

## بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح مجهز به مهاربندهای فولادی زیبی شکل تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل

سید رامین ابطحی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران  
بابک بهفروز\*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دهقان، دانشگاه آزاد اسلامی، دهقان، ایران

[babakbehfroz@gmail.com](mailto:babakbehfroz@gmail.com)

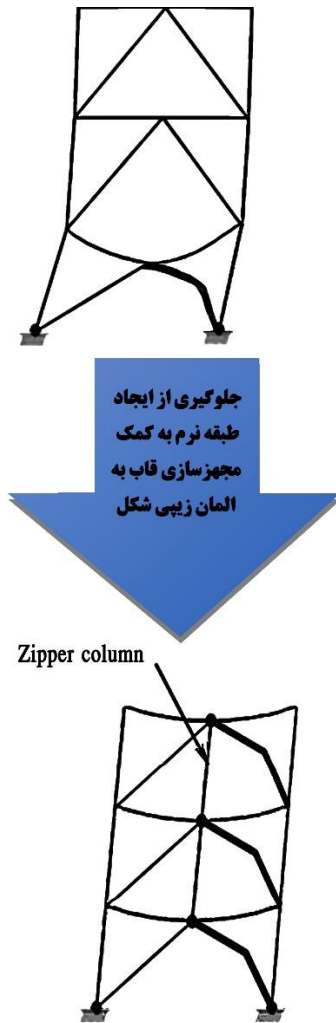
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸

### چکیده

در سال‌های اخیر زلزله‌های نزدیک گسل به واسطه ماهیت فرکانسی متفاوت، حرکت پالس گونه و همچنین ایجاد خرابی‌های فزاینده بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. از طرفی سازه‌های بتنی به واسطه فراوانی ساخت در ایران بیش از هر سازه دیگری در خطر آسیب‌های ناشی از زلزله‌های نزدیک گسل قرار دارند. این موضوع لزوم اهمیت استفاده از سیستم‌های نوین باربر جانبی در سازه‌های بتنی را به وضوح نشان می‌دهد. یکی از سیستم‌های باربر جانبی، ترکیب مهاربندهای شورون با المان‌های زیبی شکل می‌باشد. با توجه به این موضوع هدف اصلی این تحقیق بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی مجهز به المان‌های فولادی زیبی شکل تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل می‌باشد. بر این اساس پس از انتخاب هفت رکورد زلزله دور و هفت رکورد زلزله نزدیک گسل، سه قاب بتنی ۳، ۶ و ۹ طبقه با و بدون در نظر گرفتن المان‌های زیبی شکل، ابتدا با استفاده از تحلیل استاتیکی خطی طراحی و سپس به وسیله تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی تحت آنالیز قرار گرفتند. پس از انجام تحلیل، نتایج از قبیل تغییر مکان کلی طبقات، تغییر مکان نسبی طبقات، برش طبقات و همچنین نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که المان‌های زیبی شکل به صورت محسوسی در انتقال بارهای نامتقارن مهاربندهای طبقات تحتانی به طبقات فوقانی موفق عمل کرده و از ایجاد طبقه نرم در اولین تراز ارتفاعی سازه جلوگیری نموده‌اند. از طرفی مقایسه نتایج حاکی از تأثیر بسزای فاصله از گسل در تغییر شکل‌های کلی و نسبی سازه با افزایش ارتفاع طبقات است.

**کلید واژگان:** زلزله نزدیک گسل، مهاربند شورون، المان زیبی شکل، تحلیل تاریخچه زمانی، طبقه نرم.

در قاب‌های مهاربندی شده توسط سیستم ابداعی خطیب و همکاران، مهاربندی زیبی محل تقاطع تیرها و مهاربندها را در تمام طبقات به هم متصل می‌سازد، این مسئله موجب می‌شود تا همه مهاربندهای فشاری موجود در یک دهانه مهاربندی شده، به طور یکپارچه و به صورت هم‌زمان دچار کماتش شوند و میزان استهلاک انرژی توزیع بهتری در تمام ارتفاع سازه داشته باشد.



شکل ۱- بهبود عملکرد مهاربند با استفاده از مهاربند زیبی [۳]

در حالت کلی می‌توان گفت، عملکرد سیستم زیبی به این شکل است که اگر مهاربند فشاری در اولین طبقه دچار کماتش شود، مهاربندهای طبقات بالاتر در مرحله اول همچنان رفتار الاستیک خواهند داشت. اما نیروی نامتعادل قائم ناشی از کماتش و تسلیم مهاربندهای طبقه اول که به وسط دهانه تیر اعمال می‌شود، مستقیماً به ستون‌های زیبی اعمال می‌گردد و این ستون‌ها همه تیرها و مهاربندهای باقی‌مانده در طبقات

## ۱- مقدمه

قاب‌های فولادی با مهاربندهای همگرا سازه‌هایی اقتصادی و مؤثر در مقابله با بارهای جانبی هستند. قاب شورون یا قاب مهاربندی شده با مهاربند V معکوس یک نوع قاب با مهاربندی هم‌مرکز معمولی است که در این سیستم، محورهای مرکزی اعضای مهاربندی برای مقابله با نیروهای جانبی به صورت یک سیستم خرابایی قائم عمل می‌کنند. مزیت عمده این سیستم مهاربندی در جنبه‌های معماری است و امکان تعبیه بازشو در وسط دهانه‌های مهاربندی شورون با سهولت بیشتری فراهم می‌باشد؛ که به همین علت نسبت به سایر سیستم‌های مهاربندی همگرا ممکن است ترجیح داده شود. بر این اساس و با توجه به ملاحظات معماری و همچنین افزایش میزان شکل پذیری، این نوع از مهاربندها برای بهسازی لرزه‌ای در قاب‌های بتن مسلح نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

با وجود تمام این محاسن، طراحی این گونه از مهاربندها دارای مشکلات عمده‌ای نیز می‌باشد. عملکرد این سیستم‌ها عموماً با ایجاد کماتش در اعضای مورب در هنگام اعمال بار فشاری با مشکل روبرو می‌گردد. علاوه بر این در اعمال اثر بارهای جانبی، نیروی موجود در مهاربند کششی افزایش خواهد یافت تا جایی که این عضو به تسلیم برسد. این موضوع موجب به وجود آمدن یک نیروی قائم نامتعادل بزرگ در محل تقاطع اعضا در تیر می‌شود. در نتیجه ایجاد تمرکز تغییر شکل نسبی ایجاد شده در طبقه اول باعث شکل‌گیری طبقه نرم در طبقه همکف می‌گردد و منجر به انهدام سازه خواهد شد. بنابراین در حالت کلی این سیستم مهاربندی، به عنوان یک سیستم با عملکرد سازه‌ای مناسب به خصوص در مناطق با لرزه‌خیزی بالا محسوب نمی‌شود [۱، ۲].

یک راه حل ابتکاری برای مقابله با تشکیل طبقه نرم در اولین طبقه قاب‌های شورون و همچنین جلوگیری از افزایش بی‌قاعده ابعاد تیر در قاب‌ها، استفاده از المان‌های قائم در محل تقاطع اعضای مهاربندی در وسط تیر است. این راه حل برای نخستین بار توسط خطیب در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد شد. در این حالت ستون اضافه شده در وسط دهانه نیروی قائم نامتعادل را به طبقات بالا انتقال خواهد داد. در نتیجه به جای خرابی موضعی در طبقه اول، با توزیع نیرو در طبقات بالا مکانیسم خرابی به صورت هم‌زمان در تمام ارتفاع شکل می‌گیرد. این موضوع مازاد مقاومت و شکل‌پذیری اضافی چشمگیری فراهم می‌کند. این المان قائم که به صورت اضافی در قلب سیستم مهاربندی قرار می‌گیرد، به دلیل شکل ظاهری سیستم مهاربندی و نحوه عملکرد آن در انتقال نیرو، المان زیبی یا ستون زیبی نام گرفته است و سیستم مهاربندی حاصله را سیستم مهاربندی زیبی شکل نامگذاری کرده‌اند. این سیستم از لحاظ معماری نیز مشکلی برای پیش‌بینی بازشو در طبقه همکف ایجاد نمی‌کند. نحوه عملکرد لرزه‌ای مهاربند زیبی شکل و راهکار حل مشکل کماتش شورون در شکل (۱) قابل مشاهده است [۳].

افزایش قابل ملاحظه میزان شکل پذیری بدون نیاز به افزایش ابعاد ستون‌ها و تیرهای بتنی است [۶].

