

Numerical study of the effect of slit shape with new geometry in slit dampers on the seismic performance of beam-to-column connections

Fatemeh Tanha Sartakhti¹  Mohammad Hossein Adibrad^{2✉} 

1.Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran .E-mail:

fatemehtanha7913@gmail.com

2.Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

E-mail: m.adibrad@razi.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

2026-02-19

Received in revised form

2026-05-29

Accepted

2026-06-13

Available online

2026-06-30

Keywords:

Energy dissipation,
Slit damper,
Semi-elliptical slit,
Slit height

ABSTRACT

This paper investigates and optimizes steel slit dampers with novel semi-elliptical shapes to enhance seismic performance of beam-to-column connections, preventing damage to primary structural members, inspired by failures in past earthquakes. These dampers achieve more uniform stress distribution and increased energy dissipation, particularly in the middle sections, compared to conventional designs.

Due to the brittle failure of many rigid beam-to-column connections in the Northridge and Kobe earthquakes, this research investigated and optimized steel slit dampers to improve the seismic performance of connections and prevent damage to primary structural members. The main innovation of this study lies in the use of semi-elliptical slit shapes instead of conventional slits, leading to a more uniform stress distribution across the damper surface and a significant increase in the contribution of the middle sections to energy dissipation.

Finite element analyses indicated that these novel dampers enhance energy absorption by up to 44.9% compared to dampers with conventional slits. Subsequent studies focused on two key parameters: slat width and slit height distribution. The results suggest that reducing slat width concentrates stress towards the damper and improves energy absorption by transferring stress distribution to the middle part of the slat. Conversely, increasing slat width, up to the point where primary structural members do not yield, enhances the overall connection resistance. Slit height distribution also plays a crucial role in damper performance, with the optimal configuration found to be a maximum slit height at the center of the damper, which withstands the highest bending moment (332.15 kJ of energy) and results in optimal stress distribution and maximum energy dissipation. Overall, this research demonstrates that employing semi-elliptical slits and optimizing geometric parameters such as slat width and slit height distribution is an effective strategy for significantly increasing the resistance and energy absorption of beam-to-column connections against seismic forces

Cite this article: Tanha Sartakhti, Fatemeh., & Adibrad, Mohammad Hossein. (2026). Numerical study of the effect of slit shape with new geometry in slit dampers on the seismic performance of beam-to-column connections. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(2), 20-34. DOI:10.22126/amcen.2026.13711.1077



© The Author(s).

DOI:10.22126/amcen.2026.13711.1077

Publisher: Razi University

Introduction

This research fundamentally aims to improve and enhance the seismic performance of rigid beam-to-column connections in steel structures. Given the history of connection failures in past earthquakes (e.g., Northridge, Kobe), this study pursues an innovative approach: utilizing semi-elliptical slot geometry in steel dampers. This geometric shape, by creating a more uniform stress distribution, allows for greater absorption of seismic energy and protects the main structural members.

Method

Analyses were conducted using Abaqus software via a nonlinear static approach with Solid elements (C3D20).

Connection modeling involved Tie constraints (for the T-plate to beam and column) and surface-to-surface contact.

To reduce computational load, a half model was used, and pinned boundary conditions were applied to the column.

Meshing was detailed in sensitive areas (1 cm) and coarser elsewhere.

Standard steel material properties were used, and a cyclic loading pattern consistent with experiments was applied.

Model validation was confirmed by comparing results with the experimental data of Oh et al. (2009).

Results

Slot Shape: The semi-elliptical slot damper absorbs 44.9% more energy than conventional slot shapes. Web Width (B): Narrower widths concentrate damage on the damper and protect the main members; controlled increases enhance strength. Slot Height Distribution (D): While height changes have minimal impact, optimal distribution (maximum height at the center) can increase strength and energy absorption by up to 7%. Specimen 6 (with a 2-degree slope) exhibited the best performance. Comparison Basis: Specimen 2, capable of sustaining 80-100% of the beam's plastic moment (per AISC 2005), was chosen as the benchmark to prevent beam damage

Conclusions

The use of semi-elliptical slotted dampers significantly improves the seismic performance of beam-to-column connections. These dampers absorb more energy and withstand higher forces compared to traditional dampers, while protecting the primary structural elements. Optimizing the slot geometry, particularly its height distribution, is key to maximizing these benefits.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



مطالعه عددی تأثیر شکل شکاف با هندسه جدید در میراگرهای شکافدار بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون

فاطمه تنها سرتختی^۱، محمدحسین ادیبراد^۲✉

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: fatemehtanha7913@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.adibrad@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹	
کلیدواژه‌ها: استهلاک انرژی، میراگر شکافدار، شکاف نیم بیضی، ارتفاع شکاف	با توجه به شکست ترد بسیاری از اتصالات گیردار تیر به ستون در زلزله‌های نورث‌ریچ و کوبه، این تحقیق به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصالات و جلوگیری از آسیب به اعضای اصلی سازه، به بررسی و بهینه‌سازی میراگرهای شکافدار فولادی پرداخته است. نوآوری اصلی این پژوهش، استفاده از شکل شکاف نیم‌بیضی به جای شکاف‌های مرسوم است که منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش در سطح میراگر و افزایش قابل توجه مشارکت نواحی میانی در جذب انرژی می‌شود. تحلیل‌های المان محدود نشان می‌دهد که میراگرهای با شکاف نیم بیضی، جذب انرژی را تا ۴۴.۹ درصد نسبت به میراگرهای با شکاف مرسوم افزایش می‌دهند. با کاهش عرض نوارها، تمرکز تنش به سمت میراگر منتقل شده و با تغییر توزیع تنش و افزایش تنش قسمت میانی نوار، جذب انرژی را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، افزایش عرض نوارها تا حدی که اعضای اصلی سازه وارد ناحیه پلاستیک نشوند، مقاومت کلی اتصال را افزایش می‌دهد. توزیع ارتفاع شکاف‌ها نیز نقش بسزایی در عملکرد میراگر ایفا می‌کند و پیکربندی بهینه، حالتی است که بیشترین ارتفاع شکاف در مرکز میراگر قرار گیرد. این حالت، منجر به توزیع بهینه تنش شده و علاوه بر تحمل بالاترین لنگر حداکثر اتلاف انرژی را باعث می‌شود. در نمونه‌های بررسی شده تغییر محل شکاف نیم بیضی بلندتر به شکلی که شکاف بلند تر از مرکز فاصله بگیرد تا ۷/۲۲ درصد مقاومت را کاهش می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت طراحی به جزئیات هندسی است. در مجموع، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از شکاف نیم‌بیضی و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی نظیر عرض نوارها و توزیع ارتفاع شکاف‌ها، راهکار مؤثری برای افزایش چشمگیر مقاومت و جذب انرژی اتصالات تیر به ستون در برابر نیروهای لرزه‌ای است.

استناد: تنها سرتختی، فاطمه؛ ادیبراد، محمدحسین. (۱۴۰۵). مطالعه عددی تأثیر شکل شکاف با هندسه جدید در میراگرهای شکافدار بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۲)، ۳۴-۲۰.

DOI:10.22126/amcen.2026.13711.1077



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

خرابی‌های گسترده و غیرمنتظره در محل اتصالات گیردار تیر به ستون در زلزله‌های نورث‌ریچ (سال ۱۹۹۴ میلادی) و کوبه (سال ۱۹۹۵ میلادی) مشاهده گردید. مطالعات انجام شده پس از وقوع آن زلزله‌ها نشان دادند که خرابی‌ها عمدتاً ناشی از شکست ترد اتصالات بوده است پس از آن کارهای تحقیقاتی متعددی برای رفع نواقص اتصالات گیردار تیر به ستون انجام شدند.

