

Numerical and analytical investigation of seismic performance of steel dampers with different heights and shapes

Ali Mohammad Rousta^{1*}, Masoud Amin Safaei Ardakani², Sohrab Shoja²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

2- Graduate of MSc. Structural Engineering

ABSTRACT

By studying steel buildings, civil engineers are always looking to design joints that, in addition to increasing the rotational capacity of the joint, prevent the brittle failure of the structure and allow the structure to be repaired after an earthquake. Steel dampers are suitable elements to achieve this goal and simple construction and use, has given them a relatively high advantage over other dampers. These dampers also provide the possibility of reconstruction and low cost of the building by preventing the severe destruction of steel beams and columns during an earthquake.

In this study, by comparing several samples of these dampers, their energy dissipation, damping and effective stiffness have been investigated by modeling in ABAQUS software. According to the results, SPD and DPD type dampers have better seismic behaviors and with increasing height, the seismic performance of all dampers have improved. Also, by simulating the behavior of dampers in SAP software, two-dimensional frames of 3, 7 and 15 story with and without dampers have been investigated under the acceleration of 5 earthquakes. The frame response does not give the same results at different accelerometers. However, by adding dampers and creating suitable conditions for the steel beam rotation, an increase in frame energy absorption has been observed in all models with dampers.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.270979.2352

*Corresponding author: Ali Mohammad Rousta

Email address: arousta@yu.ac.ir

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 January 2021

Revise Date: 19 September 2021

Accept Date: 01 November 2021

Keywords: Steel damper

Dissipated energy

Steel Panel Damper

Dual-Pipe Damper

Effective stiffness

بررسی عملکرد لرزه ای میراگرهای فولادی با ارتفاع و شکل های متفاوت

علی محمد روستا^{۱*}، مسعود امین صفائی اردکانی^۲، سهراب شجاع^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سازه

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی سازه

چکیده

مهندسان ساختمان با مطالعه ساختمان های فولادی همواره به دنبال طراحی اتصالاتی هستند که علاوه بر افزایش ظرفیت دورانی اتصال، از شکست ترد سازه جلوگیری کرده و مرمت سازه پس از وقوع زلزله را میسر سازند. میراگرهای فولادی المان های مناسبی جهت رسیدن به این هدف بوده و ساخت و به کارگیری ساده، در مقابل سایر میراگرها به آنها برتری نسبتا بالایی داده است. این میراگرها با جلوگیری از تخریب شدید تیر و ستون های فولادی در هنگام وقوع زلزله، امکان بازسازی مجدد و کم هزینه ی ساختمان را نیز فراهم می کنند. در این پژوهش با مقایسه ی چندین نمونه از این میراگرها، استهلاک انرژی، میرایی و سختی موثر آنها با مدلسازی در نرم افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج به دست آمده میراگرهای نوع SPD و DPD رفتارهای لرزه ای بهتری از خود نشان داده و با افزایش ارتفاع خواص لرزه ای تمامی میراگرها بهبود پیدا کرده است. میراگر نوع SSD با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر با انحراف معیار میرایی موثر ۰/۰۲۸ در بین تمامی میراگرها دارای کمترین مقدار بوده و این موضوع نشانگر ثبات بیشتر میرایی موثر در این نوع میراگر است. مشاهده ی بار ۵ تن در نمودار پوش اور تحلیل میراگرها نشان دهنده ی دقت بالای روابط طراحی می باشد. همچنین با شبیه سازی رفتار میراگرها در نرم افزار SAP، قاب دو بعدی ۳، ۷ و ۱۵ طبقه با و بدون میراگرها، تحت شتابنگاشت ۷ زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ قاب در شتابنگاشت های مختلف، نتایج یکسانی به دست نمی دهد. با این وجود با افزودن میراگرها و ایجاد شرایط مناسب برای دوران تیر فولادی، افزایش جذب انرژی قاب در تمامی مدل های دارای میراگر مشاهده گردیده است.

کلمات کلیدی: ساختمان فولادی، میراگر فولادی، استهلاک انرژی، سختی موثر، رفتار لرزه ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.270979.2352					
	10.22065/JSCE.2021.270979.2352	۱۴۰۱/۳/۳۱	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۰/۶/۲۸	۱۳۹۹/۱۱/۱۲
علی محمد روستا arousta@yu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

اصلی‌ترین مساله که در طراحی سازه‌های فولادی با اتصال صلب (خمشی، به اختصار MRFs) در نظر گرفته می‌شود داشتن ظرفیت دورانی و شکل پذیری بالا هم‌زمان با تامین صلبیت بالا می‌باشد. لذا اتصال صلب شکل‌پذیر باید قادر به تامین مقاومت و ظرفیت دورانی کافی باشد [1]. با وجود اینکه طراحی سازه‌های مرسوم قاب خمشی فولادی (MRFs) به گونه‌ای است که تغییر شکل‌های بزرگ غیر الاستیک در اثر زلزله‌های شدید در اعضای اصلی سازه رخ می‌دهد [2]، مهمترین مساله در اتصال این نوع سیستم سازه‌ای، ظرفیت کم دورانی در مقایسه با مقاومت بالای آن می‌باشد [1].

ظرفیت دورانی کم یک اتصال باعث شکست نابه‌هنگام محل اتصال بال تیر به ستون فولادی، قبل از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر می‌شود [1]. طی زلزله‌های Northridge (1994) و Kobe (1995)، اگرچه بسیاری از ساختمان‌هایی که در مقابل فروریزش طراحی شده بودند جان‌های بسیاری را نجات دادند [3,4]، بسیاری از سازه‌های فولادی در محل اتصال تیر به ستون دچار خرابی شدند. و بررسی‌های بیشتر نشان داده است که اغلب این خرابی‌ها ناشی از شکست ترد جوش بوده است [5].

پس از زلزله‌های یاد شده، در امریکا و ژاپن مطالعات زیادی در مورد اتصال مناسب تیر به ستون صورت گرفت [5] که مهمترین راهکارهای پیشنهادی، استفاده از تیر با مقطع کاهش یافته [6-9] و ورق جانبی [10] برای اتصال تیر به ستون بوده است. المان‌های نام‌برده برای نگهداری محل اتصال تیر به ستون در حالت الاستیک تا زمان ایجاد مفصل پلاستیک در تیر به کار می‌روند. منبع اصلی افزایش ظرفیت استهلاک انرژی در روش‌های یاد شده، انتهای اتصال تیر به ستون می‌باشد [1].

از آنجا که طراحی لرزه‌ای این اتصالات بر اساس ظرفیت دوران پلاستیک اتصال صورت می‌گیرد، پس از وقوع زلزله، تعمیر و مرمت این گونه اتصالات به راحتی قابل اجرا نمی‌باشد [5]. برای غلبه بر این مشکل استفاده از تجهیزات کنترل کننده آسیب پیشنهاد شده است. میراگرهای فلزی یکی از متداول‌ترین کنترل کننده‌ها می‌باشند. این میراگرها با استفاده از تغییر شکل‌های غیر الاستیک خود پس از رسیدن به نقطه‌ی تسلیم انرژی را مستهلک می‌کنند [11]. انواع مختلف این میراگرها عبارت‌اند از میراگرهای فولادی افزایش یافته سختی و میرایی [12]، میراگرهای لانه زنبوری [13]، مهاربندهای کمانش‌تاب [13-16] و میراگرهای فولادی I شکل سوراخدار [17-20].

از برتری و مزیت استفاده از این نوع میراگرها می‌توان به، رفتار هیستریزس پایدار، حساسیت کم نسبت به تغییر دمای محیط، قابلیت اعتماد طولانی مدت و هزینه‌ی کم اجرا اشاره نمود و کاهش شدید پاسخ سازه اشاره نمود [11]. میراگرهای SSD اولین بار توسط Oh معرفی شدند [21]. مطالعات آزمایشگاهی و عددی زیادی بر روی میراگرهای SSD صورت گرفته است [1,5,20,22,24-28] که در نتایج تمامی این تحقیقات رفتار مناسب چرخه‌ای میراگرهای SSD، جلوگیری از آسیب دیدگی تیر، استهلاک انرژی بالا و همچنین اقتصادی بودن اجرای این نوع میراگر تایید شده است. با این وجود در عملکرد این میراگرها دو مشکل دیده می‌شود که عبارت‌اند از وجود برش زیاد در ساق‌های میراگر و احتمال شکست ترد ساق‌ها [29] و کمانش ساق‌های میراگر که در شکل ۱ نشان داده شده است.

¹ Damage-Controlled

² Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements (ADAS)

³ Honeycomb dampers

⁴ Buckling restrained brace (BRB)

⁵ Steel Slit Dampers (SSD)



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱: کمانش ساق‌های میراگر SSD، الف: کمانش ساق‌های مدل میراگر مورد آزمایش ماع همکاران [30] ب: کمانش ساق‌های مدل میراگر مورد آزمایش تاگاوا همکاران [31] پ: کمانش ساق‌های مدل میراگر مورد آزمایش لی همکاران [32]

بنابر این در سال‌های بعد با ایجاد تغییر در شکل و پیکربندی این نوع میراگر و بهبود رفتار آن در مقابل تنش‌های وارده از جمله اثر هم‌زمان تنش خمشی و تنش برشی، علاوه بر افزایش سختی این میراگر، ظرفیت استهلاک انرژی و معایب دیگری از پیکربندی این وسیله را بهبود بخشیدند. در این راستا میراگرهای فلزی با شکل‌ها و حالت‌های دیگری ارائه گردیده‌اند.

همه آنچه در اینجا ارائه گردید تنها بخش کوچکی از مطالعات صورت گرفته بر روی یکی از انواع میراگرهای فلزی می‌باشد. حجم بالای مطالعات میراگرهای فلزی نشان دهنده کاربرد بودن و همچنین بهبود رفتار ساختمان در مقابل بارهای لرزه‌ای می‌باشد. لذا بعدها میراگرهای فلزی با شکل‌های بهینه‌تر و رفتار بهتر ارائه شدند و هرکدام دارای مزایا و معایب خاص خود در مقایسه با سایر میراگرها می‌باشند. از جمله این میراگرها عبارت‌اند از میراگر دو لوله‌ای [33]، میراگر تسلیمی برشی-خمشی [34] و میراگر پنبلی برشی [35].

