

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر افزودن نانوذرات رُس در بهسازی خصوصیات مقاومتی خاک ماسه رُس دار آلوده به گازوئیل

میلاد شهیدی، فرهنگ فرخی*، فرهاد عاصمی

گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۱۷
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۲-۱۴
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۰۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۴-۰۲

کلمات کلیدی:

مقاومت تک‌محوری خاک
تراکم استاندارد
میکروسکوپ الکترونی روبشی
ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل
نانوذرات

خلاصه: انتشار آلاینده‌های نفتی در خاک باعث ایجاد تغییر در ساخت و بافت و ارتباط بین ذرات خاک می‌شود. این امر تأثیرات مخربی بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها می‌گذارد. در سال‌های اخیر، بازیابی خواص مهندسی تنزل یافته این خاک‌ها به منظور استفاده در پروژه‌های عمرانی یکی از چالش‌های پژوهشگران و مهندسان بوده است. در این مقاله، تأثیر افزودن دو نوع نانوذرات رس در بهسازی خواص مکانیکی خاک ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل بررسی شده است. بدین منظور، پس از تعیین خصوصیات پایه‌ای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به ۶ و ۸ درصد گازوئیل، خاک آلوده تثبیت شده با نانو رس مونت‌موریلونیت در مقادیر (۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد) و ارگانوس در مقادیر (۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد)، آزمایش‌های تراکم استاندارد و آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در طی دو دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین برای ارزیابی ریزساختار نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده و خاک آلوده اختلاط یافته با نانو مواد از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در اثر آلودگی خاک به ۶ و ۸ درصد گازوئیل، دانسیته خشک حداکثر، مقدار آب بهینه و مقاومت فشاری محدود نشده کاهش می‌یابد. در ادامه با تثبیت خاک آلوده با استفاده از نانوذرات رس مشخص شد که افزودن ۲ درصد نانوس مونت‌موریلونیت به خاک آلوده به ۶ و ۸ درصد گازوئیل سبب دستیابی به بیشترین میزان افزایش در مقاومت فشاری به ترتیب برابر با ۵۸/۰۷ و ۵۶/۴۵ می‌گردد. علاوه بر این، افزودن ۰/۷ درصد ارگانوس به خاک حاوی ۸ درصد گازوئیل، منجر به افزایش ۳۷/۵۶ درصدی در مقاومت فشاری می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزودن نانوس مونت‌موریلونیت و ارگانوس به خاک آلوده سبب افزایش مقدار آب بهینه و کاهش دانسیته خشک حداکثر شده و کرنش نهایی در آن‌ها افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که خاک آلوده شده با گازوئیل قابلیت بهبود خواص مقاومتی به‌وسیله نانوذرات را دارد.

۱- مقدمه

نفت و غیره باعث ایجاد تغییر در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها می‌گردد [۱]. امروزه با افزایش همزمان مقدار آلاینده‌ها و لزوم به‌کارگیری خاک‌های آلوده به نفت به‌عنوان بستر برخی از سازه‌ها، فرآیند اصلاح و ارائه راه‌حل‌های مناسب برای کنترل رفتار خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی جزو محورهای اصلی پژوهش محققان قرار گرفته است.

آلودگی خاک مانند آلودگی آب که در اثر رخدادهای طبیعی و یا فعالیت‌های بشر رخ می‌دهد؛ تهدید بزرگی برای سلامت انسان و محیط‌زیست بشمار می‌رود. آلودگی نفتی خاک‌ها از جمله موارد قابل‌ذکر و مهمی است که در اثر رخدادهایی از قبیل تصادف تانکرهای حامل، نشت از لوله‌های انتقال و مخزن مدفون، استخراج و پالایش

پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه را می‌توان به دو بخش کلی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farrokhi@znu.ac.ir



رطوبت بهینه، نسبت باربری کالیفرنیا و چسبندگی و همچنین افزایش حد خمیری، حد روانی و زاویه اصطکاک داخلی را گزارش کردند که در این بین خاک آلوده به گازوئیل دستخوش تغییرات بیشتری بوده است [۶]. السناد و اسماعیل^۷ (۱۹۹۷) و لیو^۸ و همکاران (۲۰۱۵) به ترتیب بیان کردند که در اثر فرآیند سالخوردگی و زمان ماندگاری بالا مقاومت برشی و فشاری نمونه‌های آلوده افزایش می‌یابد [۷ و ۸]. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که به دلیل تفاوت در نوع خاک، نوع و مقدار آلاینده و شرایط محیطی نتایج پژوهشگران مختلف در زمینه اثرات آلاینده‌های نفتی تطابق کاملی با یکدیگر ندارند. از این رو در طی سال‌های اخیر نیز همچنان تحقیقات مربوط به بررسی رفتار و خصوصیات خاک‌های آلوده به قوت خود باقی مانده است که در این بین می‌توان به یوکینگ^۹ و همکاران (۲۰۱۵)، هارش^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۶) و ناصحی^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد [۹ - ۱۱]. اما می‌توان به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی بیان کرد که در اغلب موارد حضور فرآورده‌های نفتی از جمله گازوئیل در خاک باعث ضعف در عملکرد آن می‌گردد.

با توجه به آنچه که تا به حال بیان شد، لازم است که تحقیقاتی به‌منظور بهبود و بازسازی ویژگی‌های تنزل یافته خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی صورت گیرد. در این زمینه برخی از پژوهشگران، سعی کرده‌اند که با استفاده از افزودنی‌های صنعتی و بازیافتی از قبیل سیمان پرتلند، آهک، خاکستر بادی، غبار کوره تولید سیمان و غیره رفتار خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی را تثبیت و اصلاح نمایند (نظیر: شا و همکاران، ۲۰۰۳؛ سریواستاوا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۹؛ محمدی و محرم زاده‌سرای، ۱۳۹۴؛ استبرق^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۷؛ خلوصی و همکاران، (۱۳۹۶) [۱۲، ۳-۱۵]). در همین راستا، سریواستاوا و همکاران (۲۰۱۰) سعی بر بهبود خصوصیات مهندسی تنزل‌یافته خاک رس در اثر وجود آلودگی ۱۰ درصدی ناشی از حضور روغن‌موتور داشتند. آن‌ها بیان کردند که تثبیت خاک آلوده توسط افزودنی غبار کوره تولید سیمان، منجر به کاهش دانسیته خشک حداکثر، زاویه اصطکاک داخلی، تورم‌پذیری و چگالی ویژه شده و در

شامل بررسی خصوصیات مهندسی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی و در ادامه تلاش برای اصلاح و بهسازی خصوصیات از دست‌رفته آن‌ها با ارائه راهکارهای مناسب تقسیم‌بندی کرد. در واقع به‌منظور دستیابی به روشی مناسب و مقرون به‌صرفه جهت بازیابی خاک‌های آلوده، محققان با انجام آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی بر روی این‌گونه خاک‌ها مطالعات متعددی را انجام داده‌اند. به‌طور کلی، تحقیقات انجام‌شده در زمینه بررسی اثرات ورود ترکیبات نفتی به خاک، از کاهش مقاومت و افت خصوصیات فیزیکی و مهندسی آن حکایت دارند. در این راستا، شین و داس^۱ در سال ۲۰۰۱ با انجام آزمایش برش مستقیم و استفاده از یک مدل آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی یک پی سطحی، به بررسی ظرفیت باربری ماسه غیراشباع آلوده پرداختند [۲]. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که زاویه اصطکاک داخلی و ظرفیت باربری پی نواری خاک در اثر افزایش مقدار آلودگی کاهش می‌یابد. شا^۲ و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی خصوصیات خاک رسی در اثر آلودگی به مواد آلی، کاهش به میزان ۲۳، ۶۶ و ۳۵ درصد به ترتیب در زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها مشاهده کردند [۳]. خامه‌چیان^۳ و همکاران (۲۰۰۷) آلودگی خاک‌های رسی و ماسه‌ای به‌وسیله نفت خام را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که به‌طور کلی مقادیر حدود اتربرگ، آب بهینه (OWC) برای عمل تراکم و دستیابی به دانسیته خشک حداکثر، نفوذپذیری و مقاومت نمونه‌های آلوده کاهش می‌یابد [۴]. خامه‌چیان^۴ و همکاران (۲۰۰۷) کاهش مقادیر حدود اتربرگ را به‌وسیله ماهیت آب موجود در ساختار کانی‌های رسی تفسیر کردند. نظیر^۵ (۲۰۱۱) در راستای مطالعه خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) به نتیجه‌ای مشابه با تحقیق آن‌ها دست یافت [۵]. وی با بررسی آلودگی خاک رس به‌وسیله روغن‌موتور ملاحظه کرد که مقادیر حدود اتربرگ و مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. رشید^۶ و همکاران (۲۰۱۴) با مقایسه تأثیر دو نوع آلاینده گازوئیل و نفت سفید بر روی خصوصیات خاک ماسه‌ای سیلت‌دار برای هر دو نوع آلاینده کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر، شاخص خمیرایی،

7 . Al-Sanad and Ismael

8 . Liu

9 . Ukpong

10 . Harsh

11 . Nasehi

12 . Srivastava

13 . Estabragh

1 . Shin and Das

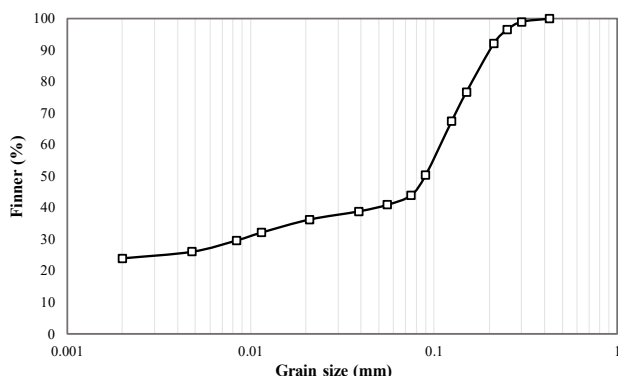
2 . Shah

3 . Khamechiyan

4 . Khamechiyan

5 . Nazir

6 . Rasheed



شکل ۱. نمودار توزیع دانه‌بندی خاک مورد مطالعه بکر (SC)
Fig. 1. Grain size distribution curve of the natural soil (SC)

