



## Analytical study of the effect of LRB isolators positioning at the base and inter-story levels on seismic response of RC buildings

Amir Mohammad Taghavi<sup>1</sup>, Ebrahim Zamani Beydokhti<sup>2\*</sup>, Hamed Kouhestanian<sup>1</sup>

1- MSc of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran

### ABSTRACT

*In this study, the effect of isolators positioning at three Levels and different arrangements on seismic response of RC buildings are investigated. For this purpose 18 RC building of 4, 8 and 12 story with and without lead rubber bearing (LRB) isolators were selected. The LRB isolators positioned at three Levels and five different arrangements were modeled in Opensees software. The near field and far fault earthquakes were added to the frames and incremental dynamic analysis was performed. The fragility curves base on inter-story drift ratio as well as the IDA curves base on maximum inter-story drift ratio, maximum base shear, maximum roof displacement and acceleration versus peak ground accelerations (PGA) were plotted and compared. The results showed that among the isolated structures, the isolator positioning at the level of below the first floor (type 1 and type 2) had the best performance in reducing responses. The positioning type 1 (MSI-1) resulted the best decreasing in inter-story drift ratio and base shear. In addition, this type of isolator had the best increasing the PGA according to median fragility between the different types of the positioning levels. The recommended type of isolator had the best performance, especially in high rise buildings in severe damage levels.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 08 November 2018

**Revise Date:** 07 February 2019

**Accept Date:** 23 February 2019

### Keywords:

*Incremental dynamic analysis*

*Lead rubber bearing*

*fragility curves*

*IDA curves*

*Near fault earthquakes*

*Far field earthquakes*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.155463.1703

\*Corresponding author: Ebrahim Zamani Beydokhti

Email address: zamani.eb@shahroodut.ac.ir

## مطالعه عددی تأثیر قرارگیری جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در حالت‌های جداسازی شده پایه و میان طبقه ای بر رفتار سازه‌های بتن آرمه

امیرمحمد تقوی<sup>۱</sup>، ابراهیم زمانی بیدختی<sup>۲\*</sup>، حامد کوهستانیان<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

در این مقاله تأثیر قرارگیری جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در حالت‌ها و ترازهای ارتفاعی مختلف بر رفتار سازه‌های بتن آرمه تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد بررسی قرار گرفت. از این رو، برای جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در سه نمونه سازه‌های بتنی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه سه تراز ارتفاعی با پنج آرایش مختلف در نحوه قرارگیری آنها در نظر گرفته شد. این سازه‌ها به همراه سازه‌های پایه ثابت مشابه در نرم‌افزار *OpenSees* مدل گردیده و تحت اثر زلزله های دور و نزدیک، تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی آنها انجام گرفت. در نهایت، برای این سازه‌ها، منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی بر اساس شاخص‌های خسارت ماکزیمم دررفت طبقات، ماکزیمم برش پایه، ماکزیمم جابجایی و شتاب بام در برابر شاخص شدت پیشینه شتاب زمین ترسیم شد. همچنین با رسم منحنی‌های شکنندگی بر اساس ماکزیمم دررفت طبقات در برابر پیشینه شتاب زمین تفسیرهای قابل قبولی ارائه گردید و احتمال خرابی در هر یک از سطوح آسیب به کمک رسم میانه منحنی‌های شکنندگی مورد بررسی گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که قرارگیری جداسازها در حالت های میان طبقه ای ۱ و ۲ دررفت طبقات و برش پایه را به کمتر از نصف کاهش می دهند. در این میان قرارگیری جداساز در سطح زیرین طبقه اول (حالت ۱) بهترین عملکرد رفتاری در کاهش دررفت و برش پایه و افزایش شتاب متناظر با بیان شکنندگی در بین سازه‌های جداسازی شده در حالات میان طبقه ای و پای ستونی داراست.

کلمات کلیدی: تحلیل *IDA*، جداساز *LRB*، منحنی‌های شکنندگی، جداسازی میان طبقه ای، حوزه نزدیک، حوزه دور

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/JSCE.2019.155463.1703	10.22065/JSCE.2019.155463.1703	۱۳۹۷/۰۸/۱۷	۱۳۹۷/۱۱/۱۸	۱۳۹۷/۱۲/۰۴	۱۳۹۷/۱۲/۰۴	۱۴۰۰/۰۱/۳۰
		* نویسنده مسئول:				ابراهیم زمانی بیدختی
		پست الکترونیکی:				zamani.eb@shahroodut.ac.ir

## ۱- مقدمه

جداساز پایه ایده‌ای که با هدف جلوگیری از انتقال حرکات زمین‌لرزه به ساختمان‌ها به‌طور کامل و یا کاهش حداکثری آن، در ذهن محققان شکل گرفت. اگرچه نقطه آغاز شکل‌گیری این ایده دقیقاً مشخص نیست اما مطمئناً به سال ۱۸۸۵ میلادی و یا حتی سال‌هایی قبل از آن برمی‌گردد. این ایده با گذشت زمان از حالت ابتدایی خود خارج و در سال‌های بعد جداسازهایی همانند جداساز لاستیکی<sup>۱</sup>، جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB<sup>۲</sup>)، NRB<sup>۳</sup>، FPB<sup>۴</sup> با ویژگی‌های پیچیده‌تر و خاص خود ساخته و پا به عرصه ظهور نهاد و در ساختمان‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفت [۱-۳].

پس از آنکه مشخص شد جداسازها پاسخ‌های سازه را بهبود بخشیده و به اقتصادی بودن طرح کمک بسیاری خواهند نمود [۴-۵] و همچنین پس از مشاهده عملکرد رفتاری مطلوب آن‌ها در زلزله‌های بزرگ در واقعیت، شدت علاقه به مطالعه در این زمینه افزایش یافته است.

با گسترش این تکنولوژی و افزایش گونه‌های جداساز، این حقیقت که چه جداسازی در چه شرایطی بهترین عملکرد را خواهد داشت همواره یکی از دغدغه‌های محققان، مهندسان و معماران بوده است. آراتی و همکاران [۶] به مقایسه پاسخ‌های دو جداساز متفاوت نسبت به هم پرداختند. جداسازهای مورد بررسی آنها جداساز لاستیکی با هسته سربی و جداساز لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی بودند. نتایج آنها نشان داد که جداساز لاستیکی با هسته سربی نسبت به جداساز لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی برش پایه و دررفت (طبقه اول) کمتری را ایجاد می‌نماید. کومور [۷] به بررسی اثرات طبقه نرم بر روی پاسخ جداساز لاستیکی با هسته سربی پرداخت. او نشان داد اثرات طبقه نرم بر روی سازه جداسازی شده بسیار ناچیز است. جانگید [۸] مطالعه‌ای بر روی بهینه کردن جداساز لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی در یک ساختمان چندطبقه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک انجام داد. در این باب یعنی جداسازی با استفاده از جداسازهای پایه (BI<sup>۵</sup>) مطالعات مقایسه‌ای بسیاری انجام شده است [۹-۱۱] اما مطالعات بر روی جداسازهای میان طبقه‌ای (MSI<sup>۶</sup>) در سازه‌ها کمتر دیده شده است. جداسازهای پایه به دلیل جایابی زیاد در تراز جداسازها در صورت عدم رعایت فاصله کافی، ممکن است باعث ایجاد برخورد با سازه مجاور نماید. جداسازی میان طبقه‌ای روش نوینی برای بهره‌گیری مطلوب‌تر از خصوصیات سیستم جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌های متفاوت است.

پیشرفت دانش در زمینه ساخت جداسازها و تکامل یافتن آن‌ها باعث شده است دیگر این تکنولوژی فقط در سازه‌ها و زیرساخت‌های حیاتی عمرانی مورد استفاده قرار نگیرد و در بسیاری از کشور لرزه‌خیز دنیا از جمله نیوزلند علاوه بر استفاده در بسیاری بیمارستان‌ها وارد حوزه ساختمان‌های مسکونی نیز گردد. به دنبال آن در ایران نیز استفاده از این تکنولوژی در حال افزایش است به طوری که استفاده از جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در بیمارستان امام حسین (ع) واقع در شهر مشهد، بیمارستان صدوقی واقع در اصفهان و بیمارستان امام حسین (ع) واقع در شهر کرمانشاه خود گواه بر این موضوع و اهمیت آن است. علاوه بر این، این سیستم لرزه‌ای در بسیاری از ساختمان‌های مسکونی نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مقاله تأثیر قرارگیری جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در حالت‌ها و ترازهای ارتفاعی مختلف بر رفتار سازه‌های بتن آرمه تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد بررسی و مقایسه گرفته است. برای جداسازها در سه نمونه سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه جداسازی شده دو تراز ارتفاعی و پنج حالت قرارگیری مختلف انتخاب و با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی گستره عظیمی از زلزله‌های مقیاس شده به آن‌ها اعمال شد. درنهایت با دریافت پاسخ‌های مربوطه و دسته‌بندی و ارائه مطلوب بر روی منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی و منحنی‌های شکنندگی این پاسخ‌ها مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفت تا رفتار این‌گونه سازه‌ها هرچه بیشتر و عمیق‌تر روشن گردد.

