

ارزیابی مقاومت تراکم تک محوری و حدود اتربرگ خاک رس ماسه دار تثبیت شده با متاکائولن

علی محمد رجیبی*^۱، زهرا همراهی^۲

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۲۹

دریافت مقاله: ۹۸/۰۹/۲۴

چکیده

اصلاح و بهسازی خاک‌های ضعیف به عنوان امری اجتناب ناپذیر نقش مهمی در پروژه‌های عمرانی دارد. اضافه نمودن برخی از افزودنی‌ها به خاک، به عنوان یکی از روش‌های موثر در بهبود مشخصه‌های رفتاری خاک همواره مدنظر مهندسين ژئوتکنیک بوده است. در پژوهش حاضر تاثیر افزودن متاکائولن بر پارامترهای مهندسی خاک رس ماسه دار نظیر حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک محوری بررسی شده است. به این منظور، آزمایش‌های مقاومت تراکم تک محوری روی نمونه‌های خاک رس ماسه دار تثبیت نشده و تثبیت شده با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد متاکائولن در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شده است. همچنین آزمایش حدود اتربرگ در درصدهای ۵، ۱۵ و ۲۵ در زمان عمل‌آوری آنی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد متاکائولن موجب افزایش حدود روانی و خمیری خاک رس ماسه دار می‌شود. به طوری که میزان افزایش حد خمیری خاک کمتر از حد روانی بوده و در نتیجه نشانه خمیری خاک افزایش یافته است. نمونه‌های تثبیت شده با ۲۵ درصد متاکائولن با افزایش ۱/۳۳ و ۱/۴ برابری به ترتیب برای حدود روانی و خمیری بیشترین تغییر را در حدود اتربرگ خاک رس ماسه دار باعث شده‌اند. بررسی خاک تثبیت شده در نمودار خمیری خاک نشان می‌دهد که موقعیت خاک در این نمودار در اثر افزایش میزان متاکائولن تغییر ناچیزی کرده و خاک در همان ساختار اولیه باقی خواهد ماند. همچنین با افزایش درصد متاکائولن و زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری تک محوری رس ماسه دار افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش مقاومت به ازای ۲۵ درصد متاکائولن و در زمان ۲۸ روز اتفاق افتاده است. همچنین بررسی سطوح گسیختگی و نحوه شکست نمونه‌های آزمایش شده نشان می‌دهد که با افزایش متاکائولن شکست نمونه‌ها پس از رسیدن به مقاومت نهایی سریع‌تر صورت می‌گیرد.

کلید واژه‌ها: حدود اتربرگ، مقاومت تک محوری، رس ماسه دار، متاکائولن، بهسازی

۱- گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران؛ amrajabi@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه قم

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

استفاده از مواد افزودنی برای تثبیت خاک، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این بین استفاده از افزودنی‌های ارزان و سازگار با محیط‌زیست مانند پوزولان‌های طبیعی حائز اهمیت می‌باشد. پوزولان‌های طبیعی، مواد سیلیسی و آلومینوسیلیکاتی هستند که ظاهراً دارای خاصیت سیمانی نیستند ولی در حضور آب، با هیدرات کلسیم ترکیب‌هایی با خاصیت سیمانی به وجود می‌آورند. با مروری بر تحقیقات گذشته، مشاهده می‌شود که استفاده از مواد پوزولانی در ساخت بتن علاوه بر سازگاری با محیط زیست، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش هزینه، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی بتن می‌شود (Ghrici and Kenai., 2007). در سال‌های اخیر استفاده از مواد پوزولانی برای بهبود پارامترهای مقاومتی خاک نیز مورد توجه قرار گرفته است. یشربی و جداری صالح زاده (۱۳۸۰) (Yasrebi and Salehzadeh., 2001) تأثیر افزودن پوزولان روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی رس و آگرا را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های ایشان نشان داد، افزایش درصد پوزولان همراه با افزایش زمان عمل‌آوری، باعث کاهش واگرایی، مقاومت فشاری تک‌محوری، دانسیته حداکثر خشک خاک و افزایش حد روانی و رطوبت بهینه خاک می‌شود.

یشربی و قابزلو (۱۳۸۰) (Yasrebi and Ghabezlo., 2001) اثر افزودن پوزولان و "آهک و پوزولان" بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نوعی خاک مارن را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده از مطالعات ایشان، پوزولان مورد استفاده به دلیل کم بودن محتوای آهک آزاد موجود در آن، به تنهایی اثر چندانی بر بهبود خصوصیات مکانیکی مارن ندارد، اما تأثیر استفاده همزمان از آهک و پوزولان بر ویژگی نمونه‌ها قابل توجه بوده و موجب بهبود پارامترهای مقاومتی خاک مارنی گردیده است.

حسین و مول (۲۰۱۱) (Hossain and Mol., 2011) ضمن انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ، پروکتور استاندارد، تراکم تک محوری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، خواص مهندسی رس‌های تثبیت شده با

پوزولان‌ها و ضایعات صنعتی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد با افزودن همزمان این مواد، مقاومت و دوام نمونه‌های تثبیت شده، افزایش می‌یابد.

سوآیدانی و همکاران (۲۰۱۶) (Swaidani et al., 2016) اثر پوزولان طبیعی روی خواص ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با آهک را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه خاک با ۰ تا ۲۰ درصد پوزولان و ۰ تا ۸ درصد آهک تثبیت شد. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان داد با افزودن پوزولان طبیعی، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) افزایش و شاخص خمیری خاک تثبیت شده با آهک کاهش می‌یابد. کاهش شاخص خمیری می‌تواند نشان‌دهنده افزایش مقاومت و کاهش پتانسیل تورم خاک باشد. این مطالعه نشان داد، ژل سیلیکات و آلومینات تشکیل شده در خاک تثبیت شده با آهک و خاک تثبیت شده با پوزولان و آهک عامل اصلی این تغییرات بوده است.

