

بکارگیری افزودنی‌های سازگار با محیط زیست به عنوان جاذب آلاینده‌های نفتی و بررسی تاثیر آنها بر مقاومت برشی ماسه آلوده

امین زارعی^۱، حامد آبه کیخا^۲، هادی محمدزاده رومیانی^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، گروه مهندسی عمران

۲. استادیار، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، گروه مهندسی عمران

۳. استادیار، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، گروه مهندسی عمران

mohamadzadeh@bzte.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۸

چکیده

در این پژوهش تأثیر آلاینده‌های نفتی بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بررسی شده و قابلیت افزودنی‌های معدنی شامل زئولیت و پرلیت و همچنین کربنات منیزیم تولید شده از جذب دی اکسید کربن، برای استفاده به عنوان جاذب آلاینده‌های نفتی مورد مطالعه قرار گرفته است. خاک مطالعه شده ماسه بدانه‌بندی شده از دشت قزوین بوده و آلاینده‌های مورد بررسی گازوئیل و نفت سفید است. به منظور ارزیابی تأثیر این آلاینده‌ها بر مقاومت برشی ماسه، آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های اشباع شده با آلاینده نفتی و در تنش‌های عمودی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال صورت پذیرفت. نتایج حاصل نشان داد که زاویه اصطکاک داخلی خاک آلوده نسبت به خاک تمیز بیش از ۱۰ درجه کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده روی نمونه‌های آلوده عمل‌آوری شده با جاذب‌ها، افزودن جاذب‌ها تأثیر چندانی بر مقاومت برشی ماسه آلوده نداشته و تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های عمل‌آوری شده با جاذب نسبت به ماسه آلوده کمتر از ۱۰ درصد است. نمونه‌های عمل‌آوری شده با پرلیت و زئولیت به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت برشی را نشان دادند. در این پژوهش پتانسیل جذب آلاینده‌های نفتی توسط جاذب‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج ارزیابی‌ها، درصد جذب کربنات منیزیم بیش از ۹۰ درصد بوده که بیشتر از سایر جاذب‌های مورد مطالعه در این پژوهش است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کربنات منیزیم مورد مطالعه در این پژوهش از یک سو در فرآیند تولید باعث جذب گاز آلاینده دی اکسید کربن شده و از سوی دیگر قابلیت جذب درصد قابل توجهی از آلاینده‌های نفتی در خاک را دارد.

واژگان کلیدی: ماسه آلوده، آلاینده نفتی، آزمایش برش مستقیم، جاذب‌های معدنی، کربنات منیزیم، جذب دی اکسید کربن.

۱-مقدمه

دهه‌های گذشته انواع آلاینده‌ها از جمله مواد هیدروکربنی شامل مواد نفتی و مشتقات آن در اثر عواملی مانند حمل و نقل، نشت یا ذخیره سازی غیر اصولی باعث آلودگی شدید خاک شده‌اند.

حضور آلاینده‌ها در خاک علاوه بر مشکلات زیست محیطی، ممکن است باعث تغییر در رفتار ژئوتکنیکی آن شود. از

این آلودگی‌ها موجب بروز مشکلات زیادی در خاک و آب-های زیرزمینی می‌شوند. بعضی از آلاینده‌های آلی به دلیل مقاومت در برابر تجزیه و همچنین مشکلات سرطان‌زایی و جهش‌زایی در زمره آلاینده‌های خطرناک قرار می‌گیرند [1] و [2].

نظیر در سال ۲۰۱۱ به بررسی آثار روغن موتور روی خاک رس پیش تحکیم یافته پرداخت. نتایج این پژوهش نشان داد که حضور روغن موتور باعث کاهش حدود خمیری، نفوذپذیری و مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس پیش تحکیم یافته می‌شود [3]. اوگین و داس در سال ۱۹۹۲ با انجام آزمایش سه‌محوری روی دو نوع ماسه سست و متراکم آلوده به نفت سفید، تاثیر این آلاینده را بر رفتار ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای بررسی نمودند. نتایج نشان داد که اشباع کامل ماسه با نفت سفید، باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش قابل توجه کرنش حجمی برای هر دو نوع ماسه سست و متراکم می‌شود [4]. ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) برای ماسه آلوده به نفت در شرایط غیر اشباع توسط شین و داس در سال ۲۰۰۱ بررسی شد. آن‌ها نمونه‌هایی با درصد آلودگی صفر تا ۶ درصد را آزمایش کردند. نتایج آزمایش نشان داد که آلودگی ماسه به نفت، نسبت CBR را به شدت کاهش می‌دهد [5]. صافحیان و همکاران در سال ۲۰۱۸ تغییرات رفتار خاک رس ایلیت آغشته به ۰ تا ۲۰ درصد گازیول را بررسی کردند. یافته‌های این پژوهش نشان دهنده کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه در نمونه‌های آلوده به گازیول بود. همچنین اضافه شدن گازیول چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده و مقاومت فشاری محدود نشده خاک را کاهش داد [6].

خامه‌چیان و همکاران در سال ۲۰۰۷، سه نمونه خاک سطحی ساحلی بوشهر در رده‌های CL، SM و SP را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهشگران آزمایش‌های مختلف شامل حدود اتربرگ، تراکم، برش مستقیم، تک محوری و نفوذپذیری را روی نمونه‌های خاک بکر (فاقد آلاینده) و خاک آلوده به نفت خام با درصدهای مختلف آلودگی (۲ تا ۱۶ درصد) انجام دادند. نتایج نشان داد که در خاک CL با افزایش مقدار آلاینده

نفت خام حد روانی (حدود اتربرگ) کاهش می‌یابد. همچنین وزن مخصوص خشک حداکثر، درصد رطوبت و نفوذ پذیری در تمامی نمونه‌ها با افزایش درصد آلاینده روند کاهشی داشته‌اند. در خاک‌های دانه‌ای نیز با افزایش میزان آلاینده، زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های ماسه‌ای کاهش یافت [7].

پژوهش‌های دیگری که برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی در خاک‌های رسی و ماسه‌ای انجام پذیرفته، بیانگر آن است که افزایش درصد ترکیبات هیدروکربنی در خاک باعث کاهش حدود اتربرگ، وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه، قابلیت نفوذ پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، شاخص تراکم و شاخص تورم می‌شود [8 تا 13].

در طول سال‌های گذشته روش‌های زیادی برای جذب آلاینده و بهبود رفتار خاک آلوده به کار گرفته شده است. این روش‌ها از نظر کارایی، مدت زمان، آثار و هزینه‌های اجرایی با یکدیگر متفاوت هستند [14]. روش‌های فیزیکی یا شیمیایی شامل استخراج آلاینده با بخار و روش تثبیت و جامدسازی هستند. روش‌های بهسازی حرارتی مانند تزریق بخار و استخراج به کمک حرارت (تبخیر)، با بالا بردن دمای خاک به وسیله حرارت موجب حذف آلاینده‌ها از خاک می‌شوند. همچنین از این روش‌ها می‌توان به عنوان مکمل سایر روش‌ها نیز استفاده کرد [15 و 16].

یکی از روش‌های مرسوم برای جذب آلاینده‌های نفتی و بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده، تثبیت آن‌ها با افزودنی‌هایی مانند سیمان پرتلند، آهک و خاکستر بادی است. این افزودنی‌ها باعث کاهش سرعت حرکت و نفوذ آلودگی‌ها درون خاک شده و مانع آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شوند [17]. اولواتویی و همکاران در سال ۲۰۲۰ از افزودنی‌های سیمان پرتلند و آهک برای کاهش میزان آلاینده و بهبود پارامتر مقاومت برشی استفاده کردند. نتایج بدست آمده بیانگر کاهش میزان آلودگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی در خاک رس کائولینیت با افزودن سیمان و آهک بوده است. با افزودن ۲۰ درصد ترکیب سیمان پرتلند و آهک به رس آلوده زاویه اصطکاک داخلی از ۳۷ درجه به ۱۴ درجه کاهش پیدا کرد ولی چسبندگی نمونه‌ها به شدت افزایش یافت

زاویه اصطکاک داخلی در خاک رس آلوده می‌شوند. اما در خاک‌های ماسه‌ای بسته به جنس و ابعاد ذرات افزودنی و جنس و دانه‌بندی ماسه، افزودنی‌های غیرچسبنده ممکن است باعث افزایش یا کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک آلوده شوند. در مورد افزودنی‌های در ابعاد نانو نیز تغییرات پارامترهای مقاومتی به شدت به جنس ذرات نانو وابسته است.

