

مجله علمی - پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره نوزدهم، شماره ۵، سال ۱۳۹۸

بررسی تأثیر شکل موج بارگذاری بر روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه - پودر لاستیک با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه

هادی بهادری^{۱*}، امین خلیلی^۲

۱- دانشیار دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه ارومیه

* h.bahadori@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۲۵

چکیده

امروزه استفاده از مشتقات تایرهای لاستیکی فرسوده در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی برای جذب و کاهش ارتعاش ناشی از بارهای لرزه‌ای و دینامیکی گسترش یافته و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار دینامیکی آن‌ها در ترکیب با خاک از اهمیت فراوانی برخوردار است. با توجه به اینکه بارهای دینامیکی از منابع متعدد و با شکل موجهای متفاوت ممکن است بر خاک وارد شوند، پس در این مقاله تأثیر شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه-پودر لاستیک از قبیل مدول برشی (G) و ضریب میرایی (D) مورد بررسی قرار گرفته است. یک سری آزمایش میز لرزه ۱g روی مخلوط ماسه - پودر لاستیک انجام گرفت. نمونه‌های خاک در دو حالت غیرمسلح و مسلح به پودر لاستیک با درصدهای وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ پودر لاستیک، و در تراکم نسبی اولیه صفر درصد تحت سه نوع بارگذاری مستطیلی، سینوسی و مثلثی در فرکانس ثابت ۲ هرتز و تحت شتاب ورودی ۰/۱g و ۰/۳g قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در همه حالات، نمونه‌های خاک تحت بارگذاری مستطیلی بیشترین مقدار و تحت بارگذاری مثلثی کمترین مقدار مدول برشی و نسبت میرایی را از خود نشان می‌دهند. پارامترهای دینامیکی نمونه‌ها تحت شکل موج‌های سینوسی و مثلثی نسبتاً نزدیک به هم هستند. تأثیر شکل موج روی ضریب میرایی در سطوح کرنش برشی پایین، ناچیز بوده ولی با افزایش سطوح کرنش، افزایش می‌یابد. ضمن اینکه با افزایش کرنش برشی مدول برشی خاک کاهش یافته ولی نسبت میرایی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش درصد پودر لاستیک از مقدار مدول برشی کاسته شده ولی بر میزان ضریب میرایی افزوده می‌شود.

واژگان کلیدی: ماسه، پودر لاستیک، میز لرزه، شکل موج، مدول برشی، ضریب میرایی.

در منابع علمی مختلف برای این منظور پیشنهاد و در طول سالیان

متمادی گسترش یافته است. هزینه هر کدام از این روش‌ها بسیار متفاوت بوده و شرایطی که تحت آن قابل استفاده هستند به

۱- مقدمه

تسلیح خاک یک تکنیک موثر در افزایش مقاومت و پایداری سازه‌های خاکی و بهبود عملکرد آن‌ها است. روش‌های متعددی

ماهیت، نزدیکی سازه‌ها و تاسیسات احدثی وابسته است. تلاش برای یافتن روش‌های جدید مسلح‌سازی خاک‌ها از یک سو و کاهش هزینه‌های اقتصادی و اجرایی و همچنین کاستن از آثار تخریبی محیط‌زیستی موادزائد از سوی دیگر باعث جلب توجه پژوهشگران به سوی کاربرد مصالح نوین بازیافتی هم‌چون مشتقات تایرهای لاستیکی فرسوده شده است. روش‌های گوناگونی وجود دارد که لاستیک‌های فرسوده را به تکه‌هایی با اندازه و اشکال متفاوت مانند پودر لاستیک و خرده لاستیک تبدیل می‌کنند. این مصالح به دلیل برخورداری از وزن مخصوص پایین، مقاومت و فشردگی بالا کاربردهای زیادی را در پروژه‌های ژئوتکنیکی دارند که از آن جمله می‌توان به مسلح‌سازی خاک‌های نرم بسترهای راهسازی [1-3]، کنترل فرسایش خاک [4]، به عنوان لایه زهکش شیرابه در لندفیل [5] و هم چنین به عنوان مصالح سبک و پرکننده برای خاکریزی پشت دیوارهای حائل [6-9] اشاره کرد. یکی دیگر از خواص مهم مشتقات لاستیک، قابلیت جذب بالای انرژی و میرایی بالای آن‌ها است که به تازگی موجب استفاده گسترده از این مصالح به عنوان سیستم ایزولاسیون ارتعاش در پی‌ها، دیوارهای حائل، لوله‌های مدفون و بستر مسیرهای راه‌آهن در مناطق لرزه‌خیز و مناطقی که بارهای دینامیکی قابل توجهی در آن‌ها وارد می‌شود، شده است. لاستیک‌ها با داشتن خواص میرایی بالا می‌توانند به عنوان جایگزین خاک و یا در ترکیب با خاک برای جذب و کاهش ارتعاش ناشی از بارهای لرزه‌ای و سایر بارهای دینامیکی عمل کنند. پس برای بررسی رفتار دینامیکی مخلوط خاک-لاستیک و عوامل مختلف موثر بر آن تاکنون پژوهش‌های متعددی انجام گرفته است. در این میان با توجه به اینکه خاک‌های ماسه‌ای، بخش عمده‌ای از رسوبات طبیعی را تشکیل داده و سازه‌های بسیاری نیز بر روی این گونه خاک‌های دانه‌ای بسته به شرایط بارگذاری و ویژگی‌های رفتاری خاک محل ساخته می‌شوند، بررسی رفتار مخلوط ماسه -لاستیک بخش عمده‌ای از پژوهش‌های انجام گرفته را به خود اختصاص داده است.

ماشیری و همکاران [10] تعدادی آزمایش بندرالمنت روی نمونه‌های ماسه که با درصد‌های مختلفی از لاستیک مخلوط

شده‌اند انجام دادند. آزمایش‌ها در یک دانسیته نسبی اولیه ثابت ۵۰٪ و تحت فشارهای محصورکننده موثر اولیه متفاوت انجام گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مدول برشی مخلوط‌های مورد آزمایش با افزایش فشار محصورکننده افزایش یافته ولی با افزایش درصد لاستیک کاهش می‌یابد.

سنتاکیس و آناستازادیس [11] یک سری آزمایش ستون تشدید روی نمونه‌های مخلوط ماسه-لاستیک با درصد‌های وزنی ۱۵٪-۰٪ لاستیک در تنش‌های موثر ایزوتروپیک متغیر و حالات مختلف نمونه‌های آزمایش، انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش درصد لاستیک در مخلوط‌های مورد آزمایش، مدول برشی کاهش ولی ضریب میرایی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر حالت نمونه آزمایش (خشک، مرطوب، اشباع کامل) تأثیر ناچیزی روی مدول برشی مخلوط داشته اما ضریب میرایی را به صورت قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. به شکلی که در حالت اشباع مقدار ضریب میرایی بیشتر از حالت مرطوب و در حالت مرطوب بیشتر از حالت خشک است.

احسانی و همکاران [12] به منظور بررسی تأثیر درصد لاستیک و نسبت اندازه دانه‌های لاستیک به دانه‌های خاک ($D_{50,r}/D_{50,s}$) روی پاسخ دینامیکی مخلوط ماسه-لاستیک تعدادی آزمایش ستون تشدید و سه محوری دینامیکی انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش درصد لاستیک به صورت قابل توجهی باعث کاهش مدول برشی و افزایش ضریب میرایی مخلوط می‌شود. هم‌چنین افزایش نسبت $D_{50,r}/D_{50,s}$ باعث افزایش در مدول برشی مخلوط می‌شود در حالی که تأثیر قابل توجهی روی رفتار میرایی مخلوط ندارد.

