

تحلیل تأثیر اکسید گرافن بر خصوصیات ژئومکانیکی و پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه ای تثبیت شده با سیمان: مطالعه تجربی

محمد رضا مقیمی^۱، عطا جعفری شالکوهی*^۲، بابک امانی جوردهی^۳، پیام عشقی^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷

چکیده

بهسازی خاک‌های مسئله دار 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. بهسازی خاک با نانومواد یکی از روش‌های نوین و کاربردی جهت بهسازی و مقاوم سازی خاک می‌باشد. هدف از بهسازی خاک بهبود مقاومت برشی، افزایش شکل پذیری، افزایش پایداری، افزایش ظرفیت باربری، افزایش ضریب اطمینان در برابر لغزش شیروانی‌ها و کاهش نشست می‌باشد. در این پژوهش به بررسی اثر افزودن اکسید گرافن (GO) بر روی ماسه تثبیت شده با سیمان در دوره‌های نگهداری ۷ و ۲۸ روزه در آزمایش تک محوری و برش مستقیم تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال پرداخته شده است. سه ترکیب مختلف از نسبت‌های اکسید گرافن (۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ درصد وزن سیمان) و یک ترکیب سیمان (۱۵ درصد وزن خاک خشک) در دوره‌های ۷ و ۲۸ روزه استفاده شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نشان داد که افزودن اکسید گرافن به خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان باعث بهبود مقاومت فشاری و افزایش مدول الاستیسیته (E50) می‌گردد. همچنین نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد افزودن اکسید گرافن باعث بهبود پارامترهای مقاومت برشی گردیده است. در نتایج حاصل از آزمون تک محوری خاک تثبیت شده با ۱۵ درصد سیمان و درصد های مختلف اکسید گرافن محدوده مشخصی بدست آمده و نمونه های حاوی ۱/۲ درصد اکسید گرافن بیشترین سطح نمودار تنش کرنش را به خود اختصاص داده است. همچنین درصد بهینه تثبیت کننده اکسید گرافن در آزمایش برش مستقیم بین ۱-۱/۲ درصد نسبت به وزن سیمان می‌باشد.

کلید واژه‌ها: خاک ماسه‌ای، اکسید گرافن، سیمان، خصوصیات مکانیکی، پارامترهای مقاومت برشی.

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران M.moghimi.civileng@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران Ata.jafary@iau.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرانزلی، ایران Babak.amani@iau.ac.ir

۴- گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران Payam.eshghi@iau.ac.ir

۱. مقدمه

بهسازی خاک‌ها برای بهبود بخشیدن به خواص مهندسی خاک‌های نامرغوب در احداث سازه‌های مهندسی عمران مثل راه‌ها، فرودگاه‌ها، خاکریزها، سدها و پی‌های سطحی بکار می‌رود (Eshghi et al., 2022). نوع روش تثبیت انتخابی در هر پروژه بستگی به ماهیت سازه و خواص ژئوتکنیکی و فیزیکی - شیمیایی خاک‌های مورد نظر دارد. براساس پاسخ اجزاء متشکله خاک به تثبیت، دستورالعمل‌هایی برای تعیین مناسب بودن خاک جهت هر نوع تثبیتی پیشنهاد شده است (Gharib et al., 2012). تثبیت با استفاده از افزودنی‌ها به عنوان یکی از روش‌های رایج برای بهسازی این خاک‌ها می‌باشد که از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به سیمان و آهک اشاره کرد که به طور سنتی در پروژه‌های مختلف بکار گرفته می‌شود. با این حال در سال‌های اخیر استفاده از افزودنی‌های نوین و همچنین استفاده از مواد طبیعی و ضایعاتی جهت دستیابی به عملکرد بهینه در مصالح ساخت و ساز مورد استفاده قرار گرفته است (Jafary et al., 2025; Eshghi et al., 2025; Hossein et al., 2024; Eshghi et al., 2025). از سوی دیگر با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از مصالح جدیدی همچون نانوموادها جهت بهسازی خاک‌ها بهبود خصوصیات نکتیکی مصالح ساخت و ساز افزایش یافته که می‌توان به صورت تنها و یا در ترکیب با افزودنی‌های سنتی بکار گرفته شوند (Eshghi et al., 2024; Eshghi et al., 2024; Sarvandani et al., 2021; Sadrinejad et al., 2024). در پژوهشی به بررسی تأثیر ترکیب الیاف بازیافتی پلی پروپیلن با نانو اکسید منیزیم بر روی خاک رس پرداخته شد که نتایج نشان داد افزودن الیاف بازیافتی به نمونه‌ها، سبب کنترل کرنش و بهبود پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت فشاری تک محوری می‌شود (Ahmadi et al., 2020). در پژوهشی دیگر به بررسی تأثیر ترکیب نانو اکسید آهن مگنتیت با ژئولیت طبیعی بر روی خاک رسی پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که هم افزایی این دو ماده تأثیر بسزایی بر بهبود خصوصیات مکانیکی دارد و همچنین به

