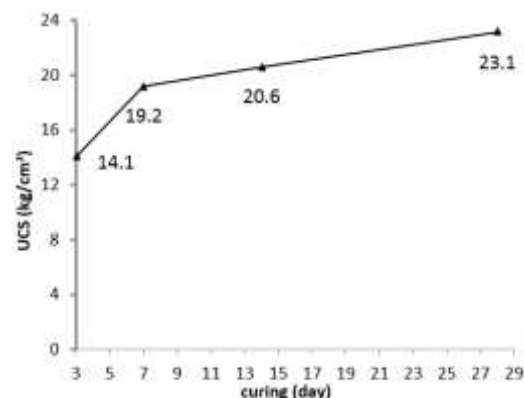
مشابه شکل (۷)، در شکل (۱۱) نیز نمودارهای تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی برای درصد‌های مختلف متارس، زمان‌های عمل‌آوری و غلظت‌های مختلف فعال-کننده بازی آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، در ژئوپلیمرهای ساخته شده بر مبنای متارس با افزایش درصد متارس مقاومت نمونه‌ها به‌ازای تمامی غلظت‌های محلول بازی و در همه زمان‌های عمل‌آوری افزایش یافته است و نمی‌توان همانند ژئولیت برای متارس نیز درصد بهینه معرفی نمود. این مسأله را می‌توان به وجود مقدار بالای سیلیکا و آلومینا در ژئولیت در مقایسه با متارس (مطابق جدول (۲)) نسبت داد که به تولید مقدار بیشتری از محصولات سیمانی در درصد یکسان ژئولیت در مقایسه با متارس شده و در نتیجه بافت خاک تقویت می‌گردد. از طرفی نوع ماده آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در ژئوپلیمر نقش مهمی در میزان مقاومت خاک اصلاح شده ژئوپلیمری دارد (Abdullah و همکاران، ۲۰۲۰) که در آزمایشات حاضر این مسأله به دلیل ترکیب شیمیایی متفاوت ژئولیت و متارس می‌باشد که بر روی محصولات واکنش تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۱۱) دیده می‌شود، برای تمامی غلظت‌های فعال‌کننده بازی و در تمامی درصد‌های متارس زمان عمل‌آوری به‌عنوان پارامتر مثبت عمل

متارس همانند شرایط حاکم بر ژئوپلیمرهای ژئولیتی مقدار غلظت ۱۲ مولار به عنوان غلظت بهینه در ترکیب دانست ولی در نمونه-های ژئوپلیمری متارسی با افزایش غلظت محلول بازی از ۱۲ به ۱۶ مولار مقاومت نمونه‌ها به صورت جزئی افزایش یافته است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز بحث شد مقدار بهینه غلظت محلول بازی به عوامل مختلفی از جمله نسبت وزنی فعال‌کننده به منبع آلومیناسیلیکات، pH محیط واکنش، رطوبت نمونه‌ها و ... دارد. در شکل (۱۴) تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه-های ژئوپلیمری متارسی در برابر کرنش محوری برای غلظت بهینه (۱۲) مولار و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه آورده شده است. در نمونه‌های حاضر نیز کرنش گسیختگی با افزایش درصد متارس کاهش یافته و کمترین مقدار کرنش گسیختگی به‌ازای ۲۰ درصد متارس به ۲/۰ درصد رسیده است.

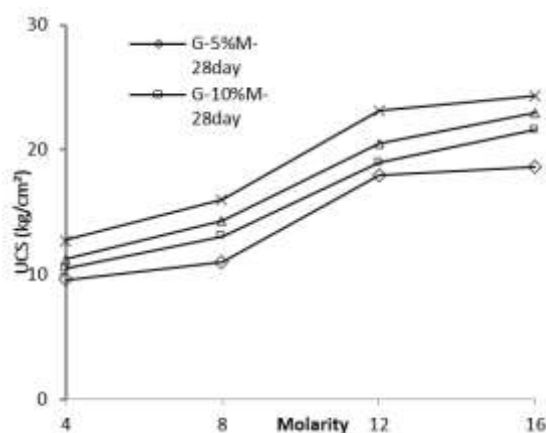


شکل ۱۴- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه با درصدهای مختلف متارس در غلظت ۱۲ مولار

