

بررسی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ی دیوارهای خاک مسلح سگمنتال با جوشن فلزی

مرتضی اسماعیلی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

عباس قلندرزاده (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهدی پرتویان نوزاد (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد

مهندسی عمران، شریف، (پیاور ۱۳۹۳)
دوری ۲-۳۰، شماره ۱/۱، ص. ۳۳-۴۳

بررسی ادبیات فنی موجود در زمینه‌ی دیوارهای خاک مسلح، نشان‌دهنده‌ی آن است که رفتار لرزه‌ی این نوع سازه‌های نگهدارنده تاکنون از منظر سختی و میرایی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش با ساخت ۶ مدل آزمایشگاهی ۱g به مقیاس ۱ به ۱۰ و اعمال شتاب پایه‌ی سینوسی با دامنه‌ی ۱g تا ۸g و بسامدهای ۵ و ۸ هرتز، مقادیر کرنش در تسمه‌های فلزی و شتاب جسم خاک و همچنین نشست سطح مدل پایش شد. با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده در آزمایش‌های یادشده، مکانیزم‌های مختلف گسیختگی این نوع دیوار به‌همراه مقادیر مدول برشی و میرایی در بسامد ۵ هرتز استخراج و با بررسی روابط رگرسیون مختلف در نهایت یک رابطه‌ی نمایی برای مدول برشی و میرایی برحسب چیدمان طول مسلح‌کننده‌ها ارائه شده است. در بخش پایانی، مقایسه‌ی بیشینه و میانگین مقادیر نیرو در تسمه‌های فلزی با مقادیر طراحی، ضریب اطمینان واقعی این تسمه‌ها تعیین و با مقادیر آیین‌نامه‌ی انجام شده است.

واژگان کلیدی: دیوار خاک مسلح، مسلح‌کننده‌ی فلزی، پایداری لرزه‌ی، مد گسیختگی، مدول برشی، نسبت میرایی.

۱. مقدمه

به‌کارگیری دیوارهای خاک مسلح به‌دلیل سرعت و سهولت اجرا و هزینه‌ی تمام‌شده‌ی پایین‌تر در مقایسه با سایر انواع سازه‌های نگهدارنده در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. از جمله کاربردهای اصلی این نوع دیوار در محیط‌های شهری می‌توان به مهار ترانشه‌ها و همچنین کاربرد به‌عنوان کوله‌ی پل‌ها اشاره کرد. یکی از چالش‌های اساسی امکان‌پذیریزش و انسداد ترانشه‌های مشرف به بزرگراه‌ها و شریان‌های حیاتی شهری است که باید امکان امدادسانی را در شرایط پس از زلزله فراهم سازند. توجه به این موضوع، لزوم نگاهی دقیق و موشکافانه‌تر به رفتار لرزه‌ی دیوارهای خاک مسلح را بیش از پیش مشخص می‌سازد. دیوارهای خاک مسلح از جمله دیوارهای انعطاف‌پذیر به‌شمار می‌روند که انعطاف‌پذیری این دیوارها در شرایط زلزله منجر به استهلاك قابل توجه انرژی لرزه‌ی می‌شود و عملکرد بهتری را برای این سازه‌ها به‌دنبال خواهد داشت. انعطاف‌پذیری این سازه‌ها به میزان قابل توجهی تحت تأثیر اندرکشی جوشن‌های فلزی با خاک و رویه‌ی بتنی دیوار است.

مشاهده‌های صورت‌گرفته در زلزله‌های بزرگ، نشانگر عملکرد مناسب این

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱/۲۲، پذیرش ۱۳۹۱/۳/۹.

نوع دیوارها نسبت به سایر سازه‌های نگهدارنده بوده است؛ ولیکن گزارش‌هایی نیز از برخی انواع خرابی‌های ایجادشده در این سیستم حائل ارائه شده است.^[۱] برای مثال در زلزله‌ی Northridge آمریکا (۱۹۹۴)^[۲] شکستگی لبه‌ی پل‌های نما و ندرتاً شکم‌دادگی‌های جزئی مشاهده شده است. در زلزله‌ی Kobe (۱۹۹۵)^[۳] نیز ترک‌خوردگی بلوک‌ها و جابجایی آنها نسبت به هم و همچنین جابجایی‌هایی در حدود ۴ تا ۱۱۳ میلی‌متر برای دیوار گزارش شده است. در زلزله‌ی Niigata-ken (۲۰۰۴)^[۴] در کشور ژاپن نیز گزارش‌ها حاکی از وقوع تغییرشکل‌هایی به‌صورت شکم‌دادگی و واژگونی در بعضی از این نوع دیوارها بود.

علاوه بر مشاهده‌های میدانی، تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ی نیز بر روی رفتار این دیوارها صورت گرفته است. بخش عمده‌ی این تحقیقات مبتنی بر انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی میز لرزه و سانتریفیوژ بوده است.^[۵] از اولین فعالیت‌های آزمایشگاهی در این زمینه می‌توان به آزمایشی اشاره کرد که به‌منظور مدل‌کردن دیوار خاک مسلح با مسلح‌کننده‌ی آلومینیومی انجام شده است، که در آن اولین معیار طراحی به روش تعادل حدی برای محاسبه‌ی دیوارهای خاک مسلح ارائه شده است.^[۶] اساس روش مذکور، تئوری تعادل حدی تعمیم داده‌شده در شرایط شبه استاتیکی است، که در ابتدا این روش برای بررسی پایداری لرزه‌ی شیروانی‌ها به‌کار گرفته

شده است.^[۷] در سال ۱۹۹۸، یک سری آزمایش‌های سانتریفیوژ با مسلح‌کننده‌های فلزی انجام شد که نتایج آن نشان‌دهنده‌ی تغییرشکل‌های دیوار به‌صورت شکم‌دادگی بود.^[۸] در سال ۲۰۰۳، نیز با انجام یک سری آزمایش‌های میز لرزه و استفاده از مسلح‌کننده‌های سلفر برنز، در دیوارهای خاک مسلح رفتار انواع مختلف دیوارهای حائل مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج آزمایش‌ها نشانگر عملکرد مناسب دیوارهای خاک مسلح در برابر واژگونی بود و فرم غالب تغییرشکل‌های حاصل در این آزمایش‌ها به شکل شکم‌دادگی بود.^[۹]

همچنین در سال ۲۰۰۴، شش آزمایش سانتریفیوژ در مورد این دیوارها با مسلح‌کننده‌های فلزی به شکل تسمه و توری‌های جوش‌شده انجام شد تا تأثیر طول مسلح‌کننده‌ها در لایه‌های فوقانی بر میزان جابجایی‌ها مشاهده شود.^[۱۰-۱۲] نتایج این آزمایش‌ها حاکی از آن بود که با افزایش طول مسلح‌کننده‌ها در لایه‌ی اول، دیوار پایداری بهتری از خود نشان می‌دهد و همچنین در حالت کلی تغییرشکل دیوار به حالت شکم‌دادگی ظاهر می‌شود. نوع دیگر این دیوارها، دیوارهای خاک مسلح با مسلح‌کننده‌های الیاف مصنوعی است که در این زمینه نیز تحقیقات متفاوتی انجام شده است؛ از جمله کارهای صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهشی در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد که از جمله بزرگ‌ترین مدل‌سازی‌های دیوارهای خاک مسلح به شمار می‌آید.^[۱۳] همچنین آزمایش‌های گسترده‌ی دیگری نیز برای مشاهده‌ی تأثیر عوامل مختلفی چون بسامد، طول مسلح‌کننده‌ها، ارتفاع دیوار، و نوع المان رویه در عملکرد لرزه‌ی این نوع دیوارها نیز صورت گرفته است.^[۱۴-۱۸]

با جمع‌بندی نتایج حاصل از مشاهده‌های میدانی و نتایج تحقیقات صورت‌گرفته در خصوص رفتار لرزه‌ی دیوارهای خاک مسلح، روش‌های مختلفی برای طراحی لرزه‌ی این نوع دیوارها ارائه شده است، که از آن جمله می‌توان به روش‌های تعادل حدی و روش سختی اشاره کرد. روش اصلاح‌شده بر پایه‌ی تعادل حدی در آیین‌نامه‌های FHWA و AASHTO مورد پذیرش قرار گرفته و در حال حاضر مبنای طراحی این نوع دیوارهاست.^[۱۹ و ۲۰]