لحاظ زیست محیطی و اقتصادی مقرون به صرفه است (Eshghi et al., 2024). بررسی تأثیر ترکیب الیاف بازیافتی پلی پروپیلن با نانوسیلیس بر روی خاک رس در پژوهشی دیگری مطالعه گردید که نتایج محققین نشان داد افزودن الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس سبب بهبود وضعیت مقاومت فشاری تک محوری و همچنین افزایش مدول الاستیسیته (E_{50}) در نمونه‌ها می‌گردد (Eshghi et al., 2022). کاربرد اکسید گرافن به عنوان مواد افزودنی در بتن و خاک اخیراً توسط محققین مختلف در دنیا در دست ارزیابی و بررسی‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در پژوهشی به بررسی بهبود خصوصیات مکانیکی ماسه بادی در اثر افزودن اکسید گرافن و سیمان پرداخته شد که نتایج نشان داد با افزایش درصد وزنی اکسید گرافن به دلیل افزایش مقدار جذب آب، رطوبت بهینه کاهش و وزن مخصوص خشک بیشینه و خصوصیات مکانیکی به طور قابل توجه افزایش می‌یابد. مقدار بهینه اکسید گرافن به میزان ۰/۰۹ درصد وزنی تعیین شد (Li et al., 2021). در تحقیقی دیگری رفتار مکانیکی ترکیب خاک رس نرم و اکسید گرافن (۰/۰۱ درصد وزنی) با دوره‌های عمل آوری ۱ و ۷ روزه مورد بررسی قرار گرفت که با بررسی نتایج حاصله اینگونه عنوان شد که نانو اکسید گرافن مقاومت و دوام خاک را بهبود بخشیده، همچنین هر یک از پتانسیل‌های انبساط، ضریب تغییر حجم و ضریب تحکیم با افزایش دوره عمل آوری نانو اکسید گرافن کاهش می‌یابد (Fattah et al., 2020). اثر تثبیت خاک ماسه رس‌دار با نانو اکسید گرافن (۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸، و ۰/۱ درصد وزنی خاک) نیز نشان می‌دهد حدروانی و شاخص پلاستیسیته خاک به طور پیوسته تا میزان اختلاط ۰/۰۸ درصد وزنی افزایش یافته در حالیکه حد پلاستیک خاک تثبیت شده به طور قابل توجه تغییر نمی‌کند (Zhou et al., 2017). تأثیر اکسید گرافن در هیدراتاسیون سیمان نیز در تحقیقات دیگری بررسی و نتایج نشان داد که افزودن گرافن و نانو اکسید گرافن به طور قابل توجهی سبب تسریع هسته‌زایی و رشد واکنش پوزولانی در سطح سیمان شده که همین امر باعث هیدراتاسیون سریع

هزینه بالای تولید و دسترسی محدود مواد نانویی، استفاده از مقادیر ناچیز اکسید گرافن نه تنها از لحاظ اقتصادی بهینه است، بلکه امکان پیاده سازی این فناوری در مقیاس وسیع را نیز فراهم می کند. علاوه بر این، ویژگی های ذاتی اکسید گرافن، مانند سطح ویژه بالا، خواص مکانیکی بی نظیر و تعامل مؤثر با ساختار سیمانی، حتی در مقادیر بسیار پایین، می تواند موجب بهبود تراکم، افزایش چسبندگی و مقاومت خاک شود. این رویکرد، یک راه حل عملی و اقتصادی برای بهسازی خاک در پروژه های ژئوتکنیکی ارائه می دهد که هم پایداری محیطی و هم عملکرد مهندسی را ارتقا می بخشد.

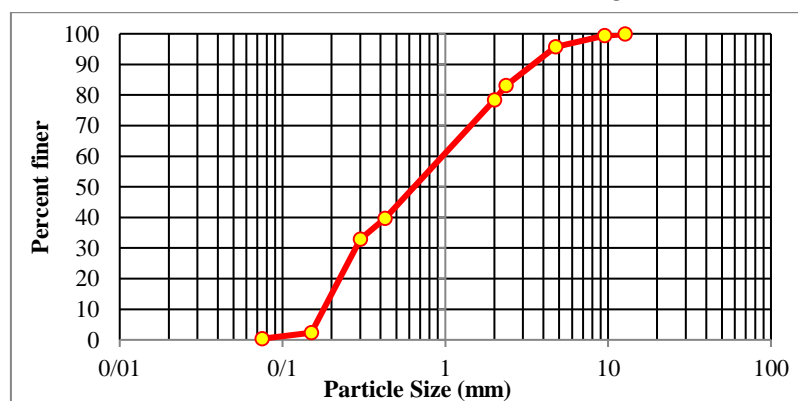
عنصری بنام طیف سنجی فلئورسانس اشعه ایکس استفاده گردید که نتایج آن در جدول (۲) ذکر گردیده است. در این مطالعه از سیمان پرتلند تیپ ۲ (جدول (۳)) و اکسید گرافن (GO) با درجه خلوص ۹۹/۹۹ (جدول (۴)) و شکل (۲)) جهت بهسازی و تثبیت خاک استفاده شد.

