

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

ارزیابی رفتار سه محوری مونوتونیک مصالح شنی

دکتر عطا آقایی آرای

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

دکتر عباس سروش

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر سعید هاشمی طباطبائی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

دکتر عباس قلندرزاده

عضو هیئت علمی دانشکده فنی دانشگاه تهران

گزارش تحقیقاتی

شماره نشر: گ - ۶۳۱

چاپ اول: ۱۳۹۱

عنوان و نام پدیدآور	: ارزیابی رفتار سه محوری مونوتونیک مصالح شنی / عطا آقایی آرایبی ... (و دیگران)
مصنفات نشر	: تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۱.
استحضات مایه‌ری	: ص. ۲۰۰؛ جدول، نمودار.
سازک	: ۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۲-۲۸-۹
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیبا
یادداشت	: عطا آقایی آرایبی، عباس سروش، سعید هاشمی طباطبایی، عباس قلندرزاده.
بازتاب	: کتابخانه: ص. ۱۷۷-۱۸۰.
موضوع	: مصالح ساختمانی - - آزمایش
موضوع	: سکنده‌ها
شماره افزوده	: آقایی آرایبی، عطا.
شماره افزوده	: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
ردیابی کنگره	: ۱۳۹۱ الف/۴۲ / T.۸۴۱۰
ردیابی دیوبی	: ۶۲۰/۱۱۰-۲۸۷
شماره کتابخانه ملی	: ۳۰۳۴۳۶۳

مضوبه شماره ۹۱/۷۲۲ چاپ کتاب، شورای علمی انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

ارزیابی رفتار سه محوری مونوتونیک مصالح شنی

دکتر عطا آقایی آرایبی، دکتر عباس سروش، دکتر سعید هاشمی طباطبایی، دکتر عباس قلندرزاده

شماره نشر: گ - ۶۳۱ چاپ اول: ۱۳۹۱

ناشر: انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تنظیم برای چاپ: نسرين مقدس

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

بها: ۳۷۰۰۰ ریال

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مسئولیت صحت دیدگاه‌های علمی بر عهده نگارندگان محترم می‌باشد.

کلیه حقوق چاپ و انتشار اثر به ناشر تعلق دارد.

نشانی: تهران، بزرگراه شیخ فضل ا. نوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی،

خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۳۱۴۵-۱۶۹۶

تلفن: ۸۸۲۵۵۹۴۲-۶۸۲۵۵۹۴۱ دورنگار: ۸۸۲۵۵۹۴۱

صفحه الکترونیکی: <http://www.bhrc.ac.ir>

president@bhrc.ac.ir

پیشگفتار

از مصالح شنی به عنوان مصالح ساخت در خاکریزهای مهندسی استفاده زیادی می‌گردد که از بستر رودخانه‌ها و یا انفجار معادن سنگی تهیه می‌شوند. از جمله مشکلات موجود در تحلیل رفتار مصالح شنی، کمبود اطلاعات در مورد پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح با جنس‌های متفاوت، تحت بارگذاری مونوتونیک در شرایط مختلف می‌باشد. این مسئله به دلیل محدودیت‌های مربوط به هزینه زیاد انجام آزمایش‌ها و محدودیت‌های مربوط به حداکثر اندازه دانه‌های قابل آزمایش در وسایل آزمایشگاهی می‌باشد.

با توجه به فراهم بودن دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، امکان انجام آزمایش‌های مونوتونیک مختلف روی مصالح شنی در کشور فراهم شده است. این پروژه نتایج حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری قطر بزرگ مونوتونیک مختلف روی انواع مصالح سنگریزه‌ای قیزکوشه، گردکوشه و مصالح با درصد‌های مختلف شن به‌کار رفته در بدنه سدهای مهم کشور را ارائه می‌دهد که اطلاعات باارزشی در زمینه رفتار مصالح خاکی می‌باشد که جمع‌آوری و پردازش نتایج ارزشمند موجود می‌تواند در تعیین چگونگی رفتار مصالح شنی، مقادیر پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی، کمک شایانی کند و نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان در بررسی ظرفیت باربری پی‌ها، میزان نشست الاستیک پی ساختمان‌های مستقر روی خاکریزهای شنی مهندسی، ضریب اطمینان پایداری شیب‌های مهندسی‌ساز و اندرکنش شالوده و خاک شنی و طراحی سدهای خاکی به‌کار برد. ضمناً از این نتایج آزمایش‌ها می‌توان به عنوان راهنمایی در طراحی آزمایش‌های تکمیلی آتی برای این نوع مصالح بهره گرفت. امید است با انجام آزمایش‌های بیشتر روی سایر مصالح خاکی، دانش و آگاهی در این زمینه افزایش یابد.

