

## بررسی مشخصات درجا و سه محوری دینامیکی خاک‌های آبرفتی غیرچسبنده با تمرکز بر عمق لایه فرسایش سطحی

مقاله علمی - پژوهشی

عطا آقایی آرایی\*، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: aghaeiarai@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

صفحه ۶۲-۳۵

چکیده

این مقاله مشخصات درجا صحرایی سه نمونه خاک ماسه ای غیرچسبنده و یک نمونه خاک لای شامل تعیین مقاومت الکتریکی و سرعت امواج به روش لرزه نگاری شکست مرزی و درون گمانه و مقایسه آن با نتایج سه محوری دینامیکی را بررسی می کند. بیشترین و کمترین مقادیر مقاومت الکتریکی به ترتیب مربوط به خاک SM گمانه BH8 و خاک ML گمانه BH34 است. مقاومت الکتریکی "لایه فرسایش سطحی" در بخشهای سطحی به ترتیب حدود ۲ و ۳ برابر حداقل مقادیر آن در کل عمق گمانه ۳۰ متری به ترتیب برای خاکهای ماسه ای SM یا SW و ML است. سرعت موج برشی "لایه فرسایش سطحی"، حداکثر نصف متوسط سرعت موج برشی کل لایه ۳۰ متری است. ضخامت "لایه فرسایش سطحی" براساس سرعت موج برشی روش شکست مرزی تا عمق ۳/۹، ۲/۸، ۱/۷ و ۷/۲ متر به ترتیب برای خاک SW گمانه SM BH32، SM BH3 گمانه SM BH8 و ML گمانه BH34 است که داده های مقاومت الکتریکی، با تفاوت حدود ۳۰٪ ضخامت‌های مذکور را تایید می کند. سرعت موج برشی بدست آمده روش شکست مرزی و روش درون گمانه ایزتروالی به ترتیب معرف مقادیر سرعت در جهت افقی و طولی و به نوعی معرف تخمینی از بیش تحکیم یافتگی نمونه درجا است. در ادامه روی مصالح متراکم شده SM گمانه BH8 با رطوبت ساخت بهینه و شرایط نیمه اشباع و اشباع کامل، آزمایش‌های نوسانی دینامیکی با دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس طبق ASTM D3999 انجام شد. نمونه ها تحت تحکیم همسان و غیرهمسانی ( $\sigma'_1/\sigma'_3$ ) مختلف و  $\sigma'_3$  برابر ۲، ۱ و  $5 \text{ kg/cm}^2$  و فرکانس‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و  $10 \text{ Hz}$  آزمایش شدند. با توجه به تفاوت قابل ملاحظه بین مقادیر  $G/G_{max} - \gamma$  و  $D - \gamma$  مصالح ماسه ای از جمله SM گمانه BH8 با نتایج موجود در ادبیات فنی، لزوم انجام آزمایش برای دستیابی به منحنی‌های مناسب مورد تاکید است. تطابق نسبتاً خوبی بین داده‌های صحرایی سرعت موج برشی متوسط از سطح روش درون گمانه با متوسط مقادیر نمونه آزمایشگاهی سه محوری تحت تحکیم غیر همسان برقرار است.

واژه‌های کلیدی: آبرفت، غیرچسبنده، مقاومت الکتریکی، سرعت موج، مدول برشی، نسبت میرایی، غیرهمسانی، فرکانس، مونوتونیک پسانوسانی، لایه فرسایش سطحی

### ۱- مقدمه

ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاه است (Aghaei Arai) و همکاران (۲۰۲۳، Aghaei Arai ۲۰۲۴). برای محاسبات طیف پاسخ نیاز به مشخصات خاک لایه‌های سطحی معمولاً تا عمق سنگ بستر

تعیین مدول برشی حداکثر، نسبت مدول برشی و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی خاک، پارامترهای بسیار مهم در محاسبات مرتبط با طیف طراحی زلزله برای مطالعات ریزپهنه‌بندی

لرزه ای یا ۳۰ متری نیاز است. در روند فعلی برای تحلیل‌های پاسخ زمین، داده‌های سرعت موج برشی به همراه دانسیته خشک به عنوان ورودی به نرم‌افزارهای تحلیل پاسخ داده شده و مدول برشی حداکثر محاسبه می‌شود. همچنین از نتایج مقاومت الکتریکی برای تعیین عمق سنگ بستر، تراز آب زیرزمینی، خصوصاً تعیین "لایه فرسایش سطحی" که دارای درزه و ترک و تراکم کمتری بوده، استفاده می‌شود. تعیین لایه فرسایش سطحی که به ترتیب دارای سرعت موج برشی کمتر و مقاومت الکتریکی نسبی بیشتر نسبت به خاک متراکم مشابه در اعماق بیشتر است، دارای اهمیت زیادی در تعیین نوع زمین در استاندارد ۲۸۰۰، عمق بهسازی زمین برای احداث بنا دارد. طبق ASCEE 7-2022 در طبقه بندی نوع زمین I مصالح با سرعت متوسط تا عمق ۳۰ متر بین پی ساختمان و روی سطح سنگ نباید بیش از ۳ متر خاک باشد و گرنه در این طبقه قرار نمی‌گیرند. در استاندارد ۲۸۰۰ برای گروه زمین نوع I عمق لایه مذکور ۵ متر ذکر است. روند مشابهی برای طبقه خاک‌های نوع II و III و IV هم صادق است. بطورکلی حد پایین سرعت موج برشی در لایه‌های سطحی خاک تا عمق "لایه فرسایش سطحی" از تراز پایه برای نوع زمین‌های II، III و IV نباید به ترتیب از ۳۲۰، ۱۷۵ و ۱۵۰ متر بر ثانیه کمتر باشد و گرنه باید یا نوع زمین طبق استاندارد ۲۸۰۰ را نرم‌تر انتخاب کرده و یا حسب مورد طیف ویژه ساختگاه را بدست آورد. معمولاً سرعت موج برشی برای سایت‌ها از طریق اندازه‌گیری در محل انجام می‌شود که تفاوت قابل ملاحظه‌ای با روشهای آزمایشگاهی حتی با نمونه‌های دست نخورده دارند. روش‌های اندازه‌گیری سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر شامل روش‌های آزمایشگاهی (ستون تشدید و سه محوری دینامیکی و ...) و روش‌های صحرایی شامل الف) لرزه نگاری شکست مرزی طبق ASTM D7128 (یک بعدی- اندازه‌گیری در جهت افقی)، ب) درون گمانه طبق ASTM D7400 (یک بعدی- اندازه‌گیری در جهت قائم- دارای دقت بیشتر از شکست مرزی) و ج) بین گمانه طبق ASTM D4428 (یک بعدی- جهت افقی- دارای دقت بیشتر از درون گمانه‌ای)، د) بین گمانه‌ای توموگرافی (دو بعدی برای دو گمانه و یا سه بعدی برای سه گمانه و بیشتر- اندازه‌گیری پارامترهای خاک در جهت افقی و قائم- دارای بیشترین دقت)، و) روش تحلیل

چندکاناله امواج سطحی (MASW)، میکروترمور و ... است. اساس روش MASW بر مبنای خاصیت پاشندگی امواج سطحی (خصوصاً امواج ریلی) استوار می‌باشد. امکان جایگزینی و یا اولویت بندی روش MASW به روش فعال (Park) و همکاران (۲۰۰۲) با روش درون گمانه وجود دارد. تفاوت روش بین گمانه با روش درون گمانه در این است که سرعت هر لایه در عمق بصورت مستقیم و اینتروالی محاسبه می‌گردد و اثر لایه-های فوقانی در این برداشتها چنانچه انکساری از لایه پر سرعت اتفاق نیفتاده باشد وجود ندارد. روش شکست مرزی قادر به شناسایی لایه کم سرعت و نازک در بین لایه‌ها نبوده ولی در روش درون گمانه و بین گمانه و MASW این مشکل حل شده است. در MASW به روش غیرفعال، که چشمه امواج کنترل نشده یعنی نویزهای محیطی است و نام این روش ReMi یا "شکست مرزی بر مبنای مایکروترمورها یا ریزلرزه‌های با فرکانس بالا" است (Louie ۲۰۰۱). روش ReMi روشی مناسب برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی تا اعماقی بیشتر از روش‌های چشمه فعال است که با استفاده از دستگاه‌های لرزه نگار شکست مرزی و با گیرنده‌های معمولی برداشت می‌شود. محدوده فرکانسی مورد مطالعه در روش ReMi بین ۵ تا ۲۰ هرتز و عمق مور مطالعه ۵۰ متر و در شرایط ایده آل ۱۰۰ متر است. رفتار دینامیکی نمونه سه محوری خاک تحت فرکانس‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ هرتز و تنش محدودکننده ۱، ۲ و ۵ کیلوگرم بر متر مربع برای خاک SC/CH نشان داد که فرکانس افزایش سبب افزایش قابل توجه مدول برشی و خصوصاً نسبت میرایی می‌شود (Aghaei Araei و همکاران ۲۰۲۰). اثرات محتوای فرکانسی بر طیف پاسخ خاک شندار (Razeghi و همکاران ۲۰۱۴) و خاک ریزدانه (Aghaei Araei و همکاران ۲۰۲۰) بررسی شد. وابستگی مدول برشی و نسبت میرایی به فرکانس بارگذاری دینامیکی در کرنش‌های کوچک در پژوهش‌ها روی نمونه آزمایشگاهی توسط Meng (۲۰۰۷)، Park و Hashash (۲۰۰۸) و کرنش‌های کوچک تا بزرگ توسط Aghaei Araei و همکاران (۲۰۱۲) بررسی شده است. مقایسه رفتار نمونه بازسازی شده و مغزه‌گیری شده خاک ماسه‌ای با دستگاه ستون تشدید نشان داد که مدول برشی بدست آمده از دو روش تفاوت دارند (Aghaei Araei و همکاران، ۲۰۲۲).

(متوسط و ایتروالی)، سرعت امواج به روش برداشتهای لرزه‌نگاری شکست مرزی و آزمایشگاهی انجام نشد (Aghaei Araei و همکاران 2021a). بررسی مشخصات درجای خاک ریزدانه ربنده ML گمانه BH34 نشان داد درجه پتانسیل نسبتاً شدید، متوسط و کم، به ترتیب برای اعماق ۰-۴ متر، ۴-۱۰ متر و بیشتر است. ضخامت لایه با تراکم بسیار کم طبق نتایج مقاومت الکتریکی و سرعت موج برشی به ترتیب حدود ۴ و ۶ متر از سطح است که نیاز اصلاح خاک برای احداث بنا است. با توجه به عبور بسیاری از خطوط راه آهن از دشت‌های دارای خاک ماسه یا لای بدون چسبندگی مشابه، احتمال فرونشست زمین، ایجاد ترک منتج به آبراهه های فصلی و احتمال گسترش به زیر ریل وجود دارد. لذا شناخت عمق لایه فرسایش سطحی و عمق بهسازی برای جلوگیری از فرار خاک درجا، ضروری است. طبق اطلاعات نگارنده روند تغییرات سرعت موج برشی یا مقاومت الکتریکی با عمق برای خاک‌های دانه‌ای آبرفتی کمتر بررسی شده است. همچنین اثر تغییرات رطوبت بر نتایج برداشت‌های صحرائی و رفتار دینامیکی آزمایشگاهی خاک‌های ماسه‌ای متراکم در این مقاله بررسی می‌شود.

## ۲- مشخصات خاک

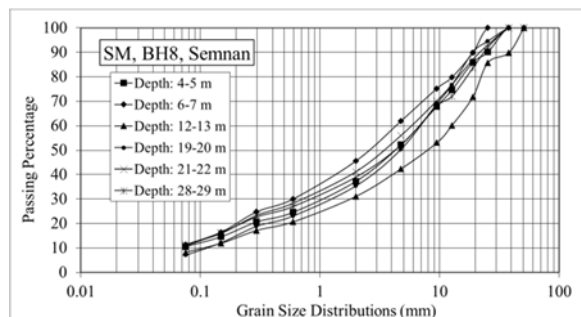
خاک‌های مورد مطالعه از گمانه های حفاری شده شهرهای استان سمنان دارای شرایط آب هوایی خشک است. مطابق شکل ۱ در این گمانه‌ها تا عمق تقریبی ۳۰ متری شامل یک نوع خاک است. منحنی دانه بندی متوسط برای مصالح مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است. جدول ۱ مشخصات خاک‌های مورد مطالعه برای انجام آزمایش‌ها ارائه شده است. هیچیک از خاک‌های مورد مطالعه خاصیت خمیر ندارند. خاک SW از گمانه BH32 و خاک SM گمانه BH3 به ترتیب دارای دانسیته خشک ۲/۳۳ و ۲/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. دانسیته خشک خاک SM گمانه BH8 و خاک ML گمانه BH34 به ترتیب برابر ۲/۲۲ و ۱/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. نتایج آزمون‌های شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

همچنین اثرات بازسازی روی رفتار دینامیکی شامل مدول برشی و میرایی (با دو روش نصف عرض توان و کاهش دامنه) نمونه های ماسه ای با دستگاه ستون تشدید توسط Aghaei Araei و همکاران (۲۰۲۰، ۲۰۲۱b) بررسی شده است. بطورکلی دست خوردگی باعث کاهش مدول برشی نسبت به نمونه مغزه می‌شود. با مقایسه سرعت موج برشی آزمایش ستون تشدید با آزمایش صحرائی درون گمانه و شکست مرزی خاک SC/CH مشاهده شد که سرعت موج برشی روش صحرائی از مقادیر نظیر ستون تشدید در تنش محدودکننده بالا، بیشتر است، اما در تنش‌های محدودکننده پایین تطابق بسیار خوبی با هم دارند. بطورکلی یکی از دلایل تطابق نامناسب مقادیر پارامترهای دینامیکی در روش‌های اندازه‌گیری صحرائی و آزمایشگاهی عدم اعمال تنش درجای واقعی و تخمین ناهمسانی تنشی است. نتایج آزمایش‌های دینامیکی روی نمونه های سه محوری خاک SW نشان داد که با افزایش غیرهمسانی تنشی  $(k_c = \frac{\sigma'_1}{\sigma'_3})$  به  $k_c = 2/1$  سبب افزایش قابل مدول برشی می‌شود، اما مدول برشی برای نسبت بزرگتر مثلاً  $k_c = 3$  کاهش می‌یابد (Aghaei Araei و Ghodrati, 2018a). تعیین ارتباط بین افزایش مقادیر سرعت موج برشی با تغییرات  $k_c$  مسبب و ارتباط آن با مقادیر  $q_{max}/\sigma'_3$  مسبب گسیختگی مونتونیک پسانوسانی یکی از اهداف این مطالعه است. رفتار دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای تحت شرایط مختلف بررسی شده است که شامل: اصلاح با آهک (Aghaei Araei و همکاران ۲۰۲۳a)، اصلاح با آهک-سیمان (Aghaei Araei و همکاران ۲۰۲۳b)، اصلاح با سیمان و نانوپلیمر-مععدنی Asvar و همکاران (۲۰۲۴) است. شبیه سازی رفتار مدول برشی و میرایی مصالح شنی توسط Aghaei Araei و Ghodrati (2017) با شبکه‌های عصبی مصنوعی بررسی شده است. همچنین رفتار سیکلی و نشست خاکهای متراکم شندار روی نمونه سه محوری هم توسط Aghaei Araei (۲۰۲۳) بررسی شده است. در مطالعات قبلی انجام شده روی رفتار دینامیکی شش نوع از مصالح خاکی مختلف کشور با استفاده از دستگاه سه محوری برای مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهرهای مختلف، مقایسه سرعت امواج به روش درون گمانه

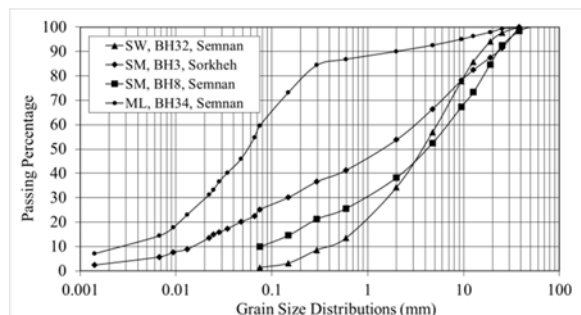
### ۳- مطالعات ژئوفیزیکی

#### ۳-۱- تعیین مقاومت الکتریکی ظاهری

نتایج مطالعات ژئوالکتریک (ASTM D6431) در نقاط اطراف گمانه‌های در شعاع کمتر ۶۰۰ متر یا درست کنار آنها انجام شد. کاوش ژئوالکتریکی به روش سونداژ الکتریکی قائم و آرایش شلومبرگر با حداکثر طول خط جریان (AB) برابر ۱۰۰۰ متر و حداکثر طول خط پتانسیل (MN) برابر ۳۰ متر انجام شده است (Apparao و Rao ۱۹۷۴). به منظور درک چگونگی گسترش لایه‌های عمقی دارای مقاومت یکسان و تعیین حدود گسترش زون‌های دارای دانه‌بندی برابر، اشباع یا غیر اشباع و همچنین سنگ کف منطقه، اقدام به سونداژ با آرایه مختلف شده است و نتایج هم‌مقاومت برای مقادیر AB/2 برابر ۴/۶۴، ۱۰، ۲۱/۵، ۳۱/۶، ۶۸/۱، ۱۰۰، ۲۱۵، ۱۴۷، ۲۱۵، ۳۱۶ و ۴۶۴ متر ارائه گردید (جدول ۳). انتخاب این مقادیر براساس تغییرات عمق، معادل تقریبی ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ متر است. بطورکلی AB/4 برابر عمق زمین (به متر) یا عمق نفوذ جریان آرایش شلومبرگر مورد بررسی پیشنهاد می‌شود (BHRC Technical report ۲۰۱۲). متوسط مقادیر مقاومت الکتریکی برای خاک SM در اعماق ۴-۱۰، ۱۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۵۰ و ۲۵۰-۵۰۰ متر به ترتیب ۳۱۸، ۲۰۴، ۱۲۵، ۲۴۲، ۷۴ و ۲۰۲ ولت-متر/آمپر است. نقطه S90 برداشت ژئوالکتریک درست کنار گمانه BH8 است. متوسط مقادیر مقاومت الکتریکی برای خاک ML در اعماق ۴-۱۰، ۱۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰، ۱۰۰-۲۵۰ و ۲۵۰-۵۰۰ متر به ترتیب ۲۱، ۱۲، ۱۲، ۱۶/۲، ۲۲/۴ و ۱۷/۶ ولت-متر/آمپر است. لذا مقادیر مقاومت الکتریکی خاک SM بین ۱۷ تا ۱۲ برابر بیشتر از مقادیر خاک ML، به ترتیب برای سطح زمین تا اعمال زیاد است. مطابق جدول ۳ در گمانه BH3 با خاک SM در سونداژهای S127، f5 مقاومت کم بوده و حدوداً بین ۲۸ تا ۳۵ اهم متر دیده می‌شود. در عمق‌های میانی نکته قابل توجه وجود مقاومت بالا به صورت لنز در سونداژهای مختلف است. شکل ۳ نقشه‌های هم‌مقاومت الکتریکی ظاهری در برابر AB/2 برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 در گمانه ML یا اطراف آنها را نشان می‌دهد. در گمانه BH32 خاک SW عمق آب زیرزمینی ۷۹/۱-۹۵/۵ متر و عمق



