

# ارزیابی تأثیر چرخش تنش‌های اصلی اولیه در رفتار ناهمسان ماسه در شرایط زهکشی شده

Original Article

هادی محمدزاده روهیانی\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا

حمیدرضا رازقی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

محمدجواد صفاریان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا

در پژوهش حاضر، تأثیر چرخش تنش‌های اصلی اولیه در رفتار ناهمسان ماسه‌ی فیروزکوه نیمه‌متراکم با استفاده از دستگاه پیچش استوانه‌ی توخالی بررسی شده است. نمونه‌های ماسه‌ی فیروزکوه با روش بارش خشک ساخته شده و در مرحله‌ی تحکیم تحت تنش‌های ناهمسان با نسبت تنش‌های اصلی  $(R_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = 2)$  و زوایای تنش‌های اصلی مختلف قرار گرفته‌اند. در مرحله‌ی بارگذاری، تنش انحرافی در شرایط زهکشی شده با کنترل زاویه‌ی اضافه‌ی تنش‌های اصلی تا گسیختگی نمونه افزایش یافته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که رفتار تنش - کرنش و مقاومت برشی نمونه‌های ماسه‌ی نیمه‌متراکم در شرایط زهکشی شده تحت تأثیر زاویه‌ی تنش‌های ناهمسان اولیه است. نمونه‌های تحکیم‌یافته تحت تنش‌های ناهمسان اولیه، مقاومت برشی و سختی کمتری نسبت به نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی همسان نشان می‌دهند. هم‌راستایی اضافه‌ی تنش‌های وارده با تنش‌های ناهمسان اولیه باعث کاهش نسبی مقاومت برشی و سختی برشی ماسه می‌شود و ضریب ناهمسانی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** رفتار ناهمسان ماسه، شرایط تنش‌های اولیه، چرخش تنش‌های اصلی، دستگاه پیچش استوانه‌ی توخالی، ماسه‌ی فیروزکوه.

## ۱. مقدمه

ناهمسانی القایی اولیه، که در هنگام تشکیل یا تحکیم خاک ایجاد می‌شود، می‌تواند تأثیر به‌سزایی در رفتار خاک به‌خصوص سختی آن تحت بارهای وارده داشته باشد.<sup>[۱]</sup> بنابراین بررسی شرایط تنش‌های وارد بر خاک در حین تحکیم، شامل نسبت تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه و زاویه‌ی اعمال تنش‌های اصلی و مطالعه‌ی تأثیر آن‌ها در رفتار خاک، اهمیت زیادی دارد.

در دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه‌ی رفتار ناهمسان ماسه با چرخش تنش‌های اصلی توسط دستگاه پیچش استوانه‌ی توخالی صورت پذیرفته است. بخش قابل توجهی از آن‌ها،<sup>[۲-۴]</sup> رفتار ناهمسان ماسه را در شرایط زهکشی نشده بررسی کرده‌اند. نمونه‌های ماسه‌ی تحت تحکیم همسان قرار گرفتند و سپس با ثابت نگه‌داشتن تنش کل متوسط بارگذاری شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش زاویه تنش اصلی بیشینه نسبت به راستای قائم  $(\alpha)$ ، رفتار تنش - کرنش ماسه نرم‌تر می‌شود و مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی آن کاهش می‌یابد.

شیبویا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۲)،<sup>[۵]</sup> آزمایش‌هایی با شرایط مشابه شیمز<sup>۲</sup> و

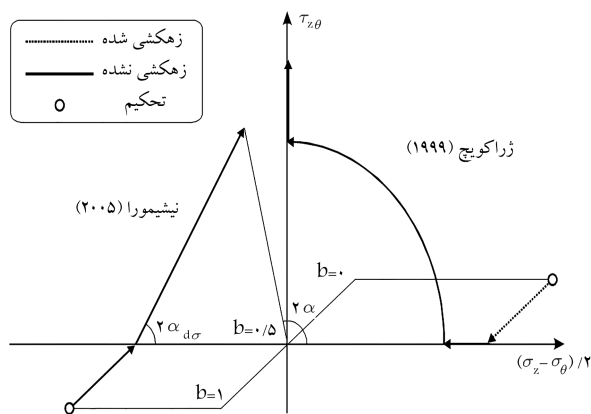
در طبیعت رفتار خاک‌ها بنا به دلایل مختلف ناهمسان و در راستای مختلف متفاوت است. در بیشتر مسائل ژئوتکنیکی، مانند: پی‌ها، گودبرداری‌ها و خاکریزها، تنش‌های اصلی مشابه شکل ۱ در راستای مختلف اعمال می‌شوند؛ در حالی که در آزمایش‌های معمول، مانند سه‌محوری فشاری، رفتار خاک فقط در یک راستای خاص بررسی می‌شود، که ممکن است ضعیف‌ترین راستا نباشد. بنابراین صرف نظر کردن از آن در بسیاری از مواقع می‌تواند خلاف جهت اطمینان باشد.

ناهمسانی خاک‌ها به دو دسته‌ی ناهمسانی ذاتی و ناهمسانی القایی تقسیم می‌شود. ناهمسانی ذاتی به نحوه‌ی رسوب‌گذاری و قرارگیری دانه‌ها در کنار هم مربوط می‌شود و بخشی از ناهمسانی خاک که تحت تأثیر تنش‌های ناهمسان در شرایط اولیه یا در هنگام بارگذاری ایجاد می‌شود، ناهمسانی القایی نامیده می‌شود.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۳/۵، اصلاحیه ۱۳۹۸/۵/۶، پذیرش ۱۳۹۸/۵/۱۶

DOI:10.24200/J30.2019.53345.2541



شکل ۲. مسیر تنش نیشیمورا در مقایسه با روش چرخش اولیه.

روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند:

$$\tan \alpha_{\sigma} = \frac{\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_{\theta}} \quad (1)$$

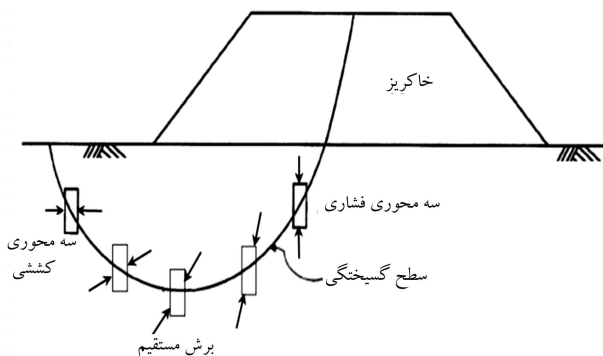
$$\tan \alpha_{\delta\sigma} = \frac{\delta\tau_{\theta z}}{\delta\sigma_z - \delta\sigma_{\theta}} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $\sigma_z, \sigma_{\theta}, \tau_{\theta z}$  به ترتیب تنش‌های قائم، مماسی و برشی ناشی از پیچش نمونه،  $\delta\sigma_z = \sigma_z - \sigma_z^0$  اضافه تنش قائم،  $\delta\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta} - \sigma_{\theta}^0$  اضافه تنش مماسی و  $\delta\tau_{\theta z} = \tau_{\theta z} - \tau_{\theta z}^0$  اضافه تنش برشی وارد شده در حین بارگذاری هستند. در حالت تحکیم همسان،  $\sigma_z - \sigma_{\theta} = \delta\sigma_z - \delta\sigma_{\theta}$  و پارامترهای  $\alpha_{\sigma}$  و  $\alpha_{\delta\sigma}$  برابر هستند. در شکل ۲، مسیر تنش مورد استفاده توسط نیشیمورا برای نمونه‌های عادی تحکیم‌یافته و پیش تحکیم‌یافته در مقایسه با مسیر تنش ژراکوویچ و جاردین (۲۰۰۰)<sup>[۹]</sup> نشان داده شده است.

مسیر تنش اشاره شده در تحقیقات دیگری نیز همچون سبیه<sup>۵</sup> (۲۰۰۰)<sup>[۱۰]</sup> و ویتل<sup>۶</sup> (۱۹۹۴)<sup>[۱۱]</sup> برای ارزیابی رفتار خاک‌ها تحت تحکیم ناهمسان استفاده شده است. ایراد عمده‌ی روش مذکور، عدم ثابت بودن  $\alpha$  در طول آزمایش است. اما برخلاف روش چرخش اولیه‌ی تنش‌ها، در روش مذکور بافت نمونه تحت تأثیر چرخش اولیه نیست و می‌توان با اطمینان بیشتری اثر شرایط تحکیم (همسان یا ناهمسان) را بررسی کرد. در پژوهش حاضر از مسیر تنش‌ی مشابه مسیر تنش نیشیمورا جهت کنترل زاویه‌ی  $\alpha_{\delta\sigma}$  استفاده شده است.

اگر یونگ<sup>۷</sup> و گانو<sup>۸</sup> (۲۰۱۶)<sup>[۱۲]</sup> با استفاده از دستگاه پیچش استوانه‌ی توخالی به بررسی رفتار ماسه‌ی توپورا تحت چرخش تنش‌های اصلی پرداخته‌اند. در آزمایش‌هایی که جهت تنش‌های اصلی ثابت نگه داشته شده بود، رفتار تنش - کرنش به‌طور قابل توجهی به ناهمسانی ذاتی بستگی داشت. همچنین نمونه‌های ماسه تحت  $\alpha_{\sigma} = 70^{\circ}$  کمترین مقاومت برشی را از خود نشان دادند. در آزمایش‌هایی که زاویه‌ی تنش‌های اصلی با چرخش همراه بود، به این نتیجه رسیدند که نمو کرنش به‌طور قابل ملاحظه‌ی به زاویه‌ی تحکیم و مقدار تنش انحرافی بستگی دارد.

