نشریه علمی

تحقیقات در علوم مهندسی سطح و نانو مواد

سال ۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲ ٤٤

نانو اکسیدمنیزیم یک تثبیت‌کننده سبز کم کربن برای تثبیت خاک‌های حاوی پسماند جامد شهری

شادی جعفری[۱]، نوید خیاط [*۱]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

این تحقیق با هدف کمک به محیط زیست بوسیله مواد نانو جهت افزایش مقاومت خاک های حاوی پسماند جامد شهری می باشد. نانومواد به دلیل ماهیت غیرسمی و مصرف انرژی کمتر موردنیاز برای تولید، در مهندسی ژئوتکنیک و ژئومحیط زیست پذیرفته شده‌اند. از این‌رو در این مطالعه چهار درصد مختلف از نانواکسیدمنیزیم (۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱) به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده در خاک‌های حاوی درصد مختلف از پسماندجامدشهری (۱۵، ۲۵، ۳۵ و ٤۵٪) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آزمون مقاومت فشاری در حالت خشک و در سیکل‌های تر و خشک نشان می‌دهد که، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ پسماند که با ۱٪ نانو اکسیدمنیزیم تثبیت شده‌اند می‌توانند دوام و رفتار مقاومتی بهتری را نشان دهند. این نتیجه از دید آزمون میکروسکوپ الکترونی نیز با تشکیل ساختار فلوکه شده مورد تایید قرار گرفت. از این رو استفاده از نانو اکسیدمنیزیم در خاک‌های حاوی پسماند جامد شهری با مقدار بهینه می‌تواند در حل مشکلات خاک مؤثر واقع شود.

واژه‌های کلیدی: *نانو اکسیدمنیزیم، تثبیت خاک، درشت ساختاری، ریزساختاری*

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۰٤/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۰٦/۲۲

Nano-MgO is a low-carbon green stabilizer for stabilization of soils containing municipal solid waste

Shadi Jafari[1], Navid Khayat [*1]

[1] Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

This study aims to help the environment with nano materials to increase the strength of soils containing municipal solid waste. Nanomaterials have been accepted in geotechnical and geo-environmental engineering due to their non-toxic nature and less energy consumption required for production. Therefore, in this study, four different percentages of Nano-MgO (0.25, 0.5, 0.75 and 1%) as a stabilizer in soils containing different percentages of municipal solid waste (15, 25, 35 and 45%) has been used. The results of the unconfined compressive strength test in dry state and in wet and dry cycles show that the specimens containing 15% waste which are stabilized with 1% Nano-MgO can show better durability and strength behavior. This result was also confirmed by the scanning electron microscope test with the formation of a flocculated structure. Therefore, the use of Nano-MgO in soils containing municipal solid waste with an optimal amount can be effective in solving soil problems.

Keywords: *Nano-Mgo, Stabilization, Macrostructure, Microstructure*

Received: 16/07/2023
Accepted: 13/09/2023

[*] نویسنده مسئول: نوید خیاط

نشانی: اهواز ، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی

پست الکترونیکی: Navid.Khayat@iau.ac.ir

۱. مقدمه

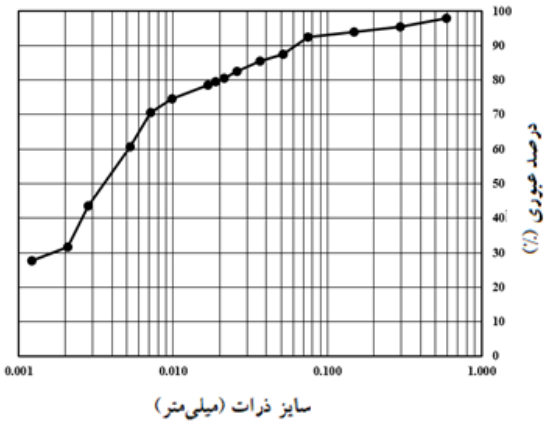
خاک طبیعی به طور گسترده به عنوان یک ماده مهندسی در ساخت و ساز جاده مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق آیین-نامه‌ها، خاک‌های نرم که حاوی درصد بالای کلسیت هستند در شمار خاک‌های نامرغوب و نامناسب قرار می‌گیرند که ظرفیت باربری پایین، تراکم پذیری بالا، فرسایش پذیری، جذب آب بالا و نشست بیش از حد را نتیجه می‌دهند[۳-۱]. این نوع خاک‌ها که به عنوان یک خاک مشکل‌ساز در مهندسی ژئوتکنیک درنظر گرفته می‌شوند، به دلیل ویژگی-های نامطلوب خود به مشکلات اساسی در پروژه‌های راهسازی کمک می‌کنند[٤]. از آنجایی که مصالح مناسب خاکریزی باید از مصالح حاصل از خاکبرداری‌های پروژه تامین شوند در صورت مرغوب نبودن، اصلاح آن‌ها قبل از هرگونه عملیات مهندسی برای دستیابی به خواص متناسب با نیازها اجتناب‌ناپذیر است[۳]. یکی از روش‌های سنتی اصلاح خاک، حذف خاک و جایگزینی آن با مواد دیگر است [۵]. عدم دسترسی کافی به خاک جایگزین مناسب و هزینه بالای حمل، محققان را به دنبال رویکردهای جایگزین سوق داده است[۳] و از طرف دیگر رشد سریع صنعتی شدن و توسعه شهری درصدکمتری از شرایط زمین و خاک قابل استفاده برای کارهای مهندسی عمران ایجاد می‌کند. از این‌رو یکی از این رویکردهای جایگزین، استفاده از پسماند جامد شهری بعنوان بخشی از خاک است که سوابق نشان داده است پسماند جامد شهری به تنهایی می‌تواند بر رفتار خاک اثر بگذارد ولی در طولانی مدت رفتار خاک را تضعیف کند[٦]. از اینرو بر اساس مطالعات اخیر، شیوه‌های تثبیت خاک به عنوان تکنیک‌های عملی با قابلیت اطمینان بیشتر معرفی شده‌اند به طوری که تثبیت شیمیایی یکی از ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین رویکردها برای بهبود رفتار خاک در نظر گرفته می‌شود[۹-۷]. در حوزه تثبیت شیمیایی، گنجاندن نانومواد یکی از جدیدترین ایده‌های خلاقانه است. زیرا نانومواد (ذراتی با گستره اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر) به دلیل ماهیت غیرسمی و مصرف انرژی کمتر مورد نیاز برای تولید، در مهندسی ژئوتکنیک و ژئومحیط زیست پذیرفته شده‌اند. این مواد خواص کاملا متفاوتی نسبت به مواد معمولی دارند. هنگامی که با ذرات خاک مخلوط می‌شوند، مقادیر سطح ویژه نسبتا بزرگتر آن‌ها واکنش آسان و سریعی را ایجاد می-کنند و به راحتی توده‌های ذرات را تشکیل می‌دهند[۱۰،۱۱]. در مهندسی ژئوتکنیک، نانوتکنولوژی را می‌توان به عنوان روش دوگانه در نظر گرفت چرا که خاک را می‌توان در مقیاس نانو پیدا کرد و در مقابل تثبیت خاک را می‌توان در سطوح اتمی و مولکولی انجام داد [۱۲]. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که افزودن نانوذراتی چون نانواکسیدمنیزیم (Nano-MgO) باعث افزایش تداوم و پیوند نمونه‌های تثبیت‌شده می‌شود[۱۳] و اثر خاصی در بهبود خواص مکانیکی دارد به گونه‌ای که مقادیر مقاومت‌فشاری‌محدود-نشده (UCS) نمونه‌ها نشان داده است که نمونه‌های تثبیت شده با نانواکسیدمنیزیم، همگی الزامات سطوح ترافیکی بسیار سنگین بزرگراه‌ها و بزرگراه‌های درجه یک را برآورد می‌کنند [١٤]; از این‌رو به نظر می‌رسد که با ترکیب مزایای نانواکسیدمنیزیم و پسماند جامد شهری و به عبارتی طراحی ماده افزودنی دو جزئی می‌توان نانو اکسیدمنیزیم را با تکنیکی به خاک حاوی پسماند جامد شهری اضافه کرد و درنتیجه خاک نرم را با صرفه اقتصادی و زیست محیطی، به گونه‌ای بهتر تثبیت کرد. با توجه به مطالب ذکر شده، متوسط سرانه تولید پسماند جامد شهری در ایران به گونه‌ای است که سرعت پاکسازی و مدیریت این پسماند بسیار کمتر از تولید آن است. از این‌رو استخراج پسماند جامد شهری و استفاده از آن فرصت قابل توجهی برای مدیریت محیط‌زیست را در ایران فراهم می‌کند و به نظر می‌رسد که این مسیر دارای پتانسیل تغییر شکل آینده محیط‌زیست است. از طرف دیگر فعالیت‌های اخیر راه‌سازی در راستای توسعه راه‌ها در جنوب ایران با خاک نرم روبرو شده است که جایگزینی چنین خاکی گران است و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست بنابراین تثبیت خاک حاوی پسماند با نانواکسیدمنیزیم ضروری بوده است. تعداد مطالعات انجام شده در مورد استفاده ترکیبی از پسماند جامد شهری و نانو اکسیدمنیزیم برای اصلاح و تثبیت خاک محدود است. لذا در این مطالعه تلاش شده

