

ارائه‌ی شیوه‌ی نو برای توزیع بار لغزش میراگر اصطکاکی FBP در ارتفاع قاب خمشی فولادی بهسازی شده

عباس حق‌اللهی* (استادیار)

سعید کریمی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۲-۳، شماره‌ی ۲، ص. ۱۲۵-۱۳۲، (پادداشت شی)

قرارگیری ایران در یکی از لرزه‌خیزترین حوزه‌های جهان، ضرورت بهسازی ساختمان‌های موجود و درحال ساخت را آشکار می‌سازد، به‌نحوی که با رعایت صرفه‌ی اقتصادی، زمانی، و... ایمنی سازه تأمین شود. یکی از راهکارهای موجود، استفاده از مستهلک‌کننده‌های انرژی از نوع اصطکاکی است. FBP یک نوع میراگر اصطکاکی جدید با سطوح لغزش لنت ترمز است. در ساختمان‌های فولادی ایران، که عمدتاً از نوع کوتاه تا متوسط‌اند، بنا به نوع عملکرد سازه و میراگر، FBP پیشنهادی مناسب است. در این نوشتار، با مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مدل‌های نرم‌فزاری سه قاب فولادی با شرایط متفاوت، اثر نحوه‌ی توزیع میراگر در ارتفاع قاب و تأثیر میراگر در عملکرد سازه‌ی بهسازی شده مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از میراگر با توزیع نسبی در کاهش انرژی، تغییر مکان‌ها، برش طبقات، تعداد مفاصل و... مؤثرتر از توزیع یکنواخت است. به‌طور کلی، به‌منظور بهبود عملکرد کلی قاب، توزیع نسبی بر سایر اشکال توزیع موجود و مرسوم ارجحیت دارد.

واژگان کلیدی: میراگر اصطکاکی، FBP، SBC، بهسازی، ساختمان فولادی،

مهاربندی شورون.

haghollahi@srttu.edu
saeid.karamee@gmail.com

۱. مقدمه

در سال ۱۹۸۴ برمی‌گردد که بیشتر بر مبنای کارهای آزمایشگاهی بودند.^[۱] البته در سال ۱۹۸۰ نیز برای اولین بار از میراگر اصطکاکی به صورت یک سیستم الحاقی در مهاربند استفاده شد.^[۲] همچنین در سال ۱۹۸۲ مبنای و مفاهیم این موضوع توسعه داده شد.^[۳] در ادامه‌ی فعالیت‌های انجام‌شده، در پژوهشی در سال ۱۹۸۹، اتصال پیچی شیاردار مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفت و پس از آن در سال ۱۹۹۳، در پژوهش دیگری از فلز برنج مابین سطوح لغزش SBC استفاده شد و نتایج جالب توجهی به دست آمد.^[۴] پژوهشگران دیگری نیز در سال ۱۹۹۶ در نوشتار خود توجه بیشتری به بار بهینه‌ی لغزش در این نوع میراگر معطوف کردند و در نهایت نتایج کار خود را با نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط فیلیاترات و آپکن^۲ مقایسه کردند.^[۵] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۴، به بررسی میراگر اصطکاکی در مهاربند‌های قطری و هشتی پرداخته شد.^[۶] در پژوهشی در سال ۲۰۰۶ نیز به تشریح هندسه و خصوصیات رفتاری اتصالات SBC پرداخته شد.^[۸] پژوهشگرانی هم در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار به بسط طرح جدیدی از SBCها پرداختند که FBP نامیده شد.^[۹] در تمامی این موارد، میراگرها به‌طور یکنواخت، یعنی با بار لغزش مساوی، در ارتفاع قاب توزیع شده‌اند. این نوشتار بر آن است تا علاوه بر بررسی تأثیر استفاده از میراگر در بهسازی، با ارائه‌ی یک شیوه‌ی نو برای توزیع میراگر در ارتفاع قاب به‌طور ویژه به بررسی اثر نحوه‌ی توزیع میراگرها در بهبود پاسخ‌های دینامیکی سازه بپردازد.

طراحی سازه‌ها به‌نحوی که بتوانند در حین رخداد زلزله‌های قوی بدون تخریب و آسیب جدی پا برجا باقی بمانند، هزینه‌ی زیادی در بر دارد. یکی از شیوه‌های اقتصادی ارتقاء عملکرد سازه، استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی در قالب میراگرهای الحاقی به سازه‌ی اولیه است. این ابزارها می‌توانند با جذب قسمت اعظم انرژی ورودی به صورت متمرکز در یک نقطه‌ی خاص، از ورود انرژی به اعضاء سازه‌ی و تخریب در اثر رفتار غیرخطی جلوگیری کنند. نتیجه‌ی این عمل، جلوگیری از آسیب و صدمه‌ی جدی به کل سازه است. میراگر اصطکاکی از انواع مستهلک‌کننده‌های الحاقی است، که توان بالایی در جذب انرژی دارد. SBC^۱ یک نوع المان اصطکاکی است که از آن به عنوان نوعی اتصال نیمه صلب (با رفتار غیرخطی) بین اجزاء قاب فولادی یاد می‌شود.^[۱] این میراگر در اصل شبیه یک اتصال ساده با سوراخ‌های لوبیایی‌شکل بلند است، که اصطکاک موجود مابین سطوح در تماس مانع لغزش سطوح برهم است. اما در صورت لغزش درصدی از انرژی محرک را در اثر اصطکاک به‌صورت گرما تلف می‌کند.

اولین مطالعات در زمینه‌ی اتصالات لوبیایی SBC به مطالعاتی در سال ۱۹۷۶

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۲/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۱/۶/۱۹، پذیرش ۱۳۹۱/۷/۳.

۲. قاب، میراگر FBP و مدل‌سازی

قاب موردنظر در این مطالعه، یک قاب خمشی فولادی است. به منظور توجیه استفاده از روش‌های بهسازی، برای طراحی از ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده و طراحی طبق آیین‌نامه‌ی AISC-ASDA۹ انجام شده است. در این قاب ۳ دهانه، ارتفاع طبقات و طول دهانه‌ها یکسان و به ترتیب برابر ۳/۲ و ۴ متر است (شکل ۱). بارگذاری مورد استفاده مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و به صورت بار مرده‌ی ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمربع برای طبقه‌ی بام و ۶۸۰ کیلوگرم بر مترمربع برای سایر طبقات و بار زنده‌ی ۱۸۰ کیلوگرم بر مترمربع برای طبقه‌ی بام و ۲۶۰ کیلوگرم بر مترمربع برای سایر طبقات است.

