

تأثیر ناهمسانی در خصوصیات دینامیکی ماسه‌ی شل بابلسر با استفاده از دستگاه استوانه‌ی توخالی تناوبی

فردین جعفرزاده (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مصطفی زمانیان* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۱۲-۱۰۳، (پادداشت نشی)

تغییر در جهت محور تنش اصلی بیشینه (α) و پارامتر تنش میانی
($b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$) به‌عنوان پدیده‌هایی رایج در بیشتر سازه‌های ژئوتکنیکی
به‌شمار می‌روند. در نوشتار حاضر، تأثیر دو پدیده‌ی ذکر شده در مدول برشی دینامیکی و
نسبت میرایی مصالح که دو پارامتر مهم در مسائل مهندسی ژئوتکنیک به‌شمار می‌روند،
بررسی شده است. به همین منظور با استفاده از دستگاه استوانه‌ی توخالی تناوبی یک
سری آزمایش تناوبی زهکشی‌نشده در شرایط مشخصی از نظر α و b ، بر روی نمونه‌های
شل ماسه‌ی بابلسر انجام شد و نتایج نشان داد که با نزدیک شدن α به ۴۵ درجه، مدول
برشی و نسبت میرایی نمونه‌های ماسه‌ی کاهش می‌یابد. در عین حال پارامتر b به جز در
شرایط $\alpha = 45$ ، تأثیر چندانی در مدول برشی و یا نسبت میرایی نمونه‌ها نداشت. همچنین
تأثیر پارامترهای α و b در مدول برشی و نسبت میرایی، با افزایش فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر
افزایش یافت.

واژگان کلیدی: مدول برشی، نسبت میرایی، ماسه، جهت محور تنش اصلی
بیشینه، پارامتر تنش میانی.

fardin@sharif.edu
m.zamanian@sbu.ac.ir

۱. مقدمه

طی آن‌ها شکل می‌گیرد)، شکل و ابعاد دانه‌هاست که به ناهمسانی ذاتی معروف
است. بخش دوم، ناهمسانی که پس از فرایند ته‌نشینی رخ می‌دهد، ناشی از
تاریخچه‌ی تنش وارد بر خاک است که به‌عنوان ناهمسانی القایی شناخته می‌شود.
با اعمال مسیرهای تنش متنوع می‌توان آثار ناهمسانی تنش و یا ناهمسانی ذاتی
را در شرایط بارگذاری استاتیکی و یا تناوبی، بررسی و آثار هر یک از پارامترهای
ناهمسانی را به تفکیک مطالعه کرد. با استفاده از تجهیزات آزمایش استوانه‌ی
توخالی می‌توان با بارگذاری کنترل‌شده، رفتار خاک را تحت شرایط مشخصی
از نظر جهت محور تنش اصلی بیشینه (α) و نیز مقدار تنش میانی بررسی
کرد.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر جهت محور تنش اصلی بیشینه، پارامتر
تنش میانی ($b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$) و تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر در مدول
برشی دینامیکی و نسبت میرایی خاک ماسه‌ی در شرایط بارگذاری تناوبی است.
بنابراین تعدادی آزمایش در شرایط بارگذاری زهکشی‌نشده و نیز شرایط کنترل‌شده از
نظر α و b و تنش همه‌جانبه‌ی مختلف انجام و مقدار مدول برشی تناوبی و نسبت
میرایی نمونه‌ها با هم مقایسه شدند.

مدول برشی دینامیکی (G) و نسبت میرایی (D)، دو پارامتر شناخته‌شده‌ی
خاک در شرایط بارگذاری دینامیکی به‌شمار می‌روند. کاربرد گسترده‌ی دو
پارامتر مذکور در مسائل مهندسی ژئوتکنیک، از قبیل: آنالیز اندرکنش خاک و
سازه، ظرفیت باربری دینامیکی پی‌ها، روان‌گرایی، ارتعاشات ناشی از ترافیک،
تأثیر بارگذاری امواج ساحل و ... منجر به توسعه‌ی طیف وسیعی از روش‌های
آزمایشگاهی شده است.^[۴-۱] هر یک از روش‌های مذکور، مزیت‌ها و معایب
خاص خود را دارند که انتخاب روش بهینه باید با توجه به شرایط بارگذاری
واقعی صورت پذیرد.^[۵] بنابراین استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی مناسب، ضروری
است. دستگاه استوانه‌ی توخالی تناوبی، یکی از تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته
به‌شمار می‌رود که قابلیت‌های زیادی در کنترل و اعمال مسیرهای تنش متنوع
دارد.

به‌طور کلی ناهمسانی در ساختار خاک، تحت تأثیر دو عامل است: بخش
اول، تحت تأثیر فرایند ته‌نشینی ذرات (شرایط محیطی و زمین‌شناسی که خاک در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۷/۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۷/۱۷، پذیرش ۱۳۹۵/۸/۱۰

DOI:10.24200/J30.2018.1371

۲. پیشینه‌ی پژوهش

مطالعات زیادی بر روی مشخصات دینامیکی خاک‌های ماسه‌یی انجام شده است. [۱۴-۶] مطالعات مذکور نشان دادند که ابعاد دانه‌ها، فشار مؤثر همه‌جانبه، حالت خمیری و پارامترهای زیاد دیگری در مدول برشی و نسبت میرایی اثرگذارند. [۱۵] به جهت تعدد مطالعات انجام‌شده و به منظور عدم تداخل نتایج به‌دست آمده و نیز ساده‌سازی، مدل ساده‌یی برای بیان رفتار غیرخطی حاکم بر خاک به‌این صورت ارائه شده است. [۱۵]

مدول برشی یک مصالح کشسان ایده‌آل هرگز تحت تأثیر مقدار کرنش قرار نخواهد گرفت و نسبت میرایی آن نیز همیشه صفر باقی خواهد ماند. این دو، شرایط مرزی برای خاک به شمار می‌روند. از طرفی شن و ماسه به‌طور قابل توجهی رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند و نسبت میرایی و مدول برشی آن‌ها با کرنش برشی تغییر می‌کند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقدار غیرخطی بودن خاک با گسسته بودن دانه‌ها ارتباط مستقیمی دارد. گسسته بودن به این معناست که دانه‌های خاک به چه صورت از یکدیگر گسسته شده‌اند. این ایده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. [۱۵]

در شن و ماسه‌ها، دانه‌ها به هم مقید^۲ نیستند و اتصال آن‌ها به‌صورت تماسی و اصطکاکی است. این وضعیت را می‌توان شرایط گسستگی شدید نامید. نتایج آزمایش‌ها بر روی شن و ماسه‌ها، گسستگی شدید را در مقایسه با رس نشان می‌دهند. مقدار فشار همه‌جانبه نیز پارامتری است که در غیرخطی بودن خاک‌ها تأثیرگذار است. در فشار همه‌جانبه‌ی بالاتر، اندرکنش مصالح بالاتر می‌رود و از گسستگی آن‌ها کاسته می‌شود و شن و ماسه‌ها در فشار همه‌جانبه‌ی بالاتر، رفتار منسجم‌تری^۳ از خود نشان می‌دهند. [۱۵]

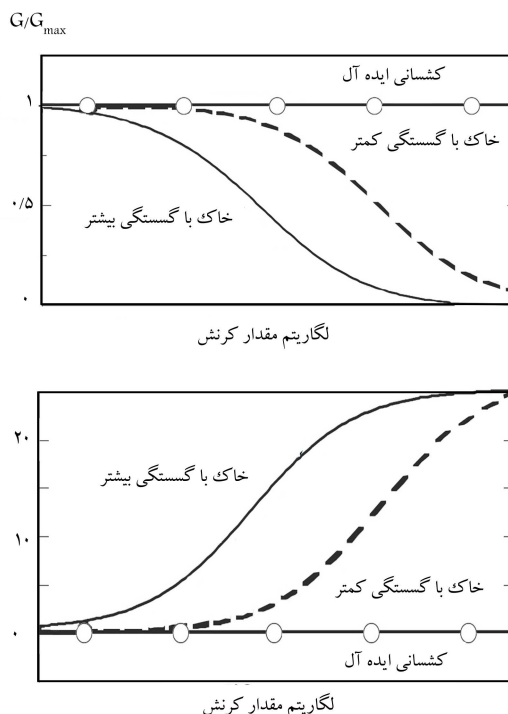
پارامترهای متعددی در مقدار مدول برشی مؤثر هستند. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، می‌توان پارامترهای مؤثر مذکور را در ۳ گروه: بسیار مهم، نسبتاً مهم و

تقریباً غیرمهم طبقه‌بندی کرد. [۱۶] مثلاً دامنه‌ی کرنش، تنش مؤثر، نسبت تخلخل و تعداد سیکل بارگذاری در دسته‌ی پر اهمیت (بسیار مهم) قرار دارند.

