



Investigating the Role of Structural Fuses in Enhancing the Rapid Reoccupancy of Steel Structures

Behzad Afiyat

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Adel Ferdousi *

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Robotics & Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Mahdi Nouri

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Robotics & Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Yousef Zandi

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

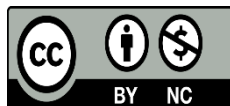
a_ferdousi@iaut.ac.ir

Keywords

Steel structure,
fuse,
PACT,
reoccupancy time

Abstract

Iran is among the most earthquake-prone regions in the world, frequently experiencing severe seismic events that have resulted in significant human and financial losses. Research in earthquake engineering has consistently sought to mitigate such irreversible damages. This study examines the effectiveness of structural fuses in improving the rapid reoccupancy of steel structures. Four structural models—5, 8, 14, and 16 stories—were developed and subjected to nonlinear time-history analyses. Eleven earthquake records were employed in the analyses, including six near-fault and five far-fault ground motions. Following the evaluation of the influence of fuses on seismic response reduction, the Performance Assessment Calculation Tool (PACT) was used for qualitative damage assessment, focusing on the repair time needed to restore the structures to an operational state.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

بررسی نقش فیوزهای سازه‌ای در کنترل برگشت‌پذیری سریع سازه‌های فولادی به حالت

بهره‌برداری

بهزاد عافیت

گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

عادل فردوسی*

گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مهدی نوری

گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

یوسف زندی

گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

a_ferdousi@iaut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۲ دی ۱۴۰۳

چکیده

کشور ایران از جمله مناطق زلزله‌خیز جهان است که هر چند وقت یک‌بار زلزله‌های شدیدی در آن به وقوع می‌پیوندد و متأسفانه تاکنون خسارات مالی و جانی زیادی نیز در برداشته است. تحقیقات در زمینه علم مهندسی زلزله همواره باهدف کاهش خسارات جبران‌ناپذیر پدیده زلزله ادامه داشته است. در این پژوهش نقش فیوزهای سازه‌ای در کنترل برگشت‌پذیری سریع سازه‌های فولادی به حالت بهره‌برداری موردبررسی قرار گرفته است. ۴ مدل ۵، ۸، ۱۴ و ۱۶ طبقه مدل‌سازی شده و تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی بر آنها صورت گرفته است. برای انجام تحلیل تاریخیچه زمانی از ۱۱ رکورد زلزله (۶ رکورد حوزه نزدیک و ۵ رکورد حوزه دور) استفاده شده است. بعد از بررسی تأثیر استفاده از فیوز از طریق کنترل پاسخ لرزه‌ای به منظور ارزیابی کیفی آسیب‌ها از نرم‌افزار PACT استفاده شده است، که بدین‌منظور زمان بازگشت سازه به وضع مطلوب مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: سازه فولادی، فیوز، PACT، زمان برگشت‌پذیری

۱- مقدمه

به مراتب بیشتری را نسبت به آسیب‌های خود زلزله دارند؛ بنابراین تعمیر و بازگرداندن سازه به حالت بهره‌برداری از ضروریات بعد از وقوع یک زلزله است. یکی از روش‌هایی که می‌توان بر اساس آن تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده را سریعاً انجام و وضعیت را به حالت قبل از زلزله برگرداند؛ متمرکز نمودن آسیب‌ها در نقاط و قسمت‌های مشخصی از اعضای باربر جانبی است. در سیستم‌هایی مانند قاب خمشی، باتوجه به اینکه آسیب‌دیدن تیرها نسبت به ستون‌ها قابلیت جذب و استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد؛ لذا می‌توان خسارات وارد بر تیرها را نیز در نقاط مشخصی از آنها متمرکز نمود. برای این منظور می‌توان از فیوزهای سازه‌ای در تیرهای قاب خمشی فولادی بهره گرفت. مطالعات انجام شده در مورد فیوزهای سازه‌ای نشان می‌دهد که فیوزها اجزای اصلی اتلاف‌کننده انرژی هستند و میزان اتلاف انرژی با تیرهای هم‌بند فولادی بدون فیوز قابل‌مقایسه است [۲]. همچنین فیوزها ظرفیت‌های مورد انتظار خود را قبل از اینکه تیرها به ظرفیت‌های برشی موردنظر خود برسند، توسعه می‌دهند و از این طریق از تیرهای تعبیه شده محافظت می‌کنند. از این رو ظرفیت خمشی الاستیک تیرها از حد مورد نظر تجاوز نمی‌کند.

لذا بر اساس موارد گفته شده می‌توان به این نتیجه رسید که متمرکز نمودن خرابی‌های سازه‌ای در فیوزها که قابلیت تعویض سریع در آنها از جمله خصوصیات بارز آنها است، برگشت‌پذیری سریع سازه‌های آسیب‌دیده به حالت قبل از زلزله و تاب‌آوری سازه‌ها را فراهم می‌نماید. آیین‌نامه FEMA در رابطه با برگشت‌پذیری سریع سازه‌ها به حالت قبل از زلزله (تاب‌آوری) تحقیقات جامعی را انجام داده و برای بررسی خسارت وارد بر سازه‌ها از جمله هزینه تعمیر، زمان تعمیر، میزان مرگ‌ومیر و... را بر اساس یک سلسله‌مراتب مشخص تعیین و برای چگونگی برآورد آنها نرم‌افزاری تحت عنوان Pact تعریف نموده است. آیین‌نامه FEMA-P58 جزئیات مربوط به چگونگی تعیین تاب‌آوری سازه‌ها و اعمال دخالت عوامل مختلف در آن را مشخص و نحوه استفاده از برنامه Pact معین نموده است.

برای افزایش تاب‌آوری سازه‌ها در مقابل زلزله روش‌های مختلفی در حال بررسی است؛ اما آنچه که از نظر سازه‌ای برای تعمیر سریع سازه‌ها مهم است، حذف و جایگزینی سریع المان‌های آسیب‌دیده در زلزله است که برای این امر می‌توان خرابی در سازه‌ها را در نقاط مشخصی متمرکز نمود. چرا که متمرکز کردن خرابی در سازه‌ها امکان تعویض سریع المان‌ها در هنگام بعد از زلزله را فراهم نموده و با برگشت‌پذیری سریع

کشور ایران از جمله مناطق زلزله‌خیز جهان است که هر چند وقت یک‌بار زلزله‌های شدیدی در آن به وقوع می‌پیوندد و متأسفانه تاکنون خسارات مالی و جانی زیادی نیز در برداشته است. تحقیقات در زمینه علم مهندسی زلزله همواره باهدف کاهش خسارات جبران‌ناپذیر پدیده زلزله ادامه داشته است. باتوجه به پیشرفت علوم کاربردی و توان پردازش رایانه‌ها، ایده‌ها و دیدگاه‌های مهندسی زلزله نیز ارتقای قابل‌توجهی پیدا کرده است. مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود در برابر زمین‌لرزه نیز به دلیل تأثیر قابل‌توجهی که در نجات جان انسان‌ها دارد به‌صورت چشمگیری در حال گسترش است. بی‌تردید اساسی‌ترین مرحله در طراحی یا مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه، تعیین نیروهای لرزه‌ای در سازه‌ها است. کیفیت پاسخ و بقای یک ساختمان در اثر رخداد زمین-لرزه به نوع سیستم باربر جانبی و نحوه رفتار آن در برابر ارتعاشات وارده وابسته است. سیستم باربر جانبی باید توانایی جذب و استهلاک انرژی زلزله را بدون ایجاد خسارت و خرابی‌های ماندگار در ساختمان داشته باشد. هر چه ظرفیت جذب انرژی در سیستم سازه‌ای بالاتر باشد، اطمینان از بقا و حفظ آن در اثر خطرات لرزه‌ای بالاتر خواهد بود. برای ایجاد چنین شرایطی در سیستم باربر جانبی باید از ایجاد مکانیسم‌های شکست ترد در اعضا جلوگیری کرد، به این معنی که عملکرد لرزه‌ای اعضا باید به‌گونه‌ای باشد که با حفظ پایداری و پیوستگی، سیستم توانایی جذب انرژی را در چرخه‌های متناوب بارگذاری داشته باشد. همچنین سیستم باربر جانبی باید از سختی و مقاومت لازم جهت حفظ و کنترل تغییر شکل‌های جانبی ساختمان برخوردار باشد. در صورت افزایش تغییر شکل‌های جانبی ساختمان علاوه بر افزایش خسارت در عناصر غیرسازه‌ای، امکان ناپایداری و خرابی کلی سازه نیز وجود دارد. از طرفی باتوجه به اینکه تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده و بهبود وضعیت برای بعد از زلزله یکی از دغدغه‌های اصلی جهان امروز در مواجهه با آسیب‌های زلزله است؛ لذا بحث تعمیر و برگشت سازه به حالت بهره‌برداری به‌عنوان یک اصل مهم در ساخت سازه‌ها خواهد بود. آنچه که مهم بوده و در آیین‌نامه‌هایی مانند FEMA-P58 [۱] به آن اهمیت ویژه‌ای داده شده، برگشت سریع سازه‌های آسیب‌دیده به وضعیت قبل از زلزله است. چرا که بعد از وقوع یک زلزله آسیب‌های روانی، اجتماعی، بهداشتی و... خسارات

1 - Federal Emergency Management Agency.

