

Investigation of seismic displacement of nailed wall under near field earthquakes using hardening soil with small strain behavioral model

Milad Mesrabadi¹, Alireza Ardakani^{2*}, Ali Lashgari³

1- MSc of Geotechnic, Faculty of Engineering & Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Engineering & Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- Research Assistant, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this study, the effect of pulse like and non-pulsed near field records on the displacement and axial force of the nail in the soil nail wall has been investigated. Pulse liked records are created under physical factors such as the effect of Forward directivity, Fling Step, the effect Hanging wall, etc., A pulse has a large amplitude with medium to long period, which contains most of the energy due to fault rupture. It has been used to investigate the effects of near-field records by the finite element method and by using the HSS behavioral model due to considering the effect of small strains and hysteresis damping. In this research, a seismic bank consisting of 62 pulsed and non-pulsed near field records has been used. The obtained results showed that the pulsed records have a direct effect on the axial force and displacement of the nailed wall, also the axial force of the nails and displacements in the pulsed records have a good correlation with the PGV (peak ground velocity) parameter, the axial force of the nails in the non-pulsed records with the parameter It had Ia (Arias intensity) and non-pulse displacement with seismic parameter PGV.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 May 2022

Revise Date: 18 August 2022

Accept Date: 10 September 2022

Keywords:

Soil nailed wall
Near field motion
Displacement
hardening soil with small
strain material model
Pulse like and non pulse
record.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.339619.2800>

*Corresponding author: Alireza Ardakani

Email address: a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

بررسی تغییر مکان لرزه‌ای دیوار میخکوبی شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک با استفاده

از مدل رفتاری سخت شونده کرنش کوچک

میلاذ مصرآبادی^۱، علیرضا اردکانی^{۲*}، علی لشگری^۳

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دستیار پژوهشی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر رکوردهای حوزه نزدیک پالس‌دار و بدون پالس بر جابه‌جایی و نیروی محوری میخ، در دیوار میخ‌کوبی شده مورد بررسی قرار گرفته است. رکوردهای حوزه نزدیک پالس‌دار تحت عوامل فیزیکی مانند اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده^۱، جابه‌جایی ماندگار^۲، اثر فرادیواره و... ایجاد می‌شوند که دارای یک پالس با دامنه بزرگ و با زمان تناوب متوسط تا بلند است که عمده انرژی ناشی از گسیختگی گسل را در بر می‌گیرد. برای بررسی اثرات رکوردهای حوزه نزدیک توسط روش اجزاء محدود و با استفاده از مدل رفتاری HSS^۳ به دلیل در نظر گرفتن اثر کرنش‌های کوچک و میرایی هیستریسیس، استفاده شده است. در این پژوهش از بانک لرزه‌ای سانگ و رودریگز در سال ۲۰۱۵ مشتمل بر ۶۲ رکورد حوزه نزدیک پالس‌دار و بدون پالس مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان دادند که دیوارهای میخ‌کوبی شده عملکرد مناسبی در برابر بارهای لرزه‌ای دارند. رکوردهای پالس‌دار تأثیر مستقیمی بر نیروی محوری و جابه‌جایی دیوار میخ‌کوبی شده دارد، همچنین نیروی محوری میخ‌ها و جابه‌جایی‌ها در رکوردهای پالس‌دار همبستگی مناسبی با پارامتر PGV^۴ (بیشینه سرعت زمین)، نیروی محوری میخ‌ها در رکوردهای بدون پالس با پارامتر I_a^۵ (شدت آریاس) و جابه‌جایی بدون پالس با پارامتر لرزه ای PGV دارا بود.

کلمات کلیدی: دیوار میخ‌کوبی شده، زلزله حوزه نزدیک، جابه‌جایی، مدل رفتاری سخت شونده کرنش کوچک، رکوردهای پالس‌دار و بدون پالس.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.339619.2800	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.339619.2800	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۱/۰۶/۱۹	۱۴۰۱/۰۶/۱۹	۱۴۰۱/۰۵/۲۷	۱۴۰۱/۰۲/۱۱
			علیرضا اردکانی a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

¹ Forward directivity

² Fling Step

³ Hardening Soil With Small Strain

⁴ Pick Ground Velocity

⁵ Arias Intensity

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر به علت توسعه روزافزون فضاهای شهری، استفاده از گودبرداری‌های عمیق و نیمه عمیق در پروژه‌های عمرانی امری مرسوم می‌باشد که جهت جلوگیری از ریزش گود و تبعات منفی احتمالی آن، روش‌های پایداری سازی مختلفی استفاده می‌شود. یکی از این روش‌های پایداری سازی، روش میخ کوبی می‌باشد که به دو صورت موقت و دائم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورت استفاده از حالت دائم می‌بایست بررسی پایداری لرزه‌ای دیوار نیز علاوه بر حالت استاتیکی صورت گیرد [۱]. بر اساس مشاهدات ثبت شده در طی زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) چندین دیوار میخ کوبی شده دچار گسیختگی و یا خسارت قابل توجهی شدند [۲، ۳]. از این رو نیاز است که عملکرد لرزه-ای این سازه‌ها مورد بررسی بیشتری قرار گیرد.

۲- پیشینه تحقیق

اولین مطالعات صورت گرفته در خصوص بررسی لرزه‌ای دیوارهای میخ کوبی شده با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ توسط شن و همکاران در سال ۱۹۸۱ و اسکولوز در سال ۱۹۸۹ انجام شد. در این پژوهش به بررسی مکانیزم‌های شکست ایجاد شده در پشت دیوار میخ کوبی شده پرداختند [۴، ۵]. در ادامه مطالعات گذشته که توسط یوستیک و توفنکچیان در سال ۱۹۹۳ انجام شد به بررسی چهار مدل مختلف و مکانیزم ایجاد شکست در مدل‌ها پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی چهار مدل با سه ردیف میخ گذاری صورت گرفت. آن‌ها به بررسی اثر سختی کششی، سختی خمشی و طول میخ‌ها در مکانیزم شکست ایجاد شده در مدل پرداختند. مشخص شد که مکانیزم ایجاد شکست در مدل به صورت یک شکست دوخطی می‌باشد که در نتیجه آن دو بلوک در توده خاک مسلح تشکیل می‌شود [۶]. این مکانیزم‌های شکست ایجاد شده در پشت دیوار توسط دشت‌آرا و همکاران با کمک نرم افزار آباکوس صحت سنجی شد. در این مطالعه مشخص گردید که برای زاویه شیب ۹۰ درجه مکانیزم شکست ترکیبی از تغییر شکل‌های انتقالی و چرخشی بود و برای زاویه شیب ۷۵ درجه عمدتاً خرابی انتقالی می‌باشد [۷]. در بررسی‌های عددی انجام شده در خصوص شرایط هندسی دیوارهای میخ کوبی شده تحت مدل‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی مشخص شد که با کاهش زاویه دیوار از ۹۰ درجه به ۸۰ درجه کاهش به سزایی در جابه‌جایی‌ها ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش زاویه قائم دیوار میخ کوبی شده مقاومت لرزه‌ای دیوار کاهش می‌یابد [۷-۱۰].

ساهو و همکاران در بررسی‌های آزمایشگاهی خود با کمک میز لرزه در خصوص اثر میخ‌ها اظهار داشتند که بهینه‌ترین زاویه میخ در حالت دینامیکی، زاویه ۱۵ درجه نسبت به افق می‌باشد [۹]. در مطالعات عددی انجام شده در خصوص تاثیر میخ‌ها مشخص شد که با افزایش زاویه میخ به دلیل کاهش ظرفیت بیرون کشیدگی، ضریب اطمینان دیوار کاهش می‌یابد [۱۱]. همچنین طول میخ‌ها تاثیر عمده‌ای در رفتار دیوار میخ کوبی شده دارد که با افزایش طول میخ، ضریب اطمینان دیوار افزایش می‌یابد [۱۲]. در مطالعات عددی انجام شده توسط مجیدیان و کمک پناه مشخص شد که، افزایش طول پایین‌ترین میخ‌ها، موثرترین روش بهبود پایداری لرزه‌ای دیوار میخ کوبی شده است که با قرار دادن میخ‌های اضافه بلندتر، به عنوان یک تکنیک در مناطق لرزه خیز استفاده شود [۱۳]. در مدل‌سازی آزمایشگاهی که توسط یزداندوست صورت گرفت مشخص شد که طول میخ‌ها تاثیر عمده‌ای بر جابه‌جایی دیوارهای میخ کوبی شده دارد که بهینه‌ترین طول میخ‌ها در حالت دینامیکی برابر ۷۰ درصد ارتفاع دیوار به دست آمد [۱۴]. ساهو و همکاران در مدل‌سازی‌های عددی خود در نرم افزار میداس^۶ اظهار داشتند که میخ‌های مایل برای شیب‌های تند نسبت به میخ‌هایی که به صورت افقی قرار گرفته اند مناسب تر هستند [۱۰]. مجیدیان و کمک پناه با ارائه یک روش جدید که با ترکیب تحلیل استاتیکی غیر خطی معادل کامل و تحلیل دینامیکی یک سازه دو درجه آزادی که قادر است تغییر مکان‌های دیوارهای میخ کوبی شده را در معرض تحریکات زمین لرزه محاسبه کند را ارائه کرده اند. روش پیشنهادی به شکل رضایت بخشی تغییر شکل‌های سازه‌ی میخ کوبی شده تحت اثر زلزله را پیش بینی می‌کند و زمان محاسبات را برای مسائل عملی کاهش می‌دهد [۱۵، ۱۶]. در بررسی‌های انجام شده توسط مجیدیان و همکاران در خصوص پایداری دیواره‌های تونل به

⁶ Midas

روش اتریسی نشان دادند که ترکیب روش های میخ کوبی و میکروپایل و فورپولینگ UAM که منجر به کاهش ۴۵/۷ درصدی نشست شد، به عنوان یک سیستم پایدارسازی قابل قبول در روش تونل زنی اتریسی می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۷].