در دهه‌های گذشته سیمان و آهک همواره جزو گزینه‌های رایج برای بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی انواع خاک‌ها بوده‌اند [22]. اما استفاده از آن‌ها برای مصارف عمرانی مخاطرات زیست محیطی زیادی به دنبال دارد [22 و 18]. فرآیند تولید سیمان از جمله آلاینده‌ترین صنایع حال حاضر است [23]. تولید هر تن سیمان منجر به ایجاد یک تن دی اکسید کربن می‌شود [24]. در سال ۲۰۱۳ صنعت سیمان به تنهایی ۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در کره زمین را به خود اختصاص داد [25]. از آنجایی که حفاظت از محیط زیست امری ضروری و اجتناب ناپذیر است پژوهشگران در دهه‌های اخیر توجه ویژه‌ای به استفاده از مصالح جایگزین داشته‌اند. مصالحی که برای تولید آن‌ها از انرژی کمتری استفاده شده و مخاطرات زیست محیطی کمتری داشته باشند.

یکی از مهمترین چالش‌های جامعه جهانی کاهش میزان دی اکسید کربن به عنوان یکی از عوامل اصلی گرمایش زمین است [26]. از اثربخش‌ترین روش‌های کاهش این آلاینده تبدیل آن به کانی‌های کربناته است. در این روش از دی اکسید کربن برای تشکیل یون بی‌کربنات (CO_3^{2-}) استفاده می‌شود [27]. کانی کربنات کلسیم حاصل از ترکیب یون بی‌کربنات (CO_3^{2-}) با یون Ca^{2+} ، غیرسمی و سازگار با محیط زیست بوده و قابلیت چسباندگی خاک را نیز دارد. در پژوهش‌های بسیاری توانایی این کانی در بهبود رفتار مقاومتی خاک ارزیابی شده است [28 الی 30]. در پژوهش‌های اخیر، علاوه بر کربنات کلسیم کانی‌های کربناته دیگر از جمله کربنات آهن (FeCO_3) و کربنات منیزیم (MgCO_3) که با جذب دی اکسید کربن تهیه شده‌اند نیز در بهبود خاصیت‌های مختلف خاک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [31].

که باعث افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها شد [18]. زمردیان و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی میزان تاثیر نانو ذرات بر روی خاک‌های آلوده نفتی پرداختند. سطح ویژه نانو ذرات بیشتر از ذرات خاک بوده که باعث افزایش واکنش‌پذیری و تاثیر گذاری بر رفتار محیط می‌شود. این مواد علاوه بر پر کردن فضاهای خالی بین ذرات ریزدانه، قابلیت جذب آلاینده‌های نفتی را نیز دارند. در این پژوهش میزان تاثیر نانورس و نانو سیلیس روی خاک رس CL بررسی شد. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و مدول برشی افزایش یافت [19]. با توجه به نتایج ناصحی و همکاران در سال ۲۰۱۵، اضافه کردن نانو ذرات براده آهن باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی در خاک رس CL آلوده به ۹ درصد گازوئیل به مقدار ۱۶ درجه شده و باعث بروز رفتار دانه‌ای در رس آلوده شده است [20].

احمد و همکاران در سال ۲۰۲۰ برای تثبیت ماسه آلوده به نفت خام و گازوئیل از سیمان پرتلند، پودر سنگ آهک و سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان تثبیت کننده استفاده کردند. برای هر دو آلودگی نفت خام و گازوئیل، تمام نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب سیمان پرتلند به همراه پودر سنگ آهک مقاومت تک محوری بالاتری را نشان دادند؛ در حالی که نمونه‌های سیمان پرتلند به همراه سرباره کوره آهن‌گدازی در سطوح آلودگی ۵ درصد و ۱۰ درصد مقاومت پایین‌تری داشتند. نمونه تثبیت شده با ۷/۵ درصد سیمان پرتلند افزایش ۱۸ درصدی جذب آلاینده را نسبت به نمونه ماسه عمل‌آوری نشده نشان داد. افزودن پودر سنگ آهک و سرباره کوره آهن‌گدازی باعث افزایش جذب آلاینده شد [21].

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تاثیر افزودنی‌ها بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های آلوده، به عواملی از جمله جنس و چگونگی عملکرد افزودنی‌ها وابسته است. افزودنی‌های چسباندنده مانند سیمان پرتلند و آهک مقاومت برشی و ضریب چسبندگی خاک آلوده را افزایش می‌دهند؛ اما باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی می‌شوند. افزودنی‌های غیر چسبنده که بیشتر با هدف جذب آلاینده به خاک آلوده اضافه می‌شوند، رفتار دانه‌ای در خاک‌های رسی ایجاد نموده و باعث افزایش

D ₅₀ (mm)	1.8	ASTM D2487
C _u	14	ASTM D2487
C _c	1.11	ASTM D2487
G _s	2.65	ASTM C127
G _{dmax} (kN/m ³)	18	ASTM D698
ω _{opt} (%)	15	ASTM D4643

Table 1. Characteristics of the studied sand

۲-۲-آلاینده‌ها

آلاینده‌های نفتی مورد مطالعه در این پژوهش گازوئیل و نفت سفید است که از مشتقات نفتی پرکاربرد در ایران بوده و در مناطق صنعتی مانند پالایشگاه‌ها، مخازن سوخت، انبارهای نفت و خطوط لوله انتقال احتمال نشت و نفوذ آن‌ها در خاک وجود دارد. این آلاینده‌ها در تحقیقات گذشته از جمله زمردیان و همکاران ۲۰۱۷، صافحیان و همکاران ۲۰۱۸ و احمد و همکاران ۲۰۲۰ نیز استفاده شده است. ویژگی‌های آلاینده‌های استفاده شده در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲. مشخصات آلاینده‌های مورد مطالعه

Pollutant	Parameter	Value
Gasoil	Density@15°	860 kg/m
	Kinematic viscosity@37.8°	2-5.5 c.st
Kerasone	Density@15°	820 kg/m
	Kinematic viscosity@37.8°	1 c.st

Table 2. Characteristics of the pollutants used

۲-۳-افزودنی‌های جاذب

در این پژوهش افزودنی‌های معدنی شامل پرلیت و زئولیت و کربنات منیزیم حاصل از جذب دی اکسید کربن به عنوان جاذب مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

۲-۳-۱-کربنات منیزیم

در این پژوهش پودر کربنات منیزیم با جذب دی اکسید کربن تولید شده است. در مطالعات پیشین از کربنات منیزیم تولید شده با این روش برای تثبیت انواع خاک‌های رسی و ماسه‌ای استفاده شده است [31, 32]. با توجه به نتایج پژوهش‌های گذشته ذرات کربنات منیزیم می‌تواند به شکل سوزنی رسوب نماید و با توجه به سطح ویژه زیاد این ذرات

رومبانی و همکاران در سال ۲۰۲۱ پژوهشی را به منظور بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی شامل شاخص خمیری، مقاومت برشی و رفتار تحکیمی نمونه‌های رسی CH تثبیت شده با کانی‌های کربنات مختلف انجام دادند. نتایج حاصل بیان می‌کند که کربنات منیزیم به دلیل اندازه ذرات آن و توزیع یکنواخت و همگن در خاک رس در مقایسه با کربنات کلسیم، تاثیر بیشتری بر بهبود خواص رسی داشته است [32].

در این پژوهش تاثیر آلاینده‌های هیدروکربنی رایج شامل گازوئیل و نفت سفید بر رفتار خاک ماسه‌ای مطالعه شده است. در ادامه قابلیت استفاده از مواد معدنی سازگار با محیط زیست شامل پرلیت و زئولیت و همچنین کربنات منیزیم تولید شده از جذب دی اکسید کربن آزاد شده از صنایع به عنوان جاذب آلاینده‌های هیدروکربنی بررسی شده است. در نهایت تاثیر این مواد بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای آلوده به گازوئیل و نفت سفید ارزیابی شده است.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-ماسه مورد مطالعه

در این پژوهش ماسه اخذ شده از عمق ۰/۵ تا ۱/۵ متر دشت قزوین در مجاورت مخازن سوخت مورد مطالعه قرار گرفته است. این خاک مطابق استاندارد ASTM D2487-11 و بر اساس سیستم متحد، از نوع ماسه بددانه‌بندی شده (SP) است. در شکل (۱) نمودار دانه بندی و در جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی ماسه مورد مطالعه ارائه شده است.

