

# کاربرد صفحات مثلثی جاری شونده جهت بهبود رفتار لرزه‌ی سازه‌های با دیوار برشی بتنی مسلح

سید مهدی زهرایی\* (استاد)

محمدرضا شبانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)  
دوره ۲ - ۳۴، شماره ۱/۱، ص. ۱۱-۳

سازه‌های با دیوار برشی بتنی، علی‌رغم تمامی مزیت‌های موجود، از نقایصی نیز رنج می‌برند. از جمله‌ی آنها می‌توان به سختی فراتر از نیاز جهت ارضاء محدودیت‌های جابه‌جایی آیین‌نامه‌ی و در نتیجه‌ی آن، انعطاف‌پذیری کم و نیاز بیشتر به شکل‌پذیری سازه در برابر بارهای جانبی زلزله نام برد. همچنین عدم توجه کافی به محل اتصال دیوار به سقف‌های سازه، می‌تواند در اثر ناکافی بودن ظرفیت برشی ناحیه‌ی اتصال، باعث آسیب‌های جدی به سازه در هنگام زلزله بشود. به همین منظور، در نوشتار حاضر تلاش شده است تا با استفاده از چیدمانی نوین از میراگرهای تغییر مکانی فولادی، ضمن تعدیل سختی خیلی زیاد، نیروهای لرزه‌ی وارد بر سازه را کاهش و با جلوگیری از معایب احتمالی، رفتار سازه را بهبود داد. این میراگرها به نحوی استفاده شده‌اند که بیشترین تغییر مکان‌ها را تجربه کنند و استهلاک بالایی از انرژی را فراهم آورند. در انتها، ضمن بررسی مثال عددی نشان داده شده است که با روش مذکور، دوره‌ی تناوب مود اول سازه افزایش چشم‌گیر می‌یابد و به‌عنوان مثال، شتاب مطلق و برش پایه‌ی ساختمان فولادی ۴ طبقه با دیوارهای برشی بتنی می‌تواند تا ۴۰٪ کاهش یابد.

واژگان کلیدی: دیوار برشی بتنی، میراگر جاری شونده‌ی صفحه مثلثی، رفتار لرزه‌ی، استهلاک انرژی، برش پایه.

mzahrai@ut.ac.ir  
mhr.sheibani@gmail.com

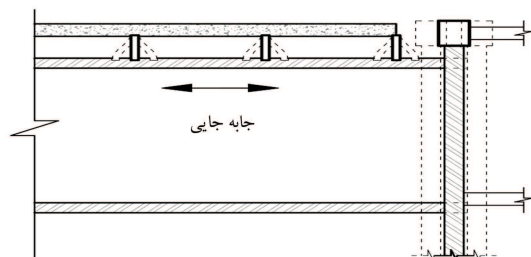
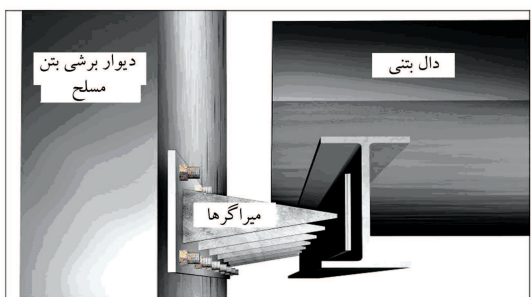
## ۱. مقدمه

پس از تغییر رویکرد مهندسان در استفاده از روش‌های طراحی براساس عملکرد نسبت به طراحی براساس مقاومت، استفاده از روش‌های کنترل حرکت سازه با اقبال بیشتری از سوی مهندسان همراه شد. اما استفاده از دیوار برشی بتنی که اکنون به‌صورت بسیار گسترده استفاده می‌شود، نیازمند روش‌هایی برای بهبود کاستی‌ها و کاهش نقص‌های طراحی و اجرایی است. محدودیت‌های آیین‌نامه‌ی مانند کمیته‌ی ضخامت دیوار، نسبت سطح مقطع آرمان‌تور به سطح مقطع مؤثر، ناحیه‌ی المان مرزی، ازدحام آرمان‌تورهای پی در مجاورت دیوار برشی و محدودیت‌های اجرایی مانع از طراحی مناسب دیوار برای سختی موردنیاز سازه می‌شود. این مسئله باعث ایجاد سختی جانبی اضافی و در نتیجه انعطاف‌پذیری کم و نیاز بیشتر به شکل‌پذیری سازه می‌شود.<sup>[۱]</sup> دوره‌ی تناوب بسیار پایین مودهای ارتعاشی در سازه‌های دیوار برشی بتنی، همواره موجب بالا رفتن نیروها، از جمله: برش پایه و همچنین بالا بودن شتاب مطلق طبقات در هنگام اعمال بارهای جانبی بوده است. از میراگرها به‌عنوان یکی از بهترین وسایل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۷/۷، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۲۹، پذیرش ۱۳۹۵/۴/۲۹

DOI: 10.24200/J30.2018.1327



الف) نمای شماتیک نحوه ی اتصال قطعات TADAS به سقف؛  
ب) تغییر مکان سازه نسبت به دیوار برشی در پلان ( حرکت سازه نسبت به دیوار برشی یا خط چین نمایش داده شده است).

شکل ۱. موقعیت قرارگیری میراگرهای صفحه ملشی بین تیر سقف و دیوار برشی بتن مسلح.

قطعات TADAS به صورتی است که علاوه بر استفاده از استهلاک انرژی فراهم شده توسط آنها، سختی شان به صورت سری با سختی دیوار برشی قرارگیرد و سختی کلی سازه نیز کاهش یابد. به سبب این کاهش سختی، افزایش تغییر مکان های سازه تا حد مجاز تعیین شده نسبت به حالت دیوار برشی معمولی اتفاق می افتد که در اثر این افزایش تغییر مکان و در نتیجه تسلیم قطعات TADAS، سختی سازه کاهش می یابد و دوره ی تناوب مود اول آن افزایش می یابد و سازه از منطقه ی بحرانی در طیف زلزله، فاصله می گیرد.

