

## Numerical Investigation of the Effect of Shear Links with Low Yield Strength Steel on the Seismic Performance of Concrete Frames

Kambiz Cheraghi<sup>1</sup>, Mehrdad RasouliTabar<sup>2</sup>, Reza Khaleghi<sup>3</sup>

1- MSc. of Structural Engineering, Civil Engineering, Department, Razi University, Kermanshah, Iran.

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, IsG.C., Islamic Azad University, Islamabad Gharb, Iran.

3- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Ker.C., Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

### ABSTRACT

One of the most effective strategies for controlling the seismic response of structures is the use of yielding dampers, which, by quickly entering the plastic region, absorb a significant portion of the earthquake energy. In this study, the effect of shear links on the performance of concrete structures was investigated numerically. First, the numerical model was validated using the results of two experimental specimens. To calculate the elastic stiffness and the maximum strength of the shear link, 18 numerical analyses were conducted, and the corresponding force-displacement diagrams were extracted. Subsequently, approximate equations for the elastic stiffness and maximum strength of the shear link were developed through curve fitting based on the numerical results. The effect of these shear links on the behavior of concrete frames was then evaluated using the pushover analysis method. The main variable of the model was the ratio of the stiffness of the shear link to the stiffness of the bare frame. The model outputs included lateral stiffness and strength, energy absorption capacity, and ductility of the frame. The results indicated that if the ratio of the elastic stiffness of the shear link to the initial frame is less than 50, the increase in the stiffness and strength of the frame equipped with the link is approximately equal to the sum of the stiffness and strength of the link and the initial frame. Furthermore, when this ratio is equal to 50, the ductility and energy absorption capacity of the frame increase by factors of 3 and 2.8, respectively. These results suggest that shear links not only improve the seismic behavior of concrete frames but also present an effective option for enhancing structural performance in earthquake-resistant design.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.519992.3714

\*Corresponding author: Reza Khaleghi  
Email address: re.khaleghi@iau.ac.ir

### ARTICLE INFO

Receive Date: 13 May 2025

Revise Date: 04 August 2025

Accept Date: 31 August 2025

### Keywords:

Yielding Damper

Shear Link

Concrete Frame

Numerical Analysis

Pushover Analysis

Seismic Performance

Energy Dissipation

## بررسی عددی تاثیر لینک‌های برشی دارای فولاد حدتسلیم پایین بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی

کامبیز چراغی<sup>۱</sup>، مهرداد رسولی تبار<sup>۲</sup>، رضا خالقی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اسلام آباد غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلام آباد غرب، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

### چکیده

یکی از مؤثرترین راه‌کارهای کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، استفاده از میراگرهای تسلیم‌شونده است که با ورود سریع به ناحیه پلاستیک، سهم عمده‌ای از انرژی زلزله را جذب می‌کنند. در این تحقیق، تأثیر لینک‌های برشی بر عملکرد سازه‌های بتنی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. در گام نخست، مدل عددی با استفاده از نتایج دو نمونه آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. برای محاسبه سختی الاستیک و مقاومت حداکثر لینک برشی، ۱۸ تحلیل عددی انجام شد و دیاگرام نیرو-جابجایی آن استخراج گردید. در ادامه، معادلات تقریبی برای سختی الاستیک و مقاومت حداکثر لینک برشی، با استفاده از روش برازش منحنی مبتنی بر نتایج عددی توسعه یافتند. سپس تأثیر این لینک‌های برشی بر رفتار قاب‌های بتنی با استفاده از روش بارافزون ارزیابی شد. متغیر اصلی مدل، نسبت سختی لینک برشی به سختی قاب تنها بود. خروجی‌های مدل شامل سختی و مقاومت جانبی، ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری قاب بودند. نتایج نشان دادند که اگر نسبت سختی الاستیک لینک برشی به قاب اولیه کمتر از ۵۰ باشد، افزایش سختی و مقاومت قاب مجهز به لینک تقریباً برابر با مجموع سختی و مقاومت لینک و قاب اولیه خواهد بود. همچنین، هنگامی که این نسبت برابر با ۵۰ باشد، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی قاب به ترتیب ۳ و ۲/۸ برابر افزایش می‌یابد. این نتایج بیانگر آن است که لینک‌های برشی نه تنها باعث بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتنی می‌شوند، بلکه به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر برای ارتقاء عملکرد سازه‌ها در طراحی مقاوم در برابر زلزله قابل مطرح شدن هستند.

کلمات کلیدی: میراگر تسلیمی، لینک برشی، قاب بتنی، تحلیل عددی، تحلیل بارافزون، رفتار لرزه‌ای، جذب انرژی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.519992.3714	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.519992.3714	۱۴۰۵/۰۱/۳۱	۱۴۰۴/۰۶/۰۹	۱۴۰۴/۰۶/۰۹	۱۴۰۴/۰۵/۱۳	۱۴۰۴/۰۲/۲۳
		رضا خالقی			*نویسنده مسئول:	
		<a href="mailto:re.khaleghi@iaau.ac.ir">re.khaleghi@iaau.ac.ir</a>			پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

ارتقاء عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها همچنان یکی از چالش‌های اصلی در مناطق زلزله‌خیز محسوب می‌شود. در چند دهه اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری‌های کنترل سازه‌ای به منظور بهبود عملکرد در برابر زلزله صورت گرفته است [۱]. فناوری کنترل غیرفعال به دلیل عملکرد مستقل از منابع انرژی خارجی، به طور گسترده در مهندسی سازه پذیرفته شده است [۲، ۳]. این میراگرها بدون نیاز به منابع انرژی خارجی و به صورت خودکار با آغاز زلزله فعال می‌شوند. این رویکرد به طور مؤثری نیاز به اتلاف انرژی غیرالاستیک در اجزای سازه‌ای مانند ستون‌ها، تیرها و اتصالات را کاهش می‌دهد. میراگرهای غیرفعال بر اساس نوع عملکردشان به دسته‌های مختلفی از جمله میراگرهای ویسکوز، ویسکوالاستیک، اصطکاکی و فلزی تقسیم می‌شوند. از میان این‌ها، میراگرهای فلزی در کاربردهای مهندسی بسیار محبوب شده‌اند. این محبوبیت به دلیل ساختار ساده، هزینه پایین، سهولت در تولید، قابلیت تعویض آسان، عملکرد پایدار و قابلیت اطمینان طولانی مدت آن‌ها است [۴-۶]. در این میان، توسعه میراگرهای فلزی با ویژگی‌های بهبودیافته مانند شکل‌پذیری بالا، هزینه ساخت پایین و قابلیت تعویض آسان، به یکی از محورهای اصلی تحقیقات لرزه‌ای تبدیل شده است.

در سال‌های اخیر، میراگرهای متعددی به عنوان جاذب انرژی پیشنهاد شده‌اند که هر یک دارای هندسه و جنس متفاوتی می‌باشند. ناکراش<sup>۱</sup> و همکاران [۷] پاسخ‌های لرزه‌ای یک ساختمان ۱۴ طبقه را در شرایط مختلف جانمایی میراگر فولادی X شکل بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که جانمایی بهینه میراگرها منجر به کاهش قابل توجه در جابه‌جایی، شتاب، نیروی برشی پایه و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود. این مطالعه نقش تعیین‌کننده محل نصب میراگرها در عملکرد لرزه‌ای سازه را تأکید می‌کند. چوکا<sup>۲</sup> و کریشنامورتی<sup>۳</sup> [۸] عملکرد لرزه‌ای میراگرهای فلزی X شکل و میراگرهای سیال ویسکوز را در قالب سازه‌های ۵، ۸ و ۱۰ طبقه و با آرایش‌های مختلف مقایسه کردند. میراگرهای ویسکوز در کاهش جابجایی نسبی بین طبقه‌ای عملکرد بهتری داشتند، در حالی که میراگرهای X شکل در کاهش نیروی برشی پایه مؤثرتر بودند. یافته‌ها نشان دادند که میراگرهای ویسکوز برای زلزله‌های با شتاب پایین و میراگرهای X شکل برای زلزله‌های با شتاب بالا مناسب‌تر هستند. در مجموع، استفاده از میراگرها در تمامی طبقات باعث کاهش جابجایی نسبی و اتلاف انرژی شد و قرارگیری آن‌ها در طبقات پایین در کاهش نیروی برشی پایه مؤثرتر بود. چراغی و همکاران [۹] به بررسی عملکرد میراگرهای آداس<sup>۴</sup> تحت اثر زلزله پرداختند. آنها روابطی برای محاسبه سختی، مقاومت و اتلاف انرژی این میراگر ارائه کردند. همچنین با تحلیل مدل‌های مختلف، تأثیر پارامترهای گوناگون را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد افزایش عرض و کاهش ارتفاع آن موجب افزایش سختی موثر و مقاومت حداکثر آن می‌شود. همچنین اثر نیروی محوری بر رفتار میراگرها شامل مقاومت نهایی و شکل‌پذیری بررسی شد. در مطالعات دیگر، میراگرهای نوآورانه‌ای همچون میراگر میله‌ای [۱۰]، میراگر آلومینیومی تسلیم‌شونده [۱۱]، میراگرهای U شکل [۱۲] و U شکل زاویه‌دار [۱۳] و میراگرهای فلزی دندان‌شانه‌ای [۱۴] در مطالعات گذشته جهت تقویت قاب‌های فولادی و بتنی پیشنهاد شده‌اند. ژائو و همکاران [۱۵] اثر لینک‌های برشی ساخته شده از فولاد کم‌مقاومت BLY160 را بررسی کرد. خواص مکانیکی مطلوب این فولاد باعث تسلیم‌پذیری زود هنگام و ظرفیت دوران پلاستیک بالای عضو می‌شود. بهبود عملکرد لرزه‌ای از طریق کاهش نسبت طول عضو و افزودن سخت‌کننده جانبی حاصل شد. ضرایب مقاومت اضافی بین ۱/۷۰ تا ۲/۰۲ گزارش شد. این نتایج حاکی از آن است که لینک‌های برشی ساخته شده از فولادهای کم‌مقاومت دارای پتانسیل بالایی در بهبود رفتار چرخه‌ای سازه‌ها هستند.