در خاک رس با آلودگی نفتی ۱۲ درصد مشاهده کردند که مقاومت فشاری محدودنشده و مدول الاستیسیته خاک افزایش می‌یابد [۲۴]. با توجه به ادبیات تحقیق، در این پژوهش به منظور روشن شدن اثر نانوذرات بر روی ویژگی‌های رفتاری خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی و همچنین با هدف بازسازی ویژگی‌های تنزل‌یافته این خاک‌ها، از دو نوع نانورس مونت‌موریلونیت سدیمی (K10) (آب‌دوست) و ارگانورس (Cloisite 30B) (آلی‌دوست) به‌عنوان افزودنی جهت بهبود خصوصیات مقاومتی و تراکمی خاک ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل طی عمل‌آوری‌های ۷ و ۲۸ روز استفاده شد. همچنین در این تحقیق، برای بررسی ریزساختار نمونه‌های خاک در حالت‌های بدون آلودگی، آلوده و آلوده اصلاح‌شده توسط نانورس و ارگانورس از عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

۲- مصالح

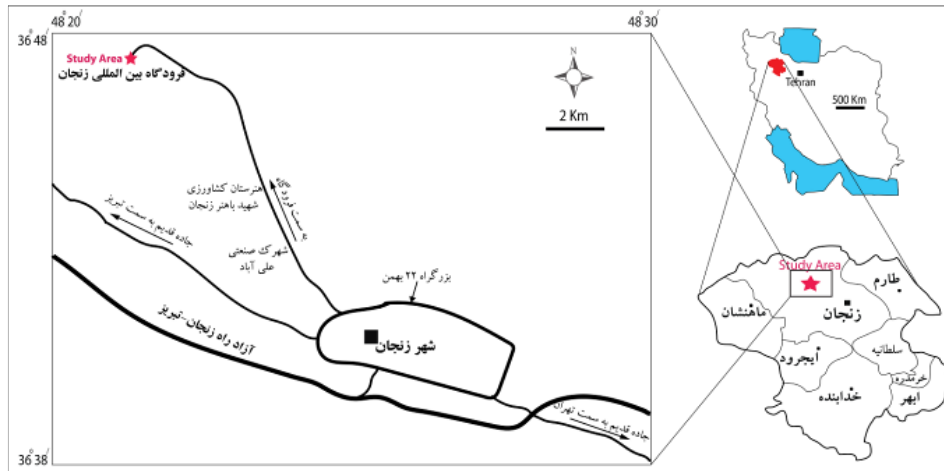
در این پژوهش از خاک ماسه‌ای رس‌دار (SC)، گازوئیل به‌عنوان آلاینده، افزودنی نانورس مونت‌موریلونیت و کلوزیت ۳۰B استفاده شده است.

۲-۱- خاک ماسه‌ای رس‌دار (SC)

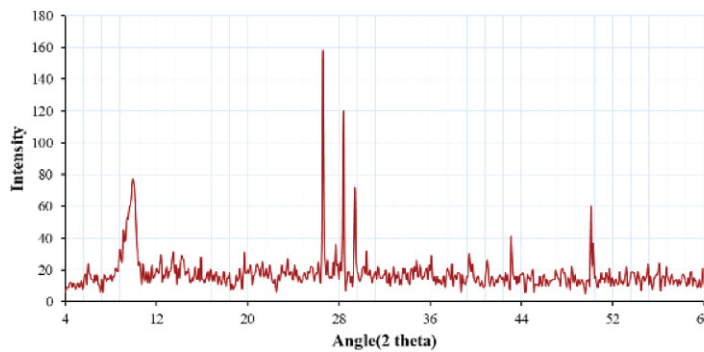
خاک مورد مطالعه در تحقیق حاضر با دانه‌بندی مناسب مطابق استاندارد ASTM D422 شکل ۱ و دارای ذراتی با قطر متوسط ۰/۰۹ میلی‌متر می‌باشد [۲۵] که از منطقه فرودگاه شهر زنجان تهیه شده است شکل ۲. مطابق با سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS) خاک مورد استفاده خاک ماسه رس‌دار (SC) است. خاک دارای چگالی ویژه

مقابل سبب افزایش حدود اتربرگ، آب بهینه، چسبندگی و مقاومت فشاری محدودنشده نمونه‌های خاک رسی آلوده می‌گردد [۱۶]. در سال ۲۰۱۴ نصر^۱ کارایی و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای آلوده تثبیت‌شده با غبار کوره دوار تولید سیمان به‌عنوان افزودنی را به‌منظور استفاده در ساخت جاده‌های روستایی مورد ارزیابی قرار داد [۱۷]. وی در تأیید نتایج پژوهش‌های پیشین با به‌کارگیری غبار کوره دوار تولید سیمان در مقادیر ۵ تا ۱۵ درصد وزنی از خاک آلوده به هیدروکربن نفتی نتیجه‌گیری کرد که ضخامت لایه روسازی در اثر افزودن این مصالح بازیافتی به‌میزان ۳۰ تا ۴۶/۵ درصد کاهش می‌یابد. با وجود استفاده زیاد از سیمان به‌منظور تثبیت خاک‌های آلوده، نتایج حاصل از مطالعات گذشته بیانگر آن است که استفاده از سیمان در خاک به‌دلیل ایجاد مقادیر بالای گاز کربن‌دی‌اکسید همزمان با تولید سیمان، نگرانی‌های زیست‌محیطی زیادی را به‌همراه دارد [۱۸]. همچنین در خاک‌هایی که به‌وسیله مواد آلی آلوده شده‌اند، حضور ترکیبات آلی سبب اختلال در هیدراتاسیون سیمان می‌شود و لذا بازدهی در فرآیند تثبیت کاهش می‌یابد [۱۹]. به‌همین دلیل، محققان در سال‌های اخیر به‌دنبال استفاده از مصالحی با عملکرد بهتر، سازگار با محیط‌زیست و صرفه‌جویی در هزینه بیشتر هستند. بر این اساس، پژوهشگران در سال‌های اخیر استفاده از فناوری نانو را برای حذف آلاینده‌های آلی به‌ویژه در آلودگی منابع آبی توصیه کرده‌اند [۲۰]. طبق بررسی‌های کوهنل^۲ (۲۰۰۶) خاک‌های رسی به‌دلیل امکان دسترسی آسان و خصوصیات فوق‌العاده از اهمیت بالایی برخوردارند [۲۱]. براساس نتایج امیدوارکننده محققان در طی سال‌های گذشته، ورود فناوری نانومواد در مهندسی ژئوتکنیک امری قابل پیش‌بینی است [۲۲]. خواص مختلف رس‌ها از قبیل ظرفیت جذب بالا، رفتار تورمی، خصوصیات مربوط به تغییرشکل رس‌ها و همچنین امکان دستیابی و تولید انواع جدیدی از رس‌های آلی منجر به ظهور رویکرد جدیدی از کاربرد آن‌ها در زمینه کنترل آلودگی‌ها و حفاظت از محیط‌زیست شده است [۲۳]. با توجه به اثبات کارایی بالای نانوذرات در امر بهسازی خصوصیات خاک‌ها و همچنین نقش بسزای فناوری نانو در کنترل آلودگی زیست‌محیطی، در سال ۲۰۱۷ زمردیان^۳ و همکاران با به‌کارگیری نانوذرات (نانورس و نانوسیلیس)

1 . Nasr
2 . Kuhnel
3 . Zomorodian



شکل ۲. محل جغرافیایی مربوط به منطقه خاک مورد مطالعه (خاک ماسه رس دار (SC))
 Fig. 2. Geographical location of the study area (clayey sand soil (SC))



عمده کانی های موجود در خاک	زاویه برگشت پرتو ایکس
کوارتز	۲۶/۶
آلبیت	۲۸/۲
کلسیت	۲۹/۵
مونت موریلونیت	۱۰

شکل ۳. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس خاک مورد مطالعه بکر (SC)
 Fig. 3. Results of X-ray diffraction analysis of natural soil (SC)

با دیگر فرآورده‌های نفتی، در این پژوهش از آن به‌عنوان آلاینده نفتی استفاده شده است. خصوصیات گازوئیل مصرفی در جدول ۳ آورده شده است که از جایگاه سوخت شهید داعی شهر زنجان تهیه شده است.

