

تأثیر شیرابه زباله بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های رسی

رضا ایوانی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه نقرش

مجید یزدان دوست (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

محمودرضا شاهوردی* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه نقرش

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۲ (۷۴-۶۵، صص. ۳۹، شمار ۴، صص. ۷۴-۶۵، پژوهشی)

در این مطالعه، تأثیر شیرابه زباله بر مدول برشی و نسبت میرایی سه نوع خاک رس مختلف تحت فشارهای مختلف سربار مورد ارزیابی شد. برای این منظور، پس از تجزیه و تحلیل شیرابه نمونه‌گیری شده از مدفن زباله البرز قم، نمونه‌های خاک با سه درصد وزنی مختلف شیرابه ترکیب و تحت آزمایش برش ساده دینامیکی قرار گرفتند. از میکروسکوپ الکترونیکی نیز برای بررسی اثر شیرابه بر بافت خاک استفاده شد. براساس حلقه‌های هیستریزس به دست آمده از آزمایش‌های برش ساده دینامیکی، مشخص شد که آلودگی و افزایش آن سبب افزایش مدول برشی و کاهش نسبت میرایی می‌شود. این افزایش و کاهش، تحت تأثیر نوع خاک بوده و در خاک‌هایی با دامنه خمیری کمتر، برجسته‌تر است. همچنین، مشاهده شد که بیشترین تأثیر شیرابه بر بهبود مدول برشی خاک در سطوح کمتری از آلودگی نمایان می‌شود. افزایش تأثیرپذیری مدول برشی و نسبت میرایی خاک رس از سربار به عنوان یکی از اثرات آلودگی خاک به شیرابه شناسایی شد. این افزایش تأثیرپذیری در رس‌هایی با دامنه خمیری بالا مشهودتر بود.

واژگان کلیدی: خاک رس، شیرابه زباله، مدول برشی، نسبت میرایی.

rezairani4152@gmail.com
m.yazdandoust@qom.ac.ir
shahverdi@tafreshu.ac.ir

۱. مقدمه

گوناگون فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تولید می‌شود. شیرابه از سمی‌ترین مواد آلاینده خاک و آب است. با این وجود، در سراسر دنیا به دلایل متعددی مانند مشکلات اقتصادی و نبود محل‌های دفن مهندسی، گاهی خاک و محیط اطراف آن توسط شیرابه آلوده می‌شود. با وجود میزان قابل توجهی از مطالعات استاتیکی در زمینه بررسی تأثیر شیرابه بر خاک، تحقیقات کمتری در زمینه پارامترهای دینامیکی انجام شده است. در زمینه بررسی رفتار مکانیکی خاک آلوده به شیرابه، پژوهش‌های مختلفی طی سال‌های گذشته صورت گرفته است. محققان ایرانی همچون حسن‌زاده، نگهدار، عسگری‌لاسکی و خوداری به کمک همکاران و با استفاده از دستگاه‌های سه‌محوری و برش مستقیم، کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی را گزارش کردند.^[۸-۱۱] بر اساس تحقیق یوسفی کبریا و همکاران، با اضافه شدن شیرابه و در پی آن برخی املاح و فلزات سنگین همچون نیتрат، آمونیاک و ... خاک و محیط اطراف آن اسیدی شده و PH نمونه

بررسی رفتار تنش برشی و کرنش برشی تناوبی خاک برای درک بهتر پاسخ ساختگاه به بارهای برشی اعمال شده، مانند بارهای ایجاد شده توسط زلزله، حائز اهمیت است.^[۱] بارهای دینامیکی در طولانی مدت ممکن است منجر به تغییر شکل‌های عمودی بیش از حد قابل قبول شوند، به‌طوری‌که زیر ساخت‌ها ممکن است قابلیت سرویس‌دهی خود را از دست بدهند.^[۲] اولین مطالعات آزمایشگاهی در رابطه با پاسخ دینامیکی خاک به امواج زلزله حدود ۸۳ سال پیش انجام شد.^[۳] پس از آن زمان، طیف وسیعی از مطالعات به این حوزه اختصاص داده شده است.^[۴-۵]

یکی از موضوعات چالش برانگیز ژئوتکنیک لرزه‌ای و ژئوتکنیک زیست‌محیطی، بررسی اثر شیرابه زباله بر پارامترهای دینامیکی خاک است. شیرابه در اثر فرایندهای

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۳۰، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۰.

استناد به این مقاله:

ایرانی، رضا، یزدان دوست، مجید، و شاهوردی، محمودرضا، ۱۴۰۲. تأثیر شیرابه زباله بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های رسی. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۷۴-۶۵.

DOI:10.24200/J30.2023.61511.3182

جدول ۱. خواص فیزیکی خاک های رسی مورد استفاده.

دامنه خمیری (درصد)	۱۶/۷	۱۴/۷	۱۳/۹
حد روانی (درصد)	۵۱	۳۶	۳۲
حد خمیری (%)	۳۴/۳	۲۱/۳	۱۸/۱
رطوبت بهینه (درصد)	۱۷/۱	۱۴/۲	۱۳/۲
وزن مخصوص خشک	۱۶	۱۷/۸	۱۶/۶
حداکثر (kN/m^2)			



شکل ۱. الف) مدفن البرز قم و ب) نمونه گیری از شیرابه.

جدول ۲. نتایج ویسکوزیته شیرابه در دماهای مختلف.

ویسکوزیته	چگالی (gr/cm^3)	دما ($^{\circ}C$)
(cp)	(cSt)	
۱	۱/۰۱	۲۰
۰/۸	۰/۸۱	۳۰
۰/۷	۰/۷۱	۴۰
۰/۶	۰/۶	۵۰

جدول ۳. نتایج آزمایش های شیمیایی شیرابه.

آزمایش	نام آزمایش	استاندارد	نتایج
COD	spectrophotometer	SM۵۲۲۰D	۵۵۸۰۰ (mg/LO_2)
TDS	Conductivity meter	SM۲۵۴۰C & ۲۵۱۰	۱۳۷۰۰ (mg/l)
BOD	BOD meter	SM۵۲۱۰B	$2000 <$ (mg/LO_2)
PH	PH meter	ASTM D-۱۲۹۳	۵/۵
EC	Conductivity meter	SM۲۵۴۰C & ۲۵۱۰	۲۵۸۰۰ ($\mu S/cm$)

کاهش می یابد. بر اثر این کاهش، حد روانی افزایش یافته، حد خمیری تغییری نمی کند و در مجموع دامنه خمیری افزایش می یابد.^[۱۲] همچنین، محققان خارجی همچون شارما، سونیل و ژیانگ به کمک همکاران و دستگاه های مختلف بر روی رس سیلت دار آزمایش هایی انجام داده و دریافته اند که با افزودن شیرابه، زاویه اصطکاک داخلی در تمامی نمونه ها و چسبندگی در بیشتر نمونه ها کاهش یافته است.^[۱۳-۱۵]

علیرغم آنکه تحقیقات قابل توجهی در زمینه عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای دینامیکی صورت گرفته است، در رابطه با اثر شیرابه بر مدول برشی و نسبت میرایی اطلاعات جامعی وجود ندارد. بنابراین، در این تحقیق با استفاده از دستگاه برش ساده سیکی^۱ به بررسی تأثیر فشار سربار و درصد آلودگی بر پارامترهای دینامیکی رس ها پرداخته شده است.

