



## ارزیابی رفتار تحکیمی و مقاومت برشی خاک‌های رسی آلوده به شیرابه زباله‌ی جامد شهری

احد اوریا، علی فارسی جانی

دانشکده فنی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶ مهرماه  
بازنگری: ۱۳۹۶ اسفندماه  
پذیرش: ۱۳۹۶ اسفندماه  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷ اردیبهشت

### کلمات کلیدی:

تحکیم  
مقاومت برشی  
خاک‌های رسی  
شیرابه  
زباله جامد شهری

**چکیده:** تأثیر شیرابه بر مشخصات خاک‌های ریزدانه به دلیل ماهیت کانی‌های تشکیل دهنده آن، بیشتر از خاک‌های دانه‌ای است. در این تحقیق با انجام ۱۴ آزمایش تحکیم و ۴۲ آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس و تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونیکی به بررسی تأثیرات شیرابه زباله‌های شهری بر پارامترهای مقاومتی دو نوع خاک رس با پلاستیسیته زیاد و با پلاستیسیته کم پرداخته شده است. در خاک CH و CL، با افزایش آلودگی تا ۲۰ درصد، مقدار تنش برشی در فشار عمودی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال حدود ۳۰ درصد در کوتاهمدت و حدود ۴۰ درصد در بلندمدت نسبت به خاک غیرآلوده کاهش یافته است. مقدار نشانه فشردگی خاک با خمیری بالا در ازای افزایش آلودگی به میزان ۲۰ درصد، در حدود ۴۵ درصد در بازه زمانی ۹۶ ساعت و ۱۸۰ روز کاهش یافته است. خاک‌های آلوده سریع‌تر به مقاومت برشی بیشینه خود رسیده و دچار گسیختگی می‌شوند. با افزایش آلودگی تا ۲۰ درصد مشاهده شد که نمونه خاک CH و CL در بلندمدت تحت فشارهای عمودی ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب حدود ۳۶ و ۳۲ درصد زودتر (از نظر طی مسافت) نسبت به حالت غیر آلوده به مقاومت برشی بیشینه خود رسیده است. با گذر زمان تأثیر شیرابه بر رفتار برشی و تحکیمی خاک افزوده می‌شود.

### ۱- مقدمه

یکی از روش‌های رایج دفع زباله از زندگی بشر، دفن آن است. از سال ۱۹۵۰ میلادی تلاش‌های اولیه برای ساخت محل‌های دفن مناسب آغاز شد، به طوری که اولین کتاب در این زمینه توسط انجمن مهندسی عمران آمریکا در سال ۱۹۵۹ ارائه شد. اما ساخت و اجرای جدی ترمحل‌های مناسب دفن از سال ۱۹۷۰ و در جریان ساخت نیروگاه‌های اتمی شکل گرفت. یکی از مباحث مهم در ارتباط با دفن زباله‌ها، تأثیرات شیرابه حاصل از آن بر خواص مهندسی خاک محل دفن است. انتشار شیرابه در خاک‌های اطراف و گسترش آن در خاک‌هایی که ممکن است به علت افزایش جمعیت به زودی محل ساخت و ساز شوند، اهمیت بررسی تأثیرات شیرابه بر رفتارهای مهندسی و مقاومتی خاک را نشان می‌دهد. مواد شیمیایی حاصل از شیرابه زباله‌ها از طریق فعالیت‌های شیمیایی جذب ذرات خاک می‌شوند و بین ذرات خاک قرار می‌گیرند. به مرور زمان، شیرابه که جایگزین آب منفذی خاک شده است، به علت بارش‌های جوی و نیروی ثقلی به خاک‌ها اطراف و عمق‌های پایین‌تر منتقل می‌شود و سبب آلودگی خاک در گستره بیشتری می‌گردد [۵-۱] که با تأثیر بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، سبب تغییر در رفتار تحکیمی، برشی

و هیدرولیکی خاک می‌شود [۶]. برای جلوگیری از نفوذ بیشتر شیرابه به آب‌های زیرزمینی، در محل‌های دفن بهداشتی از خاک رُس و یا بنتونیت (خاک رُس حاوی کانی مونت‌موریونیت) که نفوذناپذیرتر است، استفاده می‌شود [۷]. خاک رُس به علت ساختمان لایه‌ای و سطح مخصوص بزرگ، قادر به اندرکنش با مواد موجود در شیرابه‌ها بوده که این ویژگی سبب می‌شود، رُس‌ها قادر به جذب تمام یا بخشی از مواد آلاینده باشند [۸] که بسیاری از پژوهشگران رابه بررسی رفتار خاک در حضور شیرابه یا محلول‌های حاوی عناصر شیرابه بر روی خاک رُس، مشتاق کرده است [۹ و ۱۰].

توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که در بسیاری از مناطق کشور ایران، خاک منطقه‌ای که محل جمع‌آوری زباله‌ها است، رُسی است و در این مناطق دپوی زباله بدون دفن صورت می‌گیرد، از این رو خاک رُسی آن مناطق که در آینده نزدیک نیز محل ساخت و ساز خواهد بود، مستقیماً تحت تأثیر شیرابه قرار می‌گیرد. از جمله می‌توان به منطقه سراوان رشت اشاره نمود که دارای چنین ویژگی می‌باشد و شیرابه مورد مطالعه در پژوهش از این منطقه جمع‌آوری شده است.

محققینی بر روی دو نوع خاک (۱۰۰ درصد کائولینیت و دیگری مخلوطی از ۳۰ درصد کائولینیت و ۷۰ درصد ماسه) با شیرابه حاوی ترکیبات آلی سورفکتانت (اکتیل فنول، پلی‌اکسی اتیلن، بیوسورفکتانت،

شیرابه قرار خواهند گرفت که به همین علت در این تحقیق نیز خاک رُسی CH و CL مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که شدت تأثیرات شیرابه بر خاک نسبت به گذر زمان متغیر است. از این رو پیشنهاد می شود در زمان های مختلف تأثیراتش بر خاک بررسی شود [۱۹]. در این تحقیق نیز در دو بازه زمانی کوتاه مدت و بلندمدت بررسی ها صورت گرفته است.

در این تحقیق پس از جمع آوری شیرابه زباله ها و انجام آنالیز صفحه ای میکروسکوپ الکترونی و جذب اتمی شعله ای، مشخصات شیرابه مشخص شد. سپس شیرابه طبق دستورالعمل انجام آزمایش ها ژئوتکنیک زیست محیطی دانشگاه مک گیل کانادا [۲۰] با خاک مخلوط شد تا تأثیراتش بر پارامترهای مقاومتی خاک بررسی شود. از این طریق نکات مبهم تأثیرات شیرابه بر رفتار مهندسی خاک مشخص شده و گامی مؤثر در پیشبرد طراحی های دقیق تر برچین خاک هایی برداشته می شود. علیرغم تحقیقات گسترده ای که در این زمینه شده است، باید بیان داشت که در این تحقیق نگاهی متفاوت به این موضوع نسبت به محققین دیگر شده است. اکثر پژوهشگران به خاک رُس به عنوان مانع از آلودگی آب های زیرزمینی توسط شیرابه (به علت نفوذپذیری کم)، توجه داشته و از این منظر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک را در معرض شیرابه مورد بررسی قرار داده اند. حال آنکه در این تحقیق از دیدگاه مهندسی عمران به بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک پرداخته شده است که اهمیت تحقیق را بیان می دارد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- ویژگی های خاک مورد آزمایش

بر اساس آنچه بیان شد، دو نوع خاک با مشخصات متفاوت مورد بررسی قرار گرفته اند که هر دو خاک ریزدانه ولی با خاصیت خمیری کم و خاصیت خمیری زیاد می باشند. لازم به توضیح است که این دو خاک از محل دفن زباله جمع آوری نشده اند و پیش از این در معرض هیچ گونه شیرابه ای قرار نداشته اند. جدول شماره ۱ مشخصات مهندسی این دو نوع خاک را نشان می دهد.

### جدول ۱. مشخصات حدود اتربرگ، مشخصات تراکمی و وزن مخصوص جامد نمونه های خاک

#### Atterberg limits and compaction properties of soil

شماره استاندارد آزمایش	خاک دوم	خاک اول	
۷۰-ASTM D ۶۹۸	۲۳	۲۰	درصد رطوبت بهینه
۷۰-ASTM D ۶۹۸	۱/۵۲	۱/۵۸	وزن مخصوص خشک حداکثر (gr/cm <sup>3</sup> )
۶۶-ASTM D ۴۲۳	۴۰	۵۲/۵	حد روانی (%)
۵۹-ASTM D ۴۲۴	۲۵	۲۵	حد خمیری (%)
۵۹-ASTM D ۴۲۴, ۶۶-ASTM D ۴۲۳	۱۶	۲۷/۵	نشانه خمیری (%)
۷۹-ASTM C ۱۲۸	۲/۶۴	۲/۶۷	چگالی ویژه ذرات خاک

جاده رشت-قزوین جمع آوری شده است، می باشد.

سولفات سدیم) و محلول های الکترولیتی (NaPO<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>) پرداختند و بیان داشتند که محلول شیرابه بر حد روانی بی تأثیر بوده، در حالی که سبب کاهش حد خمیری در خاک می شود. به صورت مشابه پژوهشی بر روی خاک با خمیری کم صورت گرفت و نشان داده شد که شیرابه بر حد روانی تأثیری ندارد و سبب کاهش مقدار حد خمیری می شود [۱۱]. محققین دیگر با ترکیب خاک CL و شیرابه حاوی NaOH، نشان دادند که افزایش غلظت شیرابه باعث افزایش حد روانی می شود [۱۲]. محققین دیگر نشان دادند که مقادیر حد روانی خاک های CL با افزایش درصد محلول های پایه نمک و دما، تغییر می کند [۱۳ و ۱۴].