طبق بررسی های صورت گرفته در پژوهش های گذشته، بیشتر مطالعات در خصوص اثر پارامترهای مختلف هندسی یا اثر پارامترهای لرزه ای مانند دامنه و یا فرکانس های رکوردهای ورودی می باشد. در این مطالعات که با تعداد کمی رکورد انجام یافته، می تواند عدم قطعیت بالایی در نتایج به دست آمده را به دست آورد. عموماً نتایج تحلیل های دینامیکی نشان دادند که بیشترین تغییر مکان ایجاد شده در حالت دینامیکی در بالای دیوار رخ می دهد [۱۸]. با توجه به بررسی های انجام شده توسط محققین مختلف در خصوص زلزله های حوزه نزدیک، زلزله های حوزه نزدیک خسارات به مراتب بیشتری بر سازه های مختلف وارد آورده است [۱۹-۲۲]. از آنجائیکه رکورد های حوزه نزدیک که خود بر دو دسته پالس دار و بدون پالس تقسیم می شوند اثر این پالس ها تا کنون بر دیوار میخ کوبی شده نیز مورد توجه قرار نگرفته بوده است. در مطالعات جدید صورت گرفته که در خصوص شیب ها توسط لشگری و همکاران صورت گرفته است. در این پژوهش از تجزیه و تحلیل ۳۳۱۹ رکورد که برای پیش بینی تغییر مکان ناشی از زلزله در شیب ها ارائه شده است و یک مدل پیش بینی شده توسط تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه توسعه یافته است و نشان دهنده تغییر مکان لغزشی به عنوان تابعی از حداکثر ضریب سرعت تاریخچه، ضریب شتاب گسیختگی، طول لغزش و پرپود زمانی است [۲۳].

بررسی های صورت گرفته در خصوص اثر رکوردهای حوزه دور و نزدیک بر دیوار میخ کوبی شده نشان داد که ممان های خمشی و نیروی برشی و نیروی محوری در میخ ها در رکوردهای نزدیک گسل به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. همچنین تغییر مکان ایجاد شده تحت رکوردهای نزدیک گسل بیشتر می باشد که افزایش طول میخ و افزایش تراکم خاک، باعث کاهش جابه جایی دیواره میخ کوبی شده خاک می شود ولی تحت رکوردهای نزدیک گسل رفتار کلی خاک تغییر نمی کند [۲۰]. در بررسی فوق مشابه بررسی های گذشته از تعداد کمی رکورد استفاده شده است و تمایزی بین رکورد های حوزه نزدیک پالس دار و بدون پالس قائل نبوده اند. با توجه به بررسی های انجام شده در خصوص مطالعات گذشته، نشان داد که مطالعات عددی اندکی در خصوص رفتار دیوار های میخ کوبی شده تحت رکوردهای حوزه نزدیک انجام شده است و استفاده محققین مختلف [۷، ۱۲، ۱۸، ۲۰، ۲۴] از مدل رفتاری های موهر کولمب به دلیل در نظر نگرفتن شرایط پیش تحکیمی و در نظر نگرفتن یک ناحیه برای بخش الاستیک خاک و مدل رفتاری خاک سخت شونده به دلیل در نظر نگرفتن اثر کرنش های کوچک، برای مسائل سیکلیک مدل رفتاری مناسبی نمی باشد [۲۵، ۲۶].

در این مقاله، جهت بررسی های بیشتر با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود دوبعدی Plaxis ۲۰۲۰ استفاده شده است. در مدل سازی های فوق با به کارگیری مدل رفتاری HSS که با در نظر گرفتن اثر کرنش های کوچک و میرایی هیستریسیس، در تحلیل ها یک مدل رفتاری مناسب برای تحلیل های سیکلیک می باشد مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا نتایج مطالعات عددی با استفاده از نتایج مطالعه آزمایشگاهی پوستیک و توفنکچیان در سال ۲۰۰۰ صحت سنجی شده است در ادامه دیوار میخ کوبی شده با استفاده از یک بانک لرزه ای رکوردهای حوزه نزدیک شامل ۶۲ رکورد حوزه نزدیک پالس دار و بدون پالس می باشد مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- مدل سازی عددی

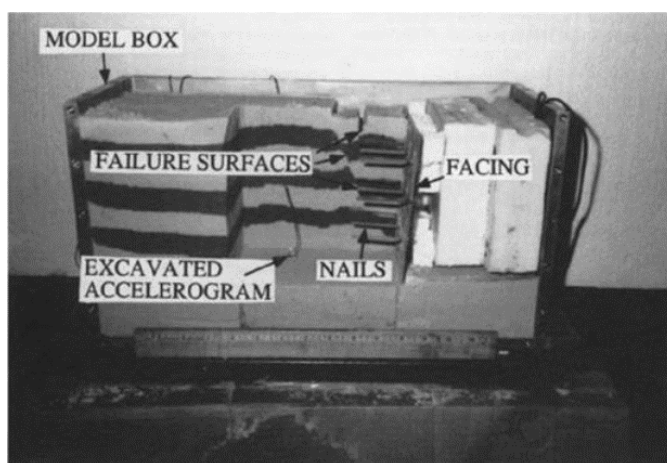
در پژوهش حاضر جهت آنالیز دینامیکی، از نرم افزار اجزاء محدود پلکسیس دوبعدی برای مدل سازی دیوار میخ کوبی استفاده شده است. در این پژوهش از ۱۲۴ مدل ساخته شده به صورت کرنش صفحه ای^۷ از المان های ۱۵ گره ای^۸ جهت افزایش دقت محاسبات استفاده شده است. جهت مدل سازی رویه و میخ ها از المان Plate به صورت الاستیک استفاده شده است.

⁷ Plane Strain

⁸ 15 Node

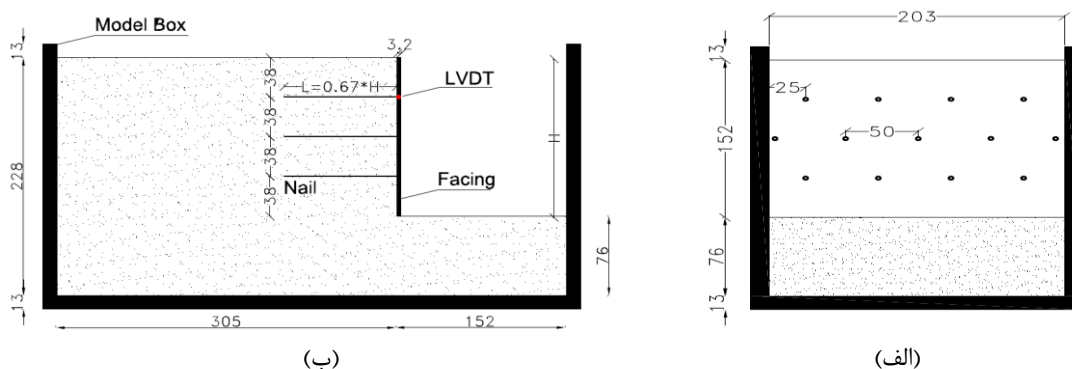
۱-۳- هندسه مدل

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است جهت صحت سنجی و مدل سازی عددی از یک مدل آزمایشگاهی که توسط یوستیک و توفنکچیان که با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ در مؤسسه RPI در سال ۱۹۹۳ اقدام به بارگذاری لرزه ای کرده اند مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی آزمایشگاهی که با شتاب گردش دستگاه برابر $50g$ در نظر گرفته شده است که جهت مدل سازی عددی در نرم افزار تمامی ابعاد مدل 50 برابر می شود.



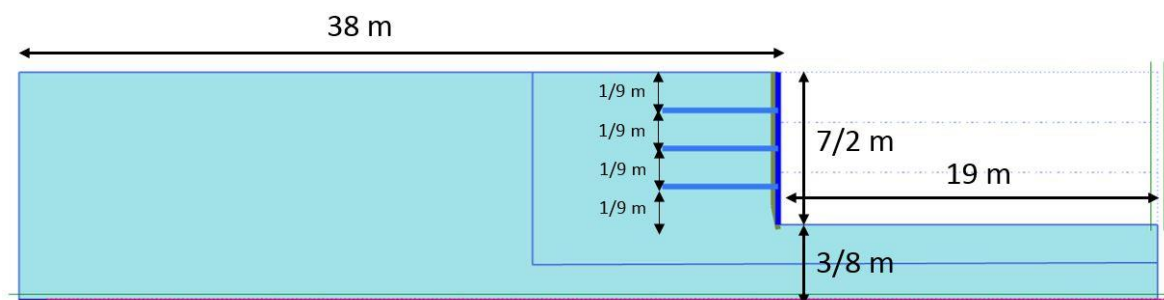
شکل ۱: مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط یوستیک و همکاران [۲۷]

ابعاد مدل در دیوار میخ کوبی شده آزمایشگاهی که در شکل ۲ نشان داده شده است دارای (ارتفاع مدل 152 میلی متر، ضخامت رویه $3/2$ میلی متر، ارتفاع کل مدل 228 میلی متر، طول کل مدل 457 میلی متر، عرض مدل برابر 203 میلی متر) ساخته شده است. فاصله درون میخها از هم 50 میلیمتر، فاصله قائم میخها از هم برابر 38 میلیمتر، طول میخها برابر $0/67$ ارتفاع دیوار در نظر گرفته شده است [۲۷].



شکل ۲: مشخصات مدل آزمایشگاهی (الف) فاصله افقی و قائم میخها (ب) ابعاد هندسی و سازه ای [۶]

جهت مدل سازی عددی باتوجه به شتاب گردش دستگاه که $50g$ بیان شده است در نرم افزار تمامی ابعاد مدل 50 برابر می شود یعنی ما در مدل سازی با یک دیوار میخ کوبی شده به ارتفاع $7/6$ متر و فاصله عمودی میخها نیز $1/9$ متر، طول میخها برابر 509 میلی متر می باشد و فاصله درون صفحه میخها (بعد سوم) از هم برابر $2/5$ متر می باشد که ابعاد هندسی مدل سازی صورت گرفته در نرم افزار پلکسیس در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: ابعاد هندسی و سازه‌ای مدل عددی این تحقیق

۲-۳- مشخصات مصالح

خاک مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی از جنس ماسه سیلیکا با درصد رطوبت ۷/۵٪ با دامنه ابعاد بین ۰/۰۵ الی ۰/۳ میلی‌متر استفاده شده است که سایر مشخصات خاک مورد نظر در جدول ۱ آمده است. همچنین بر اساس مقاله فوق میخ‌ها که از جنس پلی‌کربنات پلاستیک بوده و قطر معادل میخ‌ها نیز ۱۵۲ میلی‌متر با مدول الاستیسیته ۲۱ گیگاپاسکال می‌باشد. جهت مدل‌سازی رویه دیوار که از جنس پلکسی گلس با ضخامت ۳/۲ میلی‌متر در آزمایشگاه می‌باشد، از المان پلیت به ضخامت ۱۶ سانتی‌متر و مدول الاستیسیته ۳/۱ گیگاپاسکال استفاده شده است، همچنین جهت در نظر گرفتن اثر اندرکنش بین خاک و رویه دیوار از المان اندرکنش استفاده شده و ضریب $R_{inter} = ۰/۶۷$ در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن میرایی خاک علاوه بر میرایی هیستریسیس که مدل رفتاری *HSS* در نظر می‌گیرد بر اساس توصیه برینگرو در سال ۲۰۰۷ [۲۸] می‌توان میرایی رایلی را به میرایی هیستریسیس اضافه کرد تا اثر کرنش‌های کوچک را در نظر بگیرد و جهت محاسبه ضرایب میرایی رایلی با فرض نسبت میرایی ۵٪ از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود.

$$\alpha = 2\omega_1\omega_2 \frac{\omega_1\zeta_2 - \omega_2\zeta_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (۱)$$

$$\beta = 2 \frac{\omega_1\zeta_2 - \omega_2\zeta_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (۲)$$

که ω_1 و ω_2 سرعت زاویه‌ای موده‌های مربوطه و ζ_1 و ζ_2 نسبت میرایی موده‌های مربوطه می‌باشد و بر اساس محاسبات صورت گرفته ضرایب میرایی رایلی α و β با در نظر گرفتن نسبت میرایی ۵٪ به ترتیب برابر با ۴/۴۰۹۱ و ۰/۰۰۵۸ می‌باشد.