است تا کاربرد این مواد در زمینه تثبیت خاک رس نرم بعنوان یک نوآوری پایدار ارائه شود. آزمایش‌هایی به جهت تعیین چگالی خشک حداکثر، رطوبت بهینه، و حدود آتربرگ بر روی خاک نرم مورد مطالعه و همچنین آزمایش مقاومت فشاری بر روی خاک نرم مورد مطالعه حاوی پسماند جامد شهری و همچنین نمونه‌های تثبیت شده با نانو اکسیدمنیزیم در دوره‌های عمل‌آوری مختلف ۱، ١٤ و۲۸ روز انجام شده است و برای بررسی فعل و انفعالات بین پسماند جامد شهری و نانو اکسید منیزیم و به جهت کسب بینشی از مکانیسم‌های واکنش، از مطالعات ریزساختاری استفاده شده است. نتیجه این تحقیق استفاده از پسماند جامد شهری تثبیت شده با نانو اکسیدمنیزیم را به عنوان یک افزودنی مناسب در مصالح پایه راه‌سازی که در آن بهبود ویژگی‌های مکانیکی موردنیاز است را ترویج می‌کند.

۲. مواد

۲. ۱. خاک رس نرم

خاک با کربنات کلسیم بالا به عنوان یک خاک رس نرم با ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد معادل حدود ۲۰ میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک رس خشک و با بار سطحی و فعالیت سطحی نسبتا زیاد مشخص می‌شود. در تحقیق حاضر این خاک به عنوان خاک نرم بدست آمده از جنوب ایران انتخاب شده است که منحنی توزیع اندازه ذرات آن مطابق استاندارد [۱۵] در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق با نتایج دیگر آزمایش‌ها چون حدود آتربرگ[١٦] ، تراکم استاندارد [۱۷]، مقاومت فشاری[۱۸] و همچنین تحلیل پراش اشعه ایکس[۱۹] که در جدول ۱ نشان داده شده است، درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ این خاک حدود ۹۲٪ بوده است و طبق شاخص پلاستیسیته حاصل شده این خاک در گروه CH قرار گرفته است. رس نرم مورد مطالعه دارای مقاومت فشاری ۲/۸۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک نرم

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه

مشخصات	مقادیر اندازه‌گیری شده
ذرات رسی کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر (٪)	۹۲
کربنات کلسیم (درصد)	٥٤/١
مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۲/۸۸
حدروانی (درصد)	٦٩/٩٤
حد خمیری (درصد)	۲۸/۲۳
شاخص خمیری (درصد)	٤١/٧٢
چگالی خشک حداکثر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	١/٤٧
رطوبت بهینه (درصد)	۲٥
طبقه‌بندی خاک	CH
ترکیبات کانی خاک از آنالیز پراش اشعه ایکس	کلسیت (٥٤/١٪)، کوارتز (١٥/٩٪)، ایلیت (۲۰/٥٪)، کائولونیت (٨/١٪)، کریستوبالیت (١/٤٪)

۲. ۲. پسماند جامد شهری

پسماند جامد شهری در جنوب ایران جمع آوری شده است. در این مناطق روزانه به طور میانگین۸۰۰ تن پسماند تولید می‌شود که فقط ۳٪ از پسماندها تفکیک و مابقی دفن می-شوند و این میزان در طی سالیان شیوع اپیدمی کرونا به طور تقریبی ۱٥/۱ برابر افزایش داشته است. عدم مدیریت مناسب پسماند جامد شهری سبب شده است که آن‌ها به طور