تعدادی از پژوهشگران که بر روی تأثیر شیرابه زباله ها با pH قلیایی بر روی خاک رُسی پرداخته اند؛ بیان داشتند که ذرات شیرابه، در بین ساختار خاک رُس قرار گرفته و سبب کاهش هدایت هیدرولیکی آن شده است [۱۰]. هم چنین هنگامی که از شیرابه اسیدی (pH < 7) استفاده شد، مشاهده گردید که مقدار هدایت هیدرولیکی افزایش یافته است؛ مواد معدنی در فضای منفذی توسط شیرابه حل شده و تخلخل افزایش یافته، در نتیجه هدایت هیدرولیکی نیز افزایش یافته است [۱۵]. درباره تحکیم و مقاومت برشی خاک های رُسی در معرض شیرابه ها نیز تحقیقاتی صورت گرفته است. محققینی با بررسی خاک های آلوده به این نتیجه رسیدند که افزایش مقدار درصد آلودگی، باعث می گردد که در فشار ثابت عمودی، نمونه های خاک آلوده نسبت به غیر آلوده، دارای نشست بیشتری باشند [۱۰ و ۱۶]. هم چنین محققینی بیان داشته اند که افزایش درصد شیرابه سبب کاهش مقادیر ضریب فشردگی خاک می گردد [۱۷]. پژوهشگرانی نیز با انجام آزمایش، بر روی خاک های عادی و پیش تحکیم یافته در حضور شیرابه زباله بیان داشتند که شیرابه باعث کاهش مقاومت برشی حداکثر می شود [۱۸].

یکی از روش های جلوگیری از پخش شیرابه ها، استفاده از خاک رُس نفوذناپذیر در بستر محل جمع آوری و یا دفن و دیو در محل هایی است که دارای چنین خاکی می باشند. در بسیاری از مناطق ایران نیز خاک محل جمع آوری زباله از نوع رُسی است. از این رو خاک های رُسی بیشتر در معرض

بر اساس طبقه بندی متحد (USCS)، نمونه اول به عنوان خاک CH که از محل گلسار رشت و نمونه دوم با نام CL که از حوالی کیلومتر ۳۵

### ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه خاک جمع‌آوری شده با قرارگیری در گرم‌خانه<sup>۱</sup> با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، خشک شد. بعد از خشک شدن کامل، شیرابه زباله برحسب وزن خاک خشک با درصدهای ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ به نمونه‌ها اضافه و مخلوط شد. لازم به توضیح است که روند ساخت نمونه به این صورت بوده‌است که بعد از اضافه کردن شیرابه به خاک، خاک با همان رطوبت و شیرابه اضافه شده، وارد قالب دستگاه‌های آزمایش نشده‌است، بلکه بعد از اضافه کردن شیرابه با نسبت‌های وزنی مشخص به خاک، نمونه‌های خاک در دمای محیط باقی مانده‌اند تا رطوبت حاصل از افزایش شیرابه از بین برود تا عناصر موجود در شیرابه با نسبت‌های مورد نظر به خاک اضافه گردد، در عین حال میزان رطوبت خاک نیز تحت کنترل باشد.

با توجه به حجم قالب آزمایش برش مستقیم و تحکیم یک‌بعدی، مقدار وزن لازم خاک جهت ساخت نمونه‌ها، با در نظر گرفتن وزن مخصوص مشخص، تعیین گردیده‌است. ندر نهایت خاک‌ها با درصدهای مختلف آلودگی به صورت استاتیکی در قالب دستگاه‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس و تحکیم یک‌بعدی ریخته شده و متراکم گردیدند.

لازم به توضیح است که زمان‌های آزمایش با آزمون و خطا انتخاب گردیده‌اند، زیرا نتیجه مهم پژوهش (متوقف شدن تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌آلوده به شیرابه) بعد از ۱۸۰ روز به دست آمد و نمونه‌های تحت آزمایش پس از ۱۸۰ روز، نتایج مشابه با نمونه‌های تحت آزمایش در ۱۸۰ روز ارائه دادند.

### ۳- نتایج آزمایش‌ها

#### ۳-۱- نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ

نمونه‌های آلوده شده بر اساس استاندارد ASTM-4318 جهت دستیابی به تعادل، به مدت ۹۶ ساعت بسته‌بندی شده و پس از این زمان و هم‌چنین پس از زمان ۱۸۰ روز (بسته‌بندی شده به‌گونه‌ای که تبادل رطوبتی نداشته است)، مورد آزمایش تعیین حدود اتربرگ قرار گرفتند، نتایج تغییرات در دوبازه زمانی مشابه بوده ولی در بازه زمانی کوتاه مدت (۹۶ ساعت) تغییرات کمتر و در بازه زمانی بلندمدت تغییرات بیشتر بوده است. در جدول ۳ نتایج آزمایش بلندمدت برای بررسی ارائه شده‌است.

<sup>1</sup> oven

### ۲-۲- شیرابه زباله جامد شهری استفاده شده در پژوهش

زباله‌های جامد شهری که در مناطق دفن جمع‌آوری می‌شوند، حاوی یون‌ها، کاتیون‌ها، فلزات سنگین و مواد شیمیایی دیگر می‌باشند که پس از قرار گرفتن در معرض بارش‌های جوی، تابش خورشید و تغییرات دمای محیط، در آب ناشی از بارش‌های جوی حل شده که ماده حاصل مایعی قهوه‌ای‌رنگ با بوی بسیار نامطبوع است. این مایع چسبناک را شیرابه زباله می‌نامند [۱۰ و ۲۱]. مشخصات شیرابه مورد بررسی پژوهش در جدول شماره ۲ ارائه شده‌است. مشخصات شیرابه مذکور توسط آزمایش جذب اتمی شعله‌ای و آنالیز خطی و صفحه‌ای میکروسکوپ الکترونی مشخص شده‌است. لازم به توضیح است که شیرابه از محل دفن زباله در سراوان رشت جمع‌آوری شده‌است. تصویر شماره ۱ نشان‌دهنده شیرابه است.



شکل ۱. شیرابه

Sample of leachate

#### جدول ۲. مشخصات شیرابه جمع‌آوری شده در دمای محیط

Composition of leachate at ambient temperature

واحد غلظت مواد تشکیل دهنده mg / lit		
مقدار	نوع ساختار	ساختار
۱۱۴۰-۲۵۹۱	N-NH <sub>3</sub>	ساختار نیتروژنی
۵۶۳۰-۶۳۴۰		یون‌ها
۱۴۲-۳۵۲		
۳۶۳/۸-۶۴۰	Mg	فلزات
۹۷-۷۸۷/۵	Ca	
۰/۱۱-۵/۶	Mn	
۱۴/۲-۴۴	Fe	
۰/۰۲-۰/۷۸	Cr	
۰/۳۲-۰/۴۵	Ni	فلزات سنگین
۰/۰۲-۰/۱۳	Cu	
۰/۳۸-۱/۰۶	Zn	
۰/۰۱	Cd	
۰/۰۴	Pb	

**جدول ۴. مشخصات اولیه نمونه‌های تحکیم**  
Initial condition of consolidation test samples

شماره نمونه	نوع خاک	زمان آغاز آزمایش پس از ساخت	آلودگی (%)
۱	CH		۰
۲	CH	۹۶ ساعت	۵
۳	CH	۹۶ ساعت	۱۰
۴	CH	۹۶ ساعت	۲۰
۸	CH	۱۸۰ روز	۵
۹	CH	۱۸۰ روز	۱۰
۱۰	CH	۱۸۰ روز	۲۰
۱۱	CL		۰
۱۲	CL	۹۶ ساعت	۵
۱۳	CL	۹۶ ساعت	۱۰
۱۴	CL	۹۶ ساعت	۲۰
۱۸	CL	۱۸۰ روز	۵
۱۹	CL	۱۸۰ روز	۱۰
۲۰	CL	۱۸۰ روز	۲۰

**جدول ۳. مشخصات حدود اتربرگ خاک با شیرابه در بلندمدت**  
Atterberg limits of contaminated soil (Long-term)

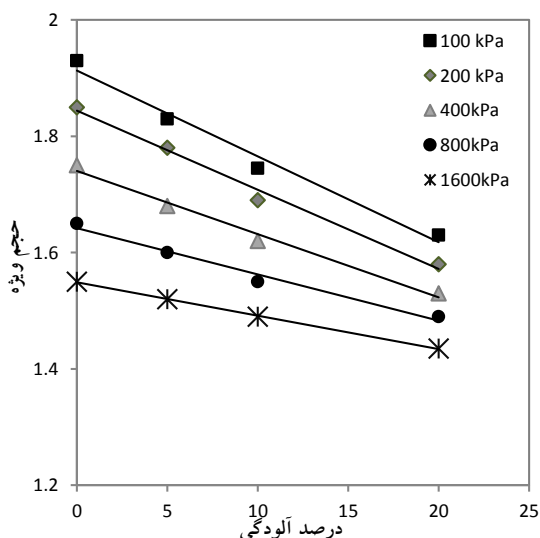
	خاک بدون شیرابه	خاک با ۵٪ شیرابه	خاک با ۱۰٪ شیرابه	خاک با ۲۰٪ شیرابه
LL(CH)	۵۲/۵	۴۶	۴۰/۵	۳۷
PL(CH)	۲۵	۲۵	۲۴/۸	۲۴/۷
PI(CH)	۲۷/۵	۲۱	۱۵/۷	۱۲/۳
LL(CL)	۴۰	۳۷	۳۴	۲۷
PL(CL)	۲۵	۲۴/۷	۲۵	۲۵
PI(CL)	۱۵	۱۲/۳	۹	۲

با توجه به جدول شماره ۳ مشاهده می‌شود که در هر دو خاک با افزایش درصد شیرابه از مقدار حد روانی کاسته شده است. در حالی که حد خمیری ثابت مانده است و در نتیجه دامنه خمیری کاهش یافته است. باید بیان داشت که تأثیر شیرابه بر حدود اتربرگ علاوه بر شیرابه به نوع کانی تشکیل دهنده خاک نیز وابسته است. یعنی شیرابه یکسان بر خاک‌هایی با کانی متفاوت، می‌تواند تأثیر متفاوت بر حدود اتربرگ داشته باشد. این نتیجه را می‌توان از مشاهده تأثیر شیرابه یکسان بر حدود اتربرگ خاک‌های مختلف مشاهده نمود [۲۲].

### ۲-۳- نتایج آزمایش تحکیم (ASTM D ۲۴۳۵-۷۰)

نمونه‌های تحکیمی پس از ساخت در داخل دستگاه تحکیم یک بعدی تحت بارگذاری قرار گرفتند؛ به ازای هر تنش اعمالی بر نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت جهت تکمیل نشست به ازای تنش وارده زمان سپری شد. این روند انجام آزمایش در هر تنش اعمالی برای تمامی نمونه‌ها در آزمایش‌های تحکیم یک بعدی (ادئومتر) رعایت شد. البته در اطراف قالب تحکیم، آب یا مایعی ریخته نشد. در نهایت، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تحکیم به صورت منحنی ارائه شد. شرایط اولیه نمونه‌ها در جدول شماره ۴ ارائه شده است. نمونه‌ها در دو بازه زمانی کوتاه مدت و بلندمدت با درصد‌های مختلف آلودگی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، تا تأثیرات زمان و افزایش درصد آلودگی بر روی رفتار تحکیمی خاک‌ها مشخص شود.