متاکائولن یک پوزولان طبیعی با واکنش پذیری بالا است و معمولاً دارای ۵۰ الی ۵۵ درصد SiO_2 می‌باشد که در واکنش با $Ca(OH)_2$ در دمای معمولی ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) تولید می‌کند. این ماده همچنین دارای ۴۰ الی ۴۵ درصد Al_2O_3 می‌باشد که با کلسیم هیدرات (CH) واکنش داده و فازهای آلومیناتی تولید می‌کند. متاکائولن از کلسینه نمودن خاک کائولن در دمای بین ۵۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بدست می‌آید. اولین استفاده مستند از این ماده در بتن و در سال ۱۹۶۲ در سد جویپای برزیل بوده است. استفاده از متاکائولن در صنعت بتن عمر کوتاه و حدود ۲۰ سال دارد، ولی به سرعت به عنوان یک ماده پوزولانی موثر پذیرفته شده است، به طوری که از سال ۱۹۹۴ میلادی متاکائولن بصورت تجاری وارد بازار شده است. مطالعات بسیاری توسط محققین در خصوص اثرات جایگزینی سیمان با متاکائولن به عنوان یک پوزولان و تأثیر آن بر بهبود خصوصیات مکانیکی و پایایی بتن انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که افزودن متاکائولن به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی آن می‌شود. همچنین این ماده مقاومت بتن در برابر خوردگی را افزایش می‌دهد.

عمل‌آوری شده در دماهای ۲۳ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش درصد متاکائولن و دمای عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد و در ساختار ذرات ملات عمل‌آوری شده ژل سیلیکات و آلومینات به وضوح دیده می‌شود. اخیراً نیز بررسی‌های لیناهو و همکاران (۲۰۱۸) (Linhao et al., 2018) در خصوص تثبیت ماسه سیمانته شده با زغال سنگ متاکائولن نشان می‌دهد که این نوع افزودنی، موجب بهبود حفرات موجود در خاک، افزایش سرعت هیدراتاسیون و بهبود مقاومت خاک می‌شود.

در سال‌های اخیر استفاده از متاکائولن برای سنتز ژئوپلمیرها مورد توجه قرار گرفته است. نتایج سنتز ژئوپلمیرها با متاکائولن و ترکیب متاکائولن با مواد دیگر مانند زئولیت، نانوسیلیس، کائولن، مواد سیمانی و... نشان می‌دهد که متاکائولن موجب بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، کاهش آلودگی زیست‌محیطی و به‌طور کلی موجب بهبود عملکرد ژئوپلمیرها می‌شود. نتیجه این‌که استفاده از ژئوپلمیرهای با پایه موادی نظیر متاکائولن در ساخت بتن، ملات و بهسازی خاک گسترش یافته و افزایش مقاومت و کارایی آن‌ها را به دنبال خواهد داشت (Sudagar et al., 2018; Avent et al., 2018; El-Eswed et al., 2017).

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از سیمان به عنوان یک افزودنی مناسب برای تثبیت خاک مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر هر چند اثر ترکیب متاکائولن و سیمان برای تثبیت خاک به صورت محدودی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما تاکنون از متاکائولن به تنهایی برای تثبیت و بهسازی خاک رس ماسه‌دار استفاده نشده است. در این مطالعه در نظر است که با توجه به ویژگی‌های منحصر بفرد متاکائولن، اثر درصدهای مختلف متاکائولن بر نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس ماسه‌دار مورد بررسی قرار گیرد.

علیرغم وجود مطالعات بسیار در خصوص اثرات افزودن پوزولان متاکائولن به بتن، استفاده از متاکائولن جهت تثبیت خاک و خاک سیمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Wild et al., 1994; Qain and Li., 2001; Courard et al., 2003; Batis et al., 2005).

کولوز و همکاران (۲۰۱۳) (Kolovos et al., 2013) خواص مکانیکی soilcrete (خاک سیمان) اصلاح شده با متاکائولن را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه بهینه‌سازی طرح اختلاط خاک سیمان و رفتار مکانیکی آن به‌طور تجربی بررسی شده و نتایج بیانگر بهبود خواص مکانیکی خاک سیمان بوده است. بررسی اثر متاکائولن بر هدایت هیدرولیکی و رفتار مکانیکی رس دریایی بهسازی شده با سیمان نشان می‌دهد که با افزایش درصد متاکائولن از ۳ به ۵ درصد هدایت هیدرولیکی ۱۰ الی ۱۰۰ برابر کاهش یافته است. مقاومت فشاری تک‌محوری خاک حاوی ۳ درصد سیمان و ۵ درصد متاکائولن، حدود ۲ الی ۳ برابر خاک بدون متاکائولن است. همچنین نرخ افزایش مقاومت خاک حاوی متاکائولن در روزهای اول عمل‌آوری بیشتر از خاک فاقد متاکائولن است. در واقع متاکائولن به واکنش‌های پوزولانی شتاب می‌دهد.

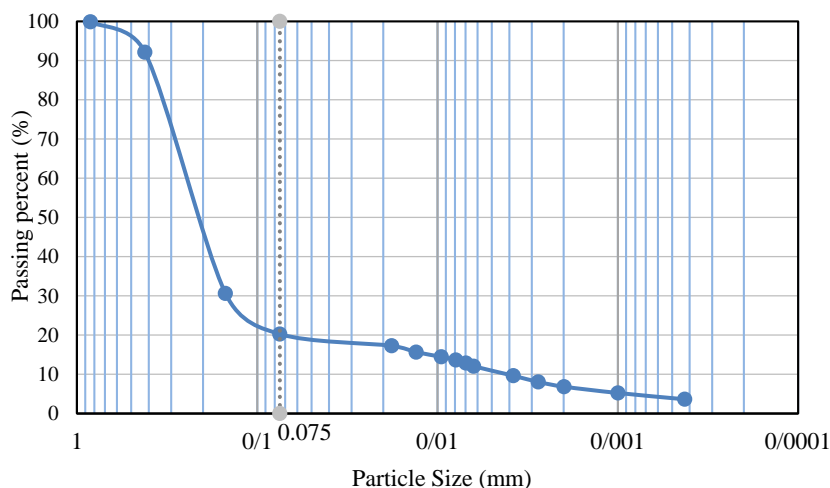
وو و همکاران (۲۰۱۶) (Wu et al., 2016) اثر متاکائولن و سیمان را بر مقاومت و ساختار خاک MHS (این خاک حاوی ۳۳ درصد ماسه، ۴۵/۵ درصد لای و ۲۰/۵ درصد رس و حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری به ترتیب ۵۵/۵، ۳۸/۱ و ۱۷ درصد است) مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که اضافه کردن متاکائولن به خاک تثبیت شده با سیمان حساسیت خاک نسبت به آب را کاهش و مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی خاک را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. نسبت بهینه سیمان به متاکائولن در این مطالعه بین ۲ الی ۳ ارزیابی شده است. بررسی‌های ریزساختاری نیز بیانگر افزایش واکنش‌های پوزولانی و تولید مواد معدنی جدید هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و هیدرات کلسیم آلومینات (CAH) است.