با بررسی ادبیات یادشده می‌توان دریافت که در میان مسائل متنوع مرتبط با پایداری لرزه‌ی دیوارهای خاک مسلح، موضوع ناپایداری داخلی و خارجی و همچنین اشکال و مودهای گسیختگی در پائل‌های پوشش سگمنتال و همچنین تسمه‌های فلزی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در عین حال بررسی مطالعات صورت‌گرفته تاکنون مبین آن است که با نگاهی به اندرکنش توده‌ی خاک و تسمه‌های فلزی، تاکنون مسئله‌ی سختی و میرایی معادل این مجموعه مورد بررسی ویژه قرار نگرفته است. برای این منظور در این پژوهش با ساخت ۶ مدل آزمایشگاهی ۱g دیوار خاک مسلح به مقیاس ۱ به ۱۰ متشکل از دو نوع خاک ماسه‌ی و ترکیب ماسه و رس در ترکیب با جوشن‌های فلزی با طول‌های مختلف و رویه‌های بتنی سگمنتال بر روی میز لرزان دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، رفتار لرزه‌ی این دیوارها مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی حرکت زلزله‌ی شتاب پایه‌ی هارمونیک با دامنه‌ی ۰/۱g تا ۰/۸g و بسامدهای ۵ و ۸ هرتز بر مدل‌های مذکور اعمال و در نتیجه مقادیر کرنش در تسمه‌های فلزی و شتاب جسم خاک، شتاب رویه‌ی بتنی در ترازهای مختلف پایش شده است. با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده در آزمایش‌های یادشده، مکانیزم‌های مختلف گسیختگی این نوع دیوار به‌همراه مقادیر مدول برشی و میرایی در بسامدهای مختلف استخراج شده است. در بخش دیگری از این پژوهش، با تعیین بیشینه‌ی مقادیر نیرو در تسمه‌های فلزی و مقایسه‌ی آنها با مقادیر طراحی، ضریب اطمینان واقعی این تسمه‌ها تعیین و با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌ی FHWA مقایسه شده است.

۲. بررسی آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ی دیوار خاک مسلح

همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، برای انجام آزمایش‌های مورد نظر از تجهیزات میز لرزه با مقیاس شتاب ۱g (g شتاب ثقل) دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران استفاده شده است. میز مذکور دارای یک درجه آزادی با ابعاد عرشه‌ی ۰/۸×۱/۸۲ متر است که بر روی آن به‌منظور ساخت مدل دیوار، یک جعبه با چارچوب فلزی و بدنه‌ی پلاستیکی (برای مشاهده‌ی بهتر جابجایی‌ها و تغییرشکل‌ها) نصب شده است. در ادامه، جزئیات ساخت مدل آزمایشگاهی میز لرزان و انجام آزمایش به همراه برنامه‌ی انجام آزمایش‌ها تشریح شده است.^[۲۱]

۳. اصول حاکم بر انتخاب مقیاس

از آنجا که مدل‌سازی فیزیکی روشی برای مطالعه‌ی دقیق رفتار نمونه‌ی واقعی است، لازم است اصول حاکم بر این مدل‌سازی در حین ساخت نمونه‌ی آزمایشی دقیقاً مد نظر قرار گیرد، تا نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش با نمونه‌ی واقعی همخوانی مناسبی از خود نشان دهد. یک مدل صحیح زمانی حاصل خواهد شد که همه‌ی قوانین تشابه بر مدل حاکم باشد. با این حال اغلب مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی نیازمند تدبیری برای ساخت یک مدل مناسب است. موضوعی که همواره در مدل‌های میز لرزه وجود دارد، این است که به‌طورکلی مدل‌سازی نیروی گرانشی به‌درستی ممکن نیست و این موضوع پیچیدگی بالایی را برای تفسیر رفتار مواد و مصالح به‌کاررفته در مدل ایجاد خواهد کرد. بسیاری از نویسندگان فرضیاتی برای ضرایب مقیاس برای مدل‌ها به‌صورت کلی و مدل‌های ژئوتکنیکی به‌صورت خاص مطرح کرده‌اند.^[۲۲-۲۵] با جمع‌آوری‌های صورت‌گرفته نیز اصول اولیه‌ی مناسبی برای مدل‌سازی توصیه شده است، که در این پژوهش نیز همین اصول ملاک عمل قرار داده شده است (جدول ۱).^[۲۶ و ۲۷]

۴. هندسه‌ی مدل و ابزاربندی

با توجه به روابط حاکم بر انتخاب مقیاس مناسب مدل و محدودیت‌های موجود در طول مسلح‌کننده‌های مورد استفاده نسبت به ارتفاع دیوار واقعی و همچنین فضای مورد نیاز جهت ابزاربندی، نسبت هندسه‌ی مدل به اندازه‌ی واقعی ۰/۱ در نظر گرفته شد. هندسه‌ی مدل مورد نظر در شکل ۱ الف نشان داده شده است. از آنجا که وسط مدل تأثیر کمتری از شرایط مرزی لبه‌ها می‌پذیرد، لذا مناسب‌ترین مکان برای قراردادن ابزار است. بدین منظور در مدل‌های ساخته‌شده، حسگرهای مورد استفاده در وسط عرض دیوار قرار داده شده‌اند. در این آزمایش‌ها از حسگرهای جابجایی‌سنج بر روی خاکریز جهت اندازه‌گیری نشست‌ها و بر روی بلوک‌های رویه‌ی دیوار برای اندازه‌گیری جابجایی‌های افقی دیوار و همچنین حسگرهای شتاب‌سنج در داخل خاک و روی بلوک‌های رویه استفاده و جهت اندازه‌گیری نیروی به‌وجودآمده در اجزاء مسلح‌کننده‌ها (تسمه‌ها) کرنش‌سنج‌هایی بر روی آنها نصب شده است. تعداد و محل ابزاربندی در شکل ۱ ب نشان داده شده است.

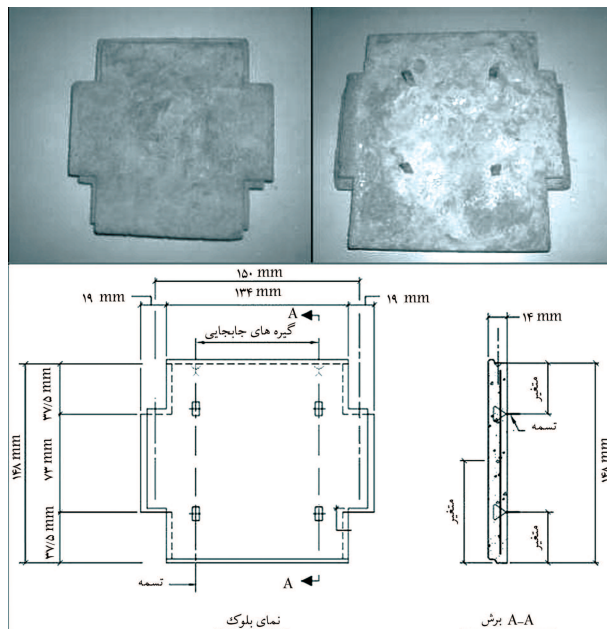
۵. اجزای مدل و مراحل ساخت

با توجه به ویژگی‌های مورد انتظار از المان‌های مورد استفاده در مدل و ویژگی خاص

ءءول ۱. ضرباب مقناس ٱنشنهانن بران ٱارامترهان مختلف در مءل سانن فزنككن.

شرح	ٱارامتر مربوط	* ضرباب مقناس	(نمونه ن اصلف/ مءل) ضرباب مقناس	(مءل/ نمونه ن اصلف) ضرباب مقناس
شءاب	a	۱	۱/۰۰	۱/۰۰
ءرم مءصوص	ρ	۱	۱/۰۰	۱/۰۰
ءول	L	$۱/N$	۰/۱۰	۱۰/۰۰
ءنش	σ	$۱/N$	۰/۱۰	۱۰/۰۰
ءرنش	q	$۱/N^{۱-\alpha}$	۰/۳۲	۳/۱۶
سءكن	G	$۱/N^{\alpha}$	۰/۳۲	۳/۱۶
ءابءانن	D	$۱/N^{۲-\alpha}$	۰/۰۳	۳۱/۶۲
ءسامء	f	$N^{۱-\alpha/۲}$	۵/۶۲	۰/۱۸
ننرو	F	$۱/N^۳$	۰/۰۰۱	۱۰۰۰/۰۰
سرءء موء برشن	V_S	$۱/N^{\alpha/۲}$	۰/۵۶	۱/۷۸
زمان	t	$۱/N^{۱-\alpha/۲}$	۰/۱۸	۵/۶۲