با توجه به تنوع میراگرهای فلزی و همچنین خواص متفاوت آنها در بهبود رفتار سازه‌های فلزی، در این تحقیق به بررسی پارامترهای لرزه‌ای (میرایی، سختی و رفتار چرخه ای و ...) شش نوع میراگر پرداخته شده است. مدلسازی این میراگرها ابتدا در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. سپس با معرفی مشخصات میراگر به صورت یک لینک آذر نرم‌افزار سپ، آقاب دو بعدی با تعداد طبقات ۳، ۷ و ۱۵ طبقه تحت ۵ شتابنگاشت مورد تحلیل قرار گرفته و به مقایسه‌ی عملکرد میراگرها در مقابل قاب بدون میراگر پرداخته شده است.

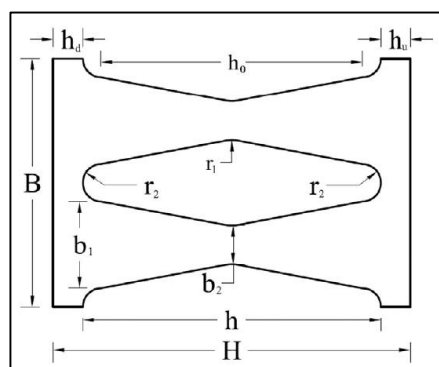
۲- معرفی و اعتبارسنجی مصالح

تحلیل مدل‌های عددی در این تحقیق با نرم‌افزار قدرتمند آباکوس انجام گرفته است. مصالح مورد استفاده در مدل‌ها، فولاد نرمه‌ی ساختمانی ST37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. جهت تایید رفتار مصالح از مقاله‌ی امیری و همکاران بر روی میراگرهای سوراخدار چند بلوکی^۵ استفاده شده است [36] مشخصات مکانیکی مصالح فولاد ST37 به شرح جدول ۱ است. مشخصات فیزیکی نمونه‌ها و پروتوکول بارگذاری مورد آزمایش امیری و همکاران در شکل ۲ و جدول ۲ قابل مشاهده است.

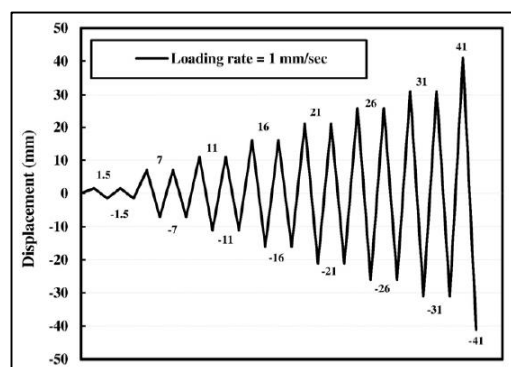
6	Ma	
7	Tagawa	
8	Lee	
9	Dual-Pipe Dampers (DPD) [33]	
1	Shear-and-Flexural Yielding Metallic Dampers ⁰ (SAFYD)	1
1	Steel Shear Panel Dampers (SSPD)	2
1	ABAQUS	3
1	Link	4
1	SAP	5
1	Block Slit Damper	

جدول ۱: مشخصات مکانیکی فولاد ST37 [36]

Steel Material	Modulus of Elasticity	Yield Stress (MPa)	Ultimate Stress (MPa)	Elongation (%)
ST37	200	241	403	29.8



(الف)



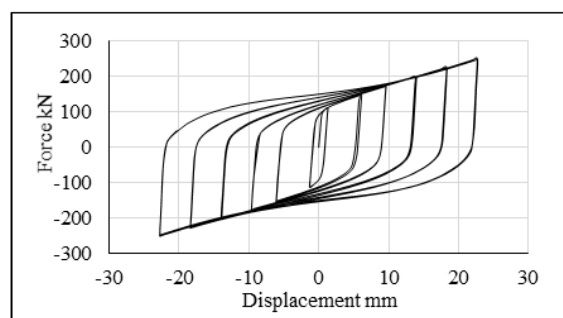
(ب)

شکل ۲: الف: مشخصات فیزیکی مدل‌های مورد بررسی امیری و همکاران به صورت پارامتری [36] ب: پروتوکول بارگذاری مدل‌های مورد بررسی توسط امیری و همکاران [36]

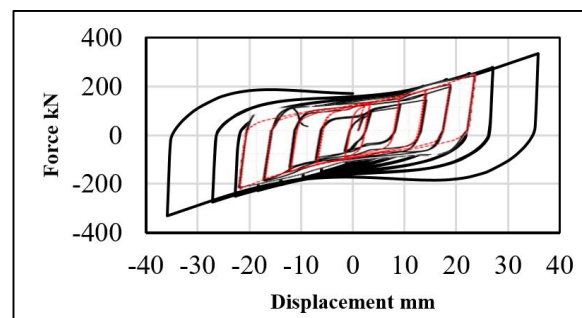
جدول ۲: مشخصات ابعادی مدل‌های مورد بررسی توسط امیری و همکاران [36]

Specimen	h	b ₁	h ₀ /b ₁	b ₂	b ₂ /b ₁	t	h ₀ /t	h _n = h _d	r ₁ , r ₂
S1	80	14	5	6.3	0.45	20	3.5	8	10, 5
S2	80	17.5	4	7.87	0.45	20	3.5	9	10, 5
S3	80	20	3.5	9	0.45	20	3.5	10	10, 5
S4	80	23.33	3	10.5	0.45	20	3.5	11	10, 5
S5	80	28	2.5	12.6	0.45	20	3.5	13	10, 5

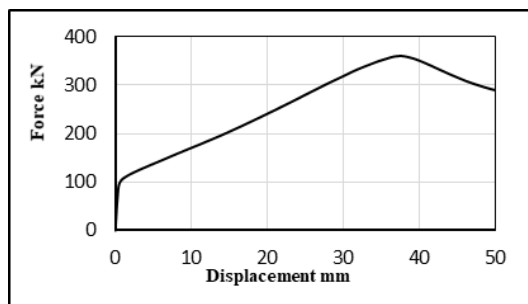
برای تایید رفتار مصالح، بر روی نمونه‌ی بازسازی شده‌ی شماره ۵، تحلیل چرخه‌ای و همچنین تحلیل پوش‌اور صورت گرفته است. نتیجه‌ی تحلیل چرخه‌ای و پوش‌اور این نمونه به ترتیب در شکل‌های ۳-الف الی ۳-ت قابل مشاهده است که با مقایسه نمودارها و تغییر شکل‌ها با نتایج مقاله‌ی امیری و همکاران روشن است که رفتار مصالح در تحلیل چرخه‌ای تطابق خوبی با داده‌های خروجی مقاله‌ی امیری و همکاران دارد. همچنین نتایج خروجی تحلیل پوش‌اور نیز با تقریب خوبی نمودار مدل آزمایشگاهی را پوشش می‌دهد.



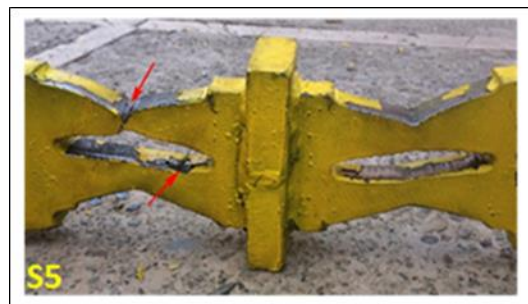
(الف)



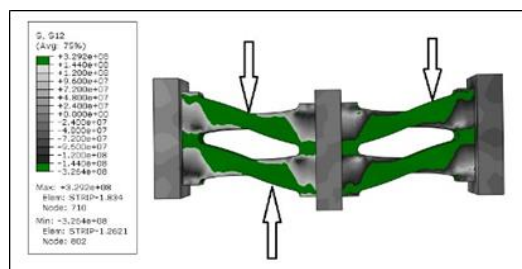
(ب)



(پ)



(ت)



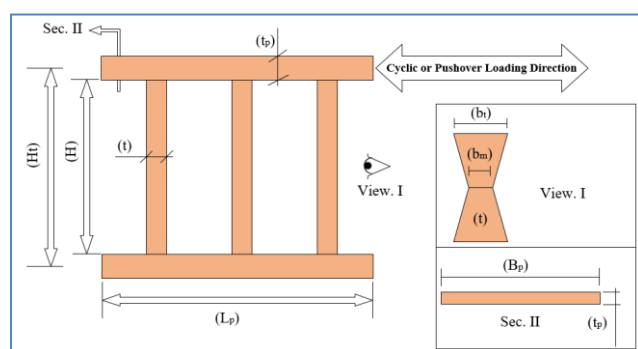
(ث)

شکل ۳: الف: نمودار بارگذاری چرخه‌ای مدل بازمدلسازی شده ب: مقایسه‌ی نتایج مدل بازمدلسازی شده و مدل تحقیق امیری و همکاران پ: نتیجه تحلیل پوش‌اور مدل بازمدلسازی شده ت: تغییر شکل نمونه‌ی آزمایشگاهی مدل S5 [36] ث: تغییر شکل مدل عددی نمونه‌ی S5 بازمدلسازی شده