۳-۲- افزودنی

در این تحقیق، از دو نوع نانوس در حالت های آب دوست و آلی دوست با کانی پایه یکسان مونت موریلونیت به ترتیب مربوط به شرکت های سیگما آلدردیچ آلمان و شرکت رس جنوبی آمریکا استفاده شد. نانو رس مونت موریلونیت سدیمی با چگالی میانگین ۳/۳۵ و خصوصیات ارائه شده در جدول ۴ و ۵ به عنوان اصلاح کننده نمونه های آلوده استفاده شده است. همچنین از ارگانو رس با نام

۲/۷۱ و دانسیته خشک حداکثر $18/2 \text{ kN/m}^3$ می‌باشد که براساس نتایج مربوط به آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD)، کانی کوارتز با زاویه برگشت پرتو ایکس ۲۶/۶ به عنوان عمده‌ترین کانی و پس از آن آلبیت، کلسیت و مونت‌موریلونیت با زوایای برگشت پرتو ایکس ۲۸/۲، ۲۹/۵ و ۱۰ کانی‌های تشکیل‌دهنده فاز جامد خاک ماسه رس‌دار مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۳). همچنین خصوصیات مکانیکی و عناصر تشکیل‌دهنده خاک ماسه رس‌دار مورد مطالعه به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

۲-۲- گازوئیل

به دلیل مصرف بالا، ماندگاری و دانسیته بالاتر گازوئیل در مقایسه

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه بکر (SC)
 Table 1. Physical and mechanical properties of the studied natural soil (SC)

مقدار	استاندارد	خصوصیات خاک	
2/71	ASTM D854	وزن مخصوص دانه های جامد (Gs)	
56	ASTM D422	ماسه (%)	
20		سیلت (%)	
24		رس (%)	
32/2	ASTM D4318	حد روانی (%)	
19		حد خمیری (%)	
13/2		دامنه خمیری (%)	
15/5	ASTM D698	رطوبت بهینه (ω_{opt}) (%)	
18/2		دانسیته خشک حداکثر ($\gamma_{d max}$) (kN/m^3)	
253/44	ASTM D2166	مقاومت فشاری محدود نشده (kN/m^2)	

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک مورد مطالعه بکر (SC) (نتایج آزمایش XRF)
 Table 2. Chemical properties of the studied natural soil (SC) (results of XRF analysis)

مقدار (%)	نوع اکسید	مقدار (%)	نوع اکسید
3/82	Fe ₂ O ₃	56/18	Si O ₂
3/31	Mg O	15/42	Al ₂ O ₃
1/16	K ₂ O	12/77	Ca O
4/92	L.O.I (Loss on ignition)	2/42	Other

جدول ۳. مشخصات گازوئیل مصرفی
 Table 3. Characteristics of the consumed gas-oil

مقدار	خصوصیات
0/82 – 0/86	وزن مخصوص در 15/56 °C (kg/l)
3	ویسکوزیته در 20°C (m^2/gr)
2/1	ثابت دی الکتریک
150 – 390	نقطه جوش (°C)
-3	نقطه ریزش (°C)
54	نقطه اشتعال (°C)

تجاری کلویزیت B ۳۰ با چگالی ۱/۹۸ و دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ارائه شده در جدول ۴ در نمونه های آلوده به گازوئیل به کار رفته است. لازم به ذکر است که با توجه به خاصیت ارگانوفیلیک بودن ارگانوسها از این مصالح به منظور پاک سازی آب های آلوده به ترکیبات آلی استفاده می شود.

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق، ابتدا به منظور تعیین درصد های بحرانی آلاینده گازوئیل، خاک ماسه رس دار به ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد گازوئیل آلوده شده و آزمایش دانه بندی، حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محدود نشده بر روی آنها انجام شد. لازم به ذکر است که برای ایجاد تعادل و انجام واکنش های بین خاک-گازوئیل، خاک های آلوده شده به مقادیر مختلف به مدت ۱۴ روز درون کیسه های پلاستیکی در دمای اتاق نگهداری شدند. نتایج بررسی های اولیه مشخص کرد که بیشترین مقدار افت در خصوصیات ژئوتکنیکی در نمونه های آلوده به ۶ و ۸ درصد گازوئیل بدست می آید. بر این اساس در تحقیق حاضر برای اصلاح خصوصیات مقاومتی از خاک های آلوده به ۶ و ۸ درصد گازوئیل استفاده شد. خصوصیات خاک آلوده به ۶ و ۸ درصد گازوئیل در جدول ۷ ارائه شده است. همانطوری که از نتایج ارائه شده در جدول ۶ و ۷ مشخص است نسبت به خاک طبیعی، افزودن آلاینده به خاک باعث افزایش قطر متوسط ذرات خاک می گردد. با توجه به اینکه در خاک های آلوده ناشی از حضور گازوئیل بین ذرات خاک چسبندگی ایجاد شده و بخش ریزدانه ساختاری فلوکوله یا مجتمع به خود می گیرد، این نتیجه قابل پیش بینی بود. همچنین مطابق با نتایج، حد خمیری از ۱۹ درصد در خاک طبیعی به ۱۴/۹۱ و ۱۰/۹۱ درصد به ترتیب برای خاک های آلوده به ۶ و ۸ درصد گازوئیل و حد روانی نیز از ۳۲/۲ درصد برای خاک طبیعی به ۳۰/۳۵ و ۲۹/۱ درصد برای خاک های حاوی ۶ و ۸ درصد گازوئیل کاهش می یابد. این نتیجه را می توان به کاهش ثابت دی الکتریک ناشی از حضور گازوئیل در خاک ربط داد. در واقع کاهش ثابت دی الکتریک ناشی از حضور گازوئیل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و کاهش نیروی دافعه بین ذرات شده و از آنجایی که نیروی جاذبه بین ذرات رسی مستقل از خصوصیات سیال می باشد، در نهایت باعث تشکیل ساختاری فلوکوله می گردد [۲۶ و ۲۷]. لذا کاهش ثابت دی الکتریک و افزایش

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورس مونت موریلونیت
Table 4. Physical and chemical properties of nanoclay

نوع / مقدار	خصوصیات
مونت موریلونیت	نوع کانی
1 - 2	اندازه ذرات (nm)
220-270	مساحت سطح ویژه (m ² /gr)
11/7	فاصله بین صفحات (Å)
زرد	رنگ
1-2	رطوبت (%)

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی نانورس مونت-موریلونیت (K۱۰)
Table 5. Chemical compounds of nanoclay

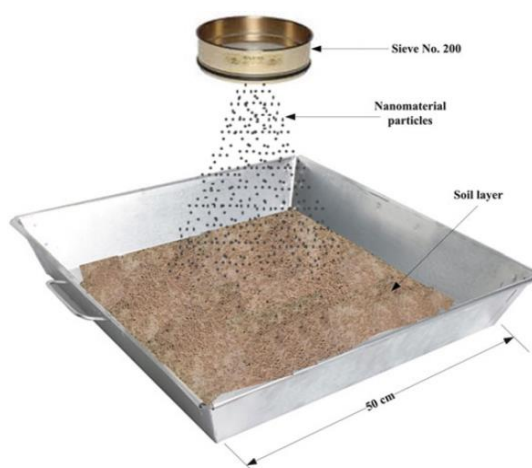
نوع اکسید	مقدار (%)	نوع اکسید	مقدار (%)
Si O ₂	50/95	Na ₂ O	0/98
Al ₂ O ₃	19/60	K ₂ O	0/86
Fe ₂ O ₃	5/62	Ti O ₂	0/62
Mg O	3/29	Other	0/66
Ca O	1/97	L.O.I	15/45

جدول ۶. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ارگانوس
Table 6. Physical and chemical properties of organoclay

نوع / مقدار	خصوصیات
Cloisite 30B	نام تجاری
مونت موریلونیت	نوع کانی پایه
0/365	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)
90	ظرفیت تبادل یون (meq/100gr clay)
MT ₂ EtOH	ماده آلی اصلاح کننده
18/5	فاصله بین صفحات (آزمایش XRD) (Å)
6	میانگین اندازه ذرات (μm)
750	سطح مخصوص ذرات (m ² /gr)
1000-200	نسبت ابعاد ذرات
سفید	رنگ
< 3	رطوبت (%)

جدول ۷. خصوصیات مکانیکی خاک با آلودگی ۶ و ۸ درصد
Table 7. Mechanical properties of soil with 6% and 8% contamination

نمونه	حد خمیری (%)	حد روانی (%)	آب بهینه (%)	دانسیتة خشک حداکثر (kN/m ³)	مقاومت فشاری محدود نشده (kPa)	قطر متوسط دانه ها (mm)
S+6%G	14/91	30/35	13/6	17/48	187/2	0/11
S+8%G	10/91	29/1	10/05	17/4	185/8	0/15

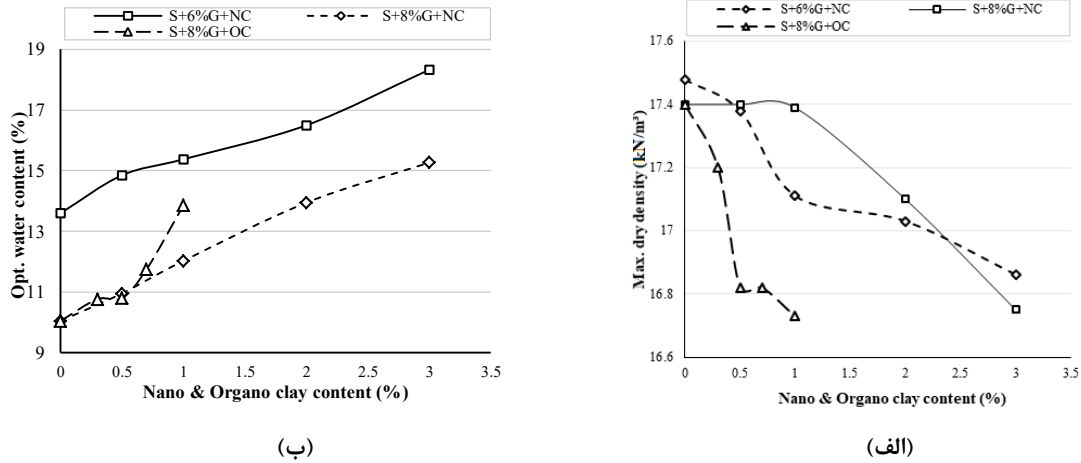


شکل ۴. نمای شماتیک از مرحله الک کردن نانوذرات بر روی خاک [۳۰]
Fig. 4. Schematic view of the Spraying of nanomaterial on the soil

