

Investigating the Effect of the Geometric Shape of the Slit on the Seismic Behavior of the Steel Slit Damper in the Concentric Braced

Leila Hosseinzadeh *

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Shahrazad Pahang

Department of Civil Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

l.hosseinzadeh@iaut.ac.ir

Keywords

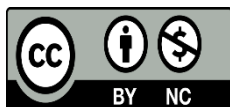
Slotted Damper,
Slot Geometry,
Convergent Capability,
Stiffness,
Resistance, Energy
Absorption.

Abstract

Considering the challenges related to improving buildings' resistance to vibrations and optimizing their design against earthquakes, several methods have been developed in recent years. One such method involves the use of steel dampers. Among them, slotted dampers have emerged as a promising alternative to conventional techniques used in the construction and structural engineering industries. The performance of these dampers can be influenced by various factors, including their geometric properties and the arrangement of the slots. This study investigates the effect of slot geometry on the seismic behavior of the dampers. To this end, while keeping the slot area constant, three different slot shapes, bean, oval, and rhombus, were analyzed. Dampers with these slot shapes were modeled at three different heights: 140 mm, 210 mm, and 280 mm. The results indicate that the slot shape significantly influences key seismic parameters such as stiffness, ultimate strength, and energy absorption. Among the shapes studied, the rhombus-shaped slots demonstrated superior performance compared to the bean- and oval-shaped ones. Furthermore, an increase in damper height led to a decrease in seismic performance, with stiffness experiencing the most significant.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Creative Commons: این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت-BY (میباشد). NC



بررسی تاثیر شکل هندسی شکاف‌ها بر رفتار لرزه‌ای میراگر شکاف‌دار فولادی در مهاربند همگرا

شهرزاد پاهنگ

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

لیلا حسین‌زاده*

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

l.hosseinzadeh@iaut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ خرداد ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۷ اسفند ۱۴۰۳

چکیده

با توجه به چالش‌های مربوط به بهبود مقاومت ساختمان‌ها در برابر ارتعاشات و بهینه‌سازی طراحی آن‌ها در برابر زلزله، در سال‌های اخیر روش‌های متعددی توسعه یافته است. یکی از این روش‌ها استفاده از میراگرهای فولادی است. در میان انواع میراگرها، میراگرهای شکاف‌دار به عنوان یک جایگزین نوید بخش برای تکنیک‌های متداول مورد استفاده در صنعت ساخت و مهندسی سازه ظاهر شده‌اند. عملکرد این میراگرها می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های هندسی و نحوه قرارگیری شکاف‌ها قرار گیرد. این مطالعه به بررسی تأثیر هندسه شکاف بر رفتار لرزه‌ای میراگرها می‌پردازد. به این منظور، در حالی که مساحت شکاف ثابت نگه داشته شده است، سه شکل مختلف شکاف لوبیایی، بیضی، و لوزی مورد تحلیل قرار گرفتند. میراگرها با این اشکال شکاف در سه ارتفاع مختلف ۱۴۰ میلی‌متر، ۲۱۰ میلی‌متر، و ۲۸۰ میلی‌متر مدل‌سازی شدند. نتایج نشان می‌دهد که شکل شکاف به طور قابل توجهی بر پارامترهای کلیدی لرزه‌ای مانند سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی تأثیر می‌گذارد. در میان اشکال بررسی شده، شکاف‌های لوزی شکل عملکرد برتری نسبت به شکاف‌های لوبیایی و بیضی نشان دادند. علاوه بر این، افزایش ارتفاع میراگر به کاهش عملکرد لرزه‌ای منجر شد که سختی، بیشترین تأثیر را تجربه کرد.

کلید واژگان: میراگر شکاف‌دار، شکل هندسی شکاف، مهاربند همگرا، سختی، مقاومت، جذب انرژی

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

کشور ایران به عنوان یکی از کشور های زلزله خیز در جهان شناخته می شود و هر ساله به دلیل وقوع زلزله های متعدد، ساختمان های احداث شده مورد چالش و آسیب قرار می گیرند. این امر به تنهایی نشان دهنده میزان ضرورت مقاوم سازی سازه ها در مقابل ارتعاشات ناشی از زلزله می باشد. به طور کلی روش های مختلفی برای طراحی و در نتیجه کنترل و کاهش پاسخ های سازه تحت اعمال بارهای جانبی و دینامیکی مطرح می گردد. از جمله عوامل مهم در نحوه عملکرد سازه میزان مقاومت آن در مقابل زلزله می باشد. یک سازه با ترکیبی از سختی، شکل پذیری و همچنین استهلاک انرژی وارد بر سازه از خود مقاومت نشان می دهد. استهلاک انرژی یکی از مهمترین پارامتر های طراحی لرزه ای است که می تواند با محدود کردن خسارات، در سازه رفتار مناسبی را فراهم سازد. برای استهلاک انرژی، میرایی در سازه ها بسیار حائز اهمیت است. به عبارت دیگر، در صورتی که میزان میرایی در یک سازه کم باشد انرژی مستهلک شده در محدوده الاستیک سازه نیز ناچیز بوده و سازه در زمان مواجهه با نیرو های دینامیکی قوی، دچار تغییر شکل های بزرگ شده و در نتیجه سازه متحمل آسیب های جدی خواهد بود [۱]. در روش های سنتی طراحی لرزه ای، تغییر شکل های غیرالاستیک در نواحی خاص سازه، مانند انتهای تیر ها در قاب های خمشی و مهاربندی ها در قاب های مهاربندی همگرا [۲]، برای اتلاف انرژی ورودی لرزه ای به عنوان فیوز استفاده می شوند. کاهش آسیب پذیری لرزه ای سازه ها با استفاده از روش های اتلاف انرژی غیرفعال به سرعت در دهه های اخیر توسعه یافته است. در طراحی لرزه ای مدرن سیستم های کنترل غیرفعال، انرژی ورودی لرزه ای را به تجهیزاتی موسوم به میراگر های لرزه ای هدایت می کنند. میراگر ها با متمرکز کردن تقاضای شکل پذیری در بخش های خاصی از سازه از وقوع تغییر شکل های غیرخطی بزرگ در اعضای اصلی جلوگیری به عمل می آورد. و به طور قابل توجهی آسیب به سازه اصلی را کاهش می دهند. استهلاک انرژی میراگر ها از طریق مکانیسم های مختلفی صورت می پذیرد که از مهمترین آن ها می توان به تسلیم فلز شکل پذیر در میراگر های فلزی [۳-۶]، اصطکاک لغزشی در میراگر های اصطکاکی [۷-۸] و تغییر شکل های ویسکوالاستیک در میراگر های ویسکوالاستیک [۹-۱۰]، اشاره نمود. از مزایای اصلی میراگر ها می توان به سهولت نصب و تعویض

آن در صورت خرابی، توانایی افزایش شکل پذیری سیستم ها، تمرکز خسارات وارد بر سازه در میراگر اشاره کرد.

قاب های فولادی مهاربندی شده همگرا از شکل پذیری مطلوبی برخوردار نیستند، ولی اعضای آسیب پذیر آن در مقابل زلزله محدود و در نتیجه بازسازی آن ها بسیار کم هزینه تر از قاب های خمشی است. به منظور رفع نقطه ضعف مهاربند های همگرا و تامین شکل پذیری مطلوب آن ها تحقیقات گسترده ای توسط محققین صورت گرفته است و روش های مختلفی برای افزایش شکل پذیری این مهاربند ها پیشنهاد شده است. یکی از راهکار های پیشنهادی برای افزایش شکل پذیری مهاربند های همگرا، استفاده از فیوز های سازه ای است. در این راستا در سال های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۷، در دانشگاه بین المللی سنگاپور، ایده به کارگیری اعضای شکل پذیر با معرفی مهاربند هایی دارای المان زانویی مطرح شده و مطالعات گسترده ای برای بررسی عملکرد این نوع المان ها انجام گرفته است [۱۱]. المان های مختلفی به عنوان میراگر که مهمترین المان شکل پذیر در قاب های مهاربندی است، توسط محققین ارائه شده است که در میان میراگر های مختلف، میراگر های جاری شونده فولادی به علت حلقه هیستریزس کامل و پایداری که دارند و با توجه به برتری نسبی آن ها از لحاظ طراحی و کاربردهای توجیه بسیاری از محققین را به خود معطوف کرده اند [۱۲-۱۳].

