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
ساسان 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 برنامهٔ *ETABS 7.171 Nonlinear 2001* استفاده شده است.

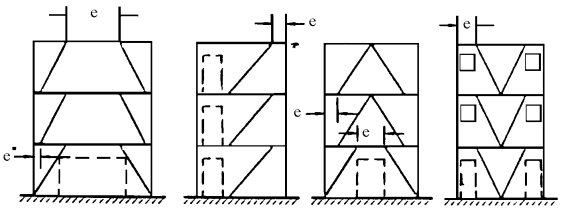
کلیدواژه ها: کنترل سازه، کنترل غیرفعال، کنترل دوگانه، دینامیک سازه ها.

۲- مقدمه

تغییرمکان 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- شکلهای ماندگار دچار مشکل نماید. از سوی دیگر، رفتار قابهای مهاربندی شده هم مرکز *(Conccentrically Braced Frames) CBF* به دلیل رفتار خرپایی این قابها، اثر قابل توجهی بر کنترل میزان تغییرمکان 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 جامعهٔ 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 صفحهٔ 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 شکلهای 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



شکل (۱): انواع قابها با مهاربندی خارج از مرکز [۱]

تغییرشکلهای غیـر ارتجاعی پایداری خود را از دست ندهد و تمامی تغییرشکلهای غیرخطی و یا اتلاف انرژی در این تیر رابط متمرکـز شود. در چنین سیستمی، نیروی محوری مهاربند از طـریق برش و خمش ایجاد شده در تیر رابط به مهاربندهای دیگـر و یـا ستونها منتقل می شود. این تیر رابط همانند یک فـیوز شـکل پذیـر عمـل مـی کند و مانع کمانش مهاربندها مـی شـود. یکـی از مهمتریـن پارامترهایی که در نحوهٔ رفتار سیسـتم هـای مهاربندی شده خارج از مرکز نقش اساسی را ایفـا مـی کـند طول تیر رابط است. در واقع دستیابی به یک رفـتار مطلـوب توأم با سختی و شکل پذیری مناسب در یک سیسـتم *EBF* بـه تعییـن طـول مناسـب برای این نوع عضو بستگی بسیاری دارد.

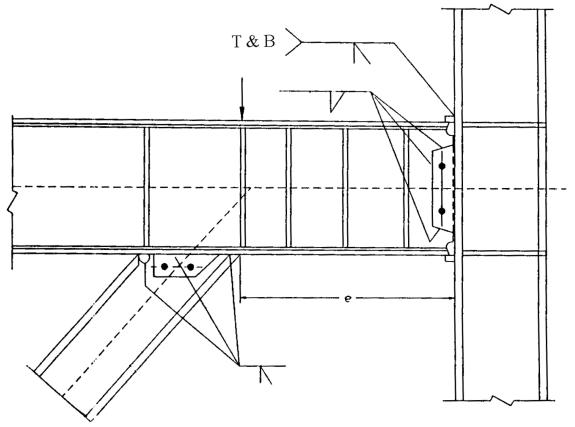
رفـتار تـیرهای رابـط بلـند تحـت بارهـای رفت و برگشتی شـدید در مقایسـه بـا تـیرهای رابـط کوتـاه از نظر سختی و مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی قابل مقایسه نبوده و در سطح پاییـن تری قرار دارد. عموماً عملکرد تیرهای رابط کوتاه بهتر گـزارش شـده است. در یک سیستم مطلوب انتظار می رود که تـیر رابط در برابر زلزله های شدید رفتار غیرارتجاعی از خود نشـان دهـد و یـک سازوکار پایدار بدون کاهش سختی را به وجـود آورد و بـه واسطهٔ آن حداکثر نیروهای قابل اعمال به تیرها و ستونهای قاب را محدود نماید.

مهمتریـن عامل تحریک کننده تیر رابط و انتقال دهندهٔ آن به فاز غیرارتجاعی، طول آن است. در تیرهای رابط کوتاه رفتار تسلیم برشی حاکم است و به عکس برای تیرهای رابط بلـند تسـلیم خمشـی تعییـن کننـده خواهد بود. در تیرهای رابـط خیلـی کوتـاه قـبل از رسـیدن لـنگر انتهایـی به لنگر پلاستیک (M_p)، نیروی برشی به برش پلاستیک (V_p) خواهد-رسـید. بـه عبارت دیگر، تسلیم برشی به شکل مفصل برشی اتفـاق خواهـد افـتاد (مفصـل پلاسـتیک برشی در تیرهای I شکل به صورت طبله شدن جان مقطع است). بـرای تیرهای I شکل، این مقادیر عبارتند از [۱]:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{3}} f_y d t_w \quad M_p = Z f_y \qquad (۱)$$

در رابطـه (۱)، f_y تـنش تسـلیم، d ارتفـاع مقطـع، t_w جان مقطع، و Z اساس مقطع پلاستیک است.