افزایش سرعت پردازش رایانه‌ها سبب شده تا انواع روش‌های تحلیل سازه‌ها به‌سوی روش‌های پیچیده‌تر و سنگین‌تر تمایل پیدا کند. در نتیجه روش‌های ابتدایی که مبتنی بر تحلیل استاتیکی خطی بودند، به تدریج به سمت روش‌های آنالیز دینامیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و نهایتاً دینامیکی غیرخطی سوق پیدا کردند. روش تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی غیرخطی یکی از روش‌های آنالیز دینامیکی غیرخطی می‌باشد که رفتار سازه را در حوزه وسیعی از شدت‌های مختلف زلزله بیان می‌نماید. پاسخ تحلیل‌های تاریخیچه زمانی به مقدار بسیار زیادی بستگی به نوع رکورد زلزله به‌کارگیری شده و مشخصات دینامیکی آن زلزله دارد. خصوصیات زمین لرزه‌هایی که در نزدیکی گسل یک زلزله ثبت می‌گردند کاملاً با زمین لرزه‌های معمول دور از گسل متفاوت می‌باشد. زمین لرزه‌های نزدیک گسل به طور معمول به فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل محدود می‌شوند. البته این تعریف به تنهایی تفاوت‌های عمده این نوع از زمین لرزه‌ها را بیان نمی‌کند. در راستای اثبات این ادعا، در سال ۲۰۰۴ قبارا پاسخ لرزه‌ای سازه‌های معمول بتنی را در برابر زلزله‌های نزدیک گسل مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق بیان شده است که رکوردهای زلزله نزدیک گسل غنی از فرکانس‌های بالا هستند، زیرا فاصله کوتاه امواج لرزه‌ای اجازه نمی‌دهد زمان کافی برای تخلیه محتویات فرکانس بالا در رکورد وجود داشته باشد. قبارا به این نتیجه رسیده است که این ویژگی بر پاسخ سازه‌ها با فرکانس بالا و دوره‌های طولانی تأثیر می‌گذارد. براین اساس در این تحقیق قاب‌های بتنی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۰ طبقه هم تحت اثر زلزله دور و هم نزدیک گسل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که نتایج زلزله‌های نزدیک گسل با رکوردهای دور از گسل تفاوت اساسی دارد. از طرفی هم برای زلزله‌های نزدیک و هم برای زلزله‌های دور از گسل مقایسه نتایج با نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی در همان میزان برش طبقات نشان‌دهنده آن است که در زمینه میزان جابه‌جایی نسبی نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی محافظه‌کارانه‌تر است [۷]. در سال ۲۰۰۷ گیشف و همکاران مکانیسم خرابی و همچنین میزان انرژی جذب شده در سازه‌های بتنی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل را مورد بررسی قرار دادند [۸]. نتایج نشان‌دهنده میزان انرژی جذب شده بسیار زیاد در سازه‌های بتنی تحت اثر زلزله نورتیج به‌عنوان یکی از معروف‌ترین زلزله‌های نزدیک گسل است. همچنین مکانیسم خرابی در قاب بتنی مورد مطالعه نشان‌دهنده میزان خرابی فزاینده در طبقات پایین و بخصوص در اتصالات است. در سال ۲۰۱۶ امیری و همکاران عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی طراحی شده بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ را تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با افزایش فاصله سازه از گسل سرعت ارتعاش طبقات بالاتر به‌خصوص در سازه‌های بلندمرتبه

بالا را درگیر خواهند نمود تا اینکه همهٔ مهاربندها در مقابل این نیروی نامتعادل مقاومت کنند. این نیروی نامتعادل انتقال یافته از طریق ستون زیبی، فشار در مهاربند فشاری طبقهٔ دوم را افزایش خواهد داد و این موضوع، سبب کماتش آن میشود. به همین ترتیب نیروهای نامتعادل در هر طبقه به طبقات بالا انتقال می‌یابد و به‌صورت مرحله‌به‌مرحله، تمامی مهاربندهای فشاری طبقات بالاتر تسلیم خواهند شد. کماتش هم‌زمان کلیهٔ مهاربندها در تمام طبقات سازه باعث توزیع بسیار یکنواخت خرابی در کل ارتفاع سازه خواهد شد که این نتیجه، همان هدف مطلوب در طراحی سیستم مهاربندی است.

در رابطه با عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای زیبی در قاب‌های فولادی در سال‌های اخیر تحقیقات دانشمندان رو به افزایش است. بر این اساس در راستای طراحی این نوع از مهاربندها، در تحقیق یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ اولین مرحله طراحی مهاربندهای شورون بدون در نظرگیری المان زیبی و مرحله دوم مرحله طراحی بر اساس سطح عملکرد کلی سازه است که در آن پایه‌های زیبی شکل اضافه می‌شود و سایر عناصر سازه‌ای مجدداً طراحی می‌شود. براین اساس در این تحقیق سه مدل سازه‌ای با ارتفاع ۳، ۹ و ۲۰ طبقه طراحی شده است [۱]. نتایج نشان‌دهنده آن است که با افزایش ارتفاع طراحی سطح عملکردی برای قاب فولادی به همراه مهاربند زیبی از ضریب اطمینان بیشتری برخوردار بوده است. در سال ۲۰۱۱ نیکنام و شرفایی مهاربند زیبی را با مهاربندهای شورون و اگر مورد مقایسه قرار دادند [۴]. نتایج نشان‌دهنده آن است که حتی با افزایش خروج از مرکزیت مهاربند و اگر تا ۳۰ درصد طول دهانه بازم مهاربند زیبی شکل عملکرد بهتری از خود نشان داده و میزان شکل‌پذیری قاب در این نوع مهاربند بیشتر است. در سال ۲۰۱۲ رضوی و شیدایی عملکرد قاب‌های فولادی با مهاربندی زیبی کابلی با ایجاد پیش‌تنیدگی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق قاب‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه مجهز به مهاربندهای زیبی کابلی تحت اثر ۷ رکورد دور و نزدیک گسل مورد بررسی قرار گرفت. کابل‌ها تحت پیش‌تنیدگی ۵ و ۲۰ درصد نیروی تسلیم قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که حتی با پیش‌تنیدگی کم در کابل‌ها در سازه‌های کوتاه مرتبه میزان جابه‌جایی نسبی طبقات به میزان محسوسی کاهش می‌یابد [۲]. در سال ۲۰۱۹ اسفندیاری و خزعلی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی مهاربندی شده با مهاربندهای زیبی را تحت اثر آنالیز استاتیکی غیرخطی و دینامیکی فزاینده مورد بررسی قرار دادند [۵]. نتایج حاکی از آن است که آنالیز استاتیکی غیرخطی با تقریب مناسبی نسبت به آنالیز دینامیکی فزاینده قابلیت تخمین عملکرد لرزه‌ای سازه را خواهد داشت. در سال ۲۰۲۰ نظامی ساوجبلاغی عملکرد قاب‌های بتنی مجهز به مهاربندهای زیبی شکل را مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق ابتدا سازه بتنی با آیین‌نامه‌های قدیمی طراحی و سپس با استفاده از مهاربندهای زیبی شکل به‌سزای لرزه‌ای شده است. نتایج حاکی از

شورون می‌باشند. برای طراحی مهاربندها از روش طراحی مقاومت حدی باتوجه به آیین‌نامه AISC 303-16 استفاده شده است [۱۱]. پس از طراحی استاتیکی خطی در نرم‌افزار ETABS Ver16.2.1 قاب موردنظر از سازه سه‌بعدی استخراج گردیده و سپس برای انجام آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار SAP 2000-V19.2 به صورت مجدد مدل‌سازی انجام می‌گردد. پس از مدل‌سازی مجدد به تیرها و ستون‌های بتنی و همچنین مهاربندهای فولادی، مفاصل پلاستیک باتوجه به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها (FEMA-356) اختصاص داده شده است [۱۲]. آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی نیز با در نظرگیری اثر P-Delta بر روی سازه‌ها تحت اثر ۱۴ رکورد زلزله شامل ۷ رکورد نزدیک و ۷ رکورد دور از گسل انجام گردیده است. پس از انجام آنالیز تاریخیچه زمانی، نتایج شامل برش طبقات، جابه‌جایی نسبی طبقات و جابه‌جایی کلی طبقات و همچنین روند تشکیل مفاصل پلاستیک استخراج گردیده و با یکدیگر مقایسه شده است.

#### ۲- مدل‌های مورد بررسی

جدول (۱) و (۲) مشخصات مصالح فولادی و بتنی استفاده شده در قاب‌های بتن مسلح و همچنین مهاربندهای شورون و المان‌های زیبایی شکل را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که میلگرد مورد استفاده در تیرها و ستون‌های بتنی از نوع AIII تعریف شده است.

به صورت معناداری کاهش می‌یابد. برای مثال در این تحقیق برای سازه بتنی ۱۵ طبقه سرعت ارتعاش طبقات بالاتر در زلزله‌های دور از گسل بین ۴۹ تا ۷۶ درصد کاهش را تجربه کرده است [۹]. در سال ۲۰۲۰ گنگ و همکاران عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی پیش‌ساخته را تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از اتصالات پیش‌ساخته فولادی برای ایجاد اتصال خمشی استفاده شده است. نتایج تحقیق حاکی از عملکرد مناسب این‌گونه از اتصال در قاب‌های پیش‌ساخته بتنی تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل بوده است. از طرفی استفاده از این نوع اتصال باعث شده تا قاب‌های کوتاه مرتبه از احتمال کمتری برای ورود به سطح عملکرد ایمنی جانی برخوردار باشند و در سطح عملکرد قابلیت استفاده بدون وقفه با احتمال بالاتری قرار گیرند [۱۰].