۲. مصالح

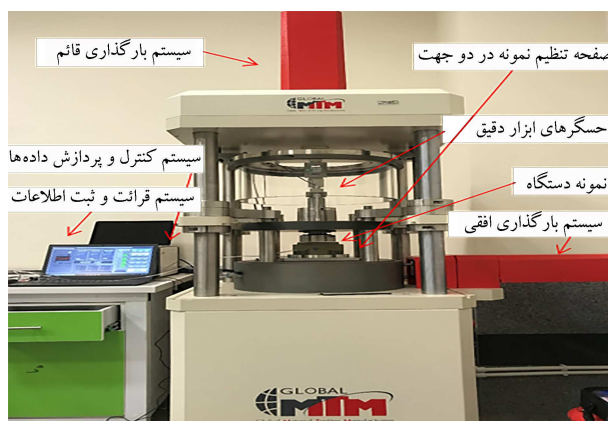
۲.۱. خاک

از آنجا که لاینرهای رسی واقع در مدفن زباله یکی از حالت های مواجهه شیرابه با خاک می باشد، بنابراین تلاش شده است تا شرایط حاکم بر آزمایش های این تحقیق مطابق با شرایط مدفن زباله باشد. برای این منظور، بر اساس دستورالعمل های ارائه شده در خصوص انتخاب مصالح به کار رفته در لاینرهای مدفن زباله، از دو رس با دامنه های خمیری ۱۴/۷ و ۱۶/۷ درصد استفاده شده است. این دو رس به گونه ای انتخاب شدند که دامنه خمیری آن ها در محدوده دستورالعمل های لاینرهای مدفن زباله باشد.^[۱۶] علاوه بر آن، با انتخاب سایت مدفن زباله البرز قم به عنوان مرجع این تحقیق، از خاک لاینر این مدفن به عنوان سومین خاک مورد مطالعه استفاده شد. دامنه خمیری رس این مدفن در حدود ۱۳/۹ درصد تعیین شد. از لحاظ شکل ظاهری، رس با دامنه خمیری بیشتر کرم رنگ و دو رس دیگر به رنگ قهوه ای می باشند. در جدول ۱ نتایج حاصله از مشخصات فیزیکی رس مورد استفاده ارائه شده است. جهت استفاده از این سه خاک در فرایند آزمایش ها، ابتدا خاک ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد به منظور از دست دادن کامل رطوبت در گرمخانه قرار گرفتند و سپس از الک نمره ۵۰ عبور داده شدند.

۲.۲. شیرابه

در این پژوهش، به منظور آلوده سازی خاک، از شیرابه نمونه برداری شده از مدفن البرز استان قم استفاده شد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، پس از اخذ نمونه ها از مدفن، آن ها در ظروف در بسته و در دمای ۱۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند تا از فعل و انفعالات شیمیایی و تغییر ماهیت آن ها جلوگیری شود.

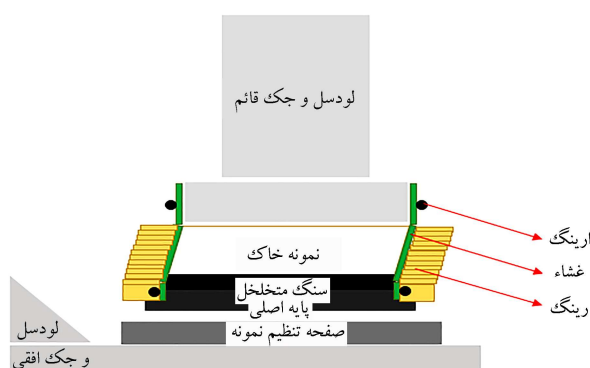
ویسکوزیته یکی از مشخصه های بارز شیرابه زباله است که به عنوان یک پارامتر متأثر از دما تعریف می شود. از اینرو، ویسکوزیته نمونه های اخذ شده توسط ویسکومتر بروکفیلد AMETEK BROOKFIELD و با اسپیندل ۶۳ و ۱۰۰ دور در دقیقه در دماهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، به منظور شناسایی بهتر شیرابه، پارامترهای شیمیایی و فلزات سنگین آن با استفاده از دستگاه ICP^۲ اندازه گیری شد. این پارامترها در جدول های ۳ و ۴ ارائه شده است.



شکل ۲. شمایی از دستگاه برش ساده دینامیکی.



شکل ۳. الف) آماده سازی نمونه خاک با ترکیب رس، آب و شیرابه و ب) ساخت نمونه در قالب آزمایش بر اساس روش کنترل حجم و بهره گیری از کوبش مرطوب.



شکل ۴. نمای شماتیک از نمونه تحت بارگذاری برش ساده.

غشا لاتکس در بین رینگ های تفلونی و نمونه خاک استفاده شد. جزئیات قالب آزمایش در شکل ۴ نمایش داده شده است. پس از آماده سازی نمونه داخل قالب آزمایش، فشار سربار مورد نظر از طریق جک قائم به نمونه اعمال شده و پس از آن نمونه تحت تنش برشی سیکلیک با دامنه ثابت $\pm 3/9$ کیلو پاسکال و فرکانس ۱ هرتز قرار گرفت. این دامنه برابر با ۵۰ درصد مقاومت برشی بیشینه رس لایز مدفن البرز انتخاب شد تا بار دینامیکی اعمال شده به آن بر اساس ضریب اطمینان ۲ انتخاب شده باشد. انتخاب فرکانس بارگذاری نیز بر اساس تحلیل های پاسخ گزارش شده از ساختمان استان قم که توسط تقی زاده و همکاران ارائه شده است، صورت گرفت.^[۱۷] لازم به ذکر است که با توجه به عدم مشاهده تغییر در نتایج به دست آمده بعد از سیکل پنجاهم، تعداد سیکل بارگذاری به ۵۰ سیکل محدود شد.

جدول ۴. نتایج آزمایش ICP.

واحد	مقدار	فلز سنگین
	۵/۲	روی
	۲۱۰۴/۳	پتاسیم
	۵۲۸۱/۱	کلسیم
ppm	۵/۳	آلومینیوم
	۴۴/۶	آهن
	۳۷۱	منیزیم
	۹/۶	منگنز
	۱۸۵۳/۵	سدیم

۳. فرایند انجام آزمایش ها

۳.۱. دستگاه برش ساده دینامیکی

در این تحقیق، یک دستگاه برش ساده دو جهته با قابلیت انجام تست بر روی نمونه استوانه ای به ارتفاع ۲۶ میلی متر و قطر ۱۰۰ میلی متر مورد استفاده قرار گرفته است که توسط شرکت مواد ساخت آزما ویستا (GLOBAL MTM) طراحی و ساخته شده است (شکل ۲). با توجه به نوع و نرخ بارگذاری در آزمایش برش ساده دینامیکی، این آزمایش در گروه آزمایش های با کرنش متوسط تا بزرگ ($10^{-2} > \gamma$) طبقه بندی می شود.

در آزمایش برش ساده، با اعمال تغییر شکل برشی به نمونه، امکان اندازه گیری تنش و کرنش برشی در المان خاک به طور مستقیم فراهم می شود. این مزیت موجب می شود که منحنی های تنش برشی، کرنش برشی و سختی برشی بدون هیچ واسطه و با کمترین خطا در مقایسه با سایر آزمایش ها تعیین شوند. همچنین، از دیگر مزایای بارز این دستگاه ایجاد شرایط سکون^۳ برای نمونه ها مطابق با شرایط واقعی زمین حین اعمال تنش های ناشی از زلزله است. دستگاه برش ساده مورد استفاده در این تحقیق دارای دو جک الکترومکانیک افقی و یک جک عمودی است که امکان انجام آزمایش در شرایط نیرو کنترل و جابه جایی کنترل را در هر سه جهت فراهم می کند. همچنین، این دستگاه با بهره گیری از سه نیروسنج^۴ و سه جابه جایی سنج^۵، ضمن ثبت خودکار نتایج با نرخ داده برداری بالا (۱۰۰ داده بر ثانیه)، امکان اعمال انواع مسیر تنش و مسیر کرنش را به نمونه فراهم می سازد.

