

به نام خداوند جان و خرد کزین برتر اندیشه برنگذرد

خداوند نام و خداوند جای خداوند روزی ده بهمای



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

تحلیل تاریخچه زمانی گروه ریزشمع تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک

نگارنده:

احسان محمدی اصفهانی

استاد راهنما:

دکتر رضا نادری

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۴۰۰/۳۷۱
تاریخ: ۱۴/۱/۱۳۹۰

باسم تعالی



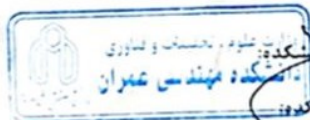
مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای احسان محمدی اصفهانی با شماره دانشجویی ۹۵۱۳۳۷۴ رشته عمران گرایش ژئوتکنیک تحت عنوان تحلیل تاریخیچه زمانی گروه ریزش تحت اثر زلزله های دور و نزدیک که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	رضا نادری	دانشیار	
۲- نماینده تحصیلات تکمیلی	میشم جلالی	استادیار	
۳- استاد ممتحن اول	امیر بذرافشان مقدم	استادیار	
۴- استاد ممتحن دوم	محسن کرامتی	استادیار	



تذکره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

سپاسگزاری

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش را بنمونان شد و به بهمنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و بهره‌مندی از علم و معرفت را روزیایمان ساخت.

بر خود لازم می‌دانم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر نادری که بی‌دریغ مراد انجام این پژوهش را بهمانی کردند نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم.

این اثر ناچیز را به پدر و خواهران عزیزم تقدیم می‌کنم
به پاس از خودگذشتگی، عاطفه سرشار و کرمای امید بخش وجودشان

تعهد نامه

اینجانب احسان محمدی اصفهانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل تاریخیچه زمانی گروه ریزشمع تحت اثر زلزله های دور و نزدیک تحت راهنمایی دکتر رضا نادری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷



امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

مطالعه عملکرد سیستم ریزشمع به عنوان یک روش موثر، مقرون به صرفه و با قابلیت بالای اجرایی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها و فونداسیون و در نظر گرفتن ویژگی‌ها و اثرات متفاوت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر سازه‌ها، ضرورت تحقیق بر روی عملکرد ریزشمع‌ها تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک را توجیه می‌نماید. در این پژوهش به کمک نرم افزار Opensees یک مدل استاندارد از خاک-ریزشمع-سرریزشمع متشکل از دو نوع خاک دانه‌ای و چسبنده الاستوپلاستیک با مشخصات مکانیکی متفاوت شامل خاک دانه‌ای سست ($Dr=40\%$)، خاک دانه‌ای متراکم ($Dr=80\%$)، خاک چسبنده نرم (Soft Clay) و خاک چسبنده متوسط (Medium Clay) به وسیله دو گروه ریزشمع قائم و مایل بتنی با رفتار الاستیک خطی مسلح گردید. با توجه به سرعت موج برشی سازه‌گاه ($Vs30$)، سیستم تحت اثر سه مجموعه زلزله دور و نزدیک قرار گرفت. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی شامل پاسخ‌های گروه ریزشمع (شتاب، تغییرمکان افقی و نیروهای داخلی) و خاک (تنش و کرنش سطحی) مقایسه و بررسی شد و موارد 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 تغییرمکان افقی در سازه‌گاه‌های ضعیف‌تر همچون خاک ماسه‌ای سست و رسی نرم می‌گردد. افزایش تغییرمکان جانبی در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در سازه‌گاه دانه‌ای سست به ترتیب 125% و 124% و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در سازه‌گاه دانه‌ای متراکم به ترتیب 15% و 13% می‌باشد. همچنین افزایش تغییرمکان جانبی در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در سازه‌گاه رسی نرم به ترتیب 119% و 125% و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در سازه‌گاه رسی متوسط به ترتیب 15% و 12% می‌باشد.

نتایج در دو سازه‌گاه دانه‌ای و چسبنده نشان داد، گروه ریزشمع مایل عملکردی تقریباً مشابه در کنترل تغییرمکان‌های افقی و شتاب سیستم و عملکرد بهتری در کنترل نیروهای داخلی نسبت به گروه ریزشمع قائم از خود نشان می‌دهد. همچنین گروه ریزشمع مایل تاثیر بهتری در کنترل تنش و کرنش برشی سطحی خاک دارد در حالی که عملکرد گروه ریزشمع قائم در کنترل تنش و کرنش نرمال بهتر است.

کلمات کلیدی: گروه ریزشمع، زلزله‌های دور و نزدیک، تحلیل تاریخچه زمانی، اجزاء محدود، Opensees.

فهرست مطالب

۱	فصل (۱): مقدمه
۱-۱-۱	کلیات تحقیق
۲-۱-۱	ضرورت تحقیق
۳-۱-۱	روش تحقیق
۴-۱-۱	ساختار پایان نامه
۵	فصل (۲): معرفی ریزشمع‌ها
۱-۲-۱	معرفی کلی (ساختار و عملکرد)
۲-۲-۱	پیشینه
۳-۲-۱	دامنه کاربرد
۴-۲-۱	طبقه‌بندی ریزشمع‌ها
۱-۴-۲-۱	طبقه‌بندی بر اساس شیوه طراحی
۲-۴-۲-۱	طبقه‌بندی بر اساس روش اجرا
۵-۲-۱	اصول طراحی
۶-۲-۱	روش اجرا
۷-۲-۱	کنترل کیفیت عملکرد
۱-۷-۲-۱	آزمایش بارگذاری فشاری ریزشمع
۲-۷-۲-۱	آزمایش بارگذاری کششی ریزشمع
۳-۷-۲-۱	آزمایش بارگذاری جانبی ریزشمع
۸-۲-۱	عوامل موثر در انتخاب ریزشمع
۱-۸-۲-۱	شرایط فیزیکی
۲-۸-۲-۱	شرایط زیرسطحی
۳-۸-۲-۱	شرایط محیطی
۴-۸-۲-۱	شرایط اقتصادی
۹-۲-۱	مزایا و محدودیت‌های استفاده از ریزشمع
۱-۹-۲-۱	مزیت‌های فنی

- ۲-۹-۲- مزیت‌های اجرایی ۲۲
- ۳-۹-۲- مزیت‌های اقتصادی ۲۲
- ۴-۹-۲- محدودیت‌ها ۲۳

فصل (۳): زلزله‌های دور و نزدیک ۲۵

- ۱-۳- مقدمه ۲۶
- ۲-۳- مفهوم زلزله‌های دور و نزدیک ۲۶
- ۳-۳- خصوصیات و اثرات زلزله‌های نزدیک ۲۷
- ۱-۳-۳- اثر جهت‌پذیری پیش رونده ۲۷
- ۲-۳-۳- اثر تغییر مکان ماندگار ۳۰
- ۳-۳-۳- محتوای فرکانسی بالا ۳۱
- ۴-۳-۳- اثر مولفه قائم ۳۲
- ۴-۳- خلاصه‌ای از مقایسه ویژگی‌های زلزله دور و نزدیک ۳۴

فصل (۴): مروری بر پژوهش‌های انجام شده ۳۵

- ۱-۴- مقدمه ۳۶
- ۲-۴- مروری بر مطالعات صورت گرفته بر روی ریزشمع ۳۶
- ۱-۲-۴- مطالعات کششیتا و همکاران (۲۰۰۰) ۳۶
- ۲-۲-۴- مطالعات ژوران و همکاران (۲۰۰۱) ۳۶
- ۳-۲-۴- مطالعات سادک و شاهرور (۲۰۰۴ و ۲۰۰۶) ۳۷
- ۴-۲-۴- مطالعات جرولیموس و همکاران (۲۰۰۸) ۳۷
- ۵-۲-۴- مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۰۹) ۳۷
- ۶-۲-۴- مطالعات شاهرور و همکاران (۲۰۱۲) ۳۸
- ۷-۲-۴- مطالعات قربانی و همکاران (۲۰۱۴) ۳۹
- ۸-۲-۴- مطالعات کاپاتی و همکاران (۲۰۱۶ و ۲۰۱۷) ۳۹
- ۹-۲-۴- مطالعات جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸) ۴۱
- ۳-۴- مروری بر مطالعات صورت گرفته بر روی اثر زلزله‌های دور و نزدیک ۴۲
- ۱-۳-۴- مطالعات اردیک و دورکال (۲۰۰۱) ۴۲
- ۲-۳-۴- مطالعات امبرزیز و داگلاس (۲۰۰۳) ۴۲

۴۳	 مطالعات بری و مارک (۲۰۰۴)
۴۴	 مطالعات ژانگ و تانگ (۲۰۰۹)
۴۵	 مطالعات مصطفی و تاکی واکي (۲۰۱۰)
۴۶	 مطالعات لیو و همکاران (۲۰۱۲)
۴۷	 مطالعات داودی و همکاران (۲۰۱۳)
۴۸	 مطالعات احمدی و خوشنودیان (۲۰۱۵)
۴۹	 مطالعات کرک و همکاران (۲۰۱۶)
۵۱	 مطالعات یاداوا و گوپتا (۲۰۱۷)
۵۲	 مطالعات پو و همکاران (۲۰۱۸)
۵۳	 مطالعات یگانه و فتاحی (۲۰۱۹)
۵۴	 خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته بر رفتار لرزه‌ای ریزشمع‌ها
۵۶	 خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در مورد اثر زلزله‌های دور و نزدیک

فصل (۵): مدل سازی عددی و تحلیل تاریخچه زمانی

۶۰	 ۱-۵ مقدمه
۶۱	 ۲-۵ معرفی نرم افزار اپنسیس
۶۱	 ۳-۵ روش‌های مدل سازی خاک-ریزشمع
۶۴	 ۴-۵ مدل مناسب سیستم خاک-ریزشمع
۶۵	 ۱-۴-۵ مدل سازی خاک
۶۶	 ۲-۴-۵ میرایی خاک
۶۷	 ۳-۴-۵ مدل سازی ریزشمع
۶۸	 ۴-۴-۵ مش بندی
۶۹	 ۵-۴-۵ شرایط مرزی
۷۰	 ۵-۵ صحت سنجی
۷۲	 ۶-۵ بیان مسئله
۷۵	 ۷-۵ بارگذاری
۸۰	 ۸-۵ روش تحلیل
۸۱	 ۹-۵ بررسی عملکرد سیستم در خاک دانه‌ای تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک
۸۱	 ۱-۹-۵ تغییر مکان افقی گروه ریزشمع

۸۳.....	۵-۹-۲- تغییرات شتاب گروه ریزشمع
۸۶.....	۵-۹-۳- پاسخ نیروها در گروه ریزشمع
۹۰.....	۵-۹-۴- تغییرات تنش و کرنش سطحی خاک
۹۴.....	۵-۱۰-۱- بررسی عملکرد سیستم در خاک چسبنده تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک
۹۴.....	۵-۱۰-۱- تغییر مکان افقی گروه ریزشمع
۹۶.....	۵-۱۰-۲- تغییرات شتاب گروه ریزشمع
۹۹.....	۵-۱۰-۳- پاسخ نیروها در گروه ریزشمع
۱۰۳.....	۵-۱۰-۴- تغییرات تنش و کرنش سطحی خاک

فصل (۶): جمع‌بندی نتایج و پیشنهادها ۱۰۷

۱۰۸.....	۶-۱- مقدمه
۱۰۸.....	۶-۲- جمع‌بندی نتایج
۱۱۱.....	۶-۳- پیشنهادها

مراجع ۱۱۳

چکیده انگلیسی ۱۱۷

فهرست اشکال

- شکل (۲-۱): ساختار یک ریزشمع ۶
- شکل (۲-۲): آرایش ریزشمع‌های شبکه‌ای موسوم به زنبوری ۸
- شکل (۲-۳): انواع کاربردهای ریزشمع ۹
- شکل (۲-۴): ریزشمع‌های دسته اول ۱۰
- شکل (۲-۵): ریزشمع‌های دسته دوم ۱۰
- شکل (۲-۶): روش‌های SLD و LFD و ارتباط بین آنها ۱۳
- شکل (۲-۷): مراحل اجرای ریزشمع ۱۵
- جدول (۲-۸): آزمایش بارگذاری فشاری ریزشمع ۱۷
- شکل (۲-۹): آزمایش بارگذاری کششی ریزشمع ۱۸
- شکل (۲-۱۰): آزمایش بارگذاری جانبی ریزشمع ۱۹
- شکل (۳-۱): موقعیت کانون زلزله، ایستگاه‌های ثبت رکورد و نگاشت‌های ثبت شده منطقه لیوسرن ۲۸
- شکل (۳-۲): تفاوت نگاشت‌های دور و نزدیک گسل زلزله کجایی (۱۹۹۹) ۲۹
- شکل (۳-۳): نمایش شماتیک اثرات جهت‌پذیری و جابجایی ماندگار در گسلش امتدادلغز و شیب لغز ۳۰
- شکل (۳-۴): نگاشت‌های ایستگاه یاریکما در زلزله کجایی (۱۹۹۹) ۳۱
- شکل (۳-۵): مقایسه مقادیر میانگین طیف شتاب فوری زلزله دور و نزدیک دارای اثر جهت‌پذیری و اثر تغییر مکان ماندگار در دامنه فرکانسی ۳۲
- شکل (۳-۶): نقشه و اطلاعات شبکه ملی شتابنگاری-زلزله بم (۱۳۸۲) ۳۳
- شکل (۳-۱): تاثیر زاویه انحراف بر نیروهای موجود در ریزشمع‌ها تحت اثر زلزله کجایی (۱۹۹۹) ۳۸
- شکل (۳-۲): تاثیر پارامترهای مختلف بر نیروهای موجود در ریزشمع طبق آنالیز حساسیت ۳۹
- شکل (۳-۳): ریزشمع‌های P1 و P2، پروفیل آزمون CPT و مشخصات مکانیکی لایه آبرفتی در آزمایش کاپاتی و همکاران (۲۰۱۶) ۴۰
- شکل (۳-۴): جزئیات آزمون صحرایی ریزشمع‌های مایل-کاپاتی و همکاران (۲۰۱۷) ۴۰
- شکل (۳-۵): نمای شماتیک از تجهیزات آزمایش میز لرزه-جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸) ۴۱

- شکل (۴-۶): تغییرات نسبت بزرگنمایی دینامیکی با افزایش دامنه موج دینامیکی ورودی در آزمایش
 ۴۱ میز لرزه- جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸)
- شکل (۴-۷): توزیع رکوردهای نزدیک گسل انتخاب شده در مطالعه بری و مارک (۲۰۰۴) ۴۴
- شکل (۴-۸): پاسخ‌های سازه‌ای برای سیستم قاب دوبعدی- فونداسیون تحت اثر پالس ورودی ۴۵
- شکل (۴-۹): اثر پالس‌های ثانویه بر ماکزیمم پاسخ غیرخطی ۴۶
- شکل (۴-۱۰): مدل دوبعدی رایانه‌ای برای شبیه‌سازی حرکات قوی زمین در سه ایستگاه زلزله نورث‌ریچ
 ۴۷
- شکل (۴-۱۱): ضریب R_u سیستم خاک- سازه چند درجه آزادی روی خاک بر مبنای نسبت T_p/T_{fix}
 برای شرایط صلبیت متفاوت
- ۴۸ خاک
- شکل (۴-۱۲): ضریب R_u سیستم خاک- سازه چند درجه آزادی روی خاک بر مبنای نسبت T_p/T_{fix}
 برای نسبت ابعاد تفاوت ۴۹
- شکل (۴-۱۳): نمودار پالس پریود به بزرگی زلزله بر اساس تحلیل رگرسیونی برای سایت‌های خاکی و
 سنگی ۵۰
- شکل (۴-۱۴): نمودار پالس پریود به بزرگی زلزله بر اساس تحلیل رگرسیونی برای زلزله‌های درون
 صفحه‌ای و بین صفحه‌ای ۵۰
- شکل (۴-۱۵): مقایسه تاریخچه زمانی واقعی و پیشنهادی برای پالس در رکود شماره ۵ ۵۱
- شکل (۴-۱۶): مقایسه طیف شتاب و جابجایی پیش بینی شده و محاسبه شده در سه میرایی مختلف
 ۵۲
- شکل (۴-۱۷): تاریخچه جابجایی قائم برای مدل‌های خاک به کار گرفته شده در زلزله‌های چی چی و
 کوریاما ۵۳
- شکل (۵-۱): جزئیات مدل اتصال ساده ۶۲
- شکل (۵-۲): جزئیات مدل المان آجری ۶۲
- شکل (۵-۳): جزئیات مدل شمع (ریزشمع) در فضای خالی ۵ ۶۳
- شکل (۵-۴): جزئیات اتصال درجات آزادی انتقالی گره‌های شمع و گره‌های خاک ۶۳
- شکل (۵-۵): جزئیات مدل سازی با فنر ۶۴
- شکل (۵-۶): المان هشت گرهی Brick u-p و رفتار برشی مصالح PDMY و PIMY ۶۵
- شکل (۵-۷): نمودار میرایی رایلی ۶۷

- شکل (۵-۸): مدل سازی خاک و ریزشمع های مایل - آزمایش میزلرزه منوس و همکاران ۷۰
- شکل (۵-۹): مقایسه نتایج آزمایش میزلرزه و مدل سازی عددی با نرم افزار اپنسیس برای کرنش قائم
- خاک در هر سیکل بار ۷۱
- شکل (۵-۱۰): جزئیات مدل سازی ریزشمع و کلاهک بتنی ۷۲
- شکل (۵-۱۱): مدل سه بعدی اجزا محدود از سیستم خاک-ریزشمع-سرریزشمع ۷۴
- شکل (۵-۱۲): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله امپریال ولی ۷۷
- شکل (۵-۱۳): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله کجایی ۷۷
- شکل (۵-۱۴): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله چی چی ۷۸
- شکل (۵-۱۵): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله نورث ریج ۷۸
- شکل (۵-۱۶): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله لوماپریتا ۷۹
- شکل (۵-۱۷): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله لندرز ۷۹
- شکل (۵-۱۸): تاریخچه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع (ساختمان دانه ای) ۸۲
- شکل (۵-۱۹): تاریخچه شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل (ساختمان دانه ای) ۸۵
- شکل (۵-۲۰): نمودار نیروی برشی در طول ریزشمع قائم و مایل (ساختمان دانه ای) ۸۷
- شکل (۵-۲۱): نمودار نیروی خمشی در طول ریزشمع قائم و مایل (ساختمان دانه ای) ۸۸
- شکل (۵-۲۲): کانتور تنش خاک دانه ای تحت اثر زلزله امپریال ولی ۹۲
- شکل (۵-۲۳): کانتور کرنش خاک دانه ای تحت اثر زلزله امپریال ولی ۹۳
- شکل (۵-۲۴): تاریخچه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع (ساختمان چسبنده) ۹۵
- شکل (۵-۲۵): تاریخچه شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل (ساختمان چسبنده) ۹۸
- شکل (۵-۲۶): نمودار نیروی برشی در طول ریزشمع قائم و مایل (ساختمان چسبنده) ۱۰۰
- شکل (۵-۲۷): نمودار نیروی خمشی در طول ریزشمع قائم و مایل (ساختمان چسبنده) ۱۰۱
- شکل (۵-۲۸): کانتور تنش خاک رسی نرم تحت اثر زلزله امپریال ولی ۱۰۵
- شکل (۵-۲۹): کانتور کرنش خاک رسی نرم تحت اثر زلزله امپریال ولی ۱۰۶

فهرست جداول

جدول (۱-۲): جزئیات طبقه‌بندی ریزش‌ها بر اساس روش اجرا	۱۱
جدول (۱-۳): نسبت PGV/PGA در ایستگاه‌های دور و نزدیک چند زلزله مهم	۳۰
جدول (۱-۴): خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته بر رفتار لرزه ای ریزش‌ها	۵۴
جدول (۲-۴): خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در مورد اثر زلزله‌های دور و نزدیک	۵۶
جدول (۱-۵): مشخصات ماسه ۳۰/۶۰ آکلند- میز لرزه منوس و همکاران	۷۰
جدول (۲-۵): مشخصات خاک چسبنده	۷۳
جدول (۳-۵): مشخصات خاک دانه‌ای	۷۳
جدول (۴-۵): مشخصات ریزش‌م	۷۳
جدول (۵-۵): مشخصات زلزله‌های دور از گسل	۷۶
جدول (۶-۵): مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل	۷۶
جدول (۷-۵): دسته بندی مدل خاک-ریزش‌م برای تحلیل گروه ریزش‌م قائم و مایل	۸۰
جدول (۸-۵): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست	۸۱
جدول (۹-۵): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم	۸۱
جدول (۱۰-۵): بیشینه شتاب برای گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست	۸۳
جدول (۱۱-۵): بیشینه شتاب برای گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم	۸۳
جدول (۱۲-۵): بیشینه نیروی برشی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست	۸۶
جدول (۱۳-۵): بیشینه نیروی برشی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم	۸۶
جدول (۱۴-۵): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست	۸۸
جدول (۱۵-۵): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم	۸۸
جدول (۱۶-۵): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه دانه‌ای سست	۹۰
جدول (۱۷-۵): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه دانه‌ای متراکم	۹۱
جدول (۱۸-۵): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک رسی نرم	۹۴
جدول (۱۹-۵): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک رسی متوسط	۹۴
جدول (۲۰-۵): بیشینه شتاب برای گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک رسی نرم	۹۶
جدول (۲۱-۵): بیشینه شتاب برای گروه ریزش‌م قائم و مایل در خاک رسی متوسط	۹۶

- جدول (۵-۲۲): بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رسی نرم ۹۹
- جدول (۵-۲۳): بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رسی متوسط ۹۹
- جدول (۵-۲۴): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رسی نرم ۱۰۱
- جدول (۵-۲۵): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رسی متوسط ۱۰۱
- جدول (۵-۲۶): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه رسی نرم ۱۰۳
- جدول (۵-۲۷): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه رسی متوسط ۱۰۴
- جدول (۶-۱): اولویت‌بندی اجرای گروه ریزشمع با عملکرد مقاوم‌سازی لرزه‌ای ۱۱۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات تحقیق

ریزشمع‌ها^۱، شمع‌هایی با قطر کوچک می‌باشند که برای تقویت عملکرد فونداسیون‌ها در برابر نشست، بارگذاری فشاری و جانبی و نیز اصلاح و بهسازی خاک به کار می‌روند. این سیستم از طریق حفر گمانه، استقرار المان ریزشمع و در نهایت تزریق دوغاب اجرا می‌شود. این سیستم به دلیل استفاده توأمان از المان‌های باربر و بهبود پارامترهای مقاومتی خاک بر اثر تزریق در بسیاری از زمینه‌های بهسازی ساختگاه و فونداسیون کاربرد دارد.

زمین لرزه‌ها بر حسب فاصله محل ثبت رکورد تا محل گسل (محل اصلی لغزش) به دو دسته زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور تقسیم‌بندی شده‌اند. هر چند به طور قطعی و دقیق نمی‌توان فاصله مشخصی برای زلزله‌های نزدیک گسل تعریف نمود، اما به طور معمول فرض می‌گردد جنبش‌های ثبت شده در فاصله‌ای کمتر از ۱۵ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، نگاشت‌های نزدیک گسل می‌باشند. مطالعات دو دهه اخیر نشان داده زلزله‌های دور و نزدیک علی‌رغم شباهت‌های ذاتی دارای تفاوت‌های مهم در حوزه فرکانسی و ایجاد تغییر شکل‌های سطحی می‌باشند.

به دلیل محدودیت مدل‌سازی آزمایشگاهی با مقیاس واقعی، به کارگیری روش اجزای محدود و تحلیل تاریخیچه زمانی می‌تواند ابزار موثری برای بررسی رفتار و عملکرد لرزه‌ای ریزشمع‌ها به شمار آید. با این رویکرد، مطالعه ویژگی‌ها و اثرات زلزله‌های دور و نزدیک بر عملکرد گروه ریزشمع و مقایسه نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی آنها، هدف پژوهش حاضر قرار گرفت.

۱-۲- ضرورت تحقیق

لزوم شناخت رفتار و پیامدهای زلزله در مناطق لرزه‌خیز همچون کشورمان از یک‌سو، مطالعه عملکرد سیستم ریزشمع به عنوان یک روش موثر، مقرون به صرفه و با قابلیت بالای اجرایی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختگاه و فونداسیون از سوی دیگر و در نظر گرفتن ویژگی‌ها و اثرات متفاوت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر عملکرد سیستم‌های مقاوم سازی لرزه‌ای که در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی واقع شده، بیانگر ضرورت تحقیق بر روی عملکرد ریزشمع‌ها تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک می‌باشد. با توجه به موارد فوق این پژوهش می‌تواند الگوی مناسبی برای بهره‌گیری از گروه ریزشمع در جهت مقاوم‌سازی لرزه‌ای پی و ساختگاه موجود با لحاظ نمودن اثرات متفاوت زمین لرزه‌های نزدیک به کانون لرزه‌زا و دور از آن ارائه کند.

^۱ Micropiles

۳-۱- روش تحقیق

در این پژوهش یک مدل استاندارد از خاک- ریزشمع- سرریزشمع متشکل از دو نوع خاک دانه‌ای و چسبنده با رفتار الاستوپلاستیک و مشخصات مکانیکی متفاوت شامل خاک دانه‌ای سست ($Dr=0.40$)، خاک دانه‌ای متراکم ($Dr=0.80$)، خاک چسبنده نرم (Soft Clay) و خاک چسبنده متوسط (Medium Clay) به وسیله دو گروه ریزشمع قائم و مایل بتنی به قطر مقطع ۲۰ cm و رفتار الاستیک مسلح گردید. با توجه به سرعت موج برشی ساختگاه (V_{s30})، سیستم تحت اثر سه مجموعه زلزله شامل رکوردهای دور و نزدیک زلزله‌های امپریال ولی، کجایی و چی چی برای ساختگاه ماسه‌ای سست و رسی نرم و رکوردهای دور و نزدیک زلزله‌های نورث‌ریج، لومپرتا و لندرز برای ساختگاه ماسه‌ای متراکم و رسی متوسط قرار گرفت. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی شامل پاسخ‌های گروه ریزشمع (شتاب، تغییر مکان افقی و نیروهای داخلی) و خاک (تنش و کرنش سطحی) مقایسه و بررسی شد و موارد مهم برای بهره‌گیری از گروه ریزشمع به منظور مقاوم‌سازی لرزه‌ای در مناطق نزدیک به کانون لرزه‌زا و دور از آن ارائه گردید. برای مدل‌سازی از نرم افزار اجزاء محدود Openseese 2.5.0 استفاده شده است.

۴-۱- ساختار پایان نامه

پایان نامه در شش فصل تدوین شده است که در ادامه به محتوای هر فصل به اختصار اشاره می‌شود:

- فصل (۱): معرفی ریزشمع‌ها، ساختار، روش‌های طراحی و اجرا، کاربردها، مزایا و محدودیت‌های آن
- فصل (۲): تعریف زلزله‌های نزدیک در مقایسه با زلزله‌های دور و بررسی ویژگی‌ها و اثرات این زلزله‌ها
- فصل (۳): مروری بر پژوهش‌های انجام شده در گذشته در زمینه تحلیل لرزه‌ای گروه ریزشمع و تاثیر زلزله‌های دور و نزدیک بر انواع ساختگاه‌ها و سازه‌های ژئوتکنیکی
- فصل (۴): تشریح مدل‌سازی ریزشمع در نرم افزار اپنسیس، انتخاب روش، مصالح، المان‌ها، رکوردهای ورودی و صحت سنجی نتایج نرم افزار با نتایج مدل‌سازی فیزیکی (میز لرزه)، ارائه و بررسی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود و تاریخچه زمانی
- فصل (۵): نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای توسعه مدل و ادامه پژوهش در زمینه کار انجام شده با رویکرد این پایان نامه

فصل دوم

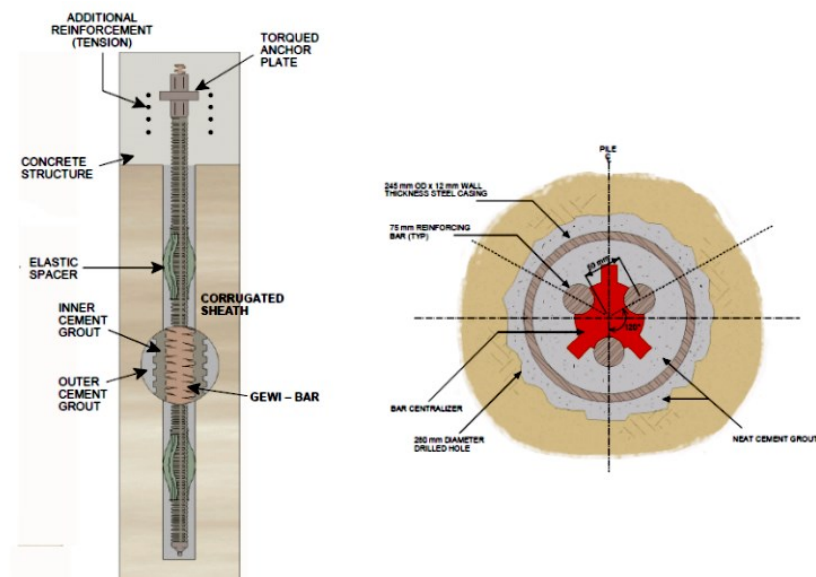
معرفی ریزش‌ها

۲-۱- معرفی کلی (ساختار و عملکرد)

ریزشمع (میکروپایل) به شمع‌هایی با قطر کمتر از ۳۰۰ میلیمتر اطلاق می‌گردد که با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب همراه است [1]. ریزشمع‌ها برای مقاصد متفاوتی از جمله تحمل بارهای محوری و جانبی، تقویت عملکرد بسترخاکی یا فونداسیون و به طور کلی به عنوان جزئی از سیستم ترکیبی خاک و شمع، 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. انواع کاربرد ریزشمع‌ها در بخش ۲-۳ بیان شده است.

یک سیستم ریزشمع متشکل از المان تسلیح کننده (معمولاً میلگرد فولادی)، دوغاب سیمان، ناحیه تزریق (مخلوط خاک و دوغاب) غلاف (کیسینگ)، فلنج (مهار انتهایی ریزشمع) و کلاهک ریزشمع می‌باشد. شکل (۱-۲) اجزای این سیستم را نمایش می‌دهد.

ریزشمع‌ها را میتوان با توجه به هدف طراحی و زمینه کاربرد بصورت تکی یا آرایش گروهی و به صورت قائم یا مایل تحت یک زاویه مشخص نسبت به سطح افق اجرا کرد. دریک نگاه کلی ریزشمع‌های قائم دارای عملکرد استاتیکی برای مقابله با نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک و ریزشمع‌های مایل دارای عملکرد دینامیکی جهت مقاوم‌سازی لرزه‌ای می‌باشند.



شکل (۱-۲): ساختار یک ریزشمع

۲-۲- پیشینه

ریزشمع‌ها در اوایل دهه ۱۹۵۰ در ایتالیا به منظور تقویت پی ساختمان‌های تاریخی و آثار باستانی، که به مرور زمان و به خصوص در طول جنگ جهانی دوم دچار آسیب شده بودند، ابداع شدند. پیمانکار ایتالیایی به نام فوندیل^۱ اولین بار شمع‌های ریشه‌ای^۲ را معرفی نمود. این شمع‌های درجاریز دارای قطر کمی بودند و با مسلح کننده فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان تقویت شده بودند. دکتر فرناندو لیزی^۳ مهندس ایتالیایی همراه با فوندیل و در سال‌های بعد مفهوم ریزشمع را به شکل امروزی گسترش داد. از او به عنوان پدر تکنولوژی ریزشمع یاد می‌شود.

در ابتدا اغلب کاربرد ریزشمع‌ها به تقویت سازه‌های موجود در محیط‌های شهری محدود می‌شد؛ ولی در سال ۱۹۵۷ نیازهای جدید مهندسی منجر به معرفی سیستم‌های جدید موسوم به ریزشمع‌های زنبوری^۴ گردید. این سیستم همان گونه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، شامل شبکه‌ای سه بعدی از ریزشمع‌های قائم و مورب بود که یک سازه ترکیبی از خاک و شمع را ایجاد می‌نمود و در جهت جانبی محدود شده بود.

فوندیل در سال ۱۹۶۲ از این روش برای تقویت ساختمان‌های تاریخی انگلستان استفاده نمود. همچنین در سال ۱۹۶۵، این روش در سیستم حمل و نقل زیرزمینی درون شهری آلمان مورد استفاده قرار گرفت. ریزشمع بیش از دو دهه بعد در ایالات متحده به کار گرفته شد و در اواسط دهه ۱۹۸۰ رشد سریعی در کاربرد آن به خصوص به عنوان المان تقویت کننده فونداسیون در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی و نیز در مسلح‌سازی برجای شیب‌ها و پایدارسازی گودبرداری‌ها به وجود آمد. در سال ۱۹۹۳، اداره کل بزرگراه‌های فدرال^۵ (FHWA) گروهی را برای تحقیق و مطالعه بر روی ریزشمع‌ها در نظر گرفت و با اتمام مطالعات صورت گرفته، یک مرجع راهنمای طراحی و ساخت برای ریزشمع‌ها تهیه و تنظیم گردید و نام ریزشمع برای این سیستم به رسمیت شناخته شد.

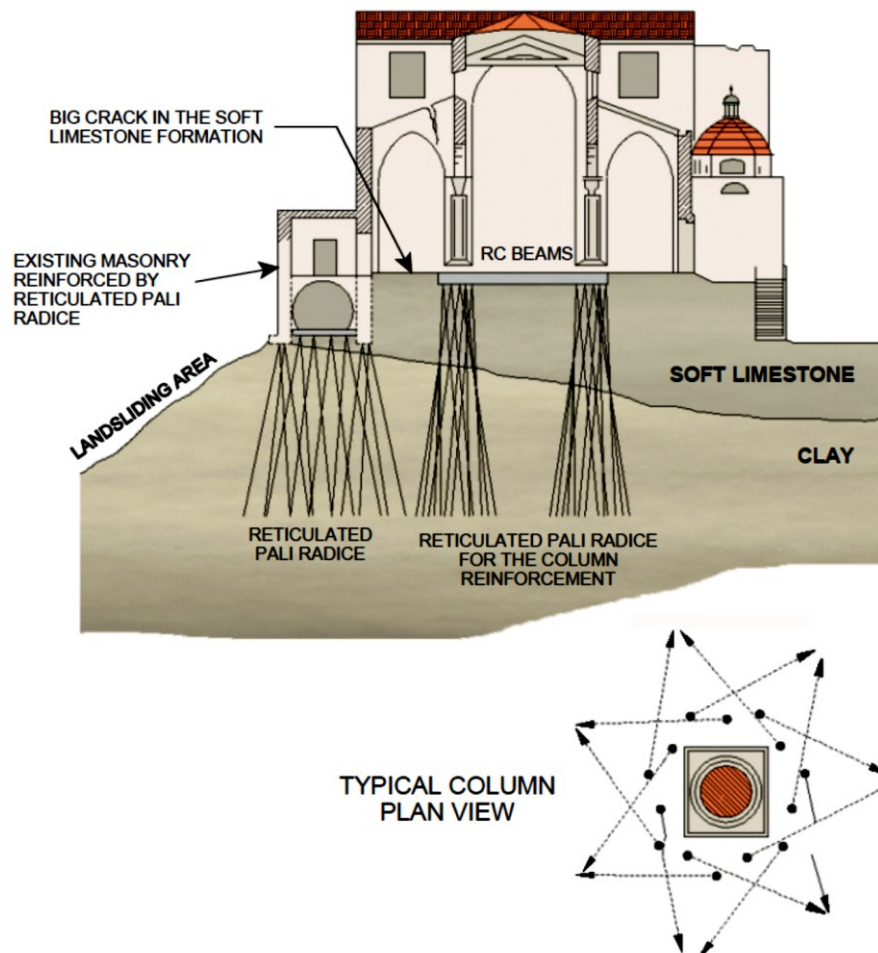
۱ Fondedile

۲ palo radice

۳ Fernando Lizzi

۴ Reticulated Micropile

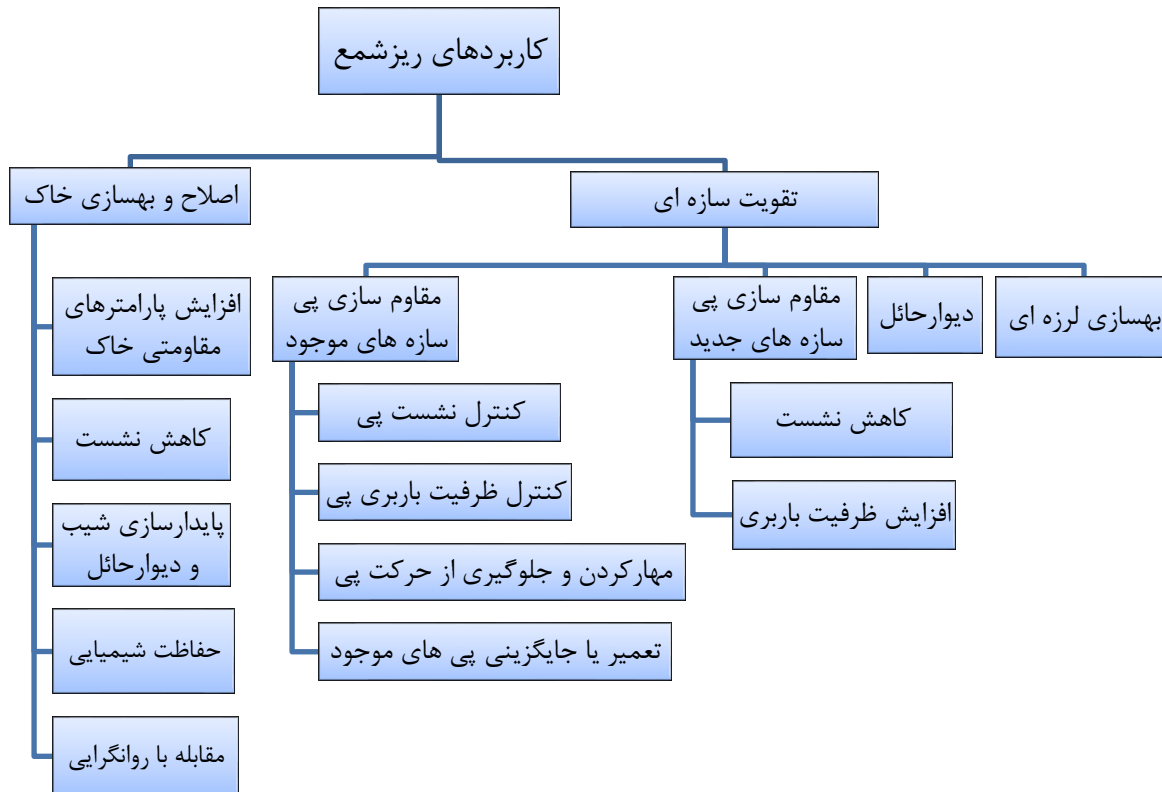
۵ Federal High Way Administration



شکل (۲-۲): آرایش ریزشمع‌های شبکه‌ای موسوم به زنبوری

۲-۳- دامنه کاربرد

بطور کلی مقابله با خاک‌های مسئله دار در مهندسی ژئوتکنیک مشتمل بر دو بخش «تقویت سازه‌ای» و «بهسازی برجای خاک» می‌باشد. ریزشمع روشی است که به نوعی مزایای هر دو روش بالا را در بر می‌گیرد. خلاصه‌ای از کاربردهای ریزشمع در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۳): انواع کاربردهای ریزشمع

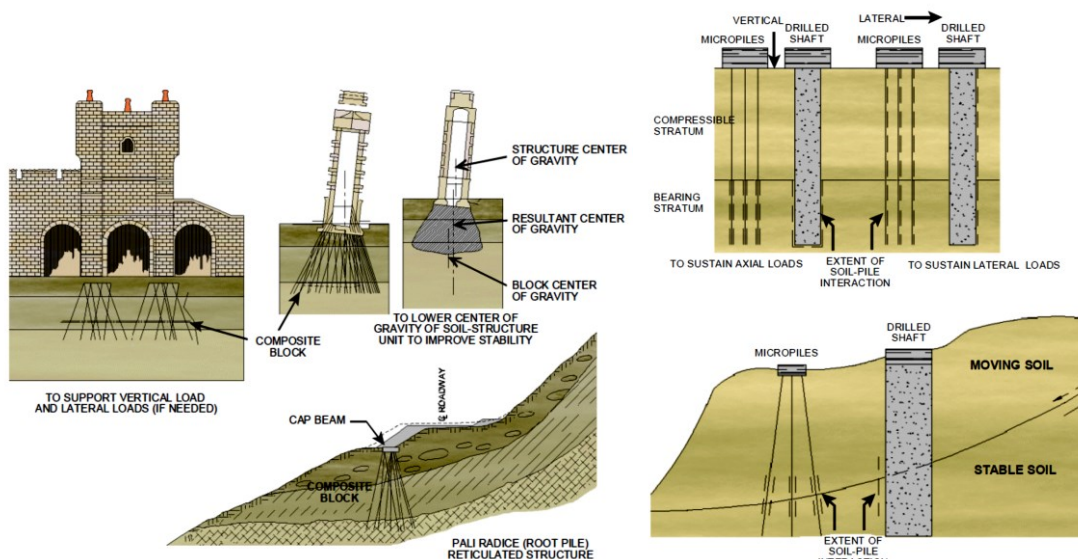
۲-۴- طبقه بندی ریزشمع‌ها

تقسیم بندی ریزشمع‌ها بر اساس دو معیار شیوه طراحی و روش اجرا صورت می‌گیرد که شرح هر کدام از این معیارها در ادامه آمده است.

۲-۴-۱- طبقه بندی بر اساس شیوه طراحی

طراحی ریزشمع منفرد یا گروه ریزشمع، با طراحی ریزشمع‌های زنبوری بسیار متفاوت است. این امر سبب شده است تا دو دسته طراحی برای ریزشمع‌ها تعریف شود. در دسته اول، ریزشمع‌ها به طور مستقیم بارگذاری شده و مسلح کننده‌ها بیشتر بار اعمالی را تحمل می‌نمایند. در دسته دوم، ریزشمع‌ها به صورت شبکه‌ای درون خاک قرار گرفته و ایجاد یک سیستم ترکیبی خاک مسلح می‌نماید که این سیستم وظیفه تحمل بارهای اعمالی را دارد. این سیستم ترکیبی همان شبکه ریزشمع‌های زنبوری می‌باشد. ریزشمع‌های دسته اول و دوم به ترتیب در شکل‌های (۲-۴) و (۲-۵) نشان داده شده‌اند. در دسته اول، ریزشمع‌ها به عنوان جایگزین شمع‌های سنتی برای انتقال بار سازه

به لایه‌های مقاوم زیرین استفاده می‌شوند. این ریزشمع‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که عملکرد منفرد داشته باشند حتی اگر به صورت گروهی اجرا شوند. در دسته دوم ریزشمع‌ها دارای تقویت سبک‌تری می‌باشند زیرا مسلح کننده‌ها، مانند دسته اول مستقیماً تحت بارگذاری قرار نمی‌گیرند و این توده خاک و شمع است که بارهای اعمالی را تحمل می‌نماید.



