

بررسی مشخصات در جای غیرمتراکم و رفتار دینامیکی نمونه متراکم شده

خاک ریزدانه رمبنده ML

مقاله علمی - پژوهشی

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

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

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

صفحه ۲۴-۱

چکیده

این مقاله مشخصات صحرایی خاک ML مستعد رمبندگی در حالت غیرمتراکم با آزمایش‌های مکانیک خاک و آزمایش‌های درجا شامل تعیین مقاومت الکتریکی و سرعت امواج و سپس رفتار دینامیکی و مونوتونیک پسانوسانی نمونه متراکم نظیر با استفاده از دستگاه سه‌محوری بزرگ‌مقیاس بررسی می‌کند. متوسط مقاومت الکتریکی لایه خاک رمبنده ML از سطح به عمق ۴ متر به یک سوم (۱۱ ولت-متر/آمپر) کاهش یافته و تا عمق ۳۰ متر تقریباً ثابت است. اما مقادیر سرعت موج برشی "متوسط از سطح" روش دانه‌پول در اعماق سطحی دارای مقدار کم بوده و به صورت تدریجی تا سه برابر و به مقدار ۴۵۰ متر بر ثانیه در عمق ۳۰ متر افزایش می‌یابد. در ادامه روی مصالح متراکم شده مذکور تحت تنش محدودکننده (σ'_3) برابر ۲.۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، آزمایش‌های نوسانی دینامیکی طبق ASTM D3999 تحت فرکانس‌های ۰.۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ هرتز انجام شد. اثر تغییر درصد رطوبت و تحکیم غیرهمسان (σ'_1/σ'_3) مختلف، شکل موج‌های مثلثی، سینوسی و مستطیلی روی نتایج مدول برشی (G)، نسبت مدول برشی (G/G_{max}) و نسبت میرایی (D) در برابر کرنش برشی (γ) از طریق ۵۷ آزمایش بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش فرکانس بارگذاری، مقادیر G و D به ترتیب بسیار اندک و شدیداً افزایش می‌یابند. روند کلی منحنی‌های $G - \gamma$ و $D - \gamma$ متاثر از تعداد نوسان بارگذاری نمی‌باشد. در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی نمونه با رطوبت ساخت ۱۳٪، با افزایش σ'_3 از ۱ به ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، نسبت تنش تفاضلی حداکثر به σ'_3 از ۵ به حدود ۱ کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج، راهکار تراکم تنها، برای اصلاح خاک مورد مطالعه مناسب نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خاک ML، مقاومت الکتریکی، سرعت موج، مدول برشی، نسبت میرایی، غیرهمسانی، فرکانس، ابعاد، مونوتونیک

پسانوسانی

۱- مقدمه

در بخش‌های سطحی دارای تراکم بسیار پایینی بوده و در صورت صورت اشباع شدن، نشست اضافی زیادی در کوتاه مدت متحمل می‌شوند. در چند ده سال گذشته، با توجه به پایین رفتن سطح آب زیرزمینی ناشی از برداشت آن و گاه دستکاری انسانی از جمله کاشت درختان مثل تاغ در اطراف جاده و خصوصاً ریل راه آهن برای جلوگیری از جابجایی ریزگردها، عمق "لایه فرسایش

خاک‌های ریزدانه ML رمبنده از جمله خاک‌های مسئله‌دار در کشور هستند که شناخت رفتار آنها نیازمند مطالعات ویژه است. روش اصلی تخمین میزان رمبندگی خاک‌ها، انجام آزمایش تحکیم مضاعف و اندازه‌گیری اختلاف تخلخل نمونه در دو خشک و اشباع تحت سربار ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است (ASTM D5333-3). با توجه به اقلیم گرم و خشک کشور این خاک‌ها

زیرا تراکم و نشست ایجاد شده، سریع و برگشت ناپذیر است (Soroush و Aghaei Araei ۲۰۰۵؛ ۲۰۰۶). موثر بودن روند اصلاحی مشابه برای خاک ریزدانه یعنی غرقاب کردن و تراکم مکانیکی خاک برای تنش‌های محدودکننده کم و زیاد، نیازمند بررسی است.

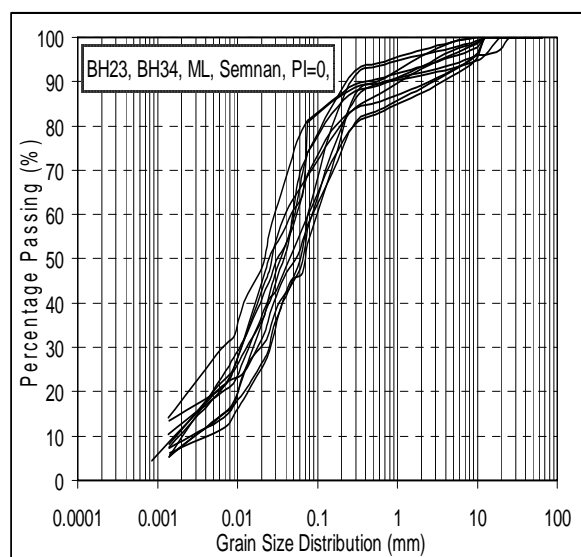
تعیین مدول برشی و نسبت میرایی در برابر کرنش برشی خاک ساختگاه دو پارامتر بسیار مهم در محاسبات مرتبط با طیف طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله است (Aghaei Araei و همکاران ۲۰۲۳). روند فعلی در تحلیل‌های پاسخ زمین از داده‌های سرعت موج برشی به همراه دانسیته خشک به نرم‌افزارهای تحلیل پاسخ داده شده و مدول برشی حداکثر محاسبه می‌شود. وابستگی مدول برشی و نسبت میرایی به فرکانس در کرنش‌های کوچک در پژوهش‌ها روی نمونه آزمایشگاهی Meng (۲۰۰۷)، Park و Hashash (۲۰۰۸) و Aghaei Araei و همکاران (b۲۰۱۲) بررسی شده است. رفتار دینامیکی خاک تحت فرکانس‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ هرتز و تنش محدودکننده ۱، ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی 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 2019) و اثرات محتوای فرکانسی بر طیف پاسخ خاک شنی (Razeghi و همکاران ۲۰۱۴) و خاک ریزدانه (Aghaei Araei و همکاران 2019) بررسی شد. Aghaei Araei و همکاران (2019) برای طبقه‌بندی نوع خاک طبق استاندارد ۲۸۰۰ از مقادیر ایتروالی سرعت موج برشی به روش دانهول برای محاسبه طیف پاسخ نظیر گروه خاک استفاده کردند. در مطالعات قبلی انجام شده روی رفتار دینامیکی شش نوع از مصالح خاکی مختلف کشور از جمله خاک ML با استفاده از دستگاه سه‌محوری برای مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای شهرهای مختلف، مقایسه سرعت امواج به روش دانهول (متوسط و ایتروالی)، سرعت امواج به روش برداشت‌های لرزه نگاری شکست سطحی و آزمایشگاهی انجام نشد (Aghaei Araei و همکاران 2021). طبق اطلاعات نگارنده روند تغییرات سرعت موج برشی یا مقاومت الکتریکی با عمق برای خاک ML کمتر بررسی نشده است. اثر تغییرات رطوبت بر نتایج برداشت‌های صحرايي و آزمایشگاهی، اثر ابعاد نمونه بر رفتار دینامیکی خاک ML متراکم در این مقاله بررسی

سطحی" افزایش یافته است. این لایه که در بعضی از آیین نامه‌ها از جمله ASCE7-2022 محدودیتی برای محاسبه تعیین نوع زمین در صورت وجود و مقدار ضخامت مجاز آن مطرح کردند، دارای سرعت موج برشی کم و ضخامت بین ۳ تا ۷ متر می‌باشد. منظور از سرعت موج برشی کم این است که برای یک نوع خاک که سرعت موج برشی متوسط لایه آن بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه است و طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ خاک نوع II فرض می‌شود، در لایه‌های سطحی سرعت موج برشی حتی کمتر از ۱۸۰ متر بر ثانیه هم یافت می‌شود. با توجه به کمبود زمین شهری مناسب در محدوده شهری، ساخت ساز روی این زمین‌ها گاهی گریز ناپذیر می‌شود. احداث سازه و حبس شدن رطوبت زیر پی و لرزش‌های ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه از جمله قطار یا ماشین، سبب نشست زیاد در خاک مذکور می‌شود. معمولاً فرض این است این لایه سطحی با توجه به احداث زیرزمین برداشته و یا اصلاح و بهسازی می‌شود. از بین روش‌های مکانیکی برای اصلاح خاک این خاک در لایه‌های سطحی شامل مرطوب کردن خاک، اصلاح با آهک و آهک-سیمان (Marofi و Bolori Bazaz، ۲۰۱۴)، اجرای میکروپایل برای پرکردن فضای خاکی یا محل ریشه‌های پوسیده درخت تاغ و احداث پی‌های عمیق، روش تراکم ضربه‌ای سریع توصیه می‌شود. در صورت مشاهده این نوع خاک دارای پتانسیل رهمندگی در گمانه‌های اکتشافی و با توجه به مقاومت بسیار کم در صورت حضور آب، معمولاً پیشنهاد می‌شود از حفره‌گونه چاه جذبی فاضلاب و ورود هرگونه آب سطحی به زیر ساختمان‌ها و بناها در محدوده اطراف گمانه خودداری شود. رفتار دینامیکی خاک اصلاح شده با آهک (Aghaei Araei و همکاران a۲۰۲۳) و آهک-سیمان (Aghaei Araei و همکاران b۲۰۲۳) بررسی شده است. ارزیابی آزمایشگاهی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رهمنده بهسازی شده با مواد نانو توسط Mokhberi و همکاران (۲۰۲۳) بررسی شده است.

در خاک‌های مستعد رهمش اشباعی درشت دانه سنگریزه‌ای خاکریزهای مهندسی از جمله پوسته بالادست سدها در حین اولین آگیری که در ساخت خشک کوبیده می‌شود (Aghaei Araei، ۲۰۰۲)، تنها از آبپاشی در حین ساخت و متراکم کردن مکانیکی خاکریز برای ایجاد تراکم بالای ۹۵٪ استفاده می‌شود،

متوسط درصد رطوبت و دانسیته خشک در محل (ASTM D1556) ۰ تا ۴ متر با ۱۳/۴٪ و ۱/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب و برای اعماق ۴ تا ۱۰ متر با مقدار متوسط ۱۲/۵٪ و ۱/۵۸ گرم بر سانتی متر مکعب است. برای اعماق بیشتر درصد رطوبت بیش از ۱۰/۵٪ و دانسیته خشک ۱/۹۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. آزمایش چگالی ویژه ذرات جامد (ASTM D854) برای عمق ۰-۲ متر، ۲/۵۸ و برای عمق ۴-۲ متر برابر ۲/۶ است که قابل مقایسه با مقدار ۲/۶۵ متوسط برای اعماق بیشتر در گمانه BH34 است. نتایج آزمون‌های شیمیایی خاک ML مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. برای اعماق ۰-۴ متر مقدار سولفات (ISIRI 12827) موجود در خاک (SO_4^{2-}) بین ۰/۰۴ تا ۰/۵۹٪ با متوسطی در حدود ۰/۲۵ و مقدار یون کلر (BS 1377-3) بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۷٪ با متوسطی در حدود ۰/۰۴ است. لذا استفاده از سیمان ضد سولفات تیب ۵ برای استفاده در بتن پی ضروری باشد.

محل برداشت خاک مورد مطالعه، متحمل کاهش سطح آب زیرزمینی ناشی از برداشت آب شده است. این نوع خاک ساختار نیمه پایدار، نامتراکم و تخلخل بالا (بالای ۴۰٪) در لایه‌های سطحی است و در اثر افزایش رطوبت (درجه اشباع خاک مورد مطالعه کم و زیر ۴۰٪ است) یا اعمال بار بیش از یک حد معین، دچار تغییر شکل و نشست ناگهانی قابل ملاحظه می‌شوند.



شکل ۱. دانه‌بندی صحرایی مصالح انتخابی جهت انجام آزمایش

می‌شود. برای کاهش مشکلات مرتبط با این خاک، تراکم آن در لایه‌های سطحی ضروری است. لذا آزمایش‌های دینامیکی روی خاک متراکم انجام می‌شود.