۳.۲. روش ساخت نمونه ها و انجام آزمایش

نمونه های مورد استفاده در آزمایش برش ساده بر اساس روش کنترل حجم و با استفاده از کوبش مرطوب بازسازی شدند. برای این منظور، خاک لازم جهت دستیابی به وزن مخصوص ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در قالب آزمایش با عمق ۲۶ میلی متر و قطر ۱۰۰ میلی متر توزین شد و در دو لایه متراکم گردید. این وزن مخصوص بر اساس گزارش های ژئوتکنیکی موجود از مدفن البرز انتخاب شد. جهت حذف اثر درصد رطوبت و نمایان شدن اثر دقیق شیرابه، میزان آب اضافه شده به نمونه ها جهت تراکم به گونه ای انتخاب شد که میزان درصد رطوبت کلی نمونه ها با درصد وزنی شیرابه مختلف ثابت باقی بماند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده نشان داده شده است، پس از همگن شدن خاک، شیرابه و آب، نمونه آماده شده به دو قسمت تقسیم شده و هر لایه در قالب استوانه ای و تا رسیدن به ارتفاع ۱۳ میلی متر کوبیده می شود. لازم به ذکر است که به منظور حفظ پیوستگی خاک در هنگام آزمایش، از یک

جدول ۵. مشخصات آزمایش‌های انجام شده.

شماره آزمایش	سطوح کرنش تجربه شده (%)	دامنه خمیری (%)	آلودگی (%)	سر بار (kPa)
۱, ۲, ۳	۰/۳۱ - ۰/۲۸, ۰/۱۵ - ۰/۱۹, ۰/۰ - ۰/۱۳		۰	
۴, ۵, ۶	۰/۲۵ - ۰/۱۷, ۰/۱۲ - ۰/۱۳, ۰/۰ - ۰/۰۹	۱۶/۷	۶	
۷, ۸, ۹	۰/۲۴ - ۰/۱۵, ۰/۱۰ - ۰/۱۱, ۰/۰ - ۰/۰۷	۱۲/۵	۱۲/۵	
۱۰, ۱۱, ۱۲	۰/۵۹ - ۰/۳۲, ۰/۲۱ - ۰/۲۲, ۰/۱۸ - ۰/۱۶		۰	
۱۳, ۱۴	۰/۳۷ - ۰/۲۲, ۰/۱۹ - ۰/۱۷, ۰/۱۵ - ۰/۱۲	۱۴/۷	۶	
۱۶, ۱۷, ۱۸	۰/۳۵ - ۰/۲۳, ۰/۱۸ - ۰/۱۴, ۰/۱۳ - ۰/۱۰	۱۲/۵	۱۲/۵	
۱۹, ۲۰, ۲۱	۰/۵۶ - ۰/۳۶, ۰/۳۴ - ۰/۲۵, ۰/۲۲ - ۰/۱۸		۰	
۲۲, ۲۳, ۲۴	۰/۷۷ - ۰/۴۶, ۰/۳۲ - ۰/۲۷, ۰/۲۰ - ۰/۱۴	۱۳/۹	۶	
۲۵, ۲۶, ۲۷	۰/۶۲ - ۰/۳۳, ۰/۳۱ - ۰/۱۹, ۰/۱۸ - ۰/۱۲	۱۲/۵	۱۲/۵	

۳۱/۱۸, ۴۷/۶, ۸۸/۲۹

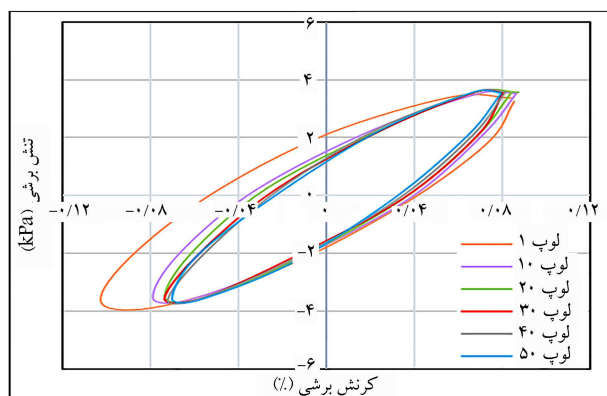
رو، با در نظر گرفتن سه آلودگی وزنی مختلف (۰، ۶ و ۱۲/۵ درصد)، تلاش شد تا تأثیر میزان آلودگی نیز مورد بررسی قرار گیرد. برنامه آزمایش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

۳.۳. برنامه آزمایش‌ها

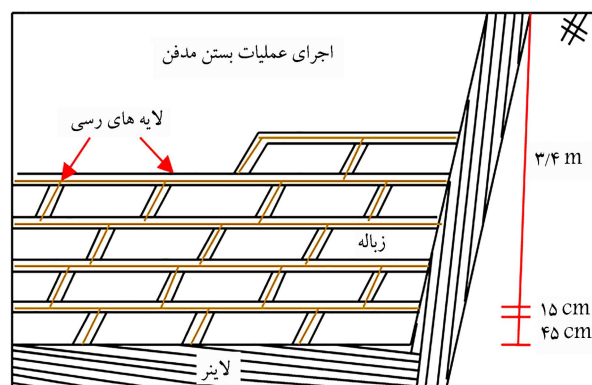
همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، یک مدفن زباله از تراکم متوالی لایه‌های زباله و لایه جداکننده رسی تشکیل می‌شود. در نهایت، هر مدفن پس از تکمیل فرایند دفن زباله، با اجرای یک لایه مصالح خاکی به عنوان پوشش نهایی و قراردادن تجهیزات کنترل گاز و شیرابه بسته می‌شود. ضخامت هر یک از لایه‌های مذکور متناسب با شرایط مدفن زباله می‌تواند متغیر باشد که در مورد سایت مدفن زباله البرز، این ضخامت‌ها حدود ۴۵ سانتی‌متر برای لایه زباله (با وزن مخصوص حدود ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، ۱۵ سانتی‌متر برای لایه رسی جداکننده (با وزن مخصوص حدود ۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و ۱ متر برای پوشش نهایی (با وزن مخصوص حدود ۱۷۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب) گزارش شده است. بنابراین، فشار قائم وارد بر لایه رسی یک مدفن حاوی ۵ لایه زباله حدود ۳۱/۴۷ کیلوپاسکال می‌باشد. چنین مدفنی به عنوان عمیق‌ترین مدفن در سایت البرز گزارش شده است. با توجه به این موضوع، با انتخاب فشارهای قائم ۳۱/۴۷، ۱۸/۸۸ و ۶/۲۹ کیلوپاسکال جهت استفاده در آزمایش‌های برش ساده تلاش شد تا شرایط عمیق‌ترین و کم‌عمق‌ترین ترانشه در آزمایش‌ها شبیه‌سازی گردد. از سوی دیگر، گزارش‌های موجود در سایت مدفن زباله البرز نشان داد که نرخ آلودگی لایه رسی تحتانی بسیار متغیر بوده و در برخی قسمت‌ها آلودگی به ۱۲/۵ درصد و در برخی مناطق عاری از نفوذ شیرابه گزارش شده است. از این