## ۲. مدل سازی و تحلیل عددی

به منظور بررسی موضوع ذکر شده، یک ساختمان ۴ طبقه با پلان مستطیل شکل به ابعاد  $8 \times 12$  متر و ارتفاع طبقات ۳ متر و با اسکلت فلزی، یک بار با دیوار برشی بتنی به صورت سنتی و متصل به سقف و سازه و بار دیگر به صورت جداسازی شده توسط قطعات TADAS، در نرم افزار SAP2000 مدل شده است. قاب خمشی سازه نیز به منظور بهره گیری از عملکرد دوگانه، برای ۲۵٪ از نیروی زلزله طراحی شده است. المان های طراحی شده برای سازه عبارت اند از:

- ستون ها:  $160 \times 160 \times 8$  mm Box
- تیرها در جهت قاب خمشی: IPE200
- تیرها در جهت عمود بر قاب خمشی: IPE180
- ضخامت سقف کامپوزیت: ۱۰ cm

مفاصل خمیری به صورت Fiber section برای تیرها و ستون ها در نظر گرفته شده است، تا رفتار غیرخطی اعضا مذکور مدل شود. همچنین به منظور بهره گیری از شکل پذیری بیشتر، ضخامت کمیته ی ۱۵ سانتی متر توصیه شده در آیین نامه برای

از چرخه های هیستریزیس که در اثر جاری شدن مصالح آن به وجود می آید، به خوبی اتلاف انرژی می کنند و میرایی قابل قبولی برای سازه فراهم می آورند.

در این راستا، برخی پژوهشگران (۲۰۱۵) به وسیله ی ایجاد شکافی در دیوار و اتصال شکاف با صفحات فولادی و سوراخ های لوزی شکل درون آن تلاش کردند تا استهلاک انرژی را به قطعات فولادی منتقل کنند و از خاصیت هیستریزیس مصالح فولادی بیشترین استفاده را ببرند، و نشان دادند با استفاده از روش مذکور می توان شکل پذیری دیوار را افزایش و آسیب لرزه یی وارد بر دیوار را کاهش داد. [۵] در پژوهش دیگری (۲۰۱۴) نیز به مقایسه ی رفتار شکل های مختلف سوراخ ها در سیستم ذکر شده پرداخته شد. [۶] همچنین به منظور تقویت و بهبود رفتار دیوارهای برشی بتنی، در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۳، از اتصال نوارهای فولادی در جوه خارجی دیوار برشی به شکل های مختلف استفاده و رفتار هیستریزیس دیوار بهبود بخشیده شد. [۷]

## ۱.۱. میراگرهای تغییر مکانی TADAS

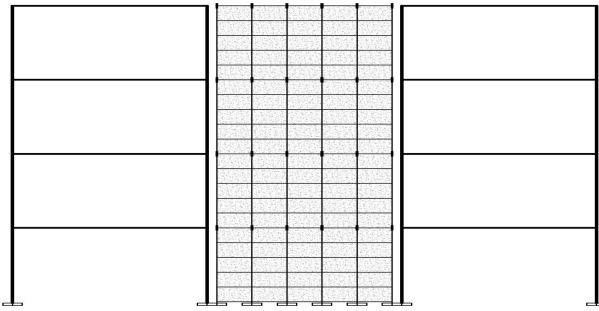
از جمله میراگرهای تغییر مکانی فولادی می توان به سیستم میراگرهای صفحات فولادی مثلثی شکل برای افزایش سختی و میرایی (TADAS) اشاره کرد. میراگرهای مذکور به دلیل استفاده از هندسه ی مثلثی شکل خود به طور یکنواخت از تمامی طول خود برای اتلاف انرژی استفاده می کنند.

آزمایش های مختلف بر روی قطعات TADAS و قاب هایی که در آنها از قطعات مذکور استفاده شده است، نشان می دهند که قطعات TADAS برای جذب انرژی بسیار قابل اطمینان هستند، و رفتار هیستریزیک پایداری حتی در تغییر مکان های تا  $14\Delta y$  تغییر مکان تسلیم قطعه) از خود نشان می دهند و برای ساختمان هایی که در منطقه با خطر لرزه یی نسبی بالا قرار گرفته اند، بسیار مناسب هستند. در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ نشان داده شد که استفاده از قطعات TADAS باعث کنترل مؤثر پاسخ غیرخطی سازه می شود و از اتلاف انرژی به وسیله ی المان های سازه یی جلوگیری و اتلاف انرژی به میراگرها تحمیل می شود. [۸]

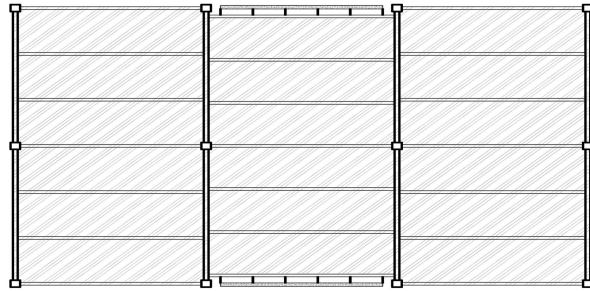
## ۲.۱. استفاده در سازه های با دیوار برشی بتنی

سیستم استفاده شده از قطعات TADAS که بیشتر مطالعات پیشین از آن بهره برده اند، به صورت قرارگیری در محل اتصال تیر پیوند باندنداست. [۹] به این ترتیب با افزایش سختی سازه و استهلاک انرژی توسط قطعات مذکور، رفتار بهبود بخشیده می شود. روش های مرور شده در ادبیات گاهی پر هزینه و غیراجرایی هستند. اما در روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، اجرا به سادگی و با هزینه ی بسیار پایین تری انجام شده است. این آرایش را به صورت مدل شده در شکل ۱ می توان مشاهده کرد.

یکی از مناطقی که می توان از قطعات TADAS استفاده کرد، در ناحیه یی است که بیشترین تنش ها بین سقف و دیوار برشی به وجود می آید. در صورت جداسازی سقف از دیوار و قرار دادن قطعات مذکور بین آنها، ضمن استفاده از مزیت های کنترلی آنها، ایراد دیگری که ناشی از کافی نبودن مقاومت برشی ناحیه ی اتصال سقف به دیوار است، نیز برطرف می شود و نیروها از طریق قطعات TADAS از سقف به دیوار منتقل می شوند. این سیستم در سازه هایی که از سقف های مرکب به صورت تیر فولادی و دال بتنی روی آن که اصطلاحاً «کامپوزیت» خوانده می شوند، می تواند مانند شکل ۱ اجرا شود. در شکل مذکور مشاهده می شود که قطعات فولادی TADAS به تعداد مناسب بین یکی از تیرچه های سقف و دیوار برشی بتنی قرار گرفته اند. در این روش دال بتنی به دیوار برشی متصل نیست و اجازه ی تغییر شکل را به قطعات TADAS می دهد. در حقیقت ایده ی استفاده از روش مذکور، قراردادن



شکل ۲. نمای کناری ساختمان مجهز به میراگرهای TADAS بدون درگیری مستقیم دیوار با تیر و ستون قاب فولادی.



