

مطالعه‌ی اثر ناهمسانی ذاتی در رفتار خاک‌های ریزدانه‌ی منطقه‌ی شمال تبریز

حسین سلطانی جیقه* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

چیا زارعی (دانشجوی دکتری)

کاظم بدو (استاد)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه ارومیه

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۱، ص. ۱۱۷-۱۲۶

جهت طراحی دقیق پی‌سازه‌ها و همچنین آنالیز پایداری سازه‌های خاکی، مطالعه‌ی مقاومت برشی خاک‌ها با توجه به اثر ناهمسانی اهمیت زیادی دارد. از طرف دیگر، در سال‌های اخیر ساخت و ساز و بلندمرتبه‌سازی در نوار شمالی و شمال شرق شهر تبریز رواج پیدا کرده است. مصالح سطحی مناطق مذکور عمدتاً از مارن‌های زرد و زیتونی رنگ تشکیل یافته است. با توجه به اجرای پی ساختمان‌ها بر روی مصالح ذکر شده و همچنین لزوم پایداری گودبرداری‌های موجود در منطقه و عدم لحاظ اثر ناهمسانی در خاک مناطق نوار شمالی و شمال شرق، ویژگی‌های رفتاری خاک مناطق اخیر اهمیت زیادی پیدا کرده است. در پژوهش حاضر، رفتار مکانیکی خاک‌های مارن مناطق مرزداران و نگین پارک با انجام آزمایش سه‌محوری و با لحاظ ناهمسانی ذاتی مطالعه شده و نتایج نشان داده است که ناهمسانی در مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ی هر دو خاک تأثیرگذار بوده و باعث شده است که در یک زاویه‌ی خاص، مقاومت برشی کمترین و فشار آب حفره‌ی بیشترین مقدار را داشته باشد. میزان بیشینه‌ی کاهش مقاومت برشی در فشارهای محصورکننده‌ی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال برای مارن زرد به ترتیب ۳۱٪، ۳۲٪ و ۴۰٪ و برای مارن زیتونی به ترتیب ۳۰٪، ۲۹٪ و ۲۱٪ بوده است. روند مشابهی برای تغییرات مقاومت در سطوح کرنش مختلف مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: ناهمسانی ذاتی، آزمایش سه‌محوری، رفتار زهکشی نشده، خاک مارن.

۱. مقدمه

همان‌گونه که می‌دانیم، در حین رسوب و تحکیم خاک‌ها در طبیعت تحت عوامل مختلف، ذرات خاک تمایل به منظم شدن در جهت معینی دارند و امتداد طولی آن‌ها معمولاً به موازات سطح افق و یا در امتداد خاص قرار می‌گیرد. در نتیجه، ریزساختار اسکلت خاک‌ها ذاتاً ناهمسان می‌شود.^[۱] کاساگرانده و کاریلو^۱ (۱۹۴۴) دو نوع ناهمسانی را در خاک‌ها معرفی کرده‌اند. نوع اول، که ناهمسانی ذاتی نام دارد، مربوط به نحوه‌ی قرارگیری ذرات در حالت دست‌نخورده قبل از هرگونه بارگذاری است. نوع دوم ناهمسانی، در نتیجه‌ی بارگذاری و تغییرشکل خمیری است.^[۲] در این حالت، در اثر اعمال تنش‌های اصلی نامساوی، خاک‌ها پاسخ ناهمسانی نسبت به تغییرات تنش دارند، که ناهمسانی ناشی از تنش نامیده می‌شود. ناهمسانی در مقاومت برشی خاک‌ها در اوایل قرن بیستم شناخته و برای اولین بار در دهه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۳۱، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۲۸.

DOI:10.24200/J30.2018.50116.2287

hsoltani@azaruniv.ac.ir
chia.zarei@hotmail.com
k.badv@urmia.ac.ir

شصت میلادی تأیید شد، که در بیشتر مسائل پایداری سازه‌ها و همچنین انتخاب مقادیر مقاومت برشی، ناهمسانی عامل مهمی است، که باید در نظر گرفته شود.^[۳] هانسن و گیسن^۲ (۱۹۴۹) به لحاظ تئوری پیش‌بینی کردند که در نتیجه‌ی حالت ناهمسان تنش موجود در زمین، مقاومت برشی خاک نسبت به امتداد شیب سطح لغزش تغییر می‌کند.^[۴]

بعد از آن، مطالعات آزمایشگاهی مختلفی درخصوص رفتار ناهمسان خاک‌ها، به‌ویژه خاک‌های دانه‌ی، انجام شده است،^[۵-۱۲] که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره شده است. فرهادی و لشکری (۲۰۱۷)^[۱۳] و الرکابی^۳ و همکاران (۲۰۱۷)^[۱۴] نشان دادند که رفتار خاک‌های ماسه‌ی به شدت به امتداد لایه‌بندی بستگی دارد. رفتار ناهمسان خاک ماسه‌ی توسط میورا و همکاران (۱۹۸۶)^[۱۵] و لاده و همکاران (۲۰۱۴)^[۱۶] به‌طور وسیعی توسط دستگاه استوانه‌ی توخالی^۴ بررسی و نتیجه‌گیری شده است، که کمترین مقاومت برشی در زوایای ۶۰ تا ۷۵ درجه به دست می‌آید و پس از آن مقاومت برشی در زاویه‌ی ۹۰ درجه، اندکی

افزایش می‌یابد. همچنین رازقی و رومیانی (۲۰۱۵)^[۱۷] هم به نتایج مشابهی دست یافته‌اند.

علی‌رغم مطالعات گسترده‌ی آزمایشگاهی در زمینه‌ی رفتار ناهمسان خاک‌های دانه‌یی، اطلاعات اندکی در رفتار ناهمسان خاک‌های چسبیده وجود دارد. با توجه به این‌که موضوع پژوهش حاضر در خصوص اثر ناهمسانی ذاتی در رفتار مکانیکی خاک‌های ریزدانه‌ی چسبیده است، در ادامه، برخی مطالعات گزارش شده در ادبیات فنی موضوع بررسی شده است.

آتوم و الاخرس (۲۰۰۸)^[۱۸] با مطالعه‌ی رفتار مقاومت برشی ۱۵ نوع خاک رس بیش تحکیم‌یافته از نقاط مختلف کشور اردن، در عمق‌های مختلف نشان دادند که مقاومت فشاری محصور نشده در جهت عمود بر لایه‌بندی بزرگ‌تر از جهت‌های افقی و سایر جهت‌ها بوده و با افزایش نسبت بیش‌تحکیمی، نسبت مذکور افزایش یافته است. علاوه بر آن، کرنش تسلیم در نمونه‌های افقی کوچک‌تر از مقدار مشابه در نمونه‌های قائم است. اسلام و هوکیو (۲۰۰۳)^[۱۹] با بررسی رفتار برش مستقیم و تک‌محوری نمونه‌های رس بازسازی شده با $\pm 4\%$ رطوبت بهینه، تحت زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق مشاهده کردند که ضریب ناهمسانی (نسبت مقاومت نمونه‌ها به مقاومت نمونه‌ی افقی) در نمونه‌های خشک از ۰/۷۴ تا ۰/۲۸ و در نمونه‌های مرطوب از ۰/۵۹ تا ۱/۰۵ متغیر است. ضریب مذکور در نمونه‌های تک‌محوری و برش مستقیم، به دلیل متفاوت بودن صفحه‌ی گسیختگی در نمونه‌ها برابر نیست. روشن‌ضمیر و عسکری (۲۰۱۰)^[۲۰] مقاومت ناهمسان خاک رس در هسته‌ی نفوذناپذیر سدهای خاکی را با تهیه‌ی نمونه‌های مکعبی بزرگ با رطوبت و انرژی تراکم متفاوت مطالعه کردند و دریافتند که نسبت ناهمسانی مقاومت برای نمونه‌های خشک و مرطوب به ترتیب ۱/۰۴ و ۱/۲۳ است و بیشترین آن در نمونه‌های با چگالی $1/62 \text{ gr/cm}^3$ و در رطوبت ۲۳٪ مشاهده می‌شود. تانکیوزیک (۲۰۱۵)^[۲۱] با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده بر روی نمونه‌های تهیه شده‌ی رس وارود^۷ اخذ شده در زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به این نتیجه رسید که نمونه‌های تهیه شده در زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق، به ترتیب کمترین و بیشترین مقاومت برشی را دارند.

