

## ارائه ضریب شبه استاتیک سیستم مرکب سری جهت پایدارسازی ترانشه خاکی خطوط حمل و نقل بر اساس سطوح عملکرد لرزه‌ای

مجید یزداندوست\*، دانش آموخته دکتری خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
علی کمک پناه، دانشیار، گروه خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
عباس قلندر زاده، دانشیار، گروه خاک و پی، دانشگاه تهران، تهران

E-mail: mj.yazdandoust@modares.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۶/۲۲ - پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۱

### چکیده

در این تحقیق، در راستای اصلاح روش شبه استاتیک بر مبنای عملکرد لرزه‌ای سیستم مرکب سری به عنوان یک سیستم نوظهور، سعی شده تا ضریب شبه استاتیک به عنوان تابعی از پارامترهای اصلی زلزله نظیر پیروید غالب، شتاب بیشینه و سرعت مطلق تجمعی، ویژگی‌های ژئوتکنیک در قالب شرایط ساختمانی و سطوح عملکرد سیستم معرفی گردد. به این منظور، با تکیه بر نتایج مطالعات عددی در قالب سطوح عملکرد سیستم مرکب در شرایط لرزه‌ای و ژئوتکنیک مختلف و تعیین ضریب شبه استاتیک معادل هر یک از مدل‌های عددی مورد مطالعه با استفاده از آنالیزهای تعادل حدی، به ارائه ضریب شبه استاتیک معادل با سطوح عملکرد پرداخته شده است. نتایج حاصل در قالب تقسیمات ساختمانی و لرزه‌ای مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران و به صورت مجزا ارائه شده است که بیانگر تأثیر چشمگیر نوع ساختمان و شرایط لرزه‌ای بر انتخاب ضریب شبه استاتیک معادل با سطوح عملکرد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستم مرکب سری، عملکرد لرزه‌ای، ضریب شبه استاتیک، سطوح عملکرد.

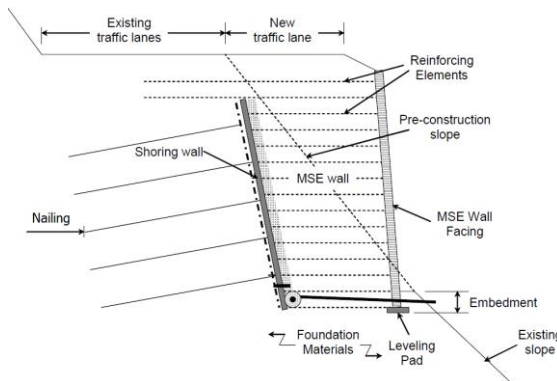
### ۱. مقدمه

محدودیت‌های موجود در برخی شرایط اجرایی مانند فقدان فضای لازم جهت اجرای یک سیستم پایدار مشخص، کافی نبودن ظرفیت باربری خاک و توجیحات اقتصادی، ضرورت استفاده همزمان از چند سیستم مسلح‌سازی متفاوت را در کنار هم به عنوان یک سیستم مسلح‌سازی مرکب، مسجل می‌سازد. از سوی دیگر، سازگاری و هماهنگی مناسب بین روش‌های مختلف مسلح‌سازی خاک با المان‌های تسلیح، سبب شده است تا طی سال‌های اخیر استفاده ترکیبی از این سیستم به عنوان یک روش ایده‌آل و کارآمد در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مطرح شود.

استقبال از سیستم خاک مسلح شده با المان‌های تسلیح طی چهار دهه گذشته به لحاظ دارا بودن مزایایی از جمله سرعت اجرای زیاد، صرفه اقتصادی مناسب، سازگاری با فضاهای اجرایی محدود و پیچیده، قابلیت برقراری هماهنگی با سایر سیستم‌های پایدارسازی، در دسترس بودن ملزومات اجرایی، انعطاف‌پذیری مناسب، عدم نیاز به پی‌سازی و عملکرد مناسب لرزه‌ای سبب شده این سیستم رفته رفته به عنوان یک سیستم پایدار دائمی و مستقل، جایگزین سیستم‌های متداول گردد.

ارائه ضریب شبه استاتیک سیستم مرکب سری جهت پایدارسازی ترانشه خاکی خطوط حمل و نقل بر اساس سطوح عملکرد لرزه‌ای

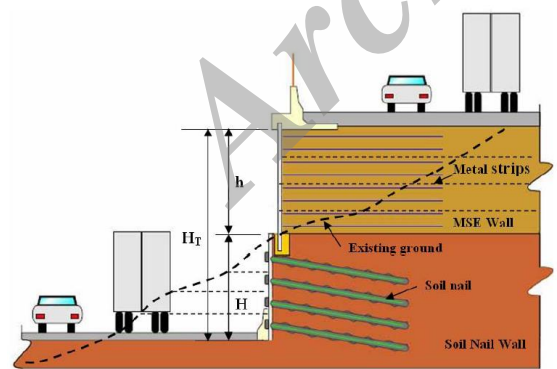
ب- سیستم‌های ترکیبی سری: در این سیستم‌ها (شکل ۲)، نیروهای وارد شده به کل مجموعه بر حسب موقعیت اجزای تشکیل دهنده، به‌طور مستقیم به هر سیستم اعمال می‌شود.



شکل ۲. سیستم ترکیبی موازی متشکل از خاک مسلح با تسمه و میخکوبی در حالت سری (FHWA, ۲۰۰۶)

هر سیستم بر حسب موقعیت هندسی آن، تأمین کننده پایداری بخشی از کل مجموعه می‌باشد.

این سیستم عموماً متشکل از سیستم میخکوبی در قسمت تحتانی سازه و سیستم خاک مسلح در قسمت فوقانی می‌باشد (شکل ۳) و استفاده از آن به شرط امکان اجرای سیستم میخکوبی، منجر به کاهش چشمگیر حجم عملیات خاکی و افزایش بهره‌وری اقتصادی پروژه می‌گردد.



شکل ۳. سیستم ترکیبی سری متشکل از خاک مسلح با تسمه در قسمت فوقانی و میخکوبی در قسمت تحتانی

با توجه به مکانیزم ترکیب و قرارگیری سیستم‌های سازنده سازه‌های مرکب، شناخت اندرکنش سیستم‌های تشکیل

سیستم خاک مسلح شده ترکیبی عبارتست از استفاده همزمان از دو یا چند سیستم مسلح‌سازی مختلف در قالب یک طرح واحد. در این سیستم، بر اساس شرایط اجرایی حاکم بر طرح، دو یا چند سیستم مسلح‌سازی با المان‌های تسلیح مختلف جهت دستیابی به پایداری کل طرح مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ایده این سیستم ترکیبی نخستین بار در سال ۲۰۰۴ توسط شرکت ساختمانی Nicholson و با اجرای سیستم میخکوبی به‌منظور پایدارسازی یک دیوار خاک مسلح با تسمه فلزی، ارائه گردید. در این پروژه، که در ایالت ایلی‌نویز آمریکا اجرا شده، به علت نامناسب بودن عملکرد دیواره خاک مسلح یک بزرگراه در زمان بهره‌برداری، با بهره‌گیری از سیستم میخکوبی، به پایدارسازی آن پرداخته شده است (۱).

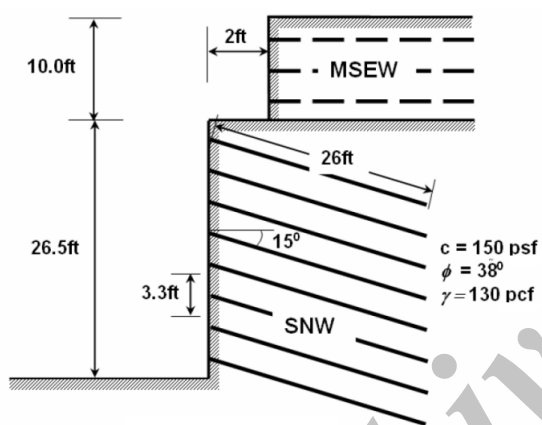


شکل ۱. سیستم ترکیبی موازی متشکل از خاک مسلح با تسمه و میخکوبی در حالت موازی (۱)

سیستم‌های ترکیبی بر حسب نحوه عملکرد اجزای تشکیل دهنده آنها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

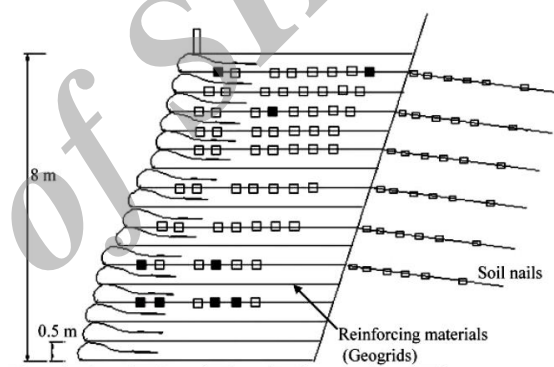
الف- سیستم‌های ترکیبی موازی: در این سیستم‌ها (شکل ۱)، نیروهای وارد شده به کل مجموعه به نسبت ظرفیت اندرکنشی المان‌های تسلیح، بین دو سیستم تقسیم می‌شوند. مجموع ظرفیت اندرکنشی تمامی سیستم‌های تشکیل دهنده موجب برقراری پایداری کل سیستم می‌گردد (FHWA, ۲۰۰۶).

همچنین، نتایج مطالعات صورت گرفته توسط پژوهشگاه حمل و نقل تگزاس روی یک سیستم مرکب سری به ارتفاع ۱۱ متر، متشکل از سیستم میخکوبی در قسمت تحتانی و سیستم خاک مسلح با تسمه فلزی در قسمت فوقانی، حاکی از وقوع بیشترین تغییر مکان سازه در تاج سیستم میخکوبی می‌باشد. به طوری که سازه خاک مسلح با تغییر مکان‌های بسیار ناچیز، همراه با سیستم میخکوبی جابجا شده است. این امر بیانگر اهمیت سیستم میخکوبی به عنوان یک بستر برای سازه خاک مسلح بوده و عملکرد آن را به طور مستقیم وابسته به سیستم میخکوبی می‌سازد (شکل ۵) (بادک، ۲۰۰۴).



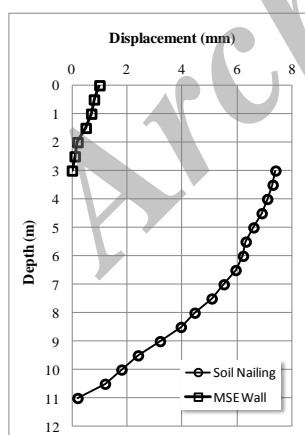
دهنده با یکدیگر جهت دستیابی به یک طراحی ایده‌آل، اجتناب‌ناپذیر است. پیچیده بودن رفتار سیستم‌های مسلح‌سازی از یک سو و نوپا بودن این سیستم از سوی دیگر سبب شده که تا کنون شناختی جامع در زمینه عملکرد سیستم‌های مرکب صورت نگرفته باشد. لذا مطالعات انجام شده روی این سیستم بسیار اندک بوده و تنها در شرایط استاتیک صورت گرفته، که در زیر به آنها اشاره شده است.

