

تأثیر حرکات پالس مانند زلزله‌های حوزه نزدیک گسل دارای خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده بر پاسخ سازه‌های بتنی

میثم محبوبی نیازمندی^{۱*}، سهراب میراثی^۲، محمد مؤمنی^۲، محمد بخشنده^۳، حسین لطفی^۴

۱- دکترای ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، شیمی، محیط زیست و مصالح، دانشگاه بولونیا، بولونیا، ایتالیا

۴- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

چکیده

خصوصیات زلزله‌ها برای ساختگاه‌های نزدیک به چشمه لرزه‌زا و دور از آن، هم به لحاظ دامنه و هم محتوای فرکانسی متفاوت است. مطالعه رفتار سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های دور از گسل بیانگر اثرات بیشتر این نوع زلزله بر سازه بوده‌اند. عمده این اثرات به خصوصیات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکت پرتابی دارای اثر تغییرمکان ماندگار وابسته است. از اینرو خصوصیات زلزله‌های نزدیک گسل باید در طراحی و تحلیل سازه‌ها در نظر گرفته شود. هدف تحقیق حاضر بررسی اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک بر پاسخ سازه‌های بتنی می‌باشد. بدین منظور رکوردهای حاصل از ایستگاه‌های مختلف زلزله چی‌چی به‌عنوان شتابنگاشت‌های مبنا انتخاب شد. سپس با استفاده از روش‌های تحلیلی، طیف پاسخ این رکوردها با در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون آن (حذف پالس‌های غالب) در جهت‌های شرق-غرب و شمال-جنوب تعیین شد. در ادامه با تحلیل تاریخچه زمانی بر روی دو سازه ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه بتنی، برای هفت رکورد زلزله چی‌چی، در یافت (جابجایی نسبی) و برش پایه طبقات در سازه‌های مذکور بررسی شد. نتایج نشان داد که با توجه به ماهیت غیرقابل پیش‌بینی زلزله، پاسخ در یافت و برش پایه طبقات در سازه‌های مورد مطالعه در جهات مختلف در برخی موارد افزایش و یا کاهش یافته است. بنابراین می‌توان دریافت که جهت‌پذیری همیشه تأثیر یکنواختی بر رفتار سازه نداشته و از الگوی ثابتی پیروی نمی‌کند. علاوه بر این، نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع سازه و در نتیجه افزایش پیروی آن، تأثیر جهت‌پذیری رکورد زلزله بر پاسخ سازه افزایش می‌یابد. این در حالی است که در سازه‌های کوتاه‌تر در بسیاری از موارد جهت‌پذیری رکورد زلزله، تأثیر چندانی بر پاسخ سازه نداشته و حتی در برخی موارد، باعث کاهش آن می‌گردد.

کلمات کلیدی: زلزله حوزه نزدیک، خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده، زلزله چی‌چی، پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بتنی، در یافت و برش پایه طبقات.

*نویسنده مسئول: میثم محبوبی نیازمندی

پست الکترونیکی: m.mahboubi@sutech.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

ماهیت زلزله‌ها متفاوت بوده و تأثیر آنها بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها متفاوت است [۱]. همین موضوع ارزیابی مکانیزم اثر انواع مختلف زلزله‌ها بر عملکرد سازه‌ها را به یکی از مسائل مورد توجه مهندسی سازه و زلزله تبدیل نموده است [۲]. در گذشته به دلیل تراکم کم شبکه‌های لرزه‌نگاری، امکان ثبت دقیق زلزله‌ها به راحتی امکان‌پذیر نبود؛ اما به مرور زمان، با افزایش شبکه‌ها و پیشرفت دستگاه‌های لرزه‌نگاری، امکان ثبت نگاشت‌های متعددی از زلزله‌ها در موقعیت‌های مختلف فراهم گردید. براساس همین پیشرفت‌ها، محققین شاهد اثرات متفاوت زلزله‌ها بر رفتار سازه‌ها بوده‌اند [۳ و ۴]. این مشاهدات به صورت ویژه در زمین‌لرزه‌های پارکفیلد (۱۹۶۶) و سن‌فرناندو (۱۹۷۱) در آمریکا به سرآغازی برای پژوهش در خصوص شناسایی ماهیت ارتعاشات ناشی از حرکات نیرومند زمین در نزدیکی مرکز زمین‌لرزه (زلزله‌های حوزه نزدیک گسل) تبدیل شد [۵]. علاوه بر این، مطالعات صورت گرفته در خصوص خسارات فراوان ناشی از زلزله‌های نورتریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵) و چی‌چی (۱۹۹۹) نشان داد که تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای بین رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در مقایسه زلزله‌های حوزه دور وجود دارد [۶].

در زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل فاصله اندک محل وقوع زلزله تا گسل، اثر کاهندگی امواج زلزله ناچیز است. از همین رو این زلزله‌ها دارای محتوای فرکانسی بالایی هستند که منجر به ایجاد پالس‌هایی با پیروید زیاد می‌شوند [۷ و ۸]. در این زلزله‌ها، حرکات زمین به شدت به مکانیزم گسلش، جهت انتشار شکست نسبت به ساختگاه و نیز جهت لغزش گسل وابسته هستند [۸]. مطالعات متعدد گذشته به وضوح بیانگر این مطلب بوده‌اند که رکوردهای زلزله‌های نزدیک را می‌توان به دو بخش با ضربه و بدون ضربه تقسیم کرد [۳-۶]. اثر ضربه در این رکوردها معمولاً به صورت یک شوک پالس‌مانند شتاب، سرعت و جابجایی رخ می‌دهد که می‌توان آنها را برحسب تغییرات بزرگ در تاریخچه‌های شتاب، سرعت و جابجایی دارای محتوای فرکانسی بالا مشاهده نمود [۹]. این ویژگی متمایز پالس‌مانند با پیروید بلند به خصوص در رکوردهای سرعت و جابجایی در امتداد عمود بر گسل زلزله‌های حوزه نزدیک قابل مشاهده است و اثرات آنها منجر به افزایش بخش پیروید بلند طیف پاسخ شتاب می‌گردد. همین موضوع مکانیزم اثر این نوع زلزله‌ها بر رفتار سازه‌ها را بسیار متفاوت از زلزله‌های حوزه دور می‌نماید [۱-۴]. بیشتر این اختلافات نتیجه وجود دو خصوصیت متمایز یعنی جهت‌پذیری پیش‌رونده^۱ و حرکت پرتابی^۲ در زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد [۹]. اثرات این خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل‌های فعال بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، لزوم در نظر گرفتن چنین ویژگی‌هایی را در تحلیل‌های دینامیکی بسیار حائز اهمیت نموده است [۱۰ و ۱۱].

ارزیابی اثرات ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بر روی سازه‌ها موضوع نسبتاً جدیدی است که در دو دهه اخیر نظرات بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است [۱-۱۴]. به طور مثال، اندرسون و برترو (۱۹۸۷) [۱۲] با بررسی رفتار یک سازه فولادی تحت اثر زلزله حوزه نزدیک امپریال‌والی (۱۹۷۹) دارای حرکات پالس‌گونه به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت پیروید پالس حرکت زمین به پیروید طبیعی سازه و همچنین افزایش نسبت شتاب زمین به مقاومت تسلیم سازه، سبب افزایش پاسخ غیرخطی و خسارات وارد بر سازه می‌گردد. استیوارت و همکاران^۳ (۲۰۰۲) [۱۳] با بررسی اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بر رفتار ستون‌های طراحی شده بر مبنای آئین‌نامه‌ها دریافتند که به دلیل اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده در شتابنگاشت این زلزله‌ها، تغییر شکل‌های ماندگار بر روی ستون‌ها باقی می‌ماند. چامپیون و لیل^۴ (۲۰۱۲) [۱۷] با بررسی تأثیر جهت‌پذیری زلزله‌های حوزه نزدیک بر احتمالی خطر فروپاشی لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه دریافتند که ظرفیت فروپاشی پیش‌بینی شده به شدت تحت تأثیر تغییرات دوره پالس و شکل‌پذیری قاب‌هاست. همچنین ارزیابی دقیق خطر فروپاشی لرزه‌ای توسط این محققین نشان داد که احتمال پیش‌بینی شده ریزش در ۵۰ سال برای ساختمان‌های بتن‌آرمه در یک سایت نزدیک به گسل تقریباً ۶٪ است که به طور قابل توجهی بالاتر از احتمال ۱٪ در نظر گرفته شده برای سایت‌های دور از گسل می‌باشد. آکار و همکاران^۵ (۲۰۱۸) [۱۴] با ارزیابی اثرگذاری پارامترهای اصلی لرزه‌ای وابسته به محل گسل‌های امتدادلغز بر تقاضاهای حرکت زمین ناشی

^۱ Forward directivity

^۲ Fling step

^۳ Stewart et al.

^۴ Champion and Liel

^۵ Akkar et al.

از جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک، توصیه‌هایی را برای گنجاندن احتمالی اثرات جهت‌پذیری برای تخمین تقویت طیف‌های رکورد زلزله در استانداردهای طراحی لرزه‌ای پیشنهاد نمودند. چن و همکاران⁶ (۲۰۲۰) [3] با آنالیز پاسخ لرزه‌ای یک سازه برج تحت اثر حرکات زمین نزدیک به گسل دارای خصوصیات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکات پالس‌مانند دریافتند که این خصوصیات منجر به ایجاد جابجایی‌های گره‌ای بزرگ در سازه برج می‌شوند و انحنای زیادی در قسمت پایین سازه ایجاد می‌نمایند. این محققین همچنین با مطالعه پاسخ‌های دینامیکی برج برمبنای شتاب اوج زمین (PGA) و شتاب اوج موثر (IEPA) به‌عنوان شاخص‌های مقیاس‌بندی رکوردها، به این نتیجه رسیدند که پراکندگی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه برج با مقیاس‌بندی دامنه، کوچکتر از موارد بدون مقیاس‌بندی است و اندازه‌گیری شدت IEPA برای مقیاس‌بندی رکوردهای تکانشی نزدیک به گسل مناسب‌تر از PGA است. رویز-گارسیا و راموس-کروز⁷ (۲۰۲۰) [۱۵] با ارزیابی تقاضای جابجایی‌های ماندگار در ساختمان‌های فولادی مجهز به سیستم قاب خمشی تحت اثر خصوصیات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکات پالس‌مانند زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل، دریافتند که سازه‌ها تحت رکوردهای زلزله نزدیک و دور از گسل، دارای رفتار متفاوتی می‌باشند؛ به این معنی که دامنه جابجایی‌های ماندگار در طبقات خاصی از سازه با توجه به دامنه کمتر حاصل از حرکات کوچکتر زمین، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، این محققین دریافتند که هر دو مدل پالس سرعت منجر به دامنه متفاوتی از تقاضاهای جابجایی‌های ماندگار محاسبه‌شده از حرکات زلزله‌های ثبت‌شده می‌گردند. بهاگات و همکاران⁸ (۲۰۲۱) [8] با بررسی پاسخ لرزه‌ای یک ساختمان ۱۰ طبقه جداسازی‌شده از پایه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک گسل دریافتند که به‌دلیل خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده در این نوع زلزله‌ها، نسبت دریافت و شتاب‌های کف طبقات سازه تحت اثر پالس‌های غالب، حذف شده است. همچنین این محققین دریافتند که پاسخ‌های جداساز و زیرسازه برای پالس‌هایی با ویژگی‌های حرکت پرتابی، در مقایسه با پالس‌هایی با ویژگی‌های جهت‌پذیری پیش‌رونده بزرگتر هستند. محمود و همکاران⁹ (۲۰۲۱) [۱۶] با بررسی تأثیر سیستم کف بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح تحت اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک گسل به این نتیجه رسیدند که سیستم کف به‌طور قابل توجهی بر پاسخ القایی طبقات و همچنین سطح آسیب ساختمان‌ها اثرگذار است. همچنین آنها دریافتند که صرف‌نظر از نوع طبقه، تقاضای پاسخ و مقادیر شاخص آسیب برای حرکات پالس‌مانند با جهت‌پذیری پیش‌رونده تشدید می‌شوند. ساها و همکاران¹⁰ (۲۰۲۲) [10] با ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در فواصل مختلف گسیختگی، پاسخ تغییرمکان‌های ماندگار بین طبقات، شتاب اوج کف و رفتار هیستریتیک قاب‌ها را برای هر یک از سناریوهای مختلف جهت‌پذیری پیش‌رونده ناشی از این زلزله‌ها تعیین نمودند.

اگرچه اثرات نادیده گرفتن خصوصیت حرکات پرتابی زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه‌ها در طول بسیاری از زلزله‌ها به خوبی شناخته شده و مطالعات زیادی در این خصوص به انجام رسیده، با این حال اثر خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده این نوع زلزله‌ها در تحقیقات محدودی مورد بررسی قرار گرفته است. بر همین اساس در تحقیق حاضر در تلاش است تا اثر این خصوصیت در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل را بر پاسخ رفتار سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار دهد. به همین منظور با مدلسازی دو سازه بتنی ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه دارای سیستم قاب خمشی ویژه و انجام تحلیل تاریخچه زمانی تحت اثر رکوردهای زلزله حوزه نزدیک، اثر خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده بر رفتار این سازه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- ضرورت انجام تحقیق

از آنجایی که خصوصیات زلزله هم به لحاظ دامنه و هم محتوای فرکانسی برای ساختگاه‌ها در فواصل نزدیک به چشمه زلزله و دور از آن متفاوت است [2-5]، لذا لزوم مطالعه و مقایسه چنین اثراتی بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها ضروری است. در سال‌های اخیر سازه‌های بیشماری در محدوده نزدیک گسل ساخته شده‌اند که اثرات حوزه نزدیک در طراحی آنها نادیده گرفته شده است. طبق تحقیقات گذشته در

⁶ Chen et al.

⁷ Ruiz-García and Ramos-Cruz

⁸ Bhagat et al.

⁹ Mahmoud et al.

¹⁰ Saha et al.

این زمینه مشخص شده که تاثیرات زلزله‌های حوزه نزدیک از تاثیرات ارائه شده در آئین‌نامه‌ها بیشتر است [۱۷]. زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل داشتن حرکات پالس مانند با سرعت بالا، نیروی زیادی را در یک مدت زمان محدود به سازه وارد می‌کنند. در زلزله‌های حوزه نزدیک که اوج پالس سرعت موجود در آنها از شدت بیشتری برخوردار است و یا مدت زمان پالس در آنها بزرگتر است، پاسخ سازه افزایش می‌یابد، لذا سازه‌هایی که به منبع لرزه‌زا نزدیکتر هستند، باید شکل‌پذیری بیشتری داشته باشند تا بتوانند در مقابل زلزله مقاومت بیشتری از خود نشان دهند [۱۸]. یافته‌های مطالعات محققین مختلف در گذشته به وضوح نشان داده است که علل اصلی مکانیزم رفتاری متفاوت زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های حوزه دور ناشی از دو خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکت پرتابی در نگاشت‌های حوزه نزدیک می‌باشد [۱۹]. با وجود آگاهی از این تفاوت‌ها، به علت کمبود اطلاعات تا پیش از دو دهه اخیر، مطالعات اندکی بر روی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک و تاثیر آنها بر رفتار سازه‌ها انجام گرفته است. اما با وقوع زلزله‌های نورتریج آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه ژاپن (۱۹۹۵)، آزمایش ترکیه (۱۹۹۹) و چی چی تایوان (۱۹۹۹)، اطلاعات بسیار ارزشمندی در مورد خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک حاصل شد که راه را برای مطالعه بیشتر جهت ارزیابی اثرات این زلزله‌ها بر رفتار سازه‌ها هموارتر نمود [۲۰].