نتایج آزمایش‌های تحکیم یک بعدی برای نمونه‌های خاک CH در مختصات حجم ویژه-درصد آلودگی در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است.



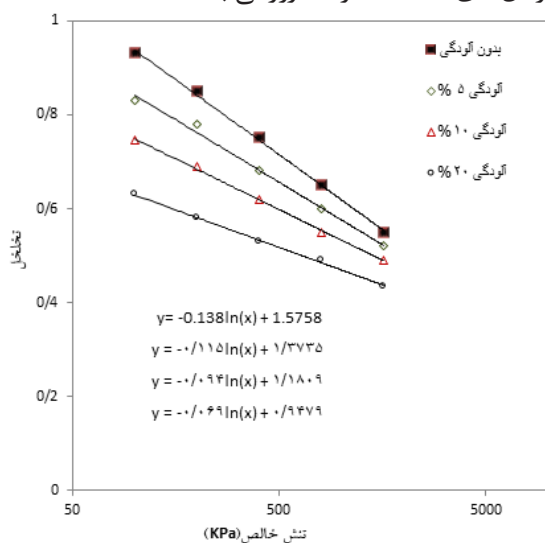
**شکل ۲. تغییرات حجم ویژه نمونه خاک CH در برابر افزایش آلودگی (۹۶ ساعت)**

Specific volume variations of the CH soil sample against increased contamination (96 hours)

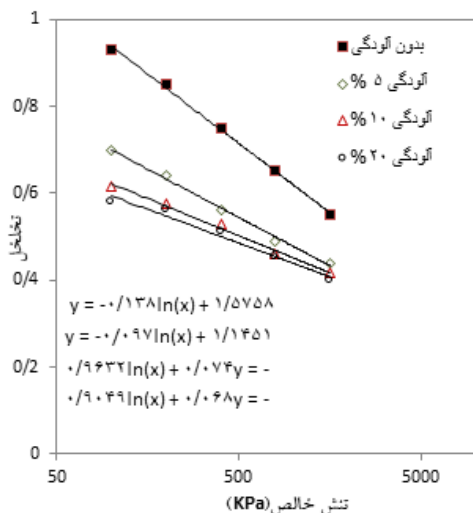
رامی توان به تکمیل واکنش هاشیمیایی شیرابه با خاک نسبت داد که سبب تغییر در ساختار خاک شده است. نحوه تغییر ساختار خاک پس از بررسی تغییرات ضرایب فشردگی به کمک تصاویر SEM نشان داده می شود.

شکل شماره ۴، تغییرات حجم نمونه های خاک در دو تنش انتخابی ۱۰۰ و ۱۶۰۰ کیلوپاسکال را در دو زمان ۹۶ ساعت و ۱۸۰ روز پس از آلودگی، نشان می دهد. ناحیه هاشور خورده بیانگر افزایش تغییرات حجم نمونه هادر تنش های یکسان با گذر زمان می باشد. باتوجه به این شکل مشاهده می شود که گذر زمان سبب کاهش حجمی به اندازه ناحیه هاشور خورده شده است که بیانگر افزایش تأثیرات شیرابه با گذر زمان بر نمونه های خاک است.

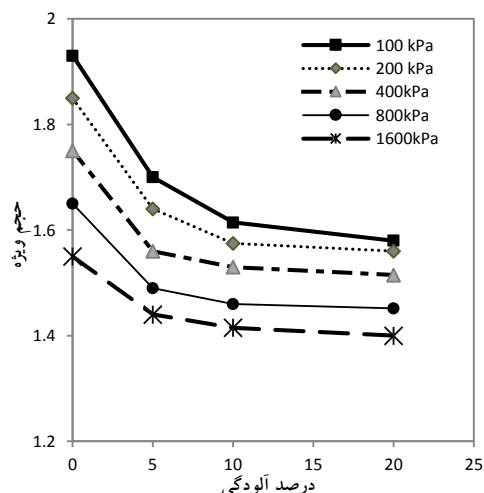
شکل های شماره ۵ و ۶ بیانگر منحنی های  $NCL^2$  نمونه های خاک CH در زمان های ۹۶ ساعت و ۱۸۰ روز می باشد.



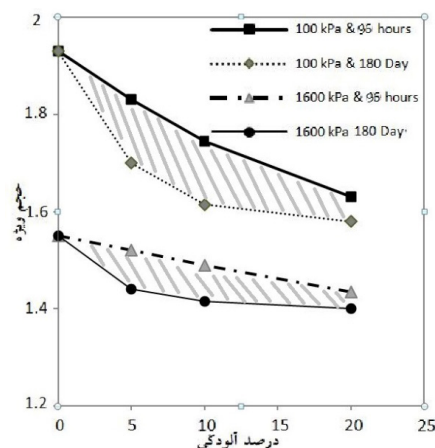
شکل ۵. منحنی NCL خاک CH (۹۶ ساعته)  
NCL curve for CH samples (96 hours)



شکل ۶. منحنی NCL خاک CH (۱۸۰ روز)  
NCL curve for CH samples (180 days)



شکل ۳. تغییرات حجم ویژه نمونه خاک CH در برابر افزایش آلودگی (۱۸۰ روز)  
Specific volume variations of the CH soil sample against increased contamination (180 days)



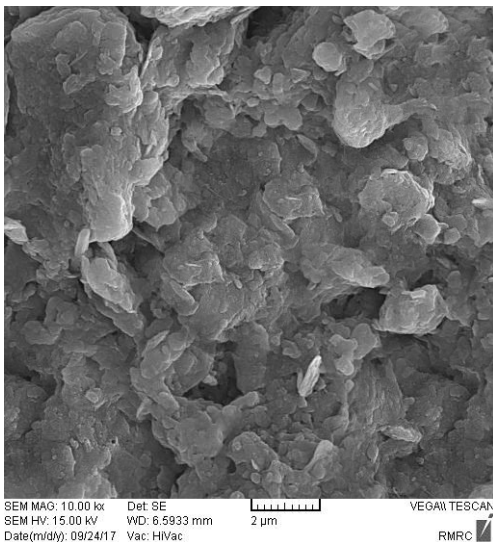
شکل ۴. تغییرات حجم ویژه نمونه خاک CH در برابر افزایش آلودگی (۱۸۰ روز و ۹۶ ساعت)  
Specific volume variations of the CH soil sample against increased contamination (180 days and 96 hours)

شکل شماره ۳ بیانگر تغییرات حجم ویژه نمونه های خاک بر حسب افزایش آلودگی در تنش های قائم متفاوت برای نمونه های خاک CH که مدت ۱۸۰ روز از زمان ساخت آنها گذشته است، می باشد. با توجه به شکل شماره ۳ نیز مشاهده می شود که در تمامی تنش ها با افزایش مقدار درصد آلودگی، از مقادیر حجم ویژه کاسته شده است. اما با توجه به این نمودار مشاهده می شود که برخلاف حالت قبل (۹۶ ساعته)، نمونه ها با یک آهنگ مشخص، تغییر حجم را تجربه نکرده اند. نمونه هادر تمامی تنش ها با سه شیب مختلف درازای افزایش آلودگی تغییر حجم داده اند که با افزایش درصد آلودگی از مقادیر شیب ها کاسته شده است. این تفاوت مابین دو نمودار را می توان اینگونه توصیف نمود که با گذر زمان، تأثیر درصد های کم شیرابه به درصد های زیاد می رسد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، تغییر حجم نمونه در تنش های مختلف برای درصد های ۱۰ و ۲۰ تقریباً یکسان است. علت این امر

۱ Scanning electron microscope  
۲ Normal Consolidation Line

این تأثیر را افزایش داده است که مشابه این نتیجه توسط یافته‌های محققین دیگر نیز بیان شده است [۱۷]. نکته قابل توجه در شکل شماره ۷ این است که مشابه تغییرات حجم ویژه (شکل های ۲ و ۳)، تغییرات ضریب فشردگی نیز در دو بازه زمانی ۹۶ ساعت و ۱۸۰ روز با یکدیگر متفاوت است. به گونه ای که در بازه زمانی ۱۸۰ روز بر خلاف بازه زمانی ۹۶ ساعت، یک آهنگ مشخص برای تغییرات وجود ندارد. منحنی نمونه های ۱۸۰ روزه، سه شیب مختلف را در ازای افزایش آلودگی نشان می دهد که با افزایش درصد آلودگی از مقادیر شیب ها کاسته می شود. به عبارت دیگر در مورد تغییرات ضریب فشردگی با گذر زمان نیز می توان بیان داشت که تأثیر درصد های کم شیرابه به درصد های زیاد می رسد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود، در بازه زمانی بلند مدت، تغییر CC نمونه برای درصد های ۱۰ و ۲۰ تقریباً یکسان است.

دلیل این رفتار تحکیمی خاک آلوده به شیرابه را می توان به وجود فلزات سنگین در شیرابه نسبت داد که از طریق خصوصیات کترولیت آب حفره ای باعث کاهش نیروی دافعه بین ساختار خاک در نتیجه کاهش ضخامت لایه دوگانه ساختار می گردد [۱۷] و کاهش ضخامت لایه دوگانه سبب نزدیک شدن ساختار خاک به هم شده که باعث کاهش فضای بین ذرات می شود و در نتیجه آن حجم ویژه (تخلخل) در هر مرحله بارگذاری برای نمونه های حاوی شیرابه، کمتر از حالت بدون شیرابه شده است [۱۶]. علت این امر را نیز می توان در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز مشاهده نمود. شکل شماره ۸ نشان دهنده تصویر خاک در حالت بدون شیرابه می باشد. تصویر خاک حاوی شیرابه در شکل شماره ۹ ارائه شده است.