شکل (۱۵) جهت مقایسه مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه-های ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی به‌ازای درصدهای مختلف ژئولیت و یا متارس، غلظت‌های مختلف محلول بازی در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه ارائه شده است. در این نمودار محور قائم نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی به متارسی و محور افقی درصد وزنی ژئولیت و یا متارس به‌کار رفته در ساخت نمونه‌ها می‌باشد. همان‌طور که از این نمودار استنباط می‌شود در غلظت ۱۲ مولار، بیشترین اختلاف بین نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی به متارسی به‌دست آمده و این نسبت بین ۱/۳۲ تا ۲/۰۷ متغیر می‌باشد. از طرفی با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که برای غلظت محلول بازی ۴ مولار، مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی کمتر از مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی می‌باشد که علت این مسأله



شکل ۱۲- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت تک‌محوری فشاری نمونه بهینه ژئوپلیمری متارسی (12M, 20% meta)



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری در مقابل غلظت محلول بازی برای درصدهای مختلف متارس

برای درک بهتر این مسأله نمودار مربوط به نرخ تغییرات مقاومت تک‌محوری برای نمونه ژئوپلیمر متارسی با ۲۰ درصد متارس و غلظت فعال‌کننده ۱۲ مولار در برابر زمان عمل‌آوری در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود نرخ کسب مقاومت با گذشت زمان کاهش یافته است. دلیل این مسأله در بخش‌های قبلی توضیح داده شده است.

با مقایسه شکل‌های (۷) و (۱۱) چنین استنباط می‌شود که رفتار خاک‌های به‌سازی شده ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی در کسب مقاومت نسبت به زمان کاملاً مشابه نیست. با مراجعه به مطالعات قبلی انجام شده دلیل این تفاوت را می‌توان چنین بیان نمود که زمان لازم برای تشکیل یک ژل پیوسته از محلول آلومینوسیلیکات فوق اشباع، به‌طور قابل توجهی با شرایط فرآوری مواد خام (در این تحقیق ژئولیت و یا متارس)، ترکیب محلول و شرایط سنتز متفاوت است (Duxson و همکاران، ۲۰۰۷). در شکل (۱۳) تأثیر غلظت فعال‌کننده بازی بر مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه به‌صورت نمودار ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود برای تمامی درصدهای

محلول بازی با افزایش درصد وزنی زئولیت تا ۱۵٪ مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته و مقدار زئولیت ۱۵٪ را می‌توان به‌عنوان درصد بهینه معرفی نمود. ولی در نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی با افزایش درصد متارسی مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته و مقدار بهینه وزنی به‌دست نیامده است.

- در نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی و متارسی مقدار غلظت ۱۲ مولار به‌عنوان غلظت بهینه فعال‌کننده بازی برای تمامی درصد‌های ماده افزودنی آلومینا سیلیکاتی به‌دست آمده است.

- در تمامی غلظت‌های فعال‌کننده بازی و به‌ازای تمامی درصد‌های زئولیت و متارسی با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده افزایش می‌یابد ولی نرخ تغییرات مقاومت برای تمامی شرایط نسبت به زمان ثابت نیست.

- با افزایش درصد زئولیت و متارسی کرنش گسیختگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد به‌عبارت دیگر ثابت نگه داشتن غلظت محلول بازی و افزایش درصد ماده افزودنی به ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری تردتر می‌انجامد.

- در غلظت‌های بالای ۴ مولار محلول بازی به‌ازای تمامی درصد‌های وزنی زئولیت و یا متارسی، مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی بیشتر از نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی می‌باشد.

- با در نظر گرفتن تمامی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی و متارسی، مزیت عمده‌ای که برای تثبیت با تکنیک ژئوپلیمریزاسیون در مقایسه با سایر روش‌های قبلی (تثبیت با آهک، پوزولان‌های طبیعی و یا نانومواد) می‌توان مطرح نمود بالا بودن مقاومت فشاری نمونه‌ها در درصد‌های مشابه مواد افزودنی می‌باشد.