یانگ و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۱۳]</sup> با استفاده از دستگاه پیچش استوانه‌ی توخالی به بررسی اثر هم‌زمان چرخش تنش‌های اصلی و تنش میانی پرداخته‌اند و دریافتند که به‌طور کلی با افزایش  $b$  (نسبت تنش میانی) رفتار خاک‌ها نرم‌تر می‌شود و مقاومت خاک به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. در بررسی اثر توأم نسبت تنش میانی و زاویه‌ی تنش‌های اصلی در تغییر حجم نمونه‌ها نیز به این نتیجه رسیدند که برای زوایای  $0^{\circ}$  و  $15^{\circ}$  و  $30^{\circ}$  درجه، عمدتاً خاک‌ها رفتار اتساعی دارند. در این بین، نمونه‌های با نسبت



شکل ۱. تغییر راستای تنش اصلی پیشینه‌ی  $\sigma_1$  در خاک بستر خاکریز.

همکاران (۱۹۸۴)، اما در شرایط تحکیم ناهمسان  $K$  انجام دادند و دریافتند که با تغییر شرایط تحکیم از حالت همسان به شرایط  $K$ ، ناهمسانی در مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی ماسه افزایش می‌یابد و با افزایش  $\alpha$ ، مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی ماسه‌ی تحت تحکیم  $K$  با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. وونگ و آرتور (۱۹۸۵)<sup>[۶]</sup> نیز ناهمسانی القائی اولیه‌ی ماسه را با استفاده از سلول برش جهت‌دار<sup>۳</sup> بررسی کردند. روش کار آن‌ها به این صورت بوده است که ابتدا نمونه را تا تنش همه‌جانبه‌ی همسان  $\sigma_1' = \sigma_3' = 14 \text{ kPa}$  زهکشی کردند و سپس با افزایش نسبت تنش  $R = \frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$  از ۱ تا ۶ در یک راستای مشخص و در حالت زهکشی شده، نمونه را تحت برش قرار دادند. همچنین نمونه را تحت همان راستا و تا تنش همسان  $\sigma_1' = \sigma_3' = 14 \text{ kPa}$  باربرداری کردند و دوباره تحت زاویه‌ی  $\alpha$  نسبت به راستای بارگذاری اولیه تحت برش قرار دادند. با افزایش زاویه‌ی  $\alpha$  در بارگذاری مجدد نسبت به بارگذاری اولیه، مقاومت و سختی خاک به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. در واقع بارگذاری اولیه تا  $R = 6$  باعث جهت‌گیری مجدد دانه‌ها و سطح تماس بین دانه‌ها و باعث ایجاد ستون‌های مقاوم در راستای تنش پیشینه‌ی اولیه می‌شود. بدین ترتیب هر چه راستای بارگذاری مجدد به راستای بارگذاری اولیه (ستون‌های مقاوم) نزدیک‌تر باشد، خاک رفتار مقاوم‌تری از خود نشان خواهد داد.

شاه‌نظری (۲۰۰۱)<sup>[۷]</sup> با استفاده از دستگاه پیچش استوانه‌ی توخالی، رفتار ماسه‌ی سست و نیمه‌سست توپورا را در هر دو حالت بارگذاری سیکلیک و مونوتونیک بررسی کرد و نمونه‌های ماسه را تحت شرایط اولیه‌ی متنوعی تحکیم ساخت، تا تأثیر تاریخچه‌ی تنش برشی و تحکیم ناهمسان را در رفتار ماسه در هر دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده مطالعه کند. بارگذاری نمونه‌ها در شرایط کنترل کرنش و در راستاهای مختلف صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در آزمایش اخیر، نمونه در شروع مرحله‌ی بارگذاری، تنش انحرافی  $q = 150 \text{ kPa}$  داشته است. در مرحله‌ی بارگذاری که با کنترل کرنش‌های اصلی و راستای آن‌ها صورت گرفته است، تنش‌های اصلی در راستای متفاوتی به نمونه اعمال شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، نمونه‌هایی که تحت تنش‌های برشی اولیه قرار گرفتند، رفتار سخت‌تری را در همان راستا از خود نشان دادند.

همچنین نیشیمورا<sup>۴</sup> (۲۰۰۵)<sup>[۸]</sup> رفتار ناهمسان نمونه‌های رسی را تحت تحکیم ناهمسان بررسی کرد و به جای ثابت نگه‌داشتن زاویه‌ی تنش اصلی پیشینه ( $\sigma_1$ ) نسبت به راستای رسوب‌گذاری ( $\alpha$ )، زاویه‌ی اضافه تنش‌های اصلی اعمال شده در حین بارگذاری ( $\delta\sigma_1$ ) را نسبت به راستای رسوب‌گذاری ( $\alpha_{\delta\sigma}$ ) ثابت نگه داشت و مقدار  $\alpha_{\sigma}$  را نیز در هنگام گسیختگی محاسبه کرد. پارامترهای  $\alpha_{\sigma}$  و  $\alpha_{\delta\sigma}$  به‌صورت

می‌تواند مطرح باشد، استفاده از نتایج آزمایش سه‌محوری فشاری جهت برآورد پارامترهای خاک است. پارامترهای مکانیکی به دست آمده از آزمایش سه‌محوری به دلیل این‌که بر روی نمونه‌هایی در راستای قائم انجام می‌شوند، معمولاً از مقادیر واقعی آن در راستاهای مختلف بیشتر هستند. بیشتر مطالعات پیشین به بررسی رفتار زهکشی نشده‌ی ماسه پرداخته‌اند. در مطالعاتی که در حالت زهکشی شده صورت گرفته‌اند، نیز مسیر تنش اعمالی در فضای تنش انحرافی ( $q$ ) نسبت به تنش مؤثر متوسط ( $P'$ ) عمدتاً متفاوت از مسیر تنش سه‌محوری فشاری است.

مسئله‌ی مهم دیگری که در مطالعات پیشین خیلی به آن پرداخته نشده است، مطالعه‌ی تأثیر زاویه‌ی تنش‌های ناهمسان اولیه در رفتار خاک است. در بیشتر مطالعات پیشین، تنش اصلی بیشینه در حین تحکیم در راستای قائم (عمود بر راستای رسوب‌گذاری) بوده است؛ در حالی که عملاً ممکن است چرخش تنش‌های اولیه از حالت قائم تحت تأثیر عواملی چون نزدیکی به سازه‌های مجاور یا گودبرداری و ... اتفاق افتد. چرخش تنش‌های اولیه می‌تواند باعث تغییر رفتار خاک شود، که باید تأثیر آن در برخی از مسائل ژئوتکنیکی، مانند احداث پی در مجاورت سازه‌های موجود، گودها، و شیروانی‌ها در نظر گرفته شود.

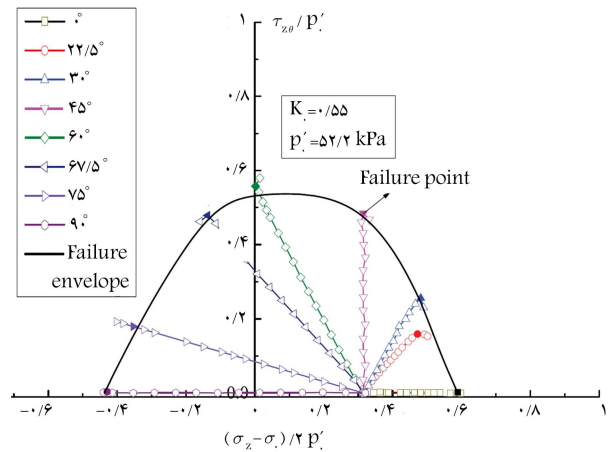
بنابراین در پژوهش حاضر، مسیر تنش  $q - p'$  در هنگام بارگذاری مشابه سه‌محوری فشاری در نظر گرفته شده و همچنین با چرخش تنش‌های اصلی در حین تحکیم، تأثیر راستای تنش‌های اولیه در رفتار ماسه در شرایط زهکشی شده بررسی شده است.

## ۲. دستگاه مورد استفاده

در پژوهش حاضر، از دستگاه پیچش استوانه‌ی توخالی موجود در مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران برای اعمال بار با زوایای مختلف استفاده شده است. دستگاه مذکور قابلیت کنترل هم‌زمان فشار سلول‌های داخلی و خارجی، فشار آب حفره‌ی، نیرو یا تغییر شکل قائم و گشتاور پیچشی یا زاویه‌ی پیچش نمونه را دارد. با استفاده از آن، نمونه‌ی خاک به شکل استوانه‌ی توخالی با قطرهای داخلی و خارجی ۶ و ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر آزمایش شده است.<sup>[۱۷]</sup> در آزمایش پیچش استوانه‌ی توخالی گشتاور پیچشی ( $T$ )، نیروی قائم ( $F_v$ )، فشار سلول خارجی ( $P_o$ ) و فشار سلول داخلی ( $P_i$ ) قابل کنترل و اندازه‌گیری هستند. با اعمال بارهای مذکور، شرایط تنش در هر المان از نمونه‌ی استوانه‌ی توخالی، شامل: تنش‌های محوری  $\sigma_z$ ،  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  و تنش برشی  $\tau_{\theta z}$  قابل تعریف هستند. بر این اساس در حین آزمایش، زاویه‌ی تنش‌های اصلی  $\alpha$  و نسبت تنش میانی  $b$  تعیین و کنترل می‌شوند. اطلاعات بیشتر در مورد دستگاه مورد استفاده در نوشتار محمدزاده (۲۰۱۴)،<sup>[۱۷]</sup> موجود است.

