تأثیر پودر لاستیک بر رفتار دینامیکی و مقاومت روان‌گرایی ماسه‌های اشباع

هادی بهادری*، روح‌اله فرضعلی‌زاده؛
دانشگاه ارومیه، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۳/۲۶ پذیرش ۹۵/۱۱/۱۶

چکیده

عامل اصلی خسارت‌های وارده بر اثر زلزله به سازه‌هایی که روی خاک‌های ماسه‌ای اشباع واقع شده‌اند، پدیدهٔ روان‌گرایی است. مسلح‌سازی خاک تکنیکی مؤثر در افزایش مقاومت و پایداری سازه‌ها است. در این مقاله تأثیر افزودن پودر لاستیک به خاک ماسه‌ای اشباع بررسی می‌شود. برای این منظور یک سری تست‌های مدل میز لرزه 1-g ماسه مخلوط با درصدهای مختلف پودر لاستیک انجام شد. استفاده از پودر لاستیک در مسلح‌سازی خاک‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. ماسه فیروزکوه شمارهٔ ۱۶۱ و پودر لاستیک برای مخلوط قسمت مسلح و ماسه خالی برای قسمت غیرمسلح استفاده شده است. این تحقیق با چهار نسبت اختلاط (۲۰٪ و ۱۵٪، ۱۰٪، ۵٪ =TC) انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که دامنه شتاب پایه از عمق به سطح خاک افزایش می‌یابد. فشار آب حفره‌ای یکی از پارامترهای اساسی در تحلیل رفتار لرزه‌ای ماسه اشباع است. روان‌گرایی سبب کاهش مقاومت و سختی خاک در اثر افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. افزایش درصد پودر لاستیک سبب کاهش چشم‌گیر اضافه فشار آب حفره‌ای می‌شود. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد پودر لاستیک، نسبت میرایی میانگین افزایش می‌یابد و هم‌چنین با افزایش درصد پودر لاستیک بیشینه مدول برشی خاک افزایش می‌یابد. مسلح‌سازی با پودر لاستیک تغییر شکل‌های ناشی از روان‌گرایی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: روان‌گرایی، پودر لاستیک، نسبت میرایی، میز لرزه، ماسه اشباع، فشار آب حفره‌ای، مسلح‌سازی.

*نویسنده مسئول h.bahadori@urmia.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

مقدمه

زمانی که خاک اشباع (عمدتاً ماسه‌ای یا ماسه‌ای سیلت‌دار) که تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار دارد، فشار آب حفره‌ای آن افزایش می‌یابد و برای مدت کوتاهی مقاومت یا سختی خود را از دست داده و روان‌گرایی رخ می‌دهد. اثرات ویران‌کنندهٔ روان‌گرایی زلزله گود فریدی در آلاسکا و زلزله‌ی نیگاتا در ژاپن سبب توجه ویژه مهندسان ژئوتکنیک در سال ۱۹٦٤ شد. سید از اولین کسانی بود که به رابطهٔ مهم آسیب‌دیدگی سازه‌ها و روان‌گرایی پی برد [۱]. از مهم‌ترین روش‌های کاربردی کاهش پتانسیل روان‌گرایی می‌توان به متراکم‌سازی [۲]، زهکشی [۳] و مسلح‌سازی خاک [٤] اشاره کرد.

با گسترش صنعت حمل و نقل، سالانه لاستیک‌های فرسوده زیادی در سراسر جهان وارد محیط-زیست می‌شود، که سبب بروز مشکلات جدی زیست‌محیطی می‌شود. استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده راه‌حل مناسبی برای کاهش خطرات زیست‌محیطی است. مشتقات لاستیک‌های فرسوده کاربردهای مختلفی در زمینهٔ مهندسی عمران دارد، از قبیل: مسلح‌سازی خاک‌های سست [۵]، به‌عنوان لایهٔ زهکشی در لندفیلدها [٦]، به‌عنوان مصالح پرکننده [۷].

اوچیمارا و همکاران [۸]]یک سری آزمایش‌های میز لرزه روی لوله‌های مدفون در خاک ماسه‌ای مخلوط با تکه‌های لاستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که لایه‌ای محافظ مخلوط ماسه با تکه‌های لاستیک می‌تواند سبب کاهش بلندشدگی لوله‌های مدفون و کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای شود.

هاتف و رحیمی [۹] یک سری مدل‌های آزمایشگاهی برای تحقیق در بارهٔ استفاده از خرده‌های لاستیک تایرهای فرسوده برای افزایش ظرفیت باربری ارائه کردند. نتایج نشان داد که افزودن خرده‌های لاستیک به ماسه، باعث افزایش نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا (C.B.R) می‌شود.

هازاریکا و همکاران [۱۰] آزمایش‌هایی را با استفاده دستگاه سه‌محوره سیکلیک و دستگاه مدل میزلرزه 1-g برای بررسی تأثیر افزودن مسلح‌کننده تکه‌های لاستیک به ماسه در کاهش پتانسیل روان‌گرایی انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که میزان کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای تولید شده بعد از یک درصد حجمی معین (۵۰ درصد) به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های مدل میزلرزه نشان داد که مدل دیوار با خاکریز مسلح با تکه‌های لاستیک مقاومت خوبی در برابر تولید اضافه فشار آب حفره‌ای داشته و تغییر شکل جانبی ناچیزی از خود نشان داده است.

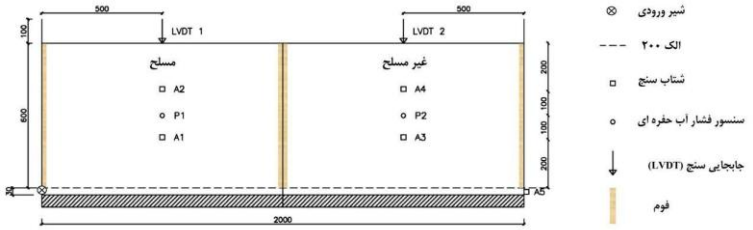
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

پژوهش‌های بسیار کمی در رابطه با مدل‌سازی فیزیکی مربوط به رفتار دینامیکی خاک مسلح با تکه‌های لاستیک به‌خصوص در حالت اشباع صورت گرفته است. بنابراین در این تحقیق رفتار دینامیکی ماسه مسلح با پودر لاستیک و غیرمسلح در حالت اشباع با استفاده از آزمایش‌های مدل میز لرزه بررسی می‌شود.

