

Introducing A Multi-Performance Repairable Brace

Jamal Mahmoudi¹, Abdolreza S. Moghadam^{2*}, Behrokh Hosseini Hashemi²

1- Phd Candidate, International Institute of Earthquake Engineering and Siesmology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Siesmology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Recent earthquakes have shown that even code-compliant structures, while effectively minimizing casualties, often sustain severe damage, become unusable, and ultimately require demolition. This results in substantial financial and social burdens on affected regions. Consequently, a new design approach is imperative to ensure buildings maintain life safety during major earthquakes while remaining repairable post-earthquake. To address this need, a novel repairable bracing system is introduced. To simultaneously satisfy ductility and stiffness requirements in response to seismic demands, multiple performance levels have been defined for the repairable braces. The system is designed to progressively increase stiffness and energy dissipation capacity in response to escalating seismic demands. A finite element model (FEM) of the proposed multi-level repairable bracing system was developed and analyzed. To validate the modeling approach, two laboratory specimens with configurations closely resembling the proposed system were selected from the literature. Their FEM models were created, and results were compared against experimental data. The comparison indicated excellent accuracy of the FEM in replicating the seismic response of the specimens. Following validation, nonlinear seismic analyses of the proposed system confirmed its high energy dissipation capacity, repairability, and effective multi-level performance under seismic loading.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 August 2025

Revise Date: 03 November 2025

Accept Date: 12 November 2025

Keywords:

Repairable Bracing System
Multi-Level Performance
Dual Performance
Energy Dissipation
Finite Element Modeling
Seismic Resilience
Staged Activation
Seismic-Resilient Structure

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.543452.3808

*Corresponding author: Abdolreza S. Moghadam

Email address: moghadam@iiees.ac.ir

معرفی مهاربند همگرای تعمیرپذیر چندسطحی

جمال محمودی^۱، عبدالرضا سروقدمقدم^{۲*}، بهرخ حسینی هاشمی^۲

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

چکیده

با بررسی زلزله‌هایی که اخیراً رخ داده‌اند، ملاحظه می‌گردد که سازه‌هایی که حتی به روش‌های آیین‌نامه‌ای طراحی شده‌اند، اگرچه تلفات جانی را حداقل می‌نمایند، اما سازه‌ها متحمل آسیب‌های سنگینی شده، غیرقابل استفاده شده و باید تخریب شوند. در نتیجه هزینه‌های مالی و اجتماعی سنگینی به منطقه تحت تاثیر زلزله وارد می‌گردد. از این رو ضرورت وجود رویکردی جدید در طراحی ساختمان‌ها احساس می‌شود که مطابق آن ساختمان‌ها در صورت وقوع زلزله‌ای شدید، ضمن تامین ایمنی جانی، پس از زلزله تعمیرپذیر نیز باشند. بنا بر ضرورت یادشده، در پژوهش حاضر سیستم مهاربندی جدیدی معرفی گردیده است که قابلیت تعمیر داشته باشد. همچنین به ضرورت تامین توانان شکل پذیری و سختی، متناسب با تقاضای لرزه‌ای، برای المان مهاربندی تعمیرپذیر معرفی شده، چندین سطح عملکردی تعریف شده است. به گونه‌ای که متناسب با افزایش تقاضای لرزه‌ای، سختی و جذب انرژی نیز افزایش یابد. به منظور بررسی عملکرد مهاربند تعمیرپذیر چندسطحی پیشنهادی، مدل المان محدود آن تهیه گردید و مورد بررسی قرار گرفت. به منظور صحت سنجی مدل سازی المان محدود، دو نمونه آزمایشگاهی نزدیک به سیستم پیشنهادی از ادبیات فنی انتخاب گردید، مدل المان محدود نمونه‌ها تهیه شد و نتایج مدل‌های المان محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. مقایسه نتایج حاکی از دقت بالای مدل سازی در نمایش رفتار لرزه‌ای نمونه‌ها بود. پس از اطمینان از دقت بالای پارامترهای مدل سازی المان محدود، با انجام آنالیزهای لرزه‌ای بر روی مدل المان محدود سیستم پیشنهادی، توانایی بالای جذب انرژی، تعمیرپذیری سیستم پیشنهادی و عملکرد چندسطحی آن به اثبات رسید.

کلمات کلیدی: مهاربند تعمیرپذیر، عملکرد چند سطحی، عملکرد دو سطحی، جذب انرژی، مدل سازی المان محدود، تاب‌آوری لرزه‌ای، فعال‌سازی مرحله‌ای، سازه تاب‌آور لرزه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.543452.3808	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.543452.3808	۱۴۰۵/۰۳/۳۱	۱۴۰۴/۰۸/۲۱	۱۴۰۴/۰۸/۲۱	۱۴۰۴/۰۸/۱۲	۱۴۰۴/۰۶/۰۹
		عبدالرضا سروقدمقدم moghadam@iiees.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

با بررسی اهداف عملکردی ارائه شده در مقررات و آیین نامه‌ها و روشهای طراحی پیشنهادی آنها و همچنین مشاهدات میدانی در خرابی‌های به وجود آمده در زمین لرزه‌های بزرگی مانند کوبه و نورتریج، ملاحظه می‌گردد که در سیستم‌های سازه‌ای مرسوم و رایج، حتی اگر سازه بر اساس روش‌های آیین‌نامه‌ای به درستی طراحی گردد، اگرچه ویران نمی‌شود و تلفات جانی به سمت حداقل میل می‌کند، اما سازه آسیب‌های سنگینی متحمل می‌شود [۱]. لذا در پی این آسیب‌های زیاد، پس از زلزله، ساختمانها غیرقابل استفاده شده و باید تخریب شوند. از این رو هزاران نفر آواره شده و کوهی از مخروبه‌ها در شهر باقی می‌ماند. با توجه به این توضیحات ضرورت وجود رویکردی جدید در طراحی ساختمان‌ها احساس می‌شود. رویکردی که در عین تامین نیازها در سطحی بالاتر، هزینه‌های ساخت را خیلی افزایش ندهد تا به لحاظ اقتصادی نیز برای اشخاص توجیه پذیر باشد. راهکاری که مطابق آن ساختمان‌ها پس از وقوع زلزله‌ای شدید در شهرهای بزرگ تعمیرپذیر باشند. بنا بر ضرورت یادشده، این پژوهش نیز هدف اصلی خود را ارائه یک سیستم سازه‌ای جدید با قابلیت تعمیرپذیری پس از زلزله قرار داده است.

جهت تامین نیازهای عملکردی، باید انرژی زلزله به طریقی در سازه مستهلک شود. در روشهای آیین‌نامه‌های مرسوم، این جذب انرژی توسط قابلیت شکل پذیری اعضای سازه‌ای تامین میگردد. استهلاک انرژی سازه در محدوده رفتار الاستیک بسیار کم است و اگر قرار بر این باشد که سازه با رفتار الاستیک تمام انرژی دریافتی زلزله را مستهلک نماید، طراحی صورت گرفته بهینه و منطقی نخواهد بود. لذا همواره نیاز است اعضای در سازه در نظر گرفته شوند تا با ورود به ناحیه پلاستیک اقدام به جذب انرژی کنند. اکثر سیستم‌های مطرح شده برای دستیابی به سازه‌ای تعمیرپذیر، و همچنین سیستم ارائه شده در این پژوهش، از ایده هدایت آسیب بهره می‌برند. هدایت آسیب به این معناست که عملکرد ساختمان به گونه‌ای طراحی شود که عمده انرژی در بخشی از سازه که مد نظر طراح است، متمرکز شود و تغییر شکل خمیری در آن بخش رخ دهد. در این ایده می‌توان با تعبیه جاذب‌های انرژی قابل تعویض در بخش‌های یاد شده به هدف تعمیرپذیری نزدیکتر شد. بدین منظور در پژوهش‌های بسیاری به معرفی جاذب‌های انرژی مختلفی پرداخته شده است و عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفته است. معرفی مهاربندهای واگرا در سال ۱۹۷۸ [۲]، میراگرهای تاداس (TADAS) در سال ۱۹۹۳ [۳]، پنل‌های برشی تسلیم شونده (YSPD) [۴] و میراگرهای با لوله‌های دابل (DPD) در سال ۲۰۱۳ [۵] و پژوهش‌های تکمیلی بسیاری در راستای معرفی، توسعه و ارتقا این سیستم‌ها، همگی نمونه‌هایی از این دست پژوهش‌ها هستند.

اما تجربه زلزله‌های گذشته موضوع دیگری را نیز نمایانگر است. بررسی این تجارب نشان می‌دهد که فیوزهای موجود در سازه در زلزله‌های با شدت کمتر از بزرگترین زلزله‌های محتمل نیز وارد فاز غیرخطی می‌شوند و میزان سختی آنها و در نهایت میزان ظرفیت شکل پذیری آنها برای مقابله با زلزله‌های شدید آینده کاهش می‌یابد [۶]. علاوه بر این به دلیل اتکا به تنها یک فیوز قابلیت اعتماد سازه پایین می‌آید و به علت عملکرد انفرادی، این فیوزها در زلزله‌ها، متحمل تغییر شکل بسیار زیادی می‌شوند.

از طرفی عدم انتخاب دقیق ظرفیت فیوزها و عدم تناسب آن با نیروی ورودی زلزله می‌تواند باعث افزایش زیاد سختی و در نتیجه افزایش نیروی اعمال شده بر اعضای نیرو کنترل شود. اگر چه تناسب نیروی ورودی و ظرفیت برای این المان‌ها در زمین لرزه‌های با شدت زیاد از طریق پلاستیک شدن فیوزها برقرار می‌شود ولی تا زمانی که شدت تحریک‌های وارده کمتر از زمین لرزه‌ی طرح باشد، رفتار الاستیک فیوزها موجب بر هم خوردن این تناسب می‌شود [۷].

مجموعه این چالش موجب گردیده است که استفاده از ترکیب میراگرها و تامین چندین سطح عملکردی به عنوانی مفهومی جدیدی در طراحی سیستم‌های باربر جانبی مورد استقبال قرار گیرد. بدین منظور با استفاده از دو فیوز لرزه ای مجزا یا یک فیوز با دو سطح عملکرد سعی شد تا نواقص مذکور در مورد سیستم‌های تعمیرپذیر پیشین برطرف گردد. در این سیستم‌ها در زلزله‌های متوسط تنها یکی از دو فیوز در نظر گرفته شده برای باربری جانبی وارده محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک شده و این در حالی است که فیوز دوم، بدون عبور از ناحیه تسلیم، کارایی خود را برای عملکرد در زلزله‌های شدید حفظ می‌نماید. بدین وسیله از ورود فیوز اصلی سازه در زلزله‌های نه چندان قوی به ناحیه غیرارتجاعی جلوگیری به عمل آمده و با استفاده از یک فیوز کمکی دیگر جذب و استهلاک انرژی در زلزله‌های با شدت متوسط تامین می‌گردد [۶]. به بیان دیگر فیوزی در سطوح لرزه ای متوسط فعالیت نموده و فیوز دیگر برای تامین سختی در زلزله‌های شدید و جذب

انرژی ناشی از آن رزرو می گردد. ترکیبات متفاوتی از میراگرهای وابسته به تغییر مکان و وابسته به سرعت برای کنترل دو سطح نیروی جانبی ناشی از باد و زلزله در سال‌های اخیر پیشنهاد شده است [۸].

زهرايي و وثوق قاب مهاربندی با تیر پیوند قائم را به همراه مهاربند زانویی را پیشنهاد دادند [۹]. در این سیستم، تیر پیوند به عنوان فیوز شماره یک و المان‌های زانویی به عنوان فیوز شماره دو به کار گرفته شد. خروجی مدل‌های اجزای محدود سیستم پیشنهادی تحت بارگذاری چرخه نشان دادند که این سیستم می‌تواند در دو سطح تحت اثر زلزله عمل نمایند.

حسینی هاشمی و علیرضایی در سال ۲۰۱۶ یک سیستمی دو سطحی که از قاب مهاربندی شده واگرا و زانویی تشکیل شده بود را مورد آزمایش قرار دادند [۱۰]. المان زانویی، مهاربند، تیر پیوند و ستون چهار قسمت اصلی تشکیل دهنده قاب پیشنهادی بودند. المان‌های زانویی و تیر پیوند در نقش فیوزهای سازه‌ای با تشکیل مفاصل برشی و خمشی ایجاد شده در آنها، انرژی ورودی را تحت جنبش متوسط و شدید مستهلک می‌کنند. مهاربند با تامین سختی قاب تا انتهای بارگذاری ارتجاعی باقی میماند. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی المان محدود نشان داد که انرژی تلف شده تجمعی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در پژوهشی دیگر، چراغی و زهرايي با استفاده از ترکیب لوله‌های هم‌مرکز میراگری دوسطحی برای زمین‌لرزه پیشنهاد دهند [۱۱]. پاچیده و همکاران به جهت افزایش شکل پذیری، جذب انرژی و کاهش ایرادات سیستم‌های مهاربندی از ترکیب مهاربندها و میراگرهای دایره‌ای تسلیم شونده با عملکرد موازی استفاده نمودند [۱۲]. با نوآوری ایجاد شده در این پژوهش یعنی استفاده از دو فیوز سازه‌ای به صورت همزمان، اهداف مدنظر پژوهش حاصل شد.

ایبراهیم و همکاران در پژوهش خود با هدف برقراری تعادل مناسب بین سختی و میرایی، سیستمی ترکیبی از میراگر ویسکوپلاستیک و ورق‌های فلزی تسلیم شونده معرفی کردند [۱۳]. ترکیبی این دو میراگر در سازه به نحوی بود که میراگر پیشنهادی می‌توانست در بازه‌های تغییر مکانی کوچک از مزایای میراگر وابسته به سرعت از نوع ویسکو پلاستیک استفاده کند و در تغییر مکان‌های بزرگتر از عملکرد ترکیبی دو میراگر بهره‌بردار. در پژوهشی دیگر، نوع دیگری از ترکیب میراگرها با ترکیب میراگرهای ویسکوز با مهاربندهای کمانش‌تاب، قبل از رسیدن مهاربندها به تسلیم، پیشنهاد شد که منجر به بهبود عملکرد مهاربندهای کمانش‌تاب گردید [۱۴]. در سال ۲۰۱۷ لی و همکاران با استفاده از دو میراگر تسلیمی و اصطکاکی سیستمی ارائه دادند که در آن تنها میراگر اصطکاکی در زمین‌لرزه‌های متوسط فعال بود اما با شدت یافتن زمین‌لرزه‌ها هر دو میراگر تسلیمی و اصطکاکی انرژی وارد شده را مستهلک می‌کردند [۱۵].

