



## بررسی رفتار دینامیکی ماسه ریز مسلح شده با الیاف ژئوتکستایل در جعبه چندلا (مورق) بر روی میز لرزه

حسین غیاثیان<sup>۱</sup>، رضا جمشیدی چناری<sup>۲</sup>، حبیب شاه‌نظری<sup>۳</sup> و علیرضا طبرسا<sup>۴</sup>

۱- دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- استادیار دانشگاه گیلان، رشت، ایران، jamshidi\_reza@yahoo.com

۳- استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۴- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گلستان، گلستان، ایران

### چکیده

در سالهای اخیر استفاده از خاک مسلح با استفاده از المانهای مختلف تسلیح مخصوصاً مصالح ژئوسنتتیک رو به فزونی گذاشته و کاربرد زیادی در زمینه ژئوتکنیک داشته است. الیافها (Fibers) یکی از انواع المانهای تسلیح هستند که به صورت مصنوعی و یا طبیعی تولید می‌شوند و با اختلاط با خاک باعث افزایش مقاومت برشی و کششی خاک و اصلاح خواص مهندسی آن می‌شوند. یکی از این نوع الیاف مصنوعی، تریشه‌های موکت و ژئوتکستایل است که از دیدگاه محیط زیستی دفع و استفاده صحیح از آنها از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. این مطالعه به بررسی تأثیر این نوع الیاف بر اصلاح خواص و پارامترهای دینامیکی خاکهای ماسه‌ای ریز می‌پردازد. به این منظور تعداد پنج مدل خاک ماسه‌ای مسلح در جعبه چندلا (مورق) بر روی میز لرزه دانشگاه توکیو ساخته شده و لرزه‌های متوالی با دامنه و فرکانس مختلف به آنها اعمال گردید. فرکانس و دامنه لرزه‌های متوالی به نحوی انتخاب گردیدند که دامنه جابه‌جایی که متناسب با دامنه شتاب و عکس مجذور فرکانس می‌باشد به مرور افزایش یابد. الیاف موکت در اندازه ثابت و درصدهای وزنی مختلف با ماسه در شرایط خشک مخلوط گردیده و مدل جعبه چندلا (مورق) آماده گردید. با تحلیل برگشتی داده‌های مربوط به شتابنگاری و جابه‌جایی سنج لیزری پارامترهای سختی برشی و میرایی مربوط به این مدلها محاسبه گردیده و با مدل غیرمسلح مقایسه گردیدند. نتایج حاکی از تأثیر مطلوب افزودن الیاف ژئوتکستایل بر فرکانس طبیعی و پارامترهای سختی و میرایی خاک ماسه‌ای می‌باشد.

### کلید واژه‌ها:

رفتار دینامیکی؛  
الیاف ژئوتکستایل؛  
خاک مسلح؛ ماسه ریز

### ۱- مقدمه

اندازه و ابعاد محفظه مدلسازی وجود دارد که خود باعث پر رنگ شدن اثر اندازه و مرزها می‌گردد. تغییر شکل زمین شدیداً تحت تأثیر این اثرات بوده و به خصوص در مواقع زلزله که تغییر شکلها زیاد می‌باشد نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. استفاده از جعبه چند لایه (مورق) می‌تواند به عنوان یک گزینه نویدبخش جهت کاهش اثرات گفته شده در بالا باشد. در این مطالعه از یک جعبه چندلا (مورق) و میز لرزه به منظور مطالعه رفتار تنش- کرنش خاکهای ماسه‌ای ریز مسلح‌شده با الیاف ژئوتکستایل در حین زلزله استفاده گردیده است.

### ۲- آزمایشات میز لرزه

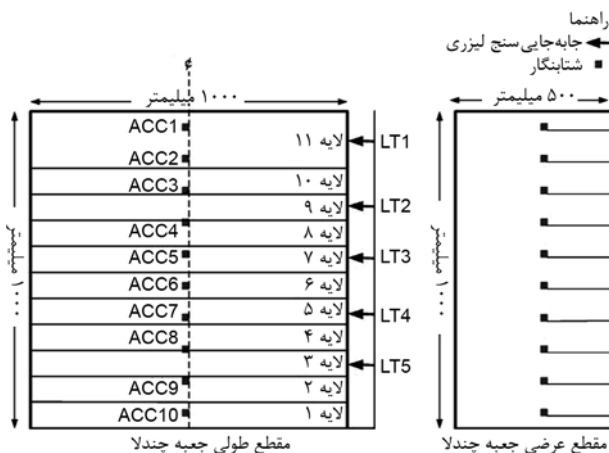
#### ۲-۱- جعبه چندلا (مورق)

جعبه چندلا (مورق) یک جعبه برشی در اندازه بزرگ متشکل از چندین لایه افقی می‌باشد. این لایه‌ها طوری ساخته شده‌اند

آزمایشات آزمایشگاهی اعم از برش پیچشی سیکلی، سه محوری فشاری، برش ساده، برش حلقه و غیره همواره به منظور مدلسازی شرایط محلی در مواقع زلزله استفاده شده‌اند. علیرغم کیفیت و دقت بالای نتایج در این آزمایشات، انعکاس دقیق رفتار سازه واقعی و یا مدلسازی شرایط واقعی در محل به کمک این نوع آزمایشات میسر نمی‌باشد. به منظور اطمینان از حصول موارد بالا همواره تلاش گردیده است به کمک نصب و جای گذاری ابزار دقیق در محل و سازه واقعی داده‌های واقعی و قابل اطمینان کسب گردد. با این حال تعداد سازه‌های خاکی ابزارگذاری شده محدود می‌باشد و به عنوان یک راه‌حل میانی می‌توان آزمایشات مدل را به کار برد.

