



مقایسه رفتار دینامیکی نمونه‌ی خاک ماسه‌ای بازسازی شده و مغزه‌گیری شده توسط آزمایش ستون تشدید در خمش

عطا آقایی آرایبی*^۱، سمیه احمدی^۲، حمید مهرنهاد^۳، ناهید عطارچیان^۱

۱- بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
۲- دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

کلمات کلیدی:

مدول یانگ
نسبت میرایی
ستون تشدید خمشی
نمونه مغزه‌گیری شده
نمونه بازسازی شده

خلاصه: تعیین خواص دینامیکی خاک‌ها مسئله‌ای مهم در حل مسائل مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای به شمار می‌رود. در این راستا انواع متعددی از روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی با مزیت‌ها و محدودیت‌های متفاوت با توجه به حل مسائل مختلف در دسترس هستند. یکی از معضلات پیش روی مهندسین اختلاف بین نتایج آزمایش‌های در محل و آزمایشگاهی است. از دلایل تفاوت بین مقادیر پارامترهای دینامیکی حاصل از آزمایش‌های در محل و آزمایشگاهی دست‌خوردگی نمونه‌ها، تفاوت شرایط تنش و از بین رفتن سیمانی شدن است که عدم توجه به این موارد بر خواص دینامیکی خاک‌ها می‌تواند موجب وقوع صدمات جدی در اثر تحلیل‌های غیرواقعی زمین شود. از میان روش‌های آزمایشگاهی، آزمایش ستون تشدید یکی از آزمایش‌های تعیین خواص دینامیکی خاک‌ها در کرنش‌های کوچک به شمار می‌رود. در این پژوهش با انجام آزمایش ستون تشدید در خمش، مدول یانگ و نسبت میرایی مصالح خاکی دست‌نخورده و بازسازی شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثرات تنش محدود کننده و ناهمسانی تنش نیز در روند تغییرات مدول یانگ و نسبت میرایی بررسی شده است. نتایج بررسی‌ها کاهش مدول یانگ را بر اثر دست‌خوردگی نشان می‌دهد در حالی که بر نسبت میرایی اثر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. افزایش تنش محدود کننده و ناهمسانی تنش افزایش مدول یانگ را به دنبال داشته است. مقایسه‌ی نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان بیشتر بودن مقادیر نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه
خواصی از خاک که بر پدیده‌ی انتشار امواج و سایر پدیده‌های کرنش کوچک تأثیرگذار است، خواص دینامیکی خاک گفته می‌شود که در میان آن‌ها مدول برشی و مدول یانگ در تراز کرنش‌های کوچک (کمتر از ۲٪) (۱۰) که به صورت E_{max} و G_{max} نشان داده می‌شوند از خواص دینامیکی مهم و کلیدی برای ارزیابی تغییر شکل‌های خاک در مصالح ژئوتکنیکی که تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند به شمار می‌روند [۱-۳] که بخش زیادی از پژوهش‌های آزمایشگاهی در راستای ارزیابی مدول برشی و نسبت میرایی در کرنش کوچک و بررسی اثر عوامل مختلف بر آن‌ها انجام شده است [۴-۹].
از میان آزمایش‌های آزمایشگاهی، آزمایش ستون تشدید یکی از کاربردی‌ترین وسایل اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی خاک‌ها در کرنش کوچک به شمار می‌رود [۱]. علی‌رغم تحریک پیچشی دستگاه ستون تشدید

- 1 Saxena and Reddy
- 2 Monterey
- 3 Cascante et al.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.aghaeiarai@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



مهندسين در ارزیابی پارامترهای دینامیکی اختلاف بین نتایج آزمایش‌های در محل و آزمایشگاهی به شمار می‌رود که می‌تواند به علت دست خوردگی نمونه‌ها و تفاوت شرایط تنش در محل و آزمایشگاه باشد و عدم توجه به این مهم می‌تواند موجب وقوع صدمات جدی در اثر تحلیل‌های غیرواقعی زمین شود. از این رو نیاز به ارزیابی پارامترهای دینامیکی کلیدی همچون مدول یانگ در کرنش کوچک با انجام آزمایش‌های دینامیکی بر روی مصالح دست نخورده و بازسازی شده احساس می‌شود. اخذ نمونه‌ی دست نخورده تقریباً تا این لحظه امری غیرممکن است زیرا نفوذ جداری نمونه‌گیر، هر چه قدر هم که نازک باشد و یا روش نمونه‌گیری هر میزان هم که دقیق باشد؛ دست خوردگی در مصالح درجا را در پی دارد. با این توصیف نمونه‌ی دست نخورده به نمونه‌ای اطلاق می‌شود که از نمونه‌گیر و روش نمونه‌گیری حاصل شده باشد که حتی‌المقدور امکان ساختار طبیعی مصالح را حفظ نماید [۱۶ و ۱۵]. در میان پژوهش‌های انجام شده بر اثر دست خوردگی بر مدول برشی و نسبت میرایی مشاهده شده است که دست خوردگی باعث کاهش مدول برشی می‌شود و نسبت میرایی در کرنش کوچک را به صورت جزئی افزایش می‌دهد [۱۹-۱۷ و ۱۵].

ناهمسانی تنش یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای دینامیکی خاک به شمار می‌رود که شرایط ناهمسانی تنش بر روی نمونه می‌تواند شرایط تنش در جای توده‌ی خاک را بهتر مدل کند. نتایج آزمایش‌های ستون تشدید و سه محوری سیکلی بر روی نمونه‌های بازسازی شده‌ی ماسه بر آن است که ناهمسانی تنش منجر به افزایش مدول برشی می‌شود اما اثری ناچیز بر منحنی‌های مدول برشی بی‌بعد شده خواهد داشت. همچنین در تنش مؤثر میانگین یکسان مدول برشی با افزایش مقدار ناهمسانی تنش افزایش می‌یابد. اثر ناهمسانی تنش بر نسبت میرایی نشان دهنده‌ی آن است که منحنی‌های نسبت میرایی، به سختی از ناهمسانی تنش تأثیر می‌پذیرند [۲۱ و ۲۰]. نتایج دیگر پژوهش‌ها بر اثر ناهمسانی تنش بر پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌ای توسط روش‌های مختلف آزمایشگاهی بر آن است که ناهمسانی تنش سبب افزایش مدول برشی می‌شود [۲۳ و ۲۲ و ۱۵ و ۶]. نسبت میرایی که به صورت نسبت مقدار انرژی زایل شده به انرژی جذب شده تعریف می‌شود به شدت از سطح کرنش اعمالی تأثیرپذیر است [۲۴]. مقایسه‌ی نتایج نسبت میرایی در تراز کرنش‌های کوچک، حاصل از روش‌های زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان با استفاده از آزمایش ستون تشدید بر روی نمونه‌های ماسه‌ای نشان دهنده تطابق خوب مقادیر نسبت میرایی حاصل از این دو روش است [۲۵ و ۱۴]. در پژوهش دیگر با

یانگ را فراهم کرده و مدل مکانیکی برای اندازه‌گیری مدول یانگ و کرنش خمشی متناظر با آن را ارائه کرده‌اند. از مزایای برجسته‌ی دستگاه ارتقا یافته در این پژوهش این است که امکان انجام آزمایش‌های تعیین سختی برشی و خمشی برای فرکانس‌های در بازه‌ی ۲۰۰-۵۰ هرتز وجود دارد [۱۱]. گو و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۳ با انجام آزمایش‌های المان خمشی، ستون تشدید و برش پیچشی بر روی ماسه‌ی خشک مقادیر مدول برشی حداکثر (G_{max})، مدول محدود شوندگی (M_0) و نسبت پواسون (ν) را مورد ارزیابی قرار داده و مشاهده کرده‌اند که نتایج مدول برشی حداکثر هر سه آزمایش بر هم منطبق است. روابط تجربی برای تخمین تقریبی نسبت پواسون با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی G_{max} و M_0 نیز توسط این محققین ارائه شده است [۱۲]. هی و سننکایس^۲ در سال ۲۰۱۶ بیان نموده‌اند که مدول یانگ برای مصالح سنگدانه‌ای بتن بازیافتی حاصل از آزمایش ستون تشدید در خمش با نتایج آزمایش المان خمشی غالباً مطابقت دارد. با این وجود در بعضی موارد مقادیر مدول یانگ حاصل از آزمایش ستون تشدید در خمش تقریباً کمتر از آزمایش المان خمشی است [۱۳]. پایان و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۶ اثر دانه‌بندی و شکل ذرات را بر مدول یانگ در کرنش کوچک برای نمونه‌های ماسه‌ای خشک توسط آزمایش‌های ستون تشدید در خمش مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش مدل جدیدی برای ارزیابی مدول یانگ کرنش کوچک و نسبت پواسون با لحاظ نمودن اثر دانه‌بندی و شکل ذرات ارائه شده است [۱۴]. پایان و همکاران در سال ۲۰۲۰ نیز با انجام آزمایش‌های ستون تشدید در خمش بر روی ماسه‌های سیلتی اثر درصد ریزدانه‌ی غیرپلاستیک سیلیکا بر مدول یانگ و نسبت پواسون مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج پژوهش بیانگر این است که با افزایش نسبت ریزدانه سیلتی خواص ماسه در رفتار دینامیکی ماسه‌ی سیلتی کمتر غالب شده و فراتر از درصد مشخصی از ریزدانه فقط سیلت، رفتار دینامیکی مخلوط را کنترل می‌کند. بر مبنای آزمایش‌های انجام شده روابطی برای ارزیابی مدول یانگ کرنش کوچک ماسه‌های سیلت‌دار ارائه شده است. همچنین تغییرات نسبت پواسون با درصد ریزدانه برای مخلوط‌های ماسه-سیلتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. در اکثر پژوهش‌های انجام شده اثر عواملی چون روش‌های آزمایشگاهی در کرنش کوچک، درصد ریزدانه، شکل ذرات، نوع مصالح و غیره بر ارزیابی مدول یانگ کرنش کوچک مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت رابطه‌ای برای پیش‌بینی مدول یانگ ارائه شده است. یکی از معضلات پیش روی

- 1 Gu et al.
- 2 He and Senetakis
- 3 Payan et al.