ماشیری و همکاران [13] در یک مطالعه دیگر به منظور بررسی تأثیر سطح کرنش برشی، تعداد سیکل‌های بارگذاری و فشارمحصورکننده موثر اولیه روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه و خرده‌های لاستیک تعدادی آزمایش سه محوری سیکلی با درصد جرمی ۳۵٪ لاستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که مدول برشی مخلوط با افزایش فشارمحصورکننده افزایش یافته ولی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری و افزایش کرنش برشی کاهش می‌یابد. هم‌چنین ضریب میرایی در فشارمحصورکننده

آزمایش‌ها استفاده شده است. ابعاد میز لرزه ۲ در ۳ متر بوده و بیشینه ظرفیت بارگذاری آن ۵ تن است و قادر به شبیه‌سازی دو نوع بارگذاری هارمونیک و زلزله می‌باشد که هماهنگی لازم بین امواج ورودی و امواج تولید شده وجود دارد. میز لرزه قابلیت کار با حداکثر شتاب $1/5g$ و حداکثر فرکانس ۲۰ هرتز را دارد. همچنین حداکثر تغییر مکانی که به این سیستم می‌تواند وارد شود ۲۴۰ میلی‌متر است. این دستگاه دارای دو موتور محرکه بوده که هر کدام سرعتی معادل ۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه را می‌توانند ایجاد کنند و دستگاه این قابلیت را دارد که به صورت تک یا دو موتوره سرعت را در سیستم شبیه‌سازی کند. مدل‌های خاک درون یک محفظه مدل که روی میز لرزه قرار می‌گیرد ساخته می‌شوند. این محفظه از ورق‌های پلکسی‌گلس با ضخامت ۲ سانتی‌متر و به ابعاد $180 \times 60 \times 80$ سانتی‌متر ساخته شده است. شکل (۱) محفظه مدل را روی میز لرزه نشان می‌دهد.

شکل ۱. محفظه مدل روی میز لرزه



Fig. 1. Model container on the shaking table

۲-۲- ماسه فیروزکوه

از ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ در تمامی آزمایش‌ها استفاده شده است. ماسه فیروزکوه دارای رنگی متمایل به طلایی بوده و از دانه‌بندی یکنواختی برخوردار است که از این لحاظ شبیه به ماسه Toyora است. بعضی از مشخصات فیزیکی این ماسه در جدول (۱) ذکر شده است [14].

۲-۳- پودر لاستیک

پودر لاستیک از خرد نمودن لاستیک‌های فرسوده ماشین آلات سبک و سنگین توسط خردکن‌های صنعتی و سرند نمودن آن

پایین به صورت قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات کرنش برشی قرار نمی‌گیرد اما در فشار محصور کننده بالا، با افزایش کرنش برشی و افزایش تعداد سیکل‌ها، افزایش می‌یابد.

اگرچه مطابق موارد بالا، پژوهش‌های متعددی در رابطه با تأثیر پارامترهای مختلف روی رفتار دینامیکی مخلوط ماسه-لاستیک انجام گرفته است، اما بارهای دینامیکی که از منابع متعددی مانند زلزله، ترافیک، ساختمان‌های بلند، ماشین‌آلات، امواج، ریل‌های راه‌آهن با سرعت بالا و مخازن نفت بر خاک وارد می‌شوند، هر کدام دارای شکل موج متفاوتی بوده و به هیچ عنوان شکل ثابت و یکسانی تولید نمی‌کنند. حتی در بیشتر موارد شکل موج تولید شده ترکیبی از شکل‌های متفاوت است. شکل موج‌های مختلف ممکن است آثار متفاوتی را روی پارامترهای دینامیکی خاک‌ها داشته باشند، به شکلی که نمی‌توان نتایج به دست آمده از یک شکل موج را به سایر شکل‌ها تعمیم داد. در این حالت، برای اطمینان از عملکرد مناسب ترکیب ماسه و پودر لاستیک در مناطق لرزه‌خیز و مناطقی که تحت اثر بارهای قابل توجه دینامیکی است، بررسی تأثیر شکل موج بر پارامترهای دینامیکی آن‌ها ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه تاکنون پژوهش مستقلی در ارتباط با تأثیر شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی مخلوط خاک-لاستیک صورت نگرفته است، پس در این مقاله با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه $1g$ تأثیر شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای مسلح به پودر لاستیک بررسی شده است. از پاسخ بدست آمده از مدل‌های مخلوط ماسه-پودر لاستیک در طول بارگذاری با شکل موج‌های مختلف برای تولید حلقه‌های هیستریزس نمونه‌های آزمایش شده در دامنه‌های مختلف کرنش استفاده شده و سپس حلقه‌های هیستریزس تولید شده برای تعیین ضریب میرایی و مدول برشی در سطوح مختلف کرنش، استفاده می‌شود. و در نهایت تأثیر شکل موج بارگذاری روی تغییرات هر کدام از پارامترهای بالا بررسی می‌شود.

۲- وسایل و تجهیزات آزمایش

۲-۱- میز لرزه

از یک میز لرزه هیدرولیکی دارای یک درجه آزادی که در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه طراحی و ساخته شده برای انجام

سانتی متر استفاده می شود [15]. نمونه های خاک در دو حالت غیرمسلح (ماسه خالی) و مسلح به پودر لاستیک با درصدهای وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ پودر لاستیک، و در تراکم نسبی اولیه صفر درصد ساخته شده اند. برای ساخت نمونه در هر یک از دو حالت مسلح و غیرمسلح از روش مرطوب برای آماده سازی استفاده شده است. در این روش ابتدا مصالح با ۵٪ رطوبت مخلوط شده و به صورت یکنواخت و از یک ارتفاع ثابت بر روی سطح محفظه ریخته می شوند تا پروفیل یکنواختی به دست آید. نمونه های خاک در چهار ارتفاع یکسان ۱۵۰ میلی متری تا رسیدن به ارتفاع کل ۶۰۰ میلی متر ساخته می شوند. پس از اتمام هر لایه، با استفاده از چکش های پلاستیکی مخصوص ضربات آرام به قسمت های مختلف لایه زده می شود تا هوای موجود بین دانه ها تخلیه گردد. به منظور اطمینان از پیوند مناسب بین دانه ها، سطح هر لایه باید خراشیده شود. در حین فرایند ساخت لایه ها، شتاب سنج های A1، A2 و A3 در اعماق ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی متری از کف محفظه درون خاک قرار داده می شوند. هم چنین یک شتاب سنج A0 نیز به منظور اندازه گیری شتاب پایه به صورت ثابت به میز لرزه متصل می شود. کار در اطراف شتاب سنج های قرار داده شده درون خاک برای جلوگیری از صدمه دیدن و جابه جایی آنها باید با دقت بیشتری صورت گیرد. یک جابه جایی سنج (L1) روی سطح خاک در ارتفاع ۶۰۰ میلی متری از کف محفظه قرار داده می شود تا جابه جایی های قائم سطح خاک را اندازه گیری کند. پاسخ خاک به صورت شتاب در اعماق مختلف و به صورت جابه جایی در سطح خاک ثبت می شود. شکل شماتیک نمونه های آزمایش همراه با ابزاربندی در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به اینکه محفظه صلب مدل می تواند پاسخ دینامیکی مدل های آزمایش را تحت تأثیر قرار دهد [16] پس به منظور کاهش آثار منفی آن، داده های شتاب در محدوده ۰/۰۵ تا ۲۰ هرتر فیلتر می شوند.

در این مطالعه ۳۰ آزمایش میز لرزه به منظور بررسی تأثیر شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه-پودر لاستیک انجام گرفته است. پارامترهای متغیر در آزمایش های مختلف در جدول (۳) ذکر شده است. نمونه های آزمایش تحت سه نوع بارگذاری مستطیلی، سینوسی و مثلثی (شکل ۴) در فرکانس ۲ هرتز و شتاب های ورودی ۰/۱g و ۰/۳g قرار گرفته اند.

