

ارزیابی مقاومت فشاری خاک ماسه‌بادی تثبیت شده با فعال‌کننده‌های قلیایی

مقاله علمی - پژوهشی

نازنین احمدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

علیرضا غنی‌زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

سمیه بختیاری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

صفحه ۱۶۰-۱۴۷

چکیده

در بیابان‌ها، ماسه‌های بادی به دلیل کمبود آب، بادهای شدید و تغییرات دما تشکیل شده و به‌طور طبیعی دارای استحکام و ظرفیت باربری کمی می‌باشند. این نوع خاک‌ها به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود برای استفاده در پروژه‌های راهسازی مناسب نیستند و نیازمند بهسازی، از جمله تثبیت با افزودنی‌ها، می‌باشند. روش‌های سنتی تثبیت مانند استفاده از سیمان یا آهک، به دلیل اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، به‌عنوان گزینه‌های مناسب شناخته نشده‌اند. در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از محلول‌های فعال‌کننده قلیایی و ژئوپلیمرها به دلیل کاهش انتشار گاز CO_2 ، مصرف کمتر انرژی و سازگاری بیشتر با توسعه پایدار نسبت به سیمان و آهک، به‌عنوان گزینه‌های سبز و مقرون‌به‌صرفه معرفی شده‌اند. در این پژوهش، به منظور بهسازی و تثبیت خاک ماسه‌بادی از نسبت‌های مختلف سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید (۲، ۱ و ۰، ۸ و ۱۰ و ۱۲ مولار استفاده شده است. آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و تحلیل‌های XRD و SEM برای ارزیابی ریزساختار خاک ماسه‌بادی تثبیت شده انجام شدند. مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه اندازه‌گیری شد و مشخص گردید که بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های تثبیت شده با نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید و غلظت ۱۲ مولار پس از ۹۱ روز عمل‌آوری حاصل شد. تحلیل SEM نشان داد که تغییرات ریزساختاری خاک محدود بوده است که این امر به دلیل کمبود سیلیس و آلومینیوم کافی برای تشکیل ژل ژئوپلیمری تفسیر شد. در مجموع، ترکیب محلول سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید با نسبت ۲ به ۱ و غلظت ۱۲ مولار به‌عنوان مؤثرترین گزینه برای بهبود مقاومت خاک ماسه‌بادی معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: تثبیت، ماسه‌بادی، مقاومت فشاری، سیلیکات سدیم، سدیم هیدروکسید

۱- مقدمه

شکل گرد گوشه دانه‌های ماسه‌بادی بر قفل و بست مکانیکی بین سنگ‌دانه‌ها تأثیر می‌گذارد (Neumann and Curbach 2018)؛ بنابراین، ماسه‌بادی اغلب الزامات فنی را برآورده نمی‌کند و نمی‌تواند بدون تثبیت به‌عنوان بستر روسازی استفاده شود (Abderrahmane and Ratiba 2013). این وضعیت ممکن است با بهبود خواص ساختاری، فیزیکی، شیمیایی-فیزیکی، مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک بستر اصلاح شود (Onyelowe et al. 2019). در طی چند دهه گذشته، ماسه‌های بادی پس از تثبیت با افزودنی‌های مختلف برای بهبود خواص ژئوتکنیکی و تأمین

در بیابان‌ها، فقدان آب، تشکیل خاک‌ها را از طریق اثرات فرسایش، بادهای شدید، رسوب‌گذاری و تغییرات مهم دما در طول شبانه‌روز تحت تأثیر قرار می‌دهد که منجر به تجزیه سنگ‌ها به ماسه‌بادی می‌شود (Li et al. 2009). ماهیت ریزدانه، گرد گوشگی و صاف ماسه‌بادی، منجر به استحکام ضعیف آن می‌شود (Amhadi and Assaf 2021). بسیاری از محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ماسه‌های بادی واقع در مکان‌های مختلف جهان دارای خواص و ویژگی‌های فیزیکی نسبتاً مشابهی هستند (Padmakumar et al. 2012; Seif 2013).

الزامات و مشخصات مهندسی، به‌عنوان شالوده و بستر ساخت‌وساز مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Shalabi et al. 2019). ماسه‌بادی را می‌توان با استفاده از انواع پوزولانی و صنعتی از جمله آهک، خاکستر بادی، دوده سیلیسی، سیمان و بتونیت تثبیت کرد (Rahman et al. 2021). سیمان پرتلند از جمله تثبیت‌کننده‌های کارآمد در بهبود خواص پایین خاک‌های ماسه‌ای است (AlKarni and ElKholi 2012). با این حال، استفاده از ژئوستتیک‌ها و تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند سیمان برای تثبیت خاک به دلیل مسائل مالی، محدودیت‌هایی دارد. علاوه بر این، تولید سیمان مسئول انتشار حدود ۷ درصد از دی‌اکسید کربن منتشرشده در جهان است (Disu and Kolay 2021; Pourakbar and Huat 2017) و به‌سازگی و تثبیت شیمیایی خاک که معمولاً با استفاده از آهک و سیمان انجام می‌شود سازگاری با محیط‌زیست و توسعه پایدار ندارد. به همین دلیل، استفاده از پوزولان‌های طبیعی و ژئوپلیمرها مورد توجه قرار گرفته است. جایگزینی سیمان با ضایعات صنعتی مانند سرباره و خاکستر بادی برای تولید سیمان مخلوط و استفاده از ژئوپلیمر یا مواد چسباننده غیرسیمانی مانند مواد آلومینوسیلیکات فعال‌شده با مواد قلیایی به‌عنوان راهکارهایی جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی سیمان پیشنهاد شده‌اند (Rashad and Ouda 2019). ژئوپلیمر به‌عنوان یک پلیمر معدنی از دو جزء اصلی، یعنی مواد منبع آلومینوسیلیکات و محلول فعال‌کننده قلیایی، تشکیل شده است (Görhan 2015). فعال‌کننده‌های قلیایی نقش مهمی در انحلال اکسیدهای آلومینات و سیلیس مواد خام فعال‌شده ایفا می‌کنند. سدیم هیدروکسید (NaOH)، هیدروکسید پتاسیم (KOH)، سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم به‌عنوان پرکاربردترین فعال‌کننده‌ها برای سنتز مواد واکنش‌دهنده آلومینوسیلیکات در فرآیند فعال‌سازی استفاده شده‌اند (Görhan 2015) واکنش‌های فعال‌سازی قلیایی در سنتز ژئوپلیمرها عمدتاً شامل انحلال آلومینوسیلیکات‌های خام، تشکیل مونومر در محلول قلیایی، جهت‌گیری مجدد و پلیمریزاسیون مونومرها به شبکه و تراکم شبکه است (Rao and Liu 2015). به‌طورکلی، مواد آلومینوسیلیکاتی که حاوی مقادیر بالایی از سیلیس، آلومینات و مواد معدنی اکسید کلسیم هستند، در تولید ژئوپلیمر استفاده شده‌اند. ترکیب سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) و سدیم هیدروکسید (NaOH) به‌طور گسترده به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی به شکل مایع مورد استفاده قرار گرفته است (Zainal et al. 2018).

