

تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سر باره، خاکستر بادی،

دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج

علیرضا غنی زاده (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

کوروش میرزایی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

سمیه بختیاری، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸

چکیده

هدف این تحقیق ارزیابی و مقایسه مشخصات خاک رس با خصوصیات خمیری بالای تثبیت شده با ژئوپلیمر سنتز شده از ضایعات صنعتی و خاکستر پوسته برنج است. در این تحقیق از سر باره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت به عنوان ماده پایه و از محلول سدیم هیدروکسید ۸٫۶۸ مولار و محلول سیلیکات سدیم استخراج شده از پوسته برنج به عنوان محلول فعال کننده قلیایی جهت تثبیت استفاده شده است. تثبیت با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده بر پایه سر باره، خاکستر بادی و دیاتومیت با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خاک خشک و تراکم در رطوبت بهینه و در سه زمان عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش ها نشان داد که استفاده از ژئوپلیمر به عنوان تثبیت کننده باعث بهبود مقاومت فشاری و کششی، افزایش مدول یانگ و کاهش کرنش شکست خاک می شود. بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری مربوط به خاک رس تثبیت شده با ژئوپلیمر سنتز شده با ۳۰ درصد سر باره بوده است که نسبت به نمونه تثبیت نشده به میزان ۲۵/۲ برابر افزایش مقاومت داشته است. همچنین نمونه های تثبیت شده با ژئوپلیمر سنتز شده با ۳۰ درصد خاکستر بادی و ۳۰ درصد دیاتومیت به ترتیب نسبت به نمونه تثبیت نشده ۵/۰۵ و ۱۲/۷۲ برابر مقاومت فشاری بیشتری داشتند. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که تثبیت خاک رس با استفاده از ژئوپلیمر سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت کششی نمونه ها می شود، به طوری که نمونه های تثبیت شده با ژئوپلیمر ۳۰ درصد سر باره، ۳۰ درصد خاکستر بادی و ۳۰ درصد دیاتومیت به ترتیب نسبت به نمونه تثبیت نشده ۲۳/۱۴، ۷/۵۸ و ۱۲/۵ برابر مقاومت کششی بیشتری داشتند.

کلمات کلیدی: بستر رسی، مقاومت فشاری و کششی، ژئوپلیمر، دیاتومیت، خاکستر پوسته برنج

۱. مقدمه

آلومینوسیلیکات تشکیل شده است و در داخل آنها نیز حفره‌هایی وجود دارد که در یک شبکه کاملاً متخلخل توزیع شده‌اند (Huang et al., 2011). ریزساختار ژئوپلیمرها کاملاً وابسته به دما است به طوری که ژئوپلیمرها در دمای اتاق حالتی جامد و بدون شکل دارند ولی در صورتی که در معرض دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد قرارگیرند به یک ماتریس بلورین تبدیل می‌شوند (Trautman, 2005). این مواد با دارا بودن خصوصیتی مناسب به نظر می‌رسد که می‌توانند جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند باشند (Nikolić et al., 2012).

تحقیقات گذشته بیشتر بر استفاده از ژئوپلیمر برای ساخت مصالح بنایی و بتن ژئوپلیمری تمرکز کرده و تحقیقات کمتری در خصوص استفاده از ژئوپلیمر برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار انجام شده است (Hu et al., 2018). ژئوپلیمرها به عنوان مصالح چسبنده‌ای که با استفاده از ضایعات پوزولانی ساخته می‌شوند و سازگاری مناسبی با محیط‌زیست دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Wattanachai and Suwan, 2017). تثبیت خاک با ژئوپلیمر از طریق اختلاط ماده آلومینوسیلیکاته با محلول فعال‌کننده قلیایی انجام می‌شود و باعث بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی خاک می‌گردد. ژئوپلیمرها مواد معدنی آلومینوسیلیکاتی هستند که خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند. این خواص با تغییر نسبت مولی سیلیسیم به آلومینیم تغییر می‌یابند. دمای معمولی سنتز ژئوپلیمر بین ۲۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد است که می‌توان نتیجه گرفت مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن را تا حد بسیار زیادی کاهش می‌دهد. ژئوپلیمرها دارای خواص مکانیکی ایده آلی هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به مقاومت فشاری زیاد، مقاومت در برابر حرارت‌های بالا و مقاومت در مقابل حلال‌های آلی و اسیدی اشاره کرد (Zhang et al., 2013). ساختمان ژئوپلیمر شامل ترکیبات سه‌بعدی آلومینوسیلیکاتی (SiO_4 و AlO_4) است که به صورت تراهدرال (چهاروجهی با زاویه ۱۰۹/۵ درجه) در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل ۱). با توجه به نسبت سیلیکات به

راه‌ها به‌عنوان شریان‌های اصلی ارتباط در معرض انواع مختلفی از تهدیدهای جوی و مکانیکی قرار دارند. لایه‌های روسازی همچون رویه آسفالتی، اساس، زیراساس و به‌خصوص بستر نقش مهمی در مقابله با این نوع تهدیدها دارند. بستر راه که پایین‌ترین لایه روسازی است و مستقیماً با خاک در ارتباط می‌باشد باید دارای مقاومت کافی جهت تحمل تنش‌های وارده از لایه‌های بالاتر و همچنین تغییرات جوی مثل یخ‌زدگی و انبساط‌شدگی خاک را داشته باشد.

بسیاری از خاک‌ها به‌خودی‌خود توانایی تحمل تنش‌هایی که بر آن‌ها وارد می‌شوند را ندارند و برای تحمل بارهای وارده از طرف وسایل نقلیه مناسب نیستند. در این میان است که مفهومی به نام تثبیت خاک به‌منظور افزایش ظرفیت باربری خاک مطرح می‌شود. تثبیت‌کننده‌های معمول خاک شامل سیمان و آهک می‌باشند (Dhakar and Jain, 2020). این افزودنی‌ها در صورت اضافه شدن به خاک، خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک را جهت دستیابی به مقاومت، سختی و توانایی مقابله با انقباض خاک، افزایش می‌دهند (Adhikari, 2017). این تثبیت‌کننده‌ها به‌وفور در طی سالیان گذشته مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دسته‌ای دیگر از تثبیت‌کننده‌ها هستند که با نام تثبیت‌کننده‌های غیرمعمول شناخته می‌شوند که از جمله آن‌ها می‌توان به ژئوپلیمر و بیوپلیمر اشاره نمود. ژئوپلیمرها موادی نسبتاً جدید، غیرآلی، پلیمری، سبک‌وزن و دوست‌دار طبیعت هستند که از واکنش مواد دارای آلومینوسیلیکات با محلول فعال‌کننده قلیایی به وجود می‌آیند. از دیدگاه شیمی‌دانان ژئوپلیمرها شامل یک چهارچوب پلیمری Si-O-Al می‌باشند و شباهت زیادی با ژئولیت دارند و دارای ساختار آمورف هستند. تفاوت اصلی این مواد با ژئولیت در آن است که ژئوپلیمرها به جای حالت بلورین حالتی بدون شکل دارند. ریزساختار ژئوپلیمرها در مقیاس نانو از خوشه‌های

تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سربراره، خاکستر بادی، دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج

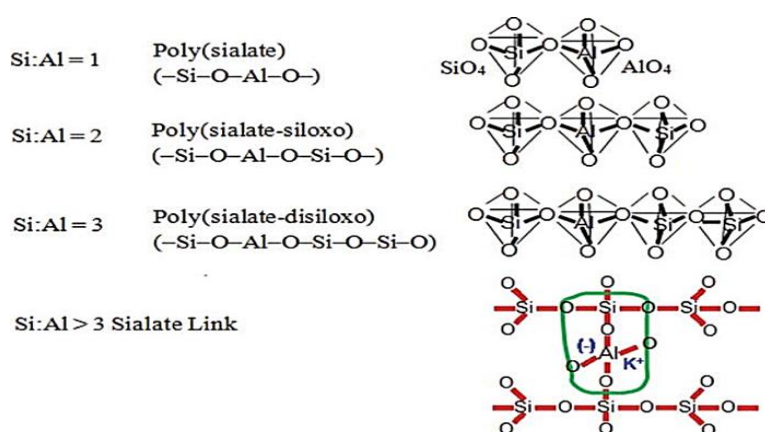
بیشتر باشد، عمل گیرش در نمونه زودتر اتفاق می افتد. در این تحقیق همچنین مقاومت فشاری بهترین نمونه ساخته شده با ژئوپلیمر با نمونه هایی که با درصد های سیمان ۳، ۶ و ۹ ساخته شده بودند، مقایسه شد که نشان دهنده عملکرد مناسب تر ژئوپلیمر در مقایسه با سیمان بود. آلوراجا و همکاران (۲۰۱۸) از ترکیبی از خاکستر بادی و سربراره و محلول فعال کننده قلیایی به عنوان یک افزودنی برای تثبیت خاک رس و جایگزینی برای سیمان پورتلند استفاده کردند. در این تحقیق خاک مورد بررسی از نوع خاک رس با خمیری بالا (CH) بود. در این تحقیق زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روز و مقدار خاکستر بادی و سربراره به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خاک خشک و نسبت سربراره به خاکستر بادی در ترکیب برابر با ۲۵:۷۵ انتخاب شد. این نسبت با توجه به تحقیقات Yaghoubi et al., 2018 و Al Bakri et al., 2012 انتخاب گردیده بود. در این تحقیق نمونه های تثبیت شده با ژئوپلیمر با نمونه های تثبیت شده با استفاده از سیمان، آهک و ترکیبی از سیمان و آهک (با نسبت ۵۰:۵۰) مقایسه شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که در مقادیر وزنی ۲۰ و ۳۰ درصد، ژئوپلیمر نسبت به سیمان و آهک و ترکیب آن ها برتری محسوسی دارد، اما در ۱۰ درصد وزنی وضعیت تثبیت با سیمان نسبت به ژئوپلیمر مناسب تر است. مورمو و همکاران (۲۰۱۸) به تثبیت یک نوع خاک با نام بلک کتان (Black Cotton) که در دسته خاک های با حد خمیری بالا CH قرار می گیرد، پرداختند. هدف آن ها بهبود مقاومت این خاک جهت استفاده در بستر راه با استفاده از خاکستر بادی با درصد های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی خاک بود. نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه بهینه، نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ خاکستر بادی و فعال شده به وسیله محلول فعال کننده سدیم هیدروکسید می باشد که به عنوان تثبیت کننده بستر و زیرساز بسیار مناسب و عملیاتی است. عبدالله و همکاران (۲۰۱۹) به تثبیت سه نوع خاک رس متفاوت با حد روانی بالا با استفاده از ژئوپلیمر پرداختند. آن ها ژئوپلیمر را به صورت مخلوطی از سربراره و خاکستر بادی با نسبت سربراره به