سیمان می گردد (He et al., 2020). در این مطالعه، ابتدا به منظور تعیین مشخصات اولیه خاک ماسه ای، آزمایش های مقدماتی مطابق با استانداردهای ASTM انجام شده است. سپس، با افزودن مقادیر بسیار پایین وزنی اکسید گرافن نسبت به وزن سیمان، آزمایش تراکم استاندارد پروکتور برای بررسی مشخصات تراکمی نمونه ها و آزمایش های برش مستقیم و مقاومت فشاری محصور نشده برای ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی و خصوصیات مکانیکی انجام گرفته است. نوآوری این پژوهش در استفاده از مقادیر کم اکسید گرافن، به عنوان یک ماده پیشرفته در مقیاس نانو، برای دستیابی به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی خاک نهفته است. با توجه به

۲. مواد و روش ها

۱.۲. مواد و مصالح

ماسه مصرفی در این پژوهش دارای ارزش ماسه ای حدود ۹۵ درصد می باشد. منحنی دانه بندی ماسه در شکل (۱) و مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) نشان داده شده است. علاوه بر این جهت تعیین مشخصات شیمیایی از روش آنالیز



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه مصرفی در پژوهش

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده

مقدار	استاندارد	خواص
SP	ASTM D-2487	طبقه بندی خاک
۱/۵	ASTM D-421	ضریب یکنواختی (C_u)
۱/۰۲۱		ضریب دانه بندی (C_c)
۲/۶۶	ASTM D-854	توده ویژه (G_s)
۱۷/۵	ASTM D-698	وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۹/۷۵		درصد رطوبت بهینه (θ_{opt})

جدول ۲. مشخصات شیمیایی (XRF) ماسه مورد استفاده

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	L.O.I	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	MnO ₂	Cl	P ₂ O ₅	La&Lu
درصد وزنی	60	12	9	4.5	4	4	2.5	2.15	0.9	0.6	0.15	0.15	0.05	<0.01

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده

ترکیب شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	L.O.I
درصد وزنی	20.13	4.53	63.88	4.11	1.35	2.28	2.82

جدول ۴. مشخصات فیزیکی GO مورد استفاده

Parameters	Values
Thickness	3.4-7 nm
Carbon Purity	~99%
Surface Area (BET)	100-300 m ² /g
Bulk Density	1 g/cc



شکل ۲. اکسید گرافن مورد استفاده در این پژوهش

۲.۲. روش آزمایش

به منظور ارزیابی اثر اکسید گرافن بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌ای و خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان جهت تعیین خصوصیات مکانیکی و پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها از آزمون مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D-2166 و ASTM D-3080 استفاده شد. آزمون‌های آزمایشگاهی با درصد‌های مختلفی از اکسید گرافن (۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ درصد نسبت به وزن سیمان) صورت پذیرفت. در آزمایش برش مستقیم سه سر بار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد. همچنین در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده برای هر نمونه سه آزمایش انجام گرفت که میانگین آن‌ها به عنوان نتیجه درج گردید. علاوه بر آزمایش‌های ذکر شده جهت

بررسی وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه از آزمایش تراکم استاندارد ASTM D-698 استفاده شد. در جدول (۵) برنامه آزمایشگاهی این پژوهش برای آزمایشات مقاومت فشاری و تراکم استاندارد و در جدول (۶) برنامه آزمایشگاهی مربوط به آزمایش برش مستقیم آورده شده است. به منظور تهیه نمونه‌ها، ابتدا ماسه مورد مطالعه از الک شماره ۴۰ عبور داده شد. سپس اکسید گرافن در درصد‌های وزنی از پیش تعیین شده طی پنج مرحله در خاک پخش و توسط میکسر مکانیکی به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شد. همچنین به منظور ایجاد شرایط تراکم بهینه برای هر درصد افزودنی، مقدار درصد رطوبت بهینه‌ی نمونه‌ها از آزمایش تراکم استاندارد تعیین گردید و متعاقباً نمونه‌ها در درصد‌های

میلیمتر ارتفاع و در آزمایش برش مستقیم با ابعاد ۶۰ در ۶۰ میلیمتر و ضخامت ۲۵ میلیمتر در محیط عایق به مدت ۷ و ۲۸ روز عمل آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند.

رطوبت بهینه ساخته شدند. سرانجام افزودن آب به نمونه‌ها نیز طی پنج مرحله انجام شد و نمونه‌ها به وسیله میکسر مکانیکی به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شدند. نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده دارای ۳۸ میلیمتر قطر و ۷۶

جدول ۵. برنامه آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده و تراکم استاندارد (S: Sand, C: Cement, GO: Graphene Oxide)

Curing	Unconfined compression test		Standard Proctor Test
	7 Days	28 Days	-
S0C0GO	1	1	1
S0C0.4GO	1	1	1
S0C0.8GO	1	1	1
S0C1.2GO	1	1	1
S15C0GO	1	1	1
S15C0.4GO	1	1	1
S15C0.8GO	1	1	1
S15C1.2GO	1	1	1
Total Tests	16		8