در پژوهش صورت گرفته توسط هاشمی و شمیری یک سیستم کنترل غیرفعال TADAS تغییر یافته، بصورت دو سطحی معرفی شد [۱۶]. استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب هیبریدی [۱۷] و میراگرهای تاداس هیبریدی [۱۸]، از دیگر نمونه‌های استفاده ترکیبی از میراگرها و جاذب‌های انرژی می باشد. تیزهوش و مودب در پژوهشی که در سال ۲۰۲۱ انجام دادند، میراگر حلقوی دوسطحی‌ای متشکل از سه حلقه‌ی تو در تو تشکیل را پیشنهاد دادند. فیوز اول (حلقه‌ی بیرونی) در تحریک‌های با دامنه‌ی کم و فیوز دوم (حلقه‌های داخلی) در تحریک‌های با دامنه‌ی زیاد انرژی ورودی را جذب می‌نماید [۸]. در سال ۲۰۲۴ احمدی و همکاران با ترکیب مهاربند واگرا با المان‌های میله‌ای دوخت، سیستم دوسطحی به جهت بهبود عملکرد مهاربندهای واگرا ارائه نمودند [۶].

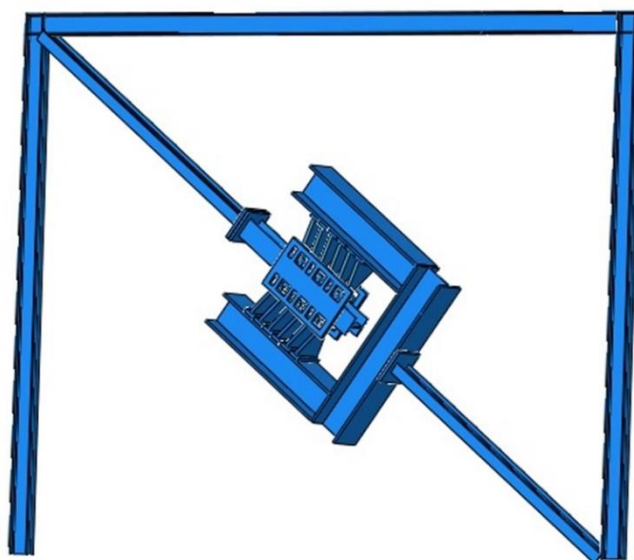
با توجه به چالش‌های مطرح در فوق، ضرورت‌های یاد شده و دستاوردهای مثبت ادبیات فنی در استفاده از این رویکردها، در سیستم پیشنهادی در این پژوهش، تمرکز بر ارائه سیستمی با قابلیت تعمیرپذیری و دارای چندین سطح عملکرد بوده است تا بدین وسیله از خرابی گسترده سازه پس از زلزله‌ها جلوگیری به عمل آید و عملکردی هوشمندانه برای سازه در حین زلزله تامین گردد، به گونه‌ای که عرضه سختی در آن متناسب با تقاضای لرزه‌ای باشد.

به دلیل ساده بودن تکنولوژی ساخت میراگرهای تسلیمی و وابسته به تغییر مکان، فلسفه عملکردی میراگر پیشنهادی در این پژوهش نیز بر این اساس تنظیم گردیده است. از سوی دیگر به منظور جلوگیری از پیچیده شدن مسیر انتقال بار و هماهنگی و یکپارچگی مکانیزم جذب انرژی، تامین چندین سطوح عملکردی مدنظر در قالب یک فیوز لرزه‌ای با یک مکانیزم جذب انرژی یکسان (تسلیم تحت عملکرد خمشی) صورت پذیرفته است تا بتوان با استفاده از وسیله‌ای واحد برای اتلاف انرژی است، مشخصات دینامیکی از جمله سختی و میرایی سازه را متناسب با چندین سطح مختلف زمین لرزه به تناسب افزایش داد و اصلاح نمود. در ادامه پس از مقدمه‌ای مختصر و بیان ضرورت‌ها

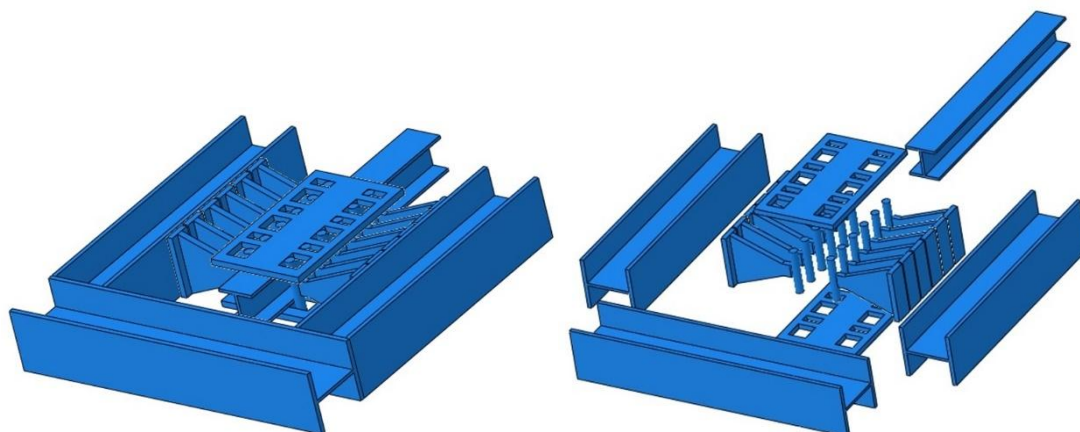
و تبیین اهداف پژوهش، در بخش دوم پیکربندی سیستم پیشنهادی به تصویر کشیده می شود و در بخش سوم جزئیات صحت سنجی های صورت گرفته و فرضیات مدل سازی عددی مطرح شده است. سپس در بخش چهارم بر روی نتایج حاصله بحث شده و در بخش پنجم جمع بندی و نتیجه گیری نهایی صورت گرفته است.

۲- پیکربندی سیستم پیشنهادی

پیکربندی سیستم پیشنهادی مطابق با شکل ۱ می باشد. در این سیستم، فیوز پیشنهادی، مطابق با شکل ۲، به صورت جعبه ای در داخل مهاربند قطری قرار می گیرد که از طریق ورق های مثلثی شکل و سیستم اتصالی پین و حفره به مهاربند متصل می شود. طی حرکت رفت و برگشتی قاب تحت بار لرزه ای، مهاربند قطری نیز در راستای طولی خود حرکت رفت و برگشتی انجام داده و به واسطه همین حرکت و اتصال بین مهاربند و ورق های مثلثی، این حرکت به سر ورق های مثلثی نیز اعمال می گردد و این ورق ها طی عملکردی خمشی، شروع به جذب انرژی می کنند. انتخاب شکل مثلثی برای ورق ها نیز از این رو است که در کل طول ورق جذب انرژی صورت پذیرد.



شکل ۱: پیکربندی سیستم پیشنهادی.



شکل ۲: میراگر چندسطحی پیشنهادی به همراه اجزا تشکیل دهنده آن.

به منظور تامین عملکرد دوسطحی برای میراگر پیشنهادی، همانطور که در شکل ۲ نیز قابل مشاهده است، در سیستم اتصالی پین و حفره، عرض حفره‌ها متغیر می‌باشد. بدین صورت که تعدادی از حفره‌ها دقیقاً عرضی برابر با قطر پین دارند. لذا به محض حرکت مهاربند، ورق‌های متصل به این حفره‌ها درگیر شده و شروع به تحمل نیرو و جذب انرژی می‌نمایند. اما در تعدادی دیگر از حفرات، عرض حفره بیش از قطر پین بوده و موجب می‌گردد با توجه به فاصله پین با بدنه حفره، ورق‌های مربوط به این حفرات بلافاصله فعال نشوند. در این ورق‌ها که سطح دوم عملکردی میراگر را فراهم می‌کنند، پس از اینکه جا به جایی مهاربند و ورق‌های سری اول از حدی تنظیم شده فراتر رفت، پین با بدنه حفرات تماس پیدا کرده و در این لحظه است که سری بعدی ورق‌ها درگیر شده و شروع به تحمل نیرو و جذب انرژی می‌کنند. با تغییر اندازه عرض حفرات می‌توان به سطح سوم عملکرد و در صورت نیاز حتی سطوح بالاتر نیز دست یافت.

از نوآوری‌های پیکربندی پیشنهادی، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

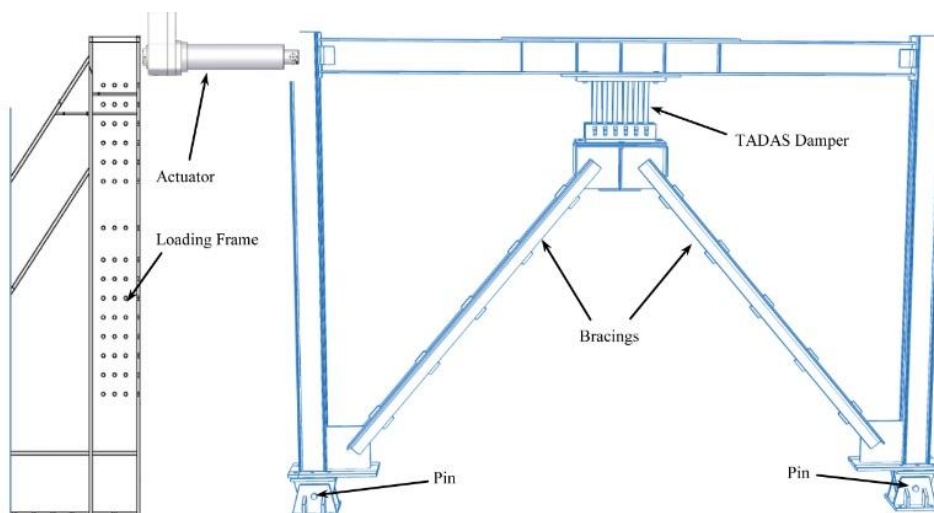
- ترکیب نوآورانه: ادغام مکانیزم "پین و حفره با گپ متغیر" در یک پیکربندی جعبه‌ای داخل محور مهاربند قطری، برخلاف کاربردهای مرسوم در قاب‌های شورون.
- مکانیزم یکپارچه و ساده: اجرای فلسفه عملکرد چندسطحی در قالب یک میراگر واحد با استفاده از یک مکانیزم جذب انرژی یکسان (خمشی)، که پیچیدگی مسیر انتقال بار را کاهش داده و یکپارچگی سیستم را حفظ می‌کند.
- انعطاف‌پذیری در طراحی: این رویکرد به سادگی و تنها با تغییر اندازه گپ‌ها، امکان تعریف بیش از دو سطح عملکرد و تنظیم سختی سیستم را متناسب با تقاضای لرزه‌ای، بدون نیاز به میراگرهای جداگانه و بدون تغییر هندسه اصلی ورق‌ها، فراهم می‌آورد.

۳- صحت سنجی و مدل سازی

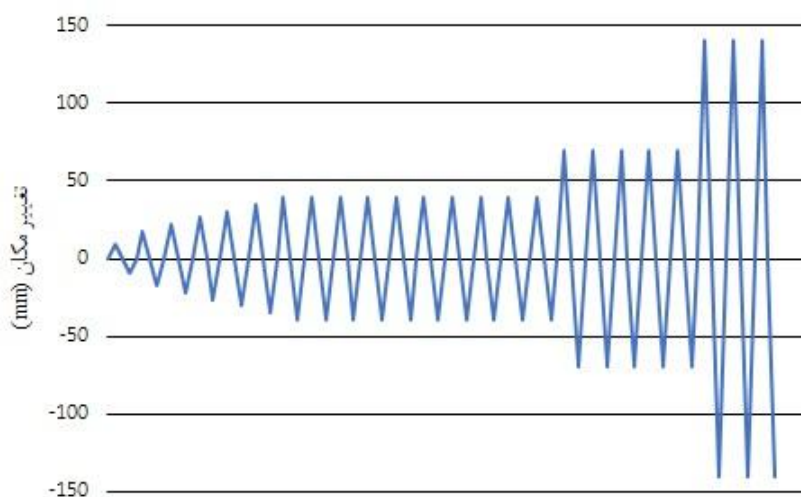
در این پژوهش جهت مدل سازی المان محدود سیستم پیشنهادی از نرم افزار آباکوس [۱۹] استفاده شد. به منظور اثبات درستی فرض‌ها، تنظیمات کلیدی، تعریف مشخصات مصالح و صحت مدل سازی در نرم افزار المان محدود، پیش از مدل سازی سیستم پیشنهادی، در ابتدای امر از ادبیات فنی دو پژوهش با پشتوانه مطالعات آزمایشگاهی که مشخصاتی نزدیک به سیستم میراگر پیشنهادی پژوهش حاضر داشتند، انتخاب گردیدند.