اولین پژوهش در زمینه میراگر های فلزی، در اوایل دهه ۱۹۷۰ ارائه شد و با پژوهش های دیگر پژوهشگران ادامه یافت [۱۴]. تاکنون میراگر های فلزی متنوعی با مکانیسم های متفاوت جاری شدن پیشنهاد شده است. این میراگر ها را می توان بر اساس رفتار جاری شدن به گروه های خمشی، برشی، محوری، پیچشی و ترکیبی طبقه بندی کرد. میراگر های ADAS^۱ [۱۵]، TADAS^۲ [۱۶] و HADAS^۳ [۱۷]، میراگر های برشی [۱۸-۲۲]، میراگر های شکاف دار [۲۳-۲۶] و مهاربند های کمانش تاب BRB^۴ [۲۷-۲۹]، از رایج ترین انواع میراگر های فلزی هستند که برای کنترل لرزه ای سازه ها استفاده می شوند.

میراگر های شکاف دار فولادی یک نوع متداول از میراگر های تسلیم شونده هستند که طراحی آن ها بر اساس تسلیم و یا تغییر شکل پلاستیک صفحه فولادی میراگر تحت بار های لرزه ای است. این تسلیم کنترل شده به اتلاف انرژی، محافظت از سازه در برابر نیرو های لرزه ای و کاهش

³Hourglass Added Damping and Stiffness damper

⁴Buckling-Restrained Brace

¹Advanced Driver-Assistance Systems

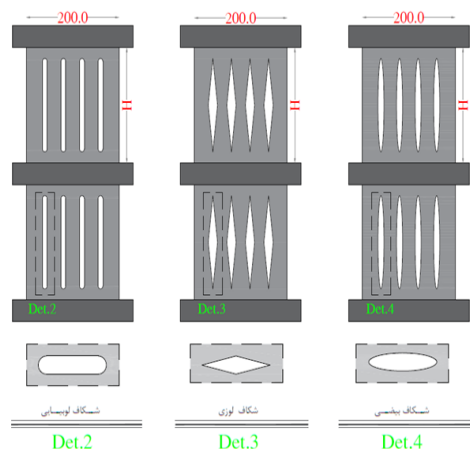
²Triangular Added Damping and Stiffness damper

این سیستم‌ها است. در مطالعات بعدی محققان، میراگر فولادی جعبه ای شکل را برای مقاوم سازی لرزه ای پیشنهاد کردند [۳۴]. نتایج حاکی از قابلیت اتلاف انرژی بالای میراگر است. همچنین با اصلاح و بهینه سازی شکل نوار های فولادی، افزایش شکل پذیری و اتلاف انرژی حاصل گردید. همچنین با توسعه این مفهوم، تحقیقات گسترده تری در زمینه میراگر های شکاف دار صورت گرفت. به طوری که در سال ۲۰۲۰، نوعی مهاربند با میراگر فلزی که شکاف های متعددی در جان آن ایجاد شده بود، ارائه گردید [۳۵]. قاب های مجهز به این نوع میراگرها مدل سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تمامی قاب ها دارای چرخه هیستریزس پایدار بوده و هیچ ترکی بر روی میراگرها مشاهده نشد. با توجه به این که میراگر باعث جلوگیری از کماتش المان قطری می شود لذا به عنوان فیوز تغییرشکل عمل می کند از این رو پس از زلزله به راحتی قابل تعویض است که علاوه بر بهبود عملکرد لرزه ای باعث کاهش هزینه های تعمیر سازه می شود. همچنین با توجه به عدم کماتش المان قطری، مقطع ضعیف تری مورد نیاز است که موجب کاهش هزینه های ساخت می شود. در این پژوهش میراگرهای شکاف دار از جهت شکل هندسی شکاف ها و تاثیر آن در عملکرد لرزه ای سازه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل شکاف های میراگر، به منظور پیش بینی مقاومت جاری شدن در تغییر شکل پلاستیک، ایده آل سازی شده و انتهای گرد در شکاف های میراگر مطابق شکل (۱)، با خطوط مستقیم جایگزین شده‌اند.

آسیب احتمالی کمک می کند. این نوع میراگر هم در اتصالات مهاربندی و هم در اتصال صلب تیر به ستون به کار می رود. این میراگر ها طوری در سازه جا سازی می شوند که در اثر برش، خمش یا نیروی محوری جاری شوند و برای استهلاک انرژی باید در نحوه جا سازی آن ها دقت کرد که در اثر جابه جایی نسبی طبقه ناشی از بار جانبی تحت تغییر شکل قرار گیرند. زیرا در غیر این صورت عمل نمی کنند و جذب انرژی انجام نمی شود. قابلیت جذب انرژی بالای میراگر های فلزی شکاف دار و همچنین راحتی ساخت و نصب آنها باعث شده که استفاده از آن ها مورد توجه قرار گیرد. این میراگر شامل یک ورق با تعدادی شکاف بریده شده در جان آن است که تحت تغییر شکل های نسبی کوچک بین دو بال تکیه گاهی، تغییر شکل می دهند. در این میراگر ها نوارهایی که بین شکاف ها قرار دارند، تغییرشکل های غیرالاستیک را جذب کرده و با تشکیل مفاصل پلاستیک، موجب استهلاک انرژی ورودی زلزله می شود. طی پژوهشی که در زمینه میراگرهای شکاف دار در سال ۱۹۹۷ انجام شد، نمونه پیشنهادی شامل یک ورق فولادی با تعدادی شکاف در جان، در شرایط آزمایشگاهی قرار گرفت. میراگر پیشنهادی در ساختمانی ۲۶ طبقه در شمال ژاپن اجرا و جایگذاری شد. با توجه به نتایج به دست آمده استفاده از میراگر باعث جذب ۴۸ درصدی انرژی لرزه ای شده و سازه رفتار پایدار و مطلوبی از خود نشان داد [۳۰]. پس از آن محققان، طرح جدیدی از استفاده از میراگر در سازه را پیشنهاد دادند. طبق مطالعات انجام شده، سیستم پیشنهادی شامل جایگذاری میراگر شکاف دار در محل اتصال مهاربندها به منظور بهبود عملکرد و جلوگیری از کماتش مهاربند های ضربدری و جذب انرژی بیشتر مطرح و اجرا شد [۳۱]. این مطالعات، توسط روش مدل سه خطی، منحنی نیرو-جابه جایی تحت بار یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد میراگر شکاف دار فولادی در معرض نیروی برشی، رفتار هیستریزس پایداری دارد. در سال ۲۰۰۸ نیز، ۲ میراگر شکاف دار در محل اتصال مهاربند شورون، به صورت یک مقطع بال پهن استاندارد با تعدادی شکاف بریده شده در جان، به عنوان ایده ای جدید، معرفی شد [۳۲]. با توجه به نتایج، میراگر در معرض تغییر شکل تناوبی غیرالاستیک انرژی، از طریق تسلیم خمشی اعضای جان، مستهلک کرده و منجر به تسلیم در جابه جایی های کوچک می شود. در نتیجه رفتار هیستریزس مناسبی را با انتقال تدریجی از حالت الاستیک به پلاستیک از خود نشان می دهد. در ادامه پژوهش ها، مطالعاتی در زمینه استفاده از میراگرهای شکاف دار فولادی در قاب های مهاربندی انجام شده است که این میراگرها در انتهای بخش مهاربندی نصب می شوند [۳۳]. نتایج بارگذاری چرخه ای نشان دهنده پایداری مناسب حلقه های هیستریزس و ظرفیت بالای اتلاف انرژی در