لو (۱۹۶۵)^[۲۲] دریافت که وقتی بارگذاری در جهت ته‌نشینی خاک رس باشد، خاک بیشترین مقاومت برشی و ضریب کشسانی را دارد و در بارگذاری عمود بر این امتداد، پارامترهای مذکور کمترین مقدار را دارند. وی با بررسی پایداری شیروانی‌های رسی مشاهده کرد که اثر ناهمسانی در شیروانی‌های با شیب کمتر از ۵۰ درجه حائز اهمیت است. کایرن کراس و جامز^۸ (۱۹۷۷) دریافتند که سختی برشی رس بیش تحکیم‌یافته در حالت محرک، ۱۰ برابر بیشتر از حالت مقاوم است و ضریب سختی نیز با جهت برش تغییر می‌کند.^[۲۳] سروش و سلطانی (۲۰۰۱) نیز نشان دادند که ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها به روش تعادل حدی، با فرض ناهمسان بودن پارامترهای مقاومت برشی در مقایسه با مقدار متناظر با فرض همسان بودن پارامترها کاهش قابل توجهی دارد و هر چه میزان ناهمسانی پارامترها زیاد باشد، شیروانی حالت بحرانی‌تری دارد. همچنین، ناهمسانی پارامترهای مقاومت برشی، موقعیت سطح لغزش بحرانی را تغییر می‌دهد. یعنی سطحی که با فرض پارامترهای مقاومتی همسان، ضریب اطمینان کمینه دارد، لزوماً با فرض ناهمسان بودن پارامترها، ضریب اطمینان کمینه نخواهد داشت.^[۲۴]

با توجه به گسترش بلندمرتبه‌سازی و گودبرداری در نواحی شمال شرقی و شمال تیرین که اغلب شامل خاک‌های مارن به رنگ زرد و زیتونی هستند، لزوم بررسی

اثر ناهمسانی در مقاومت برشی خاک‌ها و ظرفیت باربری آن‌ها در مناطق ذکر شده حائز اهمیت است. هدف اصلی نوشتار حاضر، بررسی اثر ناهمسانی ذاتی در رفتار تنش - کرنش، مقاومت برشی و فشار آب حفره‌یی خاک‌های ریزدانه در مناطق اخیر با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده است. در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی اثر ناهمسانی در مقاومت برشی، اثر ویژگی اخیر در پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) و فشار آب حفره‌یی مطالعه و تفسیرهای لازم در خصوص مکانیزم کاهش مقاومت در اثر ناهمسانی ارائه شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها و مصالح استفاده شده

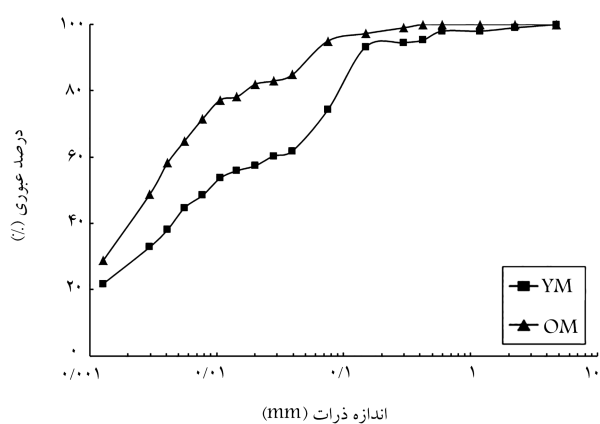
۲.۱. مصالح

در پژوهش حاضر، از دو نوع خاک ریزدانه‌ی تهیه شده از مناطق شهرک مرزداران و نگین پارک تبریز استفاده شده است. خاک سطحی در مناطق اشاره شده به ترتیب به رنگ زرد و زیتونی است و در اصطلاح منطقه‌یی، مارن زرد^۹ و مارن زیتونی^{۱۰} نامیده می‌شوند. دو نوع خاک ذکر شده جهت اختصار در پژوهش حاضر به ترتیب با علائم YM و OM نشان داده شده‌اند. حد روانی و دامنه‌ی خمیری خاک YM به ترتیب ۸۵٪ و ۴۳٪ و خاک OM به ترتیب ۷۸٪ و ۵۰٪ تعیین شده است. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک‌ها (شکل ۱) نشان می‌دهد که به ترتیب حدود ۷۵٪ و ۹۶٪ ذرات خاک‌های ذکر شده ریزتر از ۰/۷۵ mm هستند. در سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک‌های YM و OM به ترتیب در گروه‌های MH و CH قرار می‌گیرند.^[۲۵] امتداد لایه‌بندی هر دو خاک نسبت به امتداد افق حدود ۵ درجه است. خلاصه‌یی از مشخصات خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. روش تهیه‌ی نمونه‌ها

برای بررسی اثر ناهمسانی در رفتار خاک‌ها، لازم است نمونه‌ها در امتدادهای متفاوت تهیه شوند. برای این منظور، از دستگاه نمونه‌گیر ویژه، که بدین منظور ساخته شده بود، استفاده شده است (شکل ۲).

مطابق شکل مذکور، امتداد نمونه‌گیر در امتدادهای مختلف قابل تنظیم است و مغزه‌ها به صورت دست‌نخورده توسط دستگاه نمونه‌گیر و در زوایای ۵، ۲۳، ۴۱، ۵۹، ۷۷ و ۸۵ درجه نسبت به قائم تهیه شدند. در دستگاه سه‌محوری، بارگذاری



شکل ۱. توزیع اندازه‌ی ذرات خاک‌های مارن زرد و زیتونی.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایش شده.

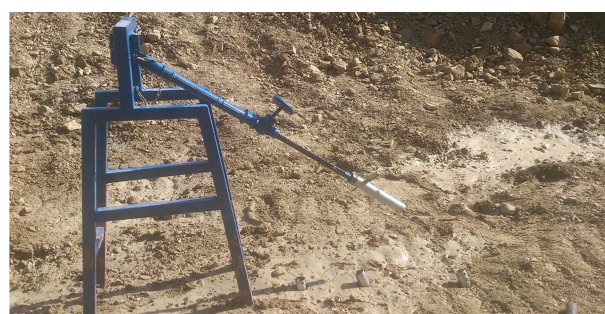
نام خاک	حد خمیری	حد روانی	دامنه‌ی خمیری	G _s	طبقه‌بندی طبق سیستم USCS	ویژگی
مارن مرزداران (YM)	٪۴۳	٪۸۵	٪۴۲	۲٫۸۵	MH	
مارن نگین پارک (OM)	٪۲۸	٪۷۸	٪۵۰	۲٫۸۸	CH	

جدول ۲. بیشترین و کمترین مقادیر مقاومت برشی برای هر دو نوع خاک مارن زرد و مارن زیتونی.