مدل و مصالح

میز لرزه

شکل ۱ ساختار مدل و نحوهٔ سنسورگذاری را نشان می‌دهد. محفظه مدل از جنس پلکسی گلس با ابعاد خارجی ۷۰× ۵۰ × ۲۰۰ سانتی‌مترمکعب است. در پایین محفظه به‌وسیلهٔ صفحه‌های مشبک پوشیده شده از الک ۲۰۰ فضایی ایجاد شده تا فرآیند اشباع خاک به‌صورت نفوذ تدریجی و یک‌نواخت آب از پایین انجام شود. یک صفحه پلاستیکی سخت و صلب، دقیقاً در وسط محفظه میز لرزه جاگذاری و از ابتدا و انتها و اطراف به‌خوبی ثابت و آب‌بندی شده است. با این عمل میز به دو قسمت کاملاً مجزا و کاملاً مشابه برای مدل‌سازی خاک مسلح و غیرمسلح هم‌زمان و با شرایط حرکت ورودی یک‌سان تقسیم شده است. در هر طرف مدل‌ها برای کاهش تأثیر شرایط مرزی و جلوگیری از برخورد مستقیم نمونه‌ها به بدنه صلب میز از فوم به ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۱. شمای کلی مدل و نحوهٔ سنسورگذاری (ابعاد بر حسب میلی‌متر

مصالح

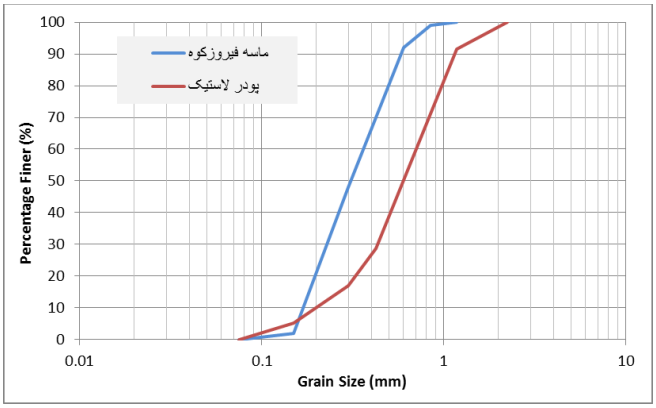
خاک استفاده شده در این آزمایش‌ها از نوع ماسه ۱۶۱ فیروزکوه مطابق سیستم طبقه‌بندی، خاک بد دانه‌بندی (SP) است. پودر لاستیک استفاده شده در این آزمایش‌ها بدون نخ و سیم است و از خرد کردن تایرهای فرسوده با خردکن‌های صنعتی و سرند کردن آن‌ها حاصل می‌شود. پودر لاستیک در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

درصدهای وزنی ٪۵، ٪۱۰، ٪۱۵ و ٪۲۰ با خاک مخلوط شده است. مشخصات مصالح در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی مصالح در شکل ۲ آمده است. نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان داد که با افزایش درصد پودر لاستیک، میزان نفوذپذیری مخلوط افزایش می‌یابد. میزان نفوذپذیری مخلوط ماسه با ٪۲۰ پودر لاستیک ۰/۰۳۵۲ cm/s است که در حدود سه برابر میزان نفوذپذیری ماسه خالی است.

جدول ۱. مشخصات مصالح استفاده شده

نوع ماسه	۱۶۱ فیروزکوه	نوع مسلح‌کننده	پودر لاستیک
G_s	۲/۶۵۸	$D_{10}(mm)$	۰/۲۱
e_{min}	۰/۵۴۸	$D_{30}(mm)$	۰/۴۱
e_{max}	۰/۸۵۸	$D_{50}(mm)$	۰/۵۹
C_c	۰/۹۷	$D_{60}(mm)$	۰/۷
C_u	۲/۵۸	C_c	۱/۱۴۳
$D_{50}(mm)$	۰/۳	C_u	۳/۳۳
K (cm/s)	۰/۰۱۲۵	G_s	۰/۸۶



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده

روش انجام آزمایش

همهٔ مدل‌های مسلح و غیرمسلح (ماسه خالی) در تراکم نسبی صفر درصد ساخته شده است. برای محاسبهٔ درصد وزنی اختلاط پودر لاستیک با ماسه از رابطهٔ اوچیمارو و همکاران [۸] استفاده شده است. جزییات آزمایش در جدول ۲ آمده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

$$TC_r = \frac{M_T}{M_S + M_T} \quad (۱)$$

$$D_r = \frac{e_{max} - e_s}{e_{max} - e_{min}} \quad (۲)$$

$$D_r = 0 \;\rightarrow\; e_{max} = e_S = \frac{V_{Total} - V_S - V_T}{V_S} \;\rightarrow\; e_{max} = \frac{V_T - \frac{M_S}{\rho_S} - \frac{M_T}{\rho_T}}{\frac{M_S}{\rho_S}}$$

بدین‌ترتیب با قرار دادن مقدار درصد وزنی مخلوط ماسه مسلح در رابطهٔ (۱) و مقدار تخلخل نسبی بیشینهٔ ماسه در رابطهٔ (۲) و حل همزمان دو معادلهٔ مذکور، مقادیر جرم کل ماسه خشک و جرم کل مسلح کننده حاصل می‌شود.