شکل (۲-۴): ریزشمع‌های دسته اول

شکل (۲-۵): ریزشمع‌های دسته دوم

۲-۴-۲- طبقه بندی بر اساس روش اجرا

روش تزریق، مهمترین عامل تاثیرگذار بر مقاومت پیوستگی^۱ بین زمین و دوجاب می‌باشد. به گونه‌ای که مقاومت پیوستگی به طور مستقیم با تغییر روش تزریق، تغییر می‌نماید. در این طبقه بندی، معیار، روش تزریق و فشار آن می‌باشد و استفاده از غلاف (کیسینگ)^۲ و آرماتور تقویت تعیین کننده زیربخش‌های این طبقه بندی خواهد بود.

همان گونه که در جدول (۲-۱) نشان داده شده است، در این طبقه بندی ریزشمع‌ها به چهار نوع تقسیم می‌شوند.

۱ Bond

۲ Casing

جدول (۱-۲): جزئیات طبقه‌بندی ریزشمع‌ها بر اساس روش اجرا

نوع میکروپایل و روش تزریق	نام زیر بخش	غلاف حفاری	تقویت
نوع A	A _۱	موقت یا بدون پوشش	بدون تقویت، تک آرماتور، قفسه آرماتور، لوله یا مقطع سازه ای
	A _۲	دائم در کل طول گمانه	خود غلاف حفاری
	A _۳	دائم، استوانه فوقانی فقط	غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین
نوع B	B _۱	موقت یا بدون پوشش	تک آرماتور یا لوله (از قفسه به دلیل ظرفیت سازه ای پایین آن به ندرت استفاده می‌شود)
	B _۲	دائم در کل طول گمانه	خود غلاف حفاری
	B _۳	دائم، فقط در قسمت فوقانی	غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین
نوع C	C _۱	موقت یا بدون پوشش	تک آرماتور یا لوله (از قفسه به دلیل ظرفیت سازه ای پایین آن به ندرت استفاده می‌شود)
	C _۲	استفاده نمی‌شود	-
	C _۳	استفاده نمی‌شود	-
نوع D	D _۱	موقت یا بدون پوشش (گمانه باز یا اوگر)	تک آرماتور یا لوله (از قفسه به دلیل ظرفیت سازه ای پایین آن به ندرت استفاده می‌شود)
	D _۲	دائم در کل طول گمانه	خود غلاف حفاری
	D _۳	دائم، استوانه فوقانی فقط	غلاف حفاری در قسمت فوقانی و آرماتور یا لوله در قسمت زیرین

نوع A: در این روش اجراء، دوغاب تحت وزن خودش در محل قرار می‌گیرد.

نوع B: در این روش دوغاب سیمان پس از خارج شدن غلاف فولادی حفاری از گمانه، تحت فشار به داخل گمانه تزریق می‌شود. فشار تزریق معمولاً بین ۰/۵ تا ۱ MPa تغییر می‌کند و بایستی به گونه‌ای باشد که مانع از شکست هیدرولیکی گردد.

نوع C: این روش یک فرآیند دو مرحله‌ای است که در آن ابتدا دوغاب سیمان تحت وزن خودش در داخل حفره قرار می‌گیرد (همانند نوع A). سپس قبل از سخت شدن دوغاب اولیه (بعد از حدود ۱۵ تا ۲۵ دقیقه)، همان نوع دوغاب از طریق لوله‌های تزریق مشبک و بدون استفاده از پکر، در محل تماس دوغاب با زمین و در فشار حداقل ۱ MPa تزریق می‌شود. این نوع ریزشمع عموماً در فرانسه استفاده می‌شود و به روش IGU^۱ موسوم است.

نوع D: این روش نیز یک فرآیند دو مرحله‌ای از تزریق مشابه نوع C، اما با تغییراتی در مرحله دوم می‌باشد. ابتدا دوغاب سیمان یکنواخت تحت اثر وزن خودش مانند نوع A و C و یا تحت فشار، مانند نوع B در حفره قرار می‌گیرد. بعد از سخت شدن دوغاب اولیه، دوغاب بعدی از طریق لوله‌های تزریق مشبک تحت فشار ۲ تا ۸ مگاپاسکال تزریق می‌شود. در این روش از پکر استفاده می‌شود تا در صورت نیاز بتوان سطوح خاص را چندین مرتبه اصلاح نمود. این نوع شمع که در فرانسه به روش IRS^۲ موسوم است، به طور گسترده در سایر کشورها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۵- اصول طراحی

اصول محاسبات مهندسی ریزشمع تابع نوع کاربری ریزشمع و به تبع آن نحوه رفتار آن می‌باشد. در شرایطی که ریزشمع‌ها با هدف تقویت و بهسازی بستر پی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، محاسبات فنی ریزشمع مشابه با محاسبه شمع‌های متداول است. این محاسبات مبتنی بر سه بخش طرح سازه‌ای، طرح ژئوتکنیکی و کنترل برش پانچ می‌باشد.

در طرح سازه‌ای، ظرفیت باربری المان‌های ریزشمع مشتمل بر جدار فولادی، آرماتور تسلیح و دوغاب سیمان محاسبه می‌شود که این ظرفیت می‌بایست با ضریب اطمینان مناسبی، بالاتر از بار وارده به ریزشمع باشد.

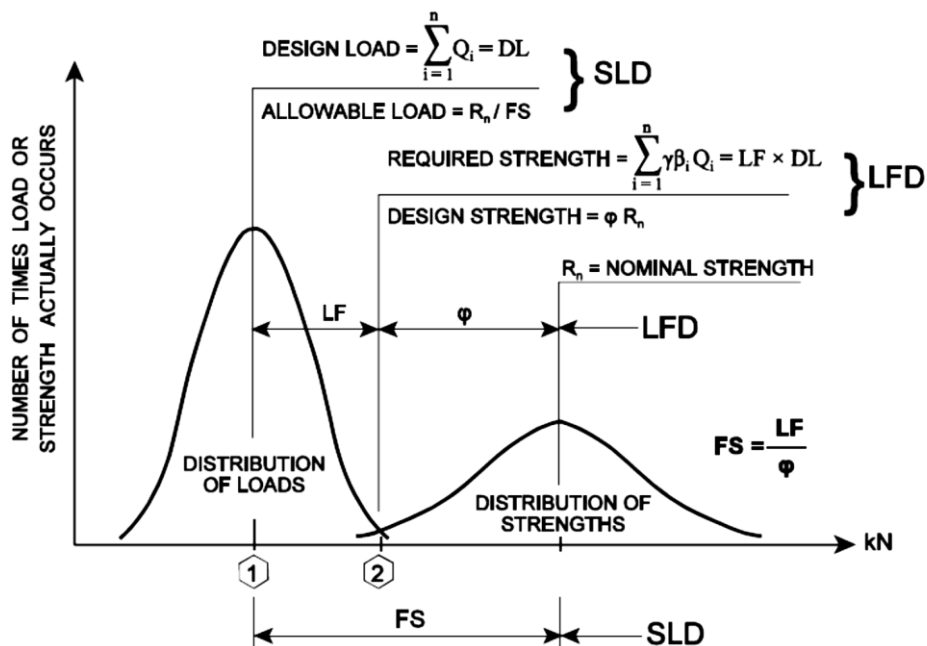
^۱ Injection Globale et Unitaire

^۲ Injection Repeitive et Selective

در طرح ژئوتکنیکی، مقاومت اصطکاکی جداره ریزشمع با خاک اطراف محاسبه می‌گردد که می‌بایست این مقاومت اصطکاکی با ضریب اطمینان مناسبی، بالاتر از بار وارده باشد تا امکان جدایی ریزشمع از خاک قبل از وقوع تسلیم عوامل مسلح کننده وجود نداشته باشد.

در گام نهایی طرح، با توجه به این که ریزشمع دارای بار متمرکز زیاد و قطر کوچک بوده و برش پانچ باتوجه به سربارهای وارده محتمل می‌باشد، کنترل مقاومت در برابر برش پانچ که منتهی به ارائه طرح فلنچ مناسب می‌گردد، انجام می‌شود.

مهمترین مرجع طراحی و اجرای ریزشمع‌ها آیین نامه FHWA می‌باشد که آخرین ویرایش آن در سال ۲۰۰۵ منتشر شده است. در این آیین‌نامه روش‌های طراحی SLD (طراحی به روش تنش مجاز) و LFD (طراحی بر اساس مقاومت) ارائه گردیده است. در حال حاضر مهندسين از هر دو روش SLD و LFD استفاده می‌کنند ولی در حال گذار از SLD و حرکت به سوی LFD و ویرایش جدید آن یعنی روش LRFD (طراحی براساس بار و مقاومت) می‌باشند.



شکل (۲-۶): روش‌های SLD و LFD و ارتباط بین آنها

۲-۶- روش اجرا

روش اجرای ریزشمع مشتمل بر چهار مرحله حفاری (در صورت نیاز)، لوله‌کوبی، تزریق و تقویت می‌باشد که مراحل اجرای آن در ادامه تشریح شده است. به طور کلی تکنیک و تجهیزاتی که در حفاری و تزریق ریزشمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشابه تجهیزات مورد استفاده در نیلینگ می‌باشد. مراحل اجرای ریزشمع در شکل (۲-۶) به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

(۱) حفاری: در صورتی که امکان کوبش لوله‌های ریزشمع از ابتدا به دلایل مختلف نظیر وجود کفسازی، بتن مگر و لایه متراکم خاک میسر نباشد، باید نسبت به انجام عملیات حفاری اقدام نمود. حفاری می‌بایست تا عمقی که امکان کوبش وجود دارد، ادامه یابد. گاهی ممکن است حفاری در کل ارتفاع ریزشمع صورت گیرد و در بخش‌های ریزشی، ممکن است به روش حفاری و تزریق مجدد تا رسیدن به عمق مورد نظر انجام پذیرد.

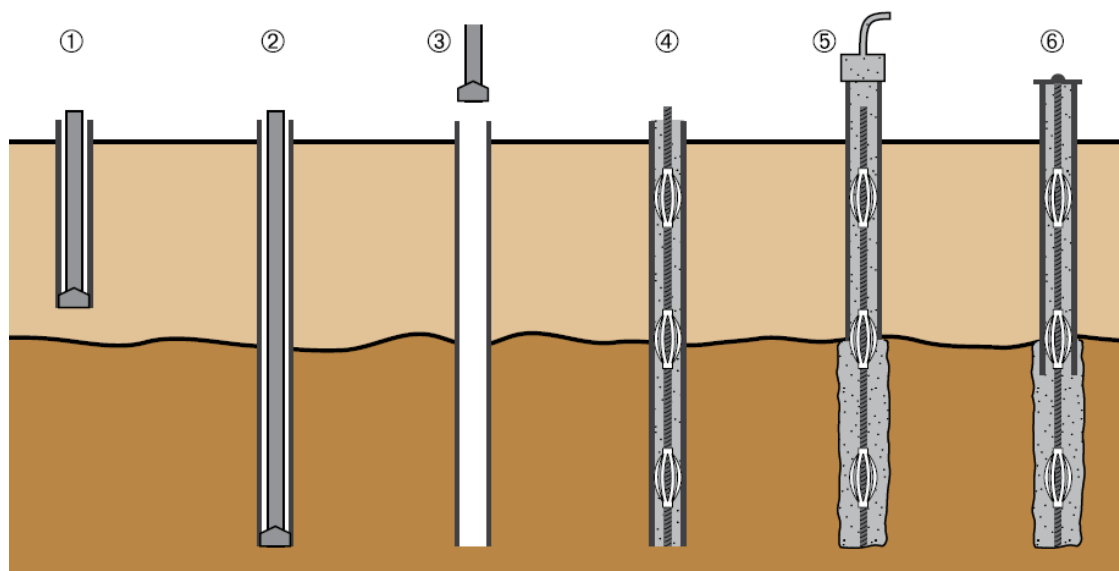
(۲) لوله‌کوبی: به منظور استقرار لوله‌های ریزشمع در محل گمانه، غالباً از عملیات لوله‌کوبی استفاده می‌گردد. برای این منظور در مرحله اول عملیات از لوله نوک‌تیز ریزشمع استفاده می‌شود و پس از فرورفتن لوله اول، لوله دوم به لوله اول متصل گردیده و کوبیده می‌شود و عملیات کوبش به همین ترتیب ادامه می‌یابد. جهت اتصال کامل لوله‌ها به یکدیگر علاوه بر استفاده از بوشن‌های رزوه شده، لوله‌ها به لبه بوشن نیز جوش داده می‌شود. عملیات کوبش تا زمانی که امکان کوبیدن لوله‌ها میسر باشد ادامه می‌یابد و اگر در ازای ۳۰ ضربه متوالی لوله‌کوب، لوله بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر فرو نرود، عملیات کوبش متوقف می‌گردد. در این حالت تا رسیدن به عمق طراحی، حفاری انجام شده و سپس لوله‌های مربوط به ریزشمع در درون گمانه نصب می‌گردد.

(۳) تزریق: عملیات ساخت و تزریق دوغاب سیمان بایستی با دقت صورت گیرد. مجموعه دستگاه‌های تزریق از سه بخش میکسر اولیه، میکسر ثانویه و پمپ تزریق تشکیل می‌شود. اختلاط در میکسر اولیه از نوع سیستم چرخش سریع آب و در میکسر ثانویه از نوع پره‌ای می‌باشد.

ساخت دوغاب تزریق در همزن‌های میکسر اولیه صورت می‌گیرد. ابتدا آب به میزان مورد نظر ریخته شده و سپس بر اساس نسبت آب به سیمان مورد نیاز، سیمان به آن افزوده می‌شود. حداقل زمان اختلاط دوغاب سیمان، ۳۰ ثانیه می‌باشد. نسبت آب به سیمان مورد استفاده با توجه به شرایط زمین بین ۰/۴ تا ۰/۵ مطلوب است. پس از آماده شدن دوغاب، جهت نگهداری در داخل همزن ثانویه ریخته شده و سپس به وسیله پمپ‌های تزریق مخصوص تزریق می‌گردد.

به دلیل اینکه دوغاب سیمان بایستی تحت فشار زیاد در لایه های خاک نفوذ می‌کند، جهت تزریق دوغاب سیمان از یک شیلنگ دو جداره به نام پکر^۱ استفاده می‌شود. پکرها بعد از اینکه به درون لوله ریزشمع فرستاده شدند جداره دوم آنها بوسیله پمپ هوا باد می‌شود. با این کار پکر کاملاً به بدنه لوله می‌چسبد و مانع خروج دوغاب در حین تزریق از بالای لوله خواهد شد. مثلاً مرحله اول بستن پکر برای ریزشمع ۸ تا ۱۰ متری در عمق ۶ متری گمانه بوده و پس از اتمام عملیات تزریق در عمق ۶ متری، پکر در عمق ۴ متری بسته می‌شود و پس از اتمام تزریق در این مرحله، پکر در عمق ۲ متری بسته می‌شود و نهایتاً پس از تزریق در این مرحله، پکر سرچاهی بسته می‌شود و عملیات تزریق به اتمام می‌رسد. در صورتی که نشستی دوغاب از سطح یا ریزشمع‌های جانبی مشاهده شود، عملیات تزریق متوقف می‌گردد. در صورتی که درون لوله ریزشمع قبل از تزریق دوغاب سیمان، کثیف باشد بایستی درون لوله توسط فشار آب یا هوای فشرده تمیز شود.

۴) جایگذاری آرماتور و نصب فلنج: گام نهایی در اجرای ریزشمع، عملیات جایگذاری آرماتور تقویت در داخل لوله ریزشمع و نصب فلنج (در صورت نیاز) می‌باشد. بدیهی است که آرماتور تقویت می‌بایست قبل از گیرش سیمان، در داخل گمانه نصب شود. فلنج که به منظور ایجاد اتصال کامل بین ریزشمع و بتن فونداسیون و همچنین جلوگیری از برش پانچ سر ریزشمع در داخل بتن پی به کار می‌رود، می‌بایست در آخرین مرحله به آرماتور تقویت ریزشمع جوش شود.



شکل (۲-۷): مراحل اجرای ریزشمع

۲-۷- کنترل کیفیت عملکرد

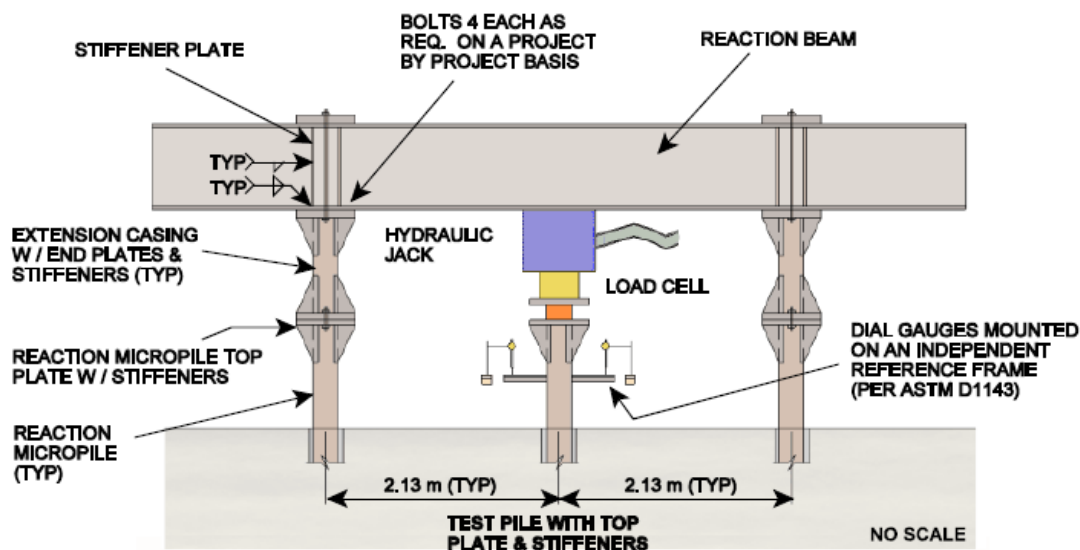
به طور کلی با توجه به کارکرد در نظر گرفته شده برای ریزشمع و برای اطمینان از فرض‌های طراحی صورت گرفته، آزمایش‌های مختلف بارگذاری بر روی ریزشمع انجام می‌شود. اعمال بار را می‌توان طی یک سیکل به طور فزاینده تا ظرفیت مورد نیاز پیش برد یا در طی چند سیکل در حین اعمال بار و حذف آن به صورت نموی تا رسیدن به حداکثر بار انجام داد. مدت زمانی که هر بار اعمال می‌شود از ملاحظات مهم است. این زمان برای ریزشمع در یک خاک غیرحساس به نشست مانند ماسه، شن و سنگ حداکثر ۱۰ دقیقه و برای ریزشمع در یک خاک حساس به نشست همچون رس و سیلت بین ۱۰۰ دقیقه تا ۲۴ ساعت باشد.

در مواقعی که ریزشمع معیارهای پذیرش شده در آزمایش پیش بهره‌برداری را ارضا نکند، پیمانکار می‌تواند طرح ریزشمع یا پروسه ساخت و اجرا را اصلاح کند. اگر گسیختگی در طی آزمایش بارگذاری یک شمع در حال بهره‌برداری رخ دهد، پیمانکار بایستی طرح، پروسه اجرا یا هر دو را اصلاح کند. این اصلاحات می‌تواند شامل اجرای ریزشمع‌های جایگزین، اصلاح روش اجرا، افزایش طول پیوند یا تغییر نوع ریزشمع شود [1]. مهمترین آزمایش‌های کنترل کیفی ریزشمع در ادامه آمده است.

۲-۷-۱- آزمایش بارگذاری فشاری ریزشمع

ریزشمع‌هایی که حداقل ۲۸ روز از زمان تزریق آنها گذشته باشد، به صورت فشاری با استفاده از جک، بارگذاری می‌شوند. این آزمایش با استفاده از تیر بارگذاری صورت می‌گیرد. با توجه به مشخصات فنی و نقشه‌های اجرایی ریزشمع‌ها بارگذاری در دو مورد از آزمایش‌ها، تا رسیدن به بار طراحی و در یک مورد تا رسیدن به بار نهایی انجام می‌شود. روش اجرای کلیه آزمایش‌های اشاره شده، مطابق استاندارد ASTM-D1143 خواهد بود. در این آزمایش‌ها باید پس از انجام بارگذاری، منحنی بارگذاری و نشست ترسیم گردد. در حین انجام آزمایش نیز ریزشمع باید تا رسیدن به بار آزمایشی، قابلیت تحمل بارهای اعمال شده را داشته باشد و نشانی از گسیختگی یا تغییر مکان بیشتر از حد استاندارد از خود نشان ندهد. در این آزمایش، بارگذاری به روش پله‌ای تا رسیدن به بار آزمایشی و باربرداری تا بار صفر به وسیله جک بارگذاری انجام می‌گیرد. بارگذاری در پله‌های ۳ تنی انجام می‌پذیرد و در هر مرحله بار به مدت ۵ دقیقه بر روی ریزشمع قرار می‌گیرد. قرائت نشست‌های حاصل از هر پله بارگذاری در سه مرحله صورت می‌پذیرد.

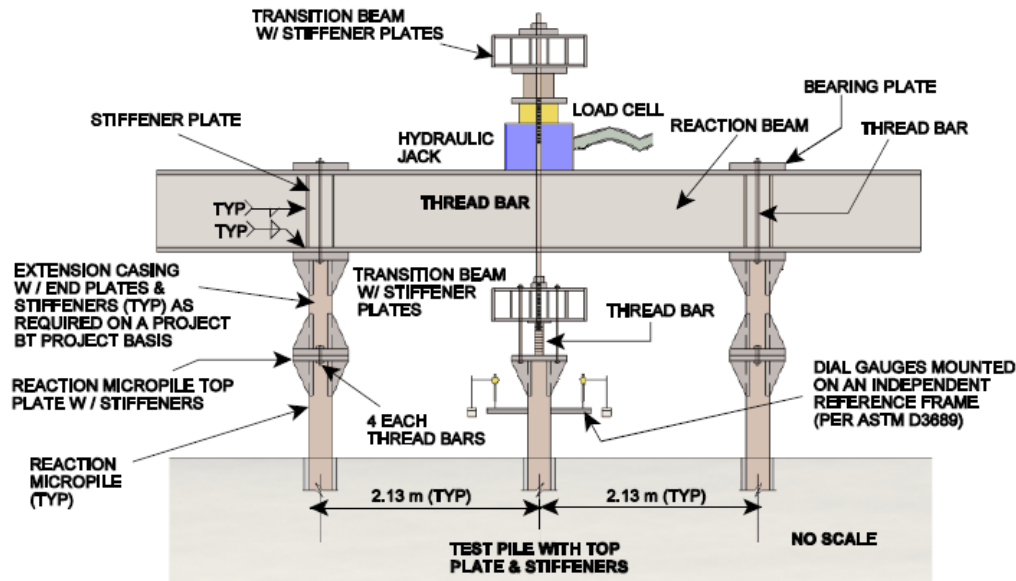
پس از انجام عملیات بارگذاری، نوبت به انجام عملیات باربرداری می‌رسد. باربرداری نیز مانند بارگذاری به روش پله‌ای و در پله‌های ۳ تنی صورت می‌گیرد. در هر مرحله از باربرداری نیز تغییر مکان‌ها بوسیله گیج‌های اندازه‌گیری تغییر مکان در سه نقطه مانیتور می‌شود [2].



جدول (۲-۸): آزمایش بارگذاری فشاری ریزشمع

۲-۷-۲- آزمایش بارگذاری کششی ریزشمع

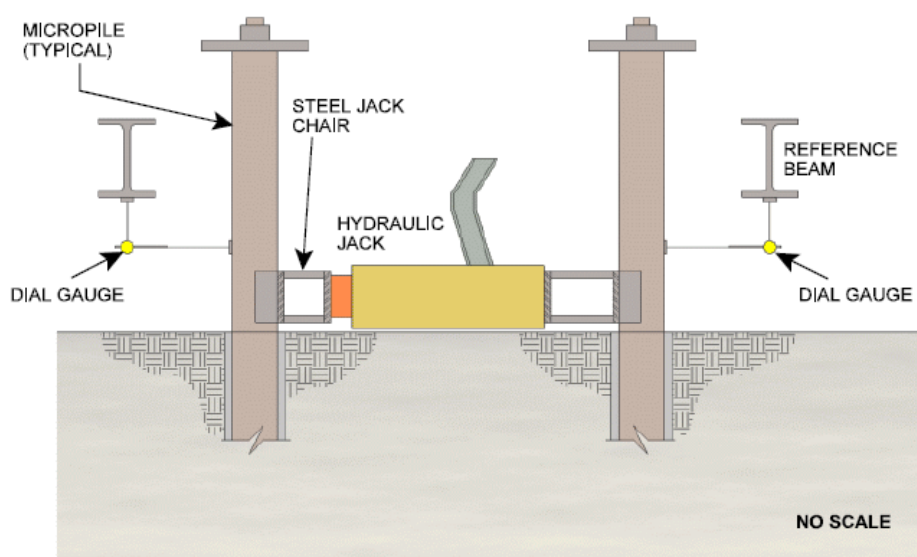
هدف از انجام این آزمایش، بررسی رفتار مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری کششی ریزشمع است. این آزمایش به صورت مستقل و یا با استفاده از ریزشمع با رویکرد تکیه‌گاهی در آزمایش فشاری انجام می‌شود. روند انجام آزمایش به این صورت است که تیر بارگذاری بر روی دو پایه بالاتر از سطح زمین مستقر شده و جک هیدرولیکی در بالای این تیر و بین صفحه فولادی متصل به ریزشمع و تیر بارگذاری قرار می‌گیرد. با به کار بردن نیروی هیدرولیکی به شیوه پله‌ای و حرکت پیستون به سمت بال، تیر بارگذاری به سمت پایین حرکت کرده و ریزشمع به سمت بال کشیده می‌شود. حرکت ریزشمع به بیرون از خاک به وسیله‌ی گیج، اندازه‌گیری می‌شود [2].



شکل (۲-۹): آزمایش بارگذاری کششی ریزشمع

۲-۷-۳- آزمایش بارگذاری جانبی ریزشمع

این آزمایش برای ارزیابی رفتار جانبی ریزشمع‌ها اجرا می‌گردد. در این آزمایش، جک هیدرولیکی میان دو ریزشمع اجرا شده قرار می‌گیرد و نیرویی برابر به هر دو ریزشمع با خروج پیستون در بازه زمانی مختلف وارد می‌شود. این جابجایی‌ها به وسیله گیج‌های اندازه‌گیری تغییر مکان، ثبت می‌شود. جک‌های هیدرولیکی باید مجهز به صفحات منحنی شکل برابر باشند تا به ریزشمع اتصال کامل پیدا کند و انتقال بار و اندازه‌گیری تغییر مکان به خوبی انجام شود. تغییر ارتفاع سطح آب زیرزمینی و احتمال از بین رفتن مقاومت ریزشمع در اثر حفاری و کاهش اصطکاک خاک از جمله ایرادهای این آزمایش محسوب می‌شود. آزمایش بارگذاری به دو صورت استاتیکی و دینامیکی انجام می‌گردد. با توجه به اینکه آزمایش بارگذاری معمولاً بر روی ریزشمع‌هایی با ابعاد و شرایط واقعی انجام می‌شود، نتایج آن بسیار با اهمیت است. به همین جهت تعدادی ریزشمع در گستره ساختگاه اجرا و بارگذاری می‌شود که تعیین شمار آنها به عهده مشاور ژئوتکنیک است [2].



شکل (۲-۱۰): آزمایش بارگذاری جانبی ریزشمع

۲-۸- عوامل موثر در انتخاب ریزشمع

عوامل مختلفی در انتخاب ریزشمع برای تقویت عملکرد پی، پایداری شیب و بهسازی خاک موثرند. این عوامل به چهار دسته شرایط فیزیکی، شرایط زیرزمینی، شرایط محیطی و شرایط اقتصادی تقسیم بندی می‌شود.

۲-۸-۱- شرایط فیزیکی

تجهیزات حفاری و تزریق مورد استفاده برای نصب ریزشمع، نسبتاً کوچک هستند و می‌توانند در نواحی محدود که امکان عبور تجهیزات نصب شمع وجود ندارد، وارد شوند. ریزشمع‌ها می‌توانند در داخل دیوارها و پی‌های با ابعاد چند میلیمتر نصب شوند. نصب آنها تحت تأثیر نیروی فوقانی آنها یا سایر موانع که در نصب شمع‌ها وجود دارد، نمی‌باشد. تجهیزات نصب می‌تواند در نواحی با شیب تند و نیز نواحی دورافتاده حرکت کند. همچنین عملیات حفاری و تزریق مرتبط با نصب ریزشمع‌ها اگر به شیوه صحیح اجرا گردد، باعث آسیب به ساختمانهای مجاور نمی‌شود.

۲-۸-۲- شرایط زیرسطحی

ریزشمع‌ها می‌توانند در نواحی با شرایط زمین شناسی سخت، متغیر و غیر قابل پیش بینی مثل زمین های دارای قلوه سنگ، تخته سنگ و تاسیسات زیرزمینی، یا وجود واریزه‌های گوناگون و لنزهای

نامرتبی از مواد و اجزای ضعیف نصب شوند. رس‌های نرم، ماسه‌های روان و سطح آب زیر زمینی بالا که در روش نصب سنتی شرایط نامساعد تلقی می‌شود، کمترین تاثیر را بر روی نصب ریزشمع دارند.

۲-۸-۳- شرایط محیطی

ریزشمع‌ها می‌توانند در خاک‌های پر خطر و آلوده نصب شوند. قطر کوچک آنها باعث کاهش میزان تلفات مصالح در هنگام اجرا نسبت به شمع‌های سنتی می‌شود. مخلوط دوغاب می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که در برابر فعالیت شیمیایی آب و خاک مقاوم باشد. در طرح اختلاط دوغاب، می‌توان از افزودنی‌هایی استفاده نمود تا از فرسایش بتن در محیط‌های اسیدی و خورنده جلوگیری شود.

ریزشمع‌ها می‌توانند در نواحی حساس مثل نواحی با طبیعت شکننده اجرا شوند. تجهیزات اجرای آنها به بزرگی و یا به سنگینی تجهیزات حفاری و نصب شمع‌های معمولی نیست و می‌تواند در نواحی باتلاقی (لجن زار) یا نواحی دیگر با خاک سطحی نرم و مرطوب، با کمترین تاثیر بر روی محیط استفاده شود. تجهیزات حفاری قابل حمل، در نواحی با دسترسی محدود به طور متداول استفاده می‌گردد.

نصب ریزشمع، صدا و لرزش کمتری نسبت به تکنیک‌های رایج نصب شمع‌های سنتی مانند شمع‌کوبی ایجاد می‌نماید. لرزش‌های ایجاد شده در حین حفاری، ابتدا به خاک و سپس از خاک به ساختمان‌های مجاور منتقل می‌شود. استفاده از ریزشمع در نواحی شهری قدیمی و صنعتی، می‌تواند مانع از ایجاد این اثر مخرب بر تجهیزات و سازه‌های حساس مجاور شود.

ریزشمع‌ها می‌توانند در مناطقی که یک لایه آبدار آلوده بر روی یک لایه باربر قرار دارد، اجرا شوند. بر خلاف شمع‌های کوبیدنی که ممکن است یک مجرای عمودی برای انتقال آلودگی ایجاد کنند، ریزشمع‌ها می‌توانند به گونه‌ای نصب شوند که مانع از آلودگی لایه های آبدار زیرین شوند.

ریزشمع‌ها می‌توانند به کلاهک شمع‌های موجود اضافه شوند. بنابراین نیاز به افزایش ابعاد پی از بین می‌رود. این عمل باعث تامین مقاومت فشاری، کششی و خمشی مورد نیاز اضافی، هنگام افزایش بار سازه می‌شود. گاهی محدودیت‌های سازه‌های مجاور، امکان افزایش ابعاد کلاهک شمع موجود را به ما نمی‌دهند. بنابراین نیاز به سیستم‌های معمول اجرای شمع از بین می‌رود.

۲-۸-۴- شرایط اقتصادی

صرفه اقتصادی ریزشمع‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد. بسیار مهم است که هزینه اجرای ریزشمع‌ها را با توجه به شرایط فیزیکی، محیطی و زیرسطحی که در بالا توضیح داده شد، ارزیابی کنیم. به عنوان مثال برای یک سایت با خاک نرم، تمیز و یکنواخت و دسترسی آسان، ریزشمع

نمی‌تواند راه حلی قابل رقابت با سایر راه‌کارها باشد. به هر حال، برای پی‌سازی در زیر پایه‌های پل در نواحی مسکونی یا صنعتی قدیمی با ترافیک سنگین، ریزشمع‌ها می‌توانند به عنوان راه حلی با صرفه اقتصادی مطرح گردند.

تحلیل اقتصادی بایستی با در نظر گرفتن کلیه هزینه‌های مربوط به پروژه و نه فقط هزینه‌های مربوط به اجرای شمع، انجام شود. این هزینه‌ها ممکن است شامل موارد زیر باشند:

- نیازمندی‌های مربوط به حفاری، شمع کوبی و خاکریزی

- اجرای پی

- حمل مصالح پر خطر

- پایین آوردن سطح آب زیر زمینی

- کنترل فرسایش

- محدودیت‌های دسترسی

- بهسازی زمین و

۹-۲- مزیت‌ها و محدودیت‌های استفاده از ریزشمع

ریزشمع در مقایسه با سایر روش‌های تقویت پی و بهسازی خاک دارای مزیت‌های زیادی است و البته مانند هر روش مهندسی محدودیت‌هایی دارد که در ذیل به صورت فهرست وار به آنها اشاره می‌شود.

۹-۲-۱- مزیت‌های فنی

ریزشمع از یک سو با دارا بودن عناصر تقویت شامل غلاف ضخیم فولادی و آرماتور تقویت، قابلیت انتقال بار به لایه‌های مقاوم زیرین و نیز کنترل نشست به دلیل سختی بالای فولاد و تقویت عمق خاک را دارد. از سوی دیگر به دلیل تزریق دوغاب سیمان، مشخصات مکانیکی خاک نظیر سختی، تراکم‌پذیری، ظرفیت باربری، زاویه اصطکاک و چسبندگی را بهبود می‌بخشد. لذا ریزشمع در مقایسه با سایر روش‌ها مانند حفاری و تزریق، تثبیت خاک با سیمان یا آهک، تراکم دینامیکی و استفاده از ژئوسنتتیک‌ها که صرفاً خصوصیات مکانیکی خاک را تغییر می‌دهند و یا استفاده از شمع که صرفاً به عنوان عنصر باربر عمل می‌کند، به دلیل عملکرد مرکب (استفاده از عناصر باربر و بهسازی خاک) دارای برتری نسبی می‌باشد. لازم به ذکر است، به علت تزریق دوغاب سیمان و افزایش چشمگیر چسبندگی بین جدار ریزشمع و توده خاک، استفاده از ریزشمع با قطر کم و با عمق نفوذ کمتر نسبت به شمع‌های بتنی یا فولادی قطور و عمیق، قابلیت تامین باربری لازم و کنترل نشست پی را خواهد

داشت. همچنین بایستی توجه نمود که عملیات کوبش ریزشمع‌ها باعث انتقال انرژی جنبشی و ارتعاشی به توده خاک گردیده و منجر به تحکیم و تراکم توده خاکی اطراف ریزشمع خواهد شد. این امر به خصوص در خاک‌های دانه‌ای مشهودتر است. همچنین در شرایطی که به علت وجود لایه‌های متراکم زیرسطحی، کوبش شمع‌های قطور مشکل یا غیر ممکن است، ریزشمع می‌تواند بهترین راه حل باشد.

با توجه به باربری کمتر ریزشمع‌ها نسبت به شمع‌های قطور و عمیق، انجام تست بارگذاری با استفاده از جک‌های سبک، با تامین نیروی عکس العمل تکیه‌گاهی کافی، با دقت بالا و به سادگی امکان‌پذیر خواهد بود. با استفاده از نتایج تست بارگذاری ریزشمع، امکان بررسی رفتار، میزان باربری، نشست‌های الاستیک و تغییر شکل‌های پسماند در حین بارگذاری وجود خواهد داشت. بدین ترتیب امکان ارزیابی صحت فرضیات طراحی فراهم گردیده و امکان تعدیل و تغییر طرح، تعداد و چیدمان ریزشمع‌ها با توجه به مشاهده رفتار واقعی و میزان باربری نهایی آنها در محل وجود خواهد داشت. علاوه بر آن مطابق دستورالعمل FHWA، تست بارگذاری بایستی تنها بر روی ۵ درصد از ریزشمع‌های اجرا شده انجام گیرد [1].

۲-۹-۲- مزیت‌های اجرایی

ماشین‌آلات اجرای ریزشمع در مقایسه با ماشین‌آلات اجرایی سایر روش‌ها دارای ابعاد و حجم کمتری می‌باشد، لذا علاوه بر آنکه دارای قابلیت حمل و جابجایی آسان در کارگاه است، امکان اجرای عملیات در چند جبهه مختلف را بدون تداخل کاری فراهم می‌نماید.

با توجه به ابعاد کوچک بدنه ریزشمع، قطر ناچیز حفاری و همچنین کوبش ریزشمع با انرژی کم، میزان لرزش و سایر اثرات جانبی بر روی سازه‌های مجاور در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر اجرای شمع، به حداقل ممکن کاهش می‌یابد.

یکی از برترین ویژگی‌های ریزشمع قابلیت اجرای بسیار ساده در شرایط وجود آب زیرزمینی است. در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالا بوده و حفاری‌های با قطر بزرگ جهت اجرای شمع‌های بتنی نیازمند پایدارسازی دیواره چاهک‌ها و تخلیه آب زیرزمینی می‌باشد، اجرای ریزشمع در سطح زمین و تزریق دوغاب سیمان از داخل آن، با سرعت فراوان انجام پذیرفته و به علت چگالی و ویسکوزیته بیشتر دوغاب سیمان، آب حفره‌ای در اثر فشار دوغاب سیمان تخلیه و با دوغاب سیمان جایگزین می‌گردد.

۲-۹-۳- مزیت های اقتصادی

با توجه به این که اجرای ریزشمع مبتنی بر استفاده از حجم کم مصالح مشتمل بر فولاد و سیمان، هزینه‌های پایین تجهیز کارگاه و نیز حجم بالای کار نیروی انسانی در زمان کوتاه می‌باشد، روش ریزشمع در مقایسه با سایر روش‌های بهسازی نظیر اجرای شمع بتنی و فولادی، تثبیت با سیمان، اجرای ستون های شنی، تراکم دینامیکی و ... که مبتنی بر استفاده از حجم زیاد مصالح و یا به کارگیری ماشین‌آلات سنگین و گران قیمت می‌باشند، اقتصادی تر است.

همچنین انجام تست بارگذاری ریزشمع با روش‌های ساده و ارزان یکی از مزایای بسیار بزرگ این روش در مقایسه با روش های دیگر نظیر اجرای شمع‌های بتنی یا فولادی با قطر بالا است.

۲-۹-۴- محدودیت‌ها

در برخی شرایط، ریزشمع‌های عمودی ممکن است از لحاظ ظرفیت باربری جانبی و کاهش هزینه‌ها دارای محدودیت باشند. همچنین فرض می شود به خاطر قطر نسبی کوچک آنها، ظرفیت باربری محوری محدودی داشته باشند. اگر در آزمایش، ریزشمع‌ها تا بار محوری 450 KN در ماسه متراکم را تحمل کرده‌اند. بنابراین انتظار می رود با تحقیقات و آزمایشات بیشتر بتوان ظرفیت باربری جانبی را نیز افزایش داد. امکان نصب ریزشمع به صورت مایل، به طراحان برای رسیدن به ظرفیت باربری جانبی مورد نیاز کمک می‌کند. به خاطر بالابودن ضریب لاغری (نسبت طول به قطر)، ریزشمع‌ها برای کاربردهای لرزه ای مرسوم در مناطقی که احتمال روانگرایی وجود دارد، مناسب نیستند [1].

هزینه اجرای ریزشمع‌ها ممکن است از سیستم‌های نصب شمع سنتی و به خصوص شمع‌های کوبیدنی بیشتر باشد. اما در برخی شرایط خاص، ریزشمع‌ها به عنوان گزینه دارای صرفه اقتصادی و در عین حال تنها راه حل ممکن برای ساخت و اجرای پروژه می‌باشند.

استفاده از ریزشمع در پایدارسازی شیب‌ها در ارتفاع‌های محدود و بر اساس تجربیات گذشته صورت گرفته است. به خاطر تعداد محدود پروژه‌های اجرا شده، پیشنهاد می‌شود که در کاربردهای پایدارسازی شیب‌ها، ابزارگذاری و پایش انجام شود.

فصل سوم

زلزله های دور و نزدیک

۳-۱- مقدمه

به علت کمبود اطلاعات تا اواخر قرن بیستم، مطالعات اندکی بر روی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های دور و تأثیر آنها بر روی سازه‌ها انجام شده است. در دو دهه اخیر از چندین زلزله مشهور مانند زلزله نورثریج^۱ آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه^۲ ژاپن (۱۹۹۵)، کجالی^۳ ترکیه (۱۹۹۹) و چی چی^۴ تایوان (۱۹۹۹)، اطلاعات بسیار ارزشمندی درمورد شناخت خصوصیات و تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌ها به دست آمد که راه را برای مطالعه بیشتر درمورد ویژگی‌های این زلزله‌ها و اثرات آنها باز کرد. رکوردهای ثبت شده از زمین لرزه‌های اخیر نشان می‌دهد که زلزله‌های نزدیک به گسل دارای ویژگی‌های متفاوتی نسبت به زلزله‌های دور از گسل می‌باشند. از این رو برای تحلیل‌های دقیق‌تر سازه‌ای یا ژئوتکنیکی، بایستی دور یا نزدیک بودن از گسل به منظور اعمال رکوردهای مناسب مشخص باشد. چنانچه موقعیت طرح یا موضوع پژوهش تحت تأثیر زلزله‌های دور از گسل است، بایستی از شتاب نگاشت‌های دور از گسل استفاده گردد چرا که استفاده از حتی یک شتاب نگاشت نزدیک به گسل می‌تواند پاسخ‌ها را دچار تغییرات بسیار زیادی کند.

در این فصل خصوصیات مختلف زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در مقایسه با زلزله‌های دور بررسی می‌شود و در فصل آتی مروری بر اثرات این نوع زلزله‌ها بر ساختگاه‌ها و سازه‌های ژئوتکنیکی بر اساس پژوهش‌های اخیر خواهیم داشت.

۳-۲- مفهوم زلزله‌های دور و نزدیک

از حدود نیم قرن پیش زمین لرزه‌ها بر حسب فاصله محل ثبت رکورد تا محل گسل (محل اصلی لغزش) به دو دسته زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور تقسیم‌بندی شده‌اند. هر چند به طور قطعی و دقیق نمی‌توان فاصله مشخصی برای زلزله‌های نزدیک گسل تعریف نمود، اما به طور معمول فرض می‌گردد جنبش‌های ثبت شده در فاصله‌ای کمتر از ۱۵ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، نگاشت‌های نزدیک گسل می‌باشند. با افزایش فاصله ذکرشده همچنان که تأثیر سایر پارامترها نظیر بزرگی زلزله و شرایط ساختگاه بر روی خصوصیات جنبش‌های ثبت شده افزایش می‌یابد، تأثیر خصوصیات ذاتی زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی جنبش‌های ثبت شده کاهش می‌یابد. بنابراین تعیین یک فاصله کانونی دقیق برای مشخص نمودن مرز زلزله‌های حوزه نزدیک و دور امری مشکل و غیرمنطقی است [3] [4]

^۱Northridge^۲Kobe^۳Kocaeli^۴Chi Chi

۳-۳- خصوصیات و اثرات زلزله‌های نزدیک

حرکات زمین در محدوده نزدیک گسل به شدت تحت تاثیر مکانیزم چشمه لرزه‌ای (شیب لغز/ امتدادلغز)، جهت گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و جابجایی ماندگار ناشی از حرکات تکنونیک زمین می‌باشد. این موارد باعث به وجود آمدن خصوصیات منحصر به فردی در زلزله‌های نزدیک گسل می‌شود [4].