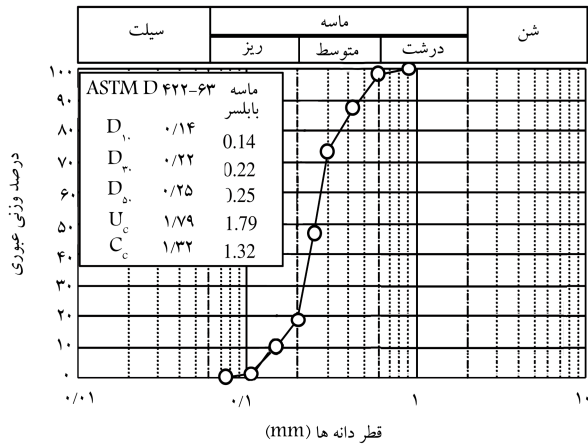
نسبت پیش تحکیم یا فتگی، تأثیر کمتری در مدول برشی در خاک‌های چسبیده و غیرچسبیده دارد. مثلاً پارامتر مذکور باعث افزایش G_{max} می‌شود که به حالت خمیری نمونه نیز بستگی دارد، به طوری که در خاک غیرخمیری، تقریباً بدون تأثیر است. برای مثال، مشخصات دانه‌ها به خودی خود در مقدار مدول برشی تأثیر نمی‌گذارند، مگر اینکه تأثیر آن‌ها در مقدار نسبت تخلخل و مقاومت نمونه در نظر گرفته شود. با توجه به این موضوع که دو پارامتر مذکور به‌عنوان پارامترهای مؤثر در نظر گرفته می‌شوند، می‌توان تأثیر مشخصات دانه‌ها را در مقدار مدول برشی، غیرمهم در نظر گرفت. تحقیقات نشان داد که ۳ پارامتر کرنش برشی، تنش مؤثر همه‌جانبه و تعداد سیکل بارگذاری، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در نسبت میرایی در خاک‌های ماسه‌یی هستند. مقدار نسبت میرایی با افزایش کرنش برشی، افزایش می‌یابد و این در حالی است که افزایش در مقدار تنش مؤثر همه‌جانبه موجب کاهش در مقدار نسبت میرایی می‌شود. در نهایت با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، مقدار نسبت میرایی خاک کاهش می‌یابد. [۱۶-۱۸]

همان‌طور که نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند، بخش عمده‌ی مطالعات پیشین در پارامترهای تأثیرگذار در خصوصیات دینامیکی خاک‌های ماسه‌یی بر مشخصات فیزیکی خاک، تنش همه‌جانبه، کرنش برشی، بسامد بارگذاری و تعداد سیکل بارگذاری متمرکز شده است، [۱۷-۲۱] و به تأثیر ناهمسانی در ماسه اعم از ناهمسانی ذاتی و یا ناهمسانی القایی به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در رفتار ماسه و پاسخ آن به بارگذاری سیکلی کمتر توجه شده است که شاید یکی از دلایل مهم آن دشواری‌های موجود برای مدل‌سازی شرایط ناهمسان خاک است. از جمله مطالعاتی که اخیراً با استفاده از دستگاه استوانه‌ی توخالی بر روی ماسه انجام شده است، می‌توان به برخی مطالعات، [۲۲، ۲۳] اشاره کرد که البته بخش اصلی آن‌ها بر روی بررسی آثار ناهمسانی و درصد ریزدانه‌ی غیرخمیری در شرایط بارگذاری استاتیکی متمرکز بوده است. در مطالعه‌ی انجام‌شده‌ی اخیر، [۲۲] اثر مصالح سیلنتی در رفتار نمونه‌های ماسه‌یی برای شرایط خاص بارگذاری نظیر غیرهمسان بودن اولیه‌ی تنش، اثر درصد مصالح سیلنتی، مقدار فشار همه‌جانبه، نسبت تنش تحکیمی و نیز آثار مقدار تنش اصلی میانی در سختی، مقاومت و الگوی تغییرات فشار آب حفره‌یی نمونه‌های ماسه‌یی و ماسه‌یی سیلنت‌دار ارزیابی و بررسی شده است. تفاوت اساسی مطالعه‌ی انجام‌شده‌ی اخیر، [۲۲] با پژوهش حاضر در روش بارگذاری نمونه‌هاست. در پژوهش حاضر، نمونه‌ها به‌صورت تناوبی آزمایش و آثار بارگذاری تناوبی در پارامترهای دینامیکی خاک (مدول برشی و نسبت میرایی) مطالعه شده‌اند، در حالی که در مطالعه‌ی ذکرشده‌ی اخیر، [۲۲] آثار بارگذاری استاتیکی در شرایط ناهمسان و نیز آثار درصد ریزدانه در رفتار خاک بررسی شده است.

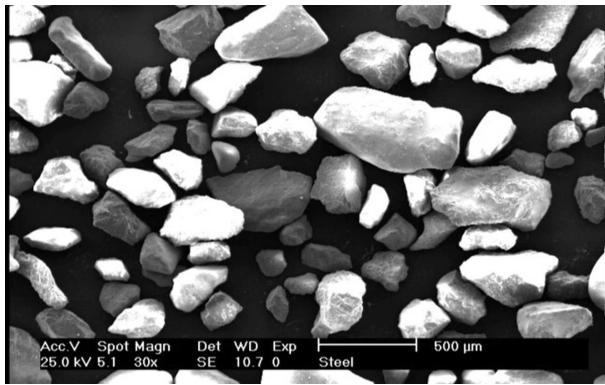
با بررسی متون فنی می‌توان مشاهده کرد که تأثیر عوامل مختلفی در پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌یی بررسی شده است. یکی از عوامل تأثیرگذار در رفتار ماسه، جهت محور بارگذاری است، که تاکنون در مطالعات انجام‌شده، آثار پارامتر مذکور در خصوصیات دینامیکی خاک به‌صورت مدون بررسی نشده است. از طرف دیگر، با توجه به محدودیت‌های تجهیزات مرسوم آزمایشگاه‌های مکانیک خاک، غالباً از آثار تنش میانی نیز صرف‌نظر شده است، که البته در متون فنی مختلف به تأثیر آن در رفتار خاک اشاره شده است. [۲۲، ۲۳] در پژوهش حاضر، تأثیر جهت محور تنش اصلی پیشینه (α)، پارامتر تنش میانی (b) و تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر (σ'_{vm}) در پارامترهای تناوبی ماسه‌ی بابلسر در شرایط بارگذاری تناوبی بررسی شده است. به همین منظور آزمایش‌های مدونی جهت بررسی تأثیر دو پارامتر α و b در پارامترهای



شکل ۱. تأثیر گسسته بودن در تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی خاک‌ها. [۱۵]



شکل ۳. منحنی دانه بندی ماسه‌ی بابلسر.



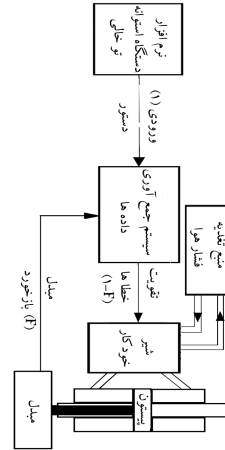
شکل ۴. تصویر میکروسکوپی دانه‌های ماسه‌ی بابلسر.