آلومینات، ساختمان ماتریس های ژئوپلیمری قرارگیری متفاوتی نسبت به هم دارند که در شکل (۲) نشان داده شده است. واکنش شیمیایی را که منجر به تشکیل ژئوپلیمر می شود، ژئوپلیمریزاسیون می نامند (Kakali et al., 2018). فرآیند ژئوپلیمریزاسیون در سه مرحله انجام می پذیرد. همان گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، مرحله اول شامل انحلال بستر اصلی (افزودنی پایه) به وسیله محلول فعال کننده قلیایی است که یون های سیلیکات و آلومینات از هم جدا می شوند. در مرحله دوم با از دست دادن رطوبت، یون های سیلیکات و آلومینات شروع به جهت دار شدن کرده و تشکیل ژل ژئوپلیمری می دهند. در مرحله سوم با از دست دادن رطوبت، ژل های تشکیل شده شروع به سخت تر شدن کرده و ژئوپلیمر حالت نهایی را به خود می گیرد (Nergis et al., 2018) در شکل (۲) تمامی مراحل ساخت ژئوپلیمر نشان داده شده است. سوین (۲۰۱۵) بر روی تثبیت بتونیت که در دسته خاک های با خمیری بالا قرار می گیرد با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از خاکستر بادی مطالعاتی انجام داد. در این تحقیق از مخلوطی از سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید با نسبت ۲ به ۱ به عنوان محلول فعال کننده قلیایی استفاده شد. محلول فعال کننده قلیایی در درصد های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی خاک خشک و خاکستر بادی در درصد های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی خاک خشک به خاک رس جهت تثبیت اضافه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه ساخته شده با ۴۰ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد محلول فعال کننده قلیایی بهترین نتیجه را نسبت به سایر نمونه ها داشته است و این درصدها درصد های بهینه هستند. عبدالله و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده با سربراره کوره آهن گدازی و خاکستر بادی اقدام به تثبیت خاک رس با خصوصیات خمیری بالا نمودند. در این تحقیق از محلول فعال کننده قلیایی سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید ۱۴ مولار استفاده شد و نمونه ها در دمای اتاق و به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که هر چه مقدار ژئوپلیمر و مولار محلول فعال کننده قلیایی

از ذرات ریز و بی شکل سیلیسی می باشند که در اثر مکانیزم تجمع پوسته یا اسکلت های فسیل شده جلبک ها و گیاهان و جانوران میکروسکوپی و تک سلولی به نام دیاتومه تشکیل می شود. دیاتومیت پس از پودر شدن قابل استفاده است. معادن دیاتومیت در ایران در مناطقی مانند اسفزار بیرجند (خراسان جنوبی) و آذرشهر آذربایجان شرقی وجود دارد. در این تحقیق مشخصات مختلف خاک تثبیت شده شامل مشخصات تراکمی، مقاومت فشاری، مدول یانگ، کرنش شکست و مقاومت فشاری تک محوری مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در تحقیقات گذشته تأکید اصلی بر تعیین مقاومت فشاری خاک رس تثبیت شده با ژئوپلیمر برپایه سرباره کوره ذوب آهن و خاکستر بادی بوده است و نتایج چندانی در خصوص مقاومت کششی، مدول یانگ و کرنش لحظه شکست خاک رس تثبیت شده با ژئوپلیمر ارائه نشده است. در این تحقیق در ساخت ژئوپلیمر به جای استفاده از سیلیکات سدیم صنعتی از سیلیکات سدیم موجود در پوسته برنج استفاده شده است و همچنین از دیاتومیت به عنوان ماده پایه در ساخت ژئوپلیمر استفاده شده است که پیش از این کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

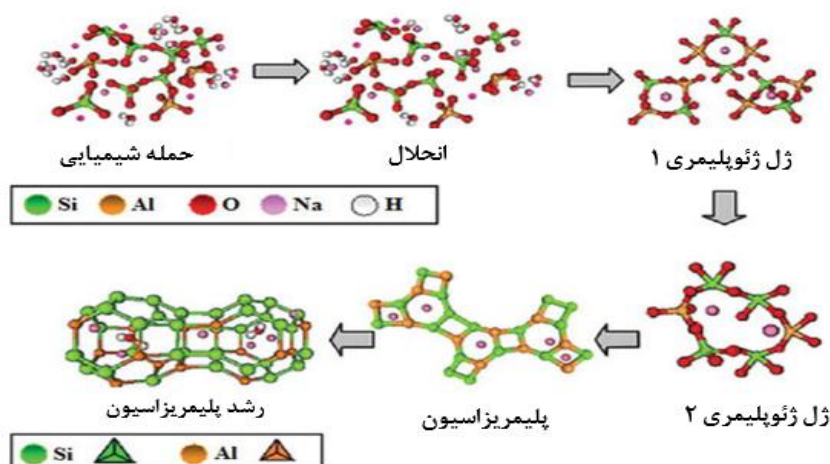
خاکستر برابر با ۰/۲ و سدیم هیدروکسید ۱۴ مولار در نظر گرفتند که دلیل این انتخاب نیز استفاده از نتیجه یکی از مطالعات (Yaghoubi et al., 2018) بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه کردن ژئوپلیمر میزان تنش تسلیم و سختی اولیه نمونه ها را به میزان قابل توجهی افزایش داده و رفتار مصالح را از حالت نرم و انعطاف پذیر به حالت ترد و شکننده ولی با مقاومت بیشتر تغییر می دهد. عبدی اله و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی خصوصیات سرباره (GGBFS) و خاکستر بادی (Fly-Ash) جهت سنتز ژئوپلیمر و تثبیت خاک پرداختند. آن ها با استفاده از نتایج آزمون های XRD, SEM, XRF, X-Ray و FTIR به این نتیجه رسیدند که تثبیت خاک رس با خصوصیات خمیری بالا با استفاده از سرباره و خاکستر بادی که منابعی سرشار از آلومینات و سیلیکات و همچنین کلسیم هستند، بسیار مفید و کاربردی است.

هدف این تحقیق ارزیابی و مقایسه مشخصات خاک رس با خصوصیات خمیری بالای تثبیت شده با ژئوپلیمر سنتز شده از سه نوع افزودنی شامل سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت به عنوان ماده پایه و محلول فعال کننده قلیایی حاصل از خاکستر پوسته برنج است. دیاتومیت ها سنگ های رسوبی متشکل

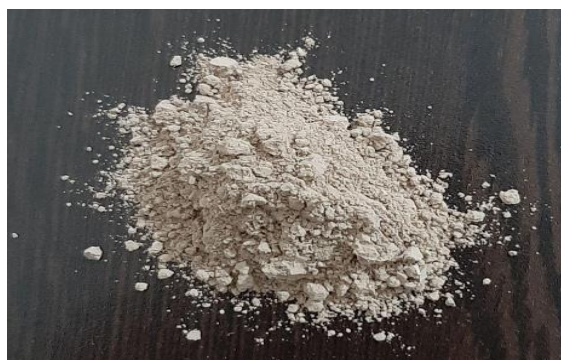


شکل ۱. ساختمان ژئوپلیمر و فرمول شیمیایی آن (Nergis et al., 2018)

تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سرباره، خاکستر بادی، دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج



شکل ۲. فرآیند ژئوپلیمریزاسیون (Nergis et al., 2018)



شکل ۳. خاک رس مورد استفاده در تحقیق

۲. مواد و روش

۱-۲ خاک

در این تحقیق از خاک رس با خصوصیات خمیری بالا استفاده شده است. این خاک هنگامی که در معرض رطوبت قرار می‌گیرد با جذب رطوبت دچار انبساط شده و افزایش حجم می‌دهد. هم‌زمان با این افزایش حجم، خاک مقاومت خود را به میزان چشمگیری از دست می‌دهد و دیگر قابل بهره‌برداری نمی‌باشد. همچنین زمانی که خاک خشک شده و رطوبت خود از دست می‌دهد دچار ترک‌خوردگی می‌شود که این ترک‌خوردگی‌ها باعث کاهش ظرفیت باربری خاک می‌شوند. این خاک از بیابان‌های اطراف شهر سیرجان واقع در استان کرمان تهیه گردید. در شکل (۳) تصویر مربوط به خاک در محل نشان داده شده است. در جدول (۱) مشخصات ژئوتکنیکی خاک رس مورد بررسی در این تحقیق داده شده است. جدول (۲) نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF را برای این خاک نشان می‌دهد.

۲-۲ سرباره

سرباره که در شکل (۴) نشان داده شده است، محصولی فرعی است که به هنگام تولید آهن در کوره‌های آهن‌گدازی به وجود می‌آید. این محصول به‌عنوان نوعی ضایعات صنعتی شناخته شده و اساساً شامل آلومینات (Al_2O_3) سیلیکات (SiO_2) و آهک (CaO) است (Adilah et al., 2020). در جدول (۲) نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF برای سرباره کوره ذوب‌آهن داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، سرباره مصرفی دارای مقادیر بالایی سیلیس و کلسیم است که جزو عناصر اصلی در واکنش پوزولانی هستند. سرباره مورد استفاده در این تحقیق از نوع سرباره پودر شده کوره بلند کارخانه ذوب‌آهن اصفهان بوده است.