این خصوصیات عبارتند از اثر جهت پذیری پیش رونده^۱، اثر تغییر مکان ماندگار^۲، محتوای فرکانسی بالا^۳ و اثر مولفه قائم که در ادامه به تشریح هریک از این خصوصیات پرداخته و اثرات آنها را بررسی می‌کنیم.

۳-۳-۱- اثر جهت پذیری پیش رونده

بیشتر ویژگی‌های متفاوت زلزله‌های حوزه نزدیک در اثر پدیده مهم جهت پذیری پیش‌رونده به وجود می‌آید. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که جهت پذیری پیش‌رونده مهمترین عامل خرابی در سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل است. هنگامی که گسیختگی گسل از کانون به سمت ساختگاه گسترش یافته و جهت لغزش گسل نیز به سمت آن باشد پدیده جهت‌پذیری پیش رونده اتفاق می‌افتد. در این صورت به دلیل نزدیک بودن سرعت گسیختگی گسل به سرعت امواج برشی زلزله (حدود $0.8 V$) [5] امواج آزاد شده در اثر لغزش‌های متوالی نواحی مختلف گسل در نزدیکی جبهه گسلش (قسمت جلوی مسیر گسیختگی در گسل) به صورت سیلی از امواج در حال حرکت، جمع می‌شوند. این امواج دفعاتاً و به صورت یک شوک قوی به ساختگاه می‌رسد. این شوک به شکل یک پالس قوی با دامنه بلند و مدت زمان کوتاه در جهت عمود بر لغزش و در ابتدای نداشت زلزله قابل تشخیص است. به این نوع گسیختگی، شکست با جهت پذیری پیش رونده می‌گویند.

این خصوصیات در پشت جبهه گسیختگی دیده نمی‌شود. پدیده جهت پذیری هم در گسل‌های امتدادلغز و هم در گسل‌های شیب‌لغز اتفاق می‌افتد. در مکانیزم گسلش امتدادلغز به علت پراکنش شعاعی تغییر مکان برشی روی آن، پالس حرکت عمود بر جهت لغزش می‌باشد و در گسلش شیب لغز نیز شرایط جهت‌پذیری پیش‌رونده برای ایستگاه‌هایی که در قسمت فوقانی صفحه گسلش قرار دارند، مهیا می‌گردد [5]. به طور مثال، شکل (۱) موقعیت دو ایستگاه در زلزله لندرز^۴ را نشان می‌دهد که

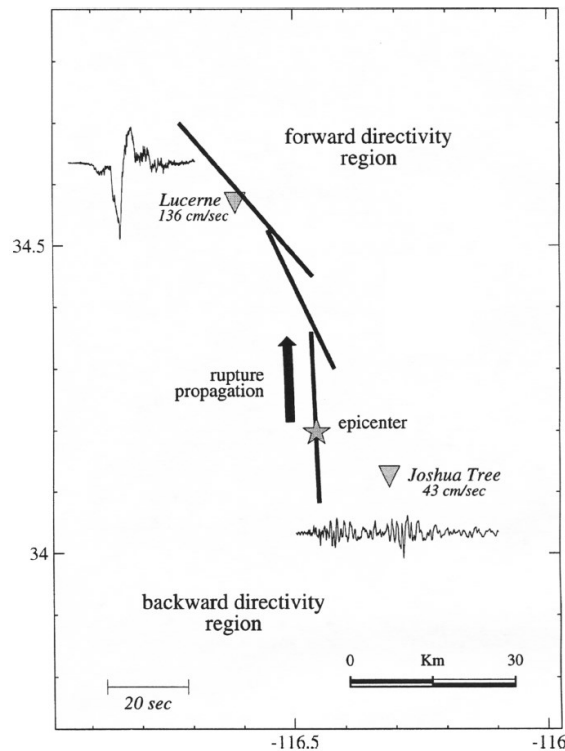
^۱Forward Directivity Effect

^۲Fling-Step Effect

^۳High Frequency Content

^۴Landers

ایستگاه لیوسرن^۱ در جلوی جبهه گسیختگی و ایستگاه جشواتری^۲ در پشت جبهه گسیختگی قرار دارند. اثر جهت گیری پیش رونده در نگاشت ثبت شده ایستگاه لیوسرن مشاهده می گردد.



شکل (۳-۱): موقعیت کانون زلزله، ایستگاه‌های ثبت رکورد و نگاشت‌های ثبت شده منطقه لیوسرن در ۱۹۶۲ [6]

لازم به ذکر است حتی زمانی که شرایط هندسی برای رخداد جهت گیری پیش رونده فراهم باشد، ممکن است آثار ناشی از آن دیده نشود. زیرا ممکن است سایت در انتهای گسل باشد و شکست هم به سمت آن نقطه پیش برود ولی لغزش اصلی در همان محل سایت رخ دهد. برعکس در شرایطی که پارامترهای هندسی فراهم نباشد هم ممکن است اثرات جهت گیری پیش رونده رخ دهد بطور مثال برای گسل امتدادلغز که زیرمرکز آن در عمق قرار دارد و روند شکست به سمت سطح پیش می رود اگر سایت در نزدیکی رومرکز باشد پدیده جهت گیری پیش رونده رخ خواهد داد. [6]

به طور کلی مطابق پژوهش‌های صورت گرفته شرایطی که منجر به اثر جهت‌پذیری پیش رونده می‌شود، می‌تواند در دو نکته زیر خلاصه شود:

^۱Lucerne

^۲Joshua Tree

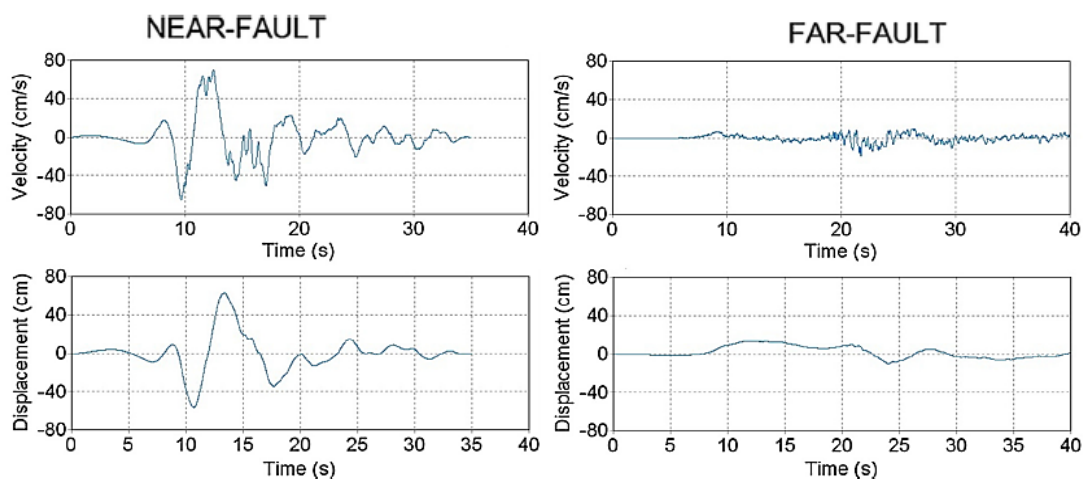
۱- گسیختگی گسل به سمت ساختگاه باشد یا زاویه بین راستای انتشار گسیختگی و جهت لغزش گسل در ساختگاه کوچک باشد.

۲- سرعت گسیختگی گسل نزدیک به سرعت موج برشی ساختگاه باشد.
مهمترین ویژگی‌های ناشی از اثر جهت گیری پیش رونده که در مطالعات انجام شده به عنوان پارامترهای مؤثر در پاسخ و رفتار سازه‌ها شناخته شده است، به شرح ذیل می‌باشد:

۱- تجمع انرژی در یک بازه زمانی کوتاه که باعث حرکتی ضربه مانند^۱ می‌شود و نمود آن به شکل یک پالس با دامنه بلند و مدت دوام کوتاه در تاریخچه زمانی نگاشت زلزله خواهد بود. به دلیل نزدیکی سایت تا گسل، رکورد حاصل از سرعت و جابجایی زمین به دلیل این که نسبت به شتاب دارای پیروید بالاتری هستند دارای شکل پالس مانند با پیروید بالا است. (شکل ۳-۲)

۲- پدیده جهت پذیری باعث می‌شود در زلزله‌های حوزه نزدیک، نسبت (PGV/PGA) بزرگتر و نسبت (PGD/PGV) کوچکتر از زلزله‌های حوزه دور باشد. (شکل ۳-۳)

۳- اثر جهت پذیری در جهت عمود بر گسل به دلیل پراکنش شعاعی جابجایی برشی گسل، مشخص‌تر بوده و مقادیر بیشینه سرعت در مؤلفه‌های عمود بر گسل به طور قابل توجهی بزرگتر از مؤلفه‌های موازی گسل می‌باشد.



شکل (۳-۲): تفاوت نگاشت‌های دور و نزدیک گسل زلزله کجایی (۱۹۹۹)

^۱ Pulse-Like

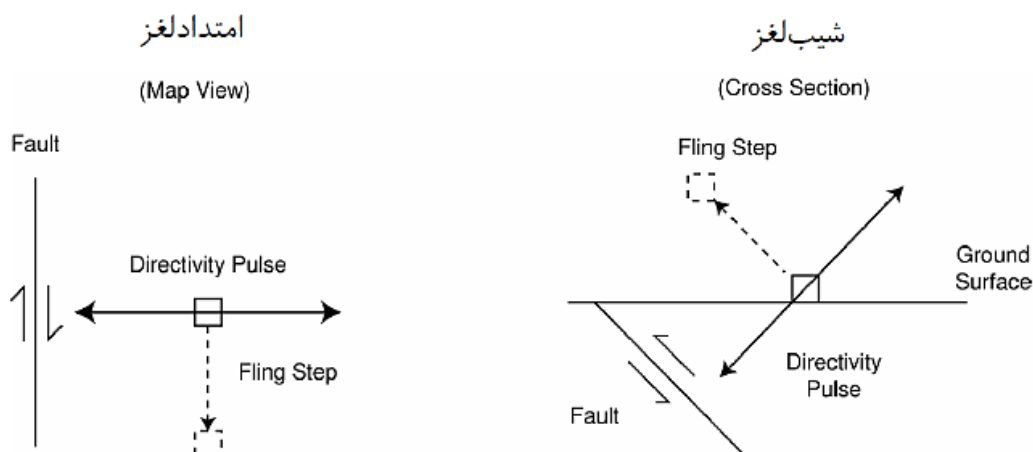
جدول (۳-۱): نسبت PGV/PGA در ایستگاه‌های دور و نزدیک چند زلزله مهم

Fault for strong ground motion	Earthquake name	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGV/PGA (s)
Near-Fault	1979 Imperial Valley (USA)	0.30 g	42.8	0.15
Far-Fault	1979 Imperial Valley (USA)	0.30 g	22.5	0.08
Near-Fault	1992 Erzincan (Turkey)	0.25 g	69.6	0.28
Far-Fault	1992 Erzincan (Turkey)	0.25 g	20.8	0.08
Near-Fault	1999 Chi-Chi (Taiwan)	0.29 g	36.9	0.13
Far-Fault	1999 Chi-Chi (Taiwan)	0.29 g	21.4	0.08
Near-Fault	1999 Kocaeli (Turkey)	0.23 g	69.7	0.31
Far-Fault	1999 Kocaeli (Turkey)	0.23 g	18.3	0.08
Near-Fault	2010 Darfield (New Zealand)	0.27 g	63.6	0.24
Far-Fault	2010 Darfield (New Zealand)	0.27 g	20.8	0.08

۳-۳-۲- اثر تغییر مکان ماندگار

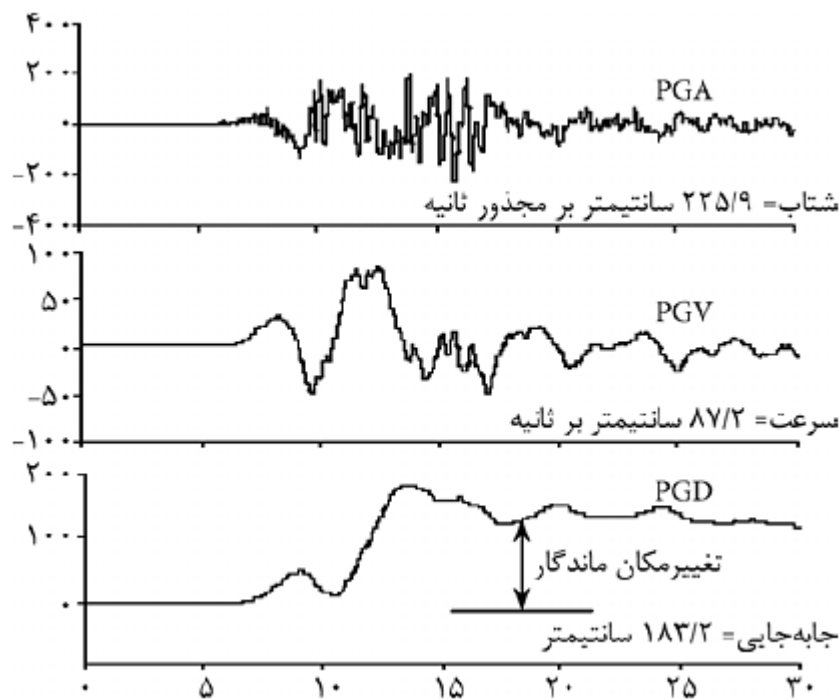
خصوصیت دیگر نگاشت های حوزه نزدیک ثبت شده در زلزله‌های جدید مانند زلزله های سال ۱۹۹۹ ترکیه و تایوان ، تغییر مکان ماندگار حاصل از گسلش زمین در مناطق نزدیک گسل می‌باشد که در بازه زمانی چند ثانیه‌ای لغزش و در جهت لغزش گسل اتفاق افتاده و مستقل از تغییر مکان دینامیکی ناشی از پالس جهت‌پذیری گسیختگی زمین می‌باشد. جهت‌پذیری پیش رونده یک پدیده دینامیکی است که در اکثر موارد جابجایی ایجاد نمی‌کند، بنابراین رکورد سرعت آن حاوی پالس های دوجته می‌باشد. در حالی که تغییر مکان ماندگار دارای رکورد سرعت با پالس یک طرفه بوده که حاصل آن جابجایی دائم زمین است [7].

پدیده تغییر مکان ماندگار، مؤلفه‌هایی را که در جهت لغزش گسل هستند، تحت تأثیر قرار خواهد داد یعنی موازی لغزش گسل در زلزله های امتداد لغز و در جهت شیب در زلزله های شیب لغز. (شکل ۳-۲)



شکل (۳-۲): نمایش شماتیک اثرات جهت‌پذیری و جابجایی ماندگار در گسلش امتداد لغز و شیب لغز [5]

برای زلزله‌های شیب لغز، اثر تغییرمکان ماندگار و اثر جهت پذیری در یک جهت رخ می‌دهد و تغییرمکان ماندگار زمین تقریباً همزمان با تغییرمکان دینامیکی حداکثر رخ می‌دهد، که نیاز است به عنوان بارهای منطبق بر هم در نظر گرفته شوند در حالی که در زلزله‌های امتدادلغز حرکات ماندگار و دینامیکی زمین با هم جمع نمی‌شوند زیرا در راستاهای متفاوتی رخ می‌دهند. این تلاقی بارها در یک زمان، پتانسیل آسیب بسیار گسترده‌ای را فراهم می‌کند. به طور نمونه، تغییرمکان ماندگاری در حدود ۲ متر در ایستگاه یاریکما طی زلزله کجایی به وجود آمد. شکل (۳-۳)



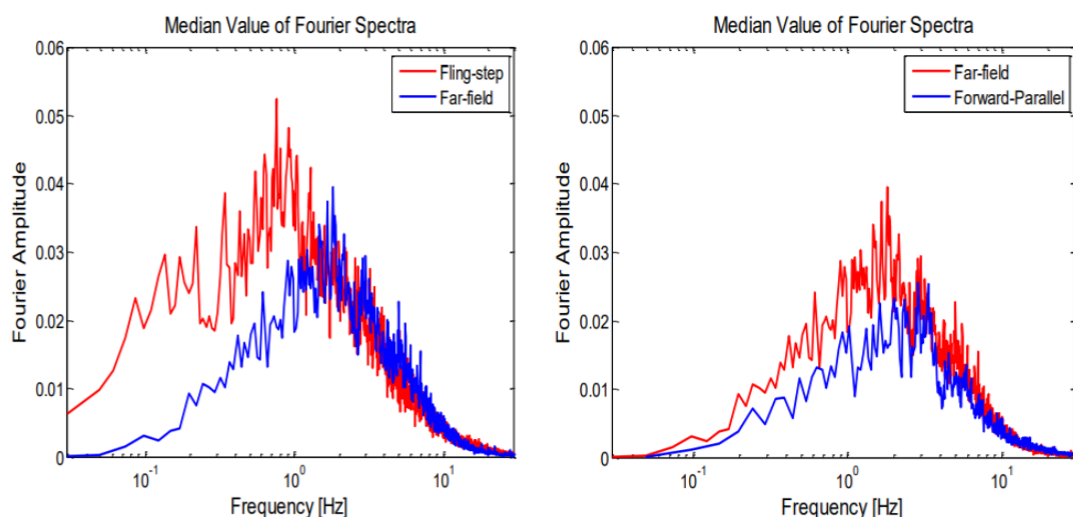
شکل (۳-۴): نگاشت‌های ایستگاه یاریکما در زلزله کجایی (۱۹۹۹)

۳-۳-۳- محتوای فرکانسی بالا

به عنوان یک تعریف ساده، به توزیع مقادیر دامنه یک سیگنال زمانی در فرکانس‌های متفاوت، محتوای فرکانسی گفته می‌شود. محتوای فرکانسی تاثیر بسیار زیادی بر پاسخ سازه‌ها دارد. برای مثال می‌توان به اهمیت حضور یک مولفه تجزیه شده از رکورد با محتوای فرکانسی نزدیک به فرکانس سازه اشاره کرد که این مولفه از اهمیت بسیار بالایی در پاسخ سازه برخوردار است و سهم عمده پاسخ، متعلق به این مولفه می‌باشد. در سیستم‌های خاک-سازه، در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، سبب شکل پذیری بیشتر سازه و کاهش فرکانس طبیعی آن می‌گردد در مقایسه با شرایطی که بر روی خاک صلب قرار دارد. علاوه بر این پاسخ دینامیکی سازه به فرکانس بارگذاری بسیار حساس است [8].

در زمان ایجاد شکست در گسل، موج‌های مختلفی با دامنه و فرکانس متفاوت از کانون زلزله منتشر می‌شود. این امواج در تمام جهات از منبع دور شده و با فاصله گرفتن از آن تعدادی از آنها میرا می‌گردند. این میرایی سبب می‌شود رکوردهای ثبت شده در فواصل دور از گسل در تمام فرکانس‌ها از لحاظ دامنه کاهش محسوسی داشته باشد ولی این کاهش در فرکانس‌های بالا بیشتر مشاهده می‌گردد. در یک دامنه فرکانسی همان طور که در شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود، بیشینه دامنه زمین لرزه نزدیک گسل که دارای اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده در راستای موازی گسل^۱ و تغییرمکان ماندگار است، در فرکانس‌های بالاتری نسبت به حرکت دور از گسل رخ می‌دهد [9].

این موضوع را می‌توان به این صورت بیان کرد که در زمین لرزه‌های حوزه نزدیک به جهت فاصله کوتاه بین محل شکست و محل دریافت آن فرصتی جهت میرا شدن فرکانس‌های بالا نبوده و به همین دلیل تاریخچه زمانی شتاب آن‌ها محتوای فرکانسی بالاتری دارد.



شکل (۳-۵): مقایسه مقادیر میانگین طیف شتاب فوریه^۲ زلزله دور و زلزله‌های نزدیک دارای اثر جهت‌پذیری و اثر تغییرمکان ماندگار در دامنه فرکانسی

۳-۳-۴ - اثر مؤلفه قائم

به دلیل ماهیت متفاوت زلزله نزدیک گسل، مؤلفه قائم آن اثراتی بر خصوصیات لرزه‌ای دارد. مهمترین ویژگی‌هایی که در نتیجه اثر مؤلفه قائم در زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های حوزه دور مطرح شده است، به شرح زیر می‌باشد:

^۱ Forward Parallel

^۲ Fourier acceleration spectra

الف- نسبت بیشینه شتاب قائم به بیشینه شتاب افقی (PVA/PHA) در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور بیشتر است. در تعدادی حالات، این نسبت بیشتر از مقدار $\frac{2}{3}$ است که به طور معمول در آیین‌نامه‌ها در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که افزایش نسبت مذکور در خاک‌های نرم نسبت به سایر ساختگاه‌ها بیشتر می‌باشد [10].

ب- نسبت طیف پاسخ قائم به افقی (Sv/SH) به پریودسازه و فاصله سازه از صفحه گسلش بستگی دارد. برای پریودهای کوتاه نسبت طیف پاسخ قائم به افقی برای ساختگاه‌های نزدیک گسل از مقداری که معمولاً $\frac{2}{3}$ فرض می‌شود، تجاوز می‌کند درحالی که برای پریودهای بلند، نسبت $\frac{2}{3}$ بسیار محافظه کارانه است [11].

شکل (۳-۶) اطلاعات دو ایستگاه دور (بم) و نزدیک (محمدآباد) را در زلزله بم (۲۰۰۳) نمایش می‌دهد. نسبت بیشینه شتاب قائم به افقی برای نگاشت نزدیک گسل در این زلزله بالاتر از یک و برای نگاشت دور از گسل کمتر از یک است.



نام ایستگاه	فاصله	PVA	PHA	PVA/PHA
بم	6 km	988	799	1.23
محمدآباد	45 km	70	123	0.57

شکل (۳-۶): نقشه و اطلاعات شبکه ملی شتابنگاری-زلزله بم ۱۳۸۲

۳-۴- خلاصه مقایسه ویژگی‌های زلزله‌های دور و نزدیک

- مهمترین ویژگی‌های متمایزکننده زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور عبارتند از:
- (۱) تاریخچه زمانی نگاشت‌های حاصل از حوزه نزدیک عموماً دارای یک پالس شدید با دامنه بزرگ و مدت دوام کوتاه هستند؛ این در حالی است که چنین ویژگی در رکوردهای حوزه دور دیده نمی‌شود.
 - (۲) در زلزله‌های نزدیک به دلیل اثر جهت‌پذیری، نسبت سرعت بیشینه به شتاب بیشینه زمین (PGV/PGA)، بزرگتر و نسبت جابجایی بیشینه به سرعت بیشینه زمین (PGD/PGV)، کوچکتر از مقادیر این نسبت‌ها برای زلزله‌های دور است.
 - (۳) شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در حوزه نزدیک عموماً شامل مؤلفه‌های فرکانس بالا هستند، در حالی که شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در حوزه دور عموماً شامل مؤلفه‌های فرکانس پایین می‌باشند.
 - (۴) به دلیل اثر مولفه قائم، نسبت بیشینه شتاب قائم به بیشینه شتاب افقی (PVA/PHA) در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور بیشتر می‌باشد.
 - (۵) تغییرمکان ماندگار حاصل از گسلش زمین در مناطق نزدیک گسل از دیگر ویژگی‌های زلزله نزدیک به گسل می‌باشد که در بازه زمانی چند ثانیه‌ای لغزش و در جهت لغزش گسل اتفاق می‌افتد و در نگاشت تغییرمکان ناشی از زلزله قابل مشاهده است.

فصل چهارم

مروری بر پژوهش‌های انجام شده

۴-۱- مقدمه

در این فصل با توجه به موضوع مورد مطالعه این پایان نامه که بر دو مبحث کلی بررسی عملکرد سیستم ریزشمع و تاثیر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک استوار است؛ در بخش اول به مطالعات صورت گرفته در مورد ریزشمع‌ها می‌پردازیم و سپس مروری بر مطالعات انجام گرفته در زمینه تاثیر زلزله‌های دور و نزدیک خواهیم داشت. در این فصل سعی شده است پیشینه مطالعات به صورت خلاصه و با ذکر ویژگی‌های مدل‌سازی و نتایج مهم بیان شود با این رویکرد که پژوهش‌های جدیدتر با تفصیل بیشتر ارائه گردد. بدیهی است خواننده محترم می‌تواند برای مطالعه بیشتر به مرجع مقالات مراجعه نمایند.

۴-۲- مروری بر مطالعات صورت گرفته بر عملکرد لرزه‌ای ریزشمع

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، مقاومت خوبی در برابر زلزله درمقایسه با شمع‌های بتنی مسلح و با قطر بزرگ دارند [12].

۴-۲-۱- مطالعات کیشیشیتا و همکاران^۱ (۲۰۰۰)

در سال ۲۰۰۰ کیشیشیتا و همکاران، یک تحلیل اجزا محدود دوبعدی بر روی ریزشمع‌ها با در نظر گرفتن دو حالت گروه ریزشمع با ظرفیت باربری بالا و گروه ریزشمع تقویت کننده شمع انجام دادند. مدل‌ها تحت حرکت زلزله‌های کوبه (۱۹۹۵) و ال سنترو (۱۹۴۰) قرار گرفتند و نتیجه آن مقاومت و انعطاف پذیری بهتر ریزشمع‌ها نسبت به شمع‌های درجا و پیش ساخته در زمان زلزله بود [13].

۴-۲-۲- مطالعات ژوران و همکاران^۲ (۲۰۰۱)

ژوران و همکاران، آزمایش‌های سانتریفیوژ را به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای گروه ریزشمع انجام دادند. در این آزمایش‌ها از ریزشمع‌هایی با قطرهای ۶/۵ و ۹/۵ میلیمتر و با طول پنج برابر قطر ریزشمع در خاک ماسه‌ای با چگالی نسبی ۵۷٪ استفاده شد. بار سینوسی با شتاب $0.3g$ و فرکانس ۲Hz به کف مدل اعمال گردید و پارامترهایی نظیر نسبت لاغری و نسبت فاصله بین ریزشمع‌ها به قطر آنها مورد

^۱Kishishita et al^۲Juran et al.

بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد ممان خمشی و جابجایی در گروه شمع 2×1 با نسبت فاصله به قطر ۳ در مقایسه با گروه شمع 2×1 با نسبت فاصله به قطر ۵ کاهش یافته است [14].

۴-۲-۳- مطالعات سادک و شاهرور^۱ (۲۰۰۴) و (۲۰۰۶)

سادک و همکاران در سال ۲۰۰۴ با یک تحلیل اجزای محدود سه بعدی توسط نرم افزار PECPLAS اطلاعاتی را در مورد تاثیر ریزشمع‌ها در تقویت ظرفیت دینامیکی سازه موجود بر روی ساختگاه ارائه کردند. این مطالعه که بر روی شتاب روسازه انجام گرفت نشان داد که استفاده از ریزشمع مایل موجب کاهش شتاب جانبی سازه می گردد [15]. سادک و شاهرور همچنین در سال ۲۰۰۶ تاثیر اتصال کلاهک و سر ریزشمع را بر روی پاسخ لرزه‌ای ریزشمع با استفاده از نرم افزار PECPLAS مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که اتصال مفصلی بین ریزشمع و کلاهک، موجب کاهش ممان خمشی و نیروی محوری به خصوص در ریزشمع‌ها می‌شود [16].

۴-۲-۴- مطالعات جرولیموس و همکاران^۲ (۲۰۰۸)

جرولیموس و همکاران در سال ۲۰۰۸، رفتار لرزه‌ای ریزشمع‌ها را با اتصال مفصلی و گیردار در دوشاک همگن و غیرهمگن و با روسازه‌های بلند و کوتاه مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه که به کمک نرم افزار ABAQUS انجام گرفت؛ نشان داد اتصال مفصلی بین شمع و کلاهک، منجر به جابجایی و چرخش بیشتر کلاهک نسبت به حالت اتصال گیردار می‌شود و نیروی محوری در گروه شمع مایل و قائم در اتصال مفصلی و گیردار تقریباً یکسان است. همچنین در مورد روسازه بلند مانند سکوه‌های بلند پل، گروه ریزشمع مایل متقارن با اتصال مفصلی عملکرد بهتری دارد و در مورد روسازه‌های کوتاه، نوع اتصال کلاهک با شمع تاثیرچندانی روی پاسخ‌ها ندارد [17].

۴-۲-۵- مطالعات وانگ و همکاران^۳ (۲۰۰۹)

وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ تاثیر ریزشمع‌ها را در مسلح‌سازی خاک تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق که با استفاده از نرم افزار PLAXIS انجام شد، مشخص گردید که ریزشمع به کارگرفته شده در خاکریز می‌تواند به میزان زیادی نشست خاکریز و واکنش لرزه‌ای آن را کاهش دهد. همچنین در این مطالعه تاثیر بار هارمونیک و بار زلزله بر روی رفتار

^۱Sadek & Sharour

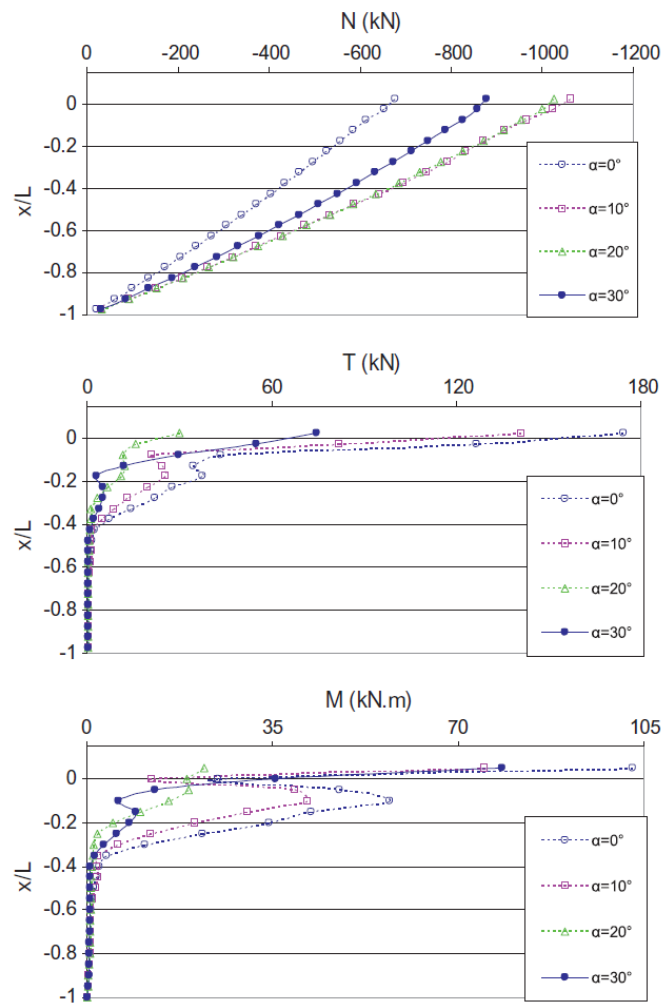
^۲Gerolymos et al

^۳Wang et al.

لرزه‌ای ریزشمع‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد، افزایش شتاب ورودی موجب افزایش تغییرمکان و شتاب ریزشمع‌ها می‌شود [18].

۴-۲-۶- مطالعات شاهرور و همکاران^۱ (۲۰۱۲)

در سال ۲۰۱۲ شاهرور و همکاران یک آنالیز الاستوپلاستیک سه بعدی بر روی رفتار لرزه‌ای ریزشمع‌های محصور شده انجام دادند. این مطالعه که به کمک نرم افزار FLAC 3D بر روی یک سیستم خاک- ریزشمع و سازه تحت اثر بار هارمونیک و سپس بار زلزله انجام شد. مایل بودن ریزشمع‌ها اثر کاملاً مثبتی بر عملکرد لرزه‌ای ریزشمع‌ها و اثرکاهشی قابل توجهی در مقدار نیروی برشی و خمشی آن‌ها دارد. همچنین زاویه ۲۰ درجه به عنوان مقدار بهینه برای شیب ریزشمع‌ها معرفی گردید [19].



شکل (۴-۱): تاثیر زاویه انحراف بر نیروهای موجود در ریزشمع‌ها تحت اثر زلزله کجایی (۱۹۹۹)

^۱Shahrour et al.

۴-۲-۷- مطالعات قربانی و همکاران (۲۰۱۴)

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. در این پژوهش که به کمک نرم افزار ABAQUS انجام گرفت، اثر پارامترهای مختلف مانند شتاب زلزله ورودی، مشخصات خاک بستر، اثر روسازه و سرشمع و اتصال آن‌ها، مشخصات ریزشمع‌ها (شامل تعداد، قطر، شیب، سختی و فاصله از یکدیگر) بر پاسخ لرزه‌ای ریزشمع مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای آن به تفکیک ارائه شد. در پایان نیز یک آنالیز حساسیت با در نظر گرفتن اثر پارامترهای ذکر شده بر خروجی نیروی برشی ماکزیمم و نیروی خمشی ماکزیمم انجام شد [20].

Parameter	Symbol	Unit	Range of variation
Inputs			
Thickness of cap	t	(m)	0.3-0.5
Peak acceleration of earthquake	a	g (m/s)	0.1-0.5
Soil's angle of friction	ϕ	(deg)	26-45
Inclination	α	(deg)	0-20
Mass of superstructure	m	(t)	40-120
Micropile diameter	d	(m)	0.25-0.45
Number of micropiles	N	(dimensionless)	3-5
Predominant frequency of superstructure	f	(Hz)	0.4-1.56
Slenderness ratio	SR	(dimensionless)	20-60
Spacing ratio	s	(dimensionless)	4-6
Relative stiffness	E	(dimensionless)	120-3666
Outputs			
Maximum shear stress	S	100 (kN/m ²)	13.04-207.2
Maximum bending stress	M	1000 (kN/m ²)	5.77-95.93

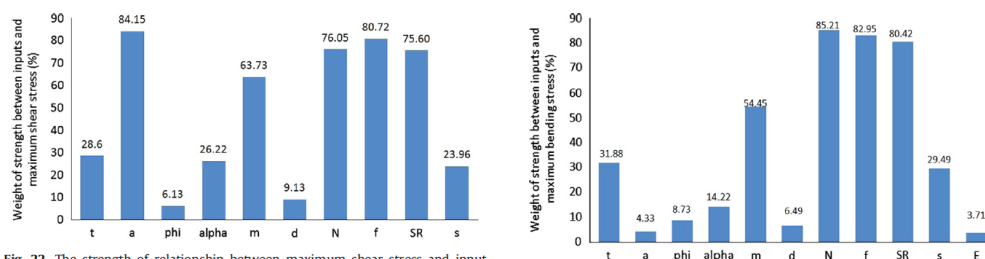


Fig. 22. The strength of relationship between maximum shear stress and input

شکل (۴-۲): تاثیر پارامترهای مختلف بر نیروهای موجود در ریزشمع طبق آنالیز حساسیت.

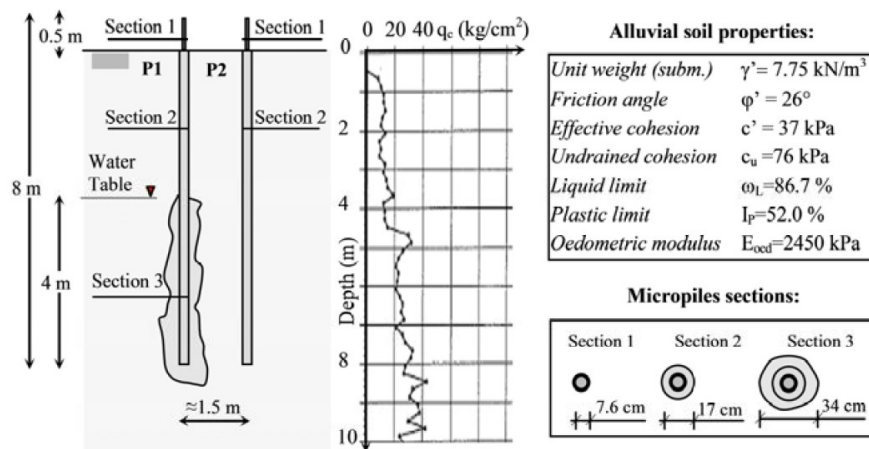
سمت راست: نیروی خمشی. سمت چپ: نیروی برشی

۴-۲-۸- مطالعات کاپاتی و همکاران^۱ (۲۰۱۶ و ۲۰۱۷)

کاپاتی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به وسیله آزمایش‌های صحرایی، ریزشمع‌ها را تحت بارگذاری دینامیکی جانبی قرار دادند. برای این منظور دو ریزشمع عمودی در خاک سیلتی آبرفتی یکی به روش تزریق شده و دیگری به روش ساده اجرا شدند و تحت آزمون‌های ارتعاش محیط و بار ضربه قرار گرفتند و در آخر داده‌های تجربی آزمون بار ضربه نیز با نتایج به دست آمده از یک مدل تحلیلی مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فشار زیاد تزریق به وضوح پاسخ دینامیکی ریزشمع‌ها را

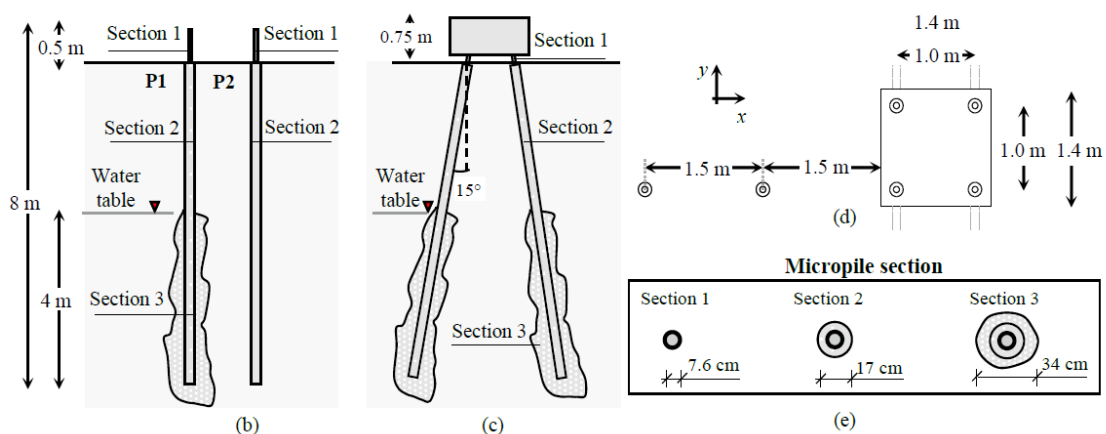
^۱Capatti et al.

در کرنش‌های کوچک دستخوش تغییر می‌کند و فرکانس‌های اساسی و جهت رفتار سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد [21].



شکل (۳-۴): ریزشمع‌های P1 و P2، پروفیل آزمون CPT و مشخصات مکانیکی لایه آبرفتی در آزمایش کاپاتی و همکاران (۲۰۱۶)

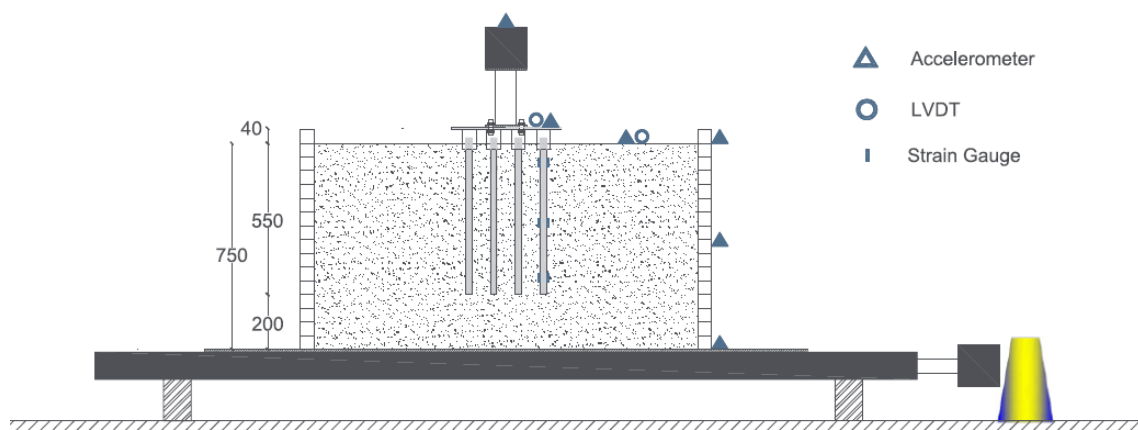
در سال ۲۰۱۷ دوباره کاپاتی و همکاران در یک آزمایش صحرایی فونداسیون تسلیح شده با ریزشمع را تحت بار جانبی مورد مطالعه قرار دادند. در این آزمون صحرایی، یک گروه چهارتایی ریزشمع مایل با زاویه ۱۵ درجه متصل به یک کلاهک بتنی تحت آزمایش‌های ارتعاش محیط، بار ضربه و ارتعاش آزاد قرار گرفت و مشاهده شد در راستایی که ریزشمع‌ها مایل شده‌اند، فرکانس اساسی گروه بالاتر است. همچنین میرایی بیشتری در راستای Y نسبت به راستای X مشاهده گردید (۱۳٪ و ۱۰٪) [22].



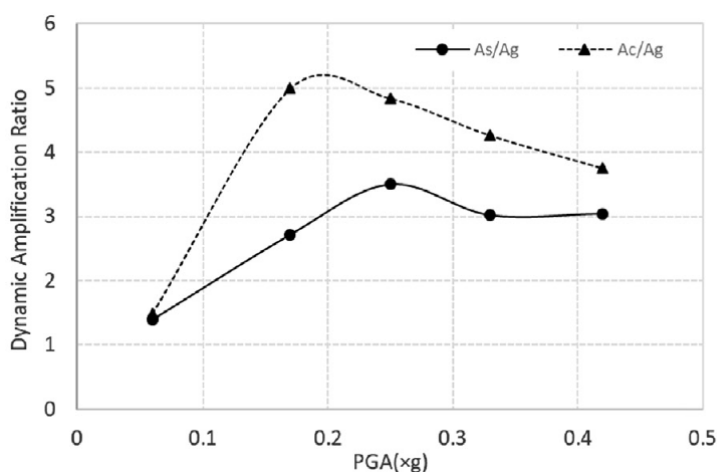
شکل (۴-۴): جزئیات آزمون صحرایی ریزشمع‌های مایل-کاپاتی و همکاران (۲۰۱۷)

۹-۲-۴- مطالعات جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸)

در سال ۲۰۱۸، جلیلیان و همکاران یک مطالعه آزمایشگاهی به وسیله میز لرزان بر روی رفتار دینامیکی ریزشمع‌ها در ماسه سست انجام دادند. برای این منظور یک مدل کوچک مقیاس از ۱۶ ریزشمع عمودی داخل ماسه سست با روسازه یک درجه آزادی ساخته شد و تحت بار هارمونیک قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد هر دو شتاب سطح خاک و کلاهک ریزشمع‌ها با توجه به شتاب تحریک ورودی تقویت می‌شوند. همچنین پس از یک افزایش اولیه در حرکات ورودی ضعیف، در ضریب بزرگنمایی شتاب سطح خاک کاهش مشاهده می‌شود. ضریب بزرگنمایی شتاب سر ریزشمع در دامنه $0.17g$ به اوج می‌رسد و پس از عبور از این دامنه، روند کاهشی به خود می‌گیرد [23].