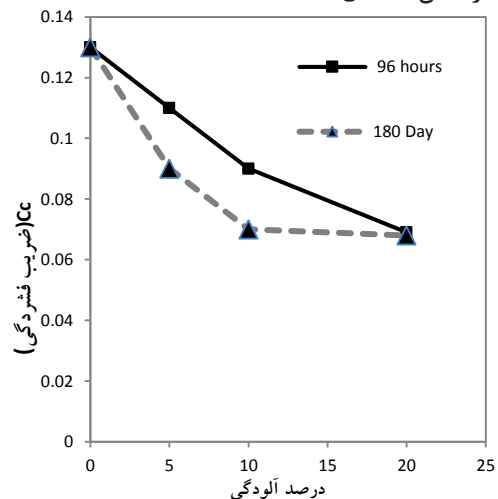
شکل ۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خاک بدون شیرابه با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر  
SEM image of a sample soil before contamination with a magnification of 10000 times

می توان با استفاده از معادلات خط ارائه شده در منحنی ها (به ترتیب از بالا تا پایین متناسب با خط NCL هر نمونه که در گوشه پایین، سمت چپ نشان داده شده است)، مقادیر ضریب فشردگی (CC) را که شیب این خطوط می باشد، برای خاک CH استخراج نمود. این مقادیر در جدول شماره ۵ ارائه شده است.

#### جدول ۵. ضرایب فشردگی نمونه های خاک CH Shear strength parameters of soil samples

درصد آلودگی	زمان آغاز آزمایش پس از ساخت	CC
۰	۹۶ ساعت	۰/۱۳
۰	۱۸۰ روز	۰/۱۳
۵	۹۶ ساعت	۰/۱۱
۵	۱۸۰ روز	۰/۰۹
۱۰	۹۶ ساعت	۰/۰۹
۱۰	۱۸۰ روز	۰/۰۷
۲۰	۹۶ ساعت	۰/۰۶۹
۲۰	۱۸۰ روز	۰/۰۶۸

تغییرات ضریب فشردگی در برابر افزایش درصد آلودگی با استفاده از جدول ۵ در شکل ۷ نشان داده شده است.



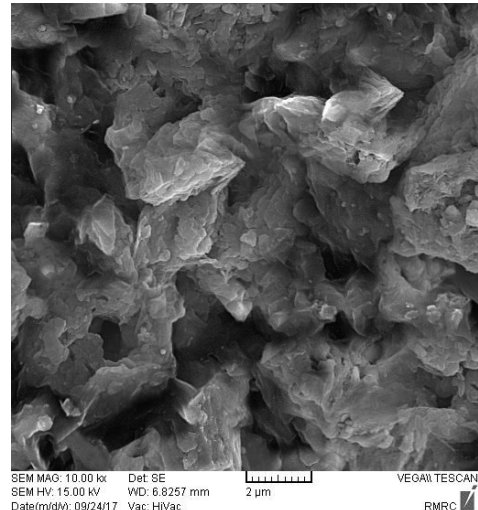
شکل ۷. تغییرات ضریب فشردگی نمونه در برابر افزایش درصد آلودگی در ۹۶ روز و ۱۸۰ ساعت  
Compression index variations of CH clay against against increased contamination (180 days and 96 hours)

با توجه به شکل شماره ۷ مشاهده می شود که افزایش درصد شیرابه سبب کاهش مقادیر ضریب فشردگی خاک شده است و گذر زمان

مونتموریونیت، کاتیون بیشتری پخش می‌شود که تنش حاصل از دافعه را در بین ذرات داخلی خاک کمتر کرده و باعث تراکم نمونه‌های خاک با تخلخل کمتر می‌شود [۶]. مشاهده می‌شود که شرح تغییر رفتار تحکیمی خاک از طریق فرضیه لایه دوگانه منطقی است [۲۳].

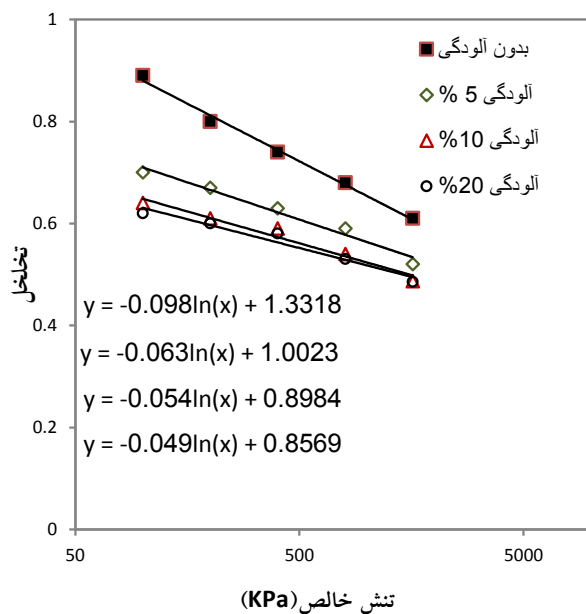
نکته حائز اهمیت ونوآوری در این تحقیق، یافته‌های به دست آمده از آزمایش بر روی نمونه‌ها پس از گذشت ۱۸۰ روز می‌باشد. اول اینکه با گذر زمان، تغییرات در رفتار تحکیمی خاک‌های آلوده (۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)، بهم نزدیک شده و در درصدهای ۱۰ و ۲۰، تقریباً یکسان می‌باشند و دوم اینکه خاک‌ها در زمان ۱۸۰ روز پس از آلودگی نسبت به خاک‌ها در زمان ۹۶ ساعت پس از آلودگی، دارای حجم ویژه کمتری هستند. به عبارت دیگر با گذر زمان و بدون افزایش درصد شیرابه در نمونه‌های خاک، مشاهده می‌شود که نمونه‌ها علاوه بر اینکه دارای رفتار تحکیم‌پذیری یکسانی شده‌اند، تأثیرپذیریشان از شیرابه نیز تشدید یافته‌است. به عبارت دیگر حضور درصدهای کم شیرابه در خاک می‌تواند تأثیراتی یکسان با درصدهای بیشتر در خاک بر تحکیم‌پذیری آن در طولانی مدت داشته باشد. پس هرچه زمان بیشتری از ورود شیرابه به خاک بگذرد، تأثیر بیشتری بر روی خاک خواهد گذاشت و باعث می‌شود نمونه‌ها در تنش‌های ثابت، نشست‌های بیشتری را متحمل شوند که علت آن را می‌توان به تکمیل واکنش‌ها نسبت داد.

برای نمونه‌های خاک CL نیز نمودارهای ۱۰ تا ۱۵، حاصل از نتایج آزمایش‌های تحکیم یک بعدی مانند حالت CH ارائه شده‌است.

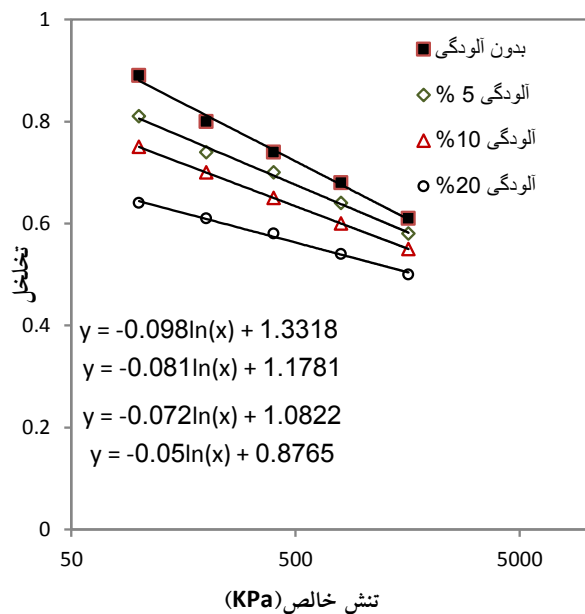


شکل ۹: تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خاک حاوی شیرابه با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر  
SEM image of a soil contaminated with lea-chate with a magnification of 10000 times

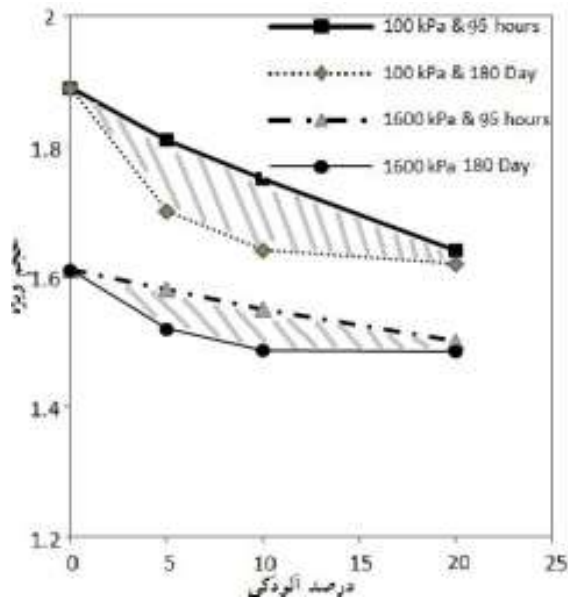
با توجه به شکل شماره ۸ مشاهده می‌شود که ساختار خاک به صورت لایه‌ای است و در آن حفرات سطحی وجود ندارد. با تأثیرگذاری فلزات سنگین موجود در شیرابه مشاهده می‌شود که در اثر کاهش نیروی دافعه و کاهش ضخامت لایه دوگانه (شکل ۹)، ساختار خاک به هم نزدیک شده و در اثر توده‌ای شدن به حالت درهم رسیده‌است. پژوهشگران دیگر نیز نتایج مشابهی را از طریق آزمایش بر روی شیرابه‌های نمکی دریافتند و علتش را اینگونه بیان کردند که با افزایش مقدار درصد شیرابه، تخلخل کمتر می‌شود؛ در بین لایه‌های



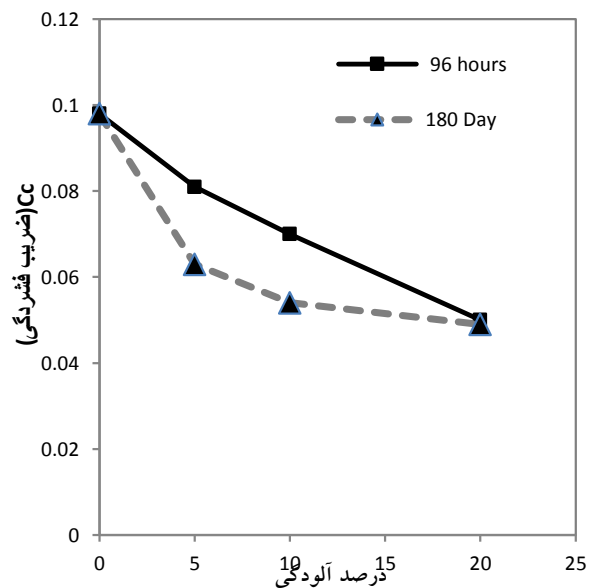
شکل ۱۱. منحنی NCL خاک CL (۱۸۰ روزه)  
NCL curve for CL samples (180 days)



