

بررسی اثر ناهمسانی در تولید فشار آب حفره‌یی در ماسه‌ی شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر

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، زمستان ۱۳۹۶ (دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۲۱-۱۳)

خاک‌ها ماهیت ناهمسان دارند و گسیختگی می‌تواند با اعمال مدهای مختلفی از برش بر آنها وارد شود. در نوشتار حاضر، اثرات جهت محور تنش اصلی، تنش برشی اضافی در حین تحکیم و نسبت تنش سیکلی بر روی فشار آب حفره‌یی اضافی بررسی شده است. به همین منظور یک سری آزمایش سیکلی زهکشی نشده بر روی نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته به وسیله‌ی دستگاه استوانه‌ی توخالی سیکلی انجام شده و نتایج نشان داده است که جهت محور تنش اصلی بیشینه در حین تحکیم، تأثیر چندانی در روند تولید فشار آب حفره‌یی اضافی ندارد. از طرفی افزایش نسبت تنش سیکلی و اعمال برش در حین تحکیم، منجر به افزایش فشار آب حفره‌یی ماندگار شده است. آنالیز برازش انجام شده بر روی نتایج آزمایش‌های نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر، منجر به اصلاح مدل تجربی بوکر و ساده‌سازی مدل توانی بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده برای پیش‌بینی فشار آب حفره‌یی ماندگار شده است.

واژگان کلیدی: ماسه، تحکیم ناهمسان، استوانه‌ی توخالی تناوبی، فشار آب حفره‌یی اضافی.

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

۱. مقدمه

افزایش فشار آب حفره‌یی خاک در حین زلزله و یا شمع‌کوبی، یکی از مباحث مورد بررسی در بسیاری از مطالعات انجام شده به شمار رفته است که هنوز هم به‌عنوان موضوع بسیاری از مطالعات روز، به شمار می‌رود.^[۱-۴] روان‌گرایی به‌وجود آمده در زلزله‌ی نیکاتای ژاپن (۱۹۶۴)، خرابی‌های فراوانی ایجاد کرده است، اما نتایج حاصل از مطالعات انجام شده بر روی زلزله‌ی مذکور منجر به تحولات بزرگی در دانش روان‌گرایی شده است. در همین راستا، پژوهش‌های زیادی بر روی بررسی عوامل مؤثر در مقاومت روان‌گرایی ماسه‌های تمیز متمرکز شده است.^[۵-۷] در حین زلزله، تنش‌های برشی ناشی از عبور امواج برشی منجر به کرنش‌های برشی تناوبی می‌شوند و با تغییر در ساختار خاک، موجب تولید فشار آب حفره‌یی اضافی خواهند شد.

فشار آب حفره‌یی اضافی به‌وجود آمده در خاک، شامل دو مؤلفه‌ی فشار آب حفره‌یی گذرا^۱ و فشار آب حفره‌یی ماندگار^۲ می‌شود. در خاک‌های اشباع، فشار آب حفره‌یی گذرا برابر با تغییرات میانگین تنش‌های نرمال^۳ است، لذا فشار آب حفره‌یی گذرا، تأثیر کمی در تنش‌های مؤثر خاک خواهد داشت. فشار آب حفره‌یی 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

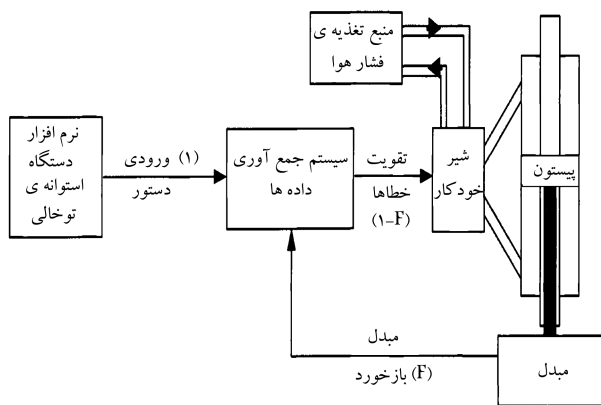
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۴/۱۳، اصلاحیه -، پذیرش ۱۳۹۵/۱/۳۱.

مختلفی بر روی ناهمسانی خاک‌ها انجام شده است. در سال ۱۹۴۴، دو مکانیزم کلی ناهمسانی شامل: ناهمسانی ذاتی و ناهمسانی القا‌یی پیشنهاد شده است.^[۱۳] نهشته‌های طبیعی خاک به‌علت نحوه‌ی ته‌نشینی ذرات و نیز شکل دانه‌ها، به‌طور ذاتی ساختاری ناهمسان دارند. ناهمسانی ذاتی به

جدول ۱. مشخصات دستگاه آزمایش نمونه‌ی استوانه‌یی توخالی. [۱۵]

مشخصه	واحد	ظرفیت	دقت
قطر خارجی	cm	۱۰	-
قطر داخلی	cm	۶	-
ارتفاع نمونه	cm	۲۰	-
نیروی محوری	kN	± ۱۰	$۰/۰۰۱$
لنگر پیچشی	N.m	± ۳۰۰	$۰/۱$
تغییرات حجم	cc	۱۰۰	$۰/۱$
تغییر مکان شعاعی	mm	± ۵۰	میکرون ۱/۵
تغییر مکان محوری	mm	± ۲۵	$۰/۱$
فشار آب حفره‌یی	kPa	۱۰۰۰	$۰/۱$
فشار داخلی ساول	kPa	۱۰۰۰	$۰/۱$
فشار خارجی ساول	kPa	۱۰۰۰	$۰/۱$
تغییرات حجم ساول داخلی	cc	۱۰۰	$۰/۱$



شکل ۱. سیستم کنترلی چرخه‌ی بسته‌ی دستگاه استوانه‌یی توخالی سیکلی.

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌های بابلسر و توپورا.

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

بار محوری و ترک پیچشی و میدل‌های بار، فشار و تغییر مکان برقرار می‌شود. کنترل مؤلفه‌های مذکور توسط یک حلقه‌ی^۵ بسته انجام می‌پذیرد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه قادر به کنترل ۵ محور مستقل نیروی محوری، ترک پیچشی، فشار ساول داخلی، فشار ساول خارجی، و پس فشار در بسامد ۱ هرتز است. [۱۵] نمونه‌های ساخته شده توسط این دستگاه، قطر خارجی ۱۰۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر دارند.

۳. 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 مذکور تعیین شده است که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. [۱۶-۱۹] با توجه به نتایج آزمایش‌های شاخص انجام شده و براساس طبقه‌بندی یونیفاید، ماسه‌ی مذکور در رده‌ی ماسه‌های با اندازه‌ی دانه‌ی متوسط و بد دانه‌بندی شده (SP) طبقه‌بندی می‌شود. شکل ۲، منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مذکور را نشان می‌دهد. شکل ۳، عکس میکروسکوپی دانه‌های ماسه‌ی بابلسر را نشان می‌دهد که مطابق آن ماسه‌ی بابلسر دانه‌بندی نسبتاً یک‌نواخت دارد و از نظر ظاهری، شکل دانه‌ها نیمه مدور^۶ تا نیمه گوشه‌دار^۷ است.