شکل ۳. پلان ساختمان مجهز به میراگرهای TADAS که دیوار برشی توسط میراگرهای صفحه‌مثلثی به سقف‌های سازه وصل شده است.

جداسازی دیوار از ستون اختصاص می‌دهند. این موضوع به شکل ساده‌یی نیز در دیوارهایی که نباید نقش میان قابی داشته باشند، به‌کار می‌رود.

همچنین بارگذاری روی سازه به صورت  $1000 \text{ kg/m}$  بار مرده و  $500 \text{ kg/m}$  بار زنده بوده است. ضریب بار مرده ۱ و بار زنده  $0.25$  براساس استاندارد  $2800$  است. در اثر بارگذاری صورت گرفته روی سازه، ماتریس جرم آن نیز به صورت رابطه‌ی ۳ است:

$$M = \begin{bmatrix} 108 & 0 & 0 & 0 \\ & 108 & 0 & 0 \\ & & 108 & 0 \\ \text{sym.} & & & 108 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} 35065.47 & -19428.64 & 3729.99 & -383.59 \\ & 31379.76 & -18770.27 & 3125.45 \\ & & 30033.05 & -14495.34 \\ \text{sym.} & & & 11681.81 \end{bmatrix} \text{ kN/m} \quad (1)$$

$$K' = \begin{bmatrix} k_{11} + k_{\text{TADAS}1} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ & k_{22} + k_{\text{TADAS}2} & k_{23} & k_{24} \\ & & k_{33} + k_{\text{TADAS}3} & k_{34} \\ \text{sym.} & & & k_{44} + k_{\text{TADAS}4} \end{bmatrix} \quad (2)$$

دیوار برشی در نظر گرفته شده است. [۱۴] عملکرد غیرخطی دیوار برشی توسط حالت Shell-Layered/Nonlinear در نرم‌افزار مدل شده و مقاومت فشاری بتن  $(f'_c)$  در نظر گرفته شده است. مشخصات آرماتورهای استفاده شده در ۲ لایه به این صورت هستند:

آرماتورهای طولی  $\Phi 16 @ 200 \text{ mm}$   
آرماتورهای عرضی  $\Phi 8 @ 200 \text{ mm}$

قابل ذکر است، میراگرها در محیط نرم‌افزار به صورت لینک از نوع Plastic wen مدل شده‌اند. سازه‌ی مدل شده به صورت تاریخچه‌ی زمانی تحت اثر زلزله‌های مختلف قرار گرفته و نتایج دو حالت سستی و به همراه میراگر مقایسه شده‌اند. اما برای مدل‌سازی قطعات TADAS و تعیین توزیع سختی آنها در طبقات، نیاز به روش‌های موجود در دینامیک سازه‌هاست. به همین منظور، ابتدا سازه‌یی که بدون دیوار برشی و به صورت فقط قاب خمشی است، مدل شده و ماتریس سختی آن با استفاده از معکوس ماتریس نرمی به دست آمده است. ماتریس سختی به دست آمده در رابطه‌ی ۱ مشاهده می‌شود.

سختی قطعات TADAS که به صورت سختی موازی با قاب خمشی عمل می‌کنند، در قطر ماتریس سختی جمع می‌شوند و به این ترتیب ماتریس سختی سازه مجهز به قطعات TADAS به دست می‌آید. به دلیل سختی بسیار زیاد دیوار برشی بتنی و قرار گرفتن آن به صورت سری با قطعات TADAS، به علت سهم ناچیز جابه‌جایی، از آوردن سختی دیوار در معادلات صرف نظر شده است. ماتریس سختی سازه‌ی مجهز شده به میراگرها با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ به صورت رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید.

شایان ذکر است که مطابق شکل‌های ۱ الی ۳، دیوار برشی بتنی به اعضاء قاب خمشی از جمله تیرها و ستون‌های مجاورش مستقیماً متصل نبوده و نیروی جانبی از سقف طبقات سازه توسط میراگرهای صفحه‌مثلثی به دیوار برشی منتقل شده است. برای اتصال قطعات میراگر به دیوار برشی نیز با استفاده از ورق فولادی جای‌گذاری شده در سطح دیوار برشی بتنی و پایدار کردن آن با عبور میلگرد از دیوار (همانند اتصال صفحه ستون‌ها به پی) انجام می‌شود و قطعات صفحه‌مثلثی TADAS از یک طرف به این ورق و از طرف دیگر به تیر سقف متصل می‌شوند که در شکل ۱ به خوبی مشاهده می‌شود. امروزه بسیاری از طراحان در سازه‌های با اهمیت بالا برای جلوگیری از انتقال نیرو از دیوار به ستون‌ها و کاهش تقاضای بالا از روی ستون‌ها، دیوار برشی را به ستون متصل نمی‌کنند و فاصله‌ی اندکی را برای

می‌دانیم معادله‌ی حاکم بر سیستم‌های دینامیکی به صورت رابطه‌ی ۴ است:

$$K\phi = \omega^2 M\phi \quad (4)$$

اما برای به دست آمدن تغییر مکان‌های مشابه با سازه‌ی سنتی در مود اول سازه، می‌توان شکل مودی  $\phi$  را به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف کرد و آن را در رابطه‌ی ۴ قرار داد:

$$\phi^{*T} = [0.12 \quad 0.36 \quad 0.67 \quad 1.00] \quad (5)$$

با توجه به ماتریس‌های سختی و جرم به دست آمده در رابطه‌های ۲ و ۳ و قراردادن آن‌ها در رابطه‌ی ۴ می‌توان سختی‌های موردنیاز برای مقاطعات TADAS را محاسبه کرد. اما برای این منظور به بسامد زاویه‌ی سازه نیز نیاز است که آن را می‌توان به این صورت به دست آورد: ابتدا میزان تغییر مکان‌های نسبی طبقات (دریفت) تعیین می‌شود و به وسیله‌ی آن می‌توان میزان تغییر مکان بام سازه را به دست آورد. میزان دریفت برای طبقات سازه ۰/۷۵٪ در نظر گرفته می‌شود که با توجه به ارتفاع طبقات، میزان بیشترین تغییر مکان بام سازه، ۹ سانتی‌متر به دست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۶، بسامد زاویه‌ی به دست می‌آید:

$$\omega^2 = \frac{\phi_{roof}^* C_0 S_a}{d_{max,roof}} \quad (6)$$

که در آن،  $\omega$  بسامد زاویه‌ی سازه،  $C_0$  ضریب تغییر برای ارتباط تغییر مکان‌های طیفی،  $d_{max,roof}$  بیشینه‌ی تغییر مکان بام سازه و  $S_a$  طیف شتاب پاسخ در دوره‌ی تناوب پایه‌ی سازه است. در بخش حاضر با توجه به آیین‌نامه‌ی «FEMA۳۵۶»، ضریب  $C_0$  برابر ۱/۴ در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن بسامد زاویه‌ی سازه، طیف طرح ساخت‌گاه با معادله‌ی به دست آمده از رابطه‌ی ۶ و دوره‌ی تناوب سازه، نیز در محل تلاقی آنها در نظر گرفته شده است (رابطه‌ی ۷):

$$\omega^2 = \frac{1 \times 1.4 \times S_a}{0.9} = 15.55 S_a \Rightarrow S_a = \frac{4\pi^2}{15.55 T^2} \quad (7)$$

