



## بررسی اثر زلزله‌های دور و نزدیک بر رفتار لرزه‌ای گروه ریزشمع در خاک دانه‌ای سست و متراکم

احسان محمدی اصفهانی، رضا نادری\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

### کلمات کلیدی:

گروه ریزشمع  
زلزله‌های دور و نزدیک  
اجزاء محدود  
تحلیل تاریخچه زمانی  
Opensees

**خلاصه:** مطالعه عملکرد سیستم ریزشمع به عنوان یک روش موثر، اجرایی و مقرون به صرفه برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان و فونداسیون و در نظر گرفتن ویژگی‌ها و اثرات متفاوت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر سازه‌ها، ضرورت مطالعه عملکرد گروه ریزشمع تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک را توجیه می‌نماید. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Opensees، دو نوع خاک دانه‌ای سست ( $Dr = 40\%$ ) و متراکم ( $Dr = 80\%$ ) با رفتار الاستوپلاستیک و دو مدل تسلیح شامل گروه ریزشمع قائم و مایل با رفتار الاستیک و مصالح بتنی با توجه به سرعت موج برشی ساختمان ( $V_{s30}$ ) تحت اثر سه مجموعه زلزله دور و نزدیک قرار گرفت. پاسخ‌های گروه ریزشمع شامل تغییر مکان افقی، شتاب و نیروهای داخلی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و نتایج مهم برای بهره‌گیری از گروه ریزشمع به منظور مقاوم‌سازی لرزه‌ای در مناطق نزدیک به کانون لرزه‌زا و دور از آن ارائه گردید. نتایج نشان داد اثر رکوردهای نزدیک گسل موجب افزایش قابل ملاحظه تغییر مکان افقی به ویژه در ساختمان دانه‌ای سست می‌گردد. افزایش تغییر مکان جانبی در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختمان دانه‌ای سست به ترتیب  $125\%$  و  $124\%$  و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختمان دانه‌ای متراکم به ترتیب  $15\%$  و  $13\%$  می‌باشد. همچنین گروه ریزشمع مایل عملکردی تقریباً مشابه در کنترل شتاب و تغییر مکان‌های افقی و عملکرد بهتری در کنترل نیروهای داخلی نسبت به گروه ریزشمع قائم از خود نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

مقاومت خوبی در برابر زلزله در مقایسه با شمع‌های بتنی مسلح و با قطر بزرگ دارند. در دو دهه اخیر از جمله کارهای مهم انجام شده در زمینه تحلیل عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع می‌توان به مطالعات سادک و شاهرور (۲۰۰۴) و (۲۰۰۶) اشاره کرد [۲ و ۳]. این مطالعه نشان داد استفاده از ریزشمع مایل موجب کاهش شتاب جانبی سازه می‌گردد و اتصال مفصلی بین ریزشمع و کلاهک، موجب کاهش ممان خمشی و نیروی محوری به خصوص در ریزشمع‌های مایل می‌شود. مطالعه شاهرور و همکاران (۲۰۱۲) مویید این مطلب بود که مایل بودن ریزشمع‌ها اثر کاملاً مثبتی بر عملکرد لرزه‌ای و اثر کاهش قابل توجهی بر مقدار نیروی برشی و خمشی آن‌ها دارد. همچنین زاویه  $20^\circ$  درجه به عنوان مقدار بهینه برای شیب ریزشمع‌ها معرفی گردید [۴]. در سال ۲۰۱۳ توسط قربانی و همکاران، یک مطالعه جامع پارامتری و تحلیل اجزای محدود سه بعدی و آنالیز حساسیت بر روی عملکرد لرزه‌ای سیستم خاک - ریزشمع - سازه صورت گرفت و اثر پارامترهای مختلف مانند شتاب زلزله ورودی، مشخصات خاک بستر، اثر روسازه و سرشمع و اتصال آن‌ها،

ریزشمع (میکروپایل) به شمع‌هایی با قطر کمتر از  $300$  میلی‌متر اطلاق می‌گردد که با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب همراه است. ریزشمع‌ها برای مقاصد متفاوتی از جمله تحمل بارهای محوری و جانبی، تقویت عملکرد بستر خاکی یا فونداسیون و به طور کلی به عنوان جزئی از سیستم ترکیبی خاک و ریزشمع، بسته به هدف طراحی به کار برده می‌شود. علاوه بر این به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مقاومتی خاک اطراف شده و به عنوان روشی برای بهسازی خاک محسوب می‌گردد. ریزشمع‌ها را می‌توان با توجه به هدف طراحی و زمینه کاربرد به صورت تکی یا آرایش گروهی و به صورت قائم یا مایل تحت یک زاویه مشخص نسبت به سطح افق اجرا کرد [۱].

گرچه پژوهش در مورد شمع‌ها سابقه زیادی دارد لکن زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ را می‌توان نقطه عطفی در آغاز مطالعات ویژه ریزشمع‌ها دانست. آنالیز خرابی پی‌ها در این زلزله نشان داد که گروه شمع‌های فولادی با قطر کوچک،

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rz\_naderi@yahoo.com



مدل خاک-شمع-پل، نشان داد تحریکات نزدیک به گسل، اثرات اندرکنش خاک و شمع را به طور قابل توجهی تقویت می‌کند [۱۷].

مطالعات فوق از یک سو بیانگر کارآمدی گروه ریزشمع و از سوی نشانگر تفاوت‌های مهم زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در محتوای فرکانسی و ایجاد تغییر شکل‌های سطحی علی‌رغم مشابهت‌های ذاتی است. همچنین مطالعه مرادی مقدم و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی آزمایشگاهی نشان داد، درصد تراکم نسبی متفاوت در خاک‌های دانه‌ای می‌تواند اختلاف قابل توجهی در ظرفیت باربری ریزشمع‌ها ایجاد کند [۱۸]. بر این اساس دو نوع خاک دانه‌ای سست ( $D_r=40\%$ ) و متراکم ( $D_r=80\%$ ) با دو مدل تسلیح (گروه ریزشمع قائم و گروه ریزشمع مایل) با توجه به نوع ساختگاه تحت اثر سه مجموعه زلزله دور و نزدیک قرار گرفت. پاسخ‌های گروه ریزشمع شامل تغییر مکان افقی، شتاب و نیروهای داخلی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و نکات مهمی برای بهره‌گیری از گروه ریزشمع به منظور مقاوم‌سازی لرزه‌ای در مناطق نزدیک به کانون لرزه‌زا و دور از آن ارائه گردید.

## ۲- مدل‌سازی عددی

### ۲-۱- مدل خاک

یک توده خاک همگن متشکل از المان‌های هشت‌گره‌ای از نوع Brick u-p برای مدل‌سازی خاک در نظر گرفته شد. گره‌های این المان دارای چهار درجه آزادی است که شامل سه درجه آزادی برای حرکت انتقالی و یک درجه آزادی برای فشار آب حفره‌ای می‌باشد. برای تعریف مصالح خاک از ماده چند تسلیمی وابسته به فشار (PDMY) استفاده شد. این ماده الاستوپلاستیک برای شبیه‌سازی خصوصیات پاسخ خاک حساس به فشار تحت حالت‌های بارگذاری عمومی به کار می‌رود و در طول بارگذاری استاتیکی دارای رفتار الاستیک خطی و در طول بارگذاری دینامیکی دارای رفتار الاستوپلاستیک است [۱۹]. سطح تسلیم این ماده از مدل دراگر-پراگر پیروی می‌کند که با توجه به تجربه‌های قبلی در مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک یکی از حالت‌های مناسب برای تعریف رفتار غیرخطی مصالح اصطکاکی از جمله خاک‌های دانه‌ای محسوب می‌شود که مقاومت آن‌ها وابسته به فشار است. میرایی رایلی مرسوم‌ترین نوع میرایی مکانیکی است که در تحلیل‌های دینامیکی به کار گرفته می‌شود و یک ترکیب خطی از دو ماتریس جرم و سختی است که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

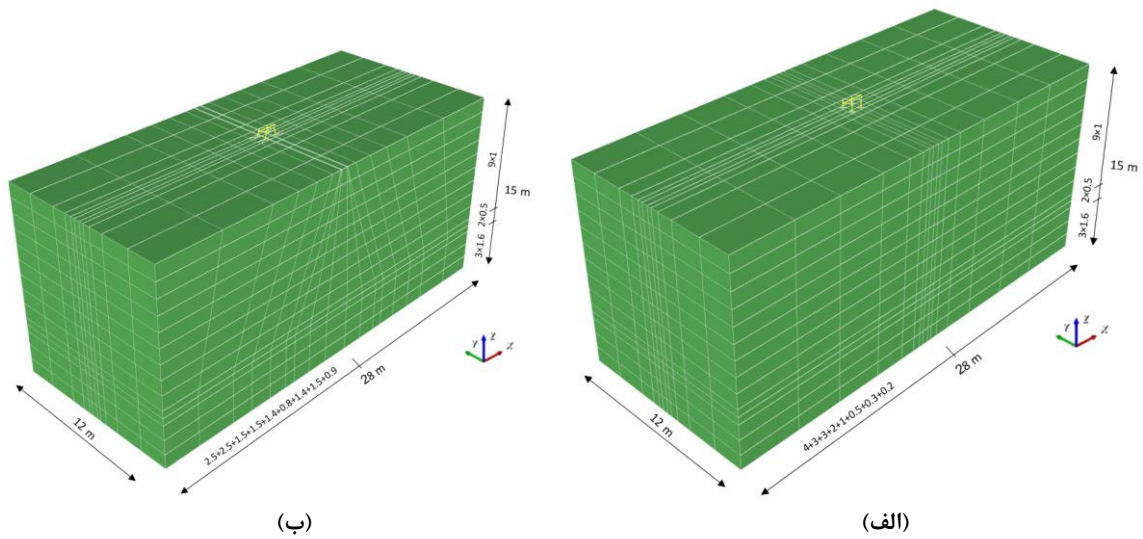
$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (1)$$

مشخصات ریزشمع‌ها (شامل تعداد، قطر، شیب، سختی و فاصله از یکدیگر) بر پاسخ لرزه‌ای ریزشمع مورد بررسی قرار گرفت [۵]. علاوه بر این به کمک مدل‌های فیزیکی، عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع در مقیاس واقعی به صورت برج‌توسط کاپاتی و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۶) و در مقیاس آزمایشگاهی توسط جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸) مورد مطالعه گرفت. این مطالعات علاوه بر بررسی عوامل اثرگذار بر پاسخ ریزشمع به روشنی تاثیر مثبت عملکرد گروه ریزشمع به ویژه ریزشمع‌های مایل را نشان داد [۸-۶].

