

بررسی عملکردی استفاده از میراگرهای فلزی جاری شونده U-شکل در ساختمان‌های بتنی نامنظم در ارتفاع

طاها بخشپوری*^۱، مونا معصوم نژاد^۲

۱. استادیار دانشکده فنی مهندسی شرق گیلان، گروه عمران، دانشگاه گیلان، رودسر، گیلان، ایران.
۲. کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رامسر.

*tbakhshpoori@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۳

چکیده

این مقاله به بررسی تاثیر میراگرهای فلزی جاری شونده U-شکل در مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتنی متداول خمشی متوسط نامنظم در ارتفاع می‌پردازد. پس از طراحی قاب‌های ضعیف در نرم‌افزار SAP2000 کاهش نیاز لرزه‌ای سازه‌های مقاوم سازی شده مطابق با ضوابط تحلیل غیرخطی سازه‌های بتنی با مدلسازی در نرم‌افزار PERFORM-3D بررسی شده است. با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی دو بعدی، تحت رکوردهای دور از گسل، تغییر مکان طبقه آخر، جابه‌جایی نسبی طبقات، برش پایه، و سطح عملکرد قاب‌ها، ارزیابی شد. مطابق نتایج بدست آمده، مقدار جابه‌جایی نسبی و تغییر مکان طبقات در قاب مقاوم سازی شده با میراگر تا حدود ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین سطح عملکرد نیز با استفاده از میراگر به شکل چشمگیری بهبود می‌یابد. کاربرد میراگر تاثیر چندانی بر کاهش مقدار برش پایه نداشته و در برخی موارد تا حدود ۵ درصد، برش پایه در قاب مقاوم سازی شده با میراگر در مقایسه با قاب بدون میراگر افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: ساختمان بتنی، نامنظمی در ارتفاع، میراگر فلزی جاری شونده، تحلیل غیرخطی، تحلیل تاریخچه زمانی.

۱- مقدمه

اجرای صحیح، عدم نگهداری و ترمیم، یا آسیب دیدگی بر اساس سوانح گذشته از لحاظ سازه‌ای مطابق با آیین‌نامه‌های روز دنیا نبوده و برای ایمن‌سازی این قبیل سازه‌ها نیاز به مقاوم‌سازی آنها است. در طول چند دهه گذشته، با پیشرفت علم مواد و تولید مصالح پیشرفته (مانند مواد کامپوزیت، بتن مسلح با الیاف، فولاد با مقاومت بالا، بتن با مقاومت بالا و ...)

ساختمان‌های بتن‌آرمه بیشترین سهم ساخت و ساز در کشور را شامل می‌شوند. از طرفی ساختمان‌های بتن آرمه بسیاری در سالیان گذشته در کشور ساخته شده‌اند که به دلایل مختلفی از جمله طراحی بر اساس آیین‌نامه‌های گذشته با ضعف فنی، عدم

پیشرفت علوم محاسباتی و روش‌های تحلیلی دقیق، ارتقاء دانش مهندسی در جامعه، تأثیر فرهنگی و اقتصادی، و رشد و تکامل مقررات طراحی لرزه‌ای، ضرورت و نیاز مبرم به انواع تکنیک‌های مقاوم سازی یا بهسازی لرزه‌ای روز افزون بوده و به موازات این عوامل رشد و توسعه پیدا کرده است. این تکنیک‌ها را می‌توان به صورت کلی به سه نوع تقسیم کرد: روش‌های مبتنی بر ترمیم یا تقویت المان‌های سازه‌ای موجود (با هدف افزایش ظرفیت شکل‌پذیری اعضا به صورت محلی، مانند تزریق اپوکسی، ژاکت فلزی و بتنی، لایه‌ها یا میلگردهای FRP و ...)، روش‌های مبتنی بر اضافه نمودن المان‌های سازه‌ای جدید (با هدف افزایش توامان سختی و مقاومت کلی سازه، مانند استفاده از بادبندهای ضربدری و دیوار)، و روش‌های مبتنی بر اساس کنترل سازه‌ای (با هدف کاهش نیاز لرزه‌ای و افزایش توامان شکل‌پذیری، سختی و مقاومت سازه‌ای، مانند انواع میراگرها و جداسازهای لرزه‌ای). هر کدام از انواع این تکنیک‌ها دارای مزایا و معایبی هستند که از پرداختن به آنها خودداری می‌شود. اما می‌توان گفت سیستم‌های کنترل غیرفعال مستهلک‌کننده انرژی در بین انواع این تکنیک‌ها با اقبال قابل توجهی از سوی پژوهشگران و دست‌اندرکاران امر برخوردار بوده است.

روش‌های کنترل غیرفعال با کاهش نیاز لرزه‌ای و افزایش شکل‌پذیری، میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها را در برابر زلزله کاهش می‌دهند. یکی از موثرترین و در عین حال ساده‌ترین روش‌های کنترل غیرفعال، استفاده از میراگرهای فلزی است که به عنوان یک عضو فرعی و فیوز شکل‌پذیر در سازه عمل می‌نمایند. میراگر در دهانه‌های مشخصی از قاب‌های سازه نصب شده و موجب استهلاک انرژی زلزله شده و سایر عناصر سازه الاستیک باقی می‌مانند. از زمان پیدایش ایده استفاده از میراگرهای فلزی در بهبود پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، پژوهشگران مختلفی روی روش‌ها و انواع متفاوتی از میراگرها به مقاله و مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی پرداخته‌اند. میراگرهای فلزی جاری‌شونده U-شکل، یکی از انواع میراگرهایی هستند که

مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در یک میراگر فلزی جاری‌شونده با انجام بارگذاری در صفحات میراگر تنش ایجاد می‌شود. در ابتدا که صفحات میراگر در حالت الاستیک قرار دارند مانند بادبند عمل کرده و سختی سازه را افزایش می‌دهند. با افزایش تنش، صفحات فولادی به حد تسلیم رسیده و وارد مرحله جاری شدن می‌شوند. در این حالت با استهلاک انرژی، صفحات فولادی مانند میراگر رفتار کرده و میرایی سازه را افزایش می‌دهند. با انجام بارگذاری متناوب این رفتار به صورت یک چرخه هیستریزس پایدار موجب استهلاک انرژی وارده به سازه می‌شود [1]. هدف از این مطالعه بررسی عملکردی میراگرهای فلزی جاری‌شونده U-شکل به همراه بادبندهای هشتی بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن آرمه نامنظم در ارتفاع است.

ایده استفاده از مستهلک‌کننده‌های فلزی انرژی در سازه‌ها برای جذب انرژی زلزله، نخستین بار توسط آزمایش‌های انجام گرفته توسط کلی و همکاران [2] در سال ۱۹۷۲ مطرح شد. ایشان ابزارهای فلزی ساده‌ای را به عنوان ابزار مستهلک‌کننده انرژی مورد آزمایش قرار دادند که میراگرهای فلزی U-شکل یکی از این ابزارها بود. در ادامه اسکینر و همکاران [3] یک نمونه میراگر فلزی U-شکل را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش نموده و پیشنهاد دادند که برای محدود نمودن پیچش در این میراگرها، سطوح کرنش به $0/05$ تا $0/1$ محدود شد. آگوئیر و سانچز [4] نیز خواص مربوط به اتلاف انرژی میراگرهای U-شکل را مورد مطالعه قرار داده و از طریق انجام آزمایش‌های رفت و برگشتی خواص ویسکوز و عمر خستگی این میراگرها را بررسی نمودند. تاگاوا و گائوه [5] با استفاده از میراگرهای U-شکل در انتهای مهاربندهای فولادی ضربدری، سازوکاری را پیشنهاد دادند که ضمن اینکه باعث شد تا عضوهای مهاربندی فقط در کشش کار کنند، از طریق خمش پلاستیک در ورق‌های U-شکل در اثر حرکت جانبی قاب، استهلاک انرژی صورت می‌گرفت.

4 Auirre & Sanchez

5 Tagawa & Gao.

1 Fiber Reinforced Polymer

2 Kelly et al.

3 Skinner et al.

با بررسی تاریخچه پژوهشی این موضوع به صورت کلی می‌توان مطالعات در دسترس را به انواع زیر تقسیم بندی نمود:

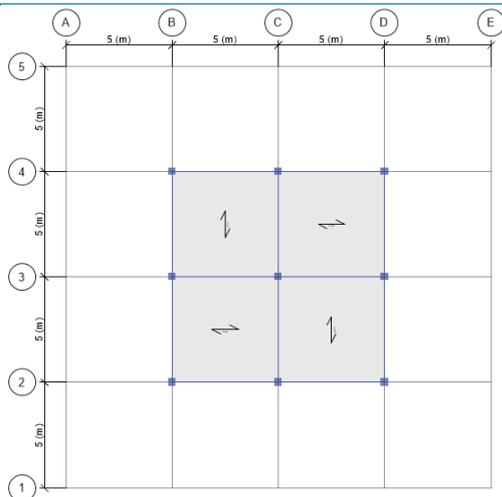
(۱) مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی، و شبیه سازی المان محدود، (۲) مطالعات روی خود میراگر، میراگر به همراه اعضای سازه‌ای، و میراگر در سیستم سازه‌ای، (۳) مطالعات مقایسه‌ای با سایر سیستم‌های غیر فعال، و (۴) مطالعات شناختی روی چگونگی عملیاتی کردن این نوع میراگر از جنبه‌های اقتصادی و عملکردی. همان‌گونه که مشخص است یک تاریخچه پژوهشی غنی و جامع و در حال رشد در این زمینه در دسترس است. پرداختن به تمامی این موارد به صورت جزئی خارج از چهارچوب اهدافی در نظر گرفته شده برای این مطالعه خواهد بود. از اینرو با محوریت قرار دادن سازه‌های بتن آرمه در ادامه به مرور بر تاریخچه پژوهشی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی المان محدود این نوع میراگر در قالب این سیستم سازه‌ای می‌پردازیم.