در نتیجه، دوره‌ی تناوب سازه ۰/۵۵ ثانیه و بسامد زاویه‌ی آن ۱۱/۴۲ رادیان بر ثانیه است. اکنون می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۴، سختی‌های موردنظر را برای مقاطعات TADAS به دست آورد.

سختی به دست آمده در جدول ۱، سختی موردنیاز برای هر طبقه است که توسط ۱۲ میراگر در هر طبقه تأمین می‌شود (رابطه‌ی ۸):

$$k_n = kt_n \times 12 \quad (8)$$

که در آن  $kt_n$  سختی هر قطعه میراگر در طبقه‌ی  $n$ ام است. اما سختی مذکور مناسب حالتی است که مقاطعات در حالت خطی باقی بمانند. بنا بر پیشنهاد آیین‌نامه‌های

جدول ۱. سختی‌های به دست آمده برای مقاطعات TADAS.

| شماره‌ی طبقه | مجموع سختی مقاطعات TADAS در هر طبقه ( $kN/m$ ) |
|--------------|--|
| ۱            | $k_1 = 19671/78$                               |
| ۲            | $k_2 = 15431/09$                               |
| ۳            | $k_3 = 15103/54$                               |
| ۴            | $k_4 = 11030/96$                               |

مختلف، برای کاستن از احتمال وقوع خستگی در تعداد چرخه‌ی کم<sup>۱</sup>، بهتر است شکل پذیری مقاطعات فولادی ( $R$ )، از ۵ واحد بیشتر در نظر گرفته نشود (رابطه‌ی ۹):<sup>[۱۱]</sup>

$$\Delta y_n = \frac{\Delta u_n}{R} \quad (9)$$

که در آن،  $\Delta y_n$  تغییر مکان تسلیم،  $\Delta u_n$  تغییر مکان نهایی در هر میراگر از طبقه‌ی  $n$ ام و  $R$  ضریب شکل‌پذیری آن است. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی مقاطعات TADAS از قانون انرژی‌های مساوی<sup>۲</sup> استفاده شده است، به این صورت که انرژی ذخیره شده در حالت خطی برابر با انرژی مستهلک شده یا به عبارتی سطح زیر نمودار تنش - کرنش در حالت غیرخطی خواهد بود.<sup>[۱۲]</sup>

در این حالت با برابر قرار دادن تغییر مکان نهایی به دست آمده در حالت خطی و غیرخطی، قرار دادن تغییر مکان تسلیم در حالت غیرخطی برابر با ۲٪ تغییر مکان نهایی و تعیین سختی بعد از تسلیم برابر با ۲٪ از سختی اولیه، رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:<sup>[۱۳]</sup>

$$\frac{kt_n \times \Delta u_n}{2} = \frac{kt'_n \times \left(\frac{\Delta u_n}{R}\right)^2}{2} + \left(kt'_n \times \frac{\Delta u_n}{R} + \frac{0.02 \times kt'_n \times \Delta u_n \times \left(1 - \frac{1}{R}\right)}{2}\right) \times \left(1 - \frac{1}{R}\right) \times \Delta u_n \quad (10)$$

که در آن  $\Delta u_n$  تغییر مکان نهایی به دست آمده برای هر طبقه و  $kt'_n$  سختی حالت غیرخطی در هر طبقه است. پس از حل معادله‌ی ۱۰، سختی معادل در حالت غیرخطی به صورت رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$kt'_n = kt_n \times 2.68 \quad (11)$$

برای به دست آوردن مقاومت تسلیم مقاطعات TADAS باید تغییر مکان هدف برای آن‌ها تعریف شود، با صرف‌نظر از تغییر مکان دیوار برشی، تغییر مکان هدف براساس مود اول سازه و تغییر مکان‌های ناشی از دریفت‌های تعریف شده برای سازه به دست می‌آیند. نتایج به دست آمده در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

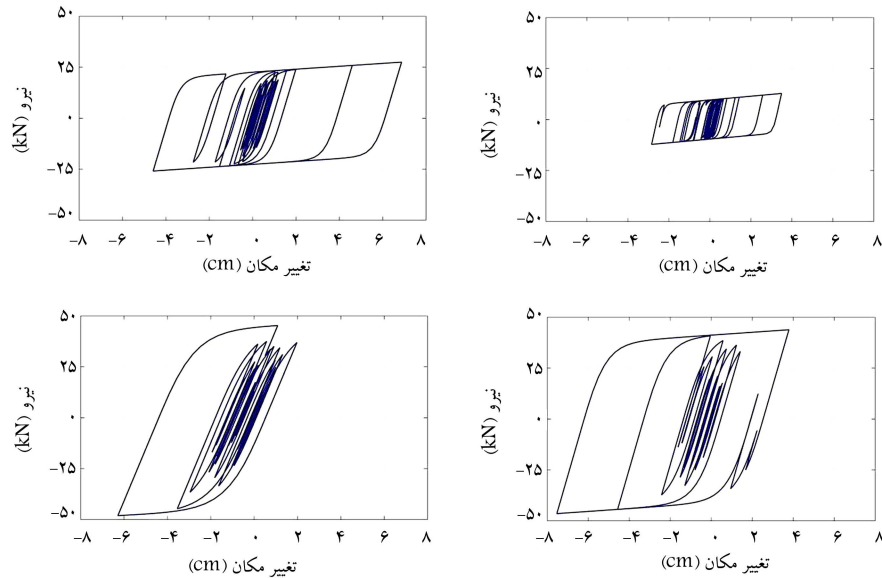
به این ترتیب مقدار سختی کشسان و مقاومت تسلیم میراگرها به دست می‌آیند و در نرم‌افزار مدل می‌شوند. شیب قسمت خمیری میراگرها، ۰/۰۲ برابر قسمت کشسان و ضریب تسلیم<sup>۳</sup> نیز برابر ۲ در نظر گرفته شده است.<sup>[۱۳]</sup>