بنابراین نیاز جمعیت مهاجر در این شهر به ساخت و سازهای گسترده، شناسایی هر چه بیشتر و بهتر رفتار مکانیکی و دینامیکی خاک این منطقه را به دنبال خواهد داشت. منحنی دانه‌بندی و مشخصات خاک مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- آماده‌سازی و ساخت نمونه‌های آزمایش

در این پژوهش از دو نمونه‌ی مغزه‌گیری شده و بازسازی شده‌ی خشک استفاده شده است. برای انجام آزمایش ستون تشدید در خمش بر روی نمونه‌ی مغزه‌گیری شده، تنها سر و ته نمونه برای قرار گرفتن در محفظه‌ی آزمایش صیقل داده شده و نمونه به صورت خشک مورد آزمایش قرار گرفته است. برای بازسازی نمونه‌ها نیز از روش کوبش مرطوب در رطوبت بهینه با استفاده از قالب استوانه‌ای شکاف‌دار استفاده شده و سپس نمونه بازسازی شده در اون خشک گردیده و تحت آزمایش ستون تشدید در خمش قرار گرفته است. مقدار نسبت تخلخل برای هر دو نمونه با توجه به مقادیر چگالی ویژه خاک مورد مطالعه و وزن مخصوص هر دو نمونه با استفاده از روابط وزنی حجمی محاسبه شده است. جدول ۲ مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

۲-۳- برنامه‌ی آزمایش‌ها

در پژوهش پیش‌رو، آزمایش‌های تشدید و میرایی در خمش در تنش‌های محدود کننده ۱۵۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال برای نمونه‌های مغزه‌ی خشک و بازسازی شده‌ی خشک در دو حالت اعمال تنش همه‌جانبه به صورت همسان و ناهمسان و مطابق با استاندارد ASTM-D4015 انجام شده است [۲۶]. اعمال تنش همه‌جانبه به صورت ناهمسان در نسبت‌های ناهمسانی ۱/۴۳، ۱/۲۱، ۱/۱۳ انجام شده که این نسبت‌های ناهمسانی با توجه به توزیع حباب تنش ناشی از وزن ساختمان در عمق و همچنین محدودیت‌های دستگاه انتخاب شده است. با توجه به اینکه آزمایش ستون تشدید، آزمایشی غیرمخرب^۱ است [۲۶ و ۲۳]، امکان انجام آزمایش‌های متعدد تحت شرایط تنش تحکیمی متفاوت بر روی یک نمونه بدون ایجاد دست خوردگی یا خرابی در نمونه‌ی مورد آزمایش فراهم می‌باشد. جدول ۳ مشخصات آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش را ارائه می‌کند.

۲-۴- دستگاه ستون تشدید مورد استفاده

دستگاه ستون تشدید مورد استفاده در این آزمایش از نوع گیردار- آزاد

مقایسه‌ی مقادیر نسبت میرایی حاصل از روش‌های زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان با استفاده از آزمایش ستون تشدید در پیچش برای نمونه‌های ماسه‌ای رس‌دار دست نخورده و بازسازی شده‌ی خشک و مرطوب، افزایش مقادیر نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان را در مقایسه با روش زوال دامنه‌ی ارتعاش را نشان می‌دهد که میزان افزایش، بیشتر برای نمونه‌ی بازسازی شده‌ی مرطوب مشهود است [۱۵].

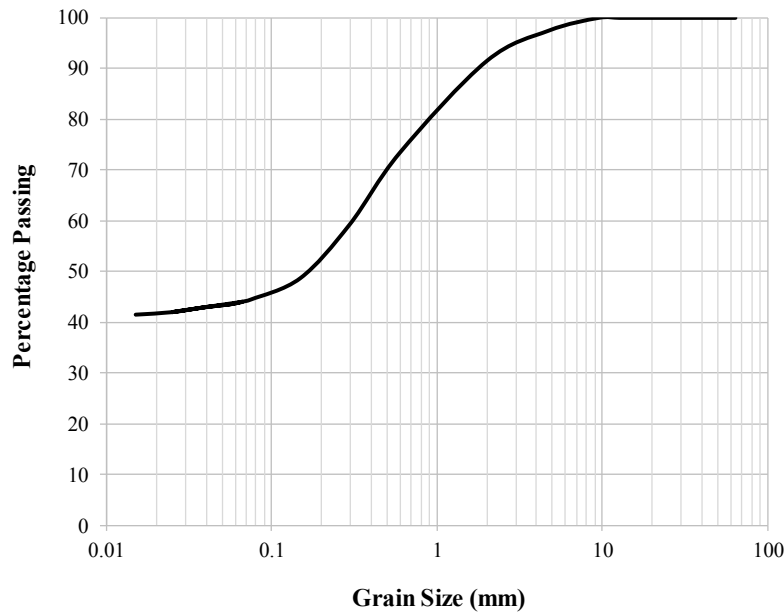
علی‌رغم پژوهش‌های متعدد انجام شده توسط محققین، همچنان این سؤال مطرح است که دست خوردگی ناشی از بازسازی نمونه‌ها در آزمایشگاه تا چه میزان بر خواص دینامیکی خاک‌ها تأثیرگذار هستند؟ هر چند اختلاف بین نتایج آزمایش‌های در محل و آزمایشگاه غیرقابل انکار است، اما آیا این بازه‌ی تفاوت برای خواص دینامیکی مختلف قابل قبول است یا خیر؟ در این پژوهش مدول یانگ و نسبت میرایی برای نمونه‌های مغزه‌گیری شده و بازسازی شده‌ی خشک از خاک ماسه‌ی رس‌دار با خاصیت پلاستیسیته بالا با استفاده از آزمایش ستون تشدید در خمش مورد بررسی قرار گرفته است و اثر دست خوردگی ناشی از بازسازی نمونه مطالعه شده است. اثر تنش محدود کننده بر مدول یانگ و نسبت میرایی نیز بررسی شده است. آزمایش‌های ستون تشدید در خمش برای دو حالت اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان به ازای نسبت‌های ناهمسانی متفاوت انجام شده و بدین ترتیب اثر شرایط اعمال تنش بر روی این نوع خاک خاص در کرنش کوچک مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت مقادیر نسبت میرایی به دست آمده از دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش و نصف عرض توان با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

در این پژوهش آزمایش‌های ستون تشدید در خمش در تنش‌های محدود کننده ۱۵۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال به صورت همسان و ناهمسان و به ازای نسبت‌های ناهمسانی متفاوت بر روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده و بازسازی شده‌ی خشک انجام شده است. در ادامه خاک مورد استفاده، آماده‌سازی و ساخت نمونه‌های آزمایش، دستگاه ستون تشدید مورد استفاده و روند انجام آزمایش ستون تشدید در خمش شرح داده شده است.

۲-۱- خاک مورد مطالعه

خاک مورد استفاده در این پژوهش مطابق با سیستم طبقه‌بندی متحد از نوع ماسه‌ی رس‌دار (SC) با خاصیت پلاستیسیته بالا است که از گمانه‌ی حفاری شده از شهر پردیس تهیه شده است. شهر پردیس واقع در هفده کیلومتری شمال شرق شهر تهران از نظر جذب جمعیت حائز اهمیت است؛



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

Fig. 1. Particle size distribution graph of the tested soil

جدول ۱. مشخصات خاک مورد مطالعه

Table 1. Physical properties of the tested soil

چگالی ویژه (G_s)	رطوبت بهینه (ω_{opt})	وزن مخصوص خشک حداکثر ($\gamma_d max$)	شاخص خمیری (PI)	حد خمیری (PL)	حد روانی (LL)
۲/۵	۲۷٪	۱/۴۹ gr/cm ³	۷۱/۴۸٪	۴۲/۲۷٪	۱۱۳/۷۵٪

فرکانس تشدید نمونه که باعث دامنه‌ی خمشی حداکثر تحریک می‌شود، تعیین شود. شکل ۳ نحوه‌ی اعمال نوسان خمشی در آزمایش ستون تشدید را نشان می‌دهد.

بر مبنای تئوری الاستیسیته، فرکانس تشدید زاویه‌ای (ω_p) یک تیر طره‌ی استوانه‌ای که تحت نوسان خمشی قرار گرفته است به جرم (m)، قطر (d)، طول (L) تیر و همچنین مشخصات جرم‌های متصل به انتهای آزاد آن بستگی دارد. مشابه تیر الاستیک و بر مبنای روش رایلی^۲، فرکانس تشدید زاویه‌ای نمونه‌ی خاک که تحت نوسان خمشی قرار گرفته است به مشخصات نمونه‌ی خاک و جرم‌های متصل به آن به وسیله‌ی رابطه‌ی (۱)

استوک^۱ بوده و امکان انجام آزمایش‌های دینامیکی تشدید در پیچش، تشدید در خمش، نسبت میرایی در پیچش و نسبت میرایی در خمش برای هر دو حالت اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان فراهم می‌باشد. شکل ۲ دستگاه ستون تشدید مورد استفاده در این پژوهش و اجزای آن را نشان می‌دهد.