اثر بخشی میراگرهای فلزی با سازوکار تسلیم خمشی [6]، سازوکار تسلیم برشی [7-10] و همچنین تسلیم ترکیبی [11] در بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های ضعیف بتن آرمه مورد توجه پژوهشگران متعددی با بررسی‌های آزمایشی کوچک مقیاس و مطالعات عددی بوده است. از مطالعات آزمایشگاهی بزرگ مقیاس که کاربرد و عملکرد میراگرهای فلزی را در قاب‌های بتن آرمه مسلح تحت بارگذاری‌های دینامیکی بررسی کرده است می‌توان به مطالعه [12] اشاره کرد. مطالعات آزمایشگاهی و عددی تقویت قاب‌های بتن آرمه کم ارتفاع با اتصالات ضعیف تیر به ستون توسط ماهیچه‌های فولادی حاکی از جلوگیری از تسلیم برشی اتصال، تامین شکل‌پذیری غیر خطی برای تیرها و ستون‌ها، و استهلاک انرژی قابل توجه است [13]. یک روش جامع طراحی مبتنی بر عملکرد ساختمان‌های بتن آرمه با میراگرهای فلزی و اصطکاکی در مطالعه [14] ارائه شده است. همچنین به تازگی مطالعات آزمایشگاهی و عددی روی سیستم‌های ترکیبی صورت گرفته است که حاکی از اهمیت موضوع دارد [15, 16]. با بررسی ادبیات موجود در راستای این موضوع می‌توان به این نتیجه رسید که برخلاف سازه‌های فولادی عدم مطالعات آزمایشگاهی و عددی بزرگ

مقیاس در حد سیستم سازه‌ای برای سازه‌های بتن آرمه حاکی از این است که پیش‌بینی دقیق پاسخ لرزه‌ای قاب‌های بتن آرمه تقویت شده یا این نوع میراگر به طور فزاینده‌ای دشوار است. از اینرو بیشتر مطالعات در سطح اجزای سازه‌ای بوده‌اند. اگرچه آزمایش‌های و مدل‌سازی‌های عددی در سطح اجزای سازه‌ای می‌تواند برای طراحی و تجزیه و تحلیل سازه مفید باشد، اما بررسی عملکردی در مقیاس کامل سازه‌ای می‌تواند مرجع مناسبی باشد و اطمینان را افزایش دهد. از اینرو در راستای چگونگی عملکرد این نوع میراگرها در سازه‌های بتنی، این مقاله به بحث و بررسی تاثیر استفاده از میراگرهای فلزی جاری‌شونده U-شکل در مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتنی متداول نامنظم در ارتفاع می‌پردازد.

برای رسیدن به این هدف سه سازه بتن آرمه با نامنظمی در ارتفاع به تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ با سیستم قاب خمشی متوسط در نظر گرفته شدند، که به ترتیب بیانگر سازه‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه می‌باشند. با طراحی قاب‌های بتنی ضعیف در نرم افزار SAP2000 و استفاده از میراگرهای U-شکل جهت مقاوم‌سازی آن‌ها و مدل‌سازی توسط نرم‌افزار PERFORM-3D، مطابق ضوابط موجود برای تحلیل غیرخطی سازه‌های بتنی، تاثیر این میراگرها در کاهش نیاز لرزه‌ای سازه‌های بتنی بررسی شده است. با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی دو بعدی، تحت رکوردهای دور از گسل، مقدار جابه‌جایی نسبی و تغییر مکان طبقات، برش پایه و سطح عملکرد قاب‌ها، ارزیابی شد. مطابق نتایج بدست آمده، مقدار جابه‌جایی نسبی و تغییر مکان طبقات در قاب مقاوم‌سازی شده با میراگر تا حدود ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین سطح عملکرد قاب‌های بتنی نیز با استفاده از میراگر به شکل چشمگیری بهبود می‌یابد. کاربرد میراگر تاثیر چندانی بر کاهش مقدار برش پایه نداشته و در برخی موارد تا حدود ۵ درصد، برش پایه در قاب مقاوم‌سازی شده با میراگر در مقایسه با قاب بدون میراگر افزایش می‌یابد.

در ادامه ابتدا در بخش دوم به طراحی مدل‌های سازه‌ای ضعیف می‌پردازیم. سپس در بخش سوم سازه‌های طراحی شده با بکار بردن میراگرهای مدنظر این مطالعه مقاوم سازی



b. The upper half of the floors
Fig. 1. Plan of 5, 10 and 15 story RC frames

خاک محل احداث سازه‌ها از نوع III و منطقه با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد، مطابق دسته‌بندی ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران و سیستم باربر جانبی در هر دو جهت قاب خمشی بتنی متوسط در نظر گرفته شده است. همچنین سقف طبقات از نوع تیرچه بلوک با بار مرده ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار معادل پارتیشن‌بندی ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع است. مدل سه‌بعدی سازه ۵ طبقه به عنوان نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است.

شکل ۲. مدل سه بعدی ساختمان‌های بتنی در نظر گرفته شده.

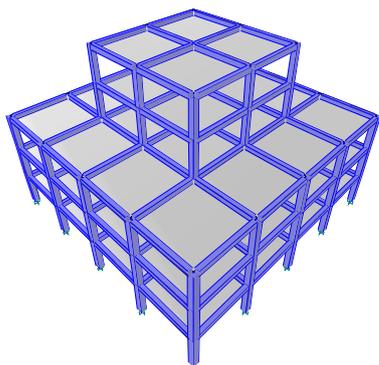


Fig. 2. Three-dimensional model of considered concrete buildings.

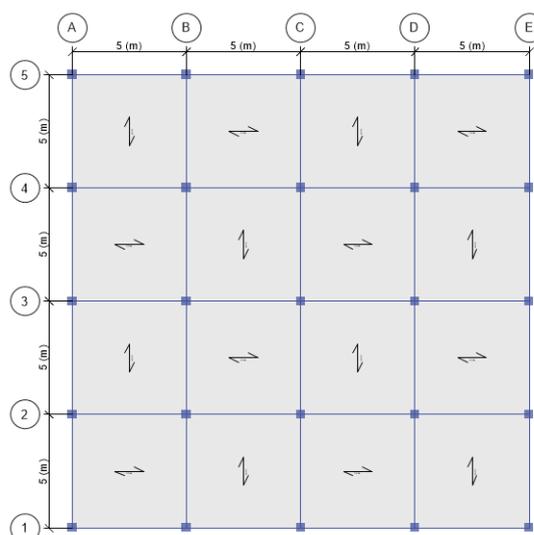
طراحی سازه‌ها مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران انجام شد. از آنجایی که هدف این مقاله استفاده از میراگرهای فلزی در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی است، طراحی به گونه‌ای انجام شده است که ساختمان‌ها دارای سازه‌ای ضعیف بوده و

می‌شوند. بخش چهارم به ارائه نتایج بدست آمده برای سازه‌های اصلی و سازه‌های تقویت شده و بحث و تفسیر نتایج می‌پردازد. در انتها جمع‌بندی کلی نتایج بدست آمده ارائه شده است.

۲- طراحی مدل‌های سازه‌ای

در ابتدا سه تیپ ساختمان بتنی با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ به عنوان ساختمان‌های بتنی متداول با پلان‌های مشابه در نظر گرفته شده و در نرم‌افزار SAP2000 با استفاده از تحلیل دینامیکی طیفی طراحی شدند. دو پلان نشان داده شده در شکل (۱) برای طراحی هر کدام از ساختمان‌ها استفاده شده است. سازه‌ها می‌توانند به دلیل نگرش‌های معماری یا کاربری که دارند، دارای نامنظمی باشند. نامنظمی‌ها دارای انواع مختلفی هستند که در این مقاله نامنظمی هندسی در ارتفاع (یا Setback) به دلیل رایج بودن آن در نظر گرفته شده است. از آنجایی که لازم بود تا سازه‌ها در ارتفاع دارای نامنظمی باشند، پس در هر ساختمان نصف طبقات از نوع پلان بزرگتر (۴ دهانه ۵ متری) و نصف دیگر طبقات از نوع پلان کوچکتر (۲ دهانه ۵ متری) فرض شد. فاصله دهانه‌ها برابر با ۵ متر و ارتفاع طبقات برابر با ۳ متر است.

شکل ۱. پلان ساختمان‌های بتنی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه



a. The lower half of the floors

شکل ۵. مشخصات هندسی و مقاطع قاب پانزده طبقه مورد بررسی

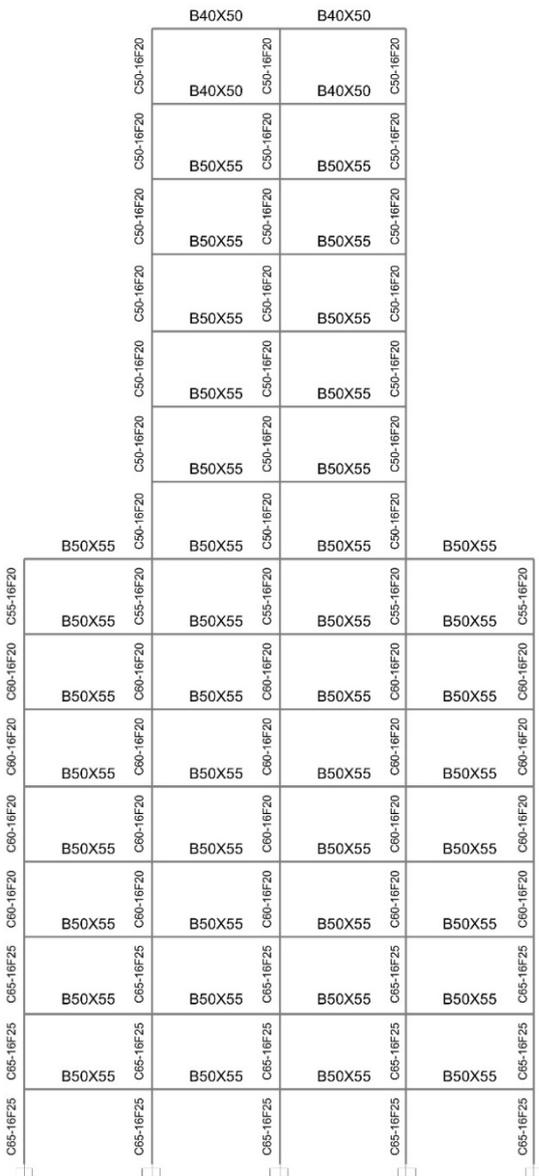


Fig. 5. Geometric specifications and designed sections for the fifteen-story frame.