میراگر موردنظر در این نوشتار، میراگر FBP از نوع میراگرهای اصطکاکی و رده‌ی میراگرهای SBC است. مزایایی نظیر عدم وابستگی این وسیله به دمای محیط، عدم نیاز به بازرسی، نگهداری، تعمیر، تعویض و جای‌گذاری قبل و بعد از زلزله، قابلیت پنهان‌کردن ساده‌ی این وسیله در نمای معماری، میراگرهای SBC را از بسیاری از میراگرها متمایز کرده است.^[۱۰،۱۱] همچنین دیده شده است که میراگر پس از تحمل تعداد زیاد سیکل‌های بارگذاری (که گرمای ایجادشده نیز از اثرات آن است)، همچنان تخریب نشده و کوچک‌ترین ناپایداری و افت بار لغزشی در آن رخ نداده است.^[۹] از سویی دیگر بستگی و تناسب انرژی مستهلک‌شده به بیشینه‌ی جابجایی صورت‌گرفته (در عوض تناسب مجذوری با جابجایی مانند میراگرهای ویسکوز)، و تغییرات ناگهانی شرایط چسبندگی و لغزش، که عدم آسایش افراد ساکن و تخریب عناصر غیرسازه‌ی را در پی دارد، از معایب این وسیله شمرده می‌شوند. همچنین بر مسئله‌ی دوام، که دلیلی بر حساسیت زیاد در مورد ضریب اصطکاک و شرایط سطوح لغزش است، به عنوان عیب مستهلک‌کننده‌ی اصطکاکی تأکید شده است.^[۱۰،۱۱] ویژگی‌های FBP اولین بار در سال ۲۰۰۸ معرفی شد.^[۹] این سیستم متشکل از ۳ صفحه‌ی اصطکاکی است که به کمک پیچ‌های گذرنده از سوراخ‌های لوبیایی شکل تعبیه‌شده در آن بر هم قرار گرفته‌اند (شکل ۲). نیروی اصطکاکی به وجودآمده در این دستگاه نیز همانند سایر سیستم‌های مبتنی بر اصطکاک در اثر دو عامل ضریب اصطکاک سطوح تماس μ و نیروی عمودی وارد بر صفحات اصطکاکی N مطابق رابطه‌ی ۱ است:

$$F_{slip} = m * \mu * N \quad (1)$$

که در آن، m تعداد سطوح است که به صفحات لغزنده و تعداد سوراخ‌ها بستگی دارد (شکل ۲). این میراگر در طی یک سیکل بارگذاری توانایی اتلافی انرژی معادل با رابطه‌ی ۲ دارد:^[۱۱]

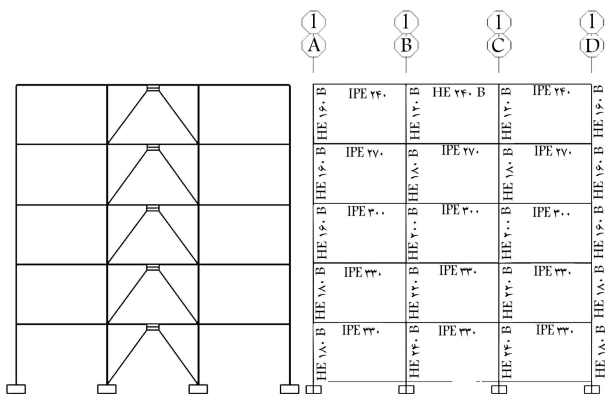
$$E = 4 * F_{slip} * \Delta \quad (2)$$

این میراگر در طول مدت بارگذاری رفتار دینامیکی مشخص و یکسانی دارد، به نحوی که حتی در سیکل‌های متعدد بارگذاری نیز تغییر محسوسی در عملکرد آن مشاهده نشده است.^[۹] این میسر نشد مگر با ارضاء ۲ شرط:

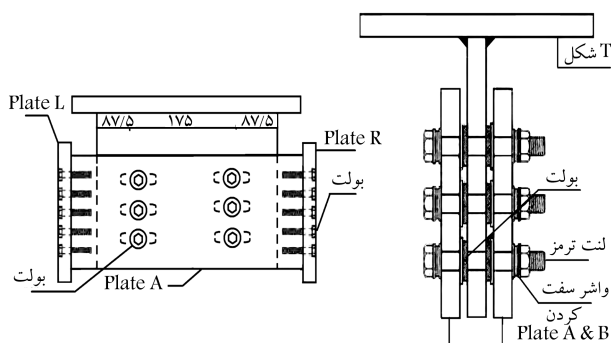
۱. داشتن سطوح لغزش با مقاومت لغزشی کافی،

۲. امکان حرکت و تغییرمکان کافی در میراگر.

شرط اول با انتخاب لنت ترمز، که سالیان دراز در صنعت خودروسازی استفاده شده و بسیاری از خواص و ویژگی‌های آن محرز است، به عنوان سطح لغزش برآورده می‌شود و شرط دوم نیز با تعبیه‌ی سوراخ‌های لوبیایی شکل برآورده شد



شکل ۱. قاب ۵ طبقه در دو وضعیت خمشی اولیه و بهسازی‌شده.



شکل ۲. شکل شماتیک FBP، نوع و تعداد سوراخ‌ها.^[۹]

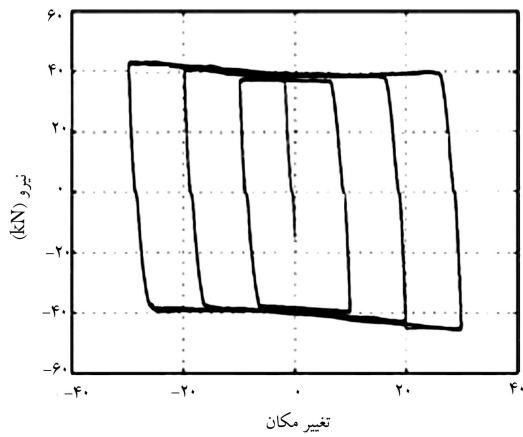


شکل ۳. FBP نصب‌شده در محل اتصال مهاربند با تیر طبقه.^[۹]

(شکل ۳). چرا که قرارگیری این میراگر در محل اتصال مهاربند شورون با تیر طبقه‌اش این امکان را به خوبی فراهم می‌آورد که بتواند در امتداد سوراخ‌های لوبیایی خود لغزش کند و تغییرمکان کافی داشته باشد (شکل ۳). بدیهی است که این مهاربندها نیز باید کمینه‌ی از سختی را برای کمک به کارایی مطلوب میراگر داشته باشند.^[۸]

استفاده از عناصر لاغر به منزله‌ی مهاربند، که در اصل نگهدارنده‌ی میراگر است، باعث می‌شود که مهاربندها در اثر کماتش وارده تخریب شوند و دیگر به حالت اول خود برنگردند. به همین دلیل رفتار لغزشی ضعیف و در نهایت راندمان میراگر کاسته می‌شود.