۴. تحلیل داده‌ها و ارائه نتایج دستگاه برش ساده

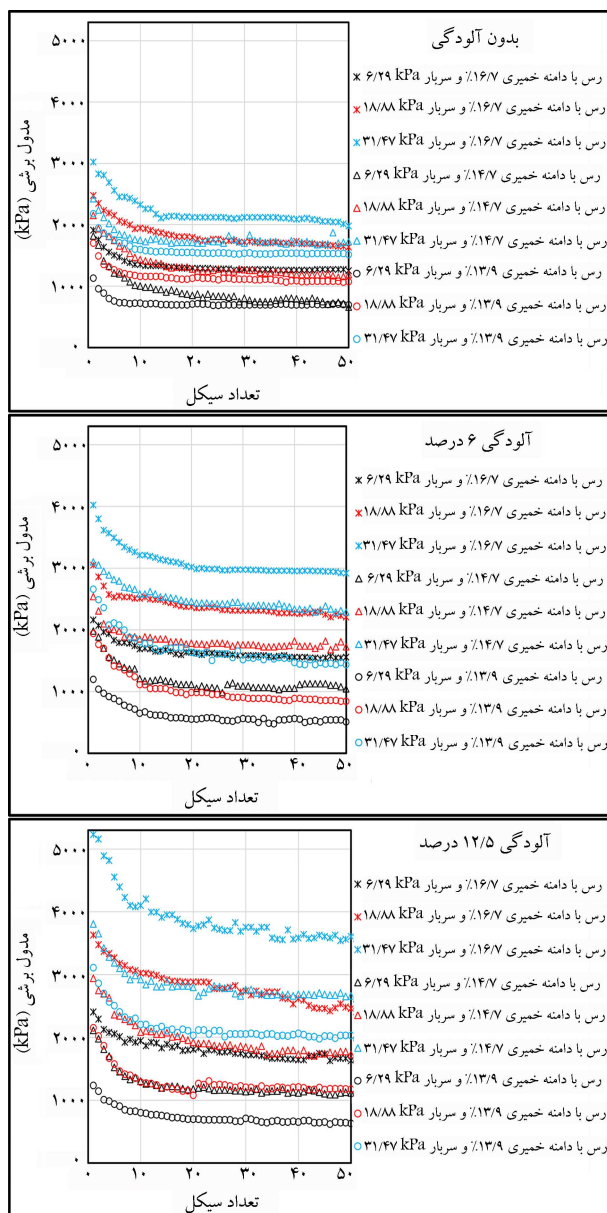
همانطور که در شکل ۶ برای آزمایش شماره ۲۰ مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش‌های برش ساده سیکلی بر روی نمونه‌ها در قالب حلقه‌های هیستریزیس^۶ تنش برشی و کرنش برشی به دست آمده است. از آنجا که هر حلقه هیستریزیس نماینده یک سیکل بارگذاری مشخص بوده و شیب حلقه نیز بیان‌کننده مدول برشی سکانتی نظیر آن سیکل است، بنابراین تغییرات مدول برشی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای هر نمونه بر اساس حلقه‌های هیستریزیس به دست آمده تعیین شد. از سوی دیگر، با تعیین انرژی الاستیک ذخیره شده (w_s) و انرژی تلف شده (w_D) در هر سیکل بارگذاری (شکل ۷)، نسبت میرایی متناظر با هر سیکل بارگذاری محاسبه و تغییرات آن در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای تمامی نمونه‌ها تعیین شد. از روابط ۱ و ۲ جهت تعیین مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی برای هر حلقه هیستریزیس استفاده شده است. محدوده سطوح کرنش برشی تجربه شده برای هر نمونه در خلال ۵۰ سیکل بارگذاری در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۶. حلقه‌های ۱ تا ۵۰ آزمایش شماره ۲۰.



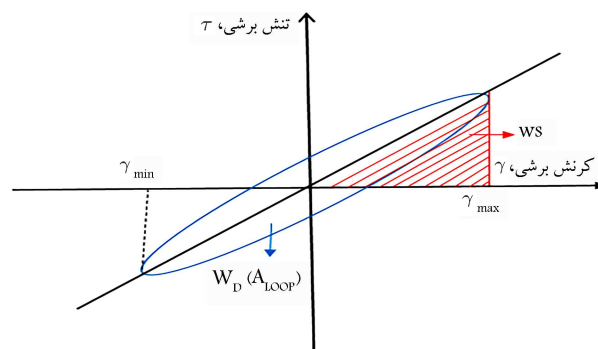
شکل ۵. نمای شماتیک از سلول مدفن زباله.



شکل ۸. تغییرات مدول برشی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای خاک با سربار مختلف به تفکیک درصد آلودگی.

افزایش سربار از ۱۸/۸۸ به ۳۱/۴۷ کیلوپاسکال در رس با دامنه خمیری ۱۶/۷ درصد حدود ۲۱ درصد می باشد، در حالی که در رس ها با دامنه خمیری ۱۴/۷ و ۱۳/۹ درصد، رشد مدول برشی به ۳۳ و ۳۸ درصد رسید. این در حالی بود که با آلودگی خاک به ۶ درصد شیرابه، مقادیر رشد مدول برشی در این خاک ها به ترتیب به ۲۹، ۳۷ و ۶۵ درصد و سپس با افزایش آلودگی به میزان ۱۲/۵ درصد، به ۳۸، ۴۴ و ۶۹ درصد رسید.

به منظور درک بهتر رابطه بین آلودگی، دامنه خمیری و مدول برشی خاک، تغییرات مدول برشی در مقابل سیکل بارگذاری برای نمونه های مختلف به تفکیک سربار در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، آلودگی و افزایش آن سبب رشد مدول برشی در کلیه نمونه ها شده است، اما با این تفاوت که این رشد متأثر از نوع خاک بوده و در خاک هایی با دامنه خمیری بیشتر پرنرنگتر است. همانطور



شکل ۷. نمای شماتیک از حلقه هیستریزس.

$$G = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) \quad (1)$$

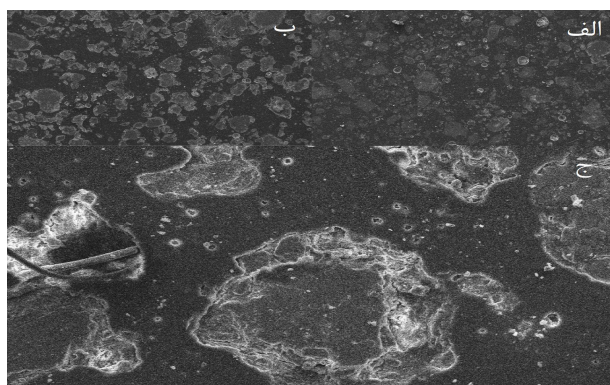
$$D = A_{loop} / 2\pi G [(\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) / 2]^2 \quad (2)$$

۱.۴. اثر سربار و آلودگی بر مدول برشی رس ها

به منظور بررسی تأثیر سربار بر مقادیر مدول برشی نمونه ها با نسبت آلودگی مختلف، تغییرات مدول برشی در برابر تعداد سیکل بارگذاری در شکل ۸ ارائه شده است. اولین نکته ای که در شکل ۸ جلب توجه می کند، رشد مدول برشی ناشی از افزایش سربار است. این رشد که با کاهش دامنه خمیری پرنرنگتر می شود، می تواند به افزایش تراکم و به دنبال آن سختی نمونه ها در فشار همه جانبه بالا نسبت داده شود. تأثیرپذیری بیشتر رس ها با دامنه خمیری کمتر از تغییر فشار همه جانبه توسط معجزی و همکاران نیز گزارش شده است.^[۱۸]

همانطور که در کلیه نمونه ها مشاهده می شود، روند کاهش مدول برشی در مقابل سیکل بارگذاری ابتدا با یک شیب تند آغاز می شود و پس از عبور از سیکل دهم با یک شیب ملایم دنبال می شود. با افزایش تعداد سیکل، این روند کاهشی رفته رفته کم رنگ شده به طوری که پس از عبور از سیکل چهارم می توان از تغییرات ایجاد شده در مدول برشی صرف نظر نمود. این بدان معنی است که عمده کاهش به وجود آمده در مدول برشی رس ها در خلال تجربه یک بار دینامیکی تنها در سیکل های ابتدایی رخ می دهد و آلودگی آن ها به شیرابه نیز تأثیری بر این روند ندارد. از این رو می توان نتیجه گرفت که در تحلیل دینامیکی این نوع خاک ها، اثر مدت دوام بارهای دینامیکی می تواند نادیده گرفته شود.