استفاده از مصالحی با شکل‌پذیری زیاد و مقاومت تسلیم کم، گزینه‌ای مطلوب برای ساخت میراگرهای تسلیم‌شونده محسوب می‌شود. تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی استفاده از فولادهای کم‌مقاومت در ساخت این نوع میراگرها انجام شده است که نتایج آن‌ها نشان‌دهنده رفتار مطلوب و شکل‌پذیری مناسب این نوع میراگرها می‌باشد. از جمله می‌توان به استفاده از فولادهای با حد تسلیم پایین در صفحات برشی [۱۶-۱۸]، که موجب بهبود رفتار چرخه‌ای و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی شده‌اند، اشاره کرد. همچنین در برخی مطالعات، از

<sup>1</sup> Nakrash

<sup>2</sup> Chukka

<sup>3</sup> Krishnamurthy

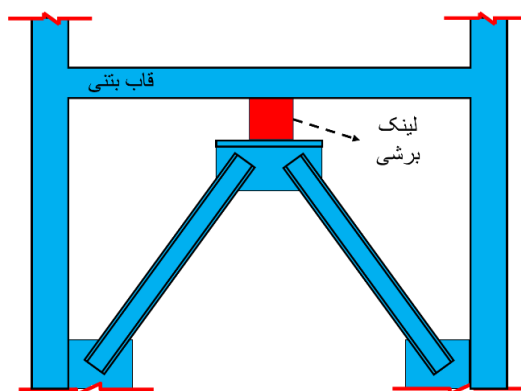
<sup>4</sup> ADAS(Added Damping and Stiffness)

مصالح آلومینیومی در طراحی و ساخت میراگرهای تسلیم‌شونده با هندسه‌های خاص نظیر میراگرهای خمشی یا U شکل استفاده شده است [۱۱، ۱۹] که این رویکرد نیز نتایج مطلوبی در بهبود شکل‌پذیری و کاهش پاسخ لرزه‌ای میراگر به همراه داشته است.

یکی از اصول کلیدی در طراحی سیستم‌های جاذب انرژی برای سازه‌های بتنی، انتخاب هوشمندانه مصالح است. قاب‌های بتن مسلح به طور کلی سیستم‌هایی با مقاومت بالا اما شکل‌پذیری محدود هستند. بنابراین، برای جلوگیری از شکست ترد و آسیب به اعضای اصلی سازه، لازم است عضو میراگر به عنوان یک «فیوز لرزه‌ای» عمل کند. این فیوز باید قبل از اینکه نیروها در قاب به حد آستانه آسیب برسند، تسلیم شده و با تغییر شکل‌های غیرالاستیک، انرژی را مستهلک نماید.

برای تحقق این هدف، ماده مورد استفاده در لینک برشی باید دارای مقاومت تسلیم پایین و شکل‌پذیری بسیار بالا باشد. فولاد کم‌مقاومت BLY160 به دلیل برخورداری از همین ویژگی‌ها، یعنی تنش تسلیم اسمی در حدود ۱۶۰ مگاپاسکال و ظرفیت بالای تغییر شکل پلاستیک [۲۰]، به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل در این تحقیق انتخاب شد. استفاده از فولادهای متداول ساختمانی با مقاومت تسلیم بالاتر، می‌توانست باعث شود که لینک برشی به جای عملکرد به عنوان یک فیوز، به یک عضو مقاوم تبدیل شده و نیروهای بزرگی را به قاب بتنی منتقل کند که این امر با فلسفه طراحی در تضاد است.

اگرچه مطالعات متعددی درباره میراگرهای تسلیمی انجام شده است، اما بررسی عددی لینک‌های برشی ساخته‌شده از فولاد حد تسلیم پایین در قاب‌های بتنی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از نوآوری‌های این تحقیق، بررسی استفاده از لینک‌های برشی تسلیمی با فولاد BLY160 برای تقویت قاب‌های بتنی است. بدین منظور، اثر این میراگرها در قاب بتنی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. ابتدا مدل عددی با نمونه‌های آزمایشگاهی (قاب بتنی و لینک برشی) صحت‌سنجی شد. سپس معادله‌ای تحلیلی برای پیش‌بینی مقاومت نهایی لینک برشی ارائه گردید. در ادامه، به منظور محاسبه سختی الاستیک لینک، ۱۸ تحلیل عددی انجام شد و معادله‌ای تقریبی برای سختی الاستیک پیشنهاد گردید که نتایج آن با تحلیل‌های عددی تطابق مناسبی داشت. جانمایی لینک برشی در قاب بتنی مطابق شکل ۱ و با الهام از مطالعات پیشین [۱۵، ۱۶، ۲۰] در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد سختی الاستیک و مقاومت نهایی مدل‌ها تا نسبت  $\alpha=50$  به صورت تقریباً خطی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. در نتیجه، نسبت سختی لینک برشی به قاب بتنی دارای اهمیت زیادی است که در این تحقیق به بررسی آن پرداخته شد. نتایج تحلیل‌های عددی شامل سختی الاستیک، مقاومت جانبی، اتلاف انرژی و شکل‌پذیری قاب بتنی تقویت‌شده با لینک برشی بوده است.



شکل ۱: قاب بتنی مجهز به لینک برشی.

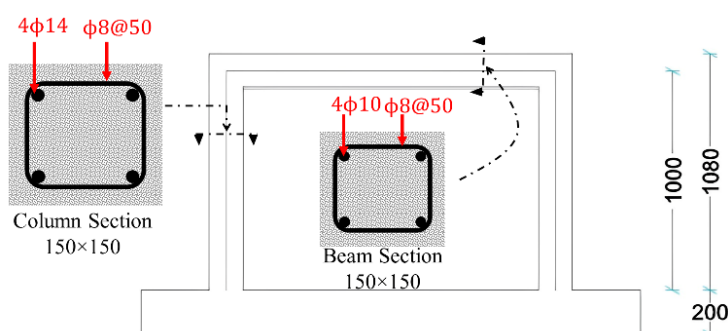
## ۲- صحت‌سنجی مدل عددی

اطمینان از دقت مدل عددی، گامی ضروری پیش از تحلیل‌های پارامتریک گسترده به شمار می‌آید. در این تحقیق، برای انجام تحلیل‌های عددی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. این بخش به تشریح فرایند صحت‌سنجی مدل‌های مورد استفاده می‌پردازد. یکی از الزامات اساسی برای اطمینان از صحت تحلیل‌های عددی، تطابق نتایج مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی معتبر است. در

روند صحت‌سنجی، مدل عددی به صورت جداگانه برای قاب بتنی و لینک برشی مورد تحلیل قرار گرفته که جزئیات آن در ادامه بیان شده است. بررسی مدل‌ها با بهره‌گیری از تحلیل استاتیکی<sup>۵</sup> غیرخطی صورت گرفته و در مدل‌سازی عددی، اثرات رفتار غیرخطی هندسی و تغییر شکل‌های بزرگ نیز لحاظ شده‌اند [۲۱].

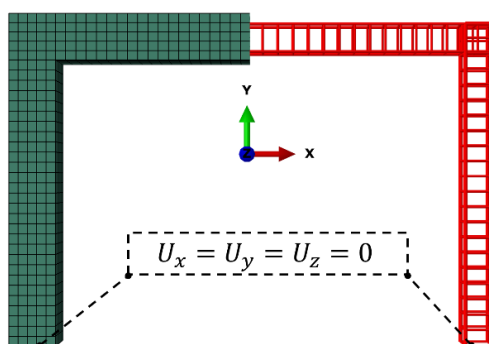
## ۲-۱ صحت‌سنجی قاب بتنی

صحت‌سنجی عددی قاب بتن‌آرمه بر اساس داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط تحملی‌رودسری و همکاران [۲۲] انجام شده است. ابعاد و مشخصات تیر و ستون این قاب در شکل ۲ قابل مشاهده است. این قاب با مقیاس ۱:۳ در شرایط آزمایشگاهی ساخته شده و تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته است. فونداسیون قاب نیز با استفاده از ۱۲ بولت به کف آزمایشگاه متصل شده است. همچنین در طول بارگذاری آزمایشگاهی هیچ‌گونه آسیبی در ناحیه فونداسیون گزارش نشده است.



شکل ۲: ابعاد و مشخصات نمونه آزمایشگاهی (واحد: میلی‌متر).

مدل‌سازی دقیق رفتار بتن، به ویژه در محدوده رفتار غیرخطی، اهمیت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد واقعی قاب‌های بتن‌آرمه دارد. برای مدل‌سازی بتن، از المان حجمی<sup>۶</sup> هشت‌گره‌ای (C3D8R) با سه درجه آزادی در هر گره استفاده شد. میلگردها نیز با استفاده از المان تیر<sup>۷</sup> (B31) مدل‌سازی شدند که شامل دو گره با شش درجه آزادی است. برای محاسبه جابجایی گره‌ها، از فرمول انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده گردید. مطابق تحلیل حساسیت اندازه‌مش برای بتن و میلگردها برابر با ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج این تحلیل‌ها در بخش صحت‌سنجی لینک برشی ارائه شده است. شکل ۳ شرایط مرزی و مش‌بندی مدل عددی قاب بتنی را نمایش می‌دهد.