تنش محصورکننده (کیلوپاسکال)									
۲۰۰			۳۰۰			۵۰۰			
$\alpha\sigma$ (درجه)									
۹۰	۵۹	۰	۹۰	۵۹	۰	۹۰	۵۹	۰	نوع خاک
-	۳۱۲٫۰۷	۴۰۳٫۶۹	-	۲۲۱٫۶	۳۲۱٫۳۳	-	۱۵۵٫۰۶	۲۸۸٫۹۴	مارن زرد
۳۱۲٫۳۷	-	۳۹۹٫۶۲	۲۱۹٫۹۹	-	۳۱۳٫۱۱	۱۴۹٫۹۸	-	۲۱۵٫۰۱	مارن زیتونی

۳.۲. آزمایش سه‌محوری

برای آماده‌سازی نمونه‌های سه‌محوری، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۳۸ mm و به ارتفاع ۷۶ mm از مغزه‌های اخذ شده بریده شدند. نمونه‌ها سپس در داخل محفظه‌ی سه‌محوری قرار گرفتند و با گذراندن آب به مدت ۲ الی ۳ روز، و متعاقب آن با اعمال فشار برگشتی تا رسیدن به مقدار B برابر ۹۷٪ اشباع شدند. سپس، نمونه‌ها تحت تنش‌های محصورکننده‌ی مؤثر ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال تحکیم یافتند و با سرعت ۰٫۵ mm/min بارگذاری شدند.^[۲۶] این تذکر لازم است که در پژوهش حاضر از دستگاه سه‌محوری با قابلیت اعمال بار یکنواخت به روش کنترل کرنش استفاده و تمامی اندازه‌گیری‌ها به طور خودکار توسط حس‌گرهای الکترونیکی انجام شده است.



شکل ۲. نمونه‌گیر با قابلیت اخذ نمونه در امتدادهای مختلف.

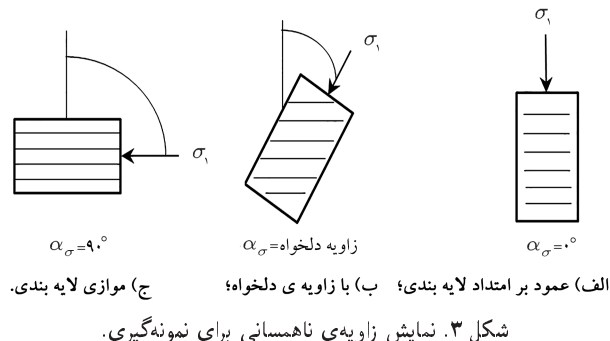
۳. نتایج و بحث روی آن‌ها

۱.۳. رفتار تنش - کرنش و مقاومت برشی ناهمسان

رفتار تنش - کرنش و فشار آب حفره‌ی هر دو خاک مارن زرد رنگ و زیتونی تحت تنش‌های محصورکننده‌ی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. صرف‌نظر از تنش محصورکننده، می‌توان گفت که ناهمسانی ذاتی در رفتار تنش - کرنش تأثیر گذاشته است. به طوری که، در هر سه تنش تحکیمی، با افزایش α_σ ، مقاومت برشی در هر دو نوع خاک کاهش یافته است، اما روند تغییرات در دو خاک متفاوت بوده است.

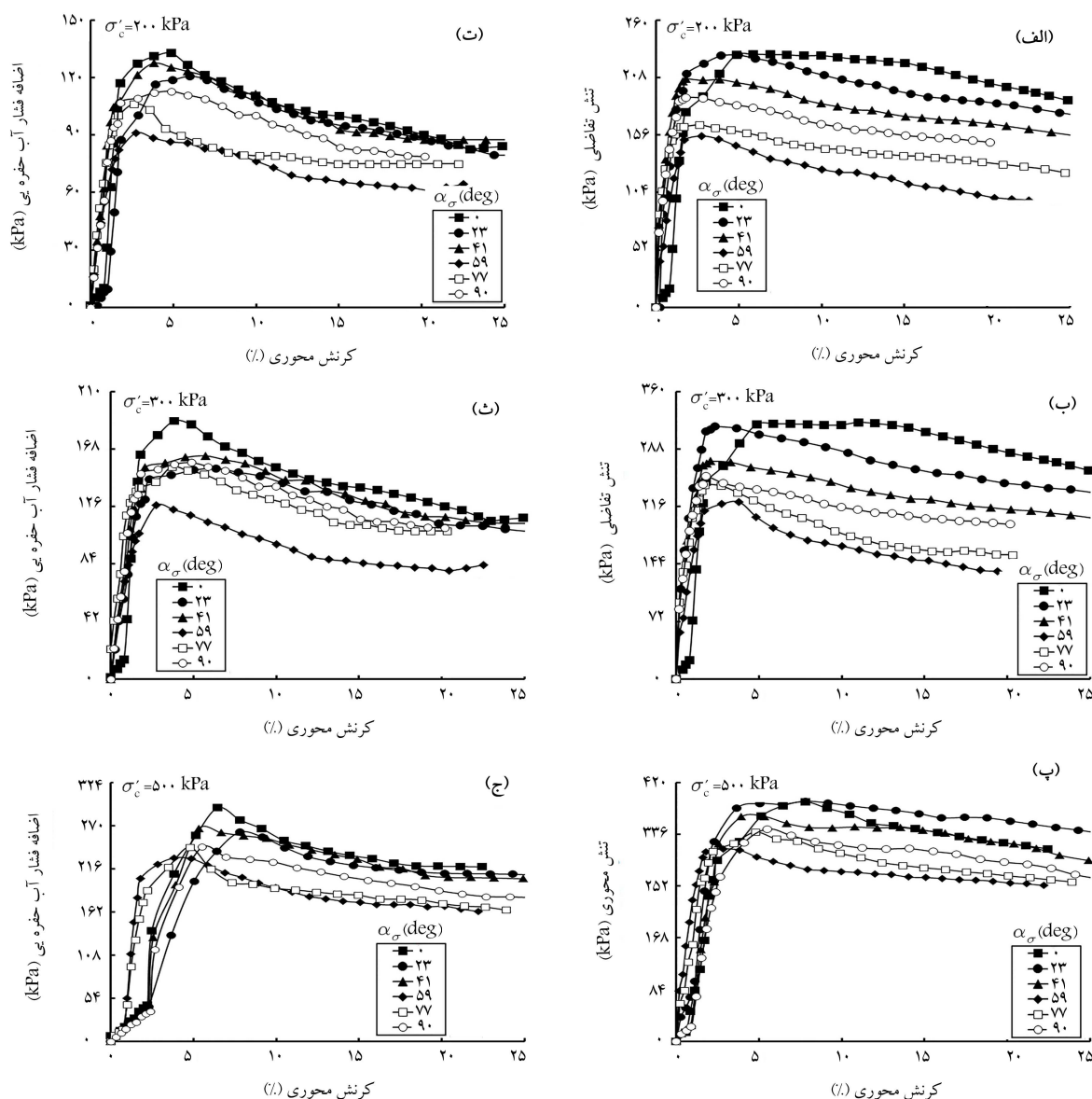
اثر زاویه‌ی ناهمسانی در مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. در شکل ۶ الف مشاهده می‌شود که مقاومت برشی مارن زرد با افزایش α_σ از صفر تا ۵۹ درجه کاهش یافته و بعد از آن با افزایش α_σ از ۵۹ تا ۹۰ درجه، مقداری افزایش داشته است. در خاک مارن زیتونی، مطابق شکل ۶ ب با افزایش α_σ از صفر تا ۹۰ درجه، مقاومت برشی کاسته شده است. با توجه به اهمیت تراز کرنش در سازه‌های ژئوتکنیکی، اثر زاویه‌ی ناهمسانی در مقاومت برشی هر دو نوع خاک در سطوح کرنش مختلف (۲٫۵٪، ۵٪، ۷٫۵٪ و ۱۰٪) در شکل ۷ مشاهده می‌شود، که مطابق آن صرف‌نظر از برخی استثناها، در همه‌ی تنش‌های محصورکننده، روند تغییرات مقاومت در یک سطح کرنش با زاویه‌ی α_σ مشابه روند تغییرات مقاومت برشی بیشینه‌ی ارائه شده در شکل ۶ است.

در جدول ۲، بیشترین و کمترین مقدار مقاومت برشی برای خاک‌های مارن زرد



نمونه همواره در امتداد طول آن و در جهت قائم صورت می‌گیرد، بنابراین مطابق شکل ۳، امتداد بارگذاری نسبت به امتداد لایه‌بندی در نمونه‌های مختلف متفاوت خواهد بود.