۲-۴ دیاتومیت

دیاتومیت‌ها، سنگ‌های رسوبی متشکل از ذرات ریز و بی‌شکل سیلیسی می‌باشند که در اثر مکانیزم تجمع پوسته یا اسکلت‌های فسیل‌شده جلبک‌ها، گیاهان و جانوران میکروسکوپی و تک‌سلولی به نام دیاتومه (دیاتومه‌ها یکسری جلبک‌های تک‌سلولی ریز هستند) به وجود آمده‌اند. دیاتومیت خالص خردشونده بوده و از نظر خصوصیات ظاهری، شبیه به گچ است. در شکل (۶) مشخصات ظاهری دیاتومیت مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. در جدول (۲) نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF برای دیاتومیت داده شده است. دیاتومیت نیز ماده‌ای سرشار از سیلیس و تا حدودی آلومینیوم است، اما میزان هیدروکسید کلسیم بسیار پایینی دارد. دیاتومیت مورد استفاده در این تحقیق از شرکت زرین خاک قائن تهیه شده است.



شکل ۶. دیاتومیت

۲-۵ خاکستر پوسته برنج

خاکستر پوسته برنج در واقع پوسته دانه‌های برنج است که در کوره با دمای بسیار زیاد سوزانده و به خاکستر تبدیل شده‌اند. خاکستر برنج منبع غنی از سیلیس است که در تحقیق حاضر سیلیس آن استخراج شده و به‌عنوان سیلیکات سدیم در محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده شده است (شکل ۷). در جدول (۲) نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF برای خاکستر پوسته برنج داده شده است.



شکل ۴. سرپاره کوره آهن‌گدازی

۲-۳ خاکستر بادی

خاکستر بادی که در شکل (۵) نشان داده شده است، محصول فرعی سوخت زغال‌سنگ است که شامل سیلیس، آلومین و اکسیدهای آهن و کلسیم است و در دو نوع C و F وجود دارد. نوع C دارای درصد CaO بیشتر از ۲۰٪ و نوع F دارای درصد CaO کمتر از ۱۰٪ است (Adilah et al., 2020). در جدول (۲) نتایج تحلیل عنصری حاصل از آزمایش XRF برای خاکستر بادی داده شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، خاکستر بادی استفاده‌شده در این تحقیق، منبعی سرشار از سیلیس است. میزان سایر عناصر در خاکستر بادی بسیار ناچیز است، برای مثال اکسید کلسیم که برابر با ۰/۴ درصد است. همین میزان کم اکسید کلسیم، خاکستر بادی را در کلاس F که بیانگر خاکستر با درصد پایین هیدروکسید کلسیم است قرار می‌دهد.



شکل ۵. خاکستر بادی

تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سرپاره، خاکستر بادی، دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج

که از کاتیون‌های سدیم و آنیون‌های هیدروکسید تشکیل شده است (شکل ۸). سدیم هیدروکسید مورد استفاده به صورت جامد و با دانه های گرد و سفید بوده که از شرکت کیان کاوه آزما تهیه شده است.



شکل ۸. سدیم هیدرواکسید (NaOH)



شکل ۷. خاکستر پوسته برنج

۶-۲ سدیم هیدروکسید (NaOH)

سدیم هیدروکسید که با عنوان سود سوزآور نیز شناخته می‌شود، یک ترکیب معدنی با فرمول شیمیایی (NaOH) است. سدیم هیدروکسید یک ترکیب یونی جامد و کریستالی سفیدرنگ است

جدول ۱. خواص مهندسی خاک رس

لای	رس	طبقه بندی اشتو	طبقه بندی متحد	چگالی دانه‌ها	حدود اتربرگ		رنگ	نوع خاک
					شاخص خمیری	حد خمیری حد مایع		
۶۰٪	٪۴۰	A-7-6	CH	۲/۶	۲۳/۷۵	۲۸/۲۵	۵۲	قهوه‌ای روشن

جدول ۲. نتایج تحلیل عنصری با استفاده از آزمایش فلورسانس اشعه ایکس (XRF)

ترکیب	خاک (%)	سرپاره (%)	خاکستر بادی (%)	دیاتومیت (%)	خاکستر پوسته برنج (%)
سیلیس (SiO ₂)	۴۶/۲۱	۳۸/۴۴	۸۷/۲	۶۴/۰۸	۸۹/۵
اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃)	۱۴/۶۱	۱۰/۳۲	۳/۱۹	۱۰/۷۴	۰/۲۸
اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)	۶/۲۸	۰/۵۷	۰/۹۸	۱/۳۷	۰/۶۵
اکسید کلسیم (CaO)	۸/۳۹	۳۰/۷۲	۰/۴	۲/۳	۱/۳۶
اکسید سدیم (Na ₂ O)	۱/۳۷	۱/۱۸	۰/۷	۱/۸۹	۰/۷۴
اکسید منیزیم (MgO)	۳/۹۶	۶/۱۸	۰/۶۳	۴/۲۸	۱/۶۴
اکسید پتاسیم (K ₂ O)	۱/۸۳	۰/۸۳	۰/۳۹	۰/۲۵	۳/۵۵
دی اکسید تیتانیوم (TiO ₂)	۰/۵	۱/۳۱	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۰۳
اکسید منگنز (MnO)	۱/۴۱	۱/۲۷	-	-	۰/۰۹
اکسید فسفر (P ₂ O ₅)	۰/۲	-	-	-	۱/۱۵
درصد کاهش وزن ناشی از احتراق (LOI)	۱۶/۴۸	۰	۵/۹۹	۱۴/۴۹	۰/۸

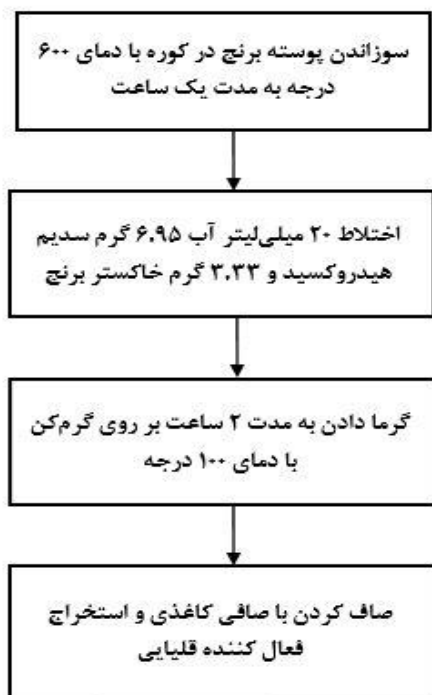
۷-۲ محلول فعال کننده قلیایی

محلول فعال کننده قلیایی از ترکیب سدیم هیدروکسید (NaOH) با مولارهای متفاوت و اختلاط آن با سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) به عنوان منبع سیلیکات به دست می آید. مولار سدیم هیدروکسید و همچنین نسبت سدیم هیدروکسید به سیلیکات سدیم دو عامل مهم و تعیین کننده در خصوصیات محلول فعال کننده قلیایی است. در بعضی تحقیقات پیشین از سدیم هیدروکسید به تنهایی به عنوان محلول فعال کننده قلیایی استفاده شده است (Murmu et al., 2018). در تحقیق حاضر از محلول ۸/۶ مولار استفاده شده که (Yaghoubi et al., 2019) آن را به عنوان مولار بهینه معرفی کرده و همچنین بجای استفاده از سیلیکات سدیم صنعتی از خاکستر پوسته برنج که منبعی سرشار از سیلیس است، استفاده شده است. به منظور سنتز ماده فعال کننده قلیایی از پوسته برنج، ابتدا پوسته برنج در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت سوزانده و به خاکستر تبدیل شد. سپس ۳/۳۳ گرم خاکستر پوسته برنج با ۶/۹۵ گرم سدیم هیدروکسید و ۲۰ میلی لیتر آب مقطر مخلوط شد و بر روی گرم کن با دمای ۱۰۰ درجه قرار داده شد تا به جوش آید سپس ۳/۳۳ گرم خاکستر پوسته برنج با ۶/۹۵ گرم سدیم هیدروکسید و ۲۰ میلی لیتر آب مقطر مخلوط شد و بر روی گرم کن با دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا به جوش آید. بعد از دو ساعت، ترکیب حاصل از صافی کاغذی عبور داده شد تا محلول فعال کننده قلیایی به دست آید. در شکل (۹) فرایند سنتز محلول فعال کننده قلیایی نشان داده شده است.

۳. آزمایش های خاک و ساخت نمونه

۱-۳ آزمایش تراکم

آزمایش تراکم بر روی خاک بدون افزودنی و همچنین تمامی نمونه ها با درصد افزودنی های متفاوت طبق استاندارد ASTM D1557 انجام شد.



شکل ۹. فرایند سنتز ماده فعال کننده قلیایی با استفاده از پوسته برنج

۲-۳ آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری با استفاده از دستگاه مخصوص آزمایش و طبق استاندارد ASTM D2166 و با سرعت بارگذاری ۱ میلی متر بر دقیقه انجام شد. نمونه های ساخته شده استوانه ای دارای قطر ۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر بودند و پس از پایان زمان عمل آوری، بلافاصله مورد آزمایش قرار گرفتند. ۳-۳ آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط دکستر و کراسبرگن (۱۹۸۵) انجام شد. برای انجام این آزمایش از قالب استوانه ای شکل با قطر و ارتفاع ۵۰ میلی متر استفاده شده است. در این آزمایش نمونه ها به صورت قطری (شکل ۱۰) زیر جک دستگاه جهت شکستن قرار داده شدند. مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از رابطه (۱) تعیین می شود.

تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سرپاره، خاکستربادی، دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج

گرفتند و نتایج مربوط به آن‌ها ثبت شد. همچنین زمان عمل‌آوری نمونه‌ها ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در نظر گرفته شد.