<sup>5</sup> Static General

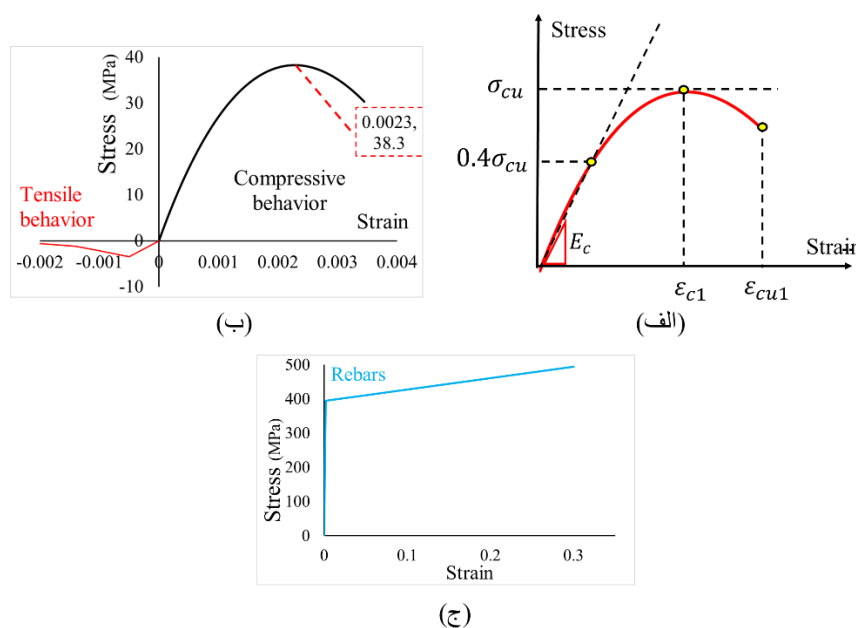
<sup>6</sup> Solid

<sup>7</sup> Beam

شکل ۳: مدل عددی و شرایط مرزی آن

منحنی تنش-کرنش بتن تحت فشار بر اساس پیشنهاد آیین‌نامه بتن اروپا<sup>۸</sup> [۲۳] و مطابق با شکل ۴ الف و معادلات ۱ تا ۳ ارائه شده است. در این معادلات،  $\sigma_c$  به عنوان تنش فشاری بتن،  $\epsilon_c$  به عنوان کرنش متناظر با تنش فشاری،  $\sigma_{cu}$  نشان‌دهنده مقاومت فشاری نهایی بتن،  $\epsilon_{cu1}$  کرنش متناظر با مقاومت فشاری نهایی،  $\epsilon_{cu1}$  کرنش نهایی بتن و  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن تعریف می‌شوند. در معادله ۱ پارامترهای  $\eta$  و  $K$  به ترتیب با استفاده از ۳ و ۲ قابل محاسبه می‌باشند.

بر اساس این آیین‌نامه، مقادیر کرنش متناظر با تنش حداکثر و کرنش نهایی بتن به ترتیب برابر با ۰/۰۰۲۳ و ۰/۰۰۳۵ پیشنهاد شده‌اند. مقاومت فشاری بتن مورد استفاده در آزمایش‌ها برابر با ۳۸/۳ مگاپاسکال گزارش شده است. همچنین، نمودار تنش-کرنش قاب بتنی مدل عددی نیز به صورت مشابه و مطابق با شکل ۴ ب استخراج شده است. در این مدل، مقاومت کششی بتن معادل یک‌دهم مقاومت فشاری آن فرض شده است که با واقعیت رفتاری بتن در کشش هماهنگی دارد. برای مدل‌سازی رفتار میلگردها در مدل عددی، از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده و منحنی تنش-کرنش میلگردها در شکل ۴ ج ارائه شده است. رفتار مصالح بتن در این مطالعه با بهره‌گیری از نظریه پلاستیسیته همراه با تخریب بتن<sup>۹</sup> مدل‌سازی شده است که امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار غیرخطی و آسیب‌پذیری بتن تحت بارگذاری را فراهم می‌سازد. همچنین، پارامترهای الاستیک و پلاستیک بتن به کاررفته در مدل عددی در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۲۴]. این رویکرد مدل‌سازی به دلیل دقت بالا در پیش‌بینی رفتار واقعی بتن تحت بارهای لرزه‌ای و غیرخطی، یکی از روش‌های معتبر در تحلیل سازه‌های بتن آرمه محسوب می‌شود [۲۵].



شکل ۴: (الف) نمودار پیشنهادی آیین‌نامه بتن اروپا برای تنش-کرنش بتن تحت فشار (ب) نمودار تنش-کرنش بتن در فشار و کشش در مدل عددی (ج) نمودار تنش-کرنش میلگردها در مدل عددی

$$\sigma = \sigma_{cu} (k\eta - \eta^2 / (1 + (k - 2)\eta)) \quad (1)$$

$$\eta = \epsilon / \epsilon_{c1} \quad (2)$$

$$k = 1.05 E_c \epsilon_{c1} / \sigma_{cu} \quad (3)$$

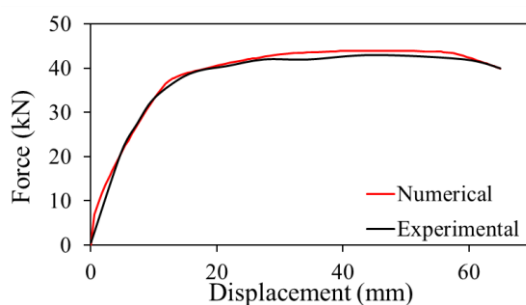
<sup>8</sup> Eurocode 2

<sup>9</sup> Concrete Damage Plasticity

جدول ۱ پارامترهای الاستیک و پلاستیک بتن

مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	زاویه اتساع <sup>۱۰</sup>	خروج از مرکزیت پتانسیل جریان <sup>۱۱</sup>	K	پارامتر ویسکوزیته
۳۴	۰/۱۹	۳۱	۰/۱	۰/۶۷	۰/۰۰۱

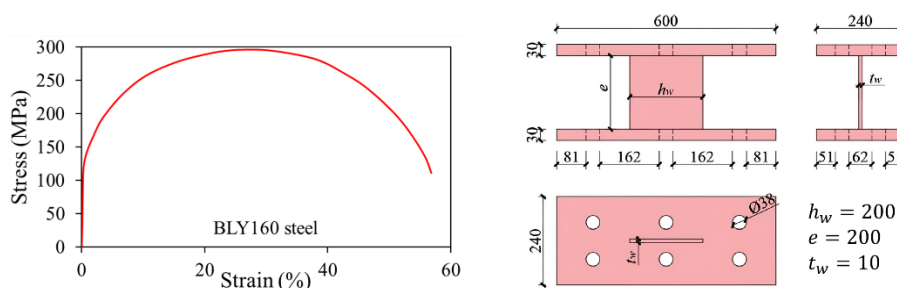
مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی، معیاری کلیدی برای ارزیابی کیفیت صحت‌سنجی مدل محسوب می‌شود. تحلیل مدل به صورت کنترل-جابجایی انجام شد و نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل عددی با نتایج استخوانی<sup>۱۲</sup> آزمایشگاهی مقایسه گردید که در شکل ۵ نمایش داده شده است. نتایج حاکی از آن است که تطابق مناسبی میان پاسخ عددی و داده‌های تجربی وجود دارد. این هم‌خوانی، بیانگر دقت مناسب مدل‌سازی، انتخاب پارامترهای مصالح، و نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در شبیه‌سازی عددی می‌باشد. اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از ساده‌سازی‌های اعمال شده در مدل‌سازی عددی مانند فرض همگن بودن مصالح و در نظر نگرفتن ترک‌های موضعی باشد. همچنین، عوامل آزمایشگاهی مانند خطاهای اندازه‌گیری و ساخت نیز می‌توانند باعث ایجاد تفاوت در نتایج شوند.



شکل ۵: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی قاب بتنی [۲۲]

## ۲-۲ صحت‌سنجی لینک برشی تسلیمی

صحت‌سنجی لینک برشی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط ژوانگ<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۰] انجام شد. ابعاد این نمونه در شکل ۶ الف نمایش داده شده است. در شکل ۶ ب، نمودار تنش-کرنش فولاد BYL160 که در ساخت این میراگر مورد استفاده قرار گرفته، ارائه شده است. مقادیر گزارش شده برای مدول یانگ، تنش تسلیم و تنش نهایی این لینک برشی به ترتیب برابر با ۲۰۳ گیگاپاسکال، ۱۵۴ مگاپاسکال و ۲۹۵ مگاپاسکال می‌باشد.