<sup>۱</sup> Elastomeric bearings

<sup>۲</sup> Lead Rubber Bearing

<sup>۳</sup> Natural and Synthetic Rubber Bearing

<sup>۴</sup> Friction pendulum bearing

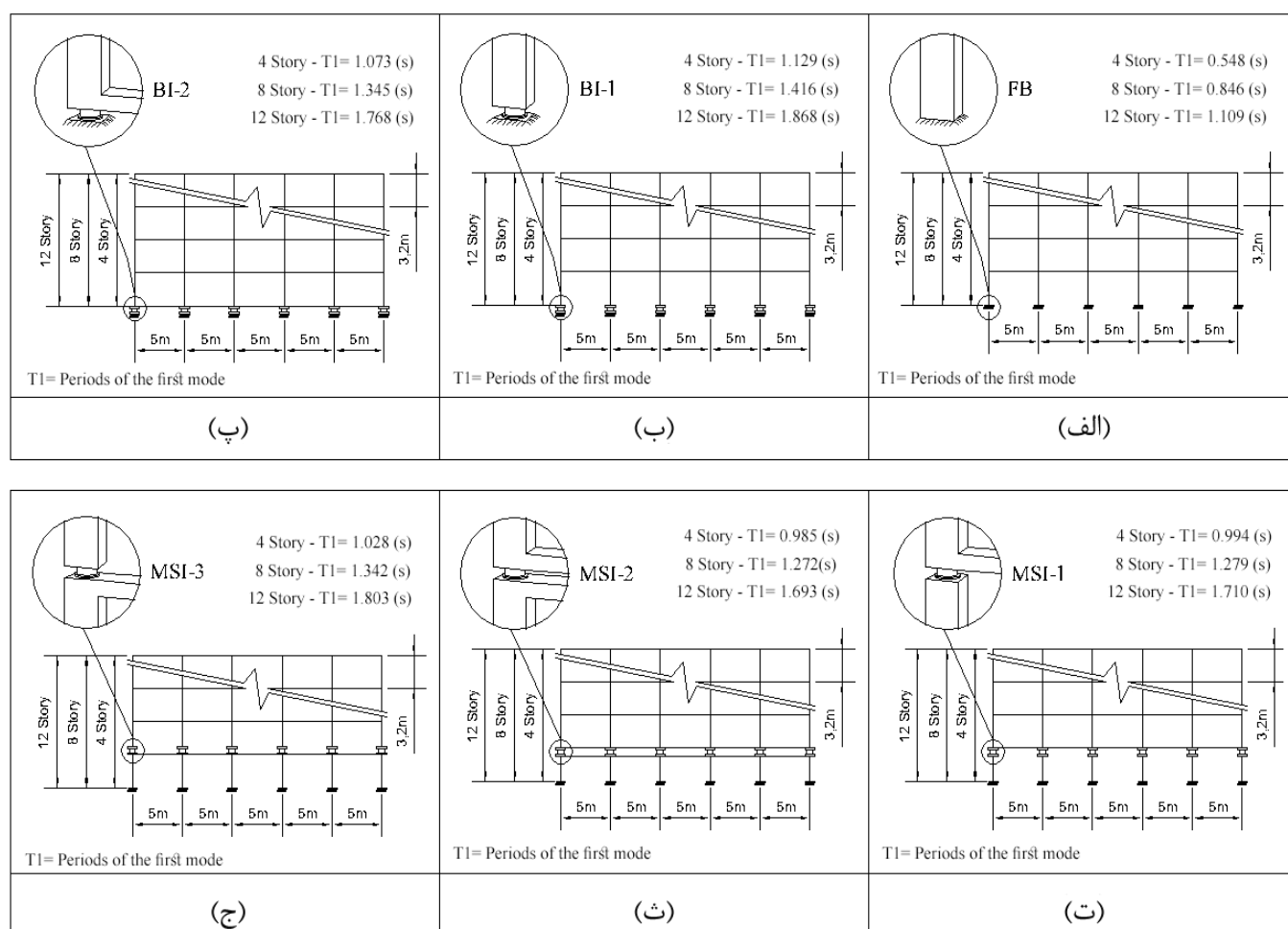
<sup>۵</sup> Base Isolation

<sup>۶</sup> Mid-Story Isolation

## ۲- مدل عددی سازه

در این پژوهش استفاده از جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در دو حالت جداساز پایه و میان طبقه ای (بالا و پایین سقف طبقه اول) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. پس از راستی آزمایی مدلسازی انجام شده با آزمایش و همچنین با نتایج حاصل از تحلیل در نرم افزار Sap2000، حالت های مختلف سازه تحت تحلیل دینامیکی افزایشی قرار گرفتند. در نهایت پاسخ ها بر مبنای منحنی های IDA و شکنندگی مقایسه شده و حالت بهینه قرارگیری جداساز انتخاب می شود.

در این پژوهش ۱۸ نمونه قاب ساختمان بتنی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در دو تراز ارتفاعی و حالات قرارگیری مختلف همانند شکل ۱ برای جداسازها، در نرم افزار OpenSees مدل گردید. قاب ها به سه حالت کلی پایه ثابت، جداسازی شده پایه و جداسازی شده میان طبقه ای تقسیم بندی شده اند که حالات مختلف در شکل ۱ قابل مشاهده است. جهت نشان دادن پایداری سازه ها در سه حالت مختلف، دوره تناوب مود اول آنها در شکل ارائه گردیده است.



شکل ۱: حالات مختلف قرارگیری جداساز (الف) پایه ثابت، (ب) جداساز پایه حالت ۱، (پ) جداساز پایه حالت ۲، (ت) تا (ج) جداسازی میان طبقه ای ۱ تا ۳

قاب های طراحی شده شامل ۵ دهانه ۵ متری با ارتفاع ۳/۲ متر برای هر طبقه است. بار مرده و بار زنده مورد استفاده به ترتیب برابر ۶/۴ و ۱/۹۶ کیلو نیوتن بر مترمربع برای طبقات و به ترتیب ۵/۹ و ۱/۴۷ کیلو نیوتن بر مترمربع برای بام است. برای طراحی لرزه ای سازه از آیین نامه (ACI 318 (۲۰۰۲) و سیستم قاب خمشی متوسط استفاده شده است. برای مواد بتنی مقاومت فشاری ۲۴/۵ MPa، نسبت پواسون ۰/۲ و مدول یانگ برابر ۲۳ GPa در نظر گرفته شده است. نسبت میلگردهای طولی در مقاطع تیر و ستون برابر ۳ درصد

است. برای مصالح فولادی تنش جاری شدن ۳۳۸ MPa، نسبت پواسون ۰/۳ و مدول یانگ ۲۰۰ GPa در تیرها و ستون‌ها در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مشخصات مقاطع بتنی مورد استفاده در سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقاطع بتنی مورد استفاده در سازه (الف) طبقه ۴، (ب) طبقه ۸ و (پ) طبقه ۱۲

آرما تور ستون	ابعاد ستون (cm)	آرما تور تیر		ابعاد تیر (cm)	طبقه
		بالا	پایین		
۲۸Ø۳۲	۸۵×۸۵	۴Ø۲۸	بالا	۵۰×۵۰	طبقه اول
		۴Ø۲۸	پایین		
۲۴Ø۲۸	۷۰×۷۰	۵Ø۳۲	بالا	۵۰×۵۰	طبقه دوم
		۵Ø۳۲	پایین		
۲۰Ø۲۶	۶۰×۶۰	۵Ø۳۲	بالا	۵۰×۵۰	طبقه سوم
		۵Ø۳۲	پایین		
۲۰Ø۲۶	۶۰×۶۰	۵Ø۳۲	بالا	۵۰×۵۰	طبقه چهارم
		۵Ø۳۲	پایین		
۲۰Ø۲۶	۶۰×۶۰	۵Ø۳۲	بالا	۵۰×۵۰	طبقه پنجم
		۵Ø۳۲	پایین		
۱۶Ø۲۶	۵۵×۵۵	۵Ø۳۲	بالا	۵۰×۵۰	طبقه ششم
		۵Ø۳۲	پایین		
۱۶Ø۲۶	۵۵×۵۵	۵Ø۳۲	بالا	۵۰×۵۰	طبقه هفتم
		۵Ø۳۲	پایین		
۱۶Ø۲۶	۵۵×۵۵	۵Ø۳۲	بالا	۵۰×۵۰	طبقه هشتم
		۵Ø۳۲	پایین		
۱۶Ø۲۵	۵۰×۵۰	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه نهم
		۴Ø۲۸	پایین		
۱۶Ø۲۵	۵۰×۵۰	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه دهم
		۴Ø۲۸	پایین		
۱۲Ø۲۵	۴۵×۴۵	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه یازدهم
		۴Ø۲۸	پایین		
۱۲Ø۲۲	۴۰×۴۰	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه دوازدهم
		۴Ø۲۸	پایین		

(پ)