## ۳. مصالح مورد استفاده و روش نمونه‌سازی

در پژوهش حاضر از ماسه‌ی فیروزکوه ۱۶۱ استفاده شده است، که در شکل ۴، نمودار دانه‌بندی آن مشاهده می‌شود. ماسه‌ی استفاده شده، تیزگوشه و بد دانه‌بندی شده است، که بر اساس طبقه‌بندی متحد در رده‌ی SP قرار می‌گیرد.<sup>[۱]</sup> برای بازسازی نمونه‌ی ماسه‌ی از روش بارش خشک استفاده شده است، که در آن ماسه‌ی خشک شده در آون دقیقاً وزن می‌شود تا از مقدار مورد نظر جهت پر کردن قالب تجاوز نکند. ماسه‌ی خشک با وزن مشخص از طریق لوله‌ی مسی



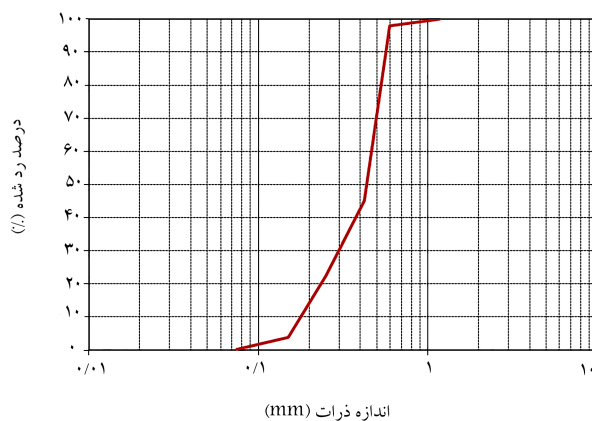
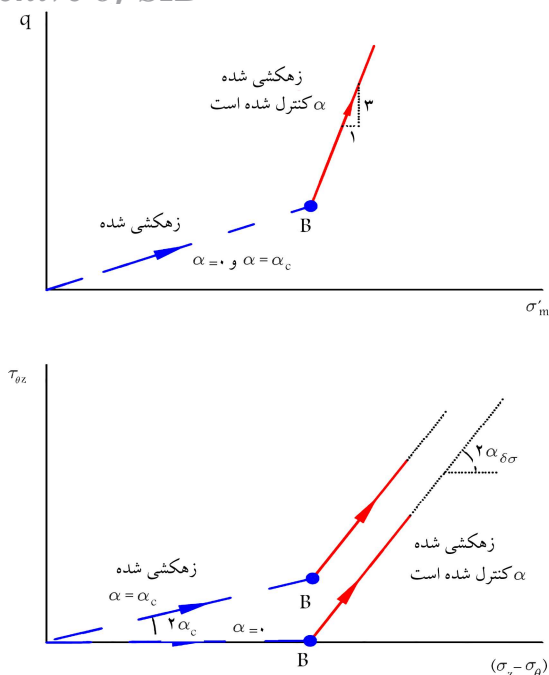
شکل ۳. مسیر تنش و پوش گسیختگی در فضای  $\tau_{\theta z} - \left[ \frac{(\sigma'_z - \sigma'_r)}{2} \right]$ .

تنش میانی  $0.2$  و  $0.5$  هیچ تمایلی به انقباض نشان نمی‌دهند، ولی نمونه‌های با نسبت تنش میانی ۱، ابتدا اندکی انقباض دارند و سپس دچار اتساع می‌شوند. جعفرزاده و زمانیان (۲۰۱۸)،<sup>[۱۲]</sup> به بررسی تأثیر ناهمسانی در خصوصیات دینامیکی ماسه‌ی سست بایلسر با استفاده از دستگاه استوانه‌ی توخالی تناوبی با در نظر گرفتن شرایط مختلف نسبت تنش میانی ( $b$ ) و زاویه‌ی تنش‌های اصلی ( $\alpha$ ) پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده با نزدیک شدن زاویه‌ی تنش‌های اصلی به  $45$  درجه، مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌های ماسه‌ی کاهش می‌یابد. همچنین نسبت تنش میانی به جز در زمانی که زاویه‌ی تنش‌های اصلی  $45$  درجه است، تأثیر چندانی در مدول برشی و نسبت میرایی نمونه‌ها ندارد. علاوه بر این، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به‌طور کلی تأثیر پارامترهای  $\alpha$  و  $b$ ، زمانی که فشار همه جانبه بیشتر می‌شود، افزایش می‌یابد.

وانگ و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۱۵]</sup> با انجام آزمایش پیچش استوانه‌ی توخالی بر روی نمونه‌ی رسی در شرایط تحکیم همسان و ناهمسان در شرایط  $K=0$  و بارگذاری با زوایای مختلف به ارزیابی مقاومت برشی رس در شرایط تحکیم مختلف و زوایای بارگذاری متنوع پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده، پوش گسیختگی در فضای  $\tau_{\theta z} - \left[ \frac{(\sigma'_z - \sigma'_r)}{2} \right]$  شبیه به بیضی (شکل ۳) است و در هر مسیر تنش، فاصله‌ی پوش ذکر شده از حالت تنش‌های اولیه، نشان‌دهنده‌ی مقاومت برشی نمونه‌ی رس است، که در حین آزمایش از خود نشان می‌دهد. بر این اساس، برخلاف نمونه‌های همسان، که بیشترین مقاومت برشی را در راستای قائم دارند، برای نمونه‌های تحت تحکیم ناهمسان  $K$ ، بیشترین مقاومت برشی در راستای بیش از  $60$  درجه مشاهده شده است.

وانگ و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۱۶]</sup> با استفاده از روش اجزاء مجزای دو‌بعدی به بررسی اثر چرخش تدریجی تنش‌های اصلی در تغییر شکل خاک‌های دانه‌ی پرداختند و دریافتند که اعمال بارگذاری سیکلی با چرخش تنش‌های اصلی به گونه‌ی که تنش انحرافی ثابت باقی بماند، باعث ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ‌تری نسبت به بارگذاری تناوبی تک‌محوری (مشابه سه‌محوری سیکلی) می‌شود. همچنین نتیجه گرفتند که در حین چرخش راستای تنش‌های اصلی نرمال، سطح تماس دانه‌ها به میزان قابل توجهی می‌چرخد، در حالی که راستای دانه‌ها تغییر چندانی ندارد و نیز تأثیر ناهمسانی ذاتی در مقاومت برشی بیشتر از تغییر کرنش حجمی در آزمایش‌های تناوبی با چرخش تنش‌های اصلی است.

یکی از مسائلی که در زمینه‌ی اثر ناهمسانی خاک در رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی



شکل ۴. دانه‌بندی ماسه‌ی فیروزکوه ۲۵ میلی‌متر.

در داخل قالب ریخته می‌شود. به منظور ثابت ماندن شرایط بارش ماسه در تمامی آزمایش‌ها، باید قطر دهانه‌ی خروجی لوله‌ی ماسی و ارتفاع بارش ثابت باشد. برای دست‌یابی به نمونه‌ی همگن با چگالی نسبی حدود ۰.۵۰، قطر دهانه‌ی خروجی لوله‌ی ماسی به مقدار ۵ میلی‌متر و ارتفاع بارش (فاصله‌ی بین دهانه‌ی خروجی و سطح نمونه) حدود ۲۵ سانتی‌متر منظور شد. در هنگام تهیه‌ی نمونه سعی شد که سرعت حرکت لوله‌ی بارش در مسیر دایروی به شعاع ۴ سانتی‌متر (میانگین شعاع داخلی و خارجی قالب)، ثابت نگه داشته شود. همچنین با معکوس کردن متناوب جهت حرکت لوله‌ی بارش در داخل قالب، اثر راستای بارش در نحوه‌ی قرارگیری دانه‌های ماسه حذف شده است.

شکل ۵. مسیر تنش‌های آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های تحت تحکیم ناهمسان قائم و غیرقائم.

مسیر تنش‌های بارگذاری در تمامی آزمایش‌ها در فضای  $q - \sigma'_m$  مشابه سه‌محوری فشاری با شیب ۱ به ۳ ( $\Delta q / \Delta \sigma'_m = 3$ ) در نظر گرفته شده است. در حین بارگذاری، فشار سلول‌ها به گونه‌ی کنترل شده است که پارامتر  $b$  نیز همانند آزمایش سه‌محوری فشاری برابر صفر ( $\sigma'_r = \sigma'_t = 0$ ) باشد. در مرحله‌ی بارگذاری به منظور اجتناب از چرخش ناگهانی تنش‌های اصلی اولیه و برای شبیه‌سازی نحوه‌ی تغییرات  $\alpha$  در حین آزمایش مشابه آنچه در واقعیت در خاک زیر پی اتفاق می‌افتد، به جای  $\alpha$  زاویه‌ی  $\alpha_{\delta\sigma}$  ثابت نگه داشته شده است.

