

# بررسی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی مجهز به میراگرهای افزاینده میرایی و سختی

ایمان طلوعی<sup>۱</sup>، احمد ملکی<sup>۲\*</sup>، محمدعلی لطف الهی یقین<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی
۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی
۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

\*A.maleki@iau-maragheh.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

## چکیده

در مطالعه حاضر رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی یک قاب فولادی سه طبقه مجهز به میراگرهای افزایش‌دهنده میرایی و سختی (ADAS) مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه با هدف بررسی و بهبود عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی در برابر نیروهای جانبی، میراگرهای پیشنهادی در فاصله مابین ستون‌ها و ورق‌های پرکننده دیوار برشی فولادی نصب شدند. پارامترهای مورد بررسی به ترتیب شامل ضخامت ورق میراگر (۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر) و ضخامت ورق پرکننده (۳، ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر) است. ارزیابی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی با استفاده از روش اجزاء محدود و توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام و پروتکل بارگذاری بر اساس ATC-24 اعمال شد. به منظور راستی آزمایشی، نمونه آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی و ملاحظه شد، نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود هماهنگی مناسبی دارند و می‌توان از مدل اجزاء محدود برای بررسی و مقایسه پارامترهای موردنظر در این مطالعه مانند استهلاک انرژی، مقاومت، سختی و شکل پذیری استفاده نمود. نتایج حاصل حاکی از افزایش استهلاک انرژی، مقاومت، سختی و شکل پذیری در مقایسه با مدل بدون میراگر بود. در ادامه با بررسی منحنی‌های هیستریزس و نسبت میرایی هیستریزس مدل‌های مختلف، برتری چشمگیر مدل‌های مجهز به میراگر نسبت به مدل بدون میراگر مشهود بود و هرچه ضخامت میراگرها افزایش یافت شاهد بیشتر شدن سطح زیر منحنی هریک از مدل‌ها بودیم. در انتها، عملکرد میراگرهای پیشنهادی به همراه سازوکار خرابی میراگرها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد میراگرهای ADAS با تغییر شکل‌های خاص خود، باعث افزایش قابل توجه استهلاک انرژی و شکل‌پذیرتر شدن دیوار برشی فولادی شده و با جذب مقدار زیاد انرژی، باعث کاهش نیروی وارد شده به اجزاء اصلی و مانع از تخریب سیستم دیوار برشی فولادی می‌شود.

**واژگان کلیدی:** دیوار برشی فولادی، میراگرهای افزایش‌دهنده میرایی و سختی، رفتار چرخه‌ای، استهلاک انرژی، شکل‌پذیری.

## ۱- مقدمه

فولادی که توسط تیرها و ستون‌ها احاطه شده‌اند تشکیل شده-  
اند. تحقیقات و مطالعات روی دیوارهای برشی فولادی از دهه  
۱۹۷۰ میلادی در کشورهای ژاپن و ایالات منحنه آغاز و مورد

دیوارهای برشی فولادی از جمله سیستم‌های مقاوم در برابر  
بارهای جانبی از جمله نیروی زلزله و باد هستند که از یک ورق

توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۷۳، برای اولین بار مطالعه آزمایشگاهی روی دیوار برشی فولادی توسط تاکاهاشی و همکاران [1] انجام شد. در سال ۱۹۷۷، میمورا و آکیاما با ارائه روشی نو رفتار چرخه‌ای و مونوتونیک (یک طرفه) دیوار برشی فولادی ورق نازک را مورد بررسی قرار دادند و رابطه انحراف بار دیوارهای برشی فولادی مقاوم در برابر زلزله را توسط یک میدان کششی قطری ارائه کردند [2]. در سال ۱۹۸۳، برای بررسی رفتار پس از کمانش دیوار برشی فولادی ورق نازک، یک مدل نوار کششی توسط توربرن و همکاران [3] طراحی شد و مشخص شد دیوار برشی فولادی ورق نازک دارای مقاومت پس از کمانش بالا و رفتار شکل‌پذیری خوب است. همچنین در سال ۱۹۸۷ ترومپوشک و کولاک [4] با بررسی نتایج آزمایشگاهی به مقاومت پس از کمانش بالا و رفتار شکل‌پذیری خوب دیوار برشی فولادی ورق نازک بدون سخت‌کننده پی بردند. در سال‌های گذشته نیز مطالعات بسیاری روی دیوار برشی‌های فولادی ورق نازک تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شده است و پژوهشگران مختلف عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی را از جنبه‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار دادند و با بررسی مطالعات آزمایشگاهی و عددی به سختی بالا، مقاومت کافی، شکل‌پذیری خوب و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالای دیوار برشی فولادی پی بردند. در دیوار برشی فولادی سیستم از سختی بالایی برخوردار است و به این علت، مقدار نیروی انتقالی از دیوار برشی فولادی به المان‌های مرزی قائم (ستون‌ها) به شدت افزایش یافته و احتمال گسیختگی در این المان‌ها افزایش می‌یابد. امروزه پژوهشگران زیادی در جهان به منظور کنترل ارتعاشات سازه‌ای در برابر نیروهای جانبی مانند زلزله، به سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی روی آورده‌اند و با ایجاد و ترکیب اجزای سازه‌ای مختلف مانع از بوجود آمدن ارتعاشات و تحریکات لرزه‌ای در سازه‌ها شده و مقاومت و ظرفیت شکل‌پذیری غیرالاستیک سازه‌ها را به طور قابل توجهی افزایش داده و امر بهسازی و ترمیم سازه‌ها را سهولت می‌بخشند. در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های جذب‌کننده انرژی سبب کاهش مطلوب جابه‌جایی در سازه‌ها

شده است [5]. یکی از موثرترین سازوکارها برای استهلاک انرژی زلزله توسط تغییر شکل‌های غیرالاستیک قطعات فولادی انجام می‌گیرد. از جمله وسایل مستهلک‌کننده انرژی وابسته به تغییر مکان که از طریق جاری شدن فلز منجر به استهلاک انرژی در سازه می‌شوند، میراگرهای ADAS می‌باشند. این میراگرها با رسیدن به ناحیه پلاستیک باعث اتلاف انرژی ورودی به سازه می‌شوند. هندسه این میراگرها باید به گونه‌ای باشد که بیشترین نقاط آن به تسلیم رسیده و اتلاف انرژی ناشی از پلاستیک شدن در آن به بیشترین مقدار ممکن برسد. استفاده از این میراگرها به عنوان عضو کنترل‌کننده تغییر مکان باعث تمرکز خسارات در میراگر شده و حداقل آسیب به اعضای اصلی سازه مانند ستون و تیر وارد خواهد شد. از دهه ۱۹۹۰، ساز و کارهای زیادی به عنوان میراگر فلزی تسلیم‌شونده معرفی، ساخته و آزمایش شده است و برخی از آن‌ها مانند ADAS و میراگرهای افزایش‌میرایی و سختی مثلثی شکل (TADAS) تجاری بوده [6] و این دو نوع میراگر از مشهورترین میراگرهایی هستند که انرژی ورودی به سازه را با استفاده از تغییر شکل‌های خمشی پراکنده می‌کنند. میراگرهای ADAS و TADAS از صفحات فلزی X شکل و صفحات مثلثی تشکیل شده‌اند [7]. از مزایای این دو میراگر می‌توان به ارزان بودن و اجرای نسبتاً آسان، حساس نبودن به دما و رطوبت، رفتار هیستریتیک پایدار و عدم تاثیر ظرفیت حمل بار جاذبه بر سازه اشاره نمود [8]. این میراگرهای تسلیم‌شونده فلزی، به عنوان نوعی میراگر همبسته با جابه‌جایی، پرکاربردترین نوع سیستم‌های جذب‌کننده انرژی هستند [9]. ویتاکر و همکاران در سال ۱۹۹۱، با بررسی یک قاب سه طبقه مجهز به میراگر ADAS به این نتیجه رسیدند که وجود مهاربندهای ADAS، علاوه بر افزایش میرایی و سختی، جذب انرژی را در حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد افزایش می‌دهد. قاب بررسی شده توسط آن‌ها متشکل از سیستم قاب خمشی و مهاربند ADAS بود [10]. تاسی و همکاران در سال ۱۹۹۳ تحقیقات وسیعی را در مورد اثربخشی استفاده از صفحات مثلثی فولادی جوش داده شده به عنوان دستگاه میرایی و سختی اضافه شده (ADAS) برای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله ارائه دادند.

شکل پذیری و استهلاک انرژی در سیستم دیوار برشی فولادی افزایش یابد و از سوی دیگر از مقدار نیروی انتقالی محوری و برشی به ستون‌ها کاسته شود تا بدین صورت موجبات افزایش پایداری و پایداری سیستم حفظ شود. از این رو برای نیل به این هدف، ترکیب میراگر ADAS با دیوار برشی فولادی بررسی و پارامترهای موردنظر مانند استهلاک انرژی، مقاومت، سختی، شکل پذیری، نسبت میرایی هیستریزس و سازوکار خرابی اجزاء میراگر برای نوآوری و رسیدن به اهداف مورد نیاز در این مطالعه، ارزیابی شد.