با توجه به بررسی‌های انجام شده و فقدان تحقیقاتی در حوزه بررسی ترکیبی مهاربندهای زیبایی شکل در قاب‌های بتنی، همزمان با بررسی عملکرد لرزه‌ای تحت زلزله‌های دور و نزدیک گسل، روش تحقیق سازه‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است عبارت‌اند از ساختمان‌های با اسکلت بتن‌آرمه از نوع قاب خمشی متوسط به همراه مهاربندهای فلزی شورون در طبقات به ترتیب ۳، ۶ و ۹ طبقه. این قاب‌ها به ترتیب به نمایندگی از ساختمان‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه در نظر گرفته شده‌اند. پلان سازه طراحی شده، قاب‌های پنج دهانه با ابعاد ۵ متر برای هر دهانه و ۴ متر برای دهانه شامل مهاربند

جدول (۱) مشخصات مصالح فولادی

مقدار	واحد	نوع مشخصه
۷۸۴۸	کیلوگرم بر مترمکعب	وزن واحد حجم (W)
۲۱۰۰۰۰۰	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	مدول ارتجاعی (E)
۰/۳	-	ضریب پواسون (ν)
۲۴۰۰	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	تنش تسلیم (F <sub>y</sub> )
۳۷۰۰	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	تنش نهایی (F <sub>u</sub> )

جدول (۲) مشخصات مصالح بتن مسلح

مقدار	واحد	نوع مشخصه
۲۵۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب	وزن واحد حجم (W)
۲۵۰۰۰۰	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	مدول ارتجاعی (E)
۰/۱۵	-	ضریب پواسون (ν)
۲۵۰	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	مقاومت فشاری (f <sub>c</sub> )
۴۰۰۰	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	تنش تسلیم میلگرد (F <sub>y</sub> )

زنده نیز به ترتیب برای بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و برای طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. لازم به ذکر است که این بار به صورت

بار مرده اختصاص داده شده به طبقات به ترتیب برای بام ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و برای سایر طبقات ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. بار

نمی‌باشند، اما نزدیک‌ترین سازه به این نوع سازه‌ها انتخاب و این ضریب رفتار برای آنها مشخص گردید. در ادامه لازم به ذکر است که ضریب ممان اینرسی مقطع ترک‌خورده قطعات باتوجه‌به اینکه قاب مهاربندی شده است، بر اساس توصیه آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای تیرها برابر ۰/۵ و برای ستون‌ها برابر یک لحاظ شده است. ضریب بازتاب ساختمان نیز برای سازه‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه برابر ۲/۷۵ به‌دست‌آمده است. پس از انجام کلیه تنظیمات و تعریف مشخصات مصالح و مقاطع در نرم‌افزار ETABS Ver16.2.1، آنالیز استاتیکی خطی بر روی سازه‌ها انجام شده و مقاطع المان‌های سازه‌ای با در نظرگیری کنترل تغییر مکان نسبی طبقات و شاخص پایداری طراحی شده است. نحوه طراحی المان‌های زیبی با فرض عملکرد مکانیسم زیبی در بخشی از ارتفاع ساختمان به‌این‌ترتیب است که این المان باید در برابر یک نیروی محوری نامتعادل ناشی از نیروهای کششی و فشاری موجود در مهاربندهای طبقه پایین‌تر طراحی گردد. نیروی کششی در مهاربند کششی برابر با  $FyAg$  در نظر گرفته می‌شود و نیروی موجود در مهاربند فشاری برابر با ۰/۳ برابر ظرفیت فشاری اسمی مقطع مهاربند لحاظ می‌شود. به‌این‌ترتیب در طبقه همکف به دلیل اینکه طبقه ای زیر المان زیبی وجود ندارد، المان زیبی قرار داده نمی‌شود. باتوجه‌به مطالب ذکر شده باتوجه‌به مقاطع مهاربندهای هر طبقه، المان زیبی طبقه بالاتر به‌صورت جدول (۳) طراحی شده است. با توجه به تمام فرآیند طراحی در این تحقیق ۶ قاب ۳، ۶ و ۹ طبقه با و بدون در نظرگیری المان زیبی شکل از سازه‌های سه بعدی استخراج شده است. بر اساس توضیحات ارائه شده در روند طراحی، قاب‌های بتنی مهاربندی شده مجهز به المان زیبی شکل در اشکال (۲) تا (۴) قابل‌ملاحظه است.

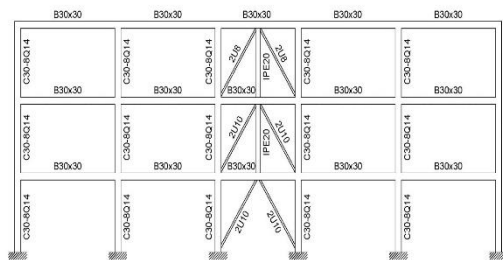
سهمی از قاب و خطی به تیرها اختصاص داده شده است. در مورد بار زلزله نیز ضریب زلزله با استفاده از استاندارد ۲۸۰۰ (طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله) ویرایش ۴ به‌دست‌آمده است. در این تحقیق، گروه‌بندی ساختمان بر اساس اهمیت در طبقه‌بندی ساختمان‌های با اهمیت متوسط قرار گرفته است. ضریب اهمیت ساختمان نیز باتوجه‌به گروه‌بندی سازه برابر یک می‌باشد. باتوجه‌به پلان سیستم مهاربندی و همچنین اجزای ستون‌ها و کف طبقات و نوع بارگذاری در پلان، سازه هم در پلان و هم در ارتفاع منظم محسوب می‌گردد. دیافراگم صلب نیز به‌تمامی طبقات اختصاص داده شده است. سازه از لحاظ سیستم سازه‌ای در طبقه‌بندی سیستم‌های دوگانه یا ترکیبی قرار می‌گیرد. در واقع مقاومت در برابر بارهای جانبی توسط مجموعه‌ای از قاب‌های مهاربندی شده همراه با مجموعه‌ای از قاب خمشی بتنی به‌گونه‌ای تأمین می‌گردد که قاب خمشی به‌تنهایی قادر به تحمل ۳۰ درصد نیروهای جانبی و قاب‌های مهاربندی شده قادر به تحمل ۱۰۰ درصد نیروهای جانبی باشند. نسبت شتاب مینای طرح نیز ۰/۳ در نظر گرفته شده است و از لحاظ سرعت موج برشی خاک، طبقه‌بندی زمین از نوع III می‌باشد. هدف از انتخاب زمین نوع III آن است که سرعت موج برشی بین ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه بوده و رکوردهای زلزله بر اساس این سرعت موج برشی انتخاب شوند. ضریب نامعینی سازه نیز برابر یک منظور شده است. زمان تناوب اصلی مود اول نوسان سازه بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای ساختمان‌های سه طبقه برابر ۰/۲۷۳ ثانیه و برای ساختمان‌های ۶ طبقه برابر ۰/۴۵۹ ثانیه و برای ساختمان‌های ۹ طبقه برابر ۰/۶۲۲ ثانیه به‌دست‌آمده است. ضریب رفتار ساختمان که بیانگر خصوصیات مانند شکل‌پذیری، میزان نامعینی و مقدار اضافه مقاومت موجود در سازه‌ها است، مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ برابر ۶ در نظر گرفته شده است. البته لازم به ذکر است که سازه‌های بتنی با مهاربندهای شورون به‌صورت واضح دارای ضریب رفتار مشخصی در این آیین‌نامه

جدول (۳) طراحی مقطع موردنیاز به‌عنوان المان زیبی شکل

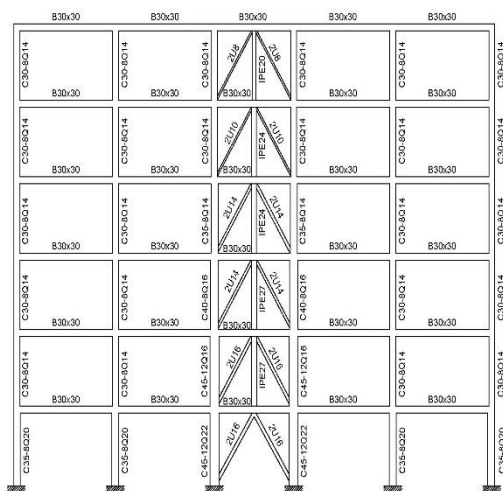
مقطع مهاربند طبقه پایین‌تر	نیروی نامتعادل (Kg)	سطح مقطع موردنیاز (cm <sup>2</sup> )	مقطع المان زیبی
UNP100 (DOUBLE)	۵۵۲۷۹/۸	۲۵/۵۹	IPE200
UNP120 (DOUBLE)	۶۷۹۱۱/۲	۳۱/۴۴	IPE220
UNP140 (DOUBLE)	۸۰۲۶۲/۸	۳۷/۱۶	IPE240
UNP160 (DOUBLE)	۹۳۷۹۷/۲	۴۳/۴۲	IPE270
UNP180 (DOUBLE)	۱۰۸۳۳۰/۰	۵۰/۱۵	IPE300
UNP200 (DOUBLE)	۱۲۳۹۱۵/۰	۵۷/۳۷	IPE330