در شکل ۵، مسیر تنش مورد استفاده در آزمایش‌های انجام شده در فضاهای  $q - \sigma'_m$  و  $\tau_{\theta z} - \frac{(\sigma'_z - \sigma'_\theta)}{2}$  نشان داده شده است. شیب مسیر تنش در فضای  $\tau_{\theta z} - \frac{(\sigma'_z - \sigma'_\theta)}{2}$  نشان‌دهنده‌ی زاویه‌ی اضافه‌ی تنش اصلی بیشینه است. در نمونه‌های تحت تحکیم ناهمسان برای شبیه‌سازی شرایط  $K_0$  نسبت تنش‌های اصلی در حین تحکیم برابر  $R_c = 2$  در نظر گرفته شده است. روش کار بدین صورت است که پس از اشباع نمونه، فشار سلول‌های داخلی و خارجی به صورت خطی و در مدت زمان ۶۰ دقیقه از ۲۱۰ به ۳۵۰ کیلوپاسکال و اضافه بار قائم از صفر به ۷۵ کیلوپاوتن افزایش یافته و پس فشار نمونه در ۲۰۰ کیلوپاسکال ثابت مانده است. سپس به مدت ۱۵ دقیقه به نمونه اجازه‌ی زهکشی داده شده و هم‌زمان تغییر حجم نمونه کنترل شده است، تا به ثبات برسد. پس از تحکیم، بارگذاری نمونه‌ها با زاویه‌ی موردنظر صورت گرفته و تا گسیختگی نمونه ادامه یافته است.

## ۵. نتایج آزمایش‌ها

### ۱.۵. نمودارهای تنش - کرنش

در شکل‌های ۶ الی ۹، رفتار تنش - کرنش ماسه در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های تحت بار با زوایای مختلف برای زوایای تحکیم ناهمسان مختلف مشاهده

## ۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

به منظور بررسی تأثیر شرایط اولیه در رفتار خاک، ۱۶ آزمایش در ۴ سری  $AC - 0$ ،  $AC - 15$ ،  $AC - 30$  و  $AC - 45$  با تحکیم ناهمسان نمونه‌ها تحت زوایای مختلف تنش‌های اصلی انجام شدند. نمونه‌های ماسه‌ی در شرایط زهکشی شده و با کنترل زاویه‌ی اضافه‌ی تنش‌های اصلی  $\alpha_{\delta\sigma}$  و مسیر تنش در فضای  $q - \sigma'_m$  تا رسیدن نمونه به گسیختگی بارگذاری شدند. به منظور برقراری شرایط زهکشی شده در طول آزمایش، بارگذاری با سرعت پایین و به گونه‌ی انجام شده است که تنش انحرافی  $q$  با سرعت تقریبی  $(5 kPa/min)$  افزایش یابد.

### ۱.۴. پارامترهای کنترلی آزمایش‌ها

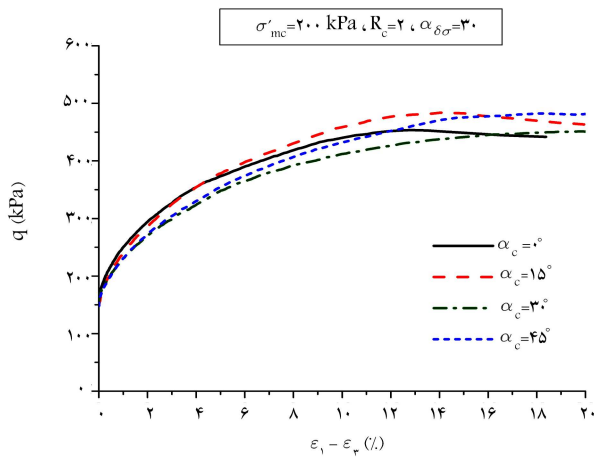
تمامی نمونه‌ها تحت تنش مؤثر متوسط  $\sigma'_{mc} = 200 kPa$  تحکیم یافته‌اند. جدول ۱، خلاصه‌ی پارامترهای کنترلی هر یک از آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد. در جدول ۱،  $\sigma'_{mc}$  تنش مؤثر متوسط در انتهای تحکیم،  $q$  تنش انحرافی،  $D_r$  چگالی نسبی نمونه در انتهای تحکیم،  $b$  نسبت تنش میانی،  $\alpha_{\delta\sigma}$  زاویه‌ی اضافه تنش اصلی بیشینه نسبت به راستای قائم،  $R_c = \sigma'_z / \sigma'_t$  نسبت تنش‌های اصلی در مرحله‌ی تحکیم و  $\alpha_c$  زاویه‌ی تنش اصلی بیشینه نسبت به راستای قائم در مرحله‌ی تحکیم هستند.

### ۲.۴. مسیر تنش‌های آزمایش‌ها

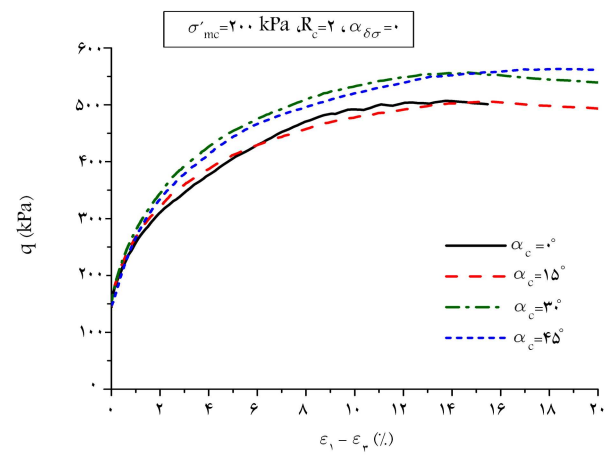
آزمایش‌های ذکر شده به منظور مقایسه‌ی رفتار خاک در شرایط چرخش تنش‌های اصلی با مسیر تنش مشابه سه‌محوری فشاری معمولی صورت پذیرفته‌اند. بنابراین

جدول ۱. خلاصه‌ی آزمایش‌های انجام شده.

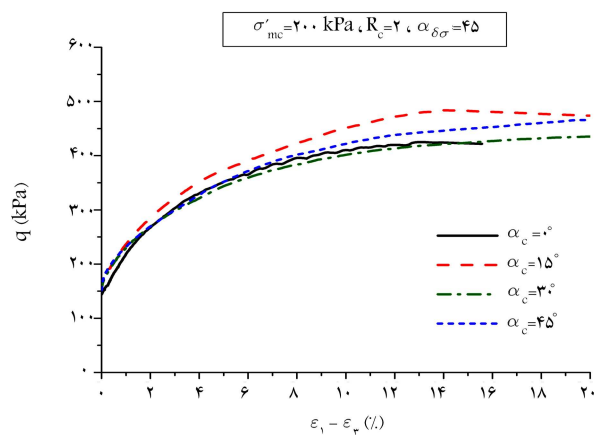
شماره‌ی آزمایش	Series	$\sigma'_{mc}$ (kPa)	$D_r$ (%)	$e_o$	$\alpha_{\delta\sigma}$	$R_c$	$\alpha_c$
۱	AC - ۰	۲۰۰	۴۹	۰٫۷۴۲	۰	۲	۰
۲	AC - ۰	۲۰۰	۵۰	۰٫۷۴۲	۱۵	۲	۰
۳	AC - ۰	۲۰۰	۵۱	۰٫۷۳۸	۳۰	۲	۰
۴	AC - ۰	۲۰۰	۵۲	۰٫۷۳۳	۴۵	۲	۰
۵	AC - ۱۵	۲۰۰	۵۰	۰٫۷۴۲	۰	۲	۱۵
۶	AC - ۱۵	۲۰۰	۵۳	۰٫۷۳۱	۱۵	۲	۱۵
۷	AC - ۱۵	۲۰۰	۵۲	۰٫۷۳۲	۳۰	۲	۱۵
۸	AC - ۱۵	۲۰۰	۵۳	۰٫۷۲۹	۴۵	۲	۱۵
۹	AC - ۳۰	۲۰۰	۵۳	۰٫۷۳۰	۰	۲	۳۰
۱۰	AC - ۳۰	۲۰۰	۵۲	۰٫۷۳۴	۱۵	۲	۳۰
۱۱	AC - ۳۰	۲۰۰	۵۲	۰٫۷۳۴	۳۰	۲	۳۰
۱۲	AC - ۳۰	۲۰۰	۵۳	۰٫۷۳۰	۴۵	۲	۳۰
۱۳	AC - ۴۵	۲۰۰	۵۰	۰٫۷۴۱	۰	۲	۴۵
۱۴	AC - ۴۵	۲۰۰	۵۱	۰٫۷۳۵	۱۵	۲	۴۵
۱۵	AC - ۴۵	۲۰۰	۵۰	۰٫۷۴۰	۳۰	۲	۴۵
۱۶	AC - ۴۵	۲۰۰	۵۲	۰٫۷۳۴	۴۵	۲	۴۵



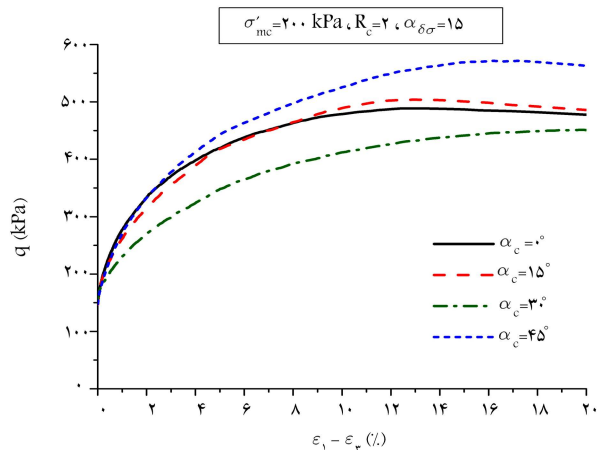
شکل ۸. رفتار تنش - کرنش نمونه‌های ماسه‌یی بارگذاری شده تحت اضافه تنش با زاویه‌ی  $\alpha_{\delta\sigma} = 30^\circ$ .



