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

چکیدہ

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 ۵/، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۹ هرتز و تحت شتاب ورودی 1g/و 7g/۶ 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 مییاید. نمونههای خاک تحت بارگذاری مستطیلی بیشترین مقدار و تحت جارگذاری مثلثی کمترین مقدار مدول برشی و نسبت میرایی را از خود نشان میدهد. در

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

h.bahadori@urmia.ac.ir ^{*}نویسنده مسئول

سازهها به بارهای لرزهای، باد و بارهای امواج استفاده می شود [۱]. به طورکلی عوامل مؤثر بر رفتار دینامیکی خاکها به دو دسته تقسیم می شوند: ۱. نوع و مشخصات خاک مانند درصد رطوبت [۲]، نسبت تخلخل [۳]، [٤]، [٥] و پلاستیسیته خاک [۲] و [۷]، ۲. پارامترهای مربوط به بار وارد بر خاک از قببل تعداد سیکلها [۸]، [۹]، فرکانس [۲]، [۸]، [۹]، [۰۱]، [۱۱] و شکل موج بارگذاری [۱۲]، [۱۳]، [۱۶]. از آنجاکه پاسخ دینامیکی خاک تا حدود زیادی به مشخصات بار وارد بر آن بستگی دارد، از این رو، 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 [۱۵] 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.

آقایی آرایی 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. درحالی که با افزایش فرکانس بارگذاری، نسبت میرایی نه تنها در سطوح کرنش پایین بلکه در سطوح کرنش متوسط و بالا نیز افزایش می باد. همچنین مقادیر مدول برشی و نسبت میرایی برای شکل موج سینوسی کمی بیشتر از شکل موج 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 سيكلى [١٩]، [٢٠]، [٢١]، برش ساده سيكلى [٢٢]، ستون تشديد [٢٠]، [٢٣]، [٢٤] و سەمحورى پيچشى [٢٥]، بەمنظور تعيين پارامترهاي ديناميكي خاكھا و عوامل مؤثر بر آنھا انجام گرفته است، اما نتایج این قبیل آزمایش ها معمولاً تحت تأثیر نبود اطمینان، محدودیت ها و تجهیزات آزمایش قرار می گیرند. از جمله این عدم اطمینانها (قطعیت) می توان به تنوع ذاتی و ناهمسانی خاک، حفاری و دستخوردگی نمونه و خطاهای مربوط به تفسیر نتایج آزمایش اشاره کرد [۱۹]. از طرف دیگر این آزمایش ها اغلب برای اندازهگیری پارامترهای دینامیکی خاک در دامنه های یائین کرنش برشی استفاده می شوند. برای مثال، از آزمایش ها ستون تشدید فقط در دامنه های کرنش کمتر از ۰/۱٪ استفاده می شود [۲٦]. از این رو به عنوان جایگزین، از آزمایشهای مدل برای اندازهگیری پارامترهای دینامیکی خاکها می توان استفاده کرد. آزمایش های مدل می توانند تحت اثر شتاب جاذبهٔ زمین و تحت اثر شتاب های جاذبه بالاتر انجام گیرند. آزمایش میز لرزه lg، آزمایش مدل است که تحت شتاب جاذبهٔ زمین انجام می گیرد. آزمایش های میز لرزه در اعمال دامنه های بزرگ کنترل شده، اعمال حرکتهای ورودی چندمحوره، امکان استفاده آسان از ابزارها و حس گرهای 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 1<u>g</u> آمادهسازی و متراكم شود. اگرچه تاکنون بررسی های 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 آزمایش های مدل که دارای برتریهای چشمگیری نسبت به بقیه روش ها است، وجود دارد. همچنین با توجه به این که مصالح دانهای غیرچسبنده مانند مصالح آبرفتی ماسهای، بخش عمدهای از رسوبات طبیعی را تشکیل می دهند و سازه های بسیاری نیز روی این گونه خاکهای دانه ای بسته به شرایط بار گذاری 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 آزمایش های 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 نمونه های خاک در طول بارگذاری با فرکانس،ها، شکل موجها و شتابهای ورودی مختلف برای تولید حلقههای هیسترزیس نمونههای آزمایش شده در دامنههای مختلف کرنش استفاده شده است و سیس حلقههای هیسترزیس تولید شده برای تعین ضریب میرایی و مدول برشی در سطوح مختلف کرنش استفاده می شوند. در نهایت تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری روی تغییرات هر کدام از یارامتر های مذکور بررسی می شود.

