

استفاده از میکروسیلیس برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی رس نازلو

کاظم بدو* (استاد)

حمید امدادی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (ص. ۹۱-۱۰۰)
دربی ۲-۳۲، شماره ۱/۲، ص. ۹۱-۱۰۰

در این مطالعه، اثر ماده‌ی افزودنی میکروسیلیس در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس سیلتی منطقه‌ی نازلو شهرستان ارومیه بررسی شده است. پس از به دست آوردن پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و میکروسیلیس، خاک با ۵ الی ۳۰ درصد میکروسیلیس ترکیب و پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح مخلوط اندازه‌گیری شده‌اند. افزایش میکروسیلیس از ۵ تا ۳۰ درصد وزنی خاک، موجب افزایش شاخص خمیری، کاهش چگالی ویژه، افزایش رطوبت بهینه، و کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک شده است. سپس اثر میکروسیلیس در ضریب نفوذپذیری، مقاومت برشی و تک‌محوری و ضریب انتشار مولکولی خاک رس سیلتی بررسی شده است. افزایش میکروسیلیس موجب کاهش ضریب نفوذپذیری، بهبود خواص مقاومتی، و افزایش چسبندگی خاک شده است. افزودن میکروسیلیس به خاک موجب شده است ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک قدری افزایش یابد، لیکن مقادیر اندازه‌گیری شده در محدوده‌ی استاندارد توصیه شده برای خاک‌های رسی بوده است. نتیجه‌گیری کلی این مطالعه حاکی از بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس سیلتی نازلو در اثر افزودن بیشینه‌ی ۳۰٪ وزنی میکروسیلیس به خاک بوده است، طوری که بتوان از آن برای ساخت آسترهای رسی در کف مدفن‌های زباله در منطقه استفاده کرد.

واژگان کلیدی: رس سیلتی نازلو، میکروسیلیس، مدفن زباله، آستر رسی، نفوذپذیری، مقاومت، انتشار مولکولی.

۱. مقدمه

برای اصلاح خاک‌های رسی استفاده کرده‌اند. [۷-۱۸] از جمله موادی که برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی می‌تواند مورد استفاده قرارگیرد، میکروسیلیس است.

برخی پژوهشگران، [۱۲، ۱۹] طی یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی نشان داده‌اند که افزودن میکروسیلیس به خاک رسی باعث افزایش مقاومت فشاری نامحسوس و کاهش فشار تورمی و ضریب نفوذپذیری آن می‌شود.

محل دفن زباله‌ی شهرستان ارومیه در ۱۷ کیلومتری غرب این شهرستان و در نزدیکی روستای نازلو قرار دارد. خاک رسی این منطقه به‌عنوان منابع قرضه‌ی مناسب برای ساخت آسترهای رسی کف یک مدفن مهندسی مورد توجه پژوهشگران بوده است. [۲۰-۳۲]

در این پژوهش، به بررسی بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تهیه‌شده از این منطقه با استفاده از میکروسیلیس پرداخته شده است. در این پژوهش درصد‌های مختلفی از میکروسیلیس به خاک رسی نازلو افزوده و اثر میکروسیلیس در بهبود خصوصیات پایه‌ی مکانیک خاکی، نفوذپذیری، مقاومت، و انتشار مولکولی خاک مذکور بررسی شده است.

استفاده از خاک رسی در اغلب پروژه‌های عمرانی و زیست‌محیطی به دلیل نفوذپذیری کم، مقاومت برشی کافی و قابلیت جذب آلاینده‌ها از دیرباز مورد توجه مهندسان و پژوهشگران بوده است. [۱-۴] یکی از موارد استفاده از خاک رسی، مدفن‌های بهداشتی - مهندسی زباله است. لایه‌های متراکم رسی (آسترهای رسی) در کف مدفن‌های مهندسی زباله تعبیه می‌شوند، تا ضمن جلوگیری از نفوذ شیرابه‌ی زباله به لایه‌های زیرین، آلاینده‌های موجود در شیرابه را نیز جذب کنند و مانع انتقال آنها به سفره‌های آب زیرزمینی منطقه دفن شوند. [۴، ۵]

یک آستر رسی متراکم باید نفوذپذیری کم داشته باشد، در اثر تغییرات رطوبت متورم و منقبض نشود و مقاومت برشی کافی داشته باشد. در صورتی که خاک رسی محلی، شرایط ذکرشده را نداشته باشد، می‌توان با مواد افزودنی خصوصیات آن را اصلاح و در غیر این صورت از مصالح جایگزین استفاده کرد.

پژوهشگران بسیاری از مواد معدنی طبیعی، مصنوعی و فرآورده‌های فرعی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۶

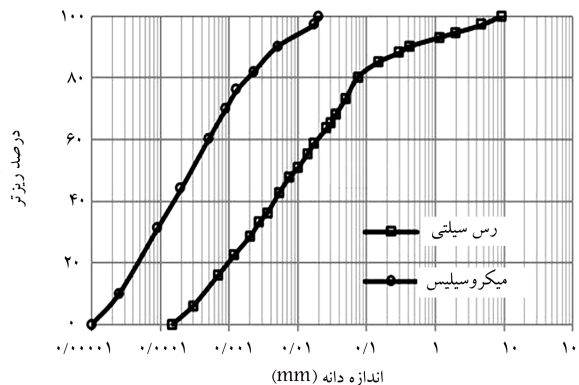
۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. خاک رسی

خاک استفاده شده در این پژوهش از محل یک کارخانه‌ی آجرپزی واقع در منطقه‌ی نازلو واقع در ۱۷ کیلومتری شهرستان ارومیه تهیه شده است. برای تعیین مشخصات پایه‌ی مکانیک خاک، آزمایش‌های مکانیک خاک شامل: دانه‌بندی با روش الک‌کردن و هیدرومتری، حدود اتربرگ، چگالی ویژه، و تراکم انجام شده است. منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۱ و مشخصات پایه‌ی مکانیک خاکی آن در جدول ۱ ارائه شده است، که با توجه به مشخصات ذکر شده، نوع خاک استفاده شده، رس سیلتی با خاصیت خمیری کم تشخیص داده شده است.

پاره‌یی از خصوصیات ژئوشیمیایی خاک رس سیلتی نازلو شامل: ظرفیت تبادل یونی، هدایت الکتریکی، pH، درصد مواد آلی، و درصد آهک طی مطالعه‌ی دیگری اندازه‌گیری و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.^[۲۳] مقدار کافی ظرفیت تبادل یونی و درصد نسبتاً بالای آهک در رس سیلتی نازلو موجب می‌شود که این خاک در صورت استفاده به عنوان مصالح آستر رسی در مدفن‌های زباله، جاذب خوبی برای آلاینده‌های شیمیایی مانند فلزات سنگین باشد.

آزمایش XRD به صورت پراش‌نگاره با ۴ تیمار شامل: اشباع با منیزیم و هوا خشک‌شده، اشباع با منیزیم و تیمار شده با گلیسرول، اشباع با پتاسیم و هوا خشک‌شده، و اشباع با پتاسیم در درجه حرارت ۵۵°C، در روی نمونه‌های خاک رس سیلتی نازلو انجام شده و نتایج نشان داده است که کانی ایلیت با ۴۹٪، کانی گروه اسمکتیت با ۲۱٪، و کانی کائولینیت با ۲۰/۵٪ کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این خاک هستند. کانی‌کلریت با ۹/۵٪، کمترین مقدار را در این خاک به خود اختصاص داده است.^[۲۳] کانی ایلیت، که درصد غالب را در خاک رس سیلتی نازلو دارد، مناسب‌ترین کانی رسی برای ساخت آستر رسی در مدفن‌های زباله محسوب می‌شود.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رس سیلتی نازلو.

جدول ۱. مشخصات پایه‌ی خاک رس سیلتی نازلو.

مقدار	پارامتر
۲/۶۷	چگالی ویژه
۳۰	حد روانی (٪)
۱۲	حد خمیری (٪)
۱۸	شاخص خمیری (٪)
۱۶/۵	درجه رطوبت بهینه (٪)
۱۸/۲	وزن مخصوص خشک بیشینه (kN/m ^۳)

جدول ۲. پاره‌یی از مشخصات ژئوشیمیایی خاک رس سیلتی نازلو.