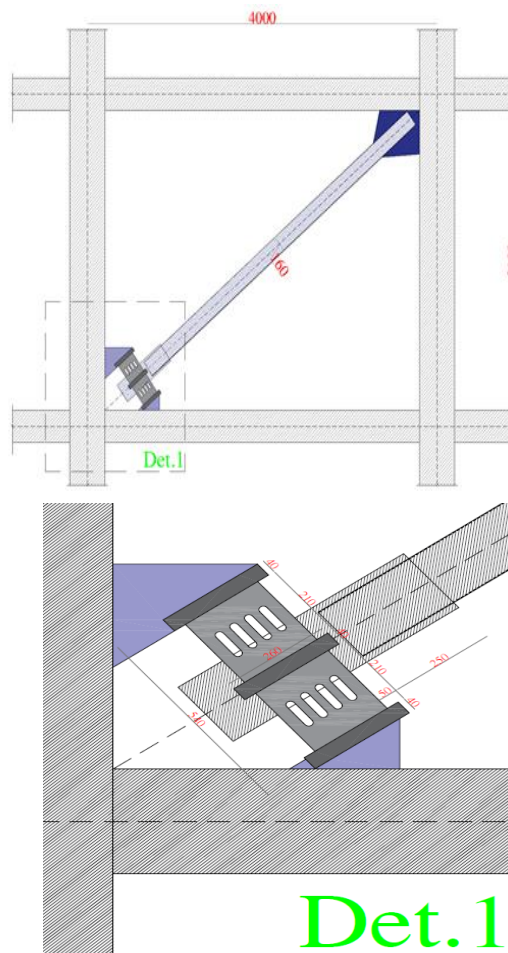
نشان داده شده است که در هر سه شکل مساحت شکاف ثابت است. همچنین متغیر (H)، ارتفاع میراگر است که برابر ۱۴۰، ۲۱۰ و ۲۸۰ میلی متر انتخاب شد. عرض میراگر ۲۰۰ میلی متر، ضخامت ورق فولادی میراگر در تمامی نمونه ها ۶ میلی متر و ضخامت ورق فولادی اتصال میراگر به مهاربند ۴۰ میلی متر فرض شد. برای سهولت در شناسایی مدل های مورد مطالعه و احتراز از بیان مکرر مشخصات آن ها، شناسه ای از ترکیب یک حرف و یک عدد برای هر نمونه تعریف گردید. قسمت اول شناسه بیانگر شکل هندسی شکاف است که برای میراگر با شکاف لویبایی حرف B، شکاف بیضی حرف O و شکاف لوزی حرف D انتخاب شد و عدد شناسه مربوط به متغیر ارتفاع می باشد. به عنوان مثال شناسه D-210 نشان دهنده ی میراگر با شکاف لوزی و ارتفاع ۲۱۰ میلی متر است.



شکل ۲- شکل هندسی شکاف های میراگر فولادی

۲-۲- مدلسازی اجزاء محدود میراگر شکاف دار

برای شبیه سازی مدل های عددی از نرم افزار ABAQUS استفاده شد. در مدلسازی میراگر از المان پوسته ای ۴ گرهی S4R استفاده شد. جنس مصالح فولادی از نوع ST37 انتخاب گردید که مشخصات فولاد شامل چگالی (ρ)، تنش حد تسلیم (F_y)، تنش حد نهایی (F_u)، ضریب پواسون (ν) و مدول الاستیسیته (E) طبق جدول (۱)، اعمال شد. برای ایجاد تکیه گاه در میراگر، دو انتهای میراگر به صورت گیردار فرض شده است. بنابراین تمام درجات آزادی در لبه های پایین و بالا در تمام جهات مقید گردید. بار وارد بر نمونه ها به دو صورت بار چرخه ای و بار یکنواخت افزایشی اعمال گردیده و آنالیز مدل ها به صورت تحلیل تاریخچه زمانی و تحلیل استاتیکی غیر خطی شامل غیرخطی هندسی و مصالح انجام شد. بار های جانبی از نوع جابجایی به ناحیه میانی میراگر وارد شد. شکل (۳)، منحنی تغییر مکان



شکل ۱- جانمایی میراگر شکاف دار در انتهای عضو مهاربند

۲. مطالعات عددی

۲-۱- مدل های عددی

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر شکل شکاف های میراگر شکاف دار در رفتار لرزه ای میراگر است. میراگر های شکاف دار مورد مطالعه از یک ورق فولادی تشکیل شده است که چند شکاف به صورت موازی با طراحی خاصی در جان ورق ایجاد گردیده و مطابق شکل (۱)، در انتهای مهاربند جاگذاری شده است. در این پژوهش تعداد ۹ مدل از میراگر شکاف دار شبیه سازی گردید. متغیرهای مورد بررسی در مدل ها شامل شکل هندسی شکاف ها که به صورت سه شکل لوزی، بیضی و لویبایی در شکل (۲)،

مقایسه گردید. نتایج این مقایسه، تطابق مناسبی را در رفتار هیستریزس و ظرفیت جذب انرژی نشان می‌دهد. المان استفاده شده برای مدلسازی میراگر شکاف‌دار شکل مورد بررسی در این بخش، از نوع المان Solid می‌باشد. ابعاد قطعات مختلف و نحوه بارگذاری مطابق شکل‌های ۵ و ۶ انجام شد. مشخصات هندسی مدل، مطابق جدول (۲) و مشخصات مصالح فولادی استفاده شده مطابق جدول (۳)، اعمال گردید.

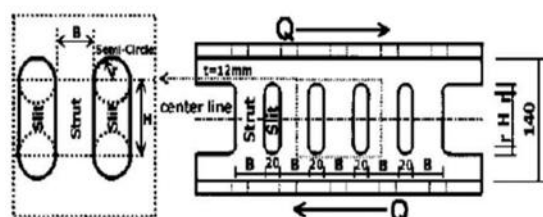
جدول ۲- مشخصات هندسی میراگر فلزی شکاف دار نمونه آزمایشگاهی [۳۱]

نام نمونه	n	T(mm)	B(mm)	H(mm)
D0300-2	7	12	42	80

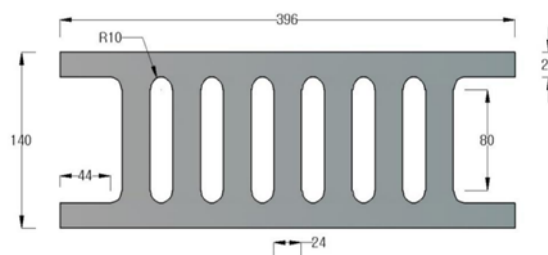
جدول ۳- مشخصات فولاد استفاده شده در میراگر فلزی شکاف دار نمونه

[آزمایشگاهی [۳۱]]

E	ρ	F_y	F_u
(MPa)	(Kg/mm ³)	(MPa)	(MPa)
200000	7.83E-06	240	370



شکل ۵- مشخصات هندسی میراگر فلزی شکاف دار نمونه آزمایشگاهی [۳۱]