سیلیکات سدیم به‌طور گسترده‌ای در فعال‌سازی مواد آلومینوسیلیکاتی مانند پودر سرباره کوره بلند، متاکائولن، خاکستر بادی و غیره استفاده شده است. این ماده بیشترین افزایش مقاومت مکانیکی را همراه با کاهش نفوذپذیری ارائه داده است که به دلیل ایجاد ساختاری پایدار و متراکم است. پارامترهایی مانند غلظت سدیم هیدروکسید و روش عمل‌آوری به‌عنوان عوامل مهمی در نظر گرفته شده‌اند که باید هنگام تولید یک محصول ژئوپلیمری برای یک کاربرد خاص مدنظر قرار گیرند (Heah et al. 2013). همچنین افزایش خواص مکانیکی ژئوپلیمر علاوه بر اندازه ذرات رس و ماسه و نسبت آن‌ها در مخلوط، به غلظت سدیم هیدروکسید نیز وابسته است (Khoury 2019). در مطالعات متعددی تأثیر مواد مختلف به همراه فعال‌کننده‌های مختلف بر خصوصیات مکانیکی خاک‌های مسئله‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. کریستلو و همکاران (۲۰۱۲) از ۱۰ مولار سدیم هیدروکسید به‌عنوان فعال‌کننده برای خاکستر بادی نوع C با درصد کلسیم بالا و خاکستر بادی نوع F با درصد کلسیم پایین برای تثبیت خاک نرم استفاده کردند. آن‌ها همچنین ترکیب‌های خاک باسیمان و خاک با آهک را به‌طور جداگانه بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقاومت فشاری کوتاه‌مدت متعلق به خاکستر با درصد بالای کلسیم و مقاومت فشاری بلندمدت متعلق به خاکستر با درصد پایین کلسیم است. در مقایسه با ترکیب‌های خاک باسیمان و خاک با آهک، مقاومت کوتاه‌مدت خاک نرم با خاکستر با درصد پایین کلسیم کمتر است، ولی در بلندمدت افزایش می‌یابد (Cristelo et al. 2012). نوع فعال‌کننده قلیایی، غلظت و نسبت سیلیکات سدیم به ترکیب قلیا کننده یک عامل تأثیرگذار بر عملکرد ترکیبات ژئوپلیمری است. کریستلو و همکاران (۲۰۱۳) اثر فعال‌کننده قلیایی بر پایه سدیم (ترکیبی از سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم) و خاکستر بادی کلاس F را بر روی خاک حاوی رس و ماسه با پلاستیسیته پایین بررسی کردند. برای ساخت نمونه‌ها، از نسبت جرمی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲، سه غلظت مختلف سدیم هیدروکسید (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ مولار)، درصد خاکستر (۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نسبت به کل جامدات) و نسبت فعال‌کننده به خاکستر حدود ۱ و ۲/۵ و نسبت خاکستر به خاک (۰/۲۵، ۰/۴۳ و ۰/۶۷) استفاده شد. مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روز اندازه‌گیری شد و اثربخشی این روش باسیمان معمولی مقایسه

مقاومت فشاری تک‌محوری، از ترکیب ۲۰ درصد سرباره زغال‌سنگ و ۸۰ درصد باطله سنگ‌آهن، برابر با ۱۱/۲۴ مگا پاسکال به‌دست‌آمده است (Li et al. 2022). شووی و همکاران (۲۰۲۲) با افزودن ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد متاکائولن و استفاده از سدیم هیدروکسید (در مولاریته‌های ۲، ۴، ۶ و ۸) به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی، خاک رس را تثبیت کردند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن و افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش یافته است. بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری، برابر با ۴۱۰۹ کیلو نیوتن در مدت عمل‌آوری ۲۸ روزه بود (Shi et al. 2022). آنودریکویکوا و همکاران (۲۰۱۶) ژئولایت را با متاکائولن در درصدهای صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ ترکیب کرده و از سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند. نمونه‌ها در مدت‌های ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه با افزودن ۵۰ درصد متاکائولن به‌دست‌آمده است (Andrejkovičová et al. 2016). دانشوگر، غفارپور و ارزانی بخشی از ماسه‌بادی را با ۵، ۱۰ و ۲۵ درصد متاکائولن جایگزین کرده و از نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید برابر با ۱ تا ۳ و سدیم هیدروکسید ۳ تا ۱۴ مولار برای تثبیت استفاده کردند. نمونه‌ها در دو مدت‌زمان ۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری با افزودن ۲۰ درصد متاکائولن، با نسبت ۲/۵ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در سدیم هیدروکسید ۱۲ مولار، برابر با ۵/۳ مگا پاسکال در مدت‌زمان ۲۸ روزه به‌دست‌آمده است (Daneshgar, Ghaffarpour Jahromi, and Arzani 2023). بررسی پیشینه تحقیق نشان داد که تاکنون مطالعه‌ای جامع در خصوص تثبیت خاک ماسه‌بادی با استفاده از فعال‌کننده‌های قلیایی مانند سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید، به‌صورت مستقل و بدون استفاده از مواد آلومینو-سیلیکاتی، انجام نشده است. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه بادی با نسبت‌های مختلف سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با مولاریته‌های مختلف سدیم هیدروکسید در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه است. همچنین، آزمایش‌های XRD و SEM بر روی یکی از نمونه‌هایی که دچار تورم شده بود، انجام شد.