از آنجا که هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر جهت اعمال تنش‌های اصلی (α) در پارامترهای سیکلی ماسه‌ی شل و تحکیم ناهمسان یافته بوده است، یک سری آزمایش سیکلی زهکشی نشده‌ی استوانه‌یی توخالی تناوبی بر روی ماسه‌ی بابلسر انجام شده است. برای ساخت نمونه‌ها نیز از روش تراکم کاهش یافته به روش کوبش مرطوب استفاده شده است. [۲۰] درصد تراکم نمونه‌ها در انتهای مرحله‌ی تحکیم، در محدوده‌ی ۲۲ الی ۲۸ درصد (به‌طور متوسط ۲۵٪) قرار گرفته است.

برای اشباع نمونه‌ها، ابتدا گاز دی‌اکسیدکربن و سپس آب بدون هوا از درون نمونه‌ها عبور داده شده است. مرحله‌ی اشباع کامل با افزایش مرحله‌یی پس فشار و تا رسیدن مقدار ضریب اسکیمپتون (B) به حدود $۰/۹۶$ ادامه یافته است. در مرحله‌ی بعد، نمونه‌ها تحت تنش همه جانبه‌ی ۱۵۰ کیلوپاسکال و به‌صورت ناهمسان، تحکیم

وضعیت غیرهمسان بافت خاک در شرایط قبل از برش اطلاق می‌شود که عمدتاً تحت تأثیر شکل دانه‌ها و جهت قرارگیری آنهاست. ساختارهای دانه‌یی غیرچسبیده^۴ برای رسیدن به آرایش پایدار و نیز تعادل نیروهای داخلی در اثر بارگذاری، به‌طور مداوم در حال تغییر شکل هستند. تغییرات ساختار خاک ممکن است منجر به افزایش تدریجی درجه‌ی ناهمسانی شود. این تغییرات ناشی از برش، به‌عنوان ناهمسانی القایی شناخته می‌شوند. [۱۴] غیرهمسانی القایی خاک از تغییر شکل تدریجی میکروساختار خاک در حین برش ناشی می‌شود که مستقل از شرایط اولیه‌ی خاک و نوع اتصال بین دانه‌یی است.

با توجه به شرایط تشکیل نهشته‌های خاکی، رفتار خاک را در جهت محور ته‌نشینی می‌توان همسان در نظر گرفت. علاوه بر این، رفتار خاک در تمامی محورهای افقی نیز مشابه است و امکان تعریف یک صفحه‌ی همسان (عمود بر محور ته‌نشینی) نیز وجود دارد. در این شرایط، خاک ناهمسان عرضی در نظر گرفته می‌شود. در مصالح ناهمسان عرضی، تنش‌های اصلی مؤثر ($\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$) و همچنین انحراف σ'_1 نسبت به محور ته‌نشینی ذرات، رفتار خاک را مشخص می‌کنند. به جهت ساده‌سازی، ۴ پارامتر مقدار تنش میانگین مؤثر (σ'_{vm})، پارامتر تنش میانی (b)، تنش تقاضایی (σ'_d) و زاویه‌ی محور تنش‌های اصلی (α) جهت بررسی ناهمسانی استفاده می‌شوند. در پژوهش حاضر، تأثیر جهت محور تنش‌های اصلی در حین پروسه‌ی تحکیم و نیز در شرایط بارگذاری سیکلی زهکشی نشده، در فشار آب حفره‌یی اضافی نمونه‌های ماسه‌یی شل تحکیم ناهمسان یافته بررسی شده است.

۲. دستگاه مورد استفاده

جهت انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر از دستگاه استوانه‌ی توخالی سیکلی استفاده شده است که مشخصات اصلی دستگاه، محدوده‌ی بارگذاری و نتایج قابل استحصال در جدول ۱ ارائه شده است. سیستم بارگذاری و اعمال نیروی این دستگاه پنوماتیکی است و از تجهیزات الکترونیکی متعددی جهت اندازه‌گیری نیرو، کرنش و فشار استفاده می‌شود. دستگاه مذکور، حرکت‌های مکانیکی را به سیگنال‌های الکترونیکی تبدیل می‌کند، تا امکان جمع‌آوری و سنجش آنها توسط دستگاه قرانت مرکزی فراهم شود. برای کنترل دقیق مقادیر تنش و کرنش، ارتباط مشخصی بین ۵ مؤلفه‌ی نرم‌افزار دستگاه، سیستم جمع‌آوری سریع اطلاعات، شیرهای اتوماتیک، محرک‌های

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های آزمایش شده.

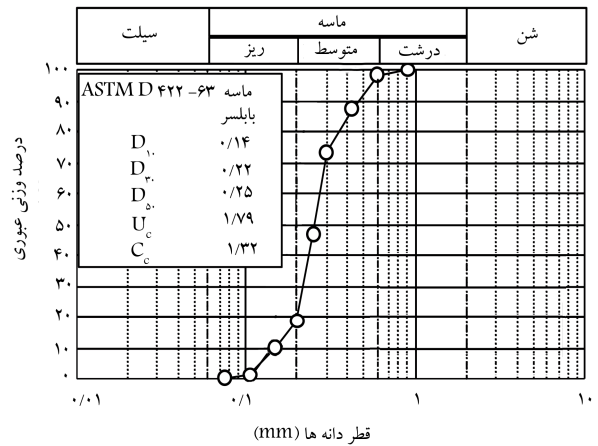
شماره	q_c (kPa)	b_c	α_c (درجه)	e	Dr (%)
۲	۰	۰	۳۰	۰/۷۲۵	۲۵
۳	۰	۰/۱	۴۵	۰/۷۲	۲۷
۴	۰	۰	۶۰	۰/۷۲۵	۲۵
۵	۰	۰	۸۰	۰/۷۳	۲۳
۶	۰	۰	۱۰	۰/۷۲۸	۲۴
۷	۰	۰	۳۰	۰/۷۳	۲۳
۸	۰	۰/۱	۴۵	۰/۷۳۳	۲۲
۹	۰	۰	۶۰	۰/۷۴۱	۱۹
۱۰	۰	۰	۸۰	۰/۷۳۶	۲۱
۱۱	۳۰	۰/۱	۱۰	۰/۷۲	۲۷
۱۲	۳۰	۰/۱	۳۰	۰/۷۳۶	۲۱
۱۳	۳۰	۰/۱	۴۵	۰/۷۳۸	۲۰
۱۴	۳۰	۰/۱	۶۰	۰/۷۳۸	۲۰
۱۵	۳۰	۰/۱	۸۰	۰/۷۳۸	۲۰

نیز نرخ ثابت تنش تفاضلی بیشینه به مقدار تنش انتهای تحکیم (3۰ kPa) و $q/\sigma'_m = 24$ انجام شده است. مقدار پارامترهای α ، b و q/σ'_m در هر آزمایش ثابت نگه داشته شده است. با توجه به تأثیر کم بسامد بارگذاری در پاسخ نمونه‌ها به بارگذاری سیکلی و همچنین به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر فشار آب حفره‌یی اضافی، بسامد بارگذاری ۰/۲۵ انتخاب و در هر سیکل بارگذاری، ۵۰ داده ثبت شده است.^[۲۱، ۲۲] در نهایت، ۱۵ آزمایش استوانه‌ی توخالی تناوبی بر روی نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته در شرایط تحکیم و بارگذاری کنترل شده انجام شده است. مشخصات نمونه‌های آزمایش شده در جدول ۳ ارائه شده است.