به منظور بهسازی قاب اولیه، باید میراگرها در ارتفاع قاب توزیع شوند. براساس نتایج تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی نحوه‌ی توزیع میراگرها دیده شد که توزیع



شکل ۵. نمودار نیرو - تغییر مکان میراگر FBP. [۹]

رفتار کشسان و بعد از اینکه صفحات شروع به لغزش کردند، میراگر رفتار خمیری از خود نشان می‌دهد (شکل ۵).

لذا برای مدل‌کردن میراگر از المانی استفاده می‌شود که علاوه بر برآورد کردن این نیاز، ملاحظات هندسی رفتار و محل قرارگیری میراگر را نیز برآورده کند. [۱۶] از آنجایی که میراگر مورد بررسی در محل اتصال مهاربند جناقی به تیر طبقه واقع می‌شود، با تقریب بسیار خوبی می‌توان ادعا کرد که میراگر فقط در راستای محور طولی المان و به موازات تیر کار می‌کند. برای شبیه‌سازی میراگر باید از المانی استفاده کرد که این ویژگی را داشته باشد. لذا برای مدل‌کردن عضو، از المان میله‌یی ساده ۳ و برای مدل‌کردن رفتار غیرخطی این وسیله از قسمت غیرخطی ۴ استفاده می‌شود.

۳. رویای مدل‌سازی

برای بررسی رویایی و اعتبار مدل‌سازی انجام‌شده، توجه خود را به این نکته کلیدی معطوف می‌کنیم که به ازاء بار لغزش صفر برای میراگر، رفتار سازه همان رفتار قاب خمشی خواهد بود و در ازاء بارهای لغزش بزرگ‌تر از ظرفیت مهاربندها رفتار سازه مشابه رفتار قاب مهاربندی است، چرا که در این حالت لغزشی در میراگر رخ نمی‌دهد و عملاً میراگر نقش یک اتصال پیچی صلب را دارد. نمودار شکل‌های ۶ و ۷ مربوط به مقایسه‌ی وضعیت برش پایه و جابجایی طبقه‌ی بام در قاب‌های خمشی و خمشی مهاربندی‌شده به ترتیب با قاب بهسازی‌شده با بار آستانه‌ی لغزش ۰ و ۷۵ تن است، که به درک بهتر این موضوع کمک خواهد کرد.

منظور از برش پایه در قاب‌های مهاربندی و بهسازی‌شده با بار لغزش ۷۵ تن مقدار نیروی برشی وارد به ستون‌های طبقه است. همچنین اختلاف جزئی موجود در نمودارها با توجه به هندسه و ابعاد مهاربندهای به‌کاررفته برای مدل‌سازی قابل توجیه است. این‌گونه که اولاً برای نزدیک‌شدن هرچه بیشتر رفتار قاب‌ها به مدل واقعی، میراگر در زیر تیر طبقه و با رعایت اصول اجرایی، و به‌صورت یک عضو الحاقی با ابعاد و اندازه‌ی متعارف مدل شد که این خود باعث کوتاه‌تر شدن مهاربندها در حالت با میراگر نسبت به قاب مهاربندی شد و ثانیاً وزن ملحقات میراگر باعث اختلاف در جرم و وزن دو قاب برای مقایسه می‌شود که در مورد میراگر با بار لغزش صفر این موضوع مشهودتر بوده و باعث افزایش تغییرشکل ماندگار سازه شده است (شکل ۶).

میراگرها در ارتفاع قاب با الگوی یکنواخت (تمام میراگرها با بار لغزش برابر) بر الگوی دوزنقه‌یی و دوزنقه‌یی معکوس ارجحیت دارد. [۱۳] در توزیع دوزنقه‌یی بار لغزش میراگر طبقه‌ی اول F و بار لغزش میراگر طبقه‌ی آخر $0.75F$ در نظر گرفته می‌شود و بار لغزش سایر میراگرها بین F و $0.75F$ به صورت خطی درون‌بایی می‌شوند. لذا در این نوشتار میراگرها در قاب، مطابق دو الگوی مختلف چیده شده‌اند:

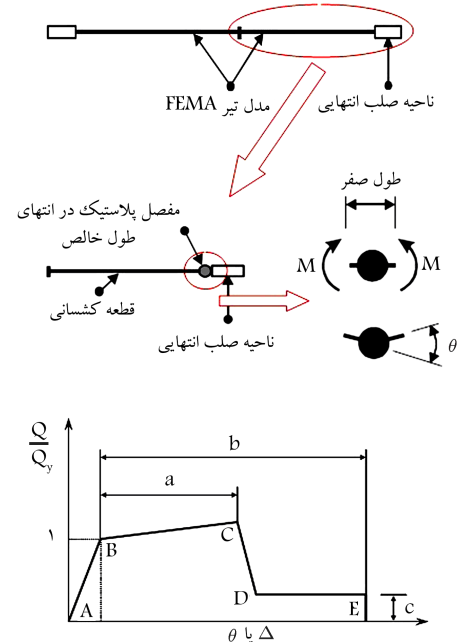
الگوی یکنواخت: که به‌طور کلی از الگوهای با شیب خطی مؤثرتر است. [۱۳]

الگوی نسبی: که در آن بار لغزش میراگر هر طبقه، با نسبت برش آن طبقه به برش پایه در قاب خمشی اولیه متناسب است.

برای مدل‌سازی قاب و میراگر و همچنین بررسی رفتار لرزه‌یی این نوع میراگر در قاب از نرم‌افزار ۳D Perform که یک نرم‌افزار با توانمندی‌های بالا در مدل‌سازی انواع سیستم‌های سازه‌یی است، استفاده شده است. این نرم‌افزار علاوه بر امکان اعمال ضوابط آیین‌نامه‌های مختلف و نیز داشتن انواع پارامترهای مدل توانایی انجام انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی خطی و غیرخطی را نیز دارد. همچنین از خروجی‌های مهم این نرم‌افزار می‌توان به نسبت نیاز به ظرفیت و نمایش‌های بالاتس انرژی اشاره کرد.