سید محمود فاطمی عقدا

رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

عنوان	صفحه
چکیده	س
مقدمه	ف
فصل اول: مروری بر تاریخچه موضوع	۱
۱-۱ مقدمه	۱
۲-۱ پدیده شکست ذرات	۱
۱-۲-۱ بررسی اثر شکست دانه‌ها بر روی رفتار مصالح	۲
۲-۲-۱ عوامل مؤثر بر شکست ذرات	۳
۳-۲-۱ روش‌های تعیین مقدار شکست ذرات	۶
۳-۱ مقاومت برشی مصالح سنگریزه‌ای	۷
۱-۳-۱ پارامترهای تأثیرگذار روی مقاومت برشی مصالح سنگریزه‌ای	۷
۴-۱ فروریزش سنگریزه‌ای	۱۹
۵-۱ تراکم‌پذیری مصالح سنگریزه‌ای	۲۲
۶-۱ خزش مصالح سنگریزه‌ای	۲۲
۷-۱ مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی مصالح سنگریزه‌ای	۲۴
۱-۷-۱ حداکثر اندازه دانه‌ها	۲۶
۲-۷-۱ دانه‌بندی نمونه	۲۷
۸-۱ پیش‌بینی رفتار مصالح برای حالت واقعی	۲۹
۹-۱ ضریب پواسن مصالح سنگریزه‌ای	۳۱
۱۰-۱ مشکلات موجود در تعیین رفتار مصالح شن‌دار	۳۲
۱۱-۱ مدل‌سازی عددی رفتار مکانیکی نمونه‌های مصالح خاکی و سنگریزه‌ای	۳۴
۱۲-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۳۵
فصل دوم: آزمایش‌های آزمایشگاهی	۳۹
۱-۲ مقدمه	۳۹
۲-۲ دستگاه سه‌محوری سیکی قطر بزرگ و قابلیت‌های آن	۳۹
۱-۲-۲ اشباع کردن و تحکیم و آزمایش نمونه‌ها در دستگاه سه‌محوری مورد استفاده ۴۳	
۳-۲ برنامه آزمایش‌های مونوتونیک	۱۴۴



۴۴	۱-۳-۲ نتایج آزمایش‌های CD
۴۴	۱-۱-۳-۲ مشخصات مصالح مورد بررسی
۴۸	۲-۱-۳-۲ روش آزمایش
۴۸	۳-۱-۳-۲ نتایج اولیه آزمایش‌ها
۴۸	۴-۱-۳-۲ پردازش نتایج
۴۹	۱-۳-۲-۱-۴ تغییرات $(\varepsilon_1)q_{max}$ در برابر تنش محدودکننده
۴۹	۲-۳-۲-۱-۴ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در برابر تنش محدودکننده
۶۱	۳-۳-۲-۱-۴ اثر اندازه دانه‌ها
۶۴	۳-۳-۲-۱-۴ اثر شاخص بار نقطه‌ای و سایش لس‌آنجلس
۶۶	۳-۳-۲-۱-۴ شکست دانه‌ها
۶۷	۳-۳-۲-۱-۴ تغییرات مقادیر پارامترهای مقاومت برشی
۶۸	۴-۲ نتایج آزمایش‌های CU و UU
۶۹	۱-۴-۲ مشخصات مصالح مورد بررسی
۷۱	۲-۴-۲ روش آزمایش
۷۱	۳-۴-۲ نتایج اولیه آزمایش‌ها
۱۰۰	۲-۴-۳-۱ پردازش نتایج
۱۰۷	۵-۲ مقایسه نتایج CU و CD
۱۱۲	۶-۲ نتایج آزمایش مونوتونیک پس از آزمایش سیکی
۱۱۶	۷-۲ جمع‌بندی
۱۱۹	فصل سوم: مدل‌سازی عددی رفتار مصالح شنی سنگریزه‌ای
۱۱۹	۱-۳ مقدمه
۱۱۹	۲-۳ مدل موهر-کولمب
۱۲۱	۳-۲-۱ پارامترهای مدل موهر-کولمب
-	۳-۲-۲ مدل‌سازی عددی رفتار مصالح سنگریزه‌ای با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب
۱۲۴	۳-۲-۳ مدل هذلولی Duncan و Chang (۱۹۷۰)
۱۲۵	۳-۲-۴ معرفی مدل رفتاری هذلولی Duncan و Chang مورد استفاده برنامه Feadam
۱۲۸	۲-۳-۳ روند استفاده از مدل هذلولی برای نمونه‌های مورد بررسی