جدول ۱. مشخصات دستگاه آزمایش نمونه‌ی استوانه‌یی توخالی. [۲۴]

مشخصه	واحد	ظرفیت	دقت
قطر خارجی	cm	۱۰	-
قطر داخلی	cm	۶	-
ارتفاع نمونه	cm	۲۰	-
نیروی محوری	kN	± ۱۰	۰/۱۰۰۱
لنگر پیچشی	N.m	± ۳۰۰	۰/۰۱
تغییرات حجم	cc	۱۰۰	۰/۱
تغییر مکان شعاعی	mm	± ۵	میکرون ۱/۵
تغییر مکان محوری	mm	± ۲۵	۰/۰۱
فشار آب حفره‌یی	kPa	۱۰۰۰	۰/۱
فشار داخلی سلول	kPa	۱۰۰۰	۰/۱
فشار خارجی سلول	kPa	۱۰۰۰	۰/۱
تغییرات حجم سلول داخلی	cc	۱۰۰	۰/۱

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌ی بابلسر.

ویژگی	ماسه‌ی بابلسر
چگالی ویژه (Gs)	۲/۷۵۳
نرخ تخلخل بیشینه	۰/۷۹۰
نرخ تخلخل کمینه	۰/۵۳۱



شکل ۲. سیستم کنترلی حلقه‌ی بسته‌ی دستگاه استوانه‌یی توخالی سیکلی.

دینامیکی خاک ماسه‌یی انجام شده است. به جهت تدقیق نتایج و نیز بررسی آثار تنش همه‌جانبه، آزمایش‌ها در دو مقدار تنش همه‌جانبه‌ی مختلف انجام شده‌اند.

۳. دستگاه مورد استفاده

جهت انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر، از دستگاه استوانه‌یی توخالی سیکلی استفاده شده است، که مشخصات اصلی آن، محدوده‌ی بارگذاری و نتایج قابل استحصال در جدول ۱ ارائه شده است. سیستم بارگذاری و اعمال نیروی دستگاه مذکور، پنوماتیکی بوده و از تجهیزات الکترونیکی متعددی برای اندازه‌گیری نیرو، کرنش و فشار استفاده شده است. دستگاه استوانه‌یی توخالی سیکلی، حرکت‌های مکانیکی را به سیگنال‌های الکترونیکی تبدیل می‌کند تا امکان جمع‌آوری و سنجش آن‌ها توسط دستگاه قرائت مرکزی فراهم شود. برای کنترل دقیق مقادیر تنش و کرنش، ارتباط مشخصی بین ۵ مؤلفه‌ی نرم‌افزار دستگاه، سیستم جمع‌آوری سریع اطلاعات، شیرهای اتوماتیک، محرک‌های بار محوری و ترک پیچشی و مبدل‌های بار، فشار و تغییر مکان برقرار می‌شود. کنترل مؤلفه‌های ذکر شده توسط یک حلقه‌ی بسته انجام می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. دستگاه مذکور قادر به کنترل ۵ محور مستقل نیروی محوری، ترک پیچشی، فشار سلول داخلی، فشار سلول خارجی و پس‌فشار در بسامد ۱ هرتز است. [۲۴] نمونه‌های ساخته‌شده توسط دستگاه مذکور، به قطر خارجی ۱۰۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر هستند.

۴. روش انجام آزمایش‌ها و مصالح مورد استفاده

آزمایش‌های پژوهش حاضر بر روی ماسه‌ی بابلسر (واقع بر سواحل دریای خزر) انجام شده است. با انجام آزمایش‌های شاخص براساس استانداردهای ASTM، خصوصیات مکانیکی ماسه‌ی بابلسر تعیین شد، که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. [۲۵-۲۸] با توجه به نتایج آزمایش‌های شاخص انجام شده و براساس طبقه‌بندی یونیفاید، ماسه‌ی بابلسر در رده‌ی ماسه‌های با اندازه‌ی دانه‌یی متوسط و بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی می‌شود. شکل ۳، منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی بابلسر را نشان می‌دهد. شکل ۴، عکس میکروسکوپی دانه‌های ماسه‌ی بابلسر را نشان می‌دهد که مطابق آن ماسه‌ی بابلسر با دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت است و از نظر ظاهری، شکل دانه‌ها نیمه مدور تا نیمه گوشه‌دار است.

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های آزمایش‌شده.

نمونه‌ی آزمایش‌شده	σ'_{om}	b	α درجه	$Dr(\%)$	(e)
۱	۵۰	۰٫۱	۱۰	۲۶	۰٫۷۲۳
۲	۵۰	۰٫۱	۳۰	۲۴	۰٫۷۲۸
۳	۵۰	۰٫۱	۴۵	۲۴	۰٫۷۲۸
۴	۵۰	۰٫۱	۶۰	۲۵	۰٫۷۲۵
۵	۵۰	۰٫۱	۸۰	۲۳	۰٫۷۳۰
۶	۵۰	۰٫۵	۱۰	۲۴	۰٫۷۲۸
۷	۵۰	۰٫۵	۳۰	۲۳	۰٫۷۳۰
۸	۵۰	۰٫۵	۴۵	۲۶	۰٫۷۲۳
۹	۵۰	۰٫۵	۶۰	۲۲	۰٫۷۳۳
۱۰	۵۰	۰٫۵	۸۰	۲۷	۰٫۷۲۰
۱۱	۵۰	۰٫۹	۱۰	۲۶	۰٫۷۲۳
۱۲	۵۰	۰٫۹	۳۰	۲۳	۰٫۷۳۰
۱۳	۵۰	۰٫۹	۴۵	۲۲	۰٫۷۳۳
۱۴	۵۰	۰٫۹	۶۰	۲۷	۰٫۷۲۰
۱۵	۵۰	۰٫۹	۸۰	۲۸	۰٫۷۱۷
۱۶	۱۵۰	۰٫۱	۱۰	۲۳	۰٫۷۳۰
۱۷	۱۵۰	۰٫۱	۳۰	۲۶	۰٫۷۲۳
۱۸	۱۵۰	۰٫۱	۴۵	۲۵	۰٫۷۲۵
۱۹	۱۵۰	۰٫۱	۶۰	۲۸	۰٫۷۱۷
۲۰	۱۵۰	۰٫۱	۸۰	۲۷	۰٫۷۲۰
۲۱	۱۵۰	۰٫۵	۱۰	۲۵	۰٫۷۲۵
۲۲	۱۵۰	۰٫۵	۳۰	۲۸	۰٫۷۱۷
۲۳	۱۵۰	۰٫۵	۴۵	۲۳	۰٫۷۳۰
۲۴	۱۵۰	۰٫۵	۶۰	۲۲	۰٫۷۳۳
۲۵	۱۵۰	۰٫۵	۸۰	۲۶	۰٫۷۲۳
۲۶	۱۵۰	۰٫۹	۱۰	۲۴	۰٫۷۲۸
۲۷	۱۵۰	۰٫۹	۳۰	۲۳	۰٫۷۳۰
۲۸	۱۵۰	۰٫۹	۴۵	۲۴	۰٫۷۲۸
۲۹	۱۵۰	۰٫۹	۶۰	۲۵	۰٫۷۲۵
۳۰	۱۵۰	۰٫۹	۸۰	۲۶	۰٫۷۲۳

از آنجا که هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر جهت محور تنش اصلی بیشینه (α) و نیز پارامتر تنش میانی (b) در پارامترهای سیکلی ماسه‌ی شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی بابلسر بود، یک‌سری آزمایش سیکلی زهکشی‌شده توسط دستگاه استوانه‌ی توخالی تناوبی انجام شد. برای ساخت نمونه‌ها نیز از روش تراکم کاهش‌یافته به روش کوبش مرطوب استفاده شد.^[۲۹] درصد تراکم نمونه‌ها در انتهای مرحله‌ی تحکیم، در محدوده‌ی ۲۲ الی ۲۸ درصد (به‌طور متوسط ۲۵٪) قرار گرفت. از عوامل مهم و مؤثر در ساخت نمونه، تأثیر تراکم لایه‌های بالایی در هنگام ساخت بر روی لایه‌های پایینی است. در صورت در نظر نگرفتن مسئله‌ی مذکور، قسمت‌های پایینی نمونه، تراکم بیشتری نسبت به قسمت‌های بالایی خواهند داشت. در روش تراکم کاهش‌یافته با معرفی پارامتری با عنوان درصد تراکم کاهش‌یافته و انتخاب درست آن برای هر لایه و به ویژه لایه‌ی اول، می‌توان به یک نمونه با تراکم یکنواخت رسید.^[۲۹] درصد تراکم نمونه‌ها در انتهای مرحله‌ی تحکیم، در محدوده‌ی ۲۲ الی ۲۸ درصد (به‌طور متوسط ۲۵٪) قرار گرفت.

