

تعیین ضریب شبه استاتیکی دیوارهای خاک مسلح بر اساس عملکرد لرزه‌یی

علی کمک‌پناه (دانشیار)

رضا صادق‌زادگان* (دانشجوی کارشناس ارشد)

مجید یزداندوست (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۲۵-۳۱)
دربی ۲-۳۰، شماره ۱/۱

برتری دیوارهای خاک مسلح نسبت به سایر روش‌های پایدارسازی سبب گسترش روزافزون این‌گونه سازه‌ها شده است. صرف زمان زیاد و هزینه‌ی نسبتاً بالای انجام تحلیل‌های دینامیکی مبتنی بر تاریخچه‌ی زمانی سبب شده است تا روش تحلیل شبه استاتیکی علی‌رغم عدم دقت مناسب، از اهمیت و جایگاه خاصی برخوردار شود. عدم وابستگی این روش به پارامترهای مؤثر در عملکرد لرزه‌یی سازه و در نظر نگرفتن مشخصات بارگذاری دینامیکی، از جمله نقاط ضعف این روش به‌شمار می‌روند. این پژوهش با کمک مدل‌سازی عددی تفاضل محدود کوشیده است تا با در نظر گرفتن مشخصات بارگذاری، میزان تغییر مکان سازه‌ی خاک مسلح و مشخصات هندسی دیوار خاک مسلح، روش شبه استاتیکی را اصلاح کند و در نهایت ضریب شبه استاتیکی به‌منزله‌ی تابعی از سطح عملکرد لرزه‌یی و شتاب بیشینه معرفی شود. نتایج حاصله، نمایان‌گر دست‌یابی به روش‌های طراحی موجود در مقایسه با روش‌های مبتنی بر پایه‌ی تغییر مکان است.

واژگان کلیدی: دیوار خاک مسلح، طراحی بر مبنای تغییر مکان، ضریب شبه استاتیکی، عملکرد لرزه‌یی.

a-panah@modares.ac.ir
sadeghzadegan@live.com
mj.yzandandoust@modares.ac.ir

۱. مقدمه

صورت‌گرفته در این زمینه در سال ۱۹۷۳ برای مسلح‌کننده‌های فولادی صورت پذیرفت. همچنین تحقیقاتی در سال ۱۹۷۵، بر روی تعدادی دیوار خاک مسلح تحت اثر شتاب افقی انجام شد. شتاب دینامیکی باعث حاصل شدن سطح گسیختگی صاف‌تر، نیروی افقی بزرگ‌تر و توزیع غیرخطی نیروی حاصله از بار دینامیکی بر روی پوشش است.^[۱] اولین مدل مقیاس کامل در سال ۱۹۷۷ مورد بررسی قرار گرفت، که در آن برای شبیه‌سازی زلزله بر روی دیوار ۶ متری از انفجار استفاده شد. به دلیل طراحی دیوار براساس روش‌های محافظه‌کارانه‌ی ارائه شده برای حالت استاتیکی، دیوار رفتار مناسبی را در شرایط دینامیکی نشان داد. نیروهای دینامیکی بیشینه‌ی تسمه، شامل نیروی استاتیکی اولیه به اضافه‌ی نیروی دینامیکی حاصل از انفجار تولید می‌شوند و به طور کلی در تسمه‌های بلندتر، نیروهای دینامیکی بزرگ‌تری تولید می‌شوند. نیروی بیشینه‌ی دینامیکی اندازه‌گیری شده به طور قابل ملاحظه‌یی از نیروهای محاسباتی با روش طراحی لرزه‌یی ریچاردسون و لئی (۱۹۷۵) کمتر هستند که به علت تأثیر طول، آرایش و تراکم مسلح‌کننده‌ها در خاکریز است.^[۲] در سال ۱۹۹۹، آزمایش‌های سانتریفیوژ برای نمونه‌های دیوار ساخته شده که با شبکه‌هایی از فولاد گالوانیزه به طول‌هایی بین ۵/۵ تا ۱/۴ برابر ارتفاع دیوار مسلح و تحت شتابی معادل ۰/۸۵g قرار گرفته بود، انجام شد و بر مبنای نتایج آزمایش سانتریفیوژ مد گسیختگی به صورت دو خطی پیشنهاد شد (شکل ۲).^[۳]

کاساگرانده^۱ اولین ایده در مورد مسلح‌سازی خاک را پیشنهاد کرد، اما اولین فرم نوین استفاده از خاک مسلح در سازه‌های خاکی امروزی را هنری ویدال^۲ در دهه‌ی ۱۹۶۰ ارائه کرد. واژه‌ی خاک مسلح به تسلیح خاک با عناصر کششی نظیر میلگرد، تسمه‌ی فولادی و یا ژئوتکستایل^۳ اطلاق می‌شود. آثار سودمند مسلح‌کردن خاک در افزایش مقاومت کششی و مقاومت برشی خاک به علت اصطکاک موجود در سطح تماس خاک و مصالح مسلح‌کننده است. حائل‌های خاک مسلح علاوه بر باربری جانبی، توانایی باربری قائم را نیز دارند. لذا می‌توان عبور ترافیک از روی آن در کارهای راه‌سازی باعث پیشنهاد وسیع این دیوارها شده است. سهولت اجرا و شکل‌پذیری مناسب آنها بخصوص در مقایسه با حائل‌های بتنی از مزیت‌های دیگر سازه‌های نگهدارنده‌ی خاک محسوب می‌شود. مطابق شکل ۱، در این روش از سه المان اصلی خاک، مسلح‌کننده، و رویه استفاده شده است.^[۱]

افزایش انعطاف و شکل‌پذیری سیستم خاک مسلح نسبت به سایر حائل‌ها موجب شده است این سیستم عملکرد لرزه‌یی مناسبی را در گذشته از خود نشان دهد. توجه به این امر سبب شده است تا نیاز بیشتری به شناسایی پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد لرزه‌یی این سازه‌ها از سوی پژوهشگران احساس شود؛ اولین تحقیقات

* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۸/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱/۲۷، پذیرش ۱۳۹۱/۴/۱۸.