- با مراجعه به کلیه نتایج به‌دست آمده از تحقیق اخیر، روش ژئوپلیمریزاسیون می‌تواند به‌عنوان یک تکنیک نو و کاربردی برای تثبیت بسترهای مارنی تبریز مطرح شده و مزایای این روش از لحاظ فنی و ملاحظات فنی و اقتصادی بسیار رضایت‌بخش می‌باشد.

۵- مراجع

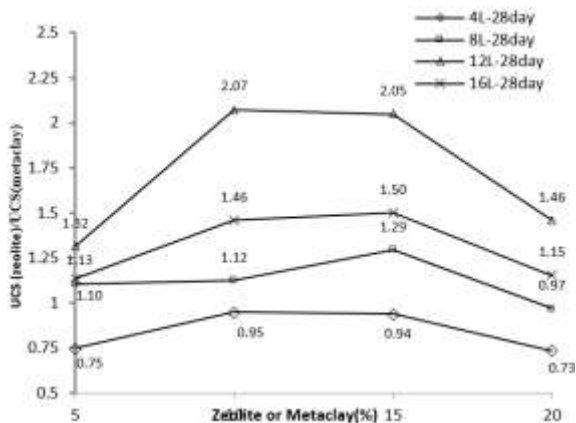
ماهوتی، کاتبی، ه. "طبقه‌بندی خاک‌های کربناته از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک (مطالعه موردی: خاک مارن‌دار شهر تبریز)"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷، ۴۸ (۳)، ۶۱-۷۳.

<https://doi.org/10.22034/CEEJ.2018.8240>
Abdullah HH, Shahin MA, Sarker P, "Use of fly-ash geopolymer incorporating ground granulated slag for stabilisation of kaolin clay cured at ambient temperature", Geotechnical and Geological engineering, 2018, 37(2), 721-740.

<https://doi.org/10.1007/s10706-018-0644-2>

به‌دلیل ناکافی بودن هیدروکسید موجود در محیط برای انحلال آلومینا سیلیکاتی زئولیت باشد.

با در نظر گرفتن تمامی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی و متارسی، مزیت عمده‌ای که برای تثبیت با تکنیک ژئوپلیمریزاسیون در مقایسه با سایر روش‌های قبلی (تثبیت با آهک، پوزولان‌های طبیعی و یا نانومواد) می‌توان مطرح نمود بالا بودن مقاومت فشاری نمونه‌ها در درصد‌های مشابه مواد افزودنی می‌باشد. به‌عنوان مثال در مقاله Bahadori و همکاران (۲۰۱۹) بیشترین مقاومت فشاری برای مارن تثبیت شده با ۱۵٪ توف (پوزولان طبیعی) حدود ۵ برابر مارن خالص گزارش شده، این درحالی است که برای نمونه ژئوپلیمری زئولیتی این نسبت افزایش مقاومت برای ۱۵٪ زئولیت حدود ۱۲ برابر است. این مسأله در مقایسه دو روش تثبیت برای تمامی درصد‌ها برقرار می‌باشد.



شکل ۱۵- تغییرات نسبت مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ژئوپلیمری ۲۸ روزه با درصد‌های مختلف زئولیت یا متارسی

با مراجعه به کلیه نتایج به‌دست آمده از تحقیق اخیر، روش ژئوپلیمریزاسیون می‌تواند به‌عنوان یک تکنیک نو و کاربردی برای تثبیت بسترهای مارنی تبریز مطرح شده و مزایای این روش از لحاظ فنی و ملاحظات فنی و اقتصادی بسیار رضایت‌بخش می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش ژئوپلیمریزاسیون برای تثبیت مارن سبز تبریز استفاده شده و اثر نوع ماده افزودنی حاوی آلومینا سیلیکا (زئولیت و یا متارسی)، اثر درصد وزنی ماده افزودنی، غلظت محلول بازی و زمان عمل‌آوری در کسب مقاومت فشاری نمونه‌ها ارزیابی شده است. عمده‌ترین نتایج به‌دست آمده به‌شرح زیر خلاصه شده است.