آرما تور ستون	ابعاد ستون (cm)	آرما تور تیر		ابعاد تیر (cm)	طبقه
		بالا	پایین		
۲۰Ø۲۶	۶۰×۶۰	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه اول
		۴Ø۲۸	پایین		
۱۲Ø۲۵	۴۵×۴۵	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه دوم
		۴Ø۲۸	پایین		
۱۲Ø۲۲	۴۰×۴۰	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه سوم
		۴Ø۲۸	پایین		
۸Ø۲۵	۳۰×۳۰	۳Ø۲۵	بالا	۳۰×۳۰	طبقه چهارم
		۳Ø۲۵	پایین		

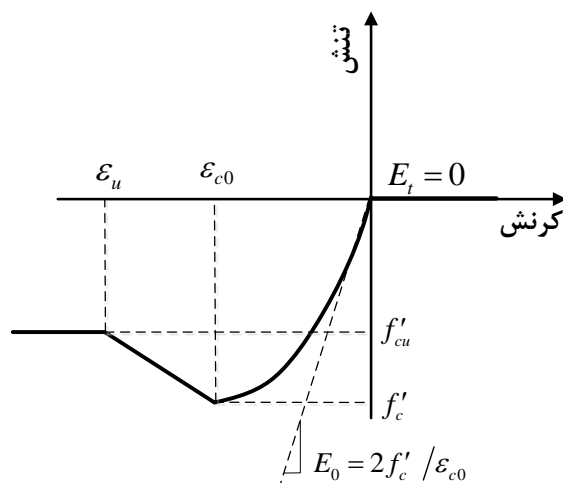
(الف)

آرما تور ستون	ابعاد ستون (cm)	آرما تور تیر		ابعاد تیر (cm)	طبقه
		بالا	پایین		
۲۴Ø۳۰	۷۵×۷۵	۴Ø۳۲	بالا	۴۵×۴۵	طبقه اول
		۴Ø۳۲	پایین		
۲۰Ø۲۸	۶۵×۶۵	۴Ø۳۲	بالا	۴۵×۴۵	طبقه دوم
		۴Ø۳۲	پایین		
۲۰Ø۲۶	۶۰×۶۰	۴Ø۳۲	بالا	۴۵×۴۵	طبقه سوم
		۴Ø۳۲	پایین		
۱۶Ø۲۶	۵۵×۵۵	۴Ø۳۲	بالا	۴۵×۴۵	طبقه چهارم
		۴Ø۳۲	پایین		
۱۶Ø۲۵	۵۰×۵۰	۴Ø۳۲	بالا	۴۵×۴۵	طبقه پنجم
		۴Ø۳۲	پایین		
۱۲Ø۲۵	۴۵×۴۵	۳Ø۲۵	بالا	۴۰×۴۰	طبقه ششم
		۳Ø۲۵	پایین		
۱۲Ø۲۲	۴۰×۴۰	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه هفتم
		۴Ø۲۸	پایین		
۸Ø۲۲	۴۰×۴۰	۴Ø۲۸	بالا	۴۰×۴۰	طبقه هشتم
		۴Ø۲۸	پایین		

(ب)

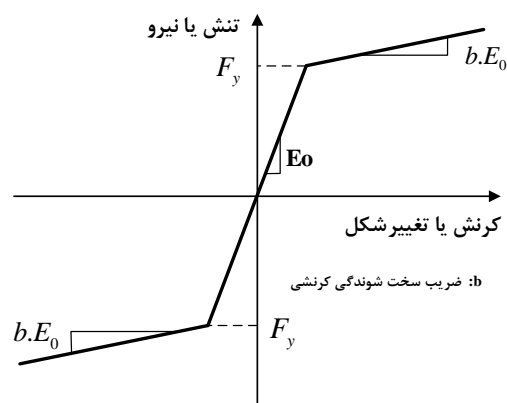
به تیرها و ستون‌های بتنی مصالح concrete01<sup>۷</sup> با مقاومت کششی صفر اختصاص داده شد که نمودار تنش-کرنش آن مطابق شکل ۲- الف می باشد. این مدل برای ساخت مصالح بتنی تک‌محوره کنت، اسکات و پارک با سختی باربری/بارگذاری که به صورت خطی کاهش یافته به کار می‌رود. برای تعریف مقاطع از مقطع فایبر<sup>۸</sup> استفاده شده است. این مقطع یک شکل هندسی عمومی دارد که از نواحی با

اشکال ساده‌تر و منظم‌تر مانند نواحی مستطیلی، دایروی و مثلثی تشکیل می‌شود. علاوه بر این آرماتورهای مسلح کننده را نیز می‌توان با این مقطع تعریف کرد.



شکل ۲: نمودار تنش-کرنش مصالح بتن concrete01 [۱۲]

از دستور steel01 برای مدل کردن مصالح فولادی استفاده شد که دارای نمودار تنش-کرنش مطابق شکل ۳ است. مصالح steel01 برای ساخت مصالح فولادی بصورت رفتار تک‌محوره دوخطی با سخت‌شوندگی سینماتیک و سخت‌شوندگی ایزوتروپیک اختیاری توصیف می‌شود. لازم به ذکر است، ضریب سخت‌شوندگی کرنشی (b) در این پژوهش برای آرماتورها ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.



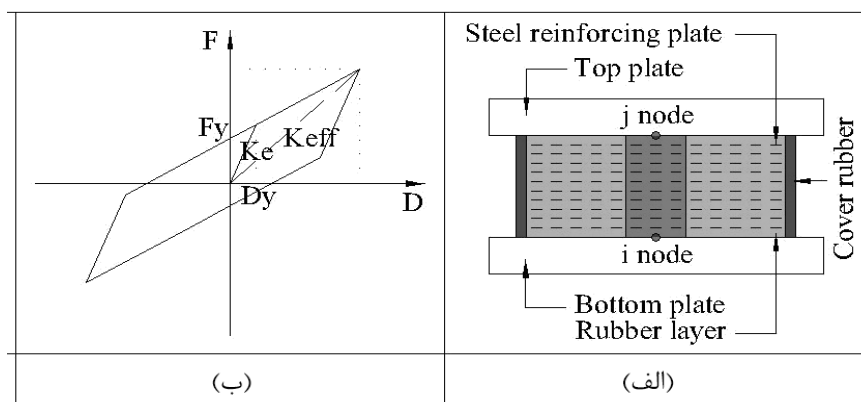
شکل ۳: نمودار تنش-کرنش مصالح steel01 [۱۲]

### ۳- جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB<sup>۱۰</sup>)

مطابق شکل ۴ - الف جداساز لاستیکی با هسته سربی شامل لایه‌های لاستیکی و فولادی به همراه هسته استوانه‌ای شکل سربی است که در آن لایه‌های لاستیکی و فولادی انعطاف‌پذیری جانبی و سختی قائم را فراهم می‌کند و هسته سربی با هدف افزایش ظرفیت جذب انرژی، سختی قائم و میرا کردن لرزش‌ها به آن اضافه گردیده است. به‌طور کلی طرز کار این‌گونه جداسازها شبیه جداسازهای

9 Steel01 Material  
10 Lead Rubber Bearing

لاستیکی می‌باشد با این تفاوت که هسته استوانه‌ای سربی در میان آن قرار گرفته تا یک صلیبیت اضافی را بر سیستم اعمال نماید. سیستم جداساز لاستیکی به‌طور گسترده در کشورهای مختلف از جمله ژاپن و آمریکا مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۴: الف) مقطع عرضی جداساز لاستیکی با هسته سربی، ب) نمودار نیرو-تغییر مکان ایدئال برای جداساز [۱۲]

برای مدل‌سازی جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB) در Opensees در این مقاله از المان Elastomeric Bearing استفاده شده است. این المان بر اساس پاسخ دوخطی نیرو-تغییر مکان مطابق شکل ۴ - ب توسعه یافته است [۱۲]. برای پارامترهای غیرخطی جداسازها از مقادیر طراحی ارائه‌شده توسط سازنده استفاده شده است.

### ۳-۱- طراحی جداسازها

در این بخش ابتدا روش طراحی جداساز بر اساس تحقیقات توکلی و همکاران [۱۳] نگاشته شده و سپس در ادامه، مشخصات هندسی جداسازهای طراحی شده ارائه می‌گردد. مراحل طراحی جداسازها به این صورت است که در ابتدا پیروی هدف برای سازه مورد نظر فرض می‌گردد. سپس سختی مؤثر با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$K_{eff} = \frac{W_{DL} + 0/2LL}{g} \left( \frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \quad (1)$$

بطوریکه  $W$  جمع بار مرده به‌اضافه ۲۰ درصد باره زنده،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $T_D$  همان پیروی هدفی است که در ابتدا فرض شد.