تمامی مقاطع تیرها و ستون‌ها به ترتیب صورت مستطیلی و مربعی در نظر گرفته شده‌اند به گونه‌ای که به عنوان مثال B 50×55 و C-50/16F20 در شکل (۵) به ترتیب معرف تیر مستطیلی به عرض ۵۰ و ارتفاع ۵۵ سانتی متر و ستون مربعی با ابعاد ۵۰ سانتی متر و ۱۶ عدد میلگرد شماره ۲۰ هستند. دوره تناوب قاب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر ۰/۳، ۰/۸۸ و ۱/۴۸ ثانیه است.

معیارهای لرزه‌ای آیین‌نامه‌های طراحی را برآورده نساژند. از این‌رو سازه‌ها بر اساس ویرایش اول استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده‌اند. ضریب زلزله بدست آمده پایین‌تر از ضریب زلزله مربوطه در ویرایش حال حاضر است که معیارهای جابه‌جایی نسبی و نسبت DCR مقاطع برآورده نشدند. قاب‌های انتخاب شده از هر سازه و نتایج طراحی سازه‌ها به ترتیب در شکل (۳) تا (۵) نشان داده شده‌اند.

شکل ۳. مشخصات هندسی و مقاطع قاب پنج طبقه مورد بررسی



Fig. 3. Geometric specifications and designed sections for the five-story frame.

شکل ۴. مشخصات هندسی و مقاطع قاب ده طبقه مورد بررسی

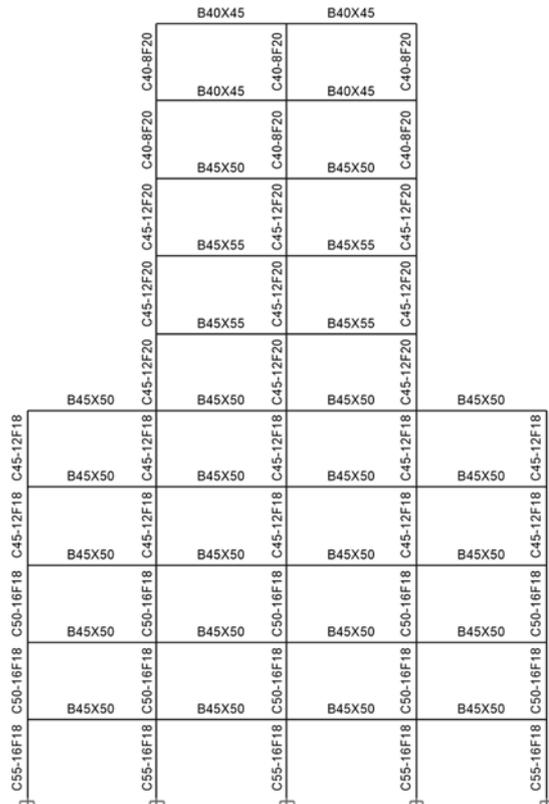


Fig. 4. Geometric specifications and designed sections for the ten-story frame.

۳- مدلسازی و روش تحقیق

پس از مشخص شدن مقاطع اعضای سازه‌ای در مدل‌های مورد بررسی، با انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی به ارزیابی و مقایسه رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتنی بدون میراگر و دارای میراگر پرداخته شد. با توجه به اینکه نرم‌افزار PERFORM-3D قابلیت مدلسازی رفتار غیرخطی سازه‌های بتنی و بررسی سطح عملکردی آن‌ها مطابق آیین‌نامه‌های مقاوم‌سازی را دارد، از این نرم‌افزار برای انجام تحلیل‌های دو بعدی تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است.

۳-۱- کاربرد میراگر جاری شونده U-شکل در سازه

در این مقاله از یک جفت ورق فلزی U-شکل که مطابق آرایش نشان داده شده در شکل (۶) در مقابل هم نصب شده‌اند، به عنوان میراگر جاری شونده فلزی، برای مقاوم‌سازی قاب‌های بتنی استفاده شد. مشابه مطالعات انجام شده توسط دالک و همکاران [17]، هر قطعه U-شکل دارای پهنای ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر بوده و شعاع انحنای آن ۵۰ میلی‌متر است. چگونگی جایگذاری میراگر در قاب‌های دارای میراگر U-شکل مطابق روش پیشنهادی توسط باقری و همکاران [18] فرض شده است. در این روش از مهاربند فولادی شورون در دهانه‌های قاب برای نصب میراگر استفاده می‌شود. بخش پایینی میراگر به بالای آرایش مهاربند جناقی (شورون) متصل شده و بخش بالای میراگر به تراز سقف بالاتر از مهاربند متصل می‌شود (شکل ۷). مهاربندهای شورون با استفاده از مقاطع باکس در نرم‌افزار Sap2000 طراحی شدند و در نرم‌افزار پرفورم از المان Steel Bar استفاده شده است، که در آن مصالح فولاد مربوطه با مدل رفتار مهاربند فولادی مطابق ضوابط نشریه ۳۶۰ [19] تعریف شد.

رفتار نیرو- تغییرمکان میراگر به صورت منحنی دو خطی در نظر گرفته شده است. سختی اولیه میراگر برابر با ۲۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر و سختی ثانویه آن ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر بوده و دارای مقاومت تسلیم ۹۲۴۷ کیلوگرم و تغییرشکل تسلیم ۰/۴۶ سانتی‌متر است [17]. تغییرشکل نهایی

میراگر نیز ده برابر تغییرشکل تسلیم آن و برابر با ۴/۶ سانتی‌متر فرض شده است. در شکل (۸) مدل قاب ۵ طبقه و مکان جایگذاری میراگر در سازه نشان داده شده است. برای قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه نیز همین آرایش استفاده شد.

در میراگرهای بکار رفته در قاب‌ها که ضریبی از این میراگر اولیه تعریف شده هستند، عرض میراگر به اندازه‌ی ضریب مربوطه تغییر کرده و سایر ابعاد ثابت باقی می‌ماند. در نتیجه کلیه مشخصات میراگر ثابت بوده و تنها سختی و نیروی تسلیم به صورت خطی با عرض قطعه تغییر می‌یابد. به عنوان نمونه این مقادیر برای میراگر ۲U دو برابر مقادیر مربوط به میراگر ۱U است. برای تعیین اینکه چه ضریبی از میراگر مبنا برای هر یک از طبقات مناسب است سه پارامتر مستقل، جابه‌جایی تسلیم میراگر، نسبت سختی میراگر، طبقه و مهاربند باید تعیین شود. در این مقاله مانند مطالعه باقری و همکاران [18] با فرآیند آزمون و خطا شامل بررسی واحدهای مختلف دستگاه میراگر در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تا رسیدن به رفتار مناسب انجام شد.

شکل ۶. میراگر فلزی جاری شونده U-شکل [17].

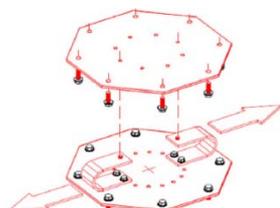


Fig. 6. U-shaped metallic-yielding damper [17].

شکل ۷. جزئیات اتصال میراگر U-شکل به سازه.

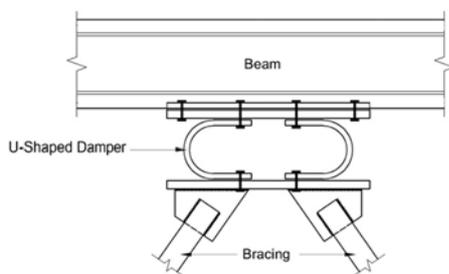


Fig. 7. Connection details of the U-shaped metallic-yielding damper to the structure.

زمانی و از تکنیک حل پیشامد به پیشامد (event-to-event) برای همگرایی استفاده می‌کند.

در شکل (۹) رابطه کلی بار-تغییر شکل رسم شده است. این رابطه از نقطه A (عضو فاقد بارگذاری) تا یک نقطه تسلیم موثر در B، خطی است و بین نقاط B و C سختی کاهش یافته‌ای به صورت خطی وجود دارد، که با یک کاهش ناگهانی در مقاومت در برابر بار جانبی از نقطه C به نقطه D می‌رسد و تا نقطه E ثابت می‌ماند. سرانجام در این نقطه مقاومت به صفر کاهش می‌یابد.

شکل ۹. رابطه بار-تغییر شکل کلی (تعمیم یافته) برای اعضا و اجزای بتنی

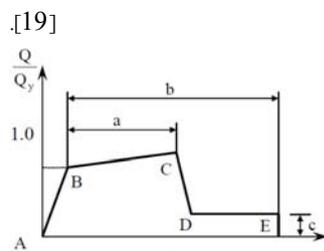


Fig. 9. General load-deformation relationship for concrete members [19].

مطابق نشریه ۳۶۰ (دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود) [19]، برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی می‌توان از رابطه کلی بار-تغییر شکل ارائه شده در این شکل استفاده نمود. متغیرهای مورد نیاز برای مدلسازی رفتار غیرخطی اجزاء سازه شامل a ، b و c هستند که برای هر جزء از سازه این متغیرها محاسبه شده و در مدلسازی رفتار غیرخطی اعضا استفاده شده‌اند. همچنین حدود عملکرد سازه شامل حد قابلیت استفاده بی‌وقفه، حد ایمنی جانی و حد فروریزش برای تمامی اجزاء سازه تعریف شده است.

از آنجایی که در نرم‌افزار PERFORM 3D المان میراگر جاری‌شونده وجود ندارد، برای مدلسازی رفتار غیرخطی این میراگر از المان Seismic Isolator, Rubber Type استفاده شده است. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، رفتار این المان مشابه رفتار دوخطی در نظر گرفته شده برای میراگر U- شکل است و با تعریف رفتار برشی متناظر با سختی، مقاومت و تغییر شکل میراگر، می‌توان رفتار آن را

شکل ۸. مکان جایگذاری میراگر در قاب ۵ طبقه.