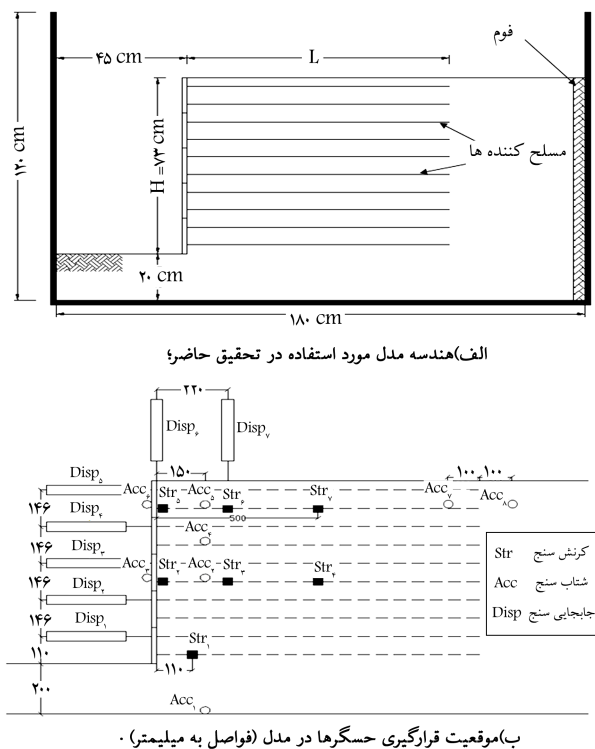
* $N = ۱۰$ و $\alpha = ۰/۵$



شكل ۲. ابعاء بلكه‌هان مورد اسءفاهه در سانء ءنوار.

بشءر موارء، نمائ بءنن كه ٱاءارن بشءرن ءءء ءاءنر شراطء مءنطن ءارء مورد اسءفاهه قرار مكنرء. با ءوءه به روابء ءشابه موءوء، وزن مءصوص بلكه‌هان باءء بءون ءعبنر باقن بمانء؛ اما با ءوءه به كاهش وزن مءصوص ءاكرنرء واقءن و ءاكرنرء مورد اسءفاهه در آزمون‌هان، وزن مءصوص بلكه‌هان نزن با همان نسبء كاهش ءاهه شء. در عفن ءال به ءان مسلء كنءهءن به كارئءه ءهء اسءءكام بلكه‌هان در ان آزمون‌هان از ك ءورن ءوش شءه با ضءامء مءءول ۰/۸ مئلن مءر و فواصل ۱۲ مئلن مءر اسءفاهه شءه اسء. ابعاء بلكه‌هان نزن با رعان روابء ءشابه با ءوءه به ابعاء بلكه‌هان اسءانءارء سانءه شء. شكل ۲، ابعاء بلكه‌هان و شمائن از مءل انءصال ءوشن‌هان فلزن به ٱشء ءنوار را نشان مكن ءهء.

اما با ءوءه به شكل ءنوار و نزن به ٱوش كل سءء مءءظه‌ن مزن لرزان با ان بلكه‌هان لازم شءءا از ك ٱسرن بلكه‌هان با ابعاء كوءكءر و به صورء ناقص نزن



ب) موءعنء قرارءنرن ءسءرها در مءل (فواصل به مئلمءر).

شكل ۱. هءنءسه مءل و انزار بءنن

هر ك لازم اسءءا هر المان به بهءرن شنوءن ممكن با ءوءه به روابء مقناس ءاكم بر آن سانءه شوء. در ان ءسمء اءزان ءشكفل ءهءهءن ءنوار ءاك مسلء و مراءل سانء و ءهفنن هر ك مورد بررسن قرار ءرءه اسء.

۱.۵. بلكه‌هان نمائ ءنوار

در مقناس آزمائشءاهن بران سانء روءن ءنوارهان ءاك مسلء از مصالء مءنءلفن اعم از ءوبن، فلزن، الناف مءصنوءن، و بءنن اسءفاهه مكن شوء؛ ولن در

استفاده شود. در نهایت با قفل و بست بلوک‌ها در یکدیگر، فرم نهایی رویه‌ی دیوار به صورت نشان داده شده در شکل ۳ در آمده است.

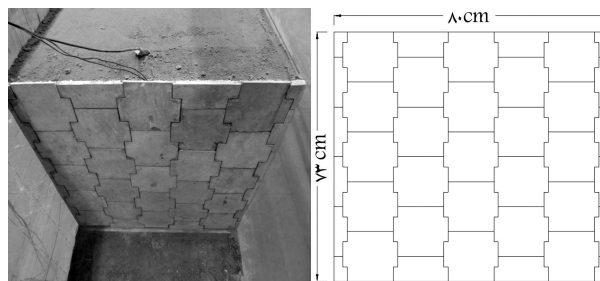
۲.۵. جوشن‌های فلزی

از آنجایی که مسلح‌کننده‌ها به عنوان اصلی‌ترین جزء تشکیل دیوارهای خاک مسلح، وظیفه‌ی انتقال نیرو از ناحیه‌ی محرک به ناحیه‌ی مقاوم دیوار را بر عهده دارند، باید پیوستگی و اصطکاک مناسبی با مصالح مورد استفاده برای خاکریز داشته باشند. با توجه به شکل خاص و لزوم ایجاد برجستگی‌های منظم در فواصل مشخص بر روی ورق، روش‌های مختلفی برای ساخت مسلح‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت یک ورق آهنی با ضخامت ۸/۰ میلی‌متر انتخاب و آزمایش کشش برای تعیین مشخصات آن صورت گرفت. در عین حال با نصب سیم‌هایی در فواصل مشخص و انجام عمل گالوانیزاسیون نهایتاً زوائد اجرایی لازم در سطح ورق ایجاد و با برش دادن آن تسمه‌های لازم برای انجام آزمایش و نصب در پشت دیوار ایجاد شد (شکل ۴).

مشخصات مکانیکی مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، مطابق مقادیر مندرج در جدول ۲ است. لازم به ذکر است که این مسلح‌کننده‌ها در ۱۰ لایه از پایین به بالا در روند ساخت مدل در محفظه‌ی میز لرزان درون خاک جاگذاری شده‌اند.

۳.۵. مشخصات خاک پشت ریز

در برنامه‌ی آزمایش‌ها از دو نوع مصالح خاکی ماسه‌یی و رسی استفاده شده است. در یک سری از آزمایش‌ها از ماسه‌ی خالص و در سری دیگر آزمایش‌ها از مخلوط ماسه با ۱۵٪ رس استفاده شده است. مصالح ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه با مشخصات مندرج در جدول ۳ است.^[۲۱]



شکل ۳. فرم نهایی رویه‌ی دیوار با مقیاس آزمایشگاهی.



شکل ۴. فرم نهایی تسمه‌های مورد استفاده.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مسلح‌کننده‌های مورد استفاده.

ضخامت مسلح‌کننده (mm)	عرض مسلح‌کننده (mm)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
۸	۵۰	۱۷۱	۲۷۱

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

نوع ماسه	C_u	C_c	Φ°	e_{max}	e_{min}
۱۶۱ فیروزکوه	۱٫۸۷	۰٫۸۸	۴۰	۰٫۸۷۴	۰٫۵۴۸

جدول ۴. مشخصات مکانیکی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه با ۱۵٪ رس.

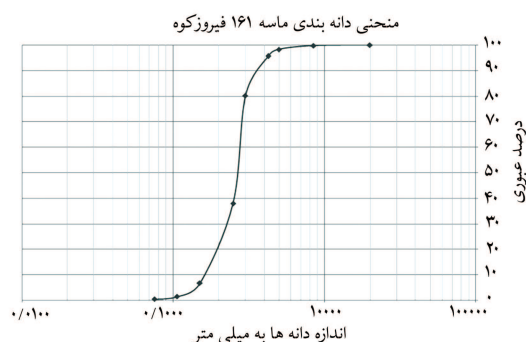
نوع خاک	زاویه‌ی اصطکاک داخلی Φ°	چسبندگی (KPa)
ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه با ۱۵٪ رس	۴۵	۳۰

برای تراکم ماسه از سیستم بارش با ارتفاع بارش ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده است و طی آن درصد تراکم Dr برابر ۷۰٪ و وزن مخصوص ۱۵۷۰ کیلوگرم در متر مکعب حاصل شد. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است.

دومین خاک مورد استفاده مخلوط همین ماسه با ۱۵٪ رس بود که برای تراکم آن از غلتکی با وزن ۲۰ کیلوگرم و با درصد رطوبت بهینه رطوبت ۸٪ استفاده شد و در نهایت وزن مخصوص متراکم این مصالح به مقداری برابر ۱۵۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد (جدول ۴).