بدین منظور، برای لحاظ چرخش جهت بارگذاری نسبت به امتداد لایه‌بندی، زاویه‌ی بین امتداد بارگذاری و امتداد عمود بر جهت لایه‌بندی به عنوان زاویه‌ی ناهمسانی (α_σ) تعریف شده است. برای مثال، در صورتی که لایه‌بندی خاک به صورت افقی باشد، زاویه‌ی α_σ برای نمونه‌ی که در امتداد قائم تهیه می‌شود، برابر صفر درجه و برای نمونه‌ی تهیه شده در امتداد افق برابر ۹۰ درجه است. با توجه به امتداد لایه‌بندی هر دو نوع خاک، برای نمونه‌های اخذ شده در زوایای ۵، ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۷۷ و ۸۵ درجه نسبت به قائم، زاویه‌ی α_σ به ترتیب برابر با ۰، ۲۳، ۴۱، ۵۹، ۷۷ و ۹۰ درجه خواهد بود.



شکل ۴. نتایج آزمایش‌های سه محوری بر روی مارن زرد در تنش‌های محصورکننده‌ی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال.

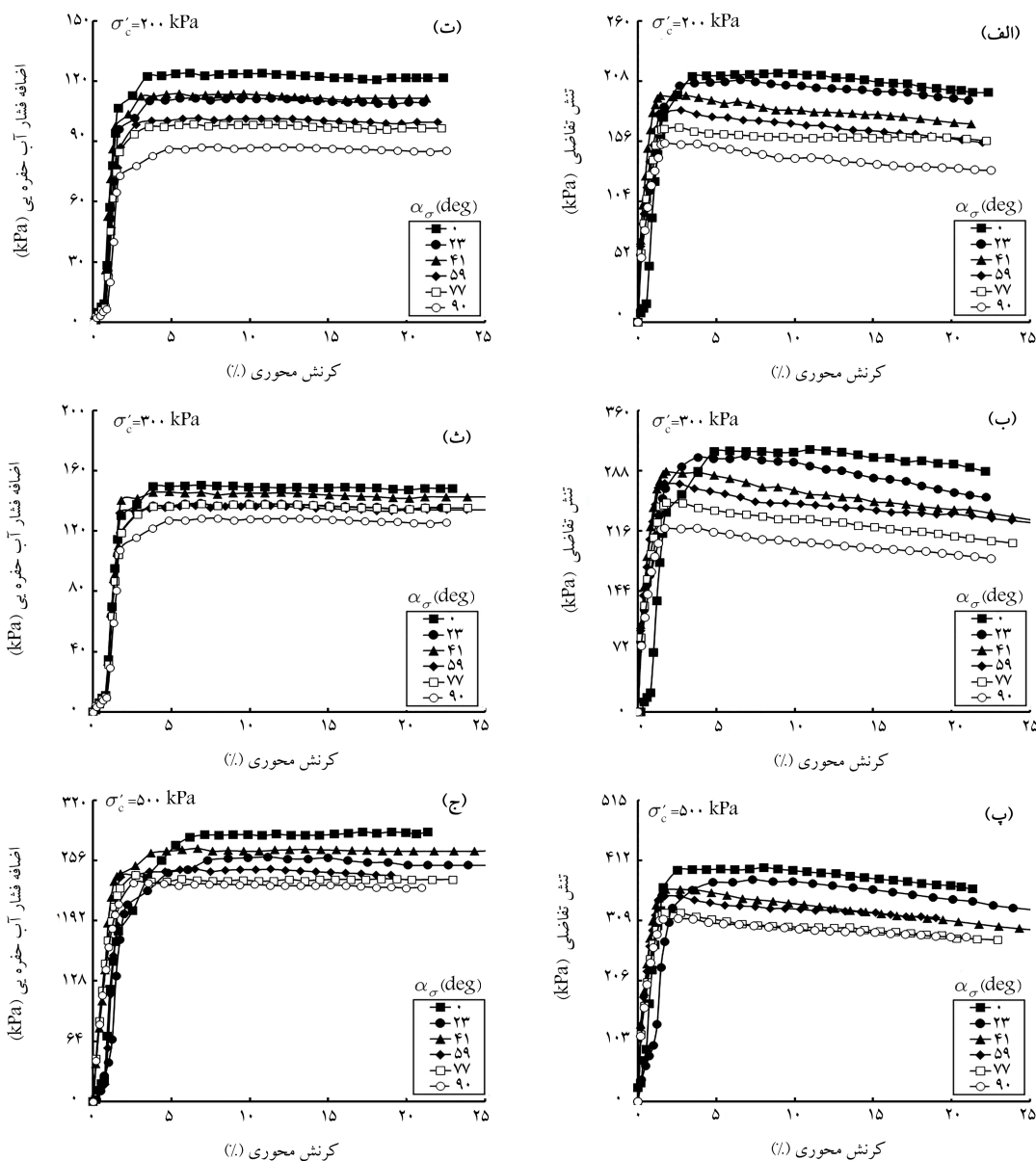
زیتونی از $1/^\circ$ تا $1/43^\circ$ (شکل ۸ ب) متغیر است. از آنجایی که پارامترهای مقاومت برشی، نقش مهمی در آنالیز پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی دارند، ارزیابی اثر ناهمسانی‌ها در پارامترهای مذکور مهم است. شکل ۹، اثر ناهمسانی را در زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ') و چسبندگی (c') خاک‌های مارن زرد و زیتونی نشان می‌دهد. برای مارن زرد، با افزایش α_σ تا 41° درجه، مقدار ϕ' تغییر چندانی نداشته و سپس در 59° α_σ به کمترین مقدار خود رسیده و سپس با افزایش α_σ تا 90° درجه، مقدار آن زیاد شده است. در خاک مارن زیتونی با افزایش α_σ تا 59° درجه، مقدار ϕ' به طور قابل توجهی تغییر نکرده و بعد از آن تا 90° درجه کاهش یافته است (شکل ۹ الف). در شکل ۹ ب نیز مشاهده می‌شود که در خاک مارن زرد با افزایش α_σ از صفر تا 59° درجه، مقدار c' کم شده و بعد از آن افزایش یافته است؛ حال آنکه در خاک مارن زیتونی با افزایش α_σ تا 90° درجه، مقدار چسبندگی کاهش یافته است، به طوری که کمترین چسبندگی در α_σ برابر 90° درجه اتفاق افتاده است. بر اساس شکل ۹، می‌توان نتیجه گرفت که ناهمسانی،

و زیتونی ارائه شده است. میزان بیشینه‌ی کاهش مقاومت برشی برای مارن زرد در فشارهای محصورکننده‌ی ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر با ۳۲٪، ۳۱٪ و ۲۰٪ و مقادیر مشابه برای مارن زیتونی به ترتیب مساوی با ۳۰٪، ۲۹٪ و ۲۱٪ بوده است.