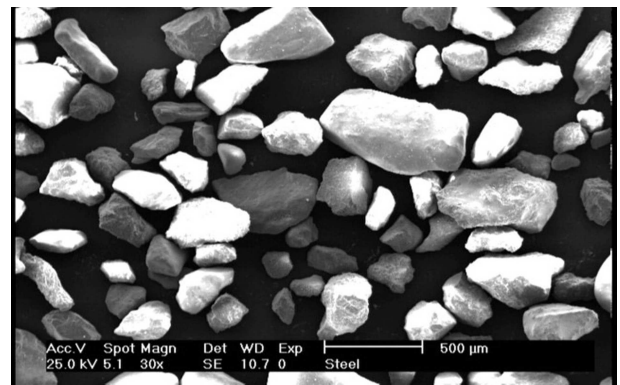
۴. مسیرهای تنش در آزمایش‌های استوانه‌ی توخالی

برای کنترل پارامترهای α ، b و q در حین بارگذاری تناوبی، باید مقادیر تنش در جهت‌های مختلف ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) کنترل شود. به همین منظور فشار آب سلول داخلی و خارجی نمونه، لنگر پیچشی و بار محوری به‌صورت تناوبی و کنترل شده بر نمونه وارد شده و با اعمال کنترل شده‌ی ۴ مؤلفه‌ی مذکور تنش، علاوه بر کنترل مقدار و جهت تنش اصلی، پارامترهای دیگری همچون نسبت تنش افقی به تنش قائم نیز به‌صورت کنترل شده بر نمونه اعمال شده‌اند.

مسیرهای تنش برشی اعمال شده در نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلر نشان می‌دهد در صورتی که مقدار تنش برشی اضافی در حین تحکیم برابر صفر باشد، مسیر تنش فقط وابسته به جهت محور تنش اصلی بیشینه در حین بارگذاری است. همان‌طور که در شکل ۴الف نیز نشان داده شده است، مسیر تنش نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی که مقدار برش اولیه‌ی آنها صفر است، فقط تحت تأثیر جهت محور تنش اصلی بیشینه در حین برش قرار دارد. وجود برش اولیه، تأثیر به‌سزایی در مسیرهای تنش طی شده در حین بارگذاری داشته است (شکل ۴ب)، به‌طوری که بیشتر شدن مقدار تنش برشی در حین تحکیم نمونه‌ها نسبت به مقدار



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه‌های بابلر و توپورا.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی دانه‌های ماسه‌ی بابلر.

پیدا کرده‌اند. هدف از این نوع از تحکیم ناهمسان رسیدن به مقدار مشخصی از فشار مؤثر همه‌جانبه و تنش تفاضلی است، که از طریق اعمال نیروی محوری، لنگر پیچشی و تغییر فشار آب سلول‌های داخلی و خارجی میسر می‌شود. قبل از شروع فرایند تحکیم، مقادیر تنش مؤثر همه‌جانبه، مقدار تنش برشی اضافی و پارامترهای α_c و b_c موردنظر در انتهای مرحله‌ی تحکیم به دستگاه معرفی می‌شود و دستگاه، مقادیر بار محوری، لنگر پیچشی و فشارهای داخلی و خارج نمونه را طوری تنظیم می‌کند که در انتهای تحکیم ناهمسان، به شرایط مذکور برسد.

در پژوهش حاضر، تحکیم ناهمسان نمونه‌ها به دو شیوه‌ی متفاوت انجام شده است. تفاوت در نحوه‌ی تحکیم ناهمسان نمونه‌ها مربوط به مقدار برش اعمال شده در حین تحکیم آنها بوده است. به‌طوری که در تحکیم سری اول، تغییرات مقادیر نیرو و تنش، منجر به تحکیم نمونه تحت شرایط کنترل شده‌ی α_c و b_c شده است. به‌عبارت دیگر، این سری از نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته در انتهای مرحله‌ی تحکیم تحت فشار همه‌جانبه‌ی σ'_m قرار داشته است، اما جهت تنش اصلی بیشینه به اندازه‌ی α_c (شامل $10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ و 80°) و مقدار پارامتر تنش میانی نیز به اندازه‌ی b ($b_c = 0/1$) تغییر کرده بود. در فرایند تحکیم ناهمسان نمونه‌های سری دوم، علاوه بر کنترل مقادیر α_c و b_c در حین پروسه‌ی تحکیم، تنش برشی اضافی نیز بر این نمونه‌ها اعمال شده است، تا در انتهای مرحله‌ی تحکیم علاوه بر کنترل مقدار و جهت محور تنش‌های اصلی، تنش برشی اضافه نیز در نمونه باقی بماند ($q_c = 30 \text{ kPa}$).

بارگذاری سیکلی نمونه‌ها، تحت شرایط کنترل شده‌ی $\alpha = 45^\circ$ و $b = 0/1$

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، مسیر تنش‌های اصلی در حین فرایند تحکیم در نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی که علاوه بر تغییر در پارامترهای α و b ، تنش برشی اضافی نیز به آنها اعمال شده بود، با خط نیمساز فضایی اختلاف زیادی دارد. دلیل این موضوع نیز تنش برشی اضافی اعمال شده در حین فرایند تحکیم است.

۵. نتایج آزمایش‌ها

همان‌طور که اشاره شده است، نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر همگی تحت شرایط $\alpha = 45^\circ$ و $b = 0.1$ بارگذاری شده‌اند. جهت محور تنش اصلی بیشینه و تنش برشی اضافی در حین تحکیم، به‌عنوان دو پارامتر متغیر در آزمایش‌های تحکیم ناهمسان به شمار رفته و مقدار آنها در آزمایش‌های مختلف تغییر کرده است. در ادامه، تغییرات مقدار فشار آب حفره‌ی با نسبت سیکلی و نیز انرژی مستهلک شده در هر سیکل ارائه شده و نتایج آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده از مدل تجربی بوکر و مدل توانی بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده مقایسه شده است.

