

# بررسی موردی عملکرد سیستم‌های کنترلی لرزه‌ای در سازه‌های بیمارستانی

ناصر اسدپور<sup>۱</sup>، آرش رایگانی<sup>۲</sup>

۱- مدیر گروه سازه مهندسین مشاور گروه ۴

۲- دانشجوی دکتری عمران سازه دانشگاه خوارزمی تهران، ایران

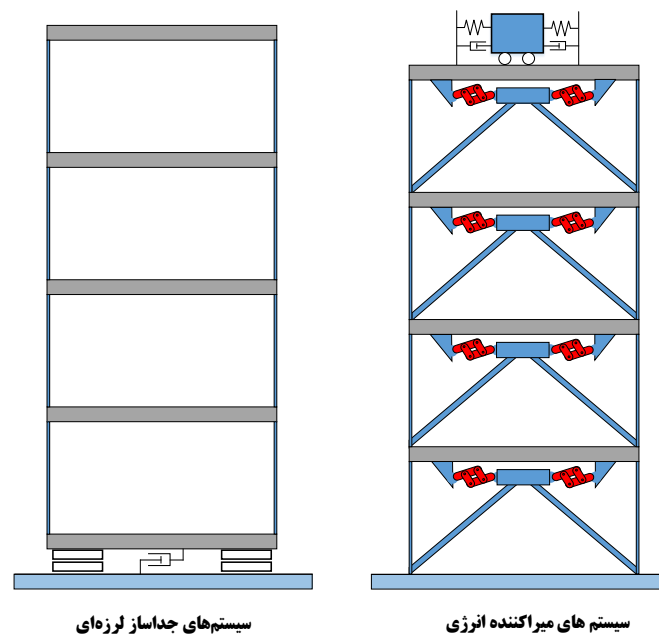
تجربیات زلزله‌های اخیر در شهرهای مختلف کشور از جمله ازگله، سراوان و بم که با خسارت‌های شدید به ساختمان‌های مهم مانند بیمارستان‌ها و مراکز مدیریتی که دارای نقش بسیار مهمی در سرویس دهی به آسیب دیدگان پس از زلزله هستند، نشان داده است که می‌باید توجه ویژه به دستیابی و حتی افزایش عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های با اهمیت زیاد به میزانی فراتر از شاخص‌های در نظر گرفته شده در آیین نامه‌های لرزه‌ای کشور، از اولویت‌های اصلی در مدیریت بحران زلزله می‌باشد. به‌کارگیری سیستم‌های کنترل لرزه‌ای مانند میراگرها و جداسازهای لرزه‌ای یکی از کارآمدترین روش‌ها جهت افزایش عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها می‌باشد که در بسیاری از کشورهای پیشرفته به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم‌های کنترل لرزه‌ای با جذب بخشی از نیروی ورودی زلزله باعث کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای و در نتیجه کاهش خسارت‌های ایجاد شده ساختمان می‌شود. در این پژوهش علاوه بر بیان نحوه عملکرد سیستم‌های کنترلی لرزه‌ای، به‌صورت موردی نمونه‌هایی از بیمارستان‌های مهم داخل کشور که به سیستم‌های میراگر مجهز شده‌اند معرفی شده و شاخص‌های عملکردی سازه و سیستم‌های لرزه‌ای و میرایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۱- مقدمه:

کشور ایران در یکی پر لرزه‌خیزترین نقاط جهان قرار دارد و هر ساله زلزله‌های متعددی را تجربه می‌کند. در سال‌های اخیر زلزله‌های شدیدی در شهرهای مختلفی مانند سر پل ذهاب، کرمان و ... رخ داده است که باعث ایجاد خسارت‌های مالی و جانی بسیاری شده است و تا به حال نیز آثار این خرابی‌ها پا بر جا مانده و ساکنین آن مناطق را با مشکلات مختلفی روبرو کرده است. در این زلزله‌ها متأسفانه برخی از ساختمان‌های مهم مانند بیمارستان نیز دچار آسیب شده است که همین امر خسارت‌های جانی را افزایش داده است. بیمارستان به عنوان محلی امن جهت درمان و پنا گرفتن افراد پس از زلزله به شمار می‌آید و لازم است پس از زلزله‌های شدید نیز به سرویس دهی خود ادامه دهند. این تجربیات نشان داده است که به‌کارگیری روش‌های نوین در طراحی و ساخت سازه‌های مهم مانند بیمارستان‌ها در کنار در نظرگیری راهکارهای نظارتی دقیق بر روی ساخت ساختمان‌های بیمارستانی بسیار مهم می‌باشد. در بسیاری از کشورهای لرزه‌خیز و پیشرفته استفاده از تکنولوژی‌های نوین کنترل لرزه‌ای به عنوان یک راهکار مناسب جهت کاهش خسارت‌های ناشی از نیروهای زلزله و افزایش عملکرد سازه‌ها در برابر زلزله به شمار می‌آیند. رویکرد کلی روش‌های متداول طرح سازه‌ها افزایش مقاومت سازه با افزودن اعضای

باربر جانبی بیشتر می‌باشد. به طور کلی افزایش مقاومت در سازه‌ها باعث افزایش سختی سازه و در نتیجه افزایش نیروی ورودی به سازه در هنگام زلزله می‌شود در حالی که بکارگیری سیستم‌های کنترل لرزه‌ای، باعث کاهش میزان انرژی جذب شده توسط سازه بواسطه جذب حداکثری انرژی توسط سیستم‌های جاذب انرژی خواهد شد. استفاده از انواع سیستم‌های کنترلی در دهه‌های گذشته مورد توجه بسیاری از طراحان و پژوهشگران قرار گرفته و تحقیقات بسیاری بر روی انواع این سیستم‌ها انجام شده است [۱-۳]. خوشبختانه در سال‌های اخیر در کشور ما نیز با بهره‌گیری از تجربیات کشورهای پیشرو در استفاده از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای، بکارگیری انواع سیستم‌های جاذب انرژی و جداساز لرزه‌ای در سازه‌های مهم رو به‌گسترش بوده است.