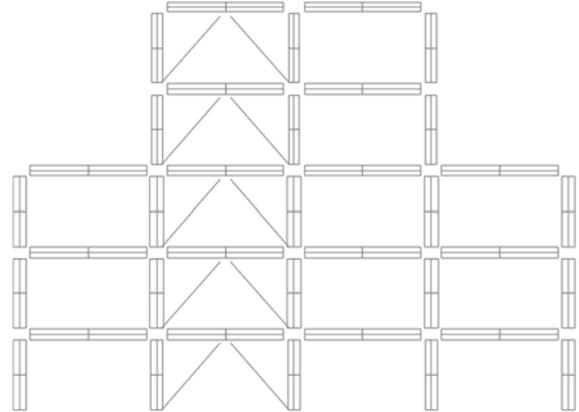


Fig. 8. Layout of the U-shaped metallic-yielding damper in the five-story frame.

۲-۳- رفتار غیر خطی اجزای سازه

رفتار اجزاء سازه با توجه به نوع تلاش داخلی آنها و منحنی نیرو-تغییر شکل حاصل به صورت کنترل شونده توسط تغییر شکل و یا کنترل شونده توسط نیرو است. چنانچه در هنگام اعمال نیرو به عضو در حین تحمل و ورود به مرحله غیرخطی از خود تغییر شکل نشان دهد و با اندازه‌گیری این تغییر شکل بتوان میزان خرابی یا مرحله آن را تخمین زد، این عضو از اعضای کنترل شونده توسط تغییر شکل در سازوکار خرابی مورد نظر است (مانند خرابی یک تیر تحت اثر خمش). چنانچه سازوکار خرابی یک عضو تحت اثر یک نیروی خاص غیر قابل اندازه‌گیری به لحاظ تغییر شکل باشد و خرابی بدون اعلام و نمایان شدن تغییر شکل خاصی صورت پذیرد، از آنجا که کنترل تغییر مکان امکان‌پذیر نیست، پس باید نیروی عضو را با نیروی خرابی و انهدام مقطع اندازه‌گیری کرد، که به این عضوها در سازوکار خرابی مورد نظر کنترل شونده توسط نیرو می‌گویند. به عنوان نمونه در ساختمان‌های با قاب‌های مهاربندی شده، نیروی محوری در مهاربند قطری، از نوع کنترل شونده توسط تغییر شکل هستند و برش موجود در ستون‌ها، از نوع تلاش کنترل شونده توسط نیرو است. برای تعریف مقاطع غیرخطی تیر و ستون از المان‌های FEMA Beams و FEMA Columns استفاده شده است. نرم‌افزار PERFORM-3D از روش انتگرال گام به گام زمانی با استفاده از روش میانگین شتاب ثابت برای تحلیل تاریخیچه

شکل ۱۲. طیف شتاب شتابنگاشت‌های استفاده شده.

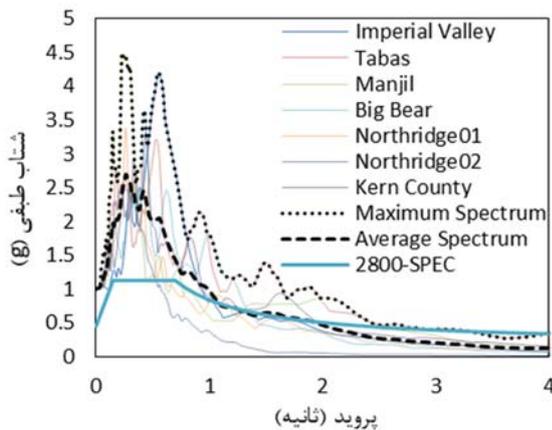


Fig. 12. Seismic acceleration spectrum of records.

۴-۳- درستی آزمایشی با پژوهش آزمایشگاهی

برای کنترل درستی مدل سازی، قاب مطرح شده در پژوهشهای انجام شده توسط Tsai در سال ۱۹۹۳ [22] مورد استفاده قرار گرفت و توسط نرم‌افزار PERFORM-3D مدل‌سازی شد. سپس شتاب‌نگاشت‌های تسترو ۱۹۴۰ به گونه‌ای که بیشینه مقدار شتاب آن به 50 Cm/sec^2 مقیاس شده باشد به سازه اعمال شد. جابه‌جایی قاب ۲ طبقه مجهز به میراگر و سازه فاقد میراگر مدل سازی شده در نرم‌افزار در شکل (۱۳) با نتایج بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی برای مقایسه ارائه شده است که حاکی از درستی و دقت مورد قبول مدلسازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار مورد استفاده است.

شکل ۱۳. جابه‌جایی قاب مجهز به میراگر و بدون میراگر تحت اثر زلزله تسترو. الف) مدل پرفورم، ب) مدل Tsai [22]

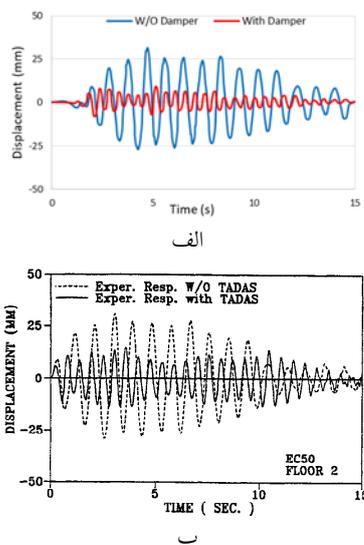


Fig. 13. W/o and With Dapmer frame Displacement under EL Centro earthquake, a) Perform-3D model, b) Tsai model [22].

شبه‌سازی نمود. بر مبنای مشخصات مکانیکی ذکر شده برای میراگر منحنی رفتاری آن مطابق شکل (۱۱) است.

شکل ۱۰. مدل رفتاری المان Seismic Isolator

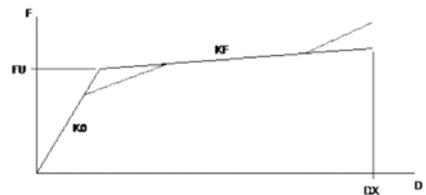


Fig. 10. Behavior model of the seismic isolator element [20].

شکل ۱۱. منحنی رفتاری میراگر جاری شونده U-شکل.

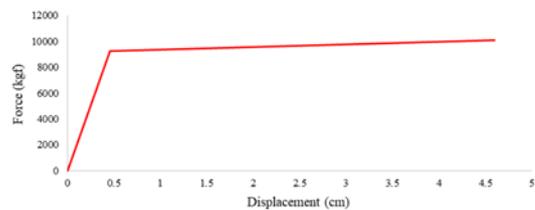


Fig. 11. Behavior model of the U-shaped metallic-yielding damper.

۳-۳- شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده

شتاب‌نگاشت‌هایی که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرند در جدول (۲) لیست شده‌اند. با توجه به فاصله از گسل، تمامی رکوردهای استفاده شده، دور از گسل بوده و روی خاک نوع III ثبت شده‌اند. قبل از انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، ابتدا تمامی رکوردهای انتخاب شده، برای هر سازه و مطابق با طیف طرح استاندارد خاک نوع III استاندارد ۲۸۰۰، بر اساس بند ۱۶-۱-۳ آیین‌نامه ASCE07-10 [21] برای قاب‌های دو بعدی، مقیاس شده و ضرایب مقیاس قاب‌ها با توجه دوره تناوب آن‌ها به ترتیب $1/0.3$ ، $1/0.6$ و $1/0.5$ بدست آمده است، سپس برای انجام تحلیل استفاده شدند. طیف شتاب این هفت شتاب‌نگاشت در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

جدول ۲. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده.

Earthquake	Ms	PGA	Date	Epicentral distance	Station name
Imperial Valley-06	6.53	0.13	1979	50.1	Coachella Canal #4
Tabas	7.35	0.11	1978	28.8	Boshrooyeh
Manjil	7.37	0.18	1990	49.97	Qazvin
Big Bear	6.53	0.23	1992	40.54	Desert Hot Springs
Northridge01	7.35	0.29	1994	24.76	Moorpark - Fire Sta
Northridge02	7.37	0.03	1994	38.69	LA - 116th St School
Kern County	7.36	0.18	1952	38.89	Taft Lincoln School

Table 2. Records are used.

۴-۱- تغییر مکان حداکثر بام

نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی بام قاب ۵ طبقه در دو حالت بدون میراگر و با میراگر تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورثریج ۱ و ۲ و کرن کانتی در شکل (۱۴) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر هفت رکورد تغییر مکان جانبی بام ساختمان دارای میراگر به طرز محسوسی کاهش می‌یابد. تحت رکورد امپریال ولی، کاربرد میراگر سبب کاهش بیشینه تغییر مکان بام از ۳۹ سانتی‌متر به ۲۸ سانتی‌متر شده است. همچنین بیشینه تغییر مکان بام تحت رکورد منجیل، با کاربرد میراگر از ۲۱ سانتی‌متر به ۱۹ سانتی‌متر کاهش

۴- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

پس از مدل‌سازی قاب‌های بتنی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در نرم‌افزار PERFORM-3D و انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی بر روی هر کدام از قاب‌ها در دو حالت مقاوم‌سازی نشده و مقاوم‌سازی شده با استفاده از میراگر U-شکل، پاسخ‌های سازه‌ها در قالب تغییر مکان بام، جابه‌جایی نسبی طبقات، برش پایه و سطح عملکرد قاب‌ها مقایسه شدند.

