تأثیر آلودگی گازوئیل و تیمار نانوسیلیس بر رفتار برشی، مقاومتی و تحکیمی ماسه رسی

مقاله علمی-پژوهشی

*علی لکی روحانی (نویسنده مسئول)، استاد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
بهرام عباسی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
علیرضا معظمی، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rou001@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۱۲۰-۹۱

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی اثرات هم‌زمان آلودگی گازوئیلی (۰ تا ۱۰ درصد) و افزودن نانوسیلیس (۰، ۱ و ۲ درصد) بر خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه رسی (۶۰ درصد ماسه و ۴۰ درصد کائولینیت) می‌پردازد. در مجموع ۱۸ مخلوط تهیه و آزمایش‌های وزن مخصوص، تراکم، حدود اتربرگ، نفوذپذیری، تحکیم، مقاومت فشاری تک‌محوری، نسبت باربری کالیفرنیا و برش مستقیم انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که رفتار خاک حاصل برهم‌کنش میان گازوئیل (روان‌کنندگی، مسدودسازی منافذ و آب‌گریزی) و نانوسیلیس (فعال‌سازی سطحی، ریزپیوندسازی و کلوخه‌شدگی) است. افزایش گازوئیل موجب کاهش پیوسته وزن مخصوص، کاهش رطوبت بهینه و افزایش حداکثر وزن واحد خشک می‌شود. مقاومت فشاری تک محوری در حدود ۴ درصد آلودگی به اوج می‌رسد (۳۲ درصد افزایش نسبت به نمونه بدون آلودگی) و سپس در ۱۰ درصد، کاهشی ۲۵ درصدی نشان می‌دهد. نانوسیلیس ۱ درصد بالاترین مقاومت فشاری تک محوری را نتیجه می‌دهد. در مقابل، نسبت باربری کالیفرنیا با افزایش گازوئیل به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد و نانوسیلیس ۲ درصد بالاترین مقادیر را به همراه دارد. نتایج برش مستقیم نشان می‌دهد که مقاومت برشی کل با افزایش آلودگی به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد؛ این کاهش حاصل رفتار متفاوت دو مؤلفه است: چسبندگی روندی غیریکنواخت با اوج در ۴ درصد آلودگی دارد (افزایش اولیه به‌دلیل متراکم‌سازی و کاهش ثانویه به‌دلیل اختلال در لایه دوگانه پراکنده)، در حالی که زاویه اصطکاک داخلی روندی پیوسته و یکنواخت کاهشی نشان می‌دهد. نانوسیلیس هر دو مؤلفه چسبندگی و اصطکاک را بهبود می‌بخشد و نمونه‌های حاوی ۱ درصد بالاترین مقادیر را دارند. نفوذپذیری با افزایش گازوئیل به‌دلیل مسدودشدن منافذ کاهش می‌یابد، در حالی که پارامترهای تحکیم روندی غیریکنواخت با اوج در سطوح آلودگی متوسط دارند. درصد بهینه نانوسیلیس (۱ درصد) اثرات نامطلوب گازوئیل را تعدیل کرده و عملکرد مکانیکی را بهبود می‌بخشد؛ یافته‌هایی که می‌تواند برای مدیریت خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها راهگشا باشد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش برش مستقیم، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، ضریب تحکیم، ضریب نفوذپذیری

۱- مقدمه

آلودگی خاک به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که طی آن یک یا چند عامل آلاینده در بستر خاک تجمع یافته و با غلظت و دوامی فراتر از آستانه تحمل طبیعی، تغییرات منفی چشمگیری در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن ایجاد می‌نمایند. این وضعیت نه‌تنها

کارکردهای طبیعی خاک را مختل می‌کند، بلکه پیامدهای جدی برای سلامت انسان، موجودات زنده، پوشش گیاهی و حتی سازه‌های انسان‌ساخت به همراه دارد (Van der Perk 2013). منابع تولید این آلاینده‌ها عمدتاً به فعالیت‌های شهری، صنعتی و کشاورزی باز می‌گردد؛ موادی که در صورت فراتر رفتن از ظرفیت خودپالایی خاک، می‌توانند زنجیره‌هایی از دگرگونی‌های زیانبار را در محیط‌های خاک، آب و هوا رقم زنند. در این میان، نفت خام و فرآورده‌های تصفیه‌شده آن به‌عنوان یکی از فراگیرترین و بحران‌آفرین‌ترین عوامل آلودگی خاک در سطح جهانی شناخته می‌شوند. با افزایش روزافزون تقاضای انرژی در جهان، ابعاد زیست‌محیطی این آلودگی نیز گسترده‌تر شده، چرا که فعالیت‌های اکتشاف، پالایش و حمل ونقل نفت با شتاب بیشتری دنبال می‌شوند. بر اساس پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، مصرف جهانی نفت در سال ۲۰۲٤ به ۱۰۱/۸ میلیون بشکه در روز خواهد رسید (بدون احتساب سوخت‌های زیستی و دربرگیرنده مشتقات زغال‌سنگ و گاز طبیعی). این آژانس همچنین اعلام کرده است که ایالات متحده با مصرف ۱۹ میلیون بشکه در روز، پرمصرفترین کشور جهان در این سال بوده (با کاهش یک دهم درصدی نسبت به سال قبل)، و چین با ١٦/٤ میلیون بشکه در روز در جایگاه دوم قرار دارد که کاهشی معادل ۱/۲ درصد را تجربه کرده است (British Petroleum. Statistical review of world energy 2023).

پس از وقوع نشت، آلاینده‌های نفتی تحت تأثیر نیروی ثقل، مسیری عمودی را در نیمرخ خاک طی می‌کنند و به‌سرعت به لایه‌های زیرین نفوذ نموده و تهدیدی جدی برای سفره‌های آب زیرزمینی به شمار می‌روند. این آلاینده‌ها پس از برخورد با سطح ایستایی، با جریان آب زیرزمینی در جهت افقی به حرکت ادامه داده و از طریق پدیده‌هایی نظیر افزایش مویینگی و نوسانات فصلی تراز آب، می‌توانند بار دیگر به نواحی مجاور خاک بازگشته و آلودگی ثانویه ایجاد نمایند (Van der Perk 2013). هیدروکربن‌های نفتی ذاتاً ترکیباتی شیمیایی خنثی و غیرقابل اختلاط با آب هستند؛ این ویژگی سبب می‌شود تا آنها به شکل سیالات مجزا با فاز غیرآبی درون حفرات خاک به دام افتاده و برای مدت‌های طولانی در ماتریس خاک باقی بمانند. حضور این مواد، اثرات محسوسی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک از جمله بافت، ساختمان و مقاومت برشی آن می‌گذارد و عملکرد ژئوتکنیکی خاک را دستخوش تغییر می‌کند. دامنه و شدت این دگرگونی‌ها اما یکنواخت نبوده و به سه عامل بنیادین وابسته است: ویژگی‌های ذاتی خاک (از قبیل توزیع ابعاد دانه‌ها و نوع کانی‌های رسی)، ماهیت شیمیایی فرآورده نفتی و نیز غلظت آلاینده موجود در محیط. تأثیر سطوح گوناگون آلودگی هیدروکربنی بر رفتار مهندسی خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه، یکی از محورهای پرتکرار پژوهش‌های ژئوتکنیکی در سال‌های اخیر بوده است.

در یک مطالعه تجربی بر روی ماسه کویت، مشاهده گردید که آلودگی نفت خام سبب کاهش همزمان نفوذپذیری و مقاومت برشی خاک می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که میزان این کاهش، تابع مستقیمی از غلظت آلاینده بوده و با افزایش آن، تشدید می‌شود (Al-Sanad Hasan et al. 1995).

در یک بررسی تجربی سیستماتیک بر روی سه نوع خاک (CL, SM, SP) از جنوب ایران، اثرات آلودگی نفت خام مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها حاکی از آن بود که افزایش محتوای نفت خام به‌طور پیوسته باعث کاهش نفوذپذیری، رطوبت بهینه، حداکثر چگالی خشک و شاخص خمیری در هر سه نوع خاک می‌گردد. اما پاسخ مقاومت فشاری تک‌محوری الگویی غیریکنواخت نشان داد؛ به‌گونه‌ای که در سطوح پایین آلودگی، افزایشی جزئی و سپس روند کاهشی مشاهده شد. همچنین از آزمایشات انجام شده دریافت شد که چسبندگی برای خاکهای SP, SM روند افزایشی و برای خاک CL روند کاهشی دارد. زاویه اصطکاک داخلی در خاک CL با افزایش مقدار آلودگی نفت خام همبستگی مثبت نشان داد، حال آنکه در خاکهای SP, SM رابطه‌ای معکوس مشاهده گردید (Khamehchiyan et al. 2007).

تأثیر آلودگی هیدروکربنی بر رفتار هیدرومکانیکی خاک در پژوهش‌های متعددی به اثبات رسیده است. در یکی از این مطالعات، مشاهده گردید که آلودگی گازوئیل منحنی نگهداشت آب–خاک را دستخوش تغییر می‌سازد و ظرفیت نگهداشت آب را در مکش‌های ماتریک زیر ۱ بار نسبت به نمونه‌های آلوده نشده افزایش می‌دهد؛ ضمن اینکه تغییراتی در pH خاک نیز ثبت شد (Fallah et al. 2015). در راستای تکمیل این یافته‌ها، بررسی دیگری نقش ترکیب نفت را مورد تأکید قرار داد و نشان داد که ترکیبات آلی می‌توانند ظرفیت نگهداشت آب خاک‌های

شنی-سیلتی را در شرایط فشار بالاتر کاهش دهند (Wei et al. 2019). به‌طور کلی، یافته‌های فوق حاکی از آن است که تأثیر نفت بر نگهداشت آب، پدیده‌ای پیچیده بوده و به نوع خاک و ویژگی‌های خاص آلاینده وابسته است.

در یک مطالعه تجربی بر روی خاک CL واقع در یکی از سایت‌های پالایشگاهی تهران، اثر افزایش غلظت نفت خام بر پارامترهای ژئوتکنیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش آلاینده، حداکثر چگالی خشک، حد خمیری و زاویه اصطکاک داخلی را افزایش می‌دهد و در مقابل چسبندگی و رطوبت بهینه را کاهش می‌دهد (Kermani and Ebadi 2012). در پژوهش جداگانه دیگری بر روی کائولینیت آلوده به گازوئیل، مشاهده شد که چسبندگی با افزایش غلظت آلاینده اندکی افزایش می‌یابد، حال آنکه زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی کاهش نشان می‌دهند (Khosravi et al. 2013). مجموعه این تحقیقات بر روی خاک‌های ریزدانه، مؤید وقوع تغییرات ریزساختاری قابل‌توجه در نتیجه آلودگی هیدروکربنی است.

تأثیر هیدروکربن‌ها بر بافت خاک در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس یکی از این تحقیقات، حضور آلاینده‌های نفتی سبب افزایش قابل‌توجه در تعداد و اندازه حفرات و منافذ خاک‌های آلوده نسبت به حالت طبیعی یعنی خاک غیر آلوده می‌گردد (Izdebska-Mucha and Trzci´nski 2008). در پژوهشی دیگر با تمرکز بر مقیاس ریزساختار، خاک رس آلوده به سوخت دیزل ارزیابی شد و مشاهده گردید که آلودگی، نیروهای دافعه الکترواستاتیک بین ذرات را تضعیف می‌کند؛ این امر، تفسیری فیزیکی-شیمیایی برای دگرگونی‌های بافتی گزارش‌شده در پژوهش‌های قبلی را توجیه می‌کند (Trzciński et al. 2015).

تأثیر آلودگی گازوئیل بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس CL در یک مطالعه تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که این آلاینده، چسبندگی و حدود اتربرگ را افزایش داده، و در مقابل راندمان تراکم و زاویه اصطکاک داخلی را کاهش می‌دهد (Nasehi et al. 2016). با انجام آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مشاهده شد که مقاومت فشاری تک محوری در مقابل درصد آلودگی رفتاری غیریکنواخت دارد؛ به این ترتیب که مقاومت فشاری تک محوری در غلظت‌های پایین آلاینده روندی افزایشی دارد، اما با افزایش سطح آلودگی، روند نزولی می‌شود. در پژوهشی دیگر بر روی خاک رس، کاهش مقاومت برشی ناشی از آلودگی نفت خام به اثبات رسید (Hosseini et al. 2019). این نتایج تایید کننده مطالعات دیگری بود که بر روی خاک رس ایلیت (CH) انجام شده بود، جایی که آلودگی گازوئیل باعث کاهش خواص تراکمی و مقاومت برشی خاک رس ایلیت شد (Safehian et al. 2018). افزون بر این، در خاک SM آلوده به گازوئیل، افزایش چسبندگی به‌عنوان یکی از پیامدهای حضور هیدروکربن‌ها گزارش شده است (Kererat 2019).

در مطالعه‌ای دیگر تأثیر آلودگی نفت سفید بر رفتار مهندسی ماسه SPدر چارچوب یک پژوهش آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر چگالی خشک الگویی غیریکنواخت در پاسخ به افزایش آلاینده دارد؛ بدین صورت که در غلظت‌های پایین (۳ تا ٦ درصد) افزایش یافته و سپس با افزایش سطح آلودگی، روند کاهشی می‌شود. سایر پارامترهای مورد بررسی نیز حاکی از آن بودند که آلودگی نفت سفید، زاویه اصطکاک داخلی، رطوبت بهینه و نفوذپذیری را کاهش داده، ولی در مقابل چسبندگی را افزایش می‌دهد (Sarmadi et al. 2019).

این تفاوت در رفتار، بیانگر یک قاعده اساسی در مکانیک خاک‌های آلوده است، بدین معنی که در خاک‌های دانه‌ای نظیر ماسه SP، خواص مهندسی عمدتاً توسط مشخصات فیزیکی ذرات و سیال منفذی تعیین می‌شوند، حال آنکه در خاک‌های رسی، بافت، ساختار و اندرکنش‌های فیزیکی و شیمیایی با سیال منفذی نقش تعیین‌کننده دارند؛ همانگونه که در تحقیقات پیشین نیز این پدیده به تأیید رسیده است (Zhao 1996).

تأثیر آلودگی هیدروکربنی بر حد روانی خاک‌های لوم سیلتی و لوم شنی در یک مطالعه تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که این آلاینده به‌ترتیب سبب کاهش ۳۸ و ١٦ درصدی این پارامتر می‌گردد. افزون بر این، کاهش نفوذپذیری خاک در اثر آلودگی نفتی نیز در همین پژوهش مستند شده است (Mekkiyah et al. 2023). در عرصه ژئوتکنیک، به‌کارگیری ژئوسنتتیک‌ها رویکردی رایج در بهسازی مکانیکی خاک محسوب می‌شود. اما از اواخر سده بیستم، پیشرفت‌های فناوری نانو، زمینه‌ساز مطالعات متعددی گردیده که کاربرد مؤثر نانوذرات را در بهبود مشخصات خاک به اثبات رسانده‌اند. در یکی از این

پژوهش‌های جامع، اثر اندازه ذرات نانوسیلیکا و میزان جایگزینی آن بر ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و ریزساختاری خاک سیمانی‌شده به‌روش سیستماتیک بررسی شد. یافته‌ها حاکی از آن بود که ذرات ریزتر نانوسیلیکا، فرآیندهای اولیه را تسریع می‌نمایند، در حالی که ذرات درشت‌تر پس از ۱۴ روز عمل‌آوری، عملکرد مؤثرتری از خود نشان می‌دهند (Bahmani et al. 2016).

تأثیر افزودنی‌های نانورس و نانوسیلیکا بر افزایش مقاومت خاک رس ماسه‌ای، در دو حالت فاقد آلودگی و آلوده به نفت سفید، در یک مطالعه تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد ۰٫۵ تا ۲٫۵ درصد از هر یک از این نانومواد، باعث بهبود چشمگیر مقاومت خاک در شرایط غیرآلوده می‌گردد. برای خاک‌های آلوده به ۱۲ درصد وزنی نفت سفید نیز، بیشترین مقدار مقاومت اوج به‌ترتیب با مقادیر ۲ درصد نانورس و ۲٫۵ درصد نانوسیلیکا به دست آمد (Ali Zomorodian et al. 2017).