۱.۵. پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی ماندگار با استفاده از مدل بوکر^۸

مدل بوکر یکی از مدل‌های کاربردی جهت پیش‌بینی مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار (r_{ur}) در خاک‌های دانه‌ی به شمار می‌رود. [۲] رابطه‌ی ۱، رابطه‌ی حاکم بر مدل مذکور را نشان می‌دهد. در مدل بوکر، مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار براساس تعداد سیکل منجر به روان‌گرایی (N_L) و تخمین مناسبی از ضریب ثابت β پیش‌بینی می‌شود:

$$r_{ur} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_L}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

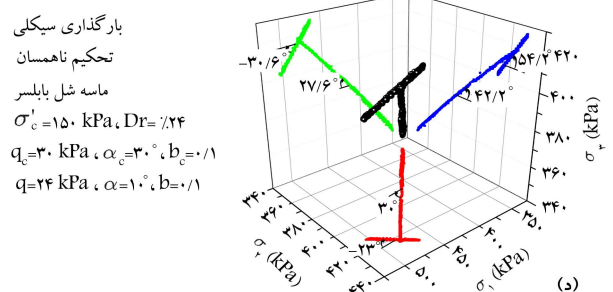
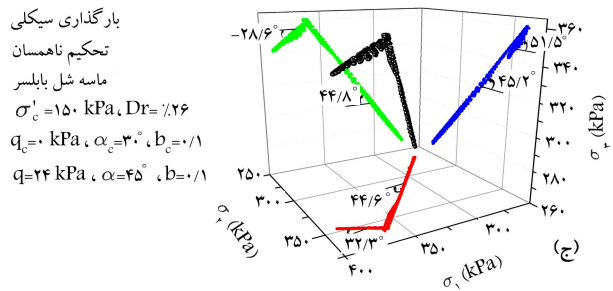
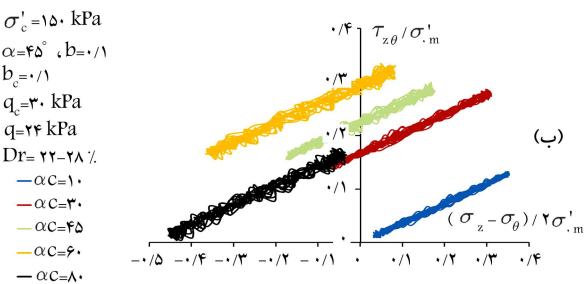
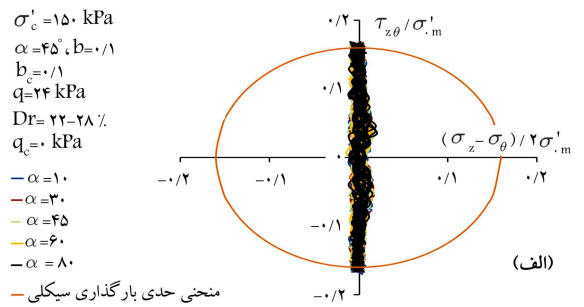
بهترین تخمین از پارامتر β با استفاده از نتایج آزمایش‌های تناوبی زهکشی نشده و انجام تحلیل برازش محاسبه خواهد شد. رابطه‌ی ۲، نیز جهت برآورد مقدار کیفیت برازش استفاده خواهد شد:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 - \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

که در آن، Y_i مقدار r_{ur} اندازه‌گیری شده در i امین نسبت تناوبی سیکل، \bar{Y} میانگین مقادیر r_{ur} اندازه‌گیری شده در آزمایش \hat{Y}_i ، مقدار r_{ur} پیش‌بینی شده از رابطه‌ی ۱ و R^2 ضریب همبستگی به‌دست آمده از آنالیز برازش هستند.

نتایج آنالیز برازش رابطه‌ی ۱ بر روی نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که مدل بوکر دقت چندان مناسبی در پیش‌بینی مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های شل و تحکیم همسان یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر ندارد. به جهت رفع این نقیصه، به جای ضریب ثابت ۲ در رابطه‌ی ۱، از پارامتر η استفاده شده است. با اضافه کردن این ضریب، یک پارامتر به تعداد پارامترهای مدل اضافه شده و توانایی مدل در پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی ماندگار افزایش یافته است. از طرفی با اضافه شدن این پارامتر، پیچیدگی مدل بالاتر رفته و استفاده از آن (به دلیل ۳ پارامتر شدن مدل) دشوارتر می‌شود. فرم تغییر یافته‌ی مدل بوکر و همکارانش در رابطه‌ی ۳ ارائه شده است:

$$r_{ur} = \frac{\eta}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_L}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3)$$



شکل ۴. مسیرهای تنش در آزمایش‌های استوانه‌ی توخالی ماسه‌ی شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر.

تنش برشی بیشینه در حین بارگذاری، منجر به یک‌سویه شدن تنش‌های برشی (همیشه مثبت) شده است.

مسیر تنش در حین تحکیم در آزمایش‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی که در حین فرایند تحکیم به آنها تنش برشی اضافی وارد نشده بود (شکل ۴ج)، نیز اختلاف ناچیزی نسبت به خط نیمساز فضایی (خط مسیر تنش تحکیم همسان) دارد. دلیل این امر، مقدار تنش برشی ناچیزی است که در حین تحکیم و به منظور کنترل جهت محور تنش اصلی بیشینه و پارامتر تنش اصلی میانی بر نمونه‌ها وارد می‌شود.

جدول ۵. نتایج آنالیز برازش رابطه‌ی ۴ بر روی نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر.

$$y = \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{2\beta}}$$

R^2	β	α_c	b_c
۰٫۹۷	۰٫۸	۱۰	۰٫۱
۰٫۹۷	۰٫۷	۳۰	۰٫۱
۰٫۹۷	۰٫۹	۴۵	۰٫۱
۰٫۹۷	۰٫۷	۶۰	۰٫۱
۰٫۹۶	۰٫۸	۸۰	۰٫۱
$q_c = 0^\circ, q = 24^\circ$			
۰٫۹۹	۰٫۶	۱۰	۰٫۱
۰٫۶۱	۰٫۵	۳۰	۰٫۱
۰٫۶۷	۰٫۸	۴۵	۰٫۱
۰٫۹۹	۰٫۶	۶۰	۰٫۱
۰٫۸۴	۰٫۵	۸۰	۰٫۱
$q_c = 0^\circ, q = 30^\circ$			
۰٫۹۹	۱٫۱	۱۰	۰٫۱
۰٫۹۲	۱٫۳	۳۰	۰٫۱
۰٫۸۸	۱٫۲	۴۵	۰٫۱
۰٫۷۵	۱٫۱	۶۰	۰٫۱
۰٫۹۰	۱٫۳	۸۰	۰٫۱