حرکات زمین در محدوده نزدیک گسل به شدت تحت تاثیر مکانیزم چشمه لرزه‌ای، جهت گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و جابجایی ماندگار ناشی از حرکات تکنونیک زمین می‌باشد. این تاثیر باعث به وجود آمدن خصوصیات منحصر به فردی از جمله جهت پذیری پیش‌رونده، اثر تغییر مکان ماندگار، محتوای فرکانسی بالا و اثر مولفه قائم در زلزله‌های نزدیک گسل می‌شود و موجب رفتار متفاوت این زلزله‌ها در مقایسه با زلزله‌های دور از گسل می‌گردد. تاثیر این مولفه‌ها به صورت یک پالس شدید با دامنه بزرگ و مدت دوام کوتاه، محتوای فرکانسی بالا و یا تغییر مکان ماندگار حاصل از گسلش زمین، در نگاهت‌های نزدیک گسل نمود پیدا می‌کند [۹]. با افزایش فاصله از گسل همچنان که تاثیر سایر پارامترها نظیر بزرگی زلزله و شرایط ساختگاه بر روی خصوصیات جنبش‌های ثبت شده افزایش می‌یابد، تاثیر خصوصیات ذاتی زلزله‌های حوزه نزدیک کاهش می‌یابد. با این وجود تعیین یک فاصله کانونی دقیق برای مشخص نمودن مرز زلزله‌های حوزه نزدیک دور امری مشکل و غیرمنطقی است [۱۱ و ۱۰].

به علت کمبود اطلاعات تا اواخر قرن بیستم، مطالعات اندکی بر روی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های دور و تاثیر آن‌ها بر روی سازه‌ها انجام شده است. در دو دهه اخیر از چندین زلزله مشهور مانند زلزله نورث‌ریج آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه ژاپن (۱۹۹۵)، کجالی ترکیه (۱۹۹۹) و چی‌چی تایوان (۱۹۹۹)، اطلاعات ارزشمندی در مورد شناخت خصوصیات و تاثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر سازه‌ها به دست آمد که راه را برای مطالعه بیشتر در مورد زلزله‌های حوزه نزدیک و اثرات آن‌ها باز کرد.

مصطفی و تاکی واکا (۲۰۱۰) و لیو و همکاران (۲۰۱۲) مدل‌هایی را برای شبیه‌سازی حرکت زمین نزدیک به گسل ارائه دادند [۱۳ و ۱۲]. مطالعات احمدی و خوشنودیان (۲۰۱۵)، کرک و همکاران (۲۰۱۶) و یگانه و فتاحی (۲۰۱۹)، تاثیرات متفاوت زلزله‌های نزدیک به گسل را بر ساختگاه، مدل‌های سازنده خاک و اندرکنش خاک و سازه بیش از پیش نشان داد [۱۴-۱۶]. همچنین نتایج آزمایش میز لرزه‌زی و سان (۲۰۲۱) بر روی یک



شکل ۱. مدل کلی سیستم خاک - ریزشمع - سرریزشمعالف - گروه ریزشمع قائم (ب) - گروه ریزشمع مایل

Fig. 1. General model of soil - micropile - cap system (a): Vertical micropile group (b): Inclined micropile group

برای اعمال میرایی رایلی از دستور رایلی در نرم افزار استفاده شد. این دستور برای اختصاص میرایی به تمام المان و گره‌های تعریف شده در دامنه مدل به کار می‌رود.

دو نوع مصالح دانه‌ای (ماسه نوادا) با دو تراکم متفاوت ( $Dr = 40\%$  و  $Dr = 80\%$ ) برای بلوک خاکی در نظر گرفته شد. مشخصات خاک‌ها در جدول ۱ آمده است.

## ۲-۲- مدل ریزشمع و کلاهک (سر ریزشمع)

برای مدل‌سازی ریزشمع المان Displacement-Based Beam-Column انتخاب گردید. این المان قابلیت تولید تیر-ستون با مقاطع منشوری یا غیرمنشوری و با در نظر گرفتن اثر پلاستیسیته را دارد. همچنین ماده الاستیک تک محوره از نوع بتن با مقطع دایره‌ای به عنوان مصالح به ریزشمع اختصاص یافت. رفتار ریزشمع‌ها خطی و الاستیک در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی کلاهک (سر ریزشمع) از المان تیر-ستون مشابه ریزشمع استفاده شده است. مصالح اختصاص یافته به کلاهک ریزشمع از نوع بتن با رفتار ماده الاستیک تک محوره و با مقطع مستطیلی می‌باشد و به وسیله قیدهای equalDOF که درجات آزادی گره‌ها را به هم متصل می‌کند به ریزشمع‌ها به صورت صلب بسته شده است.

در مطالعات مربوط به میرایی خاک، میرایی رایلی هم به صورت ترکیبی از ماتریس‌های جرم و سختی و هم به صورت ساده فقط با در نظر گرفتن ماتریس سختی پیشنهاد شده است. چنانچه از ماتریس جرم صرف نظر شود، ماتریس میرایی به ماتریسی منفرد تبدیل می‌شود [۲۰ و ۲۱]. بنابراین داریم:

$$\beta_k = \frac{2\zeta_0}{\omega_0} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $\omega_0$  فرکانس غالب بارگذاری و  $\zeta_0$  نسبت میرایی مواد است که ۵٪ در نظر گرفته شده است.

فرکانس طبیعی خاک برای هر مود قابل محاسبه است. این مقدار برای مود اول از رابطه (۳) به دست می‌آید [۲۲].

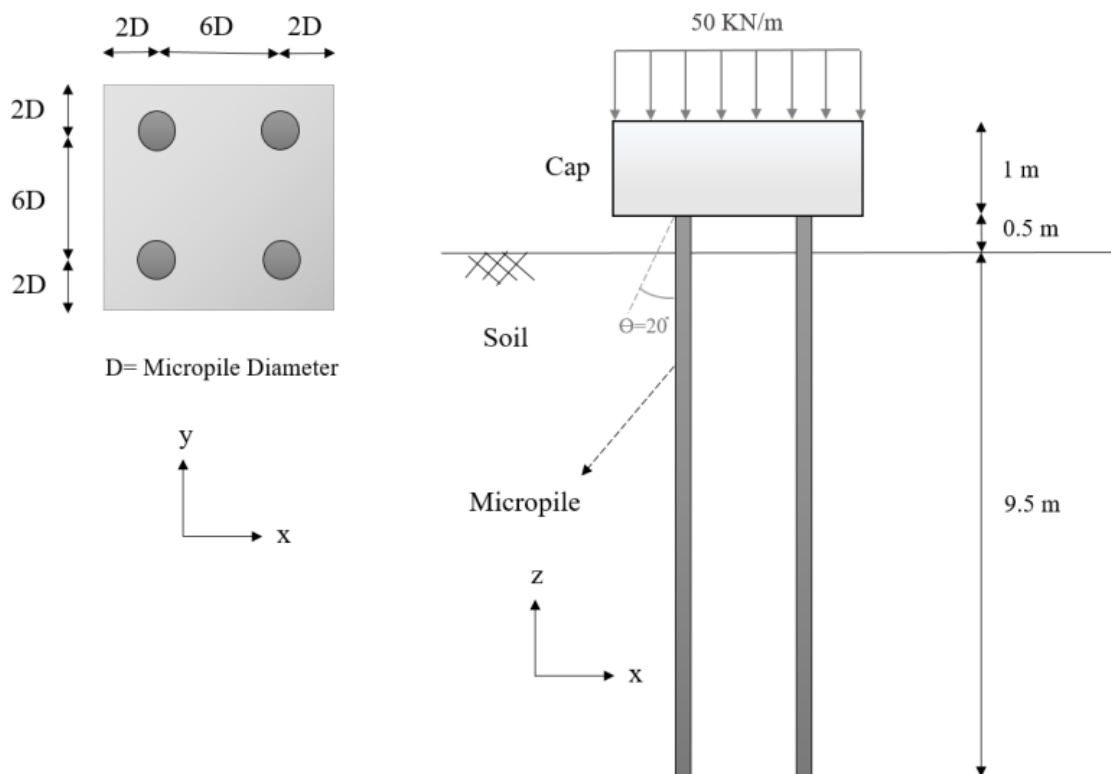
$$f_s = \frac{V_s}{4H_s} \quad (3)$$

در این رابطه  $f_s$  فرکانس طبیعی خاک،  $V_s$  سرعت موج برشی در خاک و  $H_s$  ضخامت لایه خاک می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات خاک دانه‌ای [۲۳]

Table 1. Characteristics of granular soil

پارامترها	ماده نوادا	
تراکم نسبی (%)	۸۰	۴۰
جرم مخصوص اشباع $\rho$ ( $\text{ton/m}^3$ )	۲/۰۳	۱/۹۶
مدول برشی مرجع Gr (MPa)	۸۸/۴	۴۶/۲
مدول بالک مرجع Br (MPa)	۲۳۶	۱۲۳
زاویه اصطکاک $\phi$	۳۶/۵	۳۲
گرانش برشی حداکثر $\gamma_{\text{max}}$	۰/۱	۰/۱
فشار محصور کننده موثر مرجع (kPa)	۱۰۱	۱۰۱
ضریب وابستگی فشار	۰/۵	۰/۵
زاویه تبدیل فاز $\phi_{\text{PT}}$	۲۶	۳۰
نسبت تخلخل	۰/۶۱۸	۰/۷۳



شکل ۲. جزئیات مدل‌سازی ریزشمع و کلاهک بتنی

Fig. 2. Details of modeling of micropile and concrete cap

جدول ۲. مشخصات ریزشمع

Table 2. Micropile Characteristics

پارامترها	جرم مخصوص $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته E (GPa)	قطر D (m)
بتن	۲۴۰۰	۰/۳	۲۵	۰/۲

جدول ۳. مشخصات ماسه ۳۰/۶۰ آکلند- آزمایش میز لرزه منوس و همکاران [۲۵]

Table 3. Auckland 30/60 Sand Specifications - Manus shaking table test

پارامترها	مقدار	توضیحات
$\rho_s$	۲/۶۵ ton/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص ذرات جامد
$D_{10}$	۰/۳ mm	اندازه دانه با ۱۰ درصد ذرات خاک ریزتر
$D_{60}$	۰/۴۵ mm	اندازه دانه با ۶۰ درصد ذرات خاک ریزتر
$e_{min}$	۰/۵۳	بیشینه نسبت تخلخل
$e_{max}$	۰/۸۳	کمینه نسبت تخلخل
$\phi_s$	۳۳°	زاویه اصطکاک داخلی در حالت ثابت