مقایسه روند تغییرات مدول برشی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری در سربارهای ۶/۲۹ و ۱۸/۸۸ کیلوپاسکال نشان می دهد که در خاک های بدون آلودگی، رشد مدول برشی در رس با دامنه خمیری ۱۶/۷ درصد حدود ۳۶ درصد می باشد، در حالی که در رس ها با دامنه خمیری ۱۴/۷ درصد و ۱۳/۹ درصد، رشد مدول برشی به ۵۰ و ۵۹ درصد می رسد. این مقادیر رشد مدول برشی که در خاک های آلوده شده به ۶ درصد شیرابه برابر با ۴۵، ۵۶ و ۶۹ درصد اندازه گیری شد و با افزایش آلودگی به میزان ۱۲/۵ درصد به ۵۶، ۷۵ و ۷۹ درصد رسید. این روند نشان می دهد که آلودگی به شیرابه سبب افزایش تأثیرپذیری مدول برشی رس از سربار می شود، بطوری که این افزایش در رس ها با دامنه خمیری کم تر پرنرنگتر است. با افزایش سربار از ۱۸/۸۸ به ۳۱/۴۷ کیلوپاسکال، رشد مدول برشی همچنان ادامه داشت، اما با این تفاوت که این رشد با نرخ کمتری دنبال شد. همانطور که در شکل ۸ برای خاک های بدون آلودگی مشاهده می شود، رشد مدول برشی ناشی از



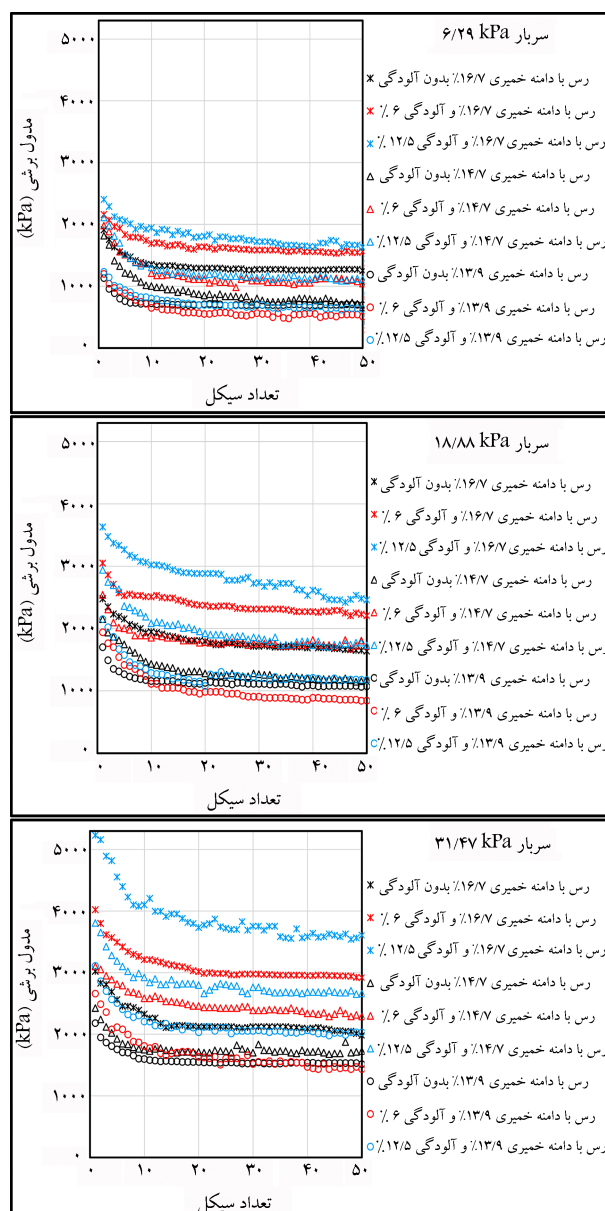
شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از رس با دامنه خمیری ۱۴/۷ درصد.

حد فلزات سنگین در میان ذرات خاک نسبت داد که موجب کم رنگ شدن باند بین آن‌ها می‌شود.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، رشد مدول برشی ناشی از افزایش آلودگی در سربارهای ۱۸/۸۸ و ۳۱/۴۷ کیلوپاسکال نیز مشاهده می‌شود. این رشد در نمونه‌ها با دامنه خمیری بیشتر، پررنگتر است. این بدان معناست که در مدفن‌های عمیق، هنگامی می‌توان افزایش سختی لایه‌های رسی را ناشی از نفوذ شیرابه در طراحی در نظر گرفت که از رس با دامنه خمیری بالا در ساخت در لایه‌ها استفاده شود. نکته مهم دیگری که در نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود، نقش دامنه خمیری در میزان رشد مدول برشی ناشی از نفوذ شیرابه است. همانطور که مشاهده می‌شود، رشد مدول برشی ناشی از نفوذ شیرابه با کاهش دامنه خمیری پررنگتر می‌شود. این بدان معنی است که نوع کانی رس در میزان تأثیرگذاری آلاینده بر خواص خاک آلوده نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. افزایش دامنه خمیری، هرچند اندک، نشان از فعالیت بیشتر کانی‌های رس و تمایل بیشتر آن‌ها جهت انجام واکنش شیمیایی با شیرابه است. بنابراین، می‌توان انتظار وقوع فعل و انفعالات شیمیایی فراگیرتر و متعاقب آن، تشکیل باندهای قوی‌تر در نمونه‌هایی با دامنه خمیری بیشتر را داشت، همانطور که در نتایج نیز مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که اگر چه اختلاف بین دامنه خمیری نمونه‌ها پررنگ نیست، اما این اختلاف حاکی از تغییر نوع کانی رس می‌باشد. بنابراین، تفاوت بین کانی‌های سه نمونه رس مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان در کنار دامنه خمیری، عامل دوم بروز تغییرات در پارامترهای خاک حین آلودگی دانست.

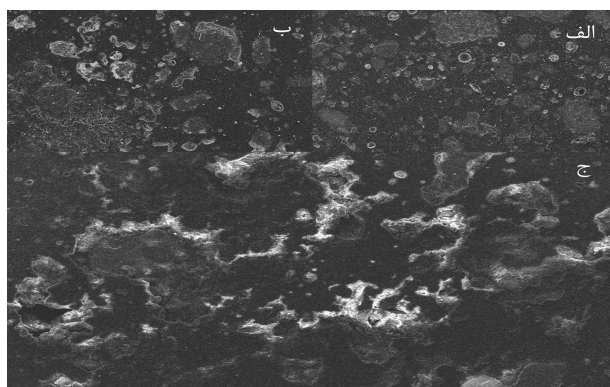
۲.۴. آنالیز SEM

به منظور بررسی تأثیرات شیرابه بر بافت خاک رس، نمونه‌ها پس از آغشته شدن به شیرابه، با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد عکس برداری قرار گرفتند و سپس از لحاظ پستی، بلندی و شروع واکنش‌ها، با استفاده از نرم افزار Image J ارزیابی شدند. تصاویر به دست آمده از نمونه رس با دامنه خمیری ۱۴/۷ درصد با درصد آلودگی مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به منظور درک بهتر روند واکنش شیرابه با دانه‌های رس، نمای سه بعدی از این خاک (رس با دامنه خمیری ۱۴/۷ درصد) در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۱ ب مشاهده می‌شود، نقاطی از این نمونه خاک شروع به واکنش با شیرابه کرده‌اند. به علت زیاد بودن غلظت شیرابه و تجمع فلزات سنگین، سطح وسیع‌تری از نمونه با گذشت زمان دچار واکنش شده است. این گسترش آلودگی در شکل

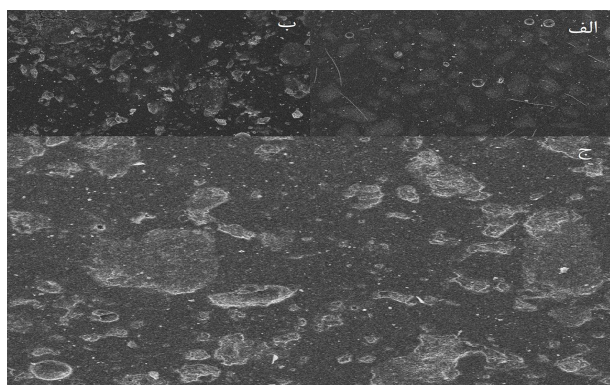


شکل ۹. تغییرات مدول برشی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای خاک با درصد آلودگی مختلف به تفکیک سربار.

