

اصلاح پارامترهای تحکیمی خاکهای مارنی با استفاده از مکانیسم ژئوپلیمریزاسیون (مطالعه موردی: مارن تبریز)

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

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

چکیده

به فرایند تشکیل پیوندهای سیمانته آلومینو سیلیکاتی در حضور فعال کننده بازی ژئوپلیمریزاسیون اطلاق می گردد. در پژوهش حاضر کاربرد روش فوق برای اصلاح ضرایب تحکیمی خاک مارن زرد و سبز بستر تبریز مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور در تهیه نمونه ها ژئولیت و متارس بصورت جداگانه بعنوان منابع آلومینا سیلیکات و محلول هیدروکسید سدیم بعنوان فعال کننده بازی بکار رفته و اثر نوع مارن، درصد وزنی ژئولیت و متارس، غلظت فعال کننده بازی و زمان عمل آوری بر روی رفتار تحکیمی نمونه ها بررسی شده است. نتایج آزمایشات حاکی از تاثیر بالای ژئوپلیمریزاسیون در اصلاح مشخصات تحکیمی مارنها بوده و ترکیب بهینه برای نمونه ها بدست آمده است. در نمونه های بهینه ژئوپلیمری ژئولیتی با مارن زرد و یا سبز (۱۵٪ ژئولیت، غلظت ۱۲ مولار محلول بازی) ضرایب C_c و C_s حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد اصلاح شده و این کاهش در نمونه های بهینه ژئوپلیمری متارس با مارن زرد و سبز کمتر می باشد. با مقایسه تمامی نتایج میتوان گفت که ژئولیت در مقایسه با متارس منبع آلومینا سیلیکات مناسبتری برای هدف مورد نظر این تحقیق بوده و از طرفی میزان اصلاح ضرایب تحکیمی نمونه های ژئوپلیمری مارن زرد بیشتر از نمونه های مشابه حاوی مارن سبز می باشد.

کلید واژه ها: مارن تبریز، ژئوپلیمریزاسیون، ژئولیت، متارس، آزمایش تحکیم

۱. دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲. عضو هیات علمی، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران sarand@iaut.ac.ir

۳. عضو هیات علمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

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 et al., 2017) البته بازه فوق توسط پتیجان (Pettijohn, 1975) بین ۳۵ تا ۶۵ درصد تعریف شده‌است. مارن‌ها با توجه به روشهای معمول طبقه‌بندی موجود عموماً در رده رس‌ها و یا سیلت‌ها قرار می‌گیرند و حضور کربنات در این نوع خاکها در رده‌بندی آنها مد نظر قرار نمی‌گیرد این درحالیست که وجود کربنات در ساختار مارنها تاثیر قابل‌توجهی در رفتار آنها دارد و مشخصات ژئوتکنیکی این نوع خاکها تابع مقدار کربنات موجود در آنهاست (Lamas et al., 2002, Elert et al., 2017). خاکهای رسی بعلت دارا بودن پتانسیل تغییر حجم در اثر تغییرات رطوبتی جزء یکی از مهمترین انواع خاکهای مسأله‌دار محسوب می‌شوند. فرایند تورم و انقباض رس‌ها منجر به آسیب‌رسانی به بسیاری از سازه‌های مهندسی از قبیل روسازی جاده‌ها و پیاده‌روها، فونداسیون ساختمانها، لوله‌های مدفون، کانالهای انتقال آب و ... شده و حتی در برخی مواقع نشست‌های نامساوی گسیختگی و تخریب را بدنبال دارد (Wray et al., 2005, Kalantari, 2012, Nelson et al., 1992). خاکهای مارنی نیز از این مسأله مستثنی نیستند. تثبیت معمول‌ترین تکنیک برای بهبود مشخصات مکانیکی خاکهای مسأله‌دار بوده و در رس‌ها استفاده از آهک برای اصلاح ضعفهای آن در طول سالیان متمادی بسیار رایج می‌باشد (Al-Obuzor et al., 2012, Mukhtar et al., 2012). در برخی از خاکهای رسی که حاوی مقادیر کافی Si و Al برای انجام واکنش پوزولانی نیستند این یونها باید از طریق ماده تثبیت‌کننده به محیط اضافه شود. یکی از معمول‌ترین این مصالح سیمان پرتلند (رایج‌ترین تثبیت‌کننده بعد از آهک) می‌باشد. استفاده از ریز شمع و تزریق دوغاب سیمانی از این طریق به زیر فونداسیونهای موجود به منظور بهسازی بستر یک رویکرد از کاربرد سیمان در بهسازی خاکهای رسی می‌باشد (عالی

پور و همکاران، ۱۴۰۱). هم‌چنین از اختلاط سیمان با خاک رسی ضعیف بصورت روش اختلاط عمیق بعنوان روشی برای اصلاح مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی مسأله‌دار استفاده شده‌است (Pakbaz and Alipour, 2012). میزان بهبود مشخصات مکانیکی خاکهای رسی تثبیت شده به مقدار و غلظت ماده تثبیت‌کننده، کانی خاک، اندازه و شکل دانه‌ها و شرایط عمل‌آوری بستگی دارد (Goktepe et al., 2005, Misra et al., 2008). با وجود اینکه تثبیت با آهک در طول سالیان متمادی بصورت موفق در خاکهای رسی بکار گرفته شده ولی مطالعات اخیر گزارش از عدم تاثیر بلند مدت آن در خاکهای مارنی می‌دهد. بر اساس نتایج کارهای مطالعاتی انجام شده تفاوت واضحی بین مشخصات مکانیکی کوتاه مدت و بلند مدت مارنهای بهسازی شده با آهک در مقایسه با رس‌های اصلاح شده با آهک مشاهده شده‌است. در بررسی‌های انجام شده این نتیجه حاصل شده‌است که تثبیت با آهک در مارنها نسبت به انواع دیگر خاکهای رسی تاثیر کمتری داشته و برای دستیابی به مشخصات مکانیکی مناسب در این نوع خاکها باید درصد آهک بیشتری مورد استفاده قرار گیرد (Ghobadi et al., 2014 و Ureña et al., 2015). در پاسخ به شبهات مطرح شده در مورد اثربخشی طولانی مدت تثبیت با آهک، افزودنی‌های جایگزین برای تثبیت مارن در سالهای اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است (Guney et al., 2007, Ureña et al., 2015). امروزه بصورت محدود علاوه بر آهک یا سیمان پرتلند، انواع محصولات جانبی صنعتی و مواد زائد حاوی اکسیدهای موثر در واکنش‌های پوزولانی به عنوان تثبیت‌کننده خاک استفاده می‌شوند. این محصولات نظیر خاکستر بادی (Yarbasi et al., 2007, Bahadori et al., 2019), MgO (Bahadori et al., 2007), خاکستر و مواد ناشی از سوزاندن ضایعات گیاهی (Behak and Perez, 2008) به تنهایی و یا بصورت ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تثبیت خاکهای رسی از جمله مارنها با نانو مواد نیز یک رویکرد دیگر برای اصلاح

محصولات ژئوپلیمری می‌توانند دارای بازه گسترده ای از مشخصات از جمله مقاومت فشاری بالا، تغییر شکل پذیری پایین، مقاومت در برابر اسید، مقاومت در برابر آتش سوزی و انتقال پذیری حرارت کم باشند (Duxson et al., 2007). مکانیسم ژئوپلیمرها شامل واکنش تراکمی پیش ماده ژئوپلیمری مانند اکسید آلومینا سیلیکات با پلی سیلاتهای قلیایی با پیوند Si-O-Al پلیمری می‌شود که دارای فرمول تجربی (۱) می‌باشد:



که در آن M، کاتیون (K^+ ، Na^+ یا Ca^{++})، n درجه پلیمری و Z برابر با نسبت مولار Si/Al می‌باشد که در محدوده ۱ تا ۱۵ و یا ۱ تا ۳۲ می‌تواند قرار بگیرد (2007, Khale and Chaudhary, Zhang et al., 2013). در واقع ژئوپلیمریزاسیون بر مبنای پیوندهای غیر آلی فعال شده بازی استوار است. بسته به مقدار z، ژئوپلیمر می‌تواند یکی از چندین سیستم اصلی را بخود بگیرد (Davidovits, 2008)، بطوریکه برای $z > 3$ یک ژئوپلیمر انعطاف پذیر از یک شبکه دوبعدی متصل خطی تولید می‌شود و در شرایط $z < 3$ محصول سیمانی شکننده از یک اتصال متقاطع بصورت شبکه سه بعدی مناسب برای تثبیت خاک حاصل می‌گردد (Zhang et al., 2013). اگرچه استفاده از ژئوپلیمرها در دهه های اخیر بعلاوه مقاومت و کارایی بالا و هم چنین مقبولیت محیط زیستی، مورد توجه صناعی همچون ساخت سرامیک، کاشی و نیز تولید بتن قرار گرفته ولی کاربرد این تکنیک در مهندسی ژئوتکنیک بسیار نوپا بوده و نیاز به مطالعات گسترده تر دارد (Phetchuay et al., 2016). البته با مراجعه به منابع فنی موجود می‌توان به مقالاتی که در آنها به بررسی اصلاح خاک های مساله دار از جمله رسها با استفاده از ژئوپلیمرها پرداخته شده است دست یافت (Ghadir and Ranjbar, 2018), Abdullah et al., 2018, Liu et al., 2019(a), Zhang et al., 2013, al., 2016, Abdullah et al., 2019(b), Cristelo et al., 2011).