ویانگلر و همکاران (۲۰۱۷) (Wianglor et al., 2017) اثر متاکائولن فعال قلیایی بر مقاومت فشاری و ساختار ذرات ملات

۲. مواد و روش‌ها

درصد عبوری این ماسه از الک ۲۰۰ کمتر از ۱ است. آنالیز شیمیایی ماسه فیروزکوه به شرح جدول (۱) است. به منظور طبقه‌بندی و رسم نمودار دانه‌بندی خاک رس ماسه‌دار (شکل ۱)، آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری بر طبق استاندارد (ASTM D422-87) و (ASTM D422-63) انجام شده است.

در این تحقیق مخلوط خاک رس ماسه‌دار با ۵۲ درصد رس و ۴۸ درصد ماسه ۱۶۱ فیروزکوه مورد استفاده قرار گرفته است. رنگ ماسه ۱۶۱ فیروزکوه سفید متمایل به زرد با دانسیته $2/68 \text{ (kg/cm}^3\text{)}$ و ضریب گوشه داری کمتر از $1/3$ می‌باشد.



شکل ۱. توزیع دانه‌بندی خاک رس ماسه‌دار

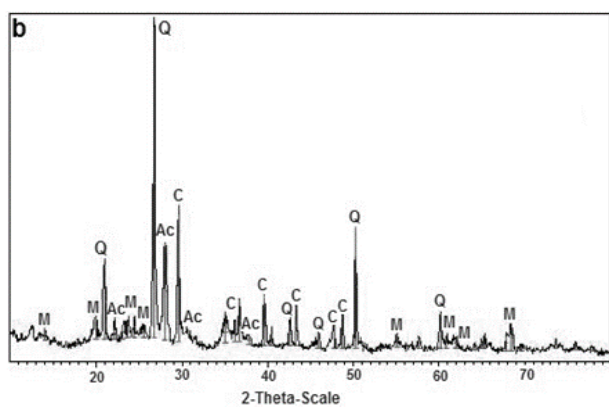
آمورف بودن نمونه در این بازه است. در واقع متاکائولن مخلوطی از بلورها و مواد آمورف است. بلورهای موجود در متاکائولن شامل ایلیت $((K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)])$ ، کوارتز (SiO_2) و آناتاز (TiO_2) است. آنالیز شیمیایی متاکائولن به شرح جدول (۱) است (Surdagar et al., 2018; Colvis et al.).

در این مطالعه به منظور تهیه نمونه، ابتدا خاک رس و ماسه به صورت خشک با یکدیگر مخلوط و سپس ماده افزودنی به نسبت وزن مخصوص خشک خاک در درصدهای مختلف به خاک اضافه و مخلوط شده است.

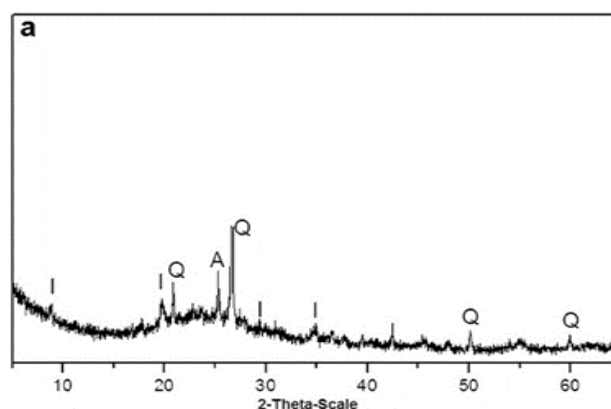
در شکل (۲) منحنی پراش پرتو ایکس رس و متاکائولن نشان داده شده است. تحلیل الگوی پراش پرتو ایکس خاک رس مورد استفاده در این مطالعه (شکل ۲-ب)، نشان می‌دهد در ساختار خاک رس کریستال‌های کوارتز (SiO_2) ، کلسیت $(CaCO_3)$ ، آلبیت $(Na, Ca)Al(Si, Al)_3O_8$ و موسکویت $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$ وجود دارد. وزن مخصوص متاکائولن مورد استفاده در این تحقیق $2/63$ گرم بر سانتی‌مترمکعب و سطح مخصوص ویژه آن 9169 سانتی‌مترمربع بر گرم می‌باشد. مطابق شکل (۲-الف) در الگوی پراش پرتو ایکس متاکائولن در بازه ۱۸ تا ۳۰، برجستگی نموداری یافت نمی‌شود که نشان دهنده

جدول ۱. مشخصات شیمیایی ماسه فیروزکوه و متاکائولن مورد استفاده در این مطالعه.

Oxide Content (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Cr	Loss on ignition
Sand	97.5	0.95	0.85	0.27	-	0.19	0.24	-	
MK	52.8	36.2	4.21	<0.1	<0.1	1.41	0.81		3.53



(ب)



(الف)

شکل ۲. منحنی الگوی پراش پرتو ایکس الف) متاکائولن ب) رس.