۴. نتایج و بحث

۴-۱ تغییرات درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن

مخصوص خشک خاک

نتایج مربوط به آزمایش تراکم برای درصدهای مختلف هر یک از افزودنی‌ها و خاک خشک در شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود، با افزودن سرپاره به خاک رطوبت بهینه از ۲۲/۵ درصد به ۲۳/۵ تا ۲۳/۸ درصد افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک نیز از ۱/۶۱۵ به ۱/۶۵۱ تا ۱/۶۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش یافته است که این نتایج با نتایج حاصل از تحقیق (Shalabi et al., 2017) که بر روی خاک رس با خمیری بالا انجام گرفته بود، مطابقت دارد. افزودن خاکستربادی (شکل ۱۲) باعث افزایش رطوبت بهینه از ۲۲/۵ درصد به ۲۲/۸ تا ۲۳/۵ درصد به ازاء درصدهای مختلف افزودنی شده است که تغییرات زیادی نداشته است. همچنین حداکثر وزن مخصوص خشک خاک نیز در محدوده ۱/۶۰۵ تا ۱/۶۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نوسان بوده که بازهم تغییرات نسبت به خاک تثبیت نشده چشمگیر نبوده است. سایر محققین نیز چنین نتیجه‌گیری نموده‌اند که افزایش درصد خاکستربادی باعث تغییر چندانی در رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک نمی‌شود (Sarid and Dutta, 2016). افزودن دیاتومیت به خاک (شکل ۱۳)، رطوبت خاک را از ۲۲/۵ به ۲۴ تا ۲۶ درصد رسانده که مقدار افزایش قابل توجهی است. این موضوع می‌تواند به دلیل قابلیت جذب بالای آب توسط دیاتومیت باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزودن دیاتومیت به خاک، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک از ۱/۶۱۵ به ۱/۵۹۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش می‌یابد.

$$T = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (1)$$

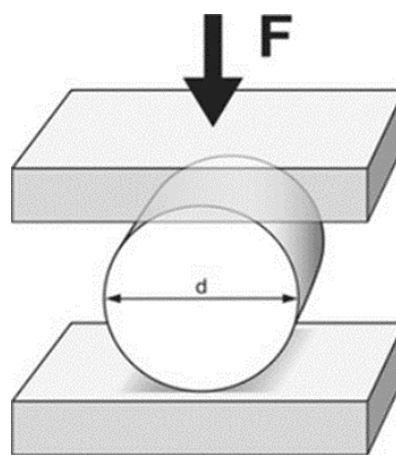
که در آن:

T: مقاومت کششی غیرمستقیم (مگاپاسگال)

P: حداکثر نیروی اعمال‌شده به نمونه (نیوتون)

d: قطر نمونه (میلی‌متر)

l: طول نمونه (میلی‌متر)

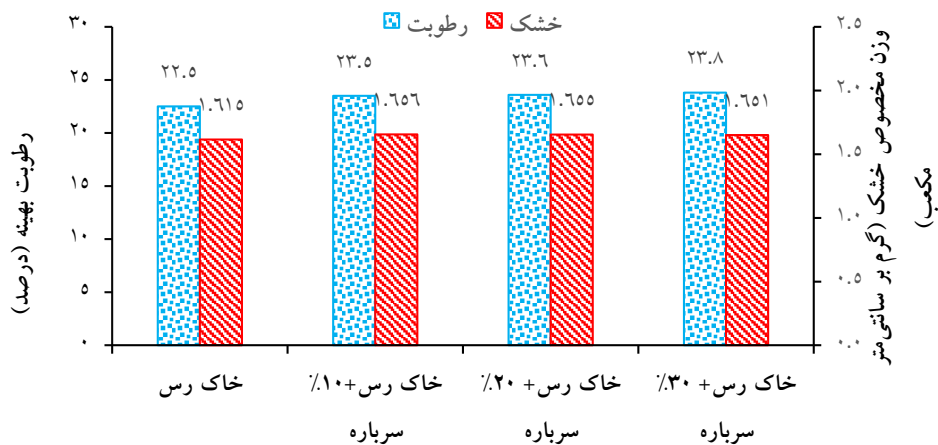


شکل ۱۰. جهت بارگذاری در کشش غیرمستقیم (ITS)

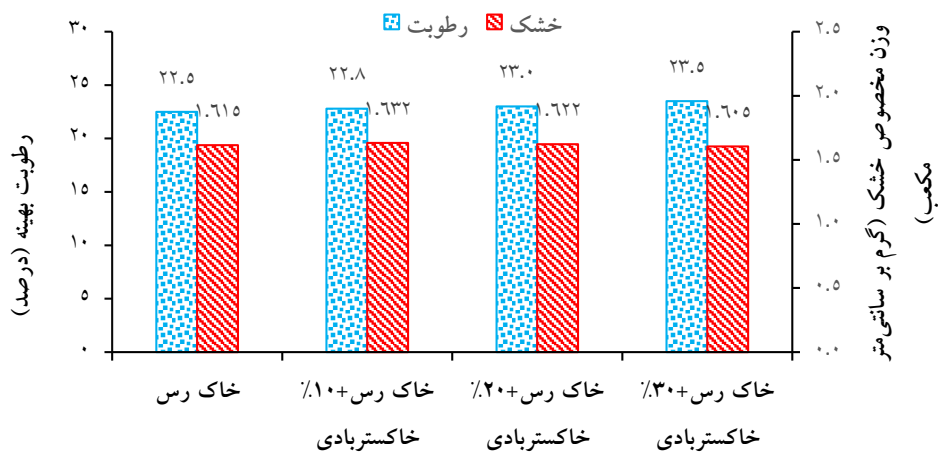
۳-۳ روش ساخت، زمان و نحوه عمل‌آوری

برای ساخت نمونه‌های مختلف ابتدا خاک و ماده افزودنی باهم به مدت ۵ دقیقه مخلوط و سپس به میزان رطوبت بهینه به آن محلول فعال‌کننده قلیایی اضافه شد و سپس مخلوط هم زده شد تا رطوبت کاملاً در خاک و ماده افزودنی پخش شود. پس از یکنواخت شدن مخلوط و رسیدن رطوبت به تمام نقاط خاک و افزودنی، نمونه در درون قالب مخصوص ریخته و تا رسیدن به چگالی حداکثر متراکم گردید.

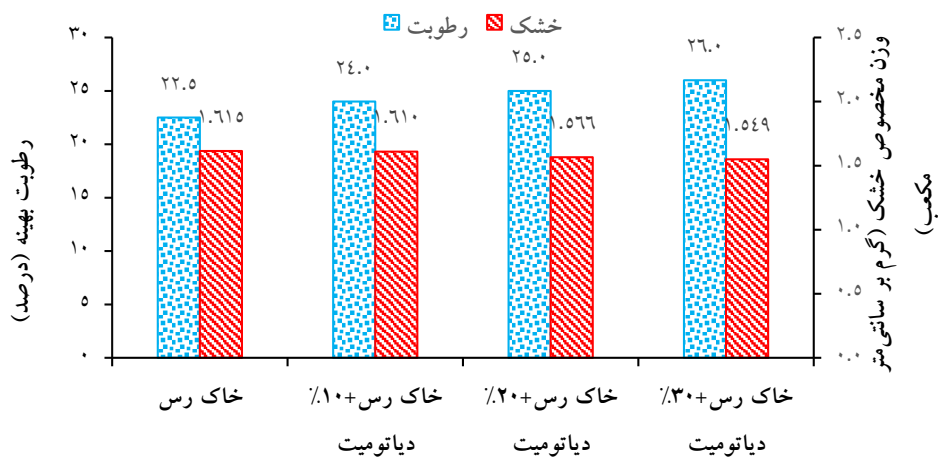
بعد از ساخت، نمونه‌ها بلافاصله از قالب خارج و در چندلایه نایلن پلاستیکی پیچیده و تا پایان زمان عمل‌آوری در این نایلن‌ها عمل‌آوری شدند. در پایان زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها بلافاصله بعد از بیرون آورده شدن از داخل نایلن بدون اینکه رطوبتی از دست دهند در همان حالت مرطوب و اشباع مورد آزمایش قرار



شکل ۱۱. رطوبت بهینه و تراکم خاک رس تثبیت شده با سرپاره



شکل ۱۲. رطوبت بهینه و تراکم خاک رس تثبیت شده با خاکستر بادی



شکل ۱۳. رطوبت بهینه و تراکم خاک رس تثبیت شده با دیاتومیت

۴-۲ نتایج مربوط به مقاومت فشاری تک‌محوری

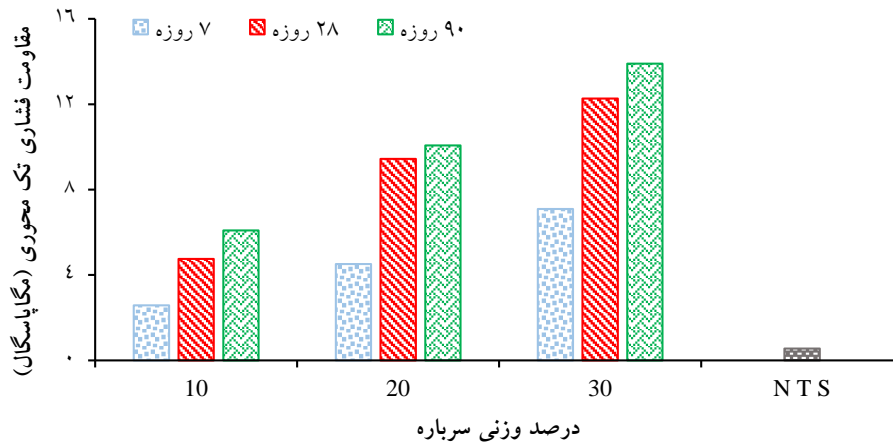
(UCS)