با توجه به تاریخچه مطالعات انجام شده می‌توان گفت که تا به امروز روش ژئوپلیمریزاسیون برای بهسازی خاکهای

مشخصات این نوع خاکها مطرح می‌باشد، Alipour et al., (2022).

در شرایط کنونی این مساله در جهان پذیرفته شده است که پیوند دهنده های جدیدی برای جایگزینی سیمان پرتلند (OPC) برای بهبود عملکرد محیطی و دوام مورد نیاز است. تلاش برای کاهش انتشار دی اکسید کربن از یک طرف و از طرف دیگر مواجهه با این واقعیت که سازه های OPC که چند دهه پیش ساخته شده اند، در حال حاضر با مشکلات تخریب روبرو هستند، نشان دهنده نقص های پیوند دهنده های OPC است. با مراجعه به تاریخچه موجود تعداد موارد پیش از موعد تخریب سازه های OPC بسیار زیاد است (Mehta, 1991, Gjorv, 1994). یک نوع از این پیوند دهنده های جدید مطرح شده پیوند دهنده های بازی فعال شده می‌باشند که کارهای تحقیقاتی انجام شده تاکنون حاکی از این حقیقت است که این پیونددهنده جدید احتمالاً پتانسیل بسیار زیادی برای تبدیل شدن به جایگزینی برای سیمان پرتلند دارد (Pacheco-Torgal et al., 2008).

محقق فرانسوی به نام دویدویتز در سال ۱۹۷۸ (Davidovits, 1978) پیوندهای به دست آمده از فعال سازی قلیایی متاکائولین را ساخته و ثبت اختراع کرد و این نوع پیوندها را «ژئوپلیمر» نامگذاری کرد. پس از آن تحقیقات در این زمینه افزایش نمایی داشته است. از نظر دویدویتز، ژئوپلیمرها پلیمر هستند زیرا در دمای پایین تبدیل، پلیمریزه و سخت می‌شوند و از طرفی ژئوپلیمر هستند زیرا غیر آلی، سخت و پایدار در دمای بالا و همچنین غیر قابل اشتعال می‌باشند (Davidovits, 1991).

در واقع 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 (معمولاً متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره کوره و یا پوزولان های طبیعی) تولید می‌شوند (Provis et al., 2009) و (Yung-Ming et al., 2016). بسته به انتخاب نوع مصالح مبنای حاوی آلومینا سیلیکا و همچنین شرایط واکنش،

آلومیناسیلیکات (ژئولیت و متارس)، غلظت محلول بازی مورد استفاده (NaOH) و زمان عمل آوری اشاره نمود. با توجه به توضیحات ارائه شده در صورت بدست آوردن نتایج مناسب، روش ژئوپلیمریزاسیون می‌تواند بعنوان یک روش نوین برای بهسازی رفتار تحکیمی خاکهای مارنی بکار برده شود.

۲. مواد و روش‌ها

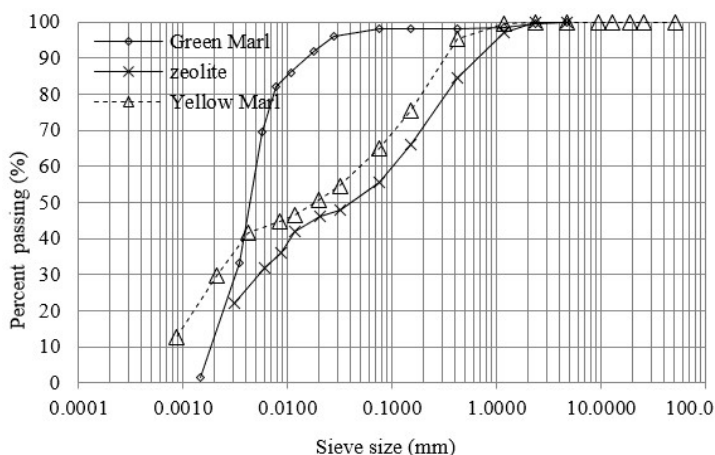
۲-۱- خاک مورد مطالعه

خاک مبنای مورد مطالعه (مارن زرد و سبز) در مقاله اخیر از عمق ۱-۲ متری منطقه نصر واقع در شمال شرق شهر تبریز تهیه شده است. بر اساس مطالعات انجام شده توسط ماهوتی و کاتبی در سال ۱۳۷۳ در نمونه‌های متعدد مارن تبریز، مقدار کربنات کلسیم در نمونه‌های مختلف در بازه ۱۰ تا ۳۵ درصد با روشهای مختلف اندازه گیری شده است. تصاویر مربوط به موقعیت جغرافیایی محل نمونه برداری و نمونه‌های استحصالی از حفاریهای انجام یافته در شکل ۱ (الف و ب) آورده شده است. بر اساس طبقه بندی متحد مارنهای زرد و سبز به ترتیب در رده رس با خاصیت خمیری پایین (CL) و رس با خاصیت خمیری بالا (CH) قرار می‌گیرند. برخی از مشخصات اولیه مارنهای مورد مطالعه در جدول ۱ و توزیع دانه بندی آنها در شکل ۲ آورده شده است. نتایج تحلیل طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) خاکهای مورد نظر نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

رسی استفاده شده و عموماً خاکستر بادی و یا متاکائولن بعنوان منبع آلومینا سیلیکا بکار رفته است. در پژوهش حاضر تلاش شده است که از منابع موجود در طبیعت همانند ژئولیت و هم چنین خود خاک مساله دار بصورت حرارت دیده (متارس) بعنوان ماده افزودنی استفاده شود و از طرفی تا امروز پژوهشی بر روی اصلاح خاکهای رسی کربناته (مارن زرد و یا سبز) به روش مذکور انجام نشده است. مارنهای تبریز رسوبات کربناته دریاچه‌ای هستند که در نواحی شرقی، شمالی و جنوبی شهر برونزد داشته، در بیشتر نواحی شهر تشکیل دهنده سنگ بستر بوده و در زیر رسوبات آبرفتی قرار دارند. این مارنها به رنگهای مختلفی از جمله زرد، زیتونی (سبز)، قهوه‌ای (به ندرت) و خاکستری دیده میشوند که لایه های زرد و زیتونی در سطح و قهوه‌ای و خاکستری در عمق قرار دارند. این نوع خاکها استعداد هوازدگی زیادی دارند و هرچه از سطح به عمق حرکت شود وضعیت آنها از لحاظ استقامت بهتر میگردد (ماهوتی و کاتبی، ۱۳۷۳). از آنجا که این نوع رسها جزء خاکهای مساله دار محسوب شده و در اثر تغییرات رطوبتی قابلیت تغییر حجم قابل توجهی داشته و بافت عظیمی از بستر شهر تبریز را نیز تشکیل می‌دهند مارنهای زرد و سبز بعنوان خاک مبنا در آزمایشات انتخاب شده‌اند. برای ارزیابی رفتار تغییر شکلی نمونه‌ها قبل و بعد از تثبیت از آزمایشات متعدد تحکیم استفاده شده است. از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار مورد مطالعه در تحقیق حاضر می‌توان به نوع خاک مارن مبنا (زرد یا سبز)، درصدهای وزنی مصالح حاوی



شکل ۱. تهیه نمونه‌ها، الف. موقعیت جغرافیایی محل نمونه برداری ب. نمونه‌های تهیه شده از منطقه نصر تبریز ج. مارن زرد د. مارن سبز ر. نمونه‌های ساخته شده در حال عمل آوری



شکل ۲. توزیع دانه بندی خاک مارن زرد، سبز و ژئولیت

جدول ۱. مشخصات فیزیکی نمونه‌های مارن زرد و سبز

| Green Marl | Yellow Marl | Specifications |
|------------|-------------|------------------------|
| 58 | 32 | Liquid Limit (LL)% |
| 28 | 17 | Plastic Limit (PL)% |
| 30 | 15 | Plasticity Index (PI)% |
| 2.58 | 2.61 | Specific Gravity (Gs) |

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی نمونه‌های مارن زرد، سبز و ژئولیت

| P ₂ O ₅ | MnO% | TiO ₂ % | K ₂ O% | Na ₂ O% | MgO% | CaO% | Fe ₂ O ₃ % | Al ₂ O ₃ % | SiO ₂ % | Title |
|-------------------------------|-------|--------------------|-------------------|--------------------|------|------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------|
| 0.175 | 0.06 | 0.559 | 1.44 | 1.13 | 8.81 | 18.3 | 3.35 | 9.51 | 40.08 | Yellow Marl |
| 0.121 | 0.076 | 0.73 | 2.74 | 1.06 | 4.23 | 8.09 | 5.01 | 14.1 | 50.35 | Green Marl |
| 0.015 | 0.022 | 0.234 | 1.72 | 2.87 | 1.08 | 1.54 | 1.76 | 11.25 | 65.78 | Zeolite |

می‌شوند. این فرایند برای ایجاد تجزیه گرمایی، حذف فازهای ناپایدار و یا انتقال فاز انجام می‌شود (Pera, 2001). در این پژوهش برای نیل به این هدف نمونه‌های مورد نظر بعد از عبور دادن از الک شماره ۴۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شده که با توجه به توضیحات داده شده فوق ساختار کریستالی ماده شکسته شده و یک ماده با فاز بی شکل با ذخیره انرژی و فعالیت بالا حاصل شده است.