این آزمایشات نیز علی‌رغم کلیه مزایایی که دارند گاهی اوقات به دلیل زمان زیاد نمونه‌سازی و هزینه بالای انجام آنها جذاب نمی‌باشند. در انجام آزمایشات مدل همواره محدودیت

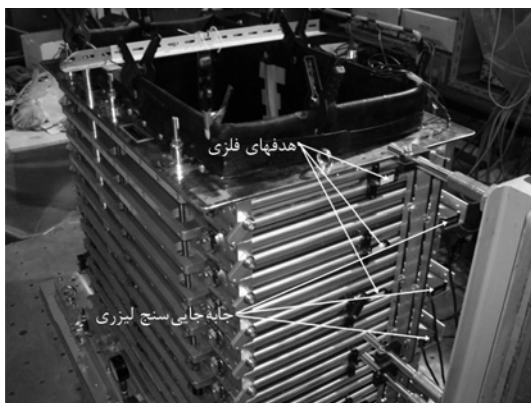
در راستای قائم نصب گردیدند و یک عدد نیز در پی جعبه به منظور ثبت شتاب اعمالی نصب گردیده است. عمق شتابنگار سطحی (ACCI) نیز ۵ سانتیمتر می‌باشد. شکل (۲) به طور شماتیک آرایش سنسورهای شتابنگاری درون جعبه را نشان می‌دهد. به منظور جلوگیری از چرخش شتابنگارها و تأمین پایداری آن در حین اعمال لرزه، برای هر شتابنگار یک پایه از جنس اکریل تهیه گردیده و ترانسدیوسرها بر روی آن محکم گردیدند. این پایه‌ها دارای مقطعی مربعی به ضلع ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر می‌باشند و مقطع بزرگ آن پایداری سنسورها را در برابر چرخش تأمین می‌نماید.



شکل ۲. آرایش لوازم اندازه‌گیری درون جعبه چندلا (مورق).

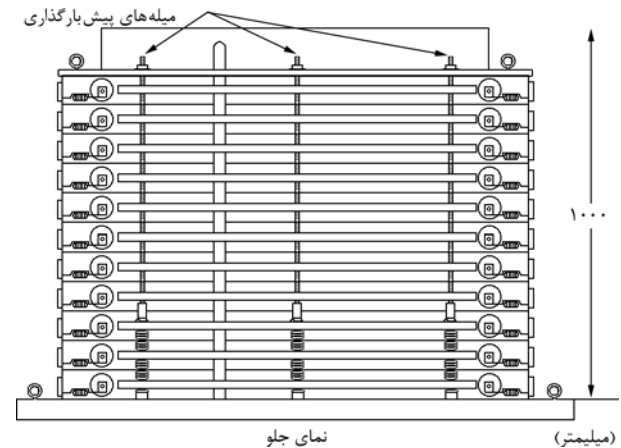
### ۳-۲- جابه‌جایی سنج لیزری

پنج عدد سنسور جابه‌جایی سنج لیزری بر روی یک ستون و قاب فلزی صلب که مستقل از جعبه چندلا بر روی میز لرزه ثابت گردیده است نصب گردید. ستون صلب به همراه سنسورها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. سنسورهای لیزری قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی در بازه ۶۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر با حساسیت ۰/۰۵ میلی‌متر می‌باشند. هدفهای فلزی این سنسورها بر روی لایه‌های جعبه لایه‌ای نصب گردیده و توسط یک کاغذ سفید پوشانده شده است.



شکل ۳. آرایش جابه‌جایی سنج لیزری بر روی قاب خارجی.

که اصطکاک بین لایه‌ها حداقل باشد. در این سیستم لایه‌ها می‌توانند متناسب با تغییر شکل خاک داخل جعبه روی همدیگر بلغزند. جعبه چندلا مورد استفاده در این مطالعه توسط پروفسور توهااتا (Towhata) در دانشگاه توکیو طراحی و شرکت Seiken Sha در توکیو مسئولیت ساخت آن را به عهده گرفت. مقطع این جعبه مستطیلی به ابعاد داخل ۵۰۰ میلی‌متر عرض، ۱۰۰۰ میلی‌متر طول و نیز ۱۰۰۰ میلی‌متر ارتفاع می‌باشد. شکل (۱) نمای کلی جعبه چندلا را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. نمای کلی جعبه چندلا (مورق) [۱].