جدول ۶. برنامه آزمایش برش مستقیم (S: Sand, C: Cement, GO: Graphene Oxide)

Curing	Direct Shear Tests						
	Overhead	7 Days			28 Days		
		50 kPa	100 kPa	150 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa
S0C0GO	1	1	1	1	1	1	
S0C0.4GO	1	1	1	1	1	1	
S0C0.8GO	1	1	1	1	1	1	
S0C1.2GO	1	1	1	1	1	1	
S15C0GO	1	1	1	1	1	1	
S15C0.4GO	1	1	1	1	1	1	
S15C0.8GO	1	1	1	1	1	1	
S15C1.2GO	1	1	1	1	1	1	
Total Tests	48						

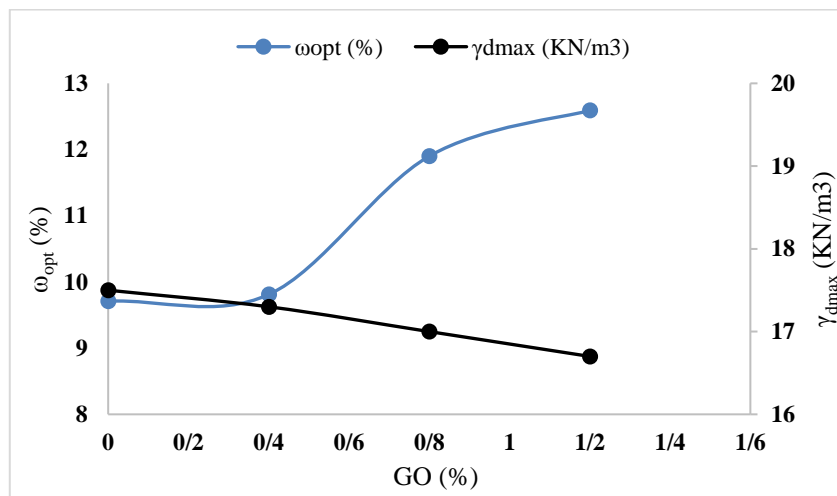
۱/۲ می‌باشد. علت این تغییرات را می‌توان به دلیل جذب رطوبت توسط GO عنوان نمود. در ادامه وزن مخصوص خشک بیشینه روند کاهشی داشته اما تغییرات آن چندان قابل ملاحظه نمی‌باشد. تغییرات به وجود آمده در درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک حداکثر بدلیل اندرکنش‌های میان توده خاک سیمان‌دار و GO می‌باشد. به عبارت دیگر ورق‌های GO سبب افزایش تراکم خاک و تشکیل کریستال‌ها متراکم

۳. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

۳.۱. اثر نانو اکسید گرافن بر پارامترهای تراکم خاک
نتایج آزمایش تراکم استاندارد برای خاک ماسه‌ای با درصد‌های مختلف GO نسبت به وزن سیمان ۱۵ درصد در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقادیر GO، رطوبت بهینه افزایش یافته که بیشترین افزایش به میزان حدود ۳۰ درصد در درصد وزنی

باشد. علاوه بر این، افزایش تماس بین ذرات منجر به تغییر در رفتار مکانیکی و هیدرولیکی خاک می‌شود که می‌تواند بر ویژگی‌های مهندسی آن تأثیر بگذارد.

شده‌اند. همچنین کاهش فضای خالی بین ذرات سبب ایجاد تغییرات نشان داده شده بر روی درصد رطوبت بهینه خاک شده است. این تغییرات می‌تواند به دلیل بهبود تراکم‌پذیری و کاهش میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر تراکم



شکل ۳. تغییرات رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه در درصد‌های مختلف نانو اکسید گرافن

به دلیل افزایش چسبندگی بین ذرات و تراکم بالاتر ساختار ماتریکس سیمان-گرافن باشد. از منظر فنی، خواص منحصر به فرد اکسید گرافن، نظیر سطح ویژه بسیار بالا و توانایی ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی با ترکیبات سیمانی، به تقویت ساختار خمیر سیمان و کاهش ترک‌های ریز در ماتریکس منجر شده است. این ویژگی‌ها باعث بهبود انتقال تنش و کاهش احتمال تمرکز تنش در ساختار خاک می‌شود و نتایج را برای کاربردهای عملی در پروژه‌های ژئوتکنیکی، نظیر تثبیت بستر راه‌ها یا پی‌سازی، بسیار امیدبخش می‌کند.