۲-۴- فعال‌کننده بازی (L)

معمول ترین فعال‌کننده‌های بازی مورد استفاده در فرایند ژئوپلیمریزاسیون هیدروکسید سدیم (NaOH)، سیلیکات سدیم و هیدروکسید پتاسیم (KOH) گزارش شده است

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 ۲ و جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۳- متارس (M)

متارس بکار رفته در مطالعه اخیر از فرآیند کلسینه کردن خود رس کربناته (نمونه مارنهای زرد و سبز) بدست 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

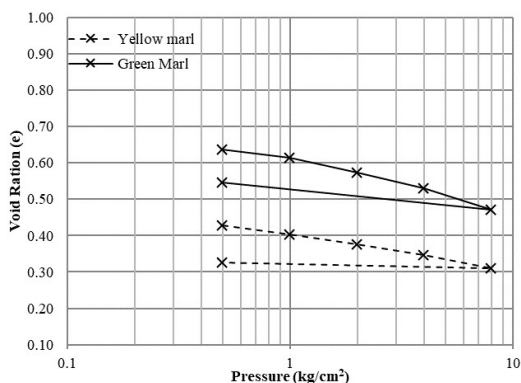
فعال‌کننده بازی و زمان عمل‌آوری بر روی مارن زرد و سبز بصورت جداگانه مطابق جدول ۳ برنامه ریزی و انجام شده‌است.

برای ساخت نمونه‌های بازسازی شده از قالب استاندارد دستگاه تحکیم که بصورت رینگ با قطر ۲ اینچ و ارتفاع حدود ۲۰ میلی‌متر می‌باشد استفاده شده‌است. نمونه‌های مورد آزمایش مطابق شرایط ارائه شده در جدول ۳ و در درصد رطوبت بهینه خاک مینا (۱۴٪ برای مارن زرد و ۲۲٪ برای مارن سبز) که از آزمایش تراکم استاندارد حاصل شده‌است ساخته شده‌است. نمودار مربوط به آزمایش تراکم انجام شده بر روی نمونه مارنهای مورد نظر در شکل ۳ ارائه شده‌است.

جدول ۳. برنامه آزمایشات

| Secend Series | First Series | Unite | Title |
|---------------|--------------|-------|------------------------------------|
| - | 5,10,15,20 | % | Yellow Marl (Y) or Green Marl |
| 5,10,15,20 | - | % | Zeolite (Z) |
| 4,6,12,16 | 4,6,12,16 | M | Metaclay (M) |
| 3,14 | 3,14 | day | alkaline activator (L) curing time |

زرد بیشتر بوده و مقادیر ضریب فشردگی (Cc) مارن سبز و زرد به ترتیب ۰/۱۹۲ و ۰/۱۲۱ و ضریب تورمی (Cs) آنها به ترتیب ۰/۰۶۲ و ۰/۰۱۴ بدست آمده‌است.



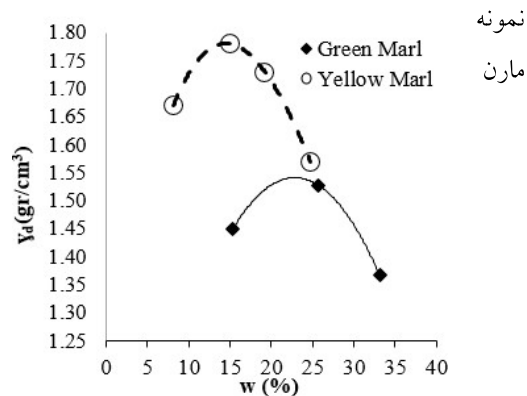
شکل ۳. نتایج آزمایش تراکم استاندارد خاک مارن (ASTMD698-12)

(Morsy, et al., 2014). در مطالعه حاضر هیدروکسید سدیم بعلت ارزانتر بودن و هم چنین کارایی بالاتر در جداسازی مونومرهای سیلیکا و آلومینا بعنوان فعال‌کننده بازی انتخاب شده‌است (Zhang et al., 2013). شکل اولیه NaOH تهیه شده بصورت پولکی بوده و با حل کردن در آب مقطر با درصدهای وزنی مختلف بر اساس غلظت مورد نیاز (M) بصورت محلول فعال‌کننده بازی در می‌آید.

۵-۲-تهیه نمونه و آزمایشات

در این تحقیق دو سری آزمایشات تحکیم مطابق استاندارد ASTM D2435-04 برای بررسی اثر عواملی همچون نوع ماده افزودنی، درصد ماده افزودنی، غلظت

جهت مقایسه نتایج، نمونه‌های بازسازی شده مارن زرد و سبز در رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه بدون مواد افزودنی تهیه شده و تحت آزمایش تحکیم قرار گرفته‌اند که نمودارهای حاصل از این آزمایشات در شکل ۴ ارائه شده‌است. همانطور که از این نمودارها قابل مشاهده می‌باشد در شروع آزمایش نسبت تخلخل اولیه نمونه مارن سبز از



شکل ۴. رفتار نمونه‌های مارن بازسازی شده در آزمایش

برای ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری، نمونه خاکهای مارن زرد و سبز عبوری از الک شماره ۴۰ (هر کدام بصورت جداگانه) با ماده افزودنی حاوی آلومینا سیلیکا (ژئولیت و یا متارس) در درصدهای وزنی مورد نظر بصورت خشک به مدت ۵ دقیقه کاملاً مخلوط شده و سپس فعال‌کننده بازی (L) با مولاریته مشخص و در درصد رطوبت بهینه به مواد اضافه شده و این مخلوط توسط همزن تا جایی به هم زده شد که یک بافت همگن حاصل گردید. زمان مورد نیاز برای رسیدن به بافت مورد نظر در حدود ۵ دقیقه است. ترکیب بدست آمده در داخل رینگ تحکیم در سه لایه تا رسیدن به وزن مخصوص خشک بیشینه متراکم گردید. نمونه‌های ساخته شده از قالبها خارج شده و داخل پوششهای پلاستیکی قرار گرفته و در دمای آزمایشگاهی (25 ± 2) تا زمان مورد نظر (۳ و یا ۱۴ روز) عمل‌آوری گردیده است (Phetchuay et al., 2016, Khan et al., 2018).

۳. نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایشات تحکیم نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی

در شکل ۵ نتایج آزمایشات تحکیم نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن زرد آورده شده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شده است نمونه‌های مختلف مطابق با برنامه آزمایشات ارائه شده در جدول ۳ ساخته شده و بعد از عمل‌آوری در بازه زمانی مورد نظر تحت آزمایش تحکیم قرار گرفته‌اند. جهت ایجاد امکان مقایسه، نمونه‌های ساخته شده با درصدهای ژئولیت مختلف و با غلظت محلول بازی ثابت و در زمان عمل‌آوری مشخص بصورت یکجا نشان داده شده است. به منظور بررسی تاثیر تغییرات درصد ژئولیت، غلظت فعال‌کننده بازی و زمانهای عمل‌آوری بر روی رفتار تحکیمی مارن زرد تثبیت شده، نمودار مربوط به تغییرات ضرایب فشردگی (Cc) و تورمی (Cs) نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی در شکل ۶ آورده شده است.