حاصل می شود. لاستیک فرسوده شامل سیم فلزی، نخ تایلر و سایر ناخالصی ها است که در جریان سرنده نمودن برخی از ناخالصی ها از آن جدا می شود. پودر لاستیک مورد استفاده در آزمایش ها فاقد سیم فلزی، نخ تایلر و سایر ناخالصی ها است. منحنی دانه بندی پودر لاستیک و ماسه فیروزکوه در شکل (۲) و برخی از مشخصات فیزیکی پودر لاستیک در جدول (۲) ذکر شده است.

شکل ۲. منحنی دانه بندی ماسه فیروزکوه و پودر لاستیک

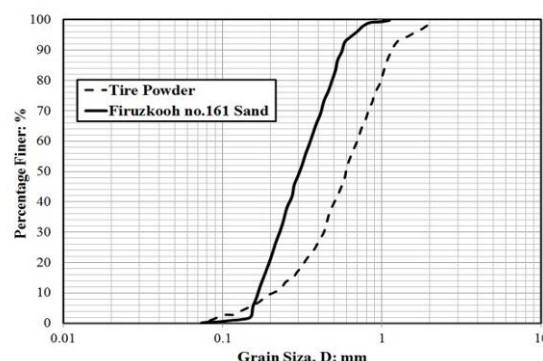


Fig. 2. The particle size distribution for Firoozkuh sand and tire powder

۴-۲- ابزار بندی

در این مطالعه از سنسورهای شتاب سنج برای اندازه گیری شتاب ورودی به مدل و همچنین ثبت تغییرات شتاب در اعماق مختلفی از خاک استفاده شده است. برای جلوگیری از کج شدن سنسورها در حین ساخت و آزمایش و هم چنین برقراری تماس پایدارتر با توده خاک، پایه هایی متشکل از دو صفحه با ابعاد ۵×۵ و ۲×۵ سانتی متر ساخته شده و به کف سنسورها به صورت محکم چسبانده می شود. هم چنین از سنسور جابه جایی سنج (LVDT)، برای اندازه گیری تغییر مکان های خطی استفاده می شود. برای ثبت اطلاعات، همه سنسورها به دستگاه دیتالاگر دینامیکی ۱۶ کاناله ART-DL16D متصل می شوند. این دستگاه قادر است تغییر ولتاژهای ایجاد شده توسط سنسورهای گفته شده را لحظه به لحظه در طول آزمایش ثبت کند.

۳- ساخت نمونه و روش انجام آزمایش

ابتدا برای جلوگیری از انعکاس امواج تولید شده در اثر لرزش و تحت تأثیر قرار دادن نمونه، ناشی از صلب بودن دیواره های انتهایی محفظه مدل میز لرزه از یک لایه فوم به ضخامت ۲

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه [14]

Material	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	G _s	F _c (%)	C _u	C _c	e _{max}	e _{min}
Firoozkuh No.161	0.16	0.21	0.3	2.65	1	1.87	0.88	0.874	0.548

Table1. Physical properties of Firoozkuh Sand

جدول ۲. مشخصات پودر لاستیک

Material	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	G _s (%)	C _u	C _c
Tire Powder	0.21	0.41	0.59	0.7	0.86	3.33	1.143

Table2. Physical properties of Tire Powder

جدول ۳. پارامترهای متغیر در آزمایش‌های میز لرزه

Soil / Tire Powder	Waveform	Acceleration of loading (g)	Number of cycles	Total no.
Sand/ 0%	Rectangle – Sinusoidal - Triangle	0.1, 0.3	20	6
Sand/ 5%	Rectangle – Sinusoidal - Triangle	0.1, 0.3	20	6
Sand/ 10%	Rectangle – Sinusoidal - Triangle	0.1, 0.3	20	6
Sand/ 15%	Rectangle – Sinusoidal - Triangle	0.1, 0.3	20	6
Sand/ 20%	Rectangle – Sinusoidal - Triangle	0.1, 0.3	20	6

Table 3. Variable parameters in shaking table tests

شکل ۳. شکل شماتیک نمونه‌های آزمایش همراه با ابزاربندی

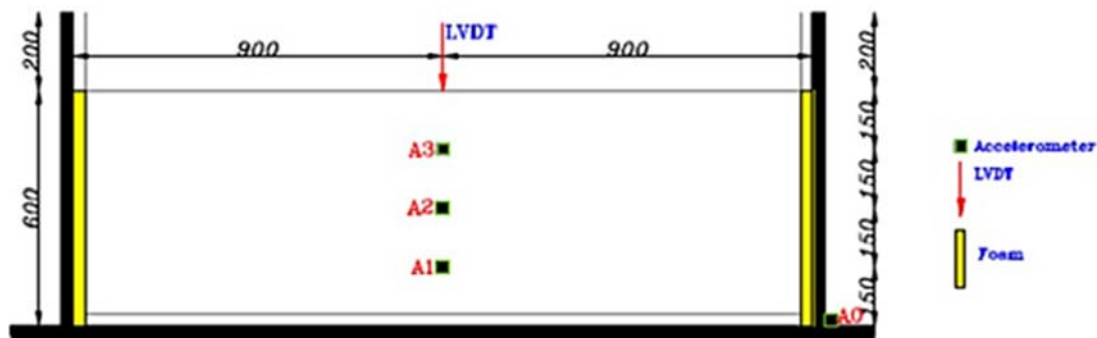


Fig. 3. Schematic form of test samples with instrumentation

شکل ۴. نمونه‌ای از شکل موج‌های اعمال شده در فرکانس ۲ هرتز و شتاب ورودی ۰/۳ g برای دوره زمانی ۱ پریرود: شکل موج مستطیلی، (b) سینوسی و (c) مثلثی

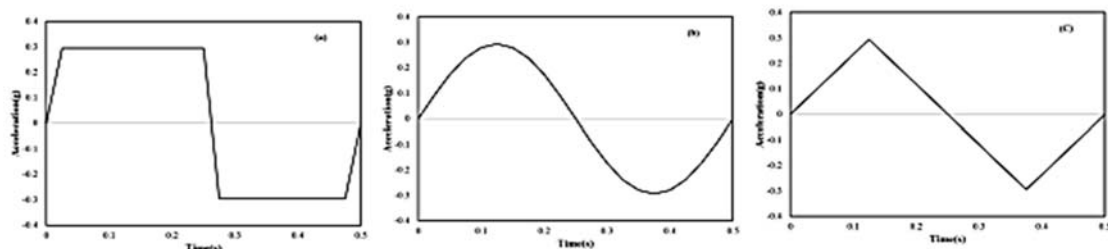


Fig. 4. Typical waveforms at loading frequency of 2 Hz and acceleration of 0.3g (for the time of 1 period): (a) Rectangular (b) Sinusoidal (c) Triangular waveform

۴- رابطه تنش- کرنش هیستریزیس و پارامترهای دینامیکی خاک

هدف اصلی از این مطالعه، به دست آوردن حلقه‌های هیستریزیس برای نمونه‌های آزمایش، با استفاده از داده‌های ثبت شده توسط شتاب‌سنج‌های قرار داده شده درون نمونه در آزمایش‌های میز لرزه و سپس استفاده از آن‌ها برای تعیین تغییرات مدول برشی و ضریب میرایی در برابر کرنش‌برشی در تعداد سیکل ثابت است. برای مقایسه، تعداد سیکل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است (جدول ۳). مطالعات مشابهی پیشتر با استفاده از مفاهیم فوق توسط پژوهشگران مختلف برای تعیین پارامترهای دینامیکی خاک‌ها انجام گرفته است [17-21]. در یک مطالعه که توسط صابرمهانی و همکاران [22] انجام گرفته، برای تعیین پارامترهای دینامیکی از داده‌های ثبت شده توسط شتاب‌سنج و LVDT به همراه معادله تیربرشی یک‌بعدی ارائه شده توسط زگال و همکاران [23] استفاده شده است. همچنین الگامال و همکاران [24] و برنان و همکاران [25] نیز از معادله تیربرشی یک‌بعدی برای تعیین پارامترهای دینامیکی در آزمایشات دینامیکی سانتریفیوژ مقیاس کوچک استفاده کردند. علاوه بر آن در مطالعه اخیر، بهادری و فرض‌علیزاده [26] از مفاهیم فوق برای بررسی تأثیر پودر و تکه‌های لاستیک روی پارامترهای دینامیکی ماسه‌های اشباع استفاده کردند. معادله تیربرشی یک‌بعدی که نخستین بار توسط زگال و همکاران [23] ارائه شده است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \ddot{u} \quad (1)$$