شکل (۴-۵): نمای شماتیک از تجهیزات آزمایش میز لرزه- جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸)



شکل (۴-۶): تغییرات نسبت بزرگنمایی دینامیکی با افزایش دامنه موج دینامیکی ورودی در آزمایش میز لرزه- جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸)

۴-۳- مروری بر مطالعات صورت گرفته بر روی اثر زلزله های دور و نزدیک

همان طور که در فصل سوم بیان شد، به علت کمبود داده‌ها تا اواخر قرن بیستم، مطالعات اندکی بر روی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک و تأثیر آنها بر روی سازه‌ها انجام شده است. در دو دهه اخیر از چندین زلزله مشهور مانند زلزله نورثریج آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه ژاپن (۱۹۹۵)، کجایی ترکیه (۱۹۹۹) و چی چی تایوان (۱۹۹۹)، اطلاعات ارزشمندی درمورد شناخت خصوصیات و تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌ها به دست آمد که راه را برای مطالعه بیشتر درمورد این زلزله‌ها و اثرات آنها باز کرد. گرچه در سال‌های گذشته اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه‌های مختلف شامل ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها و ... مورد مطالعه قرار گرفته ولی در این بخش به جهت رعایت اختصار و ارتباط مطالب، به مرور این مطالعات با زمینه ژئوتکنیکی خواهیم پرداخت.

۴-۳-۱- مطالعات اردیک و دورکال^۱ (۲۰۰۱)

اساس این مطالعه ارائه یک روش ترکیبی برای ارزیابی طراحی لرزه‌ای در شرایط نزدیک به گسل می‌باشد. این روش متکی بر ترکیبی از فرکانس پایین قطعی (DC-1Hz) به دست آمده از زمین لرزه با مولفه‌های شبیه سازی شده تصادفی فرکانس بالا است و ارزیابی خطر لرزه ای یک بندر در خلیج ازمیت^۲ برای نشان دادن کاربرد این روش ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل روش ترکیبی با داده‌های واقعی نزدیک گسل از زلزله کجایی (۱۹۹۹)، مولفه‌های فرکانس پایین قابل اطمینانی را نشان داد [3].

۴-۳-۲- مطالعات امبریز و داگلاس^۳ (۲۰۰۳)

امبریز و داگلاس روابطی را برای شتاب حداکثر زمین، شتاب طیفی، چگالی انرژی، حداکثر مطلق انرژی ورودی و نسبت‌های آنها برای دو راستای افقی و قائم در زلزله های نزدیک ارائه کردند. این معادلات با استفاده از مجموعه داده‌های جهانی از ۱۸۶ جنبش قوی ضبط شده با فاصله ۱۵ کیلومتر از زلزله‌هایی با بزرگای ۵/۸ تا ۷/۸ ریشتر به دست آمده است. همچنین شرایط سایت محلی و مکانیسم کانونی در برخی از این معادلات گنجانده شده است.

^۱Erdik & Durukal

^۲İzmit

^۳Ambraseys & Douglas

براساس نتایج، نسبت حداکثر شتاب قائم زمین به حداکثر شتاب افقی زمین (q)، برابر دوسوم ($\frac{2}{3}$) ارائه گردید. حداکثر مقادیر شتاب قائم و افقی در این نسبت ولی در زمان‌های متفاوت رخ می‌دهد. همچنین نسبت حداکثر پاسخ طیفی قائم به حداکثر پاسخ طیفی افقی (q_s)، برای پریودهای کوتاه ($0.15s$) بیشتر از یک و برای پریودهای بلند حدود 0.5 است. حداکثر این نسبت در پریودهای یکسان ($T_v=Th$) ولی در زمان‌های متفاوت رخ می‌دهد [24].

۴-۳-۳- مطالعات بری و مارک^۱ (۲۰۰۴)

بری و مارک بر اساس داده‌های ۱۳ زلزله منتخب دارای جهت‌پذیری پیش‌رونده، پژوهشی را بر روی مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل انجام دادند و یک رابطه پارامتریک بر مبنای تعداد پالس‌های قابل توجه، دامنه پالس‌ها و پالس پریود تاریخچه سرعت-زمان ارائه کردند. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتست از [4]:

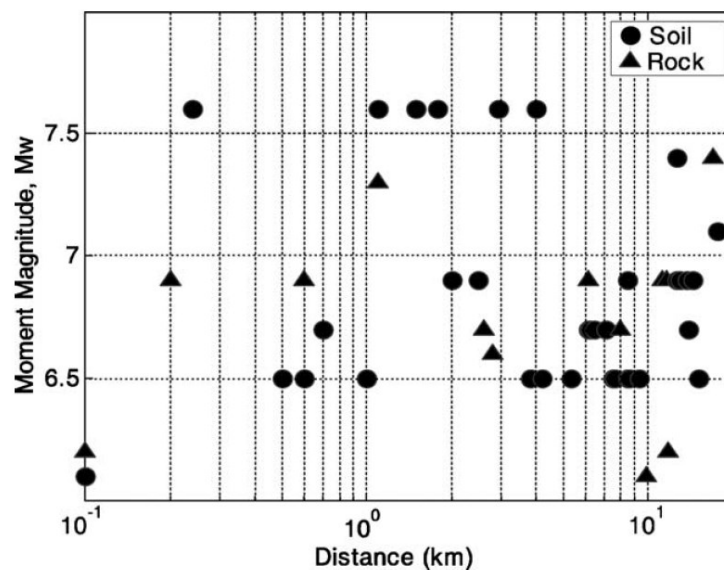
الف) مقدار PGV با تغییر فاصله و بزرگای زلزله، تغییرات چشمگیری دارد. مثلاً برای یک زلزله در فاصله ۵ کیلومتری از گسل با بزرگای ۶ ریشتر، مقدار PGV برابر 60 cm/s و برای زلزله‌ای با بزرگای $7/5$ ریشتر این مقدار برابر 100 cm/s می‌باشد. مقدار PGV برای زلزله‌ای به بزرگای $7/5$ ریشتر و فاصله ۱۵ کیلومتر از گسل به 50 cm/s کاهش می‌یابد.

ب) متوسط PGV برای ساختگاه‌های خاکی بزرگتر از همین مقدار برای ساختگاه‌های سنگی است. این تفاوت با فاصله از گسل بیشتر می‌شود.

ج) پالس پریود سرعت تابعی از بزرگای زلزله است. برای یک زلزله با بزرگای ۶ ریشتر پالس پریود حدود 0.8 ثانیه است که به ۴ ثانیه برای یک زلزله به بزرگای $7/5$ ریشتر افزایش می‌یابد.

د) شرایط ساختگاه اثرات قابل توجهی در زلزله‌های نزدیک گسل دارد. به عنوان مثال برای زلزله‌های با بزرگای کمتر از ۷ ریشتر، تاریخچه زمانی سرعت با پریودهای بلندتری در ساختگاه خاکی نسبت به ساختگاه سنگی رخ می‌دهد.

^۱Bray & Marek

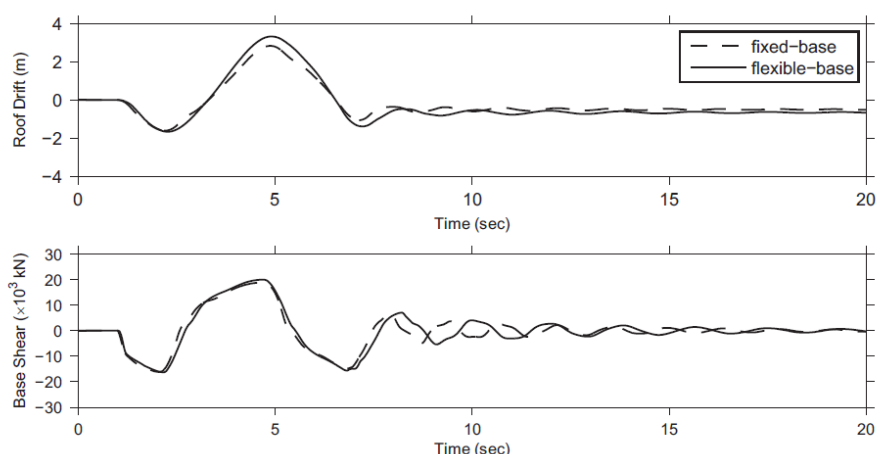


شکل (۴-۷): توزیع رکوردهای نزدیک گسل انتخاب شده در مطالعه بری و مارک (۲۰۰۴)

۴-۳-۴- مطالعات ژانگ و تانگ^۱ (۲۰۰۹)

در این مقاله به بررسی اثرات خطی و غیرخطی اندرکنش خاک و سازه پرداخته شده و تحت یک چارچوب دقیق آنالیز ابعادی، پارامترهای بی بعد حاکم بر پاسخ سازه‌ای به دست آمده است. پاسخ‌های همپایه شده سازه‌های با تکیه گاه منعطف محاسبه شده و با مقادیر به دست آمده از سازه‌های با تکیه گاه صلب برای آشکارسازی اهمیت اثرات متقابل خاک و سازه مقایسه شد. شبیه سازی عددی که در چارچوب آنالیز ابعادی انجام گرفت نشان داد که اثرات اندرکنش خاک و سازه به نسبت فرکانس پالس به سازه (P)، نسبت سختی فونداسیون به سازه (Pk)، ضریب میرایی فونداسیون (Pc) و حرکت فونداسیون و امکان گسترش غیرخطی سازه بسیار وابسته است. همچنین اثرات اندرکنش خاک و سازه به تغییرات نسبت جرم فونداسیون به سازه و ضریب میرایی سازه‌های با پایه گیردار حساس نیست.

^۱Zhang & Tang



شکل (۴-۸): پاسخ‌های سازه‌ای برای سیستم قاب دوبعدی- فونداسیون تحت اثر پالس ورودی با شتاب $0.75g$ و پریود $5/7$ ثانیه

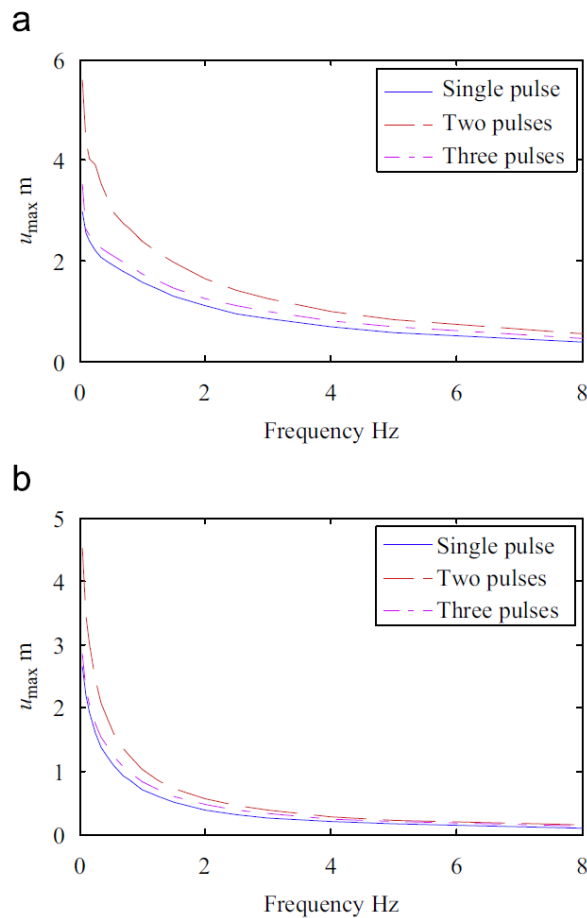
اثرات اندرکنش خاک و سازه زمانی که P بیش از $1/5$ باشد و نسبت سختی فونداسیون به سازه در محدوده مشخصی قرار گیرد، می‌تواند پاسخ‌های سازه‌ای را تقویت کند. مطالعه موردی ده ساختمان واقعی و یک قاب نه طبقه از سازه، کارکرد آنالیز ابعادی در پیش‌بینی اثرات اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های مهندسی واقعی را نشان داد به شرط آنکه مدل برگرفته از یک سیستم چند درجه آزادی باشد [25].

۴-۳-۵- مطالعات مصطفی و تاکی واکي^۱ (۲۰۱۰)

بازتعریف قطعی و احتمالی حرکات پالس گونه حوزه نزدیک زمین عنوان مقاله‌ایست در زمینه پیش‌بینی حرکات قوی زمین که توسط مصطفی و تاکی واکي ارائه شد. در این پژوهش به بررسی ویژگی‌های زمین لرزه‌های حوزه نزدیک با پالس سرعت مشخص پرداخته شده است. برای این منظور مدل‌هایی برای این دسته از زمین لرزه‌ها توسعه داده شد. مدل‌هایی که هدف آنها تکثیر برخی از ویژگی‌های مشاهده شده در زلزله‌های نزدیک است. هردو این مدل‌ها (قطعی و احتمالی) برای غیر ثابت بودن و پالس‌های چندگانه در سرعت حرکت زمین در نظر گرفته شده است. مدل قطعی می‌تواند برای شبیه‌سازی حرکات پالس گونه زمین به عنوان ورودی تحلیل تاریخچه زمانی خطی و غیرخطی سازه‌ها استفاده شود. مدل احتمالی همراه با روش‌های قابلیت اعتماد نظیر FORM و SORM می‌تواند برای ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌های خطی و غیرخطی به کار رود. علاوه بر این، مدل احتمالی، بررسی عدم قطعیت در حرکت زمین و تغییر خصوصیات سازه را تسهیل می‌کند. کاهش پاسخ‌های سازه برای

^۱Moustafa & Takewaki

سازه‌های الاستیک با استفاده از میراگر مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین مشاهدات عددی در مورد استفاده از مدل احتمالی در ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های الاستیک ارائه شده است [26].



شکل (۴-۹): اثر پالس‌های ثانویه بر ماکزیمم پاسخ غیرخطی (a): $\zeta=0.05$; (b): $\zeta=0.2$

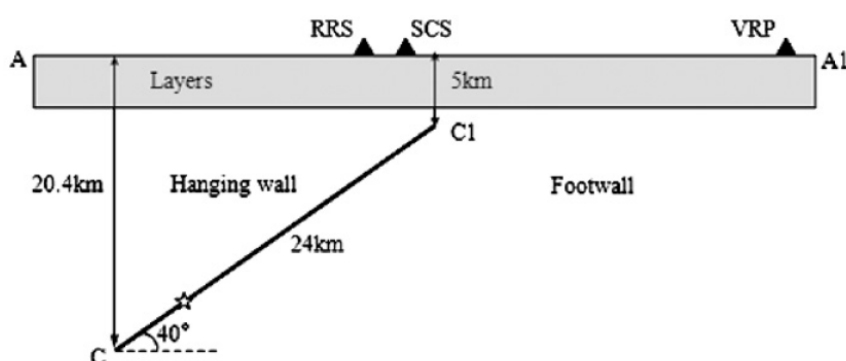
۴-۳-۶- مطالعات لیو و همکاران^۱ (۲۰۱۲)

این مقاله، ارائه یک روش عددی برای مدل‌سازی جنبش‌های نزدیک گسل و بررسی کاربرد آن در زلزله نورتریچ (۱۹۹۵) است. روش عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی حرکت زمین نزدیک به گسل از ترکیب مدل گسل محدود با الگوریتم عددی به نام روش انتشار توده^۲ برای انتشار موج به دست آمد. توده‌های مورد بررسی با استفاده از شبکه‌های چهار ضلعی محاسباتی ساخته شده و شرایط پایداری الگوریتم برای شبیه‌سازی موج فراهم شده است. شرایط مرزی آزاد ارائه شده در این روش می‌تواند به طور طبیعی برآورده شود. این روش به راحتی می‌تواند برای شبیه‌سازی انتشار موج در محیط ناهمگن با توپوگرافی سطحی استفاده شود. حرکات زمین نزدیک به گسل در سه ایستگاه در طول

^۱Liu et al.

^۲ Investigated lump method

زلزله نورث‌ریچ ترکیب شد و نتایج شبیه‌سازی به طور کیفی با سوابق حرکت زمین مربوطه مطابقت دارد [27].



شکل (۴-۱۰): مدل دوبعدی رایانه‌ای برای شبیه‌سازی حرکات قوی زمین در سه ایستگاه زلزله نورث‌ریچ

۳-۷- مطالعات داودی و همکاران (۲۰۱۳)

این مقاله، به مطالعه پاسخ لرزه‌ای سد خاکی تحت اثر حرکات دور و نزدیک گسل می‌پردازد. برای این منظور مقایسه اثرات حرکت زمین در میدان نزدیک و دور از گسل در رفتار دینامیکی غیرخطی سد خاکی با اعمال ۱۸۰ تاریخچه زمانی غیرخطی در سه سطح شدت انجام گرفت. سد خاکی با ورود پالس‌های سرعت حرکت نزدیک به گسل در معرض جابجایی‌های بزرگی قرار گرفت. در نتیجه لازم بود سد در تعداد سیکل اندک انرژی ورودی قابل توجهی را مستهلک کند. این درحالی است که در مقابل، حرکت دور از گسل، انرژی ورودی را به تدریج در سیکل‌های بیشتر به بدنه سد اعمال می‌کند.

شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در این مطالعه نشان داد [28]:

الف) شاخص‌های مربوط به سرعت حرکت زمین، مانند اوج سرعت زمین و سرعت مطلق تجمعی بسیار مؤثرتر از شاخص‌های شدت حرکت زمین مانند شتاب اوج زمین، برای پاسخ‌های لرزه‌ای در سطح با شدت بالا و رفتار غیرخطی است.

ب) نسبت T_p/T_0 و شکل طیفی نقش مهمی در پاسخ لرزه‌ای سدهای خاکی دارد.

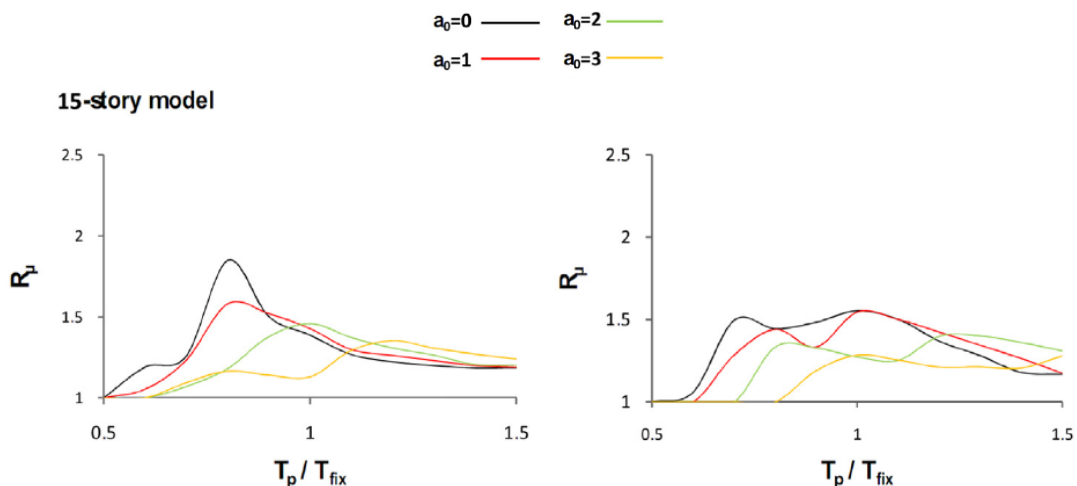
ج) حرکات نزدیک گسل با T_p/T_0 بزرگتر از ۱/۵ تمایل به ایجاد واکنش لرزه‌ای بزرگتر نسبت به حرکات دور یا نزدیک گسل با T_p/T_0 کمتر از ۱/۵ دارد.

د) متوسط نشست تاج برای حرکات شدید زمین به ترتیب ۱/۸۵ و ۱/۲۵ برابر بیشتر از حرکات آرام و دور از گسل زمین است. این مقادیر برای جابجایی سطحی به ترتیب ۲/۳۵ و ۲/۱ برابر افزایش می‌یابد.

۴-۳-۸- مطالعات احمدی و خوشنودیان (۲۰۱۵)

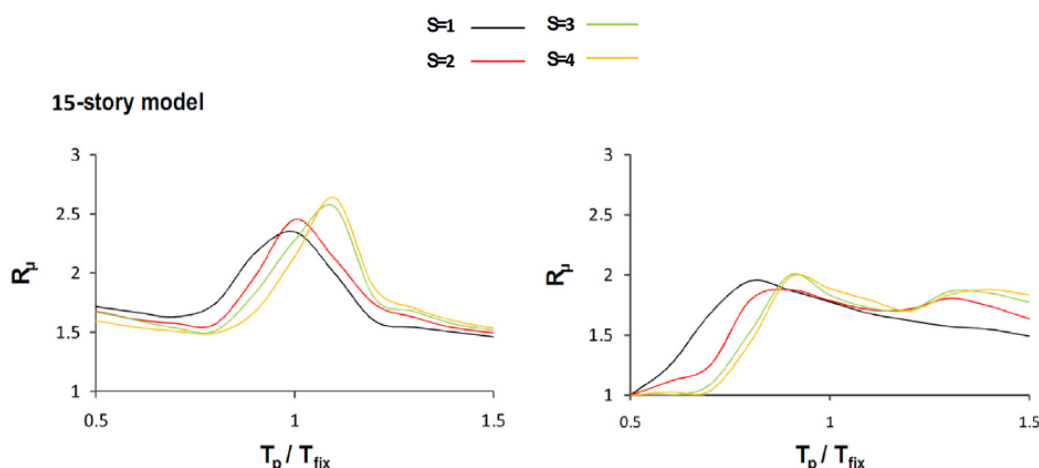
در این مطالعه، عوامل کاهش مقاومت سیستم‌های خاک-سازه چند درجه آزادی با در نظر گرفتن سه پارامتر بدون بعد: فرکانس بدون بعد به عنوان نسبت سختی سازه به خاک، نسبت ابعاد روسازه و شکل پذیری سازه مورد بررسی قرار گرفت. برای تحریک ورودی از مدل‌های ریاضی پالس که اثرات شناخته شده زلزله‌های نزدیک گسل نظیر جهت پذیری پیش‌رونده و تغییر مکان ماندگار را اعمال می‌کند، استفاده شد. خاک زیر سازه بر اساس مفهوم مدل مخروط شبیه‌سازی شده و روسازه چند درجه آزادی به عنوان یک ساختمان برشی غیرخطی مدل شده است. انعطاف پذیری سازه، فرکانس بدون بعد و نسبت ابعادی به عنوان پارامترهای کلیدی سیستم خاک - سازه مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج تحلیل در نسبت انعطاف پذیری کم نشان می‌دهد که اثر اندرکنش خاک و سازه، ضریب کاهش مقاومت (R_u) را قبل از رسیدن نسبت (T_p/T_{fix}) به یک کاهش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش نسبت ابعاد سازه (نسبت ارتفاع سازه به شعاع فونداسیون) اثر اندرکنش خاک و سازه را قبل از رسیدن به نسبت پریود یک کاهش می‌دهد. همچنین اثر جهت پذیری پیش‌رونده بر ضریب کاهش مقاومت در نسبت T_p/T_{fix} کوچکتر از یک قابل ملاحظه است. پارامتر a_0 بیانگر ضریب صلبیت خاک است و مقادیر ۰ تا ۳ را پوشش می‌دهد که مقدار صفر برابر شرایط صلبیت کامل است. [29].



شکل (۴-۱۱): ضریب R_u سیستم خاک-سازه چند درجه آزادی روی خاک بر مبنای نسبت T_p/T_{fix} برای شرایط صلبیت متفاوت خاک در رکوردهای دارای (چپ): تغییر مکان ماندگار (راست): جهت پذیری پیش‌رونده

همچنین نتایج نشان داد، ضریب بزرگنمایی در نسبت‌های کمتر T_p/T_{fix} بزرگتر است و اثر اندرکنش خاک و سازه این ضریب را افزایش می‌دهد. با افزایش نسبت ابعاد روسازه، اثر اندرکنش در نسبت‌های کوچکتر T_p/T_{fix} تقویت کننده و در نسبت‌های بزرگتر T_p/T_{fix} کاهنده است [29].



شکل (۴-۱۲): ضریب R_u سیستم خاک-سازه چند درجه آزادی روی خاک بر مبنای نسبت T_p/T_{fix} برای نسبت ابعاد متفاوت در رکوردهای دارای (چپ): تغییرمکان ماندگار (راست): جهت پذیری پیش رونده

۴-۳-۹- مطالعات کرک و همکاران^۱ (۲۰۱۶)

در این پژوهش، تأثیر شرایط سایت (سنگ/خاک) و رژیم تکتونیکی (درون صفحه‌ای^۲ / بین صفحه‌ای^۳) بر پالس‌پریرود حرکات نزدیک به گسل با جهت‌پذیری پیش رونده و با بهره‌مندی از تحلیل رگرسیون خطی و قوانین مقیاس‌بندی که از دوره پالس به بزرگی زلزله مشتق شده‌اند، بررسی شده است.

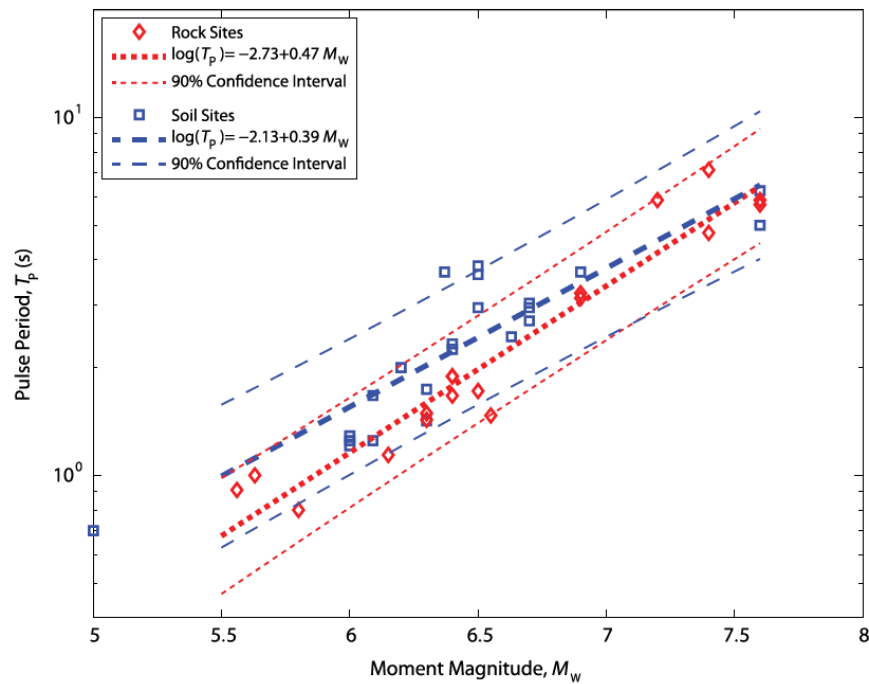
نتایج نشان داد برای زمین لرزه‌هایی با بزرگی کمتر، دوره پالس در سایت‌های خاکی طولانی‌تر از سایت‌های سنگی است و با افزایش بزرگی زلزله، مقادیر دوره پالس در سایت‌های سنگی و خاکی همگرا می‌شوند به طوری که در $M_w = 7/5$ دو خط رگرسیون با هم تلاقی دارند. توضیح این مشاهدات این است که زمین لرزه‌ها با بزرگی بیشتر، طول موج‌های بیشتر از ۳۰ متر طول دارند.

نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد که دوره پالس نزدیک به گسل درون صفحه‌ای به طور قابل توجهی طولانی‌تر از (به طور متوسط با ضریب ۲/۴۵) دوره پالس نزدیک به گسل بین صفحه‌ای در یک بزرگی زلزله یکسان است [30].

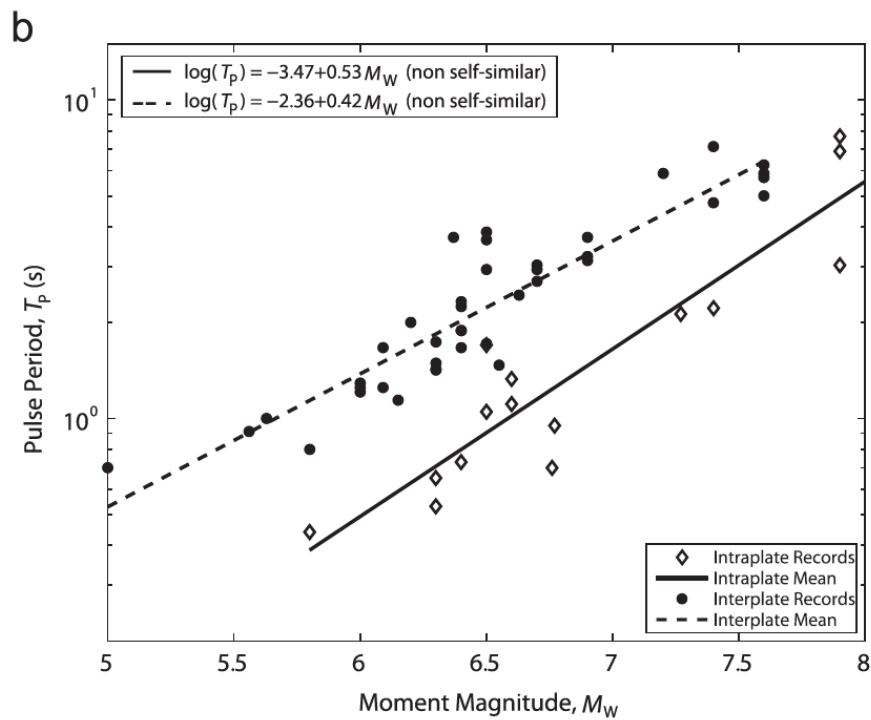
^۱Cork et al.

^۲interplate

^۳intraplate



شکل (۴-۱۳): نمودار پالس پریود به بزرگی زلزله بر اساس تحلیل رگرسیونی برای سایت‌های خاکی و سنگی



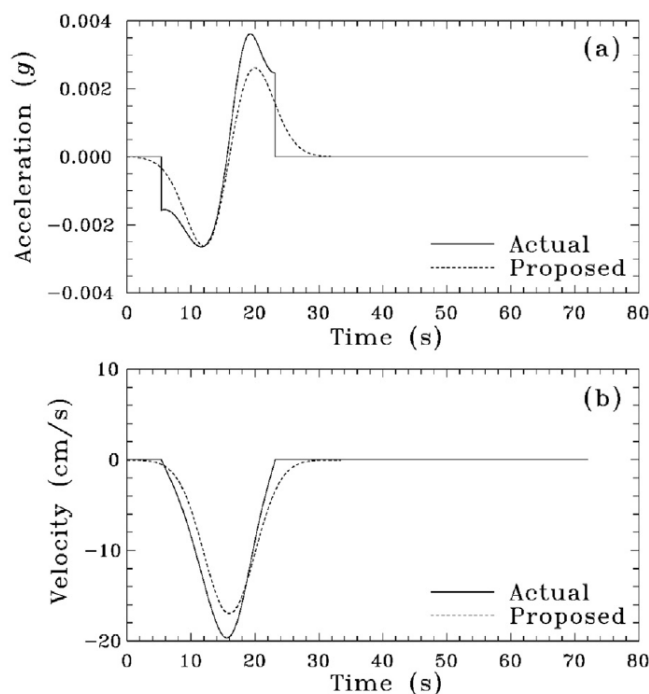
شکل (۴-۱۴): نمودار پالس پریود به بزرگی زلزله بر اساس تحلیل رگرسیونی برای زلزله‌های درون صفحه‌ای و بین صفحه‌ای

۴-۳-۱۰- مطالعات یاداو و گوپتا^۱ (۲۰۱۷)

وجود پالس‌های با پریود بلند در زمین لرزه‌های نزدیک به گسل، پتانسیل خسارت را به ویژه برای سازه‌های منعطف مانند پل افزایش می‌دهد و انجام تحلیل غیرخطی برای اطمینان از ایمنی سازه‌ها را ضروری می‌سازد. این پژوهش، شبیه سازی یک جابجایی ماندگار را در نظر می‌گیرد با این فرض که یک شتاب‌سنج در جابجایی ماندگار می‌تواند به یک جزء پالس‌دار و یک جزء بدون پالس تجزیه شود. پالس‌های جابجایی ماندگار از بانک اطلاعاتی ۲۰ شتاب‌سنج استخراج شده و با استفاده از روش میانگین حرکت پنج نقطه‌ای هم‌پایه شده است.

براساس پالس‌هایی که از این بانک اطلاعاتی استخراج شده است یک شکل موج تحلیلی که دارای همان عملکرد توزیع عادی برای پالس سرعت در چنین حرکاتی است؛ ارائه گردید. این شکل موج با سه پارامتر مشخص می‌شود: a مربوط به دامنه پالس، σ مربوط به مدت زمان پالس و t_{loc} مربوط به محل پالس.

به وسیله یک مطالعه عددی مشخص شد این شکل موج توافق خوبی با ویژگی‌های پالس‌های واقعی در سیستم‌های یک درجه آزادی دارد گرچه پژوهشگران اکیداً معتقدند بانک اطلاعاتی کامل‌تری برای بهبود مدل‌های پیشنهادی مورد نیاز است [31].



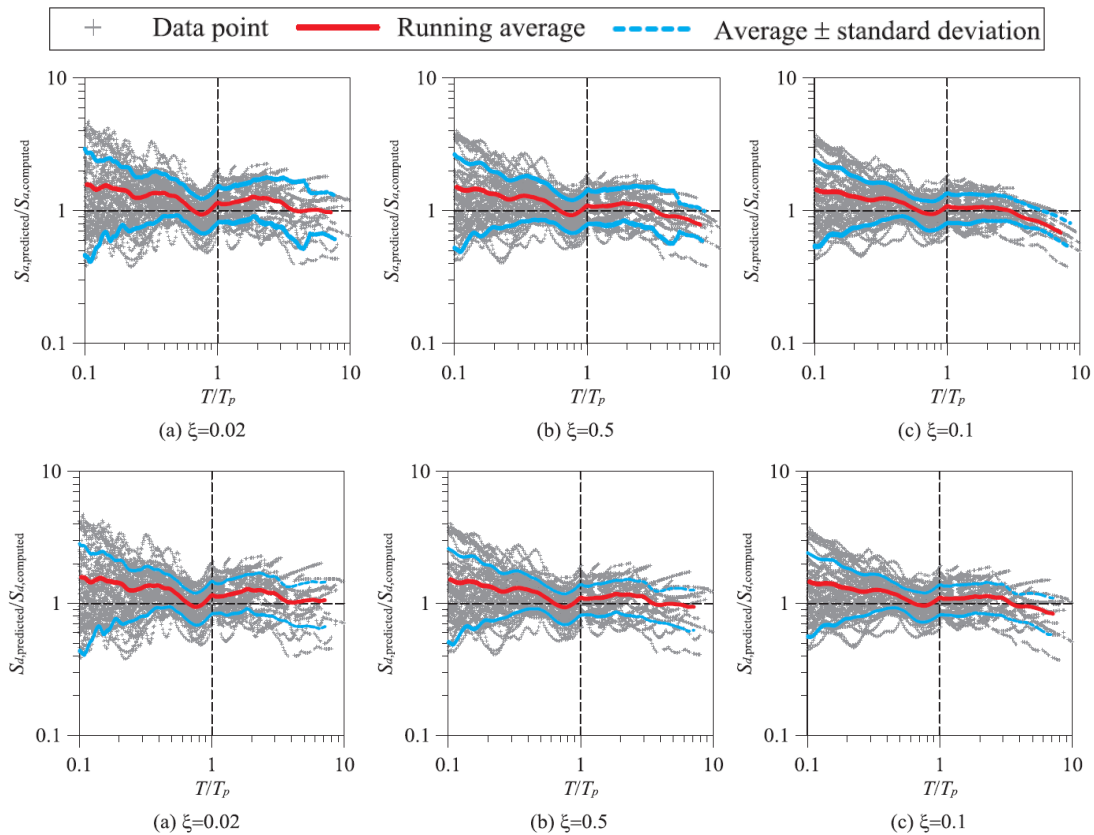
شکل (۴-۱۵): مقایسه تاریخچه زمانی واقعی و پیشنهادی برای پالس

در رکود شماره ۵ ($a=67/82$ و $\sigma=3/38$ و $t_{loc}=16/03$)

^۱Yadav & Gupta

۴-۳-۱۱- مطالعات پو و همکاران^۱ (۲۰۱۸)

این مطالعه آماری با هدف تعیین طیف پاسخ شتاب و جابجایی زمین در حرکات پالس گونه نزدیک به گسل انجام شده است. طیف‌ها بر اساس مجموعه‌ای از حرکات پالس گونه زمین محاسبه می‌شوند و اشکال طیفی، حاصل نرمال‌سازی طیف با مقادیر طیفی در دوره پالس هستند. یک روش دو مرحله‌ای برای استخراج فرمول‌های تخمین طیف شتاب و جابجایی حرکات زمین به کار گرفته شد و مشاهده شد مقادیر نرمال شده طیفی در دوره‌های بزرگتر از دوره پالس (T_p) تغییرات بسیار کمی را نشان می‌دهند اما پراکندگی‌های بسیار بزرگ در دوره‌های کوتاه‌تر از دوره پالس دارند. در دوره‌های بزرگتر از دوره پالس، افزایش میرایی موجب افزایش شتاب نرمال شده و در دوره‌های کوتاه‌تر از دوره پالس، تغییرات میرایی تاثیر ناچیزی بر طیف شتاب نرمال شده دارد. مقدار طیفی در $T = T_p$ تقریباً متناسب با مقدار $2\pi PGV/T_p$ بود. مقایسه طیف‌های محاسبه شده از سوابق و طیف‌های برآورد شده از مدل‌های پیشنهادی نشان داد که مدل‌های ارائه شده طیف پاسخ با دقت رضایت بخشی در پیش بینی مؤثرند [32].



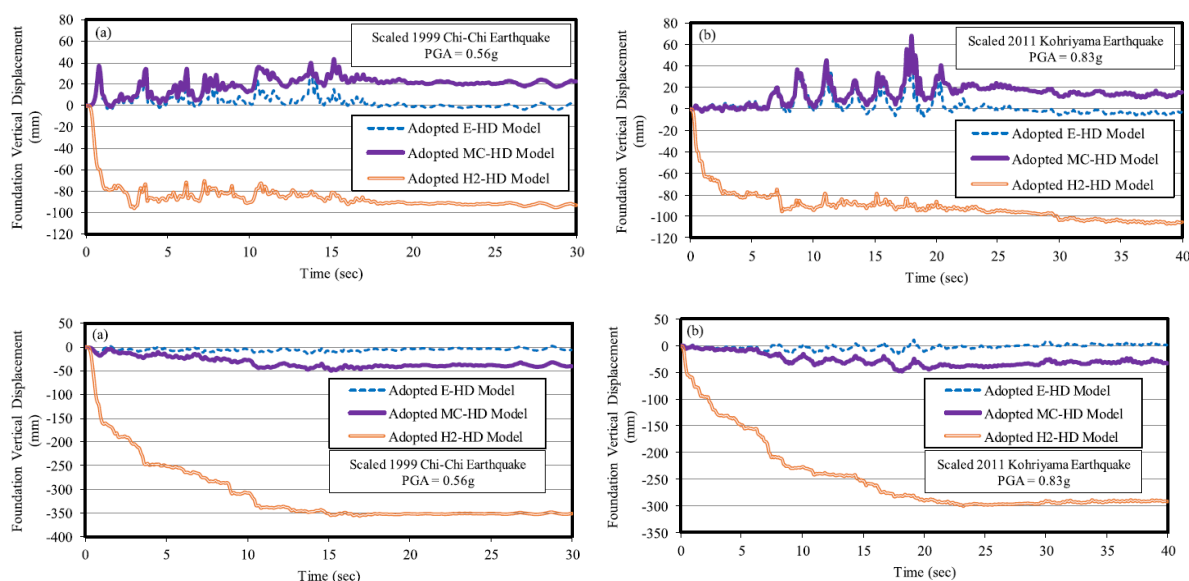
شکل (۴-۱۶): مقایسه طیف شتاب و جابجایی پیش بینی شده و محاسبه شده در سه میرایی مختلف

^۱Pu et al.

۴-۳-۱۲- مطالعات یگانه و فتاحی (۲۰۱۹)

مطالعه حاضر به بررسی میزان تأثیر مدل‌های سازنده خاک بر پیش بینی عملکرد لرزه‌ای برای یک ساختمان بتن مسلح ۲۰ طبقه دارای پی گسترده و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در زلزله‌های نزدیک گسل می‌پردازد. در این تحقیق، از مدل سازنده خاک مبتنی بر پلاستیسیته سخت شونده تحت عنوان "سخت شونده‌گی هایپربولیک با میرایی هیسترتیک"^۱، در رابطه با دو مدل معمول خاک یعنی الاستیک ایزوتروپیک^۲ با میرایی هیسترتیک و الاستوپلاستیک مور-کولمب^۳ با میرایی هیسترتیک، در شبیه‌سازی عددی سه بعدی با استفاده از نرم افزار FLAC 3D استفاده شد. شتاب زلزله‌های نزدیک گسل چی‌چی (۱۹۹۹) و کوریاما^۴ (۲۰۱۱) که با استفاده از روش تطبیق طیف پاسخ^۵ مقیاس شده، به عنوان تحریک ورودی پایه به مدل اعمال شده است.

این مطالعه نشان داد که مدل سازنده خاک می‌تواند بر پیش بینی‌های عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مقاوم خمشی تأثیر بگذارد. تغییر شکل جانبی دائمی پی گسترده که یک ساختمان ۲۰ طبقه را تحمل می‌کند، افزایش قابل توجهی (یعنی ۱۲ برابر افزایش) در تحلیل اندرکنش خاک و سازه تجربه می‌کند هنگامی که یک مدل مناسب الاستوپلاستیک برای خاک اختیار شود [33].