تحکیم

همانطور که از نمودار شکل ۶ قابل استنباط است در تمامی نمونه‌های ژئوپلیمری مارن زرد برای تمامی غلظتهای محلول بازی با افزایش درصد وزنی ژئولیت تا ۱۵٪، ضرایب فشردگی و تورمی نمونه‌ها کاهش یافته و مقدار ژئولیت ۱۵٪ را می‌توان بعنوان درصد بهینه معرفی نمود. از طرفی در غلظت محلول بازی ۱۲ مولار نیز بیشترین کاهش در ضرایب حاصل شده و مقدار ضریب Cc از عدد ۰/۱۲ (در نمونه مارن زرد خاص) به ۰/۳۶۶ (در نمونه ژئوپلیمری مارن زرد با ۱۵٪ ژئولیت و غلظت ۱۲ مولار محلول بازی) و ضریب Cs از ۰/۱۴ به ۰/۰۳۵۲ بعد از ۱۴ روز (به ترتیب کاهشی در حدود ۷۰٪ و ۷۵٪ در ضرایب) رسیده است. از طرفی لازم به توضیح است که همانطور که در نمودارهای مربوط به شکل ۶ مشاهده می‌شود زمان نقش مثبت در بهبود مشخصات تحکیمی نمونه‌های ژئوپلیمری داشته و هر دو ضریب Cc و Cs در اثر عمل‌آوری روند کاهشی داشته‌اند. افزایش زمان عمل‌آوری منجر به تشکیل محصولات سمنتاسیون بیشتری در خاک اصلاح شده گردیده و این پدیده بهبود رفتار مکانیکی خاک ژئوپلیمری را بدنبال دارد (Phummiphan, et al., 2017). با وجود اینکه مقادیر Z، ۱۵٪ و M را بعنوان مقادیر بهینه در نمونه‌های اصلاح شده مارن زرد میتوان معرفی نمود ولی نتایج حاکی از کاهش بسیار چشمگیر مقدار ضریب فشردگی خاک در مقدار وزنی ۵٪ ژئولیت می‌باشد بطوریکه این پارامتر از مقدار ۰/۱۲ به ۰/۰۴۵ در غلظت محلول بازی ۱۲ مولار رسیده که این عدد برای اهداف مهندسی میتواند قابل قبول باشد. بعبارت دیگر در کارهای عملی مهندسی با درصد بسیار پایین ژئولیت نیز خاصیت تحکیم پذیری خاک قابل اصلاح می‌باشد. در خصوص تفسیر واکنش بوجود آمده در داخل نمونه‌ها که منجر به این تغییر رفتاری شده می‌توان چنین گفت که مقدار آلومینا سیلیکات موجود در ماده افزودنی (ژئولیت) تاثیر عمده ای در ایجاد سمنتاسیون در بافت نمونه اصلاح شده ژئوپلیمری دارد. افزایش مقدار ژئولیت فعال شده بازی بدلیل آزاد سازی بیشتر کانیهای سیلیکات و آلومینات

زرد در ترکیب بهینه بین ۷۰ تا ۸۰ درصد می‌باشد. تنها تفاوتی که در مقایسه رفتار نمونه‌های ژئوپلیمری مارن سبز و زرد مطابق شکل‌های ۶ و ۸ دیده می‌شود اثر کم رنگتر زمان عمل‌آوری در بهبود مشخصات تحکیمی نمونه‌های اصلاح شده مارن سبز در مقایسه با نمونه‌های مشابه ساخته شده با مارن زرد می‌باشد.

۳-۲- نتایج آزمایشات تحکیم نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی

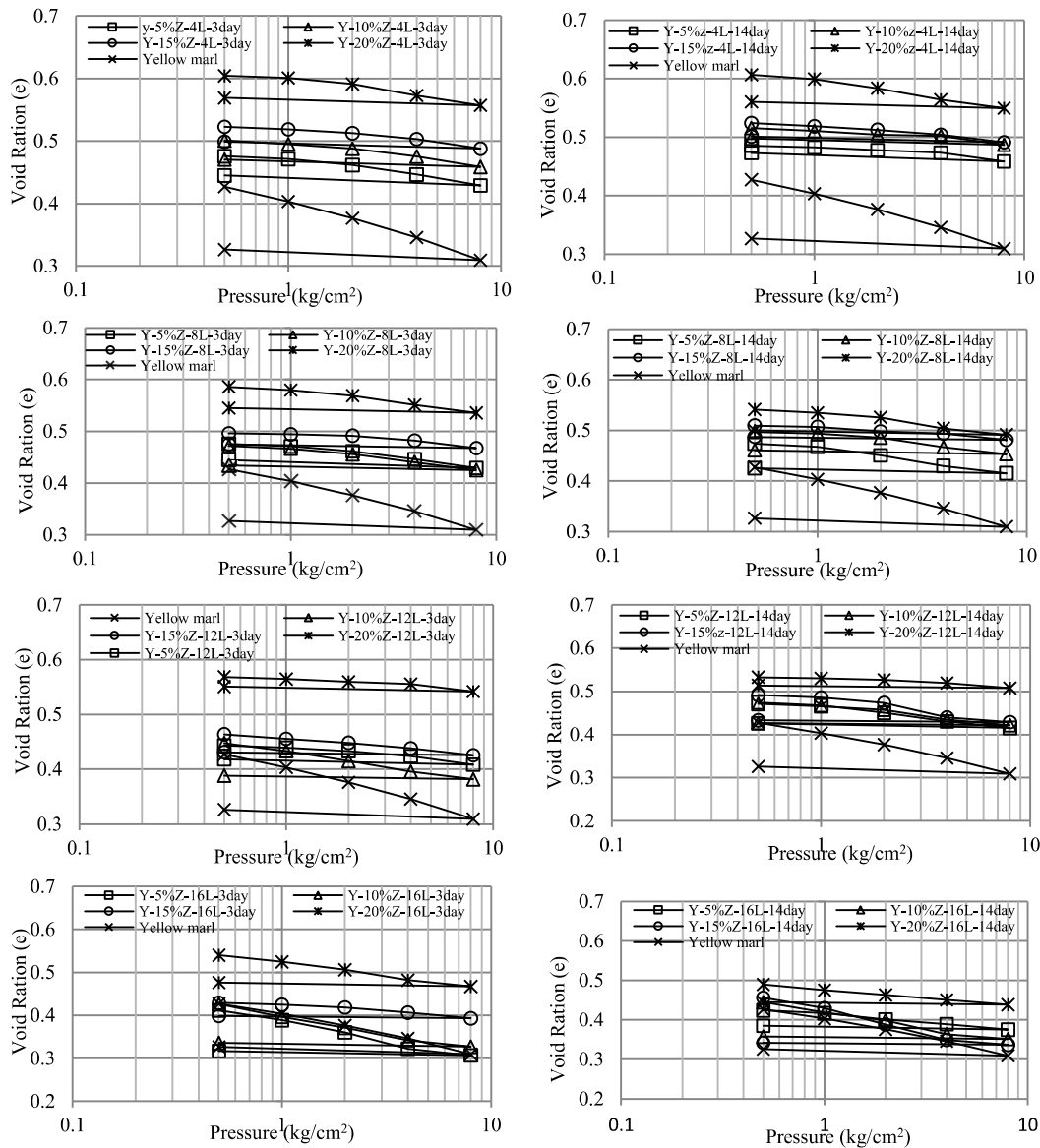
در اشکال ۹ و ۱۰ نتایج آزمایشات تحکیم نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی مارن زرد آورده شده است. نتایج بدست آمده از آزمایشات حاکی از تاثیر مثبت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون بر رفتار تغییر شکلی نمونه‌های اصلاح شده متارسی مارن زرد در غلظتهای پایین محلول بازی دارد. بهترین نتیجه در نمونه‌های با ۱۵٪ وزنی ژئولیت و غلظت ۴ مولار محلول بازی حاصل شده است ولی لازم به ذکر است که میزان تاثیر افزایش درصد متارسی بر اصلاح ضرایب فوق در مقایسه با ژئولیت کمتر است. همانطور که در هر دو نمودار تغییرات ضرایب C_c و C_s در شکل ۱۰ دیده می‌شود با افزایش غلظت محلول بازی هر دو ضریب روند افزایش دارند به نحوی که در غلظت ۱۶ مولار محلول بازی اصلاح ضرایب فوق اصلاً چشمگیر نیست. بر اساس اطلاعات ارائه شده در منابع فنی موجود، ارتباط قوی بین نسبت وزنی فعال‌کننده به منبع آلومیناسیلیکات و افزایش مشخصات مقاومتی و به تبع آن اصلاح مشخصات تغییر شکلی خاکهای بهسازی شده ژئوپلیمری وجود دارد. افزایش غلظت فعال‌کننده ممکن است منجر به افزایش شرایط بازی محیط واکنش (pH) شده و این مساله امکان تولید محصولات سمته را بهبود می‌بخشد (Abdullah et al., 2020). البته مطالعات موجود نشان می‌دهد که مقدار غلظت بالا ضرورتاً نمی‌تواند مقدار بهینه محسوب شود. این نتیجه توسط Cristelo و همکاران در سال ۲۰۱۲ (Cristelo et al., 2012) که محلول هیدروکسید سدیم با غلظتهای ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ مولار برای ساخت نمونه‌های تک محوری ژئوپلیمری بکار برده اند تایید شده است بطوریکه در بلند مدت نمونه‌های ساخته شده با غلظت ۱۲/۵ مولار مقاومت

