

## ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگر تسلیمی U-شکل متأثر از زلزله‌های متوالی حوزه نزدیک گسل

نوید سیاه پلو<sup>۱\*</sup>، عباس دغاغله<sup>۲</sup>، نگار علیزاده بهبهانی<sup>۳</sup>

استادیار، گروه عمران، دانشکده تحصیلات تکمیلی، مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران، [siahpolo@acecr.ac.ir](mailto:siahpolo@acecr.ac.ir)  
<sup>۲</sup>دانش آموخته ای کارشناسی‌ارشد، گروه عمران، دانشکده تحصیلات تکمیلی، مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران  
<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه عمران، دانشکده تحصیلات تکمیلی، مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران

### چکیده

توسعه سامانه اتلاف انرژی به‌عنوان فیوز قابل تعویض و جلوگیری از توسعه خرابی در اعضا اصلی موضوع مهمی است. زلزله قهرمان ماراش ترکیه اهمیت توالی لرزه‌ای نزدیک گسل را بیشتر نشان داد. در این پژوهش عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی فولادی مجهز به میراگر U-شکل بررسی شد. بدین منظور قاب‌های ۷ طبقه بدون و با میراگر U-شکل، بر اساس ضوابط طراحی لرزه‌ای طراحی شد. سپس ۵ توالی لرزه‌ای نزدیک گسل به سازه‌ها وارد شد. نتایج نشان می‌دهد پاسخ سازه در پدیده توالی لرزه‌ای نسبت به زلزله منفرد بحرانی‌تر بوده و جای این پدیده در آیین‌نامه‌ها طراحی لرزه‌ای خالی است. بعلاوه استفاده از میراگر توانسته است معیار عملکرد ایمنی جانی در IDR را در هر دو حالت لرزش اصلی و توالی لرزه‌ای برآورده نماید. تأمین این معیار برای پیشینه دریافت ماندگار محقق نشده است.

**واژگان کلیدی:** طراحی لرزه‌ای، توالی لرزه‌ای نزدیک گسل، قاب خمشی فولادی، میراگر تسلیمی U-شکل

### ۱- مقدمه

جهت جلوگیری از بروز خرابی در سازه، باید فرایندی در سازه تعبیه شود که انرژی عظیم زلزله را کنترل و میرا کند. یکی از این روش‌ها افزایش شکل‌پذیری است. ضوابطی برای طراحی سازه‌ها پیشنهاد شود که باعث افزایش شکل‌پذیری گردد. با افزایش شکل‌پذیری سازه رفتار غیرخطی پایداری از خود نشان داده و بخش عمده‌ای از انرژی ورودی با اضافه نمودن سیستم‌های کنترل غیرفعال لرزه‌ای مستهلک می‌شود. بر همین اساس یکی از نوین‌ترین روش‌ها اضافه نمودن میراگر به سازه برای مقاوم‌سازی است. با آنچه در زلزله قهرمان ماراش ترکیه (۲۰۲۳) رخ داد می‌توان استنباط کرد اگر قاب‌ها مجهز به میراگرهای جاذب انرژی بودند، خسارات مالی و جانی به نسبت کمتری رخ می‌داد. از آنجاکه شرایط پهنه کشور ایران از منظر ساخت‌وساز و بقیه عوامل دخیل همانند کشور ترکیه است و به‌موجب جلوگیری از آنچه که در زلزله قهرمان ماراش ترکیه (۲۰۲۳) به وقوع پیوست، ضرورت دارد با تجدیدنظر دقیق‌تری برای توالی‌های لرزه‌ای ارزیابی انجام گیرد. با نگاهی به تحقیقات

پیشین، بخشپوری و معصوم نژاد، (۱۴۰۱) بررسی عملکردی استفاده از میراگرهای فلزی جاری شونده U شکل در ساختمان‌های بتنی نامنظم در ارتفاع را مدنظر قرار دادند. نتایج حاکی از این است، کاربرد میراگرها سطح عملکرد سازه را به مقدار قابل توجهی بهبود می‌دهد. 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. روشنی و باقری، (۱۳۹۷) تأثیر شرایط اتصال میراگرهای فلزی تسلیمی U بر رفتار چرخه‌ای آنها را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت نتایج نشان داد که اگر شرایط و تعداد اتصالات پیچی به‌درستی مدل شود می‌توان چیدمان دایره‌ای این میراگر را که برای بارگذاری‌های دوجبهه استفاده می‌شود از مجموع چند حالت ساده‌تر نتیجه گرفت. شجاعی فر و سیاه پلو، (۱۳۹۷) عملکرد میراگر جاری شونده U شکل در قاب‌های خمشی فولادی تحت زلزله نزدیک گسل پالس‌گونه را مورد بررسی قرار دادند. ارزیابی نتایج نشان داد در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مویید تأثیر قابل توجه این میراگر بر کاهش تاریخچه تغییر مکان بام، نسبت دریافت طبقات، از بین رفتن مفاصل پلاستیک و برخورداری از منحنی‌های هیستریزس خوب با جذب انرژی تقریباً برابر است. سلحشور دورکی و رهگذر، (۱۳۹۸) نوع خاصی از میراگرهای فولادی جاری شونده U شکل را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد با قراردادن میراگر فولادی جاری شونده U شکل در قاب‌های خمشی رفتار غیرخطی از اعضای سازه‌ای به قطعات میراگر منتقل می‌گردد. افزودن این میراگر به قاب خمشی، باعث بهبود رفتار قاب و کاهش متغیرهای مختلف از جمله حداکثر برش پایه و تغییر مکان افقی بام می‌گردد.

