

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

ارزیابی استفاده از حسگر غیرتماسی در اندازه‌گیری مدول برشی خاک‌ها در خاک‌های دانه‌ای و شنی لایه‌ای شده

دکتر عطا آقایی آرانی

(عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)

گزارش تحقیقاتی

شماره نشر: گ - ۷۰۲

چاپ اول: ۱۳۹۳

سرشناسه	آقای آرای، عطا، ۱۳۵۶-
عنوان و نام پدیدآور	ارزیابی استفاده از حسگر غیر تماسی در اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر در خاک‌های دانه‌ای و شنی لایه‌بندی شده/عطا آقای آرای.
مشخصات نشر	تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	۱۵۲ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۱۱۳-۱۱۶-۵
وضعیت فهرست‌نویسی	فیبیا
یادداشت	کتابنامه
موضوع	مصالح ساختمانی - - آزمایش
موضوع	مصالح ساختمانی - - آزمایش - - ابزار و وسایل
موضوع	مصالح ساختمانی - - اثر زلزله
پایه افزوده	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
رده‌بندی کنگره	TA۴۱۰/۱۷۱۴ ۱۳۹۲
رده‌بندی دیویی	۶۹۱/۰۲۸۷
شماره کتابشناسی ملی	۳۳۳۰۰۲

مصور: ۹۲/۲۰۰ چاپ کتاب، شورای علمی انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

ارزیابی استفاده از حسگر غیر تماسی در اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر در خاک‌های دانه‌ای و شنی لایه‌بندی شده

دکتر عطا آقای آرای

شماره نشر: گ - ۷۰۲ چاپ اول: ۱۳۹۳

ناشر: انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تنظیم برای چاپ: نسرين مقدس

شمارگان: ۱۰۰ نسخه

بها: ۵۵۰۰۰ 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 فضل، ل.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>

پست الکترونیکی: president@bhrc.ac.ir

ISBN: 978-600-113-116-5

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۱۳-۱۱۶-۵

پیشگفتار

اندازه‌گیری سرعت امواج و کرنش‌های مصالحی مانند خاک‌های دانه‌ای و شنی، با محدودیت‌هایی در وسایل آزمایشگاهی روبرو است. تاکنون برای اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی خصوصاً سرعت موج برشی، مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی در مصالح مختلف روش‌های صحرایی و دستگاه‌های آزمایشگاهی مختلفی به‌کار گرفته شده که هرکدام از آنها قابلیت کاربرد برای یک مصالح خاص را دارند و یا دارای محدودیت‌هایی هستند. در این راستا بررسی امکان نصب وسایل و دستگاه‌های جدید برای اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی یاد شده در کرنش‌های کوچک از اهمیت قابل توجهی در مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ها برخوردار است. این پژوهش با هدف به‌کارگیری روشی ساده، غیرمخرب، برخوردار از تکرارپذیری مناسب و قابلیت امکان نصب روی دستگاه موجود، پیشنهاد و انجام شد.

با توجه به فراهم‌بودن دستگاه‌های قطر بزرگ در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، امکان انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک و سیکلی مختلف روی مصالح دانه‌ای و شنی در کشور فراهم شده‌است. نصب دستگاه استفاده شده در این تحقیق روی دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ کمک شایانی در اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر بدون صرف وقت و هزینه اضافی آماده‌سازی نمونه را فراهم می‌کند. با نصب دستگاه‌های دستگاه یاد شده در مکان مناسب برای خاک‌های لایه‌بندی شده می‌توان پارامترهای دینامیکی را برای دو مصالح مختلف اندازه‌گیری کرد. از نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان بر ارائه منحنی‌های رفتار دینامیکی مصالح مختلف از جمله مصالح بدنه سدهای خاکی سنگریزه‌ای، تحلیل پاسخ لایه‌های زمین برای مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، بررسی اندرکنش مصالح و خاک‌های دانه‌ای و شنی لایه‌بندی شده استفاده کرد. همچنین از این نتایج آزمایش‌ها می‌توان به عنوان راهنمایی در طراحی آزمایش‌های تکمیلی آتی برای انواع مصالح بهره گرفت. باید است با آزمایش‌های بیشتر با دستگاه ابداعی مذکور روی سایر مصالح دانه‌ای و شنی، دانش و آگاهی در این زمینه افزایش یابد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
بیشگفتار.....	ج
چکیده.....	ف
مقدمه.....	ق
فصل اول: مرور ادبیات فنی موضوع.....	
۱-۱- مقدمه.....	۱
۲-۱- انتشار امواج الاستیک در خاک.....	۲
۱-۲- ارسال و دریافت امواج الکتریکی تعیین مشخصات موج‌های الاستیک.....	۴
۳-۱- آزمایش‌های سنج‌های تعیین مدول برشی و میرایی در کرنش‌های کوچک.....	۴
۱-۳-۱- استفاده از سنج‌های مستقر در آرایه‌های عمودی در محاسبه مدول برشی و نسبت میرایی.....	۶
۴-۱- آزمایش‌های آزمایشگاهی با کرنش.....	۸
۱-۴-۱- آزمایش ستون تشدید.....	۹
۲-۴-۱- آزمایش نوسان اولتراسونیک.....	۱۵
۳-۴-۱- آزمایش المان خمشی.....	۱۷
۱-۴-۳- انواع المان خمشی.....	۱۸
۲-۴-۳- فواصل بین منبع ارسال و دریافت امواج الاستیک برای المان خمشی.....	۱۸
۳-۴-۳- روش‌های تعیین نتایج در آزمایش المان خمشی برای تاثیرگذار و مقایسه نتایج.....	۱۹
۴-۳-۴- استفاده از المان خمشی برای محاسبه میرایی.....	۲۵
۱-۴-۳-۴- روش نصف عرض توان با استفاده از تحلیل طیف پاسخ تحلیلی المان خمشی.....	۲۶
۴-۴-۱- آزمایش سه محوری.....	۴۴
۱-۴-۴-۱- استفاده از کرنش سنج‌های غیرتماسی و تکنیک برون‌یابی.....	۴۵
۲-۴-۴-۱- استفاده از شتاب‌سنج‌ها و تکنیک سرعت موج.....	۴۷
۳-۴-۴-۱- چگونگی نصب تجهیزات مختلف اندازه‌گیری روی بدنه نمونه سه محوری.....	۴۷



