

دیدگاهی جدید در کنترل غیرفعال سازه ها

نگرشی بر سیستم های دوگانه ADAS-EBF

بابک کریمخانی، کارشناس بخش سازه های خاص پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه

ساان عشقی، استادیار و مدیر بخش سازه های خاص پژوهشکده سازه پژوهشگاه

۱- چکیده

این مقاله دیدگاه جدیدی تحت عنوان کنترل غیرفعال دوگانه (*Dual Passive Control*) را معرفی می کند. اعضای غیرفعال معرفی شده در این مقاله میراگرهای ADAS (*Added Damping And Stiffness*) و لینکهای برشی سیستم قابهای مهاربندی خارج از مرکز (*Eccentrically Braced Frames*) می باشند که به شکل همزمان در یک قاب نصب شده و رفتار لرزه ای آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. اتلاف انرژی در این دو نوع سیستم بر اساس فرآیند تسلیم شدن می باشد و ترکیب نمودن اعضای مذکور، اتلاف انرژی بیشتری را ممکن می سازد. نتایج، صحت این ادعا را ثابت می کند. در تحلیل قاب نمونه مجهز به اعضای مزبور از برنامه *ETABS 7.171 Nonlinear 2001* استفاده شده است.

کلیدواژه ها: کنترل سازه، کنترل غیرفعال، کنترل دوگانه، دینامیک سازه ها.

۲- مقدمه

تغییر مکان نسبی طبقات، یکی از معایب قابهای فولادی خمشی است. اگرچه این نوع سیستم، ظرفیت اتلاف انرژی و شکل پذیری بالایی دارد، اما تشکیل مفاصل پلاستیک در اطراف ناحیه بحرانی تحت ناحیه گره (*Panel Zone*) می تواند کاربری این نوع قابها را بعد از وقوع زلزله به علت ایجاد تغییر- شکل های ماندگار دچار مشکل نماید. از سوی دیگر، رفتار قابهای مهاربندی شده هم مرکز (*Concentrically Braced Frames*) به دلیل رفتار خرابی این قابها، اثر قابل توجهی بر کنترل میزان تغییر مکان نسبی طبقات دارد؛ اما چنین قابی فاقد یک

سازوکار پایدار اتلاف انرژی است. با توجه به معایب این دو سیستم، پوپوف در سال ۱۹۷۰ سیستم مهاربندی خارج از مرکز (*EBF*) را به جامعه مهندسی معرفی نمود [۱]. در این نوع سیستم، مهاربند قطری به گونه ای طرح می شود که عمداً خروج از مرکزیت بزرگی نسبت به محل اتصال به مهاربند دیگر با تیر یا محل اتصال تیر به ستون داشته باشد. این نوع سیستم در واقع ترکیبی از قاب خمشی و مهاربندی هم مرکز می باشد و به گونه ای است که هم مقاومت و سختی سیستم های مهاربندی شده هم مرکز و هم قابلیت بالای اتلاف انرژی و شکل پذیری قابهای خمشی را دارد. میراگرهای ADAS نیز نوع دیگری از اعضای جاذب انرژی، می باشند. چنین میراگری از چند صفحه فولادی به شکل مقطع ساعت شنی تشکیل شده است و به علت شکل خاص آنها این نوع اعضا رفتاری مناسب در خلال زمین لرزه های شدید دارند. در این مقاله، عملکرد یک قاب فولادی مجهز به دو نوع سیستم *ADAS-EBF* بررسی شده است. سیستم های مذکور به طور خلاصه در قسمتهای بعد توضیح داده شده اند.

۳- سیستم مهاربندی خارج از مرکز EBF

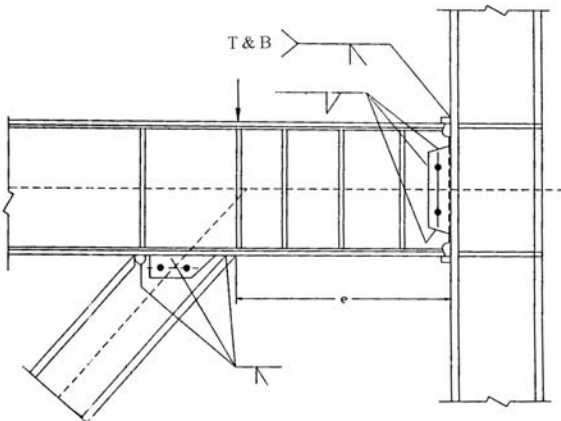
نصب مهاربند خارج از مرکز بر روی قابها می تواند به شکل های گوناگونی انجام پذیرد (شکل ۱). وجود خارج از مرکزیت در یک انتهای مهاربند نیز کفایت می کند. به قسمتی از تیر که بین دو مهاربند و یا بین محل اتصال مهاربند و تیر و یا ستون مجاور قرار می گیرد تیر رابط (*Link Beam*) گفته می شود و طول آن در شکل با e نمایش داده شده است. تیر رابط باید به گونه ای طراحی شود که تحت