کف جعبه توسط یک سنگ متخلخل به ضخامت ۱۰ میلی‌متر پوشیده شده است و می‌توان از آن به منظور توزیع یکنواخت آب، مکش و همچنین زهکشی استفاده نمود. به منظور جلوگیری از نفوذ خاک به درز بین لایه‌ها، درون جعبه توسط یک غشاء لاستیکی به ضخامت ۲ میلی‌متر پوشیده شده است. همچنین به منظور نصب ترانسدیوسر جهت اندازه‌گیری تغییر شکل جانبی لایه‌ها از یک عدد قاب فلزی استفاده شده است که این قاب در خارج از جعبه چندلا (مورق) و نزدیک به آن روی میز لرزه توسط پیچ سفت می‌گردد و سنسورهای جابه‌جایی سنج روی آن نصب می‌گردند.

### ۳- لوازم اندازه‌گیری

شتابنگار و جابه‌جایی سنج لیزری به عنوان لوازم اندازه‌گیری هستند که در حین انجام آزمایشات میز لرزه استفاده گردیدند. شکل (۲) به طور شماتیک آرایش سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده در این آزمایشات را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- شتابنگار

یازده شتابنگار تک محوره در این آزمایشات استفاده گردید که ده تای آن درون جعبه و به فاصله ۱۰ سانتیمتر از یکدیگر



## ۶- مراحل آزمایش

پروسه مرحله به مرحله آزمایش میز لرزه بر روی مدل جعبه چندلا خاک ماسه‌ای ریز مسلح شده توسط الیاف و تریشه‌های ژئوتکستایل به شرح زیر می‌باشد:

- کلیه قطعات و لایه‌های جعبه لایه‌ای قبل از شروع اولین آزمایش باز شده، اتصالات و بلبرینگ‌ها تمیز و عاری از هر گونه گرد و خاک و آلودگی می‌گردند. این کار فقط قبل از شروع اولین آزمایش انجام گرفته و برای آزمایشات متوالی نیاز به این کار نمی‌باشد.

- غشاء لاستیکی از جنس رزین و ضخامت ۲ میلی‌متر به دیواره‌های جعبه لایه‌ای محکم شده و لبه بالایی آن بر روی لایه فوقانی محکم گردید.

- قاب خارجی جهت نصب جابه‌جایی سنج‌های لیزری بر روی میز لرزه محکم گردید و سنسورها بر روی آن نصب گردیدند. مطابق روش شرح داده شده در بخش قبلی، نمونه‌سازی انجام گرفته و سنسورهای شتابنگاری در ترازهای مورد نظر قرار گرفتند.

- کلیه سنسورهای شتابنگاری و جابه‌جایی سنج لیزری به دیتالاگر متصل شده و صفر می‌گردند.

- قبل از اعمال لرزه‌های اصلی، به منظور اندازه‌گیری فرکانس طبیعی مدل خاکی یک لرزه خفیف (۵۰ گال) که فرکانس آن از ۱ تا ۴۰ هرتز تغییر می‌کند تحت عنوان آزمایش سوئیپ (*Sweep Test*) به مدل جعبه چندلا اعمال گردید. شرح کامل این آزمایش در بخش‌های بعدی ارائه گردیده است.

پس از ذخیره نمودن داده‌های مربوط به آزمایش سوئیپ ثبت شده توسط دیتالاگرها مجدداً سنسورها به حالت صفر برگردانده شده و سپس لرزه‌های اصلی با فرکانس و دامنه به شرح جدول (۲) به هر مدل اعمال گردید. هدف از اعمال لرزه‌های متعدد ایجاد دامنه‌های کرنش متغیر که از مقدار کم شروع شده و به مقادیر زیاد منتهی می‌گردد، می‌باشد. دامنه شتاب از  $0.1g$  تا  $0.8g$  قابل اعمال بوده و فرکانس بارگذاری نیز از ۱ هرتز تا ۴۰ هرتز متغیر می‌باشد. این سری با فرض اینکه دامنه جابه‌جایی رابطه مستقیم با دامنه شتاب اعمالی و معکوس با مجذور فرکانس دارد، انتخاب گردید. بدین ترتیب که ابتدا مقدار کسر مورد نظر برای دامنه و فرکانسهای مختلف محاسبه شده و سپس مقادیر به دست آمده را به صورت صعودی مرتب نموده تا سری ارائه شده در جدول (۲) شکل گیرد. نکته مهمی که در ارتباط با نحوه بارگذاری در این سری

کیلوگرمی متراکم گردید تا به وزن مخصوص مورد نظر برسد. در هر لایه سنسور شتابنگاری که می‌بایست در وسط آن لایه نصب گردد، در جای خود قرار گرفت و لایه‌های بعدی به همین ترتیب آماده گردید تا لایه آخر به اتمام رسد. قبل از ریختن هر لایه سطح لایه قبلی توسط یک کاردک خراشیده شده تا لایه‌بندی شکل نگیرد. سنسورهای شتابنگاری قبل از اینکه مدفون گردند کالیبره گردیده و پس از انجام کنترل‌های لازم به دیتالاگر متصل گردیدند.