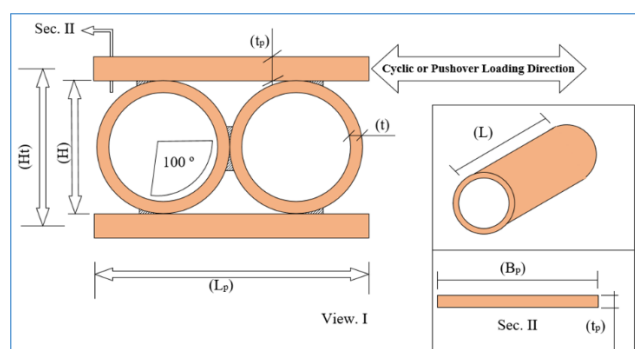
۳- معرفی مدل‌ها و روش تحلیل

۳-۱- میراگرها و روابط طراحی

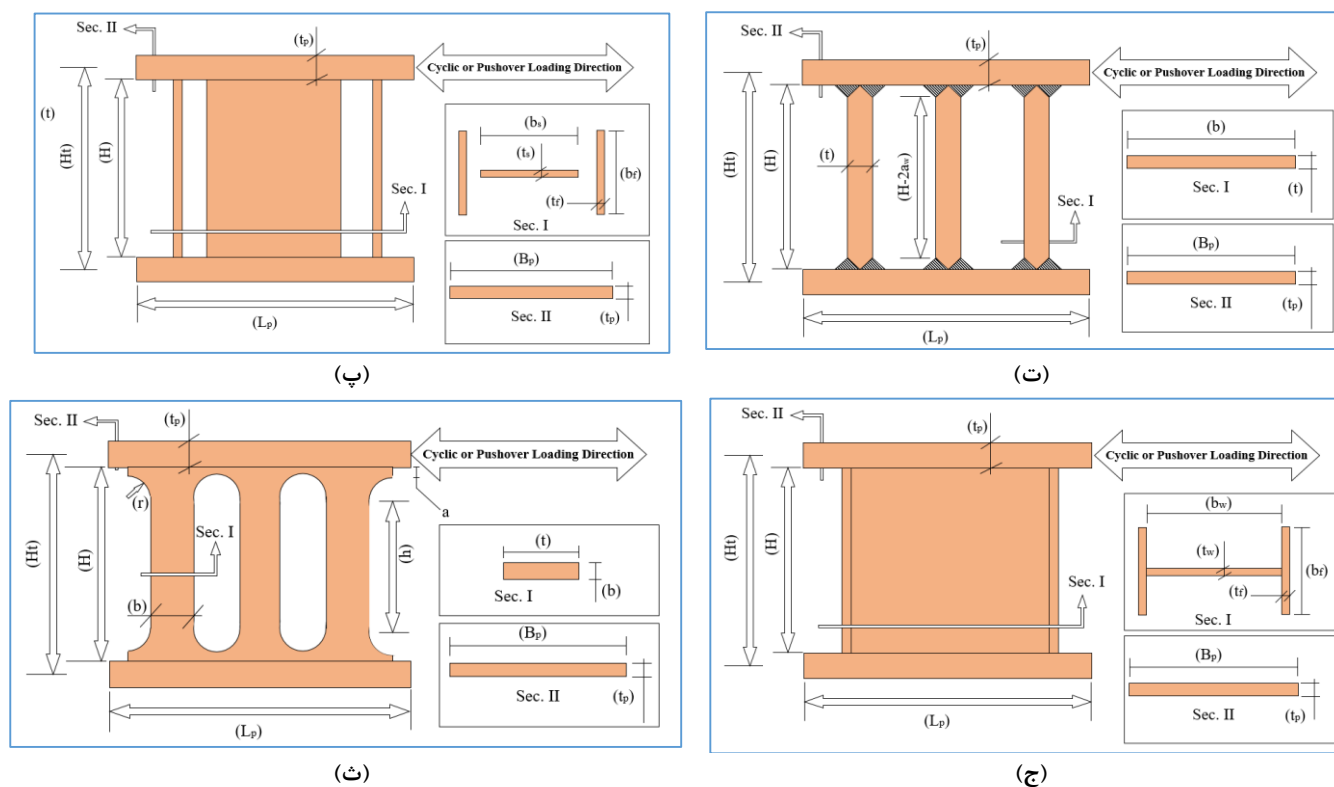
در این تحقیق ۶ نوع میراگر فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. این میراگرها بر اساس روابط طراحی آنها با یک بار ۵ تن طراحی شده و در سه ارتفاع ۱۵، ۲۱ و ۲۷ سانتیمتری مورد بارگذاری قرار گرفته اند. میراگرهای شبیه‌سازی شده که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده هستند عبارت اند از میراگرهای فولادی افزایشی سختی و میرایی، میراگر دو لوله‌ای، میراگر تسلیمی برشی-خمشی، میراگر پنبلی فلزی^{۱۶}، میراگر I شکل سوراخدار و میراگر پنبلی برشی.



(الف)



(ب)



شکل ۴: الف: مدل ADAS ب: مدل DPD پ: مدل SAFYD ت: مدل SPD ث: مدل SSD ج: مدل SSPD

روابط طراحی میراگرهای DPD و SPD در روابط ۱ الی ۹ و جدول پارامترهای مربوط به میراگرهای ADAS و SPD در جدول - های ۳ و ۴ ارایه شده است. متذکر می‌شود که روابط طراحی میراگر نوع SPD بر اساس روابط کلاسیک مقاومت مصالح می‌باشد.

$$[33]\Delta_y = 0.0001[4.75D - 8.2] \left(\frac{D}{t}\right) \quad (۱)$$

$$[33]K_0 = 3156(L) \left(\frac{D}{t}\right)^{-3.14} \quad (۲)$$

$$[33]K_0 = 3156(L) \left(\frac{D}{t}\right)^{-3.14} \quad (۳)$$

$$[33]P_y = K_0 * \Delta_y \quad (۴)$$

در روابط ۱ الی ۴، Δ_y جابجایی تسلیم میراگر در واحد میلیمتر، D قطر خارجی میراگر در واحد میلیمتر، t ضخامت لوله‌های میراگر در واحد میلیمتر، L طول لوله‌ی میراگر در واحد میلیمتر، K_0 سختی الاستیک میراگر در واحد کیلونیوتن بر میلیمتر و P_y نیروی معادل جابجایی تسلیم در میراگر در واحد کیلونیوتن می‌باشند.

$$H = H_t - t_p \quad (۵)$$

$$H^* = H - 2aw \quad (۶)$$

$$Z = (bt^2)/4 \quad (۷)$$

$$M_p = Zfy \quad (8)$$

$$V_y = (nbt2fy)/(2H) \quad (9)$$

در روابط ۵ الی ۶ نیز b عرض ساق میراگر، t ضخامت ساق میراگر، f_y تنش تسلیم مصالح فولاد، H ارتفاع ساق میراگر، H^* ارتفاع محل تشکیل مفصل پلاستیک در ساق میراگر، M_p لنگر پلاستیک در یک ساق از میراگر، n تعداد ساق‌های میراگر، a_w ارتفاع ساق جوش در محل اتصال ساق میراگر به ورق اصلی بالا و پایین و V_y نیروی تسلیم میراگر می‌باشد.

جدول ۳: پارامترهای فیزیکی میراگر ADAS

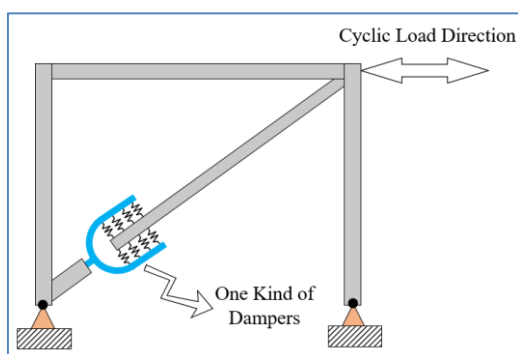
Model	H_t cm	H cm	b_t cm	b_m cm	t cm	L_p cm	B_p cm	t_p cm	n
ADAS15	15	13	6	2.3	1.5	18	10	2	4
ADAS21	21	19	8	2.3	1.15	18	10	2	4
ADAS27	27	25	8	2.3	1.8	18	10	2	4

جدول ۴: پارامترهای فیزیکی میراگر SSPD

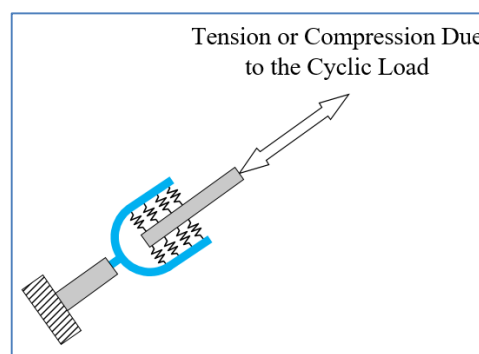
Model	H_t cm	H cm	b_t cm	t_f cm	b_w cm	t_w cm	L_p cm	B_p cm	t_p cm
SSPD15	15	13	8	0.3	12	0.3	18	10	2
SSPD21	21	19	8	0.3	12	0.3	18	10	2
SSPD27	27	25	8	0.3	12	0.3	18	10	2

۳-۲- مدلسازی عددی و تحلیل حساسیت مش بندی

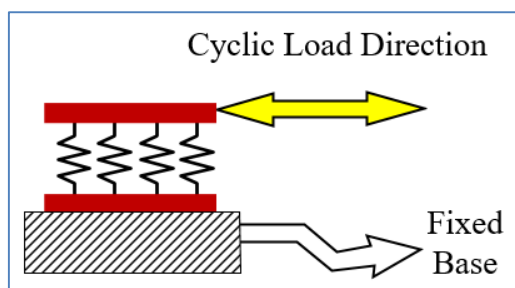
میراگرهای فلزی اغلب در محل تشکیل مفاصل پلاستیک تیر در قاب خمشی و انتهای مهاربند در محل اتصال آن به قاب نصب می‌شوند. نمای شماتیک محل قرارگیری میراگرهای فلزی در شکل ۵ قابل مشاهده است. این جانمایی میراگر در ساختمان باعث رفتار بهینه‌ی آن و جلوگیری از آسیب دیدگی عضو اصلی شده و علاوه بر آن در مواقع آسیب دیدگی میراگر شرایط تعویض آن را نیز تسهیل می‌کند. با توجه به باربری محوری مهاربند، اعضای میراگر فلزی تحت اثر خمش و برش قرار خواهند گرفت که در شکل ۶ قابل مشاهده است. لذا با کوچک سازی مدل قاب به شکل ۷ خواهیم رسید که مدل مناسبی جهت بررسی رفتار میراگرها در مقیاس کوچک است و مدلسازی و زمان تحلیل آن را به حداقل می‌رساند.