برای مدل‌سازی رفتارهای غیرخطی اعضای قاب از شیوه‌ی تیر وستون FEMA موجود در نرم‌افزار ۳D Perform استفاده شد. در این شیوه، هر عضو از ۳ قسمت تشکیل می‌شود. قسمت صلب انتهایی، یک قسمت کشسان و یک مفصل با طول صفر که نوع رفتار آن براساس مفروضات و شیوه‌ی مطرح‌شده در نشریه‌ی ۳۶۰ ایران است، که بسیار نزدیک به FEMA ۳۵۶ است، لحاظ شد (شکل ۴).

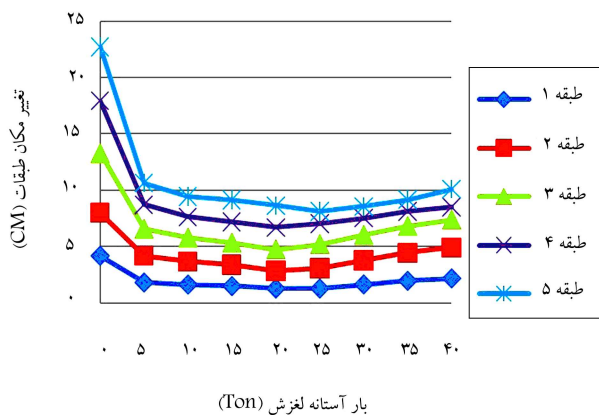
با بررسی رفتار اصطکاکی میراگر موردنظر دیده می‌شود که رفتار این میراگر بسیار نزدیک به رفتار مواد کشسان - خمیری کامل است (مستطیلی‌شکل بودن حلقه‌های هیسترتیک). [۱۵] یعنی قبل از اینکه صفحات میراگر لغزش کنند، میراگر



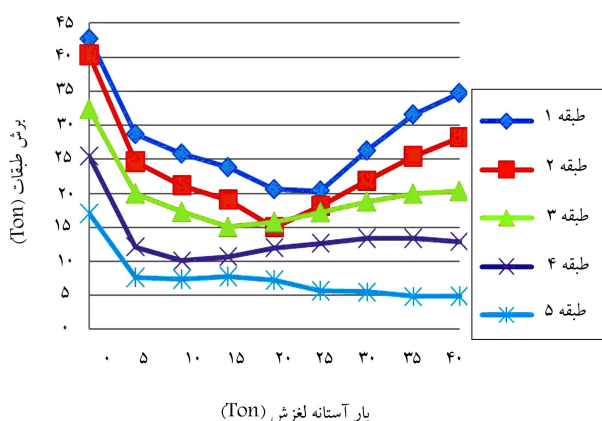
شکل ۴. هندسه و مدل رفتار غیرخطی تیر FEMA مورد استفاده در مدل‌سازی. [۱۴]

و مقدار برش طبقه، بالاخص برش پایه به عنوان معیار تعیین بار لغزش بهینه میراگر انتخاب شدند. [۱۷] نمودار بیشینه‌ی پاسخ‌های تغییرمکان و برش طبقات قاب‌ها در محدوده‌ی بار لغزش‌ها در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است.

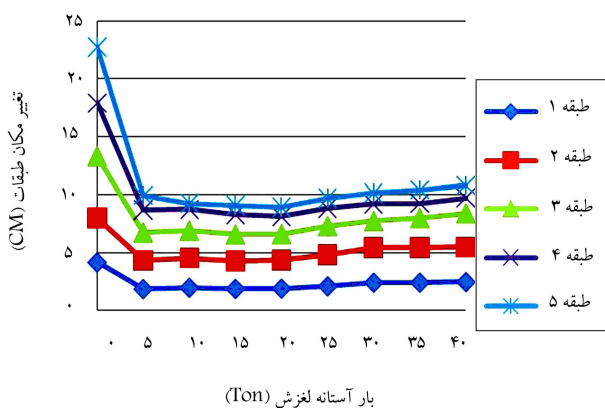
از مقایسه‌ی نتایج، بار لغزش متناظر با کمترین پاسخ به عنوان بار بهینه‌ی لغزش انتخاب شد. این مقدار برای توزیع یکنواخت برابر ۱۷/۵ تن و برای توزیع متناسب با برش پایه مطابق جدول ۱ است.



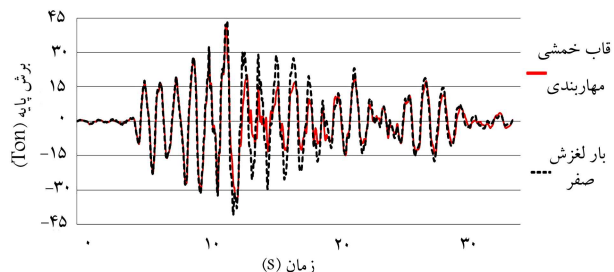
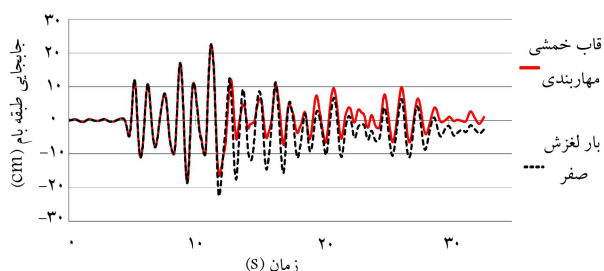
شکل ۸. نمودار تغییرمکان طبقات - بار لغزش میراگر (طبقه‌ی اول) در توزیع نسبتی.



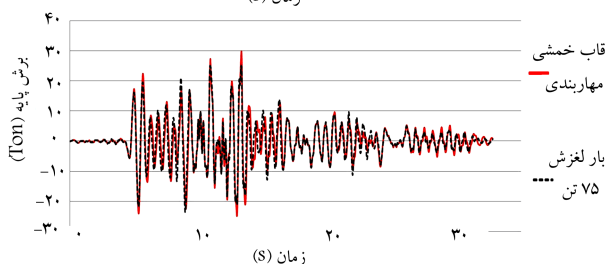
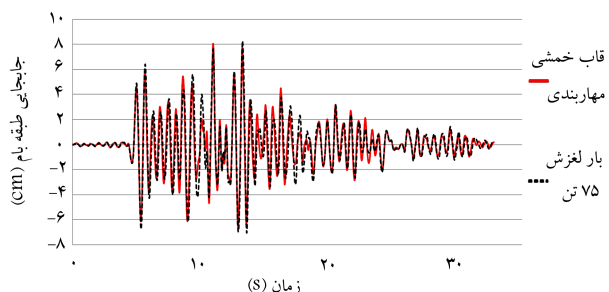
شکل ۹. نمودار برش طبقات - بار لغزش میراگر (طبقه‌ی اول) در توزیع نسبتی.