مقدار	پارامتر
۲۹	ظرفیت تبادل یونی (CEC) (meq/۱۰۰ Clay)
۵/۶	هدایت الکتریکی (EC) (dSm ^{-۱})
۷/۱۷	pH
۰/۲۶	درصد مواد آلی
۱۶/۷	درصد آهک

جدول ۳. درصد مواد شیمیایی تشکیل‌دهنده‌ی میکروسیلیس.

ماده‌ی شیمیایی	درصد	ماده‌ی شیمیایی	درصد
H ₂ O	۰/۰۸	CaO	۰/۴۹
SiO ₂	۰/۵	MgO	۰/۹۷
C	۰/۳	Na ₂ O	۰/۳۱
SiO ₂	۹۶/۴ - ۹۴/۶	K ₂ O	۱/۰۱
Fe ₂ O ₃	۰/۸۷	P ₂ O ₅	۰/۱۶
Al ₂ O ₃	۱/۳۲	SO ₃	۰/۱
CL	۰/۰۴		

۲.۲. میکروسیلیس

میکروسیلیس استفاده شده، ساخت شرکت ایمن بتن در ایران است. درصد تشکیل‌دهنده‌ی عناصر شیمیایی میکروسیلیس در جدول ۳ و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این ماده‌ی پودری با حالت فیزیکی پوزولان به رنگ خاکستری متمایل به سفید و با وزن مخصوص ۵۰۰ kg/m^۳ و چگالی ویژه ۲/۲۲ است. شکل ذرات، کروی غیرکریستاله و مطابق جدول ۳، حاوی حدود ۹۶٪ دی‌اکسیدسیلیسیم^۱ است، که از فرایند تولید فروسیلیسیوم در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می‌آید و معمولاً برای افزایش کیفیت بتن به مخلوط خشک آن اضافه می‌شود. نام دیگر این ماده، سیلیکافیوم^۲ است و با استاندارد C۱۲۴۰ ASTM مطابقت دارد.^[۲۳] افزودن میکروسیلیس به مخلوط بتن باعث می‌شود که دی‌اکسیدسیلیسیم فعال آن با محلول هیدرواکسید کلسیم^۳ آزاد موجود در منافذ موئین بتن مخلوط شود و کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید کند؛ و در نهایت، باعث تراکم و ساختار خمیر سیمان و افزایش مقاومت بتن شود.

۳.۲. اختلاط خاک رس سیلتی و میکروسیلیس و انجام آزمایش‌های پایه

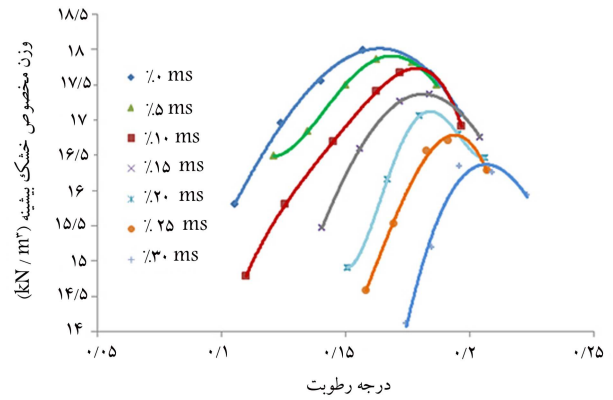
نحوه‌ی انتخاب درصد اختلاط خاک رس سیلتی و میکروسیلیس براساس سعی و خطا در آزمایشگاه و مطالعه‌ی تجارب پژوهشگران دیگر انجام پذیرفته است. از آنجا که میکروسیلیس، وزن مخصوص پایینی دارد و کار با نمونه‌های ترکیبی و درصد بالای میکروسیلیس با مشکل همراه است، براساس نتایج آزمایش‌های اولیه، بیشینه‌ی میکروسیلیس در اختلاط، ۳۰٪ در نظر گرفته شده است. میکروسیلیس با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰، درصد وزنی خشک کل مخلوط خاک رس سیلتی و میکروسیلیس انتخاب و نمونه‌های خاک و میکروسیلیس با دقت با هم مخلوط شده‌اند. اختلاط با دست انجام شده است تا به صورت همگن باشد. به دلیل اینکه خاک رس سیلتی کاملاً در کوره‌ی حرارتی خشک شده بود، در هنگام اختلاط ابتدا مقداری رطوبت به مخلوط خاک رس و میکروسیلیس اضافه و حدود ۱۲

جدول ۵. تغییرات شاخص خمیری و چگالی ویژه با افزودن میکروسیلیس به خاک رس سیلتی.

چگالی ویژه	شاخص خمیری (%)	میکروسیلیس (%)
۲,۶۷	۱۸	۰
۲,۶۴	۱۹,۴	۵
۲,۶۲	۲۱	۱۰
۲,۵۹	۲۳,۴	۱۵
۲,۵۷	۲۴,۵	۲۰
۲,۵۴	۲۴,۹	۲۵
۲,۵۰	۲۵,۳	۳۰

از چسب آکواریوم مسدود شده است. نمونه‌های ترکیب‌شده‌ی خاک رس سیلتی و میکروسیلیس پس از افزودن رطوبت به مقدار حدود ۳٪ بیش از رطوبت بهینه (برای داشتن کمینه‌ی نفوذپذیری: آنچه که برای عایق‌های رسی در مدفن‌های زباله توصیه شده است)، در ۳ لایه در داخل لوله‌ی پلیکا متراکم و ارتفاع نهایی خاک اندازه‌گیری شده است. سپس به مدت ۲ روز در بالای خاک متراکم‌شده آب مقطر ریخته شده است، تا غیراشباع‌بودن نمونه‌ی متراکم‌شده در لایه‌های بالایی از بین رود و اثر مکش، که می‌تواند در روند انتشار مولکولی تأثیر منفی بگذارد، خنثی شود. سپس آب تخلیه و به جای آن محلول کلرورسدیم با غلظت ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر یون کلر، به ارتفاع ۴ سانتی‌متر ریخته شده است. نمونه‌ی اول بعد از ریختن محلول در مخزن بالای خاک برداشته شده است، تا غلظت اولیه‌ی یون کلر در ابتدای آزمایش تعیین شود. سپس نمونه‌برداری‌ها در نیم روز، یک روز و روزهای بعد، هر دو روز ۱ بار انجام شده است. آزمایش‌ها بعد از مدت ۱۲ تا ۱۵ روز به اتمام رسیده است. یادآور می‌شود مقدار نمونه‌هایی که هر روز برداشته شده‌اند، برابر ۲ میلی‌لیتر بوده و به جای آن به همان مقدار، آب مقطر اضافه شده است. این امر باعث رقیق شدن محلول کلرورسدیم مخزن شده است، که در پیش‌بینی‌های تئوریک، که در ادامه شرح داده شده است، منظور شده است. در پایان آزمایش، محلول مخزن تخلیه و شیشه‌ی کف از لوله جدا شده، و نمونه‌ی خاک توسط یک سمبده‌ی چوبی از داخل لوله‌ی پلیکا خارج شده و به قطعات با ضخامت‌های حدود ۱,۷ سانتی‌متری بریده شده است. سپس تعداد ۷ قرص خاک بریده و با استفاده از دستگاه استحصال آب حفره‌ی آبیگری و در نهایت، غلظت یون کلر در ۷ نمونه آب حفره‌ی توسط دستگاه غلظت‌سنج کلر تعیین شده است. نمونه‌ی محلول‌های برداشت‌شده از مخزن بالای خاک نیز برای نسبت به زمان آزمایش و غلظت نسبت به عمق خاک برای هر نمونه‌ی ترکیبی رس سیلتی با میکروسیلیس ترسیم شده‌اند، که در بخش نتایج ارائه شده‌اند.

از نرم‌افزار پولوت^۷ برای محاسبات تئوریک استفاده شده است،^[۲۵] که در آن، خصوصیات خاک، محلول، شرایط مرزی آزمایش، و ضریب انتشار مولکولی تخمینی یون کلر به برنامه معرفی و خروجی برنامه به صورت منحنی‌های تئوریک (پیش‌بینی شده) غلظت - زمان و غلظت - عمق خاک تولید شده است. با ترسیم منحنی‌های مشاهده‌ی و تئوریک در یک نمودار تشخیص داده شده است که کدام ضریب انتشار مولکولی بهترین برازش را بین این دو منحنی نتیجه داده و آن ضریبی که بهترین برازش را داشته است، به عنوان ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک



شکل ۲. منحنی‌های تراکم برای ترکیب‌های خاک رس سیلتی و میکروسیلیس، حاوی ۵ الی ۳۰ درصد میکروسیلیس (در شکل ms به معنی میکروسیلیس است).

