تأثیر شکل موج و فرکانس بارگذاری بر پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای خشک با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه

هادی بهادری*، امین خلیلی؛ دانشگاه ارومیه، دانشکدهٔ فنی

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۷/۱۵ پذیرش ۹۸/۰۳/۱۸

چکیده

در این پژوهش، تأثیر شکل موج و فرکانس بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای خشک از قبیل مدول برشی (G) و ضریب میرایی (D) بررسی شده است. یک سری آزمایش میز لرزه 1g روی ماسه خشک فیروزکوه انجام شد. نمونه‌های خاک با دانسیتهٔ نسبی صفر تحت سه نوع بارگذاری مستطیلی، سینوسی و مثلثی در فرکانس‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹ هرتز و تحت شتاب ورودی ۰/۱g و ۰/۳g قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برای هر نوع بارگذاری، افزایش در فرکانس باعث افزایش در مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی می شود. هم‌چنین با افزایش کرنش برشی مدول برشی خاک کاهش یافته ولی نسبت میرایی افزایش می‌یابد. نمونه‌های خاک تحت بارگذاری مستطیلی بیش‌ترین مقدار و تحت بارگذاری مثلثی کم‌ترین مقدار مدول برشی و نسبت میرایی را از خود نشان می‌دهند. در حالت کلی، تأثیر شکل موج مستطیلی روی G و D بیش‌تر از دو شکل موج دیگر است.

واژه‌های کلیدی: میز لرزه، پارامترهای دینامیکی، فرکانس، شکل موج، مدول برشی، ضریب میرایی

مقدمه

پارامترهای دینامیکی به‌منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی خاک‌ها در سطوح مختلف کرنش در مهندسی ژئوتکنیک استفاده می‌شوند. مدول برشی و ضریب میرایی از جمله مهم‌ترین پارامترهای دینامیکی خاک است. این پارامترها برای حل مسائل مختلفی از قبیل پاسخ پی‌ها و

*نویسنده مسئول h.bahadori@urmia.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

سازه‌ها به بارهای لرزه‌ای، باد و بارهای امواج استفاده می‌شود [۱]. به‌طورکلی عوامل مؤثر بر رفتار دینامیکی خاک‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱. نوع و مشخصات خاک مانند درصد رطوبت [۲]، نسبت تخلخل [۳]، [٤]، [٥] و پلاستیسیته خاک [٦] و [۷]، ۲. پارامترهای مربوط به بار وارد بر خاک از قبیل تعداد سیکل‌ها [۸]، [۹]، فرکانس [٦]، [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱] و شکل موج بارگذاری [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]. از آن‌جاکه پاسخ دینامیکی خاک تا حدود زیادی به مشخصات بار وارد بر آن بستگی دارد، از این‌رو، تا کنون محققان تحقیقات مختلفی را برای بررسی تأثیر این مشخصات از جمله فرکانس و شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی انواع مختف خاک انجام داده‌اند.

لین و همکاران [۱٥] تعدادی آزمایش برش پیچشی سیکلی به‌منظور بررسی تأثیر فرکانس بارگذاری روی رفتار میرایی خاک ماسه خشک انجام دادند. نتایج نشان داد که میرایی ماسه خشک به‌صورت چشم‌گیری با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد.

زنگ و آگور [۱٦] برای بررسی تأثیر نوع بارگذاری روی ضریب میرایی خاک‌های ماسه‌ای خشک، تعدادی آزمایش ستون تشدید با استفاده از ۳ نوع بارگذاری سینوسی، ضربه‌ای و تصادفی تحت ۳ فشار محصورکننده مختلف روی نمونه‌های ماسه خشک اوتاوا انجام دادند. نتایج نشان داد که در سطوح کرنش بالا نمونه‌های ماسه، تحت بارگذاری ضربه‌ای بیش‌ترین میرایی و تحت بارگذاری سینوسی کم‌ترین میرایی را دارند. اما در سطوح کرنش پائین، میرایی تحت همه انواع بارگذاری یک‌سان است.

آقایی‌آرایی و همکاران [۱۷] تعدادی آزمایش سه‌محوری مقیاس بزرگ به‌منظور بررسی تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری روی مدول برشی و ضریب میرایی مصالح شنی انجام دادند. نتایج نشان داد که افزایش در فرکانس بارگذاری باعث افزایش در مدول برشی در سطوح کرنش پایین می‌شود اما با افزایش کرنش، نرخ (سرعت) افزایش مدول برشی با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش فرکانس بارگذاری، نسبت میرایی نه تنها در سطوح کرنش پایین بلکه در سطوح کرنش متوسط و بالا نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی برای شکل موج سینوسی کمی بیش‌تر از شکل موج

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

مثلثی است. علاوه بر آن مقدار نسبت میرایی برای شکل موج مستطیلی به‌صورت چشم‌گیری بیش‌تر از شکل موج‌های سینوسی و مثلثی است.

دَش و سیتهارام [۱۸] تعدادی آزمایش سه‌محوری سیکلی به‌منظور بررسی تأثیر فرکانس بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی ماسه اشباع انجام دادند. نتایج نشان داد که مدول برشی ماسه اشباع با افزایش فرکانس کاهش یافته ولی ضریب میرایی افزایش می‌یابد. هم‌چنین فرکانس بارگذاری در یک کرنش برشی خاص هیچ تأثیری روی مدول برشی ندارد.

هم‌چنین تحقیقات دیگری نیز با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند سه‌محوری سیکلی [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]، برش ساده سیکلی [۲۲]، ستون تشدید [۲۰]، [۲۳]، [۲٤] و سه‌محوری پیچشی [۲۵]، به‌منظور تعیین پارامترهای دینامیکی خاک‌ها و عوامل مؤثر بر آن‌ها انجام گرفته است، اما نتایج این قبیل آزمایش‌ها معمولاً تحت تأثیر نبود اطمینان، محدودیت‌ها و تجهیزات آزمایش قرار می‌گیرند. از جمله این عدم اطمینان‌ها (قطعیت) می‌توان به تنوع ذاتی و ناهم‌سانی خاک، حفاری و دست‌خوردگی نمونه و خطاهای مربوط به تفسیر نتایج آزمایش اشاره کرد [۱۹]. از طرف دیگر این آزمایش‌ها اغلب برای اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی خاک در دامنه های پائین کرنش برشی استفاده می‌شوند. برای مثال، از آزمایش‌ها ستون تشدید فقط در دامنه‌های کرنش کم‌تر از ۰/۱٪ استفاده می‌شود [۲٦]. از این‌رو به‌عنوان جای‌گزین، از آزمایش‌های مدل برای اندازه‌گیری پارامترهای دینامیکی خاک‌ها می‌توان استفاده کرد. آزمایش‌های مدل می‌توانند تحت اثر شتاب جاذبهٔ زمین و تحت اثر شتاب‌های جاذبه بالاتر انجام گیرند. آزمایش میز لرزه 1g، آزمایش مدل است که تحت شتاب جاذبهٔ زمین انجام می‌گیرد. آزمایش‌های میز لرزه در اعمال دامنه‌های بزرگ کنترل شده، اعمال حرکت‌های ورودی چندمحوره، امکان استفاده آسان از ابزارها و حس‌گرهای اندازه‌گیری متعدد دارای برتری است. علاوه بر آن آزمایش میزلرزه 1g، آزمایش مدل قابل اعتماد برای بررسی مسائل مختلفی از قبیل روان‌گرایی، اندرکنش خاک- سازه و نشست زمین است. هم‌چنین یک نمونه خاک واقعی می‌تواند به‌آسانی برای یک آزمایش میز لرزه 1g آماده‌سازی و متراکم شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

اگرچه تاکنون بررسی‌های زیادی در رابطه با تأثیر پارامترهای مختلف روی پارامترهای دینامیکی خاک‌های متنوع انجام شده است؛ اما هم‌چنان نیاز به انجام تحقیقات بیش‌تری از جمله در ارتباط با تأثیر پارامترهای مربوط به بارهای دینامیکی مانند فرکانس و شکل موج بارگذاری بر رفتار دینامیکی خاک‌ها به‌ویژه با استفاده از آزمایش‌های مدل که دارای برتری‌های چشم‌گیری نسبت به بقیه روش‌ها است، وجود دارد. هم‌چنین با توجه به این‌که مصالح دانه‌ای غیرچسبنده مانند مصالح آبرفتی ماسه‌ای، بخش عمده‌ای از رسوبات طبیعی را تشکیل می‌دهند و سازه‌های بسیاری نیز روی این‌گونه خاک‌های دانه‌ای بسته به شرایط بارگذاری و خصوصیات رفتاری خاک محل ساخته می‌شوند، نیاز به درک بهتر رفتار پیچیده ماسه‌ها در برابر بارهای مختلف دینامیکی است. از این‌رو، در این مقاله، از آزمایش‌های میزلرزه 1g به‌منظور بررسی تأثیر شکل موج و فرکانس بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی خاک ماسه در حالت خشک استفاده شده است. پاسخ به‌دست آمده از نمونه‌های خاک در طول بارگذاری با فرکانس‌ها، شکل موج‌ها و شتاب‌های ورودی مختلف برای تولید حلقه‌های هیسترزیس نمونه‌های آزمایش‌شده در دامنه‌های مختلف کرنش استفاده شده است و سپس حلقه‌های هیسترزیس تولید شده برای تعین ضریب میرایی و مدول برشی در سطوح مختلف کرنش استفاده می‌شوند. در نهایت تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری روی تغییرات هر کدام از پارامترهای مذکور بررسی می‌شود.