۴-۴-۱-۴	اندازه‌گیری کرنش حجمی در دستگاه سه محوری.....	۴۷
۴-۴-۱-۵	اثرات مایع اطراف نمونه بر فرکانس.....	۴۸
۴-۴-۱-۶	استفاده از مکش برای اعمال تنش محدودکننده در دستگاه سه محوری.....	۴۹
۴-۴-۱-۷	روش‌های اطمینان از اعمال یکسان تنش همه‌جانبه ناشی از مکش در کل نمونه سه‌محوری.....	۵۰
۱-۱	عوامل موثر بر نسبت مدول برشی حداکثر، نسبت مدول برشی و میرایی در برابر کرنش برشی.....	۵۴
۱-۱-۱	مقایسه نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی.....	۵۵
۱-۱-۶	نتیجه‌گیری.....	۵۶
فصل دوم: دستگاه اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر.....		
۱-۲	مقدمه.....	۵۹
۲-۲	اجزاء تشکیل‌دهنده دستگاه.....	۵۹
۲-۲-۳	دستگاه ثبت داده ۸ کاناله با سرعت نمونه‌گیری 100 kHz همراه با متعلقات مربوطه.....	۷۰
۴-۲	لوازم نصب و اتصالات IAP-SENSOR در روی دستگاه سه محوری قطر بزرگ.....	۷۳
۵-۲	سایر لوازم انجام آزمایش.....	۷۵
۶-۲	دستگاه سه محوری مورد استفاده.....	۷۶
۷-۲	ضرایب کالیبراسیون حسگرهای مختلف به کار رفته در آزمایش‌ها.....	۷۸
۸-۲	جمع‌بندی.....	۸۴
فصل سوم: آزمایش‌های آزمایشگاهی و نتایج.....		
۱-۳	مقدمه.....	۸۵
۲-۳	مصالح مورد مطالعه.....	۸۵
۱-۲-۳	نتایج آزمایش‌های اولیه.....	۸۵
۲-۲-۳	مشخصات مصالح مورد بررسی.....	۸۶
۱-۲-۲-۳	ساخت نمونه.....	۸۷
۲-۲-۲-۳	اعمال تنش محدودکننده و نصب تجهیزات لازم در اطراف نمونه‌ها.....	۸۸
۳-۳	تکنیک اندازه‌گیری مدول برشی براساس سرعت موج.....	۸۹



۴-۳	مدول برشی در کرنش‌های کوچک	۹۰
۴-۳-۱	اثر غشاء بر سرعت موج اندازه‌گیری شده	۹۵
۴-۳-۲	اثر شرایط انتهایی نمونه بر سرعت موج اندازه‌گیری شده	۹۶
۴-۳-۳	اثر ضخامت لایه‌های مصالح بر سرعت موج اندازه‌گیری شده در مرزها	۹۷
۴-۳-۴	اثر محل قرارگیری‌ها لایه مصالح در یک نمونه بر سرعت موج اندازه‌گیری شده	۹۸
۵-۳	برنامه آزمایش‌های سه محوری سیکلی دینامیکی	۹۹
۵-۳-۱	روش آزمایش	۹۹
۵-۳-۲	نایج آزمایش‌های خصوصیات دینامیکی مصالح	۱۰۰
۵-۳-۳	۱-۲ مدول یانگ	۱۰۰
۵-۳-۴	۲-۵-۳ ثبت سیگنالی	۱۰۵
۶-۳	جمع‌بندی	۱۱۰
۱۱۱	فصل چهارم: نتیجه‌گیری	۱۱۱
۱۲۲	پیشنهادهایی برای ادامه کار	۱۲۲
۱۲۳	منابع و مأخذ	۱۲۳