در حال حاضر سه روش برای بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات گیردار تیر به ستون وجود دارد: (۱) تقویت اتصال (۲) تضعیف تیر در محل اتصال تیر به ستون (۳) استفاده از سیستم اتلاف انرژی

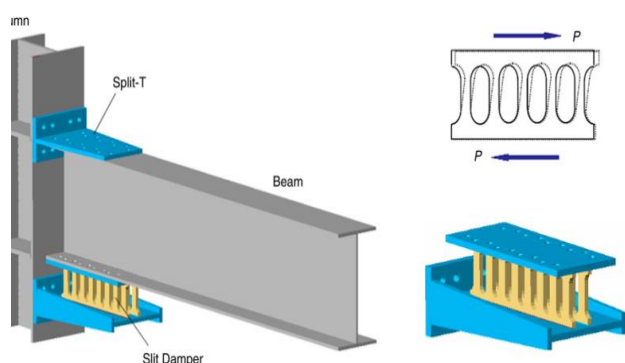
در روش اول برخی المان‌های اضافی به منظور نگه داشتن انتهای تیر در محدوده الاستیک در هنگام تشکیل مفصل پلاستیک به اتصال اضافه می‌گردد. در روش دوم یک بخش از بال تیر (RBS) و یا جان تیر (RWS) بریده می‌شود [۴] اگرچه دو روش فوق‌الذکر در آزمایشگاه عملکرد مناسبی از خود نشان دادند اما به دلیل اینکه در صورت آسیب رسیدن به اعضای اصلی به سادگی قابل تعمیر یا تعویض نیستند، استفاده از سیستم‌های اتلاف کننده انرژی پیشنهاد گردید. میراگرهای تسلیم شونده فلزی یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین انواع سیستم‌های اتلاف کننده انرژی برای جذب انرژی ورودی سازه می‌باشند [۲].

در سال ۲۰۰۹ آه و همکاران جهت رفع مشکل ضعف اتصالات گیردار تیر به ستون قاب‌های خمشی فولادی در برابر زلزله، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی اتصالات سازه‌ای با میراگر شکافدار با شکاف لوبیایی انجام دادند. نتایج آزمایش بارگذاری چرخه‌ای نشان داد که اتصالات مجهز به میراگرهای شکافدار رفتار هیستریزس خوبی را از خود نشان می‌دهند. همچنین تغییر شکل پلاستیک، فقط در میراگرهای شکافدار متمرکز شده و از رفتار غیر الاستیک تیر و ستون جلوگیری می‌کند [۱]. در سال ۲۰۱۳ صفاری و همکاران یک مطالعه پارامتری به منظور یافتن بهترین پیکربندی میراگرهای شکافدار با توجه به نسبت‌های مختلف طول تیر به عمق تیر انجام دادند. آن‌ها از میراگرهای شکافدار فولادی به عنوان عنصر اتلاف انرژی برای افزایش شکل پذیری اتصالات تیر به ستون استفاده کردند. اتصالات پیشنهادی آن‌ها برای ایجاد تاخیر در شکست از یک سیستم پیچیده انتقال بار که از صفحات اضافی قرار

گرفته در مسیر انتقال بار از تیر به ستون تشکیل شده بود، استفاده می‌کرد. به طور کلی میراگرهای شکافدار به صورت برشی یا خمشی تسلیم می‌شوند. از این رو، برای دو مکانیسم تسلیم مختلف (تسلیم برشی و تسلیم خمشی) جزئیات برای طراحی میراگرهای شکافدار پیشنهاد و مقاومت و شکل پذیری اتصال مقایسه شدند. بررسی نتایج در نهایت منجر به پیشنهاد یک اتصال اصلاح شده گردید. همچنین نتایج المان محدود نشان داد که این نوع اتصال ظرفیت اتلاف انرژی بالایی دارد. با این حال، میراگرهای شکافدار طراحی شده بر اساس تسلیم خمشی باعث دستیابی اتصال به مقاومت و شکل پذیری نسبتاً بالاتری شدند اما هزینه ساخت و مصالح آن‌ها در مقایسه با میراگرهای شکافدار که بر اساس معیارهای تسلیم برشی طراحی شده بودند بیشتر بود. از این رو، استفاده از معیارهای تسلیم برشی برای طراحی میراگرهای شکافدار از نظر عملکرد و هزینه ساخت توصیه شد [۳].

در سال ۲۰۱۸ فراهی شهری و موسوی رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون با میراگرهای شکافدار با شکاف بیضی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در میراگر شکافدار پیشنهادی با شکاف‌های بیضی، توزیع تنش در امتداد پایه‌های میراگر بهبود می‌یابد. علاوه بر این، استفاده از شکاف‌های بیضی منجر به مشارکت بیشتر قسمت میانی پایه‌ها در اتلاف انرژی می‌شود. در نتیجه، شدت تنش در قسمت‌های انتهایی میراگرها کاهش می‌یابد. همچنین میراگرهای شکافدار بیضی به طور موثری به اتلاف انرژی کمک می‌کنند [۵]. در سال ۱۳۹۵ بلوچی و جابریزاده میراگر شکافدار فولادی با شکاف‌های مثلثی در اتصالات تیر به ستون را مورد بررسی قرار دادند. عملکرد اتصال پیشنهادی تحت آنالیز استاتیکی غیر خطی بصورت چرخه‌ای در محیط نرم افزار المان محدود مدل‌سازی شد و بهترین هندسه معرفی گردید که باعث بیشترین تمرکز تغییر شکل پلاستیک در میراگر همراه با کاهش لنگر و آسیب وارده به اتصال می‌شد و رفتار هیستریک پایدار و بیشترین میزان استهلاک انرژی را نشان می‌داد. استفاده از میراگر با شکاف مثلثی در اتصالات تیر به ستون عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به استفاده از میراگر متداول با شکاف لوبیایی در اتصالات تیر به ستون از خود نشان داد [۶]. در سال ۱۳۹۶ مقدم راد و حق الهی اثر نحوه توزیع ارتفاع شکاف بر عملکرد میراگر شکافدار را در اتصال تیر

مفاصل پلاستیک در آن‌ها موجب استهلاک انرژی می‌شوند. مطابق با شکل (۱) در اتصالات تیر به ستون، میراگر شکافدار به‌عنوان رابط نشیمن تیر در بال پایین تیر نصب می‌شود. میراگرهای شکافدار با تسلیم شدن تحت جابجایی کوچک، امکان جذب نیرو و انرژی وارده به اتصال را فراهم و از رفتار غیر الاستیک تیرها و ستون‌ها جلوگیری می‌کنند. از بارزترین خصوصیات آن‌ها راحتی در ساخت به علت عدم پیچیدگی زیاد در شکل و تکنولوژی ساخت، قابلیت تعویض آسان در صورت آسیب‌دیدگی به علت استفاده از اتصال پیچی در میراگر شکافدار به‌وسیله پیچ‌های پر مقاومت، رفتار هیستریزس عالی و ظرفیت اتلاف انرژی زیاد را می‌توان بیان نمود.



شکل ۱. معرفی اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر شکافدار (Oh et al, 2009)

۲. روش تحقیق

در این تحقیق برای مدل سازی از نرم افزار اجرای محدود آباکوس استفاده شده است و برای اطمینان از نحوه مدل سازی و صحت سنجی آن در ابتدا مدل آزمایش شده‌آه و همکاران (Oh et al, 2009) مدل گردید و تحت بارگذاری مشابه با شرایط آزمایشگاهی قرار گرفت. در ادامه مدل مربوطه به همراه نتایج نرم افزار که نشان از دقت مناسب مدل سازی داشته، آورده شده است.