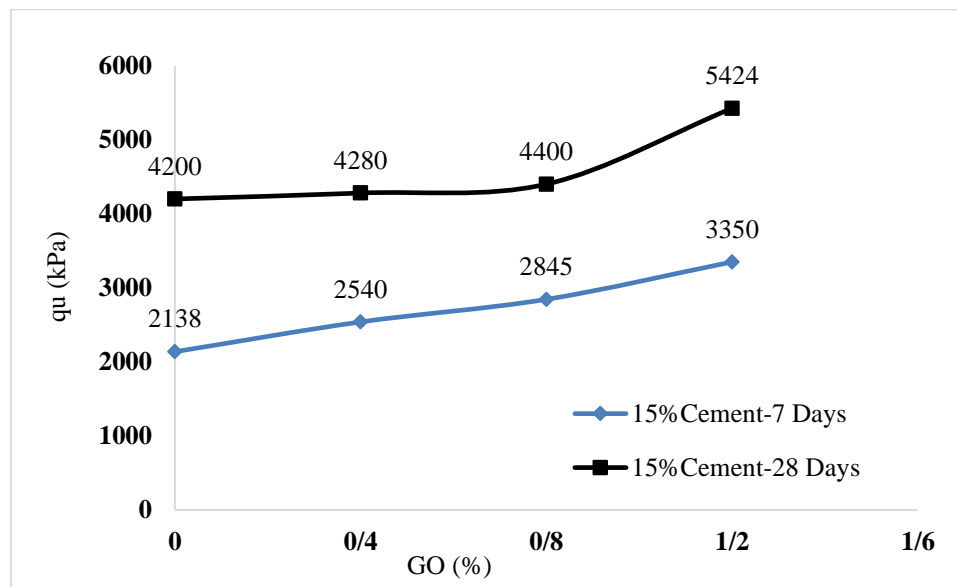
افزودن نانو اکسید گرافن به خاک سیمان‌دار سبب افزایش تراکم و کاهش منافذ خاک گردیده است. این تغییرات و کاهش منافذ در مقایسه با خاک حاوی سیمان بسیار بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر ترکیب این افزودنی سبب تشکیل خاک همگن-تری شده است که این مورد توسط (Naseri et al, 2016. Pan et al, 2015. Azam, 2014) نیز گزارش گردیده است.

۳.۲. آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

۳.۲.۱. اثر نانو اکسید گرافن بر مقاومت فشاری خاک ماسه-

ای و خاک ماسه‌ای سیمانی

نتایج آزمایش فشاری محصور نشده خاک ماسه‌ای تثبیت شده با درصد‌های مختلف GO نسبت به وزن سیمان ۱۵ درصد شکل (۴) ارائه شده است. نتایج این آزمون بر روی نمونه‌های با ۱۵٪ وزنی سیمان نشان داد مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه‌های با درصد‌های ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ درصد وزنی GO به ترتیب برابر ۲۱۳۸، ۲۵۴۰، ۲۸۴۵ و ۳۳۵۰ کیلو پاسکال برای دوره عمل آوری ۷ روزه و به میزان ۴۲۰۰، ۴۲۸۰، ۴۴۰۰ و ۵۴۲۴ کیلو پاسکال برای دوره عمل آوری ۲۸ روزه می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است بیشترین افزایش مربوط به درصد وزنی ۱/۲ اکسید گرافن نسبت به وزن سیمان می‌باشد که نسبت به خاک سیمانی شده پایه در دوره‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۵۷ و ۳۰ درصد رشد داشته است. این بهبود می‌تواند



شکل ۴: تغییرات مقاومت فشاری با ۱۵ درصد سیمان در دوره‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه در درصدهای مختلف GO

به طور کلی جذب آب توسط اکسید گرافن و افزایش درصد وزنی آن باعث افزایش سفتی و خاصیت شکنندگی در ماسه تثبیت شده با سیمان می‌شود (شکل ۵)). به‌طور کلی، ذرات نانو نیروی قفل و بست بین ذرات خاک را افزایش داده و سبب افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها و سخت تر شدن آن می‌شود که در نهایت این امر موجب افزایش مدول الاستیسیته خاک می‌گردد. بیشترین مدول الاستیسیته در این پژوهش مربوط به خاک سیمانی با ۱/۲ درصد اکسید گرافن نسبت به وزن سیمان می‌باشد که نسبت به خاک سیمانی در دوره‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه حدود ۲/۵ برابر رشد داشته است.

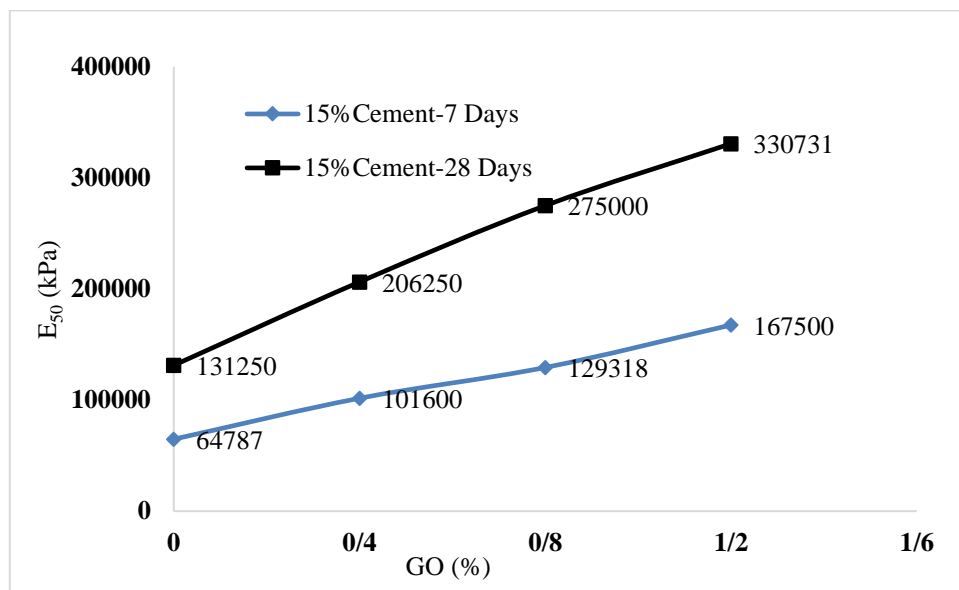
۳.۲.۲. اثر نانو اکسید گرافن بر مدول الاستیسیته (E_{50})