برای ساخت مدل در هر یک از دو قسمت مسلح و غیرمسلح از روش مرطوب برای آماده‌سازی نمونه‌ها استفاده شده است. در این روش ابتدا ماسه با ۵٪ رطوبت مخلوط شده و به‌صورت یک‌نواخت در سطح جعبه ریخته می‌شود تا پروفیل خاک یک‌نواختی به‌دست آید. سپس هر لایه به مقدار مشخصی متراکم شده تا به چگالی کل مشخص (معادل تراکم نسبی صفر) حاصل شود. در ضمن برای مشاهده تغییر شکل‌های مدل در هر دو قسمت مسلح و غیرمسلح شبکه مربعی از ماسه رنگی در دیواره مدل اجرا شده است. سپس گاز دی‌اکسیدکربن از خاک عبور داده می‌شود تا با هوای محبوس در خلل و فرج خاک جای‌گزین شده تا در ادامه روند اشباع‌سازی خاک را تسریع بخشد. در انتها از پایین مدل جریان پایدار آب با دبی کم برقرار می‌شود تا نمونه اشباع شود. لرزش اعمالی در تست‌ها به صورت موج هارمونیک و با فرکانس تقریبی ۲ هرتز است

جدول ۲. جزئیات آزمایش

تست	a	b	c	d
درصد پودر لاستیک (TC_r)	۵	۱۰	۱۵	۲۰

تحلیل نتایج آزمایش‌های مدل

تاریخچهٔ زمانی شتاب

شکل ۳ و ٤ تاریخچه‌های زمانی شتاب برای تست‌های مسلح شده با پودر لاستیک (a تا d) را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که شتاب پایه (A5) هنگام عبور از خاک تشدید می‌یابد مگر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

این‌که روانگرایی در لایه‌های سطحی قسمت غیرمسلح رخ دهد. افزایش آنی فشار آب حفره‌ای در لایه های سطحی خاک باعث کاهش سختی برشی خاک می‌شود در نتیجه شتاب در خاک کاهش می‌یابد و شکل نامنظمی به خود می‌گیرد.

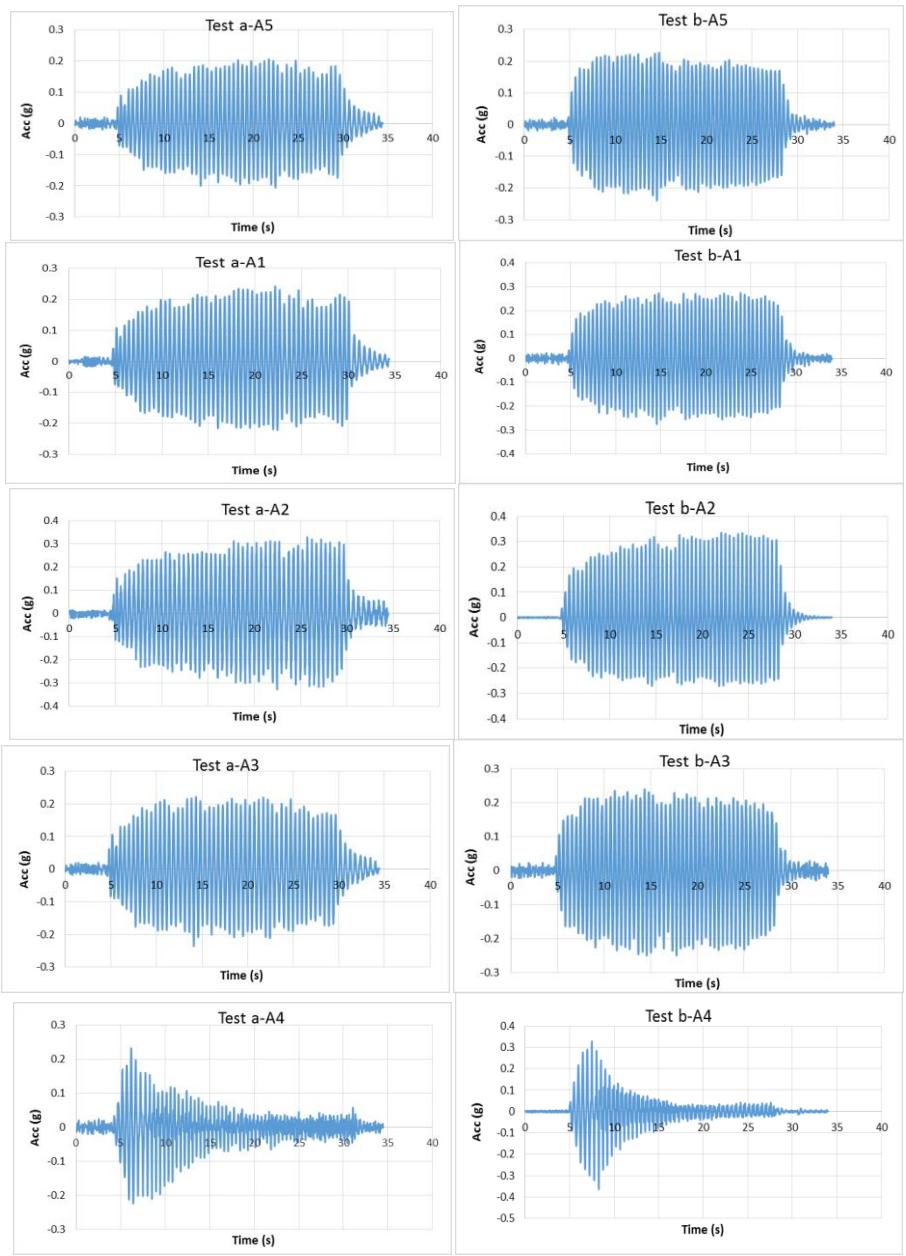
تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای

تولید و زایل شدن فشار آب حفره‌ای یکی از فاکتورهای اصلی بررسی رفتار لرزه‌ای خاک‌های اشباع است. روان‌گرایی خاک، کاهش سختی و مقاومت از نتایج افزایش فشار آب حفره‌ای است. چنان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش درصد پودر لاستیک، نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (R_u) به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای از تقسیم اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در طول آزمایش بر تنش موثر قائم اولیه ($R_u = \Delta u/\sigma'_0$) در مختصات سنسور فشار آب حفره‌ای به‌دست می‌آید. از نکات بارز این شکل تأثیر مسلح کننده لاستیکی در تغییر الگوی ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای است. مسلح‌سازی با پودر لاستیک از افزایش R_u جلوگیری کرده و زمان به اوج رسیدن فشار آب حفره‌ای را به تأخیر می‌اندازد.

با توجه به شکل ۵ در همهٔ مدل‌های غیرمسلح مقدار R_u به بیش‌تر ۹۵٪ رسیده و روان‌گرایی رخ داده است. زمانی که نمونه‌ها با پودر لاستیک مسلح می‌شوند، روان‌گرایی نیز کنترل می‌شود. تست d با ۲۰٪ پودر لاستیک بهترین عملکرد را داشته و به‌خوبی از وقوع روان‌گرایی جلوگیری می‌کند. نتایج تأثیر پودر لاستیک بر کاهش فشار آب حفره‌ای مشابه نتایج هازاریکا و همکاران [۱۰] با استفاده از خرده لاستیک است. استفاده از پودر لاستیک نسبت به خرده لاستیک عملکرد بهتری در کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای دارد.