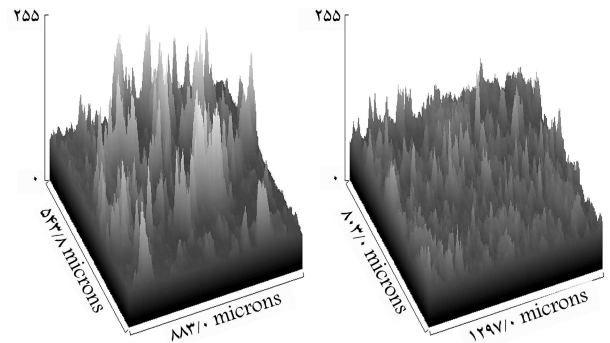
که در شکل ۹ برای سربار ۶/۲۹ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود، آلودگی نمونه رسی با دامنه خمیری ۱۶/۷ درصد به ۶ درصد شیرابه منجر به رشد ۱۳ درصدی مدول برشی شد، در حالی که این رشد در رس‌ها با دامنه خمیری ۱۴/۷ و ۱۳/۹ درصد حدود ۹ و ۶ درصد مشاهده شد. این پدیده را می‌توان به افزایش چسبندگی بین دانه‌ها در اثر حضور شیرابه و قرارگیری فلزات سنگین با مقاومت بالا در بین ذرات خاک نسبت داد. این امر سبب ایجاد ترکیب‌هایی قوی در نمونه‌ها و افزایش مقاومت خاک افزایش می‌شود. با افزایش آلودگی به میزان ۱۲/۵ درصد، رشد مدول برشی همچنان مشاهده شد، با این تفاوت که این رشد با نرخ کمتری ظاهر شد و در رس‌ها با دامنه خمیری ۱۶/۷، ۱۴/۷ و ۱۳/۹ درصد به ترتیب به حدود ۱۱، ۷ و ۳ درصد رسید. این بدان معناست که بیشترین تأثیر شیرابه بر بهبود مدول برشی خاک، در سطوح کمتری از آلودگی نمایان می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان به تجمع بیش از



شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از رس با دامنه خمیری ۱۳/۹ درصد (الف) بدون آلودگی، (ب) با ۶٪ آلودگی و (ج) با ۱۲/۵٪ آلودگی.



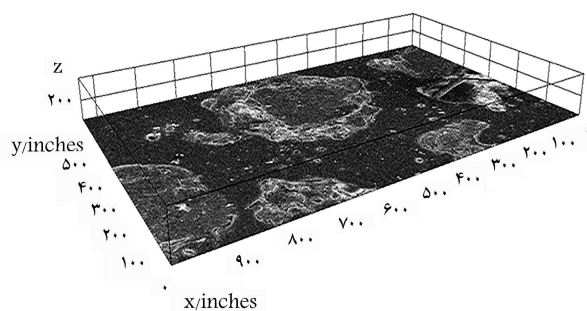
شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از رس با دامنه خمیری ۱۶/۷ درصد (الف) بدون آلودگی، (ب) با ۶٪ آلودگی و (ج) با ۱۲/۵٪ آلودگی.



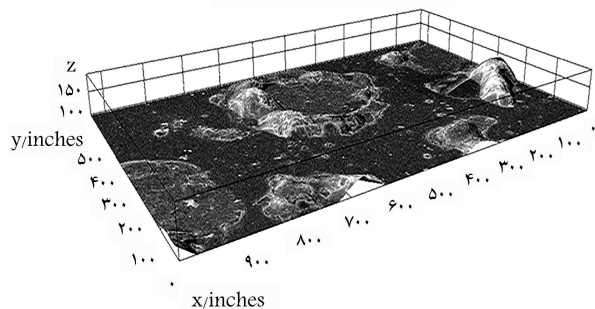
شکل ۱۴. میزان پستی و بلندی سطح نمونه رس با دامنه خمیری ۱۳/۹ درصد. (الف) بدون آلودگی؛ (ب) با ۱۲/۵ درصد آلودگی.

شکل ۱۴. میزان پستی و بلندی سطح نمونه رس با دامنه خمیری ۱۳/۹ درصد.

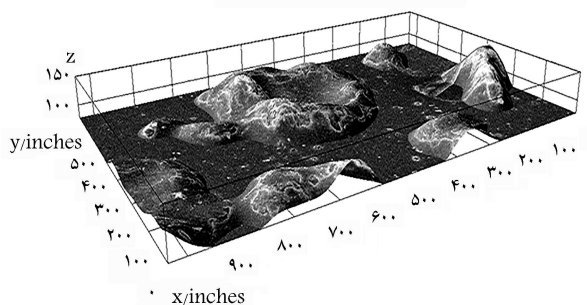
کاهش که با کاهش دامنه خمیری پررنگ تر می شود، می تواند به افزایش قفل و بست دانه ها و کاهش حرکت نسبی آن ها نسبت به هم و به دنبال آن افزایش استهلاک انرژی در فشار همه جانبه بالا نسبت داده شود. مشابه با آنچه در مورد روند تغییرات مدول برشی در مقابل تعداد سیکل مشاهده شد، عمده تغییرات به وجود آمده در نسبت میرایی در ۱۰ سیکل اول بارگذاری رخ داد. روند افزایش نسبت میرایی در مقابل سیکل بارگذاری ابتدا با یک شیب تند آغاز و پس از عبور از سیکل دهم، با یک شیب ملایم دنبال شد. با افزایش تعداد سیکل، این روند افزایشی رفته رفته کم رنگ شده به طوری که پس از عبور از سیکل چهارم می توان از تغییرات ایجاد شده در نسبت میرایی صرف نظر نمود. بنابراین، مشابه با آنچه در رابطه با مدول برشی



الف) بلافاصله بعد از آلودگی؛



ب) ۱۲ ساعت پس از آلودگی؛



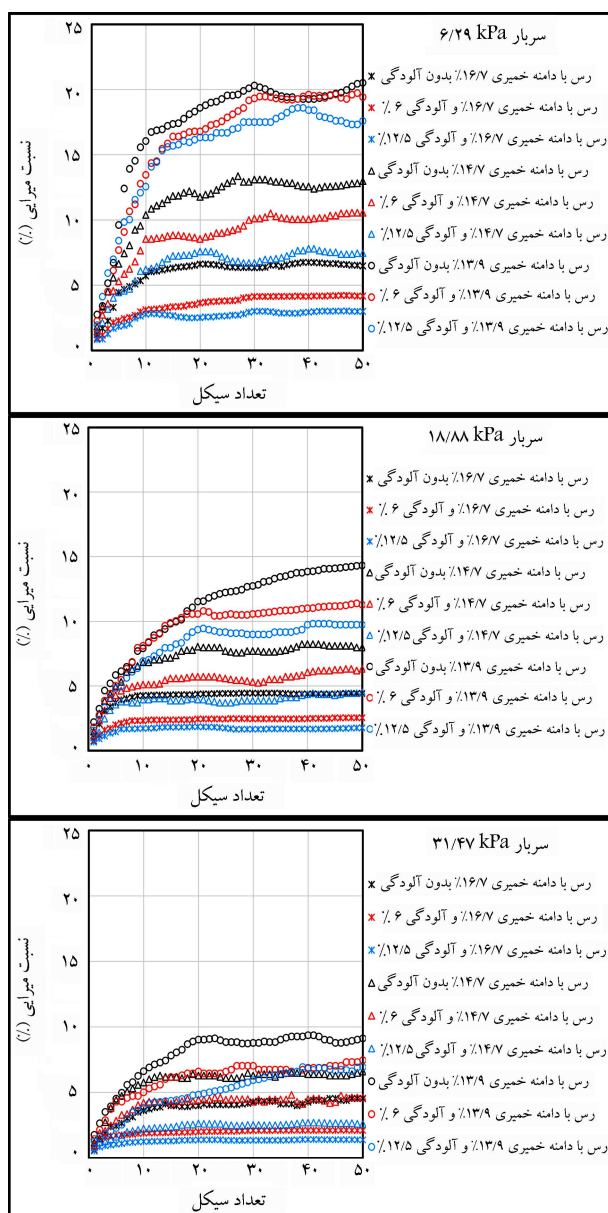
ج) ۲۴ ساعت پس از آلودگی.