۱-۲. هندسه نمونه

در شکل (۳ و ۲) مشخصات ابعادی اجزای تشکیل‌دهنده اتصال به همراه نحوه انجام آزمایش نمایش داده شده است.

به ستون مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی نمونه‌ها در نرم افزار المان محدود نشان داد که با توزیع ارتفاع شکاف‌ها به حالت شکاف‌های کوچک و بزرگ به صورت یک در میان با یک نسبت مشخص نسبت به حالتی که شکاف‌ها با ارتفاع یکسان توزیع شده‌اند عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد و موجب توزیع بهتر تنش در سطح میراگر و افزایش ظرفیت استهلاک انرژی می‌گردد (مقدم راد و حق الهی، ۱۳۹۶).

در سال ۱۴۰۰ علوی نیا و همکاران به بررسی رفتار میراگرهای شکافدار فولادی در سازه‌های بتنی پرداختند. به همین منظور ۴ مدل از میراگر شکافدار فولادی به صورت ۳ شکاف تکی و دوبل، ۵ شکاف تکی و دوبل در سه ضخامت ۶، ۸ و ۱۰ میلیمتر طراحی شده و در قاب بتنی با مهاربند تک قطری در محل اتصال مهاربند به تیر و ستون قرار گرفت. اثرات افزایش تعداد شکاف‌ها از ۳ به ۵ از تکی به دوبل و نیز اثر افزایش ضخامت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت میراگر، سطح زیر نمودار نیرو - تغییرمکان، سختی و مقاومت در قاب افزایش می‌یابد. همچنین قاب‌هایی که از میراگرهای ۳ شکاف دوبل بهره می‌برند نسبت به قاب‌هایی که میراگر آن ۵ شکاف دارد عملکرد مطلوبتری را خواهند داشت [۸].

با توجه به پیشینه تحقیق در این پژوهش، ضمن معرفی شکل شکاف نیم‌بیضی به ارزیابی آن به عنوان جایگزینی برای هندسه‌های مرسوم شکاف در میراگرهای فولادی پرداخته شده است. شکاف نیم بیضی با توزیع بهینه‌تر تنش در سطح میراگر، مشارکت نواحی مرکزی را در جذب انرژی افزایش داده و منجر به ارتقاء عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون می‌شود. علاوه بر این، تأثیر عرض نوارهای میراگر و نحوه توزیع ارتفاع شکاف‌های میراگر مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۱. میراگر شکافدار

میراگر شکافدار فولادی یک ورق یا پروفیل استاندارد است که تعدادی شکاف در جان آن قرار گرفته است. نوارهایی که بین شکاف‌ها قرار دارند با جذب تغییر شکل‌های غیر الاستیک و ایجاد

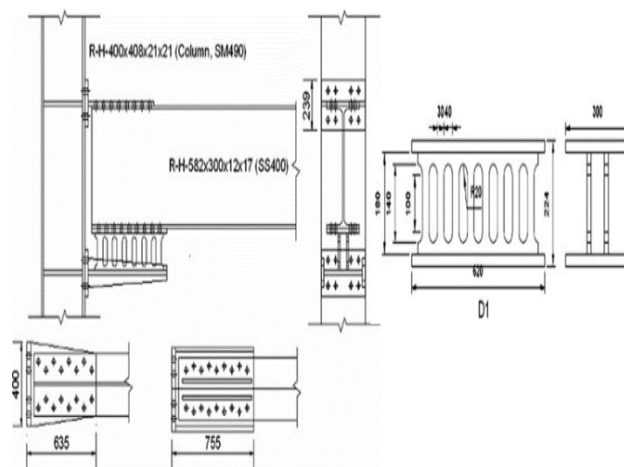
۲-۲. مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی

در جدول (۱) مشخصات مکانیکی فولاد استفاده شده در اجزای مختلف اتصال ذکر شده است. در مدل آباکوس، منحنی تنش-کرنش به صورت دوطبقی فرض شده و مشخصات ماده شامل چگالی فولاد برابر با ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ضریب پواسون ۰.۳ و مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال برای تیر، ستون، میراگر و اتصالات در نظر گرفته شده است. نواحی تکیه‌گاهی و محل اعمال بار برای جلوگیری از تمرکز تنش به صورت صلب مدل شده است.

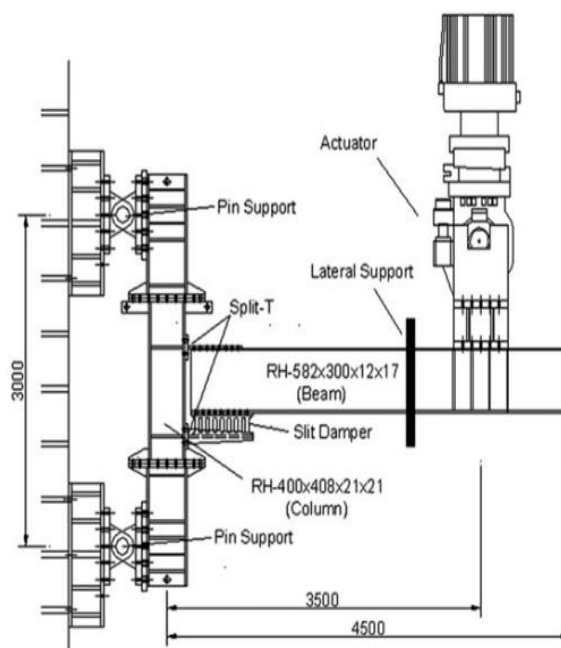
۳-۲. بارگذاری

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، نواحی مربوط به اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها به منظور جلوگیری از تمرکز تنش و دستیابی به شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تر رفتار سازه، به صورت صلب مدل‌سازی شده‌اند. بر این اساس، محل اعمال بار در نرم‌افزار به صورت یک خط تعریف گردیده و مقادیر جابجایی بر اساس شرایط آزمایشگاهی، در همان ناحیه اعمال شده است.

با استفاده از داده‌های استخراج شده از نمودار لنگر-دوران در پژوهش آه و همکاران (که به عنوان مرجع اصلی در نظر گرفته شده است)، مقادیر دوران در ۱۵ گام بارگذاری محاسبه گردید که جزئیات آن در جدول (۲) ارائه شده است. از این مقادیر دوران، می‌توان جابجایی متناظر در هر گام بارگذاری را نیز محاسبه نمود. تحلیل به صورت غیرخطی و نوع حل گر Static General انتخاب شد. تحلیل استاتیکی غیرخطی با بارگذاری تناوبی روی اتصال تیر به ستون مجهز به میراگر شکاف دار انجام شده است. این بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان بوده و به صورت تغییر مکان رفت و برگشتی است تا اتصال در شرایط مشابه آزمایش قرار گیرد.



