

مقایسه عملکرد لرزه‌ای کاربرد میراگر لوله‌ای در مهاربندهای پرده‌ای و قطری

عطا عبدالله پور^۱، سید مهدی زهرائی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳۱۲-۱۱۱۵۵، mzahrai@ut.ac.ir

چکیده

کنترل انفعالی سازه سیستمی است که بدون نیاز به منبع انرژی خارجی و به صورت ثابت به میرا کردن انرژی ورودی ناشی از اعمال بارهای جانبی می‌پردازد. بهبود عملکرد سازه‌های مجهز به میراگر را می‌توان در افزایش انرژی مستهلک‌شده و کاهش جابه‌جایی سازه دانست. برای این منظور می‌توان از سیستم مهاربند پرده‌ای مجهز به میراگر (Toggle Brace Damper (TBD با رعایت طراحی اصولی کمک گرفت. هدف از این مقاله، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار آباکوس و SAP2000 برای دو سازه مجهز شده به میراگر تسلیمی با سیستم مهاربندی پرده‌ای و مهاربندی قطری (Diagonal Brace Damper (DBD است. در این تحقیق از تحلیل تاریخچه زمانی با اعمال سه زلزله السترو، کوبه و طیس استفاده شده است. میراگر مورد استفاده در تمامی مدل‌ها یکسان و از نوع میراگر لوله‌ای تسلیم‌شونده انتخاب شده است. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد که ظرفیت باربری سیستم TBD نسبت به سیستم DBD تقریباً ۳ برابر شده است. دلیل این افزایش، هندسه سیستم TBD است که در تعیین ظرفیت باربری سازه بسیار تاثیر دارد. نتایج SAP2000 نشان می‌دهد که جابه‌جایی بام در سیستم TBD نسبت به سیستم مهاربند قطری با میراگر به طور میانگین در قاب‌های دو و پنج طبقه به ترتیب ۷۷ و ۴۲ درصد کاهش پیدا کرده است. در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD برای قاب دوطبقه، جابه‌جایی نسبی طبقات اول و دوم به طور متوسط برای هر سه زلزله به ترتیب ۸۲ و ۷۸ درصد کاهش یافته است و برای قاب پنج‌طبقه نیز جابه‌جایی نسبی در طبقات اول تا پنجم به ترتیب ۵۳، ۴۶، ۴۱، ۳۵ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد ضریب بزرگ‌نمایی (نسبت جابه‌جایی محوری میراگر به جابه‌جایی افقی طبقه، برای بیان ظرفیت شکل‌پذیری) در طبقه اول قاب دوطبقه سیستم TBD و DBD به ترتیب برابر است با ۱/۸۳ و ۰/۷۴ و برای طبقه دوم قاب پنج‌طبقه سیستم TBD و DBD به ترتیب برابر ۱/۴۶ و ۰/۷۳ است.

واژگان کلیدی

کنترل انفعالی، سیستم مهاربند پرده‌ای با میراگر (TBD)، سیستم مهاربند قطری با میراگر (DBD)، میراگر لوله‌ای، استهلاک انرژی

Comparing seismic performance of using pipe damper in toggle and diagonal braces

A. Abdollahpour, S.M. Zahrai

Abstract

Passive control of the structure is a system that dissipates the input energy caused by lateral loads without the need for an external energy source. Improvement of seismic performance of the structures equipped with a damper, lies in increasing the energy dissipation and decreasing the vibration of the structure. For this purpose, Toggle Brace Damper system can be used to follow design guidelines. This paper aims to compare the results obtained from SAP2000 software for two structures equipped with Toggle Brace Damper (TBD) and Diagonal Brace Damper (DBD). In this research, time-history analysis is used by applying the El Centro, Kobe and Tabas earthquake records. The dampers used in all models are the same pipe dampers selected from the hysteretic type. The results suggest that the roof displacement of the TBD system in the 2 and 5-story frames decrease in average 77 and 42 percent respectively compared to that of DBD system. The drifts of the floors in the TBD system for 2-story frame are 82 and 78 percent in the 1st and 2nd floors respectively and for the 5-story frame are 53, 46, 41, 35 and 30 percent in the 1st to 5th floors respectively, lower compared to those of DBD system. Magnification factor (ratio of axial damper displacement to floor displacement as ductility capacity) of the 1st story in the TBD and DBD systems for 2-story frame are 1.83 and 0.74 percent respectively and in the 2nd story of TBD and DBD systems for 5-story frame are 1.46 and 0.73 percent respectively.

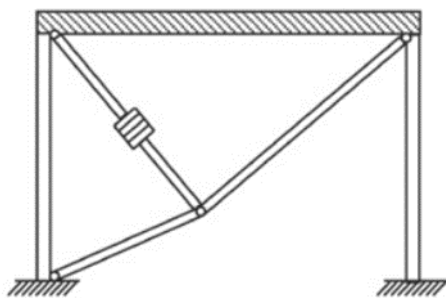
Keywords

Passive control, Toggle brace damper (TBD), Diagonal brace damper (DBD), Pipe damper, Energy dissipation device

در سیستم‌های مجهز به کنترل لرزه‌ای، انرژی ورودی به اجزای مستهلک‌کننده انرژی وارد می‌شود و لذا اعضای اصلی سازه از آسیب‌های جدی محافظت می‌شوند. می‌توان این سیستم‌ها را به چهار نوع سیستم کنترل انفعالی، فعال، نیمه‌فعال و هیبریدی (دوگانه) دسته‌بندی کرد [۱]. سیستم‌های انفعالی یا منفعل به دلیل عدم نیاز به منبع انرژی خارجی و هزینه کم نگهداری، بیش‌تر مورد توجه و استفاده قرار گرفته‌اند. کاربرد سیستم‌های اتلاف انرژی انفعالی برای تغییر میرایی، سختی و مقاومت سازه است، هم‌چنین این ابزار برای کاهش خطرات لرزه‌ای و بهسازی ساختمان‌های موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. میراگر تسلیم‌شونده یکی از پرکاربردترین انواع سیستم کنترل انفعالی است. میراگرهای فلزی تسلیم‌شونده بر پایه استهلاک انرژی در سازه، از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک توسعه یافته‌اند. در این گونه سیستم‌ها، سطح محصور بین حلقه‌های ایجادشده بر اثر جاری شدن در منحنی نیرو-تغییر مکان، مقدار انرژی تلف‌شده را بیان می‌کند. به عبارت دیگر مبنای اتلاف انرژی در این سیستم‌ها رفتار غیرارتجاعی مصالح تشکیل‌دهنده (رفتار هیستریزس) آن‌ها است. **عندلیب و همکاران** [۳] میراگر لوله‌ای با شکل جدیدی را معرفی کرده‌اند که برای ساختن لوله، از دو حلقه ساخته‌شده از ورق در آن استفاده شده است. مستهلک نکردن انرژی مورد انتظار در جابه‌جایی‌های مجاز از جمله مشکلات اساسی سیستم‌های موجود به شمار می‌آید. محققین برای رفع این کاستی، در این مقاله تلاش کرده‌اند تا مقدار سرعت و تغییرشکل به‌وجودآمده در میراگر را نسبت به یک جابه‌جایی مشخص افزایش دهند تا میزان انرژی استهلاک‌یافته افزایش یابد. برای نیل به این هدف، سیستم مهاربند پرده‌ای با میراگر (TBD) یک پیشنهاد موثر است (شکل (۱)).