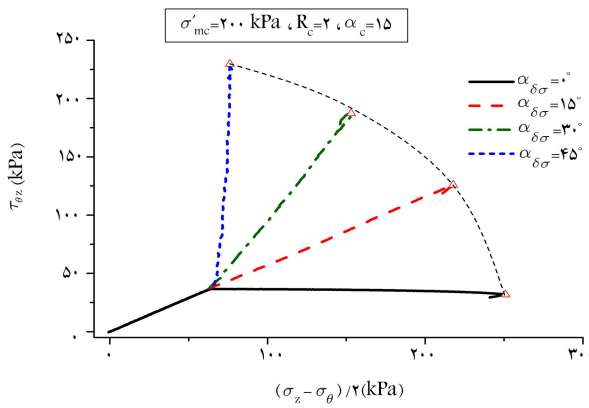
شکل ۶. رفتار تنش - کرنش نمونه‌های ماسه‌یی بارگذاری شده تحت اضافه تنش قائم  $\alpha_{\delta\sigma} = 0^\circ$ .



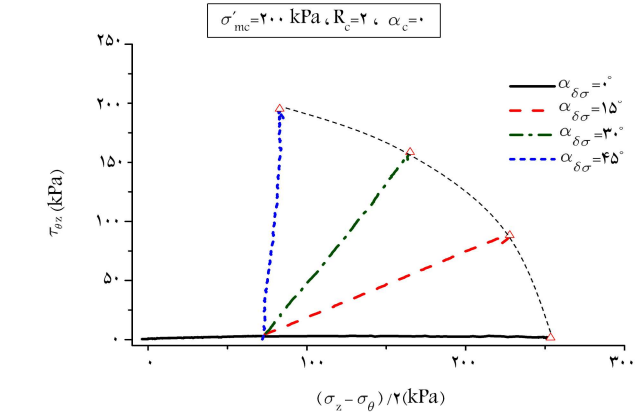
شکل ۹. رفتار تنش - کرنش نمونه‌های ماسه‌یی بارگذاری شده تحت اضافه تنش با زاویه‌ی  $\alpha_{\delta\sigma} = 45^\circ$ .



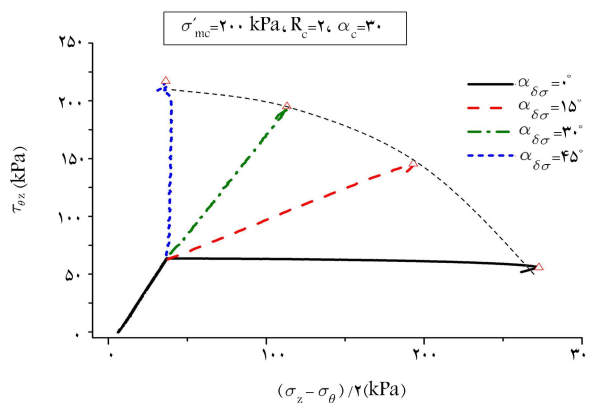
شکل ۷. رفتار تنش - کرنش نمونه‌های ماسه‌یی بارگذاری شده تحت اضافه تنش با زاویه‌ی  $\alpha_{\delta\sigma} = 15^\circ$ .



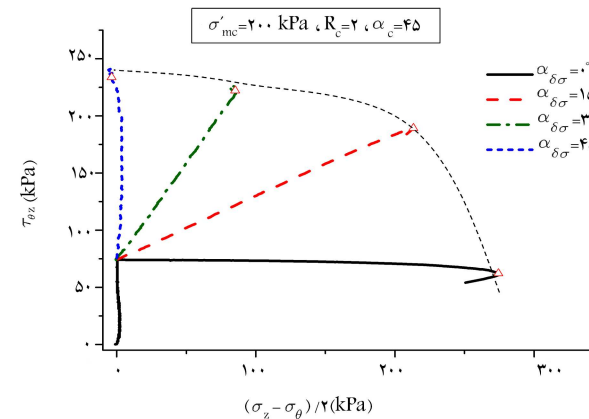
شکل ۱۱. مسیر تنش و پوش گسیختگی نمونه‌های ماسه‌بی تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان قائم با زاویه‌ی  $\alpha_c = 15^\circ$ .



شکل ۱۰. مسیر تنش و پوش گسیختگی نمونه‌های ماسه‌بی تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان قائم با زاویه‌ی  $\alpha_c = 0^\circ$ .



شکل ۱۲. مسیر تنش و پوش گسیختگی نمونه‌های ماسه‌بی تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان قائم با زاویه‌ی  $\alpha_c = 30^\circ$ .



شکل ۱۳. مسیر تنش و پوش گسیختگی نمونه‌های ماسه‌بی تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان قائم با زاویه‌ی  $\alpha_c = 45^\circ$ .

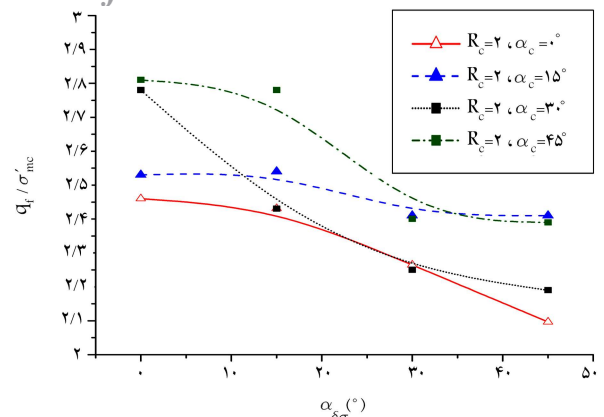
می‌شود. نمودارهای مذکور تأثیر چرخش تنش‌های اصلی در زمان تحکیم را در رفتار تنش - کرنش ماسه تحت بارگذاری با زوایای مختلف نشان می‌دهند. به دلیل اعمال تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان با نسبت تنش  $R_c = 2$  در مرحله‌ی تحکیم، در لحظه‌ی شروع بارگذاری تنش انحرافی در حدود  $15^\circ$  کیلوپاسکال است. با توجه به شکل ۶، در نمونه‌هایی که در راستای قائم بارگذاری شده‌اند، با افزایش زاویه‌ی تنش‌های اولیه نسبت به قائم ( $\alpha_c$ ) سختی و مقاومت برشی تا حدودی افزایش می‌یابد. در مورد آزمایش‌های با زاویه‌ی  $\alpha_{\delta\sigma} = 15^\circ$  (شکل ۷)، نمونه‌هایی که تحت تنش‌های اولیه با زوایای  $0^\circ$ ،  $15^\circ$  و  $30^\circ$  درجه قرار داشتند، مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌ی تحت تنش اولیه با زاویه‌ی  $45^\circ$  نشان داده‌اند. برای نمونه‌های بارگذاری شده با زوایای  $30^\circ$  و  $45^\circ$  درجه (شکل‌های ۸ و ۹) اختلاف بین نمودارهای تنش - کرنش تا حدودی کاهش یافته است.

در ادامه، تغییرات مقاومت برشی و سختی ماسه تحت تنش‌های اولیه و بارگذاری متفاوت به تفصیل بررسی شده است.

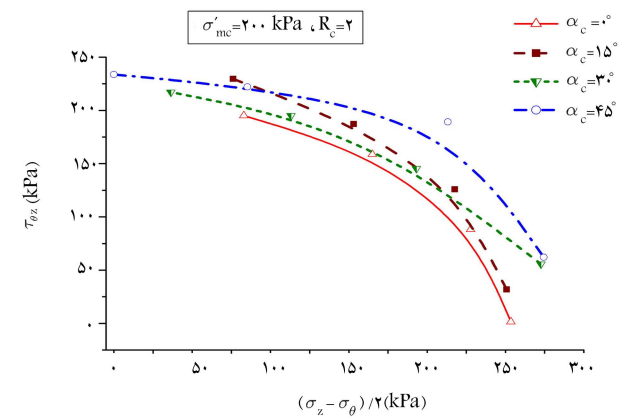
## ۲.۵. پوش مقاومت برشی

در پژوهش حاضر، آزمایش‌ها در مسیر تنش مشابهی در فضای  $q - \sigma'_m$  انجام شده‌اند. اما به دلیل تغییر زاویه‌ی تنش‌های اصلی در شرایط اولیه و بارگذاری، مسیر تنش آزمایش‌ها در فضای  $\tau_{\theta z} - \left[ \frac{\sigma'_z - \sigma'_\theta}{2} \right]$  متفاوت است. بنابراین به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، مسیر تنش آزمایش‌ها تا رسیدن به گسیختگی در فضای  $\tau_{\theta z} - \left[ \frac{\sigma'_z - \sigma'_\theta}{2} \right]$  مطالعه شده‌اند و نتایج حاصل در شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ مشاهده می‌شوند. لحظه‌ی گسیختگی در هر کدام از نمودارها مشخص است و از به هم پیوستن نقاط مذکور، پوش گسیختگی ایجاد شده است، که در فضای  $\tau_{\theta z} - \left[ \frac{\sigma'_z - \sigma'_\theta}{2} \right]$  شبه بیضی است. در فضای مذکور، شعاع پوش گسیختگی (فاصله از مبدأ مختصات)، نشان‌دهنده‌ی مقاومت برشی خاک یا به عبارت دیگر، تنش انحرافی در لحظه‌ی گسیختگی است. در شکل ۱۴، پوش‌های گسیختگی مربوط به نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه با زوایای مختلف با هم مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی با چرخش از محور افقی ( $\alpha_{\delta\sigma} = 0^\circ$ ) به محور قائم ( $\alpha_{\delta\sigma} = 45^\circ$ )، شعاع پوش و در نتیجه مقاومت برشی کاهش یافته است. نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی  $45^\circ$  درجه، بزرگ‌ترین پوش را داشته و بیشترین مقاومت برشی را از خود نشان داده‌اند. در مقابل، نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی قائم، کوچک‌ترین پوش و کمترین مقاومت برشی را داشته‌اند. به نظر می‌رسد