گردید. نتایج نشان داد با کاهش نسبت فعال‌کننده به خاکستر تا حداکثر مقدار (۳/۴۳)، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که این امر به دلیل هزینه بالای فعال‌کننده، نتیجه‌ای مثبت محسوب می‌شود. بررسی تثبیت خاک با استفاده از فعال‌کننده‌های قلیایی نشان داد که تنها ۲۰ تا ۴۰ درصد حداکثر مقاومت فشاری UCS در دوره عمل‌آوری یکساله به دست آمد، درحالی‌که سیمان در مدت ۲۸ روز به ۸۰ تا ۹۰ درصد حداکثر مقاومت فشاری خود رسیده است (Cristelo et al., 2013). کیم و همکاران به مطالعه تثبیت ماسه و شن با نسبت‌های مختلف سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بیشترین مقاومت فشاری را دارد (Kim, Dang, and Do 2016). در پژوهش مهنا و همکاران (۲۰۱۷)، متاکائولین به همراه درصدهای مختلف سیمان، سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید برای تثبیت مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد پتاسیم هیدروکسید باعث افزایش واکنش‌پذیری بین پتاسیم هیدروکسید و ژل سیلیکا می‌شود، درحالی‌که سدیم هیدروکسید موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها گردید. در مرحله دوم، تأثیر جایگزینی جزئی متاکائولن با سیمان پرتلند به‌منظور کاهش زمان عمل‌آوری ملات‌های ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفت. جایگزینی جزئی متاکائولن با سیمان پرتلند به‌طور قابل‌توجهی زمان را بهبود بخشید و ژئوپلیمر را تازه و نزدیک به سیمان معمولی کرد. این مزیتی بزرگ بود، زیرا ژئوپلیمر خالص برای زمان‌گیرش به دمای حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد. بهترین نسبت که در نهایت انتخاب شد، از ۷۵٪ متاکائولن و ۲۵٪ سیمان تشکیل شده بود (Mehena, Amar, and Raoul 2017). لانگوس و همکاران (۲۰۲۰) تشکیل سیمان ژئوپلیمری را با استفاده از ضایعات معدن نیکل، خاکستر بادی زغال‌سنگ و فعال‌کننده‌های قلیایی مانند سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ترکیب ۵۰ درصد ضایعات معدن نیکل و ۵۰ درصد خاکستر بادی زغال‌سنگ، با نسبت ۰/۵ برای سدیم هیدروکسید به سیلیکات سدیم، بالاترین مقاومت (۲۲/۱ مگا پاسکال) را در مدت‌زمان ۲۸ روزه دست می‌دهد (Longos Jr et al. 2020). لی و همکاران (۲۰۲۲) باطله سنگ‌آهن را با مقادیر صفر و ۱۰ تا ۴۰ درصد سرباره زغال‌سنگ ترکیب کرده و سپس با سدیم هیدروکسید ۱۰ مولار تثبیت کردند. نتایج نشان داد بیشترین

۲-مواد و روش کار

۲-۱-خاک

خاک ماسه‌بادی مورد استفاده در این تحقیق از روستای فخرآباد سیرجان در استان کرمان تهیه شده (شکل ۱) که به دلیل ظرفیت



شکل ۱. خاک ماسه‌بادی مورد استفاده

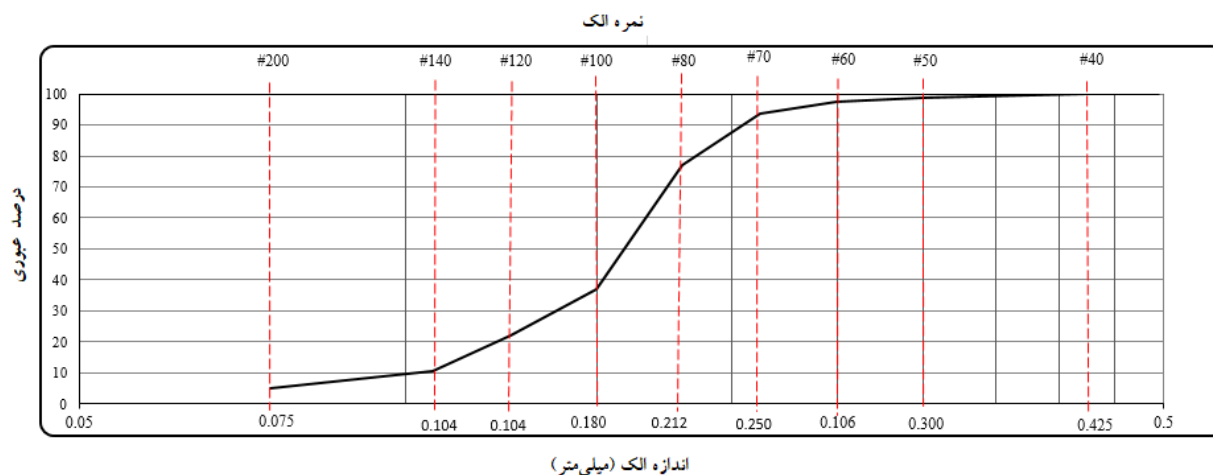
باربری پایین، به‌عنوان خاک ضعیف و مسئله‌دار جهت خاکریزی و بسترسازی شناخته می‌شود. بسیاری از مناطق کویری ایران دارای خاک‌هایی با ویژگی‌های مشابه می‌باشند. طبقه‌بندی به روش متحد انجام شده و ماسه‌بادی در رده ماسه بد دانه‌بندی شده لای دار (SP-SM) قرار داده شده است. همچنین، در روش آشتو، این ماسه در رده ماسه لای دار (A-3) طبقه‌بندی شده است. مشخصات فیزیکی ماسه‌بادی در جدول ۱ و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه‌بادی نیز در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک ماسه‌بادی فخرآباد

| مقدار | استاندارد | مشخصات |
|-------|------------|----------------------|
| A-3 | ASTM D3282 | طبقه‌بندی آشتو |
| SP-SM | ASTM D2487 | طبقه‌بندی یونیفاید |
| ۹۴/۹۸ | ASTM D2487 | درصد ماسه |
| ۵/۰۲ | ASTM D2487 | درصد رس و لای |
| ۰/۱۵ | ASTM D2216 | درصد رطوبت بهینه |
| ۱/۵۴۷ | ASTM D2216 | وزن مخصوص خشک حداکثر |
| ۲/۶۵ | ASTM D854 | چگالی دانه‌ها |
| NP | ASTM D4318 | حد روانی |
| NP | ASTM D4318 | حد خمیری |

جدول ۲. ترکیب شیمیایی خاک ماسه‌بادی

| ترکیبات شیمیایی | درصد (%) |
|--------------------------------|----------|
| LOI | ۶/۳۷ |
| Pb | <۰/۰۱ |
| Zn | <۰/۰۱ |
| Cu | <۰/۰۱ |
| BaO | ۰/۰۶ |
| P ₂ O ₅ | ۰/۰۸ |
| MnO | ۰/۲۹ |
| TiO ₂ | ۰/۴ |
| K ₂ O | ۱/۸۹ |
| Na ₂ O | ۲/۹۳ |
| MgO | ۱/۸۲ |
| CaO | ۷/۸۶ |
| Fe ₂ O ₃ | ۶/۲۷ |
| Al ₂ O ₃ | ۱۳/۷۳ |
| SiO ₂ | ۵۸/۱۴ |



شکل ۲. منحنی دانه بندی خاک ماسه بندی



شکل ۳. چسب سیلیکات سدیم



شکل ۴. سدیم هیدروکسید جامد

۲-۲- سیلیکات سدیم

در این تحقیق از چسب سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3)، تولیدی شرکت سیلیکات گستر اصفهان، استفاده شده است. سیلیکات سدیم به عنوان یک فعال کننده قلیایی، چسبنده، نرم کننده یا پخش کننده مورد استفاده قرار گرفته است (Jamil et al. 2021). تصویر سیلیکات سدیم مایع در شکل ۳ نمایش داده شده است.