با توجه به معایب سیستم مهاربند پرده‌ای به خصوص ناپایداری این سیستم در محل اتصال اعضا در بارگذاری زیاد و

کمانش خارج از صفحه این سیستم، **تیلور**^۱ [۴] سیستم اصلاح‌شده مهاربند پرده‌ای را به نام سیستم مهاربند Toggle Brace Damper (TBD) پیشنهاد کرد که در آن ناپایداری سیستم توسط میراگر کنترل می‌شود، به گونه‌ای که قبل از رسیدن به بار کمانش، میراگر شروع به کار کرده و نه تنها مهاربند کمانش نمی‌کند بلکه در جابه‌جایی‌ها و سرعت‌های کم، سرعت و جابه‌جایی ایجادشده در میراگر موجب استهلاک انرژی تحمیلی می‌گردد. **مک نامارا و همکاران**^۲ [۵] سیستم TBD را در یک ساختمان اداری ۳۹ طبقه در شهر بستون اجرا کردند. تحلیل‌های کامپیوتری آن‌ها نشان داد سختی مهاربند پرده‌ای (Toggle-Brace) سهم مهمی در کارایی میراگر دارد و اتصال آن به محل اتصال تیر و ستون باعث حذف تغییرشکل تیر می‌شود. **کنستانتینو و همکاران**^۳ [۶] سیستم TBD را پیشنهاد کردند به گونه‌ای که عضو سومی که میراگر به آن متصل است به محل اتصال پای ستون و تیر پایینی وصل می‌شود (Lower TBD).



شکل ۱- مهاربند پرده‌ای با میراگر (TBD)

دسیمون و استیون^۴ [۷] این طرح را با اضافه کردن میراگر ویسکوز به قسمت بالایی مهاربند پرده‌ای (Upper TBD) در سازه‌ای ۴۰ طبقه (هتل سیسون^۵) در سانفرانسیسکو اجرا کردند. افزودن میراگر در این سیستم به منظور کاهش نیروی باد صورت گرفت. **ژانگ و همکاران**^۶ [۸] در آزمایش‌های خود در مورد سیستم TBD به نتایج مهمی رسیدند که در این جا به چند مورد آن اشاره می‌شود.

³ Constantinou et al.

⁴ Desimone and Steven

⁵ Season Hotel

⁶ Zhang et al.

¹ Taylor

² McNamara et al.

در این مقاله نسبت تغییرشکل محوری میراگر به جابه‌جایی افقی نسبی طبقه به عنوان ضریب بزرگ‌نمایی برای بیان ظرفیت شکل‌پذیری معرفی شده است. در بین حالت‌های مختلف، سیستم مهاربند پرده‌ای همراه با میراگر از نوع Upper TBD ضریب بزرگ‌نمایی بیش‌تری نسبت به حالت‌های دیگر دارد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد تغییرشکل محوری مهاربندها تأثیر بسزایی در مقدار ضریب بزرگ‌نمایی و در نتیجه تأثیر مستقیمی در مقدار انرژی استهلاک‌یافته دارد. باید توجه کرد که مقدار ضریب بزرگ‌نمایی در فشار و کشش متفاوت از هم بوده ولی چون امواج زلزله به صورت رفت و برگشتی هستند این ضریب تقریباً متقارن می‌شود. پولات و کنستانتینو^۱ [۹] در تحقیق خود به ارزیابی ضریب بزرگ‌نمایی سیستم‌هایی پرداختند که امکان ایجاد بازشو در دهانه مهاربند را فراهم می‌سازد. آن‌ها در این تحقیق علاوه بر معرفی حالت جدیدی از سیستم TBD، به ضریب بزرگ‌نمایی بالای سیستم TBD و امکان اتلاف انرژی بالا در جابه‌جایی‌های کم اشاره کرده‌اند. دمنیکو و همکاران^۲ [۱۰] در تحقیق خویش به بررسی و طراحی بهینه میراگر ویسکوز در سیستم‌های مختلف پرداختند. آن‌ها اذعان داشتند که سیستم TBD نسبت به دیگر سیستم‌ها ضریب موثر بزرگ‌تری برای میراگر ایجاد می‌کند و از دیگر سیستم‌ها کاربردی‌تر است.

هوانگ و همکاران^۳ [۱۱] به مقایسه عملکرد لرزه‌ای کاربرد میراگر ویسکوز در TBD و DBD (سیستم مهاربند قطری با میراگر) پرداختند. آزمایش آن‌ها برای یک سازه فلزی سه طبقه با میراگر و بدون میراگر بر روی میز لرزان انجام گرفت. نتایج نشان داد در سیستم TBD تأثیر میراگر بر پاسخ لرزه‌ای نسبت به سیستم مهاربند قطری، افزایش یافته است. جی‌یانگ و همکاران^۴ [۱۲] سیستم TBD را برای سرکوب ارتعاشات سازه‌های کابلی استفاده کردند. فینگ و همکاران^۵ [۱۳] سیستم TBD را در سازه‌های بتنی استفاده کردند. نتایج نشان داد که سیستم TBD اثر کنترل ارتعاش را به میزان قابل توجهی افزایش داده و پاسخ دینامیکی سازه‌ها را کاهش داده است.

میراگرهای تسلیمی نسبت به میراگرهای ویسکوز ارزان قیمت‌تر هستند و ساخت آن‌ها راحت‌تر و در کشورهای در حال توسعه دسترسی به این نوع میراگرها نسبت به میراگرهای ویسکوز بیش‌تر است. حال با توجه به تفاوت در ماهیت این دو نوع میراگر، از کارهای نوآورانه این تحقیق می‌توان به بررسی رفتار سیستم TBD اشاره کرد که به جای میراگر ویسکوز مجهز به میراگر تسلیمی لوله‌ای شکلی است که توسط **عندلیب و همکاران** [۳] معرفی شده است. هم‌چنین در این مقاله، برای اولین بار عملکرد لرزه‌ای دو سیستم TBD و سیستم مهاربند قطری مجهز به میراگر لوله‌ای با هم مقایسه شده است.

با توجه به کاربردی بودن، اقتصادی بودن و اجرای راحت این میراگر، در نرم‌افزار آباکوس برای هر دو سیستم مهاربند قطری و پرده‌ای از این میراگر استفاده شده و رفتار هیستریزیس قاب با یک دهانه و یک طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی سیستم‌های DBD و TBD در نرم‌افزار آباکوس به ترتیب در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده است. به منظور بررسی سیستم‌های مذکور تحت زلزله‌های متفاوت و مقایسه عملکرد این سیستم‌ها در سازه‌های چند طبقه، قاب‌های مورد آزمایش با تحلیل تاریخیچه زمانی تحت سه زلزله السسترو، کوبه و طیس در نرم‌افزار SAP2000 مدل شده و نتایج آن‌ها شامل برش پایه، جابه‌جایی بام، جابه‌جایی نسبی طبقه (دریفت طبقه) و منحنی هیستریزیس میراگر بررسی شده است.

۲- مشخصات بارگذاری و مصالح

برای بارگذاری مدل، بار مرده 20 kN/m و بار زنده 8 kN/m در نظر گرفته شده است. مدل ایجادشده بر اساس آیین‌نامه فولاد آمریکا AISC 360 و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طرح شده و مقاطع استفاده‌شده از میان مقاطع استاندارد جدول اشتال انتخاب شده است. بخش لرزه‌ای مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ می‌باشد. رکورد زلزله‌ها بر اساس طیف استاندارد ۲۸۰۰ برای خاک نوع ۳ و میرایی ۵ درصد مقیاس شده‌اند. این سازه‌ها

³ Hwang et al.

⁴ Jiang et al.

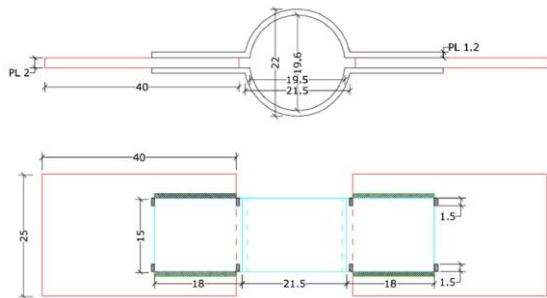
⁵ Feng et al.

¹ Polat and Constantinou

² Domenico et al.



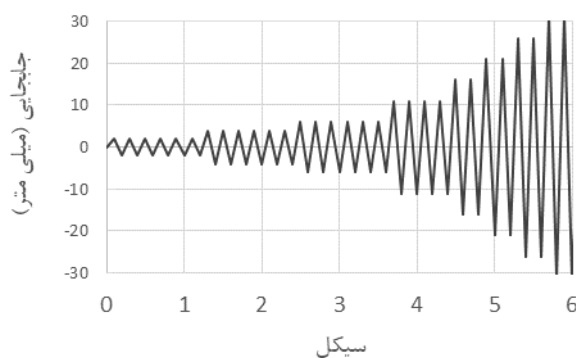
در ۲۵ سانتی متر متصل شده و لوله‌ای با قطر ۲۲ سانتی متر به طول ۱۵ سانتی متر را تشکیل می‌دهند. ضخامت ورق‌های خم شده به منظور ایجاد لوله ۱/۲ سانتی متری و ورق‌های کناری با ضخامت دو سانتی متر است.