سیستم‌های میرایی به لحاظ وابستگی به انرژی خارجی به سه دسته کلی میراگرهای غیر فعال، نیمه فعال و فعال تقسیم می‌شوند. در این بین سیستم‌های غیر فعال به جهت عدم وابستگی خود به انرژی خارجی، قیمت مناسب و عملکرد ساده آنها در سالیان گذشته از استقبال بیشتری برخوردار بوده و در سازه‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۷]. در شکل ۱ رویکرد کلی در جایگذاری انواع سیستم‌های جاذب انرژی به نمایش در آمده است. سیستم‌های جداسازی با قرار گیری در زیر ساختمان و ایجاد یک تراز نرم میزان انرژی ورودی به سازه را کاهش داده و سیستم‌های میراگر با قرار گیری در میان طبقات انرژی وارد شده به سازه را میرا می‌نمایند.

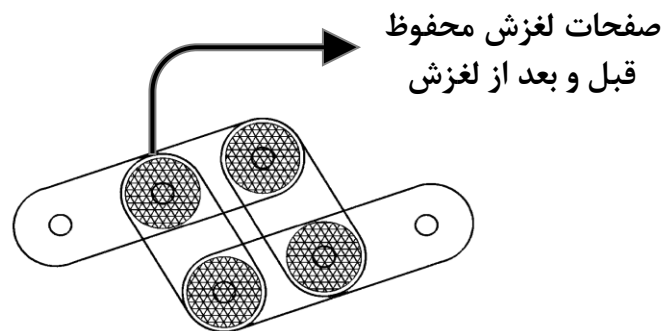


شکل ۱- سه مفهوم کلی از جایگذاری میراگرهای غیر فعال

## ۲- میراگرهای اصطکاکی دورانی

میراگرها از لحاظ عملکردی به دو دسته، وابسته به جابجایی و وابسته به سرعت تقسیم بندی می‌شوند. یکی از انواع سیستم‌های کنترلی وابسته به جابجایی میراگرهای اصطکاکی دورانی می‌باشد که در دو پروژه مورد بررسی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو در ادامه به توضیحاتی در رابطه با ویژگی‌های این میراگر پرداخته می‌شود. ثبت رسمی اولین انواع میراگرهای اصطکاکی به قبل از سال ۱۹۵۰ بر می‌گردد. این میراگرها

بدلیل ویژگی‌های خاص از جمله نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری، نصب آسان، طول عمر زیاد و قیمت مناسب از مقبولیت زیادی در میان طراحان برخوردار بوده‌اند. در دهه‌های گذشته محققین بسیاری از جمله پال<sup>۱</sup> و مارش<sup>۲</sup> [۸]، فیتسگراالد<sup>۳</sup> [۹]، آیکن<sup>۴</sup> و کلی<sup>۵</sup> [۱۰]، کونستانتینو<sup>۶</sup> و رینهورن<sup>۷</sup> [۱۱]، گریگورین<sup>۸</sup> و پوپوف<sup>۹</sup> [۱۲]، نیمس<sup>۱۰</sup> [۱۳] بر روی این نوع از میراگرها مطالعه و تحقیق نموده و عملکرد آن را بهبود بخشیده‌اند. در سال ۱۹۹۸ دکتر معلا<sup>۱۱</sup> نسل جدید از این میراگرهای اصطکاکی به نام میراگرهای اصطکاکی دورانی مجهز به پدهای اصطکاکی را ارائه نموده و از آن پس تحقیقات بسیاری پیرامون این میراگر صورت پذیرفت [۱۴، ۱۵]. در یک دهه گذشته این میراگر در پروژه‌های مختلف از جمله بلندترین برج کشور ژاپن استفاده شده است. صفحات لغزش در این میراگرها به واسطه عملکرد دورانی، بر خلاف میراگرهای نسل‌های پیشین خود، همواره قبل و بعد از لغزش محفوظ بوده و بر روی هم قرار دارند (شکل ۲). این ویژگی در میراگرهای اصطکاکی دورانی باعث می‌شود احتمال تاثیر شرایط محیطی، نفوذ و سمنتگی<sup>۱۲</sup> مواد زائد بر روی صفحات لغزش از بین برود و عملکرد قابل اطمینان در طول عمر سازه برای میراگر قابل پیشبینی باشد.

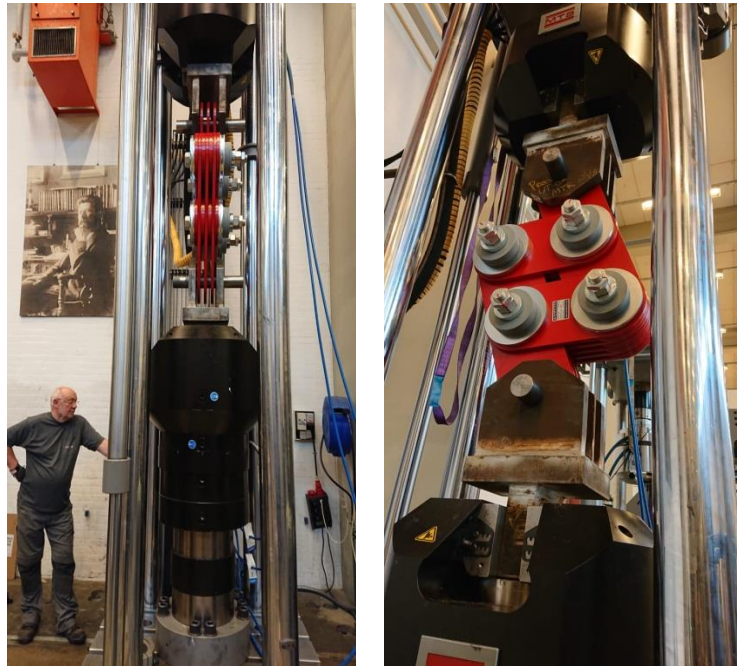


شکل ۲- ناحیه اصطکاکی در میراگرهای اصطکاکی دورانی

به‌طور کلی در مورد تمام انواع تجهیزات کنترلی، این تجهیزات می‌باید قبل از نصب در ساختمان مطابق ضوابط آیین نامه‌های معتبر مورد آزمایش قرار گرفته تا از صحت رفتار و عملکرد آنها اطمینان حاصل شود. میراگرهای اصطکاکی دورانی بکار رفته در سازه‌های مورد بررسی در این مقاله نیز طبق ضوابط آیین نامه‌ای تحت آزمایش‌های Prototype و Production در یکی از معتبرترین آزمایشگاه‌های دنیا در دانشگاه DTU دانمارک آزمایش شده‌اند.