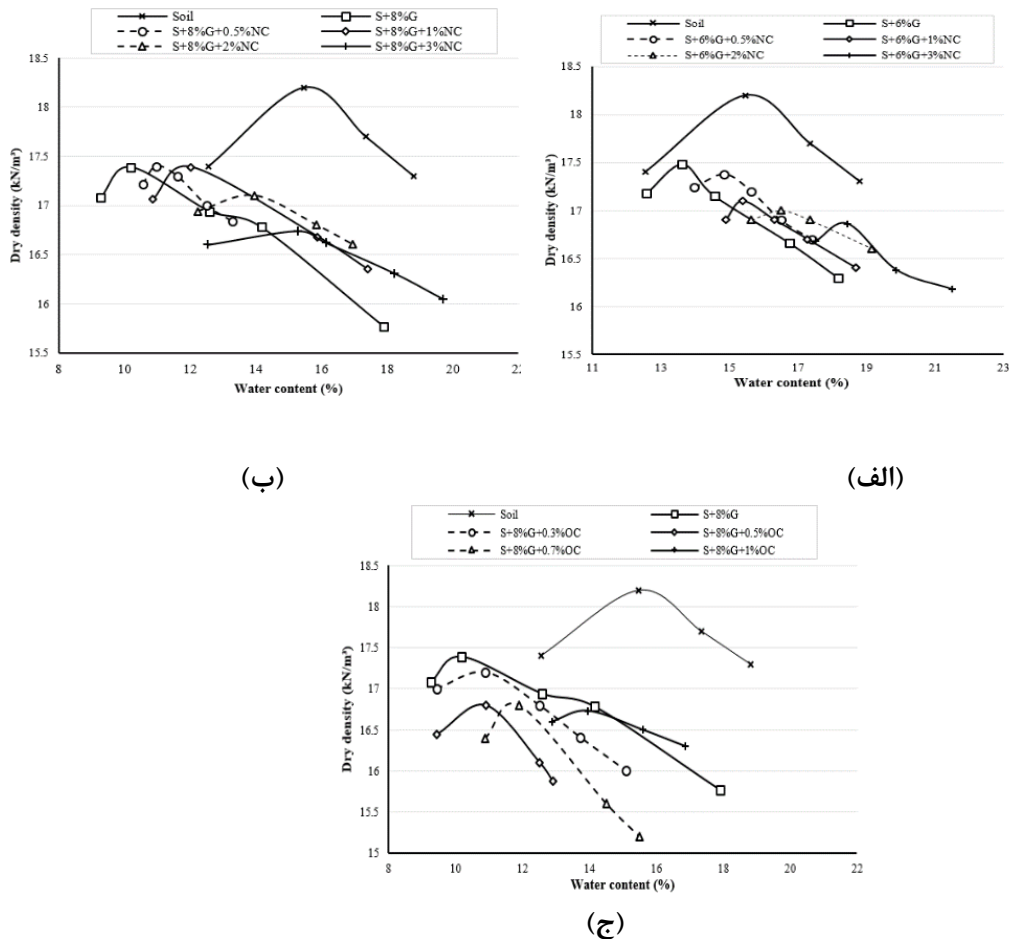
رس اصلاح نشده و اصلاح شده بر خصوصیات خاک آلوده به گازوئیل مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که نمونه‌های مربوط به آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده به وسیله دستگاه تراکم کوچک مقیاس هاروارد^۱ بر اساس استاندارد ASTM D4609 با قطر ۳۳/۳ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر ۲/۱۱ قالب‌گیری شدند. همچنین پس از الک کردن نانوذرات رس بر روی خاک آلوده و ایجاد حالت یکنواخت ترکیب خاک آلوده- نانوذرات شکل ۴، مطابق طاهها و طاهها^۲ (۲۰۱۲) و بازیار^۳ و همکاران (۲۰۱۰) به منظور دستیابی به بازده بالای نانوذرات پس از ترکیب همگن خاک آلوده- نانورس- آب و هیدراته شدن یکنواخت ترکیب حاصله، نمونه‌ها حداقل به مدت ۱۶ ساعت درون کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شدند [۲۸ و ۲۹].

نسبت سیال آلی به آب باعث کاهش حد روانی می‌شود. همچنین به دلیل پوشیده شدن سطح ذرات توسط مولکول‌های غیرقطبی گازوئیل امکان جذب آب کمتر شده و حد خمیری با افزایش درصد گازوئیل کاهش می‌یابد. خصوصیات خاک تمیز و خاک آلوده به ۶ و ۸ درصد گازوئیل در مرحله بعد از نانو رس مونت موریلونیت (Na⁺) در مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی خشک خاک حاوی گازوئیل با هدف اصلاح نمونه‌های آلوده استفاده شد. همچنین از کلویزیت ۳۰B نیز در خاک با آلودگی ۸ درصد در مقادیر ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد وزنی استفاده گردید. با انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد (ASTM D896)، مقاومت فشاری محدود نشده (ASTM D2166) طی عمل‌آوری‌های ۷ و ۲۸ روز و عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای نمونه‌های خاک بکر، آلوده و آلوده اصلاح شده با نانورس مونت‌موریلونیت و کلویزیت ۳۰B، تأثیر کاربرد نانوذرات

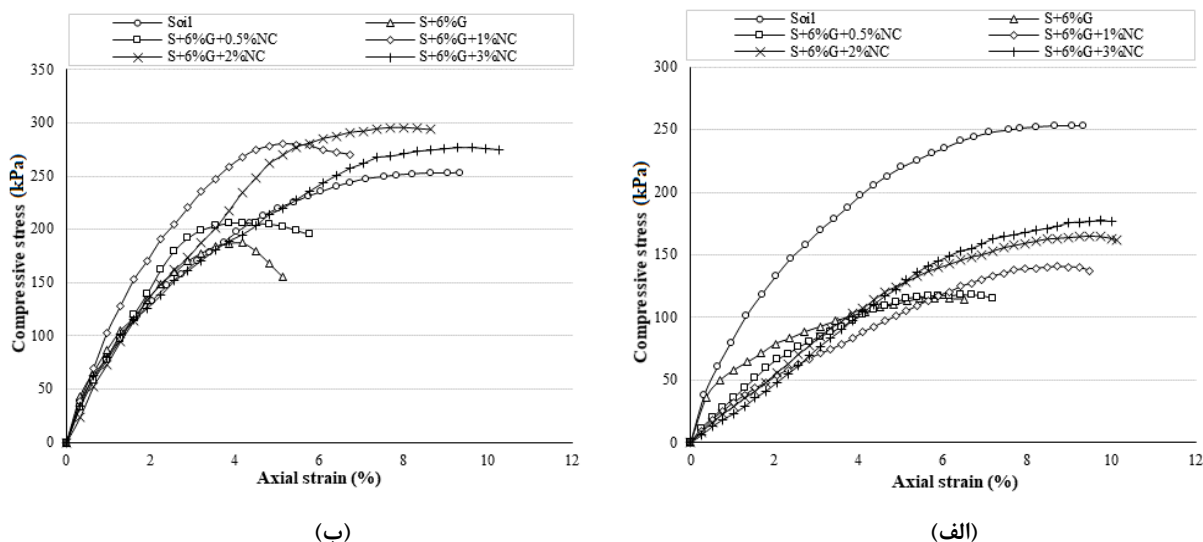
1 . Harvard
2 . Taha
3 . Baziar



شکل ۵. تأثیر مقادیر نانورس مونت‌موریلونیت و کلویزیت 30B بر مقادیر (الف) دانسیته خشک حداکثر (ب) آب بهینه خاک با آلودگی ۶ و ۸ درصد
 Fig. 5. Influence of montmorillonite nanoclay (MMT-Na) and Cloisite 30B content on (a) Maximum dry unit weight, (b) Optimum water content of the clayey sandy soil with 6 and 8% contamination



شکل ۶. منحنی های تراکم استاندارد خاک با آلودگی (الف) ۶ درصد (ب) ۸ درصد در مقادیر مختلف نانورس مونت‌موریلونیت (ج) ۸ درصد در مقادیر مختلف کلویزیت 30B
 Fig. 6. Standard Proctor compaction curves for SC soil with: (a) 6% contamination stabilized with different wt% of nanoclay, (b) 8% contamination stabilized with different wt% of nanoclay; (c) 8% contamination stabilized with different wt% of Cloisite 30B.



شکل ۷. منحنی های تنش - کرنش نمونه های با آلودگی ۶ درصد تثبیت شده با مقادیر مختلف نانورس مونت موریلونیت طی عمل آوری الف (۷ روز ب) ۲۸ روز

Fig. 7. Stress-strain curves of samples with 6% contamination stabilized with nanoclay during (a) 7- and (b) 28-day curing periods

نتایج مربوط به خاک آلوده اصلاح شده با کلوزیت ۳۰B حاکی از شیب تغییرات بیشتر در مقایسه با حالت استفاده از نانورس مونت موریلونیت می باشد. به طوری که خاک حاوی ۸ درصد گازوئیل ترکیب شده با بیشترین مقدار ارگانورس (۱ درصد)، به ترتیب با کاهش ۳/۸۵ و افزایش ۳۷/۹۱ درصدی دانسیته خشک حداکثر و مقدار آب بهینه مواجه شد. مقایسه نتیجه بدست آمده برای نانورس مونت موریلونیت و ارگانورس نشان می دهد که ارگانورس در مقایسه با نانورس مونت موریلونیت به مقدار آب کمتری برای رسیدن به دانسیته خشک حداکثر نیاز دارد. این مسئله را می توان به خاصیت آلی دوستی ارگانورس ها نسبت داد. به عبارت دیگر، به دلیل ایجاد پیوند الکترواستاتیکی قوی ارگانورس ها با مواد هیدروکربنی، آلاینده ها برخلاف نمونه های اصلاح شده با نانورس مونت موریلونیت به راحتی از بافت خاک جدا نشده و وارد سیال منفذی نمی گردد که همین امر باعث افزایش ثابت دی الکتریک و قطبیت بیشتر در خاک گشته و به دلیل امکان جذب گازوئیل توسط ارگانورس ها، سرعت افزایش مقدار آب بهینه خاک آلوده حاوی کلوزیت ۳۰B کمتر از حالتی است که از نانورس مونت موریلونیت استفاده شده است.