جهت اعمال شرایط مرزی برای مدل‌سازی عددی فوق بر اساس نرم‌افزار پلکسیس [۲۹] در مرزهای قائم از مرزهای آزاد^۹ مورد استفاده قرار گرفته است که شبیه سازی انتشار امواج به سمت مرزهای دور با حداقل انعکاس در مرزها می‌باشد، این گزینه برای آنالیزهای لرزه‌ای و جایی که ورودی بارهای دینامیکی در مرز پایینی مدل اعمال می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد، همچنین برای مرز افقی تحتانی مدل از مرز پایه سازگار^{۱۰} شبیه سازی ادامه امواج را به داخل عمق خاک با حداقل انعکاس در مرز پایین شبیه سازی می‌کند استفاده شده است.

^۹ Free Field

^{۱۰} Compliant base

جدول ۱: مشخصات ژئوتکنیکی خاک مدل [۶]

مقدار	پارامتر
۷/۲	چسبندگی، $C (kN/m^2)$
۳۶	زاویه اصطکاک ϕ
۶	زاویه اتساع ψ
۱۴	وزن مخصوص خشک خاک $\gamma_d (kN/m^3)$
۱۵/۰۵	وزن مخصوص خشک اشباع $\gamma_{sat} (kN/m^3)$
۵۰۰۰۰	مدول الاستیسیته خاک $E (kN/m^3)$
۵۰۰۰۰	مدول مرجع مماسی در تنش معادل ۵۰٪ تنش نهایی $E_{50}^{ref} (kN/m^3)$
۵۰۰۰۰	مدول مماسی در بارگذاری اودیومتری اولیه $E_{oed}^{ref} (kN/m^3)$
۱۵۰۰۰۰	مدول باربرداری بارگذاری مجدد $E_{ur}^{ref} (kN/m^3)$
۸۰۰۰۰	مدول برشی مرجع $G_0^{ref} (kN/m^3)$
۱۰۰	فشار مرجع $P_{ref} (kN/m^2)$
۰/۰۰۰۲	کرنش برشی وقتی به $0.7G_0$ میرسد. $\gamma_{0.7}$
۰/۳۵	نسبت پواسون ν
۰/۲	نسبت پواسون باربرداری و بارگذاری مجدد ν_{ur}
۰/۵	مقدار توانی برای وابسته ساختن سختی به سطح تنش m

با تعریف کردن هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی و اختصاص مصالح، در واقع آن را با یک شبکه اجزاء محدود معادل جایگزین کرده‌ایم که در آن زمین به صورت المان‌های پیوسته است. شبکه اجزاء محدود از المان‌هایی بر اساس درجه‌ای از دقت که در مدل موردنیاز است تشکیل شده است. اندازه و آرایش المان‌ها در یک مش‌بندی می‌تواند تأثیر مهمی بر دقت تحلیل اجزاء محدود داشته باشد. مش‌بندی که به خوبی شکل نگرفته باشد منشأ ایجاد خطا است، اساساً مناطق با تمرکز تنش بالا و یا تغییرات سریع تنش و کرنش به المان‌های کوچک‌تری نیاز دارد. یک شبکه مش بسیار خوب با المان‌های کوچک در همه جا می‌تواند بسیار دقیق باشد، اما استفاده از این شبکه، محاسباتی طولانی‌تری را نیاز دارد. یک شبکه اجزاء محدود خوب با ترکیبی از المان‌های کوچک‌تر در مناطق موردنیاز و المان‌های بزرگ‌تر در مناطق دور از محل منتخب و در مکان‌هایی که تنش‌ها و کرنش‌ها یکنواخت‌تر هستند تشکیل شده داده می‌شود [۳۰] در تحلیل‌های دینامیکی علاوه بر جنبه‌های فوق، ابعاد المان‌ها باید آنگونه انتخاب شوند که امواج زلزله بتواند از المان‌ها عبور کند و اصطلاحاً فیلتر نشوند. در این راستا فرکانس امواج ورودی و ویژگی‌های سرعت امواج در محیط نقش تعیین کننده‌ای خواهند داشت. همچنین بر اساس توصیه لایزمز و کوهلمیر [۳۱] با استفاده از طول موج (λ)، سرعت موج برشی (V_s) و فرکانس موج ورودی می‌توان بزرگ‌ترین ابعاد مش‌ها را تخمین زد بر همین اساس با تعریف کردن هندسه مدل و اعمال شرایط مرزی و اختصاص مصالح، در واقع آن را با یک شبکه اجزاء محدود معادل جایگزین کرده‌ایم که در آن زمین به صورت المان‌های پیوسته است. با استفاده از طول موج (λ)، سرعت موج برشی (V_s) و (f_{max}) فرکانس غالب موج ورودی، می‌توان بزرگ‌ترین ابعاد مش‌ها را تخمین زد بر همین اساس و با استفاده از روابط (۳) و (۴) و (۵) ابعاد مش‌ها برابر خواهد بود با:

$$\Delta l = \frac{\lambda_{min}}{8} \approx \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (۳) \quad -$$

$$\lambda_{min} = V_s.T = \frac{V_s}{f_{max}} \quad (۴) \quad -$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho}} \quad (5)$$

همان طور که بیان شد، حداکثر ابعاد مش‌ها را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه نمود. باتوجه به آنکه سرعت موج برشی ساختگاه در حدود ۱۹۰ متر بر ثانیه برآورد می‌شود (رابطه شماره ۵) حداکثر فرکانس امواج ورودی ۱۰ هرتز است، در جهت اطمینان از المان‌هایی با میانگین طول ۱/۱ متر استفاده شده است طوریکه در مجموع از ۱۱۷۳ المان ۱۵ گره‌ای استفاده شده است.

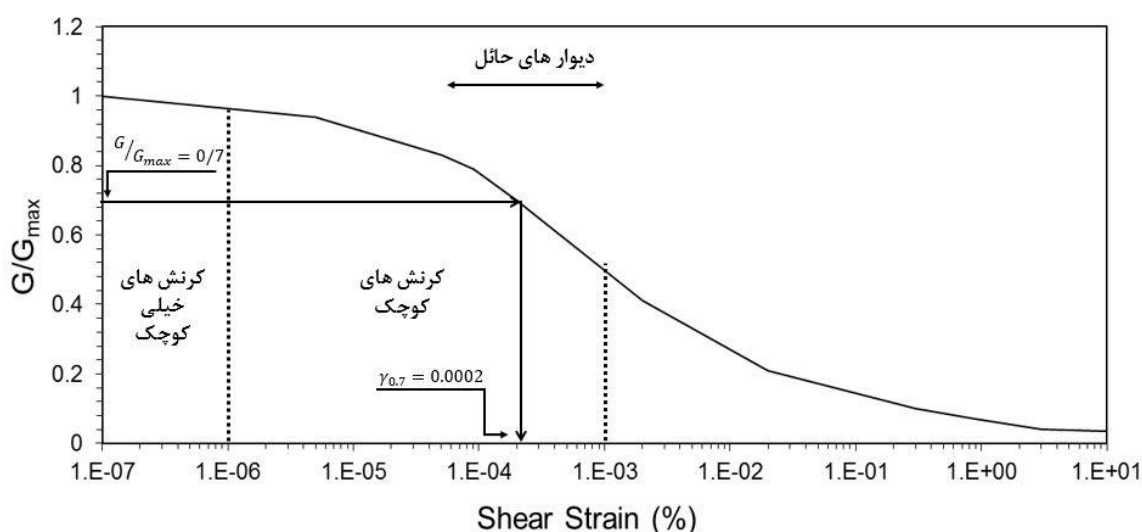
۳-۳- مدل رفتاری HS small

در مدل اصلی خاک سخت شونده فرض بر این است که رفتار مصالح در طول باربرداری و بارگذاری مجدد خطی می‌باشد. در دامنه کرنش‌های بسیار کوچک این رفتار واقعاً کوچک است، ولی با افزایش دامنه کرنش سختی خاک به طور غیرخطی کاهش می‌یابد. با ترسیم نمودار نسبت سختی خاک در مقابل کرنش منحنی S شکلی ایجاد می‌شود که در طول آن سختی خاک روبه کم شدن می‌گذارد. در شکل ۴ منحنی مدول برشی خاک مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی این پژوهش در مقابل لگاریتم کرنش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محدوده‌ای از این کرنش‌ها مربوط به کرنش‌هایی است که در مجاورت سازه‌های ژئوتکنیکی اتفاق می‌افتد. قسمت اولیه این محدوده کرنش بایستی با آزمایش‌های توسط ابزارهای پیشرفته و دقیق از قبیل آزمایش‌های ستون تشدید و سه محوری سیکلی اندازه‌گیری شود. قسمت بعدی این محدوده از کرنش‌ها را می‌توان توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی کلاسیک از قبیل سه محوری و تحکیم اندازه‌گیری کرد و مشاهده می‌شود که در آن سختی خاک به نصف مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد [۲۶].