فهرست تصاویر

صفحه

عنوان شکل

- شکل ۱-۱ روش‌های لرزه‌ای برای اندازه‌گیری سختی زمین ۶
- شکل ۲-۱ جزئیات آزمایش امواج سطحی پیوسته ۶
- شکل ۳-۱ (a) آرایه شتاب‌سنج و جزءبندی خاک برای محاسبات تنش - کرنش، (b) نمونه‌ای از حلقه هیستریزس ۸
- شکل ۴-۱ نمونه دستگاه ستون تشدید، الف) تصویر فوقانی از سیستم بارگذاری، ب) تصویر جانبی از سیستم بارگذاری، نمونه خاک ۹
- شکل ۵-۱ روش کاهش لگاریتمی دامنه در محاسبه نسبت میرایی دستگاه ستون تشدید ۱۱
- شکل ۶-۱ بار عددی برای محاسبه I/I_0 ۱۲
- شکل ۷-۱ الگو توزیع موج ایجادشونده برای مود اول ارتعاش برای در نوع دستگاه ستون تشدید، (a) وسیله ارتعاش در پایین، (b) وسیله ارتعاش در بالای نمونه ۱۲
- شکل ۸-۱ اندازه‌گیری شتاب مود پایه، تاب‌سنج‌های مینیاتوری در سه مکان ۲، ۱ و ۳ و شتاب‌سنج مرجع در مکان ۱۴
- شکل ۹-۱ شکل مودهای اندازه‌گیری شدیدی، ماسه سیمانی‌شده با چسب‌های متصل‌کننده مختلف در تنش محدودکننده ۹۲ kPa (SR = سیمان گچی، PC = سیمان پورتلند) ۱۴
- شکل ۱۰-۱ نمایش ترانسیدوسر آلتراسونیک با مبرق آلومینوم متصل‌شده ۱۷
- شکل ۱۱-۱ نحوه کار المان خمشی برای ایجاد موج برشی ۱۸
- شکل ۱۲-۱ المان خمشی (a) نمونه خاک و مکان نصب حسگرهای ایجاد موج برشی، (b) تفسیر نتایج ۱۸
- شکل ۱۳-۱ سیگنال‌ها برای تعیین سرعت موج برشی در آزمایش المان خمشی در یک محیط با ضریب پواسن ۰/۲۵ (اثر سانچز-سالینرو ۱۹۸۷) (a) $D = 0\%$ ، (b) $D = 5\%$ ، نسبت میرایی ۲۰
- شکل ۱۴-۱ تعیین اولین رسیدن سرعت موج برشی در آزمایش المان خمشی، (a) سیگنال‌های آزمایشگاهی (ماسه سیلیکا، $e_f = 0/75$ و $\sigma'_m = 100$ kPa)؛ سیگنال تحلیلی ۲۱
- شکل ۱۵-۱ نمونه‌ای از تغییرات سرعت موج برشی، V_s ، در برابر فرکانس تحریک در شرایط خاک در سیلیکا با $e_f = 0/75$ حاصل از روش‌های مختلف تعیین زمان رسیدن در آزمایش المان خمشی ۲۲
- شکل ۱۶-۱ نمونه‌ای از سیگنال‌های ارسالی و دریافتی توسط المان خمشی برای ماسه سیلیکا با $e_f = 0/75$ و kPa ۲۲
- شکل ۱۷-۱ مقایسه مقادیر سرعت موج برشی V_s آزمایش‌های آزمایشگاهی المان خمشی (BE) ستون تشدید (RC) و برش پیچشی (TC) به صورت تابعی از فرکانس تحریک بارگذاری برای ماسه سیلیکا با $e_f = 0/75$ ، (a) شرایط خشک ماسه، (b) شرایط اشباع همراه با نمودار حاصل از تئوری بیوت ۲۳