نامناسب تخلیه و دفن شوند که آژانس حفاظت از محیط-زیست امریکا فرآیندهای مختلفی مانند بازیافت و کمپوست سازی از طریق پردازش مکانیکی را برای سهولت مدیریت پسماندهای رو به رشد تولید شده پیشنهاد می‌کند[۲۰]. که در این مطالعه در راستای حذف پسماند از طبیعت، بعنوان بخشی از خاک مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این‌رو ٤ درصد متفاوت (۱۵، ۲۵، ۳۵ و ٤۵٪ پسماند جامد شهری) تعریف شده است که به عنوان افزودنی اصلی به خاک پایه با هدف حذف این پسماندها از طبیعت و استفاده از آن‌ها بعنوان بخشی از خاکریز جاده‌های درجه ۲و۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. ۳. نانو اکسیدمنیزیم

از آنجایی که مهندسان، اصلاح یا تثبیت ویژگی‌های مهندسی خاک را به عنوان یک روش مهم برای افزایش اثربخشی خاک‌های مشکل دار شناسایی می‌کنند نیاز است که به جهت بالابردن کارایی خاک‌های حاوی پسماند جامد شهری مواد افزودنی دیگری چون نانو اکسید منیزیم به خاک‌ها افزوده شود. اثر افزودن نانو مواد مختلف به خاک از دیدگاه مقالات مختلف تأیید شده است[۱۱] . پس نانو اکسیدمنیزیم بعنوان ماده افزودنی تثبیت‌کننده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصه‌های نانو اکسیدمنیزیم مطابق با [۱۲] است که به دلیل داشتن کاتیون‌های دوظرفیتی می‌تواند به راحتی با کاتیون‌های با ظرفیت کمتر مبادله شود در نتیجه ساختار خاک نرم حاوی پسماند جامد شهری را تغییر بدهد. از طرف دیگر بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که حتی مقدار کمی از نانو مواد می‌تواند به طور قابل توجهی کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر دهند که این به دلیل سطح ویژه بزرگ نانو مواد است که به آن‌ها اجازه می‌دهد تا به طور موثرتری با سایر ذرات خاک تعامل داشته باشند[۱۲] لذا مقدار نانو مواد اضافه شده باید به طور مناسب اندازه-گیری شود تا اثر قابل توجهی بر روی خاک‌های حاوی پسماند داشته باشد و تجمع نانو مواد به حداقل برسد. بنابراین در راستای تثبیت خاک حاوی پسماند جامد شهری مقادیر ۰/۲۵٪، ۵٪، ۷۵٪ و ۱٪ وزنی نانو اکسید منیزیم به جهت مقرون به صرفه بودن نمونه‌های تثبیت شده تعریف گردیده است. نمونه‌ای از نانو اکسیدمنیزیم تهیه شده در شکل ۲ آورده شده که از شرکت کیمیا طب با برند مرک آلمان خریداری شده است.

شکل۲- نمونه‌ای از نانو اکسیدمنیزیم مورد استفاده. (الف) پودر نانواکسیدمنیزیم; (ب) مشخصات شیمیایی پودر نانواکسیدمنیزیم حک-شده روی بسته‌ها

۲. ٤. مشخصه‌یابی نمونه‌ها

از پراش‌سنج پرتوایکس مدل D8 DAVANCE با ولتاژ ٤۰KV و جریان ۳۰ mA ساخت شرکت BRUKER با لامپ مسی و طول موج ۱/٥٤۰٥٦ A^o جهت تشخیص کانی‌های موجود در خاک پایه بهره‌گیری شد. همچنین از میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی(FE-SEM) مدل MIRA۳ ساخت شرکت TESCAN که دارای قدرت تفکیک در حد ۱/۵ nm در ولتاژ ۱۵ KV و ٤/۵ NM در ولتاژ ۱KV می‌باشد و امکان تصویربرداری از طیف وسیعی از شاخه‌های مختلف را فراهم می‌آورد، استفاده شده است.

۳. طرح اختلاط، ساخت نمونه، آزمایش

در راستای طرح اختلاط‌ها، ترکیب‌هایی به شرح جدول ۲ تعریف شده است. برای ساختن این ترکیب‌ها در ابتدا پسماند جامد شهری و خاک نرم از الک شماره ٤ عبور داده شده است تا نتیجه اختلاط آن‌ها بر حسب درصد رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم استاندارد، ترکیبی همگن و یکنواختی باشد. این مرحله شامل ترکیب‌های شماره ۲ تا ۵ در جدول ۲ می‌باشد که تحت عنوان خاک‌های اصلاح شده با پسماند جامد شهری تعریف می‌شوند.

جدول ۲- نمونه‌های تعریف شده برای آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

شماره نمونه	ترکیب نمونه	علامت اختصاری نمونه	شماره نمونه	ترکیب نمونه	علامت اختصاری نمونه
۱	رس نرم	CH	۱۲	رس نرم + ۲۵٪ پسماند + ۰/۷۵٪ نانومنیزیم	CH25,0.75
۲	رس نرم + ۱۵٪ پسماند	CH15	۱۳	رس نرم + ۲۵٪ پسماند + ۱٪ نانومنیزیم	CH25,1
۳	رس نرم + ۲۵٪ پسماند	CH25	۱۴	رس نرم + ۳۵٪ پسماند + ۰/۲۵٪ نانومنیزیم	CH35,0.25
۴	رس نرم + ۳۵٪ پسماند	CH35	۱۵	رس نرم + ۳۵٪ پسماند + ۰/۵٪ نانومنیزیم	CH35,0.5
۵	رس نرم + ۴۵٪ پسماند	CH45	۱۶	رس نرم + ۳۵٪ پسماند + ۰/۷۵٪ نانومنیزیم	CH35,0.75
۶	رس نرم + ۱۵٪ پسماند + ۰/۲۵٪ نانومنیزیم	CH15,0.25	۱۷	رس نرم + ۳۵٪ پسماند + ۱٪ نانومنیزیم	CH35,1
۷	رس نرم + ۱۵٪ پسماند + ۰/۵٪ نانومنیزیم	CH15,0.5	۱۸	رس نرم + ۴۵٪ پسماند + ۰/۲۵٪ نانومنیزیم	CH45,0.25
۸	رس نرم + ۱۵٪ پسماند + ۰/۷۵٪ نانومنیزیم	CH15,0.75	۱۹	رس نرم + ۴۵٪ پسماند + ۰/۵٪ نانومنیزیم	CH45,0.5
۹	رس نرم + ۱۵٪ پسماند + ۱٪ نانومنیزیم	CH15,1	۲۰	رس نرم + ۴۵٪ پسماند + ۰/۷۵٪ نانومنیزیم	CH45,0.75
۱۰	رس نرم + ۲۵٪ پسماند + ۰/۲۵٪ نانومنیزیم	CH25,0.25	۲۱	رس نرم + ۴۵٪ پسماند + ۱٪ نانومنیزیم	CH45,1
۱۱	رس نرم + ۲۵٪ پسماند + ۰/۵٪ نانومنیزیم	CH25,0.5	--	----	------