I شکل، این مقادیر عبارتند از [1]:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{3}} f_y d t_w \quad M_p = Z f_y \quad (1)$$

در رابطه (1)، f_y تنش تسلیم، d ارتفاع مقطع، t_w جان مقطع، و Z اساس مقطع پلاستیک است.

به منظور اطمینان در کنترل رفتار تیررابط و تسلیم شدن برشی آنها، کاسای و پوپوف [1] رابطه (2) را برای طول تیر رابط پیشنهاد کرده اند (شکل 2):



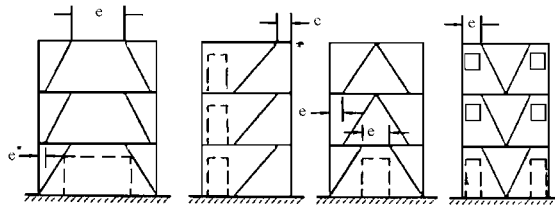
شکل (2): جزئیات تیررابط

$$e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p} \quad (2)$$

سازوکار تسلیم برشی تیرهای رابط کوتاه بهتر از سازوکار تسلیم خمشی تیرهای رابط بلند است؛ زیرا نیروهای برشی در تمام طول رابط ثابت بوده و کرنشهای برشی غیرخطی به طور یکنواخت در طول تیر رابط توزیع می شوند. این عمل، باعث ایجاد دورانه‌های غیرارتجاعی بزرگ در تیرهای رابط کوتاه بدون ایجاد کرنشهای موضعی خیلی زیاد خواهد شد. به نظر می رسد تیرهای رابط کوتاه مؤثرترین سیستم اتلاف انرژی می باشند که شکل پذیری بالایی دارند. در این مقاله، از تیررابط برشی برای بررسی استفاده شده است.

۴- میراگرهای ADAS

اعضایی که افزاینده سختی و میرایی اند (ADAS) دستگاههایی می باشند که از تعدادی صفحات فولادی موازی تشکیل شده اند (شکل 3). میراگرهای ADAS در زمره سیستم های غیرفعال می باشند. صفحات فولادی عموماً به شکل X (شکل ساعت شنی) ساخته می شوند. عملکرد این نوع

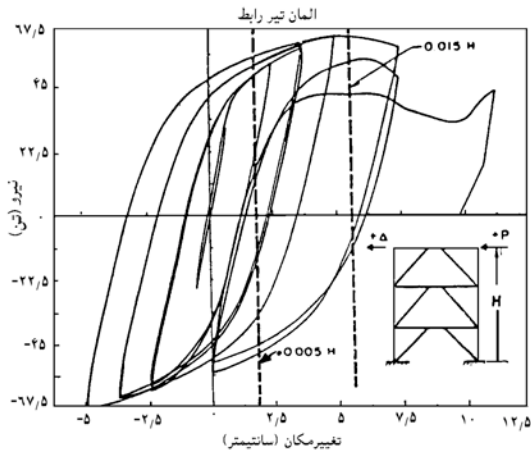
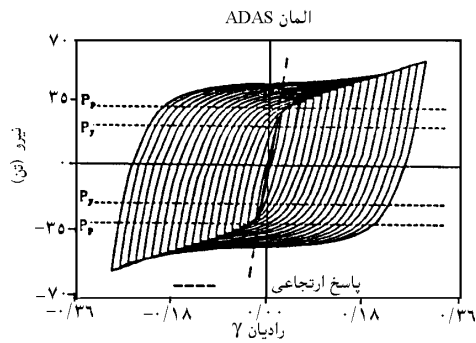


شکل (1): انواع قابها با مهاربندی خارج از مرکز [1]

