

تثبیت باطله سنگ آهن مگنتیت با ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن به عنوان مصالح راهسازی

مقاله علمی - پژوهشی

علیرضا غنی‌زاده*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
مجتبی نژادکورکی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
سمیه بختیاری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

صفحه ۸۸-۶۳

چکیده

فرآوری سنگ آهن باعث تولید حجم قابل ملاحظه‌ای باطله سنگ آهن می‌گردد. از طرفی صنعت ساخت و ساز دارای پتانسیل زیادی برای جذب پسماندهای سایر صنایع از جمله صنایع معدنی است. هدف از این مقاله تثبیت باطله سنگ آهن مگنتیت با استفاده از ژئوپلیمر سنتز شده از متاکائولن به عنوان منبع آلومیناسیلیکات و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) و سدیم هیدروکسید ($NaOH$) به عنوان مواد فعال کننده قلیایی است. برای این منظور، محلول فعال کننده قلیایی با ترکیب سدیم هیدروکسید (سود) در سه مولاریته ۸، ۱۰ و ۱۲ با محلول سیلیکات سدیم در سه نسبت وزنی ۱، ۲ و ۴ (سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید) ساخته شد و به عنوان رطوبت بینیه به ترکیب‌های مختلف باطله سنگ آهن و متاکائولن (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی مگنتیت) اضافه شد. نمونه‌های مقاومت فشاری با دو زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه ساخته شدند. نتایج نشان دادند که افزایش درصد متاکائولن به تنهایی باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده می‌گردد. همچنین افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید و افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید باعث کاهش مقاومت فشاری محصور نشده ۲۸ روزه می‌گردد. بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه‌های ۲۸ روزه با افزودن ۳۰ درصد متاکائولن و در نسبت وزنی ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید (در سدیم هیدروکسید ۸ مولار) برابر با ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد. همچنین بررسی انجام شده نشان دهنده همبستگی بالای مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ است.

واژه‌های کلیدی: باطله سنگ آهن مگنتیت، تثبیت، متاکائولن، ژئوپلیمر، مقاومت فشاری محصور نشده

۱- مقدمه

با ابهام روبرو شده است. در برخورد با ضایعات و باطله‌های معدنی دو راهکار اصلی یعنی دیو نمودن باطله‌ها و یا استفاده مجدد از آن‌ها به عنوان مواد اولیه برای سایر زنجیره‌های تولیدی وجود دارد (Rodrigues et al. 2020). افزایش تولید پسماندهای جامد باعث مشکلات اجتماعی، زیست محیطی و از طرفی مدیریت دشوار و پیچیده آن‌ها شده است که نیازمند ملاحظاتی در مورد دفع یا استفاده مجدد از آن‌ها شده است. از

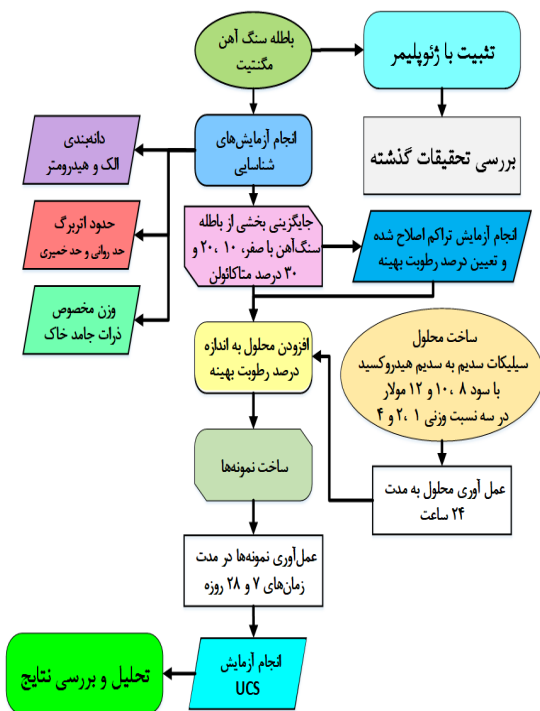
سنگ آهن یکی از محصولات مهم معدنی کشور است. سالانه حجم زیادی سنگ آهن با هدف فرآوری و تولید آهن استخراج می‌شود که فرآوری این حجم سنگ آهن باعث تولید حجم زیادی باطله سنگ آهن می‌گردد. این باطله‌ها معمولاً در سدها یا مخازن باطله ذخیره می‌شوند. با این وجود پس از گسیختگی سد فوندائو در شهر ماریانا در سال ۲۰۱۵ و سد کورگو دو فیجانو در شهر برومادینو در سال ۲۰۱۹، ذخیره باطله در سدها

مواد چسباننده غیر سیمانی مانند مواد آلومینوسیلیکات فعال شده با مواد قلیایی است (Rashad and Ouda, 2019). ژئوپلیمر یک پلیمر معدنی است که از دو جزء اصلی یعنی مواد منبع آلومینوسیلیکات و محلول فعال‌کننده قلیایی تشکیل شده است (Davidovits, 1994). آلومینوسیلیکات‌هایی مانند خاک رس می‌توانند از طریق پلیمریزاسیون شیمیایی در مدت زمان کوتاهی سخت و به ژئوپلیمر تبدیل شوند (Xu and Deventer, 2000). ژئوپلیمرها مواد جامد، سخت و پایداری مشابه هیدروکسی سولیدیت (Hydroxysodalite)، فلدسپاتوئید (Feldspathoid) یا زئولیت (Zeolite) هستند (Hamaideh et al. 2014). ژئوپلیمرها از یک شبکه سه بعدی و بی شکل تشکیل شده‌اند که از پلیمریزاسیون مونومرهای آلومینوسیلیکات، یعنی یون‌های ارتو سیلیکات، با استفاده از محلول قلیایی حاصل می‌شوند (Komnitsas, Zaharaki and Perdikatsis, 2007). این مواد، که ممکن است تا حدی آمورف یا میکرو کریستالی باشند، از شبکه‌ای چهار وجهی از سیلیس (SiO_4) و آلومینات (AlO_4) تشکیل شده‌اند که به طور متناوب با به اشتراک گذاشتن تمام اتم‌های اکسیژن به هم متصل شده‌اند. هنگامی که آلومینات با چهار اتم اکسیژن هماهنگ می‌شود، یک بار منفی ایجاد می‌شود و بنابراین، وجود کاتیون‌هایی مانند Na^+ ، K^+ ، Li^+ ، Ca^{2+} ، Ba^{2+} ، NH_4^+ و H_3O^+ برای متعادل کردن این بار ضروری است (Zaharaki, Komnitsas and Perdikatsis, 2010). خاکستر بادی، سرباره، کائولن و متاکائولن نمونه‌هایی از مواد آلومینوسیلیکاتی هستند که دارای رفتار و خواص متفاوتی هستند که خواص آن‌ها به عوامل زیادی بستگی دارد (Zailani et al. 2020). استفاده از متاکائولن به عنوان منبع یا ماده خام برای سنتز ژئوپلیمرها نسبت به سرباره یا خاکستر بادی امیدوارکننده‌تر، واقع‌گرایانه‌تر و جذاب‌تر است؛ زیرا سرشار از سیلیس و آلومینات است و قابلیت جذب خوب، واکنش‌پذیری مناسب و همچنین ترکیبات شیمیایی نسبتاً ثابت تری دارد (Rashad and Ouda, 2019). متاکائولن با حرارت دادن کائولن تولید می‌شود که یکی از فراوان ترین مواد معدنی طبیعی است. کائولن یک خاک رس ریز و سفید است که به طور سنتی در ساخت چینی و به عنوان پوشش کاغذ استفاده می‌شود (Metakaolin, 2004). در کائولن، یون‌های هیدروکسیل (Hydroxyl) به ساختار آلومینوسیلیکات متصل

جمله راهکارهای به حداقل رساندن چنین مسائلی بازیافت است. صنعت ساخت و ساز دارای پتانسیل زیادی برای جذب پسماندهای سایر صنایع از جمله صنایع معدنی است (John and Zordan, 2001). در صنایع معدنی، فرآیندهای آسیاب سنگ، حجم قابل توجهی ضایعات تولید می‌کنند. این ضایعات معمولاً در سطح زمین پخش می‌شوند و حوضچه‌هایی از پسماندها را تشکیل می‌دهند که به عنوان سدهای باطله نیز شناخته می‌شوند. اگرچه این نشان دهنده گامی مثبت به سمت کاهش تخریب محیط زیست است، اما سدهای باطله مناطق وسیعی را برای تشکیل مخزن خود اشغال می‌کنند و بنابراین تأثیر مستقیمی بر محیط زیست دارند و باعث نگرانی افراد ساکن در اطراف این سدها می‌شوند. علاوه بر این، بهره‌برداری از این مخازن، هزینه‌های نگهداری و نظارت بالایی دارد (Das, Kumar & Ramachandrarao, 2000). از طرفی، انباشت مداوم پسماندهای معدنی سبب پیامدها و مشکلات زیست محیطی مانند از بین رفتن حاصل‌خیزی زمین، گرد و غبار و فرسایش و اثرات آن بر تخریب اکوسیستم می‌شود (Kuranchie, 2015). باطله سنگ آهن مگنتیت به دلیل دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت و همچنین عدم چسبندگی دارای ظرفیت باربری بالایی نیست و استفاده از آن نیازمند بهسازی و بهبود مشخصات فنی آن است. بهسازی و تثبیت شیمیایی خاک معمولاً با استفاده از آهک یا سیمان انجام می‌شود که با محیط زیست سازگاری ندارد و به همین دلیل امروزه استفاده از پوزولان‌های طبیعی و ژئوپلیمرها مورد توجه قرار گرفته است (Daneshgar, Ghaffarpour & Arzani, 2023). تولید سیمان پر تلند نه تنها مقادیر زیادی دی‌اکسید کربن (CO_2) منتشر می‌کند، بلکه مقادیر زیادی انرژی نیز مصرف می‌کند. صنعت سیمان مسئول آزادسازی حدود ۸ درصد از کل دی‌اکسید کربن انسانی آزاد شده است (Andrew, 2018) و حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد از کل انرژی مصرف شده در صنعت در سراسر جهان را به خود اختصاص داده است. افزایش انتشار دی‌اکسید کربن به معنای افزایش آلودگی هوا است. انتظار می‌رود تولید سیمان سالانه حدود ۰/۸-۱/۲ درصد افزایش یابد (Gutierrez et al. 2017). دو سیاست اصلی برای کاهش اثرات زیست محیطی سیمان پیشنهاد شده است که شامل جایگزینی سیمان با ضایعات صنعتی مانند سرباره و خاکستر بادی برای تولید سیمان مخلوط است و استفاده از ژئوپلیمر یا