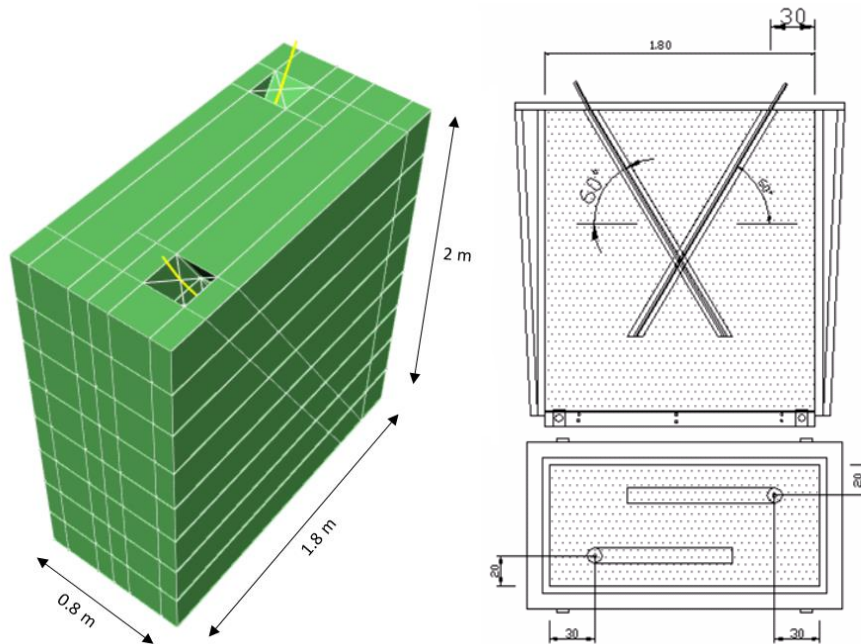
۲-۳- شرایط مرزی

به منظور جلوگیری از خطای تحلیل ناشی از برخورد امواج زلزله به مرزهای مدل و بازگشت آن‌ها به داخل محیط، شرایط مرز آزاد در وجوه مدل، با اتصال گره‌های هم تراز در وجوه راست و چپ مدل در راستای X (جهت اعمال شتاب زلزله) تامین گردید. کف مدل به عنوان سنگ بستر در نظر گرفته شده و در سه راستای X، Y و Z مقید شده است. برای در نظر گرفتن اثرات سنگ بستر، از میراگر با المان طول صفر و مواد تک محوره ویسکوز بر اساس روش لیزمر و کول میر در راستاهای X و Z استفاده شد [۲۴].

۳- صحت سنجی

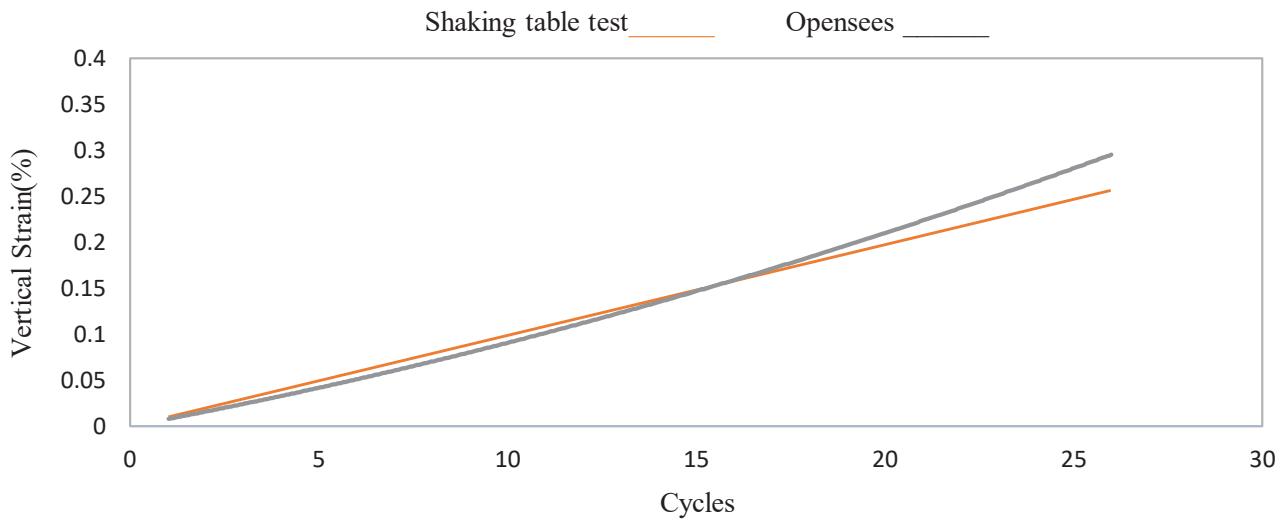
عملکرد مدل نرم افزاری بر اساس مدل میز لرزه منوس و همکاران که در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه کانتربری نیوزلند با موضوع تسلیح خاک با ریزشمع‌های مایل در مقابل روانگرایی انجام شده مورد صحت سنجی قرار گرفت. در این آزمایش یک مدل خاکی از نوع ماسه ۳۰/۶۰ آکلند با تراکم ۴۰٪ در جعبه مدل‌سازی به ابعاد  $1/8 \times 0/8 \times 2$  m در دو حالت بدون تسلیح و با تسلیح ریزشمع مایل با زاویه ۳۰ درجه تحت آزمون میز لرزه یک درجه آزادی قرار گرفت. در شرایط تسلیح شده خاک از دو ریزشمع خود حفار

استفاده گردید و دوغاب سیمان هنگام حفاری با فشار کم تزریق شد تا با خاک اطراف مخلوط شود. قطر ریزشمع‌های مورد استفاده پس از اجرای دوغاب با مقاومت ۲۸ روزه ۱۱ MPa برابر ۱۰۰ mm می‌باشد. تحریک ورودی دستگاه، یک بار هارمونیک سینوسی در ۲۶ سیکل با فرکانس ۱ Hz و محدوده دامنه ۴/۰-+ می‌باشد. محفظه مدل‌سازی از جنس لمینت، امکان تغییر شکل‌های برشی خاک را با حداقل اثرات مرزی فراهم کرده است [۲۵]. مدل عددی متناظر با آزمایش میز لرزه از یک بلوک خاکی با مشخصات جدول ۳ و ابعاد مشابه با جعبه مدل‌سازی فیزیکی تشکیل شده است. دو المان با مصالح بتنی مشابه با مشخصات مقاومتی دوغاب سیمانی برای مدل‌سازی ریزشمع‌های مایل در نظر گرفته شد و در نهایت بارگذاری هارمونیک سینوسی به کف مدل اعمال شد. شکل ۳ جزئیات مدل‌سازی فیزیکی و عددی آزمایش میز لرزه منوس و همکاران را به تصویر می‌کشد. نتایج آزمایش میز لرزه شامل کرنش قائم و برشی سطح خاک در هر سیکل بارگذاری برای شرایط تسلیح شده با دو ریزشمع مایل ارائه گردید. شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب نتایج کرنش قائم و برشی خاک را در هر سیکل بار در آزمایش میز لرزه و مدل‌سازی عددی مقایسه می‌کند.



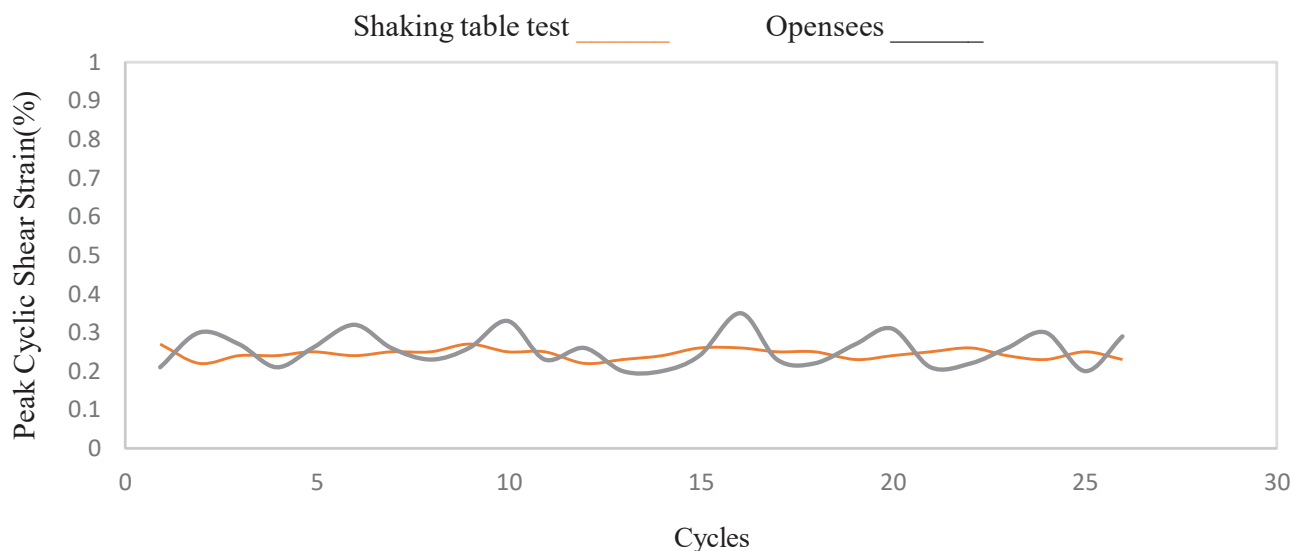
شکل ۳. مدل سازی خاک و ریزش‌های مایل- آزمایش میز لرزه منوس و همکاران الف-مدل فیزیکی در آزمایشگاه ب-مدل عددی در اپنسیس

Fig.3. Modeling of soil and inclined micropiles – shaking table test of Manus et al. (a): Physical model in the laboratory (b): Numerical model in the Opensees



شکل ۴. مقایسه نتایج آزمایش میز لرزه و مدل سازی عددی برای کرنش قائم خاک در هر سیکل بار در شرایط تسلیح خاک با دو ریزش‌های مایل

Fig. 4. Comparison of shaking table test results and numerical modeling for soil vertical strain in each load cycle in the case of soil reinforcement with two inclined micropiles



شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایش میز لرزه و مدل سازی عددی برای کرنش برشی خاک در هر سیکل بار در شرایط تسلیح خاک با دو ریزشمع مایل

Fig. 5. Comparison of shaking table test results and numerical modeling for soil shear strain in each load cycle in the case of soil reinforcement with two inclined micropiles