شکل ۱۰. نمودار تغییرمکان طبقات - بار لغزش میراگرها در توزیع یکنواخت.



شکل ۶. نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بام و برش پایه‌ی مربوط به قاب خمشی و قاب بهسازی‌شده با بار لغزش صفر.



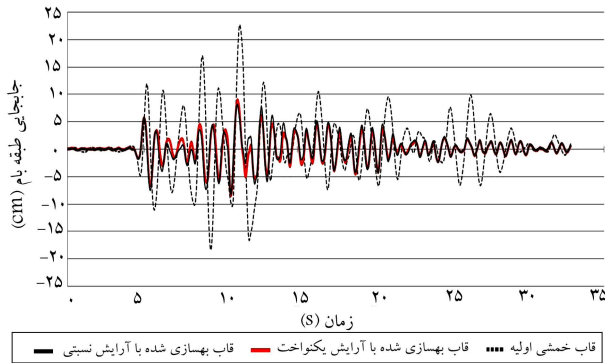
شکل ۷. نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بام و برش پایه‌ی مربوط به قاب مهاربندی و قاب بهسازی‌شده با بار لغزش ۷۵ تن.

۴. تحلیل قاب‌ها

میراگرهای اصطکاکی ادواتی هستند که به زلزله‌های معمولی و متوسط حساس نیستند و در حین رخداد زلزله‌ی قوی مانند فیوز عمل می‌کنند و با لغزش تحت نیرویی از پیش معلوم، از تغییر فرم‌های فرا ارتجاعی بزرگ در اعضای اصلی جلوگیری می‌کنند. از آنجا که قیاس یک موضوع در دو وضعیت متفاوت مدنظر است و همچنین طراحی قاب خمشی اولیه برای زلزله‌ی طبع انجام شده است، لذا برای تحلیل تاریخچه‌ی زمانی قاب‌ها از رکورد زلزله‌ی طیس نرمال به $g = 0.5$ PGA استفاده شد تا در بردارنده‌ی مطالب مذکور باشد. تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به ازاء بار آستانه‌ی لغزش میراگرها در بازه‌ی ۰ تا ۴۰ تن در حالت توزیع بار لغزش میراگرها به صورت یکنواخت و همچنین متناسب با برش پایه انجام شد. تغییرات در جابجایی طبقات به‌ویژه طبقه‌ی بام

جدول ۲. جابجایی انجام‌شده‌ی طبقات در قاب‌های سه‌گانه (cm).

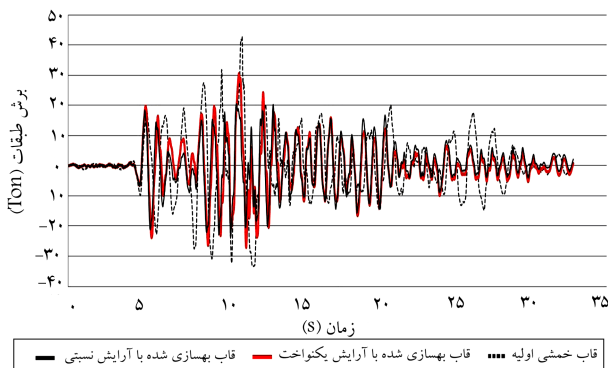
نوع قاب	طبقات				
	۵	۴	۳	۲	۱
قاب خمشی	۲۲٫۷۱	۱۷٫۹۲	۱۳٫۲۹	۷٫۹۸	۴٫۱۷
آرایش یکنواخت	۸٫۹۲	۸٫۰۶	۶٫۳۷	۴٫۲۰	۱٫۹۰
آرایش نسبتی	۸٫۱۳	۷٫۰۴	۵٫۲۰	۳٫۰۶	۱٫۲۸



شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بام در سه حالت.

جدول ۳. درصد کاهش جابجایی انجام‌شده در طبقات قاب‌های با توزیع متفاوت نسبت به قاب خمشی.

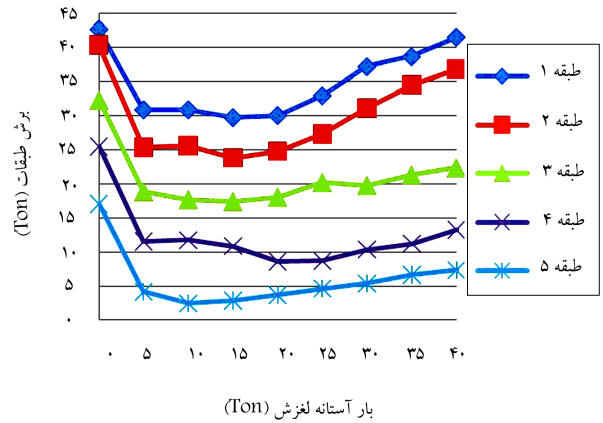
نوع توزیع	طبقات				
	۵	۴	۳	۲	۱
آرایش یکنواخت	۶۰٫۷۱	۵۴٫۹۸	۵۲٫۰۷	۴۷٫۲۸	۵۴٫۴۲
آرایش نسبتی	۶۴٫۱۷	۶۰٫۷۰	۶۰٫۸۶	۶۱٫۶۷	۶۹٫۲۹
آرایش نسبتی نسبت به آرایش یکنواخت	۸٫۷۹	۱۲٫۶۹	۱۸٫۳۴	۲۷٫۳۰	۳۲٫۶۲



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی نیروی برشی وارد بر ستون‌های طبقه‌ی اول در سه حالت.

جدول ۴. درصد کاهش برش طبقات.

طبقات	آرایش یکنواخت	آرایش نسبتی
۱	۲۸٫۷	۵۲٫۳
۲	۴۲٫۰	۵۵٫۰
۳	۴۸٫۳	۴۶٫۹
۴	۶۲٫۸	۵۰٫۳
۵	۸۰٫۹	۶۶٫۸



شکل ۱۱. نمودار برش طبقات - بار لغزش میراگرها در توزیع یکنواخت.

جدول ۱. بار بهینه‌ی لغزش در توزیع نسبتی.