- در نمونه‌های ژئوپلیمری زئولیتی برای تمامی غلظت‌های

- <https://doi.org/10.1680/grim.900032>.
Davidovits J, "Geopolymers", *Journal of Thermal Analysis*, 1991, 37 (8), 1633-1656.
<https://doi.org/10.1007/BF01912193>.
Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ, "Geopolymer technology: the current state of the art", *Journal of Material Science*, 2007, 42, 2917-2933.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
Elert K, Nieto F, Azañón JM, "Effects of lime treatments on marls", *Applied Clay Science*, 2017, 135 611-619. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.047>
Ghadir P, Ranjbar N, "Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement", *Construction and Building Materials*, 2018, 188, 361-371.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>
Ghobadi MH, Abdilor Y, Babazadeh R, "Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73 (2), 611-619. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0563-7>
Horpibulsuk S, Phetchuay Ch, Chinkulkijniwat A, Cholaphatsorn A, "Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash", *Soils and Foundations*, 2013, 53 (4), 477-486.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.001>
Hooshmand A, Aminfar MH, Asghari E, Ahmadi H, "Mechanical and physical characterization of Tabriz Marls, Iran", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30 (1), 219-232.
<https://doi.org/10.1007/s10706-011-9464-3>
Khale D, Chaudhary R, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review", *Journal of Materials Science*, 2007, 42, 729-746.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
Lamas F, Irigaray C, Chacón J, "Geotechnical characterization of carbonate marls for construction of impermeable dam cores", *Engineering, Geology*, 2002, 66, 283-294.
[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00048-0)
Li C, Sun H, Li L, "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements", *Cement and Concrete Research*, 2010, 40, 1341-1349.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>
Liu Z, Cai C, Liu F, Fan F, "Feasibility Study of Loess Stabilization with Fly Ash-Based Geopolymer", *Journal of Material in Civil Engineering*, 2016, 28, 04016003.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001490](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001490).
Lodeiro IG, Palomo A, Fernández-Jiménez A, "An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders", In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 2015, Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands, 19-47.
<https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.19>.
Morsy MS, Alsayed SH, Salloum YA, Almusallam T, "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), 4333-4339.
<https://doi.org/10.1007/s13369-014-1093-8>
Abdullah HH, Shahin MA, Walske ML, "Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag", *Soils and Foundations*, 59(6), 1906-1920.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.08.005>
Abdullah HH, Shahin MA, Walske ML, Karrech A, "Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization", *Canadian Geotechnical Journal*, 2019(b), 57(9), 1-37.
<https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0215>
Abdullah HH, Shahin MA, Walske ML, "Review of fly-ash-based geopolymers for soil stabilisation with special reference to clay", *Geosciences*, 2020, 10 (7), 249. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070249>
Afrin HA, "A Review on different types soil stabilization techniques", *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 2017, 3 (2), 19-24. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0215>
Alipour R, Heshmati A, Karimiazar J, Esazadefar N, Asghari E, "Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina", *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*, 2022.
<https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00016>
Al-Mukhtar M, Khattab S, Alcover J-F, "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil", *Engineering Geology*, 2012, 139-140, 17-27.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>.
Azarafza M, Ghazifard A, Akgun H, Asghari-Kalajahi E, "Geotechnical characteristics and empirical geo-engineering relations of the South Pars Zone marls, Iran", *Geomechanics and Engineering*, 2019, 19 (5), 393-405.
<https://doi.org/10.12989/gae.2019.19.5.393>.
Bahadori H, Hasheminezhad A, Taghizadeh F, "Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31 (2), 04018363.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002577](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002577)
Buchwald A, Kaps Ch, "Peroperty controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay", *Geopolymer*, 2002, (Melbourn Australia).
Corrêa-Silva M, Araújo N, Cristelo N, Miranda T, Topa Gomes A, Coelho J, "Improvement of a clayey soil with alkali activated low-calcium fly ash for transport infrastructures applications", *Road Materials and Pavement Design*, 2019, 20 (8), 1912-1926.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1473286>
Cristelo N, Glendinning S, Fernandes LSG, Pinto AT, "Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation", *Construction and Building Materials*, 2012, 29, 167-174.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.049>.
Cristelo N, Teixeira Pinto A, Glendinning A, "Deep soft soil improvement by alkaline activation", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2011, 164(2), 73-82.

Zhang YS, "Research on structure formation mechanism and properties of high-performance geopolymers concrete", PhD Thesis, 2003, Southeast University, Nanjing.

Obuzor GN, Kinuthia JM, Robinson RB, "Soil stabilisation with lime-activated-GGBS-a mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains", *Engineering Geology*, 2012, 151, 112-139.