پژوهش‌های پیشین در حوزه ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده، عمدتاً به بررسی جداگانه خاک‌های دانه‌ای و چسبنده پرداخته‌اند. شایان ذکر است که خاک‌های رسی و چسبنده به دلیل تفاوت‌های بنیادین در ترکیب شیمیایی میان کانی‌های خاک و هیدروکربن‌ها، رفتاری پیچیده در مواجهه با آلودگی نفتی از خود نشان می‌دهند که پیامد آن، تغییراتی متنوع و اغلب متناقض در خواص خاک خواهد بود. در سوی دیگر، تاکنون هیچ مطالعه‌ای به بررسی روش‌مند اثرات همزمان آلودگی دیزل و تیمار با نانوسیلیکا بر خواص ژئوتکنیکی مخلوط ماسه–رس نپرداخته است. با توجه به اینکه آلودگی دیزل موجب آبگریزی و تضعیف برهمکنش‌های رس–آب می‌گردد، در حالی که نانوسیلیکا با ماهیت بسیار آبدوست و سطح ویژه بزرگ، در جهت مخالف عمل می‌کند، کنش متقابل میان این دو سازوکار متضاد (آبگریزی ناشی از دیزل در برابر آبدوستی ناشی از نانوسیلیکا) تاکنون گزارش نشده است. در پژوهش حاضر، مجموعه‌ای از داده‌های تجربی پیرامون اثر ترکیبی این مکانیسم‌ها در یک مخلوط واقعی ماسه–رس ارائه می‌گردد که در ادبیات فنی پیشینه‌ای ندارد.

انتخاب مخلوط‌های ماسه–کائولینیت به‌عنوان ماده مورد مطالعه در این تحقیق، مبتنی بر سه ملاحظه اساسی بوده است: نخست، خاک‌های طبیعی در اغلب موارد به‌صورت آمیزه‌ای از بخش‌های درشت‌دانه و ریزدانه ظاهر می‌شوند. دوم، کائولینیت یکی از فراوان‌ترین و پرکاربردترین کانی‌های رسی در نقاط مختلف جهان است. سوم، علی‌رغم اینکه پژوهش‌های پیشین در زمینه خاک‌های آلوده بیشتر به بررسی ماسه یا رس خالص پرداخته‌اند، مطالعه بر روی خاک‌های طبیعی با بافت ترکیبی بسیار اندک است. بنابراین، تأثیر کمی و کیفی میزان رس بر رفتار مهندسی مخلوط‌های آلوده همچنان به‌درستی شناسایی نشده و این تحقیق در پی پاسخ‌گویی به این خلأ پژوهشی طراحی گردیده است.

گستره موضوعی و ضرورت انجام پژوهش

خلیج فارس و دریای عمان، به‌دلیل برخورداری از منابع نفتی گسترده، منطقه‌ای راهبردی در حوزه انرژی محسوب می‌شود که پالایشگاه‌های متعددی در آن مستقر هستند و روزانه مقادیر قابل‌توجهی سوخت و فرآورده‌های نفتی را تأمین می‌نمایند. با این حال، این فعالیت‌های صنعتی، همراه با پدیده قاچاق سوخت، چالش‌های زیست‌محیطی جدی را ایجاد کرده‌اند. در این میان، گازوئیل که از طریق نشت یا تخلیه‌های غیرمجاز وارد خاک می‌شود، سهم عمده‌ای در آلودگی خاک منطقه دارد. بنابراین، شناخت دقیق رفتار خاک‌های آلوده به این فرآورده نفتی و ارائه مدل‌های رفتاری قابل‌اعتماد، از اولویت‌های پژوهشی محسوب می‌شود. در مطالعه کنونی، مخلوطی از ماسه و رس با نسبت‌های وزنی مختلف گازوئیل آلوده گردید و سپس با سه سطح متفاوت از نانوسیلیس اصلاح شد تا تأثیرات ژئوتکنیکی و تغییرات رفتاری ایجادشده مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مصالح مصرفی، چگونگی تهیه نمونه‌ها و آزمایشات

۲-۱- مصالح مصرفی

در پژوهش حاضر، تأثیر آلودگی ناشی از گازوئیل بر رفتار ژئوتکنیکی خاکی با بافت شنی-لومی، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های نظام‌مند آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های آلوده و غیرآلوده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌های خاک با اختلاط رس و ماسه به نسبت وزنی ثابت ۶۰ به ۴۰ (ماسه در مقابل رس کائولینیت) ساخته شدند. پارامترهای متغیر در این بررسی شامل درصد آلاینده گازوئیل در شش سطح (صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی) و مقدار نانوسیلیس در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ درصد

وزنی) بودند که در مجموع، ۱۸ ترکیب نمونه‌ی متفاوت را پدید آوردند. به منظور افزایش دقت و پایایی نتایج، کلیه آزمایش‌ها با تکرار انجام شدند. برای شناسایی آسان نمونه‌ها، سیستم نام‌گذاری منسجمی تدوین گردید که بر اساس آن، هر نمونه با استفاده از درصد گازوئیل (دیزل) (D) و درصد نانوسیلیس (N) مشخص می‌شود؛ به عنوان مثال منظور از نمونه با نام D0-N0 نمونه‌ای است که فاقد آلاینده گازوئیل و همچنین فاقد نانوسیلیس می‌باشد (خاک تمیز)، و نمونه با نام اختصاری D1-N1 معرف نمونه خاک حاوی ۱٪ گازوئیل و ۱٪ نانوسیلیس، و نمونه با نام D10-N2 نشان‌دهنده‌ی نمونه‌ای با ۱۰٪ گازوئیل و ۲٪ نانوسیلیس است.

ماسه به‌کاررفته در این پژوهش، نوعی ماسه سیلیسی با دانه‌بندی یکنواخت (ماسه فیروزکوه با شماره ۱۷۱) است که از معدن فیروزکوه در شمال‌شرقی تهران تهیه شده است. همچنین خاک رس مورد استفاده از نوع کائولینیت بود که توسط شرکت صنایع خاک چینی ایران تأمین شده و از معدن جلفا در شمال‌غربی ایران برداشت شده است. به منظور شناسایی ترکیب کانی‌شناسی اولیه ماسه و کائولینیت، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) انجام پذیرفت. همچنین، برای تعیین ترکیب شیمیایی هر دو ماده، از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) استفاده گردید که نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری بر روی نمونه‌های ماسه و کائولینیت، مطابق با استاندارد ASTM D422-63 (2014) انجام شدند. منحنی‌های توزیع اندازه ذرات مربوط به ماسه، رس و مخلوط ماسه-رس در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، ماسه در گروه SP، رس در گروه CL و مخلوط ماسه-رس در گروه SC جای می‌گیرند.

نانوسیلیس مورد استفاده از شرکت تحقیقات نانومواد ایران تهیه شد و مشخصات فیزیکی وشیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است. افزون بر این، ویژگی‌های اساسی گازوئیل مصرفی در این مطالعه – که از یک جایگاه سوخت محلی تأمین گردید، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش فلورسنس اشعه ایکس برای ماسه سیلیسی و رس کائولینیت

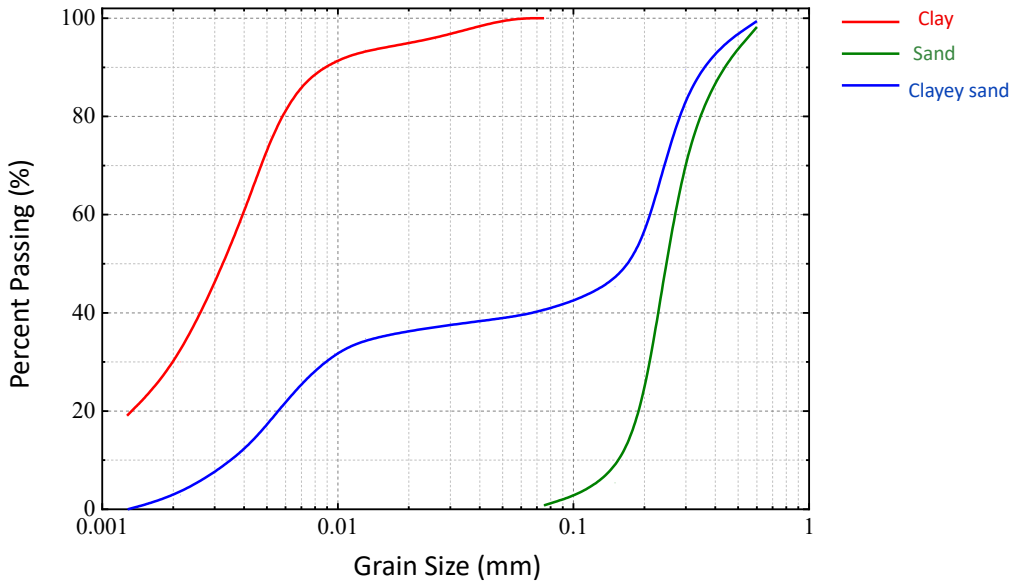
مولفه‌های شیمیایی	LOI	K_2O	Na_2O	MgO	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
ماسه (٪)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.43	0.12	0.56	0.36	97.69
کائولینیت (٪)	6.77	0.93	0.19	0.42	0.95	0.42	1.63	15.00	73.29

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نانو سیلیس

خصوصیات	واحد	مقدار
رنگ	---	خاکستری تیره
درصد خلوص	%	۸۵
شکل	---	پودر
وزن ویژه	Kg/m^3	۲۰۰–۳۰۰
اندازه	μm	۰,۱–۰,۳۰
سطح ویژه	m^2/g	۱۵

جدول ۳. خصوصیات فنی گازوئیل

خصوصیت	واحد	مقدار
دانسیته	g/m^3	۰٫۸۵
نقطه جوش	C°	۱۸۰–۳۸۵
نقطعه اشتعال	C°	۵۵–۸۰
رنگ	---	زرد کهربایی
ویسکوزیته	mm^2/s	۲–٤



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی رس کائولینیت، ماسه سیلیسی فیروزکوه و مخلوط ماسه- رس (٤٠٪ رس و ٦٠٪ ماسه)

۲-۲- تهیه مخلوط‌ها

پیش از انجام اختلاط خاک‌ها با نسبت‌های تعیین‌شده، ماسه و رس کائولینیت هر یک به‌طور مجزا در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲٤ ساعت خشک گردیدند. سپس مواد خشک‌شده بر اساس نسبت وزنی ٦۰ درصد ماسه به ٤۰ درصد رس با یکدیگر مخلوط شدند. برای تهیه نمونه‌های آلوده به گازوئیل، سوخت دیزل به‌تدریج و با غلظت‌های ۲، ٤، ٦، ۸ و ۱۰ درصد وزنی نسبت به جرم خاک خشک، به نمونه‌ها افزوده شد. لازم به ذکر است که در پژوهشی که بر روی خاک رس غیراشباع انجام شده بود، گزارش گردید که این نوع خاک حداکثر توانایی نگهداشت ۱۲/٦ درصد گازوئیل را داشته و مقادیر بیش از آن، دفع خواهد شد (Hernández-Mendoza 2021).

برای دستیابی به اختلاط یکنواخت، از روش اختلاط دو مرحله‌ای استفاده گردید که شامل اختلاط دستی اولیه به مدت حدود ۳ تا ۵ دقیقه و سپس اختلاط مکانیکی با کمک همزن استاندارد ملات آزمایشگاهی با سرعت دورانی ۱۰ ± ۳۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه بود. در پژوهش حاضر، مدت زمان عمل‌آوری یک ماهه در نظر گرفته شد که در پژوهش‌های پیشین درباره خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها و فرآورده‌های نفتی، رویه‌ای رایج و پذیرفته‌شده

است. بر این اساس، نمونه‌های خاک آلوده در کیسه‌های پلاستیکی ضخیم قرار گرفته و در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و دور از تابش مستقیم نور خورشید نگهداری شدند تا به حالت تعادل برسند. گازوئیل، به عنوان یک سوخت با تقطیر متوسط، دارای فشار بخار پایینی است و بر خلاف بنزین، در شرایط عادی آزمایشگاهی به کندی و به‌طور ناقص تبخیر می‌شود.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حتی لایه‌های نازک گازوئیل روی سطوح باز ممکن است ۲۴ تا ۴۸ ساعت زمان نیاز داشته باشند تا فقط سبک‌ترین اجزای خود را از دست دهند، در حالی که گازوئیل جذب‌شده در درون ماتریس متخلخل خاک، برای هفته‌ها یا ماه‌ها باقی می‌ماند. از آنجا که نمونه‌های این مطالعه در ظروف دربسته با حداقل فضای خالی بالای نمونه نگهداری شدند، فرایند تبخیر به میزان قابل‌توجهی مهار گردید. بنابراین، در طول دوره عمل‌آوری یک‌ماهه، میزان اتلاف ناشی از تبخیر برای اهداف این تحقیق ناچیز در نظر گرفته شد.

پس از پایان دوره عمل‌آوری اولیه، نانوسیلیس با غلظت‌های ۱ و ۲ درصد وزنی، نسبت به وزن خشک خاک، به نمونه‌های انتخاب‌شده افزوده گردید. سپس این نمونه‌های اصلاح‌شده به مدت ۷۲ ساعت دیگر نگهداری شدند تا عمل‌آوری تکمیل شده و به تعادل جدیدی دست یابند. انتخاب بازه زمانی ۳ روزه برای این مرحله، مبتنی بر چند ملاحظه است: نخست آنکه این مدت در پژوهش‌های پیشین به عنوان بازه‌ای استاندارد برای ارزیابی مقاومت اولیه خاک‌های تیمارشده با نانوسیلیس شناخته شده است. دوم آنکه مطالعات نشان می‌دهد نانوسیلیس در مقایسه با مواد افزودنی متداول، می‌تواند فرآیند تحکیم را تسریع نماید؛ به‌گونه‌ای که بهبودهای قابل‌توجهی در خواص مهندسی خاک، از جمله کاهش تغییرات حجمی و افزایش چشمگیر مقاومت، طی چند روز نخست پس از افزودن قابل مشاهده است. سوم آنکه دوره ۷۲ ساعته از نظر فیزیکی، برای بررسی مکانیسم‌های اولیه‌ای همچون اثر پرکنندگی، لخته‌شدگی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی، که در این مخلوط کم‌کلسیم غالب هستند، بسیار مرتبط و کارآمد می‌باشند. با توجه به اینکه در مخلوط مورد آزمایش، واکنش‌های پوزولانی چشم‌گیری انتظار نمی‌رود، افزایش زودهنگام مقاومت عمدتاً ناشی از انباشتگی و لخته‌شدن ذرات است که فرایندهایی هستند که عمدتاً در همان ۷۲ ساعت نخست رخ می‌دهند.

۳-۲- آزمایشات

برنامه آزمایشگاهی این پژوهش شامل اندازه‌گیری خصوصیات پایه و شاخص خاک (شامل وزن مخصوص و حدود اتربرگ)، پارامترهای تراکم، شاخص‌های مقاومتی) از جمله مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت برشی و نسبت باربری کالیفرنیا، ضریب نفوذپذیری و همچنین رفتار تحکیم‌پذیری نمونه‌ها می‌باشد.

توده ویژه جامد خاک (G_s) به عنوان نسبت جرم حجم معینی از ذرات جامد خاک به جرم معادل با همان حجم آب مقطر در دمای معین (معمولاً ۲۳ درجه سانتی‌گراد) تعریف می‌شود. این پارامتر نقشی بنیادین در برقراری ارتباط میان وزن و حجم توده خاک ایفا می‌کند؛ به‌گونه‌ای که با داشتن توده ویژه و نسبت تخلخل (e)، می‌توان وزن واحد خشک یا مرطوب خاک را محاسبه نمود. وزن واحد (یا چگالی) خاک از جمله کمیت‌های کلیدی در تحلیل بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی نظیر نشست‌ها و پایداری شیروانی‌ها به شمار می‌رود. همچنین توده ویژه به عنوان یکی از ورودی‌های ضروری در محاسبات مربوط به آزمایش‌های متداول آزمایشگاهی، از جمله آزمایش تحکیم، کاربرد دارد. در پژوهش حاضر، توده ویژه برای همه نمونه‌های خاک بر اساس استاندارد ASTM D854-23 (2023) تعیین گردیده است.

به منظور تعیین ویژگی‌های تراکمی مخلوط‌های خاک، آزمایش تراکم استاندارد مطابق با روش آورده شده در استاندارد ASTM D698-12 (2021) بر روی نمونه‌ها انجام گردید. مقادیر حداکثر چگالی خشک و رطوبت بهینه برای هر دو گروه نمونه‌های تمیز و آلوده، پس از سپری شدن دوره عمل‌آوری یک‌ماهه، اندازه‌گیری شدند. این پارامترها متعاقباً به عنوان مبنا برای ساخت نمونه‌های مورد نیاز در سایر آزمایش‌ها به کار گرفته شدند تا از یکنواختی شرایط و قابلیت مقایسه نتایج در تمامی آزمون‌ها اطمینان حاصل گردد. شایان ذکر است که تمامی نمونه‌های آزمایشی در رطوبت بهینه متناسب با خود، و با استفاده از خاک‌هایی با ترکیب و میزان آلاینده یکسان، تهیه شدند.