اگرچه بیشتر آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه روش‌هایی را برای مقیاس‌سازی رکورد زلزله‌ها پیشنهاد کرده‌اند، با این حال یکی از اساسی‌ترین چالش‌ها جهت استفاده از رکوردهای ثبت‌شده برای زلزله‌های حوزه نزدیک، نحوه فیلتر کردن و مقیاس‌سازی آنهاست [۲]. به‌طور معمول، رکوردهای خام ثبت‌شده برای زلزله‌ها به وسیله دستگاه‌های لرزه‌نگار اغلب به دلیل وجود خطاهای محاسباتی و دستگامی با استفاده از روش‌های پردازش استاندارد همچون روش اصلاح پایه^{۱۱} و فیلتر باند بالا^{۱۲} اصلاح شده و خطاهای موجود در آنها حذف می‌گردند [۱]. با توجه توجه به اینکه رکوردهای ثبت‌شده برای زلزله‌های حوزه نزدیک به شدت به مشخصات منبع زلزله وابسته هستند، عمدتاً اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکت پرتابی دارای پالس‌های با سرعت زیاد در رکوردهای سرعت و تغییر مکان آنها قابل مشاهده است. حال آنکه پردازش استاندارد و اصلاح این رکوردها با روش‌های مذکور در برخی موارد منجر به حذف این اثرات (پالس‌های سرعت و تغییر مکان با دامنه بالا) از رکورد زلزله گردیده و رکورد مقیاس‌شده قادر نیست خصوصیات منبع لرزه‌زا را به‌طور دقیق نشان دهد. به همین دلیل در سال‌های گذشته مطالعات متعددی در خصوص اثرات تغییر مکان ماندگار بر روی سازه‌ها برخلاف جهت‌پذیری پیش‌رونده انجام نشده است [۱، ۸-۱۴]. بر مبنای این مطالعات معمولاً توصیه می‌شود که از رکوردهای مقیاس‌نشده زلزله‌های حوزه نزدیک دارای خصوصیت حرکت پرتابی برای انجام آنالیزها استفاده شود [۹، ۲۶ و ۳۶]، اما این مسئله در مورد خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده تاکنون به‌طور جدی مورد بررسی قرار نگرفته است و همین موضوع ضرورت انجام تحقیق حاضر در خصوص ارزیابی اثر این خصوصیت رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه‌ها را به‌وضوح نشان می‌دهد.

۳- خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

در اوایل دهه ۱۹۷۰، بولت [۲۱] پالس‌های سرعت منسجمی را در اثر وقوع برخی زمین‌لرزه‌ها شناسایی کرد که عموماً دارای یک یا چند پالس مجزا در تاریخچه زمانی سرعت بودند. در ادامه این تحقیقات، هادسون و هاوسنر^{۱۳} [۲۲]، برترو و همکاران^{۱۴} [۲۳] با مطالعه بیشتر بر روی این زمین‌لرزه‌ها، مفهوم زلزله‌های حوزه نزدیک گسل را گسترش دادند. مطالعات این محققین نشان داد که حرکات لرزه‌ای زمین که در مناطق حوزه نزدیک و در جهت گسیختگی گسل ثبت می‌شوند با حرکات مشاهده شده در مناطق دور از گسل بسیار متفاوت هستند [۲۴]. با شناسایی برخی از خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک، هال و همکاران (۱۹۹۵) [۲۵]، هیتون و همکاران (۱۹۹۵) [۲۶] و ایوان (۱۹۹۷) [۲۷] با مطالعه بر روی این نوع زلزله‌ها دریافتند که زلزله‌های حوزه نزدیک اگرچه ممکن است بزرگای کوچک (از نظر ریشتر) و یا دامنه کوچکی داشته باشند، اما به دلیل دارا بودن پالس‌های بحرانی انرژی، از پتانسیل تخریب بالایی برخوردارند [۲۲] و اثرات متفاوتی را نسبت به زلزله‌های حوزه دور بر رفتار سازه‌ها ایجاد می‌نمایند [۲۸ و ۲۹].

¹¹ Baseline Correction

¹² High-Pass Filter

¹³ Hudson and Housner

¹⁴ Bertero et al.

محدوده نزدیک گسل معمولاً در فاصله‌ای بین ۱۵ تا ۶۰ کیلومتری از گسل فعال فرض شده [۳۰] و فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، برای ثبت نگاشت‌های حوزه نزدیک در نظر گرفته می‌شود [2]. در این محدوده، رکوردهای حوزه نزدیک به شدت به مکانیزم شکست چشمه لرزه‌زا و جهت انتشار گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و جهت لغزش گسل وابسته هستند [۸، ۱۰-۱۲]. تاریخچه زمانی این نوع رکوردها دارای ویژگی‌های منحصر به فردی همچون ارتعاشات پالس‌مانند دارای پالس‌هایی با دامنه و زمان تناوب بلند، نسبت‌های PVG/PGA و PGD/PGA زیاد، شکل طیف پاسخ غیرعادی و وجود قسمت عمده انرژی در یک یا چند پالس می‌باشند [6]. این ویژگی‌ها باعث ایجاد دو اثر به نام‌های جهت‌پذیری شکست^{۱۵} (پالس نوع A) و حرکت پرتابی^{۱۶} (پالس نوع B) در زلزله‌های حوزه نزدیک می‌گردند [3-5 و 11].

جهت‌پذیری شکست شامل دو مود جهت‌پذیری پیش‌رونده^{۱۷} (رو به جلو) و جهت‌پذیری پس‌رونده^{۱۸} (رو به عقب) می‌باشد که مفهوم آن با در نظر گرفتن جهت انتشار شکست گسل مطابق شکل ۱ قابل توصیف است. زمانی که یک گسل شروع به شکسته شدن می‌کند، شکست از نقطه‌ای بر روی امتداد گسل ایجاد شده و بسته به محل آغاز گسیختگی به طرف ابتدا و انتهای گسل و یا هر دو طرف آن گسترش می‌یابد [۳۱ و ۳۲]. مطابق شکل ۱ ملاحظه می‌گردد که اگر انتشار شکست گسل به سمت ساختگاه و جهت لغزش گسل نیز در جهت ساختگاه باشد (ساختگاه A)، جهت‌پذیری پیش‌رونده رخ می‌دهد؛ حال چنانچه ساختگاه در نزدیکی مرکز زمین‌لرزه باشد و انتشار شکست به سمت دور شدن از ساختگاه باشد (ساختگاه B)، جهت‌پذیری پس‌رونده رخ می‌دهد [۳۳]. انرژی زلزله در طول مدت ارتعاش در ساختگاه A در ابتدای ارتعاش به صورت یک پالس ضربه‌ای (شوک) با دامنه بزرگ و در ساختگاه B به صورت پراکنده آزاد می‌شود [32]. نگاشت زمین‌لرزه‌ها در حالت جهت‌پذیری پس‌رونده دارای مدت زمان بیشتر و پالس‌های متعدد با دوره تناوب کوتاه و دامنه کوچک بوده، اما در حالت جهت‌پذیری پیش‌رونده، معمولاً دارای مدت زمان کوتاه، با یک پالس ویژه با دامنه زیاد و دوره تناوب متوسط تا بلند هستند. در این حالت به دلیل نزدیک بودن سرعت انتشار شکست به سرعت موج برشی در سنگ بستر منبع زلزله، پالس‌های غالب در تاریخچه زمانی سرعت ایجاد می‌شوند [۳۴]. در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل ابتدا موج برشی و سپس شکست به سمت ساختگاه انتشار می‌یابد و این مسئله باعث می‌شود که یک موج پالس‌مانند افقی با دامنه زیاد در ابتدای نگاشت‌ها ناشی از جهت‌پذیری پیش‌رونده در جهت عمود بر امتداد گسل دیده شود [5 و 32]. در سمت مقابل خصوصیت حرکت پرتابی در رکورد زلزله‌های حوزه نزدیک با پالس‌های سرعت با دامنه زیاد و یک گام یکنواخت در تاریخچه زمانی تغییرمکان قابل مشاهده است [28]. این حرکت باعث افزایش تقاضای نیاز سازه‌های چندطبقه جهت اتلاف انرژی ورودی ناشی از زلزله به آنها گردیده و در نتیجه خطر شکست ترد برای سیستم‌های سازه‌ای ضعیف را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [5].

به طور خلاصه می‌توان گفت که اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده (پالس نوع A) زمانی ایجاد می‌شود که گسیختگی گسل با سرعتی تقریباً برابر با سرعت موج برشی به سمت ساختگاه انتشار یابد، در حالی که اثرات حرکت پرتابی (پالس نوع B) در رکورد جابجایی زلزله‌های حوزه نزدیک گسل زمانی ایجاد می‌شود که تغییرمکان‌های دائمی (جابجایی ماندگار) زمین^{۱۹} در اثر تغییرشکل‌های تکتونیکی صفحات گسل و همراه شدن آن با مکانیزم گسلش در طول فعالیت لرزه‌ای وجود داشته باشد [28 و ۳۵].

اثرات ناشی از خصوصیات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکت پرتابی حرکات زمین در زلزله‌های حوزه نزدیک از روی تاریخچه‌های زمانی سرعت و جابجایی این زلزله‌ها به راحتی قابل شناسایی است [8]. مطالعات محققین در سال‌های اخیر نشان داده است که بین خصوصیات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکت پرتابی در رکوردهای حرکت زمین در زلزله‌های حوزه نزدیک تفاوت‌هایی وجود دارد [۳۶ و ۳۷]. تاریخچه زمانی سرعت در اثر خصوصیت حرکت پرتابی شامل یک پالس سرعت غالب یک‌طرفه است که منجر به یک مرحله یکنواخت در تاریخچه زمانی جابجایی می‌شود. این در حالی است که تاریخچه زمانی سرعت ناشی از خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده حاوی یک

¹⁵ Rupture Directivity

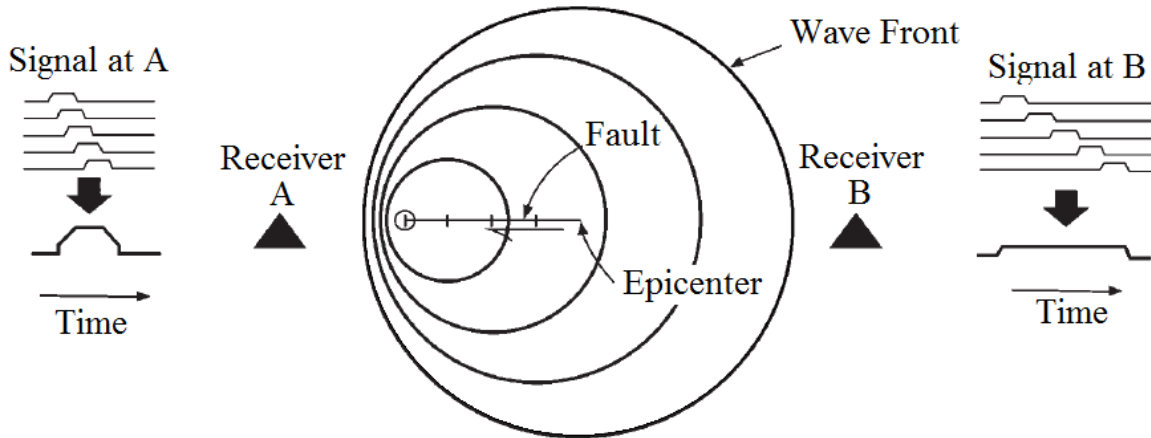
¹⁶ Fling step

¹⁷ Forward Directivity

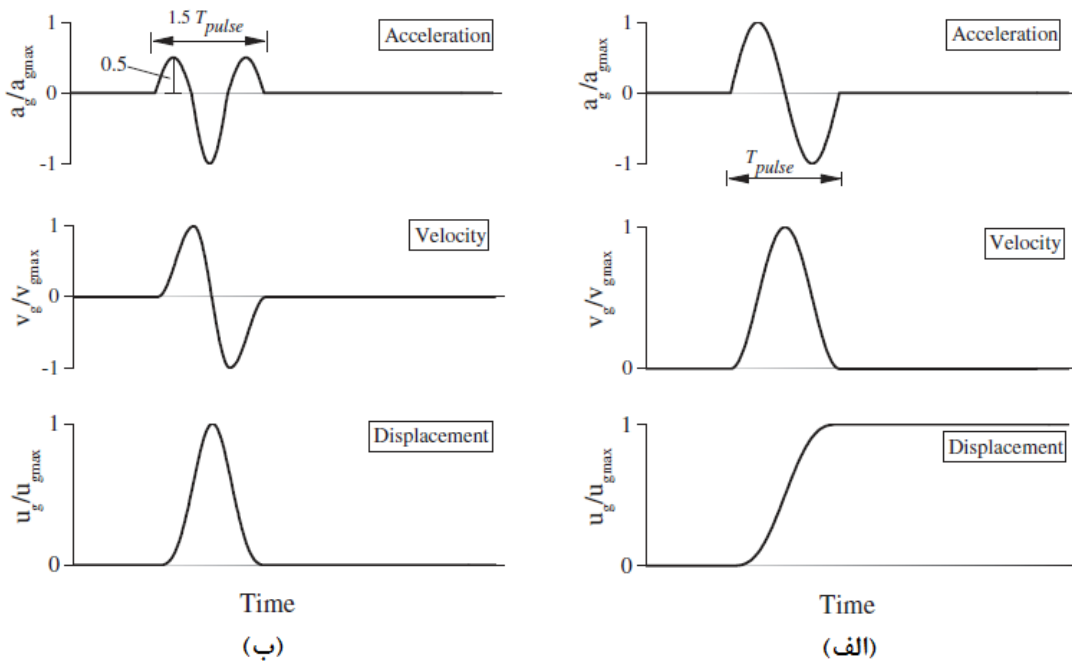
¹⁸ Backward Directivity

¹⁹ Permanent Displacement of the Ground

پالس سرعت غالب دوطرفه است. بنابراین ساختمان‌هایی که در معرض چنین حرکات زمینی قرار می‌گیرند، باید انرژی را در چند سیکل تلف کنند، زیرا در مدت زمان نسبتاً کوتاهی در معرض مقادیر زیادی انرژی لرزه‌ای قرار می‌گیرند [4 و 33]. شکل ۲ مدل ریاضی نرمالایز شده مربوط به خصوصیات جهت‌پذیری پیش‌رونده و همچنین تغییر مکان ماندگار زمین ناشی از حرکت پرتابی را در اثر زلزله‌های حوزه نزدیک نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳، خصوصیات جهت‌پذیری پیش‌رونده و حرکت پرتابی برای زلزله‌ها در نزدیکی گسل‌های شیب‌لغز و امتدادلغز به صورت شماتیک نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که در زلزله با مکانیزم شیب‌لغز مانند زلزله چی چی تایوان (۱۹۹۹)، پالس جهت‌پذیری شکست در جهتی عمود بر شیب گسل رخ داده و پالس حرکت پرتابی (جابجایی ماندگار زمین) در جهتی موازی با شیب گسل جهت‌گیری شده و دارای مؤلفه‌هایی هم در جهت قائم و هم در جهات افقی عمود بر امتداد می‌باشد. این در حالی است که در زلزله با مکانیزم امتدادلغز مانند زلزله کواکایی ترکیه (۱۹۹۹)، پالس جهت‌پذیری شکست در جهت عمود بر امتداد گسل رخ داده و پالس جابجایی ماندگار زمین موازی با امتداد گسل جهت‌گیری می‌شود [۳۸]. اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و جابجایی ماندگار زمین (حرکت پرتابی) ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک لندنز (۱۹۹۲) و لوماپریتا (۱۹۹۸) در تاریخچه‌های زمانی شتاب، سرعت و جابجایی آنها به وضوح در شکل ۴ نشان داده شده است.