خاک ماسه‌ای و خاک ماسه‌ای سیمانی

مدول الاستیسیته نمونه‌های اصلاح شده با مقادیر متفاوت GO نسبت به وزن سیمان ۱۵ درصد در شکل‌های (۸) و (۹) برای خاک ماسه‌ای بدون سیمان و حاوی سیمان ارائه شده است. به منظور دستیابی به سختی مصالح داریم:

$$E_{50} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

که در آن $\Delta\sigma$ تغییرات تنش محوری تا دستیابی به ۵۰ درصد مقاومت نهایی و $\Delta\varepsilon$ تغییرات کرنش معادل آن است.



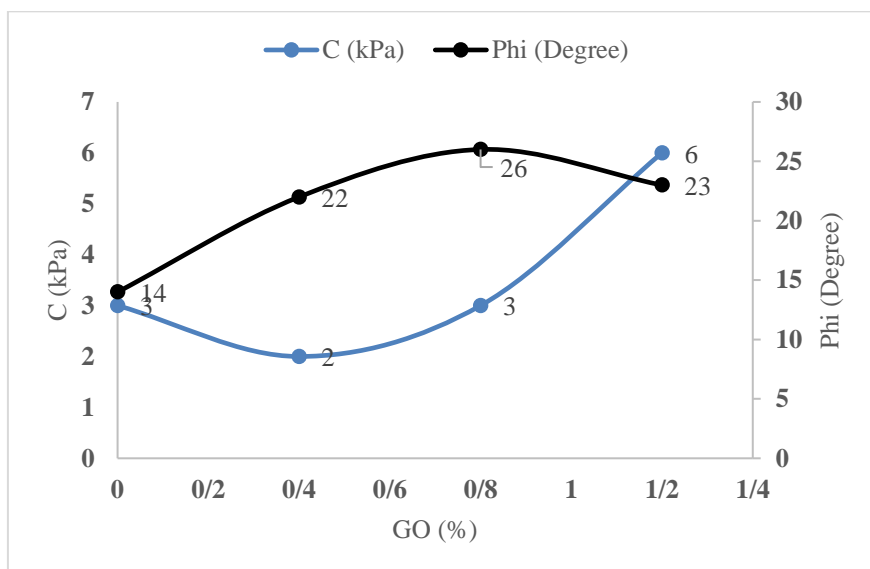
شکل ۵. تغییرات مدول الاستیسیته (E_{50}) ماسه سیمانی در دوره‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه در درصدهای مختلف GO

است با توجه به افزودن GO به نمونه‌های خاک سیمانی با توجه خصوصیات این نانوماده مبنی بر مسلح سازی نمونه‌ها و ماهیت این نانو ماده که بصورت رشته‌ای می‌باشد سبب تسلیح نمونه‌ها گردیده و می‌توان انتظار داشت سبب بهبود خصوصیات مکانیکی از جمله پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها گردد و همچنین با توجه به افزودن مقداری بیشتر از ۱ درصد وزنی نسبت به وزن سیمان با توجه به استفاده از ظرفیت موجود در خاک و اینکه از این حد به بعد عملاً کارایی در خصوص بحث مقاومتی خاک نداشته و سبب کاهش پارامترهای مقاومت برشی در نمونه‌ها می‌گردند. بنابراین افزودن بهینه GO نسبت به وزن سیمان سبب افزایش سختی نمونه‌ها گردیده است که این مطلب توسط (Naseri et al, 2016) نیز مورد تایید قرار گرفته است.