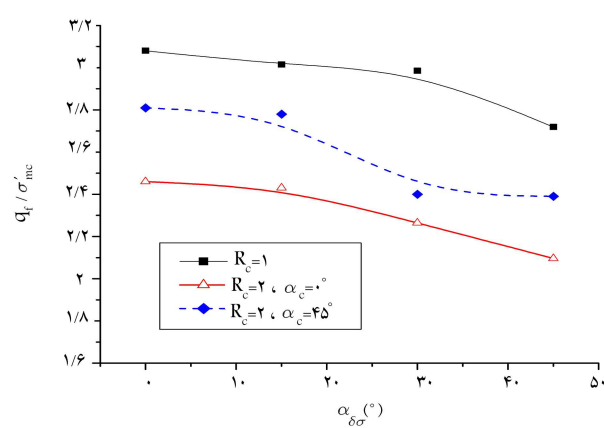
اعمال تنش‌های اولیه و باقی ماندن آن‌ها در خاک ماسه باعث ایجاد کرنش‌های اولیه در راستای مشخص و تضعیف خاک در آن راستا می‌شود. پوش نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی  $15^\circ$  و  $30^\circ$  درجه هم‌دیگر را قطع می‌کنند. در بارگذاری قائم، شعاع پوش  $\alpha_c = 15^\circ$  کوچک‌تر از  $\alpha_c = 30^\circ$  بوده است؛ ولی با افزایش زاویه‌ی بارگذاری، نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی  $15^\circ$  درجه، مقاومت بیشتری از خود



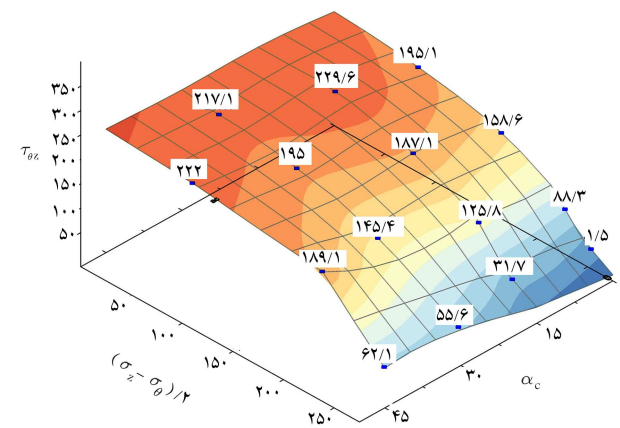
شکل ۱۶. تغییرات مقاومت برشی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  برای نمونه‌های تحت تحکیم ناهمسان با زوایای مختلف.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی پوش گسیختگی نمونه‌های ماسه‌یی تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان با زوایای مختلف.



شکل ۱۷. تغییرات مقاومت برشی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  برای نمونه‌های تحت تحکیم همسان و ناهمسان با زوایای مختلف.



شکل ۱۵. تغییرات سه‌بُعدی پوش گسیختگی نمونه‌های ماسه‌یی تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان با زوایای مختلف.

رسوب‌گذاری، که معمولاً راستای قائم است، نشان می‌دهد. اما اعمال تنش‌های اولیه باعث ایجاد کرنش‌های اولیه و تغییر جهت‌گیری سطح تماس بین دانه‌ها می‌شود. این عوامل باعث کاهش نسبی مقاومت برشی در شرایط  $\alpha_c = \alpha_{\delta\sigma}$  و تغییر شیب نمودار مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی همسان می‌شود. در شکل ۱۷، نمودار مربوط به نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی همسان  $R_c = 1$  جهت مقایسه مشاهده می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷ دو نتیجه‌ی مهم می‌توان گرفت:

- اعمال تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان به دلیل ایجاد کرنش‌های اولیه باعث کاهش مقاومت برشی می‌شود.
- زاویه‌ی اعمال تنش‌های ناهمسان اولیه در شیب نمودار و میزان ناهمسانی در مقاومت برشی تأثیرگذار است.

در شکل ۱۸، تغییرات مقاومت برشی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  و  $\alpha_c$  به صورت سه‌بُعدی نشان داده شده است. به منظور ارزیابی دقیق‌تر ناهمسانی مقاومت برشی، ضریب ناهمسانی خاک به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

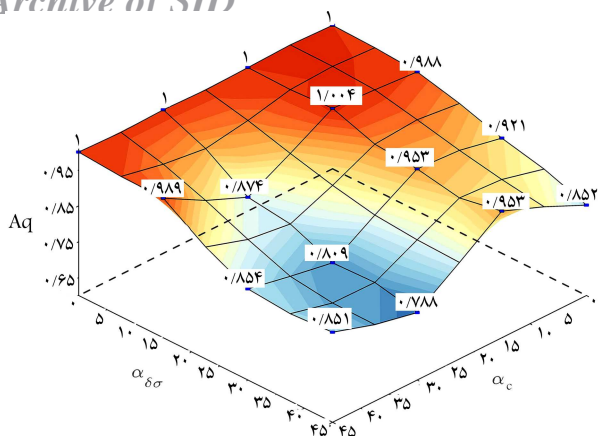
$$A_q = \frac{q_{\alpha}}{q_0} \quad (3)$$

که در آن،  $A_q$  ضریب ناهمسانی مقاومت برشی،  $q_{\alpha}$  مقاومت برشی خاک تحت

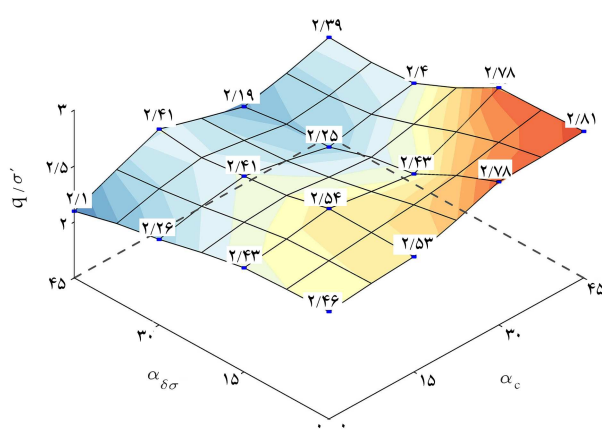
نشان می‌دهند. در شکل ۱۵، تغییرات اندازه‌ی پوش به صورت سه‌بُعدی مشاهده می‌شوند.

### ۳.۵. ناهمسانی در مقاومت برشی

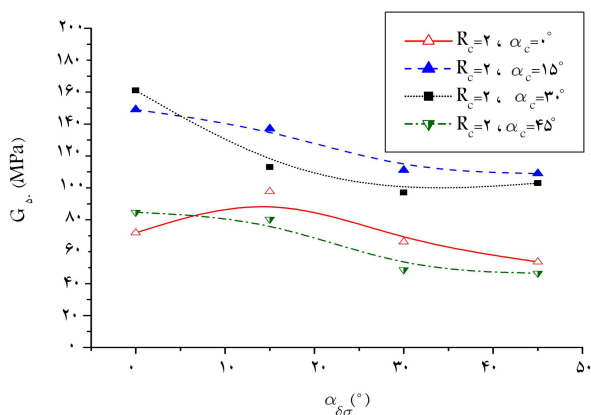
جهت بررسی تأثیر زاویه‌ی تنش‌های اصلی در زمان تحکیم در مقاومت برشی ماسه، تنش انحرافی بیشینه در هر آزمایش در لحظه‌ی گسیختگی ( $q_{peak}$ ) به عنوان مقاومت برشی نمونه مد نظر قرار گرفته است. تغییرات مقاومت برشی بیشینه‌ی نرمال ( $q_{peak} / \sigma'_{mc}$ ) برای نمونه‌های ماسه‌یی تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان با زوایای مختلف نسبت به زاویه‌ی اضافه‌ی تنش‌های اصلی ( $\alpha_{\delta\sigma}$ ) در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در نمودارهای مذکور به منظور حذف بُعد تنش، مقاومت برشی بیشینه نسبت به تنش مؤثر متوسط اولیه ( $\sigma'_{mc} = 200 \text{ kPa}$ ) نرمال شده است. با توجه به شکل اخیر، به‌طور کلی با افزایش  $\alpha_{\delta\sigma}$  مقاومت برشی خاک کاهش می‌یابد. در شرایط  $\alpha_c = 15^\circ$ ، نرخ کاهش مقاومت با افزایش  $\alpha_{\delta\sigma}$  بسیار ملایم است. شیب نزولی نمودار مقاومت برشی به مقدار  $\alpha_c$  وابسته است. با توجه به شکل ۱۶، به‌طور کلی در شرایطی که اضافه‌ی تنش‌های اصلی با تنش‌های اولیه هم‌راستا هستند ( $\alpha_{\delta\sigma} = \alpha_c$ )، شیب تغییرات نمودار مقاومت برشی کاهش می‌یابد. در واقع خاک به دلیل ناهمسانی ذاتی ناشی از بافت، بیشترین مقاومت را در راستای



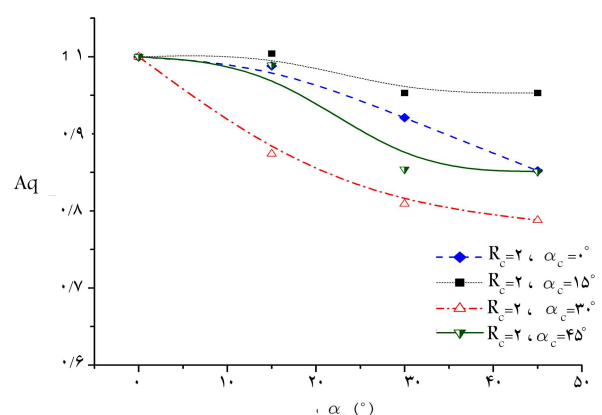
شکل ۲۰. تغییرات سه‌بعدی ضریب ناهمسانی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  و  $\alpha_c$ .