وسایل و تجهیزات آزمایش

الف) ميز لرزه

از میز لرزه هیدرولیکی دارای یک درجه آزادی که در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه طراحی و ساخته شده برای انجام آزمایش ها استفاده شده است. ابعاد میز لرزه ۲ در ۳ متر بوده و حداکثر ظرفیت بارگذاری آن ۵ تن است و قادر به شبیه سازی 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 ۱/۵gو حداکثر فرکانس ۲۰ هرتز را دارد. همچنین حداکثر تغییر مکانی که به این سیستم می تواند وارد شود ۲٤۰ میلی متر است. این دستگاه دارای دو 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 ۸۰×۲۰×۱۸۰ 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 ۱۳۱۱ 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)	Gs	F _c (%)	C_u	C _c	e _{max}	e_{min}
(SP) فیروزکوہ ۱٦۱	•/١٦	•/٢١	٠/٣	۲/٦٥	١	1/AV	• /٨٨	•/AV£	•/٥٤٨

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 ٥×٥ و ٥×٢ سانتیمتر ساخته شده و به کف سنسورها بهصورت محکم چسبانده می شود. همچنین از سنسور جابه جایی سنج (LVDT)، برای اندازه گیری تغییر مکان های خطی استفاده می شود. برای ثبت اطلاعات، همهٔ سنسورها به دستگاه دیتالاگر دینامیکی ۱۲ کاناله ART-DL16D متصل می شوند. این دستگاه قادر است تغییر ولتاژهای ایجاد شده به وسیلهٔ 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 می شود.

۱۰۰ هر نمونه خاک با استفاده از ماسه خشک فیروزکوه در چهار ارتفاع یکسان میلیمتری تا رسیدن به ارتفاع کل ۲۰۰ 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 (Gs) و تخلخل بیشینهٔ ماسه (e_{max}) که معادل با تراکم نسبی صفر است، از راابطهٔ (۱) بهدست میآید: $\rho_d = \frac{G_S}{1+e_{max}} \times \rho_w \to M_S = \rho_d \times V_T$ (۱)

که در آن، V_{T} حجم کل محفظه مدل و M_{s} جرم ماسه خشک است.

به منظور دستیابی به دانسیتهٔ نسبی هدف یکسان برای تمامی لایه ها ، ریختن خاک باید از یک ارتفاع ثابت انجام گیرد. در حین فرایند تراکم، شتاب سنجهای A₁ م A₂ و A₃ در اعماق ٤٥٠، ٣٠٠ و ١٥٠ میلی متری از سطح آزاد نمونه، 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. تراکم خاکهای اطراف شتاب سنجهای قرار داده شده درون خاک برای جلوگیری از صدمه دیدن و جابه جایی آنها باید با دقت بیش تری انجام شود. یک جابه جایی سنج (L₁) روی سطح آزاد خاک قرار داده می شود تا جابه جایی های قائم سطح خاک را اندازه گیری کند. پاسخ خاک بهصورت شتاب در اعماق مختلف و بهصورت جابهجایی در سطح خاک ثبت می شود. شکل شماتیک نمونه های آزمایش همراه با ابزاربندی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این که محفظه صلب مدل می تواند پاسخ دینامیکی مدل های آزمایش را تحت تأثیر قرار دهد [۲۹]. از این رو، به منظور کاهش اثرات منفی آن، داده های شتاب در محدوده ۰,۰۵ تا ۲۰ هرتر فیلتر می شوند.

در این پژوهش ٤٢ 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 ۰/۱۶ و ۲/۰ 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

	تعداد کل آزمایش،ها	تعداد سيكلها	شتاب بارگذاری	نس بارگذاری (هرتز)	خاک/ شکل موج فرکا		
	١٤	۳.	۴g/، و ۱۳/۰	(۰، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷و ۹	ماسه/ مستطیلی ٥		
	١٤	۳.	۴g/، و ۱۳/۰	(۰، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷و ۹	ماسە/ سينوسى ٥		
	١٤	۳.	۴g/، و ۱۳g	(۰، ۱، ۲، ۳، ۵، ۷و ۹	ماسە/ مثلثى ٥		
0.4 0.2 01 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1	1.47	04 03 02 02 03 04 04 04 04 04 04 04 04 04 04 04 04 04		All	Ψ. (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)		
0	0.5 Time 00	1 0	0.5 Time (s)	1 1	a 0.5 Time (c)		