### ۳. نتایج مطالعه‌ی عددی

مدل‌های ساخته شده با طیف تاریخی‌ی زمانی زلزله‌های مختلف بررسی شده‌اند. این طیف‌ها با استفاده از نرم‌افزار SeismoMatch برای طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ در ساخت‌گاه با خاک ۳ و ضریب اهمیت زیاد مقیاس شده‌اند. به منظور ارزیابی عملکرد سیستم سازه‌ی مجهز به مقاطعات TADAS، به دلیل رفتار غیرخطی آن‌ها باید تحلیل گام به گام به روش تاریخی‌ی زمانی انجام گیرد.<sup>[۱۴]</sup> پس از تحلیل سازه‌ی مجهز شده به مقاطعات میراگر، دوره‌ی تناوب مود اول ارتعاشی ۰/۴۹ ثانیه به دست آمده است، که در حدود ۷۵٪ بزرگ‌تر از دوره‌ی تناوب سازه‌ی سنتی است. سازه‌های مدل‌سازی شده به صورت تاریخی‌ی زمانی برای ۲۵ ثانیه اول در زلزله‌های مختلف تحلیل شده و این نمودارها به دست آمده‌اند.

#### ۱.۳. نمودارهای رفتار چرخه‌ی مقاطعات TADAS

نمودارهای رفتار چرخه‌ی مقاطعات TADAS از رسم نیروی وارده‌ی بر میراگرها نسبت به تغییر مکان به دست می‌آیند. میزان اتلاف انرژی صورت گرفته توسط



الف) طبقه اول؛ ب) طبقه دوم؛ ج) طبقه سوم؛ د) طبقه چهارم.

شکل ۴. نمودارهای چرخشی مقاطع TADAS در زلزله‌ی نورث ریج.

جدول ۲. مقاومت تسلیم مقاطع TADAS.

| شماره‌ی طبقه (n) | تغییر مکان هدف $\Delta u_n$ (مطلق) (m) | سختی برای هر قطعه از میراگرهای TADAS, $kt'_n$ (kN/m) | تغییر مکان تسلیم $\Delta y_n$ (m) | $P y_n = kt'_n \times \Delta y_n$ (kN) |
|------------------|--|--|-----------------------------------|--|
| ۱                | ۰٫۰۱۰۴                                 | ۴۵۴۰٫۹۰  | ۰٫۰۰۲۰                            | ۹٫۸۰                                   |
| ۲                | ۰٫۰۳۲۰                                 | ۳۵۶۲٫۰۱  | ۰٫۰۰۶۴                            | ۲۳٫۰۸                                  |
| ۳                | ۰٫۰۶۰۱                                 | ۳۴۸۶٫۴۰  | ۰٫۰۱۲۰                            | ۴۲٫۰۴                                  |
| ۴                | ۰٫۰۹۰۰                                 | ۲۵۴۶٫۳۱  | ۰٫۰۱۸۰                            | ۴۵٫۸۳                                  |

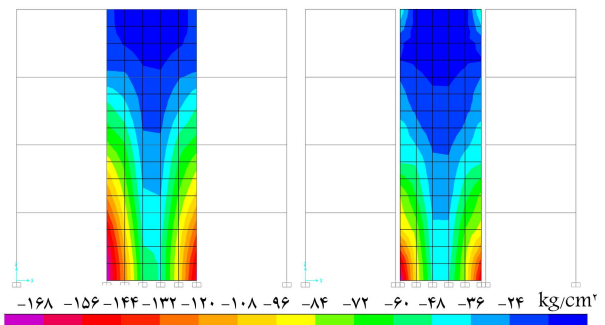
همچنین تغییر مکان دیوار در بالاترین ارتفاع از ۳٫۵۵ به ۲٫۲۵ سانتی‌متر کاهش یافته است که نشان‌دهنده‌ی بهبود رفتار و کاهش نیروهای جانبی اعمالی به دیوار برشی است. قابل ذکر است، به دلیل سهم عمده‌ی دیوار برشی در باربری جانبی، مفاصل خمیری در اعضاء قاب خمشی، قبل و بعد از استفاده از میراگر تشکیل نشده‌اند.

### ۳.۳. نمودارهای برش پایه

در تحلیل‌های استاتیکی معادل، به منظور بررسی نیروی جانبی وارده بر سازه در هنگام زلزله، برش پایه در طبقات سازه توزیع و بدین وسیله نیروهای جانبی وارد بر هر طبقه محاسبه می‌شود. به این ترتیب می‌توان برش پایه‌ی ساختمان را نماینده‌ی برای مقدار نیروی جانبی وارد بر اعضاء ساختمان در نظر گرفت. در شکل ۶، نمودارهای برش پایه‌ی سازه تحت زلزله‌های مختلف مشاهده می‌شوند.

### ۴.۳. نمودارهای شتاب بام

نمودار شتاب بام، نشان‌دهنده‌ی میزان شتاب مطلق در بام سازه است. اجزاء غیرسازه‌ی سهم عمده‌ی در ارزش یک ساختمان دارند و در پاسخ‌هایی ملایم‌تر از پاسخ‌های لازم برای ایجاد خسارت‌های سازه‌ی، آسیب می‌بینند. این در حالی است که آسیب‌های وارده در بسیاری از اجزاء غیرسازه‌ی و محتویات ساختمان، عمدتاً به