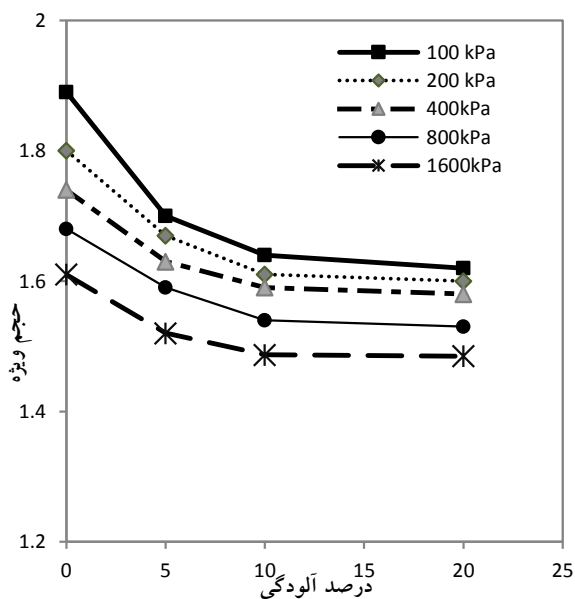
شکل ۱۰. منحنی NCL خاک CL (۹۶ ساعته)  
NCL curve for CL samples (96 hours)



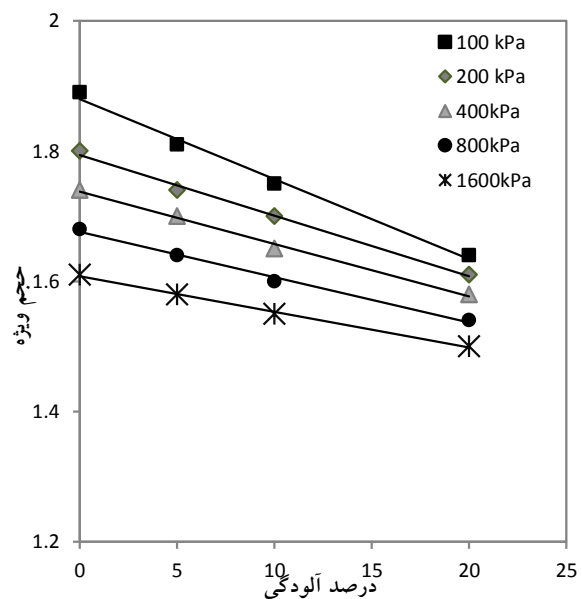
شکل ۱۳. تغییرات حجم ویژه نمونه خاک CL  
Specific volume variations of the CL soil sample



شکل ۱۲. تغییرات Cc مقابل آلودگی (۱۸۰ روز و ۹۶ ساعت)  
Compression index variations against in-  
reased contamination (180days and 96 hours)



شکل ۱۵. تغییرات حجم ویژه خاک CL در برابر آلودگی (۱۸۰ روز)  
Specific volume variations of the CL soil sam-  
ple against contamination (180days)



شکل ۱۴. تغییرات حجم ویژه خاک CL در برابر آلودگی (۹۶ ساعت)  
Specific volume variations of the CL soil sam-  
ple against contamination (96 hours)

اهمیت است که مقدار درصد کمینه که می‌تواند به اندازه درصد بیشینه تاثیرگذار باشد، در این تحقیق ۱۰ درصد بوده است و ممکن در خاک دیگر این مقدار متفاوت باشد. نکته مهم این است که شیرابه ۱۰ درصد بعد از گذر زمان ۱۸۰ روز به اندازه شیرابه ۲۰ درصد در زمان ۱۸۰ روز، بر رفتار تحکیمی خاک تأثیر منفی داشته است. تصویر شماره ۱۶ نمونه‌های تحکیم رانشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۰ الی ۱۵ مشاهده می‌شود که مطالب گفته شده در مورد خاک CH از قبیل ارائه نمودارها در این قسمت نیز صادق است. حضور شیرابه در فضای منفذی بین دانه‌های خاک باعث افزایش نشست نمونه‌ها در تنش ثابت شده است که محققین دیگر نیز به نتیجه مشابه دست یافته‌اند [۶ و ۱۰ و ۲۴].

اثر درصدهای کمتر شیرابه با گذر زمان افزایش یافته و به تاثیرگذاری درصدهای بیشتر در طولانی مدت می‌رسد. بیان این نکته نیز حائز





(ب)



(الف)

شکل ۱۶. (الف) نمونه‌های تحکیمی پیش از آغاز بارگذاری، (ب) نمونه‌های تحکیمی برای آزمایش بلند مدت  
(A) - Samples of consolidation before loading (B) - Samples of consolidation for Long-term

شیرابه، مورد آزمایش قرار گرفتند و با نمونه غیرآلوده مقایسه شدند. لازم به توضیح است که در تمامی شکل‌ها، منحنی مربوط به خاک غیرآلوده برای مقایسه بهتر بین نمودارها، ارائه شده است. شکل شماره ۱۷ دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس را در این پژوهش نشان می‌دهد

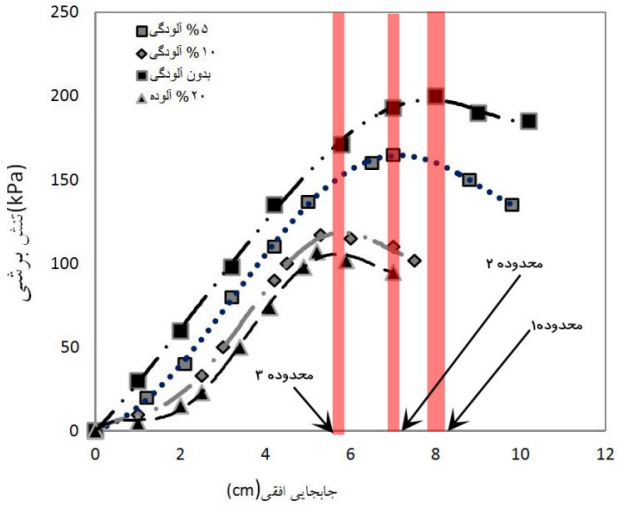
۳-۳ - نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس  
آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس برای بررسی تأثیر شیرابه بر مقاومت برشی خاک صورت گرفت؛ نمونه‌های خاک با درصد‌های مختلف آلودگی (۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪) در دو بازه زمانی ۹۶ ساعت و ۱۸۰ روز پس از آلودگی با



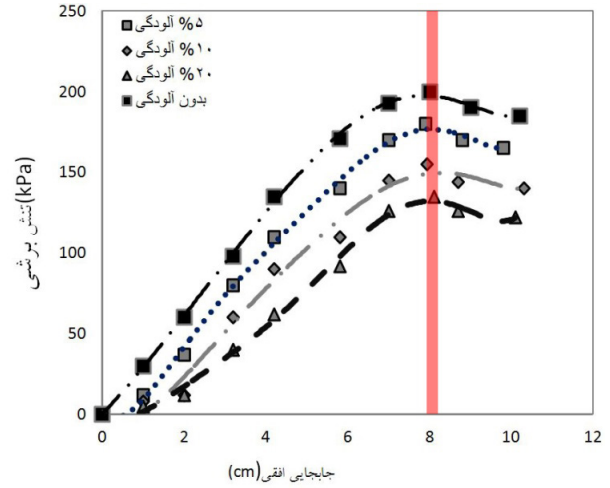
شکل ۱۷. دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس  
Large-scale direct shear

برشی خاک CL در تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال و شکل‌های ۲۴ و ۲۵ نشان‌دهنده رفتار برشی خاک CL در تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشند. نواحی قرمز نشان داده شده در شکل‌ها، نواحی است که نمونه‌های خاک به حداکثر تنش برشی خود رسیده‌اند. محدوده ۱، مرتبط با خاک بدون شیرابه، محدوده ۲، مرتبط با خاک ۵ درصد آلوده و محدوده ۳ نیز برای خاک‌هایی با ۱۰ و ۲۰ درصد آلودگی است.

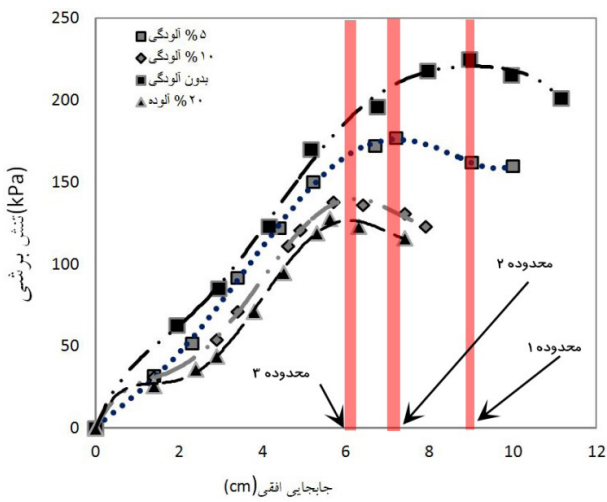
نتایج نشان‌دهنده تغییرات با روند مشابه در هر تنش قائم بوده است. منحنی تنش برشی نمونه‌های خاک در دو بازه زمانی برای دو نوع خاک در شکل‌های ۱۸ الی ۲۵ ارائه شده است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان‌دهنده رفتار برشی خاک CH در تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال و شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نشان‌دهنده رفتار برشی خاک CH در تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشند. شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان‌دهنده رفتار



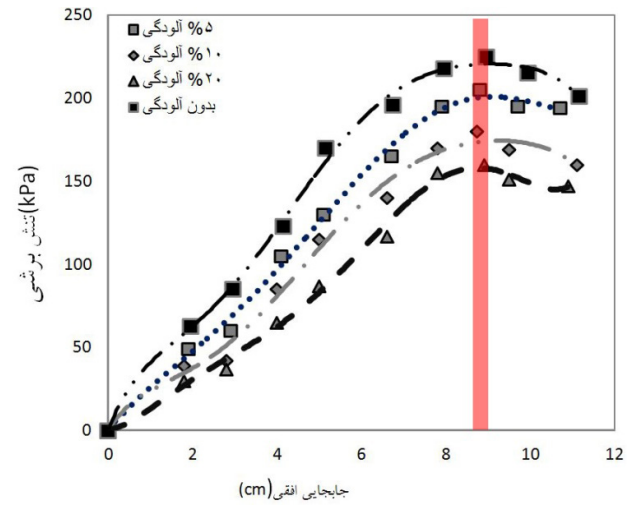
شکل ۱۹. منحنی برشی خاک CH (۱۸۰ روزه) (۱۰۰ kPa)  
Shear curve of CH (180 days) (100kPa)