- شکل ۱-۱۸ استفاده از روش نصف عرض توان بر طیف پاسخ فرکانسی نمونه‌ای سیلتی دست‌نخورده در تنش محدودکننده همسان 100 kPa ۲۷
- شکل ۱-۱۹ استفاده از چند جمله‌ای کسر گویا بر طیف پاسخ فرکانسی نمونه‌ای سیلتی دست‌نخورده در تنش محدودکننده همسان 100 kPa ۲۸
- شکل ۱-۲۰ نتایج حاصل از انجام آزمایش تشدید المان خمشی روی نمونه‌های سیلتی (S1، S2 و S3) با استفاده از روش نصف عرض توان (X) روش چند جمله‌ای کسر گویا (●) همراه با نتایج حاصل از آزمایش ستون تشدید و آزمایش پاندول پیچشی معلق روی همان نمونه‌ها ۲۹
- شکل ۱-۲۱ نمونه‌ای از نتایج حاصل از انجام آزمایش تشدید المان خمشی نمونه رسی (C4) با استفاده از روش نصف عرض توان (X) روش چند جمله‌ای کسر گویا (●) همراه با نتایج حاصل از آزمایش ستون تشدید و آزمایش پاندول پیچشی معلق روی همان نمونه‌ها ۲۹
- شکل ۱-۲۲ ارزیابی زلزله‌گیری المان خمشی روی نمونه سیلتی S0 با قطر 50 mm و ارتفاع نمونه 85 mm و سرعت موج برسی 2300 m/s ۳۲
- شکل ۱-۲۳ ضریب هدایت α ای تحریک 2 kHz نمونه سیلت S0 بر مبنای اولین و دومین دریافت (خط پر) و اولین و سومین دریافت (خط چین) ۳۳
- شکل ۱-۲۴ سیگنال دریافتی از المان خمشی اثر فاصله بر روی پاسخ دریافت شده، (b) نمونه سیگنال ارسالی و دریافتی ۳۶
- شکل ۱-۲۵ مراحل تعیین نسبت میرایی SRM: (a) ترتیب قرارگیری حسگرها، (b) سیگنال دریافتی در دو دریافت‌کننده مختلف سیگنال‌ها، (c) طیف سیگنال دریافتی مجزای شده، (d) نسبت طیفی در برابر فرکانس ۳۸
- شکل ۱-۲۶ نسبت میرایی به دست آمده تحت پنجره‌بندی‌های مختلف در آزمایش‌ها ۳۹
- شکل ۱-۲۷ ترتیب قرارگیری حسگرها در SRM جهت دستیابی به روش خود ترمیمی ۴۰
- شکل ۱-۲۸ تعیین نسبت میرایی با SRM همراه با روش خود ترمیمی: (a) امواج دریافتی در دو جهت انتشار امواج، (b) طیف سیگنال‌های دریافتی، (c) نسبت طیفی در برابر فرکانس ۴۳
- شکل ۱-۲۹ برون‌یابی مدول برشی حداکثر در نمونه‌های (الف) شنی، (ب) ماسه‌ای ۴۶
- شکل ۱-۳۰ موقعیت بلوک‌های کوچک روی قالب شکاف‌دار ۴۷
- شکل ۱-۳۱ استفاده از LDT برای اندازه‌گیری کرنش شعاعی، (الف) نمونه معکبی، (ب) نمونه سه ضلعی استوانه‌ای قطر بزرگ ۴۸
- شکل ۱-۳۲ امواج دریافتی از نمونه با افزایش مقادیر مکش رطوبت (a) روند امواج P، (b) روند امواج S ۵۱
- شکل ۱-۳۳ دانسیته طیف توان امواج دریافتی از نمونه با افزایش مقادیر مکش رطوبت (a) روند امواج P، (b) روند امواج S ۵۲
- شکل ۱-۳۴ نمونه‌ای از پاسخ سرعت موج بعد از اعمال افزایش مکش رطوبت ۵۳

- شکل ۱-۲۵ خواص دینامیکی نمونه مخلوط ماسه - بنتونیت - گل (SBM) با استفاده از روش‌های ستون تشدید، روش غیر تشدید و تابع تبدیل جدید برای محدوده وسیعی از فرکانس‌های بارگذاری (تنش محدودکننده ۳۲kPa و کرنش برشی کمتر از 10^{-3}) ۵۵
- شکل ۱-۳۶ مقایسه مدول برشی حداکثر در روش‌های مختلف اندازه‌گیری ۵۶
- شکل ۲-۱ مشخصات حسگر PU09 ۶۰
- شکل ۲-۲ نمودار خطی رسم‌شده از اندازه‌گیری‌های واقعی و خط ایده‌آل فرضی ۶۱
- شکل ۲-۳ اثر حرارت بر رابطه مقادیر ولتاژ خروجی و جابه‌جایی ۶۲
- شکل ۲-۴ نمودار عملکرد GAP-SENSOR ۶۲
- شکل ۲-۵ رابطه بین ولتاژ خروجی و جابه‌جایی در محدوده خطی ۶۳
- شکل ۲-۶ وابستگی تغییرات جابه‌جایی - ولتاژ خروجی برای مصالح مختلف ۶۳
- شکل ۲-۷ تغییرات نسبت حساسیت به ابعاد صفحه هدف ۶۴
- شکل ۲-۸ جزئیات نصب حسگر و خط محیط اطراف آن ۶۵
- شکل ۲-۹ راه‌های عدم تداخل بین حسگرها ۶۵
- شکل ۲-۱۰ تعریف ناحیه مرده برای حسگر مورد استفاده ۶۵
- شکل ۲-۱۱ تنظیم CAL (GAIN) برای حسگر مورد استفاده ۶۶
- شکل ۲-۱۲ تنظیم SHIFT برای حسگر مورد استفاده ۶۶
- شکل ۲-۱۳ تنظیم خطی کردن برای حسگر مورد استفاده ۶۷
- شکل ۲-۱۴ دستگاه مورد استفاده در انجام کالیبراسیون ۶۸
- شکل ۲-۱۵ مشخصات کابل PC-03YY (ابعاد به میلی‌متر) ۶۸
- شکل ۲-۱۶ آمپلی‌فایر از نوع AEC 5509 ۶۸
- شکل ۲-۱۷ ابعاد آمپلی‌فایر از نوع AEC 5509 ۶۹
- شکل ۲-۱۸ منبع برق (سه کاناله) از نوع AEC-55 SPS-3 ۷۰
- شکل ۲-۱۹ چگونگی اتصال GAP-SENSOR، آمپلی‌فایر، منبع برق و دستگاه ثبت داده‌ها به هم ۷۰
- شکل ۲-۲۰ نمایش گرافیکی نرم‌افزار ZR-SV10 ۷۱
- شکل ۲-۲۱ مدل دستگاه ثبت داده ZR-RX70V ۷۲
- شکل ۲-۲۲ جزئیات مدل دستگاه ثبت داده ZR-RX70V ۷۳
- شکل ۲-۲۳ نصب حسگرها روی میله‌های رابط در اطراف نمونه سه محوری قطر بزرگ ۷۴
- شکل ۲-۲۴ نمونه‌ای از صفحات هدف روی غشاء ۷۵
- شکل ۲-۲۵ چکش سر لاستیکی ۷۵