فن و هسیانو (۲۰۱۱) با ابزاربندی یک سیستم مرکب موازی حین ساخت، اقدام به بررسی رفتار استاتیک این سیستم نموده‌اند (شکل ۴).



شکل ۴. سیستم ترکیبی موازی متشکل از خاک مسلح

ژئوگرید و میخکوبی در حالت سری (فن و هسیانو، ۲۰۱۱)



شکل ۵. سیستم ترکیبی سری متشکل از خاک مسلح با تسمه در قسمت فوقانی و میخکوبی در قسمت تحتانی (بادک،

۲۰۰۴)

نتایج این مطالعات نشان داده که بیشترین نیروی استاتیک ایجاد شده در سیستم خاک مسلح در تراز ۰/۴۵ ارتفاع سازه و در سیستم میخکوبی در تراز ۰/۵۵ ارتفاع گزارش شده است. این در حالی است که در مورد سیستم خاک مسلح و سیستم خاک میخکوبی شده، این تراز ۰/۳۳ توصیه شده است. همچنین، بیشترین نیروی به وجود آمده در اثر اعمال بارهای ترافیکی در سیستم میخکوبی، در بالاترین ردیف میخ‌ها گزارش شده است.

با استناد به نتایج به دست آمده، لزوم توجه بیشتر به المان‌های تسلیح قرار گرفته در ترازهای ارتفاعی بالاتر در این سیستم، مسجل می‌گردد (فن و هسیانو، ۲۰۱۱).

آیین‌نامه ۲۸۰۰ به عنوان نماینده شتاب بیشینه، پیروید غالب و پارامترهای ژئوتکنیک و از پارامتر  $CAV^1$  به عنوان نماینده مدت دوام زلزله در قالب متغیرهای تأثیرگذار بر ضریب شبه استاتیک استفاده شده است.

در راستای تعیین ضریب شبه استاتیک به عنوان تابعی از پارامتر  $CAV$  و سطوح عملکرد در شرایط لرزه‌ای و ساختگاهی مختلف، از عملکرد لرزه‌ای سیستم میخکوبی در قالب تغییر مکان‌های افقی رویه و الگوی سطح عملکرد به عنوان عامل رابط میان ضریب شبه استاتیک و پارامترهای لرزه‌ای استفاده شده است. در این الگو، هر یک از مدل‌های عددی با توجه به پارامترهای حاکم بر آن نظیر ارتفاع، طول و آرایش المان‌های تسلیح و پارامترهای ژئوتکنیک نوع ساختگاه، در آنالیزهای تعادل حدی با ضریب اطمینان ۱، معادل یک ضریب شبه استاتیک معین می‌باشند. از سوی دیگر، هر یک از مدل‌های مذکور در مواجهه با پارامترهای لرزه‌ای مشخص نظیر شتاب، پیروید و مدت دوام، یک سطح عملکرد مشخص را تجربه خواهد نمود. حال می‌توان با انتخاب سطوح عملکرد به عنوان عامل رابط، ضریب شبه استاتیک را تابعی از سطوح عملکرد و پارامتر لرزه‌ای مورد نظر برای ساختگاهها و مناطق لرزه‌ای به صورت جداگانه معرفی نمود (رابطه ۳):

$$k_h = f(CAV, Displacement) \quad (3)$$

### ۳. مراحل انجام تحقیق

#### ۳-۱. انتخاب پارامترهای لرزه‌ای بر اساس

##### تقسیمات ساختگاهی

طبق مطالعات صورت گرفته توسط یزداندوست (۱۳۹۲)، هر ساختگاه با توجه به منطقه لرزه‌ای قرار گرفته در آن نماینده محدوده‌ای از شتاب بیشینه و پیروید غالب می‌باشد. لذا، در این تحقیق، نوع ساختگاه و منطقه لرزه‌ای قرارگیری آن به عنوان جایگزین پارامترهای شتاب بیشینه و پیروید غالب انتخاب و بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ به ۳

## ۲. انتخاب ضریب شبه استاتیک به صورت

### تابعی از پارامترهای عملکرد لرزه‌ای

صرف زمان زیاد و هزینه نسبتاً بالای تحلیل‌های دینامیک سبب شده تا تحلیل شبه استاتیک به عنوان یک روش معادل برای تحلیل دینامیک مطرح گردد. وابستگی نتایج تحلیل‌های دینامیک به عملکرد لرزه‌ای سازه، متأثر بودن عملکرد لرزه‌ای سازه‌های ژئوتکنیک از پارامترهای زلزله، پارامترهای ژئوتکنیک و هندسه سازه و عدم لحاظ نمودن پارامترهای مذکور در تحلیل شبه استاتیک، سبب کاهش دقت تحلیل و ارائه نتایجی دور از واقعیت شده است.

لذا در راستای اصلاح این ضعف و لحاظ نمودن اثر سطوح عملکرد لرزه‌ای سیستم مرکب سری در روش شبه استاتیک، تعریف ضریب شبه استاتیک به عنوان تابعی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای سیستم اجتناب‌ناپذیر است (رابطه ۱).

$$k_h = f(a_{max}, T, t, f_s, H, L, S_H, S_V, \dots) \quad (1)$$

$$k_h = f(a_{max}, T, t, f_s, H, L, S_H, S_V, \dots) \quad (1)$$

که در آن  $k_h$  ضریب شبه استاتیک،  $a$  شتاب زلزله طرح،  $T$  پیروید بارگذاری،  $t$  مدت زمان زلزله،  $f_s$  پارامترهای ژئوتکنیک سیستم،  $H$  ارتفاع سازه،  $L$  طول المان‌های تسلیح و  $S_H, S_V$  فواصل المان‌ها می‌باشند.

این در حالی است که در تمامی روش‌های متداول و توصیه شده در آیین‌نامه‌های معتبر، ضریب شبه استاتیک تنها به عنوان تابعی از شتاب ماکزیمم تعریف شده است (رابطه ۲)، که این امر از صحت و واقعیت نتایج به دست آمده می‌کاهد (FHWA، ۲۰۰۳):

$$k_h = \left[ 1.45 - \frac{a_{max}}{g} \right] \quad (2)$$

$$k_h = \left[ 1.45 - \frac{a_{max}}{g} \right] \quad (2)$$

به منظور تعریف ضریب شبه استاتیک به عنوان تابعی از سطوح عملکرد و پارامترهای مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای و با توجه به کثرت پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار لرزه‌ای سیستم مرکب سری، از تقسیمات ساختگاهی و لرزه‌ای

1- Cumulative absolute velocity

ساختگاه تیپ I، تیپ II و تیپ III و ۳ منطقه با بندی شده است. پارامترهای لرزه‌ای بر اساس این تقسیم خطرپذیری لرزه‌ای خیلی زیاد، زیاد و متوسط تقسیم بندی در جدول ۱ ارائه شده است (یزداندوست، ۱۳۹۲).

جدول ۱. پارامترهای لرزه‌ای در سطح زمین بر اساس نوع ساختگاه و منطقه لرزه‌ای (یزداندوست، ۱۳۹۲)

نوع منطقه	خطر پذیری زیاد			خطر پذیر متوسط		
	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳
نوع ساختگاه						
پرود غالب (S)	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۳۰
شتاب پیشینه (g)	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۶۷	۰/۴۰	۰/۴۷	۰/۶۱

ضریب شبه استاتیکی منحصر بفرد می‌باشد، بررسی عملکرد لرزه‌ای این سیستم در ۲ رده ارتفاعی (۶ و ۹ متر) و ۵ رده طولی از المان تسلیح (H/۰/۶، H/۰/۸، H/۱/۰)، مطالعات انجام شده توسط یزداندوست (۱۳۹۲)، طول المان‌های میخ به عنوان ضریبی از ارتفاع کل سیستم و طول المان‌های تسمه به ضریبی از ارتفاع سیستم خاک مسلح با مقادیر برابر، در نظر گرفته شده است.

در راستای حذف تأثیر مرزهای تعریف شده بر نتایج تحلیل، بر اساس تحلیل‌های حساسیت انجام شده، طول توده خاک پشت ناحیه مسلح شده و جلوی سیستم به ترتیب پنج و دو برابر ارتفاع سازه در هر یک از مدل‌ها انتخاب شده است. همچنین، با توجه به تأثیر چشمگیر ابعاد پی بر تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در سیستم، بر اساس تحلیل‌های حساسیت انجام شده از یک پی با ارتفاعی برابر با H/۰/۲۵ استفاده شده است (یزداندوست، ۱۳۹۲). شکل ۶ حاوی نمای شماتیک از سیستم خاک مسلح با ابعاد مذکور می‌باشد.

همچنین، به جهت عبور موج از مدل و جلوگیری از فیلتر شدن امواج با فرکانس‌های بالا، ابعاد مش‌ها تقریباً به اندازه طول موج بزرگترین فرکانس موج ورودی انتخاب شده است.

### ۳-۳-۳. المان‌های تسلیح و رویه سیستم میخکوبی

از آنجا که ابعاد چال حفاری و آرماتور مورد استفاده تابعی از آرایش میخ‌ها و شرایط محیطی و اجرایی

### ۳-۲. انتخاب پارامترهای ژئوتکنیک بر اساس

#### تقسیمات ساختگاهی

از آنجا که تقسیمات ساختگاهی در آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده بر اساس سرعت موج برشی صورت گرفته است، لذا با انتخاب خاک‌های دانه‌ای به عنوان مصالح با قابلیت اجرای سیستم میخکوبی و استفاده از روابط موجود میان سرعت موج برشی، عدد نفوذ استاندارد و سایر پارامترهای ژئوتکنیک، به تعیین و انتخاب پارامترهای مذکور و مدل‌سازی آن با استفاده از مدل رفتار مور-کلمب پرداخته شده است (جدول ۲).

### ۳-۳-۳. انتخاب مدل‌های عددی مورد بررسی

#### ۱-۳-۳-۳. نرم‌افزار مورد استفاده

جهت انجام تحلیل‌ها، نرم‌افزار تفاضل محدود<sup>۱</sup> FLAC مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از مدل‌های رفتاری متنوع خاک، توانمندی در مدل‌سازی اندرکنش مصالح، در نظر گرفتن رفتار غیر خطی مصالح، مدل‌سازی مناسب رفتار مصالح حین زلزله و همچنین قابلیت کد نویسی توسط کاربر از جمله مزیت‌های این نرم‌افزار به شمار می‌آید (FLAC، ۲۰۰۵).