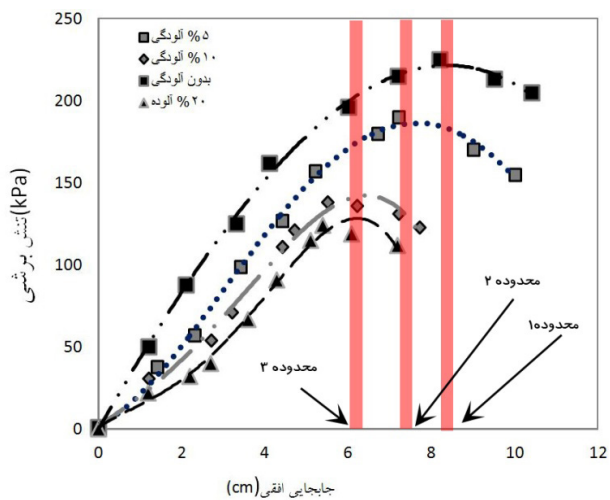
شکل ۱۸. منحنی برشی خاک CH (۹۶ ساعته) (۱۰۰ kPa)  
Shear curve of CH (96 hours) (100kPa)



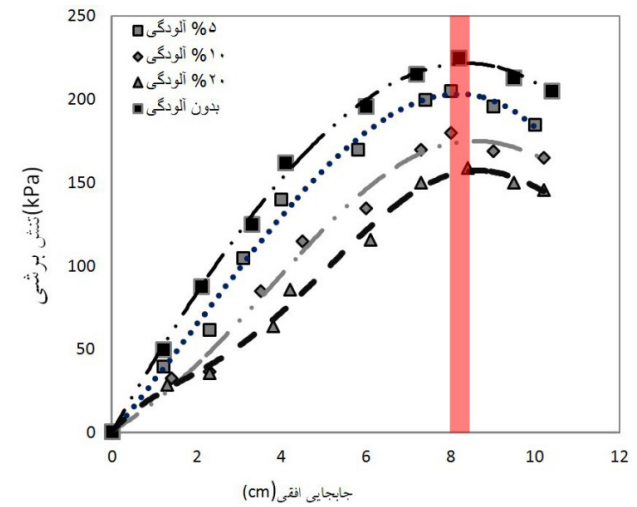
شکل ۲۱. منحنی برشی خاک CH (۱۸۰ روزه) (۲۰۰ kPa)  
Shear curve of CH (180 days) (200kPa)



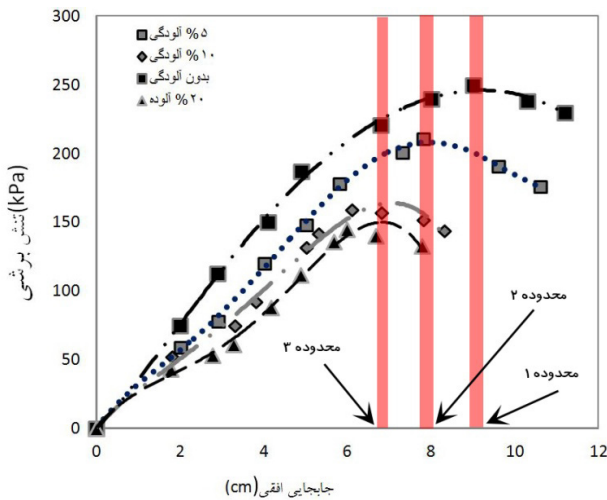
شکل ۲۰. منحنی برشی خاک CH (۹۶ ساعته) (۲۰۰ kPa)  
Shear curve of CH (96 hours) (200kPa)



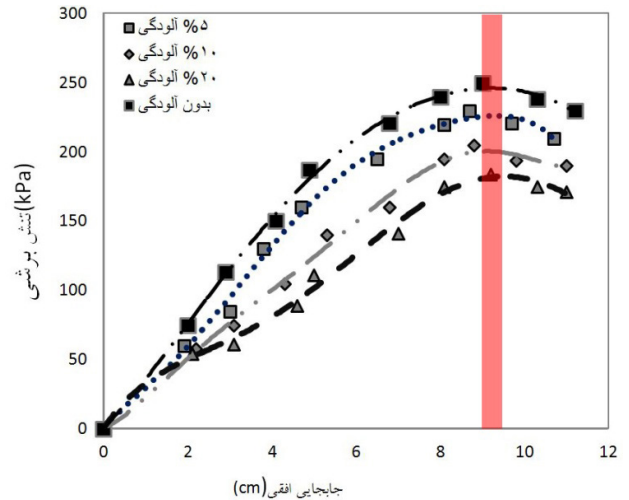
شکل ۲۳. منحنی برشی خاک CL (۱۸۰ روزه) (۱۰۰ kPa)  
Shear curve of CL (180 days) (100kPa)



شکل ۲۲. منحنی برشی خاک CL (۹۶ ساعته) (۱۰۰ kPa)  
Shear curve of CL (96 hours) (100kPa)



شکل ۲۵. منحنی برشی خاک CL (۱۸۰روزه) (۲۰۰kPa)  
Shear curve of CL (180 days) (200kPa)



شکل ۲۴. منحنی برشی خاک CL (۹۶ ساعته) (۲۰۰kPa)  
Shear curve of CL (96 hours) (200kPa)

[۱۸] بر روی نمونه‌های ۱۵ و ۳۰ روزه تحقیقاتی را انجام داده و یافتند که گذر زمان باعث افزایش تأثیرات منفی شیرابه بر روی خاک رُس می‌گردد. نکته مهم دیگر اینست که در بلند مدت (۱۸۰ روز در این تحقیق) رفتار برشی نمونه‌های خاک با ۱۰ و ۲۰ درصد آلودگی مشابه هم شده‌است. با گذر زمان درصد کم شیرابه (در این تحقیق ۱۰ درصد) تأثیری یکسان همانند درصد‌های زیاد (در این تحقیق ۲۰ درصد)، بر روی مقاومت برشی خاک آلوده داشته‌است. در ادامه درباره جزئیات محدوده‌های تنش برشی بیشینه بحث می‌گردد. از این رو در جدول شماره ۶، مشخصات نمودارهای مقاومت برشی (شکل ۱۸ تا ۲۵) ارائه شده‌است.

با توجه به شکل‌های ۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آلودگی، مقاومت برشی حداکثر در خاک کمتر شده‌است. اوزتپراک و پیسرچی [۱۸] نیز با انجام آزمایش، بر روی خاک‌های عادی و پیش تحکیم یافته در حضور شیرابه زباله بیان داشتند که شیرابه باعث کاهش مقاومت برشی حداکثر می‌شود.

با مقایسه رفتار خاک CH در بازه زمانی ۹۶ ساعت و ۱۸۰ روز در تنش‌های وارده (شکل ۱۸ نسبت به شکل ۱۹ و شکل ۲۰ نسبت به شکل ۲۱)، مشاهده می‌شود که گذر زمان باعث کاهش بیشتر در مقاومت برشی حداکثر نمونه‌های خاک شده‌است. اوزتپراک و پیسرچی (۲۰۱۱)

### جدول ۶. جزئیات آزمایش‌های برش مستقیم خاک CH و CL

Details of direct shear test

ردیف	خاک	تنش قائم (kPa)	درصد آلودگی	زمان آغاز آزمایش پس از ساخت	تنش برشی حداکثر (kPa)	جابجایی افقی تا تنش برشی حداکثر (cm)
۱	CH	۱۰۰	۰	-----	۲۰۰	۸
۲	CH	۱۰۰	۵	۹۶ ساعت	۱۸۰	۸
۳	CH	۱۰۰	۵	۱۸۰ روز	۱۶۵	۷
۴	CH	۱۰۰	۱۰	۹۶ ساعت	۱۵۵	۸
۵	CH	۱۰۰	۱۰	۱۸۰ روز	۱۰۹	۵/۱
۶	CH	۱۰۰	۲۰	۹۶ ساعت	۱۳۵	۸
۷	CH	۱۰۰	۲۰	۱۸۰ روز	۱۰۷	۵/۱
۸	CH	۲۰۰	۰	-----	۲۲۵	۹
۹	CH	۲۰۰	۵	۹۶ ساعت	۲۰۵	۹
۱۰	CH	۲۰۰	۵	۱۸۰ روز	۱۷۷	۷/۵
۱۱	CH	۲۰۰	۱۰	۹۶ ساعت	۱۸۰	۹
۱۲	CH	۲۰۰	۱۰	۱۸۰ روز	۱۳۲	۵/۷
۱۳	CH	۲۰۰	۲۰	۹۶ ساعت	۱۶۰	۹
۱۴	CH	۲۰۰	۲۰	۱۸۰ روز	۱۳۰	۵/۷
۱۵	CL	۱۰۰	۰	-----	۲۲۳	۸/۲
۱۶	CL	۱۰۰	۵	۹۶ ساعت	۲۰۵	۸/۲
۱۷	CL	۱۰۰	۵	۱۸۰ روز	۱۹۰	۷/۲
۱۸	CL	۱۰۰	۱۰	۹۶ ساعت	۱۸۰	۸/۲
۱۹	CL	۱۰۰	۱۰	۱۸۰ روز	۱۳۱	۵/۵

ردیف	خاک	تنش قائم (kPa)	درصد آلودگی	زمان آغاز آزمایش پس از ساخت	تنش برشی حداکثر (kPa)	جابجایی افقی تا تنش برشی حداکثر (cm)
۲۰	CL	۱۰۰	۲۰	۹۶ ساعت	۱۶۰	۸/۲
۲۱	CL	۱۰۰	۲۰	۱۸۰ روز	۱۲۹	۵/۵
۲۲	CL	۲۰۰	۰	-----	۲۵۰	۹
۲۳	CL	۲۰۰	۵	۹۶ ساعت	۲۳۰	۹
۲۴	CL	۲۰۰	۵	۱۸۰ روز	۲۱۱	۷/۸
۲۵	CL	۲۰۰	۱۰	۹۶ ساعت	۲۰۵	۹
۲۶	CL	۲۰۰	۱۰	۱۸۰ روز	۱۵۴	۶/۱
۲۷	CL	۲۰۰	۲۰	۹۶ ساعت	۱۸۴	۹
۲۸	CL	۲۰۰	۲۰	۱۸۰ روز	۱۴۹	۶/۱

قائم دیگر در مورد هر دو نوع خاک با توجه به جدول ۶ صادق است. با توجه به جدول شماره ۶ مشاهده می شود که مقدار جابجایی افقی برای رسیدن به تنش برشی حداکثر و مقدار تنش برشی حداکثر برای تمامی نمونه ها با درصد های ۱۰ و ۲۰ به یک مقدار یکسان رسیده است. علت کاهش مقاومت برشی با بررسی پارامترهای برشی نمونه های خاک که از طریق منحنی شکست مور-کلمب به دست آمده است، بررسی شده است. نتایج پارامترهای مقاومت برشی نمونه خاک در جدول ۷ ارائه شده است.