تغییر مکان طرح در مرکز سختی سیستم جداساز در طول زلزله طرح با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$D_D = \left[ \frac{g}{4\pi^2} \right] \cdot \frac{S_{1D} T_D}{B_{1D}} \quad (2)$$

بطوریکه  $S_{1D}$  ضریب طیفی و  $B_{1D}$  ضریب میرایی است که با فرض نسبت میرایی ۰.۲۵٪ برابر ۱/۶ محاسبه می‌گردد.

$$Q_D = \frac{W_D}{4D_D} \quad (3)$$

$W_D$  انرژی مستهلک‌شده در هر سیکل می‌باشد. حال با به دست آمدن  $Q_D$ ، سختی ژس کمانشی جداساز ( $K_P$ ) می‌تواند با استفاده از رابطه (۴) تخمین زده شود:

$$K_P = K_{eff} - \frac{Q_D}{D_D} \quad (4)$$

$Q_D$  دوباره و با استفاده از تنش تسلیم و سطح هسته سربی رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$Q_D = A_{pb} \times F_{ypb} \quad (5)$$

سپس با فرض کردن  $K_e = 10K_d$  و  $F_y, D_y = \frac{Q_D}{K_e - K_p}$  با استفاده از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$F_y = Q_D + K_p \times D_y \quad (۶)$$

در نهایت سختی الاستیک جداساز از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$K_e = \frac{F_y}{D_y} \quad (۷)$$

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی جداسازهای لاستیکی با هسته سربی با توجه طراحی انجام برای سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد. در نرم افزارهای اپنسیس و Sap2000 برای معرفی مصالح جداساز لاستیکی با هسته سربی با توجه به دستور معرفی این مصالح از مقادیر  $K_1$  برای معرفی سختی الاستیک ابتدایی،  $F_y$  برای معرفی مقدار تنش تسلیم هسته سربی، از مقدار  $\alpha$  برای معرفی مقدار نسبت سختی الاستیک به سختی پس از تسلیم و مقدار  $K_{eff}$  برای معرفی سختی موثر جداساز استفاده شده است.

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی سیستم جداسازهای لاستیکی با هسته سربی [۱۳]

سازه	$K_{eff}$ (KN/m)	$K_1$ (KN/m)	$K_p$ (KN/m)	$Q_D$ (KN)	$F_y$ (KN)	$\alpha$	$T_D$ (s)	$D_D$ (m)
۴ طبقه	۴۳۷/۴	۳۰۸۳/۲۲	۲۶۵/۶	۵۴/۵۵	۶۴/۷۵	۰/۰۸۶	۲/۵	۰/۲۹۵
۸ طبقه	۷۹۷/۹۳	۴۵۰۴/۵۹	۴۸۴/۵۹	۹۲/۴۶	۱۰۳/۶	۰/۱	۲/۷	۰/۳۲
۱۲ طبقه	۹۲۳/۳۲	۵۸۸۶/۴	۵۶۰/۷۵	۱۳۳/۱۴	۱۴۷/۱۶	۰/۰۹۵	۳	۰/۳۵۴

#### ۴-صحت سنجی

راستی آزمایشی در این مقاله در دو مرحله صورت گرفته است. ابتدا با مقایسه دوره تناوب تحلیلی قاب های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه حاصل از نرم افزار Sap2000 با دوره تناوب حاصل شده از نرم افزار OpenSees در جدول ۳، درستی مدل سازی عضو جداساز در نرم افزار OpenSsse مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی اختلاف دوره تناوب حاصل شده از دو نرم افزار می‌توان به این نتیجه دست یافت که مدل سازی به درستی انجام شده است.

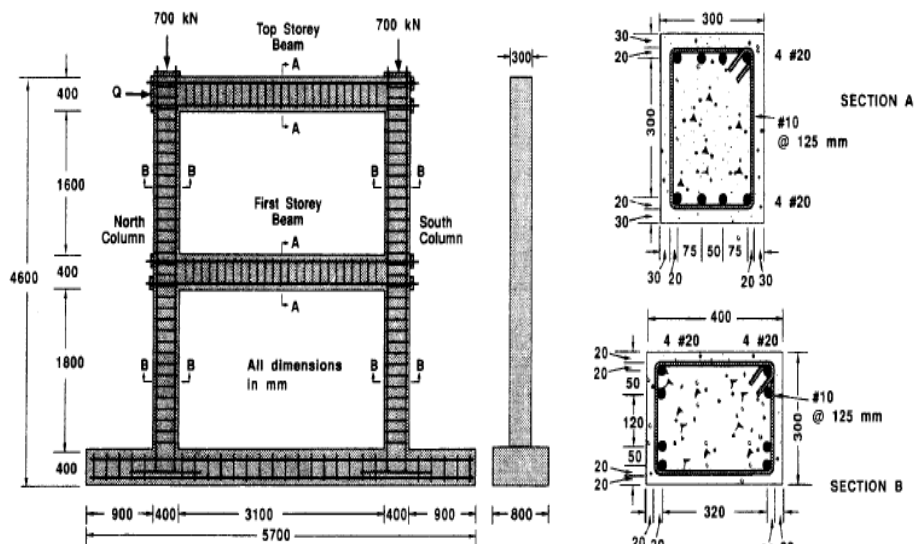
جدول ۳: مقادیر دوره‌ی تناوب مدل‌های سازه‌ای در نرم افزار های Sap2000 و OpenSees

تعداد طبقات	زمان تناوب سازه (ثانیه)		
	OpenSees	Sap2000	درصد اختلاف
۴ طبقه	۰/۶۹۹	۰/۷۹۳	٪۱۱
۸ طبقه	۱/۲۶	۱/۳۳۸	٪۶
۱۲ طبقه	۱/۷۷	۱/۹۴	٪۸

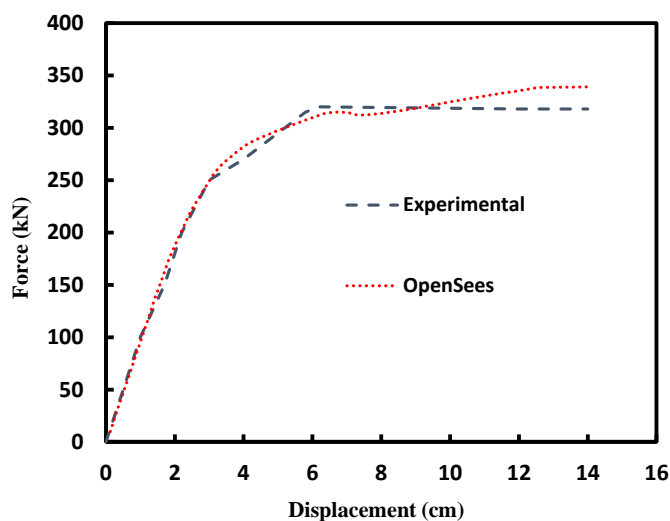
در بخش دوم صحت سنجی به مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار OpenSees با نمونه آزمایشگاهی پرداخته شده است و نتایج حاصل از تحلیل پوش آور در نرم افزار و نمونه آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه گردیده است. در شکل ۵ مدل آزمایشگاهی حاصل پژوهش وسچیو و امارا [۱۴] ارائه شده است. مدل آزمایشگاهی استفاده شده دارای یک دهانه که طول محور به محور ستون‌ها ۳/۵ متر و دو طبقه با ارتفاع ۲- متر برای هر طبقه می‌باشد. مقاطع استفاده شده برای تمام المان‌ها با عرض ۰/۳ و عمق ۰/۴ متر بوده است، در تمامی مقاطع تیر و ستون‌ها از دولاپه آرمتور به تعداد چهار میلگرد با نمره ۲۰ برای میلگردهای طولی و از میلگردهای نمره ۱۰ به فاصله ۱۲۵ میلی‌متر به‌عنوان خاموت استفاده شده است. بتن مورد استفاده در این مدل آزمایشگاهی دارای مقاومت فشاری  $30 \text{ MPa}$  و میلگردهای دارای تنش تسلیم  $418 \text{ MPa}$  و تنش نهایی  $596 \text{ MPa}$  و مدول الاستیسیته بتن برابر با  $192500 \text{ MPa}$  بوده است. این مدل آزمایشگاهی تحت بار ثقلی



در هر ستون و در تراز بام و تحت الگوی بارگذاری جانبی مثلثی که در طبقه دوم مقدار  $1000 \text{ kN}$  به صورت جانبی به مدل اعمال شده، واقع شده است [۱۴]. با رسم نمودار نیرو-جابجایی برای دو حالت آزمایشگاهی و نرم افزاری در شکل ۶ به مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار و نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. مشاهده می شود که نتایج حاصل از مدلسازی در نرم افزار OpenSees کمتر از ۵ درصد با نتایج آزمایش تفاوت دارند.



شکل ۵: جزئیات ابعاد و فولادگذاری قاب دویعدی به منظور صحت سنجی [۱۴]



شکل ۶: مقایسه نتایج پوش آور نمونه آزمایشگاهی و نمونه مدل سازی شده در نرم افزار OpenSees

از نتایج حاصل از دو مرحله صحت سنجی می توان استنباط کرد که خروجی حاصل از نرم افزار OpenSees با مصالح استفاده شده دارای درستی در خروجی نرم افزار بوده است.

## ۵- تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA<sup>۱۱</sup>)

تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) شامل انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مدل سازه‌ای تحت یک سری رکوردهای حرکت زمین است که هر یک به گونه‌ای در سطوح مختلف شدت مقیاس بندی شده‌اند تا سازه از ناحیه الاستیک تا ناپایداری دینامیکی کلی پیش برود. روش تحلیل دینامیکی افزایشی دارای مزیت‌هایی نسبت به سایر تحلیل‌های موجود می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان مشخص شدن پاسخ سازه بر اساس مقدار سطح پتانسیل لرزه‌ای شتاب‌نگاشت، درک بهتر شرایط سازه در سطوح مختلف تحریک یک زلزله، درک بهتر تغییرات پاسخ طبیعی سازه با افزایش شدت زلزله، محاسبه ظرفیت دینامیکی کلی سیستم سازه‌ای و به دست آوردن یک منحنی چندانگانه IDA برای پاسخ‌های مورد نظر را نام برد [۱۵].