#### ۲-۳-۳. مشخصات هندسی مدل عددی

از آنجا که ارتفاع سازه و طول المان‌های تسلیح نقش مهمی در رفتار لرزه‌ای سیستم مرکب ایفا کرده و هر مدل عددی با ارتفاع و طول المان تسلیح معین نماینده یک

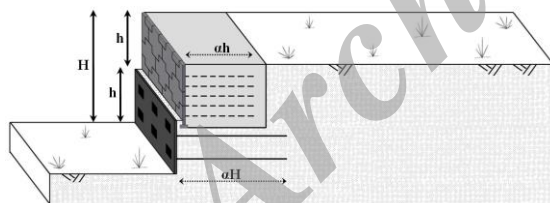
ارائه ضریب شبه استاتیک سیستم مرکب سری جهت پایدارسازی ترانسه خاکی خطوط حمل و نقل بر اساس سطوح عملکرد لرزه‌ای

می‌باشد، لذا در این پروژه با در نظر گرفتن تمامی حالات و شرایط مورد مطالعه و توصیه‌های آیین‌نامه FHWA، از چال حفاری با قطر ۱۰ cm و آرماتور به قطر ۲۵ mm استفاده شده است.

جدول ۲. پارامترهای ژئوتکنیک منتخب بر اساس تقسیمات ساختگاهی

پارامتر	نوع ساختگاه			مرجع
	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳	
سرعت موج برشی (m/s)	925	560	275	(استاندارد ۲۸۰۰)
عدد نفوذ استاندارد ( $N_{SPT}$ )	76	34	12	اشیهارا و آسال، ۱۹۸۲؛ جعفری و همکاران، ۲۰۰۲ (سید و همکاران، ۱۹۸۶)
مدول برشی	$20 \times 1000(N_1)_{60}^{1/3}(\sigma'_m)^{1/2}$ (psf)			$3080 \frac{(2.17 - e)^4}{1 + e} (\sigma'_0)^{0.8}$
وزن مخصوص ( $kg/m^3$ )	2187	1903	1691	2050 (شریف و همکاران، ۲۰۰۸)
زاویه اصطکاک داخلی بیشینه (درجه)	$\phi_{max} = 1.85^0 \left( \frac{N}{0.7 + \sigma'_v/P_a} \right)^{0.6} + 26^0$			39 (چای و کارتر، ۲۰۰۹)
زاویه اتساع (درجه)	$\psi_{max} = \left( \frac{1}{6} \sim \frac{1}{8} \right) \phi_{max}$			5
زاویه اصطکاک داخلی نهایی (درجه)	$\phi_{residual} = \phi_{max} - 0.8\psi$			35
ضریب پواسون	$\nu = \frac{1 - \sin\phi}{2 - \sin\phi}$			0.3
چسبندگی (kPa)	5			(کرامر، ۱۳۷۸)

مدل‌های عددی، از ضوابط و توصیه‌های مربوط به رویه‌های دائمی پیروی شده است.



شکل ۵. ابعاد مدل‌های ساخته شده (یزداندوست، ۱۳۹۲)

رویه‌های دائمی به صورت یکپارچه روی رویه‌های موقت اجرا می‌شوند و ظرفیت برشی و خمشی آنها باید به گونه‌ای باشد تا فشار جانبی اعمال شده از خاک را به راحتی به میخ‌ها منتقل نمایند. در این پروژه، طبق توصیه‌های AASHTO و FHWA در خصوص شرایط رویه‌های دائمی، از رویه‌ای با ضخامت ۱۰ cm و پارامترهای مکانیکی منطبق با جدول ۴ استفاده شده است (AASHTO، ۱۹۹۸).

در راستای مدل‌سازی عددی میخ‌ها از المان Cable استفاده شده است. این المان تنها با قابلیت تحمل نیروهای محوری و مدل رفتاری الاستوپلاستیک، گزینه‌ای مناسب جهت مدل نمودن رفتار میخ‌های تزریقی می‌باشد. از سوی دیگر، توابع اندرکنشی غیر خطی که برای المان Cable تعریف شده، این امکان را فراهم می‌سازد تا با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده در زمینه رفتار اندرکنشی میخ‌ها، شرایط اندرکنش این المان با توده خاک به خوبی مدل گردد (چای و کارتر، ۲۰۰۹). پارامترهای مکانیکی المان‌های میخ انتخاب شده در جدول ۳ ارائه شده است.

همچنین، سیستم میخکوبی بر اساس نوع کاربری به دو صورت موقتی و دائمی تعریف و طراحی می‌شود که نوع رویه به کار رفته در آن نیز تابعی از نوع کاربری آن می‌باشد. با توجه به نگرش دائمی بودن سیستم میخکوبی در این تحقیق، در انتخاب پارامترهای رویه به کار رفته در

گزینه‌ای مناسب جهت مدل نمودن رفتار قطعات بتنی رویه می‌باشد.

در راستای مدل‌سازی عددی رویه بتنی از المان Beam استفاده شده است. این المان با قابلیت تحمل نیروهای خمشی، برشی و محوری و مدل رفتاری الاستوپلاستیک،

جدول ۳. پارامترهای مکانیکی المان‌های میخ (یزداندوست، ۱۳۹۲)

پارامتر	واحد	نوع ساختگاه		
		تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳
ظرفیت بیرون کشیدگی	(KN/m <sup>2</sup> )	۲۱۴/۲	۱۵۱/۴	۹۶/۸
وزن مخصوص	(Kg/m <sup>3</sup> )		۷۸۰۰	
مدول الاستیسیته	(GPa)		۲۰۰	
تنش گسیختگی	(MPa)		۲۳۵	

جدول ۵. مشخصات رویه و تسمه (FHWA، ۲۰۰۶)

پارامتر	تسمه	پوسته	واحد
وزن مخصوص	۷۸۰۰	۲۵۰۰	(kg/m <sup>3</sup> )
مدول الاستیسیته	۲۰۰	۲۰	(GPa)
ابعاد	۶×۱۰/۵	۱۵×۱۵×۱۵	(cm)
تنش گسیختگی	۲۳۵	۲۱	(MPa)

جدول ۴. پارامترهای مکانیکی المان‌های رویه (FHWA، ۲۰۰۶)

پارامتر	مقدار	واحد
وزن مخصوص	۲۵۰۰	(kg/m <sup>3</sup> )
مدول الاستیسیته	۲۰	(GPa)
ضخامت	۱۰	(cm)
تنش گسیختگی	۲۱	(MPa)

از جمله مهمترین پارامتر در مدل‌سازی تسمه‌ها، اندرکنش میان تسمه و خاک است. به منظور مدل‌سازی تسمه‌های فولادی از المان Strip استفاده گردید. المان Strip تسلیم در کشش و حد پارگی فولاد را می‌تواند به خوبی مدل نماید. یکی از مزیت‌های این المان مدل‌سازی غیر خطی اندرکنش تسمه و خاک می‌باشد.

### ۳-۳-۵. شرایط مرزی و تکیه‌گاهی

شرایط مرزی در تحلیل‌های دینامیک و استاتیک از اهمیت خاصی برخوردار است. در حالت استاتیک، از تکیه‌گاه‌های غلتکی برای مدل‌سازی خاک اطراف مدل استفاده شده است. به این معنی که در تکیه‌گاه‌های جانبی، حرکت خاک در جهت افقی بسته شده و در جهت قائم حرکت آزادانه انجام می‌گیرد. اما در تکیه‌گاه زیرین مدل، حرکت در جهت قائم بسته و در راستای افق رها شده است. این

### ۳-۳-۴. المان‌های تسلیح و رویه سیستم خاک مسلح

#### با تسمه فلزی

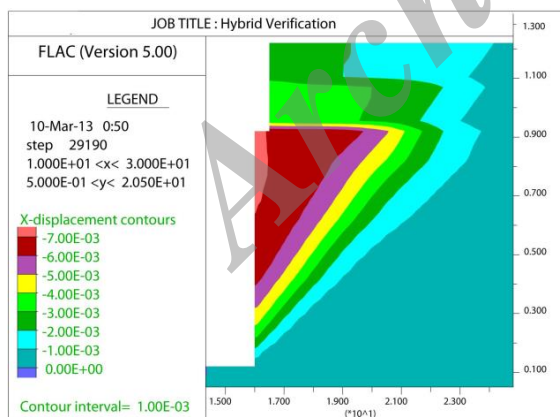
فاصله قائم و افقی تسمه، طول تسمه و ابعاد آن تأثیر به‌سزایی در رفتار دیوارهای خاک مسلح ایفا می‌کند. در تحقیق حاضر، با توجه به استفاده از المان‌های پوسته به صورت صلیبی شکل، ابعاد آنها و روش‌های اجرا، فواصل تسمه‌ها در راستای قائم و افق به صورت مساوی برابر با ۷۵ سانتی‌متر انتخاب گردید. بدین گونه که ۲ تسمه به صورت افقی و عمودی با فواصل مساوی روی هر پوسته ۱/۵ متری نصب می‌گردد. تسمه‌ها به ابعاد رایج ۵×۶۰ میلی‌متر جهت مدل‌سازی انتخاب گردیدند. سایر مشخصات تسمه‌های فولادی در جدول ۵ نشان داده شده است.

ارائه ضریب شبه استاتیک سیستم مرکب سری جهت پایدارسازی ترانشه خاکی خطوط حمل و نقل بر اساس سطوح عملکرد لرزه‌ای

بر اساس پارامترهای ارائه شده، مدل عددی در محیط نرم‌افزار FLAC آماده و تحت تحلیل استاتیک قرار گرفته است. نتایج این تحلیل در قالب تغییر مکان‌های رویه در شکل ۶ ارائه شده است. مقایسه بین نتایج به‌دست آمده از تحلیل استاتیک مدل عددی با نتایج گزارش شده ابزاربندی سیستم مقیاس کامل توسط جانسون، حاکی از انطباق مناسب بین نتایج می‌باشد. این انطباق به گونه‌ای است که می‌توان از اختلافات موجود میان مقادیر مدل عددی و مدل مقیاس کامل چشم پوشی نمود.

### ۳-۳-۸. انتخاب پارامترهای ژئوتکنیک مصالح حد فاصل<sup>۲</sup>

به‌منظور تحقق رفتار مناسب در فصل مشترک دو توده از مصالح ژئوتکنیک با پارامترهای متفاوت، استفاده از یک لایه حدفاصل با مشخصات ژئوتکنیک معادل در مدل‌سازی عددی توصیه شده است (باترست و حاتمی، ۱۹۹۸). لذا، در این تحقیق نیز در فصل مشترک مصالح با پارامترهای متفاوت، از یک لایه با ضخامت ۵ سانتی‌متر و با مشخصات معادل مصالح ضعیف‌تر مطابق جدول ۶ استفاده شده است.



شکل ۶. تغییر مکان‌های رویه سیستم مرکب و مدل عددی (بادک، ۲۰۰۴)

روش در تحلیل سبب نزدیک شدن مدل‌سازی به واقعیت خواهد شد. در تحلیل‌های دینامیک، با توجه به امکان بازتاب امواج به داخل مدل و کاهش شدید دقت نتایج، مرزهای استاتیک جای خود را به مرزهای آرام<sup>۱</sup> می‌دهند.