شکل ۳- اجزای تشکیل دهنده میراگر معرفی شده توسط **عندلیب و همکاران [۳]** (ابعاد به سانتی متر می‌باشند).

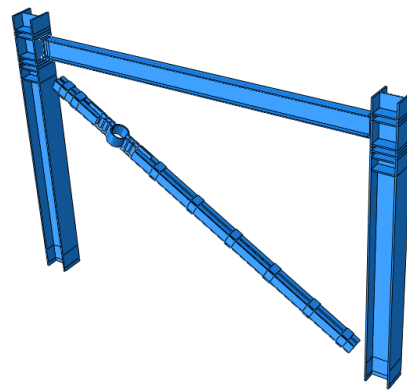
۴- صحت‌سنجی نتایج

برای بررسی درستی نتایج و اطمینان از تطبیق مشخصات میراگر مورد استفاده در مدل عددی با نمونه مورد آزمایش در تحقیق **عندلیب و همکاران [۳]**، میراگر مذکور تحت بارگذاری پیشنهادی ATC-24 مطابق شکل (۴) بارگذاری شده و منحنی هیستریزس مدل عددی در این تحقیق با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده و در شکل (۵) نمایش داده شده است.

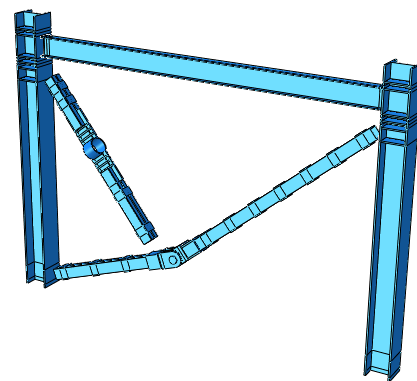


شکل ۴- بارگذاری پیشنهادی ATC-24

میزان دقت مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، با مقایسه منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی میراگر لوله‌ای و منحنی هیستریزس مدل عددی در شکل (۵) بررسی شده است. با توجه به این که در این تحقیق از دو نرم‌افزار استفاده شده



(الف)



(ب)

شکل ۲- شکل شماتیک قاب مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس: (الف) DBD و (ب) TBD

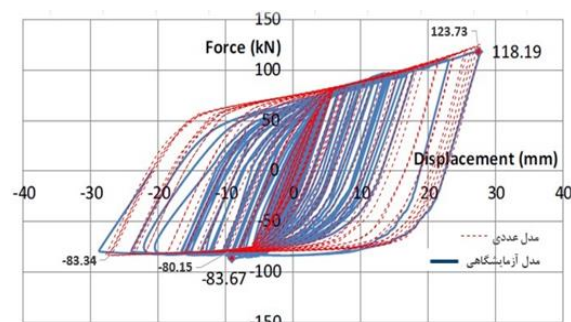
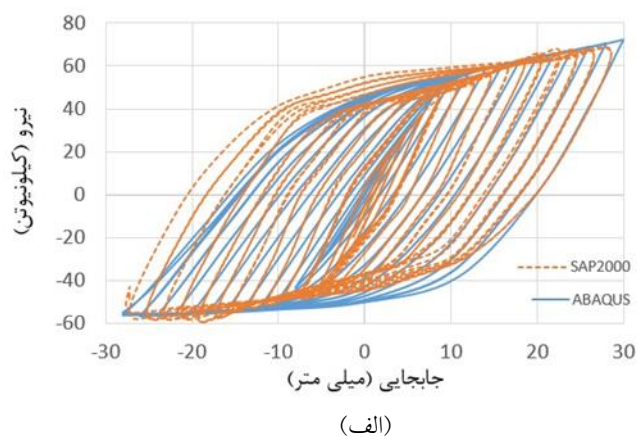
در مناطقی با خطرپذیری زیاد قرار گرفته‌اند. مشخصات مصالح مورد استفاده در این تحقیق بر اساس جدول (۱) انتخاب شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح

وزن واحد حجم	kN/m^3	۷۷
مدول الاستیسیته E	kN/m^2	$2/0.5 \times 10^8$
ضریب پواسون		۰/۳
تنش جاری شدن فولاد F_y	kN/m^2	۲۳۵۴۰۰
تنش تسلیم فولاد F_u	kN/m^2	۳۶۲۸۰۰

۳- مشخصات میراگر

این میراگر از دو ورق خم‌خورده همانند شکل (۳) ساخته شده است. دو ورق به وسیله جوش به ورق فولادی با ابعاد ۴۰



شکل ۵- مقایسه منحنی هیستریزیس میراگر لوله‌ای شکل در

مدل آزمایشگاهی تحقیق **عندلیب و همکاران [۳]** و منحنی

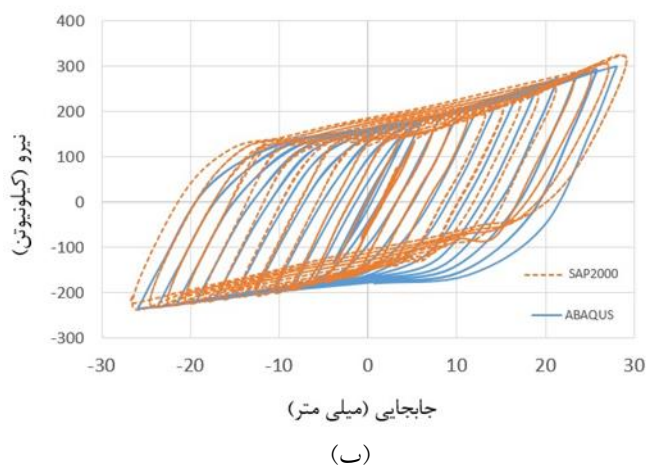
هیستریزیس میراگر لوله‌ای شکل در مدل عددی تحت بارگذاری

پیشنهادی ATC-24

است، بایستی مدل‌های ساخته‌شده در هر دو نرم‌افزار صحت‌سنجی شود که در این راستا منحنی هیستریزیس قاب یک‌طبقه و یک‌دهانه برای هر دو نرم‌افزار، در شکل (۶) با هم مقایسه شده است تا صحت مدل‌سازی مشخص شود.

۵- مدل‌سازی عددی

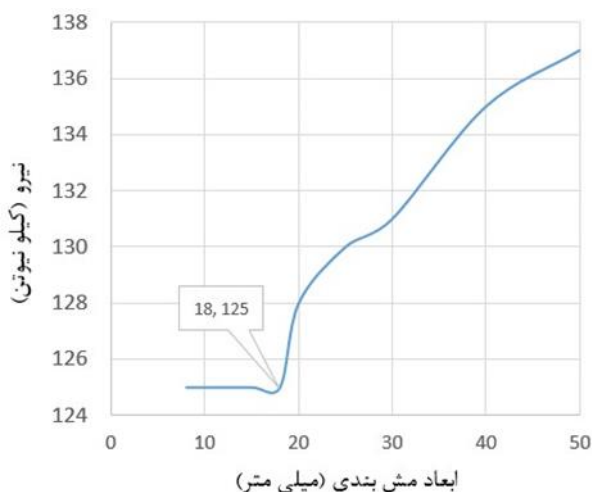
در گام نخست میراگر معرفی‌شده توسط **عندلیب و همکاران [۳]** در نرم‌افزار آباکوس مدل شد. ابعاد مدل‌سازی میراگر طبق شکل (۳) انجام گرفت و برای بخش منحنی از روش sweep و المان wedge و برای سایر قسمت‌ها از روش structured استفاده شده است. ابعاد مش نیز از طریق تحلیل حساسیت و با در نظر گرفتن دقت و زمان محاسبه، به‌دست آمده است. تحلیل حساسیت نسبت به میزان نیروی میراگر مورد بررسی قرار گرفته است، به طوری که برای هر ابعادی از مش‌بندی نیروی متناظر آن در نموداری در شکل (۷) رسم شده است. با توجه به نمودار، بعد از یک بازه می‌توان مشاهده کرد که تغییر مش‌بندی تغییر بزرگی در نیرو ایجاد نمی‌کند که با در نظر گرفتن زمان محاسبه، ابعاد مش‌بندی برای قسمت لوله‌ای شکل میراگر و بخش‌های متصل‌شده، ۱۸ میلی‌متر تعیین شده است. مش‌بندی میراگر در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۶- مقایسه منحنی پوش در نرم‌افزار آباکوس و