شکل ۱. تغییرات دانه‌بندی صحرایی خاک SM گمانه BH8 از سطح تا عمق ۳۰ متر



شکل ۲. دانه‌بندی صحرایی متوسط برای مصالح انتخابی

#### جدول ۱. مشخصات خاک‌های مورد مطالعه

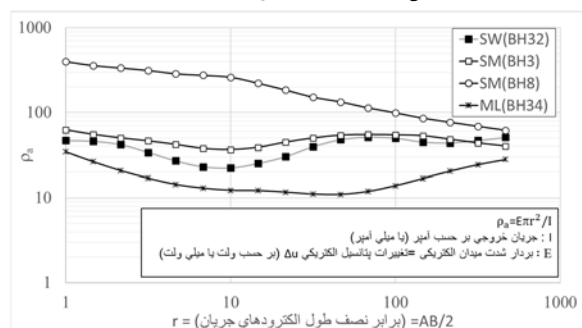
	SW(BH32)	SM(BH3)	SM(BH8)	ML(BH34)
Passing 4.75 mm (%)	57	65	52	96
Passing #200 (%)	2	25	10	71
PI, ASTM D4318(%)	0	0	0	0
$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	2.33	2.05	2.22	1.95
Optimum moisture content, $W_{opt}$ (%)	6.1	9.3	6.0	13.0
Gs	2.69	2.61	2.65	2.65
e corresponding to $\gamma_d$ maximum	0.147	0.249	0.182	0.333
Dimension of specimens(cm), Diameter(height)	20*40	20*40	20*40	20(40);30(60)
Poisson ratio ( $\nu$ )	0.29	0.29	0.3	0.33

#### جدول ۲. نتایج آزمایش شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Type of element	Result of chemical tests (%)			
	SW(BH32)	SM(BH3)	SM(BH8)	ML(BH34)
Loss of Ignite(LOI)	31.04	20.52	32.68	18.53
SiO2	27.43	40.77	30.40	42.22
Al2O3	4.17	7.62	3.25	9.30
Fe2O3	2.80	3.00	3.10	4.50
CaO	26.60	21.00	25.90	13.30
MgO	5.00	5.00	2.00	9.00
SO3	0.13	0.63	0.25	0.29
Cl <sup>-</sup>	0.01	0.01	0.01	<0.01

چاه‌های آب کنار گمانه BH34 خاک ML با دبی بالا و در حدود ۱۸ تا ۲۷ لیتر بر ثانیه، عمق آب زیرزمینی ۵۰ متر می‌باشند که قابل مقایسه با حداکثر مقادیر تا ۱۷۵ متر در سایر نقاط و ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر در مناطق مرکزی شهر سمنان می‌باشد. هدایت الکتریکی (E.C.) ۱۹۰۰-۲۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، TDS برابر ۱۳۰۰۰ است که به ترتیب در مقایسه با مقادیر ۲۸۷ تا ۱۳۲۰۰ میکروموس بر ثانیه و ۲۱۶ تا ۸۷۶۰ برای نقاط دیگر شهر سمنان است. مقاومت الکتریکی کم در گمانه BH34 با توجه به وجود آب با املاح نسبتاً کم و رطوبت موجود در اعماق بالاتر و نهشته‌های ریزدانه قابل توجه است ( BHRC Technical report ۲۰۱۲) و بخش‌هایی از این مکان فرونشست زمین دارد. بطور کلی بیشترین و کمترین مقادیر مقاومت الکتریکی به ترتیب مربوط به خاک SM گمانه BH8 و خاک ML گمانه BH34 است. متوسط مقاومت الکتریکی برای عمق تا ۳۴ متر به ترتیب ۴۱/۰۹، ۵۴/۶، ۹۹/۵، ۱۳/۹ ولت-متر/آمپر برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 است.

چاه ۲۰۰-۱۷۶ متر و دبی آب چاه ۴۲/۳-۲۶/۹ لیتر بر ثانیه، هدایت الکتریکی (E.C.) ۲۸۴۰-۲۳۸۰ میکروموس بر سانتیمتر، TDS برابر ۱۷۰۰-۱۴۴۰ است. در گمانه BH8 با خاک SM، عمق آب زیر زمینی ۱۳۰-۱۲۲ متر و عمق چاه ۲۲۵-۲۰۱ متر، دبی آب چاه ۵/۹۳-۳/۰۸ لیتر بر ثانیه است و هدایت الکتریکی (E.C.) ۱۸۹۰-۱۴۳۰ میکروموس بر سانتیمتر و TDS برابر ۲۱۶-۹۰۹ است. لازم به ذکر است در محل گمانه BH8 با خاک SM مشکل فرونشست زمین مشاهده نشده است.



شکل ۳. نقشه‌های هم مقاومت الکتریکی ظاهری در برابر AB/2 برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 یا اطراف آن

جدول ۳. نتایج برداشت مقاومت ژئوالکتریکی (ولت-متر/آمپر) در ایستگاه‌های دارای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 یا اطراف آن

AB/2	S103-SW(BH32)	SM(BH3)							SM(BH8)			Average for each depth BH34(ML)
		ff3	ff5	ff6	ff12	S126	S127	Average	S89	S90*	Average	
1	47	81.6	47	68.4	80	68	30	62.5	400	400	400	34.6
1.47	46	70	41.1	61.7	76	56	26.5	55.2	400	320	360	26.4
2.15	42	61.7	37	56.7	72	50	24	50.2	414	260	337	20.8
3.16	34	55.3	35.2	50.2	67	46.7	23.5	46.3	400	230	315	17.0
4.64	27	51.1	33.1	42.1	59.5	42.1	24.5	42.1	360	216	288	14.4
6.81	23	45.6	30.9	34.7	50.5	38	27	37.8	330	222	276	13.0
10	22.3	42.9	30.9	29.8	46.5	36.4	33.3	36.6	300	224	262	12.3
14.7	25.2	45.3	34.9	30.4	42.8	38.3	42	39.0	250	195	222.5	12.2
21.5	30.2	52.2	42.4	34.2	42.5	43.2	54	44.8	220	150	185	11.7
31.6	39.7	58.7	49.4	39.2	43	46.4	64	50.1	192	113	152.5	11.1
46.4	48.0	60.2	63.5	41.3	45	47	67.5	54.1	170	98	134	11.0
68.1	51.5	61.8	65.7	43.2	47.8	48	63.5	55.0	142	86	114	11.9
100	50	61	66.2	42.4	52	50	56	54.6	122	77	99.5	13.9
147	45	57.9	62.2	42.4	54	51.4	51.8	53.3	103	69	86	16.9
215	44	55	46.1	41.0	51.4	49	48	48.4	94	60	77	20.5
316	47	50.5	39.7	38.5	45	44.5	45	43.9	86	52	69	24.4
464	51	45	34.2	37	41	41.7	43	40.3	80	44	62	28.0
Average for 34 m	41.09							54.6			99.5	13.9
Average for 232 m	47.1							46			85.9	21.7

\* S90 کنار گمانه BH8 است.

ایستگاه ۳/۷۵ متر و فاصله ۲۴ ایستگاه برداشت هریک ۳/۷۵ متر) و در مقاطع S، شش شوت با چشمه موج برشی که دو به دو دارای پلاریته معکوس و با فاصله ۴۷/۸۷۵ متر بوده، انجام شد. آرایش برداشتهای لرزه نگاری شکست مرزی درمحل گمانه‌ها در مرجع Aghaei Araei (۲۰۲۴) ارائه شده است. ضخامت لایه‌ها به ترتیب یک لایه ۰/۶ متری، تعداد ۶ لایه ۱/۱ متری و تعداد ۱۰ لایه ۲/۳ متری می‌باشد. در جدول ۴ نتایج سرعت امواج تراکمی ( $V_P$ ) و برشی ( $V_S$ ) بر حسب (متر بر ثانیه) و نسبت پواسن،  $\nu$ ،

$$\left( \frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1-\nu}{0.5-\nu}} \right)$$

در ۱۷ لایه تا عمق ۳۰ متری روش برداشتهای لرزه نگاری شکست مرزی در اطراف گمانه‌های مختلف مورد ارائه شده است. مطابق جدول ۵ متوسط سرعت امواج تراکمی و برشی روش برداشتهای لرزه نگاری شکست مرزی به عمق تقریبی ۳۰ متر برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8، ML گمانه BH34، به ترتیب ۱۳۷۲، ۷۹۲، ۱۱۲۶، ۶۴۸، ۱۸۱۱ و ۹۸۷، ۸۴۰ و متر بر ثانیه ۴۶۶ است. به‌طورکلی براساس سرعت موج برشی روش شکست مرزی مقدار تراکم در اعماق سطحی تا عمق ۳/۹، ۲/۸، ۱/۷، ۷/۲ متر به ترتیب برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 بسیار کم می‌باشد که از آن به عنوان "لایه فرسایش سطحی" نام برده می‌شود.

### ۳-۳- تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی به روش درون گمانه

در محل گمانه‌های مورد مطالعه، آزمایش لرزه‌نگاری درون چاهی یا درون گمانه (ASTM D7400) انجام شد. لرزه سنج درون چاهی سه مؤلفه‌ای با فرکانس ۴/۵ و ۱۰ هرتز برای روش درون چاهی استفاده شد. برداشتهای لرزه نگاری درون چاهی با قراردادن یک لرزه‌سنج ۳ مؤلفه‌ای درون گمانه‌ها در عمق‌های مختلف با تولید موج، توسط منبع تولید موج مکانیکی (توسط ضربه چکش بر صفحه) ثبت می‌گردد. موج رسیده به لرزه‌سنج موج مستقیم بوده و سعی می‌گردد تا منبع تولید موج در نزدیکی دهانه گمانه قرار گیرد. پس از رسید موج به لرزه‌سنج و ثبت آن توسط لرزه‌نگار، اولین زمان رسیدهای موج در حد میلی ثانیه و

### ۳-۲- تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی به روش برداشتهای لرزه نگاری شکست مرزی

تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی به روش برداشتهای لرزه‌نگاری شکست مرزی (ASTM D7128) در فواصل بسیار نزدیک گمانه‌ها برای خاک‌های مختلف مورد مطالعه انجام شد. وسیله مورد استفاده برای ثبت ساینز موگراف‌های حاصله از اکتشاف لرزه‌ای به روش (انکساری) شکست مرزی و درون چاهی ناشی از منابع مختلف انرژی، دستگاه TERRALOC MK8، جدیدترین سیستم دیجیتالی ۲۴ کاناله ساخت شرکت ABEM کشور سوئد با نرم افزارهای چون Vista و SeisImager است. سایر وسایلی مورد استفاده شامل چکش، صفحات اعمال ضربه و واحد آرایش است. این دستگاه توانایی کار با چشمه‌های انرژی دینامیت، چکش، ویراتور و Air Gun را دارد. که برای چشمه‌های ویراتور قابلیت correlation با Sweep زده شده وجود دارد. همچنین دستگاه، امکان نمایش و ذخیره کانال Auxiliary زمان شوت انفجاری و Air gun را دارد. برنامه دستگاه Seisw می‌باشد که بر خلاف سیستم‌های قبلی در محیط ویندوز اجرا می‌شود و هر لحظه قابلیت انجام بزرگنمایی روی کانال‌ها، آنالیز فرکانس و سرعت را دارد. نرخ نمونه‌گیری بین ۲۵ تا ۲۰۰۰ میکروثانیه (با گام دوبرابری)، طول برداشت ۱۲۸ تا ۱۶۳۸۴ میلی‌ثانیه (با گام دوبرابری) و حداکثر تعداد Stack برابر ۹۹۹ است. نرم‌افزار دستگاه قابلیت قرائت اولین رسیده‌های موج بطور خودکار و دستی را دارد. حداقل سیگنال ورودی قابل ثبت، بین ۰/۲۴ mvolts ± و حداکثر سیگنال ورودی ۲۵۰ mvolts ± است. فیلتر شکافی برابر Z ۶۰-۵۰ هرتز و فیلتر بالا-گذر بین ۱۹۲-۱۲ یا ۲۴۰-۱۵ هرتز بر داده‌های ساینزموگرافها اعمال می‌شود. منبع تغذیه بین ۱۰ تا ۳۰ ولت جریان مستقیم است.

برای روش شکست مرزی، ژئوفون‌های P با فرکانس‌های ۱۰ و ۳۰ هرتز به تعداد ۳۰ و ۲۵ عدد و ژئوفون‌های S با فرکانس ۱۰ هرتز به تعداد ۳۰ عدد استفاده شده است (BHRC Technical report, ۲۰۱۲).

از نرم افزار DownHole برای تفسیر نتایج روش شکست مرزی استفاده شده است. برای هر برداشت در مقاطع P بطور نرمال پنج شوت صورت گرفته (فاصله محل شوت تا اولین

است. عمق لایه کم سرعت سطحی در گمانه، تا ۴ متر است و بعد از آن یک لایه با اندکی افزایش سرعت نسبت به لایه سطحی تا عمق ۱۱ ادامه دارد که در اثر تراکم، سرعت آن با عمق افزایش می‌یابد. از عمق ۱۱ تا ۱۳ متر سرعت تراکمی و برشی کاهش می‌یابد و از عمق ۱۳ تا ۱۸ متر و همین‌طور ۱۸ تا ۲۲ متر به ترتیب افزایش و کاهش سرعت‌ها مشاهده می‌شود و از ۲۲ متر انتهای گمانه، لایه با سرعت نسبتاً بالا وجود دارد. برای خاک SM گمانه BH8 مقادیر سرعت امواج تراکمی اینتروالی بین ۶۶۸ تا ۱۹۹۳ متر بر ثانیه و مقادیر سرعت امواج برشی اینتروالی بین ۳۲۲ تا ۱۱۰۷ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. ضریب‌های پواسون در سطح و عمق ۳۰ متری گمانه BH8 به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۲۵ است. طبق ادبیات فنی سرعت موج برشی و طولی خاک SM به ترتیب بین ۹۰۰-۳۰۰ متر بر ثانیه و ۱۹۰۰-۵۰۰ متر بر ثانیه است. طبق جدول ۷ زمین در نقطه گمانه BH34، شامل خاک ML بطور واضح به چهار زون سرعتی تقسیم شده است. عمق لایه کم سرعت سطحی در گمانه، تا ۲/۵ متر است و بعد از آن یک لایه با اندکی افزایش سرعت نسبت به لایه سطحی تا عمق ۱۰ متر ادامه دارد که در اثر تراکم، سرعت آن با عمق افزایش می‌یابد. از عمق ۱۰ تا ۲۵ متر لایه با سرعت تراکمی و برشی بالاتری داریم و از عمق ۲۵ متر تا انتهای گمانه، لایه با سرعت نسبتاً بالا وجود دارد. برای خاک ML گمانه BH34 مقادیر سرعت امواج تراکمی اینتروالی بین ۳۶۸ تا ۱۶۶۱ متر بر ثانیه و مقادیر سرعت امواج برشی اینتروالی بین ۱۶۲ تا ۹۰۵ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. ضریب‌های پواسون در سطح و عمق ۳۰ متری گمانه BH34 به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۲۹ است. طبق ادبیات فنی سرعت موج برشی و طولی خاک ML به ترتیب بین ۱۰۰۰-۳۰۰ و ۱۹۰۰-۳۰۰ متر بر ثانیه است. هرچند افزایش سرعت مذکور به دلیل میان لایه‌هایی با سرعت‌ها و ضخامت‌های متفاوت دارای تغییراتی می‌باشد، اما بطور کلی نشان دهنده افزایش سرعت با شیب نسبتاً ملایم تا انتهای گمانه است. با در نظر گرفتن روند تغییرات سرعت‌های امواج لرزه‌ای برشی ارائه شده برای گمانه BH34 برای خاک ML، عمقی که سرعت موج S اینتروالی به ۷۵۰ متر بر ثانیه برسد عمیق‌تر از ۳۰ متر بدست می‌آید. درگمانه BH34 خاک ML در عمق بیش از ۲۰ متری تا ۲۵ متری یک میانه لایه ضعیف با سرعت کمتر از لایه بالایی وجود دارد.