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.09.010>.

Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali S, "Alkali-activated binders: a review.Part 2. About materials and binders manufacture", *Construction and Building Materials*, 2008, 22 (7), 1315-1322.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019>.

Pera J, "Metakaolin and calcined clays", *Cement and Concrete Composites*, 2001, 23, 441-454.

[https://DOI:10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://DOI:10.1016/S0958-9465(00)00092-5).

Phetchuay C, Horpibulsuk S, Arulrajah A, Suksiripattanapong C, Udomchai A, "Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer", *Applied Clay Science*, 2016, 134-142.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.005>

Phummiphon I, Horpibulsuk S, Sukmak P, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A, Shen S, "Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer", *Road Materials and Pavement Design*, 2017, 17, 1-15.

<https://DOI:10.1080/14680629.2015.1132632>

Provis JL, Deventer JSJ, Van D, "Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications", CRC Press, 2009, Cambridge UK.

Rethinking Cement. Available online: <https://bze.org.au/research/manufacturing-industrial-processes/rethinking-cement/> (accessed on 29 May 2020).

Rios S, Ramos C, Viana da Fonseca A, Cruz N, Rodrigues C, "Colombian soil stabilized with geopolymers for low cost roads", *Procedia Engineering*, 2016, 143, 1392-1400.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.164>.

Singhi B, Laskar AI, Ahmed MA, "Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 41, 393-400. <https://DOI: 10.1007/s13369-015-1677-y>.

Ureña C, Azañón JM, Corpas FA, Salazar LM, Ramírez A, Rivas F, Mochón I, Sierra MJ, "Construcción de un terraplén con suelo estabilizado mediante el uso de agentes alternativos en la Autovía del Olivar", *Carreteras*, 2015, 203, 63-72.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.053>.

Yung-Ming L, Cheng-Yong H, Al Bakri M, Hussin K, "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review", *Progress in Materials Science*, 2016, 83, 595-629.

<https://DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>

Xu H, Van Deventer J, "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals", *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 59, 247-266.

[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5).

Zhang M, Guo H, El-Korchy T, Zhang G, Tao M, "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer", *Construction and Building Materials*, 2013, 47, 1468-1478.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>.

EXTENDED ABSTRACT

Improvement of Tabriz Green Marl Using Alkaline Activated Zeolite and Metaclay

Afshin Dibamehr, Fariba Behrouz Sarand*, Ramin Vafaiepour sorkhabi

Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

Received: 08 January 2023; **Review:** 11 March 2023; **Accepted:** 12 March 2023

Keywords:

Stabilization, Green Marl, Geopolymerization, Zeolite, Metaclay.

1. Introduction

Marl or marl clays are named for carbonated soils with the amount of carbonate in varying proportions from 20 to 55% (Elert et al., 2017). Marls are one of the most important problematic soils that not only the problem of volume changes but also their bearing capacity is lower than coarse-grained beds, so not meet the load-bearing goals of engineering structures. Different improvement methods are proposed to improve the engineering characteristics of problematic soils, the most common is using of lime for this purpose in clayey soils (Al-Mukhtar et al., 2012 and Obuzor et al., 2012) But this substance is less effective in marls (Ghobadi et al., 2014 and Ureña et al., 2015). According to the history of soil modification, the geopolymerization method can be introduced as the third generation of cementation methods after lime and cement (Li et al., 2010). Geopolymers are alkaline activated bonds with low calcium and medium to high aluminum produced by the reaction between alkaline hydroxide solution and materials containing alumina silicate (Provis et al., 2009 and Yung-Ming et al., 2016).

The purpose of this research is using the geopolymerization technique to stabilize Tabriz carbonate clay with the approach of controlling deformations and increasing strength. To achieve this outcome, laboratory studies have been carried out on Tabriz green marl with alkali activated zeolite and metaclay as sources of alumina silicate to form cemented bonds. The alkali activator used in this study is sodium hydroxide with different concentrations to achieve optimal results. For this purpose, multiple tests of uniaxial compressive strength have been used to evaluate the strength of stabilized soil. The effective parameters studied in the current research can be referred to the weight percentages of materials containing alumina silicate (zeolite and metaclay), curing time and molarity of the alkaline solution (NaOH)