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده

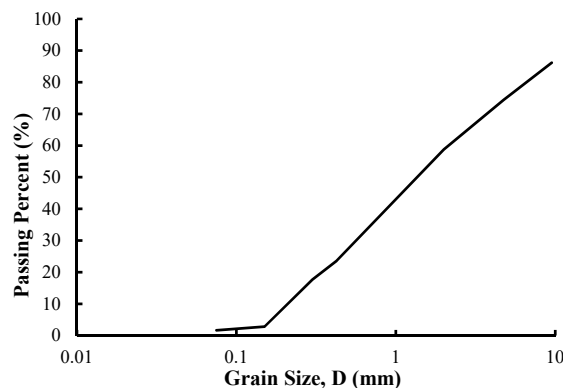


Fig. 1. Grading of the sand

جدول ۱. ویژگی‌های ماسه مورد استفاده

Parameter	Value	Standard
-----------	-------	----------

فلزات سنگین در خاک را دارد و می‌تواند باعث بهبود پارامترهای مقاومتی خاک نیز شود [28, 33].

پرلیت نیز از جمله مواد آتشفشانی و معدنی بوده که از جمله ویژگیهای بارز آن آب‌دوست بودن و توانایی جذب و نگهداشت بالای سیالات است. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان دهنده قابلیت بالای این ماده برای تصفیه سیالات و جذب آلاینده‌های هیدروکربنی در سیالات است [34, 35]. در جدول (۳) مشخصات فیزیکی و شیمیایی این مواد ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت و پرلیت

Properties	Zeolite	Perlite
Particle size (mm)	0.6-1	1-1.2
Specific gravity	2.3	2.2
Chemical composition (%)		
SiO ₂	64	70
Al ₂ O ₃	10.1	14
Fe ₂ O ₃	1.8	1
CaO	1.8	1
MgO	0.8	1
Na ₂ O	4.9	7.5
K ₂ O	2.3	3.2
SO ₃	1.2	0.08

Table 3. Physical and chemical properties of additives

۴-۲-آزمایش‌ها

۴-۲-۱-تعیین درصد جذب

برای ارزیابی عملکرد مواد مورد مطالعه در جذب آلاینده‌های نفتی، درصد جذب این مواد تعیین شد. مراحل آزمایش مشابه آزمایش درصد جذب آب سنگدانه در استاندارد ASTM C-128-01 در نظر گرفته شد [36]. ماسه مطالعه شده و مواد افزودنی به صورت مجزا با وزن مشخصی از نفت سفید و گازوئیل به مدت ۲۴ ساعت اشباع شدند. سپس این مواد به مدت یک ساعت روی کاغذ فیلتر قرار گرفتند تا اضافه آلاینده‌ها جدا شود. در پایان با تعیین وزن هر کدام از مواد و مقایسه با وزن اولیه میزان جذب و نگهداری آلاینده‌ها برای هر ماده تعیین شده است.

هر سه افزودنی استفاده شده در این پژوهش جزو کانی‌های غیرآلی بوده و با آلاینده‌های نفتی مانند گازوئیل و نفت سفید

می‌توان انتظار داشت که قابلیت جذب این پودر قابل توجه باشد [31].

در شکل (۲) مراحل تولید کربنات منیزیم با جذب دی اکسید کربن ارائه شده است. برای تولید کربنات منیزیم، ۰/۲۵ کیلوگرم گاز CO₂ به ۳ لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۱/۵ مولار به مدت ۷۲ ساعت تزریق می‌شود تا محلول کربنات سدیم تولید شود. در ادامه محلول کربنات سدیم با محلول سولفات منیزیم ۱ مولار با نسبت ۱ به ۱ ترکیب می‌شود تا رسوب کربنات منیزیم تولید شود [32]. این رسوب با کاغذ صافی از بقیه محلول جدا شده و پس از خشک شدن به صورت پودر قابل استفاده است.

شکل ۲. مراحل تولید کربنات منیزیم با جذب دی اکسید کربن

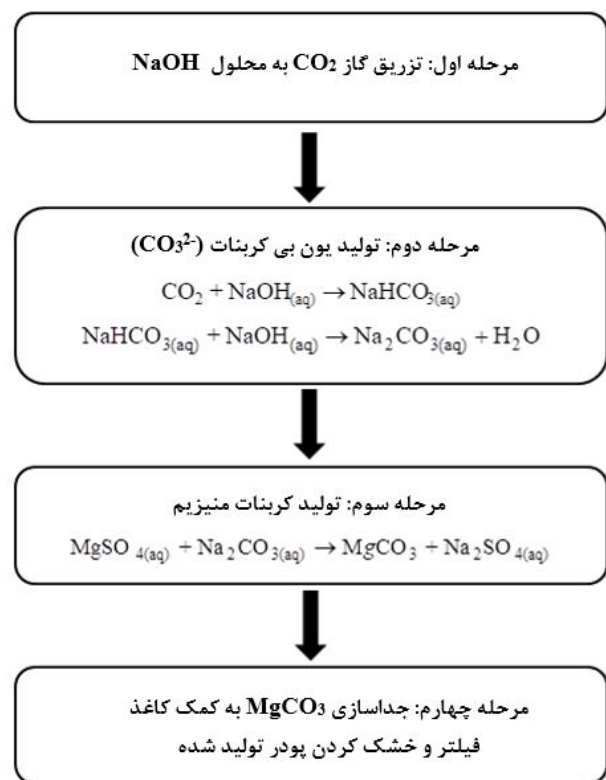


Fig. 2. Process of magnesium carbonate producing

۲-۳-۲-افزودنی‌های معدنی پرلیت و زئولیت

زئولیت طبیعی یکی از متداول‌ترین پوزولان‌ها است که در زمره مواد آتشفشانی یا آتشفشان رسوبی با ساختار سه‌بعدی و بلوری است. این ماده پتانسیل جذب آلاینده‌های مختلف از جمله

پژوهش‌های مختلف گذشته عمدتاً بین ۵ تا ۴۰ درصد متغیر بوده است [18، 21 و 40]. در این پژوهش در نمونه‌های عمل‌آوری شده برای آزمایش‌های برش مستقیم، میزان جاذب ۲۰ درصد وزنی در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. برنامه آزمایش‌های برش مستقیم

Test code	Pollutant	Additive (%)	Vertical Stress (kPa)
Sand	-	-	50, 100, 200
SG	-	-	50, 100, 200
SG-Mg	Gasoil	20	50, 100, 200
SG-Zeo		20	50, 100, 200
SG-Per		20	50, 100, 200
SK	-	-	50, 100, 200
SK-Mg	Kerason	20	50, 100, 200
SK-Zeo		20	50, 100, 200
SK-Per		20	50, 100, 200

Table 4. Direct shear tests program

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین درصد جذب آلاینده

در شکل (۳) درصد جذب خاک ماسه و جاذب‌های مطالعه شده شامل پرلیت، زئولیت و کربنات منیزیم برای هر دو آلاینده گازوئیل و نفت سفید ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین درصد جذب مربوط به کربنات منیزیم است که می‌تواند به میزان ۹۱/۵ درصد وزن خود، گازوئیل جذب کند. قابلیت جذب کربنات منیزیم ۳/۵ تا ۴ برابر خاک ماسه است. بعد از کربنات منیزیم، زئولیت نیز قابلیت جذب قابل توجهی دارد. اما پرلیت نسبت به این دو ماده قابلیت جذب کمتری نشان می‌دهد.