۴-۳	مدل رفتاری سخت‌شوندگی موجود در نرم‌افزار PLAXIS	۱۳۱
۴-۳-۱	رفتار سهموی برای آزمایش بارگذاری سه‌محوری استاندارد	۱۳۲
۴-۳-۲	قطع اتساع	۱۳۴
۴-۳-۲	کلاهک سطح تسلیم در مدل رفتاری سخت‌شوندگی	۱۳۵
۴-۳-۳	پارامترهای مدل رفتاری سخت‌شوندگی خاک	۱۳۸
۵-۳	مقایسه مدل رفتاری الاستوپلاستیک سخت‌شوندگی در برنامه PLAXIS با مدل معروف	
	Cheng و Duncan	۱۳۹
۶-۳	نتایج مدل‌سازی عددی با مدل سخت‌شوندگی	۱۴۰
۷-۳	تخمین میزان شکست ذرات در آزمایش سه‌محوری	۱۵۰
۷-۳-۱	نتایج تخمین میزان شکست دانه	۱۵۵
۸-۳	جمع‌بندی	۱۶۲
	فصل چهارم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۱۶۳
	پیشنهادهایی برای ادامه کار	۱۷۵
	منابع و مآخذ	۱۷۷

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل

صفحه

شکل ۱-۱	تغییرات فاکتور شکست در برابر کرنش محوری برای بالاست Latite	۵
شکل ۱-۲	منحنی میزان تغییرات دانه‌بندی در اثر شکست ذرات	۶
شکل ۱-۳	نتایج برش روی مصالح سنگریزه‌ای مدل شده	۱۲
شکل ۱-۴	تغییرات مقادیر زاویه اصطکاک با حداکثر اندازه دانه‌ها	۱۳
شکل ۱-۵	تغییرات نسبت تخلخل اولیه در برابر درصد شن نمونه	۱۵
شکل ۱-۶	رابطه فشار محدودکننده مؤثر آستانه اولیه در برابر درصد شن نمونه	۱۵
شکل ۱-۷	روابط بین تنش تقاضایی، کرنش حجمی و کرنش محوری در هنگام آزمایش‌های فشاری زهکشی شده خاک شنی دست‌نخورده و بارسازی شده با همان دانسیته	۱۸
شکل ۱-۸	تغییرات ϕ با d آزمایش سه‌محوری	۲۷
شکل ۱-۹	تبدیل دانه‌بندی نمونه‌های آزمایشگاهی	۲۷
شکل ۱-۱۰	تخمین رفتار تنش-کرنش-تغییر حجم نمونه واقعی مصالح سنگریزه‌ای رودخانه‌ای بر اساس نتایج حاصل از محل Silt Ejector سد Western Yamuna Canal در $\sigma_3 = 60 \text{ kPa}$	۳۰
شکل ۱-۱۱	تخمین رفتار تنش-کرنش-تغییر حجم نمونه واقعی مصالح سنگریزه‌ای تیزگوشه تا قطر ۳۰۰ mm بر اساس نتایج حاصل از محل سد Purulia در $\sigma_3 = 900 \text{ kPa}$	۳۰
شکل ۱-۱۲	تغییرات ضریب پواسن با حداکثر اندازه دانه	۳۱
شکل ۱-۱۳	اثر تنش محدودکننده روی نسبت پواسن در کرنش‌های کوچک برای بالاست Bombo خشک	۳۱
شکل ۱-۱۴	رفتار تنش-کرنش واقعی و منظور شونده در طراحی برای مصالح دانه‌ای خوب کوبیده شده	۳۳
شکل ۱-۱۵	تغییرات تنش تقاضایی حداکثر با میزان تراکم تحت تنش 50 kPa (Tatsooka, ۲۰۰۹)	۳۳
شکل ۱-۱۶	تغییرات زاویه اصطکاک حداکثر با میزان تراکم تحت تنش 50 kPa برای مصالح مختلف دانه‌ای	۳۳
شکل ۱-۱۷	تغییرات تقاضایی حداکثر با میزان تراکم ماسه Inagi تحت تنش محدودکننده 50 kPa در تراکم‌های مختلف تحت شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده	۳۴
شکل ۱-۱۸	تغییرات تنش تقاضایی پسماند با میزان تراکم ماسه Inagi تحت تنش محدودکننده 50 kPa در تراکم‌های مختلف تحت شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده	۳۴
عکس ۱-۲	نمای کلی دستگاه آزمایش سه‌محوری سیکلی قطر بزرگ آزمایشگاه دینامیک خاک و سنگ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن	۴۰
شکل ۱-۲	جزئیات سل دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ آزمایشگاه مکانیک خاک بخش ژئوتکنیک مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	۴۱
شکل ۲-۲	جزئیات سیستم اعمال فشار توسط آب و هوا دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ آزمایشگاه دینامیک خاک بخش ژئوتکنیک مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	۴۲
شکل ۲-۳	تهیه نمونه برای آزمایش در دستگاه سه‌محوری بزرگ مقیاس	۴۴
شکل ۲-۴	دانه‌بندی مصالح آزمایش شده در آزمایش‌های CD	۴۵