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

نتايج و بحث

الف) نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب و جابهجایی قائم

شکلهای ٤ و ٥ نمونههایی از تاریخچهٔ زمانی شتاب برای ۳ نوع بارگذاری در فرکانس ۳ هرتز و شتابهای ورودی ۱۵/۰و ۳۶/۰در شتابسنج A2 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 L₁ برای ۳ نوع بارگذاری در فرکانس۳ هرتز و شتابهای ورودی ۱/و ۳/۰و ۳/۰ 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 ۱g-۰۰در شتاب سنج A₂ تحت بارگذاری الف) مستطیلی، ب) سینوسی و ج) مثلثی



شکل ۵. نمونهای از تاریخچههای زمانی شتاب در فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی ۳g/۰در شتاب سنج A2 تحت بارگذاری الف) مستطیلی، ب) سینوسی و ج) مثلثی



شکل ٦. الف. نمونهای از تاریخچههای زمانی جابهجایی قائم در فرکانس ۳ هرتز و شتاب ورودی الف) ۰/۳g، 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 شکل پذیر 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 می شود. یکی از مهم ترین ویژگی های مصالح ویسکوالاستیک، ظرفیت آنها در ذخیره و هم چنین اتلاف انرژی در درجههای مختلف، در سیکلهای بارگذاری/ باربرداری است [۳۰]. خاک از مهم ترین 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 می دهند [۲۲]، [۳۱]. مشاهدات مختلف نشان می دهند که خاکهای ماسهای یکی از انواع خاکها هستند که تحت بارهای سیکلی رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان برای تعریف و بررسی رفتار ویسکوالاستیک خاکها تاکنون محققان مختلف از مدلهای مختلفی استفاده کردهاند که مهمترین آنها عبارتند از [۳۳]، [۳۵]، [۳۵]: مدل Kelvin–Voigt، مدل Maxwell، مدل Poynting-Thompson

به عنوان مثال مدل Kelvin–Voigt، که مدل Voigt نیز نامیده می شود با یک دمپرویسکوز خالص و یک فنر الاستیک خالص که به صورت موازی به یک دیگر متصل شده اند تعریف می شود (شکل ۷). در این مدل کرنش ها در هر جزء با هم برابر است. هم چنین تنش کل از مجموع تنش در هر جزء به دست می آید و به صورت روابط (۲) و (۳) بیان می شوند: $\mathcal{E}_{Total} = \mathcal{E}_{S} = \mathcal{E}_{D}$

$$\sigma_{Total} = \sigma_{S} + \sigma_{D} \tag{(*)}$$

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

$$\sigma(t) = E \varepsilon(t) + \eta \frac{d \varepsilon(t)}{d(t)}$$
⁽¹⁾

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:

$$\mathcal{E}_{Total} = \mathcal{E}_S + \mathcal{E}_D \tag{0}$$

$$\sigma_{Total} = \sigma_S = \sigma_D \tag{7}$$

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

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



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

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 [۳۲]، [۳۳]، [۳۹]، [۰۵].

صابرماهانی و همکاران [٤1] در پژوهشی، برای تعیین پارامترهای دینامیکی از دادههای ثبتشده بهوسیلهٔ شتابسنج و LVDT بههمراه معادلهٔ تیر برشی یک بعدی ارائه شده بهوسیلهٔ زگال و همکاران [٤٢]، استفاده کردند. همچنین الگاما و همکاران [٣٣] و برنان و همکاران [٤٤] نیز از معادلهٔ تیر برشی یک بعدی برای تعیین پارامترهای دینامیکی در آزمایشها دینامیکی سانتریفیوژ مقیاس کوچک استفاده کردند. علاوه بر آن اخیراً در پژوهشی، بهادری و فرض علیزاده [٤٥] 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 [٤٢] ارائه کردند بدینصورت بیان می شود:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \ddot{u} \tag{(A)}$$

- 1. Zeghal
- 2. Elgama
- 3. Bernan

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

از معادله تیر برشی، تنش برشی
$$au$$
 در عمق دلخواه Z با انتگرالگیری از حاصل ضرب
دانسیته $ho(z)$ در شتاب $m{U}(z)$ در بازه $(0,z)$ به صورت (۹) به دست می آید:
(۹) $au(z) = \int_0^z
ho(z) \ddot{u}(z) dz$