دهم میلی ثانیه بدست می‌آید که می‌تواند توسط این ارقام به سرعت‌های امواج P و S در داخل گمانه از سطح تا عمق دست یافت. در جدول ۶ میزان تغییرات متوسط و اینتروالی سرعت‌های امواج P و S و ضریب پواسون را از سطح تا کف گمانه‌ها ارائه شده است. در جدول ۷ خلاصه نتایج سرعت موج S و P اینتروالی گمانه‌ها و نسبت پواسون به روش درون گمانه ارائه شده است. ضخامت خاک SW گمانه BH32 سمنان ۲۶ متر بوده و با فواصل یک متر برداشت لرزه‌نگاری درون چاهی صورت گرفت. از نمودار زمان رسید- عمق دیده می‌شود که زمین در این نقطه براساس سرعت موج اینتروالی بطور واضح به پنج زون سرعتی تقسیم شده است. عمق لایه کم سرعت سطحی در گمانه، تا ۵ متر است و بعد از آن لایه با سرعت بالاتری نسبت به لایه سطحی تا عمق ۱۰ متر ادامه دارد. از عمق ۱۰ متر تا ۱۳ متر که یک لایه با سرعت تراکمی و برشی نسبتاً بالا داریم. سرعت موج برشی در این لایه به بالای ۷۵۰ متر بر ثانیه می‌رسد. از عمق ۱۳ متر تا ۱۹ متر لایه با سرعت کمتر از لایه رویی داریم و سپس از عمق ۱۹ متر تا ۲۰ متر انتهای گمانه، لایه با سرعت بالا داریم که همچنان سرعت‌ها نسبت به عمق در حال افزایش می‌باشد. برای گمانه BH32 سمنان وجود میان لایه با سرعت کمتر نسبت به لایه‌های بالایی در عمق بیش از ۱۲ متری بر مقادیر سرعت موج متوسط شدیداً تأثیر می‌گذارد. عمق خاک SM گمانه BH3 سرخه ۲۸ متر بوده و با فواصل یک متر برداشت لرزه‌نگاری درون چاهی صورت گرفت. از نمودار زمان رسید- عمق دیده می‌شود که زمین در این نقطه بطور واضح به پنج زون سرعتی تقسیم شده است. عمق لایه کم سرعت سطحی در گمانه، تا ۳ متر است و بعد از آن لایه با اندکی افزایش سرعت تا عمق ۷ متر ادامه دارد. از عمق ۷ متر تا ۱۴ متر همچنان افزایش سرعت داریم و لایه مجزا قابل تفکیک می‌باشد. از عمق ۱۴ متر تا ۱۸ متری لایه با سرعت کمتر از لایه رویی دیده می‌شود و از عمق ۱۸ متر تا انتهای گمانه لایه با سرعت نسبتاً بالا وجود دارد که همچنان سرعت‌ها نسبت به عمق در حال افزایش می‌باشد. سرعت موج برشی در این لایه به بالای ۷۵۰ متر بر ثانیه می‌رسد. برای SM گمانه BH3 سرخه وجود میان لایه با سرعت کمتر نسبت به لایه‌های بالایی در عمق بیش از ۱۴ متری بر مقادیر سرعت موج متوسط شدیداً تأثیر می‌گذارد. همچنین طبق جدول ۷ زمین در نقطه گمانه BH8، شامل خاک SM بطور واضح به شش زون سرعتی تقسیم شده

فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال بیست و یکم، دوره سوم، شماره ۸۰، پاییز ۱۴۰۳

جدول ۴. سرعت امواج تراکمی (Vp) و برشی (Vs) بر حسب (متر بر ثانیه) در ۱۷ لایه تا عمق ۳۰ متری روش برداشتهای لرزه نگاری شکست مرزی

در اطراف گمانه BH32 خاک SW، گمانه BH3 خاک SM، گمانه BH8 و خاک SM یا اطراف آنها

Soil(borehole) Profile No.	Direction	مختصات UTM		Layer	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17																
		X	Y		Depth (m)	0.6	1.7	2.8	3.9	5.0	6.1	7.2	9.5	11.8	14.1	16.4	18.7	21.0	23.3	25.6	27.9
SW (BH32) 73	SOL	716146	3938058	Vp	452	461	516	629	737	863	936	1091	1255	1416	1598	1610	1653	1690	1762	1853	1992
	EOL	716239	3938077	Vs	237	257	291	349	417	482	518	600	669	754	870	946	998	1023	1069	1127	1217
SM (BH3) 4	SOL	701209	3926653	Vp	362	535	628	676	758	798	828	922	983	1039	1131	1213	1319	1436	1527	1605	1720
	EOL	701183	3926744	Vs	210	317	348	377	418	437	452	483	543	605	681	739	808	880	914	964	1030
SM (BH3) 6	SOL	701215	3927371	Vp	471	543	676	730	790	841	880	960	1032	1061	1149	1235	1276	1279	1285	1465	1550
	EOL	701308	3927391	Vs	221	282	343	359	392	414	434	513	557	588	674	725	751	757	762	840	909
SM (BH8) 16	SOL	715025	3942288	Vp	528	638	838	1129	1209	1260	1282	1315	1350	1365	1400	1400	1425	1445	1519	1682	1854
	EOL	714990	3942376	Vs	206	270	345	447	571	649	692	741	829	843	907	907	923	937	985	1092	1205
SM (BH8) 17	SOL	715844	3942414	Vp	516	874	1142	1504	1633	1769	1783	1796	1847	1878	1888	1912	1917	2142	2396	2601	2776
	EOL	715926	3942367	Vs	202	345	462	597	648	760	817	931	970	987	1172	1193	1196	1320	1440	1535	1648
SM (BH8) 25	SOL	714999	3941581	Vp	606	852	1031	1139	1323	1386	1465	1677	1745	1812	1865	1878	2007	2165	2303	2412	2556
	EOL	715080	3941630	Vs	246	352	444	563	633	660	721	788	990	1058	1171	1211	1274	1329	1378	1465	1562
SM (BH8) 26	SOL	715607	3941808	Vp	393	676	969	1301	1502	1679	1877	1969	2018	2105	2322	2420	2436	2482	2574	2730	2730
	EOL	715651	3941725	Vs	187	337	484	654	686	721	794	911	967	1000	1008	1034	1056	1107	1280	1329	1427

جدول ۵. متوسط سرعت امواج تراکمی (Vp) و برشی (Vs) بر حسب (m/s) در ۱۷ لایه تا عمق ۳۰ متری روش برداشتهای لرزه نگاری شکست مرزی در اطراف

گمانه BH32 خاک SW، گمانه BH3 خاک SM، گمانه BH8 خاک SM و گمانه BH34 خاک ML

Soil(borehole)	Layer	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17																	Average
		Depth (m)	0.6	1.7	2.8	3.9	5.0	6.1	7.2	9.5	11.8	14.1	16.4	18.7	21.0	23.3	25.6	27.9	
SW (BH32)	Vp	452	461	516	629	737	863	936	1091	1255	1416	1598	1610	1653	1690	1762	1853	1992	1372
	Vs	237	257	291	349	417	482	518	600	669	754	870	946	998	1023	1069	1127	1217	795
	ν	0.31	0.27	0.27	0.28	0.26	0.27	0.28	0.30	0.30	0.29	0.24	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.25
SM (BH3)	Vp	417	539	652	703	774	820	854	941	1008	1050	1140	1224	1298	1358	1406	1535	1635	1126
	Vs	216	300	346	368	405	426	443	498	550	597	678	732	780	819	838	902	970	648
	ν	0.32	0.28	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32	0.31	0.29	0.26	0.23	0.22	0.22	0.21	0.22	0.24	0.23	0.26
SM (BH8)	Vp	511	760	995	1268	1417	1524	1602	1689	1740	1790	1869	1903	1946	2059	2198	2356	2479	1811
	Vs	210	326	434	565	635	698	756	843	939	972	1065	1086	1112	1173	1271	1355	1461	987
	ν	0.40	0.39	0.38	0.38	0.37	0.37	0.36	0.33	0.29	0.29	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.23	0.29
ML (BH32) Aghaei Araci (2024)	Vp	386	427	468	515	561	588	616	687	753	809	866	908	943	975	1024	1171	1276	840
	Vs	177	228	258	283	300	322	335	370	406	438	476	494	515	553	593	670	735	466
	ν	0.37	0.30	0.28	0.28	0.30	0.29	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28	0.29	0.29	0.26	0.25	0.26	0.25	0.28

جدول ۶. تغییرات سرعت امواج P و S درون گمانه (درون گمانه) و نسبت بواسن به روش ایتروال و متوسط از سطح

Soil: UTM Coordinate	SW: X=716282, Y=3938096						SM (BH3): X=700916, Y=3927100						SM (BH8): X=715697, Y=3942078						ML: X=71526, Y=3938527					
	Average From Surface			Interval			Average From Surface			Interval			Average From Surface			Interval			Average From Surface			Interval		
	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν
1	440	212	0.35	440	212	0.35	410	196	0.35	410	196	0.35	668	322	0.35	668	322	0.35	368	162	0.38	368	162	0.38
2	481	234	0.35	530	260	0.34	481	236	0.34	582	296	0.33	758	368	0.35	875	429	0.34	379	169	0.38	390	176	0.37
3	508	250	0.34	574	292	0.33	541	268	0.34	722	370	0.32	799	390	0.34	896	444	0.34	436	196	0.37	622	289	0.36
4	534	267	0.33	630	334	0.30	593	298	0.33	836	443	0.30	854	423	0.34	1081	567	0.31	480	218	0.37	691	327	0.36
5	552	279	0.33	641	341	0.30	637	322	0.33	899	481	0.30	916	458	0.33	1285	684	0.30	519	237	0.37	774	368	0.35
6	583	297	0.33	812	432	0.30	672	344	0.32	934	514	0.28	966	489	0.33	1335	739	0.28	557	256	0.37	875	416	0.35
7	623	318	0.32	1040	564	0.29	688	354	0.32	804	437	0.29	1023	521	0.33	1573	853	0.29	577	266	0.37	737	354	0.35
8	656	337	0.32	1061	576	0.29	714	368	0.32	966	508	0.31	1071	546	0.32	1599	833	0.31	603	280	0.36	874	435	0.34
9	691	356	0.32	1201	660	0.28	742	383	0.32	1078	570	0.31	1120	572	0.32	1757	919	0.31	625	292	0.36	883	440	0.33
10	722	373	0.32	1213	646	0.30	760	395	0.32	980	543	0.28	1169	598	0.32	1941	1020	0.31	636	297	0.36	756	364	0.35
11	758	392	0.32	1491	775	0.31	785	409	0.31	1153	631	0.29	1213	624	0.32	1954	1083	0.28	661	310	0.36	1085	541	0.33
12	790	409	0.32	1501	780	0.31	806	421	0.31	1158	634	0.29	1234	633	0.32	1519	760	0.33	683	322	0.36	1090	544	0.33
13	818	424	0.32	1403	784	0.27	823	431	0.31	1098	598	0.29	1235	632	0.32	1241	621	0.33	696	330	0.36	899	470	0.31
14	833	434	0.31	1100	618	0.27	843	442	0.31	1235	658	0.30	1246	639	0.32	1417	735	0.32	711	338	0.35	989	520	0.31
15	852	445	0.31	1237	682	0.28	859	451	0.31	1166	639	0.29	1278	655	0.32	1977	1040	0.31	728	349	0.35	1099	598	0.29
16	850	445	0.31	830	452	0.29	869	458	0.31	1046	584	0.27	1296	667	0.32	1654	902	0.29	747	359	0.35	1236	637	0.32
17	866	454	0.31	1240	661	0.30	871	460	0.31	905	498	0.28	1323	683	0.32	1983	1101	0.28	755	364	0.35	904	473	0.31
18	873	458	0.31	995	553	0.28	877	463	0.31	995	524	0.31	1338	689	0.32	1658	829	0.33	775	374	0.35	1414	707	0.33
19	891	468	0.31	1418	763	0.30	891	470	0.31	1243	641	0.32	1352	698	0.32	1659	904	0.29	788	381	0.35	1104	584	0.31
20	914	481	0.31	1802	991	0.28	908	479	0.31	1419	736	0.32	1337	690	0.32	1109	570	0.32	802	389	0.35	1242	621	0.33
21	938	494	0.31	1982	1101	0.28	923	487	0.31	1421	737	0.32	1333	688	0.32	1247	644	0.32	819	397	0.35	1419	709	0.33
22	959	505	0.31	1806	946	0.31	936	493	0.31	1327	687	0.32	1336	691	0.32	1425	767	0.30	832	405	0.35	1244	663	0.30
23	981	517	0.31	1986	1045	0.31	945	498	0.31	1173	623	0.30	1348	697	0.32	1661	867	0.31	838	408	0.34	997	498	0.33
24	1002	529	0.31	1988	1104	0.28	958	506	0.31	1423	796	0.27	1362	706	0.32	1812	996	0.28	850	414	0.34	1245	622	0.33
25	1023	540	0.31	2115	1169	0.28	973	514	0.31	1532	866	0.27	1380	717	0.32	1993	1107	0.28	855	417	0.34	997	499	0.33

جدول ۷. خلاصه سرعت متوسط موج S و P اینتروالی خاک‌های گمانه‌های مختلف استان سمنان و نسبت پواسن به روش درون گمانه

Layer No	SW				SM(BH3)				SM(BH8)				ML			
	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Depth (m) Up to	$\nu$	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Depth (m) Up to	$\nu$	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Depth (m) Up to	$\nu$	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Depth (m) Up to	$\nu$
1	556	280	5	0.33	535	265	3	0.34	854	421	4	0.34	379	169	2.5	0.38
2	1051	568	10	0.29	874	471	7	0.30	1597	854	11	0.30	803	388	10	0.35
3	1467	780	13	0.30	1088	590	14	0.29	1361	681	13	0.33	1123	579	25	0.32
4	1048	574	19	0.29	1007	550	18	0.29	1741	924	18	0.30	1550	797	---	0.32
5	1957	1063	---	0.29	1388	749	---	0.29	1291	675	22	0.31	---	---	---	---
6	---	---	---	---	---	---	---	---	1809	979	---	0.29	---	---	---	---

تنشی ( $\sigma'_1/\sigma'_3 = k_c$ ) برابر ۲ برای ۵ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و  $\sigma'_3=1$  قرار گرفتند. نمونه‌ها با رطوبت ساخت بهینه ساخته شده و سپس با رطوبت بهینه (نیمه اشباع) و اشباع کامل تحت آزمایش دینامیکی قرار گرفتند. آزمایش‌ها در بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس و با فرکانس‌های بارگذاری مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ هرتز انجام شده است. دستگاه سه‌محوری مورد استفاده از پیشرفته‌ترین و مجهزترین سیستم‌های آزمایشگاهی دینامیک خاک در جهان است و توانایی انجام آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی مصالح خاکی و سنگریزه‌ای روی نمونه‌هایی به قطر ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر را دارد. دستگاه از قطعات مختلفی از جمله محفظه سه محوری، قاب بارگذاری عمودی، پمپ‌های پنوماتیک و هیدرولیکی، دستگاه کنترل واحد دیجیتال تمام الکترونیکی و سیستم کامپیوتری ثبت داده‌ها تشکیل شده است. سیستم سروهیدرولیک دستگاه توانایی بارگذاری تا  $20 \pm 30$  تن بار محوری عمودی را دارد. جهت اندازه‌گیری مقدار بار عمودی اعمالی به نمونه با قطر ۳۰ سانتی‌متر، از یک نوع سیستم بارگذاری به ظرفیت ۵۰ تن با دقت ۱۵ کیلوگرم هم در داخل و هم در خارج محفظه سه محوری استفاده می‌شود. اما برای نمونه‌ها به قطر ۲۰ سانتی‌متر از لودسل داخلی به ظرفیت ۲۰ تن و دقت ۶ کیلوگرم استفاده می‌شود. فشار جانبی قابل اعمال در محفظه سه محوری مخصوص نمونه‌های خاکی ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. برای اندازه‌گیری تغییر طول نمونه برای آزمایش‌های مونوتونیک یک عدد حسگر از نوع LVDT به ظرفیت ۱۰۰ میلی‌متر با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر در قسمت بالای محفظه سه محوری و برای آزمایش‌های دینامیکی دو عدد حسگر حساس از نوع غیرتماسی به ظرفیت ۲/۵ میلی‌متر تا حداکثر ۲۵ میلی‌متر با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر در داخل محفظه سه محوری روی نمونه استفاده می‌شود. زمان عکس‌العمل حسگرهای

با داشتن چگالی خاک و همچنین سرعت‌های امواج P و S می‌توان مدول یانگ و مدول برشی در کرنش‌های کوچک را از روابط مربوطه بدست آورد و با نتایج آزمایش‌های سه محوری مثلا خاک SM گمانه BH8 مقایسه کرد. نسبت سرعت موج برشی درون گمانه به روش متوسط از سطح به روش اینتروال برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۷۰، ۰/۷۵ و ۰/۶۴ و نسبت مذکور برای امواج تراکمی به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۷۲، ۰/۷۶ و ۰/۶۸ است.

#### ۴- برنامه آزمایش‌های دینامیکی

با توجه به ارائه نتایج آزمایش‌های دینامیکی سه محوری خاک ML گمانه BH34 (Aghaei Araei, 2024)، خاک SM گمانه BH3 (Aghaei Araei and Ghodrati, 2018a)، و خاک SW گمانه BH32 (Aghaei Araei and Ghodrati, 2018a) ارائه شده است، لذا در این مقاله فقط نتایج آزمایش‌های سه محوری آزمایشگاهی خاک SM گمانه BH8 را ارائه می‌دهد. جزئیات کاملی از نتایج آزمایش‌ها با دستگاه سه محوری قطر بزرگ روی ۶ مصالح خاکی کشور از جمله ۴ مصالح مورد بررسی در این مقاله در گزارش تحقیقاتی R-837 مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (Aghaei Araei و همکاران 2021) ارائه شده است. روی ۷ نمونه سه محوری از مصالح SM متراکم تا بسیار متراکم با مشخصات ارائه شده در بخش‌های قبلی، به تعداد ۴۹ آزمایش نوسانی تعیین مدول برشی و میرایی طبق ASTM D3999 انجام شده است. قطر نمونه‌های سه محوری ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر است. مطابق جدول ۸ نمونه‌ها تحت شرایط تنش محدودکننده ( $\sigma'_3$ ) مختلف همسان ۱، ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ناهمسانی

سیستم کامپیوتری گیرنده اطلاعات از یک طرف به واحد کنترل و از طرف دیگر به یک دستگاه کامپیوتر شخص متصل بوده و قادر است در حین آزمایش در هر فاصله زمانی دلخواه، از حداکثر هشت کانال خروجی دستگاه نمونه برداری کند. آزمایش به هر دو شکل کنترل تنش و کنترل کرنش قابل انجام است و هر نوع مسیر تنشی مورد نظر را می توان به نمونه اعمال کرد. شکل موج بار اعمالی به نمونه می تواند سینوسی، مستطیلی و یا مثلثی (دندانه دار) باشد. جزئیات اجزای دستگاه سه محوری قطر بزرگ در آزمایشگاه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در مرجع Aghaei Areai و همکاران (۲۰۱۲a) ارائه شده است.

غیرتماسی ۰/۲ میلی ثانیه است. حسگرهای تغییرشکلی غیرتماسی در مقابل هم و در بالای صفحه روی نمونه قرار می گیرند تا این که متوسط کرنشها به دست آید و مولفه های چرخشی کم شود. با تمهیدات بکار گرفته شده، اصطکاک در پیستون بارگذاری را از اندازه های بارگذاری حذف کرده و اندازه گیری بسیار دقیق کرنشها تا حدود ۰/۰۰۰۲٪ و در نتیجه مدول برشی در کرنش های کوچک فراهم می شود. مقدار فشار آب حفره ای در نمونه خاک به کمک یک نوع حسگر به ظرفیت ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع قابل اندازه گیری است. تغییرات حجم نمونه به کمک یک نوع حسگر به ظرفیت ۴ لیتر اندازه گیری می شود.

جدول ۸. مشخصات آزمایش های نوسانی ASTM D 3999 روی نمونه مصالح SM گمانه BH8 سمنان با قطر ۲۰ سانتی متر و ارتفاع ۴۰ سانتی متر

Moisture of Specimen During Construction	Moisture Condition of Specimen During Testing	$\sigma'_3$ kg/cm <sup>2</sup>	$kc=\sigma'_1/\sigma'_3$	Loading Frequency (Hz)	No. Specimen	No. Test
$W_{opt}=6\%$	dry	1*, 2, 5*	1*, 2	0.5, 1*, 2, 5, 10	3	30+2
$W_{opt}=6\%$	saturated	1	1, 2	0.5###, 1, 2, 5, 10	1	10
$W_{opt}=6\%$	saturated	5	1	0.5, 1, 2, 5, 10	1	5
$W_{opt}=6\%$	dry	1*	1	1	1	1
$W_{opt}=6\%$	dry	5	1	1	1	1

\*آزمایش تکرار پذیری نتایج، ### نمونه اشباع (BH8) Semnan تحت فرکانس ۰/۵ هرتز به صورت زهکشی شده آزمایش شد.