شکل ۱۴. مقایسه تغییر مکان بام قاب ۵ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

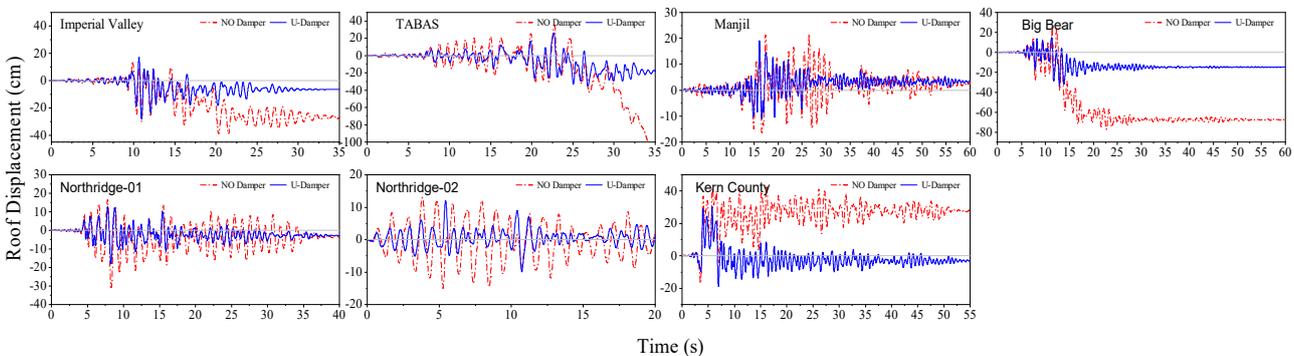


Fig. 14. Comparison of the roof displacement of the 5-story frame for with and without damper cases.

شکل ۱۵. مقایسه تغییر مکان بام قاب ۱۰ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

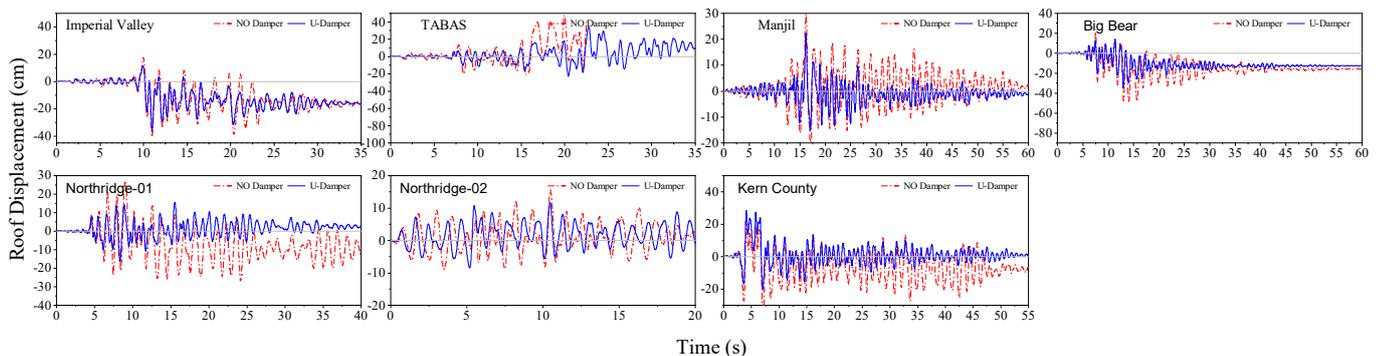


Fig. 15. Comparison of the roof displacement of the 10-story frame for with and without damper cases.

شکل ۱۶. مقایسه تغییر مکان بام قاب ۱۵ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

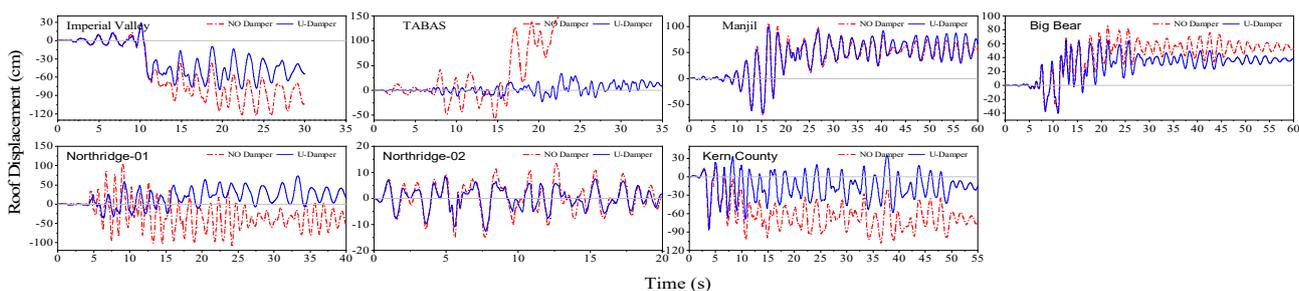


Fig. 16. Comparison of the roof displacement of the 15-story frame for with and without damper cases.

شکل ۱۷. مقایسه برش پایه قاب ۵ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

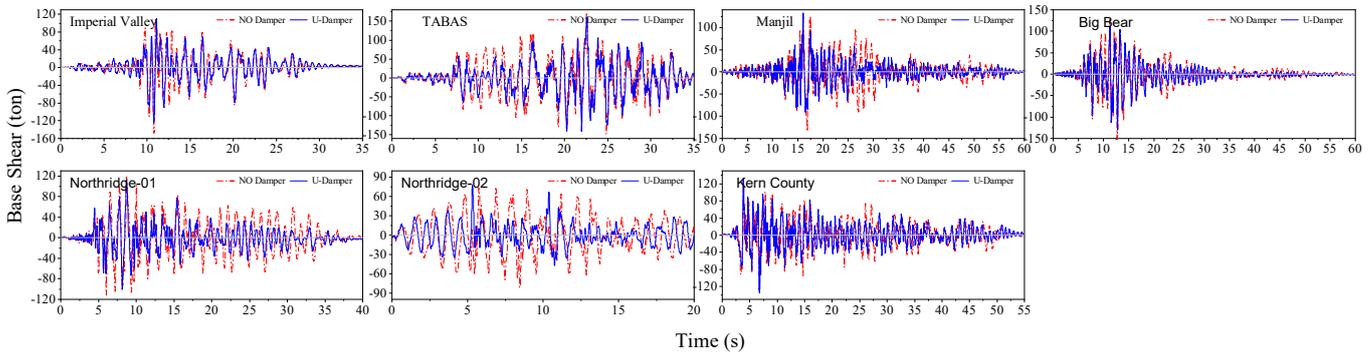


Fig. 15. Comparison of the base shear of the 5-story frame for with and without damper cases.

شکل ۱۸. مقایسه برش پایه قاب ۱۰ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

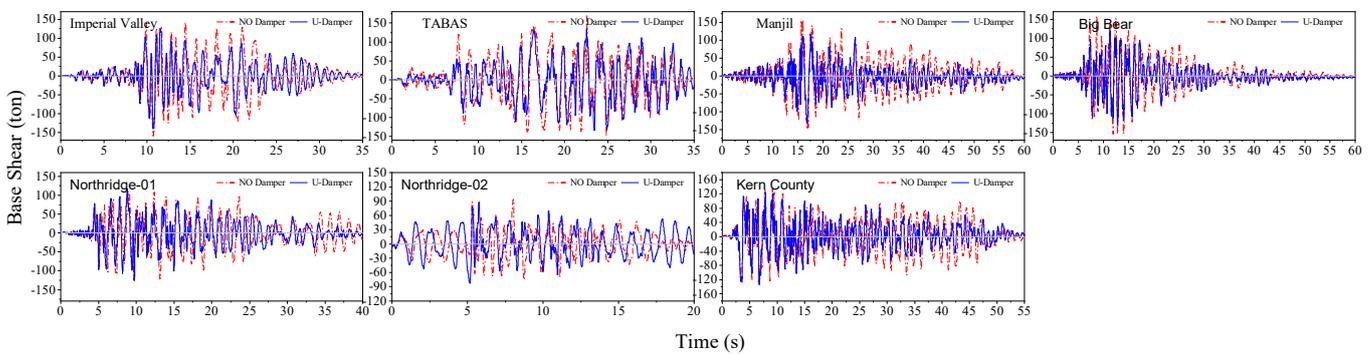


Fig. 18. Comparison of the base shear of the 10-story frame for with and without damper cases.

شکل ۱۹. مقایسه برش پایه قاب ۱۵ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

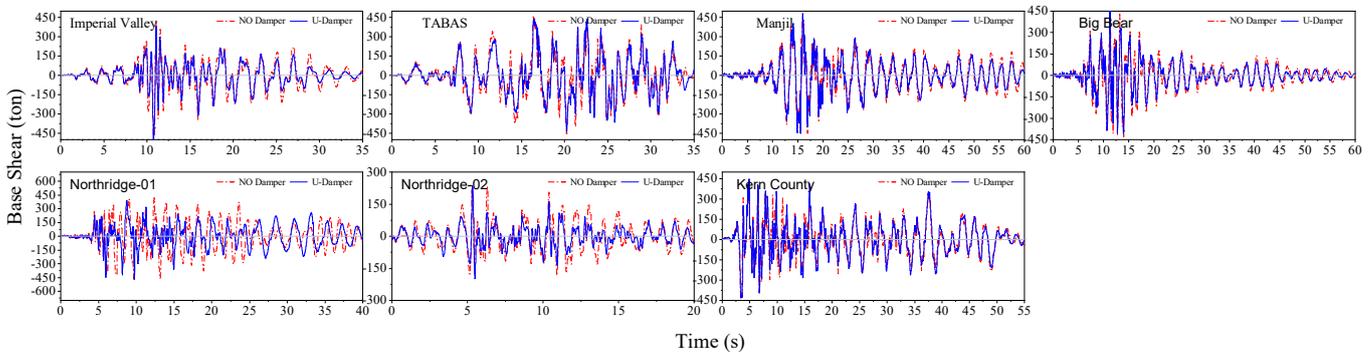


Fig. 19. Comparison of the base shear of the 15-story frame for with and without damper cases

سانتی متر به ۷۳ سانتی متر، تحت رکورد نورتریج ۲ از ۱۶ سانتی متر به ۱۳ سانتی متر و تحت رکورد کرن کانتی از ۱۰۷ سانتی متر به ۸۴ سانتی متر کاهش داده است. در نتیجه تحت شش رکورد امپریال ولی، منجیل، بیگ بیر، نورتریج ۱ و ۲ و کرن کانتی با استفاده از میراگر، مقدار تغییر مکان بیشینه بام به ترتیب ۶، ۳۵، ۲۳، ۳۲، ۱۶ و ۲۲ درصد کاهش یافته است. لازم به ذکر اینکه تحت رکورد طبس قاب به مرحله خرابی رسید و به دلیل خرابی در سازه ۱۵ طبقه تحت زلزله طبس، نمودار تا زمان مربوطه ارائه شده است.