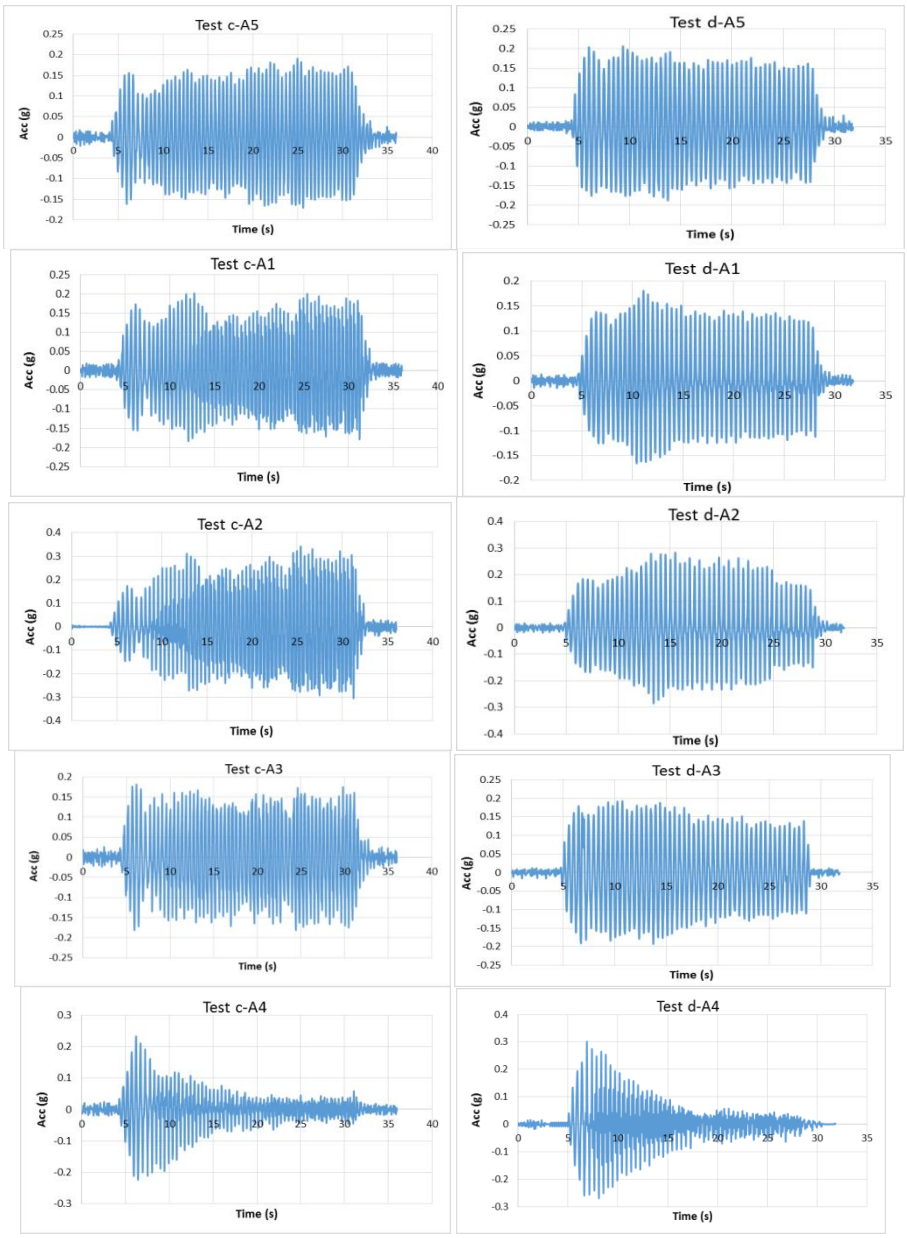
از دلایل عملکرد مناسب مخلوط ماسه مسلح با پودر لاستیک در کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای و افزایش مقاومت روانگرایی را می‌توان در نفوذپذیری زیاد مخلوط ماسه مسلح نسبت به ماسه خالی و سختی کم دانه‌های لاستیک نسبت به دانه‌های ماسه دانست، که اجازه تغییر حجم در هنگام اعمال بارگذاری و افزایش فشار آب حفره‌ای پیدا می‌کند. این امر باعث بموجود آمدن وضعیتی شبیه به زهکشی آنی شده و جلوی تجمع اضافه فشار آب حفره‌ای را می‌گیرد، در نتیجه سبب افزایش مقاومت روانگرایی مخلوط مسلح می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]



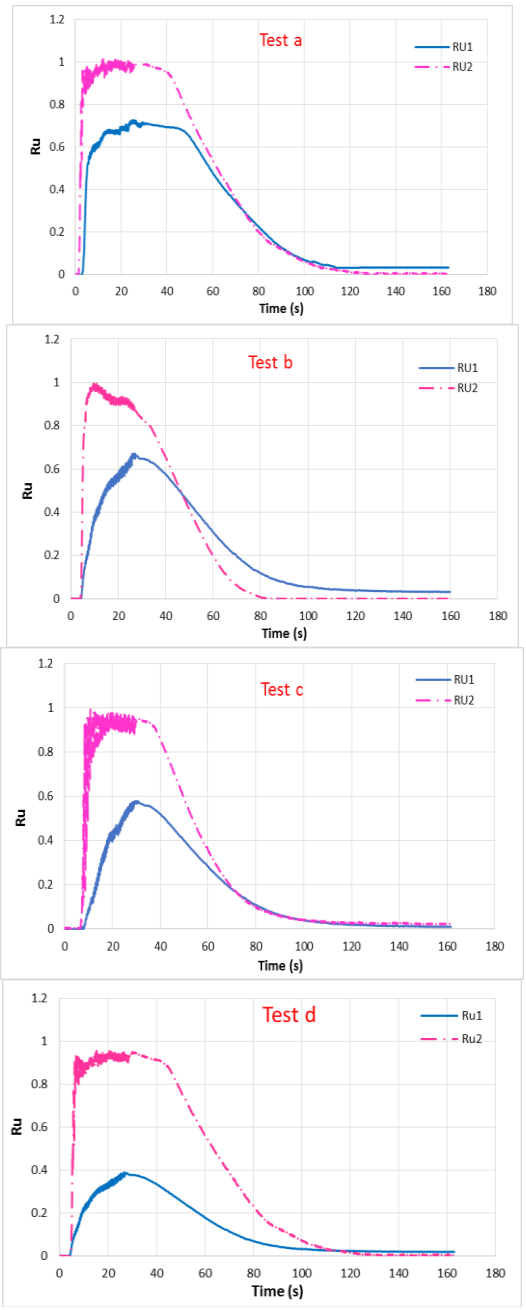
شکل ۳. تاریخچهٔ زمانی سنسورهای شتاب برای تست (a $TC_r = 5\%$ (b $TC_r = 10\%$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]