۲. انتخاب ضریب شبه استاتیکی به صورت تابعی از

عملکرد لرزه‌یی

اغلب روش‌های طراحی دیوارهای خاک مسلح بر پایه‌ی روش‌های حدی است و روش‌های مبتنی بر تغییر مکان، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان استفاده از روش‌های شبه استاتیکی به جهت سهولت و هزینه‌ی کمتر نسبت به تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی استفاده از روش‌های شبه استاتیکی، به دلیل لحاظ نکردن پارامترهای مهم بارگذاری، مد نظر قراردادن مشخصات هندسی دیوار، و عملکرد لرزه‌یی، غالباً دقت کمتری دارد و نتایج محافظه‌کارانه‌ی را به دست می‌دهند. تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی از این جهت که تمامی پارامترهای مذکور را در نظر می‌گیرند، دقت مناسبی دارند؛ ولی از سویی هزینه‌ی بالا و زمان طولانی سبب شده است تا استفاده از تحلیل‌های دینامیکی، محبوبیت کمتری داشته باشند. با توجه به این موارد، در این پژوهش کوشیده شده است تا با انجام تحلیل‌های دینامیکی مقادیر ضریب شبه استاتیکی براساس پارامترهایی همچون عملکرد لرزه‌یی دیوار و مشخصات هندسی تعیین شود.

$$k_h = f(\text{Seismic Performance}) \quad (2)$$

این در حالی است که در تمامی روش‌های متداول و توصیه‌شده در آیین‌نامه‌های معتبر، ضریب شبه استاتیکی فقط به‌منزله‌ی تابعی از شتاب بیشینه (a_{max}) تعریف شده است (رابطه‌ی ۳)، که این امر از صحت و واقعیت نتایج به‌دست‌آمده می‌کاهد.^[۸]

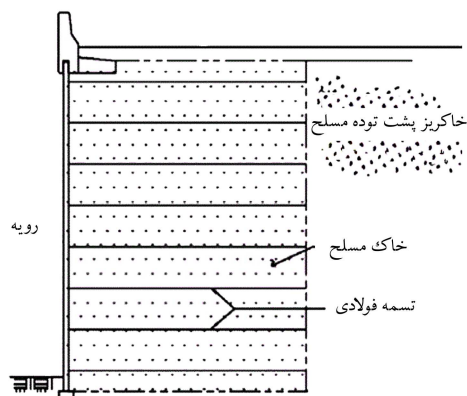
$$k_h = \left[1.45 - \frac{a_{max}}{g} \right] a_{max} \quad (3)$$

به منظور تعریف ضریب شبه استاتیکی به‌عنوان تابعی از پارامترهای مؤثر در عملکرد لرزه‌یی و با توجه به نقش مؤثر شرایط هندسی سازه و پارامترهای بارگذاری لرزه‌یی در رفتار لرزه‌یی سیستم خاک مسلح، ارتفاع سازه و طول تسمه از میان مشخصات هندسی سیستم (ارتفاع سازه، شیب سازه، طول و آرایش المان‌های تسلیح، ویژگی‌های رویه) و همچنین نوع بارگذاری به‌عنوان متغیرهای اصلی انتخاب شده است. برای انجام تحلیل‌ها از بار هارمونیک با دامنه‌ی متغیر استفاده شده است. در این راستا سعی شد ابتدا با انتخاب ۳۰ نگاشت که تعداد ۱۲ زوج آنها مربوط به زلزله‌های ایران است و مابقی، زمین‌لرزه‌های مهم آمریکا و ترکیه هستند؛ که از نظر ویژگی‌های زمین‌ساختی، شباهت‌های بسیاری با زمین‌لرزه‌های ایران دارند و سپس تعیین پاسخ سازه‌ی خاک مسلح به این نگاشت‌ها و پس از آن با برابر قراردادن عملکرد سیستم حاصل از بار هارمونیک با میانگین عملکرد حاصله از نگاشت‌ها، بار هارمونیکی متناظر با این ۳۰ نگاشت برای انجام آنالیزها انتخاب شود. در نهایت مقدار ضریب شبه استاتیکی به‌منزله‌ی تابعی از تغییر مکان بیشینه و عملکرد لرزه‌یی تعیین شد.

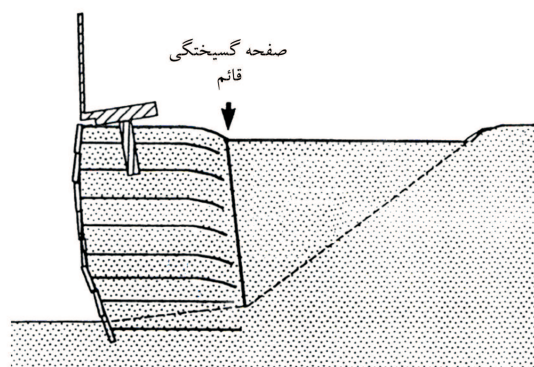
$$k_h = f(\text{Displacement}) \quad (4)$$

۳. مراحل انجام تحقیق

با توجه به اهداف تعریف شده، مراحل انجام این تحقیق به این شرح است:



شکل ۱. مقطع عرضی از یک سیستم خاک مسلح.



شکل ۲. سطوح شکست در آزمایش‌های سانتریفیوژ.

در مطالعاتی که در سال ۲۰۰۳ انجام شد، این نتیجه به‌دست آمد که سختی مسلح‌کننده‌ها تأثیر کمی در پاسخ دیوار بر بارهای استاتیکی دارد؛ ولی توزیع و مقدار نیروی پشت دیوار در هنگام زلزله به شدت تحت تأثیر سختی مسلح‌کننده‌هاست.^[۵]

محققان در سال ۲۰۰۶ در آزمایش‌های میز لرزه سختی، طول و فاصله‌ی قائم مسلح‌کننده را در پاسخ دیوار به نیروهای دینامیکی بررسی کردند و نتایج آنها نشان داد که با افزایش سختی مسلح‌کننده‌ها، مقدار جابجایی دیوار به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین نیروهای وارد به دیوار و مسلح‌کننده‌ها به شدت تحت تأثیر آرایش لایه‌های مسلح‌کننده، نوع مسلح‌کننده و فاصله‌ی لایه‌های آنها از یکدیگر هستند.^[۶]

آزمایش‌های میز لرزان بر روی ۳ مدل نیز در سال ۱۹۷۴ انجام شد. در این آزمایش‌ها مشاهده شد که دیوارهای صلب و انعطاف‌پذیر در هنگام زلزله رفتار مشابهی ندارند و توزیع رانش فعال دینامیکی در پشت دیوار حائل کاملاً غیرخطی است و نقطه‌ی اثر رانش در دیوار صلب پایین‌تر بوده است، به طوری که نقطه‌ی اثر رانش فعال در دیوارهای انعطاف‌پذیر بین ۰٫۳۶۴H و ۰٫۴۳۳H گزارش شد. براساس این مطالعه پیشنهاد شد که در روش شبه استاتیکی، ضریب شتاب افقی براساس رابطه‌ی ۱ اصلاح شود:

$$k_h = \frac{2\pi f}{g} v_{max} \quad (1)$$

که در این رابطه، v_{max} سرعت بیشینه، و f بسامد بارگذاری است.^[۷]

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک مسلح.