شکل ۳. میزان جذب آلاینده توسط افزودنی‌های پیشنهادی

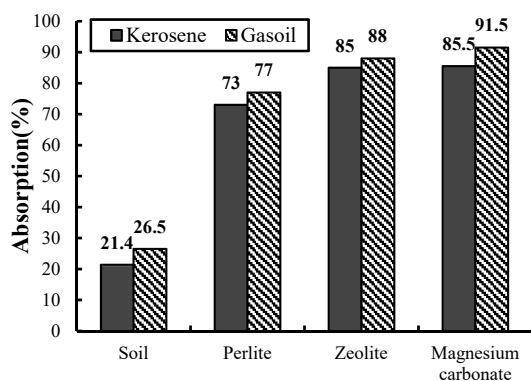


Fig. 3. Absorption of pollutants by proposed additives

واکنش شیمیایی نشان نمی‌دهند. زئولیت و پرلیت کانی‌های معدنی و غیر آلی بوده و دارای ساختار شیمیایی پایدار هستند. این مواد به دلیل وجود تخلخل بالا در ساختار خود مواد نفتی را جذب می‌کنند. [37، 38 و 39]. مواد نفتی دارای ترکیبات کربن، اکسیژن و هیدروژن بوده و واکنش شیمیایی خاصی را با مواد معدنی ندارند. منیزیت نیز نوعی ماده غیر آلی یا معدنی با ترکیب شیمیایی پایدار (MgCO₃) است و تنها در شرایط اسیدی ترکیب آن دچار ناپایداری می‌شود و می‌توان گفت در شرایط غیراسیدی با مواد نفتی واکنش شیمیایی نخواهد داشت.

۲-۴-۲- آزمایش برش مستقیم

برای تعیین تغییرات مقاومت برشی خاک، آزمایش‌های برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080 روی نمونه‌های خاک تمیز، خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید و خاک آلوده به همراه جاذب‌های مختلف تحت تنش‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. ابعاد نمونه مورد آزمایش ۱۰×۱۰×۳ سانتی‌متر است. آزمایش برش مستقیم به صورت کنترل کرنش با سرعت جابه‌جایی افقی ثابت برابر با ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه (به روش کند) انجام شد.

برای ساخت نمونه‌های آزمایش برش مستقیم از روش بارش خشک استفاده شد. وزن مشخصی از ماسه خشک توسط قیفی با دهانه به قطر ۱۰ میلی‌متر و از ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر درون جعبه برش به ضلع ۱۰ و ارتفاع ۳ سانتی‌متر ریخته شد تا نمونه‌ای با وزن مخصوص ۱۸/۳۵ کیلونیوتن بر متر مکعب بدست آید. برای نمونه‌های آلوده، پس از قرارگیری جعبه در دستگاه، محفظه دستگاه به مدت ۲۴ ساعت با آلاینده پر می‌شود تا نمونه با آلاینده‌ها اشباع شود. برای نمونه‌های عمل‌آوری شده، افزودنی به میزان ۲۰ درصد وزنی با خاک خشک ترکیب شده و فرآیند نمونه‌سازی مشابه نمونه‌های خاک خالص انجام شده است.

در جدول (۴) برنامه آزمایش‌های برش مستقیم ارائه شده است. در کدهای ارائه شده در این جدول، خاک ماسه بدون افزودنی با حرف S، افزودنی‌های کربنات منیزیم، زئولیت و پرلیت به ترتیب با Mg، Zeo و Per و آلاینده‌های گازوئیل و نفت به ترتیب با حروف G و K بیان شده‌اند. درصد تثبیت کننده در

۳-۲- تصاویر SEM و آنالیز EDS

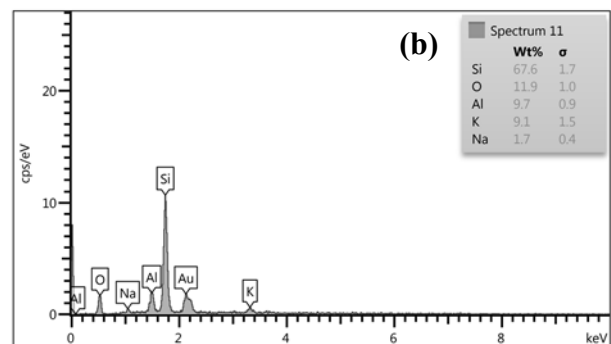
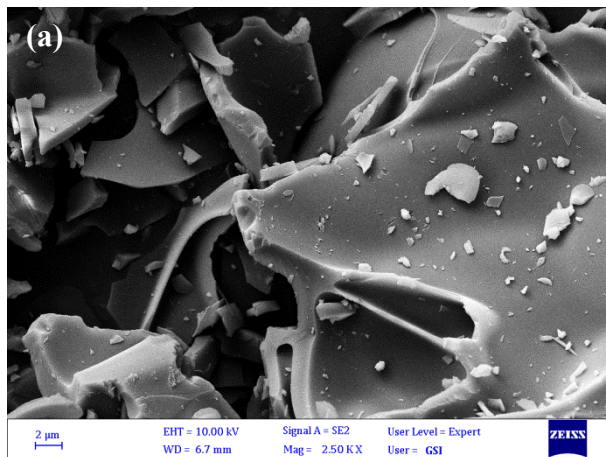
به منظور بررسی دقیق‌تر و مطالعه میکروسکوپی افزودنی‌ها، تصاویر SEM و آنالیزهای EDS تهیه شد که نتایج حاصل در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به تصاویر SEM، ذرات پرلیت درشت‌تر بوده و سطوح آن‌ها صاف است. بنابراین کمترین درصد جذب را در بین مواد مورد مطالعه نشان داده‌اند. بلورهای کربنات منیزیم بیشتر سوزنی شکل و با قطر کمتر از ۱ میکرومتر است. بنابراین انتظار می‌رود سطح ویژه آن بیشتر بوده و در نتیجه درصد جذب بیشتری داشته باشد. نتایج آنالیز EDS نیز نشان دهنده عناصر تشکیل دهنده مواد مطالعه شده و بیانگر خلوص کربنات منیزیم تولید شده با جذب CO_2 در این پژوهش است.

۳-۳- آزمایش‌های برش مستقیم

۳-۳-۱- تأثیر آلودگی نفتی بر مقاومت برشی ماسه

در شکل (۵) نمودارهای تنش برشی نسبت به جابه‌جایی افقی برای نمونه‌های ماسه تمیز و آلوده تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، اشباع نمونه ماسه با آلاینده‌ها باعث کاهش قابل توجه در مقاومت برشی ماسه شده است. میزان کاهش مقاومت در تنش‌های قائم مختلف، برای نمونه‌های آلوده به نفت سفید ۱۳ الی ۳۷ درصد و برای نمونه‌های آلوده به گازوئیل ۱۰ الی ۳۸ درصد است. هر دو آلاینده نفت سفید و گازوئیل تقریباً با نسبت مشابهی مقاومت برشی ماسه را کاهش داده‌اند و تفاوت چندانی بین نوع آلاینده مصرفی در کاهش مقاومت برشی مشاهده نشده است. در محدوده تنش‌های برشی پایین، شیب نمودار تنش برشی-جابه‌جایی افقی برای نمونه‌های آلوده تفاوت چندانی با نمونه‌های ماسه تمیز ندارد. اما با افزایش تنش برشی شیب نمودارهای مربوط به نمونه‌های آلوده کاهش یافته و این نمونه‌ها نسبت به ماسه تمیز رفتار نرم‌تری از خود نشان داده‌اند.

شکل ۴. تصویر SEM و آنالیز EDS از بافت افزودنی‌های مورد استفاده: a,b-پرلیت، c,d-زئولیت، e,f-کربنات منیزیم