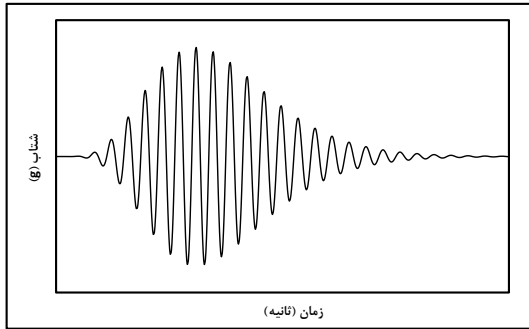
### ۳-۳-۶. میرایی

برای تعیین پارامترهای میرایی هیستریسیس توده خاک نظیر روابط  $D$  و  $G/G_0$  با کرنش برشی، از مطالعات کوکوشو و همکاران (۱۹۸۰) استفاده شده است. در این مطالعات، تأثیر فشار همه‌جانبه بر روابط میان  $D$  و  $G/G_0$  با کرنش برشی برای خاک‌های دانه‌ای بررسی شده است (ایشیهارا و آسال، ۱۹۸۲). لذا، با تکیه بر نتایج مطالعات مذکور و استفاده از قابلیت برنامه نویسی در محیط FLAC، روابط میان  $D$  و  $G/G_0$  با کرنش برشی به گونه‌ای کُد نویسی شده که نرم‌افزار در هر گام تحلیل بر اساس تنش‌های همه‌جانبه موجود، روابط مذکور را با توجه به نتایج مطالعات کوکوشو و همکاران (۱۹۸۰) برای مدل تعریف نماید.

### ۳-۳-۷. صحت‌سنجی مدل عددی

از آنجا که تا کنون مطالعات لرزه‌ای روی سیستم ترکیبی انجام نشده، لذا صحت‌سنجی مدل عددی این سیستم تنها در شرایط استاتیک صورت گرفته است. جهت صحت-سنجی استاتیک مدل‌سازی عددی، از نتایج مطالعات صورت گرفته روی یک سیستم ترکیبی سری به ارتفاع ۳۶/۵ فوت در تگزاس استفاده شده است. این سیستم ترکیبی متشکل از یک سیستم میخکوبی به ارتفاع ۲۶/۵ فوت و یک سیستم خاک مسلح شده با تسمه به ارتفاع ۱۰ فوت می‌باشد. بادک (۲۰۰۴) با استفاده از ابزارگذاری و مانیتورینگ این سیستم به مطالعه روی رفتار استاتیک آن پرداخته‌اند که نتایج این تحقیقات در قالب تغییر شکل‌های افقی سیستم در شکل ۶ ارائه شده است.





شکل ۸. شکل عمومی بار هارمونیک مورد استفاده (یزداندوست، ۱۳۹۲)

با توجه به رابطه مذکور، تعریف پارامترهای دامنه بیشینه، پیروید غالب و تعداد سیکل‌های بارگذاری (مدت دوام) به عنوان پارامترهای ورودی این بار هارمونیک، برای تعریف آن ضروری می‌باشد. لذا، برای تکمیل پارامترهای ورودی این بار، با استناد به شتاب‌های بیشینه و پیروید غالب تعیین شده در بخش ۱-۳ بر اساس تقسیمات ساختگاهی و لرزه‌ای، تنها کافی است تعداد سیکل‌های بارگذاری به عنوان یک پارامتر ورودی برای این بار تعیین گردد. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط یزداندوست (۱۳۹۲)، پارامتر سرعت مطلق تجمعی (CAV) به عنوان جایگزینی مناسب برای پارامتر تعداد سیکل بارگذاری (مدت دوام) توصیه و حدود تغییرات مقادیر این پارامتر بر حسب نوع ساختگاه و مناطق لرزه‌ای در قالب جدول ۷ ارائه شده است.

CAV عبارتست از جمع مطلق تجمعی سرعت و یا سطح زیر نمودار شتاب که به صورت تجمعی و بدون در نظر گرفتن علامت منفی حاصل می‌شود و هر اندازه تعداد سیکل‌های مؤثر یک نگاشت در یک دامنه ثابت بیشتر باشد مقدار بزرگتری خواهد داشت.

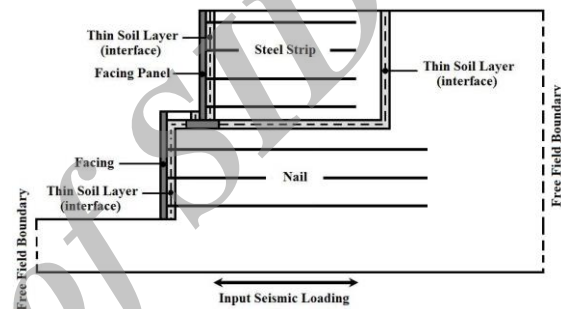
$$CAV = \int_0^t |a(t)| dt \quad (5)$$

که در آن  $a(t)$  تغییرات شتاب در برابر زمان می‌باشد. لذا، با انتخاب مقادیر پارامتر CAV در محدوده‌های توصیه شده، بارهای هارمونیک نظیر هر ساختگاه و منطقه لرزه‌ای تولید شده است (یزداندوست، ۱۳۹۲).

#### جدول ۶. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح حد فاصل

پارامتر معادل	پارامتر
$\gamma_{interface} = \gamma_{soil}$	وزن مخصوص
$G_{interface} = G_{soil}$	مدول برشی
$v_{interface} = v_{soil}$	ضریب پواسون
$c_{interface} = 0$	چسبندگی
$\phi_{interface} = 2/3 \phi_{soil}$	زاویه اصطکاک داخلی

همانند قسمت‌های قبل، تعریف این پارامترها برای مدل توسط قابلیت کد نویسی در محیط نرم‌افزار FLAC صورت گرفته است (شکل ۷).



شکل ۷. مدل عددی سیستم مرکب سری

#### ۳-۴. انتخاب بار لرزه‌ای

بار هارمونیک مورد استفاد در این تحقیق از نوع سینوسی-نمایی بوده که ضمن حفظ پیروید ثابت در طول بارگذاری، قابلیت افزایش و کاهش دامنه بارگذاری را دارا می‌باشد. این قابلیت تا حد زیادی این بار هارمونیک را شبیه نگاشت‌های طبیعی می‌سازد. این بار هارمونیک از رابطه (۴) تبعیت می‌کند و شکل عمومی آن مطابق با شکل ۸ می‌باشد.

$$a(t) = \sqrt{\beta} \cdot e^{-\alpha t} \cdot t^{\xi} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (4)$$

که در آن  $f$  فرکانس بارگذاری بوده و  $\xi$  و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایبی هستند که شکل بارگذاری و تعداد سیکل‌ها را مشخص می‌سازند.

جدول ۷. محدوده تغییرات CAV در سطح زمین بر اساس نوع ساختگاه و منطقه لرزه‌ای (یزداندوست، ۱۳۹۲)

نوع منطقه	خطر پذیری خفلی زیاد			خطر پذیری زیاد			خطر پذیری متوسط		
	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳
نوع ساختگاه	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳
CAV (cm/s)	۳۰۴~۱۶۹۷	۴۹۶~۱۹۳۹	۱۰۶۳~۲۸۰۸	۳۲۷~۱۱۱۵	۳۹۵~۱۷۲۰	۷۲۴~۲۴۱۶	۲۰۴~۸۹۲	۴۲۸~۱۵۰۲	۶۰۴~۱۹۸۱

### ۳-۵-۲. تحلیل مدل در حالت دینامیک

به منظور تعیین عملکرد لرزه‌ای سیستم مرکب در قالب تغییر مکان‌های افقی ماندگار رویه در حالت دینامیک، پس از انجام تحلیل استاتیک آخرین گام اجرایی و صفر نمودن تغییر مکان‌های به وجود آمده در مدل، بارگذاری دینامیک بر اساس اعمال بارهای هارمونیک انتخاب شده در طول بستر پی و تحلیل دینامیک در طول زمان هر شتاب نگاشت و با گام‌های زمانی  $10^{-7} \times 5/207$  ثانیه انجام گردیده است.



شکل ۹. مراحل ساخت مدل سیستم مرکب سری

### ۳-۵-۳. تهیه و تحلیل مدل‌های عددی

#### ۳-۵-۱. ساخت مدل عددی مطابق با روش اجرای

#### سیستم مرکب سری در حالت استاتیک

در راستای نزدیکتر شدن هر چه بیشتر فرایند ساخت مدل به مراحل اجرایی سیستم مرکب سری و دستیابی به توزیع واقعی تنش در مدل ساخته شده، ابتدا زمین طبیعی بر اساس ملاحظات ارائه شده در بخش ۳-۳ مدل و تحت تحلیل استاتیک قرار می‌گیرد. سپس، جهت اجرای قسمت خاک مسلح، ابتدا بلوک‌ها، فنداسیون تنظیم، المان‌های تسلیح، مصالح توده خاک مسلح، مصالح حد فاصل و توده خاک برجا بر اساس ملاحظات موجود برای اولین لایه اجرا و سپس جهت برقراری پایداری در سیستم و توزیع تنش‌های استاتیک، مدل ساخته شده تحت تحلیل استاتیک قرار می‌گیرد. این فرایند تا اجرای لایه آخر که دستیابی به ارتفاع مورد نظر می‌باشد، ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است که طبق توصیه آیین‌نامه‌های FHWA و AASHTO مبنی بر اجرای یک لایه به ضخامت  $1/10$  ارتفاع سازه در جلوی رویه بتنی (عمق مدفون)، این لایه همزمان با اجرای اولین لایه اجرا می‌گردد.

در ادامه، جهت اجرای مرحله اول سیستم میخکوبی ابتدا لایه اول حفاری و پس از انجام تحلیل استاتیک، المان‌های تسلیح، رویه و مصالح حد فاصل بر اساس ملاحظات موجود اجرا و جهت برقراری پایداری در سیستم و توزیع تنش‌های استاتیک، مدل ساخته شده تحت تحلیل استاتیکی قرار می‌گیرد. این فرایند تا اجرای مرحله آخر که دستیابی به ارتفاع یا عمق مورد نظر می‌باشد، ادامه می‌یابد. مراحل ساخت مدل به صورت شماتیک در شکل ۹ ارائه شده است.

### ۳-۵-۳. تعیین ضریب شبه استاتیک معادل هر مدل با

#### استفاده از آنالیزهای تعادل حدی

به منظور تعیین ضریب شبه استاتیک معادل هر مدل کافی است تک تک مدل‌های عددی ساخته شده، با استفاده از یک نرم افزار تعادل حدی در شرایط شبه استاتیک تحت تحلیل قرار گیرند. در انتهای تحلیل، ضریب شبه استاتیک معینی که منجر به اکتساب ضریب اطمینان ۱ برای مدل شود،  $k_H$  معادل مدل در نظر گرفته می شود.