#### ۴-۱- روش آزمایش

حتی تا کرنش حدود ۰/۱٪ در نمونه های سنگریزه ای متراکم مورد بررسی انجام چندین آزمایش روی یک نمونه تاثیر زیادی در نتایج ندارد. لذا به دلایل هزینه های زیاد، زمان مورد نیاز و سادگی استفاده از یک نمونه، برای هر تنش محدودکننده تنها یک نمونه که به صورت پله ای بارگذاری شده، استفاده شده است. فواصل زمانی قرائت داده های مربوط به بارهای محوری، جابجایی قائم و فشار آب حفره ای نمونه خاک طوری تنظیم شده که در هر نوسان بارگذاری ۵۰ قرائت ثبت شود. طبق استاندارد ASTM D3999 حداقل قرائت لازم در هر نوسان بارگذاری ۴۰ داده تعیین شده است.

#### ۴-۲- نتایج آزمایش های خصوصیات دینامیکی

نتایج آزمایشها شامل مقادیر مدول برشی ( $G$ ) و نسبت میرایی ( $D$ ) در برابر کرنش برشی ( $\gamma$ ) در تعداد نوسانهای ۱، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبق استاندارد ASTM D3999 محاسبه شدند.

نمونه های طبق استاندارد ASTM D3999 تحت بار محوری نوسانی با فرکانس های مختلف ارائه شده در جدول ۸، به صورت زهکشی نشده بارگذاری می شوند. بر طبق این استاندارد برای هر نمونه خاک که برای شروع بارگذاری نوسانی آماده شده است با ثابت نگهداشتن تنش محدودکننده فرکانس معینی به تعداد ۴۰ نوسان به نمونه وارد شده و تغییرات بار و جابجایی نسبت به زمان ثبت می گردد. سپس شیر زهکشی بسته شده و ۴۰ نوسان دیگر، با بار بیشتر از گام قبلی به نمونه وارد می شود و در پایان بار دیگر شیر زهکشی باز می شود. به همین ترتیب گام به گام بارگذاری نوسانی با ثابت ماندن تعداد نوسان و افزایش بار اعمال می شود. همزمان با افزایش فرکانس در هر گام سطح تنش و کرنش تغییر می کند. طبق استانداردهای ASTM D3999 و ASTM D4015 انجام چندین آزمایش روی یک نمونه برای بدست آوردن مقادیر مدول برشی و میرایی به شرط اعمال کرنش برشی کمتر ۰/۰۱٪ مجاز است. بررسی های انجام شده قبلی نشان داد که

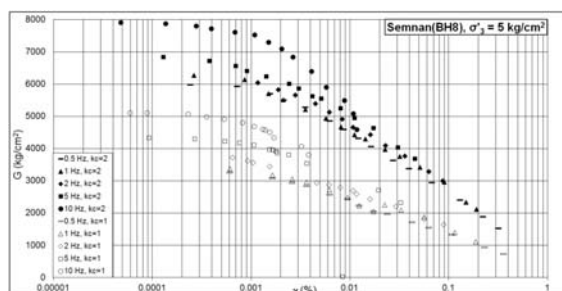
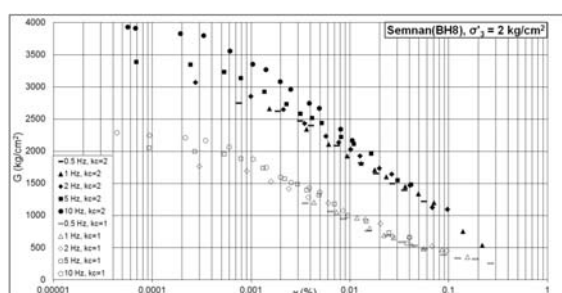
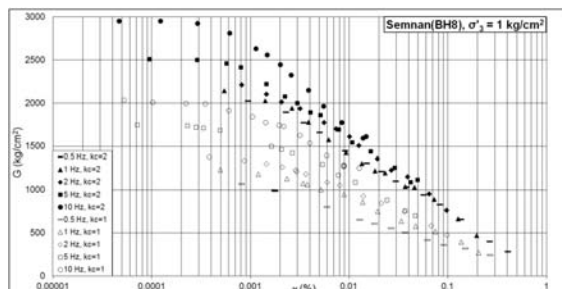
متفاوت در شرایط تحکیم غیرهمسان و رطوبت بهینه مصالح SM گمانه BH8 را نشان می‌دهد. برای فرکانس‌های مورد بررسی مقدار مدول برشی تفاوتی چندانی با هم ندارند.

محاسبات با فرض برش مصالح SM تحت شرایط زهکشی نشده برای نمونه‌های با رطوبت کمتر یا مساوی بهینه و اشباع با فرض نسبت پواسن به ترتیب برابر  $0/3$  و  $0/5$  انجام شده است (Aghaei Araei و همکاران 2019).

#### ۴-۲-۱-مدول برشی

نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی  $G$  در برابر  $\gamma$  (به صورت متوسط مقادیر سیکل‌های ۱ تا ۱۰ در کرنشهای کوچک و نوسان ۱۱۰م برای کرنش‌های بزرگ) برای مصالح SM گمانه BH8 در تنش‌های محدودکننده مختلف و فرکانس بارگذاری مختلف و شکل موج سینوسی با کوبش در رطوبت بهینه تحت شرایط تحکیم همسان و غیرهمسان در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در فرکانس ثابت با افزایش کرنش برشی ( $\gamma$ ) مقادیر  $G$  کاهش می‌یابد. مشابه رفتار مشاهده شده برای مصالح سنگریزه ای درشت دانه، در سطح کرنش‌های بزرگتر از  $10^{-2}$ % تغییر فرکانس، تاثیر قابل توجهی بر مقادیر  $G$  ندارد (Aghaei Araei و همکاران ۲۰۱۲). بطورکلی در دامنه کرنش‌های کوچک و متوسط، افزایش فرکانس بارگذاری منجر به تغییرات قابل توجه در منحنی  $G - \gamma$  شده و سبب زیاد شدن مقادیر  $G$  می‌شود. ضمناً با افزایش تنش محدودکننده اثر افزایشی تحکیم غیرهمسان در افزایش مدول برشی تقریباً ثابت است. مقدار مدول برشی خاک متراکم SM در کرنش  $0/2$ % و تنش محدودکننده‌های ۱، ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و غیرهمسانی‌های مختلف بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و برای تنش محدودکننده بین ۵ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع یا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. تحکیم غیرهمسان، باعث افزایش مقادیر مدول برشی می‌شود. شکل ۵ نتایج آزمایش تکرار مدول برشی-کرنش برشی در تنش محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت فرکانس ۱ هرتز و شکل موج سینوسی و رطوبت بهینه مصالح SM گمانه BH8 را نشان می‌دهد. مطابق شکل تفاوت بین مقادیر مدول برشی در اثر تکرار اندک است. روند مشابهی برای سایر فرکانس‌ها و شکل موج‌های متفاوت در شرایط تحکیم غیرهمسان و غیرهمسان بدست آمد.

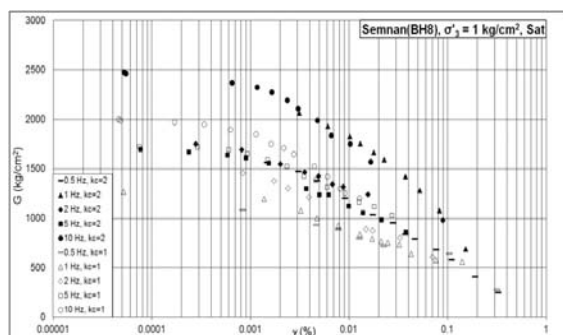
شکل ۶ نتایج مدول برشی-کرنش برشی در تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت فرکانس‌ها و شکل موج‌های



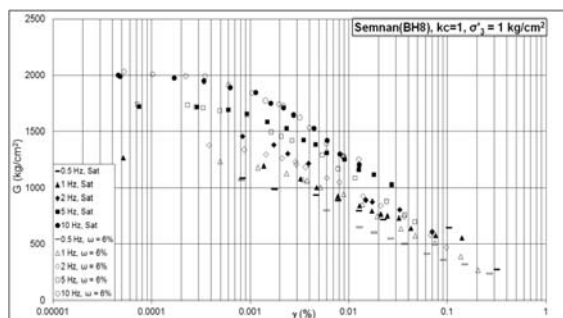
شکل ۴. مقایسه نتایج  $G - \gamma$  مصالح SM گمانه BH8 با رطوبت بهینه برای نمونه تحت تنش‌های محدودکننده ۱، ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در دو حالت تحکیم همسان و ناهمسانی تنشی مختلف

شکل ۷ نتایج مدول برشی-کرنش برشی مصالح گمانه BH8 سمنان برای نمونه اشباع تحت تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در دو حالت تحکیم همسان و تحکیم تحت تنش محوری قائم را نشان می‌دهد. افزایش غیرهمسانی سبب افزایش مدول برشی می‌شود.

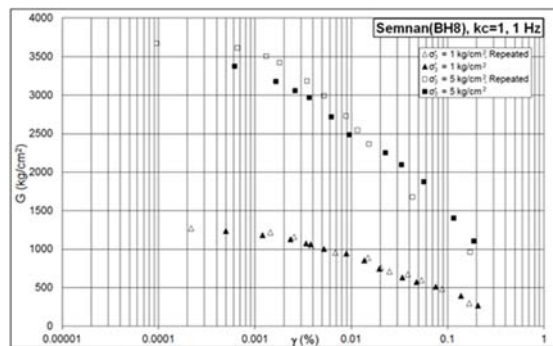
می دهد. از مقایسه شکل های ۴ تا ۹ که پنج پارامتر رطوبت نمونه،  $\sigma'_3$ ، تحکیم غیرهمسان، شکل بار نوسانی و فرکانس را برای مصالح SM گمانه BH8 سمنان بررسی شد، اینگونه استنباط می شود که در مورد مصالح مورد بررسی به ترتیب تحکیم غیرهمسان، تغییرات  $\sigma'_3$  و فرکانس بارگذاری بیشترین درصد تاثیر را بر مقادیر مدول برشی دارند و بعد از آن درصد رطوبت است که اثر اندک افزایشی خود را بر مقدار G تحمیل می کند و پس از آن پارامتر شکل بار مثلی، سینوسی و مستطیلی است که تغییر بسیار اندکی در G ایجاد می کند. البته درصد اثر هر یک از پارامترهای یادشده با توجه به میزان تنش محدودکننده متفاوت است.



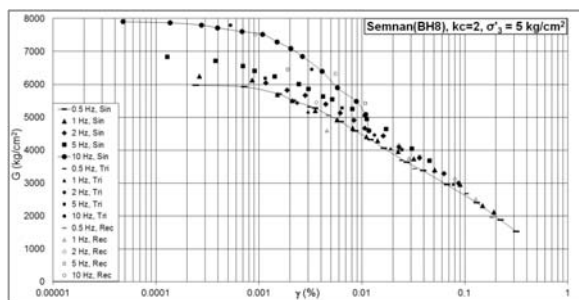
شکل ۷. نتایج مدول برشی - کرنش برشی مصالح SM گمانه BH8 برای نمونه اشباع تحت تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در دو حالت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان ( $\sigma'_1/\sigma'_3$ )



شکل ۸ مقایسه نتایج مدول برشی - کرنش برشی در حالت تحکیم همسان مصالح SM گمانه BH8 سمنان برای نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه و نمونه اشباع تحت تنش محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل ۵. نتایج آزمایش تکرار مدول برشی - کرنش برشی تحت تحکیم همسان تنش محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و فرکانس ۱ هرتز و موج سینوسی و رطوبت بهینه مصالح SM گمانه BH8



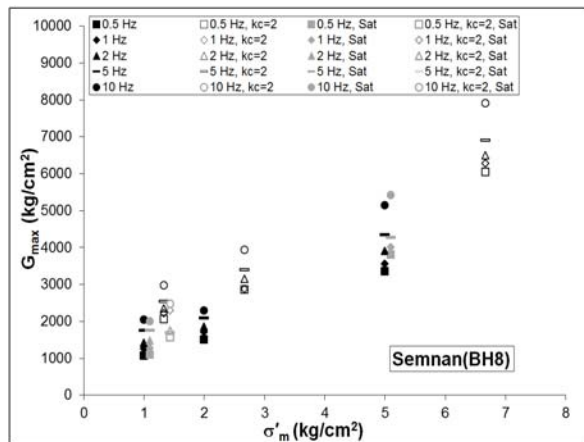
شکل ۶. نتایج مدول برشی - کرنش برشی در تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تحت فرکانس ها و شکل موج های متفاوت در شرایط تحکیم غیرهمسان و رطوبت بهینه مصالح SM گمانه BH8

شکل ۸ مقایسه نتایج مدول برشی - کرنش برشی در حالت تحکیم همسان مصالح گمانه BH8 سمنان برای نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه و نمونه اشباع تحت تنش محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع را نشان می دهد. مقادیر مدول برشی در تنشهای محدودکننده کم در حالت رطوبت اشباع اندکی بیشتر از مقادیر نظیر بهینه است اما در تنشهای بالا روند برعکس است. مقدار مدول برشی خاک متراکم SM در کرنش ۰/۲٪ تحت تنش محدودکننده ۵ حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است و برای تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، حدود ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. شکل ۹ مقایسه نتایج مدول برشی - کرنش برشی تحت تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در حالت تحکیم تحت تنش محوری قائم برای نمونه با رطوبت بهینه و اشباع مصالح SM گمانه BH8 را نشان

### روابط $G/G_{max}$

شکل ۱۱ نتایج  $\gamma - G/G_{max}$  در تنش محدودکننده مختلف تحت تحکیم همسان و غیرهمسان در فرکانس‌های متفاوت تحت موج سینوسی برای مصالح SM گمانه BH8 با رطوبت بهینه و اشباع را نشان می‌دهد. منحنی‌های ارائه شده توسط Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه، EPRI (۱۹۹۳) برای مصالح ماسه ای با  $PI=0$  برای اعماق ۶-۰ متر، ۳۶-۱۵ متر و Seed و همکاران (۱۹۸۶) برای شن در شکل ۱۱ برای مقایسه ارائه شده است. افزایش فرکانس، تنش محدودکننده و افزایش رطوبت سبب کاهش مقادیر نتایج  $\gamma - G/G_{max}$  در یک کرنش معین می‌شود. بطورکلی اکثر نقطه داده‌های نسبت مدول بین مرز متوسط Seed و همکاران (۱۹۸۶) برای شن و مرز متوسط Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه از کرنش‌های کوچک تا کرنش ۰.۳٪ قرار می‌گیرند. اما در کرنش‌های بزرگتر از ۰.۳٪ بین مرز بالایی Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه (یا EPRI (۱۹۹۳) برای عمق ۶-۰ متر) و EPRI (۱۹۹۳) عمق ۳۶-۱۵ متر قرار می‌گیرند.

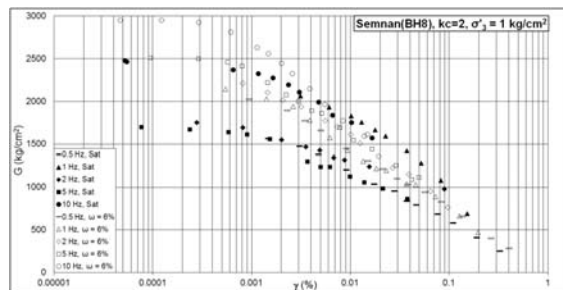
لذا تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین مقادیر  $\gamma - G/G_{max}$  مصالح SM گمانه BH8 با نتایج موجود در ادبیات فنی وجود دارد که این موضوع اهمیت بررسی رفتار مصالح مورد بررسی در این تحقیق و دقت در جزئیات برای انتخاب منحنی‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. تغییرات  $G_{max}$  در برابر تنش متوسط محدودکننده مصالح

SM گمانه BH8 در رطوبت بهینه

و حالت اشباع حالت همسان و غیرهمسان



شکل ۹. مقایسه نتایج مدول برشی - کرنش برشی تحت تنش

محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در حالت تحکیم

غیرهمسان قائم برای نمونه با رطوبت بهینه و

اشباع مصالح SM گمانه BH8

### مدول برشی کرنش کوچک

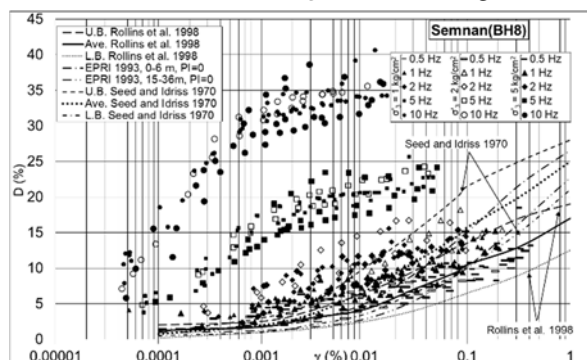
با بکارگیری حسگرهای‌های کرنش‌سنج غیرتماسی و اندازه‌گیری کرنش‌های به کوچکی  $10^{-6}$ ، تعیین  $G_{max}$  امکان‌پذیر شد. در جدول ۹ مقادیر و سرعت موج برشی برای مصالح SM گمانه BH8 و سایر مصالح (Aghaei Araei و همکاران 2021a) برای نمونه‌های ساخته شده با رطوبت بهینه و نصف رطوبت بهینه و اشباع تحت موج سینوسی ارائه شده است. رابطه سرعت موج برشی ( $V_S$ ) و مدول برشی ( $G$ ) و چگالی خاک ( $\rho$ ) با رابطه  $G = \rho V_S^2$  قابل بیان است. با تعیین سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه تعیین نوع زمین آیین نامه ۲۸۰۰ برای خاک‌های مورد مطالعه ممکن است. شکل ۱۰ تغییرات  $G_{max}$  در برابر تنش متوسط محدودکننده،  $\sigma'_m = (\sigma'_1 + (2\sigma'_3)/3)$  مصالح SM گمانه BH8 سمنان در رطوبت بهینه و حالت اشباع برای حالت همسان و غیرهمسان تحت موج سینوسی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش تنش متوسط محدودکننده، مدول برشی حداکثر برای نمونه‌های تحت تحکیم همسان و غیرهمسان در محدوده تنش‌های مورد بررسی افزایش می‌یابد. نرخ افزایش مقادیر مدول برشی با فرکانس بارگذاری با افزایش  $\sigma'_m$  افزایش می‌یابد. ضمناً مقادیر متوسط مدول برشی حداکثر در حالت تحکیم غیرهمسان برای نمونه‌های با رطوبت بهینه هم اندکی بیشتر از مقادیر نظیر تحکیم همسان است. اشباع نمونه سبب کاهش مقادیر  $G_{max}$  در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با رطوبت بهینه می‌شود.