## ۲- روش مطالعه

در این مطالعه، از نتایج آزمایشگاهی و مشخصات نمونه دیوار برشی فولادی با عنوان TM2 که توسط وانگ و همکاران گزارش شده است استفاده شد [23]. این نمونه با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. در این نمونه، دیوار برشی فولادی متشکل از تیرها، ستون‌ها، ورق‌های پرکننده و اتصالات تیر به ستون بوده و کلیه اعضای مرزی قاب دیوار برشی فولادی توسط جوش بهم متصل شد. ارتفاع ستون و طول تیرها به ترتیب ۳۹۰۰ میلی متر و ۲۱۶۰ میلی متر و ضخامت دیوار برشی فولادی در طبقه اول، دوم و سوم به ترتیب ۶ میلی-متر، ۴ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر و نسبت دهانه به ارتفاع  $L/h = 1.8$  و نسبت ارتفاع به ضخامت  $\lambda = 300$  است. همچنین نمونه در ۲ مرحله بارگذاری شد که در مرحله ۱ مقدار ۴۵۰ کیلو نیوتن بار قائم و در مرحله ۲ مقدار ۱۰۰ کیلو نیوتن بار افقی اعمال شد. شکل (۱) جزئیات ساخت نمونه آزمایشگاهی [23] و شکل (۲) مدل شبیه‌سازی شده و مش‌بندی مدل اجزاء محدود نمونه آزمایشگاهی TM2 را در نرم‌افزار ABAQUS [24] نشان می‌دهد. همچنین کانتور تنش فون میسز نمونه آزمایشگاهی TM2 در شکل (۳) نشان داده شده است. به منظور راستی آزمایی، نمونه آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی و منحنی هیستریزس (نیرو - جابه‌جایی) مدل اجزاء محدود با نمونه آزمایشگاهی که در شکل (۴) نشان داده شده مقایسه گردید و با بررسی نتایج بدست آمده

نتایج تجربی این تحقیقات نشان می‌دهد که یک افزایش میرایی و سختی فولادی که به درستی جوش داده شده باشد می‌تواند تعداد زیادی از بازده‌های معکوس را بدون هیچ‌گونه سختی و تنزل در مقاومت حفظ کند [11]. در تحقیق صورت گرفته توسط تهرانی‌زاده در سال ۲۰۰۰ تاثیر میراگرهای ADAS بر رفتار اتصالات خورجینی ارزیابی شد که استفاده از میراگرهای ADAS باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مورد آزمایش شد [12]. زوو و هان در سال ۲۰۱۲ با بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب سه طبقه مجهز به میراگر ADAS پی بردند که رفتار هیستریتیک این میراگرها بسیار پایدار است [13]. تعدادی از پژوهشگران رفتار اجزاء ADAS را به صورت مجزا بررسی کرده‌اند از جمله برگمان و گول [14]، ویتاکر و همکاران [15]، سو و هانسون [16]، و شیا و هانسون [17]. میراگرهای ADAS مورد استفاده در این مطالعات از صفحات فولادی X شکل ساخته شدند که ورق‌های X شکل در دو انتها به صفحات اتصال متصل شدند. این مطالعات مناسب بودن میراگر ADAS را برای استفاده در ساختمان‌ها برای بهبود عملکرد لرزه‌ای تایید کرده است. در ادامه تعدادی از پژوهشگران دیگر از جمله دنگ و همکاران [18]، هانگ و همکاران [19]، مارشال و همکاران [20]، روی انواع مختلفی از میراگر ADAS تحقیق کرده و گزارش‌های خود را از چگونگی عملکرد این میراگر گزارش کردند. تحملی رودسری و همکاران [21] در سال ۲۰۱۸ تأثیر استفاده از مهاربند شورون را در برابر ممان RC با استفاده از میراگرهای ADAS و TADAS در قاب‌های مقاوم تحت بارگذاری چرخه‌ای به صورت تجربی بررسی کردند و مقاومت، انبساط ترک، سختی، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی تمامی قاب‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش مقاومت و شکل‌پذیری قاب‌ها در حد قابل توجهی بود. هوشمند سروسناتی و همکاران [22] در سال ۲۰۲۱ به بررسی عملکرد دیوار برشی فولادی و میراگر ADAS پرداختند و نتایج بدست آمده افزایش شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی و نسبت میرایی معادل را نشان داد. هدف از این مطالعه این بود که علاوه بر سختی، ظرفیت

شکل ۲. مدل شبیه‌سازی شده و مدل مش بندی اجزاء محدود نمونه آزمایشگاهی TM2

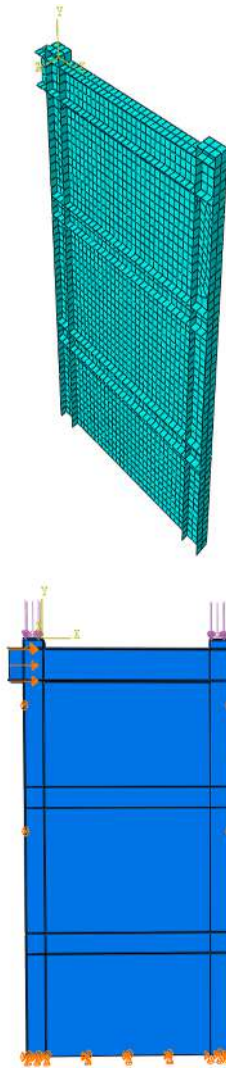


Fig. 2. Simulated model and Mesh of numerical model for TM2 specimen

شکل ۳. کانتور تنش فون میسز نمونه TM2

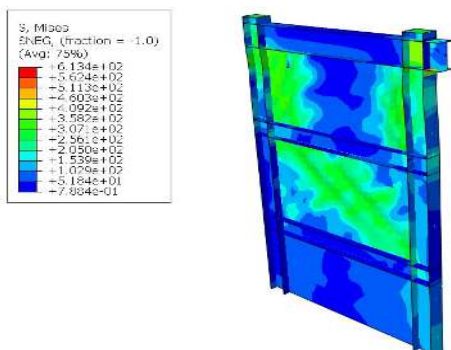


Fig. 3. Von Mises stress contour of TM2 specimen

از مدل مورد مطالعه مشخص شد نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود تطابق مناسبی دارند و می‌توان از مدل اجزاء محدود جهت بررسی و مقایسه پارامترهای موردنظر در این مطالعه نظیر ارزیابی ظرفیت استهلاک انرژی، مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و ارزیابی سازوکار خرابی میراگر استفاده نمود. در ادامه با هدف بررسی و بهبود عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی در برابر نیروهای جانبی، میراگرهای پیشنهادی ADAS در فاصله مابین ستون‌ها و ورق‌های پرکننده دیوار برشی فولادی در نظر گرفته شد. کانتور تنش فون میسز مدل مجهز به میراگر پیشنهادی ADAS در شکل (۵) نشان داده شده است. پارامترهای متغیر در این مطالعه شامل ضخامت میراگر (۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر) و ضخامت ورق پرکننده (۳، ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر) می‌باشد. در مجموع ۹ مدل اجزای محدود طبق جدول (۱) شبیه‌سازی شد و رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی ارزیابی گردید.

شکل ۱. جزئیات ساخت نمونه آزمایشگاهی TM2 [23]

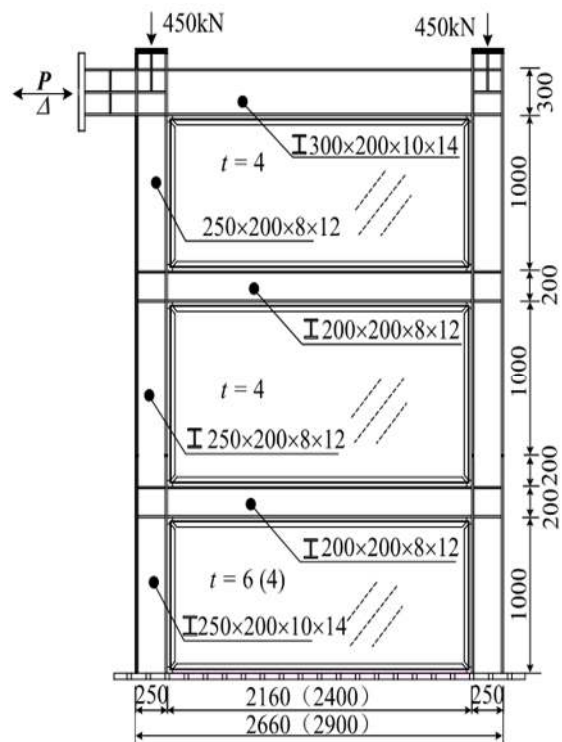


Fig. 1. Construction details of TM2 specimen [23]

### ۳- مدل سازی المان محدود

#### ۳-۱ مشخصات کلی

به منظور بررسی عملکرد میراگرهای ADAS در دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای، نمونه آزمایشگاهی به کمک نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شد. شکل (۶) مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی مجهز به میراگرهای ADAS را نشان می‌دهد. برای تجزیه و تحلیل مدل‌ها از تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده شود. اجزاء قابل مطالعه قاب شامل تیر، ستون، ورق‌های پرکننده، اتصالات تیر به ستون و میراگرهای ADAS است. مصالح مدل‌ها بر اساس استاندارد GB/T 228-2002 [25] طراحی شد. رفتار اجزاء سه بعدی و تغییر شکل-پذیر است. از المان صفحه‌ای SHELL برای مدل‌سازی کلیه اعضای قاب استفاده شد. پروتکل بارگذاری بر اساس ATC-24 [26] برای هر مرحله از بار چرخه‌ای ۰٫۱ ثانیه تنظیم شد.