۲- مشخصات خاک

خاک مورد مطالعه از گمانه BH34 با مختصات $X=718111$ و $Y=3937848$ جنوب شهر سمنان دارای شرایط آب هوایی خشک برداشت شده و بخشی از ریل راه آهن شهر سمنان روی آن دارد که اطراف آن در سطح، توسط درختچه‌های غیر بومی تاغ احاطه شده است. این گمانه ۳۰ متری شامل خاک ML بوده و با فواصل ۱ متر آزمایش SPT (ASTM D1586) صورت گرفت. تعداد ضربات SPT برای کفشک با قطر بیرونی ۵۰ و قطر داخلی ۳۵ میلی‌متر (مناسب برای حداکثر اندازه دانه برابر نصف قطر داخلی کفشک یعنی ۱۷/۵ میلی‌متر) برای گمانه BH34 در مغزه گیری کامل و حالت حفاری کاملاً خشک برای متوسط نفوذ ۹ سانتی‌متر (یعنی بین ۳ تا ۱۴ سانتی‌متر) در مرحله جانمایی، حدود ۵۰ ضربه برای هر سه عمق ۰-۴، ۴-۱۰ و ۱۰-۳۰ متر است (ASTM D1586). برای گمانه‌های مجاور و نزدیک همین گمانه، این عدد برای حالت حفاری ضربه و به علت اثرات دست خوردگی و وجود رطوبت برای مرحله جانمایی و عمق ۰-۴، ۴-۱۰، ۱۰-۳۰ متر برابر ۱۳، ۱۳، ۱۸ است و عدد N2 برای عمق ۰-۴، ۴-۱۰ و ۱۰-۳۰ متر برابر ۱۸، ۱۸، ۲۵ و برای N3 به ترتیب برابر ۲۹، ۲۴ و ۳۲ است. با توجه به حساسیت به رطوبت برای چاهک اطراف گمانه طبق EN ISO 22476-3 برای چکش نوک مخروطی با زاویه راس ۶۰ درجه مقادیر SPT برای مرحله جانمایی و عمق ۰-۴، ۴-۱۰، ۱۰-۱۲ متر برابر ۸، ۱۴، ۱۶ است و عدد N2 برای عمق ۰-۴، ۴-۱۰، ۱۰-۱۲ متر برابر ۱۳، ۲۰، ۲۵ و برای N3 به ترتیب برابر ۱۶، ۲۷ و ۴۰ است که در SPT به ترتیب ۲۹، ۴۷ و ۶۵ بدست می‌آید. بررسی جزئیات نتایج SPT در دو روش یاد شده نشان دهنده حساسیت شدید این مصالح به رطوبت و دست‌خوردگی است.

منحنی دانه‌بندی مصالح ML مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. جدول ۱ مشخصات خاک رمبنده ML گمانه BH34 مورد مطالعات برای انجام آزمایش‌ها ارائه شده است. مقدار

جدول ۱. مشخصات خاک رمنده ML گمانه BH34 مورد مطالعه

شهر سمنان

Passing 4.75 mm (%)	96
Passing #200 (%)	71
PI, ASTM D4318(%)	0
$\gamma_d (gr/cm^3)$	1.95
Moisture content (%)	13.0
Gs	2.65
γ_d e corresponding to maximum	0.333
minimum for to depth up e corresponding to γ_d to 4 m from surface	0.743
Dimension of specimens(cm), Diameter(height)	20(40);30(60)
Poisson ratio	0.33

جدول ۲. نتایج آزمایش شیمیایی خاک ML مورد مطالعه در گمانه

BH34 شهر سمنان

Result of chemical tests(%)	Type of element
18.53	Loss of Ignite(LOI)
42.22	SiO ₂
9.30	Al ₂ O ₃
4.50	Fe ₂ O ₃
13.30	CaO
9.00	MgO
0.29	SO ₃
<0.01	Cl ⁻

میزان لای این مصالح نزدیک به ۵۰٪ بوده و لذا خاک از نوع رمنده است که باید با آزمایش تحکیم مضاعف، شدت رمنده‌گی آن مشخص شود. شاخص پتانسیل رمنده‌گی (ASTM D5333-3) برای اعماق ۰ تا ۴ متر (۲/۷، ۲/۴۴، ۴/۶۷، ۷/۲ نسبتاً شدید) با متوسطی در حدود ۳/۴٪ (درجه رمنده‌گی متوسط) و برای اعماق ۴ تا ۱۰ متر (۱/۱۲، ۲/۲۹، ۱/۸۱، ۱/۴۶) با مقدار متوسط ۱/۶۷٪ و درجه رمنده‌گی کم است. لذا به طور متوسط تا عمق ۶ متر خاک دارای پتانسیل رمنده‌گی قابل توجه است.

برای نمونه دست نخورده با رطوبت طبیعی براساس نتایج آزمایش برش مستقیم (ASTM D3080) به روش تند، زاویه اصطکاک داخلی ۲۳ درجه و چسبندگی ۰/۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بدست آمد که برای نمونه دست خورده و غرقاب شده سرعت آزمایش "کند"، زاویه اصطکاک داخلی ۲۶ درجه بدست آمد (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج آزمایش برش مستقیم خاک نامتراکم مورد مطالعه در اعماق سطحی

Depth (m)	Specimen moisture condition	Specimen type/Speed of loading	Normal stress(kg/cm ²)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
0-2	Natural	* Undisturbed/High speed	0.18, 0.28, 0.44	0.1	23
	Submerged	** Disturbed/Low speed	0.11, 0.18, 0.39	0	26
	Natural	* Undisturbed/High speed	0.18, 0.26, 0.43	0.09	23
	Natural	* Undisturbed/High speed	0.15, 0.20, 0.39	0.06	22
2-4	Submerged	** Undisturbed/Low speed	0.19, 0.49, 0.83	0.03	27
	Submerged	Undisturbed/Low speed	0.22, 0.49, 0.85	0.04	27

*تند ۰/۵۶ میلی‌متر و ثابته و ** کند ۰/۰۷ میلی‌متر و ثابته و ابعاد قالب برش ۶x۶x۲ سانتی‌متر است.

۳- مطالعات ژئوفیزیکی

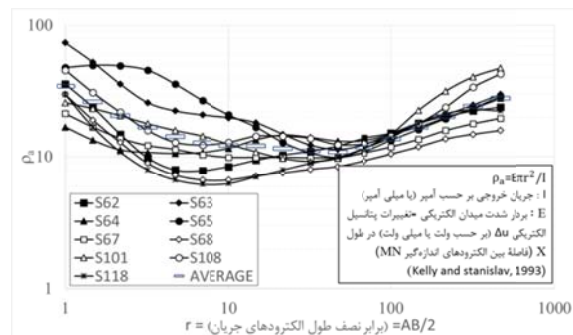
۳-۱- تعیین مقاومت الکتریکی ظاهری

نتایج مطالعات ژئوالکتریکی (ASTM D 6431) در ۱۰ نقطه در اطراف گمانه BH34 در فواصل کمتر ۶۰۰ متر انجام شد که نقطه S101 درست کنار گمانه BH34 است. 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 برای تعیین نتایج هم مقاومت برای مقادیر AB/2 برابر ۴/۶۴، ۱۰، ۲۱/۵، ۳۱/۶، ۶۸/۱، ۱۰۰، ۲۱۵، ۱۴۷، ۲۱۵، ۳۱۶ و ۴۶۴ مترگردید (جدول ۴). 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. متوسط مقادیر مقاومت الکتریکی اعماق ۴-۰

می‌شود، که شامل هدایت الکتریکی و محلول کلی آب است. مقدار محلول موجود در آب، هدایت الکتریکی آن را بشدت بالا می‌برد و با افزایش TDS، هدایت الکتریکی هم بالا می‌رود. لذا هدایت الکتریکی بالا یا مقاومت الکتریکی کمتر معرف وجود املاح مختلف در آب است. مقدار EC گمانه BH34 حدود ۱۹۰۰ تا ۲۱۰۰ میکروموس برثانیه و TDS آن ۱۳۰۰۰ به ترتیب در مقایسه با مقادیر ۲۸۷ تا ۱۳۲۰۰ میکروموس برثانیه و ۲۱۶ تا ۸۷۶۰ برای نقاط دیگر شهر سمنان است. لذا برای شهر کویری مثل سمنان آب چاه در نزدیکی این گمانه از کیفیت مناسبی در مقایسه با مناطق دیگر شهر برخوردار است. عمق سطح آب زیر زمینی در گمانه BH34 حدود ۵۰ متر است که قابل مقایسه با حداکثر مقادیر تا ۱۷۵ متر در سایر نقاط و ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر در مناطق مرکزی شهر سمنان می‌باشد. 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 توجیه است (BHRC Technical report, ۲۰۱۲).

متر، ۱۰-۴، ۱۰-۵۰، ۵۰-۲۵۰، ۲۵۰-۵۰۰ متر به ترتیب ۲۱، ۱۲، ۱۲، ۱۶/۲، ۲۲/۴ و ۱۷/۶ ولت-متر/آمپر است (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه‌های هم مقاومت الکتریکی ظاهری در برابر AB/2 برای خاک ML در گمانه BH34 و اطراف آن

چاه‌های آب کنارگمانه BH34 با دبی بالا و در حدود ۱۸ تا ۲۷ لیتر بر ثانیه می‌باشند. علاوه بر وجود آب و دبی آب که با بطور مستقیم یا غیرمستقیم مقاومت الکتریکی را بطور واضح تحت تاثیر قرار می‌دهند، کیفیت آب نیز بطور محسوسی مقاومت الکتریکی را تغییر می‌دهد. کیفیت آب زیرسطحی را با فاکتورهای مختلفی که از جمله هیدروشیمی آب یا فیزیک آب سنجیده

جدول ۴. نتایج برداشت مقاومت ژئوالکتریکی (ولت-متر/آمپر) در ایستگاه‌های دارای خاک ML در گمانه BH34 و اطراف آن

AB/2	S62	S63	S64	S65	S66	S67	S68	*S101	S108	S118	Average for each depth
1	36	74	17	48	17	21.5	30	26	46	30	34.6
1.47	24	52.7	13.5	50	16	17	19.2	23.5	31	17	26.4
2.15	15	36	11.4	49.5	15	14	13	20.7	22	11	20.8
3.16	9.9	26	10.9	45.8	13.8	12.3	9	18	16	8	17.0
4.64	8	22.5	10.7	36	12.7	11.5	7.3	16	13	6.7	14.4
6.81	7.9	21	10.9	27	12.4	10.5	6.7	14.5	12.4	6.2	13.0
10	8.5	20	11.7	21	13.2	10	6.7	12.6	13	6.3	12.3
14.7	9.5	18.3	13.6	17	13.7	10	7.2	11	14.5	7.1	12.2
21.5	10.4	15	14.8	13	13.4	10	7.6	9.8	14.5	8	11.7
31.6	11.1	12.4	14.2	10.8	12.3	9.9	8.1	9.3	14	9	11.1
46.4	12.2	11.5	13.3	10	11.7	10	8.5	9.8	12.5	10	11.0
68.1	14	12.5	13.4	11	12	10.8	9.4	11.7	12.7	11.7	11.9
100	15.3	15	15	13.5	13.5	12	10.6	15	14.5	14.1	13.9
147	18.2	18	17	16.3	15	13.7	12	22.7	18	18.2	16.9
215	20.5	21	20	19.7	16.5	16	13.8	31.8	24	21.5	20.5
316	22.5	25	23.5	23.6	18.5	18	15	40.8	34	23	24.4
464	24	30	28	29	20	19.8	16	47.6	43	22.5	28.0
Average (total layers)											17.6

* S101 کنار گمانه BH34 است.

(D7128) در فواصل بسیار نزدیک گمانه BH34، روی خاک ML انجام شد. وسایل ثبت امواج لرزه به روش شکست سطحی در شکل ۳ الف، ب و ج نشان داده شده است. وسیله مورد استفاده برای ثبت سائزموگراف‌های حاصله از اکتشاف لرزه‌ای به روش (انکساری) شکست سطحی و درون چاهی ناشی از منابع

۲-۳- تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی به روش برداشت‌های لرزه نگاری شکست سطحی در اطراف گمانه BH34
تعداد چهار برداشت تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی به روش برداشت‌های لرزه‌نگاری شکست سطحی (ASTM

سطحی در اطراف گمانه BH34 شهر سمنان ارائه شده است. متوسط سرعت امواج تراکمی و برشی روش برداشت‌های لرزه نگاری شکست سطحی به عمق تقریبی ۳۰ متر به ترتیب ۸۴۰ و ۴۶۶ متر بر ثانیه است. به طور کلی سرعت موج برشی در گمانه BH34 در اعماق سطحی بسیار کم می‌باشد.