در ادامه طرح اختلاط‌ها نیاز است که خاک‌های اصلاح شده با پسماند جامد شهری توسط درصدهای مختلف نانواکسیدمنیزیم تثبیت شوند. اما از آنجایی که نحوه ترکیب نانو مواد در خاک‌ها نقش حیاتی در بدست آوردن نتایج مطلوب دارد از اینرو سوسپانسیون آب-نانواکسیدمنیزیم توسط هم‌زن مغناطیسی به طور مداوم همزده شده است تا از ته نشین شدن نانو ذرات در حین افزودن جلوگیری شود و پراکندگی نانو مواد کاملا همگن باشد [۲۱] . هنگام اضافه کردن به خاک رأس پیپت به گونه‌ای به دور خاک چرخانده می‌شود که سبب پراکندگی مخلوط شده است و از ته‌نشین شدن نانو ذرات جلوگیری شده است. بدین گونه نمونه‌های شماره ۶ تا ۲۱ حاصل شده است. تمامی مخلوط‌های حاصل شده در ۲ کیسه پلاستیکی به جهت حفظ رطوبت و انجام تبادل‌کاتیونی به مدت ۲۴ ساعت برای نمونه‌های ۱ روزه در محیط آزمایشگاه نگهداری شده‌اند و بدین صورت نمونه-هایی با عمل‌آوری طولانی‌تر (۱۴ و ۲۸روزه) نیز طراحی و تعریف شده است. لازم بذکر است که طبق برنامه آزمایشگاهی توضیح داده شده نمونه‌های تعریف شده در جدول ۲ برای آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و برای هر سه عمل آوری ساخته شده است و در مجموع تعداد نمونه‌ها ۶۳ عدد می‌باشند.

خواص مکانیکی نمونه‌ها با انجام تست مقاومت فشاری محدود نشده در حالت خشک و تر و خشک (دوام) ارزیابی شده است. به گونه‌ای که برای آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های همگن مرطوب به طور استاتیکی در قالب‌های فولادی استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۳۸ و ۷۶ میلی‌متر به ترتیب قرار گرفتند تا حداکثر چگالی خشک خاک بدست آید. پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب مانند مواردی که در قسمت آماده سازی نمونه توضیح داده شد، عمل‌آوری شده‌اند و سپس آزمایش مقاومت فشاری در حالت خشک بر روی نمونه‌های اصلاح شده و تثبیت شده با نرخ کرنش ثابت ۱/۲ میلی متر در دقیقه انجام شده است. جهت انجام تست دوام بر روی نمونه‌های تعریف شده طبق آیین‌نامه [۲۲] ، نمونه در سیکل ۱ ابتدا به مدت ۵ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شده و سپس به مدت ٤۲ ساعت در درون آون با دمای ۷۱ درجه قرار داده می‌شود و برای سیکل‌های دوم و سوم همین روند دوباره تکرار خواهد شد تا تمامی سیکل‌ها کامل شود. در نهایت آنالیز ریزساختاری خاک رس نرم طبیعی و نمونه‌های اصلاح و تثبیت شده با عمل‌آوری ۲۸ روزه و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با استفاده از آزمون میکروسکوپ الکترونی انجام شده است. شکل ۳ نحوه ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

شکل ۳- مراحل ساخت نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (الف: قالب تراکم؛ ب: خاک متراکم شده؛ پ: مغزه گیر سه عددی؛ ت و ث: خارج کردن نمونه از مغزه‌گیر؛ ج: نمونه در حال آزمایش)

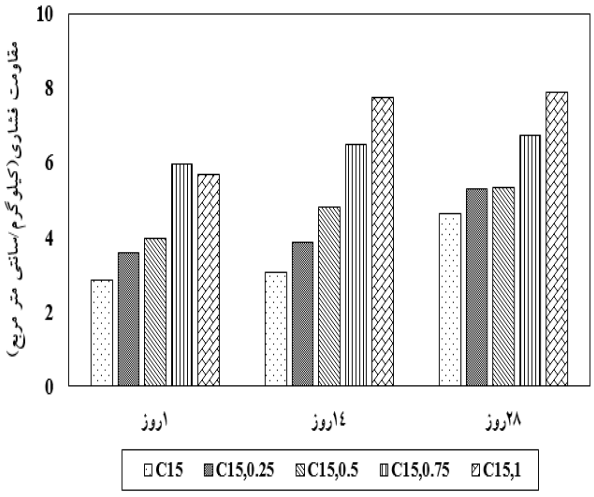
٤. نتایج و بحث

٤. ١. درشت‌ساختاری

٤. ١ .١. بررسی اثر نانو اکسیدمنیزیم بر خاک حاوی ۱۵٪ پسماند

شکل ٤ به بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ۱۵٪ پسماند جامد شهری در عمل‌آوری‌های ۱، ١٤ و ۲۸ روزه پرداخته است. مشاهده می‌شود در تمام نمونه‌های خاک حاوی پسماند و تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم با گذشت زمان ۲۸ روزه مقاومت نسبت به نمونه CH15 افزایش یافته است. پس می‌توان نتیجه گرفت که رشد مقاومت در نمونه-های ۲۸ روزه یک شاخص مهم برای ارزیابی کیفیت خاک تثبیت شده با نانواکسیدمنیزیم است [۲۳]. از نکات قابل توجه در این شکل این است که نمونه CH15,0.75 در ۱ روز دارای مقاومتی بیشتر از CH15,1 است ولی نمونه CH15,1 توانسته است در ١٤ و ۲۸ روز از نمونه CH15,0.75 بیشتر شود و رشد مقاومت بیشتری به اندازه ۷/۸۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را تجربه کند.