جدول ۹. مقادیر  $G_{max}$  و سرعت موج برشی مصالح مورد بررسی نمونه‌های تحکیم همسان ( $\sigma'_1/\sigma'_3=1$ ) و غیرهمسان نمونه‌ها با رطوبت ساخت بهینه برای ماسه‌ها و نصف رطوبت بهینه و بهینه برای خاک‌های مختلف در شرایط خشک و اشباع با قطرهای ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر

$\sigma'_1/\sigma'_3 = k_c$	$\sigma'_3(kg/cm^2)$	Loading frequency (Hz)	Measured $G_{max}(kg/cm^2)$				Vs ( m/s)			
			SW(BH32)	SM(BH3)	SM(BH8)	ML(BH34)	SW(BH32)	SM(BH3)	SM(BH8)	ML(BH34)
$k_c = 2$	1	0.5		2069	2061	1269		318	305	255
		1	2153	2195	2221	1295	304	327	316	258
		2	2346	2380	2352	1322	317	341	325	260
		5	2493	2599	2533	1408	327	356	338	269
		10	2884	2987	2980	1462	352	382	366	274
	2	0.5		3826	2860	1704		432	359	296
		1	3578	4041	2874	1792	392	444	360	303
		2		4262	3148	1800		456	377	304
		5	4005	4573	3398	1837	415	472	391	307
		10	4822	5219	3935	1950	455	505	421	316
	5	0.5		8214	6045			633	522	
		1	6900	8409	6272	2014	544	640	532	321
		2		9104	6496			666	541	
		5	7670	9633	6906	2326	574	685	558	345
		10	8635	10265	7912	2534	609	708	597	360
$k_c = 1$	1	0.5		1677	1070	794		286	220	202
		1	950	1893	1256	833	202	304	238	207
		2	1060	1994	1415	854	213	312	252	209
		5	1177	2147	1746	932	225	324	280	219
		10	1340	2404	2048	1046	240	342	304	232
	2	0.5		1964	1510	1204		310	261	248
		1	2530	2101	1710	1242	330	320	278	252
		2		2386	1847	1306		341	288	259
		5	2750	2727	2081	1387	344	365	306	267
		10	3060	3061	2291	1510	362	386	321	278
	5	0.5		4341	3356	1436		460	389	271
		1	3540	4561	3557	1589	390	472	400	285
		2		5040	3911	1790		496	420	303
		5	4010	5425	4348	2072	415	514	443	326
		10	4390	6050	5144	2413	434	543	481	352
$k_c=1, w=w_{opt}/2^*$ for ML(BH34); Saturation for SM(BH8)	1	0.5			1100	990			223	231
		1			1272	1053			239	238
		2			1469	1090			257	242
		5			1744	1107			280	244
		10			2002	1201			300	254
	5	0.5			3805	2762			414	385
		1			4008	2849			425	391
		2			3844	2923			416	396
		5			4262	3029			438	404
		10			5421	3121			494	410
$k_c=2, w=w_{opt}/2^*$ for ML(BH34); Saturation for SM(BH8)	1	0.5			1580	1468			267	281
		1			2300	1475			322	282
		2			1755	1496			281	284
		5			1698	1575			277	291
		10			2480	1658			334	299
$k_c=1.5, w=w_{opt}/2^*$ for ML(BH34);	5	0.5			3565					438
		1			3646					443
		2			3699					446
		5			3894					458
		10			4115					470

\* $e=0.398$ , Dry density= $1.86 gr/cm^3$

۱۰٪ می‌باشد. کاهش میرایی حداکثر از حدود ۴۵٪ برای مصالح سنگریزه‌ای به کمتر از ۴۰٪ مصالح SM گمانه BH8 یا کمتر از ۳۵٪ برای ML سمنان در گمانه BH34 ممکن است ناشی از اثر حداکثر اندازه دانه و یا اینرسی دانه‌ها، اثرات ریزدانه و همچنین شرایط رطوبتی نمونه‌ها باشد. بطور کلی رطوبت بیشتر سبب میرایی بیشتر، اما ناهمسانی سبب کاهش نسبت میرایی می‌شود. تنش محدودکننده ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع دارای بیشترین نسبت میرایی در مقایسه دو تنش محدودکننده دیگر هستند.

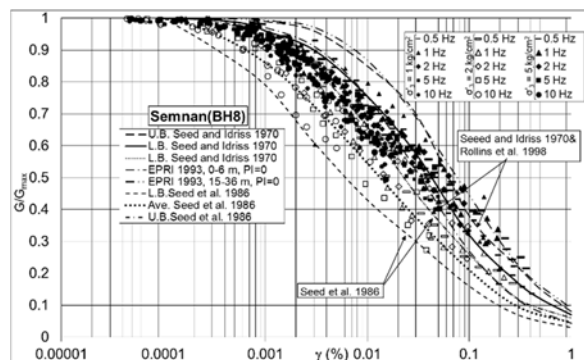


شکل ۱۲. مقایسه نتایج  $D-\gamma$  در نمونه‌ها با قطر ۲۰ سانتی‌متر با رطوبت بهینه و اشباع و تحت تنشهای محدود کننده همسان و غیرهمسانی تنشی مختلف و فرکانسهای متفاوت تحت امواج سینوسی مصالح سمنان گمانه BH8 و مقایسه با منحنیهای ادبیات فنی

#### ۴-۳- تجزیه و تحلیل نتایج برای مصالح سمنان BH8

##### ۴-۳-۱- اثر تعداد نوسان بر مدول برشی و نسبت میرایی

شکل ۱۳ الف و ب به ترتیب تغییرات نسبت مدول برشی و میرایی متوسط در نوسانهای ۱ تا ۱۰ به نتایج نوسانهای ۳۰ تا ۴۰ (مقادیر  $G_{1-10}/G_{30-40}$  و  $D_{1-10}/D_{30-40}$ ) را در برابر  $\gamma$  برای نمونه با قطر ۲۰ و رطوبت ساخت بهینه و اشباع در فرکانسهای مختلف نشان می‌دهد. در نمودار، بار وارده سینوسی و نمونه‌ها با تحت تحکیم همسان و غیرهمسان با رطوبت ساخت بهینه و اشباع بوده است. چنانچه مشاهده می‌شود تا دامنه کرنش مورد بررسی، حداکثر و حداقل نسبت  $G_{1-10}/G_{30-40}$  به ترتیب ۱/۲۸ و ۰/۹۲ می‌باشد (شکل ۱۳ الف). دامنه تغییرات مذکور برای نمونه اشباع بیشتر از مقادیر نظیر رطوبت بهینه است.



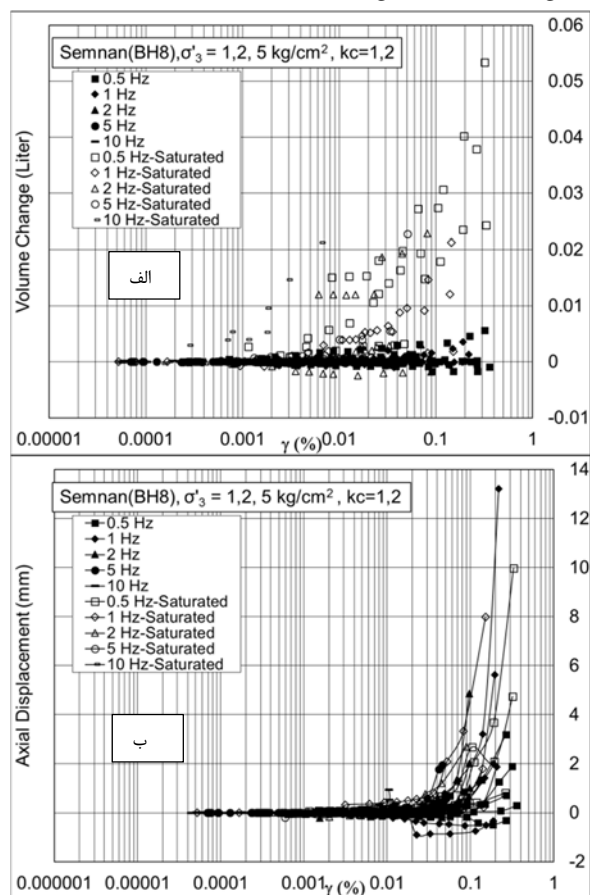
شکل ۱۱. نتایج  $G/G_{max} - \gamma$  در تنش محدودکننده مختلف تحت

تحکیم همسان و غیرهمسان در فرکانسهای متفاوت تحت موج سینوسی برای مصالح SM گمانه BH8 با رطوبت بهینه و اشباع و مقایسه با منحنیهای ادبیات فنی

##### ۴-۲-۲- نسبت میرایی

در شکل ۱۲ مقادیر نسبت میرایی (به صورت متوسط مقادیر سیکل‌های ۱ تا ۱۰) در برابر کرنش برشی برای تنشهای محدود کننده مختلف مصالح SM گمانه BH8 ارائه شده است. محدوده‌های ارائه شده توسط Seed و همکاران (۱۹۸۶) برای شن و منحنیهای Rollins و همکاران (۱۹۹۸) مشابه Seed و Idriss ۱۹۷۰ برای ماسه و منحنیهای EPRI (۱۹۹۳) برای مصالح ماسه‌ای با  $PI=0$  و اعماق ۰-۶ متر، ۳۶-۱۵ متر هم در شکل ۱۲ ارائه شده است. نکته بسیار مهم، افزایش میرایی با افزایش فرکانس بارگذاری نه تنها در کرنشهای برشی کوچک، بلکه در کرنشها بالاتر از آن می‌باشد. به نظر می‌رسد که مقادیر میرایی در هر فرکانس بارگذاری به حدی میل می‌کند. در کل نتایج میرایی در برابر کرنش برشی مصالح مورد بررسی حتی تحت فرکانس بارگذاری ۰/۵ هرتز در سطح کرنشهای کوچک در بالای محدوده منحنیهای پیشنهادی ادبیات فنی می‌باشد. روند نسبتاً مشابهی برای شکل موج مثلثی و مستطیلی و سینوسی هم مشاهده شده است (Aghaei Araei و همکاران ۲۰۱۹). همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد افزایش تنش محدود سبب کاهش میرایی می‌شود. ملاحظه می‌شود حداکثر مقدار میرایی اندازه‌گیری شده کمتر از ۴۰٪ بیشتر از مقادیر نظیر نمونه‌های با رطوبت طبیعی خاک ML گمانه BH34 (Aghaei Araei 2024) می‌باشد. حداکثر میرایی در کرنشهای کوچک کمتر از

نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر با رطوبت ساخت بهینه (۰/۶٪) دامنه تغییر حجم در اثر ورود یا خروج آب از نمونه در دامنه کرنش برشی حدود ۰/۱٪ حداکثر ۰/۰۰۲٪ و حداقل ۰/۰۰۲-٪ لیتر می‌باشد. لذا تغییر در دانسیته در اثر ورود یا خروج آب تا کرنش ۰/۱٪ برای مصالح SM گمانه BH8 ناچیز می‌باشد. برای نمونه‌های اشباع، دامنه تغییر حجم در دامنه کرنش برشی حدود ۰/۱٪ حداکثر ۰/۰۳٪ و حداقل ۰/۰۰۲-٪ لیتر می‌باشد. در شکل ۱۴ نتایج تغییر طول نمونه در برابر کرنش‌های برشی مصالح SM گمانه BH8 تحت آزمایش‌های نوسانی تحت شرایط مختلف ارائه شده است. تغییر طول در اثر پیشینه بارگذاری برای دامنه کرنش‌های برشی کوچکتر از ۰/۱٪ برای نمونه‌های با قطر ۲۰ سانتی‌متر اندک می‌باشد. حداکثر میزان تغییر طول در کرنش برشی ۰/۱٪ کمتر ۵ میلی‌متر است.

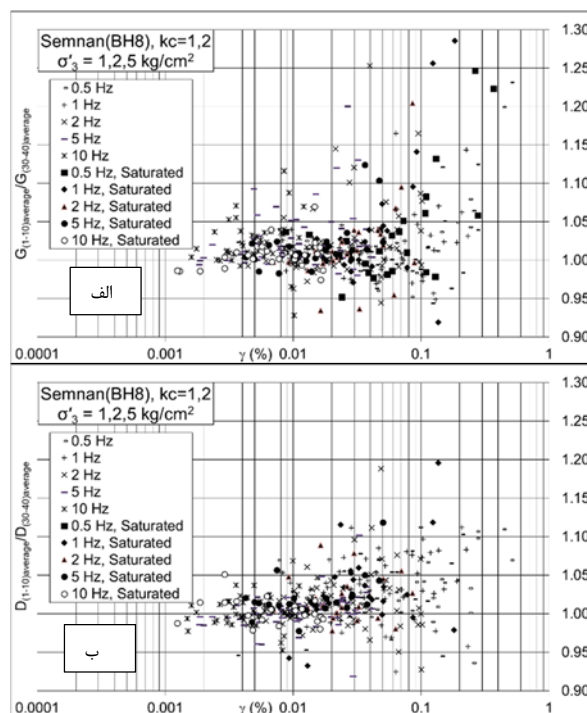


شکل ۱۴. الف) تغییرات حجم، ب) تغییر طول محوری در برابر کرنش

برشی مصالح SM گمانه BH8 در آزمایش نوسانی

با رطوبت بهینه و اشباع

بطور کلی روند کلی منحنی  $G-\gamma$  متاثر از تعداد نوسان بارگذاری نمی‌باشد. چنانچه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود برای نمونه‌های با رطوبت ساخت بهینه و اشباع تا دامنه کرنش ۰/۴٪ نسبت  $D_{1-10}/D_{30-40}$  بین ۰/۹۲ و ۱/۲۰ متغیر است. دامنه تغییرات مذکور برای نمونه اشباع بیشتر از مقادیر نظیر رطوبت بهینه است. در دامنه کرنش‌های ۰/۱٪ و بزرگتر با زیاد شدن دامنه کرنش، در اثر زیاد شدن تعداد نوسان،  $D$  اندکی افزایش می‌یابد. همچنین روند کلی منحنی  $D-\gamma$  متاثر از تعداد نوسان بارگذاری نمی‌باشد.



شکل ۱۳. الف) مقادیر  $G_{1-10}/G_{30-40}$  ب)

در برابر کرنش برشی مصالح سمنان گمانه

BH8 رطوبت بهینه و اشباع تحکیم همسان و غیرهمسان و

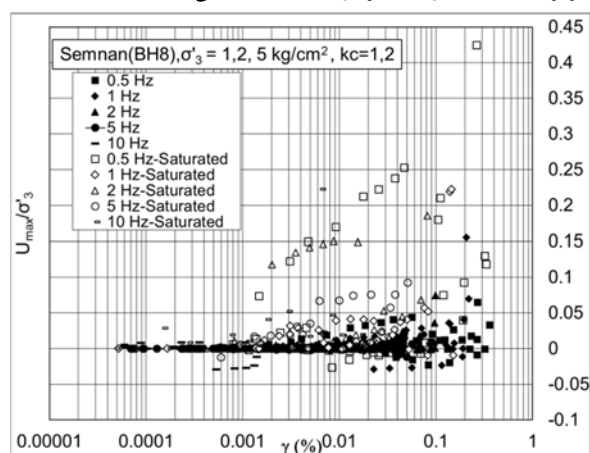
موج سینوسی

۴-۳-۲ تغییرات حجمی و طول نمونه

شکل ۱۴ الف مقدار خروج آب از نمونه (تغییر حجم) در برابر کرنش برشی در اثر باز کردن شیرهای زهکش در انتهای هر پله بارگذاری نوسانی مصالح SM گمانه BH8 تحت شرایط رطوبت بهینه و اشباع، فرکانس‌ها و  $\sigma'_3$  مختلف را نشان می‌دهد؛ بیشترین تغییرات حجم مربوطه به فرکانس بارگذاری بالا می‌باشد. برای

### ۳-۳-۴- تغییرات نسبت بی بعد شده فشار آب حفره‌ای

شکل ۱۵ تغییرات نسبت بی‌بعد شده فشار آب حفره‌ای  $(U_{max}/\sigma'_3)$  در برابر کرنش برای نوسان چهلیم نمونه مصالح SM گمانه BH8 را در فرکانس‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در تمامی محدوده کرنش‌های برشی مورد بررسی، تغییرات بی‌بعد شده فشار آب حفره‌ای برای نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه کمتر از ۷٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که میزان اضافه فشار آب حفره‌ای تولیدی در نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه تحت بارگذاری نوسانی در فرکانس ۰/۵ و ۱ هرتز اندکی بیشتر از مقادیر نظیر سایر فرکانس‌ها می‌باشد. برای نمونه اشباع خصوصاً برای فرکانس‌های ۰/۵، ۱ و ۲ هرتز نسبت مذکور بیشتر بوده و به ۰/۲۵ می‌رسد.