در شکل (۱۴) الی (۱۶) نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار داده شده است. شکل (۱۴) نشان می‌دهد که نمونه‌های تثبیت‌شده با ژئوپلیمر (بر پایه سرپاره) عملکرد بسیاری مناسبی داشته و افزایش مقاومت‌های چشمگیری نسبت به نمونه تثبیت نشده (N T S) از خود نشان می‌دهند. نمونه تثبیت‌شده با ۳۰ درصد وزنی سرپاره و محلول فعال‌کننده قلیایی در بلندمدت (عمل‌آوری ۹۰ روزه) به مقاومتی برابر با ۱۳/۹ مگاپاسکال رسیده است که نسبت به نمونه تثبیت نشده ۲۵/۲ برابر افزایش مقاومت داشته است. تثبیت با سرپاره در زمان کوتاه‌مدت (عمل‌آوری ۷ روزه) نیز عملکرد بسیار مناسبی داشته و به مقاومت ۷/۰۹ مگاپاسکال رسیده که نسبت به نمونه تثبیت نشده ۱۲/۸ برابر افزایش مقاومت داشته است. با توجه به شکل (۱۵)، درصد بهینه سرپاره جهت تثبیت با واکنش ژئوپلیمریزاسیون برابر با ۳۰ درصد وزن خشک خاک است. در شکل (۱۵) مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، تثبیت خاک رس در مواردی که مقاومت بسیار بالا مورد انتظار نباشد، مناسب است. نمونه تثبیت‌شده با ۳۰ درصد خاکستر بادی در مقایسه با سایر درصدها عملکرد بسیار مناسب‌تری داشته است. این نمونه در بلندمدت (عمل‌آوری ۹۰ روزه) توانسته است که به مقاومت ۲/۲۳ مگاپاسکال برسد که نسبت به نمونه تثبیت نشده ۴/۰۵ برابر افزایش مقاومت داشته است. این نمونه در کوتاه‌مدت نیز توانسته به مقاومت ۱/۳۹ مگاپاسکال برسد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد خاکستر بادی، مقاومت فشاری تک‌محوری نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۱۶) مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه دیاتومیت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه تثبیت‌شده با ۳۰ درصد

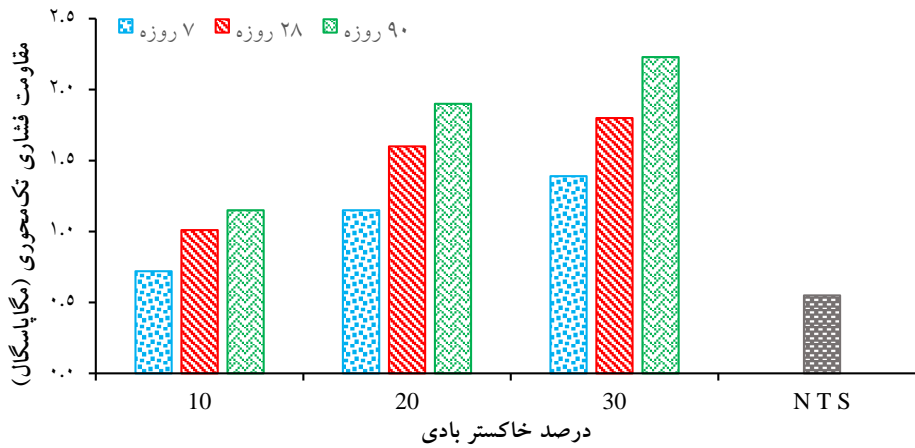
دیاتومیت در بلندمدت (عمل‌آوری ۹۰ روزه) به مقاومتی برابر با ۷ مگاپاسکال رسیده است که در مقایسه با نمونه تثبیت نشده ۱۲/۷ برابر افزایش مقاومت داشته است. در کوتاه‌مدت (عمل‌آوری ۷ روزه) نیز همین نمونه توانسته است به مقاومت مناسب ۳/۱ مگاپاسکال برسد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد خاکستر بادی، مقاومت فشاری تک‌محوری نیز افزایش می‌یابد.

دلیل عملکرد بهتر سرپاره نسبت به خاکستر بادی و دیاتومیت در تثبیت خاک را می‌توان به درصد کلسیم متفاوت آن‌ها نسبت داد. محتوای بالای کلسیم می‌تواند بر توسعه پلیمریزاسیون تأثیر گذاشته و ریزساختار ماده را تغییر دهد (Temuujin et al., 2009).

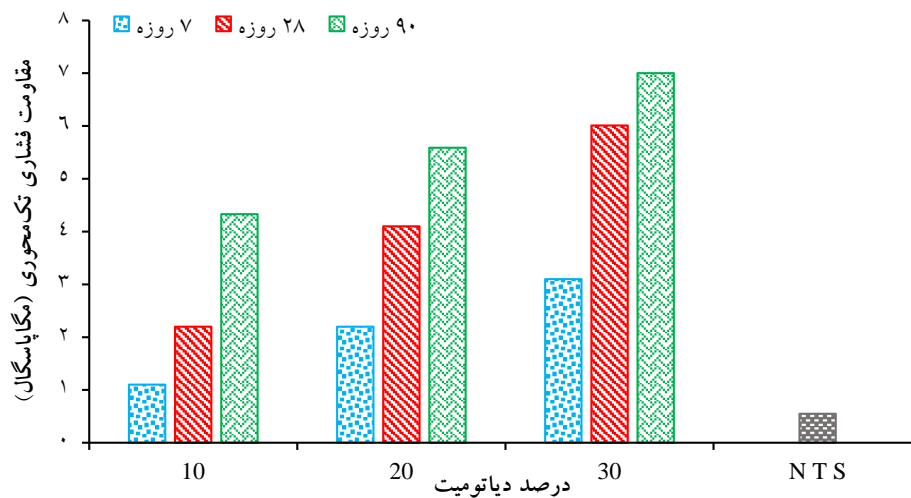
تحقیقات نشان داده است که در تثبیت خاک با ژئوپلیمر ساخته‌شده بر پایه سرپاره علاوه بر تشکیل ژل ژئوپلیمری، ژل حاوی کلسیم سیلیکات (C-S-H) نیز حاصل می‌شود و به‌طور هم‌زمان عمل می‌کنند. به‌علاوه محتوای بالای CaO زمان گیرش اولیه خمیر ژئوپلیمر را تسریع می‌بخشد (Wijaya et al., 2016; Kwad et al., 2020). اثر هم‌زمان این دو عامل سبب افزایش مقاومت چشمگیر نمونه تثبیت‌شده در مدت‌زمان کوتاه شده است. حداکثر میزان افزودنی در اکثر تحقیقات گذشته جهت تثبیت بر اساس واکنش ژئوپلیمریزاسیون برابر با ۳۰ درصد تعیین شده است (Yaghoubi et al., 2019; Abdullah et al., 2017; Aluraja et al., 2018). بیش از این میزان استفاده از افزودنی از لحاظ اقتصادی به‌صرفه نمی‌باشد و استفاده بیش از این درصد پروژه را از حالت اقتصادی بودن خود خارج می‌کند. در نمونه‌هایی تثبیت شده ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد افزودنی در تمامی زمان‌های عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها سیر صعودی داشته و افزایش پیدا کرده است که این روند مشابه تحقیقات گذشته است (Murmu et al., 2020; Yaghoubi et al., 2019).



شکل ۱۴. مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سنتز شده از سرباره و محلول فعال کننده قلیایی



شکل ۱۵. مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سنتز شده از خاکستر بادی و محلول فعال کننده قلیایی



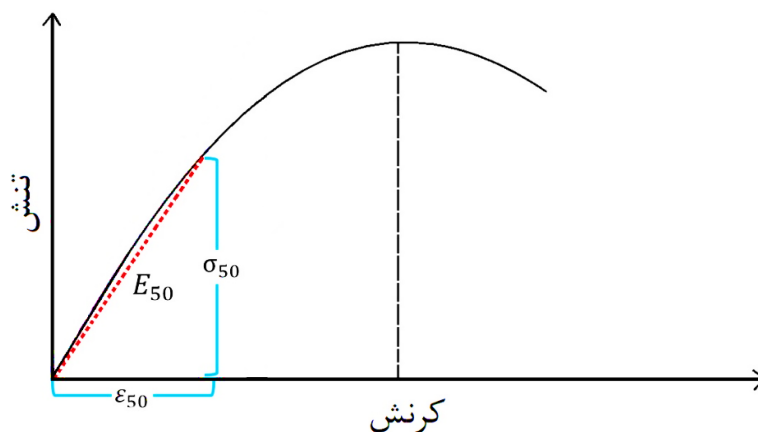
شکل ۱۶. مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سنتز شده از دیاتومیت و محلول فعال کننده قلیایی

تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سربراره، خاکستر بادی، دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج

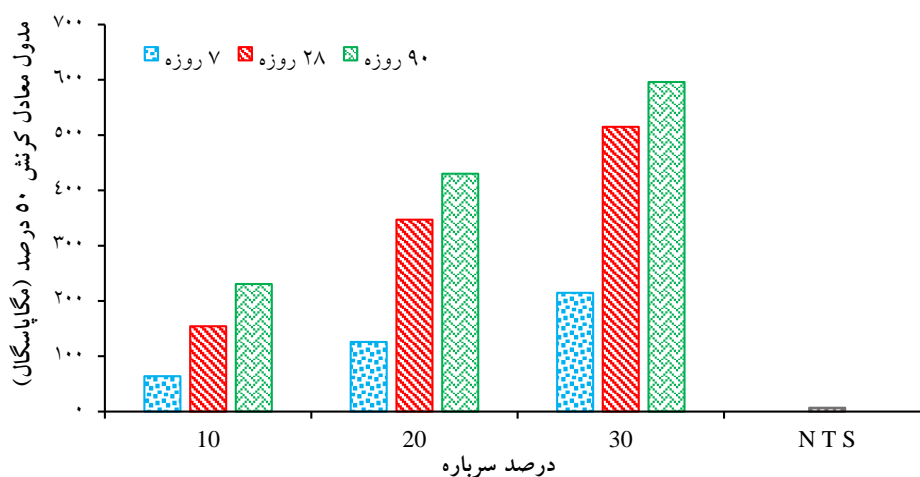
۳-۴ نتایج مدول یانگ

مقادیر مدول یانگ سکانت معادل کرنش ۵۰ درصد (E_{50}) که از شیب نمودار تنش و کرنش حاصل از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق شکل (۱۷) به دست آمده‌اند در شکل‌های (۱۸) تا (۲۰) نشان داده شده‌اند. برای محاسبه این پارامتر، کرنش معادل با نصف کرنش شکست (ϵ_{50}) در نظر گرفته می‌شود و با تقسیم مقدار تنش معادل با این کرنش (σ_{50}) بر کرنش نظیر آن (ϵ_{50}) مقدار آن به دست می‌آید.