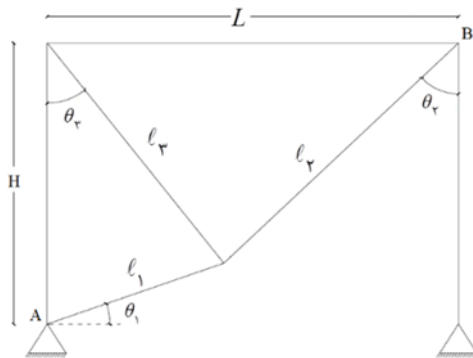
SAP2000

(الف) سیستم DBD و (ب) سیستم TBD

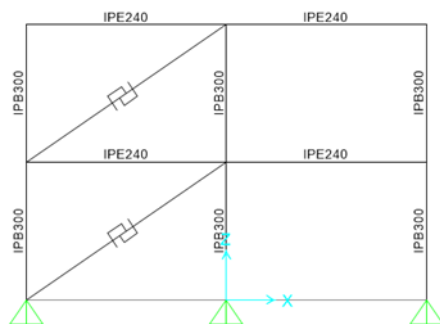


شکل ۷- تحلیل حساسیت برای تعیین ابعاد مش‌بندی میراگر

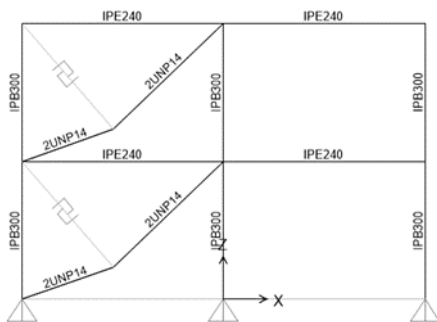
در نرم‌افزار SAP2000 قاب‌های مورد آزمایش به ترتیب قاب دوطبقه و پنج طبقه با دو دهانه و هر دهانه به طول ۴/۴ متر و ارتفاع ۳ متر رسم شده‌اند. شماتیک قاب‌های دو طبقه برای سیستم‌های TBD و DBD در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مشخصات هر دهانه مطابق با شکل (۹) است.



شکل ۹- شماتیک سیستم TBD



(الف)

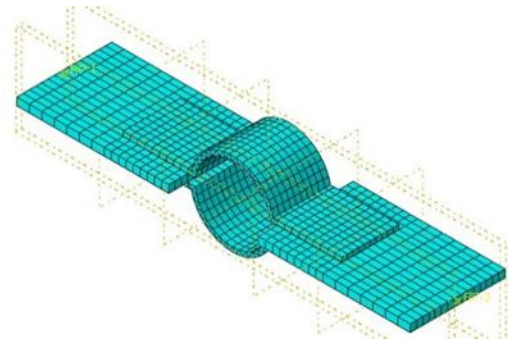


(ب)

شکل ۱۰- شماتیک قاب مدل‌سازی شده در نرم‌افزار

SAP2000: (الف) DBD و (ب) TBD

مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در این مقاله به شرح جدول (۲) می‌باشد. زلزله‌های موردنظر توسط نرم‌افزار



شکل ۸- مش‌بندی میراگر در نرم‌افزار آباکوس

قاب مورد آزمایش با دهانه‌ای به طول ۴/۴ متر و ارتفاع ۳ متر انتخاب شده است. پروفیل تیر IPE240، پروفیل ستون‌ها IPB300 و پروفیل مهاربند 2UNP14 در نظر گرفته شده است. در انتخاب این قاب سعی شده است تا قاب با دهانه مرسوم در کارهای اجرایی انتخاب شود. اتصالات تیر به ستون، مهاربند به قاب و اتصالات پای ستون در نرم‌افزار کاملاً مفصلی مدل شده است. با توجه به تحقیقات گذشته، سیستم انتخابی از بین حالت‌های مختلف سیستم‌های TBD حالت Upper TBD در نظر گرفته شده است. شماتیک سیستم مورد مطالعه در شکل (۹) نشان داده شده است. روابط استفاده شده برگرفته شده از تحقیق ژانگ و همکاران [۸] است.

$$\theta_1 \leq \tan^{-1} \left(\frac{3}{4.4} \right) = 34.29^\circ \rightarrow \theta_1 = 19^\circ \quad (1)$$

$$L_1 \leq 4.65 \rightarrow L_1 = 2 \quad (2)$$

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{1 - (2/4.4) \cos 19^\circ}{(3/4.4) - (2/4.4) \sin 19^\circ} \right) \approx 47^\circ \quad (3)$$

به منظور ایجاد سیستم پرده‌ای و این که دو مهاربند در یک راستا قرار نگیرند، بایستی زاویه عضو اول با افق کمتر از زاویه ایجادشده توسط راستای AB و راستای افق در نظر گرفته شود (رابطه (۱)). بعد از تعیین زاویه عضو اول با افق (θ_1) طول عضو باید مقداری کمتر از حداکثر مقدار آن در نظر گرفته شود. در این تحقیق طول عضو اول (l_1) دو متر در نظر گرفته شده است (رابطه (۲)). سپس با استفاده از روابط مثلثاتی زاویه عضو دوم با راستای قائم (θ_2) با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

SeismoMatch به طیف زلزله استاندارد ۲۸۰۰، مقیاس شده‌اند. در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها سعی شده فاصله از گسل تمام شتاب‌نگاشت نزدیک به هم باشد تا پارامتر فاصله از گسل تاثیر کم‌تری در نتایج داشته باشد.

جدول ۲- مشخصات زلزله‌های انتخابی

زلزله	سال	ایستگاه	بزرگی (ریشتر)	فاصله از گسل (کیلومتر)	سرعت (m/s)
السترو	۱۹۷۹	Calipatria Fire	۶٫۵۳	۲۳٫۱۷	۲۳۷
کوبه	۱۹۹۵	Abeno	۶٫۹	۲۴٫۸۵	۲۵۸
طبس	۱۹۷۸	Boshrooyeh	۷٫۳۵	۲۴٫۰۷	۳۲۵

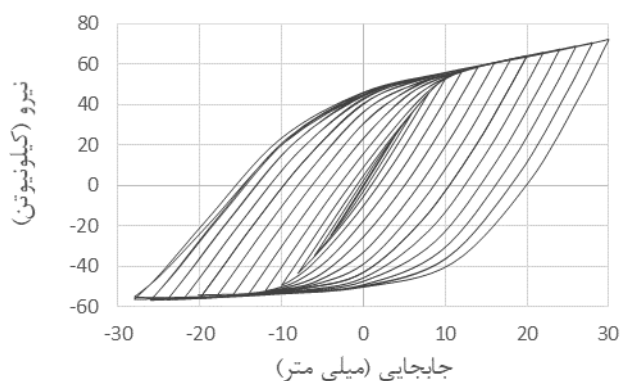
۶- مقایسه و تفسیر نتایج

منحنی هیستریزیس میراگر مدل‌شده با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای پیشنهادشده توسط ATC-24 رسم شده و سپس با نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده است. شکل (۵) میزان دقت مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. در ادامه بعد از اطمینان از نوع مدل‌سازی میراگر، دو سیستم TBD و DBD با مشخصات کاملاً یکسان در نرم‌افزار آباکوس مدل شده و منحنی هیستریزیس هر دو قاب مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی هیستریزیس قاب با ارتفاع ۳ متر و طول دهانه ۴/۴ متر با سیستم‌های DBD و TBD به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