### ۱-۵- منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی

منحنی IDA یگانه، شامل مطالعه تحلیل دینامیکی یک سازه مشخص تحت سطوح مختلف بارهای لرزه‌ای است. یک منحنی IDA می‌تواند به صورت دو یا چندبندی بسته به تعداد شاخص شدت (IM) ها رسم شود. در هر منحنی IDA محور افقی بیان‌کننده شاخص خسارت (DM) و محور قائم مشخص‌کننده شاخص شدت تحریک زلزله (IM) است.

یک منحنی IDA یگانه که مربوط به یک شتاب‌نگاشت است، نمی‌تواند به تنهایی رفتار یک سازه را در زلزله احتمالی پیش‌بینی نماید. یک منحنی IDA یگانه تا حد زیادی وابسته به شتاب‌نگاشت مربوطه می‌باشد، پس یک سری شتاب‌نگاشت لازم است تا بتوان به صورت آماری خصوصیات تعداد زیادی شتاب‌نگاشت را در پاسخ سازه وارد کرد. یک منحنی IDA چندانگانه، یک استنتاج از یک سری منحنی‌های یگانه IDA بوده که مربوط به تحلیل یک سازه می‌باشد.

### ۲-۵- شاخص شدت<sup>۱۲</sup> و خسارت<sup>۱۳</sup>

شاخص شدت (IM) یک مقدار مثبت می‌باشد که تابعی از شتاب‌نگاشت اصلاح شده و پارامترهای مقیاس شتاب‌نگاشت می‌باشد. چون شدت یک زلزله به انواع مختلفی تعریف شده است، بنابراین می‌توان یک زلزله را به انواع گوناگونی برای مثال پیشینه شتاب زمین (PGA) پیشینه سرعت زمین (PGV) شتاب طیفی برای مود اول ارتعاش سازه مقیاس نمود. شاخص خسارت یک مقدار مثبت اسکالر است که مشخص‌کننده پاسخ یک سازه در برابر بارهای لرزه‌ای ورودی می‌باشد به بیان دیگر DM، یک مقدار محاسبه شده است که می‌تواند یک قسمت از پاسخ سازه در تحلیل دینامیکی غیرخطی باشد. شاخص‌های خسارت متعددی را از جمله برش پایه، چرخش گره‌ها، پیشینه شکل‌پذیری طبقات، شاخص خسارت انرژی، تغییر مکان نسبی طبقات و بیشینه مقادیر چرخش نسبی طبقات و ... می‌توان انتخاب کرد.

### ۳-۵- پارامتر مقیاس<sup>۱۴</sup>

در ابتدا یک شتاب‌نگاشت زلزله در نظر گرفته می‌شود، که این شتاب‌نگاشت می‌تواند توسط زلزله شناسان یا مهندسان زلزله، مورد اعمال تصحیحانی از قبیل تصحیح خط مبنا و عبور دادن از فیلترها قرار گرفته شده باشد. این پارامتر مربوط به یک شتاب‌نگاشت مقیاس شده می‌باشد که یک عدد مثبت مانند  $\lambda$  که در مقادیر شتاب‌نگاشت اولیه ضرب شده و شتاب‌نگاشت مقیاس شده را به دست می‌دهد. در این صورت شتاب‌نگاشت جدید دارای مقادیر شتاب‌هایی خواهد بود که هر کدام به صورت  $\alpha\lambda = \lambda \cdot \alpha_1$  قابل تعریف می‌باشند.

<sup>11</sup> Incremental Dynamic Analysis

<sup>12</sup> Intensity Measure

<sup>13</sup> Damage Measure

<sup>14</sup> Scale Factor

## ۶- رکوردهای زلزله

همان طور که در جدول ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد در این مقاله ۶ رکورد حوزه نزدیک و ۶ رکورد حوزه دور که دارای مؤلفه‌های یکسان اما ایستگاه‌های متفاوتی بودند انتخاب گردید سپس هر یک از آن‌ها در ۱۵ گام مقیاس و به صورت جداگانه به هریک از قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ جداسازی شده در ترازهای ارتفاعی مختلف اعمال گردید. اگرچه به‌طور دقیق نمی‌توان فاصله مشخصی برای زلزله‌های نزدیک گسل تعریف نمود، اما به‌طور قراردادی به جنبش‌های ثبت‌شده در فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، نگاشت‌های نزدیک گسل نامیده می‌شود.

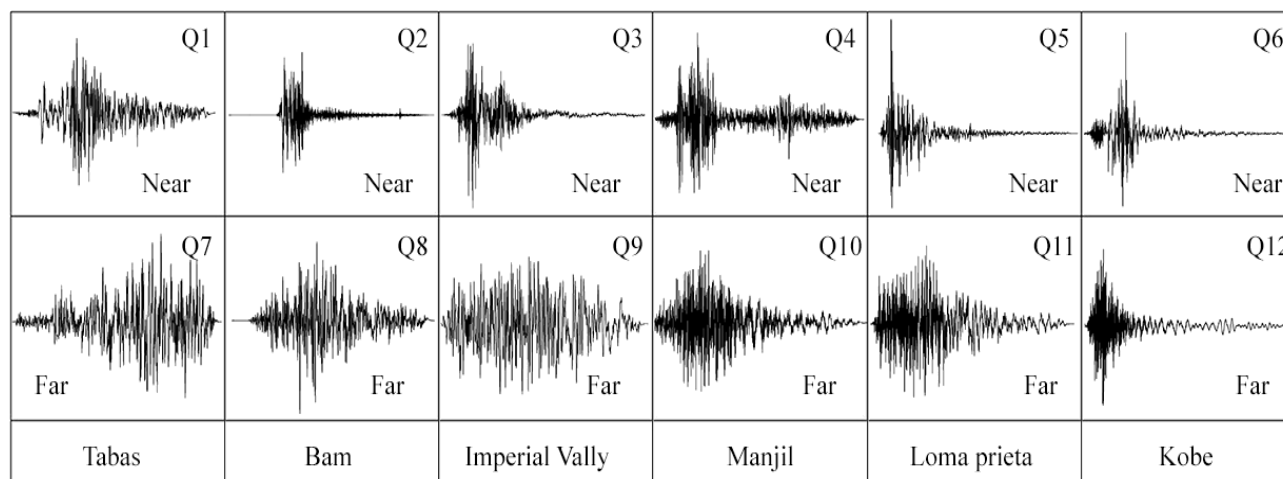
جدول ۴: مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک

نام رکورد	Tabas (Q1)	Bam (Q2)	Imperial Valley (Q3)	Manjil (Q4)	Loma prieta (Q5)	Kobe (Q6)
بزرگا	۷/۶۲	۶/۶	۶/۵۳	۷/۳۷	۶/۹۳	۶/۹
ایستگاه	Tabas	Bam	El Centro Array A#	Abbar	Corralitos	Kobe University
مسافت (Km)	۱/۷۹	۱/۷	۰/۵۶	۱۲/۵۵	۰/۱۶	۰/۹
شتاب بیشینه زمین (g)	۰/۸۵۴	۰/۸۰۷	۰/۵۷۷	۰/۵۱۵	۰/۴۵۸	۰/۴۵۱

جدول ۵: مشخصات رکوردهای حوزه دور

نام رکورد	Tabas (Q7)	Bam (Q8)	Imperial Valley (Q9)	Manjil (Q10)	Loma prieta (Q11)	Kobe (Q12)
بزرگا	۷/۶۲	۶/۶	۶/۵۳	۷/۳۷	۶/۹۳	۶/۹
ایستگاه	Boshruyeh	Jiroft	Plaster City	Qazvin	Fremont E. C.	Fukushima
مسافت (Km)	۲۸/۷۹	۶۹/۲۹	۳۰/۳۳	۴۹/۹۷	۳۹/۸۵	۱۷/۸۵
شتاب بیشینه زمین (g)	۰/۱۰۵	۰/۴	۰/۲۶	۰/۹۵	۰/۶۸	۰/۱۹۸

شکل ۷ نمودارهای دوازده شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و دور انتخاب شده از شش زلزله مورد نظر نشان می‌دهد. در این شکل نمودارهای قرارگرفته در بالا مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک و نمودارهای قرارگرفته در پایین مربوط به رکوردهای حوزه دور می‌باشد.