اگر متاکائولن با مقادیر مشخصی از محلول سدیم هیدروکسید یا محلول سدیم هیدروکسید بعلاوه سیلیکات سدیم مخلوط شود (غلظت‌های بین ۷ تا ۱۲ مولار) و سپس در دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد عمل آوری شود، می‌توان مواد جامدی را تولید کرد که دارای ساختار شبکه‌ای آلومینوسیلیکاتی شبیه یک ماده ژئولیتی باشند (Liew et al. 2011). هدف از این تحقیق بررسی مقاومت فشاری محصور نشده باطله سنگ آهن مگنتیت گل‌گهر تثبیت‌شده با متاکائولن و ژئوپلیمر در نسبت‌های ۱، ۲ و ۴ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید (با مولاریته ۸، ۱۰ و ۱۲) به‌عنوان فعال‌ساز قلیایی است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت فشاری، مدول یانگ و کرنش شکست است. در این مقاله ابتدا پیشینه تحقیق در خصوص تثبیت باطله سنگ آهن و همچنین کاربرد مواد ژئوپلیمری برای تثبیت خاک آورده شده است که نشان دهنده نوآوری تحقیق حاضر در خصوص استفاده از ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن برای تثبیت باطله سنگ آهن است. در ادامه پس از معرفی مواد و روش‌های آزمایشگاهی نتایج آزمایشگاهی آورده شده اند و مورد بحث قرار گرفته‌اند. فرایند کلی مطالعه به همراه آزمایش‌های انجام شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

هستند و فقط در دماهای بالاتر از ۵۵۰ درجه سانتیگراد قابل حذف هستند. در طول فرآیند دهیدروکسیلاسیون (Dehydroxylation)، بازآرایی اتمی قابل توجهی رخ می‌دهد. نتیجه این بازآرایی، یک ساختار تا حدی منظم است که نمی‌تواند در حضور آب دوباره هیدراته شود (با این کار را بسیار آهسته انجام می‌دهد) و دارای پتانسیل واکنشی شدیدی در حضور محلول قلیایی/قلیایی خاکی است (Fernández- Jiménez et al. 2008). واکنش متاکائولن به دمای کلسینه شدن بستگی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد مناسب است و کلسینه شدن کائولن تحت این دما منجر به تولید یک ماده واکنش‌پذیر می‌شود (Ambroise et al. 1985). فعال‌کننده‌های قلیایی نقش مهمی در انحلال اکسیدهای آلومینات و سیلیس مواد خام فعال شده دارند. سدیم هیدروکسید (NaOH)، هیدروکسید پتاسیم (KOH)، سیلیکات پتاسیم یا سیلیکات سدیم پرکاربردترین فعال‌کننده‌ها برای سنتز مواد واکنش‌دهنده آلومینوسیلیکات در فرآیند فعال‌سازی هستند (Görhan, 2015). واکنش‌های فعال‌سازی قلیایی در سنتز ژئوپلیمرها عمدتاً شامل انحلال آلومینوسیلیکات‌های خام به مونومر در محلول قلیایی، جهت‌گیری مجدد و پلیمریزاسیون مونومرها به شبکه و تراکم شبکه است (Rao and Liu, 2015). به طور کلی، معمولاً مواد آلومینوسیلیکات که حاوی سیلیس بالا، آلومینات و مواد معدنی اکسید کلسیم هستند در تولید ژئوپلیمر استفاده می‌شوند. ترکیب سیلیکات سدیم (Na₂SiO₃) و سدیم هیدروکسید (NaOH) به طور گسترده‌ای به عنوان فعال‌کننده قلیایی به شکل مایع استفاده شده است (Zainal et al. 2018). سیلیکات سدیم به طور گسترده در فعال‌سازی مواد آلومینوسیلیکات مانند پودر سربراره کوره بلند، متاکائولن، خاکستر بادی و غیره استفاده شده است. این ماده بیشترین افزایش مقاومت مکانیکی را همراه با کاهش نفوذپذیری ارائه می‌دهد که با ساختاری پایدار و متراکم همراه است (Bernal et al. 2011). پارامترهایی مانند غلظت سدیم هیدروکسید و روش عمل آوری، عوامل مهمی هستند که باید هنگام تولید یک محصول ژئوپلیمری برای یک کاربرد خاص در نظر گرفته شوند (Heah et al. 2013). علاوه بر اندازه ذرات رس، ماسه و نسبت آن‌ها در مخلوط به غلظت سدیم هیدروکسید نیز بستگی دارد (Khoury, 2006).



شکل ۱. مراحل انجام تحقیق

۲-پیشینه تحقیق

(2016). سوداگر و همکاران بخشی از متاکائولن را در درصدهای صفر، ۲۵، ۵۰، و ۷۵ با ژئولایت جایگزین و به آن ۲۰ درصد ضایعات پوست درخت بلوط افزودند و از سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید به عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند. نمونه‌ها در مدت زمان‌های یک، ۱۴ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده با افزودن ۵۰ درصد متاکائولن در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه برابر با ۱۵/۸۴ مگاپاسکال به دست می‌آید (Sudagar et al. 2018). دانشگر، غفارپور و ارزانی بخشی از ماسه بادی را با ۵، ۱۰ تا ۲۵ درصد متاکائولن جایگزین و به ترتیب 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 مدت زمان ۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده با افزودن ۲۰ درصد متاکائولن، با نسبت ۲/۵ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در سدیم هیدروکسید ۱۲ مولار برابر با ۵/۳ مگاپاسکال در مدت زمان ۲۸ روز به دست می‌آید (Daneshgar, Ghaffarpour & Arzani, 2023). لی و همکاران مقادیر ۴۰، ۵۰ تا ۱۰۰ درصد متاکائولن را با مقادیر صفر، ۱۰ تا ۵۰ درصد ماسه و ۱، ۲ و ۳ درصد فیبر آهن ترکیب و از مقادیر ۰/۱ تا ۰/۱۲۵ تا ۰/۲۵ مول سدیم هیدروکسید و ۰/۲، ۰/۲۵ تا ۰/۵ مول سیلیکات سدیم و از ۳/۲، ۳/۶ تا ۸ مول آب جهت فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند. نسبت سدیم بر آلومینیم بر روی ۱/۸ نگه داشته شد. نتایج نشان دادند که افزودن متاکائولن تا ۵۰ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود (Li et al. 2018). بوچوالد و همکاران مقادیر صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی را به ترتیب با مقادیر ۱۰۰، ۵۰، ۲۵ و صفر درصد متاکائولن باهم مخلوط و از سدیم هیدروکسید به عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند. نتایج نشان داد که ترکیب ۵۰ درصد متاکائولن و ۵۰ درصد سرباره باعث ایجاد ماده‌ای با مقاومت فشاری محصور نشده ۳۱ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۸ مگاپاسکال می‌گردد (Buchwald, Hilbig and Kaps, 2007). همکاران مقادیر صفر، ۲۰ تا ۸۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی را با متاکائولن جایگزین و از سیلیکات سدیم بعلاوه سدیم

لی و همکاران باطله سنگ‌آهن را با مقادیر صفر، ۱۰ تا ۴۰ درصد سرباره زغال‌سنگ ترکیب و سپس با سدیم هیدروکسید ۱۰ مولار تثبیت کردند. نتایج نشان که بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده از ترکیب ۲۰ درصد سرباره زغال‌سنگ و ۸۰ درصد باطله سنگ‌آهن برابر با ۱۱/۲۴ مگاپاسکال به دست می‌آید (Li et al. 2022). شی و همکاران با افزودن ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد متاکائولن و استفاده از سدیم هیدروکسید (در مولاریته‌های ۲، ۴، ۶ و ۸) به عنوان فعال‌کننده قلیایی خاک رس را تثبیت نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن و افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری محصور نشده افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده برابر با ۴۱۰۹ کیلو نیوتن در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه به دست آمد (Shi et al. 2022). کاظم‌زاده و همکاران خاک رس آلوده را با مقادیر صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن و سیلیکات سدیم بعلاوه سدیم هیدروکسید (در سدیم هیدرواکسید ۸ مولار) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن مقدار درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری محصور نشده و نسبت باربری کالیفرنیا افزایش پیدا می‌کند (Kazemzadeh, Zad and Latifi, 2023). عبدالکریم و عباس، خاک رس را با مقادیر ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد متاکائولن ترکیب کردند و از سیلیکات سدیم به همراه سدیم هیدروکسید ۱۰ مولار به عنوان فعال‌کننده قلیایی جهت تثبیت خاک استفاده کردند. در این تحقیق نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دو دمای ۲۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد در آن قرار گرفتند و سپس در مدت زمان‌های یک، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در دمای اتاق عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده با افزودن ۱۰ و ۱۲ درصد متاکائولن برای هر دو دمای ۲۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد به دست می‌آید (Abdulkareem and Abbas, 2021). آندریکویچووا و همکاران ژئولایت را با متاکائولن در درصدهای صفر، ۲۵، ۵۰، و ۷۵ ترکیب و از سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید به عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند. نمونه‌ها در مدت زمان‌های یک، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه با افزودن ۵۰ درصد متاکائولن به دست می‌آید (Andrejkovičová et al.