۳-۱- پژوهش منتخب اول جهت صحت سنجی:

کرمی محمدی و همکاران در پژوهشی که بر روی میراگرهای TADAS در سال ۲۰۱۷ انجام دادند [۲۰] به بررسی رفتار این میراگرها در تغییر شکل‌های بزرگ پرداختند. در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد لرزه ای میراگر، یک قاب یک طبقه یک دهانه به ارتفاع ۳ متر و طول دهانه ۴ متر مجهز به میراگرهای تاداس، مطابق با شکل ۳، ساخته شد. در ادامه این قاب تحت بارگذاری چرخه ای مطابق منحنی ارائه شده در شکل ۴ قرار گرفت. در دو پژوهش دیگر که به موازات پژوهش اول بر روی همین سیستم و نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی آن صورت پذیرفت، محققین به بررسی خطاهای محتمل در پیکربندی میراگر TADAS [۲۱] و مدل سازی هیبرید قاب مجهز به میراگر TADAS در اپنسیس و آباکوس [۲۲] پرداختند. از آنجا که برخی از ویژگی‌های شاخص سیستم بررسی شده در این پژوهش مانند استفاده از ورق‌های مثلثی و عملکرد خمشی این ورق‌ها به سیستم پیشنهادی در پژوهش حاضر نزدیک بود و در مجموع سه پژوهش صورت گرفته اطلاعات کافی از جزئیات مدل و بارگذاری ارائه شده بود، از مطالعه آزمایشگاهی این پژوهش به منظور صحت سنجی مدل سازی عددی در پژوهش حاضر استفاده گردید.

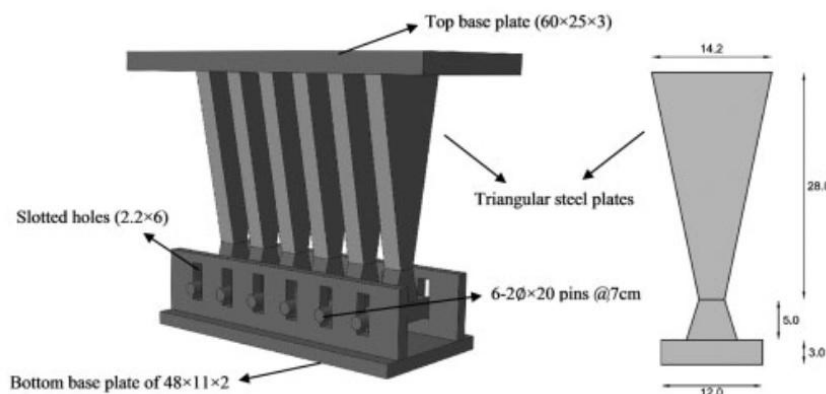


شکل ۳: پیکربندی قاب آزمایشگاهی مجهز به میراگر تاداس [۲۰].



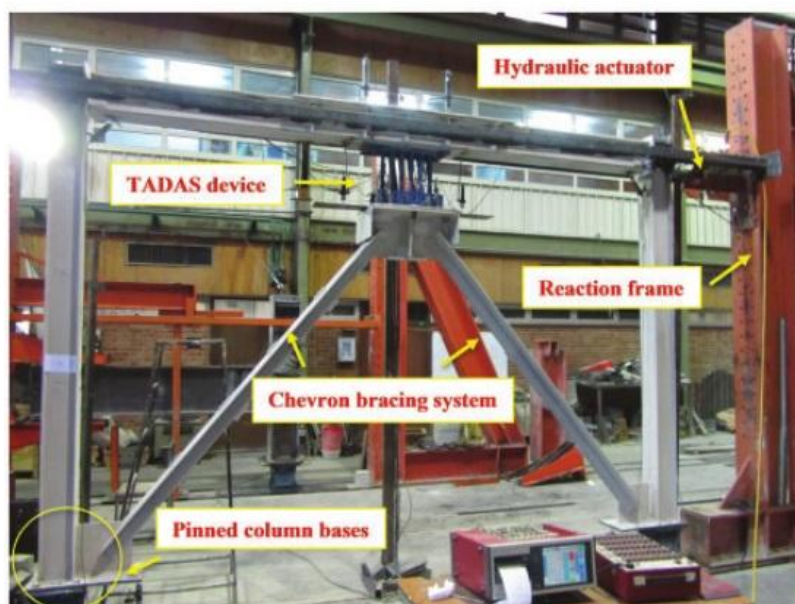
شکل ۴: منحنی بارگذاری چرخه ای به کارگرفته شده در تست آزمایشگاهی قاب مجهز به میراگر تاداس [۲۰].

شکل ۵ جزئیات میراگر تاداس مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۵: منحنی بارگذاری چرخه ای به کارگرفته شده در تست آزمایشگاهی قاب مجهز به میراگر تاداس [۲۰].

در شکل ۶ قاب آزمایشگاهی آماده شده جهت تست و در شکل ۷ میراگر تاداس نمونه آزمایشگاهی در حین بارگذاری نشان داده شده است.



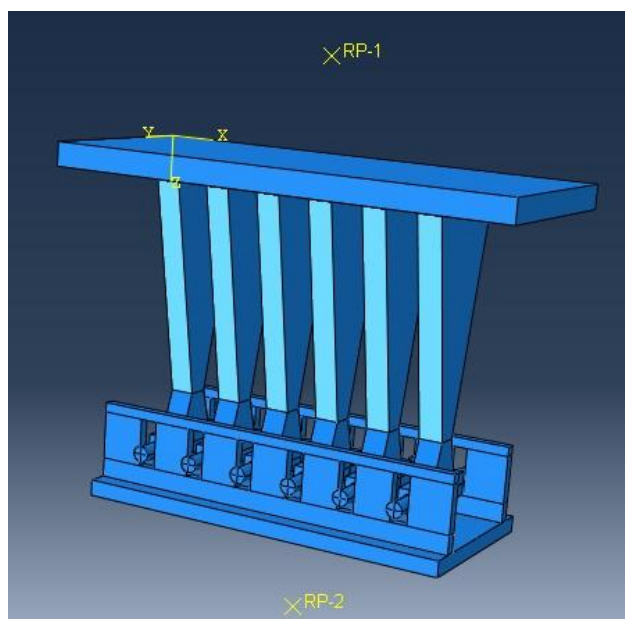
شکل ۶: قاب ساخته شده مجهز به میراگر تاداس جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی [۲۰].



شکل ۷: تغییر شکل ایجاد شده در میراگر تاداس حین انجام آزمایش [۲۰].

۲-۳- مدل سازی المان محدود پژوهش اول:

در ماژول Part نرم افزار، کلیه المان ها و اجزا به صورت Solid تعریف شدند. در تعریف مصالح فولادی، در بخش رفتار مصالح از سه گزینه Density، Elastic و Plastic برای مدل سازی رفتار مصالح استفاده شد. در بخش Density چگالی فولاد و در بخش Elastic مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آن تعریف شد. در بخش Plastic با انتخاب حالت Isotropic برای رفتار Hardening، با تعریف Yield Stress و Plastic Strain (تنش و کرنش واقعی) برای دو نقطه که معرف نقطه آغازین و انتهای رفتار پلاستیک ماده هستند، محدوده رفتار پلاستیک ماده نیز تعریف شد و تعریف ماده تکمیل گردید. پس از تعریف مصالح مربوط به هر المان به آن جز اختصاص داده شده و مونتاژ نهایی میراگر جهت انجام آنالیز، مطابق با شکل ۸، صورت پذیرفت.

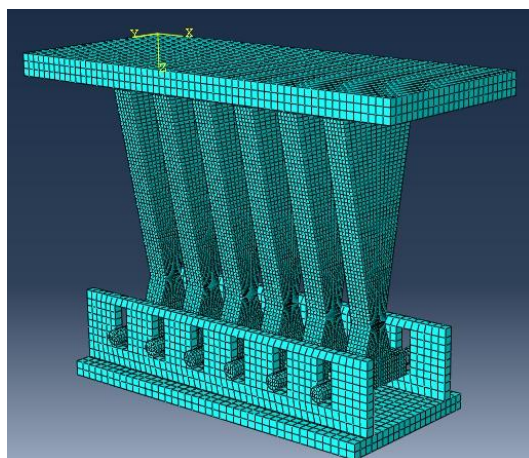


شکل ۸: مونتاژ نهایی میراگر در نرم افزار.

به منظور تحلیل مدل از روش Static, General و برای اتصال قطعات از قید Tie استفاده گردید. در مورد تماس پین ها با بدنه حفرات از مدل Interaction تیپ Contact و نوع Surface to Surface Contact بهره برده شد. شرایط تکیه گاهی، بوسیله Coupling صفحه زیرین با یک Reference Point و مقید کردن تمام درجات آزادی آن نقطه مرجع اعمال گردید. همچنین به منظور اعمال شرایط بارگذاری در هر دو حالت یکنوا و چرخه ای، صفحه فوقانی نیز با یک Reference Point دیگر Couple شد. نقاط مرجع در شکل ۸ قابل مشاهده هستند. برای تعریف مشخصات تماس، گزینه های Normal Behavior و Tangential Behavior مورد استفاده قرار گرفتند. برای بخش Normal Behavior گزینه "Hard" Contact انتخاب گردید و تیک چک باکس Allow separation after contact زده شد. برای بخش Tangential Behavior گزینه Penalty برای فرمولاسیون لحاظ اثر اصطکاک انتخاب گردید و می بایست مقدار ضریب اصطکاک نیز در این بخش وارد می شد. از آنجا که در سه پژوهش مرتبط با مدل انتخاب شده برای صحت سنجی سه مقدار متفاوت ۰.۱، ۰.۱۶ و ۰.۳ برای ضریب اصطکاک گزارش شده بود، به ناچار جهت یافتن نزدیک ترین پاسخ از هر سه مقدار در تحلیل های مختلف استفاده گردید.

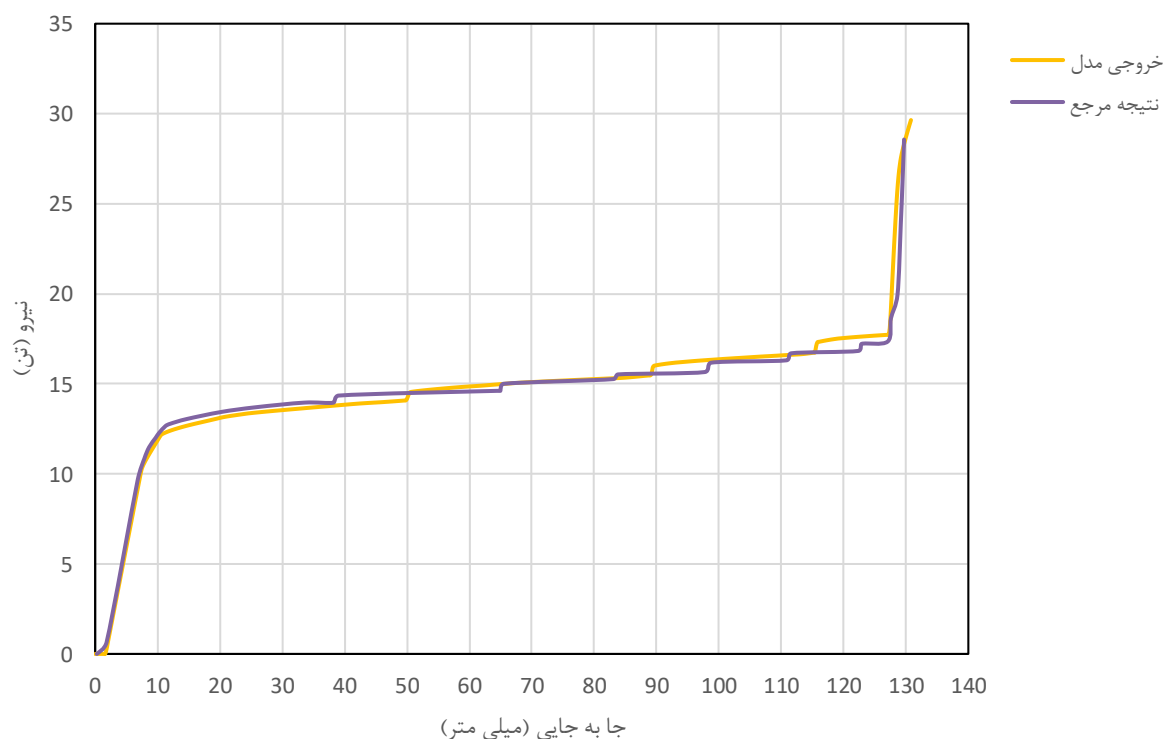
به منظور اعمال بارگذاری در ماژول Load، با استفاده از ابزار Amplitude، بارگذاری های چرخه ای و یکنوا در قالب جا به جایی در تحلیل های جداگانه به صورت شرایط مرزی (Boundary Condition) بر نقطه مرجعی که پیش تر به آن اشاره شده بود، اعمال گردید.

برای مش بندی قطعات از المان Hex استفاده گردید. به صورت عمومی برای مدل حداکثر اندازه Seedها برابر با ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد. اما این اندازه برای ورق های مثلی به جهت پر اهمیت تر بودن قطعه، رفتار پلاستیک آن و حساس تر بودن خروجی ها و همچنین در پین ها و محدوده تماس آن ها با بدنه حفرات که مساله تماس و احتمال واگرایی وجود دارد، حداکثر ۵ میلی متر تنظیم گردید. شکل ۹ جزئیات مش بندی نهایی مدل را نشان می دهد.