ب) ژئوفون P-شکست سطحی



الف) دستگاه ABEM (MK8)



د) لرزه‌سنج درون‌چاهی سه مؤلفه‌ای (VSP)



ج) ژئوفون S-شکست سطحی

شکل ۳. وسایل ثبت امواج لرزه به روش شکست سطحی و درون چاهی

۳-۳- تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی به روش دانهول در گمانه BH34

در محل گمانه BH34 آزمایش لرزه‌نگاری درون چاهی یا دانهول (ASTM D7400) انجام شد. برداشت‌های لرزه نگاری درون چاهی با قراردادن یک لرزه‌سنج ۳ مؤلفه‌ای (شکل ۳ د) درون گمانه BH34 در عمق‌های مختلف با تولید موج، توسط منبع تولید موج مکانیکی (توسط ضربه چکش بر صفحه) ثبت می‌گردد. موج رسیده به لرزه‌سنج (شکل ۳ الف) 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 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 ایتروالی سرعت‌های امواج P و S ضریب پواسون را از سطح تا کف گمانه ارائه شده است. مقادیر سرعت امواج تراکمی ایتروالی بین ۳۶۸ تا ۱۶۶۱ متر بر ثانیه و مقادیر سرعت امواج برشی ایتروالی بین ۱۶۲ تا ۹۰۵ متر بر ثانیه

مختلف انرژی، دستگاه TERRALOC MK8، جدیدترین سیستم دیجیتالی ۲۴ کاناله ساخت شرکت ABEM کشور سوئد با نرم افزارهای چون Vista و SeisImager است (شکل ۳ الف). سایر وسایلی مورد استفاده شامل چکش، صفحات اعمال ضربه و واحد آرایش است. این دستگاه توانایی کار با چشمه‌های انرژی دینامیت، چکش، و 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 Seistw 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 ± 0.24 mvolts و حداکثر سیگنال ورودی ± 250 mvolts است. فیلتر شکافی برابر ۶۰-۵۰ هرتز و فیلتر بالا-گذر بین ۱۹۲-۱۲ هرتز یا ۲۴۰-۱۵ هرتز بر داده‌های سائزموگراف‌ها اعمال می‌شود. منبع تغذیه بین ۱۰ تا ۳۰ ولت جریان مستقیم است. برای روش شکست سطحی، 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 (شکل ۳ ب و ج).

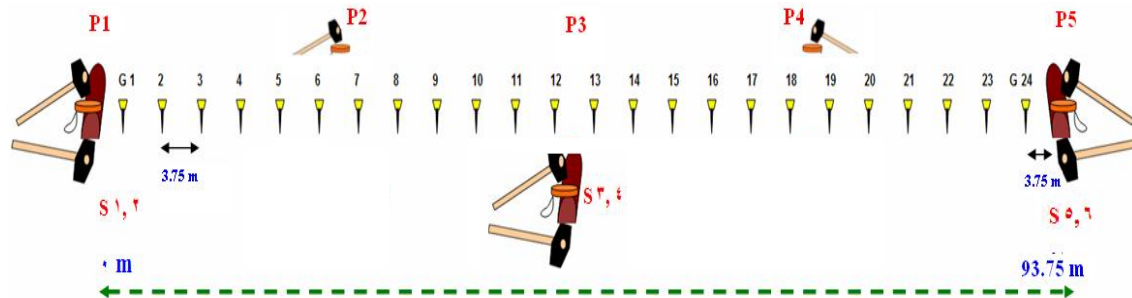
لرزه‌سنج درون چاهی سه مؤلفه‌ای با فرکانس ۴/۵ و ۱۰ هرتز برای روش درون چاهی استفاده می‌شود (شکل ۳ د). از نرم افزار DownHole برای تفسیر نتایج روش شکست سطحی استفاده شده است. آرایش برداشت‌های لرزه نگاری شکست سطحی در گمانه شماره BH34 در شکل ۴ نشان داده شده است. برای هر برداشت در مقاطع P بطور نرمال پنج شوت صورت و در مقاطع S، شش شوت با چشمه موج برشی که دو به دو دارای پلاریته معکوس می‌باشند، انجام شد. 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 ۵ نتایج سرعت امواج تراکمی (V_P) و برشی (V_S) بر

حسب متر بر ثانیه و نسبت پواسن، V ، $V = \sqrt{\frac{1-\nu}{0.5-\nu} V_P}$ در ۱۷ لایه تا عمق ۳۰ متری روش برداشت‌های لرزه نگاری شکست

بالاتری داریم و از عمق ۲۵ تا انتهای گمانه، لایه با سرعت نسبتاً بالا وجود دارد. 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. با داشتن چگالی خاک و همچنین سرعت‌های امواج P و S می‌توان مدول یانگ و مدول برشی در کرنش‌های کوچک را با رابطه بدست آورد و با نتایج آزمایش‌های سه محوری مقایسه کرد.

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 ۵۰۰-۱۰۰ متر بر ثانیه و ۱۹۰۰-۳۰۰ متر بر ثانیه است. در جدول ۷ خلاصه نتایج سرعت موج S و P اینتروالی گمانه BH34 و نسبت پواسن به روش دانهول ارائه شده است که طبق آن زمین در این نقطه 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



شکل ۴. آرایش برداشت‌های لرزه نگاری شکست سطحی در اطراف گمانه BH34

جدول ۵. سرعت امواج تراکمی (VP) و برشی (VS) بر حسب (متر بر ثانیه) در ۱۷ لایه تا عمق ۳۰ متری روش برداشت‌های لرزه نگاری شکست

سطحی در اطراف گمانه BH34 شهر سمنان

Profile No	Direction	مختصات UTM		Layer	Depth (m)																
		X	Y		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	30.2
75	EOL	717541	3937708	VP	423	435	457	493	544	575	606	678	725	763	800	812	832	898	916	1304	1440
	SOL	717631	3937738	VS	204	231	244	269	290	311	332	385	417	441	467	481	494	536	548	692	738
76	EOL	717891	3938085	VP	334	351	400	485	525	564	606	669	757	789	828	886	905	959	1019	1117	1215
	SOL	717984	3938101	VS	135	191	217	240	258	305	315	337	365	398	427	452	484	533	584	656	751
77	EOL	718373	3937809	VP	404	500	548	563	595	607	624	665	688	740	788	869	875	878	978	1037	1115
	SOL	718445	3937870	VS	169	254	292	309	316	324	335	374	396	418	452	458	471	510	581	636	677
83	EOL	718438	3937433	VP	383	422	467	520	580	607	629	734	840	945	1047	1066	1158	1166	1183	1226	1335
	SOL	718442	3937338	VS	200	235	277	313	336	348	357	384	444	496	557	583	610	633	658	694	773
Average VP (m/s)					386	427	468	515	561	588	616	687	753	809	866	908	943	975	1024	1171	1276
Average VS (m/s)					177	228	258	283	300	322	335	370	406	438	476	494	515	553	593	670	735
v					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

جدول ۶. تغییرات سرعت امواج و S درون گمانه (دانهول) و نسبت

پواسن گمانه BH34 به روش اینتروال و متوسط از سطح

Depth (m)	Average From Surface			Interval		
	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν
1	368	162	0.38	368	162	0.38
2	379	169	0.38	390	176	0.37
3	436	196	0.37	622	289	0.36
4	480	218	0.37	691	327	0.36
5	519	237	0.37	774	368	0.35
6	557	256	0.37	875	416	0.35
7	577	266	0.37	737	354	0.35
8	603	280	0.36	874	435	0.34
9	625	292	0.36	883	440	0.33
10	636	297	0.36	756	364	0.35
11	661	310	0.36	1085	541	0.33
12	683	322	0.36	1090	544	0.33
13	696	330	0.36	899	470	0.31
14	711	338	0.35	989	520	0.31
15	728	349	0.35	1099	598	0.29
16	747	359	0.35	1236	637	0.32
17	755	364	0.35	904	473	0.31
18	775	374	0.35	1414	707	0.33
19	788	381	0.35	1104	584	0.31
20	802	389	0.35	1242	621	0.33
21	819	397	0.35	1419	709	0.33
22	832	405	0.35	1244	663	0.30
23	838	408	0.34	997	498	0.33
24	850	414	0.34	1245	622	0.33
25	855	417	0.34	997	499	0.33
26	868	423	0.34	1423	687	0.35
27	881	430	0.34	1423	712	0.33
28	893	436	0.34	1424	738	0.32
29	905	442	0.34	1424	712	0.33
30	919	450	0.34	1661	905	0.29

جدول ۷. خلاصه سرعت متوسط موج S و P اینتروالی گمانه

BH34 و نسبت پواسن به روش دانهول

Layer No.	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Depth (m) Up to	ν
1	379	169	2.5	0.38
2	803	388	10	0.35
3	1123	579	25	0.32
4	1550	797	---	0.32

۴- برنامه آزمایش‌های دینامیکی

روی ۸ نمونه سه محوری از مصالح ML متراکم تا بسیار متراکم با مشخصات ارائه شده در بخش‌های قبلی، به تعداد ۵۷ آزمایش نوسانی تعیین مدول برشی و میرایی طبق ASTM D3999 انجام شده است. تعداد ۶ نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر و با ارتفاع تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. تنها دو نمونه با قطر ۳۰ سانتی‌متر و با ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند.

مطابق جدول ۸ نمونه‌ها تحت شرایط تنش محدودکننده (σ'_3) مختلف همسان ۱، ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ناهمسانی تنشی ($k_c = \sigma'_1/\sigma'_3$) برابر ۲ برای تنش محدودکننده ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و $k_c = 1/5$ برای تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع قرار گرفتند. آزمایش‌ها در بخش ژئوتکنیک و زیرساخت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با دستگاه سه محوری بزرگ مقیاس تشریح شده در ذیل 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 دیجیتالی تمام الکترونیک و سیستم کامپیوتری ثبت داده‌ها تشکیل شده است. سیستم سروهیدرولیک دستگاه توانایی بارگذاری تا 30 ± 20 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 با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر در داخل محفظه سه محوری روی نمونه استفاده می‌شود. زمان عکس‌العمل حسگرهای غیرتماسی ۰/۲ میلی‌ثانیه است. حسگرهای تغییرشکلی غیرتماسی در مقابل هم و در بالای صفحه روی نمونه قرار می‌گیرد تا این که متوسط کرنش‌ها به دست آید و مولفه‌های چرخشی کم شود. با تمهیدات بکار گرفته شده، اصطکاک در پیستون بارگذاری را از اندازه‌های بارگذاری حذف کرده و اندازه‌گیری بسیار دقیق کرنش‌ها تا حدود

نمونه برداری کند. آزمایش به هر دو شکل کنترل تنش و کنترل کرنش قابل انجام است و هر نوع مسیر تنش 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 و تا فرکانس ۱۰ هرتز را می توان به نمونه اعمال کرد. جزئیات اجزای دستگاه سه محوری قطر بزرگ در آزمایشگاه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در مرجع Aghaei Arai و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شده است.

۰/۰۰۰۲٪ 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. 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

جدول ۸ مشخصات آزمایش های نوسانی انجام شده طبق ASTM D 3999 روی نمونه مصالح ML گمانه BH34 سمنان

Diameter(Height) (cm)	Dry Density gr/cm ³	Moisture of Sample During Construction (%)	σ'_3 kg/cm ²	$kc=\sigma'_1/\sigma'_3$	Loading Frequency (Hz)	No. Specimen	No. Test
20(40)	1.95	Optimum (13)	1, 2	1, 2	0.5, 1, 2, 5, 10	2	20
20(40)	1.95	Optimum (13)	5	1	0.5, 1, 2, 5, 10	1	5
20(40)	1.95	Optimum (13)	5	1.5	1, 5, 10	1	3
20(40)	1.86	Half Optimum (7)	1	1, 2	0.5, 1, 2, 5, 10	1	10
20(40)	1.86	Half Optimum (7)	5	1, 1.5	0.5, 1, 2, 5, 10	1	10
30(60)	1.93	Optimum (13)	1, 2	1	1, 5, 10	1	6
30(60)	1.93	Optimum (13)	1	2	1, 5, 10	1	3

۴-۱- روش آزمایش

استفاده از یک نمونه، برای هر تنش محدودکننده تنها یک نمونه که به صورت پله ای بارگذاری می شود 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.

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 زهکش 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 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

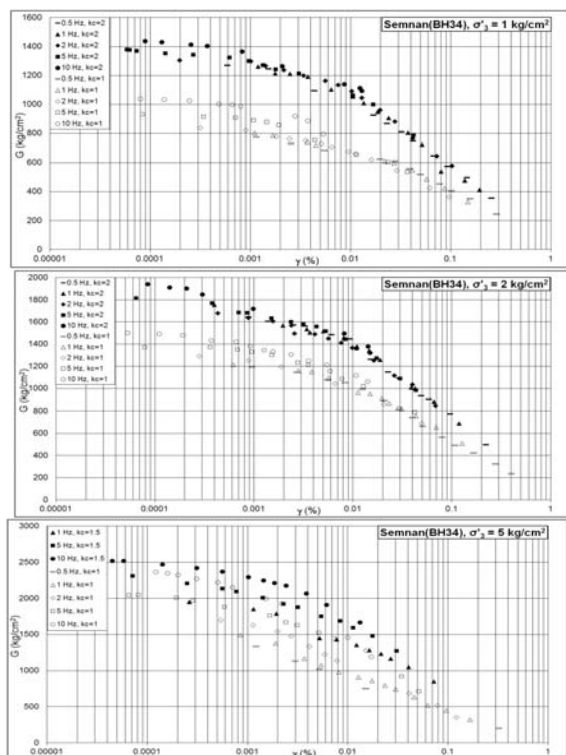
۴-۲- نتایج آزمایش های خصوصیات دینامیکی مصالح

نتایج آزمایش ها شامل مقادیر مدول برشی (G) و نسبت میرایی (D) در برابر کرنش برشی (γ) در تعداد نوسان های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبق استاندارد ASTM D3999 محاسبه شدند. محاسبات با فرض برش مصالح ML تحت شرایط زهکشی نشده برای نمونه های با رطوبت کمتر یا مساوی بهینه و اشباع با فرض نسبت پواسن به ترتیب برابر ۰/۳۳ و ۰/۵ انجام شده است (Aghaei Arai و همکاران 2019).