شکل ۷: نمودارهای شش رکورد حوزه نزدیک (Q1-Q6) و شش رکورد حوزه دور (Q7-Q12) انتخابی با مؤلفه‌های یکسان و ایستگاه‌های متفاوت

## ۷- نتایج تحلیل

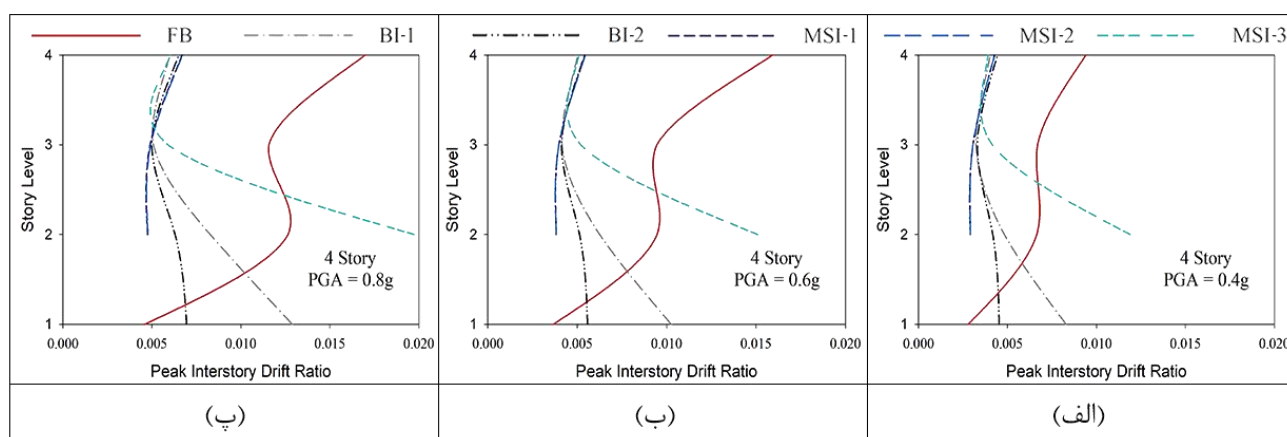
در این پژوهش نتایج تحلیل‌ها ابتدا بر اساس منحنی‌های IDA و سپس بر اساس منحنی‌های شکنندگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است به‌گونه‌ای که منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی بر اساس شاخص‌های خسارت ماکزیمم دررفت طبقات، ماکزیمم برش

پایه، ماکزیمم جابجایی و شتاب بام در برابر شاخص شدت بیشینه شتاب زمین و منحنی‌های شکنندگی بر اساس ماکزیمم دررفت طبقات در برابر بیشینه شتاب زمین ترسیم گردیده‌اند.

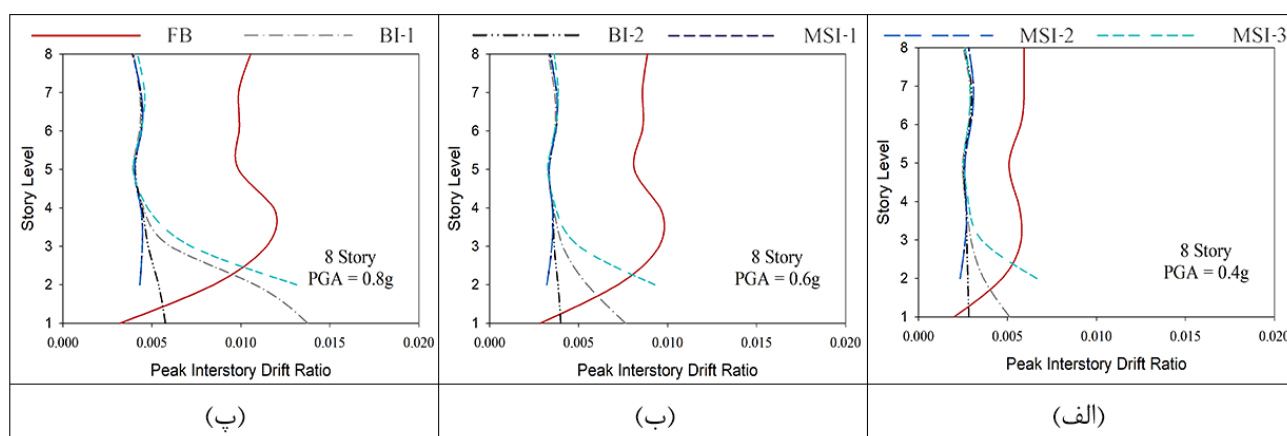
### ۷-۱- تحلیل منحنی‌های IDA

#### ۷-۱-۱- ماکزیمم دررفت طبقات

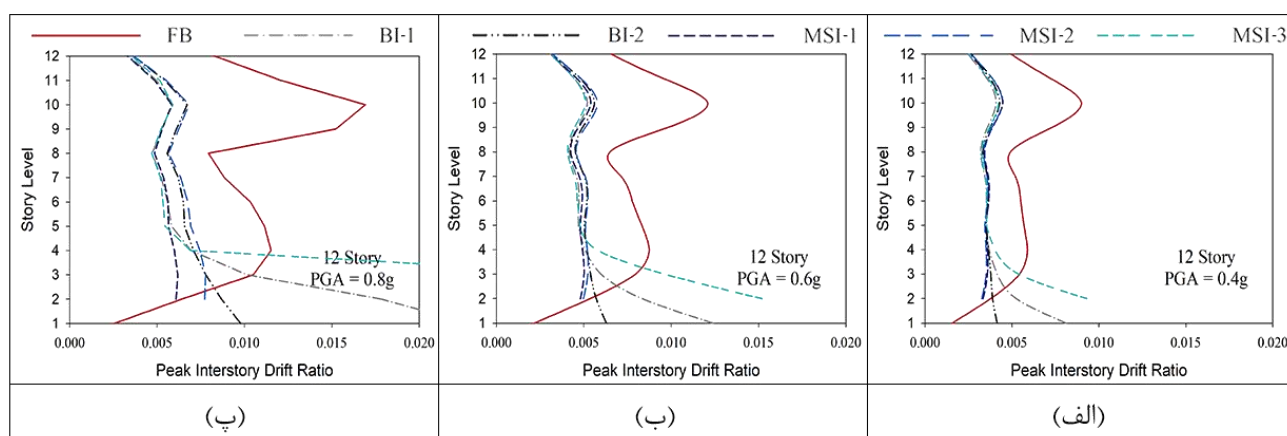
در این بخش ابتدا ماکزیمم دررفت هر طبقه تحت اثر دوازده رکوردهای ۱۲ گانه در دور به همراه میانگین این پاسخ‌ها در سه شتاب بیشینه زمین  $0.4g$ ،  $0.6g$  و  $0.8g$  برای سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مطابق با شکل‌های ۸ تا ۱۰ رسم گردید. در انتهای هر یک برای بررسی جامع‌تر رفتار سازه‌های مورد نظر در حالت‌های مختلف، منحنی‌های IDA چندگانه برای میانگین ماکزیمم دررفت طبقات در شکل ۱۱ ترسیم گردیده است.



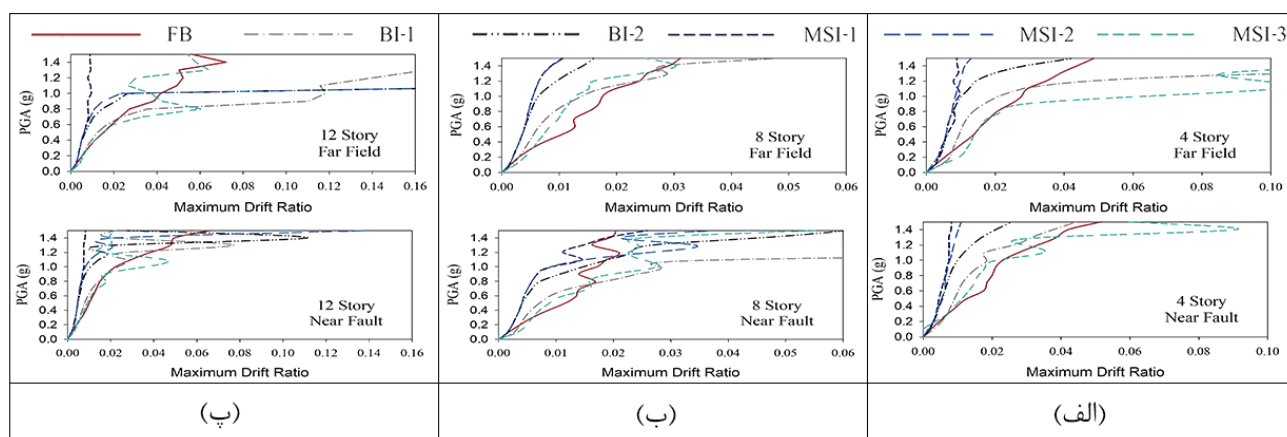
شکل ۸: نمودارهای میانگین ماکزیمم دررفت هر طبقه تحت اثر رکوردهای ۱۲ گانه در سازه‌های ۴ طبقه در شتاب بیشینه زمین (الف)  $0.4g$ ، (ب)  $0.6g$  و (پ)  $0.8g$



شکل ۹: نمودارهای میانگین ماکزیمم دررفت هر طبقه تحت اثر رکوردهای ۱۲ گانه در سازه‌های ۸ طبقه در شتاب بیشینه زمین (الف)  $0.4g$ ، (ب)  $0.6g$  و (پ)  $0.8g$



شکل ۱۰: نمودارهای میانگین ماکزیمم دررفت هر طبقه تحت اثر رکوردهای ۱۲ گانه در سازه‌های ۱۲ طبقه در شتاب بیشینه زمین (الف) ۰/۴g، (ب) ۰/۶g و (پ) ۰/۸g