جدول ۴. نتایج آنالیز برازش رابطه‌ی ۳ بر روی نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر.

$$y = \frac{\eta}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{2\beta}}$$

R^2	β	η	α_c	b_c
۰٫۹۹	۱٫۱	۱٫۵	۱۰	۰٫۱
۰٫۹۹	۰٫۹	۱٫۵	۳۰	۰٫۱
۰٫۹۹	۱٫۱	۱٫۵	۴۵	۰٫۱
۰٫۹۸	۱٫۱	۱٫۵	۶۰	۰٫۱
۰٫۹۹	۱٫۰	۱٫۴	۸۰	۰٫۱
$q_c = 0^\circ, q = 24^\circ$				
۰٫۹۹	۱٫۰	۱٫۵	۱۰	۰٫۱
۰٫۹۶	۱٫۱	۱٫۳	۳۰	۰٫۱
۰٫۹۷	۱٫۰	۱٫۳	۴۵	۰٫۱
۱٫۰۰	۰٫۹	۱٫۵	۶۰	۰٫۱
۰٫۹۸	۰٫۹	۱٫۳	۸۰	۰٫۱
$q_c = 0^\circ, q = 30^\circ$				
۰٫۹۹	۱٫۱	۱٫۶	۱۰	۰٫۱
۰٫۹۲	۱٫۴	۱٫۶	۳۰	۰٫۱
۰٫۸۸	۱٫۵	۱٫۶	۴۵	۰٫۱
۰٫۷۹	۱٫۶	۱٫۳	۶۰	۰٫۱
۰٫۹۰	۱٫۱	۱٫۶	۸۰	۰٫۱
$q_c = 30^\circ, q = 24^\circ$				
۰٫۹۶	۱٫۱	۱٫۶	میانگین	
۰٫۰۶	۰٫۲۲	۰٫۱۳	انحراف استاندارد	

مقادیر فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های استوانه‌ی توخالی تحکیم ناهمسان یافته است.

مطابق شکل ۵، تغییر در جهت محور تنش اصلی بیشینه در حین تحکیم، تأثیری در روند تولید فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌ها نخواهد داشت و با دقت مناسبی می‌توان مقدار میانگین مقادیر فشار آب حفره‌ی ماندگار را در شرایط مختلف تحکیم از نظر α_c تعیین کرد. در عین حال، مقدار فشار آب حفره‌ی اضافی ماندگار با افزایش نسبت سیکلی (q/σ'_m) اعمال تنش برشی اضافی در حین تحکیم افزایش خواهد یافت. مطابق شکل مذکور، فشار آب حفره‌ی ماندگار در شرایط $\sigma'_m = 50 \text{ kPa}$ متناظر با حد پایین فشار آب حفره‌ی ماندگار در آزمایش‌ها $\sigma'_m = 50 \text{ kPa}$ است که ناشی از تأثیر فشار همه‌جانبه در افزایش مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های ماسه‌ی است. به عبارت دیگر، با افزایش تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر، فشار آب حفره‌ی ماندگار بیشتری در نمونه‌ها به وجود می‌آید. مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار در دو سری از نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی که در حین تحکیم تحت تنش برشی اضافی قرار نگرفته بودند، نیز بسیار نزدیک به هم بوده و تقریباً در محدوده‌ی میانی نتایج آزمایش‌های تحکیم همسان یافته در شرایط $\sigma'_m = 150 \text{ kPa}$ قرار داشته است. به عبارت دیگر، مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی که فقط جهت محور تنش اصلی بیشینه در حین تحکیم تغییر کرده بود، تفاوت چندانی با نمونه‌های تحکیم همسان یافته نداشته است.

با اعمال برش در حین تحکیم، مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار به‌طور قابل

جدول ۴، نتایج آنالیز برازش رابطه‌ی ۳ را بر روی نتایج آزمایش‌های نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج آنالیز برازش مذکور نشان می‌دهد، مقدار ضریب η را می‌توان با دقت مناسب ۱٫۶ فرض کرد و از رابطه‌ی ۴، جهت پیش‌بینی r_{ur} نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته استفاده کرد:

$$r_{ur} = \frac{1}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{2\beta}} \quad (4)$$

نتایج آنالیز تحلیل برازش مدل اصلاح شده‌ی بوکر (رابطه‌ی ۴) بر روی نتایج آزمایش‌های نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته و شل ماسه‌ی بابلسر در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که از مقادیر ضریب همبستگی به دست آمده است، از تحلیل برازش رابطه‌ی ۴ بر روی نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته مشخص است که فرم اصلاح شده‌ی رابطه‌ی بوکر می‌تواند با دقت مناسبی مقادیر فشار آب حفره‌ی اضافی ماندگار نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته را پیش‌بینی کند.

در شکل ۵، مقادیر فشار آب حفره‌ی به دست آمده از آزمایش‌های استوانه‌ی توخالی با مقادیر پیش‌بینی شده از نتایج آنالیز برازش مدل بوکر اصلاح شده و نیز حد بالا و پایین به دست آمده از نتایج آزمایش‌های تحکیم همسان یافته تحت شرایط چگالی نسبی مشابه و فشار همه‌جانبه‌ی ۵۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال مقایسه شده است.^[۲۳] همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، مدل بوکر اصلاح شده به خوبی قادر به پیش‌بینی

شرایط $\sigma'_{vm} = 150 \text{ kPa}$ ، $\sigma'_{vm} = 50 \text{ kPa}$ و نتایج آزمایش‌های تحکیم ناهمسان یافته می‌توان نتیجه گرفت که مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار تمامی نمونه‌ها (اعم از تحکیم همسان و تحکیم ناهمسان‌یافته) در یک محدوده‌ی مشخص رخ خواهد داد که همان محدوده‌ی به‌دست آمده از آزمایش‌های نمونه‌های تحکیم همسان‌یافته در شرایط $\sigma'_{vm} = 150 \text{ kPa}$ است. به‌عبارت دیگر، پارامتر فشار همه‌جانبه مؤثر، بیشترین تأثیر را در فشار آب حفره‌ی دارد و پارامترهای بارگذاری ناهمسان و تحکیم ناهمسان فقط منجر به افزایش و یا کاهش فشار آب حفره‌ی در این محدوده خواهند شد.

۲.۵. پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی ماندگار با استفاده از مدل توانی

استفاده از مدل بوکر و همکارانش برای آنالیز پاسخ ساخت‌گاه با مشکلاتی مواجه است، که یکی از آنها نیاز به تبدیل شتاب جنبش نیرومند زمین به تعداد سیکل‌های معادل یک‌نواست^۹ که این تبدیل به‌عنوان بزرگ‌ترین عیب مذکور به‌شمار می‌رود. علاوه بر این، تعیین مقدار N_L برای خاک‌هایی که روان‌گرا نمی‌شوند و یا مقدار قابل توجهی ریزدانه دارند، دشوار است. در این‌گونه خاک‌ها، مقدار فشار آب حفره‌ی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است، اما تعیین دقیق گسیختگی (خرابی) در آنها دشوار خواهد بود.