شکل (۴-۱۷): تاریخچه جابجایی قائم برای مدل‌های خاک به کار گرفته شده در زلزله‌های چی‌چی و کوریاما

بالا: سمت راست فونداسیون پایین: سمت چپ فونداسیون

^۱hyperbolic hardening with hysteretic damping

^۲isotropic elastic

^۳elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb

^۴Kohriyama

^۵response spectrum matching method

۴-۴- خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته بر رفتار لرزه‌ای ریزشمع‌ها

جدول (۴-۱): خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته بر رفتار لرزه‌ای ریزشمع‌ها

ردیف	سال	عنوان پژوهش	پژوهشگران	مهمترین نتایج
۱	۲۰۰۰	پاسخ دینامیکی سازه با سیستم فونداسیون- ریزشمع	کیشیشیتا و همکاران	مقاومت و شکل پذیری بهتر ریزشمع‌ها نسبت به شمع‌های پیش ساخته و درجا
۲	۲۰۰۱	تحلیل مهندسی رفتار لرزه‌ای سیستم ریزشمع	ژوران و همکاران	کاهش جابجایی و ممان خمشی در گروه ریزشمع با کاهش نسبت فاصله به قطر
۳	۲۰۰۴	تحلیل اجزا محدود سه بعدی از رفتار لرزه‌ای ریزشمع‌های مایل	سادک و شاهروور	کاهش شتاب جانبی سازه با استفاده از ریزشمع مایل
۴	۲۰۰۶	تاثیر اتصال کلاhek به سر ریزشمع بر عملکرد لرزه‌ای ریزشمع‌ها	سادک و شاهروور	کاهش ممان خمشی و نیروی برشی با وجود اتصال مفصلی بین ریزشمع و کلاhek
۵	۲۰۰۸	شواهدی از نقش مفید ریزشمع‌های مایل	جرولیموس و همکاران	عملکرد بهتر اتصال گیردار ریزشمع و کلاhek در جابجایی و عملکرد بهتر اتصال مفصلی در مورد روسازه‌های بلند
۶	۲۰۰۹	تحلیل اجزا محدود دینامیکی فونداسیون دارای ریزشمع	وانگ و همکاران	افزایش تغییر مکان‌ها با افزایش شتاب ورودی
۷	۲۰۱۲	آنالیز الاستوپلاستیک سه بعدی عملکرد لرزه‌ای ریزشمع‌های مایل	شاهروور و همکاران	اثر مثبت ریزشمع‌های مایل بر کاهش نیروی برشی و خمشی با زاویه بهینه ۲۰ درجه

۸	۲۰۱۴	تحلیل جامع اجزا محدود سه بعدی، مطالعه پارامتریک و آنالیز حساسیت برای سیستم خاک - ریزشمع - روسازه	قربانی و همکاران	بررسی اثر پارامترهای مختلف بر پاسخ لرزه‌ای گروه ریزشمع قائم و مایل
۹	۲۰۱۶	آزمون صحرایی در ریزشمع‌ها تحت بارگذاری جانبی	کاپاتی و همکاران	تأثیر قابل ملاحظه فشار توزیع بر پاسخ دینامیکی ریزشمع‌ها در کرنش‌های کوچک
۱۰	۲۰۱۷	فونداسیون دارای ریزشمع تحت بارگذاری جانبی	کاپاتی و همکاران	فرکانس بالاتر و میرایی کمتر سیستم در راستای تمایل ریزشمع‌ها
۱۱	۲۰۱۸	مطالعه آزمون میز لرزه بر رفتار دینامیکی ریزشمع‌ها در خاک ماسه‌ای سست	جلیلیان و همکاران	تقویت شتاب سطحی خاک و کلاهی با افزایش شتاب ورودی

۴-۵- خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در مورد اثر زلزله‌های دور و نزدیک

جدول (۴-۲): خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در مورد اثر زلزله‌های دور و نزدیک

ردیف	سال	عنوان پژوهش	پژوهشگران	مهمترین نتایج
۱	۲۰۰۱	روشی ترکیبی برای ارزیابی طراحی لرزه‌ای	اردیک و دورکال	ارائه یک روش کاربردی برای ارزیابی خطر لرزه‌ای در شرایط نزدیک گسل همراه با مثال واقعی
۲	۲۰۰۳	حرکات افقی و عمودی زمین لرزه‌های نزدیک گسل	امبرزیز و داگلاس	ارائه روابطی برای شتاب حداکثر زمین، شتاب طیفی و چگالی انرژی و نسبت‌های آنها در دو راستای افقی و قائم
۳	۲۰۰۴	خصوصیات زمین لرزه‌ها با جهت پذیری پیش رونده	بری و مارک	تغییرات قابل ملاحظه مقدار PGV در اثر تغییر فاصله، بزرگای زلزله و نوع ساختگاه
۴	۲۰۰۹	آنالیز ابعادی سازه‌ها با فونداسیون سنگی تحت زمین لرزه‌های نزدیک گسل	ژانگ و تانگ	وابستگی اثرات اندرکنش خاک و سازه به نسبت فرکانس زلزله به سازه، سختی و ضریب میرایی فونداسیون و رفتار غیرخطی سازه
۵	۲۰۱۰	نمایش قطعی و احتمالی حرکات پالس گونه حوزه نزدیک	مصطفی و تاکی	ارائه مدل‌های کاربردی با ویژگی‌های زلزله‌های نزدیک گسل به منظور شبیه سازی حرکات پالس گونه زمین و ارزیابی قابلیت اعتماد سازه‌ها
۶	۲۰۱۲	یک روش عددی برای مدل سازی حرکات نزدیک به گسل زمین	لیو و همکاران	ارائه یک روش عددی برای شبیه سازی انتشار موج در محیط ناهمگن در زمین لرزه‌های نزدیک به گسل
۷	۲۰۱۳	پاسخ لرزه‌ای سدهای خاکی تحت اثر زمین لرزه‌های دور و نزدیک	داودی و همکاران	جابجایی‌های بزرگتر در تاج سد ناشی از زمین لرزه‌های نزدیک به گسل نسبت به زمین لرزه‌های دور
۸	۲۰۱۵	اثرات نزدیکی به گسل بر ضرایب کاهش مقاومت سیستم خاک - سازه چند درجه آزادی	احمدی و خشنودیان	ارائه اثر اندرکنش خاک و سازه، ابعاد سازه و جهت پذیری پیش رونده بر ضریب کاهش مقاومت سیستم

۹	۲۰۱۶	اثرات رژیم تکتونیکی و شرایط خاک بر دوره پالس حرکت‌های نزدیک به گسل	کُرک و همکاران	در زلزله‌های با بزرگای کمتر، دوره پالس در سایت‌های خاکی طولانی‌تر از سایت‌های سنگی است
۱۰	۲۰۱۷	زمین لرزه‌های نزدیک به گسل با تغییرمکان ماندگار: ویژگی‌ها و شبیه سازی	یاداو و گوپتا	ارائه یک شکل موج تحلیلی با قابلیت توزیع پالس سرعت در حرکات نزدیک گسل
۱۱	۲۰۱۸	کمی سازی طیف پاسخ حرکات پالس مانند نزدیک به گسل	پو و همکاران	ارائه طیف پاسخ شتاب و جابجایی زمین در حرکات پالس گونه نزدیک به گسل
۱۲	۲۰۱۹	اثرات انتخاب مدل سازنده خاک بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک	یگانه و فتاحی	اثر قابل ملاحظه مدل سازنده خاک بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مقاوم خمشی و تغییرشکل جانبی پی

فصل پنجم

مدل سازی عددی و تحلیل تاریخچه زمانی

۵-۱- مقدمه

این فصل دربرگیرنده موضوع اصلی پژوهش یعنی بررسی عملکرد گروه ریزشمع قائم و مایل در دو ساختگاه دانه‌ای و چسبنده تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک است و به ترتیب مشتمل بر پنج بخش مدل‌سازی عددی، صحت سنجی، بیان مسئله، بارگذاری و تحلیل تاریخیچه زمانی به شرح زیر می‌باشد:

- مدل‌سازی عددی: در این بخش ابتدا معرفی مختصری از Opensees و روش‌های مدل‌سازی در این نرم افزار خواهیم داشت. سپس مدل مطلوب انتخاب شده و جزئیات هر یک از عناصر مدل‌سازی شامل خاک، ریزشمع، سرریزشمع، نحوه مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی بیان می‌گردد.

- صحت سنجی: نتایج هرمدل‌سازی عددی می‌بایست در مقایسه با نتایج یک پژوهش معتبر مورد صحت سنجی قرار گیرد. در این بخش دقت عملکرد مدل موردنظر در نرم افزار Opensees با نتایج حاصل از یک آزمایش میز لرزه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

- بیان مسئله: در این قسمت مسئله مورد مطالعه که شامل یک سیستم خاک-گروه ریزشمع می‌باشد، تشریح گردیده و جزئیات هندسی مدل، مشخصات مصالح خاکی و ریزشمع‌ها بیان شده است.

- بارگذاری: در این بخش، نحوه انتخاب، دسته بندی و مشخصات رکوردهای دور و نزدیک زلزله‌های منتخب برای اعمال به مدل خاک-ریزشمع بیان می‌گردد.

- تحلیل تاریخیچه زمانی: روش تحلیل و نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی شامل جداول، نمودارها و کانتورها در این بخش ارائه گردیده و نتایج مورد تفسیر قرار گرفته است.

۵-۲- معرفی نرم افزار اپنسیس

نرم افزار ^۱ OpenSees (اپنسیس) از جمله نرم افزارهای تحلیل عددی در مهندسی سازه و ژئوتکنیک مبتنی بر روش اجزای محدود است. این نرم افزار توسط محققین دانشگاه برکلی در سال ۱۹۹۸ به وجود آمد و یک نرم افزار رایگان و متن باز است. این بدان معنی است که هم کدهای برنامه و هم نسخه قابل اجرای آن در اختیار عموم قرار دارد تا پژوهشگران بتوانند تغییرات مورد نظر خود را در آن اعمال نمایند و قابلیت های جدید به آن بیفزایند. این نرم افزار به زبان برنامه نویسی C++ نوشته شده و امکان تولید و توسعه ای انواع مقاطع سازه ای و غیرسازه ای را برای کاربران خود فراهم کرده است. اپنسیس به منظور مدل سازی و تحلیل، از زبان برنامه نویسی TCL/TK استفاده می کند. هم اکنون توسعه ای این نرم افزار به عهده ی مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام (PEER)^۲ است. اپنسیس به عنوان قدرتمندترین نرم افزار تحلیل غیرخطی ماکرو سازه ها شناخته می شود و با داشتن کتابخانه کاملی از رفتار مصالح به پژوهشگران ابزار لازم جهت تحقیقات را ارایه می نماید. هم چنین این نرم افزار به طور ویژه ابزاری بسیار کارآمد در مدل سازی و تحلیل انواع سازه ها و ساختگاه ها تحت اثر بار زلزله به شمار می رود [34] [35].

۵-۳- روش های مدل سازی خاک-ریزشمع

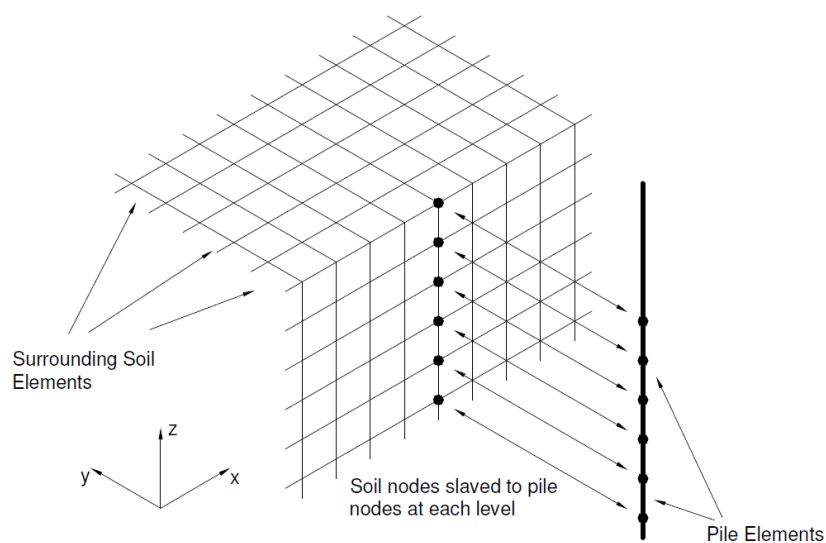
روش های مختلفی برای مدل سازی سیستم شمع (ریزشمع)-خاک بر اساس نوع المان های مصالح و اندرکنش اجزای سیستم در نرم افزار اپنسیس وجود دارد. در ادامه به معرفی این روش ها و روش انتخاب شده در این پژوهش می پردازیم.

(۱) مدل اتصال ساده^۳: در این روش، شمع ها (ریزشمع ها) با المان Beam و خاک با المان Brick مدل می شود. المان های شمع در راستای نودها به هم متصل شده و نودهای خاک به نودهای شمع در هر تراز مقید می شود. تنش ها از شمع به نقطه متناظر آن در خاک منتقل می گردد. نقص عمده این مدل عدم در نظر گرفتن سطح مقطع شمع و ناحیه خاک مجاور آن است که در برابر حرکت مقاومت می کند [36].

^۱ Open System for Earthquake Engineering Simulation

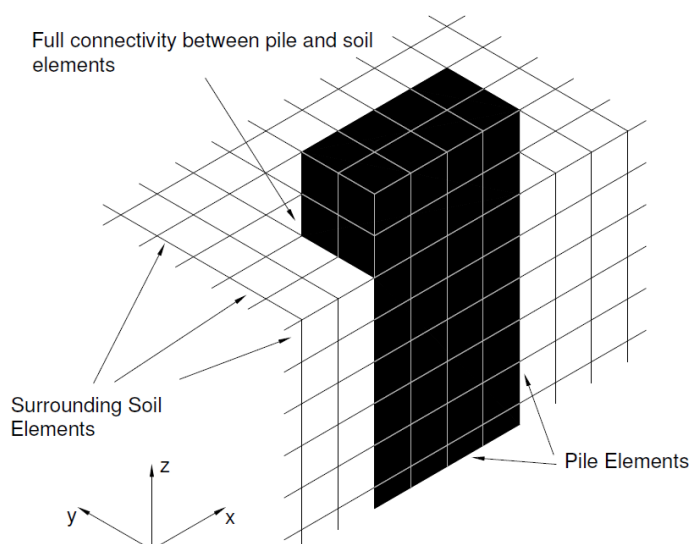
^۲ Pacific Earthquake Engineering Research Center

^۳ Single connection model



شکل (۵-۱): جزئیات مدل اتصال ساده

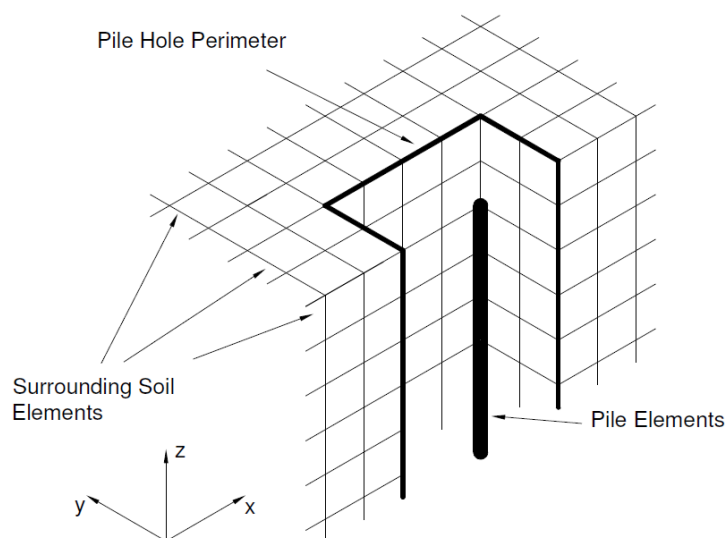
۲) مدل المان آجری^۱: در این روش، از المان‌های Brick علاوه بر خاک در مدل‌سازی شمع (ریزشمع) البته با مشخصات مصالح متفاوت استفاده می‌شود؛ به دلیل تشابه کامل دو المان، اتصال کامل بین آن‌ها برقرار می‌شود. اگرچه در این مدل، سطح مقطع شمع در نظر گرفته می‌شود ولی المان Brick مورد استفاده در شمع تنها توانایی تعریف سه درجه آزادی انتقالی را دارد و خمش شمع را در نظر نمی‌گیرد [36].



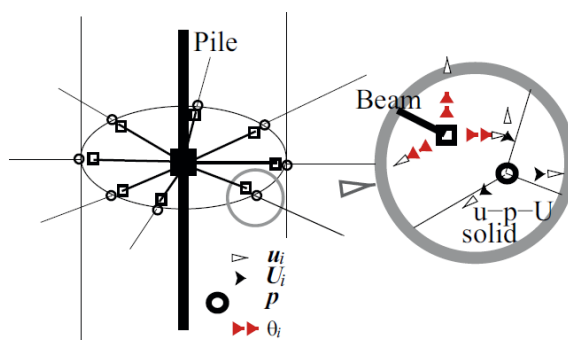
شکل (۵-۲): جزئیات مدل المان آجری

^۱Brick element model

۳) مدل شمع (ریزشمع) در فضای خالی^۱: در این مدل، المان های خاک در محل جایگذاری المان شمع حذف شده و اتصال در تراز مشابه بین خاک و شمع از طریق بسته شدن سه درجه آزادی انتقالی (dx, dy, dz) نودهای شمع به سه درجه آزادی ابتدایی نودهای خاک (U_x, U_y, U_z) که معرف جابجایی اسکلت خاک هستند صورت می گیرد. در این مدل علاوه بر امکان حرکت انتقالی در المان های شمع و خاک، امکان حرکت دورانی شمع نیز فراهم می گردد [36].



شکل (۳-۵): جزئیات مدل شمع (ریزشمع) در فضای خالی



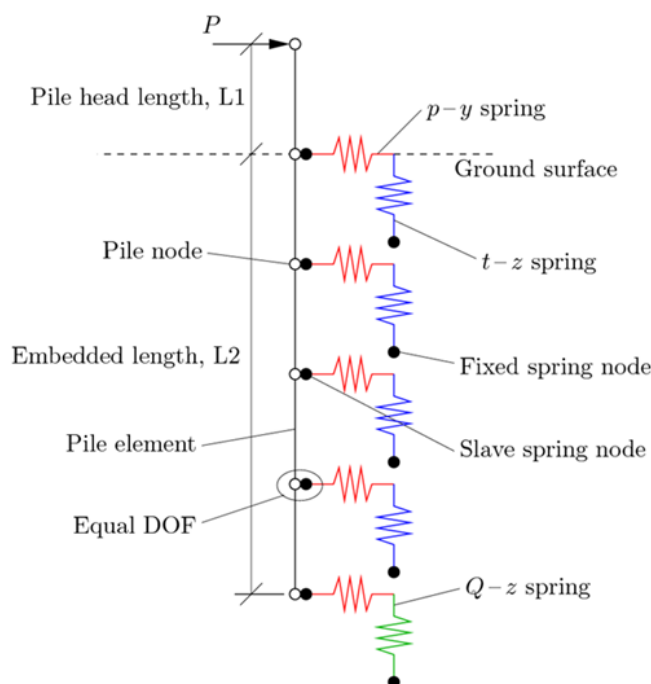
شکل (۴-۵): جزئیات اتصال درجات آزادی انتقالی گره های شمع و گره های خاک [37]

۴) مدل سازی با فنر (مدل وینکلر^۲): در این روش، فنرهای خطی جایگزین المان های خاکی می شود. فنرهای $t-z$ برای مقاومت اصطکاکی، فنرهای $Q-z$ برای مقاومت اتکایی و فنرهای $p-y$ برای مقاومت

^۱Pile void model

^۲Winkler model

جانبی شمع در سیستم خاک-شمع مدل تعریف می‌شود. نودهای هم تراز شمع و خاک با دستور EqualDOF به صورت مفصلی به هم متصل می‌گردند. نتایج مدل‌سازی با فنر مشابهت زیادی با نتایج مدل اتصال ساده دارد و نشانگر ارتباط نزدیک راه حل نظری و حل عددی اجزا محدود ساده است.



شکل (۵-۵): جزئیات مدل سازی با فنر [34]

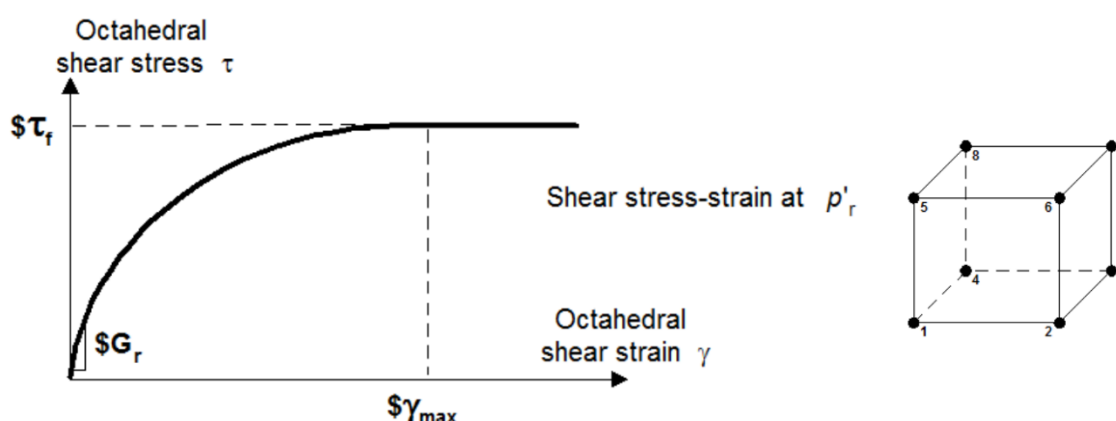
۵-۴- مدل مناسب سیستم خاک-ریزشمع

با توجه به مسئله تحقیق که شامل تحلیل دینامیکی سه بعدی سیستم خاک-ریزشمع تحت بار زلزله و دریافت پارامترهای خروجی مورد نیاز از قبیل نیروهای محوری، خمشی، برشی و تغییرمکان در ریزشمع و نیز تنش و کرنش خاک می‌باشد، روش مدل‌سازی، نوع المان‌ها و مصالح، شرایط مرزی و گام‌های تحلیل انتخاب گردید. بر این اساس مدل ریزشمع در فضای خالی با توجه به امکان شبیه‌سازی مناسب مسئله موجود، لحاظ نمودن اثرات توزیع تنش در خاک و طیف کامل‌تری از خروجی‌ها برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد.

هندسده مدل مبنا متشکل از یک توده خاک همگن، گروه ریزشمع و کلاهی است که جزئیات آن به تشریح در قسمت‌های بعد آمده است.

۵-۴-۱- مدل سازی خاک

یک توده خاک همگن با ابعاد $28 \times 12 \times 15$ متر متشکل از المان های هشت گرهی Brick u-p برای مدل سازی خاک در نظر گرفته شد. گره های این المان دارای چهار درجه آزادی است که شامل سه درجه آزادی برای حرکت انتقالی و یک درجه آزادی برای فشار آب حفره ای می باشد [34]. برای کاهش اثر شرایط مرزی و انعکاس امواج لرزه ای، ابعاد جانبی مدل حداقل به اندازه ۵۰ برابر قطر ریزشمع از طرفین گسترش یافته است [20].



شکل (۵-۶): المان هشت گرهی Brick u-p (چپ): رفتار برشی مصالح PDMY و PIMY (راست): المان هشت گرهی Brick u-p

برای تعریف مصالح خاک دانه ای از ماده چند تسلیمی وابسته به فشار (PDMY^۱) استفاده شد. این ماده الاستوپلاستیک برای شبیه سازی خصوصیات پاسخ خاک حساس به فشار تحت حالت های بارگذاری عمومی به کار می رود و در طول بارگذاری استاتیکی دارای رفتار الاستیک خطی و در طول بارگذاری دینامیکی دارای رفتار الاستوپلاستیک است. سطح تسلیم این ماده از مدل دراگر-پراگر^۲ پیروی می کند و اطلاعات تنش، کرنش، استحکام و شیب را می توان با استفاده از دستور خروجی المان برای این ماده به دست آورد [34]. برای تعریف مصالح خاک چسبنده از ماده چند تسلیمی مستقل از فشار (PIMY^۳) استفاده شد. این ماده الاستوپلاستیک برای شبیه سازی خصوصیات پاسخ موادی که رفتار برشی آنها به تغییر محصورشوندگی غیر حساس است، به کار می رود و در طول بارگذاری استاتیکی دارای رفتار الاستیک خطی و در طول بارگذاری دینامیکی دارای رفتار الاستوپلاستیک است. سطح

^۱Pressure Depend Multi Yield Material

^۲Drucker-Prager

^۳Pressure Independ Multi Yield Material

تسلیم این ماده از مدل فون مایزر^۱ پیروی می‌کند و اطلاعات تنش، کرنش، استحکام و شیب را می‌توان با استفاده از دستور خروجی المان برای این ماده به دست آورد [34].

۵-۴-۲- میرایی خاک

بخش عمده‌ای از انرژی گسترش یافته در یک محیط ژئوتکنیکی صرف غلبه بر اصطکاک بین ذرات و بخشی دیگر سبب پیدایش کرنش‌های برگشت ناپذیر (پلاستیک) می‌شود. لذا با انتشار موج در درون یک محیط ژئوتکنیکی به تدریج از انرژی آن کاسته شده و به عبارتی میرا می‌گردد. در غیر این صورت، اعمال یک نیرو بر یک سیستم، سبب نوسان آن تا مدت نامحدودی خواهد شد. بدین ترتیب میرایی مصالح به عنوان جزء لاینفکی از ذات مصالح ژئوتکنیکی تلقی می‌گردد. عدم توجه به این پارامتر در تحلیل‌های دینامیکی می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار داده و پاسخ‌های غیر قابل قبولی را ارائه دهد.

به طور کلی در یک تحلیل دینامیکی، میرایی را می‌توان به دو دسته میرایی هیستریزیس^۲ و میرایی مکانیکی تقسیم نمود. میرایی هیستریزیس در واقع میرایی طبیعی مصالح ژئوتکنیکی بوده و به نوعی جزئی از خصوصیات ذاتی آن محسوب می‌شود. از آنجا که در اغلب مواقع استفاده از مدل‌های رفتاری غیر خطی که قادر باشند میرایی هیستریزیس را در مدل لحاظ کنند با مشکلات زیادی همراه بوده و در برخی موارد، مدل قابلیت ارائه این نوع از میرایی را ندارد. در این حالت از میرایی مکانیکی برای بررسی رفتار دینامیکی خاک استفاده می‌شود.

میرایی رایلی^۳ مرسوم ترین 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 (۵-۱) به دست می‌آید.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad \text{رابطه (۵-۱)}$$

در این رابطه $[M]$ ماتریس جرم، $[K]$ ماتریس سختی و α و β ضرایب میرایی رایلی هستند که از روابط (۵-۲) و (۵-۳) به دست می‌آید.

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad \text{رابطه (۵-۳)}$$

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

^۱ Von Mises

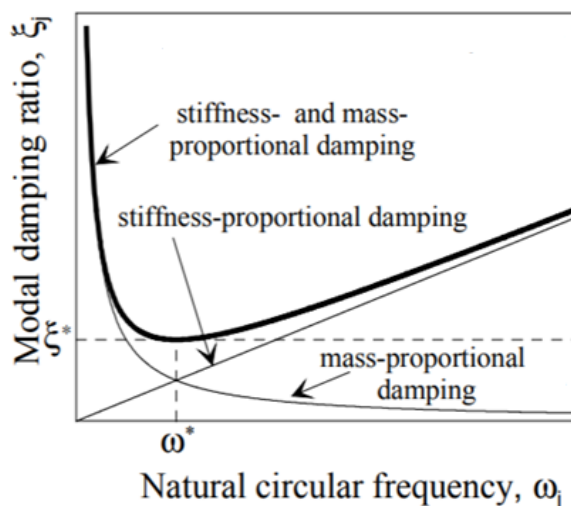
^۲ Hysteresis damping

^۳ Rayleigh Damping

ماتریس جرم صرف نظر شود، ماتریس میرایی به ماتریسی منفرد تبدیل می شود [38] [39]؛ بنابراین داریم:

$$\beta_k = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad \text{رابطه (۴-۵)}$$

در رابطه فوق، ω_0 فرکانس غالب بارگذاری و ξ نسبت میرایی مواد است که ξ معادل ۵٪ در نظر گرفته شده است.



شکل (۵-۷): نمودار میرایی رایلی [38]

فرکانس طبیعی خاک برای هر مود قابل محاسبه است. این مقدار برای مود اول از رابطه (۵-۶) به دست می آید [8].

$$f_s = \frac{V_s}{4H_s} \quad \text{رابطه (۵-۵)}$$

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

برای اعمال میرایی رایلی از دستور رایلی در نرم افزار استفاده شد. این دستور برای اختصاص میرایی به تمام المان و گره های تعریف شده در دامنه مدل به کار می رود.

۵-۴-۳- مدل سازی ریزشمع

برای مدل سازی 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. روش انتگرال گیری پیش فرض در این المان، روش گوس- لژاندر چهار نقطه ای است. همچنین ماده

الاستیک تک محوره^۱ از نوع بتن با مقطع فیبر^۲ 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 Displacement-Based Beam-Column مشابه ریزشمع استفاده شده است. مصالح اختصاص یافته به کلاهک ریزشمع از نوع بتن با رفتار ماده الاستیک تک محوره و با مقطع فیبر مستطیلی می‌باشد و به وسیله قیدهای equalDOF به ریزشمع‌ها به صورت صلب متصل شده است.

۵-۴-۴- مش‌بندی

انتخاب مناسب ابعاد المان‌ها در یک تحلیل عددی به جهت تاثیرگذاری آن بر دقت نتایج حائز اهمیت است. در تحلیل‌های دینامیکی، مش‌بندی می‌بایست به گونه‌ای باشد که موج بتواند در مدل حرکت کند و از یک مش به مش بعدی انتقال یابد. برای این منظور مستقل از نوع نرم افزار، ابعاد مش‌های خاک در راستای حرکت امواج زلزله کمتر از یک هشتم تا یک دهم کوچکترین طول موج در نظر گرفته می‌شود [40]. چنانچه برای محاسبه ابعاد مش بحرانی‌ترین حالت یعنی کوچکترین طول موج یا بیشترین فرکانس مد نظر قرار گیرد ابعاد مش بسیار کوچک خواهد شد، لذا حالت بهینه تعیین ابعاد مش براساس فرکانس غالب زلزله است.

طول موج از رابطه (۵-۶) تعیین می‌گردد.

رابطه (۵-۶)

$$\lambda = \frac{V_s}{f_{max}}$$

در این رابطه λ طول موج مولفه‌ای از امواج زلزله است که دارای بیشترین فرکانس می‌باشد و V_s و f_{max} به ترتیب سرعت موج برشی در مدل و حداکثر فرکانس زلزله می‌باشد. سرعت موج برشی از مشخصات لرزه نگاری زلزله و حداکثر فرکانس زلزله از طیف فوریه دامنه تاریخچه شتاب آن به دست می‌آید.

تقسیم بندی المان‌ها برای خاک در جهت عمود (به استثناء نوک ریزشمع‌ها) ثابت می‌باشد. برای نواحی تمرکز تنش از جمله محل قرارگیری کلاهک و ریزشمع‌ها، مش‌ها متراکم تر و در سایر نواحی به تناسب با تراکم کمتری در نظر گرفته شد. همچنین در طول ریزشمع، مش بندی با تراکم مناسب جهت تحلیل دقیق نیروها و تغییر مکان‌ها انجام گرفت.

^۱Elastic Uniaxial Material

^۲Fiber

۵-۴-۵- شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل در دو حالت استاتیکی و دینامیکی متفاوت است. با توجه به مدل سازی سه بعدی، می بایست برای دو جهت در صفحه (راستاهای x و y) و یک جهت قائم (راستای z) شرایط مرزی تعریف گردد. در حالت تحلیل استاتیکی، عملاً در مرزهای جانبی جابجایی افقی نداریم اما ممکن است بر اثر نشست در راستای قائم، جابجایی وجود داشته باشد. در مرز پایین حرکت در هر دو راستای افقی و قائم محدود شده است.

در حالت تحلیل دینامیکی، برای جلوگیری از خطای تحلیل ناشی از برخورد امواج زلزله به مرزهای مدل و بازگشت آنها به داخل محیط می بایست تمهیداتی به کار گرفته شود. برای این منظور سه راهکار وجود دارد.

الف) ابعاد مدل به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود تا امواج پس از برخورد به مرزها و بازتاب شدن تا رسیدن به سازه مستهلک گردد.

ب) استفاده از مرزهای جاذب^۱ که امواج زلزله را جذب کند.

ج) استفاده از مرزهای آزاد^۲ که امواج از آنها عبور میکند.

به طور کلی استفاده از مرزهای آزاد بهترین گزینه برای تحقق شرایط مرزی مناسب در وجوه کناری مدل در حالت دینامیکی است چرا که از طرفی مشکلات ناشی از افزایش ابعاد مدل و در نتیجه افزایش زمان تحلیل را ندارد و از طرفی عملکرد بهتری در مواجهه با امواج مایل نسبت به مرزهای جاذب دارد. برای تامین شرایط مرز آزاد در وجوه مدل، گره های هم تراز در وجوه راست و چپ مدل در راستای x (جهت اعمال شتاب زلزله) به یکدیگر بسته شدند [41]. کف مدل به عنوان سنگ بستر^۳ در نظر گرفته شده و در سه راستی x, y, z مقید شده و در مرزهای جلو و عقب، حرکت تنها در راستای y محدود شده است. برای در نظر گرفتن اثرات سنگ بستر، از دشیپت ها^۴ با المان طول صفر و مواد تک محوره ویسکوز بر اساس روش لیزمر و کول میر^۵ در راستاهای x و z استفاده شد [41] [42].

^۱Viscous Elements

^۲Free Field

^۳Bedrock

^۴Dashpot

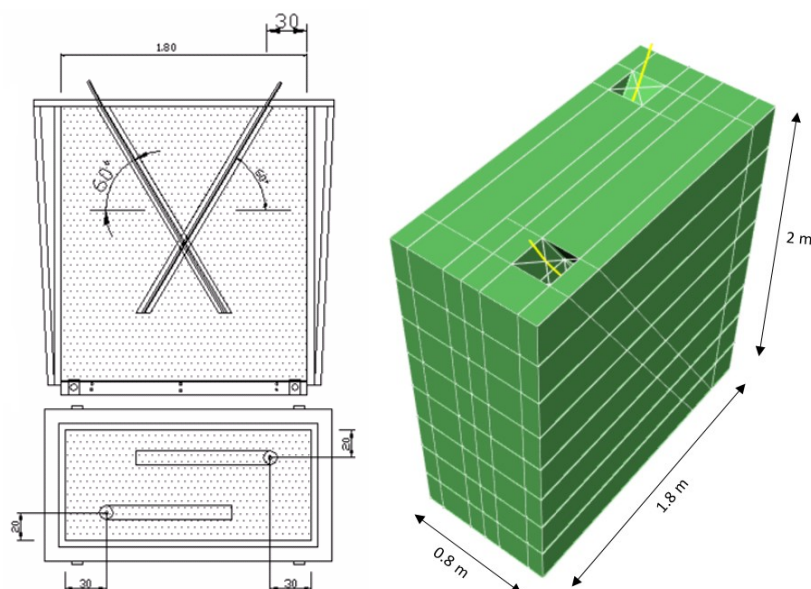
^۵Lysmer & Kuhlemeyer

۵-۵- صحت سنجی

عملکرد مدل نرم افزاری بر اساس مدل میز لرزه منوس^۱ 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 با و بدون تسلیح ریزشمع مایل با زاویه ۳۰ تحت آزمون میزلرزه یک درجه آزادی قرار گرفت. تحریک ورودی دستگاه، یک بار هارمونیک سینوسی در ۲۶ سیکل با فرکانس ۱ Hz و محدوده دامنه $0/4 \pm$ می‌باشد. محفظه مدل‌سازی از جنس لمینت، امکان تغییرشکل‌های برشی خاک را با حداقل اثرات مرزی فراهم کرده است [43].

جدول (۵-۱): مشخصات ماسه ۳۰/۶۰ آکلند- میزلرزه منوس و همکاران

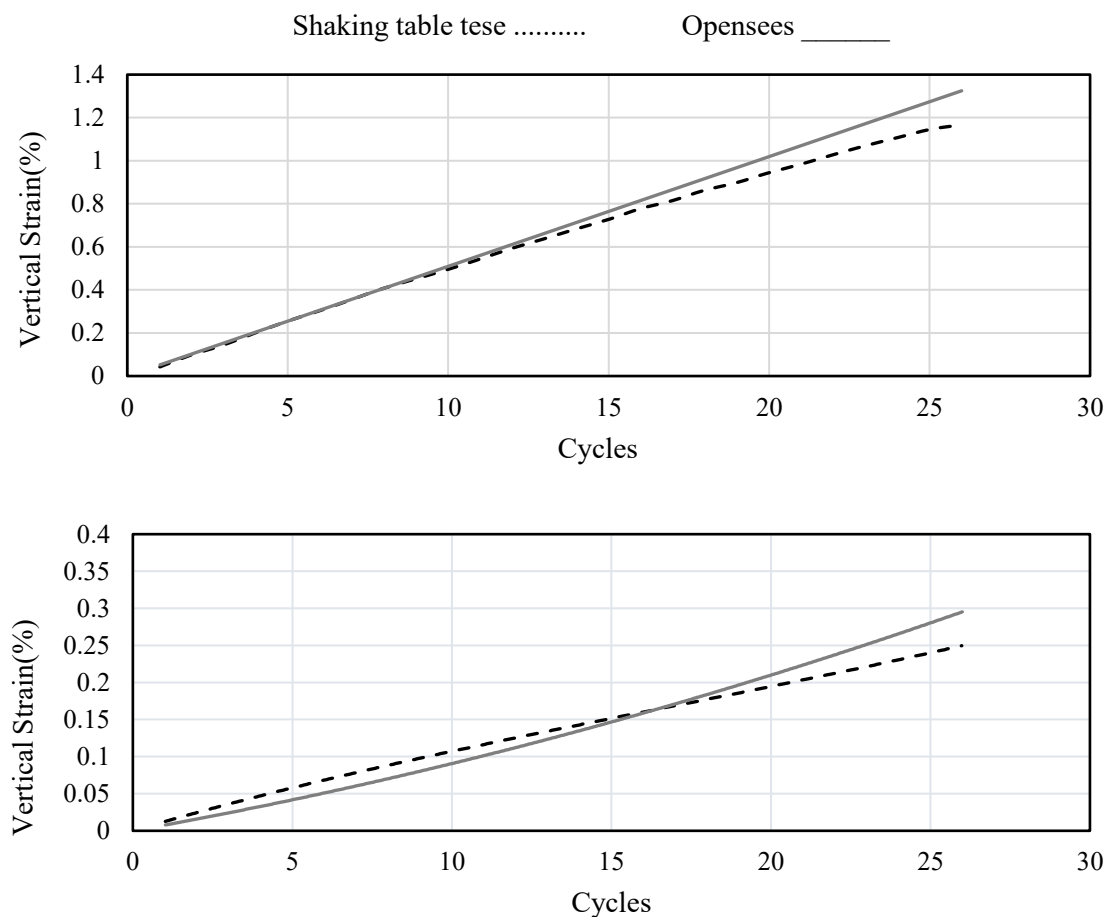
Property	Symbol	Value
Density of Solid Particles	ρ_s	2.65 t/m^3
10% finer	D_{10}	0.30 mm
60% finer	D_{60}	0.45 mm
minimum voids ratio	$e_{\min}$	0.53
maximum voids ratio	$e_{\max}$	0.83
Steady State Friction Angle	ϕ_{ss}	33°



شکل (۵-۸): مدل‌سازی خاک و ریزشمع‌های مایل - آزمایش میزلرزه منوس و همکاران
(راست): مدل عددی در اپنسیس (چپ): مدل فیزیکی در آزمایشگاه

^۱Mc Manus et al.

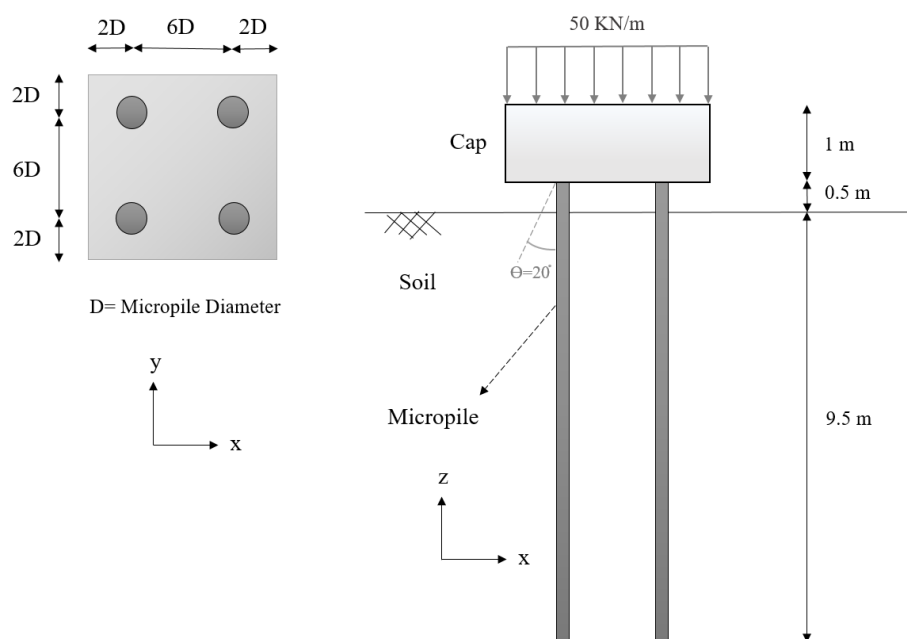
نتایج آزمایش میز لرزه شامل کرنش قائم سطح خاک در هر سیکل برای دو شرایط بدون ریزشمع و تسلیح شده با دو ریزشمع مایل ارائه گردید. شکل (۵-۹)، نتایج کرنش قائم خاک را در هر سیکل بار در آزمایش میز لرزه و مدل سازی عددی مقایسه می کند.



شکل (۵-۹): مقایسه نتایج آزمایش میز لرزه و مدل سازی عددی با نرم افزار اپنسیس برای کرنش قائم خاک در هر سیکل بار در شرایط خاک بدون ریزشمع (بالا) و تسلیح خاک با دو ریزشمع مایل (پایین)

۵-۶- بیان مسئله

هندسۀ مدل بر اساس مفاهیم بیان شده برای دو گروه ریزشمع قائم و ریزشمع مایل تعریف شد. بلوک خاکی به ابعاد $22 \times 12 \times 13$ مشتمل بر ۲۳۴۰ المان هشت گرهی با مشبندی مطابق شکل (۵-۱۱) در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی گروه ریزشمع قائم و مایل از چهار ریزشمع بتنی با مشخصات جدول (۵-۴) استفاده شد. مطابق توضیحات قسمت ۴-۲-۶، زاویه 20° درجه نسبت به محور قائم در راستای X به عنوان زاویه بهینه ریزشمع‌های مایل انتخاب شد. یک کلاهی بتنی مربعی شکل با مشخصات مصالح مشابه ریزشمع‌ها به ابعاد 2×2 متر و ضخامت ۱ متر جهت عملکرد یکپارچه و سطح بارگیر گروه ریزشمع ایجاد گردید. یک بارگذاری خطی استاتیکی معادل ۵۰ کیلونیوتن بر متر به منظور در نظر گرفتن اثر بارهای ثقیل بر روی کلاهی بتنی قرار داده شد. جزئیات هندسی مدل ریزشمع و سرریزشمع در شکل (۵-۱۰) آمده است.