مدل رفتاری خاک سخت شونده با کرنش‌های کوچک به کار گرفته شده در نرم‌افزار Plaxis بر اساس مدل خاک سخت شونده استوار است و تمام پارامترهای آن مشابه مدل خاک سخت شونده می‌باشد. در واقع فقط دو پارامتر اضافی مورد نیاز برای توصیف رفتار سختی در کرنش‌های کوچک به کار گرفته شده است عبارت‌اند از:

G_0 : مدول برشی اولیه یا مدول برشی که در کرنش‌های بسیار کوچک

$\gamma_{0.7}$: میزان کرنش برشی زمانی که مدول برشی به میزان ۷۰ درصد از مقدار اولیه خود می‌رسد.



شکل ۴: رفتار سختی برشی نرمالیزه شده - کرنش خاک مورد مطالعه در این پژوهش تحت کرنش‌های معمول برای آزمایش‌های آزمایشگاهی و سازه‌ای [۳۲]

در واقع با مقایسه منحنی‌های چند نوع مختلف خاک نشان می‌دهد که شکل منحنی آن تغییر خاصی ندارد و پارامتر $\gamma_{0.7}$ در بازه $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ قرار می‌گیرد. همچنین مقدار مدول برشی سکانت (G_S) را می‌توان با توجه به رابطه ۶ با یک تقریب خوبی به دست آورد.

$$G_S = \frac{G_0}{1 + \alpha\gamma/\gamma_{0.7}} \quad (6)$$

که برای رسیدن به بهترین تناسب مقدار ثابت α را برابر 0.385 در نظر گرفته می‌شود.

از مدول برشی سکانت، رابطه تنش کرنش زیر را می‌توان به‌سادگی به دست آورد:

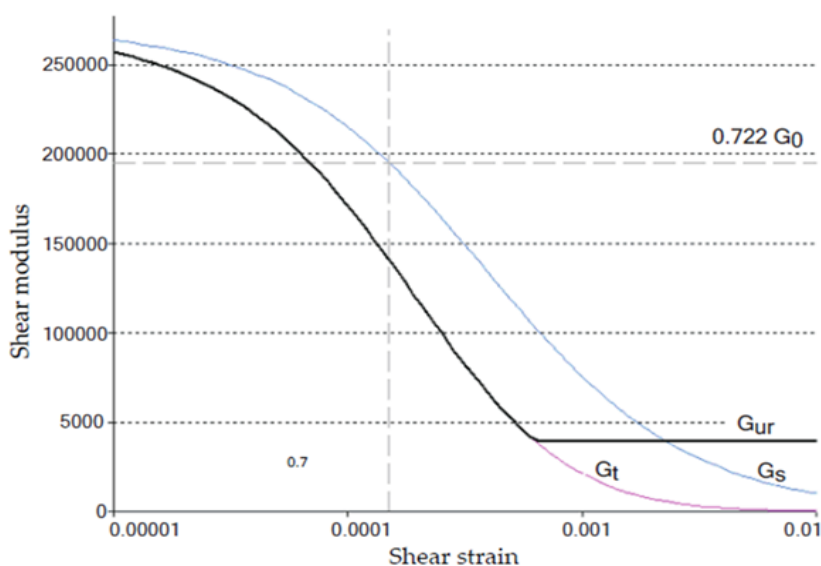
$$\tau = G_S \cdot \gamma = \frac{G_0 \cdot \gamma}{1 + \alpha\gamma/\gamma_{0.7}} \quad (7)$$

با مشتق‌گیری از کرنش برشی، مدول برشی تانژانت را به ما می‌دهد:

$$G_t = \frac{G_0}{(1 + \alpha\gamma/\gamma_{0.7})^2} \geq G_{ur} \quad (8)$$

در مدل خاک سخت شونده کاهش سختی ناشی از کرنش‌های پلاستیک با کرنش سخت شونده مدل‌سازی می‌شود. در رفتار خاک سخت شونده با کرنش‌های کوچک بر اساس نتایج آزمایشگاهی، منحنی کاهش سختی در کرنش‌های کوچک توسط یک حد پایین محدود می‌شود. این مرز پایین به‌عنوان سختی باربرداری و بارگذاری مجدد معرفی می‌شود که به‌وسیله پارامترهای E_{ur} و ν_{ur} دست می‌آید.

از معایب مدل رفتاری خاک سخت شونده با کرنش‌های کوچک که در شکل ۵ نشان داده شده، این است که مقدار مدول برشی را خیلی کمتر از مدول برشی واقعی خاک محاسبه می‌کند. برای رفع این عیب برنامه به‌صورت خودکار مقدار G_0 را کاهش می‌دهد تا به G_{ur} برسد سپس مقدار آن را ثابت در نظر گرفته و مقدار آن را تغییر نمی‌دهد که در این حالت مقدار G_{UR} مسلماً کمتر از G_0 خواهد بود چراکه مقدار آن بر اساس آزمایش سه محوره به دست می‌آید. [۲۸]

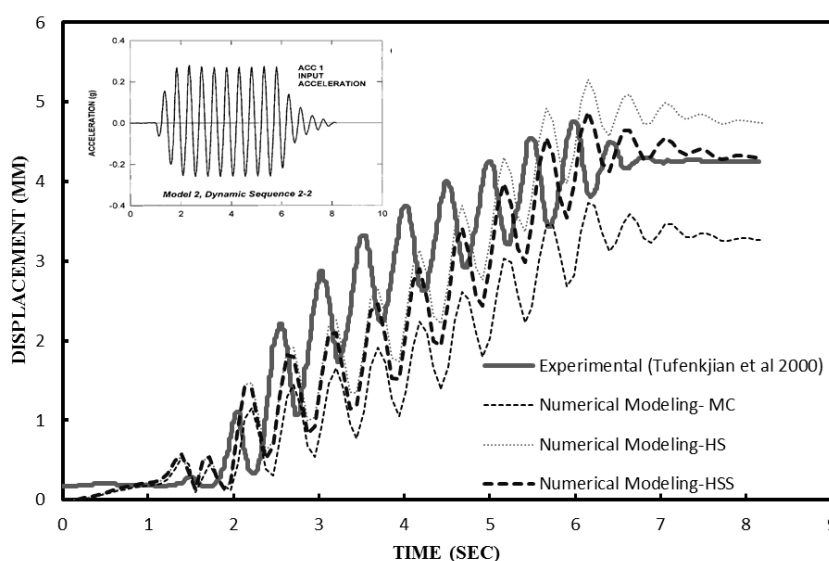


شکل ۵: نمودار کاهش مدول برشی تانژانت و سکانت [۲۹]

۴-۳- صحت سنجی

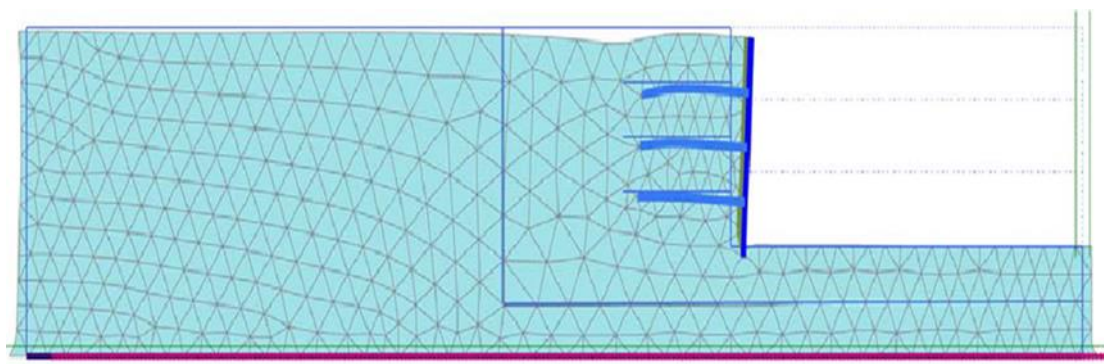
همان طور که در بخش ۱-۲ توضیح داده شد جهت صحت سنجی نرم افزار پلکسیس، از نتایج مدل آزمایشگاهی یوستیک و توفنکچیان که با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ در سال ۱۹۹۳ انجام گرفته مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش که شتاب دستگاه برابر $50g$ و از یک بارگذاری لرزه‌ای با دامنه $0.28g$ به مدل اعمال شده است که نتایج جابه‌جایی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی در نقطه LVDT در شکل (۲-ب) نشان داده شده است مورد بررسی قرار گرفته است.

جهت صحت سنجی از سه مدل رفتاری موهر کولمب (MC)، خاک سخت شونده (HS)، خاک سخت شونده با کرنش‌های کوچک (HSS) مورد استفاده قرار گرفت تا بهترین مدل رفتاری جهت انجام آنالیزهای لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. تغییر مکان‌های حاصل از مدل‌سازی با سه مدل رفتاری MC، HS و HSS در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: مقایسه تغییر مکان لرزه‌ای حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی

شکل ۶ نشان می‌دهد که تا ثانیه ۳ هر سه مدل روند مشابهی را دنبال می‌کنند و از این ثانیه به بعد روند رفتاری متفاوت می‌باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که تغییر مکان ماندگار حاصل از مدل HSS به مدل تغییر مکان آزمایشگاهی منطبق شده است؛ در حالی که مدل HS نتایج محافظه‌کارانه و مدل MC نتایج غیر محافظه‌کارانه‌ای فراهم کرده‌اند. تغییر مکان حاصل از مدل HS در حدود $1/1$ برابر بیشتر از مدل آزمایشگاهی و تغییر مکان حاصل از مدل MC در حدود $1/42$ برابر کمتر از مدل آزمایشگاهی می‌باشد؛ بنابراین مدل رفتاری HSS دقت قابل قبولی را در پیش‌بینی رفتار دیوار می‌خکوبی مدل‌سازی شده نسبت به سایر مدل‌های رفتاری مورد مطالعه دارد. در شکل شماره ۷ نیز تغییر شکل‌های ایجاد شده در مش‌بندی مدل نیز نشان داده شده است.