جهت مقایسه رفتار مدل‌های مسلح حالت ایده‌آل آن است که وزن مخصوص خشک ماسه در مدل‌های مختلف یکسان باشد [۴]. الیاف مورد استفاده توسط نورانی [۴] از نوع الیاف مویی و از جنس پلی پروپیلن بوده و از این رو در اثر تراکم حجم آنها تغییر نمی‌کند و لذا تخمین حجم بخش الیاف امکان‌پذیر می‌باشد. اما از آنجایی که محاسبه دقیق حجم تریشه‌های ژئوتکستایل پس از تراکم به سبب تغییر شکل‌پذیری و تغییر حجم آنها بر اثر انرژی تراکم میسر نمی‌باشد، وزن مخصوص واقعی بخش ماسه‌ای در پایان نمونه‌سازی و بلافاصله قبل از اعمال لرزه قابل کنترل نمی‌باشد. بر این اساس سعی بر این گردید که حجم الیاف قبل از تراکم محاسبه گردیده و از حجم قالب کسر گردد و سپس وزن بخش ماسه‌ای بر مبنای حجم باقیمانده و تراکم نسبی حدود ۵۰ درصد محاسبه و وزن تریشه‌های ژئوتکستایل نیز بر حسب درصد وزنی مورد نظر محاسبه گردید.



شکل ۴. آماده‌سازی مصالح ماسه‌ای مسلح شده با الیاف ژئوتکستایل.

مسلح شده با الیاف نقش تسلیح را در کاهش اثر پیش کرنش یافتگی سیکلی (*Cyclic Prestraining*) بر رفتار دینامیکی ماسه ریزدانه بررسی نمودند. آنان دریافتند که به طور کلی اثر پیش کرنش یافتگی سیکلی باعث افزایش مدول برشی در نمونه‌های ماسه معمولی می‌گردد، ولیکن در نمونه‌های مسلح به دلیل حضور الیاف و محدود گشتن باز شکل‌گیری و جهت‌گیری ذرات ماسه (*Reorientation*) ناشی از بارگذاری دینامیکی، اثر تاریخچه بارگذاری محدود و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

### ۷- آزمایشات میز لرزه

تعداد پنج آزمایش میز لرزه به منظور بررسی اثر افزودن تصادفی الیاف و تریشه‌های ژئوتکستایل به ماسه توپورا با درصد‌های وزنی صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد در جعبه لایه‌ای انجام گرفت. در کلیه آزمایشات مربوط به مدل‌های مسلح نسبت ابعاد ثابت باقی مانده است بدین منظور از تریشه‌های با مقطع مربعی به ضلع ۵ میلیمتر و طول ۴/۵ میلیمتر (نسبت اضلاع ۹) استفاده گردید. در کلیه آزمایشها تراکم نسبی (*Dr*) ماسه برابر ۵۰٪ در نظر گرفته شد. در بخشهای متوالی نتایج مربوط به آزمایشات سوئیپ و لرزه اصلی بر روی مدل‌های مختلف ارائه گردیده و تحلیل می‌گردد. از بین پنج آزمایش انجام شده و به منظور تضمین تکرارپذیری نتایج، آزمایش مربوط به مدل با ۱ درصد وزنی الیاف تکرار و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردید. مشخصات نمونه‌ها در آزمایشات جعبه لایه‌ای بر روی میز لرزه در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۳: مشخصات و جزئیات لرزه‌های اعمالی به مدل‌های میز لرزه.

شماره مدل	درصد وزنی الیاف (درصد)	نسبت اضلاع الیاف
LB01	۰	-
LB02	۰/۵	۹
LB03	۰/۷۵	۹
LB04	۱	۹
LB05	۱	۹

نکته: آزمایشات LB04 و LB05 به جهت تأمین تکرارپذیری کاملاً مشابه انجام گردیدند.

در این سری از آزمایشها بررسی اثر پارامترهایی نظیر نوع خاک، تنش همه جانبه و تاریخچه تنش روی عملکرد ماسه مسلح مد نظر نمی‌باشد بلکه جهت شرایط تنشهای پایین نظیر بستر بزرگراهها تأثیر افزودن الیاف و تریشه‌های ژئوتکستایل بررسی می‌گردد.

از آزمایشات وجود دارد این است که دامنه و سطح کرنش برشی مرحله به مرحله بزرگتر می‌گردد. ماهر و وودز [۵] با انجام تعدادی آزمایش برشی پیچشی بر روی ماسه

جدول ۲: مشخصات و جزئیات لرزه‌های اعمالی به مدل‌های میز لرزه.