- شکل ۲-۲۶ شمایی از تغییرات مورد نیاز برای زدن ضربه افقی به نمونه شنی سنگریزه‌ای در دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ برای اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر تحت شرایط زهکشی و رطوبتی و تنش محدودکننده مختلف.... ۷۷
- شکل ۲-۲۷ نیروسنج مورد استفاده در دستگاه سه محوری..... ۷۸
- شکل ۲-۲۸ نمودار کالیبراسیون نیروسنج مورد استفاده در دستگاه سه محوری ۸۰
- شکل ۲-۲۹ نمودار و ضریب کالیبراسیون برای ۶ عدد GAP-SENSOR ۸۲
- شکل ۲-۳۰ نمودار و ضریب کالیبراسیون برای ۴ عدد LDT..... ۸۳
- شکل ۲-۳۱ نمودار و ضریب کالیبراسیون برای LVDT به کاررفته برای اندازه‌گیری کرنش محوری..... ۸۴
- شکل ۱-۱۰ بندی مصالح آزمایش شده ۸۸
- شکل ۳-۱ مراحل ساخت نمونه‌های سه محوری قطر بزرگ..... ۸۹
- شکل ۳-۲ نمونه‌های نتایج یابفتی از GAP-SENSOR در جهت‌های افقی و قائم روی نمونه‌ای از دو مصالح سنگریزه‌ای از دو ضربه زدن در راستای قائم بر کلاهک بالای نمونه در تنش محدود کننده ۸۰ kPa..... ۹۱
- شکل ۳-۴ نمونه‌ای از نتایج سلب نرم افزار Smart Viewer ۹۱
- شکل ۵-۲ تغییرات سرعت مدول برشی در برابر تنش محدودکننده مصالح مختلف داسیتی ۹۵
- شکل ۶-۲ تغییرات سرعت موج برشی در برابر تنش محدودکننده مصالح مختلف گل‌سنگی ۹۵
- شکل ۷-۲ تغییرات ضریب پواسن در برابر سرعت موج برشی در تنش‌های محدودکننده مختلف ۹۶
- شکل ۸-۲ نتایج نسبت سرعت برشی در برابر تنش در مصالح گل‌سنگ، گل‌سنگ شنی و داسیت شنی .. ۹۷
- شکل ۹-۲ مقادیر نسبت سرعت موج برشی در مرز لایه‌ها جنس و ضخامت‌های مختلف در برابر تنش محدودکننده ۹۸
- شکل ۱۰-۲ اثر محل قرارگیری مصالح در نمونه بر سرعت موج در مصالح در برابر تنش محدودکننده ۹۹
- شکل ۱۱-۲ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح داسیت شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی (DM2519GS) ۱۰۱
- شکل ۱۲-۲ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکی (M02519GS) ۱۰۱
- شکل ۱۳-۲ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح داسیت تازه و دوباره آزمایش‌شده با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکی (D0219) ۱۰۲
- شکل ۱۴-۲ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدود کننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ تازه و دوباره آزمایش‌شده با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی (M0219)..... ۱۰۲
- شکل ۱۵-۲ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدود کننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ و داسیت با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکی (MD0219) ۱۰۳
- شکل ۱۶-۲ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح داسیت و گل‌سنگ با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکی (DM0219)..... ۱۰۳



- شکل ۲-۱۷ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ و داسیت (اولین) با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی (MD0219-fresh) ۱۰۴
- شکل ۲-۱۸ مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده غیرهمسان $(\sigma'_1/\sigma'_3=2)$ ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی (M02519GS) ۱۰۴
- شکل ۲-۱۹ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح داسیت شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی و روش کاهش دامنه تحت ضربه (D02519GS) ۱۰۵
- شکل ۲-۲۰ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی و روش کاهش دامنه تحت ضربه (D02519GS) ۱۰۶
- شکل ۲-۲۱ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح تازه و دوباره آزمایش شده با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی و روش کاهش دامنه تحت ضربه (D0219) ۱۰۶
- شکل ۲-۲۲ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ تازه و دوباره آزمایش شده با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی و روش کاهش دامنه تحت ضربه (M0219) ۱۰۷
- شکل ۲-۲۳ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ و داسیت با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی و روش کاهش دامنه تحت ضربه (MD0219) ۱۰۷
- شکل ۲-۲۴ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح داسیت و گل‌سنگ با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی و روش کاهش دامنه تحت ضربه (DM0219) ۱۰۸
- شکل ۲-۲۵ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ و داسیت (اولین) با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی و روش کاهش دامنه تحت ضربه (MD0219- fresh) ۱۰۸
- شکل ۲-۲۶ مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده همسان $(\sigma'_1/\sigma'_3=2)$ ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکی (M02519GS) ۱۰۹
- شکل ۲-۲۷ مقادیر متوسط نسبت میرایی در برابر کرنش محوری تحت تنش محدودکننده همسان ۵۰ kPa برای مصالح گل‌سنگ و داسیت با استفاده از روش کاهش دامنه تحت ضربه ۱۱۰