شکل ۷: تغییر شکل ایجاد شده در مش مدل

۵-۳- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

هادسون و هوسنر در سال ۱۹۵۸ بیان داشتند که زلزله‌های حوزه نزدیک شامل پالس‌های انرژی هستند که ممکن است این زلزله‌ها دارای بزرگای کوچکی شامل پالس‌های بحرانی انرژی باشند و ممکن است این زلزله‌ها دارای بزرگای کوچکی از نظر ریشتر $4/7$ و یا دامنه کوچکی $0/78$ متر بر مجذور ثانیه باشند ولی دارای پتانسیل تخریب بالاتری هستند [۱۹]. همچنین برای اولین بار توسط بولت پالس-های سرعت که ناشی از لغزش سریع گسل در نگاشت‌های ثبت شده زلزله ۱۹۷۱ سن فرناندو می‌باشد شناخته شد [۳۳] محققین مختلفی فهمیدند، آنچه که باعث ایجاد آثار تخریبی زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌ها می‌گردد، وجود حرکات پالس گونه زمین است که صدمات زیادی به سازه‌ها وارد می‌کند [۲۲، ۳۴-۴۰] جهت شناسایی رکوردهای پالس دار حوزه نزدیک، از علل فیزیکی مانند اثر جهت پذیری و حرکت پرتابی می‌توان نام برد [۲۱، ۴۱] یکی از روش‌های کاهش عدم قطعیت‌های پارامترهای لرزه‌ای استفاده از یک بانک لرزه‌ای است. برای بررسی حرکات‌های زمینی پالس گونه نیازمند یک بانک از حرکات پالس گونه و بدون پالس می‌باشد که حرکات زمین را طبقه بندی کرده باشد. بسیاری از محققان با طبقه بندی حرکات زمین با استفاده از تکنیک‌های بصری یا کمی، بانکی از حرکات زمینی پالس دار را ایجاد کرده‌اند [۳۹، ۴۲-۴۴] مشکل این دسته بندی‌ها این است که حرکات زمینی بدون پالس را ارائه نمی‌دهند و مانع از آن می‌شوند که تحلیل گران احتمال وقوع پالس را تعیین کنند. این کمبود توسط بیکر در سال ۲۰۰۷ [۴۵] که از تحلیل موج‌های کوچک برای استخراج پالس‌های اصلی از تاریخچه زمانی سرعت استفاده شده است برطرف گردید.

در این مقاله از بخشی از رکوردهای مورد استفاده توسط سانگ در سال ۲۰۱۵ [۴۶] جهت آنالیز لرزه‌ای شیب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. به همین منظور تعداد ۳۱ رکورد حوزه نزدیک پالس‌دار و ۳۱ رکورد حوزه نزدیک بدون پالس که در جدول ۲ به صورت میانگین هندسی آورده شده، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین با توجه به سرعت موج برشی ثبت شده در پایگاه داده رکوردها و بر اساس تقسیم بندی آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش ۴ در رکوردهای حوزه نزدیک پالس‌دار 7% از رکوردها بر روی سنگ بستر و 45% از رکوردها بر روی خاک تیپ ۲ و 48% از رکوردها بر روی خاک تیپ ۳ ثبت شده‌اند و برای رکوردهای حوزه نزدیک بدون پالس 42% از رکوردها بر روی خاک تیپ ۲ و 58% از رکوردها بر روی خاک تیپ ۳ ثبت شده است. لذا با توجه محدودیت ثبت تمامی رکورد بر روی سنگ بستر از سایر رکوردهایی که بر روی سطح زمین خاکی ثبت شده‌اند نیز در پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است رکوردهای فوق جهت جلوگیری از تغییر نکردن محتوای فرکانسی و میزان PGV رکوردها، از مقیاس کردن رکوردها به یک PGA ثابت صرفه نظر شده است تا اثر پالس حفظ شود. زیرا بر اساس تحقیقات بیکر [۴۵] زمانی یک رکورد پالس دار خواهد بود که سه شرط زیر را ارضا کند:

الف- میزان نشان‌دهنده پالس (Pulse indicator) با استفاده از رابطه (۹) تعریف شده است بزرگ‌تر از $0/85$ باشد.

$$Pulse\ indicator = \frac{1}{1 + e^{-23/3+14/6(PGV\ ratio)+20/5(energy\ ratio)}} \quad (9)$$

ب- پالس‌هایی که در ابتدای تاریخچه زمانی می‌رسد نشان دهند که $t_{20\% orig}$ بزرگتر از $t_{10\% pulse}$ باشد.

پ- میزان PGV رکورد ورودی باید بزرگتر از ۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه باشد.

در این تحقیق جهت افزایش دقت آنالیزها هر شتاب نگاشت را در دو جهت افقی خود بر مدل اعمال شده و نتایج مربوط به هر دو جهت در نمودارهای بخش‌های آتی به صورت میانگین هندسی آمده است.

جدول ۲: رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس دار و بدون پالس

رکوردهای حوزه نزدیک بدون پالس						رکوردهای حوزه نزدیک پالس دار						ردیف
Ia (m/s)	Vs ۳۰ (m/s)	D 5-95 (S)	PGV (m/s)	PGA (g)	NGA record	Ia (m/s)	Vs ۳۰ (m/s)	D 5-95 (s)	PGV (m/s)	PGA (g)	NGA record	
0/94	602	15/9	0/169	0/42	71	12/1	2016/13	10	1/27	1/73	77	۱
7/25	223	13/71	0/647	0/98	160	0/79	663/31	5/15	0/47	0/44	150	۲
1/14	231	18/4	0/292	0/34	162	1/24	242	18/15	0/54	0/34	159	۳
1/8	471	47/2	0/224	0/22	164	1/05	192	16/78	0/82	0/31	170	۴
1/67	242	31/59	0/383	0/37	165	0/6	202	25/82	0/51	0/2	173	۵
0/4	196	27/57	0/227	0/16	175	1/17	162	25/02	0/48	0/29	178	۶
0/45	350	17/48	0/152	0/44	457	1/4	208	20/6	0/42	0/56	179	۷
0/84	221	15/53	0/224	0/46	458	2/15	205	9/28	0/62	0/79	180	۸
6/99	362	17/37	0/49	1/01	727	10/35	203	11/83	0/92	1/94	181	9
7/53	735	13/3	0/68	0/67	741	1/43	210	8/03	0/58	0/67	182	10
5	288	17/9	0/48	0/67	752	2/75	202	9/59	0/85	0/59	184	11
0/97	359	44/75	0/28	0/23	850	1/23	202	17/43	0/73	0/33	185	12
2/86	379	37/6	0/5	0/39	864	4/81	561	5/07	0/94	1/48	451	13
¼	396	43	0/37	0/27	881	0/51	663	8/89	0/18	0/46	459	14
1/92	297	18/7	0/47	0/46	949	3	489	5/27	1/01	0/82	568	15
0/4	581	14	0/14	0/19	957	1/3	270	14/26	0/38	0/47	766	16
3/44	267	15/9	0/71	0/53	959	0/3	370	28/04	0/32	0/18	838	17

1/35	371	14/88	0/13	0/42	974	9/59	1369	19/04	1/36	1/07	879	18
1/06	347	19/9	0/29	0/28	978	7/28	525	8/94	1/01	1/14	983	19
0/91	297	23/9	0/22	0/29	985	2/22	628	9/17	0/88	0/53	1013	20
1/39	277	18/9	0/32	0/33	988	1/82	285	10/8	1/32	0/55	1045	21
1/93	320	17/3	0/28	0/43	1082	5/64	440	8/63	1/5	1/03	1086	22
1/58	277	48/8	0/61	0/22	1194	3/78	258	40/3	1/27	0/52	1244	23
9/42	492	37/3	0/42	0/69	1205	0/97	406	31/56	0/63	0/25	1476	24
11/57	496	30/95	1/41	1/18	1231	1/43	460	34/94	0/64	0/24	1494	25
1/66	379	50/17	0/55	0/2	1500	10/5	305	40/3	1/57	0/97	1503	26
2/85	401	39/33	0/75	0/3	1506	4/6	487	18/11	3/63	0/63	1505	27
13/32	624	34/17	0/84	0/83	1507	3/22	573	41/19	1/15	0/42	1510	28
6/84	443	38/9	0/5	0/54	1512	۱/۴	389	26/98	0/92	0/33	1528	29
8/6	363	36/18	0/78	0/72	1513	2/65	714	24/63	1/13	0/34	1529	30
1/85	451	47	0/53	0/2	1533	1/03	599	28/19	0/82	0/22	1548	31

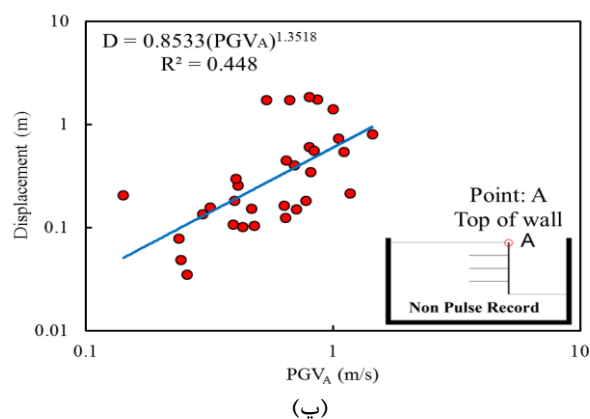
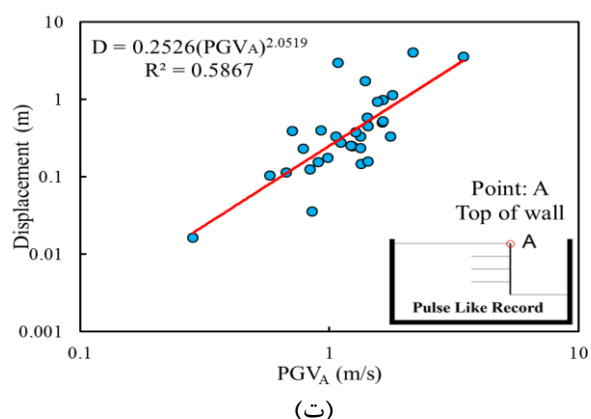
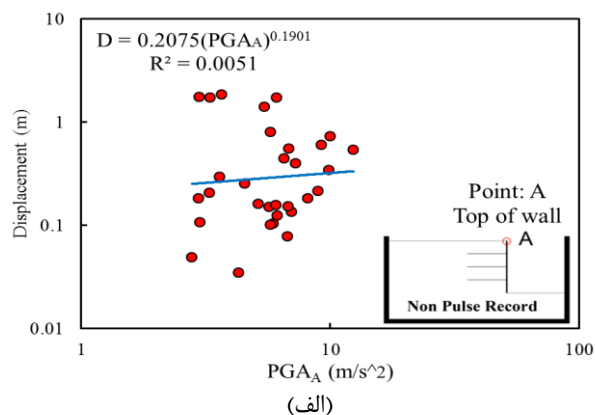
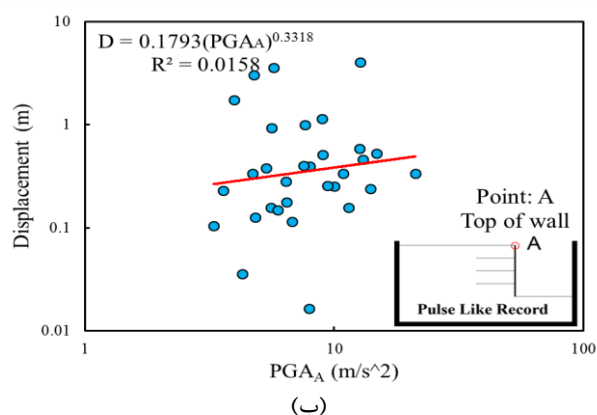
۴- تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از آنالیزها، جهت شناسایی بهترین پارامترهای لرزه‌ای برای پیش‌بینی تغییرمکان تاج دیوار میخ‌کوبی شده و بیشترین نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها برای رکوردهای پالس دار و بدون پالس انجام شده است. برای این پیش‌بینی از پارامترهای لرزه‌ای (PGA و PGV و $U_5-95\%$ و Ia) مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