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر اساس استانداردهای ASTM D1883-16 (2021) و AASHTO T 193-13 (2013) بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین، مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) نمونه‌ها مطابق با استاندارد

ASTM D2166/D2166M-16 (2024) به منظور بررسی رفتار مقاومتی آن‌ها مورد آزمون قرار گرفت.

آزمون برش مستقیم کوچک مقیاس برای تعیین مقاومت برشی نمونه‌ها و همچنین تعیین مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آنها تحت سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال انجام شد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D3080/D3080M-23e1 (2026) انجام شد.

حدود اتربرگ برای بخش ریزدانه خاک (عبوری از الک شماره ۲۰۰ با اندازه روزنه ۰٫۰۷۵ میلی‌متر) مطابق با دستورالعمل ASTM D4318-17e1 (2018) تعیین گردید.

به منظور ارزیابی ضریب نفوذپذیری (ضریب هدایت هیدرولیکی) نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف گازوئیل و نانوسیلیس، آزمایش نفوذپذیری با روش بار افتان بر اساس استاندارد ASTM D5084-24 (2024) انجام شد. برای این کار، از یک نفوذسنج با دیواره صلب و قالب استوانه‌ای به ارتفاع ۶۱ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر استفاده گردید.

آزمایش تحکیم تک‌محوری (ادئومتر) بر اساس استاندارد ASTM D2435-96 (2017) به منظور بررسی رفتار نشست در نمونه‌های خاک تمیز و آلوده به گازوئیل انجام شد. نمونه‌ها با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و قطر ۵۰ میلی‌متر، در حالت حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه تهیه شده و پیش از بارگذاری با آب مقطر اشباع گردیدند. برای کاهش اصطکاک جانبی، جداره داخلی حلقه تحکیم با لایه نازکی از گریس سیلیکونی پوشانده شد. تمهیدات ویژه‌ای نیز برای جلوگیری از تبخیر سیال حفره‌ای از سطح سلول تحکیم اتخاذ گردید. فشار تحکیم اعمالی در محدوده ۴۹ تا ۱۵۶۹ کیلوپاسکال قرار داشت و هر گام از تنش بر روی نمونه به مدت ۲۴ ساعت حفظ شد. پس از اتمام مرحله بارگذاری نهایی، نمونه‌ها باربرداری شدند تا ویژگی‌های تورم خاک نیز ارزیابی گردد. دستگاه آزمایش تحکیم مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است. شاخص فشردگی که یکی از ویژگی‌های مهم خاک‌های ریزدانه می‌باشد از نتایج آزمایش بدست آورده شد.

pH خاک با استفاده از نسبت ۱:۲/۵ (وزنی/حجمی) خاک به آب دیونیزه اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خاک خشک‌شده در هوا از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند و ۱۰ گرم از خاک آماده‌شده با ۲۵ میلی‌لیتر آب دیونیزه در یک بشر مخلوط شد. سوسپانسیون به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از همزن مغناطیسی هم زده شد تا به تعادل برسد. پس از کالیبراسیون pH سنج با محلول‌های بافر استاندارد در دمای اتاق، pH سوسپانسیون در حالی که به آرامی هم زده می‌شد، اندازه‌گیری شد. آزمایشات سه بار تکرار شدند و نتایج آورده شده میانگین مقادیر بدست آمده از سه آزمایش می‌باشند.



شکل ۲. دستگاه تحکیم استفاده شده در آزمایشات

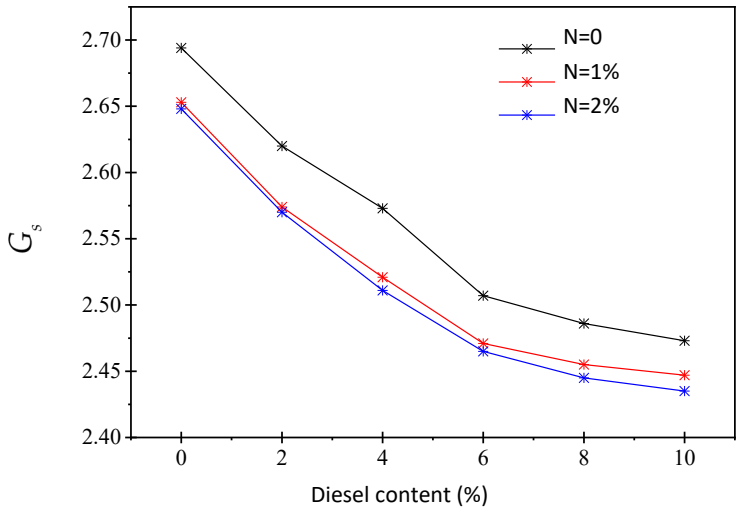
۳- نتایج

۳-۱- تاثیر آلودگی گازوئیل بر روی توده ویژه خاک

شکل ۳ تأثیر آلودگی گازوئیلی بر توده ویژه مخلوط ماسه-رس (۶۰٪ ماسه و ۴۰٪ رس) را در سه حالت نشان می‌دهد: خاک بدون نانوسیلیس (N=0)، خاک تیمار شده با ۱٪ نانوسیلیس (N=1%) و خاک تیمار شده با ۲٪ نانوسیلیس (N=2%). همانطور که مشاهده می‌شود، در همه نمونه‌ها، با افزایش درصد گازوئیل، کاهشی پیوسته در توده ویژه رخ می‌دهد. این افت عمدتاً از دو منشأ ناشی می‌شود: جایگزینی دانه‌های سنگین با فاز هیدروکربنی سبک‌تر، و همچنین جذب گازوئیل بر سطح ذرات خاک. چنین فرآیندی به تشکیل لایه‌های آلی کم‌چگالی در پیرامون دانه‌ها و افزایش ریزحفرات در ساختار خاک می‌انجامد.

در خاک بدون نانوسیلیس (N=0) به ازای تمامی سطوح آلودگی، دارای بیشترین مقادیر توده ویژه است، زیرا در آن هیچ ماده ریزدانه یا واکنش‌پذیر اضافی وجود ندارد که برهم‌کنش ذرات را دچار تغییر کند. در مقابل، خاک‌های اصلاح‌شده با نانوسیلیس توده ویژه اندکی کمتر دارند و در این میان، نمونه‌های حاوی دو درصد نانوسیلیس (N=2%)، پایین‌ترین مقادیر توده ویژه را به خود اختصاص می‌دهند. این کاهش جزئی را می‌توان با چگالی بسیار پایین نانوسیلیس و واکنش‌پذیری سطحی بالای آن توضیح داد؛ ویژگی‌هایی که موجب بهبود پوشش‌دهی ذرات و افزایش نسبت سیلیس آمورف سبک‌وزن نسبت به مواد معدنی موجود در مخلوط می‌گردد. تفاوت ناچیز میان منحنی‌های مربوط به ۱٪ و ۲٪ نانوسیلیس نشان می‌دهد که پس از عبور از یک آستانه حداقلی، افزودن نانوسیلیس تأثیر اندکی بر ویژگی‌های کلی حجم توده نمونه دارد و اثر آن بر توده ویژه، در مقایسه با اثر غالب آلودگی گازوئیلی، در مرتبه دوم اهمیت قرار می‌گیرد.

روند مشابهی با مطالعات انجام شده بر روی خاک لوم سیلتی و لوم ماسه‌ای گزارش شده است که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. مطالعات انجام شده بر خاک‌های لوم سیلتی و لوم ماسه‌ای آلوده به ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نفت خام، نشان داده است که توده ویژه با افزایش سطح آلودگی به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. در مطالعه انجام شده کاهش توده ویژه به رفتار تجمع (کلوخه‌شدن) ذرات خاک نسبت داده شده است که باعث می‌شود توزیع اندازه حفرات تحت کنترل آلودگی درآید. همچنین استدلال شده است که ضخامت (یا ویسکوزیته) بیشتر نفت خام، موجب تجمع ذرات و شکل‌گیری حفرات بزرگ‌تر می‌شود که در نهایت، باعث کاهش توده ویژه خاک می‌شود (Mekkiyah et al. 2023).



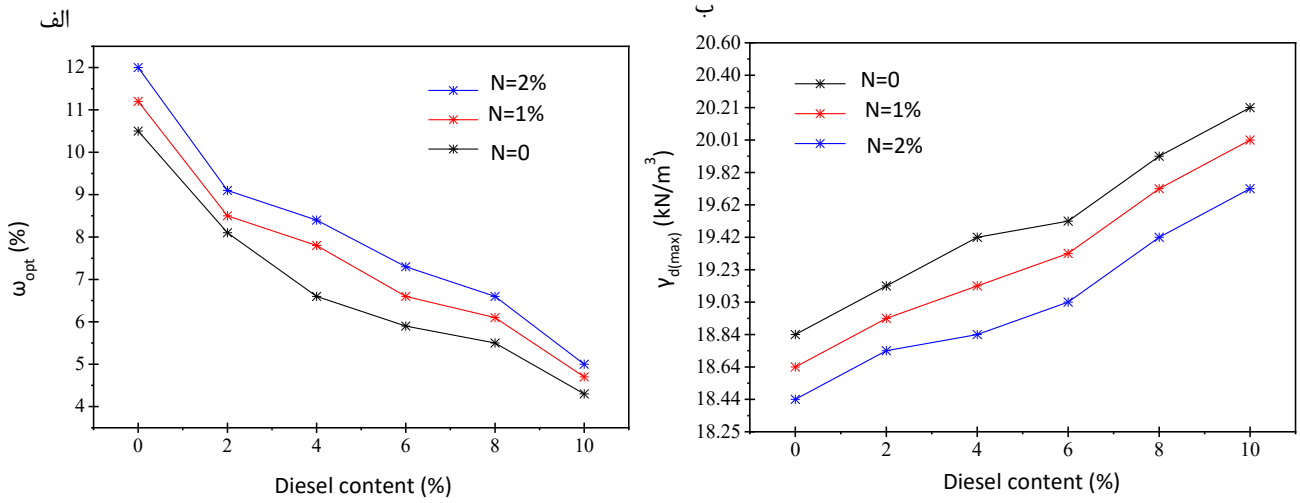
شکل ۳. توده ویژه جامد خاک (G_s) در مقابل گازوئیل، به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیس

۳-۲- ویژگی‌های تراکمی خاک ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل، اصلاح‌شده با نانوسیلیس

شکل ٤ تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک مخلوط ماسه-رس (٦٠٪ ماسه و ٤٠٪ رس) را در سطوح مختلف آلودگی گازوئیل و مقادیر مختلف نانوسیلیس (٠٪، ١٪ و ٢٪)، نشان می‌دهد. مطابق با شکل ٨-الف، رطوبت بهینه در همه نمونه‌ها با افزایش مقدار گازوئیل به‌طور پیوسته کاهش یافته است. این رفتار را می‌توان به خصلت آب‌گریز (هیدروفوبیک) گازوئیل نسبت داد؛ بدین معنا که گازوئیل با پوشاندن سطح ذرات خاک، دسترسی به جایگاه‌های جذب آب را محدود می‌سازد و در نتیجه، آب کمتری برای روان‌سازی و تراکم مورد نیاز خواهد بود. از سوی دیگر، گازوئیل به‌عنوان سیالی سبک با ویسکوزیته پایین عمل می‌کند که تا اندازه‌ای جایگزین آب در پرکردن ریزحفره‌ها می‌شود و کاهش بیشتر رطوبت بهینه را رقم می‌زند. روند منحنی‌ها گویای آن است که نمونه‌های حاوی نانوسیلیس (١٪ و ٢٪) در مقایسه با خاک اصلاح‌نشده، به‌ویژه در سطوح پایین‌تر آلودگی، به رطوبت بهینه اندکی بیشتر نیاز دارند. این پدیده از واکنش‌پذیری سطحی بالا و آب‌دوستی (هیدروفیل بودن) ذرات نانوسیلیس سرچشمه می‌گیرد که از طریق جذب آب و تشکیل ریزساختارهای لخته‌ای، نیاز به آب را افزایش می‌دهد. بالاتر بودن رطوبت بهینه در نمونه ٢٪ نسبت به ١٪ نشان می‌دهد که افزایش نانوسیلیس، سطح ویژه نیازمند رطوبت را بیشتر می‌کند؛ هرچند این اختلاف در مقادیر بالای گازوئیل، جایی که اثرات آب‌گریزی غالب است، کاهش می‌یابد. نتایج آزمایشگاهی، رابطه معنی‌داری را میان آلودگی گازوئیل و رفتار تراکمی آشکار می‌سازند. همان‌گونه که در شکل ٤-ب دیده می‌شود، حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش مقدار گازوئیل افزایش می‌یابد. این امر در نگاه نخست متناقض می‌نماید؛ زیرا افزودن گازوئیل وزن مخصوص ذرات جامد را کاهش می‌دهد و از منظر تئوری، به‌تنهایی باید به کاهش وزن مخصوص خشک بینجامد. افزایش مشاهده‌شده را می‌توان به نقش غالب گازوئیل به‌عنوان روان‌کننده نسبت داد که اصطکاک بین‌ذره‌ای و نیروهای موییننگی را تقلیل می‌دهد. این روان‌کاری، آرایش مجدد کارآمدتر ذرات را در برابر نیروی تراکم تسهیل کرده و به چیدمانی متراکم‌تر می‌انجامد که بر اثرِ کاهش وزن مخصوص ذرات جامد چیره می‌شود. در سوی مقابل، افزودن نانوسیلیس اثری معکوس برجای می‌گذارد؛ به‌گونه‌ای که خاک اصلاح‌نشده (٠٪ نانوسیلیس) همواره بیشترین مقادیر وزن مخصوص خشک را به دست می‌دهد. نمونه‌های اصلاح‌شده با نانوسیلیس، به‌ویژه در غلظت ۲ درصد (N=2%)، افت آشکاری را در حداکثر وزن مخصوص خشک از خود نشان می‌دهند. این پدیده احتمالاً از تشکیل ریزتوده‌ها در ذرات رس تحت تأثیر نانوسیلیس و افزایش متعاقب اصطکاک داخلی در مقیاس کوچک ناشی می‌شود؛ اثراتی که تا حدی مانع از آرایش مجدد بهینه ذرات در حین عملیات تراکم می‌گردند. تفاوت‌های ناچیز میان منحنی‌های مربوط به نانوسیلیس ۱ و ۲ درصد نشان می‌دهد که پس از عبور از یک آستانه مشخص، افزودن نانوسیلیس تأثیر اندکی بر ویژگی‌های تراکمی دارد؛ به‌ویژه هنگامی که خاک در محیطی آلوده به گازوئیل قرار داشته باشد.

در مطالعه دیگر انجام شده نیز یافته‌هایی همانند را در خصوص تأثیر آلودگی بر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه گزارش کرده‌اند.

به عنوان مثال در پژوهشی دیگری که بر بر روی ماسه مخلوط‌شده با ۰، ۵ و ۱۰ درصد بنزین و گازوئیل مشاهده انجام شده، گزارش شده است که با افزایش میزان آلودگی، رطوبت بهینه کاهش می‌یابد؛ در حالی که حداکثر وزن مخصوص خشک با بالا رفتن سطح آلودگی افزایش پیدا کرده است (Al-Aghbari et al. 2011).