### ۳- آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی

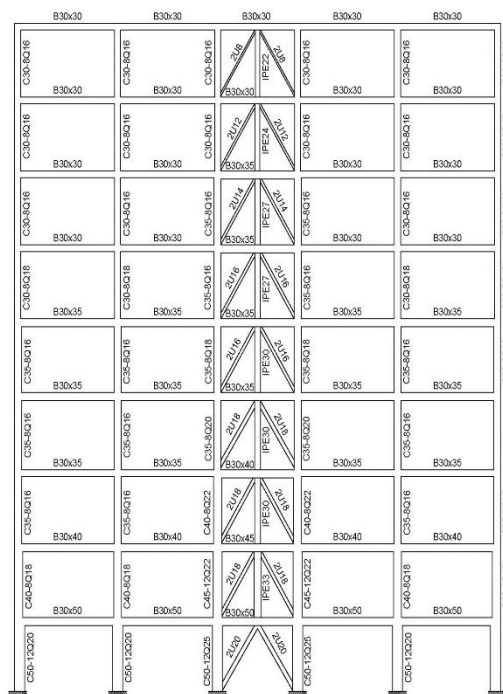
در روش آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی یا روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، سازه تحت بارگذاری تاریخچه زمانی شتاب زلزله قرار می‌گیرد و به طور کامل تحلیل و پاسخ به صورت تاریخچه‌های زمانی مختلف تعیین می‌گردد. در این نوع تحلیل، آثار مودهای بالاتر ارتعاش سازه و تغییرات ماتریس سختی سازه به واسطه ورود به مرحله غیرخطی در المان‌های سازه‌ای به صورت گام‌به‌گام به طور خودکار لحاظ می‌شود. در این روش به صورت مستقیم، تغییر مکان کلی حداکثری که توسط یک شتاب نگاشت مشخص به سازه اعمال می‌شود، تعیین شده و احتیاجی به تخمین پارامترها بر پایه روابط تئوریک نمی‌باشد. به این دلیل است که این نوع از تحلیل را به عنوان دقیق‌ترین تحلیل برای تخمین عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها معرفی نموده‌اند. نکته اصلی در مورد این تحلیل آن است که خصوصیات شتاب نگاشت‌های زلزله و همچنین رفتار غیرخطی المان‌های سازه‌ای تغییرات فراوانی را در نتایج تحلیل ایجاد می‌نماید. معمولاً در آیین‌نامه‌های ساختمانی از جمله آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران و آیین‌نامه طراحی سازه‌های آمریکا ASCE-07 چند روش را برای استفاده از شتاب نگاشت‌ها معرفی نموده‌اند؛ بنابراین می‌توان گفت که مهم‌ترین عوامل در نتایج دقیق تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده صحیح از شتاب نگاشت‌های زلزله و همچنین مدل‌سازی دقیق عملکرد مفاصل پلاستیک و جانمایی دقیق آنها در سازه می‌باشد. در حالت کلی یک شتاب نگاشت زلزله برای همخوانی با طیف طرح آیین‌نامه‌های موجود در استانداردها باید مقیاس یا هم‌پایه گردد. آیین‌نامه‌های مختلف روش‌های متفاوتی را برای مقیاس کردن شتاب نگاشت‌های زلزله ارائه کرده‌اند. برای مثال در آیین‌نامه ۲۸۰۰، طیف شتاب نگاشت زلزله در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب اصلی سازه نباید بیشتر از ۱۰ درصد از ۱/۳ برابر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ کمتر باشد. ضریبی که برای این محدودیت به دست می‌آید را در اصطلاح، ضریب مقیاس زلزله می‌گویند. بر اساس آیین‌نامه ASCE-07 ویرایش سال ۲۰۱۰، برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله ابتدا لازم است تا ۷ رکورد زلزله با خصوصیات مشابه از لحاظ سرعت موج برشی و نوع گسل (برای مثال امتدادلغز بودن) انتخاب شود. سپس طیف این ۷ رکورد میانگین‌گیری شده و میانگین طیفی در محدوده ۰/۲ زمان تناوب اصلی تا ۱/۵ برابر آن نباید از طیف طرح آیین‌نامه کمتر باشد. ضریبی که از این کار حاصل می‌شود را ضریب مقیاس برای رکوردهای زلزله می‌گویند. مشکل اصلی در هر دو روش مقیاس کردن برای رکوردهای نزدیک گسل، عدم در نظرگیری رفتار پالس گونه در ابتدای رکورد می‌باشد؛ بنابراین در تحقیقات گذشته این دو روش مقیاس کردن برای رکوردهای نزدیک گسل پیشنهاد نشده است. در این تحقیق برای حل مشکل فوق از نرم‌افزاری استفاده گردید که قابلیت مقیاس کردن رکوردهای زلزله بر اساس طیف طرح آیین‌نامه موردنظر را با در



شکل (۲) قاب بتنی سه طبقه مهاربندی با المان زیبی



شکل (۳) قاب بتنی شش طبقه مهاربندی با المان زیبی



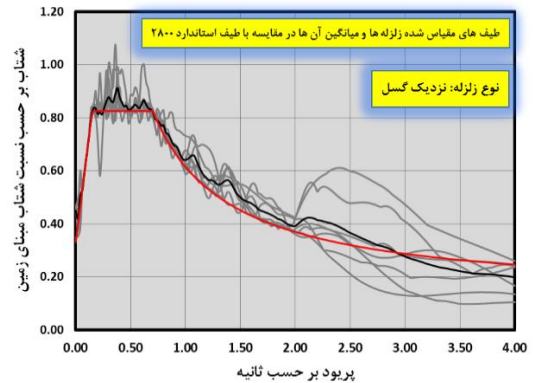
شکل (۳) قاب بتنی نه طبقه مهاربندی با المان زیبی

تحقیق از هفت سری رکورد زلزله نزدیک گسل و هفت سری رکورد زلزله دور از گسل، استفاده گردید. در جدول (۴) مشخصات زلزله‌های انتخاب شده به صورت کامل قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که معیار نزدیک گسل بودن، فاصله بین صفر تا ده کیلومتر و معیار دور از گسل بودن، فاصله بین ده تا پنجاه کیلومتر لحاظ شده است.

نظریه‌گیری جوانب مختلف از قبیل لحاظ کردن حرکات پالس گونه در ابتدای رکوردهای نزدیک گسل داشته باشد. این نرم‌افزار SeismoMatch نام دارد. این نرم‌افزار این قابلیت را دارد که با گرفتن طیف طرح آیین‌نامه موردنظر و مجموعه هفت رکورد مورد استفاده، هر رکورد را به صورت جداگانه بر اساس طیف زلزله با طیف طرح آیین‌نامه منطبق سازد و نتایج را به صورت دسته‌ای از شتاب نگاشت‌های اصلاح شده ارائه دهد. باتوجه به توضیحات فوق در این

جدول (۴) مشخصات رکوردهای زلزله دور و نزدیک گسل انتخابی در این تحقیق

ردیف	نام	ایستگاه	حداکثر شتاب زمین بر حسب g	حداکثر سرعت زمین بر حسب سانتی متر بر ثانیه	سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه	فاصله از گسل بر حسب کیلومتر	نوع رکورد
1	Landers	Coolwater	۰/۴۱۷	۴۳/۴۱۴	۳۵۲/۹	۱۹/۷۴	دور از گسل
2	Duzce Turkey	Bolu	۰/۸۰۶	۶۵/۸۷۴	۲۹۳/۵۷	۱۲/۰۲	
3	Sierra Mex	Michoacan De Ocampo	۰/۵۳۸	۶۱/۵۴۹	۲۴۲/۰۵	۱۳/۲۱	
4	Sierra Mex	El Centro Meloland eot Array	۰/۴۳۹	۲۶/۰۵۹	۲۶۴/۵۷	۲۸/۵۳	
5	Sierra Mex	El Centro Differential Array	۰/۵۵۴	۲۹/۳۰۴	۲۰۲/۲۶	۲۲/۸۳	
6	Sierra Mex	El Centro Array #11	۰/۵۸۶	۶۳/۲۱۶	۱۹۶/۲۵	۱۵/۳۶	
7	Darfield New Zealand	DFHS	۰/۵۱۳	۲۹/۷۶۳	۳۴۴/۰۲	۱۱/۸۶	
1	Duzce Turkey	Duzce	۰/۵۱۵	۸۴/۰۹۴	۲۸۱/۸۶	۰/۵	نزدیک گسل
2	Denali Alaska	TAPS Pump Station #10	۰/۳۳۳	۱۱۵/۷۱۶	۳۲۹/۴	۰/۶۸	
3	Darfield New Zealand	DLC	۰/۷۶۴	۱۱۶/۱	۳۴۴	۱/۲۲	
4	Darfield New Zealand	HORC	۰/۴۷۷	۶۹/۸۵	۳۲۶	۷/۲۹	
5	Darfield New Zealand	LINC	۰/۴۶۱	۱۰۸/۷۴	۲۶۳/۲	۵/۰۷	
6	Darfield New Zealand	ROLC	۰/۳۹۰	۸۵/۷۳	۲۹۵/۸	۰/۵	
7	Sierra Mex	El Centro Array #12	۰/۴۰۶	۷۰/۱۵۸	۱۹۶/۹	۹/۹۸	



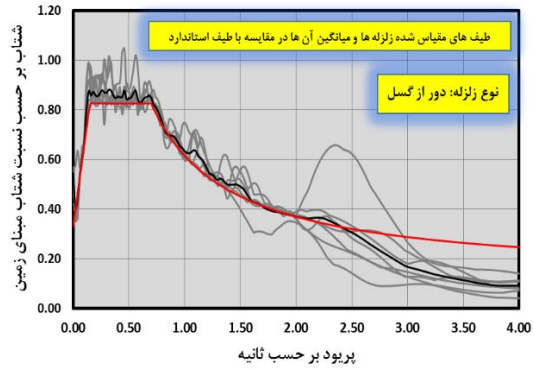
شکل (۶) طیف‌های مقیاس شده رکوردهای زلزله‌های نزدیک گسل

### ۴- نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی قاب‌های سه طبقه

باتوجه به نتایج حاصل از میانگین‌گیری تغییر مکان کلی سازه سه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل که در شکل (۷) ارائه شده است، می‌توان دریافت که اولاً در حالت کلی در قاب‌های سه طبقه تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل جابه‌جایی کلی سازه به‌خصوص در بام به شکل قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. ثانیاً استفاده از المان زیپی در مهاربندهای شورون باعث کاهش تغییر مکان کلی قاب سه طبقه، هم در زلزله‌های نزدیک گسل و هم در زلزله‌های دور از گسل نسبت به قاب مهاربندی شده با مهاربند شورون بدون استفاده از المان زیپی می‌گردد. از دیگر نکات شایان‌ذکر که با مقایسه نمودارهای شکل (۷) می‌توان دریافت، کاهش روند افزایش تغییر مکان کلی در طبقه دوم نسبت به طبقه اول می‌باشد، اما این روند کاهشی در طبقه سوم نسبت به طبقه دوم در قاب‌های شامل المان زیپی شکل ادامه نیافته است. باتوجه به تحقیقات گذشته، دلیل این موضوع را می‌توان در کاهش ناگهانی ظرفیت مهاربندهای شورون طبقات فوقانی به‌واسطه انتقال نیروی طبقات تحتانی دانست. براین‌اساس می‌توان به این نکته اشاره نمود که در حالت کلی، افزودن المان زیپی شکل به قاب شورون موجود، بدون در نظرگیری اثر المان زیپی در تحلیل و طراحی مقاطع سازه، ممکن است روند انتقال بار به طبقات فوقانی را با مشکل روبرو سازد و سازه به‌طور ناگهانی دچار شکست کلی گردد.