منجر به ساخت محصولات سمته N-A-S-H (هیدرات سیلیکات آلومینات سدیم) در خاک بهسازی شده می‌گردد. این مطلب قبلاً توسط محققین دیگری که از خاکستر بادی بعنوان منبع آلومینا سیلیکات استفاده کرده‌اند نیز گزارش شده است (Phummiphan, et al., 2017). از طرفی هر اندازه مقدار محصولات سمته افزایش می‌یابد سطح پیوند بین دانه‌ها نیز افزایش یافته و این عامل منجر به افزایش مقاومت و همچنین کاهش خاصیت تغییر شکل پذیری (Liu et al., 2016, Abdullah et al., 2019(a)). البته تا به امروز بر اساس مطالعات انجام شده مقدار بهینه مشخصی برای منابع آلومینا سیلیکات در بهسازی خاکهای ژئوپلیمری گزارش نشده است (Abdullah et al., 2020). مطالعات انجام شده عموماً با تمرکز بر بررسی اثر فرآیند ژئوپلیمریزاسیون بر افزایش مقاومت می‌باشد و مطالعات محدودی به منظور تثبیت ژئوپلیمری نمونه‌ها جهت کنترل رفتار تحکیمی آنها انجام شده است که یکی از این مطالعات توسط خان و همکاران در سال ۲۰۱۸ (Khan et al., 2018) بر روی رس بسیار متورم شونده انجام شده و از خاکستر بادی بعنوان منبع آلومینا سیلیکات استفاده شده و نتایج حاکی از تاثیر قابل قبول این مکانیسم با هدف کنترل تورم می‌باشد. در شکل‌های ۷ و ۸ بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده نمودارهای مشابه برای نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن سبز نیز رسم شده است. به کمک این نمودارها براحتی می‌توان مشاهده نمود که همانند نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن زرد در نمونه‌های اصلاح شده مارن سبز نیز مقدار وزنی ۱۵٪ ژئولیت و غلظت ۱۲ مولار محلول بازی بعنوان مقادیر بهینه منبع آلومینات سیلیکات و غلظت محلول بازی بدست آمده است. در بهترین حالت نمونه ژئوپلیمری ژئولیتی مارن سبز (15%Z ، 12M ، 14day) مقادیر ضرایب C_c و C_s به ترتیب از مقادیر ۰/۱۹۲ و ۰/۰۶۲ (مارن سبز خالص) به ۰/۰۵۷ و ۰/۰۱۰۳ بهبود یافته که میزان کاهش این ضرایب به ترتیب در حدود ۷۴٪ و ۸۳٪ بدست آمده است. با توجه به نتایج حاصله میزان کاهش ضرایب فشردگی و تورم در هر دو نوع نمونه ژئوپلیمری مارن سبز و

منفی بر واکنش ژئوپلیمری می‌گذارد (Xu and Van Deventer, 2000).

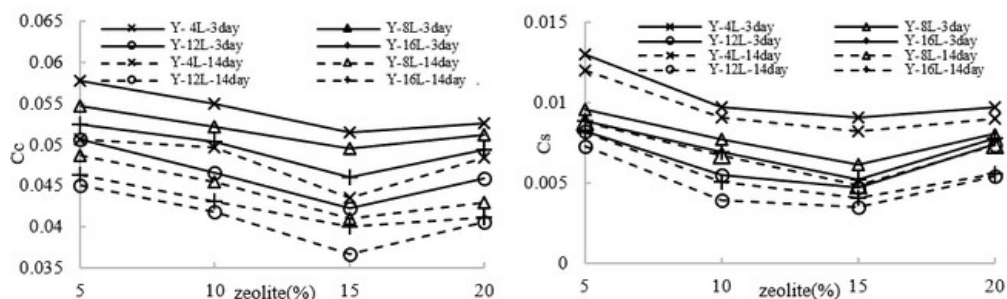
بالا تری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با غلظت ۱۵ مولار از خود نشان داده‌اند. این مساله می‌تواند به نسبت اکسیدهای سیلیکا به سدیم موجود در محلول بازی مرتبط باشد که منجر به ناپایدار شدن محلول بازی (کریستالی شدن) گردیده و اثر

مارن زرد- ژئولیت



شکل ۵. رفتار تحکیمی نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن زرد به‌ازای تغییرات درصد‌های ژئولیت و غلظت فعال‌کننده بازی در

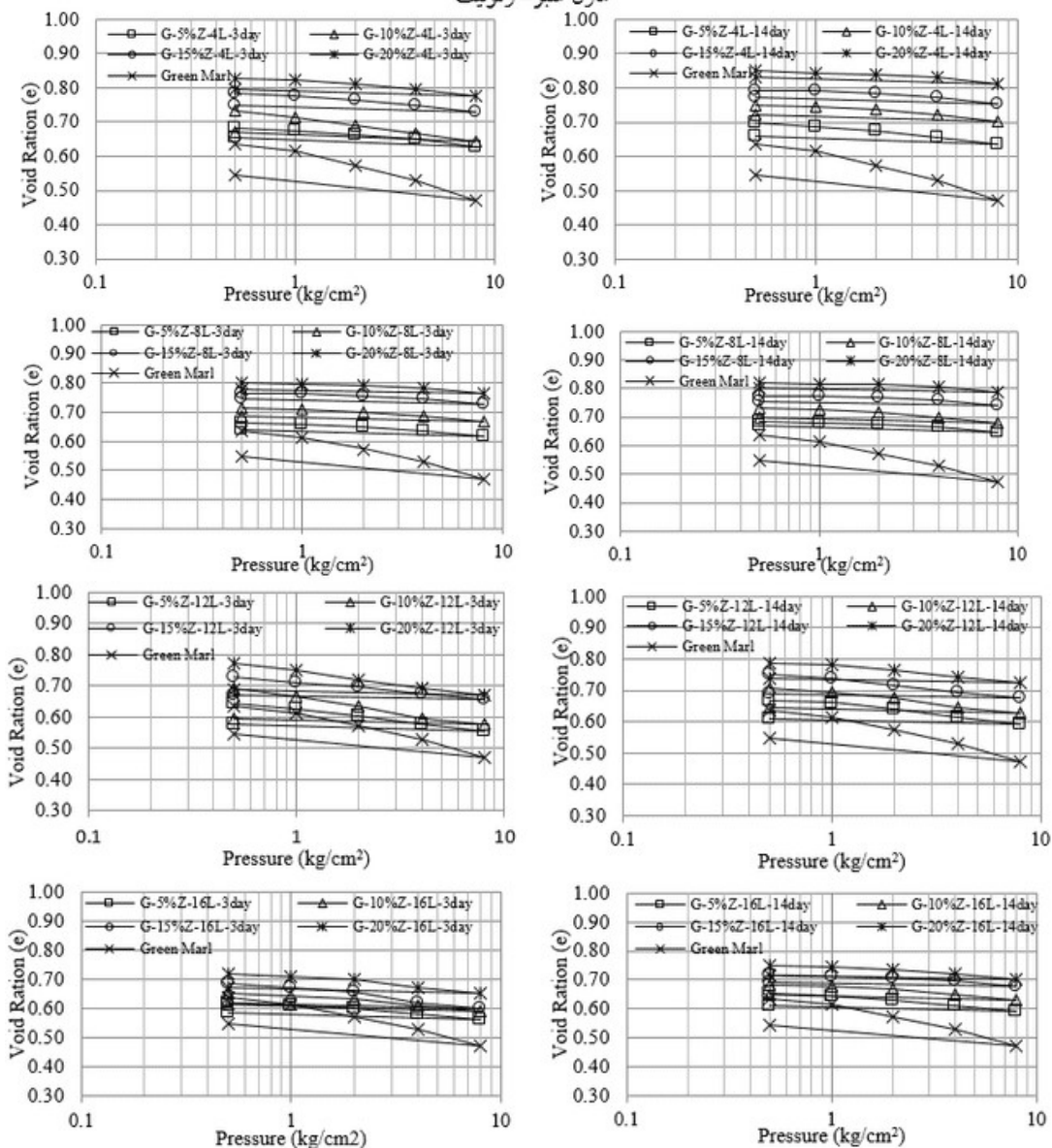
زمانهای عمل‌آوری ۳ و ۱۴ روزه



شکل ۶. تغییرات ضرایب فشردگی (C_c) و تورمی (C_s) نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن زرد به‌ازای تغییرات درصدهای ژئولیت و

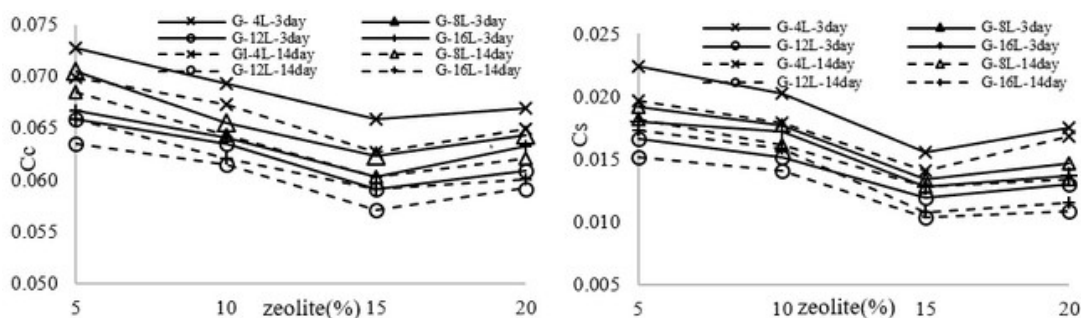
غلظت فعال‌کننده بازی در زمانهای عمل‌آوری ۳ و ۱۴ روزه

مارن سبز- ژئولیت



شکل ۷. رفتار تحکیمی نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن سبز به‌ازای تغییرات درصدهای ژئولیت و غلظت فعال‌کننده بازی در