شکل ٤. الف) ω_{opt} در مقابل مقدار گازوئیل ب) $\left(\gamma_d\right)_{\max}$ در مقابل مقدار گازوئیل

۳-۳- تأثیر آلودگی گازوئیل و نانوسیلیس بر حدود اتربرگ

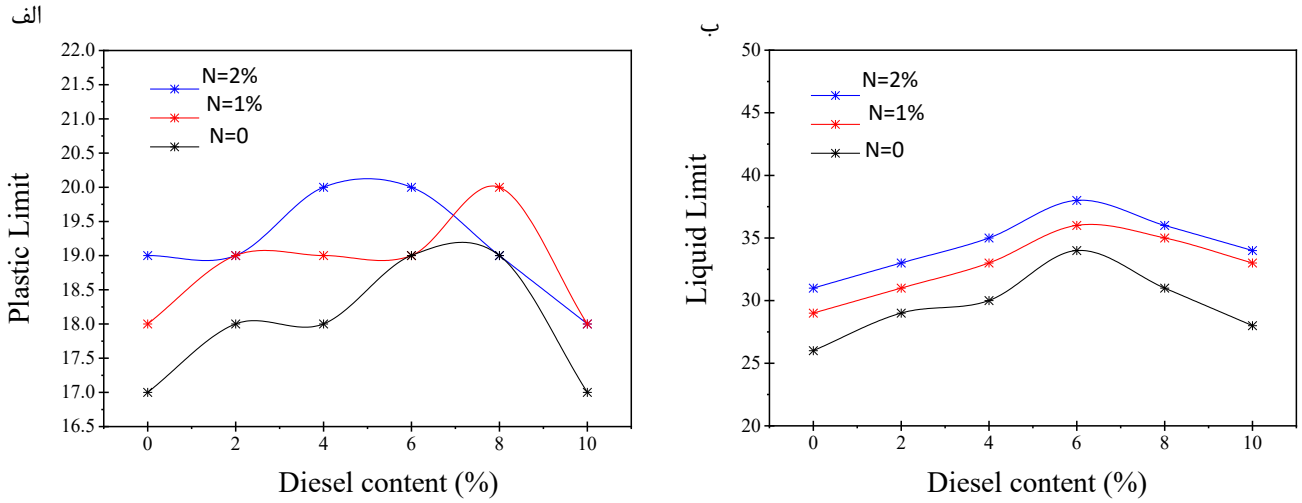
شکل ۵ نحوه تغییرات حد خمیری (PL) و حد روانی (LL) را در مخلوط‌های متشکل از ٦٠٪ ماسه و ٤٠٪ رس کائولینیتی، بر حسب میزان آلودگی گازوئیلی و برای سه سطح مختلف نانوسیلیس (۰٪، ۱٪ و ۲٪) نشان می‌دهد. از میان داده‌ها، دو ویژگی شاخص قابل استخراج است. نخست آنکه حد روانی (LL) در برابر افزایش گازوئیل رفتاری غیریکنواخت (غیرمونوتونیک) از خود نشان می‌دهد؛ به این معنا که تا سطح آلودگی متوسط (حدود ٦٪) روندی صعودی دارد و سپس در مقادیر بالاتر گازوئیل، اندکی افت می‌کند. دوم آنکه نمونه‌های حاوی نانوسیلیس (۱٪ و ۲٪) عموماً مقادیر حد روانی بالاتری در مقایسه با خاک فاقد افزودنی (۰٪) از خود نشان می‌دهند و نمونه‌های دارای ۲٪ نانوسیلیس در همه مقادیر آلودگی، بیشترین مقدار حد روانی را به خود اختصاص می‌دهند. داده‌های مربوط به حد خمیری (PL) نیز الگویی مشابه، اما با شدتی کمتر را بازتاب می‌دهند که در آن موقعیت نقاط اوج، بسته به مقدار نانوسیلیس، اندکی جابه‌جا شده است.

این مشاهدات را می‌توان با اثرات رقابتیِ میان‌ذره‌ای و جذب سطحی، که از حضور هم‌زمان گازوئیل و نانوسیلیس برمی‌خیزد، توجیه کرد. در مقادیر کم تا متوسط گازوئیل، هیدروکربن حفره‌های ریز درون خاک را پر می‌کند و همزمان به‌عنوان لایه‌ای روان‌ساز عمل کرده، بازآرایی ذرات را تسهیل می‌نماید. این امر موجب افزایش مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن به حالت روانی می‌شود و در نتیجه، در ابتدا افزایشی در حد روانی (LL) پدیدار می‌گردد. با ادامه افزایش گازوئیل، مولکول‌های آب‌گریز به‌تدریج سطوح ذرات را می‌پوشانند؛ این پوشش، دسترسی به لایه‌های آب جذب‌شده را محدود کرده و برهم‌کنش‌های رس-آب را تضعیف می‌کند. در پی آن، در سطوح بالای آلودگی، هر دو حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) تمایل به کاهش نشان می‌دهند. نتایج حاضر مطابق با یافته‌های دیگری است که در آن از نمونه‌های مارن استفاده شده بود. نمونه‌های مارن استفاده شده مطابق با طبقه‌بندی متحد در گروه خاک‌های SC قرار می‌گرفتند و متعلق به منطقه‌ای در شرق عربستان سعودی بودند. گزارش شد که حد روانی این نمونه‌ها در مواجهه با آلودگی گازوئیل تا سطح آلودگی ۹٪ افزایش می‌یابد، اما پس از آن، افزایش بیشتر آلودگی منجر به کاهش حد روانی می‌شود (Mustafa et al. 2018).

نانوسیلیس این روندها را از طریق دو مکانیسم اصلی دگرگون می‌سازد. نخست آنکه این ماده سطح ویژه مؤثر را افزایش داده و مکان‌های جذب آب‌دوست (هیدروفیل) بیشتری فراهم می‌کند؛ سطح ویژه بالای نانوسیلیس موجب جذب مقدار بیشتری آب

می‌شود. دوم آنکه این ماده فرآیند لخته‌سازی و ایجاد پل‌های اتصال میان ذرات رس و لای (سیلت) را تقویت می‌کند. در نتیجه، مقادیر حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) در مقایسه با نمونه‌های فاقد افزودنی افزایش می‌یابند. تأثیر اندکی بیشترِ مشاهده‌شده در نمونه حاوی ۲٪ نانوسیلیس نسبت به نمونه ۱٪، از سطح ویژه در دسترسِ بیشتر و ظرفیت بالاترِ نگهداری آب در آن سرچشمه می‌گیرد.

با این حال، منحنی‌های مربوط به مقادیر ۱٪ و ۲٪ نانوسیلیس در برخی دامنه‌های آلودگی به یکدیگر شبیه‌اند؛ این شباهت گویای آن است که فراتر از یک مقدار مصرف معین، تأثیر افزایشی بر حدود اتربرگ محدود می‌شود؛ به‌ویژه زمانی که اثر غالبِ آب‌گریزی ناشی از گازوئیل حاکم باشد.



شکل ۵. الف) حد خمیری در مقابل مقدار گازوئیل ب) حد روانی در مقابل مقدار گازوئیل

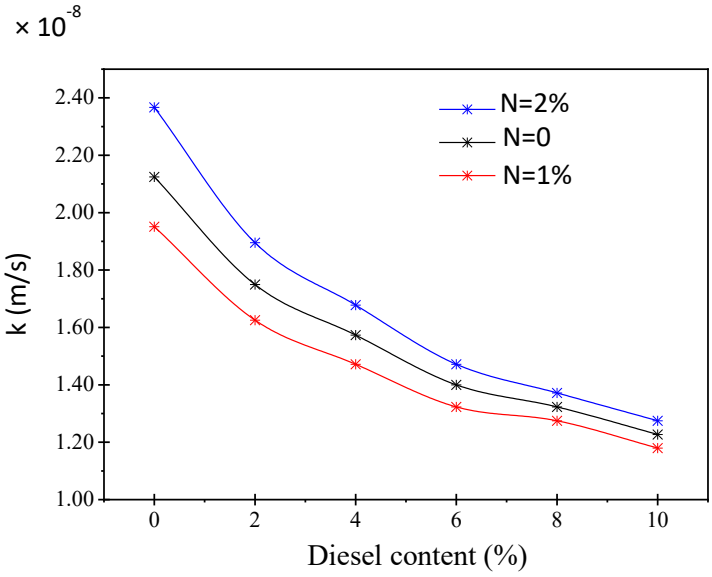
۳-٤- اثرات آلودگی گازوئیل و نانوسیلیس بر نفوذپذیری

شکل ٦ رابطه میان ضریب نفوذپذیری و میزان آلودگی گازوئیل را به نمایش می‌گذارد. نتایج حاکی از کاهش پیوسته نفوذپذیری با افزایش مقدار گازوئیل است. این کاهش از هم‌افزایی چندین مکانیسم ناشی می‌شود. نخست، مولکول‌های گازوئیل که خصلتی آب‌گریز دارند، سطوح ذرات خاک را پوشانده و ریزحفره‌ها را پر می‌کنند؛ در نتیجه، کانال‌های منافذ مسدود شده و سطح جریان مؤثر به‌طور مستقیم کاهش می‌یابد. دوم، هرچند لخته‌شدگی ناشی از گازوئیل به تشکیل سنگدانه‌های رس بزرگ‌تر می‌انجامد، اما اتصال منافذ توسط لایه‌های هیدروکربنی آب‌گریز که نقش سدّی میان منافذ را ایفا می‌کنند، به‌شدت مختل می‌شود. علاوه بر این، آلودگی گازوئیلی ضخامت لایه‌های آب جذب‌شده در پیرامون ذرات رس را کاهش می‌دهد که خود به انقباض بیشتر منافذ کمک می‌کند. سوم، ویسکوزیته دینامیکی بالاتر گازوئیل در مقایسه با آب (تقریباً ۳ تا ٤ برابر بیشتر) بر اساس قانون دارسی، رسانایی هیدرولیکی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، با وجود تشکیل سنگدانه‌های بزرگ‌تر از طریق لخته‌شدگی، اثرات ترکیبی انسداد منافذ، اختلال در اتصال هیدرولیکی، کاهش ضخامت لایه آب و افزایش ویسکوزیته، بر هرگونه افزایش نفوذپذیری که ممکن بود در غیر این صورت از تشکیل سنگدانه حاصل شود، چیره می‌گردد. بنابراین، رسانایی هیدرولیکی با افزایش مقدار گازوئیل کاهش می‌یابد.

اثر نانوسیلیس، تفاوت‌های قابل‌توجهی را میان سه منحنی پدید می‌آورد. نمونه‌های حاوی ۲٪ نانوسیلیس به‌طور پیوسته بالاترین مقادیر نفوذپذیری را نشان می‌دهند، در حالی که نمونه‌های حاوی ۱٪ نانوسیلیس در سراسر بازه آلودگی، کمترین نفوذپذیری را از خود بروز می‌دهند. این رفتار را می‌توان با نقش ریزساختاری دوگانه نانوسیلیس توضیح داد: در مقادیر متوسط (N=1%)، ذرات

نانوسیلیس در ماتریس رس پراکنده می‌شوند، مساحت سطح ویژه را افزایش می‌دهند، لخته‌شدگی را تقویت می‌کنند و اتصال منافذ را کاهش می‌دهند؛ در نتیجه، نفوذپذیری افت می‌کند. اما در مقادیر بالاتر (N=2%)، تجمع ذرات نانوسیلیس چشمگیرتر می‌شود. این کلوخه‌ها موجب ایجاد ریزحفره‌های موضعی شده و از گرفتگی کامل کانال‌های منافذ توسط خوشه‌های گازوئیل-رس جلوگیری می‌کنند و در نتیجه، نفوذپذیری اندکی بالاتر نسبت به مخلوط‌های حاوی ۰٪ و ۱٪ نانوسیلیس پدید می‌آید.

همانند یافته‌های پژوهش حاضر در خصوص تأثیر آلودگی بر نفوذپذیری، دیده شده است که نفوذپذیری ماسه کویتی با افزایش آلودگی نفتی کاهش می‌یابد (Al-Sanad Hasan et al. 1995). به همین ترتیب، گزارش شده است کاهش نفوذپذیری در نمونه‌های ماسه مخلوط‌شده با ۰، ۵ و ۱۰ درصد بنزین و گازوئیل که گویای کاهش رسانایی هیدرولیکی با افزایش میزان آلاینده است (Al-Aghbari et al. 2011). همچنین در مطالعه دیگری بر روی خاک سیلتی-رسی، دریافت شد که نفوذپذیری به‌طور کلی با افزایش آلودگی نفتی کاهش می‌یابد (Azam et al. 2022).



شکل ٦. ضریب نفوذپذیری در مقابل مقدار گازوئیل به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیس

۳-۵- اثرات آلودگی گازوئیلی و نانوسیلیس بر خواص تحکیمی خاک

شکل ۷ تأثیر آلودگی گازوئیلی بر منحنی‌های تحکیم e-logσ مخلوط ماسه-کائولینیت را که در رطوبت بهینه متراکم شده است، به نمایش می‌گذارد. با افزایش مقدار گازوئیل از ۰٪ تا ۸٪، منحنی‌های تحکیم به سمت پایین جابه‌جا شده و به‌تدریج به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. این جابه‌جایی رو به پایین، گویای کاهش نظام‌مند نسبت تخلخل اولیه و تراکم‌پذیری خاک است.

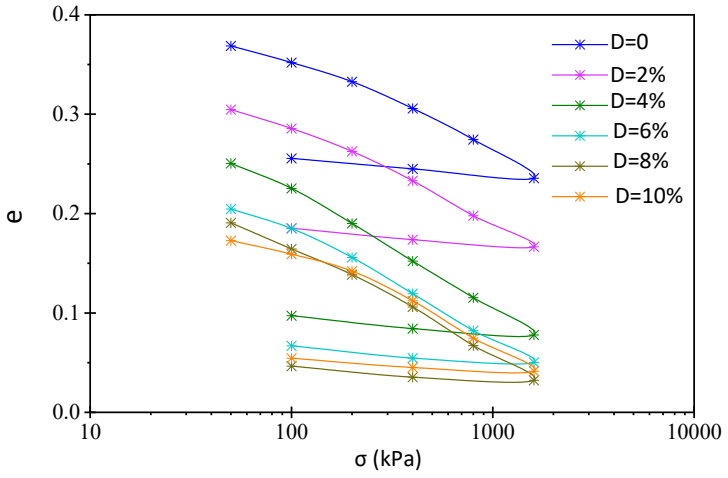
جابه‌جایی نزولی منحنی‌ها را می‌توان به جایگزینی آب منفذی با گازوئیل نسبت داد؛ فرآیندی که ضخامت لایه دوگانه پراکنده را کاهش داده و نیروهای دافعه میان ذرات را تضعیف می‌کند. افزون بر این، گازوئیل در مقادیر کم تا متوسط به‌عنوان عاملی روان‌کننده عمل کرده، بازآرایی ذرات را در جریان تراکم تسهیل می‌نماید و به بافتی متراکم‌تر پیش از بارگذاری می‌انجامد. در نتیجه، نسبت‌های تخلخل پایین‌تر به ازای همه مقادیر تنش مشاهده می‌شود. با این حال، در سطوح بالاتر آلودگی، مکانیسمی رقابتی غالب می‌گردد. هنگامی که مقدار گازوئیل به ۱۰٪ می‌رسد، هیدروکربن اضافی فضاهای منافذ را اشغال کرده و ویسکوزیته سیال منافذ را افزایش می‌دهد. این امر از اتلاف مؤثر فشار منفذی جلوگیری کرده و بازآرایی بیشتر ذرات را تحت بار محدود می‌سازد. در نتیجه، نمونه حاوی ۱۰٪ گازوئیل نسبت‌های تخلخل اندکی بالاتر از نمونه ۸٪ از خود نشان می‌دهد. این رفتار بیانگر گذار از رژیمی کنترل‌شده با

روان‌کاری در مقادیر متوسط گازوئیل، به رژیمی مبتنی بر انسداد منافذ و کنترل‌شده با ویسکوزیته، در سطوح بالاتر آلودگی است.