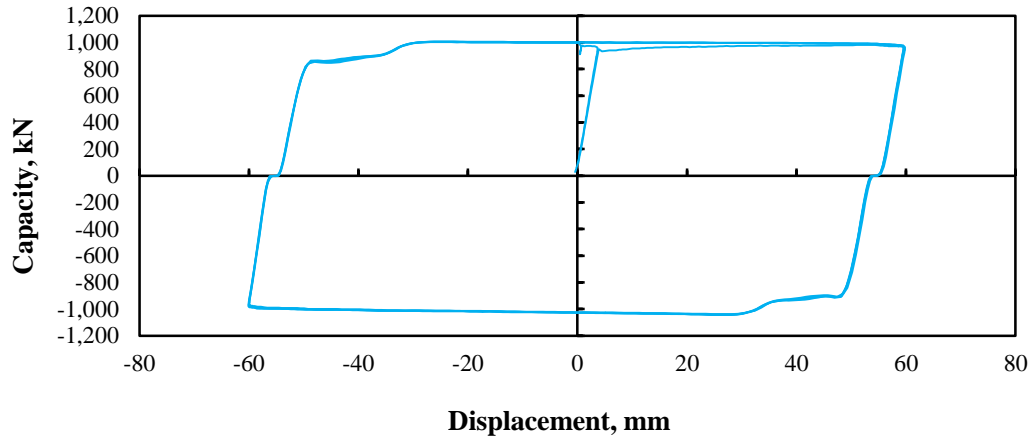
1 Pall  
 2 Marsh  
 3 Fitzgerald  
 4 Aiken  
 5 Kelly  
 6 Constantinou  
 7 Reinhorn  
 8 Grigorian  
 9 Popov  
 10 Nims  
 11 Moalla  
 12 cemented

در شکل ۳ نمونه تصاویری از نحوه‌ی تست این میراگرها نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها میراگرها حتی بیش از مقادیر درخواست شده در آیین نامه، تحت آزمایش‌های چرخه‌ای قرار گرفته و ارزیابی شده‌اند.



شکل ۳- میراگرهای اصطکاکی دورانی DAMPTECH در حال آزمایش در آزمایشگاه دانشگاه DTU دانمارک

مطابق نتایج آزمایشگاهی و با توجه به استفاده از پدهای اصطکاکی خاص در این میراگر، رفتار و نیروی ایجاد شده در سیکل‌های متوالی متعدد نیز تغییر نکرده، مقادیر پاسخ نیرویی پایدار در چرخه‌های مختلف حاصل می‌شود. این ویژگی برای میراگرهای نصب شده در ساختمان‌های بلند که در معرض نیروهای باد شدید قرار می‌گیرند و امکان فعال شدن آنها در طول عمر سازه برای تعداد دفعات بسیار زیاد محتمل می‌باشد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. همچنین در آزمایشی دیگر نمونه‌ای از میراگرهای اصطکاکی دورانی تحت آزمایش ۱۰ هزار سیکل قرار گرفته و نتایج آن نشان داده است که مقدار نیروی ایجاد شده در این نوع از میراگرها حتی تحت این تعداد چرخه حرکتی بسیار زیاد نیز ثابت بوده و کمترین تغییر (کمتر از ۴ درصد) را در خود داشته است. در بخش بعد به معرفی دو سازه بیمارستانی مهدی کلینیک و آتیه ۲ که به این نوع از سیستم‌های میرایی مجهز شده‌اند پرداخته می‌شود و نتایج تحلیل بیمارستان آتیه ۲ به عنوان نمونه‌ای از نحوه‌ی عملکرد سیستم‌های میرایی آن ارائه می‌گردد.



شکل ۴) نمودار چرخه هیستریزس ۴ سیکل کامل میراگر اصطکاکی دورانی ۱۰۰ تنی

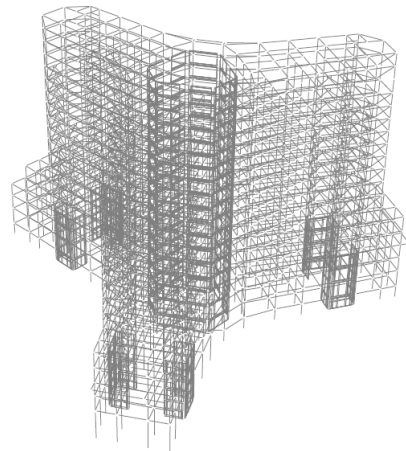
### ۳- نمونه بیمارستان‌های مجهز به سیستم میرایی در ایران

#### ۱-۳ بیمارستان‌های بیمارستان ۸۰۰ تخت خوابی مهدی کلینیک

بیمارستان هشتصد تخت‌خوابی مهدی کلینیک در ۱۹ طبقه ساخته شده و با توجه به تمهیدات در نظر گرفته شده این ساختمان یکی از مجهزترین بیمارستان‌ها در خاورمیانه خواهد بود. سازه این ساختمان متشکل از قاب خمشی فولادی ویژه و هسته دیوار بتنی بوده که عملکرد لرزه‌ای آن با استفاده از میراگرهای اصطکاکی دورانی ارتقاء پیدا کرده است. در شکل ۸ نمای کلی و مدل المان محدود این ساختمان نشان داده شده است.