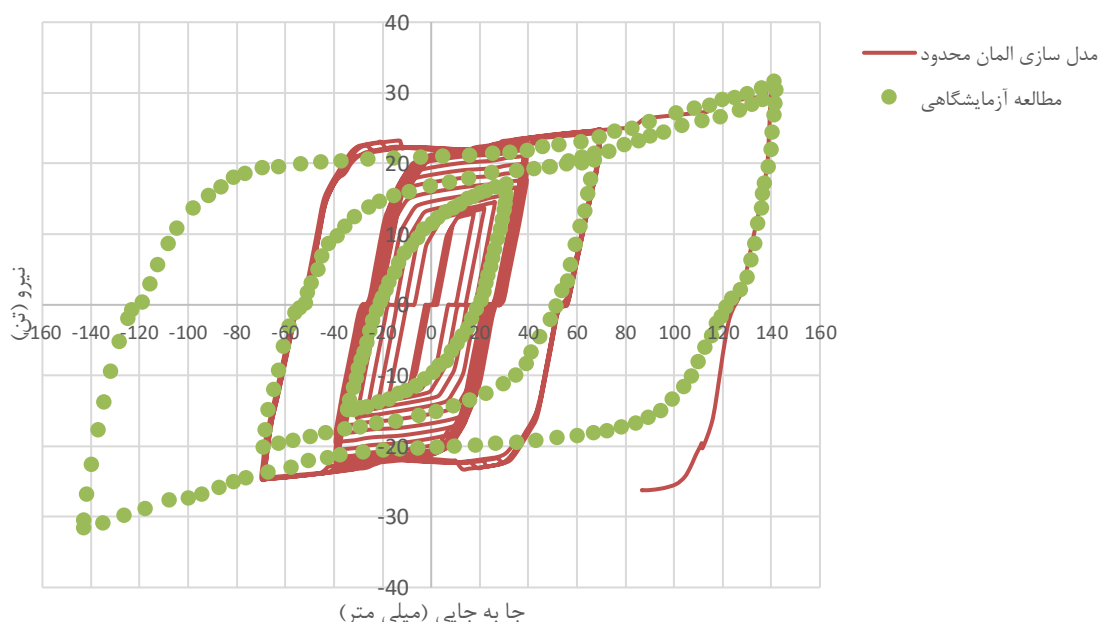
شکل ۹: مش بندی نهایی میراگر.

پس از تکمیل تمامی مراحل مدل سازی، مدل ابتدا تحت بارگذاری یکنوا قرار گرفت. در شکل ۱۰ مقایسه بین خروجی مدل با نتایج بارگذاری یکنوا منتشر شده در پژوهش مرجع را ملاحظه می‌کنید. همانطور که ملاحظه می‌گردد، خروجی مدل المان محدود با دقت بسیار بالایی توانسته است رفتار ارائه شده از سیستم را مدل سازی نماید. لازم به ذکر است، از بین مدل ها با ضریب اصطکاک مختلف، مدل با ضریب اصطکاک ۰.۱ نزدیک‌ترین پاسخ را داشت که در نمودار شکل ۱۰ خروجی مربوط به همین مدل به نمایش درآمده است. شایان ذکر است که در بخش بعدی، بخش بحث بر روی نتایج، مقایسه‌ای تحلیلی از خروجی مدل تحت بارگذاری یکنوا با هر سه ضریب اصطکاک ارائه شده است که شایان توجه می باشد.



شکل ۱۰: مقایسه بین خروجی مدل با نتایج پژوهش مرجع تحت بارگذاری یکنوا.

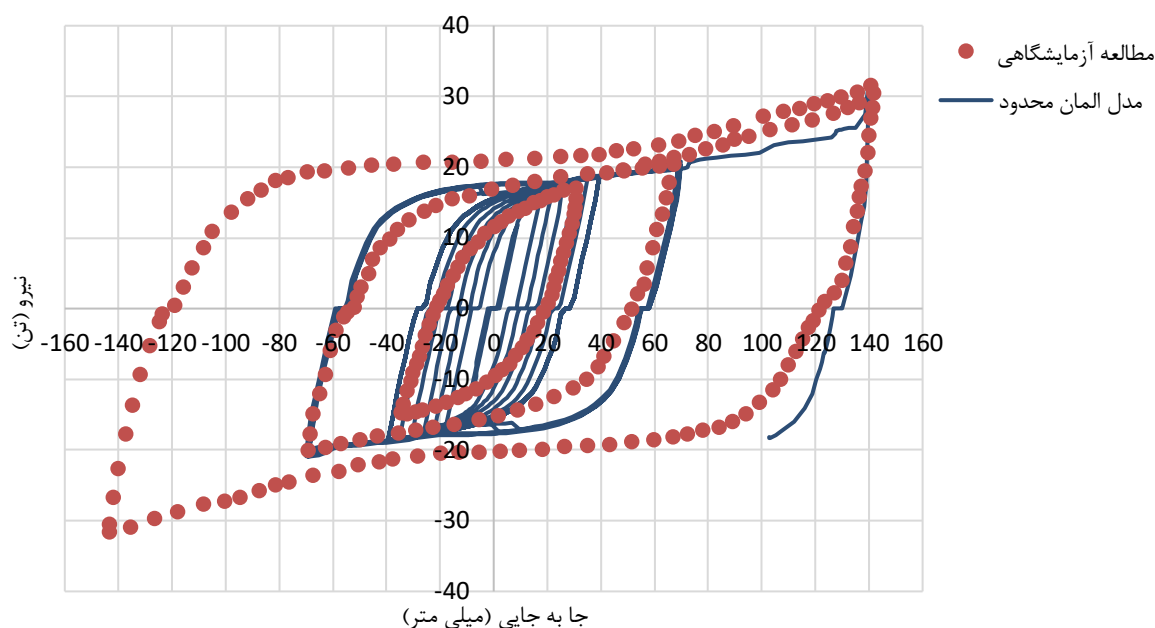
در مرحله بعدی مدل تحت بارگذاری چرخه ای مطابق با شکل ۴ قرار گرفت. شکل ۱۱ مقایسه بین خروجی مدل با نتیجه مطالعه آزمایشگاهی را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، مطابقت بسیار خوبی بین خروجی مدل با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود که تایید کننده دقت بالای مدل سازی و قابل اتکا بودن نتایج آن می باشد.



شکل ۱۱: مقایسه بین خروجی مدل با نتایج مطالعات آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه ای.

تنها نقطه اختلاف بین منحنی خروجی مدل با منحنی به دست آمده در آزمایشگاه، در مسیرهای برگشت چرخه ها و انحنا و خم این قسمت ها می باشد. علت این اختلاف عدم لحاظ اثر بوشینگر در مدل می باشد. بدین منظور به جهت رفع این اختلاف و نزدیک تر کردن خروجی های نهایی به نتایج آزمایشگاهی، مدل جدیدی ساخته شد و در آن پارامترهای مربوط به مدل سازی اثر بوشینگر به تعریف ویژگی های مصالح اضافه گردید.

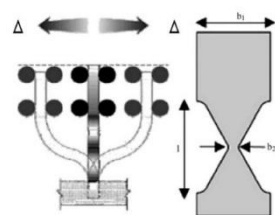
برای اعمال اثر بوشینگر در ویژگی مصالح، در بخش Plastic، برای رفتار Hardening حالت Isotropic به حالت Combined تغییر داده شد و نوع داده بر روی حالت پارامتری تنظیم گردید. در نهایت تعداد پنج backstress به جهت مدل سازی هر چه دقیقتر اثر بوشینگر برای نرم افزار تعریف گردید. پس از اعمال تغییرات فوق بر روی تعریف مصالح، مدل بار دیگر تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفت. در شکل ۱۲ مقایسه بین خروجی مدل با لحاظ اثر بوشینگر را با نتایج مطالعه آزمایشگاهی مشاهده می کنید. همانطور که در شکل ۱۲ پیداست، مدل المان محدود به خوبی و با دقت بالا توانسته است تا رفتار نمونه آزمایشگاهی را پیش بینی نموده و خروجی هایی کاملاً منطبق با نمونه های واقعی ارائه دهد.



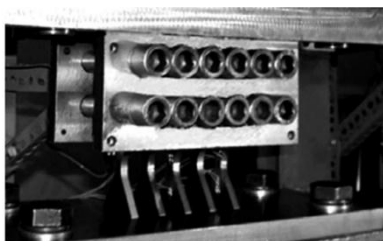
شکل ۱۱: مقایسه بین خروجی مدل با نتایج نتایج مطالعات آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه ای.

۳-۳- پژوهش منتخب دوم جهت صحت سنجی:

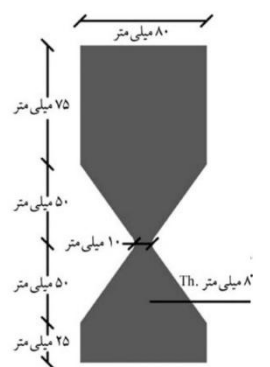
وتر، شفیع زاده و همکاران در پژوهشی به ارزیابی رفتار لرزه ای سازه های فولادی مجهز به MADAS در مقایسه با سیستم قاب خمشی در سال ۱۳۹۸ پرداختند [۲۳]. در این پژوهش مشخصات میراگر ADAS اصلاح شده (MADAS) با ورق های X شکل مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی به پشتیبانی یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی سیستمی دقیقاً مشابه که توسط خالقیان و تهرانی زاده در سال ۲۰۰۷ صورت پذیرفته بود [۲۴]، انجام شد. ورق های X شکل مورد استفاده در این میراگر به گونه ای قرار گرفته بودند که علی رغم مقید نمودن درجات آزادی چرخشی در دو انتها، تغییر مکان آن ها در امتداد قائم کاملاً آزاد بود و در نتیجه هیچگونه نیروی محوری در میراگر ایجاد نمی شد. شکل ۱۲ شماتیکی از ورق های تسلیمی X شکل، ابعاد و اندازه آن و نمونه آزمایشگاهی تهیه شده را نمایش می دهد. از آنجا که در این پژوهش نیز از ورق های خمشی تسلیمی به عنوان جاذب انرژی استفاده شده و همچنین به دلیل شرایط مرزی پیچیده تر نسبت به مدل قبلی، گزینه مناسبی برای فاز دوم صحت سنجی می باشد. شکل ۱۳ پروتکل بارگذاری چرخه ای اعمال شده در این مطالعه آزمایشگاهی را نشان می دهد.



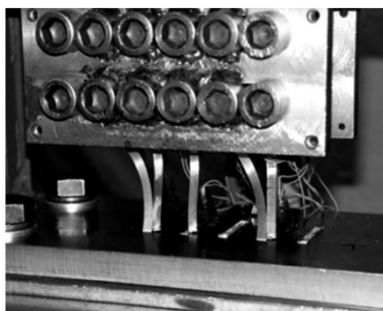
(الف)



(ب)

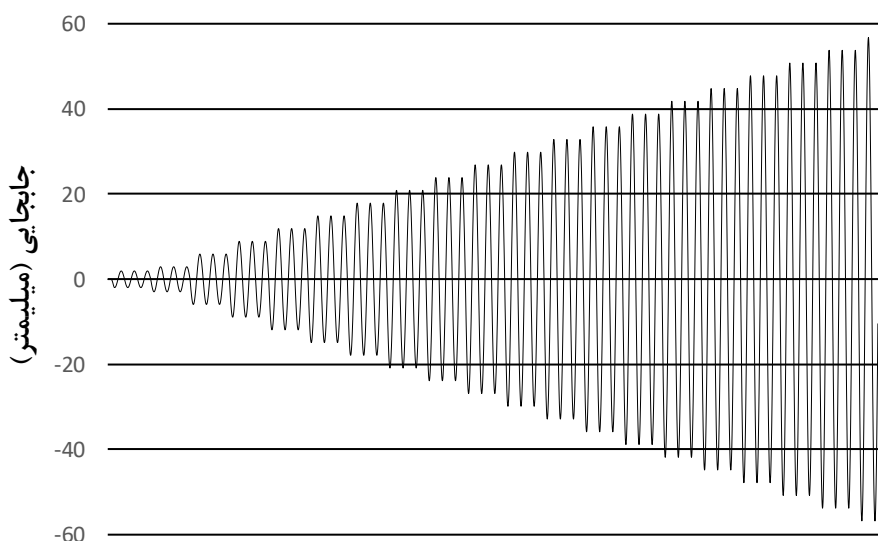


(پ)



(ت)

شکل ۱۲: (الف) نمای شماتیک ورق های X شکل و شرایط تکیه گاهی آن (ب) نمونه آزمایشگاهی (پ) ابعاد و اندازه ورق X شکل (ت) نمونه آزمایشگاهی پس از تست [۲۳].



شکل ۱۳: منحنی بارگذاری چرخه ای به کار گرفته شده در تست آزمایشگاهی قاب مجهز به میراگر MADAS [۲۳].

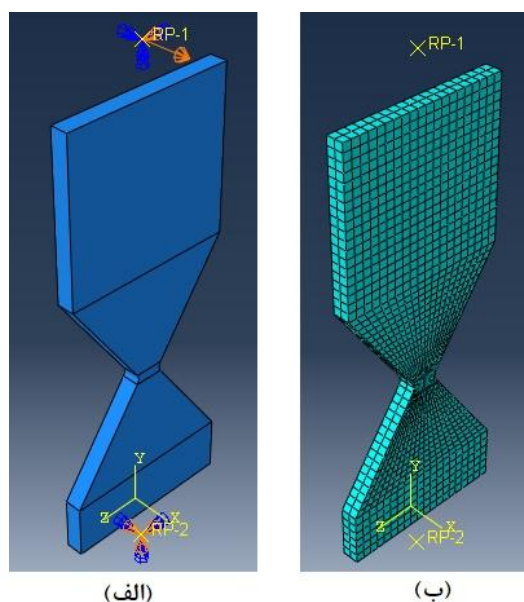
۳-۴- مدل سازی المان محدود پژوهش دوم:

مدل سازی المان محدود میراگر MADAS دقیقاً با تنظیماتی مشابه با مدل سازی پژوهش اول صورت گرفته و تنها تفاوت هایی در شرایط مرزی و نحوه اعمال بار وجود دارد. قطعه به صورت Solid مدل شده و در تعریف بخش Plastic مصالح فولادی با انتخاب حالت Combined برای رفتار Hardening و تعریف تعداد پنج backstress اثر بوشینگر لحاظ گردیده است.

برای تحلیل از روش Static, General و برای اتصال قطعات از قید Tie استفاده گردید. شرایط تکیه گاهی، بوسیله Coupling سطح زیرین ورق با یک Reference Point و مقید کردن تمام درجات آزادی آن نقطه مرجع اعمال گردید. همچنین به منظور اعمال شرایط بارگذاری چرخه ای، صفحه فوقانی نیز با یک Reference Point دیگر Couple شد. نقاط مرجع در قسمت (الف) شکل ۱۴ قابل مشاهده هستند.