شماره زلزله	دامنه (گال)	فرکانس (هرتز)	تعداد سیکل
۱	۱۰۰	۴۰	۱۰
۲	۱۰۰	۳۵	۱۰
۳	۱۰۰	۳۰	۱۰
۴	۲۰۰	۴۰	۱۰
۵	۱۰۰	۲۵	۱۰
۶	۲۰۰	۳۵	۱۰
۷	۲۰۰	۳۰	۱۰
۸	۱۰۰	۲۰	۱۰
۹	۴۰۰	۴۰	۱۰
۱۰	۲۰۰	۲۵	۱۰
۱۱	۴۰۰	۳۵	۱۰
۱۲	۶۰۰	۴۰	۱۰
۱۳	۱۰۰	۱۵	۱۰
۱۴	۴۰۰	۳۰	۱۰
۱۵	۶۰۰	۳۵	۱۰
۱۶	۲۰۰	۲۰	۱۰
۱۷	۴۰۰	۲۵	۱۰
۱۸	۶۰۰	۳۰	۱۰
۱۹	۲۰۰	۱۵	۱۰
۲۰	۶۰۰	۲۵	۱۰
۲۱	۱۰۰	۱۰	۱۰
۲۲	۴۰۰	۲۰	۱۰
۲۳	۶۰۰	۲۰	۱۰
۲۴	۴۰۰	۱۵	۱۰
۲۵	۲۰۰	۱۰	۱۰
۲۶	۶۰۰	۱۵	۱۰
۲۷	۱۰۰	۵	۱۰
۲۸	۴۰۰	۱۰	۱۰
۲۹	۶۰۰	۱۰	۱۰
۳۰	۲۰۰	۵	۱۰
۳۱	۴۰۰	۵	۱۰
۳۲	۶۰۰	۵	۱۰
۳۳	۱۰۰	۱	۱۰
۳۴	۲۰۰	۱	۱۰
۳۵	۴۰۰	۱	۱۰
۳۶	۶۰۰	۱	۱۰
۳۷	۸۰۰	۵	۲۰

۷-۱- آزمایشات سوئیپ (Sweep Test)

قبل از اعمال لرزه‌های اصلی با فرکانس و دامنه‌های مختلف، یک لرزه خفیف با شدت کم (۵۰ گال) که فرکانس آن از ۱ هرتز تا ۴۰ هرتز با نرخ ۱ هرتز در ثانیه تغییر می‌کند به مدل اعمال گردیده و شتاب در ترازهای مختلف مدل توسط شتابنگارهای نصب شده اندازه‌گیری می‌شود. فرکانس نمونه‌برداری (*Sampling Frequency*) در این آزمایشات ۱۰۰۰ هرتز می‌باشد بدین ترتیب که در هر ثانیه ۱۰۰۰ داده برای هر سنسور توسط دیتالاگر ثبت می‌گردد. شتاب ثبت شده در پای جعبه به عنوان طیف ورودی و شتاب ثبت شده در بالاترین تراز جعبه به عنوان طیف پاسخ در نظر گرفته می‌شود. ابتدا همبستگی متقابل طیف ورودی و پاسخ (*Rxy*) را محاسبه نموده و سپس خود همبستگی طیف ورودی (*Rxx*) محاسبه می‌گردد. با محاسبه سری فوریه مربوط به *Rxy* و *Rxx* چگالی طیفی مربوط به طیف ورودی (*Sxx*) و همچنین چگالی طیفی متقابل مربوط به طیف‌های ورودی و خروجی (*Sxy*) محاسبه می‌گردد. نسبت این دو مقدار تحت عنوان تابع تبدیل (*G(JW)*) تلقی گردیده و نمودار آن بر حسب فرکانس ترسیم می‌گردد. مقدار حداکثر تابع تبدیل متناظر با فرکانس طبیعی مدل می‌باشد. شکل (۵) حاصل محاسبات شرح داده شده در این بخش را نشان می‌دهد و فرکانس طبیعی برای مدل‌های مختلف از روی این نمودار مشخص می‌باشد. نتایج نشان‌دهنده این است که با افزودن درصد وزنی الیاف فرکانس طبیعی خاک افزایش می‌یابد. مدول برشی حداکثر خاک را که متناظر با کرنش‌های پایین می‌باشد و معمولاً مدول برشی بر حسب آن نرمال می‌گردد، می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

میناتوری هوا محاسبه نمود [۶]. بازه کرنش برشی در این روش حدود ۰/۰۳ درصد می‌باشد. برای ماسه خشک از آنجایی که سرعت انتشار امواج بالا می‌باشد نمی‌توان برآورد دقیقی از اختلاف زمانی انتشار موج برشی بین دو نقطه به دست آورد. بدین منظور می‌توان به کمک محاسبه فرکانس طبیعی لایه خاک مربوط به مدل‌های مختلف که متناظر با مقدار حداکثر تابع تبدیل در شکل (۵) می‌باشد و ارتفاع لایه، سرعت موج برشی را برای هر مدل از رابطه (۲) محاسبه نمود.

$$V_s = 4Hf \quad (2)$$

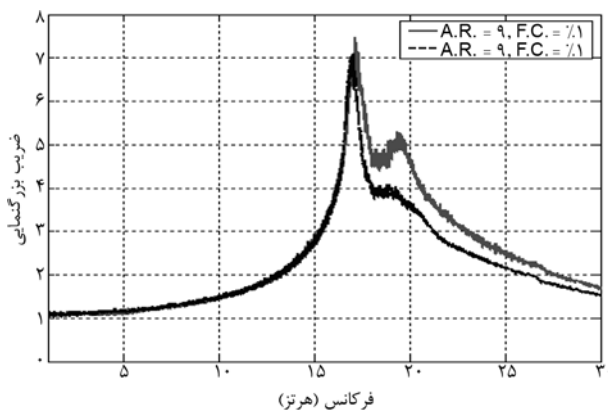
نتایج مربوط به فرکانس طبیعی، سرعت موج برشی و مدول برشی حداکثر لایه خاک مسلح برای مدل‌های مختلف در جدول (۴) ارائه گردیده است.