شکل ۱۸. تغییرات سه‌بعدی مقاومت برشی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  و  $\alpha_c$ .



شکل ۲۱. تغییرات مدول برشی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  برای نمونه‌های تحت تحکیم ناهمسان با زاویه‌های مختلف.



شکل ۱۹. تغییرات ضریب ناهمسانی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  برای نمونه‌های تحت تحکیم ناهمسان با زاویه‌های مختلف.

#### ۴.۵. ناهمسانی در مدول برشی ماسه

در مطالعات ژئوتکنیکی علاوه بر مقاومت برشی خاک، تغییر شکل خاک در زیر و اطراف سازه نیز کنترل می‌شود. در طراحی‌های ایمن، معمولاً ضریب اطمینان خاک زیر پی در مقابل گسیختگی برشی تحت بارهای بهره‌برداری در حدود ۲ است. در شرایط اشاره شده، ارزیابی رفتار تنش - کرنش خاک در محدوده‌ی تنش‌های انحرافی کمتر از ۵۰٪ مقاومت برشی بیشینه ( $q_{50}$ ) به منظور کنترل نشست خاک زیر پی در زمان بهره‌برداری می‌تواند حائز اهمیت باشد. تحقیقات انجام شده در زمینه ناهمسانی ماسه‌ها در حالت زهکشی شده عمدتاً بر مقاومت برشی خاک تمرکز داشته و نتایج قابل توجهی در مورد نحوه‌ی تغییر مدول برشی ماسه با چرخش تنش‌های اصلی ارائه نشده است. در پژوهش حاضر، تغییرات مدول برشی ماسه در محدوده‌ی تنش انحرافی  $q_{50}$  برای آزمایش‌های مختلف با استفاده از رابطه‌ی ۴ تعیین و ارزیابی شده است:

$$G_{50}^0 = \frac{q_{50}^0}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_{50}^0} \quad (4)$$

که در آن،  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)_{50}^0$  کرنش انحرافی معادل تنش انحرافی  $q_{50}^0$  است. در شکل ۲۱، تغییرات مدول برشی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  در حالت‌های مختلف و در شکل ۲۲، تغییرات مدول برشی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  و  $\alpha_c$  به صورت سه‌بعدی ارائه شده‌اند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش  $\alpha_{\delta\sigma}$  مدول برشی خاک کاهش یافته

بارگذاری در راستای  $\alpha$  و مقاومت برشی خاک در راستای قائم است. هر چه مقدار  $Aq$  به ۱ نزدیک‌تر باشد، میزان ناهمسانی در مقاومت برشی کمتر است. با کاهش  $Aq$  ناهمسانی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۹، تغییرات ضریب ناهمسانی برای مقادیر مختلف  $\alpha_c$  ارائه شده است. با افزایش  $\alpha_{\delta\sigma}$  ضریب ناهمسانی کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده‌ی افزایش ناهمسانی است. بیشترین ناهمسانی در شرایط  $\alpha_c = 30^\circ$  و کمترین ناهمسانی در شرایط  $\alpha_c = 15^\circ$  مشاهده می‌شود. در شکل ۲۰، تغییرات ضریب ناهمسانی نسبت به  $\alpha_{\delta\sigma}$  و  $\alpha_c$  به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. در بحث ضریب ناهمسانی، عوامل مختلف ناهمسانی، شامل: ناهمسانی القائی اولیه، ناهمسانی ذاتی و القائی در زمان بارگذاری مؤثر هستند. نتایج مطالعات محمدزاده (۲۰۱۴) [۱۷] نشان می‌دهد که برای نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه‌ی همسان در محدوده‌ی  $0 - 30^\circ$   $\alpha_{\delta\sigma}$ ، ضریب ناهمسانی که نشان‌دهنده‌ی ناهمسانی ذاتی و القائی در زمان بارگذاری است در حدود  $1/0 - 0/97 = Aq$  متغیر است. بنابراین در محدوده‌ی اخیر، سهم ناهمسانی القائی اولیه بسیار چشم‌گیر است و در حدود ۶۰٪ الی ۸۰٪ می‌تواند باشد. البته نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه با  $\alpha_c = 15^\circ$  از این قاعده مستثنی هستند و به نظر می‌رسد در شرایط ذکر شده، ناهمسانی ماسه حتی کمتر از ناهمسانی ذاتی آن به دست آمده است. در هر صورت نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تنش‌های اولیه به شدت در رفتار ناهمسان ماسه تأثیرگذار هستند و سهم ناهمسانی القائی اولیه قابل چشم‌پوشی نیست.



مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در شکل‌های ۲۱ و ۲۳ نشان می‌دهد که از یک سو، زاویه‌ی تنش‌های اولیه در مدول برشی خاک تأثیر به‌سزایی دارد و از سوی دیگر، ماسه‌ی نیمه متراکم در شرایط  $K_c$ ، که به شرایط واقعی رسوبات نزدیک‌تر است، رفتار نرم‌تری نسبت به شرایط تحکیم همسان (آزمایش سه‌محوری رایج) دارد. بنابراین در آزمایش‌های سه‌محوری با تحکیم همسان با فرض تعیین دقیق کرنش‌های برشی انتظار می‌رود که مدول برشی بیشتر از مقادیر واقعی آن به دست آید.

## ۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار ناهمسان ماسه‌ی فیروزکوه نیمه متراکم با استفاده از دستگاه پیچش استوانه‌ای توخالی بررسی شده است. نمونه‌های ماسه تحت تنش‌های ناهمسان اولیه با زوایای مختلف قرار گرفته و تأثیر شرایط تنش‌های اولیه در رفتار ناهمسان ماسه مطالعه شده است. خلاصه‌ی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده به این شرح است:

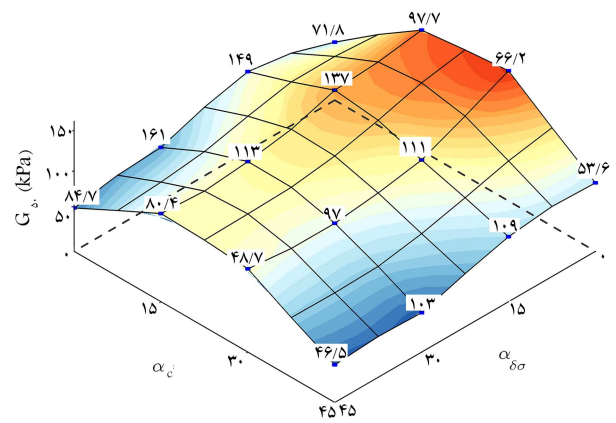
-- رفتار خاک ماسه‌ی نیمه متراکم ناهمسان بوده و به‌طور کلی با چرخش زاویه‌ی تنش اصلی بیشینه از سمت قائم به سمت افقی، مقاومت و سختی ماسه کاهش یافته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت برشی ماسه تحت بارگذاری با زاویه‌ی ۴۵ درجه ممکن است نسبت به بارگذاری قائم تا ۲۰٪ کاهش یابد. ناهمسانی در سختی برشی شدیدتر است و این کاهش برای سختی برشی تا ۴۰٪ نیز پیش‌بینی می‌شود.

-- اعمال تنش‌های ناهمسان اولیه، باعث ایجاد کرنش‌های برشی اولیه، افزایش سطح کرنش و در نتیجه کاهش سختی برشی خاک می‌شود.