باقری و همکاران، (۲۰۱۵) رفتار لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی مجهز به میراگر تسلیمی U شکل را با قاب‌های ساختمانی مجهز به میراگر اصطکاکی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد، عملکرد میراگرهای اصطکاکی در کاهش بیشینه برش پایه قاب‌ها اندکی بهتر از میراگر U شکل است. در حالی که جابه‌جایی جانبی قاب‌های مجهز به میراگر اصطکاکی بیشتر از جابه‌جایی جانبی قاب‌های مجهز به میراگر تسلیمی U شکل است. ژانگ و همکاران، (۲۰۱۶) اتصالات مرکز گرای تیر پیوسته به ستون قاب خمشی فولادی مجهز به میراگر فولادی U شکل مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه نتایج، مکانیسم پیشنهادی از خود رفتاری پایدار و مطابق با ایده مرکز گرای نشان داد به طوری که جابه‌جایی ماندگار پس از بارگذاری‌های چرخه‌ای به نحو مطلوبی محدود و در عین حال اتصال از خود اتلاف انرژی مناسبی نشان می‌دهد. عرض میراگرهای فولادی U شکل نسبت به ضخامت آنها تأثیر به مراتب بیشتری بر ظرفیت تحمل بار و سختی و ظرفیت اتلاف انرژی در محل اتصال دارد. آته و همکاران، (۲۰۱۶) ظرفیت تغییر شکل غیر ارتجاعی میراگرهای فولادی U-شکل را تحت بارگذاری دو محوره برای سازه‌های جداسازی شده از پایه مورد مطالعه تجربی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده در تست‌های استاتیکی، یک منحنی اندرکنش که کاهش ظرفیت تغییر شکل سیکلی را شرح می‌دهد، پیشنهاد شده است. نتایج تست‌های دینامیکی منحنی اندرکنش پیشنهادی را برای تخمین ظرفیت تغییر شکل تایید کرده است. خطی‌نی و همکاران، (۲۰۱۹) میراگرهای فولادی U شکل را تحت بارگذاری سیکلی با استفاده از یک روش ترکیبی کارآمد، مورد بهینه‌سازی قرار دادند. نتایج حاکی از این است، روش پیشنهادی بهینه‌سازی میراگر تسلیمی U شکل، یک شکل بهینه را با افزایش قابل توجه استهلاک انرژی و قابلیت تغییر شکل در مقایسه با نمونه‌های موجود در مطالعات قبلی ارائه داده است.

تایاری و همکاران، (۲۰۱۹) پیشنهادی برای اتلاف انرژی زلزله با استفاده از نوارهای فولادی U شکل ارائه کردند. بررسی‌ها نشان داد که ظرفیت اتلاف انرژی سیستم با افزایش ضخامت المان‌های U شکل و یا کاهش ارتفاع المان‌های U شکل افزایش می‌یابد. رهنورد و همکاران، (۲۰۲۰) عملکرد سیکلی قاب‌های بتن مسلح مجهز به ترکیبی از یک هسته لاستیکی و یک میراگر فلزی U شکل را مورد بررسی عددی قرار دادند. نتایج حاصل از این بود نحوه ترک کششی ایجاد شده در مدل با میراگر نسبت به مدل بدون میراگر به مقدار کافی تغییر نکرده؛ اما حداکثر مقاومت برشی، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی به مقدار کافی بهبود یافته است.

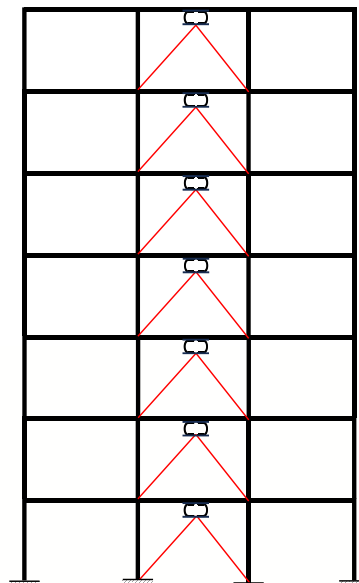
بررسی مطالعات قبل نشان می‌دهد که تا کنون تعداد قابل توجهی تحقیق رفتار میراگرهای U شکل را بررسی کرده‌اند؛ اما هیچ‌کدام از مطالعات به اثر توالی لرزه‌ای و عملکرد این نوع میراگر برای کمک به سیستم باربر جانبی نپرداخته‌اند. در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود نیز اثر توالی لرزه‌ای بر روند طراحی سیستم باربر جانبی دیده نشده است؛ لذا سؤال اصلی این پژوهش این گونه طرح می‌شود که «آیا به‌کارگیری سیستم میراگر تسلیمی U-شکل در قاب‌های خمشی فولادی که بر اساس ضوابط طراحی لرزه‌ای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (۱۴۰۱) طراحی