به منظور اطمینان در کنترل رفتار تیر رابط و تسلیم شدن برشی آنها، کاسای و پوپوف [۱] رابطه (۲) را برای طول تیر رابط پیشنهاد کرده اند (شکل ۲):



شکل (۲): جزئیات تیر رابط

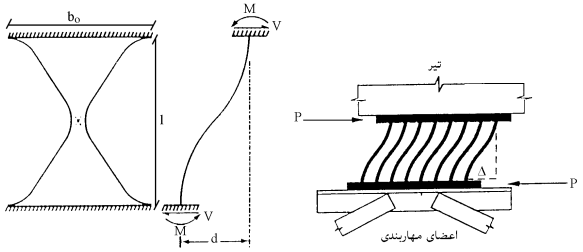
$$e \le 1.6 \frac{M_p}{V_p} \qquad (۲)$$

سازوکار تسلیم برشی تیرهای رابط کوتاه بهتر از سازوکار تسـلیم خمشـی تیرهای رابط بلند است؛ زیرا نیروهای برشی در تمـام طـول رابـط ثابت بوده و کرنشهای برشی غیرخطی بـه طـور یکنواخـت در طـول تیر رابط توزیع می شوند. این عمـل، باعـث ایجـاد دورانهـای غیرارتجاعی بزرگ در تیرهای رابط کوتاه بدون ایجاد کرنشهای موضعی خیلی زیاد خواهد-شـد. بـه نظر می رسد تیرهای رابط کوتاه مؤثرترین سیستم اتـلاف انرژی می باشند که شکل پذیری بالایی دارند. در این مقاله، از تیر رابط برشی برای بررسی استفاده شده است.

۴- میراگرهای ADAS

اعضـایی کـه افزایـندهٔ سـختی و میرایـی انـد *(ADAS)* دسـتگاههایی مـی باشـند کـه از تعـدادی صـفحات فولادی موازی تشکیل شده اند (شکل ۳). میراگرهای *ADAS* در زمرهٔ سیسـتم های غیرفعال می باشند. صفحات فولادی عموماً به شکل X (شکل ساعت شنی) ساخته می شوند. عملکرد این نوع

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 (شکل۳).



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

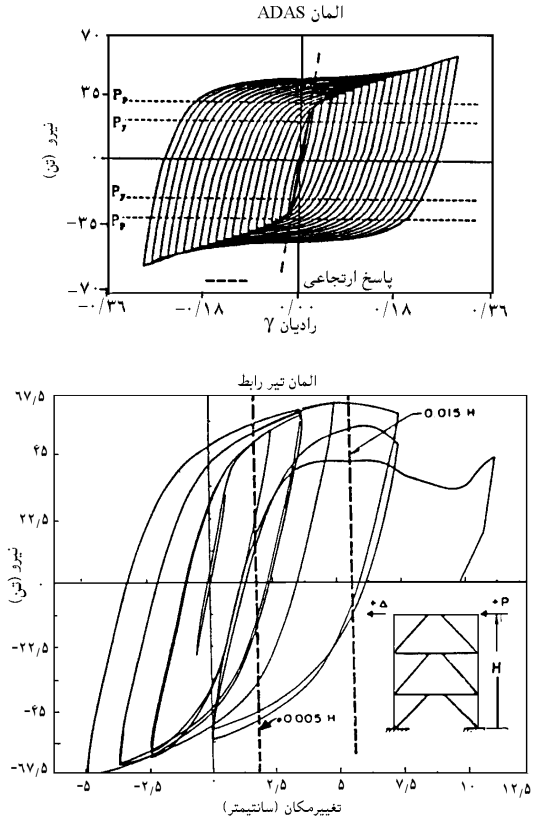
با تسلیم صفحات فولادی، میراگر *ADAS* مقدار زیادی از انرژی ورودی زمین لرزه را جذب می کند و از آنجایی که عمل تسلیم در یک عضو فیوز مانند رخ می دهد علاوه بر اینکه اتلاف انرژی در یک محل خاص محدود و متمرکز می شود باعث ایمنی سایر اعضای سازه ای خواهد شد. یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر در رفتار قابهای مجهز به *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:

$$V_p = 0.5 f_y b_o t^2 / l \qquad (۳)$$

$$M_p = 0.25 f_y b_o t^2 \qquad (۴)$$

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



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

صفحهٔ 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.