تغییرشکل‌های غیر ارتجاعی پایداری خود را از دست ندهد و تمامی تغییرشکل‌های غیرخطی و یا اتلاف انرژی در این تیررابط متمرکز شود. در چنین سیستمی، نیروی محوری مهاربند از طریق برش و خمش ایجاد شده در تیررابط به مهاربندهای دیگر و یا ستونها منتقل می شود. این تیررابط همانند یک فیوز شکل پذیر عمل می کند و مانع کماتش مهاربندها می شود. یکی از مهمترین پارامترهایی که در نحوه رفتار سیستم های مهاربندی شده خارج از مرکز نقش اساسی را ایفا می کند طول تیررابط است. در واقع دستیابی به یک رفتار مطلوب توأم با سختی و شکل پذیری مناسب در یک سیستم EBF به تعیین طول مناسب برای این نوع عضو بستگی بسیاری دارد.

رفتار تیرهای رابط بلند تحت بارهای رفت و برگشتی شدید در مقایسه با تیرهای رابط کوتاه از نظر سختی و مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی قابل مقایسه نبوده و در سطح پایین تری قرار دارد. عموماً عملکرد تیرهای رابط کوتاه بهتر گزارش شده است. در یک سیستم مطلوب انتظار می رود که تیررابط در برابر زلزله های شدید رفتار غیرارتجاعی از خود نشان دهد و یک سازوکار پایدار بدون کاهش سختی را به وجود آورد و به واسطه آن حداکثر نیروهای قابل اعمال به تیرها و ستونهای قاب را محدود نماید.

مهمترین عامل تحریک کننده تیررابط و انتقال دهنده آن به فاز غیرارتجاعی، طول آن است. در تیرهای رابط کوتاه رفتار تسلیم برشی حاکم است و به عکس برای تیرهای رابط بلند تسلیم خمشی تعیین کننده خواهد بود. در تیرهای رابط خیلی کوتاه قبل از رسیدن لنگر انتهایی به لنگر پلاستیک (M_p)، نیروی برشی به برش پلاستیک (V_p) خواهد رسید. به عبارت دیگر، تسلیم برشی به شکل مفصل برشی اتفاق خواهد افتاد (مفصل پلاستیک برشی در تیرهای I شکل به صورت طبله شدن جان مقطع است). برای تیرهای



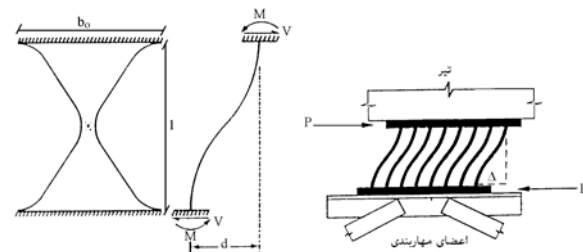
شکل (۴): نمونه رفتار هیسترتیک میراگرهای ADAS و تیرهای رابط برشی در سیستم EBF [۱]

صفحه فولادی و l ارتفاع عضو می باشد.

طول تیر رابط نقش عمده ای را در رفتار سیستم های EBF ایفا می کند. سختی برشی طبقه (K_s) ، سختی برشی ADAS (K_e) ، سختی مهاربندها، پارامترهای B/D و SR نیز نقش قابل ملاحظه ای در قابهای مجهز به چنین میراگرهایی دارند. پارامتر B/D به شکل نسبت سختی مهاربند به سختی میراگر و پارامتر SR به شکل نسبت سختی میراگر به سختی طبقه تعریف می شوند که عموماً مقادیر پیشنهادی برای آنها به ترتیب ۲ و ۳ می باشد [۴].

با معرفی دو سیستم ADAS و EBF و با توجه به عملکرد این دو نوع سیستم در خلال زمین لرزه های گذشته (نورث ریج ۱۹۹۴) و نتایج میز لرزان به نظر می رسد که ترکیب نمودن دو سیستم مذکور می تواند ظرفیت اتلاف انرژی را به شکل قابل ملاحظه ای افزایش دهد. از دیدگاه انرژی این موضوع ملموس تر است.

میراگرها بر اساس تسلیم خمشی است (عموماً از برش-تسلیم نظیر خمش در مدلسازی استفاده می شود) و از این طریق، ظرفیت اتلاف انرژی را افزایش می دهند. هنگامی که میراگر ADAS تحت اثر نیروی جانبی قرار می گیرد تغییرشکلهای صفحات فولادی به صورت انحنای مضاعف خواهد بود. این نوع میراگرها، عموماً در زیر تیر طبقه و بر روی عضو تکیه گاهی مهاربندهای جناقی قرار می گیرند. جا به جایی میان طبقه ای باعث می شود که قسمت بالای ADAS نسبت به پایین آن یک حرکت نسبی داشته باشد (شکل ۳).