ب) نمای سه بعدی از بیمارستان مهدی کلینیک

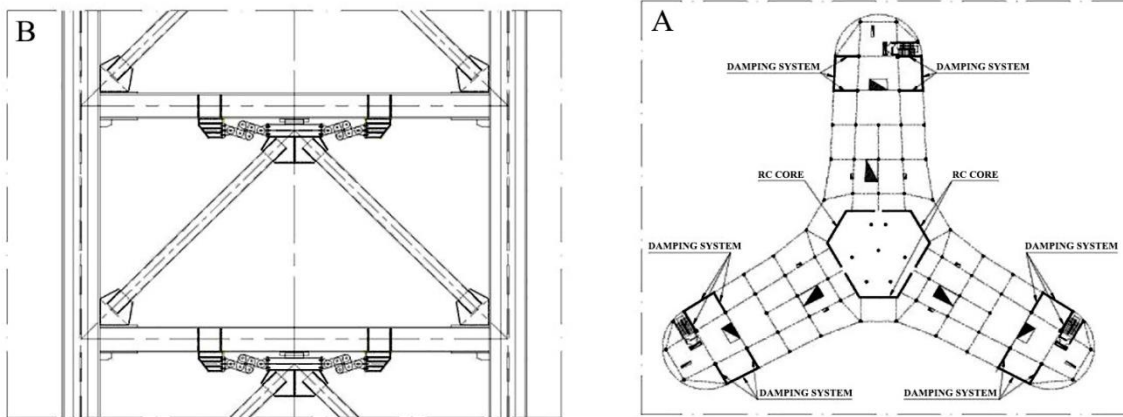


الف) مدل Perform3D

شکل ۵- بیمارستان مهدی کلینیک

همانطور که در شکل ۶-الف نشان داده شده است این ساختمان در مرکز خود دارای یک هسته بتنی در کنار قاب خمشی فولادی ویژه بوده و در دهانه‌هایی از قاب به میراگرهای اصطکاکی دورانی مجهز شده‌اند که بصورت دوتایی مطابق شکل ۶-ب نصب گردیده‌اند. در طراحی برای دستیابی به ظرفیت‌های مناسب میراگرها، پس از انجام

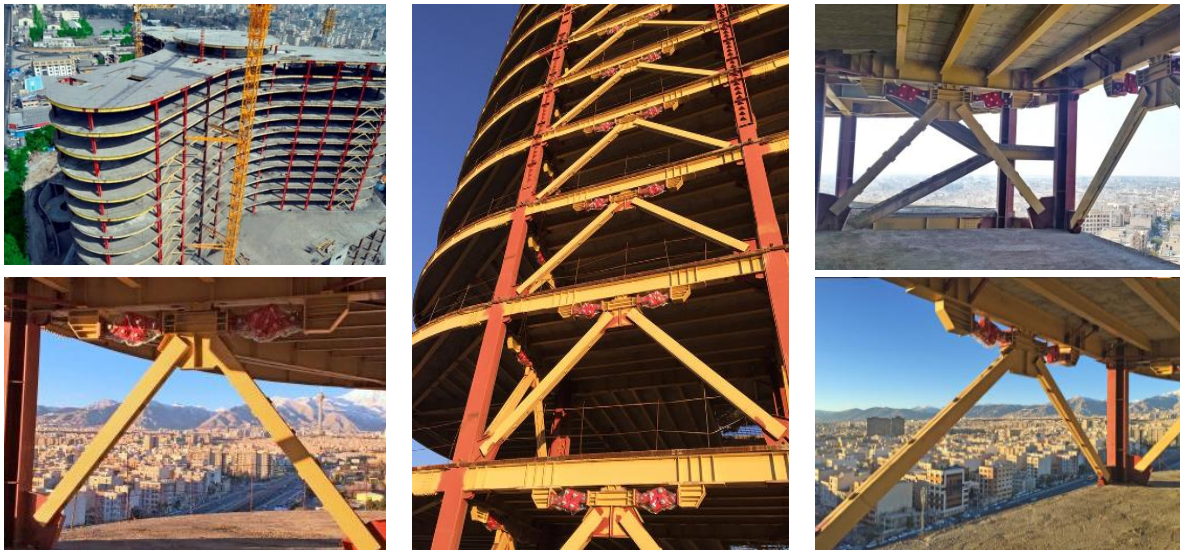
تحلیل‌های رفت و برگشتی از میراگرهایی با ظرفیت نیرویی ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ تنی با ظرفیت جابجایی ۱۴ سانتی‌متر استفاده شده است. البته میزان جابجایی حداکثر سازه بسیار کمتر از این میزان بوده و استفاده ظرفیت جابجایی بیشتر، با هدف کمک به سازه حتی در زلزله‌هایی فراتر از زلزله mce انجام پذیرفته است.



شکل ۷-ب) نمای نحوه نصب میراگرهای اصطکاکی دورانی

شکل ۶-الف) پلان محل قرارگیری میراگرهای اصطکاکی دورانی

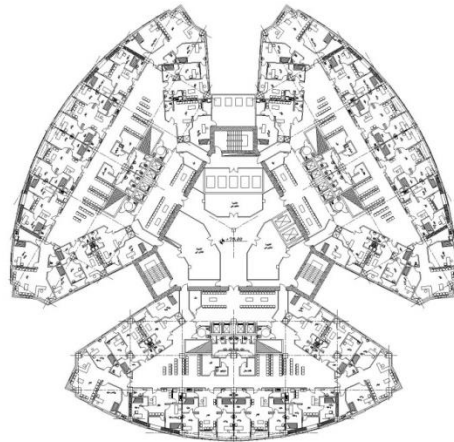
مطابق نتایج تحلیل‌های غیر خطی تاریخچه زمانی، تجهیز سیستم باربر جانبی سازه این ساختمان به سیستم‌های جاذب انرژی میراگرها اصطکاکی دورانی توانسته مقدار قابل توجهی نیروهای وارد شده به ساختمان را کنترل کرده و پاسخ‌های سازه ای را کاهش دهد و در نتیجه سهم جذب سازه از مقدار انرژی ورودی به ساختمان در حالت با میراگر نسبت به ساختمان بدون میراگر بسیار کاهش یابد.



شکل ۸- تصاویری از دهانه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی در بیمارستان مهدی کلینیک

## ۲-۳ بیمارستان ۷۰۰ تخت خوابی آتیه غرب ۲

این بیمارستان دارای ۷۰۰ تخت خواب بوده که در ۳۶ طبقه در منطقه شهرک غرب تهران در حال ساخته شدن می‌باشد. سازه این ساختمان از نوع فولادی بوده و سیستم باربر جانبی آن متشکل از قاب خمشی، دیوار برشی فلزی می‌باشد که به سیستم‌های جاذب انرژی میراگر اصطکاکی دورانی مجهز شده است. همچنین در سه طبقه این ساختمان از کمربندهای<sup>۱۳</sup> دیوار برشی فلزی استفاده شده است. در شکل ۹ نمای پلان و نمای سه بعدی این بیمارستان به نمایش در آمده است.