جدول ۴: پارامترهای دینامیکی مربوط به مدل‌های جعبه چندلا در میز لرزه.

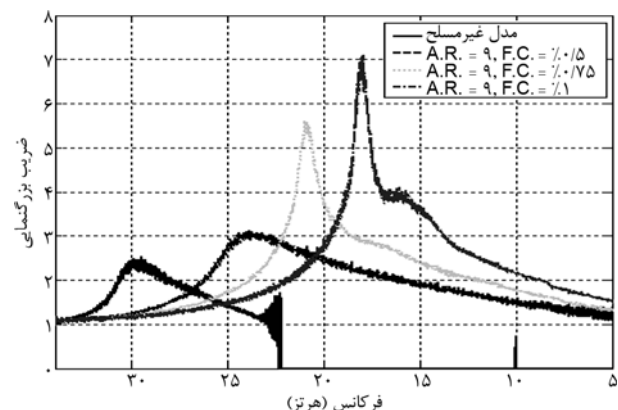
شماره مدل	فرکانس طبیعی (هرتز)	سرعت موج برشی (متر/ثانیه)	مدول برشی حداکثر (مگاپاسکال)
LB01	۵	۲۰	۰/۶۰
LB02	۱۱	۴۴	۲/۸۹
LB03	۱۴	۵۶	۴/۶۹
LB04	۱۷	۶۸	۶/۹۱

از آنجایی که الیاف درون ماسه به صورت تصادفی توزیع می‌گردند و همگن بودن مدل ساخته شده همواره از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد، دو مدل مسلح با درصد وزنی ۱ درصد در شرایط کاملاً یکسان ساخته شده و تحت بار دینامیکی یکسان قرار گرفت. شکل (۶) مؤید تکرارپذیری نتایج می‌باشد. کلیه محاسبات مربوط به این بخش به کمک نرم‌افزار *MATLAB 6.5* انجام پذیرفته است.

رابطه (۱)  $G_{max} = V_s^2 \rho$  سرعت موج برشی و چگالی خاک می‌باشد. برای ماسه اشباع سرعت موج برشی را می‌توان به کمک چکش



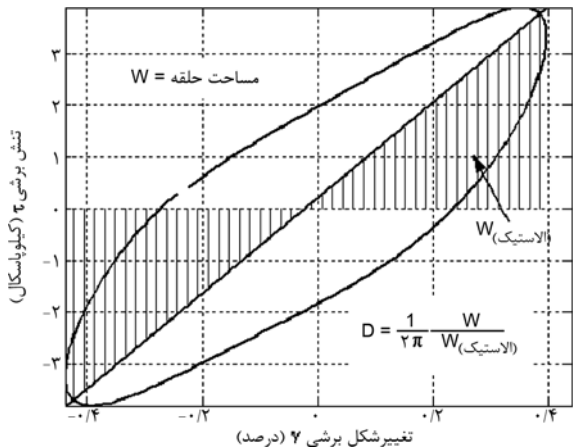
شکل ۶. تکرارپذیری نتایج آزمایش سوئیپ.



شکل ۵. بزرگنمایی لرزه ورودی برای فرکانس‌های مختلف.

۲-۷- رفتار تنش - کرنش خاک مسلح

توسط برنان و همکاران [۹] پیشنهاد گردید، استفاده شده است. در این روش ابتدا مقادیر بیشینه و کمینه تنش و کرنش برشی را از روی حلقه‌های تنش - کرنش برشی محاسبه نموده و سپس با اتصال نقاط مربوط به حداقل و حداکثر تنش و کرنش برشی و ترسیم خطی بین این دو نقطه مطابق شکل (۷) و با برآورد شیب این خط می‌توان مدول برشی معادل را محاسبه نمود.



شکل ۷. محاسبه مدول برشی معادل و نسبت میرایی از حلقه تنش و کرنش برشی.