برای اشباع نمونه‌ها، ابتدا گاز دی‌اکسیدکربن و سپس آب بدون هوا از درون نمونه‌ها عبور داده شدند. مرحله‌ی اشباع کامل با افزایش مرحله‌ی پس فشار و تا رسیدن مقدار ضریب اسکیمپتون (B) به حدود ۰٫۹۶ ادامه یافت. در مرحله‌ی بعد، نمونه‌ها تحت تنش همه‌جانبه‌ی ۵۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال و به‌صورت همسان تحکیم پیدا کردند. بارگذاری سیکلی نمونه‌ها، تحت شرایط کنترل‌شده‌ی α (۱۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۸۰ درجه) و b (۰٫۱، ۰٫۵، ۰٫۹) و نیز نسبت ثابت تنش تفضلی بیشینه به مقدار تنش انتهای تحکیم ($q/\sigma'_{vm} = ۰٫۲$)، انجام شد، به‌طوری‌که مقدار پارامترهای α ، b در طول هر آزمایش ثابت نگه داشته شد. با توجه به تأثیر کم بسامد بارگذاری در پاسخ نمونه‌ها به بارگذاری سیکلی و همچنین به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر فشار آب حفره‌ی اضافی، بسامد بارگذاری ۰٫۲۵ انتخاب و در هر سیکل بارگذاری، ۵۰ داده ثبت شد.^[۲۹] در نهایت، ۳۰ آزمایش استوانه‌ی توخالی تناوبی بر روی نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته در شرایط بارگذاری کنترل‌شده انجام شد که مشخصات نمونه‌های آزمایش‌شده در جدول ۳ ارائه شده است.

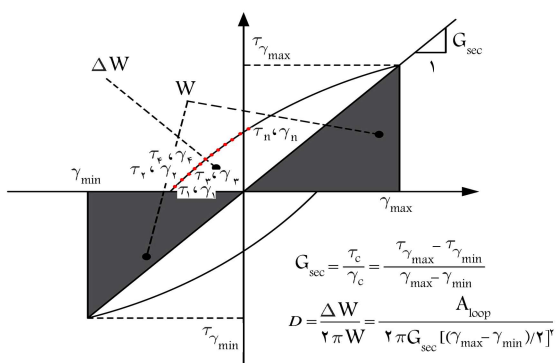
۵. نتایج آزمایش‌ها

مقدار مدول برشی و نسبت میرایی در هر سیکل بارگذاری را می‌توان از نمودار تنش- کرنش (لوپ هیستریزیس^۷) محاسبه کرد. شکل ۵، شکل شماتیک حلقه هیستریزیس و نحوه‌ی محاسبه‌ی مدول برشی سکانت^۸ و نسبت میرایی را نشان می‌دهد. با استفاده از انتگرال‌گیری عددی می‌توان مساحت حلقه هیستریزیس را محاسبه کرد. دستگاه مورد استفاده در پژوهش حاضر، تعداد ۵۰ داده در هر سیکل بارگذاری ثبت می‌کند. لذا جهت محاسبه‌ی مساحت حلقه هیستریزیس می‌توان از رابطه‌ی ۱ استفاده کرد:

$$A_{loop} = -\frac{1}{4} \left(\begin{bmatrix} \gamma_1 & \tau_1 \\ \tau_1 & \gamma_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_2 & \tau_2 \\ \tau_2 & \gamma_3 \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} \gamma_{50} & \tau_{50} \\ \tau_{50} & \gamma_1 \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

که در آن، مساحت یک چندضلعی مسطح بسته است که اضلاع آن هم‌دیگر را قطع نمی‌کنند. مختصات نقاط چندضلعی مذکور، (τ_i, γ_i) ، (τ_1, γ_1) ، (τ_2, γ_2) ، ...، (τ_{50}, γ_{50}) است که τ_i و γ_i به ترتیب کرنش و تنش برشی در نقطه‌ی i ام هستند.^[۳۲]

معمولاً تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی بررسی می‌شود.



شکل ۵. نحوه‌ی تعیین مدول برشی و نسبت میرایی در یک حلقه‌ی هیستریزیس تنش برشی بر حسب کرنش برشی.^[۳۲]

α در مدول برشی ماسه کاسته می‌شود.

برای تفسیر نتایج می‌توان از مدل توها،^[۱۵] استفاده کرد. (شکل ۱) لازم به ذکر است که در مدل ارائه‌شده‌ی توها، تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی مقایسه شده‌اند که با توجه به توضیحات ارائه‌شده، روند تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با فشار آب حفره‌ی ماندگار نیز به همین صورت خواهد بود. بنابراین از مدل توها می‌توان برای مقایسه‌ی نتایج استفاده کرد.

با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها با مدل ارائه‌شده‌ی توها، می‌توان گفت که در شرایط $\alpha = 10^\circ$ و $\alpha = 80^\circ$ نمونه‌ها رفتار منسجم‌تری دارند و با نزدیک شدن α به 45° درجه، از انسجام نمونه‌ها کاسته و رفتار کشسان کمتر و به تبع آن تغییر شکل‌پذیری بیشتری مشاهده می‌شود که به دلیل بیشتر بودن مقدار سختی محوری نسبت به سختی برشی است.

مطابق شکل ۶، مدول برشی نمونه‌ها تا رسیدن مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار به حدود 0.2° کاهش چندانی نخواهد داشت. از طرف دیگر، با افزایش فشار آب حفره‌ی ماندگار و رسیدن نسبت فشار آب ماندگار به حدود 0.6° ، تقریباً بیش از 8% از مدول برشی خاک از بین خواهد رفت. به عبارت دیگر، در نمونه‌های شل ماسه‌یی، بخش عمده‌ی فرایند کاهش سختی خاک در محدوده‌ی فشار آب حفره‌ی ماندگار (0.2° تا 0.6°) رخ می‌دهد.

تأثیر پارامتر α در تغییرات نسبت میرایی با نسبت فشار آب حفره‌ی ماندگار را می‌توان به وضوح در آزمایش‌هایی که در فشار همه‌جانبه‌ی 150° کیلو پاسکال انجام شده‌اند، مشاهده کرد (شکل ۷). مطابق شکل مذکور، در شرایط فشار همه‌جانبه‌ی 150° کیلو پاسکال، نمونه‌هایی که در شرایط بارگذاری محوری آزمایش شده‌اند ($\alpha = 10^\circ$ و $\alpha = 80^\circ$) نسبت میرایی کمتری داشته و با نزدیک شدن α به 45° درجه (مد تغییر شکل برشی)، نسبت میرایی افزایش یافته است. با مقایسه‌ی این رفتار با مدل ارائه‌شده‌ی توها مجدداً می‌توان تأیید کرد که رفتار نمونه‌هایی که در شرایط $\alpha = 10^\circ$ و $\alpha = 80^\circ$ ، آزمایش شده‌اند، منسجم‌تر^۱ و یکپارچه‌تر^۲ بوده و با نزدیک شدن α به 45° درجه، از انسجام مذکور کاسته شده است. همین روند در تغییرات نسبت میرایی با نسبت فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر در شرایط فشار همه‌جانبه‌ی 50° کیلو پاسکال مشاهده می‌شود. با این تفاوت که در شرایط $\sigma'_{vm} = 50^\circ kPa$ پارامتر α تأثیر بسیار کمتری در نسبت میرایی در مقایسه با شرایط $\sigma'_{vm} = 150^\circ kPa$ دارد. به عبارت دیگر، با افزایش فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر اولیه، پارامتر α تأثیر بیشتری در نسبت میرایی خواهد گذاشت.