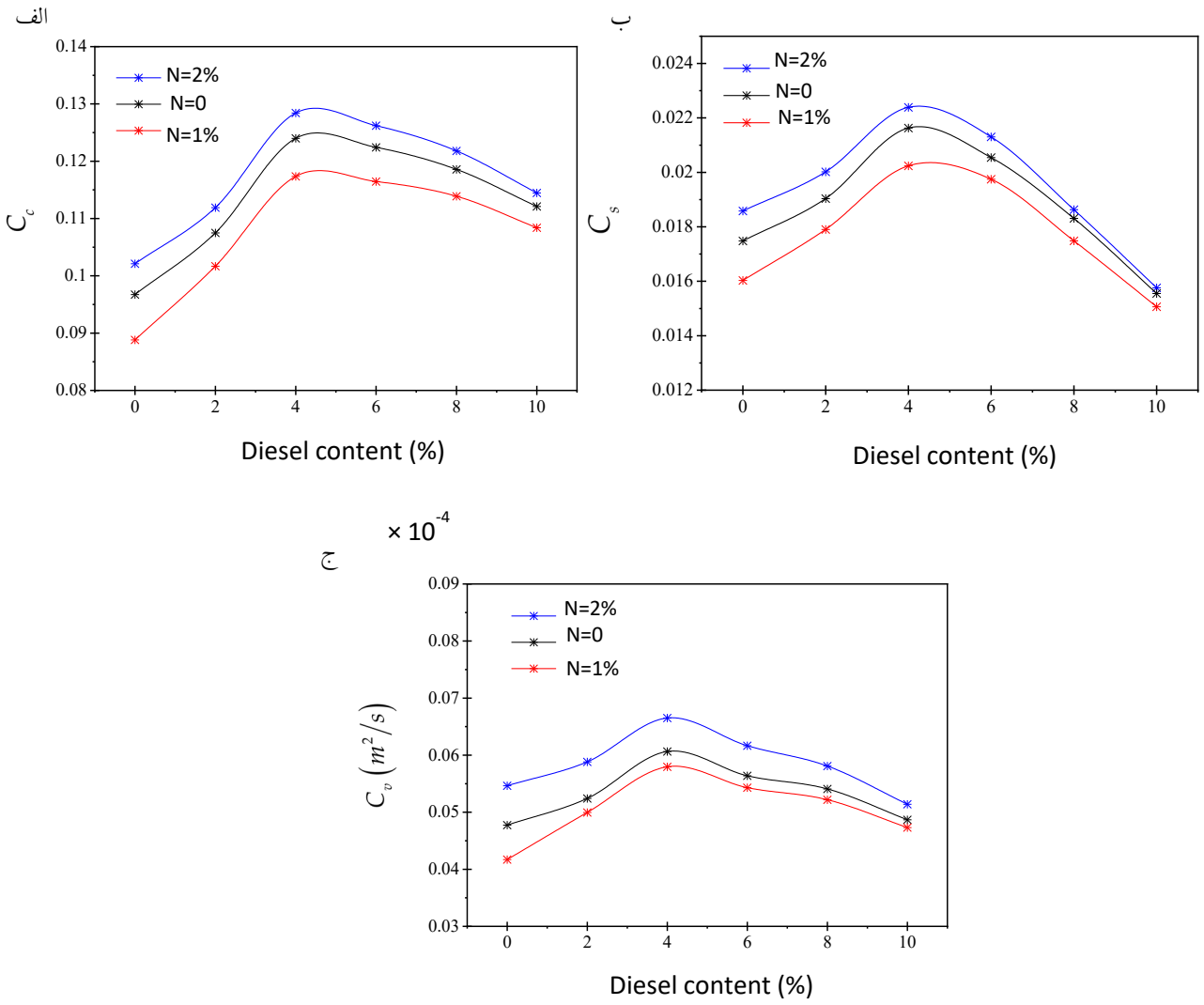
تغییر غیریکنواخت شاخص فشردگی، شاخص تورم و ضریب تحکیم در برابر آلودگی گازوئیلی را می‌توان به مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی رقابتی نسبت داد؛ مکانیسم‌هایی که ساختار خاک و رفتار سیال منفذی را تحت کنترل دارند. در مقادیر کم گازوئیل، هیدروکربن پوششی نازک بر ذرات خاک تشکیل می‌دهد که نیروهای دافعه میان ذرات را کاهش داده و بازآرایی ذرات را تحت بار افزایش می‌دهد. این امر به تراکم‌پذیری و پتانسیل تورم بالاتر می‌انجامد که در پی آن، مقادیر C_c و C_s افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ساختار منافذ اصلاح‌شده و نفوذپذیری کاهش‌یافته نیز به مقادیر بالاتر کمک می‌کنند. با این حال، در مقادیر بالاتر گازوئیل، فضاهای منافذ به‌طور فزاینده‌ای با گازوئیل پر می‌شوند که مانع از برهم‌کنش مؤثر آب-ذرات شده و ویسکوزیته سیال منفذی را افزایش می‌دهد. این امر اتلاف فشار منفذی را سرکوب کرده و بازآرایی بیشتر ذرات را محدود می‌سازد و در نتیجه، کاهش مقادیر C_c، C_s و C_v را به همراه دارد. بنابراین، رفتار پیک مشاهده‌شده، بازتاب‌دهنده گذار از رژیمی غالباً مبتنی بر بازآرایی در سطوح پایین آلودگی، به رژیمی مبتنی بر انسداد منافذ و کنترل‌شده با ویسکوزیته، در مقادیر بالاتر آلودگی گازوئیل است.

مقایسه شکل ٦ و شکل ٨–ج، اثر دوگانه آلودگی گازوئیلی را آشکار می‌سازد. در حالی که نفوذپذیری (k) به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد، ضریب تحکیم در ابتدا در مقادیر کم گازوئیل، به دلیل کاهش غالب در تراکم‌پذیری (m_v)، افزایش می‌یابد. سپس در سطوح بالاتر آلودگی افت می‌کند، زیرا کاهش نفوذپذیری به عامل کنترل‌کننده تبدیل می‌شود.

تفاوت‌های میان خاک‌های تیمارشده با نانوسیلیس و خاک‌های تیمارنشده، از اصلاح ریزساختاری ناشی از نانوذرات سرچشمه می‌گیرد. نانوسیلیس به‌دلیل سطح ویژه بالای خود، پیوند میان ذرات را تقویت کرده و ریزحفره‌ها را پر می‌کند و در نتیجه، بافتی متراکم‌تر و یکپارچه‌تر در خاک پدید می‌آورد. بر این اساس، خاک‌های حاوی ۲٪ نانوسیلیس بالاترین مقادیر C_c، C_s و C_v را نشان می‌دهند و پس از آن‌ها به‌ترتیب، خاک بدون تیمار (N=0%) و خاک حاوی ۱٪ نانوسیلیس قرار می‌گیرند. این امر گویای آن است که مقدار بهینه نانوسیلیس، راندمان تماس ذرات و ظرفیت تغییرشکل را تحت بارگذاری تحکیمی بهبود می‌بخشد.



شکل ۷. نسبت تخلخل در مقابل فشار وارد شده (لگاریتمی)



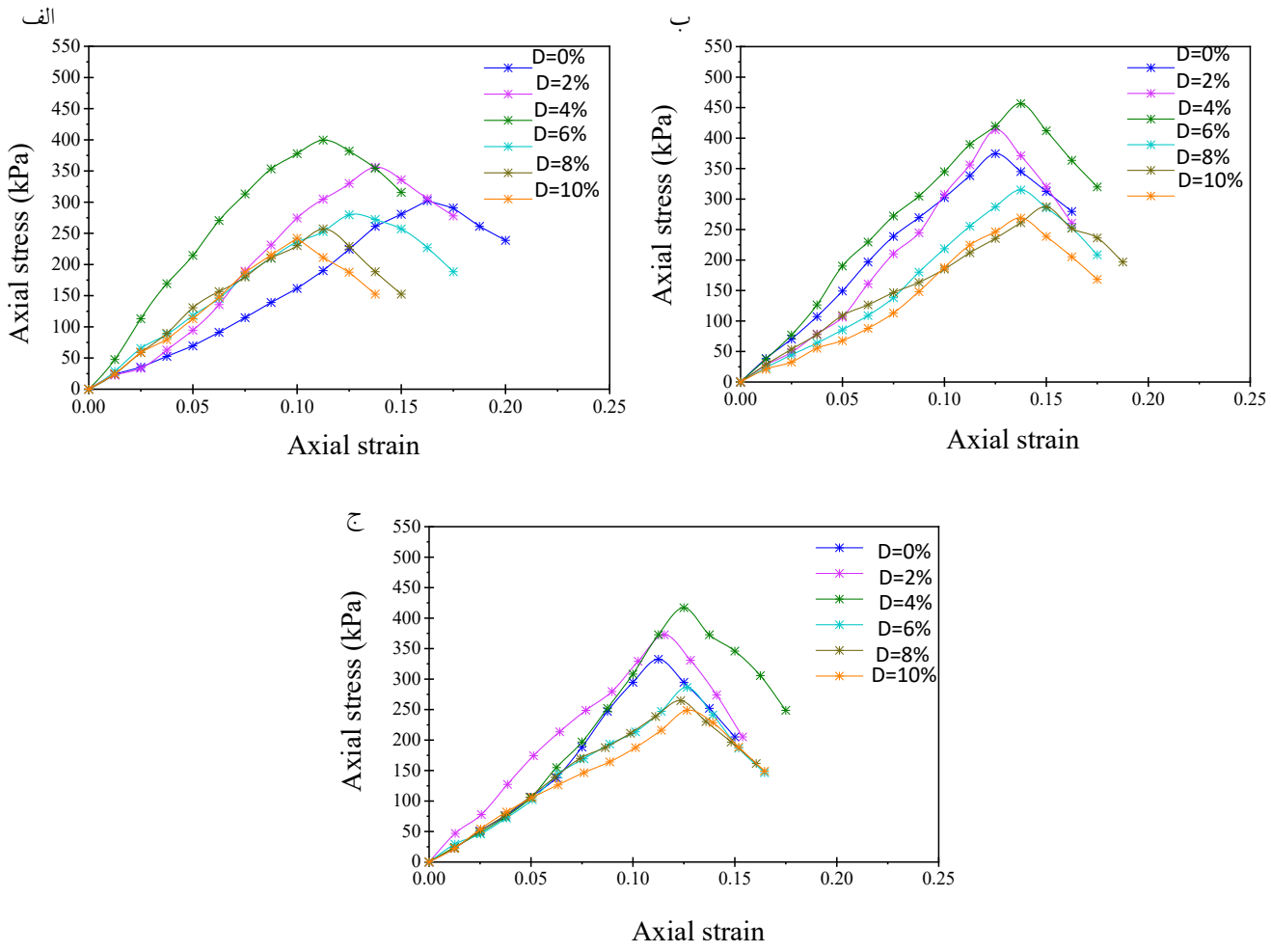
شکل ۸. الف) ضریب فشردگی در مقابل گازوئیل ب) ضریب تورم در مقابل گازوئیل ج) ضریب تحکیم در مقابل مقدار گازوئیل به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیس

۳-۶- تأثیر آلودگی گازوئیلی و درصد نانوسیلیس بر مقاومت فشاری محصورنشده

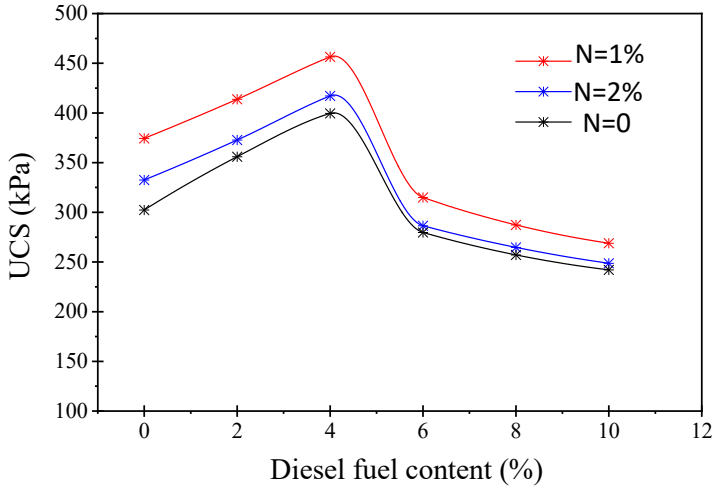
شکل ۹ منحنی‌های تنش-کرنش محوری حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، با افزایش سطح آلودگی، مقاومت نخست روندی صعودی و سپس نزولی می‌پیماید و سختی اولیه نمونه‌ها نیز از همین الگو پیروی می‌کند. با این حال، رفتار نمونه‌ها در مرحله پس از رسیدن به اوج مقاومت، از میزان آلودگی تأثیر نمی‌پذیرد. خلاصه‌ای از مقادیر مقاومتِ استخراج‌شده از منحنی‌های شکل ۹ در شکل ۱۰ ارائه شده است. شکل ۱۰ تغییرات مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) را در پی افزایش آلودگی گازوئیلی نشان می‌دهد. یافته‌ها گویای آن است که با بالا رفتن محتوای گازوئیل از صفر تا حدود ٤ درصد، مقدار UCS به‌تدریج افزایش می‌یابد، اما پس از آن افت محسوسی در مقاومت پدیدار می‌شود. نمونه آلوده به ۱۰ درصد

گازوئیل، در مقایسه با نمونه فاقد آلودگی، کاهشی ۲۵ درصدی در UCSاز خود نشان می‌دهد. افزایش اولیه UCS را می‌توان به اثر روان‌کنندگی گازوئیل نسبت داد؛ اثری که اصطکاک بین‌ذره‌ای را کاهش داده و موجب می‌شود ذرات خاک در جریان تراکم (در رطوبت بهینه) به شکلی متراکم‌تر در کنار یکدیگر قرار گیرند. این متراکم‌سازی که با افزایش مشاهده‌شده در حداکثر وزن مخصوص خشک در مقادیر کم گازوئیل همخوانی دارد، به شکل‌گیری ساختاری سخت‌تر و منسجم‌تر در خاک می‌انجامد و در نتیجه، مقاومت فشاری را بالا می‌برد. اما در مقادیر گازوئیل بیش از حدود ٤ درصد، پوشش بیش‌ازحد ذرات خاک با گازوئیل موجب اختلال در پیوندهای بین‌ذره‌ای، کاهش چسبندگی مؤثر در ماتریس رس و تضعیف اسکلت خاک می‌شود که به افت مقاومت مشاهده‌شده، می‌انجامد.

نتایج مشابهی با تحقیق و آزمایش بر روی نمونه‌های خاک SC (ماسه رس‌دار) از منطقه سائوپائولو در برزیل به دست آمده است. مطابق با آزمایشات انجام شده در آن تحقیق، مشاهده شد که با افزایش آلودگی گازوئیل، مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) نخست افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در سطح آلودگی ٤ درصد به بیشترین مقدار خود می‌رسد. علاوه بر این، نمونه آلوده به ۱۰ درصد گازوئیل در مقایسه با خاک طبیعی بدون آلودگی، کاهشی ٤٥ درصدی در مقاومت نشان داد (de Souza Correia et al. 2020). همچنین مطابق با پژوهش دیگری که بر روی خاک SC انجام شد دریافت شد که مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)خاک آلوده به گازوئیل در سطح آلودگی ۳ درصد به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ با این حال، افزایش بیشتر سطح آلودگی تا ۹ درصد منجر به کاهش مقاومت می‌شود (Mustafa et al. 2018). همچنین در همین اشکال تأثیر نانوسیلیس بر روی نتایج آزمایش UCS نیز به وضوح نمایان است. برای هر میزان مشخصی از گازوئیل، بیشترین مقاومت در نمونه خاک مخلوط حاوی ۱ درصد نانوسیلیس و پس از آن در مخلوط دارای ۲ درصد نانوسیلیس به دست می‌آید. خاکی که فاقد نانوسیلیس است، کمترین مقدار UCS را نشان می‌دهد. عملکرد برتر مخلوط حاوی ۱ درصد نانوسیلیس بیانگر وجود مقدار بهینه‌ای از نانوذرات است که در آن، پر شدن ریزحفره‌ها و پیوند ذرات به مؤثرترین شکل ممکن انجام می‌شود. در مقادیر بالاتر نانوسیلیس (۲ درصد)، تجمع (کلوخه‌شدن) نسبی ذرات ممکن است کارایی توزیع را کاهش داده و نواحی ضعیف موضعی پدید آورد که در نهایت به UCS اندکی کمتر در مقایسه با مخلوط ۱ درصدی می‌انجامد. در مجموع، اثرات ترکیبیِ متراکم‌سازی ناشی از گازوئیل، تضعیف ناشی از گازوئیل در غلظت‌های بالاتر، و اصلاح ریزساختار توسط نانوسیلیس، روندهای مشاهده‌شده را در UCS تعیین می‌کنند.



شکل ۹. تنش محوری در مقابل کرنش محوری الف) N=0% ب) N=1% ج) N=2%



شکل ۱۰. مقاومت فشاری تک محوری (UCS) در مقابل مقدار گازوئیل

۳-۷- اثرات آلودگی گازوئیلی و افزودنی نانوسیلیس بر مقاومت برشی

آزمایش برش مستقیم کوچک مقیاس بر روی ۱۸ نمونه مخلوط ماسه رس‌دار آلوده به گازوئیل و تیمار شده با نانوسیلیس انجام شد که در ادامه نتایج آن آورده شده است. شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ خطوط گسیختگی مور- کولمب به ترتیب به ازای ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانوسیلیس می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر مقدار معین از نانوسیلیس با افزایش آلودگی مقاومت برشی نمونه کمتر شده است. این کاهش کلی، حاصل هم‌افزایی دو مؤلفه اصلی مقاومت برشی، یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی است که هر یک به‌نوعی متفاوت تحت تأثیر آلودگی قرار می‌گیرند (شکل ١٤ و شکل ١٥).