بهطور معمول مقدار تنش برشی از اندازه گیری های میدانی که با استفاده از شتاب سنج هایی که تا سطح زمین ادامه می یابد به دست می آید. اما به ندرت می توان تاریخچه شتاب سطحی قابل اطمینانی را از آزمایش های مدل (میزلرزه یا سانتریفیوژ) به دست آورد. دلیل آن این است که سنسور های شتاب سنج برای ثبت صحیح داده های 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 برون یابی خطی داده های شتاب جفت سنسورهای مدفون در عمق به دست آید:

$$\ddot{u}(z) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1} (z - z_1) \tag{1}$$

با جایگذاری
$$z = 0$$
 در رابطهٔ (۱۰) شتاب در سطح زمین برابر است با:
 $\ddot{u}(0) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1}(0 - z_1)$
(۱۱)

بنابراین، تنش برشی در عمق z از حل انتگرال معادله ۳ بدینصورت بهدست می آید:
$$au(z) = \frac{1}{2}
ho z(\ddot{u}(0) + \ddot{u}(z))$$

برای محاسبهٔ کرنش برشی در ابتدا باید جابهجاییها را از دادههای شتاب ثبت شده بهوسیلهٔ سنسورهای شتابسنج بهدست می آوریم. دادههای شتاب به کار برده شده برای محاسبات جابهجایی از چند هم ثانیه قبل از اعمال بارگذاری لرزهای تا مقدار زمان مشخصی بعد از بارگذاری ادامه می یابد. با این عمل آن قسمت از دادهها که مربوط به نویز دستگاههای اندازه گیری شتاب است شناسایی شده و در مرحلهٔ فیلترینگ دادهها حذف می شود. برای محاسبه سرعت از دادههای شتاب انتگرال گیری می شود ولی قبل از انجام این پروسه، دادههای شتاب در فرکانسهای بالا برای حذف نویز و در فرکانسهای کم برای کاستن از خطای جابهجایی محور انتگرال گیری فیلتر می شوند (۰۰/۰–۲۰ هرتز). بعد از محاسبه سرعت، دادههای حاصل دوباره در محدوده فرکانسی ذکر شده فیلتر می شوند. سپس جابهجایی با انتگرالگیری از این دادهها حاصل می شود. از رابطهٔ (۱۳) برای محاسبهٔ کرنش برشی استفاده می شود: ۱۳۱)

$$\gamma = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \tag{17}$$

در این پژوهش مقادیر تنش برشی و کرنش برشی در اعماق ۳۷۵ میلی متری (نقطه میانی شتاب سنجهای A₁ و A₂) و ۲۲۵ میلی متری (نقطه میانی شتاب سنجهای A₂ و A) از سطح آزاد نمونه خاک محاسبه و حلقه های هیسترزیس ترسیم شدند. شکل های ۹ و ۱۰، نمونه هایی از حلقه های هیسترزیس تحت ۳ نوع بارگذاری و فرکانس های ۳ و ۷ هرتز تحت شتاب ورودی ۳۳/۰ و در عمق ۳۷۵ میلی متری از سطح آزاد مدل را نشان می دهند. با توجه به شکل ها، تفاوت های چشم گیری در شکل ظاهری حلقه های هیسترزیس تحت بارگذاری های مستطیلی، سینوسی و مثلثی وجود دارد (جهت چرخش حلقه ها به صورت ساعت گرد است). علاوه بر آن، با افزایش فرکانس بارگذاری داویهٔ حلقه ها نسبت به محور افق افزایش یافته و حلقه ها به محور قائم نزدیک تر می شوند به نحوی که این افزایش برای شکل موج مستطیلی بیش تر 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 = $\frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}$

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.