پارامتر	پی	خاک مسلح	واحد
وزن مخصوص	۲۰۰۰	۲۰۵۰	(kg/m ³)
مدول برشی	$\sigma_m^{\text{ش}}/6$	$3080 \frac{(2.17-e)^2}{1+e}$	(KPa)
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۳	—
چسبندگی	۰/۱	۰	(kg/cm ²)
زاویه اصطکاک داخلی	۳۲	۳۷	درجه

جدول ۲. مشخصات رویه و تسمه.

پارامتر	تسمه	پوسته	واحد
وزن مخصوص	۷۸۰۰	۲۵۰۰	(kg/m ³)
مدول کشسانی	۲۰۰	۲۰	(GPa)
ابعاد	۶ × ۰/۵	۱۵ × ۱۵ × ۱۵	(cm)
تنش گسیختگی	۲۳۵	۲۱	(MPa)

خاک و همچنین مقدار میرایی با کرنش تغییر می‌کند. با توجه به ماهیت خاک که درشت‌دانه فرض شده است و محدوده‌ی دانه‌بندی توصیه‌شده‌ی مصالح، مقادیر مدول برشی بیشینه (در کرنش‌های پایین) و همچنین مقادیر میرایی هیستریسیس تعیین می‌شود.^[۱۲]

مطابق جدول ۱، مقدار مدول برشی تابعی از تنش محصورکننده است که با عمق تغییر می‌کند. جهت مدل‌سازی از قابلیت برنامه‌نویسی به زبان FISH در نرم‌افزار FLAC استفاده شده است، تا مقادیر مدول برشی را برای هر المان با توجه به تنش محصورکننده اصلاح کند.

به منظور جلوگیری از افزایش زمان محاسبات به علت استفاده از المان‌های حد فاصل^۶، اعمال اندرکنش توده‌ی خاک با رویه به واسطه‌ی استفاده از المان‌های پیوسته با مشخصات معادل صورت گرفته است.^[۱۳]

۳.۱.۳. المان‌های تسلیم و رویه

فاصله‌ی قائم و افقی تسمه، طول تسمه و ابعاد آن تأثیر به‌سزایی در رفتار دیوارهای خاک مسلح ایفا می‌کنند. در این پژوهش، با توجه به استفاده از المان‌های پوسته به‌صورت صلیبی‌شکل، ابعاد آن‌ها و روش‌های اجرا، فواصل تسمه‌ها در راستای قائم و افق به‌صورت مساوی برابر با ۷۵ سانتی‌متر انتخاب شد. بدین‌گونه که ۲ تسمه به‌صورت افقی و عمودی با فواصل مساوی بر روی هر پوسته‌ی ۱/۵ متری نصب و تسمه‌ها به ابعاد رایج ۶۰ × ۵ میلی‌متر جهت مدل‌سازی انتخاب شدند. سایر مشخصات تسمه‌های فولادی در جدول ۲ نشان داده شده است.

از جمله مهم‌ترین پارامتر در مدل‌سازی تسمه‌ها، اندرکنش میان تسمه و خاک است. به منظور مدل‌سازی تسمه‌های فولادی از المان STRIP استفاده شد، که می‌تواند تسلیم درکشش و حد پارگی فولاد را به خوبی مدل کند. یکی از مزیت‌های این المان مدل‌سازی غیرخطی اندرکنش تسمه و خاک است.

۴.۱.۳. شرایط مرزی و تکیه‌گاهی

شرایط مرزی در تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی اهمیت خاصی دارد. در حالت استاتیکی از تکیه‌گاه‌های غلتکی برای مدل‌کردن خاک اطراف دیوار استفاده شده است. به این معنی که در تکیه‌گاه‌های جانبی دیوار، حرکت خاک در جهت افقی بسته شده است و در جهت قائم بسته و در راستای افق رها شده است. این روش در تحلیل، سبب نزدیک شدن مدل‌سازی به واقعیت خواهد شد. در تحلیل‌های دینامیکی

۱.۳. انتخاب مدل‌های عددی مورد بررسی

۱.۱.۳. مشخصات هندسی مدل عددی

جهت انجام تحلیل‌ها از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC^۴ استفاده شد. استفاده از مدل‌های رفتاری متنوع خاک، توانمندی در مدل‌سازی اندرکنش مصالح، در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح، مدل‌سازی مناسب رفتار مصالح حین زلزله و همچنین قابلیت کدنویسی توسط کاربر از جمله مزیت‌های این نرم‌افزار است.^[۹]

از آنجا که ارتفاع سازه U نقش مهمی در رفتار لرزه‌ی سیستم خاک مسلح شده ایفا می‌کند و در این تحقیق نیز ارتفاع سازه به‌عنوان متغیر اصلی انتخاب شده است؛ لذا، بررسی اثر ارتفاع سازه در ضریب شبه استاتیکی با انتخاب سه رده‌ی ارتفاعی ۴/۵، ۶ و ۷/۵ متری صورت گرفته است.

در راستای حذف تأثیر مرزهای تعریف‌شده در نتایج تحلیل براساس تحلیل‌های حساسیت انجام‌شده، طول توده‌ی خاک پشت دیوار به اندازه‌ی ۵ برابر ارتفاع دیوار و طول توده‌ی خاک جلوی دیوار برابر با ۱/۵ برابر ارتفاع آن در هر یک از مدل‌ها انتخاب شده است. همچنین با توجه به تأثیر چشمگیر ابعاد پی در تغییر شکل‌های به‌وجودآمده در سیستم، در راستای اعمال این تأثیر و حذف اثر ساختگاه، براساس تحلیل‌های حساسیت انجام‌شده از یک پی با ارتفاعی برابر با ارتفاع سازه استفاده شده است.^[۱۱]

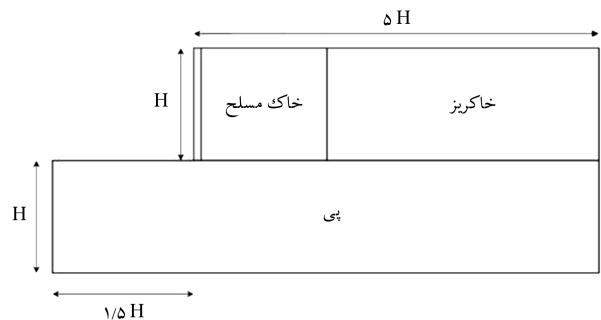
نمای شماتیک سیستم خاک مسلح با ابعاد مذکور در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین به جهت عبور موج از مدل و جلوگیری از فیلتر شدن امواج با بسامدهای بالا، ابعاد مش‌ها تقریباً تا طول موج بزرگ‌ترین بسامد موج ورودی در نظر گرفته شده است.