(در مولاریته‌های ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴) مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌ها در دو دمای ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که وقتی دما ۷۰ درجه سانتیگراد دارد مقدار مقاومت فشاری محصور نشده به سایر پارامترها بستگی دارد ولی دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود (Horvat, Ducman and Pavlin, 2019). لونگوس و همکاران ضایعات معدن نیکل را با خاکستر بادی زغال‌سنگ ترکیب و از سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم به‌عنوان فعال‌کننده‌های قلیایی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مخلوط ۵۰ درصد ضایعات معدن نیکل و ۵۰ درصد خاکستر بادی زغال‌سنگ با نسبت ۰/۵ برای سدیم هیدروکسید به سیلیکات سدیم بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده را (۲۲/۱ مگاپاسکال) در مدت‌زمان ۲۸ روز به دست می‌دهد (Longos et al. 2020). ولچک و همکاران خاکستر بادی زغال‌سنگ را با متاکائولن ترکیب و از سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید (در مولاریته‌های ۱، ۲، ۳ تا ۸ و ۱۶) به‌عنوان فعال‌ساز قلیایی استفاده شد. نمونه‌ها در دو دمای اتاق و دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری و مقاومت فشاری محصور نشده در مدت‌زمان‌های ۲، ۲۸ و ۵۶ روزه بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده برابر ۱۶ مگاپاسکال و ۲۴ مگاپاسکال به ترتیب برای خاکستر بادی فعال‌شده با آب و متاکائولن فعال‌شده با سدیم هیدروکسید بالای ۵ مولار در مدت‌زمان ۲۸ روز به دست می‌آید (Vlcek et al. 2021). سیلوا و همکاران ضایعات معدن را با نسبت‌های ۱/۲۵، ۳ و ۴ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید (در سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار) مخلوط و نمونه‌ها در مدت‌زمان‌های ۱، ۲ تا ۱۴ هفته و در دو دمای ۲۰ و ۱۳۰ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد با افزایش دما مقاومت فشاری محصور نشده افزایش پیدا می‌کند ولی زمان عمل‌آوری تاثیر بر مقاومت فشاری محصور نشده ندارد (Silva, Castro-Gomes, and Albuquerque, 2010). لی و همکاران مقایسه‌ای برای سیمان با دو روش فعال‌شده با سرباره و فعال‌شده با متاکائولن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که ساختار هر نوع سرباره، نقش کلسیم در ساختار شیشه‌ای و فرآیند هیدراتاسیون مهم هست. درحالی‌که سطح بسیار زیاد متاکائولن باعث افزایش تقاضای آب می‌شود (Li, Sun and Li, 2010). سیتول و

هیدروکسید به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده شد. از مقادیر ۳، ۳/۴، ۳/۸ و ۴ برای نسبت $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ استفاده شد و مقاومت فشاری با عملکرد حرارتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده با افزودن ۶۰ درصد سرباره وقتی که نسبت $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ برابر ۳ است برابر با ۷۰ مگاپاسکال به دست می‌آید. درحالی‌که با افزودن ۸۰ درصد سرباره وقتی که نسبت $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ برابر ۳/۴ است، مقاومت فشاری محصور نشده برابر با ۵۷ مگاپاسکال به دست می‌آید (Bernal et al. 2011). هادی ماسه را در مقادیر صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ گرم با کائولن در مقادیر ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ گرم ترکیب و از ۱۵ گرم سدیم هیدروکسید جهت فعال‌کننده قلیایی استفاده کرد. نمونه‌ها در مدت‌زمان ۲۸ روزه عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که با نسبت ۵۰ درصد ماسه و ۵۰ درصد کائولن بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده برابر ۳۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست می‌آید (Hadi, Hadi, 2016). جمیل و همکاران سرباره کوره آهن‌گدازی و کائولن را با نسبت ۴ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید (در سدیم هیدرواکسید ۸ مولار) مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌ها در چهار دمای، دمای اتاق، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۴ روز عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد برابر با ۸/۹ مگاپاسکال به دست می‌آید و ژئوپلیمریزاسیون باعث افزایش استحکام نهایی خاک می‌گردد (Jamil et al. 2021). فتحی و همکاران سیلیکات سدیم مایع را در درصد‌های وزنی ۱، ۲، ۳ و ۴ برای تثبیت خاک ماسه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد با استفاده از ۲ درصد وزنی سیلیکات سدیم مایع، بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده برابر با ۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست می‌آید (فتحی، پرویزی و هوشمند، ۱۳۹۲). همایده و همکاران ماسه سیلیسی، کائولن و سدیم هیدروکسید (در سدیم هیدرواکسید ۱۳ مولار) را مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌ها در زمان‌های صفر، ۴ تا ۲۴ ساعت با بخار عمل‌آوری و با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد خشک شدند. نمونه‌ها به مدت ۷ روز عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که سیکل عمل‌آوری با بخار خصوصیات کائولن بر پایه ژئوپلیمر را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها می‌گردد (Hamaideh et al. 2014). هروات و همکاران ماسه ریخته‌گری زباله را با سدیم هیدروکسید

۳- مواد و روش کار

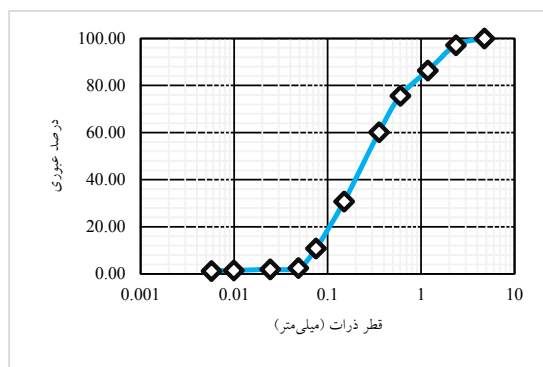
۳-۱- باطله سنگ آهن مگنتیت

باطله سنگ آهن مگنتیت مورد استفاده در این تحقیق از مجتمع صنعتی و معدنی گل گهر سیرجان تهیه شده است. طبق استاندارد ASTM C637 سنگ آهن مگنتیت در گروه سنگ دانه های محافظ در برابر پرتو طبقه بندی می شود. عکس باطله سنگ آهن مگنتیت در شکل ۲ به نمایش درآمده است. طبقه بندی به روش متحد انجام شد و باطله سنگ آهن در رده ماسه بد دانه بندی شده لای دار (SP-SM) و در روش آشتو در رده ماسه لای دار (A-2-4) قرار گرفت. مشخصات فیزیکی باطله سنگ آهن در جدول ۱ و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است. همچنین منحنی دانه بندی باطله سنگ آهن مگنتیت در شکل ۳ نشان داده شده است.

ماگیچ ماسه ریخته گری زباله را با سربراره کوره آهن گدازی در درصدهای صفر، ۱۰ تا ۶۰ ترکیب و از آلومینات سدیم (در مولاریته های ۱، ۲ تا ۸) به عنوان فعال کننده قلیایی استفاده شد. نمونه ها به مدت ۵ روز در دماهای ۳۰، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد در آون عمل آوری شد. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده در بین دماهای مختلف در ۸۰ درجه سانتیگراد، در بین مولاریته های مختلف در ۶ مولار و در بین درصدهای مختلف سربراره با افزودن ۵۰ درصد سربراره به ترتیب برابر با ۱۱، ۳/۵ و ۸ مگاپاسکال به دست می آید (Sithole and Magage, 2021).



شکل ۲. باطله سنگ آهن مگنتیت



شکل ۳. منحنی دانه بندی باطله سنگ آهن مگنتیت

جدول ۱. مشخصات باطله سنگ آهن معدن گل گهر سیرجان

مقدار	استاندارد	مشخصات
A-2-4	ASTM D3282	طبقه بندی آشتو
SP-SM	ASTM D2487	طبقه بندی یونیفاید
۸۹/۱۶	ASTM D2487	درصد ماسه
۱۰/۸۴	ASTM D2487	درصد لای و رس
۴/۸۹	-	ضریب یکنواختی
۰/۸۵	-	ضریب انحنای
۷/۸	ASTM D2216	درصد رطوبت بهینه
۲/۳	ASTM D2216	وزن مخصوص خشک حداکثر
۳/۱۵	ASTM D854	چگالی دانه ها
NP	ASTM D4318	حد روانی
NP	ASTM D4318	حد خمیری

متاکائولن

متاکائولن در شکل ۴ و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

متاکائولن یک ماده ثانویه است که از کلسینه کردن خاک رس کائولن به دست می آید. متاکائولن مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مهان پودر دلیجان تهیه شده است. تصویر

جدول ۲. آنالیز شیمیایی مواد (XRF)

متاکائولن (%)	باطله سنگ آهن (%)	عناصر
۸۰/۲۶	۳۵/۹۵	SiO ₂ (سیلیس)
۱۵/۶۹	۵/۹۱	Al ₂ O ₃ (اکسید آلومینیوم)
۰/۰۴	۱/۸۶	K ₂ O (اکسید پتاسیم)
۱/۴۶	۹/۲۵	CaO (اکسید کلسیم)
۰/۰۴	۲۲/۱۷	Fe ₂ O ₃ (هماتیت)
۰/۰۵	۱۴/۱۶	MgO (اکسید منیزیم)
-	۰/۰۸	MnO (اکسید منگنز)
۰/۰۱	۰/۹۴	Na ₂ O (اکسید سدیم)
۰/۱	۰/۴۵	P ₂ O ₅ (فسفات)
۰/۱۲	۱/۸	SO ₃ (تری اکسید گوگرد)
۰/۳۸	۰/۶۳	TiO ₂ (دی اکسید تیتانیوم)
-	۶/۲	(هدر روی از طریق احتراق)
		LOI



شکل ۴. متاکائولن

سیلیکات سدیم

پخش کننده عمل می کند (Jamil et al. 2021). تصویر سیلیکات سدیم مایع در شکل ۵ نمایش داده شده است.

در این تحقیق، از سیلیکات سدیم مایع شرکت تولیدی و شیمیایی چسب‌های صنعتی آریا استفاده شده است. سیلیکات سدیم به عنوان یک فعال کننده قلیایی، چسبنده، نرم کننده یا



شکل ۵. سیلیکات سدیم مایع

سدیم هیدروکسید

رسوب می شود (Jamil et al. 2021). تصویر سدیم هیدروکسید در شکل ۶ نمایش داده شده است.

در این تحقیق، از سدیم هیدروکسید شرکت کیان کاوه آزما استفاده شده است. سدیم هیدروکسید با pH بالا به واکنش انحلال منابع آلومینوسیلیکات کمک می کند که به دنبال آن



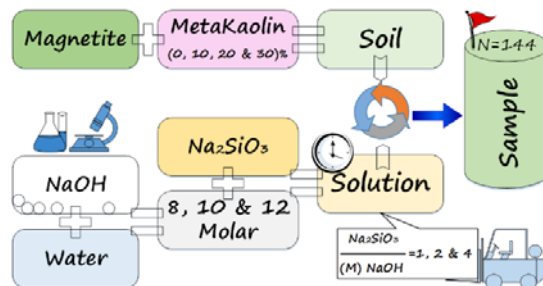
شکل ۶. سدیم هیدروکسید

۲-۳- روش ساخت

ترکیب مواد برای ساخت نمونه در شکل ۷ به نمایش درآمده است. مجموعاً به تعداد ۱۴۴ نمونه ساخته و عمل‌آوری شد.