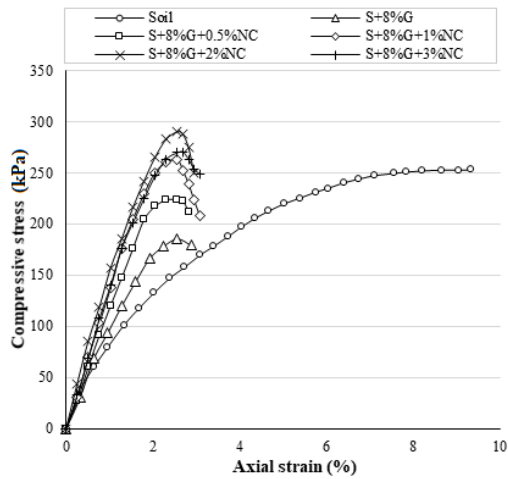
۴-۲- مقاومت فشاری محدود نشده

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه های

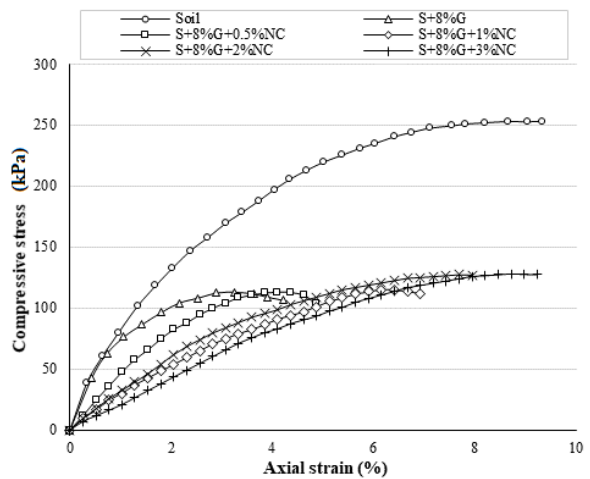
۴- نتایج و بحث

۴-۱- آزمایش تراکم استاندارد

میزان درجه تراکم خاک بر روی خصوصیات مهندسی آن از جمله قابلیت فشرده گی، سختی و مقاومت فشاری تأثیرگذار می باشد. آزمایش تراکم استاندارد برای خاک در حالت بکر، با آلودگی ۶ و ۸ درصد و آلوده ترکیب شده با درصد های مختلف نانورس مونت موریلونیت و ارگانورس بر اساس استاندارد ASTM انجام شد. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۵، به طور کلی کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش مقدار آب بهینه خاک آلوده در اثر افزودن نانورس مونت موریلونیت و کلوزیت ۳۰B را می توان بیان کرد. به طوری که در خاک با آلودگی ۶ درصد حاوی بیشترین مقدار نانورس مونت موریلونیت (۳ درصد)، به ترتیب کاهش ۳/۵۵ درصدی و افزایش ۳۴/۷۸ درصدی دانسیته خشک حداکثر و مقدار آب بهینه حاصل شد. همچنین برای خاک با آلودگی ۸ درصد، افزودن ۳ درصد نانورس مونت موریلونیت کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش مقدار آب بهینه را به ترتیب به میزان ۳/۷۴ و ۵۱/۹۴ درصد منجر شد. علاوه بر این، بررسی نتایج بدست آمده برای خاک های با ۶ و ۸ درصد آلودگی اصلاح شده با نانورس مونت موریلونیت نشان می دهد که افزایش میزان آلودگی در خاک، سبب افزایش میزان آب بهینه مورد نیاز برای دستیابی به دانسیته خشک حداکثر می گردد (شکل ۶).



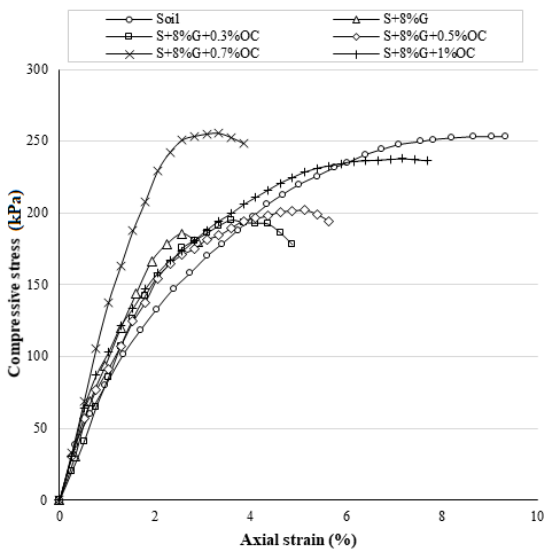
(ب)



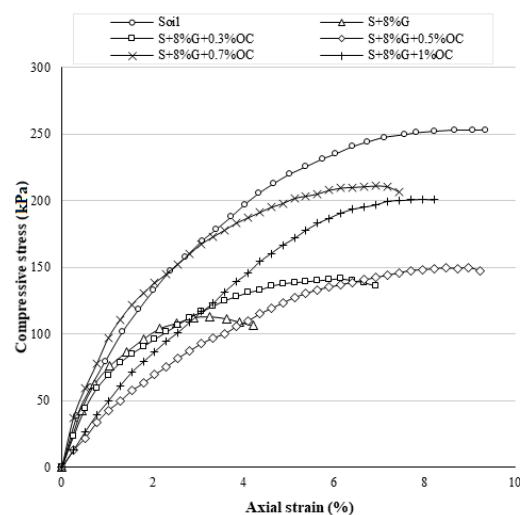
(الف)

شکل ۸. منحنی های تنش- کرنش نمونه های با آلودگی ۸ درصد تثبیت شده با مقادیر مختلف نانورس مونت موریلونیت طی عمل آوری (الف) ۷ روز (ب) ۲۸ روز

Fig. 8. Stress-strain curves of samples with 8% contamination stabilized with nanoclay during (a) 7- and (b) 28-day curing periods



(ب)



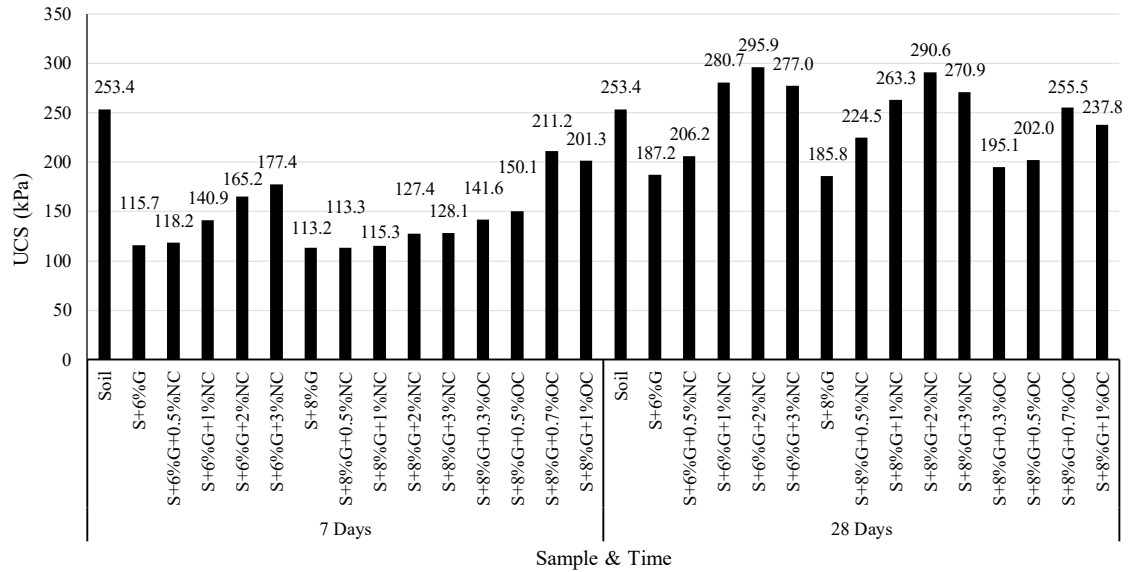
(الف)

شکل ۹. منحنی های تنش- کرنش نمونه های با آلودگی ۸ درصد تثبیت شده با مقادیر مختلف کلویزیت 30B طی عمل آوری (الف) ۷ روز (ب) ۲۸ روز

Fig. 9. Stress-strain curves of samples with 8% contamination stabilized with Cloisite 30B during (a) 7- and (b) 28-day curing periods

شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ و ۱۱ مقاومت خاک طبیعی ۲۵۳/۴ کیلوپاسکال بدست آمد که با آلوده شدن آن با ۶ و ۸ درصد گازوئیل، مقاومت فشاری برای دوره عمل آوری ۷ روزه به ترتیب به میزان ۱۱۹ و ۱۲۴ درصد و برای دوره عمل آوری ۲۸ روزه به ترتیب ۳۵ و ۳۶ درصد افت ناگهانی داشته است. لذا برای