۲-۵- آزمایش ستون تشدید در خمش

در آزمایش ستون تشدید در خمش، نمونه تحت نوسان خمشی در کرنش‌های کوچک برای محدوده‌ی وسیعی از فرکانس‌ها قرار می‌گیرد تا

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

Table 2. Samples properties used in this study

نسبت تخلخل	ارتفاع (mm)	قطر (mm)	نمونه
۰/۵۱	۱۷۹/۵	۹۵	مغزه‌گیری شده ^۱ (C.B)
۰/۴۹	۱۷۹/۵	۹۰	بازسازی شده خشک ^۲ (R)

¹ Core Barrel (C.B)

² Reconstituted (R)



(ب)



(ج)



(الف)



(د)

شکل ۲. اجزای تشکیل دهنده‌ی دستگاه ستون تشدید مورد استفاده: (الف) محفظه‌ی آزمایش، (ب) سیستم کنترل کننده‌ی تنش محدود کننده، (ج) کامپیوتر کنترل و (د) دستگاه‌های کنترل و ثبت نتایج

Fig. 2. Different parts of the used resonant column device: a) Test cell. b) Confining pressure control system. c) Control computer. d) Data acquisition devices.

جدول ۳. مشخصات آزمایش های انجام شده

Table 3. Experimental program

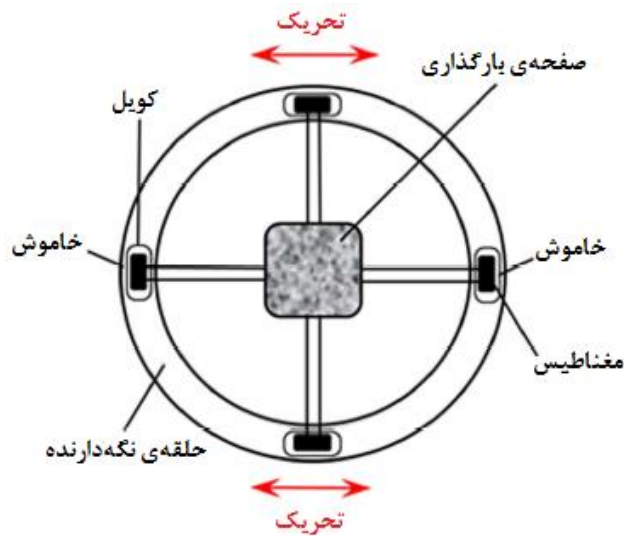
شماره آزمایش	نام آزمایش	σ_3 (KPa)	ω (%)	e	Kc
۱	R ^a -C.B ^b -150-1	۱۵۰	۵	۰/۵۱	۱
۲	R-C.B-300-1	۳۰۰	۵	۰/۵۱	۱
۳	R-C.B-500-1	۵۰۰	۵	۰/۵۱	۱
۴	R-C.B-150-1.43	۱۵۰	۵	۰/۵۱	۱/۴۳
۵	R-C.B-300-1.21	۳۰۰	۵	۰/۵۱	۱/۲۱
۶	R-C.B-500-1.13	۵۰۰	۵	۰/۵۱	۱/۱۳
۷	R-R ^c -150-1	۱۵۰	۵	۰/۴۹	۱
۸	R-R-300-1	۳۰۰	۵	۰/۴۹	۱
۹	R-R-500-1	۵۰۰	۵	۰/۴۹	۱
۱۰	R-R-150-1.43	۱۵۰	۵	۰/۴۹	۱/۴۳
۱۱	R-R-300-1.21	۳۰۰	۵	۰/۴۹	۱/۲۱
۱۲	R-R-500-1.13	۵۰۰	۵	۰/۴۹	۱/۱۳
۱۳	D ^d -C.B-150-1	۱۵۰	۵	۰/۵۱	۱
۱۴	D-C.B-300-1	۳۰۰	۵	۰/۵۱	۱
۱۵	D-C.B-500-1	۵۰۰	۵	۰/۵۱	۱
۱۶	D-C.B-150-1.43	۱۵۰	۵	۰/۵۱	۱/۴۳
۱۷	D-C.B-300-1.21	۳۰۰	۵	۰/۵۱	۱/۲۱
۱۸	D-C.B-500-1.13	۵۰۰	۵	۰/۵۱	۱/۱۳
۱۹	D-R-150-1	۱۵۰	۵	۰/۴۹	۱
۲۰	D-R-300-1	۳۰۰	۵	۰/۴۹	۱
۲۱	D-R-500-1	۵۰۰	۵	۰/۴۹	۱
۲۲	D-R-150-1.43	۱۵۰	۵	۰/۴۹	۱/۴۳
۲۳	D-R-300-1.21	۳۰۰	۵	۰/۴۹	۱/۲۱
۲۴	D-R-500-1.13	۵۰۰	۵	۰/۴۹	۱/۱۳

^a R: Resonant test

^b Core Barrel Sample

^c Reconstituted Sample

^d D: Damping Test



شکل ۳. نحوه‌ی اعمال نوسان خمشی توسط سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی [۳]

Fig. 3. Flexural excitation by electromagnetic drive system

مرتبط می‌شود [۱۱]:

$$f_i = 1 + \frac{3(h1_i + h0_i)}{2 \times L} + \frac{3(h1_i^2 + h0_i h1_i + h0_i^2)}{4 \times L^2} \quad (3)$$

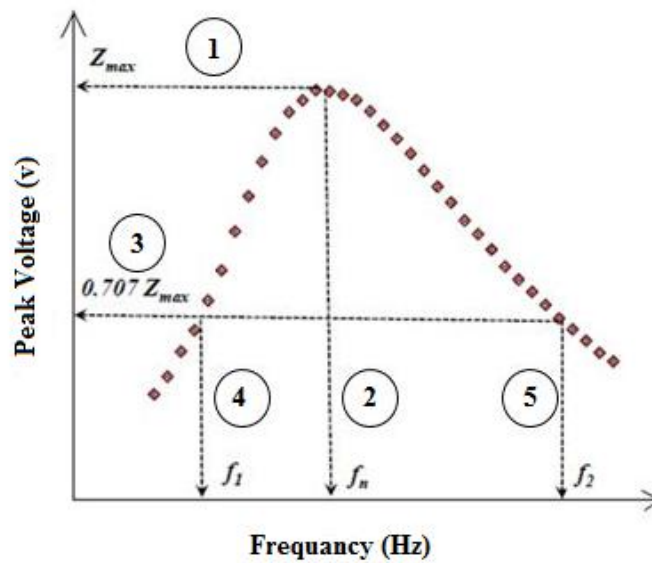
$$\omega_f^2 = \frac{3 \times E \times I_b}{L^3 \times \left[\frac{33}{140} \times m_s + \sum_{i=1}^N (m_i \times f_i) \right]} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۳)، $h1_i$ و $h0_i$ به ترتیب ارتفاع اندازه‌گیری شده از بالای نمونه‌ی خاک از پایین و بالای جرم 1 متصل به بالای نمونه‌ی خاک است. نسبت میرایی نمونه خاک در آزمایش ستون تشدید با استفاده از روش زوال دامنه‌ی ارتعاش^۱ تعیین می‌شود؛ به این صورت که پس از تعیین مقدار فرکانس تشدید، نمونه در این فرکانس بارگذاری شده و سپس بارگذاری خاموش می‌شود تا نمونه تحت ارتعاش آزاد قرار گیرد. در طول ارتعاش آزاد نمونه، منحنی کاهش دامنه بر حسب زمان ثبت شده و در نهایت با استفاده از شیب خط نمودار نیمه لگاریتمی تغییرات دامنه برحسب تعداد سیکل که ضریب کاهش لگاریتمی (δ) نامیده می‌شود، مقدار نسبت میرایی به کمک رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید [۲۷-۲۹].

که در این رابطه ω_f ، فرکانس تشدید زاویه‌ای است که از آزمایش ستون تشدید در خمش به دست می‌آید. همچنین L طول نمونه، m_s جرم نمونه و I_b ممان اینرسی سطحی سطح مقطع نمونه حول محور عمود عبوری از مرکز نمونه است که برای نمونه‌ی با قطر d از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$I_b = \frac{\pi \times d^4}{64} \quad (2)$$

N در رابطه‌ی (۱) تعداد جرم‌های متصل به بالای نمونه بوده و f_i تابع بی‌بعد است که به جرم m_i متصل به بالای نمونه (شامل سنگ متخلخل، کلاهک بالای نمونه و سیستم بارگذاری) مرتبط می‌شود و توسط رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.



شکل ۴. محاسبه ی نسبت میرایی با روش نصف عرض توان [۲۳]

Fig. 4. Half-power bandwidth method for damping ratio calculation

افزایش کرنش خمشی مقدار مدول یانگ همانند مدول برشی کاهش و مقدار نسبت میرایی افزایش می‌یابد که به علت رفتار غیرخطی خاک و عبور تنش از محدوده‌ی الاستیک و وارد شدن به محدوده‌ی الاستوپلاستیک است. نتایج محققین دیگر بر روی انواع دیگر خاک‌ها نیز کاهش سختی (مدول برشی یا مدول یانگ) و افزایش نسبت میرایی را با افزایش سطح کرنش نشان می‌دهد [۱۵ و ۷ و ۶].