که در آن، $\ddot{u}$ شتاب در عمق z و ρ دانسیته خاک می‌باشد. از معادله تیربرشی، تنش برشی τ در عمق دلخواه z با انتگرال‌گیری از حاصل ضرب دانسیته $\rho(z)$ در شتاب $\ddot{u}(z)$ در بازه $(0, z)$ به صورت رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau(z) = \int_0^z \rho(z) \ddot{u}(z) dz \quad (2)$$

به‌طور معمول مقدار تنش برشی از اندازه‌گیری‌های میدانی که با استفاده از شتاب‌سنج‌هایی که تا سطح زمین ادامه می‌یابد به دست می‌آید. اما به‌ندرت می‌توان تاریخچه شتاب سطحی قابل

اطمینانی را از آزمایش‌های مدل (میزلرزه یا سانتریفیوژ) بدست آورد. دلیل آن این است که سنسورهای شتاب‌سنج برای ثبت صحیح داده‌های زلزله باید در عمق مناسبی قرار گیرند تا تماس کافی با جسم خاک داشته باشند. بنابراین برای حل مشکل فوق پیشنهاد شده است که تاریخچه زمانی شتاب سطح زمین با برون‌یابی خطی داده‌های شتاب جفت سنسورهای مدفون در عمق با استفاده از رابطه زیر به دست آید:

$$\ddot{u}(z) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1} (z - z_1) \quad (3)$$

با جای‌گذاری $z = 0$ در رابطه فوق شتاب در سطح زمین برابر خواهد بود با:

$$\ddot{u}(0) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1} (0 - z_1) \quad (4)$$

بنابراین، تنش‌برشی در عمق z از حل انتگرال رابطه (۲) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\tau(z) = \frac{1}{2} \rho z (\ddot{u}(0) + \ddot{u}(z)) \quad (5)$$

در ادامه، برای محاسبه کرنش‌برشی در ابتدا باید جابه‌جایی‌ها را از داده‌های شتاب ثبت شده توسط سنسورهای شتاب‌سنج به دست آورد. داده‌های شتاب به‌کار برده شده برای محاسبات جابه‌جایی از چند دهم ثانیه قبل از اعمال بارگذاری دینامیکی تا مقدار زمان مشخصی بعد از بارگذاری ادامه می‌یابد. با این عمل آن قسمت از داده‌ها که مربوط به نویز دستگاه‌های اندازه‌گیری شتاب است شناسایی شده و در مرحله فیلترینگ داده‌ها حذف می‌شود. برای محاسبه سرعت از داده‌های شتاب انتگرال‌گیری می‌شود ولی قبل از انجام این پروسه، داده‌های شتاب در فرکانس‌های بالا برای حذف نویز و در فرکانس‌های پایین برای کاستن از خطای جابه‌جایی محور انتگرال‌گیری فیلتر می‌شوند (۲۰-۰/۰۵ هرتز). بعد از محاسبه سرعت، داده‌های به دست آمده دوباره در محدوده فرکانسی ذکر شده فیلتر می‌شوند. سپس جابه‌جایی با انتگرال‌گیری از این داده‌ها حاصل می‌شود. از رابطه زیر برای محاسبه کرنش برشی استفاده می‌شود:

$$\gamma = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \quad (6)$$

نمونه‌ای از حلقه‌های هیستریزیس رسم شده برای سه نوع شکل موج بارگذاری تحت فرکانس ۲ هرتز و شتاب ورودی $0.3g$ در ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متری از کف محفظه مدل را نشان می‌دهد (برای چرخش حلقه‌ها به صورت ساعت گرد است).

در این مطالعه مقادیر تنش برشی و کرنش برشی در ارتفاع‌های ۲۲۵ میلی‌متری (نقطه میانی شتاب‌سنج‌های A_1 و A_2) و ۳۷۵ میلی‌متری (نقطه میانی شتاب‌سنج‌های A_2 و A_3) از کف محفظه مدل محاسبه و حلقه‌های هیستریزیس ترسیم شدند. شکل (۵)،

شکل ۵. نمونه‌ای از رفتار تنش-کرنش نمونه‌های خاک در ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متری، فرکانس ۲ هرتز و شتاب ورودی $0.3g$ تحت بارگذاری: (a) مستطیلی، (b) سینوسی و (c) مثلثی (برای ده سیکل اول بارگذاری)

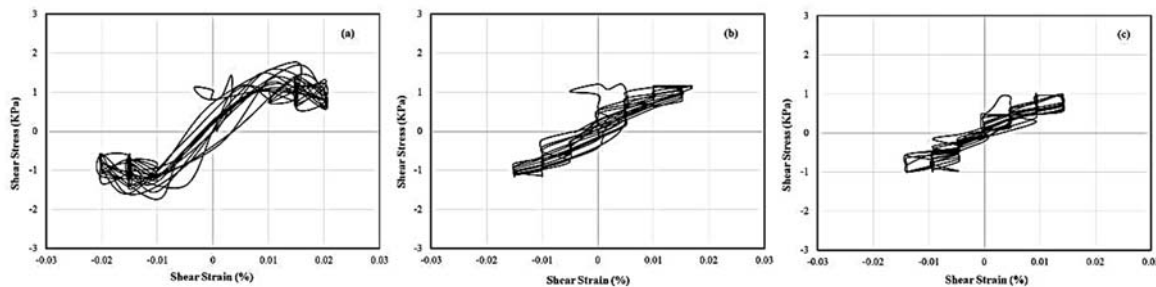


Fig. 5. Typical shear stress-strain behavior of soil samples at elevation 225mm at loading frequency of 2 Hz and input acceleration of $0.3g$ under (a) rectangular (b) sinusoidal (c) triangular waveform (for the first 10 cycles)

لاستیک افزایش یافته و در نتیجه مخلوط از رفتار شبیه ماسه به رفتار شبیه لاستیک تغییر حالت پیدا می‌کند که در نتیجه آن مقاومت و سختی مخلوط و مدول برشی کاهش پیدا می‌کند. هم چنین افزایش درصد پودر لاستیک باعث افزایش دامنه کرنش برشی مخلوط‌های ماسه و پودر لاستیک شده و با افزایش کرنش برشی، مدول برشی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش در مقادیر مدول برشی به ویژه مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) بین مخلوط‌های مختلف، بین مخلوط با درصد پودر لاستیک ۱۰٪ به ۱۵٪ اتفاق می‌افتد. به شکلی که به عنوان نمونه تحت شتاب $0.3g$ ، میزان کاهش G_{max} در نمونه‌های با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر لاستیک نسبت به یکدیگر در شکل موج مستطیلی در حدود ۵، ۹/۵ و ۷ درصد است. هم چنین تحت شتاب $0.1g$ و شکل موج سینوسی تغییرات فوق به ترتیب در حدود ۳/۵، ۸ و ۶ درصد است که روند مشابه در بقیه حالات بارگذاری نیز دیده می‌شود. از طرف دیگر، مطابق شکل‌های (۶-۹)، نمونه‌های مخلوط ماسه-پودر لاستیک در همه حالات (درصد‌های وزنی مختلف پودر لاستیک و شتاب‌های بارگذاری)، تحت شکل موج مستطیلی بیشترین و تحت شکل موج مثلثی کمترین مدول برشی را از خود نشان می‌دهند. مقادیر مدول برشی تحت شکل موج سینوسی نیز نزدیک به مقادیر مدول برشی تحت شکل موج مثلثی بوده و مقداری از آن بیشتر است. میزان تفاوت بین مقادیر مدول برشی