۴-۲- برش پایه قاب

نمودار تاریخچه زمانی برش پایه قاب ۵ طبقه در دو حالت بدون میراگر و با میراگر تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورتریج ۱ و ۲ و کرن کانتی در شکل (۱۷) مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، اگرچه در هر هفت رکورد مقدار برش پایه ساختمان دارای میراگر کمتر از مقدار برش پایه قاب بدون میراگر است اما این کاهش برش پایه چشمگیر نیست. تحت رکورد امپریال ولی، کاربرد میراگر سبب کاهش بیشینه برش پایه از ۱۴۸ تن به ۱۲۲ تن شده است. همچنین برش پایه ساختمان تحت رکورد منجیل، با کاربرد میراگر از ۱۶۸ تن به ۱۵۹ تن و تحت رکورد طبس از ۱۳۴ تن به ۱۳۲ تن کاهش یافته است. افزودن میراگر به قاب بیشینه برش پایه را تحت رکورد بیگ بیر را از ۱۶۴ تن به ۱۳۰ تن، تحت رکورد نورتریج ۱ از ۱۱۸ تن به ۱۱۲ تن، تحت رکورد نورتریج ۲ از ۸۲ تن به ۷۸ تن و تحت رکورد کرن کانتی از ۱۳۵ تن به ۱۲۲ تن کاهش داده است. در نتیجه تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورتریج ۱ و ۲ و کرن کانتی با استفاده از میراگر، مقدار بیشینه برش پایه به ترتیب ۱۷، ۵، ۲، ۲۱، ۵، ۵ و ۱۱ درصد کاهش یافته است.

مطابق شکل (۱۸)، در قاب ۱۰ طبقه تحت رکورد امپریال ولی، کاربرد میراگر سبب کاهش بیشینه برش پایه از ۱۵۸ تن به ۱۳۸ تن شده است. همچنین برش پایه ساختمان تحت رکورد منجیل، با کاربرد میراگر از ۱۵۴ تن به ۱۳۰ تن و تحت رکورد طبس از ۱۳۹ تن به ۱۳۷ تن کاهش یافته است. افزودن میراگر به قاب

یافته است. افزودن میراگر به قاب بیشینه تغییر مکان بام را تحت رکورد بیگ بیر را از ۷۷ سانتی متر به ۳۳ سانتی متر، تحت رکورد نورتریج ۱ از ۳۰ سانتی متر به ۱۸ سانتی متر، تحت رکورد نورتریج ۲ از ۱۵ سانتی متر به ۱۲ سانتی متر و تحت رکورد کرن کانتی از ۴۳ سانتی متر به ۳۰ سانتی متر کاهش داده است. در نتیجه تحت شش رکورد امپریال ولی، منجیل، بیگ بیر، نورتریج ۱ و ۲ و کرن کانتی با استفاده از میراگر، مقدار تغییر مکان بیشینه بام به ترتیب ۲۷، ۱۱، ۵۷، ۴۱، ۱۹ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. همچنین تحت رکورد طبس قاب بدون میراگر به مرحله خرابی رسید و قاب با میراگر تغییر مکان بیشینه بام ۳۵ سانتی متر را تجربه کرد.

تاثیر میراگر در نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی بام قاب ۱۰ طبقه در شکل (۱۵) نشان شده است. تحت رکورد امپریال ولی، کاربرد میراگر سبب کاهش بیشینه تغییر مکان بام از ۳۹ سانتی متر به ۳۶ سانتی متر شده است. همچنین تغییر مکان بیشینه بام تحت رکورد منجیل، با کاربرد میراگر از ۲۹ سانتی متر به ۲۲ سانتی متر کاهش یافته است. افزودن میراگر به قاب بیشینه تغییر مکان بام را تحت رکورد بیگ بیر را از ۴۸ سانتی متر به ۳۴ سانتی متر، تحت رکورد نورتریج ۱ از ۲۶ سانتی متر به ۱۶ سانتی متر، تحت رکورد نورتریج ۲ از ۱۵ سانتی متر به ۱۲ سانتی متر و تحت رکورد کرن کانتی از ۳۵ سانتی متر به ۲۸ سانتی متر کاهش داده است. در نتیجه تحت شش رکورد امپریال ولی، منجیل، بیگ بیر، نورتریج ۱ و ۲ و کرن کانتی با استفاده از میراگر، مقدار تغییر مکان بیشینه بام به ترتیب ۹، ۲۵، ۲۹، ۳۹، ۲۵ و ۲۱ درصد کاهش یافته است. همچنین تحت رکورد طبس قاب بدون میراگر به مرحله خرابی رسید و قاب با میراگر تغییر مکان بیشینه بام ۳۴ سانتی متر را تجربه کرد.

نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی بام قاب ۱۵ طبقه در دو حالت بدون میراگر و با میراگر در شکل (۱۶) رسم شده است. تحت رکورد امپریال ولی، کاربرد میراگر سبب کاهش بیشینه تغییر مکان بام از ۱۲۲ سانتی متر به ۸۰ سانتی متر شده است. همچنین تغییر مکان بیشینه بام تحت رکورد منجیل، با کاربرد میراگر از ۱۰۶ سانتی متر به ۹۹ سانتی متر کاهش یافته است. افزودن میراگر به قاب بیشینه تغییر مکان بام را تحت رکورد بیگ بیر را از ۸۲ سانتی متر به ۶۵ سانتی متر، تحت رکورد نورتریج ۱ از ۱۰۷

مشاهده شد که در قاب دارای میراگر همواره مقدار جابه‌جایی نسبی طبقه کمتر از مقدار جابه‌جایی نسبی سطح عملکرد ایمنی جانی است، در حالی که مقدار جابه‌جایی نسبی قاب فاقد میراگر از حد ایمنی جانی فراتر می‌رود.

شکل ۲۰. مقایسه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۵ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

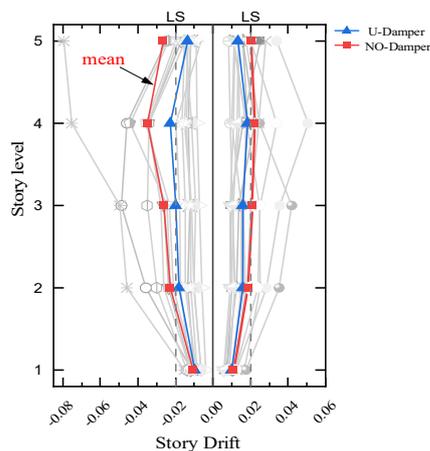


Fig. 20. Comparison of story drifts of the 5-story frame for with and without damper cases.

بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۱۰ طبقه در دو حالت بدون میراگر و با میراگر تحت رکوردهای زلزله در شکل (۲۱) مقایسه شده است. بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات تحت رکوردهای زلزله برای قاب ۱۰ طبقه در محدوده ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۵ و ۰/۰۲۴ تا ۰/۰۳۵ قرار دارد که تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورث‌ریج ۱ و ۲ و کرن کانتی با استفاده از میراگر، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات به ترتیب ۸، ۳۹، ۴۴، ۳۹، ۲۷، ۲۵ و ۱۵ درصد کاهش یافته است.

شکل ۲۱. مقایسه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۱۰ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

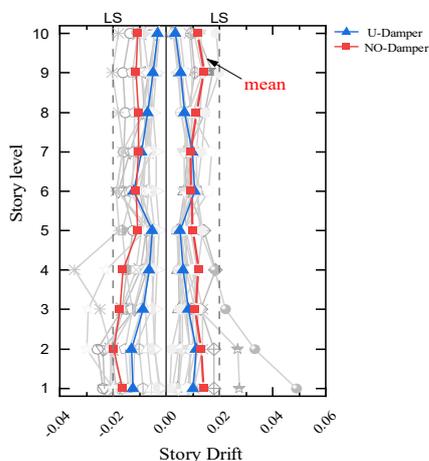


Fig. 21. Comparison of story drifts of the 10-story frame for with and without damper cases.

بیشینه برش پایه را تحت رکورد بیگ بیر را از ۱۵۵ تن به ۱۳۰ تن، تحت رکورد نورث‌ریج ۱ از ۱۲۶ تن به ۱۲۵ تن، تحت رکورد نورث‌ریج ۲ از ۹۳ تن به ۸۸ تن و تحت رکورد کرن کانتی از ۱۳۳ تن به ۱۳۵ تن کاهش داده است. در نتیجه تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورث‌ریج ۱ و ۲ و کرن کانتی با استفاده از میراگر، مقدار بیشینه برش پایه به ترتیب ۲، ۱۲، ۱۵، ۱۷، ۱، ۶ و ۱ درصد کاهش یافته است.

تاثیر میراگر بر برش پایه در قاب ۱۵ طبقه در شکل (۱۹) نشان داده شده است. بیشینه برش پایه در قاب دارای میراگر تحت رکوردهای

امپریال ولی، منجیل، بیگ بیر، نورث‌ریج ۲ به ترتیب از ۴۸۸، ۴۵۱، ۴۳۰ و ۲۳۳ تن به ۵۱۱، ۴۸۱، ۴۷۰ و ۲۳۵ تن افزایش یافته است و همچنین تحت رکوردهای طبس، نورث‌ریج ۱ و کرن کانتی به ترتیب از ۴۵۵، ۴۸۳ و ۴۵۴ تن به ۴۴۲، ۴۶۸ و ۴۴۵ تن کاهش یافته است. بطور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در زلزله‌های امپریال ولی، منجیل، بیگ بیر، نورث‌ریج ۲ کاربرد میراگر به ترتیب سبب افزایش ۵، ۷، ۹ و ۱ درصدی برش پایه شده و در زلزله‌های طبس، نورث‌ریج ۱ و کرن کانتی مقدار برش پایه با کاربرد میراگر به ترتیب حدود ۳، ۳ و ۲ درصد کاهش داشته است.

به صورت کلی می‌توان این تغییرات اندک برش پایه مشاهده شده (افزایش یا کاهش) را ناشی از اثر محتوای فرکانسی و پیوند غالب زلزله بر قاب‌های مختلف دانست.