شکل ۱۵. تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در تنش‌های محدودکننده و فرکانس‌های بارگذاری مختلف در نوسان‌های چهلیم مصالح SM گمانه BH8 نمونه با رطوبت ساخت بهینه و اشباع

### ۳-۳-۴- نتایج آزمایش‌های مونوتونیک مصالح مختلف تا مرحله اعمال غیرهمسانی تنش

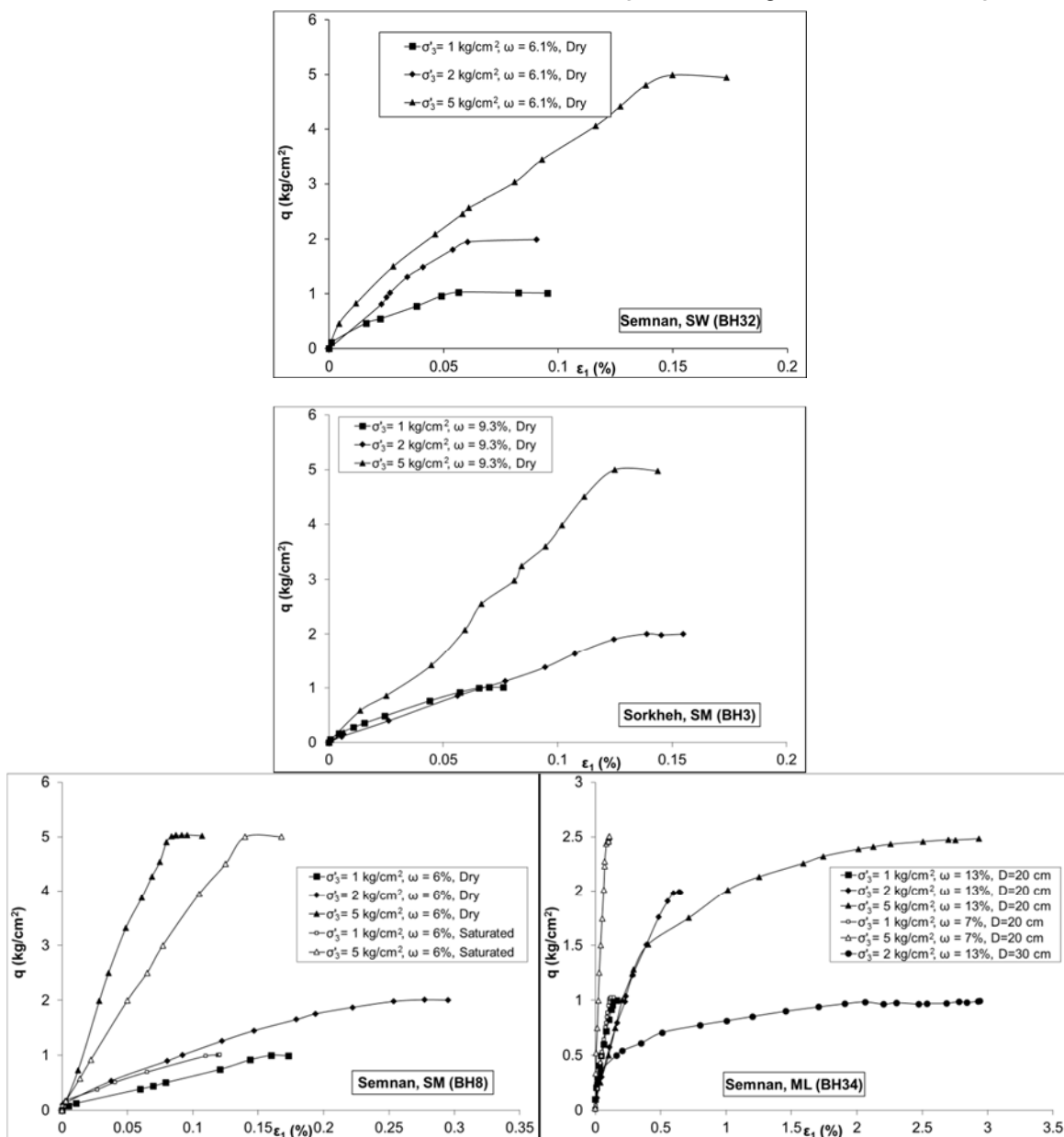
شکل ۱۶ نمودار تنش تفاضلی-کرنش محوری نمونه مصالح مورد بررسی برای اعمال تحکیم غیرهمسان تا حداکثر  $kc=2$  به صورت زهکشی شده (ASTM 7181، ۲۰۱۱) تحت شرایط مختلف را نشان می‌دهد. برای نمونه ML با رطوبت ساخت بهینه اعمال  $kc=2$  در کیلوگرم برسانتی‌متر مربع  $\sigma'_3=2$  اعمال  $kc=1/5$  تحت کیلوگرم برسانتی‌متر مربع  $\sigma'_3=5$  سبب ایجاد کرنش‌های

بزرگتر از ۰/۵٪ می‌شود. در جدول ۱۰ نتایج تحکیم غیرهمسان در آزمایش‌های مونوتونیک نمونه‌های مصالح مورد مطالعه براساس نمودارهای شکل ۱۶ ارائه شده است. برای اهداف مقایسه‌ای مقادیر  $G_{max}$  آزمایش سه محوری برای حالت همسان و غیرهمسان برای مقایسه با نتایج مدول سکانتی مرحله اعمال غیرهمسانی تنش ارائه شده است. مقادیر مدول  $G_{max}$  سه محوری برای حالت همسان برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8، ML گمانه BH34، به ترتیب ۰/۵۷، ۱/۳۴، ۱/۴۰، ۱/۹۵ و حالت غیرهمسان ۱/۳۱، ۲/۲، ۲/۳۳، ۲/۶۵ برابر بیشتر از مقادیر نظیر مدول سکانتی مرحله اعمال غیرهمسانی تنش است. مقادیر مدول  $G_{max}$  سه محوری برای حالت همسان و غیرهمسان به طور متوسط برای ۴ مصالح مورد بررسی به ترتیب ۱/۴۳ و ۲/۱ برابر بیشتر از مقادیر نظیر مدول سکانتی مرحله اعمال غیرهمسانی تنش است. همچنین مقادیر مدول یانگ حداکثر آزمایش سه محوری  $(E_{max} = (1 + \nu) G_{max} \times 2)$  برای حالت همسان و غیرهمسان به طور متوسط برای ۴ مصالح مورد بررسی به ترتیب بیش از ۳/۷۷ و ۵/۸۶ برابر بیشتر از مقادیر نظیر مدول سکانتی مرحله اعمال غیرهمسانی تنش است، لذا از ارائه آن خودداری شده است. براساس نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ برای نمونه ML با افزایش تنش محدودکننده برای نمونه‌ها با رطوبت بهینه، مدول سکانتی کاهش می‌یابد و با افزایش قطر نمونه مدول سکانتی شدید می‌یابد. برای مصالح ماسه‌ای مورد بررسی معمولاً مدول سکانتی با افزایش تنش محدودکننده در مرحله اعمال ناهمسانی افزایش می‌یابد. حداکثر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای تولیدی در مرحله اعمال  $kc$  برای نمونه SM گمانه BH8 کیلوگرم برسانتی‌متر مربع  $\sigma'_3=1$  برابر ۱۰٪ است و معمولاً در اکثر نمونه‌ها بجز نمونه SM گمانه BH3 و نمونه خاک ML گمانه BH34 تحت کیلوگرم برسانتی‌متر مربع  $\sigma'_3=1$  برای هر دو قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر با رطوبت ساخت بهینه، آب به داخل نمونه مکیده می‌شود.

شده است. تعدادی نمونه از خاک SW هم به صورت زهکشی شده تحت استاندارد ASTM D7181 بارگذاری شدند. بارهای محوری، جابجایی قائم، اضافه فشار آب حفره‌ای داخل نمونه و تغییرحجم به صورت همزمان ثبت گردیده است.

## ۵- نتایج آزمایش مونوتونیک پسانوسانی تا مرحله گسیختگی مصالح مورد مطالعه

بعد از اعمال بار نوسانی سینوسی، اکثر نمونه‌های مصالح مورد بررسی به صورت زهکشی نشده (ASTM 4767، ۲۰۱۱) به صورت کرنش کنترل با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه برش داده



شکل ۱۶. نمودار تنش تفاضلی-کرنش محوری نمونه‌های مصالح مورد مطالعه برای اعمال تحکیم غیرهمسان

جدول ۱۰. نتایج تحکیم غیرهمسان در آزمایش‌های مونوتونیک نمونه‌های مصالح مورد مطالعه

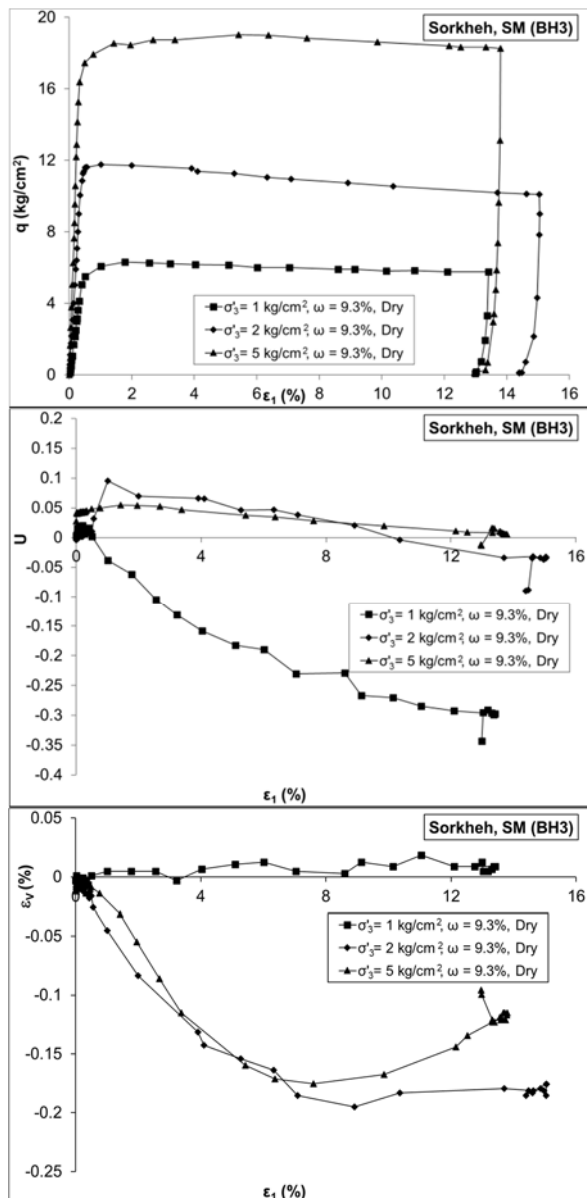
Bore hole (Soil Type)	Specimen diameter (cm)	Dry density $gr/cm^3$	Moisture Condition During Testing (%)	$\sigma'_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma'_1/\sigma'_3$	$E_{sec}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Axial strain (%) at $E_{sec}$	Excess pore water pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Inlet(+) and outlet volume change sensor of specimen (Liter)	$G_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
										$k_c=2$	$k_c=1$
BH32, SW	20	2.33	Dry ( $W_{opt}=6.1\%$ )	1	2	2435	0.045	+0.002	+0.004	2469	1132
	20	2.33	Dry ( $W_{opt}=6.1\%$ )	2	2	3825	0.053	-0.006	+0.005	4135	2085
	20	2.33	Dry ( $W_{opt}=6.1\%$ )	5	2	4218	0.122	+0.04	+0.01	7735	2985
BH3, SM	20	2.05	Dry ( $W_{opt}=9.3\%$ )	1	2	1986	0.049	+0.03	-0.001	2446	2023
	20	2.05	Dry ( $W_{opt}=9.3\%$ )	2	2	1461	0.154	+0.01	-0.001	4384	2448
	20	2.05	Dry ( $W_{opt}=9.3\%$ )	5	2	3832	0.133	+0.01	-0.002	9125	5083
BH8, SM	20	2.22	Dry ( $W_{opt}=6\%$ )	1	2	634	0.158	-0.015	+0.001	2429	1507
	20	2.22	Dry ( $W_{opt}=6\%$ )	2	2	1092	0.184	+0.02	+0.001	3243	1888
	20	2.22	Dry ( $W_{opt}=6\%$ )	5	2	7037	0.071	+0.1	+0.006	6726	4063
	20	2.22	Saturated	1	2	1264	0.081	-0.1	+0.036	1963	1517
	20	2.22	Saturated	5	2	3846	0.13	-0.008	+0.023	-	4268
BH34, ML	20	1.95	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	1	2	1098	0.09	+0.04	-0.002	1351	892
	20	1.95	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	2	2	444	0.47	+0.05	+0.002	1817	1330
	20	1.95	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	5	1.5	437	0.57	+0.13	+0.005	2291	1860
	20	1.86	Dry ( $W_{opt}/2=7\%$ )	1	2	1083	0.09	+0.04	+0.006	1534	1088
	20	1.86	Dry ( $W_{opt}/2=7\%$ )	5	1.5	4266	0.06	+0.01	+0.006	3784	2937
	30	1.93	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	1	2	313	0.32	+0.1	-0.003	955	603

مشخصات و نتایج آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی از جمله مدول باربرداری و بارگذاری مجدد در جدول ۱۱ ارائه شده است. در شکل ۱۷ نتایج تنش تقاضایی- کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای-تغییرحجم در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی مصالح SW گمانه BH32 نمونه با رطوبت ساخت بهینه (۶/۱٪) ارائه شده است. بطورکلی برای رطوبت ساخت بهینه (حالت نیمه اشباع) و تحت  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع حداکثر تنش تقاضایی در کرنش‌های بزرگتری در حالت CD نسبت به حالت CU رخ می‌دهد. افزایش تنش محدود کننده سبب فشار آب از منفی (حالت مکش) به مثبت تغییر پیدا می‌کند. تغییر حجم نمونه تحت  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع حالت CD به صورت کاهش حجم و برای نمونه تحت  $\sigma'_3=1$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع حالت CU به صورت افزایش حجم می‌باشد.

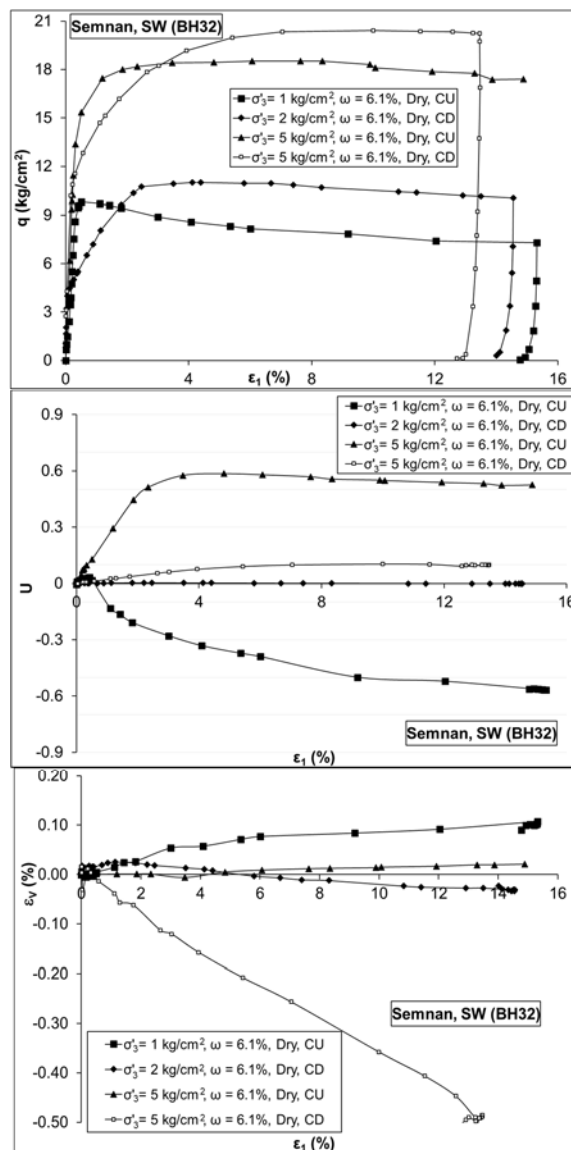
مقادیر زاویه اصطکاک خاک SW گمانه BH32 از ۱، ۲ و  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب ۶۳ درجه، ۴۷/۲ درجه و ۴۰/۵ درجه برای CU و برای  $\sigma'_3=5$  برای حالت CD حدود ۴۲/۲ درجه است که اندکی بیش از مقادیر نظیر CU است. مقادیر مدول سکانتی خاک SW گمانه BH32 تحت ۱ و  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب ۲۳۹۴ و ۴۶۶۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای CU و برای ۲ و  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب ۱۳۵۵ و ۱۳۱۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تقریباً یکسان است.

شکل ۱۸ نتایج تنش تقاضایی-کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای-تغییرحجم در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی مصالح SM گمانه BH3 نمونه با رطوبت ساخت بهینه (۹/۳٪) با باز بودن شیر زهکش را نشان می‌دهد.

افزایش حجم می باشد. مقادیر زاویه اصطکاک خاک SM گمانه BH3 از ۱، ۲ و ۵  $\sigma'_3$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب ۴۹/۴ درجه، ۴۸/۳ درجه و ۴۰/۵ درجه برای CU است که دارای روند کاهش با افزایش تنش محدودکننده است. مقادیر مدول سکانتی خاک SM گمانه BH3 از ۱، ۲ و ۵  $\sigma'_3$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب ۱۲۶۸، ۲۷۹۹ و ۵۱۶۹ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است.



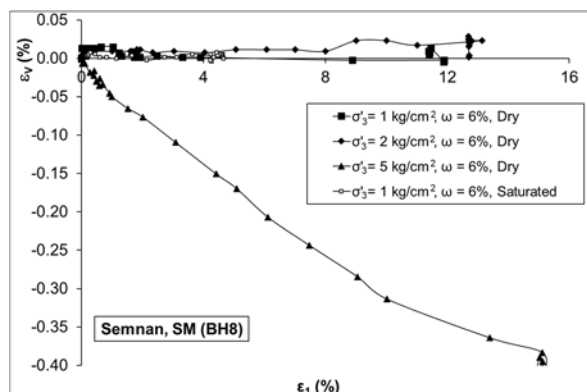
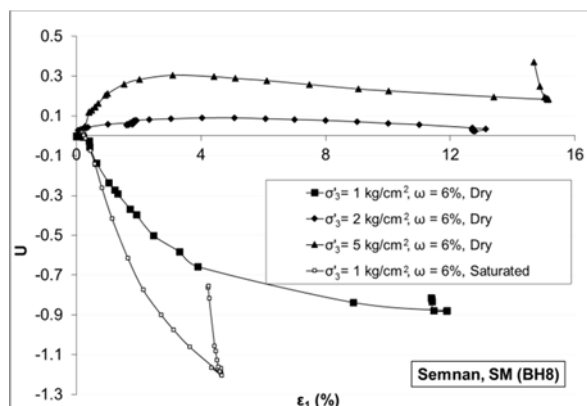
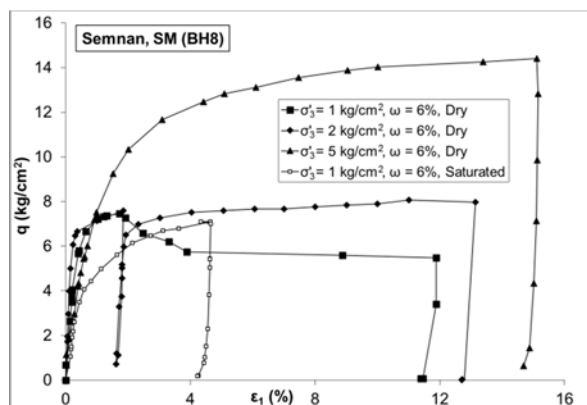
شکل ۱۸. نتایج تنش تفاضلی- کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای- تغییر حجم در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی مصالح SM گمانه BH3 نمونه با رطوبت ساخت بهینه (۹/۳٪)



شکل ۱۷. نتایج تنش تفاضلی- کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای- تغییر حجم در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی مصالح SW گمانه BH32 نمونه با رطوبت ساخت بهینه (۶/۱٪)

در نمونه SM گمانه BH3 حداکثر تنش تفاضلی در کرنش‌های کمتر از ۱٪ رخ می‌دهد. با افزایش تنش محدود کننده سبب فشار آب از منفی (حالت مکش) به مثبت تغییر پیدا می‌کند با این حال در کرنش‌های ۱۰٪ و ۱۲٪ به ترتیب برای ۲  $\sigma'_3 = 5$  و  $\sigma'_3 = 2$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع مکش رخ می‌دهد. تغییر حجم نمونه تحت ۵ و ۲  $\sigma'_3$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع صورت کاهش حجم و برای نمونه تحت ۱  $\sigma'_3 = 1$  به صورت

سانتی متر مربع، نسبت تنش تفاضلی حداکثر به تنش محدودکننده از حدود ۵ به حدود ۱ کاهش می‌یابد.