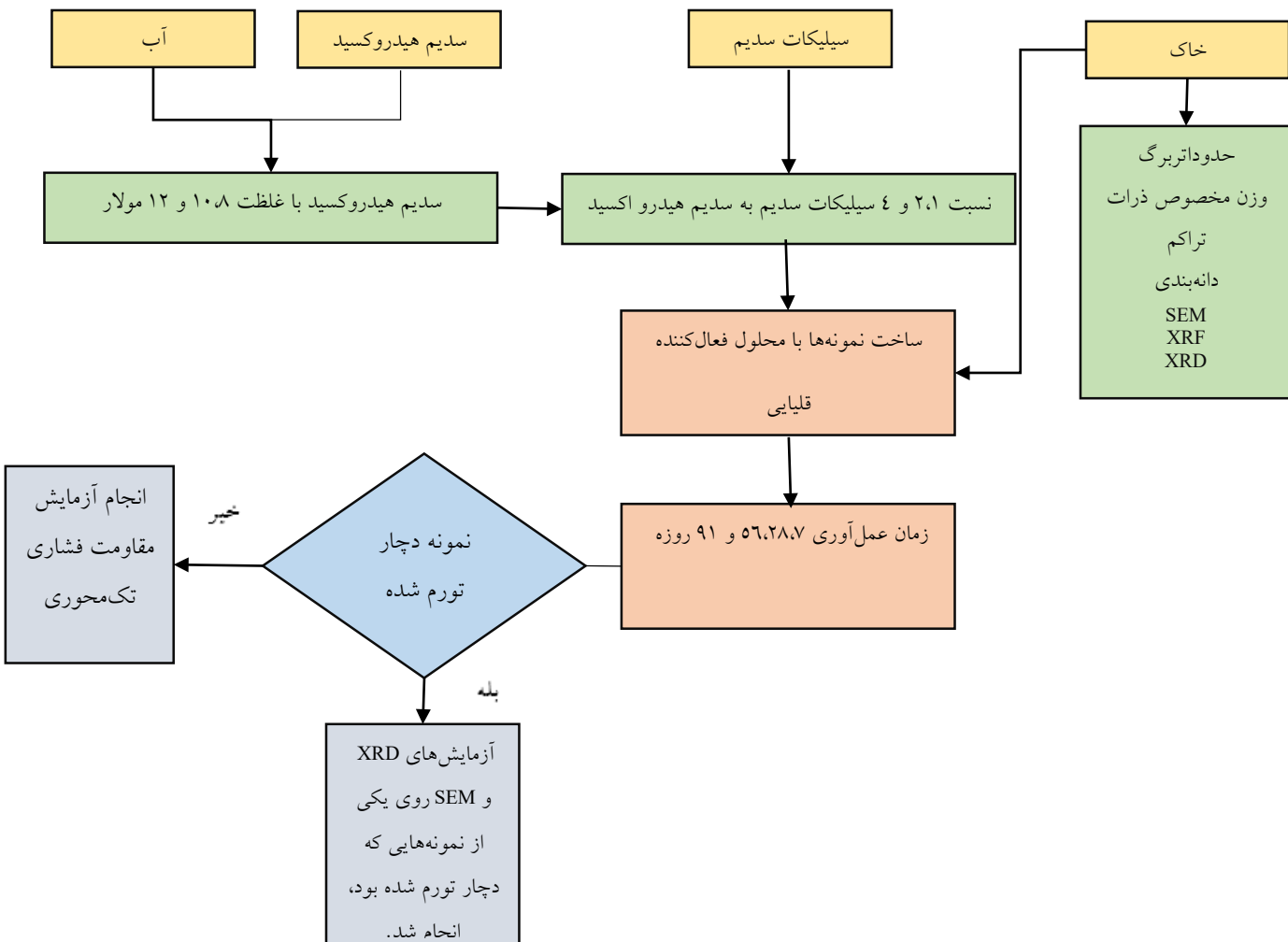
۲-۳- سدیم هیدروکسید

سدیم هیدروکسید که در گذشته با نام محلول قلیایی شناخته می شد و امروزه به عنوان یک محلول با خاصیت بازی قوی در بسیاری از صنایع کاربرد دارد، در بازار مواد شیمیایی با نام کاستیک سودا یا سود پرک نیز معروف است (شکل ۴). این ماده سفیدرنگ و بی بو به شدت تمایل به حل شدن در آب دارد و آب را به خود جذب می کند؛ بنابراین در نگهداری و ذخیره سازی آن باید دقت شود تا دور از آب و رطوبت نگهداری شود. سود پرک از شرکت گهر پارس تهیه شده است.

۵-۲- روش ساخت

بهینه به صورت وزنی به ماسه بادی اضافه شد و مخلوط به دست آمده تا رسیدن به یکنواختی کامل هم زده شد. سپس این مخلوط در سه لایه در قالب‌های نمونه‌سازی با ابعاد ۵۰ در ۱۰۰ میلی‌متر ریخته و با استفاده از چکش مخصوص و انرژی تراکم مورد استفاده در آزمایش‌های تراکم، متراکم گردید. بعد از آن، نمونه‌ها با جک هیدرولیکی از قالب بیرون آورده شدند و در چند لایه سلفون پیچیده شده و برای عمل‌آوری در دوره‌های زمانی ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روز درون پلاستیک‌های زیپ‌دار قرار داده شدند و در دمای اتاق عمل‌آوری شدند. در شکل ۵، فلوچارت مراحل ترکیب مواد و فرآیند مربوط به آزمایش‌های انجام شده ارائه شده است.

برای تثبیت ماسه بادی با استفاده از سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید به عنوان فعال‌کننده قلیایی، ابتدا محلول سدیم هیدروکسید با آب مقطر در سه مولاریته ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار تهیه و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد. سپس این محلول با سیلیکات سدیم در سه نسبت وزنی ۱، ۲ و ۴ (نسبت وزنی سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید) ترکیب گردید. برای تعیین میزان هر یک از مواد شیمیایی، محلول نهایی محاسبه شد و سپس با توجه به نسبت وزنی مواد، مقدار دقیق هر کدام از مواد تعیین و میزان سدیم هیدروکسید مشخص شد. در نهایت، مجموعاً ۳۶ نمونه ساخته و عمل‌آوری گردید. برای ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری، محلول فعال‌کننده به همراه رطوبت



شکل ۵. فلوچارت مراحل ترکیب مواد و فرآیند مربوط به آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

۶-۲- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

مورد استفاده برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در شکل ۶ نشان داده شده است.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166 انجام شد. این آزمایش با کنترل اثر شکل نمونه و با سرعت بارگذاری ۱ میلی متر در دقیقه انجام شد. دستگاه



شکل ۶. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

۳- نتایج

۳-۱- تأثیر افزودن نسبت های مختلف سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری

مقاومت فشاری تک محوری افزایش یافته است. مطالعات نشان داده اند که در غلظت ۸ مولار، بهترین عملکرد مربوط به نسبت یک به یک سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید است، اما با افزایش غلظت، نسبت دوه یک این ترکیب عملکرد بهتری دارد (نژاد کورکی، غنی زاده و بختیاری، ۱۴۰۳). در پژوهش دیگری، زمانی که نسبت مایع قلیایی به خاکستر بادی ثابت نگه داشته شد، نسبت های مختلفی از سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم با غلظت

۱۰ مولار به مخلوط اضافه شد و نتیجه نشان داد که نسبت ۱/۵ به یک بیشترین مقاومت را ایجاد کرده است. در آزمایش های دیگری که برای تثبیت ماسه و شن با نسبت های مختلف سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید و غلظت ۸ مولار انجام شد، نسبت دوه یک سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بیشترین مقاومت فشاری را تولید کرد (Kim et al. 2016). دلایل احتمالی کاهش مقاومت فشاری با افزایش نسبت سدیم هیدروکسید از ۲ به ۴ به شرح زیر می باشند.