- شکل ۵-۲ BLR کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۴
- شکل ۶-۲ BSV کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۴
- شکل ۷-۲ BDV کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۴
- شکل ۸-۲ BABS کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۵
- شکل ۹-۲ BDZ کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۵
- شکل ۱۰-۲ BAA1-re و BAA1 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۵
- شکل ۱۱-۲ BAA2 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۶
- شکل ۱۲-۲ BLSBU1 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۶
- شکل ۱۳-۲ BVLSBII1 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۶
- شکل ۱۴-۲ BLSBIV1 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۷
- شکل ۱۵-۲ BLSBU2 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۷
- شکل ۱۶-۲ BVLSBII2 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۷
- شکل ۱۷-۲ BLSBIV2 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۸
- شکل ۱۸-۲ AADY1 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۸
- شکل ۱۹-۲ AADY2-re و AADY2 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۸
- شکل ۲۰-۲ AABG کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۹
- شکل ۲۱-۲ ADBS1 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۹
- شکل ۲۲-۲ ADBS2 کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۵۹
- شکل ۲۳-۲ AAA کرنش محوری - کرنش حجمی مصالح ۶۰
- شکل ۲۴-۲ تغییرات کرنش حجمی در تنش تفاضلی حداکثر در برابر تنش محدودکننده، (a) مصالح سنگریزه‌ای، (b) مصالح رودخانه‌ای ۶۰
- شکل ۲۵-۲ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در تنش تفاضلی حداکثر در برابر تنش محدودکننده، (a) مصالح سنگریزه‌ای، (b) مصالح رودخانه‌ای ۶۱
- شکل ۲۶-۲ تغییرات $\frac{q_{max}}{\sigma_3}$ در برابر ϕ' ۶۱
- شکل ۲۷-۲ تغییرات مقادیر زاویه اصطکاک در تنش تفاضلی حداکثر در برابر اندازه داده ۶۳
- شکل ۲۸-۲ تغییرات ϕ' / σ_3' در برابر I_s / σ_3' برای مصالح سنگریزه‌ای ۶۵
- شکل ۲۹-۲ تغییرات ϕ' در برابر $\frac{I_s}{L_A}$ برای مصالح سنگریزه‌ای ۶۶
- شکل ۲۹-۲ تغییرات ϕ' در برابر سایش لس آنجلس برای مصالح سنگریزه‌ای و رودخانه‌ای ۶۶
- شکل ۳۱-۲ تغییرات $(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'})_{max}$ در برابر B_g ۶۷
- شکل ۳۲-۲ تغییرات B_g در برابر σ_3' ۶۷
- شکل ۳۳-۲ تغییرات $\frac{q}{\sigma_3'}$ در برابر σ_3' ۶۷



شکل ۲-۳۴ تغییرات ϕ' در برابر σ_3	۶۸
شکل ۲-۳۵ تغییرات زاویه اصطکاک حداکثر و پسماند تا تنش محدودکننده 8 kg/cm^2	۶۸
شکل ۲-۳۶ دانه‌بندی مصالح آزمایش شده در آزمایش‌های CU و UU	۷۱
شکل ۲-۳۷ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای، مسیر تنش و دواير موهر مصالح BABS تحت شرایط CU	۷۸
شکل ۲-۳۸ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح BABS-re تحت شرایط CU	۷۹
شکل ۲-۳۹ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح BAA1 تحت شرایط CU	۸۰
شکل ۲-۴۰ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای مصالح BAA1-re تحت شرایط CU	۸۱
شکل ۲-۴۱ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح AADY2 تحت شرایط CU	۸۲
شکل ۲-۴۲ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح AADY1 تحت شرایط CU	۸۳
شکل ۲-۴۳ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح AADY1-re تحت شرایط CU	۸۴
شکل ۲-۴۴ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح C.SC تحت شرایط CU	۸۵
شکل ۲-۴۵ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح C.SC-re تحت شرایط CU	۸۶
شکل ۲-۴۶ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح ADBS1 تحت شرایط CU	۸۷
شکل ۲-۴۷ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح ADBS2 تحت شرایط CU	۸۸
شکل ۲-۴۸ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح AAA تحت شرایط CU	۸۹
شکل ۲-۴۹ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح AASK تحت شرایط CU	۹۰
شکل ۲-۵۰ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح AASK-re تحت شرایط CU	۹۱
شکل ۲-۵۱ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح C.MES-20 تحت شرایط CU	۹۲
شکل ۲-۵۲ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره ای و مسیر تنش مصالح C.MES-17 تحت شرایط CU	۹۳