شکل ۵: محل قرارگیری میراگر در سازه



شکل ۶: نیروی وارد بر مجموعه‌ی مهاربند و میراگر فلزی متصل به مهاربند



شکل ۷: زیرسازه‌ی میراگر متصل به مهاربند جهت مدلسازی و تحلیل چرخه‌ای

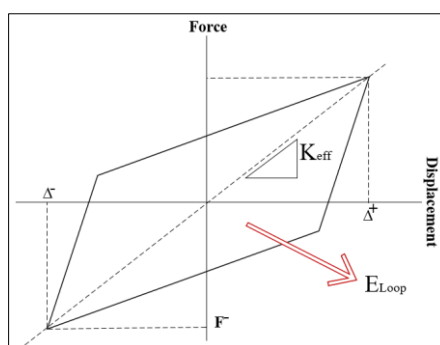
در پژوهش حاضر، جهت بارگذاری مدل‌ها بر اساس پروتکل بارگذاری استاندارد FEMA461، مطابق جدول ۵، استفاده شده است. سختی موثر میراگر در هر چرخه از بارگذاری با پارامتر K_{eff} و میرایی موثر در هر چرخه با پارامتر B_{eff} نشان داده می‌شود از رابطه‌هایی ۱۰ و ۱۱ حاصل می‌شود. در رابطه‌ی ۱۰، $|F^+|$ و $|F^-|$ ، به ترتیب نیروهای مربوط به جابجایی حداکثر $|\Delta^+|$ و حداقل $|\Delta^-|$ در هر چرخه از بارگذاری می‌باشند. همچنین در رابطه‌ی ۱۱، انرژی مستهلک شده در هر چرخه یا سطح داخلی نمودار نیرو-جابجایی در هر چرخه است. تعریف پارامترهای رابطه‌ی ۱۰ و ۱۱ در شکل ۸ قابل مشاهده هستند.

جدول ۵: پروتکل بارگذاری بر اساس FEMA461 [37]

Displacement mm	No. of Cycles
1.5	two Cycles
2.03	two Cycles
2.94	two Cycles
4.12	two Cycles
5.77	two Cycles
8.06	two Cycles
11.28	two Cycles
15.79	two Cycles
22.06	two Cycles
31.25	two Cycles

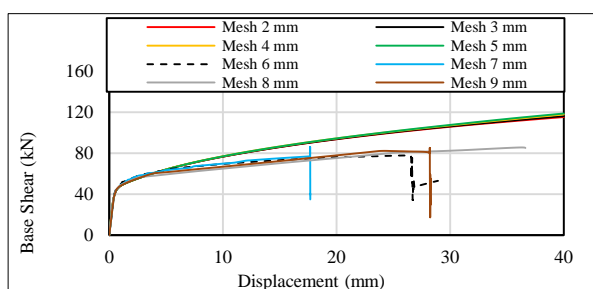
$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad [38](10)$$

$$B_{eff} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \frac{E_{loop}}{K_{eff}(|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2} \quad [38](11)$$

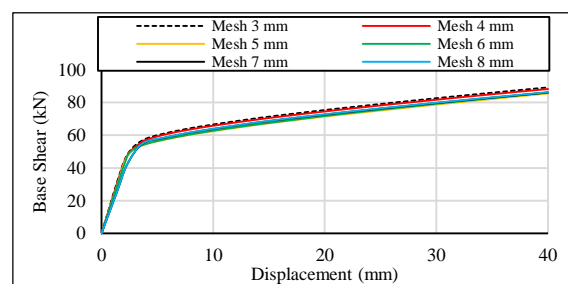


شکل ۸: تعریف پارامترهای رابطه‌ی سختی موثر و میرایی موثر در هر چرخه از بارگذاری [38]

به دلیل حساسیت نتایج نسبت به ابعاد مش‌بندی مدل‌ها، تحلیل حساسیت مش^۷ نیز انجام گرفته است. به عنوان مثال در میراگر نوع SSD و SPD ابعاد مش پیشنهادی آباکوس در هر مرحله از تحلیل به میزان یک واحد کوچکتر شده و نتایج تحلیل پوش‌اور انجام گرفت که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که در یک مدل با تحلیل پوش، مدل قبل از رسیدن به جابجایی حداکثر دچار خرابی می‌شود. برای مقایسه‌ی بهتر نتایج، تغییرات نیروی برشی نسبت به ابعاد نسبی مش در شکل ۱۰ ارائه شده است. شکل ۱۰ این مساله را بیان می‌کند که در مش‌بندی با بعد کمتر از ۴ میلی‌متر، تغییرات نتایج مدل SSD کمتر از ۱ درصد و تغییرات نتایج مدل SPD کمتر از ۲ درصد می‌باشد. اندازه مش‌بندی‌های کلیه مدل‌سازی‌های این تحقیق بر این اساس تعیین شده است.

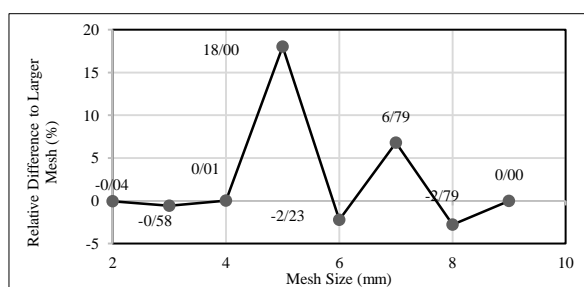


(الف)

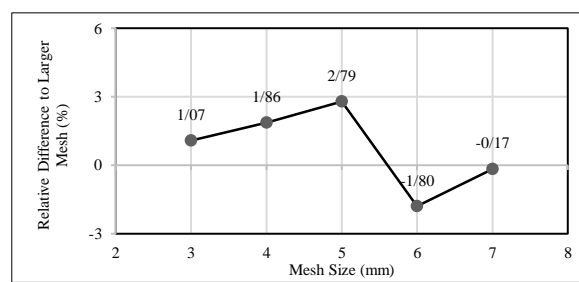


(ب)

شکل ۹: الف: نمودار تحلیل پوش مدل SSD با ابعاد مش متفاوت ب: نمودار تحلیل پوش مدل SPD با ابعاد مش متفاوت



(الف)



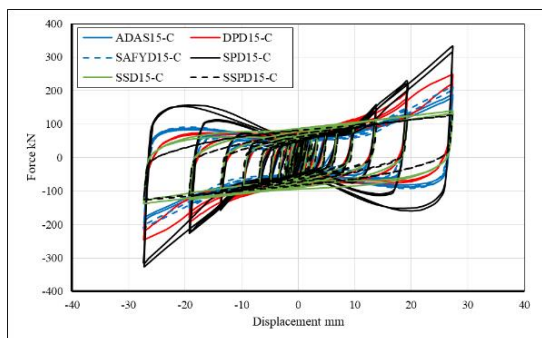
(ب)

شکل ۱۰: الف: تفاوت نسبی برش نسبت به ابعاد مش در مدل SSD ب: تفاوت نسبی برش نسبت به ابعاد مش در مدل SPD

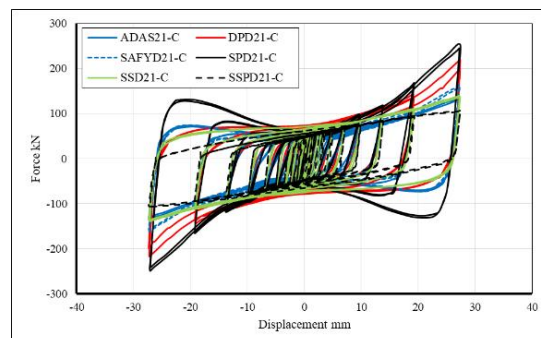
۴- نتایج تحلیل عددی و خروجی‌ها

۴-۱- نمودارهای تحلیل چرخه‌ای و پوش

نمودار نیرو-جابجایی تحلیل چرخه‌ای مدل‌های با ارتفاع ۱۵ و ۲۱ سانتیمتر در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به این نمودارها حلقه‌های ایجاد شده در میراگر نوع SPD از سایر میراگرها بزرگتر می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی سطح بالاتر استهلاک انرژی در این نوع میراگر است. همچنین با افزایش ارتفاع تمامی میراگرها از مساحت درونی نمودار چرخه‌ای آنها کاسته می‌شود که بیانگر کاهش استهلاک انرژی با افزایش ارتفاع میراگر است. در ادامه تمامی مدل‌های شبیه‌سازی شده‌ی میراگرها با استفاده از تحلیل پوش‌اور مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۱۲ قابل ارائه شده است.

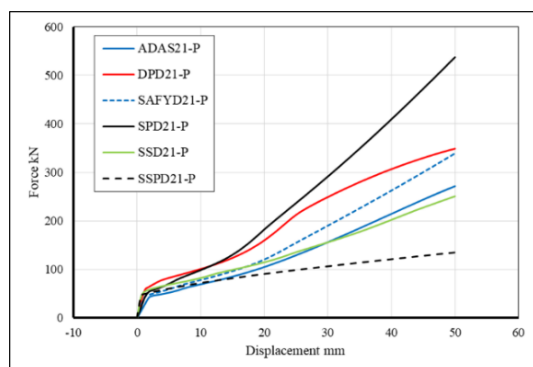


(الف)

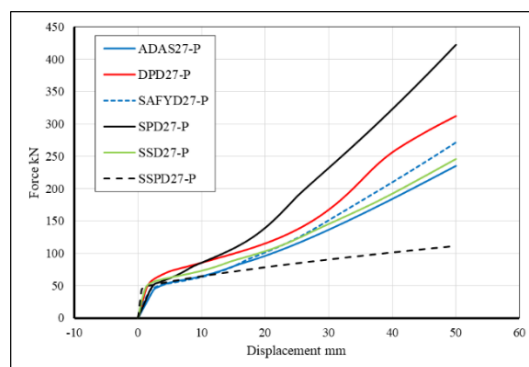


(ب)

شکل ۱۱: الف: نمودار چرخه‌ای مدل‌های با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ب: نمودار چرخه‌ای مدل‌های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر



(الف)



(ب)