شکل ۶. مدل اجزاء محدود دیوار برشی فولادی مجهز به میراگرهای ADAS

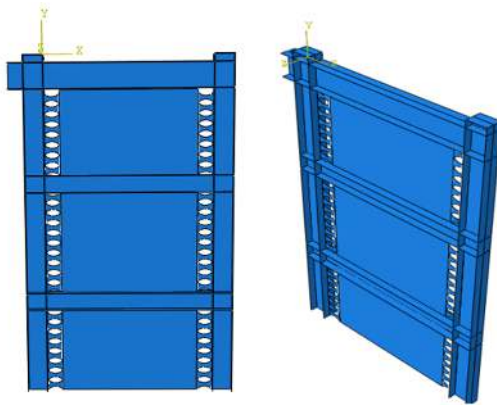


Fig. 6. Finite element model of steel shear wall equipped with ADAS dampers

شکل ۴. مقایسه منحنی نیرو - تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزاء

محدود

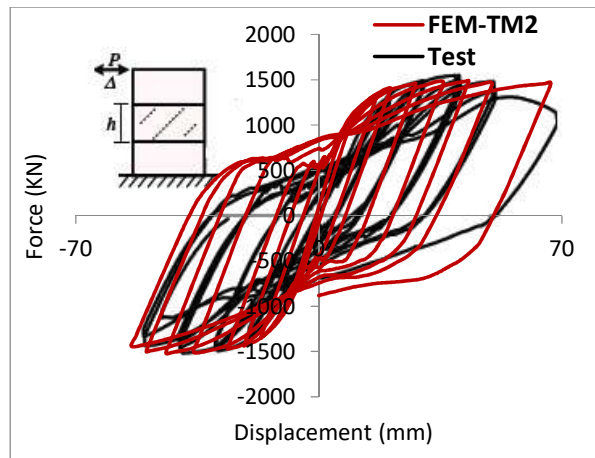


Fig. 4. Comparison of force-displacement curve between TM2 experimental specimen model and finite element model

شکل ۵. کانتور تنش فون میسز مدل مجهز به میراگرهای ADAS

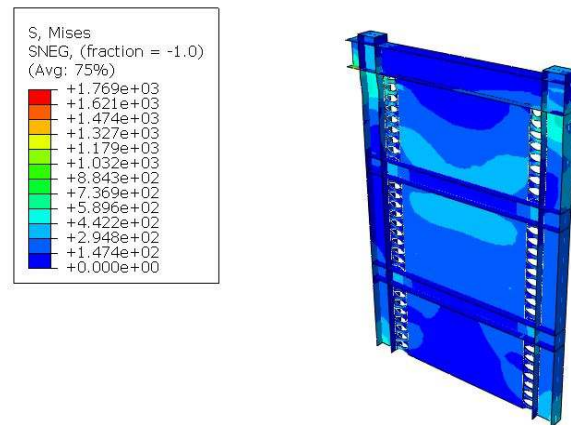


Fig. 5. Von Mises stress contour of model equipped with ADAS dampers

جدول ۱. جزئیات مدل‌های شبیه‌سازی شد

Specimen	Column			Beam	Infill Plate			Damper		Damper		
	1	2	3	L (mm)	1	2	3	t (mm)	1, 2, 3	1	2	3
	floor	floor	floor	1, 2, 3 floors	floor	floor	floor	floors	floor	floor	floor	floor
TM2 (No Damper)	1000	1200	1000	2160	6	4	4	0	0	0	0	0
TM2 + ADAS t8	1000	1200	1000	2160	6	4	4	8	8	10	8	8
TM2 + ADAS t10	1000	1200	1000	2160	6	4	4	10	8	10	8	8
TM2 + ADAS t12	1000	1200	1000	2160	6	4	4	12	8	10	8	8
TM2 + ADAS t14	1000	1200	1000	2160	6	4	4	14	8	10	8	8
TM2 + ADAS t16	1000	1200	1000	2160	6	4	4	16	8	10	8	8
Infill Plate t6,3,3 + ADAS t14	1000	1200	1000	2160	6	3	3	14	8	10	8	8
Infill Plate t6,5,5 + ADAS t14	1000	1200	1000	2160	6	5	5	14	8	10	8	8
Infill Plate t6,6,6 + ADAS t14	1000	1200	1000	2160	6	6	6	14	8	10	8	8

Table 1. Details of simulated models

### ۲-۳ تعریف هندسه و مش‌بندی مدل

شکل ۷. هندسه و مش‌بندی مدل مورد مطالعه

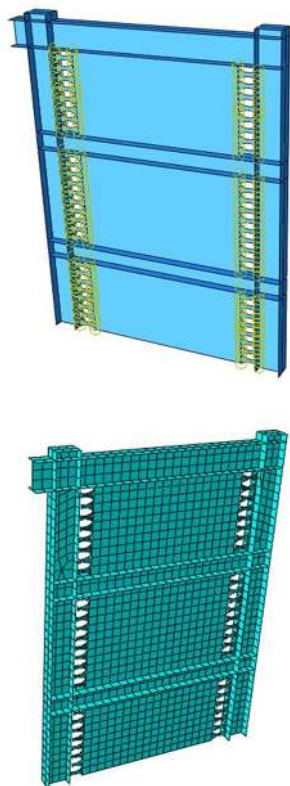


Fig. 7. Geometry and meshing of the studied model

مدل‌ها با استفاده از المان چهارگره‌ای (S4R) مش‌بندی شدند. المان S4R، چرخش‌های بزرگ و کرنش‌های اجزاء محدود را در نظر گرفته و امکان تغییر در ضخامت را ایجاد می‌کند. المان S4R، از یک روش انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده می‌کند، به شکلی که فقط از یک نقطه انتگرال‌گیری در مرکز صفحه استفاده می‌کند. این روش می‌تواند نتایج دقیق‌تری را رقم بزند و در عین حال نسبت به حالت استفاده از المان‌هایی که به صورت کامل انتگرال‌گیری در آن‌ها انجام می‌شود و به ویژه در مسائل سه‌بعدی، زمان تحلیل را به مراتب کاهش می‌دهد. بنابراین برای آنالیزهای با کرنش بزرگ و برای مصالحی که ضریب پواسون مؤثر آنها غیر صفر است و همچنین مواردی که غیر خطی شدن هندسی و مواد ممکن است رخ دهد، مناسب است. برای افزایش دقت و قابلیت اعتماد نتایج تحلیل توسط نرم افزار، برای مش‌بندی، کل مدل به قسمت‌های ریزتری تقسیم شد. اجزا و مش مورد استفاده در مدل اجزا محدود در شکل (۷) نشان داده شده است.

### ۳-۳ مشخصات مصالح

در نمونه‌ها، مصالح ورق‌های پرکننده از جنس فولاد Q235B

و اعضای تیر و ستون‌ها و میراگرها از جنس فولاد Q345B

### ۳-۲ طراحی اجزاء میراگر ADAS

صفحات این میراگرها با پارامترهای طول، عرض و ارتفاع مشخص شده و نحوه طراحی صفحات به نحوی است که ابتدا اجزاء میراگر ADAS و سپس تیرها و ستون‌های قاب دیوار برشی فولادی به محدوده تسلیم وارد شوند. در بارگذاری‌های لرزه‌ای، همیشه صفحات میراگر زودتر تسلیم شده و پس از اجزاء میراگر، تیرها و ستون‌ها وارد محدوده تسلیم می‌شوند. در این مطالعه در طراحی اجزاء میراگر از صفحات X شکل که مشخصات فیزیکی اجزاء آن در شکل (۸) نشان داده شده استفاده گردید که در آن عرض قطعه برابر ۲۰۰ میلی متر، ارتفاع برابر ۱۲۰ میلی متر و شعاع خم در قسمت میانی برابر با ۴۰ میلی متر است. در این مطالعه ورق‌های موجود در قطعه میراگر در ضخامت‌های مختلف بررسی شد و ورق‌های X شکل در دو انتها به صفحات اتصال گیردار متصل شدند.

شکل ۸ مشخصات فیزیکی اجزاء میراگر ADAS (ابعاد به میلی متر)

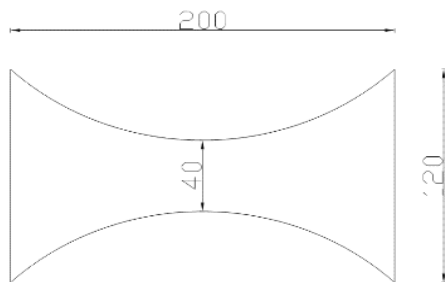


Fig. 8. Physical characteristics of ADAS damper components (dimensions in millimeters)

### ۳-۵ شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی و بارگذاری مدل اجزا محدود همانند نمونه آزمایشگاهی انجام شد. شرایط مرزی شامل پشتیبانی ستون و پشتیبانی جانبی برای جلوگیری از تغییر شکل خارج صفحه و بارگذاری چرخه ای است. نمونه در ۲ مرحله بارگذاری شد که در مرحله ۱ مقدار ۴۵۰ کیلو نیوتن بار قائم و در مرحله ۲ مقدار ۱۰۰ کیلو نیوتن بار افقی اعمال گردید. شکل (۹) مکان‌های بارگذاری چرخه‌ای در مدل اجزاء محدود را نشان می‌دهد. برای اعمال جابه‌جایی از الگوی پروتکل بارگذاری چرخه‌ای ATC-24 [26] استفاده شد که در شکل (۱۰) ارائه شده است. در