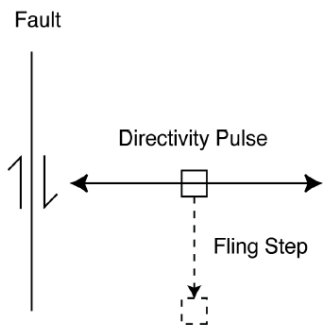


شکل ۱: اثرات ناشی از جهت‌پذیری‌های پیش‌رونده و پس‌رونده در حین شکست گسل برای ساختگاه‌های A و B [32]

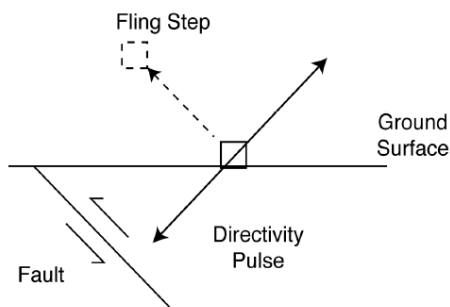


شکل ۲: مدل ریاضی نرمالایز شده مربوط به خصوصیات (الف) جهت‌پذیری پیش‌رونده (پالس نوع A)، (ب) حرکت پرتابی (پالس نوع A) [33]

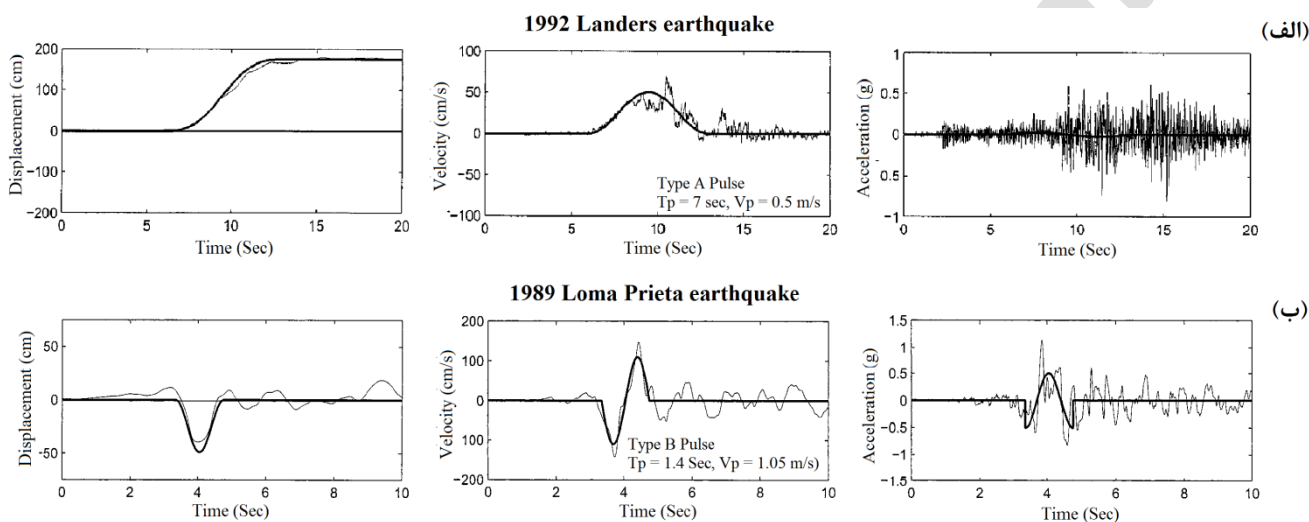
STRIKE SLIP
(Map View)



DIP SLIP
(Cross Section)



شکل ۳: جهت پذیری شماتیک پالس های نگاشت زلزله ها و جابجایی های ماندگار زمین برای گسل های شیب لغز و امتداد لغز [4]



شکل ۴: تاریخچه های زمانی شتاب، سرعت و جابجایی ثبت شده برای ویژگی های (الف) جهت پذیری پیش رونده (پالس نوع A) در زلزله لندرز (۱۹۹۲) و (ب) جابجایی ماندگار زمین (حرکت پرتابی) (پالس نوع B) در زلزله لوما پریتا (۱۹۸۹) [24]

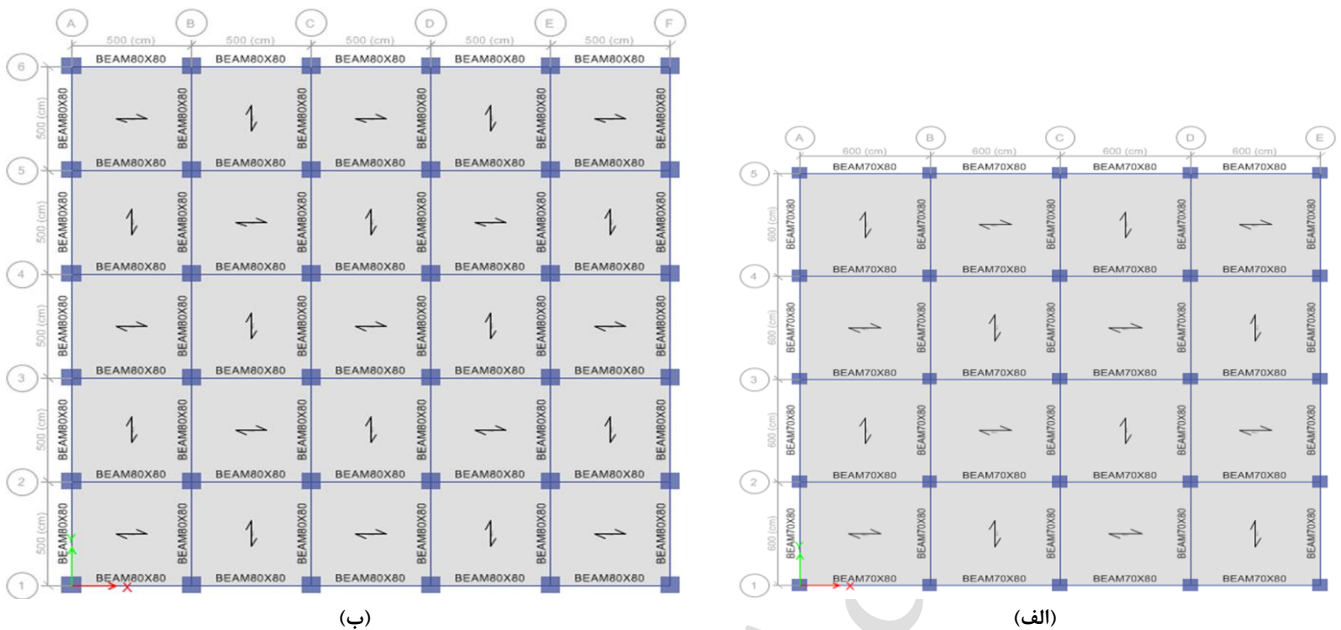
۴- روش تحقیق

۴-۱- طراحی و مدلسازی اولیه سازه ها

در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از نرم افزار ETABS²⁰ اقدام به مدلسازی ساختمان های بتنی ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه شد. سازه های مورد مطالعه از نوع مسکونی در شهر تهران واقع بر خاک نوع II و دارای سیستم باربر قاب خمشی ویژه می باشند. تمامی اتصالات تیر به ستون در قاب های خمشی از نوع گیردار فرض شده و اتصالات پای ستون ها به زمین نیز از نوع تکیه گاه های کاملاً گیردار در نظر گرفته شده اند. پلان سازه های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه مورد مطالعه مطابق شکل ۵- الف و ب در نظر گرفته شد. این پلان ها به گونه ای انتخاب شد که نسبت ارتفاع به عرض سازه های مورد مطالعه به ترتیب کمتر از ۱/۵ برای ساختمان ۱۰ طبقه و بین ۱/۵ تا ۳ برای ساختمان ۱۵ طبقه باشد. بر این اساس، پلان سازه ۱۰ طبقه با ابعاد ۲۴×۲۴ متر و دارای چهار دهانه ۶ متری و همچنین پلان سازه ۱۵ طبقه با ابعاد ۲۵×۲۵ متر و دارای پنج دهانه ۵ متری در نظر گرفته شد. ارتفاع کف زیرین تا روی کف بالایی برای هر طبقه برابر ۳ متر فرض شد. بر همین اساس نسبت ارتفاع به عرض سازه های مورد مطالعه برای سازه ۱۰ طبقه برابر ۱/۲۵ و برای سازه ۱۵ طبقه برابر ۱/۸ می باشد. جدول ۱

²⁰ <https://www.csiamerica.com/products/etabs>

خصوصیات مصالح مورد استفاده (بتن مصرفی در دال‌ها و فولاد مصرفی در تیر و ستون‌ها) جهت طراحی سازه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۵: پلان سازه‌های بتنی مدلسازی شده، (الف) مدل ۱۰ طبقه و (ب) مدل ۱۵ طبقه

جدول ۱: مشخصات مصالح مورد استفاده در مدلسازی سازه‌ها

نوع مصالح	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (Kg/m^2)	مقاومت فشاری (Kg/m^2)	وزن واحد حجم (Kg/m^3)	تنش تسلیم فولاد (Kg/m^2)
بتن	۰/۲	$2/23 \times 10^9$	250×10^4	۲۵۰۰	-
فولاد	۰/۳	$2/00 \times 10^{10}$	-	۷۸۵۰	2400×10^4

از آنجایی که سازه در مرحله نخست با بارهای ثقلی درگیر می‌شود و حتی پیش از بهره‌برداری به‌طور مداوم وزن اسکلت خود را تحمل می‌کند، لذا ابتدا ترکیب بارهای ثقلی بر روی سازه اعمال می‌شود. به منظور بارگذاری بر روی سازه‌ها از دستورالعمل‌های نشریه ۳۶۰ [۳۹] و مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران (بارهای وارد بر ساختمان) [۴۰] و طراحی مدل‌ها از روش حالت حدی^{۲۱} (LRFD) استفاده شد. مطابق با بند ۳-۲-۸ نشریه ۳۶۰ در خصوص ترکیب بارگذاری ثقلی و جانبی، حد بالا و پایین اثرات بار ثقلی (Q_G) براساس معادلات ۱ و ۲ و برحسب بار مرده مؤثر (Q_D) و بار زنده مؤثر (Q_L) محاسبه می‌شود. سیستم سقف مورد استفاده در سازه‌های مورد مطالعه از نوع تیرچه بلوک بوده و مشخصات بارگذاری بر روی این سازه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

$$Q_{G1} = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (1)$$

$$Q_{G2} = 0.9 Q_D \quad (2)$$

جدول ۲: مشخصات بارگذاری سازه‌های مورد مطالعه

بارگذاری	بار مرده	کف‌ها	بار مرده سقف	بار معادل تیغه‌بندی و دیوار	بار زنده	طبقات	بار مرده	بار زنده	تعداد طبقات
(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	(Kg/m^2)	
۶۴۰	۵۴۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۴۵	۱۵۰				۱۰
۶۵۵	۵۵۵	۱۰۰	۲۰۰	۴۵۵	۱۵۰				۱۵

²¹ Load and Resistant Factor Design

لازم به ذکر است که برای طراحی المان‌های سازه‌ای ساختمان‌های مورد مطالعه از آئین‌نامه ACI-318-99 [۴۱] و دستورالعمل‌های پیشنهادشده در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران [۴۲] استفاده گردید. همچنین برای آنالیز لرزه‌ای قاب‌های بتنی از استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم [۴۳] بهره گرفته شد. پس از طراحی اولیه سازه‌ها در نرم‌افزار ETABS، مشخصات مقاطع برای طبقات مختلف سازه‌های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه مورد مطالعه مطابق با جدول ۳ تعیین شد.

جدول ۳: مشخصات مقاطع طراحی شده برای سازه‌های بتنی مورد مطالعه

مشخصات سازه	سازه ۱۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه	
	مقاطع تیر	مقاطع ستون	مقاطع تیر	مقاطع ستون
طبقات ۱ تا ۴	Beam 70×80	Column 70×70-24TOR26	Beam 90×90	Column 95×95-28TOR28
طبقات ۵ تا ۸	Beam 60×70	Column 60×60-20TOR22	Beam 80×80	Column 80×80-28TOR28
طبقات ۹ و ۱۰	Beam 50×60	Column 50×50-16TOR20	Beam 70×70	Column 70×70-28TOR28
طبقات ۱۱ و ۱۲	-	-	Beam 70×70	Column 70×70-28TOR28
طبقات ۱۳ تا ۱۵	-	-	Beam 65×65	Column 65×65-20TOR28

۴-۲- تحلیل طیفی (استاتیکی معادل)

در روش تحلیل طیفی یا استاتیکی معادل که یک روش تحلیل غیرخطی ساده‌شده منطبق بر استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم [43] است، حداقل نیروی برشی پایه یا مجموع نیروهای جانبی زلزله در هر یک از امتدادهای ساختمان محاسبه شده و براساس نیروی برشی در تراز پایه و وزن کل ساختمان، ضریب زلزله تعیین می‌گردد. این ضریب از پارامترهای شتاب مبنای طرح، ضریب بازتاب ساختمان، ضریب اهمیت ساختمان و ضریب رفتار سازه تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه سازه‌های بتنی مورد مطالعه در این تحقیق در شهر تهران و در خاک نوع II واقع شده‌اند، لذا در منطقه طرح با خطر نسبی خیلی زیاد قرار گرفته و پس از محاسبات لازم منطبق بر تحلیل طیفی استاندارد ۲۸۰۰، پارامترهای مربوط به ضریب زلزله در سازه‌های مورد مطالعه مطابق با جدول ۴ تعیین شد. پس از طی مراحل مذکور و ورود پارامترهای اولیه به نرم‌افزار ETABS، سازه‌های بتنی مدلسازی شده و تحت اثر تحلیل طیفی قرار گرفت.

جدول ۴: مقادیر پارامترهای مربوط به ضریب زلزله در سازه‌های بتنی مورد مطالعه براساس تحلیل طیفی منطبق بر استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم [Error! | Bookmark not defined].

سازه	شتاب مبنای طرح (A)	زمان تناوب اصلی (T)	ضریب بازتاب (B)	ضریب اهمیت (I)	ضریب رفتار (R _w)	ضریب زلزله (C)
۱۰ طبقه	۰/۳۵	۱/۰۶۷	۱/۰۲	۱	۷/۵	۰/۰۹۱۳
۱۵ طبقه	۰/۳۵	۱/۵۳۷	۰/۹	۱	۷/۵	۰/۰۴۵۸

۴-۳- تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور)

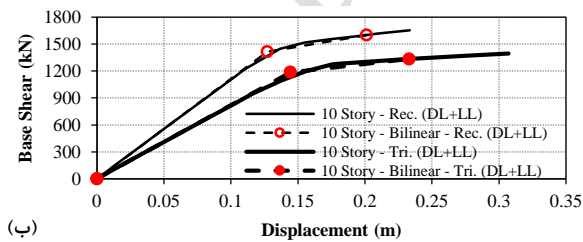
در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، با افزایش گام به گام بار جانبی استاتیکی به صورت غیرخطی، تصویری از رفتار الاستیک سازه تا حد جاری شدن و در نهایت فروریزش آن حاصل می‌گردد. برای انجام تحلیل‌های پوش‌اور در تحقیق حاضر از هر دو ترکیب بار ثقلی (معادلات ۱ و ۲) استفاده گردید. همچنین مطابق با ضوابط نشریه ۳۶۰ [39]، اثرات P-Δ لحاظ شد و از دو نوع توزیع بار جانبی شامل توزیع مثلثی مطابق با شکل مود اول سازه و توزیع مستطیلی متناسب با وزن طبقات سازه بهره گرفته شد. رفتار غیرخطی اعضای سازه‌های مورد مطالعه براساس استاندارد FEMA356 [۴۴] با فرض تشکیل مفاصل پلاستیک در دو انتهای عضو و به فاصله نسبی ۰/۰۵ و ۰/۹۵ طول عضو از بر تکیه‌گاه تعریف شد. با این فرض، تعریف مفاصل پلاستیک به ترتیب با در نظر گرفتن اثر لنگر خمشی حول محور قوی در ابتدا و انتها برای تیرها و اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی حول محور قوی برای ستون‌ها صورت گرفت. جدول ۵ وضعیت مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه‌های مورد مطالعه به‌ازای الگوهای مختلف توزیع بار ثقلی به صورت مثلثی و مستطیلی را نشان می‌دهد. مفاصل پلاستیک در سیستم‌های قاب خمشی علاوه بر تیرهای طبقات تحتانی و میانی در ستون‌های طبقه اول نیز تشکیل شدند. با توجه به رفتار برشی سیستم سازه‌ای قاب خمشی و حادث شدن تغییر شکل‌های بزرگ طبقات تحتانی در این سیستم، تشکیل مفاصل پلاستیک و شروع

خرابی از ستون‌های طبقه اول در سازه‌ها قابل پیش‌بینی است. همچنین با توجه به جدول ۶ ملاحظه می‌گردد که نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در الگوی متفاوت توزیع بار تقریباً یکسان بوده و این موضوع مؤید تاثیر قابل چشم‌پوشی الگوهای متفاوت بار ثقیل در شکل‌گیری مفاصل و تعداد آنهاست.