شده اند، می‌تواند باعث ارتقا عملکرد سازه در برابر توالی‌های لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل از گردد؟» آنچه این تحقیق را با مطالعات قبل متمایز می‌سازد اینکه تاکنون هیچ مطالعه ای مبنی بر اثرات توالی‌های لرزه‌ای نزدیک گسل بر قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگر U-شکل طراحی شده بر اساس ضوابط طراحی لرزه‌ای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (۱۴۰۱) صورت نگرفته است. بدین منظور یک قاب خمشی فولادی ۷ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر U-شکل با تعداد دهانه ۳ و ۵ دهانه به صورت یکسان طراحی شدند. سپس مدل‌ها در برابر ۵ توالی لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل که از ترکیب تصادفی زلزله‌های نزدیک گسل FEMA P695 ایجاد شده اند، بروش تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی ارزیابی شده اند.

## ۲- مدلسازی و روش تحقیق

### ۲-۱- معرفی قاب و روند طراحی

در این مقاله، یک قاب دویعدی ۷ طبقه برابر ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر بدون نامنظمی در ارتفاع مدلسازی شده است. تعداد دهانه‌های قاب در هر طبقه، برابر ۳ و طول دهانه ۵ متر در نظر گرفته شده است. سیستم باربر جانبی قاب خمشی ویژه فولادی بانتخاب شده است. فرض شده سازه در منطقه لرزه خیزی خیلی زیاد و روی خاک نوع III مستقر است. برای طراحی قاب فولادی از نرم‌افزار CSI ETABS 2015 استفاده شده است. بارگذاری و تحلیل لرزه‌ای براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) و استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) می‌باشد. بار مرده و زنده کلیه طبقات و بام به ترتیب مقادیر ۳۰۰۰ و ۱۲۵۰ کیلوگرم/متر فرض شد. مقاطع مورد نظر استفاده شده در تیرها از نوع IPE و ستون‌ها از نوع جعبه ای ساخته شده از ورق است. برای محاسبه جرم لرزه‌ای با فرض مسکونی برای قاب‌ها، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) درصد مشارکت بارهای ثقلی ۲۰٪ در نظر گرفته شد. از محاسبه بار باد صرف نظر شد. اتصال ستون به پی ساختمان از نوع اتصال گیردار و اتصال تیر و ستون‌ها از نوع گیردار فرض شد. در ادامه برای هر یک از مدل‌ها میراگر U-شکل و مهاربند مربوطه برای اتکا طراحی شده است. برای طراحی میراگر، ابتدا با فرض اینکه شکل مودی مود اول سازه تغییرچندانی نداشته باشد، جابجایی تسلیم هر طبقه بدست آمد. آنگاه جابجایی تسلیم میراگرها در طبقات محاسبه شد. در ادامه سختی هر طبقه محاسبه و براساس آن مجموع سختی مهاربند و میراگر محاسبه شد. با بدست آوردن این اطلاعات، مشخصات میراگر مورد نیاز در هر طبقه مشخص شد. برای مدلسازی میراگر سه پارامتر سختی ارتجاعی میراگر؛ تغییرمکان تسلیم و مقاومت نهایی آن نیاز است. در شکل (۱) نمونه شماتیک قاب خمشی با سیستم میراگر نمایش داده شده است. یادآور می‌شود که برای مدلسازی میراگر کافی است رفتار دو خطی نیرو-تغییرمکان میراگر در اختیار باشد. در جدول (۱) نیز مشخصات مقاطع مورد استفاده در قاب ۷ طبقه ۳ دهانه ارائه شده اند.



شکل (۱): قاب ۷ طبقه مجهز به میراگر

جدول (۱): مشخصات پروفیل تیرها و ستون‌ها و مهاربندها

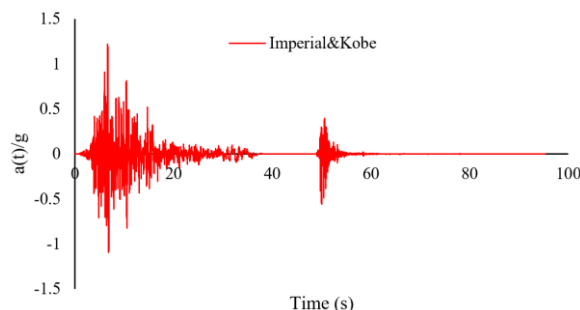
طبقه	نوع المان	محل المان	مقطع
2~7	ستون	همه دهانه‌ها	BOX-250x15
1	ستون	همه دهانه‌ها	BOX-250x20
6~7	تیر	همه دهانه‌ها	IPE330
3~5	تیر	همه دهانه‌ها	IPE360
1~2	تیر	همه دهانه‌ها	IPE400
1~7	مهاربند	دهانه میانی	TUBO80X80X5