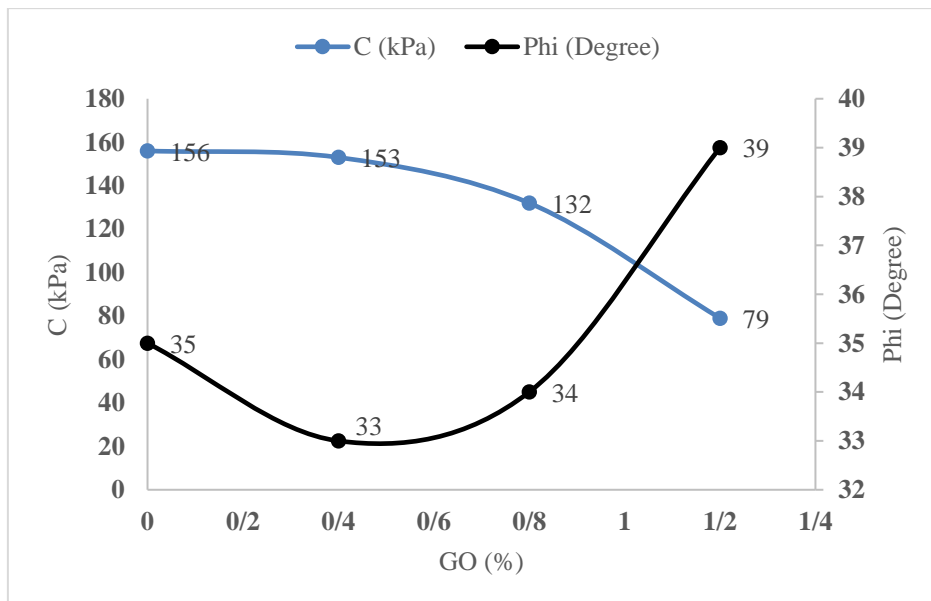
۳.۳. اثر نانو اکسید گرافن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک

ماسه‌ای و خاک ماسه‌ای سیمانی

نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم کوچک مقیاس خاک ماسه‌ای حاوی ۱۵ درصد سیمان که با درصدهای مختلف GO نسبت به وزن سیمان تثبیت شده، در شکل‌های (۶) و (۷) آورده شده است. وجه اشتراک بین نمودارهای حاصل از آزمایش برش مستقیم که پارامترهای مقاومت برشی را در دو دوره عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد، بیانگر این است که در نمودارها یک محل تلاقی می‌توان برای پارامترهای مقاومت برشی متصور بود که در محدوده ۱ تا ۱/۲ درصد وزنی GO نسبت به وزن سیمان ۱۵ درصد می‌باشد که می‌توان گفت در این محدوده بهینه از درصد وزنی اضافه شده به نمونه‌ها حاصل گردیده است. همچنین لازم به توضیح



شکل ۶. تغییرات پارامترهای مقاومت برشی ماسه سیمانی در دوره عمل آوری ۷ روزه در درصد‌های مختلف GO



شکل ۷. تغییرات پارامترهای مقاومت برشی ماسه سیمانی در دوره عمل آوری ۲۸ روزه در درصد‌های مختلف GO

۴. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر نانو اکسید گرافن بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداخته شد و نتایج به شرح زیر استخراج گردید:

- نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داد که با افزایش درصد وزنی GO در خاک ماسه‌ای، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش می‌یابد. افزایش درصد رطوبت بهینه

احتمالاً بدلیل جذب رطوبت توسط GO می‌باشد. همچنین قابل ذکر است تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه حدود ۴ درصد بود که تغییرات قابل ملاحظه‌ای مشاهده نگردید.

همچنین در این مطالعه با ساخت نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف GO نسبت به وزن سیمان، به بررسی مقاومت فشاری محصور نشده، مدول الاستیسیته و پارامترهای مقاومت

- برشی نمونه‌ها پرداخته شد که از جمله نتایج آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- نمودارهای حاصل از آزمایش برش مستقیم که پارامترهای مقاومت برشی را نشان می‌دهد بیانگر این است که در نمودارها، محل بهینه در محدوده ۱ تا ۱/۲ درصد وزنی GO نسبت به وزن سیمان ۱۵ درصد می‌باشد.
 - ذرات اکسید گرافن نیروی قفل و بست بین ذرات خاک را افزایش داده و سبب افزایش مقاومت فشاری تک محوری خاک و سخت‌تر شدن آن می‌شود که در نهایت این امر موجب افزایش مدول الاستیسیته خاک می‌گردد. بیشترین مدول الاستیسیته در این پژوهش مربوط به خاک سیمانی با ۱/۲ درصد اکسید گرافن نسبت به وزن سیمان بوده که
- نسبت به خاک سیمانی در دوره های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه حدود ۲/۵ برابر رشد داشته است.
- در این پژوهش بیشترین افزایش مقاومت فشاری نمونه خاک ماسه ای حاوی ۱۵ درصد سیمان با افزودن ۱/۲ درصد اکسید گرافن نسبت به وزن سیمان در دوره های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه مشاهده شده داشته که به ترتیب حدود ۵۷ و ۳۰ درصد رشد مقاومت داشته است.
- استفاده از گرافن اکساید در ترکیب با خاک سیمانی، علاوه بر بهبود خصوصیات مکانیکی و پارامترهای مقاومت برشی، با کاهش نیاز به مقادیر زیاد مواد افزودنی، روشی اقتصادی و مؤثر برای بهسازی خاک فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها، این روش را به گزینه‌ای پایدار و کاربردی برای پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک تبدیل کرده است.