-تعداد قلیایی: سدیم هیدروکسید یک ماده بسیار قلیایی است. افزایش بیش از حد قلیائیت می تواند منجر به تخریب ساختار خاک و کاهش چسبندگی بین ذرات شود. این امر می تواند باعث کاهش مقاومت فشاری خاک شود (Olaniyan et al. 2011).

-کاهش واکنش های مفید: در نسبت های بالاتر، سدیم هیدروکسید ممکن است به طور کامل با سیلیکات ها و آلومینات ها در خاک واکنش ندهد. واکنش ناکامل می تواند به کاهش تشکیل مواد پایدار و مقاوم منجر شود (Keshav, Mishra, and Singh 2018).

تغییرات مقاومت فشاری تک محوری ماسه بادی با توجه به نسبت های مختلف سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ مولار و زمان های عمل آوری مختلف (۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه) تحت انرژی تراکم استاندارد به ترتیب در شکل های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است. با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری نمونه ها کاهش و همچنین با توجه به شکل ها، با افزایش زمان عمل آوری، مقاومت نمونه ها افزایش پیدا کرده است. در شکل ۹، بیشترین مقاومت فشاری تک محوری به میزان ۱/۳۸ مگا پاسکال در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، پس از ۹۱ روز عمل آوری مشاهده شده است. همچنین، کمترین مقاومت در نسبت ۴ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، به مقدار ۰/۲۷ مگا پاسکال در زمان عمل آوری ۷ روزه به دست آمد. در شکل ۱۰، بیشترین مقاومت در نسبت ۴ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۰ مولار برابر با ۱/۵۳ مگا پاسکال در زمان عمل آوری ۹۱ روزه مشاهده شد و کمترین مقاومت در نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۰ مولار برابر با ۰/۲۰۸ مگا پاسکال در زمان عمل آوری ۷ روزه ثبت گردیده است. در شکل ۱۱، بیشترین مقاومت در نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مولار برابر با ۱/۵۸ مگا پاسکال در زمان عمل آوری ۹۱ روز و کمترین مقاومت در نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مولار برابر با ۰/۳۲۹ مگا پاسکال در زمان عمل آوری ۷ روزه مشاهده شده است. با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید،

شکست پیوندهای بین ذرات خاک شود. این امر می‌تواند مقاومت فشاری را کاهش دهد (Kulanthaivel et al. 2023). در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۰ و ۱۲ مولار نمونه‌های مقاومت فشاری تورم پیدا کردند. شکل نمونه تورم یافته در شکل (۱۰) نشان داده شده است. به دلیل تغییر ابعاد نمونه‌ها و خارج شدن شکل نمونه‌ها از حالت استاندارد استوانه‌ای، مقدار مقاومت فشاری برای این نمونه‌ها اندازه‌گیری نشده است.

-تشکیل محصولات ناخواسته: افزایش بیش‌ازحد سدیم هیدروکسید ممکن است به تشکیل محصولات واکنشی ناخواسته منجر شود که ممکن است خواص مکانیکی خاک را تضعیف کند (Hajiani Boushehrian 2022).

-تورم و انقباض زیاد: مقادیر زیاد سدیم هیدروکسید می‌تواند منجر به تغییرات حجمی زیاد (تورم و انقباض) در خاک شود. این تغییرات باعث ایجاد ترک‌ها و ضعف در ساختار خاک می‌شوند (Ramesh and Manjunatha 2020).

-تغییر در ساختار میکروسکوپی: سدیم هیدروکسید بیش‌ازحد می‌تواند ساختار میکروسکوپی خاک را تغییر داده و باعث



۱ روز بعد از عمل‌آوری ۷ روز بعد از عمل‌آوری

شکل ۱۰. تورم نمونه‌های ساخته‌شده با نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۰ و ۱۲ مولار باگذشت زمان عمل‌آوری

به‌دقت کنترل شود، زیرا مقدار بیش‌ازحد می‌تواند تأثیرات منفی بر خواص مهندسی خاک داشته باشد.

۴-نسبت‌های مقاومت فشاری در زمان‌های مختلف

عمل‌آوری نسبت به ۷ روزه

نسبت مقاومت فشاری در زمان عمل‌آوری ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه به مقاومت فشاری ۷ روزه در جدول ۳ نشان داده‌شده است. نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه به مقاومت فشاری ۷ روزه در محدوده‌ای بین ۱/۰۷ تا ۲/۷۹ قرار دارد. همچنین، نسبت مقاومت فشاری ۵۶ روزه به مقاومت فشاری ۷ روزه در محدوده‌ای بین ۱/۴۳ تا ۶/۶۹ است. همچنین، نسبت مقاومت فشاری ۹۱ روزه به مقاومت فشاری ۷ روزه در محدوده‌ای بین ۱/۹۵ تا ۷/۱۹ ثبت شده است.

در تحقیقات گذشته نیز نشان داده‌شده است که اضافه نمودن سدیم هیدروکسید (NaOH) به خاک می‌تواند باعث تورم خاک شود. برای مثال در پژوهشی، خاک ماسه بد دانه‌بندی شده با نسبت‌های مختلف سدیم هیدروکسید با غلظت‌های ۱۲/۵ و ۱۵ مولار به آلومینا (۰/۹، ۱/۲۵ و ۱/۶) تثبیت شد. نتایج نشان داد که پس از گذشت سه روز، نمونه‌های ساخته‌شده با نسبت‌های سدیم هیدروکسید (با غلظت‌های ۱۲/۵ و ۱۵ مولار) به آلومینا ۰/۹ و ۱/۲۵ دچار تورم گردیدند (دهجی، ۱۳۹۵). علت این تورم واکنش هیدروکسید (NaOH) به‌عنوان یک باز قوی با کانی‌های رس در خاک است. این واکنش‌ها می‌توانند منجر به تغییر ساختار کانی‌های رس و افزایش حجم آن‌ها شوند. به‌طور خاص، سدیم هیدروکسید می‌تواند سبب تجزیه برخی از کانی‌های رس و آزاد شدن سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها شود که این امر می‌تواند به جذب آب بیشتر و در نتیجه تورم خاک منجر شود (Hussain 2019). مقدار سدیم هیدروکسید مورد‌استفاده در تثبیت خاک‌ها باید