شکل ٤. تاریخچهٔ زمانی سنسورهای شتاب برای تست (c $TC_r = 15\%$ (d $TC_r = 20\%$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]



شکل ۵. نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (R_u) برای تست‌های مدل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

تاریخچه زمانی نشست

وقوع روان‌گرایی در خاک‌های اشباع سبب افزایش مقادیر نشست می‌شود. شکل ٦ تاریخچهٔ زمانی نشست را برای هر دو قسمت غیرمسلح و مسلح با پودر لاستیک نشان می‌دهد که به‌وسیله LVDTقرار گرفته در سطح مدل‌ها، اندازه‌گیری شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود نشست‌های مدل‌های مسلح با پودر لاستیک به‌طور محسوسی کم‌تر از مدل‌های غیرمسلح است و با افزایش درصد پودر لاستیک به‌مقدار ناچیزی افزایش حجم از خود نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان چگالی کم و شکل‌پذیری زیاد پودر لاستیک دانست. با افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش تنش مؤثر خاک در حین لرزش، پودر لاستیک متراکم شده در حین ساخت مدل فرصت افزایش حجم پیدا می‌کند.

تنش-کرنش برشی

محاسبه تنش برشی: مدل خاکی درون میز لرزه تحت بارگذاری برشی یک بعدی قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان معادلات سه‌بعدی حرکت به معادلات یک‌بعدی کاهش داد. معادله تیر برشی را اولین بار زگال و الگامل [۹] درسال ۱۹۹٤ ارائه داده است.

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \ddot{u} \qquad (۳)$$

تنش برشیτ در عمق دل‌خواه z، از معادلهٔ تیر برشی، با انتگرال‌گیری از حاصل ضرب دانسیته حجمی$\rho(z)$ در شتاب $\ddot{u}$ در بازه (۰، z) بدین‌صورت به‌دست می‌آید:

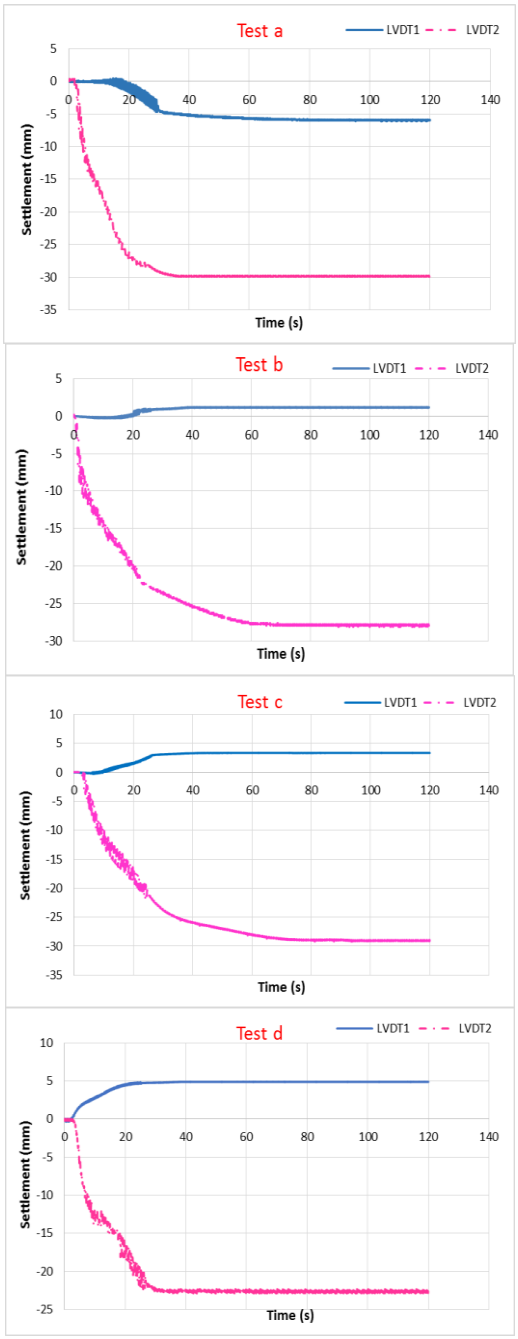
$$\tau(z) = \int_0^z \rho(z)\ddot{u}\,(z)dz \qquad (٤)$$

به‌طور معمول مقدار تنش برشی از اندازه‌گیری‌های میدانی که با استفاده از شتاب‌سنج‌هایی‌تا سطح زمین ادامه می‌یابد، به‌دست می‌آید. ولی چنان‌که می‌دانیم به‌ندرت می‌توان تاریخچهٔ شتاب سطحی قابل اطمینانی را از آزمایش‌های مدل به‌دست آورد. بنابراین برای حل مشکل فوق پیشنهاد شده است که تاریخچهٔ زمانی شتاب سطح زمین با برون‌یابی خطی داده‌های شتاب جفت سنسورهای مدفون در عمق به‌دست آید.

$$\ddot{u}(z) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1}(z - z_1) \qquad (۵)$$

شتاب سطح زمین با جای‌گذاری z=0 در معادلهٔ (۵) به‌دست می‌آید.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]



شکل ٦. تاریخچهٔ زمانی نشست برای تست‌های مدل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

$$\ddot{u}(0) = \ddot{u}_1 + \frac{\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1}{z_2 - z_1}(0 - z_1) \quad (۶)$$