افزایش تنش محدود کننده، ذرات خاک را به یکدیگر نزدیک‌تر کرده و در نتیجه منجر به افزایش سختی نمونه می‌شود، لذا انتظار می‌رود که با افزایش سطح تنش محدود کننده مدول یانگ افزایش یابد که همین روند در شکل ۵ برای هر دو نمونه مغزه‌گیری شده و بازسازی شده مشاهده می‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه بارگذاری در آزمایش ستون تشدید توسط سیستم بارگذاری الکترومغناطیسی متصل به کلاهک بالای نمونه به نمونه وارد می‌شود؛ بنابراین با افزایش تنش محدود کننده درگیری بیشتری بین نمونه و کلاهک بالای نمونه صورت گرفته و احتمال لغزش کلاهک بر روی نمونه را کاهش می‌دهد که این خود باعث اندازه‌گیری سرعت موج برشی و در نتیجه سختی در تراز کرنش‌های کوچک‌تری می‌شود. به همین سبب مطابق با شکل ۵ با افزایش سطح تنش محدود کننده، کرنش‌های کوچک‌تری قرائت شده است.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (4)$$

علاوه بر روش زوال دامنه‌ی ارتعاش، مقدار نسبت میرایی را نیز می‌توان با استفاده از روش نصف عرض توان^۱ به کمک منحنی پاسخ فرکانس و با استفاده از رابطه‌ی (۵)، مطابق مراحل نشان داده شده در شکل ۴ تعیین نمود [۲۳ و ۲۹].

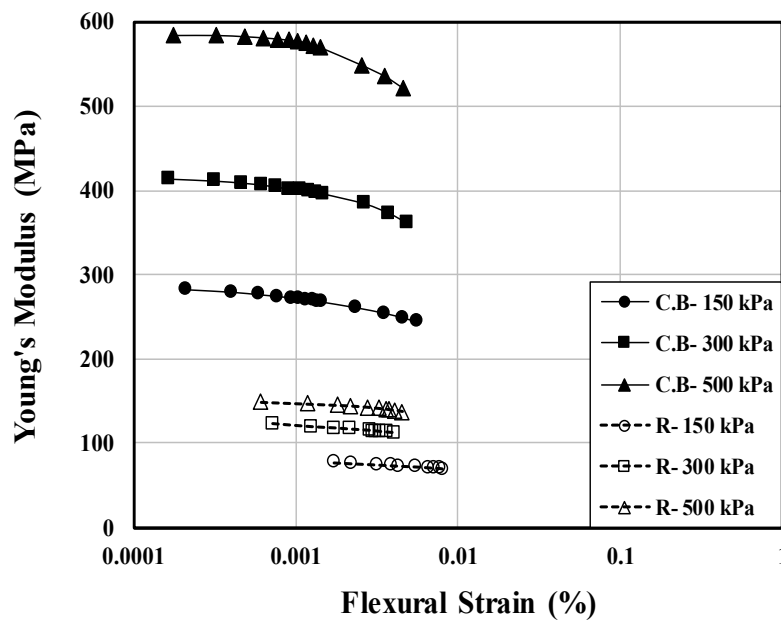
$$D = \frac{1}{2} \left(\frac{f_2 - f_1}{f_n} \right) \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱ اثر دست خوردگی و تنش محدود کننده

اثرات دست‌خوردگی و تنش محدود کننده بر مدول یانگ و نسبت میرایی در تراز تنش‌های محدود کننده‌ی همسان ۱۵۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با

1 Half Power Bandwidth Method (H.P.B)



شکل ۵. اثر دست خوردگی و تنش محدود کننده بر مدول یانگ

Fig. 5. Effects of Reconstitution and confining pressure on Young's Modulus

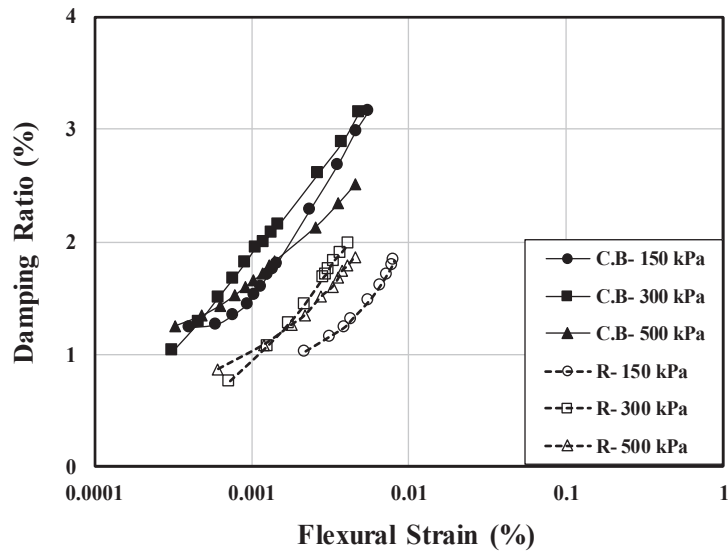
حداقل شدن اتلاف انرژی در نمونه می‌شود در نمودارهای ارائه شده در شکل ۶ خیلی واضح نیست که علت آن را می‌توان سطوح کرنش کوچک و تغییرات جزئی نسبت میرایی در این سطوح کرنش دانست، همان‌طور که در نتایج دیگر محققین نیز چنین روندی مشاهده می‌شود [۱۰].

با توجه به اهمیت نمودارهای بی‌بعد شده سختی (E/E_{max} و G/G_{max}) بر حسب کرنش در تحلیل پاسخ‌های زمین، تغییرات نسبت مدول یانگ (E/E_{max}) بر حسب کرنش خمشی برای نمونه‌های مغزه و بازسازی شده در حالت اعمال تنش محدود کننده به صورت همسان، در شکل ۷ ارائه شده است. بخش ریزدانه‌ی خاک مورد بررسی و پلاستیسیته بالای آن باعث شده است تا نرخ کاهش نسبت مدول یانگ در سطوح کرنش کوچک برای هر دو نمونه ناچیز باشد؛ حال آنکه در سطوح کرنش بزرگ‌تر با شروع رفتار الاستوپلاستیک در خاک، برای هر دو نمونه افزایش نرخ کاهش نسبت مدول یانگ دیده می‌شود.

برای نمونه‌ی مغزه افزایش نسبت مدول یانگ با افزایش تنش محدود کننده مشاهده می‌شود در حالی که برای نمونه‌ی بازسازی شده، تنش محدود کننده ۱۵۰ کیلو پاسکال از این روند پیروی نکرده است. مطابق با شکل ۷، محدوده‌ی الاستیک خطی برای نمونه‌ی مغزه بیشتر

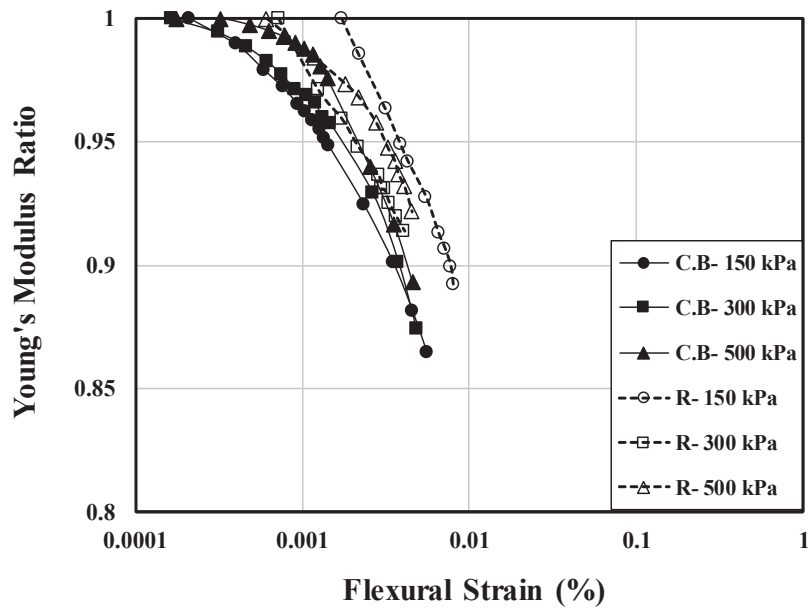
با مقایسه‌ی مدول یانگ برای دو نمونه‌ی مغزه‌گیری شده و بازسازی شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود که مقادیر مدول یانگ در ترازهای مختلف تنش محدود کننده برای نمونه‌ی مغزه بیشتر از نمونه‌ی بازسازی شده است و مدول یانگ برای نمونه‌ی بازسازی شده در مقایسه با نمونه‌ی دست نخورده حدود ۷۰ درصد کاهش یافته است. همچنین کرنش خمشی به ازای مدول یانگ حداکثر برای نمونه‌ی مغزه از نمونه‌ی بازسازی شده کوچک‌تر است.