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]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_S(u,\dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \qquad (۵)$$

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

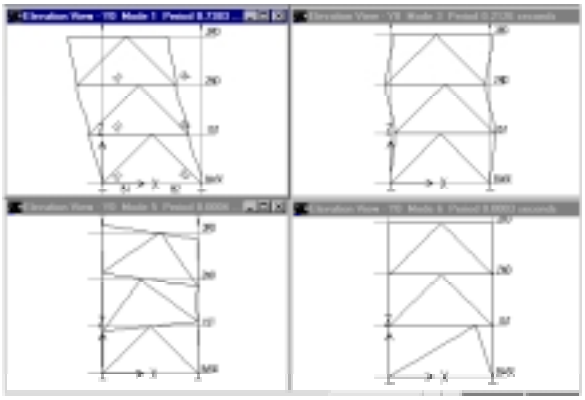
$$\int_0^u m\ddot{u}(t)\,du + \int_0^u c\dot{u}(t)\,du + \int_0^u f_S(u,\dot{u})\,du = -\int_0^u m\ddot{u}_g(t)\,du \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، $\int_0^u m\ddot{u}(t)\,du$ انرژی جنبشی، $\int_0^u c\dot{u}(t)\,du$ انرژی میرایی، $\int_0^u f_S(u,\dot{u})\,du$ انرژی تسلیمی و کرنشی و $\int_0^u m\ddot{u}_g(t)\,du$ 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 واسطهٔ 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]:

$$\int_0^u m\ddot{u}(t)\,du + \int_0^u c\dot{u}(t)\,du + \int_0^u f_S(u,\dot{u})\,du + \int_0^u \eta\, u\,du = -\int_0^u (m+\bar{m})\ddot{u}_g(t)\,du \qquad (۷)$$

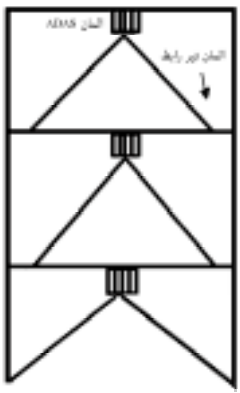
پارامتر η در این بخش انرژی، ماتریس اپراتور میراگر غیرفعال است و $\bar{m}$ جرم میراگر است که عموماً در مدلسازی کامپیوتری درصدی از جرم کل جرم طبقه برای آن منظور می شود. ذکر این نکته ضروری است که در یک سیستم N درجه آزادی چنانچه M میراگر غیرفعال نصب شوند سیستم جدید دارای $N+M$ درجه آزادی خواهد بود (شکل ۵).



شکل (۵): مد ارتعاشی اول، سوم، پنجم و ششم در سیستم دوگانهٔ پیشنهادی

۶- مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی این مقاله مطابق شکل (۶) است. توجیه 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 دوگانهٔ *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

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

$$\frac{1}{\sqrt{3}} f_y dt_w = n \times \frac{1}{2} f_y b_o t^2 / l \qquad (۸)$$

در این رابطهٔ، 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 لرزهٔ ال سنترو و طبس است. مشخصات سختی و برش تسلیم میراگرهای *ADAS* مطابق جدول (۱) می باشد.

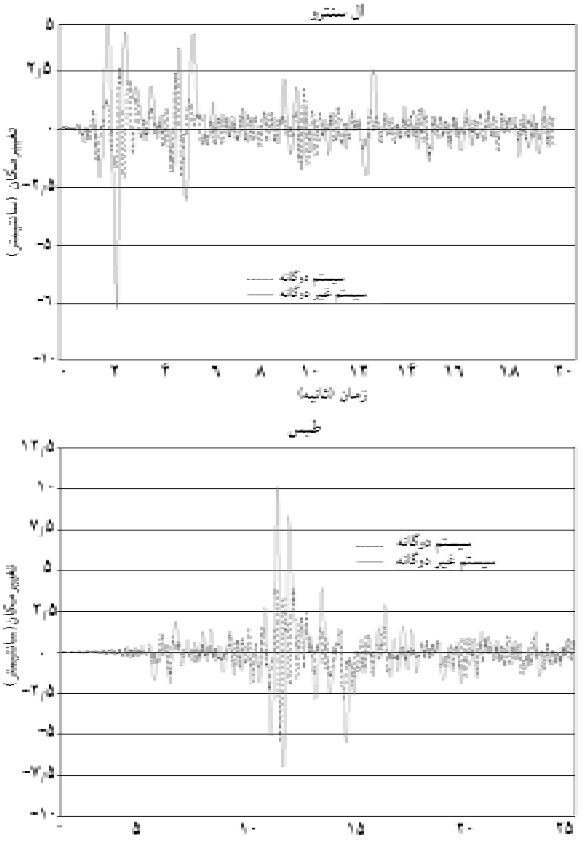
جدول (۱): مشخصات عمومی میراگر و تیرهای رابط

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 طبقهٔ بام، انرژی های 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.