در پژوهشی که در سال ۲۰۲۲ انجام شده است [۴]، اثر الگوی سوراخ‌های اسلات‌شکل در جان تیر لینک‌های قاب مهاربندی واگرا بررسی گردید. در این مطالعه، هفت نمونه لینک جداگانه با الگوهای مختلف سوراخ‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی چرخه‌ای آزمایش شدند. نتایج نشان داد که استفاده از سوراخ‌های اسلات‌شکل در جان تیر موجب کاهش قابل توجه ظرفیت برشی لینک‌ها می‌شود و مکانیزم شکست در انتهای این سوراخ‌ها رخ می‌دهد. همچنین، ظرفیت چرخش غیرالاستیک لینک‌ها بسته به الگوی سوراخ‌ها بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۶۵ رادیان متغیر بود که بیانگر تأثیر قابل توجه طراحی سوراخ‌ها بر رفتار پلاستیک لینک‌ها است.

در مطالعه‌ای آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۹ [۵]، عملکرد لرزه‌ای لینک‌های تعویض‌پذیر در قاب‌های مهاربندی واگرا مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، دستگاه برشی ویژه‌ای با هشت نمونه لینک قابل تعویض طراحی شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دادند که تغییر شکل‌های غیرالاستیک در ناحیه لینک متمرکز شده، رفتار هیستریزس پایداری حاصل گردیده و لینک‌های آسیب‌دیده به سادگی به واسطه اتصال‌های صفحه انتهایی قابل تعویض هستند. همچنین، ظرفیت جذب انرژی و چرخش پلاستیک این لینک‌ها به آرایش سخت‌کننده‌ها، نسبت طول و وجود سوراخ‌های جوش بستگی دارد.

در یک بررسی تجربی در سال ۲۰۲۴ [۶]، عملکرد لرزه‌ای و قابلیت تعویض در قاب‌های فولادی با تیرهای بخش‌بندی شده قابل تعویض مورد مطالعه قرار گرفت. در این سیستم، بخش‌های خاصی از تیرها به‌عنوان مؤلفه‌های تسلیم‌پذیر طراحی شده‌اند که با اتصالات پیچی به قاب متصل می‌شوند و امکان تعویض سریع پس از زلزله را فراهم می‌کنند. نتایج آزمایش‌های شبه‌استاتیکی و تحلیل‌های عددی نشان داد که این بخش‌های قابل تعویض قادرند تغییر شکل‌های غیرالاستیک را به صورت متمرکز جذب کرده، رفتار هیستریزس کامل با ظرفیت بالای اتلاف انرژی ارائه دهند، و پس از زلزله بدون نیاز به تعویض اجزای اصلی سازه، به سادگی جایگزین شوند. این یافته‌ها رویکردی نوین در توسعه سیستم‌های مقاوم، قابل بازیابی و قابل تعمیر برای سازه‌های فولادی معرفی می‌کنند.

باتوجه به نتایج آنالیزهای غیرخطی می‌توان نتیجه گرفت که ایده جلوگیری از تغییر شکل‌های پلاستیک در اجزای سازه‌ای اصلی قاب خمشی فولادی، می‌تواند از طریق متمرکزکردن تغییر شکل‌های

سازه‌ها به حالت اولیه تاب‌آوری آنها را افزایش می‌دهد. برای افزایش تاب‌آوری و متمرکزکردن خرابی در نقاط مشخصی از سازه، استفاده از فیوز سازه‌ای یک راهکار مناسب است. فلذا در این تحقیق تأثیرات فیوزهای سازه‌ای در قابلیت برگشت و تعمیر سریع سازه‌های آسیب‌دیده بر اساس روش FEMA-P58 که یک روش و بحث جدید در زمینه مهندسی زلزله است که در تمام جوامع پیشرفته به‌عنوان یک اصل در حال پایه‌ریزی برای گذر از طراحی بر اساس عملکرد به طراحی بر اساس تاب‌آوری است.

پژوهش‌های زیادی در خصوص عملکرد لرزه‌ای این روش‌ها صورت پذیرفته که این امر اهمیت بالای این موضوع را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۸ انجام گرفته شده است [۲]، یک سیستم جدید شامل فیوز قابل تعویض قرار گرفته بر روی یک تیرهمیند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، روش ارائه شده بر روی یک سازه ۲۰ طبقه ساخته شده در آزمایشگاه اجرا گردیده است. نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی حاصل از آنالیز استاتیکی و دینامیکی غیرخطی بدست آمده از این مطالعه بشرح زیر می‌باشد.

فیوزها اجزای اصلی اتلاف‌کننده انرژی هستند و میزان اتلاف انرژی با تیرهای هم‌بند فولادی بدون فیوز قابل‌مقایسه است.

زوال سختی نسبت به تیرهای هم‌بند بدون فیوز قابل‌مقایسه است. فیوزها ظرفیت‌های موردانتظار خود را قبل از اینکه تیرها به ظرفیت‌های برشی موردنظر خود برسند، توسعه می‌دهند و از این طریق از تیرهای تعبیه شده محافظت می‌کنند.

ظرفیت خمشی الاستیک تیرها از حد موردنظر تجاوز نمی‌کند و سوراخ‌های بولت‌های جان و بال تیر دچار خرابی نمی‌شود.

در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ انجام گرفته است [۳]، عملکرد قاب فولادی مجهز به لینک‌های برشی قابل تعویض ریخته‌گری شده در قالب پروژه آزمایشی گسترده بررسی شده. این لینک‌ها به‌گونه‌ای طراحی گردیدند که به‌عنوان "فیوز" عمل کرده و تغییر شکل پلاستیک را در ناحیه‌ای کنترل شده متمرکز کنند. نتایج نشان داد دست‌یابی به چرخش پلاستیک تا حدود ۰/۲۱ رادیان در لینک‌ها، همراه با اتلاف انرژی بالا و افزایش انعطاف‌پذیری دینامیکی سیستم ممکن شد. این ساختار نه تنها ظرفیت استهلاک انرژی را افزایش داد، بلکه قابلیت تعویض سریع فیوزها پس از زلزله را به‌صورت عملی تثبیت کرد که دقیقاً با هدف افزایش تاب‌آوری در تحقیق حاضر هم‌راستا است.

۲-۲- مشخصات مصالح

در این مقاله مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی به صورت زیر است:

جدول ۱- مشخصات فولاد مصرفی

مدول الاستیسیته فولاد	200000 kg/cm^2
تنش تسلیم فولاد (F_y)	2400 kg/cm^2
تنش نهایی فولاد (F_u)	3700 kg/cm^2
تنش تسلیم موردانتظار فولاد (F_y)	2640 kg/cm^2
تنش نهایی موردانتظار فولاد (F_u)	4070 kg/cm^2
ضریب پواسون	۰/۳

بار مرده طبقات مشابه و برابر 600 kgf/m^2 و بار زنده طبقات 250 kgf/m^2 فرض شده است. ابعاد دهانه ها ۶ متر و بار وارد بر هر تیر بصورت خطی برای بار مرده ۱۸۰۰ و برای بار زنده ۷۵۰ کیلوگرم بر مترمربع است.

۳- طراحی لرزه‌ای سازه‌ها

در این تحقیق برای بررسی خرابی پیش‌رونده در سازه‌های فولادی با قاب خمشی و تأثیر فیوز برشی در برگشت‌پذیری سازه‌های ۵، ۸، ۱۴ و ۱۶ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی متوسط، با پلان منظم بررسی شده است. سازه‌ها در هر دو راستا دارای ۵ دهانه ۵ متری هستند. ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شده است.