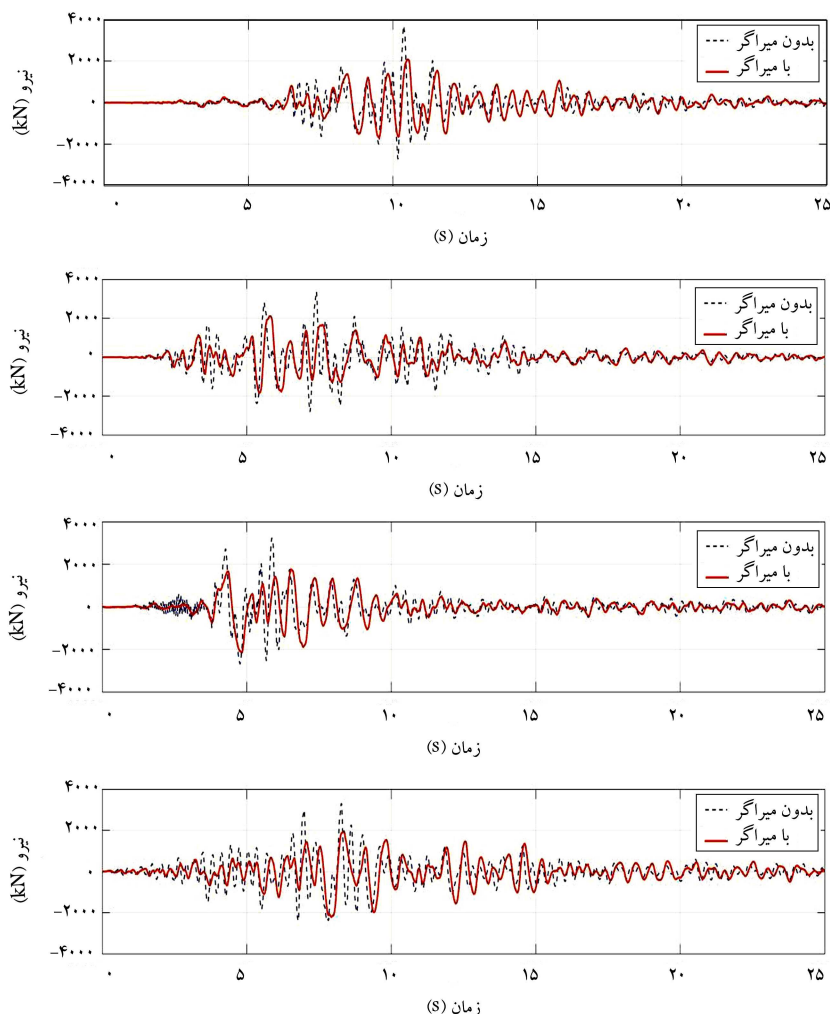


شکل ۵. دیاگرام تنش بیشینه‌ی دیوار برشی، قبل از استفاده از میراگر (شکل چپ) و بعد از استفاده از میراگر (شکل راست).

میراگرهای مذکور از مجموع سطح داخلی نمودار در هر چرخه به دست می‌آیند. این نمودارها در هر طبقه برای زلزله‌ی نورث ریج در شکل ۴ ترسیم شده‌اند.

### ۲.۳. تغییرات رفتار اعضاء سازه

دیاگرام مؤلفه‌ی S۲۲ تنش‌های بیشینه‌ی دیوار، قبل و بعد از استفاده از میراگر در شکل ۵ ارائه شده است. در شکل مذکور، تنش‌های بیشینه در دو سمت پای دیوارها مشاهده می‌شوند. تنش‌های دیوار پس از استفاده از میراگر کاهش یافته است.



الف) ایمریال ولی؛ ب) کوبه؛ ج) لوماپرتا؛ د) نورتریج.  
 شکل ۶. نمودارهای برش پایه تحت زلزله.

### ۶.۳. نمودارهای تغییر مکان بام سازه

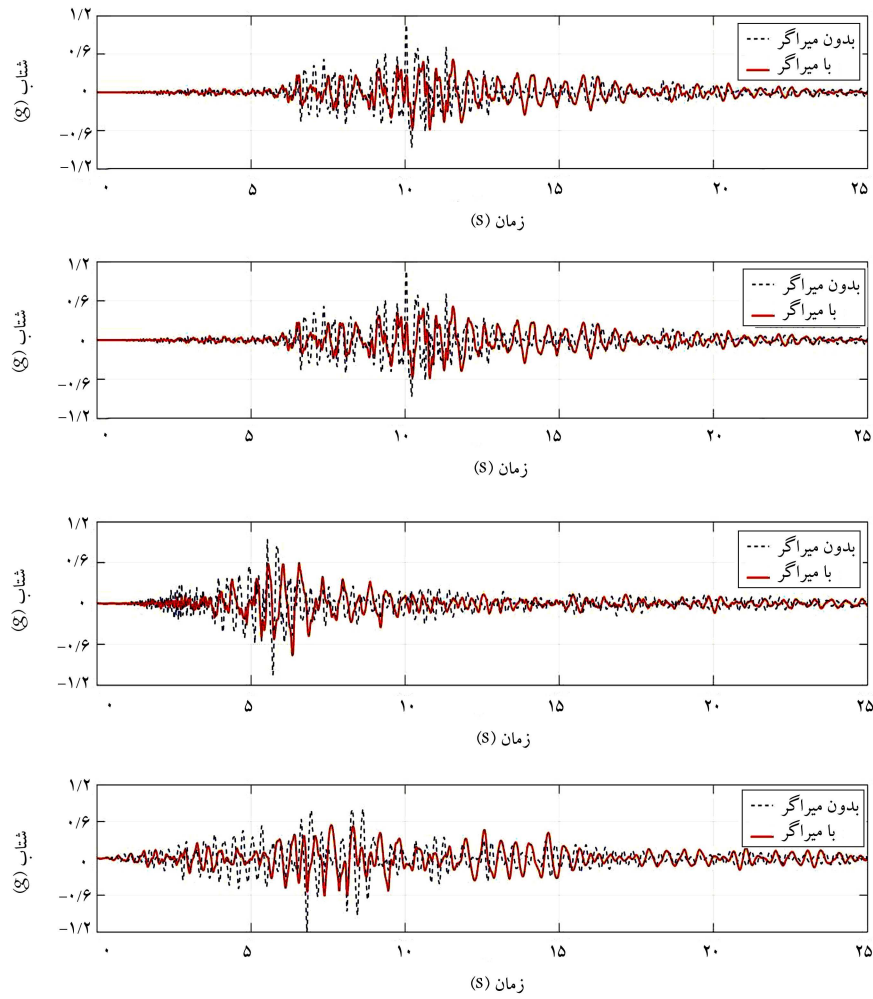
نمودارها در بخش کنونی، نمایش دهنده‌ی میزان تغییر مکان مطلق بام سازه هستند. تغییر مکان بام باید کنترل شده باشد و از حدود مجاز دریافت تجاوز نکند. در سازه‌های ساخته شده با دیوار برشی بتنی به صورت سنتی، به دلیل سختی بالای دیوار برشی، تغییر مکان‌ها بسیار ناچیز هستند و بیشتر اوقات مشکلی از نظر تغییر مکان یا دریافت سازه وجود ندارد. اما در روش مذکور به دلیل جداسازی سازه از دیوار برشی، تغییر مکان‌ها افزایش می‌یابند. قابل ذکر است که در نمودارها حد بالا و پایین تغییر مکان ۹ سانتی‌متر انتخاب شده است، که حد مجاز تعیین شده است. نمودارهای تغییر مکان مطلق بام سازه در اثر اعمال زلزله‌های مختلف در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