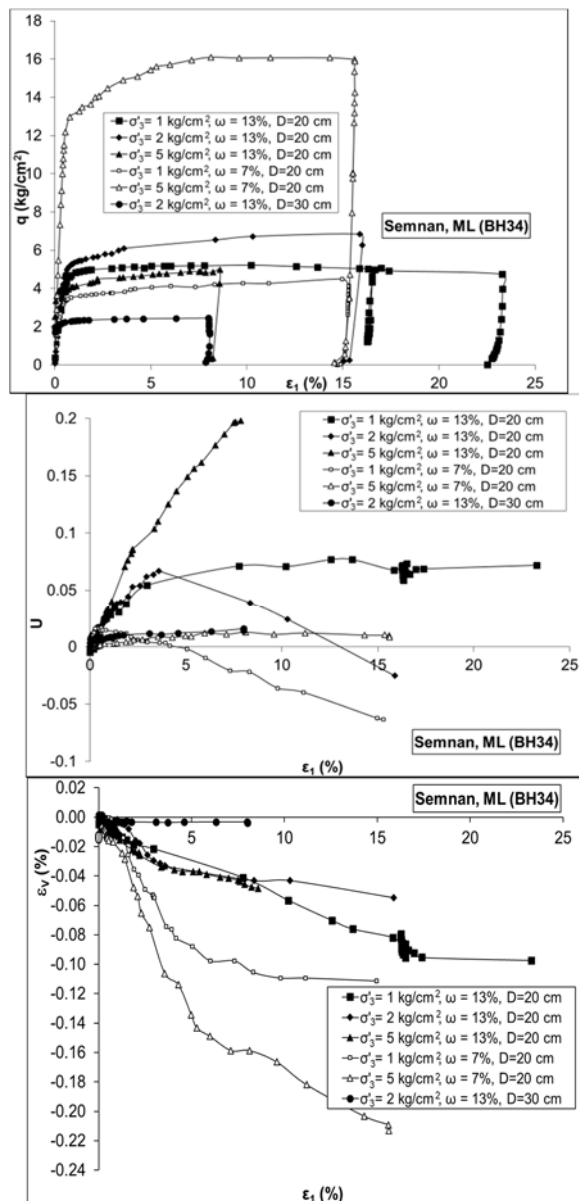
شکل ۱۹. نتایج تنش تفاضلی- کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای - تغییر حجم در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی مصالح SM گمانه BH8 نمونه با رطوبت ساخت بهینه (۶٪) و اشباع

شکل ۲۰. نتایج نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری برای نمونه‌های با رطوبت ساخت بهینه و رطوبت ۷٪ در تنشهای محدودکننده مختلف در آزمایش مونوتونیک پسا

در شکل ۱۹ نتایج تنش تفاضلی-کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای -تغییرحجم در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی مصالح SM گمانه BH8 نمونه با رطوبت ساخت بهینه (۶٪) و اشباع ارائه شده است. در مصالح SM گمانه BH8 در تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای هر دو شرایط رطوبت بهینه و اشباع، اتساع وجود دارد و مکش در داخل نمونه ایجاد می‌شود. بخشی از این مکش و افزایش مقاومت به علت پس فشار بالا است. تحت  $\sigma'_3 = 5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع مقدار حجم کاهش می‌یابد که با اضافه آب حفره‌ای تولیدی تطابق دارد. در مصالح SM گمانه BH3 سرخه با برداشت تنش قائم از روی نمونه برعکس مصالح SM گمانه BH8 سمنان U کاهش می‌یابد. مقادیر زاویه اصطکاک خاک SM گمانه BH8 از ۱، ۲ و  $\sigma'_3 = 5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب ۵۲/۳ درجه، ۴۸/۱ درجه و ۳۶/۲ درجه برای CU است که دارای روند کاهش با افزایش تنش محدودکننده است. تفاوتی چندانی بین زاویه اصطکاک خشک و اشباع SM گمانه BH8 وجود ندارد. مقادیر مدول سکانتی خاک SM گمانه BH8 از ۱، ۲ و ۵  $\sigma'_3$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب ۱۹۰۲، ۳۲۶۲ و ۱۰۴۶ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. برای حالت اشباع مقادیر مدول سکانتی برای  $\sigma'_3 = 1$  برابر ۷۸۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است که کمتر از نصف مقادیر نمونه با رطوبت ساخت بهینه است.

مطابق شکل ۲۰ الف برای نمونه‌های ML گمانه BH34 با رطوبت ساخت بهینه، تنش تفاضلی در منحنی  $q: \varepsilon_1$  ابتدا تا سطح کرنش محوری کمتر از ۰/۵٪ افزایش سریع می‌یابد و سپس به صورت ملایم افزایش می‌یابد (Aghaei Araei ۲۰۲۴). نکته جالب توجه اینکه با افزایش تنش محدودکننده از ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقدار تنش تفاضلی حداکثر افزایش می‌یابد، اما دوباره در تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، مقادیر تنش تفاضلی حتی از مقادیر نظیر ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نمونه‌های با رطوبت بهینه کمتر است. در صورتیکه برای نمونه با رطوبت ساخت ۷٪، با افزایش تنش محدودکننده مقادیر تنش تفاضلی افزایش می‌یابد. در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی برای نمونه ML با رطوبت ساخت ۱۳٪، با افزایش تنش محدودکننده از ۱ به ۵ کیلوگرم بر

است. لذا توصیه می شود برای دستیابی به  $k_c$  مناسب اعمال بار سیکلی، حداقل ضریب اطمینان  $1/33$  بر  $k_c(max)$  منظور شود.



شکل ۲۰. نتایج تنش تفاضلی- کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره ای در آزمایش های مونوتونیک پسانوسانی مصالح ML گمانه BH34 نمونه با رطوبت ساخت ۱۳٪ (بهینه) و ۷٪ و قطر نمونه ۲۰ و ۳۰ سانتی متر (Aghaei Araei ۲۰۲۴).

نوسانی را نشان می دهد. مشاهده می شود که پاسخ اضافه فشار آب حفره ای شدیداً وابسته به تنش محدودکننده است. بطورکلی با افزایش محدودکننده از ۱ به ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع مقدار حداکثر نسبت اضافه فشار آب حفره ای افزایش می یابد. وجود سابقه تنش بزرگتر در  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع در کل سبب کاهش مقادیر مدول سکانتی و افزایش نسبت اضافه فشار آب حفره ای تولیدی می شود. کاهش قابل ملاحظه تنش تفاضلی حداکثر با افزایش قطر نمونه جالب توجه است. همچنین حداکثر اضافه فشار آب حفره ای تولیدی در نمونه با قطر ۳۰ سانتی متر از مقادیر نظیر ۲۰ سانتی متر کمتر است، که دلیل آن شاید ابعاد بزرگتر و دانسیته کمتر نمونه باشد. با افزایش تنش محدودکننده نمونه ها، اضافه فشار آب حفره ای برای مصالح ML تغییرات U در اثر باربرداری تقریباً ناچیز است (Aghaei Araei ۲۰۲۴). بطورکلی نمونه ML تحت آزمایش مونوتونیک دچار کاهش حجم می شود.

مطابق جدول ۱۱ ملاحظه می شود که برای مصالح ML با افزایش تنش محدودکننده مقادیر زاویه اصطکاک کاهش می یابد. اعمال بارگذاری نوسانی در حالت نمونه با قطر ۲۰ سانتی متر با رطوبت ساخت ۱۳٪ و تحت  $\sigma'_3$  برابر ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و نمونه با قطر ۳۰ سانتی متر با رطوبت ساخت ۱۳٪ و تحت  $\sigma'_3$  برابر ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع سبب افزایش حدود ۳ برابر مدول سکانتی می شود. اعمال بارنوسانی سبب می شود که  $E_{sec}$  حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای حالت های مختلف بجز برای  $\sigma'_3$  برابر ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع (با مقدار  $E_{sec}=2750$ ) کیلوگرم بر سانتی متر مربع برسد (Aghaei Araei ۲۰۲۴). نسبت مدول باربرداری  $E_{ur}$  مونوتونیک پسانوسانی به مدول سکانتی اولیه در مرحله اعمال غیرهمسانی برای تنش های مختلف حدود ۲/۲ است (Aghaei Araei ۲۰۲۴). کمترین نسبت  $\sigma'_{1max}/\sigma'_3 = k_c(max)$  برای خاک ML خصوصاً برای  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع با مقدار ۲ و ۲/۲ به ترتیب برای نمونه با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی متر

جدول ۱۱. خلاصه مشخصات و نتایج آزمایش‌های استاتیکی پسانوسانی مصالح SW گمانه BH32، مصالح SM گمانه BH3، مصالح SM گمانه

**BH34 و مصالح ML گمانه BH8**

	$\sigma'_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Dimens ion (cm)	$\gamma_d$ (gr/c m <sup>3</sup> )	Moisture Condition During Testing (%)	Axial strain at end of cyclic test (%)	$q_{max}$ $/\sigma'_3$	$\sigma'_{1max}$ $/\sigma'_3 =$ $k_c(max)$	Axial strain at end of Monotoni c test (%)	EPWP at $q_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'_{peak}$ (°)	$E_{ur}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{sec}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) for post cyclic
BH32 , SW	1	20*40	2.33	Dry ( $W_{opt}=6.1\%$ )	0.30	9.8	10.8	15.32	+0.32	63.0	2538	2394
	2	20*40	2.33	Dry ( $W_{opt} = 6.1\%$ )	0.05	5.5	6.5	14.5	0	47.2	2500	1355
	5	20*40	2.33	Dry ( $W_{opt} = 6.1\%$ )	0.15	3.7	4.7	14.88	2.5	40.5	-	4661
	5	20*40	2.33	Dry ( $W_{opt} = 6.1\%$ )-repeat	0.18	4.08	5.08	13.46	0.1	42.2	4400	1318
BH3, SM	1	20*40	2.05	Dry ( $W_{opt} = 9.3\%$ )	0.44	6.3	7.3	13.41	-0.28	49.4	2174	1268
	2	20*40	2.05	Dry ( $W_{opt} = 9.3\%$ )	0.53	5.9	6.9	15.05	-0.13	483	2088	2799
	5	20*40	2.05	Dry ( $W_{opt} = 9.3\%$ )	0.38	3.8	4.8	13.8	-0.14	40.5	4293	5169
BH8, SM	1	20*40	2.22	Dry ( $W_{opt}=6\%$ )	0.37	7.6	8.6	11.89	-0.37**	52.3	1286*	1902
	2	20*40	2.22	Dry ( $W_{opt}=6\%$ )	0.69	4	5	13.14	+0.034	41.8	2257*- 2875	3262
	5	20*40	2.22	Dry ( $W_{opt}=6\%$ )	0.36	2.88	3.88	14.4	+0.18	36.2	3209	1046
	1	20*40	2.22	Saturated	0.42	7	8	4.66	-1.2	51.1	1700	788
	5	20*40	2.22	Saturated	-	3	4	-	-	36.9	-	-
BH34 , ML	1	20*40	1.95	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	0.38	5.2	6.2	23.3	+0.07	46.2	1789	1022
	2	20*40	1.95	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	0.88	3.4	4.4	15.88	-0.05	39.02	1222	1000
	5	20*40	1.95	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	3.91	1.0	2	8.59	+0.99	19.47	1243	1000
	1	20*40	1.86	Dry ( $W_{opt}/2=7\%$ )	0.31	4.5	5.5	15.33	-0.06	43.81	1778	1070
	5	20*40	1.86	Dry ( $W_{opt}/2=7\%$ )	0.37	3.2	4.2	16	+0.04	38.09	4708	2750
	2	30*60	1.93	Dry ( $W_{opt}=13\%$ )	0.03	1.2	2.2	8	+0.03	22.02	1058	1013

\*انتهای مونوتونیک، \*\*انتهای مونوتونیک برابر 0.88

ترتیب کمتر و بیشتر از مقادیر نظیر داده‌های صحرایی ایتروالی درون گمانه است. لذا توصیه می‌شود برای طبقه بندی خاک و اگر طبقه استاندارد ۲۸۰۰، از روش درون گمانه و از روش اندازه‌گیری متوسط سرعت موج برشی از سطح استفاده شود. به نظر می‌رسد سرعت موج برشی بدست آمده روش شکست مرزی و روش درون گمانه ایزتروالی به ترتیب معرف مقادیر سرعت در جهت افقی و طولی و به نوعی معرف بیش تحکیم یافتگی نمونه باشد. برای نمونه ML نسبت سرعت مذکور برای تمام اعماق و متوسط عمق ۳۰ متر کمتر از یک است. در صورتیکه متوسط نسبت مذکور برای خاکهای SM و خاک SW مورد مطالعه بیش از یک است و اما در سطح تنش‌های کم به علت لایه فرسایش سطحی کمتر از یک است. با توجه به عدم امکان اعمال غیرهمسانی از بیش ۱/۵ برای ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع خاک ML دقت این یافته‌ها قابل تصدیق است. بطورکلی نتایج سه محوری دینامیکی روی خاک SW تحت  $\sigma'_3 = 2$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تا  $k_c = 2$  مقادیر مدول برشی افزایش و تحت  $k_c = 3$  مقادیر مدول برشی کاهش می‌یابد (Aghaei Araei و Ghodrati, 2018a). لذا تنها اعمال غیرهمسانی تنش برای نمونه آزمایشگاهی دستنخورده برای دستیابی به مقادیر سرعت موج برشی صحرایی کافی نیست بلکه جهت نمونه گیری افقی (برای لرزه‌نگاری شکست مرزی) و یا عمودی (برای متوسط از سطح درون گمانه) هم باید در نظر گرفته شود.

نسبت مدول باربرداری لحظه گسیختگی به مدول سکانتی مونوتونیک پسا نوسانی برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8، ML گمانه BH34، به ترتیب ۱/۴۵، ۱/۹۳، ۱/۴۸، ۱/۴۴ با متوسطی در حدود ۱/۵۵ برای ۴ مصالح است. همچنین نسبت مدول سکانتی مرحله اعمال غیرهمسانی تنش به مدول سکانتی مونوتونیک پسانوسانی برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8، ML گمانه BH34 به ترتیب ۱/۵۸، ۱/۳۴، ۱/۷۹، ۱/۸۰ با متوسطی در حدود ۱/۳۳ برای ۴ مصالح است.

**۶- طبقه‌بندی نوع زمین براساس مطالعات ژئوفیزیکی و آزمایشگاهی**

در جدول ۱۲ طبقه بندی زمین براساس سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه‌های سطحی خاک‌های مختلف در گمانه‌های مورد بررسی طبق استاندارد ۲۸۰۰ برای روش‌های مختلف اندازه‌گیری سرعت موج ارائه شده است. معمولاً افزایش تنش‌های محدودکننده سبب افزایش مقادیر سرعت موج برشی می‌شود. مطابق جدول ۱۳ تطابق نسبتاً خوبی بین داده‌های صحرایی سرعت موج برشی متوسط از سطح روش درون گمانه با متوسط مقادیر نمونه آزمایشگاهی سه‌محوری تحت تحکیم غیرهمسان برقرار است. مقادیر متوسط سرعت موج برشی لرزه‌نگاری برداشت شکست مرزی برای خاک لای و ماسه‌ها به

جدول ۱۲. طبقه بندی زمین براساس سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه های سطحی خاکها طبق استاندارد ۲۸۰۰

SW(BH32)	SM(BH3)	SM(BH8)	ML(BH34)		روش اندازه گیری سرعت موج
Vs (m/s)	Vs (m/s)	Vs (m/s)	Vs (m/s)		
432	436	681	333	$\sigma'_3=1 \text{ kg/cm}^2$	داده های صحرایی اینتروالی درون گمانه
706	614	855	570	$\sigma'_3=2 \text{ kg/cm}^2$	
1089	790	876	675	$\sigma'_3=5 \text{ kg/cm}^2$	
292	316	469	237	$\sigma'_3=1 \text{ kg/cm}^2$	داده های صحرایی متوسط از سطح درون گمانه
441	448	661	352	$\sigma'_3=2 \text{ kg/cm}^2$	
523	511	700	422	$\sigma'_3=5 \text{ kg/cm}^2$	
428	399	613	301	$\sigma'_3=1 \text{ kg/cm}^2$	داده های صحرایی برداشت لرزه نگاری شکست مرزی
847	667	1035	466	$\sigma'_3=2 \text{ kg/cm}^2$	
1109	882	1315	638	$\sigma'_3=5 \text{ kg/cm}^2$	
220	314	259	214	$\sigma'_3=1 \text{ kg/cm}^2$	تحکیم همسان (داده های آزمایشگاهی سه محوری) همه فرکانسها
345	344	291	261	$\sigma'_3=2 \text{ kg/cm}^2$	
413	497	427	307	$\sigma'_3=5 \text{ kg/cm}^2$	
325	345	330	263	$\sigma'_3=1 \text{ kg/cm}^2$	تحکیم غیرهمسان (داده های آزمایشگاهی سه محوری) - همه فرکانسها
421	462	382	305	$\sigma'_3=2 \text{ kg/cm}^2$	
576	666	550	353	$\sigma'_3=5 \text{ kg/cm}^2$	

جدول ۱۳. طبقه بندی زمین براساس سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه های سطحی خاکها طبق استاندارد ۲۸۰۰

SW(BH32)		SM(BH3)		SM(BH8)		ML(BH34)		روش اندازه گیری سرعت موج
نوع خاک	Vs (m/s)	نوع خاک	Vs (m/s)	نوع خاک	Vs (m/s)	نوع خاک	Vs (m/s)	
II	689	II	601	II	789	II	526	داده های صحرایی اینتروالی درون گمانه - متوسط برای ۳۰ متر
								داده های صحرایی متوسط از سطح درون گمانه - متوسط برای ۳۰ متر
II	403	II	419	II	592	III	337	داده های صحرایی برداشت لرزه نگاری شکست مرزی - متوسط برای ۳۰ متر
I	795	II	648	I	987	II	466	تحکیم همسان (داده های آزمایشگاهی) - همه فرکانسها و تنشها
III	316	II	385	III	325	III	261	تحکیم غیرهمسان (داده های آزمایشگاهی) - همه فرکانسها و تنشها
II	429	II	491	II	421	III	298	

## ۷- نتیجه گیری

تغییرات سرعت موج برشی در جهت قائم (درون گمانه) و افقی (لرزه نگاری شکست مرزی) در محاسبه مقدار تنش درجای برای نمونه های آزمایشگاهی دینامیکی و یا تعیین عمق "لایه فرسایش سطحی" قابل استفاده است.

مقاومت الکتریکی "لایه فرسایش سطحی" در بخش های سطحی به ترتیب حدود ۲ و ۳ برابر حداقل مقادیر آن در کل عمق گمانه به ترتیب برای خاک های SM یا SW و ML است. لذا با فرض  $AB/4$  برابر عمق، ضخامت لایه مذکور از سطح برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 به ترتیب ۵، ۳/۴، ۲/۳ و ۱۰/۷ متر به

مشخصات درجا شامل مقاومت الکتریکی و سرعت امواج روش لرزه نگاری شکست مرزی و درون گمانه ای و رفتار دینامیکی و مونوتونیک پسانوسانی نمونه متراکم شده قطر بزرگ سه محوری خاک های ماسه ای غیرچسبنده و خاک لای مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج این تحقیق به شرح ادامه است.