شکل (۳): میراگر ADAS و نحوه تغییرشکل آن [۲]

با تسلیم صفحات فولادی، میراگر ADAS مقدار زیادی از انرژی ورودی زمین لرزه را جذب می کند و از آنجایی که عمل تسلیم در یک عضو فیوز مانند رخ می دهد علاوه بر اینکه اتلاف انرژی در یک محل خاص محدود و متمرکز می شود باعث ایمنی سایر اعضای سازه ای خواهد شد. یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر در رفتار قابهای مجهز به ADAS، مستقل بودن رفتار هیسترتیک آنها نسبت به سرعت است که می تواند رفتار چرخه ای پایداری را در پی داشته باشد (شکل ۴). این موضوع در خلال آزمایشهای صورت گرفته ثابت شده است [۳].

میراگرهای ADAS در حقیقت نوعی تیر رابط مشابه در سیستم مهاربندی خارج از مرکزند که به شکل قائم قرار گرفته اند. از مهمترین پارامترهای این نوع میراگرها ظرفیت برشی (V_p) ، خمشی (M_p) و سختی برشی آنهاست که مقادیر آنها بر اساس مرجع [۴] عبارتند از:

$$V_p = 0.5 f_y b_o t^2 / l \quad (3)$$

$$M_p = 0.25 f_y b_o t^2 \quad (4)$$

در روابط مذکور، f_y تنش تسلیم، b_o عرض عضو، t ضخامت

۵- معادلات انرژی برای سیستم دوگانه

انرژی ورودی به یک سیستم غیرارتجاعی به هنگام وقوع زمین لرزه عموماً توسط میرایی لزج و تسلیم اعضا تلف می شود. قسمتهای مختلف انرژی با انتگرال گیری از معادله حرکت (معادله ۵) حاصل می شود [۵]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{g}(t) \quad (5)$$

عبارت $f_s(u, \dot{u})$ نیروی مقاوم برای سیستم الاستو-پلاستیک است:

$$\int_0^u m\ddot{g}(t) du + \int_0^u c\dot{g}(t) du + \int_0^u f_s(u, \dot{g}(t)) du = - \int_0^u m\ddot{g}(t) du \quad (6)$$

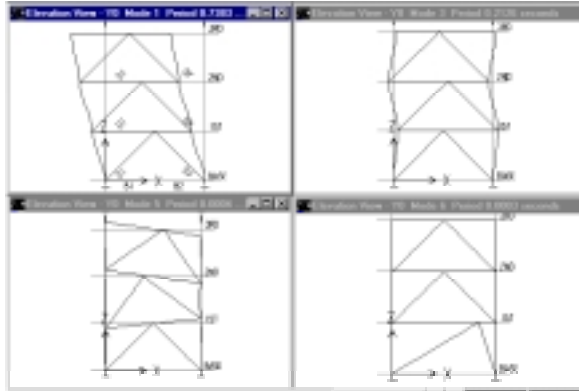
در رابطه (۶)، $\int_0^u m\ddot{g}(t) du$ انرژی جنبشی، $\int_0^u c\dot{g}(t) du$ انرژی میرایی، $\int_0^u f_s(u, \dot{g}(t)) du$ انرژی تسلیمی و کرنشی و $\int_0^u m\ddot{g}(t) du$ انرژی ورودی می باشد.

سمت راست معادله (۶) کل انرژی ورودی به سازه را از هنگام تحریک تا مرحله رسیدن به جا به جایی (u) نشان می دهد. اگر انرژی ورودی به سازه ثابت فرض شود، هرچه مقدار انرژی جذب شده بیشتر شود، از انرژی ارتعاش ارتجاعی کاسته می شود. به عبارت دیگر، هرگاه نسبت جذب انرژی به انرژی ورودی به سازه افزایش یابد خسارتهای سازه ای و غیرسازه ای محتمل است. اگر بتوان سیستمی را پدید آورد که از طریق افزایش میرایی و یا از طریق رفتار غیرخطی، انرژی ورودی را مستهلک کند می توان با انرژی ورودی به سازه مقابله نمود که حاصل آن کاهش پتانسیل خسارت است. رفتار مناسب میراگرهای ADAS و تیرهای رابط در سیستم های EBF در افزایش میرایی هیسترتیک می توانند سهم زیادی از انرژی ورودی را تلف کنند. از این رو، معادله انرژی به واسطه قرار گرفتن یک عضو غیرفعال نظیر ADAS به شکل رابطه (۷) تغییر می کند که در آن بخش چهارم انرژی، انرژی تلف شده ناشی از عضو غیرفعال است [۶]:

$$\int_0^u m\ddot{g}(t) du + \int_0^u c\dot{g}(t) du + \int_0^u f_s(u, \dot{g}(t)) du + \int_0^u \eta u du = - \int_0^u (m + \bar{m})\ddot{g}(t) du \quad (7)$$

پارامتر η در این بخش انرژی، ماتریس اپراتور میراگر غیرفعال است و \bar{m} جرم میراگر است که عموماً در مدل سازی کامپیوتری درصدی از جرم کل جرم طبقه برای آن منظور می شود. ذکر

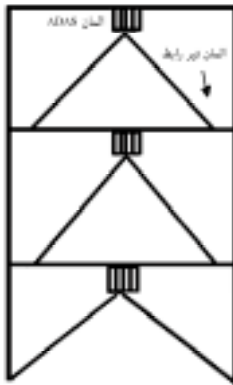
این نکته ضروری است که در یک سیستم N درجه آزادی چنانچه M میراگر غیرفعال نصب شوند سیستم جدید دارای $N + M$ درجه آزادی خواهد بود (شکل ۵).



شکل (۵): مدل ارتعاشی اول، سوم، پنجم و ششم در سیستم دوگانه پیشنهادی

۶- مدل پیشنهادی

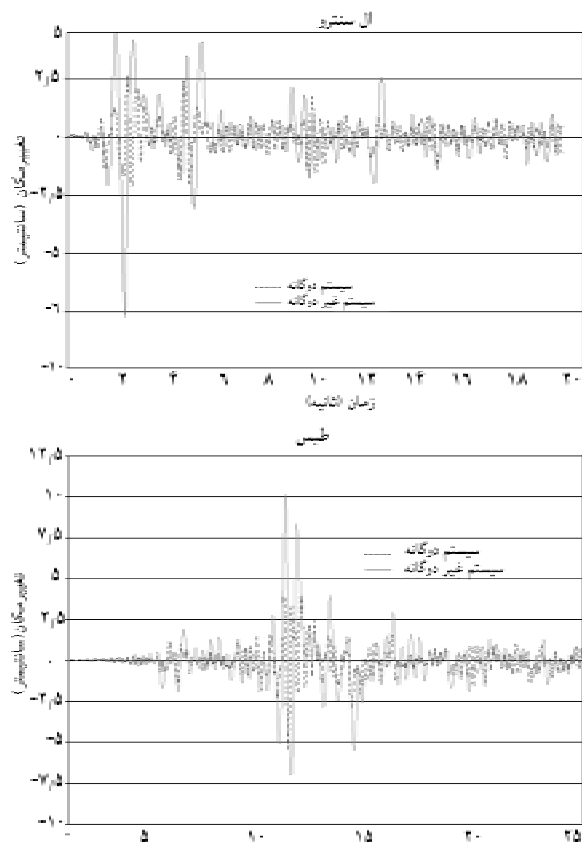
مدل پیشنهادی این مقاله مطابق شکل (۶) است. توجه استفاده از چنین سیستمی را می توان چنین ابراز کرد. "در مقاوم سازی یک قاب خمشی با میراگرهای ADAS می توان با اعمال یک خروج از مرکزیت عمدی، سیستمی با ظرفیت اتلاف انرژی به مراتب بالاتر از سیستم ADAS یا EBF ایجاد نمود بدون آنکه هزینه اجرایی اضافی در بر داشته باشد."



شکل (۶): مدل پیشنهادی برای سیستم دوگانه ADAS-EBF

در این تحقیق سعی شده است تیرهای رابط و میراگرهای ADAS تقریباً به شکل همزمان تسلیم شوند. به عبارت دیگر ظرفیت برشی دو عضو یکسان در نظر گرفته شده است. البته تقدم و تأخر در تسلیم اعضای مذکور به

برای این دو سیستم، منحنی های انرژی مطابق شکل (۸) می باشد. رفتار مناسب میراگرهای ADAS در این دو سیستم غیرقابل انکار است؛ اما، پایین آمدن سطح تراز انرژی ورودی به سازه به علت کاهش تغییرمکانهای طبقاتی و تأثیر مدهای بالاتر در سیستم دوگانه نکته ای در خور توجه می باشد.