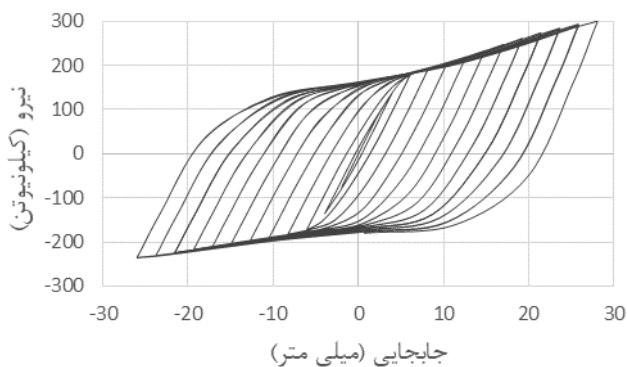
نتایج نشان می‌دهد نیروی تحمل‌شده در سیستم TBD در مقایسه با سیستم DBD تقریباً ۳ برابر است. در این قسمت باید توجه کرد که ظرفیت میراگر تغییری نکرده و دلیل افزایش نیروی تحمل‌شده در قاب با سیستم TBD به دلیل ماهیت این سیستم است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شد، هندسه سیستم TBD در ظرفیت باربری سیستم بسیار تاثیرگذار است.

در ادامه، دو سیستم مدنظر در نرم‌افزار SAP2000 تحت تحلیل تاریخچه زمانی ناشی از سه زلزله السترو، کوبه و طبس مدل شده و نتایج با هم مقایسه شده است. در این تحقیق برش پایه، جابه‌جایی نسبی طبقه (دریفت طبقه)، جابه‌جایی بام، منحنی

هیستریزیس میراگرها و ضرایب بزرگ‌نمایی دو سیستم بررسی شده است. قبل از مقایسه نتایج باید توجه کرد که تمام ابعاد و پارامترها اعم از جنس مصالح و مشخصات میراگرها در سیستم‌های مذکور و در تمامی طبقات کاملاً شبیه به هم انتخاب شده است. تمام واحدهای اعمالی در تحلیل‌ها بر حسب کیلونیوتن و میلی‌متر است.



شکل ۱۱- منحنی هیستریزیس سیستم DBD



شکل ۱۲- منحنی هیستریزیس سیستم TBD

برش پایه به مجموع نیروهای جانبی در تراز پایه گفته می‌شود و یکی از پارامترهای مهم در طراحی است. شکل (۱۳) برش پایه مورد مطالعه تحت سه زلزله السترو، کوبه و طبس را نشان می‌دهد. در سیستم TBD برش پایه در هر دو قاب افزایش یافته است که با توجه به بیش‌تر بودن سختی سیستم TBD نسبت به سیستم DBD این افزایش منطقی است. البته نسبت افزایش برش پایه در قاب پنج‌طبقه نسبت به قاب دوطبقه بیش‌تر است که دلیل آن این است که سازه‌های بلند انعطاف‌پذیرتر هستند و باید توجه کرد که سیستم مهاربند قطری مجهز به میراگر جزو سیستم‌های

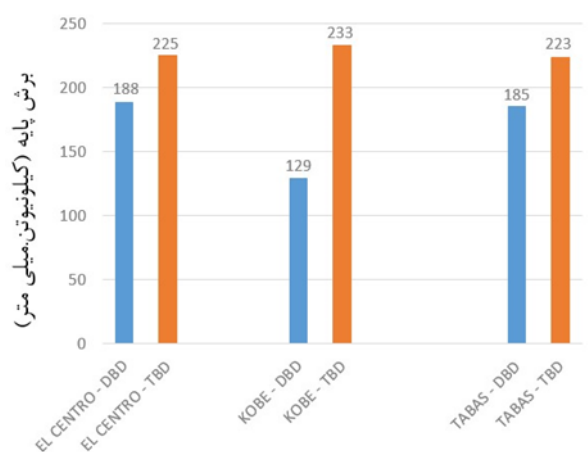
برای سنجش ایمنی جانی ساکنان است و علاوه بر آن کاهش جابه‌جایی نسبی طبقه تاثیر بسزایی در طراحی سازه‌ها دارد. در نتیجه کاهش جابه‌جایی نسبی طبقه باعث اقتصادی‌تر شدن طرح و ایجاد احساس امنیت بیش‌تر ساکنان می‌شود. جابه‌جایی نسبی طبقات در قاب‌های دوطبقه تحت زلزله‌های السنترو، کوبه و طبس در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

هم‌چنین جابه‌جایی نسبی طبقات برای سه زلزله ذکرشده در قاب پنج‌طبقه در شکل (۱۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در قاب دوطبقه جابه‌جایی نسبی طبقات اول و دوم به طور متوسط برای هر سه زلزله به ترتیب ۸۲ و ۷۸ درصد در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD کاهش پیدا کرده است. این مقدار در قاب پنج‌طبقه برای طبقات اول تا پنجم به ترتیب ۵۳، ۴۶، ۴۱، ۳۵ و ۳۰ درصد در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های نسبی طبقه‌های پایینی در سیستم TBD بیش‌تر کاهش یافته است. با توجه به بیش‌تر بودن سختی ذاتی سیستم TBD کاهش جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی طبقه در این سیستم نسبت به سیستم DBD منطقی است. لازم به ذکر است که جابه‌جایی نسبی زیاد در طبقه اول قاب پنج‌طبقه نشان‌دهنده ایجاد طبقه نرم در این سازه است. ایجاد طبقه نرم در سازه باعث کاهش انرژی ورودی و کاهش برش پایه می‌شود. به همین دلیل تفاوت برش پایه در قاب پنج‌طبقه در مقایسه دو سیستم بیش‌تر شده است.

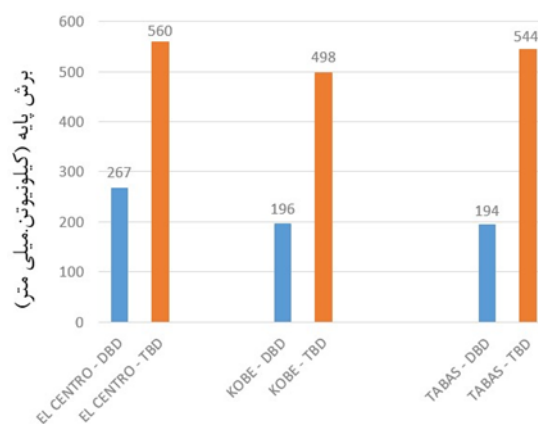
برای درک بیش‌تر تاثیر سیستم TBD در جابه‌جایی سازه در این بخش جابه‌جایی بام برای دو سیستم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد جابه‌جایی بام در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD در قاب دوطبقه و پنج‌طبقه به ترتیب ۷۷ و ۴۲ درصد کاهش پیدا کرده است.

در مقایسه دوره تناوب نتایج نشان می‌دهد که دوره تناوب هر دو نمونه (قاب دوطبقه و قاب پنج‌طبقه) در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD کاهش یافته است. دوره تناوب قاب دوطبقه در سیستم TBD و DBD به ترتیب برابر با ۰/۳۰۹ و ۰/۱۸۷ ثانیه و

شکل‌پذیر است و مقدار برش پایه در سازه‌های نرم نسبت به سازه‌های سخت کم‌تر است. برش پایه در قاب دوطبقه در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD به طور میانگین ۴۰ درصد افزایش یافته است و در قاب پنج‌طبقه این مقدار تقریباً ۲/۵ برابر شده است. البته ایجاد طبقه نرم در قاب پنج‌طبقه با سیستم DBD از دلایل دیگر این مقدار تفاوت است. میزان برش پایه برای سیستم‌های TBD و DBD در قاب‌های دو و پنج طبقه در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



(الف)