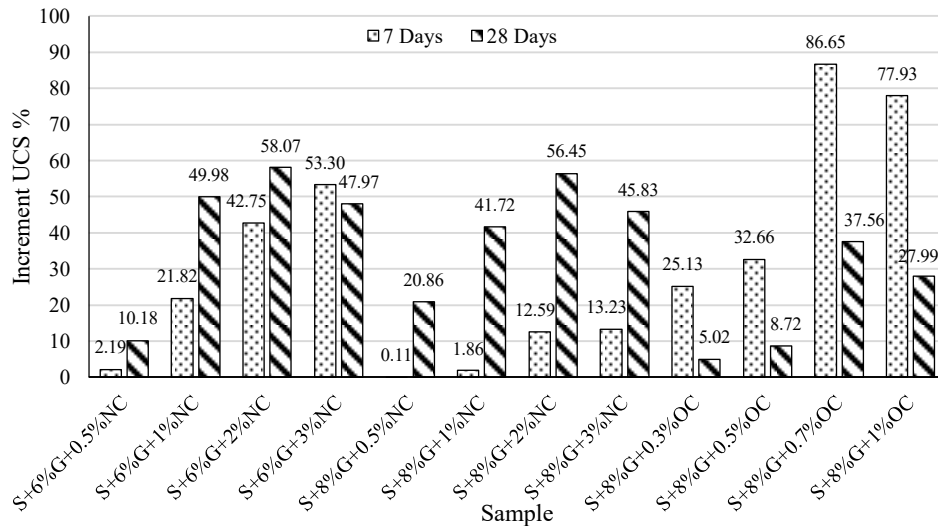
قالب گیری شده در مقدار آب بهینه توسط چکش مخصوص و قالب تراکم کوچک مقیاس هاروارد طی عمل آوری های ۷ و ۲۸ روز صورت گرفت. نتایج مربوط به تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده و کرنش نهایی نمونه های آلوده و آلوده اصلاح شده توسط نانورس مونت موریلونیت و کلویزیت 30B در شکل ۷ تا ۱۰ و جدول ۸ ارائه



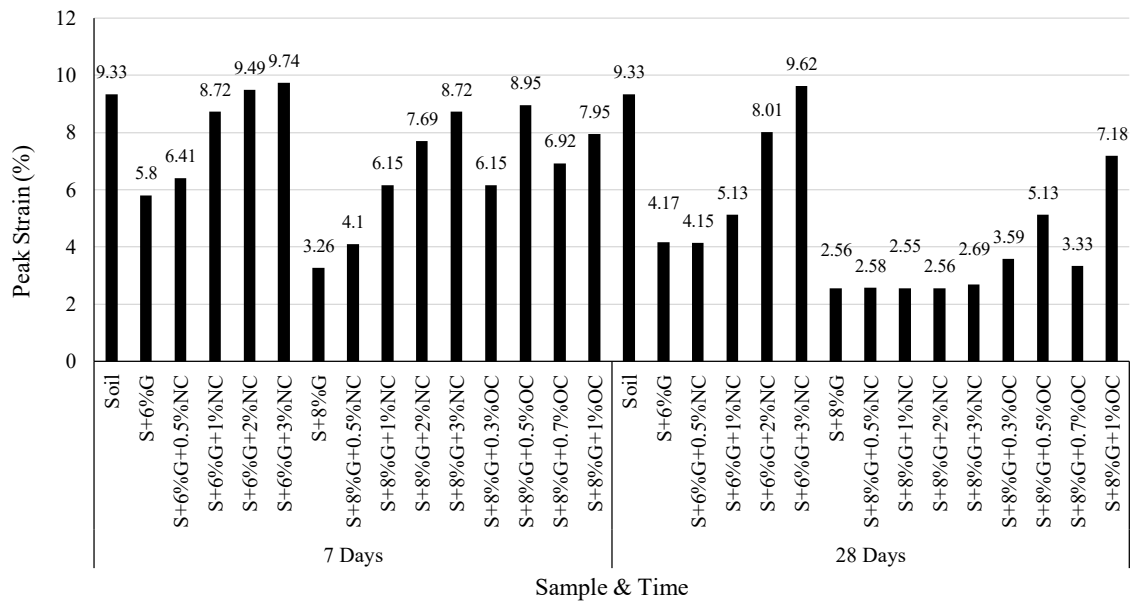
شکل ۱۰. مقادیر مقاومت فشاری نمونه های با آلودگی ۶ و ۸ درصد تثبیت شده با نانورس مونت موریلونیت و کلوزیت B30 طی عمل آوری های ۷ و ۲۸ روز
 Fig. 10. Unconfined compressive strength in samples with 6 and 8% contamination stabilized with nanoclay and organoclay at curing period of 7 and 28 days

جدول ۸. مقادیر مقاومت فشاری محدود نشده خاک با آلودگی ۶ و ۸ درصد تثبیت شده با نانورس مونت موریلونیت و ارگانورس طی عمل آوری های ۷ و ۲۸ روز
 Table 8. Unconfined compressive strength in samples with 6 and 8% contamination stabilized with nanoclay and organoclay at curing period of 7 and 28 days

نمونه	مقدار نانورس مونت موریلونیت (%)	مقدار ارگانورس (%)	تعداد آزمایش	مقاومت فشاری محدود نشده (kPa)	
				7 روز	28 روز
Soil	0	0	3	253/44	-
S+6%G	0	0	3	115/69	187/18
S+6%G	0/5	0	3	118/22	206/24
S+6%G	1	0	3	140/93	280/73
S+6%G	2	0	3	165/15	295/87
S+6%G	3	0	3	177/35	276/97
S+8%G	0	0	3	113/15	185/75
S+8%G	0/5	0	3	113/28	224/5
S+8%G	1	0	3	115/25	263/25
S+8%G	2	0	3	127/4	290/6
S+8%G	3	0	3	128/12	270/87
S+8%G	0	0/3	3	141/59	195/08
S+8%G	0	0/5	3	150/11	201/95
S+8%G	0	0/7	3	211/19	255/52
S+8%G	0	1	3	201/33	237/75



شکل ۱۱. درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه های آلوده تثبیت شده با نانورس مونت موریلونیت و کلویزیت ۳۰B طی عمل آوری های ۷ و ۲۸ روز
 Fig. 11. Changes in unconfined compressive strength of the samples with 6 and 8% contamination stabilized with nanoclay and cloisite 30B at curing period of 7 and 28 days



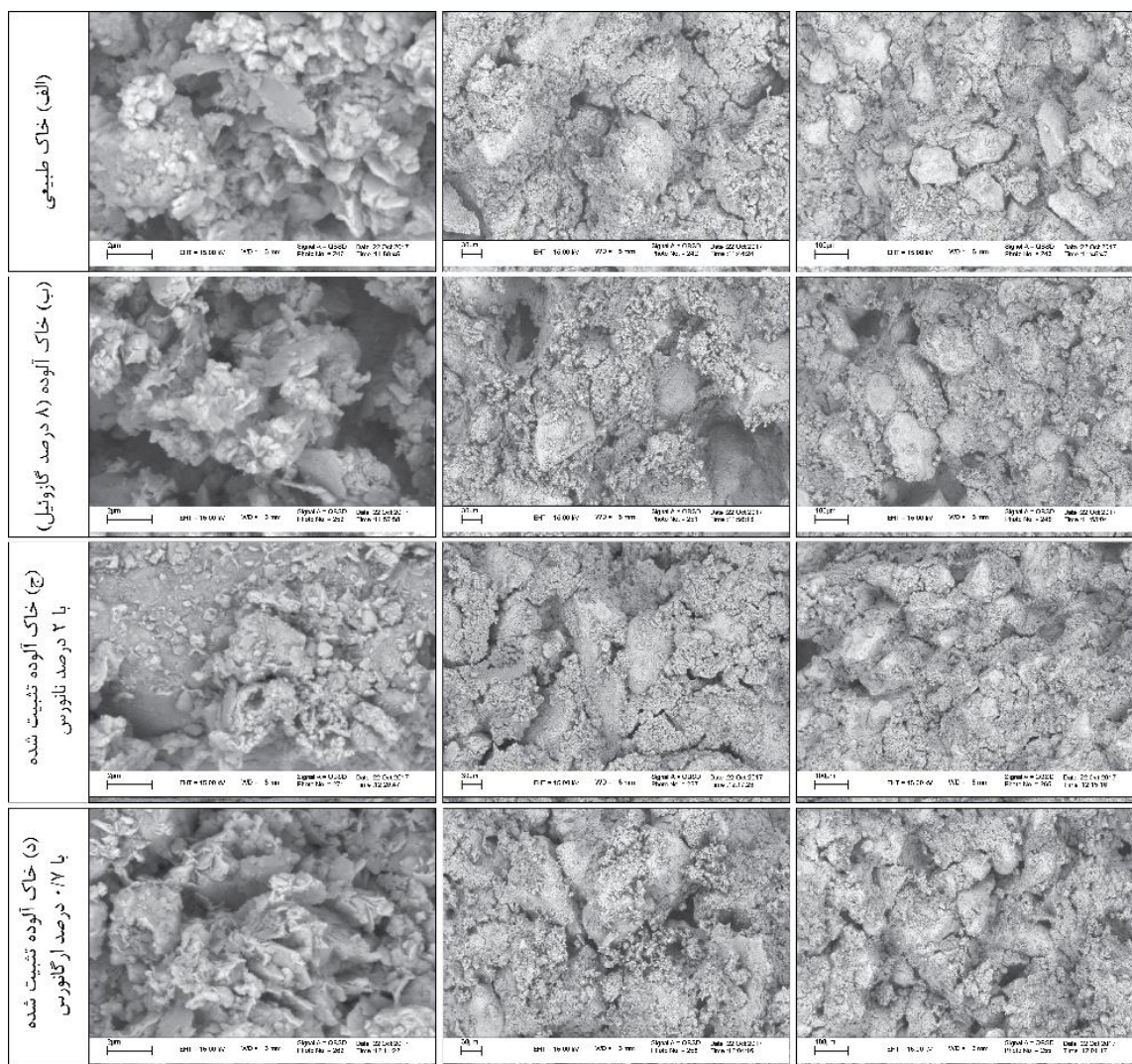
شکل ۱۲. مقادیر کرنش نهایی نمونه های با آلودگی ۶ و ۸ درصد تثبیت شده با نانورس مونت موریلونیت و کلویزیت 30 B طی عمل آوری های ۷ و ۲۸ روز
 Fig. 12. Changes in ultimate strain values of the samples with 6 and 8% contamination stabilized with nanoclay and cloisite 30B at curing period of 7 and 28 days

با آزمایش بر روی خاک های مختلف به نتیجه مشابه با تحقیق حاضر رسیده بودند [۳۱،۱۱،۸،۴].