شکل ۹- نمای پلان و سه بعدی از بیمارستان آتیه

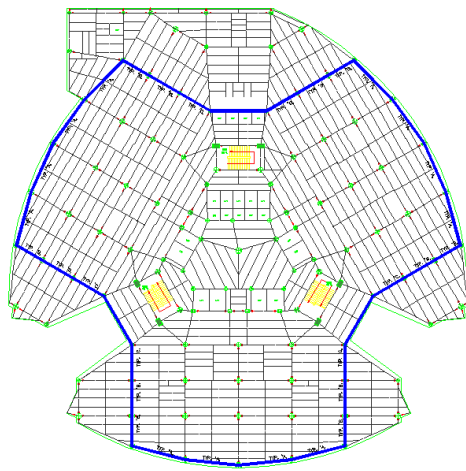
این ساختمان بیمارستانی که پیش بینی شده با تجهیز آن به جدیدترین تجهیزات پزشکی به یکی از پیشرفته‌ترین بیمارستان‌های کشور تبدیل گردد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد و عملکرد لرزه ای آن یکی از موضوعات بسیار مهم در طرح این سازه است. همانطور که ذکر شد سیستم‌های سازه‌ای متداول در هنگام زلزله‌های شدید دچار خرابی‌هایی گاه‌ب‌گاه از سطح عملکردی بی‌وقفه می‌گردد، خواهد شد که این امر می‌تواند بهره برداری از ساختمان را در زمان پس از زلزله با مشکل روبرو سازد. از این رو در این ساختمان با هدف کاهش خرابی‌ها و کاهش میزان نیروها و جابجایی‌ها به محدوده عملکرد بی وقفه از سیستم‌های جاذب انرژی میراگرهای اصطکاکی دورانی در کنار سیستم‌های باربر جانبی آن استفاده شده است. در جدول ۱ تعداد و ظرفیت میراگرهای بکار رفته در این پروژه نشان داده شده است.

جدول ۱- تعداد و ظرفیت میراگرهای بکار رفته در پروژه بیمارستان آتیه غرب ۲

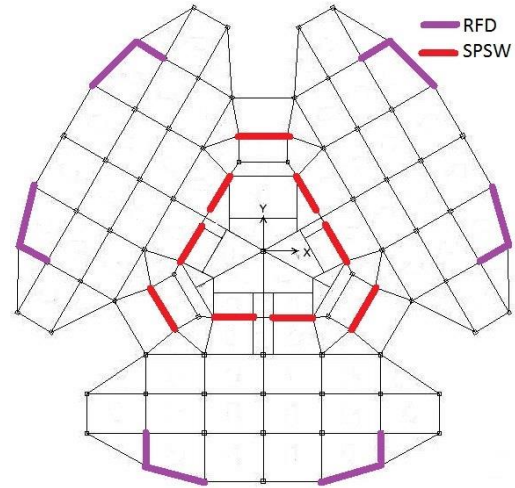
ظرفیت میراگر (kN)	تعداد
۱۰۰۰	۲۷۰
۸۰۰	۹۶
۵۰۰	۶۰

<sup>13</sup> Outrigger

در شکل ۱۰-الف محل قرار گیری دیوارهای برشی فلزی و دهانه‌های مجهز به میراگر نشان داده شده است. در شکل ۱۰-ب محل قرار گیری کمر بند دیوار برشی فلزی مشخص شده است. این کمر بندهای دیوار فلزی در سه طبقه از ساختمان قرار خواهند گرفت.

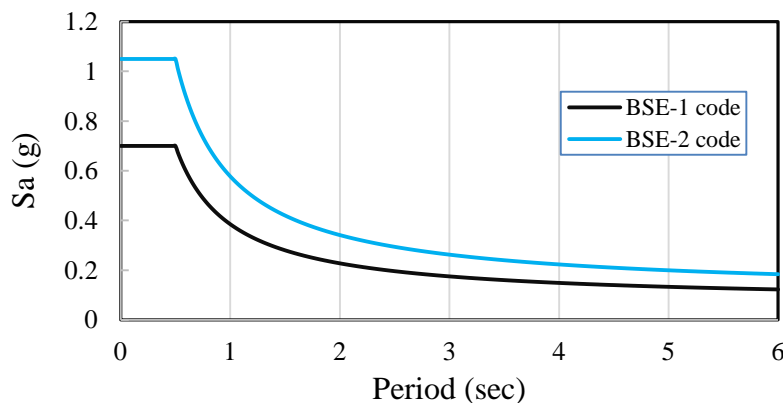


شکل ۱۱-ب) محل قرارگیری دهانه‌های کمر بند دیوار برشی فولادی



شکل ۱۰-الف) محل قرارگیری دهانه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی دورانی (RFD) و دیوارهای برشی فولادی (SPSW)

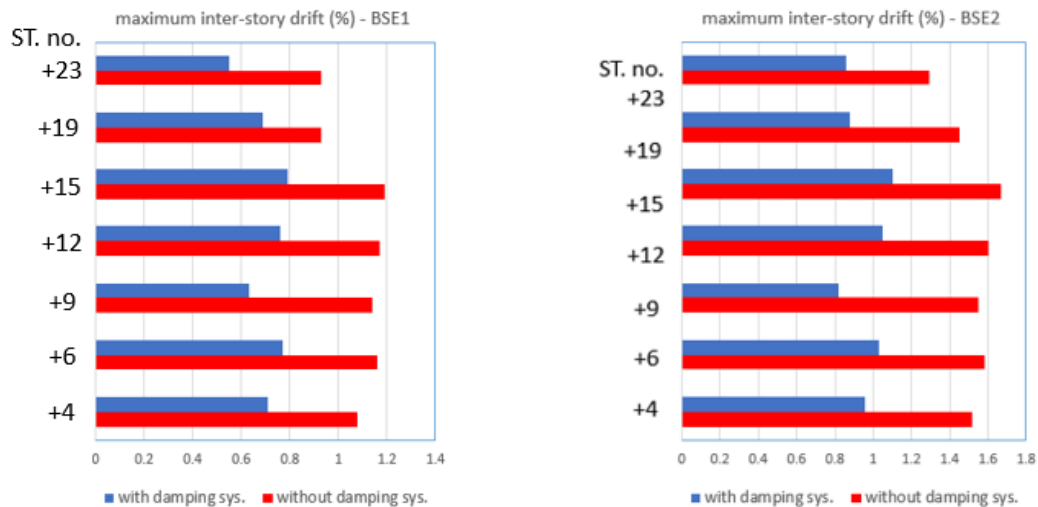
در طرح این ساختمان در کنار بررسی‌های مختلف فنی و مهندسی انجام گرفته بر روی جزئیات مختلف آن، از تحلیل‌های خطی، تحلیل استاتیکی غیر خطی و تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی مودال استفاده شده است. جهت بررسی کلی عملکرد میراگرهای اصطکاکی - دورانی تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی اشاره شده، این المانها بدون هیچ تغییر دیگری از سازه حذف شده و میزان تاثیر میراگرها در سازه با میراگر و بدون میراگر بررسی شده است. جهت انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی از سه رکورد متناسب با شرایط سازه و شرایط ساختگاه پروژه استفاده شده است. این رکوردها طبق ضوابط آیین نامه ASCE7-10 به طیف طرح مقیاس شده‌اند. طیف طرح زلزله این سازه در دو سطح خطر زلزله براساس ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال که معادل دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال و سطح خطر براساس ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال که معادل دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ سال می‌باشد بررسی شده است. در شکل ۱۲ طیف طرح زلزله برای دو سطح خطر نشان داده شده است.