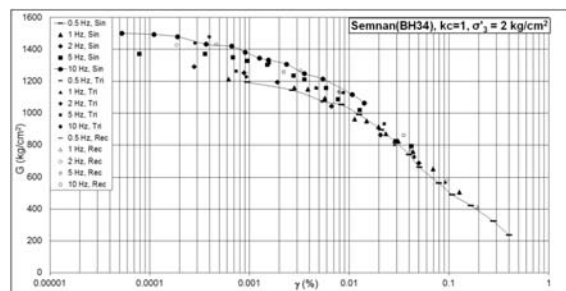
۴-۲-۱-مدول برشی

غیرهمسان متفاوت در شکل ۷ نشان داده شده است. روند کلی نتایج مشابه نمونه با رطوبت بهینه (برابر ۱۳٪) می‌باشد و تحکیم غیرهمسان، باعث افزایش مقادیر مدول برشی می‌شود. نکته جالب توجه اثر کمتر فرکانس بارگذاری بر مقادیر مدول برشی در مقایسه با نمونه با رطوبت ساخت بهینه می‌باشد.

نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی G در برابر γ (به صورت متوسط مقادیر سیکل‌های ۱ تا ۱۰ در کرنش‌های کوچک و نوسان ۱۱۰م برای کرنش‌های بزرگ) برای مصالح سمنان در گمانه BH34 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 ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در فرکانس ثابت با افزایش کرنش برشی (γ) مقادیر G کاهش می‌یابد. مشابه رفتار مشاهده شده برای مصالح سنگریزه‌ای درشت دانه، در سطح کرنش‌های بزرگتر از 10^{-2} تغییر فرکانس، تاثیر قابل توجهی بر مقادیر G ندارد (Aghaei Areai و همکاران ۲۰۱۲b). بطورکلی در دامنه کرنش‌های کوچک و متوسط، افزایش فرکانس بارگذاری منجر به پراکندگی اندک در منحنی $G - \gamma$ شده و سبب زیاد شدن اندک مقادیر G می‌شود. اما در تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع اثر فرکانس در افزایش مدول برشی جالب توجه است. در حالت تحکیم غیرهمسان، مقادیر مدول برشی افزایش می‌یابد. ضمناً با افزایش تنش محدودکننده از اثر افزایشی تحکیم غیرهمسان در افزایش مدول برشی کاسته می‌شود. مقدار مدول برشی خاک متراکم ML در کرنش ۰/۲٪ و تنش محدودکننده‌های ۱، ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و غیرهمسانی‌های مختلف، بین ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تا ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با متوسطی حدود ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.



شکل ۵. مقایسه نتایج $G - \gamma$ مصالح گمانه BH34 سمنان 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

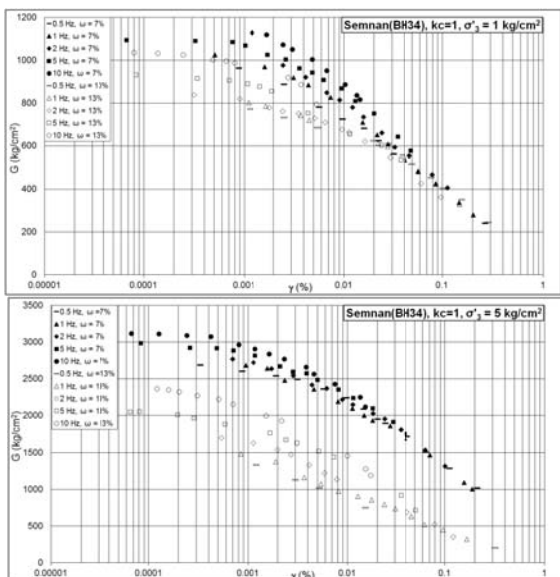


شکل ۶. نتایج مدول برشی - کرنش برشی در تنش محدودکننده ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت فرکانس‌ها و شکل موج‌های متفاوت در شرایط تحکیم همسان و رطوبت بهینه مصالح سمنان

گمانه BH34

شکل ۶ نتایج مدول برشی - کرنش برشی در تنش محدودکننده ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت فرکانس‌ها و شکل موج‌های متفاوت در شرایط تحکیم همسان و رطوبت بهینه مصالح سمنان گمانه BH34 را نشان می‌دهد. مطابق شکل تفاوت بین مقادیر مدول برشی در شکل موج‌های مختلف اندک است. روند مشابهی برای سایر تنش‌های محدودکننده برای نمونه با رطوبت ساخت بهینه و رطوبت ساخت ۷٪ و حتی برای نمونه با قطر ۳۰ سانتی‌متر در تنش‌های محدودکننده مختلف تحت فرکانس‌ها و شکل موج‌های متفاوت در شرایط تحکیم غیرهمسان و غیرهمسان بدست آمد. نتایج $G - \gamma$ مصالح گمانه BH34 سمنان با رطوبت ۷٪ برای نمونه تحت تنش محدودکننده ۱، ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در دو حالت تحکیم همسان و تحکیم

(مثلاً رطوبت بهینه + ۶/۵٪) خارج از قالب شکافدار حتی با اعمال مکش بر نمونه ممکن نشد، لذا آزمایش‌ها روی نمونه‌های ساخته شده با نصف رطوبت بهینه و رطوبت بهینه انجام شد. لذا برای این مصالح امکان انجام آزمایش روی نمونه با رطوبت ساخت بهینه بعلاوه ۷٪ (یعنی ۲۰٪) به علت خرابی نمونه بدون هرگونه اعمال بار ممکن نشد. مقایسه نتایج $G - \gamma$ در حالت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان مصالح گمانه BH34 سمنان برای نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه برای نمونه‌ها با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ۴۰ و ۶۰ سانتی متر در شکل ۱۰ ارائه شده است.



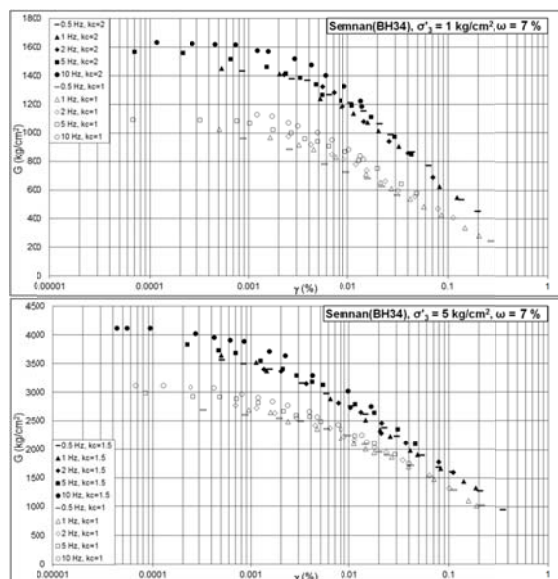
شکل ۸. مقایسه نتایج $G - \gamma$ مصالح گمانه BH34 سمنان برای

نمونه با رطوبت بهینه و رطوبت ۷٪ تحت تنش‌های محدودکننده ۱

و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در حالت تحکیم همسان

با افزایش قطر نمونه از ۲۰ به ۳۰ سانتی متر مدول برشی کاهش چشمگیری می‌یابد که این کاهش با افزایش تنش محدودکننده بیشتر و با افزایش غیرهمسانی، اندکی تفاوتها کاهش می‌یابد. از مقایسه شکل‌های (۵) تا (۱۰) که پنج پارامتر ابعاد نمونه، رطوبت نمونه، σ'_3 ، تحکیم غیرهمسان، شکل بار نوسانی و فرکانس را برای مصالح گمانه BH34 سمنان بررسی شد، اینگونه استنباط می‌شود که در مورد مصالح مورد بررسی به ترتیب ابعاد نمونه، تحکیم غیرهمسان، تغییرات σ'_3 و درصد رطوبت بیشترین درصد تاثیر را بر مقادیر مدول برشی دارند و بعد از آن فرکانس

مقدار مدول برشی خاک متراکم ML با رطوبت ساخت ۷٪ در کرنش ۰/۲٪ تحت تنش محدودکننده همسان و غیرهمسان ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع با متوسطی حدود ۱۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است و مقادیر متوسط نظیر برای تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، حدود ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است.



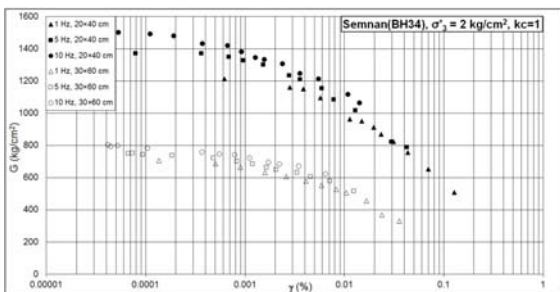
شکل ۷. مقایسه نتایج $G - \gamma$ مصالح گمانه BH34 سمنان برای

نمونه با رطوبت ۷٪ تحت تنش‌های محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم

بر سانتی متر مربع در حالت تحکیم تحت تنش محوری قائم با نسبت-

های مختلف σ'_1/σ'_3

مقایسه نتایج $G - \gamma$ مصالح گمانه BH34 سمنان برای نمونه با رطوبت بهینه و رطوبت ۷٪ تحت تنش محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تحت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان (با نسبت مختلف σ'_1/σ'_3) به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. بطورکلی با کاهش درصد رطوبت نمونه از مقدار بهینه به نصف آن، مقادیر مدول برشی حتی با کاهش دانسیته ساخت از ۱/۹۵ گرم بر سانتی متر مکعب به ۱/۸۶ گرم بر سانتی متر مکعب افزایش می‌یابد، که این اثر خصوصاً در تنش‌های محدودکننده بالا محسوس تر است. حفظ نمونه ساخته شده تنها با غشاء در اطراف آن با رطوبت ساخت بیش از رطوبت بهینه

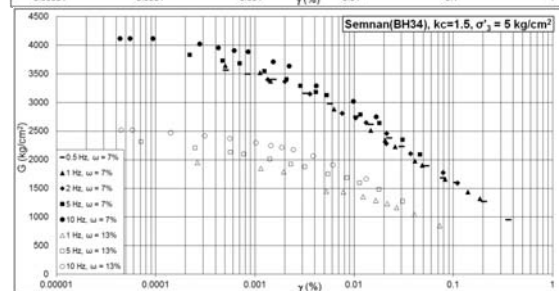
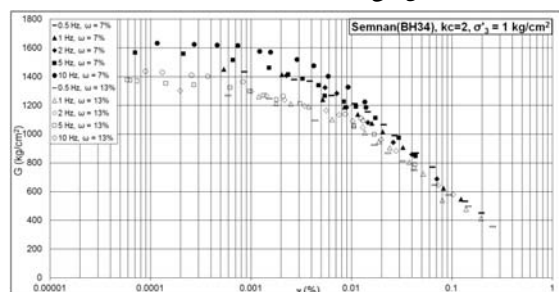


شکل ۱۰. مقایسه نتایج $G - \gamma$ در حالت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان مصالح گمانه BH34 سمنان برای نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه با قطرهای ۲۰ و ۳۰ سانتی متر

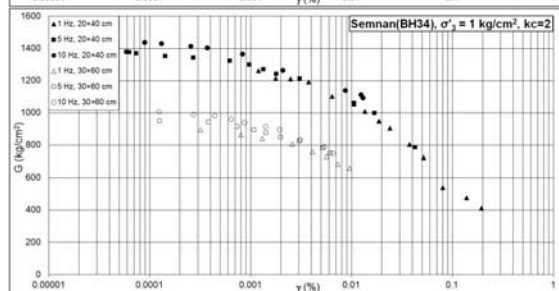
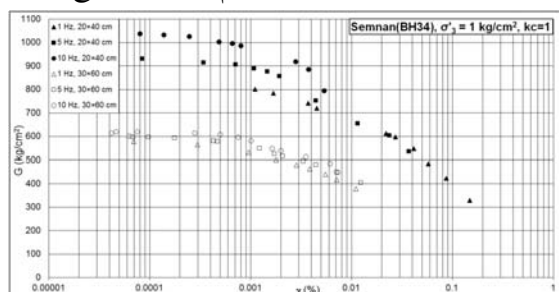
مدول برشی کرنش کوچک