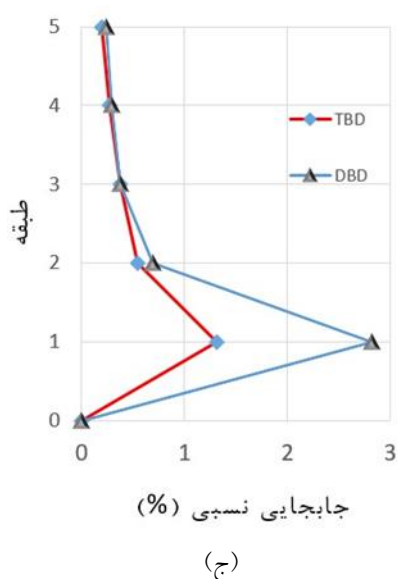
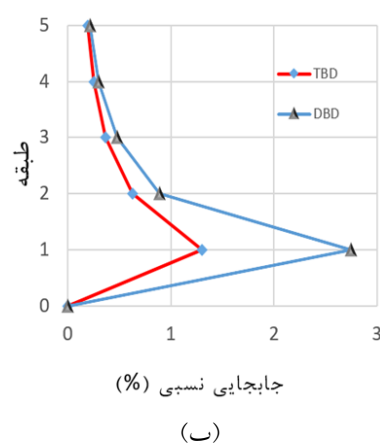
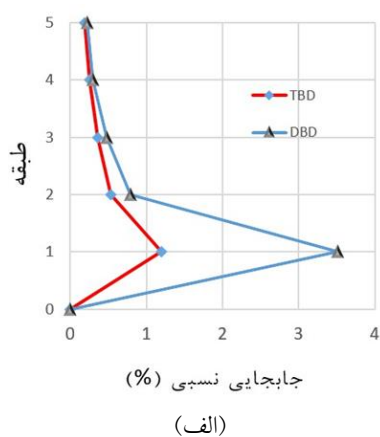
(ب)

شکل ۱۳- مقایسه برش پایه در قاب‌ها:

(الف) قاب دوطبقه و (ب) قاب پنج‌طبقه

جابه‌جایی نسبی طبقه از جمله موضوعات مهم بررسی‌شده در این تحقیق است. مقایسه جابه‌جایی نسبی طبقات معیار مناسبی

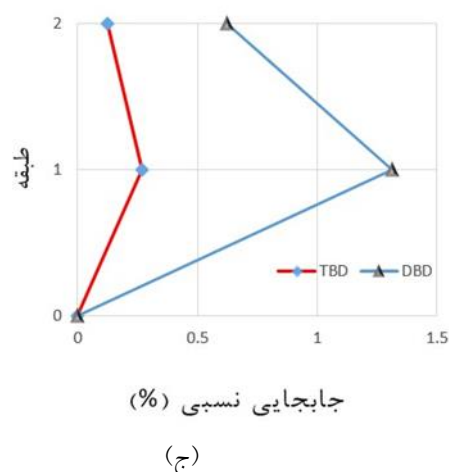
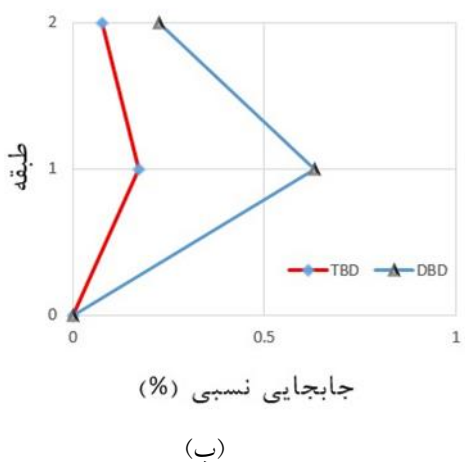
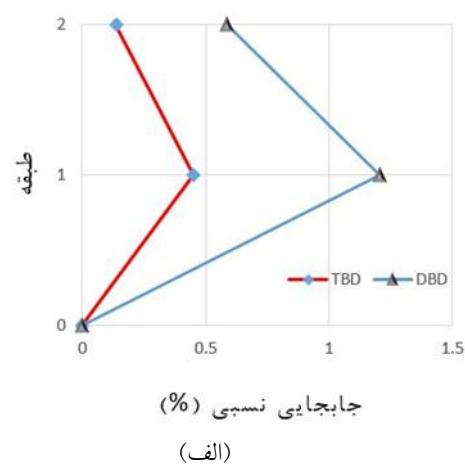
در قاب پنج طبقه این مقادیر به ترتیب برابر با ۰/۶۵۳ و ۰/۴۸۲ ثانیه است.



شکل ۱۵- جابه‌جایی نسبی قاب پنج طبقه تحت سه زلزله:

(الف) زلزله السترو، (ب) زلزله کوبه و (ج) زلزله طیس

در جدول (۳) حداکثر جابه‌جایی بام در دو سیستم TBD و DBD بررسی شده است.



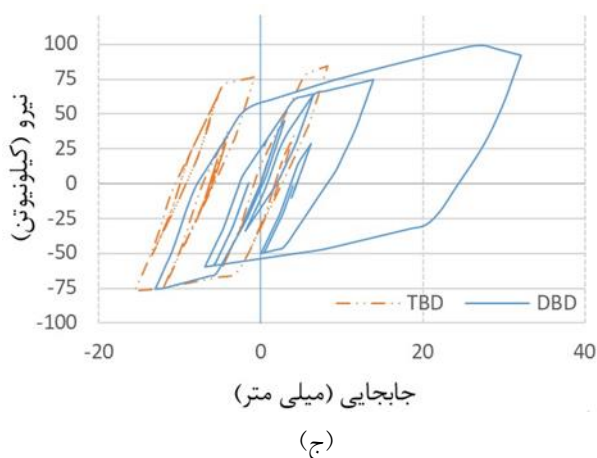
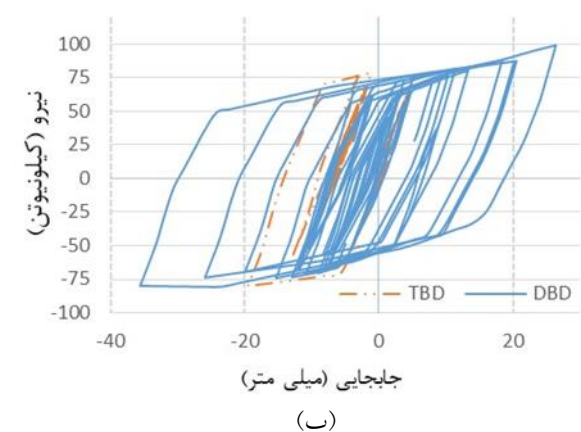
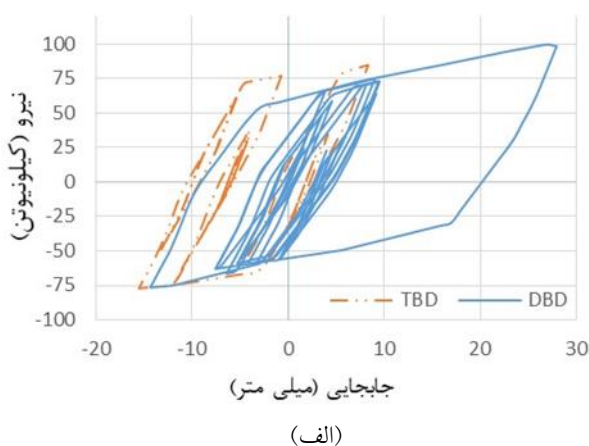
شکل ۱۴- جابه‌جایی نسبی قاب دو طبقه تحت سه زلزله:

(الف) زلزله السترو، (ب) زلزله کوبه و (ج) زلزله طیس

جدول ۳- مقایسه حداکثر جابه‌جایی بام (برحسب میلی‌متر) در

دو سیستم TBD و DBD

قاب	نوع سیستم	زلزله		
		السترو	کوبه	طبس
دوطبقه	DBD	۶۰	۵۵	۵۸
	TBD	۱۶	۱۲	۱۲
پنج طبقه	DBD	۱۷۴	۱۰۱	۱۲۲
	TBD	۶۴	۷۲	۷۸