۲.۱.۳. پارامترهای ژئوتکنیکی

در این تحقیق کوشیده شده است تا با در نظر گرفتن ۳ نوع پروفیل خاک که هر یک معرف خاک نوع ۱ تا ۳ آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران است، اثر ساختگاه نیز ارزیابی شود که در اینجا مختصراً به ساختگاه نوع ۲ پرداخته می‌شود. با در نظر گرفتن شهر تهران به‌منزله‌ی محدوده‌ی مورد بررسی و ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی حاصله از ۳ گمانه‌ی معرف خاک نوع ۲ در مناطق مختلف، پارامترهای ژئوتکنیکی جهت مدل‌سازی پی و پشت خاک مسلح انتخاب شدند.

مصالح خاکی به کار رفته در دیوارهای خاک مسلح غالباً مصالح دانه‌ی و درشت‌دانه‌ی بدون چسبندگی و یا با چسبندگی کم است که باید دارای تراکم بالای ۹۵٪ باشند.^[۸] پارامترهای ژئوتکنیکی فرض‌شده در جدول ۱ نمایش داده شده است.

برای انجام تحلیل‌های دینامیکی از روش خطی معادل^۵ استفاده شده است. در این روش مدل رفتاری ماده به صورت خطی فرض شده است و میزان سختی

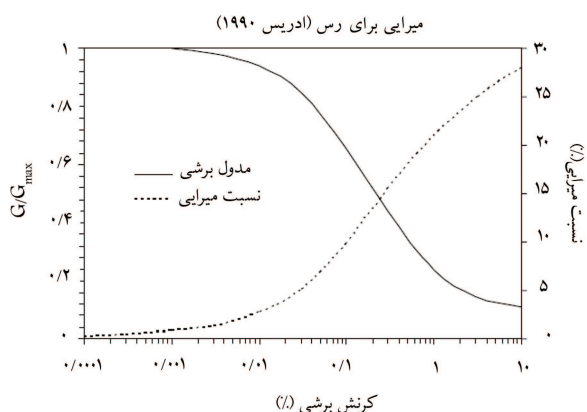


شکل ۳. ابعاد مدل‌های ساخته‌شده.

دینامیکی دیوار خاک مسلح به کار برد. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از پاسخ سازی خاک مسلح به نگاشت های فوق و مقایسه ی آن با پاسخ سازی خاک مسلح به بار هارمونیک، یک و یا چند بار هارمونیک که نماینده ی این ۳۰ نگاشت است، به دست آید.

آنالیزهای تکمیلی جهت به دست آوردن ضریب شتاب افقی با استفاده از این بارهای هارمونیک صورت می گیرد. بسامد بار هارمونیک منتخب با توجه به میانگین بسامد غالب نگاشت های اعمالی مشخص می شود.

از میان شتاب نگاشت های انتخاب شده، تعداد ۱۲ نگاشت به زمین لرزه های ایران تعلق دارند که شتاب نگاشت هایی از زمین لرزه های ونديک (۱۹۷۶)، ناغان (۱۹۷۷)، طبس (۱۹۷۸)، چنگوره (۲۰۰۲)، بم (۲۰۰۳) و بلده (فیروزآباد کجور، ۲۰۰۴) را در بر می گیرند. شتاب نگاشت های متعلق به زمین لرزه ی ۱۹۹۹ دوزجه ی ترکیه نیز به لحاظ ویژگی های زمین ساختی، شباهت های بسیاری با زمین لرزه های ایران دارند. مابقی شتاب نگاشت های انتخاب شده به زمین لرزه های مهم آمریکا مربوط هستند که حوادثی چون زلزله های معروف سان فرناندو (۱۹۷۱) و نورث ریج (۱۹۹۴) را در بردارند. شکل ۵، طیف پاسخ سازی یک درجه آزادی با میرایی ۵٪ را برای زمین لرزه ها بر روی سطح پروفیل خاک نمایش می دهد. با میانگین گیری می توان محدوده ی غالب بسامد را تعیین کرد، که در شکل ۶ نمایش داده شده است. بار هارمونیک انتخابی باید تا حد زیادی شبیه واقعیت باشد، به طوری که



شکل ۴. منحنی تغییرات مدول و میرایی.

با توجه به امکان بازتاب امواج به داخل مدل و کاهش شدید دقت نتایج، مرزهای استاتیکی جای خود را به مرزهای آرام می دهند.

۵.۱.۳. میرایی

همان گونه که بیان شد میرایی به کار گرفته شده تابعی از سطح کرنش است. در نرم افزار FLAC به منظور ساده سازی با استفاده از الگوهای موجود و با توجه به نوع خاک فرض شده، منحنی میرایی و مدول برشی مربوطه به مدل اعمال می شود. شکل ۴ این مطلب را بیان می کند.

۲.۳. تحلیل های استاتیکی و دینامیکی

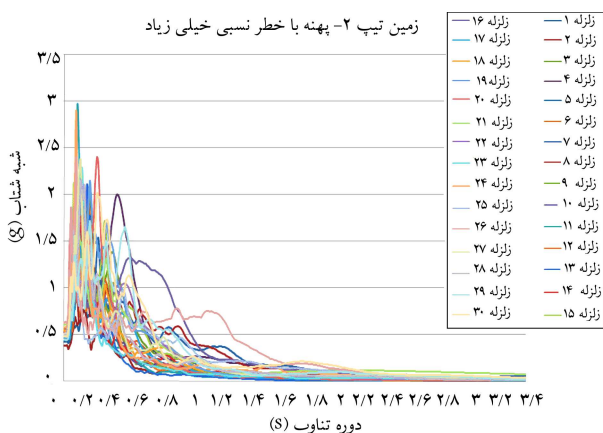
۱.۲.۳. مراحل ساخت مدل مطابق با روش اجرای سیستم خاک مسلح

FLAC نرم افزاری است که قابلیت مدل سازی مرحله به مرحله را دارد، بدین معنی که قادر است همان گونه که در اجرای دیوارهای خاک مسلح مرحله به مرحله عملیات خاکریزی انجام می گیرد، مدل سازی نیز همان گونه انجام شود. اولین کار به تعادل رسیدن قسمت زیر دیوار یا همان پی است. در مرحله ی بعدی، اولین لایه ی بلوک ها چیده، تسمه ها نصب و سپس خاکریزی انجام می شود. پس از آن، مرحله ی دوم تحلیل استاتیکی شروع می شود و این مراحل تا اتمام روند ساخت و خاکریزی ادامه پیدا می کند. در این مرحله، سیستم فقط تحت بارهای ثقلی و یا بار سربار تحت تحلیل قرار می گیرد.