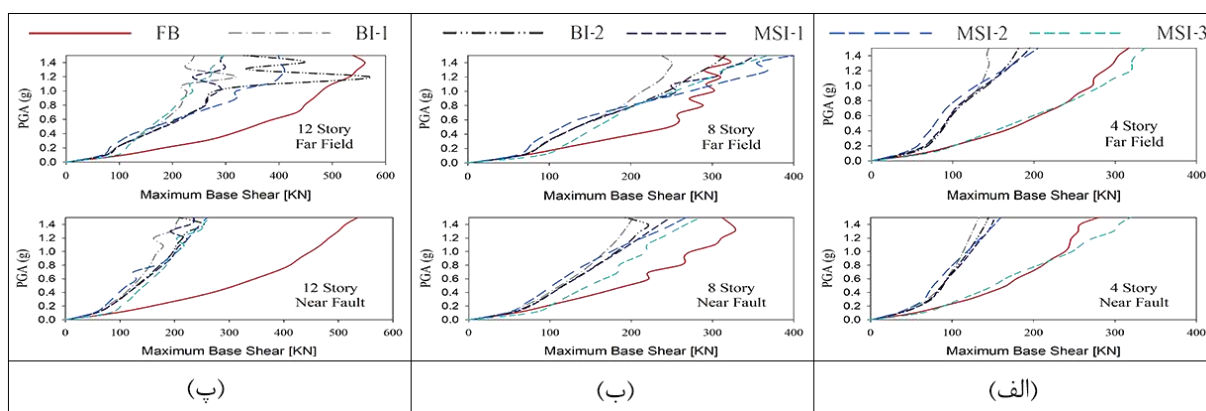
شکل ۱۱: منحنی‌های IDA ماکزیمم دررفت طبقات تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور در حالت‌های مختلف در سازه‌های (الف) ۴ طبقه، (ب) ۸ طبقه، (پ) ۱۲ طبقه

همان‌طور که از نمودارهای شکل های ۸ تا ۱۰ مشخص است، در بین تمامی حالات سازه‌های مدل‌سازی شده، بهترین حالت در کاهش ماکزیمم دررفت طبقات در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مربوط به زمانی است که جداسازها در سطح زیرین طبقه اول قرار گیرند. به بیان دیگر می‌توان گفت حالات MSI-1 و MSI-2 برای زمانی که جداسازها در سطح زیرین طبقه اول قرار می‌گیرد و BI-2 برای زمانی که جداسازها در تراز ارتفاعی پایه قرار می‌گیرند به ترتیب بهترین عملکرد را در کاهش ماکزیمم دررفت طبقات دارند. همچنین با مقایسه نمودارهای حاصل از تحلیل IDA در شکل ۱۱ مشخص شد رکوردهای حوزه نزدیک با بیشینه شتاب واقعی پاسخ‌های بیشتری نسبت به رکوردهای حوزه دور ایجاد می‌نمایند اما در بیشینه شتاب‌های زمین با مقادیر یکسان، این رکوردهای حوزه دور خواهند بود که پاسخ‌های بیشتری را ارائه خواهند کرد. نتایج کمی تحلیل IDA در بخش ۶-۲ در قالب منحنی‌ها شکنندگی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

۷-۱-۲- ماکزیمم برش پایه

شکل ۱۲ منحنی‌های IDA ماکزیمم برش پایه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور در سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد. در این میان حالت معمول قرارگیری جداساز (حالت BI-1) کاهش بیشتری را در برش پایه به نسبت حالات دیگر بوجود آورده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به طور میانگین و در شتاب بیشینه زمین ۰/۶g، قرارگیری جداسازها در سطح زیرین طبقه اول (MSI-1) و MSI-2 ماکزیمم برش پایه را نسبت به سازه‌های پایه ثابت به نصف کاهش داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد قرارگیری جداساز در

روی سقف طبقه اول (MSI-3) با افزایش تعداد طبقات برش پایه کمتری داشته و نتایج نزدیک تری به سایر حالات قرارگیری جداساز نشان می دهد.



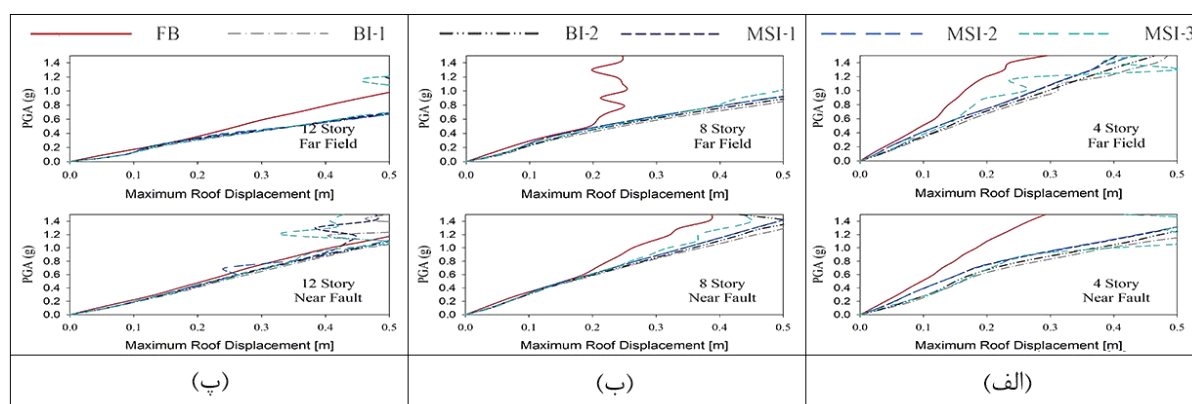
شکل ۱۲: منحنی های IDA ماکزیمم برش پایه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور در حالت های مختلف در سازه های الف) ۴ طبقه، ب) ۸ طبقه، پ) ۱۲ طبقه

۳-۱-۷- ماکزیمم جابجایی و شتاب بام

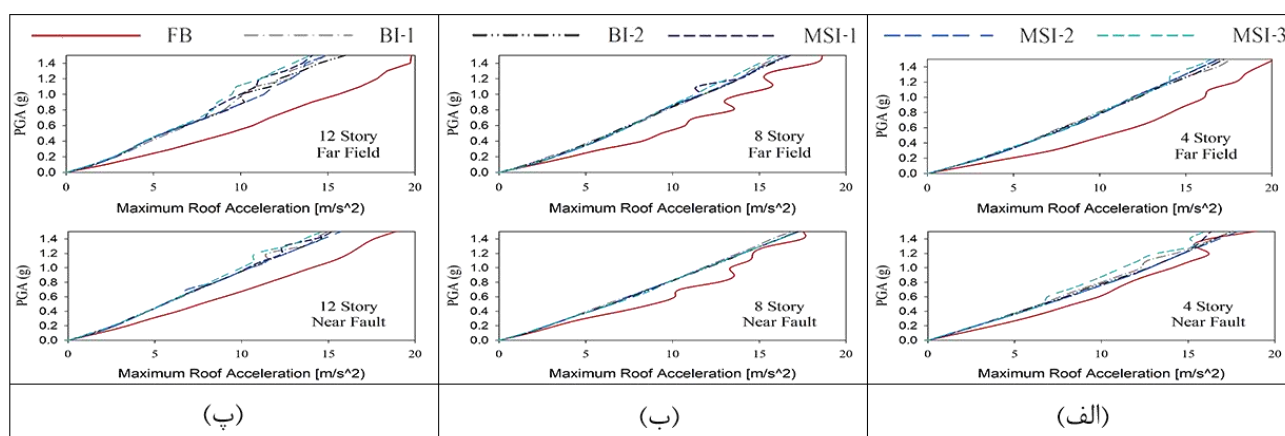
قرارگیری جداسازها در سازه های جداسازی شده مختلف باعث افزایش ماکزیمم جابجایی بام و کاهش ماکزیمم شتاب بام در بیشینه شتاب های گوناگون زمین نسبت به سازه های پایه ثابت مشابه می گردد. براساس شکل ۱۳، در تمام حالات قرارگیری جداساز، جابجایی بام به نسبت حالت پایه ثابت افزایش داشته است؛ با این حال، افزایش جابجایی بام در سازه های جداسازی شده نسبت به سازه های پایه ثابت مشابه، عملکرد رفتاری نامطلوب تلقی نشده بلکه با توجه خصوصیات ذاتی این سیستم لرزه ای امری کاملاً طبیعی است. شکل ۱۳ و شکل ۱۴ به ترتیب منحنی های IDA چندگانه ماکزیمم جابجایی و شتاب بام برای حالت ها و ترازهای ارتفاعی مختلف در سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه را نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود قرارگیری جداساز در حالت ها و ترازهای ارتفاعی مختلف در سازه های جداسازی شده نسبت به یکدیگر در بیشتر حالات در بیشینه شتاب زمین کمتر از  $0.6g$  تأثیر چندانی بر روی ماکزیمم جابجایی بام نگذاشته و پاسخی نزدیک به یکدیگر را تولید نموده اند. باین حال با افزایش بیشینه شتاب زمین و تعداد طبقات، تفاوت بین این پاسخ ها در سازه های جداسازی شده نسبت به یکدیگر چشمگیرتر خواهد شد.