۳-۴- تغییر مکان نسبی طبقات

با بررسی بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۵ طبقه در دو حالت بدون میراگر و با میراگر تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورث‌ریج ۱ و ۲ و کرن کانتی در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود که، در هر هفت رکورد بیشینه جابه‌جایی نسبی قاب دارای میراگر به طرز محسوسی کاهش می‌یابد. بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات تحت رکوردهای زلزله برای قاب ۵ طبقه در محدوده ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۵ و ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۸ قرار دارد که تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورث‌ریج ۱ و ۲ و کرن کانتی با استفاده از میراگر، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات به ترتیب ۲۹، ۴، ۲۱، ۵۶، ۵۵، ۴۰ و ۳۳ درصد کاهش یافته است. همچنین

فروریزش رسیده‌اند، درحالی‌که با استفاده از میراگر U- شکل سطح عملکرد تمامی تیرهای این قاب پایین‌تر از آستانه فروریزش بوده و سطح عملکردی سازه بهبود می‌یابد.

شکل ۲۳. توزیع مفاصل پلاستیک قاب ۵ طبقه در پایان زلزله امپریال ولی.

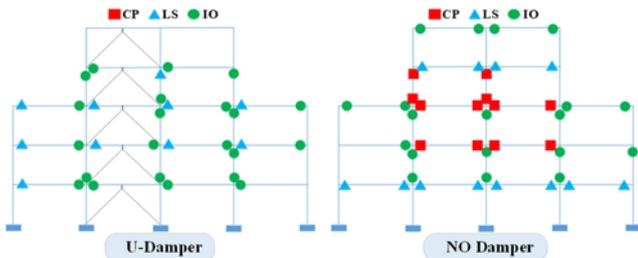


Fig. 23. disturbance of plastic hinges in 5-story frame under Imperial Valley record.

مطابق شکل (۲۴) تحت زلزله امپریال ولی، تیرهای قاب ۱۰ طبقه بدون میراگر در طبقات اول از سطح عملکرد آستانه فروریزش فراتر می‌روند، اما با استفاده از میراگر U- شکل سطح عملکرد تمامی تیرهای این قاب بهبود یافته است.

شکل ۲۴. توزیع مفاصل پلاستیک قاب ۱۰ طبقه در پایان زلزله امپریال ولی.

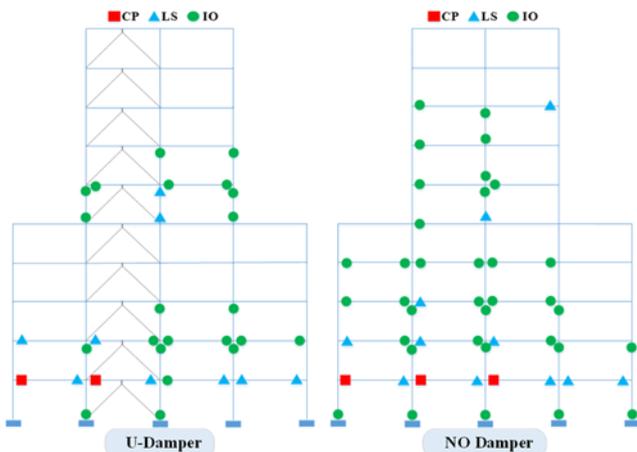


Fig. 24. disturbance of plastic hinges in 10-story frame under Imperial Valley record.

در قاب ۱۵ طبقه همانطور که در شکل (۲۵) نشان داده شده است، تحت زلزله امپریال ولی ستون‌های سازه بدون میراگر در طبقات اول و نهم از سطح عملکرد آستانه فروریزش فراتر می‌روند، اما با استفاده از میراگر U- شکل، تنها سطح عملکرد ستون‌های طبقه اول قاب به آستانه فروریزش رسیده‌اند و سطح عملکردی سازه مطلوب‌تر است.

همان‌گونه که در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود، در قاب ۱۵ طبقه کاربرد میراگر عموماً باعث کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات می‌شود. بیشینه دریفت طبقات در قاب دارای میراگر تحت رکوردهای امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورث‌ریچ ۱، نورث‌ریچ ۲، کرن کانتی به ترتیب ۲۲، ۷، ۵۶، ۲۱، ۹۴، ۲۸ و ۵۰ کاهش یافته است. لازم به ذکر اینکه دلیل پرش ناگهانی در این نمودار برای رکوردهای زلزله ضعف سیستم باربری در طبقه هشتم قاب ۱۵ طبقه با عقب‌نشینی طبقات است.

همچنین با بررسی توزیع جابه‌جایی نسبی در طبقات قاب‌ها مشاهده می‌شود که افزودن میراگر به قاب‌ها ضعف سیستم باربری در محل نامنظمی را بهبود بخشیده است.

شکل ۲۲. مقایسه جابه‌جایی نسبی طبقات قاب ۱۵ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر.

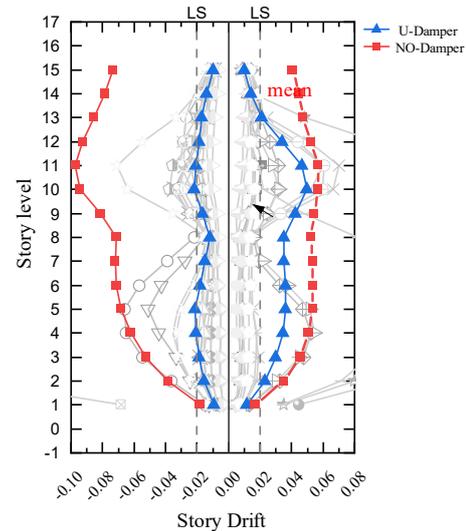


Fig. 22. Comparison of story drifts of the 15-story frame for with and without damper cases.

۴-۴- مقایسه عملکرد قاب‌ها در سطوح عملکرد لرزه‌ای

برای بررسی تاثیر میراگر در بهبود عملکرد سازه در زلزله، سطوح عملکردی عملکرد بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) مطابق تعریف ارائه شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود (نشریه ۳۶۰) [19] برای قاب‌های دارای میراگر و بدون میراگر، پس از زلزله امپریال ولی بدست آمده و مقایسه شده است. بررسی قاب ۵ طبقه تحت زلزله امپریال ولی در شکل (۲۳) حاکی از آن است که تیرهای قاب بدون میراگر در طبقات دو تا چهار به سطح عملکرد آستانه

۶- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی چگونگی عملکرد میراگرهای فلزی جاری شونده U-شکل در سازه‌های بتنی پرداخته است. سه سازه بتن آرمه با نامنظمی در ارتفاع به تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ با سیستم قاب خمشی متوسط به عنوان سازه‌های بتنی متداول در نظر گرفته شده‌اند. با طراحی قاب‌های بتنی ضعیف و استفاده از میراگرهای U-شکل برای مقاوم‌سازی آن‌ها و مدلسازی توسط نرم‌افزار PERFORM-3D، مطابق ضوابط موجود برای تحلیل غیرخطی سازه‌های بتنی، تاثیر این میراگرها در کاهش نیاز لرزه‌ای سازه‌های بتنی بررسی شده است. با انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی دو بعدی، تحت رکوردهای دور از گسل، مقدار جابه‌جایی نسبی طبقات، تغییر مکان حداکثر بام، برش پایه، و سطح عملکرد قاب‌ها، ارزیابی شد. اهم نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

۱) کاربرد میراگرهای U-شکل همواره باعث کاهش تغییر مکان پیشینه بام ساختمان شده و این کاهش چشمگیر است. بطور متوسط تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورث‌ریج ۱، نورث‌ریج ۲، کرن کانتی، میراگرها تغییر مکان پیشینه بام ساختمان را در قاب ۵ طبقه ۳۱، در قاب ۱۰ طبقه ۲۵ و در قاب ۱۵ طبقه ۲۲ درصد کاهش دادند

۲) هر چند کاربرد میراگر U-شکل می‌تواند تا حدی باعث کاهش برش پایه ساختمان شود، اما از سویی این کاهش در سازه‌های با ارتفاع بیشتر بسیار اندک بوده و از سوی دیگر در برخی سازه‌ها و تحت برخی زلزله‌های خاص، کاربرد میراگر می‌تواند سبب افزایش برش پایه شود. بطوریکه در ساختمان ۱۵ طبقه و تحت رکورد امپریال ولی مقدار برش پایه در قاب دارای میراگر ۵ درصد بیشتر از قاب معمولی بدست آمد. همچنین مقدار کاهش برش پایه در اثر کاربرد میراگر در قاب‌های ۵ و ۱۰ طبقه غالباً کمتر از ۱۰ درصد است.

۳) کاربرد میراگرهای U-شکل همواره باعث کاهش پیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان شده و این کاهش چشمگیر می‌باشد. بطور متوسط تحت هفت رکورد امپریال ولی، منجیل، طبس، بیگ بیر، نورث‌ریج ۱، نورث‌ریج ۲، کرن کانتی، میراگرها پیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان را در قاب ۵ طبقه ۳۴ درصد، در قاب ۱۰ طبقه ۲۸ و در قاب ۱۵ طبقه ۲۶ درصد کاهش دادند.

شکل ۲۵. توزیع مفاصل پلاستیک قاب ۱۵ طبقه در پایان زلزله امپریال ولی

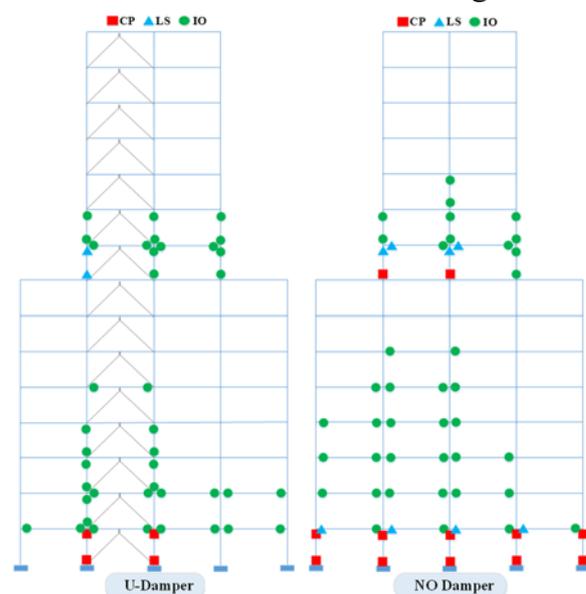


Fig. 25. disturbation of plastic hinges in 15-story frame under Imperial Valley record.