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. به نحوی که در فرکانس ۹ هرتز ، مدول برشی بیشینه (Gmax) دارای بیشترین مقدار و در فرکانس ۰/۰ هرتز دارای کمترین مقدار است (شکل ۱٤). به نحوی که مثلاً تحت شتاب ۱۹/۰ و شکل موج مستطیلی، در فرکانس ۳ هرتز مقدار مقدار ماد مگاپاسکال و در فرکانس ۹ هرتز ۲۵/٦۲ مگاپاسکال است که افزایش حدود ۳۸ درصدی را نشان می دهد. به همین ترتیب تحت شتاب ۲ %۰ و شکل موج سینوسی، در فرکانس ۳ هرتز مقدار ۲۲/٤۵ برابر ۱۵/۳۵ مگاپاسکال و در فرکانس ۹ هرتز ۲۲/٤۰ مگاپاسکال است که افزایش حدود ۲۵ درصدی را نشان می دهد. 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 می شود. از طرف دیگر با افزایش کرنش برشی میزان مدول برشی کاهش می یابد. قابل ذکر است با توجه به اینکه نمونههای خاک همگی در حالت خشک آزمایش شدهاند، از این رو، دامنهٔ تغییرات كرنش برشى محدود است كه با افزايش فركانس مقداري افزايش مى يابد.

۲. تأثیر شکل موج بار گذاری

مطابق شکل های ۱۵ و ۱۲، در یک فرکانس ثابت، نمونه های 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' نسبت به دو شکل موج دیگر و همچنین مقایسهٔ منحنیهای هیسترزیس بهدست آمده از سه شکل موج مختلف (شکل های ۹ و ۱۰) 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 g 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 مى شود.

۳. تأثیر شتاب ورودی

در مورد تأثیر شتاب ورودی روی مدول برشی نیز چنانکه از شکلهای ۱۱تا ۱۲ در فرکانس ها و شکل موج های 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

مدول برشی در همه حالتها کاسته می شود (مقادیر مدول برشی در فرکانسها و شکل موجهای مختلف تحت شتاب ورودی ۱۹/۰ بیش تر از مقادیر مدول برشی تحت شتاب ورودی ۲۳۵ است). به عنوان مثال، تحت شکل موج مستطیلی و فرکانس ۱ هرتز، مدول برشی بیشینه در شتاب ۱۹/۰، برابر ۱۹/۰۵ مگاپاسکال و در شتاب ۲۳۵ برابر ۱۹/۹ مگاپاسکال است که تفاوت ۷۷ درصدی را نشان می دهد. هم چنین تحت شکل موج سینوسی و فرکانس ۵ هرتز، مدول برشی بیشینه در شتاب ۱۹/۰و ۲۳۵، به ترتیب برابر ۱۷/۵۵ و ۱۱/۸

همچنین در شتاب ورودی پایینتر تأثیر شکل موج روی مقادیر مدول برشی بهویژه مدول برشی بیشینه (G_{max}) بیشتر دیده میشود (شکل۱۵). بهنحوی که در شتاب ورودی ۱۹/۰ تفاوت بین مقادیر مدول برشی بیشینه (G_{max}) تحت شکل موجهای مختلف نسبتاً بیشتر از حالت شتاب ورودی ۷/۳ است (این تفاوت بین شکل موجهای مستطیلی و سینوسی بیشتر مشاهده می شود).



شکل ۱۱. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری مستطیلی و شتاب ورودی الف) ۰/۱g، ب) ۳g/۰



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



شکل ۱۳. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در فرکانس های مختلف بار گذاری تحت بار گذاری مثلثی و شتاب ورودی الف) ۰/۳g (۰٫۰۰ ب) ۳g



شکل ۱٤. تغییرات G_{max} در برابر فرکانس بارگذاری در شتاب ورودی الف) G/۱۶، ب) ۰/۳g



شکل ۱۵. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در شتاب ورودی ۱۹/۰ و فرکانس بارگذاری الف) ۳ هرتز، ب) ۷ هرتز



شکل ۱٦. تغییرات مدول برشی با کرنش برشی در شتاب ورودی ۴/۳g و فرکانس بارگذاری الف) ۳ هرتز، ب) ۷ هرتز