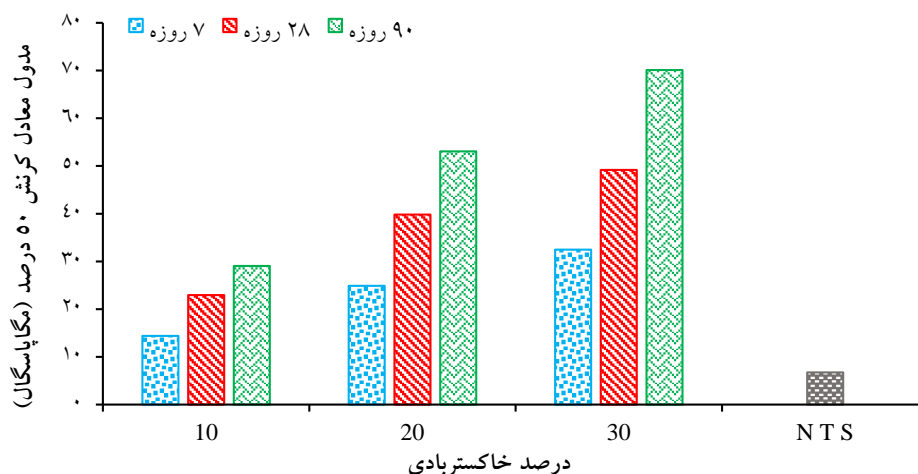
دلیل افزایش مقاومت نمونه‌ها با افزایش درصد افزودنی، افزایش سیلیکات، آلومینا و کلسیم در نمونه‌ها است (Xu and Van , 2002). سدیم هیدروکسید موجود در محلول فعال‌کننده قلیایی موجب انحلال سیلیکات آلومینا و کلسیم موجود در ماده افزودنی و تشکیل ژل ژئوپلیمری در ساختار خاک می‌گردد. با افزایش میزان ژل‌های ژئوپلیمری که در نتیجه افزایش درصد بستر است، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد (Al Bakri et al., 2012; Gao et al., 2013; Arulraja et al., 2018; Trinh and Bui 2018).



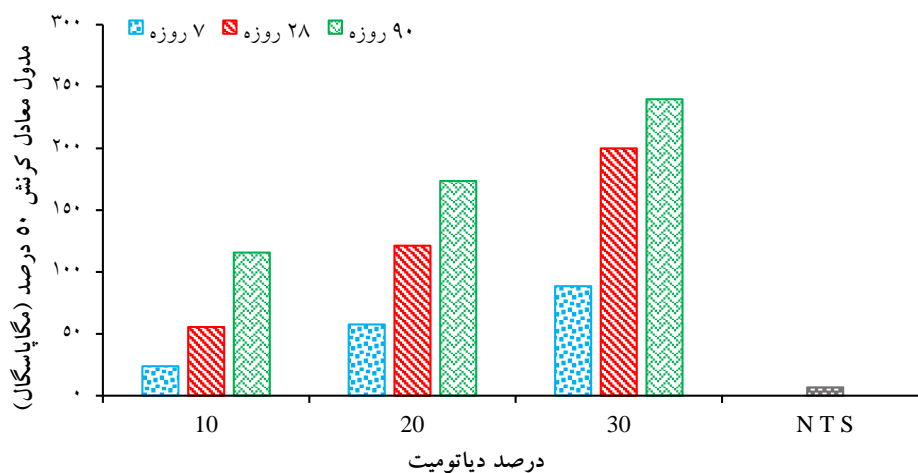
شکل ۱۷. نحوه اندازه‌گیری مدول یانگ E_{50}



شکل ۱۸. مدول یانگ (E_{50}) خاک تثبیت‌شده با سربراره و محلول فعال‌کننده قلیایی



شکل ۱۹. مدول یانگ (E50) خاک تثبیت شده با خاکستر بادی و محلول فعال کننده قلیایی



شکل ۲۰. مدول یانگ (E50) خاک تثبیت شده با دیاتومیت و محلول فعال کننده قلیایی

خاکستر بادی که نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد خاکستر بادی است در ۹۰ روز عمل آوری توانسته به مدولی برابر با ۷۰/۱۲ مگاپاسگال برسد که ۱۰/۴۱ برابر افزایش مدول نسبت به نمونه تثبیت نشده داشته است. نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد دیاتومیت نیز در روز ۹۰ عمل آوری به مدولی برابر با ۲۳۹/۷۲ رسیده است که نسبت به نمونه تثبیت نشده، ۳۵/۶۱ برابر افزایش مدول داشته است. همچنین ملاحظه می شود که با افزایش زمان عمل آوری و افزایش درصد افزودنی، نمونه ها سخت تر شده و مدول یانگ آن ها افزایش یافته است.

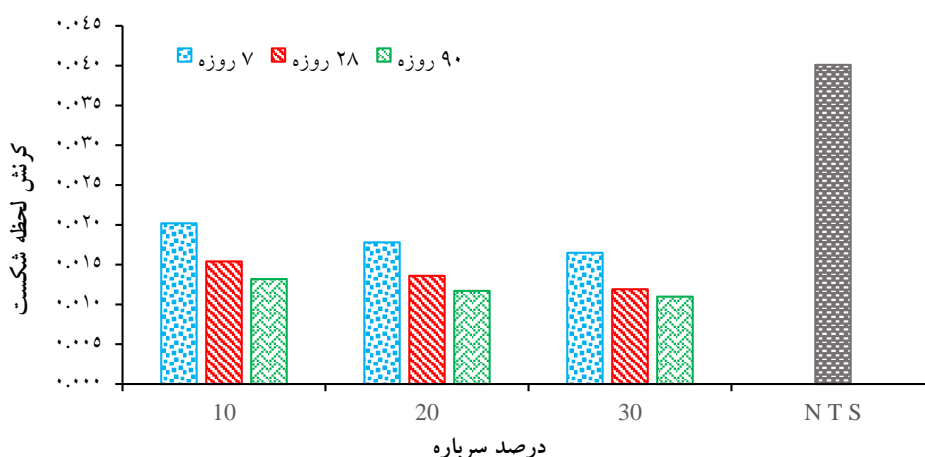
همان گونه که ملاحظه می شود، تغییرات مدول یانگ روندی مشابه با تغییرات مقاومت فشاری دارد. به عبارت دیگر با افزایش مقاومت فشاری، مدول یانگ نیز افزایش یافته است. محققانی همچون Biswal et al., و Ghanizadeh et al., 2020 نیز نشان داده اند که نمونه های با مقاومت فشاری بیشتر، مدول یانگ بیشتری دارند. بیشترین افزایش مدول یانگ در نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد سرباره مشاهده شده است. این نمونه توانسته است در ۹۰ روز عمل آوری به مدولی برابر با ۵۹۶ مگاپاسگال برسد که نسبت به نمونه تثبیت نشده (۶/۷۳ مگاپاسگال) حدود ۸۸ برابر افزایش مدول داده است. نمونه بهینه

تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سربراره، خاکستر بادی، دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج

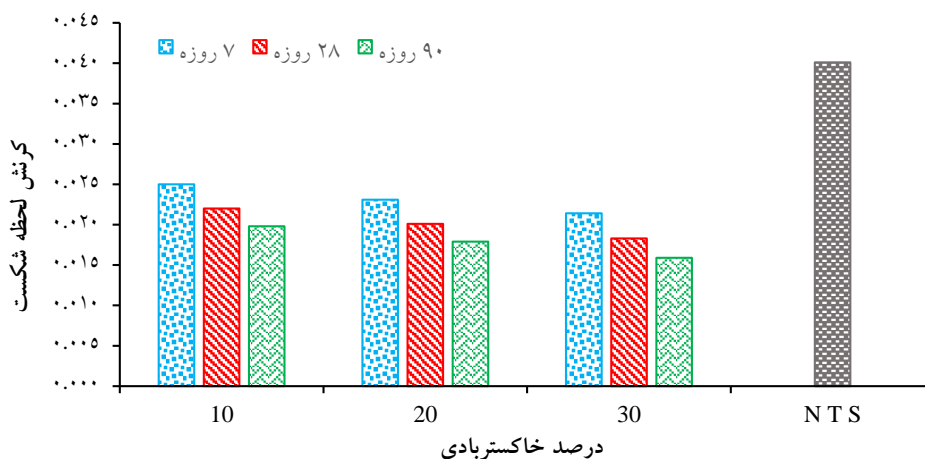
۴-۴ کرنش شکست

به ۰/۰۱۵۹ کاهش یافته است. همچنین کرنش شکست نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد دیاتومیت در روز ۹۰ عمل آوری نیز کاهش و به ۰/۰۱۴۶ رسیده است. در نمونه های تثبیت شده با تثبیت کننده ها در حضور محلول فعال کننده قلیایی، میزان کرنش شکست نسبت به نمونه تثبیت نشده به میزان چشمگیری کاهش یافته است. این موضوع بیانگر عملکرد مناسب تثبیت کننده ها در تغییر حالت خاک از حالت سست و انعطاف پذیر به حالت سخت و ترد می باشد. نتایج سایر محققین نیز نشان می دهد که با افزایش میزان تثبیت کننده و همچنین بیشتر شدن زمان عمل آوری مقاومت نمونه ها افزایش و کرنش شکست آن ها کاهش می یابد (abdilah et al., 2020; Zhang et al., 2013).