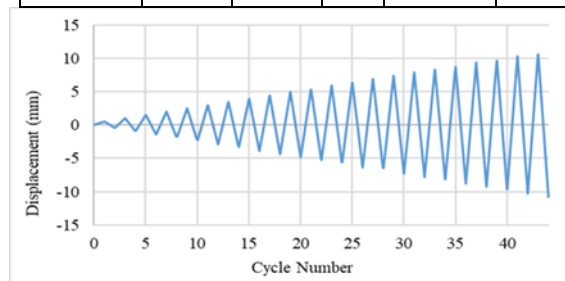


شکل ۶- ابعاد هندسی میراگر فلزی شکاف دار نمونه آزمایشگاهی [۳۱]

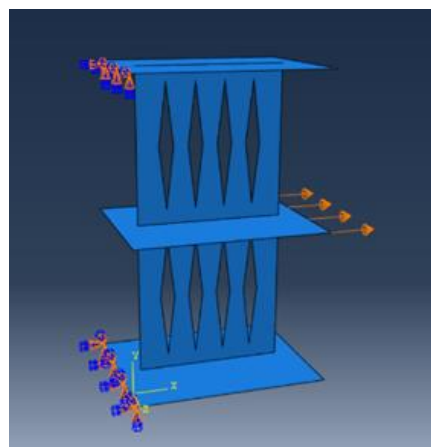
اعمال شده به میراگر را در بارگذاری چرخه ای نشان می‌دهد. در تحلیل استاتیکی غیرخطی نیز بار به صورت تدریجی وارد شد و تا تغییر مکان مجاز برابر $0.08H$ (ارتفاع میراگر)، افزایش یافت. شکل (۴)، مدل اجزاء محدود نمونه D-210 را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فولاد ST37

Elong(%)	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	ν	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)
28	451	307	0.3	7850	214



شکل ۳- منحنی تغییر مکان اعمال شده به میراگر



شکل

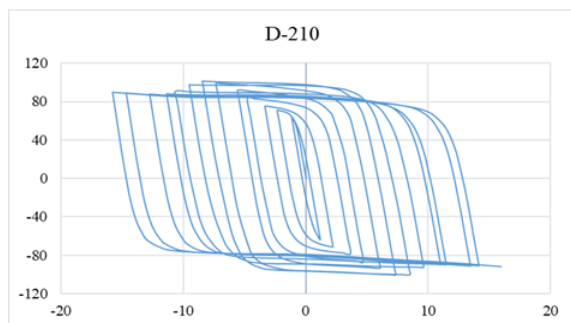
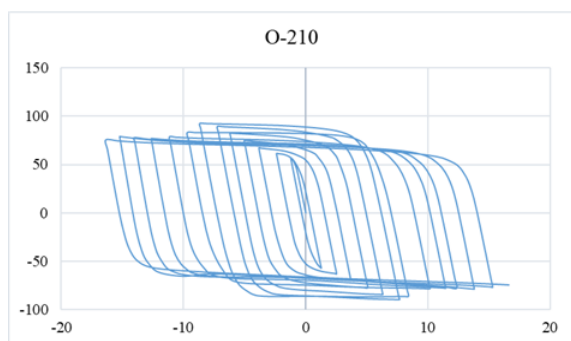
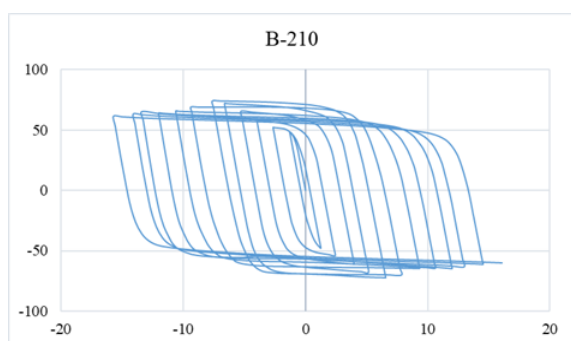
۴- مدل اجزاء محدود میراگر D-210

۲-۳- صحت سنجی

جهت صحت سنجی روش پیشنهادی، نمونه طراحی شده (عددی)، با نمونه ای که در یکی از مطالعات پیشین (آزمایشگاهی)، ارائه شده است [۳۱]،

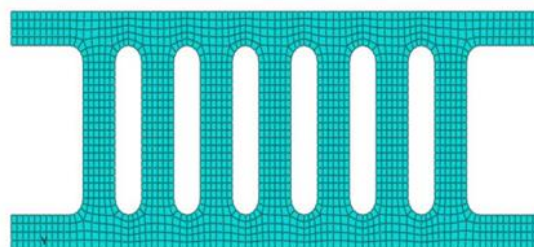


میزان تمرکز تنش در ورق میانی و همچنین قسمت انتهایی شکاف ها افزایش یافته و در نواحی فوقانی و تحتانی تنش کمتری ایجاد شده است. در نتیجه میزان خرابی در نواحی میانی بیشینه است. در قسمت های بعدی منحنی ظرفیت تمام مدل ها به تفکیک متغیر مورد بررسی نشان داده می شود. در جدول (۴)، سختی (K)، مقاومت نهایی (Vu)، و جذب انرژی (E)، مستخرج از منحنی های ظرفیت برای تمام نمونه ها محاسبه گردید. سختی الاستیک برابر است با شیب اولیه منحنی ظرفیت و از تقسیم نیرو به جابجایی در ناحیه خطی قابل محاسبه است. مقاومت نهایی برابر با بیشترین نیروی حاصل شده در منحنی ظرفیت و و میزان انرژی جذب شده از مساحت زیر منحنی ظرفیت محاسبه گردید.

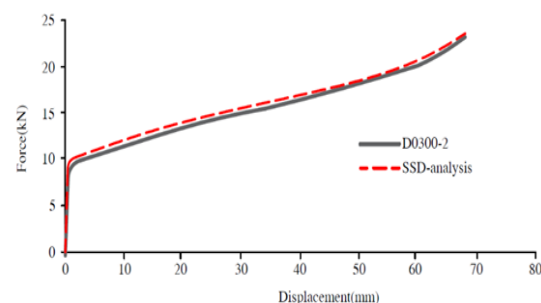


شکل ۹- منحنی های هیستریزس مدل های با اشکال هندسی متفاوت شکاف در ارتفاع ۲۱۰ میلی متر

شکل (۷)، مدل عددی مش بندی شده را نشان می دهد. شکل المان های مورد استفاده برای مش بندی به صورت HEX انتخاب شد. لازم به ذکر است که ابعاد مش بندی ۱۰*۱۰ میلی متر است که منجر به ایجاد ۱۳۸۰ المان شد. نمونه تحت اعمال جابجایی افقی در جهت X در نقطه مرجع به اندازه ۶۶ میلی متر به صورت خطی قرار گرفته و از اثر وزن صرف نظر شده است. منحنی نیرو - جابجایی مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی در شکل (۸)، مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان دهنده تطابق رضایت بخش مدل عددی و آزمایشگاهی است.