## ۲-۲- توالی لرزه‌ای

در این مقاله از پنج رکورد زلزله نزدیک گسل پالس‌گونه برای ساخت زلزله‌های متوالی و سپس جهت انجام تحلیل NTHA استفاده شده است. شتاب‌نگاشت‌ها ابتدا از پایگاه اطلاعاتی PEER استخراج شده و پس از هم‌پایه سازی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) در اجرای تحلیل‌ها مورد استفاده قرار داده شدند. قبل از انجام این فرایند لازم است در نرم‌افزار SeismoSignal نویزهای اضافی (فیلتراسیون) انجام پذیرد. لازم به ذکر است در استاندارد ۲۸۰۰ سطح خطر DBE داده شده است و برای تبدیل آن به سطح خطر MCE بر اساس نشریه ۹۲-۳۶۰ فرض می‌شود که شتاب MCE، ۱/۵ برابر DBE است. لازم به ذکر است به دلیل کمبود توالی‌های لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل تصمیم به تولید تصادفی (مصنوعی) زلزله‌های متوالی گرفته شده است. در جدول (۲) شماره و نام‌گذاری توالی‌های لرزه‌ای آمده است. جهت ساخت توالی‌های لرزه‌ای مصنوعی از نرم‌افزار SeismoSignal استفاده شده است. توالی‌های لرزه‌ای مصنوعی از ترکیب ۲ به ۲ رکوردهای زلزله ایجاد شده است و براین اساس ۲۰ توالی می‌آید که در شکل (۲) ترکیب یک نمونه از رکوردها مشاهده می‌شود. بین هر دو رکورد متوالی ۱۰ ثانیه زمان در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات ۵ زلزله نزدیک گسل

Record	Name Earthquake	Year	Name Station	PGA (g)	Magnituded	Closest Distance
1	Imperial Valley	1979	Calexico Fire Station	0.2715	6.53	10.45
2	Kobe Japan	1995	KJMA	0.8036	6.9	0.96
3	Loma Prieta	1989	Gilroy - Historic Bldg	0.3330	6.93	10.97
4	North Palm Spring	1986	North Palm Springs	0.6576	6.06	4.04
5	Parkfield	1966	Cholame - Shandon Array #5	0.4450	6.19	9.58



شکل (۲): نمونه ای از توالی لرزه‌ای برای سازه ۷ طبقه (Imperial&amp;Kobe)

## ۲-۳- جزئیات مدل غیرخطی

برای ایجاد مدل غیرخطی در این مقاله از نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. برای انجام تحلیل NTHA در کلیه تحلیل‌های

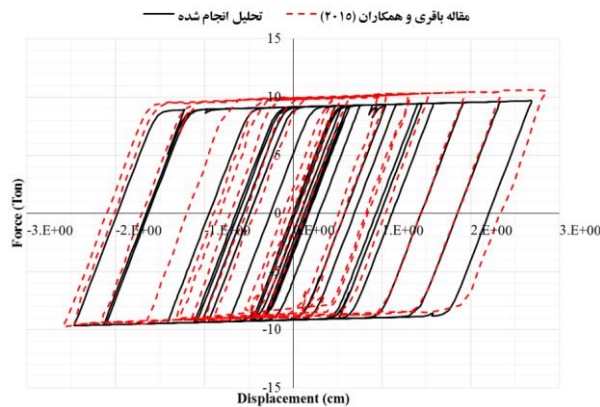
انجام گرفته از میرایی متناسب رایلی با ضریب استهلاک ۵٪ در کلیه مودها استفاده شد. برای حل معادلات از روش نیومارک بتا (۰/۲۵) استفاده شده است. ویژگی غیرخطی مصالح با استفاده از پلاستیسیته متمرکز بر اساس ASCE 41-13 به المان‌ها اختصاص داده شد. برای اختصاص دادن مفاصل پلاستیک به المان‌ها، از مفاصل پلاستیک خودکار نرم افزار SAP2000 استفاده شد. مفاصل پلاستیک ستون‌ها دوتا مفصل از نوع P-M3 در فواصل ۰/۰۵ و ۰/۹۵ بر اساس جدول ۶-۹، ASCE41-13 اختصاص داده شد. مفاصل پلاستیک تیرها دوتا مفصل از نوع M3 در فواصل ۰/۰۵ و ۰/۹۵ بر اساس جدول ۶-۹، ASCE41-13 اختصاص داده شد. مفاصل پلاستیک مهاربندها یک مفصل پلاستیک محور P اختصاص داده شد. در مدل‌های قاب خمشی همراه با میراگر تسلیمی U-شکل اعضای که عضو مشترکی با دهانه‌های که میراگر ندارند مطابق مفاصل قاب خمشی تعریف شد. برای رفتار میراگر، رفتار خطی نیرو-جابجایی در نظر گرفته شده است. اثرات P-Delta در تحلیل NTHA به روش انتگرال گیری مستقیم لحاظ شد. برای تعریف سطوح عملکردی نیز از FEMA 356 استفاده شده است. در جدول (۳) جزئیات دررفت (IDR) و دررفت ماندگار (RIDR) ارائه شده اند. برای آنکه امکان مقایسه و تأثیر گذاری توالی با تک لرزه (لرزه اصلی) وجود داشته باشد، کلیه تحلیل‌ها یکبار برای لرزش اصلی (Main-Shock) و بار دیگر برای توالی لرزه‌ای (Main-Shock After-Shok) انجام شده است.