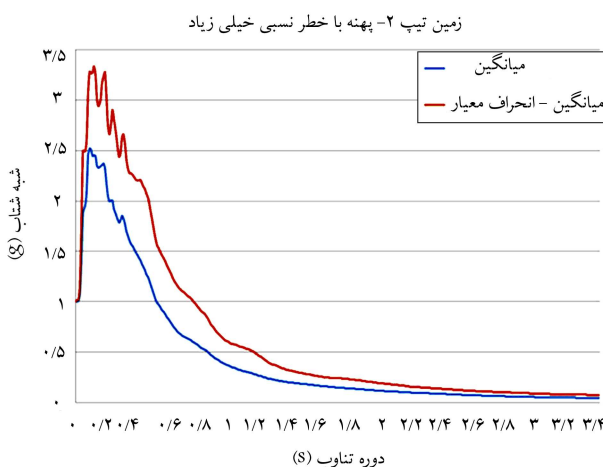
۲.۲.۳. بارگذاری دینامیکی

در این تحقیق سعی شده است که از نوع بارگذاری زلزله ی اصلاح شده و بار هارمونیک با دامنه ی متفاوت استفاده شود. در نظر گرفتن بار هارمونیک معادل به جهت سهولت انجام تحلیل های دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا با انتخاب ۳۰ نگاشت سعی شد که پاسخ آبرفت بر روی سطح زمین، برای خاک نوع ۲ جهت انجام تحلیل ها به دست آید. روش کار چنین است که با انتخاب تهران به عنوان یک منطقه با خطر پذیری لرزه یی خیلی زیاد و در نظر گرفتن چندین پروفیل خاک در ایستگاه های مختلف که نماینده ی تیپ خاک نوع ۲ است، نگاشت های منتخب پس از همپایه شدن به شتاب سنگ بستر با نرم افزار Deep Soil مورد تحلیل قرار گرفته است و نگاشت های خروجی (روی سطح زمین) به دست می آید. این کار برای مناطق با خطر پذیری زیاد و متوسط نیز صورت می گیرد. بدین ترتیب می توان میانگین شتاب بیشینه و همچنین میانگین بسامد غالب نگاشت ها را بر روی سطح زمین، برای هر نوع خاک به دست آورد.

نگاشت های به دست آمده بر روی زمین را می توان جهت انجام تحلیل های



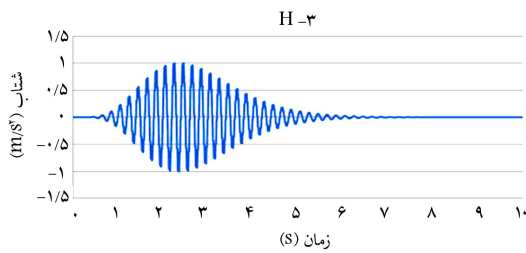
شکل ۵. طیف پاسخ سازی یک درجه آزادی برای ۳۰ نگاشت.



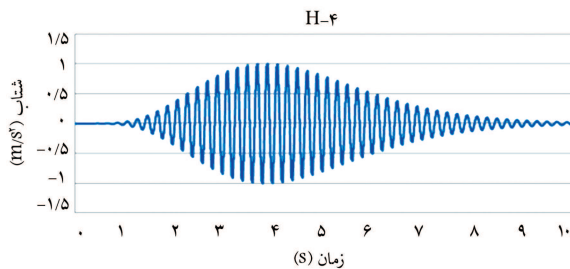
شکل ۶. میانگین طیف پاسخ و انحراف از معیار برای ۳۰ نگاشت.

جدول ۳. مشخصات بارهای هارمونیک منتخب.

نوع خاک	بار هارمونیک	α	β	ζ	f
۲	H-۳	۵	۵٫۷۵	۱۱٫۸	۵
	H-۴	۳٫۱	۰٫۰۲	۱۱٫۸	



شکل ۸. بار هارمونیک ۳.



شکل ۹. بار هارمونیک ۴.

جدول ۴. مقادیر بیشینه‌ی شتاب به دست آمده در پهنه‌بندی‌های مختلف.

خطر پذیری	خیلی زیاد	زیاد	متوسط
سطح شتاب بیشینه (g)	۰٫۵	۰٫۴۴	۰٫۳۱

شکل‌های ۸ و ۹ نیز شکل بارهای هارمونیک را که به شتاب ۱ متر بر مجذور ثانیه مقیاس شده است، نمایش می‌دهد.

۳.۲.۳. تحلیل دینامیکی

مدل ساخته شده پس از صحت‌سنجی با نتایج حاصل از آزمایش‌های ریچاردسون و لی (۱۹۷۶) به منظور تحلیل‌های دینامیکی به کار گرفته شد. در روند تحلیل دینامیکی تأثیر نوع ساختگاه، طول مسلح‌کننده و شتاب افقی زلزله در جابجایی جانبی دیوار بررسی شده است. پس از به اتمام رسیدن تحلیل استاتیکی و به تعادل رسیدن سیستم خاک مسلح، با ایجاد شتابی در تراز پی، سیستم تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفت. در این پژوهش، شتاب زلزله با توجه به تحلیل‌های انجام شده بر روی پاسخ لرزه‌پی آبرفت و در نظر گرفتن میزان بزرگ‌نمایی برای ساختگاه‌های مختلف تعیین شده است. بدین منظور ۳ سطح شتاب که هر یک معرف مناطق با خطرپذیری خیلی زیاد، زیاد و متوسط مد نظر قرار گرفت (جدول ۴).

۴. نتایج و بحث

۴.۱. تغییر مکان‌ها

برای نمونه، تغییرمکان‌های رویه برای یک سازه‌ی ۶ متری در برابر ۲ بار هارمونیک برای طول تسمه‌های مختلف در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. به طور متوسط تغییرمکان‌های به دست آمده از بارگذاری H-۴ به میزان ۷۵٪ بیشتر از H-۳ است. این میزان در سطوح شتاب بالا مقدار بیشتر و در شتاب‌های پایین مقدار کمتری دارد.

به تدریج بر دامنه‌ی آن افزوده شود و دوباره کاهش یابد تا بتواند مدل مناسبی از شتاب نگاشت‌هایی که در حین زلزله تولید می‌شود، باشد. این بار هارمونیک از رابطه‌ی ۵ تبعیت می‌کند. [۱۱]

$$a = \sqrt{\beta \cdot e^{-\alpha t} \cdot t \zeta} \cdot \sin(2\pi f t) \quad (5)$$

که در آن f بسامد بارگذاری است و ζ ، α ، β ضرایبی هستند که شکل بارگذاری و تعداد سیکل‌ها را مشخص می‌کنند.