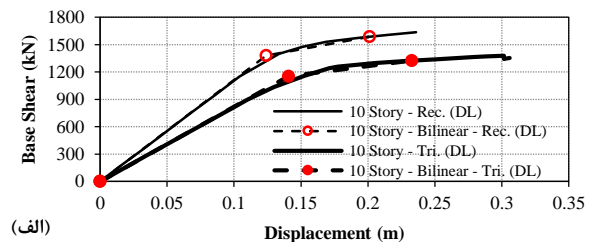
جدول ۵: وضعیت مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه‌های مورد مطالعه تحت اثر الگوهای بار مختلف

مدل‌های سازه‌ای	نحوه توزیع بار	مقطع	مجموع	A to B	B to C	C to D	D to E	>E	A to IO	IO to LS	LS to CP
۱۰ طبقه	مستطیلی (D+L)	ستون	۱۰۳	۹۳	۶	۰	۴	۰	۹۶	۰	۷
		تیر	۸۵	۳۴	۴۶	۰	۳	۲	۸۰	۵	۰
	مثلثی (D+L)	ستون	۱۰۳	۹۳	۹	۰	۱	۰	۹۹	۴	۰
		تیر	۸۵	۲۴	۵۱	۱	۵	۴	۷۲	۱۳	۰
	مستطیلی (D)	ستون	۱۰۳	۹۳	۶	۰	۴	۰	۹۴	۵	۴
		تیر	۸۵	۳۵	۴۴	۰	۱	۵	۷۴	۱۰	۱
	مثلثی (D)	ستون	۱۰۳	۹۳	۹	۰	۱	۰	۱۰۳	۰	۰
		تیر	۸۵	۲۴	۵۱	۳	۷	۰	۷۶	۹	۰
۱۵ طبقه	مستطیلی (D+L)	ستون	۱۳۸	۱۱۷	۱۴	۲	۵	۰	۱۱۹	۸	۱۱
		تیر	۱۰۱	۳۸	۵۸	۰	۳	۲	۸۸	۱۰	۳
	مثلثی (D+L)	ستون	۱۳۸	۱۱۴	۲۰	۴	۰	۰	۱۲۴	۱۰	۴
		تیر	۱۰۱	۴۰	۵۱	۲	۴	۴	۹۱	۱۰	۰
	مستطیلی (D)	ستون	۱۳۸	۱۱۸	۱۴	۱	۵	۰	۱۱۵	۱۷	۶
		تیر	۱۰۱	۴۰	۵۵	۰	۱	۵	۹۰	۱۱	۰
	مثلثی (D)	ستون	۱۳۸	۱۱۲	۲۳	۱	۱	۱	۱۲۰	۱۳	۵
		تیر	۱۰۱	۲۶	۶۱	۴	۹	۱	۹۱	۱۰	۰

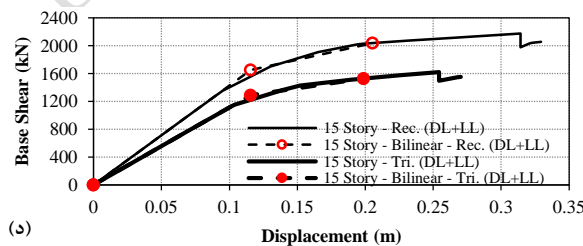
شکل ۶ منحنی‌های ظرفیت استخراج شده متناظر با نقطه تسلیم و نهایی برای سازه‌های مورد مطالعه را براساس الگوی توزیع بار مثلثی مطابق با شکل مود اول سازه و توزیع بار مستطیلی متناسب با وزن طبقات و ترکیبات مختلف بار ثقیل نشان می‌دهد. نتیجه کلی قابل استحصال از منحنی‌های ظرفیت ارائه شده در شکل ۶ برای سازه‌های مورد مطالعه حاکی از افزایش ظرفیت نهایی با افزایش تعداد طبقات سازه قاب خمشی است. نتایج ارائه شده در جدول ۶ مقادیر عددی منحنی‌های دوخطی نیز این ادعا را تصدیق می‌نماید. نکته قابل توجه در مقایسه منحنی‌های دوخطی مدل‌های مورد مطالعه انطباق نقاط نهایی منحنی دوخطی بر منحنی ظرفیت در مدل‌های سازه‌ای می‌باشد. همچنین بررسی مقادیر متناظر با نقطه تسلیم و نهایی در جدول ۶ نشان می‌دهد که ظرفیت نهایی باربری سازه در الگوی توزیع بار مثلثی بدون استثنا در کلیه مدل‌های عددی مورد مطالعه نسبت به الگوی نظیر توزیع بار مستطیلی به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌باشد. لذا در این مطالعه ترکیب بار مثلثی در تعیین مشخصات رفتاری سازه‌ها دارای اهمیت بیشتری است.



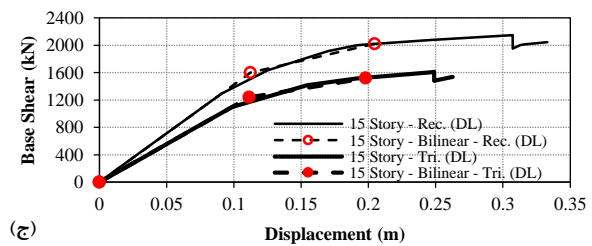
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶: منحنی ظرفیت سازه‌های مورد مطالعه در معرض الگوهای مختلف توزیع بار و منحنی‌های دوخطی متناظر، (الف و ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج و د) سازه ۱۵ طبقه

جدول ۶: مقادیر عددی برش پایه و جابجایی متناظر نقاط تسلیم و نهایی منحنی دوخطی سازه‌های مورد مطالعه تحت اثر الگوهای مختلف توزیع بار

مدل‌های سازه‌ای		توزیع بار مستطیلی		توزیع بار مثلثی	
		Q_{G1}		Q_{G2}	
جابجایی (m)	برش پایه (kN)	جابجایی (m)	برش پایه (kN)	جابجایی (m)	برش پایه (kN)
۱۰ طبقه					
۰/۱۲۴	۱۳۷۷/۸۹	۰/۱۲۷	۱۴۱۶/۱۲	۰/۱۴۱	۱۱۵۲/۸۵
۰/۲۰۱	۱۵۸۵/۳۷	۰/۲۰۱	۱۶۰۲/۳۵	-۰/۲۳۳	۱۳۲۳/۷۰
۱۵ طبقه					
۰/۱۱۲	۱۶۰۲/۴۴	۰/۱۱۶	۱۶۵۱/۰۹	۰/۱۱۱	۱۲۴۰/۲۳
۰/۲۰۵	۲۰۲۰/۹۶	۰/۲۰۵	۲۰۳۹/۴۹	۰/۱۹۸	۱۵۲۰/۲۳

۴-۴- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

در تحقیق حاضر پس از مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های طیفی و پوش‌اور بر روی سازه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار ETABS، برای ارزیابی اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک بر پاسخ سازه‌ها از تحلیل تاریخچه زمانی منطبق بر استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم [43] در نرم‌افزار SeismoStruct^{۲۲} استفاده شد. در تحلیل تاریخچه زمانی، با اثر دادن تغییرات شتاب زمین به صورت تابعی از زمان به طور پیوسته و معمولاً در گام‌های زمانی برابر ۰/۱ ثانیه، نیروهای دینامیکی در تراز پایه بر روی سازه اعمال می‌شوند و پاسخ سازه در هر گام محاسبه می‌شود. به طور کلی این روش در بین روش‌های مختلف تحلیل سازه‌ها کاملاً منحصر به فرد است، چراکه به طور واقعی بیانگر میزان تقاضای اجزای بارگذاری شده سازه در محدوده غیرالاستیک می‌باشد. این روش علیرغم مزایای عمده در مقابل سایر روش‌ها، روشی به نسبت زمان‌بر و در نتیجه غیراقتصادی برای سازه‌های متداول می‌باشد. در تحلیل‌های تاریخچه زمانی انجام شده در تحقیق حاضر نسبت میرایی ۰/۵ منظور می‌گردد و شتاب زمین براساس شتابنگاشت‌هایی منطبق بر شرایط یادشده در بند ۲-۵-۳ استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم [43] تهیه می‌شوند.

۴-۵- آماده‌سازی رکوردهای زلزله

آنالیزهای تاریخچه زمانی به شدت به ویژگی‌های شتابنگاشت‌های مورد استفاده وابسته هستند و تغییرات جزئی در انتخاب این شتابنگاشت‌ها منجر به اختلاف زیادی در پاسخ سازه‌ها می‌گردد. شتابنگاشت‌های مورد استفاده در این آنالیزها بایستی به گونه‌ای انتخاب شوند که دارای ویژگی‌های (بزرگ، فاصله از گسل فعال و شرایط خاک محل) مشابه با شرایط زلزله طرح در محل باشند. همچنین شتابنگاشت‌های جمع‌آوری شده می‌بایست الزامات بند ۲-۵-۳-۲-پ از استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم [43] مبنی بر داشتن مدت زمان حرکت شدید زمین حداقل برابر ۱۰ ثانیه و یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه (هر کدام که بیشتر است) را برآورده نمایند. با توجه به اینکه هدف اصلی مطالعه حاضر، ارزیابی اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه‌های بتنی است، لذا رکوردهای مورد بحث با در نظر گرفتن زلزله حوزه نزدیک چی چی (تایوان، ۱۹۹۹) با بزرگای ۷/۶ به عنوان زلزله مرجع انتخاب شدند [۴۵]. لازم به ذکر است که نگاشت زلزله چی چی مجموعاً در ۶۵ ایستگاه مختلف ثبت شده است [45] که در تحقیق حاضر با لحاظ کردن الزامات آئین‌نامه‌ای مذکور، رکوردهای ثبت‌شده در ۱۲ ایستگاه مختلف مطابق با شکل ۷ و جدول ۷ دارای خاصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده برای انجام آنالیزها در نظر گرفته شد. تمامی رکوردهای حرکت زمین برای زلزله مذکور از پایگاه داده PEER Strong Motion دانشگاه برکلی [۴۶] استخراج شد. در ادامه به منظور بررسی اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده رکوردهای مختلف زلزله چی چی بر رفتار سازه، از روش پیشنهادی باکر^{۲۳} [۴۷] با ارائه برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب^{۲۴} برای پردازش و جداسازی (فیلتر کردن) این ویژگی از رکوردهای زلزله استفاده شد. با توجه به اینکه خروجی

²² <https://www.thestructuralengineer.info/software/145-SeismoStruct>

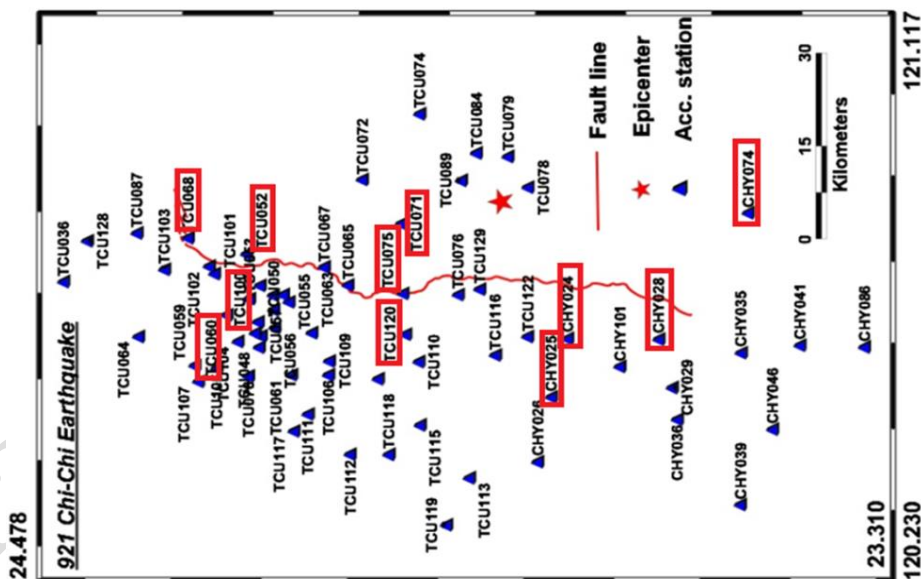
²³ Baker

²⁴ www.stanford.edu/bakerjw/pulse-classification/

روش پیشنهادی [47] به صورت تاریخچه‌های زمانی سرعت با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن برای نگاشت‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های مختلف می‌باشد، لذا با کمک گرفتن از نرم‌افزار EXCEL و مشتق‌گیری سرعت‌ها و تبدیل آنها به شتاب، اقدام به ترسیم طیف‌های پاسخ با میرایی ۵٪ در نرم‌افزار SeismoSignal²⁵ شد. پس از ترسیم طیف‌های پاسخ و تعیین رکوردهایی با بیشترین اختلاف بین طیف‌های پاسخ با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن برای رکوردها در جهت‌های شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S)، مناسب‌ترین رکوردها برای تحلیل تعیین گردید.

جدول ۷: مشخصات رکوردهای مختلف زلزله چی چی برای ترسیم طیف‌های پاسخ با میرایی ۵٪

نام ایستگاه‌ها	محدوده گسل جهت رکورد	PGA (g)		PGV (cm)		PGD (cm)		پریود غالب (T _p)	
		N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W
TCU052	بالا	۰/۴۷	۰/۴۵	۱۸۵/۲۱	۲۱۸/۵۵	۶۹۷/۸۲	۳۲۴/۲۸	۹/۸۱۴	۱۳/۱۴۶
TCU060	بالا	۰/۳۳	۰/۲	۸۴/۴۴	۵۸/۱	۴۵۸/۴۲	۱۵۸/۱۲	۱۲/۵۵۸	۷/۵۳۲
TCU068	بالا	۰/۴۶	۰/۵۱	۶۸/۵۸	۲۸۵/۶۶	۷۸۳/۰۰	۳۶۵/۵۴	۱۳/۲۴۴	۱۱/۹۱۴
TCU100	بالا	۰/۳۸	۰/۱۱	۴۴/۱۶	۷۳/۶۰	۲۸۸/۳۱	۳۶۹/۲۴	۱۲/۶۹۸	۸/۷۶۴
TCU071	میانه	۰/۴۴	۰/۶۵	۴۴/۷۱	۸۳/۶۸	۲۷۷/۱۸	۱۶۷/۱۵	۱۵/۶۱	۱۱/۴۹۴
TCU075	میانه	۰/۳۸	۰/۳۲	۲۵۴/۳۰	۱۱۱/۷۹	۱۶۴/۴۰	۹۶/۱۲	۴/۷۷۴	۵/۹۶۴
TCU076	میانه	۰/۴۴	۰/۴۳	۶۴/۶۶	۵۵/۷۶	۷۹/۷۴	۵۸/۹۷	۶/۴۴	۵/۳۹
TCU120	میانه	۰/۱۱	۰/۲۳	۶۳/۶۴	۷۸/۵۴	۱۸۸/۴۵	۱۰۳/۳۶	۵/۳۰۶	۶/۴۸۲
CHY024	پایین	۰/۱۴	۰/۲۸	۴۷/۵۸	۳۳/۱۰	۱۵۴/۸۹	۷۶/۴۴	۵/۱۹۴	۶/۵۵۲
CHY025	پایین	۰/۱۹	۰/۱۷	۷۴/۷۶	۵۲/۴۸	۷۹/۵۴	۸۳/۱۲	۵/۶۱۴	۶/۵۱
CHY028	پایین	۰/۵۴	۰/۷۶	۱۰۲/۱۱	۷۷/۷۴	۱۰۹/۰۰	۶۶/۱۲	۲/۵۷۶	۱/۰۵
CHY074	پایین	۰/۴۴	۰/۵۹	۵۸/۹۴	۱۹۳/۱۹	۶۸/۹۰	۵۴/۴۶	۴/۶۹	۳/۷۵۲



شکل ۷: موقعیت ایستگاه‌های مختلف و منتخب جهت برداشت رکوردهای ثبت‌شده برای زلزله چی چی [45]

۵- بحث و بررسی یافته‌ها

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از آنالیز رکوردهای مختلف زلزله چی چی و طیف پاسخ به دست آمده جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی و همچنین نحوه جداسازی خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده شتابنگاشت‌ها با پالس‌های غالب سرعت ارائه می‌شود. در ادامه پاسخ

²⁵ <https://www.seismosoft.com/SeismoSignal>

رفتار سازه‌های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه مورد مطالعه برحسب فاکتورهای کلیدی عملکرد سازه یعنی دریافت (جابجایی نسبی) طبقات و برش پایه میان طبقه‌های تحت اثر تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال رکوردهای منتخب زلزله چی چی در جهت‌های شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S) مورد بحث قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که رکوردهای منتخب زلزله برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی در دو حالت با در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون آن (حذف پالس‌های غالب) بر روی سازه‌ها اعمال شده و پاسخ سازه برحسب فاکتورهای مذکور مقایسه می‌گردد. در نهایت براساس نتایج حاصله، تاثیر ماهیت جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک بر پاسخ سازه‌ها تعیین می‌شود.