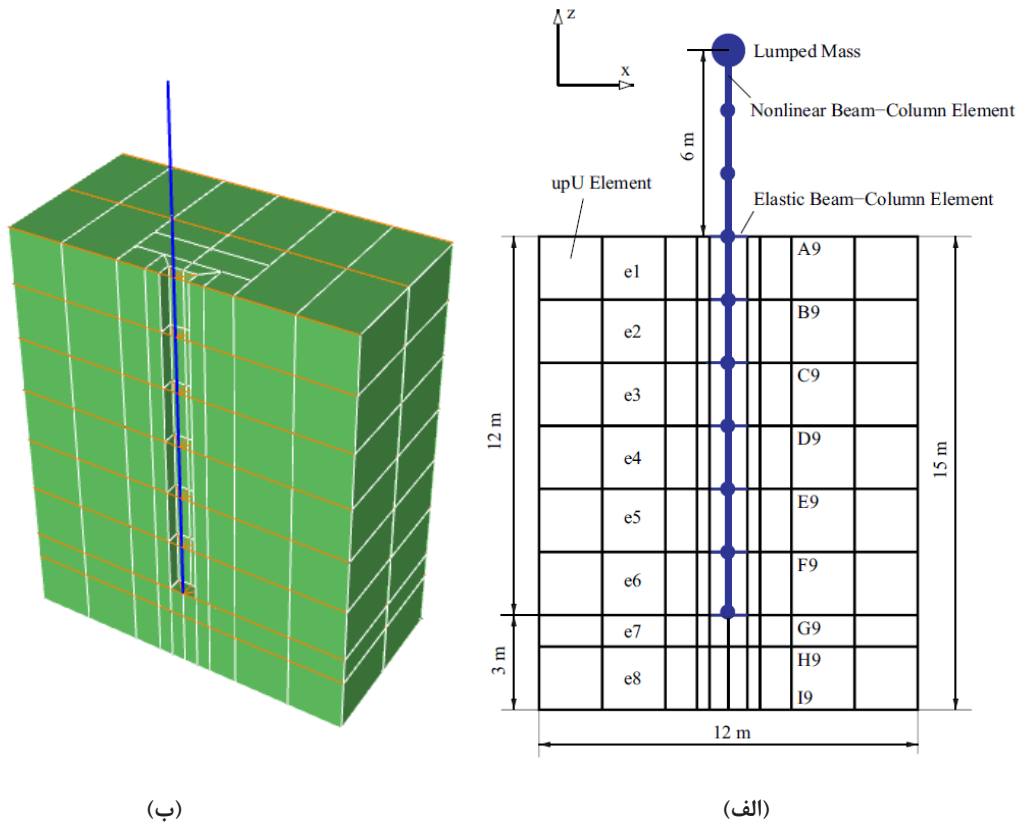
$$R_u = \frac{P'_{initial} - P'_{current}}{P'_{initial}}, P' = \sigma_{kk} / 3 \quad (4)$$

#### ۴- زلزله‌های ورودی

در انتخاب شتاب نگاشت مناسب برای یک ساختمان، لازم است خصوصیات ساختمان و منبع زلزله از نظر بزرگای زلزله، سرعت موج برشی، فاصله ساختمان تا منبع زلزله، زمین شناسی منطقه و شتاب حداکثر مورد توجه قرار گیرد و تا حد امکان این ویژگی‌ها با خصوصیات ساختمان مورد نظر و زلزله محتمل در آن همسان باشد. با توجه به موضوع پژوهش، دو دسته زلزله دور و نزدیک برای اعمال زلزله به کف مدل (سنگ بستر) مورد نیاز است. برای این منظور ابتدا زلزله‌های دور و نزدیک از مجموعه رکوردی پیشنهادی دستورالعمل P695-Femna انتخاب گردید و سپس با توجه به سرعت موج برشی خاک مبتنی بر طبقه‌بندی وردوگ و همکاران (۲۰۱۸) [۲۷]، Vs30>300m/s خاک متراکم - به ساختمان دانه‌ای سست و متراکم اعمال گردید.

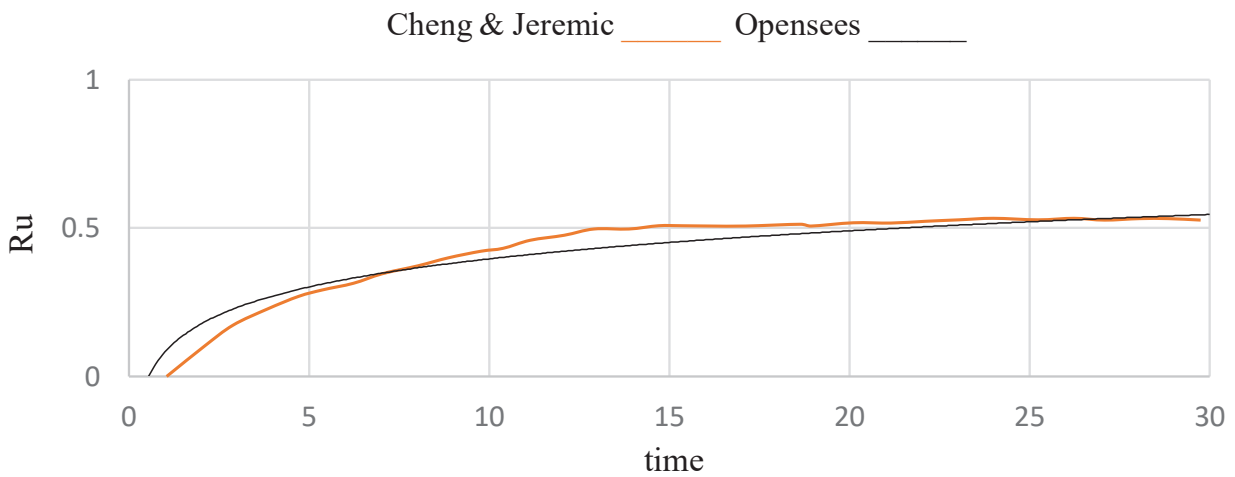
همچنین بر اساس پژوهش چنگ و جرمیک (۲۰۰۹) تحت عنوان مدل سازی عددی و شبیه سازی شمع در خاک روانگرا که به وسیله نرم افزار Opensees انجام شده است، صحت نتایج مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. برای این مدل، یک شمع از جنس آلومینیوم با مقطع دایره توخالی به قطر خارجی یک متر با المان Force Based Beam-Column در توده خاک ماسه‌ای بر اساس مدل مصالح الاستوپلاستیک Manzari Dafalias متشکل از المان‌های هشت گرهی جایگذاری شد. علاوه بر این، سازه یک درجه آزادی شامل ستون با مشخصات مصالح شمع و جرم متمرکز به اندازه ۱۲۰۰ کیلوگرم برای روسازه در نظر گرفته شد. شتاب نگاشت انتخاب شده یک رکورد شتاب افقی برداشت شده توسط انستیتو پلی-تکنیک رنسلر مربوط به مدل یک پروژه می‌باشد که به صورت رکورد زلزله شبیه سازی شده و به مدل اعمال گردیده است [۲۶].

در این پژوهش نسبت  $R_u$  به صورت نسبت تفاضل تنش موثر میانگین اولیه و تنش موثر میانگین موجود به تنش موثر میانگین اولیه مطابق رابطه (۴) تعریف شده است. شکل ۷ مقایسه نتایج تغییرات وابسته به زمان  $R_u$  در مطالعه چنگ و جرمیک (۲۰۰۹) و مدل سازی عددی اپنسیس را نشان می‌دهد.



شکل ۶. جزئیات مدل سازی المان محدود خاک-شمع-روسازه الف-مدل عددی چنگ و جرمیک و ب-مدل عددی در اپنسیس

Fig. 6. Details of finite element modeling of soil - micropile – superstructure (a): Cheng and Jeremic Numerical model



شکل ۷. تغییرات Ru نسبت به زمان برای المان e7

Fig. 7. Ru times histories for elements e7



جدول ۴. مشخصات زلزله‌های دور و نزدیک - Femma P695 [۲۸]

Table 4. Characteristics of far-fault and near-fault earthquakes - Femma P695

مجموعه رکورد حوزه دور							
ردیف	مشخصات سایت			زلزله			
	مسافت (km)	Vs30(m/s)	ایستگاه رکورد	PGA(g)	بزرگا	سال	نام
۱	۱۳/۵	۱۹۶	El Centro Array #11	۰/۳۸	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley (آمریکا)
۲	۱۵/۴	۲۷۶	Duzce	۰/۳۶	۷/۱	۱۹۹۹	Kocaeli (ترکیه)
۳	۱۵/۵	۲۵۹	CHY101	۰/۴۴	۷/۶	۱۹۹۹	Chi-Chi (تایوان)
۴	۱۷/۲	۳۵۶	Beverly Hills-Mulhol	۰/۵۲	۶/۷	۱۹۹۴	Northridge (آمریکا)
۵	۲۳/۸	۳۵۴	Yermo Fire Station	۰/۲۴	۷/۳	۱۹۹۲	Landers (آمریکا)
۶	۱۲/۸	۳۵۰	Gilroy Array#3	۰/۵۶	۶/۹	۱۹۸۹	Loma Prieta (آمریکا)

مجموعه رکورد حوزه نزدیک							
ردیف	مشخصات سایت			زلزله			
	مسافت (km)	Vs30(m/s)	ایستگاه رکورد	PGA(g)	بزرگا	سال	نام
۱	۳/۵	۲۰۳	El Centro Array #6	۰/۴۴	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley (آمریکا)
۲	۵/۳	۲۹۷	Yarimca	۰/۳۱	۷/۱	۱۹۹۹	Kocaeli (ترکیه)
۳	۶/۷	۳۰۶	TCU065	۰/۸۲	۷/۶	۱۹۹۹	Chi-Chi (تایوان)
۴	۵/۳	۴۴۱	Sylmar - Olive View	۰/۷۳	۶/۷	۱۹۹۴	Northridge (آمریکا)
۵	۳/۷	۶۸۵	Lucerne	۰/۷۹	۷/۳	۱۹۹۲	Landers (آمریکا)
۶	۳/۹	۴۶۲	Corralitos	۰/۶۴	۶/۹	۱۹۸۹	Loma Prieta (آمریکا)

شبییه‌سازی شرایط تنش بر جا قبل از اعمال بار زلزله، توده خاک تحت اثر بارگذاری اولیه شامل وزن اسکلت خاک و آب منفذی و در شرایط مرزی تعریف شده تحلیل استاتیکی می‌شود.

۲) تحلیل استاتیکی سیستم خاک - ریزشمع تحت اثر بارهای ثقلی: این مرحله شامل حفاری خاک در محل نصب ریزشمع‌ها با حذف المان‌های خاکی این ناحیه، مدل‌سازی ریزشمع‌ها، کلاهدک و در نهایت بارگذاری استاتیکی بر روی گروه ریزشمع برای در نظر گرفتن اثر بارهای ثقلی (زنده و مرده) است. مجموعه فوق تحت اثر بارگذاری ثقلی، تحلیل استاتیکی می‌شود.

بدین ترتیب رکوردهای دور و نزدیک زلزله‌های امپریال‌ولی، کجالیلی و چی‌چی برای ساختگاه سست و رکوردهای دور و نزدیک زلزله‌های نورث‌ریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه متراکم، در نظر گرفته شد. جدول ۴ به ترتیب مشخصات گروه زلزله‌های دور و نزدیک انتخاب شده را نمایش می‌دهد.