در این تحقیق، جهت تحلیل‌های تعادل حدی از نرم افزار Geo-Slope استفاده شده است. این نرم افزار که بر اساس روش تعادل حدی استوار است، پس از ساخت مدل و اعمال  $k_H$  مشخص، مطابق با بحرانی ترین گوه گسیختگی ضریب اطمینان مدل را محاسبه می نماید. از آنجا که ضریب شبه استاتیک به دست آمده بر اساس این الگو یک ضریب منحصر بفرد نیست و ممکن است دو مدل با ارتفاع، طول تسمه و پارامترهای ژئوتکنیک مختلف که دارای عملکرد لرزه ای متفاوتند دارای یک ضریب شبه استاتیک معادل باشند، لذا جهت جلوگیری از اغتشاشات احتمالی، در تعریف  $k_H$  به عنوان تابعی از سطوح عملکرد از ضریب شبه استاتیک همسنگ شده (نرمالیزه شده) بر اساس ارتفاع استفاده شده است (۶).

#### ۴. نتایج و تحلیل‌ها

##### ۴-۱. بررسی تأثیر طول المان‌های تسلیح بر تغییر

##### مکان‌های افقی سیستم

به منظور بررسی تأثیر طول المان‌های تسلیح بر تغییر مکان‌های افقی سیستم مرکب در خلال بارهای هارمونیک انتخاب شده، به ثبت تغییر مکان‌های افقی رویه در خلال شتاب نگاشت‌های مذکور برای هر سیستم با طول المان معین، پرداخته شده است. لذا، از میان تمامی نتایج به دست آمده، نتایج تحلیل‌های دینامیک مدل‌های قرار

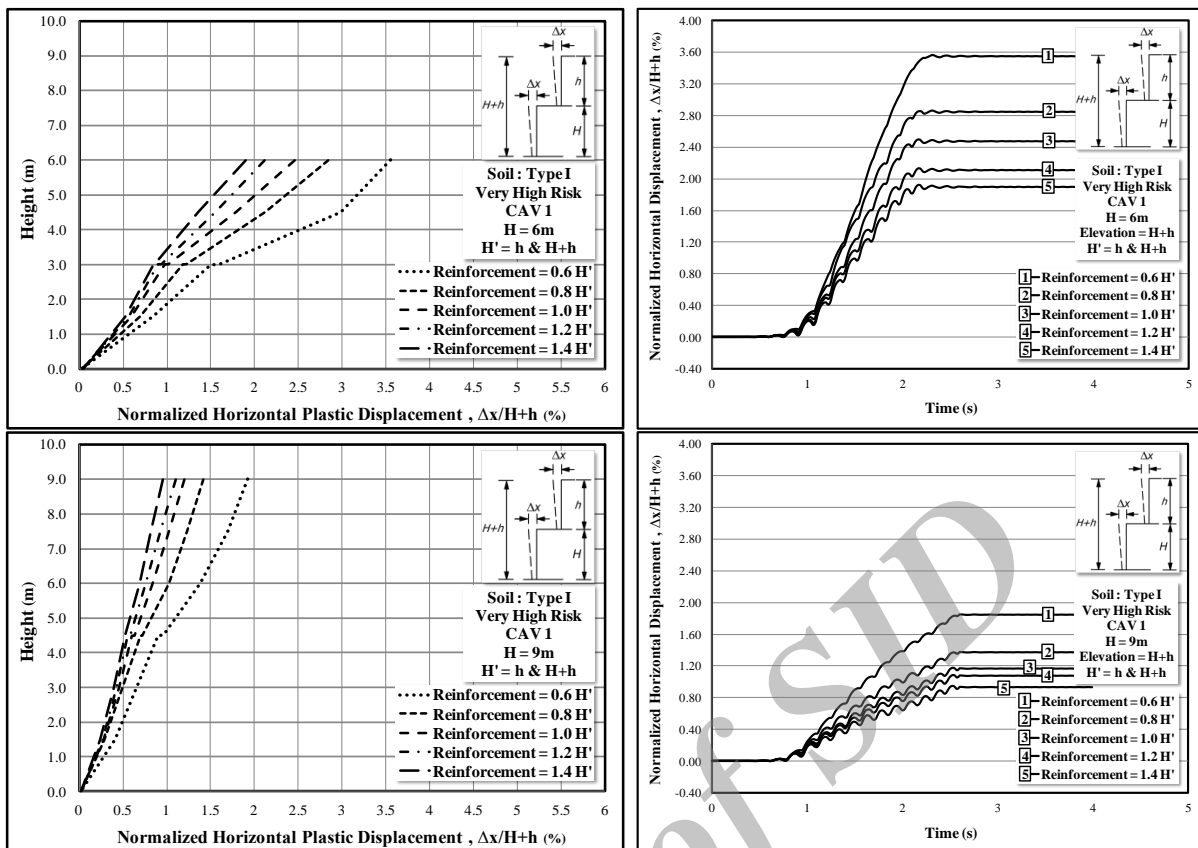
گرفته در ساختگاه نوع ۱ در قالب تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی رویه مطابق شکل ۱۰ ارائه شده است.

نتایج به دست آمده نشان دهنده تأثیر چشمگیر طول میخ‌ها بر تغییر مکان‌های الاستیک و پلاستیک به وجود آمده در سیستم مرکب می باشد، به گونه ای که در یک بار هارمونیک مشخص افزایش طول المان‌های تسلیح سبب کاهش تغییر شکل‌های افقی سیستم می شود. این در حالی است که بیشترین تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از افزایش طول المان‌های تسلیح، تا رده طولی  $0.8H$  مشاهده می شود. لذا، می توان همانند سیستم خاک مسلح و سیستم میخکوبی، طول  $0.7H$  را به عنوان طول حداقل المان‌های تسلیح در شرایط لرزه ای، توصیه نمود.

از سوی دیگر، ضمن افزایش ارتفاع سازه، میزان تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از افزایش طول المان‌های تسلیح با کاهش چشمگیر مواجه می گردد که علت این پدیده را می توان در رشد تصاعدی طول میخ‌ها در خلال افزایش ارتفاع سازه به علت وابسته بودن آن به ارتفاع سیستم، جستجو نمود. این در حالی است که میزان تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از طول المان‌های تسلیح ضمن افزایش تراز ارتفاعی سیستم، با افزایش قابل توجهی مواجه می شود. به نحوی که این تأثیرپذیری در قسمت خاک مسلح نسبت به ناحیه میخکوبی شده برجسته تر می باشد.

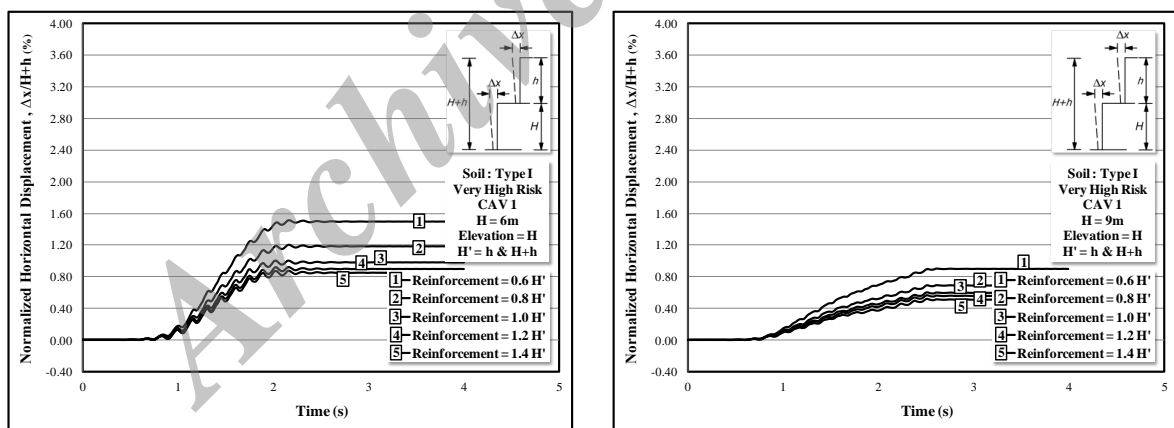
همچنین، با وجود آنکه سهم اعظم تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم مربوط به تغییر شکل‌های پلاستیک می باشد، افزایش صلبیت توده مسلح شده در اثر افزایش طول المان‌های تسلیح منجر به پررنگ شدن تغییر شکل‌های الاستیک در کنار تغییر شکل‌های پلاستیک می شود.

ارائه ضریب شبه استاتیک سیستم مرکب سری جهت پایدارسازی ترانسه خاکی خطوط حمل و نقل بر اساس سطوح عملکرد لرزه‌ای



شکل ۱۰- الف. تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی قسمت فوقانی رویه سیستم ترکیبی در رده‌های ارتفاعی و طول المان‌های

تسلیح مختلف در حضور بارهای هارمونیک مربوطه



شکل ۱۰- ب. تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی قسمت میانی رویه سیستم ترکیبی در رده‌های ارتفاعی و طول

المان‌های تسلیح مختلف در حضور بارهای هارمونیک مربوطه

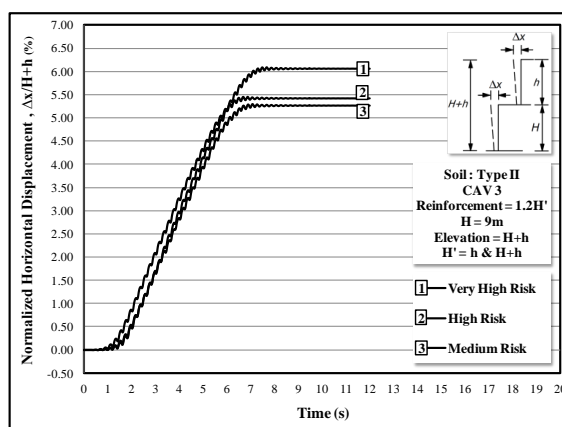
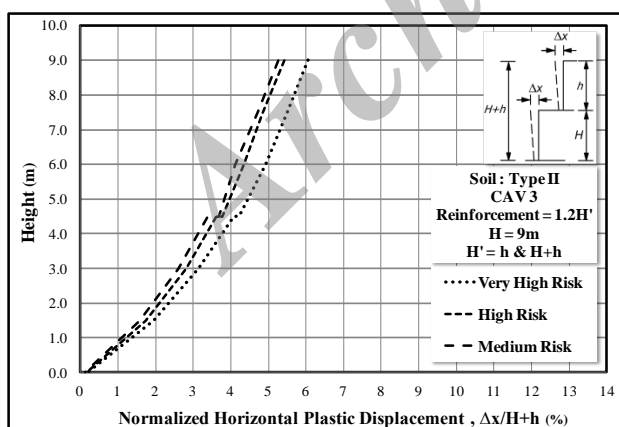
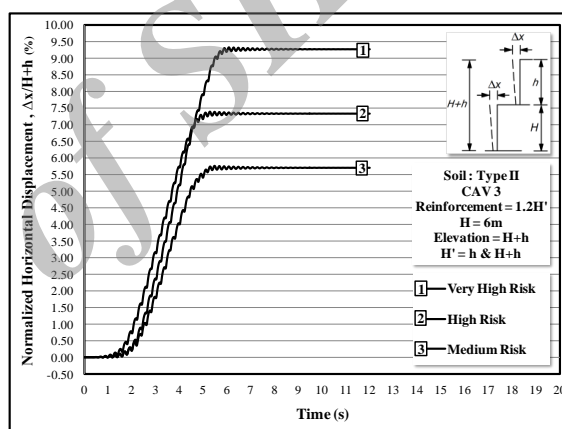
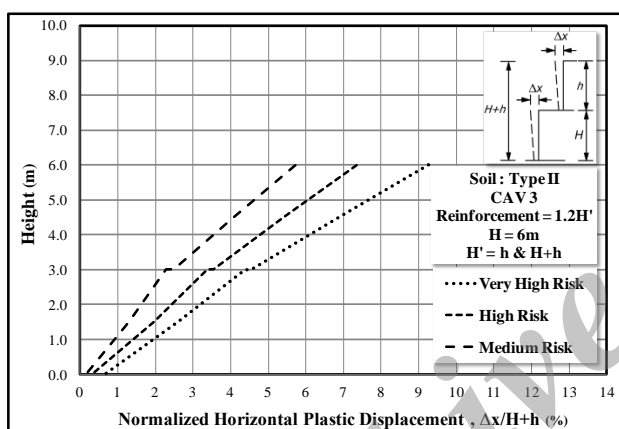
لرزه‌ای با میزان خطرپذیری متفاوت پرداخته شده است. لذا، از میان تمامی نتایج به دست آمده، نتایج تحلیل‌های دینامیک مدل‌های مسلح شده با المان‌هایی به طول  $1.2H$  و قرار گرفته در ساختمان نوع ۲ در قالب تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی رویه مطابق شکل ۱۱ ارائه شده