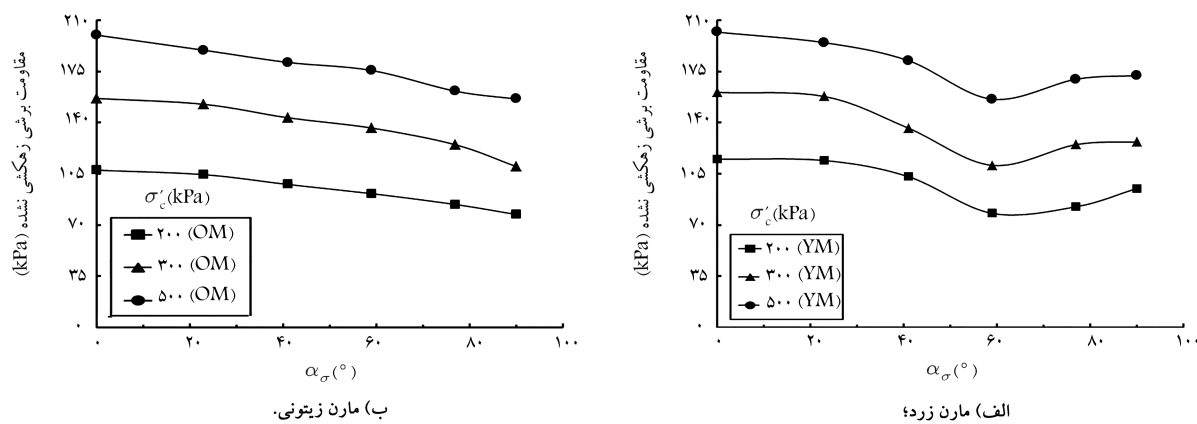
برای بررسی اثر ناهمسانی ذاتی، معمولاً نسبت ناهمسانی با تقسیم مقاومت برشی نمونه‌ی تهیه شده با زاویه‌ی دلخواه ($S_{u(\alpha_\sigma)}$) به مقاومت برشی نمونه‌ی تهیه شده در امتداد لایه‌بندی ($S_{u(\alpha_\sigma=90^\circ)}$) تعریف و با علامت $AR_{(su)}$ نمایش داده می‌شود (رابطه‌ی ۱):

$$AR_{(su)} = \frac{S_{u(\alpha_\sigma)}}{S_{u(\alpha_\sigma=90^\circ)}} \quad (1)$$

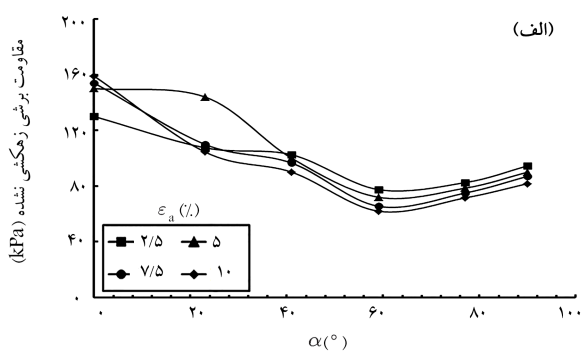
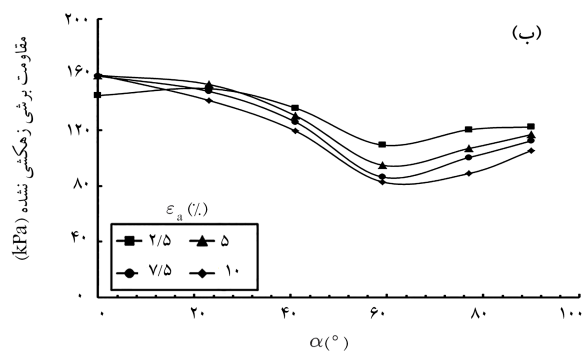
تغییرات $AR_{(su)}$ با زاویه‌ی α_σ برای مقادیر مختلف α_σ حاکی از آن است که مقادیر $AR_{(su)}$ برای مارن زرد از ۰٫۸۲ تا ۱٫۲۶ (شکل ۸ الف) و برای مارن



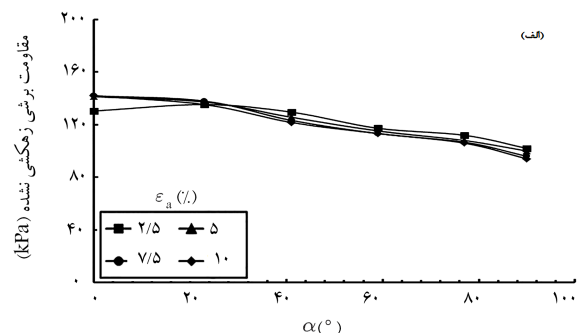
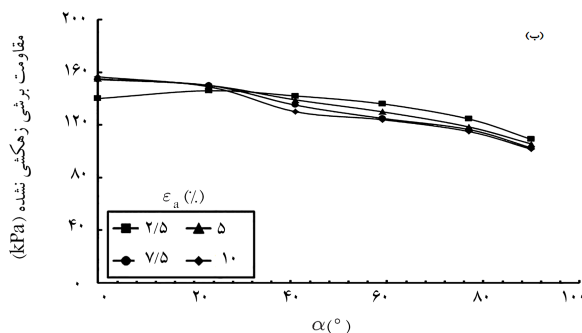
شکل ۵. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی مارن زیتونی در تنش‌های محصورکننده ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال.



شکل ۶. اثر زاویه‌ی ناهمسانی در مقاومت برشی خاک‌های مارن زرد و مارن زیتونی.

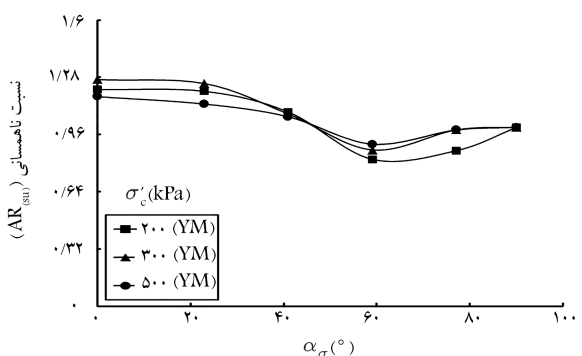
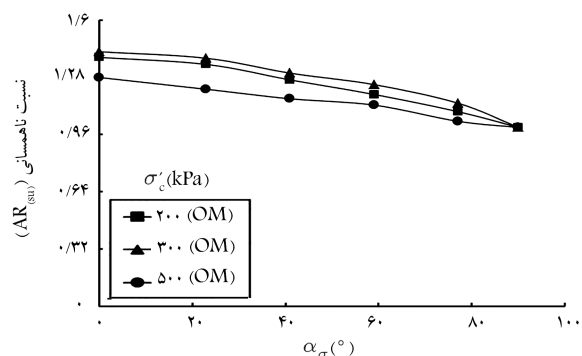


(الف و ب) مارن زرد به ترتیب برای تنش محصور کننده ی ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال؛

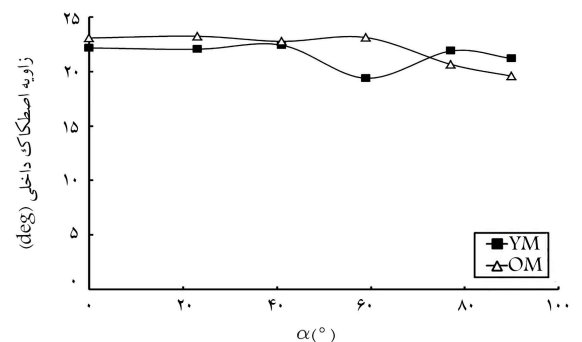
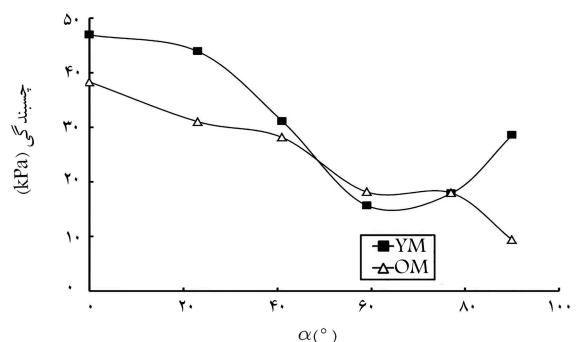


(ج و د) مارن زیتونی به ترتیب برای تنش محصور کننده ی ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال.