##### ۵- تحلیل و بررسی نتایج

تحلیل اجزاء محدود مدل در سه مرحله زیر انجام شده است:  
 ۱) تحلیل استاتیکی بلوک خاک تحت اثر وزن: در اولین گام به منظور

جدول ۵. بیشینه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 5. Maximum horizontal displacement of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه تغییر مکان افقی (m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	0.239	0.719	0.424	0.457	0.362	<b>1.133</b>
ریزشمع مایل	0.231	0.696	0.413	0.439	0.332	<b>1.053</b>

جدول ۶. بیشینه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 6. Maximum horizontal displacement of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

بیشینه تغییر مکان افقی (m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	0.146	0.396	0.134	0.121	0.415	<b>0.281</b>
ریزشمع مایل	0.136	0.375	0.128	0.122	0.419	<b>0.274</b>

گزارش شد، می‌توان در موارد زیر بیان کرد:

(۱) نتایج بیانگر اثر قابل توجه زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل نسبت به زلزله‌های دور در ساختگاه دانه‌ای سست است. افزایش تغییر مکان جانبی در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای سست به ترتیب ۱۲۵٪ و ۱۲۴٪ و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای متراکم به ترتیب ۱۵٪ و ۱۳٪ می‌باشد. تاریخچه تغییر مکان افقی (شکل ۶) در هر دو ساختگاه سست و متراکم نشان می‌دهد، پالس شدید ناشی از جهت‌پذیری پیش رونده در زلزله‌های نزدیک بر پاسخ تغییر مکان افقی در هر دو گروه ریزشمع موثر بوده و تغییر قابل ملاحظه در مقادیر تغییر مکان افقی در یک بازه زمانی کوتاه ایجاد می‌کند. بنابراین ضروریست در کنترل تغییر شکل پی‌ها یا ساختگاه‌های سست مسلح شده با گروه ریزشمع اثر زلزله‌های نزدیک در نظر گرفته شود.

(۲) با وجود ساختگاه دانه‌ای متراکم، علی‌رغم اثر زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل، این افزایش به مراتب کمتر از مقادیر مشابه برای ساختگاه سست است. نسبت مقادیر در دو گروه زلزله نشان می‌دهد اثر رکوردهای نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در خاک دانه‌ای سست نسبت به خاک دانه‌ای متراکم برای گروه

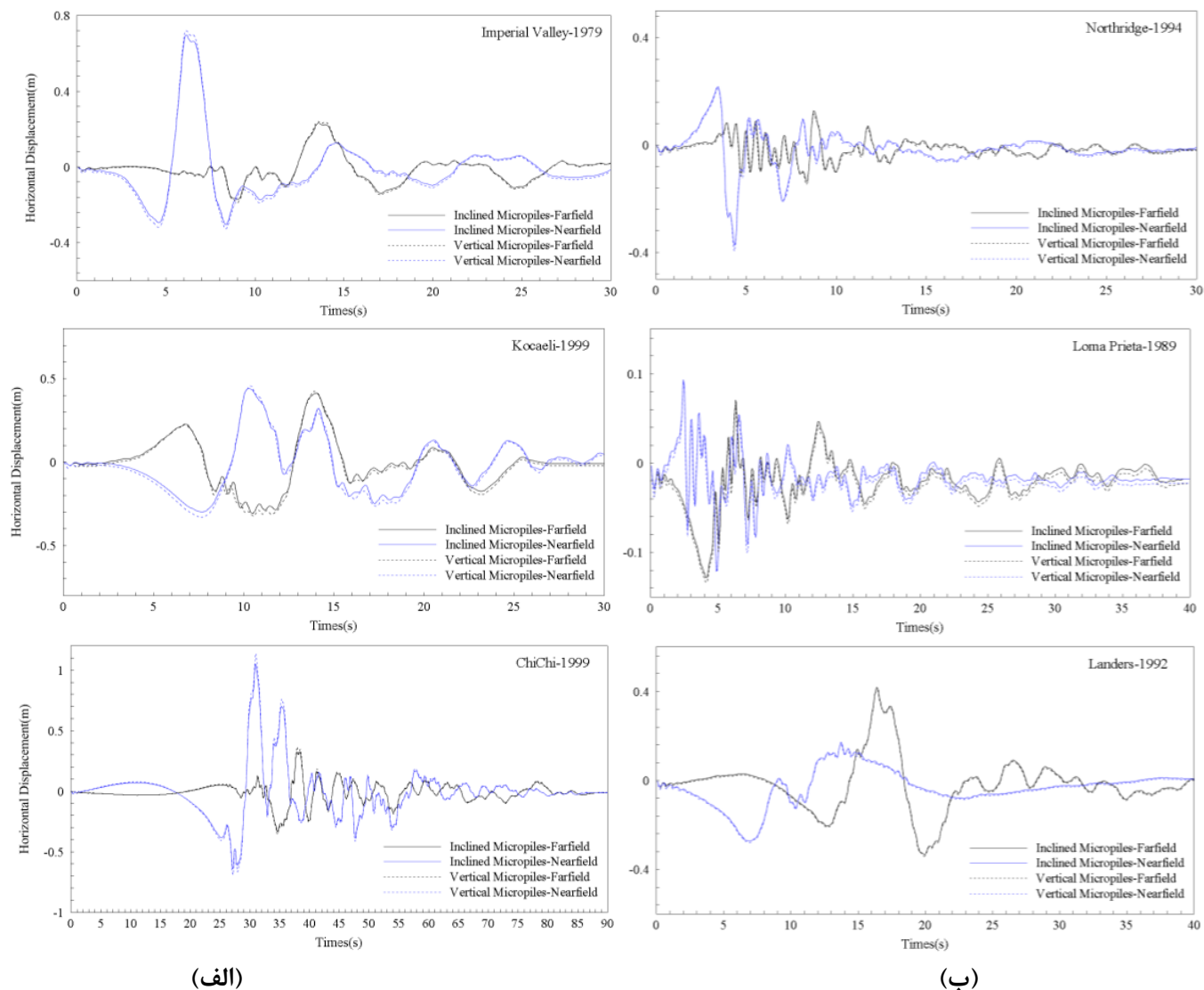
(۳) تحلیل دینامیکی سیستم خاک - ریزشمع - روسازه تحت اثر بار زلزله؛ در این مرحله با تعریف شرایط مرزی جدید و اعمال رکورد زلزله به کف مدل (سنگ بستر)، سیستم، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی می‌شود.

۵-۱-۱ - تغییر مکان افقی گروه ریزشمع

شکل ۸ تاریخچه تغییر مکان افقی در محل اتصال ریزشمع‌ها به سرریزشمع را نشان می‌دهد. میانگین بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای سست ۲/۲۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. به طور متوسط بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای سست ۲/۲۴ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است که مشابه این نسبت برای گروه ریزشمع قائم است.

نتایج برای ساختگاه دانه‌ای متراکم نشان می‌دهد، بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای متراکم ۱/۱۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. به طور متوسط بیشینه تغییر مکان افقی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک دانه‌ای متراکم ۱/۱۳ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است.

مهم‌ترین نتایج بررسی مقادیر جابجایی افقی گروه ریزشمع را که در بالا



شکل ۸. تاریخچه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل الف-ساختمان دانه‌ای سست ب-ساختمان دانه‌ای متراکم

Fig. 8. History of horizontal displacement of the vertical and inclined micropile group (a): Loose granular site (b): Dense granular site

با گروه ریزشمع قائم ندارد و هر دو مدل تسلیح، کارکرد یکسانی در کنترل تغییر مکان جانبی ناشی از رکوردهای دور و نزدیک دارند. به نظر می‌رسد، با وجود اینکه جرم خاک محصور شده بین گروه ریزشمع قائم کمتر از گروه ریزشمع مایل است، اما به دلیل تراکم مناسب خاک، مقاومت هر دو سیستم در برابر بارگذاری جانبی یکسان است.

لازم به توضیح است اعمال یک بارگذاری جانبی مستقل از بارگذاری زلزله می‌تواند منجر به تفاوت بیشتر در عملکرد ریزشمع‌های قائم و مایل گردد، لکن تمرکز این پژوهش صرفاً بر ارزیابی اثر رکوردهای دور و نزدیک می‌باشد.

ریزشمع قائم و مایل، به طور میانگین حدود ۹۶٪ و ۹۸٪ بیشتر است. به نظر می‌رسد، افزایش میرایی رایلی که ناشی از افزایش موج برشی در ساختمان متراکم است، نقش کاهنده در اثر افزایشی رکوردهای نزدیک گسل بر تغییر مکان جانبی گروه ریزشمع دارد.

در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم در ساختمان دانه‌ای سست اندکی بهتر است و گروه ریزشمع مایل موجب کاهش مقدار بیشینه تغییر مکان افقی در سرریزشمع شده است. این بهبود عملکرد در زلزله‌های دور به طور متوسط ۵/۲٪ و در زلزله‌های نزدیک ۵/۵٪ است. برخلاف ساختمان دانه‌ای سست، عملکرد گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای متراکم تفاوت قابل ملاحظه‌ای

جدول ۷. بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 7. Maximum acceleration of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه شتاب (g)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	0.296	0.589	0.571	0.496	0.501	<b>0.756</b>
ریزشمع مایل	0.254	0.541	0.503	0.395	0.510	<b>0.732</b>

جدول ۸. بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 8. Maximum acceleration of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

بیشینه شتاب (g)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	1.487	1.855	0.791	1.377	0.416	<b>0.439</b>
ریزشمع مایل	1.425	1.478	0.737	1.180	0.392	<b>0.431</b>

نزدیک به طور میانگین ۱۰۳٪ و ۷۱٪ بزرگ‌نمایی در شتاب بیشینه را نشان می‌دهد.

مهم‌ترین نتایج بررسی مقادیر تغییرات شتاب گروه ریزشمع را که در بالا گزارش شد، می‌توان در موارد زیر بیان کرد:

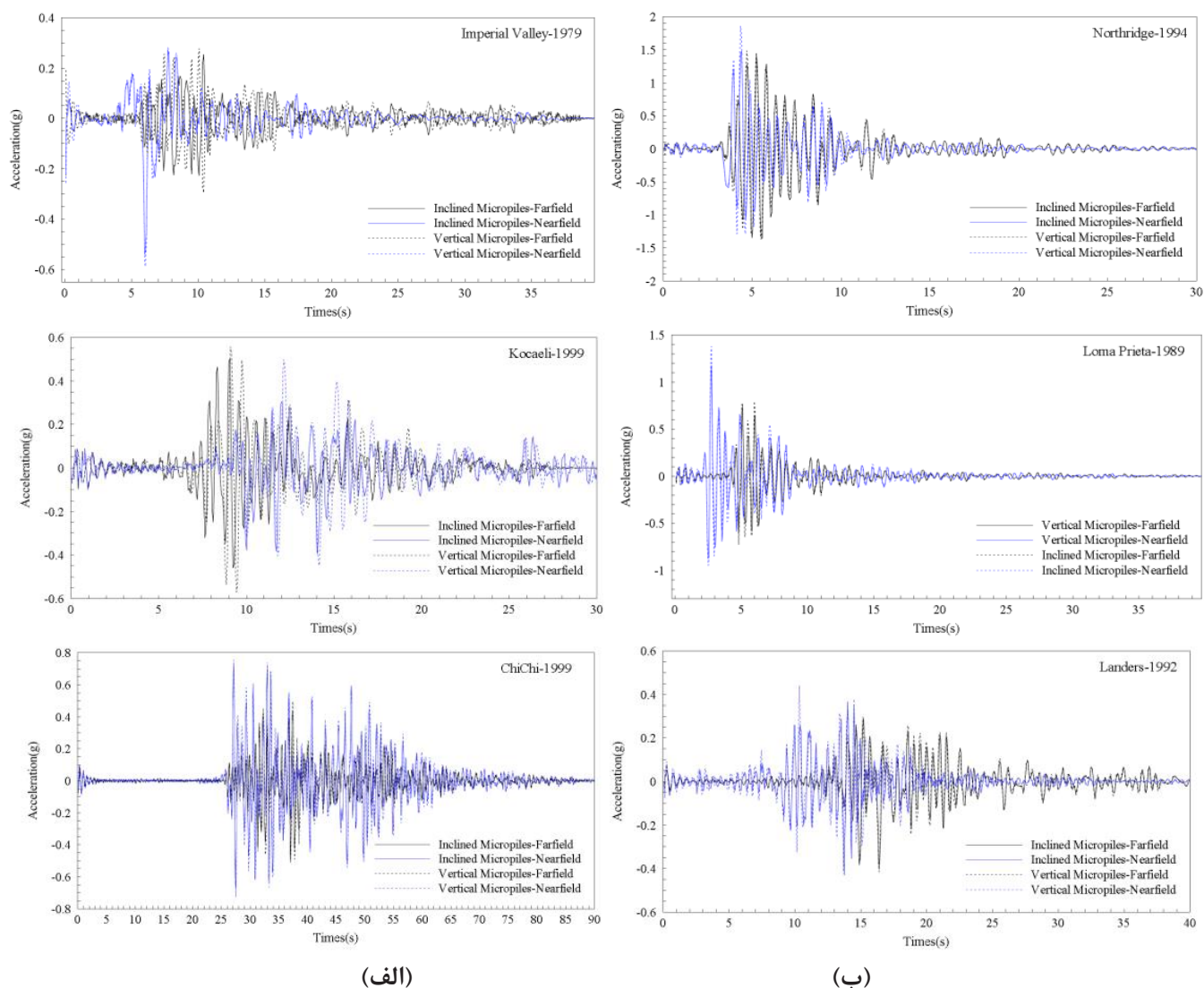
(۱) به طور کلی افزایش شتاب بیشینه گروه ریزشمع قائم و مایل ناشی از رکوردهای نزدیک گسل در هر دو ساختگاه سست و متراکم قابل توجه بوده و می‌بایست اثر این رکوردها در طراحی سیستم خاک-ریزشمع-کلاهدک دیده شود. افزایش شتاب در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای سست به ترتیب ۳۵٪ و ۳۳٪ و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه دانه‌ای متراکم به ترتیب ۳۶٪ و ۲۱٪ می‌باشد.

(۲) شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه متراکم و در زلزله‌های نزدیک اعداد بزرگ‌تری را ثبت نمود، این امر با توجه به شتاب ورودی بزرگ‌تر در این زلزله‌ها منطقی به نظر می‌رسد و موید نتایج پژوهش‌های گذشته در افزایش شتاب سیستم ناشی از افزایش شتاب ورودی است [۸ و ۵]. (۳) درصد بزرگ‌نمایی شتاب در ساختگاه متراکم و زلزله‌های دور بیشتر از درصد مشابه در ساختگاه سست و زلزله‌های نزدیک است. ممکن است نزدیکی مقادیر فرکانس طبیعی ساختگاه متراکم و سنگ بستر، باعث شده

۵-۲- تغییرات شتاب گروه ریزشمع

شکل ۹ تاریخچه شتاب سیستم در محل اتصال ریزشمع‌ها به سرریزشمع را نشان می‌دهد. بررسی خروجی تحلیل نشان می‌دهد، میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در خاک دانه‌ای سست در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۳۴/۷٪ افزایش یافته است. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای سست در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۳۲/۷٪ افزایش را نشان می‌دهد. در ساختگاه دانه‌ای متراکم، میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۳۵/۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای متراکم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۲۱/۲٪ افزایش را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج به دست آمده از شتاب سرریزشمع با مقادیر PGA در جداول ۵ و ۴ نشان می‌دهد، در ساختگاه دانه‌ای سست برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور به طور میانگین ۱۶/۹٪ و ۸/۲٪ و در زلزله‌های نزدیک به طور میانگین ۱۸/۱٪ و ۷/۷٪ بزرگ‌نمایی در شتاب بیشینه پدید آمده است. مقایسه این مقادیر در ساختگاه دانه‌ای متراکم برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور به طور میانگین ۱۱۳٪ و ۱۰۲٪ و در زلزله‌های



شکل ۹. تاریخچه شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل الف-ساخگاه دانه‌ای سست ب-ساخگاه دانه‌ای متراکم

Fig. 9. Acceleration history of vertical and inclined micropile group (a): Loose granular site (b): dense granular site

سرریزشمع کمی بهتر می‌باشد. این بهبود عملکرد برای ساخگاه دانه‌ای سست در زلزله‌های دور و نزدیک به طور متوسط ۷/۵٪ و ۸/۸٪ است و برای ساخگاه دانه‌ای متراکم در زلزله‌های دور و نزدیک به طور میانگین ۴/۵٪ و ۱۵/۶٪ می‌باشد. این تفاوت عملکرد در زلزله‌های با PGA بزرگ‌تر نمود بیشتری دارد و با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد که زاویه‌دار شدن ریزشمع‌ها، سختی جانبی و مقاومت آن‌ها را در برابر بارگذاری جانبی افزایش می‌دهد [۲۹].

خاک دانه‌ای متراکم دارای تابع تقویت بزرگ‌تری نسبت به خاک دانه‌ای سست باشد. نکته حائز اهمیت آن است که علی‌رغم وجود شتاب‌های بزرگ‌تر، عملکرد گروه ریزشمع قائم و مایل در کنترل تغییر مکان جانبی در ساخگاه متراکم، بهتر بوده است. به نظر می‌رسد تقویت قابل ملاحظه مقاومت اصطکاکی جدار ریزشمع‌ها در خاک دانه‌ای متراکم عامل این بهبود عملکرد باشد.

(۴) در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم در کاهش مقدار بیشینه شتاب در

جدول ۹. بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 9. Maximum shear force of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه نیروی برشی (KN)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	556.06	565.58	648.88	668.58	676.33	<b>857.37</b>
ریزشمع مایل	468.56	470.46	477.95	496.14	467.15	<b>470.58</b>

جدول ۱۰. بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 10. Maximum shear force of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

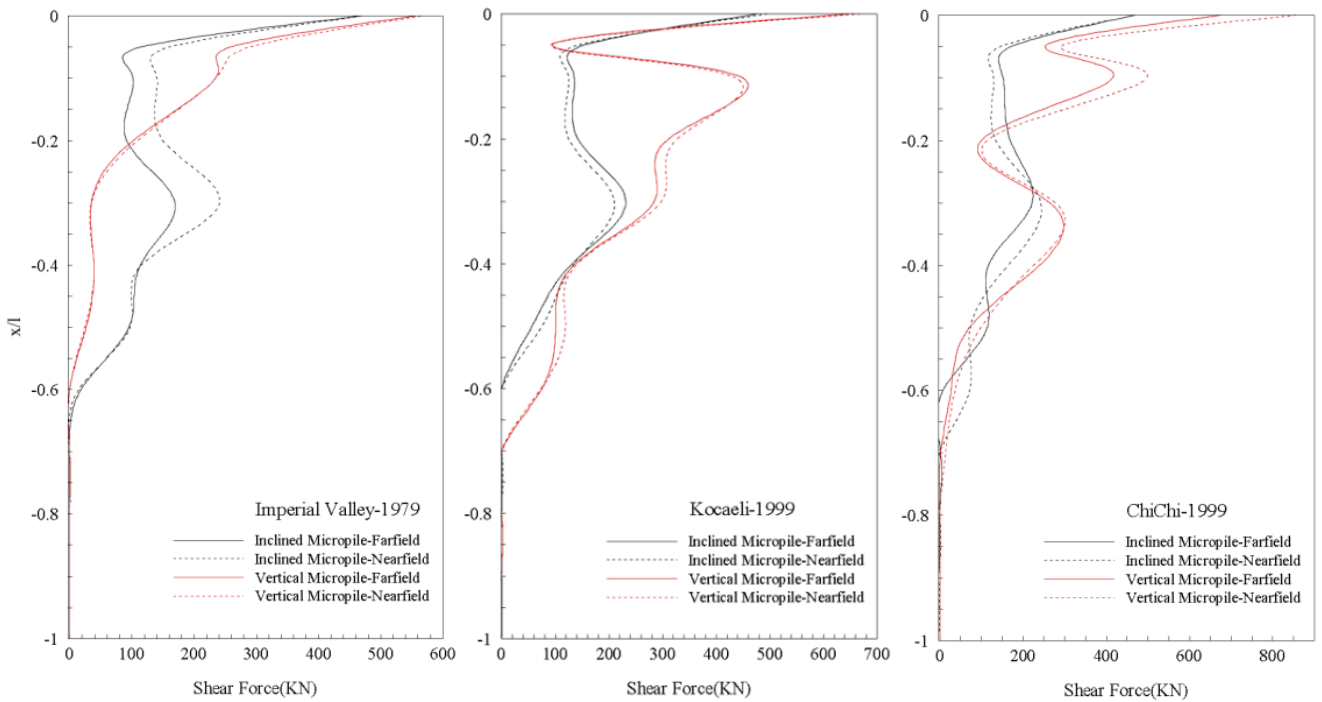
بیشینه نیروی برشی (KN)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	497.88	675.78	471.09	515.93	463.24	<b>456.99</b>
ریزشمع مایل	464.11	495.96	305.98	316.72	344.19	<b>331.33</b>

و خمشی در ریزشمع‌های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین ۱۵٪ برای نیروی برشی و ۱۱/۵٪ برای نیروی خمشی می‌باشد. همچنین افزایش نیروهای ریزشمع در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل ناچیز است. این نتایج به طور کلی نشان می‌دهد، پاسخ نیروهای ریزشمع تحت تاثیر نوع تسلیح گروه ریزشمع (قائم/مایل) است و نوع ساختگاه تاثیر کمتری در مقدار نیروهای ریزشمع دارد، اگر چه ساختگاه دانه‌ای متراکم کمک بیشتری به افزایش ظرفیت باربری گروه ریزشمع مایل در اثر زلزله‌های دور و نزدیک به ویژه در نیروی خمشی به دلیل افزایش سختی سیستم کرده است. (۲) در ساختگاه دانه‌ای سست در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم بهتر است و گروه ریزشمع مایل موجب کاهش مقدار بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع شده است. کاهش بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۲۴/۹٪ و در زلزله‌های نزدیک ۳۱/۳٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۲۵/۸٪ و در زلزله‌های نزدیک ۳۲/۷٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. (۳) در ساختگاه دانه‌ای متراکم در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم بهتر است و