۲-۴. بررسی تأثیر شتاب پیشینه بر تغییر مکان‌های افقی سیستم

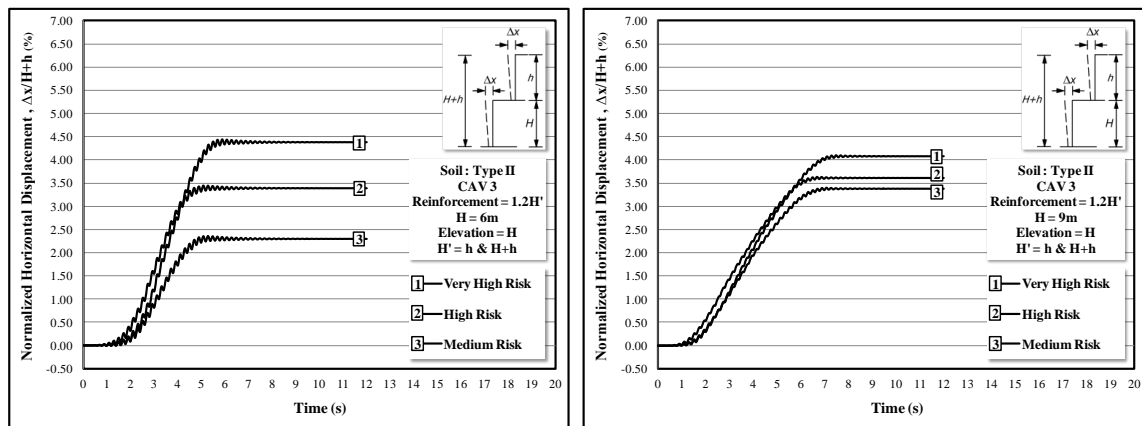
در راستای بررسی تأثیر شتاب پیشینه بر تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم میخکوبی، به ثبت تغییر مکان‌های افقی رویه در حضور بارهای هارمونیک مربوط به مناطق

میزان تأثیر پذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از شتاب بیشینه ضمن افزایش تراز ارتفاعی در سیستم، با افزایش قابل توجهی مواجه می‌شود. به نحوی که این تأثیرپذیری در قسمت خاک مسلح نسبت به ناحیه میخکوبی شده برجسته‌تر می‌باشد. همچنین، میزان تأثیرپذیری تغییر شکل‌های پلاستیک از شتاب بیشینه به مراتب بیشتر از تغییر شکل‌های الاستیک بوده است. به نحوی که می‌توان شتاب بیشینه را عامل اصلی انتقال سیستم از حالت الاستیک به محدوده پلاستیک و ایجاد گسیختگی در سیستم دانست.

است. نتایج به‌دست آمده نشان دهنده تأثیر چشمگیر شتاب بیشینه بر تغییر مکان‌های به‌وجود آمده در سیستم ترکیبی، می‌باشد. به‌گونه‌ای که افزایش آن سبب افزایش تغییر شکل‌های افقی سیستم می‌شود. این در حالی است که میزان این تأثیرگذاری ضمن افزایش ارتفاع سیستم، به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. عامل این پدیده را می‌توان در تأثیر همزمان رشد تصاعدی طول المان‌های تسلیح در خلال افزایش ارتفاع سازه دانست. از سوی دیگر، افزایش این پارامتر مد لغزش را در سیستم مرکب پررنگ‌تر می‌سازد که این پدیده با افزایش ارتفاع سیستم کمرنگ می‌شود.



شکل ۱۱- الف. تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی قسمت فوقانی رویه سیستم مرکب در رده‌های ارتفاعی مختلف در حضور بارهای هارمونیک مربوطه با شتاب بیشینه متفاوت



شکل ۱۱- ب. تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی قسمت میانی رویه سیستم مرکب در رده‌های ارتفاعی مختلف در حضور

بارهای هارمونیک مربوطه با شتاب پیشینه متفاوت

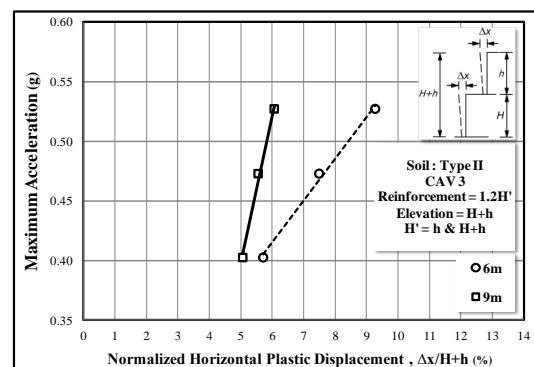
#### ۴-۳. بررسی تأثیر سرعت مطلق تجمع (CAV) بر

##### تغییر مکان‌های افقی سیستم

به‌منظور بررسی تأثیر سرعت مطلق تجمعی بر تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در سیستم مرکب، به ثبت تغییر مکان‌های افقی رویه در حضور بارهای هارمونیک منتخب با مقادیر CAV مختلف پرداخته شده است. لذا، از میان تمامی نتایج به‌دست آمده، نتایج تحلیل‌های دینامیک مدل‌های مرکب با المان‌هایی به طول  $1.0H$  و قرار گرفته در ساختگاه نوع ۱ در قالب تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی رویه مطابق شکل ۱۳ ارائه شده است.

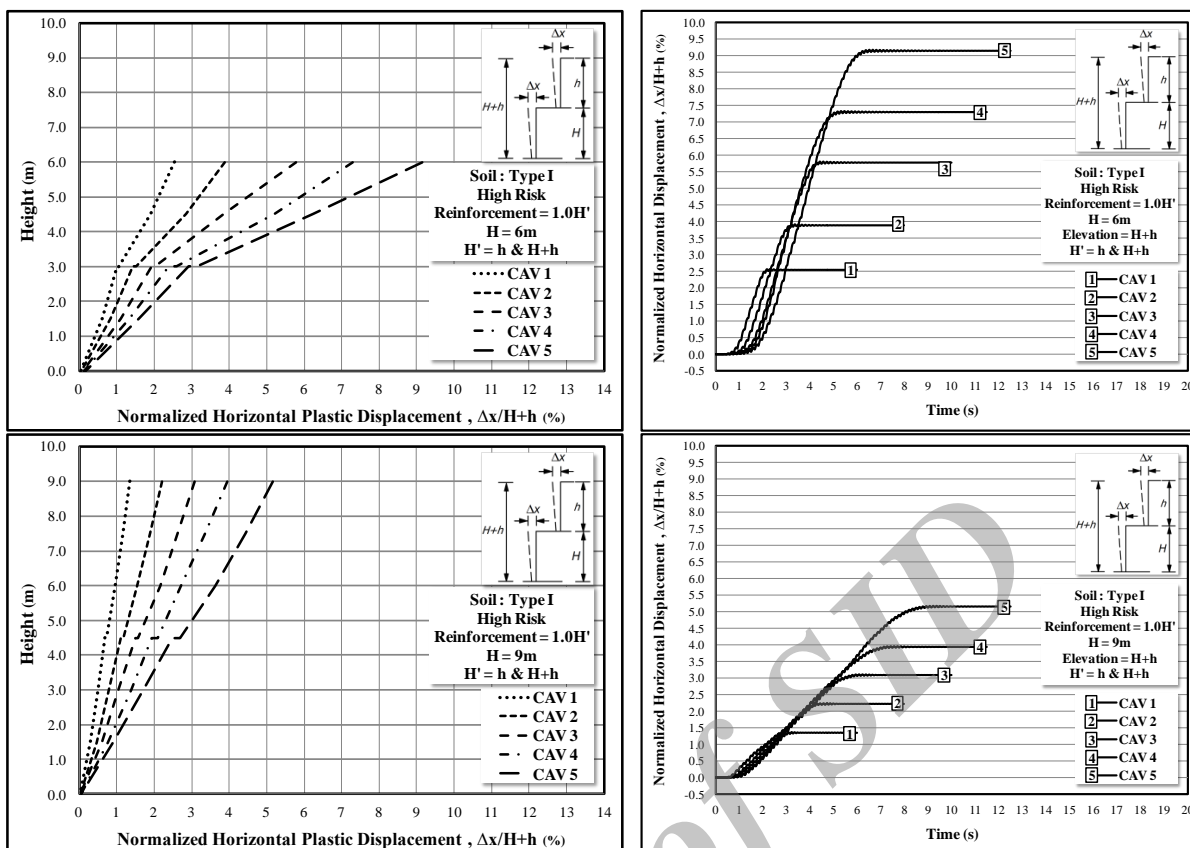
نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده تأثیر مستقیم پارامتر CAV بر تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در سیستم ترکیبی می‌باشد. به‌گونه‌ای که افزایش آن سبب افزایش تغییر مکان‌های به‌وجود آمده در سیستم می‌شود. این در حالی است که میزان این تأثیرگذاری ضمن افزایش ارتفاع سیستم، به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. عامل این پدیده را می‌توان در تأثیر همزمان رشد تصاعدی طول المان‌های تسلیح در خلال افزایش ارتفاع سازه دانست. از سوی دیگر، افزایش این پارامتر مُد لغزش را در سیستم مرکب پررنگ‌تر می‌سازد که این پدیده با افزایش ارتفاع سیستم کمرنگ می‌شود.

از سوی دیگر، همبستگی مناسب بین شتاب پیشینه و تغییر شکل‌های ماندگار به‌وجود آمده در سیستم مرکب بر خلاف سیستم خاک مسلح و سیستم میخکوبی که در شکل ۱۲ نیز مشاهده می‌شود، علاوه بر تأیید نتایج مطالعات عددی انجام شده، بیانگر کارایی مناسب شتاب پیشینه به عنوان پارامتر شاخص در انتخاب زلزله طرح در روش طراحی بر مبنای عملکرد لرزه‌ای برای سیستم‌های مرکب سری نیز می‌باشد.