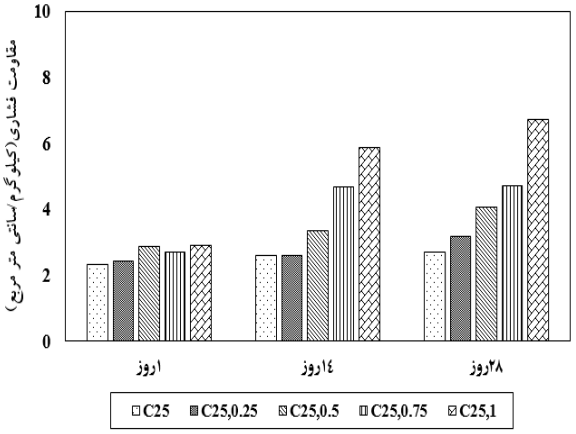
این نتیجه نشان دهنده اثرگذاری نانومواد در خاک‌های حاوی پسماند در عمل‌آوری طولانی‌تر است. همچنین نمونه CH15,0.25 و CH15,0.5 در ۲۸ روز توانسته‌اند به مقاومتی تقریبا یکسانی به اندازه ۵/۳ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع برسند. در مجموع بیشترین مقاومت کسب شده مربوط به نمونه CH15,1 در ۲۸ روز است.



شکل ٤- بررسی اثر نانواکسیدمنیزیم بر خاک حاوی ۱۵٪پسماند

٤. ١. ٢. بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ۲۵٪ پسماند

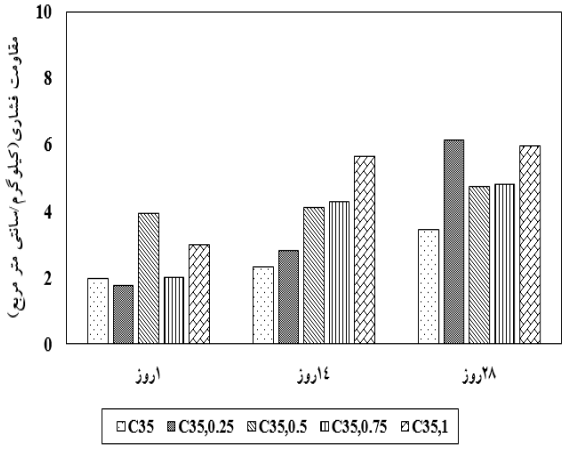
شکل ۵ به بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ۲۵٪ پسماند جامد شهری در عمل‌آوری‌های ۱، ١٤ و ۲۸ روزه پرداخته است. در این نمونه‌ها نیز با افزودن نانو اکسید منیزیم رشد مقاومتی با شیب‌های متفاوت تا ۲۸ روز مشاهده شده است. که دلیل آن واکنش‌های آسان و سریع نانومواد می‌باشد [۱۱]. از نکات قابل تأمل در این شکل این است که تمامی نمونه‌های تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم در ۱روز، مقاومت تقریبا یکسانی را تجربه کرده‌اند که ابتدا در ١٤ روز و سپس در ۲۸ روز مقاومت با اختلاف بیشتری را نتیجه داده است که نشان‌دهنده اثرگذاری بیشتر نانو مواد در خاک حاوی ۲۵٪ پسماند جامد شهری در ۲۸ روز است[٢٤]. نمونه C25,1 در ۲۸ روز بیشترین مقاومت را به میزان ٦/٧١ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نتیجه داده است.



شکل ۵- بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ٪۲۵ پسماند

٤. ١. ٣. بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ۳۵٪ پسماند

شکل ٦ به بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ۳۵٪ پسماند جامد شهری در عمل‌آوری‌های ۱، ١٤ و ۲۸ روزه پرداخته است. مشاهده می‌شود در مقایسه با CH35 با افزودن نانو اکسید منیزیم همه نمونه‌ها افزایش مقاومت را در ۱ روز تجربه نکرده‌اند. این رشد مقاومت در ١٤ روز رفتار منظم‌تری را تجربه کرده است اما در ۲۸ روز مجددا رفتار یکسانی از نمونه‌ها مشاهده نشد. هرچند همه نمونه‌ها در ۲۸ روز دارای مقاومتی بیشتر از CH35 می‌باشند. مغایرت رفتاری حاصل شده را می‌توان به ماهیت پسماند جامد شهری و اندرکنش آن با نانو اکسید منیزیم نسبت داد [٦]. در بین نمونه‌های حاوی ۳۵٪ پسماند و تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم، نمونه CH35,0.25 بیشترین مقاومت را به میزان ٦/١٤ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نتیجه داده است.

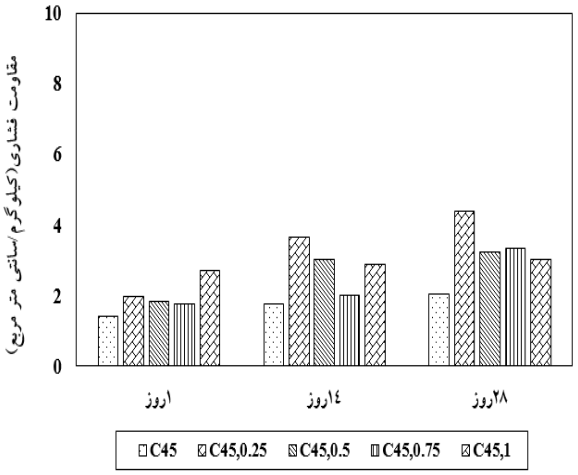


شکل ٦- بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ۳۵٪ پسماند

٤. ١. ٤. بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ٤۵٪ پسماند

شکل ۷ به بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ٤۵٪ پسماند جامد شهری در عمل‌آوری‌های ۱، ١٤ و ۲۸ روزه پرداخته است. در مقایسه با CH45 با افزودن نانو اکسید منیزیم مقاومت‌ها افزایش یافته است ولی روند یکسانی از نمونه‌ها در هر سه عمل‌آوری مشاهده نمی‌شود. اما با گذشت زمان ۲۸ روزه اختلاف بین مقاومت‌های حاصل شده بیشتر شده است. نکته قابل توجه در تثبیت خاک حاوی ٤۵٪ پسماند جامد شهری این است که نمونه‌های CH45,0.5 – CH45,0.75 و CH45,1 در ۲۸ روز مقاومت تقریبا یکسانی را تجربه کرده‌اند اما نمونه CH45,0.25 بیشترین مقاومت را به میزان ٤/٣٩ نتیجه داده است. که این نتایج مجددا مؤید اثر متناقص نانو اکسید منیزم در خاک‌های حاوی درصد بیشتری از پسماند جامد شهری است. در مقایسه هر چهار شکل ٤- ۷ می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های خاک حاوی درصد کمتری پسماند جامد شهری رفتار منظم‌تر و قابل پیش‌بینی‌تری را در مقایسه با درصدهای بیشتر پسماند جامد شهری تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم را دارا می‌باشند و نمونه

CH15,1 دارای بیشترین مقاومت به میزان ۷/۸۸ در ۲۸روز بوده است.