جدول ۴. مقادیر درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی ترکیب‌های حاوی صفر تا ۳۰ درصد میکروسیلیس.

میکروسیلیس (%)	رطوبت بهینه (%)	وزن مخصوص خشک بیشینه (kN/m ³)
۰	۱۶,۷	۱۸
۵	۱۷	۱۷,۹
۱۰	۱۷,۶	۱۷,۷
۱۵	۱۸	۱۷,۴
۲۰	۱۸,۴	۱۷,۱
۲۵	۱۹,۳	۱۶,۸
۳۰	۲۰,۶	۱۶,۴

ساعت زمان داده شد تا رطوبت جذب خاک شود تا تراکم نمونه‌ها بهتر انجام پذیرد. پس از اختلاط، آزمایش تراکم برای نمونه‌های ترکیبی انجام پذیرفته است. شکل ۲، منحنی‌های تراکم را برای نمونه‌های ترکیبی حاوی ۵ الی ۳۰ درصد میکروسیلیس نشان می‌دهد. در جدول ۴، مقادیر درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی حاصل از آزمایش‌های تراکم روی نمونه‌های ترکیبی نشان داده شده است. همچنین آزمایش‌های حدود اتربرگ و چگالی ویژه برای نمونه‌های ترکیبی انجام شده است، که نتایج آن در جدول ۵ مشاهده می‌شود. با توجه به چگالی ویژه پایین میکروسیلیس، همان‌طور که در هنگام اختلاط مشاهده شده است، پایین آمدن چگالی ویژه‌ی ترکیب خاک با میکروسیلیس قابل پیش‌بینی بوده است. همچنین مشاهده شده است که افزایش میکروسیلیس باعث افزایش شاخص خمیری خاک می‌شود، که آن هم در اثر افزایش حد روانی است، در حالی که حد خمیری تغییر چندانی نداشته است.

۴.۲. روش آزمایش‌های انتشار مولکولی

برای به دست آوردن ضریب انتشار مولکولی (ضریب دیفیوژن)^۴ خالص یک بُعدی باید از مدلی استفاده کرد که سایر مکانیزم‌های انتقال آلودگی در آن بی‌اثر باشند؛ بدین معنی که مکانیزم‌های فرارفت (ادوکشن)^۵، پارکنش مکانیکی^۶، جذب و تجزیه در آن مؤثر نباشند. برای این منظور از یک لوله‌ی پلیکا به قطر داخلی ۱۰ سانتی‌متر و طول حدود ۲۱ سانتی‌متر استفاده و یک طرف آن با یک صفحه‌ی شیشه‌ی با استفاده

جدول ۶. داده‌های ورودی و خروجی نرم افزار Pollute.

داده‌های ورودی	داده‌های خروجی
ضخامت خاک - پوکی خاک - وزن مخصوص خشک خاک - تعداد جزء لایه‌های خاک - ضریب انتشار مولکولی یون کلر در خاک (D_e) - غلظت بیشینه یون کلر در خاک - ارتفاع شیرابه (محلول کلرور سدیم) در بالای خاک - غلظت اولیه یون کلر در بالای خاک - مقدار محلول نمونه برداری شده برای تعیین غلظت در طول مدت آزمایش - شرط مرزی بالای خاک (جرم محدود) - شرط مرزی پایین خاک (جریان توده‌ی صفر)	داده‌های غلظت یون کلر در مخزن کلرور سدیم در بالای خاک در طول زمان و داده‌های غلظت یون کلر در ارتفاع خاک بصورت نوشتاری و به صورت ترسیم

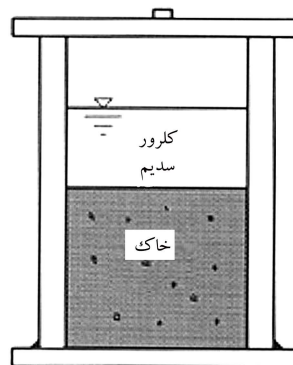
بوده است که معمولاً یک آستر رسی در کف مدفن زباله تحت آن تنش‌ها قرار می‌گیرد. در طول آزمایش‌ها میزان آب جریان‌یافته از نمونه‌ها در طول زمان یادداشت شده و آزمایش‌ها زمانی به پایان رسیده است که میزان آب ورودی به نمونه‌ها با میزان آب خروجی برابر شده است. پس از اتمام آزمایش‌ها، متحنی‌های جریان - زمان رسم شده و سپس با استفاده از رابطه‌ی دارسی ($k = Q/iA$) ضریب نفوذپذیری برای هر نمونه به دست آمده است. در این رابطه، Q دبی آب جریان‌یافته از داخل نمونه، i گرادیان هیدرولیکی، و A سطح مقطع نمونه است. ضرایب نفوذپذیری به دست آمده برای درجه حرارت آزمایشگاه اصلاح و نتایج به دست آمده در ادامه ارائه شده‌اند.

۶.۲. روش آزمایش‌های برش مستقیم

بعد از اختلاط خاک رس و میکروسیلیس با ۳٪ بیشتر از رطوبت بهینه، نمونه‌ها طبق روش B تراکم استاندارد در قالب سایز بزرگ متراکم شده و تعداد ۳ عدد نمونه‌ی دست‌نخورده به ابعاد $10 \times 10 \text{ cm}$ توسط نمونه‌گیر مخصوص دستگاه برش بریده شده‌اند. نمونه با دقت در داخل جعبه‌ی برش قرار گرفته و جعبه با آب اشباع شده است. صفحه‌ی سربار را، که مجهز به سنگ متخلخل است، روی نمونه گذاشته و قاب مخصوص بارگذاری قائم روی آن قرار گرفته است. نیروی قائم با توجه به شرایط آزمایش و با افزودن وزنه‌های مناسب روی قاب بارگذاری اعمال شده است. نیروی برش به صورت افقی و به وسیله‌ی موتور الکتریکی با دور معینی اعمال شده است. این نیرو به وسیله‌ی حلقه‌ی نیروسنج و جابه‌جایی توسط گیج تغییرشکل افقی اندازه‌گیری شده است. اعمال برش به صورت کنترل کرنش بوده و آنقدر ادامه یافته است تا نیروی برش به نقطه‌ی اوج برسد و سپس رو به کاهش بگذارد. برای اعمال نیروی قائم از وزنه‌های ۴، ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم و بازوی ۱ به ۱۰ دستگاه استفاده شده است. برای هر نمونه از ۳ تنش قائم ۰٫۴، ۱ و ۲ (kg/cm^2) استفاده شده و سرعت اعمال نیروی برشی $1/1 \text{ (mm/min)}$ بوده است. پس از انجام آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌ی خاک رس سیلتی خالص و نمونه‌های ترکیبی رس سیلتی و میکروسیلیس، نتایج به صورت نمودارهای تنش قائم در مقابل تنش برشی ترسیم شده و پارامترهای مقاومتی چسبندگی (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) به دست آمده‌اند، که در ادامه توضیح داده شده است.

۷.۲. روش آزمایش‌های فشاری تک‌محوری

بعد از اختلاط خاک رس و میکروسیلیس با ۳٪ بیشتر از رطوبت بهینه، نمونه‌ها طبق روش A تراکم استاندارد در قالب سایز کوچک متراکم شده‌اند. سپس خاک از قالب خارج و ۳ نمونه‌ی استوانه‌ی شکل با نسبت قطر به ارتفاع ۱ به ۲ تهیه شده‌اند (قطر متوسط نمونه‌ها ۳۶ cm و ارتفاع متوسط آنها ۷۲ cm بوده است). قبل از قراردادن نمونه‌های خاک در زیر دستگاه آزمایش، سطوح بالا و



شکل ۳. شکل مصور مدل آزمایش انتشار مولکولی انجام شده روی نمونه‌های ترکیبی خاک رس سیلتی و میکروسیلیس.