برای ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری، مخلوط باطله سنگ‌آهن و متاکائولن مخلوط به خوبی هم زده شد تا مخلوطی یکدست و یکنواخت حاصل شود. سپس به اندازه درصد رطوبت بهینه به صورت وزنی محلول اضافه شد و آن قدر هم‌زده شد تا مخلوط یکدست و یکنواخت گردد. مخلوط به دست آمده در سه لایه در قالب نمونه‌سازی با ابعاد ۵۰ در ۱۰۰ میلی‌متر ریخته شد و با چکش مخصوص و با انرژی تراکم بکار رفته در آزمایش‌های تراکم، متراکم گردید (مطابق شکل ۸). سپس نمونه توسط جک هیدرولیکی از قالب بیرون آورده شد. نمونه‌ها درون چند لایه سلفون پیچیده شدند و جهت عمل‌آوری در دو مدت زمان ۷ و ۲۸ روز درون پلاستیک زیپ‌دار مطابق شکل ۹ قرار داده شدند.

برای تثبیت باطله سنگ‌آهن با متاکائولن و استفاده از سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید به عنوان فعال‌کننده قلیایی، ابتدا سدیم هیدروکسید با آب مقطر در سه مولاریته ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار ساخته شد و سپس با سیلیکات سدیم در سه نسبت وزنی ۱، ۲ و ۴ (سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید) ترکیب و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق عمل‌آوری شد. بخشی از باطله سنگ‌آهن با متاکائولن در درصدهای صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ جایگزین شد و به اندازه رطوبت بهینه به آن فعال‌کننده قلیایی اضافه شد. برای تعیین میزان هر یک از مواد شیمیایی، با توجه به اینکه برای ساخت نمونه باید به اندازه درصد رطوبت بهینه، به صورت وزنی فعال‌کننده قلیایی به ترکیب باطله سنگ‌آهن و متاکائولن جهت تثبیت اضافه شود، ابتدا مقدار محلول نهایی مورد نیاز محاسبه شد سپس با توجه به نسبت وزنی میزان هر کدام از مواد شیمیایی به دست آمد و با تناسب‌گیری میزان سدیم هیدروکسید محاسبه شد. فلوچارت



شکل ۷. فلوچارت ترکیب مواد



شکل ۸. چکش و قالب نمونه



شکل ۹. عمل آوری نمونه‌ها

۴- آزمایش‌ها

۴-۱- آزمایش تراکم اصلاح شده

اصلاح‌شده از چکش به وزن $4/53$ کیلوگرم با ارتفاع سقوط $45/7$ سانتی‌متر و از قالب به قطر $101/6$ میلی‌متر استفاده گردید. نمونه‌ها در ۵ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم شدند.

آزمایش تراکم اصلاح شده با توجه به استاندارد ASTM D1557 انجام شد. این آزمایش برای ترکیب‌های مختلف باطله سنگ‌آهن با متاکائولن (جایگزینی درصد‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ باطله با متاکائولن) انجام شد. برای انجام آزمایش تراکم

۴-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری محصور نشده

شد. دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

آزمایش تعیین مقاومت فشاری محصور نشده طبق استاندارد ASTM D2166 انجام شد. این آزمایش به صورت کنترل تغییر شکل با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام



شکل ۱۰. دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده

تحلیل نتایج و بحث

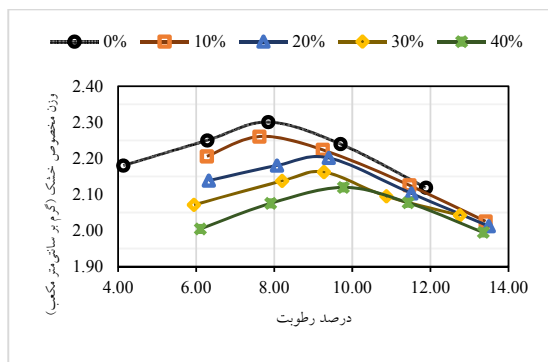
آزمایش تراکم اصلاح شده

تا $9/8$ افزایش و چگالی خشک حداکثر از $2/3$ تا $2/12$ کاهش می‌یابد. نتایج نشان دادند که با افزایش متاکائولن، درصد رطوبت نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش تقاضای آب

نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده بر روی ترکیب‌های مختلف باطله سنگ‌آهن مگنتیت و متاکائولن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ درصد رطوبت بهینه از $7/8$

شده به خاک رس، رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد (Kazemzadeh, Zad and Latifi, 2023). با جایگزینی یک ماده با وزن مخصوص بالاتر با خاک رس که وزن مخصوص کمتری دارد باعث می‌شود وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش پیدا کند (Cabalar and Mustafa, 2015).

از طرف متاکائولن است. هم چنین با افزایش متاکائولن وزن مخصوص خشک حداکثر نیز کاهش می‌یابد. کاهش وزن مخصوص به این دلیل است که متاکائولن وزن مخصوص کمتری نسبت به باطله سنگ آهن دارد و با افزایش مقدار متاکائولن، وزن مخصوص نمونه‌ها کاهش می‌یابد. تحقیقات گذشته نیز نشان می‌دهند که با افزایش درصد متاکائولن اضافه



شکل ۱۱. نمودار تراکم حاوی درصد‌های مختلف متاکائولن

اثرگذاری متاکائولن بر تثبیت ماسه بادی نشان دهنده این است که متاکائولن به عنوان ماده پایه در ژل چسباننده، شرایط لازم جهت پیوستن ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل ماتریس ژل-ماسه را فراهم آورده است. توسعه ژل، حاصل برهم کنش متاکائولن و فعالساز قلیایی، با چسباندن هر چه بیشتر ذرات ماسه، استحکام بیشتر ماتریس پدیدآمده را فراهم می‌آورد (کیانی نژاد، توفیق و توفیق، ۱۴۰۲). در نمونه‌های بدون متاکائولن با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری محصور نشده افزایش می‌یابد زیرا با افزایش سیلیکات سدیم مایع، چسبندگی نمونه بیشتر شده و مقاومت فشاری محصور نشده آن افزایش می‌یابد، در حالی که در نمونه‌های حاوی متاکائولن با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری محصور نشده کاهش می‌یابد. در این حالت، سدیم هیدروکسید موجود در محلول فعال‌کننده قلیایی موجب انحلال سیلیکات، آلومینات و کلسیم موجود در متاکائولن و تشکیل ژل ژئوپلیمری در ساختار خاک می‌گردد (میرزائی، غنی‌زاده و بختیاری، ۱۴۰۱). مقایسه شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد تحقیقات نشان می‌دهد که مقادیر بالای فعالساز قلیایی با اثرگذاری بر ویسکوزیته مخلوط حاصل، از میزان حل شدن ماده پایه آلومینوسیلیکاتی می‌کاهد (Horpibulsuk et al. 2013) یون‌های هیدروکسید آزاد موجود در مخلوط که در فرآیند شکل‌گیری زنجیره‌های ماکرومولکولی شرکت نداشته‌اند، در واکنش

نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده
با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده می‌توان مقاومت فشاری محصور نشده، کرنش لحظه شکست و مدول یانگ را برای هر نمونه به دست آورد. مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر نتیجه پیوندهای شیمیایی شامل ژل آلومینوسیلیکات تشکیل شده و برهمکنش‌های فیزیکی و شیمیایی است که می‌تواند بین ژل ژئوپلیمری و ذرات واکنش نداده رخ دهد (Duxson et al. 2005).

مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های ۷ روزه

در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های ۷ روزه به ترتیب برای سدیم هیدرواکسید ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش میزان متاکائولن مقاومت فشاری محصور نشده افزایش پیدا می‌کند. بنابراین متاکائولن عامل اصلی مقاومت فشاری است (Buchwald, Hilbig, and Kaps. 2007; Yip,) در خاک‌های ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده مانند ماسه بادی، با توجه به اندازه ریزتر ذرات متاکائولن و دانه‌بندی یکنواخت ماسه بادی، ذرات متاکائولن که در فرآیند تشکیل زنجیره‌های ماکرومولکولی حل نشده‌اند، این قابلیت را دارند که با اصلاح ساختار دانه‌بندی ماسه، همچنان باعث بهبود رفتار فیزیکی خاک گردند. همچنین

افزایش پیدا می‌کند اما با افزودن ۳۰ درصد مقاومت فشاری محصور نشده تفاوت چندانی ایجاد نمی‌کند تحقیقات نیز نشان می‌دهد که افزودن ۲۰ درصد متاکائولن به ترکیب خاک ماسه بادی و ژئوپلیمر بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده را به دست می‌دهد (Daneshgar, Ghaffarpour, and Arzani, 2023). در نمونه‌های بدون افزودن متاکائولن با سدیم هیدروکسید ۸ مولار با افزایش سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در نسبت ۲ افزایش و در نسبت ۴ کاهش می‌یابد اما در نمونه‌های با سدیم هیدروکسید ۱۰ و ۱۲ مولار با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در نمونه‌های با افزودن ۱۰ درصد متاکائولن با سدیم هیدروکسید ۸ مولار با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد اما در سدیم هیدروکسیدهای ۱۰ و ۱۲ مولار با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت ۲ افزایش و در نسبت ۴ کاهش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ با شکل ۱۵ نتایج نشان می‌دهند که با توجه به این که متاکائولن عامل اصلی مقاومت فشاری است و متاکائولن واکنش بهتری با نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید انجام می‌دهد ولی نسبت بهینه سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در نسبت وزنی ۲ است زیرا با افزایش مولاریته سدیم هیدرواکسید بهینه‌ترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت وزنی ۲ از حالت عدم افزودن متاکائولن (شکل ۱۵) به افزودن ۱۰ درصد متاکائولن (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) انتقال یافته است که می‌تواند نشان دهنده این باشد که با افزایش مولاریته سدیم هیدرواکسید pH محلول بیشتر شده، در این حالت سدیم هیدروکسید موجود در محلول فعال‌کننده قلیایی موجب انحلال سیلیکات، آلومینات و کلسیم موجود در متاکائولن و تشکیل ژل ژئوپلیمری در ساختار خاک می‌گردد (میرزائی، غنی‌زاده و بختیاری، ۱۴۰۱). در نمونه‌های با افزودن ۲۰ و ۳۰ درصد متاکائولن با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد. مقایسه شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ با شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهد که رفتار نمونه‌ها، در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روزه و ۷ روزه یکسان بوده و با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند.