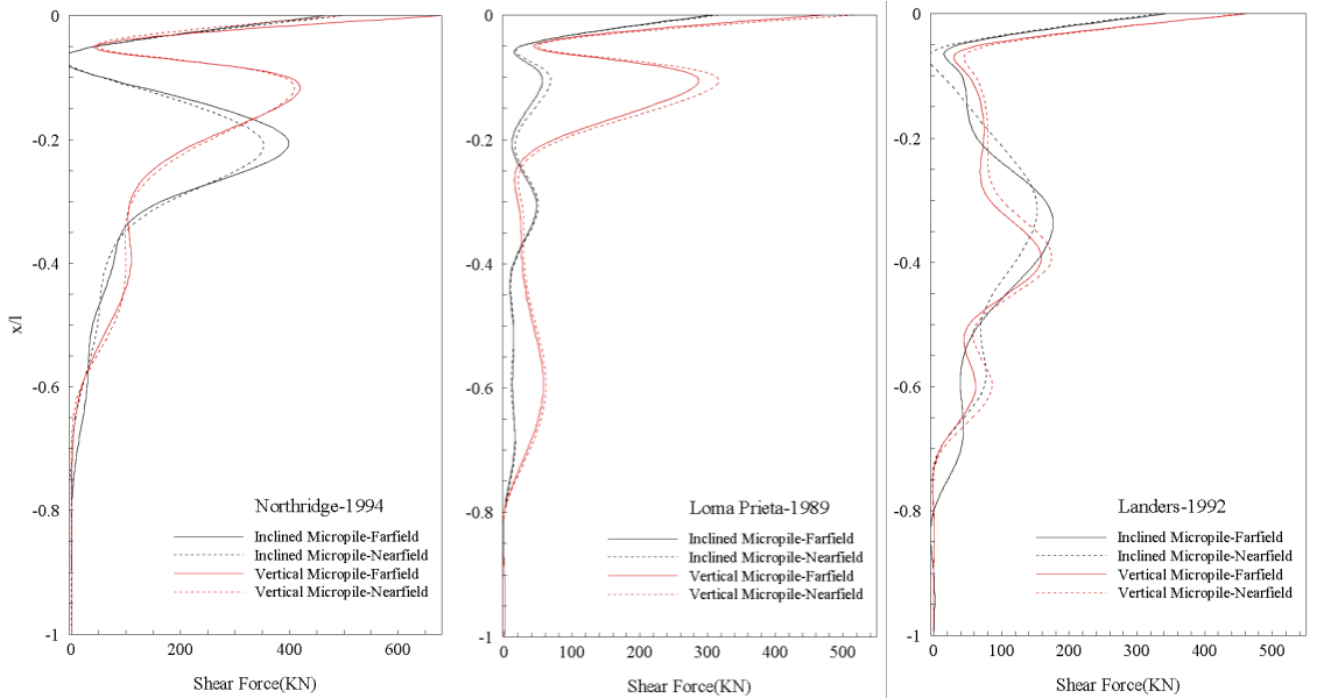
۵-۳- پاسخ نیروهای ریزشمع

منحنی تغییرات نیروی برشی در امتداد طول ریزشمع در خاک دانه‌ای سست و متراکم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول ۹ و برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول ۱۰ آمده است. همچنین منحنی تغییرات نیروی خمشی در امتداد طول ریزشمع در خاک دانه‌ای سست و متراکم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول ۱۱ و برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول ۱۲ آمده است. نتایج حاصل از بررسی پاسخ نیروهای گروه ریزشمع قائم و مایل در موارد زیر قابل ارائه است:

(۱) در ساختگاه دانه‌ای سست، رکورد زلزله‌های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع‌های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین ۱۱/۲٪ برای نیروی برشی و ۱۲/۳٪ برای نیروی خمشی می‌باشد. همچنین افزایش نیروی برشی و خمشی در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل ناچیز است. همچنین در ساختگاه دانه‌ای متراکم، رکورد زلزله‌های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. نمودار نیروی برشی در طول ریزشمع قائم و مایل الف-ساختمان دانه ای سست ب-ساختمان دانه ای متراکم

Fig.10. Shear force curves along vertical and inclined micropiles (a): Loose granular site (b): dense granular site

جدول ۱۱. بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Table 11. Maximum bending force of vertical and inclined micropile group in loose granular soil

بیشینه نیروی خمشی (KN-m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	356.14	362.21	415.25	427.77	432.71	<b>562.49</b>
ریزشمع مایل	262.16	273.07	360.71	359.93	270.29	<b>276.82</b>

جدول ۱۲. بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 12. Maximum bending force of vertical and inclined micropile group in dense granular soil

بیشینه نیروی خمشی (KN-m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	دور	نزدیک	دور	نزدیک	دور	نزدیک
ریزشمع قائم	387.04	501.48	320.95	348.16	350.08	<b>330.59</b>
ریزشمع مایل	366.73	417.24	239.75	285.49	253.56	<b>233.19</b>

۶- جمع بندی نتایج

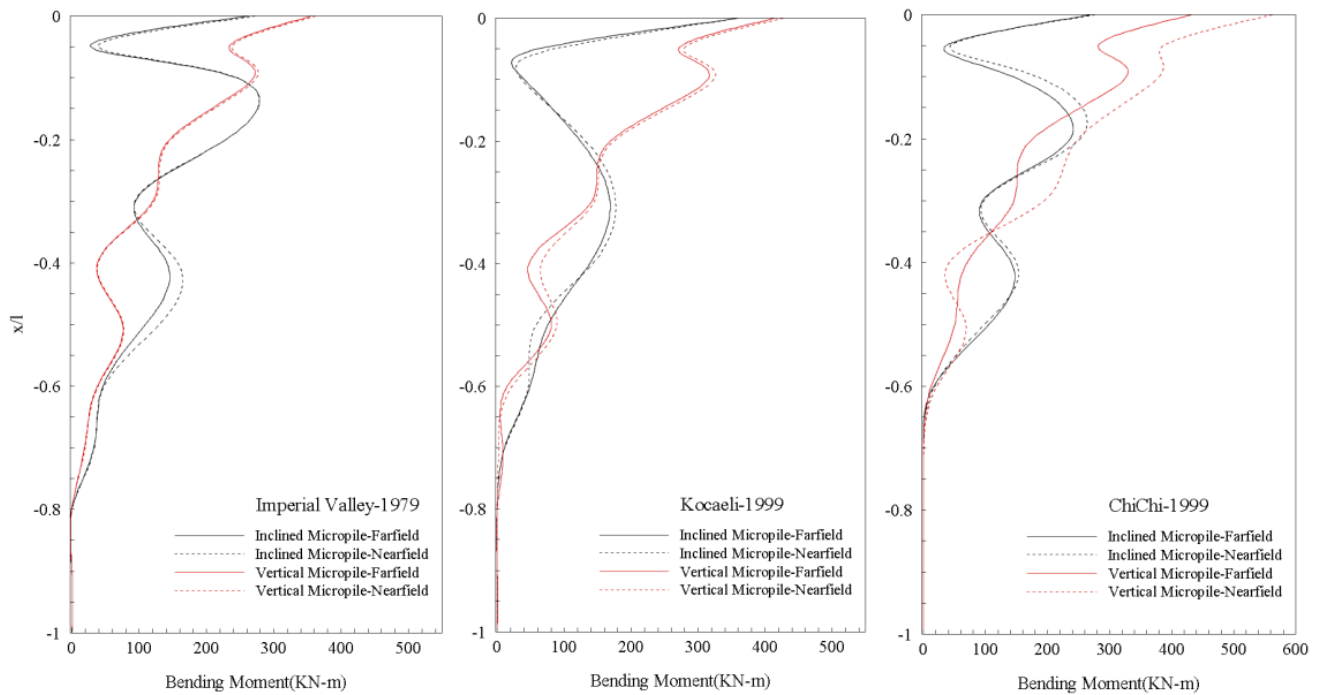
در این پژوهش یک مدل استاندارد از خاک-ریزشمع-سرریزشمع متشکل از دو نوع خاک دانه‌ای الاستوپلاستیک با مشخصات مکانیکی متفاوت شامل خاک دانه‌ای سست و خاک دانه‌ای متراکم به وسیله دو گروه ریزشمع قائم و مایل بتنی با رفتار الاستیک خطی مسلح گردید. با توجه به سرعت موج برشی ساختگاه، سیستم تحت اثر سه مجموعه زلزله دور و نزدیک قرار گرفت. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی شامل پاسخ‌های گروه ریزشمع مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. از آنجا که تاثیر سه مولفه اثرگذار بر سیستم شامل نوع ساختگاه، نوع زلزله ورودی و مدل تسلیح ریزشمع، به صورت همزمان در این پژوهش دیده شد، امکان نتیجه‌گیری جامع از عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع در انواع شرایط محتمل فراهم آمد.

(۱) نتایج نشان داد، پارامترهای مورد بررسی در گروه ریزشمع شامل جابجایی، شتاب، نیروی خمشی و برشی، تابع یکی از سه ویژگی نوع ساختگاه، رکورد ورودی و مدل تسلیح است و سایر عوامل تاثیر کمتری بر پاسخ‌ها دارد. در یک نگاه کلی می‌توان چنین بیان کرد که نیروهای برشی

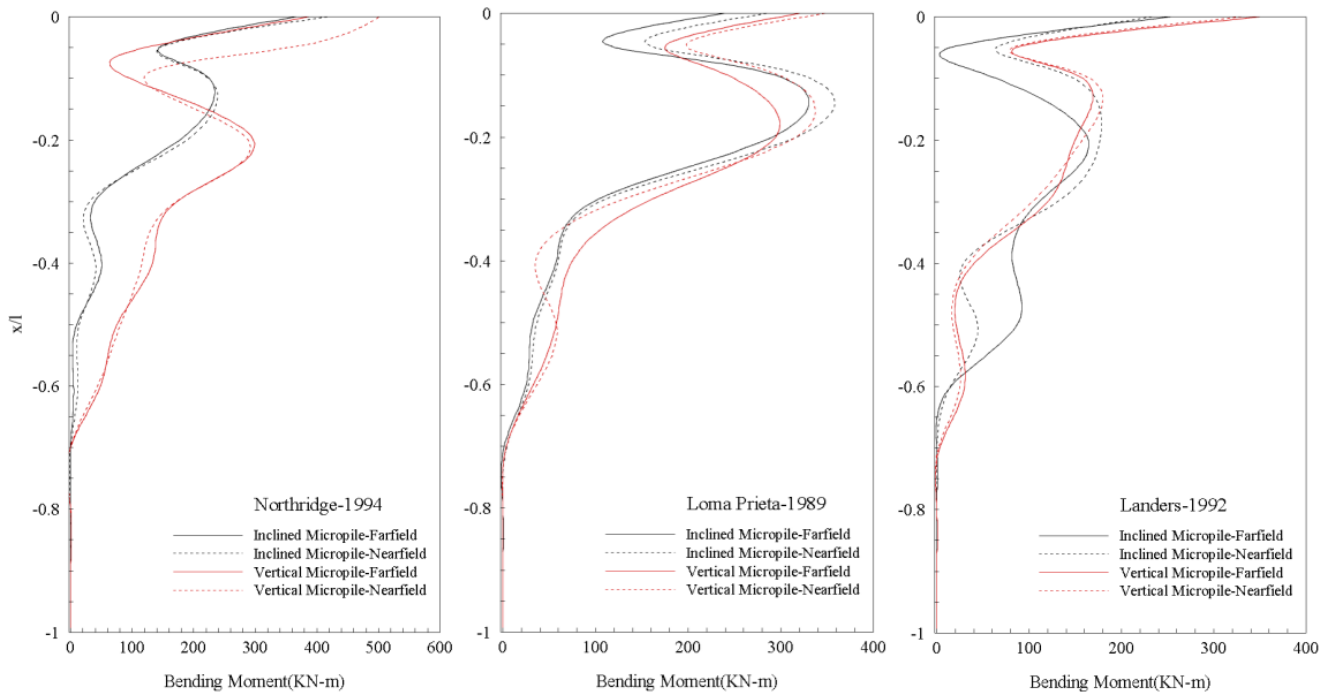
گروه ریزشمع مایل موجب کاهش مقدار بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع شده است. کاهش بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۲۲/۲٪ و در زلزله‌های نزدیک ۳۰/۶٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط ۱۸/۸٪ و در زلزله‌های نزدیک ۲۰/۷٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. نتایج ۲ و ۳ موید یافته‌های مطالعات گذشته است که وجود ریزشمع‌های مایل موجب افزایش سختی محوری و در نتیجه کاهش پاسخ نیروهای ریزشمع می‌باشد [۴].