شکل ۱۱. روند انجام واکنش در نمونه رس با دامنه خمیری ۱۴/۷ درصد و آلودگی ۱۲/۵ درصد.

۱۱ ج مشاهده می شود. در شکل های ۱۲ و ۱۳ نیز تصاویر به دست آمده از نمونه رس با دامنه خمیری ۱۳/۹ و ۱۶/۷ درصد با درصد آلودگی مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، بر اثر اضافه شدن شیرابه به نمونه ها، ساختارهایی در خاک تشکیل شده اند که عامل اصلی افزایش سختی خاک می باشد. میزان تجمع این ساختارها و زبری آن ها در شکل ۱۴ برای خاک با دامنه خمیری ۱۳/۹ درصد نشان داده شده است. همانطور که به وضوح دیده می شود، حضور شیرابه سبب تشکیل ساختارهایی زبر و مجتمع در سطح خاک رسی می شود. این سطوح زبر سبب قفل و بست بیشتر و به دنبال آن سبب سختی خاک می شود. این امر پیش از این نیز در بخش ۱-۴ مشاهده شده است.

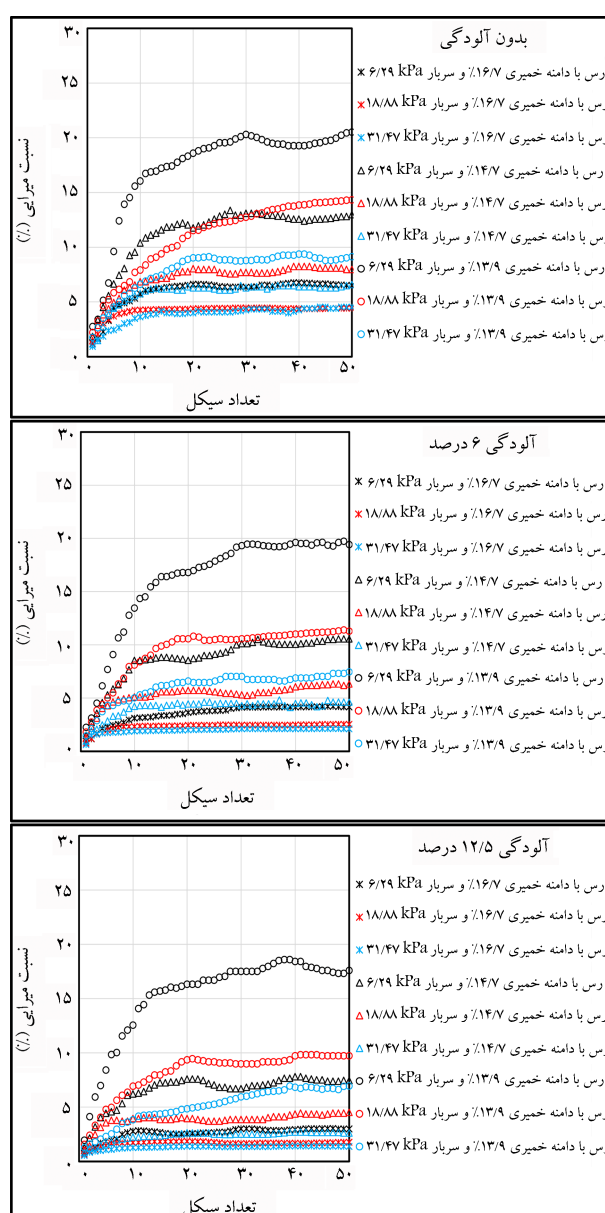
۳.۴. اثر سربار و آلودگی بر نسبت میرایی رس ها

برای بررسی تأثیر سربار بر نسبت میرایی نمونه ها با نسبت آلودگی مختلف، تغییرات نسبت میرایی در برابر تعداد سیکل بارگذاری در شکل ۱۵ ارائه شده است. اولین نکته قابل توجه در شکل ۱۵، کاهش نسبت میرایی ناشی از افزایش سربار است. این



شکل ۱۶. تغییرات نسبت میرایی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای خاک با درصد آلودگی مختلف به تفکیک سربار.

کاهش نسبت میرایی همچنان ادامه داشت، اما با نرخ کمتری دنبال شد. همانطور که در شکل ۱۵ برای خاک‌های بدون آلودگی مشاهده می‌شود، کاهش نسبت میرایی ناشی از افزایش سربار از ۱۸/۸۸ به ۳۱/۴۷ کیلوپاسکال در رس با دامنه خمیری ۱۶/۷ درصد حدود ۹ درصد می‌باشد. این کاهش در رس‌ها با دامنه خمیری ۱۴/۷ و ۱۳/۹ درصد، رشد مدول برشی به ۱۹ و ۲۷ درصد رسید. این در حالی بود که با آلودگی خاک به ۶ درصد شیرابه، مقادیر کاهش نسبت میرایی در این خاک‌ها به ترتیب به ۱۵، ۲۳ و ۳۴ درصد و سپس با افزایش آلودگی به میزان ۱۲/۵ درصد، به ۲۲، ۳۷ و ۳۹ درصد رسید. برای تعیین رابطه بین آلودگی، دامنه خمیری و میرایی خاک، تغییرات نسبت میرایی در مقابل سیکل بارگذاری برای نمونه‌های مختلف به تفکیک سربار در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، آلودگی و افزایش آن سبب کاهش نسبت میرایی در کلیه نمونه‌های رسی می‌شود. این کاهش



شکل ۱۵. تغییرات نسبت میرایی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای خاک با سربار مختلف به تفکیک درصد آلودگی.

نتیجه‌گیری شده، این بدان معنا است که اثر مدت دوام بارهای دینامیکی در انتخاب نسبت میرایی می‌تواند نادیده گرفته شود.

همانطور که در شکل ۱۵ برای خاک‌های بدون آلودگی مشاهده می‌شود، کاهش نسبت میرایی در رس با دامنه خمیری ۱۶/۷ درصد در اثر افزایش سربار از ۶/۲۹ به ۱۸/۸۸ کیلوپاسکال حدود ۲۷ درصد می‌باشد. این کاهش در رس‌ها با دامنه خمیری ۱۴/۷ و ۱۳/۹ درصد به ترتیب به ۳۳ و ۳۵ درصد می‌رسد. این مقادیر کاهش نسبت میرایی که در خاک‌های آلوده شده به ۶ درصد شیرابه برابر با ۳۲، ۳۶ و ۳۹ درصد اندازه‌گیری شد و با افزایش آلودگی به میزان ۱۲/۵ درصد، نسبت میرایی به ۴۰، ۴۶ و ۴۷ درصد رسید. این روند نشان می‌دهد که آلودگی به شیرابه سبب افزایش تأثیر پذیری نسبت میرایی رس از سربار می‌شود. این افزایش در رس‌ها با دامنه خمیری کمتر، پررنگ‌تر است. با افزایش سربار از ۱۸/۸۸ به ۳۱/۴۷ کیلوپاسکال،

هنگامی می‌توان کاهش نسبت میرایی لایبرهای رسی را ناشی از نفوذ شیرابه در طراحی در نظر گرفت که از رس با دامنه خمیری بالا در ساخت در لایبرها استفاده شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از آزمایش برش ساده سیکلی، رفتار دینامیکی خاک رس آلوده به شیرابه زباله در فشار سربار مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که عمده کاهش به وجود آمده در مدول برشی و افزایش به وجود آمده در نسبت میرایی خاک‌های رسی در خلال تجربه یک بار دینامیکی تنها در سیکل‌های ابتدایی رخ می‌دهد و آلودگی به شیرابه نیز تأثیری بر این روند ندارد. همچنین، مشاهده شد که آلودگی به شیرابه سبب افزایش تأثیرپذیری مدول برشی و نسبت میرایی رس از سربار می‌شود. این افزایش در رس‌ها با دامنه خمیری کمتر، پررنگ‌تر است.