بدین منظور، در این تحقیق، از نانورس مونت موریلونیت و ارگانورس در درصد های مختلف استفاده شد. با توجه به نتایج، برای نمونه های اصلاح شده با نانورس مونت موریلونیت، بیشترین مقاومت فشاری

استفاده از این نوع خاک به عنوان مصالح پایه ای، لازم است تدابیری به منظور جبران مقاومت از دست رفته خاک ناشی از آلودگی با مواد نفتی صورت گیرد. پیش از این خامه چیان و همکاران (۲۰۰۷)، لیو و همکاران (۲۰۱۵)، ناصحی و همکاران (۲۰۱۶) و ایسا^۱ (۲۰۱۶) نیز

1 Eissa



شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌های (الف) خاک طبیعی، (ب) خاک آلوده شده با ۸ درصد گازوئیل، (ج) خاک با ۸ درصد آلودگی تثبیت شده با ۲ درصد نانورس مونت‌موریلونیت و (د) خاک با ۸ درصد آلودگی تثبیت شده با ۰/۷ درصد ارگانورس طی عمل‌آوری ۲۸ روزه
Fig. 13. Scanning electron microscopy images from samples of (a) natural soil, (b) soil contaminated with 8% gas-oil, (c) soil with 8% contamination stabilized with 2% nanoclay, and (d) soil with 8% contamination stabilized with 0.7% of organoclay during the 28-day curing period

محدود نشده مربوط به افزودن ۲ درصد نانورس مونت‌موریلونیت بوده و طی عمل‌آوری ۲۸ روزه برای خاک با آلودگی‌های ۶ و ۸ درصد به ترتیب برای مقاومت مقادیر ۲۹۵/۹ و ۲۹۰/۶ کیلوپاسکال بدست آمد. در واقع با افزودن ۲ درصد نانورس مونت‌موریلونیت در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، خاک‌های با ۶ و ۸ درصد گازوئیل به ترتیب ۵۸/۰۷ و ۵۶/۴۵ درصد افزایش در مقاومت در مقایسه با خاک آلوده بدون افزودنی داشتند (شکل ۷، ۸، ۱۰ و ۱۱). همچنین ارزیابی نتایج بدست آمده برای ارگانورس نشان می‌دهد که با افزودن ۰/۷ درصد ارگانورس طی عمل‌آوری ۲۸ روزه بیشترین افزایش مقاومت فشاری

محدود نشده (به مقدار ۳۷/۵۶ درصد) بدست آمد (شکل‌های ۹ تا ۱۱). این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانورس مونت‌موریلونیت و ارگانورس باعث افزایش در مقاومت خاک آلوده به گازوئیل می‌شود. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که افزودن ۲ درصد نانورس مونت‌موریلونیت و ۰/۷ درصد ارگانورس باعث برگشت مقاومت از دست‌رفته خاک ناشی از آلودگی با گازوئیل می‌شود. البته اثربخشی این افزودنی‌ها برای خاک‌های مختلف آلوده شده با آلاینده‌های دیگر نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه را می‌طلبد. همچنین مطابق با نتایج بدست آمده مشاهده شد که برای

درصد اصلاح شده با ۲ درصد نانورس مونت موریلونیت و با آلودگی ۸ درصد اصلاح شده با ۰/۷ درصد ارگانورس انجام شد که نتایج در سه مقیاس ۲، ۳۰ و ۱۰۰ میکرومتر در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند.

بر اساس تصاویر گرفته شده از سطح نمونه‌ها، ماتریس اصلی بخش جامد خاک مورد مطالعه را بخش ریزدانه با رفتار خمیری تشکیل داده است که سطح ذرات مربوط به بخش درشت‌دانه (ماسه) را پوشش داده‌اند. شکل ۱۳-ب حاکی از ساختمان مجتمع و فلوکوله بخش ریزدانه خاک آلوده در مقیاسه با خاک در حالت بکر می‌باشد. همچنین بر اساس شکل در مقیاس ۲ میکرومتر، افزودن گازوئیل به خاک طبیعی، به دلیل کمتر بودن ضریب دی‌الکتریک این ماده نسبت به آب، سبب کاهش ضخامت لایه مضاعف تشکیل یافته در اطراف ذرات ریز بخش ریزدانه خاک شده و سبب افزایش درجه فلوکولاسیون خاک آلوده شده نسبت به خاک طبیعی و افزایش فضای خالی بین ذرات می‌شود. به طور مشابه با این تحقیق، خلوصی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از عکس برداری به وسیله SEM در خاک آلوده به آنتراسن مشاهده کردند که درجه‌ی فلوکولاسیون در خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی بیشتر است [۱۵]. همین امر را می‌توان یکی از دلایل کاهش ویژگی‌های مقاومتی در خاک‌های آلوده شده با گازوئیل دانست. با توجه به ماهیت آب‌دوستی نانورس مونت موریلونیت در برابر ترکیبات هیدروکربنی رفتاری مشابه با بخش ریزدانه خاک دارد (شکل ۱۳-ج). اما با این وجود خاصیت نانوتخلخلی نانورس مونت موریلونیت منجر به کاهش مجموع خلل و فرج نمونه‌های آلوده شده است که بهبود اتصال بین ذرات درشت دانه را به دنبال دارد. روند افزایشی مشاهده شده در مقاومت فشاری محدود نشده در نمونه‌های حاوی نانورس مونت موریلونیت را می‌توان به این خاصیت در نانورس‌ها ارتباط داد.

در شکل ۱۳-د خاک آلوده تثبیت شده با ارگانورس نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از خاک آلوده حاوی ارگانورس در مقیاسه با نمونه‌های آلوده حاوی نانورس مونت موریلونیت حاکی از پیوستگی بهتر بخش ریزدانه خاک آلوده و کاهش چشمگیر ساختمان فلوکوله می‌باشد. این مشاهده را می‌توان به ماهیت آلی‌دوستی ارگانورس‌ها و خاصیت نانوتخلخلی آن‌ها نسبت داد. در یک نتیجه‌گیری کلی از مشاهدات میکروسکوپی می‌توان بیان کرد که نانو نانورس مونت موریلونیت و نانورس اصلاح شده سبب کاهش قابل

نمونه‌های آلوده تثبیت نشده، مقاومت فشاری محدود نشده در اثر عمل‌آوری ۲۸ روزه نسبت به عمل‌آوری ۷ روزه افزایش می‌یابد. به طور کلی تحقیقات موجود در زمینه بررسی اثر دوره عمل‌آوری بر مقادیر مقاومت فشاری محدود نشده ترکیب خاک-نانومواد-آلاینده بسیار محدود است. در این راستا، نظیر (۲۰۱۱) دریافت که خاک آلوده به روغن موتور در دوره عمل‌آوری ۶ ماهه ۳۸ درصد افزایش مقاومت از خود نشان می‌دهد. همچنین زمردیان و همکاران (۲۰۱۷) به طور مشابه دریافتند که مقاومت ۲۸ روزه خاک آلوده به مواد هیدروکربنی بیشتر از مقاومت یک روزه آن است. با این حال به نظر می‌رسد نیاز هست که مطالعه آزمایشگاهی جامعی برای اثر عمل‌آوری در دراز مدت در خاک با ضخامت زیاد انجام شود تا بتوان با قاطعیت بیشتری در مورد این نتیجه بحث کرد. با این حال، در محدوده تحقیق حاضر می‌توان این نتیجه را به تبخیر گازوئیل در طی زمان ارتباط داد [۵ و ۲۴].

نتیجه دیگری که از منحنی‌های تنش-کرنش حاصله از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده می‌توان دریافت این است که به‌طور کلی آلودگی خاک به گازوئیل باعث کاهش قابل توجهی در مقدار کرنش نهایی نمونه‌ها می‌شود. همچنین مطابق شکل ۱۲ افزودن نانوذرات به خاک‌های آلوده سبب افزایش در مقدار کرنش لحظه گسیختگی نمونه‌ها به‌ویژه در دوره عمل‌آوری ۷ روزه می‌شود. البته همانطور که ملاحظه می‌شود در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه کرنش نهایی در مقایسه با نمونه‌های ۷ روزه دارای مقدار کمتری می‌باشد.