شکل (۷): تاریخچه زمانی تغییرمکان بام در دو سیستم دوگانه و غیردوگانه

کاهش برش پایه نیز از دیگر مزایای استفاده از سیستم دوگانه است که تاریخچه زمانی آنها مطابق شکل (۹) می باشد. شکل مذکور نشان می دهد که برش پایه در سیستم دوگانه تحت زمین لرزه های ال ستررو و طیس کمتر از سیستم غیردوگانه است.

شکل (۱۰) منحنی های هیسترتیک میراگر ADAS و تیرهای رابط برشی طبقه اول را نشان می دهد. منحنی هیسترتیک میراگر ADAS در سیستم غیردوگانه رفتار چرخه ای

اهمیت سازه و پارامترهای دیگر بستگی دارد. اگر فرض شود دو عضو همزمان عمل می کنند باید رابطه (۸) برقرار باشد:

$$\frac{1}{\sqrt{3}} f_y dt_w = n \times \frac{1}{2} f_y b_o t^2 / l \quad (8)$$

در این رابطه، n تعداد صفحات فولادی میراگر ADAS است.

۷- مشخصات قاب

برای بررسی رفتار قاب مجهز به میراگرهای ADAS و تیرهای رابط برشی یک قاب تک دهانه سه طبقه در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقات ۳/۷۵ متر و عرض دهانه قاب ۷/۵ متر می باشد. نگاشت استفاده شده در این مثال، زمین لرزه ال ستررو و طیس است. مشخصات سختی و برش تسلیم میراگرهای ADAS مطابق جدول (۱) می باشد.

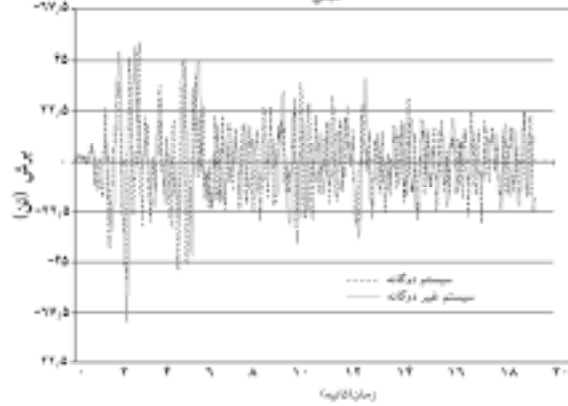
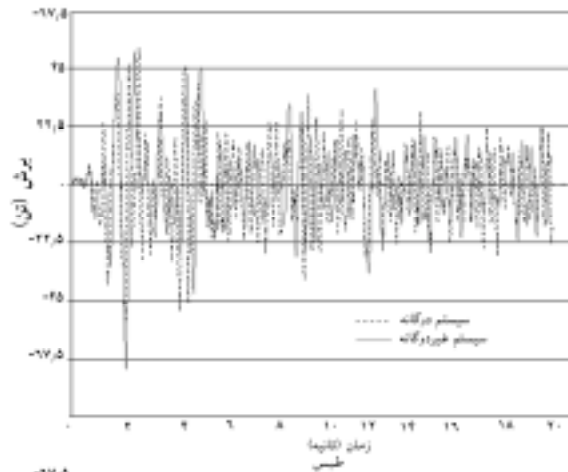
جدول (۱): مشخصات عمومی میراگر و تیرهای رابط