به منظور جلوگیری از وقوع تغییر مکان‌های بسیار بزرگ احتمالی، فراهم کردن مکانیزمی برای کنترل تغییر مکان بیشینه‌ی ممکن است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۵، برای جلوگیری از ضربات وارده به سازه در سیستم جداسازی لرزه‌یی، استفاده از میراگرهای با فاصله<sup>۶</sup> به این صورت که در هنگام رسیدن تغییر مکان به حد مجاز، میراگر ویسکوزی مانع از حرکت نسبی بیشتر و نیروهای ضربه‌یی وارده به سازه بشود، آزمایش شده است.<sup>[۱۶]</sup>

دلیل قرارگرفتن در معرض شتاب‌های زیاد طبقات اتفاق می‌افتند. کارایی بسیاری از ساختمان‌ها، از جمله بیمارستان‌ها به کارایی تجهیزات ذکر شده وابسته است.<sup>[۱۵]</sup> علاوه بر آن، براساس معیار تدوین شده توسط مؤسسه‌ی ملی علوم ساختمانی<sup>۴</sup> اگر شتاب از حدود  $0.7g$  بالاتر رود، می‌تواند باعث برهم خوردن تعادل انسان شود. در صورت کنترل شتاب می‌توان آرامش بیشتری را فراهم آورد و از خطرات احتمالی کاست. نمودارهای شتاب بام مدل‌ها برای زلزله‌های مختلف در شکل ۷ مقایسه شده‌اند.

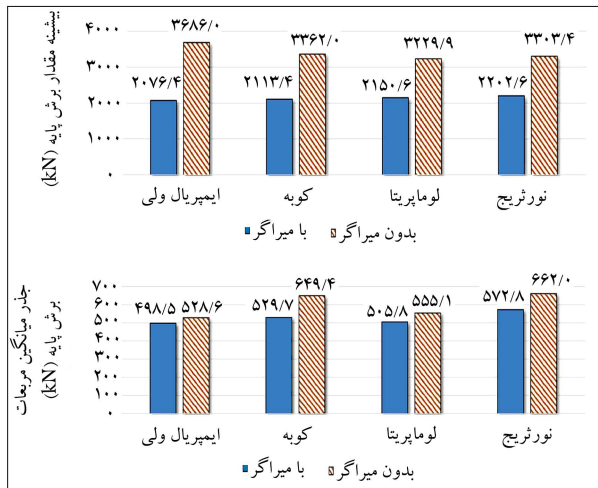
### ۵.۳. تغییرات معیارهای آماری شتاب و برش پایه

در هنگام مقایسه‌ی نتایج سازه قبل و بعد از کاربرد میراگر، علاوه بر مقدار بیشینه‌ی هر کمیت، مسئله‌ی مهم دیگر، مقدار میانگین کمیت در طول فرایند است. به‌عنوان مثال می‌توان به اهمیت مقدار میانگین نیروی وارده به اعضا در خستگی با تعداد چرخه کم<sup>۵</sup> در هنگام زلزله اشاره کرد. به همین منظور نمودارهای بیشینه و جذر میانگین مربعات برای شتاب و برش پایه در شکل‌های ۸ و ۹ ترسیم شده‌اند.

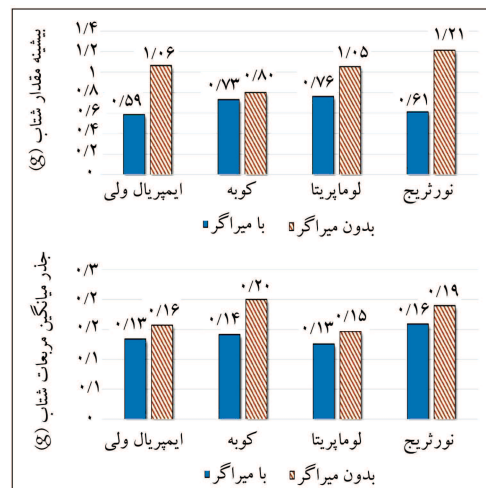


الف) ایمریال ولی؛ ب) کویه؛ ج) لوماپریتا؛ د) نورثریج.

شکل ۷. نمودارهای شتاب مطلق بام سازه تحت زلزله.



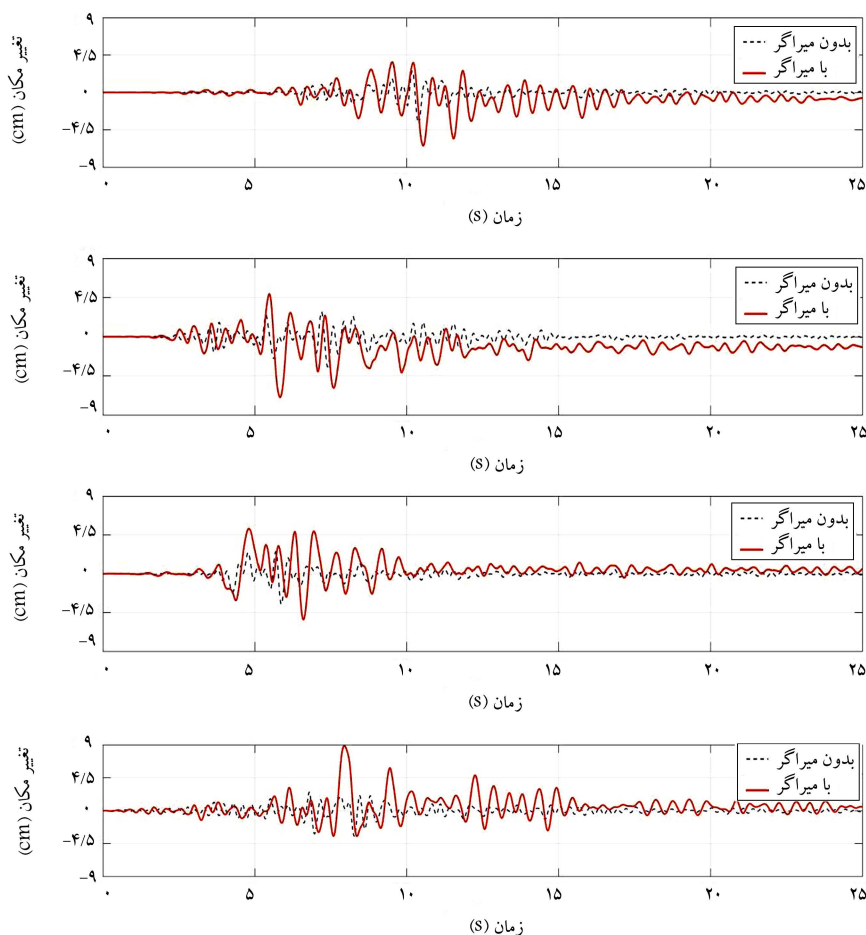
الف) بیشینه برش پایه؛ ب) جذر میانگین مربعات دامنه های برش پایه.