۴- انتخاب روش طراحی و تحلیل

طبق بند ۱۲/۶ آیین‌نامه ASCE 7-16 آنالیز سازه‌ها باید بر اساس دسته طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، نوع سیستم سازه‌ای، مشخصات دینامیکی با استفاده از جدول ۱ انتخاب شود. با توجه به این جدول، مجاز به انجام روش‌های آنالیزی نیروی جانبی معادل، طیف پاسخ مودی، تاریخچه پاسخ خطی و غیرخطی می‌باشد. در این پروژه، ساختمان‌های مورد مطالعه با استفاده از روش تحلیل طیفی، تحلیل و بر اساس نتایج حاصل از آن برای تلاش‌های داخلی المان‌ها، طراحی شده‌اند. جدول زیر رکوردهای مورد استفاده برای تحلیل تاریخچه زمانی آورده شده است. در این قسمت مجموعاً از ۱۱ رکورد زلزله استفاده شده است، که ۶ رکورد

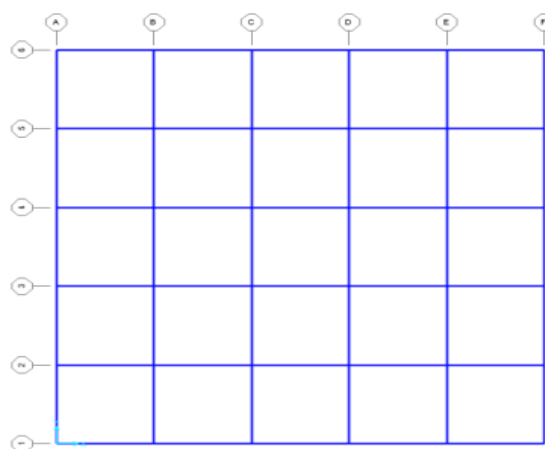
پلاستیک در اعضای "ضعیف" که بین المان‌های تیر و ستون وصل می‌شوند، قابل اجرا باشد. این عناصر نسبتاً ضعیف، به اصطلاح فیوزها، باید به اندازه کافی سخت باشند تا قاب در زیر بارهای سرویس پایدار باشد، هم چنین باید آنها عناصر اصلی سازه باشند تا رفتار غیرعادی و اتلاف انرژی ناشی از زلزله قوی را نشان دهند.

در این تحقیق نیز برای بررسی تأثیر فیوزهای سازه‌ای در برگشت‌پذیری سازه‌های فولادی، سازه‌هایی سه‌بعدی ۵، ۸، ۱۴ و ۱۶ طبقه با استفاده از برنامه Sap2000 مدل‌سازی و طراحی گردیده است تا مقاطع المان‌ها مشخص گردد. در سازه‌های فوق یکبار از فیوز دستک که بصورت قطری در گوشه قاب‌ها از تیر به ستون وصل گردیده استفاده شده و یک بار دیگر استفاده نشده است. نتایج تحلیل‌های غیرخطی با برنامه Opensees استخراج شده که بدین‌منظور از ۱۱ رکورد زلزله استفاده شده است. در نهایت برای ارزیابی آسیب از نرم‌افزار Pact استفاده شده است.

۲- مشخصات ساختمان‌های مورد مطالعه

۱-۲- مشخصات سیستم سازه‌ای

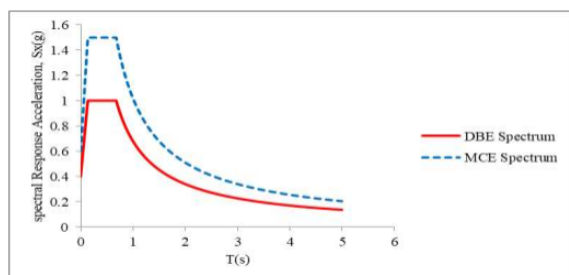
در این تحقیق نیز برای بررسی تأثیر فیوزهای سازه‌ای در برگشت‌پذیری سازه‌های فولادی، سازه‌هایی سه‌بعدی ۵، ۸، ۱۴ و ۱۶ طبقه با استفاده از برنامه Sap2000 مدل‌سازی و طراحی خواهند شد تا مقطع المان‌ها مشخص گردد. در سازه‌های فوق یکبار از فیوز دستک که بصورت قطری در گوشه قاب‌ها از تیر به ستون وصل خواهد شد، استفاده شده و یکبار دیگر استفاده نخواهد شد.



شکل ۱- پلان سازه‌ها

۴-۱- مقاطع مورد استفاده

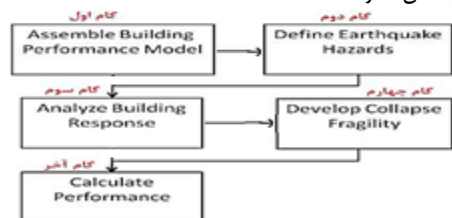
بعد از انجام تحلیل سازه و کنترل صحت مدل‌سازی و اعمال بارگذاری به سازه، نهایتاً با انتخاب آیین‌نامه طراحی که در این تحقیق آیین‌نامه فولاد آمریکا (AISC) انتخاب گشته؛ مقاطع المان‌های مقاوم جانبی (تیر و ستون) برای سازه‌ها تعیین شده است. در تعیین مقاطع المان‌ها، نسبت تنش در اعضا و دریافت مجاز آیین‌نامه کنترل شده است.



شکل ۴- طیف پاسخ طراحی زلزله مبنا و طیف پاسخ زلزله حداکثر

۵- ارزیابی تاب‌آوری سازه‌ها

همچنان که در مباحث گذشته بیان شده است، هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیرات استفاده از فیوز در برگشت‌پذیری سریع سازه‌های فولادی است. برای این منظور، بر اساس روش و مسیر پیشنهاد شده در آیین‌نامه FEMA-P58 اقدام شده است. آیین‌نامه فوق جهت ارزیابی تاب‌آوری سازه‌ها از نرم‌افزار Pact استفاده می‌نماید. در این نرم‌افزار مشخصات و اطلاعات لازم در مورد هندسه و اجزای سازه‌ها وارد شده و در نهایت با واردکردن پاسخ‌های لرزه‌ای حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها، نمودار شکنندگی برای سازه‌ها تهیه و بر اساس آن نتایجی از قبیل مدت‌زمان تعمیر، تعداد کشته و مجروحین در حین رخداد زلزله و مسائلی از قبیل آسیب‌های زیست‌محیطی را به‌عنوان خروجی حاصل می‌نماید. گام‌بندی و نمودار گردشی روش برگشت‌پذیری سازه‌ها در آیین‌نامه در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- نمودار گردشی روش ارزیابی عملکردی سازه‌ها

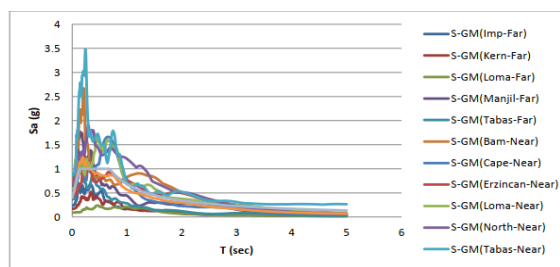
مربوط به زلزله حوزه نزدیک گسل و ۵ رکورد دیگر مربوط به زلزله دور از گسل می‌باشد.

جدول ۲- رکوردهای مورد استفاده برای حوزه دور

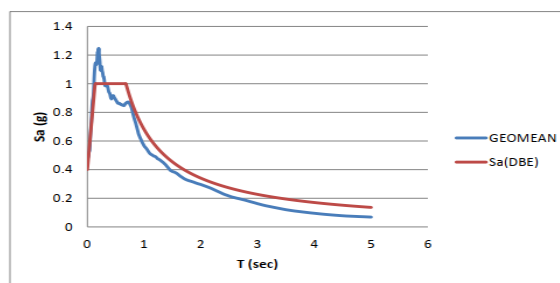
Earthquake	Year	Mw
Imperial Valley-06	1979	6.53
Kern County	1952	7.36
Loma Prieta	1989	6.93
Manjil_Iran	1990	7.37
Tabas_Iran	1978	7.35

جدول ۳- رکوردهای مورد استفاده برای حوزه نزدیک

Earthqu	Year	Mw
Bam_Iran	2003	6.6
Cape Mendocino	1992	7.01
Erzican_Turkey	1992	6.69
Loma Prieta	1989	6.93
Northridge-01	1994	6.69



شکل ۲- طیف پاسخ رکوردها



شکل ۳- مقایسه میانگین طیف پاسخ رکوردها با طیف پاسخ طراحی

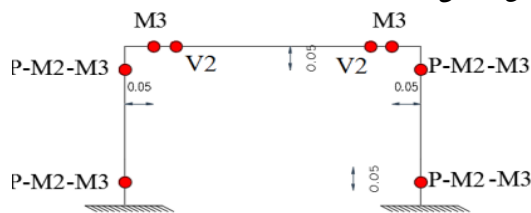
بعد از مقیاس هر یک از رکوردها، رکوردها در نرم‌افزار SAP2000 تعریف شده و تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی صورت پذیرفته است.