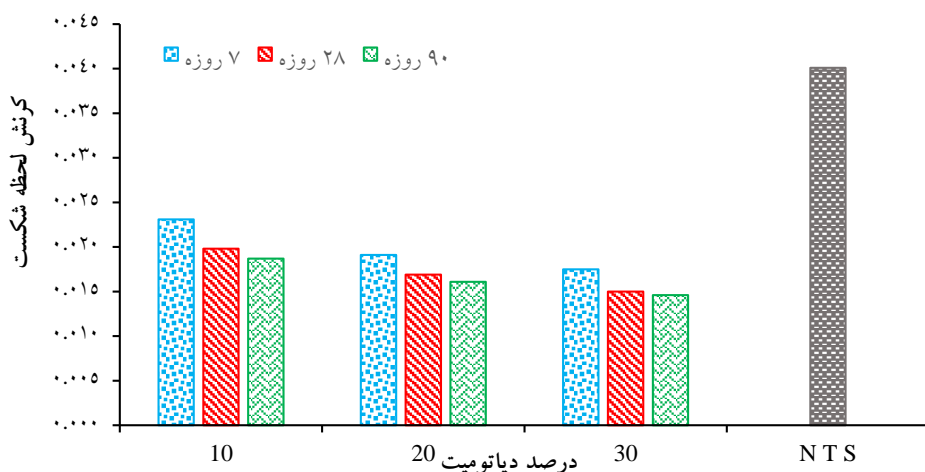
کرنش شکست نمونه های تثبیت شده در شکل های (۲۱) تا (۲۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل های (۲۱) تا (۲۳) می توان دید که تمامی نمونه های تثبیت شده نسبت به نمونه تثبیت نشده کرنش شکست کمتری دارند. کرنش شکست نمونه تثبیت نشده برابر با ۰/۰۴۰۱ می باشد. نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد سربراره که نمونه بهینه سربراره نیز هست زمانی که ۹۰ روز عمل آوری شده است کمترین میزان کرنش شکست یعنی ۰/۰۱۰۹ را به خود اختصاص داده است. میزان کرنش شکست نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد خاکستر بادی در روز ۹۰ عمل آوری



شکل ۲۱. کرنش شکست نمونه های تثبیت شده با سربراره و فعال کننده قلیایی



شکل ۲۲. کرنش شکست نمونه‌های تثبیت‌شده با خاکستربادی و فعال‌کننده قلیایی



شکل ۲۳. کرنش شکست نمونه‌های تثبیت‌شده با دیاتومیت و فعال‌کننده قلیایی

۴-۵ نتایج مربوط به کشش غیرمستقیم (ITS)

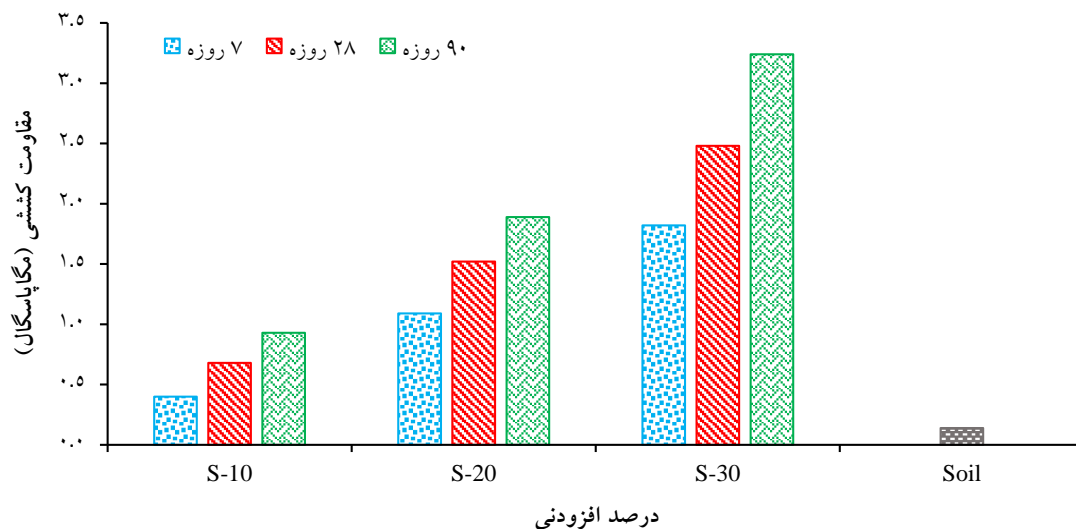
آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌هایی که در آزمایش مقاومت فشاری توانستند مقاومت‌های مناسبی را کسب کنند انجام گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) نشان داده شده است. در شکل‌های زیر نمونه‌ها با کدهایی به شکل S-10 نشان داده شده‌اند که حرف اول سمت چپ (برای مثال S) بیانگر نوع افزودنی (S=سرباره، D=دیاتومیت و F=خاکستربادی) و عدد بعد از آن (برای مثال ۱۰) نیز بیانگر درصد افزودنی است. آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه

تثبیت نشده خاک نشان داد که این خاک دارای مقاومت ناچیزی است؛ اما با توجه به شکل‌های (۲۴) و (۲۵) نمونه‌های اصلاح‌شده با ژئوپلیمر بر پایه سرباره، خاکستربادی و دیاتومیت مقاومت کششی مطلوبی از خود نشان می‌دهند. مناسب‌ترین عملکرد را در بین نمونه‌های تثبیت‌شده، نمونه تثبیت‌شده با ۳۰ درصد سرباره و محلول فعال‌کننده قلیایی نشان می‌دهد. این نمونه در بلندمدت (عمل‌آوری ۹۰ روزه) توانست به مقاومت کششی ۳/۲۴ مگاپاسکال دست یابد که نسبت به نمونه تثبیت نشده که مقاومتی برابر با ۰/۱۴ داشت، ۲۳ برابر افزایش مقاومت

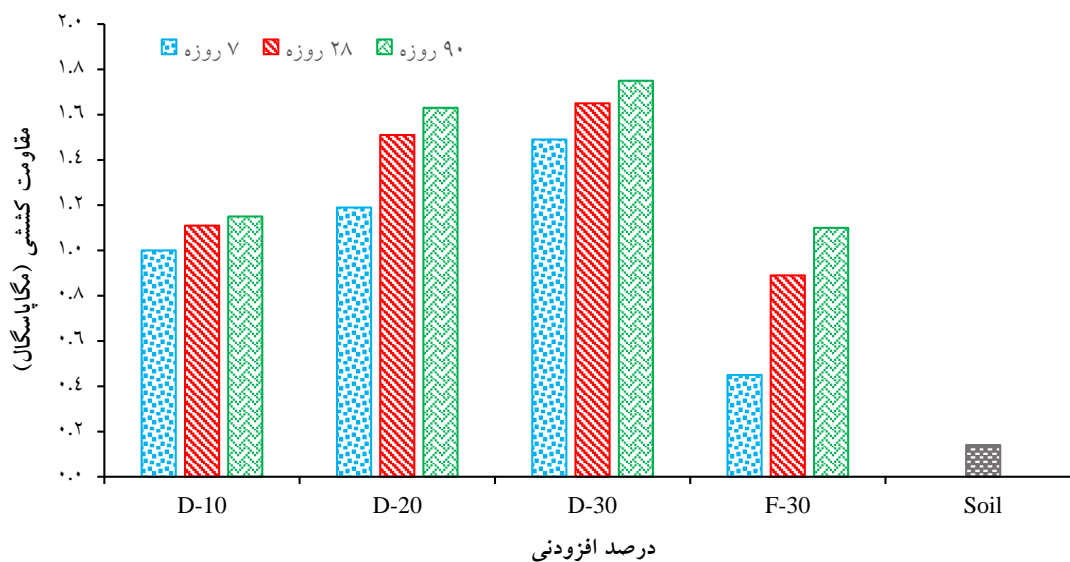
تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سربراره، خاکستریادی، دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج

نشان می‌دهد. نمونه تثبیت‌شده با ۳۰ درصد خاکستریادی و نمونه تثبیت‌شده با ۳۰ درصد دیاتومیت نیز به مقاومت کششی برابر با ۱/۱ و ۱/۷۵ مگاپاسگال پس از ۹۰ روز عمل‌آوری رسیدند.

کششی از خود نشان می‌دهد. همین نمونه در کوتاه‌مدت (عمل‌آوری ۷ روزه) توانسته است به مقاومت ۱/۸۲ مگاپاسگال برسد که نسبت به نمونه تثبیت نشده ۱۳ برابر افزایش مقاومت



شکل ۲۴. تغییرات مقاومت کششی نسبت به تغییر درصد مواد افزودنی در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت در سربراره



شکل ۲۵. تغییرات مقاومت کششی با تغییر درصد مواد افزودنی در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت دیاتومیت و خاکستریادی

(با فعال‌کننده قلیایی)

۵. نتیجه گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده می‌توان نتایج زیر را به صورت خلاصه بیان نمود:

۱- آزمایش XRF نشان داد که سرپاره مصرفی دارای مقادیر بالایی اکسید کلسیم، اکسید سیلیس و اکسید آلومینیم است که باعث می‌شود سرپاره یک بستر مناسب برای ساخت ژئوپلیمر باشد. تحلیل عنصری خاکسترپادی و دیاتومیت نشان داد که این دو ماده دارای درصد بالایی اکسید سیلیس هستند، اما اکسید کلسیم و آلومینیم کمتری دارند.

۲- اضافه کردن خاکسترپادی به خاک نتوانست تأثیر زیادی بر روی رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک داشته باشد، ولی اضافه کردن سرپاره به خاک با وجود تغییرات کم رطوبت بهینه، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را به میزان قابل توجهی افزایش داد و از ۱/۶۱۵ به حدود ۱/۶۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب رساند. اضافه کردن دیاتومیت به خاک به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به صورت پیوسته باعث افزایش درصد رطوبت بهینه از ۲۲،۵ به ۲۶ درصد و کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک از ۱/۶۱۵ به ۱/۵۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب شد.

۳- ژئوپلیمر بر پایه سرپاره بالاترین بازده را در بین ژئوپلیمرها داشته که با درصد بستر ۳۰ توانست به مقاومت ۱۳/۹ مگاپاسکال در ۹۰ روز عمل‌آوری برسد. ژئوپلیمر بر پایه ۳۰ درصد خاکسترپادی و ۳۰ درصد دیاتومیت نیز در ۹۰ روز عمل‌آوری توانستند به ترتیب به مقاومت فشاری تک‌محوری ۲/۲۳ مگاپاسکال و ۷ مگاپاسکال دست یابند. بنابراین می‌توان دید که دیاتومیت در مقایسه با خاکسترپادی افزودنی مناسب‌تری جهت سنتز ژئوپلیمر است.