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

باتوجه به این که مقدار مدول برشی (G) نسبت به مدول برشی بیشینه (G_{max}) دارای اهمیت و کاربرد عملی بیش تری است، از این و، تغییرات G/G_{max} در برایر کرنش برشی (γ) برای خاکها در شرایط مختلف اهمیت زیادی دارد. از این و منحنیهای $G/G_{max} - \gamma$ در برایر کرنش برشی (γ) برای خاکها در شرایط مختلف اهمیت زیادی دارد. از این و منحنیهای $G/G_{max} - \gamma$ ارائه شده به وسیلهٔ محققان مختلف اهمیت زیادی دارد. از این و منحنیهای محقیان مختلف امانه شده به وسیلهٔ محققان مختلف امانه شده به وسیلهٔ محققان مختلف معکاران [ϵ] برای سالیان متمادی به وسیلهٔ محققان مختلف استفاده شده است. هم چنین، رولینز و همکاران [ϵ] برای سالیان متمادی به وسیلهٔ محققان مختلف استفاده شده است. هم چنین، رولینز و همکاران [ϵ] نیز منحنی هایی در رابطه با تغییرات محققان مختلف استفاده شده است. هم چنین، رولینز و محکاران [ϵ] برای سالیان متمادی به وسیلهٔ محققان مختلف استفاده شده است. هم چنین، رولینز و محکاران [ϵ] نیز منحنی هایی در رابطه با تغییرات محقاده شده است. هم چنین، رولینز و محکاران [ϵ] برای سالیان مندی هایی در رابطه با تغییرات (G/G_{max}) در برایر کرنش برشی پیشنهاد دادهاند. در این پژوهش، مقادیر مدول برشی در کرنش های برشی مختلف به دست 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 به وسیلهٔ محققان مذکور مقایسه شده است. شکلهای ۱۷ الی ۱۹، منحنی های $\gamma - G/G_{max}$ را برای شکل موجهای مختلف، تحت شتابهای ورودی g ۱/۰ و فرکانس های ۳ و ۷ هرتز نشان می دهند.

با توجه به نتایج بهدست آمده در هر ۳ شکل موج، تحت شتاب ورودی ۰/۱۶، مقادیر G/G_{max} تقریباً در محدوده مرزهای پیشنهاد شده به وسیلهٔ سید و همکاران قرار می گیرند، با این توضیح که در شکل موج مستطیلی مقادیر G/G_{max} به حد پایین منحنیهای مذکور نزدیک تر بوده است ولی در شکل موج مثلثی به حد بالایی نزدیک ترند. با افزایش فرکانس بارگذاری (از ۳ هرتز به ۷ هرتز)، مقادیر مربوط در تمام شکل موجها، به حد بالایی منحنیهای سید و همکاران نزدیک تر شده و در بعضی نقاط از آن فراتر می روند. اما تحت شتاب ورودی ۲۵/۰ در هر ۳ شکل موج، مقادیر می G/G_{max} به حد بالایی منحنیهای رولینز و همکاران نزدیک تر است و با افزایش فرکانس بارگذاری، از این حد نیز فراتر می روند.

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 (Welastic) را محاسبه کرد (شکل ۲۰):

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W_{elastic}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\oint \tau d\gamma}{0.125 \times \Delta \tau \times \Delta \gamma} \tag{10}$$



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



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



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



د 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 میلی متری از سطح آزاد مدل، در شکل های ۲۱ تا ۲۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهند که در تمام حالات، با افزایش کرنش برشی مقدار ضریب میرایی افزایش می یابد. در سطوح کرنش پایین مقادیر نسبت میرایی در فرکانس ها و شکل موجهای مختلف پایین و بسیار نزدیک به هم است اما در سطوح کرنش بالاتر، افزایش در فرکانس باعث افزایش نسبت میرایی می شود. که این افزایش ، در فرکانس های بالاتر بیش تر مشاهده می شود به نحوی که در فرکانس های پایین، افزایش ، در فرکانس های بالاتر بیش تر مشاهده می شود به نحوی که در فرکانس های پایین، افزایش در فرکانس باعث افزایش نسبتا نشان دادن خواص جذب انرژی در خاک یا میزان اتلاف انرژی در آن استفاده می شود، زمانی می مورد تا تماس و برخورد دانه ها با یک دیگر افزایش پیدا کرده و اتلاف انرژی در محل برخورد دانه ها با یک دیگر افزایش یابد. هم چنین با افزایش کرنش برشی تأثیر شکل موج بر می شود تا تماس و برخورد دانه ها با یک دیگر افزایش پیدا کرده و اتلاف انرژی در محل برخورد دانه ها با یک دیگر افزایش یابد. هم چنین با افزایش کرنش برشی تأثیر شکل موج بر می می می می بیش تر نمایان می شود به تحوی که نمونه های خان و می فران و می فراد می ترانی برخورد دانه ها با یک دیگر افزایش یابد. هم چنین با مزایش کرنش برشی تأثیر شکل موج بر روی نسبت میرایی بیش تر نمایان می شود به نحوی که نمونه های خاک تحت بارگذاری نیز مقادیر نسبت میرایی نزدیک به هم است وبرای بارگذاری سینوسی کمی بیش تر 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 می یابد. علاوه بر آن در فرکانسهای بیش تر با توجه به افزایش بیش تر کرنش برشی، تأثیر افزایش شتاب ورودی روی افزایش نسبت میرایی بیش تر مشاهده می شود. در هر دو شتاب ورودی (۱۶/۰و ۲۰/۰) میزان تأثیر فرکانس و شکل موج بارگذاری بر نسبت میرایی مشابه هم بوده و تفاوت چشم گیری دیده نمی شود.