معادله (۶) بیانگر نحوه محاسبه مدول برشی معادل می‌باشد.

$$G_e = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (۶)$$

نسبت میرایی مصالح را می‌توان با محاسبه سطح حلقه محصور در نمودار تنش - کرنش برشی، در شکل (۷)، به روش انتگرال گیری دوزنقه‌ای تحت عنوان کار انجام شده (W) و همچنین محاسبه سطح زیر خط مربوط به مدول برشی معادل که همان کار الاستیک (W<sub>elastic</sub>) می‌باشد را از رابطه (۷) محاسبه نمود.

$$D = \frac{1}{2\pi} \frac{W}{W_{elastic}} = \frac{1}{2\gamma} \frac{\int \tau dy}{(0.25 \times \Delta\tau \times \Delta\gamma)} \quad (۷)$$

شکل (۸) نمونه‌ای از نتایج مربوط به حلقه‌های تنش و کرنش را برای سیکلهای مختلف بارگذاری نمایش می‌دهد. نتایج مربوط به سختی برشی و میرایی برای لرزه‌های متوالی نهایتاً به صورت نمودارهای سختی برشی - کرنش برشی ارائه گردیده است. کلیه محاسبات مربوط به این بخش به کمک نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

بررسی نمودار سختی برشی بر حسب کرنش برشی در شکل (۹) نشانگر آن است که برای کلیه مدل‌های مسلح و غیرمسلح با افزایش سطح کرنش برشی مدول برشی معادل کاهش می‌یابد. نتایج همچنین حاکی از آن است که با افزودن درصد وزنی الیاف مدول سختی برشی خاک مسلح افزایش

تنش و تغییر شکل ناشی از اعمال لرزه‌های اصلی به جعبه چندلا در تراز و لایه‌های مختلف را می‌توان توسط داده‌های ثبت شده از شتابنگاری و جابه‌جایی‌سنج‌های لیزری محاسبه نمود. مدل حاکی درون جعبه چندلا تحت یک بارگذاری برشی یک بعدی می‌باشد. بنابراین معادلات سه بعدی حرکت را می‌توان به یک بعدی کاهش داد. معادلات حاکم به شرح زیر می‌باشد:

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

با انتگرال گیری از معادله حرکت و با فرض تنش صفر در سطح مدل می‌توان تنش برشی در هر عمق z را محاسبه نمود [۷-۸]:

$$\tau(z, t) = \int_0^z \rho \ddot{u}(\xi, t) d\xi \quad (۴)$$

متناظر با معادلات بالا، برای محاسبه کرنش برشی نیز یک سری معادلات در ترازهای Z<sub>i</sub> به شرح زیر ارائه می‌گردد:

$$\gamma_i(t) = \frac{1}{\Delta Z_{i-1} + \Delta Z_i} \left( (u_{i+1} - u_i) \frac{\Delta Z_{i-1}}{\Delta Z_i} + (u_i - u_{i-1}) \frac{\Delta Z_i}{\Delta Z_{i-1}} \right) \quad (۵)$$

در روابط فوق u<sub>i</sub> = u(Z<sub>i</sub>, t) جابه‌جایی در عمق Z<sub>i</sub> می‌باشد. معادلات ارائه شده در بالا مربوط به تنش و کرنش برشی صرفاً با استفاده از معادله حرکت و تعریف کرنش برشی به دست آمده‌اند؛ لذا این الگوریتم بدون فرض هر گونه مدل رفتاری که تنش و کرنش را به یکدیگر ارتباط می‌دهد پذیرفته شده است و به کمک تنش و کرنش برشی برآورد شده می‌توان سختی برشی و میرایی را محاسبه نمود.

تاریخچه تنش و کرنش برشی محاسبه شده توسط معادلات (۴) و (۵) در ترازهای مختلف مدل که سنسورهای شتابنگاری نصب شده‌اند به کمک خواص سختی برشی خاک به یکدیگر مرتبط می‌باشند. از آنجایی که مطابق معادله (۵) برای محاسبه کرنش برشی در هر نقطه نیاز به تاریخچه جابه‌جایی نقاط ماقبل و بعدی می‌باشد؛ لذا نقطه LT4 و یا ACC7 در همان تراز در شکل (۲) پایین‌ترین نقطه‌ای می‌باشد که می‌توان محاسبات مربوط به تنش و کرنش برشی را توسط معادلات ارائه شده، انجام داد. بنابراین خواص دینامیکی خاک اعم از سختی برشی و نسبت میرایی در عمق ۶۵ سانتیمتری مدل‌های جعبه لایه‌ای (ACC7 در شکل (۲)) با درصد وزنی مختلف الیاف را می‌توان با ترسیم نمودار تنش و کرنش برشی استخراج نمود. به منظور استخراج پارامترهای دینامیکی خاک مشتمل بر مدول برشی معادل و نسبت میرایی از یک روش ساده که

می‌یابد. ماهر و وودز [۵] با انجام آزمایشات ستون تشدید و برش پیچشی بر روی نمونه‌های ماسه‌ای مسلح با الیاف مویی با مدول الاستیسیته بالا و پایین نتایج مشابهی را گزارش نمودند. آنان اذعان داشتند که مدول سختی برشی با افزایش درصد وزنی الیاف افزایش می‌یابد.

از آنجایی که مدول برشی حداکثر مصالح ژئومکانیکی متناسب با مجذور فرکانس طبیعی آن می‌باشد لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن الیاف، مدول سختی برشی مربوط به سطح کرنش پایین که مقدار بیشینه آن نیز می‌باشد افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج مربوط به مدول برشی در سطوح بالاتر کرنش برشی همخوانی دارد.