بر اساس استاندارد GB/T 228-2002 [25] طراحی شدند. ویژگی‌های مکانیکی اجزاء فولادی حاصل از آزمایش‌های کشش مصالح در جدول (۲) آورده شده است [23]. نسبت پواسون اجزای فولادی ۰٫۳ است. برای نشان دادن کامل رفتار چرخه‌ای دو نوع فولاد به کار رفته در نمونه، از یک رابطه اصلی در تحلیل مدل استفاده شده است. از آنجایی که برای آزمایش کششی مصالح، فقط از آزمایش استاندارد یکنواخت استفاده شده است، تعریف مشخصات غیر خطی مصالح برای نمونه تحلیلی، نیاز به فرضیاتی دارد. در نرم افزار ABAQUS برای تعریف مشخصات پلاستیک مواد، از دو نوع سخت شوندهگی ایزوتروپیک و کینماتیک می‌توان استفاده نمود. در اینجا، از روش سخت‌شوندهگی ایزوتروپیک، برای بیان رفتار تنش- کرنش ورق و اعضای قاب استفاده شده است. نرم‌افزار ABAQUS/Standard [24] محاسبات مربوط به المان‌ها را بر مبنای تنش حقیقی  $\sigma_{true}$  و کرنش لگاریتمی  $\epsilon_{ln}$  انجام می‌دهد. بنابراین نتایج آزمایش کشش، با استفاده از روابط ساده زیر به مقادیر ورودی نرم افزار تبدیل شدند:

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} \cdot (1 + \epsilon_{nom}) \quad (1-3)$$

رابطه (۱-۳) بیان کننده تنش حقیقی و رابطه (۲-۳) نشان دهنده کرنش لگاریتمی است:

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln (1 + \epsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2-3)$$

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های کشش مصالح فولادی [23]

Type	t (mm)	E (×105 MPa)	fy (MPa)	fu (MPa)
Q345B	16	2.07	332	501
	14	2.03	363	586
	12	2.11	352	499
	10	1.94	365	511
	8	2.08	323	488
Q235B	10	2.01	288	434
	8	2.02	402	556
	6	1.98	418	563
	5	1.94	314	455
	4	2.02	256	378
	3	2.00	278	391

Table 2. Results of steel materials tensile tests [23]

انرژی وابسته به تغییر مکان که از طریق جاری شدن فلز منجر به استهلاک انرژی در سازه می‌شوند، میراگرهای ADAS هستند. این میراگرها با رسیدن به ناحیه پلاستیک باعث اتلاف انرژی ورودی به سازه می‌شوند. هندسه این میراگرها باید به گونه‌ای باشد که بیشترین نقاط آن به تسلیم رسیده و اتلاف انرژی ناشی از پلاستیک شدن در آن به بیشترین مقدار ممکن برسد. استفاده از این میراگرها به عنوان عضو کنترل کننده تغییر مکان باعث تمرکز خسارات در میراگر شده و کمترین آسیب به اعضای اصلی سازه مانند ستون و تیر وارد خواهد شد.

مقایسه استهلاک انرژی در جدول و شکل (۳) و شکل (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود هرچه ضخامت ورق میراگرها بیشتر شد استهلاک انرژی در سیستم دیوار برشی فولادی افزایش یافت و سیر صعودی به خود گرفت و استهلاک انرژی با استفاده از میراگرهای ADAS در مقایسه با مدل بدون میراگر TM2، از ۱/۱۲ تا ۱/۶۶ برابر افزایش یافت. در شکل (۱۳) با در نظر گرفتن ورق‌های پرکننده با ضخامت‌های مختلف، هرچه ضخامت ورق‌های پرکننده طبقات دوم و سوم (با ضخامت یکسان) به ضخامت ورق پرکننده طبقه اول نزدیکتر شد، استهلاک انرژی سیستم دیوار برشی فولادی در مقایسه با مدل بدون میراگر از ۱،۵۲ تا ۱،۶۴ برابر افزایش یافت به طوری که در مدل Infill Plate t6,6,6 + ADAS t14 (سه طبقه با ضخامت ورق‌های پرکننده یکسان) بیشترین میزان استهلاک انرژی مشاهده شد.

جدول ۳. مقایسه استهلاک انرژی سیستم دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌های مختلف برای میراگر و ورق پرکننده

Specimen	Dissipation energy (KN.m)	Normalized energy dissipation with respect to No damper case
TM2 (No Damper)	728	1.00
TM2 + ADAS t8	816	1.12
TM2 + ADAS t10	918	1.26
TM2 + ADAS t12	1059	1.45
TM2 + ADAS t14	1181	1.62

این شکل،  $\delta_i$  اوج تغییر شکل در مرحله بارگذاری  $i$  است،  $n_i$  تعداد چرخه‌هایی است که باید در مرحله بارگذاری  $i$  انجام شود، و  $\Delta$  افزایشی در اوج تغییر شکل بین دو مرحله متوالی است [27]. در شکل (۱۱) الگوی بارگذاری مدل‌ها با توجه پروتکل بارگذاری ATC-24 نشان داده شده است.

شکل ۹. بارگذاری مدل

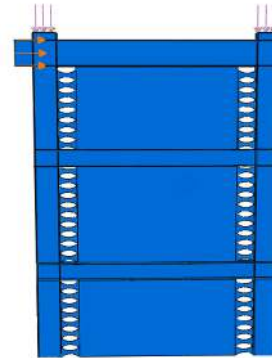


Fig. 9. loading of model

شکل ۱۰. الگوی پروتکل بارگذاری چرخه‌ای ATC-24 [26]

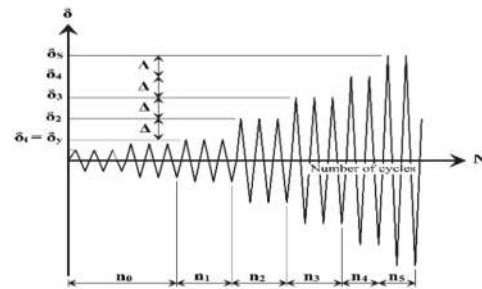


Fig. 10. ATC-24 Cycle Loading Protocol Pattern [26]

شکل ۱۱. چرخه بارگذاری مورد استفاده در این مطالعه

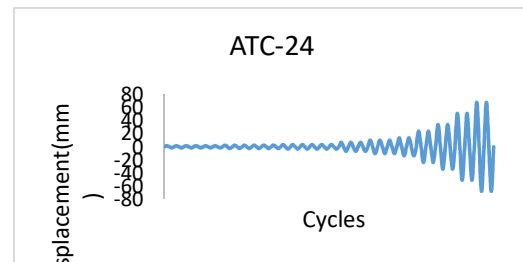


Fig. 11. The loading cycle used in this study

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱ ارزیابی استهلاک انرژی

همان‌گونه که پیشتر گفته شد یکی از موثرترین سازوکارها برای استهلاک انرژی زلزله توسط تغییر شکل‌های غیرالاستیک قطعات فولادی انجام می‌گیرد. از جمله وسایل مستهلک‌کننده



نسبت به مدل بدون میراگر TM2 شده است. همان گونه که در شکل (۱۴) مشاهده می شود در تمامی مدل ها با اضافه کردن میراگر ADAS، مقاومت سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به مدل بدون میراگر TM2 افزایش یافت و با بیشتر شدن ضخامت ورق های میراگر این افزایش مقاومت در مقایسه با مدل بدون میراگر، از ۲/۴۰ تا ۳/۱۴ برابر افزایش یافت. همچنین در شکل (۱۵) با در نظر گرفتن ضخامت ورق های پرکننده مختلف برای سیستم دیوار برشی فولادی، شاهد افزایش مقاومت از ۲/۳۰ تا ۲/۸۱ برابر نسبت به مدل بدون میراگر TM2 + ADAS بوده به طوری که در مدل t14 بیشترین میزان مقاومت مشاهده شد.

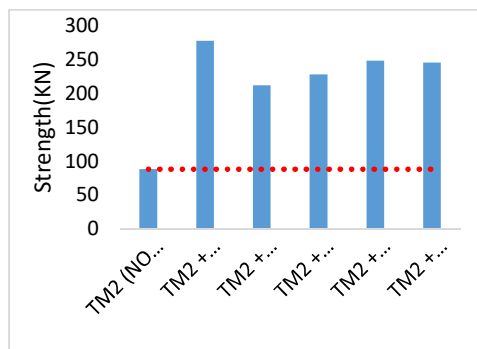
جدول ۴. مقایسه میزان مقاومت سیستم دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن ضخامت ورق های مختلف برای میراگر و ورق پرکننده

Specimen	Strength (KN)	Normalized strength with respect to No damper case
TM2 (No Damper)	88	1.00
TM2 + ADAS t8	277	3.14
TM2 + ADAS t10	212	2.40
TM2 + ADAS t12	228	2.58
TM2 + ADAS t14	248	2.81
TM2 + ADAS t16	245	2.78
Infill Plate t6,3,3 + ADAS t14	203	2.30
Infill Plate t6,5,5 + ADAS t14	236	2.68
Infill Plate t6,6,6 + ADAS t14	234	2.65

**Table 4.** Comparison of strength of steel plate shear wall considering the thickness of different sheets for dampers and infill plates

شکل ۱۴. مقایسه مقاومت دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف ورق-

های میراگر

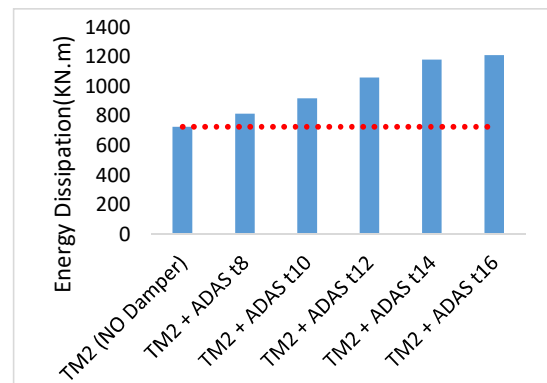


**Fig. 14.** Comparison of strength of steel plate shear wall with different thickness of damper sheets

TM2 + ADAS t16	1211	1.66
Infill Plate t6,3,3 + ADAS t14	1107	1.52
Infill Plate t6,5,5 + ADAS t14	1173	1.61
Infill Plate t6,6,6 + ADAS t14	1197	1.64