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مدول برشی

مدول برشی به صورت نسبت دامنه تنش برشی به دامنه کرنش برشی تعریف می‌شود که می‌توان آن را از طریق یک حلقه هیستریزیس به دست آورد. مدول برشی برای یک حلقه دلخواه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (7)$$

با توجه به اینکه منحنی‌های $G-\gamma$ و $D-\gamma$ از پارامترهای ورودی مهم در آنالیزهای دینامیکی است، بنابراین پس از محاسبه مدول برشی، تغییرات مدول برشی در برابر کرنش برشی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۶-۹ رابطه بین مدول برشی و کرنش برشی را در حالات مختلف نشان می‌دهند. بر اساس نتایج بدست آمده، در همه حالات بارگذاری (شکل موج‌ها و شتاب‌های مختلف)، با افزایش درصد پودر لاستیک، از میزان مدول برشی کاسته می‌شود به نحوی که نمونه مخلوط ماسه با ۲۰ درصد پودر لاستیک دارای کمترین مدول برشی بین مخلوط‌ها با درصد‌های مختلف پودر لاستیک است. دلیل این امر جایگزینی ذرات سخت ماسه با ذرات نرم پودر لاستیک است. هم چنین با افزایش درصد لاستیک، میزان تماس و برخورد ذرات لاستیک با

تحت شتاب ورودی $0.1g$ بیشتر از مقادیر مدول برشی تحت شتاب ورودی $0.3g$ می باشد. همچنین با توجه به شکل (۹)، با افزایش شتاب ورودی تفاوت بین مقادیر G_{max} بین شکل موج های مختلف افزایش می یابد. به شکلی که مثلاً در شتاب $0.1g$ و پودر لاستیک 10% ، این تفاوت بین شکل موج های مستطیلی و سینوسی $8/5\%$ و بین شکل موج های سینوسی و مثلثی 5% است در حالی که تحت شتاب $0.3g$ ، مقادیر فوق به ترتیب $12/5$ و $7/5\%$ است. پس با افزایش شتاب ورودی فاصله بین مقادیر مدول برشی در شکل موج های مستطیلی، سینوسی و مثلثی افزایش می یابد. قابل ذکر است که در یک شکل موج ثابت، افزایش شتاب ورودی تأثیر چندانی بر روی میزان تغییرات مدول برشی بین نمونه های مخلوط ماسه با درصد های مختلف پودر لاستیک نداشته پس در هر دو شتاب ورودی نسبت تغییرات فوق نسبتاً مشابه است.

تحت شکل موج های مستطیلی و سینوسی نسبت به تفاوت بین شکل موج های سینوسی و مثلثی بیشتر است. به عنوان نمونه، تحت شتاب $0.1g$ در نمونه مخلوط ماسه با 5% پودر لاستیک، تفاوت مقادیر G_{max} بین شکل موج های مستطیلی و سینوسی در حدود 9% درصد بوده در حالی که این مقدار بین شکل موج های سینوسی و مثلثی 7% است. همچنین تحت شتاب $0.3g$ در نمونه مخلوط ماسه با 15% پودر لاستیک، تغییرات G_{max} بین شکل موج های مستطیلی و سینوسی در حدود $12/5\%$ و بین شکل موج های سینوسی و مثلثی 8% است. مشابه روند فوق در مابقی آزمایش ها نیز مشاهده می شود. در مورد تأثیر شتاب ورودی روی مدول برشی نیز می توان گفت با افزایش شتاب ورودی، کرنش برشی افزایش یافته و در نتیجه از میزان مدول برشی در همه حالات کاسته می شود (مقادیر مدول برشی در نمونه ها با درصد های مختلف پودر لاستیک تحت شکل موج های مختلف،

شکل ۶. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی تحت شکل موج مستطیلی و شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$

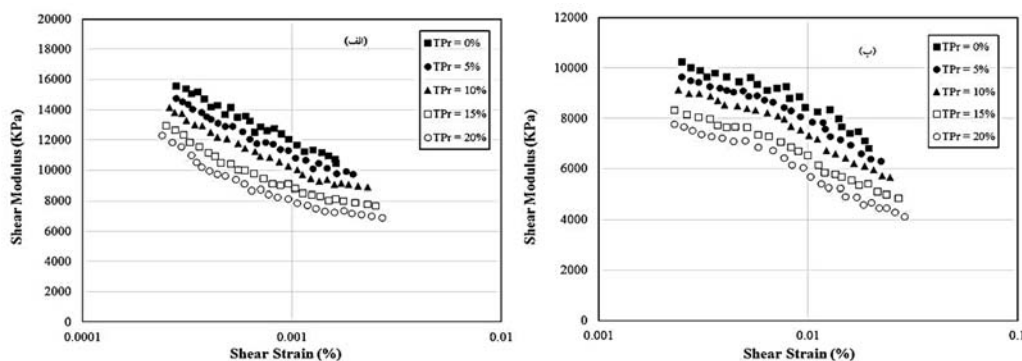


Fig. 6. Variation of shear modulus with shear strain under rectangular waveform and input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g

شکل ۷. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی تحت شکل موج سینوسی و شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$

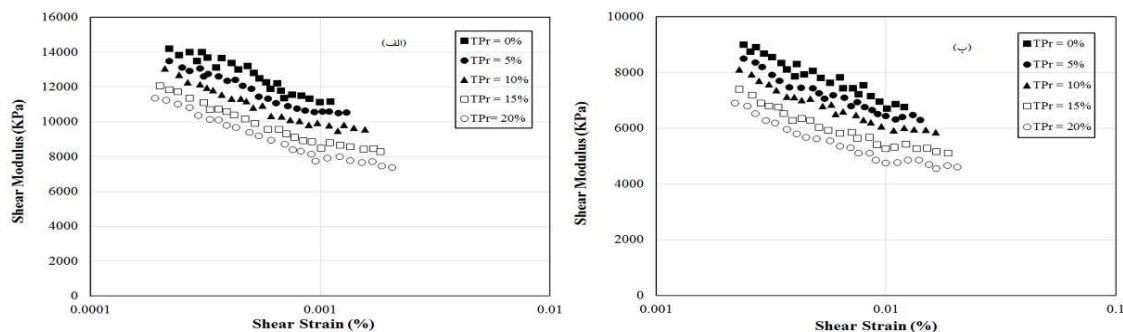


Fig. 7. Variation of shear modulus with shear strain under sinusoidal waveform and input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g

شکل ۸. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی تحت شکل موج مثلثی و شتاب ورودی (الف) ۰/۱g (ب) ۰/۳g

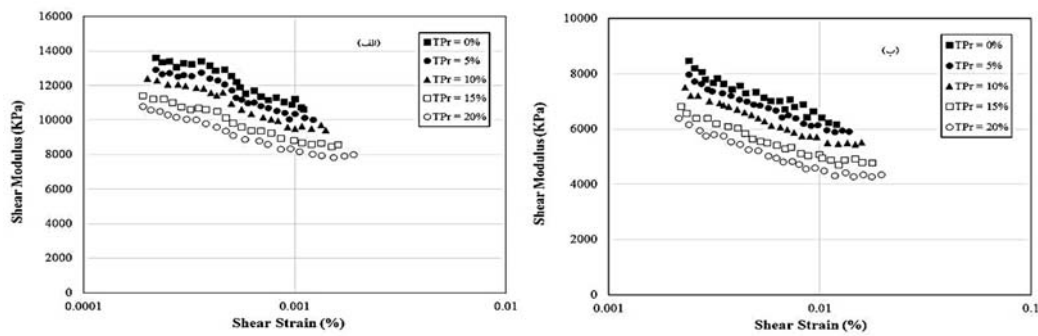
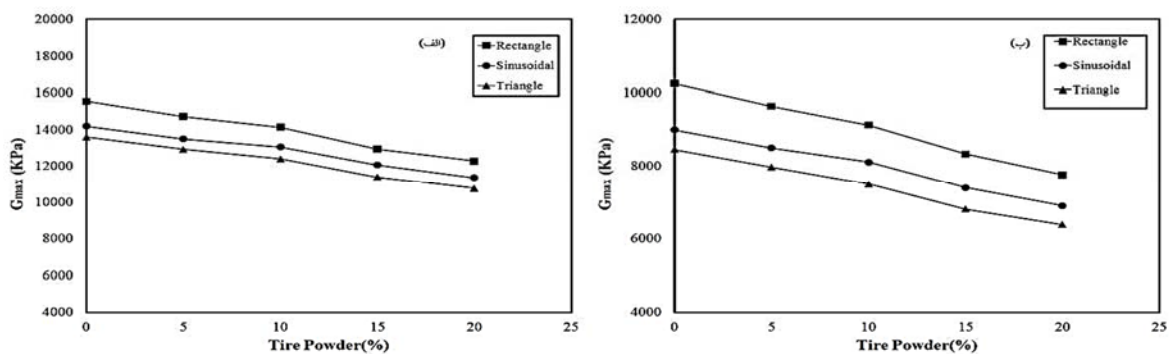