صورت تدریجی به آن آب اضافه شده است تا نمونه‌ها به رطوبت بهینه خود برسند. خاک مورد نظر در سه لایه با ضخامت تقریباً یکسان در قالب تک محوری ریخته و تا رسیدن به حداکثر وزن مخصوص خشک، متراکم شده است. در این آزمایش، بارگذاری با سرعت ثابت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شده و تا کرنش ۰/۳ میلی‌متر بعد از رسیدن به مقاومت نهایی نمونه‌ها ادامه یافته است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش حدود اتربرگ

نتایج تغییرات حدود اتربرگ خاک رس ماسه‌دار تثبیت نشده و تثبیت شده با ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق شکل (۳) حد روانی خاک رس ماسه‌دار ۲۰/۴، حد خمیری ۱۴/۳۳ و شاخص خمیری آن ۶/۰۷ می‌باشد. با افزایش درصد متاکائولن شاخص خمیری خاک ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. بعلاوه با افزایش درصد متاکائولن حدود روانی و خمیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نمونه‌های تثبیت شده با ۲۵ درصد متاکائولن با افزایش ۱/۳۳ برابری حد روانی و ۱/۴ برابری حد خمیری بیشترین تغییر را در حدود اتربرگ خاک رس ماسه‌دار باعث شده است.

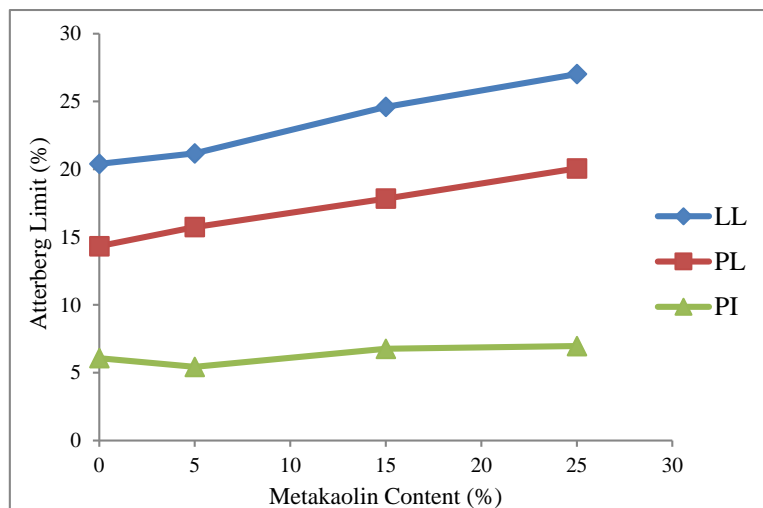
۲-۱. آزمایش حدود اتربرگ

آزمایش حدود اتربرگ قوام خاک را همزمان با تغییر رطوبت نشان می‌دهد و به‌طور گسترده‌ای در مهندسی ژئوتکنیک برای شناسایی، توصیف، طبقه‌بندی و به عنوان مبنایی برای ارزیابی اولیه پارامترهای مکانیکی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه حدود اتربرگ به آسانی قابل اندازه‌گیری است و همبستگی خوبی با پارامترهای خاک دارد اما تفسیر اساسی حدود اتربرگ و روابط کمی بین این مقادیر و فاکتورهای ترکیبی بسیار پیچیده است (Khamechiyan et al., 2007).

به منظور بررسی اثر افزودنی متاکائولن بر حدود اتربرگ خاک، آزمایش حدود اتربرگ بر طبق استاندارد ASTM D4318-93 روی خاک رس ماسه‌دار بدون افزودنی و تثبیت شده با ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد متاکائولن و در زمان عمل‌آوری آبی انجام شد.

۲-۲. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

آزمایش تک‌محوری بر اساس استاندارد ASTM D2166-85 روی خاک رس ماسه‌دار بدون افزودنی و تثبیت شده با افزودنی متاکائولن در درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵، در زمان‌های عمل‌آوری آبی، ۷، ۱۴ و ۲۸ انجام شد. جهت ساخت نمونه تک‌محوری، از قالب استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۳/۸ و ۷/۶ سانتی‌متر استفاده شده است. به این منظور ابتدا متاکائولن به صورت خشک با خاک مخلوط شده و سپس به



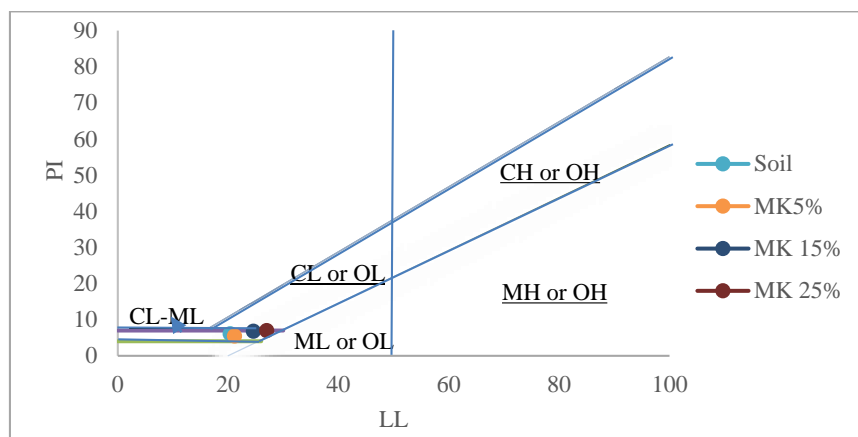
شکل ۳. منحنی تغییرات حدود اتربرگ بر حسب درصد افزودنی متاکائولن

ضعامت لایه مضاعف و لخته شدن ذرات موجب افزایش حد خمیری خاک می‌گردد.

در این پژوهش ملاحظه شد که با افزایش درصد متاکائولن حدود روانی و خمیری خاک افزایش می‌یابد. افزودن متاکائولن به خاک موجب تغییرات فیزیکی خاک (افزایش ذرات ریز خاک) می‌گردد. افزایش ذرات ریز خاک، کاهش حد خمیری خاک را در پی دارد. از طرفی آهک آزاد موجود در خاک باعث وقوع واکنش‌های کاتیونی و لخته شدن (اثر شیمیایی) و در نتیجه افزایش حد خمیری می‌گردد. با توجه به شکل (۳) می‌توان گفت تقابل اثر فیزیکی و شیمیایی افزودن متاکائولن باعث افزایش حد خمیری خاک می‌گردد.