جدول ۳. نسبت مقاومت فشاری در زمان‌های مختلف عمل‌آوری به مقاومت فشاری در زمان عمل‌آوری ۷ روزه

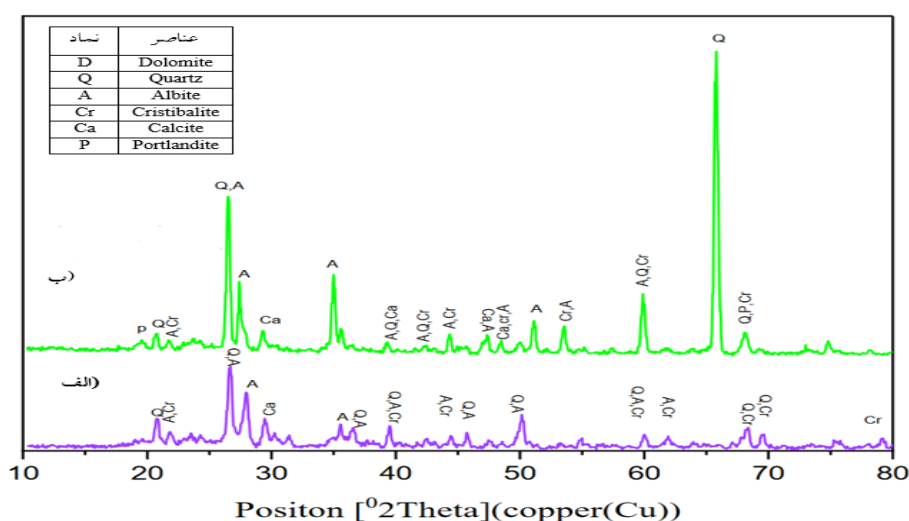
| نسبت سیلیکات | | | | |
|--------------|--------------|---------|---------|---------|
| مولارسته | سدیم به سدیم | ۲۸ روزه | ۵۶ روزه | ۹۱ روزه |
| هیدرو اکسید | | | | |
| | ۱ | ۲/۷۷ | ۶/۶۹ | ۷/۱۹ |
| ۸ | ۲ | ۱/۰۷ | ۲ | ۳/۲۴ |
| | ۴ | ۱/۱۸ | ۱/۴۳ | ۱/۹۵ |
| ۱۰ | ۲ | ۲/۳۶ | ۲/۸ | ۴/۷۵ |
| | ۴ | ۱/۲۱ | ۱/۵ | ۳/۷۹ |
| ۱۲ | ۲ | ۲/۷۹ | ۳/۸۹ | ۴/۸۱ |
| | ۴ | ۱/۱۳ | ۱/۸۱ | ۴/۰۹ |

نتایج تحلیل پرتو اشعه ایکس (XRD)

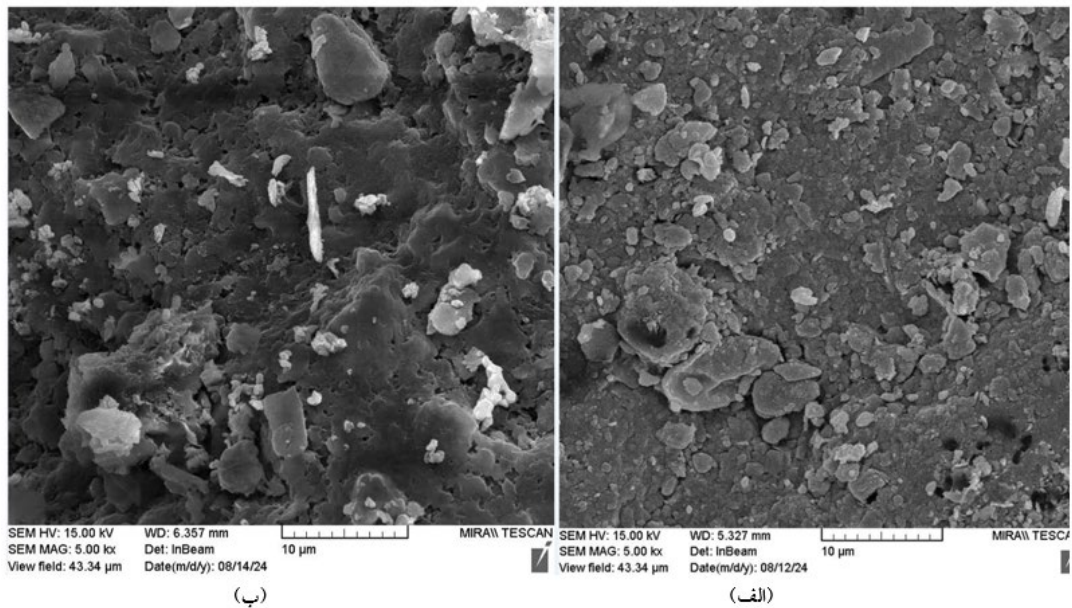
آزمایش‌های XRD و SEM بر روی نمونه خاک و یکی از نمونه‌هایی که دچار تورم شده بود (با نسبت یک سیلیکات سدیم به هیدروکسید با غلظت ۱۲ مولار در زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه) انجام گرفت. در شکل ۱۱ نتایج گراف‌های XRD مربوط به نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. در نمونه‌های خاک ۱۱-الف و نسبت یک سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه (۱۱-ب)، فازهای اصلی شامل آلپیت و کوارتز هستند. پیک‌های XRD این نمونه‌ها تقریباً مشابه‌اند.

نتایج تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در شکل ۱۲ نتایج SEM مربوط به نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج آزمایش SEM بر روی نمونه نسبت یک سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه (۱۲-الف) نشان داد ساختار خاک به‌طور کلی مشابه ماسه‌بادی اولیه باقی مانده است. تغییرات شیمیایی و فیزیکی مورد انتظار با افزودن ژل‌های ژئوپلیمری به‌طور محدود مشاهده شدند. این به این دلیل است که مقدار کمی ژل ژئوپلیمری در نمونه تشکیل شده است. علت این موضوع، وجود تنها مقدار کمی سیلیس و آلومینیوم در خاک ماسه‌بادی است که به واکنش با ژل‌های ژئوپلیمری کمک کرده است. به‌طور کلی، تأثیر ژل‌های ژئوپلیمری بر روی خاک به دلیل کمبود مواد فعال برای تشکیل ژل محدود بوده است.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش XRD نمونه‌ها الف (خاک، ب) نسبت یک سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه



شکل ۱۲. نتایج آزمایش SEM نمونه‌ها

(الف) نسبت یک سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در زمان عمل آوری ۵۶ روزه، (ب) خاک

۵- نتیجه گیری

در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت‌های ۱۰ و ۱۲ مولار، نمونه‌ها دچار تورم شدند. این تورم ممکن است به دلیل عدم تعادل در نسبت ترکیبات و واکنش‌های شیمیایی ناپایدار بوده باشد؛ بنابراین، تنظیم دقیق‌تر نسبت‌ها برای جلوگیری از تورم و بهبود خواص مکانیکی ضروری است.