۶- رفتار غیرخطی مصالح

بعد از مشخص کردن سطوح عملکرد برای المان‌های سازه‌ای، رفتار غیرخطی مصالح از طریق مفاصل پلاستیک انجام می‌شود. در اختصاص مفاصل پلاستیک به المان‌ها، دقت شده است که مفصل پلاستیک به المانی اختصاص یابد که المان مقاوم در برابر بارهای جانبی باشد، یا نیروی جانبی زلزله در مقدار تلاش‌های داخلی آن المان تأثیرگذار باشد (المان مقاوم جانبی) همچنین مفاصل پلاستیک در نقاطی از المان‌ها اختصاص داده شده است که در آن نقطه احتمال ورود به مرحله غیرخطی بیشتر از سایر نقاط باشد که این موضوع بستگی به نوع سیستم مقاوم جانبی و تلاش‌های داخلی اعضا دارد. در قاب خمشی باتوجه به اینکه تیرها و ستون‌ها المان‌های مقاوم جانبی هستند، لذا مفاصل پلاستیک به تیرها و ستون‌ها اختصاص یافته است.

تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در عضو است، لذا مفاصل خمشی (M) باید به تیرهای بتنی اختصاص یابد. از طرفی دیگر جهت بررسی شکست برشی تیرهای فولادی حتماً باید مفاصل پلاستیک برشی نیز به تیرها اختصاص یابد. پس به تیرهای فولادی هم مفاصل برشی و هم مفاصل خمشی باید اختصاص یافته یابد. موقعیت مفاصل خمشی در 0.05 و 0.95 تیرها و مفاصل برشی در 0.1 و 0.9 تیر خواهد بود.

موقعیت‌های فوق بر اساس میزان حداکثر تلاش خمشی و برشی تیرها انتخاب شده است. در ستون‌های بتنی نیز بر اساس اینکه در قاب‌های خمشی تحت تأثیر نیروهای محوری و لنگرهای خمشی هستند، لذا باید اثرات هم‌زمان (اندرکنش) نیروی محوری با لنگرهای خمشی در رفتار ستون‌ها در نظر گرفته شود. برای این منظور از مفاصل P-M2-M3 استفاده می‌گردد. موقعیت این مفاصل در ستون‌ها نیز بر اساس حداکثر تلاش داخلی عضو در 0.05 و 0.95 طول عضو خواهد بود. مفاصل پلاستیک اختصاص یافته و موقعیت آنها در قاب خمشی فولادی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- اختصاص مفاصل پلاستیک به قاب خمشی

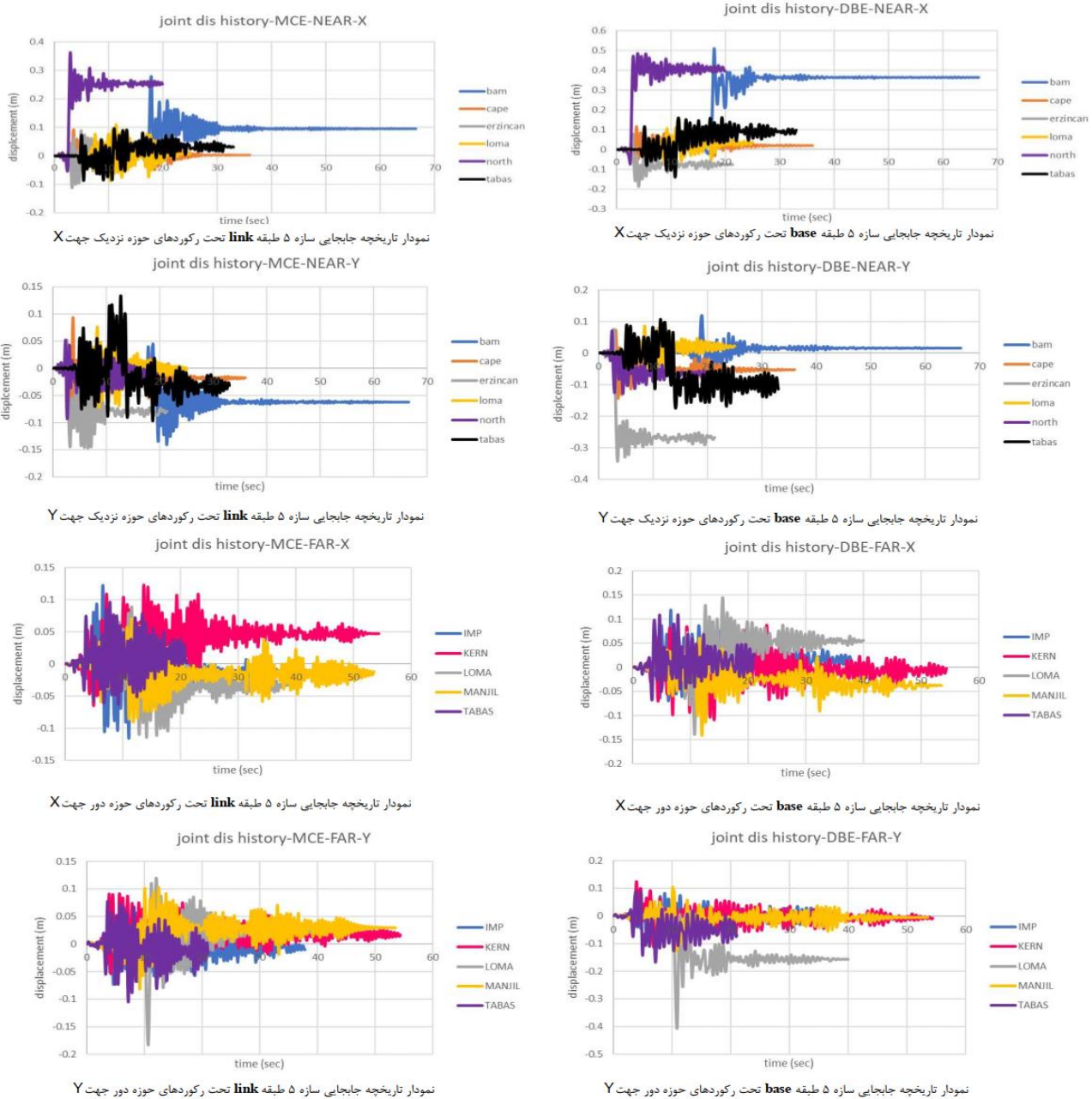
بعد از اختصاص رفتار غیرخطی مصالح و تعریف رکوردهای زلزله در برنامه SAP2000، تحلیل تاریخیچه زمانی جهت استخراج دررفت‌های غیرخطی طبقات انجام شده و دررفت سازه‌ها برای حالت‌های طیف پاسخ طراحی زلزله مبنا (DBE) و طیف پاسخ زلزله حداکثر (MCE) استخراج شده است.

۷- تحلیل پوش‌آور

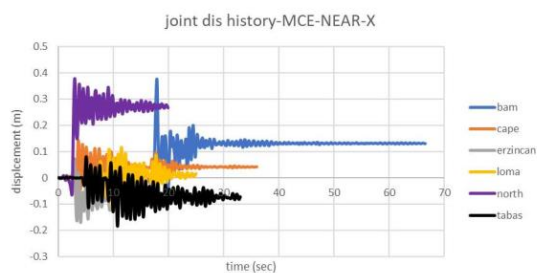
تحلیل استاتیکی غیرخطی یا تحلیل پوش‌آور تحلیلی است که در آن به‌وسیله یک بارگذاری استاتیکی بر اساس شکل مود اول در هر راستا، سازه تا رسیدن به یک مقدار جابه‌جایی مشخص (تغییر مکان هدف) پوش می‌شود. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط محققین در زمینه مهندسی زلزله و تحلیل‌های غیرخطی به این نتیجه رسیده‌اند که به‌جای وارد کردن رکورد شتاب حاصل از زلزله واقعی به سازه می‌توان یک مقدار جابه‌جایی مشخصی برای هر سازه محاسبه کرد و سازه را تا به رسیدن به آن جابه‌جایی پوش داد که با دقت قابل‌قبولی نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی بر اساس زلزله واقعی با نتایج حاصل از این تحلیل (پوش‌آور) یکسان خواهند بود.