با بکارگیری حسگرهای های کرنش سنج غیرتماسی و اندازه‌گیری کرنش‌های به کوچکی 10^{-6} ، تعیین G_{max} امکان‌پذیر شد. در جدول (۹) مقادیر G_{max} و سرعت موج برشی برای مصالح سمنان در گمانه BH34 برای نمونه‌های ساخته شده با رطوبت بهینه و نصف رطوبت بهینه تحت موج سینوسی ارائه شده است. رابطه سرعت موج برشی (V_S) و مدول برشی (G) و چگالی خاک (ρ) با رابطه $G = \rho V_S^2$ قابل بیان است. با تعیین مدول برشی حداکثر و برای نمونه با قطر ۲۰ سانتی متر با رطوبت بهینه و دانسیته خشک ۱/۹۵ گرم بر سانتی متر مکعب مقادیر سرعت موج برشی بین ۲۰۲ تا ۳۶۰ متر بر ثانیه است، اما برای نمونه با قطر ۳۰ سانتی متر با دانسیته خشک ۱/۹۳ گرم بر سانتی متر مکعب مقادیر حداقل سرعت موج برشی با مقدار ۱۷۳ متر بر ثانیه کمتر از ۱۸۰ متر بر ثانیه تعیین شده برای خاک نوع III آیین‌نامه ۲۸۰۰ است. برای نمونه ساخته با نصف رطوبت بهینه مقادیر سرعت موج برشی ۲۳۱ تا ۴۷۰ متر بر ثانیه می‌باشد. نسبت مقادیر مدول برشی در فرکانس‌های بارگذاری و تنش‌های محدودکننده مختلف به مقادیر نظیر آن در فرکانس ۱ هرتز برای نمونه‌های تهیه شده با (-۵)٪ تا (+۲۴)٪ متغییر است. لذا این حد از درصد تغییرات برای مدول برشی نمی‌تواند ناشی از خطای تغییر نتایج آزمایش برای یک فرکانس ثابت باشد. در شکل (۱۱) مقادیر G_{max} مصالح سمنان در گمانه BH34 در تنش‌های محدود کننده متوسط، $\sigma'_m = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ مختلف نمونه‌های تحکیم همسان و غیرهمسان دارای رطوبت بهینه تحت موج سینوسی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تنش

بارگذاری است که اثر اندک افزایشی خود را بر مقدار G تحمیل می‌کند و پس از آن پارامتر شکل بار مثلی، سینوسی و مستطیلی است که تغییر بسیار اندکی در G ایجاد می‌کند. البته درصد اثر هریک از پارامترهای یاد شده با توجه به میزان تنش محدودکننده متفاوت است. مثلاً هرچند که اثر درصد رطوبت بر تغییر مقدار مدول برشی بسیار زیاد می‌باشد. اما درصد تاثیر آن با افزایش تنش محدودکننده کاهش می‌یابد.



شکل ۹. نتایج آزمایش $G - \gamma$ در حالت تحکیم غیرهمسان مصالح گمانه BH34 سمنان برای نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه تحت تنش محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



$k_c = 1.5$	5	1	2014	321	
		5	2326	345	
		10	2534	360	
		0.5	794	202	
		1	833	207	
$k_c = 1$	1	2	854	209	
		5	932	219	
		10	1046	232	
		0.5	1204	248	
		1	1242	252	
	2	2	1306	259	
		5	1387	267	
		10	1510	278	
		0.5	1436	271	
		1	1589	285	
	5	2	1790	303	
		5	2072	326	
		10	2413	352	
		0.5	990	231	
		1	1053	238	
$k_c = 1, w = w_{opt}/2^*$	1	2	1090	242	
		5	1107	244	
		10	1201	254	
		0.5	2762	385	
		1	2849	391	
	5	2	2923	396	
		5	3029	404	
		10	3121	410	
		0.5	1468	281	
		1	1475	282	
	$k_c = 2, w = w_{opt}^*$	1	2	1496	284
			5	1575	291
			10	1658	299
			0.5	3565	438
			1	3646	443
5		2	3699	446	
		5	3894	458	
		10	4115	470	
		1	580	173	
		5	603	177	
$k_c = 1, 30 \times 60 \text{ cm}^{**}$		1	10	627	180
			1	713	192
			5	754	198
		2	10	799	203
			1	899	216
	5		954	222	
$k_c = 2, 30 \times 60 \text{ cm}^{**}$	1	10	1011	229	

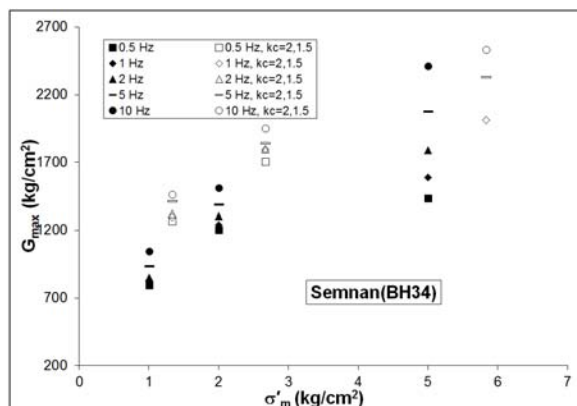
* $e=0.398$; ** $e=0.350$

افزایش فرکانس، تنش محدودکننده و افزایش رطوبت سبب کاهش مقادیر نتایج $G/G_{max} - \gamma$ در یک کرنش معین می‌شود. اثر غیر همسانی سبب می‌شود داده‌ها در خارج از مرز مربوط به منحنی Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) به سمت مرز پایین قرار می‌گیرند. علی‌رغم تفاوت قابل ملاحظه در مقادیر مدول برشی تفاوتی در نسبت مقادیر مدول برشی نمونه‌ها با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر وجود ندارد. شکل (۱۲) دلالت بر آن دارد که مقدار G/G_{max} مصالح تقریباً در خارج از مرز پایین محدوده پیشنهادی Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) قرار می‌گیرند. لذا تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین مقادیر $G/G_{max} - \gamma$ مصالح سمنان در گمانه BH34 با نتایج موجود در ادبیات فنی وجود دارد که این

محدودکننده متوسط، 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 σ'_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.

روابط G/G_{max}

در شکل ۱۲ مقادیر اندازه‌گیری شده تغییرات $G/G_{max} - \gamma$ برای مصالح سمنان در گمانه BH34 ارائه شده است. منحنی‌های ارائه شده توسط Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه و Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) برای مصالح لای برای $PI=0$ و $PI=15$ در شکل (۱۲) برای مقایسه ارائه شده است.



شکل ۱۱. تغییرات G_{max} در برابر تنش متوسط محدودکننده مصالح گمانه BH34 سمنان در رطوبت بهینه نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر

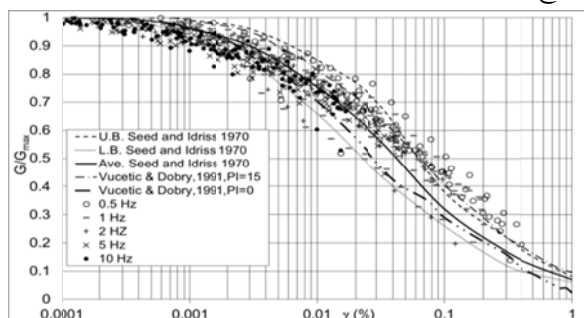
جدول ۹. مقادیر G_{max} و سرعت موج برشی مصالح گمانه BH34 سمنان نمونه‌های تحکیم همسان ($\sigma'_1/\sigma'_3=1$) و غیرهمسان نمونه‌ها با رطوبت ساخت بهینه و رطوبت ۷٪ با قطرهای ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر

$\sigma'_1/\sigma'_3 = k_c$	σ'_3 (kg/cm ²)	Loading frequency (Hz)	Measured G_{max} (kg/cm ²)	V_s (m/s)
$k_c = 2$	1	0.5	1269	255
		1	1295	258
		2	1322	260
		5	1408	269
		10	1462	274
	2	0.5	1704	296
		1	1792	303
		2	1800	304
		5	1837	307
		10	1950	316

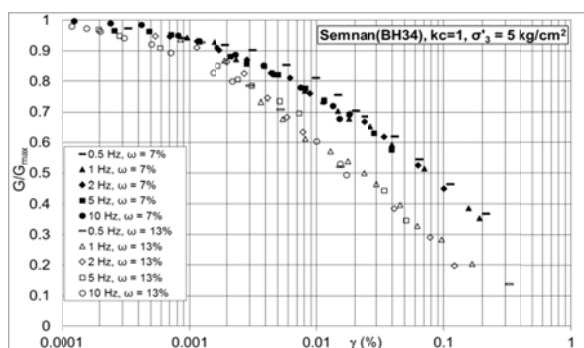
۴-۲-۲-نسبت میرایی

در شکل ۱۴ مقادیر نسبت میرایی (به صورت متوسط مقادیر سیکل‌های ۱ تا ۱۰) در برابر کرنش برشی برای تنش‌های محدود کننده مختلف مصالح سمنان در گمانه BH34 ارائه شده است. محدوده‌های ارائه شده توسط Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) برای مصالح لای و منحنی‌های Rollins و همکاران (۱۹۹۸) (مشابه Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه) هم در شکل 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 حادی میل می‌کند. در کل نتایج میرایی در برابر کرنش برشی مصالح مورد بررسی حتی تحت فرکانس بارگذاری ۰/۵ هرتز در تمام سطح کرنش‌های کوچک و بزرگ در بالای محدوده منحنی‌های پیشنهادی Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) با $PI=15$ و پایین‌تر $PI=0$ می‌باشد. روند نسبتاً مشابهی برای شکل موج مثلی و مستطیلی و سینوسی هم مشاهده شده است (Aghaei Areai و همکاران ۲۰۱۹). مقادیر میرایی موج مثلی بیشتر از مقادیر نظیر سینوسی و مستطیلی است که برعکس روند مشاهده شده برای مصالح سنگریزه‌ای می‌باشد. روند مذکور در فرکانس ۲ و ۵ هرتز مشهودتر است. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که به طور کلی اثر غیرهمسانی سبب افزایش نسبت میرایی در سطح کرنش‌های کوچک و کاهش نسبت میرایی در سطح کرنش‌های بزرگ برای نمونه‌های ساخته شده با رطوبت بهینه نسبت به نمونه‌های همسان تحت تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌شود. در صورتیکه برای تنش محدودکننده ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع اثر یاد شده اندک است و تفاوت چندانی بین نتایج تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان وجود ندارد. بطور کلی کاهش رطوبت در مصالح ML باعث کاهش اندک نسبت میرایی خصوصاً در فرکانس‌های ۵ و ۱۰ هرتز می‌گردد. تفاوت چندانی بین نسبت میرایی نمونه‌های با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر در حالت نمونه تنش محدودکننده همسان ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و نمونه تحت تنش محدودکننده ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع وجود ندارد. در تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع حالت تحکیم همسان و غیرهمسان، نسبت میرایی نمونه با قطر ۲۰ در فرکانس‌های ۵ و ۱۰ هرتز

موضوع اهمیت بررسی رفتار مصالح مورد بررسی در این تحقیق و دقت در جزئیات برای انتخاب منحنی‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۱۳ نتایج $G/G_{max} - \gamma$ در تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت تحکیم همسان در فرکانس‌های متفاوت تحت موج سینوسی برای مصالح سمنان در گمانه BH34 با رطوبت بهینه و رطوبت ۷٪ ارائه شده است که تنها داده‌های مربوط به تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر متر مربع با رطوبت ساخت ۱۳٪ (رطوبت بهینه) خارج از محدوده ادبیات فنی برای ماسه و لای قرار می‌گیرند. اکثر داده‌های $G/G_{max} - \gamma$ در سطح کرنش‌های برشی کمتر از ۰/۰۲٪ پایین منحنی متوسط Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه و در سطح کرنش برشی بزرگتر از ۰/۰۶٪ بالای منحنی Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) برای مصالح لای برای $PI=15$ قرار می‌گیرند.