شکل (۴) موقعیت نمونه‌های خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با درصد‌های مختلف متاکائولن را روی نمودار خمیری نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴)، خاک رس ماسه‌دار در محدوده خاک‌های CL=ML قرار دارد. افزودن متاکائولن به این خاک باعث افزایش اندکی در حد روانی و شاخص خمیری خاک می‌شود و در نهایت خاک تثبیت شده با درصد‌های مختلف متاکائولن در محدوده خاک‌های CL=ML باقی می‌ماند.

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که اضافه نمودن پوزولان به خاک تحت اثر دو عامل حد روانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عامل اول آهک آزاد موجود در پوزولان است که منجر به واکنش‌های کاتیونی و لخته شدن ذرات رس می‌گردد (Sivapullaiah and Prashanth., 1996). واکنش کاتیونی موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف و در نتیجه کاهش حد روانی می‌گردد و لخته شدن ذرات رس، ظرفیت نگهداری آب را افزایش داده و موجب افزایش حد روانی می‌گردد (Matoes., 1964). تقابل این دو اثر، چگونگی تغییرات حد روانی را در اثر اضافه نمودن پوزولان تعیین خواهد نمود. عامل دوم اثر فیزیکی اضافه شدن پوزولان به محیط است. در صورتی که دانه‌های پوزولان درشت‌تر از دانه‌های خاک باشند موجب کاهش حد روانی می‌گردد (Sivapullaiah and Prashanth., 1996). مکانیزم‌های فیزیکی شامل میزان دانه‌های درشت در خاک (دانه‌بندی)، ضخامت لایه مضاعف و اسکلت خاک رس، حد خمیری خاک را کنترل می‌کنند. به طوری که اضافه نمودن دانه‌های درشت، کاهش ضخامت لایه مضاعف و لخته شدن ذرات موجب افزایش حد خمیری می‌گردند. مشاهده می‌گردد که آهک آزاد موجود در پوزولان، با انجام دو واکنش کاهش



شکل ۴. نمودار خمیری خاک رس ماسه دار تثبیت شده با درصد های مختلف متاکائولن.

۳-۲. آزمایش تک محوری

زمان های عمل آوری آنی، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در جدول (۲) نشان داده شده است.

نتایج آزمایش مقاومت تک محوری روی خاک رس ماسه دار تثبیت شده با ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد متاکائولن در

جدول ۲. نتایج آزمایش تک محوری روی نمونه های تثبیت شده با درصد های متفاوت متاکائولن در زمان های مختلف.

Curing times (d)	Metakaoline content (%)					
	0	5	10	15	20	25
0	5.16	7.51	7.94	8.33	8.66	9.46
7	5.45	7.68	8.19	8.79	9.15	9.71
14	5.92	8.12	8.7	9.69	10.24	10.99
28	6.33	8.85	9.53	11.11	11.78	12.94

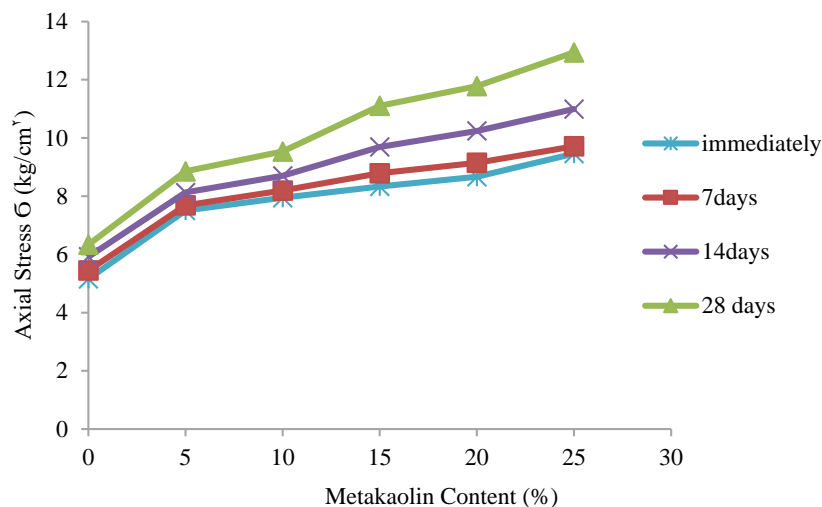
به طور قابل توجهی افزایش می یابد. برای مثال مقاومت نمونه های تثبیت شده با ۲۵ درصد متاکائولن در زمان عمل آوری آنی ۹/۴۶ کیلوگرم بر سانتی مترمربع می باشد. این مقدار با افزایش زمان عمل آوری ۱/۳۷ برابر افزایش می یابد و به مقدار ۱۲/۹۴ کیلوگرم بر سانتی مترمربع در زمان عمل آوری ۲۸ روز می رسد. دلیل این افزایش مقاومت می تواند وقوع واکنش های تبادل کاتیونی و کلوخه شدن باشد که در زمان های اولیه پس از تثبیت اتفاق می افتد. در این واکنش ها، کاتیون های یک ظرفیتی موجود در لایه دوگانه رسی با کاتیون های دوظرفیتی جایگزین می شوند. این واکنش ها موجب تغییر در

مطابق جدول (۲) با افزایش درصد متاکائولن تا ۲۵ درصد، مقاومت خاک رس ماسه دار افزایش می یابد. به طوری که در زمان عمل آوری آنی مقاومت نمونه های بدون افزودنی از ۵/۱۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع با افزایش ۱/۸۴ برابری به ۹/۴۶ کیلوگرم بر سانتی مترمربع می رسد. علت این افزایش مقاومت در زمان عمل آوری آنی را می توان به تغییر یافت فیزیکی خاک نسبت داد. در واقع ریزتر بودن دانه های متاکائولن و فعالیت بالاتر این ماده افزودنی نسبت به خاک، موجب افزایش مقاومت تک محوری نمونه های تثبیت شده در زمان عمل آوری آنی می شود. با گذشت زمان مقاومت نمونه های تثبیت شده با متاکائولن

فشاری افزایش می‌یابد. بیشترین نرخ افزایش مقاومت مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با ۵ درصد متاکائولن می‌باشد. به طوری که افزودن ۵ درصد متاکائولن موجب افزایش ۱/۴ برابری مقاومت خاک می‌شود. همچنین مطابق شکل با افزایش درصد متاکائولن فاصله قائم بین نمودارها افزایش می‌یابد. در واقع افزایش متاکائولن موجب افزایش واکنش‌های پوزولانی می‌شود و نرخ افزایش مقاومت در زمان‌های عمل‌آوری مختلف را افزایش دهد.