#### جدول ۷. پارامترهای مقاومت برشی نمونه های خاک Compression index variations of CH clay against a against increased contamination (180 days and 96 hours)

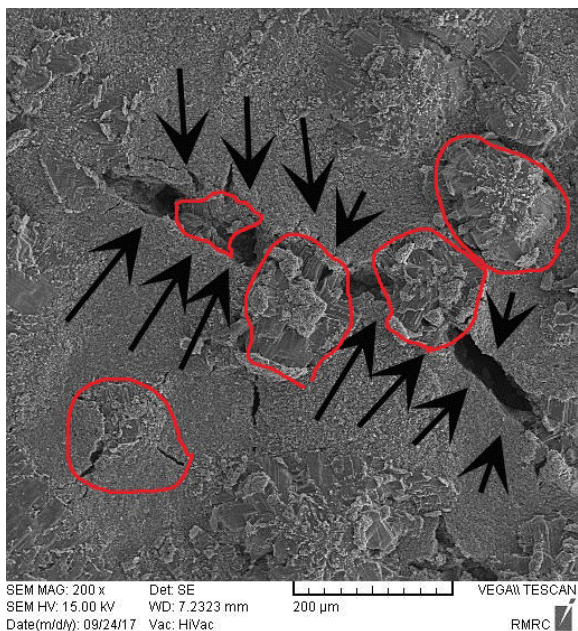
نوع خاک	درصد آلودگی	بازه زمانی	چسبندگی خاک (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
CH	۰		۴۰	۱۸
CH	۵	۹۶ ساعت	۴۴	۱۷
CH	۱۰	۹۶ ساعت	۴۵	۱۳
CH	۲۰	۹۶ ساعته	۴۶	۹
CH	۵	۱۸۰ روزه	۴۵	۱۵
CH	۱۰	۱۸۰ روزه	۴۷	۱۰
CH	۲۰	۱۸۰ روزه	۴۷	۵
CL	۰		۴۸	۱۵
CL	۵	۹۶ ساعت	۵۱	۱۴
CL	۱۰	۹۶ ساعت	۵۲	۱۰
CL	۲۰	۹۶ ساعته	۵۳	۶
CL	۵	۱۸۰ روزه	۵۲	۱۲
CL	۱۰	۱۸۰ روزه	۵۲	۷
CL	۲۰	۱۸۰ روزه	۵۳	۳

با توجه به جدول ۷ مشاهده می شود که در هر دو نوع خاک در بازه زمانی کوتاه مدت، افزایش درصد شیرابه سبب افزایش جزئی در چسبندگی خاک شده است و با گذر زمان چسبندگی در خاک افزایش نیافته است. این افزایش جزئی که قابل چشم پوشی است را می توان به چسبندگی شیرابه نسبت داد؛ طبق تعریف، شیرابه مایعی چسبناک با

با توجه به جدول شماره ۶ مشاهده می شود که در درصد های ۱۰ و ۲۰ پس از گذر زمان ۱۸۰ روز، تنش برشی بیشینه خاک (هم CH و هم CL) تقریباً برابر می باشند. به عبارت دیگر همانگونه که پیش از این در مورد رفتار تحکیمی خاک بیان شد، در رفتار برشی هم نیز مشاهده می شود که با گذر زمان، تأثیر درصد های کم شیرابه به درصد های بیشتر رسیده است.

در مورد خاک CH با توجه به ردیف های ۲، ۴ و ۶ در جدول ۶ که از زمان حضور شیرابه در نمونه ها ۹۶ ساعت می گذرد و تنش قائم برابر ۱۰ کیلو پاسکال می باشد، مشاهده می شود که حداکثر جابجایی افقی برای رسیدن به تنش برشی ماکزیم برابر ۸ سانتی متر و برابر با حالت غیر آلوده (ردیف ۶ در جدول ۶) می باشد. به عبارت دیگر، نمونه ها در کوتاه مدت علیرغم کاهش مقاومت برشی با حضور شیرابه در خود نشان می دهند، تفاوتی در مسافت طی شده برای رسیدن به مقاومت برشی حداکثر خود نسبت به خاک غیر آلوده ندارند. این نتیجه برای خاک CH در تنش قائم های ۲۰۰ کیلو پاسکال و هم چنین برای خاک CL در ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال نیز مشاهده می شود. (برای تنش ۵۰ کیلو پاسکال نیز روند تغییرات مشابه بوده است)

با توجه به شکل های ۱۹، ۲۱، ۲۳ و ۲۵ مشاهده می شود که سه محدوده ۱، ۲ و ۳ مشخص شده است. در واقع مشاهده می شود که با گذر زمان از حضور شیرابه در خاک، نمونه های خاک در درصد های مختلف آلودگی، طی مسافت کمتری در راستای افقی به حداکثر مقاومت برشی خود می رسند. در جدول ۶ برای خاک CH در تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال، مقایسه ردیف های ۲ با ۳، ۴ با ۵ و ۶ با ۷، نشان می دهد که گذر زمان از ۹۶ ساعت به ۱۸۰ روز باعث شده است که نمونه های خاک در درصد های آلودگی مشابه، طی مسافت کمتری به ماکزیم تنش برشی خود برسند. مقایسه جابجایی افقی برای رسیدن به تنش برشی حداکثر، بین ردیف ۵ و ردیف ۱ از جدول ۶، نشان می دهد که حتی درصد های کم و متوسط با گذر زمان می توانند تا چه حد بر رفتار خاک تأثیرگذار باشند؛ در حالت غیر آلوده جابجایی افقی برای رسیدن به تنش برشی حداکثر، ۸ سانتی متر بوده است که با گذر زمان در خاک با ۱۰٪ آلودگی، این مقدار به ۵/۱ سانتی متر رسیده است. از اینرو اهمیت کنترل از ورود شیرابه حتی با درصد های کم به داخل خاک بیشتر از پیش مشخص می شود. این نتایج برای تنش های



**شکل ۲۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خاک حاوی شیرابه با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر SEM image of a soil contaminated with lea-chate with a magnification of 200 times**

شکل های ۲۶ و ۲۷، تصویر خاک آلوده به شیرابه را نشان می دهند.

با توجه به شکل ۲۶ مشاهده می شود که شیرابه باعث ایجاد فاصله بین ساختارهای توده ای خاک شده است که در نتیجه آن، درگیری ساختار خاک کمتر شده و زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش یافته است. حضور ساختارهای نیتروژنی و آمین ها در شیرابه، عامل اصلی این رفتار شیرابه می باشد. ساختارهای آمین و نیتروژنی، ترکیبات حجمی هستند و هرچه شاخه های متصل به نیتروژن بزرگتر باشد، همانند پیوند موجود در این پژوهش که  $(N-NH_3)$  می باشد، حجم گروه بزرگتر می شود، هر چه حجم گروه بزرگتر شود، می تواند بر روی ساختار خاک همانند شاخک هایی تأثیر گذاشته و مانع از اتصال ساختار خاک شود [۲۷ و ۲۸].

در شکل ۲۷، ناحیه های قرمز رنگ، شیرابه ها هستند که بر ساختار خاک تأثیر گذاشته و در آن شکاف هایی را ایجاد کرده است. باید بیان داشت که تکمیل این فضاهای شکاف دار در مقیاس میکرو و گاهاً در مقیاس ماکرو و هم چنین بسیج شدن شان در جهت موافق برش خاک، سبب کاهش بیشتر مقاومت برشی خاک با گذر زمان و هم چنین تسلیم سریع تر (رسیدن به حداکثر تنش برشی در مسیر جابجایی افقی کوتاه تر) بوده است.

#### ۴- نتیجه گیری

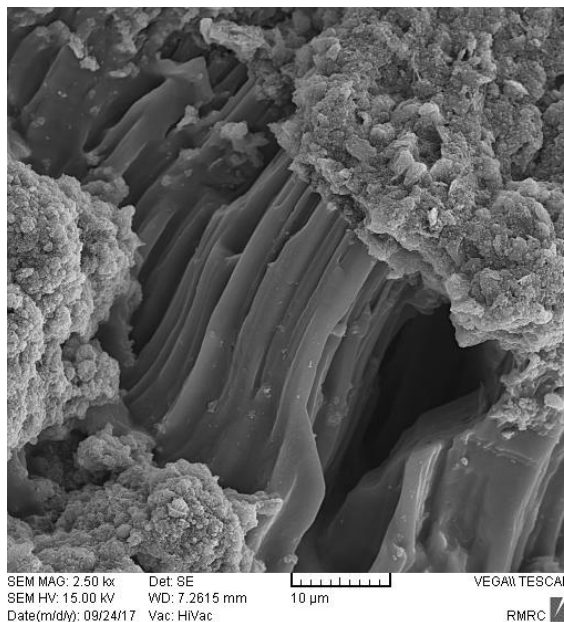
در این پژوهش با بهره گیری از آزمایش های تحکیم یک بعدی، تصویر برداری با میکروسکوپ الکترونی و برش مستقیم بزرگ مقیاس

بوی غیر قابل استشمام و بسیار نامطبوعی است [۱۰ و ۲۱]. از اینرو در طولانی مدت سبب تغییر نمی شود و تنها در لحظه اول پس از حضور در خاک به خاطر چسبندگی ذاتی، با ایجاد ساختار سیمانته و یا پیوندهای ضعیف، کمی سبب افزایش چسبندگی خاک شده است.