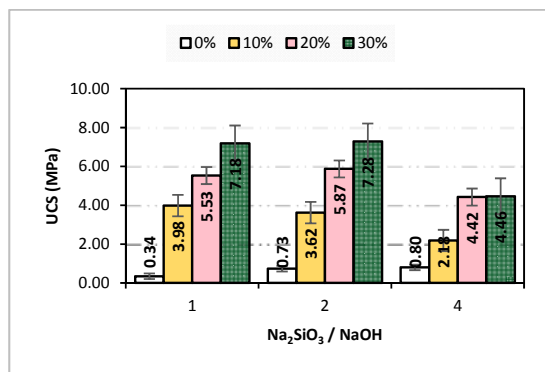
با عناصر فلزی موجود در خاک هیدروکسیدهای فلزی را تشکیل می‌دهند که باعث افزایش حجم و آسیب به ژل سخت شکل گرفته می‌گردد (Pourabbas, Toufigh and Toufigh, 2018) تجمع یون‌های کلسیم باعث پدید آمدن ژل‌های با ساختار ناهمگن می‌شود که باعث افت کیفیت و یکنواختی ریزساختار پدیدآمده می‌گردد (کیانی نژاد، توفیق و توفیق، ۱۴۰۲). در شکل ۱۲ تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر مقاومت فشاری محصور نشده در درصدهای مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه نشان داده شده است. بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با افزودن ۳۰ درصد متاکائولن برابر با ۷/۲۸ مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بدون افزودن متاکائولن ۱۰ برابر افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۱۳ تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر مقاومت فشاری محصور نشده در درصدهای مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه نشان داده شده است. بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با افزودن ۳۰ درصد متاکائولن برابر با ۷/۰۵ مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بدون افزودن متاکائولن ۲۴/۳ برابر افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۱۴ تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر مقاومت فشاری محصور نشده در درصدهای مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه نشان داده شده است. بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با افزودن ۳۰ درصد متاکائولن برابر با ۵/۹۷ مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نسبت ۲ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بدون افزودن متاکائولن ۱۱/۳ برابر افزایش مقاومت داشته است.

مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های ۲۸ روزه

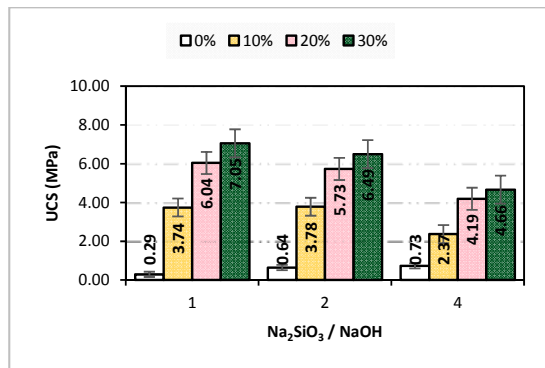
در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نتایج مقاومت فشاری محصور نشده ۲۸ روزه به ترتیب برای سدیم هیدرواکسید ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که در صورت جایگزینی بخشی از باطله سنگ‌آهن با متاکائولن، مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش درصد متاکائولن، مقاومت فشاری محصور نشده افزایش می‌یابد. با اضافه کردن متاکائولن تا ۲۰ درصد مقاومت فشاری محصور نشده به مقدار قابل توجهی

روزه در سدیم هیدرواکسید ۸ مولار با افزودن ۳۰ درصد متاکائولن در نسبت وزنی ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید برابر با ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد.

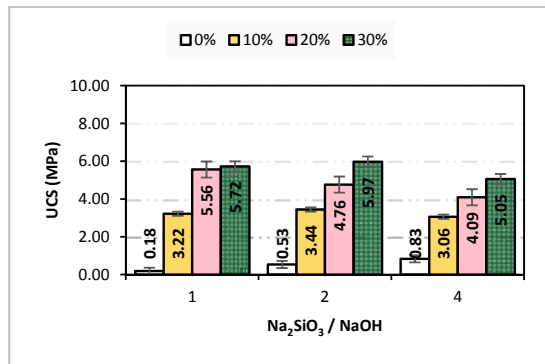
بنابراین در حالت عدم افزودن متاکائولن، واکنش بهینه بین سیلیکات سدیم و سدیم هیدروکسید در نسبت وزنی ۲ به دست می آید در حالی که با اضافه نمودن متاکائولن، نسبت وزنی بهینه ۱ به دلیل زلال تر بودن محلول فعال کننده قلیایی جهت بهتر پنخ شدن بین ذرات متاکائولن و مشارکت متاکائولن به عنوان عامل اصلی در کسب مقاومت، واکنش بهتری انجام می دهد. بیشترین مقدار مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه های ۲۸



شکل ۱۲. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر مقاومت فشاری ۷ روزه



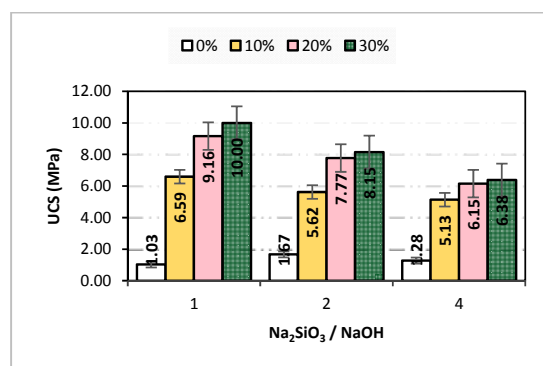
شکل ۱۳. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر مقاومت فشاری ۷ روزه



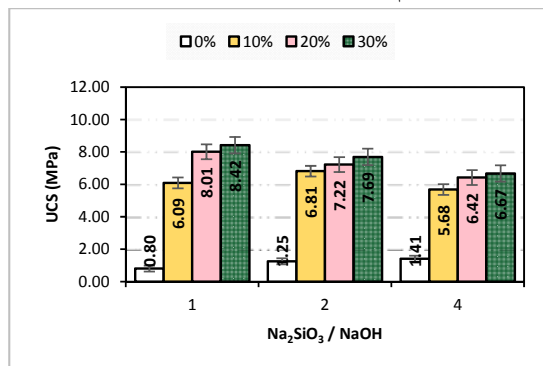
شکل ۱۴. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر مقاومت فشاری ۷ روزه

متاکائولن برابر با ۸/۴۲ مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بدون افزودن متاکائولن، ۱۰/۵۳ برابر افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۱۷ تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر مقاومت فشاری محصور نشده در درصدهای مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه نشان داده شده است. بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با افزودن ۳۰ درصد متاکائولن برابر با ۷/۷۶ مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بدون افزودن متاکائولن ۱۱/۲۵ برابر افزایش مقاومت داشته است.

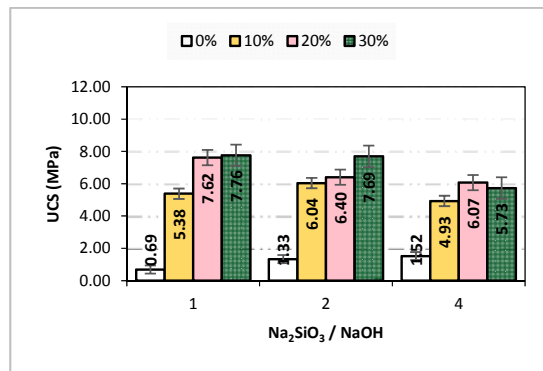
در شکل ۱۵ تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر مقاومت فشاری محصور نشده در درصدهای مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه نشان داده شده است. بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با افزودن ۳۰ درصد متاکائولن برابر با ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد که در مقایسه با نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بدون افزودن متاکائولن، ۹/۷ برابر افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۱۶ تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر مقاومت فشاری محصور نشده در درصدهای مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه نشان داده شده است. بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با افزودن ۳۰ درصد



شکل ۱۵. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه



شکل ۱۶. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه



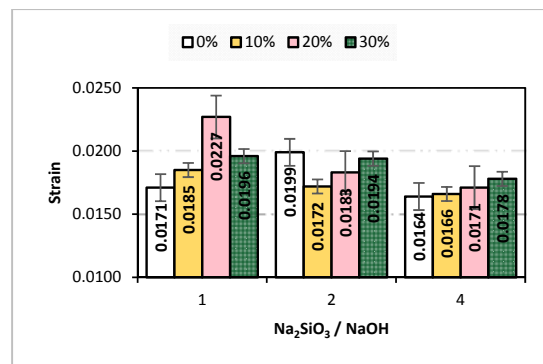
شکل ۱۷. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه

کرنش شکست

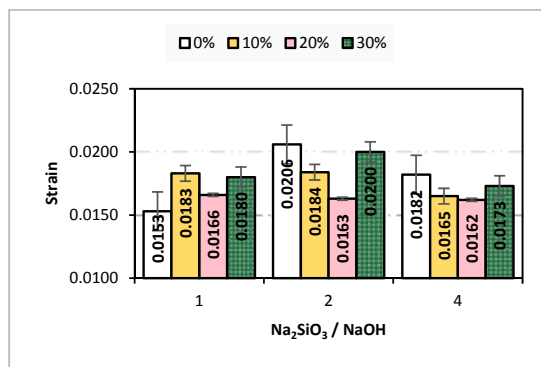
به تغییر طول نمونه نسبت به طول اولیه در لحظه شکست، کرنش شکست می‌گویند.

کرنش شکست در نمونه‌های ۷ روزه

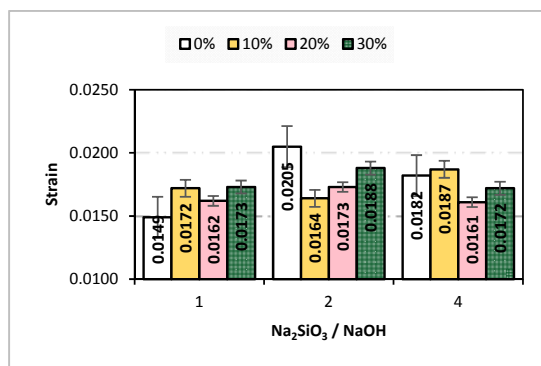
در شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نتایج کرنش لحظه شکست برای سدیم هیدرواکسیدهای ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه نشان داده شده است. نتایج نشان دادند که کرنش لحظه شکست به خاطر حضور سیلیکات سدیم مایع بین بازه ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ متغیر است. با افزایش مولاریته سدیم هیدرواکسید کرنش لحظه شکست کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند نشان دهنده این باشد که با افزایش مولاریته سدیم هیدرواکسید، pH موجود در محلول افزایش یافته است که باعث می‌شود واکنش بیشتری با سیلیکات سدیم صورت گیرد. در نتیجه میزان سیلیکات سدیم واکنش نداده کاهش می‌یابد. با کاهش سیلیکات سدیم مایع، رفتار ماده ترد و شکننده شده و کرنش شکست کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر کرنش لحظه شکست در نمونه‌های ۷ روزه



شکل ۱۹. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر کرنش لحظه شکست در نمونه‌های ۷ روزه