شکل ۲. مشخصات ابعادی نمونه آزمایشگاهی (Oh et al, 2009)



شکل ۳. مشخصات و ابعاد هندسی قطعات اتصال تیر به ستون

جدول ۱. معرفی خصوصیات مکانیکی فولاد مصرفی در نمونه آزمایشگاهی

Test specimen		Steel grade	σ_y (Mpa)	σ_u (Mpa)	Elo(%)
Beam	Web(t=12mm)	SS400	339	488	27
	Flange(t=17mm)	SS400	318	480	30
Column	Web(t=20mm)	SM490	395	554	27
	Flange(t=20mm)	SM490	378	551	24
Split-T	Web(t=22mm)	SM490	388	577	25
	Flange(t=35mm)	SM490	386	573	24
Slit Plate(t=19mm)		SS400	288	464	30

جدول ۲. مقادیر جابجایی در هر گام

جابجایی (m)	لنگر (kN.m)	دوران (Rad)
0.00771876	353.25	0.00441072
-0.00807039	-363.413	-0.00461165
0.016440865	459.871	0.00939478
-0.01679249	-470.034	-0.00959571
0.033100025	604.484	0.0189143
-0.03345458	-591.765	-0.0191169
0.0489699	710.975	0.0279828
-0.04972765	-652.487	-0.0284158
0.066431225	794.556	0.0379607
-0.06719615	-682.678	-0.0383978
0.082707275	832.396	0.0472613
-0.08109273	-697.68	-0.0463387
0.09893905	871.932	0.0565366
-0.09816905	-689.743	-0.0560966
0		

برای اتصال ورق‌های T شکل به تیر از قید Tie استفاده گردید بدلیل وجود پیچ‌های متعدد و نبود اصطکاک بین سطوح امکان ساده‌سازی مدل فراهم شده و لذا پیچ‌ها در مدل‌سازی حذف و با قید Tie قطعات به یکدیگر متصل شدند. اما در اتصال قطعه T شکل به ستون، فقط نواحی دارای پیچ Tie شده و سایر بخش‌ها با قید تماس سطح به سطح مدل شدند. برای دیگر قطعات در تماس نیز از Tie استفاده شد. با توجه به وجود تقارن در مدل و به‌منظور کاهش حجم تحلیل، مدل به صورت نیمه ساخته شد. دو انتهای ستون مفصلی و تمام درجات آزادی انتقالی بسته در نظر گرفته شد همچنین یک تکیه‌گاه جانبی نیز در جهت عمود بر صفحه برای جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه اعمال گردید.

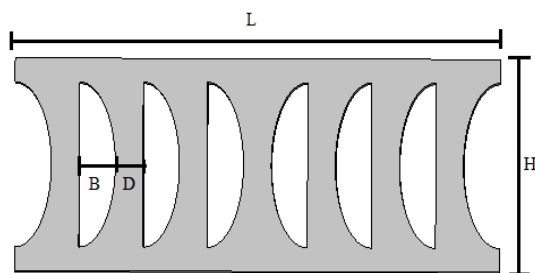
با در نظر گرفتن تأثیر قابل توجه اندازه المان (mesh size) بر پاسخ سازه، فرآیند مش‌بندی به صورت هوشمندانه انجام شد. در ابتدا، نواحی حساس با دقت بیشتری پارتیشن‌بندی شدند. این تقسیم‌بندی به گونه‌ای صورت گرفت که ضخامت هر جزء (part) و همچنین بخش‌هایی با مشخصات مصالح متفاوت، به صورت مجزا در نظر گرفته شوند تا نظم در مش‌بندی حفظ گردد.

به طور خاص، در ورق T شکل پایینی و ناحیه میراگر که انتظار تمرکز تنش بالایی می‌رود، از شبکه‌بندی ریزتر (با اندازه المان ۱ سانتی‌متر و کمتر) استفاده شده است. این اقدام منجر به دقت بالاتر در تحلیل تمرکز تنش در این نواحی حساس می‌شود. در مقابل،

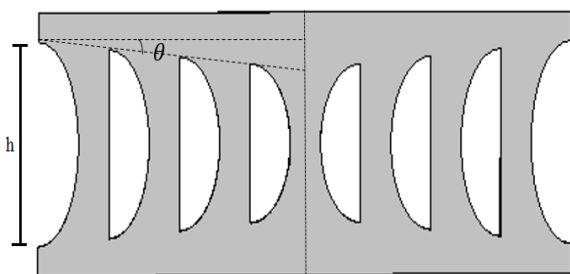
۴-۲. مدل‌سازی و صحت‌سنجی

ساخت قطعات با المان‌های Solid انجام شد و در مرحله مونتاژ به‌صورت Dependent اسمبل گردید. به دلیل رفتار غیرخطی تنش- کرنش و احتمال ایجاد کرنش پلاستیک، لازم است کرنش کل به بخش‌های الاستیک و پلاستیک تفکیک شود؛ این موضوع مطابق داده‌های آزمایشگاهی منبع مرجع در مدل لحاظ شده است.

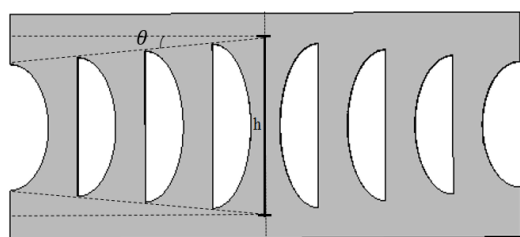
نمونه‌های ۱ تا ۳، مقایسه نتایج این نمونه‌ها (با شکاف نیم‌بیضی) با نمونه مرجع (با شکاف لوبیایی) در بخش‌های بعدی مقاله است. برای تسهیل این مقایسه طول (L) و ضخامت (t) میراگرها مشابه نمونه مرجع در نظر گرفته شد. سپس، ابعاد B و D به گونه‌ای تعیین شدند که امکان ایجاد تعداد و فاصله معقولی از شکاف‌ها در طول میراگر فراهم شود.



شکل ۵. پارامترهای هندسی میراگر شکافدار نیم بیضی با ارتفاع شکاف ثابت



شکل ۶. پارامترهای هندسی میراگر شکافدار نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف‌ها با شیب صعودی

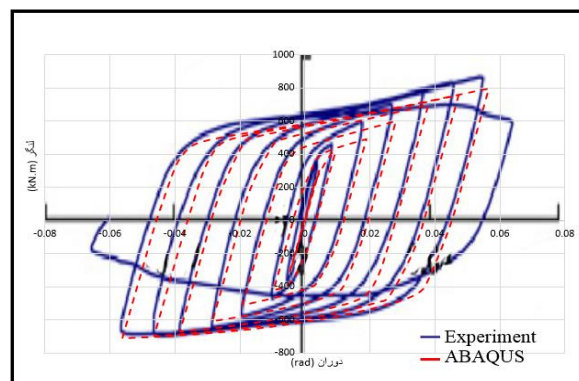


شکل ۷. پارامترهای هندسی میراگر شکافدار نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف‌ها با شیب نزولی

برای سایر بخش‌های سازه که تنش کمتری دارند، از شبکه‌بندی درشت‌تر (با اندازه مش ۵ سانتی‌متر) بهره گرفته شده است تا از افزایش بی‌رویه تعداد المان‌ها و زمان محاسبات جلوگیری شود.

المان‌های Hex با روش Structured انتخاب و نوع المان C3D20 با تابع شکل Quadratic و بدون Reduced integration به کار گرفته شد تا دقت نتایج افزایش یابد.

پس از بارگذاری مطابق با الگوی استفاده شده در آزمایشگاه همانطوری که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد منحنی هیستریزیس بدست آمده از مدل تحلیلی همپوشانی خوبی با نمونه آزمایشگاهی داشته و لذا صحت سنجی مدل ساخته شده در نرم افزار مورد تایید قرار می‌گیرد.