شکل (۵-۱۰): جزئیات مدل‌سازی ریزشمع و کلاهی بتنی

دو نوع مصالح دانه ای و ریزدانه با درصد تراکم متفاوت برای بلوک خاکی در نظر گرفته شد. خاک دانه‌ای شامل ماسه نوادا با دو تراکم متفاوت ($Dr = 0.40$ و $Dr = 0.80$) و خاک چسبنده شامل دو نوع رس نرم و معمولی می‌باشد. مشخصات این خاک‌ها در جداول (۵-۲) و (۵-۳) آمده است.

جدول (۲-۵): مشخصات خاک چسبنده [34]

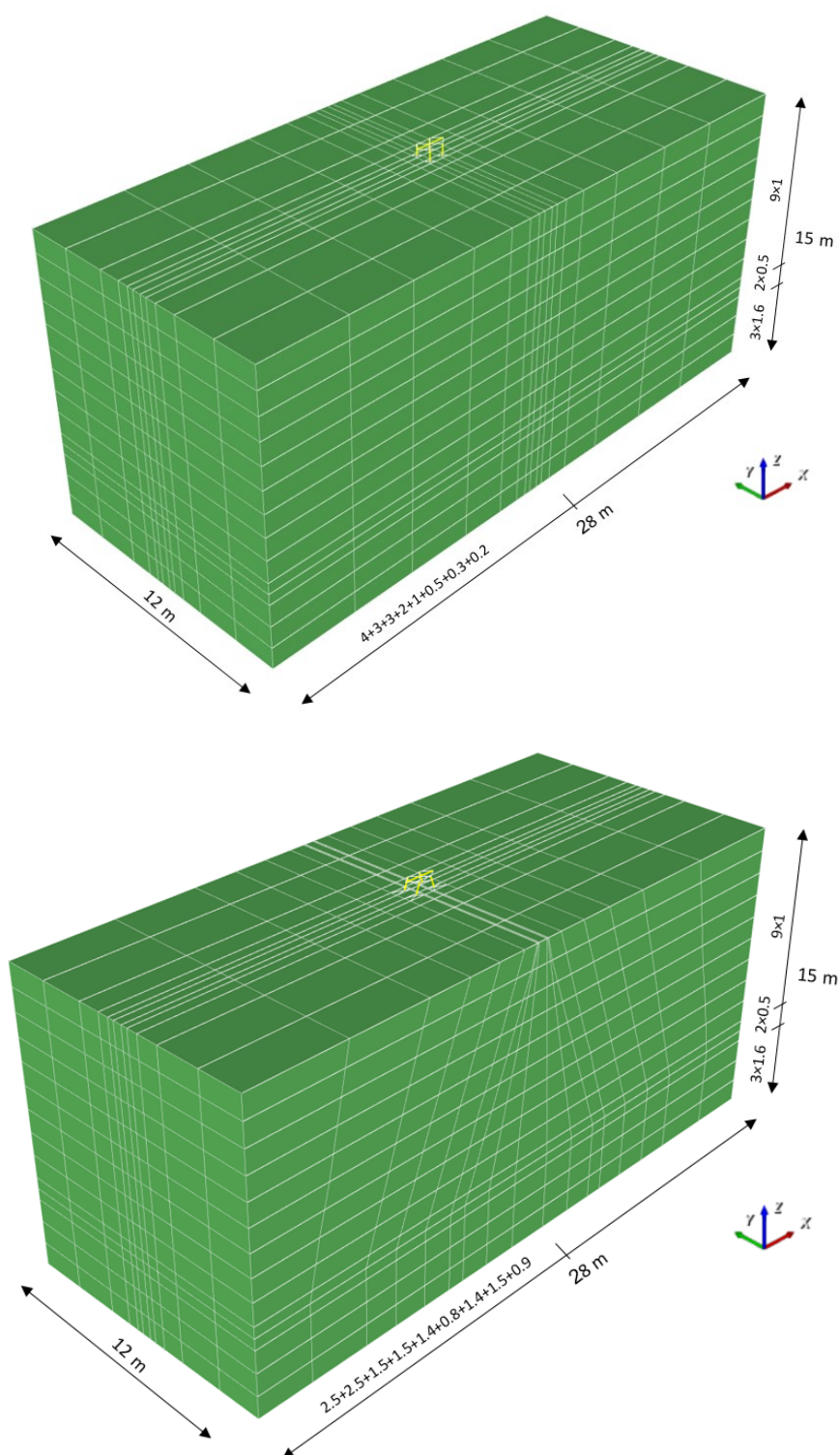
<i>Parameters</i>	<i>Soft Clay</i>	<i>Medium Clay</i>
Saturated mass density ρ (ton/m ³)	1.30	1.50
Reference shear modulus G_r (MPa)	13	60
Reference bulk modulus B_r (MPa)	65	300
Cohesion C (KPa)	18	37
Friction angle ϕ°	0	0
Peak Shear Strain γ_{max}	0.1	0.1
Pressure dependency coefficient	0	0

جدول (۳-۵): مشخصات خاک دانه ای [44]

<i>Parameters</i>	<i>Nevada Sand</i>	
Relative density (%)	40	80
Saturated mass density ρ (ton/m ³)	1.96	2.03
Reference shear modulus G_r (MPa)	46.2	88.4
Reference bulk modulus B_r (MPa)	123.3	236
Friction angle ϕ°	32	36.5
Peak Shear Strain γ_{max}	0.1	0.1
Reference effective confining P_r (KPa)	101	101
Pressure dependency coefficient	0.5	0.5
Phase transformation angle ϕ_{PT}	30	26
Void Ratio	0.73	0.618

جدول (۴-۵): مشخصات ریزشمع

<i>Parameters</i>	<i>Mass Density</i> $\rho(kg/m^3)$	<i>Poison's ratio</i>	<i>modulus of elasticity</i> $E(GPa)$	<i>Diameter</i> $D(m)$
Concrete	2400	0.3	25	0.2



شکل (۵-۱۱): مدل سه بعدی اجزا محدود از سیستم خاک- ریزشمع -سرریزشمع

(بالا): گروه ریزشمع قائم (پایین): گروه ریزشمع مایل

۵-۷- بارگذاری

امواج زلزله با دورشدن از کانون زلزله و گذشتن از لایه های زمین تحت تاثیر تغییر و تحولاتی قرار می گیرند. عوامل مربوط به فاصله ی نقاط از کانون زلزله تحت عنوان «اثر فاصله» و عوامل مربوط به لایه های آبرفتی واقع بر سنگ بستر تحت عنوان «اثر ساختگاه» شناخته می شوند. در انتخاب شتاب نگاشت های مناسب، لازم است خصوصیات ساختگاه و منبع زلزله از نظر بزرگای زلزله، مکانیزم گسلش، سرعت موج برشی، فاصله ساختگاه تا منبع زلزله، زمین شناسی منطقه و شتاب حداکثر مورد توجه قرار گیرد و تا حد امکان این ویژگی ها با خصوصیات ساختگاه موردنظر و زلزله محتمل در آن همسان باشد. با توجه به موضوع پژوهش، دو دسته رکورد دور و نزدیک برای اعمال زلزله به بستر مدل مورد نیاز است. به منظور در نظر گرفتن توامان اثر فاصله، اثر ساختگاه و بزرگای زلزله، در انتخاب شتاب نگاشت های مناسب برای هر دو رکورد دور و نزدیک، زلزله های زیر با بزرگای متناظر هم بر اساس سرعت موج برشی ساختگاه مبتنی بر روش طبقه بندی وردوگ و همکاران^۱ (۲۰۱۸) از مجموعه رکوردهای پیشنهادی دستورالعمل Femma-P695 به شرح زیر انتخاب شد [45]. جداول (۵-۵) و (۵-۶) به ترتیب مشخصات گروه زلزله های دور و زلزله های نزدیک انتخاب شده را نمایش می دهد.

الف) برای خاک ماسه ای سست و خاک رسی نرم ($V_{s30} < 300 \text{ m/s}$):

- امپریال ولی ایالات متحده: زلزله دور ID=1، زلزله نزدیک ID=7
- کجایلی ترکیه: زلزله دور ID=2، زلزله نزدیک ID=8
- چی چی تایوان زلزله دور ID=3، زلزله نزدیک ID=9

ب) برای خاک ماسه ای متراکم و خاک رسی متوسط ($V_{s30} > 300 \text{ m/s}$):

- نورث ریچ ایالات متحده: زلزله دور ID=4، زلزله نزدیک ID=10
- لوماپریتا ایالات متحده: زلزله دور ID=5، زلزله نزدیک ID=11
- لندرز ایالات متحده زلزله دور ID=6، زلزله نزدیک ID=12

برای در نظر گرفتن اثرات مهم زلزله های نزدیک گسل نظیر جهت پذیری پیش رونده و تغییر مکان ماندگار و رفع خطای اپنسیس در تبدیل رکورد شتاب با استفاده از روش انتگرال گیری دوزنقه ای، از رکوردهای جابجایی (یا سرعت) به عنوان تحریک ورودی سیستم استفاده می شود. [35]

^۱Verdugo et al.

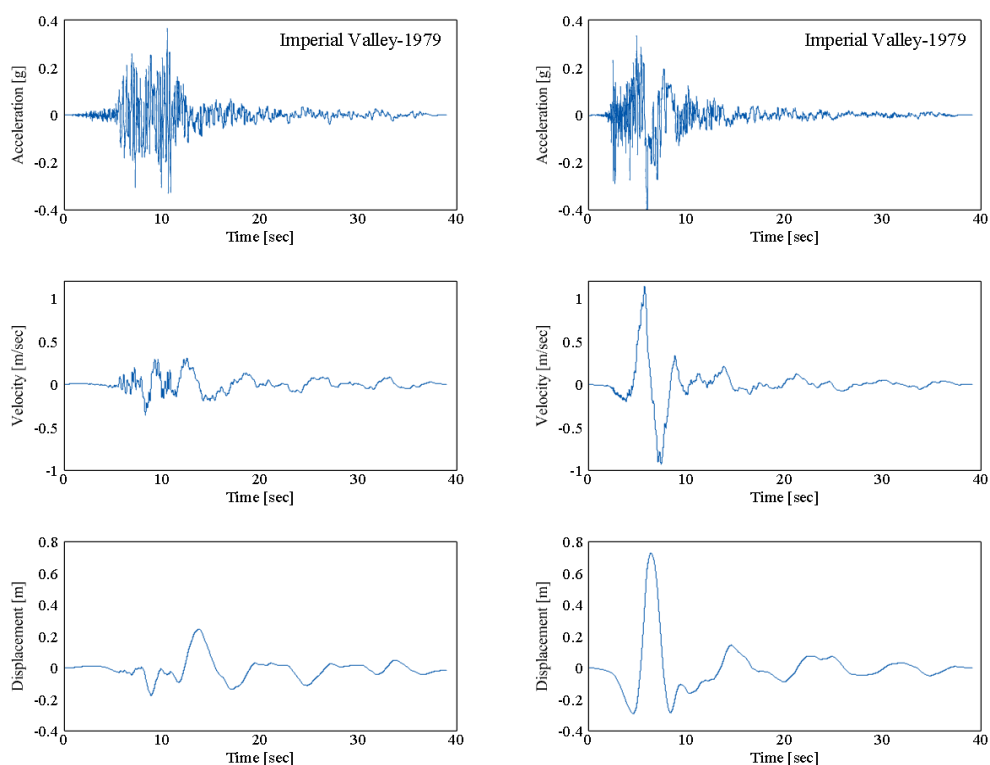
بار زلزله در راستای X به مدل اعمال می‌شود. به دلیل ناچیز بودن تغییرشکل‌ها در جهت قائم در مقایسه با تغییرشکل‌ها در جهت افقی از اعمال شتاب زلزله در جهت قائم صرف نظر شده است. نگاشت‌های شتاب دو گروه زلزله انتخاب شده در اشکال (۵-۱۰) الف و ب آمده است.

جدول (۵-۵): مشخصات زلزله‌های دور از گسل - Femma P695 [46]

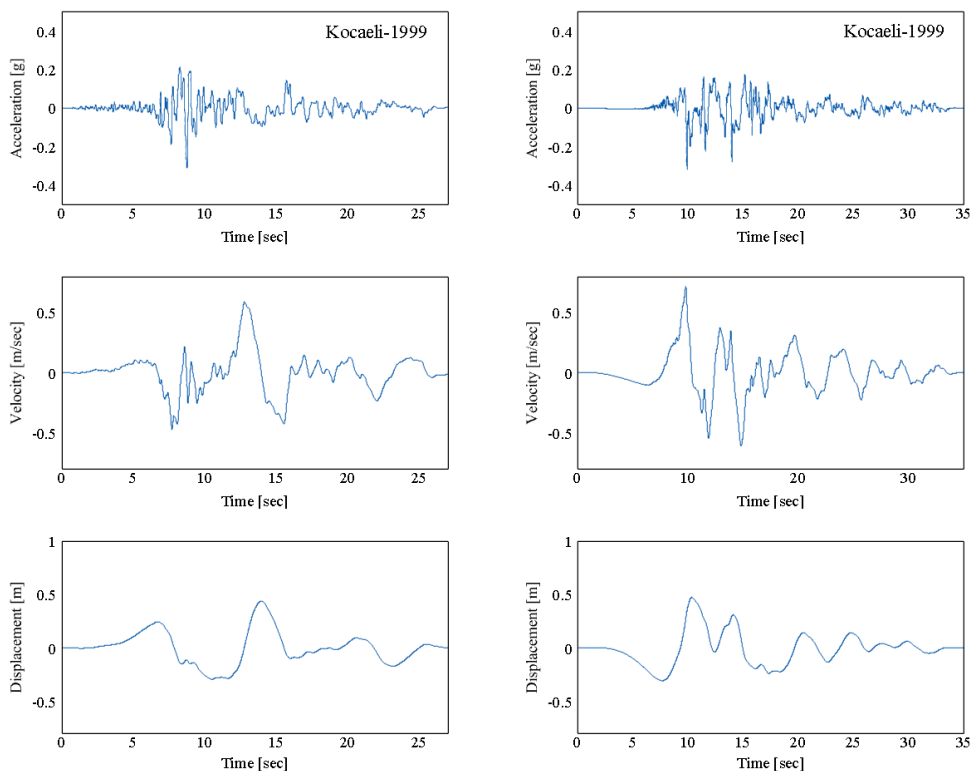
Far-Field Record Set							
ID No.	Earthquake				Recording Station	Site Data	
	Name	Year	M	PGA(g)		Vs30(m/s)	Distance(km)
1	Imperial Valley, USA	1979	6.5	0.38	El Centro Array #11	196	13.5
2	Kocaeli, Turkey	1999	7.1	0.36	Duzce	276	15.4
3	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	0.44	CHY101	259	15.5
4	Northridge, USA	1994	6.7	0.52	Beverly Hills - Mulhol	356	17.2
5	Loma Prieta	1989	6.9	0.56	Gilroy Array#3	350	12.8
6	Landers, USA	1992	7.3	0.24	Yermo Fire Station	354	23.8

جدول (۵-۶): مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل - Femma P695 [46]

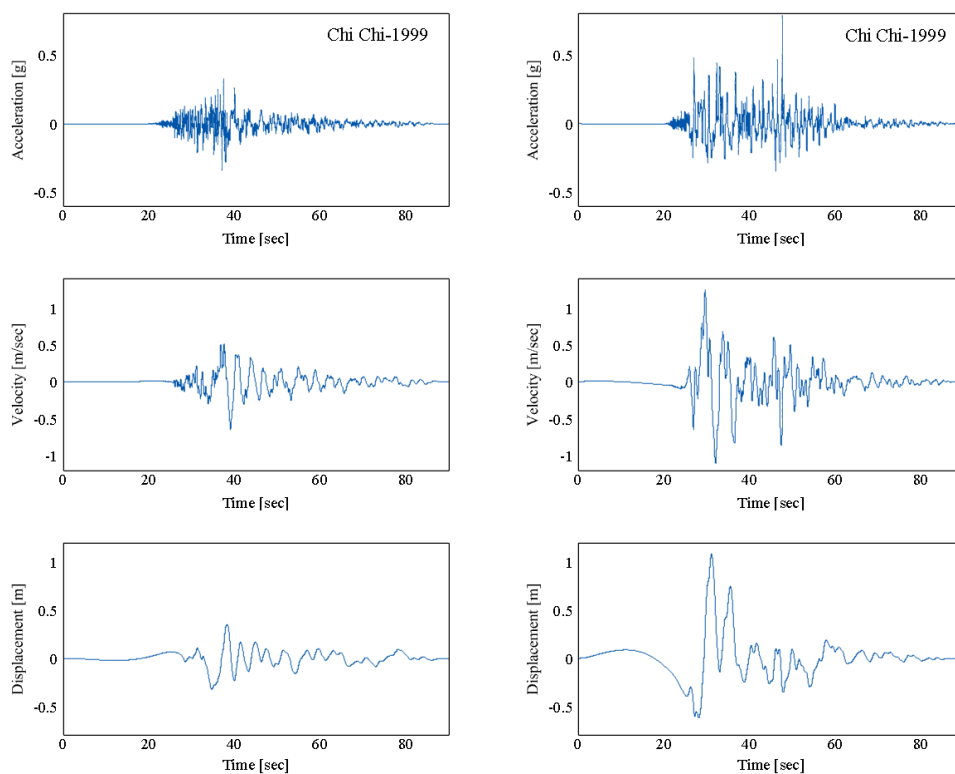
Near-Field Record Set							
ID No.	Earthquake				Recording Station	Site Data	
	Name	Year	M	PGA(g)		Vs30(m/s)	Distance(km)
7	Imperial Valley, USA	1979	6.5	0.44	El Centro Array #6	203	3.5
8	Kocaeli, Turkey	1999	7.1	0.31	Yarimca	297	5.3
9	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.6	0.82	TCU065	306	6.7
10	Northridge, USA	1994	6.7	0.73	Sylmar - Olive View	441	5.3
11	Loma Prieta	1989	6.9	0.64	Corralitos	462	3.9
12	Landers, USA	1992	7.3	0.79	Lucerne	685	3.7



شکل (۵-۱۲): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله امپریال ولی
چپ: دور از گسل راست: نزدیک به گسل

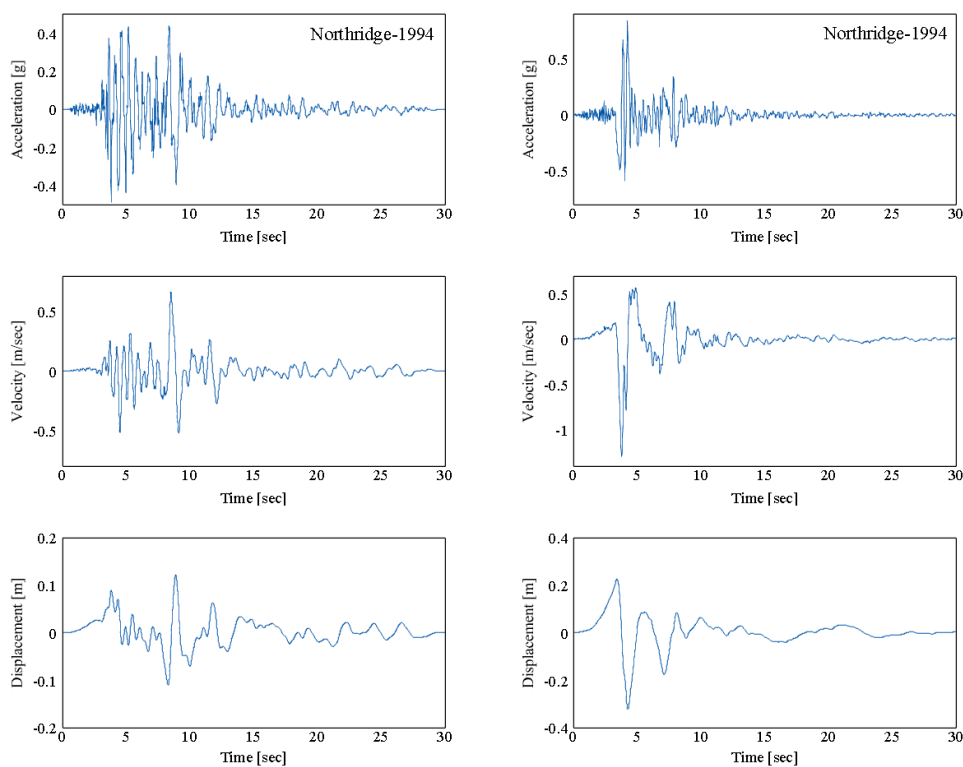


شکل (۵-۱۳): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله کجاییلی
چپ: دور از گسل راست: نزدیک به گسل



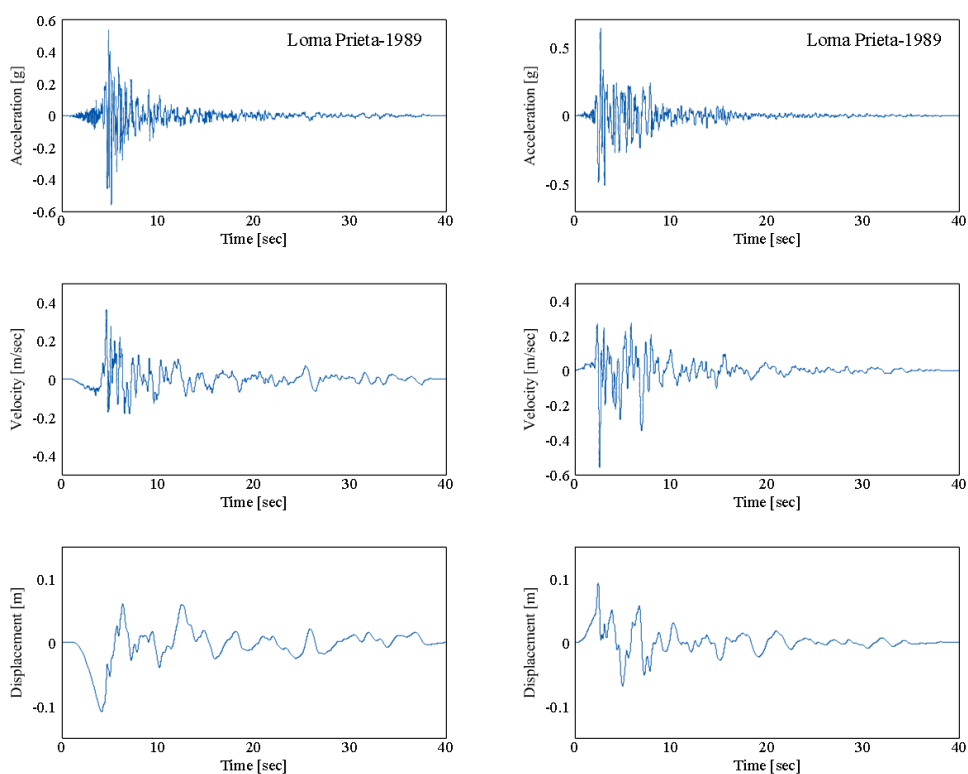
شکل (۵-۱۴): نگاهت‌های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله چی چی

چپ: دور از گسل راست: نزدیک به گسل

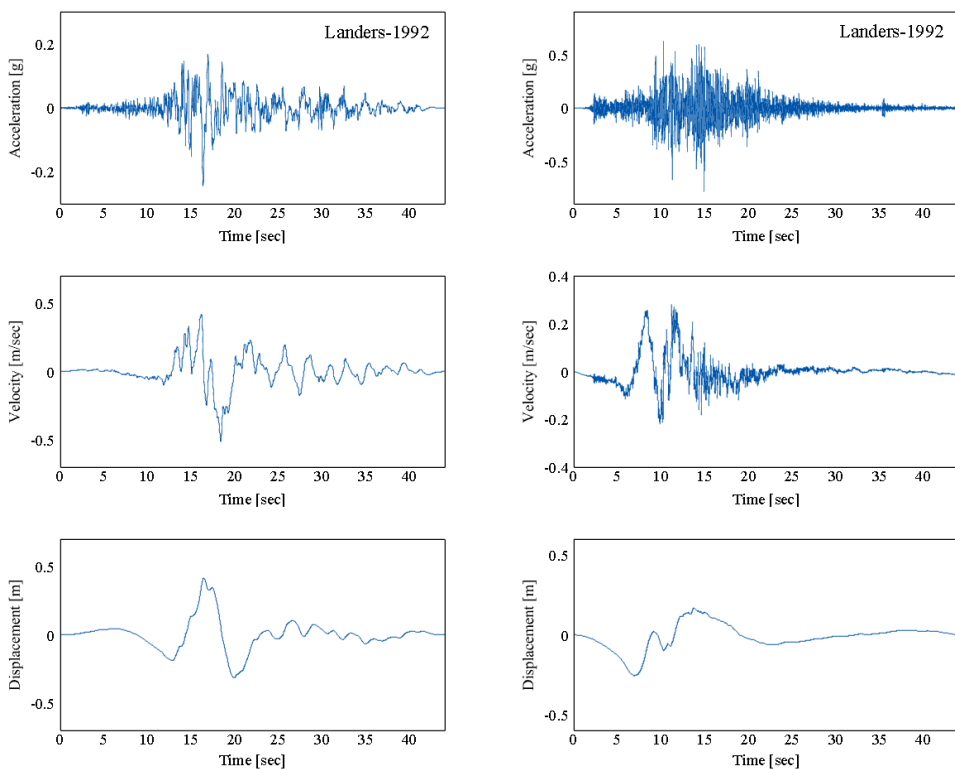


شکل (۵-۱۵): نگاهت‌های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله نورتریج

چپ: دور از گسل راست: نزدیک به گسل



شکل (۵-۱۶): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله لوماپریتا
چپ: دور از گسل راست: نزدیک به گسل



شکل (۵-۱۷): نگاشت های شتاب، سرعت و جابجایی زلزله لندرز
الف: دور از گسل ب: نزدیک به گسل

۵-۸- روش تحلیل

تحلیل اجزاء محدود مدل درسه مرحله زیر انجام شده است:

(۱) تحلیل استاتیکی بلوک خاک تحت اثر وزن خودش: در اولین گام به منظور شبیه‌سازی شرایط تنش برجا 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 - ریزش‌مخ تحت اثر بارهای ثقلی: این مرحله شامل حفاری خاک در محل نصب ریزش‌مخ‌ها با حذف المان‌های خاکی این ناحیه، مدل‌سازی ریزش‌مخ‌ها، سرریزش‌مخ و درنهایت بارگذاری استاتیکی بر روی گروه ریزش‌مخ برای در نظر گرفتن اثر بارهای ثقلی (زنده و مرده) است. مجموعه فوق تحت اثر بارگذاری ثقلی، تحلیل استاتیکی می‌شود.

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

برای در نظر گرفتن اثر پارامترهای مختلف در زمان تحلیل و امکان نتیجه‌گیری و مقایسه اصولی پس از تحلیل، تعریف یک روند و طبقه‌بندی کارآمد و جامع برای تحلیل سیستم حائز اهمیت است. برای این منظور با توجه به نوع ساختگاه (خاک دانه‌ای/چسبیده)، زلزله ورودی (دور از گسل/نزدیک گسل) و نوع تسلیح (گروه ریزش‌مخ‌های قائم/مایل) مدل خاک-ریزش‌مخ - سرریزش‌مخ در هشت گروه مختلف مطابق دسته‌بندی جدول (۵-۷) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

جدول (۵-۷): دسته‌بندی مدل خاک-ریزش‌مخ برای تحلیل گروه ریزش‌مخ قائم و مایل

گروه تحلیل	ساختگاه	زلزله	
		نزدیک	دور
۱	Nevada Sand (Dr=40%)	Imperial Valley(El Centro#6) Chi-Chi (TCU065) Kocaeli (Yarimca)	Imperial Valley(El Centro#11) Chi-Chi (CHY101) Kocaeli (Duzce)
۲	Nevada Sand (Dr=80%)	Northridge(Sylmar) Loma Prieta(Corralitos) Landers(Lucerne)	Northridge(Beverly Hills) Loma Prieta(Gilroy Array#3) Landers(Yermo Fire)
۳	Soft Clay	Imperial Valley(El Centro#6) Chi-Chi (TCU065) Kocaeli (Yarimca)	Imperial Valley(El Centro#11) Chi-Chi (CHY101) Kocaeli (Duzce)
۴	Medium Clay	Northridge(Sylmar) Loma Prieta(Corralitos) Landers(Lucerne)	Northridge(Beverly Hills) Loma Prieta(Gilroy Array#3) Landers(Yermo Fire)

۵-۹- بررسی عملکرد سیستم در خاک دانه‌ای تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک

۵-۹-۱- تغییر مکان افقی گروه ریزشمع

شکل (۵-۱۸) تاریخچه تغییرمکان افقی در محل اتصال ریزشمع‌ها به سرریزشمع را نشان می‌دهد. بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک امپریال ولی، کجایی و چی چی برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول (۵-۸) و بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک نورثریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول (۵-۹) آمده است.

جدول (۵-۸): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Maximum Horizontal Displacement(m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	0.239	0.719	0.424	0.457	0.362	1.133
Inclined Micropiles	0.231	0.696	0.413	0.439	0.332	1.053

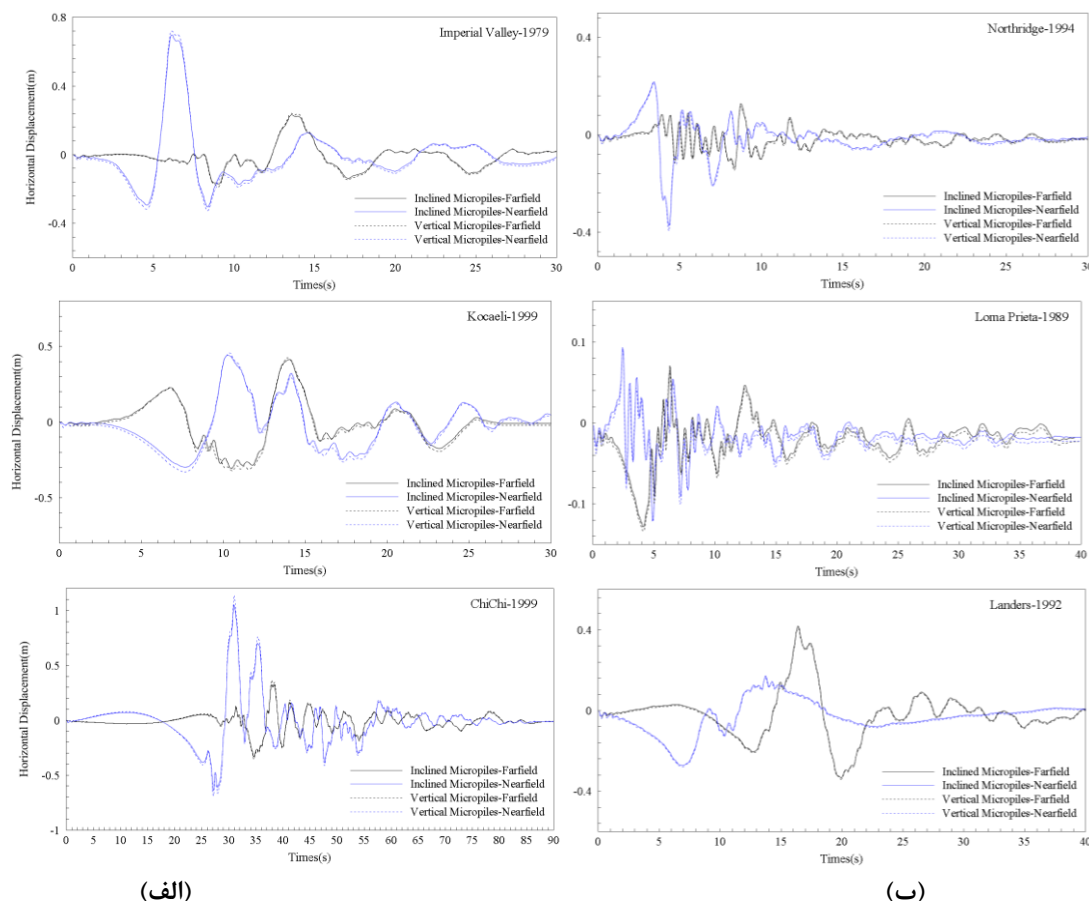
جدول (۵-۹): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Maximum Horizontal Displacement(m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	0.146	0.396	0.134	0.121	0.415	0.281
Inclined Micropiles	0.136	0.375	0.128	0.122	0.419	0.274

میانگین بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک ماسه‌ای سست ۲/۲۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. نسبت این متغیرها در بیشترین مقدار برای زلزله چی چی برابر ۳/۱۳ و در کمترین مقدار برای زلزله کجایی برابر ۱/۰۸ است. به طور متوسط بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک ماسه‌ای سست ۲/۲۴ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است که مشابه این نسبت برای گروه ریزشمع قائم است. این نسبت در بیشترین مقدار برای زلزله چی چی برابر ۳/۱۷ و در کمترین حالت برای زلزله کجایی برابر ۱/۰۶ است.

نتایج برای ساختگاه دانه‌ای متراکم نشان می‌دهد، بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک ماسه‌ای متراکم ۱/۱۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. این نسبت در بیشترین مقدار برای زلزله نورثریج برابر ۲/۷۱ و در کمترین حالت برای زلزله لندرز برابر ۰/۶۸ است. به طور متوسط بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک

ماسه‌ای متراکم ۱/۱۳ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. این نسبت در بیشترین مقدار برای زلزله نورث‌ریج برابر ۲/۷۶ و در کمترین حالت برای زلزله لندرز برابر ۰/۶۵ است.



(الف)

(ب)

شکل (۵-۱۸): تاریخچه تغییرمکان افقی گروه ریزشمع
(الف): ساختگاه دانه‌ای سست (ب): ساختگاه دانه‌ای متراکم

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

(۱) نتایج بیانگر اثر قابل توجه زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییرمکان جانبی در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل نسبت به زلزله‌های دور در ساختگاه دانه‌ای سست است. افزایش تغییرمکان جانبی در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک ماسه‌ای سست به ترتیب ۱۲۵٪ و ۱۲۴٪ و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک ماسه‌ای متراکم به ترتیب ۱۵٪ و ۱۳٪ می‌باشد.

۲) با وجود ساختگاه دانه‌ای متراکم، علی رغم اثر زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییرمکان 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 تغییرمکان جانبی در خاک دانه‌ای سست نسبت به خاک دانه‌ای متراکم برای گروه 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 ساختگاه متراکم است، نقش کاهنده بر تاثیر رکوردهای نزدیک گسل در افزایش تغییرمکان جانبی گروه ریزشمع دارد.

۳) در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم در ساختگاه دانه‌ای سست اندکی بهتر است و گروه ریزشمع مایل موجب کاهش مقدار بیشینه تغییرمکان افقی در سرریزشمع شده است. این بهبود عملکرد در زلزله‌های دور به طور متوسط ۲۳٪/۵ و در زلزله‌های نزدیک ۴۹٪/۵ است. برخلاف ساختگاه دانه‌ای سست، عملکرد گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای متراکم تفاوت قابل ملاحظه‌ای با گروه ریزشمع قائم ندارد و هر دو مدل تسلیح، کارکرد یکسانی در کنترل تغییرمکان جانبی ناشی از رکوردهای دور و نزدیک دارند.

۵-۹-۲- تغییرات شتاب گروه ریزشمع

شکل (۵-۱۹) تاریخچه شتاب سیستم در محل اتصال ریزشمع‌ها به سرریزشمع را نشان می‌دهد. بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک امپریال ولی، کجایی و چی چی برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول (۵-۱۰) و بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک نورثریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول (۵-۱۱) آمده است.

جدول (۵-۱۰): بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Maximum Acceleration (g)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	0.296	0.589	0.571	0.496	0.501	0.756
Inclined Micropiles	0.254	0.541	0.503	0.395	0.510	0.732

جدول (۵-۱۱): بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Maximum Acceleration (g)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	1.487	1.855	0.791	1.377	0.416	0.439
Inclined Micropiles	1.425	1.478	0.737	1.180	0.392	0.431

بررسی خروجی تحلیل نشان می‌دهد، میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در خاک ماسه‌ای سست در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور $34/65\%$ افزایش یافته است. نسبت این دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله امپریال ولی برابر $1/98$ و در کمترین حالت برای زلزله کجایی برابر $0/87$ است. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک دانه‌ای سست در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور $32/70\%$ افزایش را نشان می‌دهد. نسبت این دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله امپریال ولی برابر $2/13$ و در کمترین حالت برای زلزله کجایی برابر $0/79$ است.

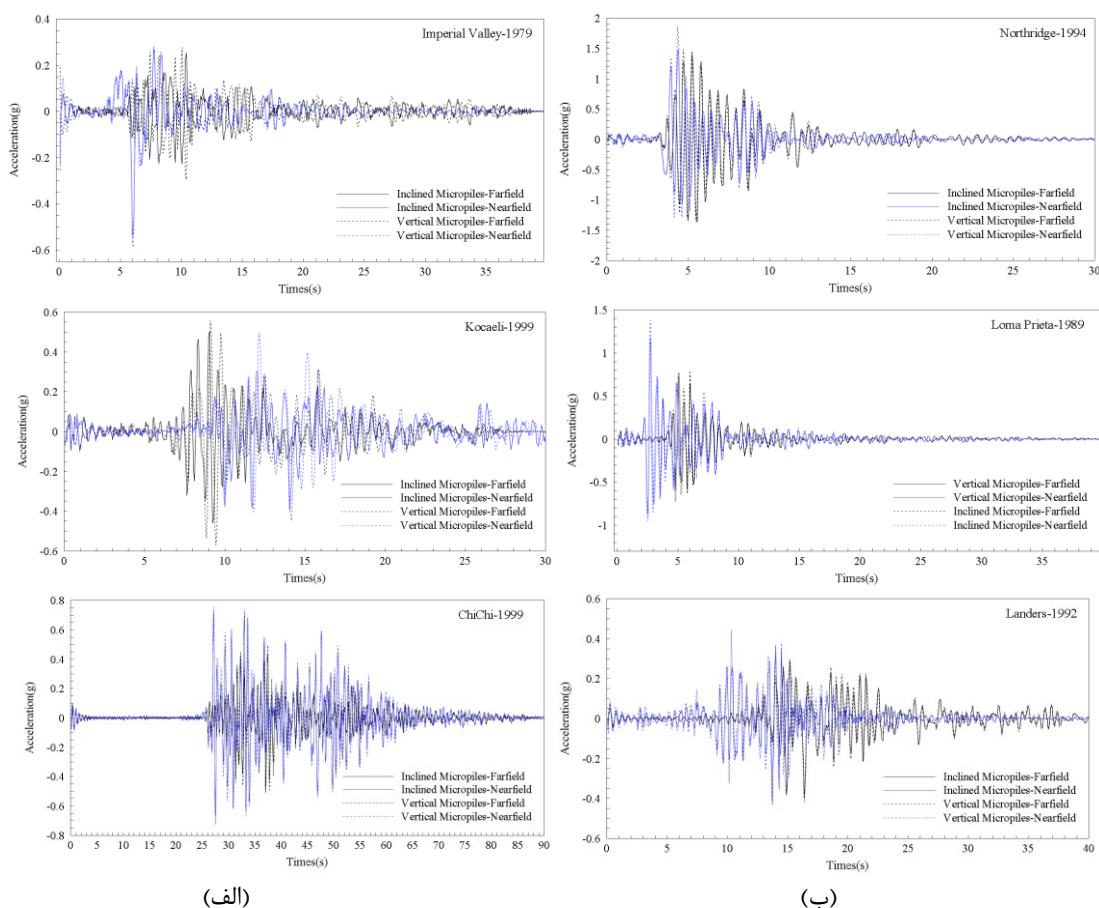
در ساختگاه دانه‌ای متراکم، میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور $35/85\%$ افزایش را نشان می‌دهد. نسبت این دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله لوماپریتا برابر $1/75$ و در کمترین حالت برای زلزله لندرز برابر $1/06$ است. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک ماسه‌ای متراکم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور $21/18\%$ افزایش را نشان می‌دهد. نسبت این دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله لوماپریتا برابر $1/60$ و در کمترین حالت برای زلزله نورتریج برابر $1/04$ است.

مقایسه نتایج به دست آمده از شتاب سرریزشمع با مقادیر PGA در جداول (۵-۵) و (۵-۶) نشان می‌دهد، در ساختگاه دانه‌ای سست برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور به طور میانگین $16/92\%$ و $8/20\%$ و در زلزله‌های نزدیک به طور میانگین $18/07\%$ و $7/69\%$ 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 $113/80\%$ و $102/38\%$ و در زلزله‌های نزدیک به طور میانگین $103/33\%$ و $71/66\%$ 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 هردو ساختگاه سست و متراکم قابل توجه بوده و می‌بایست اثر این رکوردها در طراحی سیستم خاک-ریزشمع-کلاهیک دیده شود. افزایش شتاب در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک ماسه‌ای سست به ترتیب 35% و 33% و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک ماسه‌ای متراکم به ترتیب 36% و 21% می‌باشد.

۲) شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختمان متراکم و در زلزله های نزدیک اعداد بزرگتری را ثبت نمود، این امر با توجه به شتاب ورودی بزرگتر در این زلزله ها منطقی به نظر می رسد و موید نتایج پژوهش های گذشته از جمله مطالعه عددی وانگ و همکاران (۲۰۰۹) و آزمایش میز لرزه جلیلیان و همکاران (۲۰۱۸) در افزایش شتاب سیستم ناشی از افزایش شتاب ورودی است.



شکل (۵-۱۹): تاریخچه شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل
الف: ساختمان دانه ای سست ب: ساختمان دانه ای متراکم

۳) برای گروه ریزشمع مایل، نسبت شتاب بیشینه در زلزله های نزدیک به زلزله های دور در ساختمان دانه ای سست مقدار بزرگتری است. به عبارت دیگر برای این نوع تسلیح، رکوردهای نزدیک گسل در خاک ماسه ای سست اثرگذاری بیشتری در افزایش شتاب سرریزشمع در مقایسه با رکوردهای دور زلزله های خود دارد. این اثرگذاری ۱۲٪ بیش از مقدار معادل آن در خاک ماسه ای متراکم است در حالی که در گروه ریزشمع قائم این اثر ناچیز است. به نظر می رسد، این افزایش بیش از تاثیر ساختمان ناشی از عملکرد گروه ریزشمع مایل در کاهش شتاب سیستم است.

۴) درصد بزرگنمایی شتاب در ساختگاه متراکم و ریزش‌مخ قائم بیشتر از درصد مشابه در ساختگاه سست و ریزش‌مخ مایل است. ممکن است نزدیکی مقادیر فرکانس طبیعی ساختگاه متراکم و سنگ بستر، باعث شده خاک دانه‌ای متراکم دارای تابع تقویت بزرگتری نسبت به خاک دانه‌ای سست باشد. نکته حائز اهمیت آن است که علی‌رغم وجود شتاب‌های بزرگتر در ساختگاه متراکم، عملکرد گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در کنترل تغییرمکان جانبی، بهتر بوده است. به نظر می‌رسد، تقویت مقاومت اصطکاکی جدار ریزش‌مخ‌ها در خاک ماسه‌ای متراکم عامل این بهبود عملکرد باشد.

۵) در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزش‌مخ مایل در مقایسه با گروه ریزش‌مخ قائم در کاهش مقدار بیشینه شتاب در سرریزش‌مخ بهتر می‌باشد. این بهبود عملکرد برای ساختگاه دانه‌ای سست در زلزله‌های دور و نزدیک به طور متوسط $7/5\%$ و $8/8\%$ است و برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در زلزله‌های دور و نزدیک به طور میانگین $4/5\%$ و $15/6\%$ می‌باشد.