شکل ۴. تصویر سری آزمایش‌های انتشار مولکولی در حال انجام.

انتخاب شده است. در جدول ۶، داده‌های ورودی و خروجی نرم‌افزار پولوت خلاصه شده است. شکل ۳، به‌طور مصور مدل آزمایش انتشار مولکولی را نشان می‌دهد و در شکل ۴، تصویر سری آزمایش‌های انتشار مولکولی مشاهده می‌شود. اطلاعات مربوط به نتایج آزمایش‌های انتشار مولکولی برای خاک رس سیلتی خالص و ترکیب‌های خاک رس سیلتی با میکروسیلیس به همراه نمودارهای غلظت - زمان و غلظت - عمق در ادامه توضیح داده شده‌اند.

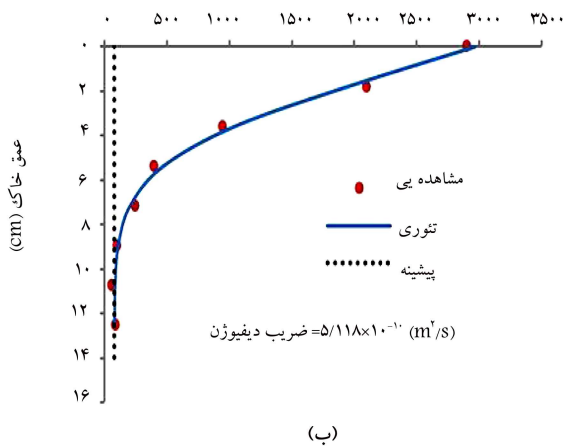
۵.۲. روش آزمایش‌های نفوذپذیری

آزمایش‌های نفوذپذیری با دستگاه نفوذپذیری سه‌محوری با دیواره‌ی انعطاف‌پذیر^۸ بر روی خاک رس سیلتی خالص و همچنین ترکیب‌های خاک رس سیلتی و میکروسیلیس انجام شده‌اند. نمونه‌ی خاک‌ها به قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۷ میلی‌متر بوده‌اند. نمونه‌ها در درجه رطوبت ۳٪ بیشتر از درجه رطوبت بهینه و با استفاده از روش تراکم پروکتور استاندارد^۹ در قالب تراکم آماده شده، در داخل محفظه‌ی آزمایش قرار گرفته، پوشش ممبرین اطراف نمونه‌ها کشیده شده، و نمونه‌ها تحت آزمایش نفوذپذیری با گرادیان هیدرولیکی ۲۰، تنش محفظه (تنش هم‌جانبه 100 kPa) و تنش مؤثر 60 kPa قرار گرفته و برای هر ترکیب خاک با میکروسیلیس ۲ نمونه مشابه آزمایش شده‌اند. مقادیر تنش اعمال شده در محدوده‌ی تنش‌هایی

به علت فراوانی نمودارهای مشاهده‌ی و پیش‌بینی‌شده‌ی غلظت - زمان و غلظت - عمق، فقط نمودارهای مربوط به خاک رسی سیلتی خالص و ترکیب خاک با ۳۰٪ میکروسیلیس به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. با تکرار آزمایش انتشار مولکولی روی هر کدام از نمونه‌ی خاک‌ها، این نتیجه به دست آمده است که روش به کار رفته، روش صحیحی برای تعیین ضریب انتشار مولکولی است. مطابق جدول ۷، ضریب انتشار مولکولی خاک رس سیلتی خالص نازلو، 5.18×10^{-10} مترمربع بر ثانیه به دست آمده و با افزایش درصد میکروسیلیس در این خاک، افزایش یافته و در ترکیب آخر یعنی ۳۰٪ میکروسیلیس، به مقدار 7.67×10^{-10} مترمربع بر ثانیه رسیده است. بنابراین با افزایش درصد میکروسیلیس تا ۳۰٪ وزنی در خاک رس سیلتی نازلو، ضریب انتشار مولکولی قدری افزایش یافته است؛ لیکن مقادیر به دست آمده در داخل محدوده‌ی مقادیر استاندارد برای آستر رسی یک مدفن مهندسی، یعنی محدوده‌ی 1.5×10^{-10} تا 1.0×10^{-10} مترمربع بر ثانیه است. [۳۶] همچنین با بررسی کارهای انجام‌شده‌ی پیشین روی خاک رسی منطقه‌ی نازلوی ارومیه، ضریب انتشار مولکولی خاک رس سیلتی خالص و ترکیب‌های خاک رس سیلتی با میکروسیلیس به دست آمده در این مطالعه، در محدوده‌ی ضرایب به دست آمده در مطالعات پیشین بوده است. [۲۸-۳۳]

۲.۳. آزمایش‌های نفوذپذیری

نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری انجام‌شده روی خاک رس سیلتی خالص و ترکیب‌های خاک با میکروسیلیس در جدول ۸ و شکل ۷ ارائه شده‌اند. مطابق جدول ۸،

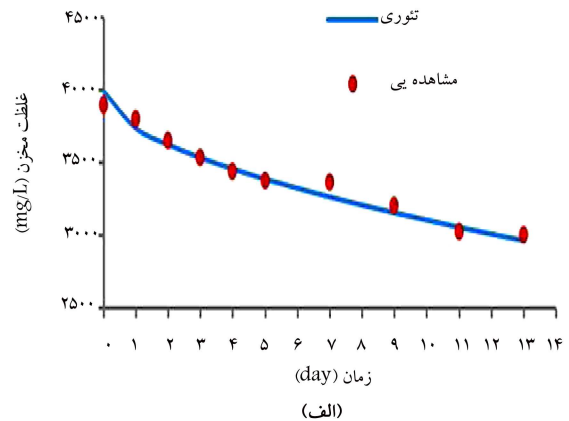


پایین نمونه‌ها با تیغه صاف شده‌اند، تا خاک در تماس کامل با دو فک دستگاه باشد. سپس بار محوری روی نمونه‌ها اعمال و با ثبت تغییر ارتفاع، کرنش‌های محوری محاسبه شده‌اند. در هنگام آزمایش، با ثابت در نظر گرفتن فواصل میان کرنش‌ها، نیروی مربوط قرائت شده است. در ابتدا قرائت‌ها با فواصل کم و در ادامه به علت نزول منحنی بار - تغییر شکل، قرائت‌ها با فواصل بیشتری انجام شده‌اند. قرائت‌ها تا هنگامی ادامه یافته‌اند که بار به نقطه‌ی اوج رسیده و سپس کاهش یافته است؛ و یا بار به مقدار بیشینه رسیده و بعد از آن تقریباً ثابت باقی مانده است. در پایان هر آزمایش، منحنی‌های تنش محوری - کرنش محوری ترسیم و چسبندگی زهکشی‌نشده (C_u) برای خاک رس سیلتی خالص و نمونه‌های ترکیبی رس سیلتی و میکروسیلیس به دست آمده‌اند، که در ادامه توضیح داده شده است.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. آزمایش‌های انتشار مولکولی

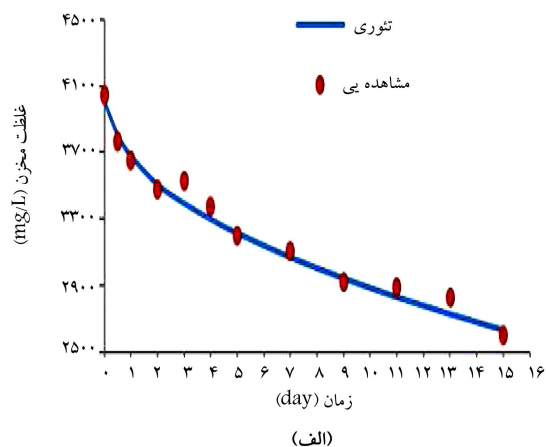
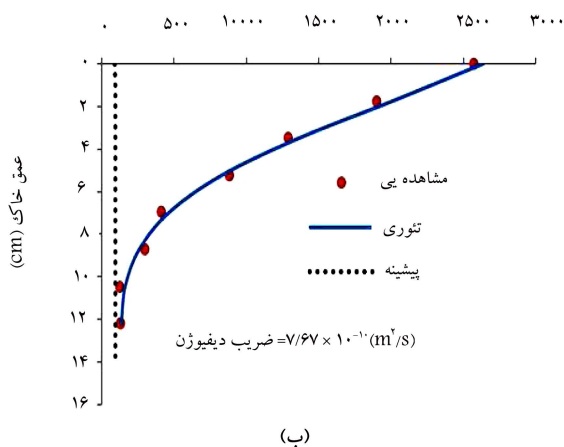
همچنان که توضیح داده شده است، آزمایش‌های انتقال آلودگی به طریقه‌ی انتشار مولکولی برای رس خالص و ترکیب‌های ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس انجام پذیرفته است. داده‌ها و نتایج آزمایش‌ها در جدول ۷ ارائه شده‌اند، که در آن، عدد و حرف مربوط به شماره‌ی هر آزمایش به ترتیب نشان دهنده‌ی درصد میکروسیلیس و سری تکرار آزمایش (A یا B) است.