شکل ۴. صحت سنجی نمونه تحلیلی با نمونه آزمایشگاهی

۵-۲. مطالعات پارامتریک

به منظور بررسی تأثیر عرض نواری میراگر شکافدار نیم بیضی، ۳ نمونه با عرض نوار و شکاف متفاوت به گونه‌ای که ارتفاع تمام شکاف‌ها با هم برابر باشد، مطابق با جدول (۳) و شکل (۵) مدل‌سازی شد. با توجه به اینکه حداکثر لنگر تحمل شده در نمونه ۲ بین هشتاد تا صد درصد لنگر پلاستیک تیر است بنابراین تیر دچار خرابی نشده و ضوابط آیین نامه AISC 2005 را برای شکل پذیری متوسط و ویژه برآورده می‌سازد لذا از نمونه ۲ به عنوان مبنا به منظور بررسی تأثیر نحوه توزیع ارتفاع شکاف‌ها با شیب صعودی و نزولی، مطابق با جداول (۵و۴) و شکل‌های (۷و۶) برای مدل‌سازی سایر نمونه‌ها استفاده گردید دلیل انتخاب مقادیر مختلف B در

جدول ۳. مشخصات هندسی نمونه‌های تحلیلی با عرض متغیر و ارتفاع شکاف ثابت

نام میراگر	L(mm)	D(mm)	B(mm)	t(mm)	H(mm)	h(mm)
نمونه ۱	560	24	49	19	180	140
نمونه ۲	560	32	42	19	180	140
نمونه ۳	560	40	35	19	180	140

جدول ۴. مشخصات هندسی نمونه‌های تحلیلی با توزیع ارتفاع شکاف با شیب صعودی

نام میراگر	θ (deg)	L(mm)	D(mm)	B(mm)	t(mm)	H(mm)	h(mm)
نمونه ۲	0	560	32	42	19	180	140
نمونه ۴	2	560	32	42	19	180	140
نمونه ۵	4	560	32	42	19	180	140

جدول ۵. مشخصات هندسی نمونه‌های تحلیلی با توزیع ارتفاع شکاف با شیب نزولی

نام میراگر	θ (deg)	L(mm)	D(mm)	B(mm)	t(mm)	H(mm)	h(mm)
نمونه ۲	0	560	32	42	19	180	140
نمونه ۶	-2	560	32	42	19	180	140
نمونه ۷	-4	560	32	42	19	180	140

۳. نتایج تحلیل مدل‌های مختلف

۳-۱. بررسی تأثیر عرض نوارهای میراگر شکافدار نیم بیضی با ارتفاع

شکاف ثابت

۳-۱-۱. رفتار تنش

در شکل (۸) کانتورهای تنش فون میسز نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌گردد تنش‌های بزرگتری با افزایش عرض نوار میراگر در اتصال ایجاد می‌گردد. با توجه به اصل عدم آسیب به اعضای اصلی، افزایش عرض نوار میراگر تا جایی ادامه یافت که تنش در اعضای اصلی بدون اینکه وارد ناحیه پلاستیک شود به میراگر هدایت گردد.

۳-۱-۲. رفتار هیستریزیس

در شکل (۹) نمودار هیستریزیس لنگر-دوران نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود نمونه‌ها رفتار هیستریزیس پایدار و منظمی را از خود نشان می‌دهند. همچنین با کاهش عرض نوار میراگر فولادی شکافدار حداکثر لنگر تحمل شده توسط اتصال

کاهش می‌یابد. نمونه ۳ لنگری فراتر از لنگر پلاستیک تیر (۱۲۷۰ kN.m) متحمل شده است که موجب خرابی در تیر فولادی می‌گردد. در نمونه ۱ مقدار لنگر در وجه ستون در زوایای دوران ۰.۰۲ و ۰.۰۴ رادیان کمتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر است بنابراین ضوابط آیین‌نامه AISC 2005 را برای شکل‌پذیری متوسط و ویژه برآورده نمی‌کند. درحالی‌که حداکثر لنگر تحمل شده در نمونه ۲ کمتر از ۱۰۰ و بیشتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر است بنابراین تیر دچار خرابی نشده و ضوابط آیین‌نامه AISC 2005 را برای شکل‌پذیری متوسط و ویژه برآورده می‌سازد.

۳-۱-۳. کرنش معادل پلاستیک

نتایج حاصل از کرنش معادل پلاستیک (PEEQ) در شکل (۱۰) نشان داد که کرنش معادل پلاستیک در میراگر شکافدار با شکاف نیم بیضی با افزایش عرض نوار میراگر، افزایش می‌یابد. افزایش این شاخص بیانگر افزایش کرنش و تغییر شکل بیشتر در میراگر است. افزایش عرض نوار میراگر تا جایی ادامه یافت که تجمع کرنش

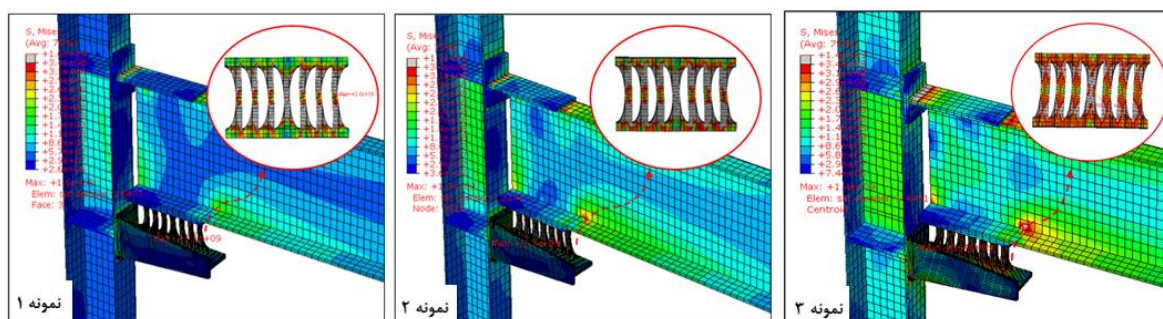
بیشتری از میراگر وارد حیطه پلاستیک شده و انرژی بیشتری را جذب می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش شیب توزیع ارتفاع شکاف‌ها در میراگر محدوده پلاستیک شده میراگر افزایش می‌یابد. با توجه به اصل عدم آسیب به اعضای اصلی، افزایش شیب توزیع ارتفاع شکاف‌ها در میراگر تا جایی ادامه یافت که تنش در اعضای اصلی بدون اینکه تیر وارد ناحیه پلاستیک شود به میراگر هدایت گردد.

معادل پلاستیک در میراگر صورت گیرد و در اعضای اصلی کرنش معادل پلاستیک مشاهده نشود.

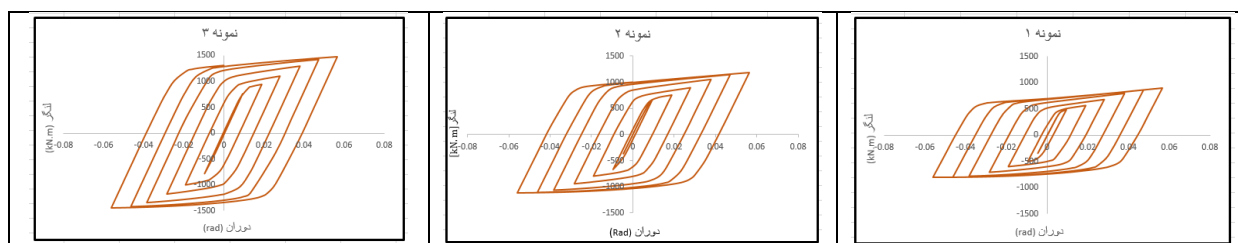
۲-۳. بررسی تأثیر نحوه توزیع ارتفاع شکاف‌ها بر رفتار میراگر شکافدار