مطابق با شکل ١٥ و جدول ٤، زاویه اصطکاک داخلی با افزایش مقدار گازوئیل روندی پیوسته و یکنواخت کاهشی دارد. به‌عنوان مثال، در نمونه‌های فاقد نانوسیلیس (N=0)، مقدار زاویه اصطکاک داخلی از ٢٨,٤ درجه در حالت بدون آلودگی به ٢٧,٦، ٢٦,٩، ٢٥,٨، ٢٤,٧ و در نهایت ٢٣,٨ درجه به‌ترتیب در سطوح آلودگی ٢، ٤، ٦، ٨ و ١٠ درصد کاهش می‌یابد. این رفتار یکنواخت را می‌توان به دو مکانیسم اصلی نسبت داد:

الف) اثر روان‌کنندگی گازوئیل و کاهش اصطکاک بین‌ذره‌ای: گازوئیل به‌عنوان یک سیال با ویسکوزیته پایین، بر سطوح ذرات خاک گسترده شده و لایه‌ای نازک و لغزنده میان ذرات تشکیل می‌دهد. این لایه، تماس مستقیم بین سطوح جامد ذرات را کاهش داده و سهم اصطکاک بین‌ذره‌ای را به‌طور محسوسی تقلیل می‌دهد. از آنجا که زاویه اصطکاک داخلی عمدتاً بازتاب‌دهنده درگیری و قفل‌وبست مکانیکی ذرات است، پوشش تدریجی سطوح ذرات با گازوئیل به‌طور پیوسته این مؤلفه را تضعیف می‌کند.

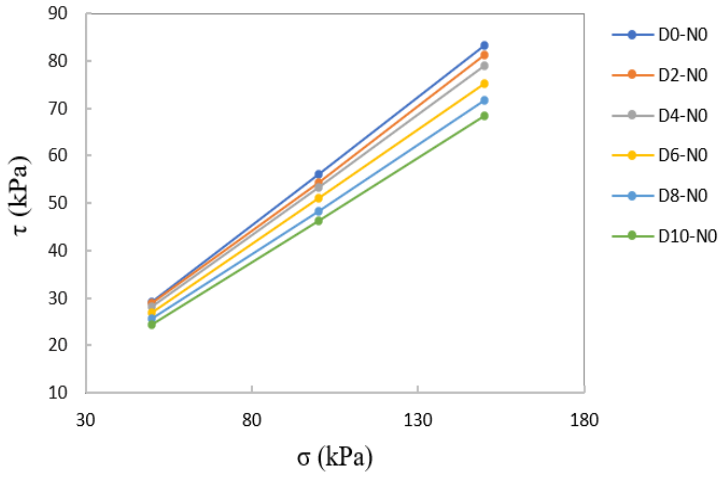
ب) کاهش زبری سطحی مؤثر ذرات: با اشغال شدن ریزحفره‌ها و ناهمواری‌های سطحی ذرات توسط مولکول‌های گازوئیل، سطح تماس مؤثر و درگیری مکانیکی بین ذرات کاهش می‌یابد. این اثر نیز با افزایش غلظت آلودگی تشدید شده و به افت پیوسته زاویه اصطکاک داخلی می‌انجامد.

اما برخلاف زاویه اصطکاک داخلی که روندی یکنواخت دارد، تغییرات چسبندگی در مقابل مقدار آلودگی همانطور که در در جدول ٤ و شکل ١٤ مشاهده می‌شود، رفتاری غیریکنواخت از خود نشان می‌دهد: با افزایش آلودگی تا حدود ٤ درصد، چسبندگی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس در سطوح بالاتر (٦ تا ١٠ درصد) کاهش می‌یابد. این رفتار دوگانه را می‌توان چنین توجیه کرد: در مقادیر کم تا متوسط گازوئیل (٠ تا ٤ درصد) مولکول‌های گازوئیل به‌عنوان یک عامل روان‌کننده و پوشش‌دهنده عمل می‌کنند که با کاهش اصطکاک بین‌ذره‌ای، امکان بازآرایی و چیدمان متراکم‌تر ذرات را در جریان تراکم فراهم می‌سازند. این تراکم بیشتر، تماس مؤثر بین ذرات را افزایش داده و به‌طور موقت موجب تقویت چسبندگی ظاهری می‌شود. به بیان دیگر، در این محدوده، اثر متراکم‌سازی مکانیکی بر اثر تضعیف شیمیایی غلبه می‌کند.

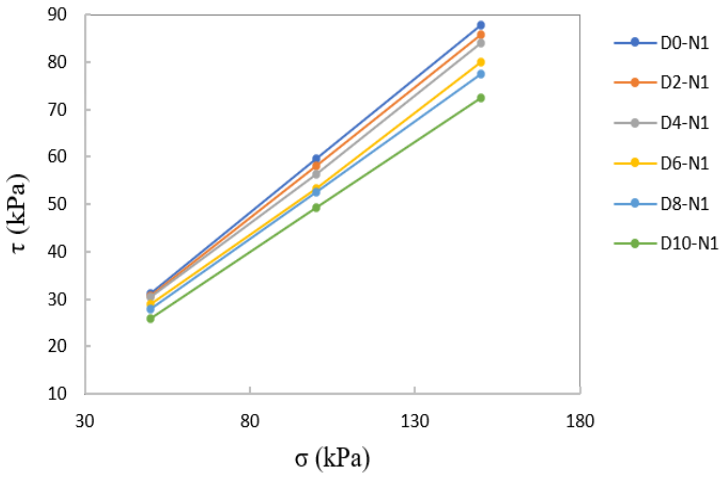
اما در مقادیر بالاتر گازوئیل (٦ تا ١٠ درصد) با اشباع شدن تدریجی منافذ و پوشش کامل سطوح ذرات رس، مولکول‌های آب‌گریز گازوئیل لایه دوگانه پراکنده را مختل کرده و فاصله بین ذرات را افزایش می‌دهند. این امر نیروهای جاذبه سطحی (نظیر واندروالس و پیوندهای الکترواستاتیکی) را تضعیف کرده و در نتیجه، مؤلفه چسبندگی کاهش می‌یابد. در این مرحله، اثر تضعیف‌کننده شیمیایی گازوئیل بر هرگونه بهبود ناشی از تراکم غلبه می‌کند.

اما مطابق با جدول ٤ و شکل‌های ١٤ و ١٥، افزودن نانوسیلیس به‌طور مشخصی موجب افزایش هر دو مؤلفه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد. ترتیب عملکرد نمونه‌ها در تمام سطوح آلودگی یکسان است یعنی نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس (N=1%) بالاترین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را نشان می‌دهند و نمونه‌های حاوی ۲ درصد نانوسیلیس (N=2%) در مرتبه بعدی قرار می‌گیرند و نمونه‌های فاقد نانوسیلیس (N=0) کمترین مقادیر چسبندگی و اصطکاک را دارند. این برتری نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس را می‌توان به وجود مقدار بهینه‌ای از نانوذرات نسبت داد که در آن، پر شدن مؤثر ریزحفره‌ها، افزایش سطح ویژه و تقویت پیوندهای بین‌ذره‌ای از طریق گروه‌های سیلانول (Si-OH) به‌بهترین شکل ممکن رخ می‌دهد. در مقدار ۲ درصد، تجمع نسبی (کلوخه‌شدن) ذرات نانوسیلیس احتمالاً کارایی توزیع را اندکی کاهش داده و نواحی ضعیف موضعی پدید می‌آورد که در نهایت به افت جزئی مقاومت نسبت به نمونه ۱ درصدی می‌انجامد. با این حال، هر دو سطح نانوسیلیس نسبت به خاک تیمارنشده عملکرد بهتری دارند.

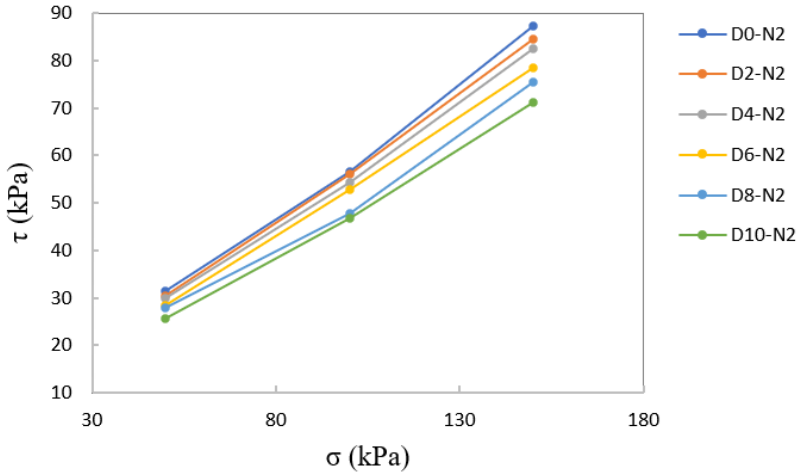
نکته قابل توجه درباره اثر متقابل گازوئیل و نانوسیلیس اینست که اگرچه نانوسیلیس به‌طور نسبی مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد، اما نمی‌تواند اثر تضعیف‌کننده گازوئیل را به‌طور کامل جبران کند؛ زیرا مکانیسم آب‌گریزی گازوئیل با ماهیت آب‌دوست نانوسیلیس در تضاد است و در غلظت‌های بالای آلودگی، اثر غالب گازوئیل بر رفتار برشی حاکم می‌شود. بنابراین، روند کلی کاهش مقاومت برشی با افزایش آلودگی، در همه سطوح نانوسیلیس حفظ می‌گردد.



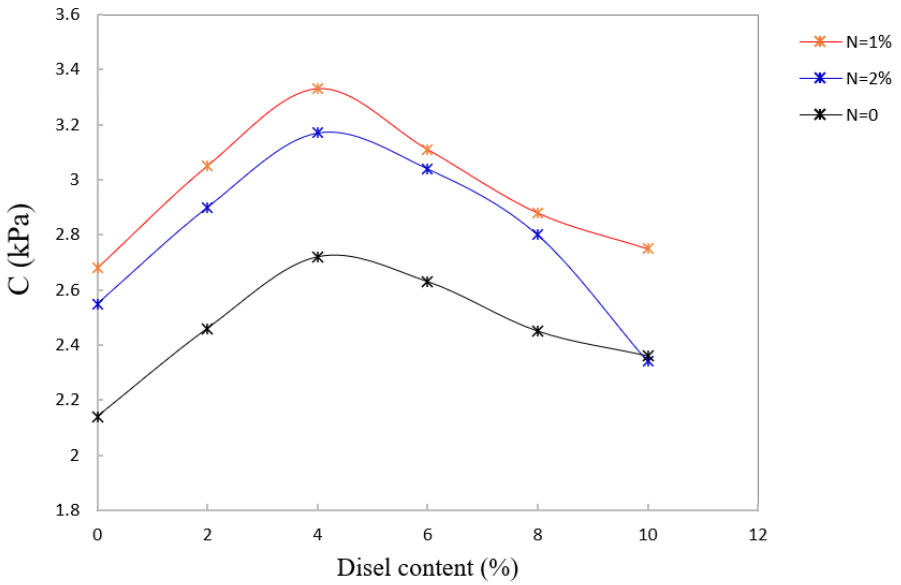
شکل ۱۱. خطوط گسیختگی مور- کولمب (تنش برشی در مقابل تنش عمودی) به ازای مقادیر مختلف آلودگی گازوئیل و N=0%



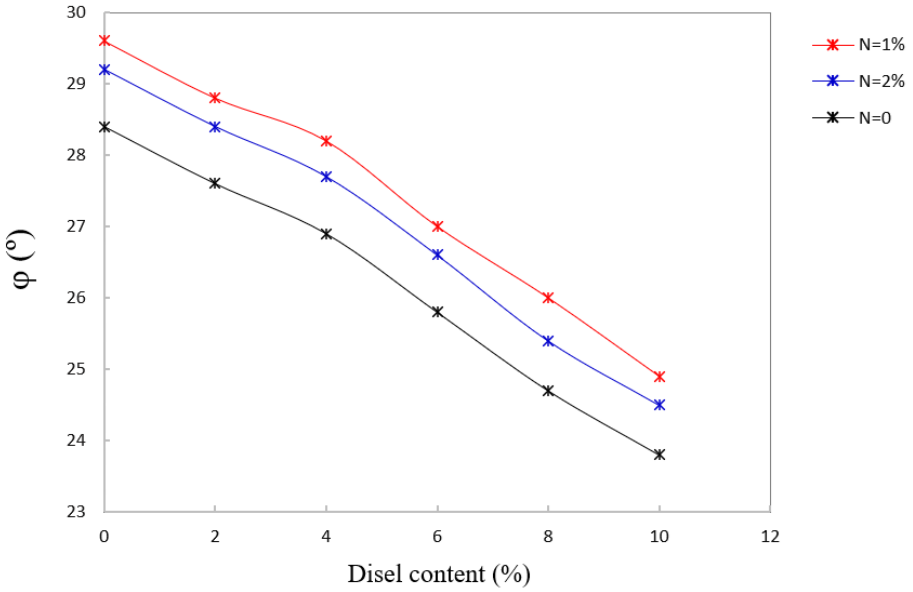
شکل ۱۲. خطوط گسیختگی مور- کولمب (تنش برشی در مقابل تنش عمودی) به ازای مقادیر مختلف آلودگی گازوئیل و N=1%



شکل ۱۳. خطوط گسیختگی مور- کولمب (تنش برشی در مقابل تنش عمودی) به ازای مقادیر مختلف آلودگی گازوئیل و N=2%



شکل ۱۴. چسبندگی در مقابل درصد آلودگی گازوئیل به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیس



شکل ۱۵. زاویه اصطکاک داخلی در مقابل درصد آلودگی گازوئیل به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیس

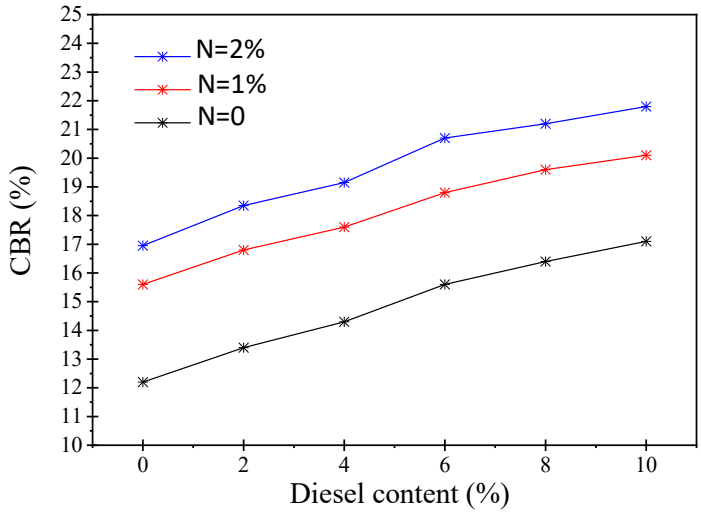
جدول ٤. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

Sample	C (kPa)	φ (⁰)	Sample	C (kPa)	φ (⁰)	Sample	C (kPa)	φ (⁰)
D0-N0	2.14	28.4	D0-N1	2.68	29.6	D0-N2	2.55	29.2
D2-N0	2.46	27.6	D2-N1	3.05	28.8	D2-N2	2.90	28.4
D4-N0	2.72	26.9	D4-N1	3.33	28.2	D4-N2	3.17	27.7
D6-N0	2.63	25.8	D6-N1	3.11	27.0	D6-N2	3.04	26.6
D8-N0	2.45	24.7	D8-N1	2.88	26.0	D8-N2	2.80	25.4
D10-N0	2.36	23.8	D10-N1	2.75	24.9	D10-N2	2.34	24.5

۳-۸- اثرات آلودگی گازوئیلی و افزودنی نانوسیلیس بر نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

شکل ۱۶ تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) را در پی افزایش آلودگی گازوئیلی نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که CBR با بالا رفتن محتوای گازوئیل از ۰٪ به ۱۰٪ به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. این افزایش در مقادیر CBR را می‌توان به‌عنوان یک دگرگونی فیزیکی توجیه کرد؛ روند صعودی مذکور را می‌توان عمدتاً به اثر روان‌کنندگی گازوئیل نسبت داد که اصطکاک میان ذرات را کاهش داده و امکان چیدمان متراکم‌تر را در جریان تراکم فراهم می‌کند. از آنجا که تمامی نمونه‌ها در رطوبت بهینه و در شرایط خشک متراکم شدند، بازدهی چیدمانِ بهبودیافته به حداکثر وزن واحد خشک بالاتر می‌انجامد که به‌طور مستقیم به افزایش مقادیر CBR کمک می‌کند. افزون بر این، گازوئیل میل ترکیب مواد معدنی رس به آب را کاهش داده و انبساط لایه دوگانه پراکنده را از بین می‌برد که منجر به بافتی سفت‌تر در خاک و بهبود مقاومت در برابر نفوذ در جریان آزمایش CBR می‌شود. در مطالعه مشابه دیگری بر روی شن و ماسه رس‌دار آلوده به بنزین، افزایش پیوسته CBRرا با بالا رفتن غلظت آلاینده از صفر به ۱۰ درصد مشاهده کردند (Quiñones-Bolaños and Bustillo-Lecompte 2020). همچنین در پژوهشی دیگر، دریافت شد که در نمونه‌های خاکی متشکل عمدتاً از کائولینیت، کوارتز و مسکوویت، تغییراتی در نسبت‌های نسبی این کانی‌ها به‌دلیل ناهمگونی خاک‌های آلوده رخ داده است؛ با این حال، هیچ‌گونه تشکیل مواد معدنی جدیدی مشاهده نشد (Echeverri-Ramírez et al. 2015).