(۴) آنچه از بررسی موردی پاسخ نیروهای ریزشمع (نیروی برشی و خمشی) حاصل می‌شود لزوم توجه به اثرات متفاوت رکوردهای نزدیک گسل در هر زلزله صرف نظر از تاثیر کلی این رکوردها بر افزایش پاسخ ریزشمع‌ها است. این اثر ممکن است در برخی زلزله‌ها مانند زلزله امپریال ولی مشابه رکورد دور باشد و در برخی زلزله‌ها مانند زلزله چی‌چی موجب تفاوت قابل ملاحظه در نتایج شود.





(الف)



(ب)

شکل ۱۱. نمودار نیروی خمشی در طول ریزش‌معم قائم و مایل الف-ساختمان دانه‌ای سست ب-ساختمان دانه‌ای متراکم

Fig.11. bending force curves along vertical and inclined micropiles (a): Loose granular site (b): dense granular site

تاثیر کلی این رکوردها بر افزایش پاسخ ریزش‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به عنوان مثال پاسخ شتاب و جابجایی سیستم در اثر زلزله‌ی نزدیک کجایی مشابه رکورد دور این زلزله است، در حالی که زلزله‌ی نزدیک چی‌چی موجب تفاوت قابل ملاحظه در نتایج شده است.

### منابع

- [1] D.A. Bruce, I. Juran, Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review, Volume I: Background, Classifications, Cost (1997).
- [2] M. Sadek, S. Isam, Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(6) (2004) 473-485.
- [3] M. Sadek, I. Shahrour, Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(5) (2006) 461-468.
- [4] S. Isam, A. Hassan, S. Mhamed, 3D elastoplastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles, *Computers and Geotechnics*, 39 (2012) 1-7.
- [5] A. Ghorbani, H. Hasanzadehshooili, E. Ghamari, J. Medzvieckas, Comprehensive three dimensional finite element analysis, parametric study and sensitivity analysis on the seismic performance of soil-micropile-superstructure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58 (2014) 21-36.
- [6] M.C. Capatti, F. Dezi, M. Morici, Field tests on micropiles under dynamic lateral loading, *Procedia Engineering*, 158 (2016) 236-241.
- [7] M. Capatti, D. Roia, S. Carbonari, F. Dezi, Micropile foundation subjected to dynamic lateral loading, *Procedia engineering*, 199 (2017) 2324-2329.
- [8] H.J. Mashhoud, J.-H. Yin, A.K. Panah, Y.F. Leung, Shaking table test study on dynamic behavior of micropiles in loose sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110 (2018) 53-69.
- [9] J.P. Stewart, S.-J. Chiou, J.D. Bray, R.W. Graves, P.G.

و خمشی ریزش‌ها وابسته به نوع تسلیح (گروه ریزش‌ها قائم/ مایل) می‌باشد و نوع ساختگاه و زلزله ورودی تاثیر کمتری بر این پاسخ‌ها دارد در حالی که شتاب و جابجایی سیستم بیشتر متاثر از نوع ساختگاه و زلزله ورودی می‌باشد.

(۲) اثر زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی و شتاب در هر دو گروه ریزش‌ها قائم و مایل به ویژه در ساختگاه دانه‌ای سست، که مشخصات مکانیکی ضعیف‌تری دارد، قابل توجه است. ضمن اینکه اثر زلزله‌های نزدیک در ایجاد تغییر مکان‌های افقی پالس‌گونه و مخرب در هر دو گروه ریزش‌ها به وضوح قابل مشاهده است. بنابراین تاثیر رکوردهای نزدیک گسل می‌بایست در طراحی و کنترل تغییر شکل پی‌ها یا ساختگاه‌های مسلح شده با گروه ریزش‌ها مدنظر قرار گیرد. هر چند به طور متوسط تاثیر رکوردهای نزدیک بر ساختگاه‌های کیفی‌تر نظیر خاک دانه‌ای متراکم بسیار کمتر است، نتایج موردی نشان داد که در برخی رکوردها افزایش تغییر مکان جانبی و به ویژه شتاب گروه ریزش‌ها در این خاک‌ها می‌تواند قابل توجه باشد.

(۳) تغییرات شتاب گروه ریزش‌ها قائم و مایل تابع دو مولفه شتاب ورودی زلزله و ضریب بزرگ‌نمایی ساختگاه است. شتاب سیستم در ساختگاه متراکم و در زلزله‌های نزدیک و در شرایط تسلیح با گروه ریزش‌ها قائم، اعداد بزرگ‌تری را ثبت نمود. در زلزله‌های نزدیک با توجه به PGA بزرگ‌تر، مولفه شتاب ورودی افزایش پیدا می‌کند و منجر به افزایش شتاب سیستم می‌شود.

(۴) از منظر مقایسه عملکرد گروه ریزش‌ها قائم و مایل در دو ساختگاه دانه‌ای و چسبیده می‌توان چنین نتیجه گرفت که گروه ریزش‌ها مایل عملکردی تقریباً مشابه در کنترل تغییر مکان‌های جانبی و شتاب سیستم و عملکردی بهتر در کنترل نیروهای داخلی نسبت به گروه ریزش‌ها قائم از خود نشان می‌دهد.

(۵) مقایسه نتایج متغیرهای شتاب و جابجایی در گروه ریزش‌ها قائم و مایل نشان داد، عملکرد هر دو گروه ریزش‌ها در کاهش شتاب و جابجایی جانبی در ساختگاه‌های متراکم بهتر است. این ویژگی در ریزش‌ها مایل با وضوح بیشتری مشاهده شد. می‌توان چنین نتیجه گرفت که عملکرد گروه ریزش‌ها مایل در ساختگاه‌های متراکم‌تر نسبت به ساختگاه‌های ضعیف‌تر قابلیت اطمینان بالاتری دارد.

(۶) با توجه به اینکه نتایج پژوهش، برآیند پاسخ‌های سیستم خاک - ریزش‌ها تحت اثر مجموعه زلزله‌های دور و نزدیک با ماهیت‌های مختلف است، این نتایج لزوماً نشان دهنده اثر یکایک زلزله‌های ورودی نیست. از این رو توجه به اثرات متفاوت رکوردهای نزدیک گسل در هر زلزله صرف نظر از

- Parameters, Installation Methods and Soil Density on the Micropile Bearing Capacity, *International Journal of Civil Engineering*, (2021) 1-13.
- [19] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006) 137-158.
- [20] G. Lanzo, A. Pagliaroli, B. D'Elia, Numerical study on the frequency-dependent viscous damping in dynamic response analyses of ground, *Earthquake Resistant Engineering Structures IV*, WIT Press, Southampton, Boston, (2003) 315-324.
- [21] D. Park, Y.M. Hashash, Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, 8(02) (2004) 249-274.
- [22] S. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, (1996).
- [23] Z. Karimi, S. Dashti, Numerical and centrifuge modeling of seismic soil–foundation–structure interaction on liquefiable ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(1) (2016) 04015061.
- [24] J. Lysmer, R.L. Kuhlemeyer, Finite dynamic model for infinite media, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4) (1969) 859-877.
- [25] K. McManus, J. Turner, G. Charton, Inclined reinforcement to prevent soil liquefaction, in: *Proceedings of the Annual NZSEE Technical Conference*, Citeseer, 2005, pp. 523-533.
- [26] Z. Cheng, B. Jeremić, Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(11-12) (2009) 1405-1416.
- [27] R. Verdugo, F. Ochoa-Cornejo, J. Gonzalez, G. Valladares, Site effect and site classification in areas with large earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126 (2019) 105071.
- [28] A.T. Council, U.S.F.E.M. Agency, Quantification of building seismic performance factors, US Department of Somerville, N.A. Abrahamson, Ground motion evaluation procedures for performance-based design, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 22(9-12) (2002) 765-772.
- [10] M. Erdik, E. Durukal, A hybrid procedure for the assessment of design basis earthquake ground motions for near-fault conditions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(5) (2001) 431-443.
- [11] J.D. Bray, A. Rodriguez-Marek, Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 24(11) (2004) 815-828.
- [12] A. Moustafa, I. Takewaki, Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(5) (2010) 412-422.
- [13] T. Liu, Y. Luan, W. Zhong, A numerical approach for modeling near-fault ground motion and its application in the 1994 Northridge earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1) (2012) 52-61.
- [14] E. Ahmadi, F. Khoshnoudian, Near-fault effects on strength reduction factors of soil-MDOF structure systems, *Soils and Foundations*, 55(4) (2015) 841-856.
- [15] T.G. Cork, J.H. Kim, G.P. Mavroedidis, J.K. Kim, B. Halldorsson, A.S. Papageorgiou, Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near-fault ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80 (2016) 102-118.
- [16] N. Yeganeh, B. Fatahi, Effects of choice of soil constitutive model on seismic performance of moment-resisting frames experiencing foundation rocking subjected to near-field earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121 (2019) 442-459.
- [17] W. Xie, L. Sun, Assessment and mitigation on near-fault earthquake wave effects on seismic responses and pile-soil interactions of soil-pile-bridge model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143 (2021) 106596.
- [18] H.M. Moghaddam, M. Keramati, A. Ramesh, R. Naderi, Experimental Evaluation of the Effects of Structural

inclination angle on seismic performance of micropiles,  
International Journal of Geomechanics, 18(11) (2018)  
04018142.

Homeland Security, FEMA, 2009.

[29] A. Komak Panah, H. Jalilian Mashhoud, J.-H. Yin,  
Y. Fai Leung, Shaking table investigation of effects of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*E. Mohamadi Esfahani, R. Naderi, e effect of farfield and nearfield earthquakes on the seismic behavior of micropile group in loose and dense granular soils, Amirkabir J. Civil Eng., 54(4) (2022) 1483-1502.*

DOI: [10.22060/ceej.2021.19598.7209](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19598.7209)