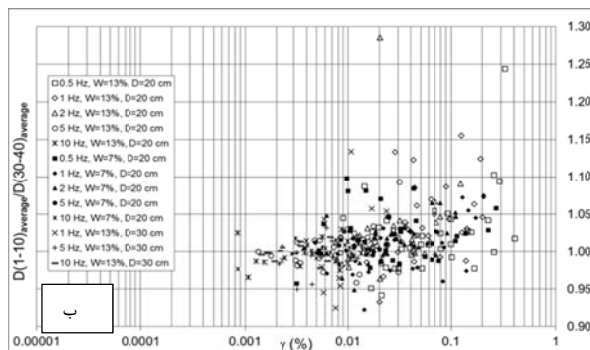
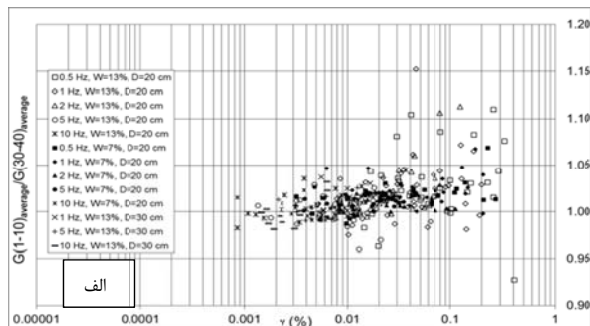
شکل ۱۲. نتایج $G/G_{max} - \gamma$ در تنش محدودکننده مختلف تحت تحکیم همسان و غیرهمسان در فرکانس‌های متفاوت تحت موج سینوسی برای مصالح سمنان در گمانه BH34 با رطوبت بهینه و رطوبت ۷٪ و مقایسه با منحنی‌های ادبیات فنی



شکل ۱۳. مقایسه نتایج $G/G_{max} - \gamma$ در تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر متر مربع تحت تحکیم همسان در فرکانس‌های متفاوت تحت موج سینوسی برای مصالح سمنان در گمانه BH34 با رطوبت بهینه و رطوبت ۷٪

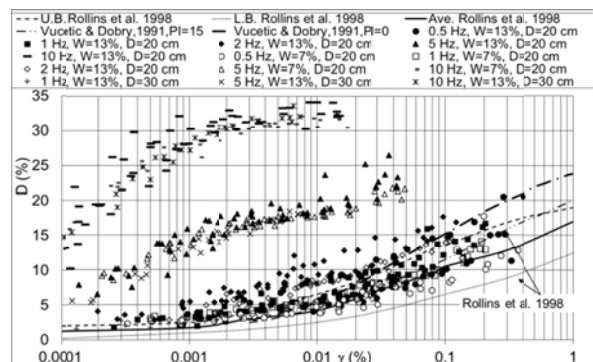
حداکثر و حداقل نسبت G_{1-10}/G_{30-40} به ترتیب ۱/۱۶ و ۰/۹۲ برای نمونه با رطوبت بهینه می‌باشد (شکل ۱۵ الف). دامنه تغییرات مذکور برای رطوبت ۷٪ کمتر از مقادیر نظیر رطوبت بهینه است. مقایسه مقادیر G_{10} و G_{40} در برابر کرنش برشی تحت تحکیم همسان ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت شکل موج سینوسی نشان می‌دهد که روند کلی منحنی $G - \gamma$ متأثر از تعداد نوسان بارگذاری نمی‌باشد (شکل ۱۶ الف). مطابق شکل (۱۵ ب) چنانچه مشاهده می‌شود تا دامنه کرنش ۰/۴٪ نسبت D_{1-10}/D_{30-40} بین ۰/۹۳ و ۱/۲۹ برای نمونه‌های با رطوبت ساخت بهینه متغیر است. دامنه تغییرات مذکور برای رطوبت ۷٪ کمتر از مقادیر نظیر رطوبت بهینه است. در دامنه کرنش‌های ۰/۰۱٪ و بزرگتر با زیاد شدن دامنه کرنش، در اثر زیاد شدن تعداد نوسان، D اندکی افزایش می‌یابد.

همچنین مقایسه مقادیر D_{10} و D_{40} در برابر کرنش برشی تحت تحکیم همسان ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر تحت شکل موج سینوسی نشان می‌دهد که روند کلی منحنی $D - \gamma$ متأثر از تعداد نوسان بارگذاری نمی‌باشد (شکل ۱۶ ب). دامنه تغییرات مذکور برای نمونه‌ها با قطر ۳۰ سانتی‌متر کمتر از مقادیر نظیر رطوبت ۷٪ برای نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر است.



شکل ۱۵. الف) مقادیر G_{1-10}/G_{30-40} (ب) D_{1-10}/D_{30-40} در برابر کرنش برشی مصالح سیمان گمانه BH34 تحکیم همسان و غیرهمسان و موج سینوسی

بیشتر از مقادیر نظیر نمونه با قطر ۳۰ سانتی‌متر است. این نتایج نشان می‌دهد افزایش نسبت میرایی در فرکانس‌های بالا به ابعاد نمونه ارتباط چندانی ندارد. در سطح کرنش‌های کوچک داده‌های D در برابر γ برای مصالح سیمان در گمانه BH34 بالای مرز پیشنهادی Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) قرار می‌گیرند. اما در سطح کرنش‌های بالاتر تنها بخش اندکی از داده‌های تنها برای فرکانس‌های ۰/۵ و ۱ هرتز در داخل محدوده تعیین شده قرار می‌گیرند. ملاحظه می‌شود حداکثر مقدار میرایی اندازه‌گیری شده کمتر از ۳۵٪ برای نمونه‌های با رطوبت طبیعی می‌باشد. حداکثر میرایی در کرنش‌های کوچک کمتر از ۱۳٪ می‌باشد. کاهش میرایی حداکثر از حدود ۴۵٪ برای مصالح سنگریزه‌ای به کمتر از ۳۵٪ مصالح سیمان در گمانه BH34 ممکن است ناشی از اثر حداکثر اندازه دانه و یا اینرسی دانه‌ها و همچنین شرایط رطوبتی نمونه باشد.



شکل ۱۴. مقایسه نتایج $D - \gamma$ در نمونه‌ها با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر دارای رطوبت بهینه و تحت تنش‌های محدود کننده و غیرهمسانی تشیی مختلف و فرکانس‌های متفاوت تحت امواج سینوسی مصالح سیمان گمانه BH34 و مقایسه با منحنی‌های ادبیات فنی

۴-۳- تجزیه و تحلیل نتایج برای مصالح سیمان BH34

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

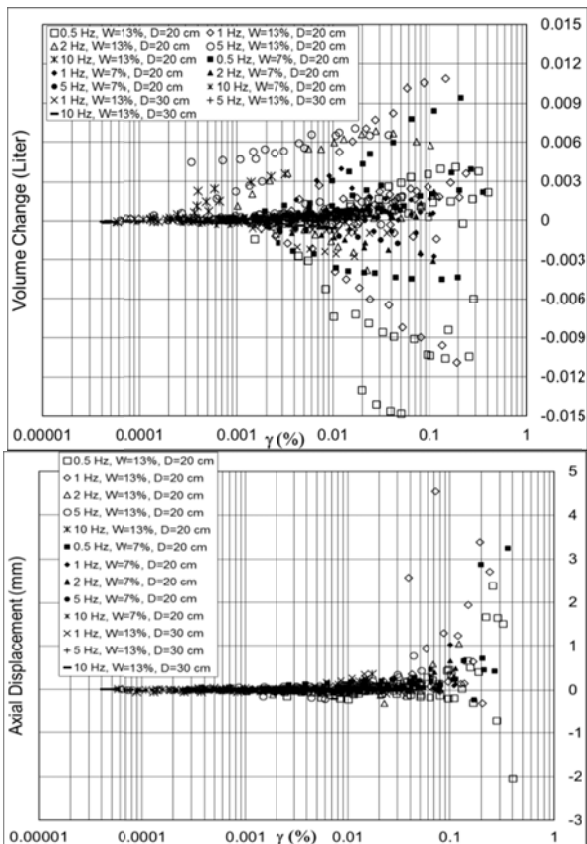
شکل ۱۵ الف و ب به ترتیب تغییرات نسبت مدول برشی و میرایی متوسط در نوسان‌های ۱ تا ۱۰ به نتایج نوسان‌های ۳۰ تا ۴۰ (مقادیر G_{1-10}/G_{30-40} و D_{1-10}/D_{30-40}) را در برابر γ برای نمونه با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و رطوبت ساخت بهینه و ۷٪ در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. در نمودار، بار وارده سینوسی و نمونه‌ها با تحت تحکیم همسان و غیرهمسان بوده است. چنانچه مشاهده می‌شود تا دامنه کرنش مورد بررسی

۴-۳-۲- تغییرات حجمی و طول نمونه

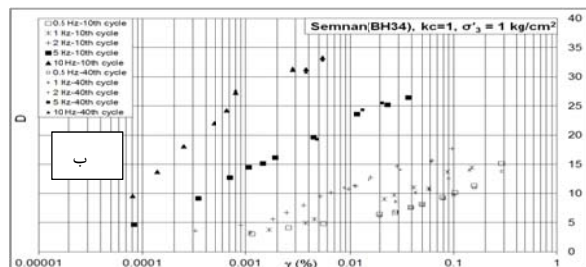
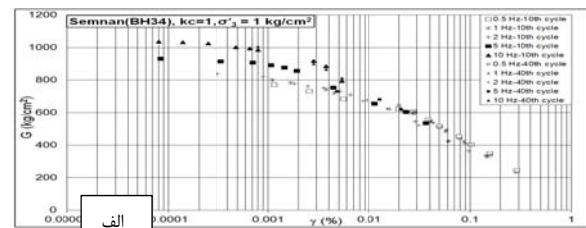
شکل ۱۷ الف مقدار خروج آب از نمونه (تغییر حجم) در برابر کرنش برشی در اثر باز کردن شیرهای زهکش در انتهای هر پله بارگذاری نوسانی مصالح سمنان گمانه BH34 تحت شرایط رطوبت بهینه، فرکانسها و تنشهای محدودکننده و ابعاد مختلف را نشان می‌دهد؛ بیشترین تغییرات حجم مربوطه به فرکانس بارگذاری پایین می‌باشد.

برای نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر با رطوبت ساخت بهینه (۱۳٪) دامنه تغییر حجم در اثر ورود یا خروج آب از نمونه در دامنه کرنش برشی حدود ۰/۱٪ حداکثر ۰/۱۱ و حداقل ۰/۱۵- لیتر می‌باشد. لذا تغییر در دانسیته در اثر ورود یا خروج آب تا کرنش ۰/۱٪ برای مصالح سمنان در گمانه BH34 ناچیز می‌باشد. برای نمونه‌ها با رطوبت ۷٪، دامنه تغییر حجم در دامنه کرنش برشی حدود ۰/۱٪ حداکثر ۰/۰۸ و حداقل ۰/۰۵- لیتر می‌باشد. برای نمونه با رطوبت ساخت بهینه و قطر ۳۰ سانتی‌متر، حداکثر آب ورودی به داخل نمونه حدود ۰/۰۳- لیتر می‌باشد. در شکل ۱۷ ب نتایج تغییر طول نمونه در برابر کرنشهای برشی مصالح سمنان گمانه BH34 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٪ برای نمونه‌ها با رطوبت بهینه کمتر ۴/۵ میلی‌متر است. روند مشابهی برای نمونه‌ها با قطر ۳۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود، با این تفاوت که مقادیر تغییر طول در کرنش ۰/۱٪ اندکی بیشتر از مقادیر نظیر نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۷. الف) تغییرات حجم، ب) تغییر طول محوری در برابر کرنش برشی مصالح سمنان گمانه BH34 در آزمایشهای نوسانی با رطوبت بهینه و ۷٪ و قطرهای ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر



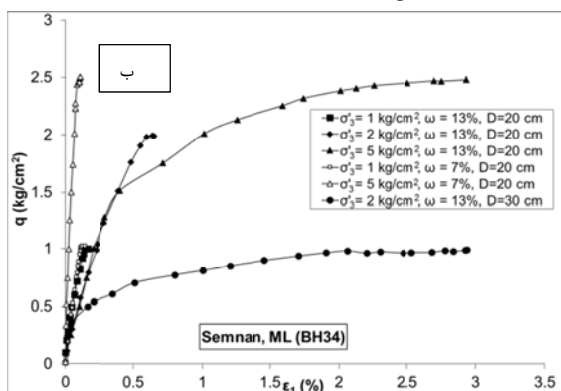
شکل ۱۶. مقایسه مقادیر الف) G_{10} و G_{40} ب) D_{10} و D_{40} در برابر کرنش برشی تحت تحکیم همسان ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و شکل موج سینوسی مصالح سمنان گمانه BH34

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

شکل ۱۸ تغییرات نسبت بی‌بعد شده فشار آب حفره‌ای (U_{max}/σ'_3) در برابر کرنش برای نوسان چهارم نمونه مصالح سمنان در گمانه BH34 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 ۱۰٪ می‌باشد. برای مصالح ML مورد بررسی، میزان فشارهای آب تولیدی در نمونه تحت

۴-۳-۴- نتایج آزمایش‌های استاتیکی مصالح سمنان گمانه BH34 مرحله اعمال غیرهمسانی تنش

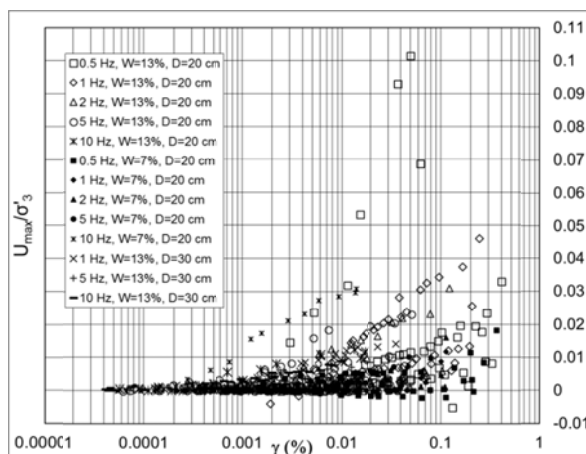
شکل ۱۹ نمودار تنش تفاضلی- کرنش محوری نمونه مصالح سمنان در گمانه BH34 برای اعمال تحکیم غیرهمسان به صورت زهکشی شده (ASTM 7181, ۲۰۱۱) تحت شرایط مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹ نمودار تنش تفاضلی- کرنش محوری نمونه مصالح سمنان در گمانه BH34 برای اعمال تحکیم غیرهمسان

در جدول ۱۰ نتایج تحکیم غیرهمسان در آزمایش‌های استاتیکی نمونه‌های مصالح سمنان گمانه BH34 ارائه شده است. مطابق شکل ۱۹ با افزایش تنش محدودکننده برای نمونه‌ها با رطوبت بهینه، مدول سکانتی کاهش می‌یابد. براساس نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ مقادیر مدول سکانتی با کاهش رطوبت افزایش می‌یابد و با افزایش قطر نمونه مدول سکانتی کاهش شدید می‌یابد. حداکثر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای تولیدی در مرحله اعمال k_c برای نمونه قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر به ترتیب ۲/۶٪ و ۰/۵٪ است و معمولاً آب به داخل نمونه مکیده می‌شود.