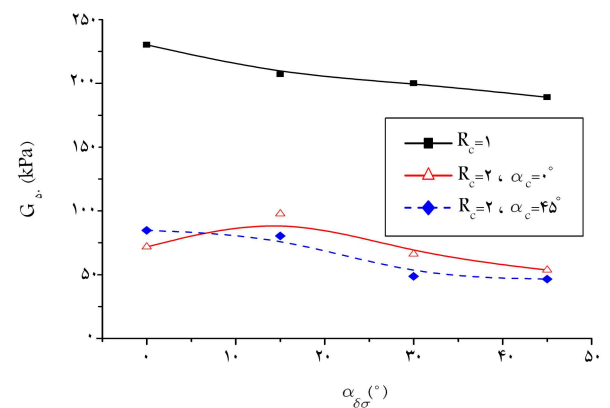
-- زاویه‌ی تنش‌های ناهمسان اولیه می‌تواند در مقاومت برشی ماسه تأثیرگذار باشد. میزان آثار آن به زاویه‌ی اعمال تنش‌های اصلی در حین بارگذاری نیز وابسته است. هم‌راستایی اضافه‌تنش‌های وارده در مرحله‌ی بارگذاری با تنش‌های ناهمسان اولیه، باعث کاهش نسبی مقاومت برشی می‌شود. البته ناهمسانی ذاتی (اثر بافت) و القائی ماسه همچنان تأثیرگذار بوده و کمترین مقاومت برشی در شرایط بارگذاری با زاویه‌ی اضافه‌تنش‌های ۴۵ درجه گزارش شده است.

-- نتایج به دست آمده و نمودارهای سه‌بعدی بیان‌گر آن هستند که در شرایط هم‌راستایی اضافه‌تنش‌های وارده در مرحله‌ی بارگذاری با تنش‌های ناهمسان اولیه، کمترین مقادیر سختی برشی در ماسه مشاهده می‌شود. به‌نظر می‌رسد شرایط تنش‌های ناهمسان اولیه در سختی برشی، که در محدوده‌ی کرنش‌های کوچک‌تری نسبت به مقاومت برشی بررسی می‌شود، تأثیرگذاری بیشتری دارد.

-- مطالعات حاضر حاکی از تأثیر قابل توجه شرایط تنش‌های اولیه در رفتار مقاومت و نشست‌پذیری خاک است. در بسیاری از پروژه‌های شناسایی ژئوتکنیک معمولاً به انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحت تحکیم همسان بسنده می‌شود و از شرایط تحکیم ناهمسان  $K_c$  یا تأثیر تنش‌های سازه‌های موجود یا مجاور صرف‌نظر می‌شود، که این امر ممکن است منجر به برآورد پارامترهای ژئوتکنیکی بیش از مقادیر واقعی و ارائه‌ی طرح ناپایم شود. بنابراین توجه بیشتر به شرایط و تاریخچه‌ی تنش‌های اولیه وارد بر خاک حائز اهمیت است.



شکل ۲۲. تغییرات سه‌بعدی مدول برشی نسبت به  $\alpha_c$  و  $\alpha_{\sigma}$  برای نمونه‌های تحت تحکیم ناهمسان با زاویه‌های مختلف.



شکل ۲۳. تغییرات مدول برشی نسبت به  $\alpha_{\sigma}$  برای نمونه‌های تحت تحکیم همسان و ناهمسان.

است. کرنش اصلی بیشینه‌ی اولیه در نمونه‌هایی که تحت تنش‌های اولیه‌ی ناهمسان قائم تحکیم یافته‌اند، تقریباً در راستای قائم اعمال شده‌اند. بنابراین با وجود بالا بودن سختی ماسه‌ها در راستای قائم (راستای رسوب) به دلیل ناهمسانی ذاتی خاک، کاهش نسبی مدول برشی خاک در اثر اعمال کرنش‌های برشی اولیه قابل پیش‌بینی است. به‌عنوان مثال با توجه به شکل ۲۱ برای نمونه‌ی تحت تنش‌های اولیه‌ی قائم  $\alpha_c = 0^\circ$ ، مدول برشی خاک برای بارگذاری قائم ( $\alpha_{\sigma} = 0^\circ$ ) کمتر از بارگذاری با زاویه‌ی  $\alpha_{\sigma} = 15^\circ$  است. به‌طور کلی در شرایطی که اضافه‌تنش در مرحله‌ی بارگذاری هم‌راستا با تنش‌های اولیه اعمال شده است، نمونه‌ی ماسه، در مدول برشی افت نسبی نشان داده است.

نکته‌ی دیگری که حائز اهمیت است، افت نسبی مدول برشی در نمونه‌های تحت تنش‌های اولیه با زاویه‌ی قائم و ۴۵ درجه است. به‌نظر می‌رسد در محدوده‌ی کرنش‌های بهره‌بردار، که کمتر از کرنش‌های گسیختگی است، شرایط تنش‌های اولیه تأثیر به مراتب بیشتری در رفتار خاک دارد. مقایسه‌ی نمودارهای ۱۶ و ۲۱ مؤید مسئله‌ی مذکور است. اعمال تنش‌های ناهمسان اولیه باعث ایجاد کرنش‌های برشی در نمونه می‌شود و در نتیجه خاک رفتار نرم‌تری از خود نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که ماسه تحت تنش‌های اولیه‌ی همسان، رفتار سخت‌تری از خود نشان دهد (شکل ۲۳). همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، نمونه‌ها تحت تنش‌های اولیه با  $R_c = 2$ ، که تقریباً مشابه شرایط  $K_c$  است، قرار گرفته‌اند.

## ۷. محدودیت‌های پژوهش

هر پژوهشی طبیعتاً با محدودیت‌هایی همراه است که باید هنگام ارزیابی نتایج به آن‌ها توجه شود. مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش حاضر به این شرح هستند: آزمایش بیچسب استوانه‌ای توخالی در پژوهش حاضر با مسیر تنش مشابه سه‌محوری فشاری و در شرایط  $b = 0^\circ$  صورت پذیرفته است. در این شرایط با در نظر گرفتن ابعاد نمونه، اعتبار نتایج آزمایش در محدوده‌ی  $\alpha = 0^\circ - 45^\circ$  برقرار بوده و برای

زوایای بیشتر، از اعتبار نتایج کاسته شده است. در پژوهش حاضر نیز آزمایش‌ها در همین محدوده انجام شده‌اند.

همچنین در پژوهش حاضر تمرکز بر کنترل زاویه‌ی تنش‌های اصلی در حین بارگذاری در شرایط زهکشی شده بوده و آزمایش‌ها به صورت کنترل تنش انجام شده است. بنابراین اعتبار نتایج تا مقاومت پیک است و استفاده از نتایج آزمایش برای مطالعه‌ی حالت پایدار و شبه حالت پایدار توصیه نمی‌شود.

## پانویس‌ها

1. Shibuya
2. Symes
3. direct shear cell
4. Nishimura
5. Seah
6. Wittle
7. Xiong

## منابع (References)

9. Zdravkovic, L. and Jardine, R.J. "Undrained anisotropy of k0-consolidated silt", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(1), pp. 178-200 (2000).
10. Seah, T.H. "Anisotropy of resedimented boston blue clay", PhD. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (1990).
11. Wittle, A.J., DeGroot, D.J., Ladd, C.C. and et al. "Model prediction of anisotropic behavior of boston blue clay", *Journal of Geotechnical Engineering, ACSE*, **120**(1), pp. 199-224 (1994).
12. Xiong, H., Guo, L., Cai, Y. and et al. "Experimental study of drained anisotropy of granular soils involving rotation of principal stress direction", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **20**(4), pp. 431-454 (2016).
13. Yang, L.T., Li, X., Yu, H.S. and et al. "A laboratory study of anisotropic geomaterials incorporating recent micromechanical understanding", *Acta Geotechnica*, **11**(5), pp. 1111-1129 (2016).
14. Jafarzadeh, F. and zamanian, M. "Effect of anisotropy on the dynamic properties of the loose babolsar sand with cyclic hollow cylinder apparatus", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **34**(2,2), pp. 103-112 (2018).
15. Wang, J., Feng, D., Guo, L. and et al. "Anisotropic and noncoaxial behavior of K 0-consolidated soft clays under stress paths wit principal stress rotation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **145**(9), (2019).
16. Wang, R., Fu, P., Zhang, J.M. and et al. "Deformation of granular material under continuous rotation of stress principal axes", *International Journal of Geomechanics*, **19**(4) (2019).
17. Mohamadzaeh, H. "Evaluation of inherent and induced anisotropy of sandy soils using hollow torsion apparatus", PhD. Thesis, Iran University of Science and Technology, (In persian) (2014).
18. Razeghi, H.R. and Mohamadzaeh, H. "Effect of fabric and initial stresses on the anisotropic behavior of sand", *Scientia Iranica*, **A21**(6), pp. 1750-1761 (2014).
1. Razeghi, H.R. and Mohamadzaeh, H. "Experimental investigation on the inherent and initial induced anisotropy of sand", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **19**(3), pp. 583-591 (2015).
2. Symes, M.J., Gens, A. and Hight, D.W. "Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand", *Geotechnique*, **34**(1), pp. 11-27 (1984).
3. Shibuya, S. and Hight, D.W. "A bounding surface for granular material", *Soils and Foundations*, **27**(4), pp. 123-136 (1987).
4. Nakata, Y., Hyodo, M., Murata, H. and et al. "Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation", **38**(2), pp. 115-128 (1998).
5. Shibuya, S., Hight, D.W. and Jardine, R.J. "Four-dimensional local boundary surfaces of an isotropically consolidated loose sand", *Soils and Foundations*, **43**(2), pp. 89-103 (2002).
6. Wong, R.K.S. and Arthur, J.R.F. "Induced and inherent anisotropy in sand", *Geotechnique*, **35**(4), pp. 471-481 (1985).
7. Shahnazari, H. "Experimental investigation on volume change and shear deformation characteristics of sand undergoing cyclic loading", PhD. Thesis, University of Tokyo (2001).
8. Nishimura, S. "Laboratory study on anisotropy of natural london clay", PhD. Dissertation, Imperial College London (2005).