Fig. 8. Variation of shear modulus with shear strain under triangular waveform and input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g

شکل ۹. تغییرات مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) در برابر درصد پودر لاستیک در شتاب ورودی (الف) ۰/۱g (ب) ۰/۳gFig. 9. Variation of G_{max} with tire powder at input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g

لاستیک، در اثر بارگذاری دینامیکی انرژی قابل توجهی برای تغییر شکل ذرات لاستیک صرف می‌شود که در نتیجه آن نیز ضریب میرایی مخلوط مجدداً افزایش پیدا می‌کند. مشابه نتایج مدول برشی، بیشترین میزان افزایش در ضریب میرایی بین نمونه‌های مخلوط ماسه با ۱۰ و ۱۵ درصد پودر لاستیک مشاهده می‌شود. از طرف دیگر در سطوح کرنش پایین مقادیر ضریب میرایی در شکل موج‌های مختلف و نمونه‌های با درصد‌های مختلف پودر لاستیک، پایین و بسیار نزدیک به هم است در حالی که با افزایش کرنش برشی مقادیر ضریب میرایی افزایش یافته و تفاوت ضریب میرایی بین شکل‌های موج‌ها و نمونه‌های مختلف بیشتر قابل مشاهده است. لذا در سطوح کرنش پایین بین مقادیر ضریب میرایی در شکل موج‌های مختلف تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود اما با افزایش میزان کرنش برشی ملاحظه می‌شود که نمونه‌ها (با درصد‌های مختلف پودر لاستیک) تحت شکل موج مستطیلی بیشترین ضریب میرایی را از خود نشان می‌دهند. تحت بارگذاری سینوسی و

۲-۵- ضریب میرایی

ضریب میرایی برای یک حلقه ایده‌آل از رابطه زیر به دست می‌آید. که نخست باید انرژی تلف شده در هر سیکل (ΔW) و انرژی ذخیره شده در هر سیکل ($W_{elastic}$) را محاسبه نمود:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_{elastic}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\oint \tau d\gamma}{0.125 \times \Delta \tau \times \Delta \gamma} \quad (۸)$$

تغییرات ضریب میرایی در برابر کرنش برشی برای حالات مختلف بارگذاری در شکل‌های (۱۰-۱۲) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در تمام حالات، با افزایش درصد پودر لاستیک، ضریب میرایی افزایش می‌یابد، به طوری که نمونه ماسه خالی دارای کمترین و نمونه مخلوط ماسه با ۲۰ درصد پودر لاستیک دارای بیشترین مقادیر ضریب میرایی هستند. دلیل این امر آن است که ذرات ماسه بسیار سخت بوده بنابراین در اثر بارگذاری دینامیکی، انرژی زیادی در اثر برخورد و اصطکاک بین ذرات ماسه تلف شده و در نتیجه میرایی افزایش پیدا می‌کند. در مقابل به دلیل نرم و انعطاف پذیر بودن ذرات

میرایی مدل‌های مسلح با یکدیگر پارامتری به عنوان D_m یا مقدار میانگین ضریب میرایی معرفی کردند. پارامتر فوق از میانگین‌گیری مقادیر ضریب میرایی در یک کرنش خاص در هر یک از آزمایش‌ها حاصل می‌شود. تحت شتاب ورودی $0.1g$ این کرنش برابر 0.001 و تحت شتاب ورودی $0.3g$ برابر 0.01 است. شکل (۱۳) مقادیر ضریب میرایی میانگین (D_m) در برابر درصد وزنی پودر لاستیک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۳)، با افزایش درصد پودر لاستیک مقدار میانگین ضریب میرایی در همه شکل موج‌ها افزایش می‌یابد. هم‌چنین تفاوت بین مقادیر میانگین ضریب میرایی بین شکل موج‌های مستطیلی و سینوسی بیشتر از تفاوت بین شکل موج‌های سینوسی و مثلثی می‌باشد که این تفاوت در هر دو حالت شتاب ورودی ملاحظه می‌شود.

مثلی نیز مقادیر ضریب میرایی نسبتاً نزدیک به هم بوده ولی مقدار آن برای بارگذاری سینوسی بیشتر است. هم‌چنین با افزایش شتاب ورودی با توجه به افزایش کرنش برشی، ضریب میرایی افزایش می‌یابد که البته افزایش ضریب میرایی در اثر افزایش شتاب ورودی نیز در سطوح بالاتر کرنش برشی بیشتر مشاهده می‌شود. اما همان‌گونه که در شکل‌های (۱۰-۱۲) مشاهده می‌شود، تغییرات ضریب میرایی در مقابل کرنش برشی نامنظم و غیر یکنواخت است و این امر باعث می‌شود تا نتوان مقایسه عددی دقیقی بین مقادیر ضریب میرایی در حالت‌های مختلف انجام داد. تغییرات نامنظم نسبت میرایی در برابر کرنش برشی با نتایج سایر پژوهشگران هماهنگی دارد [27 و 28] صابرمهانی و همکاران [22] با مشاهده روند غیر یکنواخت ضریب میرایی در مقابل کرنش برشی برای مقایسه مقادیر

شکل ۱۰. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی تحت شکل موج مستطیلی و شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$

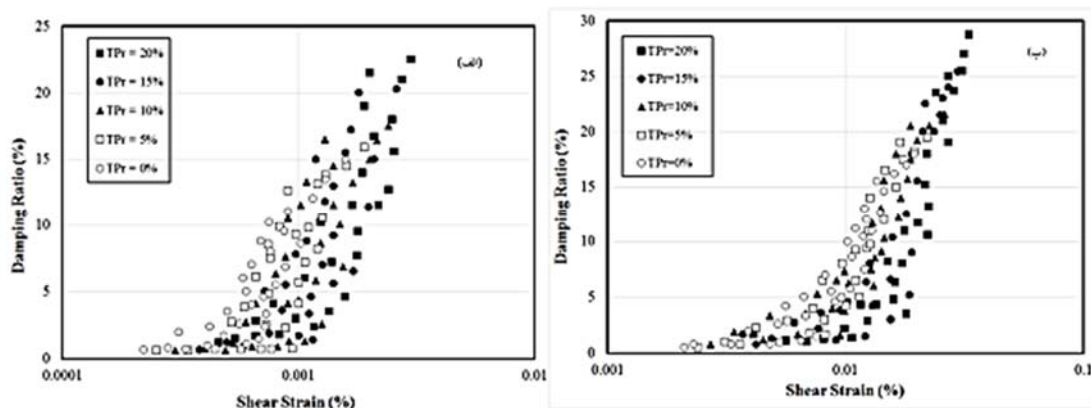


Fig. 10. Variation of damping ratio with shear strain under rectangular waveform and input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g

شکل ۱۱. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی تحت شکل موج سینوسی و شتاب ورودی (الف) $0.1g$ (ب) $0.3g$