متوسط مقاومت الکتریکی تا عمق ۳۴ متر خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 به ترتیب ۱/۴۱، ۶/۵۴، ۵/۹۹، ۹/۱۳ ولت-متر/آمپر است.

سبب کاهش نسبت میرایی شده، اما رطوبت بیشتر سبب افزایش نسبت میرایی می‌شود. تنش محدودکننده ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع دارای بیشترین نسبت میرایی در مقایسه دو تنش محدودکننده دیگر هستند. کاهش میرایی حداکثر از حدود ۴۵٪ برای مصالح سنگریزه ای به کمتر از ۴۰٪ مصالح SM گمانه BH8 یا کمتر از ۳۵٪ برای ML در گمانه BH34 ممکن است ناشی از اثر حداکثر اندازه دانه و یا اینرسی دانه‌ها، اثرات ریزدانه و همچنین شرایط رطوبتی نمونه‌ها باشد.

بطور کلی روند کلی منحنی  $G - \gamma$  و  $D - \gamma$  متاثر از تعداد نوسان بارگذاری نمی‌باشد.

برای هر سه نمونه ماسه‌ای اعمال غیرهمسانی تنشی تا  $kc=2$  برای تمام تنش‌های محدودکننده ۵، ۲، ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع سبب ایجاد کرنش‌های کمتر از ۰/۲٪ می‌شود. اما برای نمونه ML با رطوبت ساخت بهینه اعمال  $kc=2$  در  $\sigma'_3=2$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای اعمال  $kc=1/5$  تحت  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع سبب ایجاد کرنش‌های بزرگتر از ۰/۳۲٪ می‌شود.

مقادیر مدول  $G_{max}$  سه محوری برای حالت همسان و غیرهمسان به طور متوسط برای ۴ مصالح مورد بررسی به ترتیب ۱/۴۳ و ۲/۱ برابر بیشتر از مقادیر نظیر مدول سکانتی مرحله اعمال غیرهمسانی تنشی است.

برای مصالح ماسه ای مورد بررسی معمولاً مدول سکانتی با افزایش  $\sigma'_3$  در مرحله اعمال ناهمسانی افزایش می‌یابد. اما در نمونه ML با افزایش  $\sigma'_3$  برای نمونه‌ها با رطوبت بهینه، مدول سکانتی کاهش می‌یابد.

نسبت مدول باربرداری  $E_{ur}$  مونوتونیک پسانوسانی به مدول سکانتی اولیه در مرحله اعمال غیرهمسانی برای تنش‌های مختلف حدود ۲/۲ برای خاک ML است. کمترین نسبت  $k_c(max) = \sigma'_{1max} / \sigma'_3$  برای خاک ML خصوصاً برای  $\sigma'_3=5$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با مقدار ۲ و ۲/۲ به ترتیب برای نمونه با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر است. لذا توصیه می‌شود برای دستیابی به  $k_c$  مناسب اعمال بار سیکلی، حداقل ضریب اطمینان ۱/۳۳ بر  $k_c(max)$  منظور شود. تطابق نسبتاً خوبی بین داده‌های صحرائی سرعت موج برشی متوسط از سطح روش درون گمانه با متوسط مقادیر نمونه آزمایشگاهی سه‌محوری تحت تحکیم غیرهمسان برقرار است. مقادیر متوسط سرعت موج برشی لرزه نگاری برداشت شکست مرزی برای خاک لای و ماسه‌ها به ترتیب کمتر و بیشتر از مقادیر نظیر داده‌های صحرائی اینتروالی درون گمانه است. به نظر می‌رسد سرعت موج برشی بدست آمده

ترتیب است. سرعت موج برشی "لایه فرسایش سطحی"، حداکثر نصف متوسط سرعت موج برشی کل لایه ۳۰ متری است و عمق آن براساس لرزه نگاری شکست مرزی از سطح ۳/۹، ۲/۸، ۱/۷، ۷/۲ متر به ترتیب برای خاک SW گمانه SM، BH32، گمانه SM، BH3، گمانه ML، BH8، گمانه BH34 است که عمق آن بطور متوسط ۳۰٪ کمتر از مقادیر نظیر لایه مذکور با روش مقاومت الکتریکی است.

نسبت سرعت موج برشی متوسط به روش "متوسط از سطح" به روش "اینتروالی" درون گمانه برای خاک SW گمانه BH32، SM گمانه BH3، SM گمانه BH8 و ML گمانه BH34 به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۷۰، ۰/۷۵ و ۰/۶۴ است.

براساس نتایج آزمایش‌های سه محوری دینامیکی روی مصالح SM گمانه BH8، به ترتیب تحکیم غیرهمسان، تغییرات  $\sigma'_3$  و فرکانس بارگذاری بیشترین درصد تاثیر را بر مقادیر مدول برشی دارند و بعد از آن درصد رطوبت، اثر اندک افزایشی خود را بر مقدار  $G$  تحمیل می‌کند و پس از آن پارامتر شکل بار مثالی، سینوسی و مستطیلی تغییر بسیار اندکی در  $G$  ایجاد می‌کند و اشباع نمونه، سبب کاهش مقادیر  $G_{max}$  در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با رطوبت بهینه می‌شود. با افزایش تنش محدودکننده اثر افزایشی تحکیم غیرهمسان در افزایش مدول برشی تقریباً ثابت است و مقادیر مدول برشی در تنش محدود کننده کم ( $\sigma'_3=1$ ) کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در حالت رطوبت اشباع اندکی بیشتر از مقادیر نظیر بهینه است، اما در تنش بالا ( $\sigma'_3=5$ ) کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع روند برعکس است.

افزایش فرکانس، تنش محدود کننده و افزایش رطوبت سبب کاهش مقادیر نتایج  $G/G_{max} - \gamma$  در یک کرنش معین می‌شود. بطور کلی اکثر نقطه داده‌های نسبت مدول بین مرز متوسط Seed و همکاران (۱۹۸۶) برای شن و مرز متوسط Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه از کرنش‌های کوچک تا کرنش ۰/۰۳٪ قرار می‌گیرند. اما در کرنش‌های بزرگتر از ۰/۰۳٪ بین مرز بالای Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه (یا EPRI (۱۹۹۳) برای عمق ۶-۰ متر) و EPRI (۱۹۹۳) عمق ۳۶-۱۵ متر قرار می‌گیرند. لذا تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین مقادیر  $G/G_{max} - \gamma$  مصالح SM گمانه BH8 با نتایج موجود در ادبیات فنی وجود دارد.

بطور کلی نتایج میرایی در برابر کرنش برشی مصالح مورد بررسی حتی تحت فرکانس بارگذاری ۰/۵ هرتز در سطح کرنش‌های کوچک، در بالای محدوده منحنی‌های پیشنهادی ادبیات فنی است. افزایش ناهمسانی مشابه تنش محدود کننده

کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای مصالح ماسه‌ای و ML به ترتیب ۳ و ۱ است.

با توجه به نتایج آزمایش‌های سه محوری، برای طبقه بندی خاکهای ماسه ای طبق استاندارد ۲۸۰۰ توصیه می‌شود از روش درون گمانه و از روش اندازه گیری متوسط سرعت موج برشی از سطح استفاده شود.

#### ۸- سپاسگزاری

داده‌های آزمایش‌های سه محوری این مقاله از پروژه "ارزیابی رفتار دینامیکی شش نوع مصالح خاکی ایران با استفاده از دستگاه سه‌محوری بزرگ مقیاس" به شماره قرارداد ۹۹۰۷-۳۹ (۲۰۱۱) تهیه شده است که بدین وسیله از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، همکاران و دانشجویان وقت بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، خصوصاً آقای دکتر احمدرضا قدرتی قزآنی تشکر می‌گردد.

روش شکست مرزی و روش درون گمانه ایزنتروالی به ترتیب معرف مقادیر سرعت در جهت افقی و طولی و به نوعی معرف بیش تحکیم یافتگی نمونه باشد. برای نمونه ML نسبت سرعت مذکور برای تمام اعماق و متوسط عمق ۳۰ متر کمتر از یک است. در صورتی که متوسط نسبت مذکور برای خاک‌های SM و خاک SW مورد مطالعه بیش از یک است و اما در سطح تنشهای کم به علت لایه فرسایش سطحی کمتر از یک است. با توجه به عدم امکان اعمال غیرهمسانی از بیش ۱/۵ برای ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع خاک ML دقت این یافته‌ها قابل تصدیق است. لذا تنها اعمال غیرهمسانی تنشی برای نمونه آزمایشگاهی دست نخورده برای دستیابی به مقادیر سرعت موج برشی صحرائی کافی نیست بلکه جهت نمونه‌گیری افقی (برای لرزه‌نگاری شکست‌مرزی) و یا عمودی (برای متوسط از سطح درون گمانه) و اثرات لایه فرسایش سطحی هم باید در نظر گرفته شود. حداقل نسبت  $\sigma'_3/\sigma'_3 = 1$  به  $\sigma'_3 = 5$  مونتونیک پسااسیکلی

#### ۹- مراجع

-Aghaei Araei, A., Attarchian, N., Ghodrati Ghazaani, A., Haddad, H., Salamat, A.S., Hasani, H., (2020). Design spectrum for near fault ground motions considering frequency-dependence of CH/SC material behavior regarding laboratory and field shear wave velocity (Vs). *Journal of Engineering Geology*. 13,4, 541-570 (In Persian).

-Aghaei Araei, A., Attarchian, N., Ahmadi, S., Rhmani, I., Salamat, A.S., Hasani, H., (2021b). Assessment dynamic behavior of reconstituted sand using resonant column test, *BHRC publication No. R.926*, (In Persian).

-Aghaei Araei, A., Cyclic Strength and Settlement Behaviors of High Compacted Saturated Gravelly Soils, *Transportation Research*, 20(2), 75, 2023, 17-42 (In Persian).doi: 10.22034/TRI.2023.369416.3103.

Aghaei Araei, A., Ghazavi, M., Lashani Zand, F., (2023a). Comparison the resilient modulus behavior of untreated and treated soil by lime as base and subbase, *Transportation Research*, 20(1), 1-22 (In Persian). doi:10.22034/TRI.2022.366118.3090.

-Aghaei Araei, A., Ghodrati Ghazaani, A.R., Attarchian, N., Salamat, A.S. and Hasani, H., (2019). Design spectra for near fault ground motions considering frequency-dependence of material behavior, Research report BHRC *Publication No. 861*, 241pages, ISBN: 978-600-113-239-1 (In Persian).

-Aghaei Araei, A. A., Ghazavi, M., Zand, F. L., and Rahmani, I., (2023b). Modulus of resilience under road and runway stresses for base soil modified with cement and lime. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 55, 7, (In Persian).

-Aghaei Araei, A. and Ghodrati, A., (2018b). Loading frequency effect on dynamic properties of mixed sandy soils, *Scientia Iranica*, 25 (5), 2461-2479.

-Aghaei Araei, A. and Ghodrati, A., (2018a). The effect of stress induced anisotropy on shear modulus and damping ratio of mixed sandy soils, *Indian Geotechnical Journal*. 48, 153-175.

-Aghaei Araei, A. and Ghodrati, A., (2017). Artificial neural networks for modeling shear modulus and damping behavior of gravelly materials. *International Journal of Geomechanics*. 17 (2), 04016060.

-Aghaei Araei, A., Ahmadi, S., Mehrnahad, H., Attarchian, N., (2022). Comparison of dynamic behavior of reconstituted and core barrel sandy soil sample by resonant column test in flexural mode, *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 54 (2), 521-540(In Persian).

-Aghaei Araei, A., Asvar, F., Barkhordari, K., (2023). Evaluation of Durability and Dynamic Properties of Treated Silty-sand Soil as the Road and Runways Base Material, 32, No.118, 2024, 1-26. doi: 10.22034/ROAD.2023.425627.2222.

- ASTM D7128-18, (2018). Standard guide for using the seismic-reflection method for shallow subsurface investigation.
- ASTM D7400/D7400M-19, (2019). Standard test methods for downhole seismic testing.
- Asvar, F., Barkhordari, K., Aghaei Araei, A., (2024). Dynamic and durability characterization of silty-sand mixture treated with cement and mineral polymer. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 1-30.
- BHRC Technical report, (2012). Seismic mirozonation of Semnan and Sorkheh, Geology and Engineering Geology, First Volume; Seismo-Tectonic and site response analysis, Second Vol., Client: Housing and Urban Development Organization of Semnan Province, Adviser: Road, Housing and Urban Research Center (BHRC). *Geotechnical and Infrastructure Department*. (In Persian).
- Electric Power Research Institute (EPRI). (1993). Guidelines for determining design basis ground motions. *Final Rep. No. TR-102293*, Palo Alto, Calif.
- Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, (2015). Standard 2800, 4<sup>th</sup> Edition, Road, Housing and Urban Research Center (BHRC), (In Persian).
- Louie, J.N. (2001), Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. *BSSA*, (91)2,347-364.
- Meng J., (2007). Earthquake ground motion simulation with frequency-dependent soil properties. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 27, 3, 234-241.
- Park D., and Hashash Y. M.A., (2008). Rate-dependent soil behavior in seismic site response analysis, *Can. Geotechnical Journal*. 45, 4, 454-469.
- Park, C.B., Miller R.D., and Miura H., (2002). Optimum Field Parameters of an MASW Survey [Report]. *Kansas*. [s.n.].
- Razeghi, A., Aghaei Araei, H.R., A. Ghalandarzadeh and S. Hashemi Tabatabaei, (2014). Rate-dependence of rockfill behavior on propagated near fault ground motions, *Scientia Iranica A*. 21(4), 1263-1280.
- Rollins, K.; M., Evans, M.D., Diehl, N. B. and Daily, W. D. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 124, 5, 398-405.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic analysis, Report No. EERC 70-10, University of California, *Berkeley*.
- Seed, H. B. Wong, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K., (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *J. Geotech. Eng.*, 112, 11, 1016-1032.
- Aghaei Araei, A., (2024). Investigating the Un-Compacted in-Situ Characteristics and Dynamic Behavior of the Compacted Specimen of Collapsible Fine-Grained ML Soil, *Road*, 23, 2(119), (In Persian). **doi:10.22034/road.2024.429534.2228**
- Aghaei Araei, A., Kalantari, F., Ghalandarzadeh, A., Shahnazari, H., Attarchian, N., and Rahmani, I.,(2023a). Guideline for Test and Analysis of Static, Dynamic and Cyclic strength Triaxial Tests, Iranian Building Codes and Standard, *BHRC Publication No.S-1058*. (In Persian).
- Aghaei Araei, A., Mehrnahad, H., Attarchian, N., Rahmani, I., Salamat, A.S., (2020). Remolding effect on dynamic behavior of sandy soil samples using resonant column tests, Sharif. *Civil Engineering*. 362, (32002077), 159-169. (In Persian).
- Aghaei Araei, A., Razeghi, H. R., Tabatabaei, S.H. and Ghalandarzadeh, A. (2012a). Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic strength of modeled rockfill materials, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Elsevier*, 33, 1-18, **doi:10.1016/j.soildyn.2011.05.009**
- Aghaei Araei, A., Ghodrati Ghazaani, A.R., Hashemi Tabatabaei, S., and Ghalandarzadeh, A., (2021). Assessment dynamics behavior of six types geo-materials in Iran using using large triaxial apparatus, *Research report BHRC Publication No. 837*, 352 pages, ISBN:978-600-113-354-1(In Persian).
- Aghaei Areai, A., Razeghi, H.R., and Ghalandarzadeh, A., (2012b). Effects of loading rate and initial stress state on stress-strain behavior of rockfill materials under monotonic and cyclic loading conditions. *Scientia Iranica* 19.5, 1220-1235.
- Apparao, A., and Rao, T.G., (1974). Depth of investigation in resistivity methods using linear electrodes, *Geophysical Prospecting* 22, 211-223.
- ASTM D4015-21, (2021). Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices.
- ASTM 4767-11, (2020). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
- ASTM 7181-20, (2006). Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils, 2020.
- ASTM D3999, Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus, Reapproved 1996, 2006.
- ASTM D4428/D4428M-07, (2014). Standard test methods for crosshole seismic testing, 2014.
- ASTM D6431, (2018). Standard guide for using the direct current resistivity method for subsurface investigation.

# Investigating the In-situ Characteristics and Dynamic Behavior of Non-cohesion Alluvium Soils with a Focus on the Depth of the Surface Erosion Layer

Ata Aghaei Araei, Associate Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

*E-mail: aghaeiaraei@bhrc.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## ABSTRACT

This paper presented and compares the in-situ characteristics of three non-cohesion alluvium soils and one silty soil, including the determination of electrical resistance and waves velocity using seismic-reflection and Downhole method, and comparing its result with dynamic triaxial results. In general, the highest and lowest electrical resistance values are related to SM soil of borehole BH8 and ML soil of borehole BH34, respectively. The electrical resistance of the "surface erosion layer" in the surface sections is about 2 and 3 times the minimum values in the whole borehole depth of 30 meters respectively for SM or SW and ML soils. The shear wave velocity ( $V_S$ ) of the "surface erosion layer" is half the average shear wave velocity of 30 m depth ( $V_{S30}$ ). In general, the thickness of the "surface erosion layer" based on  $V_S$  of the seismic-reflection method are 3.9, 2.8, 1.7 and 7.2 m, respectively, for SW of BH32, SM of BH3, SM of BH8, and ML of BH34 boreholes, which, mentioned thicknesses, are confirmed by the electrical resistance data, with a difference of about 30%. The  $V_S$  obtained by the seismic-reflection method and the Downhole method respectively represent the velocity values in the horizontal and longitudinal directions and in a way represent the estimated overconsolidation of the in-situ sample. In the following, on the compacted SM of borehole BH8 materials with optimum water content during construction stage under semi and full saturation conditions, dynamic cyclic tests ASTM D3999 were performed, using large triaxial equipment. Specimens were tested under  $\sigma_3$  equal to 1, 2 and  $5\text{ kg/cm}^2$ , under isotropic and unisotropic consolidation ( $\sigma'_1/\sigma'_3$ ) and loading frequencies of 0.5, 1, 2, 5 and 10 Hz. Due to the significant difference between  $G/G_{max} - \gamma$  and  $D - \gamma$  values of sand materials, including SM of BH8 borehole, with the results available in the technical literature, the necessity of conducting these tests is emphasized. There is a relatively good agreement between the field data of the average shear wave velocity from the surface of the Downhole method with the average values of the triaxial laboratory sample under unisotropic consolidation.

**Keywords:** Alluvium, Non-Cohesion, Electrical Resistance, Wave Velocity, Shear Modulus, Damping Ratio, Anisotropic, Frequency, Post-Cyclic Monotonic, Surface Erosion Layer