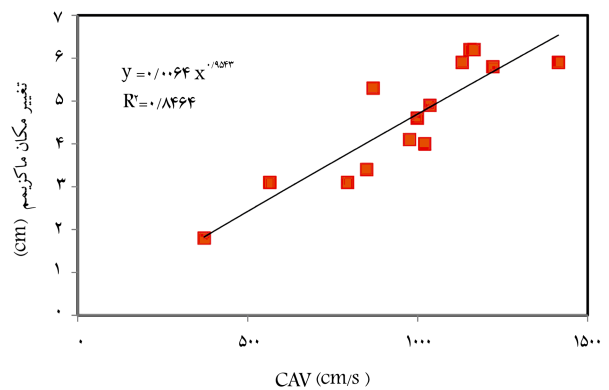
با توجه به تحلیل‌های انجام شده، مقدار بسامد بار هارمونیک برابر با ۵ هرتز در نظر گرفته می‌شود. جهت به دست آوردن مقادیر ζ ، β و α که در واقع تعداد سیکل‌های بار هارمونیک را مشخص می‌کند، می‌توان به این صورت عمل کرد که در ابتدا پاسخ سازه‌ی خاکی را براساس نگاشت‌های حاصله به دست آورد و سپس با مقایسه با پاسخ سازه‌ی خاکی به بارهای هارمونیک با مقادیر مختلف α ، ζ و β مقادیر مناسب پارامترهای مذکور را به دست آورد.

با توجه به این‌که ماهیت هر نگاشت از نقطه‌نظر محتوای بسامدی، بزرگ، زمان مؤثر و... متفاوت است، طبیعتاً تغییرمکان‌های بیشینه‌ی ایجاد شده در سازه‌ی خاک مسلح نیز یکسان نیست.

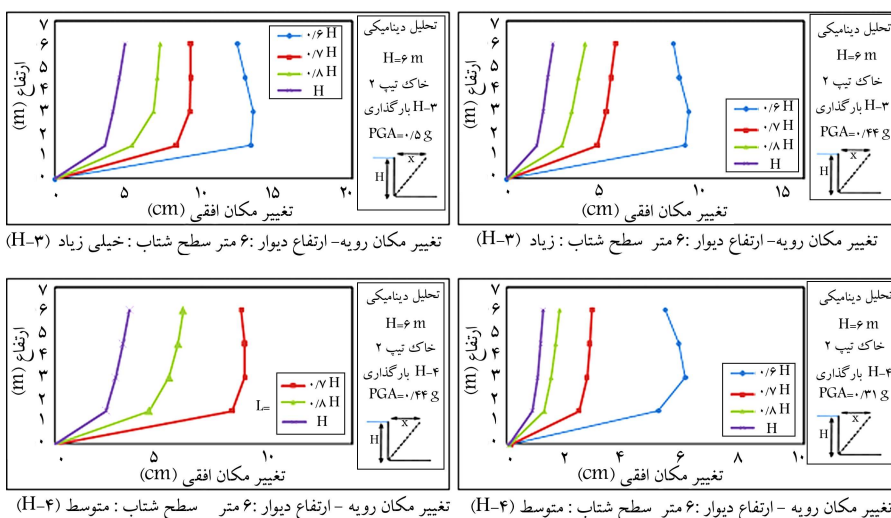
نتایج حاصل از تغییرمکان بیشینه‌ی سازه در برابر پارامتر CAV^۸ برای ۱۵ نگاشت در شکل ۷ نمایش داده شده است. پارامتر سرعت مطلق تجمعی (CAV) غالباً رابطه‌ی مستقیمی با بزرگ‌گای دارد و به منظور برآورد میزان خسارت حاصله از زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$CAV = \int_0^t |a(t)| dt \quad (6)$$

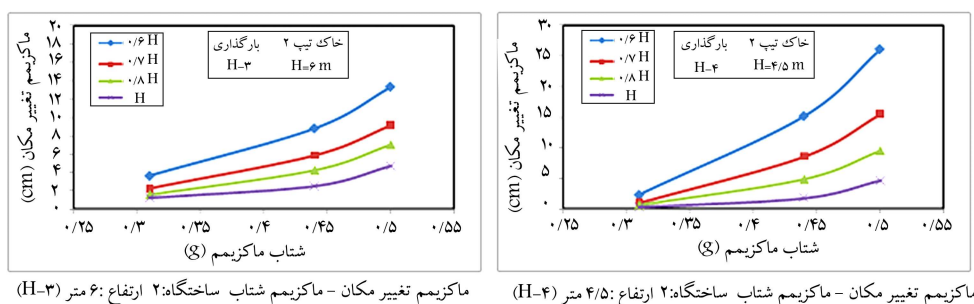
همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، بیشینه‌ی تغییرمکان ماندگار ایجاد شده در خاک مسلح با پارامتر سرعت مطلق تجمعی رابطه‌ی مناسبی دارد. از این رو زمین‌لرزه‌ها برای هر ساختگاه براساس CAV به دو دسته تقسیم می‌شوند. با تقسیم نگاشت‌ها به دو گروه میزان تغییرات و پراکندگی تغییرمکان سازه نیز کمتر می‌شود. بر این اساس با در نظر گرفتن میانگین تغییرمکان‌ها در هر گروه می‌توان با سعی و خطا بار هارمونیکی به دست آورد، که تغییرمکان متناظر با میانگین هر گروه را ایجاد کند. بدین صورت ۲ بار هارمونیک متناظر با ۳۰ نگاشت انتخاب می‌شود که بار هارمونیک ۳ متناظر با CAV های کمتر و زمین‌لرزه‌ها با بزرگ‌گای کمتر است و بار هارمونیک ۴ متناظر با CAV های بزرگ‌تر و زمین‌لرزه‌ها با بزرگ‌گای بیشتر است. جدول ۳ مشخصات پارامترهای به دست آمده برای بار هارمونیک را نمایش می‌دهد.



شکل ۷. تغییرات تغییرمکان بیشینه در برابر CAV.



شکل ۱۰. عملکرد لرزه‌ی دیوار خاک مسلح در قالب تغییر مکان‌های افقی رویه.



شکل ۱۱. روند تغییرات تغییر مکان سازه‌های خاک مسلح در برابر شتاب بیشینه.