۴- در تثبیت با ژئوپلیمر با افزایش درصد افزودنی پایه (سرپاره، خاکسترپادی و دیاتومیت) از ۱۰ به ۳۰ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌ها به صورت پیوسته افزایش می‌یابد و

هرچه درصد افزودنی بیشتر باشد با توجه به تشکیل ژل‌های

ژئوپلیمری بیشتر، مقاومت فشاری بیشتری حاصل می‌شود.

۵- مدول یانگ نسبت مستقیم با مقاومت فشاری تک‌محوری دارد و با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ نیز افزایش می‌یابد.

۶- افزایش درصد افزودنی در سنتز ژئوپلیمر باعث تغییر حالت خاک از نرم و انعطاف‌پذیر به ترد و شکننده شده است و این بدان معناست که سختی به مقدار قابل توجهی افزایش و کرنش شکست کاهش می‌یابد.

۷- مقاومت کششی با استفاده از تثبیت به وسیله ژئوپلیمر بهبود چشمگیری می‌یابد. برای مثال نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد سرپاره و فعال‌کننده قلیایی به عنوان بهینه‌ترین نمونه توانست به مقاومت ۳/۲۴ مگاپاسکال برسد، درحالی‌که مقاومت کششی خاک تثبیت نشده برابر با ۰،۱۴ مگاپاسکال است. درواقع مقاومت کششی خاک ۲۳ برابر افزایش از خود نشان می‌دهد.

۸- ژئوپلیمر سنتز شده بر پایه دیاتومیت که ماده‌ای قابل‌دسترس و ارزان است می‌تواند به صورت کارآمد برای تثبیت خاک‌های رسی با خصوصیات خمیری بالا استفاده شود. همچنین سیلیکات سدیم استخراج شده از پوسته برنج می‌تواند جایگزین سیلیکات سدیم صنعتی شود که کمک شایانی به استفاده بهینه از این ضایعات کشاورزی و حفظ محیط زیست می‌کند.

۶. مراجع

- Abdila, S. R., Abdullah, M. M. A. B., Tahir, M. F. M., Ahmad, R., & Isradi, M. 2020, May. Characterization of Fly ash and Ground Granulated Blast Slag for Soil Stabilization Application Using Geopolymerization Method. *Materials Science and Engineering*, 389: 1-9.

- Abdullah, H. H., Shahin, M. A., & Sarker, P. 2017. *Stabilisation of Clay with fly-ash*

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره چهارم (۵۳) / تابستان ۱۴۰۱

- ASTM International. (2014). ASTM D 854: standard test methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer on Soil. In Annual book of ASTM standards 2014 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.
- ASTM International. (2015). ASTM D 1557: standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). In Annual book of ASTM standards 2015 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.
- ASTM International. (2015). ASTM D 2166: standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. In Annual book of ASTM standards 2015 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society
- ASTM International. (2015). ASTM D 2487: Standard Test Method Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). In Annual book of ASTM standards 2015 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.
- ASTM International. (2015). ASTM D 3282: Standard Test Method Practice for Classification of Soils & Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. In Annual book of ASTM standards 2015 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.
- ASTM International. (2014). ASTM C 496: Standard Test Method Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In Annual book of ASTM standards 2014 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.
- geopolymer incorporating GGBFS. In Proceedings of the second Proceedings of the Second World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering. Barcelona, Spain, 1-8.
- Abdullah, H. H., Shahin, M. A., & Walske, M. L. (2019). Geo-mechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag. *Soils and Foundations*. 59: 1906–1920.
- Adhikari, S. (2017). Mechanical properties of soil-RAP-geopolymer for the stabilization of road base/subbase. PhD Dissertation, University of Louisiana.
- Al Bakri Abdullah, M. M., Kamarudin, H., Abdulkareem, O. A., Ghazali, C. M. R., Rafiza, A. R., & Norazian, M. N. (2012). Optimization of alkaline activator/fly ash ratio on the compressive strength of manufacturing fly ash-based geopolymer. *Mechanics and Materials*, 110: 734-739.
- Arulrajah, A., Yaghoubi, M., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Bo, M. W., & Leong, M. (2018). Evaluation of fly ash-and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. *Soils and Foundations*, 58: 1358-1370.
- ASTM International. (2016). ASTM D 422: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. In Annual book of ASTM standards 2016 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.
- ASTM International. (2014). ASTM D 4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, & Plasticity Index of Soils. In Annual book of ASTM standards 2014 (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.

activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. *Construction and building materials*, 48, 441-447.

- Hu, W., Nie, Q., Huang, B., Su, A., Du, Y., Shu, X., & He, Q. (2018). Mechanical property and microstructure characteristics of geopolymer stabilized aggregate base. *Construction and Building Materials*, 191: 1120-1127.

- Huang, Yi and Han, Minfang (2011). The influence of Al₂O₃ addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products, *Journal of Hazardous Materials*, 193: 90-94.

- Kakali, G., Kioupi, D., Skaropoulou, A., & Tsvilis, S. (2018). Lightweight geopolymer composites as structural elements with improved insulation capacity. *MATEC Web of Conferences*. Rabat, Morocco, 1-4.

- Kwad, N. F., Abdulkareem, A. H., & Ahmed, T. M. (2020). The Effect of Fly Ash Based Geopolymer on the Strength of Problematic Subgrade Soil with High CaO Content. In *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*. Zurich Switzerland, 539-551.

- Murmu, A. L., Dhole, N., & Patel, A. (2020). Stabilisation of black cotton soil for subgrade application using fly ash geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*, 21: 867-885.

- Nergis, D. B., Abdullah, M., Vizureanu, P., & Tahir, M. (2018). Geopolymers and Their Uses. Paper presented at the IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. Lasi, Romania, 1-10.

- Nikolić, I., Zejak, R., Radmilović, V., Blečić, D., & Tadić, M. (2012). Geopolymerization of

- ASTM International. (2015). ASTM D 1883: . Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. In *Annual book of ASTM standards 2015* (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.

- ASTM International. (2013). ASTM D 4972: Standard Test Method Method for pH of Soils. In *Annual book of ASTM standards 2013* (pp. 19428-2959). West Conshohocken, PA: American Society for Testing & Materials.

- Biswal, D.R., Sahoo, U.C. and Dash, S.R. (2017). Strength and stiffness studies of cement stabilized granular lateritic soil. In *International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"* Springer, Cham 320-336.

- Ghanizadeh, A. R., Yarmahmoudi, A., & Abbaslou, H. (2020). Mechanical Properties of Low Plasticity Clay Soil Stabilized with Iron Ore Mine Tailing and Portland Cement. *Journal of Mining and Environment*, 11: 837-853.

- Dhakar, S., JAIN, S. (2020). Improving Clay of Intermediate Plasticity for Rural Road Sub-Grades – A Case Study. *International Journal of Transportation Engineering*, 8(2), 133-148.

- Dexter, A. R., & Kroesbergen, B. (1985). Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31, 139-147.

- Ding, Y. C., Cheng, T. W., & Dai, Y. S. J. S. C. (2017). Application of geopolymer paste for concrete repair. *Journal of Structural Concrete*, 18:561-570.

- Gao, K., Lin, K. L., Wang, D., Hwang, C. L., Tuan, B. L. A., Shiu, H. S., & Cheng, T. W. (2013). Effect of nano-SiO₂ on the alkali-

- by Geopolymer Based Fly Ash. Applied Engineering Research, 13: 7954-7958.
- Wattanachai, P., & Suwan, T. (2017). Strength of Geopolymer Cement Curing at Ambient Temperature by Non-Oven Curing Approaches: An Overview. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Lisbon, Portugal, 1-6.
- Wijaya, S. W., & Hardjito, D. (2016). Factors affecting the setting time of fly ash-based geopolymer. Materials Science Forum, 841: 90-97.
- Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Bo, M. W., & Darmawan, S. (2018). Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil. Soils and foundations, 58: 716-728.
- Yaghoubi, M., Arulrajah, A., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Darmawan, S., & Wang, J. (2019). Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay. Applied Clay Science, 167: 33-42.
- 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 Materials, 47: 1468-1478.
- fly ash as a possible solution for stabilization of used sandblasting grit. Zaštita materijala, 53: 243-246.
- Saride, S., & Dutta, T. T. (2016). Effect of fly-ash stabilization on stiffness modulus degradation of expansive clays. Journal of Materials in Civil Engineering, 28: 1-12.
- Shalabi, F. I., Asi, I. M., & Qasrawi, H. Y. (2017). Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 29: 394-399.
- Swain, K. (2015). Stabilization of soil using geopolymer and biopolymer. Ms Thesis, National Institute of Technology, Rourkela.
- Trautman R.L. (2005), Geopolymers with the Potential for Use as Refractory Castables, Advances in Technology of Materials and Materials Processing, 7: 187-190.
- Temuujin, J. v., Van Riessen, A., & Williams, R. J. J. o. h. m. (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. Journal of Hazardous Materials, 167: 82-88.
- Trinh, S. H., & Bui, Q. A. T. J. I. J. o. A. E. R. (2018). Influencing of Clay and Binder Content on Compression Strength of Soft Soil Stabilized

علیرضا غنی زاده، کوروش میرزایی، سمیه بختیاری

علیرضا غنی زاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را با رتبه ممتاز در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را با رتبه ممتاز در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران- ژئوتکنیک از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی، ژئوتکنیک حمل و نقل، بهسازی خاک و محاسبات نرم بوده و در حال حاضر دانشیار دانشگاه صنعتی سیرجان است.



کوروش میرزایی درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه کرمانشاه و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی عمران-ژئوتکنیک در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه صنعتی سیرجان اخذ نموده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مطالعات آزمایشگاهی و عددی خاک بوده است.



سمیه بختیاری، درجه کارشناسی در رشته علوم و مهندسی خاک را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان و درجه کارشناسی ارشد در رشته علوم و مهندسی خاک را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته علوم و مهندسی خاک از دانشگاه صنعتی اصفهان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بازیافت ضایعات و سنتز مصالح ساختمانی سبز، سنتز جاذب های سبز و حذف آلاینده های خاک و آب است و در حال حاضر استادیار دانشگاه صنعتی سیرجان است.