تحکیم غیرهمسان در مقایسه با مقادیر نظیر تحکیم همسان کمتر می‌باشد (Aghaei Araei و همکاران 2021). 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. اما در نمونه با رطوبت ساخت کمتر از مقدار بهینه (رطوبت ۷٪) مقادیر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در فرکانس ۱۰ هرتز و سپس ۵ هرتز دارای بیشترین مقدار می‌باشد. بیشتر بودن نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای نمونه با قطر ۳۰ سانتی‌متر نسبت به نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر در کرنش ۰/۱٪ بیشتر بوده و مقدار آن مثبت است.



شکل ۱۸. تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در تنش‌های محدودکننده مختلف و فرکانس‌های بارگذاری مختلف در نوسان‌های چهلیم مصالح سمنان گمانه BH34 نمونه با رطوبت ساخت بهینه و ۷٪ نمونه با قطر ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر

جدول ۱۰. نتایج تحکیم غیرهمسان در آزمایش‌های استاتیکی نمونه‌های مصالح سمنان گمانه BH34

Sample diameter (cm)	Dry density gr/cm^3	Moisture of Sample During Construction (%)	σ'_3 (kg/cm^2)	σ'_1/σ'_3	E_{sec} (kg/cm^2)	Axial strain (%) at E_{sec}	Excess pore water pressue (kg/cm^2)	Inlet (+) and outlet volume change of specimen (Liter)
20	1.95	13(Wopt.)	1	2	1098	0.09	0.04	+0.002
20	1.95	13(Wopt.)	2	2	444	0.47	0.05	-0.002
20	1.95	13(Wopt.)	5	1.5	437	0.57	0.13	-0.005
20	1.86	7	1	2	1083	0.09	0.04	-0.006
20	1.86	7	5	1.5	4266	0.06	0.01	-0.006
30	1.93	13(Wopt.)	1	2	313	0.32	0.1	-0.003

نتایج آزمایش مونوتونیک پسانوسانی تا مرحله گسیختگی مصالح سمنان گمانه BH34

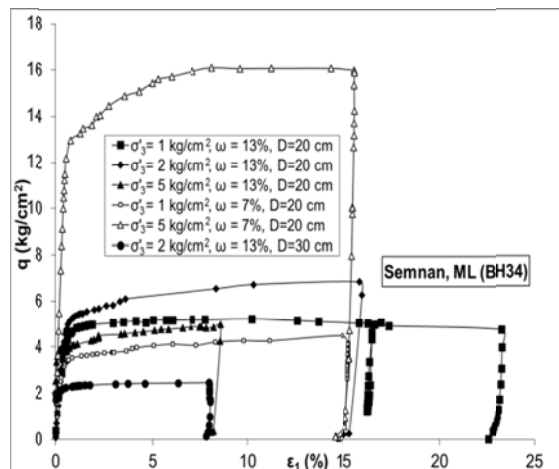
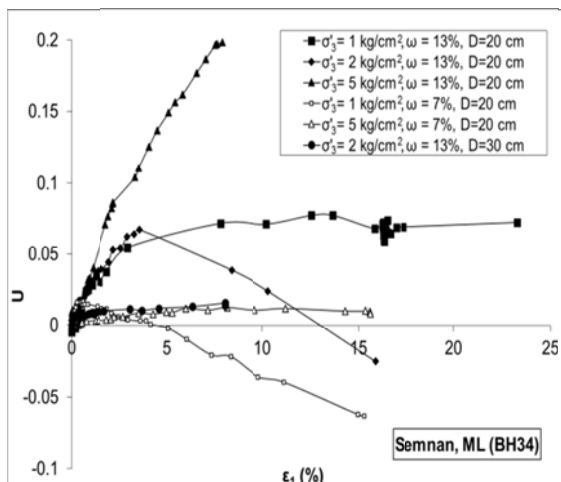
فشار آب حفره‌ای تولیدی می‌شود. لذا تنش محدودکننده پارامتر کلیدی و موثر بر پایداری نمونه‌ها است.

بر مبنای این یافته‌ها، خیلی روشن است که پاسخ تغییرشکلی و پایداری در آزمایش‌های سه محوری نمونه‌های با رطوبت بهینه در تنش‌های محدود کننده مختلف پس از آزمایش نوسانی مصالح سمنان در گمانه BH34 متفاوت است. کاهش قابل ملاحظه تنش تفاضلی حداکثر با افزایش قطر نمونه جالب توجه است. همچنین حداکثر اضافه فشار آب حفره‌ای تولیدی در نمونه با قطر ۳۰ سانتی‌متر از مقادیر نظیر ۲۰ سانتی‌متر کمتر است، که دلیل آن شاید ابعاد بزرگ‌تر و دانسیته کمتر نمونه باشد. با افزایش تنش محدودکننده نمونه‌ها، اضافه فشار آب حفره‌ای در حین بارگذاری محوری خصوصاً در نمونه‌ها با رطوبت بهینه در مقایسه با نمونه با رطوبت ۷٪ افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که با افزایش تنش محدود کننده مقادیر زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین مصالح از نظر مقدار زاویه اصطکاک وجود دارد.

هرچند اعمال بارگذاری نوسانی در حالت نمونه با قطر ۲۰ سانتی‌متر با رطوبت ساخت ۱۳٪ و تحت σ'_3 برابر ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و نمونه با قطر ۳۰ سانتی‌متر با رطوبت ساخت ۱۳٪ و تحت σ'_3 برابر ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع سبب افزایش حدود ۳ برابر مدول سکانتی می‌شود. اعمال بار نوسانی سبب می‌شود که E_{sec} حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای حالت‌های مختلف بجز برای σ'_3 برابر ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (با مقدار $E_{sec} = 2750$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) برسد. اما مقادیر زاویه اصطکاک در انتهای آزمایش سه محوری مونوتونیک پسانوسانی به مقادیر برش مستقیم در حالت تراکم اندک نزدیک و حتی کمتر از آن می‌شود، که علت آن افزایش ناگهانی اضافه فشار آب حفره‌ای علی‌رغم سرعت کم بارگذاری مونوتونیک است. با توجه به موارد فوق‌الذکر راهکار برداشت و اصلاح شیمیایی و نظایر آنها باید برای خاک مساله‌دار، مورد بررسی قرار گیرد. نسبت مدول باربرداری E_{ur} مونوتونیک پسانوسانی به به مدول سکانتی اولیه در مرحله اعمال غیرهمسانی برای تنش‌های مختلف حدود ۲/۲ است.

بعد از اعمال بار نوسانی سینوسی نمونه مصالح سمنان در گمانه BH34 با رطوبت بهینه و رطوبت ۷٪ به صورت زهکشی نشده (ASTM 4767, ۲۰۱۱) به صورت کرنش کنترل با سرعت 0.5 mm/min برش داده شده است. بارهای محوری، جابجایی قائم، اضافه فشار آب حفره‌ای داخل نمونه به صورت همزمان ثبت گردیده است. مشخصات و نتایج آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی در جدول ۱۱ ارائه شده است. مطابق شکل ۲۰ الف برای نمونه‌های متراکم تا خیلی متراکم سمنان در 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. نکته جالب توجه اینکه با افزایش تنش محدودکننده از ۱ به ۲ سانتی‌متر مربع، مقدار تنش تفاضلی حداکثر افزایش می‌یابد، اما دوباره در تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، مقادیر تنش تفاضلی حتی از مقادیر نظیر ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر 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 با رطوبت ساخت ۱۳٪، با افزایش تنش محدودکننده از ۱ به ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، نسبت تنش تفاضلی حداکثر به تنش محدودکننده از حدود ۵ به حدود ۱ کاهش می‌یابد. لذا راهکار افزایش تراکم برای اصلاح خاک، برای تنش‌های محدودکننده بالا با توجه به رفتار مشاهده شده با افزایش رطوبت نمونه خاک (حضور آب) مورد تشکیک است.

شکل ۲۰ ب نتایج نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری برای نمونه‌های با رطوبت ساخت بهینه و رطوبت ۷٪ در تنش‌های محدود کننده مختلف در آزمایش مونوتونیک پسانوسانی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پاسخ اضافه فشار آب حفره‌ای شدیداً وابسته به تنش محدودکننده است. بطورکلی با افزایش محدود کننده از ۱ به ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مقدار حداکثر نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. وجود سابقه تنش محدودکننده بزرگتر مثل ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در کل سبب کاهش مقادیر مدول سکانتی و افزایش نسبت اضافه



شکل ۲۰. نتایج تنش تفاضلی-کرنش محوری-نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی مصالح سمنان گمانه BH34 نمونه با رطوبت ساخت ۱۳٪ (بهبه) و ۷٪ و قطر نمونه ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر

جدول ۱۱. خلاصه مشخصات و نتایج آزمایش‌های استاتیکی پسانوسانی مصالح سمنان گمانه BH34

σ'_3 (kg/cm ²)	Dimension (cm)	γ_d (gr/cm ³)	Test condition	Axial strain at end of cyclic test (%)	q_{max}/σ'_3	Axial strain at end of Monotonic test (%)	EPWP at q_{max} (kg/cm ²)	ϕ'_{peak} (°)	E_{ur} (kg/cm ²)	E_{sec} (kg/cm ²) for post cyclic
1	20*40	1.95	Dry (Wopt)	7.02	5.2	23.3	+0.07	46.2	1789	1022
2	20*40	1.95	Dry (Wopt)	0.09	3.4	15.88	-0.05	39.02	1222	1000
5	20*40	1.95	Dry (Wopt)	14.29	1.0	8.59	+0.99	19.47	1243	1000
1	20*40	1.86	Dry (W=7%)	0.03	4.5	15.33	-0.06	43.81	1778	1070
5	20*40	1.86	Dry (W=7%)	0.03	3.2	16	+0.04	38.09	4708	2750
2	30*60	1.93	Dry (Wopt)	10.85	1.2	8	+0.03	22.02	1058	1013

۲۸۰۰، از روش دانه‌هول و از روش اندازه‌گیری متوسط سرعت موج برشی از سطح استفاده شود.

جدول ۱۲. طبقه بندی زمین براساس سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه‌های سطحی خاک ML گمانه BH34 طبق استاندارد ۲۸۰۰

نوع خاک	Vs (متر بر ثانیه)	روش اندازه‌گیری سرعت موج
II	۵۲۶	داده‌های صحرائی اینتروالی دانه‌هول
III	۳۲۹	داده‌های صحرائی متوسط از سطح دانه‌هول
II	۴۶۶	داده‌های صحرائی برداشت لرزه‌نگاری شکست‌مرزی
III	۲۹۰	تحکیم همسان (داده‌های آزمایشگاهی)
III	۳۳۶	تحکیم غیرهمسان (داده‌های آزمایشگاهی)

طبقه‌بندی نوع زمین براساس مطالعات ژئوفیزیکی و آزمایشگاهی

در جدول ۱۲ طبقه بندی زمین براساس سرعت موج برشی در ۳۰ متر لایه‌های سطحی خاک ML گمانه BH34 طبق استاندارد ۲۸۰۰ برای روش‌های مختلف اندازه‌گیری سرعت موج ارائه شده است. تطابق خوبی بین داده‌های صحرائی سرعت موج برشی متوسط از سطح روش دانه‌هول با متوسط مقادیر نمونه آزمایشگاهی سه‌محوری تحت تحکیم غیرهمسان برقرار است. مقادیر متوسط سرعت موج برشی لرزه‌نگاری برداشت شکست‌مرزی کمتر از مقادیر دارد. لذا توصیه می‌شود برای طبقه بندی خاک و اگر طبق استاندارد

۵- نتیجه گیری

مشخصات درجای غیرمتراکم و رفتار دینامیکی نمونه متراکم شده خاک ریزدانه رمنده ML مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش تعیین پتانسیل رمندهگی نشان دهنده درجه رمندهگی نسبتاً شدید، متوسط و کم، خاک مورد بررسی، به ترتیب برای اعماق ۴-۰ متر، ۱۰-۴ متر و بیشتر است. ضخامت لایه با تراکم بسیار کم و 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.