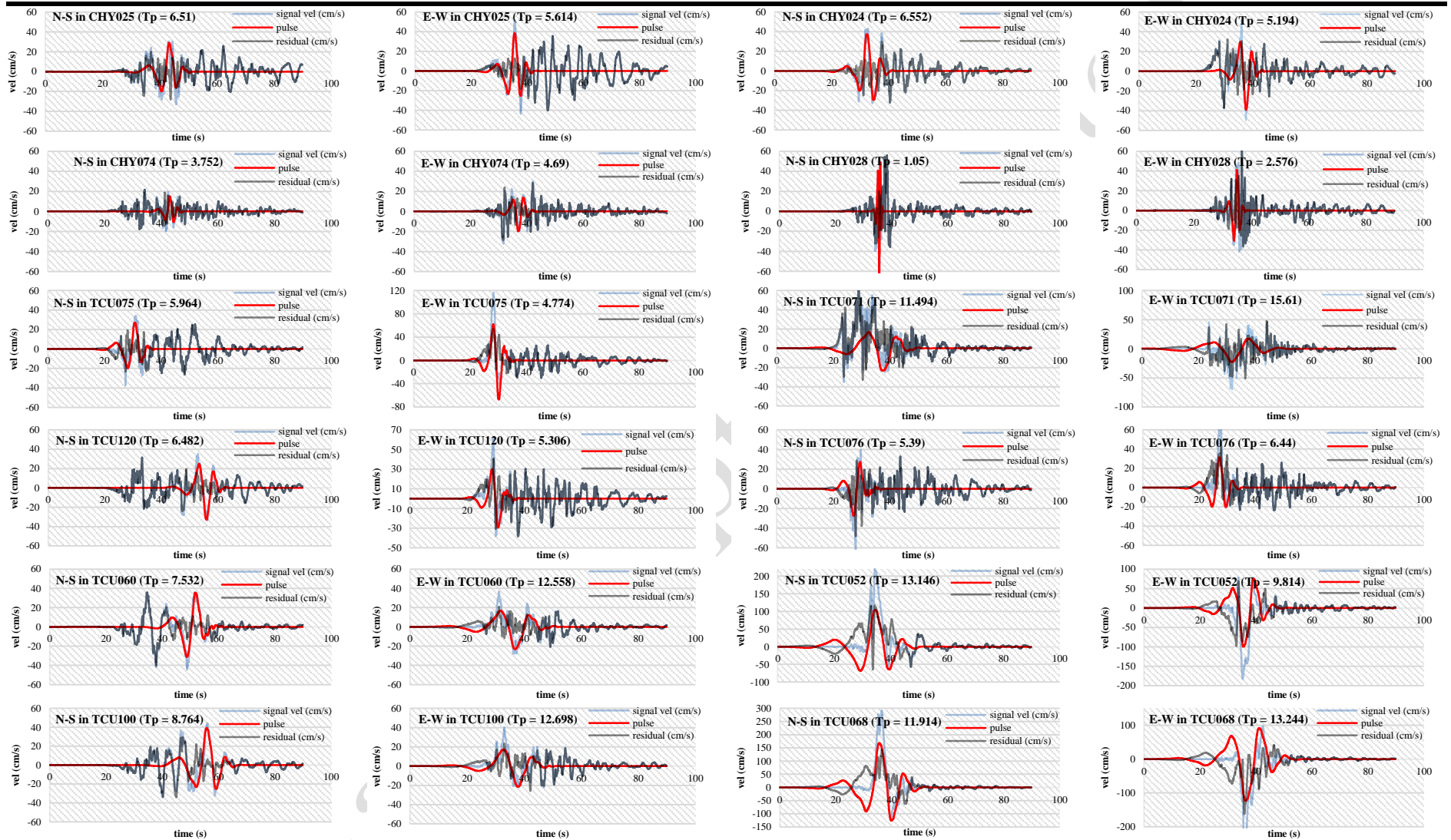
۵-۱- ارزیابی خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده رکوردهای زلزله حوزه نزدیک

برای دستیابی به حداکثر اثر خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه‌ها، نیاز به انتخاب مناسب‌ترین رکوردها جهت انجام آنالیزهای تاریخچه زمانی می‌باشد. به همین منظور در تحقیق حاضر با بررسی طیف پاسخ رکوردهای مختلف زلزله چی چی، هفت رکوردی که تفاوت بیشتری در طیف پاسخ آنها با در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن وجود داشت، به‌عنوان رکوردهای منتخب جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی انتخاب شدند. نتایج آنالیز رکوردهای زلزله چی چی در ۱۲ ایستگاه مختلف (مطابق با جدول ۷) بر مبنای روش پیشنهادی باکر [47] در سه حالت مختلف دارای اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده، بدون اثر آن و حذف پالس‌های غالب از تاریخچه سرعت رکوردهای مذکور در جهت‌های شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S) در شکل ۸ نشان داده شده است. علاوه بر این، شکل ۹ نتایج طیف‌های پاسخ رسم شده برای رکوردهای ثبت‌شده زلزله چی چی در ایستگاه‌های مختلف با میرایی ۵٪ دارای اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن در دو جهت مذکور را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن، هفت رکورد CHY024، CHY028، TCU052، TCU068، TCU075، TCU076 و TCU120 از زلزله چی چی دارای بیشترین اختلاف در طیف پاسخ می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک یعنی وجود یک پالس پررود بلند با سرعت و محتوای انرژی زیاد در این رکوردها مشهود است [۲۱]. علاوه بر این، مطابق شکل ۹ پالس غالب دوطرفه برای این رکوردها در هر دو جهت E-W و N-S قابل مشاهده است.

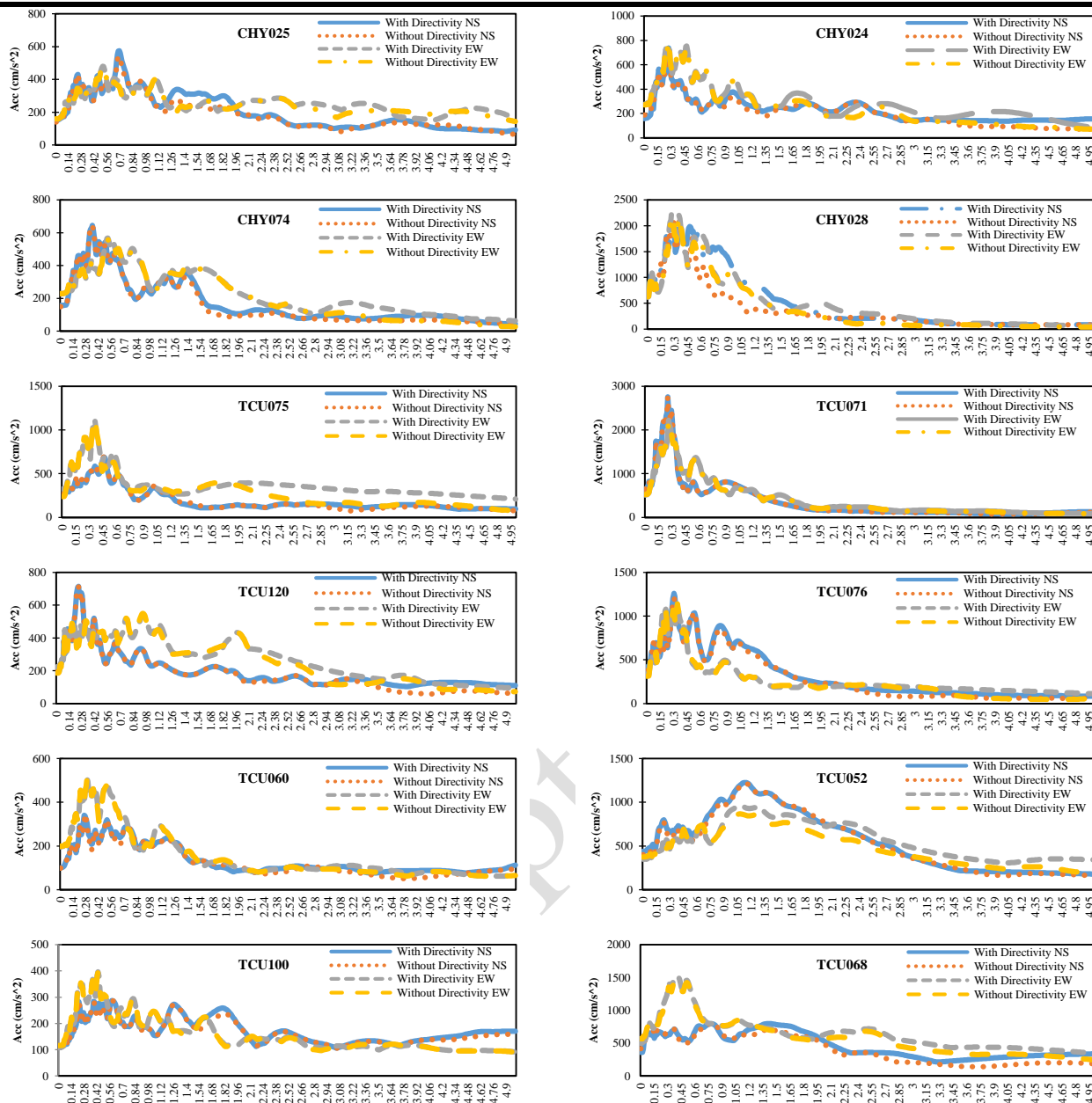
در تحلیل دینامیکی غیرخطی، زمان انجام محاسبات که تابعی از تعداد گام‌های زمانی است، از اهمیت زیادی برخوردار بوده و تاثیر به‌سزایی بر هزینه محاسباتی دارد. بنابراین، تعداد گام‌های مورد نیاز در این تحلیل باید تا حد امکان کاهش یابد تا طول طیف شتاب کوتاه‌تر گردد و از هدررفت زمان تحلیل جلوگیری به عمل آید [۴۸ و ۴۹]. برای انجام این کار می‌توان با یک تقریب قابل قبول، محدوده مؤثر حرکات نیرومند زمین بین ۵٪ - ۹۵٪ اثرگذاری را بر مبنای زمان تناوب و با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal استخراج نمود. از همین رو در تحقیق حاضر پس از انتخاب رکوردهای مذکور برای انجام آنالیزهای تاریخچه زمانی، در ادامه محدوده مؤثر هر یک از رکوردها در جهت‌های شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S) مطابق جدول ۸ استخراج شد. علاوه بر این، جدول ۹ مقادیر حداکثر پالس سرعت و حداکثر شتاب طیفی برای هفت رکوردهای منتخب زلزله چی چی در جهات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۸: محدوده مؤثر هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در جهات مختلف برحسب زمان

رکوردهای منتخب	جهت شرق-غرب (E-W)		جهت شمال-جنوب (N-S)	
	بدون جهت‌پذیری پیش‌رونده	با جهت‌پذیری پیش‌رونده	بدون جهت‌پذیری پیش‌رونده	با جهت‌پذیری پیش‌رونده
	محدوده	زمان (ثانیه)	محدوده	زمان (ثانیه)
CHY024	۵۳/۰۱-۲۷/۹۲	۲۵/۰۹	۵۶/۴۷-۲۹/۲۲	۲۷/۲۵
CHY028	۳۷/۴۵-۲۸/۲۰	۹/۲۵	۳۶/۷۹-۲۹/۰۸	۷/۷۱
TCU052	۴۹/۱۴-۲۹/۱۵	۱۹/۹۹	۴۵/۴۵-۲۸/۶۸	۱۶/۷۷
TCU068	۴۴/۲۶-۳۰/۷۲	۱۳/۵۴	۴۶/۰۶-۳۰/۲۲	۱۵/۸۴
TCU075	۵۲/۳۲-۲۴/۹۰	۲۷/۴۲	۵۷/۴۲-۲۵/۰۹	۳۱/۵۲
TCU076	۵۳/۳۶-۲۳/۵۷	۲۹/۷۹	۵۳/۳۲-۲۵/۰۷	۲۸/۲۵
TCU120	۵۹/۵۷-۲۶/۲۱	۳۳/۳۶	۵۹/۳۴-۲۶/۴۴	۳۲/۹۰



شکل ۸: تاریخچه سرعت رکوردهای مختلف زلزله چی چی دارای اثر جهت پذیری پیش‌رونده، بدون آن و پالس‌های غالب جداشده از رکوردها در جهت‌های شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S).



شکل ۹: طیف‌های پاسخ رکوردهای مختلف زلزله چی چی دارای اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن در جهات شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S)

جدول ۹: مقادیر حداکثر پالس سرعت و شتاب طیفی برای هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در جهات مختلف

رکوردهای منتخب	جهت شرق-غرب (E-W)				جهت شمال-جنوب (N-S)			
	بدون جهت‌پذیری پیش‌رونده		با جهت‌پذیری پیش‌رونده		بدون جهت‌پذیری پیش‌رونده		با جهت‌پذیری پیش‌رونده	
	پالس سرعت	شتاب طیفی	پالس سرعت	شتاب طیفی	پالس سرعت	شتاب طیفی	پالس سرعت	شتاب طیفی
CHY024	۳۲/۳۱	۸۰۶/۳۹	۴۷/۵۸	۸۱۱/۴۱	۲۷/۶۴	۶۹۰/۷۹	۴۲/۷۲	۷۳۸/۷۶
CHY028	۵۷/۹۲	۲۱۹۶/۹۵	۶۳/۰۶	۲۲۸۶/۵۸	۵۳/۷۵	۲۰۷۲/۳۹	۶۷/۵۷	۲۰۷۲/۴۳
TCU052	۶۹/۴۵	۸۶۴/۳۴	۱۸۳/۰۴	۹۵۳/۹۹	۶۴/۰۵	۱۱۹۴/۷۹	۲۱۳/۸۷	۱۲۲۶/۵۷
TCU068	۱۶۱/۸۵	۱۳۹۵/۷۸	۲۲۳/۴۷	۱۵۱۲/۰۹	۱۴۳/۲۷	۸۰۷/۳۴	۲۹۲/۱۷	۷۹۶/۴۰
TCU075	۵۴/۳۳	۱۱۳۳/۸۴	۱۱۳/۲۶	۱۱۲۱/۱۱	۲۵/۳۹	۶۹۸/۷۶	۳۷/۱۶	۶۹۰/۰۸
TCU076	۴۳/۴۶	۱۱۴۱/۵۷	۶۶/۵۳	۱۱۴۵/۰۰	۴۸/۲۴	۱۲۰۹/۴۸	۶۳/۰۲	۱۲۵۹/۱۴
TCU120	۴۰/۸۲	۵۵۰/۶۳	۶۲/۴۱	۵۴۱/۰۹	۳۱/۵۸	۷۱۴/۱۳	۳۳/۳۷	۷۱۴/۱۳

۵-۲- نتایج پاسخ حداکثر دررفت (جابجایی نسبی) طبقات

شکل ۱۰ نتایج حداکثر پاسخ دررفت طبقات برای سازه ۱۰ طبقه بر اثر اعمال هفت رکورد منتخب زلزله چی چی را در دو حالت مختلف با در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن (حذف پالس‌های غالب) در جهت‌های شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S) نشان می‌دهد. با هدف امکان مقایسه نتایج، در شکل ۱۱ حداکثر دررفت طبقات سازه ۱۰ طبقه به‌ازای رکوردهای مختلف زلزله و به‌صورت میانگین نشان داده شده است. در این شکل خطوط توپر و خط‌چین به‌ترتیب نشان‌دهنده نتایج ماکزیمم دررفت با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن می‌باشند. علاوه بر این، نتایج پاسخ دررفت طبقات برای سازه ۱۵ طبقه مشابه سازه ۱۰ طبقه در دو حالت با و بدون اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده برای رکوردهای مختلف زلزله چی چی در دو جهت E-W و N-S در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۳ این نتایج را به‌صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد.