فهرست جداول

عنوان جدول	صفحه
جدول ۱-۱ وسایل و مبدل‌های الکتریکی جهت تعیین مشخصات موج‌های الاستیک.....	۵۰
جدول ۲-۱ نسبت میرایی مصالح D_5 ، شیب S ، فرکانس غالب نمونه ماسه S_0 براساس تحلیل سیگنال شکل (۲۳-۱).....	۲۳
جدول ۳ مراحل محاسباتی تعیین نسبت میرایی با روش نسبت طیفی (ونگ و همکاران ۲۰۰۶).....	۳۷
جدول ۴ اثر شرایط محیطی و بارگذاری بر پارامترهای رفتار تنش کرنش خاک تحت بارهای سیکنی.....	۵۴
جدول ۱-۱ مشخصات حسگر PU09.....	۶۰
جدول ۲-۱ مشخصات آمپلی‌فایر از نوع AEC 5509.....	۶۹
جدول ۳-۲ مشخصات منبسط (سه کاناله) از نوع AEC-55 SPS-3.....	۷۰
جدول ۴-۲ چگونگی ثبت داده‌ها ZR-MDR10.....	۷۱
جدول ۵-۲ مشخصات نرم افزار ZR-S-10.....	۷۲
جدول ۶-۲ کالیبراسیون نیروسنج.....	۷۹
جدول ۷-۲ کالیبراسیون نیروسنج.....	۷۹
جدول ۸-۲ کالیبراسیون حسگر فشار محصور در سه محفظه پس فشار آب حفزه‌ای.....	۸۴
جدول ۱-۲ نتایج آزمایش چگالی (G_s) مصالح مورد مطالعه.....	۸۶
جدول ۲-۳ نتایج آزمایش دانسیته خشک مصالح مورد مطالعه.....	۸۶
جدول ۳-۳ مشخصات و برنامه آزمایش‌ها.....	۸۷
جدول ۴-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حد اکثر برای داسیت تازه با دانسیته $1/438 \text{ g/cm}^3$ (D02519GS).....	۹۲
جدول ۵-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حد اکثر برای داسیت ماسه‌ای با دانسیته $1/556 \text{ g/cm}^3$ (D02519GS).....	۹۲
جدول ۶-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حد اکثر برای گل‌سنگ شنی با دانسیته $1/0 \text{ g/cm}^3$ (M02519GS).....	۹۲
جدول ۷-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حد اکثر برای گل‌سنگ ماسه‌ای با دانسیته $1/0 \text{ g/cm}^3$ (M02519GS).....	۹۲
جدول ۸-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حد اکثر برای داسیت تازه با دانسیته g/cm^3 (D0219) ۱/۶۵.....	۹۳
جدول ۹-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حد اکثر برای داسیت دوباره آزمایش شده با دانسیته g/cm^3 (D0219) ۱/۶۵.....	۹۳
جدول ۱۰-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حد اکثر برای گل‌سنگ تازه با دانسیته $1/175 \text{ g/cm}^3$ (M0219).....	۹۳



جدول ۱۱-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای گل‌سنگ دوباره آزمایش شده با دانسیته $1/170 \text{ g/cm}^3$ (M0219)	۹۳
جدول ۱۲-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای گل‌سنگ تازه با دانسیته $1/170 \text{ g/cm}^3$ (MD0219)	۹۳
جدول ۱۳-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای داسیت با دانسیته $1/160 \text{ g/cm}^3$ (MD0219)	۹۳
جدول ۱۴-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای داسیت با دانسیته $1/160 \text{ g/cm}^3$ (DM0219)	۹۴
جدول ۱۵-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای گل‌سنگ با دانسیته $1/170 \text{ g/cm}^3$ (DM0219)	۹۴
جدول ۱۶-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای گل‌سنگ با دانسیته $1/170 \text{ g/cm}^3$ اولین	۹۴
نسخه (MD0219-fresh)	۹۴
جدول ۱۷-۳ آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای داسیت با دانسیته $1/160 \text{ g/cm}^3$ اولین تازه	۹۴
(MD0219-fresh)	۹۴
جدول ۱۸-۳ تعیین ضربه برای کل نمونه ۶۰ سانتیمتری در تنش 50 kPa حاصل از ضربه برای خاک	۱۰۹
لایه‌بندی شده	۱۰۹