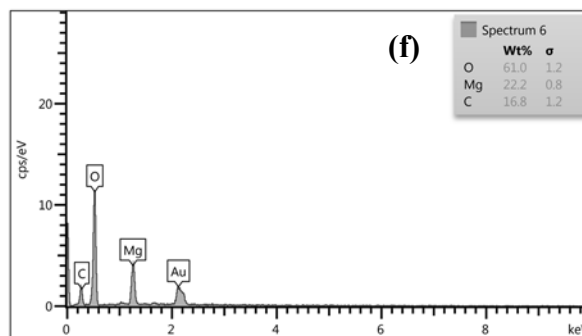
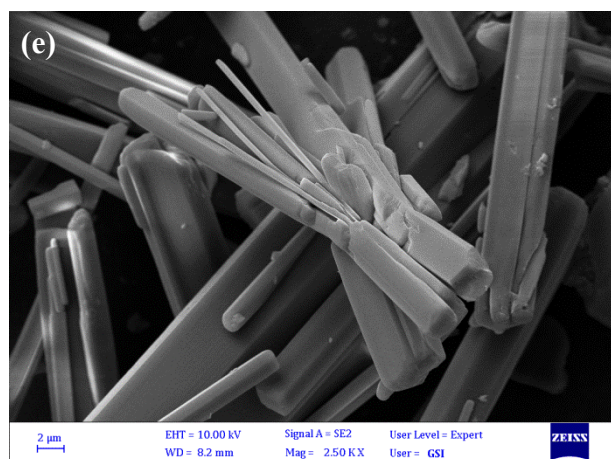
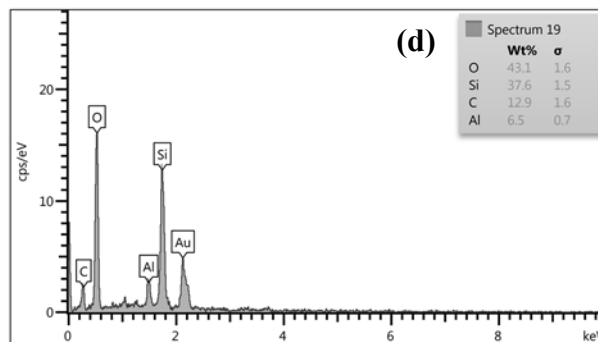
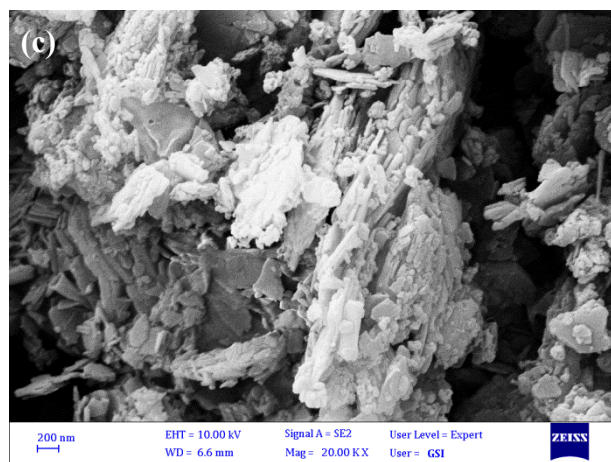


Fig 4. SEM image and EDS analysis of tissue Additives used: a,b-perlite,c,d-zeolite, e,f-magnesium carbonate

اصطکاک داخلی برای نمونه آلوده به نفت در حدود ۱۲ درجه و برای نمونه آلوده به گازوئیل در حدود ۱۱ درجه برآورد می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده توسط خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) زاویه اصطکاک داخلی دو نوع ماسه بددانه‌بندی شده و ماسه لای‌دار بوشهر در صورت اشباع شدن با نفت خام، حدود ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر میزان کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک در اثر اشباع با دو آلاینده مختلف حدود ۲۲/۵ تا ۲۴ درصد ارزیابی می‌شود که هماهنگی خوبی با تحقیقات خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) دارد.

به منظور بررسی دقیق‌تر، تغییرات مقاومت برشی نسبت به تنش قائم به صورت پوش گسیختگی برای نمونه‌های مختلف تهیه شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، پوش گسیختگی ماسه تمیز به میزان قابل توجهی بالاتر از پوش نمونه‌های آلوده قرار گرفته است که نشان دهنده مقاومت برشی بیشتر نمونه ماسه تمیز نسبت به نمونه‌های آلوده است. همچنین شیب پوش گسیختگی ماسه تمیز بیشتر از پوش نمونه‌های آلوده است. بر اساس پوش‌های گسیختگی، پارامترهای مقاومتی موهر کولمب شامل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و ضریب چسبندگی خاک (C) در شرایط زهکشی شده تعیین شده و نتایج حاصل در شکل (۷) ارائه شده است. مقدار کاهش زاویه

نشان دادند. اما در نمونه‌های آلوده به نفت سفید مقاومت برشی نمونه‌های عمل‌آوری شده با زئولیت و کربنات منیزیم نسبت به ماسه آلوده بدون افزودنی تفاوت چندانی را نشان ندادند. شکل ۶. تغییرات مقاومت برشی نسبت به تنش قائم برای نمونه‌های ماسه تمیز و آلوده

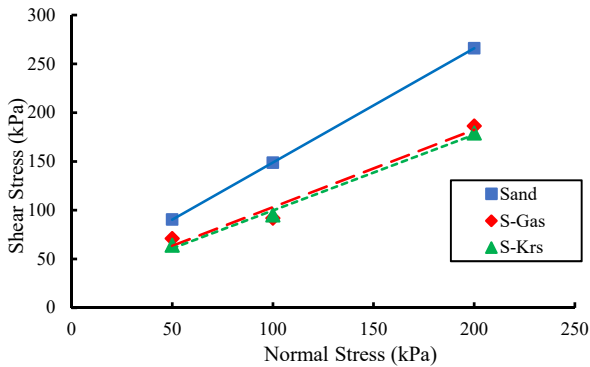


Fig. 6. Variation of shear strength versus vertical stress for clean and contaminated samples

شکل ۷. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه‌های آلوده و فاقد آلاینده

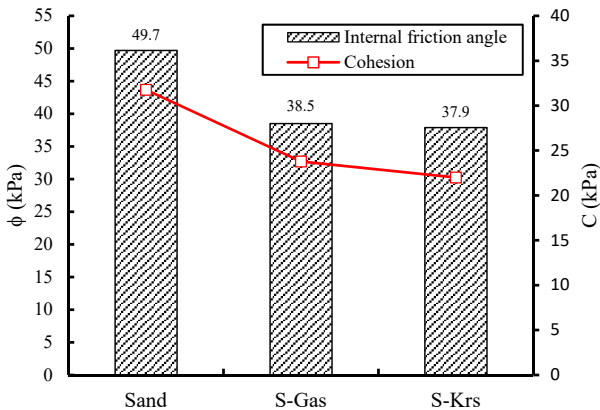


Fig. 7. Internal friction and cohesion angle values for contaminated and non-contaminated samples

شکل ۸. نمودار تنش برشی به جابه‌جایی افقی در تنش‌های قائم مختلف برای نمونه‌های آلوده به a-گازوئیل و b-نفت سفید

شکل ۵. تغییرات تنش برشی به جابه‌جایی افقی در تنش‌های قائم مختلف برای نمونه‌های خاک تمیز و آلوده

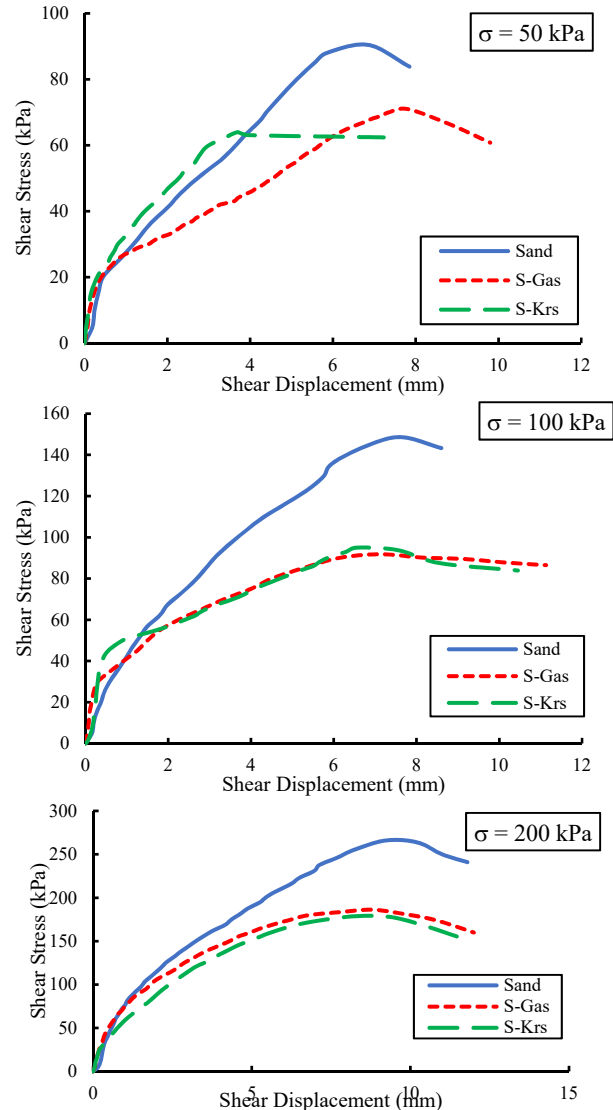


Fig. 5. Shear stress versus horizontal displacement at different stresses for clean and contaminated samples