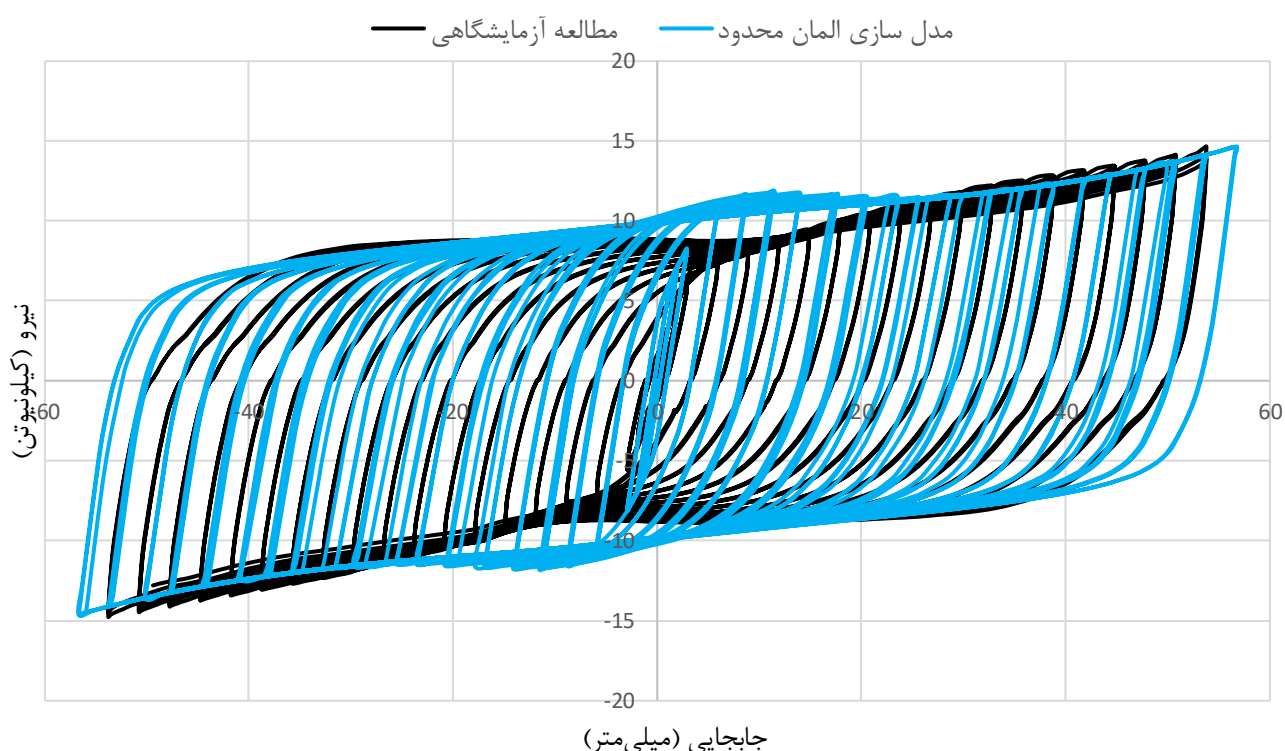
به منظور اعمال بارگذاری در ماژول Load، با استفاده از ابزار Amplitude، بارگذاری های چرخه ای در قالب جا به جایی به صورت شرایط مرزی (Boundary Condition) در راستای افق بر نقطه مرجعی که پیش تر به آن اشاره شده بود، اعمال گردید. سایر درجات آزادی نقطه مرجع به جز راستای قائم بسته شد. راستای قائم به دلیل ابتکاری که در این میراگر اعمال شده بود، آزاد گذاشته شد. در کنار اطلاعات نیرویی دریافتی از تحلیل تاریخچه زمانی، جا به جایی قائم نقطه بالای ورق نیز ثبت شد.

برای مش بندی قطعات از المان Hex با حداکثر اندازه Seedها برابر با ۴ میلی متر استفاده شد. شکل ۱۴ قسمت (ب) جزئیات مش بندی نهایی مدل را نشان می دهد.

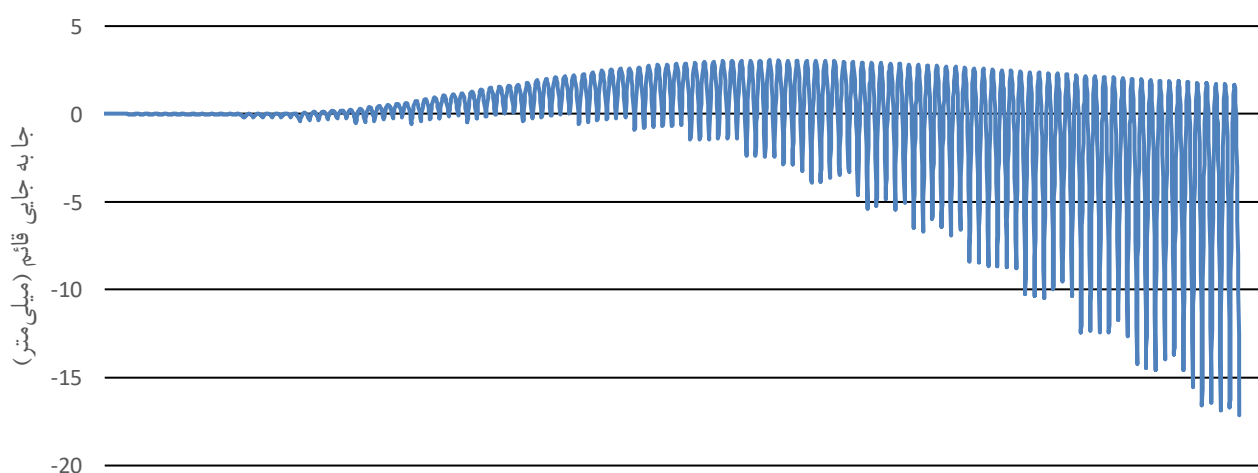


شکل ۱۴: (الف) ورق X شکل مدل شده به همراه نقاط مرجع و شرایط مرزی (ب) مش بندی نهایی ورق.

در انتها با تکمیل تمامی مراحل مدل سازی، مدل تحت بارگذاری چرخه ای مطابق با شکل ۱۳ قرار گرفت. شکل ۱۵ مقایسه بین خروجی مدل با نتیجه مطالعه آزمایشگاهی را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، مدل المان محدود توانسته است به خوبی و با دقت بسیار بالا رفتار میراگر را پیش بینی کرده و مدل نماید. در شکل ۱۶ نیز که جا به جایی قائم قسمت فوقانی ورق را نشان می دهد، بیانگر این است که مدل به خوبی توانسته است شرایط مرزی را شبیه سازی نموده و آزادی عمل میراگر در راستای قائم را مدل سازی نماید.



شکل ۱۵: مقایسه بین خروجی مدل با نتایج مطالعات آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه ای.



شکل ۱۶: مقایسه بین خروجی مدل با نتایج مطالعات آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه ای.

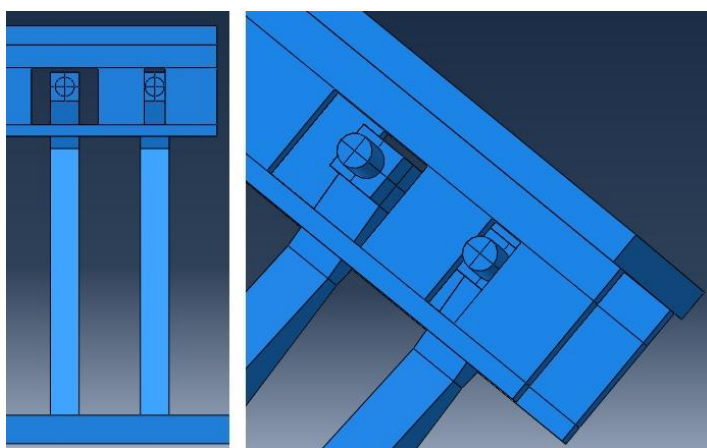
۳-۵- مدل سازی المان محدود میراگر پیشنهادی:

پس از طی مراحل صحت سنجی و اطمینان از درستی فرضیات و تنظیمات نرم‌افزاری و دقت بالای مدل سازی، با فرضیات و تنظیمات مشابه مدل سازی میراگر پیشنهادی پژوهش انجام شد. به جهت شباهت میراگر TADAS مربوط به پژوهش صحت سنجی اول با سیستم پیشنهادی، در راستای اطمینان از عملکرد دقیق مدل المان محدود، از مدل ساخته شده برای صحت سنجی میراگر TADAS یک رونوشت تهیه شد و تمامی تغییرات بر روی همان مدل صورت پذیرفت. به جهت اینکه آن مدل سازی پشتوانه مطالعات آزمایشگاهی داشت، تا حد توان سعی بر این شد که مشخصات سیستم پایه از جمله ابعاد ورق‌های مثلثی، ابعاد ورق‌های پایه تکیه گاهی، ابعاد پین و ورق حفره دار (به جز عرض حفرات)، مشخصات مصالح و پروتکل بارگذاری ثابت نگه داشته شود.

یک تغییر لازم، تغییر زاویه قرارگیری میراگر بود که از حالت افقی باید دوران می یافت و در راستای زاویه مهاربند قطری قاب قرار می گرفت. دقت شود از آنجا که بار انتقالی به میراگر به صورت محوری خالص در راستای محور طولی مهاربند خواهد بود، تغییر زاویه قرارگیری میراگر نسبت به افق، تأثیر مستقیمی بر نتایج نیرو-تغییر مکان این المان منفرد ندارد. مکانیزم باربری و تغییر شکل ورق های مثلثی کاملاً وابسته به مؤلفه محوری انتقال یافته از طریق پین ها است. دلیل اصلی در نظر گرفتن این تغییر، امکان سنجی و نمایش قابلیت اجرای میراگر پیشنهادی در یک پیکربندی واقع گرایانه است. این تغییر زاویه قرارگیری ساده نشان می دهد که سیستم پیشنهادی می تواند به راحتی و بدون تغییر در ماهیت عملکردی خود، درون یک قاب مهاربندی شده ادغام گردد. از منظر پیکربندی عملی و یکپارچگی سیستم سازه ای، در سیستم پیشنهادی، میراگر به صورت جعبه ای داخل مهاربند قطری قرار می گیرد و زاویه آن با زاویه مهاربند همخوانی دارد تا مسیر انتقال بار مستقیم و بدون ایجاد پیچیدگی های اضافی یا تمرکز تنش های محلی در اتصالات باشد. این تغییر، برخلاف میراگرهای TADAS افقی، امکان ادغام بهینه میراگر در مهاربند قطری را فراهم می کند.

تغییر دیگر، که مهمترین تغییر بود، تغییر اندازه عرض حفرات درگیر با پین ها بود. همانطور که در پیکربندی سیستم پیشنهادی نیز اشاره شد، به منظور تأمین عملکرد سطوح بالاتر، بعضی از حفرات عرضی بیش از قطر پین ها می بایست داشته باشند تا از ابتدا درگیر نشده و بعد از تغییر مکان مشخصی ورق های مربوطه این حفرات به سیستم باربر جانبی افزوده شوند. بدین منظور دو مدل جهت بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی ساخته شد.

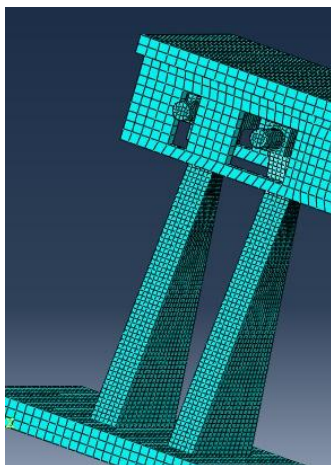
مدل اول میراگر دوسطحی که در آن حفرات با توجه به عرضشان دو تیپ هستند، شکل ۱۵. در تیپ اول عرض حفره دارای اندازه ای دقیقاً برابر با قطر پین بوده و در نتیجه به محض اعمال تغییر مکان، ورق های مثلثی متصل به پین درگیر خواهند شد و در تیپ دوم، همانطور در شکل ۱۶ نیز مشخص است، عرض حفره پنج سانتی متر بیش از قطر پین است. بدین معنا که بدنه پین از هر سمت با لبه حفره دو و نیم سانتی متر فاصله داشته و پس از تغییر شکل دو و نیم سانتی متری، معادل با دریافت یک درصد و سطح عملکرد بهره برداری، بدنه پین با بدنه حفره درگیر شده و دسته دوم ورق ها نیز فعال خواهند شد. به دلیل تماس و جدا شدن چندین باره پین با بدنه حفرات، به منظور کاهش زمان تحلیل و جلوگیری از واگرایی، با توجه به تقارن سیستم، تنها پلیت های یک سمت مدل سازی شدند و به دلیل رفتار موازی پلیت ها، تنها یک پلیت از پلیت های هر سطح عملکردی مدل سازی شد. پس از مش بندی مجدد مدل به دلیل تغییرات ایجاد شده، مطابق با شکل ۱۷، آنالیز مدل تحت بارگذاری یکنوا و چرخه ای، همان بارگذاری صحت سنجی اول، آغاز گردید.



شکل ۱۶: جزئیات لحاظ شده در اتصال پین ها و حفرات.

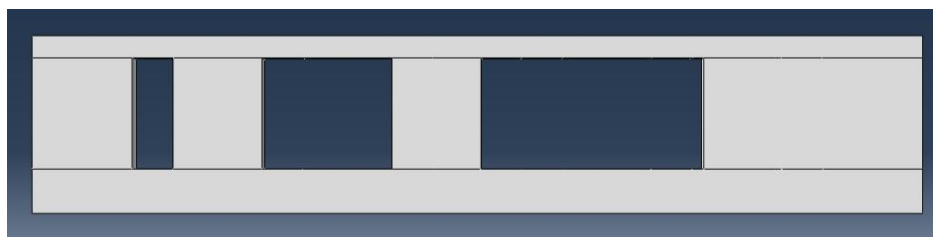


شکل ۱۵: ورق اتصال با دو تیپ سایز عرض حفرات.