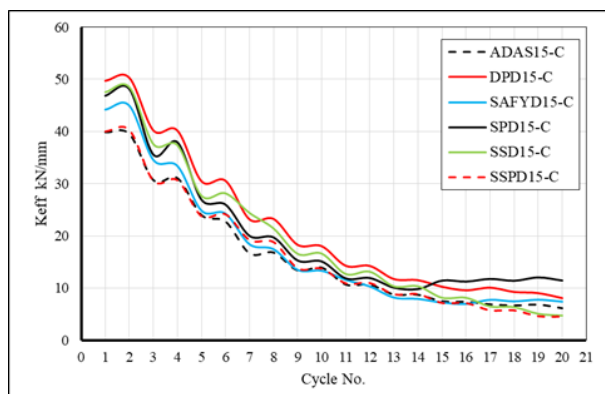
شکل ۱۲: الف: نمودار پوش‌آور مدل‌های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر ب: نمودار پوش‌آور مدل‌های با ارتفاع ۲۷ سانتیمتر

نیروی تسلیم ۵ تن (بار طراحی) در تمامی نمودارهای میراگرها به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. کاهش سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی در این نمودارها نیز تایید کننده‌ی نتایج بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. در تمامی مدل میراگرها، میراگر نوع SPD دارای بیشترین سطح زیر نمودار می‌باشد که نشان دهنده‌ی رفتار مناسب آن در مرحله‌ی فرا ارتجاعی و جذب انرژی بیشتر آن است. با این وجود میراگر نوع SSPD از سختی اولیه‌ی بیشتری از سایر میراگرها برخوردار می‌باشد که در مراحل نهایی بارگذاری پوش‌آور دچار کاهش سختی شدید می‌شود. همچنین رفتار فرا ارتجاعی تمامی میراگرها روند تقریباً یکنواختی دارد. در این بین میراگر نوع DPD در مراحل فرا ارتجاعی خود در چند مرحله دچار کاهش و افزایش شیب در نمودار نیرو-جابجایی شده است که می‌تواند رفتار متفاوت و تقریباً غیر قابل پیش‌بینی این نوع میراگر در نیروهای فراتر از نیروی تسلیم آن را نشان دهد.

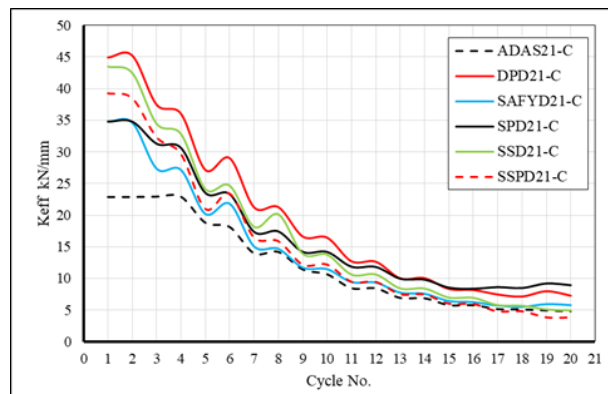
۴-۲- سختی و میرایی مدل‌ها

سختی موثر میراگرها طبق رابطه‌ی ۱۰ استخراج شده است. نمودار سختی موثر میراگرها که در شکل ۱۳ ارائه شده است نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع میراگرهای فولادی، از سختی موثر آنها در چرخه‌های ابتدایی بارگذاری کاسته می‌شود و در مراحل نهایی بارگذاری تقریباً به ثبات می‌رسد. میراگرهای نوع DPD و ADAS به ترتیب در چرخه‌های اولیه‌ی بارگذاری بیشترین و کمترین سختی موثر را دارا می‌باشند. همچنین میراگرهای نوع SPD و SSPD به ترتیب کمترین و بیشترین سختی موثر در انتهای دوره‌ی بارگذاری را از خود نشان دادند. اما نکته‌ی قابل توجه این است که منحنی سختی موثر میراگر نوع SPD در حدود چرخه‌ی ۱۵ به بعد دچار افزایش سختی شده و این منحنی از آن پس بالاتر از منحنی سایر میراگرها قرار گرفته است. این پدیده بدین معناست که این نوع میراگر در زلزله‌های طولانی مدت بیشتر از سایر میراگرها انسجام خود را حفظ کرده و در زمینه‌ی ارائه‌ی سختی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. همچنین

ثبات سختی موثر این نوع میراگر را می توان به عنوان عاملی موثر و مثبت در مقابل زلزله های طراحی و بهره برداری دانست. در مجموع برای ایجاد سختی موثر مناسب برای یک ساختمان در زمان وقوع زلزله، دو میراگر SPD و DPD می توانند انتخاب مناسبی باشند.



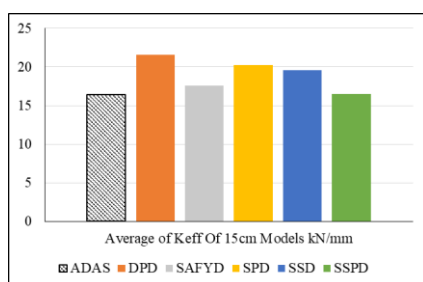
(الف)



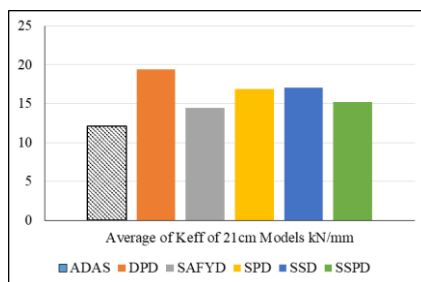
(ب)

شکل ۱۳: الف: نمودار سختی موثر مدل های با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ب: نمودار سختی موثر مدل های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر

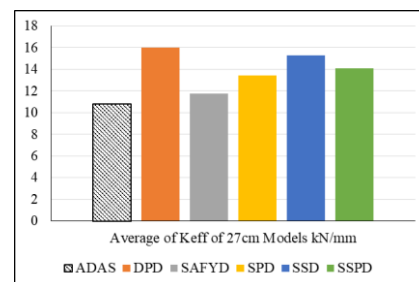
سختی موثر متوسط میراگرها در شکل ۱۴ ارائه شده است. در تمام ارتفاعات مدل شده، میراگر نوع DPD بیشترین سختی موثر متوسط را دارا می باشد.



(الف)



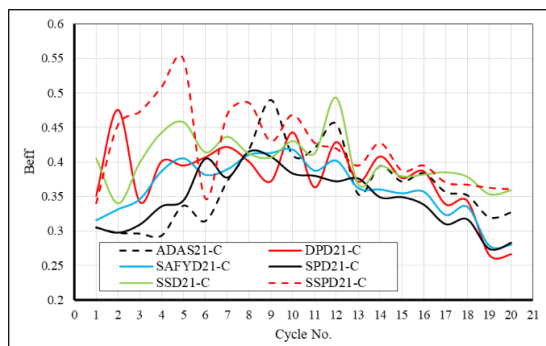
(ب)



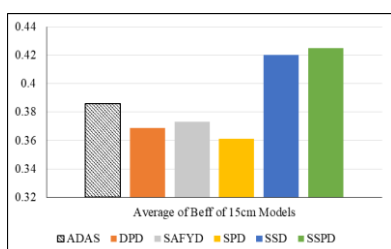
(پ)

شکل ۱۴: الف: سختی موثر متوسط مدل های با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ب: سختی موثر متوسط مدل های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر پ: سختی موثر متوسط مدل های با ارتفاع ۲۷ سانتیمتر

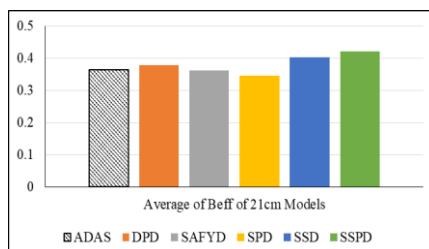
منحنی میرایی موثر مدل های مورد بررسی که از رابطه ی ۱۱ استخراج شده است در شکل ۱۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه نمودار مذکور دارای افت و خیز زیادی بوده و نتیجه ی چندانی از بررسی آن حاصل نمی شود، از پارامتر میرایی موثر متوسط و میرایی موثر جمعی در طول دوره ی بارگذاری استفاده شده است که به ترتیب در شکل های ۱۶ و ۱۷ قابل مشاهده اند.



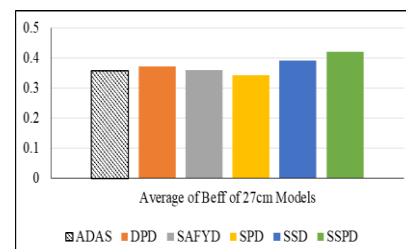
شکل ۱۵: میرایی موثر مدل‌های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر



(الف)

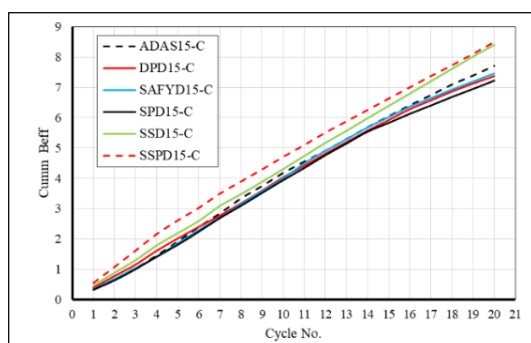


(ب)

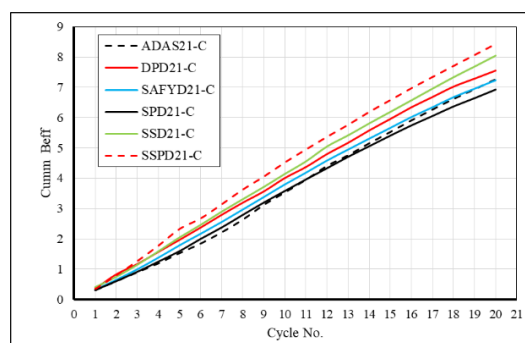


(پ)

شکل ۱۶: الف: میرایی موثر متوسط مدل‌های با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ب: میرایی موثر متوسط مدل‌های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر پ: میرایی موثر متوسط مدل‌های با ارتفاع ۲۷ سانتیمتر



(الف)



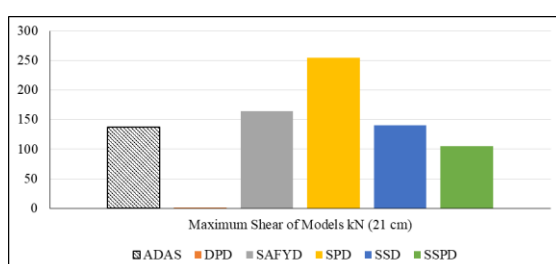
(ب)