۵-۹-۳- پاسخ نیروها در گروه ریزش‌مخ

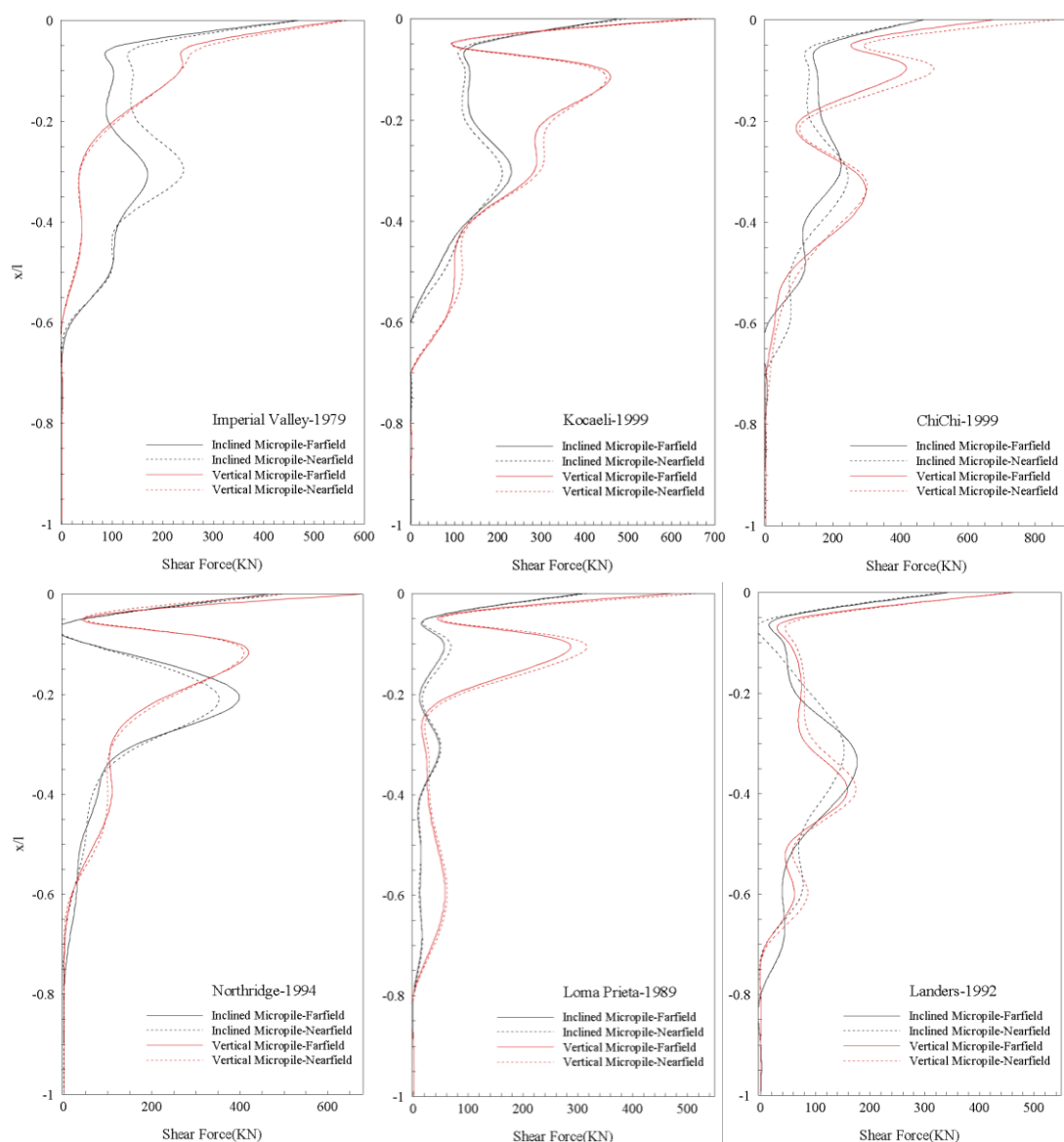
منحنی تغییرات نیروی برشی در امتداد طول ریزش‌مخ در خاک دانه‌ای سست و متراکم در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است. بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک امپریال ولی، کجایی و چی چی برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول (۵-۱۲) و بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک نورث‌ریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول (۵-۱۳) آمده است.

جدول (۵-۱۲): بیشینه نیروی برشی گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Maximum Shear Force(KN)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	556.06	565.58	648.88	668.58	676.33	857.37
Inclined Micropiles	468.56	470.46	477.95	496.14	467.15	470.58

جدول (۵-۱۳): بیشینه نیروی برشی گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Maximum Shear Force(KN)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	497.88	675.78	471.09	515.93	463.24	456.99
Inclined Micropiles	464.11	495.96	305.98	316.72	344.19	331.33



شکل (۵-۲۰): نمودار نیروی برشی در طول ریزشمع قائم و مایل
بالا: ساختگاه دانه ای سست پایین: ساختگاه دانه ای متراکم

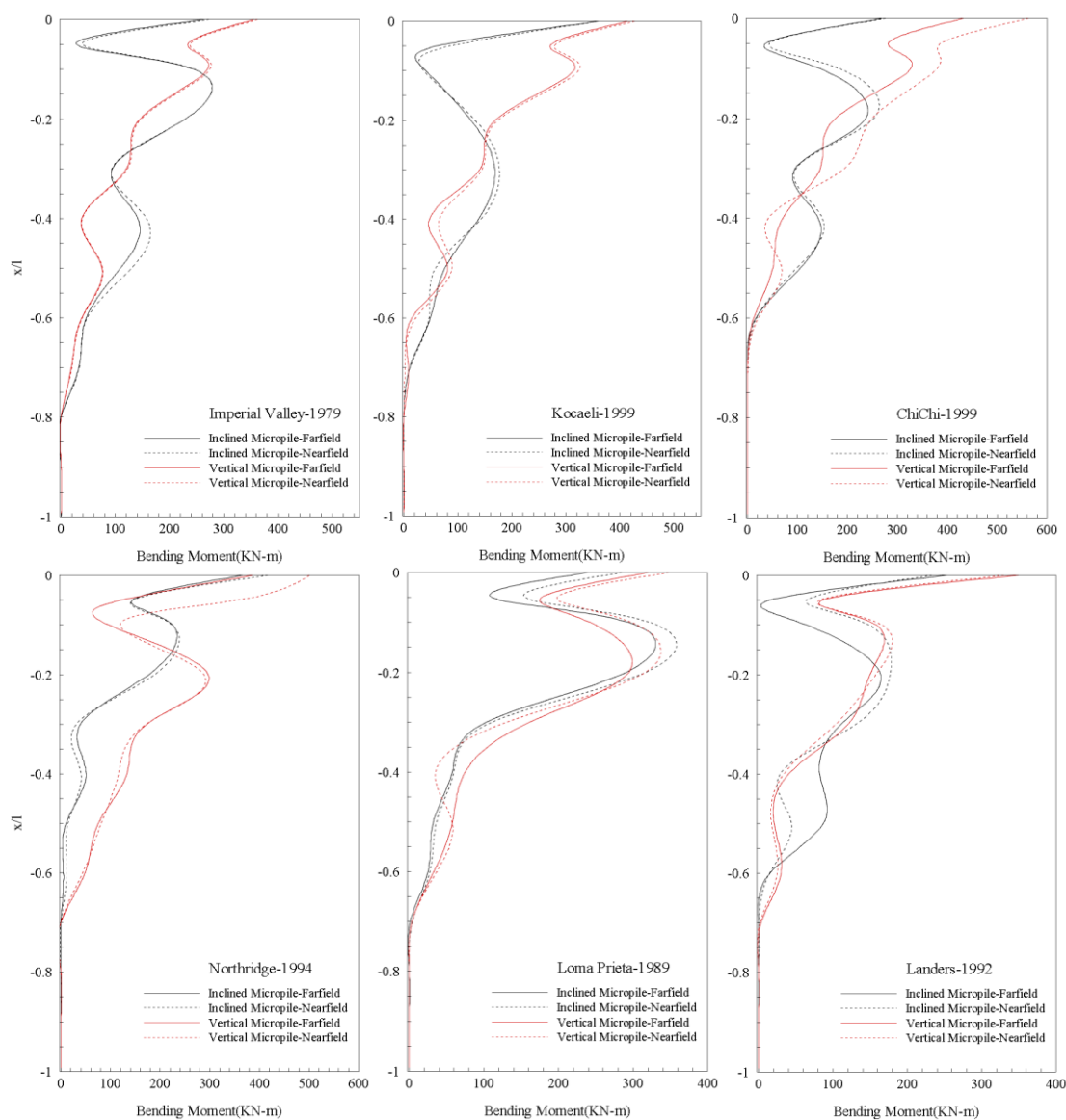
همچنین منحنی تغییرات نیروی خمشی در امتداد طول ریزشمع در خاک دانه‌ای سست و متراکم در شکل (۵-۲۱) نشان داده شده است. بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک امپریال ولی، کجایی و چی چی برای ساختگاه دانه‌ای سست در جدول (۵-۱۴) و بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک نورث ریج، لوما پریتا و لندرز برای ساختگاه دانه‌ای متراکم در جدول (۵-۱۵) آمده است.

جدول (۵-۱۴): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای سست

Maximum Bending Moment (KN-m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	356.14	362.21	415.25	427.77	432.71	562.49
Inclined Micropiles	262.16	273.07	360.71	359.93	270.29	276.82

جدول (۵-۱۵): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک دانه‌ای متراکم

Maximum Bending Moment (KN-m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	387.04	501.48	320.95	348.16	350.08	330.59
Inclined Micropiles	366.73	417.24	239.75	285.49	253.56	233.19



شکل (۵-۲۱): نمودار نیروی خمشی در طول ریزشمع قائم و مایل
(بالا): ساختگاه دانه‌ای سست (پایین): ساختگاه دانه‌ای متراکم

نتایج حاصل از بررسی پاسخ نیروهای گروه ریزشمع قائم و مایل در نکات زیر قابل ارائه است:

(۱) ماکزیمم مقدار نیروی برشی و خمشی در اثر همه زلزله های دور و نزدیک در محل اتصال ریزشمع به سرریزشمع (کلاهک) مشاهده می شود و در تمام زلزله ها تغییرات نیروی برشی در عمق $0.6 < \frac{x}{l}$ و تغییرات لنگر خمشی در عمق $0.7 < \frac{x}{l}$ قابل ملاحظه است.

(۲) در ساختگاه دانه ای سست، رکورد زلزله های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین ۱۱/۱۸٪ برای نیروی برشی و ۱۲/۳۲٪ برای نیروی خمشی می باشد. همچنین افزایش نیروی برشی و خمشی در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل ناچیز است.

(۳) در ساختگاه دانه ای سست در هر دو گروه زلزله های 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 زلزله های دور به طور متوسط ۲۴/۸۶٪ و در زلزله های نزدیک ۳۱/۲۹٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله های دور به طور متوسط ۲۵/۸۲٪ و در زلزله های نزدیک ۳۲/۷۳٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است.

(۴) در ساختگاه دانه ای متراکم، رکورد زلزله های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین ۱۵/۱۲٪ برای نیروی برشی و ۱۱/۵۵٪ برای نیروی خمشی می باشد. همچنین افزایش نیروهای ریزشمع در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل ناچیز است.

(۵) در ساختگاه دانه ای متراکم در هر دو گروه زلزله های 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 زلزله های دور به طور متوسط ۲۲/۲۰٪ و در زلزله های نزدیک ۳۰/۶۱٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله های دور به طور متوسط ۱۸/۷۲٪ و در زلزله های نزدیک ۲۰/۷۰٪ نسبت به گروه ریزشمع قائم است.

(۶) نتایج به طور کلی نشان می دهد، پاسخ نیروهای ریزشمع تحت تاثیر شیب گروه ریزشمع است و نوع ساختگاه تاثیر کمتری در مقدار نیروهای ریزشمع دارد. اثر مثبت زاویه تمایل گروه ریزشمع بر کنترل نیروهای داخلی موید نتایج پژوهش های گذشته در این زمینه است [19] [20].

۷) آنچه از بررسی موردی پاسخ نیروهای ریزش‌مخ (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 ریزش‌مخ‌ها است. این اثر ممکن است در برخی زلزله‌ها مانند زلزله امپریال ولی یا لندرز تقریباً مشابه رکورد دور باشد و در برخی زلزله‌ها مانند زلزله چی‌چی یا نورث‌ریج موجب تفاوت قابل ملاحظه در نتایج شود.

۵-۹-۴- تغییرات تنش و کرنش سطحی خاک

جداول (۵-۱۶) و (۵-۱۷)، نتایج تنش و کرنش سطحی خاک در محل قرارگیری سرریزش‌مخ را در دو ساختگاه دانه‌ای سست و متراکم نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر بیشینه تنش نرمال (σ_{xx})، تنش برشی (τ_{xy})، کرنش نرمال (ϵ_{xx}) و کرنش برشی (γ_{xy}) برای رکوردهای دور و نزدیک در گروه ریزش‌مخ قائم و مایل گزارش شده است. مقادیر تنش بر حسب کیلونیوتن بر متر مربع می‌باشد.

جدول (۵-۱۶): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه دانه‌ای سست

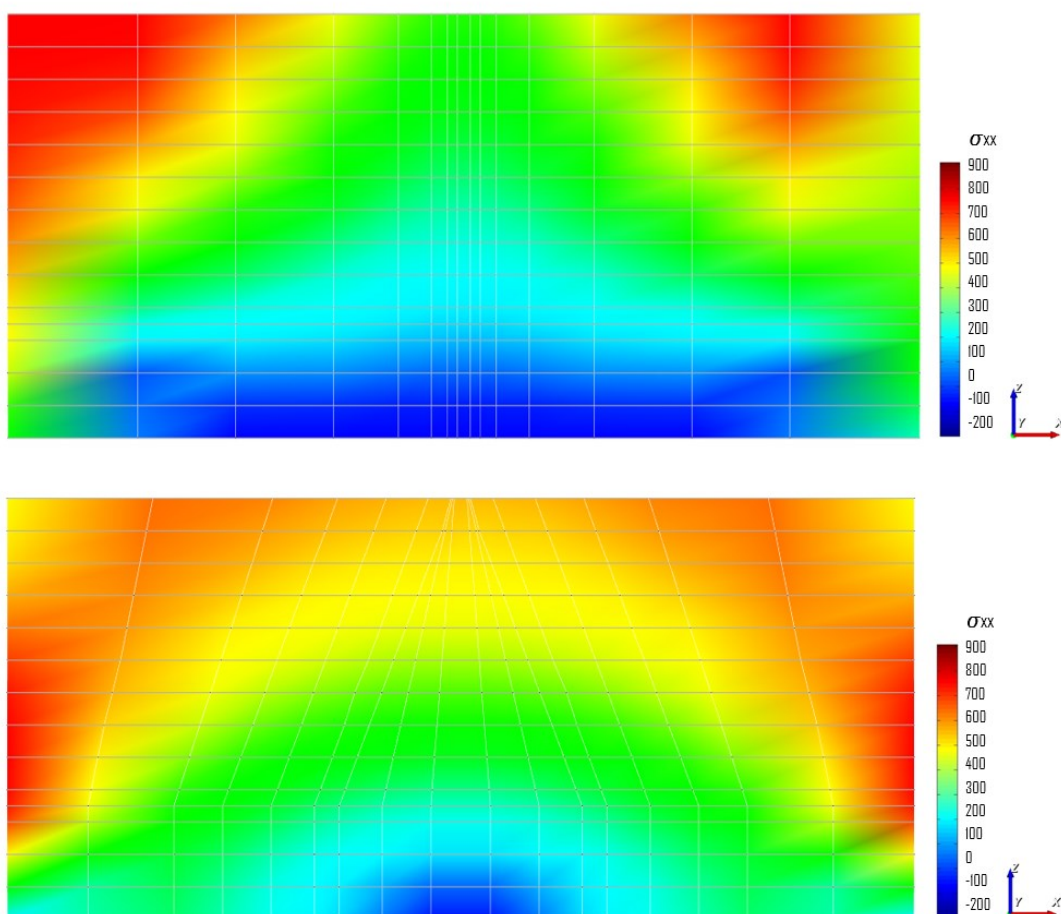
Record	Model	σ_{xx}	τ_{xy}	ϵ_{xx}	γ_{xy}
Imperial Valley- Farfield	Vertical Micropiles	350.12	1409.31	0.0009	0.0305
	Inclined Micropiles	602.76	903.83	0.0034	0.0196
Imperial Valley- Nearfield	Vertical Micropiles	337.75	1408.83	0.0009	0.0304
	Inclined Micropiles	603.33	903.93	0.0035	0.0196
Kocaeli- Farfield	Vertical Micropiles	607.38	2299.33	0.0029	0.0466
	Inclined Micropiles	1186.95	889.55	0.0035	0.0196
Kocaeli- Nearfield	Vertical Micropiles	610.65	2370.45	0.0028	0.0465
	Inclined Micropiles	1183.86	904.48	0.0035	0.0196
Chi-Chi- Farfield	Vertical Micropiles	354.86	1411.89	0.0009	0.0306
	Inclined Micropiles	604.29	901.18	0.0034	0.0195
Chi-Chi- Nearfield	Vertical Micropiles	363.25	1412.54	0.0009	0.0306
	Inclined Micropiles	611.89	904.88	0.0035	0.0196

جدول (۵-۱۷): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه دانه‌ای متراکم

Record	Model	σ_{xx}	τ_{xy}	ε_{xx}	γ_{xy}
Northridge - Farfield	Vertical Micropiles	519.31	4855.88	0.0015	0.0549
	Inclined Micropiles	291.25	1049.75	0.0003	0.0118
Northridge - Nearfield	Vertical Micropiles	545.95	4902.84	0.0015	0.0555
	Inclined Micropiles	322.44	965.92	0.0003	0.0109
Loma Prieta - Farfield	Vertical Micropiles	480.51	4780.72	0.0015	0.0540
	Inclined Micropiles	477.21	1798.8	0.0010	0.0204
Loma Prieta - Nearfield	Vertical Micropiles	522.61	4860.07	0.0015	0.0549
	Inclined Micropiles	564.17	1788.53	0.0011	0.0202
Landers - Farfield	Vertical Micropiles	460.56	2754.92	0.0015	0.0238
	Inclined Micropiles	423.06	1798.58	0.0011	0.0204
Landers - Nearfield	Vertical Micropiles	503.28	2168.93	0.0016	0.0245
	Inclined Micropiles	429.50	1791.73	0.0011	0.0202

میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی در ساختگاه دانه‌ای سست برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های دور به ترتیب $437/45 \text{ KN/m}^2$ و $1706/84 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0015$ و $0/0359$ و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب $437/22 \text{ KN/m}^2$ ، $1730/61 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0015$ و $0/0358$ می‌باشد. همچنین میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به ترتیب 798 KN/m^2 و $898/18 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0034$ و $0/0196$ و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب $799/69 \text{ KN/m}^2$ ، $904/43 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0035$ و $0/0196$ است.

میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی در ساختگاه دانه‌ای متراکم برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های دور به ترتیب $486/79 \text{ KN/m}^2$ و $4797/17 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0015$ و $0/0542$ و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب $590/61 \text{ KN/m}^2$ ، $3977/28 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0019$ و $0/0449$ می‌باشد. همچنین میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به ترتیب $397/17 \text{ KN/m}^2$ و $1549/04 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0008$ و $0/0175$ و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب $438/70 \text{ KN/m}^2$ ، $1515/39 \text{ KN/m}^2$ ، $0/0008$ و $0/0171$ است.



شکل (۵-۲۲): کانتور تنش خاک دانه‌ای تحت اثر زلزله امپریال ولی
(بالا): تسلیح با گروه ریزشمع قائم (پایین): تسلیح با گروه ریزشمع مایل

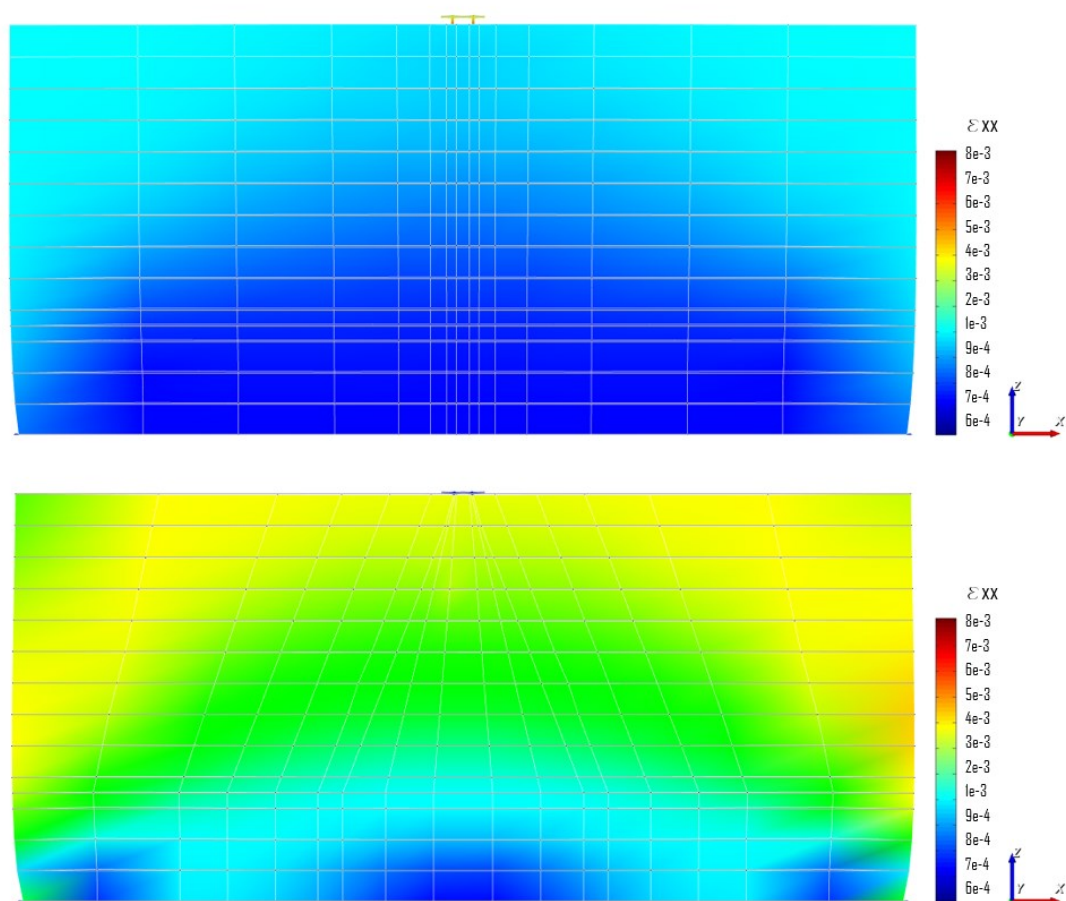
بررسی و مقایسه مقادیر تنش و کرنش سطحی خاک در دو ساختمان دانه‌ای سست و متراکم نتایج زیر را دربر دارد:

(۱) در هر دو ساختمان سست و متراکم، تغییرات تنش و کرنش سطحی خاک در زلزله‌های دور و نزدیک تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد ولی نوع تسلیح خاک (گروه ریزشمع قائم/مایل) بر نتایج اثرگذار است. به عبارت دیگر تغییرات تنش و کرنش خاک به نوع تسلیح خاک وابسته است نه رکورد ورودی.

(۲) در ساختمان دانه‌ای سست و با اعمال هر دو گروه رکورد دور و نزدیک، گروه ریزشمع قائم عملکرد بهتری در کنترل تنش و کرنش نرمال خاک نشان می‌دهد. مقادیر تنش و کرنش نرمال خاک در حالت تسلیح با ریزشمع مایل به طور میانگین ۸۲/۶۷٪ و ۱۲۳/۷۱٪ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع قائم است. همچنین گروه ریزشمع مایل عملکرد بهتری در کنترل تنش و کرنش برشی خاک

نشان می دهد. مقادیر تنش و کرنش برشی خاک در حالت تسلیح با ریزشمع قائم به طور میانگین ۹۰٪/۸۳ و ۸۳٪/۱۵ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع مایل است.

۳) در ساختگاه دانه ای متراکم و با اعمال هر دو گروه رکورد دور و نزدیک، گروه ریزشمع مایل عملکرد بهتری در کنترل هر چهار پارامتر مورد بررسی یعنی تنش و کرنش نرمال و تنش و کرنش برشی خاک نشان می دهد. مقادیر تنش و کرنش نرمال خاک در حالت تسلیح با ریزشمع قائم به طور میانگین ۲۰٪/۸۵ و ۸۵٪/۷۵ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع مایل است. همچنین مقادیر تنش و کرنش برشی خاک در حالت تسلیح با ریزشمع قائم به طور میانگین ۱۶۴٪/۵۶ و ۱۵۷٪/۶۲ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع مایل است.



شکل (۵-۲۳): کانتور کرنش خاک دانه ای تحت اثر زلزله امپریال ولی
(بالا): تسلیح با گروه ریزشمع قائم (پایین): تسلیح با گروه ریزشمع مایل

۵-۱۰- بررسی عملکرد سیستم در خاک چسبنده تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک

۵-۱۰-۱- تغییر مکان افقی گروه ریزش‌مخ

شکل (۵-۲۴) تاریخچه تغییرمکان افقی در محل اتصال ریزش‌مخ‌ها به سرریزش‌مخ را نشان می‌دهد. بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک امپریال ولی، کجایی و چی‌چی برای ساختگاه چسبنده نرم (رس نرم) در جدول (۵-۱۸) و بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک نورث‌ریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه چسبنده متوسط (رسی متوسط) در جدول (۵-۱۹) آمده است.

جدول (۵-۱۸): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در خاک رسی نرم

Maximum Horizontal Displacement(m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	0.257	0.801	0.461	0.516	0.447	1.242
Inclined Micropiles	0.253	0.793	0.444	0.519	0.427	1.214

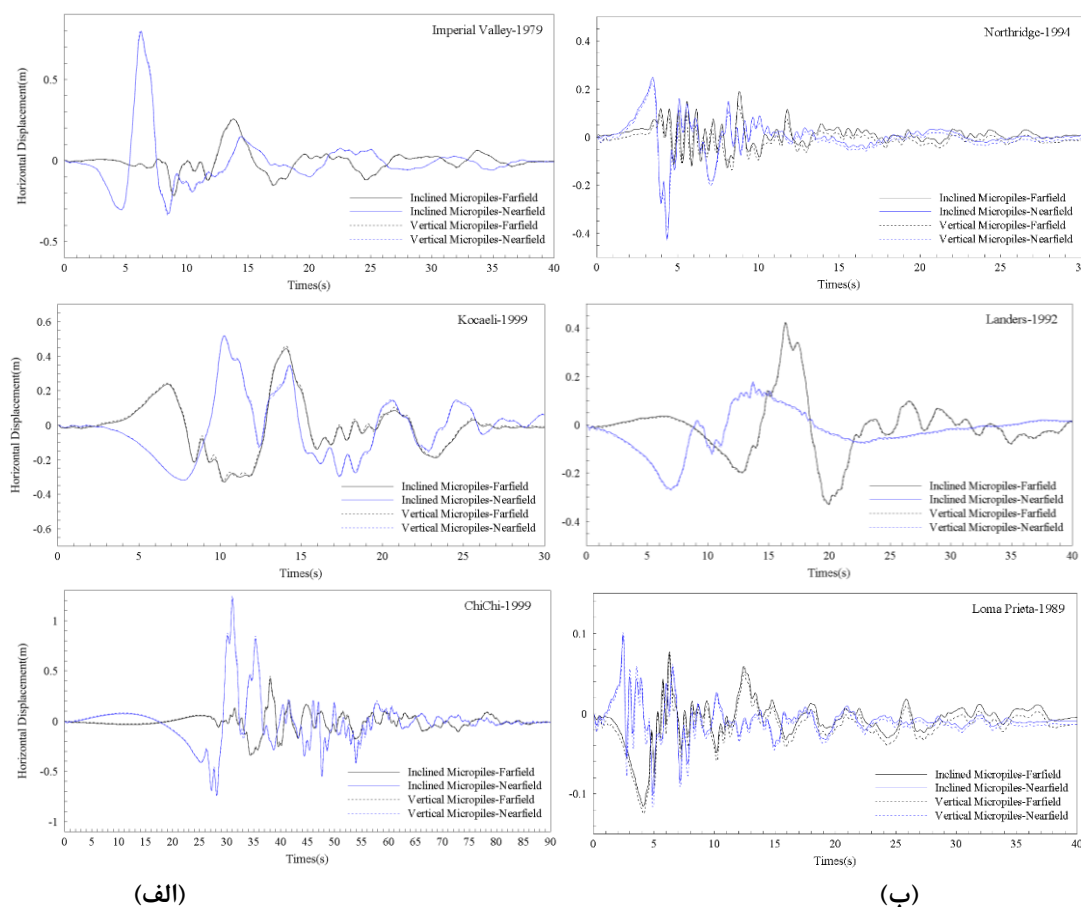
جدول (۵-۱۹): بیشینه تغییرمکان افقی گروه ریزش‌مخ قائم و مایل در خاک رسی متوسط

Maximum Horizontal Displacement(m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	0.138	0.389	0.134	0.121	0.415	0.281
Inclined Micropiles	0.189	0.428	0.128	0.122	0.419	0.274

میانگین بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزش‌مخ قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک رسی نرم ۲/۱۹ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. نسبت این متغیرها در بیشترین مقدار برای زلزله امپریال ولی برابر ۳/۱۱ و در کمترین مقدار برای زلزله کجایی برابر ۱/۱۲ است. به طور متوسط بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزش‌مخ مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک رسی نرم ۲/۲۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است که مشابه این نسبت برای گروه ریزش‌مخ قائم است. این نسبت در بیشترین مقدار برای زلزله امپریال ولی برابر ۳/۱۳ و در کمترین حالت برای زلزله کجایی برابر ۱/۱۸ است.

نتایج برای ساختگاه رسی متوسط نشان می‌دهد، بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزش‌مخ قائم در زلزله‌های نزدیک در خاک رسی متوسط ۱/۱۵ برابر همین مقدار در زلزله‌های دور است. این نسبت در بیشترین مقدار برای زلزله نورث‌ریج برابر ۲/۸۱ و در کمترین حالت برای زلزله لندرز برابر ۰/۶۵ است. به طور متوسط بیشینه تغییرمکان افقی برای گروه ریزش‌مخ مایل در زلزله‌های نزدیک در خاک رسی

متوسط ۱/۱۲ برابر همین مقدار در زلزله های دور است. این نسبت در بیشترین مقدار برای زلزله نورثریج برابر ۲/۲۶ و در کمترین حالت برای زلزله لندرز برابر ۰/۶۵ است.



شکل (۵-۲۴): تاریخچه تغییر مکان افقی گروه ریزشمع

(الف): ساختگاه رسی نرم (ب): ساختگاه رسی متوسط

مهمترین نتایج بررسی مقادیر جابجایی افقی گروه ریزشمع را که در بالا گزارش شد، می توان در موارد زیر بیان کرد:

- (۱) نتایج بیانگر اثر قابل توجه زلزله های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل نسبت به زلزله های دور در ساختگاه رسی نرم است. افزایش تغییر مکان در اثر زلزله های نزدیک نسبت به زلزله های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه رسی نرم به ترتیب ۱۱۹٪ و ۱۲۵٪ و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه رسی متوسط به ترتیب ۱۵٪ و ۱۲٪ می باشد.
- (۲) با وجود ساختگاه رسی متوسط، علی رغم اثر زلزله های نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل، این افزایش به مراتب کمتر از مقادیر مشابه برای ساختگاه نرم است. نسبت مقادیر در دو گروه زلزله نشان می دهد اثر رکوردهای نزدیک بر افزایش تغییر مکان جانبی در

خاک رسی نرم نسبت به خاک رسی متوسط برای گروه ریزشمع قائم و مایل، به طور میانگین حدود ۹۰٪ و ۱۰۰٪ بیشتر است. به نظر می‌رسد، افزایش میرایی رایلی که ناشی از افزایش موج برشی در خاک رسی متوسط است، نقش کاهنده بر اثر رکوردهای نزدیک گسل در افزایش تغییرمکان جانبی گروه ریزشمع دارد.

(۳) در هر دو گروه زلزله‌های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک چسبنده اعم از نرم و متوسط تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارد و هر دو مدل تسلیح، کارکرد یکسانی در کنترل تغییرمکان جانبی ناشی از رکوردهای دور و نزدیک از خود نشان می‌دهند.

۵-۱۰-۲- تغییرات شتاب گروه ریزشمع

شکل (۵-۲۵) تاریخچه شتاب سیستم در محل اتصال ریزشمع‌ها به سرریزشمع را نشان می‌دهد. بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک امپریال ولی، کجایی و چی‌چی در خاک چسبنده نرم در جدول (۵-۲۰) و بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک نورثریج، لوماپریتا و لندرز در خاک چسبنده متوسط (رس متوسط) در جدول (۵-۲۱) آمده است.

جدول (۵-۲۰): بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک چسبنده نرم

Maximum Acceleration (g)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	0.250	0.521	0.483	0.432	0.589	0.954
Inclined Micropiles	0.221	0.420	0.357	0.386	0.452	0.910

جدول (۵-۲۱): بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک چسبنده متوسط

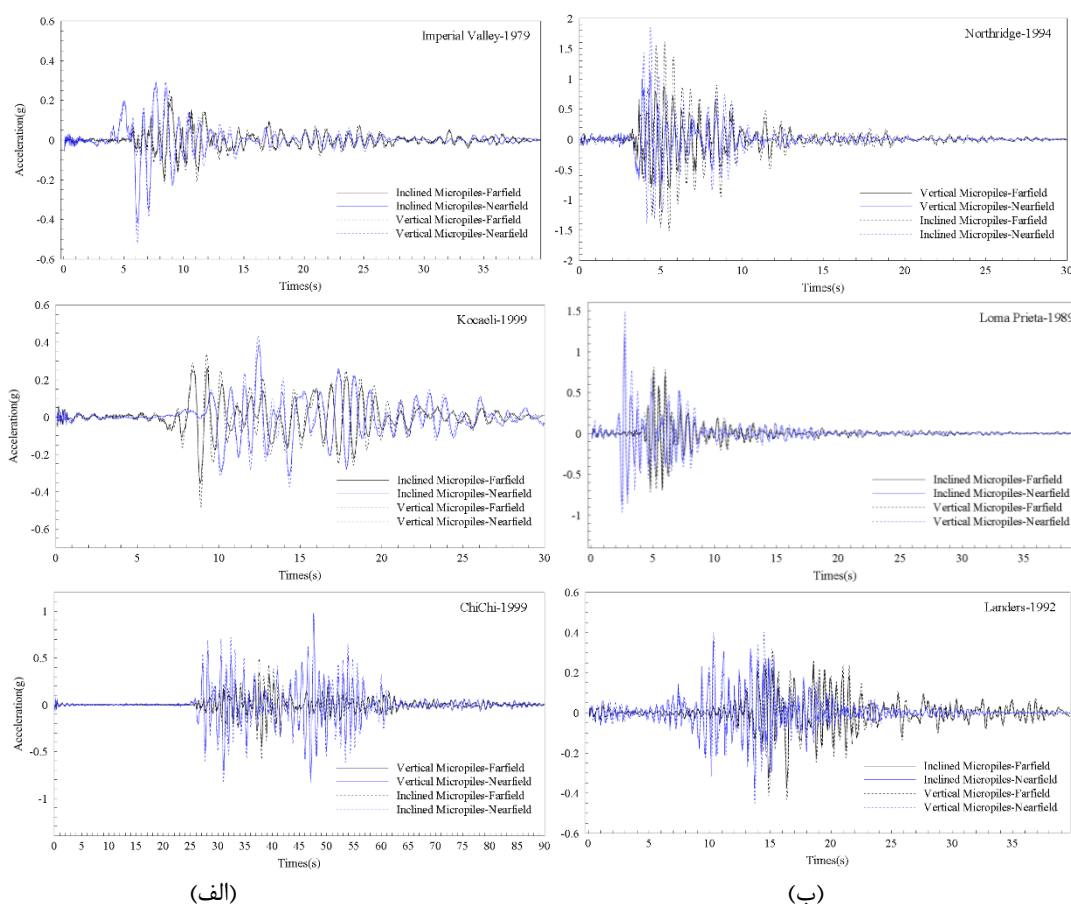
Maximum Acceleration (g)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	1.611	1.849	0.812	1.485	0.434	0.459
Inclined Micropiles	1.123	1.121	0.752	1.216	0.375	0.373

بررسی خروجی تحلیل نشان می‌دهد، در خاک رسی نرم میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۴۴/۲۵٪ افزایش یافته است. نسبت این دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله امپریال ولی برابر ۲/۰۸ و در کمترین حالت برای زلزله کجایی برابر ۰/۸۹ است. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک رسی نرم در زلزله‌های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله‌های دور ۶۶/۶۰٪ افزایش را نشان می‌دهد. نسبت این

دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله چی چی برابر $2/01$ و در کمترین حالت برای زلزله کجایی برابر $1/08$ است.

در ساختگاه رسی متوسط، میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع قائم در زلزله های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله های دور $32/76\%$ افزایش را نشان می دهد. نسبت این دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله لوماپریتا برابر $1/83$ و در کمترین حالت برای زلزله لندرز برابر $1/06$ است. میانگین بیشینه شتاب برای گروه ریزشمع مایل در خاک رسی متوسط در زلزله های نزدیک نسبت به همین مقدار در زلزله های دور $20/44\%$ افزایش را نشان می دهد. نسبت این دو مقدار در بیشترین حالت برای زلزله لوماپریتا برابر $1/62$ و در کمترین حالت برای زلزله نورث ریج برابر $0/99$ است.

مقایسه نتایج به دست آمده از شتاب سرریزشمع با مقادیر PGA در جداول (5-5) و (5-6) نشان می دهد، در ساختگاه رسی نرم برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله های دور به طور میانگین $10/18\%$ افزایش و $12/7\%$ کاهش و در زلزله های نزدیک به طور میانگین $21/15\%$ و $9/61\%$ در بزرگنمایی شتاب بیشینه پدید آمده است. مقایسه این مقادیر در ساختگاه رسی متوسط برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله های دور به طور میانگین $115/91\%$ و $70/45\%$ و در زلزله های نزدیک به طور میانگین 75% و 25% بزرگنمایی در شتاب بیشینه را نشان می دهد.



شکل (۵-۲۵): تاریخچه شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل
الف: ساختگاه رسی نرم ب: ساختگاه رسی متوسط

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 هردو ساختگاه چسبنده نرم و متوسط قابل توجه بوده و می‌بایست اثر این رکوردها در طراحی سیستم خاک-ریزشمع-کلاهک دیده شود. افزایش شتاب در اثر زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه رسی نرم به ترتیب ۴۴٪ و ۶۷٪ و برای گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه رسی متوسط به ترتیب ۳۳٪ و ۲۰٪ می‌باشد.

(۲) شتاب گروه ریزشمع قائم و مایل در ساختگاه رسی متوسط و در زلزله‌های نزدیک اعداد بزرگتری را ثبت نمود، این امر با توجه به شتاب ورودی بزرگتر در این زلزله‌ها منطقی به نظر می‌رسد.

(۳) برای گروه ریزشمع مایل، نسبت شتاب بیشینه در زلزله‌های نزدیک به زلزله‌های دور در خاک رسی نرم مقدار بزرگتری است. به عبارت دیگر برای این نوع تسلیح، رکوردهای نزدیک گسل در خاک رسی

نرم اثرگذاری بیشتری در افزایش شتاب سرریزشمع در مقایسه با رکوردهای دور زلزله های خود دارد. این اثرگذاری ۵۳٪ بیش از مقدار معادل آن در خاک رسی متوسط است، در حالی که در گروه ریزشمع قائم این اثر ناچیز است. به نظر می رسد، این مورد ناشی از عملکرد بهتر گروه ریزشمع مایل در ساختگاه با مشخصات مکانیکی کیفی تر است. چنان که این پدیده با اختلاف کمتر برای خاک های ماسه ای سست و متراکم در بخش ۴-۸-۲ نیز مشاهده شد.

۴) درصد بزرگنمایی شتاب در ساختگاه رسی متوسط و گروه ریزشمع قائم بیشتر از درصد مشابه در ساختگاه رسی نرم و گروه ریزشمع مایل است. ممکن است نزدیکی مقادیر فرکانس طبیعی ساختگاه رسی متوسط و سنگ بستر، باعث شده خاک رسی سخت تر دارای تابع تقویت بزرگتری باشد.

۵) در هر دو گروه زلزله های دور و نزدیک، عملکرد گروه ریزشمع مایل در مقایسه با گروه ریزشمع قائم در کاهش مقدار بیشینه شتاب در سرریزشمع بهتر می باشد. این بهبود عملکرد برای ساختگاه رسی نرم در زلزله های دور و نزدیک به طور متوسط ۲۲/۰۹٪ و ۱۰/۰۲٪ است و برای ساختگاه رسی متوسط در زلزله های دور و نزدیک به طور میانگین ۲۱/۲۵٪ و ۲۸/۵۵٪ می باشد.