الف) بیشینه شتاب؛ ب) جذر میانگین مربعات دامنه های شتاب.

شکل ۹. مقایسه آماری برش پایه، قبل و بعد از استفاده از میراگر تحت اثر زلزله های مختلف.

شکل ۸. مقایسه آماری شتاب، قبل و بعد از استفاده از میراگر تحت اثر زلزله های مختلف.



الف) ایمریال ولی؛ ب) کوبه؛ ج) لوما پیریتا؛ د) نوررئج.

شکل ۱۰. نمودارهای تغییر مکان مطلق بام سازه تحت زلزله.

شده و استفاده از روش‌های توزیع بهینه‌ی سختی برای رسیدن به هدف کنترل سازه و برای دستیابی به توزیع بهینه‌ی قطعات TADAS لازم است. با بررسی سختی‌های به دست آمده و اعمال آنها بر مدل‌سازی‌های عددی و تحلیل سازه در اثر اعمال شتاب‌نگاشت زلزله‌های مختلف، نتایج تحلیل‌های مذکور برای شتاب و جابه‌جایی مطلق بام سازه و همچنین برش پایه برای مدل سنتی و مدل مجهز به قطعات TADAS مقایسه شده‌اند. با بررسی نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده کرد که در اثر تجهیز سازه به میراگرهای مذکور، دوره‌ی تناوب مود اول سازه به شدت افزایش یافته و با ازدیاد انعطاف‌پذیری سازه، تأثیر زلزله‌های مختلف بر آن کمتر شده و با وجود میراگرها، سازه تا حدی نیز شکل‌پذیر شده است که در نتیجه‌ی تغییرات ایجاد شده، بیشینه‌ی شتاب بام سازه از ۸ تا ۴۹ درصد کاهش یافته است. همچنین برش پایه‌ی ساختمان از ۳۳ تا ۴۳ درصد کاهش یافته و تغییر مکان بام سازه نیز از حد مجاز تعیین شده فراتر نرفته است.

مسئله‌ی دیگری که جلب توجه می‌کند، وجود تغییر مکان‌های پسماند در انتهای زلزله است. میراگرهای هیستریزیس معمولی از این عیب رنج می‌برند و وجود تغییر مکان پسماند در آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. امروزه به وسیله‌ی مصالح هوشمند حافظه‌دار شکلی (SMA)، بر مشکل مطرح شده غلبه شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

میراگرهای تغییرمکانی TADAS با اتلاف انرژی وارده بر سازه در نتیجه‌ی منحنی‌های رفتاری چرخه‌یی، می‌توانند به راحتی و با کمترین هزینه در سازه‌ها استفاده شوند. لذا تأثیر آنها در بهبود رفتار لرزه‌یی سازه‌های مقاوم‌شده با دیوار برشی بتنی بررسی

#### پانویس‌ها

1. low cycle fatigue
2. equal energy principle

3. yielding exponent
4. national institute of building sciences
5. low cycle fatigue
6. gap damper



## منابع (References)

1. Kuang, J.S. and Ho, Y.B. "Seismic behavior and ductility of squat reinforced concrete shear walls with non-seismic detailing", *ACI Structural Journal*, **105**(2), pp. 225-231 (2008).
2. Soong, T.T. and G.F. Dargush., *Passive Energy Dissipation and Active control*, Structural Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton (1999).
3. Kim, H.J., Choi, K.S., Oh, S.H. and Kang, C.H. "Dissipative Coupling Beams used for RC Shear Walls Systems", 15WCEE, Lisboa, Portugal, September (2012).
4. Zahrai, S.M. "Vibration passive control of structures", The Univ. of Tehran Press, Tehran, Iran (in Persian) (1389).
5. Wang, J., Ou, J. and Huo, L. "Research on seismic performance of slotted RC walls with replaceable damper", SPIE Smart Structures and Materials+Ndestructive Evaluation and Health Monitoring, pp. 94312A-94312A (2015).
6. Zhang, Z., Ou, J.P. and He, Z. "Optimization design for coupling beam dampers of shear walls", *Applied Mechanics and Materials*, **444-445**, pp. 115-121 (2014).
7. Altin, S., Koprman, Y. and Baran, M. "Strengthening of RC walls using externally bonding of steel strips", *Engineering Structures*, **49**, pp. 686-695 (2013).
8. Zahrai, S.M. and Rad, B. "Analytical investigation of TADAS damper applied in seismic rehabilitation & design of concrete structures", *ESTEGHLAL*, **25**(2), pp. 51-64 (2007).
9. Yousefzadeh, A., Sebt, M.H. and Tehranizadeh, M. "The optimal TADAS damper placement in moment resisting steel structures based on a cost-benefit analysis", *International Journal of Civil Engineering*, **9**(1), pp. 23-32 (2011).
10. Labafzadeh, M.S.R. and Ziyaeifar, M. "Dual ductility mode shear walls: Concept and behavior", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **13**(1), pp. 33-45 (2011).
11. Hanson, R.D., Xia, C. and Su, Y.F. "Design of supplemental steel damping devices for buildings", *Proc. of the 10WCEE*, pp. 4139-4142 (1992).
12. pekoz, H.A., *Lateral Drift of Reinforced Concrete Frames with Stiffness and strength Degradation Subjected to Strong Ground Motions*, ProQuest (2007).
13. Pollino, M., *Analytical and Experimental Investigation of a Controlled Rocking Approach for Seismic Protection of Bridge Steel Truss Piers*, ProQuest (2007).
14. Soong, T.T. and Spencer, B.F. "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", *Engineering Structures*, **24**(3), pp. 243-259 (2002).
15. Taghavi, Sh, and Miranda, E. "Estimation of seismic acceleration demands in building components", *In 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, August (2004).
16. Rawlinson, T.A., Marshall, J.D., Ryan, K.L. and Zargar, H. "Development and experimental evaluation of a passive gap damper device to prevent pounding in base-isolated structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **44**(11), pp. 1661-1675 (2015).