در شکل ۶ تغییرات ناچیز نسبت میرایی بر حسب کرنش خمشی برای دو نمونه‌ی مغزه و بازسازی شده نشان داده شده است. هر چند که انتظار می‌رود که نسبت میرایی برای نمونه‌ی مغزه از نمونه‌ی بازسازی شده کمتر باشد، اما این روند در شکل ۶ مشاهده نمی‌شود و تقریباً می‌توان تغییرات نسبت میرایی را برای هر دو نمونه مورد بررسی در بازه‌ی ۱ تا ۳ درصد در نظر گرفت؛ بنابراین اثر دست‌خوردگی بر نسبت میرایی در تراز کرنش‌های کوچک را تقریباً می‌توان ناچیز در نظر گرفته و نسبت میرایی در خمش برای هر دو نمونه را تقریباً برابر دانست. نتایج مشابه برای نسبت میرایی در آزمایش ستون تشدید در پیچش بر روی نمونه‌ی دست نخورده و بازسازی شده توسط دیگر محققین نیز ارائه شده است [۱۵]. اثر کاهش نسبت میرایی با افزایش تنش محدود کننده بر اثر به هم فشرده شدن ذرات که منجر به



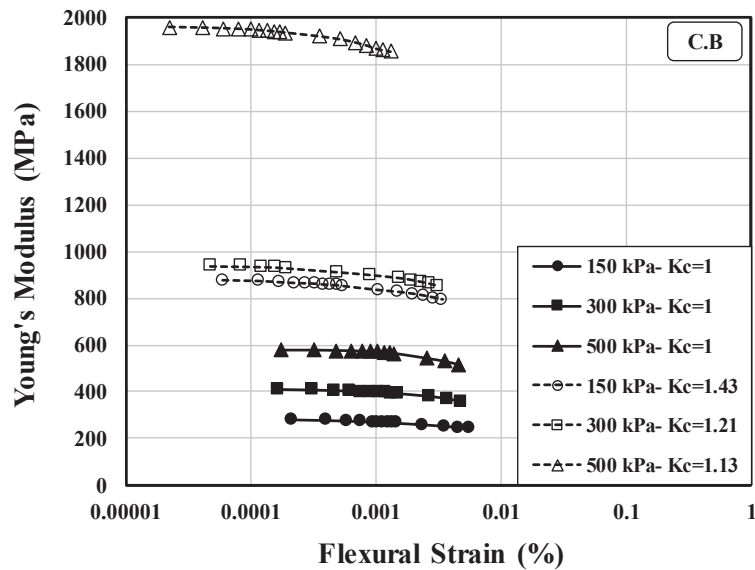
شکل ۶. اثر دست خوردگی و تنش محدود کننده بر نسبت میرایی

Fig. 6. Effects of Reconstitution and confining pressure on damping ratio



شکل ۷. اثر دست خوردگی و تنش محدود کننده بر نسبت مدول یانگ

Fig. 7. Effects of Reconstitution and confining pressure on normalized Young's Modulus



شکل ۸. اثر ناهمسانی تنش بر مدول یانگ نمونه مغزه گیری شده

Fig. 8. . Effect of stress anisotropy on Young's modulus in core barrel sample

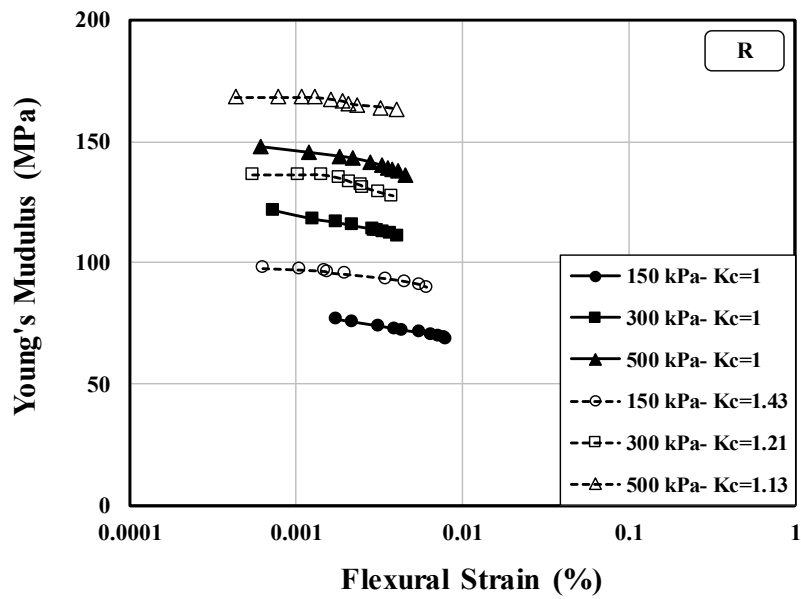
۱۰ درصدی مدول یانگ شده است. افزایش مدول یانگ با افزایش نسبت ناهمسانی را می‌توان بر اثر افزایش تنش میانگین نیز دانست. افزایش ۶۰ درصدی مدول یانگ برای نمونه‌ی مغزه در اثر اعمال ناهمسانی تنش را می‌توان به علت سیمانی شدن نمونه در طول سالیان و یا تحت فشار سربار لایه‌های بالایی خاک در طول سالیان دانست در حالی که در نمونه‌ی بازسازی شده با توجه به اینکه فرصتی برای سیمانی شدن وجود نداشته و بلافاصله پس از بازسازی نمونه و خشک شدن آن تحت آزمایش قرار گرفته است، لذا محتمل است با توجه به نوع خاک مورد مطالعه که ماسه رس‌دار با خاصیت پلاستیسیته بالا بوده است امکان سیمانی شدن نمونه فراهم نشده و سبب شده تا ناهمسانی تنش حداکثر باعث افزایش ۲۰ درصدی مدول یانگ شود.

مطابق با شکل ۱۰ نسبت مدول یانگ در حالت اعمال تنش به صورت همسان از ناهمسان بیشتر بوده و علاوه بر این بازه‌ی کرنش آستانه الاستوپلاستیک در حالت اعمال تنش به صورت همسان از ناهمسان کمتر است؛ در حالی که این تفاوت‌ها برای نمونه بازسازی شده در دو حالت اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان در شکل ۱۱ خیلی واضح نیست. به طور کلی می‌توان گفت که علی‌رغم تفاوت‌های جزئی در شکل ۱۰ برای نمونه مغزه در دو حالت اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان و همچنین با

از نمونه‌ی بازسازی شده است و کرنش آستانه‌ی الاستوپلاستیک برای نمونه‌های بازسازی شده مقدار بیشتری دارد. البته با توجه به اینکه نمونه مغزه در طول سالیان حداقل تحت تنش ناشی از خاک لایه‌های بالاتر از ارتفاع مغزه بوده است خود می‌تواند دلیل باشد تا ذرات خاک نمونه مغزه به یکدیگر نزدیک‌تر شده و هم مدول یانگ بیشتر (مطابق شکل ۵) و هم کرنش آستانه الاستوپلاستیک بالاتری را نسبت به نمونه بازسازی شده ارائه دهند.

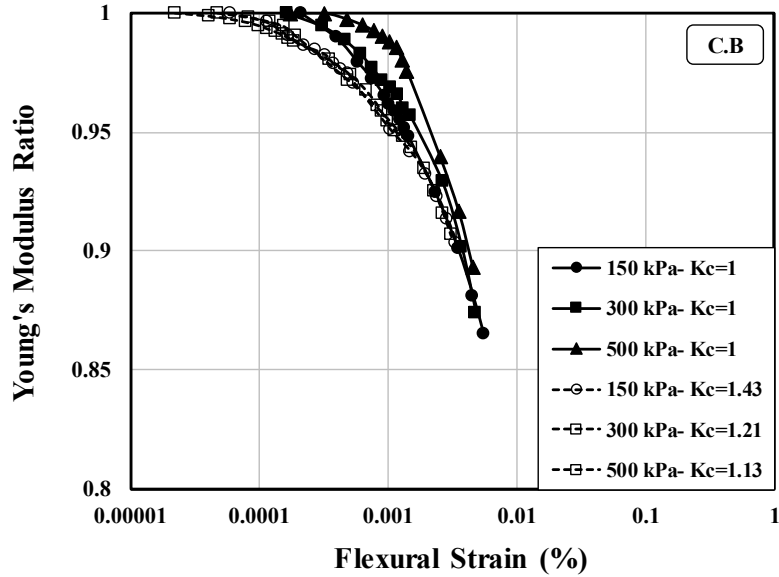
۳-۲- اثر ناهمسانی تنش

اثر ناهمسانی تنش بر مدول یانگ، نسبت مدول یانگ و نسبت میرایی برای دو نمونه‌ی مغزه‌گیری شده و بازسازی شده در شکل‌های ۸ الی ۱۳ ارائه شده است. مطابق با شکل‌های ۸ و ۹ اعمال ناهمسانی تنش در هر دو نمونه باعث افزایش مدول الاستیسیته شده است. در نمونه‌ی مغزه ناهمسانی تنش به طور میانگین ۶۵ درصد مدول یانگ را افزایش داده است. حال آنکه در نمونه‌ی بازسازی شده، ناهمسانی تنش بیشتر باعث افزایش بیشتر مدول یانگ در مقایسه با ناهمسانی تنش کمتر شده است. به عنوان مثال در ناهمسانی تنش ۱/۴۳ برای تنش محدود کننده ۱۵۰ کیلو پاسکال مدول یانگ ۲۰ درصد افزایش یافته حال آنکه در ناهمسانی تنش ۱/۲۱ و ۱/۱۳ برای تنش‌های محدود کننده ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال تنها باعث افزایش