وسایل و تجهیزات آزمایش

الف) میز لرزه

از میز لرزه هیدرولیکی دارای یک درجه آزادی که در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه طراحی و ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. ابعاد میز لرزه ۲ در ۳ متر بوده و حداکثر ظرفیت بارگذاری آن ۵ تن است و قادر به شبیه‌سازی دو نوع بارگذاری هارمونیک و زلزله است که تطابق لازم بین امواج ورودی و امواج تولید شده وجود دارد. میز لرزه قابلیت کار با حداکثر شتاب ۱/۵g 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

موتور محرکه است که هر کدام سرعتی معادل ۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه را می‌توانند ایجاد کنند و دستگاه این قابلیت را دارد که به‌صورت تک یا دو موتوره سرعت را در سیستم شبیه‌سازی کند. نمونه‌های خاک درون یک محفظه مدل که روی میز لرزه قرار می‌گیرد ساخته می‌شوند. این محفظه از ورق‌های پلکسی گلس با ضخامت ۲ سانتی‌متر و به ابعاد ۸۰×۶۰×۱۸۰ سانتی‌متر ساخته شده است. شکل ۱ محفظه مدل را روی میز لرزه نشان می‌دهد.



شکل ۱. محفظهٔ مدل روی میز لرزه

ب) مصالح

از ماسه فیروزکوه شمارهٔ ۱۶۱ در تمامی آزمایش‌ها استفاده شده است. ماسه فیروزکوه دارای رنگی متمایل به طلایی است و دانه‌بندی یک‌نواختی دارد و شبیه به ماسه Toyora است. بعضی از مشخصات فیزیکی این ماسه در جدول ۱ ذکر شده است [۲۷].

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه [۲۷]

نام ماسه	D_{10}(mm)	D_{30}(mm)	D_{60}(mm)	G_s	F_c (%)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}
فیروزکوه (SP) ۱۶۱	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۳	۲/۶۵	۱	۱/۸۷	۰/۸۸	۰/۸۷۴	۰/۵۴۸

ج) ابزاربندی

در این پژوهش از سنسورهای شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری 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 هم‌چنین برقراری تماس پایدارتر با توده خاک، پایه‌هایی متشکل از دو صفحه با ابعاد ۵×۵ و ۲×۵ سانتی‌متر ساخته شده و به کف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

سنسورها به‌صورت محکم چسبانده می‌شود. هم‌چنین از سنسور جابه‌جایی‌سنج (LVDT)، برای اندازه‌گیری تغییر مکان‌های خطی استفاده می‌شود. برای ثبت اطلاعات، همهٔ سنسورها به دستگاه دیتالاگر دینامیکی ۱۶ کاناله ART-DL16D متصل می‌شوند. این دستگاه قادر است تغییر ولتاژهای ایجاد شده به‌وسیلهٔ سنسورهای مذکور را لحظه به لحظه در طول آزمایش ثبت کند.

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 دیواره‌های انتهایی محفظه مدل [۲۸] از یک لایه فوم به ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده می‌شود.

هر نمونه خاک با استفاده از ماسه خشک فیروزکوه در چهار ارتفاع یک‌سان ۱۵۰ میلی‌متری تا رسیدن به ارتفاع کل ۶۰۰ میلی‌متر ساخته می‌شود. خاک به‌صورت همگن بر روی سطح محفظه ریخته می‌شود . سپس هر لایه تا رسیدن به یک دانسیته مخصوص متراکم می‌شود. (دانسیته نسبی برابر صفر) به‌منظور اطمینان از پیوند مناسب بین دولایه خاک، سطح هر لایه متراکم شده باید خراشیده شود. قبل از تراکم خاک‌ها درون محفظه، جرم ماسه خشک با در دست داشتن چگالی نسبی (G_s) و تخلخل بیشینهٔ ماسه (e_{max}) که معادل با تراکم نسبی صفر است، از راابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید:

$$\rho_d = \frac{G_S}{1+e_{max}} \times \rho_w \rightarrow M_S = \rho_d \times V_T \qquad (۱)$$

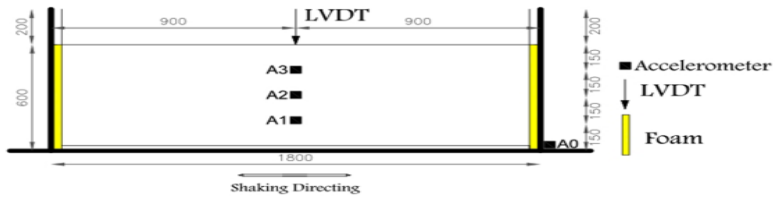
که در آن، V_Tحجم کل محفظه مدل و M_s جرم ماسه خشک است.

به‌منظور دست‌یابی به دانسیتهٔ نسبی هدف یک‌سان برای تمامی لایه‌ها ، ریختن خاک باید از یک ارتفاع ثابت انجام گیرد. در حین فرایند تراکم، شتاب سنج‌های A_1، A_2 و A_3 در اعماق ۴۵۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متری از سطح آزاد نمونه، درون خاک قرار داده می‌شوند. هم‌چنین یک شتاب سنج A_0 نیز به‌منظور اندازه‌گیری شتاب پایه به‌صورت ثابت به میز لرزه متصل می‌شود. تراکم خاک‌های اطراف شتاب سنج‌های قرار داده شده درون خاک برای جلوگیری از صدمه دیدن و جابه‌جایی آنها باید با دقت بیش‌تری انجام شود. یک جابه‌جایی‌سنج (L_1) روی سطح آزاد خاک قرار داده می‌شود تا جابه‌جایی‌های قائم سطح خاک را اندازه‌گیری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

کند. پاسخ خاک به‌صورت شتاب در اعماق مختلف و به‌صورت جابه‌جایی در سطح خاک ثبت می‌شود. شکل شماتیک نمونه‌های آزمایش همراه با ابزاربندی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این‌که محفظه صلب مدل می‌تواند پاسخ دینامیکی مدل‌های آزمایش را تحت تأثیر قرار دهد [۲۹]. از این‌رو، به‌منظور کاهش اثرات منفی آن، داده‌های شتاب در محدوده ۰,۰۵ تا ۲۰ هرتز فیلتر می‌شوند.

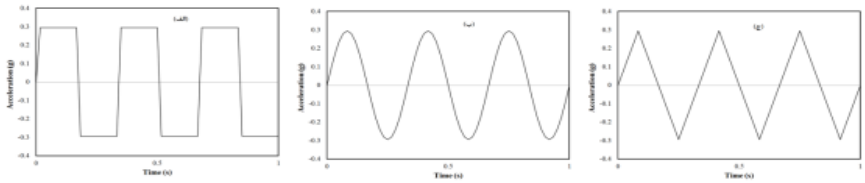
در این پژوهش ٤۲ آزمایش میزلرزه روی نمونه‌های خاک به‌منظور بررسی تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی ماسه خشک انجام شد. پارامترهای متغیر در آزمایش‌های مختلف در جدول ۲ ذکر شده است. نمونه‌های آزمایش تحت بارگذاری‌های مستطیلی، سینوسی و مثلثی (شکل۳)، فرکانس‌های ۰/۵ تا ۹ هرتز و شتاب‌های ورودی ۰/۱g و ۰/۳g قرار گرفتند. (برای مدل‌سازی شکل موج مستطیلی از حالت ذوزنقه استفاده شده است)



شکل ۲. شکل شماتیک نمونه‌های آزمایش همراه با ابزاربندی

جدول ۲. پارامترهای متغیر در آزمایش‌های میزلرزه

خاک/ شکل موج	فرکانس بارگذاری (هرتز)	شتاب بارگذاری	تعداد سیکل‌ها	تعداد کل آزمایش‌ها
ماسه/ مستطیلی	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷و ۹	۰/۳gو ۰/۱g	۳۰	١٤
ماسه/ سینوسی	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷و ۹	۰/۳gو ۰/۱g	۳۰	١٤
ماسه/ مثلثی	۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷و ۹	۰/۳gو ۰/۱g	۳۰	١٤



شکل۳. نمونه‌ای از شکل موج‌های اعمال شده در فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی g ۰/۳:
الف) شکل موج مستطیلی، ب) سینوسی و ج) مثلثی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

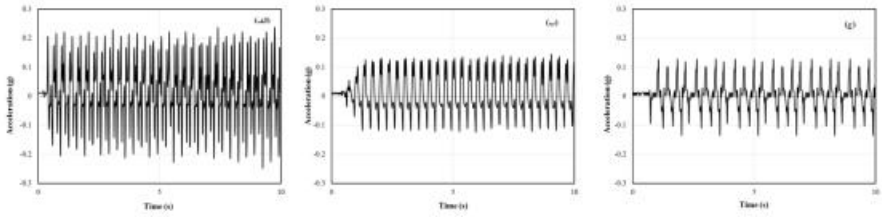
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

نتایج و بحث

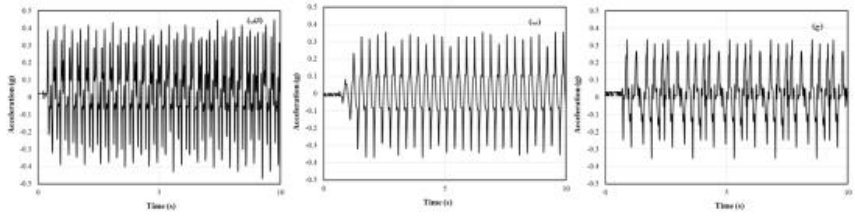
الف) نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب و جابه‌جایی قائم

شکل‌های٤ و ٥ نمونه‌هایی از تاریخچهٔ زمانی شتاب برای ۳ نوع بارگذاری در فرکانس ۳ هرتز و شتاب‌های ورودی ۰/۱g و ۰/۳gدر شتاب‌سنج A_2 را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که در همه موارد، مقادیر شتاب با افزایش شتاب ورودی افزایش می‌یابند. با این تفاوت که این افزایش مقادیر شتاب در بارگذاری مستطیلی بیش‌تر از بارگذاری سینوسی و در بارگذاری سینوسی کمی بیش‌تر از بارگذاری مثلثی است.