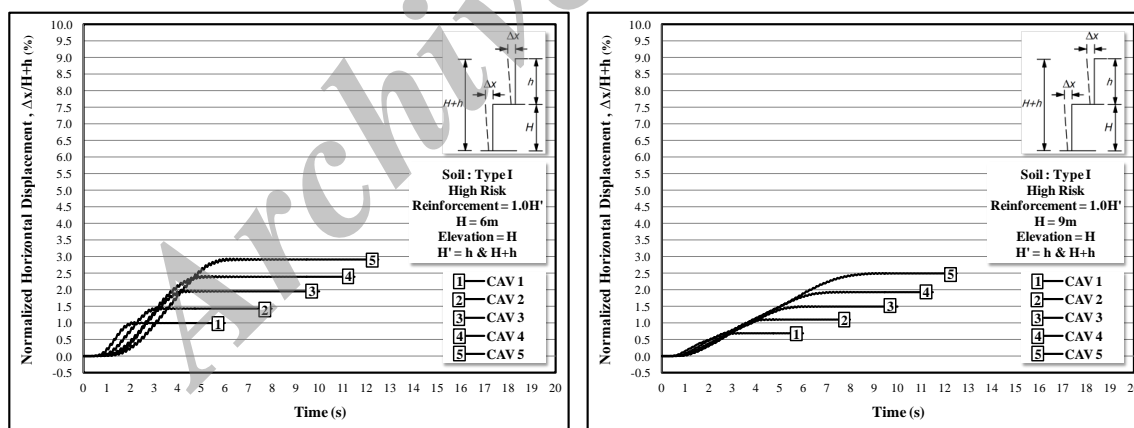


شکل ۱۲. تغییرات تغییر شکل‌های افقی ماندگار سیستم

مرکب در مقابل شتاب پیشینه



شکل ۱۳- الف. تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی قسمت فوقانی رویه سیستم ترکیبی در رده‌های ارتفاعی مختلف در حضور بارهای هارمونیک مربوطه با CAV متفاوت



شکل ۱۳- ب. تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های افقی قسمت میانی رویه سیستم ترکیبی در رده‌های ارتفاعی مختلف در حضور بارهای هارمونیک مربوطه با CAV متفاوت

همچنین، وجود همبستگی مناسب بین پارامتر CAV و تغییر شکل‌های ماندگار به وجود آمده در سیستم مرکب که در شکل ۱۴ نیز مشاهده می‌شود، علاوه بر تأیید نتایج مطالعات عددی انجام شده، بیانگر کارآمد بودن پارامتر CAV به عنوان پارامتر شاخص در انتخاب زلزله طرح در

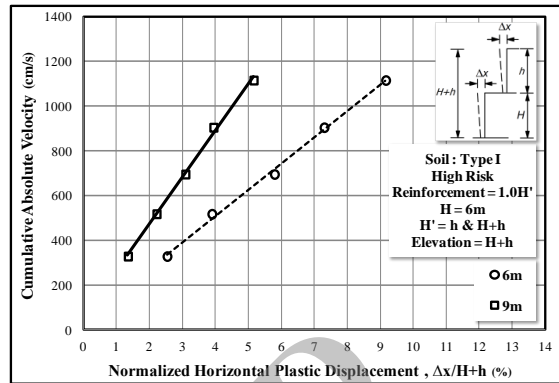
از سوی دیگر، میزان تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از پارامتر CAV ضمن افزایش تراز ارتفاعی سیستم، با افزایش قابل توجهی مواجه می‌شود. به نحوی که این تأثیرپذیری در قسمت خاک مسلح نسبت به ناحیه میخکوبی شده برجسته‌تر می‌باشد.

ارائه ضریب شبه استاتیک سیستم مرکب سری جهت پایداری ترانشه خاکی خطوط حمل و نقل بر اساس سطوح عملکرد لرزه‌ای

رویه و با تکیه بر ضرایب شبه استاتیک معادل هر مدل، ضریب شبه استاتیک به عنوان تابعی از میزان تغییر شکل‌های ماندگار سیستم مرکب سری (سطوح عملکرد) و مقدار پارامتر CAV، برای ساختگاه‌ها و مناطق لرزه‌ای تعریف شده در این تحقیق به صورت مجزا در قالب نمودارهای شکل ۱۵ ارائه شده است.

انتخاب مقادیر تغییر شکل سیستم به عنوان مرزهای تغییر سطوح عملکرد در نمودارهای ارائه شده، بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده توسط یزداندوست (۱۳۹۲) روی مدل‌های فیزیکی سیستم مرکب سری با استفاده از میز لرزه، صورت گرفته است. طبق مشاهدات و گزارش‌های به دست آمده، میزان  $\Delta x/H = 0.75\%$  به عنوان مرز ورود سیستم میخکوبی به شرایط وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک و میزان  $\Delta x/H = 5.25\%$  به عنوان مرز ورود سیستم به شرایط وقوع گسیختگی و تخریب انتخاب شده است (شکل ۱۶).

روش طراحی بر مبنای عملکرد لرزه‌ای برای سیستم‌های مرکب سری نیز می‌باشد.



شکل ۱۴. تغییرات تغییر شکل‌های افقی ماندگار سیستم

مرکب سری در مقابل پارامتر CAV

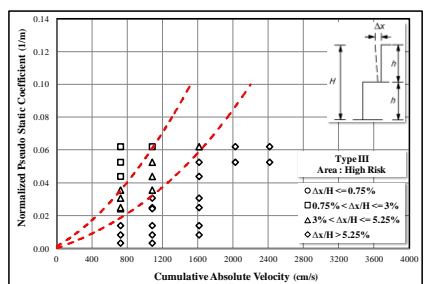
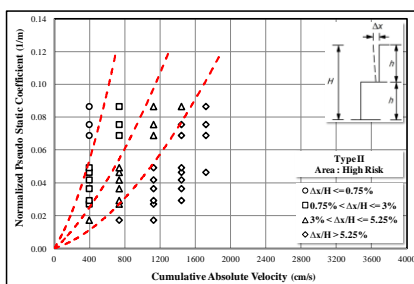
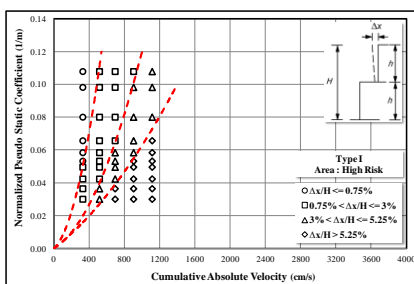
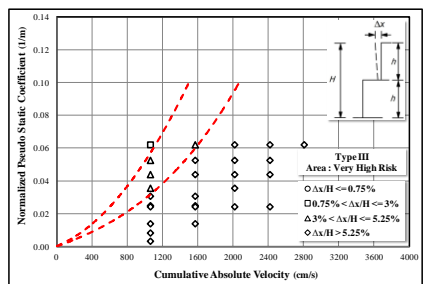
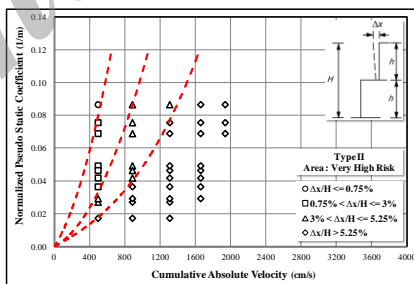
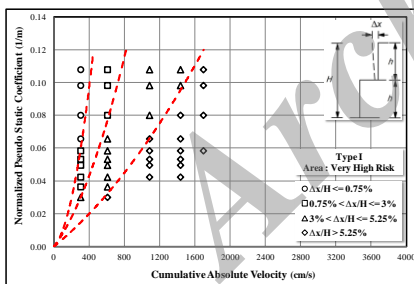
۴-۴. ارائه ضریب شبه استاتیک بر اساس سطوح عملکرد

با استناد به نتایج آنالیزهای دینامیک هر یک از مدل‌های عددی ساخته شده در قالب تغییر شکل‌های افقی حداکثر

ساختگاه تیپ ۱

ساختگاه تیپ ۲

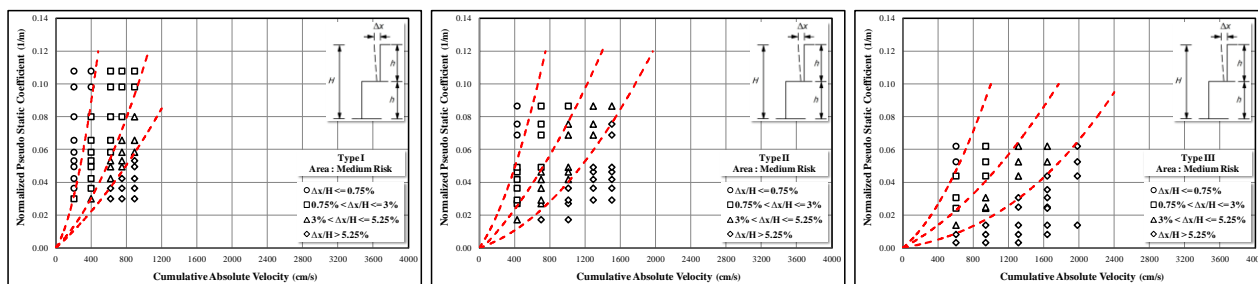
ساختگاه تیپ ۳



منطقه با خطر پذیری لرزه‌ای خیلی زیاد

منطقه با خطر پذیری لرزه‌ای زیاد





شکل ۱۵. ضرایب شبه استاتیک معادل سطوح عملکرد سیستم مرکب سری بر اساس تقسیمات ساختمانی

۶- افزایش تغییر شکل‌های افقی سیستم در اثر افزایش ترازهای ارتفاعی در سیستم و وقوع دوران به عنوان مُد اصلی تغییر شکل سازه

۷- کاهش دوران سیستم در اثر افزایش طول المان‌ها

۸- تأثیرپذیری بیشتر تغییر شکل‌های افقی سیستم از افزایش ترازهای ارتفاعی در سیستم و وقوع بیشترین تأثیرپذیری از تراز ارتفاعی در ناحیه خاک مسلح

۹- افزایش تغییر شکل‌های افقی سیستم ناشی از افزایش شتاب بیشینه

۱۰- تأثیرپذیری بیشتر تغییر شکل‌های پلاستیک از شتاب بیشینه نسبت به تغییر شکل‌های الاستیک و معرفی شتاب بیشینه به عنوان عامل اصلی انتقال سیستم از حالت الاستیک به محدوده پلاستیک و ایجاد گسیختگی در سیستم مرکب

۱۱- همبستگی مناسب بین شتاب بیشینه و تغییر شکل‌های ماندگار به وجود آمده در سیستم مرکب و در نتیجه کارایی مناسب شتاب بیشینه به عنوان پارامتر شاخص در انتخاب زلزله طرح در روش طراحی بر مبنای عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مرکب سری

۱۲- پرننگ شدن مُد لغزش در سیستم ترکیبی در اثر افزایش شتاب بیشینه

۱۳- تبدیل مُد دوران به تلفیقی از مُد شکم دادگی و دوران ضمن افزایش شتاب بیشینه

لذا، با استفاده از نمودارهای ارائه شده می‌توان بر اساس ساختمان و منطقه لرزه‌ای قرارگیری سیستم مرکب، ضمن انتخاب پارامتر CAV زلزله طرح و سطوح عملکرد مورد انتظار از سیستم، مقدار ضریب شبه استاتیک معادل را تعیین نمود.