مشابه روندی که برای فرکانس طبیعی مدلها مشاهده گردید در مورد سختی برشی ماسه مسلح در سطوح مختلف کرنش برشی نیز می‌توان گفت که با افزودن درصد وزنی تریشه‌های ژئوتکستایل، مدول برشی افزایش می‌یابد. بر خلاف آنچه در مورد سختی برشی استنتاج گردید به دلیل تغییر فرکانس بارگذاری در مراحل مختلف بارگذاری، در ارتباط با نسبت میرایی که متأثر از فرکانس بارگذاری می‌باشد روند مشخصی مشاهده نگردید.

### تقدیر و تشکر

این مطالعه در قالب یک دوره فرصت مطالعاتی در کشور ژاپن و در دانشگاه توکیو انجام گرفته است. در اینجا لازم است از پروفیسور *Ikuo Towhata* که در طول مدت انجام این تحقیق امکان استفاده از کلیه تجهیزات آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه توکیو را فراهم نمودند تشکر و قدردانی به عمل آید.

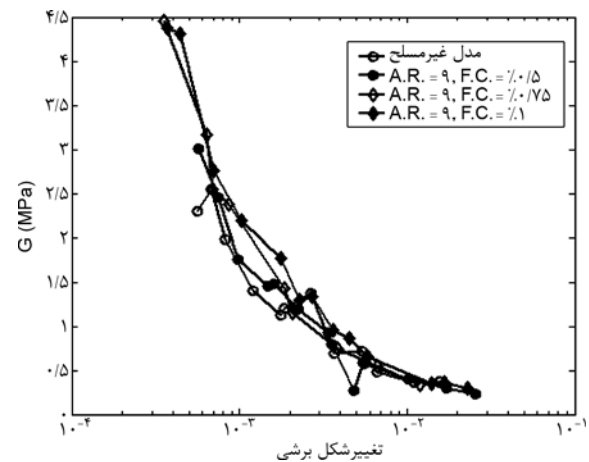
### مراجع

- Mohajeri, M. (2001). "Experimental Study on Development of Residual Strain Due to Cyclic Loading", Doctoral Thesis of Engineering, The University of Tokyo.
- Towhata, I. (1982) "The Effect of Principal Stress Axis Rotation on the Cyclic Shear Deformation Characteristics of Sand", Doctoral Thesis, The University of Tokyo.
- Poorebrahim, G. (2004). "Soil Reinforcement with Carpet Wastes", Ph.D. Dissertation, Iran Univ. of Science and Technology, Tehran, Iran.
- Noorany, I. and Uzdavines, M. (1989). "Dynamic

اندازه‌گیری تنش برشی در نقطه AC7، عمق ۶۵ سانتیمتر

شکل ۸. حلقه‌های تنش-کرنش در عمق ۶۵ سانتیمتر مدل مسلح به ۱ درصد وزنی الیاف با نسبت اضلاع ۹ در دامنه ۲۰۰ گال و فرکانس ۵ هرتز.

شکل ۹. نتایج مربوط به سختی برشی معادل برای مدل‌های مسلح و غیرمسلح با نسبت اضلاع ۹ در عمق ۶۵ سانتیمتر.



شکل ۸- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی نقش افزودن الیاف در خواص دینامیکی ماسه ریزدانه اعم از سختی برشی معادل و نسبت میرایی و همچنین فرکانس طبیعی این مصالح که مرتبط با مدول برشی حداکثر آن می‌باشد، پنج مدل ماسه توپورا مسلح شده با الیاف و تریشه‌های ژئوتکستایل در جعبه لایه‌ای ساخته شده و تحت لرزه‌های مختلف با فرکانس و دامنه‌های متفاوت قرار گرفتند. از بین پنج مدل ساخته شده، دو مدل کاملاً مشابه و با درصد وزنی ۱ درصد ساخته شده و سه مدل نیز با درصد‌های صفر،



7. Zeghal, M. and Elgamal, A.W. (1994). "Analysis of Site Liquefaction Using Earthquake Records", *J. of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120**(6), 996-1017.
8. Zeghal, M. Elgamal, A.W., Tang, H.T., and Stepp J.C. (1995). "Lotung Downhole Array, II: Evaluation of Site Nonlinear Properties", *J. of Geotechnical Engineering, ASCE*, **121**(4), 363-378.
9. Brennan, A.J., Thusyanthan, N.I., and Madabhushi, S.P.G. (2005). "Evaluation of Shear Modulus and Damping Centrifuge Tests", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **131**(12), 1488-1497.
- Behavior of Saturated Sand with Geosynthetic Fibers", *Geosynthetics Conference*, **2**, 385-396, San Diego, USA.
5. Maher, M.H. and Woods, R.D. (1990). "Dynamic Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers", *J. of Geotechnical Engineering, ASCE*, **116**(7), 1116-1131.
6. Ghosh, B. and Madabhushi, S.P.G. (2002). "An Efficient Toll for Measuring Shear Wave Velocity in the Centrifuge", *Proceedings of International Conf. on Physical Modeling in Geotechnics*, Philips, R., Guo, P.J., and Popescu, R., eds., Balkeman, Rotterdam, The Netherlands, 119-124.