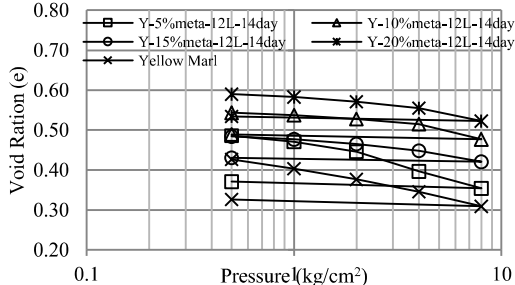
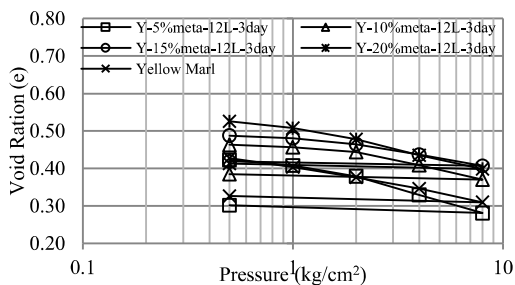
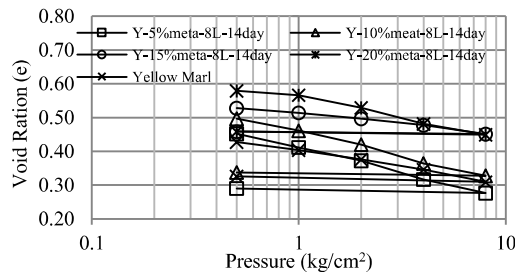
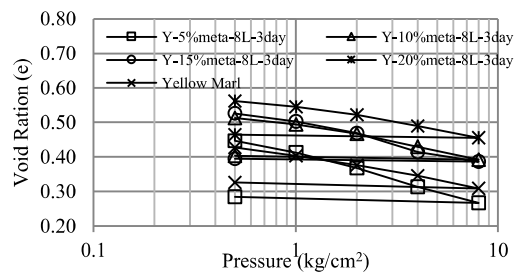
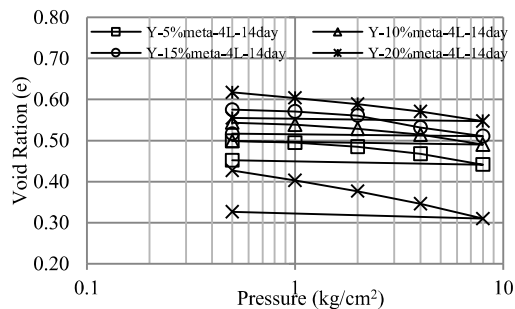
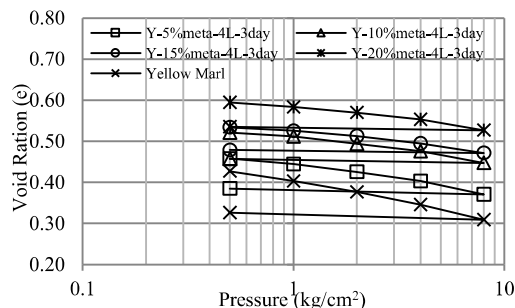
زمانهای عمل‌آوری ۳ و ۱۴ روزه

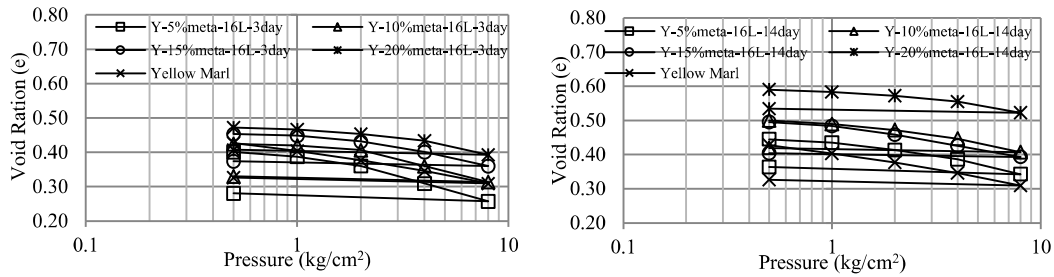


شکل ۸. تغییرات ضرایب فشردگی (C_c) و تورمی (C_s) نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن سبز به‌ازای تغییرات درصد‌های ژئولیت و غلظت فعال‌کننده بازی در زمانهای عمل‌آوری ۳ و ۱۴ روزه

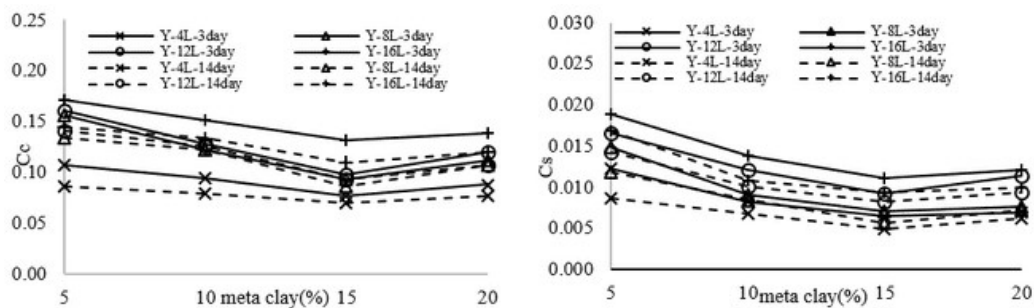
مشابه نتایج بدست آمده در نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی مارن زرد در بهینه‌ترین ترکیب (با ۱۵٪ متارس و غلظت محلول بازی ۴ مولار و ۱۴ روز عمل‌آوری) مقدار ضریب C_c از عدد ۰/۱۲ (در نمونه مارن زرد خاص) به ۰/۰۶۹ و ضریب C_s از ۰/۱۴ به ۰/۰۴۹ رسیده که به ترتیب معادل با کاهش ۴۳ و ۶۵ درصدی ضرایب می‌باشد. با مقایسه این مقادیر با پارامترهای مشابه نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن زرد مشخص می‌شود که نمونه‌های ژئولیتی در شرایط

مطابق نتایج بدست آمده در نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی مارن زرد در بهینه‌ترین ترکیب (با ۱۵٪ متارس و غلظت محلول بازی ۴ مولار و ۱۴ روز عمل‌آوری) مقدار ضریب C_c از عدد ۰/۱۲ (در نمونه مارن زرد خاص) به ۰/۰۶۹ و ضریب C_s از ۰/۱۴ به ۰/۰۴۹ رسیده که به ترتیب معادل با کاهش ۴۳ و ۶۵ درصدی ضرایب می‌باشد. با مقایسه این مقادیر با پارامترهای مشابه نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن زرد مشخص می‌شود که نمونه‌های ژئولیتی در شرایط





شکل ۹. رفتار تحکیمی نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی مارن زرد به‌ازای تغییرات درصد‌های متارس و غلظت فعال‌کننده‌بازی در زمانهای عمل‌آوری ۳ و ۱۴ روزه



شکل ۱۰. تغییرات ضرایب فشردگی (Cc) و تورمی (Cs) نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی مارن زرد به‌ازای تغییرات درصد‌های ژئولیت و غلظت فعال‌کننده‌بازی در زمانهای عمل‌آوری ۳ و ۱۴ روزه

ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی نقش مثبت دارد ولی روند کاهش ضرایب C_c و C_s نسبت به زمان در خاکهای بهسازی شده ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی 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 et al., 2007).