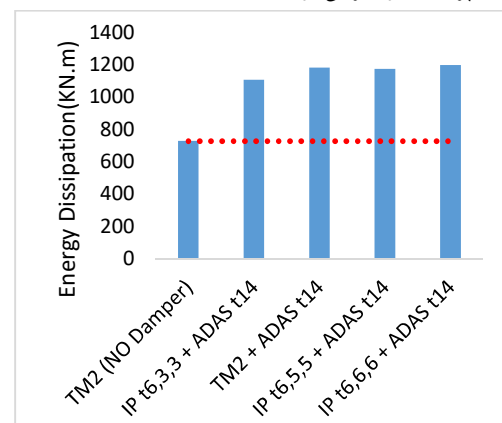
**Table 3.** Comparison of energy dissipation of steel plate shear wall considering different sheet thickness for dampers and infill plates

شکل ۱۲. مقایسه استهلاک انرژی دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف ورق های میراگر



**Fig. 12.** Comparison of energy dissipation of steel plate shear wall with different thickness of damper sheets

شکل ۱۳. مقایسه استهلاک انرژی دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف ورق های پرکننده دیوار برشی فولادی



**Fig. 13.** Comparison of energy dissipation of steel plate shear wall with different thickness of steel plate shear wall infill plates

#### ۲-۴ ارزیابی مقاومت

در جدول (۴) و اشکال (۱۴ و ۱۵) میزان مقاومت سیستم دیوار برشی فولادی با توجه به ضخامت ورق های مختلف میراگر و ورق های پرکننده دیوار برشی فولادی نشان داده شده است. همانطور که در جدول (۴) مشاهده می شود اضافه کردن میراگر ADAS باعث بالا رفتن مقاومت در تمامی مدل ها

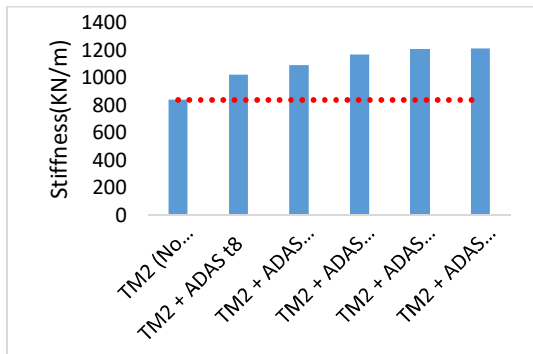
به مدل بدون میراگر TM2 افزایش پیدا کرد و در شکل (۱۷) با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌های پرکننده مختلف برای سیستم دیوار برشی فولادی، میزان سختی نسبت به مدل بدون میراگر TM2 افزایش یافت.

جدول ۵. مقایسه میزان سختی سیستم دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌های مختلف برای میراگر و ورق پرکننده

Specimen	Stiffness (KN/m)	Normalized Stiffness with respect to No damper case
TM2 (No Damper)	841	1.00
TM2 + ADAS t8	1022	1.22
TM2 + ADAS t10	1092	1.30
TM2 + ADAS t12	1168	1.39
TM2 + ADAS t14	1206	1.43
TM2 + ADAS t16	1215	1.44
Infill Plate t6,3,3 + ADAS t14	1113	1.32
Infill Plate t6,5,5 + ADAS t14	1233	1.47
Infill Plate t6,6,6 + ADAS t14	1184	1.41

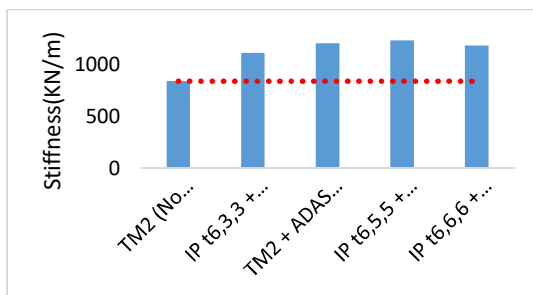
**Table 5.** Comparison of stiffness of steel plate shear wall considering the thickness of different sheets for dampers and infill plates

شکل ۱۶. مقایسه میزان سختی دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف ورق‌های میراگر



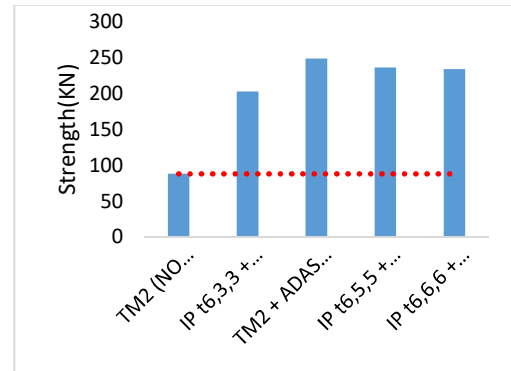
**Fig. 16.** Comparison of stiffness of steel plate shear wall with different thickness of damper sheets

شکل ۱۷. مقایسه میزان سختی دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف ورق‌های پرکننده دیوار برشی فولادی



**Fig. 17.** Comparison of stiffness of steel plate shear wall with different thickness of steel shear wall infill plates

شکل ۱۵. مقایسه مقاومت دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف ورق‌های پرکننده دیوار برشی فولادی



**Fig. 15.** Comparison of strength of steel plate shear wall with different thickness of steel shear wall infill plates

### ۳-۴ ارزیابی ظرفیت سختی

سختی عامل کاهش دهنده تغییر مکان جانبی سازه است و راندمان اجزای غیرسازه‌ای را مشخص می‌کند. هر چه سختی اجزای سازه‌ای بیشتر باشد تغییر مکان جانبی طبقات کمتر خواهد بود. البته باید توجه داشت که افزایش بیش از حد سختی قاب، موجب کاهش پریود سازه و افزایش نیروی برشی پایه می‌شود. در نتیجه نیروی برشی وارد بر ستون می‌تواند بیشتر از برش طراحی آن شده و موجب تخریب ستون و سازه شود. برای جلوگیری از این مشکل، ضرایب کاهش سختی در اعضای اسکلت فولادی اعمال گردیده است. در واقع هدف از افزایش سختی در سازه این نیست که کاملاً تغییر شکل سازه را به صفر برسانیم بلکه طراحی مورد قبول آن است که بتواند علاوه بر تامین سختی مورد نیاز و مقاومت لازم، تغییر شکل سازه را در محدوده مجاز نگه دارد. با توجه به اینکه در تحلیل غیر خطی تعیین میزان سختی سازه‌ها دشوار است پس تغییر مکان جانبی طبقات به صورت مطلق یا نسبی تعیین می‌شوند و بر اساس آن‌ها سختی قاب‌ها ارزیابی می‌شود. در این مطالعه میزان سختی هر یک از مدل‌های دیوار برشی فولادی بررسی و مقایسه شود که در جدول (۵) نشان داده شده است و شاهد افزایش میزان سختی از ۱/۲۲ تا ۱/۴۷ برابر نسبت به مدل بدون میراگر TM2 بودیم. همان‌گونه که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف برای میراگر ADAS، میزان سختی سیستم دیوار برشی فولادی از ۱/۲۲ تا ۱/۴۴ برابر نسبت

## ۴-۴ ارزیابی ظرفیت شکل پذیری

مفهوم شکل پذیری بدین معناست که یک سازه در برابر نیروهای جانبی تا چه اندازه می تواند دچار تغییر شکل های بزرگ شود تا سازه دچار تخریب نشود. سازه ها تحت بارگذاری شدید نیروهای جانبی مانند زلزله قادر به تغییر شکل خطی هستند و انرژی وارد شده به سازه را دفع نموده و از تخریب سازه جلوگیری می کنند [28]. در این مطالعه برای بدست آوردن ظرفیت شکل پذیری از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شد. جدول (۶) مقایسه شکل پذیری دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن ضخامت ورق های مختلف برای میراگر و ورق پرکننده را نشان می دهد. همانگونه که در شکل (۱۸) مشاهده می شود در تمامی مدل ها با اضافه کردن میراگر ADAS، شکل پذیری سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به مدل بدون میراگر TM2 افزایش یافت و با بیشتر شدن ضخامت ورق های میراگر، ظرفیت شکل پذیری در مقایسه با مدل بدون میراگر، از ۲/۳۲ تا ۲/۵۵ برابر افزایش یافت. همچنین در شکل (۱۹) با در نظر گرفتن ضخامت ورق های پرکننده مختلف برای سیستم دیوار برشی فولادی، شاهد افزایش مقاومت از ۲/۲۹ تا ۲/۴۰ برابر نسبت به مدل بدون میراگر TM2 بوده به طوری که در مدل TM2 + ADAS t14 بیشترین میزان مقاومت مشاهده شد.