شکل ۱۷: الف: نمودار میرایی موثر تجمعی مدل‌های با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ب: نمودار میرایی موثر تجمعی مدل‌های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر

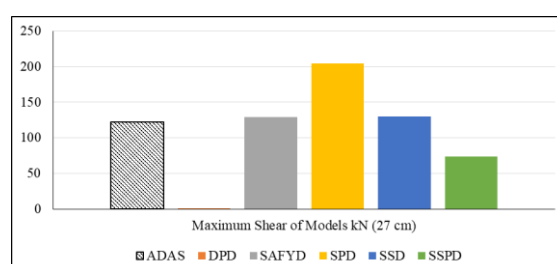
با توجه به نمودار میرایی موثر متوسط، میراگرهای نوع SSD و SPD به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار نسبت به سایر میراگرها هستند. انحراف معیار میرایی متوسط میراگر نوع SSD با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر با مقدار ۰/۰۲۸ در بین تمامی میراگرها دارای کمترین مقدار بوده و این موضوع نشانگر ثبات بیشتر میرایی موثر در این نوع میراگر است. با افزایش ارتفاع از میرایی موثر متوسط میراگرها نیز کاسته شده است که این مساله نیز همانند سختی موثر، دلیل دیگری است که در طراحی میراگرها باید به کمینه بودن ارتفاع آنها برای به دست آوردن سختی و میرایی بیشتر توجه نمود. لذا برای برآورده کردن پارامتر میرایی در یک ساختمان، اجرای میراگر SSD انتخاب‌های مناسب‌تری است. همچنین بررسی نمودار میرایی تجمعی میراگرها نشان می‌دهد که در میان مدل‌های مورد بررسی، میراگرهای نوع SSD و SSPD به ترتیب بیشترین میرایی تجمعی را داشته‌اند و میرایی کلی در هر نوع میراگر با افزایش ارتفاع تقریباً ثابت مانده است.

۳-۴- نیروهای داخلی میراگرها

در ادامه‌ی تحلیل مدل‌ها، نیروهای خمشی و برشی اعضای تشکیل دهنده‌ی میراگرها استخراج و بررسی شده است. با استخراج حداکثر نیروی برشی و خمشی ایجاد شده در میراگرها که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ارائه شده است مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع میراگرها از رفتار برشی آنها کاسته و به رفتار خمشی آنها افزوده می‌شود. میراگر نوع SPD دارای بیشترین نیروی برشی و میراگر نوع SSD دارای بیشترین نیروی خمشی در بین تمامی میراگرها می‌باشند. اما با نگاهی به مدل DPD مشخص می‌شود که این نوع میراگر کمترین رفتار برشی و خمشی را از خود نشان داده است. نیروی برشی و خمشی ایجاد شده در مدل‌های میراگر DPD در مقایسه با سایر میراگرها ناچیز و تقریباً برابر با صفر می‌باشد. همان‌گونه که در بخش تحلیل پوش‌اور نیز به رفتار متمایز فرا ارتجاعی این نوع میراگر نسبت به سایر مدل‌ها اشاره شد، این پدیده را می‌توان به ایجاد نیروهای کششی در کمان مرکزی و پیکربندی مناسب آن نسبت داد. تغییر شکل و نقاط تسلیم میراگر نوع DPD در مقایسه با سایر میراگرها در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.

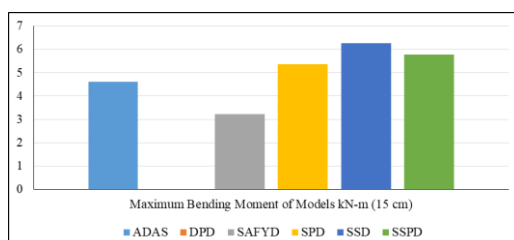


(الف)

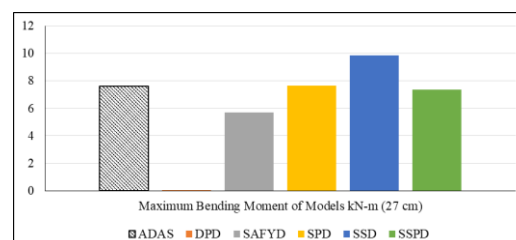


(ب)

شکل ۱۸: الف: حداکثر نیروی برشی مدل‌های با ارتفاع ۲۱ سانتیمتر ب: حداکثر نیروی برشی مدل‌های با ارتفاع ۲۷ سانتیمتر

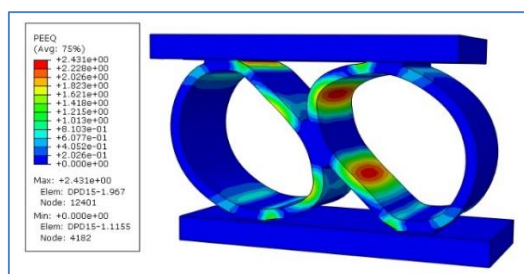


(الف)

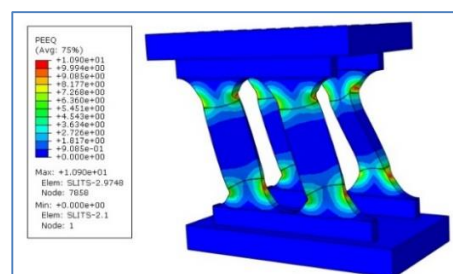


(ب)

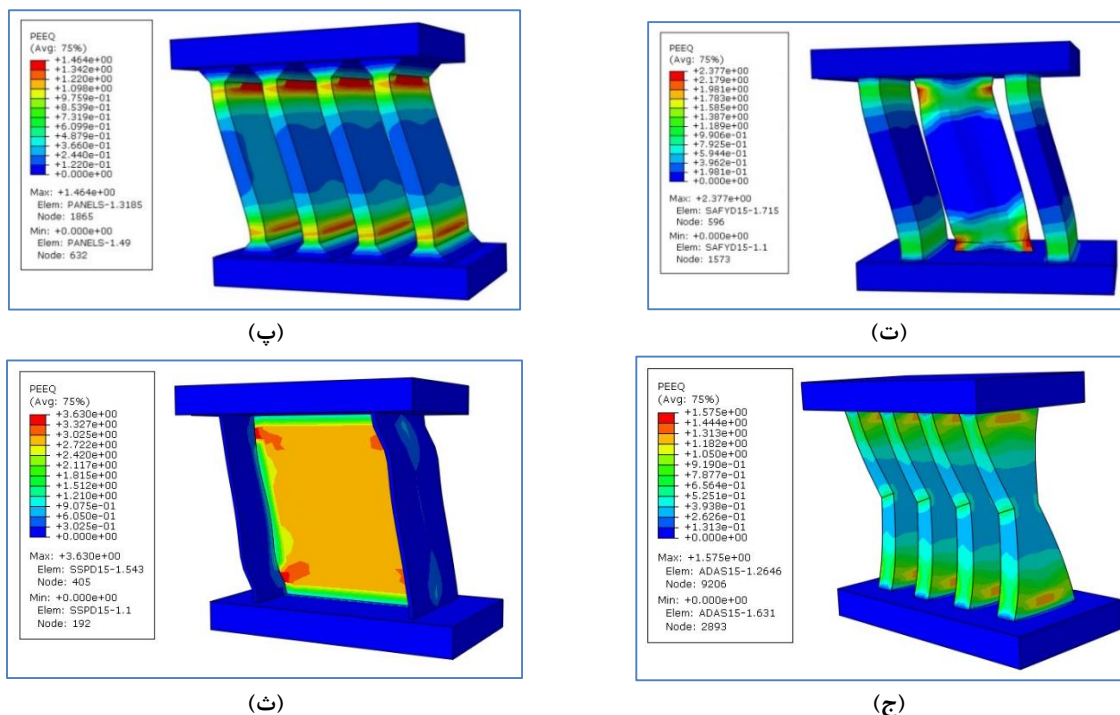
شکل ۱۹: الف: حداکثر نیروی خمشی مدل‌های با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر ب: حداکثر نیروی خمشی مدل‌های با ارتفاع ۲۷ سانتیمتر



(الف)



(ب)

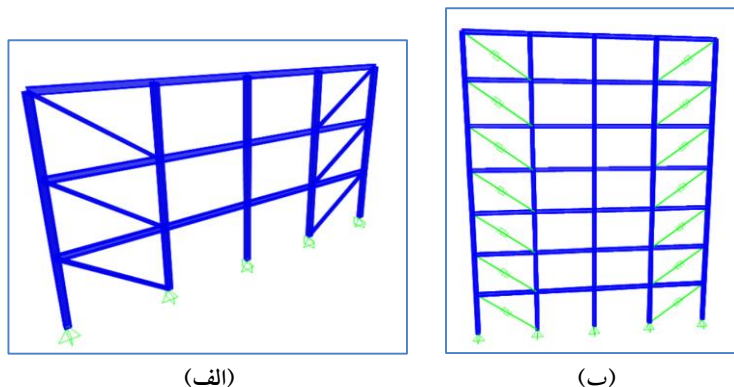


شکل ۲۰: الف: تغییر شکل و نقاط تسلیم میراگر DPD ب: تغییر شکل و نقاط تسلیم میراگر SSD پ: تغییر شکل و نقاط تسلیم میراگر SPD
 ت: تغییر شکل و نقاط تسلیم میراگر نوع SAFYD ج: تغییر شکل و نقاط تسلیم میراگر SSPD د: تغییر شکل و نقاط تسلیم میراگر ADAS

از آنجا که رفتار فولاد در کشش بهتر و قابل پیش‌بینی‌تر از رفتار آن در خمش و برش می‌باشد، میراگر نوع DPD با ارائه‌ی تغییر شکل بیضوی مانند رفتار کششی در مقاطع خود، بیشتر توسط نیروی کششی دچار خرابی می‌شود. این مساله در سایر میراگرها به صورت گسیختگی برشی، خمشی یا کمانش میراگر می‌باشد که رفتار آنها را بیشتر غیر قابل پیش‌بینی می‌کند. لذا رفتار میراگر DPD را می‌توان به پیکربندی مناسب آن نسبت به سایر میراگرها نسبت داد. همچنین در میراگرهای نوع SSD، SAYYD و SSPD رفتارهای کمانشی مشاهده شده است که در ابتدا نیز از این رفتار به عنوان ضعف این میراگرها نام برده شد.