چکیده

از میان پارامترهای دینامیکی، مدول برشی حداکثر مصالح دانه‌ای و شنی از اهمیت زیادی در تحلیل‌های دینامیکی برخوردار است. از مشکلات مربوط در اندازه‌گیری این پارامتر در مصالح یادشده، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: خطاهای ناشی از نقص در اتصال کامل کلاهک و نمونه و ناسازگاری برای دستگاه‌های سه‌محوری با استفاده حسگرهای غیرتماسی. برخوردن LDT به صورت موضعی روی غشاءهای به‌کار رفته (با ضخامت بیش از ۲۰ سانتیمتر) برای مصالح شنی سنگریزه‌ای و همچنین فرکانس پایین آنها، عدم قابلیت دسترسی از وسایل مثل المان خمشی و ستون تشدید برای دانه‌های بزرگ شن سنگریزه‌ای، فرکانس پایین (۲kHz) و نویز بالا و عدم امکان اندازه‌گیری ضریب پواسن به صورت مستقیم. تنش استفاده از شتاب‌سنج‌ها. در این تحقیق برای اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر مصالح دانه‌ای و شنی از حسگر غیرتماسی با فرکانس پاسخ بالا استفاده گردید. روش کار این دستگاه با این شکل است که با زدن ضربه‌ای ضعیف و ثبت جابه‌جایی‌های خفیف حاصل در جهت افقی و قائم (کرنشی در حدود 10^{-6}) با دستگاه ثبت نتایج با نرخ نمونه‌گیری ۱۰۰۰/۰۰۰، در هر لایه برای هر کانال، سرعت موج و جابه‌جایی‌های افقی و قائم در فاصله بین حسگر اندازه‌گیری شده و در نهایت با محاسبه ضریب پواسن، مدول برشی حداکثر در مصالح اندازه‌گیری می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که عواملی چون ضخامت لایه‌های مصالح در مرزها و محاسبات لایه‌های مصالح در یک نمونه بر سرعت موج اندازه‌گیری شده تاثیرگذار هستند. همچنین تغییرات و مقدار سرعت موج با تنش محدودکننده به اندازه دانه‌ها و جنس دانه‌ها بستگی دارد. همچنین استفاده از تکنیک کاهش دامنه ارتعاش در ترازهای مختلف نمونه مقدار ضریب میرایی ناشی از ضربه محاسبه می‌گردد. مقایسه نتایج مدول برشی و نسبت میرایی با اندازه‌گیری کرنش محوری به صورت موضوعی با حسگر غیرتماسی و LDT در آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی روی مصالح مورد بررسی با نتایج روش ارائه شده در این تحقیق، مؤید دقت بسیار مناسب روش ابداعی است.

مقدمه

از مصالح دانه‌ای و شنی به طور وسیع به عنوان مصالح ساخت در خاکریزهای مهندسی استفاده می‌شود. حتی اخیراً استفاده از مصالح سنگریزه‌ای سبک وزن به جهت کاهش فشارهای جانبی وارد بر دیوار، مورد توجه قرار گرفته‌است. از جمله مشکلات موجود در تحلیل رفتار دینامیکی این مصالح، عدم شناخت رفتار و همچنین مشخص نبودن پارامترهای مقاومت و تغییرشکلی تحت بارگذاری مونوتونیک و سیکلی دینامیکی آنها با توجه به محدودیت های هزینه زیاد انجام آزمایش‌ها، اندازه دانه‌ها و همچنین محدودیت وسایل آزمایشگاهی در اندازه‌گیری و اندازه‌گیری بعضی از پارامترها است. رفتار تنش - کرنش مصالح سنگریزه‌ای تحت بارگذاری مونوتونیک و سیکلی به عوامل مختلفی نظیر نوع کانی‌ها، دانه‌بندی، شکل و اندازه ذرات، رطوبت ذرات و سطح تنش بستگی دارد.

از میان پارامترهای دینامیکی مدول برشی حداکثر مصالح خاکی و سنگی از اهمیت زیادی در تحلیل‌های دینامیکی برخوردار است. برای مدول برشی برای نرمالایز کردن مقادیر مدول برشی در کرنش‌های متفاوت جهت تحلیل‌های سیکلی پاسخ ساختگاه‌ها و بدنه سدهای خاکی و سنگریزه‌ای استفاده می‌گردد. از روش‌های فعلی برای اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر در مصالح سنگریزه‌ای خصوصاً برای مصالح بدنه سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، ایجاد خاکریزهای آزمایشی و اندازه‌گیری سرعت موج با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی است که مستلزم هزینه و وقت زیاد است. تاکنون روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای اندازه‌گیری مدول برشی در مصالح مختلف به کار گرفته شده که هر کدام از آنها قابلیت کاربرد برای یک مصالح خاص را دارند و یا دارای محدودیت‌هایی هستند. مثلاً روش آزمایش سه محوری با اندازه‌گیری دقیق کرنش‌های محوری (توسط LDT) و کرنش سنج‌های غیرتماسی) به عنوان محبوب‌ترین روش برای اندازه‌گیری مدول برشی و کرنش مصالح دانه‌ای و شنی در سال‌های اخیر شناخته شده است. برای اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر در خاک‌های شنی سنگریزه‌ای از روش‌های برون‌یابی (روش غیرمستقیم اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر بر مبنای قضاوت مهندسی) در آزمایش‌های سه محوری استفاده می‌شود. به‌طوری‌که با استفاده از حسگرهای جابه‌جایی غیرتماسی مدول برشی در کرنش حدود 10^{-6} اندازه‌گیری و مقادیر نظیر کرنش 10^{-6} برون‌یابی می‌شود. پاره‌ای از مشکلات در ارتباط با دستگاه سه محوری مثل سرخوردن LDTها بر روی غشاء نمونه‌های بزرگ سه