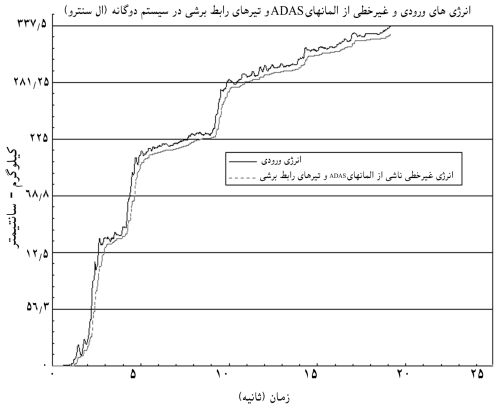
یکی دیگر از پارامترهای اساسی که حاوی اطلاعات زیادی در ارتباط با رفتار قاب می باشد منحنی های انرژی است. برای این دو سیستم، منحنی های انرژی مطابق شکل (۸) می باشد. رفتار مناسب میراگرهای *ADAS* در این دو سیستم غیرقابل انکار است؛ اما، پایین آمدن سطح تراز انرژی ورودی به سازه به علت کاهش تغییرمکانهای طبقاتی و تأثیر مدهای بالاتر در سیستم دوگانه نکته ای در خور توجه می باشد.

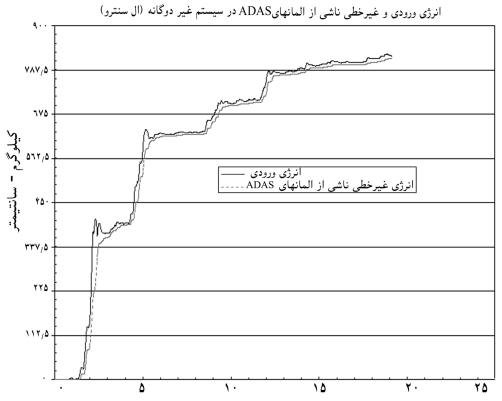


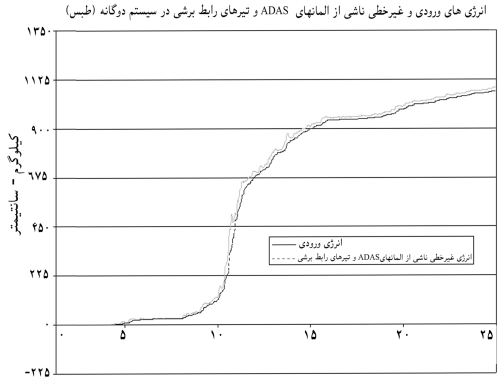
شکل (۷): تاریخچه زمانی تغییرمکان بام در دو سیستم دوگانه و غیردوگانه

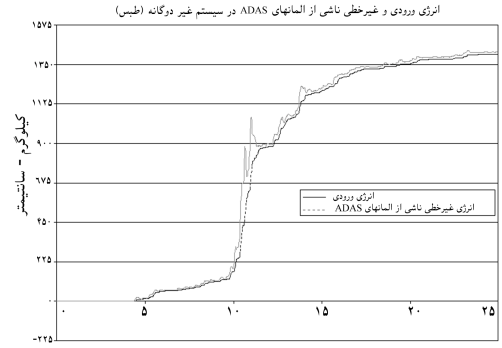
کاهش برش پایه نیز از دیگر مزایای استفاده از سیستم دوگانه است که تاریخچه زمانی آنها مطابق شکل (۹) می باشد. شکل مذکور نشان می دهد که برش پایه در سیستم دوگانه تحت زمین لرزه های ال سنترو و طبس کمتر از سیستم غیردوگانه است.