شکل ٦ نمونه‌هایی از تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی قائم اندازه‌گیری شده به‌وسیلهٔ جابه‌جایی سنج L_1 برای ۳ نوع بارگذاری در فرکانس۳ هرتز و شتاب‌های ورودی ۰/۱gو ۰/۳g را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، میزان جابه‌جایی قائم سطح خاک در یک فرکانس یک‌سان، برای بارگذاری مستطیلی بیش‌تر از دو نوع دیگر بارگذاری است و برای بارگذاری‌های سینوسی و مثلثی نزدیک به‌هم است هر چند که مقدار آن برای بارگذاری سینوسی کمی بیش‌تر از بارگذاری مثلثی است. علاوه بر آن با افزایش میزان شتاب ورودی مقدار جابه‌جایی قائم سطح خاک برای همه انواع بارگذاری افزایش می‌یابد.



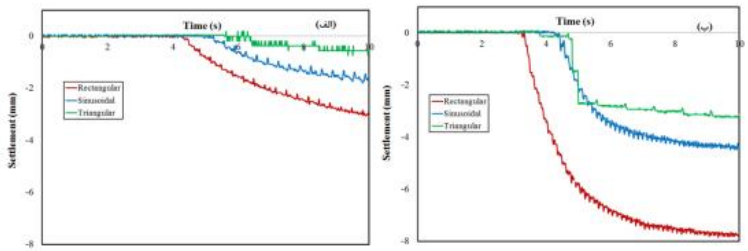
شکل ٤. نمونه‌ای از تاریخچه‌های زمانی شتاب در فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی ۰/۱gدر شتاب سنج A_2 تحت بارگذاری الف) مستطیلی، ب) سینوسی و ج) مثلثی



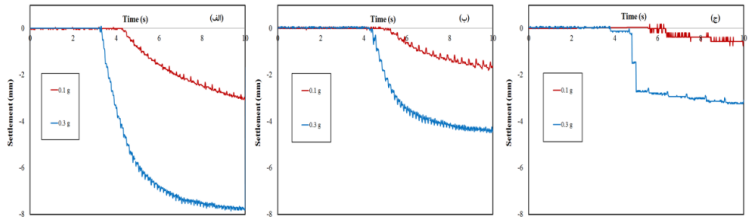
شکل ٥. نمونه‌ای از تاریخچه‌های زمانی شتاب در فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی ۰/۳gدر شتاب سنج A_2 تحت بارگذاری الف) مستطیلی، ب) سینوسی و ج) مثلثی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]



شکل ٦. الف. نمونه‌ای از تاریخچه‌های زمانی جابه‌جایی قائم در فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی الف) ۰/۱g، ب) ۰/۳g



شکل ٦. ب. نمونه‌ای از تاریخچه‌های زمانی جابجایی قائم در فرکانس ۳ هرتز و تحت شکل موج: الف) مستطیلی، ب) سینوسی، ج) مثلثی

ب) رابطهٔ تنش – کرنش هیسترزیس و پارامترهای دینامیکی خاک

برای مدت زمان طولانی مکانیک اجسام تغییر شکل‌پذیر بر مبنای قانون هوک که اساس آن بر فرضیه الاستیسیته خطی است، استوار بود. اما در حقیقت بسیاری از اجسام دارای رفتار کاملاً الاستیک نیستند بلکه دارای رفتاری دوگانه هستند. به این معنی که هم تمایل به رفتار الاستیکی مانند جامدات داشته و هم تمایل به رفتار ویسکوزی مانند مایعات دارند. به این دسته از مصالح، در اصطلاح مصالح ویسکوالاستیک گفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مصالح ویسکوالاستیک، ظرفیت آنها در ذخیره و هم چنین اتلاف انرژی در درجه‌های مختلف، در سیکل‌های بارگذاری/ باربرداری است [۳۰]. خاک از مهم‌ترین مصالح ویسکوالاستیک در طبیعت است. بعضی از خاک‌ها تحت فشار، رفتار الاستیک از خود نشان داده اما بعضی دیگر نیز تحت تنش‌های برشی رفتار کاملا ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند [۲٦]، [۳۱]. مشاهدات مختلف نشان می‌دهند که خاک‌های ماسه‌ای یکی از انواع خاک‌ها هستند که تحت بارهای سیکلی رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند [۳۲].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

برای تعریف و بررسی رفتار ویسکوالاستیک خاک‌ها تاکنون محققان مختلف از مدل‌های مختلفی استفاده کرده‌اند که مهم‌ترین آنها عبارتند از [۳۳]، [۳٤]، [۳۵]: مدل Kelvin–Voigt، مدل Maxwell، مدل Poynting-Thompson و مدل Burger.

به‌عنوان مثال مدل Kelvin–Voigt، که مدل Voigt نیز نامیده می‌شود با یک دمپرویسکوز خالص و یک فنر الاستیک خالص که به‌صورت موازی به یک‌دیگر متصل شده‌اند تعریف می‌شود (شکل ۷). در این مدل کرنش‌ها در هر جزء با هم برابر است. هم‌چنین تنش کل از مجموع تنش در هر جزء به‌دست می‌آید و به‌صورت روابط (۲) و (۳) بیان می‌شوند:

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_S = \varepsilon_D \quad (۲)$$

$$\sigma_{Total} = \sigma_S + \sigma_D \quad (۳)$$

در این روابط، S نشان‌دهندهٔ فنر و D نشان‌دهندهٔ دمپر است. از این روابط می‌توان دریافت که در مصالح Voigt، تنش، کرنش و هم‌چنین نرخ تغییرات آنها با زمان از طریق رابطهٔ (٤) تعیین می‌شود:

$$\sigma(t) = E\,\varepsilon(t) + \eta \frac{d\,\varepsilon(t)}{d\,(t)} \quad (٤)$$

که در این رابطه، E مدول الاستیسیته و η نشان‌دهندهٔ ویسکوزیته است. رابطهٔ (٤) هم‌چنین می‌تواند در مورد تنش برشی و تنش نرمال نیز به‌کار رود.

اگر در مدل voigt، به‌جای اتصال موازی دمپر و فنر، آنها به‌صورت سری به‌هم متصل شوند (شکل ۸)، مدل Maxwell به‌دست می‌آید. در این مدل، کرنش کل و تنش کل از روابط (۵) و (٦) به‌دست می‌آیند:

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_S + \varepsilon_D \quad (۵)$$

$$\sigma_{Total} = \sigma_S = \sigma_D \quad (٦)$$

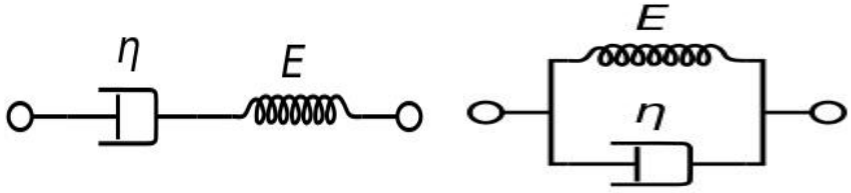
هم‌چنین در این مدل نیز، تنش، کرنش و نرخ تغییرات آنها با زمان از طریق رابطه (۷) تعیین می‌شود:

$$\frac{1}{E}\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (۷)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

مشابه مدل voigt، رابطهٔ مذکور در مورد تنش برشی و تنش نرمال نیز به‌کار می‌رود.



شکل ۷. بیان شماتیک مدل Voigt **شکل ۸. بیان شماتیک مدل Maxwell**

از این‌رو، هدف اصلی از این پژوهش، تعیین تنش و کرنش برشی از طریق به‌دست آوردن حلقه‌های هیسترزیس برای نمونه‌های خاک، با استفاده از داده‌های ثبت شده به‌وسیلهٔ شتاب‌سنج‌های قرار داده شده درون خاک در آزمایش‌ها میز لرزه و سپس استفاده از آن‌ها برای تعیین تغییرات مدول برشی و ضریب میرایی در برابر کرنش برشی در تعداد سیکل ثابت است (برای مقایسه، تعداد سیکل‌ها در همه فرکانس‌ها یک‌سان در نظر گرفته شده است (جدول۲)). محققان مختلف قبلاً پژوهش‌های مشابهی با استفاده از مفاهیم مذکور به‌وسیلهٔ برای تعیین پارامترهای دینامیکی خاک‌ها انجام داده‌اند [۳۶]، [۳۷]، [۳۸]، [۳۹]، [۴۰].