شکل ۱۲- طیف طرح زلزله در سطح خطر یک (BSE-1) و دو (BSE-2)



مقادیر دررفت نسبی طبقات برای دو سطح خطر مطابق با شکل ۱۳ می‌باشد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است بکارگیری میراگرها توانسته مقادیر دررفت نسبی طبقات را در اکثر طبقات بیش از ۴۰ درصد کاهش دهد.

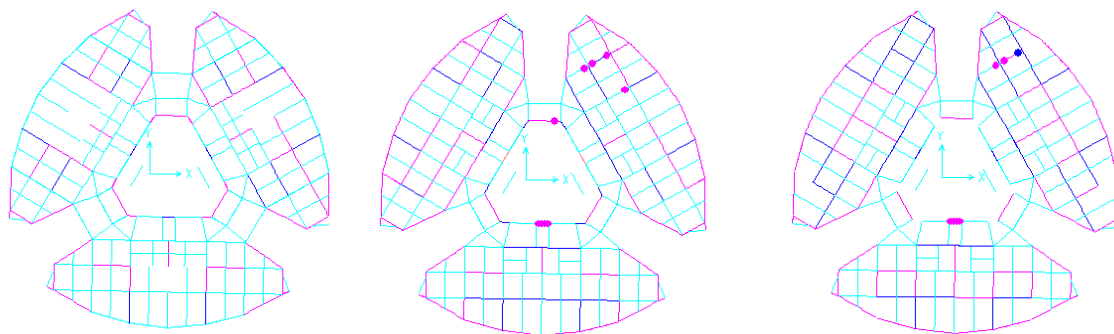


مقادیر نسبت دررفت طبقات در سطح خطر BSE1

مقادیر نسبت دررفت طبقات در سطح خطر BSE2

شکل ۱۳- مقادیر نسبت دررفت سازه

این پروژه جهت بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه مجهز به میراگرها از ضوابط و معیارهای دستور العمل FEMA356 و ASCE41 جهت انجام تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی استفاده شده است. نمونه ای از نتایج بدست آمده مربوط به مفاصل تشکیل شده در تیرهای سازه تحت سطح خطر ۱ و ۲ در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است. مفاصل محدود نشان دهنده دستیابی به عملکرد مورد نظر در سطح خطرهای مورد بررسی بوده است.

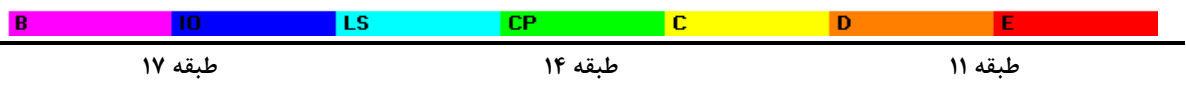
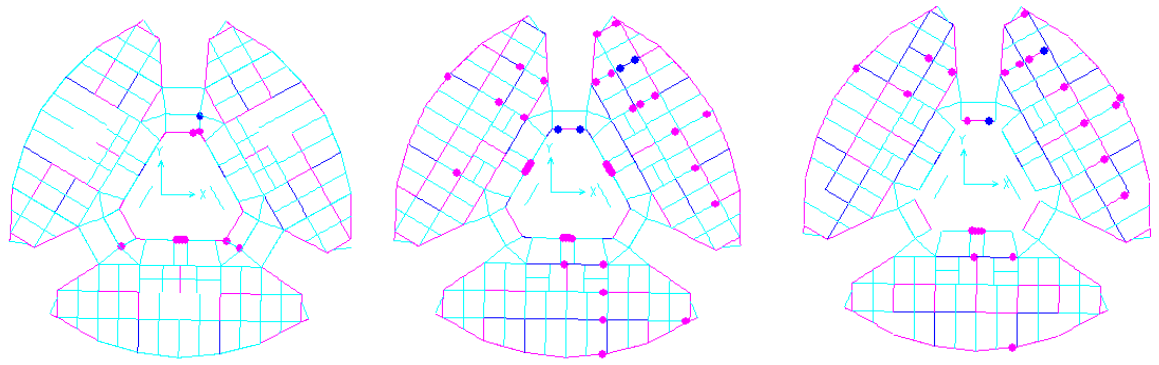