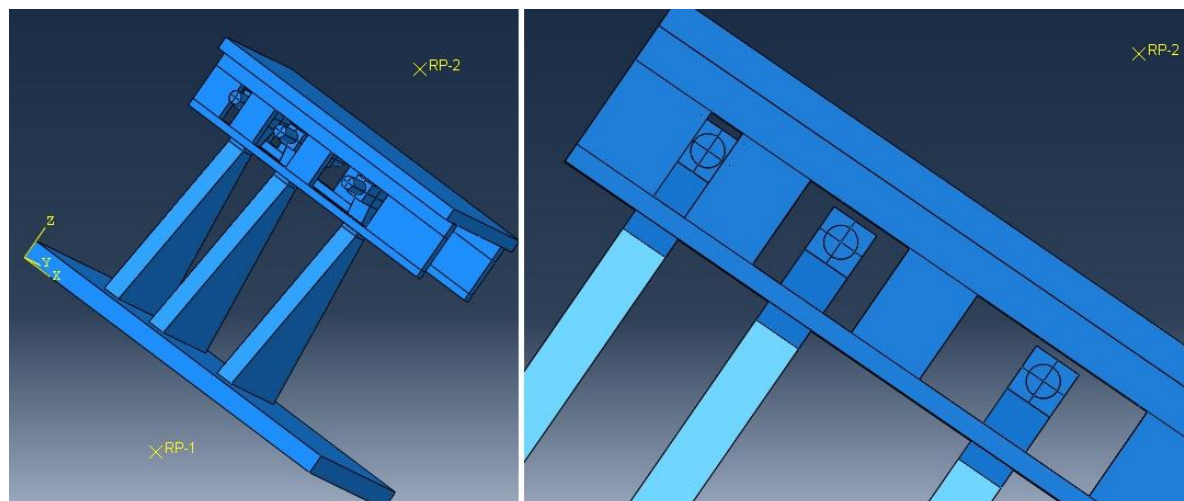


شکل ۱۷: مش بندی مدل.

مدل دوم میراگر چندسطحی که در آن حفرات با توجه به عرضشان سه تیپ هستند، شکل ۱۸. تیپ اول عرض حفره دارای اندازه‌ای دقیقاً برابر با قطر پین بوده و ورق‌های سطح عملکردی یک را فعال می‌کنند. تیپ دوم عرض حفره پنج سانتی متر بیش از قطر پین است و ورق‌های سطح عملکردی دو را پس از تغییر شکل دو و نیم سانتی متری، معادل با دریافت یک درصد و سطح عملکرد بهره برداری، فعال می‌کنند و تیپ سوم عرض حفره ده سانتی متر بیش از قطر پین است و ورق‌های سطح عملکردی سه را پس از تغییر شکل پنج سانتی متری، معادل با دریافت ۲ درصد و سطح عملکرد ایمنی جانی، فعال می‌کنند، شکل ۱۹. بدین معنا که بدنه پین از هر سمت با لبه حفره دو و نیم سانتی متر فاصله داشته و بدنه پین با بدنه حفره درگیر شده و دسته دوم ورق‌ها نیز فعال خواهند شد. به دلیل تماس و جدا شدن چندین باره پین با بدنه حفرات، به منظور کاهش زمان تحلیل و جلوگیری از واگرایی، با توجه به تقارن سیستم، تنها پل‌های یک سمت مدل سازی شدند و به دلیل رفتار موازی پل‌ها، تنها یک پل‌های هر سطح عملکردی مدل سازی شد. آنالیزهای مشابهی بر روی این مدل به جهت مقایسه عملکرد آن با مدل‌های پیشین صورت پذیرفت.



شکل ۱۸: ورق اتصال با دو تیپ سایز عرض حفرات.



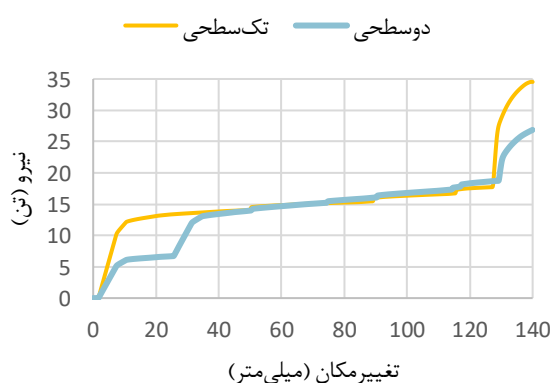
شکل ۱۹: جزئیات لحاظ شده در اتصال بین ها و حفرات.

۴- بحث بر روی نتایج

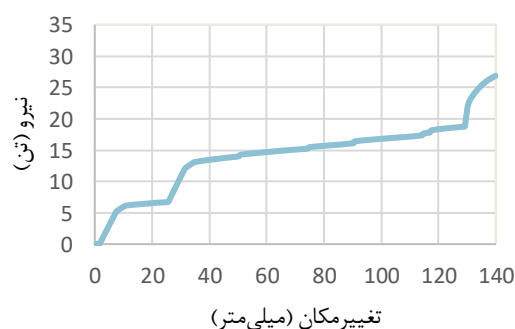
پس از طی مراحل صحت سنجی و سپس مدل سازی المان محدود و آنالیز سیستم پیشنهادی، در این بخش در چهار قسمت به بررسی و تحلیل نتایج پرداخته می شود.

۴-۱- تحلیل نتایج میراگر دو سطحی:

شکل ۲۰ منحنی نیرو-تغییر مکان مدل دوسطحی را تحت بارگذاری یکنوا و شکل ۲۱ مقایسه آن با مدل تک سطحی را نشان می دهد. همانطور که در منحنی شکل ۲۰ پیداست، در ابتدا با فعال شدن ورق های سطح یک سیستم یک سختی اولیه نشان داده و بعد وارد ناحیه پلاستیک شده و جذب انرژی سیستم بالا رفته است. با افزایش تقاضا و نزدیک شدن دررفت سیستم به دررفت در نظر گرفته شده برای فعال شدن سطح دوم عملکردی، معادل با تغییر مکان ۲.۵ سانتی متری در نظر گرفته شده برای گپ بین پین و بدنه حفرات، ورق های سطح دوم نیز فعال شده و سختی سیستم را بالا برده اند. با مشاهده منحنی شکل ۲۱ افزایش پلکانی سختی متناسب با افزایش تقاضا کاملاً قابل مشاهده است.



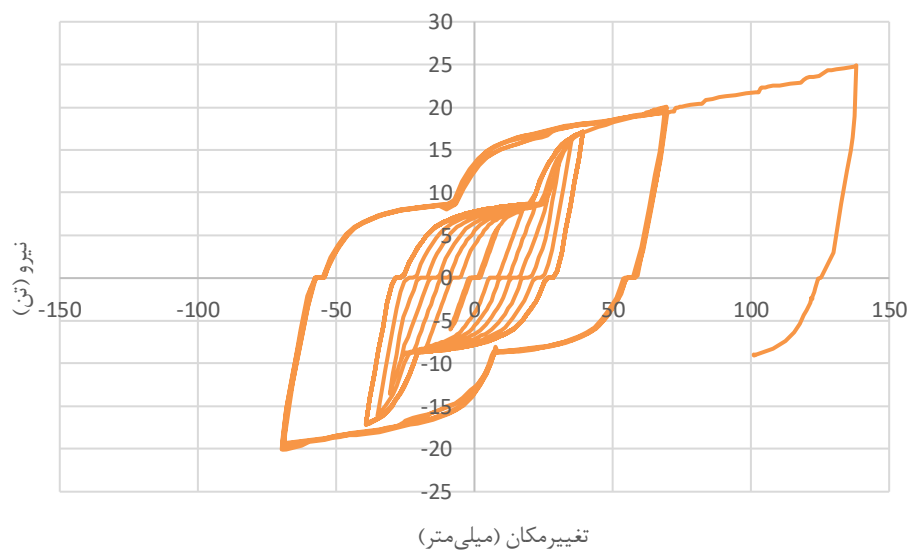
شکل ۲۱: مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل دوسطحی و تک سطحی.



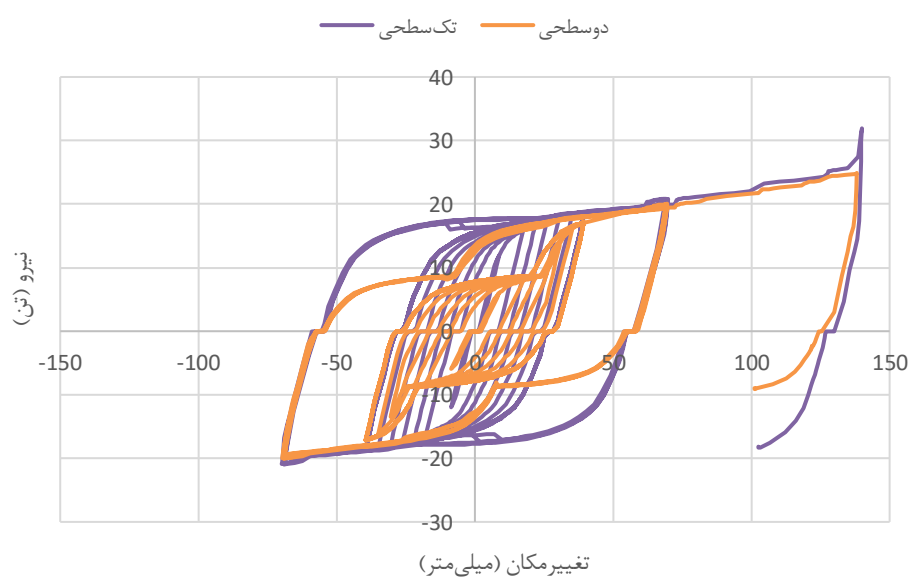
شکل ۲۰: منحنی نیرو-تغییر مکان مدل دوسطحی تحت بارگذاری یکنوا.

شکل ۲۲ منحنی هیستریزیس میراگر دوسطحی پیشنهادی را تحت بارگذاری چرخه ای و شکل ۲۳ نیز مقایسه آن با مدل تک سطحی را نشان می دهد. همانطور که در این دو منحنی پیداست سیستم پیشنهادی در کنار ارائه مقاومت نهایی یکسان به خوبی توانسته است عملکرد

هوشمندانه داشته و متناسب با تقاضا، سختی عرضه نماید و عملکرد دوسطحی سیستم طی چرخه ها و حرکت رفت و برگشتی اعمالی به وضوح پیداست.



شکل ۲۲: منحنی هیستریزیس میراگر دوسطحی.

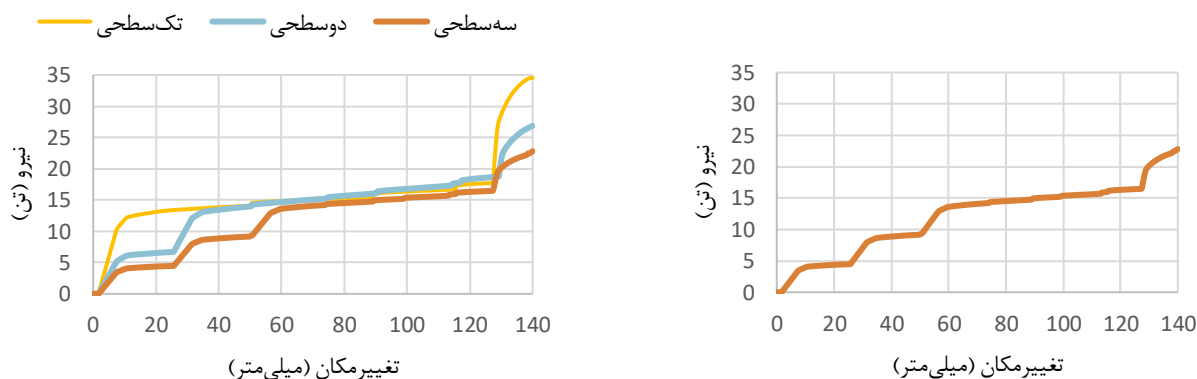


شکل ۲۳: مقایسه منحنی هیستریزیس میراگر دوسطحی با میراگر تک سطحی.

۲-۴- تحلیل نتایج میراگر چندسطحی:

شکل ۲۴ منحنی نیرو-تغییر مکان مدل چندسطحی (سه سطحی) را تحت بارگذاری یکنوا و شکل ۲۵ مقایسه آن با مدل تک سطحی و دوسطحی را نشان می دهد. همانطور که در منحنی شکل ۲۴ پیداست، در ابتدا با فعال شدن ورق های سطح یک سیستم یک سختی اولیه نشان داده و بعد وارد ناحیه پلاستیک شده و جذب انرژی سیستم بالا رفته است. با افزایش تقاضا و نزدیک شدن تغییر مکان به ۲.۵ سانتی

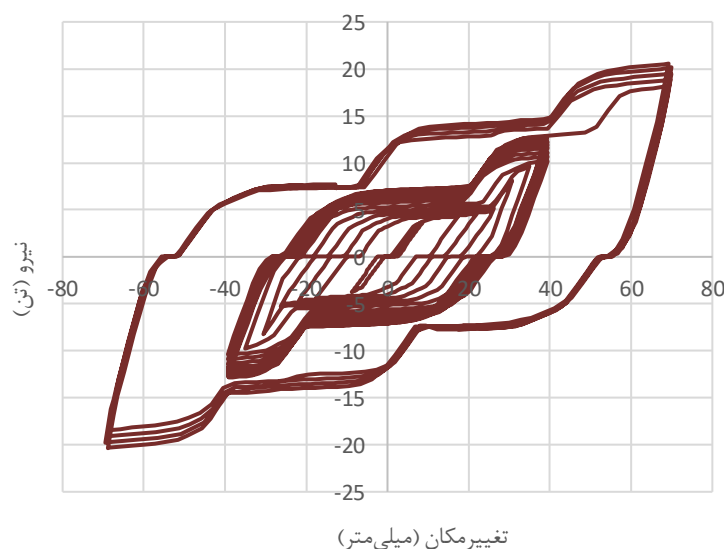
متر، ورق های سطح دوم نیز فعال شده و سختی سیستم را بالا برده اند. با ادامه افزایش تغییر مکان و رسیدن آن به ۵ سانتی متر، معادل دریافت ۲ درصد، ورق های سطح سه نیز فعال شده اند و مجددا سختی جدیدی به سیستم اضافه کرده اند. با مشاهده منحنی شکل ۲۵ افزایش تدریجی سختی کاملاً متناسب با افزایش تقاضا و بسیار هماهنگ تر با آن در مقایسه با مدل تک سطحی به خوبی قابل مشاهده است.