برای تثبیت خاک ماسه‌بادی با غلظت ۸ مولار سدیم هیدروکسید، نسبت ۱:۱ سیلیکات به سدیم هیدروکسید به عنوان نسبت بهینه تعیین شد. با افزایش غلظت به ۱۰ و ۱۲ مولار، نسبت ۱:۲ سیلیکات به سدیم هیدروکسید عملکرد بهتری نشان داد، زیرا ژل‌های سیلیکاتی بیشتری تشکیل می‌شود و تثبیت خاک به شکل مناسب‌تری انجام می‌شود؛ بنابراین، برای غلظت‌های بالاتر، نسبت ۱:۲ بهترین عملکرد را دارد.

نسبت مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش زمان عمل آوری به طور قابل توجهی افزایش یافته است. نسبت مقاومت فشاری در دوره‌های ۲۸، ۵۶ و ۹۱ روزه نسبت به مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب در محدوده‌های ۱/۰۷ تا ۲/۷۹، ۱/۳۴ تا ۶/۶۹ و ۱/۹۵ تا ۷/۱۹ قرار داشته است. این افزایش نشان‌دهنده بهبود قابل توجه مقاومت فشاری نمونه‌ها با گذشت زمان است که تأکید بر اهمیت

دوره عمل آوری طولانی‌تر برای دستیابی به مقاومت فشاری بالاتر دارد.

نتایج آزمایش SEM نشان داد تثبیت خاک ماسه‌بادی با نسبت ۱:۱ سیلیکات به سدیم هیدروکسید و غلظت ۱۲ مولار پس از ۵۶ روز عمل آوری، تنها منجر به تشکیل مقدار کمی ژل ژئوپلیمری شده و تغییر ساختاری قابل توجهی در خاک رخ نداده است. این امر نشان می‌دهد واکنش شیمیایی برای ایجاد پیوندهای قوی بین ذرات خاک کافی نبوده‌اند. در نتیجه، خاک ماسه‌بادی همچنان به حالت اولیه خود نزدیک باقی‌مانده و مقاومت فشاری مطلوبی به دست نیامده است. این ترکیب به‌تنهایی برای تثبیت مؤثر خاک کافی تشخیص داده نشد.

خاک ماسه‌بادی، زمانی که با محلول سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید با نسبت ۲ به ۱ و غلظت ۱۲ مولار ترکیب شد و به مدت ۹۱ روز عمل آوری گردید، به بالاترین مقاومت فشاری دست یافت.

خاک ماسه‌بادی، زمانی که با محلول سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید با نسبت ۴ به ۱ و غلظت ۸ مولار ترکیب شد و به مدت ۷ روز عمل آوری گردید، به کمترین مقاومت فشاری دست یافت.

۶-مراجع

- International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(2):23.
- Görhan, Gökhan (2015). The Evaluation with Anova of the Effect of Lime Admixture and Thermal Cure Time on Fly Ash Paste Activated with Sodium Silicate Solution. *Construction and Building Materials*, 94:228–34.
- Hajjani Boushehrian, Alireza (2022). Effect of Sodium Hydroxide Additive on Mechanical Properties and Durability of Self-Compacting Concrete with Sulfate Aggregates in Chloride Environment. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(5):3819–32.
- Heah, C. Y., H. Kamarudin, A. M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul Nizar, C. M. Ruzaidi, and Y. M. Liew (2013). Kaolin-Based Geopolymers with Various NaOH Concentrations. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20: 313–22.
- Hussain, Saddam (2019). Stabilization of Expansive Soil Using Sodium Hydroxide.
- Jamil, Noorina Hidayu, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, Faizul Che Pa, Mohamad Hasmaliza, Wan Mohd Arif W. Ibrahim, Ikmal Hakem A. Aziz, Bartłomiej Jeż, and Marcin Nabiałek (2021). Phase Transformation of Kaolin-Ground Granulated Blast Furnace Slag from Geopolymerization to Sintering Process. *Magnetochemistry*, 7(3):32.
- Keshav, K., M. K. Mishra, and J. P. Singh (2018). Stabilization of Soil Using Sodium Hydroxide Additive. *Int J Res Eng Appl Manag*, 4(2):328–32.
- Khoury, Hani N. (2019). Review of Clays and Clay Minerals in Jordan. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(23):706-707.
- Kim, Young-sang, My Quoc Dang, and Tan Manh Do, (2016). Studies on Compressive Strength of Sand Stabilized by Alkali-Activated Ground Bottom Ash and Cured at the Ambient Conditions. *International Journal of Geo-Engineering*, 7:1–8.
- Kulanthaivel, P., S. Selvakumar, B. Soundara, and A. R. Krishnaraja (2023). Strength Enhancement of Clay Soil Stabilized with Ordinary Portland Cement, Sodium Silicate and Sodium Hydroxide. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(5): 1297–1310.
- برزگری دهجی، محمد. (۱۳۹۵). مطالعه آزمایشگاهی امکان‌سنجی ژئوپلیمر پوزولان تفتان برای تثبیت خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.
- نژاد کورکی، مجتبی، غنی‌زاده، علیرضا و بختیاری سمیه (۱۴۰۳). تثبیت باطله سنگ‌آهن مگنتیت با ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن به‌عنوان مصالح راهسازی، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل ۱۲۱، (۴)، ۸۸–۶۳.
- میرزائی، کوروش غنی زاده علیرضا و بختیاری سمیه (۱۴۰۱). تثبیت بستر رسی با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از سرباره خاکستر بادی دیاتومیت و خاکستر پوسته برنج. فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل ۱۳، (۴)، ۲۰۶۴–۲۰۴۳.
- Abderrahmane, Ghrieb, and Mitiche-Kettab Ratiba (2013). Stabilized Dune Sand for Road Foundation Layers-Case of the Dune Sand of the Region of Djelfa (Algeria). *Applied Mechanics and Materials*, 319:263–77.
- AlKarni, Awad, and Sherif M. ElKholi (2012). Improving Geotechnical Properties of Dune Sands through Cement Stabilization. *Journal of Engineering and Computer Sciences*, 5(1):1–19.
- Amhadi, Talal S., and Gabriel J. Assaf (2021). Improvement of Pavement Subgrade by Adding Cement and Fly Ash to Natural Desert Sand. *Infrastructures*, 6(11):151.
- Andrejkovičová, S., A. Sudagar, J. Rocha, C. Patinha, W. Hajjaji, E. Ferreira da Silva, A. Velosa, and F. Rocha (2016). The Effect of Natural Zeolite on Microstructure, Mechanical and Heavy Metals Adsorption Properties of Metakaolin Based Geopolymers. *Applied Clay Science*, 126:141–52.
- Cristelo, Nuno, Stephanie Glendinning, Lisete Fernandes, and Amândio Teixeira Pinto (2012). Effect of Calcium Content on Soil Stabilisation with Alkaline Activation. *Construction and Building Materials*, 29:167–74.
- Daneshgar, Pouria, Saeed Ghaffarpour Jahromi, and Hamed Arzani (2023). Investigation of the Behavior of Ahvaz Sand Soil Stabilized with Metakaolin. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(2):337–58.
- Disu, Adedeji A., and Prabir K. Kolay (2021). A Critical Appraisal of Soil Stabilization Using Geopolymers: The Past, Present and Future.