نشانه خمیری و افزایش مقاومت خاک می‌شوند. علاوه بر این وقوع واکنش‌های بلند مدت پوزولانی بین خاک رس ماسه‌دار و متاکائولن به عنوان پوزولان طبیعی در حضور رطوبت و آهک آزاد می‌تواند منجر به تولید هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و هیدرات کلسیم آلومینات (CAH) شود که خود موجب افزایش مقاومت خاک می‌شود.

تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به درصد متاکائولن به ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش درصد متاکائولن مقاومت



شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به درصد متاکائولن در زمان‌های عمل‌آوری مختلف.

میزان تنش محوری قابل تحمل توسط نمونه‌ها در کرنش ثابت افزایش می‌یابد.

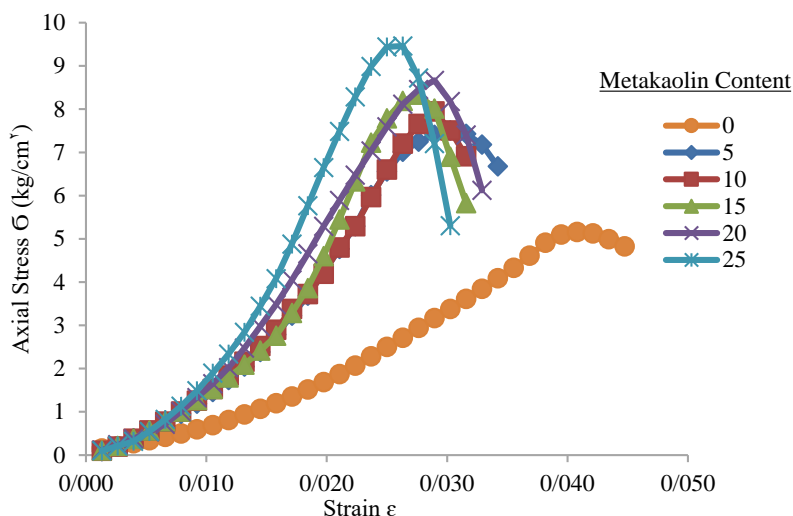
مقاومت تک‌محوری تمامی نمونه‌ها تا تغییر شکل ۰/۳ میلی‌متر بعد از رسیدن به مقاومت نهایی قرائت شده است. مطابق شکل (۶) در زمان عمل‌آوری آبی نمونه‌های تثبیت شده با ۵ و ۱۰ درصد متاکائولن، بعد از رسیدن به مقاومت نهایی نیز قادر به تحمل بار هستند و نرخ کاهش مقاومتشان کم است. با افزایش درصد متاکائولن نرخ کاهش مقاومت نمونه‌ها پس از رسیدن به مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. در شکل (۷) مشاهده می‌شود که گذشت زمان، علاوه بر افزایش مقاومت نهایی نمونه‌ها،

۱-۲-۳. تأثیر متاکائولن بر تغییرات تنش-کرنش و سطح گسیختگی

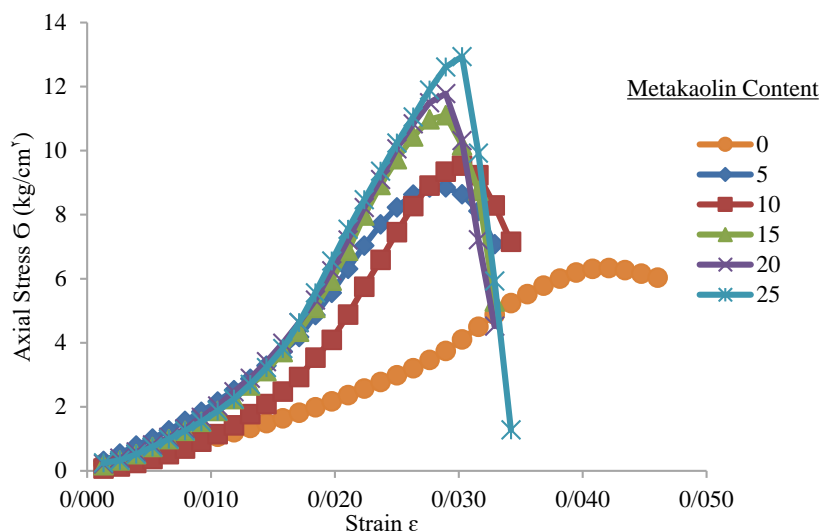
شکل (۶) و (۷) به ترتیب تغییرات تنش-کرنش خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با درصد‌های مختلف متاکائولن در زمان‌های عمل‌آوری آبی و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد متاکائولن نمونه‌ها تنش محوری بیشتری را متحمل می‌شوند. اما کرنش محوری نمونه‌ها نسبت به خاک رس ماسه‌دار بدون افزودنی به شدت کاهش می‌یابد و نمونه‌ها تردتر می‌شوند. با افزایش درصد متاکائولن

نمونه‌های تثبیت شده با ۲۵ درصد متاکائولن و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، از ۱۲/۹۴ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع به ۱/۲۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع کاهش می‌یابد.

موجب ترد شدن نمونه‌ها می‌شود در نتیجه نرخ کاهش مقاومت نمونه‌ها پس از شکست به شدت افزایش می‌یابد. به طوری‌که بعد از گذشت مدت کوتاهی از شکست، مقاومت نهایی



شکل ۶. نمودار تنش-کرنش خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با درصدهای مختلف متاکائولن بلافاصله پس از تثبیت (آنی)



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با درصدهای مختلف متاکائولن در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز

نهایی و ایجاد ترک‌های جزئی، شکستگی موضعی و سطحی در نمونه به وقوع پیوسته است. این نوع شکست موجب شده تا نمونه پس از رسیدن به مقاومت نهایی خود همچنان قادر به

در شکل (۸-الف) سطح شکست نمونه خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با ۱۰ درصد متاکائولن در زمان عمل‌آوری آنی نشان داده شده است. مطابق شکل پس از رسیدن نمونه به مقاومت

گسیختگی کلی موجب شده است تا نمونه پس از رسیدن به مقاومت نهایی دیگر توانایی تحمل بار نداشته و به سرعت گسیخته شود.