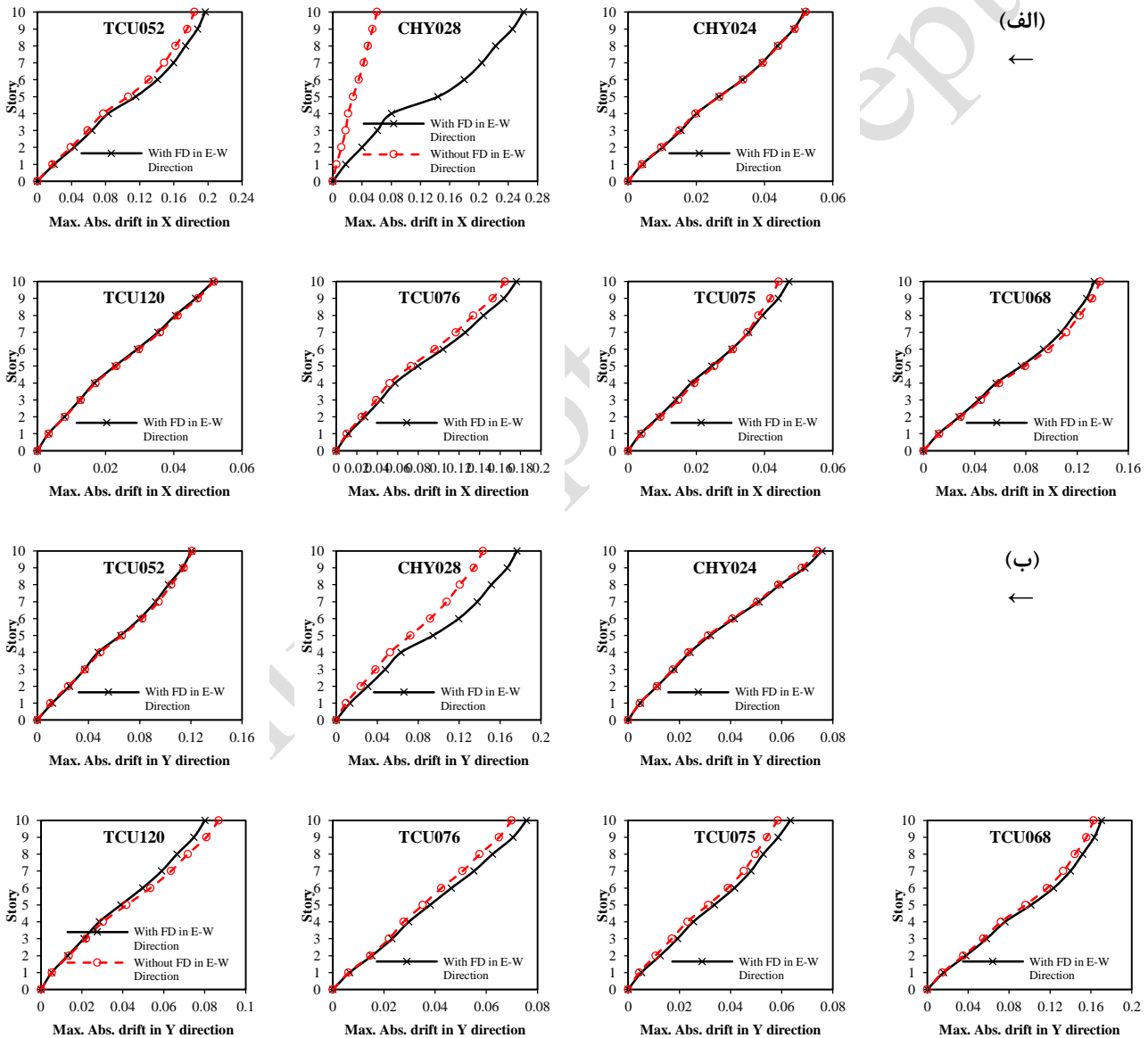
همانگونه که در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ مشاهده می‌گردد، بیشترین پاسخ دررفت طبقات سازه‌های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه در دو حالت با و بدون اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده در جهت E-W به‌ترتیب متعلق به رکوردهای CHY028 و TCU052 می‌باشد. مطابق جدول ۵، مقدار محدوده مؤثر و حداکثر پالس سرعت رکورد CHY028 در حالت با اثر جهت‌پذیری برابر با ۸/۷ ثانیه و ۶۳/۰۶ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد. رکورد TCU052 نیز در حالت بدون اثر جهت‌پذیری به‌ترتیب دارای محدوده مؤثر ۱۹/۹۹ ثانیه و حداکثر پالس سرعت ۱۶۱/۸۵ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که محدوده مؤثر و پالس‌های سرعت غالب ناشی از جهت‌پذیری پیش‌رونده در زلزله‌های حوزه نزدیک تأثیری بر پاسخ دررفت سازه‌های مورد مطالعه ندارد. چراکه رکوردهایی با محدوده مؤثر پالس‌های غالب بیشتر، الزاماً اثرگذاری بیشتری را بر پاسخ دررفت طبقات سازه‌ها نسبت به رکوردهای با محدوده مؤثر کمتر از خود برجای نگذاشته‌اند. با این حال، عاملی که سبب ایجاد اختلاف زیاد در پاسخ دررفت طبقات سازه‌ها در اثر اعمال رکوردهای مختلف می‌شود را می‌توان در مقادیر شتاب طیفی به‌دست آمده برای آنها مطابق با طیف‌های پاسخ شکل ۹ جستجو کرد؛ جایی که دو رکورد CHY028 و TCU052 بیشترین شتاب طیفی (به‌ترتیب ۲۲۸۶/۵۸ و ۱۳۹۵/۷۸ سانتیمتر بر مجذور ثانیه) را در مقایسه با سایر رکوردها دارا می‌باشند و همین موضوع سبب افزایش پاسخ دررفت طبقات سازه‌ها تحت اثر این رکوردها گردیده است. ذکر این نکته ضروری است که علاوه بر پالس سرعت و شتاب طیفی، عوامل دیگری همچون نحوه اعمال انرژی، مدت زمان و محتوای فرکانسی زلزله‌های حوزه نزدیک نیز بر پاسخ دررفت سازه‌ها تأثیرگذار است.

نتایج مذکور برای سازه‌های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه در جهت N-S در حالت با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده به‌طور مشترک مربوط به رکوردهای CHY028 و TCU068 و در حالت بدون اثر جهت‌پذیری متعلق به رکورد TCU068 می‌باشد. محدوده مؤثر و حداکثر پالس سرعت رکورد CHY028 به‌ترتیب برابر ۵/۹۲ ثانیه و ۶۷/۵۷ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد. مقادیر محدوده مؤثر و حداکثر پالس سرعت برای رکورد TCU068 در دو حالت با و بدون اثر جهت‌پذیری به‌ترتیب برابر با ۱۳/۲ و ۱۵/۸۴ ثانیه و ۲۹۲/۱۷ و ۱۴۳/۲۷ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد. همچون قبل به‌وضوح می‌توان مشاهده نمود که محدوده مؤثر و بیشترین پالس سرعت، عوامل تأثیرگذاری بر پاسخ بیشتر دررفت طبقات سازه‌های مورد مطالعه نبوده و این موضوع در اثر دارا بودن شتاب طیفی بیشتر توسط این رکوردها در مقایسه با سایر رکوردها رخ داده است.

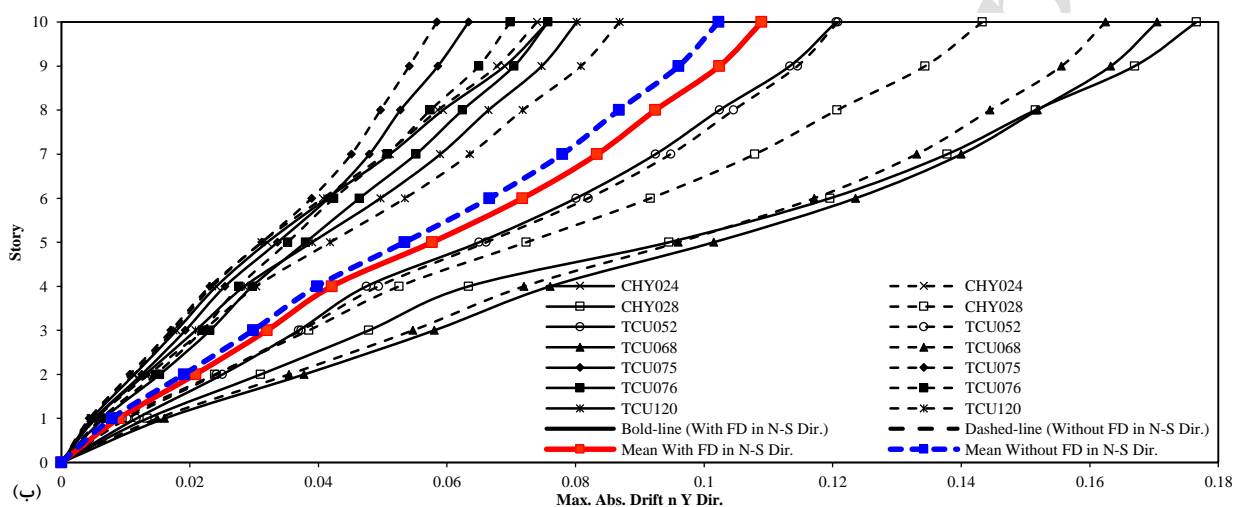
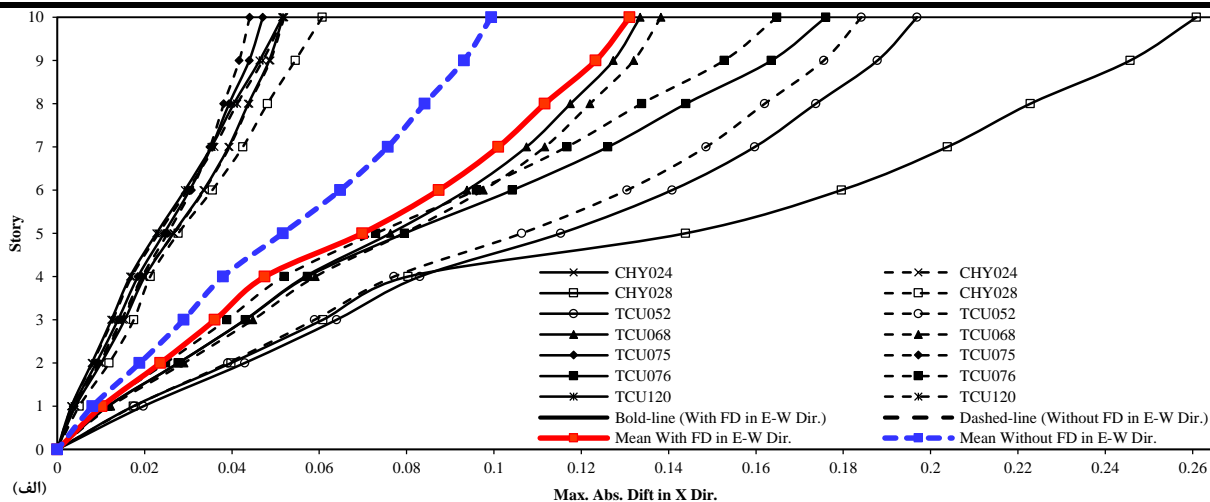
بررسی اثر خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده رکوردهای مختلف زلزله چی چی در شکل‌های ۱۱ و ۱۳ نشان می‌دهد که خصوصیت مذکور همیشه تأثیر یکنواختی بر پاسخ دررفت طبقات سازه نداشته و از الگوی ثابتی پیروی نمی‌کند. چراکه براساس نتایج حاصله در نظر گرفتن جهت‌پذیری پیش‌رونده برای رکوردهای زلزله در جهت E-W و N-S در مقایسه با عدم در نظرگیری این اثر، در برخی موارد منجر به افزایش پاسخ دررفت طبقات و در برخی موارد باعث کاهش آن شده است. علاوه بر این براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌گردد که برخی از رکوردها به دلیل دارا بودن خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده (پالس سرعت) نزدیک به هم، اثرگذاری نسبتاً یکسانی را بر پاسخ دررفت طبقات سازه‌ها داشته‌اند. این موضوع بیانگر تأثیر پارامترهای دخیل دیگری علاوه بر خصوصیت جهت‌پذیری ناشی زلزله‌های حوزه نزدیک بر رفتار سازه‌ها می‌باشد. با این حال، با مشاهده شکل‌های ۱۱ و ۱۳ می‌توان دریافت که میانگین پاسخ دررفت طبقات سازه‌های مورد مطالعه در حالت اعمال اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده بیشتر از حالت عدم اعمال این اثر در هر دو جهت E-W و N-S

است. این موضوع نشان می‌دهد که عدم نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری زلزله‌های حوزه نزدیک ممکن است باعث عدم تعیین دقیق رفتار سازه‌ها گردد.

نتیجه حائز اهمیت دیگری که از مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۳ قابل مشاهده است، اختلاف بیشتر بین پاسخ دررفت در طبقات بالاتر سازه‌های مورد مطالعه است که این موضوع می‌تواند ناشی از پیوند بالاتر طبقات بالایی سازه‌ها و تاثیرگذاری بیشتر پالس‌های سرعت رکورد زلزله با پیوند بالا بر روی این طبقات باشد. به عبارت بهتر، پالس‌های بلند سرعت ناشی از خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده در زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل دارا بودن پیوند بالا، مودهای بالاتر سازه را تحریک کرده و با کاهش پیوند (حذف پالس‌های غالب در حالت بدون اثر جهت‌پذیری) اثر مودهای بالاتر سازه از بین می‌رود. این موضوع با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع سازه از اثرگذاری بیشتری برخوردار بوده و همین موضوع در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر برای سازه‌های بلندتر در آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای در مقابل زلزله‌های حوزه نزدیک را حائز اهمیت‌تر می‌سازد.