- شکل ۲-۵۳ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مصالح C.K تحت شرایط CU ۹۴
- شکل ۲-۵۴ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مصالح C.SC-cu تحت شرایط CU ۹۵
- شکل ۲-۵۵ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مصالح C.SC-uu-us تحت رطوبت طبیعی و شرایط UU ۹۶
- شکل ۲-۵۶ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مصالح C.SV-cu تحت شرایط CU ۹۷
- شکل ۲-۵۷ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مصالح C.SV-uu تحت شرایط UU ۹۸
- شکل ۲-۵۸ منحنی‌های تنش - کرنش محوری - اضافه فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مصالح C.SV-uu-us تحت رطوبت طبیعی و شرایط UU ۹۹
- شکل ۲-۵۹ تغییرات $\frac{q}{\sigma_3}$ در برابر σ_3' ۱۰۱
- شکل ۲-۶۰ تغییرات u در برابر σ_3' ۱۰۲
- شکل ۲-۶۱ زاویه اصطکاک (تنش کل) با فرض چسبندگی برابر با صفر برای هر نمونه ۱۰۳
- شکل ۲-۶۲ زاویه اصطکاک (تنش مؤثر) با فرض چسبندگی برابر با صفر برای هر نمونه ۱۰۴
- شکل ۲-۶۳ زاویه اصطکاک (تنش کل و مؤثر) بر اساس ترسیم بهترین برازش بر نقاط - درصد اندازه دانه‌ها ۱۰۵
- شکل ۲-۶۴ چسبندگی (تنش کل و مؤثر) بر اساس ترسیم بهترین برازش بر نقاط در برابر درصد اندازه دانه‌ها ۱۰۶
- شکل ۲-۶۵ زاویه اصطکاک (تنش کل و مؤثر) با فرض چسبندگی صفر برای هر نمونه در برابر درصد اندازه دانه‌ها ۱۰۷
- شکل ۲-۶۶ منحنی‌های تنش تفاضلی، کرنش حجمی، نسبت تنش تفاضلی و نسبت کرنش حجمی به اضافه فشار حفره‌ای تحت شرایط CD و CU ۱۱۲
- شکل ۲-۶۷ الف) اعمال تنش تفاضلی برای رسیدن به شرایط غیرهمسانی، ب) آزمایش مونوتونیک پس از آزمایش‌های سیکی در نمونه‌های خشک ۱۱۵
- شکل ۲-۶۸ الف) اعمال تنش تفاضلی برای رسیدن به شرایط غیرهمسانی، ب) آزمایش مونوتونیک پس از آزمایش‌های سیکی در نمونه‌های اشباع ۱۱۶
- شکل ۲-۶۹ مسیر تنش زهکشی شده برای آزمایش‌های مونوتونیک پس از آزمایش سیکی مصالح اشباع SCG ۱۱۶
- شکل ۳-۱ سطح تسلیم موهر-کولمب ۱۲۰
- شکل ۳-۲ تعریف E_0 و E_{50} ۱۲۲
- شکل ۳-۳ دایره‌های موهر در تسلیم، یکی از دواير به پوش کولمب مماس می شود ۱۲۳
- شکل ۳-۴ نمایش زاویه اتساع در آزمایش سه‌محوری استاندارد ۱۲۳
- شکل ۲-۵۰ طرح شماتیک نحوه مدل سازی آزمایش سه‌محوری در نرم افزار PLAXIS ۱۲۴
- شکل ۳-۶ مقایسه نمودار تنش برشی - کرنش محوری - کرنش حجمی به دست آمده از آزمایش سه‌محوری به قطر