۳-۳-۲- تأثیر جاذب‌ها بر مقاومت برشی ماسه آلوده

برای بررسی تاثیر افزودنی‌های جاذب بر بهبود پارامترهای مقاومتی در خاک‌های آلوده به مواد نفتی، آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های آلوده عمل‌آوری شده با کربنات منیزیم، زئولیت و پرلیت انجام شد. در شکل (۸) نمودارهای تنش برشی نسبت به جابه‌جایی افقی تحت تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌های آلوده به گازوئیل و نفت سفید ارائه شده است. نمونه‌های عمل‌آوری شده با پرلیت بیشترین مقاومت برشی را نشان دادند. افزودنی‌های زئولیت و کربنات منیزیم در نمونه‌های آلوده به گازوئیل افزایش مقاومت برشی را

زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های عمل‌آوری شده با پرلیت و کمترین مقدار برای نمونه‌های عمل‌آوری شده با زئولیت بدست آمده است. بر اساس تصاویر SEM شکل (۴)، ذرات پرلیت در حد لای بوده و در میان افزودنی‌های مورد مطالعه بزرگترین ابعاد را دارند. اندازه و شکل ذرات پرلیت و بافت سطوح ذرات به همراه خاصیت جذب آلاینده باعث افزایش اصطکاک بین ذرات پرلیت و ماسه و در نتیجه باعث افزایش مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است. ذرات زئولیت در اندازه ذرات رس و دارای کمترین ابعاد است. حضور این ذرات ریز در بین دانه‌های ماسه باعث کاهش مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است. اندازه ذرات منیزیت کمتر از ذرات پرلیت است. اما به دلیل شکل سوزنی ذرات منیزیت و خاصیت جذب آلاینده آنها، سطح تماس مناسب بین دانه‌های ماسه و ذرات منیزیت فراهم شده و مقاومت برشی نمونه‌های عمل‌آوری شده با مقاومت برشی ماسه آلوده بدون افزودنی تقریباً برابر است. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده توسط اولواتویی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دهنده کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک آلوده به نفت خام با افزایش درصد افزودنی سیمان پرتلند و آهک است که با نتایج مربوط به زئولیت در این پژوهش تا حدودی هماهنگی دارد. البته لازم به ذکر است که افزودنی‌های سیمان پرتلند و آهک خاصیت چسبندگی زیادی داشته و تاثیر آنها در افزایش مقاومت برشی معمولاً به صورت افزایش ضریب چسبندگی خاک نمود پیدا می‌کند.

با توجه به شکل (۱۰)، ضریب چسبندگی زهکشی شده برای نمونه‌های عمل‌آوری شده آلوده به گازوئیل بیشتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده آلوده به نفت سفید است. این مسأله می‌تواند به دلیل گرانیوی بیشتر گازوئیل نسبت به نفت سفید باشد که باعث ایجاد مقاومت در برابر تغییر شکل برشی می‌شود. اگرچه افزایش مقاومت چندان زیاد نیست، اما در محدوده تنش‌های مؤثر کم می‌تواند باعث افزایش محسوس در مقاومت برشی نمونه شود.

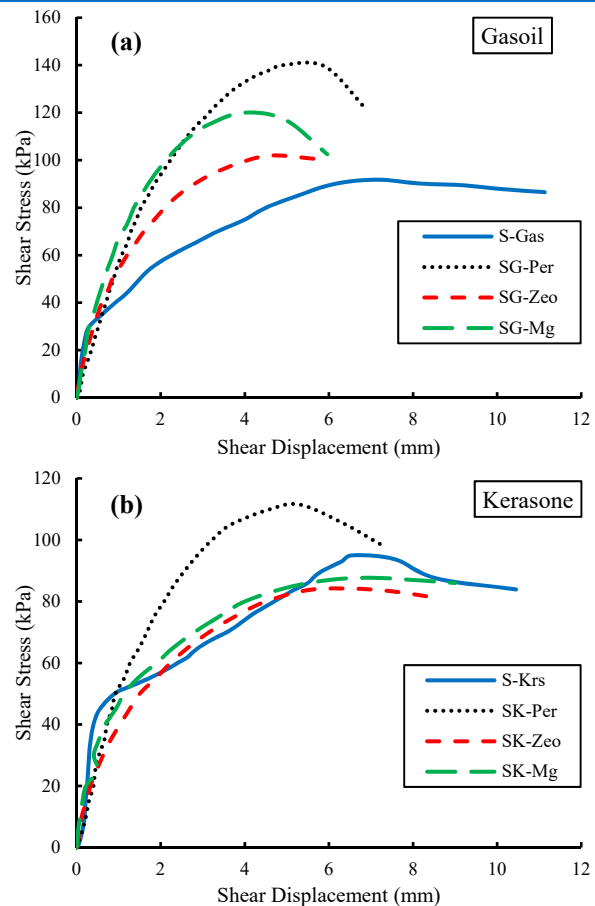


Fig. 8. Shear stress diagram to horizontal displacement at different stresses for contaminated samples with a-Gasoil and b-Kerasone

در شکل (۹) تغییرات مقاومت برشی نسبت به تنش قائم بصورت پوش گسیختگی برای نمونه‌های آلوده عمل‌آوری شده با جاذب‌های مختلف برای هر دو آلاینده گازوئیل و نفت سفید نشان داده شده است. پوش گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری شده با پرلیت شیب بیشتری داشته و بالاتر از سایر نمونه‌های آلوده قرار گرفته است که نشان دهنده تاثیر قابل توجه پرلیت در افزایش مقاومت برشی است. کمترین مقاومت برشی برای نمونه‌های عمل‌آوری شده با زئولیت مشاهده شده و پوش گسیختگی این نمونه‌ها پایین‌تر از سایر نمونه‌های آلوده قرار گرفته است. پوش گسیختگی نمونه‌های عمل‌آوری شده با کربنات منیزیم نیز به پوش ماسه آلوده بدون افزودنی بسیار نزدیک است. با توجه به پوش‌های گسیختگی پارامترهای مقاومتی موهر کولمب شامل زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و ضریب چسبندگی خاک (C) در شرایط زهکشی شده محاسبه شده و نتایج حاصل در شکل (۱۰) ارائه شده است. بیشترین

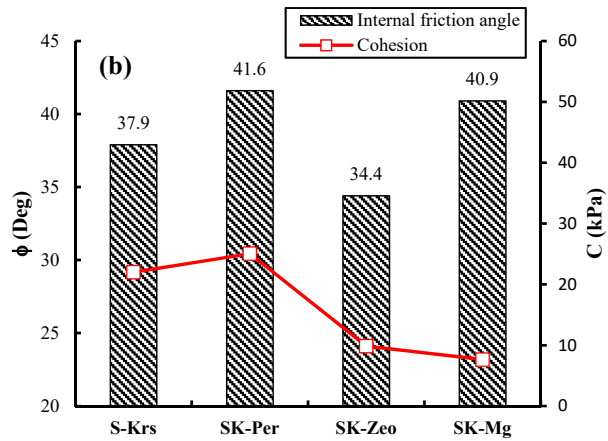


Fig. 10. Internal friction angle and cohesion values for contaminated and non-contaminated samples with a-Gasoil and b-Kerasone

بطور کلی نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان می‌دهد که افزودنی‌های مورد مطالعه در این پژوهش خاصیت چسبانندگی چندانی نداشته و در صورت عمل‌آوری ماسه متراکم آلوده به گازوئیل و نفت با این افزودنی‌ها، نمی‌توان انتظار افزایش چشمگیر مقاومت برشی در نمونه‌های عمل‌آوری شده را داشت. ولی این افزودنی‌های ریزدانه به ویژه پرلیت و منیزیت تأثیر منفی چندانی نیز بر مقاومت برشی ماسه آلوده ندارند. حضور این افزودنی‌ها در خاک از نظر جذب و تثبیت آلاینده‌های نفتی می‌تواند ارزشمند و قابل توجه باشد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش قابلیت افزودنی‌های پرلیت، زئولیت و کربنات منیزیم تولید شده از جذب دی اکسید کربن به عنوان جاذب آلاینده‌های نفتی و تأثیر آنها بر مقاومت برشی خاک مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر است.