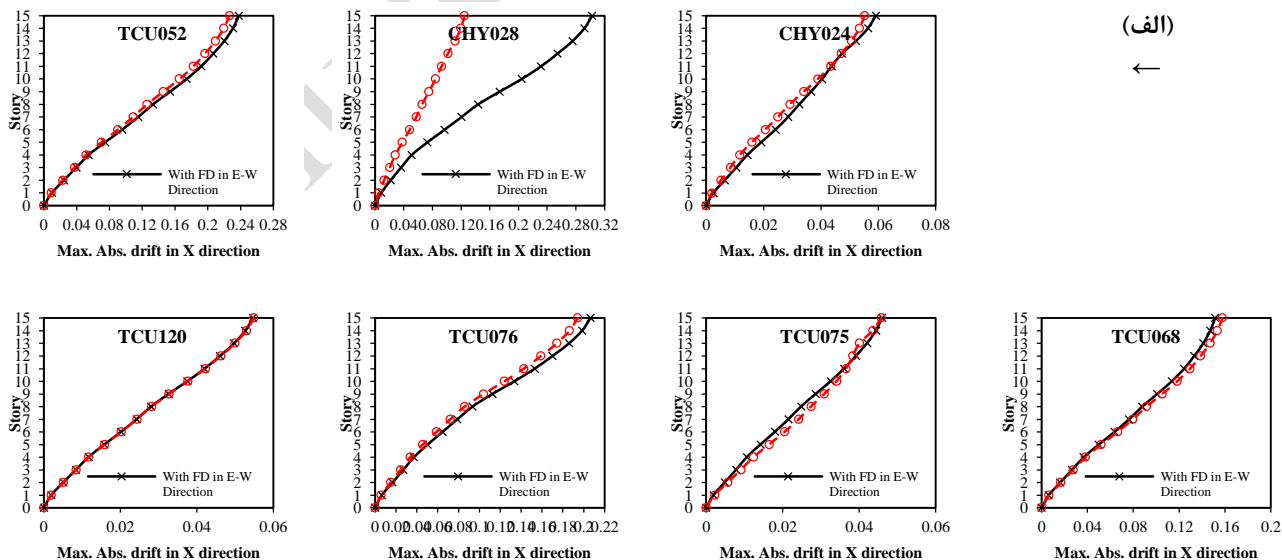


شکل ۱۰: حداکثر دررفت طبقات سازه ۱۰ طبقه تحت اثر هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در جهت‌های (الف) شرق-غرب (E-W) و (ب) شمال-جنوب (N-S)

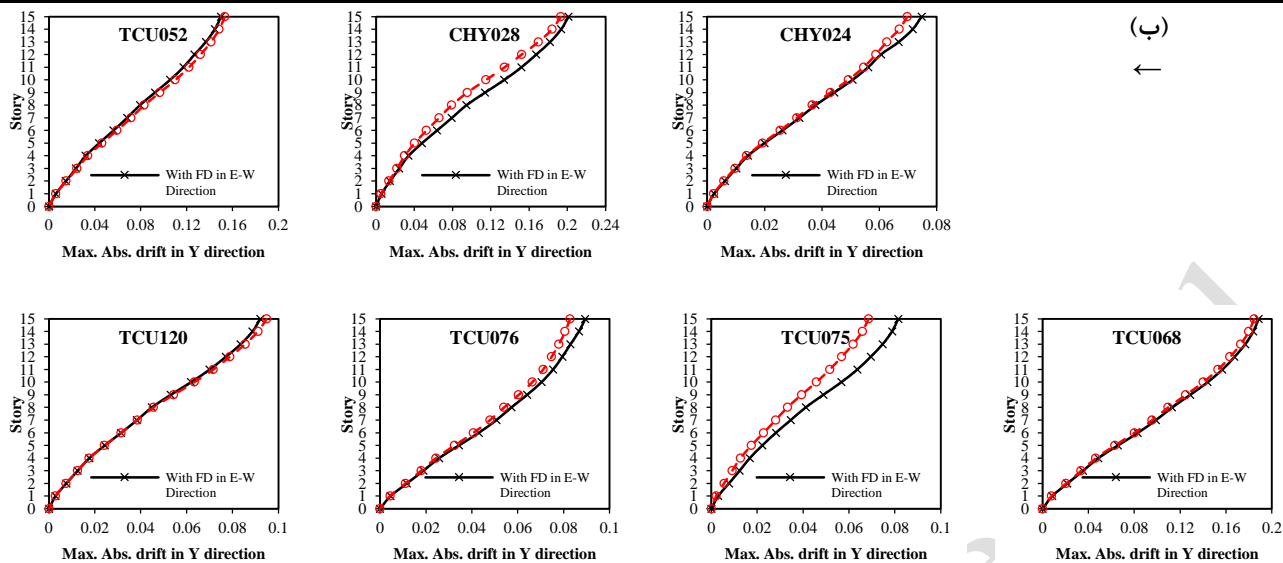


شکل ۱۱: مقایسه نتایج حداکثر دریفت طبقات سازه ۱۰ طبقه تحت اثر هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در دو حالت مختلف با و بدون اثر جهت پذیری در جهت های

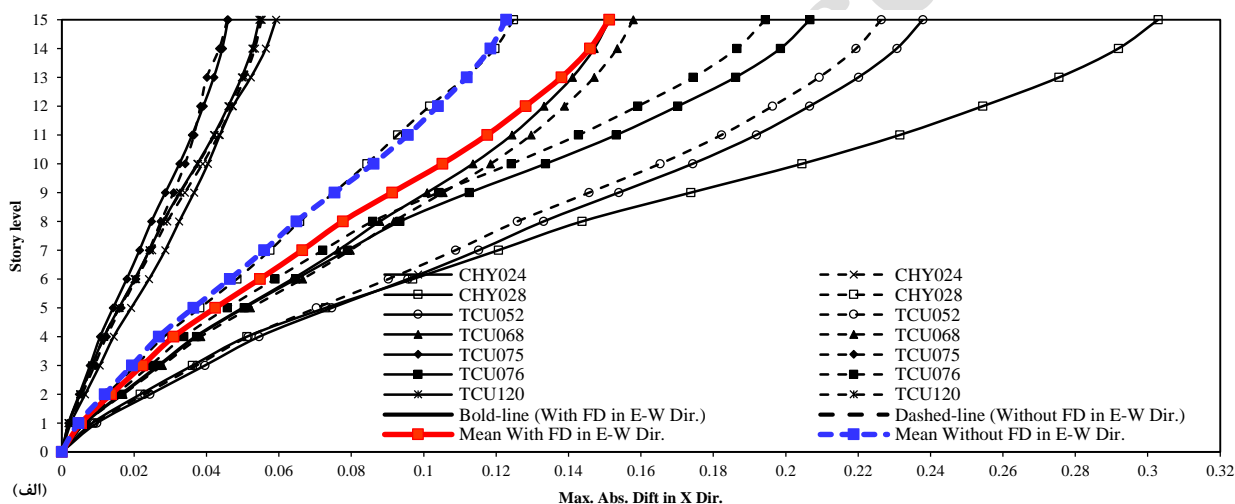
(الف) شرق-غرب (E-W) و (ب) شمال-جنوب (N-S)



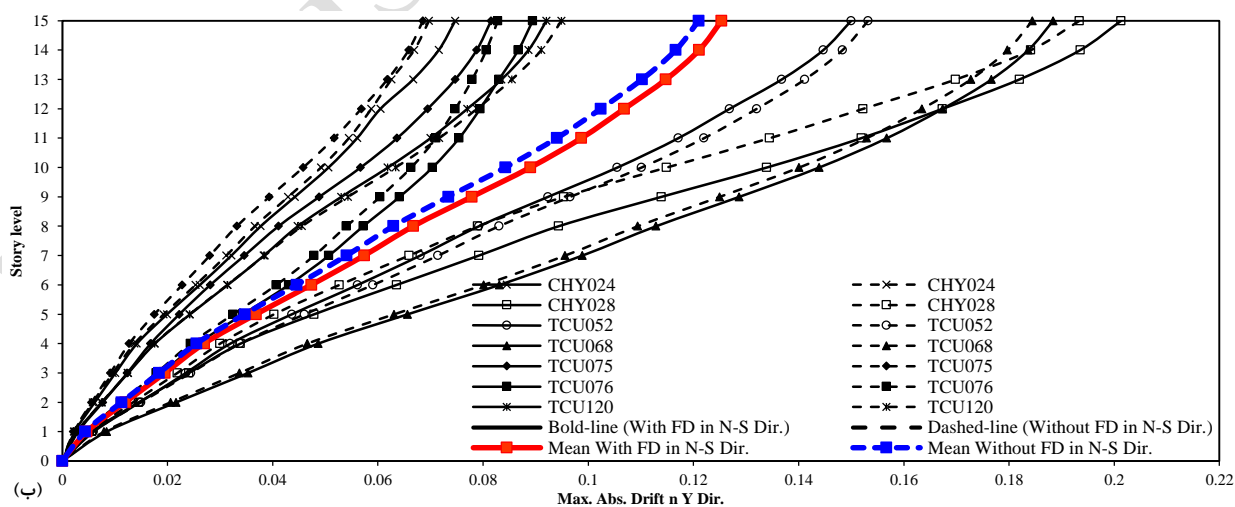
(الف)



شکل ۱۲: حداکثر دریفت طبقات سازه ۱۵ طبقه تحت اثر هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در جهت‌های (الف) شرق-غرب (E-W) و (ب) شمال-جنوب (N-S)



(الف)



(ب)

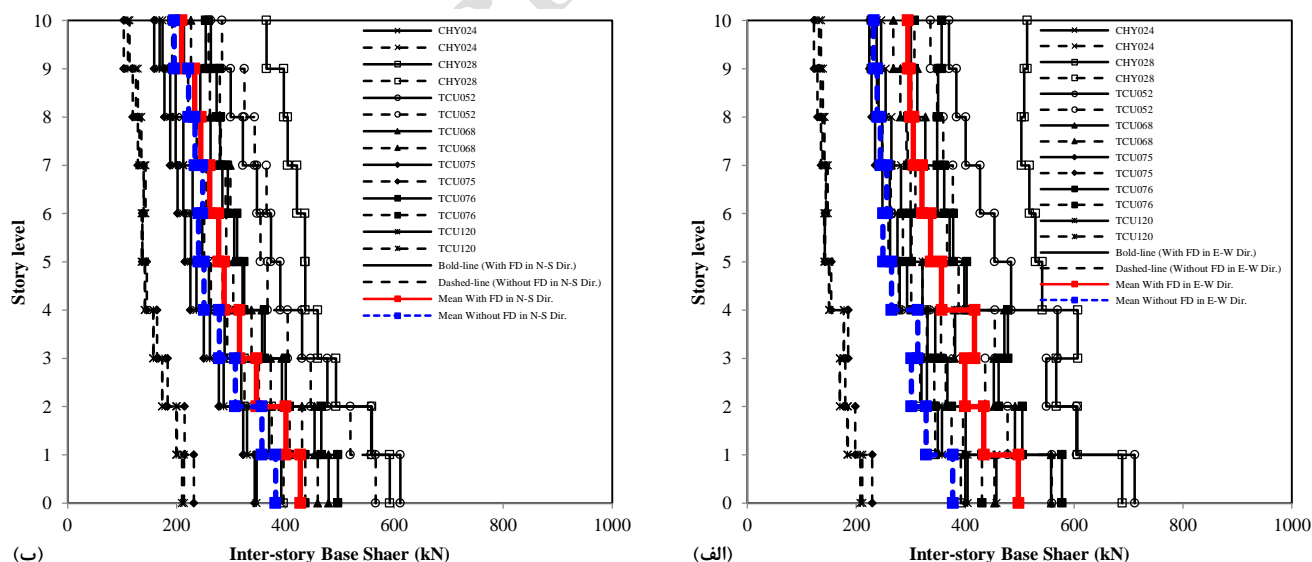
شکل ۱۳: مقایسه نتایج حداکثر دریفت طبقات سازه ۱۵ طبقه تحت اثر هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در دو حالت مختلف با و بدون اثر جهت‌پذیری در جهت‌های (الف) شرق-غرب (E-W) و (ب) شمال-جنوب (N-S)

۵-۳- نتایج برش پایه طبقات

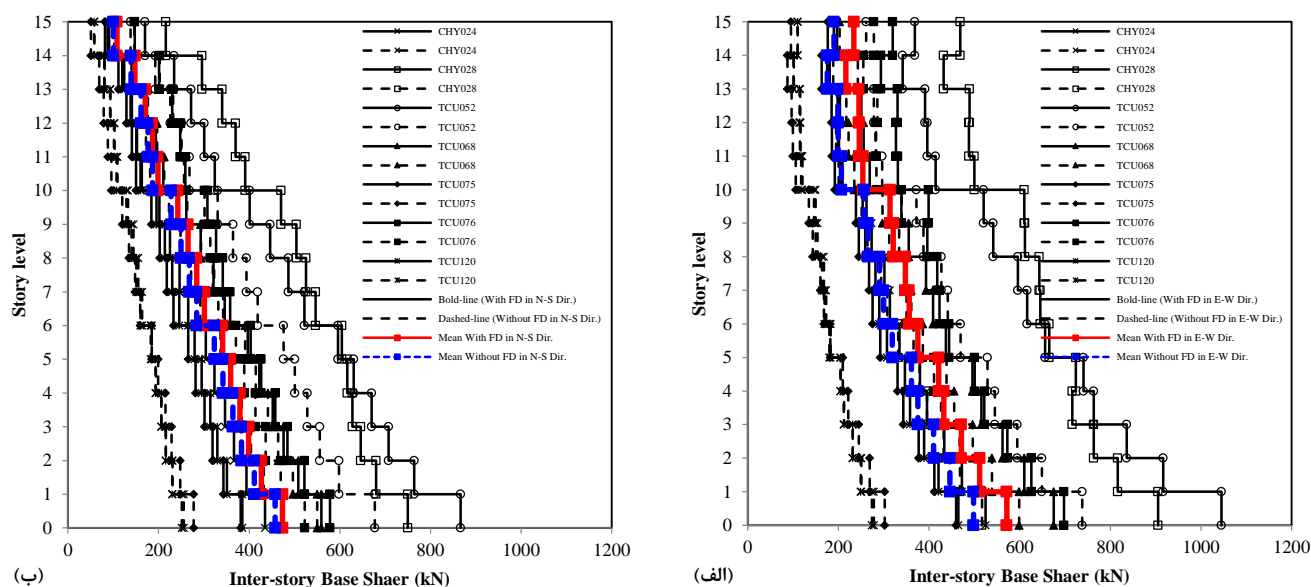
شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نتایج برش پایه بین طبقه‌ای برای سازه‌های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه را بر اثر اعمال هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در دو حالت مختلف با در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن و در جهت‌های شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S) نشان می‌دهند. در این شکل‌ها خطوط توپر و خط‌چین به ترتیب نشان‌دهنده نتایج برش پایه بین طبقه‌ای با اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده و بدون اثر آن می‌باشند. همانند نتایج به دست آمده در خصوص نیازهای تقاضای دررفت طبقات در سازه‌های مورد مطالعه، بیشترین پاسخ برش طبقات نیز در دو حالت با و بدون اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده در جهات E-W و N-S مربوط به رکوردهای زلزله با شتاب‌های طیفی بیشتر می‌باشد. این موضوع مجدداً بر اثرگذاری بیشتر رکوردهایی با حداکثر شتاب طیفی اشاره دارد.

علاوه بر این، با عنایت به نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود که ظرفیت برش پایه طبقات در سازه‌های مورد مطالعه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک با پالس جهت‌پذیری نسبت به رکوردهای بدون پالس در هر دو جهت E-W و N-S در برخی موارد قدری بیشتر بوده و گاهی بر هم منطبق می‌شوند. این موضوع بیانگر تاثیر پارامترهای دخیل دیگری علاوه بر خصوصیت جهت‌پذیری ناشی زلزله‌های حوزه نزدیک بر برش پایه طبقات در سازه‌ها می‌باشد. با این حال، مطابق شکل ۱۴ میانگین نیروی برشی طبقات در سازه ۱۰ طبقه تحت اثر خصوصیت جهت‌پذیری در جهت‌های E-W و N-S به ترتیب به اندازه $23/38\%$ و $9/58\%$ بزرگتر از رکوردهای بدون اثر جهت‌پذیری می‌باشد. علاوه بر این، همانگونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در سازه ۱۵ طبقه میانگین نیروی برشی بین طبقه‌ای در جهت‌های E-W و N-S به ترتیب به اندازه $15/53\%$ و $4/88\%$ بزرگتر از رکوردهای بدون اثر جهت‌پذیری است. این موضوع تأثیر پالس‌های سرعت با دامنه بالا در اثر خصوصیت جهت‌پذیری زلزله‌های حوزه نزدیک را نشان می‌دهد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت بالای در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری زلزله‌های حوزه نزدیک جهت تعیین دقیق نیازهای ظرفیت برشی سازه‌هاست.