صابرماهانی و همکاران [۴۱] در پژوهشی، برای تعیین پارامترهای دینامیکی از داده‌های ثبت‌شده به‌وسیلهٔ شتاب‌سنج و LVDT به‌همراه معادلهٔ تیر برشی یک‌بعدی ارائه شده به‌وسیلهٔ زگال[1] و همکاران [۴۲]، استفاده کردند. هم‌چنین الگاما[2] و همکاران [۴۳] و برنان[3] و همکاران [۴۴] نیز از معادلهٔ تیر برشی یک‌بعدی برای تعیین پارامترهای دینامیکی در آزمایش‌ها دینامیکی سانتریفیوژ مقیاس کوچک استفاده کردند. علاوه بر آن اخیراً در پژوهشی، بهادری و فرض‌علیزاده [۴۵] از مفاهیم مذکور برای بررسی تأثیر پودر و تکه‌های لاستیک روی پارامترهای دینامیکی ماسه‌های اشباع استفاده کردند.

معادلهٔ تیر برشی یک‌بعدی که نخستین بار زگال و همکاران [۴۲] ارائه کردند بدین‌صورت بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \ddot{u} \qquad (۸)$$

1. Zeghal
2. Elgama
3. Bernan

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

که در آن، $\ddot{u}$ شتاب در عمق z و ρ دانسیته خاک است.

از معادله تیر برشی، تنش برشی τ در عمق دلخواه z با انتگرال‌گیری از حاصل‌ضرب دانسیته $\rho(z)$ در شتاب $\ddot{u}(z)$ در بازه $(0,z)$ به‌صورت (۹) به‌دست می‌آید:

$$\tau(z) = \int_0^z \rho(z)\ddot{u}(z)dz \qquad (۹)$$

به‌طور معمول مقدار تنش برشی از اندازه‌گیری‌های میدانی که با استفاده از شتاب‌سنج‌هایی که تا سطح زمین ادامه می‌یابد به‌دست می‌آید. اما به‌ندرت می‌توان تاریخچه شتاب سطحی قابل اطمینانی را از آزمایش‌های مدل (میزلرزه یا سانتریفیوژ) به‌دست آورد. دلیل آن این است که سنسورهای شتاب سنج برای ثبت صحیح داده‌های زلزله باید در عمق مناسبی قرار گیرند تا تماس کافی با جسم خاک داشته باشند. بنابراین برای حل این مشکل پیشنهاد شده است که تاریخچهٔ زمانی شتاب سطح زمین با برون‌یابی خطی داده‌های شتاب جفت سنسورهای مدفون در عمق به‌دست آید:

$$\ddot{u}(z) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1}(z - z_1) \qquad (۱۰)$$

با جای‌گذاری $z = 0$ در رابطهٔ (۱۰) شتاب در سطح زمین برابر است با:

$$\ddot{u}(0) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1}(0 - z_1) \qquad (۱۱)$$

بنابراین، تنش برشی در عمق z از حل انتگرال معادله ۳ بدین‌صورت به‌دست می‌آید:

$$\tau(z) = \frac{1}{2}\rho z(\ddot{u}(0) + \ddot{u}(z)) \qquad (۱۲)$$

برای محاسبهٔ کرنش برشی در ابتدا باید جابه‌جایی‌ها را از داده‌های شتاب ثبت شده به‌وسیلهٔ سنسورهای شتاب‌سنج به‌دست می‌آوریم. داده‌های شتاب به‌کار برده شده برای محاسبات جابه‌جایی از چند هم ثانیه قبل از اعمال بارگذاری لرزه‌ای 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 مرحلهٔ 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 کم برای کاستن از خطای جابه‌جایی محور انتگرال‌گیری فیلتر می‌شوند (۰/۰۵–۲۰ هرتز). بعد از محاسبه سرعت، داده‌های حاصل دوباره در محدوده فرکانسی ذکر شده فیلتر می‌شوند. سپس جابه‌جایی با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

انتگرال‌گیری از این داده‌ها حاصل می‌شود. از رابطهٔ (۱۳) برای محاسبهٔ کرنش برشی استفاده می‌شود:

$$\gamma = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \quad (۱۳)$$

در این پژوهش مقادیر تنش برشی و کرنش برشی در اعماق ۳۷۵ میلی‌متری (نقطه میانی شتاب‌سنج‌های A_1 و A_2) و ۲۲۵ میلی‌متری (نقطه میانی شتاب‌سنج‌های A_2 و A_3) از سطح آزاد نمونه خاک محاسبه و حلقه‌های هیسترزیس ترسیم شدند. شکل‌های ۹ و ۱۰، نمونه‌هایی از حلقه‌های هیسترزیس تحت ۳ نوع بارگذاری و فرکانس‌های ۳ و ۷ هرتز تحت شتاب ورودی ۰/۳g و در عمق ۳۷۵ میلی‌متری از سطح آزاد مدل را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌ها، تفاوت‌های چشم‌گیری در شکل ظاهری حلقه‌های هیسترزیس تحت بارگذاری‌های مستطیلی، سینوسی و مثلثی وجود دارد (جهت چرخش حلقه‌ها به‌صورت ساعت‌گرد است). هم‌چنین مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس بارگذاری، دامنه کرنش برشی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، با افزایش فرکانس بارگذاری زاویهٔ حلقه‌ها نسبت به محور افق افزایش یافته و حلقه‌ها به محور قائم نزدیک‌تر می‌شوند به‌نحوی که این افزایش برای شکل موج مستطیلی بیش‌تر از دو شکل موج دیگر است.

ج) مدول برشی

مدول برشی به‌صورت نسبت دامنهٔ تنش برشی به دامنهٔ کرنش برشی تعریف می‌شود که می‌توان آن را از طریق یک حلقه هیسترزیس به‌دست آورد. مدول برشی برای یک حلقه دل‌خواه از رابطهٔ (۱٤) به‌دست می‌آید:

$$G = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (۱٤)$$

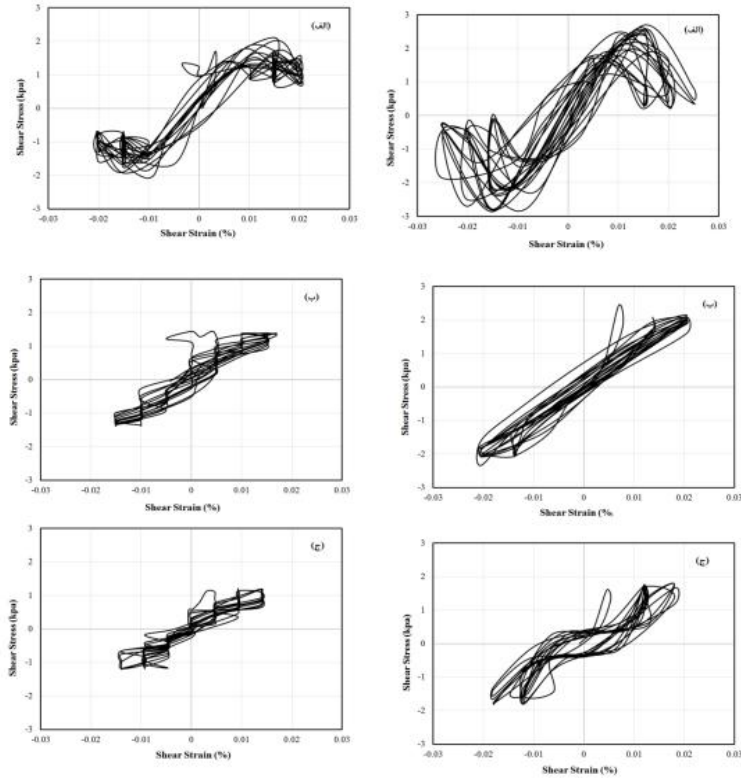
با توجه به این‌که منحنی‌های G-γ و D-γ از پارامترهای ورودی مهم در آنالیزهای دینامیکی است، از این‌رو، پس از محاسبهٔ مدول برشی، تغییرات مدول برشی در برابر کرنش برشی در اثر عوامل مختلف بررسی شده است.

۱. تأثیر فرکانس بارگذاری

شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ رابطهٔ بین مدول برشی و کرنش برشی برای حالات مختلف فرکانس، شکل موج و شتاب بارگذاری، در عمق ۳۷۵ میلی‌متری از سطح آزاد مدل را نشان می‌دهند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]



شکل ۹. نمونه‌ای از رفتار تنش- کرنش نمونه‌های خاک در عمق ۳۷۵ میلی متری، فرکانس ۷ هرتز و شتاب ورودی ۰/۳g تحت بارگذاری: الف) مستطیلی، ب) سینوسی و ج) مثلثی

نتایج نشان می‌دهند که در همهٔ حالت‌ها، با افزایش فرکانس مدول برشی نیز افزایش می‌یابد که این افزایش در فرکانس‌های پایین کم‌تر و با افزایش فرکانس بیش‌تر مشاهده می‌شود. به‌نحوی که در فرکانس ۹ هرتز ، مدول برشی بیشینه (G_{max}) دارای بیش‌ترین مقدار و در فرکانس ۰/۵ هرتز دارای کم‌ترین مقدار است (شکل ١٤). به‌نحوی که مثلاً تحت شتاب ۰/۱g و شکل موج مستطیلی، در فرکانس ۳ هرتز مقدار G_{max} برابر ۱۸/۵ مگاپاسکال و در فرکانس ۹ هرتز ۲۵/٦۲ مگاپاسکال است که افزایش حدود ۳۸ درصدی را نشان می‌دهد. به‌همین ترتیب تحت شتاب g ۰/۳ و شکل موج سینوسی، در فرکانس ۳ هرتز مقدار G_{max} برابر ۱۵/۳۵ مگاپاسکال و در فرکانس ۹ هرتز ۲۲/٤۵ مگاپاسکال است که افزایش حدود ٤٦ درصدی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

در واقع، بارگذاری دینامیکی در فرکانس بالا باعث ایجاد تماس و برخورد بیش‌تر بین دانه‌ها شده و دانه‌های خاک در اثر این درگیری تمایل به کاهش حجم از خود نشان می‌دهند که این مسئله به‌صورت نشست خاک، خود را نشان داده و در نتیجه نزدیک‌تر شدن بیش‌تر دانه‌ها به یک‌دیگر وچگال‌تر شدن خاک، افزایش مقاومت خاک حاصل می‌شود. از طرف دیگر با افزایش کرنش برشی میزان مدول برشی کاهش می‌یابد. قابل ذکر است با توجه به اینکه نمونه‌های خاک همگی در حالت خشک آزمایش شده‌اند، از این‌رو، دامنهٔ تغییرات کرنش برشی محدود است که با افزایش فرکانس مقداری افزایش می‌یابد.