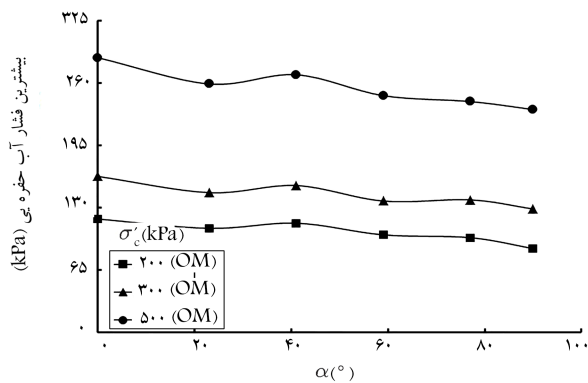
شکل ۷. اثر زاویه‌ی ناهمسانی در مقاومت برشی در کرنش‌های ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪.



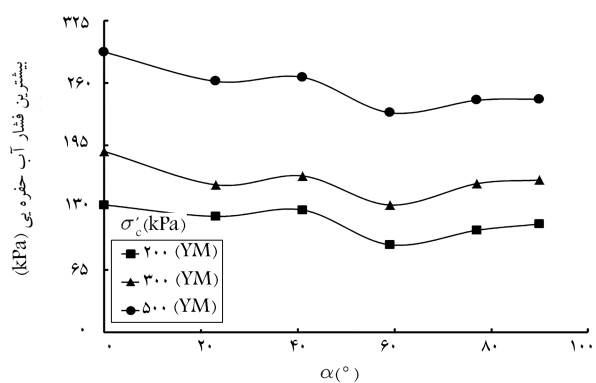
شکل ۸. تغییرات نسبت ناهمسانی با زاویه ی α_σ برای خاک‌های مارن زرد و مارن زیتونی.



شکل ۹. اثر زاویه‌ی ناهمسانی در پارامترهای مقاومت برشی هر دو خاک.

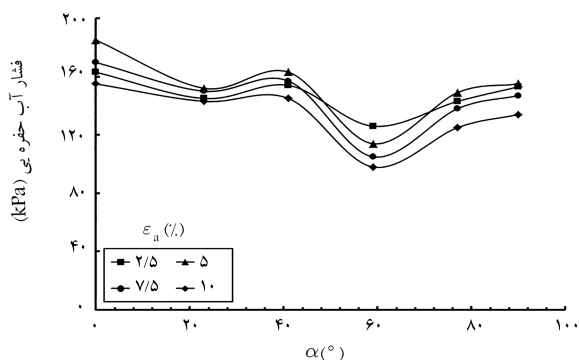


ب) مارن زیتونی.

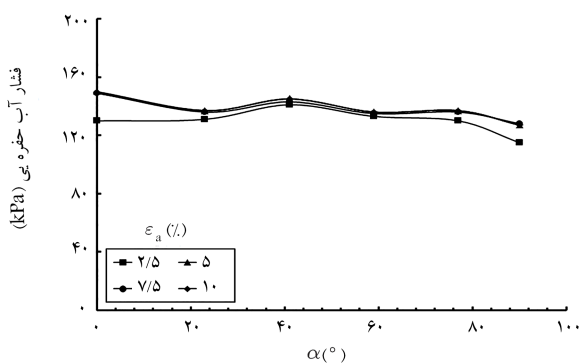
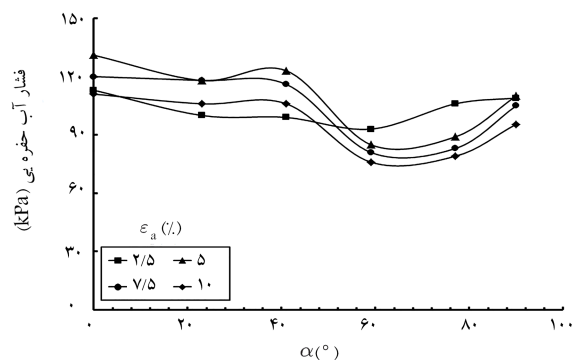


الف) مارن زرد؛

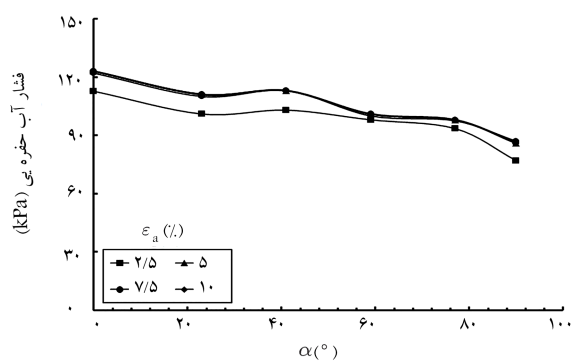
شکل ۱۰. تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی بیشینه در خاک‌های الف) مارن زرد، ب) مارن زیتونی.



الف و ب) خاک مارن زرد به ترتیب برای تنش محصور کننده ی ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال؛



ج و د) خاک مارن زیتونی به ترتیب برای تنش محصور کننده ی ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال.



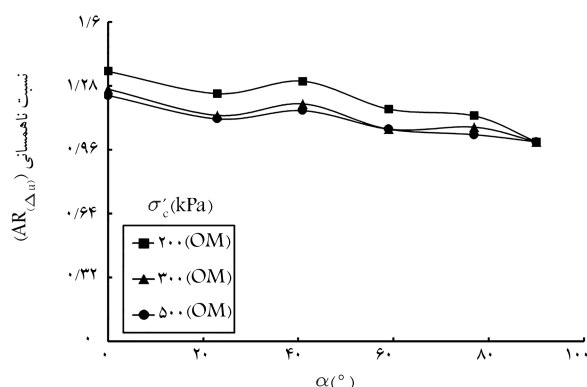
شکل ۱۱. اثر زاویه ناهمسانی در تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی در کرنش‌های ۵٪، ۷٫۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪.

قابل ملاحظه‌ای تغییر نکرده و در $\alpha_\sigma = 59^\circ$ ، Δu_{max} به کمترین مقدار خود رسیده و سپس در $\alpha_\sigma = 77^\circ$ و $\alpha_\sigma = 90^\circ$ ، مقدار آن اندکی افزایش یافته است (شکل ۱۰ الف). در خاک مارن زیتونی نیز صرف نظر از مقدار σ'_c ، با افزایش α_σ تا 41° درجه، مقدار Δu_{max} به طور قابل توجهی تغییر نکرده است؛ ولی با افزایش α_σ از 41° تا 90° درجه، Δu_{max} با نرخ ملایمی کاهش یافته و در $\alpha_\sigma = 90^\circ$ به کمترین مقدار خود رسیده است (شکل ۱۰ ب). همچنین بررسی اثر زاویه ناهمسانی در تغییرات فشار آب حفره‌ای در سطوح کرنش مختلف (یعنی ۲٫۵٪، ۵٪، ۷٫۵٪ و ۱۰٪) (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که صرف نظر از برخی استثناءها، در همه‌ی تنش‌های محصورکننده، روند تغییرات فشار آب حفره‌ای در یک سطح

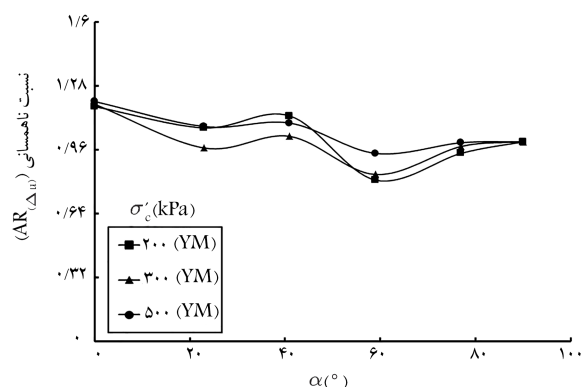
بیشترین اثر را در پارامتر چسبندگی دارد و اثر آن در زاویه اصطکاک داخلی کم است.