۳. نسبت میرایی میانگین

چنانکه در شکلهای ۲۱ تا ۲۳ مشاهده می شود، تغییرات نسبت میرایی در مقابل کرنش برشی نامنظم و غیریکنواخت است و این امر باعث می شود تا نتوان مقایسه عددی دقیقی بین مقادیر نسبت میرایی در حالتهای مختلف انجام داد. تغییرات نامنظم نسبت میرایی در برابر کرنش برشی با نتایج سایر محققان تطابق دارد [13]، [28]. صابرماهانی و همکاران [13] با مشاهده روند غیریکنواخت نسبت میرایی در مقابل کرنش برشی برای مقایسهٔ مقادیر میرایی مدلهای مختلف با یک دیگر پارامتری به عنوان m یا مقدار میانگین نسبت میرایی معرفی کردند. پارامتر فوق از میانگین گیری مقادیر نسبت میرایی در هر یک از آزمایش ها به دست میآید. از این پارامتر در بررسی های پیشین به وسیلهٔ محققان مختلف [۰۰]، [20]، [20] نیز استفاده شده است. شکل ۲۵ مقادیر نسبت میرایی میانگین (Dm) در برابر فرکانس نیز استفاده شده است. شکل ۲۵ مقادیر نسبت میرایی میانگین (Dm) در برابر فرکانس بارگذاری را نشان می دهد. با توجه به شکل ۲۵، مقادیر نسبت میرایی میانگین در همه حالات (تمام شکل موجها و شتاب های ورودی)، با افزایش فرکانس بارگذاری، افزایش می یابد. فرکانس ۳ به ۵ هرتز، در حدود ۲۶ درصد و از فرکانس ۵ به ۷ هرتز، ۲۰ درصد افزایش می یابد، مشابه این روند در سایر فرکانس ها و هم چنین شکل موجها و شتابهای اعمال

از طرف دیگر با مقایسه نسبت میرایی میانگین بین شکل موجهای مختلف نیز می توان نتیجه گرفت که شکل موج مستطیلی دارای مقادیر میرایی بیش تری نسبت به دو شکل موج دیگر است، به نحوی که مثلا در فرکانس ۲ هر تز و شتاب ۱g/۰، نسبت میرایی میانگین تحت شکل موج مستطیلی نسبت به شکل موج سینوسی و مثلثی به تر تیب ۲٦ و ٤٧درصد بیش تر است.

همچنین با افزایش شتاب ورودی از ۲۵/۰به ۳۵/۰، 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 ۲/۰، برابر ۲/۱۵٪ و در شتاب ۳۵/۰برابر ۲۸/۰٪ است که افزایش ۲۰ درصدی را نشان میدهد. همچنین تحت شکل موج مثلثی و فرکانس ۹ هرتز، مقدار نسبت میرایی میانگین در شتاب ۱۱۹۰۰، برابر ۱۰٪ و در شتاب ۳۵/۰برابر ۱۲٫۸٪ است که ۲۰ درصد افزایش را نشان میدهد.



شکل ۲۱. تغییرات نسبت میرایی با کرنش برشی در فرکانس های مختلف بار گذاری تحت بار گذاری مستطیلی و شتاب ورودی الف و ب) ۰/۱g، ج و د) ۳۶/



شکل ۲۲. تغییرات نسبت میرایی با کرنش برشی در فرکانس های مختلف بارگذاری تحت بارگذاری سینوسی و شتاب ورودی الف و ب) ۱/۱۶، ج و د) ۳g/۰





شکل ۲٤. تغییرات میانگین نسبت میرایی(D_m) با فرکانس بارگذاری در شتاب ورودی الف) ۱g/۰ ب)**۳ g**(ب

نتيجه گيري

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

 مدول برشی با افزایش فرکانس، افزایش مییابد که این افزایش در فرکانس های بالاتر بيش تر مشاهده مي شود.