۴.۵. برنامه‌ی انجام آزمایش‌ها

با توجه به لزوم بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در رفتار لرزه‌یی دیوار خاک مسلح در این تحقیق، تأثیر عوامل مختلفی همچون دامنه و بسامد شتاب پایه‌ی هارمونیک، طول جوشن‌ها در ارتفاع دیوار، و همچنین نوع مصالح خاکی مورد استفاده‌ی پشت‌ریز مورد توجه قرار داده شده است. جدول ۵، جزئیات مدل و شتاب پایه‌ی اعمالی را برای ۶ مدل ساخته شده نشان می‌دهد. این تذکر لازم است که تغییر دامنه‌ی شتاب پایه‌ی اعمالی به صورت پیوسته بر مدل اعمال شده و مدت زمان اعمال هر شتاب ۴ ثانیه است و تمامی شتاب‌ها به شکل سینوسی وارد شده‌اند.



شکل ۵. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

جدول ۵. طول تسمه و نوع خاک مورد استفاده در تست‌ها.

تست	نوع خاک	درصد رطوبت	نسبت طول مسلح‌کننده‌ها بر ارتفاع دیوار در			بسامد (Hz)	شتاب‌های پایه اعمالی (g)
			۳ لایه‌ی بالا	۳ لایه‌ی وسط	۳ لایه‌ی پایین		
۱	ماسه‌یی	۰	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۵	۰/۸۰/۵۰/۳۵۰/۲۵۰/۲۰/۱۵۰/۱
۲	ماسه با ۱۵٪ رس	۸	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۵	۰/۸۰/۵۰/۳۵۰/۳۰/۲۵۰/۲۰/۱۵۰/۱
۳	ماسه با ۱۵٪ رس	۸	۱/۲	۱	۰/۷	۵	۰/۸۰/۶۰/۵۰/۴۵۰/۴۰/۳۵۰/۳۰/۲۵۰/۲۰/۱۵۰/۱
۴	ماسه با ۱۵٪ رس	۸	۱/۲	۱	۰/۷	۸	۰/۸۰/۷۰/۶۰/۵۰/۴۰/۳۰/۲۵۰/۲۰/۱۵۰/۱
۵	ماسه با ۱۵٪ رس	۸	۱	۰/۸۵	۰/۷	۵	۰/۸۰/۶۰/۵۰/۴۰/۳۰/۲۵۰/۲۰/۱۵۰/۱
۶	ماسه با ۱۵٪ رس	۸	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۵	۰/۸۰/۵۰/۳۵۰/۳۰/۲۵۰/۲۰/۱۵۰/۱

جابجایی‌های حسگرهای ۳ و ۴ بیشتر از دیگر حسگرهاست که با افزایش شتاب برای شتاب بالای ۰/۵g، جابجایی حسگر ۵ به شدت افزایش یافته و به کج‌شدگی بالای دیوار منجر شده است. اما در شکل ۸ جابجایی حسگر ۲ و ۳ بیشتر از دیگر حسگرهاست و با افزایش شتاب نیز همین روند ادامه می‌یابد. همچنین بررسی نشست‌های قائم در تاج دیوار و در فاصله‌ی ۰/۳H از رویه، نشان‌دهنده‌ی آن است که با تغییر طول تسمه‌ها در ارتفاع دیوار شکل نشست‌ها تغییر می‌کند؛ بدین صورت که برای طول یکسان مسلح‌کننده‌ها نشست در دو نقطه‌ی موردنظر یکسان است، در حالی که برای طول متغیر مسلح‌کننده‌ها نشست‌های غیریکنواخت روی می‌دهد (شکل ۹).

حال با توجه به مشاهدات حاصل از نشست‌های سطح دیوار و جابجایی‌های نمای دیوار در نمونه‌های ساخته‌شده می‌توان روندی را برای تغییرشکل‌های این نوع دیوارهای خاک مسلح با توجه به متغیرهای موجود ارائه داد. برای مثال شکل ۱۰ فرم تغییرشکل یافته و نحوه‌ی تشکیل گوه‌ی گسیختگی پس از آزمایش را در دو نمونه از دیوار با طول یکسان و متغیرمسلح‌کننده‌ها در ارتفاع نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، الگوریتمی برای پیش‌بینی نحوه‌ی ایجاد تغییر شکل‌ها در دیوار قابل ارائه خواهد بود. برای این منظور ارتفاع دیوار را مطابق شکل ۱۱ الف به دو قسمت تقسیم و تغییرات حاصل از هر قسمت با توجه به ویژگی‌های آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهدات حاکی از آن است که در شرایط دینامیکی برای دیوارهای با طول یکسان مسلح‌کننده‌ها، جابجایی به‌وجود آمده مطابق شکل ۱۱ ب به شکل واژگونی ظاهر می‌شود. در این شرایط جابجایی نیمه‌ی بالایی دیوار بیشتر است. با افزایش شتاب و همچنین افزایش طول مسلح‌کننده‌ها تغییرشکل تاج دیوار نیز افزایش یافته است و به‌صورت کج‌شدگی نوک دیوار پیش می‌رود (شکل ۱۱ ج). برای دیوارهایی با طول نامساوی مسلح‌کننده‌ها، شکل جابجایی افقی به‌صورت شکم‌دادگی ظاهر شده است، همچنین نشست ناهمگونی بین تاج دیوار و فاصله‌ی ۲۲ سانتی‌متری از قله مشاهده می‌شود (شکل ۱۱ د)؛ که در مجموع باعث آن می‌شود که حرکت قسمت بالای دیوار حالت پیچشی پیدا کرده و جابجایی افقی و نشست تاج دیوار کاهش یابد.

۲.۶. تعیین مدول برشی معادل خاک مسلح‌شده

در این بخش هدف آن است که با استفاده از نتایج حاصل از حسگرهای شتاب و حسگرهای جابجایی نمای دیوار و استفاده از فرضیات شکل ۱۲، برای

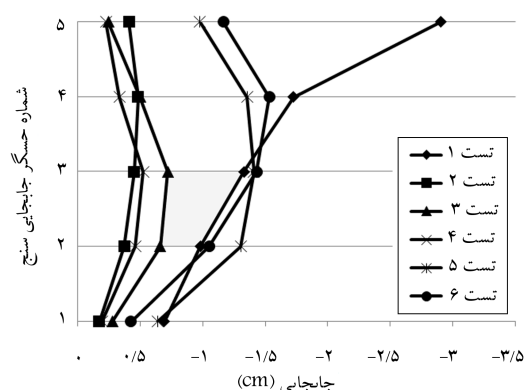
۶. تفسیر نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های میز لرزان

در این بخش نتایج آزمایش‌های میز لرزان بررسی خواهد شد. عمده‌ی نتایج موردنظر از انجام این آزمایش‌ها عبارت‌اند از: تغییرشکل‌های ایجادشده در دیوار به‌ویژه در نقطه‌ی تاج و تبیین شکل گسیختگی دیوار، تعیین مدول برشی معادل برای خاک مسلح پشت دیوار و تعیین میرایی معادل.

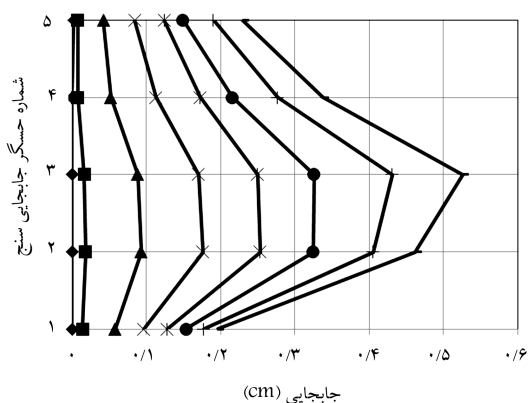
۱.۶. تغییرشکل‌های به‌وجودآمده در دیوار

مشاهدات عینی از رفتار دیوارهای مدل‌سازی‌شده نشان‌دهنده‌ی آن است که تغییرشکل‌های حاصل بر اثر حرکت هارمونیک با توجه به ویژگی‌های متفاوت دیوارها در راستای قائم در دو شکل نشست‌های متقارن و نامتقارن و در راستای افقی به‌صورت شکم‌دادگی و واژگونی ظاهر شده‌اند. شکل ۶، جابجایی افقی ماندگار پس از پایان آزمایش‌ها را در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد.