شکل ۱۶- منحنی هیستریزس میراگر طبقه اول در قاب

دوطبقه تحت سه زلزله: (الف) الاسترو، (ب) کوبه و (ج) طبس

برای قاب پنج طبقه منحنی هیستریزس میراگر در سیستم

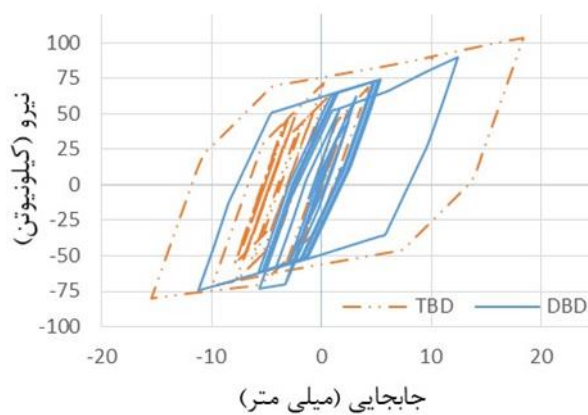
TBD و سیستم DBD در شکل (۱۷) نشان داده شده است. با

توجه به این که این قاب سختی کم‌تری از قاب دوطبقه دارد و

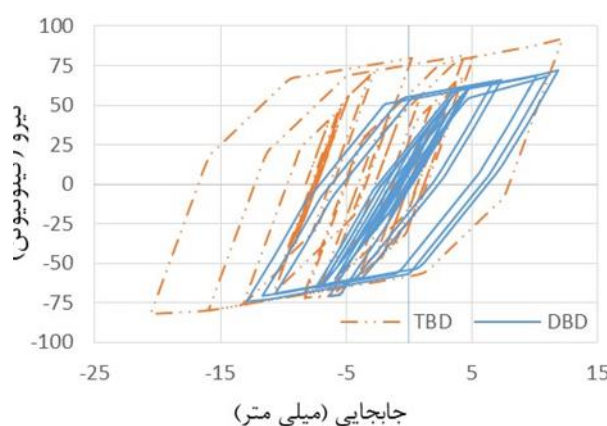
برای بررسی بیش‌تر تاثیر سیستم TBD بر میراگر، تغییر شکل میراگر و میزان انرژی مستهلک‌شده توسط میراگر مقایسه شده است. با توجه به این که یکی از پارامترهای مهم و اساسی در کارهای تحقیقاتی به خصوص در زمینه‌ی بررسی سیستم‌های دارای میراگر، منحنی‌های هیستریزس است، در این بخش منحنی هیستریزس هر دو سیستم بررسی شده است. محور افقی در منحنی هیستریزس نشانگر تغییر شکل میراگر و محور قائم نشانگر نیروی تحمل‌شده توسط میراگر است. برای قاب دوطبقه منحنی هیستریزس میراگر برای سیستم TBD و سیستم DBD در شکل (۱۶) تحت سه زلزله الاسترو، کوبه و طبس نشان داده شده است. عملکردهای میراگرهای تسلیمی رابطه مستقیم با مقدار جابه‌جایی دارد. باید توجه داشت که قاب‌های کوتاه دارای سختی ذاتی بیش‌تری هستند و همان‌طور که قبلاً ذکر شد، سیستم TBD نسبت به سیستم DBD دارای سختی بیش‌تری است و از سوی دیگر سازه‌های کوتاه سختی مضاعفی دارند. این دو پارامتر یعنی کوتاه بودن قاب دوطبقه و مجهز بودن به سیستم TBD باعث افزایش بیش‌تر سختی قاب شده است. جابه‌جایی نسبی پایین در قاب دوطبقه‌ی مجهز به سیستم TBD باعث افت کارایی میراگرها شده است و در نتیجه انرژی مستهلک‌شده توسط این میراگرها نسبت به سیستم DBD کاهش یافته است. مقدار انرژی مستهلک‌شده در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD به طور میانگین برای سه زلزله تقریباً ۵۷ درصد کاهش یافته است.

TBD نسبت به سیستم DBD در زلزله السترو، کوبه و طبس به ترتیب ۳۰، ۲۵ و ۱۰ درصد افزایش یافته است.

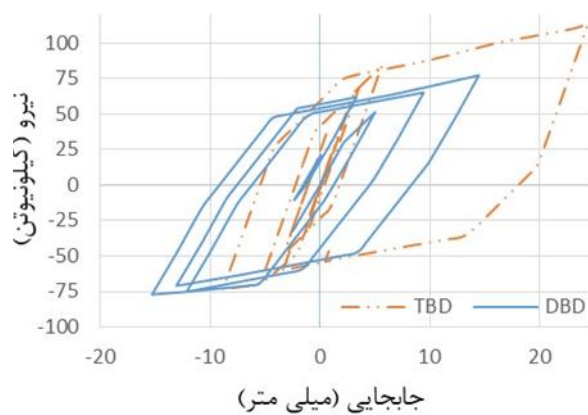
نتایج نشان می‌دهد انرژی مستهلک‌شده در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD در قاب دوطبقه کاهش یافته است و این مقدار در قاب پنج‌طبقه افزایش نسبی داشته است. میراگر مورد استفاده در این قاب‌ها از نوع تسلیمی بوده و استهلاک انرژی در این میراگرها وابسته به جابه‌جایی است. از طرفی باید توجه شود که میزان جابه‌جایی در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD کاهش چشم‌گیری داشته است. پس برای بررسی میزان کارایی میراگر در این دو سیستم باید منحنی هیستریزس و مقدار جابه‌جایی را به طور توأم مورد بررسی قرار داد. در مقاله ژانکا و همکاران [۸] که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، پارامتری به نام ضریب بزرگ‌نمایی معرفی شده است که کارایی سیستم مهاربندی TBD را نشان می‌دهد. در این مقاله نسبت تغییرشکل محوری میراگر به جابه‌جایی افقی نسبی طبقه به‌عنوان ضریب بزرگ‌نمایی معرفی شده است. ضریب بزرگ‌نمایی به وضوح نشان می‌دهد که با تغییر هندسی در سیستم مهاربندی چه مقدار می‌توان کارایی میراگر را تغییر داد و میراگر را بیش‌تر یا کم‌تر به چالش کشید و در نهایت انرژی مستهلک‌شده در سازه را دست‌کاری کرد و یا چه مقدار می‌توان با ثابت نگه داشتن انرژی تلف‌شده، جابه‌جایی نسبی طبقه را تغییر داد. برای به دست آوردن این ضریب باید جابه‌جایی‌های هر طبقه با جابه‌جایی میراگرهای متناظر با آن را مقایسه کرد. نسبت جابه‌جایی میراگر به جابه‌جایی افقی طبقه نشان می‌دهد در هر واحد جابه‌جایی افقی طبقه میراگر به چه اندازه تغییرشکل می‌یابد. ضریب بزرگ‌نمایی سیستم TBD و سیستم DBD برای قاب‌هاب یک‌طبقه تحت یک بارگذاری چرخه‌ای واحد به ترتیب برابر ۱/۹۱ و ۰/۸۳ است. اگر ضریب بزرگ‌نمایی برابر یک باشد یعنی جابه‌جایی میراگر برابر با جابه‌جایی افقی طبقه است و اگر این عدد بزرگ‌تر از یک باشد نشانگر آن است که جابه‌جایی میراگر بیش‌تر از جابه‌جایی طبقه بوده و این نشان می‌دهد که سیستم مذکور دارای ضریب بزرگ‌نمایی بیش‌تری بوده و میراگر در جابه‌جایی‌های کم، عملکرد بهتری داشته است. با توجه به



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷- منحنی هیستریزس میراگر طبقه دوم در قاب پنج‌طبقه

تحت سه زلزله: (الف) السترو، (ب) کوبه و (ج) طبس

جابه‌جایی نسبی در آن ناچیز نیست. نتایج افزایش نسبی انرژی مستهلک‌شده در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD نشان می‌دهد برای قاب پنج‌طبقه مقدار انرژی مستهلک‌شده در سیستم

ایجاد طبقه نرم در قاب پنج طبقه در سیستم DBD برای مثال ضریب بزرگ‌نمایی طبقه دوم قاب پنج طبقه و ضریب بزرگ‌نمایی طبقه اول قاب دوطبقه در جدول شماره (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴- ضریب بزرگ‌نمایی TBD و DBD تحت سه زلزله