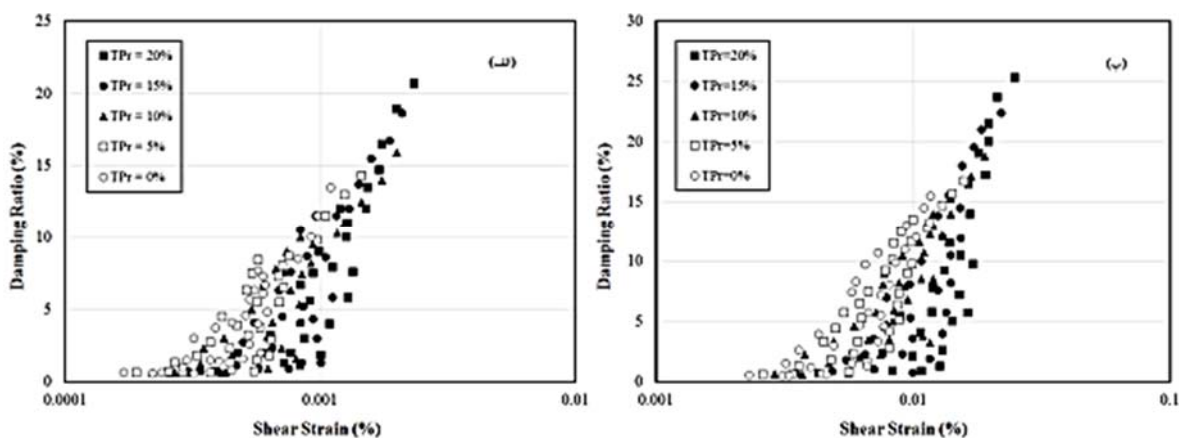


Fig. 11. Variation of damping ratio with shear strain under sinusoidal waveform and input acceleration of (a) 0.1g (b)

شکل ۱۲. تغییرات ضریب میرایی با کرنش برشی تحت شکل موج مثلثی و شتاب ورودی (الف) ۰/۱g (ب) ۰/۳g

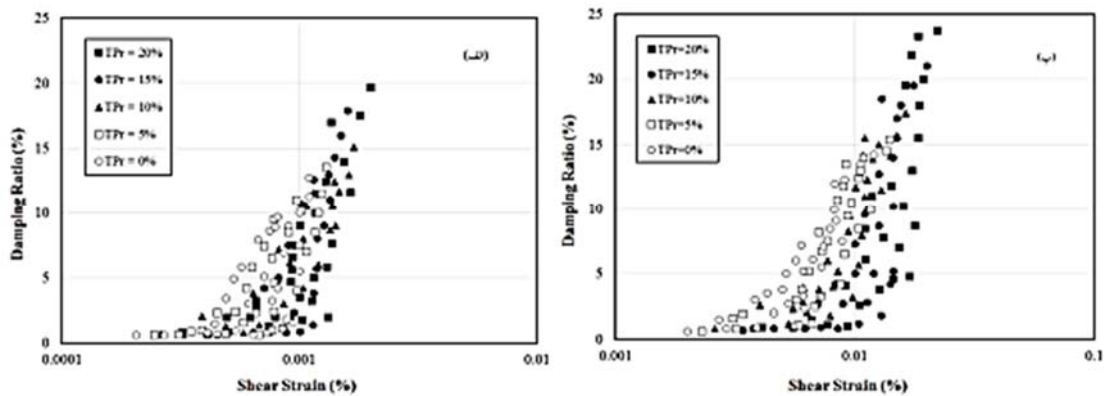
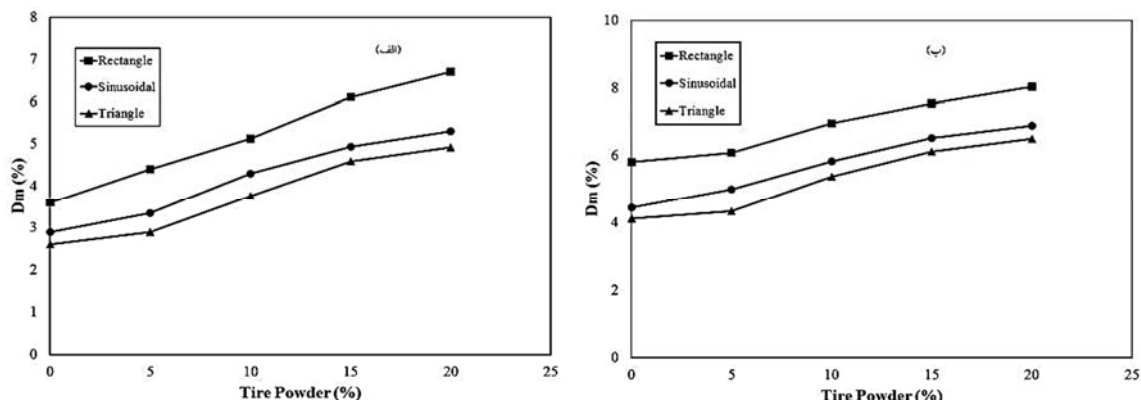


Fig. 12. Variation of damping ratio with shear strain under triangular waveform and input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g

شکل ۱۳. تغییرات میانگین ضریب میرایی با درصد پودر لاستیک در شتاب ورودی (الف) ۰/۱g (ب) ۰/۳g

Fig. 13. Variation of D_m with tire powder at input acceleration of (a) 0.1g (b) 0.3g

برای شکل موج سینوسی کمی بیشتر از شکل موج مثلثی است.

- تاثیر شکل موج بارگذاری روی ضریب میرایی مخلوط در سطوح پایین کرنش ناچیز بوده ولی با افزایش سطوح کرنش، افزایش می‌یابد.
- افزایش در درصد پودر لاستیک باعث کاهش در مدول برشی مخلوط می‌شود. بیشترین میزان کاهش، بین مخلوط‌های با ۱۰ و ۱۵٪ پودر لاستیک مشاهده می‌شود.
- ضریب میرایی مخلوط با افزایش پودر لاستیک افزایش می‌یابد. این افزایش بسیار قابل توجه بوده و نشان دهنده قابلیت بالای پودر لاستیک در جذب و استهلاک انرژی است. بنابراین می‌توان از ترکیب ماسه و پودر لاستیک به عنوان یک راه‌کار موثر برای استهلاک انرژی ناشی از زلزله

نتیجه‌گیری

- در این مطالعه، تأثیر شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی مخلوط ماسه-پودر لاستیک با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه بررسی شد. نتایج زیر تحت فرکانس بارگذاری ۲ هرتز و شتاب‌های ورودی ۰/۱g و ۰/۳g به دست آمدند:
- نمونه‌های مورد آزمایش، بیشترین مدول برشی و ضریب میرایی را تحت بارگذاری مستطیلی از خود نشان می‌دهند. به گونه‌ای که در تمام حالات، مقادیر G و D برای شکل موج مستطیلی بیشتر از شکل موج‌های سینوسی و مثلثی است.
 - مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی برای شکل موج‌های سینوسی و مثلثی نزدیک به هم بوده با این حال مقادیر آنها