<sup>10</sup> Dilatation Angle

<sup>11</sup> Flow potential eccentrically

<sup>12</sup> BackBone

<sup>13</sup> Zhuang

(الف)

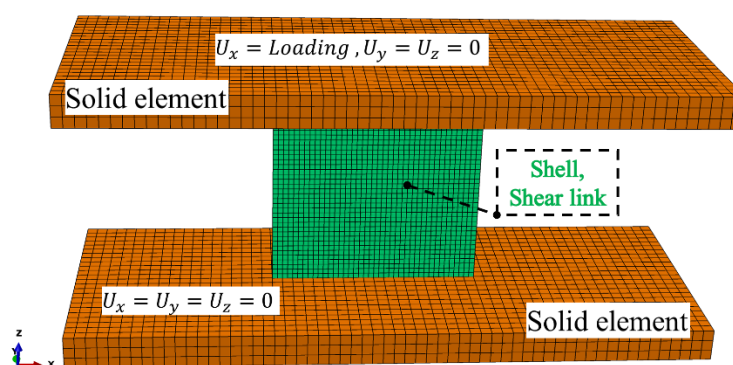
(ب)

شکل ۶: (الف) ابعاد لینک برشی [۲۰] (واحد: میلی‌متر) (ب) نمودار تنش- کرنش مصالح لینک برشی

با توجه به اهمیت رفتار پس از کمانش در عملکرد لینک‌های برشی، انتخاب نوع المان دارای ظرفیت مدل‌سازی کمانش و رفتار غیرخطی ضروری بود. برای شبیه‌سازی لینک برشی، از المان صفحه<sup>۱۴</sup> ایزوپارامتریک چهارگره‌ای (S4R) استفاده شد [۲۱]. هر گره از این المان دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی می‌باشد. این نوع المان به‌ویژه در مدل‌سازی کمانش کلی و موضعی صفحات نازک عملکرد مناسبی دارد [۲۶]. شکل ۷ شرایط مرزی و جزئیات این مدل نشان داده شده است.

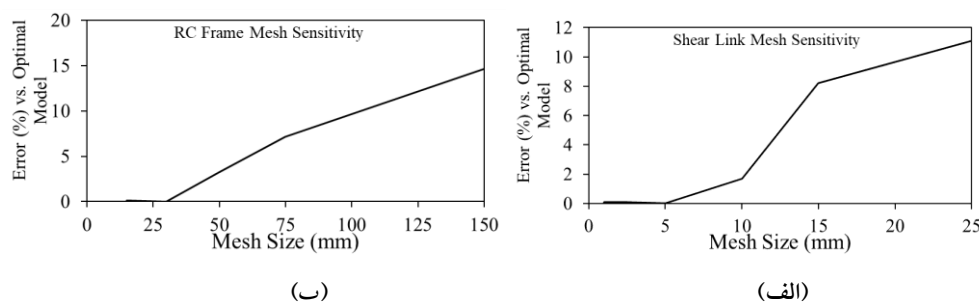
در این تحقیق، به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی و افزایش دقت نتایج، اهمیت مش‌بندی مناسب به طور ویژه مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور، تحلیل حساسیت ابعاد مش برای هر دو مدل قاب بتنی و لینک برشی به صورت جداگانه انجام و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شد. در این شکل، اختلاف نتایج مقاومت حداکثر مدل‌ها، با مدل بهینه نشان داده شده است. مطابق این شکل ابعاد مش بهینه برای قاب بتنی و لینک برشی به ترتیب ۳۰ میلی‌متر و ۵ میلی‌متر حاصل شده است. به طوری که ریزتر کردن ابعاد مش تاثیر ناچیزی بر نتایج داشته است.

مدل عددی به گونه‌ای تعریف شد که تغییر شکل‌های بزرگ، رفتار پس از کمانش و غیرخطی هندسی را نیز در بر گیرد. مقایسه دقیق رفتار عددی و آزمایشگاهی لینک برشی، امکان ارزیابی اعتبار معادلات پیشنهادی و مدل‌سازی در مراحل بعدی را فراهم می‌آورد. پس از تحلیل مدل عددی، نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد که در شکل ۹ نمایش داده شده است. نتایج عددی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارند. علت اصلی اختلاف جزئی مشاهده شده بین نتایج عددی و آزمایشگاهی لینک برشی را می‌توان به چند عامل نسبت داد. مهم‌ترین عامل، وجود نقص‌های هندسی اولیه<sup>۱۵</sup> در نمونه آزمایشگاهی است که باعث می‌شود رفتار کمانشی آن با مدل عددی که به صورت ایده‌آل و بدون نقص در نظر گرفته شده، متفاوت باشد. عامل دوم، تنش‌های پسماند<sup>۱۶</sup> ناشی از فرآیندهای برش و جوشکاری است که در شبیه‌سازی لحاظ نشده و می‌تواند بر مقاومت تسلیم موضعی تاثیر بگذارد. افزون بر این، تفاوت بین شرایط مرزی ایده‌آل (مانند گیرداری کامل) تعریف شده در نرم‌افزار و اتصالات فیزیکی در محیط آزمایشگاه که دارای مقداری انعطاف‌پذیری اجتناب‌ناپذیر هستند، نیز می‌تواند بخشی از این اختلاف را توجیه کند.

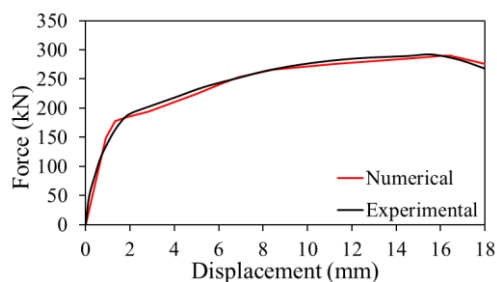


شکل ۷: شرایط مرزی و نوع المان در مدل عددی

<sup>14</sup> Shell<sup>15</sup> Initial Imperfections<sup>16</sup> Residual Stresses



شکل ۸ نتایج آنالیز حساسیت، میزان خطای نتایج مدل‌ها با ابعاد مش متفاوت بر مقاومت حداکثر (الف) لینک برشی (ب) قاب بتنی



شکل ۹: مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی لینک برشی

یکی از دلایل اصلی اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، وجود خطاهای ساخت از جمله تغییر شکل‌های اولیه در نمونه آزمایشگاهی است که می‌تواند موجب بروز رفتاری متفاوت نسبت به مدل عددی ایده‌آل گردد.

### ۳- بررسی عددی لینک برشی

در این بخش، مطالعات عددی انجام شده بر روی لینک برشی به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن ارائه شده است. به منظور اطمینان از قابلیت مقایسه نتایج، هندسه اولیه مدل تحلیل شده با مدل صحت‌سنجی شده یکسان در نظر گرفته شد. مدل تحلیل شده در این بخش مشابه با مدل نشان داده شده در شکل ۷ است، با این تفاوت که ابعاد آن به صورت متغیر در نظر گرفته شد. جدول ۲ مشخصات مدل‌های عددی شامل ابعاد ارتفاع (e)، عرض ( $h_w$ ) و ضخامت ( $t_w$ ) لینک برشی را ارائه می‌دهد. مدل‌های ارائه شده در جدول به همان روشی که مدل صحت‌سنجی شده تحلیل شده بود، مورد بررسی قرار گرفتند و تعدادی از نتایج آن‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نمودار دوخطی نتایج نیز بر اساس دستورالعمل FEMA [۲۷] ترسیم شد. دو پارامتر مهم در طراحی میراگرهای تسلیمی، مقاومت حداکثر و سختی الاستیک آنها است. این دو پارامتر نقش مهمی در طراحی آن در سازه ایفا می‌کنند. به طوری که مقاومت حداکثر باید به گونه‌ای باشد که پیش از اعضای اصلی تسلیم شود. همچنین سختی الاستیک نیز ارتباط مستقیم با سهم نیروی دمپر از نیروی وارده دارد [۲۴]. به منظور تسهیل فرآیند طراحی و کاهش زمان تحلیل‌های عددی، توسعه معادلات تخمینی بر مبنای نتایج تحلیل ضرورت داشت. به همین ترتیب برای تخمین ساده‌تر این دو نتایج لینک برشی، معادلاتی تقریبی بر اساس تکنیک برازش منحنی ارائه شد. در فرآیند تدوین معادلات تخمینی، ابتدا نحوه تاثیرگذاری مستقیم یا معکوس هر متغیر بر نتایج تحلیل مشخص شد. سپس متغیرهای دارای تاثیر مستقیم، در صورت معادله قرار داده شدند و متغیرهای دارای تاثیر معکوس در مخرج معادله. ضرایب این متغیرها به گونه‌ای محاسبه شدند که نتایج این معادلات با نتایج عددی دارای حداقل اختلاف باشد.

به منظور ارزیابی دقیق عملکرد لرزه‌ای مدل‌ها، از تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون استفاده شد. این تحلیل به روش کنترل جابجایی و با اعمال جابجایی جانبی یکنواخت و افزایشده به گره‌های تراز تیرها انجام گرفت. برای هر مدل، منحنی بارافزون که بیانگر تغییرات نیروی برشی پایه در مقابل تغییر مکان جانبی قاب است، استخراج گردید. روند بارگذاری تا زمانی ادامه یافت که کاهش قابل توجهی در مقاومت جانبی مدل مشاهده شود تا امکان بررسی رفتار پس از نقطه پیک، میزان شکل‌پذیری و مکانیزم‌های خرابی فراهم شود. استفاده از

این روش، محاسبه و مقایسه پارامترهای کلیدی عملکرد لرزه‌ای شامل سختی اولیه، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی را برای هر یک از مدل‌ها امکان‌پذیر ساخت.

پس از تحلیل مدل‌های عددی، سختی الاستیک یا شیب اولیه منحنی نیرو-جابجایی به همراه مقاومت حداکثر بر اساس نتایج شکل ۱۰ محاسبه شد. سپس معادلات تقریبی ۴ و ۵ به ترتیب برای محاسبه مقاومت حداکثر و سختی الاستیک آن‌ها ارائه شد. دقت معادلات تخمینی از طریق محاسبه شاخص خطای مطلق میانگین (MAPE) ارزیابی شده است. برای مقایسه نتایج عددی و تحلیلی، میانگین درصد خطای مطلق با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد [۹، ۲۸]. در این معادله، متغیر "N" نشان‌دهنده تعداد کل مدل‌ها است. مقدار خطای مطلق میانگین (MAPE) کمتر از ۴٪ به دست آمد که بیانگر تطابق مناسب میان نتایج عددی و معادلات تخمینی می‌باشد. شایان ذکر است که معادلات (۴) و (۵) بر پایه تحلیل‌های عددی انجام‌شده در این تحقیق توسعه یافته‌اند و کاربرد آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه است. این روابط صرفاً برای لینک‌های برشی با ابعاد هندسی و مشخصات مصالح (فولاد BLY160) در محدوده مورد بررسی این پژوهش معتبر بوده و تعمیم نتایج آن‌ها به مدل‌هایی با ابعاد یا مصالح متفاوت خارج از دامنه مطالعات حاضر، ممکن است با دقت لازم همراه نباشد.