۱-۲-۳. رفتار تنش

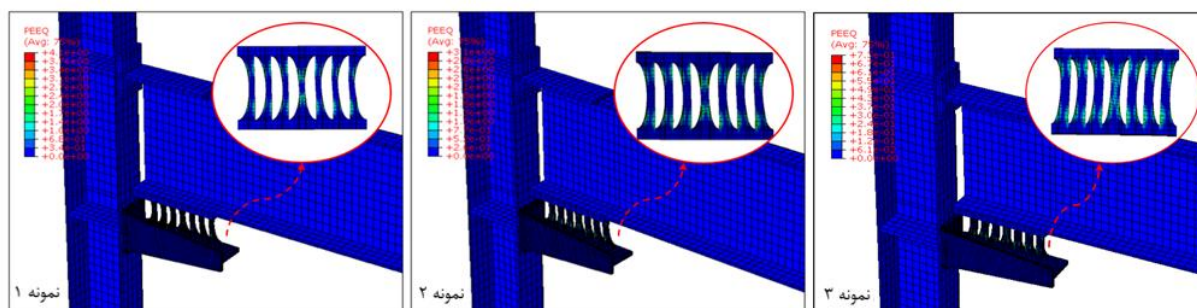
بر اساس نتایج مشاهده شده در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) می‌توان دریافت هنگامی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در وسط و کمترین آن در گوشه باشد (نسبت به حالتی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در گوشه و کمترین آن در وسط باشد) قسمت



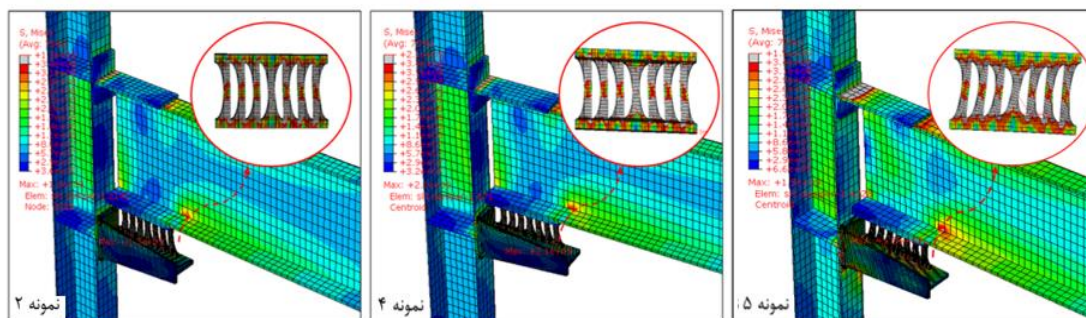
شکل ۸. کانتور تنش فون میسز میراگر شکافدار نیم بیضی با عرض متغیر و ارتفاع شکاف ثابت



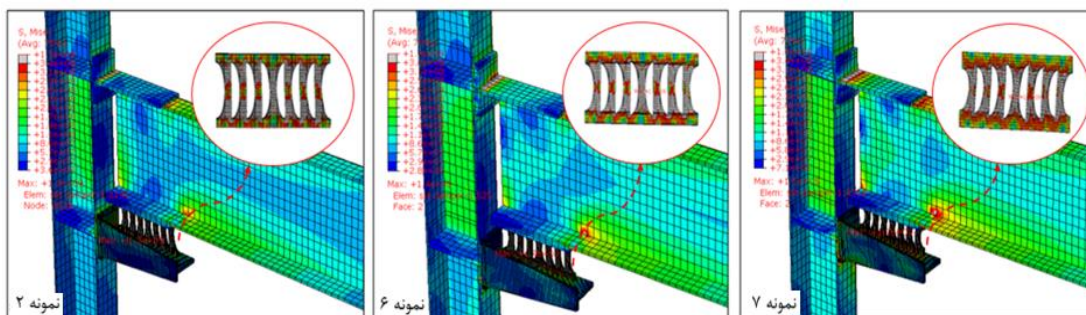
شکل ۹. نمودار هیستریزیس میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با عرض مختلف



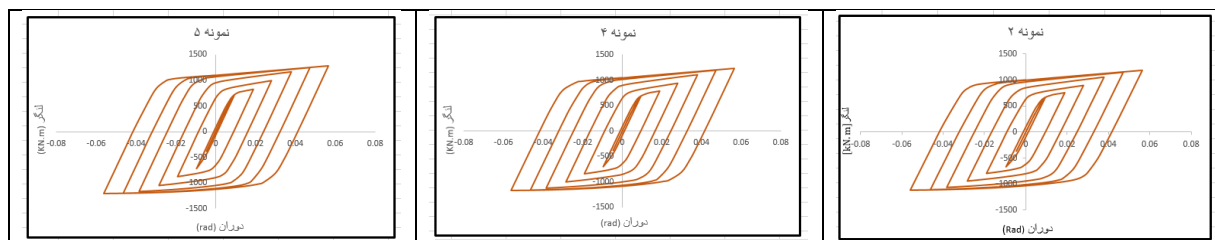
شکل ۱۰. کرنش معادل پلاستیک در میراگر شکافدار نیم بیضی با عرض متغیر



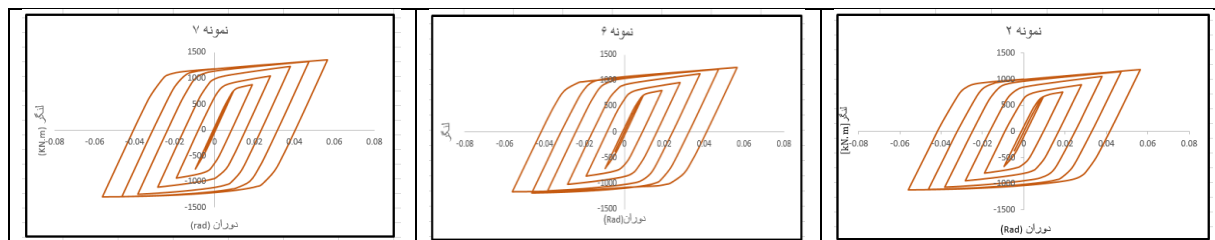
شکل ۱۱. کانتور تنش فون میسز میراگر شکافدار نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت صعودی



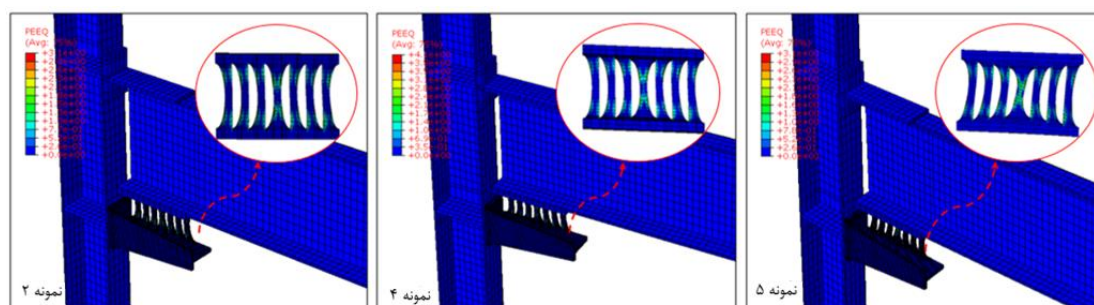
شکل ۱۲. کانتور تنش فون میسز میراگر شکافدار نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت نزولی