شکل ۷- نحوه مش بندی میراگر شکاف دار نمونه آزمایشگاهی [۳۱]



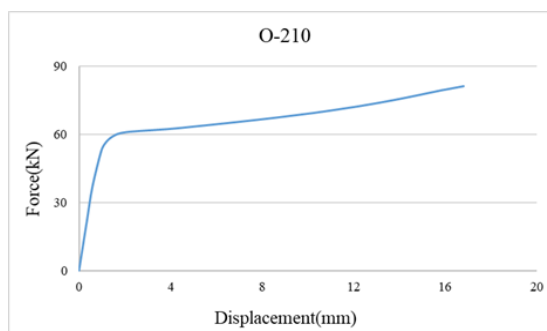
شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

۳- بحث و بررسی نتایج

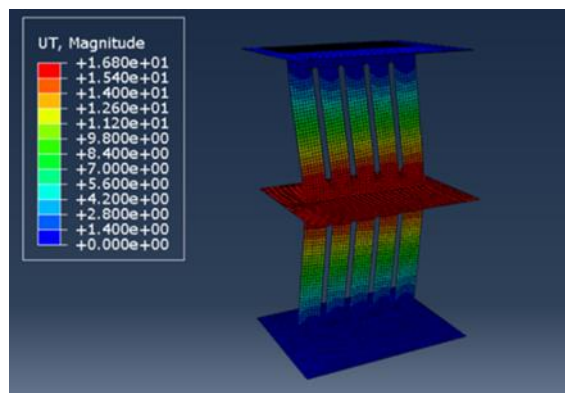
پس از اتمام مدلسازی و آنالیز نمونه ها، عملیات پس پردازش بر روی نتایج حاصل از نرم افزار انجام شد و منحنی های هیستریزس و ظرفیت هر نمونه ترسیم گردید. شکل (۹)، منحنی های هیستریزس نمونه های با اشکال متفاوت شکاف و شکل (۱۰)، منحنی ظرفیت مدل O-210 را نشان می دهد. برای مشاهده توزیع تنش در میراگر، شکل (۱۱)، کانتور تنش فون میسز مدل O-210 را نشان می دهد. کانتور تنش نمونه ها نشان داد که

۳-۱- تاثیر شکل هندسی شکاف‌های میراگر

به منظور بررسی تاثیر شکل هندسی در توزیع تنش، کانتور تنش فون میسز در انتهای بارگذاری برای سه نمونه با اشکال متفاوت شکاف در ارتفاع ۲۱۰ میلی متر در شکل (۱۲)، نشان داده شد. همچنین شکل (۱۳)، منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه‌های با ارتفاع یکسان و اشکال متفاوت شکاف را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است برای تعیین میزان تاثیر شکل هندسی شکاف، مساحت شکاف در هر سه شکل لوبیایی، بیضی و لوزی ثابت فرض شده است. برای مقایسه پارامترهای لرزه ای در هر گروه سه تایی از نمودارها، پارامتر مربوط به یک مدل به عنوان مقدار پایه انتخاب گردید و مقادیر پارامترهای دو نمونه دیگر بر مقدار عددی نمونه پایه تقسیم شد. در این حالت تغییرات نسبی در هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت و انرژی جذب شده در نمونه پایه یک و میزان این تغییرات در دو نمونه دیگر نسبت به نمونه پایه تعیین شده است. در این قسمت مدل دارای شکاف لوبیایی به عنوان نمونه پایه انتخاب شده است. در شکل (۱۴)، نمودار تغییرات نسبی پارامترها برای مدل های با ارتفاع ۲۱۰ میلی‌متر ترسیم گردید. در جدول (۵)، درصد تغییرات نسبی پارامترها برای تمام نمونه ها بر اساس شکل هندسی گزارش شده است. نتایج جدول نشان می‌دهد در ارتفاع ثابت ۱۴۰ میلی متر با تغییر شکل شکاف از لوبیایی به بیضی مقادیر پارامترهای سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی به ترتیب ۲۰، ۱۳ و ۱۵ درصد افزایش یافت و با تغییر شکل از لوبیایی به لوزی مقادیر سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی به ترتیب ۳۲، ۲۳ و ۲۶ درصد افزایش یافت که نتایج بیانگر رفتار بهتر میراگر با شکل شکاف لوزی است.



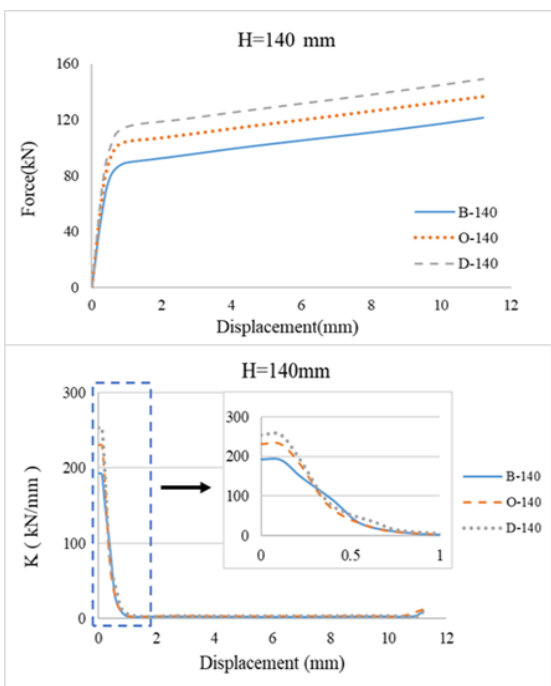
شکل ۱۰- منحنی ظرفیت مدل O-210



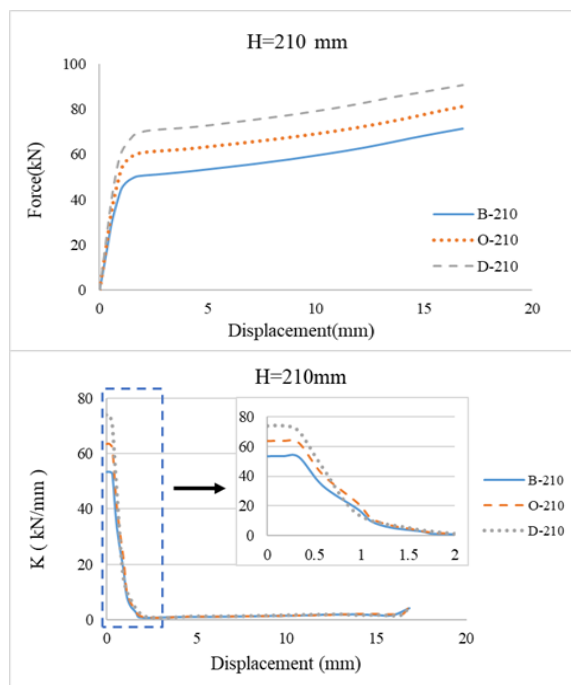
شکل ۱۱- کانتور تنش فون میسز مدل O-210

جدول ۴- پارامترهای لرزه ای سختی، مقاومت و جذب انرژی مدل‌های عددی

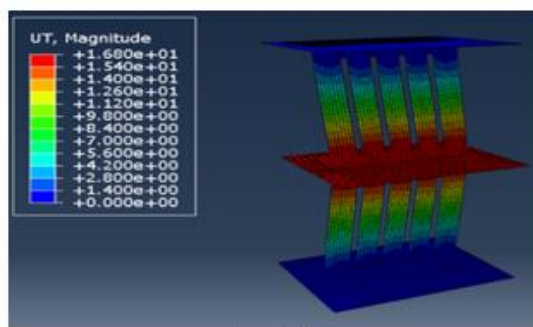
Model	K (kN/mm)	V _u (kN)	E (kN.m)
B-140	192.50	121.16	1136.30
O-140	230.28	136.73	1303.54
D-140	253.42	149.07	1429.05
B-210	53.36	71.47	956.31
O-210	63.48	81.07	1111.82
D-210	73.89	90.63	1271.31
B-280	21.44	53.50	897.93
O-280	25.80	61.00	1064.20
D-280	29.72	67.11	1207.81



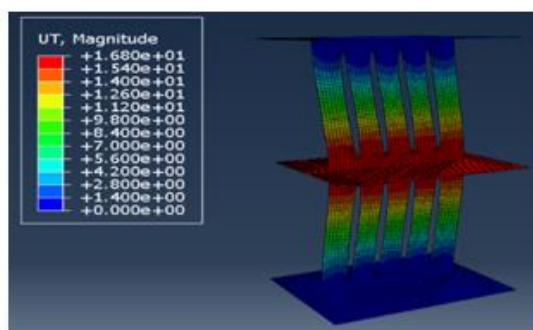
شکل ۱۳-الف- منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه‌های با ارتفاع ۱۴۰ میلی‌متر