۲.۳. فشار آب حفره‌ای اضافی (Δu)

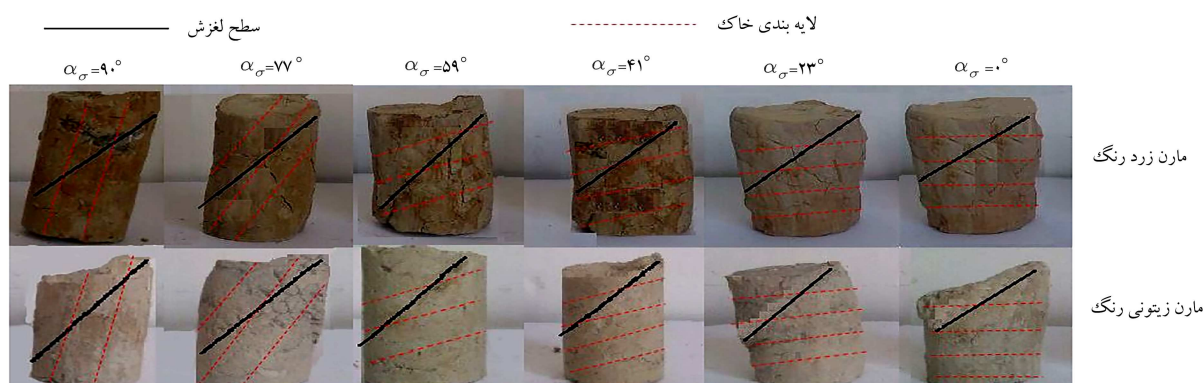
با مطالعه‌ی تغییرات فشار آب حفره‌ای ناشی از برش (بخش‌های ت، ث، ج و شکل‌های ۴ و ۵) مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه با افزایش α_σ ، فشار آب حفره‌ای کاهش یافته است. در شکل ۱۰، اثر زاویه ناهمسانی در مقادیر بیشینه‌ی فشار آب حفره‌ای اضافی (Δu_{max}) مشاهده می‌شود که مطابق آن، صرف نظر از مقدار σ'_c ، با افزایش α_σ از صفر تا 41° درجه، مقدار Δu_{max} خاک مارن زرد به طور



ب) مارن زیتونی.



الف) مارن زرد؛

شکل ۱۲. تغییرات نسبت ناهمسانی با زاویه‌ی α_σ برای خاک‌های مارن زرد و مارن زیتونی.

شکل ۱۳. سطح لغزش نمونه‌های آزمایش شده.

زاویه‌ی α_σ بین ۴۵ و ۹۰ درجه گزارش شده است. نسبت ناهمسانی مقاومت برای خاک‌های مارن زرد و زیتونی به ترتیب از ۰/۸۲ تا ۱/۲۶ و ۱/۰ تا ۱/۴۳ تغییر کرده است. این نسبت در مطالعات پیشین برای نمونه‌های خشک بازسازی شده بین ۰/۷۵ تا ۱/۲۸ و برای نمونه‌های مرطوب بازسازی شده بین ۰/۵۹ تا ۱/۰۵ گزارش شده است.^[۱۹] در مطالعه‌ی دیگری، مقدار نسبت ناهمسانی مقاومت برای نمونه‌های خشک و مرطوب به ترتیب ۱/۰۴ و ۱/۲۳ بوده است.^[۲۰]

برای خاک‌های مارن زرد و زیتونی، نسبت ناهمسانی در فشار آب حفره‌یی به ترتیب از ۰/۸۲ تا ۱/۲ و ۱/۰ تا ۱/۳۵ تغییر می‌کند. این تذکر لازم است که تاکنون مطالعه‌یی در مورد اثر ناهمسانی در فشار آب حفره‌یی در خاک‌های چسبنده انجام نشده است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو نوع خاک مارن، علی‌رغم کاهش فشار آب حفره‌یی، مقاومت برشی نیز کاهش یافته است، که برخلاف روند مورد انتظار، بر اساس مفاهیم پایه‌ی مکانیک خاک است و کاهش مقاومت، دلیل دیگری دارد.

علت کاهش در مقاومت را می‌توان به نحوه‌ی قرارگیری سطح لغزش نسبت به امتداد لایه‌بندی خاک‌ها نسبت داد. برای این منظور، سطوح لغزش نمونه‌های آزمایش شده در شکل ۱۳ و همچنین زاویه‌ی سطح لغزش (θ_f) هر یک از نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌اند. می‌توان با مقایسه‌ی امتداد سطوح لغزش نمونه‌ها و با ارزیابی آن‌ها نسبت به جهت لایه‌بندی به تفسیر رفتارهای مشاهده شده پرداخت. مطابق شکل ۱۳، با تغییر α_σ ، زاویه‌ی بین سطح لغزش و جهت لایه‌بندی (β) تغییر می‌کند، به طوری که با زیاد شدن α_σ ، مقدار زاویه‌ی β کم می‌شود؛ این بدین معنی

گردد که با زاویه‌ی α_σ مشابه روند تغییرات فشار آب حفره‌یی پیشین‌هی ارائه شده در شکل ۱۰ است.

برای بررسی اثر ناهمسانی در فشار آب حفره‌یی، نسبت ناهمسانی فشار آب حفره‌یی با تقسیم Δu_{max} نمونه با زاویه‌ی دلخواه ($\Delta u_{max}(\alpha_\sigma)$) بر $\Delta u_{max}(\alpha_\sigma = 90^\circ)$ نمونه‌ی تهیه شده در امتداد لایه‌بندی ($\Delta u_{max}(\alpha_\sigma = 90^\circ)$)، به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف شده است:

$$AR_{\Delta u} = \frac{\Delta u_{max}(\alpha_\sigma)}{\Delta u_{max}(\alpha_\sigma = 90^\circ)} \quad (2)$$

تغییرات مقادیر $AR_{\Delta u}$ در برابر زاویه‌ی α_σ برای هر دو نوع خاک در فشارهای محصورکننده‌ی مختلف در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، که مطابق آن مقدار $\Delta R_{\Delta u}$ تقریباً مستقل از فشار محصورکننده بوده و مقداری متغیر از ۰/۸ تا ۱/۱۷ برای مارن زرد و از ۱/۰ تا ۱/۳۵ برای مارن زیتونی داشته است.

۴. بحث در نتایج

ملاحظه شد که مقاومت برشی خاک مارن زرد در $\alpha_\sigma = 59^\circ$ و در مارن زیتونی در $\alpha_\sigma = 90^\circ$ ، کمترین مقدار را دارد و نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات قبلی سازگار است.^[۲۷، ۲۸، ۲۹] در مطالعات پیشین، بسته به نوع خاک، فشار محصورکننده، عادی تحکیم یافته بودن یا نسبت بیش تحکیمی نمونه‌ها، کمترین مقاومت برشی در

جدول ۳. سطح لغزش (θ_f) و زاویه β برای نمونه‌های آزمایش شده تحت تنش محصورکننده 500° کیلوپاسکال.

نوع خاک	α_σ (درجه)					
	۰	۲۳	۴۱	۵۹	۷۷	۹۰
مارن زرد	۴۷(۴۷)†	۵۰(۲۷)	۵۱(۱۰)	۵۵(۴)	۵۲(۲۴/۵)	۴۹(۴۰/۵)
مارن زیتونی	۴۶(۴۶)	۴۸(۲۵)	۴۹(۸)	۴۹(۱۰)	۵۰(۲۷)	۶۵(۲۵)

† اعداد داخل پرانتز، مقادیر زاویه β هستند.

زرد به ترتیب برابر با 32% ، 31% و $20/4\%$ و مقادیر مشابه برای مارن زیتونی به ترتیب مساوی با 30% ، $29/7\%$ و $21/8\%$ بوده است.

— نسبت ناهمسانی در مقاومت برشی برای σ'_e ‌های مختلف در مارن زرد از 82° تا 26° و برای مارن زیتونی از 1° تا 43° تا متغیر بوده است.

— در هر دو نوع خاک با افزایش زاویه ناهمسانی، فشار آب حفره‌یی اضافی کاهش یافته است.

— نسبت ناهمسانی فشار آب حفره‌یی تقریباً مستقل از فشار محصورکننده بوده و مقدار آن برای مارن زرد از 8° تا 17° و برای مارن زیتونی از 1° تا 35° تغییر داشته است.