جدول ۲ مشخصات مدل‌های عددی لینک برشی و نتایج مقاومت و سختی الاستیک آن

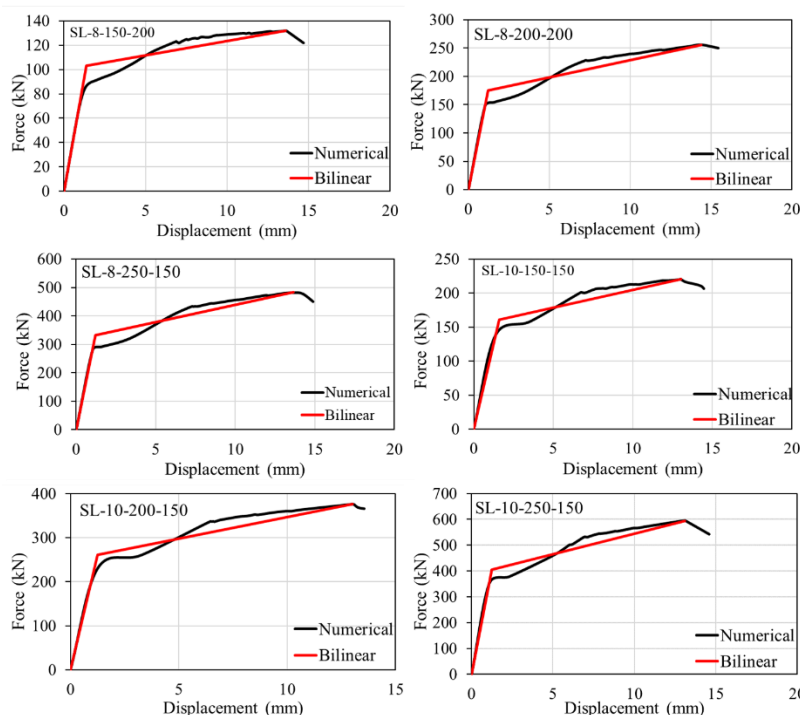
SL - t <sub>w</sub> - h <sub>w</sub> - e	سختی الاستیک مقاومت حداکثر ابعاد لینک برشی			(kN)	(kN/mm)		
	(mm)	(mm)	(mm)				
	t <sub>w</sub>	h <sub>w</sub>	e	معادله ۵ عددی	معادله ۴ عددی		
SL-8-150-150	۸	۱۵۰	۱۵۰	۱۷۶/۱	۱۷۷	۱۲۰/۲	۱۱۸
SL-8-150-200			۲۰۰	۱۳۲	۱۳۲/۸	۷۵/۸	۷۸/۹
SL-8-150-250			۲۵۰	۱۰۵/۶	۱۰۶/۲	۵۰/۴	۵۷/۷
SL-8-200-150	۲۰۰	۱۵۰	۳۱۷/۹	۳۱۴/۷	۱۷۹/۳	۱۷۶/۵	
SL-8-200-200			۲۰۰	۲۵۵/۸	۲۳۶	۱۲۰/۲	۱۱۸
SL-8-200-250			۲۵۰	۱۸۸/۳	۱۸۸/۸	۸۴/۶	۸۶/۳
SL-8-250-150	۲۵۰	۱۵۰	۴۸۲/۷	۴۹۱/۷	۲۳۷/۱	۲۴۱/۲	
SL-8-250-200			۲۰۰	۳۵۱/۶	۳۶۸/۸	۱۶۴/۶	۱۶۱/۳
SL-8-250-250			۲۵۰	۲۹۷/۱	۲۹۵	۱۲۰/۲	۱۱۸
SL-10-150-150	۱۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۲۰/۴	۲۲۱/۳	۱۵۰/۲	۱۴۷/۵
SL-10-150-200			۲۰۰	۱۷۶	۱۶۵/۹	۹۴/۸	۹۸/۶
SL-10-150-250			۲۵۰	۱۴۰/۲	۱۳۲/۸	۶۳	۷۲/۱
SL-10-200-150	۲۰۰	۱۵۰	۳۷۶/۲	۳۹۳/۳	۲۲۴/۱	۲۲۰/۶	
SL-10-200-200			۲۰۰	۲۸۶/۵	۲۹۵	۱۵۰/۲	۱۴۷/۵

SL-10-200-250	۲۵۰	۲۴۶/۱	۲۳۶	۱۰۵/۷	۱۰۷/۹
SL-10-250-150	۲۵۰	۱۵۰	۵۹۴/۵	۶۱۴/۶	۲۹۶/۴
SL-10-250-200	۲۰۰	۴۳۲/۴	۴۶۰/۹	۲۰۵/۸	۲۰۱/۶
SL-10-250-250	۲۵۰	۳۴۷/۱	۳۶۸/۸	۱۵۰/۲	۱۴۷/۵
MAPE			% ۳/۲		% ۳/۵

$$Vu_{(App.)} = 0.295 \times (t \times h^2) / 2e \rightarrow (kN) \quad (۴)$$

$$K_{(e, App.)} = 14.75 \times t \times (h/e)^{1.4} \rightarrow (kN/mm) \quad (۵)$$

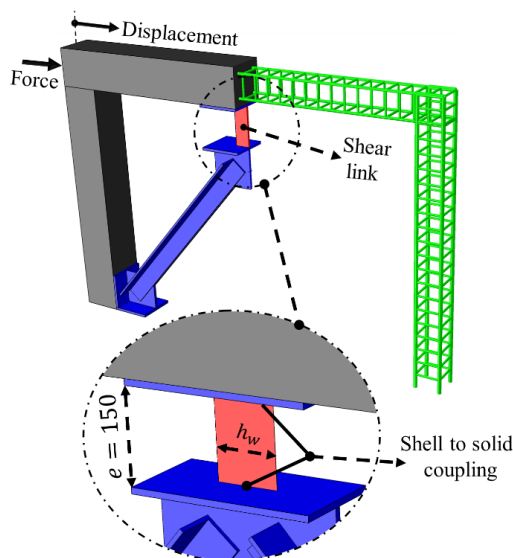
$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{|FEM_{(res_i)} - Analytical_{(res_i)}|}{FEM_{(res_i)}} \right) \quad (۶)$$



شکل ۱۰: چند نمونه از نتایج مدل های معرفی شده در جدول ۲ و منحنی دوخطی آن

#### ۴- تأثیر لینک برشی بر عملکرد لرزه‌ای قاب بتنی

این بخش به تحلیل تأثیر لینک‌های برشی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی اختصاص دارد. در این راستا، لینک برشی با همان مشخصات صحت‌سنجی شده، بر روی قاب بتنی صحت‌سنجی شده قرار داده شد که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این شکل مشخصات تمامی مقاطع مدل را ارائه می‌دهد. برای اتصال لینک‌های برشی به قاب بتنی، از مهاربندهای نوع شورون استفاده شده است. مهاربندها به گونه‌ای طراحی شدند که در طول فرآیند بارگذاری، دچار کماتش نشوند. به طوری که نیروی محوری آنها بر اساس حداکثر مقاومت لینک برشی طراحی شد. اتصالات بین بخش‌های فولادی و بتنی در مدل عددی با استفاده از گزینه "Tie" ایجاد شدند.



شکل ۱۱ جزئیات مدل عددی قاب بتنی مجهز به لینک برشی

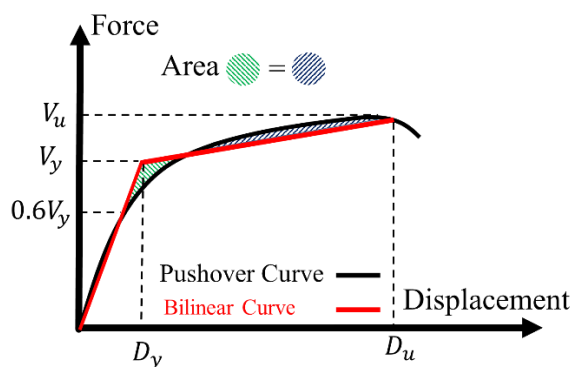
در جدول ۳، تمامی مدل‌های بررسی شده در این بخش ارائه شده‌اند. از آنجا که نسبت سختی الاستیک لینک برشی به سختی قاب تأثیر قابل توجهی بر عملکرد لرزه‌ای آن دارد؛ بنابراین، نام‌گذاری مدل‌ها بر اساس این نسبت انجام شده است. به این ترتیب، ارتفاع ( $e=150$  میلی‌متر) و ضخامت ( $t_w=10$  میلی‌متر) ثابت نگه داشته شد و تنها عرض لینک برشی ( $h_w$ ) تغییر یافت. سختی الاستیک قاب بدون میراگر برابر با  $3/9$  کیلو نیوتن بر میلی‌متر گزارش شده است [۲۲].