تحمل بارهای وارده باشد. در حالی که مطابق شکل (۸-ج)، در نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰ درصد متاکائولن در زمان عمل آوری ۲۸ روز، نمونه دچار گسیختگی کلی شده و سطح شکستی با زاویه ۴۵ با سطح افق تشکیل شده است. وقوع



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۸. سطح گسیختگی خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با ۱۰ درصد متاکائولن در زمان عمل آوری الف) آبی ب) ۷ روز ج) ۲۸ روز

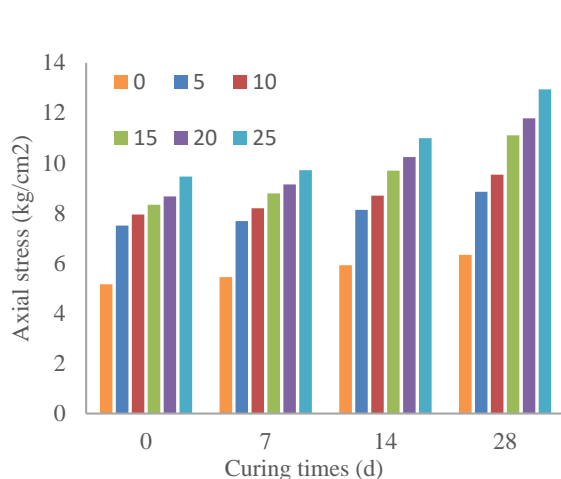
مطابق شکل در زمان عمل آوری ۲۸ روز، نمونه‌های تثبیت شده با زئولیت از مقاومت فشاری بیشتری برخوردار هستند. به طوری که مقاومت خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با ۲۵ درصد زئولیت و متاکائولن به ترتیب برابر ۱۴/۷۷ و ۱۲/۷۷ کیلوگرم بر سانتی مترمربع می‌باشد. این در حالی است که در زمان‌های اولیه عمل آوری عملکرد نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن بهتر از زئولیت می‌باشد. برای مثال مقاومت ۷ روزه نمونه‌های تثبیت شده با ۵ درصد زئولیت و متاکائولن به ترتیب برابر ۵/۴۲ و ۷/۶۸ می‌باشد. در واقع متاکائولن با تسریع واکنش‌های پوزولانی، تغییر بافت فیزیکی و افزایش چسبندگی خاک باعث افزایش چشمگیر مقاومت خاک رس ماسه‌دار در زمان‌های اولیه عمل آوری می‌شود. این در حالی است که نمونه‌های تثبیت شده با زئولیت در زمان‌های اولیه تغییر چندانی در مقاومت خاک ایجاد نمی‌کنند. با افزایش زمان عمل آوری و وقوع واکنش‌های پوزولانی مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن و زئولیت افزایش می‌یابد. مطابق با شکل (۹)، نرخ افزایش مقاومت در

در شکل (۸-ب) نیز گسیختگی کلی نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد متاکائولن در زمان عمل آوری ۷ روز کاملاً مشخص است. به‌طور کلی بررسی نمودارهای تنش کرنش و سطح شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد با افزایش درصد متاکائولن و زمان عمل آوری نمونه‌ها تردتر شده و نرخ کاهش مقاومت‌شان پس از رسیدن به مقاومت نهایی به شدت افزایش می‌یابد. همچنین سطح شکست نمونه‌ها واضح‌تر و نمونه‌ها دچار شکست کلی شده‌اند.

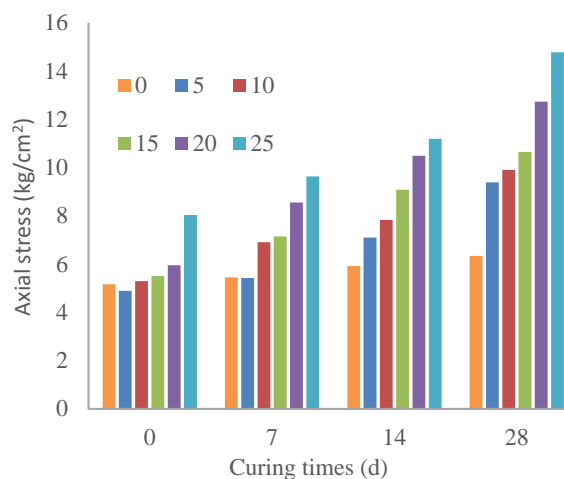
۳-۲-۲. مقایسه تأثیر متاکائولن و زئولیت بر مقاومت تک‌محوری خاک رس ماسه‌دار

در شکل (۹) تغییرات مقاومت تک‌محوری خاک رس ماسه‌دار تثبیت شده با درصد‌های مختلف زئولیت و متاکائولن در زمان‌های مختلف نشان داده شده است (Bakhshi Ardakani, 2018)

نمونه‌ها تثبیت شده با زئولیت بیشتر از متاکائولن می‌باشد که نشان دهنده افزایش نرخ واکنش‌های پوزولانی نمونه‌های تثبیت شده با زئولیت نسبت به متاکائولن در طول زمان می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۹. چگونگی تغییر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس ماسه‌دار به ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف در درصد‌های مختلف افزودنی الف) زئولیت ب) متاکائولن

شیمیایی افزودن متاکائولن مانند واکنش‌های کاتیونی و لخته شدن موجب افزایش حد خمیری می‌گردد. تقابل اثر فیزیکی و شیمیایی افزودن متاکائولن باعث افزایش حد خمیری خاک می‌گردد.