Improvement of Soils. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(2):206–16.

-Rahman, Inayat Ur, Muhammad Raheel, Muhammad Wajahat Ali Khawaja, Rawid Khan, Jie Li, Arsalaan Khan, and Muhammad Tariq Khan (2021). Characterization of Engineering Properties of Weak Subgrade Soils with Different Pozzolanic & Cementitious Additives. *Case Studies in Construction Materials*, 15:e00676.

-Ramesh, H. N., and B. V Manjunatha (2020). Justification of Strength Properties of Microstructural Changes in the Black Cotton Soil Stabilized with Rice Husk Ash and Carbide Lime in the Presence of Sodium Salts. *SN Applied Sciences*, 2(3):457.

-Rao, Feng, and Qi Liu. (2015). Geopolymerization and Its Potential Application in Mine Tailings Consolidation: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 36(6):399–409.

-Rashad, Alaa M., and Ahmed S. Ouda (2019). Thermal Resistance of Alkali-Activated Metakaolin Pastes Containing Nano-Silica Particles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136:609–20.

-Seif, El-Sayed Sedek Abu. (2013). Assessing the Engineering Properties of Concrete Made with Fine Dune Sands: An Experimental Study. *Arabian Journal of Geosciences* 6:857–63.

-Shalabi, Faisal I., Javed Mazher, Kaffayatullah Khan, Mohammed Alsuliman, Ibrahim Almस्ताفا, Ward Mahmoud, and Naif Alomran (2019). Cement-Stabilized Waste Sand as Sustainable Construction Materials for Foundations and Highway Roads. *Materials*, 12(4):600.

-Shi, Xianzeng, Qingkun Zha, Shuqing Li, Guojun Cai, Dun Wu, and Chaojiao Zhai (2022). Experimental Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Metakaolin-Based Geopolymer Modified Clay. *Molecules*, 27(15):4805.

-Zainal, Farah Farhana, Muhammad Faiz Fazill, Hussin Kamarudin, Azmi Rahmat, Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah, and Warid Wazien (2018). Effect of Geopolymer Coating on Mild Steel. *Solid State Phenomena*, 273:175–80.

-Li, Xiaoguang, Panqi Wang, Zhizhong Guo, Jinyi Qin, and Kun Liang (2022). Effect of Fe²⁺/Fe³⁺ on High-Strength Ceramsite Prepared by Sintering Geopolymers Using Iron Ore Tailings. *Ceramics International*, 48(4):5681–88.

-Li, Yulin, Jianyuan Cui, Tonghui Zhang, Toshiya Okuro, and Sam Drake (2009). Effectiveness of Sand-Fixing Measures on Desert Land Restoration in Kerqin Sandy Land, Northern China. *Ecological Engineering*, 35(1):118–27.

-Longos Jr, Alberto, April Anne Tigue, Ithan Jessemar Dollente, Roy Alvin Malenab, Ivyleen Bernardo-Arugay, Hirofumi Hinode, Winarto Kurniawan, and Michael Angelo Promentilla. (2020). Optimization of the Mix Formulation of Geopolymer Using Nickel-Laterite Mine Waste and Coal Fly Ash. *Minerals*, 10(12):1144.

-Mehena, Oualit, Irekti Amar, and Jauberthie Raoul (2017). Strength and Setting Times of Metakaolincement-Based Geopolymer Pastes. *American Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2(4):30–36.

-Neumann, Frank, and Manfred Curbach (2018). Thermal Treatment of Desert Sand to Produce Construction Material. P. 1030 in MATEC Web of Conferences. *EDP Sciences*. Vol. 149.

-Olaniyan, O. S., R. A. Olaoye, O. M. Okeyinka, and D. B. Olaniyan (2011). Soil Stabilization Techniques Using Sodium Hydroxide Additives. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 11(6):9–22.

-Onyelowe, Kennedy, Clifford Igboayaka, Francis Orji, Henry Ugwuanyi, and Duc Bui Van. (2019). Triaxial and Density Behaviour of Quarry Dust Based Geopolymer Cement Treated Expansive Soil with Crushed Waste Glasses for Pavement Foundation Purposes. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12:78–87.

-Padmakumar, G. P., K. Srinivas, K. V Uday, K. R. Iyer, Pankaj Pathak, S. M. Keshava, and D. N. Singh (2012). Characterization of Aeolian Sands from Indian Desert. *Engineering Geology* 139:38–49.

-Pourakbar, Shahram, and Bujang Kim Huat (2017). A Review of Alternatives Traditional Cementitious Binders for Engineering

Evaluation of Compressive Strength of Dune Sand Stabilized with Alkaline Activators

Nazanin Ahmadi, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Ali Reza Ghanizadeh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

Somayeh Bakhtiari, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

Dune sand naturally possess low strength and bearing capacity. Due to their specific physical characteristics, they are unsuitable as road subgrade soil without improvement or stabilization using additives. Traditional stabilization methods, such as the use of cement or lime, are not considered suitable alternatives due to their adverse environmental effects. In recent years, the use of alkaline activator solutions and geopolymers has been introduced as a green and cost-effective alternative to cement and lime, owing to their reduced CO₂ emissions, lower energy consumption, and better compatibility with sustainable development. In this study, different sodium silicate-to-sodium hydroxide ratios (1, 2, and 4) with concentrations of 8, 10, and 12 molar were used to improve and stabilize dune sand. Compaction and unconfined compressive strength (UCS) tests along with XRD and SEM analyses were conducted to evaluate the microstructure of the stabilized dune sand. The compressive strength of the samples was measured at curing times of 7, 28, 56, and 91 days. The results revealed that the highest UCS was achieved in samples stabilized with a sodium silicate-to-sodium hydroxide ratio of 2 and a concentration of 12 molar after 91 days of curing. SEM analysis indicated limited microstructural changes, which were attributed to the insufficient availability of silica and alumina for the formation of geopolymer gel. Overall, the combination of sodium silicate and sodium hydroxide at a 2:1 ratio and a concentration of 12 molar was identified as the most effective option for improving the strength of dune sand.

Keywords: Stabilization, Dune Sand, Compressive Strength, Sodium Silicate, Sodium Hydroxide