قاب	سیستم	زلزله		
		السترو	کوبه	طیس
دو طبقه	DBD	۰/۶۹	۰/۸۱	۰/۷۱
	TBD	۱/۹۰	۱/۸۳	۱/۷۷
پنج طبقه	DBD	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۷۴
	TBD	۱/۴۱	۱/۴۹	۱/۴۹

با توجه به نتایج، ضریب بزرگ‌نمایی سیستم TBD در طبقه اول قاب دوطبقه و ضریب بزرگ‌نمایی آن در طبقه دوم قاب پنج طبقه به طور میانگین برای هر سه زلزله به ترتیب برابر ۱/۸۳ و ۱/۴۶ است و این مقدار برای سیستم DBD در طبقات متناظر به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۷۳ است. در مجموع ضریب بزرگ‌نمایی در سیستم TBD برای تمام حالت‌ها بزرگ‌تر از یک است ولی در سیستم DBD این مقدار کم‌تر از یک می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس، ظرفیت قاب مهاربندی پرده‌ای (TBD) نسبت به قاب مهاربندی قطری (DBD) تقریباً ۳ برابر شده است. دلیل این افزایش، بیش‌تر بودن سختی سیستم مهاربندی پرده‌ای در مقایسه با سیستم مهاربندی قطری است. هم‌چنین تحلیل‌های نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد که در سیستم TBD مهاربندها دارای تنش‌های بیش‌تری نسبت به مهاربندهای سیستم مهاربند قطری هستند که دلیل آن تفاوت هندسه در دو سیستم است. در سیستم مهاربندی پرده‌ای نوع پروفیل‌های مهاربند تأثیر شایانی در ظرفیت نهایی سیستم دارد. لازم به ذکر است که اتصالات تیر و ستون در هر دو سیستم مفصلی بوده و قاب در سختی سیستم تأثیر چندانی ندارد. از نرم‌افزار SAP2000 برای بررسی رفتار این سیستم‌ها در سازه چند طبقه تحت تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است. نتایج

نشان می‌دهد به دلیل افزایش سختی سیستم TBD برش پایه در این سیستم برای قاب دوطبقه به طور میانگین ۱/۴ برابر و برای قاب پنج طبقه ۲/۵ برابر نسبت به سیستم DBD افزایش یافته است. از سوی دیگر جابه‌جایی نسبی طبقات اول و دوم به طور متوسط برای هر سه زلزله در قاب دوطبقه به ترتیب ۸۲ و ۷۸ درصد در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD کاهش پیدا کرده است. این مقدار در قاب پنج طبقه برای طبقات اول تا پنجم به ترتیب ۵۳، ۴۶، ۴۱، ۳۵ و ۳۰ درصد در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD کاهش یافته است. جابه‌جایی بام نیز در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD در قاب دوطبقه و پنج طبقه به ترتیب ۷۳ و ۴۶ درصد کاهش پیدا کرده است. به عنوان مثال انرژی مستهلک‌شده‌ی یکی از میراگرهای هر قاب در هر دو سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای میراگر طبقه اول قاب دوطبقه مقدار انرژی مستهلک‌شده در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD به طور میانگین برای هر سه زلزله تقریباً ۵۷ درصد کاهش یافته است و برای میراگر طبقه دوم قاب پنج طبقه این مقدار در سیستم TBD نسبت به سیستم DBD به طور میانگین برای سه زلزله تقریباً ۲۲ درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج، چون قاب دوطبقه ذاتاً سختی بالایی دارد، جایگزینی سیستم TBD با سختی بالا به جای سیستم DBD باعث شده است که میراگرها کم‌تر تغییر شکل دهند و چون میراگرهای مورد استفاده وابسته به جابه‌جایی هستند، انرژی کم‌تری را مستهلک کرده‌اند ولی با افزایش طبقات و کم‌تر شدن سختی سازه سیستم TBD هم‌زمان با کاهش جابه‌جایی‌ها، مقدار قابل توجهی از انرژی موجود را نیز مستهلک کرده است. به منظور بررسی هم‌زمان مقدار جابه‌جایی و مقدار انرژی مستهلک‌شده، پارامتری به عنوان ضریب بزرگ‌نمایی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی ضریب بزرگ‌نمایی سیستم‌ها نشان می‌دهد در قاب یک طبقه مدل‌شده در نرم‌افزار آباکوس این ضریب برای سیستم TBD و DBD به ترتیب برابر با ۱/۹۱ و ۰/۸۳ است. در قاب دوطبقه ضریب بزرگ‌نمایی طبقه اول سیستم‌های TBD و DBD به ترتیب برابر با ۱/۸۳ و ۰/۷۴ است و این مقدار برای طبقه دوم قاب پنج طبقه



(2012), "Theoretical analysis and experimental research on toggle-brace-damper system considering different installation modes," *Scientia Iranica*, Vol. 19, No. 6, pp. 1379–1390.

[9] Polat, E. and Constantinou, M.C. (2016), "Open-Space Damping System Description, Theory, and Verification", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143, No.4.

[10] De Domenico, D., Ricciardi, G. and Takewaki, I. (2019), "Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 118, No. 12, pp. 144–165.

[11] Hwang, J., Asce, M., Huang, Y. and Hung, Y. (2005), "Analytical and Experimental Study of Toggle-Brace-Damper Systems Analytical and Experimental Study of Toggle-Brace-Damper Systems", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. April, pp. 1035–1043.

[12] Jiang, H., Wu, S. and He, L. (2021), "Theoretical analysis and optimization of toggle-brace damper for cable tray system," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 187, p. 106936.

[13] Feng, H., Zhou, F., Ge, H., Zhu, H. and Zhou, L. (2021), "Energy dissipation enhancement through multi-toggle brace damper systems for mitigating dynamic responses of structures", *Structures*, Vol. 33, pp. 2487–2499.

به ترتیب برابر ۱/۴۶ و ۰/۷۳ است. با بررسی ضریب بزرگنمایی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم TBD در عین حال با کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات، میزان جابه‌جایی میراگر را افزایش می‌دهد. این امر باعث اتلاف انرژی در جابه‌جایی کم می‌شود که می‌تواند برای طراحی سازه‌ها بسیار مفید واقع شود. در نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت سیستم TBD سختی سازه را افزایش می‌دهد که با توجه به این مطلب اگر سختی سازه اولیه بالا باشد احتمالاً با اضافه کردن سیستم TBD سختی سیستم به قدری افزایش می‌یابد که تحت زلزله‌های خفیف، میراگرهای موجود در سیستم عمل نکنند ولی اگر این سیستم به سازه‌هایی با سختی متوسط اضافه شوند، کنترل هر دو پارامتر مهم در طراحی سازه یعنی کاهش جابه‌جایی طبقات و افزایش استهلاک انرژی توسط میراگرها را برای طراح امکان‌پذیر می‌کند.

۸- مراجع

[1] Soong, T.T. and Spencer, B.F. (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 24, No. 3, pp. 243–259.

[2] Spencer, B.F. and Nagarajaiah, S. (2003), "State of the Art of Structural Control", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 129, No. 7, pp. 845–856.

[3] Andalib, Z., Kafi, M., Kheyroddin, A. and Bazzaz, M. (2014), "Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates," *Journal of Constructional Steel Research*.

[4] Taylor, D.P. (1999), "Toggle linkage seismic isolation structure", U.S. Patent 5934028, filed November 20, 1997, Issued August 10, 1999,

[5] McNamara, R.J., Huang, C.D. and Wan, V. (2000), "Viscous-Damper with Motion Amplification Device for High Rise Building Applications", *Advanced Technology in Structural Engineering*.

[6] Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Hammel, W. and Sigaher, A.N. (2001), "Toggle-brace-damper seismic energy dissipation systems", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 2, pp. 105–112.

[7] DeSimone, S. and Steven, B., "upturned spandrels and toggle brace-dampers meet the complex seismic requirements of the irregularly shaped steel tower for San Francisco's Four Seasons Residences," *Modern Steel Construction*, December 2002.

[8] Zhang, R., He, H., Weng, D., Zhou, H. and Ding, S.