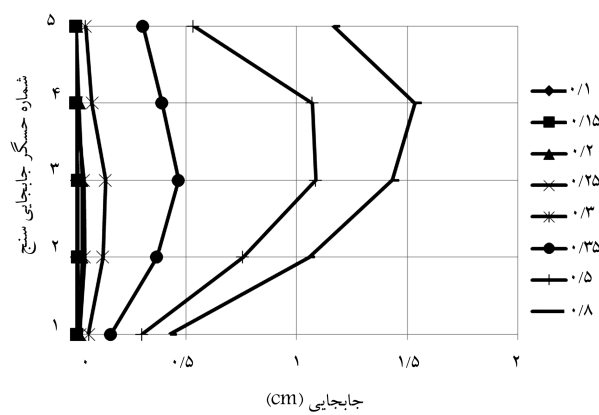
جابجایی‌های افقی با توجه به طول مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در هر آزمون در دو قالب شکم‌دادگی و واژگونی ظاهر می‌شوند؛ بدین صورت که در زمانی که طول مسلح‌کننده‌ها یکسان است، تغییرشکل به‌صورت واژگونی (شکل ۷ الف) و زمانی که طول مسلح‌کننده‌ها به‌صورت پله‌یی از بالا به پایین کاهش می‌یابد، تغییرشکل به‌صورت شکم‌دادگی ظاهر می‌شود (شکل ۷ ب). روند شکل‌گیری جابجایی‌ها برای هر یک از حالات مذکور مطابق شکل ۸ است، بدین صورت که در شکل ۸ الف



شکل ۶. تغییرشکل‌های ماندگار در دیوار پس از پایان آزمایش‌ها.

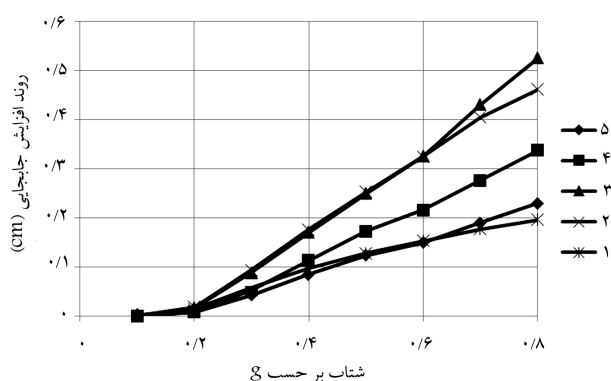


ب) مدل شماره ۴.

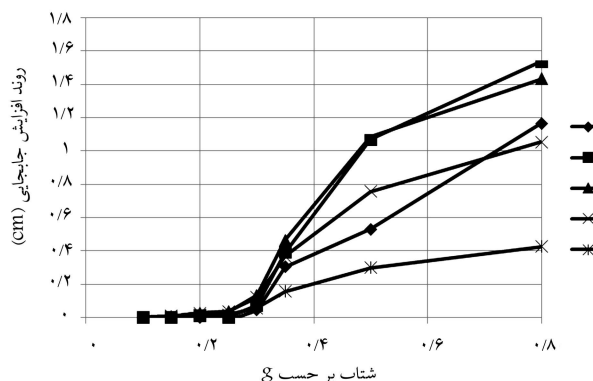


الف) مدل شماره ۶.

شکل ۷. تغییر شکل دیوار در مدل شماره‌های ۶ و ۴ پس از پایان آزمایش‌ها در شتاب‌های مختلف.



ب) حالت شکم دادگی (آزمون ۴).



الف) حالت واژگونی (آزمون ۶).

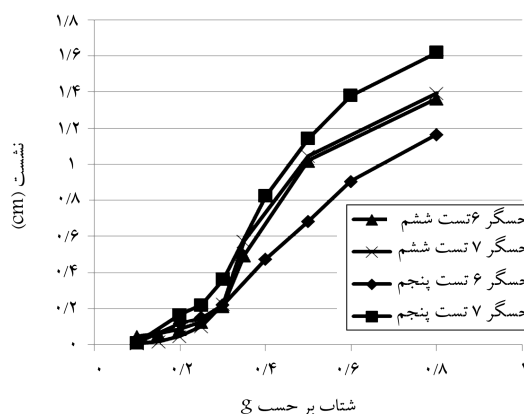
شکل ۸. روند شکل‌گیری تغییر شکل‌ها در حالت‌های واژگونی و شکم‌دادگی.

بدنه‌ی دیوار، مدول برشی محاسبه می‌شود. برای این منظور با استفاده از تفاضل نتایج حسگرهای جابجایی و نتایج حسگر شتاب در هر لایه، نمودارهای پسماند هر یک از دیوارها در ۳ مقطع مورد نظر مطابق شکل ۱۳ ترسیم شده است. با توجه به نمودارهای رسم شده و از آنجایی که مدول برشی خاک از شیب خط واصل مرکز مختصات به نقطه‌ی تنش بیشینه و کرنش برشی بیشینه به دست می‌آید، برای هر یک از نمودارها مدول برشی تا سیکل ۹ام محاسبه می‌شود. حال با ترکیب نمودارهای حاصل برای ترازهای مختلف، شکل ۱۴ قابل ارائه خواهند بود. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود که دیوار پس از اعمال شتاب اولیه، رفتار منظم و همگنی را از خود بروز می‌دهد. با این رویکرد، روند تغییرات مدول برشی برای خاک پشت دیوار براساس درون‌یابی اطلاعات موجود مطابق آنچه که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، برای شکل‌های مختلف گسیختگی دیوار با رابطه‌های ۱ برای حالت واژگونی و رابطه‌ی ۲ برای حالت شکم‌دادگی قابل ارائه خواهد بود.

$$G' = 319.4 \gamma^{-0.42} \quad (1)$$

$$G' = 144.7 \gamma^{-0.65} \quad (2)$$

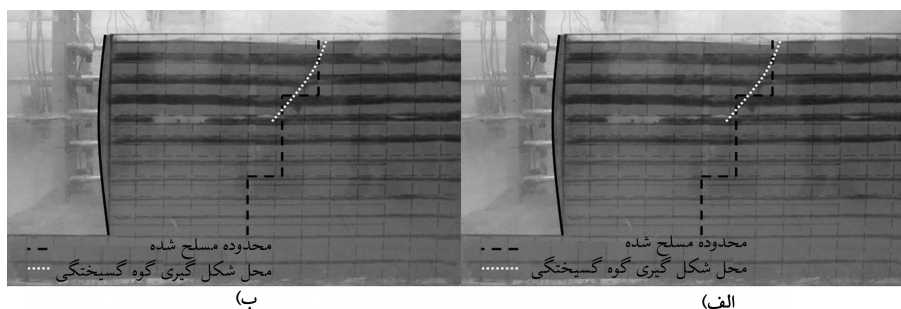
از ترکیب اطلاعات همه‌ی مدل‌ها و درون‌یابی مقدار مدول برشی مطابق شکل ۱۶



شکل ۹. نشست‌های سطح دیوار (نشست قائم) پس از هر شتاب در آزمایش‌ها.

هر یک از رفتارهای تغییرشکلی مشاهده شده در دیوارها، مدول برشی معادل خاک مسلح محاسبه شود. برای این منظور از میان آزمون‌ها، آزمون شماره‌ی ۳ به نمایندگی از حالت شکم‌دادگی و شماره‌ی ۶ به نمایندگی از حالت واژگونی انتخاب شد. [۲۹، ۲۸]

در این بخش برای هر یک از ۳ حسگر شتاب ۲، ۴ و ۵ موجود در داخل



شکل ۱۰. روند تغییر شکل های دیوار در آزمون های ۳ و ۶ آزمایش های میز لرزان.

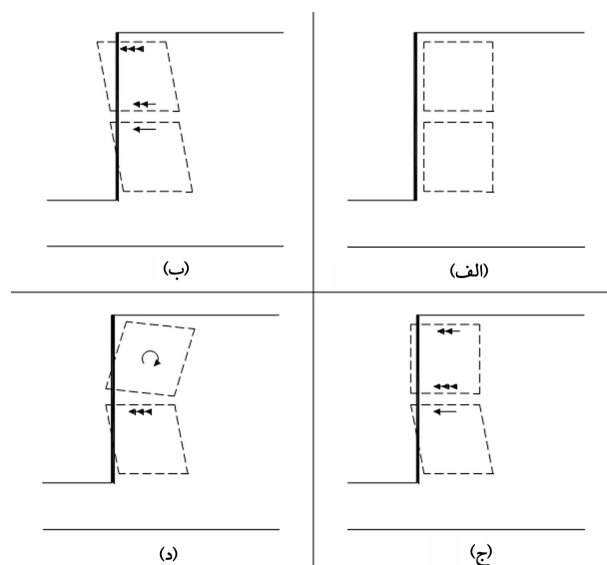
جدول ۶. مقایسه ی نتایج نیروهای واقعی حاصل از آزمایش مقادیر پیشنهادی FHWA.