محاسبه کرنش برشی: در ابتدا باید جابه‌جایی‌ها را از داده‌های شتاب ثبت شده با سنسورهای شتاب‌سنج، به‌دست آورد. از این رو، با دو بار انتگرال‌گیری پیاپی از داده‌های شتاب، مقادیر جابه‌جایی به‌دستمی‌آید. 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 (۰,۰۵ تا ۲۰ هرتز). چنان‌چه تنها دو سنسور شتاب‌سنج در لایه خاکی برای محاسبه کرنش وجود داشته باشد از فرمول زیر برای‌محاسبه کرنش برشی استفاده می‌شود (بیان درجه اول کرنش).

$$\gamma = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1} \quad (۷)$$

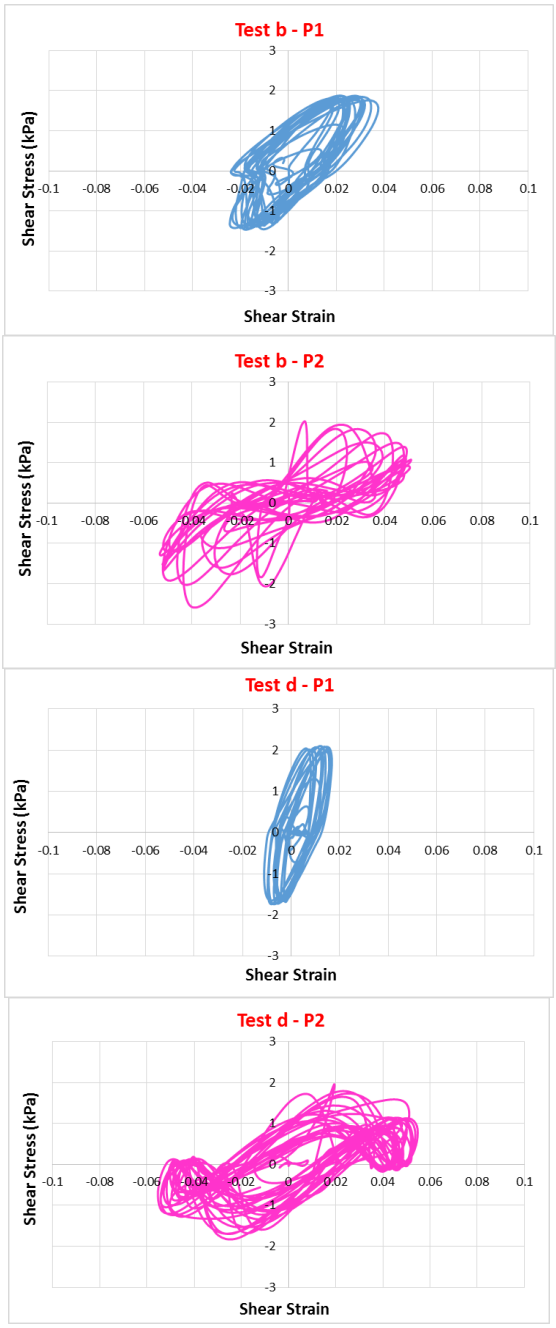
بعد از محاسبه تنش برشی و کرنش برشی در موقعیت‌های P1 و P2 واقع در عمق ۳۰ سانتی-متری خاک مدل‌های مسلح و غیرمسلح از معادلات مذکور، می‌توان حلقه‌های هیسترزیس تنش–کرنش را محاسبه و ترسیم کرد. شکل ۷ منحنی حلقه‌های هیسترزیس تنش–کرنش را برای تست‌های b و d با ٪۱۰ و ٪۲۰ پودر لاستیک نشان می‌دهد. در نمونه غیرمسلح به‌جز چند سیکل اولیه، بقیهٔ سیکل‌ها به‌تدریج شکل خوابیده داشته و کرنش‌های برشی بزرگ‌تری را نشان می‌دهند. این امر به‌دلیل کاهش سختی خاک در اثر وقوع روان‌گرایی است.

نسبت میرایی و مدول برشی

مقادیر $D-\gamma$ و $G-\gamma$ به‌عنوان پارامترهای مهم برای آنالیزهای دینامیکی هستند. برای محاسبه نسبت میرایی در هر سیکل بارگذاری، ابتدا باید انرژی تلف شده در هر سیکل (ΔW = مساحت داخلی هر سیکل) و انرژی ذخیره شده در هر سیکل ($W_{elastic}$) را محاسبه کرد. حال می‌توان نسبت میرایی در هر سیکل را از رابطهٔ (۸) محاسبه کرد. در حالت کلی نسبت میرایی در مدل‌های مسلح و غیرمسلح با افزایش دامنه کرنش برشی کاهش می‌یابد. شکل ۸ نسبت میرایی برای نمونه‌های مسلح و غیرمسلح تست d نشان می‌دهد.

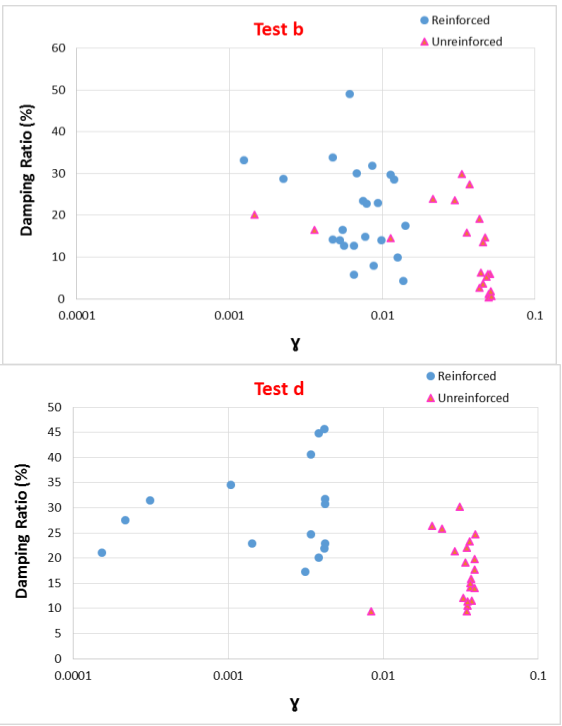
$$D = \frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W}{W_{elastic}} = \frac{1}{4\pi}\frac{\oint \tau d\gamma}{0.125 \times \Delta\tau \times \Delta\gamma} \quad (۸)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]



شکل ۷. رفتار تنش-کرنش برشی در عمق درموقعیت‌های **P1** و **P2** برای تست‌های
(b $TC_r = 10\%$ **و (d** $TC_r = 20\%$