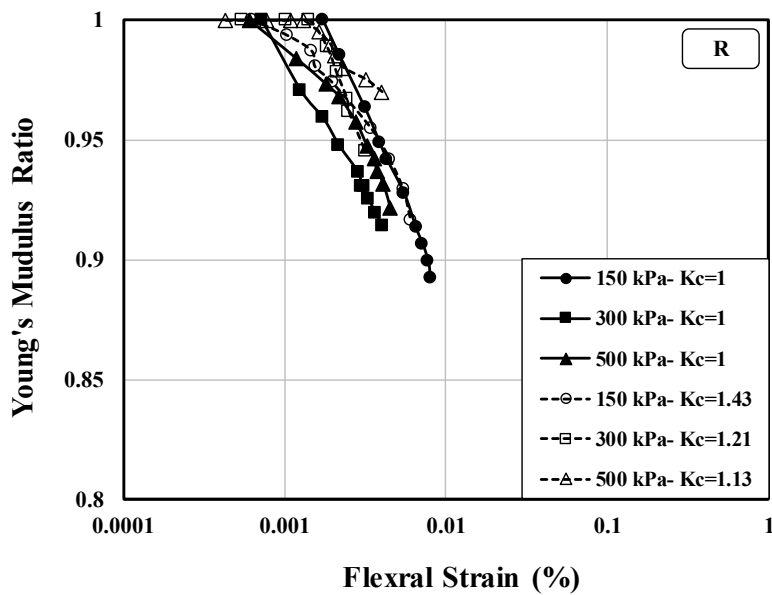
شکل ۹. اثر ناهمسانی تنش بر مدول یانگ نمونه بازسازی شده

Fig. 9. Effect of stress anisotropy on Young's modulus in reconstituted sample



شکل ۱۰. اثر ناهمسانی تنش بر نسبت مدول یانگ نمونه مغزه گیری شده

Fig. 10. Effect of stress anisotropy on normalized Young's modulus in core barrel sample



شکل ۱۱. اثر ناهمسانی تنش بر نسبت مدول یانگ نمونه بازسازی شده

Fig. 11. Effect of stress anisotropy on normalized Young's modulus in reconstituted sample

و نصف عرض توان قابل اندازه‌گیری است. در شکل ۱۴ روش نصف عرض توان برای نمونه مغزه‌گیری شده در تنش محدود کننده ۱۵۰ کیلو پاسکال که به صورت همسان تحکیم یافته است نحوه‌ی محاسبه نسبت میرایی نشان داده شده است.

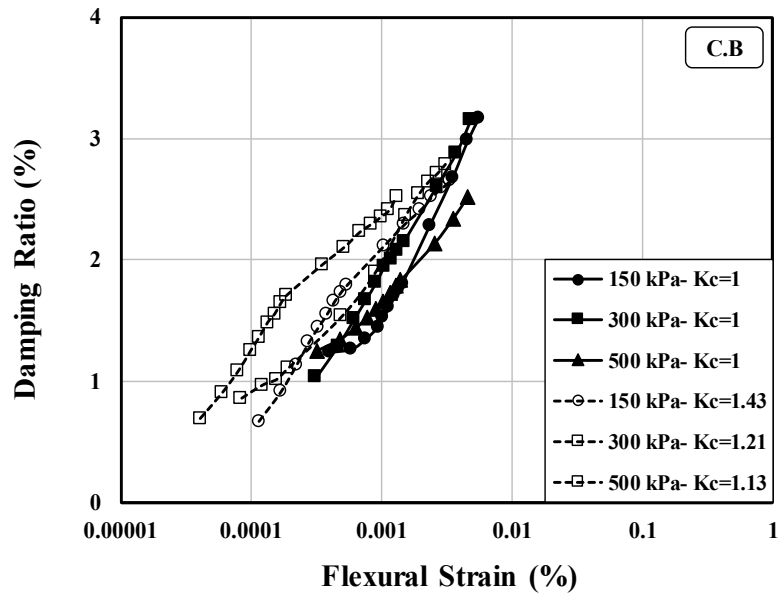
در شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از دو روش تعیین نسبت میرایی برای دو نمونه‌ی مغزه و بازسازی شده در حالت اعمال تنش محدود کننده به صورت همسان و ناهمسان انجام شده است. فارغ از روش اندازه‌گیری نسبت میرایی، در تمام شکل‌ها همان‌گونه که مورد انتظار است با افزایش کرنش خمشی مقدار نسبت میرایی افزایش پیدا کرده است به این معنی که با افزایش سطح کرنش در نمونه میزان اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. افزون بر این با مقایسه‌ی این نمودارها مشاهده می‌شود که مقادیر نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان بیشتر از روش زوال دامنه‌ی ارتعاش است. مشاهده‌ی دقیق‌تر نمودارهای نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان نشان می‌دهد که در کرنش‌های خمشی کوچک مقدار نسبت میرایی تقریباً ثابت بوده و به ازای افزایش کرنش روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. روند بیشتر بودن مقدار نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان از روش زوال دامنه ارتعاش و همچنین ثابت بودن مقدار

توجه به شکل ۱۱ برای نمونه بازسازی شده، نمودارهای نسبت مدول یانگ برای اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان تقریباً بر هم منطبق هستند. این نتیجه برای نسبت مدول برشی بر حسب کرنش برشی در حالت اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان بر روی دو نمونه‌ی دست نخورده و بازسازی شده توسط محققین دیگر نیز مشاهده شده است [۱۵].

با مقایسه نتایج نسبت میرایی برای نمونه مغزه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که مقدار نسبت میرایی در حالت اعمال تنش به صورت ناهمسان تا حدودی بیشتر از حالت همسان است اما مطابق با شکل ۱۳ برای نمونه‌ی بازسازی شده تقریباً مقدار نسبت میرایی برای دو حالت اعمال تنش محدود کننده به صورت همسان و ناهمسان برابر است. این تغییرات در سطوح کرنش کوچک بسیار جزئی بوده و تقریباً تغییرات نسبت میرایی برای دو حالت اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان برای هر دو نمونه را می‌توان بین ۱ تا ۳ درصد در نظر گرفت. نتایج مشابهی بر روی همین مصالح با استفاده از آزمایش ستون تشدید در پیچش نیز مشاهده شده است [۱۵].

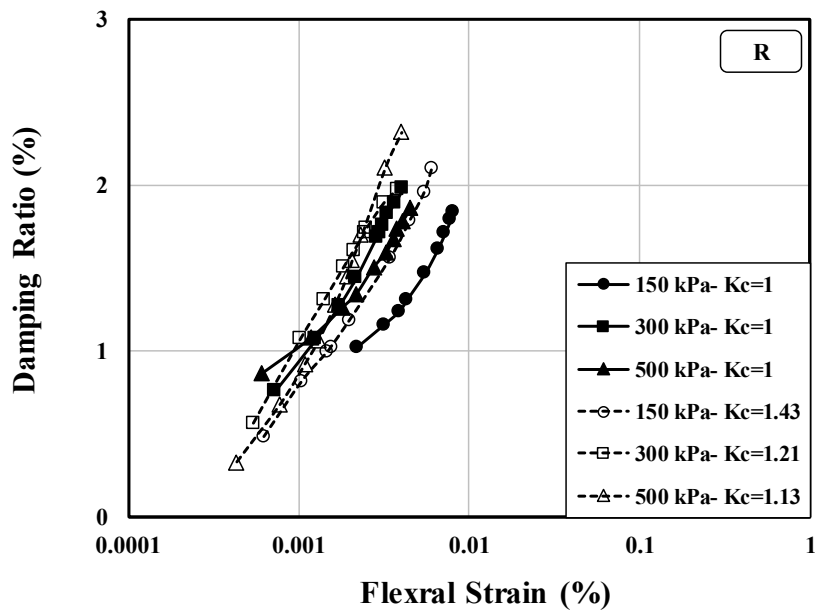
۳-۳- مقایسه‌ی روش‌های تعیین نسبت میرایی

نسبت میرایی در آزمایش ستون تشدید به دو روش زوال دامنه‌ی ارتعاش



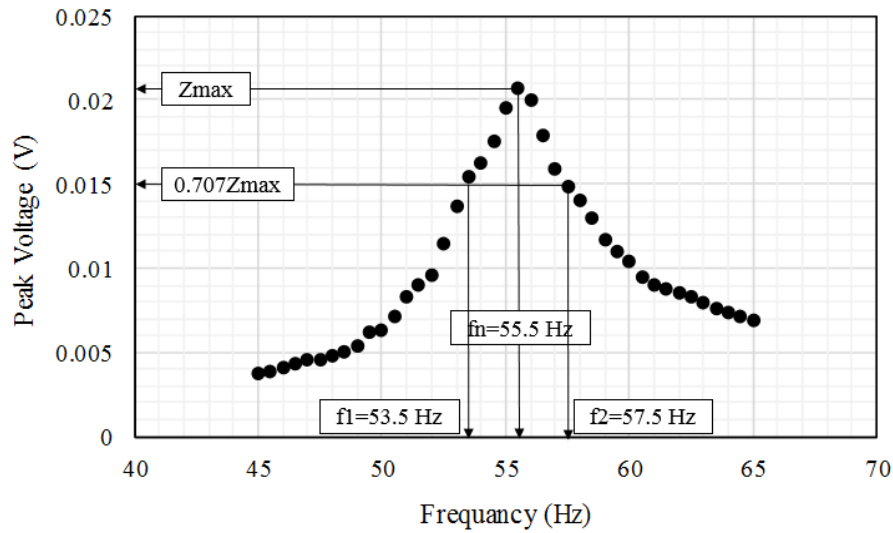
شکل ۱۲. اثر ناهمسانی تنش بر نسبت میرایی نمونه مغزه گیری شده