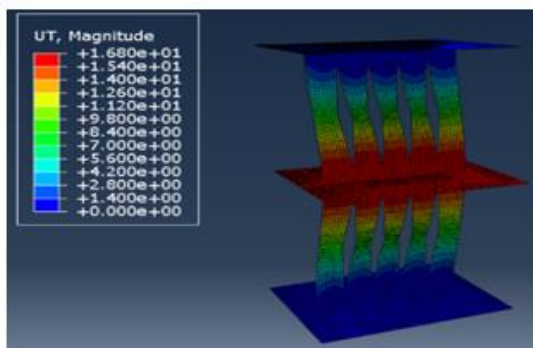
شکل ۱۳-ب- منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه‌های با ارتفاع ۲۱۰ میلی‌متر



(a) B-210



(b) O-210



(c) D-210

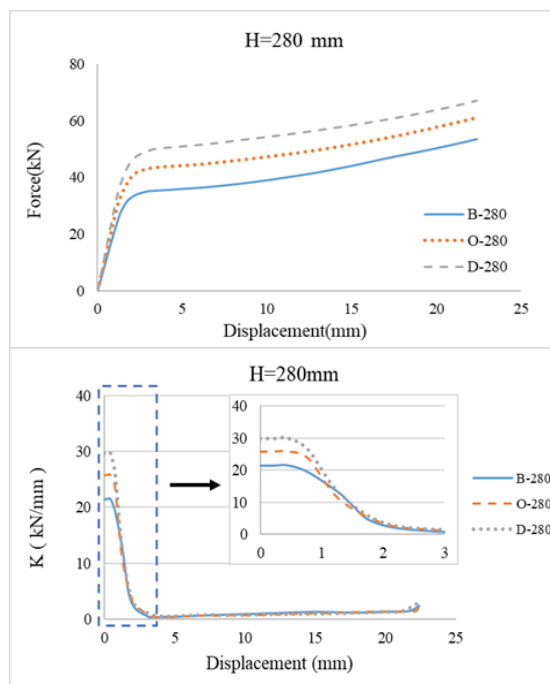
شکل ۱۲- کانتور تنش مدل‌های با اشکال هندسی متفاوت شکاف در ارتفاع ۲۱۰ میلی‌متر

جدول ۵- تغییرات نسبی پارامترهای لرزه ای- تاثیر شکل هندسی شکاف

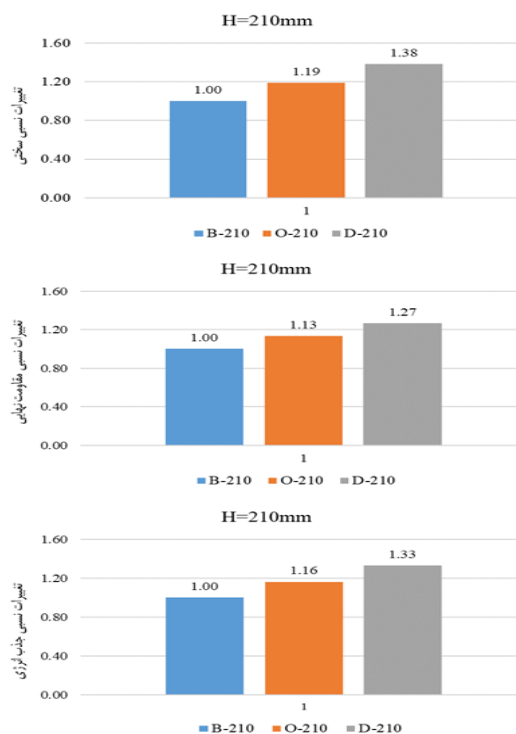
Model	K	Vu	E
B-140	1.00	1.00	1.00
O-140	1.20	1.13	1.15
D-140	1.32	1.23	1.26
B-210	1.00	1.00	1.00
O-210	1.19	1.13	1.16
D-210	1.38	1.27	1.33
B-280	1.00	1.00	1.00
O-280	1.20	1.14	1.19
D-280	1.39	1.25	1.35

۳-۲- تاثیر ارتفاع میراگر

در این قسمت تاثیر ارتفاع میراگر در رفتار لرزه ای آن مورد بررسی قرار گرفت. لازم به یادآوری است که با افزایش ارتفاع میراگر، ارتفاع شکاف هم افزایش پیدا کرده است. شکل (۱۵)، منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه های با شکل شکاف ثابت و ارتفاع متغیر نشان می دهد. همانند قسمت قبل، برای تعیین میزان تاثیر ارتفاع در پارامترهای لرزه ای در هر گروه سه تایی از نمودارها، پارامتر مربوط به یک مدل به عنوان مقدار پایه در نظر گرفته شده است که در این قسمت مدل با ارتفاع ۱۴۰ میلی متر به عنوان نمونه پایه انتخاب شد. در شکل (۱۶)، نمودار تغییرات نسبی پارامترها برای مدل های با شکاف لوزی شکل ترسیم شده است. در جدول (۶)، درصد تغییرات نسبی پارامترها برای تمام نمونه ها گزارش شده است. جدول (۶)، نشان می دهد با افزایش ارتفاع مقادیر پارامترهای لرزه ای کاهش می یابد. به طوری که در شکاف لوبیایی با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ میلی متر به ۲۱۰ میلی متر، مقادیر سختی، مقاومت نهایی و جذب انرژی به ترتیب ۷۲٪، ۴۱٪ و ۱۶٪ کاهش می یابد و با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ میلی متر به ۲۸۰ میلی متر مقادیر فوق به ترتیب ۸۹٪، ۵۵٪ و ۱۸٪ کاهش می یابد. و در مورد شکاف لوزی با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ میلی متر به ۲۱۰ میلی متر مقادیر سختی، مقاومت

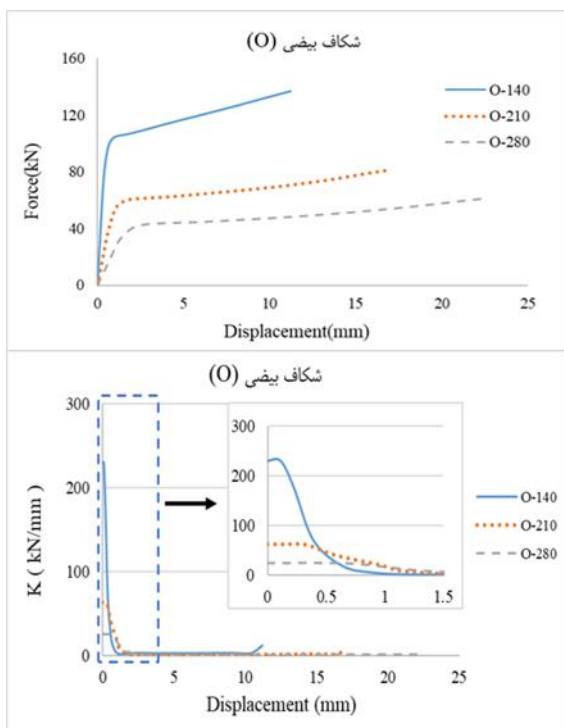


شکل ۱۳- ج- ظرفیت و نمودار سختی نمونه های با ارتفاع ۲۸۰ میلی متر

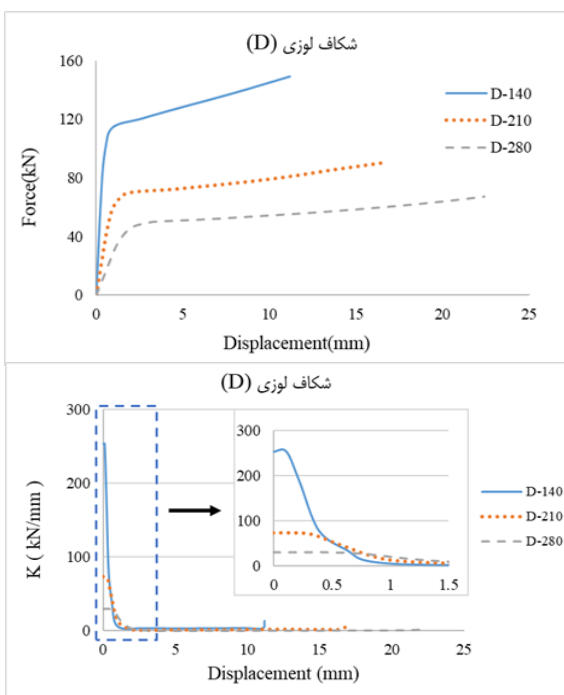


شکل ۱۴- نمودار تغییرات نسبی پارامترها (سختی، مقاومت و جذب انرژی) برای مدل هایی با ارتفاع ۲۱۰ میلی متر