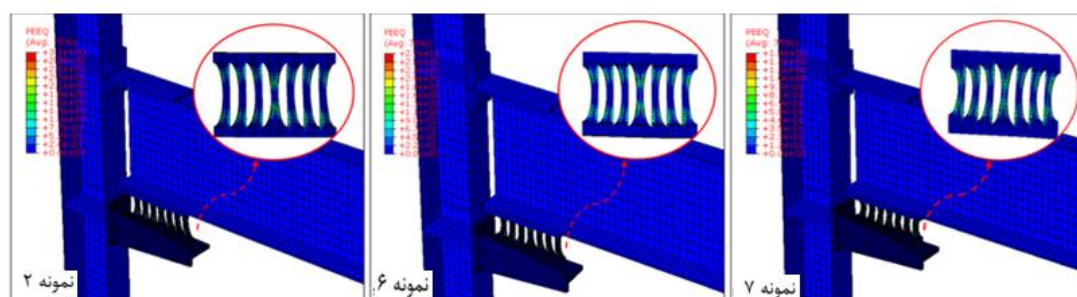
شکل ۱۳. نمودار هیستریزیس میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت صعودی



شکل ۱۴. نمودار هیستریزیس میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت نزولی



شکل ۱۵. کرنش پلاستیک معادل در میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت صعودی



شکل ۱۶. کرنش پلاستیک معادل در میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت نزولی

تحمیل کرده و با کسب ۳۳۲.۱۵ کیلوژول انرژی، بیشترین مقدار انرژی را مستهلک می‌نماید.

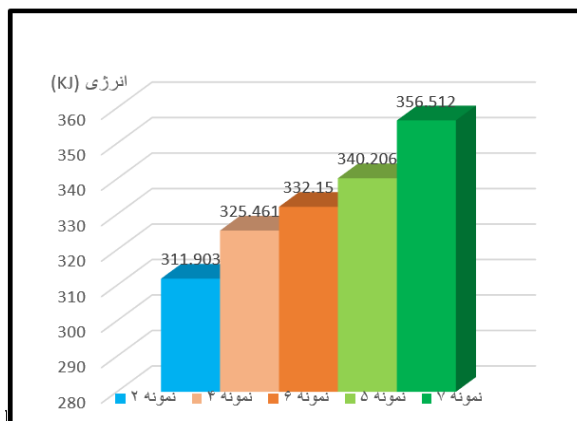
۳-۲-۳. کرنش معادل پلاستیک

نتایج حاصل از کرنش معادل پلاستیک (PEEQ) در شکل (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در نمونه‌هایی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در وسط و کمترین آن در گوشه باشد کرنش معادل پلاستیک بیشتری (نسبت به نمونه‌هایی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در گوشه و کمترین آن در وسط باشد) رخ خواهد داد. همچنین با افزایش شیب توزیع ارتفاع شکاف‌ها در میراگر میزان کرنش معادل پلاستیک افزایش می‌یابد. افزایش این شاخص بیانگر افزایش کرنش و تغییر شکل بیشتر در میراگر است. افزایش شیب توزیع ارتفاع شکاف‌ها در میراگر تا جایی ادامه یافت که تجمع کرنش معادل پلاستیک در میراگر اتفاق بیفتد و در اعضای اصلی کرنش معادل پلاستیک مشاهده نشود.

۳-۲-۲. رفتار هیستریزیس

در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) نمودار هیستریزیس لنگر- دوران نمونه‌ها نشان داده شده است. نتایج نشان داد هنگامی که توزیع ارتفاع شکاف‌ها در میراگر شکافدار نیم بیضی به صورت صعودی یا نزولی باشد با افزایش شیب، لنگر متحمل شده نیز افزایش می‌یابد. همچنین هنگامی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در وسط و کمترین آن در گوشه باشد ۲ درصد لنگر بیشتری را نسبت به حالتی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در گوشه و کمترین آن در وسط باشد تحمل می‌کند. نمونه‌های ۵ و ۷ لنگری فراتر از لنگر پلاستیک تیر (1270KN.m) متحمل شده‌اند که موجب خرابی در تیر فولادی می‌گردد.

در سایر نمونه‌ها حداکثر لنگر تحمل شده کمتر از لنگر پلاستیک تیر و بیشتر از ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر است بنابراین تیر دچار خرابی نشده و ضوابط آیین‌نامه AISC 2005 را برای شکل‌پذیری متوسط و ویژه برآورده می‌سازد. نمونه ۶ با شیب ۲ درجه در حالتی که بیشترین ارتفاع شکاف در وسط باشد، بیشترین مقدار لنگر را



شکل ۱۸. مقایسه انرژی در اتصالات با میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت صعودی و نزولی

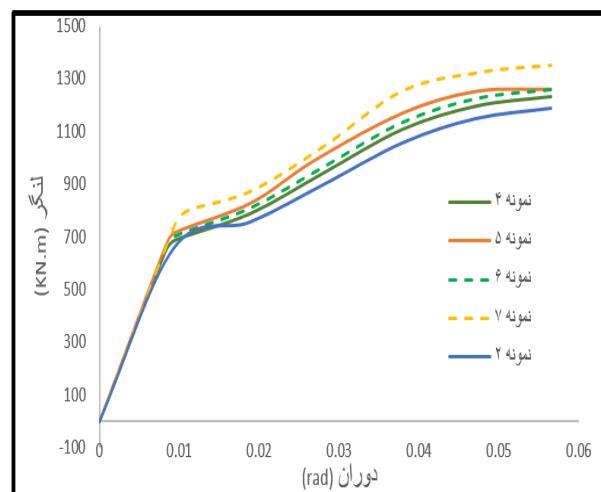
۳-۳. مقایسه میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با میراگر شکافدار شکاف لوبیایی

برای مقایسه میزان افزایش جذب انرژی بین دو نمونه میراگر شکافدار با شکاف لوبیایی و میراگر شکافدار با شکاف نیم بیضی لازم است از بین نمونه های میراگر شکافدار با شکاف نیم بیضی نمونه ای انتخاب شود که پارامترهای هندسی یکسان بیشتری با نمونه میراگر شکافدار با شکاف لوبیایی داشته باشد. بر این اساس، نمونه ۲ که زاویه θ در آن صفر است، به عنوان نمونه منتخب انتخاب شده است. با توجه به اصل عدم آسیب به اعضای اصلی و هدایت تنش به میراگر، عرض نوار و شیب توزیع ارتفاع شکاف مناسب مطابق جدول (۶) انتخاب شدند. با محاسبه سطح زیر منحنی در شکل (۱۹-الف) دیده می شود میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی ۴۴.۹ درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به میراگر شکافدار فولادی با شکاف لوبیایی دارد. در جدول (۶) مشخصات ابعادی نمونه تحلیلی پیشنهادی و نمونه با شکاف رایج آورده شده است. نتایج نشان داد که قسمت های میانی نوارها در میراگر شکافدار نیم بیضی نسبت به میراگر شکافدار فولادی با شکاف رایج مشارکت بیشتری در استهلاک انرژی دارند. در شکل (۱۹-ب) مقاومت دو نمونه مورد مقایسه قرار گرفته است. همان گونه که مشاهده می شود مقاومت نمونه ۲ با شکاف نیم بیضی حدود ۵۰ درصد بیشتر از نمونه با شکاف لوبیایی است.