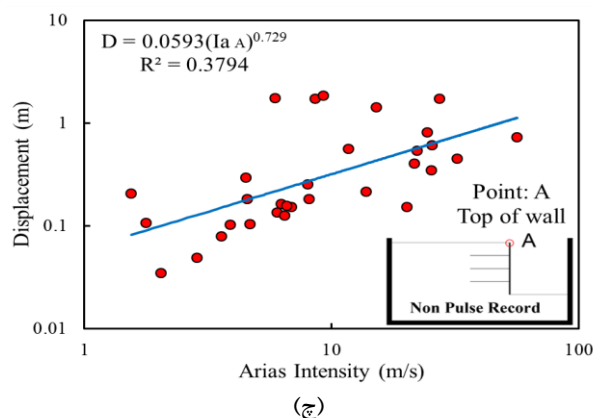
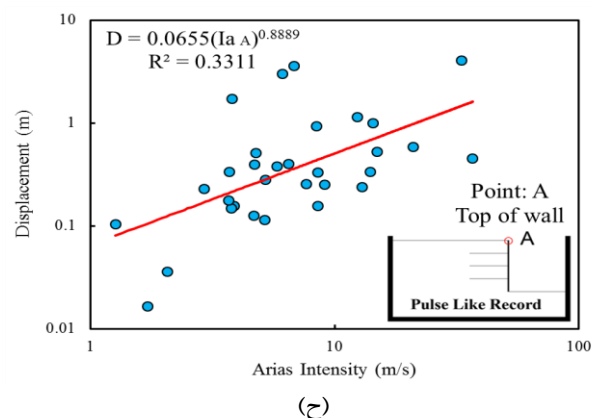
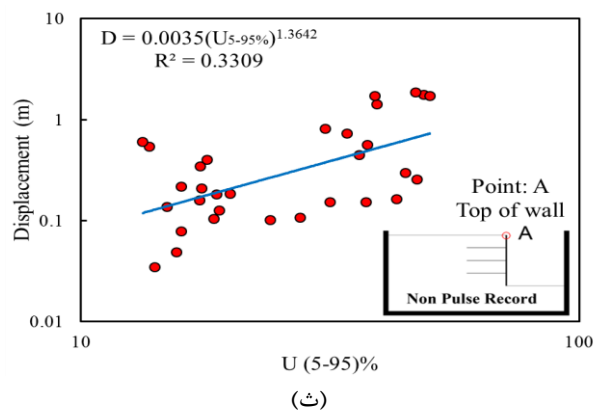
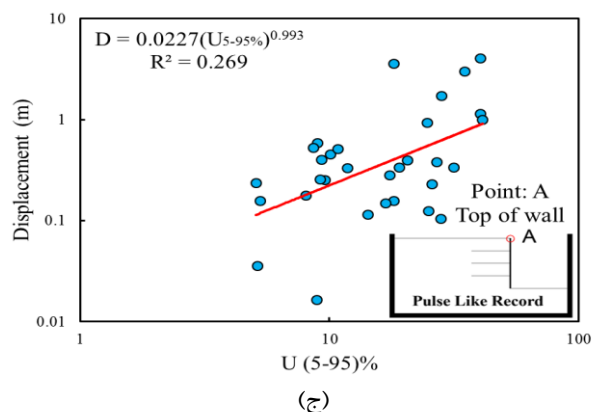
۴-۱- تغییرمکان لرزه‌ای دیوار

نتایج ۱۲۴ آنالیز نشان دادند که باتوجه به شکل (۸ الف و ب) در رکوردهای پالس دار و بدون پالس همبستگی مناسبی بین جابه‌جایی بالای دیوار میخ‌کوبی شده و پارامتر PGA نمی‌باشد پس این پارامتر جهت پیش‌بینی جابه‌جایی دیوار میخ‌کوبی شده مناسب نمی‌باشد، همچنین در شکل (۸ پ و ت) جابه‌جایی‌ها همبستگی بیشتری در رکوردهای حوزه نزدیک مخصوصاً رکوردهای پالس دار با پارامتر PGV از خود نشان داده‌اند، با بررسی دقیق‌تر در خصوص جابه‌جایی‌ها می‌توان بیان کرد که در رکوردهای حوزه نزدیک بدون پالس که دارای PGA در بازه (۱/۱۶g - ۱/۱۸g) و دارای PGV (۰/۱۳ - ۱/۴۱) متر بر ثانیه می‌باشد، دارای میانگین جابه‌جایی ۵۰ سانتی‌متر و در رکوردهای حوزه نزدیک پالس دار که دارای PGA در بازه (۱/۹۴g - ۱/۱۸g) و دارای PGV (۰/۰۹ - ۱/۳۳) متر بر ثانیه می‌باشد دارای میانگین جابه‌جایی ۸۴ سانتی‌متر می‌باشد. بررسی‌های بیشتر در خصوص جابه‌جایی‌ها نشان داد که در رکوردهای پالس دار با میانگین مدت‌زمان مؤثر ۹ ثانیه (شامل ۴۴ رکورد)، نسبت جابه‌جایی تاج دیوار (ΔX) به ارتفاع دیوار (H) برابر ($\Delta X/H = 0/034$) می

باشد در صورتی که در رکوردهای پالس دار زلزله چی چی^{۱۱} با میانگین مدت زمان موثر ۲۲ ثانیه (شامل ۱۸ رکورد) این نسبت (۰/۲) می‌رسد که به دلیل آزاد شدن انرژی در یک مدت زمان کم و PGV بزرگتر در رکوردهای زلزله چی چی جابه‌جایی‌های بزرگتری را ایجاد کرده است. در رکوردهای بدون پالس با میانگین مدت زمان موثر ۱۶/۱۵ ثانیه (شامل ۴۴ رکورد)، نسبت جابه‌جایی تاج دیوار به ارتفاع دیوار برابر (۰/۲۹) می‌باشد در صورتی که در رکوردهای پالس دار زلزله چی چی با میانگین مدت زمان موثر ۱۸/۴۷ ثانیه (شامل ۱۸ رکورد) این نسبت (۰/۱۵) می‌رسد که نشان می‌دهد اثر پالس در نداشت سرعت در رکوردهای حوزه نزدیک در جابه‌جایی تاج دیوار بسیار موثر است و همینطور پارامتر مدت زمان موثر با توجه به رکوردهای زلزله چی چی در رکوردهای پالس دار و بدون پالس با جابه‌جایی‌ها همبستگی نداشته که در شکل‌های (۸ و ۹) نشان داده شده است. در شکل‌های (۸ و ۹) تاثیر پارامتر شدت آریاس بر جابه‌جایی نشان داده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، از بین پارامترهای لرزه‌ای بررسی شده، PGA و PGV و U_{5-95%} (مدت زمان موثر) و Ia (شدت آریاس)، PGV بیشترین همبستگی را با جابه‌جایی تاج دیوار می‌خوبی شده از خود نشان داد اگر چه مستقیماً ویژگی‌های محتوای فرکانسی حرکات زمین را نشان نمی‌دهد. در صورت در نظر گرفتن $\Delta X/H = 10\%$ به عنوان گسیختگی کامل دیوار [۴۷] در رکوردهای بدون پالس دیوار می‌خوبی شده عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده و در ۹۱٪ رکوردهای اعمال شده کمتر از این نسبت جابه‌جایی از خود نشان داده است و رکوردهای عبوری از این نسبت مربوط به رکوردهای زلزله چی چی می‌باشد، همچنین این نسبت برای رکورد های پالس دار ۸۰٪ رکوردها می‌باشد که کمتر از ۱۰٪ ارتفاع تغییر شکل داده اند و در این بخش هم رکوردهای زلزله چی چی از این مقدار عبور کرده‌اند.