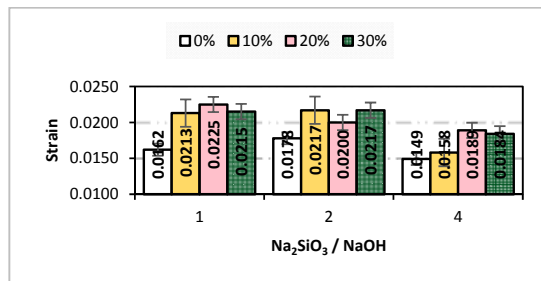


شکل ۲۰. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر کرنش لحظه شکست در نمونه‌های ۷ روزه

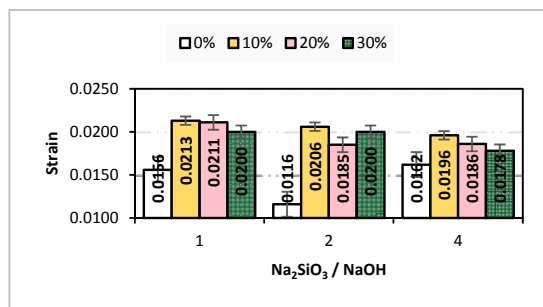
کرنش لحظه شکست در نمونه‌های ۲۸ روزه

که با نتایج ۷ روزه مطابقت دارد شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰. تحقیقات نشان می‌دهد که به خاطر حضور سیلیکات سدیم مایع کرنش شکست در یک بازه متغیر است از طرفی با افزایش درصد متاکائولن در حضور فعال‌کننده قلیایی، کرنش گسیختگی نیز افزایش پیدا می‌کند. علت این امر را می‌توان در کاهش سرعت تبخیر آب حفره‌ای در نمونه‌های خاک قلیایی و در نتیجه انقباض کمتر خاک جستجو کرد که به کاهش ترک خوردگی و در نتیجه افزایش کرنش گسیختگی منجر می‌شود (Zhang et al., 2013).

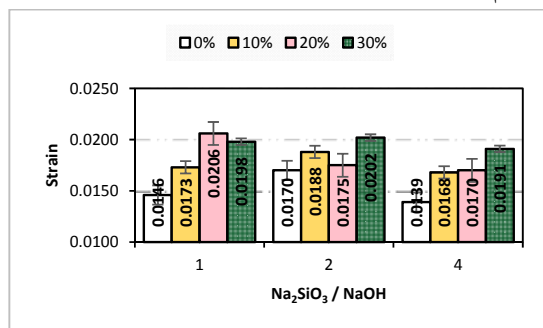
در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ نتایج کرنش لحظه شکست برای سدیم هیدرواکسیدهای ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ نتایج نشان دادند که با افزودن متاکائولن کرنش لحظه شکست افزایش پیدا می‌کند زیرا باطله سنگ آهن مگنتیت در حالت عدم افزودن متاکائولن رفتار ترد و شکننده‌ای دارد اما با افزودن متاکائولن، متاکائولن به عنوان یک ماده پایه عمل کرده و باعث می‌شود که با محلول فعال‌کننده قلیایی تشکیل یک ماده چسبنده داده و رفتار ماده شکل‌پذیر گردد. همچنین با افزایش مولاریته سدیم هیدرواکسید کرنش لحظه شکست کاهش می‌یابد



شکل ۲۱. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر کرنش لحظه شکست در نمونه‌های ۲۸ روزه



شکل ۲۲. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر کرنش لحظه شکست در نمونه‌های ۲۸ روزه



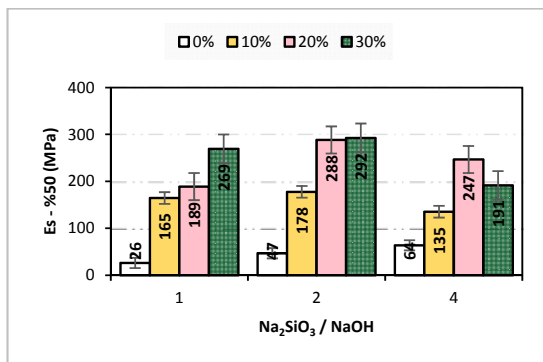
شکل ۲۳. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر کرنش لحظه شکست در نمونه‌های ۲۸ روزه

مدول یانگ سکانت

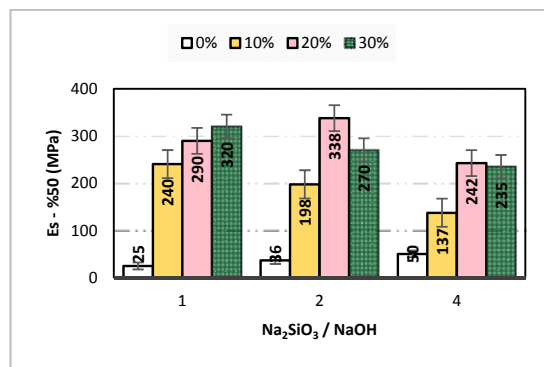
مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) در نمونه‌های ۷ روزه

یانگ سکانت ندارد. همچنین در نمونه‌های بدون افزودن متاکائولن با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مدول یانگ سکانت نیز افزایش پیدا می‌کند. تحقیقات مختلف و نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مدول یانگ سکانت دارای رفتاری شبیه مقاومت فشاری محصور نشده است (Zhang et al. 2013; Chowdary, Ramanamurty and Pillai, 2021; Liu et al. 2016) دلایل افزایش مقاومت فشاری محصور نشده برای مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) نیز صادق هستند.

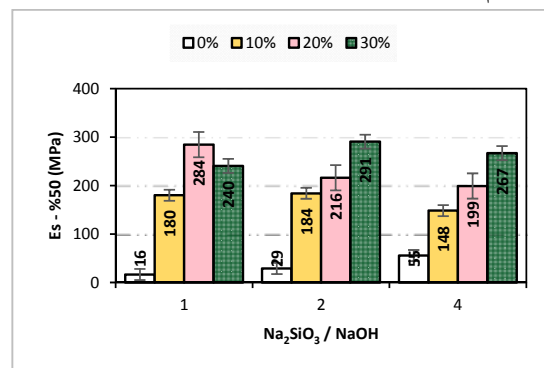
در شکل‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶ تاثیر افزایش درصد متاکائولن و افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بر مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) به ترتیب برای سدیم هیدروکسیدهای ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار در درصد‌های مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روزه نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶ مشاهده می‌گردد که با افزودن متاکائولن مدول یانگ سکانت افزایش پیدا می‌کند و با افزایش متاکائولن تا ۲۰ درصد مدول یانگ سکانت نیز افزایش می‌یابد اما افزودن ۳۰ درصد متاکائولن تاثیری بر مدول



شکل ۲۴. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر مدول یانگ سکانت در نمونه‌های ۷ روزه



شکل ۲۵. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر مدول یانگ سکانت در نمونه‌های ۷ روزه

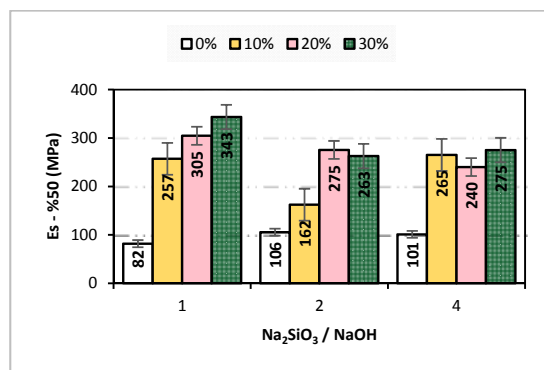


شکل ۲۶. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر مدول یانگ سکانت در نمونه‌های ۷ روزه

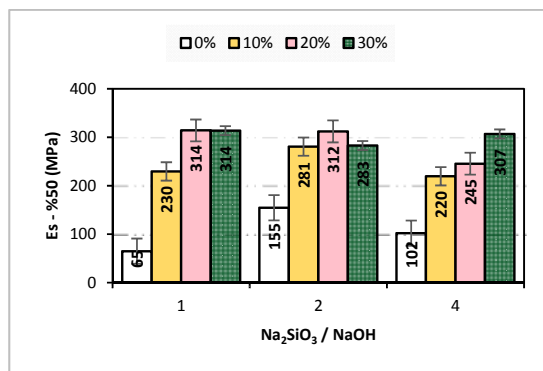
مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) در نمونه‌های ۲۸ روزه

متاکائولن شاهد کاهش مدول یانگ در بعضی نمونه‌ها می‌باشیم. این موضوع نشان دهنده آن است که نسبت بهینه اضافه کردن متاکائولن ۲۰ درصد است و افزودن درصد‌های بیشتر متاکائولن تاثیری بر مدول یانگ سکانت ندارد. با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدرواکسید نتایج به دست آمده نشان دادند که رفتار مدول یانگ سکانت و مقاومت فشاری محصور نشده تقریباً برابر است. همچنین نتایج به دست آمده با نتایج ۷ روزه (شکل‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶) مطابقت دارد.

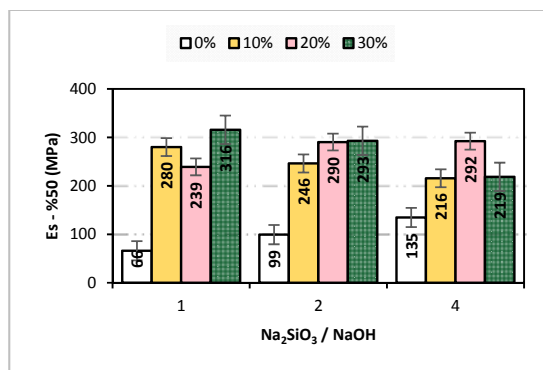
در شکل‌های ۲۷، ۲۸ و ۲۹ تاثیر افزایش درصد متاکائولن و افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدرواکسید بر مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) به ترتیب برای سدیم هیدرواکسیدهای ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار در درصد‌های مختلف متاکائولن، در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۲۷، ۲۸ و ۲۹ مشاهده می‌گردد که با افزودن متاکائولن مدول یانگ افزایش می‌یابد و با افزایش درصد متاکائولن مدول یانگ نیز افزایش می‌یابد. افزایش متاکائولن تا ۲۰ درصد تاثیر بسزایی دارد اما با افزودن ۳۰ درصد



شکل ۲۷. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۸ مولار بر مدول یانگ سکانت در نمونه‌های ۲۸ روزه



شکل ۲۸. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۰ مولار بر مدول یانگ سکانت در نمونه‌های ۲۸ روزه