- ۱۲۵..... ۸۰ cm با دانسیته 20 kN/m^3 و تحلیل عددی برای مصالح پوسته 3A سد مسجدسلیمان
- ۱۲۶..... شکل ۷-۳ مفهوم فیزیکی a و b در مدل هذلولی
- ۱۲۷..... شکل ۸-۳ نحوه به دست آوردن مقادیر a و b
- ۱۲۸..... شکل ۹-۳ نحوه به دست آوردن مقادیر پارامترهای n و K
- شکل ۱۰-۳ نمودار $\varepsilon_u : \frac{\varepsilon_u}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ برای مصالح 3A سد مسجدسلیمان، در حالت خشک و با دانسیته زیاد،
- ۱۳۱..... $\sigma'_3 = 1800 \text{ kPa}$
- ۱۳۲..... شکل ۱۱-۲ رابطه تنش کرنش هذلولی در بارگذاری آزمایش سه‌محوری زهکشی شده استاندارد
- ۱۳۴..... شکل ۱۲-۳ تعریف E_{oed}^{ref} با استفاده از نتایج آزمایش ادمتری
- شکل ۱۳-۳ منحنی کرنش محوری - کرنش حجمی آزمایش سه‌محوری استاندارد زهکشی شده در زمانی که قطع اتساع منظور می‌شود.
- ۱۳۵..... شکل ۱۴-۳ سطح تسلیم مدل سخت‌شوندگی خاک در صفحه $p-q$ ناحیه الاستیک با افزایش کشش کاهش می‌یابد.
- ۱۳۷..... شکل ۱۵-۳ نمایش کلیه کنتورهای تسلیم مدل سخت‌شوندگی در فضای تنش‌های اصلی
- ۱۳۸..... شکل ۱۶-۳ نتایج مدل‌سازی با مدل سخت‌شوندگی مصالح گزگوشه BAA1
- ۱۴۵..... شکل ۱۷-۳ نتایج مدل‌سازی با مدل سخت‌شوندگی مصالح گزگوشه ADBS1
- ۱۴۶..... شکل ۱۸-۲ رابطه E_{50}^{ref} در برابر ϕ'
- ۱۴۷..... شکل ۱۹-۲ رابطه E_{50}^{ref} در برابر E_{ur}^{ref}
- ۱۴۷..... شکل ۲۰-۲ رابطه E_{50}^{ref} در برابر E_{oed}^{ref}
- ۱۴۸..... شکل ۲۱-۲ رابطه زاویه اصطکاک مدل‌سازی با مدل سخت‌شوندگی در برابر اصطکاک آزمایش سه‌محوری
- ۱۴۹..... شکل ۲۲-۲ رابطه $\phi - \psi$ مدل‌سازی در برابر σ'_3
- ۱۴۹..... شکل ۲۳-۲ رابطه $(\phi - \psi) / \sigma'_3$ مدل‌سازی در برابر σ'_3
- ۱۵۰..... شکل ۲۴-۲ رابطه تفاوت $\phi - \psi$ مدل‌سازی در برابر سایش لس‌آنجلس
- ۱۵۰..... شکل ۲۵-۲ رابطه $\phi - \psi$ مدل‌سازی در برابر نسبت شاخص بار نقطه‌ای به سایش لس‌آنجلس
- ۱۵۰..... شکل ۲۶-۲ فشار سه‌محوری روی دانه‌های درشت دانه در نمونه سه‌محوری مقارن و مدل‌سازی تغییر شکل دانه‌ای و جزئیات نیروها و تغییر شکل‌ها در مرز تماس دو دانه
- ۱۵۴..... شکل ۲۷-۲ تغییرات زاویه اصطکاک برای مصالح BAA1
- ۱۵۶..... شکل ۲۸-۲ تغییرات زاویه اتساع در برابر کرنش محوری مصالح BAA1
- ۱۵۷..... شکل ۲۹-۳ تغییرات انرژی شکست در برای کرنش محوری مصالح BAA1
- ۱۵۷..... شکل ۳۰-۲ رابطه E_B/B_g در برابر σ'_3
- ۱۵۸..... شکل ۳۱-۳ تغییرات فاکتور شکست در برای کرنش محوری مصالح BAA1
- ۱۶۰..... شکل ۳۲-۲ رابطه ψ° در برابر E_B مصالح BAA1
- ۱۶۱..... شکل ۳۳-۲ رابطه زاویه اتساع مدل‌سازی در برابر نسبت شاخص شکست مارسال، الف) کلیه کرنشها، ب) حداکثر (مثبت)

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ مقادیر فاکتور شکست برای مصالح سنگریزه‌ای مختلف	۳
جدول ۲-۱ کاهش مدول تغییر شکل تعدادی از سنگریزه‌ها	۲۱
جدول ۳-۱ مقادیر نشست اولیه و نرخ خزش (α) حاصل از آزمایش‌ها روی مصالح سنگریزه‌ای برای یک هفته بارگذاری	۲۴
جدول ۱-۲ مشخصات مصالح به کار رفته در این مطالعات برای انجام آزمایش‌های CD ...	۴۶
جدول ۲-۲ خلاصه‌ای از نتایج اولیه آزمایش‌ها CD	۵۱
جدول ۳-۲ مشخصات مصالح به کار رفته در این مطالعات برای انجام آزمایش‌های CU و UU	۷۰
جدول ۴-۲ خلاصه‌ای از نتایج اولیه آزمایش‌ها تحت شرایط CU و UU	۷۳
جدول ۵-۲ تغییرات زاویه اصطکاک کل و مؤثر در آزمایش تحت شرایط CU و UU	۷۶
جدول ۶-۲ خلاصه اطلاعات برای آزمایش‌های مونتونیک سه‌محوری برای اعمال شرایط غیرهمسانی و پس از آزمایش سیکلی	۱۱۴
جدول ۱-۳ پارامترهای به کار رفته در مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل موهر-کولمب ..	۱۲۵
جدول ۲-۳ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و تحلیل‌های عددی روی مصالح سنگریزه‌ای ..	۱۴۳
جدول ۳-۳ نتایج مدل‌سازی‌ها برای محاسبه مقادیر فاکتور شکست	۱۵۸