۵-۱۰-۳- پاسخ نیروها در گروه ریزشمع

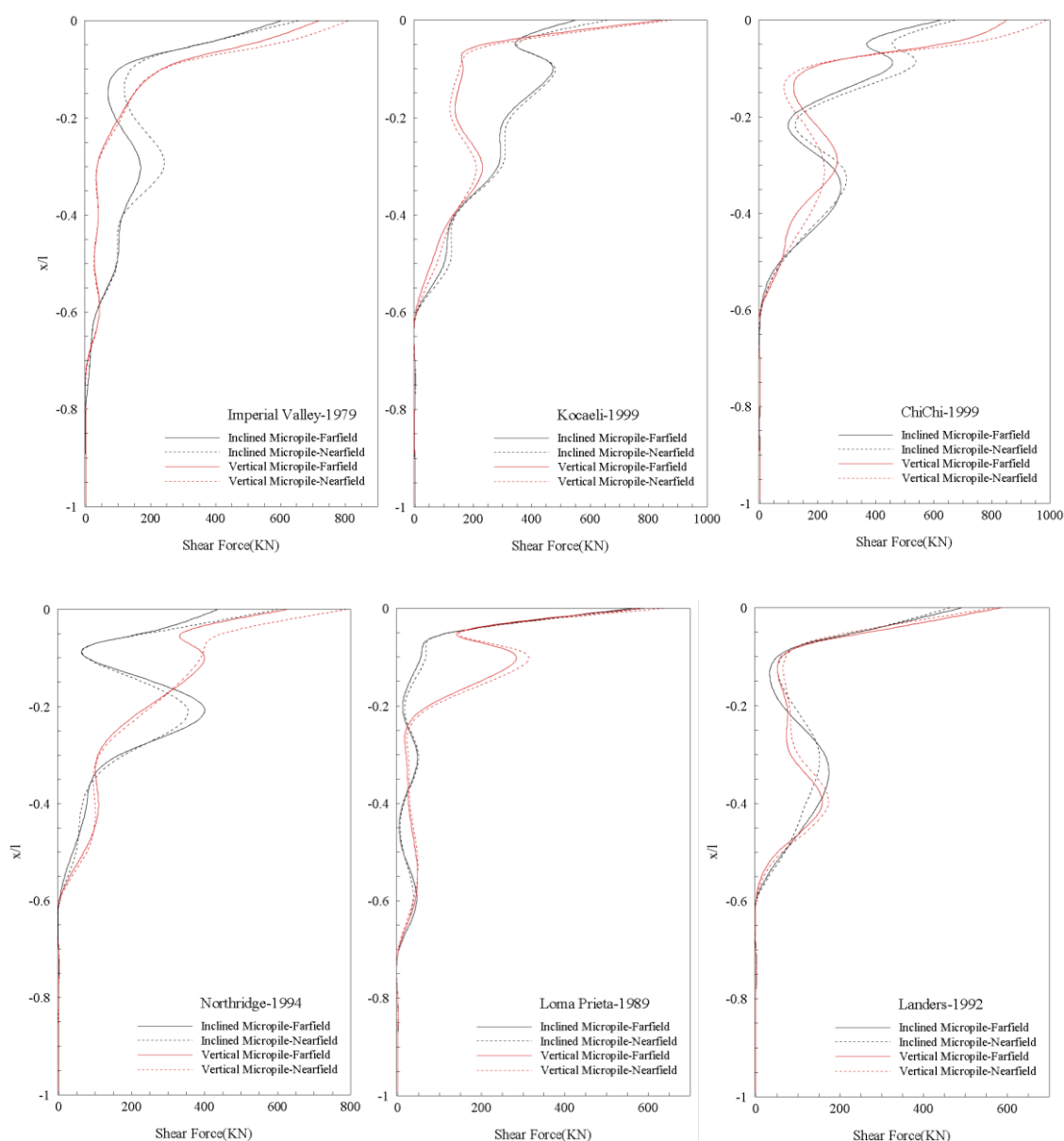
منحنی تغییرات نیروی برشی در امتداد طول ریزشمع در خاک چسبنده نرم و متوسط در شکل (۵-۲۶) نشان داده شده است. بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله های دور و نزدیک امپریال ولی، کجایی و چی چی برای ساختگاه رسی نرم در جدول (۵-۲۲) و بیشینه نیروی برشی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله های دور و نزدیک نورثریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه رسی متوسط در جدول (۵-۲۳) آمده است.

جدول (۵-۲۲): بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رس نرم

Maximum Shear Force(KN)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	718.84	809.97	838.26	890.27	851.67	988.09
Inclined Micropiles	603.56	657.46	550.59	659.32	626.06	674.23

جدول (۵-۲۳): بیشینه نیروی برشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رس متوسط

Maximum Shear Force(KN)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	627.32	789.6	512.12	585.95	585.96	568.46
Inclined Micropiles	436.18	602.73	410.17	467.36	491.46	463.28



شکل (۵-۲۶): نمودار نیروی برشی در طول ریزشمع قائم و مایل

بالا: ساختگاه رسی نرم پایین: ساختگاه رسی متوسط

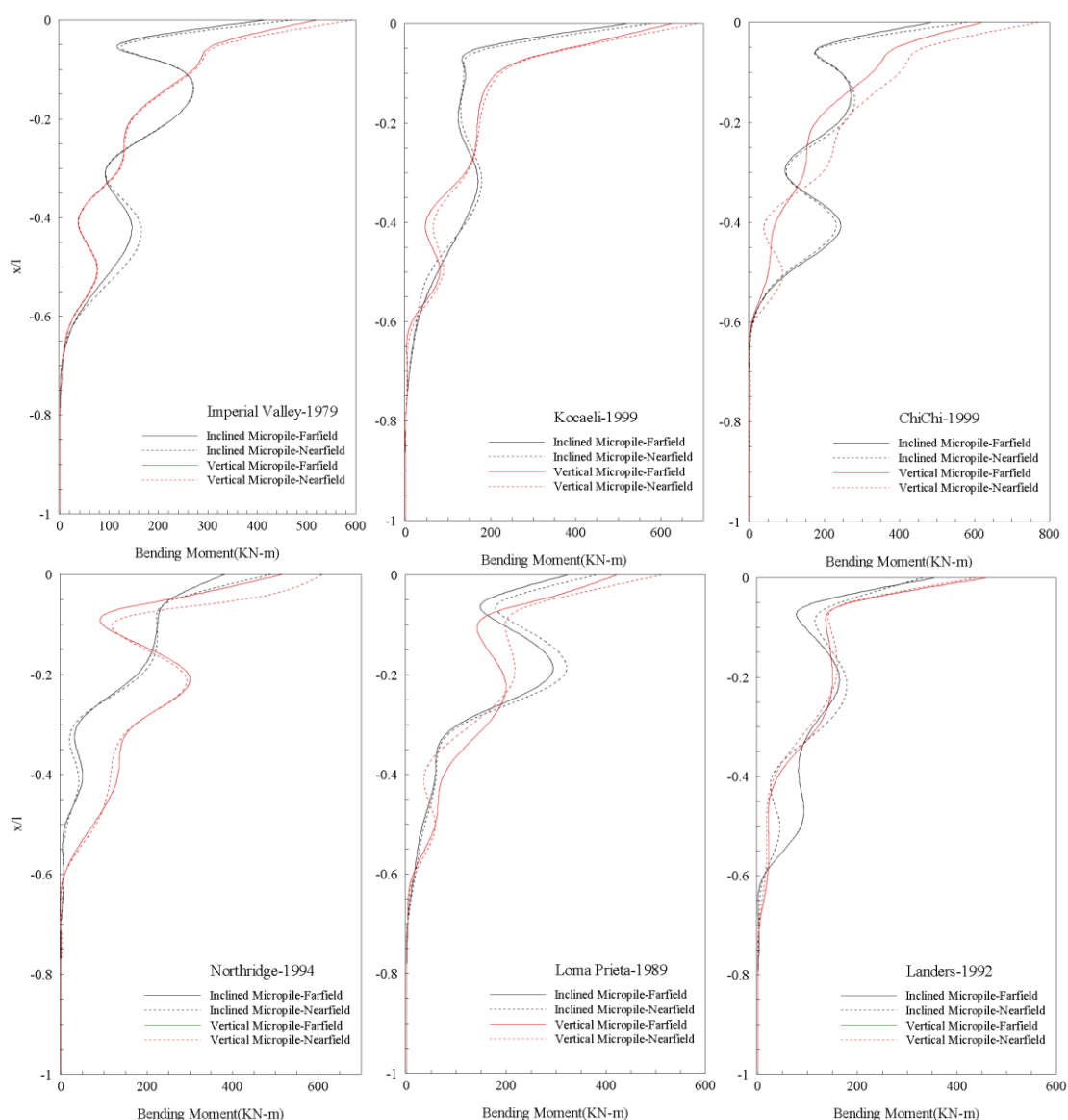
همچنین منحنی تغییرات نیروی خمشی در امتداد طول ریزشمع در خاک رسی نرم و متوسط در شکل (۵-۲۷) نشان داده شده است. بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک امپریال ولی، کجاییلی و چی چی برای ساختگاه رسی نرم در جدول (۲۴-۵) و بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع قائم و مایل در زلزله‌های دور و نزدیک نورثریج، لوماپریتا و لندرز برای ساختگاه رسی متوسط در جدول (۵-۲۵) آمده است.

جدول (۵-۲۴): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رسی نرم

Maximum Bending Moment (KN-m)	Imperial Valley		Kocaeli		Chi-Chi	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	356.14	362.21	415.25	427.77	432.71	562.49
Inclined Micropiles	262.16	273.07	360.71	359.93	270.29	276.82

جدول (۵-۲۵): بیشینه نیروی خمشی گروه ریزشمع قائم و مایل در خاک رسی متوسط

Maximum Bending Moment (KN-m)	Northridge		Loma Prieta		Landers	
	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield	Farfield	Nearfield
Vertical Micropiles	587.04	701.48	420.95	548.16	350.08	330.59
Inclined Micropiles	556.73	637.24	409.75	485.49	253.56	233.19



شکل (۵-۲۷): نمودار نیروی خمشی در طول ریزشمع قائم و مایل (بالا): ساختگاه رسی نرم (پایین): ساختگاه رسی متوسط

- نتایج حاصل از بررسی پاسخ نیروهای گروه ریزشمع قائم و مایل در نکات زیر قابل ارائه است:
- (۱) ماکزیمم مقدار نیروی برشی و خمشی در اثر همه زلزله‌های دور و نزدیک در محل اتصال ریزشمع به سرریزشمع (کلاهک) مشاهده می‌شود و در تمام زلزله‌ها تغییرات نیروی برشی در عمق $0.6 < \frac{x}{l}$ و تغییرات لنگر خمشی در عمق $0.7 < \frac{x}{l}$ قابل ملاحظه است.
 - (۲) در ساختگاه رسی نرم، رکورد زلزله‌های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع‌های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین $11/61\%$ برای نیروی برشی و $16/01\%$ برای نیروی خمشی می‌باشد. همچنین افزایش نیروهای ریزشمع در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل برای نیروی برشی به طور میانگین $11/84\%$ و برای نیروی خمشی $14/32\%$ است.
 - (۳) در ساختگاه رسی نرم 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 $26/09\%$ و در زلزله‌های نزدیک $25/94\%$ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط $19/36\%$ و در زلزله‌های نزدیک $20/53\%$ نسبت به گروه ریزشمع قائم است.
 - (۴) در ساختگاه رسی متوسط، رکورد زلزله‌های نزدیک گسل موجب افزایش بیشینه نیروی برشی و خمشی در ریزشمع‌های قائم شده است. این افزایش به طور میانگین $12/67\%$ برای نیروی برشی و $11/50\%$ برای نیروی خمشی می‌باشد. همچنین افزایش نیروهای ریزشمع در اثر رکوردهای نزدیک گسل در گروه ریزشمع مایل برای نیروی برشی به طور میانگین $14/62\%$ و برای نیروی خمشی $13/25\%$ است.
 - (۵) در ساختگاه رسی متوسط 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 $22/46\%$ و در زلزله‌های نزدیک $21/12\%$ نسبت به گروه ریزشمع قائم است. همچنین کاهش مقدار بیشینه نیروی خمشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به طور متوسط $24/08\%$ و در زلزله‌های نزدیک $22/89\%$ نسبت به گروه ریزشمع قائم است.
 - (۶) نتایج به طور کلی نشان می‌دهد، پاسخ نیروهای ریزشمع تحت تاثیر شیب گروه ریزشمع است و نوع ساختگاه و شتاب زلزله ورودی تاثیر کمتری در مقدار نیروهای ریزشمع دارد. از نظر بهبود عملکرد برشی و خمشی ریزشمع‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین ساختگاه رسی متوسط و نرم مشاهده نشد.

(۷) از بررسی موردی پاسخ نیروهای ریزشمع (نیروی برشی و خمشی) لزوم توجه به اثرات متفاوت رکوردهای نزدیک گسل در هر زلزله صرف نظر از تاثیر کلی این رکوردها بر افزایش پاسخ ریزشمع ها به دست می آید. این اثر ممکن است در برخی زلزله ها مشابه اثرات رکورد دور باشد و در برخی زلزله ها موجب تفاوت قابل ملاحظه در نتایج شود.

۵-۱۰-۴- تغییرات تنش و کرنش سطحی خاک

جداول (۵-۲۶) و (۵-۲۷)، نتایج تنش و کرنش سطحی خاک در محل قرارگیری سرریزشمع را در دو خاک چسبنده نرم و متوسط نشان می دهد. در این جدول مقادیر بیشینه تنش نرمال (σ_{xx})، تنش برشی (τ_{xy})، کرنش نرمال (ϵ_{xx}) و کرنش برشی (γ_{xy}) برای رکوردهای دور و نزدیک در گروه ریزشمع قائم و مایل گزارش شده است. مقادیر تنش بر حسب کیلونیوتن بر متر مربع می باشد.

جدول (۵-۲۶): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه رسی نرم

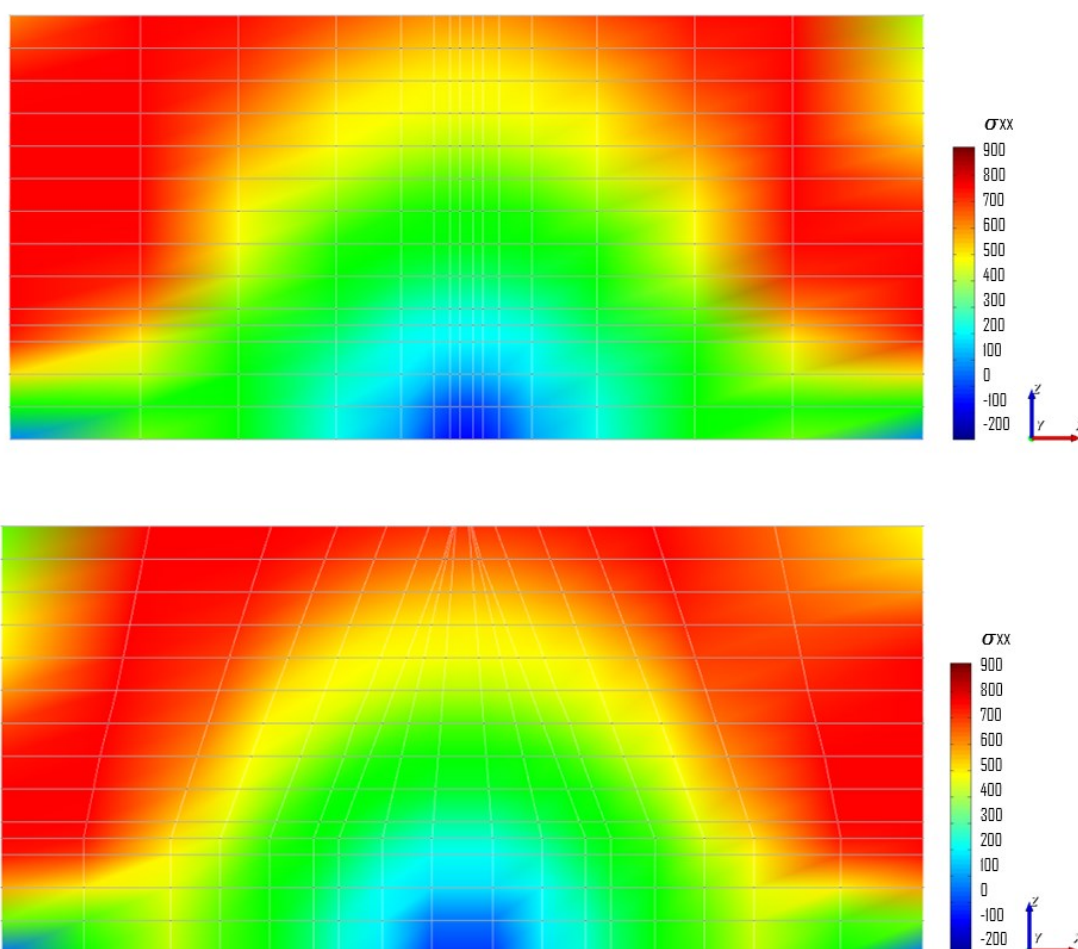
Record	Model	σ_{xx}	τ_{xy}	ϵ_{xx}	γ_{xy}
Imperial Valley- Farfield	Vertical Micropiles	595.24	2795.05	0.0098	0.0368
	Inclined Micropiles	627.18	1389.7	0.0171	0.01069
Imperial Valley- Nearfield	Vertical Micropiles	587.06	2846.31	0.0098	0.03728
	Inclined Micropiles	632.41	1366.62	0.0261	0.01051
Kocaeli- Farfield	Vertical Micropiles	822.45	2730.44	0.0065	0.0561
	Inclined Micropiles	1979.98	1558.74	0.0247	0.0429
Kocaeli- Nearfield	Vertical Micropiles	826.05	2734.84	0.0065	0.0565
	Inclined Micropiles	1879.03	1521.09	0.031	0.0393
Chi-Chi- Farfield	Vertical Micropiles	650.66	2864.96	0.0098	0.03742
	Inclined Micropiles	856.48	1548.25	0.0223	0.0421
Chi-Chi- Nearfield	Vertical Micropiles	750.95	2104.5	0.0144	0.03921
	Inclined Micropiles	999.75	1636.99	0.0252	0.049

جدول (۵-۲۷): بیشینه تنش و کرنش سطحی خاک در ساختگاه رسی متوسط

Record	Model	σ_{xx}	τ_{xy}	ε_{xx}	γ_{xy}
Northridge - Farfield	Vertical Micropiles	450.33	5455.99	0.002	0.0242
	Inclined Micropiles	940.54	1036.39	0.0046	0.034
Northridge - Nearfield	Vertical Micropiles	449.02	5444.47	0.002	0.0241
	Inclined Micropiles	1073.21	1082.33	0.0048	0.0347
Loma Prieta - Farfield	Vertical Micropiles	1178.21	5456.2	0.0019	0.0833
	Inclined Micropiles	1778.08	2511	0.0057	0.024
Loma Prieta - Nearfield	Vertical Micropiles	1248.59	5441.23	0.002	0.096
	Inclined Micropiles	1807.64	2296.49	0.0056	0.025
Landers - Farfield	Vertical Micropiles	1250.37	4392.28	0.002	0.0243
	Inclined Micropiles	859.46	2072.63	0.0009	0.0512
Landers - Nearfield	Vertical Micropiles	1154.24	4262.41	0.00194	0.0237
	Inclined Micropiles	894.14	2375.83	0.0009	0.0563

میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی در ساختگاه رسی نرم برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های دور به ترتیب 700 KN/m^2 و 2796 KN/m^2 ، 0.0087 و 0.0434 و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب 736 KN/m^2 ، 2561 KN/m^2 ، 0.0092 و 0.0443 می‌باشد. همچنین میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به ترتیب 1143 KN/m^2 و 1498 KN/m^2 ، 0.0213 و 0.0318 و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب 1155 KN/m^2 ، 1508 KN/m^2 ، 0.0274 و 0.0329 است.

میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی در ساختگاه رسی متوسط برای گروه ریزشمع قائم در زلزله‌های دور به ترتیب 959 KN/m^2 و 5101 KN/m^2 ، 0.0019 و 0.0439 و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب 950 KN/m^2 ، 5049 KN/m^2 ، 0.0019 و 0.0446 می‌باشد. همچنین میانگین مقادیر بیشینه تنش نرمال، کرنش نرمال، تنش برشی و کرنش برشی برای گروه ریزشمع مایل در زلزله‌های دور به ترتیب 1192 KN/m^2 و 1873 KN/m^2 ، 0.0037 و 0.0364 و در زلزله‌های نزدیک به ترتیب 1258 KN/m^2 ، 1918 KN/m^2 ، 0.0038 و 0.0387 است.

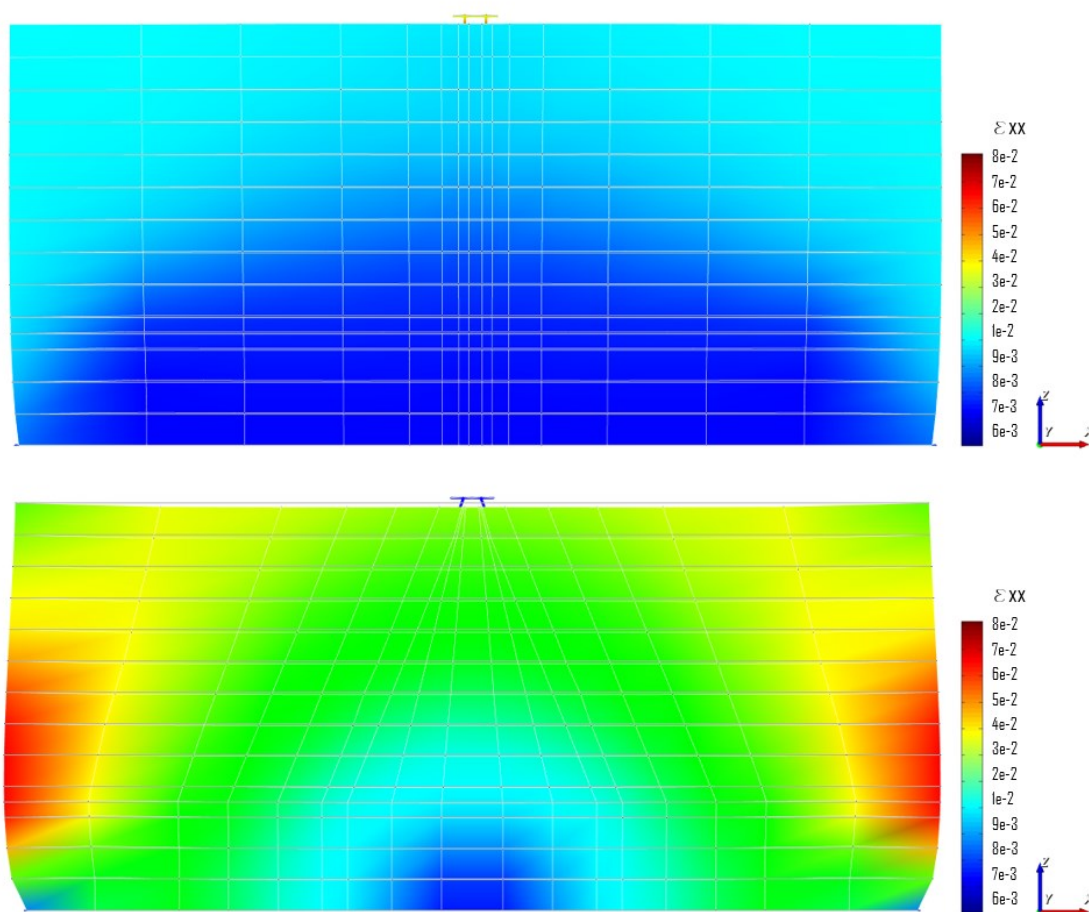


شکل (۵-۲۸): کانتور تنش خاک رسی تحت اثر زلزله امپریال ولی
(بالا): تسلیح با گروه ریزشمع قائم (پایین): تسلیح با گروه ریزشمع مایل

بررسی و مقایسه مقادیر تنش و کرنش سطحی خاک در دو ساختمان رسی نرم و متوسط نتایج زیر را دربر دارد:

- (۱) در هر دو ساختمان نرم و متوسط، تغییرات تنش و کرنش سطحی خاک در زلزله های دور و نزدیک تفاوت چندانی را نشان نمی دهد ولی نوع تسلیح خاک (گروه ریزشمع قائم/مایل) بر نتایج اثرگذار است. به عبارت دیگر تغییرات تنش و کرنش خاک به نوع تسلیح خاک وابسته است نه رکورد ورودی.
- (۲) در ساختمان رسی نرم و با اعمال هر دو گروه رکورد دور و نزدیک، گروه ریزشمع قائم عملکرد بهتری در کنترل تنش و کرنش نرمال خاک نشان می دهد. مقادیر تنش و کرنش نرمال خاک در حالت تسلیح با ریزشمع مایل به طور میانگین ۶۴٪/۸۳٪ و ۱۵۶٪/۸۳٪ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع قائم است. همچنین گروه ریزشمع مایل عملکرد بهتری در کنترل تنش و کرنش برشی خاک

نشان می‌دهد. مقادیر تنش و کرنش برشی خاک در حالت تسلیح با ریزشمع قائم به طور میانگین $۷۸\%/۳۹$ و $۳۵\%/۳۹$ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع مایل است. (۳ در ساختگاه رسی متوسط و با اعمال هر دو گروه رکورد دور و نزدیک، گروه ریزشمع قائم عملکرد بهتری در کنترل تنش و کرنش نرمال خاک نشان می‌دهد. مقادیر تنش و کرنش نرمال خاک در حالت تسلیح با ریزشمع مایل به طور میانگین $۲۸\%/۳۳$ و $۹۰\%/۰۱$ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع قائم است. همچنین گروه ریزشمع مایل عملکرد بهتری در کنترل تنش و کرنش برشی خاک نشان می‌دهد. مقادیر تنش و کرنش برشی خاک در حالت تسلیح با ریزشمع قائم به طور میانگین $۱۶۷\%/۷۷$ و $۲۲\%/۳۳$ بیش از مقادیر مشابه در حالت تسلیح با ریزشمع مایل است.



شکل (۵-۲۹): کانتور کرنش خاک رسی تحت اثر زلزله امپریال ولی
(بالا): تسلیح با گروه ریزشمع قائم (پایین): تسلیح با گروه ریزشمع مایل

فصل ششم

جمع‌بندی نتایج و پیشنهادها

۶-۱- مقدمه

در این پژوهش یک مدل استاندارد از خاک-ریزشمع-سرریزشمع متشکل از دو نوع خاک دانه‌ای و چسبنده الاستوپلاستیک با مشخصات مکانیکی متفاوت شامل خاک دانه‌ای سست، خاک دانه‌ای متراکم، خاک چسبنده نرم و خاک چسبنده متوسط 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 و نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی شامل پاسخ‌های گروه ریزشمع و خاک مقایسه و بررسی شد. از آنجا که تاثیر سه مولفه اثرگذار بر سیستم شامل نوع ساختگاه، نوع زلزله ورودی و مدل تسلیح ریزشمع، به صورت هم زمان در این پژوهش دیده شد، امکان نتیجه‌گیری جامع از عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع در انواع شرایط محتمل فراهم آمد. در ادامه ضمن بیان نتایج کلی مطالعه، پیشنهاداتی برای توسعه مدل و بسط زمینه پژوهشی انجام گرفته، ارائه می‌شود.

۶-۲- جمع‌بندی نتایج

۱) نتایج نشان داد، پارامترهای مورد بررسی در گروه ریزشمع (جابجایی، شتاب، نیروی خمشی و برشی) و خاک (تنش و کرنش سطحی) 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 و خمشی ریزشمع و تنش و کرنش سطحی خاک وابسته به نوع تسلیح (گروه ریزشمع قائم/مایل) می‌باشد و نوع ساختگاه و زلزله ورودی تاثیر کمتری بر این پاسخ‌ها دارد در حالی که شتاب و جابجایی سیستم بیشتر متأثر از نوع ساختگاه و زلزله ورودی است و نوع تسلیح تاثیر به مراتب کمتری بر این پارامترها دارد.

۲) اثر زلزله‌های نزدیک بر افزایش تغییرمکان جانبی و شتاب در هر دو گروه ریزشمع قائم و مایل به ویژه در ساختگاه‌های دانه‌ای سست و چسبنده نرم، که مشخصات مکانیکی ضعیف‌تری دارند، قابل توجه است. بنابراین تاثیر رکوردهای نزدیک گسل می‌بایست در طراحی و کنترل تغییرشکل پی‌ها یا ساختگاه‌های مسلح شده با گروه ریزشمع مدنظر قرار گیرد. هرچند به طور متوسط تاثیر رکوردهای نزدیک بر ساختگاه‌های کیفی‌تر نظیر خاک دانه‌ای متراکم و چسبنده متوسط بسیار کمتر است، نتایج موردی نشان داد که در برخی رکوردها افزایش تغییرمکان جانبی گروه ریزشمع در این خاک‌ها می‌تواند قابل ملاحظه باشد.

۳) تغییرات شتاب گروه ریزشمع 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 ریزشمع 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. همچنین نتایج نشان داد، درصد بزرگنمایی شتاب در ساختگاه‌های متراکم و سخت بیشتر از درصد مشابه در ساختگاه سست و نرم است. اگرچه در حالت کلی خاک‌های نرم‌تر یا سست‌تر تابع تقویت بزرگتری دارند، ولی این امکان وجود دارد که نزدیکی مقادیر فرکانس طبیعی ساختگاه متراکم و سنگ بستر، باعث شود خاک‌های متراکم و سخت‌تر دارای تابع تقویت بزرگتری باشند. باید توجه داشت که بررسی دقیق‌تر این مورد مستلزم در نظر گرفتن پارامترهای دیگری نظیر عمق ساختگاه، هندسه لایه‌های خاک و توپوگرافی سطحی است که از موضوع پژوهش حاضر خارج بود.

۴) از منظر مقایسه عملکرد گروه ریزشمع قائم و مایل در دو ساختگاه دانه‌ای و چسبنده می‌توان چنین نتیجه گرفت که گروه ریزشمع مایل عملکردی تقریباً مشابه در کنترل تغییر مکان‌های جانبی و شتاب سیستم و عملکردی بهتر در کنترل نیروهای داخلی نسبت به گروه ریزشمع قائم از خود نشان می‌دهد. همچنین گروه ریزشمع مایل تاثیر بهتری در کنترل تنش و کرنش برشی سطحی خاک دارد در حالی که عملکرد گروه ریزشمع قائم در کنترل تنش و کرنش نرمال بهتر است. این نتایج در خاک‌های دانه‌ای مشهودتر است.

۵) مقایسه نتایج متغیرهای شتاب و جابجایی در گروه ریزشمع قائم و مایل نشان داد، عملکرد هر دو گروه ریزشمع در کاهش شتاب و جابجایی جانبی در ساختگاه‌های متراکم و سخت‌تر بهتر است. این ویژگی در ریزشمع‌های مایل با وضوح بیشتری مشاهده شد. نتایج تغییرات تنش و کرنش سطحی خاک نیز موید این مطلب است که عملکرد گروه ریزشمع مایل، در کنترل تنش و کرنش‌های سطحی در ساختگاه ماسه‌ای متراکم و رسی متوسط موثرتر است. میتوان چنین نتیجه گرفت که عملکرد گروه ریزشمع مایل در ساختگاه‌های متراکم‌تر و سخت‌تر نسبت به ساختگاه‌های ضعیف‌تر قابلیت اطمینان بالاتری دارد.

۶) با توجه به اینکه نتایج پژوهش، برآیند پاسخ‌های سیستم خاک- ریزشمع تحت اثر مجموعه زلزله‌های دور و نزدیک با ماهیت‌های مختلف است، لزوماً نشان دهنده اثر یکایک این زلزله‌ها نیست. از این رو توجه به اثرات متفاوت رکوردهای نزدیک گسل در هر زلزله صرف نظر از تاثیر کلی این رکوردها بر افزایش پاسخ ریزشمع‌ها ضروری به نظر می‌رسد. به عنوان مثال پاسخ شتاب و جابجایی سیستم در

اثر زلزله‌ی نزدیک کجایی مشابه رکورد دور این زلزله است، درحالی که زلزله‌ی نزدیک چی چی موجب تفاوت قابل ملاحظه در نتایج شده است.

(۷) از دیدگاه اجرایی، برآیند نتایج این پژوهش در کنار مطالعات مهم گذشته در زمینه عملکرد لرزه‌ای سیستم ریزشمع، یک اولویت‌بندی برای استفاده از گروه ریزشمع قائم و مایل در شرایط مختلف مطابق جدول زیر ارائه می‌دهد.

جدول (۶-۱): اولویت‌بندی اجرایی گروه ریزشمع با عملکرد لرزه‌ای

اولویت اجرایی	نوع تسلیح	ساختمان مناسب	ملاحظات
۱	ترکیب گروه ریزشمع قائم و مایل	انواع خاک‌ها	- در نظر گرفتن اثر زلزله‌های نزدیک گسل - کنترل توازن سختی بین ریزشمع‌های قائم و مایل - رعایت زاویه تمایل بهینه در ریزشمع‌های مایل
۲	گروه ریزشمع قائم	انواع خاک‌ها	- در نظر گرفتن اثر زلزله‌های نزدیک گسل - محدودیت افزایش تعداد ریزشمع‌های قائم در نبود ریزشمع‌های مایل
۳	گروه ریزشمع مایل	خاک دانه‌ای متراکم / چسبنده متوسط و سخت	- در نظر گرفتن اثر زلزله‌های نزدیک گسل - اعمال شیب گروه ریزشمع در دو راستای X و Y برای مقابله با زلزله احتمالی - رعایت زاویه تمایل بهینه در ریزشمع‌های مایل

۳-۶- پیشنهادها

موارد زیر توسط نویسنده برای ادامه تحقیقات و توسعه مدل در آینده پیشنهاد می‌شود:

(۱) با توجه به اینکه در اجرا به علت تزریق دوغاب، خاک اطراف ریزشمع تا شعاع معینی سیمانی شده و مشخصات خاک تقویت می‌شود، می‌توان در صورت وجود داده‌های صحرایی یا آزمایشگاهی مناسب، اثر شعاع تزریق و بهبود کیفیت خاک را برای المان‌های خاکی اطراف ریزشمع در نظر گرفت و پاسخ‌های منطبق‌تر با اجرا به دست آورد.

(۲) از آن جاکه عمق و ترکیب لایه‌های خاک بر اثرات ساختگاه تاثیرگذار است، تحلیل و بررسی مدل با عمق ساختگاه بیشتر و تنوع لایه‌های خاک با توجه به مشخصات رکورد ورودی پیشنهاد می‌شود. این کار شرایط مدل‌سازی عددی را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند.

(۳) گرچه مقادیر تغییرمکان‌های قائم در مقابل تغییرمکان‌های جانبی کوچکتر است، ولی در نظر گرفتن اثر مولفه قائم زلزله به عنوان یکی از ویژگی‌های متمایزکننده رکوردهای نزدیک گسل، برای برخی مسائل مانند ارزیابی نشست سازه‌های مستقر بر پی‌های منفرد مسلح شده با گروه ریزشمع نظیر پایه پل‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

(۴) در این پژوهش با زمینه ارزیابی عملکرد لرزه‌ای گروه ریزشمع، چنانچه تعداد بیشتری از رکوردهای زلزله برای تحلیل در نظر گرفته شود، امکان ارزیابی جامع‌تر و دقیق‌تر مسئله را فراهم می‌آورد. از این رو به کارگیری بانک اطلاعاتی بزرگتر از رکوردهای دور و نزدیک گسل برای تحلیل مدل یا مدل‌های مشابه پیشنهاد می‌شود.

- [1] Sabatinia P. J., Tanyua B., Armour T., Groneck P. and Keeley J. (2005), "Micropile Design and Construction", Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [2] Bruce D. A., Juran I. (1997), "DRILLED AND GROUTED MICROPILES: STATE-OF-PRACTICE REVIEW", Vol. III: CONSTRUCTION, QA/QC, AND TESTING, Federal Highway Administration.
- [3] Erdik M. and Durukal E. (2001), "A hybrid procedure for the assessment of design basis earthquake ground", Soil Dynamics and Earthquake Engineering., 21, pp 431-443.
- [4] Bray J. D. and Marek A. R. (2004), "Characterization of forward-directivity ground motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering., 24, pp 815–828.
- [5] Stewart J. P., Chiou Sh. J., Bray J. D., Graves R. W., Somerville P. G. and Abrahamson N. A. (2001), "Ground motion evaluation procedures for performance-based design", PEER, University of California, pp 62-69.
- [6] Somerville P. G., Smith N. F., Graves R. W., Abrahamson N. A. (1997) "Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity", Seismological Research Letters., 68,1,pp 199.
- [7] Chopra A. K. and Chintanapakdee C. (2001), "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context", Soil Dynamics and Earthquake Engineering., 30, pp 1769-1789.
- [8] Kramer SL. (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [9] Davoodi M. and Sadjadi M. (2015), "Assessment of near-field and far-field strong ground motion effects on soil-structure SDOF system", International Journal of Civil Engineering., 13, Nos. 3&4B.
- [10] Wang, G.Q., Zhou, X.Y., Zhang, P.Z. (2002) "Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi Taiwan earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering., 22, pp 73-96..
- [11] Bozorgnia, Y., Niazi, M., and Campbell, K.W. (1995) "Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake, Earthquake Spectra., 11, pp 515-525..
- [12] Tokimatsu K, Mizuno H, Kakurai M. (1996), "Building damage associated with geotechnical problem soils and foundations special issue on geotechnical aspects of the january 17 1995 Hyogoken Nambu earthquake". JSSMFE, 36, 219-34.
- [13] Kishishita T., Saito E. and Miura F. (2000), "Dynamic-response characteristics of structures with micropile foundation system ", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

- [14] Juran I., Benslimane A. and Hanna S. (2001), "Engineering Analysis of Dynamic Behavior of Micropile Systems", *Journal of the Transportation Research Board*, 1772, pp 91-106.
- [15] Sadek M. and Shahrour I. (2004), "Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, pp 473–485.
- [16] Sadek M. and Shahrour I. (2006), "Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26, pp 461-468.
- [17] Gerolymos N., Giannakou A., Anastasopoulos I. and Gazetas G. (2008), Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, pp 705–722.
- [18] Wang Z., Mei G., Cai G. and Yu X. (2009), "Dynamic Finite Element Analysis of Micropile Foundation in Subgrade", *GeoHunan International Conference*, Changsha Hunan, China.
- [19] Shahrour I., Alsaleh H. and Souli M. (2012), "3D elastoplastic analysis of the seismic performance of inclined micropiles", *Computers and Geotechnics*, 39, pp 1–7.
- [20] Ghorbani A., Hasanzadehshooiili H., Ghamari E. and Medzvieckas J. (2014), "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, pp 21–36.
- [21] Capattia M. C., Dezib F. and Moricia M. (2016), "Field tests on micropiles under dynamic lateral loading", *Procedia Engineering*, 158, pp 236 – 241.
- [22] Capattia M. C., Roiaa D., Carbonaria S. and Dezib F. (2017), "Micropile foundation subjected to dynamic lateral loading", *Procedia Engineering*, 199, pp 2324–2329.
- [23] Jalilian Mashhoud H., Yin J., Komak Panah A. and Leunga Y. F. (2018), "Shaking table test study on dynamic behavior of micropiles in loose sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, pp 53–69.
- [24] Ambraseys N. N. and Douglas J. (2003) "Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*., 23, pp 1–18.
- [25] Zhang J. and Tang Y. (2009), "Dimensional analysis of structures with translating and rocking foundations under near-fault ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, pp 1330–1346.
- [26] Moustafa A. and Takewaki I. (2010), "Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, pp 412–422.

- [27] Liu T., Luan Y. and Zhong W. (2012), "A numerical approach for modeling near-fault ground motion and its application in the 1994 Northridge earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 34, pp 52–61.
- [28] Davoodi M., Jafari M.K. and N. Hadiani (2013), "Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ground motion excitation", *Engineering Geology*, 158, pp 66–76.
- [29] Ahmadi E. and Khoshnoudian F. (2015), "Near-fault effects on strength reduction factors of soil-MDOF structure systems", *Soils and Foundations*, 55, pp 841–856.
- [30] Cork T. G., Kim J. H., Mavroeidis G. P. and Kim J. K. (2016), "Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near-fault ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, pp 102–118.
- [31] Yadav K. K. and Gupta V. K. (2017), "Near-fault fling-step ground motions: Characteristics and simulation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, pp 90–104.
- [32] Pu W., Wu M., Huang B. and Zhang H. (2018), "Quantification of response spectra of pulse-like near-fault ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, pp 117–130.
- [33] Yeganeh N. and Fatahi B. (2019), "Effects of choice of soil constitutive model on seismic performance of moment-resisting frames experiencing foundation rocking subjected to nearfield earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, pp 442–45.
- [34] Mazzoni S., McKenna F., Scott M. H. and Fenves G. L. (2007), "OpenSees Command Language Manual", Version 2, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA.
- [۳۵] تهران، حسینی م و کنارنگی ه. (۱۳۹۶) "کاربرد نرم افزار OpenSees در مدل سازی و تحلیل سازه ها" چاپ چهارم، انتشارات آزاده.
- [36] Wotherspoon L.M. (2006), "Three dimensional pile finite element modelling using OpenSees", NZSEE, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- [37] Cheng Z. and Jeremic B. (2009), "Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, pp 1405–1416..
- [38] Lanzo G., Pagliaroli A. and D'Elia B. (2003), "Numerical study on the frequency-dependent viscous damping in dynamic response analyses of ground", La Sapienza, University of Rome, Rome, Italy.
- [39] PARK D. and HASHASH Y. M. A. (2004), "Soil Damping Formulation in Nonlinear TIME Domain Site Response Analysis", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp 249-274.
- [40] Klushmer R.L. and Lysmer J. (1974), "Finite Element Method Accuracy For Wave Propagation Problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 99, pp 421-7.

- [41] McGann C. and Arduino P. (2011), "OpenSees Example: Three-Dimensional Site Response Analysis of Sloping Ground", University of Washington, (https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Three-Dimensional_Site_Response_Analysis_of_Sloping_Ground), [Online].
- [42] Lysmer, J. and Kuhlemeyer, A.M. (1969). "Finite dynamic model for infinite media", Journal of the Engineering Mechanics Division, 95, pp 859-877..
- [43] McManus K. J., Turner J. P. and Charton G. (2005), "Inclined reinforcement to prevent soil liquefaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, NZSEE Conference..
- [44] Karimi Z. and Dashti Sh. (2015), "Numerical and Centrifuge modeling of seismic soil-foundation-structure interaction on liquefiable ground", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- [45] Verdugo R., Ochoa F., Gonzales J. and Valladares G. (2018), "Site effect and site classification in areas with large earthquakes", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, In press.
- [46] Federal Emergency Management Agency (2009), "Quantification of Building Seismic Performance": FEMA P695.
- [47] KomakPanah A., Jalilian Mashhoud H., Yin J and Leung Y. (2018), "Shaking table investigation of effect of inclination angle on seismic performance of micropiles", International Journal of Geomechanics., 18.

ABSTRACT:

Studying the performance of micropile system as an effective and affordable method and with high executive capability for seismic retrofitting of the site and foundation and considering the different characteristics and effects of nearfield and farfield earthquakes on structures, justifies the need to study the performance of micropile group under nearfield and farfield earthquakes. In this research, by using Opensees software, a standard model of soil-micropile-cap consists of two types of granular and cohesive soil with elastoplastic behavior and different mechanical characteristics including loose granular soil ($D_r = 40\%$), dense granular soil ($D_r = 80\%$), soft clay and medium clay which were reinforced with two groups of vertical and inclined concrete piles with linear elastic behavior. The system was affected by three sets of farfield and nearfield earthquakes due to the site shear wave velocity (V_{s30}).

The results of time history analysis including the responses of the micropile group (acceleration, horizontal displacement and internal forces) and soil (surface stress and strain) were compared and evaluated and important points for using the micropile group in order to seismic retrofitting in areas close to epicenter and far from it were presented. The results showed that the effect of near-fault records significantly increases the horizontal displacement in weaker sites such as loose sandy soil and soft clay. The increase in lateral displacement due to near earthquakes compared to far earthquakes is 125% and 124% for the vertical and inclined micropile group in the loose granular site and 15% and 13% for the vertical and inclined micropile group in the dense granular site, respectively. Also, the increase in lateral displacement due to near earthquakes compared to far earthquakes is 119% and 125% for the vertical and inclined micropile group in the soft clay site and 15% and 12% for the vertical and inclined micropile group in the medium clay site, respectively. The results in both granular and cohesive sites showed that the inclined micropile group showed almost the same performance in controlling horizontal displacement and system acceleration and performed better in controlling internal forces than the vertical micropile group. Also, the inclined micropile group has a better effect in controlling the soil surface shear stress and shear strain, while the performance of the vertical micropile group is better in controlling normal stress and normal strain .

Key words:

Micropile group, Nearfield and farfield earthquakes, Time history analysis, Finite elements, Opensees.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Geotechnical Engineering

Time history analysis of micropile group for farfield and nearfield earthquakes

By:

Ehsan Mohamadi Esfahani

Supervisor:

Dr. Reza Naderi

February 2021