شماره ی حسگر	آزمون			سوم			نشم		
	۱	۳	۶	۱	۳	۶	۱	۳	۶
F_{RMS} (Kg)	۰/۰۹	۰/۲۱۱	۰/۵۱۲	۰/۳۰۹	۰/۱۵۸	۰/۱۳۹			
F_{MAX} (Kg)	۰/۱۷۹	۰/۴۸۸	۰/۹۳۴	۰/۴۰۴	۰/۳۹۶	۰/۲۹			
F_{FHWA} (Kg)	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۵	۰/۳۲	۰/۳			
$FOS = \frac{F_{FHWA}}{F_{RMS}}$	۳/۳۳	۱/۶۶	۰/۸۶	۱/۶۲	۲/۰۳	۲/۱۶			
$FOS = \frac{F_{FHWA}}{F_{MAX}}$	۱/۶۸	۰/۷۲	۰/۴۷	۱/۲۴	۰/۸۱	۱/۰۳			

حال با توجه به مشخص شدن محل نیروهای بیشینه، مقادیر این نیروها را برای دو نمونه دیوار آزمون های ۳ و ۶ محاسبه و در شکل ۱۹ نشان داده شده است. برای به دست آوردن نیروی تسمه ها دو روش مورد استفاده قرار گرفته است: در روش اول مقدار بیشینه ی نیرو MAX براساس منحنی تاریخی زمانی کرنش محوری محاسبه شده است و در روش دیگر، برای محاسبه ی متوسط نیروها در حوزه ی زمان از میانگین جذر مربعات با RMS مطابق رابطه ی ۴ استفاده شده است:

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_r - T_1} \int_{T_1}^{T_r} f_i^2 dt} \quad (4)$$

جدول ۶، مقایسه ی صورت گرفته میان مقادیر نیروهای واقعی بیشینه و میانگین با مقادیر به دست آمده از روش پیشنهادی FHWA را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، در این بخش برای مقایسه ی نیروهای ایجاد شده در جوشن های فلزی حین آزمایش ها با مقادیر به دست آمده از روش پیشنهادی FHWA از دو روش میانگین گیری و بیشینه ی نیرو استفاده شده است. در ادامه، با تقسیم مقدار نیروی حاصله از روش FHWA با این دو مقدار به نوعی ضریب اطمینان استفاده از روش آئین نامه ی محاسبه شده است. مقایسه ی نتایج حاصل از روش RMS و MAX با نتایج FHWA نشان دهنده ی آن است که نحوه ی تقسیم نیروی لرزه یی در دو روش آزمایشگاهی و آئین نامه ی مشابه هم هستند. بدین صورت که در تست سوم مقادیر نیروی به دست آمده از حسگر ششم از همه بیشتر و مقدار نیروی به دست آمده از حسگر اول از بقیه ی نیروها کمتر است. به طور معکوس در آزمون ششم، مقدار نیروی حاصله در حسگر ششم از بقیه کمتر و نیروی حاصله از حسگر اول از همه ی نیروها بیشتر است. در عین حال اختلاف مقادیر نیروی به دست آمده از روش RMS و ضریب ایمنی حاکم بر آن نشان دهنده ی آن است که ضریب ایمنی اعضایی که سهم کمتری از نیرو در طراحی FHWA را شامل می شوند، بیشتر از اعضایی



شکل ۱۱. شکل شماتیک دیوار و تغییر شکل های آن.

رابطه ی ۳ قابل استخراج خواهد بود:

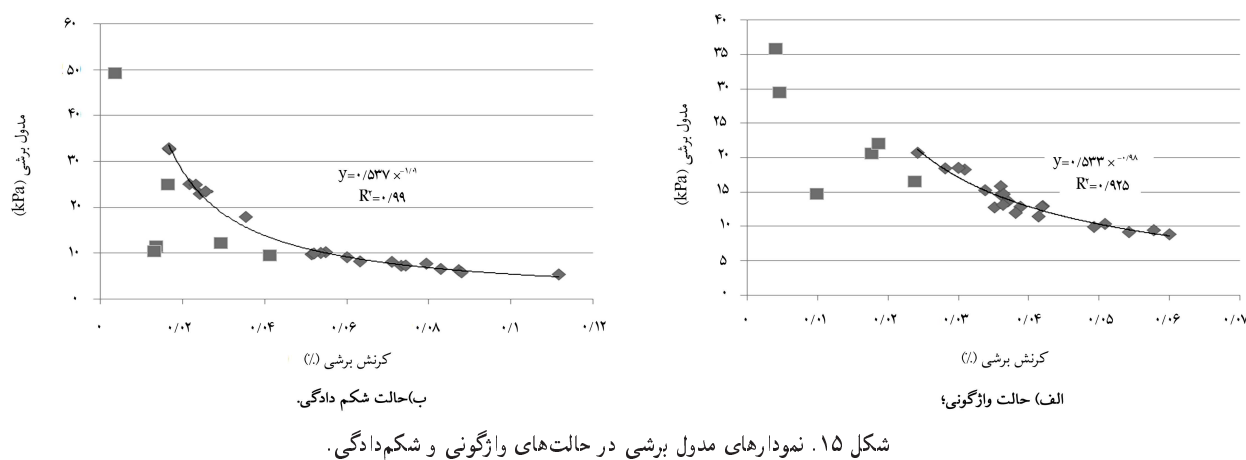
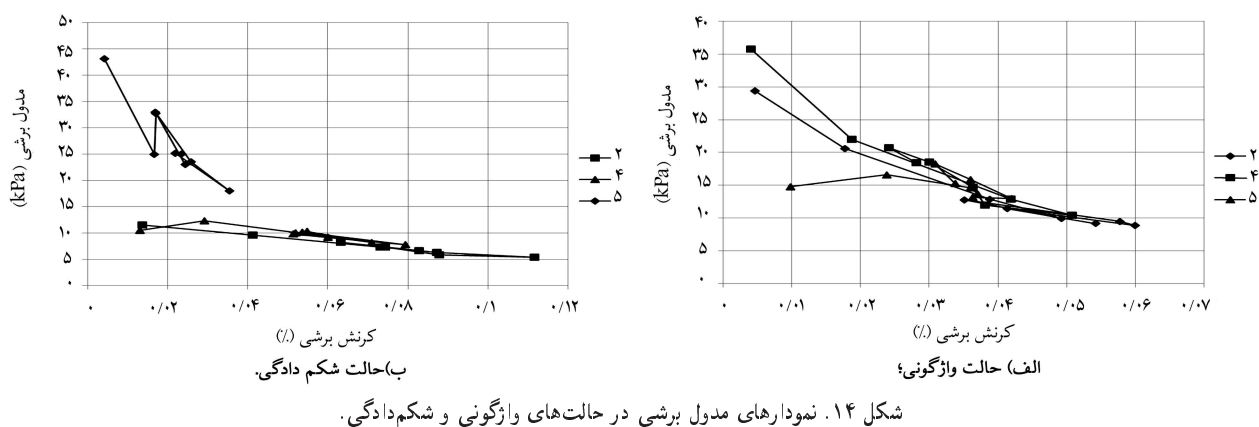
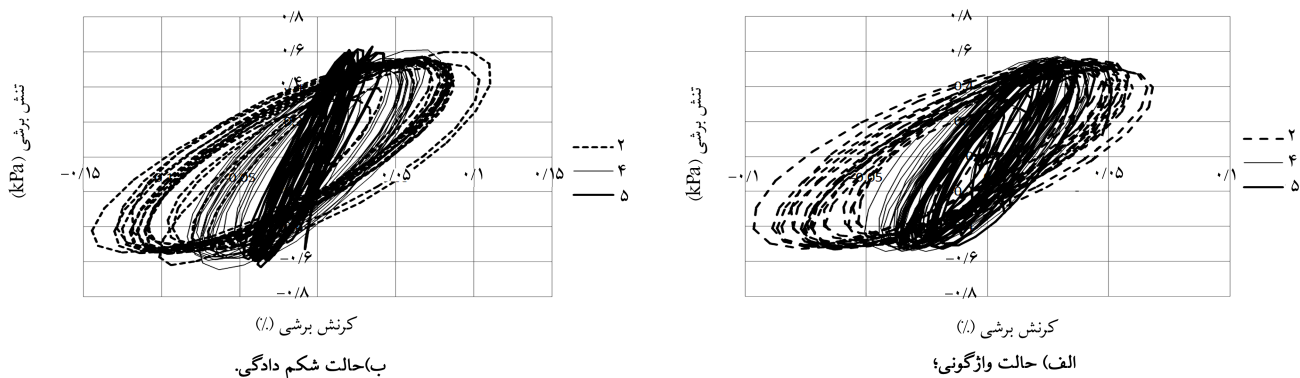
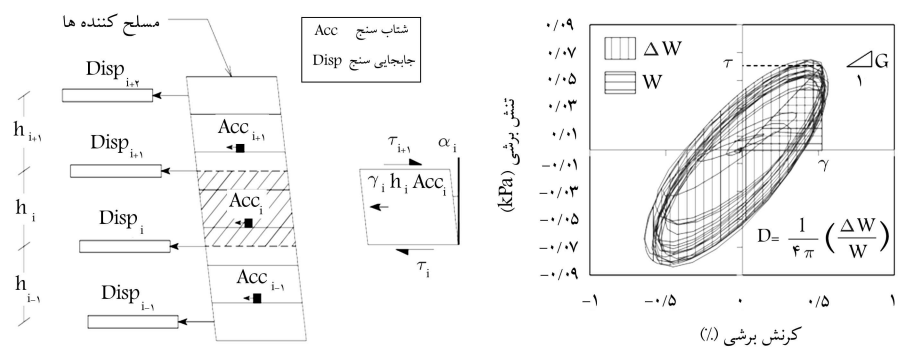
$$G = 197.2 \gamma^{-0.06} \quad (3)$$