شکل ۷- بررسی اثر نانو اکسید منیزیم بر خاک حاوی ٤٥٪ پسماند

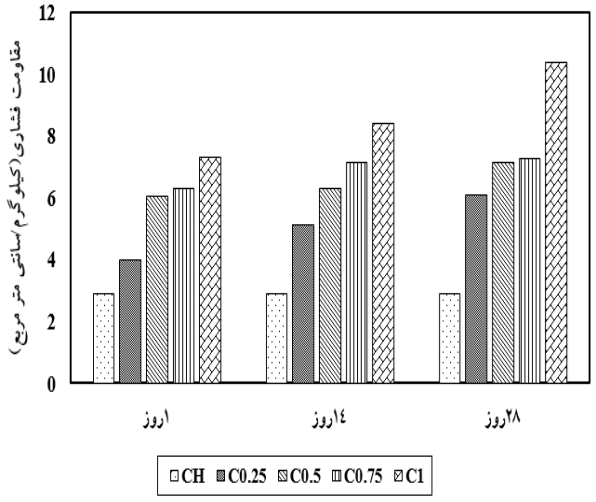
٤. ۱ .۵. بررسی دوام نمونه‌های حاوی نانو اکسید منیزیم

این بخش به بررسی اثر سه سیکل تر و خشک شدن خاک-های حاوی پسماند و تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم پرداخته است. علاوه بر ٦٣ نمونه تعریف شده در جدول ۲، نمونه‌های تعریف شده در جدول ۳ نیز مورد بررسی دوام قرار گرفتند که نتایج آزمایش مقاومت فشاری آن‌ها در حالت خشک در شکل ۸ نشان داده است که نمونه CH1 با مقاومت ۱۰/۳۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع در ۲۸ روز بهینه‌ترین نمونه است.

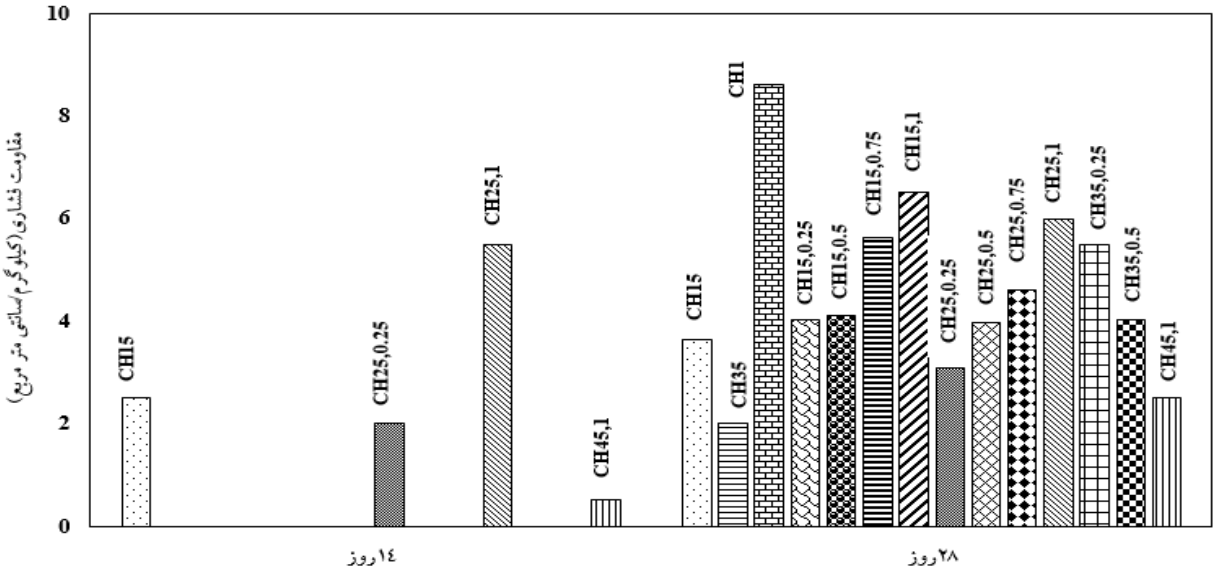
از مجموع ۷۵ نمونه که در سیکل‌های تر و خشک مورد بررسی قرار گرفتند تمامی نمونه‌های ۱ روزه در سیکل اول‌تر و خشک متلاشی شدند و به مرحله تست نرسیدند. در نمونه‌های با عمل‌آوری ١٤ روزه تنها ۳ نمونه در سیکل اول به مرحله تست مقاومت فشاری رسیدند و در سیکل‌های دیگر متلاشی شدند. در نمونه‌های با عمل‌آوری ۲۸ روزه تعداد بیشتری از نمونه‌ها شامل ١٤ نمونه تنها از سیکل اول عبور کردند و به مرحله تست رسیدند و در سیکل‌های دوم و سوم متلاشی شدند. نمونه‌ها و نتایج به شرح شکل ۹ می-باشند. نکته قابل توجه در شکل ۹ این است که همه نمونه‌ها افت مقاومت را پس از یک دوره سیکل تر و خشک تجربه کرده‌اند. در مقایسه نمونه‌های حاوی نانواکسیدمنیزیم به تنهایی، تنها نمونه CH1 در ۲۸ روز توانسته است از سیکل اول عبور کند و به مرحله تست برسد. از بین نمونه‌های حاوی پسماند به تنهایی نمونه‌های CH15 در ١٤ و ۲۸ روز و نمونه CH35 در ۲۸ روزه توانسته است رفتار دوام خوبی را نشان دهد. این دو نمونه در حالت خشک نیز ثبات رفتاری بهتری را نشان داده‌اند. در مقایسه خاک‌های تثبیت شده، نمونه‌های دارای ۱۵ و ۲۵٪ پسماند بهترین رفتار را از نظر دوام در ۲۸ روز نشان دادند. که این نتیجه مصداق نتیجه در محاسبه مقاومت در حالت خشک است و نشان می‌دهد خاک‌های حاوی درصد کمتر پسماند و تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم رفتار مقاومتی بهتری را می‌توانند نتیجه بدهند [٦].