جدول ۶. مقایسه شکل پذیری دیوار از برشی فولادی با در نظر گرفتن

ضخامت ورق های مختلف برای میراگر و ورق پرکننده

Specimen	Ductility (KN.m)	Normalized Ductility with respect to No damper case
TM2 (No Damper)	62	1.00
TM2 + ADAS t8	144	2.32
TM2 + ADAS t10	145	2.34
TM2 + ADAS t12	147	2.37
TM2 + ADAS t14	158	2.55
TM2 + ADAS t16	157	2.53
Infill Plate t6,3,3 + ADAS t14	142	2.29
Infill Plate t6,5,5 + ADAS t14	144	2.32
Infill Plate t6,6,6 + ADAS t14	149	2.40

Table 6. Comparison of ductility of steel plate shear wall considering the thickness of different sheets for dampers and infill plates

شکل ۱۸. مقایسه شکل پذیری دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف

ورق های میراگر

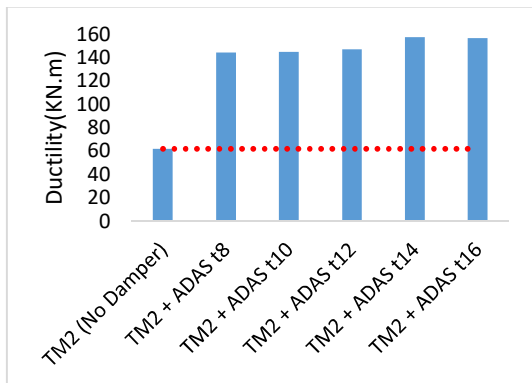


Fig. 18. Comparison of ductility of steel plate shear wall with different thickness of damper sheets

شکل ۱۹. مقایسه شکل پذیری دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف

ورق های پرکننده دیوار برشی فولادی

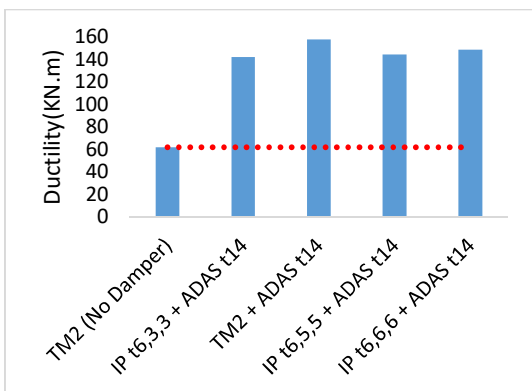


Fig. 19. Comparison of ductility of steel plate shear wall with different thickness of steel shear wall infill plates

## ۴-۵ نسبت میرایی هیستریزیس

انرژی هیستریزیس توسط منحنی نیرو - تغییر مکان (منحنی هیستریزیس) نشان داده می شود. این منحنی شامل حلقه هایی است که دارای تغییر شکل غیرخطی است [28]. شکل (۲۰) نشانگر اتلاف انرژی یا نسبت میرایی هر سیکل در منطقه  $A_h$  است و نسبت میرایی معادل برای این منطقه برابر است با [29]:

$$\zeta_{eq} = \frac{A_h}{2\pi V_m \Delta_m} = \frac{A_h}{4\pi A_e}$$

$V_m$  میانگین بیشترین نیروهای کششی و فشاری،  $\Delta_m$  میانگین بیشترین جابه جایی نیروهای کششی و فشاری در هر بارگذاری چرخه ای است.  $A_e$  منطقه انرژی ذخیره شده در یک سیستم الاستیک خطی است تحت شرایط سختی ساکن و موثر با

و قابلیت جذب انرژی بیشتری دارد. تعداد سیکل‌هایی هم که یک المان می‌تواند تا قبل از گسیختگی تحمل نماید نشان‌دهنده قابلیت اطمینان و پایداری عضو می‌باشد. این سه ویژگی در مدل‌های انجام شده به خوبی قابل مشاهده است و نمایانگر آن است که استفاده از میراگر ADAS باعث شکل‌پذیرتر شدن و افزایش استهلاک انرژی و افزایش کرنشی داخلی سیستم دیوار برشی فولادی شده است. در شکل (۲۴) منحنی هیستریزیس نمونه TM2 + ADAS t14 و TM2 با یکدیگر مقایسه شد. همچنین در شکل (۲۵) با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف برای ورق پرکننده دیوار برشی فولادی، منحنی هیستریزیس این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

جدول ۷. مقایسه نسبت میرایی هیستریزیس دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌های مختلف برای میراگر و ورق پرکننده

Specimen	Hysteresis Damping Ratio (%)	Normalized Hysteresis Damping Ratio with respect to No damper case
TM2 (No Damper)	7.98	1.00
TM2 + ADAS t8	14.19	1.78
TM2 + ADAS t10	13.41	1.68
TM2 + ADAS t12	14.85	1.86
TM2 + ADAS t14	15.42	1.93
TM2 + ADAS t16	15.96	2.00
Infill Plate t6,3,3 + ADAS t14	13.91	1.74
Infill Plate t6,5,5 + ADAS t14	14.76	1.85
Infill Plate t6,6,6 + ADAS t14	14.69	1.84

Table 7. Comparison of hysteresis damping ratio of steel plate shear wall considering the thickness of different sheets for dampers and infill plates

شکل ۲۲. مقایسه نسبت میرایی هیستریزیس دیوار برشی فولادی با

ضخامت مختلف ورق‌های میراگر

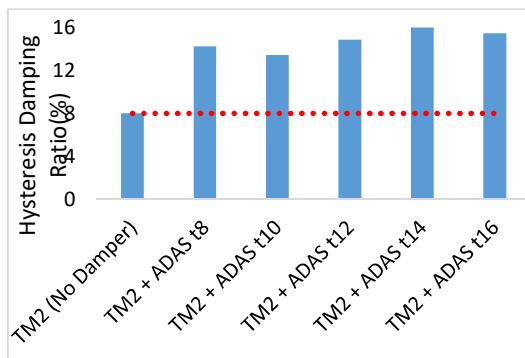


Fig. 22. Comparison of hysteresis damping ratio of steel plate shear wall with different thickness of damper sheets

$K_{eff} = V_m / \Delta_m$  همچنین، مساحت انرژی اتلاف شده در هر چرخه ( $A_h$ ) برابر با مساحت مستطیلی است که ضلع آن برابر با کل نیروهای فشاری موجود در سازه ( $2V_m$ ) است و ضلع دیگر برابر با جمع بیشترین سازه جابه‌جایی ( $2\Delta_m$ ) است. بنابراین،  $A_h = 4V_m\Delta_m$  [29]. در شکل (۲۱) رفتار هیستریزیک ایده‌آل میراگر ADAS نشان داده شده است.

شکل ۲۰. منحنی نیرو - تغییر مکان برای میرایی هیستریزیس معادل [29]

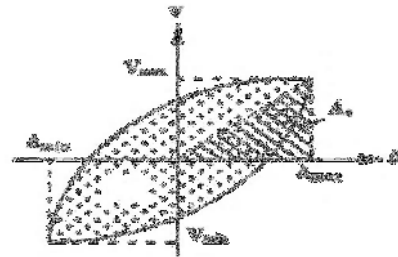


Figure 20. The force-displacement curve for equivalent hysteresis damping [29]

شکل ۲۱. رفتار هیستریزیک ایده‌آل میراگر ADAS [30]

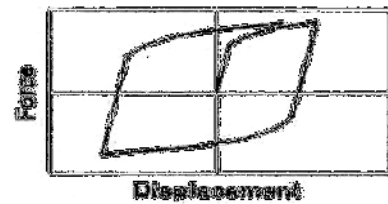


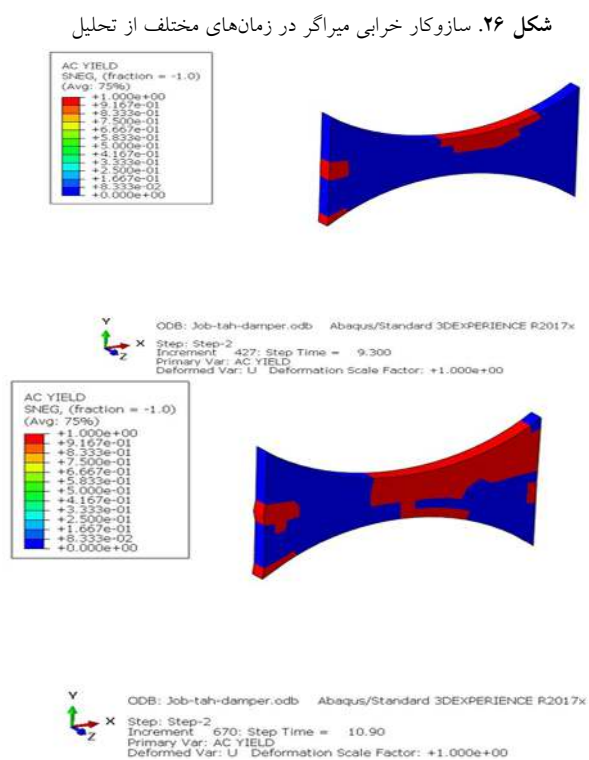
Figure 21. Idealized hysteresis behavior of Hysteretic damper [30]

در جدول (۷) و اشکال (۲۲ و ۲۳) نسبت میرایی هیستریزیس سیستم دیوار برشی فولادی با توجه به ضخامت ورق‌های مختلف میراگر و ورق‌های پرکننده دیوار برشی فولادی نشان داده شده است.

سه ویژگی اصلی منحنی‌های هیستریزیس شامل تقارن منحنی، سطح زیر نمودار منحنی و تعداد سیکل‌ها است. در منحنی‌های هیستریزیس هرچه تقارن منحنی تحت بارهای کششی و فشاری بیشتر باشد، نشان دهنده یکنواختی رفتار عضو تحت بارگذاری‌های متناوب است. سطح زیر نمودار یا به عبارتی سطح محصور شده بین نمودارهای هیستریزیس نشان دهنده انرژی مستهلک شده توسط عضو است. هرچه این سطح بزرگ‌تر باشد نشان دهنده این است که عضو شکل‌پذیرتر بوده

#### ۴-۶ ارزیابی سازوکار خرابی میراگر

در شکل (۲۶) سازوکار خرابی میراگر در زمان‌های مختلف از تحلیل آورده شده است. همان‌گونه که از بررسی اشکال مشخص است هرچه به زمان پایانی تحلیل نزدیکتر شدیم خرابی ایجاد شده در میراگر ADAS بیشتر شد که نشان دهنده عملکرد مطلوب میراگرها در جذب انرژی و افزایش شکل پذیری دیوار برشی فولادی بوده و در مقایسه با عملکرد دیوار برشی فولادی بدون میراگر برتری چشمگیری داشته و با جذب مقدار زیاد انرژی، باعث کاهش نیروی وارد شده به اجزاء اصلی و مانع از تخریب سیستم دیوار برشی فولادی می‌شود. قابل ذکر است در این سازوکار از مدل TM2 + ADAS t14 برای ارزیابی استفاده شد.