۸- بررسی تاریخیچه جابه‌جایی طبقه بام

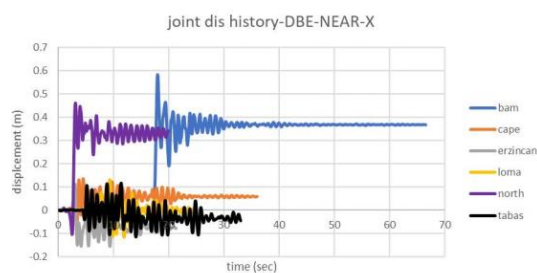
در این تحقیق تاریخیچه جابه‌جایی بام تحت رکوردهای زلزله موردبررسی قرار گرفته است. در این بخش، تاریخیچه جابه‌جایی بام برای سازه‌های طرح شده (base - link) به‌صورت جداگانه برای رکوردهای حوزه دور و نزدیک گسل که در دو امتداد عمود بر هم سازه اعمال شده‌اند، به‌صورت تاریخیچه جابه‌جایی در مقابل زمان آورده شده‌اند. در این بخش تأثیرات استفاده از فیوز در تاب‌آوری سازه‌ها از طریق مقدار کاهش تغییر مکان طبقه بام که به‌عنوان نقطه کنترل سازه محسوب می‌شود، ارزیابی شده است. باتوجه به آنچه که قبلاً توضیح داده شد، ارتقای اهداف عملکردی در این تحقیق از طریق استفاده از فیوز صورت گرفته است، انتظار می‌رود که مقدار تغییر شکل نقطه کنترل سازه‌ها به دلیل افزایش ظرفیت استهلاک انرژی در طرح سازه‌ها، کاهش یابد که از این طریق امکان بهبود وضعیت تاب‌آوری سازه‌ها حاصل شود. نتایج این بخش برای سازه‌های ۵ طبقه در شکل ۷ و جداول ۴ و ۵، نتایج سازه ۸ طبقه در شکل ۸ و جداول ۶ و ۷، نتایج سازه ۱۴ طبقه در شکل ۹ و جداول ۸ و ۹ و در آخر نتایج سازه ۱۶ طبقه در شکل ۱۰ و جداول ۱۰ و ۱۱ آورده شده و مقایسه لازم صورت گرفته است.



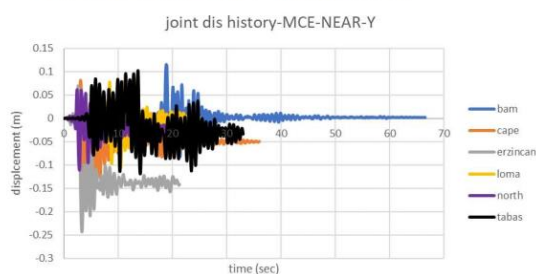
شکل ۷- نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۵ طبقه



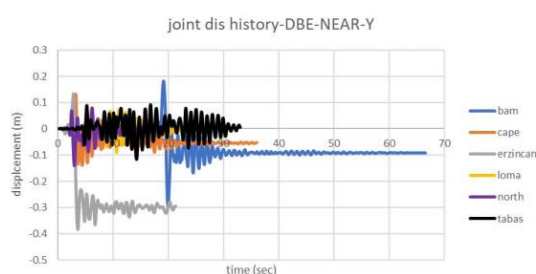
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه link تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت X



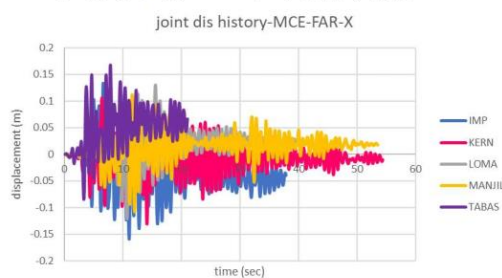
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه base تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت X



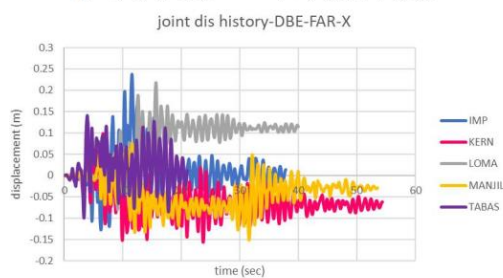
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه link تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت Y



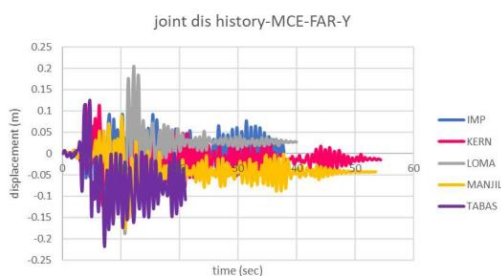
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه base تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت Y



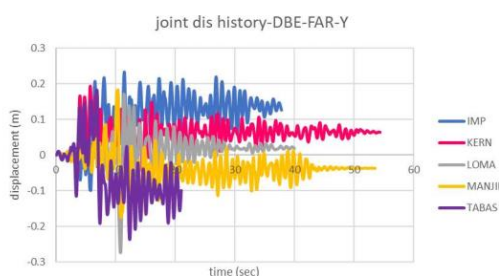
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه link تحت رکوردهای حوزه دور جهت X



نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه base تحت رکوردهای حوزه دور جهت X

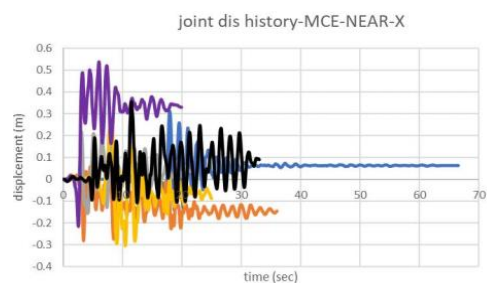


نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه link تحت رکوردهای حوزه دور جهت Y

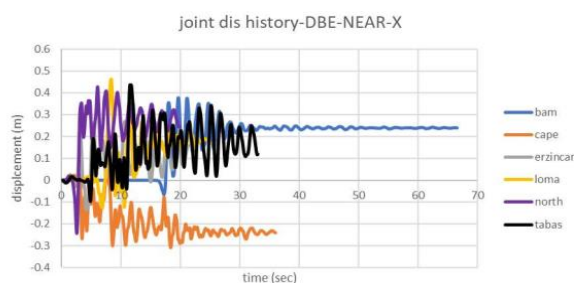


نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه base تحت رکوردهای حوزه دور جهت Y

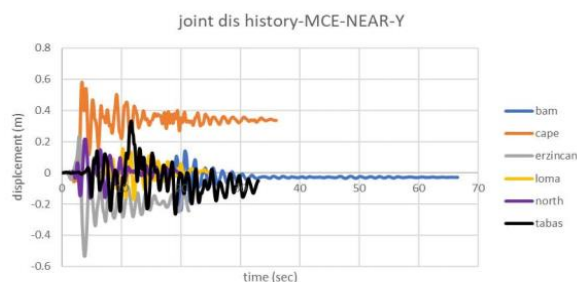
شکل ۸- نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۸ طبقه



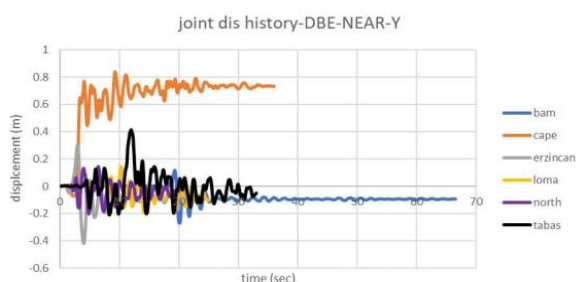
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه link تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت X



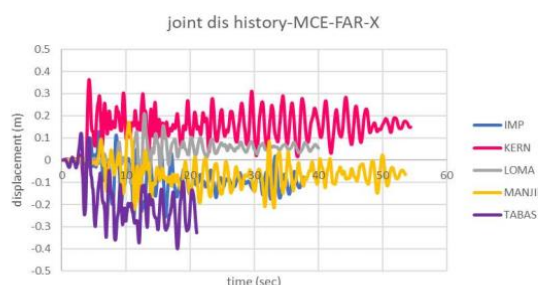
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه base تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت X



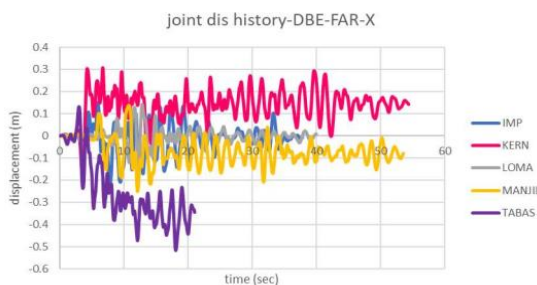
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه link تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت Y



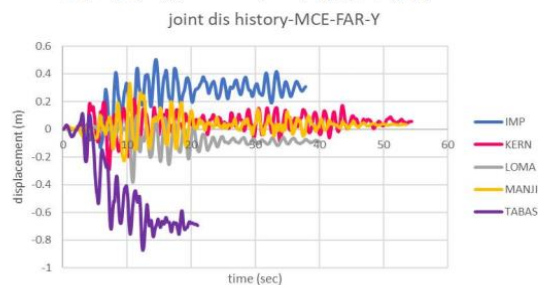
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه base تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت Y