2. Methodology

2.1. The soil studied

The clay soil (green marl) studied in present article was taken from a depth of 1-2 meters in Nasr region, located in the northeast of Tabriz city. According to the unified classification, this soil is placed in the category of clay with high plasticity properties (CH). The natural zeolite and metaclay used were obtained from the zeolite mine of Amirabad and the process of self-calcination of carbonate clay (green marl), respectively. Also sodium hydroxide has been chosen as an alkali activator because of its cheapness and having a higher efficiency in separating silica and alumina monomers (Zhang, 2003). The initial form of NaOH is prepared in the form of flakes and by dissolving in distilled water with different weight percentages based on the required molarity (M), it becomes a base activator solution.

* Fariba Behrouz Sarand

E-mail addresses: afdibamehr@gmail.com (Afshin Dibamehr), sarand@iaut.ac.ir (Fariba Behrouz Sarand), raminvafaei@yahoo.com (Ramin Vafaiepour sorkhabi).

2.2. Preparation of samples and tests

In this study, two series of experiments for determining uniaxial compressive strength have been carried out to investigate the effect of factors such as additives types, percentage of additive, molarity of alkali activator and curing time according to Table 1.

Table 1. Summary of the test program

Equation	Unit	First series	Second series
Zeolit (Z)	%	5,10,15,20	0
Metaclay (M)	%	0	5,10,15,20
Alkali activator (L)	M	4,8,12,16	4,8,12,16
Curing time	day	3,7,14,28	3,7,14,28

To make geopolymer samples, the green marl soil passed through sieve No. 40 with an additive containing silica alumina (zeolite or metaclay) in the desired percentage by weight is completely mixed in dry state for 5 minutes and then alkaline activator (L) in optimal moisture added to the ingredients and this mixture is stirred by a mixer for 5 minutes until a homogeneous texture is obtained. The composition is compacted inside a cylindrical mold in three layers until reaching the maximum dry weight. The manufactured samples are removed from the molds and placed inside the plastic covers and finally cured at the laboratory temperature ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) until the desired time.

3. Results and discussion

3.1. Uniaxial strength of zeolite geopolymer samples

According to the results obtained from the tests for all concentrations of the alkaline solution, the augmentation of zeolite up to 15%, the strength of the samples increased and the amount of zeolite 15% can be introduced as the optimal percentage. Also, for all amounts of zeolite, the concentration value of 12M is desirable. In this research, for the optimal geopolymeric sample (15Z, 12M and 28 days), the uniaxial strength was obtained $42\text{kg}/\text{cm}^2$, which is about 12 times the uniaxial strength of the pure green marl. On the other hand, the experiments show that in all molarities of activator, the resistance enhanced with the growth of the curing time, but in 12M and 16M, the role of time in obtaining the resistance is more remarkable. The minimum failure strain value of the sample was observed in 20% zeolite, in other words, keeping the alkaline solution magnitude constant and increasing the zeolite percentage leads to more brittle samples, so that the failure strain of the green marl is about 0.5%, but in the optimal geopolymer sample (15Z, 12M, 28day) this value has been reduced to 0.4%.

3.2. Uniaxial strength of metaclay geopolymer samples

In geopolymers made on activated metaclay, with enhancement of this element, the resistance of the samples has increased for all magnitude of alkaline solution and at all curing times so it is not possible to introduce the optimal percentage for metaclay like zeolite. On the other hand, for all molarities of alkali activator and metaclay, curing time acted as a positive parameter so that the passage of time has positive affect on the resistance in all samples, but the rate of resistance change for all conditions is not constant. By comparing the results of all tests, it is concluded that the behavior of zeolitic and metaclayey geopolymeric improved soils in obtaining resistance to time is not completely similar. By referring to the previous studies, the reason for this difference can be stated that the time required for forming a continuous gel from the supersaturated aluminosilicate solution, significantly varies with the processing conditions of the raw materials (in this research, zeolite or metaclay), the solution composition and synthesis procedure (Duxson et al., 2007). For all values of metaclays, like the zeolitic geopolymers, the 12M of activator was considered as the optimal, but in metaclayey geopolymer samples, the unconfined compression strength went up slightly by increment of the alkaline molarity from 12M to 16 M.