چکیده

از مصالح شنی تیزگوشه و گردگوشه به طور وسیع به عنوان مصالح ساخت در خاکریزهای مهندسی استفاده می‌شود. از جمله مشکلات موجود در تحلیل رفتار مصالح شنی در کاربری‌های یاد شده، عدم شناخت رفتار و همچنین مشخص نبودن پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح با جنس‌های متفاوت، تحت بارگذاری مونوتونیک با توجه به محدودیت‌های هزینه زیاد انجام آزمایش‌ها و اندازه دانه‌ها برای وسایل آزمایش می‌باشد.

این پژوهش نتایج حاصل از آزمایش‌های سه‌محوری قطر بزرگ مونوتونیک مختلف (۸۲ نمونه استاتیکی زهکشی شده و ۶۷ نمونه استاتیکی زهکشی نشده) روی انواع مصالح سنگریزه‌ای تیزگوشه، گردگوشه و مصالح با درصد‌های مختلف شن به کار رفته در بدنه سدهای مهم کشور را ارائه می‌دهد. بررسی نتایج آزمایش‌ها شامل تغییرات زاویه اصطکاک داخلی، تنش تفاضلی حداکثر، کرنش حجمی و یا فشار آب حفره ای در برابر تنش محدود کننده و درصد ریزدانه می‌باشد. کرنش محوری نظیر تنش تفاضلی حداکثر مصالح تحت شرایط CD کمتر از مقادیر نظیر CU می‌باشد. دیگر این‌که جایی‌که کرنش حجمی در شرایط CD حداکثر است اضافه فشار آب حفره‌ای در شرایط CU شروع به کاهش می‌کند. مقادیر نسبت تنش تفاضلی CD به CU در سطح کرنش‌های کم بیشتر از مقادیر نظیر در سطح کرنش‌های محوری بالا می‌باشد و نسبت تنش تفاضلی CD به CU در کرنش‌های کوچک، کمتر از واحد می‌باشد.

منحنی‌های تنش - کرنش - تغییر حجم تحت شرایط CD با استفاده از مدل رفتاری سخت-شوندگی نرم افزار PLAXIS شبیه‌سازی شد که دلالت بر قابلیت مناسب مدل در شبیه‌سازی رفتار مصالح سنگریزه‌ای دارد. فرمولی هم برای محاسبه فاکتور شکست ماریسال ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که رابطه خطی بین فاکتور شکست و انرژی شکست وجود دارد و با افزایش تنش محدودکننده و کرنش محوری، بر میزان انرژی شکست افزوده می‌شود. نتایج حاصل از این مطالعه، در بررسی ظرفیت باربری پی‌ها، میزان نشست الاستیک پی ساختمان‌های مستقر روی خاکریزهای شنی مهندسی، ضریب اطمینان پایداری شیب‌های مهندسی‌ساز و اندرکنش شالوده و خاک شنی قابل استفاده خواهد بود.