طبقه ۱۷

طبقه ۱۴

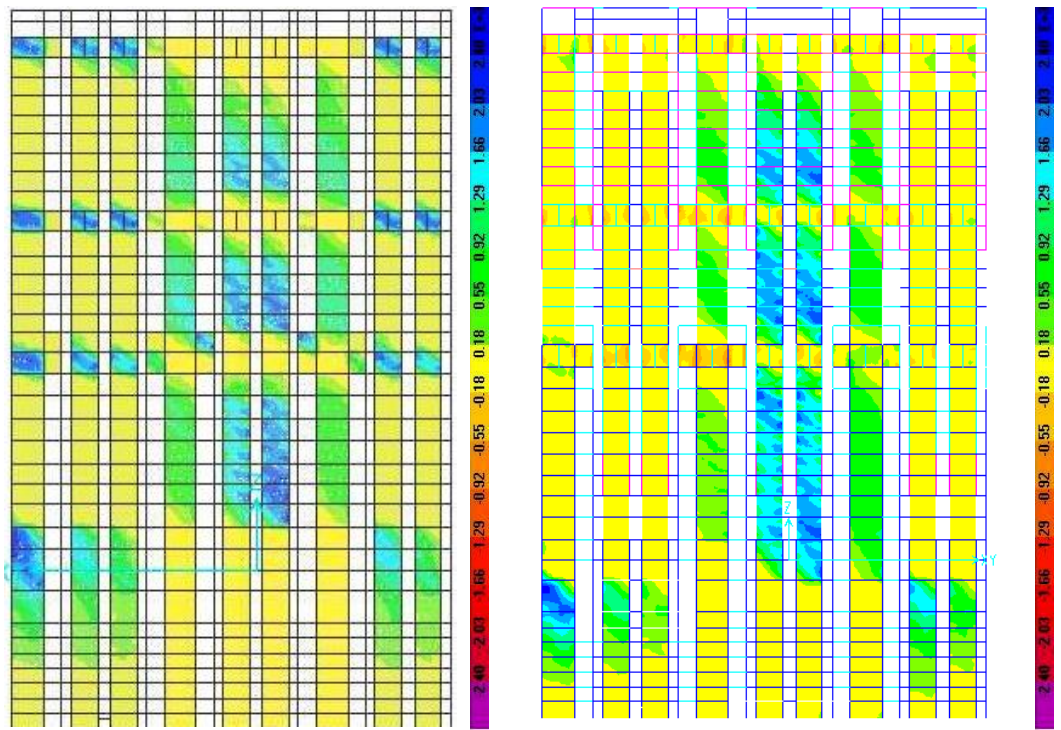
طبقه ۱۱

شکل ۱۴- نمونه‌هایی از وضعیت مفاصل پلاستیک تیرها در سطح خطر ۱ تحت تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی



شکل ۱۵- نمونه‌هایی از وضعیت مفاصل پلاستیک تیرها تحت در سطح خطر ۲ تحت تحلیل تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی

در شکل ۱۶ شکل ۱۷ وضعیت دیوارهای برشی فلزی در خصوص میزان و نحوه توزیع تنش‌ها به ترتیب تحت زلزله با سطح خطر ۱ و ۲ قابل مشاهده است. تشکیل باند کششی و عدم مقاومت دیوارهای برشی فولادی سخت نشده در فشار در این شکل‌ها قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۱۷- نمونه وضعیت میزان و نحوه توزیع تنش‌ها در دیوارهای برشی فولادی سخت نشده در طبقات تحت زلزله با سطح خطر ۱\*

شکل ۱۶- نمونه وضعیت میزان و نحوه توزیع تنش‌ها در دیوارهای برشی فولادی سخت نشده در طبقات تحت زلزله با سطح خطر ۲\*

جهت انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی از سه رکورد زلزله مطابق جدول ۲ استفاده شده است. هر یک از این رکوردها از جمله زلزله‌های مهم و تاثیر گذار در زمان خود بوده و در انتخاب آنها به مواردی از قبیل تناسب بین خاک ساختگاه پروژه با محل ثبت رکورد، پیروید غالب رکورد زلزله و سازه و دوری و نزدیکی به گسل توجه شده است.

جدول ۲- مشخصات رکوردهای مورد استفاده

اسم زلزله	PGA(g)	مدت زمان (sec)	SMD(sec)
EQ-1: Cape Mendocino	0.66	36	16.1
EQ-2: Loma Prieta	0.64	40	6.9
EQ-3: Kobe	0.51	40	11.23

در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای دو سازه و مطالعه مقایسه‌ای انجام گرفته، جریان انرژی حاکم در دو سازه کلاسیک و مجهز به میراگرها یکی از ملاک‌های اصلی قضاوت در نظر گرفته شده است. با در نظرگیری معادله حرکت یک درجه آزادی مطابق رابطه ۱ مقادیر انرژی به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_{gt} \quad (1)$$

در این رابطه  $x$  جابجایی،  $\dot{x}$  سرعت و  $\ddot{x}$  شتاب جرم می‌باشد. با ضرب تغییرات جابجایی در بازه زمانی در معادله حرکت خواهیم داشت:

$$\int_0^t (\dot{x} dt \times m\ddot{x} + \dot{x} dt \times c\dot{x} + \dot{x} dt \times kx = \dot{x} dt \times -m\ddot{x}_{gt}) \quad (2)$$

و بدین ترتیب معادلات انرژی به صورت زیر حاصل خواهد شد:

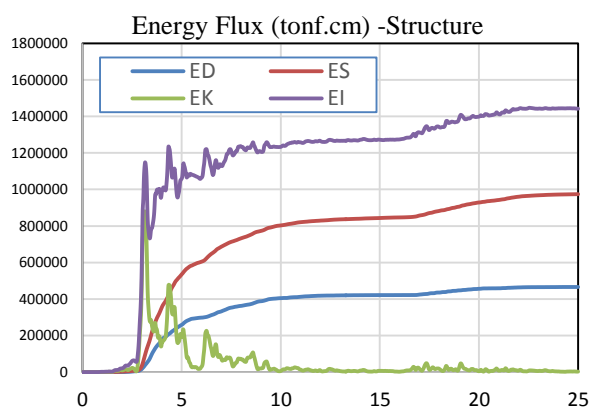
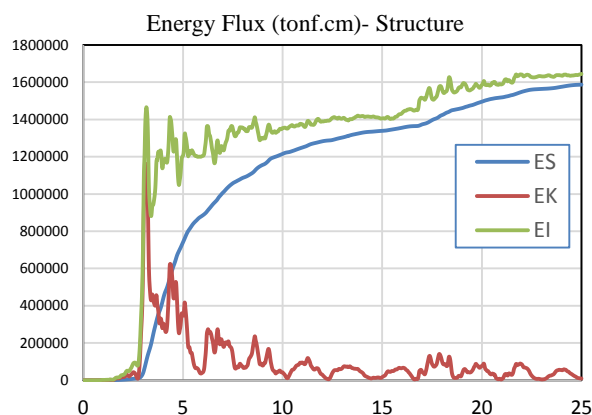
$$W_K = m \int_0^t \dot{x} \ddot{x} dt = \text{kinetic energy} \quad (3)$$