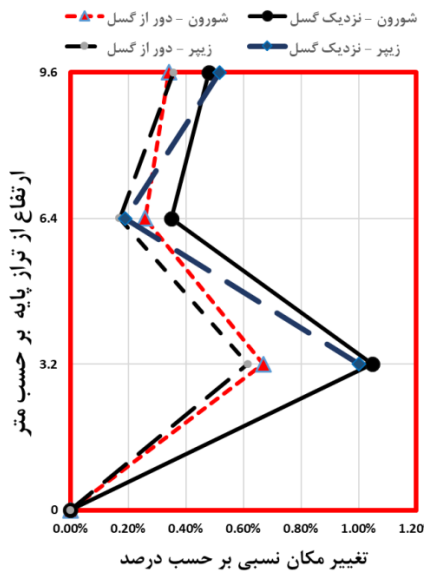
در ادامه طیف‌های مقیاس نشده و همچنین طیف‌های مقیاس شده‌ی هر یک از رکوردهای زلزله‌های انتخابی دور و نزدیک گسل در اشکال (۵) و (۶) قابل مشاهده است. پس از انجام فرایند طراحی مقاطع در نرم‌افزار ETABS Ver16.2.1، مدل‌سازی به‌صورت دویبعدی در نرم‌افزار SAP انجام شده است. برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی غیرخطی، طبق تعریف دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها FEMA-356، ابتدا باری معادل  $1.1(DL + LL)$  به عنوان شرایط اولیه بار ثقلی به‌صورت غیرخطی به قاب بتنی مسلح مهاربندی شده اعمال می‌شود. در ادامه لازم به ذکر است که برای حل عددی انتگرال دیوهمال از الگوریتم Hilber - Hughes - Taylor استفاده شده است. در این روش مقدار آلفا بر اساس تحقیقات انجام شده گذشته،  $0.33-$  در نظر گرفته شده است.

شایان‌ذکر است که یکی از مهم‌ترین مراحل تحلیل در آنالیز دینامیکی تاریخیچه زمانی، چگونگی تخصیص مفاصل پلاستیک به المان‌ها می‌باشد. براین‌اساس در این تحقیق در تیرها و ستون‌های بتنی، مفاصل پلاستیک در نقاط  $0.1/0.5$  و  $0.9/0.5$  طول آن‌ها و در مهاربندهای شورون و المان‌های زیپی، مفصل پلاستیک در میانه المان تعریف شده است. در تعریف مفاصل پلاستیک تیرها، ستون‌ها و مهاربندها به ترتیب از جداول ۶-۷، ۶-۸ و ۵-۴ دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها FEMA-356 استفاده گردیده است. باتوجه به تعاریف انجام شده برای مفاصل پلاستیک با در نظرگیری نسبتی از دوران تیر یا ستون و یا مقاطع فولادی از دوران تسلیم، سطح عملکرد مفاصل پلاستیک تعریف می‌شود. براین‌اساس در تمام نشریات بهسازی لرزه‌ای، سه سطح عملکرد کلی قابلیت استفاده بدون وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش تعریف می‌گردد. زمانی که هر یک از المان‌ها سطح عملکرد آستانه فروریزش را رد نماید، به‌صورت کلی سختی آن المان از ماتریس سختی کل سازه حذف شده و سازه با ماتریس سختی جدید وارد ادامه آنالیز تاریخیچه زمانی می‌گردد. به این فرایند، روند تشکیل مفاصل پلاستیک گفته می‌شود که در این تحقیق برای تمامی رکوردهای زلزله این فرایند مورد بررسی قرار گرفته است.

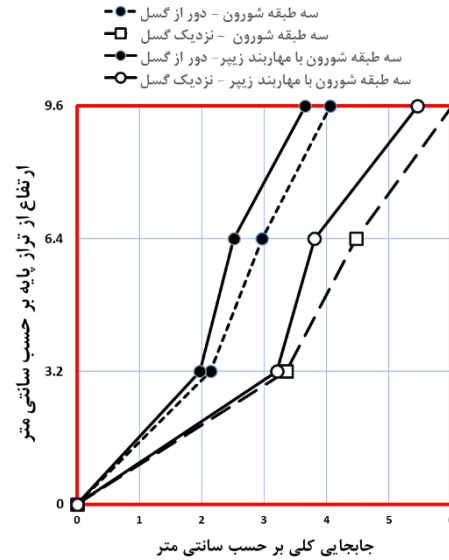


شکل (۵) طیف‌های مقیاس شده رکوردهای زلزله‌های دور از گسل





شکل (۸) میانگین تغییر مکان نسبی برای تمامی قاب‌های سه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل



شکل (۷) میانگین نتایج تغییر مکان کلی برای تمامی قاب‌های سه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل

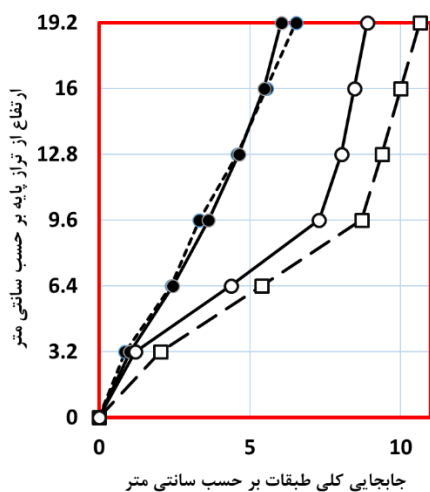
در ادامه همان گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد، مقدار برش پایه قاب‌های سه طبقه شورون تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در حدود ۱۰ درصد از برش پایه همان قاب‌ها تحت اثر زلزله‌های دور از گسل بیشتر می‌باشد. از طرفی افزودن المان‌های زیپی شکل به مقدار بسیار محدودی برش پایه را افزایش داده است. اما نکته حائز اهمیت افزایش چشمگیر برش طبقات به خصوص در طبقات دوم و سوم در قاب‌های مجهز به المان‌های زیپی شکل نسبت به قاب‌های بدون المان زیپی شکل می‌باشد. این افزایش میزان برش در تمام طبقات قابل مشاهده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که المان‌های زیپی شکل، هم در زلزله‌های نزدیک گسل و هم در زلزله‌های دور از گسل، به صورت موفقیت آمیزی توان انتقال بارهای نامتقارن ناشی از مهاربندهای شورون را به طبقات فوقانی، از خود نشان داده است.

در پایان این بخش، به واسطه استفاده از المان زیپی شکل، روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور به عنوان نمونه یک زلزله تحت اثر نگاهت‌های نزدیک گسل انتخاب و مفاصل پلاستیک در آخرین گام تحلیل در اشکال (۱۰) و (۱۱) به تصویر کشیده شده است.

روند افزایش تغییر مکان نسبی در سازه سه طبقه باتوجه به شکل (۸)، تقریباً مشابه با تمامی سازه‌های کوتاه مرتبه، هم تحت اثر زلزله‌های دور و هم تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل می‌باشد. بر این اساس بیشترین تغییر مکان نسبی، در طبقه اول نسبت به تراز پایه اتفاق افتاده است. در این حالت تغییر مکان نسبی زلزله‌های نزدیک گسل در طبقه اول نسبت به تراز پایه تقریباً دو برابر مقدار این پارامتر در زلزله‌های دور از گسل می‌باشد. در ادامه باتوجه به همین شکل می‌توان افزایش تغییر مکان نسبی قاب بتنی مجهز به المان زیپی شکل را در طبقه سوم تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل به وضوح مشاهده نمود. همان گونه که ذکر شد، دلیل این موضوع کاهش ظرفیت باربری مهاربندهای طبقه سوم به واسطه انتقال بارهای طبقات تحتانی است که این موضوع باید به صورت خاص در طراحی مدنظر قرار گیرد.

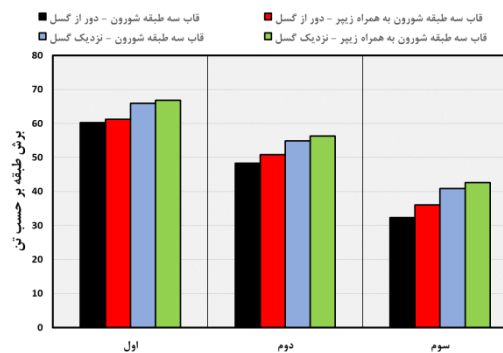
این المان‌ها در طبقات ۴، ۵ و ۶ به صورت محسوسی تغییر مکان کلی را نسبت به قاب شورون تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل کاسته‌اند. در زمینه زلزله‌های دور از گسل، المان زیبایی شکل نتایج تقریباً مشابهی در مقایسه با قاب شورون داشته است. در حالت کلی، زلزله‌های نزدیک گسل، میزان تغییر مکان کلی سازه را به خصوص در طبقات پایین‌تر، نسبت به زلزله‌های دور از گسل افزایش داده است. این افزایش تغییر مکان در طبقات ۲ و ۳ به صورت محسوسی قابل مشاهده است.