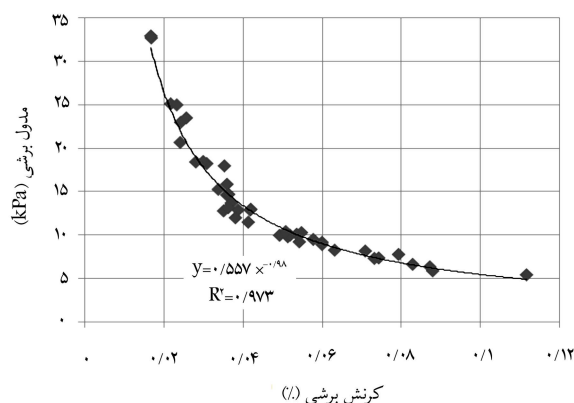
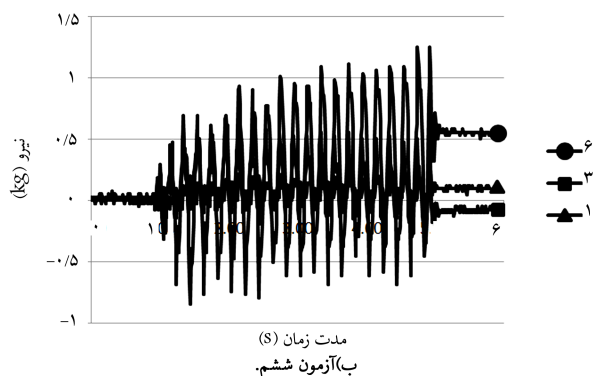
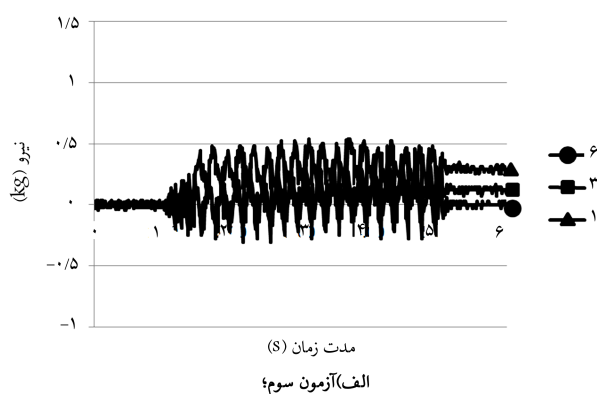
۳.۶. تعیین میرایی معادل خاک مسلح شده

در این قسمت با توجه به نمودار شکل ۱۲، با استفاده از مساحت های محصور زیر نمودار پسماند، میرایی موجود در هر یک از این حالات جابجایی دیوارها قابل محاسبه خواهد بود. در نمودار شکل ۱۲، دو پارامتر ΔW و W به ترتیب عبارت اند از: انرژی مستهلک شده و بیشینه ی انرژی ذخیره شده در هر سیکل که با ترکیب این دو و با استفاده از رابطه ی $(D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W})$ ، میرایی دیوار در هر یک از حالات شکم دادگی و واژگونی به دست آمده است (شکل ۱۷).

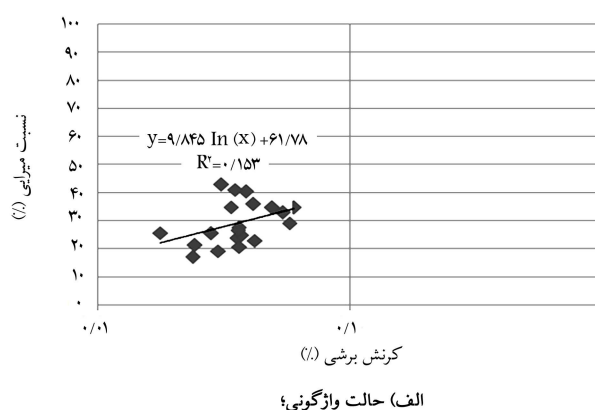
۷. بررسی نیروهای حاصل در جوشن های فلزی

در این بخش خروجی های حاصل از نیروهای موجود در تسمه ها مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهدات حاصل از آزمون ها حاکی از آن است که با توجه به فرضیات اولیه ی این دیوارها، محل نیروی بیشینه در طول هر تسمه متعلق به نیروی حاصل در محل فرضی بروز گسیختگی است (شکل ۱۸).

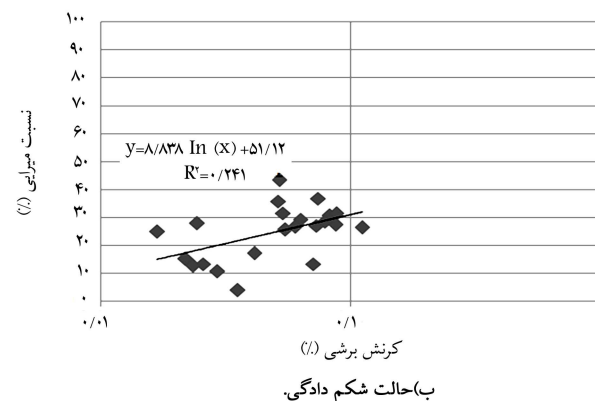




شکل ۱۶. نمودار مدول برشی در حالت کلی دیوار.

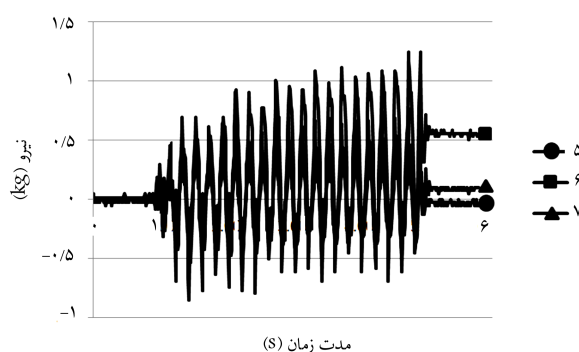


الف) حالت واژگونی؛



ب) حالت شکم دادگی.

شکل ۱۷. میرایی در حالت‌های واژگونی و شکم‌دادگی.



شکل ۱۸. نمودار نیروهای حاصل در هر کرنش سنج.

شکل ۱۹. نمودار نیروهای پیشینه‌ی آزمون‌های سوم و ششم بر اساس شماری کرنش‌سنج‌ها.

است که سهم بیشتری از نیرو را به خود اختصاص می‌دهند. در روش MAX، ضریب اطمینان به‌دست‌آمده نشان‌دهنده‌ی آن است که در دیوارهای با طول متغیر مسلح‌کننده‌ها همانند روش RMS ضریب ایمنی اعضایی که سهم کمتری از نیرو در طراحی FHWA را شامل می‌شوند، بیشتر از اعضایی است که سهم بیشتری از نیرو را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین در هر دو روش برای طول‌های یکسان مسلح‌کننده‌ها، مقادیر ضرایب ایمنی به هم نزدیک‌تر است. در مجموع براساس نتایج به‌دست‌آمده در این بخش پیشنهاد می‌شود در دیوارهای با طول متغیر مسلح‌کننده از ضرایب ایمنی متغیر برای لایه‌های مختلف استفاده شود، که این موضوع موجب افزایش ایمنی و بهینه‌سازی طراحی خواهد شد.