۲. تأثیر شکل موج بارگذاری

مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱٦، در یک فرکانس ثابت، نمونه‌های خاک آزمایش شده تحت شکل موج مستطیلی رین 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 است و کمی از آن بیش‌تر است. با توجه به سرعت بیش‌تر بارگذاری مستطیلی[1] نسبت به دو شکل موج دیگر و هم‌چنین مقایسهٔ منحنی‌های هیسترزیس به‌دست آمده از سه شکل موج مختلف (شکل‌های ۹ و۱۰) نتایج به‌دست آمده قابل انتظار است. برای مثال تحت شتاب g ۰/۱ و فرکانس ۲ هرتز، مقدار G_{max} تحت شکل موج مستطیلی نسبت به‌صورت موج سینوسی و مثلثی به‌ترتیب ۲۲ و ۳۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. به‌همین ترتیب تحت شتاب g ۰/۳ و فرکانس ۷ هرتز، مقدار G_{max} تحت شکل موج مستطیلی نسبت به‌صورت موج سینوسی و مثلثی به‌ترتیب ۱٤ و ۲۳ درصد افزایش نشان می‌دهد. مشابه این روند در سایر حالت‌ها نیز مشاهده می‌شود. علاوه بر آن با افزایش کرنش برشی مقادیر مدول برشی تحت شکل موج‌های مختلف به هم نزدیک شده و از تأثیر شکل موج بر آن کاسته می‌شود.

۳. تأثیر شتاب ورودی

در مورد تأثیر شتاب ورودی روی مدول برشی نیز چنان‌که از شکل‌های ۱۱تا ۱٦ در فرکانس‌ها و شکل موج‌های مختلف مشخص است، با افزایش شتاب ورودی ، کرنش برشی افزایش یافته و در نتیجه با توجه به رابطهٔ معکوس مدول برشی و کرنش برشی، از میزان

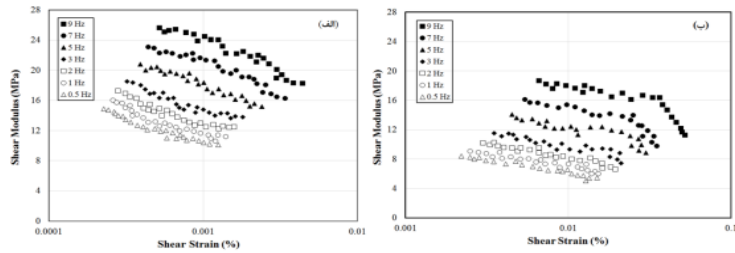
1. rapid cycling loading

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

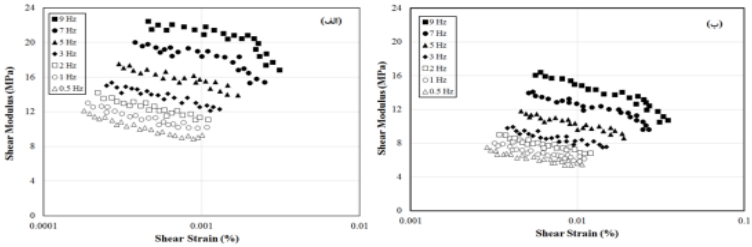
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

مدول برشی در همه حالت‌ها کاسته می‌شود (مقادیر مدول برشی در فرکانس‌ها و شکل موج‌های مختلف تحت شتاب ورودی ۰/۱g بیش‌تر از مقادیر مدول برشی تحت شتاب ورودی ۰/۳g است). به‌عنوان مثال، تحت شکل موج مستطیلی و فرکانس ۱ هرتز، مدول برشی بیشینه در شتاب ۰/۱g، برابر ۱۶/۰۵ مگاپاسکال و در شتاب ۰/۳gبرابر ۹/۰۵ مگاپاسکال است که تفاوت ۷۷ درصدی را نشان می‌دهد. هم‌چنین تحت شکل موج سینوسی و فرکانس ۵ هرتز، مدول برشی بیشینه در شتاب ۰/۱gو ۰/۳g، به‌ترتیب برابر ۱۷/۵۵ و۱۱/۸ مگاپاسکال است که تفاوت ٤٨ درصدی را نشان می‌دهد.

هم‌چنین در شتاب ورودی پایین‌تر تأثیر شکل موج روی مقادیر مدول برشی به‌ویژه مدول برشی بیشینه (G_{max}) بیش‌تر دیده می‌شود (شکل١٤). به‌نحوی که در شتاب ورودی ۰/۱g تفاوت بین مقادیر مدول برشی بیشینه (G_{max}) تحت شکل موج‌های مختلف نسبتاً بیش‌تر از حالت شتاب ورودی ۰/۳g است (این تفاوت بین شکل موج‌های مستطیلی و سینوسی بیش‌تر مشاهده می‌شود).

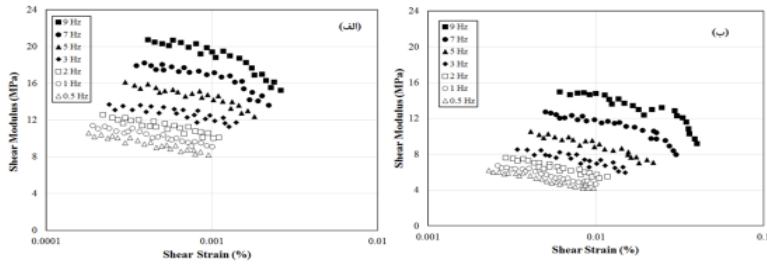


شکل۱۱. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری مستطیلی و شتاب ورودی الف) ۰/۱g، ب) ۰/۳g

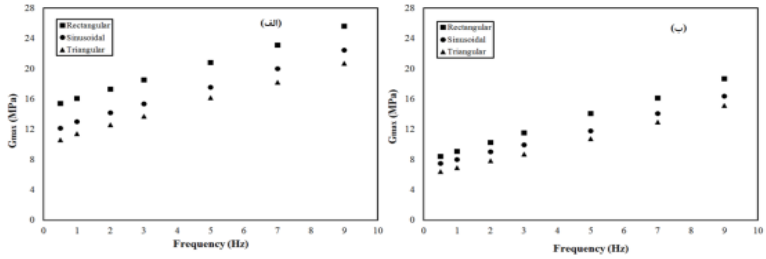


شکل۱۲. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری سینوسی و شتاب ورودی الف) ۰/۱g، ب) ۰/۳g

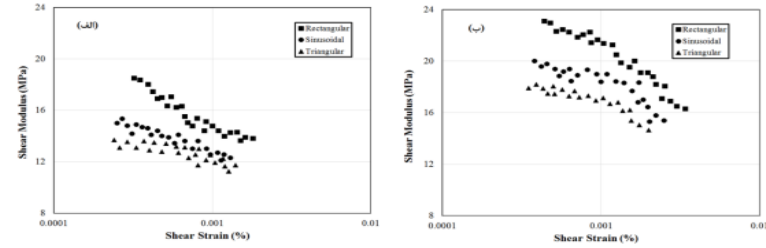
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]



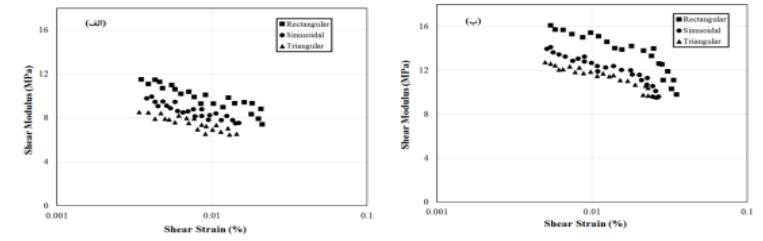
شکل۱۳. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری مثلثی و شتاب ورودی الف) ۰/۱g، ب) ۰/۳g



شکل ۱٤. تغییرات G_{max} در برابر فرکانس بارگذاری در شتاب ورودی الف) ۰/۱g، ب) ۰/۳g



شکل۱۵. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در شتاب ورودی ۰/۱g و فرکانس بارگذاری الف) ۳ هرتز، ب) ۷ هرتز



شکل۱٦. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در شتاب ورودی ۰/۳g و فرکانس بارگذاری الف) ۳ هرتز، ب) ۷ هرتز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