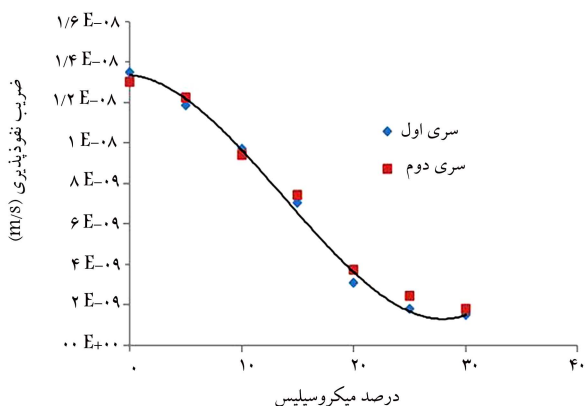
شکل ۵. الف) نمودار غلظت - زمان در مخزن کلرور سدیم، ب) نمودار غلظت - عمق خاک، در آزمایش انتشار مولکولی روی خاک رس سیلتی خالص نازلو (آزمایش A).

جدول ۷. داده‌های مورد استفاده و نتایج به دست آمده در آزمایش‌های انتشار مولکولی.

شماره‌ی آزمایش	۰ - B	۰ - A	۱۰ - B	۱۰ - A	۲۰ - B	۲۰ - A	۲۵ - B	۲۵ - A	۳۰ - B	۳۰ - A
ارتفاع خاک (cm)	۱۲	۱۲٫۵	۱۳	۱۲٫۵	۱۲	۱۲٫۵	۱۲٫۲	۱۲٫۲	۱۲٫۲	۱۲٫۵
درصد رطوبت وزنی	۱۹٫۴	۱۹٫۴	۲۰٫۵	۲۰٫۵	۲۱٫۳	۲۱٫۳	۲۲٫۱	۲۲٫۱	۲۳٫۵	۲۳٫۵
درصد اشباع	۹۶	۹۵	۹۴	۹۲	۹۳	۹۵	۹۳	۹۳	۹۳	۹۵
درجه‌ی رطوبت حجمی خاک	۰٫۳۳۴	۰٫۳۳۰	۰٫۳۵۶	۰٫۳۵۳	۰٫۳۵۷	۰٫۳۶۳	۰٫۳۶۷	۰٫۳۶۷	۰٫۳۷۸	۰٫۳۷۴
ارتفاع محلول آلوده (cm)	۴٫۱	۴٫۲	۴	۴٫۱	۴٫۲	۴	۴٫۱	۴٫۱	۴٫۱	۴٫۱
غلظت اولیه‌ی محلول (mg/l)	۳۹۰۰	۳۹۴۰	۳۹۰۰	۳۹۶۰	۳۹۱۰	۳۹۸۰	۴۰۴۰	۴۰۴۰	۴۰۲۰	۴۰۱۰
مدت زمان آزمایش (روز)	۱۳	۱۳	۱۲	۱۲	۱۳٫۲	۱۳٫۲	۱۴٫۵	۱۴٫۵	۱۵	۱۵
ضریب انتشار مولکولی یون کلر $\times 10^{-10}$ (m ² /s)	۵٫۱۸	۵٫۴۵	۶٫۲۳	۶٫۰۹	۶٫۶۸	۶٫۸۶	۷٫۰۸	۷٫۰۸	۷٫۵۷	۷٫۶۷



شکل ۶. الف) نمودار غلظت - زمان در مخزن کلرور سدیم، ب) نمودار غلظت - عمق خاک، در آزمایش انتشار مولکولی روی ترکیب خاک رس سیلتی با ۳۰ درصد میکروسیلیس (آزمایش A. ۳)



شکل ۷. تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک رس سیلتی خالص و ترکیب‌های خاک و میکروسیلیس در مقابل درصد میکروسیلیس.

هستیم، اما به دلیل مشکلات ناشی از اختلاط همگن و تراکم در هنگام اجرای آستر رسی در یک مدفن واقعی در درصدهای بالای میکروسیلیس، استفاده از ترکیب بیشینه‌ی ۲۰٪ میکروسیلیس در اجرا توصیه می‌شود. در کار مشابهی که کالکان و آکبولوت (۲۰۰۴) بر روی ۴ نوع خاک رسی مختلف در ترکیب با افزودن میکروسیلیس (سیلیکافوم) با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۵۰ به خاک انجام داده‌اند، ضرایب نفوذپذیری در محدوده‌ی 470×10^{-7} تا 475×10^{-7} متر بر ثانیه در خاک‌های رسی خالص، به مقدار 170×10^{-7} تا 175×10^{-7} متر بر ثانیه در ترکیب ۳۰٪ میکروسیلیس کاهش یافته و در ترکیب ۵۰٪، تغییر چندانی نسبت به ۳۰٪ مشاهده نشده است. این مقادیر، کاهش ۳ تا ۴ برابری ضریب نفوذپذیری را برای ۴ نوع خاک مختلف نشان داده است.^[۱۲]

۳.۳. آزمایش‌های برش مستقیم

نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام‌یافته روی خاک رس سیلتی خالص نازلو و ترکیب‌های خاک و میکروسیلیس در جدول ۹ ارائه شده است. شکل‌های ۸ و ۹ نیز به ترتیب نمودار تغییرات چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک را در مقابل درصد میکروسیلیس نشان می‌دهند. همان‌طور که در جدول ۹ و شکل ۸

جدول ۸. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری برای خاک رس سیلتی خالص و ترکیب‌های خاک و میکروسیلیس.

ضریب نفوذپذیری (m/s)	شماره‌ی نمونه	میکروسیلیس (%)
$1,51 \times 10^{-8}$	۱	۰
$1,46 \times 10^{-8}$	۲	
$1,30 \times 10^{-8}$	۱	۵
$1,35 \times 10^{-8}$	۲	
$1,07 \times 10^{-8}$	۱	۱۰
$1,04 \times 10^{-8}$	۲	
$7,59 \times 10^{-9}$	۱	۱۵
$8,01 \times 10^{-9}$	۲	
$3,46 \times 10^{-9}$	۱	۲۰
$4,20 \times 10^{-9}$	۲	
$2,47 \times 10^{-9}$	۱	۲۵
$2,76 \times 10^{-9}$	۲	
$1,63 \times 10^{-9}$	۱	۳۰
$1,97 \times 10^{-9}$	۲	

ضریب نفوذپذیری خاک رس سیلتی خالص نازلو به‌طور متوسط $1,5 \times 10^{-8}$ (m/s) است. این مقدار ضریب نفوذپذیری از استاندارد توصیه‌شده برای آستر رسی متراکم‌شده در کف مدفن زباله (کمینه‌ی 1×10^{-9} m/s) بیشتر است. همان‌طور که در جدول ۸ و شکل ۷ ملاحظه می‌شود، افزودن میکروسیلیس به خاک مذکور، باعث بهبود خاصیت نفوذپذیری و کاهش آن شده است؛ طوری که در ترکیب حاوی ۳۰٪ میکروسیلیس ضریب نفوذپذیری خاک (m/s) $1,8 \times 10^{-9}$ شده است، که حدود ۸ برابر کمتر از خاک فاقد میکروسیلیس است. هر چند با افزایش میکروسیلیس به درصدهای بالاتر یعنی ۲۵ و ۳۰، همچنان کاهش ضریب نفوذپذیری را شاهد