جدول ۳ معرفی مدل‌های قاب بتنی مجهز به لینک برشی

مدل	$h_w$ (mm)	$\alpha = \frac{\text{سختی لینک برشی}}{\text{سختی قاب بتنی تنها}}$
M-10	۵۸	۱۰
M-20	۹۵/۲	۲۰
M-30	۱۲۷/۱	۳۰
M-40	۱۵۶/۱	۴۰
M-50	۱۸۳/۱	۵۰
M-60	۲۰۸/۶	۶۰
M-70	۲۳۲/۸	۷۰

نمودار نیرو-جابجایی قاب که از تحلیل‌های عددی به دست آمده است، رفتاری غیرخطی دارد و به صورت منحنی مشکی‌رنگ در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. به منظور تسهیل در استخراج پارامترهای لرزه‌ای و مقایسه عملکرد مدل‌ها، این منحنی غیرخطی بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای به یک نمودار دوخطی ساده شده (منحنی قرمز رنگ) تبدیل می‌شود. این ساده‌سازی امکان تعیین راحت‌تر پارامترهایی مانند سختی اولیه، مقاومت تسلیم و شکل‌پذیری را فراهم می‌کند. برای دوخطی‌سازی نمودار نیرو-تغییر مکان، از دستورالعمل FEMA [۲۷] استفاده شد که به صورت شماتیک در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. در این شکل، "Vu" بیانگر مقاومت است و ناحیه زیر نمودار نشان‌دهنده

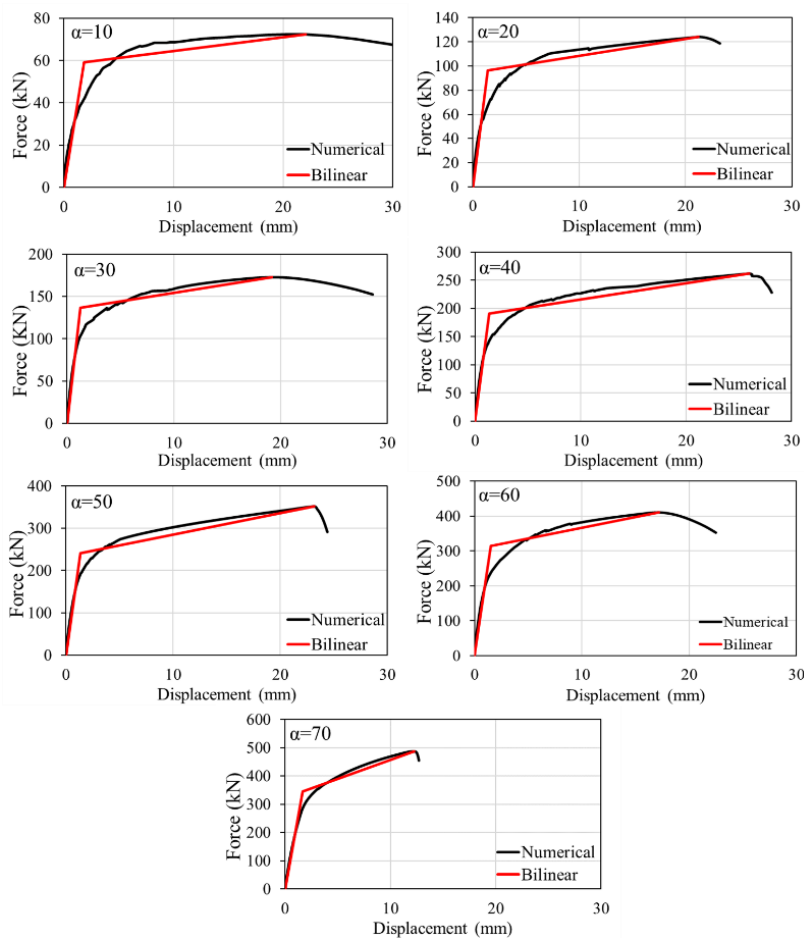
میزان اتلاف انرژی می‌باشد. سختی الاستیک ( $K_e$ ) و شکل‌پذیری به ترتیب با استفاده از معادلات ۷ و ۸ قابل محاسبه هستند. به این ترتیب نتایج مدل‌های معرفی شده در جدول ۳ در شکل ۱۳ به همراه نمودارهای ساده شده دوخطی ارائه شده است.



شکل ۱۲ نمونه غیر خطی و دوخطی معادل نیرو-جابجایی

$$K_e = \frac{V_y}{D_y} \quad (۷)$$

$$Ductility = \frac{D_u}{D_y} \quad (۸)$$

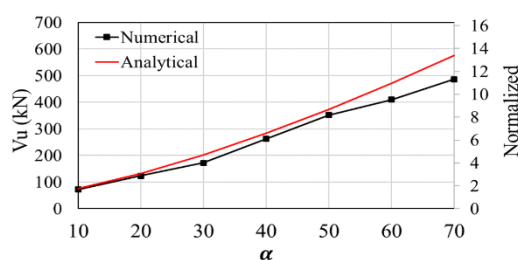


شکل ۱۳ چند نمونه از نتایج نیرو-جابجایی به همراه دو خطی معادل

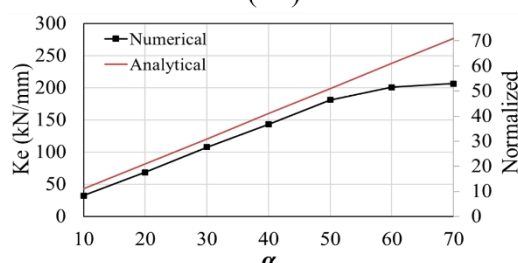
تحلیل روند تغییرات سختی و مقاومت در برابر افزایش  $\alpha$ ، مبنایی برای تعیین مقدار بهینه لینک‌های برشی در طراحی لرزه‌ای فراهم می‌کند. شکل‌های ۱۴ الف و ۱۴ ب تأثیر پارامتر " $\alpha$ " را بر مقاومت نهایی و سختی الاستیک قاب نشان می‌دهند. محور عمودی سمت راست در این شکل‌ها مقادیر نرمال شده نسبت به قاب بدون لینک برشی را نمایش می‌دهد. نمودار تا مقدار  $\alpha$  برابر با ۵۰ تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. از آنجا که جابه‌جایی قاب و لینک برشی یکسان است، سختی الاستیک و مقاومت نهایی مدل را می‌توان با استفاده از معادلات ۹ و ۱۰ و بر پایه جمع سختی الاستیک و مقاومت قاب و لینک برشی محاسبه کرد. نتایج حاصل از این معادلات و نتایج عددی در شکل‌های ۱۴ الف و ۱۴ ب ارائه شده‌اند، که برای مدل‌هایی با  $\alpha$  کمتر از ۵۰، تطابق خوبی را نشان می‌دهند. نمودار نشان می‌دهد که در مدل‌هایی با  $\alpha$  بیشتر از ۵۰، اختلاف میان نتایج عددی و تحلیلی افزایش می‌یابد. در مدل‌هایی با  $\alpha$  بزرگ‌تر از ۵۰، سختی زیاد لینک برشی منجر به جذب نیروی اضافی و بروز خرابی زود هنگام می‌شود.

$$Vu = Vu_{Bar-Frame} + Vu_{Shear-link} \quad (9)$$

$$Ke = Ke_{Bar-frame} + Ke_{Shear-link} \quad (10)$$



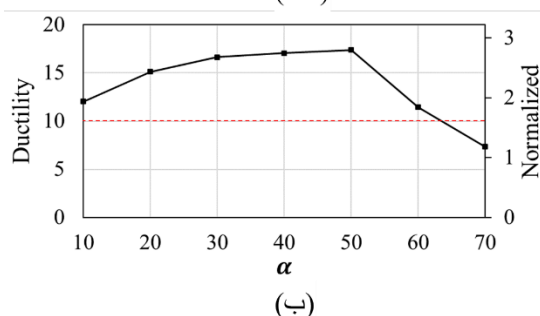
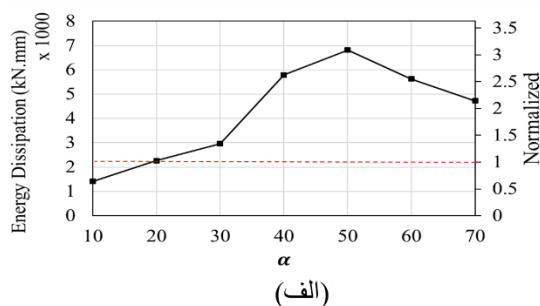
(الف)



(ب)

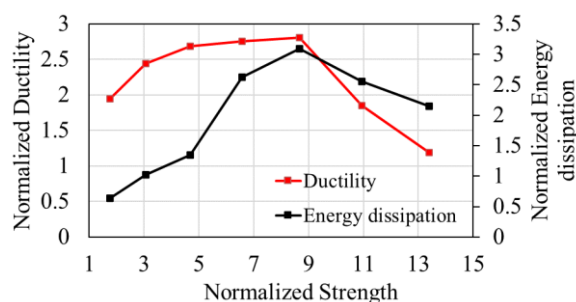
شکل ۱۴ مقایسه نتایج عددی و تحلیلی (الف) مقاومت نهایی (ب) سختی الاستیک.

شکل‌های ۱۵ الف و ۱۵ ب به ترتیب میزان اتلاف انرژی و شکل‌پذیری مدل‌های عددی را نشان می‌دهند. محور عمودی سمت راست در این شکل‌ها نیز مقادیر نرمال شده نسبت به قاب بدون دمپر را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در هر دو حالت، با افزایش مقدار " $\alpha$ " تا عدد ۵۰، نتایج روند افزایشی داشته و سپس کاهش می‌یابد. در مدلی که  $\alpha$  برابر با ۵۰ است، میزان اتلاف انرژی و شکل‌پذیری قاب به ترتیب حدود ۳ و ۲/۸ برابر قاب تنها برآورد شده است. نتایج تحلیل تأکید می‌کنند که تناسب سختی لینک برشی با سختی قاب، عاملی کلیدی در افزایش ظرفیت جذب انرژی و بهبود شکل‌پذیری سازه است.