٤. تغییرات مدول برشی نرمالیزه شده (G/G_{max}) در برابر کرنش برشی

باتوجه به این‌که مقدار مدول برشی (G) نسبت به مدول برشی بیشینه (G_{max}) دارای اهمیت و کاربرد عملی بیش‌تری است، از این‌رو، تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی (γ) برای خاک‌ها در شرایط مختلف اهمیت زیادی دارد. از این‌رو منحنی‌های $G/G_{max}-\gamma$ ارائه شده به‌وسیلهٔ سید و همکاران [٤٦] برای سالیان متمادی به‌وسیلهٔ محققان مختلف استفاده شده است. هم‌چنین، رولینز و همکاران [٤٧] نیز منحنی‌هایی در رابطه با تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی پیشنهاد داده‌اند. در این پژوهش، مقادیر مدول برشی در کرنش‌های برشی مختلف به‌دست آمده و بعد از تقسیم بر مدول برشی بیشینه، تغییرات آنها (G/G_{max}) در برابر کرنش برشی ترسیم شده و با نتایج ارائه شده به‌وسیلهٔ محققان مذکور مقایسه شده است. شکل‌های ۱۷ الی ۱۹، منحنی‌های $G/G_{max}-\gamma$ را برای شکل موج‌های مختلف، تحت شتاب‌های ورودی ۰/۱ g و ۰/۳ g و فرکانس‌های ۳ و ۷ هرتز نشان می‌دهند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در هر ۳ شکل موج، تحت شتاب ورودی ۰/۱g، مقادیر G/G_{max} تقریباً در محدوده مرزهای پیشنهاد شده به‌وسیلهٔ سید و همکاران قرار می‌گیرند، با این توضیح که در شکل موج مستطیلی مقادیر G/G_{max} به حد پایین منحنی‌های مذکور نزدیک‌تر بوده است ولی در شکل موج مثلثی به حد بالایی نزدیک‌ترند. با افزایش فرکانس بارگذاری (از ۳ هرتز به ۷ هرتز)، مقادیر مربوط در تمام شکل موج‌ها، به حد بالایی منحنی‌های سید و همکاران نزدیک‌تر شده و در بعضی نقاط از آن فراتر می‌روند. اما تحت شتاب ورودی ۰/۳g در هر ۳ شکل موج، مقادیر G/G_{max} به حد بالایی منحنی‌های رولینز و همکاران نزدیک‌تر است و با افزایش فرکانس بارگذاری، از این حد نیز فراتر می‌روند.

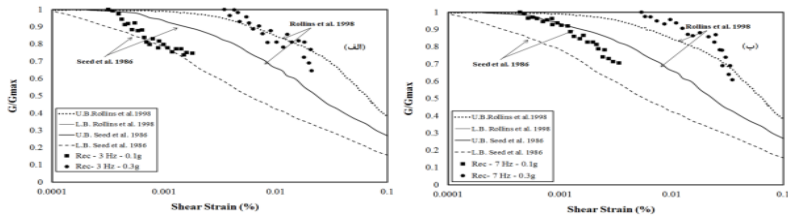
د) نسبت میرایی

نسبت میرایی برای یک حلقه ایده‌آل از رابطهٔ (۱۵) به‌دست می‌آید. که نخست باید انرژی تلف شده در هر سیکل (ΔW) و انرژی ذخیره شده در هر سیکل ($W_{elastic}$) را محاسبه کرد (شکل ۲۰):

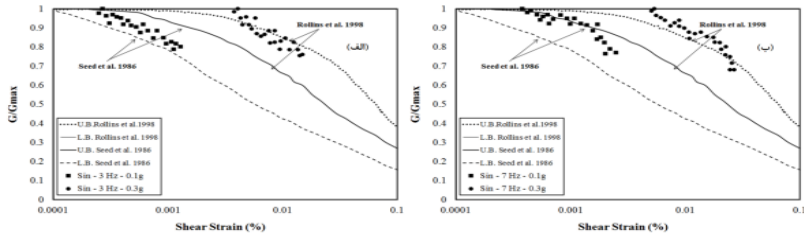
$$D=\frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W}{W_{elastic}}=\frac{1}{4\pi}\frac{\oint \tau d\gamma}{0.125\times\Delta\tau\times\Delta\gamma} \qquad (۱۵)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

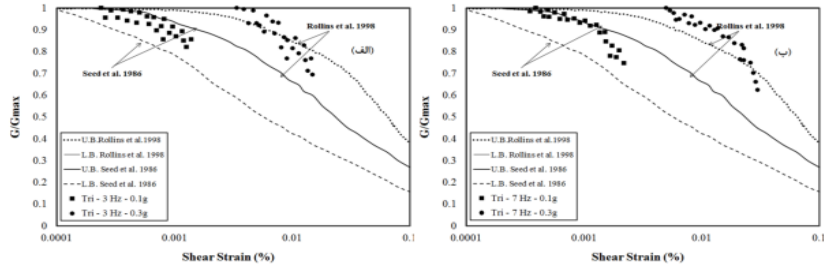
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]



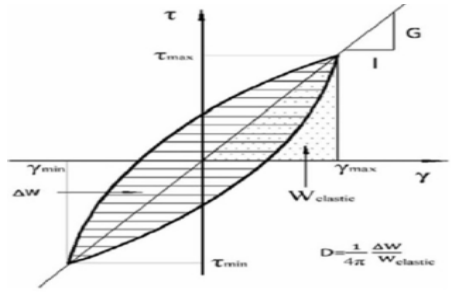
شکل۱۷. تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی تحت شکل موج مستطیلی و فرکانس الف) ۳ هرتز، ب) ۷ هرتز



شکل ۱۸. تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی تحت شکل موج سینوسی و فرکانس الف) ۳ هرتز ب) ۷ هرتز



شکل ۱۹. تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی تحت شکل موج مثلثی و فرکانس الف) ۳ هرتز، ب) ۷ هرتز



شکل ۲۰. تعریف مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی [٤٠]، [٤٥]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

۱. تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری

تغییرات نسبت میرایی در برابر کرنش برشی برای حالات مختلف فرکانس، شکل موج و شتاب بارگذاری در عمق ۳۷۵ میلی‌متری از سطح آزاد مدل، در شکل‌های ۲۱ تا ۲۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در تمام حالات، با افزایش کرنش برشی مقدار ضریب میرایی افزایش می‌یابد. در سطوح کرنش پایین مقادیر نسبت میرایی در فرکانس‌ها و شکل موج‌های مختلف پایین و بسیار نزدیک به هم است اما در سطوح کرنش بالاتر، افزایش در فرکانس باعث افزایش نسبت میرایی می‌شود. که این افزایش ، در فرکانس‌های بالاتر بیش‌تر مشاهده می‌شود به‌نحوی که در فرکانس‌های پایین، افزایش در فرکانس باعث افزایش نسبتاً کمی در مقدار نسبت میرایی می‌شود. با توجه به این‌که نسبت میرایی در خاک معمولاً برای نشان دادن خواص جذب انرژی در خاک یا میزان اتلاف انرژی در آن استفاده می‌شود، زمانی که بارهای دینامیکی با سرعت زیاد (فرکانس بارگذاری بالا) بر خاک وارد می‌شوند سبب می‌شود تا تماس و برخورد دانه‌ها با یک‌دیگر افزایش پیدا کرده و اتلاف انرژی در محل برخورد دانه‌ها با یک‌دیگر افزایش یابد. هم‌چنین با افزایش کرنش برشی تأثیر شکل موج بر روی نسبت میرایی بیش‌تر نمایان می‌شود به‌نحوی که نمونه‌های خاک تحت بارگذاری مستطیلی بیش‌ترین نسبت میرایی را از خود نشان می‌دهند. تحت بارگذاری سینوسی و مثلثی نیز مقادیر نسبت میرایی نزدیک به‌هم است وبرای بارگذاری سینوسی کمی بیش‌تر است.

۲. تأثیر شتاب ورودی

با توجه به شکل‌های ۲۱ تا ۲۳، با افزایش شتاب ورودی با توجه به افزایش کرنش برشی، نسبت میرایی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن در فرکانس‌های بیش‌تر با توجه به افزایش بیش‌تر کرنش برشی، تأثیر افزایش شتاب ورودی روی افزایش نسبت میرایی بیش‌تر مشاهده می‌شود. در هر دو شتاب ورودی (۰/۱g و ۰/۳g) میزان تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری بر نسبت میرایی مشابه هم بوده و تفاوت چشم‌گیری دیده نمی‌شود.