جدول (۳): مقادیر IDR و RIDR مربوط به سطوح عملکردی مختلف بر اساس FEMA356

پارامتر	سطح عملکرد		
	استفاده بی‌وقفه (IO)	ایمنی جانی (LS)	آستانه فروریزش (CP)
IDR (%)	0.7	2.5	5
RIDR (%)	-	0.7	5

## ۲-۴- صحت سنجی

در این مقاله جهت ارزیابی صحیح از صحت نتایج از مطالعه مقاله (باقری و همکاران، ۲۰۱۵) صحت سنجی انجام شد. قاب و میراگر صحت سنجی در نرم‌افزار SAP2000 ساخته شده است. مدل هاس سازه‌ای به صورت دویعدی و همگی از نوع قاب خمشی فولادی دارای دهانه ۵ متری است. لازم به ذکر است در مقاله مورد نظر هیچ بحثی در مورد مقیاس نمودن شتاب‌نگاشت‌ها نشده است به همین دلیل جهت انجام روند تحلیل شتاب‌نگاشتی که از منظر شکل شباهت بیشتری داشته (Kobe) انتخاب شده است. میراگرهای جاری شونده U-شکل استفاده شده در مقاله از دو قطعه خمیده در مقابل یکدیگر تشکیل شده است. هر قطعه از صفحه ای فلزی به ابعاد مقطع عرضی ۱۰×۱۰۰ میلی متر و شعاع انحنای ۵۰ میلی متر ساخته شده است. رفتار میراگر خطی است. برای میراگر سختی برابر ۲۰۰۰۰ کیلوگرم/سانتی متر و نیروی تسلیم ۹۲۴۷ کیلوگرم است تا نقطه تسلیم به صورت الاستیک عمل کرده و پس از آن سختی برابر ۰/۰۱ برابر سختی ناحیه الاستیک به کار خود ادامه دهد. در شکل (۳) منحنی‌های هیستریزس تحلیل انجام شده و مقاله (باقری و همکاران، ۲۰۱۵) در قالب یک نمودار ترسیم شده اند. با دقت بسیار می‌توان مشاهده کرد که منحنی ای هیستریزس تطابق مطلوبی با یکدیگر داشته و میزان خطا در مدلسازی بسیار پایین بوده است که نشان دهنده صحت مدلسازی های انجام شده در این مقاله است. مقایسه نتایج برش پایه و نتایج جابه جایی افقی بام در تحلیل انجام شده و مدل باقری و همکاران (۲۰۱۵) در جدول (۴) و (۵) ارائه شده است.



شکل (۳): منحنی هیستریزس بدست آمده از تحلیل انجام شده و تحلیل انجام شده توسط (باقری و همکاران، ۲۰۱۵)

جدول (۴): مقایسه نتایج برش پایه در تحلیل انجام شده و مدل مقاله (باقری و همکاران، ۲۰۱۵)

برش پایه در تحلیل انجام شده (Ton)	برش پایه در مقاله باقری و همکاران (۲۰۱۵) (Ton)	درصد خطا
۱۰۹	۱۱۲	٪۲/۷

جدول (۵): مقایسه نتایج جابه‌جایی افقی طبقه بام در تحلیل انجام شده و مدل مقاله (باقری و همکاران، ۲۰۱۵)

جابه‌جایی افقی طبقه بام در تحلیل انجام شده (cm)	جابه‌جایی افقی طبقه بام در مقاله باقری و همکاران (۲۰۱۵) (cm)	درصد خطا
۲۵/۶	۲۶/۱	٪۱/۸۵

### ۳- بحث و بررسی

#### ۳-۱- میانگین بیشینه برش پایه

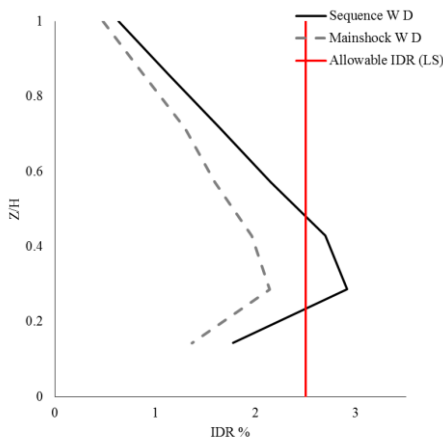
همواره در استفاده از میراگرهایی غیرفعال که علاوه بر میرایی، سختی هم دارند این نگرانی هست که با افزایش سختی سازه، نیروی برش پایه در حضور میراگر افزایش و یا حداقل بدون تغییر باقی بماند. برای کنترل تأثیر احتمالی میراگر بر برش پایه، در جدول (۶) متوسط بیشینه برش پایه برای دو حالت لرزش اصلی و توالی لرزه‌ای در دو سازه با بدون میراگر U نمایش داده شده است. برای اساس، برش پایه قاب ۷ طبقه در حالت استفاده از میراگر از برش پایه در حالت بدون میراگر بیشتر می‌باشد که دلیل آن افزایش سختی و کاهش پیروی قالب در حالت وجود میراگر است. این میزان در بدترین حالت ۴۴ درصد و به طور میانگین ۲۸ درصد افزایش یافته است. علاوه بر آن درصد تغییرات برش پایه تحت سناریوی متوالی نسبت به سناریوهای منفرد در دو حالت با و بدون میراگر در حدود ۷ درصد افزایش داشته که نشان دهنده اثر فزاینده پدیده توالی لرزه‌ای بر برش پایه قاب ۷ طبقه است.