ایجاد یک ساختار سیمانته یا پیوندهای ضعیف و اندرواسی سبب افزایش چسبندگی می شود که با اولین نیروی زیاد از بین رفته و تأثیری در پایداری خاک نخواهد داشت؛ این ساختار سیمانته توسط اوزتپراک و پیسرچی (۲۰۱۱) [۱۸] گزارش شده است. با توضیحات ارائه شده، می توان بیان داشت که افزایش چسبندگی عامل مثبتی برای افزایش مقاومت برشی خاک نمی باشد. در ضمن افزایش چسبندگی بایستی با تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز مقایسه شود.

با توجه به جدول ۷ مشاهده می شود که مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزایش درصد شیرابه کاهش یافته است و هر چه فاصله زمانی بیشتر می شود، مقدار زاویه اصطکاک داخلی نیز بیشتر کاهش می یابد، کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک از افزایش جزئی چسبندگی بیشتر بوده که مقاومت برشی در کل کاهش یافته است.

مقاومت برشی باید در حدی باشد که بتواند وزن لایه زباله های بالایی را تحمل کند [۲۵ و ۲۶] و البته توجه به گسترش ساخت در چنین محل هایی، اهمیت توجه بیشتر به مقاومت برشی در این نوع خاک ها را نشان می دهد. برای بررسی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک لازم است که تغییرات ساختار خاک در حضور شیرابه در مقیاس میکرو بررسی شود، برای دستیابی به این منظور از تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است.



**شکل ۲۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خاک حاوی شیرابه با بزرگنمایی ۲۵۰۰ برابر SEM image of a soil contaminated with lea-chate with a magnification of 2500 times**

## مراجع

- [1] Foreman, D.E., Daniel D.E. "Permeation of compacted clay with organic chemicals". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE* Vol.112(7), pp. 669-681,1986
- [2] Gidigasu, M.D. "Laterite Soil Engineering Pedogenesis and Engineering Principles". Elsevier Scientific Pub. Amsterdam, 1976.
- [3] Gnanapragasam, N., Lewis, B.G., Finno, R.J. "Microstructural changes in sand-bentonite soils when exposed to aniline". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 121(7)*, pp. 119-125, 1995.
- [4] Kamon, M., Ying, C., Katsumi, T. "Effect of acid rain on lime and cement stabilized soils." *Japanese Geotechnical Society, Vol. 36(4)*, pp. 91-96, 1996.
- [5] Khan, A.K, Pise, P.J. "Effect of liquid wastes on the physico chemical properties of lateritic soils". *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, December 1994, Warangal*, pp.189-194,1994
- [6] Dutta, J., Mishra., A.K " Consolidation behaviour of bentonites in the presence of salt solutions". *Elsiver. Applied Clay Science. 120.*,pp 61-69. Volume 3, Issue 7. 2016
- [7] Sitaram Nayak., B. M. Sunil., S. Shrihari P. V., Sivapullaiah. " Interactions Between Soils and Laboratory Simulated Electrolyte Solution". *Springer. Geotech Geol Eng. 28*.pp:899-906.2010.
- [8] V.R. Ohadi .,Amiri, M, *Geo-Environmental Behaviour of nanoclay in interaction wuth Heavy Metals Contaminant*, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 42(3) (1389) (in Persia).
- [9] Sunil, B.M., Shrihari, S., Nayak, S. "Shear strength characteristics and chemical characteristics of Leachate contaminated lateritic soils". *A Journal Engineering Geology, Vol. 106*, pp 20-25, 2009.
- [10] Pming, M., Hussain, M., Nyodu, M., Shivan, D. " A Study on the Chemical Properties of Leachate its Effect on the Geotechnical Properties of Soil". *IJETSR. International Journal of Engineering Technology Science and Research. Volume 3, Issue 7*. 2016
- [11] Park, J., C. Vipulanandan, J.W. Kim and M.H. Oh., "Effects of surfactants and electrolyte solutions on the properties of soil". *Environ. Geol.*, 49: 977-989.2006
- [12] Sivapullaiah, P.V. and M anju, "Kaolinite-alkali interaction and effects on basic properties". *Geotech. Geol. Eng.*, 23: 601-214. 2005.
- [13] Villar, M.V. and A. Lloret., "Influence of temperature on the

به بررسی تأثیرات شیرابه زباله‌های جامد شهری بر روی رفتار مکانیکی و مهندسی خاک رس پرداخته شد. نتایج بیانگر تأثیر شیرابه بر روی مقاومت برشی و رفتار تحکیمی خاک بود.

با بررسی آزمایش‌های برش مستقیم مشاهده شد که با افزایش درصد آلودگی، مقاومت برشی حداکثر در خاک کمتر شده است. نمونه‌ها در بازه زمانی کوتاه مدت، علیرغم کاهش که در مقاومت برشی با حضور شیرابه در خود نشان می‌دهند، تفاوتی در مسافت طی شده برای رسیدن به مقاومت برشی حداکثر خود نسبت به خاک غیر آلوده ندارند. با گذر زمان از حضور شیرابه در خاک، نمونه‌های خاک در درصد‌های مختلف آلودگی، طی مسافت کمتری در راستای افقی به حداکثر مقاومت برشی خود می‌رسند. مقدار جابجایی افقی برای رسیدن به تنش برشی حداکثر و مقدار تنش برشی حداکثر برای تمامی نمونه‌ها با درصد‌های ۱۰ و ۲۰ به یک مقدار رسیده است که در واقع بیانگر رسیدن اثر درصد‌های کم به زیاد با گذر زمان می‌باشد. چسبندگی ذاتی شیرابه سبب افزایش جزئی چسبندگی خاک در کوتاه می‌شود و در بلندمدت بر چسبندگی خاک بی‌تأثیر است. افزایش جزئی چسبندگی خاک در حضور شیرابه عامل مثبت و تأثیرگذاری بر افزایش مقاومت خاک محسوب نمی‌شود.

مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزایش درصد شیرابه کاهش یافته است و هر چه فاصله زمانی بیشتر می‌شود، مقدار زاویه اصطکاک داخلی نیز بیشتر کاهش می‌یابد. حضور ساختارهای نیتروژنی و آمین‌ها در شیرابه، عامل اصلی کاهش زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی خاک است.

بر اساس انجام آزمایش‌های تحکیم یک بعدی مشاهده شد که با افزایش مقدار درصد آلودگی، از مقادیر حجم ویژه کاسته شده است. آهنگ کاهش حجم نمونه‌های ۹۶ ساعته خاک آلوده، نسبت به افزایش آلودگی از ۵ تا ۱۰ و ۲۰ درصد، یکسان بوده است و با یک شیب ثابت حجم نمونه‌ها کاهش یافته است. در نمونه‌های ۱۸۰ روزه آهنگ تغییرات حجم در ازای افزایش درصد شیرابه متفاوت بوده است. افزایش درصد شیرابه سبب کاهش مقادیر ضریب فشردگی خاک شده است و گذر زمان، این تأثیر را افزایش داده است. گذر زمان، تأثیر منفی درصد‌های کم شیرابه بر روی تغییرات ضریب فشردگی را (همانند تغییرات حجم) به درصد‌های زیاد می‌رساند.

با یافتن زمان حداکثر (در این تحقیق ۱۸۰ روز) و کمترین درصد شیرابه (در این تحقیق ۱۰٪) که در گذر زمان تأثیراتش به اندازه تأثیرات درصد‌های بالا می‌رسد، در نواحی مختلف دفن زباله در ایران، گام مهمی در زمینه علمی و کاربردی برای کشور برداشته خواهد شد.

US, 1983

- [21] Goswami, D., Choudhury., B.N. "Chemical Characteristics of leachate contaminated lateritic soil". *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol.2, Issue,4. 2013.
- [22] A. Ouria, Farsijani, A., the effect of waste leachate on the mechanical behavior of high plasticity and low plasticity clay soils, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (1397)(in Persia)
- [23] Bolt, G.H., "Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays". *Geotechnique* 6 (1), 86-93. 1956
- [24] Alawaji, H.A. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids. *Appl. Clay Sci.*, 15: 411-430., 1999
- [25] Kenney, T.C., W.A. van Veen, M.A. Swallow and M.A. Sungaila., "Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures". *Can. Geotech. J.*, 29: 364-374. 1992
- [26] Tuncan, A., M. Tuncan, M. Yalcin and Y. Guney, "The effects of environmental pollution on cyclic swell and shrink behaviour of Na-bentonite clay". *Proceeding 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, 2: 57-62. 1998
- [27] Low, Philip F., "Hydrogen bonding and polywater in clay-water systems": *Clays and Clay Minerals Journal*. 18(1), 63-66. 1969
- [28] Johann Förster, Etienne Plesiat, Alvaro Magana, Alejandro Saenz., "Imaging of the umbrella motion and tunneling in the ammonia molecule by strong-field ionization" *Phys. Rev. A* 94(4), 2016.
- hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite". *Appl. Clay Sci.*, 26: 337-350. 2004
- [14] Villar, M.V., P.L. Martin and J.M. Barcala, "Modification of physical, mechanical and hydraulic properties of bentonite by thermo-hydraulic gradients". *Eng. Geol.*, 81: 284-297. 2005.
- [15] Nayak, S., Sunil, B.M., Shrihari, S." Hydraulic and compaction characteristics of leachate-contaminated lateritic soil". *Elsivier. Engineering Geology*:pp 137-144.2007.
- [16] Eştabrag, A.R., Betolahpour, I., Moradi, M., Javadi, A.A."Consolidation behavior of two finer-grained soils contaminated by glycerol and ethanol" *Engineering Geology*.178.pp.102-108.2014
- [17] V.R. Ohadi, Hamidi, S., Amiri, M, Impact of Heavy Metal Contaminants on Coefficient of Variations of Compression Index, Expansion Index and Permeability Coefficient of Bentonite from Micro-Structural Point of View, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45 (1391)(in Persia)
- [18] Oztoprak, S., Pisirici, B."Effects of micro structure changed on macro behavior of İstanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate". *Engineering Geology*.pp110-112.2011
- [19] Ourth, A.S. and Verbrugge, J.C. "First Results about the Influence of Leachates on the Properties of Boom Clay", *International Conference on Geoenvironmental Engineering*, London, pp.47-53, 1999
- [20] EPA, "Process Design Manual, Land Application of Municipal Sludge, Municipal Environmental Research Laboratory", EPA-625/1-83-016, US Government Printing Offices, New York,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

A. Ouria, A. Farsijani, Investigating the Consolidation and Shearing Behavior of Clay Contaminated with Municipal Solid Waste Leachate, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)351-365.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13528.5429