برخی آزمایش‌های برش پیچشی انجام شده،^[۳۳،۳۴] که به منظور بررسی تأثیر جهت محور تنش اصلی بیشینه و همچنین بررسی آثار چرخش جهت محور تنش اصلی بیشینه در مقاومت روان‌گرایی ماسه‌ی شل انجام شده بودند، نیز نشان دادند که کمترین مقاومت روان‌گرایی مربوط به شرایط آزمایش $\alpha = 45^\circ$ است. این رفتار با استفاده از جهت صفحه‌ی بیشینه‌ی تنش برشی تفسیر شد که در شرایط $\alpha = 45^\circ$ این صفحه در جهت صفحه‌ی ته‌نشینی ذرات (صفحه‌ی افق) قرار می‌گیرد. پژوهش‌های مذکور،^[۳۳،۳۴] بر این نکته تأکید کرده‌اند که اگرچه تأثیر جهت محور تنش اصلی بیشینه در مقاومت سیکلی، اهمیت به‌سزایی دارد، اما اثر آن در مقایسه با تأثیر جهت صفحه‌ی بیشینه‌ی تنش برشی نسبت به صفحه‌ی ته‌نشینی در درجه‌ی دوم اهمیت قرار دارد.

۲.۵. تأثیر پارامتر b

به جهت بررسی تأثیر پارامتر b در مدول برشی خاک ماسه‌یی شل، تغییرات مدول

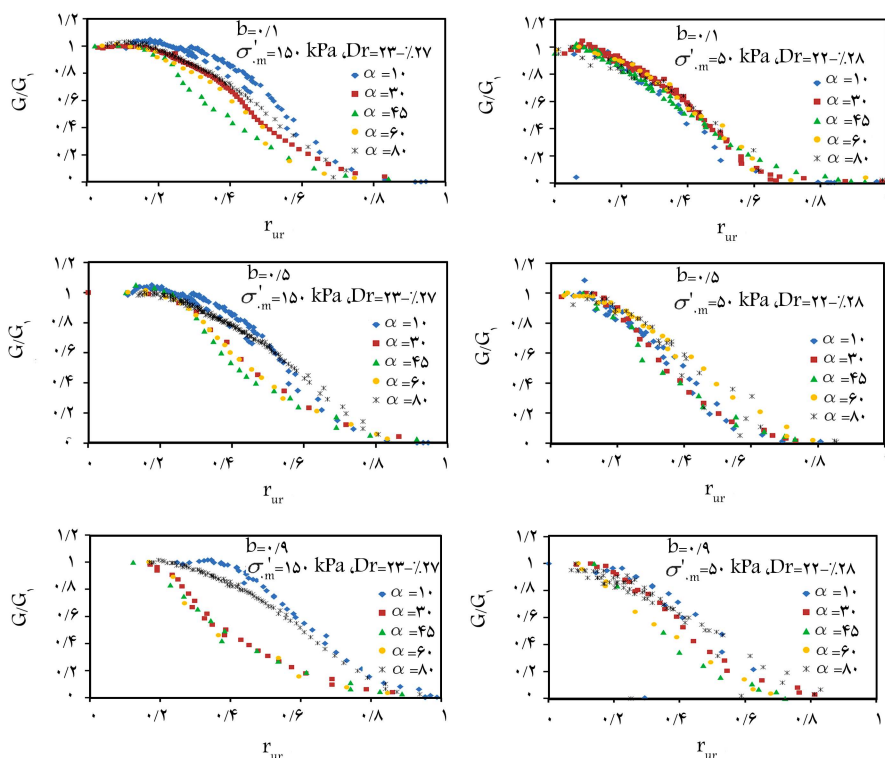
کرنش برشی در تجهیزات آزمایشگاهی مرسوم یا مستقیماً بر نمونه اعمال می‌شود (دستگاه برش ساده) و یا از اختلاف کرنش قائم و افقی به‌دست می‌آید (دستگاه سه محوری). در هر صورت، روند ایجاد کرنش برشی در طی آزمایش‌های انجام شده با یک وسیله‌ی آزمایشگاهی یکسان است. با توجه به آثار مسیر تنش در مقدار و نوع کرنش و نیز با توجه به اینکه در آزمایش‌های استوانه‌ی توخالی نمونه‌ها تحت شرایط بارگذاری ناهمسان مختلفی از نظر (α و b) قرار دارند، مقدار کرنش برشی در مسیرهای تنش مختلف آزمایش‌های انجام شده، از نظر ماهیت (کرنش برشی ناشی از برش خالص، کرنش برشی ناشی از بارگذاری محوری و یا ترکیب این دو حالت) متفاوت هستند. به‌عنوان مثال، در نمونه‌یی که در شرایط بارگذاری $\alpha = 10^\circ$ قرار دارد، کرنش برشی عمدتاً ناشی از بارگذاری محوری است و در شرایط بارگذاری $\alpha = 45^\circ$ ، کرنش برشی تحت تأثیر تنش برشی خالص ایجاد می‌شود.

از طرفی در آزمایش‌های زهکشی‌نشده، مهم‌ترین عامل در کاهش سختی و مقاومت نمونه‌های ماسه‌یی، افزایش فشار آب حفره‌ی ماندگار است. نسبت فشار حفره‌ی (r_{ur}) به‌صورت نسبت فشار آب حفره‌ی ماندگار (u_r) به تنش مؤثر همه‌جانبه (σ'_{vm}) تعریف می‌شود ($r_{ur} = u_r / \sigma'_{vm}$). این نسبت از صفر (عدم فشار آب حفره‌ی اضافی در خاک) تا یک (انتقال کامل فشار آب بر خاک یا روان‌گرایی) تغییر می‌کند و لذا دید بهتری نسبت به فشار آب حفره‌ی ماندگار ایجاد خواهد کرد. فشار آب حفره‌ی ماندگار از خرابی پیش‌رونده در اسکلت خاک (کرنش‌های خمیری) ناشی می‌شود و تنش‌های مؤثر خاک را تغییر می‌دهد، علاوه بر این تأثیر مستقیمی در مقاومت و سختی خاک دارد. مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار در آزمایش‌های تنش کنترل شده، زمانی اندازه‌گیری می‌شود که تنش تفاضلی بیشینه، صفر شود و یا از صفر عبور کند.^[۳۱]

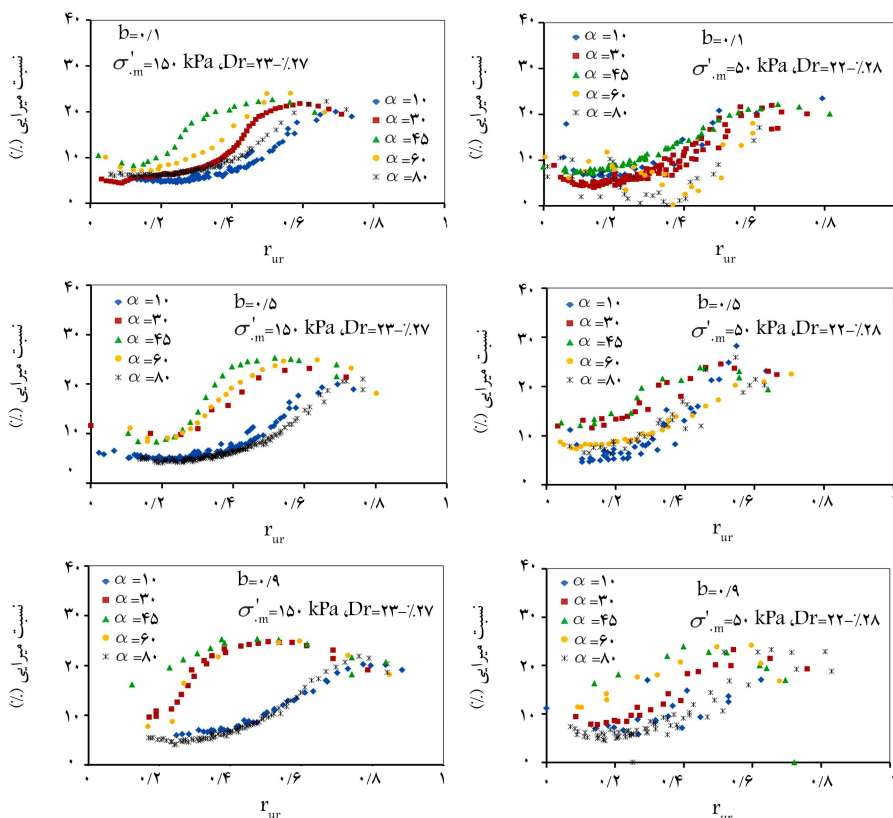
بنابراین برای تفسیر نتایج آزمایش‌های استوانه‌ی توخالی بهتر است که به‌جای کرنش برشی از فشار آب حفره‌ی ماندگار استفاده کرد. بدیهی است که هر دو پارامتر ذکر شده، بیانی از خرابی پیش‌رونده در آزمایش‌های زهکشی‌نشده هستند. با توجه به موارد مذکور، تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با فشار آب حفره‌ی ماندگار، اطلاعات بهتری از رفتار خاک در شرایط مختلف بارگذاری ارائه می‌دهد و امکان مقایسه‌ی رفتار نمونه‌ها در شرایط مختلف بارگذاری را ساده‌تر می‌کند. با توجه به شرایط اولیه‌ی یکسان همه‌ی نمونه‌ها قبل از بارگذاری (روش ساخت، چگالی نسبی انتهای مرحله‌ی تحکیم و تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر)، مدول برشی و نسبت میرایی در آن‌ها با مقدار مدول برشی و نسبت میرایی اولین سیکل بارگذاری هنجار شد.