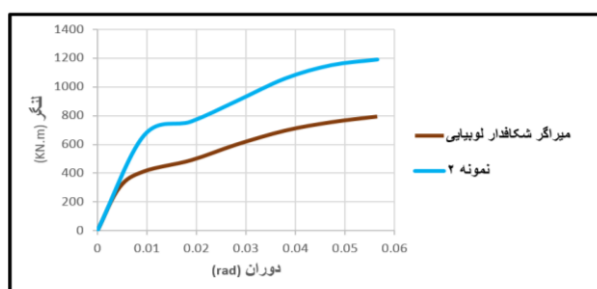
۴-۲-۳. تأثیر تغییرات هندسی مطالعه شده در میراگرهای با شکاف نیم بیضی

با توجه به شکل ۱۷ از مقایسه منحنی های لنگر - دوران می توان دریافت هنگامی که توزیع ارتفاع شکافها در میراگر شکافدار نیم بیضی به صورت صعودی یا نزولی باشد با افزایش شیب، مقاومت نیز افزایش می یابد. نمونه های ۲، ۴ و ۶ ضمن تحمل لنگر بالا و بنا بر اصل عدم رسیدن آسیب به اعضای اصلی سازه ای، مقاومت بالایی از خود نشان می دهند. نمونه ۴ نسبت به نمونه ۶ مقدار ۲ درصد و نمونه ۵ نسبت به نمونه ۷ مقدار ۷/۲ درصد مقاومت کمتری دارد. نمونه ۶ با شیب ۲ درجه در حالتی که بیشترین ارتفاع شکاف در وسط قرار دارد، بیشترین مقدار لنگر را تحمل کرده و با کسب ۳۳۲.۱۵ کیلوژول انرژی، بیشترین مقدار انرژی را مستهلک کرده است.

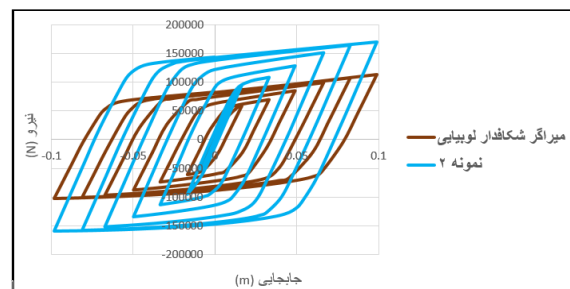
مقایسه انرژی جذب شده نمونه ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است. نمونه ۴ نسبت به نمونه ۶ مقدار ۲ درصد و نمونه ۵ نسبت به نمونه ۷ مقدار ۴.۶۸ درصد جذب انرژی کمتری داشتند.



شکل ۱۷. منحنی لنگر - دوران اتصالات با میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی با توزیع ارتفاع شکاف به صورت صعودی و نزولی



(ب)



(الف)

شکل ۱۹. مقایسه نمودار هیستریزیس و مقاومت میراگر شکافدار نیم بیضی و میراگر شکافدار لوبیایی

جدول ۶. مشخصات ابعادی و جذب انرژی نمونه‌های مورد مقایسه

نام میراگر	L(mm)	H(mm)	h(mm)	t(mm)	D(mm)	B(mm)	θ (deg)
نمونه با شکاف لوبیایی	560	180	140	19	32	42	0
نمونه ۲	560	180	140	19	30	40	0

در محدوده الاستیک باقی خواهند ماند. همچنین با کاهش

عرض نوارهای میراگر، توزیع تنش از قسمت‌های فوقانی و تحتانی نوار به قسمت میانی منتقل می‌گردد.

۳) افزایش عرض نوارهای میراگر شکافدار فولادی نیم بیضی موجب افزایش نیرو و لنگر قابل تحمل اتصال می‌گردد. در مطالعات انجام شده افزایش عرض تا جایی ادامه یافت که تنش در اعضای اصلی در محدوده الاستیک باقی بمانند و پلاستیک شدن به میراگر هدایت گردد.

۴) نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تغییر ارتفاع شکاف‌های میراگر شکافدار تأثیر خیلی زیادی در رفتار میراگر و عملکرد لرزه‌ای اتصال ندارد؛ بنابراین با تغییر در این پارامتر می‌توان تا حدودی (حدود ۷ درصد) میزان مقاومت نهایی و جذب انرژی را افزایش داد.

۵) از مقایسه نمودارهای لنگر-دوران اتصالات با نمونه‌های پیشنهادی می‌توان دریافت، هنگامی که توزیع ارتفاع شکاف‌ها در میراگر شکافدار نیم بیضی به گونه‌ای باشد که

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر شکل شکاف نیم بیضی در رفتار میراگر شکافدار فولادی بررسی شد. به منظور بررسی تأثیر عرض نوارهای میراگر شکافدار نیم بیضی ۳ نمونه با عرض نوارهای متفاوت در نظر گرفته شد. همچنین به منظور بررسی تأثیر نحوه توزیع ارتفاع شکاف‌ها با شیب صعودی و نزولی، ۶ نمونه در نظر مدل گردید. خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱) نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که شکل شکاف‌های میراگر در رفتار میراگر و عملکرد لرزه‌ای اتصال بسیار مؤثر است به گونه‌ای که میراگر شکافدار فولادی با شکاف نیم بیضی، جذب انرژی و مقاومت بیشتری نسبت به میراگر شکافدار فولادی با شکاف مرسوم دارد. میزان افزایش جذب انرژی برای نمونه‌های بررسی شده تا ۴۴.۹ درصد بدست آمد.

۲) با کاهش عرض نوارهای میراگر، قسمت‌های بیشتری از میراگر وارد حیطه پلاستیک شده و اعضای اصلی سازه‌ای

عباس، ۱۴۰۰، بررسی رفتار میراگرهای شکافدار فولادی در سازه‌های بتنی، فصلنامه آنالیز سازه - زلزله، دوره ۱۸، شماره ۱

بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در وسط و کمترین آن در گوشه و یا بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در گوشه و کمترین آن در وسط باشد، با افزایش شیب، مقاومت و انرژی جذب شده نیز افزایش می‌یابد.

۶) هنگامی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در وسط و کمترین آن در گوشه باشد تنش بیشتری را نسبت به حالتی که بیشترین ارتفاع شکاف میراگر در گوشه و کمترین آن در وسط باشد تحمل می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شیب توزیع ارتفاع شکاف‌ها در میراگر میزان تنش وارده به میراگر افزایش می‌یابد.

منابع

- [1] Oh, S. H., Kim, Y. J., & Ryu, H. S. (2009). Seismic performance of steel structures with slit dampers. *Engineering structures*, 31(9), 1997-2008.
- [2] Lee, J., & Kim, J. (2017). Development of box-shaped steel slit dampers for seismic retrofit of building structures. *Engineering structures*, 150, 934-946.
- [3] Saffari, H., Hedayat, A. A., & Nejad, M. P. (2013). Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 138-152.
- [4] Sophianopoulos, D. S., & Deri, A. E. (2017). Steel beam-to-column RBS connections with European profiles: I. Static optimization. *Journal of Constructional Steel Research*, 139, 101-109.
- [5] Shahri, S. F., & Mousavi, S. R. (2018). Seismic behavior of beam-to-column connections with elliptic slit dampers. *Steel Compos. Struct*, 26(3), 289-301.
- [۶] بلوچی، مرضیه و جابرزاده، عرفان، ۱۳۹۵، میراگر شکافدار فولادی با شکاف‌های مثلثی در اتصالات تیر به ستون، چهارمین کنفرانس ملی پژوهشهای کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران
- [۷] مقدم راد، محمد جواد و حق الهی، عباس، ۱۳۹۶، مطالعه اثر نحوه توزیع ارتفاع شکاف بر عملکرد میراگر شکافدار در اتصال تیر به ستون، چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی سازه، تهران
- [۸] علوی نیا، سید مجید و حسین زاده، لیلا و قمری، علی و اکبرپور،