جدول (۶): مقایسه نتایج جابه‌جایی افقی طبقه بام در تحلیل انجام شده و مدل مقاله (باقری و همکاران، ۲۰۱۵)

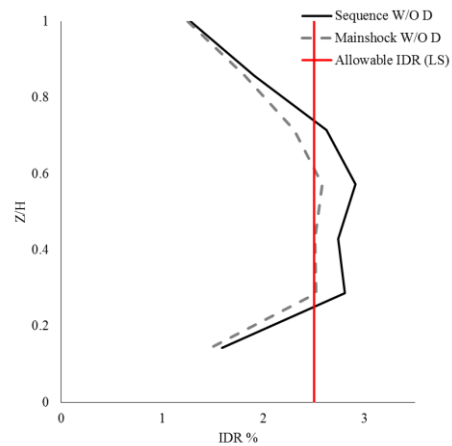
نوع زلزله	برش پایه در سازه بدون میراگر (Ton)	برش پایه در سازه با میراگر (Ton)	درصد تغییرات
میانگین لرزش اصلی	۹۵	۱۲۱	٪۲۹
میانگین توالی لرزه‌ای	۱۰۰	۱۳۰	٪۳۰
درصد تغییرات	٪۷	٪۶/۷	

#### ۳-۲- بیشینه تغییر مکان نسبی گذرا و ماندگار بین طبقات

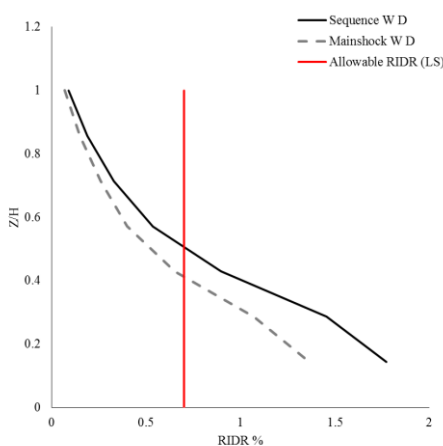
در قسمت اول از این بخش اثر لرزش اصلی و توالی لرزه‌ای بر توزیع دررفت گذرا و ماندگار بررسی شده است. هدف از این قسمت اینکه مشخص شود در دو حالت با و بدون میراگر توالی لرزه‌ای نسبت به لرزش اصلی چه تأثیری بر بیشینه پاسخ گذرا و ماندگار خواهد گذاشت. بدین منظور، شکل (۴) قسمت الف و ب، توزیع IDR را در دو حالت با و بدون میراگر تسلیمی U-شکل در قاب ۷ طبقه نشان می‌دهد. در حالتی که از میراگر استفاده نشده است بیشینه IDR در حالت توالی از لرزش اصلی بیشتر بوده و از معیار ایمنی جانی فراتر رفته است. اما استفاده از میراگر IDR را در هر دو حالت توالی و لرزش اصلی کاهش داده است. بعلاوه استفاده از میراگر باعث شد در حالت لرزش اصلی معیار ایمنی جانی تأمین شود. در شکل (۴) قسمت ج و د، تغییر نسبی ماندگار بین طبقات (RIDR) در دو حالت قاب به همراه میراگر و عدم وجود میراگر نمایش داده شده است. از نمودارها می‌توان برداشت کرد در هر دو حالت پدیده توالی لرزه‌ای، تغییر مکان نسبی باقی مانده بین طبقات افزایش یافته که این افزایش در حالت استفاده از میراگر بیشتر از عدم استفاده از میراگر بوده است. حداکثر جابه‌جایی ماندگار بام در حالت استفاده از میراگر از حالت بدون میراگر کمتر بوده که این امر بیانگر تأثیر مثبت استفاده از میراگرهای تسلیمی U-شکل در کاهش جابه‌جایی سازه است. این میانگین در زلزله‌های منفرد برابر ۳۲٪ و برای سناریوهای متوالی حدود ۲۳٪ است. درصد تغییرات جابه‌جایی ماندگار بام در مدل ۷ طبقه با میراگر در توالی لرزه‌ای چیزی حدود ۲۸٪ و بدون میراگر ۱۲٪ است.