- [10] Mashiri M.S., Vinod J., Sheikh M. Neaz. & Carraro J. 2017 Shear modulus of sand-tyre chip mixtures. *Environmental Geotechnics*, DOI: 10.1680/jenge.16.00016.
- [11] Senetakis K. & Anastasiadis A. 2015 Effects of state of test sample, specimen geometry and sample preparation on dynamic properties of rubber-sand mixtures. *Geosynthetics International*, 22(4), 301-310.
- [12] Ehsani M., Shariatmadari N. & Mirhosseini S.M. 2015 Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures. *Journal of central south university*, 22, 3159-3167.
- [13] Mashiri M. S., Sheikh M. Neaz., Vinod J. & Tsang H. 2013 Dynamic properties of sand-tyre chip mixtures, Australian Earthquake Engineering Society Conference, Tasmania: Australian Earthquake Engineering Society, 1-8.
- [14] Bahadori H., Ghalandarzadeh A. & Towhata I. 2008 Effect of Non plastic silt on the anisotropic behavior of sand, *Soils and Foundations*, 48(4), 531-545.
- [15] Lombardi D., Bhattacharya S., Scarpa F. & Bianchi M. 2015 Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, 69, 46-56.
- [16] El-Emam M.M. & Bathurst R.J. 2007 Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), 33-49.
- [17] Koga Y. & Matsuo O. 1990 Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground. *Soil and Foundation*, 30(4), 162-174.
- [18] Abdel-Gaffar A.M. & Scott R.F. 1979 Shear moduli and damping factors of earth dam. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(GT12), 1405-1426.
- [19] Kikusawa M. & Hasegawa T. 1985 Analysis of model embankment dam by shaking table test. *Soil and Foundation*, 25(1), 1-14.
- [20] Ghayamghamian M.R. & Kawakami H. 2000 On-site nonlinear hysteresis curves and dynamic soil properties. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 543-555.
- [21] Bahadori H. & Manafi S. 2015 Effect of tyre chips on dynamic properties of saturated sands. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 15(3), 116-128.
- [22] Sabermahani M., Ghalandarzadeh A. & Fagher A. 2009 Experimental study on seismic deformation modes of reinforced - soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 121-136.
- [23] Zeghal M., Elgamal A.W., Tang H.T. & Stepp J.C. 1995 Lotung downhole array-II: Evaluation of soil nonlinear properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(4), 363-378.
- [24] Elgamal A., Yang Z., Lai T. & Kutter B.L. 2005 Dynamic Response of Saturated Dense Sand in

و سایر بارهای دینامیکی در سیستم ایزولاسیون پی‌ها، دیوارهای حائل، لوله‌های مدفون و بستر مسیرهای راه‌آهن استفاده نمود.

● در همه موارد با افزایش دامنه شتاب ورودی، کرنش برشی افزایش یافته و در نتیجه مدول برشی کاهش و ضریب میرایی افزایش می‌یابد. ضمن اینکه با افزایش شتاب ورودی، تفاوت بین مقادیر مدول برشی و ضریب میرایی بین شکل موج‌های مختلف بارگذاری افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه انجام شد. بدین ترتیب نویسندگان مقاله برخود لازم می‌دانند از مسئولین مرکز به‌ویژه آقای مهندس امیلی تشکر و قدردانی نمایند.

References

مراجع

- [1] Khabiri MM., Khishdari A. & Gheibi E. 2016 Effect of tyre powder penetration on stress and stability of the road embankments. *Road Mate Pavement Des* 14, 1-4.
- [2] Naval S., Kumar A. & Bansal SK. 2014 Model tests on footing resting on waste tire fiber reinforced granular soil. *Int J Geotech Eng*, 8(4), 469-476.
- [3] Keskin M.S. & Laman M. 2014 Experimental study of bearing capacity of strip footing on sand slope reinforced with tire chips. *Geomechanics and Engineering*, 6(3), 249-262.
- [4] Poh PS. & Broms B.B. 1995 Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles. *J Perform Constr Facil*, 9(1), 76-79.
- [5] Kaushik M.K., Kumar A. & Bansal A. 2016 Drainage performance of different sizes tire chips used alone and mixed with natural aggregates as leachate drainage layer material. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 167-191.
- [6] O'Shaughnessy V. & Garga VK. 2000 Tire-reinforced earthfill. Part 3: environmental assessment. *Can Geotech J*, 37(1), 117-131.
- [7] Lee JH., Salgado R., Bernal A. & Lovell, CW. 1999 Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill. *J Geotech Geoenviron Eng*, 125(2), 132-141.
- [8] Bosscher P.J., Edil T.B. & Kuraoka S. 1997 Design of highway embankments using tire chips. *J Geotech Geoenviron Eng*, 123(4), 295-304.
- [9] Assadollahi A., Harris B. & Crocker J. 2016 Effects of Shredded Rubber Tires as a Fill Material on the Engineering Properties of Local Memphis Loess. *In Geo-Chicago*, 738-745.

- [27] Hazarika H., Yasuhara K., Karmokar A. K., Kikuchi Y. & Mitarai Y. 2010 Multifaceted potentials of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical applications and their evaluation. *Geotextiles and Geomembranes*, 28 (3), 303-315.
- [28] Zeghal M. & Elgamal A.W. 1994 Analysis of site liquefaction using earthquake records. *Journal of geotechnical engineering*, 120(6), 996- 1017.
- Laminated Centrifuge Container. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(5), 598-609.
- [25] Brennan A.J., Thusyanthan N.I. & Madabhushi S.P. 2005 Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), 1488-1497.
- [26] Bahadori H. & Farzalizadeh R. 2016 Dynamic Properties of Saturated Sands Mixed with Tyre Powders and Tyre Shreds. *International Journal of Civil Engineering*, in press, <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0136-9>.

Investigating the Effect of Loading Waveform on the Dynamic Properties of Sand-Tire Mixture Using the Shaking Table Tests

Hadi Bahadori*, Amin Khalili

Associate Professor, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran

PhD student, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran

h.bahadori@urmia.ac.ir*

Abstract

Today, the use of waste tires mixed with soil has been expanded in various geotechnical projects to absorb and reduce the vibration caused by seismic and dynamic loads. Therefore, the objective of this work was to evaluate the dynamic properties of such mixtures prior to practical applications. Given that the different kinds of exterior cyclic loading affect the natural soil, such as earthquakes, high buildings, high speed rails, wave loads, oil tanks, reservoirs and so on, and they demonstrate different wave patterns. So far independent research on the effect of loading frequency on the dynamic properties of the sand-tire mixture has not been carried out. Therefore, in this paper, 1-g shaking table tests were employed to investigate the effect of loading waveform on dynamic properties of sand-tire mixture. A hydraulic shaking table with a single degree of freedom, designed and constructed at the Crisis Management Center of Urmia University, was used to conduct the experiments. Firoozkuh No. 161 sand was used in all the experiments and tire powders were used as a soil reinforcement material. Tire powders are made from discarded tires that have been broken into pieces and sieved by an industrial tire-shredder system. Also, accelerometers were used to measure the acceleration of the input to the sample as well as to record the acceleration caused by the input excitation at different depths of the soil sample. The displacement transducers (LVDT sensors) were also used to measure linear displacement. To record information, all sensors were plugged into a 16-channel dynamic data logger ART-DL16D. Samples were constructed in both unreinforced (pure sand) and reinforced form and with a relative density of zero. In reinforced samples, tire powders were added to the sand with 5%, 10%, 15% and 20% in gravimetric basis. To prepare the sample, a wet tamping method was utilized in both the unreinforced (pure sand) and the reinforced (sand mixed with tire powders) specimens. In this method, first, the sand was mixed with 5% water. Samples were subjected to rectangle, sinusoidal and triangle waveform at constant frequency of 2 Hz and input acceleration of 0.1g and 0.3g. The results showed that in all cases, soil samples exhibit the highest shear modulus and damping ratio under rectangle loading. Therefore, the values of G and D for the rectangular waveforms are greater than those of the sinusoidal and triangle waveforms. The shear modulus and damping ratio for the sinusoidal waveforms are marginally greater than those of triangle waveforms. The effect of loading waveform on the damping ratio of the soil at low levels of strain is negligible, but it increases with increasing strain levels. The shear modulus reduced by increasing the tire powder and the highest reduction is observed in the mixture with 10% to 15% of tire powder. By increasing the tire powder, the damping ratio values of samples increased so that the mixture with 20% of the tire powder has the highest damping ratio. In all cases, the shear strain increased by increasing the amplitude of the input acceleration, and as a result, the shear modulus decreased and the damping ratio increased. In addition, with increasing acceleration, the difference between the values of the shear modulus and the damping ratio increases between different loading waveforms.

Keywords: sand, tire powder, shaking table, waveform, shear modulus, damping ratio