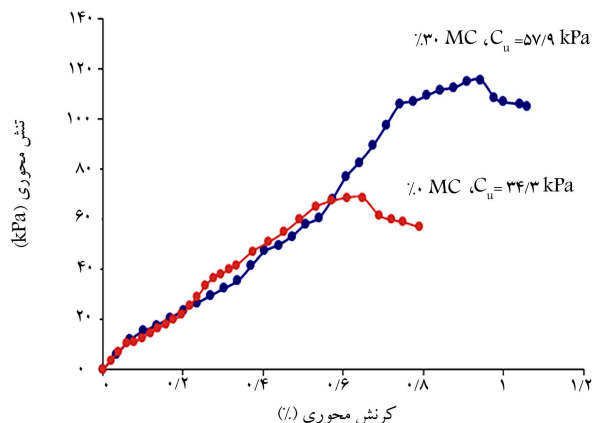
مشاهده می‌شود، با افزایش درصد میکروسیلیس در خاک تا حد ۳۰٪، چسبندگی خاک نیز افزایش یافته و بیشترین نرخ افزایش در ترکیب حاوی ۱۰ الی ۲۰ درصد میکروسیلیس رخ داده است. در آزمایش‌های مذکور، مقدار چسبندگی برای رس سیلتی خالص، ۴۶ kPa و برای ترکیب خاک و ۳۰٪ میکروسیلیس، ۶۷ kPa به دست آمده است. بنابراین با افزودن ۳۰٪ وزنی میکروسیلیس به خاک رس سیلتی نازلو، چسبندگی خاک حدود ۴۵٪ افزایش یافته است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۹ و شکل ۹، زاویه اصطکاک داخلی رس سیلتی خالص، ۴ درجه است و با افزودن میکروسیلیس به خاک مذکور، این مقدار تا ۸ درجه افزایش یافته است. هر چند نتایج، افزایش ۱۰۰ درصدی زاویه اصطکاک داخلی خاک را تا ۳۰٪ میکروسیلیس نشان می‌دهد، لیکن افزایش کلی در زاویه اصطکاک داخلی چشم‌گیر نیست.

۴.۳. آزمایش‌های فشاری تک‌محوری

مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و چسبندگی زهکشی نشده (C_u) به دست آمده از آزمایش‌های تک‌محوری انجام شده روی خاک رس سیلتی خالص نازلو و ترکیب‌های خاک با میکروسیلیس، در جدول ۱۰ ارائه شده است. شکل ۱۰، نیز نمودار تغییرات کرنش محوری در مقابل تنش محوری فشاری را برای ترکیب خاک رس سیلتی

جدول ۱۰. مقادیر چسبندگی زهکشی نشده حاصل از آزمایش‌های تک‌محوری روی ترکیب‌های خاک رسی سیلتی نازلو با میکروسیلیس.

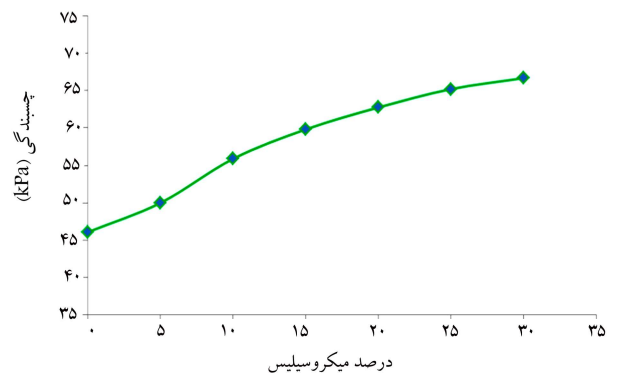
میکروسیلیس (%)	مقاومت فشاری تک‌محوری (kPa)	چسبندگی زهکشی نشده (C_u , kPa)
۰	۶۸٫۶	۳۴٫۳
۵	۷۶٫۵	۳۸٫۳
۱۰	۸۴٫۴	۴۲٫۲
۱۵	۹۶٫۰	۴۹٫۰
۲۰	۱۰۶٫۰	۵۳٫۰
۲۵	۱۱۱٫۸	۵۵٫۹
۳۰	۱۱۵٫۸	۵۷٫۹



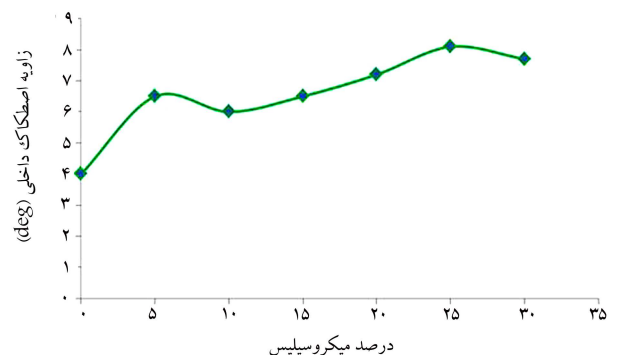
شکل ۱۰. تغییرات کرنش محوری در مقابل تنش محوری فشاری در آزمایش تک‌محوری روی ترکیب رس سیلتی نازلو با صفر و ۳۰ درصد میکروسیلیس.

جدول ۹. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده روی ترکیب‌های خاک رس سیلتی و میکروسیلیس.

میکروسیلیس (%)	تنش قائم (kPa)	تنش برشی بیشینه (kPa)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۰	۴۰	۴۸	۴۶	۴
۵	۴۰	۵۴	۵۰	۶٫۵
۱۰	۴۰	۶۲	۵۶	۶
۱۵	۴۰	۷۰	۶۰	۶٫۵
۲۰	۴۰	۷۶	۶۳	۷٫۲
۲۵	۴۰	۸۴	۶۵	۸٫۱
۳۰	۴۰	۹۰	۶۷	۷٫۷



شکل ۸. تغییرات چسبندگی خاک با درصد میکروسیلیس در آزمایش‌های برش مستقیم.



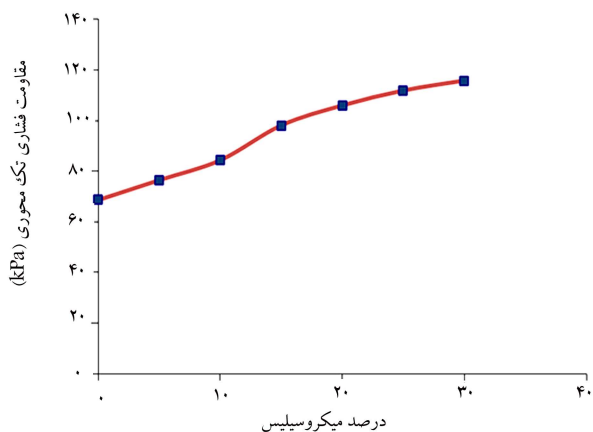
شکل ۹. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک با درصد میکروسیلیس در آزمایش‌های برش مستقیم.

خالص نازلو با ۰ و ۳۰ درصد میکروسیلیس نشان می‌دهد. در شکل ۱۱، نیز نمودار تغییرات درصد میکروسیلیس در خاک در مقابل مقاومت فشاری تک‌محوری خاک (تنش فشاری بیشینه که منجر به گسیختگی خاک شده است) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده، افزایش مقاومت تک‌محوری و چسبندگی زهکشی‌نشده‌ی خاک رس سیلتی نازلو را با افزایش درصد میکروسیلیس در خاک (از ۵ تا ۳۰ درصد) نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری تک‌محوری رس سیلتی خالص برابر ۶۸٫۶ kPa است؛ در حالی که برای ترکیب خاک با ۳۰٪ میکروسیلیس، این مقدار به ۱۱۵٫۸ kPa افزایش یافته است. بنابراین افزودن ۳۰٪ میکروسیلیس به خاک موجب شده است تا مقاومت فشاری خاک حدود ۶۹٪ افزایش یابد.

در کار مشابهی که کالکان و آکولوت بر روی ۴ نوع خاک رسی مختلف در ترکیب با افزودن میکروسیلیس (سیلیکافوم) با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۵۰ به خاک انجام داده‌اند، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری از حدود ۸۰ kPa برای خاک‌های رسی خالص، به مقدار ۱۲۰ kPa برای ترکیب ۳۰٪ میکروسیلیس با خاک و ۱۳۰ kPa برای ترکیب ۵۰٪ میکروسیلیس با خاک به دست آمده است.^[۱۲] نتایج این مطالعه نشان داده است که هرچند با افزایش درصد میکروسیلیس تا ۵۰٪، مقاومت فشاری تک‌محوری نیز روند افزایشی پیدا می‌کند، لیکن نرخ افزایش برای مقادیر بیش از ۲۵٪ میکروسیلیس کم است و بنابراین رقم ۲۵٪ میکروسیلیس در ترکیب خاک، بهینه است و بیش از آن توصیه نمی‌شود.