شکل ۱۵ مقایسه نتایج عددی: (الف) اتلاف انرژی، (ب) شکل پذیری

شکل ۱۶ یکی از نمودارهای مهم برای تحلیل عملکرد قاب‌های بتنی مجهز به لینک برشی را نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی مقاومت نهایی نرمال شده مدل‌ها نسبت به قاب بدون لینک برشی را نمایش می‌دهد و محورهای عمودی سمت چپ و راست به ترتیب شکل‌پذیری و اتلاف انرژی نرمال شده را نسبت به قاب بدون دمپر نشان می‌دهند. این نمودار به خوبی روند تغییرات شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی قاب را نسبت به افزایش مقاومت نهایی مدل‌ها نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر دو پارامتر تا مقاومت حدود  $1/6$  برابر قاب اولیه، روند افزایشی دارند. بر این اساس، می‌توان بیان کرد که در این محدوده، بیشترین میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری برای قاب مجهز به لینک برشی به دست می‌آید.

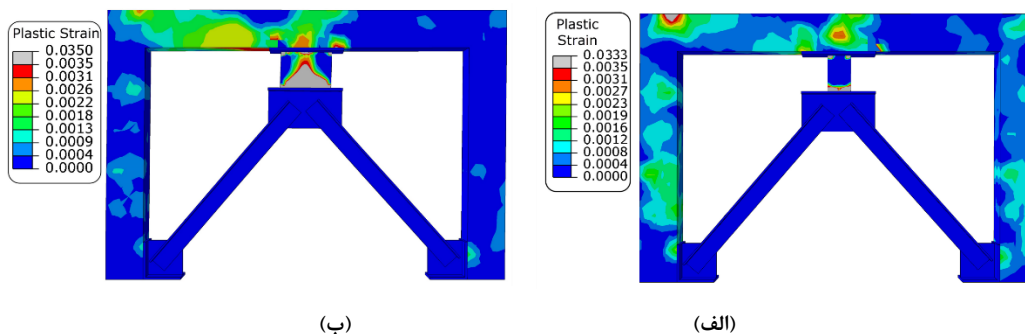


شکل ۱۶ اتلاف انرژی و شکل‌پذیری نرمال شده نسبت به مقاومت نهایی نرمال شده

## ۵- توزیع کرنش پلاستیک معادل در مدل عددی

علاوه بر تحلیل پاسخ نیرو-جابجایی، بررسی توزیع کرنش پلاستیک معادل در اعضای سازه‌ای می‌تواند درک عمیق‌تری از نحوه انتشار آسیب و تمرکز تغییرشکل‌های غیرالاستیک فراهم آورد. در بخش ۴، نتایج نیرو-تغییرمکان و پارامترهای استخراج‌شده از آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها نشان دادند که در مدل‌هایی با نسبت  $\alpha$  بزرگ‌تر از ۵۰، عملکرد لرزه‌ای کاهش می‌یابد. علت این کاهش، نسبت سختی بیش‌ازحد لینک برشی نسبت به قاب بتنی عنوان شد. در این بخش توزیع کرنش پلاستیک برای دو مدل M-20 و M-60 در شکل‌های

۱۷ (الف) و ۱۷ (ب) ارائه شده است. انتخاب این دو مدل به منظور مقایسه رفتار قاب در نسبت‌های سختی کمتر و بیشتر از مقدار بهینه  $\alpha=50$  انجام شده است. در مدل با  $\alpha$  برابر ۶۰، بیشترین کرنش‌ها در لینک برشی متمرکز شده‌اند، در حالی که قاب بتنی کرنش کمتری را تجربه می‌کند. در مدل M-60، نیروی قابل توجهی از طرف لینک برشی به تیر اعمال شده است به طوری که با مقایسه آن با مدل M-20، کرنش‌های بیشتری در ناحیه تیر ایجاد شده است.



شکل ۱۷ کانتور کرنش پلاستیک: (الف) M-20، (ب) M-60

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از لینک‌های برشی ساخته شده از فولاد با حد تسلیم پایین (BLY160)، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه ایفا کند. رفتار هم‌زمان لینک و قاب بتنی به صورت فنرهای موازی، منجر به تقسیم نیروی وارده بر اساس نسبت سختی آن‌ها می‌شود. بنابراین نسبت سختی بین لینک و قاب، یک پارامتر کلیدی در تعیین عملکرد نهایی سیستم ترکیبی به شمار می‌آید. بر اساس تحلیل‌های عددی، هنگامی که نسبت سختی الاستیک لینک به قاب از مقدار مشخصی (تقریباً ۵۰) تجاوز نکند، نه تنها سختی و مقاومت قاب به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد، بلکه شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی نیز به طرز چشمگیری ارتقا پیدا می‌کند. این بهبود عملکرد نشان می‌دهد که لینک‌های برشی پیشنهادی می‌توانند با جلوگیری از آسیب در اعضای اصلی، نقش یک فیوز تسلیمی مؤثر را ایفا کرده و عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود دهند.

از دیدگاه عملی، استفاده از چنین لینک‌هایی می‌تواند برای مقاوم‌سازی سازه‌های موجود در مناطق زلزله‌خیز، به‌ویژه سازه‌های بتنی با ضعف در شکل‌پذیری یا جذب انرژی، بسیار مفید باشد. همچنین امکان طراحی لینک‌ها به گونه‌ای که پس از زلزله به راحتی قابل تعویض باشند، می‌تواند مزیت مهمی در افزایش قابلیت بهره‌برداری سازه در رویدادهای زلزله‌ی بعدی ایجاد کند. به علاوه، به کارگیری مصالحی با حد تسلیم پایین، هزینه ساخت این تجهیزات را کاهش داده و از منظر اقتصادی نیز گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای بهسازی لرزه‌ای به شمار می‌رود. با این حال، این تحقیق با برخی محدودیت‌ها مواجه است. نخست آن‌که ارزیابی‌ها صرفاً بر پایه تحلیل‌های عددی انجام شده و هر چند نتایج با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده‌اند، ولی تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی تحت رکوردهای واقعی زلزله نیز می‌تواند به غنای یافته‌ها بیفزاید. دوم آن‌که، مدلسازی عددی صرفاً برای یک نوع قاب بتنی با ویژگی‌های خاص هندسی و مقاومتی انجام شده و نتایج ممکن است برای سایر پیکربندی‌های سازه‌ای قابل تعمیم نباشد. همچنین در این تحقیق اثرات پدیده‌هایی نظیر زوال مصالح، گسیختگی اتصال یا اندرکنش خاک و سازه لحاظ نشده است.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که لینک‌های برشی ساخته شده از فولاد کم‌مقاومت می‌توانند به‌عنوان ابزاری مؤثر، ساده و کم‌هزینه برای ارتقاء عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی به کار گرفته شوند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، ارزیابی آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ‌تر، بررسی عملکرد تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف، و نیز تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای طراحی مورد توجه قرار گیرد تا امکان بهره‌برداری گسترده‌تر از این روش در طرح‌های واقعی فراهم شود.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، بررسی‌های عددی به منظور ارزیابی تأثیر استفاده از لینک برشی ساخته شده از فولاد BLY160 بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتنی انجام شد. مدل عددی با استفاده از دو نمونه آزمایشگاهی، یکی شامل لینک برشی و دیگری شامل قاب بتنی، صحت‌سنجی شد. با توجه به اینکه مقاومت نهایی و سختی الاستیک پارامترهای کلیدی طراحی برای لینک برشی به شمار می‌روند، معادلاتی تقریبی برای تخمین آن پیشنهاد شد. نتایج حاصل، تطابق مناسبی با داده‌های عددی داشت. تأثیر ابعاد لینک برشی بر عملکرد لرزه‌ای قاب بتن مسلح نیز از طریق تحلیل‌های بارافزون بررسی شد. نمودارهای نیرو-تغییر مکان استخراج شدند و نمودار دوخطی متناظر آن‌ها نیز به دست آمد. در نهایت، پارامترهای سختی الاستیک، جذب انرژی، شکل‌پذیری و مقاومت نهایی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج این مطالعه به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱. معادلات تقریبی پیشنهادی برای محاسبه مقاومت نهایی و سختی الاستیک لینک برشی، تطابق خوبی با نتایج عددی داشتند. بنابراین، می‌توان برای طراحی لینک برشی، با داشتن ابعاد آن، این دو پارامتر را با دقت قابل قبولی تخمین زد.

۲. با افزایش نسبت سختی الاستیک لینک برشی به قاب بتن مسلح (که با " $\alpha$ " نشان داده می‌شود)، مقاومت نهایی و سختی الاستیک قاب مجهز به لینک برشی نیز افزایش می‌یابد. مدل‌های عددی در مقایسه با نتایج تحلیلی، برای مقادیر  $\alpha$  کمتر از ۵۰، نتایج قابل قبولی را ارائه دادند. معادلات تحلیلی ارائه شده بر این فرض استوار بودند که سختی و مقاومت نهایی قاب برابر با مجموع سختی و مقاومت نهایی اعضای آن از جمله لینک برشی و قاب بدون میراگر است.