اثر نانوسیلیس نیز در شکل ۱۶ به‌خوبی نمایان است. برای هر مقدار معین از آلودگی گازوئیل، نمونه‌های حاوی ۲ درصد نانوسیلیس بالاترین مقادیر CBR را نشان می‌دهند و پس از آن‌ها نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس قرار می‌گیرند، در حالی که خاک تیمارنشده کمترین CBR را از خود بروز می‌دهد. هرچند افزودن نانوسیلیس وزن واحد خشک نمونه‌ها را اندکی کاهش می‌دهد، اما در این شکل دیده می‌شود که با افزایش محتوای نانوسیلیس، استحکام CBR نمونه‌ها بالا می‌رود. این رفتار را می‌توان به نقش ریزساختاری نانوسیلیس نسبت داد. نانوسیلیس با پرکردن ریزمنافذ و ایجاد پیوندهای بین‌ذره‌ای از طریق واکنش‌پذیری سطحی خود (و نه واکنش‌های پوزولانی که به‌دلیل محتوای کم کلسیم ناچیز است)، سفتی و ظرفیت باربری خاک را افزایش می‌دهد. کاهش جزئی در وزن واحد خشک نیز با بهبود پیوند میان ذرات و شکل‌گیری ریزساختاری یکپارچه‌تر جبران می‌شود. افزایش بیشتر محتوای نانوسیلیس از ۱٪ به ۲٪، بدون تجمع‌سازی قابل‌توجه، همین روند را ادامه می‌دهد و استحکام بالاتر آن را در مقایسه با مخلوط حاوی ۱٪ نانوسیلیس نمایان می‌سازد.



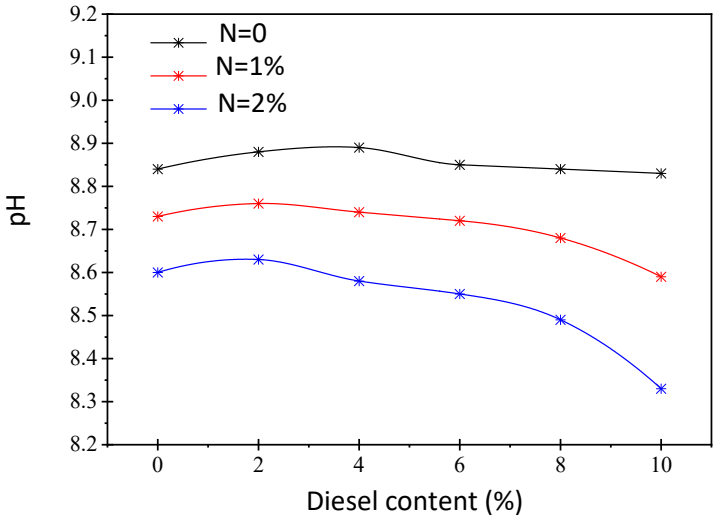
شکل ۱۶. CBR در مقابل مقدار گازوئیل

۳-۹- تأثیر آلودگی گازوئیل و افزودنی نانوسیلیس بر pH

شکل ۱۷ تغییرات pH خاک را در مقابل میزان گازوئیل به نمایش می‌گذارد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، مقادیر pH برای همه نمونه‌ها در محدوده قلیایی باقی می‌ماند؛ با این حال، با افزایش آلودگی گازوئیل، به‌ویژه در مقادیر بالاتر آن، روندی کاهشی و جزئی در pH مشاهده می‌گردد. افزایش اندک اولیه یا تقریباً ثابت‌ماندن pH در درصدهای پایین گازوئیل (تا حدود ۲ تا ٤ درصد) را می‌توان به ظرفیت بافری بافت خاک و ماهیت قلیایی سیستم‌های غالب کائولینیتی نسبت داد. در مقادیر بالاتر گازوئیل، افت تدریجی pH احتمالاً از جذب هیدروکربن‌های گازوئیل بر سطوح رس ناشی می‌شود؛ این جذب، شیمی سطح را دگرگون ساخته و دسترسی به جایگاه‌های تبادلی قلیایی را کاهش می‌دهد.

تفاوت آشکاری میان منحنی‌های مربوط به مقادیر مختلف نانوسیلیس به چشم می‌خورد. خاک تیمارنشده (N = 0%) بالاترین مقادیر pH را نشان می‌دهد، در حالی که خاک‌های تیمارشده با ۱ و ۲ درصد نانوسیلیس، سطوح pH پایین‌تری را به نمایش می‌گذارند. این رفتار عمدتاً به فعالیت سطحی بالای ذرات نانوسیلیس نسبت داده می‌شود؛ فعالیت سطحی بالا، جذب یون‌های هیدروکسیل را تسهیل کرده و واکنش‌های پروتون‌دهی سطحی را تقویت می‌کند. افزایش مقدار نانوسیلیس، به‌دلیل سطح ویژه بیشتر و تراکم بالاتر گروه‌های واکنش‌پذیر سیلانول (Si–OH)، این اثرات را تشدید کرده و به کاهش قلیائیت خاک می‌انجامد. افزون بر این، نانوسیلیس ممکن است برهم‌کنش‌های

فیزیکوشیمیایی میان هیدروکربن‌های گازوئیل و کانی‌های رسی را تسهیل کند و شیمی آبِ موجود در حفرات خاک را بیش از پیش تغییر دهد. در نتیجه، خاک‌هایی با مقدار نانوسیلیس بیشتر، کاهش محسوس‌تری در pH از خود نشان می‌دهند؛ به‌ویژه در سطوح بالای آلودگی گازوئیل.



شکل ۱۷. pH در مقابل مقدار گازوئیل

٤- بحث در ارتباط با مقاومت برشی، مقاومت فشاری و CBR

نتایج حاصل از این پژوهش، رفتار پیچیده و چندوجهی مخلوط ماسه-کائولینیت را در مواجهه با آلودگی گازوئیلی و تیمار نانوسیلیس آشکار می‌سازد. بررسی هم‌زمان پارامترهای مقاومتی (UCS)، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و CBR نشان می‌دهد که پاسخ این خاک به آلودگی، نه یکنواخت است و نه صرفاً کاهشی؛ بلکه تابعی از برهم‌کنش رقابتی مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی متعدد است.

الف: هم‌راستایی UCS و چسبندگی، نقش غالب مؤلفه چسبندگی: همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ و ١٤ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و چسبندگی (C) هر دو روندی غیریکنواخت با یک نقطه اوج در حدود ٤ درصد آلودگی گازوئیل از خود نشان می‌دهند. در سطوح پایین آلودگی (۰ تا ٤ درصد)، مولکول‌های گازوئیل به‌عنوان یک روان‌کننده عمل کرده و با کاهش اصطکاک بین‌ذره‌ای، امکان بازآرایی و چیدمان متراکم‌تر ذرات را در جریان تراکم فراهم می‌سازند. این تراکم بیشتر، تماس مؤثر بین ذرات را افزایش داده و به‌طور موقت موجب تقویت چسبندگی ظاهری و در پی آن، افزایش UCS می‌شود. در این محدوده، اثر متراکم‌سازی مکانیکی بر تضعیف شیمیایی غلبه می‌کند. اما در سطوح بالاتر آلودگی (٦ تا ۱۰ درصد)، با اشباع شدن تدریجی منافذ و پوشش کامل سطوح ذرات رس، مولکول‌های آب‌گریز گازوئیل لایه دوگانه پراکنده را مختل کرده و فاصله بین ذرات را افزایش می‌دهند. این امر نیروهای جاذبه سطحی را تضعیف کرده و مؤلفه چسبندگی کاهش می‌یابد. هم‌راستایی دقیق روند UCS و C در همه سطوح آلودگی، گویای آن است که مقاومت فشاری تک‌محوری این مخلوط عمدتاً توسط مؤلفه چسبندگی کنترل می‌شود و سهم زاویه اصطکاک داخلی در تعیین رفتار نقطه اوج، در مرتبه دوم اهمیت قرار دارد.

ب: کاهش یکنواخت زاویه اصطکاک داخلی: پیامد روان‌کنندگی پیوسته: در مقابل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی (φ) مطابق با شکل ۱۵ روندی پیوسته و یکنواخت کاهشی دارد. این رفتار را می‌توان به ماهیت مکانیکی اصطکاک نسبت داد: زاویه اصطکاک داخلی عمدتاً بازتاب‌دهنده درگیری و قفل‌وبست مکانیکی ذرات

و زبری سطحی آن‌هاست. گازوئیل با پوشش تدریجی سطوح ذرات، تماس مستقیم بین دانه‌ها را کاهش داده و زبری مؤثر را می‌کاهد. از آنجا که این پوشش با هر افزایش در مقدار گازوئیل گسترده‌تر می‌شود، اثر روان‌کنندگی نیز تجمعی بوده و به کاهش پیوسته φ می‌انجامد. برخلاف چسبندگی که تحت تأثیر برهم‌کنش‌های رقابتی قرار دارد، اصطکاک چنین رفتار غیریکنواختی از خود نشان نمی‌دهد و صرفاً کاهشی است.

ج: افزایش پیوسته CBR غلبه سختی مکانیکی بر چسبندگی شیمیایی: نتیجه قابل تأمل دیگر، رفتار افزایشی پیوسته نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) با افزایش آلودگی گازوئیل است (شکل ۱۶). این رفتار در نگاه نخست ممکن است متناقض با کاهش چسبندگی در سطوح بالای آلودگی به نظر رسد؛ اما باید توجه داشت که CBR معیاری از مقاومت در برابر نفوذ در شرایط تراکم مشخص است و بیشتر به سختی، چیدمان متراکم ذرات و وزن واحد خشک حساس است تا به چسبندگی شیمیایی. گازوئیل با کاهش اصطکاک بین‌ذره‌ای، امکان چیدمان متراکم‌تر ذرات را در حین تراکم فراهم می‌کند که به افزایش حداکثر وزن مخصوص خشک می‌انجامد. همچنین گازوئیل با کاهش میل ترکیبی رس به آب و حذف انبساط لایه دوگانه پراکنده، بافتی سفت‌تر در خاک ایجاد می‌کند. بنابراین، CBR برخلاف UCS، بیشتر تحت تأثیر تراکم‌پذیری و سختی مکانیکی قرار دارد تا چسبندگی شیمیایی، و روند افزایشی پیوسته‌ای را تجربه می‌کند.

د: نقش دوگانه نانوسیلیس: بهینه‌سازی وابسته به پارامتر هدف مطابق با جدول ٤ و شکل‌های ١٤ تا ١٦، ترتیب اثر نانوسیلیس بر پارامترهای مختلف مقاومتی یکسان نیست. در UCS و چسبندگی نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس بالاترین مقادیر را نشان می‌دهند، پس از آن‌ها نمونه‌های ۲ درصدی و در نهایت نمونه‌های فاقد نانوسیلیس قرار می‌گیرند. این ترتیب گویای وجود مقدار بهینه‌ای از نانوذرات است که در آن، پراکندگی یکنواخت نانوسیلیس در ماتریس رس، پر شدن مؤثر ریزحفره‌ها و تقویت پیوندهای بین‌ذره‌ای از طریق گروه‌های سیلانول (Si-OH) به‌بهترین شکل ممکن رخ می‌دهد. در مقدار ۲ درصد، تجمع نسبی (کلوخه‌شدن) ذرات نانوسیلیس احتمالاً کارایی توزیع را کاهش داده و نواحی ضعیف موضعی پدید می‌آورد که به افت جزئی مقاومت و چسبندگی نسبت به نمونه ۱ درصدی می‌انجامد. در CBR برخلاف UCS و چسبندگی، نمونه‌های حاوی ۲ درصد نانوسیلیس بالاترین CBR را نشان می‌دهند و پس از آن‌ها نمونه‌های ۱ درصدی و فاقد نانوسیلیس قرار می‌گیرند. این تفاوت را می‌توان به ماهیت متفاوت CBR نسبت داد. CBR به سختی و مقاومت در برابر نفوذ حساس است و تجمع ذرات نانوسیلیس در مقدار ۲ درصد، با ایجاد ریزحفره‌های موضعی و ساختار سخت‌تر، مقاومت در برابر نفوذ را افزایش می‌دهد؛ هرچند ممکن است این تجمع، چسبندگی را اندکی کاهش دهد. به بیان دیگر، نانوسیلیس در مقدار ۱ درصد برای بهبود پیوندهای شیمیایی و چسبندگی بهینه است، در حالی که در مقدار ۲ درصد برای افزایش سختی و مقاومت مکانیکی در برابر نفوذ مؤثرتر عمل می‌کند.

این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان چند شاخص مقاومتی در ارزیابی خاک‌های آلوده تأکید می‌کند؛ زیرا یک افزودنی یا آلاینده می‌تواند بر پارامترهای مختلف، اثرات متفاوت و حتی متضاد داشته باشد. از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تیمار نانوسیلیس، به‌ویژه در مقدار بهینه ۱ درصد، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود نسبی خواص مقاومتی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها در محل‌های پالایشگاهی و جایگاه‌های سوخت پیشنهاد شود.

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی اثرات هم‌زمان آلودگی گازوئیلی (۰ تا ۱۰ درصد) و افزودن نانوسیلیس (۰ تا ۲ درصد) بر ریزساختار و رفتار مهندسی مخلوط ماسه-کائولینیت (٦٠ درصد ماسه و ٤٠ درصد رس) پرداخته است. آزمون‌های فیزیکی، هیدرولیکی، تحکیمی و مکانیکی انجام شده در این مطالعه نشان می‌دهد که رفتار خاک نه تحت تأثیر یک عامل واحد، بلکه برآمده از مکانیسم‌های رقیبی همچون روان‌کاری، بازآرایی ذرات، پیوندسازی و مسدودشدن حفرات است. یافته‌های کلیدی به شرح زیر می‌باشند:

- افزودن گازوئیل به خاک موجب کاهش رطوبت بهینه و افزایش حداکثر وزن مخصوص خشک می‌شود؛ اثری که به خاصیت روان‌کاری گازوئیل نسبت داده می‌شود. افزایش مقدار گازوئیل به کاهش وزن مخصوص نسبی نمونه‌ها می‌انجامد که از جایگزینی

دانه‌ها و ذرات معدنی سنگین‌تر با هیدروکربن‌های سبک‌تر، جذب گازوئیل بر دانه‌های خاک، تشکیل لایه‌های آلی نازک و کم‌چگال، و افزایش حفرات ریز ناشی می‌شود. به‌طور مشخص، افزایش ۱۰ درصدی آلودگی گازوئیلی به کاهش میانگین ۸ درصدی در وزن مخصوص نسبی و کاهش ۵۸,٤ درصدی در رطوبت بهینه منجر می‌گردد. افزون بر این، در بازه مقادیر نانوسیلیس از ۰ تا ۲ درصد، حداکثر وزن مخصوص خشک ۷ درصد افزایش می‌یابد. نانوسیلیس به‌دلیل چگالی پایین و واکنش‌پذیری سطحی بالا، موجب افزایش رطوبت بهینه و کاهش جزئی $\gamma_{d(\max)}$ و G_s می‌شود. با وجود کاهش چگالی ذرات جامد، افزایش مشاهده‌شده در حداکثر وزن مخصوص خشک هم‌زمان با بالا رفتن سطح آلودگی، گویای فرآیند تراکمی است که در آن بازآرایی ذرات نقش غالب را ایفا می‌کند.