محوری و مشکلات مربوطه به محل تماس نمونه و کلاهک بالا برای کرنش‌سنج‌های غیرتماسی برای نمونه‌های کوبیده نشده، کاربری آن را برای اندازه‌گیری دقیق مدول برشی و نسبت میرایی در کرنش‌های کوچک خصوصاً در مصالح سنگریزه‌ای محدود می‌کند. استفاده از روش‌های دیگر چون المان خمشی با توجه به آسیب پذیر بودن سر صفحه ارتعاش در حین انجام آزمایش در مصالح سنگریزه‌ای امکان‌پذیر نیست. آزمایش ستون تشدید هم محدودیت‌های چون حداکثر اندازه دانه و فرکانس بارگذاری را دارد. از دیگر روش‌های آزمایشگاهی موجود می‌توان به استفاده از شتاب‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی و در نتیجه مدول برشی حداکثر هم اشاره کرد که فرکانس پاسخی در حدود ۲ کیلوهرتز دارند. با توجه به محدودیت‌های حداکثر فرکانس پاسخ شتاب‌سنج‌ها و وجود نویزهای زیاد، شناسایی اولین نقطه رسیدن موج در نتایج ثبت شده مشکل است. از طرفی مقادیر ضریب پواسن بر مبنای قضاوت مهندسی در محاسبات بوده و بر مبنای اندازه‌گیری مستقیم نیست. به کارگیری روشی ساده که داده‌های حاصل از تکرارپذیری مناسبی برخوردار بودند می‌تواند نویز در آنها کم باشد و همچنین قابلیت اندازه‌گیری همزمان ضریب پواسن و سرعت موج را فراهم کند، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. به همین دلیل در این تحقیق سعی شد با به کارگیری حسگر غیرتماسی (GAP-SENOR) با فرکانس پاسخ بالا (حدود ۲۰ کیلوهرتز) در ترانس دلف افقی و قائم نمونه و همچنین دستگاه ثبت داده با سرعت ثبت ۱۰۰ کیلوهرتز برای هر کانال، مقادیر سرعت موج از طریق زدن ضربه به میله متصل به کلاهک سر نمونه اندازه‌گیری شود. در این روش برخلاف روش استفاده از شتاب‌سنج‌ها که بر مبنای اندازه‌گیری شتاب در اطراف مبدل است مقادیر تغییر شکل افقی و یا قائم مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری همزمان تغییر شکل‌های کوچک در جهت‌های افقی و قائم، امکان اندازه‌گیری ضریب پواسن نیز فراهم می‌گردد. از مزایای استفاده از حسگر غیر تماسی، پایداری و پایین بودن میزان نویز در آن است. به طوریکه برعکس المان خمشی و حتی شتاب‌سنج‌ها، تشخیص زمان رسیدن موج از یک حسگر به حسگر بعدی به آسانی قابل تشخیص است. مزیت دیگر در حسگر غیر تماسی برخلاف LDT (فرکانس پاسخی در حدود ۱۲۰ Hz دارند) و شتاب‌سنج‌ها این است که بعد از رسیدن اولین موج به حسگر، حالت رزونانس ایجاد نمی‌شود و مستهلک شدن اغتشاش ایجاد شده تابع شرایط نمونه (نه حسگر) است. با توجه به نصب حسگرها با فاصله‌ای از کلاهک بالای نمونه، خطاهای مربوط به Bedding و Compliance حذف می‌شود. از دیگر مزایای این دستگاه و

روش ارائه شده در این تحقیق می‌توان به صرفه‌جویی اقتصادی قابل ملاحظه (زمان و هزینه) خصوصاً در بخش آزمایش‌های ژئوتکنیک سد خاکی و سنگریزه‌ای با توجه به استفاده از نمونه بدون تاریخچه بارگذاری قابل ملاحظه برای ادامه آزمایش‌ها اشاره کرد. فراهم شدن راهنمایی جهت طراحی و انجام آزمایش‌های سه‌محوری قطر بزرگ برای اندازه‌گیری همزمان پارامترهای تنش - کرنش مونوتونیک و سیکی دینامیکی و سرعت موج و نسبت میرایی در تمام سطح کرنش‌های مورد نیاز از دیگر اهداف است.

ساختار این گزارش به شرح زیر است:

فصل اول این تحقیق به مطالعات تاریخچه‌ای در مورد روش‌های مختلف مدول برشی حداکثر مصالح خاکی و سنگریزه‌ای اختصاص دارد. همچنین در این فصل روش‌های مختلف تعیین میرایی در سنگ‌ها هم مختلف ارائه می‌شود.

در فصل دوم تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده برای اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر و چگونگی نصب آن روی دستگاه آنتی‌ایس سه‌محوری سیکی ارائه می‌گردد.

در فصل سوم این گزارش، نتایج آزمایش‌های تعیین مدول برشی حداکثر، ضریب پواسن و نسبت میرایی ارائه می‌گردد. همچنین نتایج آزمایش‌های سه‌محوری سیکی با اندازه‌گیری موضعی کرنش‌ها ارائه و با نتایج روش پیکره‌برداری این تحقیق مقایسه می‌گردد.

در فصل چهارم این تحقیق، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه مطالعات ارائه می‌گردد.