— نتایج نشان می‌دهند که در خاک مارن زرد با تغییر زاویه ناهمسانی، زاویه بین سطح لغزش و امتداد لایه‌بندی (β) تغییر کرده است، به طوری که با زیاد شدن α_σ مقدار زاویه β کم شده است؛ این بدین معنی است که سطح لغزش به امتداد لایه‌بندی نزدیک‌تر و باعث کاهش مقاومت برشی شده است. ولی در خاک مارن زیتونی با توجه به تأثیرگذاری زیاد پارامتر چسبندگی و کمتر بودن مقدار آن، در نمونه‌ی α_σ برابر 90° درجه، کمترین مقدار مقاومت در نمونه‌ی مذکور مشاهده شده است.

— از نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که ناهمسانی در رفتار خاک، ظرفیت باربری پی‌ها و همچنین پایداری شیب‌ها تأثیر می‌گذارد. همچنین، می‌تواند مقادیر تغییرشکل‌های سازه‌های خاکی را تحت تأثیر قرار دهد.

است که سطح لغزش به جهت لایه‌بندی نزدیک‌تر می‌شود و باعث کاهش مقاومت برشی می‌شود. از داده‌های جدول ۳ ملاحظه می‌شود که در خاک YM در نمونه با $\alpha_\sigma = 59^\circ$ ، β کمترین مقدار را دارد، که مربوط به نمونه با کمترین مقاومت است و پس از آن با افزایش β ، نمونه‌ها مقاومت بیشتری را از خود نشان داده‌اند. در خاک OM نیز علی‌رغم این که کمترین مقدار β مربوط به نمونه با $\alpha_\sigma = 41^\circ$ است، ولی با توجه به تأثیرگذار بودن پارامتر چسبندگی و کمتر بودن مقدار آن در نمونه با $\alpha_\sigma = 90^\circ$ ، کمترین مقدار مقاومت در نمونه‌ی اخیر مشاهده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر ناهمسانی ذاتی در رفتار مکانیکی دو نوع خاک چسبنده مطالعه شده است. برای این منظور، از دستگاه نمونه‌گیر ویژه‌یی برای گرفتن نمونه‌های دست‌نخورده در زوایای 0° ، 23° ، 41° ، 59° و 77° استفاده و آزمایش‌های سه محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی نشده تحت تنش‌های محصورکننده‌ی متفاوت بر روی نمونه‌ها انجام شده است. اهم نتایج حاصل به این شرح است:

— ناهمسانی ذاتی در رفتار خاک‌های مورد مطالعه اثر دارد، به طوری که در اثر ناهمسانی، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. میزان بیشینه‌ی کاهش در مقاومت برشی در فشارهای محصورکننده 200° ، 300° و 500° کیلوپاسکال برای مارن

پانویس‌ها

1. Casagrande & Carrillo
2. Hansen & Gibson
3. Al-Rkaby
4. Hollow cylindrical apparatus
5. Attom & Al-Akhras
6. Tankiewicz
7. Varved
8. Cairncross & James
9. Yellow marl
10. Olivaceous marl

منابع (References)

1. Al-Karni, A.A. and Al-Shamrani, M.A. "Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method

of slices", *Computers and Geotechnics*, **26**(2), pp. 83-113 (2000).

2. Casagrande, A. and Carrillo, N. "Shear failure of anisotropic materials, in contribution to soil mechanics", Boston Society of Civil Engineering, Boston (1944).
3. Bjerrum, L. "Problems of soil mechanics and construction on soft clay", *In: Proc. 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, **3**, Balkema, Moscow pp. 111-159 (1973).
4. Hansen, J.B. and Gibson, R.E. "Undrained shear strengths of anisotropically technique", *Geotechnique*, **1**(3), pp. 189-204 (1949).
5. Yamada, Y. and Ishihara, K. "Anisotropic deformation characteristics of sand under three dimensional stress conditions", *Soils. Found.*, **19**(2), pp. 79-94 (1979).
6. Kamei, T. and Nakase A. "Undrained shear strength anisotropy of K_0 -Overconsolidated cohesive soils", *Soils. Found.*, **29**(3), pp. 145-151 (1989).

7. Miuram, K., Miura, S. and Toki, S. "Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation", *Soils. Found*, **26**(1), pp. 36-52 (1986).
8. Aghajani, H.F., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H. "Application of artificial neural network for calculating anisotropic friction angle of sands and effect on slope stability", *J. Cent. South. Univ*, **22**(5), pp. 1878-1891 (2015).
9. Sivakugan, N., Chameau, J.L. and Holtz R.D. "Anisotropy studies on cuboidal shear device", *J. Geotech. Geoenviron*, **119**(6), pp. 973-983 (1993).
10. Ochiai, H. and Lade, P.V. "Three-dimensional behavior of sand with anisotropic fabric", *J. Geotech. Geoenviron*, **109**(10), pp. 1313-1328 (1983).
11. Hight, D.W., Gens, A. and Symes, M.J. "The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils", *Géotechnique*, **33**(4), pp. 355-383 (1983).
12. Budiman, J.S., Sture, S. and Ko, H.Y. "Constitutive behavior of stress-induced anisotropic cohesive soil", *J. Geotech. Geoenviron*, **118**(9), pp. 1348-1359 (1992).
13. Farhadi, B. and Lashkari, A. "Influence of soil inherent anisotropy on behavior of crushed sand-steel interfaces", *Soils Found*, **57**(1), pp. 111-123 (2017).
14. Al-Rkaby, A.H.J., Chegenizadeh, A. and Nikraz, A. "Anisotropic strength of large scale geogrid-reinforced sand: experimental study", *Soils Found*, **57**(4), pp. 557-574 (2017).
15. Miura, K., Miura, S. and Toki, S. "Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation", *Soils Found*, **26**(1), pp. 36-52 (1986).
16. Lade, P.V., Rodriguez, N.M. and Van Dyck, E.J. "Effects of principal stress directions on 3D failure conditions in cross-anisotropic sand", *J. Geotech. Geoenviron. Eng*, ASCE, **140**(2) (2014). DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001005.
17. Razeghi, H.R. and Romiani, H.M. "Experimental investigation on the inherent and initial induced anisotropy of sand", *KSCE J. Civ. Eng*, **19**(3), pp. 583-591 (2015).
18. Attom, M.F. and Al-Akhras, N. "Investigation anisotropy in shear strength of clayey soils", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, **161**(5), pp. 269-273 (2008).
19. Islam, M.Sh. and Hoque, E.Q. "Directional dependency of strength in compacted Dhala clay", *J. Inst. Eng*, **31**(1), pp. 25-35 (2003).
20. Rowshanzamir, M.A. and Askari, A.M. "An investigation on the strength anisotropy of compacted clays", *Appl. Clay. Sci*, **50**(4), pp. 520-524 (2010).
21. Tankiewicz, M. "Experimental investigation of strength anisotropy of Varved clay", *Proceed. Earth Plan. Sc*, **15**, pp. 732-737 (2015).
22. Lo, K.Y. "Stability of slopes in anisotropic soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, **91**(4), pp. 85-106 (1965).
23. Cairncross, A.M. and James, R.G. "Anisotropy in overconsolidated clays", *Geotechnique*, **27**(1), pp. 31-36 (1977).
24. Soroush, A. and Soltani-Jigheh, H. "Effects of shear strength anisotropy on stability of earth structure", *54th Can. Geotech. Conf*, pp. 1110-1114 (2001).
25. ASTM D 2487, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", Annual Book of ASTM Standards, 04.08 (2006).
26. ASTM D 4767, "Standard test methods for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils", Annual Book of ASTM Standards, 04.08 (2011).
27. Liao, H.J. and Su S.F. "Base stability of grout pile-reinforced excavation in soft clay", *J. Geotech. Geoenviron*, **138**(2), pp. 184-192 (2012).