- شش طبقه شورون - دور از گسل
- شش طبقه شورون - نزدیک گسل
- شش طبقه شورون با مهاربند زیبر - دور از گسل
- شش طبقه شورون با مهاربند زیبر - نزدیک گسل

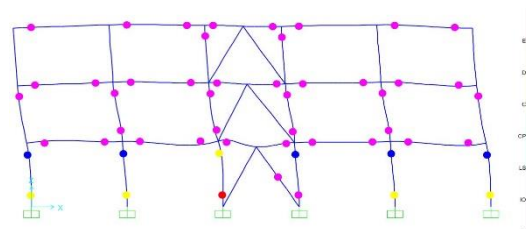


شکل (۱۲) میانگین نتایج تغییر مکان کلی برای تمامی قاب‌های شش طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل

در ادامه نتایج حاصل از میانگین تغییر مکان نسبی طبقات در قاب شش طبقه حاصل از تمامی رکورد‌های دور و نزدیک گسل در شکل (۱۳) قابل مشاهده است. نتایج حاصل از شکل (۱۳) حاکی از آن است که استفاده از المان زیبایی شکل در قاب بتنی ۶ طبقه در زلزله‌های نزدیک گسل تاحدی میزان تغییر مکان نسبی در طبقات بحرانی را که اصولاً طبقات میانی سازه می‌باشد، کاهش داده است. از طرفی در رابطه با زلزله‌های دور از گسل، ذکر این نکته ضروری است که استفاده از المان زیبایی شکل، میزان نوسان تغییر مکان نسبی و افزایش احتمال خرابی ناشی از این پارامتر را در طبقات بحرانی، تاحدی کاسته است. در حالت کلی نیز زلزله‌های نزدیک گسل به خصوص در سازه ۶ طبقه که می‌توان آن را در گروه سازه‌های میان مرتبه طبقه‌بندی نمود، تغییر مکان نسبی طبقات تحتانی را به صورت محسوسی افزایش داده است. این موضوع بر لزوم در نظرگیری تأثیر این نوع از زلزله‌ها در طراحی قاب‌های بتنی تأکید دارد.

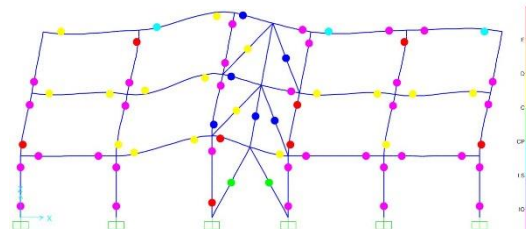


شکل (۹) میانگین نتایج برش طبقات برای تمامی قاب‌های سه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل



شکل (۱۰) مفاصل پلاستیک در آخرین مرحله از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قاب سه طبقه شورون تحت اثر رکورد نزدیک گسل

Darfield-HOR



شکل (۱۱) مفاصل پلاستیک در آخرین مرحله از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قاب سه طبقه زیبر تحت اثر رکورد نزدیک گسل

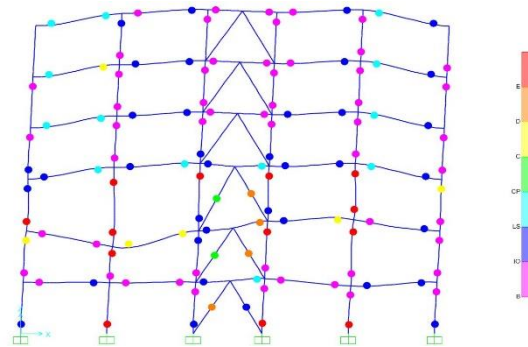
Darfield-HOR

در زلزله‌های نزدیک گسل که به صورت نمونه زلزله دارفیلد در اشکال (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است، المان زیبایی شکل کاملاً در انتقال بار به طبقات بالایی و تشکیل مفاصل پلاستیک در مهاربندها و تیرهای طبقه فوقانی به صورت موفق عمل نموده است. در شکل (۱۰) به صورت واضح، مکانیسم تشکیل طبقه نرم در طبقه همکف و در شکل (۱۱)، جلوگیری از تشکیل این مکانیسم به واسطه وجود المان زیبایی شکل، مشاهده می‌گردد.

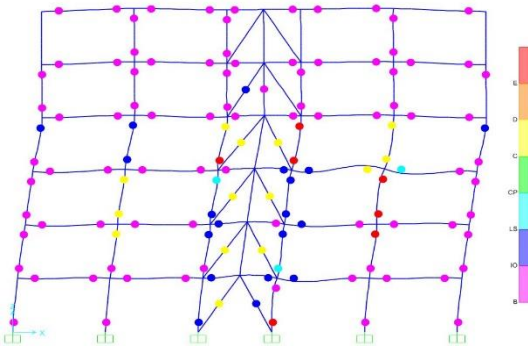
## ۵- نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی قاب‌های شش طبقه

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی قاب‌های شش طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارائه شده در شکل (۱۲) حاکی از تأثیر بسزای استفاده از المان‌های زیبایی شکل در زلزله‌های نزدیک گسل در زمینه کاهش تغییر مکان کلی در طبقات فوقانی است.

نزدیک گسل انتخاب و مفاصل پلاستیک در آخرین گام تحلیل در اشکال (۱۵) و (۱۶) به تصویر کشیده شده است.



شکل (۱۵) مفاصل پلاستیک در آخرین مرحله از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قاب شش طبقه شورون تحت اثر رکورد نزدیک گسل Sierra

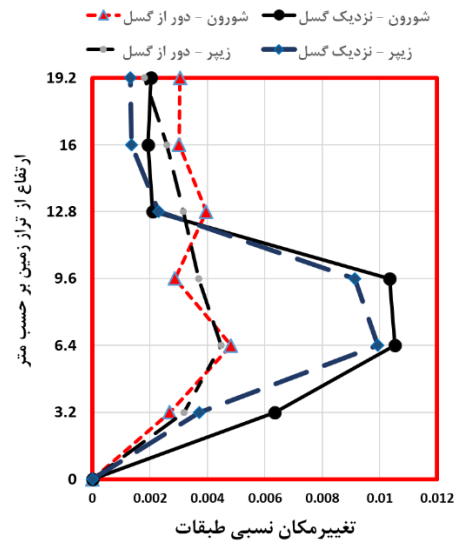


شکل (۱۶) مفاصل پلاستیک در آخرین مرحله از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قاب شش طبقه زیر تحت اثر رکورد نزدیک گسل Sierra

همان طور که در اشکال (۱۵) و (۱۶) مشاهده می شود، وجود المان زیبی شکل باعث شده تا مفاصل پلاستیک در مهاربندهای شورون در طبقات بیشتری شکل بگیرند. از طرف دیگر عملکرد مثبت المان زیبی شکل در جلوگیری از تشکیل طبقه نرم در طبقه اول ملاحظه می گردد. شایان ذکر است که در زلزله های نزدیک گسل، المان زیبی شکل در انتقال بار به طبقات بالایی و تشکیل مفاصل پلاستیک در مهاربندهای طبقه فوقانی به صورت موفق عمل نموده است.

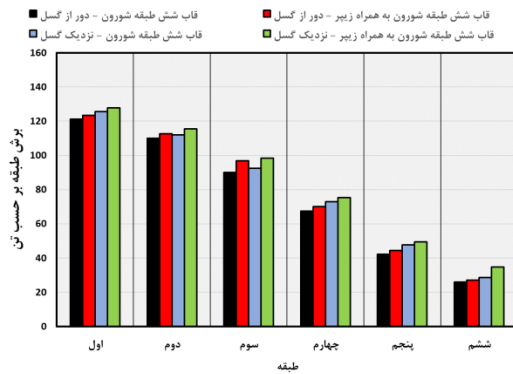
#### ۶- نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی قاب های نه طبقه

در این بخش، نتایج حاصل از میانگین گیری تغییر مکان کلی سازه نه طبقه تحت اثر زلزله های دور و نزدیک گسل در شکل (۱۷) ارائه شده است.



شکل (۱۳) میانگین تغییر مکان نسبی برای تمامی قاب های شش طبقه تحت اثر زلزله های دور و نزدیک گسل

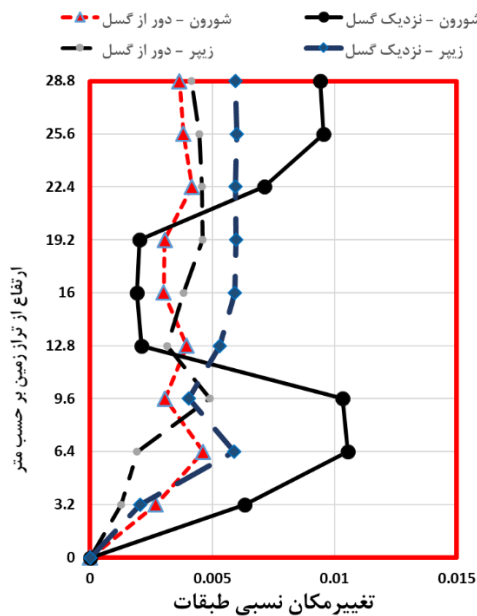
در خصوص برش طبقات در قاب های شش طبقه تحت اثر زلزله های دور و نزدیک گسل، میانگین کلی نتایج تمامی رکوردها برای تمامی قاب های شش طبقه در شکل (۱۴) مشاهده می گردد.