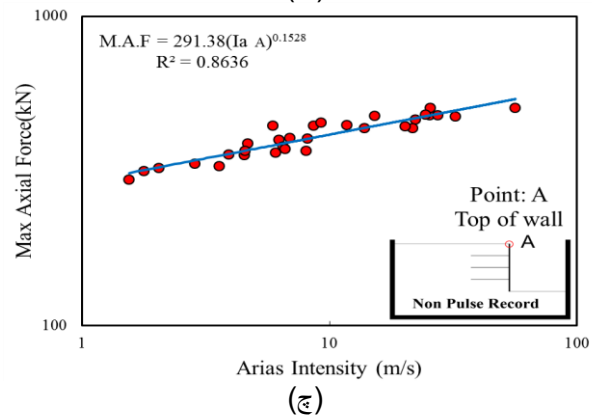
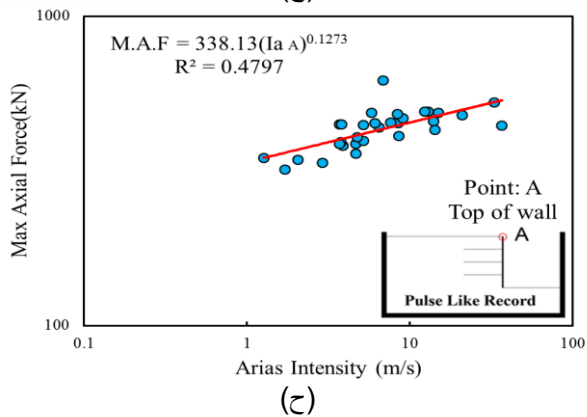
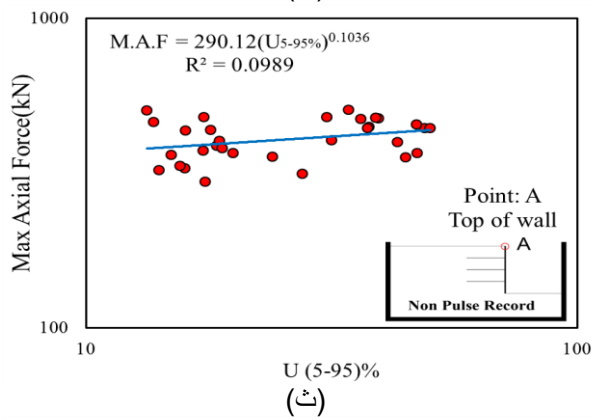
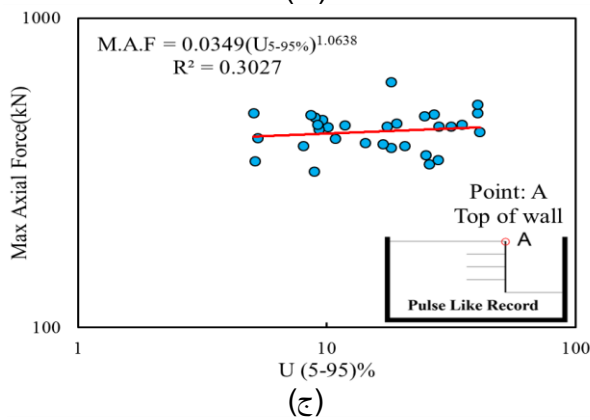
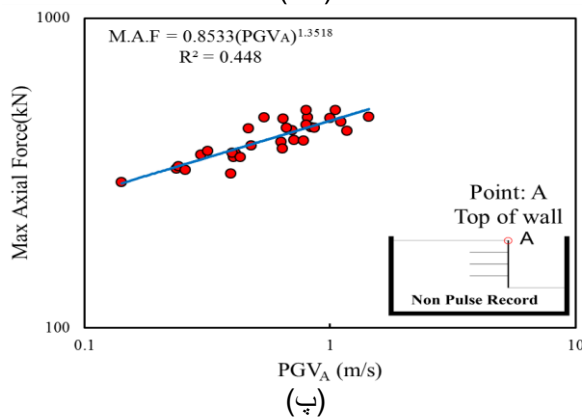
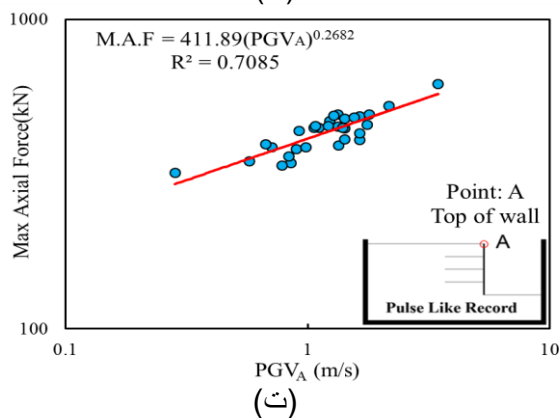
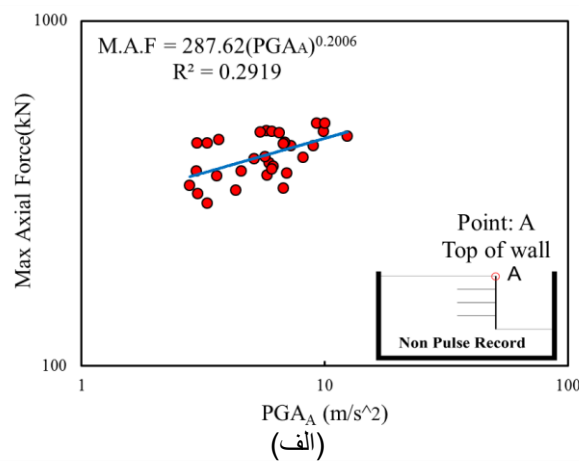
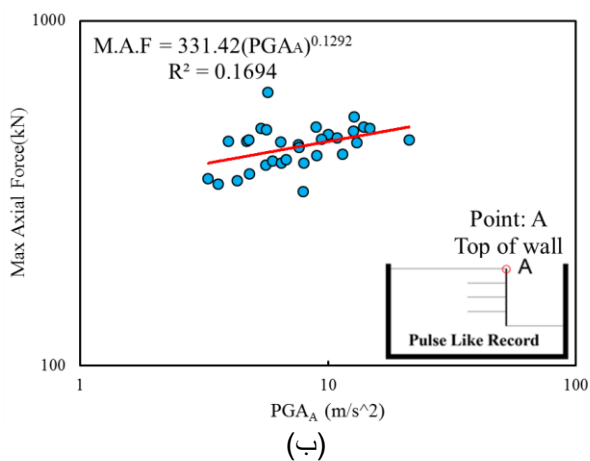
¹¹ Chi chi



شکل ۸: نمودارهای پارامترهای مختلف لرزه‌ای در مقابل جابه‌جایی تاج دیوار میخ‌کوبی شده در نقطه A

۴-۲- نیروی محوری

باتوجه به خروجی‌های گرفته شده از آنالیزهای فوق که بر اساس پارامترهای لرزه‌ای نقطه A در شکل‌های (۸) نشان داده شده است. باتوجه به شکل‌های (۹ - الف، ب، ث، ج) پارامترهای PGA و $U_{5-95\%}$ همانند جابه‌جایی‌ها همبستگی با نیروی محوری میخ‌ها مشاهده نشد، در رکوردهای پالس‌دار، پارامترهای Ia و PGV که در شکل‌های (۹ - ت) و (۹ - ح) نشان داده شده است بیشترین همبستگی با نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها را دارا می‌باشد که از دو پارامتر فوق، PGV بیشترین همبستگی را دارا می‌باشد همچنین در رکوردهای بدون پالس، پارامترهای Ia و PGV که در شکل‌های (۹ - پ) و (۹ - چ) نشان داده شده است از میان چهار پارامتر فوق بیشترین همبستگی را با نیروی محوری ایجاد شده در میخ‌ها را دارا بودند که بر خلاف حالت پالس‌دار، در این حالت پارامتر شدت آریاس که در شکل (۹ - چ) بیشترین همبستگی را با بیشترین نیروی محوری ایجاد شده دارد. در بررسی دقیق‌تر ماکزیمم نیروی محوری ماندگار میخ‌ها مشاهده می‌شود که در حالت استاتیکی بیشترین نیروی محوری میخ‌ها برابر $171/05$ کیلونیوتن می‌باشد که این مقدار نیرو در بیشترین مقدار خود در حالت رکوردهای پالس‌دار به $537/25$ کیلونیوتن رسیده است و در حالت رکوردهای بدون پالس این مقدار برابر 377 کیلونیوتن می‌باشد لذا در حالت بدون پالس مقدار نیرو $2/2$ برابر و در حالت پالس‌دار $3/14$ برابر شده است که نشان از تأثیر بالای رکوردهای پالس‌دار بر نیروی محوری میخ‌ها است.



شکل ۹: نمودارهای پارامترهای لرزه‌ای نقطه A در مقابل ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی اثر زلزله‌های حوزه نزدیک پالس دار و بدون پالس بر روی یک دیوار میخ کوبی شده در نظر گرفته شد. این مدل تحت اثر ۱۲۴ شتاب نگاشت حوزه نزدیک پالس دار و بدون پالس مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق بر روی یک خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط و یک ارتفاع ثابت صورت گرفته است؛ لذا باتوجه به اینکه پارامترهای زیادی در نتایج تحلیل‌های دینامیکی مؤثر هستند نتایج این تحقیق را می‌توان برای حالت ارائه شده در این تحقیق بسط داد. نتایج به دست آمده عبارت‌اند از:

۱- بین پارامترهای (PGA و PGV و $U_5-95\%$ و I_a) که در مقابل جابه‌جایی دیوار میخ کوبی شده ترسیم شده‌اند پارامتر PGV با $R^2 = 0/58$ به‌عنوان یک پارامتر تعیین‌کننده در پیش‌بینی جابه‌جایی رکوردهای پالس دار در نظر داشت اگرچه مستقیماً ویژگی‌های محتوای فرکانسی حرکت زمین را نشان نمی‌دهد.

۲- در صورت در نظر گرفتن $\Delta X/H = 10\%$ به‌عنوان گسیختگی کامل دیوار در رکورد های بدون پالس دیوار میخ کوبی شده عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده و در 91% رکوردهای اعمال شده کمتر از این نسبت جابه‌جایی از خود نشان داده است و رکورد های عبوری از این نسبت مربوط به رکورد های زلزله چی چی می‌باشد، همچنین این نسبت برای رکورد های پالس دار 80% رکورد ها می باشد که کمتر از 10% ارتفاع تغییر شکل داده اند و در این بخش هم رکورد های زلزله چی چی از این مقدار عبور کرده اند.

۳- علت جابه‌جایی بیشتر دیوار میخ کوبی شده تحت رکورد های پالس دار به دلیل آزاد شدن انرژی در یک مدت زمان کوتاه به دیوار می باشد این در حالی است که در رکورد های بدون پالس آزاد شدن انرژی به صورت تدریجی و یکنواخت در طول مدت زلزله می باشد.

۴- بررسی‌های انجام شده در خصوص ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها نشان داد که نیروی محوری ایجاد شده در رکوردهای بدون پالس حدود $2/2$ برابر و برای رکوردهای پالس دار $3/14$ برابر حالت استاتیکی شده است و پارامتر شدت آریاس با $R^2 = 0/86$ در رکوردهای بدون پالس یک پارامتر مؤثر در پیش‌بینی ماکزیمم نیروی محوری میخ‌ها می‌باشد در صورتی که در رکوردهای پالس دار همچنان پارامتر PGV با $R^2 = 0/7$ پارامتر مؤثر می‌باشد.