مقایسه‌ی خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوشیمیایی رس سیلتی نازلو در این مطالعه و رس استفاده‌شده در مطالعه‌ی کالکان و آکولوت در ترکیب^[۱۲] تفاوت‌هایی را به این شرح نشان می‌دهد:

کانی غالب در رس سیلتی نازلو از نوع ایلیت است،^[۲۳] که کانی مقبولی برای ساخت آسترهای رسی در مدفن‌های زباله به‌شمار می‌رود؛ لیکن کانی غالب در رس ترکیب اسمکتیت است، که عموماً خاصیت تورمی دارد و رس مناسبی برای ساخت آستر رسی در مدفن‌ها نیست. رس نازلو خاصیت خمیری، حد روانی، درصد رطوبت بهینه، و ضریب نفوذپذیری کمتری نسبت به رس ترکیب دارد. همچنان که بحث شده است، ضریب نفوذپذیری متوسط رس سیلتی خالص نازلو $(m/s) \times 10^{-8}$ است، که نحوه‌ی اصلاح آن با میکروسیلیس در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است؛ در صورتی که رس



شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری در مقابل درصد میکروسیلیس در آزمایش‌های تک‌محوری روی خاک رس سیلتی نازلو.

ترکیب ضریب نفوذپذیری کمتر و به طور متوسط برابر با $(m/s) \times 10^{-9}$ دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر میکروسیلیس در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس سیلتی منطقه‌ی نازلو شهرستان ارومیه بررسی شده است، تا بتوان از این خاک برای ساخت آستر رسی در کف مدفن‌های زباله، که با اصول بهداشتی - مهندسی در منطقه ساخته می‌شوند، استفاده کرد. خصوصیات مکانیک خاکی پایه شامل: دانه‌بندی، شاخص خمیری، چگالی ویژه، درصد رطوبت بهینه، و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک، و خصوصیات هیدرولیکی (ضریب نفوذپذیری)، مقاومتی (مقاومت برشی و فشاری تک‌محوری) و انتشار آلودگی (ضریب انتشار مولکولی) خاک رس سیلتی خالص و خاک ترکیب‌شده با میکروسیلیس بررسی شده است. برای اندازه‌گیری خصوصیات ژئوتکنیکی ذکرشده، خاک رس سیلتی نازلو با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد وزنی میکروسیلیس ترکیب، نتایج آزمایش‌ها با هم مقایسه، و اثر میکروسیلیس در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مشخص شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه را به این صورت می‌توان خلاصه کرد:

۱. با توجه به نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک، نوع خاک منطقه‌ی نازلو شهرستان ارومیه، رس سیلتی تشخیص داده شده است. این خاک پارامترهای تعریف‌شده برای یک آستر رسی در یک مدفن زباله مهندسی را از نظر شاخص خمیری (بیشتر از ۸٪) و درصد وزنی دانه‌های رسی (داشتن ۳۰٪ وزنی دانه‌های کوچک‌تر از ۲ میکرون) دارد، لیکن ضریب نفوذپذیری بالاتر از استاندارد (کمینه $(m/s) \times 10^{-9}$) است. بنابراین برای استفاده به‌عنوان مصالح آستر رسی، بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی این خاک ضروری است.

۲. نتایج آزمایش‌های تراکم پروکتر استاندارد برای هر کدام از ترکیب‌های خاک رس سیلتی نازلو با میکروسیلیس نشان داده شده است، که با افزایش درصد میکروسیلیس از ۵ تا ۳۰، درصد رطوبت بهینه‌ی خاک افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی آن کاهش یافته است.

۳. نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ نشان داده است که حدروانی خاک با افزایش میکروسیلیس از ۵ تا ۳۰ درصد، افزایش یافته است، لیکن حد خمیری آن تغییر قابل توجهی نکرده است، در نتیجه شاخص خمیری خاک افزایش یافته است.

۴. افزایش درصد میکروسیلیس در خاک، باعث کاهش چگالی ویژه‌ی آن شده است، که به دلیل پایین‌بودن چگالی ویژه‌ی میکروسیلیس است.

۵. نتایج آزمایش‌های انتقال آلودگی به طریقه‌ی انتشار مولکولی روی خاک رس سیلتی خالص و ترکیب‌های خاک با ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد میکروسیلیس نشان داده است که با افزودن میکروسیلیس به خاک، ضریب انتشار مولکولی یون کلر از $m^2/s \times 10^{-10}$ به $m^2/s \times 10^{-10}$ افزایش یافته است؛ لیکن این افزایش جزئی است و ضریب انتشار مولکولی یون کلر در ترکیب حاوی ۳۰٪ میکروسیلیس، هنوز در محدوده‌ی مجاز تعریف‌شده برای یک آستر رسی مدفن زباله قرار دارد.

۶. نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری سه‌محوری روی خاک رس سیلتی خالص و ترکیب‌های خاک با میکروسیلیس نشان داده است که با افزایش میکروسیلیس در

۱۰۰ درصدی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک را تا ۳۰٪ میکروسیلیس نشان می‌دهد، لیکن افزایش کلی در زاویه‌ی اصطکاک داخلی چشم‌گیر نیست.

۸. نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوری نشان داده است که افزودن میکروسیلیس به خاک رسی سیلتی نازلو باعث افزایش مقاومت فشاری آن شده است. بیشترین نرخ افزایش، همانند آزمایش برش مستقیم، در درصد‌های ۱۰ تا ۲۰ میکروسیلیس رخ داده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، خاک رسی سیلتی خالص نازلو، مقاومت فشاری ۶۸٫۶ kPa و خاک حاوی ۳۰٪ میکروسیلیس مقاومت فشاری ۱۱۵٫۹ kPa دارد، که ۶۹٪ افزایش نشان می‌دهد.

۹. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان چنین بیان کرد که افزودن میکروسیلیس به خاک رسی سیلتی نازلو موجب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی این خاک می‌شود، که از جمله آنها به پارامترهای نفوذپذیری و مقاومتی خاک می‌توان تأکید کرد؛ طوری که این خاک را برای استفاده در ساخت آستررسی کف مدفن‌های زباله‌ی مهندسی در منطقه مستعد می‌سازد. مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان داده است که با توجه با بروز مشکلات اختلاط، فرآوری و تراکم خاک در درصد‌های بالای میکروسیلیس، ترکیب خاک رسی سیلتی نازلو با ۲۰٪ میکروسیلیس را می‌توان به‌عنوان یک ترکیب بهینه برای این خاک در هنگام ساخت آسترهای رسی کف مدفن‌های زباله مهندسی در منطقه معرفی کرد.

خاک از ۵ تا ۳۰ درصد، ضریب نفوذپذیری خاک کاهش یافته است. ضریب نفوذپذیری متوسط خاک رسی سیلتی خالص برابر $10^{-8} \times 1/5$ m/s و خاک حاوی ۳۰٪ میکروسیلیس برابر $10^{-9} \times 1/8$ m/s است، که حدود ۸ برابر کمتر از خاک رسی سیلتی خالص است. ریزدانه‌تر بودن دانه‌های میکروسیلیس نسبت به دانه‌های خاک و پُرشدن منافذ خاک با این ریزدانه‌ها می‌تواند دلیل کاهش نفوذپذیری خاک در اثر اختلاط با میکروسیلیس باشد. این نتیجه‌گیری با نتایج مطالعات پیشین روی مصالح مشابه نیز سازگاری دارد.