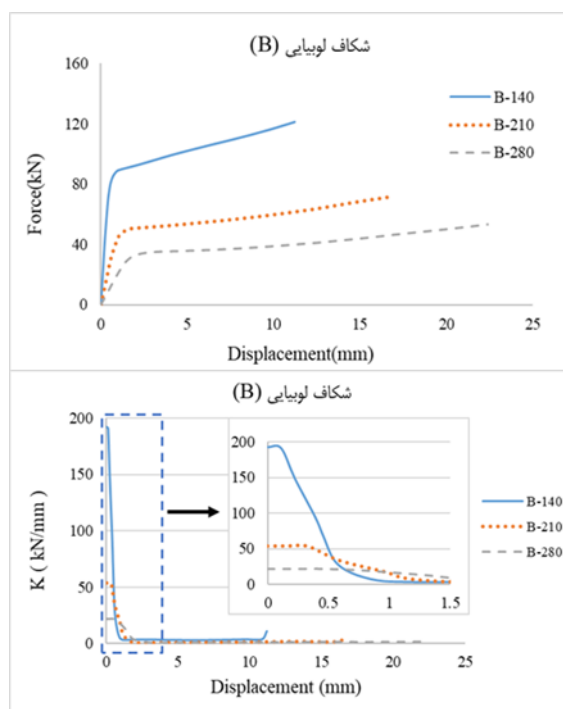


شکل ۱۵-ب- منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه های با شکاف بیضی



شکل ۱۵-ج- منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه های با شکاف لوزی

نهایی و جذب انرژی به ترتیب ۷۱٪، ۳۹٪ و ۱۱٪ کاهش می یابد و با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ میلی متر به ۲۸۰ میلی متر مقادیر فوق به ترتیب ۸۸٪، ۵۵٪ و ۱۵٪ کاهش می یابد. همانطور که نتایج نشان می دهد تاثیر افزایش ارتفاع در مقادیر پارامترهای لرزه ای در تمام اشکال هندسی شکاف کاهشی بوده است. بیشترین اثر افزایش ارتفاع در پارامتر سختی می باشد. با افزایش ارتفاع، سختی به طور چشمگیری کاهش می یابد و کمترین تاثیر افزایش ارتفاع در پارامتر جذب انرژی است.

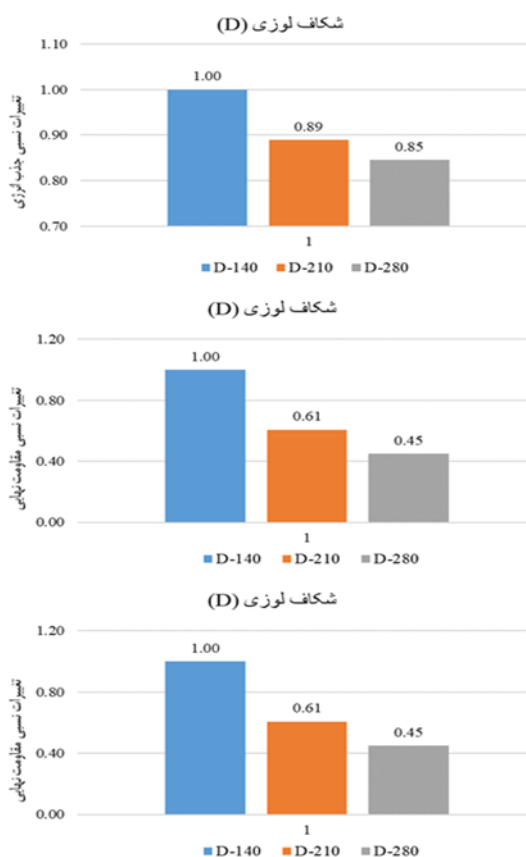


شکل ۱۵-د- منحنی ظرفیت و نمودار سختی نمونه های با شکاف لوبیایی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار میراگرهای شکاف دار فولادی با اشکال هندسی متفاوت شکاف صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل مدل های عددی به شرح زیر خلاصه می شود:

- با تغییر شکل هندسی شکاف از لوبیایی به بیضی مقادیر سختی به طور میانگین ۲۰٪ افزایش یافت و با تغییر شکل هندسی از لوبیایی به لوزی سختی به طور میانگین ۳۶/۳٪ افزایش یافت. که نتایج بیانگر سختی بیشتر میراگر با شکاف لوزی است. با افزایش ارتفاع، افزایش سختی در شکاف لوزی نسبت به لوبیایی محسوس تر است.
- با تغییر شکل هندسی شکاف از لوبیایی به بیضی مقادیر مقاومت نهایی به طور میانگین ۱۳٪ افزایش یافت و با تغییر شکل هندسی از لوبیایی به لوزی مقاومت به طور میانگین ۲۵٪ افزایش یافت. که نتایج بیانگر مقاومت بیشتر میراگر با شکاف لوزی است.
- با تغییر شکل هندسی شکاف از لوبیایی به بیضی پارامتر جذب انرژی به طور میانگین، ۱۷٪ افزایش یافت و با تغییر شکل هندسی از لوبیایی به لوزی جذب انرژی به طور میانگین، ۳۱٪ افزایش یافت. که نتایج بیانگر جذب انرژی بیشتر میراگر با شکاف لوزی است.
- با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ به ۲۱۰ میلی متر برای سه شکل هندسی متفاوت سختی بطور میانگین، حدود ۷۱/۶٪ کاهش یافت و با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ به ۲۸۰ میلی متر کاهش سختی حدود ۸۸/۷٪ است.
- با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ به ۲۱۰ میلی متر برای سه شکل هندسی متفاوت، مقاومت نهایی بطور میانگین، حدود ۴۰/۳٪ کاهش یافت و با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ به ۲۸۰ میلی متر کاهش مقاومت نهایی حدود ۵۵/۳٪ است.
- با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ به ۲۱۰ میلی متر برای سه شکل هندسی متفاوت، جذب انرژی بطور میانگین حدود ۱۴٪ کاهش یافت و با افزایش ارتفاع از ۱۴۰ به ۲۸۰ میلی متر کاهش جذب انرژی حدود ۱۸٪ است.
- نتیجه کلی این که شکل شکاف میراگر شکاف دار بر روی رفتار لرزه ای میراگر تاثیر دارد و برای بهبود رفتار لرزه ای سیستم با میراگر شکاف دار باید شکل هندسی شکاف و ابعاد هندسی میراگر بهینه یابی شود.