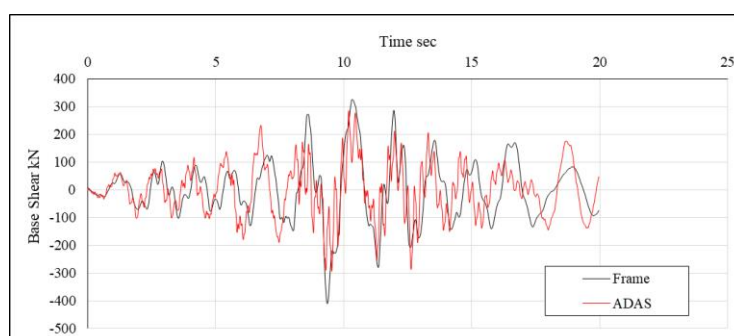
۴-۴- بررسی تاثیر میراگرها بر عملکرد قاب

در ادامه میراگرهای مورد بررسی در یک قاب دو بعدی در نرم‌افزار Sap به صورت یک لینک در محل اتصال مهاربند مدلسازی شدند. قاب مورد بررسی با تعداد طبقات ۳، ۷ و ۱۵ طبقه بوده و تحت شتابنگاشت زلزله‌های Chi Chi، Loma Prieta، Northridge، San، Poer Fernando، Duzce و Cape Mendocino قرار گرفتند و پاسخ قاب با میراگر با پاسخ قاب بدون میراگر مورد مقایسه قرار گرفت. شکل قاب‌های مدلسازی شده در تصویر ۲۱ قابل مشاهده است.

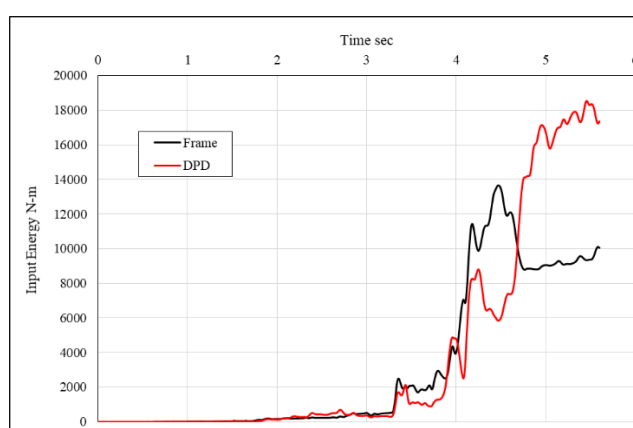


شکل ۲۱: الف: قاب سه طبقه بدون میراگر ب: قاب ۷ طبقه دارای میراگر

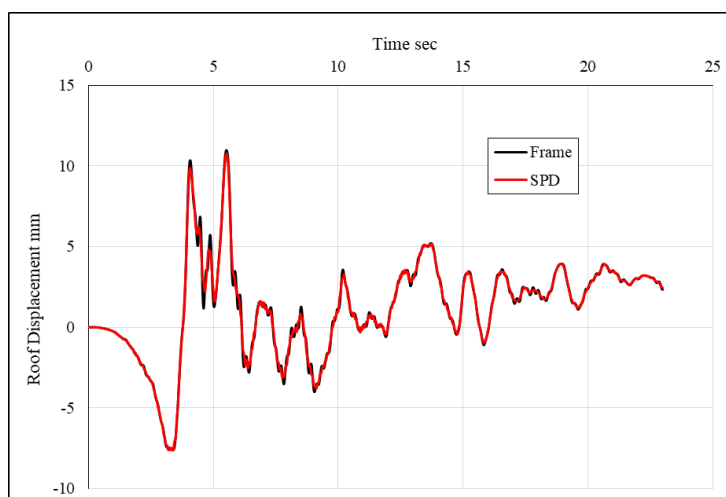
در تحلیل‌های شتابنگاشتی و مقایسه بین چندین شتابنگاشت، پاسخ‌های جابجایی بام، شتاب بام، برش پایه و میزان انرژی درونی سازه مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به حجم بالای نمودارها و خروجی‌ها تنها نمودار برش پایه، انرژی درونی و جابجایی بام برای سه میراگر در شکل‌های ۲۲ الی ۲۴ آورده شده است.



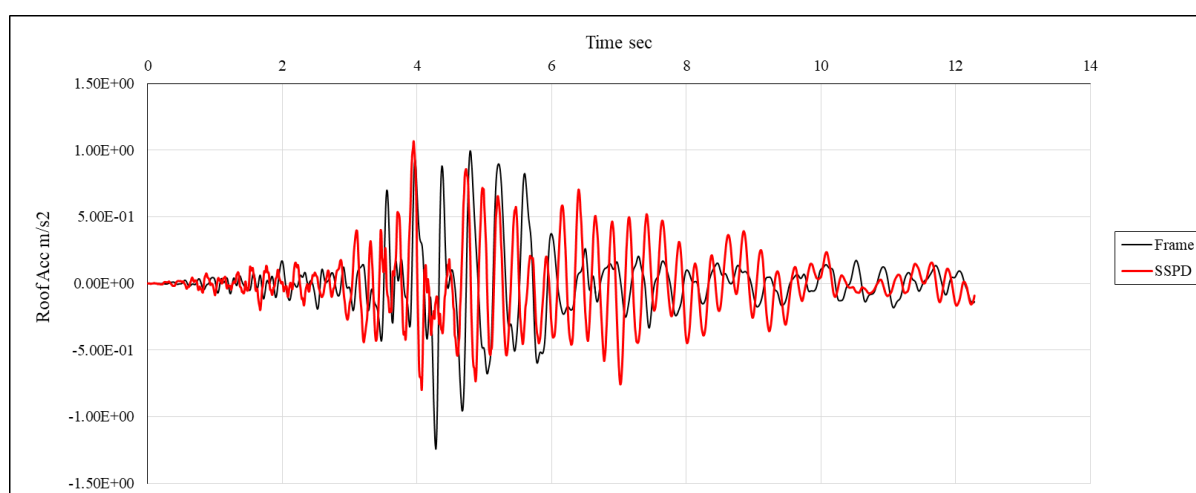
شکل ۲۲: نمودار تغییرات برش پایه قاب ۱۵ طبقه بدون میراگر و قاب دارای میراگر ADAS تحت شتابنگاشت زلزله Chi Chi



شکل ۲۳: نمودار تغییرات انرژی درونی قاب ۷ طبقه بدون میراگر و قاب دارای میراگر DPD تحت شتابنگاشت زلزله San Fernando



شکل ۲۴: نمودار تغییرات جابجایی بام قاب ۳ طبقه بدون میراگر و قاب دارای میراگر SPD تحت شتابنگاشت زلزله Loma Prieta



شکل ۲۵: تغییرات شتاب بام قاب ۱۵ طبقه بدون میراگر و دارای میراگر نوع SSPD تحت شتابنگاشت Northridge

نمودارهای انرژی درونی قاب‌ها نشان دهنده‌ی این مساله است که با به‌کارگیری میراگرها در قاب فولادی به توانایی جذب انرژی قاب افزوده شده است. با استخراج مقادیر حداکثر پاسخ مدل‌های قاب این نتیجه حاصل می‌شود که جابجایی حداکثر بام با به‌کارگیری میراگر دچار تغییرات زیادی نشده است. در قاب سه طبقه در تمامی شتابنگاشت‌ها، کاربرد میراگرهای نوع SSD، DPD، و SSPD باعث کاهش حداکثر شتاب بام شده است. اما در سایر قاب‌ها و میراگرها نتایج به دست آمده اثر کاهنده یا افزایش‌دهنده‌ی ثابتی بر روی پاسخ‌های شتاب بام و برش پایه نشان نمی‌دهد. لذا با به‌کارگیری میراگرهای فلزی علاوه بر کنترل جابجایی جانبی سازه و ایجاد دوران مناسب برای تیر، قابلیت لرزه‌ای سازه دچار افزایش خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

رفتار چرخه‌ای، پوش اور و تاریخچه زمانی شش نوع میراگر فلزی با استفاده از مدلسازی اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی درستی فرآیند مدلسازی تحلیل حساسیت سازه‌ی مش‌بندی و رفتار چرخه‌ای مدل‌های ساخته شده با مدل‌های تحقیق دیگری مقایسه و اعتبارسنجی گردید. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها به صوت جداگانه و مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه از مزایای هر یک از میراگرها، کارایی بالا در سطوح مختلف زلزله و سرعت نصب و ترمیم بالای آن است [39] لذا آینده‌ی سازه‌های فولادی با این ابزارهای کنترل‌کننده کاربردی‌تر خواهد بود. حال چکیده‌ی نتایج تحلیل و بررسی میراگرها بدین شرح می‌باشد:

- با توجه به نمودار چرخه‌ای میراگرها، میراگر نوع SPD و DPD دارای سطح استهلاک انرژی بالاتری نسبت به سایر میراگرها می‌باشند.
- در تحلیل پوش‌اور، بار تسلیم ۵ تن در تمامی میراگرها قابل مشاهده بوده که نشانگر دقت مناسب روابط طراحی استفاده شده می‌باشد.
- در تحلیل پوش‌اور میراگر نوع SPD دارای بیشترین پاسخ به جابجایی یکسان در بین میراگرها بوده که نشانگر سختی و استهلاک انرژی بالای آن نسبت به سایر میراگرها می‌باشد.
- با افزایش ارتفاع میراگرها از سختی موثر و میرایی موثر آنها کاسته شده است.
- سختی موثر میراگر نوع SPD در مراحل آخر بارگذاری افزایش یافته است که نمایانگر رفتار و عملکرد مناسب آن در زلزله‌های طولانی مدت و حفظ انسجام میراگر می‌باشد.
- میراگرهای DPD و ADAS به ترتیب بیشترین و کمترین سختی موثر را نشان داده اند.
- برای ایجاد سختی موثر مناسب برای یک ساختمان در زمان زلزله، دو میراگر SPD و DPD می‌توانند انتخاب مناسبی باشند.
- میراگرهای نوع SSPD و SPD به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار میرایی موثر متوسط نسبت به سایر میراگرها هستند.
- میراگر نوع SSD با ارتفاع ۱۵ سانتیمتر بهترین ثبات میرایی موثر را از خود به نمایش گذاشته است. همچنین در بین مدل‌های مورد بررسی میراگرهای نوع SSPD و SSD به ترتیب بیشترین میرایی تجمعی را ارائه داده اند.
- با افزایش ارتفاع میراگرها، از رفتار برشی کاسته و به رفتار خمشی آنها اضافه می‌شود که رفتار خمشی یک رفتار نرم‌تر و قابل پیش‌بینی‌تر است.
- میراگر نوع DPD با تغییر شکل مناسب خود نیروهای وارد بر خود را به صورت کشش نمایش می‌دهد که نسبت به خمش و برش رفتار بهتر و شکل‌پذیرتری می‌باشد.
- در میراگرهای SSD، SSPD و SAFYD مساله‌ی کماتش بال یا جان میراگرها یکی از ضعف‌های پیکربندی این میراگرها می‌باشد.
- به طور کلی با استفاده از دو نوع میراگر SPD و DPD، می‌توان معیارهای سختی، میرایی و انسجام میراگر در بارگذاری را برآورده نمود و همچنین مزیت دیگر این میراگرها، رفتار مناسب‌تر آنها در ارتفاع کم می‌باشد که مساله‌ی کماتش را نیز به همراه نداشته و از لحاظ معماری نیز کمترین بیرون زدگی از سقف و نمایان شدن آن در فضای معماری را به همراه دارد.
- میراگرها در شتابناک‌های متفاوت می‌توانند پاسخ‌های متفاوتی در برش پایه، جابجایی و شتاب بام داشته باشند که در کل باعث افزایش ظرفیت استهلاک سازه خواهند شد. با به کارگیری میراگرهای فلزی در ساختمان‌های فولادی، با کنترل مناسب جابجایی طبقات و ایجاد شرایط مناسب برای دوران تیر، قابلیت استهلاک بیشتر انرژی زلزله برای سازه فراهم خواهد شد.

۶- منابع

- [1] Saffari, H., Hedayat, A.A., Poorsadeghi Nejad, M. (2013). Post-Northridge Connections with Slit Dampers to Enhance Strength and Ductility. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 80, Pages (138-152)
- [2] CEN. Euro code 8: *Design of Structures for Earthquake Resistance*. Part 1: General
- [3] Miller, D.K. (1998). Lessons Learned from the Northridge Earthquake. *Engineering Structures*, Vol. 20, Pages (249-260)
- [4] Nakashima, M., Inoue, K., Tada, M. (1998). Classification of Damage to Steel Buildings Observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, *Engineering Structures*, Vol.20, Pages (271-281)

- [5] Oh, S.H., Kim, Y.J., Ryu, H.S., (2009). Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers. *Engineering Structures*, Vol. 31, Pages (1997-2008)
- [6] Engelhardt, M.D., Winneberger, T., Zekany, A.J., Potyraj, T.J. (1998). Experimental Investigation of Dog-Bone Moment Connections. *AISC*, 4th quarter, Pages (128-139)
- [7] Suita, K., Tamura, T., Morita, S., Nakashima, M., Engelhardt, M.D. (1999). Plastic Rotation Capacity of Steel Beam-to-Column Connections Using a Reduced Beam Section and no Weld Access Hole Design. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol. 64, Pages (177-184)
- [8] Oh, S.H., Kim, Y.J., Moon, T.S. (2000). Cyclic Performance of Existing Moment Connections in Steel Retrofitted with a Reduced Beam Section and Bottom Flange Reinforcements. *Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, Pages (199-209)
- [9] Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, *FEMA350*, Washington (DC)
- [10] Chen, C.C., Lee, L.M., Lin, M.C., (2003). Behaviour of Steel Moment Connections with a Single Flange Rib. *Engineering Structures*, Vol. 25, Pages (1419-1428)
- [11] Enayati, H., Roustaa, A.M. (2020), The Investigation of the Effect of Earthquake Type on the Structures Behaviour with Tuned Liquid Damper with Variable Baffles Under Semi-Active Control. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, doi: 10.22065/JSCE.2020.172223.1786
- [12] Tsai, K., Chen, H., Hong, C., (1993). Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction. *Earthquake Spectra*, Pages (505-528)
- [13] Iwata, M., Kato, T., Wada, A., (2003). Performance Evaluation of Buckling-Restrained Braces in Damage-Controlled Structures. In: *Behavior of Steel Structures in Seismic Areas: STESSA 2003*, Pages (37-43)
- [14] Sabelli, R., Mahin, S., Chang, C. (2003). Seismic Demands on Steel Braced Frame Buildings with Buckling-Restrained Braces. *Engineering Structures*, Vol. 25, Pages (655-666)
- [15] Iwata, M., Murai, M., (2006). Buckling-Restrained Brace Using Steel Mortar Planks; Performance Evaluation as a Hysteretic Damper. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol. 35, Pages (1807-1826)
- [16] Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R., Devall, R., (2006). Seismic Testing and Performance of Buckling-Restrained Bracing Systems. *Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, Pages (183-198)
- [17] Climent, A.B., Oh S., Akiyama, H., (1998). Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subjected to Shear Deformations. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol. 63, Pages (139-147)
- [18] Lee, M.H., Oh, S.H., Huh, C., Oh, Y.S., Yoon, M.H., Moon, T.S., (2002). Ultimate Energy Absorption Capacity of Steel Plate Slit Dampers Subjected to Shear Force. *Steel Structures*, Vol. 2, Pages (71-79)
- [19] Benavent Climent, A., (2006). Influence of Hysteretic Dampers on the Seismic Response of Reinforced Concrete Wide Beam-Column Connections. *Engineering Structures*, Vol. 28, Pages (580-592)
- [20] Chan, R.W.K., Albermani, F., (2008). Experimental Study of Steel Slit Damper for Passive Energy Dissipation. *Engineering Structures*, Vol. 30, Pages (1058-1066)
- [21] Oh, S.H., (1998). *Seismic Design of Energy Dissipating Multi-Story Frame with Flexible-Stiff Mixed Type Connection*. Ph.D. Thesis. Japan, Tokyo University
- [22] Roustaa, A.M., Zahrai. S.M. (2018). Parametric study of a proposed hybrid damping system: KE+ VLB in Chevron braced frames. *Acta Technica*, Vol.63, Pages (1-16)
- [23] Teruna, D.R., Majid, T.A., Budiono, B., (2015). Experimental Study of Hysteretic Steel Damper for Energy Dissipation Capacity. *Advances in Civil Engineering*, 631726
- [24] Azandariani, M.G., Roustaa, A.M., Usefvand, E., Abdolmaleki, H., and Azandariani, A.G., (2021). Improved seismic behavior and performance of energy-absorbing systems constructed with steel rings. *Journal of Structures*, Vol.29, Pages (534-548)
- [25] Köken, A., Köroğlu, M.A., (2011). An experimental Study on Energy Absorption Capacity of Steel Dampers Subjected to Shear Force. *Int. J. Arts Sci.*, Vol. 4, Pages (25-32)
- [26] Köken, A., Köroğlu, M.A., (2011). Steel Plate Slit Damper Using on Steel Frames. *E-J. New World Sci, Acad.*, Vol. 6, 1A0219
- [27] Köken, A., Köroğlu, M. A., (2013). Experimental Study on Beam-to-Column Connections of Steel Frame Structures with Steel Slit Dampers. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, individual papers, 04014066-1
- [28] Karavasilis, T.L., Kerawala, S., Hale, E., (2012). Hysteretic Model for Steel Energy Dissipation Devices and Evaluation of a Minimal-Damage Seismic Design Approach for Steel Buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 70, Pages (358-367)
- [29] Chen, S.J., Jhang, C., (2011). Experimental Study of Low-Yield-Point Steel Plate Shear Wall under in-Plane Load. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 97, Pages (977-985)
- [30] Ma, X., Borchers, E., Pena, A., Krawinkler, H., Billington, S., Deierlein, G.G., (2010). *Design and Behaviour of Steel Shear Plates with Openings as Energy Dissipating Fuses*. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, the John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No. 173, 2010

- [31] Tagawa, H., Yamanishi, T., Takaki, A., Chan, R.W.K., (2016). Cyclic Behavior of Seesaw Energy Dissipation System with Steel Slit Dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 17, Pages (24-34)
- [32] Lee, C.H., Kim, J., Kim, D.H., Ryu, J., Ju, Y.K., (2016). Numerical and Experimental Analysis of Combined Behaviour of Shear type Friction Damper and Non-Uniform Strip Damper for Multi-Level seismic Protection. *Engineering Structures*, Vol. 114, Pages (75-92)
- [33] Maleki, S., Mahjoobi, S., (2013). Dual-Pipe Damper. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 85, Pages (81-93)
- [34] Sahoo, D.R., Singhal, T., Taraithia, S., Saini, A., (2015). Cyclic Behaviour of Shear-and-Flexural Yielding Metallic Dampers. *Journal of Constructional research*, Vol. 114, Pages (247-257)
- [35] Xu, L.Y., Nic, X., Fan, J.S., (2016). Cyclic Behaviour of Low-Yield-Point Steel Shear Panel Dampers. *Engineering Structures*, Vol. 126, Pages (391-404)
- [36] Ahmadie Amiri, H., Najafabadi, E.P., Estekanchi, H., (2018). Experimental and Analytical Study of Block Slit Damper. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 141, Pages (167-178)
- [37] FEMA 461, (2007). *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Non-structural Components*. Washington, D.C.
- [38] ASCE Standard, ASCE/SEI 7-16, (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Washington, D.C.
- [39] Roustaei, A.M., Zahrai, S.M. (2017). Cyclic Testing of Innovative Two-Level Control System: Knee Brace and Vertical Link in Series in Chevron Braced Steel Frame. *Structural Engineering and Mechanics*. Vol. 64, Pages (301-310)