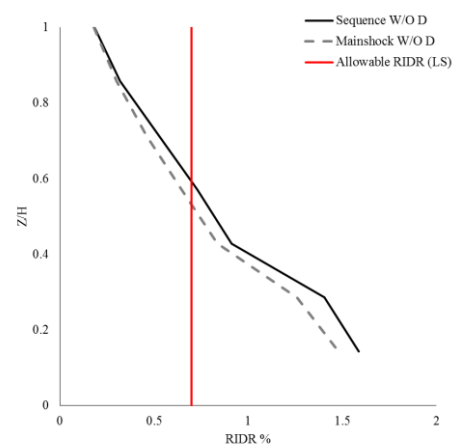
(ب): تغییر مکان نسبی بین طبقات (با میراگر)



(الف): تغییر مکان نسبی بین طبقات (بدون میراگر)



(د): تغییر مکان نسبی ماندگار بین طبقات (با میراگر)

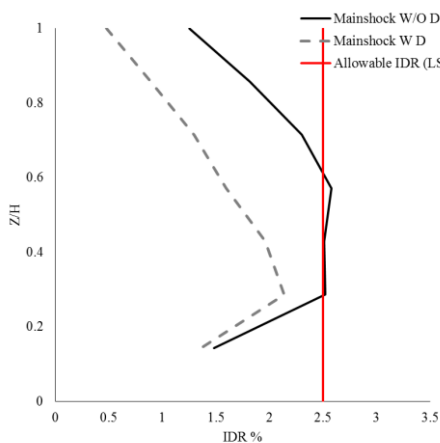


(ج): تغییر مکان نسبی ماندگار بین طبقات (بدون میراگر)

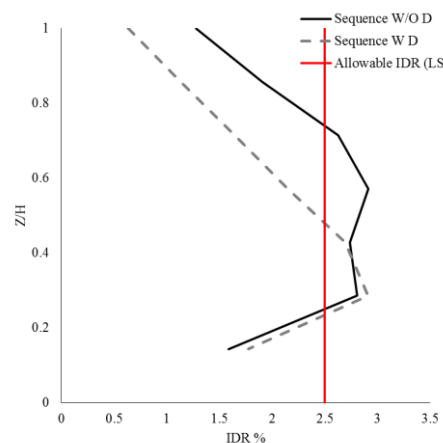
شکل (۴): نمودار IDR و RIDR در مدل‌های ۷ طبقه (مقایسه سناریوهای زلزله منفرد و متوالی)

برای آنکه بتوان تأثیر استفاده از میراگر را بر تغییر پاسخ سازه‌ها در دو حالت لرزش اصلی و توالی بررسی کرد، شکل (۵) ارائه شده است. شکل (۵) تغییر مکان نسبی و تغییر مکان نسبی ماندگار بین طبقات در مدل‌های قاب ۷ طبقه تحت سناریوهای لرزه‌ای منفرد و متوالی به طور

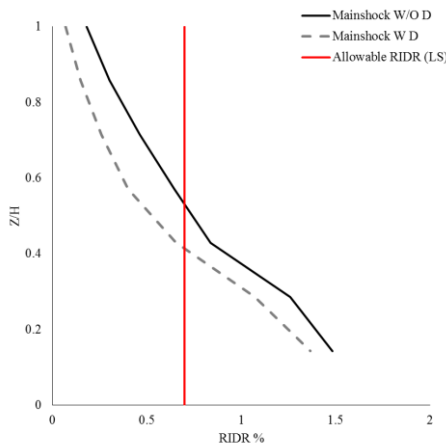
معجزا نشان می‌دهد. با توجه به نمودار الف و ب در شکل (۵) می‌توان دید که در هر دو حالت، استفاده از میراگر تغییر مکان نسبی بین طبقات را کاهش داده است که این کاهش تحت شرایط سناریوهای لرزه‌ای منفرد بیشتر از حالت متوالی است. اگرچه در حالت لرزش اصلی در هر دو حالت با و بدون میراگر حد ایمنی جانبی تأمین شده است اما در حالت اعمال توالی لرزه‌ای بیشینه IDR در برخی طبقات از حد ایمنی جانبی فراتر رفته است و استفاده از میراگر نتوانسته اند این معیار را تأمین نماید. علاوه بر آن با دقت در نمودار ج و د شکل (۵)، که به ترتیب مربوط به تغییر مکان نسبی ماندگار بین طبقات تحت سناریوهای لرزه‌ای متوالی و منفرد است، نتیجه گرفت که در هر دو حالت استفاده از میراگر، تغییر مکان نسبی ماندگار بین طبقات را کاهش داده است که این کاهش تحت سناریوهای لرزه‌ای منفرد بیشتر از حالت متوالی است اما در هر دو حالت معیار ایمنی جانبی FEMA 356 تأمین نشده است.



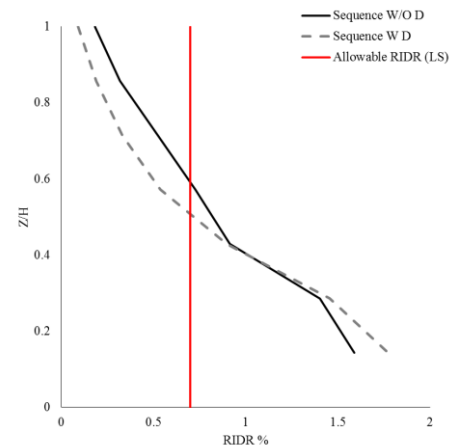
(ب): تغییر مکان نسبی بین طبقات (لرزش اصلی)



(الف): تغییر مکان نسبی بین طبقات (توالی لرزه‌ای)