–حدود روانی و خمیری در برابر آلودگی گازوئیلی رفتاری غیریکنواخت نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که به‌دلیل اثرات رقابتی جذب و خاصیت آب‌گریزی، در سطوح متوسط آلودگی به اوج می‌رسند. نانوسیلیس با افزایش جذب آب، هر دو حد مذکور را بالا می‌برد. نفوذپذیری در اثر حضور گازوئیل به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد (به‌سبب مسدودشدن حفرات)، در حالی که نانوسیلیس اثری دوگانه دارد: مقدار ۱ درصد آن نفوذپذیری را کاهش می‌دهد، اما مقدار ۲ درصد به‌دلیل ایجاد ریزحفرات ناشی از تجمع ذرات، آن را اندکی افزایش می‌دهد.

–مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) در مقدار تقریبی ٤ درصد آلودگی گازوئیل به اوج می‌رسد؛ زیرا پیش از تضعیف مقاومت در غلظت‌های بالاتر، از اثر متراکم‌سازی ناشی از خاصیت روان‌کاری گازوئیل بهره می‌برد. در این مقدار بهینه گازوئیل، نمونه نسبت به نمونه بدون آلودگی، ۳۲ درصد افزایش در UCS نشان می‌دهد. در مقابل، نمونه حاوی ۱۰ درصد آلودگی گازوئیلی، کاهشی ۲۵ درصدی در UCS نسبت به نمونه بدون آلودگی دارد. نانوسیلیس با مقدار ۱ درصد، بیشترین UCS را پدید می‌آورد. برعکس، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) با افزایش آلودگی گازوئیلی به‌طور پیوسته بالا می‌رود که از بهبود آرایش ذرات و مقاومت اصطکاکی ناشی می‌شود؛ این اثر با افزودن نانوسیلیس تشدید می‌گردد و مقدار ۲ درصد آن بالاترین مقادیر را به همراه دارد. به‌طور میانگین، ۱۰ درصد افزایش در آلودگی گازوئیلی (در بازه ۰ تا ۲ درصد نانوسیلیس) به افزایش ۳۲٫۵ درصدی CBR می‌انجامد. افزون بر این، خاک اصلاح‌شده با ۲ درصد نانوسیلیس، در سطوح مختلف آلودگی، به‌طور میانگین افزایش ۳۳,۲ درصدی در CBR نشان می‌دهد.

– نتایج آزمایش برش مستقیم کوچک‌مقیاس نشان داد که مقاومت برشی مخلوط ماسه–کائولینیت با افزایش آلودگی گازوئیلی به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. این کاهش کلی، حاصل رفتار متفاوت دو مؤلفه مقاومت برشی است:

الف: چسبندگی: برخلاف مقاومت برشی کل، چسبندگی روندی غیریکنواخت با یک نقطه اوج در حدود ٤ درصد آلودگی گازوئیل از خود نشان می‌دهد. در سطوح پایین آلودگی (۰ تا ٤ درصد)، گازوئیل به‌عنوان روان‌کننده عمل کرده و با تسهیل بازآرایی و چیدمان متراکم‌تر ذرات، تماس مؤثر بین‌ذره‌ای را افزایش می‌دهد؛ این امر به تقویت موقت چسبندگی می‌انجامد. اما در سطوح بالاتر (٦ تا ۱۰ درصد)، با اشباع منافذ و پوشش کامل سطوح ذرات رس، مولکول‌های آب‌گریز گازوئیل لایه دوگانه پراکنده را مختل کرده و پیوندهای جاذبه سطحی را تضعیف می‌کنند؛ در نتیجه چسبندگی کاهش می‌یابد. این رفتار غیریکنواخت چسبندگی، هم‌راستا با روند UCS است و تأیید می‌کند که مقاومت فشاری تک‌محوری این مخلوط عمدتاً توسط مؤلفه چسبندگی کنترل می‌شود.

ب: زاویه اصطکاک داخلی: در مقابل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی با افزایش آلودگی گازوئیلی روندی پیوسته و یکنواخت کاهشی دارد. این رفتار به ماهیت مکانیکی اصطکاک نسبت داده می‌شود؛ گازوئیل با پوشش تدریجی سطوح ذرات، تماس مستقیم و زبری مؤثر بین دانه‌ها را کاهش می‌دهد. از آنجا که این پوشش با هر افزایش در مقدار گازوئیل گسترده‌تر می‌شود، اثر روان‌کنندگی تجمعی بوده و به کاهش پیوسته φ می‌انجامد.

افزودن نانوسیلیس به‌طور مشخص هر دو مؤلفه چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را در تمام سطوح آلودگی بهبود می‌بخشد. ترتیب عملکرد نمونه‌ها در همه سطوح آلودگی یکسان است: نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس بالاترین مقادیر چسبندگی و اصطکاک را نشان می‌دهند، پس از آن‌ها نمونه‌های ۲ درصدی و در نهایت نمونه‌های فاقد نانوسیلیس قرار می‌گیرند. این ترتیب گویای وجود مقدار بهینه ۱ درصد نانوسیلیس برای بهبود پیوندهای شیمیایی و چسبندگی است؛ در مقدار ۲ درصد، تجمع نسبی ذرات نانوسیلیس

کارایی توزیع را کاهش داده و به افت جزئی مقاومت برشی نسبت به نمونه ۱ درصدی می‌انجامد. با این حال، هر دو سطح نانوسیلیس نسبت به خاک تیمارنشده عملکرد بهتری دارند. نکته قابل توجه آن است که اگرچه نانوسیلیس مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد، اما نمی‌تواند اثر تضعیف‌کننده گازوئیل را به‌طور کامل جبران کند؛ زیرا مکانیسم آب‌گریزی گازوئیل با ماهیت آب‌دوست نانوسیلیس در تضاد است و در غلظت‌های بالای آلودگی، اثر غالب گازوئیل بر رفتار برشی حاکم می‌شود.

۵. منحنی‌های تحکیم با افزایش آلودگی گازوئیلی به سمت پایین جابه‌جا می‌شوند. اوج‌گیری پارامترهای تحکیم در آلودگی متوسط گازوئیلی نشان می‌دهد که مکانیسم حاکم از سازوکاری که عمدتاً توسط روان‌سازی ذرات و بازآرایی کنترل می‌شود، به سازوکاری که با انسداد منافذ کنترل می‌گردد، تغییر می‌کند. نانوسیلیس این پارامترها را، به‌ویژه در غلظت ۲ درصد، با افزایش پیوند بین ذرات بهبود می‌بخشد.

- pHخاک با افزایش گازوئیل اندکی کاهش می‌یابد و با افزودن نانوسیلیس به‌طور محسوسی بیشتر افت می‌کند که به پروتون‌دهی سطح و دگرگونی شیمی آب منافذ نسبت داده می‌شود.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار مهندسی مخلوط ماسه-کائولینیت در مواجهه با آلودگی گازوئیلی و تیمار نانوسیلیس، حاصل هم‌افزایی چند مکانیسم رقابتی است که بسته به سطح آلودگی و مقدار افزودنی، یکی از آن‌ها غالب می‌شود. در سطوح پایین آلودگی (۰ تا ٤ درصد)، روان‌کنندگی و متراکم‌سازی گازوئیل غالب است و موجب افزایش موقت چسبندگی، UCS و CBR می‌شود؛ در حالی که اصطکاک به‌دلیل پوشش سطوح ذرات، کاهشی است. در سطوح بالای آلودگی (٦ تا ۱۰ درصد)، اشباع منافذ، اختلال در لایه دوگانه پراکنده و تضعیف پیوندهای بین‌ذره‌ای غالب می‌شود؛ در نتیجه چسبندگی، UCS و مقاومت برشی افت می‌کنند، اما CBR به‌دلیل تراکم بالاتر و سختی مکانیکی، همچنان افزایشی می‌ماند. نانوسیلیس به‌طور سیستماتیک مقاومت را در همه سطوح آلودگی بهبود می‌بخشد، اما مقدار بهینه آن بسته به پارامتر هدف متفاوت است: ۱ درصد برای بهبود چسبندگی، UCS و مقاومت برشی، و ۲ درصد برای افزایش CBR و سختی مکانیکی. این تفاوت تأکیدی بر اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان چند شاخص مقاومتی در ارزیابی خاک‌های آلوده است؛ زیرا یک افزودنی یا آلاینده می‌تواند بر پارامترهای مختلف، اثرات متفاوت و حتی متضاد داشته باشد. از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تیمار نانوسیلیس، به‌ویژه در مقدار بهینه ۱ درصد، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود نسبی خواص مقاومتی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها در محل‌های پالایشگاهی و جایگاه‌های سوخت پیشنهاد شود.

٦- مراجع

-Ali Zomorodian, S.M. Shabnam, M. Armina, S. O'Kelly, B.C. (2017). Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives. *Applied Clay Science 140*, 140-147.

-Al-Aghbari, M., Dutta, R., & Mohamedzeini, Y. (2011). Effect of diesel and gasoline on the properties of sands — a comparative study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, *5*(1), 61–68.

-Al-Sanad Hasan, A. Eid Walid, K. Ismael Nabil, F. (1995). Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, *121*, 407-412.

-ASTM D422-63 (2014). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

-ASTM D854-23: (2023). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method. https://store.astm.org/d0854-23.html

-ASTM D698-12: (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. https://store.astm.org/d0698-12r21.html

-ASTM D1883-16: (2021). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. https://store.astm.org/d1883-16.html

-Fallah, M. Shabanpor, M. Zakerinia, M. Ebrahimi, S. (2015). Risk assessment of gas oil and kerosene contamination on some properties of silty clay soil. *Environ Monit Assess*, *187*, 437.

-Hernández-Mendoza, C.E. García Ramírez, P. Chávez Alegría, O. (2021). Geotechnical Evaluation of Diesel Contaminated Clayey Soil. *Appl. Sci. 11*, 6451.

-Hosseini, S.M.R. Naeini, S.A. Hassanlourad, M. (2018). Pre- and post-cyclic behaviour of an unsaturated clayey soil contaminated with crude oil. *Sādhanā*, *43*, 204.

doi:10.1007/s12046-018-0971-2

-Izdebska-Mucha, D., Trzci´nski, J., (2008). Effects of Petroleum Pollution on Clay Soil Microstructure.

-Kererat, C. (2019). Effect of oil-contamination and water saturation on the bearing capacity and shear strength parameters of silty sandy soil. *Engineering Geology*, *257*, 105138.

-Kermani, M. Ebadi, T. (2012). The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, *21*, 655-671.

-Khamehchiyan, M. Hossein Charkhabi, A. Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology 89*, 220-229.

-Khosravi, E. Ghasemzadeh, H. Sabour, M.R. Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology 166*, 11-16.

-Mekkiyah, H.M. Al-Hamadani, Y.A.J. Abdulhameed, A.A. Resheq, A.S. Mohammed, Z.B. (2023). Effect of Crude Oil on the Geotechnical Properties of Various Soils and the Developed Remediation Methods. *Appl. Sci. 13*, 9103.

-Mustafa, Y. M. Al-Amoudi, O. S. B. Ahmad, S. Maslehuddin, M. (2018). Geotechnical Properties of Plastic Marl Contaminated with Diesel. *Arab J Sci Eng 43* (10), 5573-5583.

doi: 10.1007/s13369-018-3224-0

-Nasehi, S.A. Uromeihy, A. Nikudel, M.R. Morsali, A. (2016). Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils. *Geotech Geol Eng*. *34*, 333-345.

-AASHTO. T 193-13, (2013). Standard method of test for the California bearing ratio. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Washington.

-ASTM D4318-17e1: (2018). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
https://store.astm.org/d4318-17e01.html

-ASTM D5084-24: (2024). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. https://store.astm.org/d5084-24.html

-ASTM D2166/D2166M-16: (2024). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. https://store.astm.org/d2166_d2166m-16.html

-ASTM D2435-96: (2017). Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.
https://store.astm.org/d2435-96.html

-ASTM D3080/D3080M-23e1: (2026). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. https://store.astm.org/d3080_d3080m-23e01.html

-Azam, M. S. Xiao, Z. Mia, M. R. Rahman, M. M. Zaman, T. (2022). Effects of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Clayey Soil. *Journal of ICT, Design, Engineering and Technological Science***.**

-Bahmani, S.H. Farzadnia, N. Asadi, A. Huat, B.B.K. (2016). The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil. *Construction and Building Materials***.** *118*, 294-306.

-British Petroleum. (2023). Statistical review of world energy, Energy economic, Centre for energy economics research and policy.

-Correia, N. d. S.; Portelinha, F. H. M.; Mendes, I. S.; da Silva, J. W. B. (2020). Lime treatment of a diesel-contaminated coarse-grained soil for reuse in geotechnical applications. *International Journal of Geo-Engineering*, *11* (1), 8.

doi: 10.1186/s40703-020-00115-2

-Echeverri-Ramírez, Ó., Valencia-González, Y., Toscano-Patiño, D.E., Ordoñez-Muñoz, F.A., Arango-Salas, C., OsorioTorres, S.A. (2015). Geotechnical behavior of a tropical residual soil contaminated with gasoline. *DYNA*, 82(190), 31-37.

-Trzciński, J. Williams, D.J. Żbik, M.S. (2015). Can hydrocarbon contamination influence clay soil grain size composition? *Applied Clay Science*, *109-110*, 49-54.
-Van der Perk, M. (2013). Soil and water contamination, *CRC Press.*
-Wei, Y. Wang, Y. Han, J. Cai, M. Zhu, K. Wang, Q. (2019). Analysis of water retention characteristics of oil-polluted earthy materials with different textures based on van Genuchten model. *J Soils Sediments*, *19*, 373-380.
-Zhao, D., (1996). Experimental study of stress-strain and shear strength behavior of contaminated cohesive soils. In: Diss. Present. To Johns Hopkins Univ. Partial fulfillment Dr. Degree, 149-150.
-Quiñones-Bolaños, E. Bustillo-Lecompte, C. (2020). Geotechnical Properties and Stabilization of Well-graded Sand with Clay and Gravel Soils Contaminated with Gasoline. *Water Air Soil Pollut*, *231*, 523.
-Safehian, H. Rajabi, A.M. Ghasemzadeh, H. (2018). Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Engineering Geology*, *241*, 55-63.
-Sarmadi, M.S. Zohrevand, P. Rezaee, M. (2019). Effect of kerosene contamination on the physical and mechanical properties of sandy soil. *Innov. Infrastruct. Solut. 4*, 7.
doi:10.1007/s41062-019-0196-1

Effect of Diesel Contamination and Nanosilica Treatment on Shear, Strength, and Consolidation Behavior of Clayey Sand

Ali Lakirouhani, *Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.*

Bahram Abbasi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

ALireza Moazzami, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: rou001@znu.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

This study investigates the simultaneous effects of diesel contamination (0% to 10%) and the addition of nanosilica (0%, 1%, and 2%) on the physical and mechanical properties of clayey sand (60% sand and 40% kaolinite). A total of 18 mixtures were prepared, and tests for specific gravity, compaction, Atterberg limits, permeability, consolidation, unconfined compressive strength, California Bearing Ratio (CBR), and direct shear were conducted. The findings indicate that the soil behavior is governed by the interaction between diesel and nanosilica. Increasing diesel content leads to a continuous decrease in specific gravity and optimum moisture content, alongside an increase in maximum dry unit weight. Unconfined compressive strength peaks at approximately 4% contamination and subsequently drops by 25% at 10% contamination. In contrast, the CBR value increases continuously with rising diesel content, with the 2% nanosilica dosage yielding the highest values. Direct shear results show that total shear strength decreases steadily as contamination increases; this reduction stems from the differing behaviors of the two strength components: cohesion exhibits a non-monotonic trend peaking at 4% contamination, whereas the internal friction angle shows a continuous decline. Nanosilica enhances both cohesion and friction, with samples containing 1% nanosilica achieving the highest values. Permeability decreases with increasing diesel content due to pore clogging, while consolidation parameters display a non-monotonic trend, peaking at moderate contamination levels. The optimal percentage of nanosilica (1%) mitigates the adverse effects of diesel and improves mechanical performance—findings that could prove instrumental in managing hydrocarbon-contaminated soils.

Keywords: Direct Shear Test, Unconfined Compressive Strength, California Bearing Ratio, Coefficient of Consolidation, Coefficient of Permeability.