به منظور استفاده بهتر از ویژگی‌های استهلاک انرژی میراگر، هر یک از میراگرها باید تحت تحریک لرزه‌ای رفتار غیر الاستیک داشته باشند. با این وجود، تغییر شکل‌های پلاستیکی آن‌ها نباید از محدوده مجاز تجاوز کند، که منجر به تسلیم میراگر می‌شود. شکل (۲۶) پاسخ هیستریزس میراگر U شکل را در طبقات قاب ۱۰ طبقه مجهز به میراگر U شکل در زلزله امپریال ولی نشان می‌دهد. مشاهده شده است که میراگرها تسلیم شده‌اند اما پیشینه جابه‌جایی آن‌ها کمتر از محدودیت مجاز است.

شکل ۲۶. پاسخ هیستریزس میراگر U شکل قاب ۱۰ تحت زلزله امپریال ولی

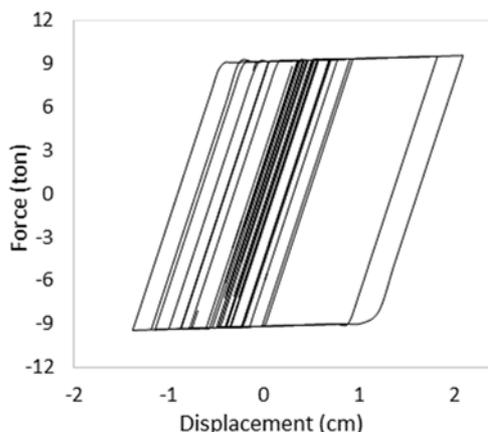


Fig. 26. Comparison of the base shear of the 10-story frame for with and without damper cases.

- seismic retrofitting of existing RC buildings by metal shear panels. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(1): 61-78.
- [8] Durucan C. & Dicleli M. 2010 Analytical study on seismic retrofitting of reinforced concrete buildings using steel braces with shear link. *Engineering Structures*, 32(10): 2995-3010.
- [9] Sahoo D. R. & Rai D. C. 2010 Seismic strengthening of non-ductile reinforced concrete frames using aluminum shear links as energy dissipation devices. *Engineering Structures*, 32(11): 3548-3557.
- [10] Sahoo D. R. & Rai D. C. 2013 Design and evaluation of seismic strengthening techniques for reinforced concrete frames with soft ground story. *Engineering Structures*, 56: 1933-1944.
- [11] Oinam R. M. & Sahoo D. R. 2017 Seismic rehabilitation of damaged reinforced concrete frames using combined metallic yielding passive devices. *Structural Infrastructures Engineering*, 13(6): 816-830.
- [12] Oinam R. M. & Sahoo, D. R. 2019 Using metallic dampers to improve seismic performance of soft-story RC frames: Experimental and numerical study. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(1), 04018108.
- [13] Junaid A., Ahmad N. & Alam B. 2020 Response modification factor of haunch retrofitted reinforced concrete frames. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(6), 04020115.
- [14] Deepshikha Ch. & Singh Y. 2014 Performance-based design of RC frame buildings with metallic and friction dampers. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 95(4), 239-247.
- [15] Madheswaran C. K. & Rama Rao GV. 2021 Development of Retrofitting Technique for Seismically Vulnerable Open Ground Storey Reinforced Concrete Buildings. *Experimental Techniques*, 1-23.
- [16] Golmoghany M. Z. & Zahrai S. M. 2021 Improving seismic behavior using a hybrid control system of friction damper and vertical shear panel in series. *Structures*, 31, 369-379.
- [17] Dolce M., Filardi B., Marnetto, R. & Nigro, D. 1996 Experimental tests and applications of a new biaxial elasto-plastic device for the passive control of structures. *Special Publication*, 164, 651-674.
- ۴) کاربرد میراگرها سطح عملکرد سازه را به مقدار قابل توجهی بهبود می‌دهد، به صورتی که در سازه‌های مورد بررسی و تحت رکوردهای مختلف، غالباً سطح عملکرد قاب‌های دارای میراگر U-شکل بسیار کمتر از حد سطح عملکرد ایمنی جانی بدست آمد. همچنین افزودن میراگرها به این قاب‌ها رفتار غیر ارتجاعی را از اعضای اصلی سازه به سیستم‌های میراگر منتقل می‌کند.
- ۵) مجهز شدن قاب‌های سازه به میراگرهای U-شکل سبب کاهش تغییر مکان نسبی طبقات و بهبود سطح عملکرد مفاصل تشکیل شده در محل نامنظمی قاب‌ها شده است.
- ۶) ارتفاع و دوره تناوب سازه در کاهش کارایی عملکرد میراگر موثر است، به گونه‌ای که با افزایش ارتفاع و دوره تناوب کارایی میراگر U شکل کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Shen H., Zhang R., Weng D., Gao C., Luo H., & Pan, C. 2017 Simple design method of structure with metallic yielding dampers based on elastic-plastic response reduction curve. *Engineering Structures*, 150, 98-114.
- [2] Kelly J. M., Skinner R. I., & Heine A. J. 1972 Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bulletin of NZ Society for Earthquake Engineering*, 5(3), 63-88.
- [3] Skinner R. I., Kelly J. M. & Heine A. J. 1974 Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3(3), 287-296.
- [4] Aguirre M. & Roberto Sánchez A. 1992 Structural seismic damper. *Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1158-1171.
- [5] Tagawa H. & Gao J. 2012 Evaluation of vibration control system with U-dampers based on quasi-linear motion mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 213-225.
- [6] Alehashem S. M. S., Keyhani A. & Pourmohammad H. 2008 Behavior and performance of structures equipped with ADAS and TADAS dampers (A comparison with conventional structures). *In Proc., 14th World Conf. Earthquake Engineering*, Beijing, Chinese Association of Earthquake Engineering.
- [7] De Matteis G., Formisano A. & Mazzolani F. M. 2009 An innovative methodology for

- [18] Bagheri S., Barghian M., Saieri, F. & Farzinfar A. 2015 U-shaped metallic-yielding damper in building structures: Seismic behavior and comparison with a friction damper. *Structures* 3, 163-171.
- [19] Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, No. 360, 2014, *Office of Deputy for Strategic Supervision*, Department of Technical Affairs. (In Persian).
- [20] Computers and S. Inc, Structural and Earthquake Engineering Software, PERFORM-3D Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3-D Structures, Version 7.0. 0. 2018, CSI Berkeley, CA.
- [21] ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2010, *American Society of Civil Engineers*.
- [22] Tsai K.C., Chen H.W., Hong C.P. & Su Y.F. 1993 Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*, 9(3): 505-528.

Performance evaluation of U-shaped metallic-yielding damper in RC frames irregular in elevation

Taha Bakhshpoori^{1*} Mona Msoum Nejad²

- 1- Faculty of Technology and Engineering, Department of Civil Engineering, East of Guilan, University of Guilan, Rudsar-Vajargah, Iran.
- 2- M.Sc. Structural Engineering, Islamic Azad University, Branch of Ramsar, Ramsar, Iran.

*tbakhshpoori@guilan.ac.ir

Abstract:

Having a long history of seismicity and experienced destructive and deadliest earthquakes make Iran one of the vulnerable countries against earthquakes. Based on the seismic hazard zoning map presented in the Iranian seismic code (2800 provisions), more than 90% of Iranian cities are located in areas with high or very high seismic hazard zones. On the other hand expansion of urbanization in recent decades almost comprises reinforced concrete (RC) buildings. Many of these RC structures constructed in accordance with codes that did not mandate adequate detailing and reinforcement for seismic protection, may have already suffered damage since their erection, due to insufficient maintenance, earthquake activity, or other natural hazards. Therefore providing appropriate solutions for the rehabilitation of such structures has always been considered essential. Metallic energy dissipators have been grown experimentally and theoretically almost for steel structures. U-shaped metallic-yielding damper as one of the most well-known metallic energy dissipators has also developed as a lateral-load resisting system for strengthening existing steel frames. Experimental and theoretical results showed that U-shaped metallic dampers can operate with large displacements in the inelastic range and dissipate energy through the plastic deformation of the steel. The purpose of this study is to take potential advantages of this system to strengthen deficient RC structures. To the best of the authors' knowledge, this issue has rarely been considered, most of which are limited to small experimental studies. Therefore, it can be useful to study this issue numerically at the real size structural level. In this regard, three RC intermediate moment frames in 5, 10, and 15 stories and irregular in elevation are considered. Irregularity is considered by a setback in elevation of the frames as a special type of irregularity with considerable effect on seismic performance. Frames were first designed deficiently by SAP2000 software according to the provisions of the Iranian national building code and Iranian seismic code for the intermediate reinforced concrete moment-resisting frames. Then the frames strengthen by adding U-shaped metallic-yielding dampers together with inverted V-braces. The nonlinear dynamic time-history analysis is performed on all frames subjected to seven far source input motions utilizing PERFORM 3D software. Nonlinear specifications of beams and columns are considered by assigning plastic hinges to them in addition to defining nonlinearity for the dampers. The results of roof displacement, base shear, inter-story drifts, and performance level of frames are monitored for both cases with and without dampers. The use of U-shaped metallic dampers has always reduced significantly the maximum lateral displacement of the buildings. On average, under the seven records of Imperial Valley, Manjil, Tabas, Big bear, Northridge 1&2 and Kern County, the reduction is obtained as 31, 25, and 22 for 5, 10, and 15 story frames, respectively. Such a significant reduction is also visible in the inter-story drifts. No major effect on the maximum base shear force is observed and even in some cases, it is increased up to 5%. Failure of frames reduced by transferring nonlinearity of elements to the dampers and seismic performance assessment indicates that dampers strengthen frames to almost satisfy the requirements of the life safety level.

Keywords: Reinforced concrete structure, irregularity in elevation, U-shaped metallic-yielding damper, nonlinear analysis, time history analysis.