نتایج نشان داد که آلودگی و افزایش آن سبب رشد مدول برشی و همچنین کاهش نسبت میرایی خاک می‌شود. میزان رشد و کاهش این دو پارامتر متأثر از نوع خاک بوده و در خاک‌هایی با دامنه خمیری بیشتر، برجسته‌تر است. از سوی دیگر، مشخص شد که بیشترین تأثیر شیرابه بر بهبود مدول برشی و کاهش نسبت میرایی خاک، در سطوح کمتری از آلودگی اتفاق می‌افتد. دلیل این پدیده را می‌توان به تجمع بیش از حد فلزات سنگین در میان ذرات خاک نسبت داد که موجب کم‌رنگ شدن باند میان آن‌ها می‌شود.

متأثر از نوع خاک بوده و در خاک‌هایی با دامنه خمیری بیشتر، پررنگ‌تر است. همانطور که در شکل ۱۶ برای سربار ۶/۲۹ کیلوپاسکال مشاهده می‌شود، آلودگی نمونه رسی با دامنه خمیری ۶/۷ درصد به ۶ درصد شیرابه منجر به افت ۳۸ درصدی نسبت میرایی شد. این کاهش در رس‌ها با دامنه خمیری ۱۴/۷ و ۱۳/۹ درصد به حدود ۲۶ و ۴ درصد تنزل یافت. این پدیده را می‌توان به کاهش حرکت نسبی دانه‌های خاک نسبت به یکدیگر نسبت داد که در اثر افزایش چسبندگی بین دانه‌ها در اثر حضور شیرابه و قرارگیری فلزات سنگین با مقاومت بالا در میان ذرات خاک ایجاد می‌شود. کاهش حرکت نسبی دانه‌های خاک، کاهش استهلاک انرژی و به دنبال آن کاهش میرایی را به دنبال خواهد داشت. با افزایش آلودگی به میزان ۱۲/۵ درصد، کاهش نسبت میرایی همچنان مشاهده شد، اما این کاهش با نرخ کمتری ظاهر شد. در رس‌ها با دامنه خمیری ۱۶/۷، ۱۴/۷ و ۱۳/۹ درصد به ترتیب به حدود ۲۹، ۲۲ و ۷ درصد رسید. این بدان معنا است که بیشترین تأثیر شیرابه بر کاهش نسبت میرایی خاک در سطوح کمتری از آلودگی نمایان می‌شود. تجمع بیش از حد فلزات سنگین در میان ذرات خاک که موجب کم‌رنگ شدن باند میان آن‌ها می‌شود، می‌تواند دلیل این پدیده باشد. با کاهش باند میان ذرات، امکان جابه‌جایی برای ذرات مجدداً فراهم شده که این امر وقوع استهلاک بیشتر در خاک را به ارمغان می‌آورد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، کاهش نسبت میرایی ناشی از افزایش آلودگی در سربارهای ۱۸/۸۸ و ۳۱/۴۷ کیلوپاسکال نیز مشاهده می‌شود. این کاهش در نمونه‌ها با دامنه خمیری بیشتر، پررنگ‌تر است. این بدان معنا است که در مدفن‌های عمیق،

پانویس‌ها

1. Simple Shear Test
2. Inductively Coupled Plasma
3. at Rest
4. Load Cell
5. Linear Variable Differential Transformer
6. Hysteresis Loop

منابع (References)

1. Brennan, A., Thusyanthan, N.I. and. Madabhushi, S.P.G., 2005. Evaluation of shear modulus and of damping in dynamic centrifuge tests. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:12\(1488\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:12(1488)).
2. Liu, F., Zhou, Z., Ma, W., Zhang, S. and Sun, Z., 2021. Dynamic parameters and hysteresis loop characteristics of frozen silt clay under different cyclic stress paths. *Hindawi. Advance in Materials Science and Engineering*, 2021.22, <https://doi.org/10.1155/2021/3763181>.
3. Iida, K., 1938. The velocity of elastic waves in sand. *Bulletin Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University Vol16*, pp.131-144.
4. Iida, K., 1940. On the elastic properties of soil, particularly in relation to its water content. *Bulletin, Earthquake Research Institute, Tokyo Imperial University*, Vpl.18, pp.657-690
5. Tofigh Tabrizi, M., Keramati, M. and Ramesh, A., 2021. Evaluation of the dynamic behavior of Anzali extractive port sand soil improved with waste polydiene terephthalate. *Journal of Marine Engineering*. [In Persian].
6. Karimi, S. and Sharifipour, M., 2021. Characterizing the shear modulus variations of crude oil contaminated clay on small-strain range. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 8(2), pp.23-36. <https://doi.org/10.48303/bese.2021.243725>. [In Persian].
7. Facciorusso, J., 2021. An archive of data from resonant and cyclic torsional shear tests performed on Italian clays. *Earthquake Spectra*, 37(1), <https://doi.org/10.1177/8755293020936692>
8. Hassanzadeh, A.R., Bighlari Fadafan, A., Mousavi, Y. and Tabarsa, A., 2019. Evaluation of the impact of urban waste leachate on the mechanical properties of fine-grained soil. *Iran Water and Soil Research*, <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.293941.668427>. [In Persian].
9. Negahdar, A.R., Sultan Qais, E. and Mukhtarian Asl, S., 2016. In vestigation the impact of Tabriz waste land-fill leachate pollution on soil mechanical parameters. *The*

- First International Conference on Water, Environment and Sustainable Development*. [In Persian].
10. Asghari laski, B. and Mehedad, M.A., 2013. Investigating the influence of municipal waste leachate on the shear strength of clay. [In Persian].
 11. Khodary, S.M., Fath, H., Negm, A. and Tawfik, A., 2021. Measuring the engineering properties of landfill leachate-contaminated soil in Egypt. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6(1), pp.6-23. <http://dx.doi.org/10.1007/s41207-020-00232-5>.
 12. Yousefi kebriya, D., Taghizadeh, M. and Darvishi, Gh., The effect of leachate infiltration on the physical and chemical characteristics of the landfill soil (case study: Tonkabon landfill).
 13. Sharma, P., Joia, P.S. and Singh, A., 2021. An experimental study to understand the effects of leachate on geotechnical characteristics of silty soil.
 14. Sunil, B.M., Shrihari, S. and Nayak, S., 2009. Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. *Engineering Geology*, 106(1-2), pp.20-25. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.011>
 15. Jiang-shan, Li. Qiang, Xue. and Ping, wanglei.liu., 2013. Influence of leachate pollution on mechanical properties of compacted clay Acase study on behavior sand mechanisms. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.013>.
 16. Jonidi Jafari, A. and Talaiekhosani, A., 2010. Solid waste management. Ebadifar Publishers. [In Persian].
 17. Taghi zadeh, F., Eskandari, M., Afsari, N. and Ghey-tanchi, M.R. Studying seismotectonics and seismicity of Qom province. *Earth Journal*, 3(3), pp.59-70. 1387. [In Persian].
 18. Mojezi, M., Biglari, M. and Jafari, M.K., Cyclic parameters of high plasticity clay in normally consolidated unsaturated condition. *MCEJ 2017*, 17 (5), pp.209-216. [In Persian].