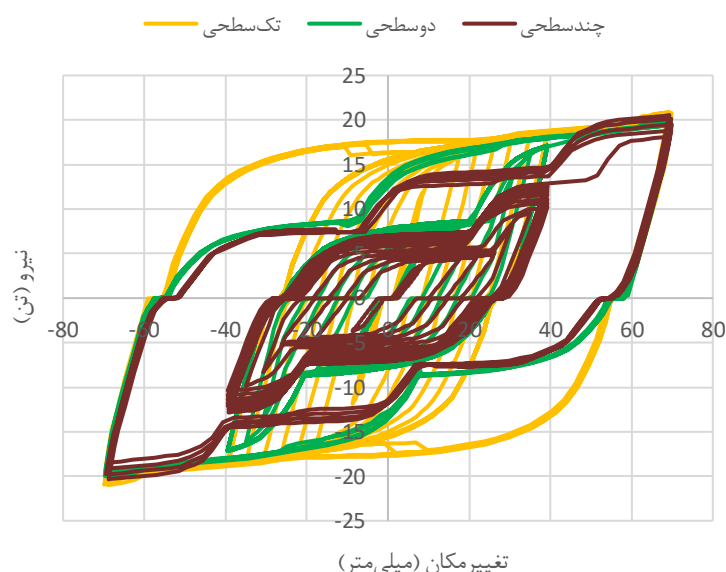
شکل ۲۵: مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل چندسطحی، دوسطحی و تک سطحی.

شکل ۲۴: منحنی نیرو-تغییر مکان مدل چند سطحی تحت بارگذاری یکنوا.

شکل ۲۶ منحنی هیستریزیس میراگر چندسطحی پیشنهادی را تحت بارگذاری چرخه ای و شکل ۲۷ نیز مقایسه آن با مدل های دو و تک سطحی را نشان می دهد. همانطور که در این دو منحنی پیداست، این سیستم نیز قادر به ارائه مقاومت نهایی یکسان در کنار عملکردی هوشمندانه در برقراری توازن بین تقاضا و عرضه (سختی) می باشد و به خوبی توانسته است عملکردی چندسطحی برای سیستم طی چرخه های رفت و برگشتی اعمالی فراهم نماید.



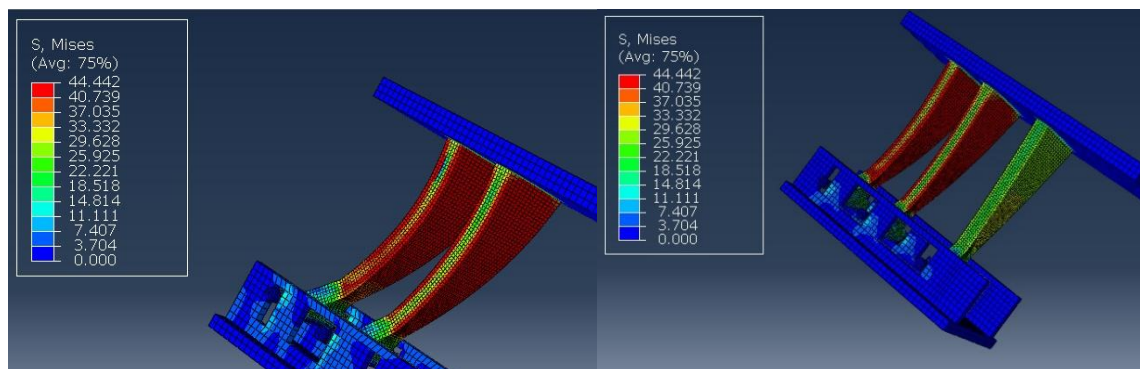
شکل ۲۶: منحنی هیستریزیس میراگر چندسطحی.



شکل ۲۷: مقایسه منحنی هیستریزیس میراگر چندسطحی با میراگر دو سطحی و تک‌سطحی.

۳-۴- بررسی کانتور تنش:

در شکل ۲۸ کانتور فون میسز تنش در لحظات پایانی یکی از چرخه‌های تغییر مکانی بزرگ مربوط به میراگرهای دو سطحی و چندسطحی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۲۸ پیداست تمام طول ورق‌های مثلثی در حال جذب انرژی هستند که این موجب می‌گردد مساحت داخل منحنی هیستریزیس و میزان جذب انرژی فیوز به میزان قابل توجهی افزایش یابد. همچنین در این شکل پیداست که تمرکز فاز خمیری تنها در ورق‌های مثلثی بوده و ورق‌های اتصال و سایر المان‌ها در ناحیه الاستیک باقی خواهند ماند. از با تمرکز خرابی در ورق‌های مثلثی و تعویض این ورق‌ها پس از زمین لرزه‌ها، هدف تعمیرپذیری حاصل می‌گردد.



شکل ۲۸: کانتور تنش در مدل‌های دو و چندسطحی.

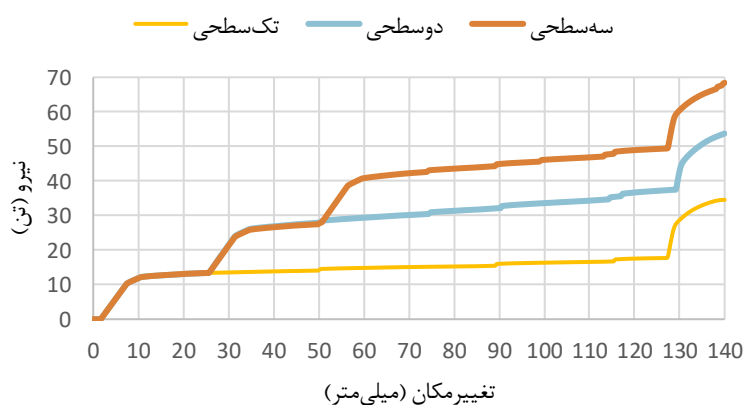
۴-۴- مباحث و توضیحات تکمیلی در مورد نتایج:

با بررسی و مقایسه دقیق منحنی نیرو - تغییر مکان میراگر تک‌سطحی با دو یا چندسطحی در شکل‌های ۲۱ و ۲۵ ملاحظه می‌گردد که میراگر چندسطحی تحت بار کوچکتر تغییر مکان بزرگتری را تجربه می‌نماید. دقت شود که این موضوع نشان دهنده ضعف این سیستم نبوده و در واقع بخشی از رفتار هوشمندانه و طراحی شده سیستم است. در بارهای کم (زلزله‌های سرویس یا سطح عملکرد بهره‌برداری)، تنها دسته اول ورق‌ها (سطح ۱) فعال است. از آنجایی که میراگر در سطح عملکرد اول خود سطح مقطع مؤثر کمتری نسبت به میراگر تک‌سطحی دارد (که تمام ورق‌ها از ابتدا در آن فعالند)، سختی اولیه کمتری نیز دارد که منجر به تغییر مکان بیشتر تحت بار یکسان می‌شود.

با نگاهی از زاویه دیگر، می‌توان مشاهده نمود که به شرط تامین الزامات عملکردی، در یک دریافت تحمیلی یکسان به سازه، میراگر چندسطحی به نسبت میراگر تکسطحی، نیروی لرزه‌ای به مراتب کمتری را به سایر المان‌های حیاتی همچون ستون‌ها و تیرها که عموماً به صورت نیرو کنترل طراحی می‌گردند، انتقال می‌دهد و این یک پدیده بسیار مطلوب در روند طراحی به حساب می‌آید. سختی بیشتر به معنای دریافت نیروی لرزه‌ای بیشتر است. با اتخاذ رویکرد چندسطحی با کاهش سختی در لرزه‌های خفیف، جذب نیروی لرزه‌ای در این سطوح نیز کنترل شده و هوشمندانه‌تر می‌شود.

دقت شود که تغییر مکان افزایش یافته، در محدوده مجاز و از پیش تعیین شده (مانند دریافت ۱٪ برای سطح بهره‌برداری) رخ می‌دهد. این طراحی، یک مبادله آگاهانه است که با قربانی کردن بخشی از سختی اولیه منجر به کاهش سطح نیروهای دریافتی و انتقالی و ذخیره ظرفیت شکل‌پذیری و مقاومت نهایی برای سطوح خطر بالاتر (زلزله‌های شدید) می‌شود. سطح اول برای مستهلک‌سازی انرژی در زلزله‌های کم تا متوسط طراحی شده است تا از فعال‌سازی زود هنگام سطوح بالاتر و خرابی گسترده جلوگیری شود و قابلیت تعمیرپذیری حفظ گردد. بنابراین، اهداف عملکردی سازه در سطوح خطر پایین‌تر، از طریق تعریف مناسب محدوده تغییر شکل سطح اول، کاملاً تأمین می‌گردد. این رویکرد، سختی را متناسب با تقاضا افزایش می‌دهد و اهداف عملکردی مانند بهره‌برداری (دریافت ۱٪) و ایمنی جانی (دریافت ۲٪) را با فعال‌سازی سطوح بعدی حفظ می‌کند.

در نهایت، در صورتی که بنا به ضرورت‌های طراحی نیاز به سختی اولیه بالاتر باشد، به سادگی با افزایش تعداد ورق‌های سطح اول می‌توان به این هدف دست یافت. به منظور شفاف‌سازی این موضوع، مدل‌هایی از میراگرهای دوسطحی و چندسطحی تهیه گردید که در آن تعداد ورق‌های در نظر گرفته شده برای سطح یک میراگر افزایش داده شده و به اندازه تعداد ورق‌های میراگر تکسطحی گردیده است و همین تعداد ورق هم برای سطح بعدی نیز در نظر گرفته شده است. شکل ۲۹ مقایسه بین منحنی نیرو-تغییر مکان این میراگرهای دو و چندسطحی با سختی بالاتر را با میراگر تکسطحی پیشین نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲۹ دیده می‌شود سختی اولیه و تغییر مکان‌ها تا زمان فعال شدن سطح دوم میراگرهای دو و چندسطحی یکسان است و پس از فعال شدن سطح دوم، سختی این میراگرها و نیروهای نظیر تغییر مکان‌های یکسان در آن به نسبت میراگر تکسطحی بسیار افزایش یافته است.



شکل ۲۹: مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل دو و چندسطحی با سختی افزایش یافته و مدل تکسطحی.

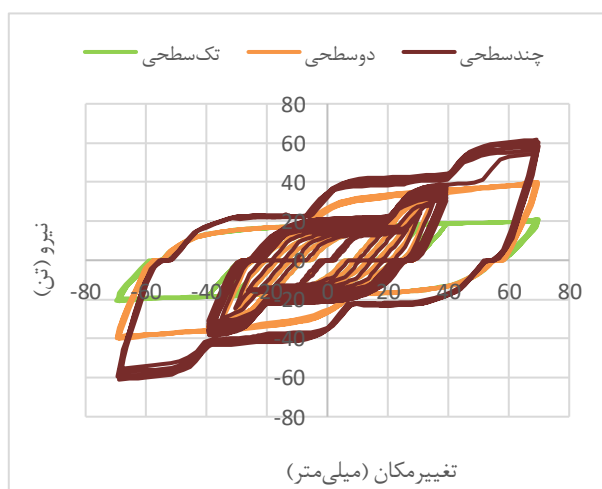
مورد قابل تامل دیگر این است که با بررسی دقیق منحنی‌های هیستریزس شکل‌های ۲۳ و ۲۷، از آنجا که میرایی هیستریزس در سیستم‌های غیرخطی متناسب با سطح زیر منحنی هیستریزس تفسیر می‌شود، این تصور ممکن است پیش بیاید که در مدل‌های چندسطحی در تغییر مکان‌های کوچک میرایی کاهش یافته است و در نتیجه آن خرابی در سازه افزایش خواهد یافت. این نگرانی در واقع شکل دیگری از نگرانی مطرح شده در ابتدای این بخش است و برای تشریح دقیق آن نیاز به تفسیر در بستر کامل تاریخچه زمانی یک زلزله دارد. در یک

چرخه مشخص با دامنه کم که تنها سطح اول فعال است، سطح زیر منحنی هیستریزیس و در نتیجه میرایی در آن چرخه خاص، ممکن است از میراگر تک سطحی کمتر باشد. اما در کل رویداد لرزه‌ای (به ویژه زلزله‌های شدید)، مزیت اصلی سیستم چندسطحی آشکار می‌شود. میراگر تک سطحی ممکن است به دلیل تغییر شکل‌های متمرکز و زیاد در نیمه اول زلزله شدید، دچار کاهش شدید سختی و حتی شکست زودرس شود. در مقابل، سیستم چندسطحی با فعال‌سازی تدریجی سطوح، سختی خود را در تغییر شکل‌های بزرگ حفظ می‌کند. این امر منجر به جذب انرژی کل قابل مقایسه یا حتی بیشتر در طول کل تاریخچه زلزله و در نهایت کنترل بهتر تغییر مکان‌های کلی سازه می‌گردد. در سیستم پیشنهادی، فعال‌سازی تدریجی سطوح، جذب انرژی را در مراحل بالاتر متمرکز می‌کند، و از خرابی گسترده در زلزله‌های متوسط جلوگیری می‌نماید. نتایج کانتور تنش تایید می‌کنند که آسیب به ورق‌های قابل تعویض محدود است، و مقاومت نهایی یکسان حفظ می‌شود.