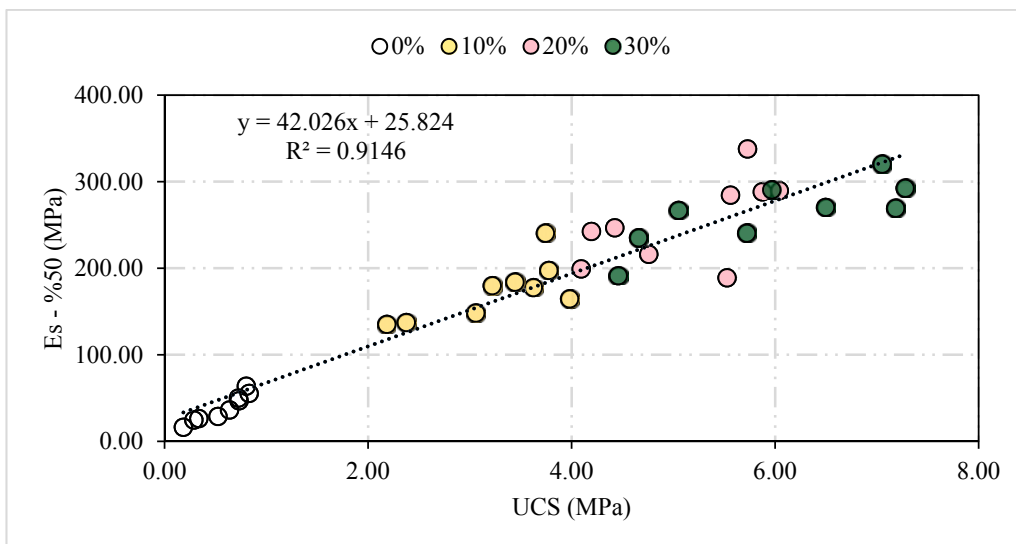


شکل ۲۹. تاثیر سدیم هیدرواکسید ۱۲ مولار بر مدول یانگ سکانت در نمونه‌های ۲۸ روزه

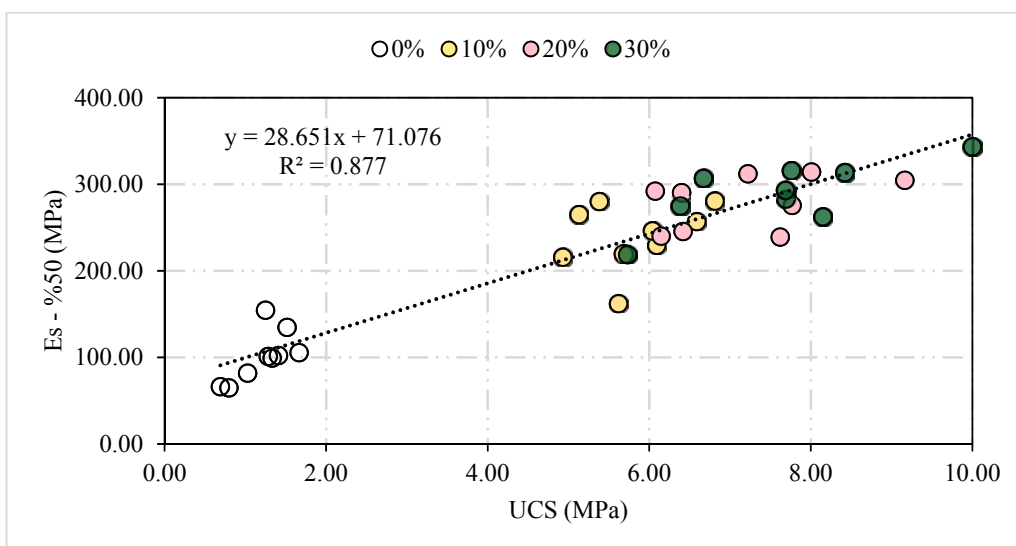
رابطه بین مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ سکانت

نمونه‌های بدون افزودن متاکائولن نشان داده شده است. با توجه به شیب نمودارها می‌توان دریافت که با افزودن متاکائولن به باطله سنگ آهن، مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ سکانت، هر دو به میزان چشمگیری افزایش پیدا خواهند کرد و همچنین با افزایش میزان متاکائولن، مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ سکانت، هر دو افزایش پیدا خواهند کرد. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری محصور نشده، مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) نیز افزایش پیدا می‌کند (zhang et al. 2013; زیلائی و غنی زاده، ۱۳۹۸).

در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ رابطه بین مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) در درصد‌های مختلف متاکائولن نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۳۰ و ۳۱ رابطه بین مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) و مقاومت فشاری محصور نشده خطی بوده و با افزایش مقاومت فشاری محصور نشده مدول یانگ نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به خط برازش داده شده و ضریب رگرسیون بالای نمایش داده شده می‌توان گفت رابطه نسبتاً مناسبی بین مدول یانگ و مقاومت فشاری محصور نشده برقرار است. در سمت چپ شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نتایج مربوط به



شکل ۳۰. رابطه بین مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) و مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه‌های ۷ روزه



شکل ۳۱. رابطه بین مدول یانگ سکانت (معادل کرنش ۵۰ درصد) و مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه‌های ۲۸ روزه

پانوش

معادل انگلیسی	اختصار	نام مواد
Iron Ore Tailings	IOT	باطله سنگ آهن
MetaKaolin	MK	متاکائولن
Alkaline Activated	AA	فعال کننده قلیایی
Sodium Silicate	SS	سیلیکات سدیم
Sodium Hydroxide	SH	سدیم هیدروکسید
Fly Ash	FA	خاکستر بادی
Granulated Blast Furnace Slag	GBFS	سرباره کوره آهن گدازی
Portland Cement	PC	سیمان پرتلند

Aluminosilicate	AS	آلومینوسیلیکات
Aluminate	-	آلومینات
Silica	-	سیلیس
Polymerization	-	پلیمریزاسیون
Monomer	-	مونومر

۵- نتیجه گیری

در ادامه نتایج به دست آمده از انجام این تحقیق ارائه می‌گردد. نتایج آزمایش تراکم نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد. زمان عمل‌آوری نقش مهمی در افزایش مقاومت فشاری محصور نشده دارد و با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها افزایش می‌یابد. جایگزینی بخشی از باطله سنگ‌آهن با متاکائولن سبب افزایش مقاومت فشاری محصور نشده می‌گردد و متاکائولن نقش اصلی در افزایش مقاومت فشاری محصور نشده را دارد و متاکائولن واکنش بهتری با محلول در نسبت وزنی ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید نشان می‌دهد. در نمونه‌های بدون افزودن متاکائولن با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری محصور نشده افزایش پیدا می‌کند. در صورت جایگزینی بخشی از باطله سنگ‌آهن با متاکائولن با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری محصور نشده کاهش پیدا می‌کند. در نمونه‌های بدون افزودن متاکائولن بیشترین میزان مقاومت فشاری محصور نشده با افزودن محلول سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در نسبت وزنی ۲ (در سدیم هیدرواکسید ۸

مولار) به دست می‌آید اما در صورت جایگزینی ۱۰ درصد از باطله سنگ‌آهن با متاکائولن بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده با افزودن محلول سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در نسبت وزنی ۲ (در سدیم هیدروکسیدهای ۱۰ و ۱۲ مولار) به دست می‌آید. خط برازش داده شده بین مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ سکانت (کرنش ۵۰ درصد) نشان داد که رابطه بین مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ سکانت نیز افزایش می‌یابد. با افزایش مولاریته سدیم هیدرواکسید (سدیم هیدروکسید)، مقاومت فشاری محصور نشده، کرنش شکست و مدول یانگ کاهش پیدا می‌کنند. کرنش لحظه شکست در بازه ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲۰ متغیر است. همچنین تاثیر زمان عمل‌آوری و افزایش نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید بر روی کرنش لحظه شکست بسیار ناچیز است. استفاده از باطله سنگ‌آهن به عنوان مصالح در مهندسی عمران بسیار حائز اهمیت است و کمک‌های فراوانی به حفظ محیط زیست می‌کند.

۶- مراجع

زیلانی، مژده و غنی‌زاده، علیرضا. (۱۳۹۸). مقاومت فشاری محصور نشده و دوام مصالح باطله سنگ‌آهن تثبیت شده با سیمان به عنوان مصالح اساس: مورد مطالعاتی معدن گل‌گهر. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، (۲)۷، ۱۰۱-۱۲۲.

فتحی، سیامک، پرویزی، منصور و هوشمند سروسستانی، غلامحسین. (۱۳۹۲). بررسی تأثیر سیلیکات سدیم بر ظرفیت باربری ماسه. اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک. اردبیل، ایران.

کیانی نژاد، محمد، توفیق، محمد محسن و توفیق، وحید. (۱۴۰۲). تثبیت ماسه‌بادی با استفاده از متاکائولن و پسماند کاربرد کلسیم به عنوان فعال‌ساز قلیایی. نشریه مهندسی عمران/میرکبیر. (۸)۵۵، ۱۶۰۰-۱۵۷۹.

- pavement subgrade. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(8), 714-726.
dx.doi.org/10.1080/10298436.2015.1121782
- Chowdary, V. B., Ramanamurty, V., and Pillai, R.J. (2021). Experimental evaluation of strength and durability characteristics of Geopolymer stabilised soft soil for deep mixing applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6, 1-10.
doi.org/10.1007/s41062-020-00407-7
- Daneshgar, P., Ghaffarpour Jahromi, S., and Arzani, H. (2023). Investigation of the behavior of Ahvaz sand soil stabilized with metakaolin. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(2), 73-76.
doi.org/10.22060/ceej.2022.21851.7838
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes, Kiev, Ukraine.
- Das, S. K., Kumar, S., & Ramachandrarao, P. (2000). Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. *Waste Management*, 20(8), 725-729.
doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00034-9
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., & Van Deventer, J. S. (2005). Understanding the relationship between Geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58.
doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060
- Fernández-Jiménez, A., Monzó, M., Vicent, M., Barba, A., and Palomo, A. (2008). Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. *Microporous and mesoporous materials*, 108(1-3), 41-49.
doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.03.024
- Görhan, G. (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, 228-234.
dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.011
- Gutierrez A. S., Eras J. C., Gaviria C. A., Caneghem J. V., and Vandecasteele C. (2017). Improved selection of the functional unit in environmental impact assessment of cement. -میرزائی، کوروش، غنی‌زاده، 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 حمل و نقل*، ۱۳(۴)، ۲۰۶۴-۲۰۴۳.
- Abdulkareem, S.O., and Abbas, J.M. (2021). Effect of Adding Metakaolin Based Geopolymer to Improve Soft Clay Under Different Conditions. *Second International Conference on Geotechnical Engineering, Iraq*.
- Ambrose, J., Murat, M., & Pera, J. (1985). Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: V. Extension of the research and general conclusions. *Cement and Concrete Research*, 15, 261-268.
- Andrejkovičová, S., Sudagar, A., Rocha, J., Patinha, C., Hajjaji, W., Ferreira da Silva, E., Velosa, A., and Rocha, F. (2016). The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based Geopolymers. *Applied Clay Science*, 126, 141-152.
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217.
doi.org/10.5194/essd-10-195-2018.
- Bernal, S.A., Rodríguez, E.D., Mejía de Gutiérrez, R., Gordillo, M., and Provis, J.L. (2011). Mechanical and thermal characterization of Geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *Journal of materials science*, 46(16), 5477-5486.
doi.org/10.1007/s10853-011-5490-z.
- Buchwald, A., Hilbig, H., and Kaps, Ch. (2007). Alkali-activated metakaolin-slag blends—performance and structure in dependence of their composition. *Advanced in Geopolymer Science and Technology*, 42(9), 3024-3032.
doi.org/10.1007/s10853-006-0525-6
- Buchwald, A. Tatarin, R., and Stephan, D. (2009). Reaction progress of alkaline-activated metakaolin-ground granulated blast furnace slag blends. *Journal of Materials Science*, 44(20), 5609-5617.
doi.org/10.1007/s10853-009-3790-3
- Cabalara, A.F., & Mustafa, W.S. (2015). Behavior of sand-clay mixtures for road