Fig. 1 is presented to compare the uniaxial compressive strength of zeolite and metaclay geopolymer samples in different concentrations of alkaline solution during 28 days of curing. As it can be deduced from this graph, at the 12 M activator, the biggest difference between the ratio of compressive strength of zeolite geopolymer to metaclay is seen so that varies between 1.32 to 2.07. On the other hand, for the 4M alkaline solution, the compressive strength of the zeolite geopolymer samples is lower the metaclay ones due to the insufficiency of the hydroxide in the environment to dissolve the alumina silica of the zeolite.

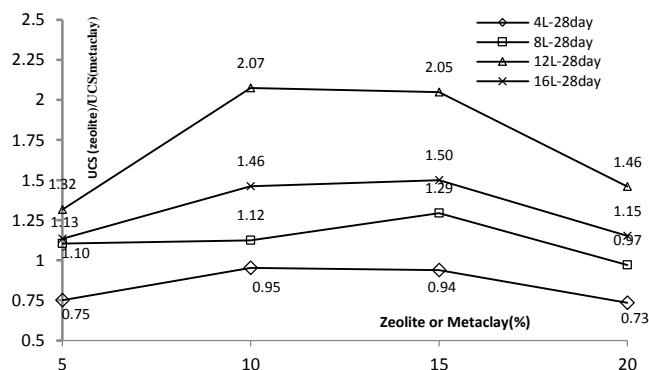


Fig. 1. Changes in the uniaxial strength ratio of 28-day geopolymers with different percentages of zeolite or metaclay

4. Conclusions

- 1) In zeolite geopolymeric samples, zeolite amount of 15%, alkaline solution concentration equal to 12 M can be introduced as optimal values.
- 2) In metaclay geopolymeric samples, with the increment of additive, the strength of the samples increased and the optimal weight value was not obtained.
- 3) In the metaclay geopolymeric samples for all magnitudes of this material, the activator concentration value of 12 M is considered as the optimal, and the resistance of the samples decrease with the growth of the alkaline solution molarity.
- 4) By enhancement of zeolite or metaclay, the failure strain of the samples reduces, in other words, keeping the alkaline solution magnitude constant and increasing the zeolite or metaclay leads to making more brittle geopolymeric samples.
- 5) In zeolite and metaclay geopolymeric samples for all alkali activator molarities and in all amount of additive, the curing time acted as a positive parameter but resistance change rate for all conditions compared to time is not fixed.
- 6) At concentrations above 4M of alkaline solution for all weight percentages of zeolite or metaclay, the uniaxial strength of zeolite geopolymeric samples is higher than that of metaclay ones.

5. References

- Afrin HA, "A Review on different types soil stabilization techniques", *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 2017, 3 (2), 19-24. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0215>
- Al-Mukhtar M, Khattab S, Alcover J-F, "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil", *Engineering Geology*, 2012, 139-140, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>.
- Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ, "Geopolymer technology: the current state of the art", *Journal of Material Science*, 2007, 42, 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Elert K, Nieto F, Azañón JM, "Effects of lime treatments on marls", *Applied Clay Science*, 2017, 135 611-619. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.047>
- Ghobadi MH, Abdilor Y, Babazadeh R, "Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73 (2), 611-619. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0563-7>
- Li C, Sun H, Li L, "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements", *Cement and Concrete Research*, 2010, 40, 1341-1349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>.
- Obuzor GN, Kinuthia JM, Robinson RB, "Soil stabilisation with lime-activated-GGBS-a mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains", *Engineering Geology*, 2012, 151, 112-139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.09.010>.
- Provis JL, Deventer JSJ, Van D, "Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications", CRC Press, 2009, Cambridge UK.
- Ureña C, Azañón JM, Corpas FA, Salazar LM, Ramírez A, Rivas F, Mochón I, Sierra MJ, "Construcción de un terraplén con suelo estabilizado mediante el uso de agentes alternativos en la Autovía del Olivar", *Carreteras*, 2015, 203, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.053>.

Yung-Ming L, Cheng-Yong H, Al Bakri M, Hussin K, "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review", *Progress in Materials Science*, 2016, 83, 595-629. [https://DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002)

Zhang YS, "Research on structure formation mechanism and properties of high-performance geopolymer concrete", PhD Thesis, 2003, Southeast University, Nanjing.