۳. نسبت میرایی میانگین

چنان‌که در شکل‌های ۲۱ تا ۲۳ مشاهده می‌شود، تغییرات نسبت میرایی در مقابل کرنش برشی نامنظم و غیریک‌نواخت است و این امر باعث می‌شود تا نتوان مقایسه عددی دقیقی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

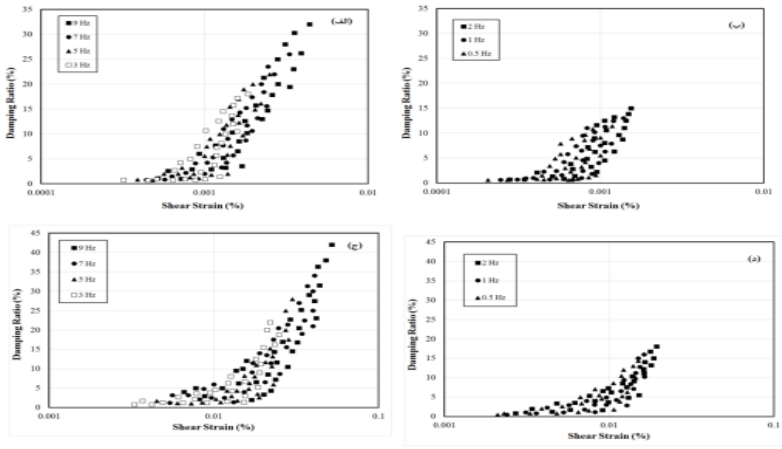
بین مقادیر نسبت میرایی در حالت‌های مختلف انجام داد. تغییرات نامنظم نسبت میرایی در برابر کرنش‌برشی با نتایج سایر محققان تطابق دارد [٤١]، [٤٤]. صابرماهانی و همکاران [٤١] با مشاهده روند غیریک‌نواخت نسبت میرایی در مقابل کرنش برشی برای مقایسهٔ مقادیر میرایی مدل‌های مختلف با یک‌دیگر پارامتری به‌عنوان D_m یا مقدار میانگین نسبت میرایی معرفی کردند. پارامتر فوق از میانگین‌گیری مقادیر نسبت میرایی در هر یک از آزمایش‌ها به دست می‌آید. از این پارامتر در بررسی‌های پیشین به‌وسیلهٔ محققان مختلف [٤٠]، [٤٥]، [٤٨] نیز استفاده شده است. شکل ٢٤ مقادیر نسبت میرایی میانگین (D_m) در برابر فرکانس بارگذاری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ٢٤، مقادیر نسبت میرایی میانگین در همه حالات (تمام شکل موج‌ها و شتاب‌های ورودی)، با افزایش فرکانس بارگذاری، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، تحت شتاب ورودی ۰/۱g و شکل موج مستطیلی، نسبت میرایی میانگین از فرکانس ۳ به ۵ هرتز، در حدود ٢٤ درصد و از فرکانس ۵ به ۷ هرتز، ۲۰ درصد افزایش می‌یابد، مشابه این روند در سایر فرکانس ها و هم چنین شکل موج‌ها و شتاب‌های اعمال شده مشاهده می‌شود.

از طرف دیگر با مقایسه نسبت میرایی میانگین بین شکل موج‌های مختلف نیز می‌توان نتیجه گرفت که شکل موج مستطیلی دارای مقادیر میرایی بیش‌تری نسبت به دو شکل موج دیگر است، به‌نحوی که مثلا در فرکانس ۲ هرتز و شتاب ۰/۱g، نسبت میرایی میانگین تحت شکل موج مستطیلی نسبت به شکل موج سینوسی و مثلثی به‌ترتیب ٢٦ و ٤٧درصد بیش‌تر است.

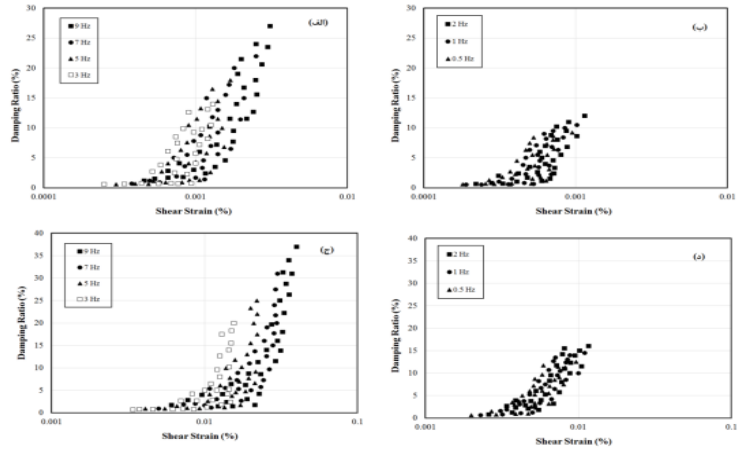
هم‌چنین با افزایش شتاب ورودی از ۰/۱gبه ۰/۳g، با توجه به افزایش کرنش برشی، در تمام فرکانس‌ها و شکل موج‌های اعمالی نسبت میرایی میانگین افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، تحت شکل موج سینوسی و فرکانس ۵ هرتز، مقدار نسبت میرایی میانگین در شتاب ۰/۱g، برابر ۷/۱۵٪ و در شتاب ۰/۳gبرابر ۸/٦٪ است که افزایش ۲۰ درصدی را نشان می‌دهد. هم‌چنین تحت شکل موج مثلثی و فرکانس ۹ هرتز، مقدار نسبت میرایی میانگین در شتاب ۰/۱g، برابر ۱۰٪ و در شتاب ۰/۳gبرابر ۱۲٫۸٪ است که ۲۸ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]



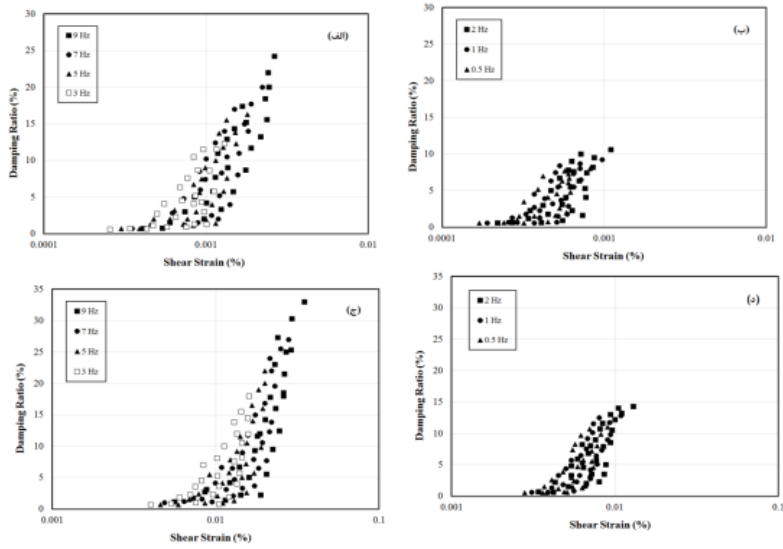
شکل۲۱. تغییرات نسبت میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری مستطیلی و شتاب ورودی الف و ب) ۰/۱g، ج و د) ۰/۳g



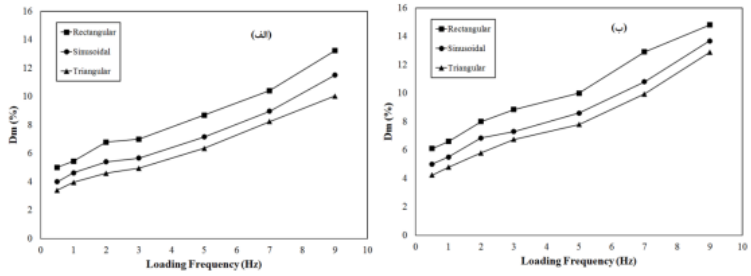
شکل۲۲. تغییرات نسبت میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری سینوسی و شتاب ورودی الف و ب) ۰/۱g، ج و د) ۰/۳g

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]



شکل۲۳. تغییرات نسبت میرایی با کرنش برشی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری مثلثی و شتاب ورودی الف و ب) ۰/۱g، ج و د) ۰/۳g



شکل۲٤. تغییرات میانگین نسبت میرایی(D_m) با فرکانس بارگذاری در شتاب ورودی الف) ۰/۱g ب) ۰/۳ g

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری روی پارامترهای دینامیکی خاک ماسه‌ای خشک با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه بررسی شد. این نتایج به‌دست آمدند:

- مدول برشی با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد که این افزایش در فرکانس‌های بالاتر بیش‌تر مشاهده می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

- تغییرات مدول برشی بیشینه (G_{max}) به‌عنوان شاخصی از تغییرات مدول برشی، نشان می‌دهد که این پارامتر در فرکانس ۹ هرتز دارای بیش‌ترین مقدار و در فرکانس ۰/۵ هرتز دارای کم‌ترین مقدار است.
- تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی نشان می‌دهد که تحت شتاب ورودی ۰/۱g، برای هر سه شکل موج، مقادیر G/G_{max} تقریبا در محدوده مرزهای پیشنهاد شده به‌وسیلهٔ سید و همکاران قرار می‌گیرند، در حالی که تحت شتاب ورودی ۰/۳g، به حد بالایی منحنی‌های Rollins و همکاران نزدیک‌ترند.
- تأثیر فرکانس بارگذاری روی نسبت میرایی خاک در سطوح پایین کرنش ناچیز بوده است ولی با افزایش سطوح کرنش، افزایش در فرکانس بارگذاری باعث افزایش نسبت میرایی می‌شود.
- با توجه به تغییرات نامنظم ضریب میرایی در برابر کرنش برشی، پارامتری به‌نام ضریب میرایی میانگین تعریف می‌شود. این پارامتر با افزایش فرکانس بارگذاری و افزایش شتاب ورودی، افزایش می‌یابد.
- نمونه‌های خاک بیش‌ترین مدول برشی و نسبت میرایی را تحت بارگذاری مستطیلی از خود نشان می‌دهند. به‌نحوی که در تمام فرکانس‌ها و شتاب‌های ورودی آزمایش شده، 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 بسیار به‌هم نزدیک بوده است، با این‌حال مقادیر آن‌ها برای شکل موج سینوسی، کمی بیش‌تر از شکل موج مثلثی است.
- در همهٔ موارد با افزایش دامنه شتاب ورودی، کرنش برشی افزایش یافته و در نتیجه مدول برشی کاهش و ضریب میرایی افزایش می‌یابد. در فرکانس‌های بالاتر، تأثیر افزایش شتاب ورودی روی افزایش ضریب میرایی بیش‌تر مشاهده می‌شود، در حالی‌که تأثیر آن روی کاهش مدول برشی در همه فرکانس‌ها ملموس است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

تقدیر و تشکر

این تحقیق در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه انجام شد. بدین‌ترتیب از مسئولین مرکز به‌ویژه آقای مهندس امیلی تشکر و قدردانی می‌کنیم.