مراجع

- [1]. Lazarte, C.A., et al. ۲۰۱۵. *Geotechnical engineering circular No.7 soil nail walls-reference manual*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [2]. Felio, G., et al. ۱۹۹۰. *Performance of soil nailed walls during the October ۱۷, ۱۹۸۹ Loma Prieta Earthquake*. in *Proceedings of the ۴۳rd Canadian geotechnical conference, Quebec, Canada*.
- [3]. Bathurst, R. ۱۹۹۷. *Review of seismic design, analysis and performance of geosynthetic reinforced walls, slopes and embankments*. Earth reinforcement, p۹۱۸-۸۸۷.
- [4]. Shen, C., et al. ۱۹۸۱. *An in situ earth reinforcement lateral support system*. NASA STI/Recon Technical Report N. ۸۲, p۲۶۵۲۰.
- [5]. Schlosser, F. ۱۹۸۹. *Le projet national CLOUTERRE*. in *ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS*.
- [6]. Tufenkjian Mark, R. and M. Vucetic. ۲۰۰۰. *Dynamic Failure Mechanism of Soil-Nailed Excavation Models in Centrifuge*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ۱۲۶(۳), p۲۳۵-۲۲۷.

- [7]. Dashtara, H., et al. ۲۰۱۹. *Numerical Investigation on the Displacements and Failure Mechanism of Soil-Nailed Structures in Seismic Conditions*. in *Geo-Congress ۲۰۱۹: Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. American Society of Civil Engineers Reston, VA.
- [8]. Hong, Y.-S., et al. ۲۰۰۵. *Shaking table tests and stability analysis of steep nailed slopes*. *Canadian Geotechnical Journal*. ۴۲(۵), p۱۲۷۹-۱۲۶۴.
- [9]. Sahoo, S., B. Manna, and K.G. Sharma . ۲۰۲۱. *Shaking Table Tests to Evaluate the Seismic Performance of Soil Nailing Stabilized Embankments*. *International Journal of Geomechanics*. ۲۱(۴), p۰۴۰۲۱۰۳۶.
- [10]. Sahoo, S., B. Manna, and K.G. Sharma. ۲۰۱۵. *Stability analysis of steep nailed slopes under seismic condition using ۳-D finite element method*. *International Journal of Geotechnical Engineering*. ۹(۵), p۵۴۰-۵۳۶.
- [11]. Rawat, P. and K. Chatterjee. ۲۰۱۸. *Seismic Stability Analysis of Soil Slopes Using Soil Nails*. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, p۸۷-۷۹.
- [12]. Moniuddin, M.K., P. Manjularani, and L. Govindaraju. ۲۰۱۶. *Seismic analysis of soil nail performance in deep excavation*. *International Journal of Geo-Engineering*. ۷(۱), p۱۰-۱.
- [13]. Panah, A.K. and S. Majidian. ۲۰۱۳. *2D numerical modelling of soil-nailed structures for seismic improvement*. *Geomechanics & engineering*. ۵(۱), p۵۵-۳۷.
- [14]. Yazdandoust, M. ۲۰۱۹. *Shaking table modeling of MSE/soil nail hybrid retaining walls*. *Soils and Foundations*. ۵۹(۲), p۲۵۲-۲۴۱.
- [15]. KOMAKPANAH, A. and S. MAJIDIAN. ۲۰۱۶. *VERIFICATION OF A STATIC NONLINEAR ANALYSIS METHOD FOR ESTIMATION OF SOIL-NAILED RETAINING WALLS SEISMIC DEFORMATIONS*. *SHARIF: CIVIL ENGINEERING*. ۲-۳۲(۳,۱), p 116-107.
- [16]. Komak Panah, A. and S. Majidian. ۲۰۱۷. *Non-linear ۲DOF system for efficient seismic analysis of vertical soil-nailed walls*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. ۲۱(۱۱), p ۱۳۲۵-۱۳۰۱.
- [17]. Majidian, S., B. Alinejad, and A. Golshani. ۲۰۲۲. *Effects of forepoling, nailing and micropiling on the behaviour of a two-storey tunnel*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, p ۱۶-۱.
- [18]. Zamiran, S., H. Ghojavand, and H. Saba. ۲۰۱۲. *Numerical Analysis of Soil Nail Walls under Seismic Condition in ۳D Form Excavations*. *Applied Mechanics and Materials*. ۲۰۸-۲۰۴, p۲۶۷۱-۲۶۷۶.
- [19]. Hudson, D.E. and G.W. Housner. ۱۹۵۸. *An analysis of strong-motion accelerometer data from the San Francisco earthquake of March ۲۲, ۱۹۵۷*. *Bulletin of the seismological society of America*. ۴۸(۳), p۲۶۸-۲۵۳.
- [20]. Mokhtari, M., K. Barkhordari, and S. Abbasi. ۲۰۲۰. *A Comparative Study of the Seismic Response of Soil-Nailed Walls under the Effect of Near-fault and Far-fault Ground Motions*. *Journal of Engineering Geology*. ۱۳(۵), p -۱۲۱ ۱۴۶.
- [21]. Somerville, P.G., et al. ۱۹۹۷. *Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity*. *Seismological research letters*. ۶۸(۱), p ۲۲۲-۱۹۹.
- [22]. Mavroeidis, G., G. Dong, and A. Papageorgiou. ۲۰۰۴. *Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. ۳۳(۹), p -۱۰۲۳ ۱۰۴۹.

- [23]. Lashgari, A., Y. Jafarian, and A. Haddad. ۲۰۲۰. *A coupled stick-slip-rotation model for earthquake-induced sliding displacement of slopes in Iran*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, :۱۳۵ p ۱۰۶۱۹۹.
- [24]. Mohammad Zaki, M.F., et al. ۲۰۱۵. *Analysis of soil nailing under earthquake loading in malaysia using finite element method*. in *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publ.
- [25]. Callisto, L., A. Amorosi, and S. Rampello. ۱۹۹۹. *The influence of pre-failure soil modelling on the behaviour of open excavations*. in *Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Proceedings) The Netherlands Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering; Ministry of Transport, Public Works and Water Management; AP van den Berg Machinefabriek; Fugro NV; GeoDelft; Holland Railconsult*.
- [26]. Benz, T. ۲۰۰۶. *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences (Ph. D. Thesis)*. Germany: University of Stuttgart.
- [27]. Vucetic, M., M. Tufenkjian, and M. Doroudian. ۱۹۹۳. *Dynamic centrifuge testing of soil-nailed excavations*. Geotechnical Testing Journal. ۱۶(۲), p۱۸۷-۱۷۲.
- [28]. Brinkgreve, R., M. Kappert, and P. Bonnier. ۲۰۰۷. *Hysteretic damping in a small-strain stiffness model*. Proc. of Num. Mod. in Geomech., NUMOG X, Rhodes. p۷۴۲-۷۳۷.
- [29]. Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P. G., & Galavi, V. ۲۰۲۰. *Material Models Manual, Plaxis, CONNECT Edition V.۲۰.۰۴*
- [30]. Lees, A. ۲۰۱۶. *Geotechnical Finite Element Analysis*. ICE publishing.
- [31]. Lysmer, J. and R.L. Kuhlemeyer. ۱۹۶۹. *Finite dynamic model for infinite media*. Journal of the Engineering Mechanics Division. ۹۵(۴), p ۸۷۷-۸۵۹.
- [32]. Atkinson, J. and G. Salfors. ۱۹۹۱. *Experimental determination of soil properties. General Report to Session ۱*. in *Proc. ۱۰th ECSMFE, Florence*.
- [33]. Bolt, B.A. ۱۹۷۱. *The san fernando valley, california, earthquake of february ۱۹۷۱ ۹: Data on seismic hazards*. Bulletin of the seismological society of America. ۶۱(۲), p ۵۱۰-۵۰۱.
- [34]. Bertero, V.V., S.A. Mahin, and R.A. Herrera. ۱۹۷۸. *Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records*. Earthquake engineering & structural dynamics. ۶(۱), p۴۲-۳۱.
- [35]. Iwan, W. ۱۹۹۷. *Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions*. Journal of structural engineering. ۱۲۳(۴), p ۴۰۴-۳۹۷.
- [36]. Alavi, B. and H. Krawinkler. ۲۰۰۱. *Effects of near-fault ground motions on frame structures*. John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford.
- [37]. Menun, C. and Q. Fu. ۲۰۰۲. *An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems*. in *Proceedings, ۷th US National Conference on Earthquake Engineering*.
- [38]. Makris, N. and C.J. Black. ۲۰۰۴. *Dimensional analysis of bilinear oscillators under pulse-type excitations*. Journal of Engineering Mechanics. ۱۳۰(۹), p۱۰۳۱-۱۰۱۹.
- [39]. Akkar, S., U. Yazgan, and P. Gülkan. ۲۰۰۵. *Drift estimates in frame buildings subjected to near-fault ground motions*. Journal of Structural Engineering. ۱۳۱(۷), p۱۰۲۴-۱۰۱۴.
- [40]. Luco, N. and C.A. Cornell. ۲۰۰۷. *Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions*. Earthquake Spectra. ۲۳(۲), p ۳۹۲-۳۵۷.

- [41]. Stewart, J.P., et al. ۲۰۰۲. *Ground motion evaluation procedures for performance-based design*. Soil dynamics and earthquake engineering. ۲۲(۱۲-۹), p ۷۷۲-۷۶۵.
- [42]. Mavroeidis, G.P. and A.S. Papageorgiou. ۲۰۰۳. *A mathematical representation of near-fault ground motions*. Bulletin of the seismological society of America : (۳)۹۳, p ۱۱۳۱-۱۰۹۹.
- [43]. Somerville, P.G. ۲۰۰۳. *Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse*. Physics of the earth and planetary interiors. ۱۳۷(۴-۱), p ۲۱۲-۲۰۱.
- [44]. Fu, Q. and C. Menun. ۲۰۰۴. *Seismic-environment-based simulation of near-fault ground motions*. in *Proceedings of the ۱۳th world conference on earthquake engineering*.
- [45]. Baker, J.W. ۲۰۰۷. *Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis*. Bulletin of the seismological society of America. ۹۷(۵), p ۱۵۰۱-۱۴۸۶ .
- [46]. Song, J. and A. Rodriguez-Marek. ۲۰۱۵. *Sliding displacement of flexible earth slopes subject to near-fault ground motions*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ۱۴۱(۳), p ۴۰۱۴۱۱۰ .
- [47]. Wu, Y. and S. Prakash. ۱۹۹۶. *On seismic displacements of rigid retaining walls*. Analysis and design of retaining structures against earthquakes. ۳۷-۲۱.