طبقات	۵	۴	۳	۲	۱
بار لغزش (kg)	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۹۰۰۰	۲۳۷۵۰	۲۵۰۰۰

۵. مقایسه‌ی نتایج

۱.۵. بیشینه‌ی تغییرمکان طبقات

استفاده از میراگر اصطکاک‌کامی در هر دو نوع آرایش یکنواخت و متناسب با برش پایه توانست به میزان قابل توجهی از بیشینه‌ی تغییرمکان طبقات به‌کاهد (جدول ۲). این کاهش به ویژه طبقه‌ی بام مشهودتر است (شکل ۱۲).

به طوری که درصد کاهش جابجایی بام برای آرایش یکنواخت و متناسب با برش پایه، نسبت به قاب خمشی اولیه به ترتیب ۶۰٫۷۱ و ۶۴٫۱۷ درصد بوده است (جدول ۳). مطابق جدول ۳ عملکرد سیستم بهسازی شده در آرایش متناسب با برش پایه در قیاس با سیستم با آرایش یکنواخت برای تمامی طبقات بهبود داشته است. کمینه‌ی بهبود عملکرد نسبت به قاب خمشی اولیه ۳٫۲٪ و در طبقه‌ی بام دیده می‌شود و این یعنی میزان جابجایی طبقات در آرایش نسبتی کمینه ۸٫۷۹ کمتر از سیستم با آرایش یکنواخت است.

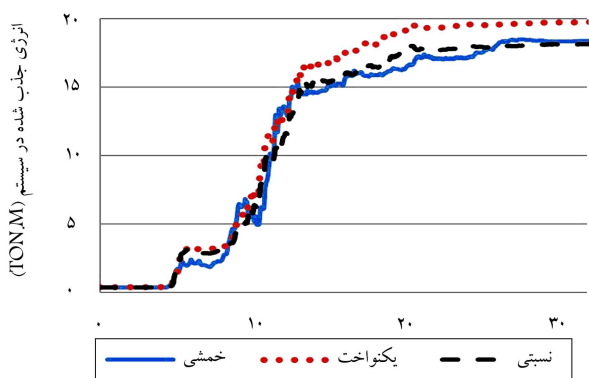
۲.۵. برش طبقات

استفاده از هر دو نوع آرایش در سیستم باعث کاهش برش طبقات و به ویژه برش پایه شد. میزان کاهش برش پایه در مورد آرایش یکنواخت ۲۸٫۷٪ و در مورد آرایش متناسب با برش پایه ۵۲٫۳٪ برش پایه‌ی قاب خمشی است (شکل ۱۳). اما دقت در توزیع این کاهش جالب‌تر است. چرا که دیده می‌شود تأثیر آرایش یکنواخت در طبقات بالاتر و آرایش متناسب با برش پایه در طبقات پایین‌تر بیشتر است. همان‌گونه که در جدول ۴ نیز دیده می‌شود، در توزیع یکنواخت میزان تأثیر میراگر در کاهش برش طبقات بالا و پایین اختلاف فاحشی دارد. و این در حالی است که در توزیع نسبتی، انرژداری میراگرها به یکدیگر نزدیک‌تر است.

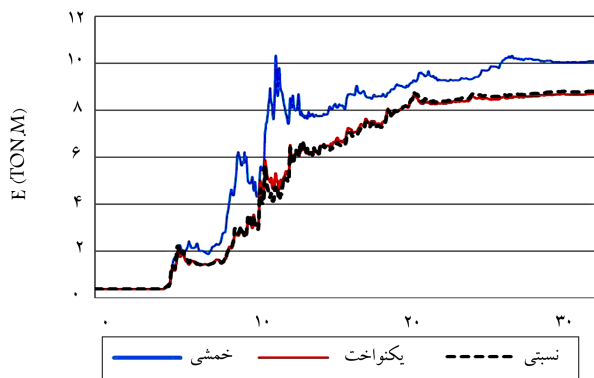
لذا اثر میراگرها برای کاهش برش طبقات در آرایش نسبتی، منظم‌تر و یکنواخت‌تر از آرایش یکنواخت است. بر این اساس در توزیع نسبتی، میراگرهای طبقات بالاتر زودتر از حالت یکنواخت جاری می‌شوند و میراگرهای طبقات پایین‌تر دیرتر از حالت

جدول ۵. درصد تغییرات در مقادیر نیروی محوری ستون‌ها.

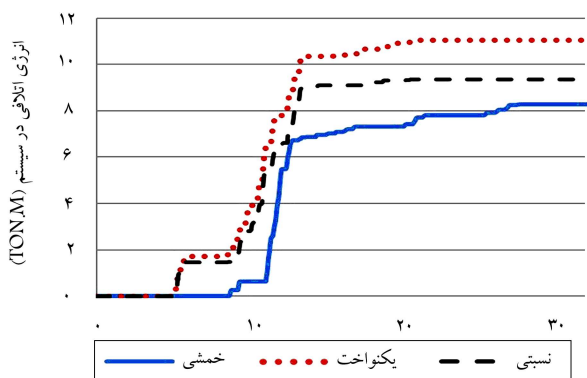
ستون‌ها	نوع آرایش	طبقات				
		۵	۴	۳	۲	۱
کناری	یکنواخت	۲۰٫۷۲	۲۴٫۳۴	۲۴٫۲۳	۲۲٫۲۱	۱۳٫۲۴
	نسبتی	۱۷٫۰۴	۱۹٫۷۴	۲۱٫۷۴	۲۲٫۳۸	۲۶٫۱
میانی	یکنواخت	۷٫۳۵	-۲۲٫۱	-۴۴٫۰	-۵۵٫۴	-۶۰٫۰
	نسبتی	۶٫۹۶	-۱۴٫۶	-۳۴٫۱	-۴۹٫۴	-۶۱٫۱



شکل ۱۴. تاریخچه‌ی انرژی جذب‌شده در قاب در طی زلزله در حالت‌های ۳ گانه.



شکل ۱۵. تاریخچه‌ی انرژی کرنشی سیستم در مدت زلزله در حالت‌های ۳ گانه.



شکل ۱۶. تاریخچه‌ی انرژی اتلافی سیستم در مدت زلزله در حالت‌های ۳ گانه.

به میزان افزایش‌ها می‌تواند جالب توجه باشد. چرا که آرایش یکنواخت نسبت به آرایش نسبتی ۸٪ افزایش انرژی جذب شده داشته است، اما مقدار افزایش انرژی اتلافی فقط در حدود ۷٪ است و این یعنی مقدار سایر انرژی‌ها که می‌تواند در رفتار سازه هم بسیار مؤثر باشد، در آرایش یکنواخت بیشتر از آرایش نسبتی است.