طبقه	سختی (تن بر سانتیمتر)	برش تسلیم (تن)
اول	۴۵	۱۷/۱
دوم	۳۶	۱۳/۶
سوم	۱۸	۶/۴

۸- نتایج

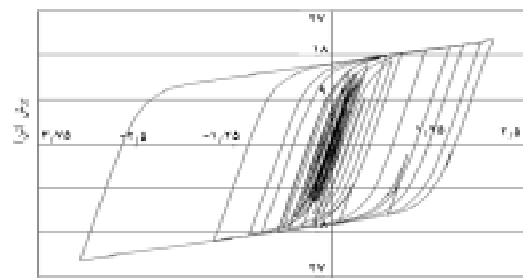
پارامترهای مورد قیاس تغییرمکان طبقه بام، انرژی ورودی و تلف شده، برش پایه و منحنی های هیسترتیک می باشند. نتایج نشان می دهد که استفاده از سیستم دوگانه ADAS-EBF تغییرمکان طبقات را به طور عمده کاهش می دهد. ایجاد تغییرمکانهای بزرگ طبقاتی در قابهای مجهز به میراگرهای ADAS همواره قابل انتظار بوده است. اگرچه، چنین قابهایی همواره نظم خاصی را در تغییرمکانهای نسبی طبقاتی دارند. شکل (۷) منحنی های تاریخچه زمانی تغییرمکان طبقه فوقانی را برای دو سیستم قاب مجهز به میراگرهای ADAS و قاب مجهز به سیستم دوگانه ADAS-EBF نشان می دهد.

یکی دیگر از پارامترهای اساسی که حاوی اطلاعات زیادی در ارتباط با رفتار قاب می باشد منحنی های انرژی است.



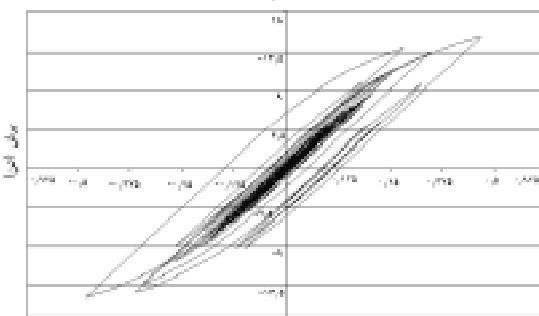
شکل (۹): تاریخچه زمانی برش پایه در دو سیستم دوگانه و غیردوگانه

المان ADAS در سیستم غیر دوگانه (ال استرو)

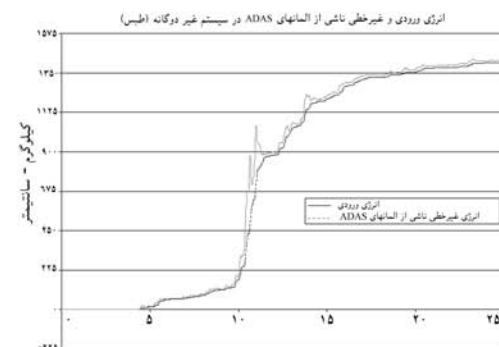
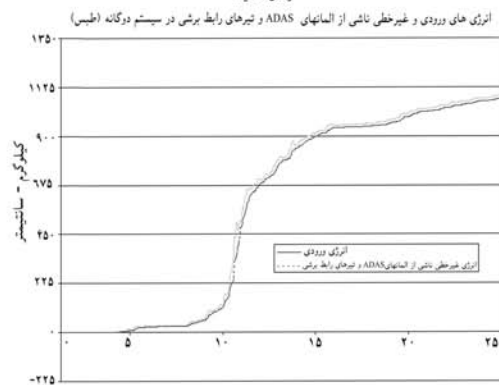
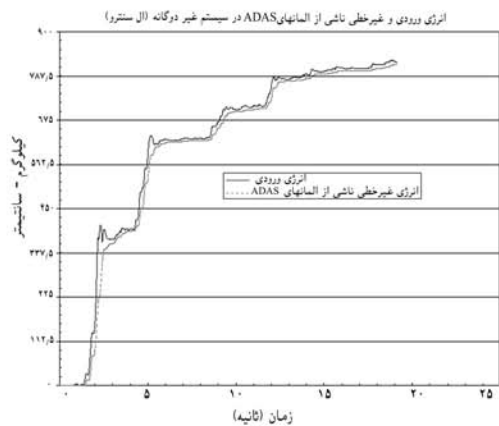
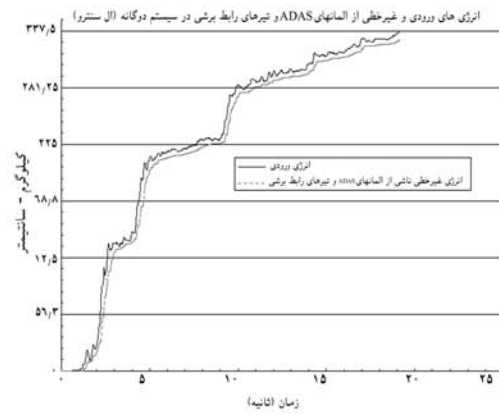