به‌طورکلی بررسی نمودار خمیری خاک نشان می‌دهد ساختار اصلی خاک در اثر افزودن متاکائولن ثابت و در محدوده خاک های *CL-ML* می‌ماند. نتایج آزمایش تک‌محوری نشان می‌دهد با افزایش درصد متاکائولن مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها تا ۲ برابر افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها می‌شود. با افزایش درصد متاکائولن اثر زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. افزایش درصد متاکائولن موجب ترد شدن نمونه‌ها می‌شود و نمونه‌ها در کرنش ثابت قادر به تحمل تنش بیشتری می‌باشند. همچنین بررسی سطوح گسیختگی و نحوه شکست نمونه‌های آزمایش شده نشان می‌دهد که با افزایش درصد متاکائولن و زمان عمل‌آوری

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی اثر پوزولان طبیعی متاکائولن بر مقاومت فشاری تک‌محوری و حدود اتربرگ خاک رس ماسه دار انجام شده است. به این منظور آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی خاک رس ماسه‌دار بدون افزودنی و تثبیت شده با افزودنی متاکائولن در درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ انجام شده است. همچنین آزمایش حدود اتربرگ در درصد‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ در زمان عمل‌آوری آنی انجام شده است.

نتایج حاصل از آزمایش حدود اتربرگ نشان می‌دهد با افزایش درصد افزودنی متاکائولن حد روانی افزایش و شاخص خمیری در ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. افزودن متاکائولن به خاک موجب تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌گردد. تغییرات فیزیکی افزودن متاکائولن مانند افزایش ذرات ریز خاک، کاهش حد خمیری خاک را در پی دارد و تغییرات

نشان دهنده افزایش نرخ واکنش‌های پوزولانی نمونه‌های تثبیت شده با ژئولیت نسبت به متاکائولن در طول زمان می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از جناب آقای مهندس بصیر و تمامی پرسنل محترم آزمایشگاه ایران خاک به جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی تشکر نمایند.

شکست نمونه‌ها پس از رسیدن به مقاومت نهایی سریع‌تر صورت می‌گیرد.

مقایسه نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن و ژئولیت نشان می‌دهد در زمان‌های اولیه عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن بیشتر از نمونه‌های تثبیت شده با ژئولیت می‌باشد. درحالی‌که با گذشت زمان عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ژئولیت نسبت به متاکائولن افزایش می‌یابد که

منابع

- استاندارد ملی ایران شماره ۳۴۳۳، ۱۳۷۳. ویژگی‌های پوزولان‌های طبیعی، چاپ یکم.
- بخشی اردکانی، ش. و رجیبی، ع.، ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودنی‌های ژئولیت و سیپولیت بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های ماسه‌رس‌دار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم.
- یثربی، ش. و جداری صالح زاده، ن.، ۱۳۸۰. بررسی تاثیر پوزولان بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی رس واگرا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران.
- یثربی، ش. و قابزلو، س.، ۱۳۸۰. بهبود خصوصیات مکانیکی خاک مارن با استفاده از پوزولان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران.

- Al-Swaidani, A., Hammoud, I., Meziab, A., 2016. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (5): 714-725.
- Ashori, P., and Madandost, R., 2012. Evaluation of engineering properties of High Performance Concrete (HPC) incorporating Metakaolin and Zeolite, Master's thesis of Guilan University.
- Avet, F., Li, X., and Scrivener, K., 2018. Determination of the amount of reacted metakaolin in calcined clay blends. *Cement and Concrete Research*, 106: 40-48.
- Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S., Badogiannis, E., 2005. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, 27(1): 125-130.
- Clovis, N., Vanderley, M.J., Cleber, M. R., Holmer, S., Mario, S., 2004. Effect of Metakaolin on the performance of PVA and cellulose fibers reinforced cement.
- Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche F., Willem, X., Degeimbre, R., 2003. Durability of mortars modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 33(9): 1473-1479.
- Deng, Y., Yue, X., Liu, S., Chen, Y., Zhang, D., 2015. Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution, *Engineering Geology*, 193: 146-152.
- El-Eswed, B.I., Aldagag, O.M., Khalili, F.I., 2017. Efficiency and mechanism of stabilization/solidification of Pb(II), Cd(II), Cu(II), Th(IV) and U(VI) in metakaolin based geopolymers, *Applied Clay Science*, 140: 148-156.
- Ghrichi, M.S., Kenai, M., 2007. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cem, Concr Compos*: 542-549.
- Hossain, K.M.A., and Mol, L., 2011. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes, *Construction and Building Materials*, 25: 3495-3501.
- Khamehchiyan, M., Charkhabi, A., Tajik M., 2007. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, 89: 220-229.
- Kolovos, K.G., Asteris, P.G., Cotsovos, D.M., Badogiannis, E., Tsivilis, S., 2013. Mechanical properties of soil Crete mixtures modified with metakaolin, *Construction and Building Materials*, 47: 1026-1036.
- Matoes, M., 1964. Soil Lime Research at Iowa State University, *Soil and Foundations*, 90(SM-2): 127-153.

- Qian, X., and Li, Z., 2001. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 31(11): 1607-1611.
- Sudagar, A., Andrejkovicova, S., Patinha, C., Velosa, A., McAdam, A., da, E., Rocha, F., 2018. A novel study on the influence of cork waste residue on metakaolin-zeolite based geopolymers, *Applied Clay Science*, 152: 196-210.
- Sivapullaiah, P.V., and Prashanth, J.P., 1996. Effect of fly ash of the index properties of black cotton soil, soils and foundations, 36: 97-103.
- Wang, L., Li, X., Cheng, Y., Bai, X., 2018. Effects of coal-metakaolin on the properties of cemented sandy soil and its mechanisms. *Construction and Building Materials*, 166: 592-600.
- Wianglor, K., Sinthupinyo, S., Piyaworapaiboon, M., Chaipanich, A., 2017. Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortars, *Applied Clay Science*, 141: 272-279.
- Wild, S., Khatib, J. M., Jones, A., 1996. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(10): 1537-1544.
- Wu, Z., Deng, Y., Liu, S., Liu, Q., Chen, Y., Zha, F., 2016. Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin, *Applied Clay Science*, 127: 51-44.
- www.silicasand-co.com
- Zhang, T., Yue, X., Deng, Y., Zhang, D., Liu, S., 2014. Mechanical behavior and micro-structure of cement-stabilized marine clay with a metakaolin agent, *Construction and Building Materials*, 73: 51-57.