شکل ۱۶- نمودار تغییرات نسبی پارامترها (سختی، مقاومت و جذب انرژی) برای مدل هایی با شکاف لوزی

جدول ۶- تغییرات نسبی پارامترهای لرزه ای- تاثیر ارتفاع

Model	K	Vu	E
B-140	1.00	1.00	1.00
B-210	0.28	0.59	0.84
B-280	0.11	0.44	0.79
O-140	1.00	1.00	1.00
O-210	0.28	0.59	0.85
O-280	0.11	0.45	0.82
D-140	1.00	1.00	1.00
D-210	0.29	0.61	0.89
D-280	0.12	0.45	0.85

Constructional Steel Research. 2020; 172: 106240.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106240>

[9] Constantinou M C, Symans M D. Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. The Structural Design of Tall Buildings. 1993; 2: 93-132.
<https://doi.org/10.1002/tal.4320020202>

[10] Bakhshinezhad S, Mohebbi M. Multi-objective optimal design of semi-active fluid viscous dampers for nonlinear structures using NSGA-II. Structures. 2020; 24: 678-689.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.003>

[11] Balendra T, Lim E L, Liaw C Y. Large-Scale Seismic Testing of Knee-Brace-Frame. Journal of Structural Engineering. 1997; 123(1): 11-19.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:1(11))

[12] Tsai K Ch, Chen H W, Hong C P, Su Y F. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic resistance construction. Earthquake Spectra. 1993; 9(3). <https://doi.org/10.1193/1.1585741>

[13] Christopoulos C, Packer J A, Sabelli R. Posttensioned energy dissipating connections for steel frames with reduced beam sections. Journal of Structural Engineering. 2002; 128(9): 1111-1120.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:9\(1111\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:9(1111))

[14] Kelly J M, Skinner R I, Heine A J. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering. 1972; 5(3): 63-88. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.5.3.63-88>

[15] Whittaker A S, Bertero V V, Alonso L J, Thompson C L. Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements. Earthquake Engineering Research Center Report, University of California, Berkeley. 1989; UCB/EERC-89/02:1-75.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28164.58243>

[16] Tahamouli Roudsari M, Eslamimanesh M B, Entezari A R, Noori O, Torkaman M. Experimental assessment of retrofitting RC moment resisting

[1] Sahoo D R, Singhal T, Taraithia S S, Saini A. Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers. Journal of Constructional Steel Research. 2015; 114: 247-257.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.006>

[2] Kheyroddin A, Gholhaki M, Pachideh G. Seismic evaluation of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel braces using IDA and pushover methods in the near-fault field. Amirkabir Journal of Civil Engineering. 2020; 52(5): 1127-1142.
<https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15235.5858>

[3] Benavent-Climent A. A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections. Engineering Structures. 2010; 32(4): 1113-1122.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.037>

[4] Saffari H, Hedayat A A, Poorsadeghi Nejad M. Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility. Journal of Constructional Steel Research. 2013; 80: 138-152.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.023>

[5] Aljawadi A S, Kafi M A, Kafi M A. Mechanical Behaviour of Metallic Yielding Dampers with Different Aspect Ratios. Latin American Journal of Solids and Structures. 2021; 18(2): e353.
<https://doi.org/10.1590/1679-78256350>

[۶] یوسفی، محسن؛ نصیرا، یحیی؛ قمری، علی. بررسی عملکرد مدل جدیدی از میراگر مستطیلی در مهاربند همگرای قطری. فصلنامه آنالیز سازه - زلزله. ۱۴۰۰؛ ۱۸ (۱): ۳۹-۵۲.
<https://doi.org/10.30495/civil.2021.681417>

[7] Bagheri S, Barghian M, Saieri F, Farzinfar A. U-shaped metallic-yielding damper in building structures seismic behavior and comparison with a friction damper. Structures. 2015; 3: 163-171.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.04.003>

[8] Francavilla A B, Latour M, Piluso V, Rizzano G. Design criteria for beam-to-column connections equipped with friction devices. Journal of



- [25] Kim J, Jeong J. Seismic retrofit of asymmetric structures using steel plate slit dampers. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016; 120: 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.02.001>
- [26] Hedayat AA. Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 114: 30–50. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.003>
- [27] Eryaşar ME, Topkaya C. An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2010; 39(5): 561–581. <https://doi.org/10.1002/eqe.959>
- [28] Mirtaheeri M, Gheidi A, Zandi AP, Alanjari P, Rahmani Samani H. Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(8): 1244–1253. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.004>
- [29] Mohammadi M, Kafi MA, Kheyroddin A, Ronagh HR. Experimental and numerical investigation of an innovative buckling-restrained fuse under cyclic loading. *Structures*. 2019; 22: 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.07.014>
- [30] Connor JJ, Wada A, Iwata M, Huang YH. Damage-Controlled Structures. I: Preliminary Design Methodology for Seismically Active Regions. *Journal of Structural Engineering*. 1997; 123(4): 423–431. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:4\(423\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:4(423))
- [31] Lee MH, Oh SH, Huh C, Oh YS, Yoon MH, Moon TS. Ultimate energy absorption capacity of steel plate slit dampers subjected to shear force. *International Journal of Steel Structures*. 2002; 2(2): 71–79. Available at: https://www.researchgate.net/publication/291159996_Ultimate_energy_absorption_capacity_of_steel_plate_slit_dampers_subjected_to_shear_force
- [32] Chan RWK, Albermani F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*. 2008; 30(4): 1058–1066. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.005>
- frames with ADAS and TADAS yielding dampers. *Structures*. 2018; 14: 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.02.005>
- [۱۷] یوسفی، م؛ نصیرا، ی؛ قمری، ع. بهبود رفتار غیرخطی مهارندهای همگرا با استفاده از یک میراگر جدید شش ضلعی شکل. فصلنامه آنالیز سازه - زلزله. ۱۳۹۹؛ ۱۸ (۱): ۱–۱۴. <https://doi.org/10.30495/civil.2020.708011>
- [18] Popov E.P, Engelhardt M.D. Seismic eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 1988; 10: 321–354. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(88\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0143-974X(88)90034-X)
- [19] Nakashima M. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel I: Test. *Journal of Structural Engineering*. 1995; 121(12): 1742–1749. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:12\(1742\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:12(1742))
- [20] Deng K, Pan P, Sun J, Liu J, Xue Y. Shape optimization design of steel shear panel dampers. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 99: 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.03.001>
- [21] Ji X, Wang Y, Ma Q, Okazaki T. Cyclic behavior of very short steel shear links. *Journal of Structural Engineering*. 2016; 142(2): 04015119. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000137)
- [22] Abebe DY, Kim JW, Gwak G, Choi JH. Low-cycled hysteresis characteristics of circular hollow steel damper subjected to inelastic behavior. *International Journal of Steel Structures*. 2019; 19: 157–167. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0097-8>
- [23] Benavent-Climent A, Oh SH, Akiyama H. Ultimate energy absorption capacity of slit-type steel plates subjected to shear deformations. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 1998; 63: 139–147. https://doi.org/10.3130/aijs.63.139_1
- [24] Lee CH, Ju YK, Min L, Lho SH, Kim SD. Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings. *Engineering Structures*. 2015; 99: 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.052>



- [33] Tagawa H, Yamanishi T, Takaki A, Chan RWK. Cyclic behavior of seesaw energy dissipation system with steel slit dampers. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016; 117: 24–34 .
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.09.014>
- [34] Lee J, Kim J. Development of box-shaped steel slit dampers for seismic retrofit of building structures. *Engineering Structures*. 2017;150:934–946.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.082>
- [35] Askariani SS, Garivani S. Introducing and numerical study of a new brace-type slit damper. *Structures*. 2020; 27: 702-717.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.019>
- [36] Zhou X, Tan Y, Ke K, Yam MCH, Zhang H, Xu J. An experimental and numerical study of brace-type long double C-section steel slit dampers. *Journal of Building Engineering*. 2023; 64: 105555.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105555>
- [37] Seyedsina Seyedjafari Olia SS, Saffari H. A novel slit damper configuration to enhance ductility and seismic behavior of concentrically braced frames. *Structures*. 2024;66:106823.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106823>