همچنین این مقاله به رفتار دینامیکی نمونه‌های بسیار متراکم و متراکم خاک مورد مطالعه با رطوبت ساخت مختلف برای بررسی اثربخش بودن راهکار افزایش تراکم به عنوان یکی از گزینه‌های بهسازی می‌پردازد. مهمترین نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- متوسط مقاومت الکتریکی و سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر به ترتیب ۱۲/۳۳ ولت-متر/آمپر و ۳۳۶ متر بر ثانیه است.

- با توجه به نتایج آزمایش‌های سه محوری، برای طبقه بندی خاک و اگر طبق استاندارد ۲۸۰۰ توصیه می‌شود از روش دانپول و از روش اندازه‌گیری متوسط سرعت موج برشی از سطح استفاده شود.

- میزان متوسط افزایش مقادیر سرعت موج برشی حالت غیرهمسان نسبت به حالت همسان مصالح ML در آزمایش سه محوری برای حالت رطوبت بهینه و رطوبت ساخت ۷٪ به ترتیب حدود ۱۶٪ و ۱۷٪ است.

- فرکانس بارگذاری، کمترین اثر بر مقادیر مدول برشی مصالح ML مورد بررسی در مقایسه با دیگر مصالح ریزدانه و دانه‌ای غیرسیمانته شده دارد.

- تاثیر شکل موج‌های مثلثی، سینوسی و مستطیلی بر رفتار دینامیکی مصالح مورد بررسی به غیر از فرکانس ۵ هرتز اندک می‌باشد.

- مقایسه نتایج $G - \gamma$ نمونه ML تحت تنش محدود کننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در حالت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان با نسبت مختلف σ'_1/σ'_3 نشان می‌دهد که بطور کلی با کاهش درصد رطوبت نمونه از مقدار بهینه به نصف مقدار، مقادیر

مدول برشی افزایش می‌یابد، که این اثر خصوصاً در درتشی‌های محدود کننده ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع محسوس‌تر است.

- با افزایش قطر نمونه از ۲۰ به ۳۰ سانتی‌متر نمونه ساخته شده با رطوبت بهینه حالت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان $G - \gamma$ کاهش چشمگیری می‌یابد که این کاهش با افزایش تنش محدود کننده بیشتر می‌شود.

- مقدار مدول برشی نمونه خاک متراکم ML با رطوبت ساخت ۱۳٪ در کرنش برشی ۰/۲٪ و تنش محدودکننده‌های ۱، ۲ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و غیرهمسانی‌های مختلف بین ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تا ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با متوسطی حدود ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

- مقدار مدول برشی نمونه خاک متراکم ML با رطوبت ساخت ۷٪ در کرنش ۰/۲٪ تحت تنش محدودکننده همسان و غیرهمسان ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بین ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ۱۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با متوسطی حدود ۱۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است و مقادیر متوسط نظیر برای تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، حدود ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

- علی‌رغم تفاوت قابل ملاحظه در مقادیر مدول برشی، تفاوتی در مقادیر $G/G_{max} - \gamma$ نمونه با رطوبت ساخت بهینه و کمتر و قطرهای ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر وجود ندارد.

- اکثر داده‌های $G/G_{max} - \gamma$ در سطح کرنش‌های برشی کمتر از ۰/۲٪. پایین منحنی متوسط Seed و Idriss (۱۹۷۰) برای ماسه و در سطح کرنش برشی بزرگتر از ۰/۰۶٪ بالای منحنی Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) برای مصالح لای برای $PI=15$ قرار می‌گیرند.

- مقایسه نتایج $D - \gamma$ در تنش محدودکننده ۱ و ۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نمونه تحت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان و فرکانس‌های مختلف و شکل موج سینوسی نمونه با رطوبت ۷٪ و ۱۳٪ نشان می‌دهد که مقادیر نسبت میرایی نمونه تحکیم غیرهمسان نسبت به تحکیم همسان در کرنش‌های کوچک اندکی بیشتر و در کرنش‌های متوسط و بزرگتر اندکی کمتر است. بطور کلی تفاوت چندان بین نسبت میرایی نمونه تحت تحکیم همسان و تحکیم غیرهمسان وجود ندارد.

برابر ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع کیلوگرم بر سانتی متر مربع (با مقدار E_{sec} برابر ۲۷۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) برسد. لذا E_{sec} مونوتونیک پسانوسانی تقریباً برابر مدول الاستیک در کرنش محوری ۰/۱۵٪ (یا کرنش برشی ۰/۲٪ با فرض نسبت پواسن ۰/۳۳) است.

- با توجه به عدم تفاوت پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی نمونه‌های متراکم و غیرمتراکم در حالت کسینجنگی، اثر بخش بودن ایجاد تراکم به تنهایی، برای اصلاح خاک ربنده مورد مطالعه برای رطوبت‌های مساوی و بیشتر از رطوبت بهینه، مورد تشکیک است. بطوریکه زاویه اصطکاک خاک غیرمتراکم در تنشهای سربار کم، تقریباً برابر مقادیر زاویه اصطکاک در تراکم بالا نمونه با قطر ۳۰ تحت تنش محدودکننده ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و یا نمونه با قطر ۲۰ سانتی متر تحت تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع با دامنه تقریبی ۱۹ تا ۲۶ درجه است. لذا توصیه می شود ضمن برداشت بخش‌های سطحی تا عمق ۴ متری، روش‌های اصلاح شیمیایی و نظایر آنها برای اعماق پایین تر خصوصاً برای تنشهای بالا مورد ارزیابی قرار گیرد.

۶- سپاسگزاری

داده‌های آزمایش‌های سه محوری این مقاله از پروژه "ارزیابی رفتار دینامیکی شش نوع مصالح خاکی ایران با استفاده از دستگاه سه محوری 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.

-بطورکلی کاهش رطوبت باعث کاهش نسبت میرایی خصوصاً در فرکانس‌های ۵ و ۱۰ هرتز می‌گردد. برای نمونه با قطر ۳۰ سانتی متر، مشابه نمونه‌های با قطر ۲۰ سانتی متر، با افزایش فرکانس بارگذاری مقادیر نسبت میرایی افزایش می‌یابد. نکته جالب توجه اینکه تفاوت چندانی بین نسبت میرایی نمونه‌های با قطر ۲۰ و ۳۰ در حالت نمونه تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع تحکیم غیرهمسان و نمونه تحت تنش محدودکننده ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع وجود ندارد. حتی در تنش محدودکننده ۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع حالت تحکیم همسان، نسبت میرایی نمونه با قطر ۲۰ در فرکانس‌های ۵ و ۱۰ هرتز بیشتر از مقادیر نظیر نمونه با قطر ۳۰ سانتی متر است. این نتایج نشان می‌دهد افزایش نسبت میرایی در فرکانس‌های بالا به ابعاد نمونه ارتباط چندانی ندارد.

-در سطح کرنش‌های کوچک داده‌های $D - \gamma$ نمونه ML بالای مرز پیشنهادی Vucetic و Dobry (۱۹۹۱) قرار می‌گیرند، اما در سطح کرنش‌های بالاتر تنها بخش اندکی از داده‌های تنها برای فرکانس‌های ۰/۵ و ۱ هرتز در داخل محدوده تعیین شده قرار می‌گیرند. ملاحظه می‌شود حداکثر مقدار میرایی اندازه‌گیری شده کمتر از ۳۵٪ برای نمونه‌های با رطوبت طبیعی می‌باشد. حداکثر میرایی در کرنش‌های کوچک کمتر از ۱۳٪ می‌باشد. کاهش میرایی حداکثر از حدود ۴۵٪ برای مصالح سنگریزه‌ای به کمتر از ۳۵٪ نمونه ML ممکن است ناشی از اثر حداکثر اندازه دانه (یا اینرسی دانه‌ها) و همچنین شرایط رطوبتی نمونه باشد.

-اثرات تعداد نوسان بارگذاری و اضافه فشار آب حفره‌ای بر نسبت مدول برشی و میرایی نیز در کرنش‌های بیش از ۰/۰۱٪ دارای اهمیت است.

-با توجه به نتایج آزمایش‌های مونوتونیک پسانوسانی توصیه می‌شود آزمایش‌های تعیین مدول برشی و نسبت میرایی نمونه خاک ML بسیار متراکم، برای غیرهمسانی ۲ برای تنش محدودکننده ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و غیرهمسانی حداکثر ۱/۵ برای تنش محدودکننده ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع انجام شود.

-اعمال بار نوسانی سبب می‌شود که E_{sec} مونوتونیک پسانوسانی حدود ۱۰۰۰ برای حالت‌های مختلف بجز برای σ_3'

- triaxial apparatus, Research report BHRC Publication No. 837, 352-353. ISBN: 978-600-113-354-1(In Persian).
- Aghaei Araei, 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, 51220-1235.
- Apparao, A., and Rao, T.G. (2019). Depth of investigation in resistivity methods using linear electrodes, *Geophysical Prospecting* 22, 974, 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 (2020). Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.
- ASTM D3999 (2006). Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus, Reapproved 1996.
- ASTM D7128-18 (2018). Standard guide for using the seismic-reflection method for shallow subsurface investigation, 2018.
- ASTM D7400/D7400M-19. (2019). Standard test methods for downhole seismic testing.
- BHRC Technical report. (2012). Seismic mirozonation of Semnan and Sorkheh, Geology and Engineering Geology, First Volume; Seismo-Tectonic and site response analysis, Second Volume, Client :Housing and Urban Development Organization of Semnan Province, Adviser: Road, Housing and Urban Research Center (BHRC), *Geotechnical and Infrastructure Department*. (In Persian).
- Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. (2015). Standard 2800, 4th Edition, Road, Housing and Urban Research Center (BHRC), (In Persian).
- Marof, M.A. and Bolori Bazaz, J. (2014). Treatment and modification of collapsible soils, *Journal of Engineering Geology*, 8, 4, 2513-2536.
- Aghaei Araei A. (2002). Back analysis of deformations induced during first impounding of Masjed-e-Soleyman dam. MSc Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, *Amirkabir University of Technology*, Tehran, Iran (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., 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., 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, 241-242. ISBN: 978-600-113-239-1 (In Persian).
- Aghaei Araei, A., Kalantari, F., Ghalandarzadeh, A., Shahnazari, H., Attarchian, N., and Rahmani, I., (2023). 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., 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

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.

-Soroush A, Aghaei Araei A. (2006). Analyses behavior of high rockfill dam. *Geotechnical Engineering Journal*, Proceeding of ICE 159, 49-59.

-Soroush, A., Aghaei Araei, A. (2005). Uncertainties in mechanical behavior of rockfills during first impounding of rockfill dam, *73rd Annual Meeting of ICOLD*, Paper No.: 186-S5, May 1- 6, Tehran, Iran.

-Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, 89-107.

-Meng J. (2007). Earthquake ground motion simulation with frequency-dependent soil properties, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 3, 234-241.

-Mokhberi. M., Soltani, A.A., Marandi, S. M., (2023). Experimental investigation of geotechnical behavior of collapsible soils improved with nanomaterials, Accepted Paper.

Doi:10022060/CEEJ.2023.21956.7862

(In Persian).

-Park D., and Hashash Y. M.A. (2008). Rate-dependent soil behavior in seismic site response analysis, *Can. Geotechnical Journal*, 45, 4, 454-469.

-Razeghi, A., Aghaei Araei, H.R., A. (2014). Ghalandarzadeh and S. Hashemi Tabatabaei, 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

Investigating the Un-Compacted in-Situ Characteristics and Dynamic Behavior of the Compacted Specimen of Collapsible Fine-Grained ML Soil

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

E-mail: aghaeiarai@bhrc.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

This paper presented the field characteristics of *ML* soil prone to collapsible in uncompact condition, using soil mechanics tests and in-situ tests including determination of electrical resistance and wave velocities, and then the dynamic and post-cyclic monotonic behavior of the compact specimen using a large-scale triaxial device. The average electrical resistance of the collapsible *ML* soil layer of is reduced to a third (11 Volt-Meter/Ampere) from the surface to the depth of 4 m and is almost constant up to the depth of 30 m. However, the values of the shear wave velocity "average from the surface" of the down hole method have a low value (i.e. 160 m/s) at the surface depth and gradually increase to 450 m/s at a depth of 30 m. In the following, on the mentioned compacted materials under σ'_3 equal to 1, 2 and 5 kg/cm^2 dynamic cyclic tests were performed according to *ASTM D3999* under frequencies of 0.5, 1, 2, 5 and 10Hz. The effect of changing the percentage of moisture and anisotropic consolidation (σ'_1/σ'_3), triangular, sinusoidal and rectangular waveforms on the results of shear modulus (G), shear modulus ratio (G/G_{max}) and damping ratio (D) versus strain shear (γ) was investigated through 57 tests. The results showed that with the increase of loading frequency the values of G and D are increased slightly and considerably, respectively. According to the results, compaction solution alone is not suitable for treatment of the studied soil.

Keywords: ML Soil, Shear Modulus, Damping Ratio, Post-Cyclic Monotonic