## ۵. نتیجه‌گیری

با تکیه بر نتایج به دست آمده از مطالعات عددی انجام شده روی سیستم مرکب سری، می‌توان به موارد زیر در قالب یک نتیجه‌گیری جامع اشاره نمود:

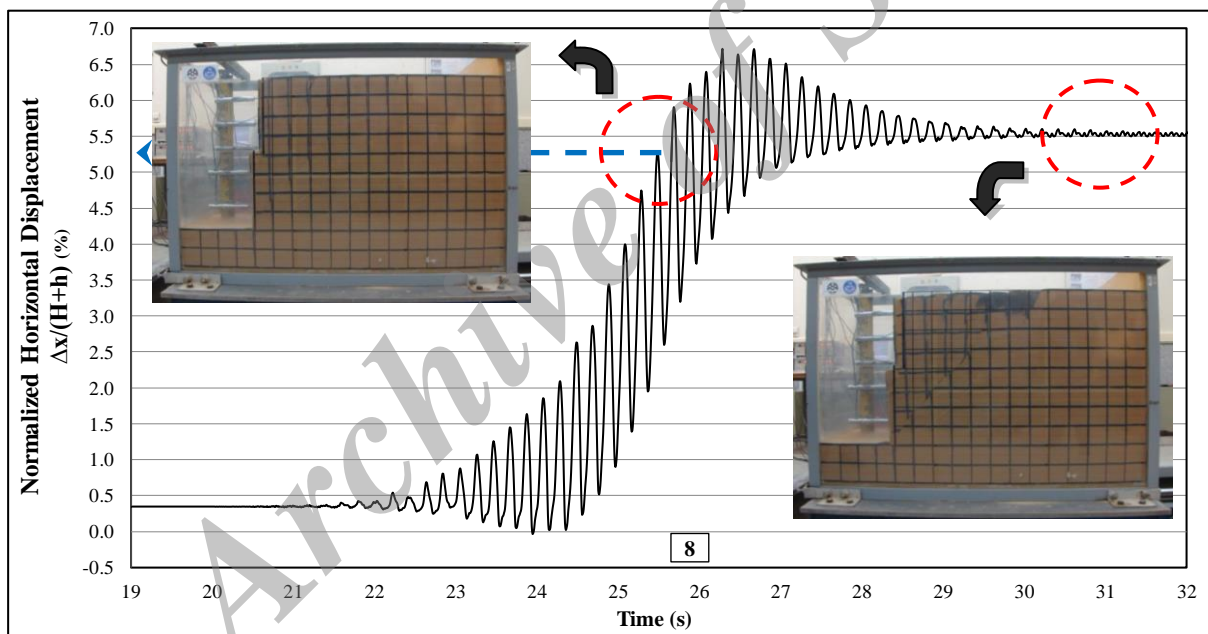
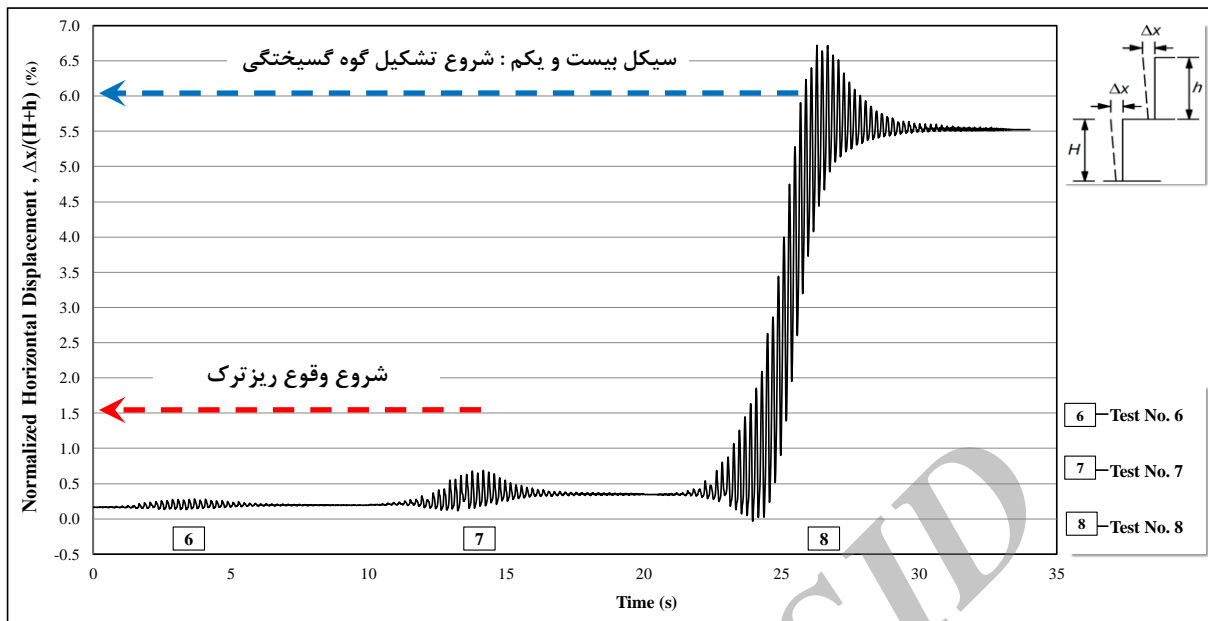
۱- کاهش تغییر شکل‌های افقی سیستم مرکب ناشی از افزایش طول المان‌های تسلیح در یک بار هارمونیک مشخص و وقوع بیشترین تأثیرپذیری در ناحیه خاک مسلح

۲- افزایش میزان تأثیرپذیری تغییر مکان‌های افقی سیستم از طول المان‌های تسلیح با افزایش تراز ارتفاعی در سیستم

۳- پرننگ‌تر شدن تغییر شکل‌های الاستیک ناشی از افزایش طول المان‌های تسلیح

۴- تأثیرپذیری بیشتر تغییر شکل‌های پلاستیک از کاهش طول المان‌های تسلیح نسبت به تغییر شکل‌های الاستیک در حضور شرایط گسیختگی

۵- کم‌رنگ شدن میزان تأثیرگذاری افزایش طول المان‌های تسلیح بر تغییر مکان‌های به وجود آمده در سیستم به واسطه عبور از طول المان 0.8H



شکل ۱۶. مرزهای عملکرد سیستم مرکب بر اساس آزمایش‌های میز لرزه (یزداندوست، ۱۳۹۲)

نتیجه کارآمد بودن پارامتر CAV به عنوان پارامتر شاخص در انتخاب زلزله طرح در روش طراحی بر مبنای عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مرکب سری  
 ۱۷- افزایش میزان تأثیرپذیری تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم از پارامتر CAV در اثر افزایش ارتفاع سازه

۱۴- تأثیرپذیری بیشتر ناحیه خاک مسلح از تغییرات شتاب بیشینه نسبت به ناحیه میخکوبی شده  
 ۱۵- تأثیر مستقیم پارامتر CAV بر تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم مرکب و وقوع بیشترین تأثیرپذیری در ناحیه خاک مسلح  
 ۱۶- وجود همبستگی مناسب بین پارامتر CAV و تغییر شکل‌های ماندگار به وجود آمده در سیستم مرکب و در

- ۱۸- پیرنگ شدن مُد لغزش در سیستم ترکیبی در اثر افزایش پارامتر CAV  
برای ساختگاه‌ها و مناطق لرزه‌ای طبقه‌بندی شده بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و شرایط ژئوتکنیک ایران
- ۱۹- معرفی ضرایب شبه استاتیک وابسته به سطوح عملکرد سیستم مرکب سری و پارامتر CAV زلزله طرح

## ۶. مراجع

- استاندارد ۲۸۰۰ ایران. ۱۳۸۴. "آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله". ویرایش سوم. کرامر، ا. ۱۳۷۸. "مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای". ترجمه: مجدالدین میر محمد حسینی و بابک عارف پور، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران.
- یزداندوست، م. ۱۳۹۲. "مطالعه عددی و آزمایشگاهی برای تعیین عملکرد لرزه‌ای خاک و زمین مسلح شده با المان‌های فولادی". رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- AASHTO. 1998 "Interims: Standard Specifications for Highway Bridges". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.
- Bathurst, R. J. and Hatami, K. 1998. "Influence of Reinforcement Stiffness, Length and Base Condition on Seismic Response of Geosynthetic Reinforced Soil Walls". Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, USA, pp. 613-616.
- Budek, A. 2004. "Research Proposal for TxDOT Project No. 0-5205: Design Procedure for MSE/Soil Nail Hybrid Retaining Wall Systems". Lubbock, Texas Tech. Univ., Dept. of Civil Eng.
- Chai, J. and Carter, J. P. 2009. "Deformation Analysis in Soft Ground Improvement". Springer.
- Daniel, A. and Thome, P. E. 2005. "Rehabilitation of an Existing Mechanically Stabilized Earth Wall using Soil Nails". DFI's 30<sup>th</sup> Annual Conference on Deep Foundations, Chicago, Illinois, September 22-24.
- Fan, C. C. and Hsiao, C. F. 2011. "Field performance of a hybrid reinforced earth embankment built adjacent to a slope with narrow fill space". J. Geoen. 6(1): 47-62.
- Federal Highway Administration . 2003. "Soil Nail Walls". Publication No. FHWA/OIF-03-017.
- FHWA. 2006. "Shored Mechanically Stabilized Earth (SMSE) Wall Systems Design Guidelines". Publication No. FHWA-CFL/TD-06-001, National Highway Institute.
- FLAC Manual. 2005. Ver. 5.0, Itasca, USA.
- Ishihara, K. and Asal, A. M. 1982. "Dynamic Behavior of Soils, Soil Amplification and Soil Structure Interaction". Final Report for Working Group D., UNDP/UNESCO project on earthquake risk reduction in Balkan region.
- Jafari, M. K., Shafiee, A. and Ramzkhah, A. 2002. "Dynamic properties of the fine grained soils in south of Tehran." J. Seismol. Earthq. Eng. 4: 25-35.
- Seed, H. B., Wong, T. R., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K. 1986. "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils". J. Geotech. Eng. 112(11): 1016-1032.
- Sharif, E. Y., Al Bis, A. A. and Harb, M. K. 2008. "An Application of Geophysical Techniques for Determining Dynamic Properties of the Ground in Dubailand Area, UAE". Arab Center for Engineering Studies.