کلی خاک مسلح است که خود تابعی از تراکم خاک، میزان سختی مسلح‌کننده‌ها و فاصله‌ی قائم مسلح‌کننده‌ها از یکدیگر است. پارامتر مهم دیگری که مد تغییر مکان را مشخص می‌کند نوع و سختی پوشش، ارتفاع پوشش و چگونگی اتصال پوسته‌ها به یکدیگر است. هر آنچه مقدار سختی خاک مسلح کمتر و فاصله‌ی قائم مسلح‌کننده‌ها بیشتر باشد، مد تغییر مکان‌ها به سمت شکم‌دادگی میل می‌کند. همان‌گونه که مشخص است، با سخت‌تر شدن خاک مسلح مد تغییر مکان به سمت واژگونی نزدیک می‌شود. در سازه‌های خاک مسلح مورد مطالعه با توجه به اینکه نسبت ابعاد پوسته‌ها به ارتفاع سازه نسبتاً زیاد است، لذا مد شکم‌دادگی نامحسوس است. در اغلب سازه‌هایی که مد شکم‌دادگی حاکم است، تغییر مکان بیشینه مربوط به پوسته‌ی اول و دوم از پایین است. نکته‌ی دیگری که مشهود است اینکه با افزایش ارتفاع سازه، طول مسلح‌کننده نیز، از این بابت که تابعی از ارتفاع فرض شده است، افزایش می‌یابد.

افزایش ارتفاع از طرفی باعث افزایش تغییر مکان‌های حاصله است و از طرف دیگر طول تسمه نیز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که مشخص است، مقادیر تغییر مکان نرمالیزه شده با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابند. این نکته بیان‌گر آن است که جهت حصول رفتار یکسان، با افزایش ارتفاع می‌توان تغییر طول تسمه را به صورت غیرخطی افزایش داد؛ یعنی در نظر گرفتن طول تسمه به‌عنوان تابعی خطی از ارتفاع در سازه‌های مسلح شده با تسمه‌ی فولادی که دارای سطح گسیختگی دو خطی هستند، برای تخمین رفتار سازه مناسب نیست.

با افزایش سطح شتاب از میزان خطرپذیری متوسط به خیلی زیاد، مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان‌ها به صورت تصاعدی زیاد می‌شود که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نکته در مورد یک سطح شتاب مشخص و با کاهش طول تسمه نیز مشخص است. به این صورت که بیشینه‌ی تغییر مکان‌های ماندگار در یک سطح شتاب مشخص با کاهش طول تسمه به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد.

از نظر تئوری، زمانی تغییر مکان‌های ماندگار در سازه ایجاد می‌شود که مقدار شتاب از K_y بیشتر شود. در مورد تحلیل‌های عددی نیز این مورد صدق می‌کند، با این تفاوت که مقدار دقیقی برای K_y در تحلیل‌های عددی نمی‌توان تصور کرد. هنگامی که سازه تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرد، اگر سطح شتاب اعمالی از میزان K_y تئوری کمتر باشد؛ مقداری تغییر مکان ماندگار در سازه شکل می‌گیرد، که اندکی با تئوری تفاوت می‌کند. ولی غالب تغییر مکان‌های ماندگار ایجاد شده مربوط به حالتی است که سطح شتاب از K_y بیشتر است. با افزایش طول تسمه، میزان K_y نیز افزایش می‌یابد و این نکته سبب می‌شود که تغییر مکان‌های ماندگار در سازه، در حالتی که تفاوت سطح شتاب اعمالی و شتاب بحرانی سازه زیاد است، به صورت تصاعدی زیاد شود.

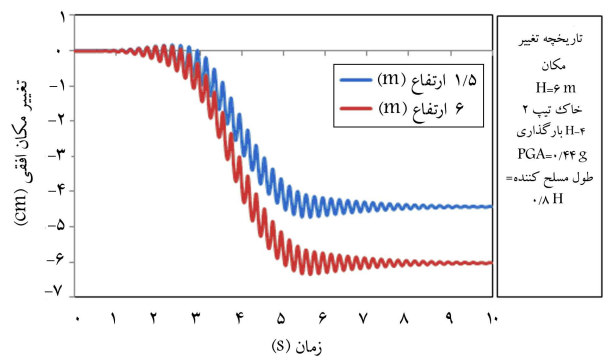
از جمله نکات دیگری که در نمودارهای مذکور قابل برداشت است، تفاوت محسوس در مد تغییر مکان‌های پوسته‌ی دیوار است. بحث در مورد مد تغییر مکان‌های دیوارهای خاک مسلح با توجه به گستردگی مسلح‌کننده‌ها و سختی و نوع پوشش‌های متفاوت نسبتاً پیچیده است. مد تغییر شکل در سازه‌های خاک مسلح تابعی از سختی

در نظر گرفتن ضرایب اطمینان، متناظر با یک ضریب شتاب افقی هستند. به منظور به دست آوردن ضریب شتاب افقی متناظر با هر سازه‌ی خاک مسلح براساس روش طراحی آیین‌نامه‌های FHWA و AASHTO، نرم‌افزاری در محیط EXCEL تهیه شده است؛ که با توجه به پارامترهای خاک، مسلح فرض شده است و در نظر گرفتن ضرایب اطمینان، مقدار ضریب شتاب افقی که متناظر با طول هر تسمه است را مشخص می‌کند. با مشخص شدن ضریب شتاب افقی می‌توان با تحلیل‌های دینامیکی انجام شده مقدار ضریب شتاب افقی را به عنوان تابعی از ارتفاع، نوع بارگذاری شتاب پیشینه‌ی اعمالی و تغییر مکان‌های شکل گرفته در سازه بیان کرد (شکل ۱۳).

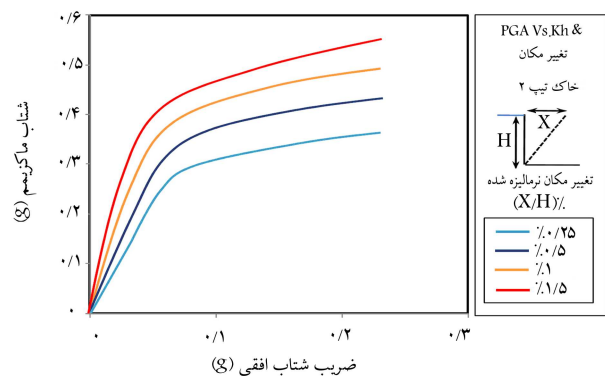
پس از مقایسه‌ی نتایج حاصله با مقادیر به دست آمده از آیین‌نامه‌های طراحی همچون AASHTO، همانند آنچه که در رابطه‌ی ۳ نمایش داده شده است، نتایج حاصله حاکی از دست بالا بودن فرضیات آیین‌نامه‌های موجود در طراحی لرزه‌یی است که علت این امر مد نظر قرار ندادن تغییر مکان‌های مجاز پس از وقوع زلزله است. طراحی براساس مفهوم تغییر مکان مجاز می‌تواند طرح‌های مناسب‌تر و اقتصادی‌تر را نتیجه دهد.