مدل‌های بر پایه‌ی انرژی با تعیین مقدار انرژی مستهلک شده در هر سیکل بارگذاری (آزمایش‌های آزمایشگاهی) و ارتباط آن با مقدار انرژی مستهلک شده در حین حرکت نیرومند زمین، قابلیت مناسبی جهت آنالیز پاسخ ساخت‌گاه خواهند داشت. در بخش کنونی از مدل بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده با فرم رابطه‌ی توانی جهت پیش‌بینی مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار در ماسه‌ی شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر استفاده شده است. فرم توانی مدل بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده توسط بریل و دیویس پیشنهاد شده که به مدل BD شهرت یافته است (رابطه‌ی ۵):^[۲۱]

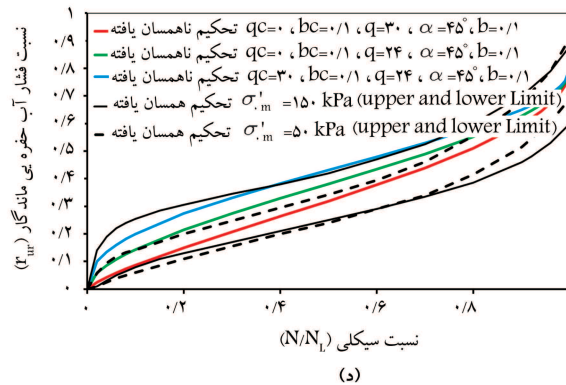
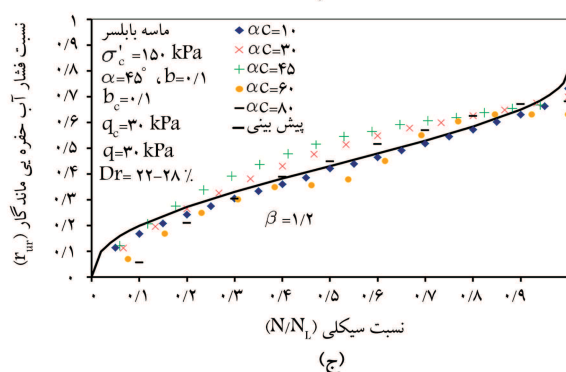
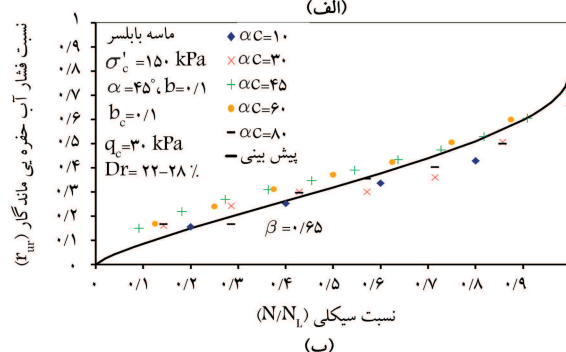
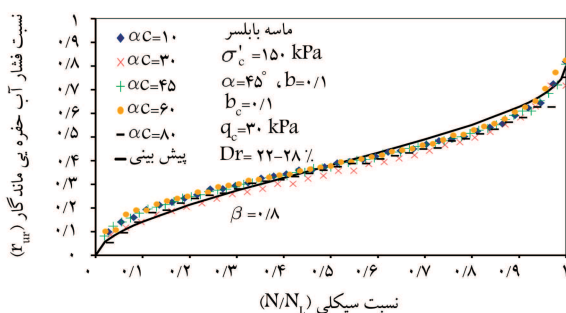
$$r_{ur} = \alpha' \left(\frac{\Delta W_s}{\sigma'_{vm}} \right)^{\beta'} \quad (5)$$

که در آن، ΔW_s مقدار انرژی مستهلک شده در واحد حجم خاک، α' و β' ضرایب ثابت مدل و σ'_{vm} تنش مؤثر همه‌جانبه‌ی اولیه‌ی خاک هستند. در شرایط بارگذاری کلی (همانند بارگذاری نمونه‌های استوانه‌ی توخالی)، مقدار dW_s را می‌توان از رابطه‌ی ۶ محاسبه کرد:

$$dW_s = \sigma'_{ij} d\varepsilon_{ij} = \sigma'_v d\varepsilon_v + \sigma'_r d\varepsilon_r + \sigma'_h d\varepsilon_h + 2\tau_{vh} d\gamma_{vh} \quad (6)$$

که در آن، σ'_v تنش قائم مؤثر؛ $d\varepsilon_v$ جزء کرنش قائم؛ σ'_r تنش شعاعی مؤثر؛ $d\varepsilon_r$ جزء کرنش شعاعی؛ σ'_h تنش افقی مؤثر؛ $d\varepsilon_h$ جزء کرنش افقی؛ τ_{vh} تنش برشی؛ $d\gamma_{vh}$ جزء کرنش برشی هستند.

جدول ۶، نتایج آنالیز برآزش مدل توانی را بر روی نتایج آزمایش‌های ماسه‌ی شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر نشان می‌دهد که مطابق آن، مدل توانی دقت بسیار بالایی در برآورد مقادیر فشار آب حفره‌ی ماندگار در نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته دارد. مقادیر ضریب همبستگی به‌دست آمده از نتایج آنالیز برآزش، عمدتاً بالاتر از ۰.۹۵ هستند. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که می‌توان ضریب ثابت α' در مدل توانی را با دقت مناسبی برابر ۴ در نظر گرفت. با این تغییر، فرم جدید مدل توانی بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده جهت استفاده در نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته به‌صورت رابطه‌ی ۷ خواهد شد. لازم به ذکر است که فرم اصلاح شده‌ی جدید، قابلیت پیش‌بینی نمونه‌های شل و تحکیم همسان



شکل ۵. تغییرات فشار آب حفره‌ی اضافی ماندگار با نسبت سیکلی در نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر.

ملاحظه‌ی بالا می‌رود و در محدوده‌ی بالایی، نمونه‌های تحکیم همسان‌یافته تحت شرایط ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار می‌گیرند. اعمال برش در حین تحکیم منجر به کاهش قابل توجه مقاومت برشی می‌شود، به‌طوری که در یک نسبت تناوبی مشخص، کرنش‌های خمیری بیشتری رخ می‌دهد و مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار بیشتری به‌وجود خواهد آمد.