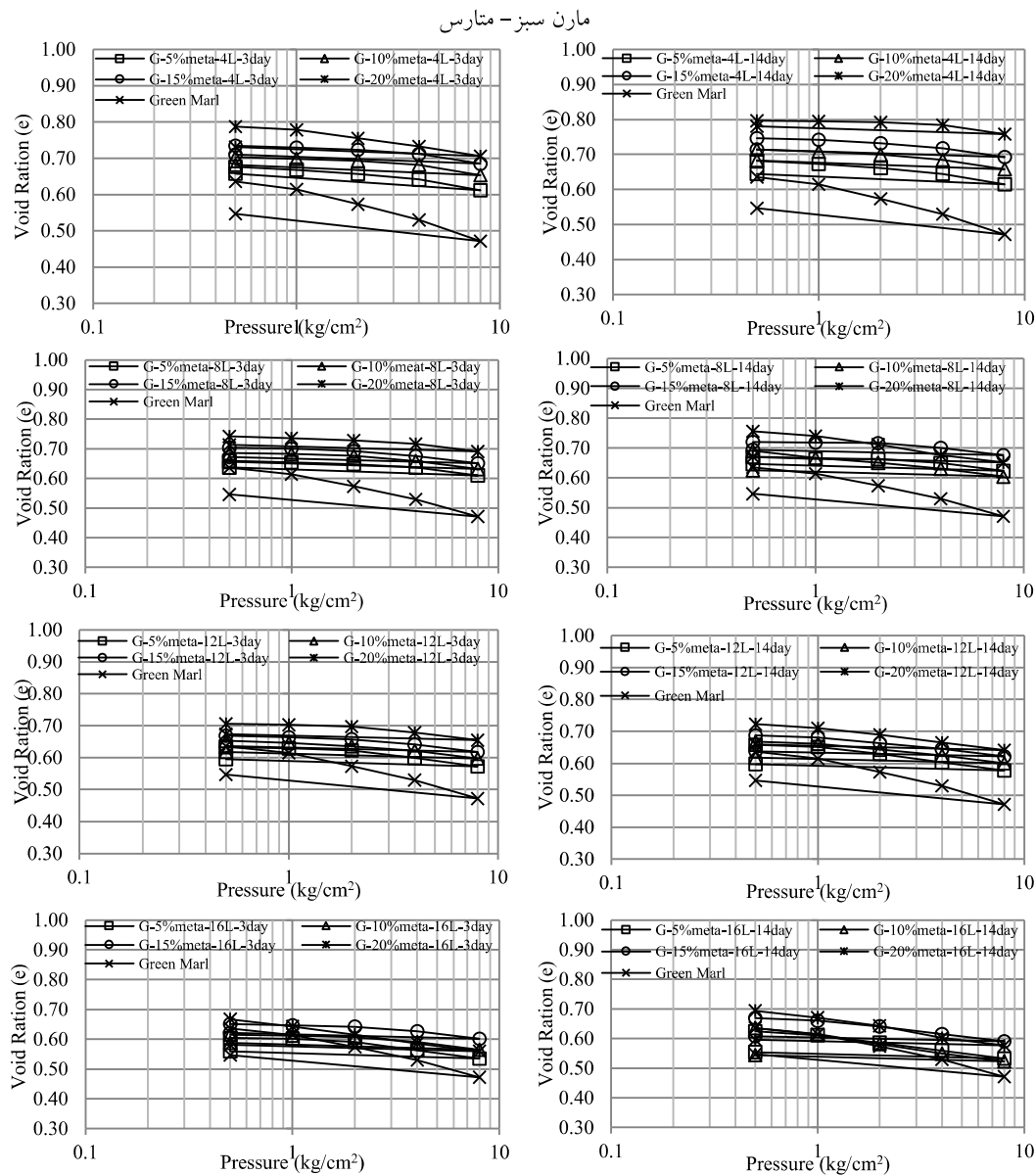
در شکل ۱۳ مقایسه کلی بین نتایج نمونه‌های ۲۸ روزه ژئوپلیمری در غلظت بهینه هر ترکیب و به‌ازای درصد‌های مختلف ژئولیت و یا متارس انجام شده است. مطابق این نمودارها و از مقایسه کلی بین نتایج حاصل برای نمونه‌های ژئوپلیمری مارن زرد و سبز چنین می‌توان استنباط نمود میزان اصلاح ضرایب تغییر شکلی نمونه‌های مارن زرد در مقایسه با نمونه‌های مشابه ساخته شده از مارن سبز در شرایط حاکم بر

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج آزمایشات تحکیم انجام شده بر روی نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی مارن سبز ارائه شده است. روند تغییرات ضرایب C_s و C_c در این نمونه‌ها مشابه نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مارن سبز بوده با این تفاوت که متارس در مقایسه با ژئولیت در تمامی درصد‌های وزنی و غلظت‌های محلول بازی اثر کمتری بر روی اصلاح پارامترهای مذکور داشته است. این مساله را می‌توان بوجود 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 فضای خالی بین دانه‌ها پر شده و در عین حال بافت خاک تقویت می‌گردد. از طرفی نوع ماده آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در ژئوپلیمر نقش مهمی در رفتار نمونه ژئوپلیمری دارد (Abdullah et al., 2020).

با وجود آنکه مطابق تمامی نتایج حاصله گذشت زمان در بهبود مشخصات تغییر شکلی همه نمونه‌های بهسازی شده

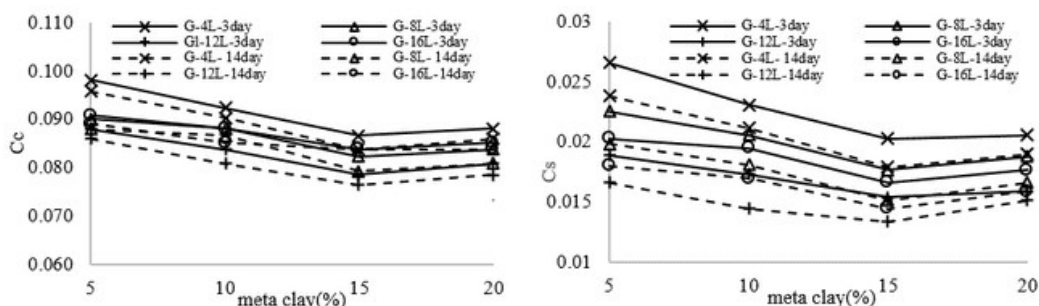
دارند. به نظر با افزایش درصد رطوبت در ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری مارن سبز می‌توان انتظار نتایج بهتری را داشت که این مساله در تحقیق اخیر مورد بررسی قرار نگرفته است. نتیجه شاخص دیگری که در نمودار شکل ۱۳ مشهود است دستیابی به نتایج بهتر در نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی (در هر دو نوع خاک مارن زرد و سبز) در مقایسه با نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی می‌باشد.

آزمایشات بهتر می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان چنین توضیح داد که درصد آلومینا سیلیکات موجود در مارن سبز در مقایسه با مارن زرد (مطابق جدول ۲) بیشتر می‌باشد و از آنجا که در تحقیق حاضر تمامی نمونه‌ها در رطوبت ثابت بهینه حاصل از آزمایش تراکم ساخته شده‌اند لذا در شرایط یکسان نمونه‌های مارن سبز برای تشکیل ژل های آلومیناسیلیکاتی به درصد رطوبت بیشتر از رطوبت بهینه‌نیاز

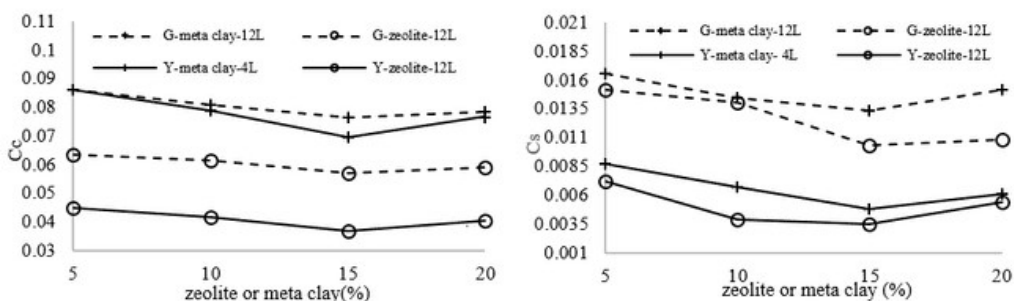


شکل ۱۱. رفتار تحکیمی نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی مارن سبز به‌ازای تغییرات درصدهای متارس و غلظت فعال‌کننده‌بازی در

زمانهای عمل آوری ۳ و ۱۴ روزه



شکل ۱۲. تغییرات ضرایب فشردگی (C_c) و تورمی (C_s) نمونه‌های ژئوپلیمری متارس مارن سبز به‌ازای تغییرات درصدهای متارس و غلظت فعال‌کننده‌بازی در زمانهای عمل‌آوری ۳ و ۱۴ روزه



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات ضرایب فشردگی (C_c) و تورمی (C_s) در نمونه‌های ۲۸ روزه ژئوپلیمری به‌ازای غلظت بهینه‌محلول بازی و تغییرات درصدهای ژئولیت و یا متارس

۴. نتیجه‌گیری

- بعنوان درصد بهینه منبع آلومینا سیلیکات معرفی نمود.
- در نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی با مارن زرد و سبز نیز مقدار وزنی ۱۵٪ بعنوان مقدار بهینه متارس بدست آمده‌است.
- در نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی مقدار غلظت ۱۲ مولار بعنوان غلظت بهینه فعال‌کننده بازی برای تمامی درصد های ژئولیت بدست آمده‌است. این در حالست که در نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی با مارن زرد و برای تمامی درصد های متارس مقدار غلظت فعال‌کننده ۴ مولار بعنوان غلظت بهینه در ترکیب محسوب شده و در نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی با مارن سبز نیز، این مقدار ۱۲ مولار بدست آمده‌است.
- در تمامی نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی با مارن زرد و سبز و در تمامی غلظت‌های فعال‌کننده بازی و به ازای تمامی درصدهای ژئولیت و یا متارس افزایش

- در این تحقیق از روش ژئوپلیمریزاسیون برای تثبیت دو نوع مارن زرد و سبز تبریز استفاده شده و اثر نوع و درصد وزنی ماده افزودنی حاوی آلومینا سیلیکا (ژئولیت و یا متارس)، غلظت محلول بازی و زمان عمل‌آوری در اصلاح ضرایب فشردگی (C_c) و تورمی (C_s) نمونه‌ها ارزیابی شده‌است. عمده‌ترین نتایج بدست آمده به شرح زیر خلاصه شده‌است.
- فرآیند ژئوپلیمریزاسیون در مارنهای زرد و سبز مورد آزمایش بعنوان یک تکنیک رضایت بخش بوده و با کاربرد این روش بصورت چشمگیری ضرایب تحکیمی خاک اصلاح شده‌است.
- در نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی با مارن زرد و سبز برای تمامی غلظت‌های محلول بازی با افزایش درصد وزنی ژئولیت تا ۱۵٪ ضرایب فشردگی (C_c) و تورمی (C_s) نمونه‌ها کاهش یافته و مقدار ژئولیت ۱۵٪ را می‌توان