جدول ۳- دیگر نمونه‌های تعریف شده برای تست دوام

شماره نمونه	ترکیب نمونه	علامت اختصاری نمونه
۲۲	رس نرم + ۲۵/../٪ نانواکسیدمنیزیم	CH0.25
۲۳	رس نرم + ۵/../٪ نانواکسیدمنیزیم	CH0.5
۲٤	رس نرم + ۷۵/../٪ نانواکسیدمنیزیم	CH0.75
۲۵	رس نرم + ۱٪ نانواکسیدمنیزیم	CH1



شکل ۸- بررسی اثر نانو اکسیدمنیزیم بر خاک نرم به تنهایی

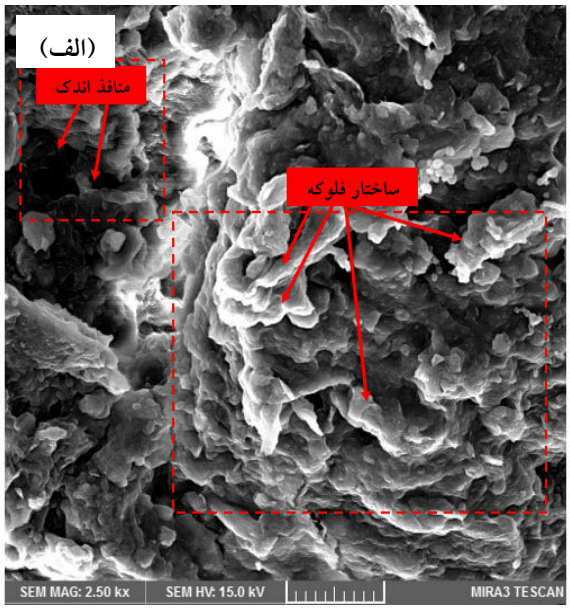


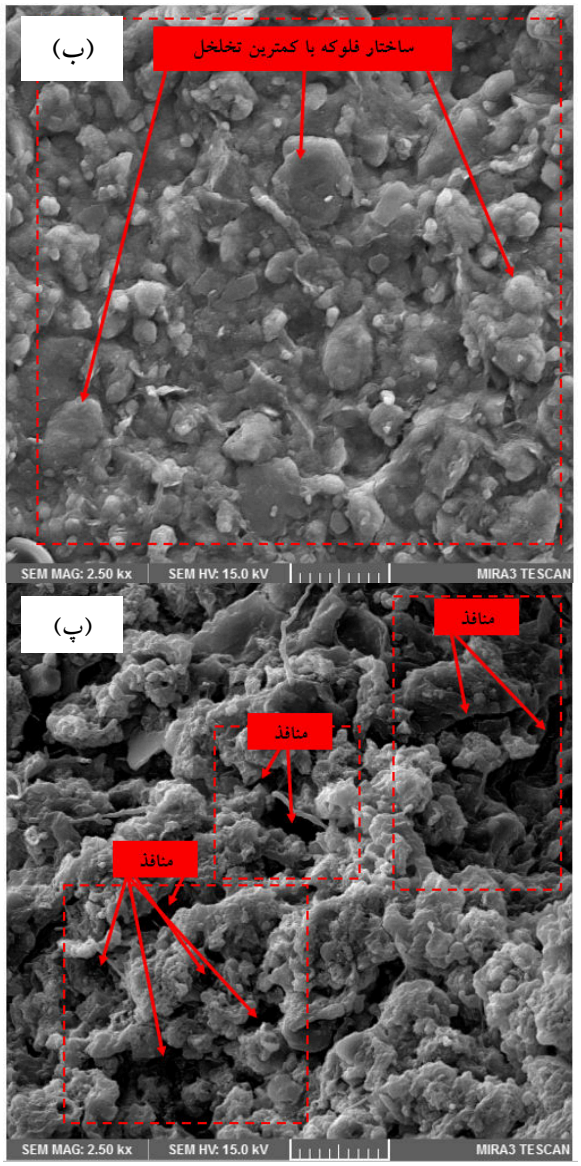
شکل ۹- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های دوام

٤. ٢ . ریزساختاری

از آنجایی که برهم کنش در سطح میکروسکوپی، تغییرشکل خاک را در سطح ماکروسکوپی کنترل می‌کند [۲۵]، آگاهی از آرایش ساختاری خاک برای درک تغییرات در خواص ژئوتکنیکی ضروری است [۱۱]. درک کامل مکانیسم‌های برهم‌کنش بین ذرات خاک و موادافزودنی به محققان کمک می‌کند تا درصد مناسبی از نانو اکسید منیزیم را برای خاک انتخاب کنند و با استفاده از این مواد در ترکیب با تکنیک‌های دیگر برای بهبود بهتر خواص خاک قدمی بردارند [۲۶] ; بنابراین آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM) بر روی نمونه‌های CH1، CH15,1 و CH45,1 طبق استاندارد مربوطه انجام شد [۲۷]. دلیل انتخاب نمونه‌های CH1 و CH15,1 بهینه بودن آن‌ها بر حسب نتایج مقاومت فشاری در حالت خشک و سیکل‌های تروخشک بوده است. یافتن این حقیقت که در مقایسه نتایج حاصل شده از آزمایش درشت ساختاری کدام نمونه بهتر می‌تواند پارامترهای ژئوتکنیکی را بهبود ببخشد را فقط آزمایش ریزساختاری قابل بررسی است. از طرف دیگر چون نمونه CH45,1 در مرحله تثبیت کمترین رشد مقاومت را داشته است نمونه قابل تأملی برای این تحلیل‌هاست.

در شکل۱۰ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه CH15,1 در عمل‌آوری ۲۸ روزه را نشان داده است. وجود اندک منافذ و پیوندهای گسترده‌ای در شکل به چشم می‌خورد که تعیین کننده ساختار فلوکه و با مقاومت بیشتر خاک‌های حاوی ۱۵٪ پسماند جامد شهری و تثبیت شده با نانواکسیدمنیزیم است [۲۸]. در مقایسه این شکل با شکل ۱۰(ب) که مربوط به نمونه CH1 است واضح است که در چنین نمونه‌ای با بیشترین مقاومت در حالت خشک و بیشترین دوام، فلوکه‌ترین ساختار با نانوذرات اکسیدمنیزیم به چشم بخورد. اما در تصویر ۱۰(پ) که مربوط به نمونه CH45,1 است مشاهده می‌شود با وجود ۱٪ نانواکسیدمنیزیم در کنار ٤٥٪ پسماند جامد شهری همچنان ساختار دارای حفرات فراوان است [۲۸].