۱.۵. تأثیر پارامتر α

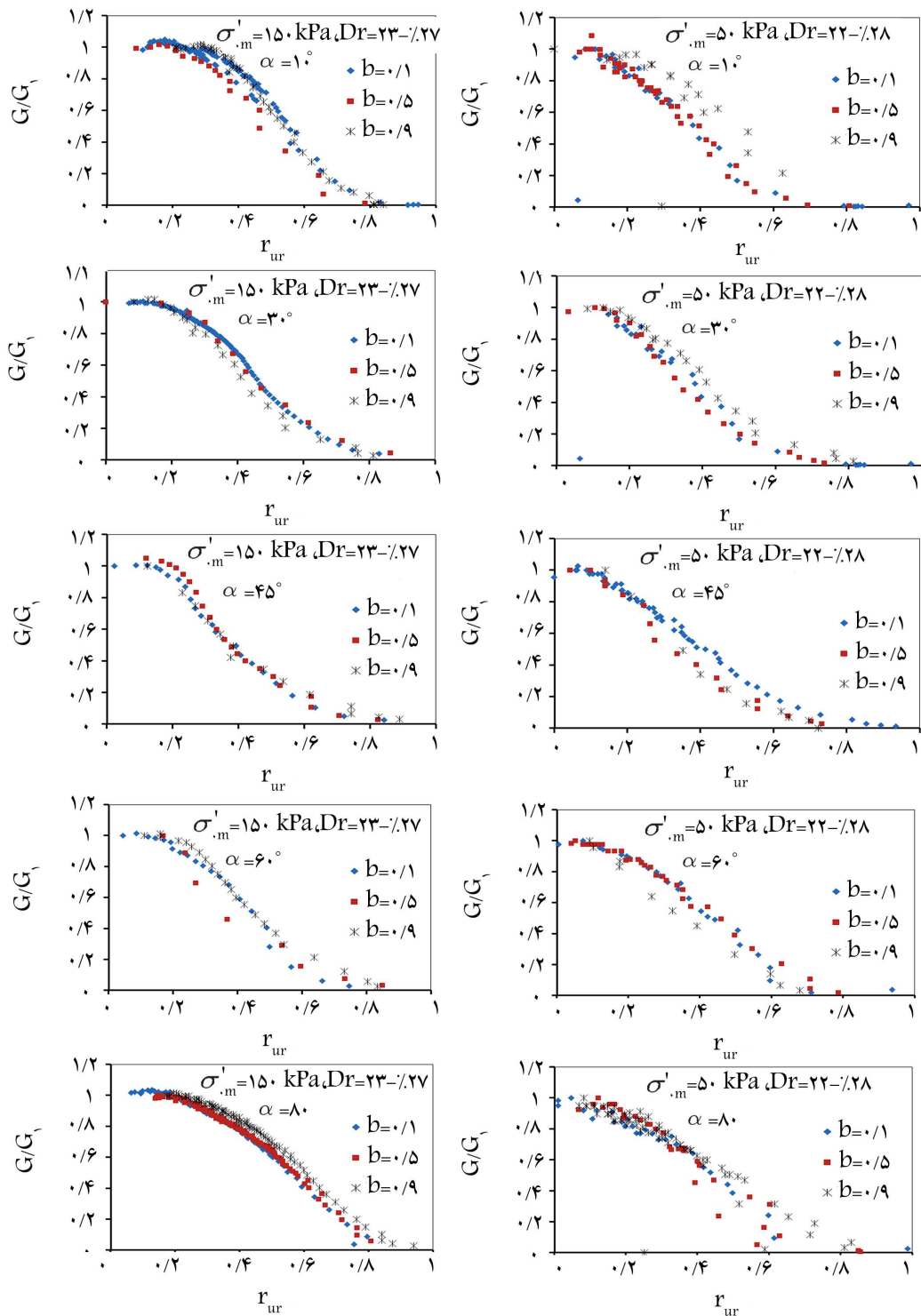
شکل ۶، تغییرات مدول برشی نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر را با فشار آب حفره‌ی ماندگار در شرایط فشار همه‌جانبه‌ی 50° و 150° کیلو پاسکال نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، روند کاهش سختی نمونه با افزایش فشار آب حفره‌ی به شکل محسوس و وابسته به جهت محور تنش اصلی بیشینه و به تبع آن مد بارگذاری است. با مقایسه‌ی رفتار نمونه‌ها در هر دو مقدار فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر (50° و 150° کیلو پاسکال) می‌توان مشاهده کرد که در یک نسبت فشار آب حفره‌ی ماندگار مشخص، با نزدیک شدن مقدار α به 45° درجه، مدول برشی کاهش می‌یابد، با این تفاوت که در شرایط فشار همه‌جانبه‌ی 150° کیلو پاسکال، تأثیر α بسیار پررنگ‌تر و مشخص‌تر است. به عبارت دیگر، با کاهش تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر، از تأثیر



شکل ۶. تغییرات مدول برشی با نسبت فشار آب حفره‌یی ماندگار در نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر تحت تنش‌های تحکیم ۵° و ۱۵° کیلو پاسکال و مقادیر مختلف α .



شکل ۷. تغییرات نسبت میرایی با نسبت فشار آب حفره‌یی ماندگار در نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر تحت تنش‌های تحکیم ۵° و ۱۵° کیلو پاسکال و مقادیر مختلف α .