(د): تغییر مکان نسبی ماندگار بین طبقات (لرزش اصلی)



(ج): تغییر مکان نسبی ماندگار بین طبقات (توالی لرزه‌ای)

شکل (۵): نمودار IDR و RIDR در مدل‌های ۷ طبقه (مقایسه حالت با و بدون میراگر)

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگر تسلیمی U-شکل متأثر از زلزله‌های متوالی حوزه نزدیک گسل بررسی شده است. بدین منظور قاب ۷ طبقه با تعداد دهانه یکسان مجهز به میراگر تسلیم شونده U-شکل بر اساس مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان با رعایت کلی ضوابط طراحی لرزه‌ای طراحی گردیده است. در ادامه قاب ۷ طبقه در برابر ۵ زلزله متوالی ساخته شده به روش تصادفی پس از همپایه سازی به روش آیین نامه ای استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، با استفاده از تحلیل NTHA مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل به شرح زیر جمع بندی می‌شوند:



- ۱) استفاده از میراگر در هر دو حالت لرزش اصلی و توالی لرزه‌ای باعث شد نیروی برش پایه افزایش یابد که دلیل آن افزایش سختی و کاهش زمان تناوب سازه است. این افزایش به طور میانگین ۳۰٪ برآورد شده است.
- ۲) به‌طور کلی پاسخ سازه (با یا بدون میراگر) در برابر توالی لرزه‌ای نسبت به لرزش اصلی افزایش داشته است؛ اما افزایش پاسخ در سازه با میراگر نسبت به سازه اولیه کمتر بوده و به عبارتی میراگر تأثیر مطلوبی بر کاهش تأثیر توالی لرزه‌ای داشته است.
- ۳) تأثیر میراگر بر کاهش بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات در دو حالت لرزش اصلی و توالی لرزه‌ای مشهود است به‌نحوی که با افزودن میراگر در هر دو حالت معیار LS مندرج در FEMA 356 تأمین شده است.
- ۴) استفاده از میراگر باعث شد بیشینه دررفت ماندگار بین طبقه‌ای در هر دو سناریوی لرزش اصلی و توالی لرزه‌ای کاهش یابد. اگرچه تأثیر میراگر بر کاهش دررفت ماندگار در توالی لرزه‌ای کمتر از لرزش اصلی است و همواره قاب‌ها نتوانسته‌اند معیار LS مندرج در FEMA 356 را برآورده نمایند.

## ۵- مراجع

- دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود. (۱۳۹۲). نشریه شماره ۳۶۰. دفتر امور فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. تهران. ایران.
- شاه ولی کوه شوری، ر. سیاه پلو، ن. (۱۳۹۶). تأثیر فرم‌های مهاربندی (هم محور و برون محور) بر عملکرد قاب خمشی فولادی در برابر خرابی پیش رونده. کارشناسی ارشد. مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان.
- روشنی، ج. باقری، س. (۱۳۹۷). تأثیر شرایط اتصال میراگرهای فلزی U-شکل بر رفتار چرخه‌ای آن‌ها، نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، تهران، ایران.
- شجاعی فر، س. ز. سیاه پلو، ن. (۱۳۹۷). ارتقاء عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی فولادی در برابر نزدیک گسل. کارشناسی ارشد. مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان.
- سلحشور دورکی، م. رهگذر، م. ع. (۱۳۹۸). ارزیابی ضریب رفتار سازه‌های مسلح به میراگرهای U-شکل. کارشناسی ارشد. مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان.
- بخش پور، ط. معصوم نژاد، م. (۱۴۰۱). بررسی عملکردی استفاده از میراگرهای فلزی جاری شونده U-شکل در ساختمان‌های بتنی نامنظم در ارتفاع. *مجله علمی-پژوهشی مهندسی عمران مدرس*، تهران، ایران.
- مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی. (۱۴۰۱). مقررات ملی ساختمان. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان. تهران. ایران.
- 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. *Journal Structures*, 3, 163-171.
- Zhang, Y. Li, Z. Zhao, W. Li, R. & Li, J. A. (2015). A performance study of beam column connections of self-centering steel frame with U-shaped steel dampers. *Advanced Steel Construction*, 12, 446-465.
- Ene, D. Kishiki, S. Yamada, S. Jiao, Y. Konishi, Y. Terashima, M. & Kawamura, N. (2016). Experimental study on the bidirectional inelastic deformation capacity of U-shaped steel dampers for seismic isolated buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(2), 173-192.
- Khatibinia, M. Jalapour, M. & Gharebaghim S. (2019). Shape optimization of U-shaped steel dampers subjected to cyclic loading using an efficient hybrid approach. *Engineering Structures*, 197, 108874.
- Taiyari, F. Mazzolani, F. M. & Bagheri, S. (2019). A proposal for energy dissipative braces with U-shaped steel strips. *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 110-122.
- Rahnavard, R. Rebelo, C. Craveiro, H. D. & Napolitano. (2020). Numerical investigation of the cyclic performance of reinforced concrete frames equipped with a combination of a rubber core and a U-shaped Metallic damper. *Engineering Structures*, 225, 111307.