شکل ۲۳. مقایسه نسبت میرایی هیستریزس دیوار برشی فولادی با ضخامت مختلف ورق‌های پرکننده دیوار برشی فولادی

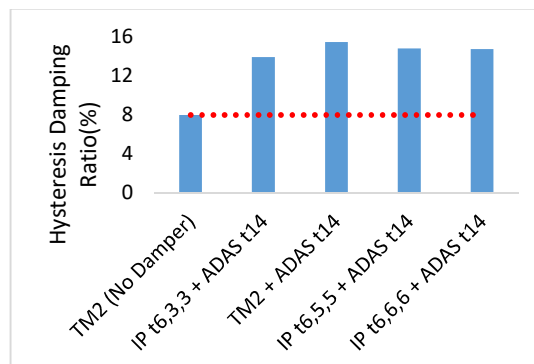


Fig. 23. Comparison of hysteresis damping ratio of steel plate shear wall with different thickness of steel shear wall infill plates

شکل ۲۴. مقایسه مدل بدون میراگر TM2 با مدل مجهز به میراگر TM2 + ADAS t14

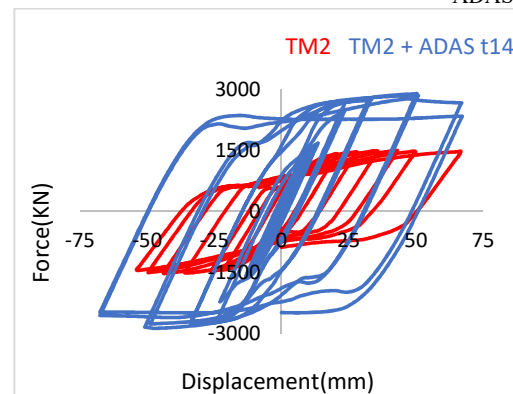


Fig. 24. Comparison of model without damper TM2 with model equipped with TM2 + ADAS t14 damper

شکل ۲۵. مقایسه مدل‌ها با ضخامت مختلف ورق‌های پرکننده دیوار برشی فولادی مجهز به میراگر ADAS t14

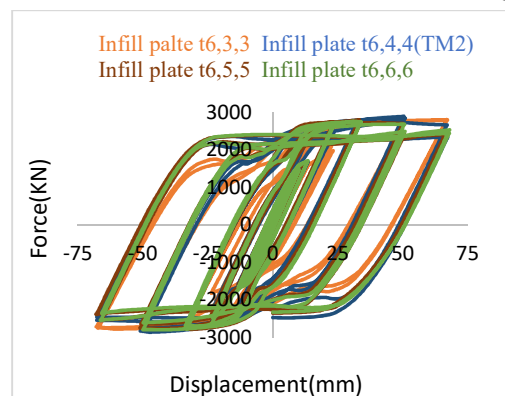


Fig. 25. Comparison of models with different thickness of steel shear wall infill plates equipped with ADAS t14 damper

کننده تغییر مکان باعث می‌شود اتلاف انرژی ناشی از پلاستیک شدن در میراگرها به بیشترین مقدار ممکن برسد. در نتیجه انرژی انتقالی به سازه به دلیل بازدهی میراگر کاهش یافته و کمترین آسیب به اعضای اصلی سازه مانند ستون و تیر وارد خواهد شد. همچنین هرچه ضخامت ورق میراگرها بیشتر شد استهلاک انرژی در سیستم دیوار برشی فولادی از ۷۲۸ به ۱۲۱۱ کیلونیوتن متر و با نسبت ۱/۱۲ تا ۱/۶۶ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگرافزایش یافت و سیر صعودی به خود گرفت. همچنین در مدل‌های مجهز به میراگر، با کاهش و افزایش ضخامت ورق‌های پرکننده در طبقات دوم و سوم نسبت به مدل بدون میراگر، شاهد افزایش میزان استهلاک انرژی از ۱۱۰۷ به ۱۱۹۷ کیلو نیوتن متر و با نسبت ۱/۵۲ تا ۱/۶۴ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگر بودیم که نشان‌دهنده عملکرد خوب میراگرها است.

برای بررسی میزان مقاومت، با اضافه کردن میراگر ADAS، میزان مقاومت سیستم دیوار برشی فولادی با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف برای میراگر از ۸۸ به ۲۴۸ کیلو نیوتن و با نسبت ۲/۴۰ تا ۳/۱۴ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگر افزایش یافت. در ادامه با در نظر گرفتن ورق‌های پرکننده برای سیستم دیوار برشی فولادی شاهد افزایش مقاومت از ۲۰۳ به ۲۴۸ کیلو نیوتن و با نسبت ۲/۳۰ تا ۲/۸۱ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگر بودیم.

عامل تعیین کننده در تأمین میرایی توسط این میراگرها، سختی اولیه آنها است. هر چه میزان سختی بیشتر باشد، استهلاک انرژی نیز بیشتر خواهد بود. در این مطالعه میزان سختی هر یک از مدل‌های دیوار برشی فولادی بررسی و مقایسه شد که با در نظر گرفتن ضخامت‌های مختلف برای میراگر ADAS، شاهد افزایش میزان سختی از ۸۴۱ به ۱۲۱۵ کیلو نیوتن بر متر و با نسبت ۱/۲۲ تا ۱/۴۴ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگر بودیم. همچنین با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌های پرکننده مختلف برای سیستم دیوار برشی فولادی، میزان سختی از ۱۱۱۳ به ۱۲۳۳ کیلو نیوتن بر متر و با نسبت ۱/۳۲ تا ۱/۴۷ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگر افزایش پیدا کرد.

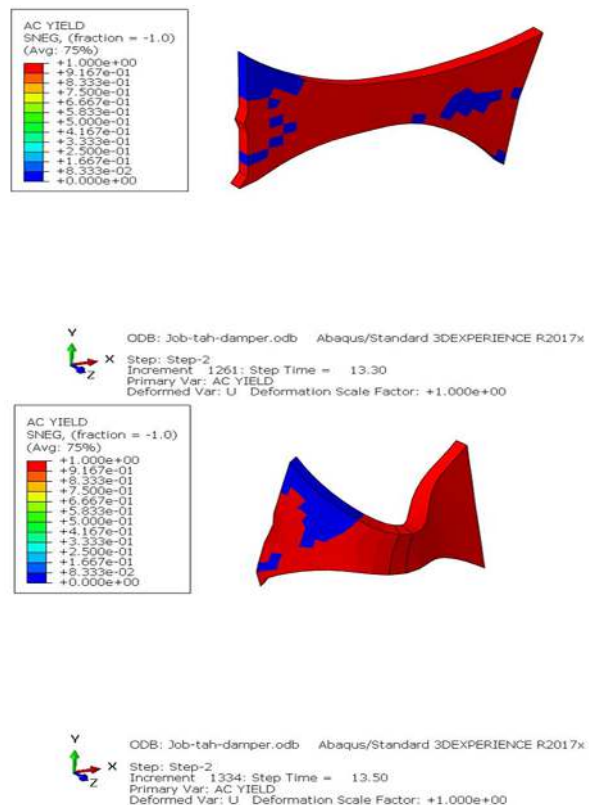


Fig. 26. Damper failure mechanism at different times of analysis

## ۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی مجهز به میراگرهای ADAS با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS تحلیل و بررسی شد. در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی و مشخصات نمونه دیوار برشی فولادی با عنوان TM2 که توسط وانگ و همکاران گزارش شده است استفاده شد و پس از درستی‌آزمایی نمونه آزمایشگاهی مشخص شد نمونه آزمایشگاهی با مدل شبیه‌سازی شده اجزاء محدود هماهنگی مناسبی دارند. در ادامه متغیرهایی همچون ضخامت ورق میراگر ADAS و ضخامت ورق پرکننده دیوار برشی فولادی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و پارامترهایی مانند استهلاک انرژی، مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و نسبت میرایی هیستریزس در حالت‌های مختلف (مجهز به میراگرهای ADAS و بدون میراگر) با یکدیگر مقایسه شد و در پایان سازوکار خرابی میراگر در زمان‌های مختلف از تحلیل بررسی شد. نتایج نشان داد استفاده از این میراگرها به عنوان عضو کنترل

- Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 260, 109-114.
- [3] Thorburn L. J., Kulak G. L. & Montgomery C. J. 1983 Analysis of steel plate shear walls. *Structural Engineering Report No. 107. Department of Civil Engineering university of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.*
- [4] Tromposch E. W. & Kulak G. L. 1987 Cyclic and static behavior of thin panel steel plate shear walls. *Structural Engineering Report No. 145. Department of Civil Engineering university of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.*
- [5] Kheyroddin A., Gholhaki M. & Pachideh G. 2018 Seismic evaluation of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel braces using IDA and Pushover methods in the near-fault field. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 1-15.
- [6] Najari Varzaneh M., Hosseini M. & Akbarpoor A. 2014 The study of EADAS elliptical steel damper function in seismic resisting of steel frames. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2(2), 40-45.
- [7] Behzadfar B., Maleki A. & Lotfollahi Yaghin M. A. 2020 Improved Seismic Performance of Chevron Brace Frames Using Multi-Pipe Yield Dampers. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(4), 137-155.
- [8] Symans M. D., Charney F. A., Whittaker A. S., Constantinou M. C., Kircher C. A., Johnson M. W. & McNamara R. J. 2008 Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments. *Journal of structural engineering*, 134(1), 3-21.
- [9] Mohammadi M., Kafi M. A., Kheyroddin A. & Ronagh H. R. 2019 Experimental and numerical investigation of an innovative buckling-restrained fuse under cyclic loading. *Structures*, 22, 186-99.
- [10] Whittaker A. S., Bertero V. V., Thompson C. L. & Alonso L. J. 1991 Seismic testing of steel plate energy dissipation devices. *Earthquake Spectra*, 7(4), 563-604.
- [11] 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.
- [12] Tehranizadeh M. 2000 Behavior of Friction Damping on Semi-Rigid "Khorjinee" Steel Framing Connection. In *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.*
- [13] Zhou C. & Han J. 2012 Study on the seismic performance of X-added damping and stiffness energy dissipation device. In *15th World*

نتایج نشان داد میراگرهای ADAS با افزایش سختی در سیستم دیوار برشی فولادی، تغییر مکان‌های نسبی در آن را کاهش داده و از این طریق باعث عدم تخریب اجزاء اصلی دیوار برشی فولادی می‌شوند.