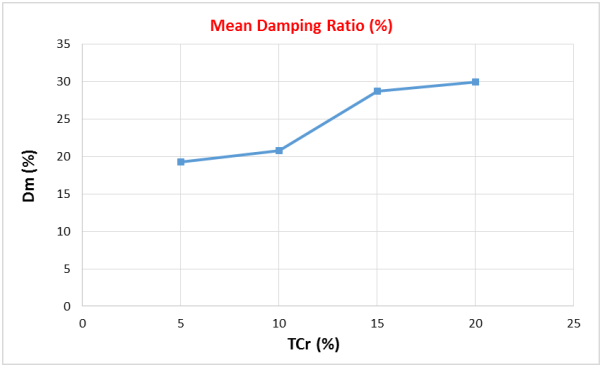
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]



شکل ۸ نسبت میرایی برای تست (b $TC_r = 10\%$ و (d $TC_r = 20\%$

چنان‌که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تغییرات نسبت میرایی در مقابل کرنش برشی نامنظم و غیریک‌نواخت است. تغییرات نامنظم نسبت میرایی در کرنش‌های برشی بزرگ با نتایج سایر محققان تطابق دارد [۱۰]، [۱۱]. افزایش آنی فشار آب حفره‌ای در حالت اشباع سبب ایجاد کرنش‌های برشی بزرگ می‌شود. صابر ماهانی و همکاران [۱۰]] با مشاهده روند غیریک‌نواخت نسبت میرایی در مقابل کرنش برشی برای مقایسهٔ مقادیر میرایی مدل‌های مسلح با یک‌دیگر پارامتری به‌عنوان (D_m) یا مقدار میانگین نسبت میرایی معرفی کردند. پارامتر فوق از میانگین‌گیری مقادیر نسبت میرایی در هر یک از تست‌ها حاصل می‌شود. شکل ۹ مقادیر نسبت میرایی میانگین (D_m) در برابر درصد وزنی پودر لاستیک در مدل مسلح را نشان می‌دهد (در محدوده کرنش برشی ۰٫۰۱). با توجه به شکل ۸ با افزایش درصد وزنی پودر لاستیک در مدل مسلح، مقدار میانگین نسبت میرایی افزایش می‌یابد

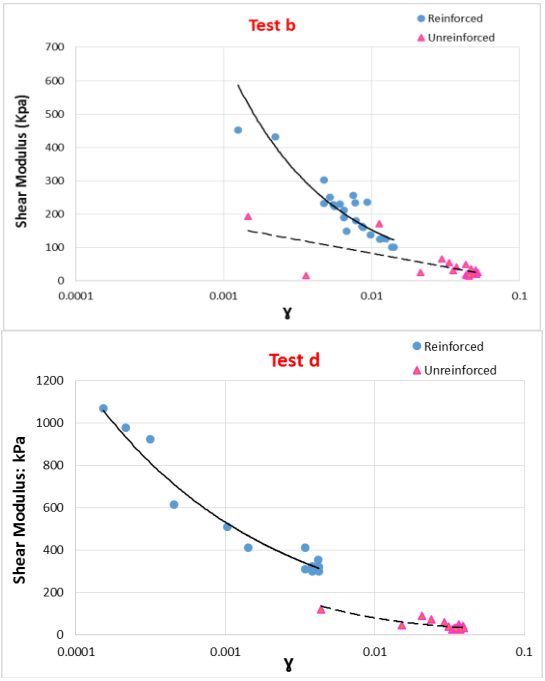
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]



شکل ۹. نسبت میرایی میانگین برای تست‌های مدل مسلح

پس از ترسیم حلقه‌های هیسترزیس تنش-کرنش برشی، مدول برشی (G) از نسبت تفاضل تنش برشی بیشینه و کمینه بر کرنش برشی بیشینه و کمینه در هر سیکل بدین‌صورت حاصل می‌شود:

$$G = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \qquad (۹)$$



شکل ۱۰. مدول برشی برای تست b) $TC_r = 10\%$ و d) $TC_r = 20\%$

با توجه به شکل ۱۰، مقادیر مدول برشی بیشینه نمونه‌های مسلح نسبت به غیرمسلح بیش‌تر است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

هم‌چنین با افزایش درصد پودر لاستیک نمونه‌های مسلح، مدول برشی بیشینه افزایش می‌یابد. با افزایش درصد پودر لاستیک، فشار آب حفره‌ای کاهش یافته و دامنه کرنش برشی کاهش می‌یابد. از این رو، سیکل‌ها حالت قائم داشته و مقادیر مدول برشی افزایش می‌یابد.

تغییر شکل‌های مدل

طی ساخت هر مدل شبکه‌ای از ماسه رنگی در خاک و در جلوی مخزن شفاف قرار داده شد تا بتوان تغییر شکل‌های ایجاد شده در طول لرزش را مشاهده کرد. شکل ۱۱ تغییر شکل‌های مدل‌های مسلح و غیرمسلح از تست d را پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای نشان می‌دهد. با توجه به شکل قسمت مسلح در هر تست تغییر شکل ناچیزی داشته و قسمت غیرمسلح دچار روان‌گرایی شده و تغییر شکل و نشست زیادی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. تغییر شکل مدل بعد از بارگذاری برای تست d) $TC_r = 20\%$

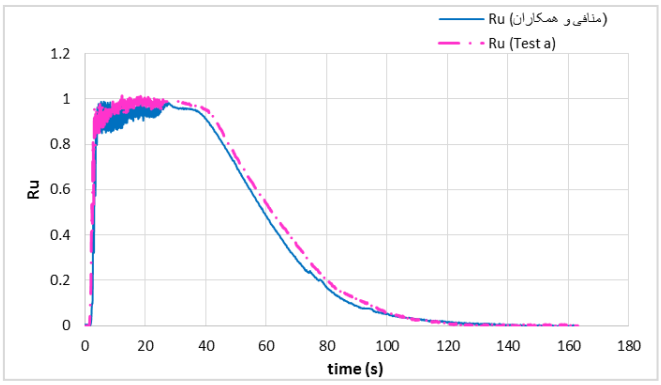
صحت‌سنجی نتایج

سنسورهای استفاده شده قبل از قرار گرفتن در نمونه به‌صورت دقیق کالیبره شده است و هم‌چنین آزمایش می‌شوند که از دقیق بودن سنسورها اطمینان حاصل شود. آزمایش‌ها ٤ بار در درصدهای مختلف پودر لاستیک انجام شده است.