۴-۳- عکس برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

از ساختار میکروسکوپی بخش ریزدانه خاک‌ها می‌توان به‌عنوان شاخصی برای شناسایی بخش‌های مختلف و ارزیابی ویژگی‌های درشت ساختار خاک‌ها استفاده کرد [۳۲]. از جمله روش‌های مدرن برای مشاهده ساختار خاک‌ها در مقیاس نانو می‌توان به میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به‌صورت عکس برداری از سطح ذرات اشاره کرد. با استفاده از این روش می‌توان اطلاعات مفیدی از ویژگی‌های ریزساختار خاک مانند اندازه، شکل و مورفولوژی ساختار و ذرات خاک را بدست آورد [۳۳ و ۳۴]. عملیات مطالعه با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی نمونه‌های متراکم شده در مقدار آب بهینه خود در حالت‌های بدون آلودگی، با آلودگی ۸ درصد گازوئیل، با آلودگی ۸

حاصله مربوط به مقدار ۲ درصد وزنی خاک آلوده خشک می‌باشد.
 * نمونه‌های آلوده اصلاح‌شده با کلویزیت B۳۰ با افزایش مقدار مقاومت فشاری محدودنشده و کرنش نهایی مواجه شدند که بیشترین مقدار مقاومت فشاری برای نمونه‌های حاوی ۰/۷ درصد وزنی خاک آلوده خشک حاصل شد.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

ω	رطوبت، %
$^{\circ}C$	دما
S	خاک
G	گازوئیل
NC	نانورس مونت‌موریلونیت
OC	ارگانورس
UCS	مقاومت فشاری محدودنشده

علائم یونانی

γ	دانسیته، kN/m^3
----------	-------------------

مراجع

- [1] J.R. Oluremi, A.P. Adewuyi, A.A. Sanni, Compaction characteristics of oil contaminated residual soil, *Engineering and Technology*, 6(2) (2015) 75-87.
- [2] E.C. Shin, M.D. Das, Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 11(3) (2001) 220-226.
- [3] S.J. Shah, A.V. Shroff, J.V. Patel, K.C. Tiwari, D. Ramakrishan, Stabilization of fuel oil contaminated soil - A Case Study, *Geotechnical and Geological Engineering*, 21 (2003) 415-427.
- [4] M. Khamehchian, A.H. Charkhabi, M. Tajik, Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*, 89 (2007) 220-229.
- [5] A.K. Nazir, Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay, *Alexandria Engineering Journal*, 50 (2011) 331-335.
- [6] Z.N. Rasheed, F.R. Ahmed, H.M. Jassim, Effect Of Crude

توجه در فضای خالی بین ذرات شده است و لذا درجه فلوکولاسیون خاک‌های تثبیت‌شده در مقایسه با خاک آلوده و خاک طبیعی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. لذا می‌توان در محدوده تحقیق حاضر بیان کرد که افزودن نانورس مونت‌موریلونیت و ارگانورس به خاک آلوده به گازوئیل به سبب تغییراتی که در بافت و ساخت خاک ایجاد می‌کند، موجب بهبود عملکرد و بازیابی خصوصیات مهندسی کاهش یافته می‌شود. نویسندگان با توجه به اهمیت اثرات زیست‌محیطی آلاینده‌های هیدروکربنی و به‌منظور ارزیابی کارایی نانوذرات به‌عنوان مصالح سازگار با محیط‌زیست توصیه می‌کنند که در قالب مطالعات صحرایی عملکرد این افزودنی‌ها مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گیرد و در صورت حصول نتایج مطلوب به‌عنوان یک روش مناسب مورد توجه قرار گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی تأثیر افزودن نانورس مونت‌موریلونیت و ارگانورس بر خصوصیات مکانیکی خاک ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده نقش قابل‌توجه این مواد افزودنی در بازیابی خواص مقاومتی از دست‌رفته خاک‌های آلوده‌شده با گازوئیل است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی نتایج اصلی تحقیق حاضر در زیر آمده است:

* خاک ماسه رس‌دار بکر در اثر آلودگی به ۶ و ۸ درصد گازوئیل با کاهش دانسیته خشک حداکثر، مقدار آب بهینه و مقاومت فشاری محدودنشده روبرو شد.

* در نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده خاک آلوده به گازوئیل برخلاف نمونه‌های بدون آلودگی، طی عمل‌آوری ۲۸ روز علی‌رغم فقدان واکنش‌های پوزولانی، افزایش مقاومت فشاری مشاهده شد. در نتیجه این امر در مطالعات مربوط به بهسازی خاک‌های آلوده ترکیبات هیدروکربنی به‌وسیله افزودنی، نیاز هست، عمل‌آوری در نمونه‌های آلوده انجام گیرد.

* افزودن نانورس مونت‌موریلونیت و ارگانورس منجر به افزایش مقدار آب بهینه و کاهش دانسیته خشک حداکثر خاک آلوده گردید.
 * نتایج مربوط به بارگذاری محوری خاک آلوده تثبیت‌شده با نانورس مونت‌موریلونیت نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری محدودنشده و کرنش در لحظه گسیختگی بوده و بیشترین مقاومت

- 2010, pp. 369- 382.
- [17] M.A. Nasr, Utilisation of oil-contaminated sand stabilised with cement kiln dust in the construction of rural roads, *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10) (2014) 889-905.
- [18] L. Wang, D.C.W. Tsang, C.S. Poon, Green remediation and recycling of contaminated sediment by waste-incorporated stabilization/solidification, *Chemosphere*, 122 (2015) 257-264.
- [19] Y. Xi, X. Wu, X. H., Solidification/stabilization of Pb-contaminated soils with cement and other additives, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 23(8) (2014) 887-898.
- [20] S. Paria, Surfactant-enhanced remediation of organic contaminated soil and water, *Advances in Colloid and Interface Science*, 138(1) (2008) 24-58.
- [21] R.A. Kuhnel, Foreword to Handbook of Clay Science, , Edited by F. Bergaya, B.K.G. Theng and G. Lagaly, *Developments in Clay Science*, Vol. 1, 2006.
- [22] N. Ghasabkolaei, A.J. Choobbasti, N. Roshan, S.E. Ghasemi, Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3) (2017) 639-650.
- [23] G.D. Yuan, B.K.G. Theng, G.J. Churchman, W.P. Gates, Clays and clay minerals for pollution control, in: F. Bergaya, G. Lagaly (Eds.), Elsevier Science, 2013, pp. 587-644.
- [24] S.M. Zomorodian, S. Moghispour, A. Soleymani, B. O'Kelly, Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives, *Clay Science*, 140 (2017) 140-147.
- [25] ASTM, Annual Book of ASTM Standards, in, Philadelphia, 2003.
- [26] R.N. Yong, B.P. Warkentin, *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier Scientific, Amsterdam, 1975.
- [27] R.N. Yong, *Geoenvironmental Engineering: Contaminated Soils, Pollutant Fate and Mitigation*, CRC Press, 2001.
- [28] M.R. Taha, O.E. Taha, Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior, *J. Nano. Res*, 14(10) (2012) 1-13.
- Oil Products On The Geotechnical Properties Of Soil, *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 186 (2014) 353-362.
- [7] H.A. Alsanad, N.F. Ismael, Aging effect on oil contaminated Kuwaiti sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (1997) 290-294.
- [8] Z.B. Liu, S.Y. Liu, Y. Cai, Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil, *Journal of Central South University*, 22 (2015) 4837-4843.
- [9] E.C. UKPONG, I.C. UMOH, EFFECT OF CRUDE OIL SPILLAGE ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF LATERITIC SOIL IN OKOROETE, EASTERN OBOLOLO, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(1) (2015) 12-24.
- [10] G. Harsh, A. Patel, B. Himanshu, P. Tiwari, Effect of Rate of Crude Oil Contamination on Index Properties and Engineering Properties of Clays and Sands, *Indian Journal of Science and Technology*, 9(30) (2016).
- [11] S.A. Nasehi, A. Uromeihy, M.R. Nikudel, Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34 (2016) 333-345.
- [12] P.L. Srivastava, B.P. Ramudu, A. Prasad, stabilization of engine oil contaminated soil using fly ash, in: *Indian Geotechnical(IGC)*, Guntur, India, 2009, pp. 361-365.
- [13] K. Moharamzade Saraye, S.D. Mohammadi, The study of workability of lime on improvement of oil materials contaminated soils around the Tabriz oil refinery, *MJCE*, 15 (2015) 223-234.
- [14] A.R. Estabragh, M.M. Kholoosi, F. Ghaziani, A.A. Javadi, Stabilization and Solidification of a Clay Soil Contaminated with MTBE, *Environmental Engineering and Technology*, 143(9) (2017) 1-8.
- [15] M.M. Kholoosi, A.R. Estabragh, J. Abdollahi, Investigation of the effect of cement on the stabilization of contaminated soil with anthracene, *Sharif Journal of Civil Engineering*, (2018) 1-14 (Persian).
- [16] L. Srivastava, B.R. Paramkusam, A. Prasad, Stabilisation of Engine Oil Contaminated Soil Using Cement Kiln Dust, in: *GEOtrendz (Ed.) Indian Geotechnical Conference*,

- [32] R.H. Bennett, W.R. Bryant, M.H. Hulbert, *Microstructure of Fine-Grained Sediments: From Mud to Shale*, Springer, 1991.
- [33] G. Kollensperger, G. Friedbacher, A. Krammer, M. Grasserbauer, Application of atomic force microscopy to particle sizing, *Journal of Analytical & Bioanalytical Chemistry*, 363(4) (1999) 323-332.
- [34] M.R. Yalamanchili, S. Veeramasuneni, M.A.D. Azevedo, J.D. Miller, Use of atomic force microscopy in particle science and technology research, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 133(1-2) (1998) 77-88.
- [29] M.H. Baziar, H. Ghazi, S.M. Mirkazemi, Effect of nanoclay on engineering properties of soil, in: *Fourth Int. Con. of Geotec. Eng. and Soil Mech*, Tehran, Iran, 2010.
- [30] Z.H. Majeed, M.R. Taha, Behavior of Nanomaterials in Soft Soils: A Case Study, in: M. Ghorbanpour, K. Manika, A. Varma (Eds.) *Nanoscience and Plant-Soil Systems. Soil Biology*, Springer, Cham, 2017, pp. 219-256.
- [31] A.M. Eissa, Effects of gasoline-contamination on geotechnical properties of clayey soil, in: *African Young Geotechnical Engineers Conference (AYGEC'16)*, Ghana, 2016, pp. 12.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Shahidi, F. Farrokhi, F. Asemi, *Experimental study of the effect of adding clay nanoparticles to improve strength properties of contaminated clayey-sand soil with gasoil*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(6) (2020) 1145-1162

DOI: [10.22060/ceej.2018.14287.5612](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14287.5612)