- تغییرات مدول برشی بیشینه (G_{max}) به عنوان شاخصی از تغییرات مدول برشی، نشان میدهد که این پارامتر در فرکانس ۹ هرتز دارای بیش ترین مقدار و در فرکانس ۰/۰ هرتز دارای کم ترین مقدار است.
- تغییرات G/G_{max} در برابر کرنش برشی نشان میدهد که تحت شتاب ورودی G/۹۰، برای هر سه شکل موج، مقادیر G/G_{max} تقریبا در محدوده مرزهای پیشنهاد شده بهوسیلهٔ سید و همکاران قرار می گیرند، در حالی که تحت شتاب ورودی ۳/۵۰، به حد بالایی منحنی های Rollins و همکاران نزدیک ترند.
- 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 می شود.
- با توجه به تغییرات نامنظم ضریب میرایی در برابر کرنش برشی، پارامتری بهنام ضریب میرایی میانگین تعریف می شود. این پارامتر با افزایش فرکانس بارگذاری و افزایش شتاب ورودی، افزایش می یابد.
- نمونههای خاک بیش ترین مدول برشی و نسبت میرایی را تحت بارگذاری مستطیلی از خود نشان میدهند. بهنحوی که در تمام فرکانس ها و شتاب های ورودی آزمایش شده، مقادیر G و D برای شکل موج مستطیلی بیش تر از شکل موج های 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.

ت*قد*یر 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

- Humar J. L., "Dynamic of Structures (2nd Edition ed.)", New York: Taylor & Francis (2005).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Vucetic M., Dobry R., "Effect of soil plasticity on cyclic response", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117 (1) (1991) 89-107.
- 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.

- 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.
- Presti D. C. L., Pallara O., Cavallaro A., "Damping Ratio of Soils from Laboratory and In-situ Tests", In Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, (1997) 6-12.
- 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.
- 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.
- Thiers G. R., "The behaviour of saturated clay under seismic loading conditions", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineers, University of California, Berkeley (1965).
- 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).
- Mulilis J. P., Townsend F. C., Horz, R. C., "Triaxial testing techniques and sand liquefaction", Dynamic Geotechnical testing, ASTM STP 654 (1978) 265-279.
- 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.

- 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).
- 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.
- 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.
- Kramer S. L., "Geotchnical Earthquake Engineering". Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall (1996).
- 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.
- 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.
- Cascante G., Vanderkooy J., Chung W., "Difference between current and voltage measurements in resonant-column testing", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40 (2003) 806-820.
- 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.

- 26. Ishihara K., "Soil behavior in earthquake geotechnics". Oxford: Clarendon Press (1996).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lyakhov G. M., "Determination of the viscous properties of soil", Prikl. Matem. Mekh (4) (1968).

- Koga Y., Matsuo O., "Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground", Soil and Foundation, Vol. 30(4) (1990) 162-174.
- 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.
- Ghayamghamian M. R., Kawakami H., "On-site nonlinear hysteresis curves and dynamic soil properties", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126 (6) (2000) 543-555.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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
               ضريب انحنا
C_c
C_{u}
               ضريب يكنو اختى
D
               ضريب ميرايي
               اندازه ای که ۱۰% دانه های خاک از آن کوچکتر است
D_{10}
D_{30}
               اندازه ای که ۳۰% دانه های خاک از آن کوچکتر است
D_{60}
               اندازه ای که ۴۰% دانه های خاک از آن کوچکتر است
               نسبت تخلخل حداقل
e_{min}
               نسبت تخلخل حداكثر
e_{max}
               مقدار ريزدانه
F_c
               مدول بر شي
G
               چگالي ويژه
G_S
               شتاب زمين
g
               جرم ماسه
M_S
               شتاب در موقعیت i
Üi
               حجم كل محفظه مدل
V_T
               حداکثر انرژی الاستیک ذخیر ، شده در هر سیکل
W_{elastic}
               عمق موقعيت i
Zi
\Delta W
               انرژی از دست رفته در هر سیکل
               چگالی خاک
\rho_d
               جگالی آب
\rho_w
               تنش بر شی
τ
                کرنش بر شی
γ
```