تعبیر مکان استاتیوا

المان تیر رابط در سیستم دوگانه (ال استرو)



تعبیر مکان استاتیوا



شکل (۸): تاریخچه زمانی انرژی ورودی و غیرخطی دو سیستم دوگانه و غیردوگانه

شکل (۱۰): نمونه چرخه های هیسترتیک میراگرهای ADAS و تیرهای رابط برشی در دو سیستم های دوگانه و غیردوگانه



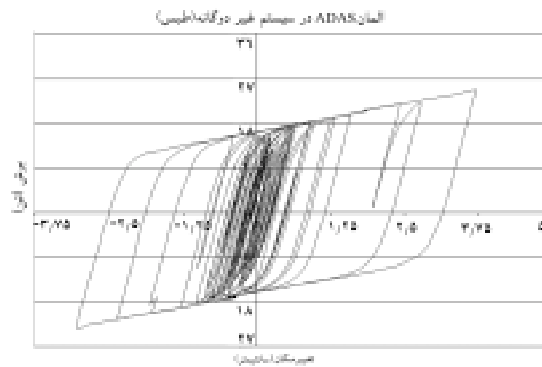
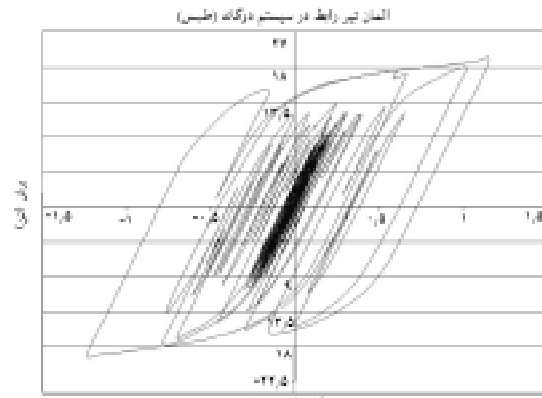
شکل (11): رفتار هیسترتیک کلی در سیستم های دوگانه و غیردوگانه

پارامترهای دیگر در سیستم دوگانه می تواند توجیهی در بررسی بیشتر این نوع سیستم ها در آینده باشد.

۱۰- مراجع

1. Kasai, K., & Popov, E.P., "A Study of Seismically Resistant Eccentrically Braced Frames", Report No. UCB/EERC-86/01.
2. Scholl, E., Roger, "Improve the Earthquake Performance of Structures with Added Damping and Stiffness Elements", Proceedings of Fourth U.S.
3. Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Alonso, L.J., & Thompson, C.L "Earthquake Simulator Testing of Steel Plate", Report No. UCB/EERC-89/02.
4. Xia, C., & Hanson, R., "Influence of ADAS Element Parameters on Building Seismic Response", ASCE Journal, Vol. 18-No. 6, 1992.
5. Chopra, A.K., "Dynamics of Structures", Prentice Hall Edition.

۶- کاربرد سیستم های غیرفعال در مهندسی سازه، تألیف T.T. Soong, G. Dargoush، ترجمه مهران تپو و بابک کریمخانی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (در دست انتشار). ▶



شکل (1۰): نمونه چرخه های هیسترتیک میراگرهای ADAS و تیرهای رابط برشی در دو سیستم های دوگانه و غیردوگانه

پایدار بدون کاهش سختی را از خود نشان می دهد که سطح بزرگتری را در مقایسه با منحنی هیسترتیک میراگرهای ADAS در سیستم دوگانه دارد؛ اما، به علت ایجاد فیوزهای شکل پذیر بیشتر در سیستم دوگانه عملکرد بهتری در این سیستم مورد انتظار است.

اگر منحنی تغییرمکان بام بر حسب برش پایه به عنوان رفتار هیسترتیک کلی سازه تلقی شود، سطح بزرگتری برای سیستم دوگانه وجود خواهد داشت (شکل ۱۱).

۹- نتیجه گیری

رفتار قابهای مجهز به میراگر ADAS را می توان با ایجاد یک خروج از مرکزیت عمدی بهبود قابل ملاحظه ای داد. این عمل، نه تنها هزینه اضافی در بر ندارد، بلکه طرح نهایی را می تواند اقتصادی تر نماید. در این مقاله، نیروهای محوری بادبند در سیستم دوگانه نسبت به سیستم غیردوگانه افزایش قابل ملاحظه ای داشته اند؛ اما، کاهش