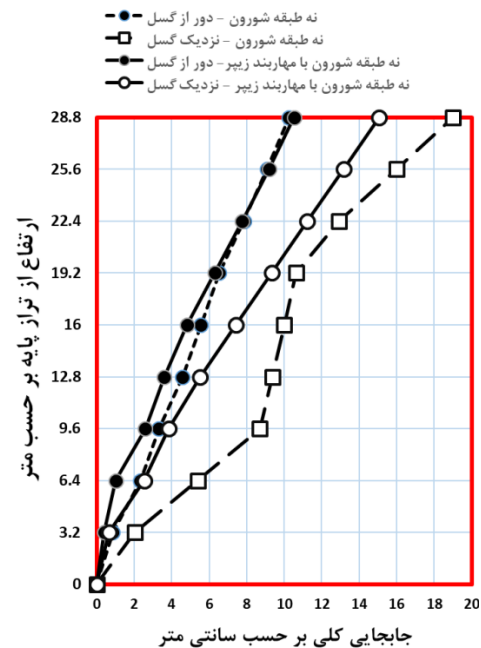
شکل (۱۴) میانگین نتایج برش طبقات برای تمامی قاب های شش طبقه تحت اثر زلزله های دور و نزدیک گسل

نتایج حاکی از اختلاف ناچیز برش پایه در میان قاب های شورون و قاب های مجهز به مهاربندهای زیبی شکل در زلزله های دور و نزدیک گسل می باشد، اما به ترتیب در زلزله های دور و نزدیک گسل نیروی برش طبقات در طبقات دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم در قاب های مجهز به مهاربند زیبی شکل ۳، ۸، ۴، ۵، ۳ و ۴ درصد افزایش را نشان داده است. این موضوع نشان دهنده عملکرد المان زیبی شکل در انتقال بارهای نامتقارن از مهاربندهای طبقه همکف به طبقات فوقانی می باشد.

در پایان این بخش به چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب های بتنی شش طبقه تحت تأثیر استفاده از المان های زیبی شکل پرداخته شده است. بدین منظور به عنوان نمونه یک زلزله تحت اثر نگاشت های



شکل (۱۸) میانگین تغییر مکان نسبی برای تمامی قاب‌های نه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل



شکل (۱۷) میانگین نتایج تغییر مکان کلی برای تمامی قاب‌های نه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل

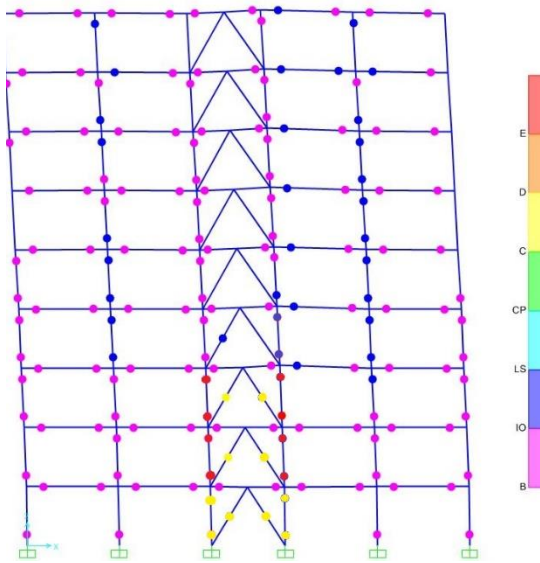
در ادامه نتایج حاصل از میانگین تغییر مکان نسبی طبقات در قاب نه طبقه حاصل از تمامی رکوردهای دور و نزدیک گسل در شکل (۱۸) قابل مشاهده است. باتوجه به شکل (۱۸)، تغییر مکان نسبی طبقات دوم، سوم، هشتم و نهم در قاب‌های نه طبقه بدون المان زبیدی شکل در زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یافته است. همچنین نتایج حاصل، نشان‌دهنده آن است که تغییر مکان نسبی طبقات در قاب‌های شورون بلندمرتبه، تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل دارای نوسان زیادی خواهد بود. این دو موضوع، توجه ویژه به رکوردهای نزدیک گسل را تأیید می‌نماید.

از طرفی با ملاحظه شکل (۱۸) نتیجه‌گیری می‌گردد که استفاده از المان زبیدی شکل در قاب‌های ۹ طبقه تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل، تا میزان زیادی تغییر مکان نسبی را در طبقات بحرانی کاهش داده است.

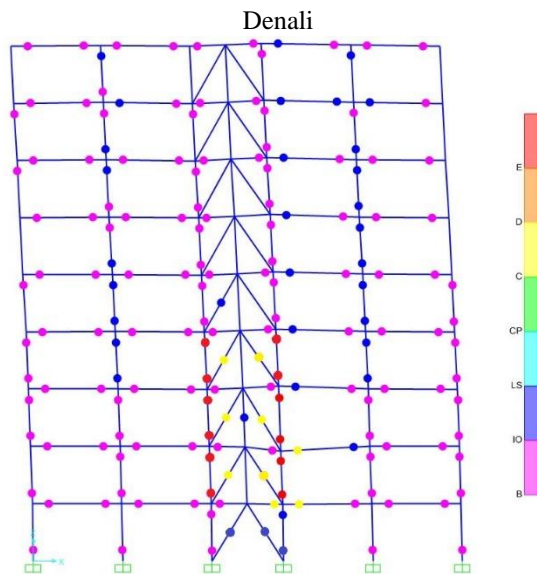
از سوی دیگر المان‌های زبیدی شکل، تقریباً میزان نوسان تغییر مکان نسبی را در این گونه از قاب‌ها از بین برده‌اند. در رابطه با زلزله‌های دور از گسل، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از المان زبیدی شکل، تأثیر چندانی در تغییر مکان نسبی طبقات قاب‌های نه طبقه ندارند.

در ادامه این بخش نتایج مربوط به برش طبقات در قاب‌های نه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل برای تمامی قاب‌های نه طبقه در شکل (۱۹) مشاهده می‌گردد. همان گونه که در شکل (۱۹-۴) نشان داده شده است، مقدار برش پایه قاب‌های نه طبقه تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در حدود ۵/۵ درصد از برش پایه همان قاب‌ها تحت اثر زلزله‌های دور از گسل بیشتر می‌باشد. همچنین همین افزایش در مقدار برش تمامی طبقات نیز دیده می‌شود. از طرفی افزودن المان‌های زبیدی شکل نیز در حدود ۲/۵ درصد برش پایه را افزایش

باتوجه به نتایج حاصل از میانگین‌گیری تغییر مکان کلی سازه‌های نه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل می‌توان دریافت که تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل جابه‌جایی کلی سازه به‌خصوص در طبقات میانی و فوقانی به شکل قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته است. همچنین استفاده از المان زبیدی شکل در مهاربند‌های شورون باعث کاهش تغییر مکان کلی تمامی قاب‌های نه طبقه به‌خصوص در طبقات بحرانی (میانی) نسبت به قاب مهاربندی شده با مهاربند شورون بدون استفاده از المان زبیدی شکل می‌شود. نتایج حکایت از آن دارد که در زمینه کاهش تغییر مکان کلی، استفاده از المان‌های زبیدی در زلزله‌های نزدیک گسل تأثیر بیشتری نسبت به زلزله‌های دور از گسل دارد. همچنین مقایسه نتایج تغییر مکان کلی طبقات قاب‌های نه طبقه شورون و زیر تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل حاکی از آن است که مهاربند زیر نوسان تغییر شکل کلی با افزایش ارتفاع را کاهش داده که این موضوع پس از مقایسه تغییر مکان‌های نسبی، شاخص‌های خرابی را تا حد زیادی کاهش خواهد داد.



شکل (۲۰) مفاصل پلاستیک در آخرین مرحله از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قاب نه طبقه شورون تحت اثر رکورد نزدیک گسل

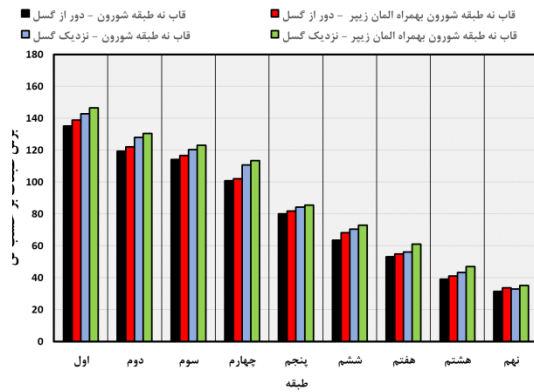


شکل (۲۱) مفاصل پلاستیک در آخرین مرحله از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قاب نه طبقه زبیر تحت اثر رکورد نزدیک گسل

Denali

شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان می‌دهند که المان زیبی شکل از تشکیل طبقه نرم در طبقه اول جلوگیری کرده و مکانیسم خرابی را به طبقات بالاتر منتقل نموده است. همچنین وجود المان‌های زیبی شکل باعث گردیده که روند تشکیل مفاصل پلاستیک در مهاربندها از طبقات اول و دوم سوم به طبقات دوم و سوم و چهارم انتقال یابد.