منابع

1. Humar J. L., "Dynamic of Structures (2nd Edition ed.)", New York: Taylor & Francis (2005).
2. Dutta T. T., Saride S., Jallu M., "Effect of saturation on dynamic properties of compacted clay in a resonant column test", Geomechanics and Geoengineering, Vol. 12 (3) (2017) 181-190.
3. Panuska J., Frankovska J., "Effect of a Void ratio on the small strain shear modulus G_{max} for coarse-grained soils", Procedia Engineering, Vol. 161 (2016) 1235-1239.
4. Dash H. K., Sitharam T. G., "Undrained cyclic and monotonic strength of sand-silt mixtures", Journal of Geotechnical Geological Engineering, Vol. 29 (2011) 555-570.
5. Dash H. K., Sitharam T. G., "Undrained cyclic pore pressure response of sand- silt mixtures: effect of non-plastic fines and other parameters", Journal of Geotechnical Geological Engineering, Vol. 27 (2009) 501-517.
6. Vucetic M., Dobry R., "Effect of soil plasticity on cyclic response", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117 (1) (1991) 89-107.
7. Shivaprakash B. G., Dinesh S. V., "Effect of plastic fines on initial shear modulus of sand-clay mixtures", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 22 (1) (2018) 73-82.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

8. Shibuya S., Mitachi T., Fukuda F., Degoshi T., "Strain-Rate Effects on Shear Modulus and Damping of Normally Consolidated Clay", Geotechnical Testing Journal, Vol. 18 (3) (1995) 365-375.
9. Presti D. C. L., Pallara O., Cavallaro A., "Damping Ratio of Soils from Laboratory and In-situ Tests", In Proceddings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, (1997) 6-12.
10. Dobry R., Vucetic M., "Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits", In International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, (1987) 51-87.
11. Malagnini L., "Velocity and Attenuation Structure of Very Shallow Soils: Evidence for Frequency Dependent Q", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 86 (5) (1996) 1471-1486.
12. Thiers G. R., "The behaviour of saturated clay under seismic loading conditions", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineers, University of California, Berkeley (1965).
13. Seed H. B., Chan C. K., "Pulsating load tests on samples of clay and silt from anchorage", Alaska. Report on Anchorage Area Soil Studies to U.S. Army Engineer District, Anchorage, Alaska, Shannon & Wilson, Inc., Seattle, Wash (1964).
14. Mulilis J. P., Townsend F. C., Horz, R. C., "Triaxial testing techniques and sand liquefaction", Dynamic Geotechnical testing, ASTM STP 654 (1978) 265-279.
15. Lin M-L., Huang T-H., You J-C., "The effects of frequency on damping properties of sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 15 (4) (1996) 269-278.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

16. Zhang X. J, Aggour M. S, "Damping determination of sands under different loadings", In Eleventh world conference on earthquake engineering. ISBN 0 08 042822 3.Paper No. 364 (1996).
17. Araei A .A., Razeghi H. R., Tabatabaei S. H., Ghalandarzadeh A., "Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic strength of modeled rockfill materials", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 33 (2012) 1-18.
18. Dash H. K., Sitharam T. G., "Effect of frequency of cyclic loading on liquefaction and dynamic properties of saturated sand", International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 10(5) (2016) 487-492.
19. Kramer S. L., "Geotchnical Earthquake Engineering". Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (1996).
20. Khan Z., ElNaggar M. H., Cascante G., "Frequency dependent dynamic properties from resonant column and cyclic triaxial tests", Journal of the Franklin Institute, Vol. 348 (7) (2011) 1363-1376.
21. Ghayoomi M., Supruneko G., Mirshekari M., "Cyclic triaxial test to measure strain-dependent shear modulus of unsaturated sand", International Journal of Geomechanics, Vol. 17 (9) (2017) 04017043.
22. Airey D. W., Wood D. M., "An evaluation of direct simple shear tests on clay", Geotechnique, Vol. 37(1) (1987) 25-35.
23. Cascante G., Vanderkooy J., Chung W., "Difference between current and voltage measurements in resonant-column testing", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40 (2003) 806-820.
24. Cascante G., Vanderkooy J., Chung W., "A new mathematical model for resonant-column measurements including Eddy-Current effects", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42 (2005) 121-135.
25. Ishihara K., Li S. I., "Liquefaction of saturated sand in triaxial torsion shear tests", Soils and Foundations, Vol. 12 (2) (1972) 19-39.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

26. Ishihara K., "Soil behavior in earthquake geotechnics". Oxford: Clarendon Press (1996).
27. Bahadori H., Ghalandarzadeh A., Towhata I., "Effect of Non plastic silt on the anisotropic behavior of sand", Soils and Foundations , Vol. 48 (4) (2008) 531-545.
28. Lombardi D., Bhattacharya S., Scarpa F., Bianchi M., "Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries", Soil Dynamic Earthquake Engineering, Vol. 69 (2015) 46-56.
29. El-Emam M. M., Bathurst R. J., "Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining walls", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 25 (1) (2007) 33-49.
30. Betten J., "Creep Mechanics". Springer: New York (2002) 187.
31. Biot M. A., "Theory of propagation elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low -frequency range", Journal of Acoustical Society of America, 28 (1956) 168-178.
32. Hsieh P. C., "A viscoelastic model for the dynamic response of soils to periodical surface water disturbance", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 30 (2006) 1201-1212.
33. Dey A., Basudhar P. K., "Applicability of burger model in predicting the response of viscoelastic soil beds", Geotech, Spec. Publ., 199 (2010) 2611-2620.
34. Kerr, A.D., "Viscoelastic Winkler foundation with shear interactions". J. Eng. Mech. Div. Proceed. ASCE 87(3) (1961) 13-30.
35. Lyakhov G. M., "Determination of the viscous properties of soil", Prikl. Matem. Mekh (4) (1968).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

36. Koga Y., Matsuo O., "Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground", Soil and Foundation, Vol. 30(4) (1990) 162-174.

37. Abdel-Gaffar A. M., Scott R. F., "Shear moduli and damping factors of earth dam", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105 (GT12) (1979) 1405-1426.

38. Kikusawa M., Hasegawa T., "Analysis of model embankment dam by shaking table test", Soil and Foundation, Vol. 25 (1) (1985) 1-14.

39. Ghayamghamian M. R., Kawakami H., "On-site nonlinear hysteresis curves and dynamic soil properties", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126 (6) (2000) 543-555.

40. Bahadori H., Manafi S., "Effect of tyre chips on dynamic properties of saturated sands", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 15 (3) (2015) 116-128.

41. Sabermahani M., Ghalandarzadeh A., Fakher A., "Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27(2) (2009) 121-136.

42. Zeghal M., Elgamal A. W., Tang H. T., Stepp J. C., "Lotung downhole array–II: Evaluation of soil nonlinear properties", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121 (4) (1995) 363-378.

43. Elgamal A., Yang Z., Lai T., Kutter B. L., "Dynamic Response of Saturated Dense Sand in Laminated Centrifuge Container", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,Vol. 131 (5) (2005) 598-609.

44. Brennan A. J., Thusyanthan N. I., Madabhushi S. P., "Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge test", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131(12) (2005) 1488-1497.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]

45. Bahadori H., Farzalizadeh R., "Dynamic Properties of Saturated Sands Mixed with Tyre Powders and Tyre Shreds", International Journal of Civil Engineering, in press, (2016) https://doi.org/10.1007/s40999-016-0136-9.

46. Seed H. B., Wong R. T., Idriss I. M., Tokimatsu K., "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", Journal of Geotechnical Engineering, (1986) 112 (11) 1016-32.

47. Rollins K. M., Evans M. D., Diehl N. B., Daily W. D., "Shear modulus and damping relationships for gravels", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE (1998) 124 (5) 398-405.

48. Manafi S., Hazarika H., Bahadori H., Chaudhary B., "Dynamic behavior of saturated sandy soil reinforced with non-woven polypropylene fiber", International Journal of Geotechnical Engineering, 12 (1) (2018) 89-100, http://doi:10.1080/19386362.2016.1250978.

علائم و اختصارات

C_c	ضریب انحنا
C_u	ضریب یکنواختی
D	ضریب میرایی
D_{10}	اندازه ای که ۱۰% دانه های خاک از آن کوچکتر است
D_{30}	اندازه ای که ۳۰% دانه های خاک از آن کوچکتر است
D_{60}	اندازه ای که ۶۰% دانه های خاک از آن کوچکتر است
e_{min}	نسبت تخلخل حداقل
e_{max}	نسبت تخلخل حداکثر
F_c	مقدار ریزدانه
G	مدول برشی
G_S	چگالی ویژه
g	شتاب زمین
M_S	جرم ماسه
$\ddot{u}_i$	شتاب در موقعیت i
V_T	حجم کل محفظه مدل
$W_{elastic}$	حداکثر انرژی الاستیک ذخیره شده در هر سیکل
z_i	عمق موقعیت i
ΔW	انرژی از دست رفته در هر سیکل
ρ_d	چگالی خاک
ρ_w	چگالی آب
τ	تنش برشی
γ	کرنش برشی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.2.5.5]