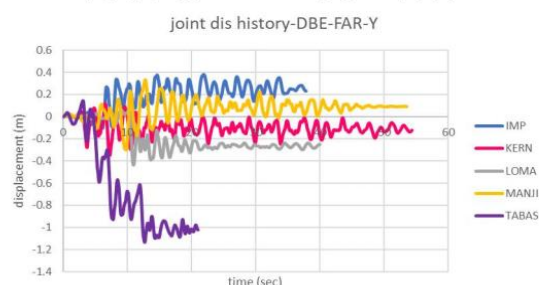
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه link تحت رکوردهای حوزه دور جهت X



نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه base تحت رکوردهای حوزه دور جهت X

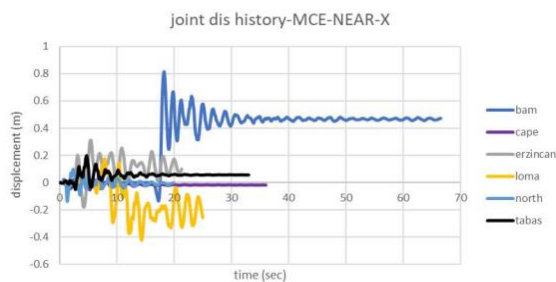


نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه link تحت رکوردهای حوزه دور جهت Y

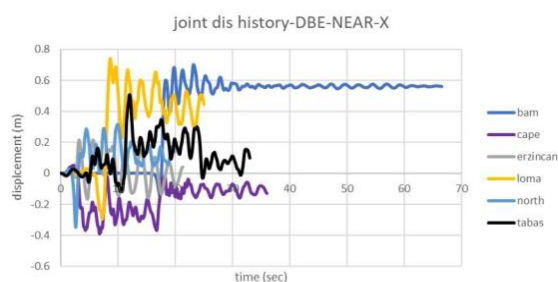


نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه base تحت رکوردهای حوزه دور جهت Y

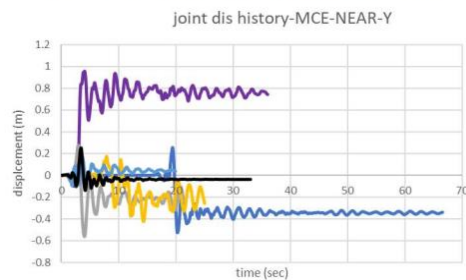
شکل ۹- نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۴ طبقه



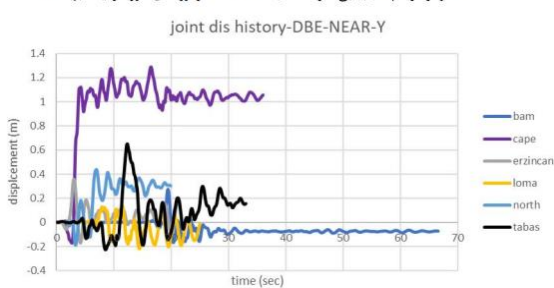
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه link تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت X



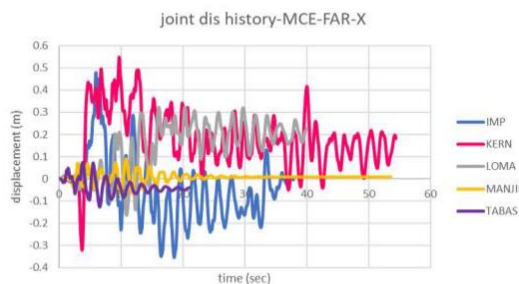
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه base تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت X



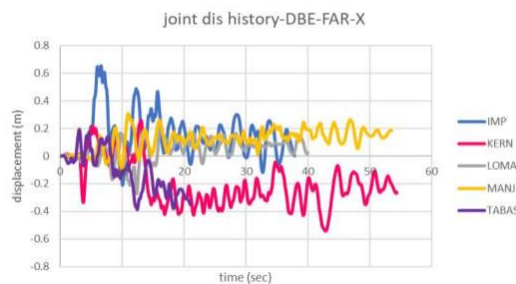
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه link تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت Y



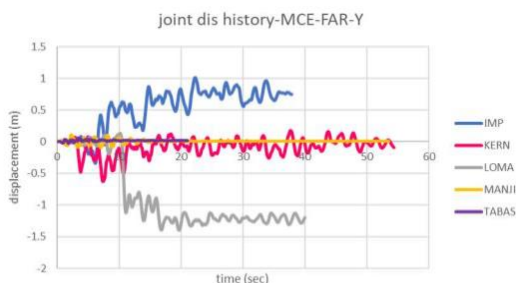
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه base تحت رکوردهای حوزه نزدیک جهت Y



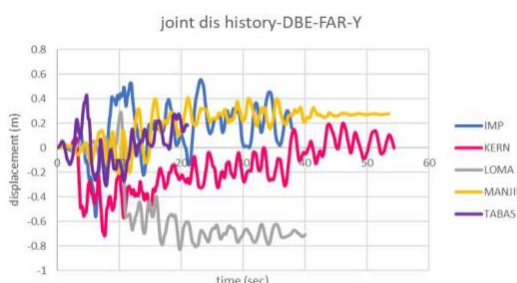
نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه link تحت رکوردهای حوزه دور جهت X



نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه base تحت رکوردهای حوزه دور جهت X



نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه link تحت رکوردهای حوزه دور جهت Y



نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه base تحت رکوردهای حوزه دور جهت Y

شکل ۱۰- نمودار تاریخچه جابجایی سازه ۱۶ طبقه

جدول ۴- ماکزیمم جابجایی سازه ۵ طبقه در جهت X

record	bam	cape	erzincan	loma	north	tabas
base-Y	0.510155	0.115825	0.510155	0.485565	0.485565	0.162057
link-Y	0.279299	0.09189	0.279299	0.363448	0.363448	0.09644
Variation-XDir(%)	47	18	47	25	25	43
record	imp	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.118792	0.087225	0.144677	0.060636	0.109179	
link-Y	0.122289	0.12279	0.088836	0.070748	0.096368	
Variation-YDir(%)	-9	-50	42	-16	10	

جدول ۵- ماکزیمم جابجایی سازه ۵ طبقه در جهت Y

record	bam	cape	erzincan	loma	north	tabas
base-Y	0.119304	0.093372	0.115825	0.162057	0.104471	0.137316
link-Y	0.045199	0.07373	0.09373	0.133573	0.102637	0.103573
Variation-XDir(%)	63	28	18	18	1	30
record	imp	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.081957	0.124357	0.138351	0.104471	0.088899	
link-Y	0.093077	0.091485	0.119826	0.102637	0.077748	
Variation-YDir(%)	-12	25	15	1	12	

جدول ۶- ماکزیمم جابجایی سازه ۸ طبقه در جهت X

record	bam	cape	erzincan	loma	north	tabas
base-Y	0.583116	0.14533	0.583116	0.460735	0.460735	0.116373
link-Y	0.376442	0.13314	0.376442	0.378352	0.378352	0.08057
Variation-XDir(%)	36	7	36	19	19	27
record	imp	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.237453	0.127476	0.218044	0.075237	0.140844	
link-Y	0.119554	0.120489	0.204861	0.088141	0.125315	
Variation-YDir(%)	52	5	4	-14	14	

جدول ۷- ماکزیمم جابجایی سازه ۸ طبقه در جهت Y

record	bam	cape	erzincan	loma	north	Tabas
base-Y	0.181882	0.132281	0.13533	0.116373	0.182856	0.091841
link-Y	0.115515	0.081715	0.14314	0.102426	0.112157	0.102426
Variation-XDir(%)	38	5	-7	9	38	-11
record	imp	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.233682	0.155808	0.130018	0.182157	0.167587	
link-Y	0.132562	0.122983	0.170961	0.112856	0.182384	
Variation-YDir(%)	76	20	-30	63	-12	

جدول ۸- ماکزیمم جابجایی سازه ۱۴ طبقه در جهت X

record	bam	cape	erzincan	loma	north	tabas
base-Y	0.377723	0.086899	0.377723	0.462576	0.427657	0.436942
link-Y	0.310802	0.057619	0.310802	0.537761	0.537761	0.354718
Variation-XDir(%)	16	37	16	15	-26	18
record	7	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.149851	0.367385	0.201237	0.137996	0.13167	
link-Y	0.129011	0.303431	0.149705	0.172647	0.121597	
Variation-YDir(%)	14	20	42	-30	7	