داده است. اما نکته حائز اهمیت افزایش بیشتر برش طبقات بالاتر در قاب‌های مجهز به المان‌های زیبی شکل نسبت به قاب‌های بدون المان زیبی شکل می‌باشد. این افزایش میزان برش تحت اثر زلزله‌های دور از گسل در طبقات دوم تا نهم به ترتیب برابر ۷، ۵، ۱۰، ۵، ۱۱، ۵، ۱۱ و ۴ درصد و تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل به ترتیب برابر ۷، ۵، ۱۱، ۴، ۷، ۱۱، ۱۵ و ۴ درصد می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان افزایش برش طبقه در طبقه آخر مقدار کمتری دارد که دلیل این موضوع را می‌توان با کاهش ظرفیت باربری المان‌های این طبقه در ارتباط دانست؛ بنابراین، این موضوع باید به صورت خاص در طراحی مدنظر قرار گیرد. به هر روی، المان‌های زیبی شکل، هم در زلزله‌های نزدیک گسل و هم در زلزله‌های دور از گسل، به صورت موفقیت آمیزی توان انتقال بارهای نامتقارن ناشی از مهاربندهای شورون را به طبقات فوقانی، از خود نشان داده‌اند.



شکل (۱۹) میانگین نتایج برش طبقات برای تمامی قاب‌های نه طبقه تحت اثر زلزله‌های دور و نزدیک گسل

در این بخش روند تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب‌های بتنی نه طبقه تحت تأثیر استفاده از المان‌های زیبی شکل بررسی شده است. بدین منظور به عنوان نمونه یک زلزله تحت اثر نگاشت‌های نزدیک گسل انتخاب و مفاصل پلاستیک در آخرین گام تحلیل به تصویر کشیده شده است (شکل (۲۰) و (۲۱)).

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق پس از انجام آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی و مقایسه نتایج قاب‌های بتنی شورون با و بدون استفاده از المان‌های زیپی شکل در مهاربندها، نتایج حاکی از آن است که به‌طور کلی استفاده از المان‌های زیپی شکل، هم در زلزله‌های دور از گسل و هم در زلزله‌های نزدیک گسل، باعث انتقال بارهای نامتقارن مهاربندها از طبقات پایین به طبقات بالاتر گردیده و از تشکیل مفاصل پلاستیک و ورود به سطح عملکرد خرابی در این طبقات جلوگیری نموده است. از سوی دیگر استفاده از المان زیپی شکل، به‌خصوص تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل، نوسان تغییر شکل‌های نسبی نامنظم در طبقات میانی سازه را به‌صورت محسوس کاهش داده است. در حالت کلی نیز می‌توان دریافت که زلزله‌های نزدیک گسل به‌خصوص در زمینه ایجاد تغییر شکل‌های فوقانی تأثیر بسزایی داشته است. علاوه بر نتیجه-گیری کلی مذکور جزئیات نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به موارد زیر تقسیم بندی نمود.

- زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل، باعث افزایش شدید تغییر مکان کلی تمامی طبقات در قاب‌های سه، شش و نه طبقه بتنی مجهز به مهاربندهای فولادی شورون، با و بدون المان‌های زیپی شکل، گردیده‌اند. البته قابل توجه است که وجود المان‌های زیپی شکل توانسته است به میزان محسوس این افزایش شدید را تعدیل نماید. به‌طور کلی المان‌های زیپی شکل میزان تغییر مکان کلی طبقات را در تمامی قاب‌ها و تحت اثر تمامی رکوردها کاسته‌اند.
- زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل، تغییر مکان نسبی طبقات بحرانی را در قاب‌های سه و شش طبقه بتنی مجهز به مهاربندهای فولادی شورون، با و بدون المان‌های زیپی شکل، همچنین در قاب‌های نه طبقه بتنی مجهز به مهاربندهای فولادی شورون بدون المان‌های زیپی شکل، حدود ۱۰۰ درصد افزایش داده‌اند. همچنین این متغیر در این قاب‌ها، به‌خصوص در قاب‌های نه طبقه، تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل دارای نوسان زیادی می‌گردد که احتمال خرابی را در سازه افزایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در قاب‌های نه طبقه بتنی مجهز به مهاربندهای فولادی شورون با المان‌های زیپی شکل، تغییر مکان نسبی طبقات تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل به‌خوبی مهار گردیده و حتی نوسان آن نیز کنترل شده است. همچنین ذکر این نکته ضروری است که وجود سیستم مهاربندی در قاب‌های بتنی به‌خوبی می‌تواند نیاز سازه در خصوص کنترل تغییر مکان نسبی طبقات را پاسخگو باشد.
- زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل، مقدار برش پایه را در قاب‌های سه، شش و نه طبقه بتنی مجهز به مهاربندهای فولادی شورون، با و بدون المان‌های زیپی شکل، بین ۵ تا ۱۰ درصد افزایش داده‌اند.

- وجود المان‌های زیپی شکل در قاب‌های سه، شش و نه طبقه بتنی مجهز به مهاربندهای فولادی شورون، هم در زلزله‌های نزدیک گسل و هم در زلزله‌های دور از گسل، باعث افزایش برش طبقات در طبقات بالاتر از طبقه اول می‌شود.
- افزودن المان‌های زیپی شکل به سیستم مهاربندی شورون در قاب‌های بتنی سه، شش و نه طبقه، هم در زلزله‌های نزدیک گسل و هم در زلزله‌های دور از گسل، از تشکیل مفاصل پلاستیک و ورود به سطح عملکرد آستانه فروریزش در طبقه اول جلوگیری کرده است. نتایج آنالیزها نشان می‌دهد که المان زیپی شکل کاملاً در روند تشکیل مفاصل پلاستیک اثرگذار بوده و باعث گردیده که این مفاصل در المان‌های طبقات فوقانی (به‌خصوص در مهاربندها) نیز تشکیل گردد و از شکل‌گیری طبقه نرم و ایجاد مکانیسم خرابی در طبقات پایین (به‌خصوص طبقه اول) جلوگیری شود.

## مراجع

- [1] Yang C-S, Leon RT, DesRoches R. Design and behavior of zipper-braced frames. *Engineering Structures*. 2008;30:1092-100.
- [2] Razavi M, Sheidaii M. Seismic performance of cable zipper-braced frames. *Journal of constructional steel research*. 2012;74:49-57.
- [3] Khatib IF, Mahin SA, Pister KS. Seismic behavior of concentrically braced steel frames: *Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley*; 1988.
- [4] Niknam A, Sharfaei A. Comparison between Seismic Behavior of Suspended Zipper Braced Frames and Various EBF Systems. Iran: Semnan University. 2011.
- [5] Esfandiari J, Khezeli Y. Seismic behavior evaluation of zipper braced steel frames based on push-over and incremental dynamic analyses. *World Journal of Engineering*. 2019.
- [6] Nezamisavjbolaghi K. Using concentric and zipper steel braces by comparison of effect on improved seismic performance level of concrete moment frame structures with moderate ductility. *SN Applied Sciences*. 2020;2:1-7.
- [7] Ghojarah A. Response of structures to near-fault ground motion. 13th World Conference on Earthquake Engineering 2004.
- [8] Gicev V, Trifunac M. Energy and power of nonlinear waves in a seven story reinforced concrete building. *Journal of Indian Society of Earthquake Technology*. 2007;44:305-23.

- [9] Amiri JV, Pahlavan H, Rahati S. The effect of near-fault earthquake on seismic behavior of concrete buildings. *European Online Journal of Natural and Social Sciences: Proceedings*. 2016;4:pp. 772-8.
- [10] Geng F, Ding Y, Wu H, Yang K. Seismic Risk Assessment of a Novel Self-Centering Precast Concrete Frame under Near-Fault Ground Motions. *Applied Sciences*. 2020;10:6510.
- [11] Construction AIoS. Code of standard practice for steel buildings and bridges: American Institute of Steel Construction; 2000.
- [12] Giannopoulos P. Seismic Assessment of RC Building according to FEMA 356 and Eurocode 8. 16th Conference on Concrete, TEE, ETEK2009. p. 21-3.

# Seismic Performance of RC Frames Equipped with Zipper Braces Subjected to the Near-field and Far-field Earthquakes

Sayed Ramin Abttahi

Department of civil engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University,  
Najafabad, Iran

Babak Behforouz\*

Department of civil engineering, Dehaghan Branch, Islamic Azad University,  
Dehaghan, Iran

[babakbehforouz@gmail.com](mailto:babakbehforouz@gmail.com)

## Abstract

In recent years, near-fault earthquakes have received more attention due to their variable frequency nature, pulsing motion, and causing incremental damage. On the other hand, due to the abundance of concrete structures in Iran, more than any other structures, they are at risk of damages caused by near-fault earthquakes. This issue clearly indicates the necessity of using new lateral bracing systems in RC structures. One of the lateral bracing systems is the combination of Chevron braces with zipper elements. Owing to this issue, the main purpose of this study is to investigate the seismic performance of RC frames equipped with zipper braced elements under near-fault earthquakes. Therefore, seven far-fault and seven near-fault earthquake records and three RC frames of 3, 6, and 9 floors with and without considering zipper elements were selected. Then, RC frames were designed using linear static analysis, after which all frames were analyzed by dynamic nonlinear time history analysis. After performing the analysis, the results such as total displacement, relative displacement, story shear, and plastic hinge formation were compared. The results of this study present that the zip-shaped elements have significantly succeeded in transferring asymmetric loads of the lower story braces to the upper stories and have prevented the creation of a soft story in the first height level of the structure. Finally, the comparison of the results exhibits the significant effect of the distance from the fault on the overall and relative deformations of the structures with increasing the height of the stories

**Keywords:** Near-fault earthquake, Chevron brace, Zipper element, Time history analysis, Soft story