Fig. 12. Effect of stress anisotropy on damping ratio in core barrel sample



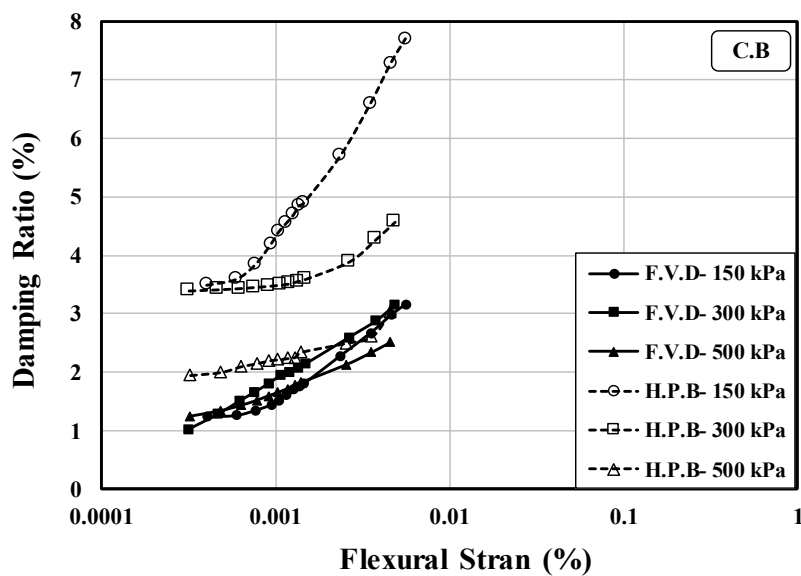
شکل ۱۳. اثر ناهمسانی تنش بر نسبت میرایی نمونه بازسازی شده

Fig. 13. Effect of stress anisotropy on damping ratio in reconstituted sample



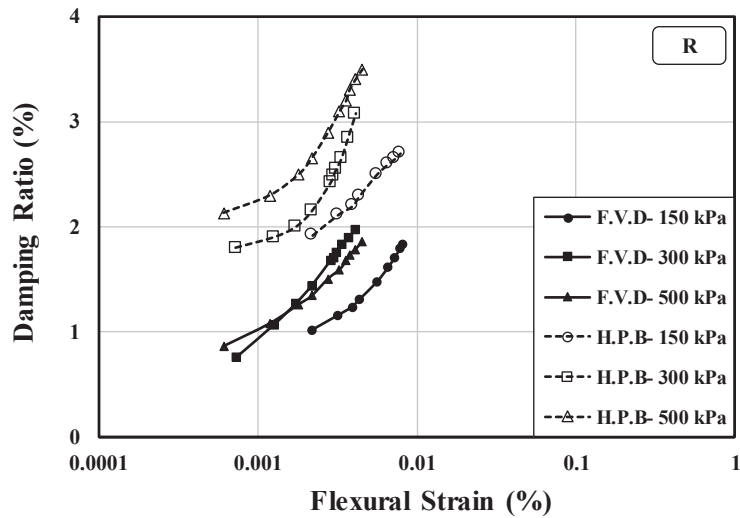
شکل ۱۴. نحوه ی محاسبه نسبت میرایی با استفاده از روش نصف عرض توان برای نمونه مغزه گیری شده در تنش محدود کننده ۱۵۰ کیلو پاسکال به صورت همسان

Fig. 14. Half power bandwidth method for damping ratio calculation of core barrel sample at 150 KPa isotropic confining pressure



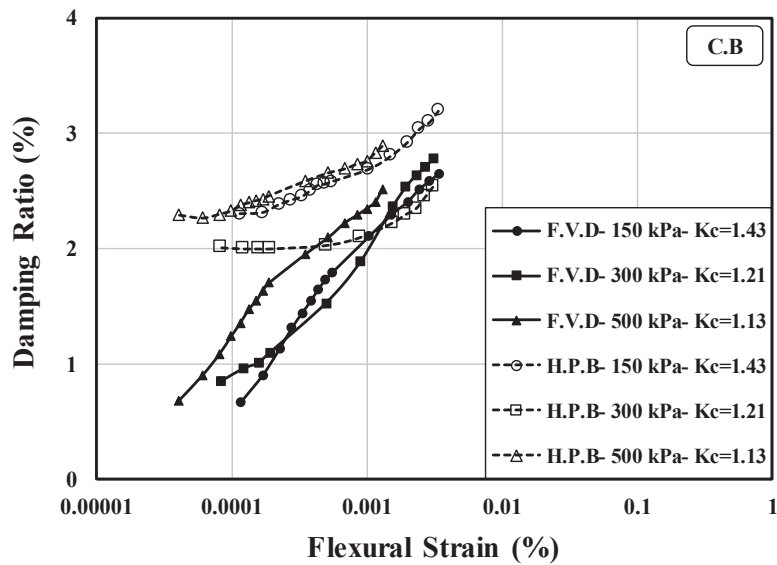
شکل ۱۵. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه ی ارتعاش (F.V.D) و نصف عرض توان (H.P.B) برای نمونه ی مغزه گیری شده

Fig. 15. Comparison of damping ratio calculation by two methods of free vibration decay (FVD) and half power bandwidth (HPB) in Core Barrel sample



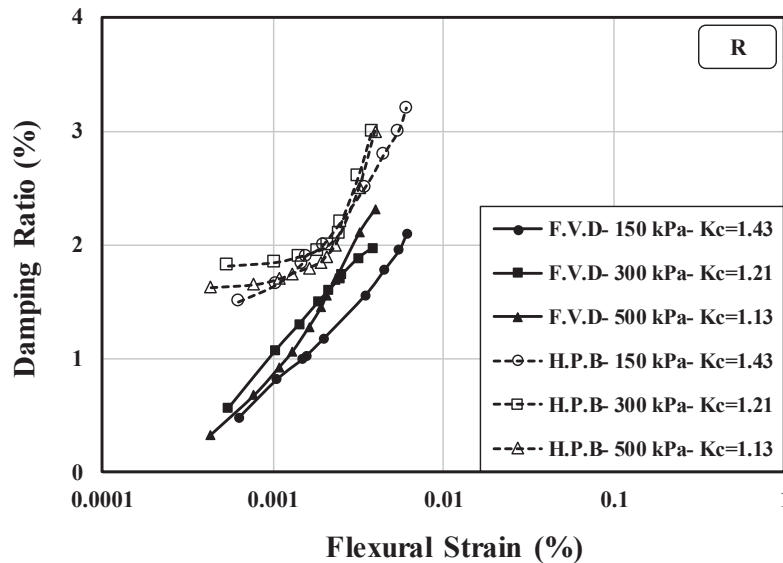
شکل ۱۶. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه ی ارتعاش (F.V.D) و نصف عرض توان (H.P.B) برای نمونه ی بازسازی شده

Fig. 16. Comparison of damping ratio calculation by two methods of free vibration decay (FVD) and half power bandwidth (HPB) in reconstituted sample



شکل ۱۷. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه ی ارتعاش (F.V.D) و نصف عرض توان (H.P.B) برای نمونه ی مغزه گیری شده در حالت ناهمسان

Fig. 17. Comparison of damping ratio calculation by two methods of free vibration decay (FVD) and half power bandwidth (HPB) in Core Barrel sample at anisotropic stress condition



شکل ۱۸. نتایج نسبت میرایی با دو روش زوال دامنه ی ارتعاشی (F.V.D) و نصف عرض توان (H.P.B) برای نمونه ی بازسازی شده در حالت ناهمسان

Fig. 18. Comparison of damping ratio calculation by two methods of free vibration decay (FVD) and half power bandwidth (HPB) in reconstituted sample at anisotropic stress condition

می‌یابند، همچنین مقادیر مدول یانگ نمونه‌ی بازسازی شده حدود ۷۰ درصد از نمونه‌ی مغزه‌گیری شده کمتر است. علاوه بر این افزایش تنش محدود کننده برای هر دو نمونه نه تنها باعث افزایش مدول یانگ شده است بلکه به علت درگیری بیشتر کلاهدک بالای نمونه با نمونه باعث شده تا سطوح کرنش کوچک‌تری را نیز ارائه دهد. با توجه به اهمیت نمودارهای بی‌بعد شده نسبت مدول الاستیسیته، مشاهده می‌شود که این نمودارها برای دو نمونه مغزه و بازسازی شده تا حدودی به خصوص در سطح کرنش الاستوپلاستیک با یکدیگر تفاوت دارند به نحوی که آستانه کرنش الاستوپلاستیک در این نمودار برای نمونه بازسازی شده تا حدودی بیشتر از نمونه مغزه‌گیری شده است که ملاحظات استفاده از نمودارهای بازسازی شده به جای نمودارهای نمونه مغزه‌گیری شده را در تحقیقات را متذکر می‌شود.

افزون بر این نتایج آزمایش‌های نسبت میرایی در خمش برای دو نمونه مغزه‌گیری شده و بازسازی شده، مقادیر نسبت میرایی را برای این دو نمونه تقریباً مشابه یکدیگر ارائه می‌نماید و به طور کلی نسبت میرایی برای خاک مورد مطالعه در بازه‌ی بین ۱ الی ۳ درصد در سطوح کرنش کوچک متغیر است.

اعمال شرایط ناهمسانی تنش باعث افزایش مدول یانگ برای هر دو

نسبت میرایی در سطوح کرنش کوچک در روش نصف عرض توان در نتایج پژوهش‌های دیگر محققین نیز مشاهده شده است [۱۵].