در تمامی مدل‌ها با اضافه کردن میراگر ADAS، شکل-پذیری سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به مدل بدون میراگر افزایش یافت و با بیشتر شدن ضخامت ورق‌های میراگر، ظرفیت شکل‌پذیری از ۶۲ به ۱۵۸ کیلو نیوتن متر و با نسبت ۲/۳۲ تا ۲/۵۵ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگر افزایش یافت. همچنین با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌های پرکننده مختلف برای سیستم دیوار برشی فولادی، شاهد افزایش میزان مقاومت از ۱۴۲ به ۱۵۸ کیلو نیوتن متر و با نسبت ۲/۲۹ تا ۲/۵۵ برابر در مقایسه با مدل بدون میراگر بودیم. در ادامه با بررسی منحنی‌های هیستریزیس و نسبت میرایی هیستریزیس مدل‌های مختلف، برتری چشمگیر مدل‌های مجهز به میراگر نسبت به مدل بدون میراگر مشهود بود و هرچه ضخامت میراگرها افزایش یافت شاهد بیشتر شدن سطح زیر منحنی هریک از مدل‌ها بودیم. در نتیجه هرچه این سطح بزرگ‌تر باشد نشان دهنده این است که عضو شکل‌پذیرتر بوده و قابلیت جذب انرژی بیشتری دارد. در پایان نیز سازوکار خرابی میراگر در زمان‌های مختلف از تحلیل بررسی شد. نتایج نشان داد هرچه به زمان پایانی تحلیل نزدیکتر شدیم خرابی ایجاد شده در میراگر ADAS بیشتر شد که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب میراگرها در جذب انرژی و افزایش شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی است.

## مراجع

- [1] Takahashi Y., Takeda T., Takemoto Y. & Takagi M. 1973 Experimental Study on Thin Steel Shear Walls and Particular steel bracing under Alternative Horizontal Load. *Preliminary Report, IABSE, symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal*, 260 (10): 185-191.
- [2] Mimura H. & Akiyama H. 1977 Load-deflection relationship of earthquake resistant steel shear walls with a developed diagonal tension field.

- [22] Houshmand-Sarvestani A., Totonchi A., Shahmohammadi M. A. & Salehipour H. 2021 Numerical assessment of the effects of ADAS yielding metallic dampers on the structural behavior of steel shear walls (SSWs). *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 1-19.
- [23] Wang M., Shi Y., Xu J., Yang W. & Li Y. 2015 Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 373-386.
- [24] Hibbitt H., Karlsson B. & Sorensen E. 2018 ABAQUS user's manual. Providence, RI: Dassault Systems Simulia Corp, (2018).
- [25] The People's Republic of China state administration of quality supervision inspection and quarantine. GB/T 228-2002 Tensile Test Method for Metal Materials at Room Temperature. Beijing, China: China Standard Press; 2002.
- [26] Krawinkler H. 1992 ATC-24: Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures. Redwood City, Report prepared for the Applied Technology Council.
- [27] Boostani M., Rezaifar O. & Gholhaki M. 2019 Seismic performance investigation of new lateral bracing system called "OGrid-H". *SN Applied Sciences*, 1(4), 1-24.
- [28] Shojaeifar H., Maleki A. & Lotfollahi-Yaghin, M. A. 2020 Performance evaluation of curved-TADAS damper on seismic response of moment resisting steel frame. *International Journal of Engineering*, 33(1), 55-67.
- [29] Priestley M. N., Seible F., & Calvi G. M. 1996 *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons.
- [30] Hameed A., Qazi A. U. & Rasool A. M. 2014 Seismic performance of low to medium rise reinforced concrete buildings using Passive energy dissipation devices. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*.  
*Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal* (pp. 24-28).
- [14] Bergman D. M. & Goel S. C. 1987 Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness. *Ann Arbor: Department of Civil Engineering, University of Michigan*; 1987(UMCE 87-10).
- [15] Whittaker A.S., Bertero V.V., G J.L.A. & Thompson C. 1989 Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements. *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*; 1989(UCB/EERC-89/02).
- [16] Su Y. F. & Hanson RW. 1990 Seismic response of building structures with mechanical damping devices. *Department of Civil Engineering, University of Michigan*; 1990(Research report .UMCE 90-2).
- [17] Xia C. & Hanson R. D. 1992 Influence of ADAS element parameters on building seismic response. *Journal of Structural Engineering*, 118(7), 1903-1918.
- [18] Deng K., Pan P., Sun J., Liu J. & Xue Y. 2014 Shape optimization design of steel shear panel dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 99, 187-193.
- [19] LI H., Li G. & WANG S. 2014 Study and Application of Metallic Yielding Energy Dissipation Devices in Buildings. In *Tenth US National Conference on Earthquake Engineering. Anais de conferência*.
- [20] Marshall J. D. & Charney F. A. 2012 Seismic response of steel frame structures with hybrid passive control systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 41(4), 715-733.
- [21] TahamouliRoudsari M., Eslamimanesh M. B., Entezari A. R., Noori O. & Torkaman M. 2018 Experimental assessment of retrofitting RC moment resisting frames with ADAS and TADAS yielding dampers. In *Structures* (Vol. 14, pp. 75-87). Elsevier.



# Evaluation of cyclic behavior of steel plate shear wall equipped with added damping and stiffness (ADAS) dampers

Iman Tolouei<sup>1</sup>, Aahmad Maleki<sup>2\*</sup>, Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin<sup>3</sup>

1.Ph.D. Student in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

2.Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

3.Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

\*A.maleki@iau-maragheh.ac.ir

## Abstract

In the present study, the cyclic behavior of steel plate shear wall of a three-story steel frame equipped with added damping and stiffness (ADAS) dampers was evaluated. In this study, with the aim of evaluating and improving the performance of the steel plate shear wall against lateral forces, the proposed dampers were applied in the distance between the columns and the steel plate shear wall infill plates. The parameters studied include the thickness of the damper sheet (8, 10, 12, 14 and 16 mm) and the thickness of the infill plate (3, 4, 5 and 6 mm) respectively. Evaluation of cyclic behavior of steel plate shear wall was performed using finite element method via ABAQUS software and the loading protocol based on ATC-24 was applied. In order to verify, the experimental specimen was simulated by ABAQUS software and it was observed that the experimental specimen and the finite element model are in good conformation and the finite element model can be applied to study and compare the parameters considered in this study such as energy dissipation, strength, stiffness and ductility. The results showed that as the thickness of the damper sheet increased, the energy consumption in the steel plate shear wall system increased from 12 to 66 percent compared to the model without dampers. Also by reducing and increasing the thickness of the infill plates in the second and third floors compared to the model without dampers, we saw an increase in energy consumption from 52 to 64 percent compared to the model without dampers, which indicates the good performance of the dampers. The strength of the steel plate shear wall system increased from 2.40 to 3.14 times by considering different thicknesses for the damper compared to the model without damper, and further by considering the infill plates for the steel plate shear wall system. We saw an increase in strength from 2.30 to 2.81 times compare to the model without damper. Also the stiffness of each of the steel plate shear wall models was evaluated and compared, considering different thicknesses for the damper, it showed an increase in stiffness from 22 to 44 percent compared to the model without damper. Also considering the thickness of different infill plates for the steel plate shear wall system, the stiffness increased from 32 to 47 percent compared to the model without damper. As the thickness of the damper sheet increased, the ductility increased from 2.32 to 2.55 times compare to the model without damper. Also considering the thickness of different infill plates for the steel plate shear wall system, we saw an increase in strength from 2.29 to 2.55 times compare to the model without damper. Further, by examining the hysteresis curves and the hysteresis damping ratio of different models, it was evident that the models equipped with dampers are significantly superior to the models without dampers, and as the thickness of the dampers increased, the area under the curve of each model increased. As a result, the larger this level is, it indicates that the member is more malleable and has the ability to absorb more energy. Finally, the performance of the proposed dampers was evaluated along with the damper failure mechanism. The results showed that ADAS dampers with their special deformations, significantly increase energy consumption and make the steel plate shear wall more malleable and by absorbing a large amount of energy they reduced the force applied to the main components and prevented the destruction of the steel plate shear wall.

**Keywords:** Steel plate shear wall, ADAS dampers, cyclic behavior, Energy dissipation, Ductility.