منابع

- Ahmadi, H., 2021. Experimental study of the effect of nano-additives on the stiffness of cemented fine sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), pp.433-446.
- Ahmadi, H., Janati, S., Jamshidi Chenari, R. 2020. Strength parameters of stabilized clay using polypropylene fibers and Nano-MgO: An experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*: 1-14.
- ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM International, West Conshohocken, 2017).
- ASTM D421, Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (ASTM International, West Conshohocken, 2007).
- ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (ASTM International, West Conshohocken, 2000).
- ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM International, West Conshohocken, 2014).
- ASTM D2166/D2166M, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM International, West Conshohocken, 2013).
- ASTM D3080, D3080M-11, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. (ASTM International, West Conshohocken, 2011)
- Azzam, W.R. 2014. Behavior of modified clay microstructure using polymer nanocomposites technique, *Alexandria Engineering Journal* 53, 143-150.
- Dongbo Li, Pengbo Lei, Hongchi Zhang, Jiaping Liu, and Wei Lu, 2021. Co-Effects of Graphene Oxide and Cement on Geotechnical Properties of Loess, *Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2021, Article ID 7429310, 12 pages.
- Eshghi, P., & Shalkoohy, A. J. (2022). Laboratory evaluation of the effect of polymer carpet waste on geotechnical properties of Bandar Anzali sandy soil. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 15(1).
- Eshghi, P., Azadi, M. and Ahmadi, H. (2025). An Innovative Investigation of Effects of Natural Zeolite on Microstructure and Physicomechanical Characteristics of Clayey Soil Under Different Curing Conditions. *International Journal of Engineering*, 38(2), 503-518.

- Eshghi, P., Niri, H. G., & Pourdada, A. (2025). Assessing the impact of recycled carpet waste (RCW) on unconfined compressive strength (UCS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) in cement-stabilized sandy soil: an experimental study. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10(1), 1-13.
- Eshghi, P., Azadi, M., & Ahmadi, H. (2024). Laboratory Evaluation of the Effects of Temperature and Nano-magnetite on the Physical and Mechanical Characteristics of Clayey Soil (Case Study: Rasht Clay). *Iranian Journal of Engineering Geology*, 17(2).
- Eshghi, P., Azadi, M., & Ahmadi, H. (2024). Experimental investigation of the effect of nano and micro Fe₃O₄ on the physical and mechanical properties of clayey soil. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(2), 154.
- Eshghi, P., Azadi, M., & Ahmadi, H. (2024). Investigating the geomechanical behavior and mechanism of clay stabilization with natural zeolite and nano-magnetite under accelerated curing conditions (ACC). *Results in Engineering*, 24, 103529.
- Eshghi, P., Shalkoohy, A. J., Khodashahri, H. T., & Pourdada, A. (2022). Laboratory Evaluation of polypropylene fibers and nano-SiO₂ on geotechnical properties of clayey soils. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 14(4).
- Fattah, M.Y., Al-Haddad, S.A. and Al-Khafaji, K.R., 2020, November. Compressibility characteristics of soft clays treated by graphene. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 978, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Gharib, M., Saba, H., Barazesh, A., 2012. Experimental investigation of impact of adding lime on atterberg limits in golestan province soils. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences* 3.4:796-800
- He, M., Wang, Y., Yuan, K., Sheng, Z., Qiu, J., Liu, J. and Wang, J., 2020. Synergistic effects of ultrafine particles and graphene oxide on hydration mechanism and mechanical property of dune sand-incorporated cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 262, p.120817.
- Hossein, S. A., Bakhoda, H., & Eshghi, P. (2024). Strength and Durability Assessment of Composite Road Pavements with Nano-Enhanced and Polypropylene Fiber-Reinforced Concretes. *Iranian Journal of Engineering Geology*, 17(3).
- Jafary Shalkoohy, A. , Fallah, N. and Eshghi, P. (2025). Influence of Zeolite on Compressive and Flexural Strength of Sand Containing Cement and Steel Fibers. *International Journal of Engineering*, 38(6), 1331-1339.
- Li, D., Lei, P., Zhang, H., Liu, J. and Lu, W., 2021. Co-effects of graphene oxide and cement on geotechnical properties of loess. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, pp.1-12.
- Naseri Farzad, Mohammad Irani, Masoud Dehkhodarajabi. 2016. Effect of graphene oxide nanosheets on the geotechnical properties of cemented silty soil, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, September 2016, 695-701.
- Pan Z., L. He, L. Qiu, A.H. Korayem, G. Li, J.W. Zhu, F. Collins, D. Li, W.H. Duan, M.C. Wang. 2015. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite, *Cement and Concrete Composites* 58, 140–147.
- Sarvandani, M. M., Mahdikhani, M., Aghabarati, H., & Fatmehsari, M. H. (2021). Effect of functionalized multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and durability of cement mortars. *Journal of Building Engineering*, 41, 102407.
- Sadrinejad, I., Miar Naimi, M. A., Saradar, A., Mansouri Sarvandani, M., & Karakouzian, M. (2024). Publisher Correction: Experimental and numerical investigation of the tensile strength of lightweight concrete including expanded clay aggregate with emphasis on the double punch test. *Materials and Structures*, 57(4), 64.
- Zhou, G.X., Zhong, J., Zhang, H., Hu, X., Wu, J., Koratkar, N. and Shi, X., 2017. Influence of releasing graphene oxide into a clayey sand: physical and mechanical properties. *RSC advances*, 7(29), pp.18060-18067.