۵.۵. مفصل و عملکرد غیرخطی

در سازه‌ی قاب خمشی اولیه از ۷۰ مفصل غیرخطی تعریف شده، ۵۲ مفصل وارد محدوده‌ی غیرخطی شده‌اند؛ که ۴۷ مفصل ملزومات سطح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه و یک مفصل نیز ملزومات سطح عملکرد ایمنی جانی را ارضاء می‌کنند و ۴ مفصل نیز از محدوده‌ی سطح عملکرد آستانه‌ی فروریزش نیز فراتر می‌روند

یکنواخت می‌لغزند. با این وضعیت در آرایش نسبتی، طبقات بالاتر از ظرفیت خود بیشتر استفاده می‌کنند که نتیجه‌ی آن مقابله‌ی مؤثرتر و جلوگیری از اثر مخرب نیروی برشی وارد، با استفاده‌ی کمتر از ظرفیت طبقات پایین‌تر است از این نوع رفتار می‌توان به عنوان یک مزیت برای استفاده از تمام ظرفیت سازه‌ی موجود به کمک آرایش نسبتی یاد کرد.

۳.۵. نیروی محوری در ستون‌ها

استفاده از میراگرها بر روی نیروی محوری ستون‌های کناری و مجاور مهاربندی در قاب بهسازی شده مؤثر است. این تأثیر در ستون‌های کناری به صورت کاهش و در ستون‌های میانی به صورت افزایش نیروی فشاری است. البته اثر افزایش و کاهش نیروی محوری ستون‌های پایین‌تر قاب بهسازی شده با آرایش نسبتی بر قاب بهسازی شده با آرایش یکنواخت غالب است. در ستون‌های بالاتر دقیقاً بر عکس است، که می‌توان این رفتار را به نزدیک‌تر شدن رفتار قاب مجهز به رفتار قاب مهاربندی شده مرتبط دانست.

در مورد ستون‌های کناری طبقه‌ی اول، مقادیر کاهش نیروی محوری برای آرایش یکنواخت و نسبتی به ترتیب برابر ۲۴٫۱ و ۲۶٫۱ درصد است و در ستون‌های میانی نیز درصد افزایش برابر ۶۰٫۱ و ۶۱٫۱ است (جدول ۵).

۴.۵. انرژی

استفاده از میراگرها می‌تواند بر بروز رفتارهای غیرخطی و ورود اعضای سازه‌ی بی‌ناحیه‌ی غیرخطی اثرگذار باشد که این خود می‌تواند بر جنبه‌های مختلف انرژی تأثیر مفید یا مضر داشته باشد.

در این تحقیق مشاهده شد که به‌کارگیری میراگر سهم قاب خمشی از کل انرژی ورودی را در آرایش یکنواخت به میزان ۴۷٫۳۸٪ و در آرایش نسبتی ۴۷٫۹۶٪ کاهش داد.

همچنین کل انرژی جذب‌شده در مجموعه‌ی سیستم بهسازی شده با آرایش یکنواخت ۷٫۴۵٪ افزایش داشته است و مجموعه سیستم مجهز شده با آرایش نسبتی ۱٫۱۷٪ کاهش داشته است (شکل ۱۴).

در هر دو نوع چیدمان میراگرها، مقدار عددی مجموع انرژی‌ها (به‌جز انرژی غیرکشسان) کاهش دیده می‌شود (شکل ۱۵). میزان انرژی اتلافی غیرکشسان نیز افزایش داشته است (شکل ۱۶).

همان‌طور که از نمودارها دیده می‌شود، با وجود کاهش انرژی ورودی در آرایش نسبتی، مقدار انرژی اتلافی افزایش داشته است؛ در حالی که در آرایش یکنواخت هم انرژی ورودی و هم انرژی اتلافی افزایش داشته است. اما توجه

۲. در آرایش یکنواخت، رانش در طبقه‌ی اول و دوم بیشتر از حالت مربوط به آرایش نسبی است و در طبقات بالاتر کمتر از مقادیر مربوط به آرایش نسبی است. از سویی رانش طبقات در آرایش یکنواخت بین 0.73 و 0.29 و در آرایش نسبی این بازه بین 0.68 و 0.04 ارتفاع طبقه است، و این به مفهوم منظم‌تر بودن توزیع رانش طبقات در آرایش نسبی در قیاس با آرایش یکنواخت است. این نتیجه‌ی استفاده از تمام ظرفیت‌های موجود قاب است.

۳. در مقایسه‌ی آرایش نسبی و آرایش یکنواخت، مقدار برش پایه در حالت نسبی، کاهش‌ی به اندازه‌ی دو برابر کاهش حالت یکنواخت دارد؛ به نحوی که در آرایش نسبی در تمامی طبقات قریب به 55% کاهش دیده شد، در حالی که در آرایش یکنواخت کاهش‌ها در بازه‌ی $28/7$ تا $80/8$ قرار دارد.

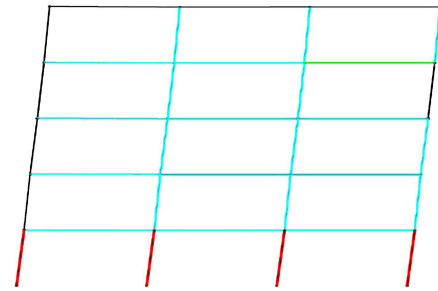
۴. مقدار افزایش نیروی فشاری در ستون‌های میانی به نظر نگران‌کننده است (61%)، اما با توجه به فلسفه‌ی طراحی ستون‌ها در قاب خمشی، با وجود زیاد بودن مقدار افزایش نیروی فشاری، این ستون‌ها بدون هیچ مشکلی این نیرو را تحمل می‌کنند.

۵. آرایش نسبی نیروی فشاری ستون‌های کنار، مهاربندی طبقه‌ی اول را 1% بیشتر از حالت آرایش یکنواخت افزایش داد و در مقابل 2% از سهم فشاری ستون‌های کنار قاب کاست. ولی برای ستون‌های طبقات بالاتر و به ویژه در ستون‌های میانی وضعیت آرایش نسبی بهتر از آرایش یکنواخت شد.