۷. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان داده است که افزودن میکروسیلیس به خاک رسی سیلتی نازلو باعث افزایش محسوس چسبندگی خاک و افزایش جزئی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک شده است. بیشترین نرخ افزایش چسبندگی در ترکیب حاوی ۱۰ الی ۲۰ درصد میکروسیلیس رخ داده است. مقدار چسبندگی برای رسی سیلتی خالص ۴۶ kPa و برای ترکیب خاک و ۳۰٪ میکروسیلیس، ۶۷ kPa به دست آمده است. بنابراین با افزودن ۳۰٪ وزنی میکروسیلیس به خاک رسی سیلتی نازلو، چسبندگی خاک حدود ۴۵٪ افزایش یافته است. زاویه‌ی اصطکاک داخلی رسی سیلتی خالص ۴ درجه است و با افزودن میکروسیلیس به این خاک این مقدار تا ۸ درجه افزایش یافته است. هر چند نتایج، افزایش

پانویس‌ها

1. SiO₂
2. Silicafume
3. Ca(OH)₂
4. Diffusion coefficient
5. Advection
6. mechanical dispersion
7. Pollute
8. flexible wall triaxial hydraulic conductivity apparatus
9. standard Proctor compaction test

منابع (References)

1. Murray, H.H. "Traditional and a new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview", *Applied Clay Science*, **17**(5-6), pp. 207-221 (2000).
2. Harvey, C.C. and Murray, H.H. "Industrial clays in the 21st century: A perspective of exploration, technology and utilization", *Applied Clay Science*, **11**(5-6), pp. 285-310 (1997).
3. Keith, K.S. and Murray, H.H., *Clay Liners and Barriers*, Chapter in Industrial Minerals and Rocks, Sixth Edition, Carr, D.D. ed., Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, pp. 435-452 (1994).
4. Rowe, R.K. "Long-term performance of contaminant barrier systems", *45th Rankine Lecture, Geotechnique*, **55**(9), pp. 631-678 (2005).
5. Rowe, R.K., Quigley, R.M., Brachman, R.W.I. and Booker, J.R., *Barrier Systems for Waste Disposal*, 2nd Edition, Spon Press, London, UK (2004).
6. Badv, K., *Engineering Principles of Solid Waste Landfilling – Fundamentals of Landfill Design*, Urmia University Press, p. 497 (2013). (in Persian)
7. Aitcin, P.C., Ballivy, G. and Parizeau, R. "The use of condensed silica fume in grouting", *Innovative Cement Grouting, Publication SP-83, ACI Detroit MI, USA*, **83**, pp. 1-18 (1984).
8. Tosca, S.Z. and Evans, J.C. "The effects of fillers and admixtures on grout performance", *Proc. ASCE Conf., Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics*, USA, New Orleans, pp. 337-349 (25-28 Feb 1992).
9. Kayabali, K. "Engineering aspects of a novel landfill liner material: Bentonite amended natural zeolite", *Engineering Geology*, **46**(2), pp. 105-114 (1997).
10. Asavasipit, S., Nanthamontry, W. and Polprasert, C. "Influence of condensed silica fume on the properties of cement based solidified wastes", *Cement and Concrete Research*, **31**(8), pp. 1147-1152 (2001).
11. Prabakar, J., Dendorkar, N. and Morchhale, R.K. "Influence of fly ash on strength behavior of typical soils", *Construction and Building Materials*, **18**(4), pp. 263-267 (2003).
12. Kalkan, E. and Akbulut, S. "The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners", *Engineering Geology*, **73**(1-2), pp. 145-156 (2004).

13. Cetin, H., Fener, M. and Gunaydin, O. "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material", *Engineering Geology*, **88**(1-2), pp. 110-120 (2006).
14. Kalkan, E. "Utilization of red mud as a stabilization material for preparation of clay liners", *Engineering Geology*, **87**(3-4), pp. 220-229 (2006).
15. Sezer, A., Inan, G., Yilmaz, H.R. and Ramyar, K. "Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay", *Building and Environment*, **41**(2), pp. 150-155 (2006).
16. Akbulut, S., Arasan, S. and Kalkan, E. "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers", *Applied Clay Science*, **38**(1-2), pp. 23-32 (2007).
17. Aliashrafi, H. and Badv, K. "An investigation into the effect of fine powder material on the hydraulic conductivity of sand", *7th National Congress of Civil Engineering*, Zahedan, Iran, pp. 1-6 (2013). (In Persian)
18. Badv, K. and Shayesteh, A. "Laboratory investigation of the utilization of the rock processing industry residue powder material in construction of the landfill barrier layers", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Tabriz University, **43**(2), pp. 1-9 (2013). (in Persian)
19. Kalkan, E. and Akbulut, S. "Improving of shear strength of natural clay liners from clay deposits NE Turkey", *3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and the Safety of Infrastructures*, CI-Premier Ltd., Singapore, pp. 295-300 (2002).
20. Badv, K. "The use of laboratory physical models to investigate contaminant transport through saturated and unsaturated soils", *Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, **2**, pp. 1211-1216 (2006a).
21. Badv, K. "Experimental and theoretical investigation on unsaturated properties of soil samples from Nazloo Plain, Iran", *59th Canadian Geotechnical Conference and 7th Joint CGS/IAH - CNC Groundwater Specialty Conference*, Vancouver, Canada (2006b).
22. Badv, K. and Abdolizadeh, R. "A laboratory study on contaminant transport through silt from Urmia landfill site, Iran, by advection-diffusion and hydraulic trap system", *Proceedings of the 6th International Conference on Civil Engineering (ICCE 2003)*, Esfahan, Iran, pp. 151-158 (2003).
23. Badv, K. and Abdolizadeh R. "A laboratory investigation on the hydraulic trap effect in minimizing chloride migration through silt", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B*, **28**(B1), pp. 107-118 (2004).
24. Badv, K. and Mahooti, A.A. "Advective-diffusive and hydraulic trap modeling in two and three layer soil systems", *Journal of Science and Technology, Transaction B*, **28**(B5), pp. 559-572 (2004).
25. Badv, K. and Mahooti, A.A. "Chloride transport in layered soil systems with hydraulic trap effect", *Environmental Technology*, **26**(8), pp. 885-897 (2005).
26. Badv, K. and Esazadeh, B. "Laboratory modelling of leachate collection, natural, and engineered hydraulic trap systems", *9th Environmental Engineering Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Toronto, Canada, pp. EV-101-1-9 (2005).
27. Badv, K. and Jafari, H. "Laboratory modelling of two dimensional diffusive and advective-diffusive chloride migration through soil", *9th Environmental Engineering Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Toronto, Canada, pp. EV-103-1-7 (2005).
28. Badv, K. and Jafari, H. "Laboratory modeling of two-dimensional diffusive and advective-diffusive chloride transport through silt and clay", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **37**(C2), pp. 311-324 (2013).
29. Badv, K. and Omidi, A. "Triaxial permeability testing on the synthetic leachate effect on the hydraulic conductivity of clayey soil", *7th International Congress on Civil Engineering*, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran (2006).
30. Badv, K. and Omidi, A. "Effect of synthetic leachate on the hydraulic conductivity of clayey soil in Urmia City landfill site", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, **31**(B5), pp. 535-545 (2007).
31. Badv, K. and Mahmoudi, M. "The study of moisture and contaminant migration through soil samples using tempe-diffusion laboratory model", *Proceedings of the 33rd International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR) Congress*, Vancouver, Canada, pp. 5038-5044 (9-14 August 2009).
32. Badv, K. and Gholikhani, M. "Effect of freeze-thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey soil from Nazlou region of Urmia City, Iran, and on a geosynthetic clay liner", *9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, pp. 1-8 (2012).
33. Isavand, F., Pirkharrati, H., Badv, K. and Dolati, B. "Investigating the capability of clayey soil deposits in Urmia city landfill site as an adsorbent of cadmium heavy metal for construction of engineered sanitary landfill liner", *16th Symposium of Geological Society of Iran*, Shiraz University, Shiraz, I.R. Iran, pp. 1-8 (September 2012).
34. American Society for Testing and Materials, *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*, ASTM Designation C 1240 (2011).
35. Rowe, R.K. and Booker, J.R. "POLLUTE v.6.: 1D pollutant migration through a non-homogeneous soil", Distributed by GAEA Environmental Engineering Ltd., 44 Canadian Oaks Drive, Whitby, Ontario, Canada (1983, 1990, 1994).
36. Shackelford, C.D. and Daniel, D.E. "Diffusion in a saturated soil. II. Results for compacted clay", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(3), pp. 485-505 (1991).