شکل ۱۰- نتایج ریزساختاری نمونه‌های (الف) CH15,1 ; (ب) CH1 ; (پ) CH45,1

۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه استفاده بالقوه و کارایی نانو اکسید منیزیم را در تثبیت خاک حاوی پسماند جامد شهری در زمان‌های مختلف عمل‌آوری بررسی کرد. در طول مطالعه پیامدهای مهم به شرح زیر است:

۱- زمان عمل‌آوری اثر قابل‌توجهی بر پارامترهای مکانیکی تمام نمونه‌های تثبیت شده با نانو اکسیدمنیزیم را نشان می‌دهد.

۲- عمل‌آوری ۲۸ روزه یک شاخص مهم برای ارزیابی کیفیت خاک تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم است.

۳- زمانی که نانو اکسیدمنیزیم به‌عنوان تثبیت‌کننده استفاده می‌شود می‌توان از خاک‌های حاوی پسماند جامد شهری در پروژه‌های راه‌سازی استفاده کرد.

٤- نانو اکسیدمنیزیم می‌تواند ریزساختار خاک حاوی پسماند جامد شهری را تغییر دهد و ساختار فلوکه‌تری را نتیجه دهد.

۵- خاک حاوی درصد بهینه پسماند جامد شهری تثبیت شده با نانو اکسید منیزیم می‌تواند رفتار دوام بهتری را نتیجه دهد.

مرجع‌ها

[1] A. Zukri, Pekan soft clay treated with hydrated lime as a method of soil stabilizer. Procedia Engineering, **53** (2013) 37-41.

[2] S.Hamidi, S. M. Marandi, Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin. *Applied Clay Science*, **151**, (2018) 92-101.

[3] M. Salimi, A. Ghorbani, Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers. *Applied Clay Science*, **184** (2020) 105390.

[4] E.Emmanuel, C. C. Lau, V.Anggraini, P. Pasbakhsh, Stabilization of a soft marine clay using halloysite nanotubes: A multi-scale approach. *Applied Clay Science*, 173 (2019) 65-78.

[5] M. H.Ghobadi, Y.Abdilor, R. Babazadeh, Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **73(2)** (2014). 611-619.

[6] A. Ohadian, N. Khayat, M. Mokhberi,. Microstructural analysis of marl stabilized with municipal solid waste and nano-MgO. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. (2024).

[7] A. Ghorbani, H. Hasanzadehshooiili, M. Mohammadi, F. Sianati, M.Salimi, L.Sadowski, J.Szymanowski, Effect of selected nanospheres on the mechanical strength of lime-stabilized high-plasticity clay soils. *Advances in Civil Engineering*, (2019).

[8] A. H.Vakili, J. Ghasemi, M. R. bin Selamat, M.Salimi, M. S. Farhadi, Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, **193** (2018). 405-415.

[9] H. Mola-Abasi, A.Khajeh, S. Naderi Semsani, Variables controlling tensile strength of stabilized sand with cement and zeolite. *Journal of adhesion science and Technology*, **32(9)** (2018) 947-962.

[10] A. Li, W. Ge , L. Liu, G. Qiu, Preparation, adsorption performance and mechanism of MgO-loaded biochar in wastewater treatment: A review. *Environmental Research*, **212** (2022) 113341.

[11] H. Harsh, A. A. B. Moghal, R. M. Rasheed, A. Almajed, State-of-the-Art Review on the Role and Applicability of Select Nano-Compounds in Geotechnical and Geoenvironmental Applications. Arabian .*Journal for Science and Engineering*, (2022) 1-25.

[12] L. V. Vijayan, J. P. A. Jose, Stability Studies Of Cohesive Soil With Nano Magnesium And Zinc Oxide. *Materials and Technology*, **56(2)** (2022) 187-191.

[13] Y. Li, J. Zhao, , X. Du, , Y.Sun, , G.Song, , H.Miao, The optimization of the properties of sodium silicate bonded ceramic sand by nano-oxide particles and ultrasonication. *International Journal of Metalcasting*, **16(1)** (2022) 234-241.

[14] W. Wang, Y. Wang, B.Lv, C. Li, H. Kong. Strength characteristics of cement-reinforced recycled aggregate modified with nano-MgO as road bases. *Case Studies in Construction Materials*, **17**(2022) e01456.

[15] ASTM. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM D422-63. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States; 2007.

[16] ASTM. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM D4318. West Conshohocken, PA 19428-2959, *United States* (2017).

[17] ASTM. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3). ASTM D698. West Conshohocken, PA 19428-2959, *United States*. (2021).

[18] ASTM. Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM D2166. West Conshohocken, PA 19428-2959, *United States*, (2006).

[19] BS EN, Non-destructive testing. X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials Procedures. 13925-2:2003

[20] EPA, Wastes - Non-Hazardous Waste - Municipal Solid Waste, (2013) 38–40.

[21] Y.Ge, J. P. Schimel, P. A. Holden, Evidence for negative effects of TiO_2 and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities. *Environmental science & technology*, **45(4)** (2011)1659-1664.

[22] ASTM D559-03. Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures.

[23] L.Ge, C. C.Wang, C. W.Hung, W. C. Liao, H.Zhao, Assessment of strength development of slag cement stabilized kaolinite. *Construction and Building Materials,* **184** (2018) 492-501.

[24] M.Saadat, M. Bayat, Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised soil by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Non-Linear Regression (NLR). *Geomechanics and Geoengineering*, **17(1)** (2022) 80-91.

[25] A. S. Muntohar, Evaluation the using of plastic sack rubbish as fabrics on expansive embankment

[26] A.Ohadian, N. Khayat, M. Mokhberi, Long-term and microstructural studies of soft clay stabilization using municipal solid waste and Nano-MgO as an Eco-Friendly Method. *Anthropogenic Pollution*, **7(1)** (2023) 35-54.

[27] R.Bahrami, N. Khayat, A. Nazarpour, Laboratory investigation on physical-mechanical characteristics and microstructure of a clayey gypsiferous soil in the presence of chemical accelerator. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **25(9)** (2021) 3273-3288.

[28] R.Bahrami, N. Khayat, A. Nazarpour, Effect of nano-stabilizer on geotechnical properties of leached gypsiferous soil. *Geomechanics and Engineering*, **23(2)** (2020) 103-113.