۸. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، با رویکردی آزمایشگاهی و با استفاده از میز لرزان دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران نمونه‌هایی از دیوار خاک مسلح با جوشن‌های فلزی با مقیاس ۱ به ۱۰ ساخته شده است و تأثیر پارامترهای مختلفی اعم از: نوع مصالح پشت دیوار، طول جوشن‌های فلزی، و بسامد شتاب هارمونیک پایه در رفتار دیوار مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، مواردی همچون مکانیزم گسیختگی دیوار، سختی معادل خاک و جوشن‌های فلزی، میرایی معادل خاک و جوشن‌های فلزی و همچنین ضریب اطمینان موجود در نیروی طراحی جوشن‌های فلزی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مجموع، عمده یافته‌های این پژوهش را می‌توان در این موارد خلاصه کرد:

۱. با توجه به دامنه و بسامد شتاب‌های اعمالی در مجموعه آزمایش‌های انجام‌شده،

روندی نمایی است. با ترکیب تمامی اطلاعات موجود تغییرات نمایی برای مدول برشی بر حسب کرنش برشی ملاحظه می‌شود.

۵. افزایش 20% طول مسلح‌کننده‌ها در لایه‌های بالا نسبت به لایه‌های پایین در جابجایی لایه‌های پایین نیز تاثیر گذاشته و باعث کاهش جابجایی لایه‌های پایین به نصف مقدار قبلی می‌شود که به تبع کاهش جابجایی مدول برشی در لایه‌های پایین افزایش می‌یابد.

۶. میرایی معادل در کل ارتفاع دیوار برای کرنش‌های 0.1% تا 0.15% را می‌توان 30% فرض کرد.

۷. مقادیر ضرایب ایمنی حاصل از روش RMS نصف مقادیر حاصل از روش MAX است. نسبت ضرایب لایه‌های مختلف در دیوارهای با طول یکسان مسلح‌کننده‌ها تقریباً یکسان است و برای طول متغیر مسلح‌کننده‌ها از لایه‌ی بالا تا لایه‌ی پایین، ۴ برابر افزایش پیدا می‌کند.

هیچ‌گونه تخریب کلی منجر به واژگونی کامل دیوار و یا جداسازی اجزای متفاوت دیوار مشاهده نشد.

۲. فرم تغییرشکل‌ها متأثر از شرایط تقسیم طول مسلح‌کننده‌ها در ارتفاع بود، بدین صورت که برای طول یکسان مسلح‌کننده‌ها به صورت واژگونی و برای طول متغیر مسلح‌کننده‌ها به صورت شکم‌دادگی ظاهر شد.

۳. روند تغییرشکل‌ها با توجه به طول متغیر و یکسان مسلح‌کننده‌ها متفاوت بود، اما در هر دو حالت پاشنه‌ی دیوار شرایط مطلوبی از نظر جابجایی را نشان داد. بدین صورت که با افزایش شتاب، میزان جابجایی نسبت به جابجایی بیشینه کاهش یافت و از مقدار 50% جابجایی بیشینه در شتاب $0.8g$ رفته رفته به مقدار 20% جابجایی بیشینه در شتاب $0.8g$ رسید.

۴. روند تغییر مدول برشی معادل با کرنش برشی برای تمامی مدل‌های ساخته‌شده

منابع (References)

1. Nova-Roessig, L. and Sitar, N. "Centrifuge model studies of the seismic response of reinforced soil slopes", In: *Proc. 2nd Int. Conf. Earthquake Geotechnical Eng.*, pp. 679-684 (1999).
2. Wartman, J., Hondlnel-Oviedo, E. and Rodriguez-Marek, A. "Performance and analyses of mechanically stabilized earth walls in the tecornan, Mexico earthquake", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **20**(3), pp. 287-299 (1 August 2006).
3. Sankey, J.E. and Segrestin, P. "Evaluation of seismic performance in mechanically stabilized earth structures", *Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement*, Kyushu, Japan, **1**, pp. 449-452 (2001).
4. Koseki, J., Tsutsumi, Y., Kiyota, T., Nakajima, S. and Maqbool, S. "Damage to earth structures caused by the 2004 NIIGATA-KEN CHUETSU earthquake", *Bulletin of Earthquake Resistant Structure*, **37**, pp. 41-50 (March 2005).
5. Koseki, J., Munaf, Y., Tatsuoka, F., Tateyama, M., Kojima, K. and Sato, T. "Shaking and tilt table tests of geosynthetic-reinforced soil and conventional-type retaining walls", *Geosynthetics International*, **5**(1-2), pp. 73-96 (1998).
6. Richardson, G.N. and Lee, K.L. "Seismic design of reinforced earth walls", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **101**(2), pp. 167-188 (1975).
7. Newmark, N.M. "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, **15**(2), pp. 139-159 (1965).
8. Howard, R.W.A., Kutter, B.L. and Siddharthan, R. "Seismic deformation of reinforced soil centrifuge models", In: *Proc. 3rd Geotechnical Earthquake Eng. Soil Dynamics Conf.*, Special Pub., **1**(75), pp. 446-457 (1998).
9. Watanabe, K., Munaf, Y., Koseki, J., Tateyama, M. and Kojima, K. "Behavior of several types of model retaining walls subjected to irregular excitation", *Soils and Foundations*, **43**(5), pp.13-27 (2003).
10. Siddharthan, R.V., Ganeshwara, V., Kutter, B.L., El-Desouky, M. and Whitman, R.V. "Seismic deformation of bar mat mechanically stabilized earth walls, I: Centrifuge tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(1), pp. 14-25 (2004a).
11. Siddharthan, R.V., Ganeshwara, V., Kutter, B.L., El-Desouky, M. and Whitman, R.V. "Seismic deformation of bar mat mechanically stabilized earth walls, II: A multi block model", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(1), pp. 26-35 (2004b).
12. Siddharthan, R.V., Vishnan, G. and Bukhary, S. "Application of displacement-based seismic design approach for MSE walls with uneven reinforcement", *Proceedings, 9th US National Earthquake Engineering Conference*, Toronto, Canada, Paper No. 1033 (July 2010).
13. Ling, H.I., Mohri, Y., Leshchinsky, D., Burke, C., Matsushima, K. and Liu, H. "Large scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining walls", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(4), pp. 465-476 (2005b).
14. Bathurst, R.J. and Hatami, K. "Physical to computational modeling of reinforced soil walls under static loading", *International Conference on Physical Modeling in Geotechnics (ICPMG)*, Hong Kong, China (2006).
15. Bathurst, R.J., Walters, D.L., Vlachopoulos, N., Burgess, P. and Allen, T.M. "Full scale testing of geosynthetic reinforced walls", In: *Proceedings of GeoDenver, ASCE*, Special Publication, 17 p. (2000).
16. Cai, Z. and Bathurst, R.J. "Seismic-induced permanent displacement of geosynthetic reinforced segmental retaining walls", *Canadian Geotechnical Journal*, **33**, pp. 937-955 (1996).

17. El-Emam, M.M. and Bathurst, R.J. "Experimental design, instrumentation and interpretation of reinforced soil wall response using a shaking table", *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, **4**, pp. 13-32 (2004).
18. Hatami, K. and Bathurst, R.J. "Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced-soil retaining walls", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**, pp. 137-157 (2000).
19. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Standard Specification for Highway Bridges*, Washington, D.C. (1996).
20. Elias, V., Christopher, B.R. and Berg, R.R. "Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes: design and construction guidelines", Rep. No. FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, Washington (2001).
21. Saber mahani, M., Ghalandarzadeh, A. and Fakher, A. "Experimental study on seismic deformation modes of reinforced-soil walls", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**, pp. 121-136 (2009).
22. Sabnis, G.M., Harris, H.G., White, R.N. and Mirza, M.S., *Structural Modeling and Experimental. Techniques*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall (1983).
23. Schofield, A.N. and Steedman, R.S. "State-of-the-art report: Recent developments on dynamic model testing in geotechnical engineering", *Proc. 9th World Conf. on Earthquake Engineering*, Tokyo/Kyoto, **8**, pp. 813-824 (1988).
24. Iai, S. "Similitude for shaking table tests on soil-structurefluid model in 1g gravitational field", *Soils and Foundations*, **29**(I), pp. 105-118 (1989).
25. Krawinkler, H. "Possibilities and limitations of scale-model testing in earthquake engineering", *Proc. 2nd US National Conf. on Earthquake Engineering*, Stanford University, pp. 283-292 (1979).
26. Wood, D.M., *Geotechnical Modelling*, Version 2.2, 247 p. (2004).
27. Wood, D.M., Crewe, A. and Taylor, C. "Shaking table testing of geotechnical models", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, **1**, pp. 01-13 (2002).
28. Ishihara, K., *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford Science Publications (1996).
29. Kramer, S.I. and Paulsen, S.B. "Seismic performance evaluation of reinforced slopes", *Geosynthetics International*, **11**(6), pp. 429-438 (2004).