نمونه‌های غیرمسلح این تحقیق و تحقیقات منافی و همکاران [۱۲] در شرایط تقریباً یک‌سانی آزمایش شده‌اند. همهٔ نمونه‌های غیرمسلح در شتاب ورودی متوسط (حدود ۰/۲۵g) روان‌گرا شده و اضافه فشار آب حفره‌ای به‌مقدار ۰/۹۵ رسیده است. نشست‌های ناشی از روان‌گرایی حدود ۳۰ میلی‌متر است. نتایج نمونه‌های غیرمسلح این تحقیق تطابق مناسبی با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

نتایج نمونه‌های غیرمسلح تحقیقات منافی و همکاران دارد که به‌عنوان مثال در شکل ۱۲ نتایج اضافه فشار آب حفره‌ای نشان داده شده است.



شکل ۱۲. مقایسهٔ نتایج اضافه فشار آب حفره‌ای نمونه‌های غیرمسلح

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر مسلح‌سازی ماسه اشباع با پودر لاستیک بر رفتار روان‌گرایی و نسبت میرایی مخلوط است. نتایج آزمایش‌های مدل میز لرزه g -۱ را می‌توان در این بندهای خلاصه کرد:

- افزایش فشار آب حفره‌ای باعث کاهش مقاومت برشی خاک و در نتیجه کاهش دامنه شتاب‌ها می‌شود.
- افزایش درصد وزنی پودر لاستیک در مخلوط ماسه مسلح، باعث کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای و افزایش مقاومت روانگرایی می‌شود.
- مسلح‌سازی خاک با پودر لاستیک از نشست‌های ناشی از رواگرایی جلوگیری می‌کند و به‌مقدار ناچیزی افزایش حجم از خود نشان می‌دهد.
- نسبت میرایی خاک در حالت اشباع، با افزایش دامنه کرنش برشی و در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ای تولید شده، کاهش می‌یابد.
- با افزایش درصد وزنی پودر لاستیک در مخلوط ماسه مسلح، دامنهٔ کرنش برشی کاهش یافته و نسبت میرایی میانگین و مدول برشی افزایش می‌یابد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

- مسلح‌سازی خاک با پودر لاستیک تغییر شکل‌ها و نشست‌های ناشی از روان‌گرایی را به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌دهد.

علایم اختصاری

C_c	ضریب انحنا
C_u	ضریب یکنواختی
D	نسبت میرایی
D_m	نسبت میرایی میانگین
e_{min}	نسبت تخلخل کمینه
e_{max}	نسبت تخلخل بیشینه
e_s	نسبت تخلخل دانه‌های ماسه
G_s	چگالی ویژه
M_s	وزن ماسه
M_T	وزن پودر لاستیک
R_u	نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای
TC_r	نسبت پودر لاستیک
$\ddot{u}$	جابه‌جایی
V_s	حجم دانه‌های جامد
V_T	حجم پودر لاستیک
V_{Total}	حجم کل نمونه
W	بیشینه انرژی ذخیره شده در هر سیکل
z_i	عمق مورد نظر
γ	کرنش برشی
τ	تنش برشی
ΔW	انرژی تلف شده در هر سیکل
ρ	چگالی
ρ_s	چگالی دانه‌های خاک
ρ_T	چگالی پودر لاستیک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

منابع

1. Seed H. B., Lee K. L., "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, No. SM6 (1966) 104-134.
2. Zekri A., Ghalandarzadeh A., Ghasemi P., Aminfar M.H., "Experimental study of remediation measures of anchored sheet pile quay walls using soil compaction", Ocean Engineering, Vol. 93 (2015) 45-63.
3. Rasouli R., Towhata I., Akima T., "Experimental Evaluation of Drainage Pipes as a Mitigation against Liquefaction-Induced Settlement of Structures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (2016) 04016041.
4. Alibolandi M., Ziaie Moayed R., "Liquefaction potential of reinforced silty sands", Int. J. Civil Eng., Vol.13(3-4B) (2015) 195-202.
5. Keskin M.S., Laman M., "Experimental study of bearing capacity of strip footing on sand slope reinforced with tire chips", Geomechanics and Engineering, Vol.6(3) (2014) 249-262.
6. Kaushik M.K., Kumar A., Bansal A., "Drainage performance of different sizes tire chips used alone and mixed with natural aggregates as leachate drainage layer material", Geotechnical and Geological Engineering, Vol.34(1) (2016) 167-191.
7. Assadollahi A., Harris B., Crocker J., "Effects of Shredded Rubber Tires as a Fill Material on the Engineering Properties of Local Memphis Loess", In Geo-Chicago, (2016) 738-745.
8. Uchimura M., Chi N.A., Nirmalan S., Satto T., Mediani M., Towhata I., "Shaking table test on the effect of tire chips and sand mixture in increasing liquefaction resistance and mitigation uplift of pipe", In

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]

Proceedings, international workshop on scrap tire derived geomaterials-opportunities and challenges, Yokosuka, japan, (2007).

9. Hataf N., Rahimi M. M., "Experimental Investigation pf Bearing Capacity of Sand Reinforced with Randomly Distributed Tire Shreds", Construction and Building Materials, Vol.20 (2005) 910-916.
10. Hazarika H., Yasuhara K., Karmokar A. K., Kikuchi Y., Mitarai Y., "Multifaceted potentials of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical applications and their evaluation", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 28 (3) (2010) 303-315.
9. Zeghal M., Elgamal A.W., "Analysis of site liquefaction using earthquake records." Journal of geotechnical engineering, Vol. 120 (6) (1994) 996-1017.
10. Sabermahani M., Ghalandarzadeh A., Fakher A., "Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls", Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27(9) (2009) 121-136.
11. Brennan A. J., Thusyanthan N. I., Madabhushi S. P., "Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge tests", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.131(12) (2005) 1488-1497.
12. Manafi Khajeh Pasha S., Hazarika H., Bahadori H., Chaudhary B., "Dynamic behaviour of saturated sandy soil reinforced with non-woven polypropylene fibre". International Journal of Geotechnical Engineering, (2016). doi.org/10.1080/19386362.2016.1250978 (2016).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.3.1]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.409]