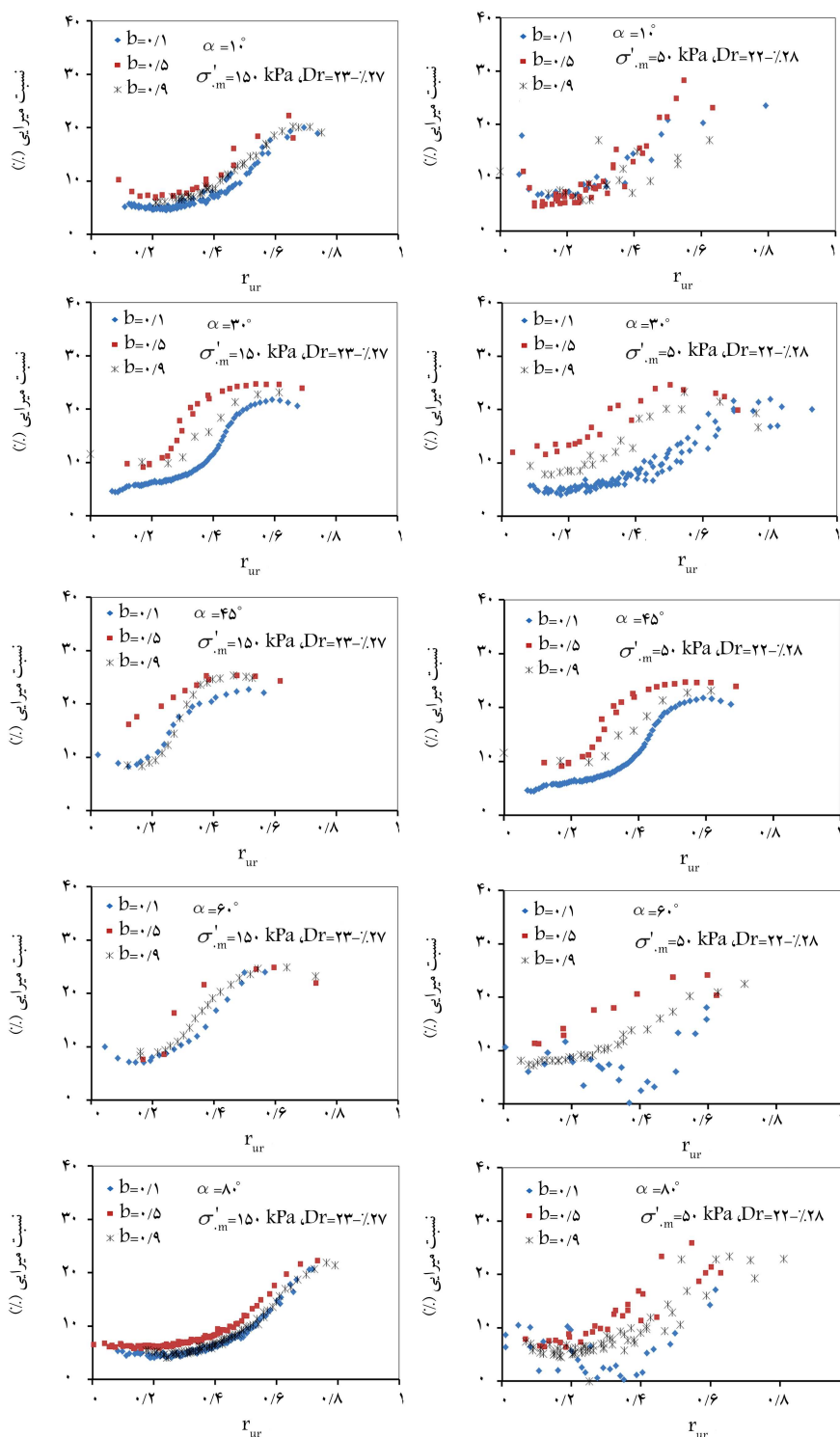
شکل ۸. تغییرات مدول برشی با فشار آب حفره‌یی ماندگار در نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی ماسه‌ی بابل‌س در مقادیر مختلف b .

آزمایش شده در شرایط $b = 45$ بیشترین نسبت میرایی (کمترین انسجام دانه‌ها) را داشته‌اند و کمترین نسبت میرایی (بیشترین انسجام دانه‌ها) نیز مربوط به نمونه‌ی آزمایش شده در شرایط $b = 0.1$ است.

به‌طور کلی در آزمایش‌های استوانه‌ی توخالی، تحت تأثیر پارامترهای α و b ، دو رژیم بارگذاری مجزا بر نمونه‌ی خاک اعمال می‌شود (شکل ۱۰). در رژیم اول، پارامتر α مقادیر تنش بر روی صفحات ۲ و ۳ را کنترل می‌کند.

برشی با فشار آب حفره‌یی ماندگار در مقادیر ثابت α در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق آن در هر دو فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال و در یک مقدار مشخص از α ، پارامتر b تأثیر کمی در مدول برشی دارد.

تغییرات نسبت میرایی با فشار آب حفره‌یی ماندگار در مقادیر ثابت b ، در شکل ۹ نشان داده شده است. تقریباً در تمامی مقادیر α به‌جز در شرایط $\alpha = 0.5$ ، پارامتر b تأثیر چندانی در نسبت میرایی نمونه‌ها ندارد. در شرایط بارگذاری $\alpha = 45$ نمونه‌های



شکل ۹. تغییرات نسبت میرایی با فشار آب حفره‌یی ماندگار در نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر در مقادیر مختلف b .

بارگذاری افقی در جهت انقباض نمونه‌ی استوانه‌ی توخالی است. صرف‌نظر از رژیم بارگذاری ناشی از پارامتر α ، این نوع بارگذاری شباهت زیادی به شرایط بارگذاری سه‌محوره‌ی فشاری^{۱۱} دارد. در شرایط بارگذاری $b = 0.9$ نیز مقدار $\sigma'_1 \approx \sigma'_3$ است که متناظر با بارگذاری افقی در جهت اتساع نمونه‌ی استوانه‌ی توخالی و معادل با شرایط بارگذاری سه‌محوره‌ی اتساعی^{۱۲} است. بنابراین مقاومت و مدول برشی

رژیم دوم، پارامتر b ، مقدار تنش ناشی از σ'_2 را کنترل می‌کند، که این تنش بر روی صفحه‌ی ۱ قرار دارد.

در شرایط $\alpha = 45^\circ$ ، بارگذاری بر روی صفحات ۲ و ۳ این المان از نمونه‌ی استوانه‌ی توخالی، به صورت برش خالص است ($\sigma'_1 = -\sigma'_3 = \tau_{max}$) در رژیم اول و در شرایط بارگذاری $b = 0.1$ ، مقدار $\sigma'_2 \approx \sigma'_1$ است که متناظر با

پژوهش حاضر، بررسی تأثیر پارامترهای بارگذاری ناهمسان (α و b) و نیز تنش مؤثر همه‌جانبه در مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی ماسه‌ی شل بابلسر بوده است. در ادامه، نتایج اصلی به‌دست آمده از پژوهش حاضر ارائه شده است:

۱. نتایج نشان داد که جهت محور تنش اصلی بیشینه، تأثیر زیادی در مقدار مدول برشی نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی بابلسر دارد. به‌طوری که در یک نسبت آب حفره‌ی پس‌ماند مشخص، مدول برشی نمونه‌ها در شرایط بارگذاری محوری ($\alpha = 10^\circ$ و $\alpha = 80^\circ$) و بیشترین مقدار را داشته و کمترین مقدار مدول برشی مربوط به نمونه‌ی بارگذاری شده در شرایط بارگذاری برشی ($\alpha = 45^\circ$) بوده است که دلیل آن کمتر بودن سختی برشی نسبت به سختی محوری و همچنین قرار گرفتن جهت محور تنش برشی بیشینه بر روی صفحه‌ی ته‌نشینی خاک (ضعیف‌ترین صفحه‌ی خاک) است.

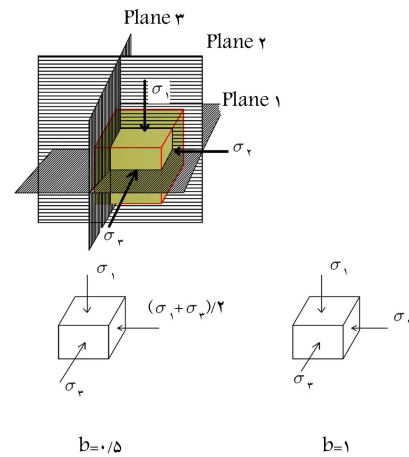
۲. نتایج نشان داد که پارامتر تنش اصلی میانی تأثیر چندانی در مدول برشی نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی بابلسر ندارد.

۳. جهت محور تنش اصلی بیشینه تأثیر زیادی در نسبت میرایی نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی بابلسر داشت. با نزدیک شدن α به 45° درجه (مد بارگذاری برشی)، نسبت میرایی افزایش و با نزدیک شدن α به 10° و 80° درجه (مد بارگذاری محوری) مقدار آن کاهش یافته است.

۴. با نزدیک شدن α به 45° درجه، تأثیر پارامتر b در نسبت میرایی قابل توجه بود. شرایط $\alpha = 45^\circ$ ، متناظر با برش در صفحات قائم است. بنابراین با افزایش b ، شرایط بارگذاری از حالت سه‌محوری فشاری به سه‌محوری اتساعی تغییر کرده است، لذا نمونه در شرایط $b = 0/1$ سختی بیشتری نسبت به شرایط $b = 0/9$ داشته است. بارگذاری در شرایط $b = 0/5$ ، نیز بینابین دو شرایط بارگذاری $b = 0/1$ و $b = 0/9$ و متناظر با اعمال برش در صفحات افقی بوده است. به همین دلیل در شرایط بارگذاری $b = 0/5$ ، کمترین مدول برشی و بیشترین نسبت میرایی مشاهده شد.