۳. بررسی‌ها نشان داد که جذب انرژی و شکل‌پذیری قاب تا مقدار  $\alpha$  برابر ۵۰ به صورت خطی افزایش می‌یابد، اما پس از آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، اگر نسبت مقاومت نهایی قاب مجهز به لینک برشی به قاب بدون لینک برشی برابر با  $1/6$  باشد، در این صورت قاب‌های دارای لینک برشی، حدود ۳ و  $2/8$  برابر بیشتر از قاب اولیه، به ترتیب شکل‌پذیری و جذب انرژی از خود نشان می‌دهند.

۴. کاهش عملکرد لرزه‌ای در مدل‌های با نسبت سختی بالا ( $\alpha > 50$ ) ناشی از پدیده‌ای است که با تسلیم‌شدگی زود هنگام لینک برشی آغاز می‌شود. وقتی لینک بیش از حد صلب است، سهم بسیار زیادی از نیروی جانبی را به خود جذب می‌کند و در نتیجه در تغییر مکان‌های بسیار کوچک سازه به مقاومت تسلیم خود می‌رسد. پس از این تسلیم زود هنگام، سختی لینک به شدت افت کرده و قابلیت آن برای جذب نیروهای اضافی عملاً از بین می‌رود. در این مرحله، بار اضافی به طور ناگهانی به قاب بتنی منتقل می‌شود. این انتقال بار ناگهانی به قاب، که شکل‌پذیری محدودی دارد، باعث ایجاد تمرکز تنش و آسیب در اعضای اصلی (به ویژه تیر) شده و در نهایت منجر به کاهش شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی کل سیستم می‌گردد.

۵. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای این سیستم از طریق مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس واقعی مورد توجه قرار گیرد. همچنین، انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از رکوردهای مختلف زلزله، درک دقیق‌تری از رفتار سیستم تحت بارگذاری‌های واقعی لرزه‌ای فراهم خواهد کرد. گسترش دامنه پژوهش به قاب‌های چند طبقه با مشخصات هندسی و مقاومتی متفاوت نیز می‌تواند نتایج جامع‌تر و کاربردی‌تری را برای طراحی عملی ارائه دهد.

## مراجع

- [1] Beheshti, M., Asadi, P. (2021). Seismic Vulnerability Assessment of Retrofitted Steel Structures with Fractional Viscoelastic Dampers Considering Uncertainty Variables. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(1), pp. 271-285. <https://doi.org/22065/10/jsce.171919/2019.1785>.

- [2] Moaddab, E., Tizhoosh, H. (2021). Experimental and numerical evaluation of new pipe damper with two-level performance. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(3), pp. 75-95. <https://doi.org/22065/10/jsce.171319/2019.1780>.
- [3] bahrololoom tabatabai, F., Mirhosseini, S.M., Zeighami, E. (2024). Experimental Investigation of the Performance of Two-Level Circular Yielding Dampers with Bolt Connection and the Effect of Friction on Their Behavior. *Journal of Structural and Construction Engineering*. pp. - <https://doi.org/22065/10/jsce.455575/2024.3404>.
- [4] Yang, J., Liang, S., Zhu, X., Dang, L., Shen, T., Zhou, S. (2023). Experimental and theoretical research on a shear-bending-metallic-damper with a double-phased yield mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*. 203, pp. 107839. <https://doi.org/1016/10/j.jcsr.107839/2023>.
- [5] Qiu, C.-X., Huang, T.-Y., Wang, Y.-Z., Qian, H.-J. (2023). Theoretical and experimental study on seismic performance of T-section metallic damper. *Journal of Constructional Steel Research*. 211, pp. 108161. <https://doi.org/1016/10/j.jcsr.108161/2023>.
- [6] Men, J., Wang, J., Zhang, Q., Fan, D., Zhou, Q., Huang, C.-H. (2023). Experimental and numerical study on cyclic behavior of a shape-optimized composite metallic yield damper with two-phase energy dissipation. *Structures*. 53, pp. 1012-1029. <https://doi.org/1016/10/j.istruc.05/2023.007>.
- [7] Nakrash, M.F., Alshukur, M., Al-Homsi, K. (2021). Modelling the effect of distribution of locations of X-added damping and stiffness steel dampers in reinforced concrete buildings. *Asian Journal of Civil Engineering*. 22(6), pp. 1085-1096. <https://doi.org/1007/10/s42107-021-00367-y>.
- [8] Chukka, N.D.K.R., Krishnamurthy, M. (2019). Comparison of X-shaped metallic dampers with fluid viscous dampers and influence of their placement on seismic response of the building. *Asian Journal of Civil Engineering*. 20(6), pp. 869-882. <https://doi.org/1007/10/s42107-019-00151-z>.
- [9] Cheraghi, K., Tahamouli Roudsari, M., Kiasat, S., Esfandiari, J. (2024). Numerical and Analytical Study of the Cyclic Behavior of ADAS Damper and the Effect of Axial Force on its Behavior. *Journal of Earthquake Engineering*. pp. 1-18. <https://doi.org/1080/10/2024/13632469.2345821>.
- [10] Ghaedi, K., Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Gordan, M., S. M. Rashid, R., Khatibi, H., Vaghei, R. (2023). Experimental and numerical studies on the cyclic performance of structural frames equipped with bar dampers. *Structures*. 50, pp. 707-722. <https://doi.org/1016/10/j.istruc.02/2023.070>.
- [11] Aghani, H., Cheraghi, K., Bakhshipour, M. (2024). Numerical Investigation of the Effect of Aluminum Yielding Damper for the Retrofitting of Semi-rigid Steel Frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 68(2), pp. 349-357. <https://doi.org/3311/10/PPci.23119>.
- [12] Cheraghi, K., and Tahamouli Roudsari, M. (2025). Analytical and Numerical Study of the Cyclic Behavior of U-Shaped Yielding Dampers. *Journal of Earthquake Engineering*. 29(3), pp. 691-708. <https://doi.org/1080/10/2024/13632469.2436620>.
- [13] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2025). Parametric study of the innovative model of angled U-shape damper with multiphase yielding mechanism. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 170, pp. 104998. <https://doi.org/1016/10/j.ijnonlinmec.104998/2024>.
- [14] Moradi, Y., Cheraghi, K., Tavana, M.H. (2025). Numerical and Analytical Study of the Seismic Behavior of NSD Dampers with Flexural Performance. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/1007/10/s40996-025-01840-3>.
- [15] Zhao, J.-Z., Tao, M.-X., Wu, Z.-H., Zhuang, L.-D. (2022). Experimental and numerical study on bent shear panel damper made of BLY160 steel. *Engineering Structures*. 260, pp. 114229. <https://doi.org/1016/10/j.engstruct.114229/2022>.
- [16] Xu, L.-Y., Nie, X., Fan, J.-S. (2016). Cyclic behaviour of low-yield-point steel shear panel dampers. *Engineering Structures*. 126, pp. 391-404. <https://doi.org/1016/10/j.engstruct.08/2016.002>.
- [17] Yao, Z., Wang, W., Zhu, Y. (2021). Experimental evaluation and numerical simulation of low-yield-point steel shear panel dampers. *Engineering Structures*. 245, pp. 112860. <https://doi.org/1016/10/j.engstruct.112860/2021>.

- [18] Ghamari, A., Thongchom, C., Putra Jaya, R., Sithole, T. (2023). Utilizing Low Yield Point Steel to Improve the Behavior of the I-Shaped Shear Links as Dampers. *Buildings*. 13(2), pp. 554
- [19] Daemi, F., Habibi, M.R., Tavana, M.H., Eivani, H. (2025). Numerical and Analytical Study of the Seismic Behavior of U-Shaped Aluminum Dampers and Their Impact on Steel Frames. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/1007/10/s40996-025-01772-y>.
- [20] Zhuang, L., Wang, J., Nie, X., Wu, Z. (2022). Experimental study on the cyclic behaviour of shear links made of BLY160 steel. *Thin-Walled Structures*. 174, pp. 109072. <https://doi.org/1016/10/j.tws.109072/2022>.
- [21] Hibbitt, K., Sorensen, I., *ABAQUS/Standard user's Manual Volumes I-III and ABAQUS CAE Manual*. 2014, Version.
- [22] TahamouliRoudsari, M., Torkaman, M., Entezari, A.R., Rahimi, H., Niazi K, K. (2019). Experimental investigation of strengthening reinforced concrete moment resisting frames using partially attached steel infill plate. *Structures*. 19, pp. 173-183. <https://doi.org/1016/10/j.istruc.01/2019.009>.
- [23] Standard, B. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures— *Part*. 1(1), pp. 230
- [24] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S., Cheraghi, K. (2024). Numerical study of metallic dampers' effect on seismic performance of concrete frames. *Asian Journal of Civil Engineering*. 25(3), pp. 2431-2441. <https://doi.org/1007/10/s42107-023-00917-6>.
- [25] Cheraghi, K., Darbandkahi, M., TahamouliRoudsari, M., Kiasat, S. (2023). Seismic behavior of RC frames with partially attached steel shear walls: A numerical study. *Earthquakes and Structures*. 25(6), pp. 443-454. <https://doi.org/12989/10/eas.25/2023.443/6>.
- [26] Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., Kafi, M.A. (2020). Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading. *Engineering Structures*. 203, pp. 109866. <https://doi.org/1016/10/j.engstruct.109866/2019>.
- [27] FEMA 440, A. (2005). 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. *FEMA-440, Redwood City*. 7(9), pp. 11
- [28] Cheraghi, K., TahamouliRoudsari, M. (2024). Numerical and analytical study of cyclic behavior of TADAS and the impact of axial force on its performance. *Steel and Composite Structures*. 53(2), pp. 195-208. <https://doi.org/12989/10/scs.53/2024.195/2>.