جدول ۹- ماکزیمم جابجایی سازه ۱۴ طبقه در جهت Y

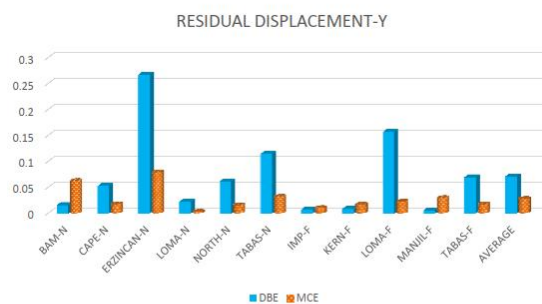
record	bam	cape	erzincan	loma	north	tabas
base-Y	0.146591	0.838215	0.838215	0.436942	0.332712	0.414032
link-Y	0.110488	0.581151	0.581151	0.354718	0.332167	0.331826
Variation-XDir(%)	27	30	30	18	0.1	19
record	imp	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.378939	0.216786	0.096828	0.332712	0.142906	
link-Y	0.50352	0.117456	0.067237	0.332167	0.113739	
Variation-YDir(%)	-35	90	50	0.1	21	

جدول ۱۰- ماکزیمم جابجایی سازه ۱۶ طبقه در جهت X

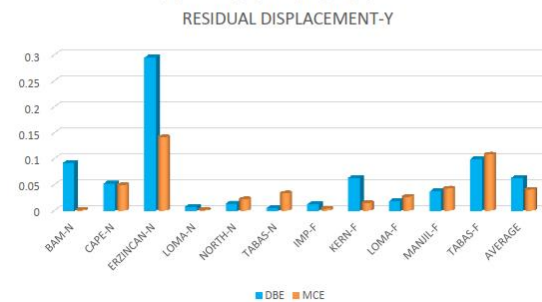
record	bam	cape	erzincan	loma	north	tabas
base-Y	0.810841	0.052041	0.700841	0.739735	0.315307	0.507825
link-Y	0.704603	0.02324	0.814603	0.322136	0.322136	0.197776
Variation-X Dir(%)	15	60	-15	51	-3	62
record	imp	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.654485	0.547744	0.206533	0.3078	0.194404	
link-Y	0.47885	0.258722	0.322136	0.090323	0.074646	
Variation-Y Dir(%)	27	116	-60	70	63	

جدول ۱۱- ماکزیمم جابجایی سازه ۱۶ طبقه در جهت Y

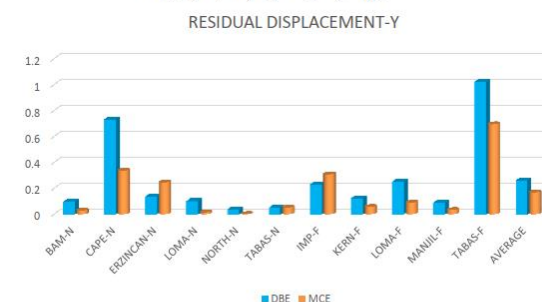
record	bam	cape	erzincan	loma	north	tabas
base-Y	0.273274	1.288377	1.288377	0.650299	0.438022	0.650299
link-Y	0.25663	0.957609	0.957609	0.252588	0.176538	0.252588
Variation-XDir(%)	7	25	25	61	60	61
record	imp	kern	loma	manjil	tabas	
base-Y	0.74299	0.200012	0.289328	0.406022	0.429109	
link-Y	1.011214	0.175536	0.133966	0.11045	0.059424	
Variation-YDir(%)	-44	15	53	72	88	



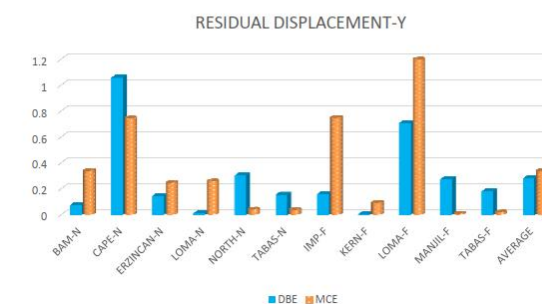
نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۵ طبقه در جهت Y



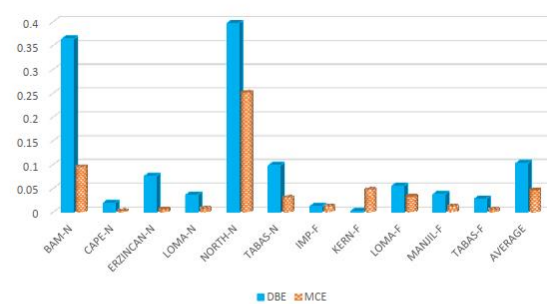
نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۸ طبقه در جهت Y



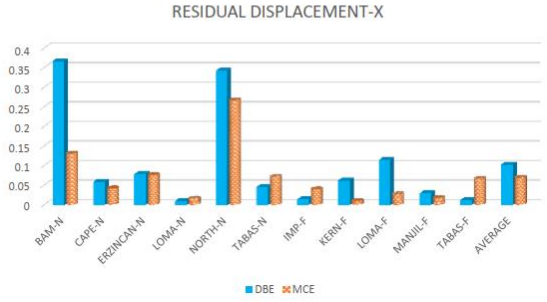
نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۱۴ طبقه در جهت Y



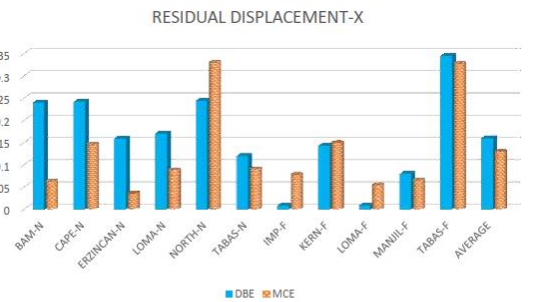
نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۱۶ طبقه در جهت Y



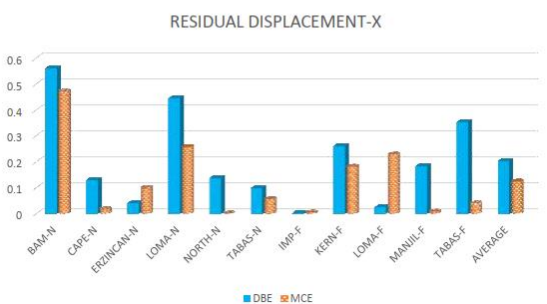
نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۵ طبقه در جهت X



نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۸ طبقه در جهت X



نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۱۴ طبقه در جهت X



نمودار تغییر شکل ماندگار سازه ۱۶ طبقه در جهت X

شکل ۱۱- نمودار تغییر شکل ماندگار

۹- بررسی تغییر شکل ماندگار

در ارزیابی خرابی‌های وارد بر یک سازه در طی رخداد زلزله، مقدار تغییر شکل‌های ماندگار اعم از دوران گره‌ها، جابه‌جایی جانبی طبقات و یا دررفت آنها به‌عنوان یک معیار اصلی در بررسی‌های میزان آسیب بشمار می‌رود. از این‌رو در این تحقیق مقدار حداکثر تغییر شکل ماندگار سازه‌ها که در دو سازه مورد بررسی ارزیابی شده‌اند، برای هر رکورد زلزله در طی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیرات تغییر اهداف عملکردی در مقدار تغییر شکل‌های ماندگار کنترل شده است. برای این منظور، مقدار جابه‌جایی جانبی ماندگار طبقه بام به‌عنوان نقطه کنترل کل سازه مدنظر قرار گرفته و جابه‌جایی ماندگار آن برای هر رکورد زلزله ثبت شده است. نتایج در طی نمودارهای ستونی برای دو سازه فوق مقایسه و میزان کاهش جابه‌جایی ماندگار برای طبقه بام در حالت استفاده فیوز که موجب افزایش تاب‌آوری سازه‌ها خواهد شد، آورده شده است. نتایج این بخش برای سازه‌های ۵، ۸، ۱۴ و ۱۶ طبقه در شکل ۱۱ آورده شده است.