با مقایسه‌ی مقادیر فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های تحکیم همسان یافته در

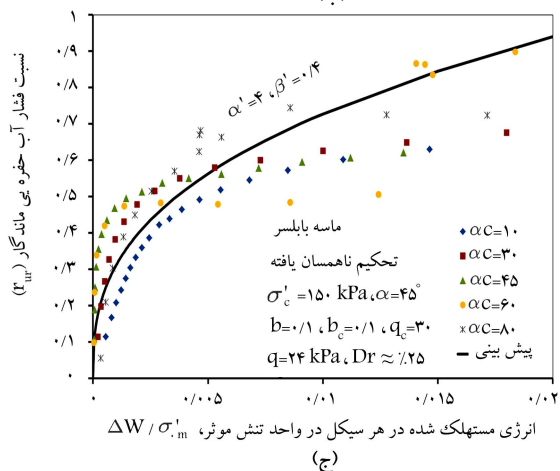
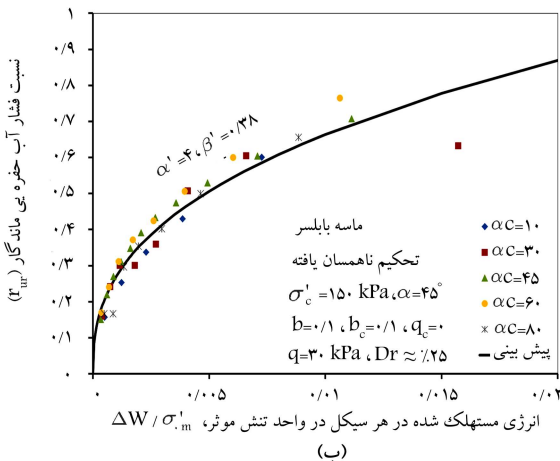
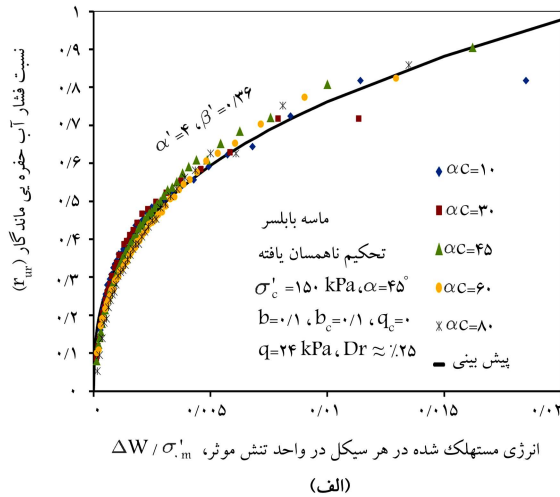
جدول ۶. نتایج آنالیز برازش رابطه‌ی ۵ بر روی نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی ماسه‌ی شل بابلسر.

$r_{ur} = \alpha' (\Delta W / \sigma'_{vm})^{\beta'}$					
R^2	β'	α'	α_c	b_c	
۰٫۹۹	۰٫۳۶	۴٫۳۶	۱۰	۰٫۱	
۱٫۰۰	۰٫۳۶	۳٫۸۴	۳۰	۰٫۱	
۱٫۰۰	۰٫۳۶	۳٫۴۱	۴۵	۰٫۱	$q_c = ۰$,
۱٫۰۰	۰٫۳۷	۴٫۱۳	۶۰	۰٫۱	$q = ۲۴$
۱٫۰۰	۰٫۳۷	۳٫۶۱	۸۰	۰٫۱	
۱٫۰۰	۰٫۳۶	۳٫۸۷	میانگین		
۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۵	۰٫۳۸۳	انحراف استاندارد		
۱٫۰۰	۰٫۴۰	۴٫۰۸	۱۰	۰٫۱	
۰٫۹۴	۰٫۳۹	۳٫۹۸	۳۰	۰٫۱	
۱٫۰۰	۰٫۳۸	۳٫۷۴	۴۵	۰٫۱	$q_c = ۰$,
۰٫۹۷	۰٫۳۶	۳٫۴۵	۶۰	۰٫۱	$q = ۳۰$
۰٫۹۸	۰٫۳۸	۴٫۵۳	۸۰	۰٫۱	
۰٫۹۸	۰٫۳۸	۳٫۹۶	میانگین		
۰٫۰۲۵	۰٫۱۵	۰٫۴۰۳	انحراف استاندارد		
۰٫۹۸	۰٫۴۲	۳٫۴۲	۱۰	۰٫۱	
۰٫۹۷	۰٫۳۹	۳٫۷۷	۳۰	۰٫۱	
۰٫۹۵	۰٫۳۸	۳٫۲۹	۴۵	۰٫۱	$q_c = ۳۰$,
۰٫۸۶	۰٫۴۰	۴٫۹۸	۶۰	۰٫۱	$q = ۲۴$
۰٫۸۸	۰٫۴۳	۴٫۵۵	۸۰	۰٫۱	
۰٫۹۳	۰٫۴۰	۴٫۰۰	میانگین		
۰٫۰۵۴	۰٫۰۲۰	۰٫۷۳۵	انحراف استاندارد		

یافته‌ی بابلسر را نیز دارد: [۲۴]

$$r_{ur} = ۴ \left(\frac{\Delta W_s}{\sigma'_{vm}} \right)^{\beta'} \quad (۷)$$

شکل ۶، نتایج آزمایش‌های نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر را با مقادیر پیش‌بینی شده از فرم اصلاح شده‌ی مدل توانی نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، فرم اصلاح شده‌ی مدل توانی بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار براساس انرژی مستهلک شده در هر سیکل است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، با افزایش نسبت سیکلی و نیز اعمال تنش برشی اضافی در هر سیکل بارگذاری، مقدار β' و به تبع آن فشار آب حفره‌ی ماندگار افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت تنش تناوبی و یا اعمال برش در حین تحکیم، سهم کرنش‌های خمیری از کرنش کل افزایش خواهد یافت. افزایش سطح کرنش‌های خمیری متناظر با افزایش مقدار انرژی مستهلک شده در هر سیکل خواهد بود. به عبارت دیگر، به ازاء یک مقدار فشار آب حفره‌ی مشخص، با افزایش سطوح تنش و یا اعمال برش در حین تحکیم، انرژی بیشتری در نمونه مستهلک خواهد شد.



شکل ۶. مقایسه‌ی فشار آب حفره‌ی ماندگار آزمایش‌های تحکیم ناهمسان یافته‌ی ماسه‌ی بابلسر با مدل بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تعداد ۱۵ آزمایش استوانه‌ی توخالی تناوبی بر روی نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر به منظور بررسی تأثیر تحکیم ناهمسان در روند تولید فشار آب حفره‌ی اضافی انجام شده است. به همین منظور نمونه‌های شل ماسه‌ی بابلسر در شرایط اولیه‌ی یکسانی از نظر چگالی نسبی اولیه (چگالی نسبی

همسان یافته در شرایط چگالی نسبی و تنش مؤثر همه‌جانبه‌ی مؤثر مشابه نشان داده است که مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته در همان محدوده‌ی فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های تحکیم همسان یافته است. به عبارت دیگر، در یک شرایط مشخص از چگالی نسبی و فشار آب حفره‌ی ماندگار می‌توان از محدوده‌ی تغییرات فشار آب حفره‌ی ماندگار نمونه‌های تحکیم همسان یافته برای پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته نیز استفاده کرد.