۵. به‌طور کلی پارامترهای بارگذاری ناهمسان (α و b) تأثیر بیشتری در نسبت میرایی در مقایسه با مدول برشی داشته‌اند.

۶. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در مقادیر تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر 50° و 150° کیلوپاسکال نشان داد که با افزایش فشار همه‌جانبه‌ی مؤثر، تأثیر پارامترهای بارگذاری ناهمسان (α و b) در مدول برشی و نسبت میرایی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. وضعیت تنش‌های اصلی در یک المان از دستگاه استوانه‌ی توخالی تحت شرایط مختلفی از پارامتر b .

نمونه‌های آزمایش شده در شرایط $b = 0/1$ بیشتر از نمونه‌های بارگذاری شده در شرایط $b = 0/9$ بوده و به تبع آن نسبت میرایی در شرایط $b = 0/1$ ، کمتر از شرایط $b = 0/9$ بوده است. در شرایط بارگذاری $b = 0/5$ نیز $\sigma'_p = (\sigma'_1 + \sigma'_r)/2 = 0$ است که بیانگر برش خالص بر روی صفحه‌ی افقی است. بنابراین بیشترین نسبت میرایی (کمترین انسجام دانه‌ها) موردانتظار در شرایط $b = 0/5$ رخ خواهد داد.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از نتایج تعداد ۳۰ آزمایش استوانه‌ی توخالی تناوبی بر روی نمونه‌های شل و تحکیم همسان‌یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر که در دانشگاه صنعتی شریف انجام شده‌اند، استفاده شده است.^[۳۵] هدف از آزمایش‌های انجام‌شده، بررسی تأثیر جهت محور تنش‌های اصلی و نیز پارامتر تنش میانی در مدول برشی و نسبت میرایی در شرایط بارگذاری سیکلی بوده است. به همین منظور نمونه‌های شل ماسه‌ی بابلسر در شرایط مشابه اولیه‌ی از نظر روش ساخت، چگالی نسبی انتهای مرحله‌ی تحکیم و تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر مرحله‌ی تحکیم، آماده‌ی بارگذاری شدند. بارگذاری سیکلی نمونه‌ها در شرایط α ، b و q/σ'_{vm} ثابت تا وقوع روان‌گرایی ادامه پیدا کرد. هدف از

پانویس‌ها

1. discreteness
2. bonded
3. less discrete
4. loop
5. sub-rounded
6. sub-angular
7. hysteresis loop
8. secant shear modulus
9. less discreteness

10. integrated
11. triaxial compression
12. triaxial extension

منابع (References)

1. Das, B.M. "Principles of soil dynamics", Boston: PWS-Kent (1993).
2. Carrubba, P. and Maugeri, M. "Dynamic soil properties from full scale tests with vibrating foundation",

- In: Proceedings of The 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisboa, Portugal: Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 35-40 (1999).
3. Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. "Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading", *Soils Found*, **18**(1), pp. 39-56 (1978).
 4. Zhang, J., Andrus, R.D. and Juang, C.H. "Normalized shear modulus and material damping ratio relationships", *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, **131**(4), pp. 453-464 (2005).
 5. Kramer, S.L. "Geotechnical earthquake engineering", Upper Saddle River, Prentice Hall (1996).
 6. Hardin, B.O. "The nature of damping in sands", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, **91**(SM1), pp. 63-97 (1965).
 7. Drnevich, V.P. and Richart, F.E. "Dynamic prestraining of dry sand", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, **96**(2), pp. 453-469 (1970).
 8. Li, X.S. and Yang, W.L. "Effects of vibration history on modulus and damping of dry sand", *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, **14**(11), pp. 1071-1081 (1998).
 9. Li, X. and Cai, Z. "Effects of low-number previbration cycles on dynamic properties of dry sand", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **125**(11), pp. 979-987 (1999).
 10. Haeri, S., Shakeri, M. and Shahcheraghi, S. "Evaluation of dynamic properties of a calcite cemented gravely sand", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, **IV**, pp. 1-10 (2008).
 11. Catano, J. and Pando, M. "Static and dynamic properties of a calcareous sand from southwest puerto rico", *GeoFlorida*, pp. 842-851 (2010).
 12. Schaeffer, K., Bearce, R. and Wang, J. "Dynamic modulus and damping ratio measurements from free-free resonance and fixed-free resonant column procedures", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **139**(12), pp. 2145-2155 (2013).
 13. Madhusudhan, B. and Kumar, J. "Damping of sands for varying saturation", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **139**(9), pp. 1625-1630 (2013).
 14. Kumar, J. and Madhusudhan, B.N. "Dynamic properties of sand from dry to fully saturated states", *Geotechnique*, **62**(1), pp. 45-54 (2011).
 15. Towhata, Ikuo., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2008).
 16. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. "Shear modulus and damping in soils: design equation and curves", *J. Soil Mech. Found. Engng. Div., ASCE*, **98**(7), pp. 667-691 (1972).
 17. Chaudhary, S.K., Kuwano, J., Hashimoto, S., Hayano, Y. and Nakamura, Y. "Effects of initial fabric and shearing direction on cyclic deformation characteristics of sand", *Soils and Foundations*, **42**(1), pp. 147-157 (2002).
 18. HongNam, N. and Koseki, J. "Quasi-elastic deformation properties of toyoura sand in cyclic triaxial and torsional loadings", *Soils and Foundations*, **45**(5), pp. 19-38 (2005).
 19. Habib, S. and Towhata, I. "Torsion shear tests on cyclic stress-dilatancy relationship of sand", *Soils and Foundations*, **42**(1), pp. 105-119 (2002).
 20. Sivathayalan, S. and Vaid, Y.P. "Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands", *Can. Geotech. J.*, **39**(1), pp. 63-76 (2002).
 21. Zdravkovic, L. and Jardine, R. "Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress conditions", *Geotechnique SIP: Pre-Failure Deformation Behaviour of Geomaterials*, **47**(3), pp. 407-437 (1997).
 22. Keyhani, R. and Haeri, S.M. "Evaluation of the effect of anisotropic consolidation and principle stress rotation on undrained behavior of silty sands", *Scientia Iranica*, **20**(6), pp. 1637-1653 (2013).
 23. Bahadori, H., Ghalandarzadeh, A. and Towhata, I. "Effect of non-plastic silt on the anisotropic behavior of sand", *Soils and Foundations*, **48**(4), pp. 531-545 (2008).
 24. Wykeham Farrance, "dynamic hollow cylinder apparatus", Reference Manual (2012).
 25. ASTM D4253-00, "Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table", (2003).
 26. ASTM D4254-00, "Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", (2003).
 27. ASTM D854-02, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", (2006).
 28. ASTM D422-63, "Standard test method for particle-size analysis of soils", (2007).
 29. Ladd, R.S. "Preparing test specimens using under compaction", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **1**(1), pp. 16-23 (1978).
 30. Boulanger, R.W., Seed, R.B., Chan, C.K., Seed, H.B. and Sousa, J. "Liquefaction behavior of saturated sands under unidirectional and bi-directional monotonic and cyclic simple shear loading", Rep. No. UCB/GT/91-08, Univ. of California, Berkeley, Calif. (1991).
 31. Polito, C.P. "The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils", Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, Va., 274 p. (1999).
 32. Jafarzadeh F. and Sadeghi H. "Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **32**(1), pp. 26-41 (2012).
 33. Logeswaran, P. "Behaviour of sands under generalized loading and drainage conditions", Ph.D Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada, 273 p. (2010).
 34. Manmatharajan, V. "Initial stress state and stress history effects on liquefaction susceptibility of sands", MASc Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada, 182 p. (2011).
 35. Zamanian, M. "Effect of anisotropy an cyclic behaviour of sands using hollow cylinder apparatus", P.h.D dissertation, Sharif University of Technology, (2014).