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه خواص دینامیکی خاک‌ها من جمله سختی و میرایی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تحلیل‌های پاسخ زمین به شمار می‌روند، لذا تعیین هر چه بهتر و دقیق‌تر این پارامترها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از سؤال‌های مطرح همواره این بوده است که بازسازی نمونه‌ها در آزمایشگاه برای انجام آزمایش‌های متعدد جهت اعمال مسیر تنش‌های مختلف به نمونه تا چه میزان بر پارامترهای دینامیکی حاصل از نمونه‌های مغزه‌گیری شده که تقریباً معرف شرایط دست نخورده محل می‌باشد تأثیرگذار است؟ در این پژوهش با مطالعه‌ی خواص دینامیکی بر روی نمونه‌های مغزه‌گیری شده و بازسازی شده ماسه‌ی رس‌دار با خاصیت پلاستیسیته بالا اثرات دست خوردگی ناشی از بازسازی نمونه در آزمایشگاه، تنش محدود کننده و ناهمسانی تنش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش کرنش خمشی، مدول یانگ و نسبت میرایی حاصل از آزمایش‌های ستون تشدید در خمش به ترتیب کاهش و افزایش

ممان اینرسی سطحی سطح مقطع نمونه، m^4	I_b
تعداد جرم‌های متصل به بالای نمونه	N
تابع بی‌بعد همراه با جرم m_i متصل به بالای نمونه	f_i
جرم "i" متصل به بالای نمونه، Kg	m_i
ارتفاع اندازه‌گیری شده از بالای نمونه خاک تا پایین جرم i ، m	h_{0i}
ارتفاع اندازه‌گیری شده از بالای نمونه خاک تا بالای جرم i ، m	h_{1i}
نسبت میرایی	D
اولین فرکانس متناظر با خروجی شتاب‌سنج برابر با Z_{max}	f_1
دومین فرکانس متناظر با خروجی شتاب‌سنج برابر با Z_{max}	f_2
فرکانس تشدید، Hz	f_n
حداکثر خروجی شتاب‌سنج، v	Z_{max}
مدول برشی بی‌بعد شده	G/G_{max}
مدول یانگ بی‌بعد شده	E/E_{max}

علائم یونانی

نسبت پواسون	ν
رطوبت بهینه، %	ω_{opt}
وزن مخصوص خشک حداکثر، Kg/m^3	γ_{dmax}
تنش محدود کننده، N/m^2	σ_3
رطوبت، %	ω
فرکانس تشدید زاویه‌ای، rad/s	ω_f
ضریب کاهش لگاریتمی	δ

منابع

- [1] S.L. Kramer, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, USA, 1996.
- [2] M. Payan, K. Senetakis, A. Khoshghalb, N. Khalili, Effect of gradation and particle shape on small-strain Young's modulus and Poisson's ratio of sands, International Journal of Geomechanics, 17(5) (2017) 04016120.
- [3] M. Payan, M. Khoshini, R. Jamshidi Chenari, Elastic Dynamic Young's Modulus and Poisson's Ratio of Sand-Silt Mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, 32(1) (2020) 04019314.
- [4] F. Jafarzadeh, H. Sadeghi, Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 32(1) (2012) 26-41.
- [5] Y. Chuancheng, C. Wenxia, D. Haiyue, Research on

نمونه‌ی مغزه و بازسازی شده، شده است و افزایش میزان ناهمسانی تنش اثر بیشتری را بر افزایش مدول یانگ خواهد داشت در حالی که اثر ناهمسانی تنش بر نسبت میرایی جزئی بوده و تغییرات نسبت میرایی برای هر دو نمونه مشابه حالت اعمال تنش به صورت همسان بین ۱ تا ۳ درصد است. البته شایان توجه است که اعمال شرایط ناهمسانی تنش برای حالت آزمایش ستون تشدید در خمش ممکن است خطاهایی را در ارائه نتایج به همراه داشته باشد و ملاحظات و توجه ویژه‌ای را طلب می‌نماید.

در نهایت نیز با مقایسه روش اندازه‌گیری نسبت میرایی مشاهده شده است که مقادیر نسبت میرایی حاصل از روش نصف عرض توان برای هر دو نمونه‌ی مغزه‌گیری شده و بازسازی شده در هر دو حالت اعمال تنش به صورت همسان و ناهمسان از روش زوال دامنه‌ی ارتعاش بیشتر است.

تشکر و قدردانی

این مقاله با کمک مالی مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، تحت عنوان پروژه‌ای با عنوان «بررسی رفتار دینامیکی خاک ماسه‌ای بازسازی شده با دستگاه ستون تشدید» با شماره ۱۱۰۸۹-۳۹-۹۶ مورخ ۱۳۹۶/۵/۱۰ انجام شده است که بدین وسیله از کلیه‌ی همکاران بخش ژئوتکنیک و زیرساخت این مرکز تشکر می‌گردد.

۵- فهرست علائم

در این مقاله از علائم انگلیسی و یونانی به شرح زیر استفاده شده است:

مدول برشی در کرنش کوچک، N/m^2	G_{max}
مدول الاستیسیته در کرنش کوچک، N/m^2	E_{max}
نسبت میرایی در تحریک پیچشی	D_s
نسبت میرایی در تحریک خمشی	D_l
مدول محدود شوندگی، N/m^2	M_0
چگالی ویژه	G_s
شاخص خمیری، %	PI
حد خمیری، %	PL
حد روانی، %	LL
نسبت تخلخل	e
نسبت ناهمسانی	K_c
جرم تیر، Kg	m
قطر تیر یا نمونه، m	d
طول تیر یا نمونه، m	l
جرم نمونه، Kg	m_s

- Science & Business Media, 2013.
- [17] M. Hatanaka, Y. Suzuki, T. Kawasaki, M. Endo, Cyclic undrained shear properties of high quality undisturbed Tokyo gravel, *Soils and Foundations*, 28(4) (1988) 57-68.
- [18] S. Goto, Y. Suzuki, S. NISHIO, H. OHOKA, Mechanical properties of undisturbed tone-river gravel obtained by in-situ freezing method, *Soils and Foundations*, 32(3) (1992) 15-25.
- [19] B. Song, A. Tsinaris, A. Anastasiadis, K. Pitilakis, W. Chen, Small-strain stiffness and damping of Lanzhou loess, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 95 (2017) 96-105.
- [20] Y. Jafarian, H. Javdanian, A. Haddad, Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions, *Soils and foundations*, 58(1) (2018) 172-184.
- [21] Y. Jafarian, H. Javdanian, A. Haddad, Strain-dependent dynamic properties of Bushehr siliceous-carbonate sand: experimental and comparative study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107 (2018) 339-349.
- [22] Y. Jafarian, H. Javdanian, A. Haddad, Laboratory study on the maximum shear modulus of Bushehr calcareous sand, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(1.2) (2017) 45-52, (in Persian).
- [23] M. Payan, Study of Small Strain Dynamic Properties of Sands and Silty Sands, university of New South Wales Sydney, Australia, 2017.
- [24] K. Senetakis, M. Payan, Small strain damping ratio of sands and silty sands subjected to flexural and torsional resonant column excitation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114 (2018) 448-459.
- [25] K. Senetakis, A. Anastasiadis, K. Pitilakis, A comparison of material damping measurements in resonant column using the steady-state and free-vibration decay methods, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 74 (2015) 10-13.
- [26] ASTM, Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method, in, 2007.
- [27] B. Madhusudhan, K. Senetakis, Evaluating use comparison of the maximum dynamic shear modulus test, *Procedia Engineering*, 28 (2012) 230-234.
- [6] Y. Jafarian, A. Haddad, H. Javdanian, Estimating the shearing modulus of Boushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments, *Modares Civil Engineering journal*, 15(4) (2015) 9-19, (in Persian).
- [7] Y. Jafarian, H. Javdanian, A. Haddad, Comparing dynamic behavior of Hormuz calcareous and Babolsar siliceous sands under identical conditions, (2016), (in Persian).
- [8] H. Patiño, E. Martínez, J. González, A. Soriano, Shear modulus of a saturated granular soil derived from resonant-column tests, *Acta Geotechnica Slovenica*, 14(2) (2017) 33-45.
- [9] D. Park, T. Kishida, Shear modulus reduction and damping ratio curves for earth core materials of dams, *Canadian Geotechnical Journal*, 56(1) (2019) 14-22.
- [10] S.K. Saxena, K.R. Reddy, Dynamic moduli and damping ratios for Monterey No. 0 sand by resonant column tests, *Soils and Foundations*, 29(2) (1989) 37-51.
- [11] G. Cascante, C. Santamarina, N. Yassir, Flexural excitation in a standard torsional-resonant column device, *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3) (1998) 478-490.
- [12] X. Gu, J. Yang, M. Huang, Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element, *Soils and Foundations*, 53(5) (2013) 735-745.
- [13] H. He, K. Senetakis, A study of wave velocities and Poisson ratio of recycled concrete aggregate, *Soils and Foundations*, 56(4) (2016) 593-607.
- [14] M. Payan, K. Senetakis, A. Khoshghalb, N. Khalili, Influence of particle shape on small-strain damping ratio of dry sands, *Géotechnique*, 66(7) (2016) 610-616.
- [15] A. Aghaei Araei, S. Ahmadi, H. Mehrnahad, N. Attarchian, I. Rahmani, A.S. Salamat, H. Hasani, Remolding effect on dynamic behavior of sandy soil samples using resonant column tests, *Sharif Journal of Civil Engineering*, (2020), (in Persian).
- [16] H.Y. Fang, *Foundation engineering handbook*, Springer

1996.
[29] B. Das, G. Ramana, Principles of soil dynamics, 2nd edn. Cengage Learning, 2010.

of resonant column in flexural mode for dynamic characterization of Bangalore sand, Soils and Foundations, 56(3) (2016) 574-580.
[28] K. Ishihara, Soil behaviour in earthquake geotechnics,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Aghaei Araei, S. Ahmadi, H. Mehrnahad, N. Attarchian, *Comparison of Dynamic Behavior of Reconstituted and Core Barrel Sandy Soil Sample by Resonant Column Test in Flexural Mode*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) 521-540.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18979.7016