مقدمه

از مصالح شنی به طور وسیع به عنوان مصالح ساخت در خاکریزهای مهندسی چون دیوارهای حایل، خاکریز بدنه رادها، خاکریز راه آهن، مصالح پشت کوله پلها، مصالح خاکریزی برای استحصال زمین از دریا، پر کردن دره‌ها برای ساخت و ساز و حتی برای حفاظت شالوده ساختمان در برابر رطوبت در مناطق با سطح آب زیرزمینی بالا (در مناطق شمالی کشور) استفاده می‌شود. این مصالح از بستر رودخانه‌ها و یا انفجار معادن سنگی تهیه می‌شود، از جمله مشکلات موجود در تحلیل رفتار مصالح شنی در کاربری‌های یاد شده، عدم شناخت رفتار و همچنین مشخص نبودن پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح با جنس‌های متفاوت، تحت بارگذاری مونوتونیک با توجه به هزینه زیاد انجام آزمایش‌ها و اندازه دانه‌ها برای وسایل آزمایش می‌باشد. پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح سنگریزه‌ای به عوامل مختلفی نظیر نوع کانی‌ها، دانه‌بندی، شکل و اندازه ذرات، شکست ذرات و سطح تنش بستگی دارد. در سازه‌های متشکل از مصالح سنگریزه‌ای و شنی، لایه‌های زیرین تحت تأثیر وزن لایه‌های فوقانی بوده و سنگدانه‌های تشکیل‌دهنده لایه‌های زیرین، تحت تنش‌های قابل توجهی می‌باشند. این مبادی قابل توجه تنش، باعث شکست ذرات می‌شوند. شکست ذرات و خرد شدن سنگدانه‌های بزرگ و ایجاد سنگریزه‌های کوچکتر، باعث تغییر اندازه دانه‌ها و منحنی دانه‌بندی می‌شود و بنابراین رفتار مکانیکی مصالح دانه‌ای تغییر می‌یابد. با توجه به انجام آزمایش‌های سه‌محوری قطر بزرگ (۲۰ cm قطر و ۶۰ cm ارتفاع) مونوتونیک روی مصالح شنی با خصوصیات مکانیک خاک مختلف از سال ۱۳۷۴ تاکنون در بخش ژئوتکنیک مرکز تحقیقات راه، مسکن، و شهرسازی جمع‌آوری و پردازش نتایج، برای تعیین چگونگی رفتار مصالح شنی و همچنین مقادیر پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی، ضروری به نظر می‌رسد. نتایج حاصل از این مطالعه، در بررسی ظرفیت باربری پی‌ها، میزان نشست الاستیک پی ساختمان‌های مستقر روی خاکریزهای شنی مهندسی، ضریب اطمینان پایداری شیب‌های مهندسی‌ساز و اندرکنش شالوده و خاک شنی قابل استفاده خواهد بود. به طور کلی اهداف این تحقیق را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد:

- جمع‌آوری نتایج آزمایش‌های سه‌محوری قطر بزرگ مونوتونیک مقاومتی (۸۲ نمونه استاتیکی زهکشی شده، ۶۷ نمونه استاتیکی زهکشی نشده) به همراه آزمایش‌های تراکم، سایش لس‌آنجلس و شاخص بار نقطه‌ای
- تعیین رفتار تغییرشکلی و مقاومتی مصالح شنی مختلف تحت آزمایش‌های مونوتونیک



زهکشی شده و زهکشی نشده در تراکم بالا و در تنش های محدودکننده مختلف - تعیین مقادیر حداکثر تنش تفاضلی، زاویه اصطکاک و تغییرات حجمی یا اضافه فشار آب حفردای برای مصالح تیزگوشه و گردگوشه با درصدهای مختلف شن به ترتیب در آزمایش های مونوتونیک CD و CU

- استفاده از یک مدل رفتاری مناسب موجود برای شبیه سازی نتایج آزمایش های استاتیکی CD و تعیین پارامترهای مدل - تعیین ارتباط بین شاخص بارنقطه ای و سایش لس آنجلس با پارامترهای مقاومتی و بررسی شکست دانه ها (بر اساس داده های موجود و برای آزمایش های CD) - فراهم شدن راهنمایی در طراحی آزمایش های سه محوری قطر بزرگ تکمیلی آبی برای این نوع مصالح

ساختار این تحقیق به شرح زیر است:

فصل اول این تحقیق به مطالعات تاریخی در مورد خواص و رفتار مکانیکی مصالح سنگریزه ای و شنی اختصاص دارد. در این فصل پنج مشخصه رفتاری مهم مصالح سنگریزه ای، یعنی: شکست ذرات، مقاومت برشی، فروریزش، تراکم پذیری و خزش و پارامترهای تأثیرگذار روی این خواص، بررسی می شود. در نهایت جمع بندی از پارامترهای مؤثر بر رفتار مکانیکی مصالح سنگریزه ای و شنی صورت می گیرد.

در فصل دوم نتایج آزمایش های CD، CU انجام شده روی مصالح مختلف ارائه می شود. ارائه تحلیل های اولیه و مقایسه نتایج در حالت های زهکشی شده و زهکشی نشده، در این بخش صورت می گیرد.

در فصل سوم این تحقیق، سعی می شود که مدل رفتاری مناسبی برای مدل سازی رفتار مکانیکی مصالح سنگریزه ای و شنی، از بین مدل های موجود انتخاب شود. ابتدا قابلیت مدل های موهر-کولمب و هذلولی بررسی می شود. سپس مدل سخت شونده گی معرفی می شود. در ادامه از مدل سخت شونده گی برای شبیه سازی منحنی های تنش - کرنش حجمی - کرنش محوری مصالح سنگریزه ای در حالت CD استفاده می شود. در ادامه روشی برای محاسبه شکست ذرات در هر سطح از کرنش ارائه می شود. بدین منظور از اصل مینیم انرژی (Rowe, 1962) استفاده می شود.

در فصل چهارم جمع بندی، نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه می گردد.