نتیجه حائز اهمیت دیگر که از مقایسه نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان استخراج نمود این است که با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع سازه، تاثیر مودهای بالاتر در رکوردهای دارای خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده غلبه بیشتری داشته و به دلیل تاثیر این مودها در رکوردها، نیازهای لرزه‌ای برش پایه طبقات بالاتر به تدریج افزایش یافته است. به عبارت دیگر، به دلیل پرورد پالس بالای ناشی از خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده در زلزله‌های حوزه نزدیک، ساختمان‌های با پرورد بلندتر تحت اثر این زلزله‌ها رفتار بحرانی‌تری از خود نشان می‌دهند.



شکل ۱۴: مقایسه نتایج برش پایه طبقات سازه ۱۰ طبقه تحت اثر هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در دو حالت مختلف با و بدون اثر جهت‌پذیری در جهت‌های (الف) شرق-غرب (E-W) و (ب) شمال-جنوب (N-S)



شکل ۱۵: مقایسه نتایج برش پایه طبقات سازه ۱۵ طبقه تحت اثر هفت رکورد منتخب زلزله چی چی در دو حالت مختلف با و بدون اثر جهت پذیری در جهت های (الف) شرق-غرب (E-W) و (ب) شمال-جنوب (N-S)

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به بررسی اثر جهت پذیری پیش رونده ناشی از حرکات پالس مانند زلزله های حوزه نزدیک گسل بر رفتار لرزه ای سازه های بتن مسلح پرداخته شد. بدین منظور ابتدا رکوردهای حاصل از ایستگاه های مختلف زلزله چی چی به عنوان مبنای انتخاب شتابنگاشت ها تعیین شد. سپس با استفاده از روش های تحلیلی، طیف پاسخ این شتابنگاشت ها با در نظر گرفتن اثر جهت پذیری پیش رونده و بدون آن و همچنین حذف پالس های غالب از این رکوردها در جهات شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S) تعیین شد. با انجام تحلیل تاریخی زمانی بر روی سازه های ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه برای هفت رکورد ایستگاهی از زلزله مذکور، در یافت (جابجایی نسبی) طبقات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر به طور خلاصه به شرح زیر قابل بیان است:

۱. نتایج بررسی اثر خصوصیت جهت پذیری پیش رونده رکوردهای مختلف زلزله چی چی نشان داد که این خصوصیت همیشه تاثیر یکنواختی بر پاسخ لرزه ای سازه ها (در یافت و برش پایه میان طبقه ای) نداشته و از الگوی ثابتی پیروی نمی کند. چراکه براساس نتایج حاصله در نظر گرفتن جهت پذیری پیش رونده رکورد زلزله در جهات شرق-غرب (E-W) و شمال-جنوب (N-S)، در برخی موارد منجر به افزایش پاسخ طبقات و در برخی موارد باعث کاهش آن شده است. این موضوع بیانگر تاثیر پارامترهای دخیل دیگری علاوه بر جهت پذیری پیش رونده ناشی از زلزله های حوزه نزدیک بر رفتار سازه ها می باشد.
۲. ارزیابی پاسخ در یافت و برش پایه طبقات سازه های مورد مطالعه نشان می دهد که محدوده مؤثر و پالس های سرعت غالب ناشی از جهت پذیری پیش رونده در زلزله های حوزه نزدیک تنها عوامل تأثیرگذار بر پاسخ سازه ها نبوده و دلیل اصلی ایجاد اختلاف زیاد در پاسخ در یافت طبقات سازه ها تحت اثر رکوردهای مختلف ناشی از مقادیر شتاب طیفی بیشتر برای این رکوردها است.
۳. میانگین پاسخ در یافت و برش پایه طبقات سازه های مورد مطالعه در حالت اعمال اثر جهت پذیری پیش رونده بیشتر از حالت عدم اعمال این اثر در هر دو جهت E-W و N-S است. این موضوع نشان می دهد که عدم در نظر گرفتن اثر جهت پذیری زلزله های حوزه نزدیک ممکن است باعث عدم تعیین دقیق رفتار سازه ها گردد. بنابراین نحوه تعیین طیف های پاسخ زلزله های حوزه نزدیک در آئین نامه ۲۸۰۰ ایران جای تأمل داشته و برای حفظ اثر جهت پذیری پیش رونده در این زلزله ها لازم است تدابیر ویژه ای اندیشیده شود که با فیلترسازی متداول رکورد زلزله ها کاملاً متفاوت است. این موضوع لزوم در نظر گرفتن

اطلاعاتی مبنی بر محدوده مجاز نزدیک به ساختگاه تا منبع لرزه‌زا و حدود و نوع گسلش شتابنگاشت‌های مورد استفاده در ارائه طیف طرح آئین‌نامه ۲۸۰۰ را بسیار حائز اهمیت می‌نماید.

۴. نتایج بررسی اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک گسل نشان داد که پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه در جهت E-W در برخی موارد تا حدود ۳۰ درصد بیشتر از جهت N-S می‌باشد. با توجه به تعداد محدود سازه‌های تحلیل شده در این تحقیق نمی‌توان ادعا نمود که در صورت استفاده از دستورالعمل‌های آئین‌نامه ۲۸۰۰ برای فیلترسازی شتابنگاشت زلزله‌های حوزه نزدیک و تعیین طیف پاسخ آنها، ایمنی سازه‌ها به دلیل بروز جابجایی‌های بیشتر مخدوش می‌شود، ولی لزوم بررسی بیشتر و نیاز به ارائه طیف‌های پاسخ برای این زلزله‌ها به وضوح روشن است. بنابراین نیاز به یک بازنگری جدی در ضوابط طراحی آئین‌نامه ۲۸۰۰ و به کارگیری ضرایب و تحلیل‌های دقیق‌تر جهت در نظر گرفتن پارامترهایی مانند شرایط ساختگاه، جهت انتشار شکست گسل نسبت به ساختگاه و فاصله از صفحه گسیختگی و مواردی از این دست در ضوابط طراحی سازه‌ها ضروری است.

۵. با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع سازه و نتیجتاً افزایش پیروید آن، تاثیر جهت‌پذیری پیش‌رونده رکوردهای زلزله بر پاسخ طبقات بالاتر سازه‌ها افزایش می‌یابد. بدین معنی که با افزایش ارتفاع، دریافت و برش پایه طبقات در جهات مختلف افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهد. این موضوع ناشی از پیروید بالاتر طبقات بالایی سازه و تاثیرگذاری بیشتر پالس‌های سرعت رکورد زلزله با پیروید بالا بر روی این طبقات باشد. به عبارت بهتر، پالس‌های بلند سرعت ناشی از خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده در زلزله‌های حوزه نزدیک به دلیل دارا بودن پرود بالا، مودهای بالاتر سازه را تحریک کرده و با کاهش پیروید (حذف پالس‌های غالب در حالت بدون اثر جهت‌پذیری) اثر مودهای بالاتر سازه از بین می‌رود. این موضوع با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع سازه از اثرگذاری بیشتری برخوردار بوده و همین موضوع در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر برای سازه‌های بلندتر در آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای در مقابل زلزله‌های حوزه نزدیک را حائز اهمیت‌تر می‌سازد. در این خصوص بایستی به این نکته اشاره کرد که نیاز شکل‌پذیری بالا در طبقات بالاتر سازه‌های با زمان تناوب بالا باعث می‌شود که برخلاف تصور رایج که هر قدر شدت زلزله بیشتر باشد، بایستی طبقات پایین‌تر سازه را تقویت نمود، در این حالت باید طبقات بالایی سازه تقویت گردد.

مراجع

- [۱] Bray, J.D., and Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 815-828.
- [۲] Archuleta, R.J., and Hartzell, S.H. (1981). Effects of fault finiteness on near-source ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(4), 939-957.
- [۳] Chen, X., Liu, Y., Zhou, B., and Yang, D. (2020). Seismic response analysis of intake tower structure under near-fault ground motions with forward-directivity and fling-step effects, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106098>.
- [۴] Malhotra, P.K. (1999). Response of buildings to near-field pulse-like ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(11), 1309-1326.
- [۵] Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., and Wald, D.J. (1995). Near-source ground motion and its effects on flexible buildings, *Earthquake Spectra*, 11(4), 569-604.
- [۶] Dicleli, M., and Buddaram, S. (2007). Equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges subjected to near-fault ground motions with forward rupture directivity effect, *Engineering Structures*, 29(1), 21-32.
- [۷] FEMA 356, (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, Prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- [۸] Bhagat, S., Wijeyewickrema, A.C., and Subedi, N. (2021). Influence of near-fault ground motions with fling-step and forward-directivity characteristics on seismic response of base-isolated buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 25(3), 455-474.

- [۹] Moniri, H. (2017). Evaluation of seismic performance of reinforced concrete (RC) buildings under near-field earthquakes, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 9, 13–25.
- [۱۰] Saha, S., Karthik Reddy, K.S.K., and Somala, S.N. (2022). Seismic assessment of steel frame subjected to simulated directivity earthquakes: The unilaterality of fault normal component at various rupture distances, *Journal of Building Engineering*, 47, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103880>.
- [۱۱] Rodriguez-Marek, A., and Bray, J.D. (2006). Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(12), 1611–1620.
- [۱۲] Anderson, J.C., and Bertero, V.V. (1987). Uncertainties in establishing design earthquakes, *Journal of Structural Engineering*, 113(8), 1709–1724.
- [۱۳] Stewart, J.P., Chiou, S.-J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., and Abrahamson, N.A. (2002). Ground motion evaluation procedures for performance-based design, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9–12), 765–772.
- [۱۴] Akkar, S., Moghimi, S., and Arici, Y. (2018). A study on major seismological and fault-site parameters affecting near-fault directivity ground-motion demands for strike-slip faulting for their possible inclusion in seismic design codes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 88–105.
- [۱۵] Ruiz-García, J., and Ramos-Cruz, J.M. (2020). Assessment of permanent drift demands in steel moment-resisting steel buildings due to recorded near-fault forward directivity earthquake ground motions and velocity pulse models, *Structures*, 27, 1260–1273.
- [۱۶] Mahmoud, S., Alqarni, A., Saliba, J., Ibrahim, A.H., Genidy, M., and Diab, H. (2021). Influence of floor system on seismic behavior of RC buildings to forward directivity and fling-step in the near-fault region, *Structures*, 30, 803–817.
- [۱۷] Champion, C., and Liel, A. (2012). The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(10), 1391–1409.
- [۱۸] Beiraghi, H., Kheyroddin, A., and Kafi, M.A. (2016). Forward directivity near-fault and far-fault ground motion effects on the behavior of reinforced concrete wall tall buildings with one and more plastic hinges, *Structural Design Tall Spectrum Buildings*, 25(11), 519–539.
- [۱۹] Mwafy, A., Elnashi, A., Sigbjörnsson, R., and Salama, A. (2006). Significance of sever distance and moderate close earthquake on design and behavior of tall building, *The Structural Design of Tall and Special Building*, 15, 391–416.
- [۲۰] Gillie, J.L., Rodriguez-Marek, A., and McDaniel, C. (2010). Strength reduction factors for near-fault forward-directivity ground motions, *Engineering Structure*, 32(1), 273–285.
- [۲۱] Bolt, B.A. (1971). The San Fernando valley, California, earthquake of February 9 1971: Data on seismic hazards. *Bulletin of the seismological society of America*, 61(2), 501–510.
- [۲۲] Hudson, D.E., and Housner, G.W. (1958). An analysis of strong motion accelerometer data from the San Francisco earthquake of March 22, 1957, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 48 (3), 253–268.
- [۲۳] Bertero, V.V., Mahin, S.A., and Herrera, R.A. (1978). Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6(1), 31–42.
- [۲۴] Makris, N., and Black, C.J. (2004). Evaluation of peak ground velocity as a “good” intensity measure for near-source ground motions. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(9), 1032–1044.
- [۲۵] Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., and Wald, D.J. (1995). Nearsources ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, 11(4), 569–605.
- [۲۶] Heaton, T.H., Hall, J.F., Wald, D.J., and Halling, M.W. (1995). Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical MW 7.0 blind thrust earthquake. *Science*, 267, 206–211.
- [۲۷] Iwan, W.D. (1997). Drift spectrum: Measure of demand for earthquake ground motions. *Journal of Structural Engineering*. 123(4), 397–404.
- [۲۸] Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., and 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, 199–222.

- [۲۹] Li, Sh., and Xie, L-L. (2007). Progress and trend on near-field problems in civil engineering, *CTA Seismologica Sinica*, 20(1), 105-114.
- [۳۰] Tang, Y., and Zhang, J. (2011). Response spectrum-oriented pulse identification and magnitude scaling of forward directivity pulses in near-fault ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(1), 59-76.
- [۳۱] Makris, N., and Chang, S.P. (2010). Effect of visco-plastic and friction damping on the response on seismic isolated structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29(1), 85-107.
- [۳۲] Elnashai, A.S., and Di Sarno, L. (2015). *Fundamentals of earthquake engineering: from source to fragility*. John Wiley & Sons.
- [۳۳] Kalkan, E., and Kunnath, S.K. (2006). Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, *Earthquake Spectra*, 22(2), 367-390.
- [۳۴] Mukhopadhyay, S., and Gupta, V.K. (2013). Directivity pulses in near-fault ground motions—I: Identification, extraction and modeling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 1-15.
- [۳۵] Bolt, B.A. (2002). *Estimation of strong seismic ground motions*. International handbook of earthquake and engineering seismology, 983-1001.
- [۳۶] Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S. (2003). A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the seismological society of America*, 93(3), 1099-1131.
- [۳۷] Abrahamson, N.A., and Silva, W.J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological research letters*, 68(1), 94-127.
- [۳۸] Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S. (2003). A mathematical representation of near-fault ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 1099-1131.
- [۳۹] Publication 360. (2018). *Guidelines for seismic improvement*, First Edition, Building and Housing Research Center.
- [۴۰] Sixth issue of the National Building Regulations of Iran. (2018). *Loads on the building*, Office of Development and Promotion of National Building Regulations, Ministry of Housing and Urban Development, Deputy Minister of Housing and Construction (In Persian).
- [41] ACI Standard (ACI 318-99). (1999). *American Concrete Institute*, Building code requirements for structural concrete and commentary, Edition January.
- [۴۲] Nine issue of the National Building Regulations of Iran. (2018). *Design and implementation of reinforced concrete buildings*, Office of Development and Promotion of National Building Regulations, Ministry of Housing and Urban Development, Deputy Minister of Housing and Construction (In Persian).
- [۴۳] Standard 2800. (2018). *Earthquake Design Regulations*, Fourth Edition Building and Housing Research Center.
- [۴۴] Building Seismic Safety Council (BSSC). (2000). *Pre-standard commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA356, Washington (DC): Federal Emergency Management Agency.
- [۴۵] Wang, G.Q., Zhou, X.Y., and 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(1), 73-96.
- [۴۶] PEER. (2006). *Next Generation Attenuation Database*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://peer.berkeley.edu/nga/index.html>.
- [۴۷] Baker, J.W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1486-1501.
- [48] Torabi, H., and Rayhani, M. (2014). Three dimensional finite element modeling of seismic soil structure interaction in soft soil. *Computers and Geotechnics*, 60, 9-19.
- [49] Tajammolian, H., Khoshnoudian, F., Rad, A.R., and Loghman, V. (2018). Seismic Fragility Assessment of Structures Supported on TCFP Bearings Subjected to Near-field Earthquakes. *Structures*, 13, 66-78.