- قابلیت جذب آلاینده‌های نفتی توسط هر سه افزودنی قابل توجه و بیش از ۳ برابر ماسه است. کربنات منیزیم بیشترین درصد جذب و پرلیت به دلیل درشت‌تر بودن ذرات آن کمترین درصد جذب را نشان داده است.
- هر دو آلاینده نفت سفید و گازوئیل تقریباً به یک میزان مقاومت برشی را کاهش داده‌اند. کاهش ۱۰ تا ۳۸

شکل ۹. تغییرات مقاومت برشی نسبت به تنش قائم برای نمونه‌های ماسه تمیز و آلوده به a-گازوئیل و b-نفت سفید

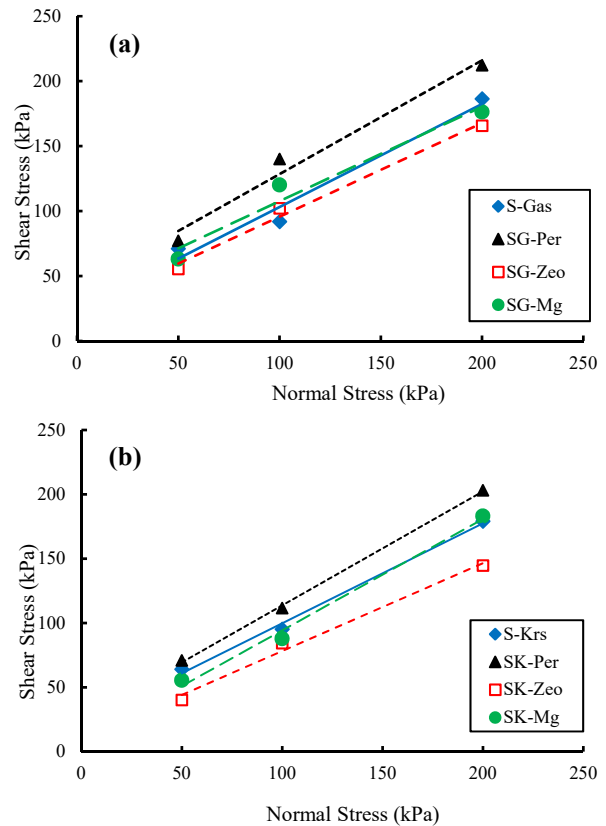
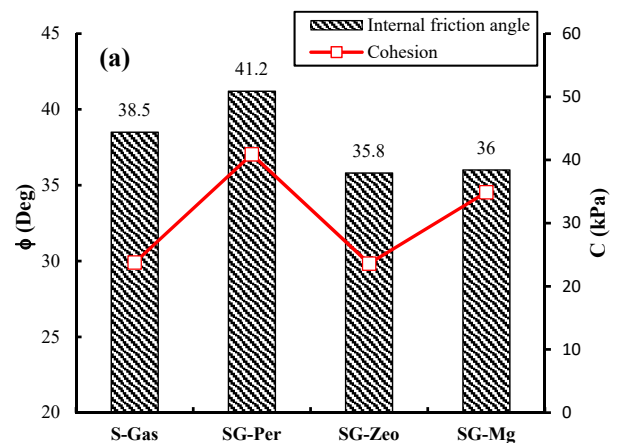


Fig. 9. Variation of shear strength versus vertical stress for clean and contaminated samples with a-Gasoil and b-Kerasone

شکل ۱۰. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی برای نمونه‌های آلوده به a-گازوئیل و b-نفت سفید



- [2] Wilson S. C., Jones K. C., 1993. Bioremediation of soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review, *Environmental Pollution* Vol. 81, 229-249.
- [3] Nazir A. k., 2011. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. *Alexandria Engineering Journal* 50. 331-335.
- [4] Evgin E., Das B. M., 1992. Mechanical behavior of an oil contaminated sand. In: *Ua A (ed) Envir. geotechnol. proc. mediterranean conf. Balkema, Rotterdam*. pp 101-108.
- [5] Shin E. C., Das B. M., 2001. Bearing capacity of unsaturated oilcontaminated sand. *Offshore Polar Eng*, 11:220-226.
- [6] Safehian H., Rajabi A. M., Ghasemzadeh H., 2018. Effect of diesel contamination on geotechnical properties of illite soil, *Engineering Geology* 241 55-63.
- [7] Khamsehchiyan 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.
- [8] Kermani M., Ebadi T., 2012. The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils, *Soil Sediment Contam Int J* 21:655-671.
- [9] Khosravi E., Ghasemzadeh H., Sabour M. R., Yazdani H., 2013. Geotechnical properties of gas oil contaminated kaolinite, *Engineering Geology* 166:11-16.
- [10] Ijimdiya T. S., 2013. The effects of oil contamination on the consolidation properties of lateritic soil, *Dev Appl Ocean Eng (DAOE)* 2:53-59.
- [11] Naeini S. A., Shojaedin M. M., 2014. Effect of oil contamination on the liquefaction behavior of sandy soils, *Int J Environ Chem Ecolog Geol Geophys Eng* 8:289-292.
- [12] Solly G., Aswathy E. A., Berlin S., Krishnaprabha N. P., Maria G., 2015. Study of geotechnical properties of diesel oil contaminated soil. *Int J Civil Struct Eng Res* 2:113-117.
- [13] Onyelowe, K. C., 2015. Pure crude oil contamination on Amaoba lateritic soil. *Electronic J Geotech Eng (EJGE)* 20:1129-1142.
- [14] Meuser, H., 2012. treatment of contaminated and disturbed land, *Soil remediation and rehabilitation*, Vol. 23.
- [15] Davis, E. L. 1998. Ground water issue: Steam injection for soil and aquifer remediation. Rep.

درصدی در مقاومت برشی نتیجه حضور آلاینده‌های یاد شده در محیط ماسه است.

- تاثیر جاذب‌ها در مقاومت برشی ماسه آلوده عمل‌آوری شده به اندازه ذرات جاذب بستگی دارد. پرلایت بزرگترین اندازه ذرات را داشته و نمونه‌های عمل‌آوری شده با این جاذب بیشترین مقاومت برشی را نشان دادند. کوچکترین ذرات نیز مربوط به زئولیت بوده و نمونه‌های عمل‌آوری شده با این جاذب کمترین مقاومت برشی را داشته‌اند.
- با در نظر گرفتن مجموعه نتایج آزمایش‌های درصد جذب و برش مستقیم و همچنین با توجه به فرآیند تولید جاذب‌های مورد مطالعه، کربنات منیزیم عملکرد بهتری به عنوان جاذب آلاینده‌های نفتی در ماسه دارد. این ماده از یک سو بیشترین درصد جذب آلاینده‌های نفتی را داشته و از سوی دیگری تأثیر منفی چندانی در رفتار مقاومتی ماسه نداشته و حتی در برخی موارد باعث افزایش مقاومت خاک آلوده نیز شده است. همچنین کربنات منیزیم تولید شده با جذب دی‌اکسید کربن آزاد شده از صنایع نه تنها باعث آسیب به محیط زیست نمی‌شود، بلکه با جذب گازهای گلخانه‌ای می‌تواند به مقابله با پدیده جهانی گرمایش زمین نیز کمک نماید.

۵- محدودیت‌های تحقیق

در این پژوهش مقاومت برشی نمونه‌های ماسه آلوده به گازوئیل و نفت سفید تحت تأثیر افزودنی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های ماسه متراکم بوده و نتایج تحقیق در این محدوده تراکم بدست آمده‌اند. همچنین مقاومت برشی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش برش مستقیم تعیین شده و ممکن است قابل تعمیم به سایر تجهیزات آزمایشگاهی مانند سه‌محوری زهکشی شده نباشد.

مراجع

- [1] Gao Y. Z., Ling W. T., 2006. Comparison for plant uptake of phenanthrene and pyrene from soil and water. *Biology and Fertility of soils*, Vol. 42, 387-394.

- activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation, *Acta Geotechnica* 8(4): 395-405.
- [26] Mohajan H K. 2017. Greenhouse gas emissions. Global warming and climate change. Proceedings of the 15th Chittagong Conference on Mathematical Physics, *Jamal Nazrul Islam Research Centre for Mathematical and Physical Sciences (JNIRCMPS)*. Chittagong, Bangladesh. March.
- [27] Lead C. 2005. Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide. *CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE*, 319.
- [28] Keykha, H. A., Romiani, H. M., Asadi, A., and Kawasaki, S., 2019. Ammonium-free carbonate-producing bacteria as an ecofriendly soil biostabilizer, *Geotechnical Testing Journal*. 42(1):19-29. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170353>.
- [29] Keykha, H. A., Asadi, A., Huat, BB., and Kawasaki, S., 2018. Microbial induced calcite precipitation by *Sporosarcinapasteurii* and *Sporosarcina aquimarina*, *Environmental Geotechnics*, 6(8): 562-566. <https://doi.org/10.1680/jenge.16.00009>.
- [30] Venuleo, S., Laloui, L., Terzis, D., Hueckel, T., and Hassan, M., 2016. Microbially induced calcite precipitation effect on soil thermal conductivity, *Géotechnique Letters*. 6(1): 39-44.
- [31] Keykha, H. A, Romiani, H. M, Zebardast, E., Asadi, A., and Kawasaki, S., 2021. CO₂-induced carbonate minerals as soil stabilizing agents for dust suppression, *Aeolian Research* 52. 100731. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100731>
- [32] Romiani, H. M., Keykha, H. A., Talebi, M., Asadi, A., and Kawasaki, S., 2021. Green soil improvement: using carbon dioxide to enhance the behaviour of clay. Proceedings of the *Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 1-26. <https://doi.org/10.1680/jgrim.20.00073>.
- [۳۳] حسین زاده محمد، حسنلوراد محمود، نائینی سید ابولحسن، ۱۴۰۰، بررسی عملکرد جاذب‌های مختلف در خاک‌های آلوده با فلز سنگین سرب، مجله علمی پژوهشی عمران امیرکبیر، شماره ۵۳.
- [34] G. Bergquist . 2019. Relationship, selection, and optimization of filter aid, filter media and clarification technologies for contaminant No. EPA/540/S-97/505. Washington, DC: USEPA.
- [16] Farrar, M. E., Morgenstern, J. A., Amari, A. MacMurray, T. P., Killeen, and R. F. Blundy. 2010. Electrical resistance heating of soils at C-reactor at the Savannah River site. *Proc. Ann. Int. Conf. Soils Sediments Water Energy* 13 (1): 328-342.
- [17] Paria, S., and P. K. Yuet., 2006. Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement: A literature review. *J. Environ. Eng*, 14 (4): 217-255.
- [18] Oluwatuyi, O., E., Ojuri, O. O., and Khoshghalb, A., 2020. Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1): 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.010>.
- [19] Zomorodian A. Moghispour Sh. Soleymani A. 2017. Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives, Brendan C. O'Kelly, *Applied Clay Science* 140, 140-147.
- [20] Nasehi, A., Urmeihy, A., Morsali, A., Nikudel, MR., 2015. Use of nanoscale zero-valent iron to improve the shear strength parameters of gas oil contaminated clay, *Geopersia* 5(2), pp. 161-175.
- [21] Ahmad, S., Al-Amoudi, O.S.B., Mustafa, Y.M., Maslehuddin, M. and Al-Malack, M.H., 2020. Stabilization and Solidification of Oil-Contaminated Sandy Soil Using Portland Cement and Supplementary Cementitious Materials, *J. Mater. Civ. Eng*, 32(8): 04020220.
- [22] Jha A K and Sivapullaiah P V. 2020. Lime stabilization of soil: a physico-chemical and micro mechanistic perspective. *Indian Geotechnical Journal*, 50: 339-347. <https://doi.org/10.1007/s40098-019-00371-9>.
- [23] Gartner E. 2004. Industrially interesting approaches to low-CO₂ cements, *Cement and Concrete research*, 34(9): 1489-1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>.
- [24] Zhang, M., Guo, H., El-Korchy, T., Zhang, G., and Tao, M., 2013. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Construction and Building Materials* 47: 1468-1478.
- [25] Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., and Pinto, A. T. 2013. Effects of alkaline-

- [39] Drăghici, E.M., Scarlat, V., Pele, M., Dobrin, E., Matei, G.M. and Matei, S., 2018. Effect of the use of new methods for the remediation of oil polluted soil. *Scientific Papers-Series B, Horticulture*, (62), pp.471-476.
- [40] Bakar, N. A., Mohamed, J. J., Sulaiman, M. A., & Muhammad, N. M. N. 2020. The Study of Mambong Clay Properties Improvement with Calcium Carbonate Addition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 596, No. 1, p. 012005)*. IOP Publishing
- finer removal from process slurries and liquids. *Industry Candidates Poster Session 2019, Held at the 2019 AIChE Spring Meeting and 15th Global Congress on Process Safety, 2019, no. May, pp. 110–125.*
- [35] N. S. Zafisah, W. L. Ang, D. J. Johnson, A. W. Mohammad, and N. Hilal. Effect of different filter aids used in cake filtration process on the removal of suspended solids in anaerobically digested palm oil mill effluent (POME). *Desalin. Water Treat.*, vol. 110, pp. 362–370, 2018.
- [36] ASTM C 128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, 2017
- [37] Dercová, K., Sejáková, Z., Skokanová, M., Barančíková, G. and Makovníková, J., 2007. Bioremediation of soil contaminated with pentachlorophenol (PCP) using humic acids bound on zeolite. *Chemosphere*, 66(5), pp.783-790.
- [38] Liang, Y., Zhang, X., Dai, D. and Li, G., 2009. Porous biocarrier-enhanced biodegradation of crude oil contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(1), pp.80-87.

Application of eco-friendly additives as the adsorbents of petroleum contaminants and their effect on the shear strength of contaminated sand

Amin Zarei¹, Hamed Abdeh Keykha², Hadi Mohamadzadeh Romiani³

1- M.Sc., Department of Civil Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran.

2- Ph.D. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran.

3- Ph.D. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran.

Abstract

Petroleum products and their derivatives cause severe soil pollution through transportation, leaks in pipelines or improper storage. These contaminants may affect the physical or chemical properties of the soil. Nowadays, due to the increase in construction projects and consequently the need for suitable lands, the construction of structures on lands with contaminated soils is necessary. To determine the optimal methods for rehabilitation of contaminated soils, it is necessary to recognize the contaminated soil behavior and characteristics. There are several methods for stabilization of contaminated soils depending on the type of soils and their pollution. For selecting the appropriate method and materials, various aspects such as environmental issues, availability and cost-effectiveness of the method should be considered. In this study, the effect of oil pollutants on the geomechanical parameters of the sandy soil has been investigated. Also, the performance of different environmentally friendly materials as adsorbents of pollutants and also their effect on the contaminated soil behavior was studied. The studied soil is poorly graded sand that has been sampled from Qazvin district. The petroleum pollutants studied in this study are kerosene and gasoil. Three different materials including zeolite, perlite, and produced magnesite were used as sorbent in this study. In this study, the carbon dioxide emissions from industry were utilized to produce magnesium carbonate minerals. In the first step, the percentage of pollutant absorption for studied materials including the sand and sorbents was investigated. The results showed that the magnesite had the highest capability to adsorb petroleum contaminants. The percentage of pollutant adsorption in magnesite was about 91% for gasoil and 85% for kerosene, while in studied sand it was 26% and 21% for gasoil and kerosene, respectively. The other sorbents including perlite and zeolite also showed high percentages of pollutant adsorption. In order to investigate the effect of petroleum pollutants in the shear strength of sand, the direct shear tests were conducted on pure and polluted samples. The soil specimens with dimension of 10x10x3 cm and dry density of 18.35 kN/m³ were prepared by dry air pluviation method. After installing the sample in the device and before performing the test, the sample was saturated with contaminant. The specimens were sheared under different vertical stresses of 50, 100 and 200 kPa. The results showed a decrease in shear strength and more than 10 degrees decrease in internal friction angle of contaminated samples with respect to pure sand. The direct shear tests were conducted on the contaminated samples, treated by different sorbents. The results demonstrated an increase in shear strength for samples treated with perlite, but a loss in shear strength for samples treated with zeolite. The difference in shear strength between the magnesite-treated samples and the untreated samples was not significant. The study confirmed that perlite, zeolite, and magnesite have a capability to adsorb petroleum contaminants in soils. Carbon dioxide is one of the most influential factors in global warming in the coming decades, so the magnesite produced by capturing CO₂ and its application as a pollutant absorbent can be an encouraging finding of this study.

Keywords: Contaminated sand, Petroleum contaminants, Direct shear test, Mineral sorbents, Magnesite, Carbon dioxide capturing.