- Kuranchie, F. A. (2015). Characterisation and applications of iron ore tailings in building and construction projects. *Doctorates and Masters Theses*. Cowan University.
- Łachl, M., Mikuła, J., Lin, W.T., Bazan, P., Figiela, B., & Korniejenko, K. (2020). Development and Characterization of Thermal Insulation Geopolymer Foams Based on Fly Ash. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, 16, 23-29.
- Li, C. Sun, H., and Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1341-1349.
doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020
- Li, X., Rao, F., Song, S., Corona-Arroyo, M.A., Ortiz-Lara, N., & Aguilar-Reyes, E.A. (2018). Effects of aggregates on the mechanical properties and microstructure of geothermal metakaolin-based Geopolymers. *Results in Physics*, 11, 267-273.
doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.018
- Li, X., Wang, P., Guo, Z., Qin, J., & Liang, K. (2022). Effect of Fe²⁺/Fe³⁺ on high-strength ceramics prepared by sintering Geopolymers using iron ore tailings. *Ceramics International*, 48(4), 5681-5688.
- Liew, Y.M., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., and Heah, C.Y. (2011). Investigating The Possibility of Utilization of Kaolin and The Potential of Metakaolin to Produce Green Cement for Construction Purposes – A Review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 441-449.
- Liu, Z., Cai, C. S., Liu, F., & Fan, F. (2016). Feasibility Study of Loess Stabilization with Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 1-8.
dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001490
- Longos, A. Tigue, A.A., Dollente, I.J., Malenab, R.A., Bernardo-Arugay, I., Hinode, H., Kurniawan, W., and Promentilla, M.A. (2020). Optimization of the mix formulation of Geopolymer using nickel-laterite mine waste and coal fly ash. *Minerals*, 10(12), 1-17.
doi.org/10.3390/min10121144
- Journal of Cleaner Production*, 168, 463-473.
dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.007
- Hadi, N.A.R.A. (2016). Geo Polymerization of Kaolin and Metakaolin Incorporating NaOH and High Calcium Ash. *Earth Science Research*, 5(1), 67-75.
dx.doi.org/10.5539/esr.v5n1p67
- Hamaideh, A., Komnitsas, K., Esaifan, M., Al-Kafawein, J.K., Rahier, H., & Mazen Alshaaer. (2014). Advantages of Applying a Steam Curing Cycle for the Production of Kaolinite-Based Geopolymers. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 7591-7597.
doi.org/10.1007/s13369-014-1314-1
- Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Chinkulkijniwat, A., and Cholaphatsorn, A. (2013). Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash. *Soils and Foundations*, 53, 477-486.
- Horvat, B., Ducman, V., & Pavlin, A.S. (2019, October 24-25). Waste Foundry Sand as Precursor in Alkali Activation Process. 2nd International Conference on Technologies & Business Models for Circular Economy, Portorož, Slovenia.
- Jamil, N. H., Abdullah, M. M. A. B., Che Pa, F., Hasmaliza, M., W. Ibrahim, W. M. A., A. Aziz, I. H., and Nabialek, M. (2021). Phase Transformation of Kaolin-Ground Granulated Blast Furnace Slag from Geopolymerization to Sintering Process. *Magnetochemistry*, 7(3), 1-13.
doi.org/10.3390/magnetochemistry7030032
- John, V. M. and Zordan, S. E. (2001). Research and development methodology for recycling residues as building materials—a proposal. *Waste management*, 21(3), 213-219.
doi.org/10.1016/s0956-053x(00)00092-1
- Kazemzadeh, M., Zad, A.A., and Latifi, P. (2023). Stabilization of clayey soils contaminated with lead and zinc nitrate using metakaolin Geopolymer. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(12), 961-964.
doi.org/10.22060/ceej.2022.21411.7712
- Khoury, H. (2006). Industrial rocks and minerals in Jordan (2nd edition). *Publications of the University of Jordan*.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., & Perdikatsis, V. (2007). Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3073-3082.

- Rocha, F. (2018). A novel study on the influence of cork waste residue on metakaolin-zeolite based Geopolymers. *Applied Clay Science*, 152, 196-210.
- Wongsa, A., Boonserm, K., Waisurasingha, C., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2017). Use of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash in high calcium fly ash Geopolymer matrix. *Journal of Cleaner Production*, 148, 49-59.
- Vlček, J., Topinková, M., Klárová, M., Maierová, P., Ovcaciková, H., Matejka, V., Martaus, A., and Blahušková, V. (2021). Alkali-Activated Metakaolin and Fly Ash as Unfired Ceramic Bonding Systems. *Minerals*, 11(2), 1-16. doi.org/10.3390/min11020197
- Xu, H. & Van Deventer, J.S.J. (2000). The Geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.
- Yip, C. K., Lukey, G. C., and Van Deventer, J. S. (2005). The coexistence of Geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1688-1697. doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.042
- Zaharaki, D., Komnitsas, K., & Perdikatsis, V. (2010). Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. *Journal of Materials Science*, 45(10), 2715-2724.
- Zailani, W.W.A., Abdullah, M.M.A., Arshad, M.F., Burduhos-Nergis, D.D., & Tahir, M.F.M. (2020, May 21-23). Effect of Iron Oxide (Fe₂O₃) on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *International Conference on Innovative Research*. Iasi, Romania. doi.org/10.1088/1757-899X/877/1/012017
- Zainal, F. F., Fazill, M. F., Kamarudin, H., Rahmat, A., Abdullah, M. M. A. B., & Wazien, W. (2018). Effect of Geopolymer coating on mild steel. *Solid State Phenomena*, 273, 175-180.
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., and Tao, M. (2013). Experimental feasibility study of Geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47, 1468-1478.
- Metakaolin, H. R. (2004). Engineered Mineral Admixture for Use with Portland Cement. *Advanced Cement Technologies*.
- Pourabbas M., Toufigh, MM. and Toufigh, V. (2018). Experimental investigation of using a recycled glass powder-based Geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and Building Materials*, 170, 302-313.
- Rao, F., & Liu, Q. (2015). Geopolymerization and its potential application in mine tailings consolidation: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(6), 399-409.
- Rashad, A. M., and Ouda, A. S. (2019). Thermal resistance of alkali-activated metakaolin pastes containing nano-silica particles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(2), 609-620. doi.org/10.1007/s10973-018-7657-1
- Rodrigues, M., Vogt, J., Lima, L., Duarte, G., Freire, C., & Lameiras, F. (2020). The Use of Iron Ore Tailings in the Iron Quadrangle of Minas Gerais, Brazil. *KnE Engineering*, 5(4), 147-156. doi.org/10.18502/keg.v5i4.6805
- Shi, X., Zha, Q., Li, S., Cai, G., Wu, D., and Zhai, C. (2022). Experimental Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Metakaolin-Based Geopolymer Modified Clay. *Molecules*, 27(15). 1-12. doi.org/10.3390/molecules27154805
- Silva, I.C., Castro-Gomes, J., & Albuquerque, A. (2010). Evaluation of the stability of waste-based Geopolymeric artificial aggregates for wastewater treatment processes under different curing conditions. *Advances in Science and Technology*, 69, 86-91. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.69.86
- Sithole, N.T., & Magage, B. (2021, December 02-04). Sodium Aluminate Activation of Non-ferrous Waste Foundry Sand: A Feasibility Study. *3rd International Conference on Resources and Environmental Research*, Online. doi.org/10.1088/1755-1315/1048/1/012002
- Sudagar, A., Andrejkovičová, S., Patinha, C., Velosa, A., McAdam, A., Silvaa, E. F., and

Stabilization of Magnetite Iron Ore Tailings with Metakaolin-based Geopolymer as Road Materials

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

*Mojtaba Nejadkorki, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering,
Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.*

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

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

Received: August 2024- Accepted: December 2024

ABSTRACT

Iron ore processing produces a considerable amount of iron ore mine tailings (IOMT). Also, the construction industry has a great potential to absorb tailings and wastes from other industries (for example mining industry). The purpose of this article is to stabilize magnetite iron ore tailings using geopolymer synthesized from metakaolin as a source of aluminosilicate and sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) as alkaline activators. For this purpose, the alkaline activating solution was made by combining sodium hydroxide (soda) in 3 molarities of 8, 10 and 12 with sodium silicate solution in 3 weight ratios of 1, 2 and 4 (sodium silicate to sodium hydroxide) and this activator was added as the optimum moisture to different combinations of iron ore tailings and metakaolin (10, 20 and 30% by weight of IOMT). Compressive strength samples were fabricated with two curing times of 7 and 28 days. The results showed that increasing the percentage of metakaolin alone increases the unconfined compressive strength. Also, increasing the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide and increasing the molarity of sodium hydroxide decreases the unconfined compressive strength of 28 days. The highest value of unconfined compressive strength in 28-day samples was observed 10 MPa, by adding 30% of metakaolin and in the weight ratio of 1 sodium silicate to sodium hydroxide (in 8 M sodium hydroxide). Also, the investigation shows a high correlation between unconfined compressive strength and Young's modulus.

Keyword: Magnetite Iron Ore Mine Tailings, Stabilization, Metakaolin, Geopolymer, Unconfined Compressive Strength