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

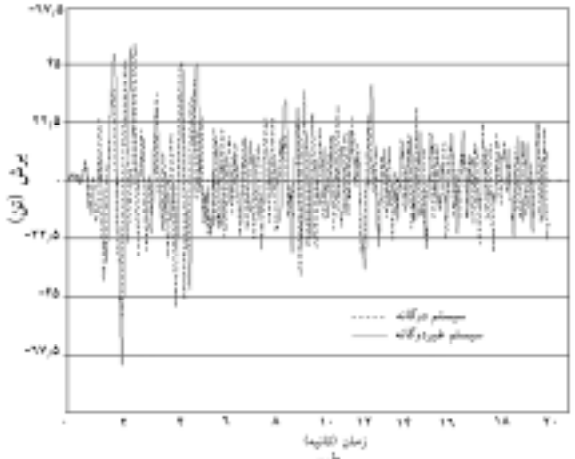




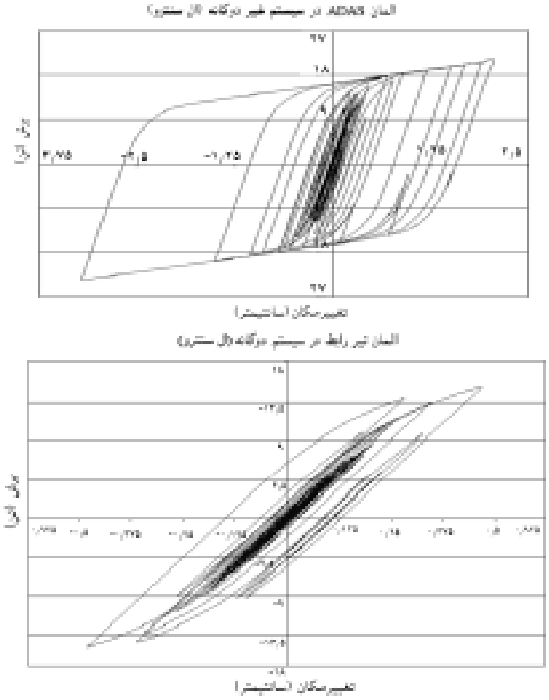




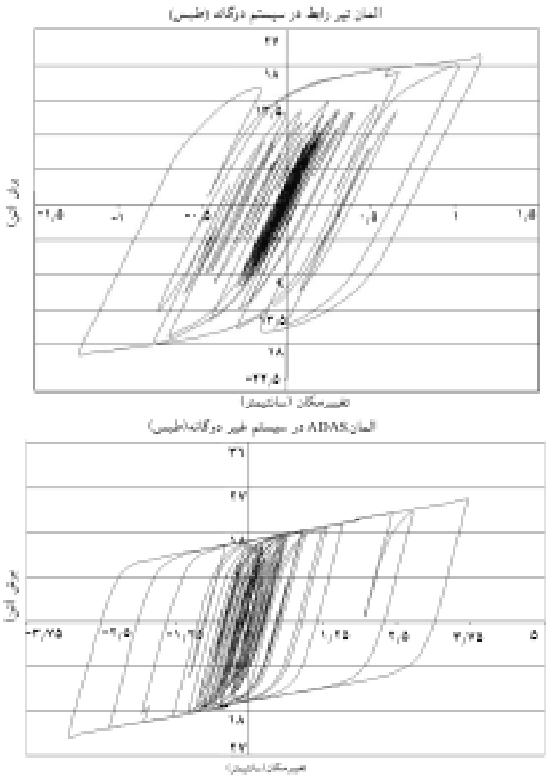
شکل (۸): تاریخچه زمانی انرژی های ورودی و غیرخطی دو سیستم دوگانه و غیردوگانه



شکل (۹): تاریخچه زمانی برش پایه در 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 (۱۰): 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 بزرگـتری را در مقایسـه بـا منحنـی هیسترتیک میراگرهای *ADAS* در سیسـتم دوگانـه دارد؛ اما، به علت ایجاد فیوزهای شـکل پذیـر بیشتر در سیستم دوگانه عملکرد بهتری در این سیستم مورد انتظار است.

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

۹- نتیجه گیری

رفـتار قابهای مجهز به میراگر *ADAS* را می توان با ایجاد یـک خـروج از مرکزیـت عمدی بهبود قابل ملاحظه ای داد. این عمل، نه تنها هزینه اضافی در بر ندارد، بلکه طرح نهایی را مـی توانـد اقتصـادی تـر نمـاید. در ایـن مقالـه، نـیروهای محـوری بادبـند در سیسـتم دوگانـه نسـبت بـه سیسـتم غیردوگانه افـزایش قـابل ملاحظه ای داشته اند؛ اما، کاهش

شکل (۱۱): رفتار هیسترتیک کلی در سیستم های دوگانه و غیردوگانه

پارامـترهای دیگـر در سیسـتم دوگانـه 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., "Influnce 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 تیو و بابک کریمخانی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (در دست انتشار). ◄