- با مراجعه به تمامی نتایج حاصل از آزمایشات و از آنجا که منابع آلومیناسیلیکاتی (ژئولیت و متارس) و محلول بازی مورد استفاده در این پژوهش به سادگی در دسترس بوده و یا بر راحتی و با قیمت بسیار پایین قابل تهیه می باشد لذا روش اصلاح ژئوپلیمریزاسیون میتواند بعنوان یک گزینه مناسب از لحاظ اقتصادی، فنی و کاربردی برای اصلاح خاکهای مساله دار مارنی برای لایه های سطحی (بصورت اختلاط) و در لایه های عمقی (بروش جت گروتینگ) مطرح گردد (Cristelo et al., 2011, Rios et al., 2016).
- زمان عمل آوری نقش مثبت در اصلاح پارامترهای تحکیمی نمونه‌ها داشته ولی نرخ تغییرات این پارامترها برای تمامی شرایط نسبت به زمان ثابت نیست.
- در تمامی درصد های وزنی ژئولیت و یا متارس و برای تمامی غلظت‌های محلول بازی، میزان اصلاح ضرایب تحکیمی نمونه‌های ژئوپلیمری مارن زرد بهتر از نمونه‌های ژئوپلیمری مارن سبز می‌باشد.
- ضرایب تحکیمی نمونه‌های ژئوپلیمری ژئولیتی (در هر دو نوع خاک مارن زرد و سبز) در مقایسه با نمونه‌های ژئوپلیمری متارسی کمتر بوده و این حاکی از عملکرد بهتر ژئولیت نسبت متارس در شرایط حاکم بر واکنش می‌باشد.

منابع

- عالی‌پور، ر، امین‌پور، ح، دهقان زاده، ع، ۱۴۰۱. بررسی اثر بهسازی خاک به روش ریزشمع در خاک مارن: مطالعه موردی بیدبلند خوزستان. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، (۱۲) ۵۴: ۴۵۸۸-۴۵۷۳.
- ماهوتی، ا، کاتبی، ه، ۱۳۷۳. طبقه‌بندی خاک‌های کربناته‌از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک (مطالعه موردی: خاک مارن‌دار شهر تبریز). نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، (۳) ۴۸: ۷۳-۶۱.
- Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Sarker, P., 2018. Use of fly-ash geopolymer incorporating ground granulated slag for stabilisation of kaolin clay cured at ambient temperature. *Geotechnical and Geological engineering*, 37(2): 721-740.
- Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske M.L., 2019(a). Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag. *Soils and Foundations*, 59(6): 1906-1920.
- Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske M.L., Karrech A, 2019(b). Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(9): 1-37.
- Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske M.L., 2020. Review of fly-ash-based geopolymers for soil stabilisation with special reference to clay. *Geosciences*, 10 (7): 249.
- Alipour, R., Heshmati, A., Karimiazar, J., Esazadefar, N., Asghari, E., 2022. Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*: 1-14.
- Al-Mukhtar, M., Khatib, S., Alcover, J-F., 2012. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139-140: 17-27.
- ASTM D 2435-04, 2003. One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. WestConshohocken, PA, USA.
- ASTM D 698-12, 2021. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. WestConshohocken, PA, USA.
- Bahadori, H., Hasheminezhad, A., Taghizadeh, F., 2019. Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (2), 04018363.
- Behak, L., Perez, N., 2008. Characterization of a material comprised of sandy soil, rice husk ash and potentially useful lime in pavements. *Journal Ingeniería de construcción*, 23 (1): 34-41.
- Cristelo, N., Teixeira Pinto, A., Glendinning, A., 2011. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proc. Inst. Civ. Eng. – Ground Improv.*, 164: 73-82.

- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L.S.G., Pinto, A.T., 2012. Effect of calcium content on soil stabilization with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 29: 167-174.
- Davidovits, J., 1991. Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*, 37 (8): 1633-1656.
- Davidovits, J., 2008. *Geopolymer Chemistry and Applications*, 2nd ed. Institut Géopolymère: Saint-Quentin, France, pp. 1-585.
- Duxson, P., Fernández-Jime'nez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., Van Deventer, J.S.J., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Material Science*, 42: 2917-2933.
- Elert, K., Nieto, F., Azañón, J.M., 2017. Effects of lime treatments on marls. *Applied Clay Science*, 135: 611-619.
- García, M.A., Chimenos, J.M., Fernandez, A.I., Miralles, L., Segarra, M., Espiell, F., 2004. Low-grade MgO used to stabilize heavy metals in highly contaminated soils. *Chemosphere* 56 (5): 481-491.
- Ghadir, P., Ranjbar, N., 2018. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361-371.
- Ghobadi, M.H., Abdilor, Y., Babazadeh, R., 2014. Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73 (2): 611-619.
- Gjorv, O.E., 1994. Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment. *ACI Concr Int*:35-9.
- Göktepe, A.B., Sezer, A., Sezer, G.I., Ramyar, K., 2008. Classification of time-dependent unconfined strength of fly ash treated clay. *Construction and Building Materials* 22 (4): 675-683.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., Tuncan, M., 2007. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Handbook of Environmental Chemistry. Volume 5: Water Pollution* 42: 681-688.
- Hermann, E., Kunze, C., Gatzweiler, R., Kiebig, G., Davitovits, J., 1999. *Proceedings of Geopolymers*, 211.
- Kalantari, B., 2012. Foundations on Expansive Soils: A Review, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(18): 3231-3237
- Khale, D., Chaudhary, R., 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, 42: 729-746.
- Khan, M., Wang, J. and Sarker, D., 2018. Stabilization of Highly Expansive Moreland Clay Using Class-C Fly Ash Geopolymer (CFAG). *Conference Paper in Geotechnical Special Publication © ASCE*.
- Lamas, F., Irigaray, C., Chacón, J., 2002. Geotechnical characterization of carbonate marls for construction of impermeable dam cores. *Engineering Geology*, 66: 283-294.
- Liu, Z., Cai, C., Liu, F., Fan, F., 2016. Feasibility Study of Loess Stabilization with Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Material in Civil Engineering*, 28, 04016003.
- Mehta, PK., 1991. *Concrete in marine environment*. New York, USA: Elsevier Science Publishers.
- Misra, A., Biswas, D., Upadhyaya, S., 2005. Physico-mechanical behavior of selfcementing class C fly ash-clay mixtures. *Fuel*, 84 (11): 1410-1422.
- Morsy, M.S., Alsayed, SH., Salloum, Y.A., Almusallam, T., 2014. Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(6): 4333-4339.
- Nelson, J.D., and Miller, D.J., 1992. *Expansive Soils – Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley and Sons, p. 259.
- Obuzor, G.N., Kinuthia, J.M., Robinson, R.B., 2012. Soil stabilisation with lime-activated-GGBS-a mitigation to flooding effects on road structural layers/embankments constructed on floodplains. *Engineering Geology*, 15: 112-139.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., 2008. Alkali-activated binders: a review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22 (7): 1315-1322.
- Pakbaz, M.S. and Alipour, R., 2012. Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. *Applied Clay Science*, 67:1-4.
- Pera, J., 2001. Metakaolin and calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, 23: 441-454.
- Pettijohn, F.J., 1975. *Sedimentary rock*. New York: Harper and Row.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C., Udomchai, A., 2016. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer. *Applied Clay Science*: 134-142.

- Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Sukmak, P., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., Shen, S., 2017. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*, 17: 1-15.
- Provis, J.L., Deventer, J.S.J., Van, D., 2009. *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. CRC Press, Cambridge UK.
- Rios, S., Ramos, C., Viana da Fonseca, A., Cruz, N. and Rodrigues, C., 2016. Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads. *Procedia Engineering*, 143:1392–1400.
- Ureña, C., Azañón, J.M., Corpas, F.A., Salazar, L.M., Ramírez, A., Rivas, F., Mochón, I., Sierra, M.J., 2015. Construcción de un terraplén con suelo estabilizado mediante el uso de agentes alternativos en la Autovía del Olivar. *Carreteras*, 203: 63-72.
- Wray, W.K., El-Garhy, B.M. and Youssef, AA., 2005. Three-Dimensional Model for Moisture and Volume Changes Prediction in Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131: 311-324.
- Yung-Ming, L., Cheng-Yong, H., Al Bakri, M., Hussin, K., 2016. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review. *Progress in Materials Science*, 83: 595-629.
- Xu, H., Van Deventer, J., 2000. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59: 247-266.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., 2007. Modification of freezing-thawing properties of granular soils with waste additives. *Cold Regions Science and Technology* 48: 44-54.
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., Tao, M., 2013. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Material*, 47: 1468–1478.