$$W_D = c \int_0^t \dot{x}^2 dt = \text{viscous damping energy} \quad (4)$$

$$W_S = \int_0^t kx \dot{x} dt = \text{cumulative elastic and plastic strain energy} \quad (5)$$

$$W_I = -m \int_0^t \ddot{x}_{gt} \dot{x} dt = \text{Input Energy} \quad (6)$$

در این معادلات  $W_I$  انرژی ورودی،  $W_K$  انرژی جنبشی،  $W_S$  انرژی جذب شده توسط سازه و  $W_D$  انرژی جذب شده توسط میراگر می‌باشد. در نظر گرفتن جریان انرژی برای ارزیابی و مطالعه مقایسه‌ای بین دو سیستم یکی از بهترین روش‌ها بوده و در بر دارنده تمامی ترم‌های موجود در معادلات حاکم بر جابه‌جایی سازه طی تحریک زلزله می‌باشد. در جابه‌جایی نسبی طبقات تنها جابه‌جایی حادث شده در طبقات بررسی می‌شود در حالی که میزان انرژی جذب شده در سازه و میزان توزیع آن به صورت ترم‌های جابه‌جایی الاستیک، پلاستیک، انرژی لختی و شتاب بسیار مهم بوده و ملاک‌های کامل تری به ویژه در خصوص مقایسه دو سیستم سازه‌ای می‌باشند. در شکل زیر نمونه‌ای از جریان انرژی حاکم در دو سازه کلاسیک و مجهز به میراگرها نشان داده شده است.



شکل ۱۸- جریان انرژی در سازه مجهز به میراگر، (راست) و سازه کلاسیک، (چپ) تحت زلزله Mendocino Cape

(EI انرژی ورودی، EK انرژی جنبشی، ES انرژی جذب شده توسط سازه و ED انرژی جذب شده)

## بحث و نتیجه‌گیری در رابطه با نتایج تحلیلی بیمارستان آتیه ۲

جابه‌جایی نسبی طبقات یکی از پارامترهای بسیار مهم در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای یک سازه می‌باشد و این پارامتر به ویژه در مورد سازه‌های بیمارستانی از اهمیت دوچندانی برخوردار است. این پارامتر در ارزیابی سرویس پذیری سازه تحت زلزله‌های شدید و لزوم حفظ کاربری بی‌وقفه و همچنین کاهش عملی سطح خسارات سازه در زلزله طرح بسیار مهم و کلیدی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی کاهش قابل توجه مقادیر دررفت نسبی در سازه کنترل شده نسبت به سازه بدون میراگر بوده است.

بواسطه استفاده از سیستم‌های غیر فعال میرایی در سازه و جذب و استهلاک ۲۵ الی ۳۰ درصدی انرژی ورودی به سازه بسیار مقادیر پاسخ‌های سازه کاهش پیدا می‌کند. شایان ذکر است که بدون در نظر گرفتن کاهش در انرژی ورودی، این میزان انرژی در صورت عدم تجهیز سازه به میراگرها می‌بایست توسط اعضای سیستم باربر جانبی کلاسیک تحمل می‌شد که به منزله وقوع چرخه‌های هیستریزیس در نواحی تشکیل مفاصل پلاستیک با مقادیر تغییر شکل‌های بزرگتر و در نتیجه وقوع خسارات سازه‌ای بیشتر می‌باشد. همچنین پایین بودن میزان انرژی وارده به سازه که المان‌های معماری به آن متصل می‌باشد به منزله وقوع کمتر خسارات غیر سازه‌ای در المان‌های معماری، تجهیزات و تاسیسات نسبت به سازه کلاسیک می‌باشد.

- 1- Soong, T. and B. Spencer Jr, *Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice*. Engineering structures, 2002. **24**(3): p. 243-259.
- 2- Kurata, N., et al., *Actual seismic response controlled building with semi-active damper system* .Earthquake engineering & structural dynamics, 1999. **28**(11): p. 1427-1447.
- 3- Kobori, T. *Mission and perspective towards future structural control research*. in *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*. 1998.
- 4- Wen, Y. and M. Shinozuka, *Cost-effectiveness in active structural control*. Engineering structures, 1998. **20**(3): p. 216-221.
- 5- Park, K.-S., H.-M. Koh, and D. Hahm, *Integrated optimum design of viscoelastically damped structural systems*. Engineering Structures, 2004. **26**(5) :(p. 581-591.
- 6- Liu, M., Y. Wen, and S.A. Burns, *Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference*. Engineering Structures, 2004. **26**(10): p. 1407-1421.
- 7- Goda, K., C. Lee, and H. Hong, *Lifecycle cost-benefit analysis of isolated buildings*. Structural Safety, 2010. **32**(1): p. 52-63.
- 8- Pall, A.S. and C. Marsh, *Response of friction damped braced frames*. Journal of Structural Engineering, 1982. **108**(9): p. 1313-1323.
- 9- Fitzgerald, T., et al., *Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections*. Earthquake Spectra, 1989. **5**(2): p. 383-391.
- 10- Aiken, I.D. and J.M. Kelly, *Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy-absorbing systems for multistory structures*. 1990, University of California, Berkeley Doctoral dissertation.
- 11- Constantinou, M., et al., *Displacement control device for base-isolated bridges*. Earthquake Spectra, 1991. **7**(2): p. 179-200.
- 12- Grigorian, C.E., T.-S. Yang, and E.P. Popov ,*Slotted bolted connection energy dissipators*. Earthquake Spectra, 1993. **9**(3): p. 491-504.
- 13- Nims, D.K., P.J. Richter, and R.E. Bachman, *The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation*. Earthquake Spectra, 1993. **9**(3): p. 467-48.<sup>9</sup>
- 14- Mualla, I.H. *Experimental evaluation of new friction damper device*. in *12th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand*. 2000.
- 15- Mualla, I.H. and B. Belev, *Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation*. Engineering Structures, 2002. **24**(3): p. 365-371.