۳. پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی اضافی با استفاده از مدل بوکر نشان داده است که این مدل دقت کافی برای پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی را ندارد. با استفاده از اصلاح انجام شده بر روی مدل بوکر، فرم تغییر یافته‌ی آن می‌تواند با دقت مناسبی فشار آب حفره‌ی اضافی نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته را پیش‌بینی کند.

۴. پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی اضافی با استفاده از مدل توانی بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده علاوه بر نداشتن محدودیت‌های مدل تجربی بوکر، با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی فشار آب حفره‌ی اضافی نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته بوده است. با استفاده از فرم تک پارامتری مدل توانی می‌توان با دقت خوبی فشار آب حفره‌ی اضافی نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته را پیش‌بینی کرد.

انتهای مرحله‌ی تحکیم، روش ساخت نمونه و مقدار تنش همه‌جانبه‌ی مؤثر آماده‌ی بارگذاری شده‌اند. پس از آن و در مرحله‌ی تحکیم، نمونه‌ها به صورت ناهمسان تحکیم پیدا کرده‌اند، به طوری که در انتهای مرحله‌ی تحکیم جهت محور تنش اصلی بیشینه و نیز مقدار تنش برشی اضافی در حین تحکیم نمونه‌ها متفاوت بوده است. سپس تمامی نمونه‌ها در شرایط بارگذاری یکسانی ($\alpha = 45$ و $b = 0.1$) تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفته‌اند. در نهایت، فشار آب حفره‌ی اضافی توسط دو مدل تجربی و نیز مدل بر پایه‌ی انرژی مستهلک شده پیش‌بینی شده‌اند. آنالیز برازش دو مدل مذکور بر روی نتایج آزمایش‌ها منجر به اصلاح آنها برای استفاده در نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر شده است. در ادامه، نتایج اصلی به دست آمده ارائه شده است:

۱. تغییرات فشار آب حفره‌ی ماندگار با نسبت سیکلی نمونه‌های شل و تحکیم ناهمسان یافته‌ی بابلسر نشان داده است که جهت محور تنش اصلی بیشینه در حین تحکیم، تأثیر چندانی در روند تولید فشار آب حفره‌ی اضافی ماندگار ندارد. از طرفی با افزایش نسبت تنش سیکلی (q/σ'_{vm}) و اعمال تنش برشی اضافی در حین پروسه‌ی تحکیم، مقدار فشار آب حفره‌ی ماندگار بیشتری تولید شده است. در این بین، تأثیر اعمال تنش برشی در حین تحکیم به مراتب بیشتر از افزایش نسبت تنش سیکلی بوده است.

۲. مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های نمونه‌های تحکیم ناهمسان یافته با نمونه‌های تحکیم

پانویس‌ها

1. transient pore water pressure
2. residual pore water pressure
3. mean normal stress
4. cohesion-less granular assemblies
5. loop
6. sub-rounded
7. sub-angular
8. booker
9. uniform

منابع (References)

1. Unjoh, S., Kaneko, M., Kataoka, S., Nagaya, K. and Matsuoka, K. "Effect of earthquake ground motions on soil liquefaction", *Soils and Foundations*, **52**(5), pp. 830-841 (2012).
2. Booker, J.R., Rahman, M.S. and Seed, H.B. "GADFLEA-A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading, Rep. No. EERC 76-24", Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif. (1976).
3. Wang, G., Zhang, D., Furuya, G. and Yang, J. "Pore-pressure generation and fluidization in a loess landslide triggered by the 1920 Haiyuan earthquake, China: A case study", *Engineering Geology*, **174**, pp. 36-45 (May 2014).
4. Sun, J. and Yuan, X. "A simplified formula for estimating realtime pore water pressure of anisotropically consolidated saturated sands under random earthquake loads", Proc., GeoShanghai, Geotechnical Special Publication, 150, ASCE/GEO Institute, Reston, Va., pp. 444-451 (2006).
5. Seed, H.B., Idriss, I.M., Makidisi, F. and Banerjee, N. "Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses", Rep. No. EERC 75-29, Univ. of California, Berkeley (1975).
6. Bhattacharya, S., Hyodo, M., Goda, K., Tazoh T. and Taylor C.A. "Liquefaction of soil in the Tokyo Bay area from the 2011 Tohoku (Japan) earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(11), pp. 1618-1628 (2011).
7. Castro, G. "Liquefaction of sands", PhD Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 231 p. (1969).
8. Dobry, R., Ladd, R., Yokel, F., Chung, R., and Powell, D. "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method", NBS Building Science, Series, 138, National Bureau of Standards, U.S. Dept. of Commerce (1982).
9. Green, R.A., Mitchell, J.K. and Polito, C.P. "An energy-based pore pressure generation model for cohesionless

- soils", Proc., John Booker Memorial Symp. Developments in Theoretical Geomechanics, D.W. Smith and J.P. Carter, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.383-390 (2000).
10. Polito, C., Green, R. and Lee, J. "Pore pressure generation models for sands and silty soils subjected to cyclic loading", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **134**(10), pp. 1490-1500 (2008).
 11. 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).
 12. 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).
 13. Casagrande, A. and Carrillo, N. "Shear failure of anisotropic materials", *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, **3**(4), pp. 122-135 (1944).
 14. Oda, M., Nasser, S.N. and Konishi, J. "Stress-induced anisotropy in granular masses", *Soils and Foundations*, **25**(3), pp.85-97 (1985).
 15. "Wykeham farrance dynamic hollow cylinder apparatus", Reference Manual, from Wykeham Farrance Limited (www.wfi.co.uk).
 16. ASTM D4253-00., *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table* (2003).
 17. ASTM D4254-00., *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density* (2003).
 18. ASTM D854-02., *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer* (2006).
 19. ASTM D422-63., *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils* (2007).
 20. Ladd, R.S. "Preparing test specimens using under compaction", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **1**(1), pp. 16-23 (1978).
 21. 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).
 22. Polito, C.P. "The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils", Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, Va., 274 (1999).
 23. Zamanian, M. "Evaluation of the cyclic behavior of anisotropic sands with hollow cylinder apparatus" Ph.D. dissertation, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, (In Persian) (2014).
 24. Davis, R.O. and Berrill, J.B. "Energy dissipation and seismic liquefaction in sands", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**(1), pp. 59-68 (1982).