از منظر دیگر، به این دلیل که در میراگر چندسطحی عرضه هوشمندانه و متناسب سختی در طول زلزله اتفاق می‌افتد، در چرخه‌های با دامنه کمتر، به دلیل سختی کمتر، انرژی کمتری از زلزله به سازه وارد شده و در نتیجه آن اساساً نیاز کمتری به استهلاک انرژی در مقایسه با سیستم تک سطحی است که تمام سختی مورد نیاز برای شدیدترین زلزله محتمل از همان ابتدا به سازه تزریق می‌گردد. بنابراین، اگرچه ممکن است میرایی در برخی چرخه‌های خاص کمتر به نظر برسد، اما استراتژی کلی، بهبود عملکرد سازه در طیف وسیعی از سطوح لرزه‌ای و جلوگیری از فروپاشی در زلزله‌های شدید را فراهم می‌آورد.

در این مورد نیز، چنانچه در مورد سازه‌هایی خاص سطوح عملکرد بسیار سختگیرانه و ویژه‌ای برای یک سازه مدنظر باشد، می‌توان برای سطوح مختلف تعداد ورق‌های بیشتری در نظر گرفته و با افزایش سختی، انرژی دریافتی از زلزله و در نتیجه آن میزان میرایی را افزایش داد. مدل‌های دو و چندسطحی تهیه شده با سختی بالاتر که پیش‌تر به آن پرداخت شده علاوه بر بارگذاری یکنوا، تحت بارگذاری چرخه‌ای نیز قرار گرفتند تا مقایسه میزان میرایی و جذب انرژی هیستریزیس این مدل‌ها با مدل تک سطحی نیز مورد مقایسه قرار گیرد. همانطور که در شکل ۳۰ مشاهده می‌گردد، با افزایش تعداد ورق‌های سطوح مختلف میراگرهای دو و چندسطحی جذب انرژی این میراگرها با میراگر تک سطحی یکسان شده و بعد از فعال شدن سطوح بالاتر، به مراتب میزان جذب انرژی و میرایی افزایش یافته است.

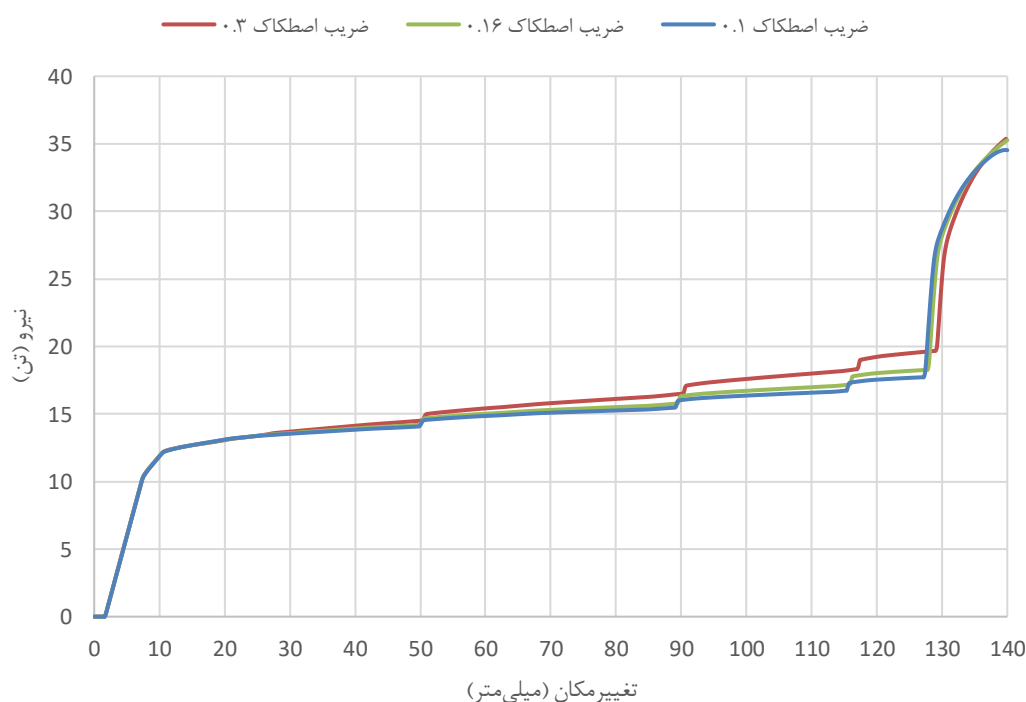
مجموعه مشاهدات و مقایسه نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی پیشنهادی برای میراگر چندسطحی، انعطاف‌پذیری بالایی در طراحی در اختیار طراح قرار می‌دهد تا متناسب با اهداف عملکردی مد نظر برای سازه پارامترهای طراحی میراگر و سازه را به سادگی متناسب‌سازی نماید.



شکل ۳۰: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل دو و چندسطحی با سختی افزایش یافته و مدل تک سطحی.

۴-۵- تحلیل نتایج جانبی حاصل در پژوهش در مورد ضریب اصطکاک:

همانطور که در بخش صحت سنجی اول عنوان شد، در سه پژوهش موازی انجام شده سه مقدار ضریب اصطکاک متفاوت (۰.۱، ۰.۱۶ و ۰.۳) برای نمونه ساخته شده گزارش شده بود که به ناچار در این پژوهش مدل سازی با هر سه ضریب اصطکاک صورت پذیرفت تا بهترین پارامتر مدل سازی مشخص گردد. شکل ۳۱ مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان سه مدل ساخته شده با ضرایب اصطکاک مختلف را تحت بارگذاری یکنوا نشان می دهد. همانطور که در شکل ۳۱ پیداست، با افزایش ضریب اصطکاک سختی سیستم نیز افزایش یافته است. علت این امر این است که هر چه اصطکاک بین پین و بدنه افزایش می یابد، ظرفیت بیشتری از سختی محوری (کششی) پلایت نیز در کنار سختی خمشی آن به کار گرفته شده و موجب افزایش سختی کل سیستم می شود. اما باید توجه داشت که این افزایش سختی اثر مطلوبی نیست، چراکه در طراحی دیده نشده است و باعث تحمل نیروی بیشتری در عضو تغییر شکل کنترل شده و در نتیجه نیروی بیشتری نسبت به انتظارات طراحی به اعضای دیگر انتقال می دهد. این نیروی اضافی انتقالی به سایر اعضا، به خصوص اعضا نیرو کنترل، می تواند بسیار خطرناک و بحرانی گردد. از این رو لازم است در اتصالانی مانند اتصال پین و حفره ای که عامل اصطکاک بر عملکرد سیستم تاثیر دارد، با صیقلی نمودن سطوح، رنگ آمیزی و سایر تکنیک ها، اصطکاک بین سطوح را به حداقل رساند.



شکل ۳۱: مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل تک سطحی با ضرایب اصطکاک متفاوت.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

۵-۱- در پژوهش حاضر با اصلاح مهاربند قطری و اضافه نمودن مدل خاصی از میراگرهای خمشی به آن، هدف ارائه سیستمی تعمیر پذیر با عملکرد چندسطحی بود.

۵-۲- برای بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی مدل های المان محدودی از سیستم ساخته شد. به منظور اطمینان از فرضیات و تنظیمات صحیح و انجام صحت سنجی مدل سازی المان محدود، دو مدل آزمایشگاهی با شاخصه های نزدیک به سیستم پیشنهادی از ادبیات تحقیق انتخاب گردید.

۳-۵- نتایج صحت سنجی بیانگر توان بالای مدل های المان محدود ساخته شده در پیش بینی رفتار نمونه های آزمایشگاهی و فرضیات و تنظیمات صحیح در مدل سازی بود. لذا با اتکا به این نتایج، مدل المان محدود سیستم پیشنهادی تهیه گردید و برای بررسی عملکرد آن، تحت بارگذاری های یکنوا و چرخه ای قرار گرفت.

۴-۵- در کنار مدل تک سطحی، مدل دوسطحی و مدل چندسطحی میراگرهای خمشی نیز تهیه گردید و با مقایسه رفتار آن ها با مدل تک سطحی مشاهده گردید که میراگر پیشنهادی به خوبی توانسته است عملکرد چندسطحی را برای سیستم و مهاربند تامین نموده و با رفتاری هوشمندانه سختی سیستم را متناسب با تقاضای لرزه ای افزایش دهد و در عین حال جذب انرژی بسیار مناسب و مقاومت نهایی یکسانی نشان دهد.

۵-۵- در کنار این موارد با متمرکز کردن رفتار پلاستیک و وظیفه جذب انرژی در ورق های خمشی میراگر امکان تعمیرپذیری را برای مهاربند قطری و سیستم پیشنهادی فراهم نماید.

۶-۵- از مزایای میراگر پیشنهادی و پیکربندی طراحی شده برای آن در داخل مهاربند قطری در مقایسه با میراگرهای مرسوم چون TADAS می توان از (۱) عملکرد چندسطحی تطبیق پذیر، (۲) تامین تعمیر پذیری در کنار محافظت از اعضای اصلی قاب (تمرکز آسیب در داخل مهاربند و باقی ماندن تیر و ستون در ناحیه الاستیک)، (۳) کنترل ساده و دقیق توالی فعال سازی از طریق تنظیم گپها، (۴) انعطاف پذیری در طراحی (امکان تنظیم سطوح عملکرد مختلف تنها با تغییر اندازه گپها) و سازگاری بهتر با معماری، (۵) ساده سازی مسیر انتقال بار و کاهش تمرکز تنش در تیرها و (۶) متناسب سازی عرضه و تقاضای لرزه ای و در نتیجه آن کنترل هوشمندانه نیروی دریافتی از زلزله و نیروی انتقالی به اعضای حیاتی سازه، نام برد.

مراجع

- [1] Bertero, V. V. (1994). *Performance of steel building structure during the Northridge earthquake* (Report No. UCB/EERC-94/09).
- [2] Popov, E. P., & Kasai, K. (1978). Eccentrically braced steel frames for earthquakes. *Journal of the Structural Division, ASCE*, *104*(ST9), 1409–1427.
- [3] 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.
- [4] Chan, R. W. K., Albermani, F., & Kitipornchai, S. (2013). Experimental Study Of Perforated Yielding Shear Panel Device For Passive Energy Dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, *91*(2), 14–25.
- [5] Maleki, S., & Mahjoubi, S. (2013). Dual-pipe Damper. *Journal of Constructional Steel Research*, *85*, 81–91.
- [6] Ahmadi, A., Alirezaei, M., & Sharifi, M. (2024). Experimental Evaluation of a Steel Braced Frame for Two Level of Performance. *Journal of Structural and Construction Engineering*, *11*(9), 260–280.
- [7] Symans, M., Charney, F., Whittaker, A., Constantinou, M., Kircher, C., Johnson, M., & McNamara, R. (2008). Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments. *Journal of Structural Engineering*, *134*(1), 3–21.
- [8] Tizhoosh Sardroodi, H., & Moaddab, E. (2021). Experimental And Numerical Evaluation of Two-Level Pipe Damper. *Journal of Structural and Construction Engineering*, *8*(3), 75–95.
- [9] Zahrai, S. M., & Vosooq, A. K. (2013). Study of an innovative two-stage control system: Chevron knee bracing & shear panel in series connection. *Structural Engineering and Mechanics*, *47*(6), 881–898.
- [10] Hossini Hashemi, B., & Alirezaei, M. (2016). Experimental and analytical investigation of a combined system for maximum energy dissipation in braced frames. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*.
- [11] Cheraghi, A., & Zahrai, S. M. (2017). Cyclic testing of multilevel pipe in pipe damper. *Journal of Earthquake Engineering*, [online] *21*(1), 1–24. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13632469.2017.1387191> (Accessed 1 Jan. 2024).
- [12] Pachideh, G., Kafi, M., & Gholhaki, M. (2020). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. *Structures*, *28*, 467–481.
- [13] Ibrahim, Y. E., Marshall, J., & Charney, F. A. (2007). A visco-plastic device for seismic protection of structures. *Journal of Constructional Steel Research*, *63*(11), 1515–1528.
- [14] Kim, D. H., Ju, Y. K., Kim, M. H., & Kim, S. D. (2014). Wind-induced vibration control of tall buildings using hybrid buckling-restrained braces. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *23*(7), 549–562.
- [15] Lee, C. H., Kim, J., Kim, D. H., Ryu, J., & Ju, Y. K. (2016). Numerical and experimental analysis of combined behavior of sheartype friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection. *Engineering Structures*, *114*, 75–92.
- [16] Shamshiri Dareini, H., & Hashemi, B. H. (2011). Use of Dual Systems in Tadas Dampers to Improve Seismic Behavior of Buildings in Different Levels. *Procedia Engineering*, *14*, 2788–2795.
- [17] Kim, D. H., Lee, C. H., & Ju, Y. K. (2017). Experimental investigation of hybrid buckling-restrained braces. *International Journal of Steel Structures*, *17*(1), 245–255.
- [18] Hosseini Hashemi, B., & Moaddab, E. (2017). Experimental study of a hybrid structural damper for multi-seismic levels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, *170*(10), 722–734.
- [19] Abaqus/CAE 2017, Build ID:2016_09_28-01.24.59 126836, Dassault Systemes.
- [20] Mohammadi, R. K., Nasri, A., & Ghaffary, A. (2017). TADAS Dampers in Very Large Deformations. *International Journal of Steel Structures*, *17*(2), 1–10.
- [21] Mohammadi, R. K., Nasri, A., & Ghamari, H. (2016). Some probable mistakes in the design of geometric configuration of TADAS damper. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, *16*(5).
- [22] Ghaffary, A., & Mohammadi, R. K. (2016). Framework for virtual hybrid simulation of TADAS frames using opensees and abaqus. *Journal of Vibration and Control*, *22*(1), 1–15.

[23] Vetr, M. G., Shafizadeh, A., & Nouri, A. R. (2020). Evaluating Seismic Performance of Steel Structures Equipped with MADAS Dampers in Comparison with Moment-Resisting Frames. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, *6*(4), 135–152.

[24] Khaleghian, F., & Tehranizadeh, M. (2007). Laboratory Study of New Metal Dampers Applying XShape Plate. In: *5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*. Tehran.