۱۰- ارزیابی کمی تاب‌آوری در اثر استفاده از فیوز

بعد از بررسی کیفی تأثیرات استفاده از فیوز از طریق کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای و همچنین سطوح عملکرد سازه‌های طرح شده با اهداف عملکردی مختلف، برای درک بهتر تأثیرات ارتقای انتظارات موردنیاز از سازه به هنگام وقوع زلزله در تاب‌آوری سازه‌های فولادی، نتایج کمی آنها نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بر اساس آنچه که در مفهوم تاب‌آوری سازه‌ها مورد توجه است؛ زمان تعمیر سازه‌ها، پلاکاردهای امنیتی و مصدومان حاصل از وقوع زلزله نیز جزء شاخص‌های اصلی افزایش تاب‌آوری است؛ لذا در این بخش تأثیرات استفاده از فیوز که برای طراحی سازه‌ها در نظر گرفته شده است، در میزان کاهش زمان تعمیر، مصدومین (کشته‌ها و زخمی‌ها) مورد توجه قرار گرفته و برای سازه‌های با اهداف عملکردی مختلف مقایسه شده است. نتایج این بخش از تحقیق برگرفته از تحلیل کمی وضعیت سازه‌های موردنظر، بر اساس الگوریتم نرم‌افزار Pact است که مطابق روش FEMA-P58 استخراج و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۱۰-۱- بررسی زمان تعمیر سازه‌ها

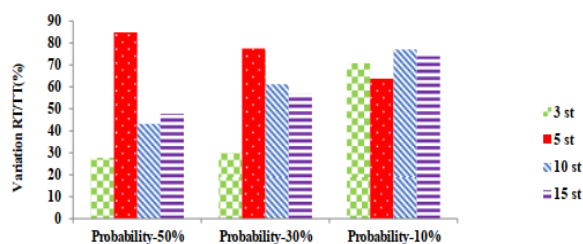
یکی از معیارهای ارزیابی تاب‌آوری سازه‌ها بررسی مدت‌زمان لازم برای بازگرداندن سازه آسیب‌دیده به حالت اولیه و زمان سرویس‌دهی است؛ لذا در این بخش زمان لازم برای تعمیر سازه‌های طرح شده با base و link مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت، زمان تعمیر کاهش‌یافته در سه احتمال رخداد ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش نیز تأثیرات استفاده از فیوز در کاهش زمان موردنیاز برای تعمیر و بازگرداندن سازه به حالت اولیه بررسی شده است. نتایج این بخش در جدول ۱۲ آورده شده است. در این جدول زمان تعمیر

سازه‌ها Repair Time تعریف شده که بصورت مخفف با RT نشان داده شده است. همچنین زمان اولیه سازه Total Time تعریف شده که بصورت مخفف با TT نشان داده شده است. لازم به توضیح است که TT در نظر گرفته شده برای هر دو سازه، زمان جایگزینی سازه مینا است.

جدول ۱۲- بررسی نسبت زمان تعمیر به زمان جایگزینی سازه مینا

Structures	RT Ratio (%)	Probability %10	Probability %30	Probability %50
5 story	RT/TT (DBE)	22.6	33.8	43.6
	RT/TT (MCE)	6.6	23.7	31.5
Variation - %	70.79	29.88	27.75	
8 story	RT/TT (DBE)	4.57	19.5	58.2
	RT/TT (MCE)	1.66	4.4	8.86
Variation - %	63.67	77.43	84.77	
14 story	RT/TT (DBE)	18.9	29.78	37.89
	RT/TT (MCE)	4.35	11.57	21.53
Variation - %	76.98	61.14	43.17	
16 story	RT/TT (DBE)	14.53	21.75	34.2
	RT/TT (MCE)	3.78	9.43	17.86
Variation - %	73.98	56.64	47.77	

با کاهش زمان تعمیر تأثیرات استفاده از فیوز در افزایش تاب‌آوری سازه‌ها قابل بحث و گفتگو است که در این بخش مورد ارزیابی قرار گرفته است. باتوجه به اینکه زمان تعمیر برای سازه‌های دارای فیوز نسبت به سازه‌های مینا به‌صورت قابل توجهی کاهش یافته است، لذا با استناد به نتایج فوق می‌توان این‌گونه بیان کرد که؛ استفاده از فیوز باعث بهبود تاب‌آوری سازه‌های فولادی شده و زمان بازگرداندن سازه‌های آسیب‌دیده در طی زلزله احتمالی (DBE) بسیار کاهش یافته است. نسبت کاهش زمان تعمیر برای سازه‌های فوق نسبت به سازه‌ها مینا در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- بررسی تأثیرات استفاده از فیوز در کاهش زمان تعمیر سازه‌ها

۱۱- منابع:

- [1] Ghobarah A. Performance based design in earthquake engineering: state of development. Eng Struct. 2001; 23 (8): 878 -84.
[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00036-0)
- [2] Shahrooz M, Fortney JP, Harries KA. Steel coupling beams with a replaceable fuse. J Struct Eng. 2018; 144 (2): 04017210.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001939](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001939)
- [3] Mortazavi P, Lee E, Binder J, Kwon OS, Christopoulos C. Large-scale experimental validation of optimized cast steel replaceable modular yielding links for EBFs. J Struct Eng. 2023; 149 (1): 04022195.
<https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-11633>
- [4] Alçiçek HE, Vatansever C. Experimental investigation of link beams with perforated web section in eccentrically braced frames. Adv Struct Eng. 2022; 25 (6): 1268-82.
<https://doi.org/10.1177/13694332211073637>
- [5] Yin Z, Feng D, Yang W. Damage analyses of replaceable links in eccentrically braced frame (EBF) subject to cyclic loading. Appl Sci. 2019; 9 (2): 332.
<https://doi.org/10.3390/app9020332>
- [6] Zhao LY, Guo D, Yang YQ, Diao YS, Liu XL. Seismic performance and replaceability of steel frame structures with replaceable beam segments. Adv Steel Constr. 2024; 20 (1): 69 -80.
<https://doi.org/10.18057/IJASC.2024.2>

۱۱- نتیجه گیری

- ۱- بررسی تاریخچه جابجایی بام سازه‌ها نشان دهنده‌ی این است که، سازه‌ها تحت زلزله‌های دور از گسل تغییر شکل‌های غیرخطی کمتری را نسبت به زلزله‌های نزدیک گسل تجربه می‌نمایند. این در حالی است که در سازه‌های مینا میزان غیرخطی شدن تغییر شکل‌ها تحت رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل به مراتب بیشتر از سازه‌های دارای فیوز است. هر چند در بعضی از رکوردهای زلزله، غیرخطی شدن سازه‌های دارای فیوز بیشتر از سازه‌های مینا بوده است که این مهم به دلیل تغییر در مشخصات فرکانسی سازه‌ها و رکوردهای زلزله است.
- ۲- ارزیابی تاریخچه جابجایی مربوط به بام در سازه‌های مینا و دارای فیوز نشان می‌دهد که در همه سازه‌های مینا، طبقه بام وارد ناحیه غیرخطی می‌شود. لذا می‌توان بیان نمود که، طبقه بام همه‌ی سازه‌های مینا آسیب می‌بینند. این در حالی است که، برخی از سازه‌های دارای فیوز در طبقه بام تغییر شکل‌های غیرخطی را تجربه نکرده‌اند، فلذا می‌توان گفت که این سازه‌ها در طبقه بام آسیب چندانی نخواهند دید. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که، طبقه بام بعنوان نقطه کنترل سازه تلقی می‌شود و رفتار آن سازه را در برخی از مودها از جمله مود اول تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجائی که در ارزیابی آسیب به روش FEMA-P58 در برنامه PACT تخمین میزان خرابی برای مودهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد، لذا می‌توان بیان نمود که سازه‌های دارای فیوز در مود اول خود آسیب کمتری را تجربه خواهند نمود.
- ۳- استفاده از فیوز در سازه‌ها باعث کاهش مقدار دررفت ماندگار سازه‌ها شده و سطح عملکرد سازه‌ها را بهبود می‌بخشد که نمودارهای شکنندگی مورد بررسی برای آنها نیز گویای این مهم می‌باشند. بطوری که منحنی شکنندگی سازه‌های دارای فیوز سطح عملکرد بسیار مناسب‌تری را نسبت به سازه‌های مینا نشان می‌دهند. بطوری که میانه دررفت سازه‌های دارای فیوز نسبت به سازه‌های مینا در ساختمان‌های ۵، ۸ و ۱۴ طبقه تحت زلزله DBE به ترتیب ۵۲، ۳۵، ۳۷ و ۴۶ درصد کاهش یافته است.
- ۴- ارزیابی هزینه تعمیر سازه‌ها بعنوان یکی از پیامدهای تصادفی مورد بررسی در این تحقیق نشان داد که، استفاده از فیوز در سازه‌ها، هزینه‌های تعمیر را بصورت قابل توجهی کاهش می‌دهد. بطوری که هزینه تعمیر برای سازه‌های دارای فیوز نسبت به سازه‌های مینا برای ساختمان‌های ۵، ۸ و ۱۴ طبقه به ترتیب ۵۳، ۵۴، ۶۲ و ۷۵ درصد کاهش یافته است.