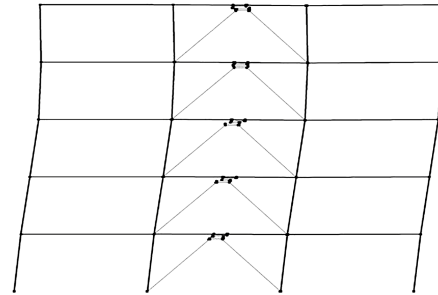
۶. هر چند سهم قاب در آرایش یکنواخت 58% کمتر از حالت آرایش نسبی است، اما آرایش نسبی توانست از میزان کل انرژی ورودی به سیستم بکاهد؛ در حالی که آرایش یکنواخت حدود $7/45\%$ بر انرژی کل ورودی نسبت به قاب خمشی افزوده است. و این یعنی با وجود تقریباً ثابت بودن سهم قاب از اتلاف انرژی مقدار اتلاف انرژی در آرایش یکنواخت بهبود یافته است، که این می‌تواند در اثر چاق‌تر بودن منحنی هیستریک مربوط به میراگرهای پایین‌تر در عوض لاغر یا حتی ناقص بودن منحنی هیستریک میراگرهای بالاتر در اثر بزرگ بودن بار لغزش میراگر از بار رانش طبقه در توزیع یکنواخت باشد.

۷. استهلاک انرژی قاب خمشی 45% است که توسط تیرها و ستون‌ها تلف می‌شود. اما استهلاک قاب‌های بهسازی شده در آرایش یکنواخت و نسبی به ترتیب $55/9$ و $51/46$ از کل انرژی ورودی است، که تماماً توسط میراگرها تلف می‌شود و تیرها و ستون‌ها هیچ مشارکتی ندارند.

۸. استفاده از میراگر توانست از ورود اعضا سازه‌ی به ناحیه‌ی غیرخطی جلوگیری کند، اما از دقت در داده‌های مربوط به نسبت نیاز به ظرفیت دیده می‌شود؛ که آرایش نسبی کاهش بیشتری در این مقدار داشته است، که این می‌تواند در مورد اعضایی که وارد محدوده‌ی غیرخطی می‌شوند پارامتر بسیار مهمی باشد.



شکل ۱۷. عملکرد اعضا وارد شده به محدوده‌ی غیرخطی در قاب خمشی.



شکل ۱۸. عملکرد اعضا وارد شده به محدوده‌ی غیرخطی در قاب خمشی مجهز.

(شکل ۱۷). این در حالی است که در قاب بهسازی شده در هیچ‌یک از آرایش‌ها هیچ مفصلی از ناحیه‌ی خطی فراتر نمی‌رود (شکل ۱۸).

اما از مقایسه‌ی بدترین نسبت، نیاز به ظرفیت‌ها دیده می‌شود که آرایش نسبی در مقایسه با آرایش یکنواخت از درجه‌ی بالاتری از حاشیه‌ی اطمینان (ظرفیت باقی‌مانده تا محدوده‌ی ورود به ناحیه‌ی غیرخطی) برخوردار است. مثلاً در مورد تیرها این عدد در آرایش یکنواخت $14/2\%$ است و در آرایش نسبی $31/4\%$ است و در ستون‌ها این تفاوت‌ها چشمگیرتر است، به نحوی که این اعداد به ترتیب برابر $6/8$ و $37/8$ درصد است.

۶. نتیجه‌گیری

۱. استفاده از میراگر اصطکاکی در کاهش مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان طبقات به ویژه بام بسیار مؤثر است. در این بین، نوع توزیع میراگرها در ارتفاع سازه نیز مؤثر است. به طوری که آرایش متناسب با برش پایه $8/79\%$ عملکرد بهتری داشته است.

پانویس‌ها

1. slotted bolted connection
2. Filiatrault & Aiken
3. simple bar
4. in elastic

منابع (References)

1. Butterworth, J. "Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joint", *journal of the Structural Engineering*, New zeland, **13**(1), pp.39-48(2000).

2. Pall, A.S. and Pall, R. "Friction-dampers used for seismic control of new and existing building in Canada", *Proceeding of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation*, Applied Technology Council (1989).
3. Soong, T.T. and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd. (UK) (1997).
4. Pall, A.S. and Marsh, C. "Response of friction damped braced frame", *Journal Struct. Div., ASCE*, **108**, pp. 1313-23 (1982).
5. Grigorian, C.E., Yang, T.S. and Popov, E.P. "Slotted bolted connection energy dissipaters", *Earthquake Spectra*, **9**(3), pp. 491-504 (August 1993).
6. Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, R.T. and Pall, A. "Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building", 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada Paper No. 1949 13WCEE (1-6 August 2004).
7. Pall, A.S. and pall, R. "Friction Damper for seismic control of buildings", Elsevier Science Ltd, Paper No. 497. (quote when citing this article) 11th World Conference on Earthquake Engineering, ISBN: 0 08 042822 3 (1996).
8. Lyan-Ywan, L., Lap-Loi, C., Lai-Yun, W. and Ging-Long, L. "Dynamic analysis of structures with friction devices using discrete-time state-space formulation", ELSEVIER, *Computers and Structures*, **84**(15-16), pp. 1049-1071 (2006).
9. Khaleghian, F. and Tehrani zadeh, M. "Design of new type friction damper with brake lining pads", *JSEE*, **9**(4), pp.171-182 (2008).
10. De la Cruz, S.T., López -Almansa, F. and Oller, S. "Numerical simulation of the seismic behavior of building structures equipped with friction energy dissipaters", ELSEVIER, *Computers and Structures*, **85**(1-2), pp. 30-42 (2006).
11. Law, S.S., Wu, Z.M. and Chan, S.L. "Analytical model of a slotted bolted connection element and its behaviour under dynamic load", *Journal of Sound and vibration*, **292** pp. 777-787 (2006).
12. Chopra, A.K., *Dynamics of Structure: Thory and Applications to Earthquake Engineering*, Prenticehall, New Jersey (1995).
13. Mahdavian , S ; Fallah , N ; Pourzeynali , S ; Using the friction damper for seismic vibration control of buildings ; 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, (In Persain) (2007).
14. CSI, Performe-3D Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, USER GUIDE, Berkeley, California, USA (2006).
15. Yaomin, F.U. and Sheldon, C. "Performance comparison of different Friction Damped systems", 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE) (2000).
16. Butterworth, J. "Seismic damage limitation in steel frames using friction energy dissipaters", 6th International Conference on Steel & Space Structures (1999).
17. Nateghi Elahi , F ; Energy dampers in seismic retrofitting of buildings [Original Language : Persian]; International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, (In Persain) (1999).