۵. نتیجه‌گیری

براساس تحقیقات انجام شده بر روی رفتار لرزه‌یی دیوارهای خاک مسلح می‌توان دریافت که این‌گونه از سازه‌ها به جهت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری مناسب دارای رفتار مناسبی است و عملکرد خوبی در زلزله‌های گذشته داشته‌اند. غالب روش‌های طراحی موجود براساس روابط تعادل حدی است و براساس چگونگی گسترش نیروها در مسلح‌کننده‌ها و لحاظ کردن ضرایب اطمینان در برابر ناپایداری‌های داخلی و خارجی است که به دلیل فرضیات ساده‌کننده غالباً روش‌های دست بالا و غیراقتصادی هستند. در این تحقیق کوشیده شده است با استفاده از مفهوم تغییر مکان مجاز ایجاد شده، روش‌های موجود اصلاح شود. مفهوم تغییر مکان‌های مجاز براساس عملکرد سازه در مناطق مختلف و غالباً براساس مشاهدات عینی و میزان خسارت وارده به سازه تعیین می‌شود که نیازمند بررسی‌های بیشتر در مورد سازه‌های خاک مسلح است. نتایج حاصله نمایانگر افزایش تغییر مکان‌ها با افزایش شتاب پیشینه‌ی اعمالی و کاهش طول مسلح‌کننده‌هاست. مد تغییر مکان‌های ایجاد شده نیز با کاهش سختی به سمت شکم‌دادگی میل می‌کند. با انجام مطالعات عددی مقادیر ضرایب شتاب افقی براساس سطوح عملکرد متفاوت تعیین شد و با مقادیر موجود در آیین‌نامه‌ی FHWA مقایسه شد. نتایج حاصله حاکی از دست بالا بودن فرضیات آیین‌نامه‌های موجود در طراحی لرزه‌یی است که علت این امر مد نظر قرار ندادن تغییر مکان‌های مجاز پس از وقوع زلزله است. طراحی براساس مفهوم تغییر مکان مجاز می‌تواند طرح‌های مناسب‌تر و اقتصادی‌تر را نتیجه دهد.



شکل ۱۲. تاریخچه‌ی جابجایی ارتفاع ۶ متر، سطح شتاب زیاد (۴-H)، طول تسمه ۰٫۸H.



شکل ۱۳. ضریب شتاب افقی بر مبنای تغییر مکان سازه و شتاب پیشینه.

۲.۴. تاریخچه‌ی مربوط به جابجایی

برای نمونه، تاریخچه‌ی مربوط به جابجایی دو نقطه از دیوار در برابر زمان در شکل ۱۲ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که جابجایی از صفر آغاز و پس از نوسان نهایتاً به یک مقدار ثابت می‌رسد و تغییر مکان ماندگار در سازه ایجاد می‌شود. این روند بیانگر این مطلب است که دیوار در انتهای تحلیل به پایداری رسیده است، زیرا جابجایی ثابت می‌شود و سیستم به همگرایی می‌رسد. همان‌گونه که مشخص است، در ابتدا با شروع بارگذاری مقادیر تغییر مکان به صورت سیکنلی تغییر می‌کند. اگر سطح شتاب در تحلیل‌ها کم باشد، هیچ‌گونه تغییر مکان ماندگاری در سیستم پدیدار نخواهد شد. با افزایش سطح شتاب در هر سیکل بارگذاری تغییر مکان‌های ماندگار در سیستم پدید می‌آید.

۳.۴. تعیین ضریب شبه استاتیکی بر مبنای تغییر مکان

با استفاده از آیین‌نامه‌های موجود هر کدام از سازه‌های تحلیل شده در قسمت قبل با

پانویس‌ها

1. Casagrande
2. Henri Vidal
3. Geotextile

4. fast lagrangian analysis of continuum
5. equivalent linear method
6. interface
7. quiet boundry
8. cumulative absolute velocity

منابع (References)

1. Jones, C.J.F.P., *Earth Reinforcement and Soil Structures*, Butterworths and Co. (1985).
2. Richardson, G.N. and Lee, K.L. "Seismic design of reinforced earth walls", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **101**(GT2), pp. 167-188 (1975).
3. Richardson, G.N., Feger, A. and Lee, K.L "Seismic testing of reinforced earth walls", *Journal of Geotechnical Engineering, Div. ASCE*, **103**(1), pp. 1-17 (1977).
4. Howard, R.W.A., Kutter, B.L. and Siddharthan, R. "Seismic deformation of reinforced soil centrifuge models", *Proceedings of the 3rd International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Dynamics Conference, Special Publication, ASCE*, **1**(75), pp. 446-457 (1999).
5. Hatami, K., Bathurst, R.J. and Allen, T. A calibrated FLAC model for geosynthetic reinforced soil modular block walls at end of construction, *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, Proceedings of the 3rd International FLAC Symposium, Sudbury, pp. 251-259 (2003).
6. El-Emam, M.M. and Bathurst, R.J. "Influence of reinforcement parameters on the seismic response of reduced-scale reinforced soil retaining wall", *Geotextiles and Geomembranes, Elsevier Journal*, **25**(1), pp 33-49 (February 2007).
7. Parakash, S. and Nandkumaran, P. "Dynamic earth pressure distribution behind flexible retaining walls", *Indian Geotech. J.*, **14**, pp. 207-224 (1974).
8. FHWA, *Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*, Publication No. FHWA-NHI-10-024, National Highway Institute Office of Bridge Technology (2009).
9. *FLAC Manual*, Ver. 5.0, Itasca, USA (2005).
10. Bathurst, R.J. and Hatami, K. "Influence of reinforcement stiffness, length and base condition on seismic response of geosynthetic reinforced soil walls", *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics*, USA, pp. 613-616 (1998).
11. Bathurst, R.J. and Hatami, K. "Earthquake response analysis of reinforced soil walls using FLAC", *Flac and Numerical Modeling in Geomechanics*, pp.273-297, (1999).
12. Ishihara, K., *Soil Behaviour in Earthquake Engineering*, Clarendon Press, Oxford University, New York, USA, 350 p. (1996).
13. Huang, B., Bathurst, R.J. and Hatami, K. "Numerical study of the influence of reinforcement length and spacing on reinforced soil segmental walls of variable height", *Proceedings of the First Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition*, Cancun, Mexico, IFAI, pp. 1256-1264 (2-5 March 2008).