شکل ۱۴ نشان دهنده این مطلب است که با وجود اینکه در تمامی حالات قرارگیری جداسازها، شتاب بام به نسبت حالت پایه ثابت کاهش یافته است، اما تفاوت چشمگیری بین حالات مختلف قرارگیری جداساز وجود ندارد.



شکل ۱۳: منحنی های IDA ماکزیمم جابجایی بام تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور در حالت های مختلف در سازه های الف) ۴ طبقه، ب) ۸ طبقه، پ) ۱۲ طبقه



شکل ۱۴: منحنی‌های IDA ماکزیمم شتاب بام تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور در حالت‌های مختلف در سازه‌های الف) ۴ طبقه، ب) ۸ طبقه، پ) ۱۲ طبقه

در بین گستره عظیمی از پاسخ‌های تولیدشده ناشی از انجام تحلیل دینامیکی افزایشی در سازه‌های مدل‌سازی شده تحت اثر رکوردهای حوزه دور و نزدیک مشخص گردید در ۷۰٪ درصد موارد مقایسه‌ای، پاسخ‌های تولیدشده ناشی از رکوردهای حوزه دور در بیشینه شتاب‌های یکسان زمین بیشتر از پاسخ‌های تولید ناشی از اعمال رکوردهای حوزه نزدیک زلزله‌ها بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رکوردهای حوزه نزدیک با بیشینه شتاب واقعی پاسخ‌های بیشتری نسبت به رکوردهای حوزه دور ایجاد می‌نمایند اما در بیشینه شتاب‌های زمین با مقادیر یکسان، این رکوردهای حوزه دور خواهند بود که پاسخ‌های بیشتری را ارائه خواهند کرد.

## ۲-۷- تحلیل منحنی‌های شکنندگی

۲-۷-۱- تعیین شاخص و محدوده شکست

منحنی‌های شکنندگی از ابزارهای مفید برای ارزیابی احتمالاتی خرابی سازه‌ها می‌باشد. به کمک منحنی‌های شکنندگی احتمال فراگذشت از یک سطح خرابی مشخص را در مقابل پارامترهای لرزه خیزی ساختمان تعیین می‌گردد. برای تولید منحنی شکنندگی یک توزیع احتمال برای پارامترهای تقاضای مهندسی که از تحلیل IDA به دست می‌آید استفاده می‌گردد. در این پژوهش از توزیع لوگ نرمال استفاده شده است. هر مدل سازه‌ای تحت رکوردهای لرزه‌ای از 0.1g تا 1.5g با گام‌های 0.05g مورد تحلیل قرار گرفته‌اند و سپس به کمک نرم‌افزار OpenSees احتمال شکست سازه بررسی گردید.

در این مطالعه از دستورالعمل HAZUS-MH MR-۵ منتشر شده توسط FEMA<sup>۱۵</sup> استفاده شده است و برای رسم منحنی‌های شکنندگی از ماکزیمم دریفت طبقات به عنوان شاخص شکست استفاده گردیده است. در دستورالعمل HAZUS-MH MR-۵ برای سازه‌های بتن آرمه چهار سطح خرابی تعریف شده که در این پژوهش سه سطح خرابی کم (ناچیز)، متوسط و زیاد مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است و سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب به عنوان سازه‌های کوتاه مرتبه، متوسط و بلندمرتبه در نظر گرفته شده است. برای سازه‌های کوتاه مرتبه حالت حدی خرابی مجاز ناچیز، متوسط و زیاد به ترتیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۸۷ و ۰/۰۲۳۳ انتخاب گردید است. این مقادیر برای سازه متوسط و بلندمرتبه به ترتیب ۰/۰۰۳۳، ۰/۰۰۵۸، ۰/۰۱۵۶ و ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۴۳، ۰/۰۱۱۷ می‌باشد [۱۶].

## ۲-۷-۲- تولید منحنی شکنندگی

در پژوهش از توزیع لوگ نرمال به عنوان توزیع احتمالاتی برای تولید منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف از رابطه (۸) استفاده شده است:

<sup>15</sup> FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY

$$p(\leq D) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{sd}} \ln \left( \frac{S_d}{S_c} \right) \right] \quad [16] \quad (8)$$

$$\beta_{sd} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - \mu)^2} \quad (9)$$

$$\ln(S_d) = a \ln(PGA) + b \quad [17] \quad (10)$$

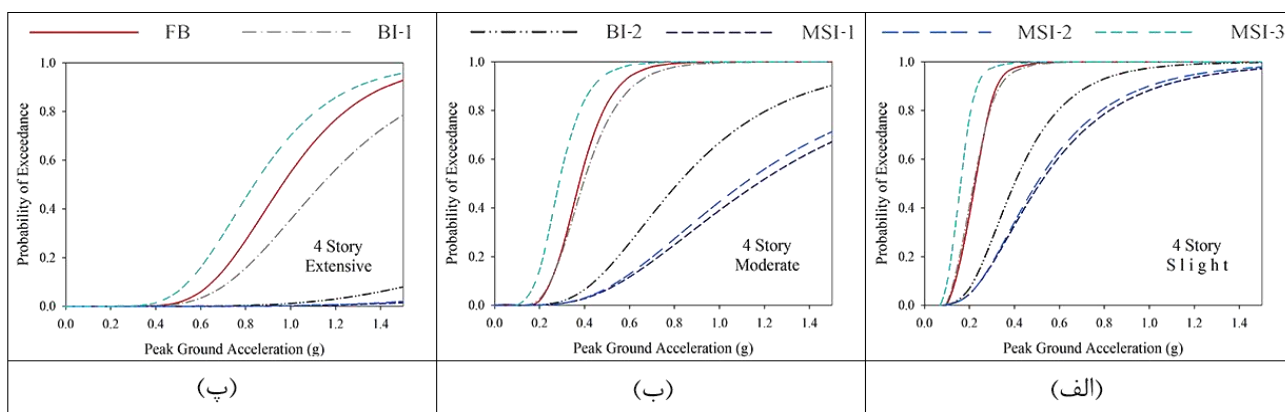
بطوریکه  $p$  احتمال فرا گذشت از حالت خرابی  $D$ ،  $B_{sd}$  انحراف معیار لگاریتم نرمال،  $S_c$  مقدار متوسط حالت حدی مجاز،  $S_d$  متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای،  $N$  تعداد کل تحلیل‌ها،  $x_i$  مقدار ماکزیمم دریافت در هر بار تحلیل و  $\mu$  متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای است.  $a$  و  $b$  ضرایب رگرسیونی هستند که با استفاده از آنها در تحلیل رگرسیون خطی حداکثر دریافت طبقات در بیشینه شتاب‌های زمین مختلف به دست می‌آید. مقادیر مربوط به ضرایب رگرسیونی، انحراف معیار، مقدار متوسط حد مجاز و متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای در جدول ۶ ذکر شده است.

جدول ۶: ضرایب رگرسیونی و ضرایب مورد استفاده در تابع توزیع لوگ نرمال

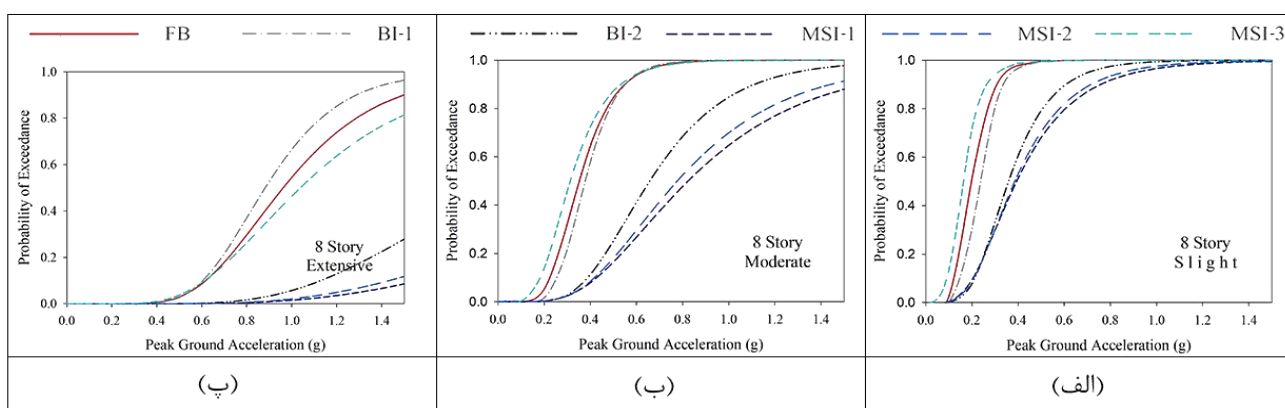
ردیف	مدل	a	b	خفیف		متوسط		شدید	
				$S_c$	$\beta_{sd}$	$S_c$	$\beta_{sd}$	$S_c$	$\beta_{sd}$
۱	4 Story - BF	۱/۴۴۵	-۳/۷۱۹۳	۰/۲۲۷	۰/۳۱۶۳	۰/۳۷۶	۰/۳۱۶۳	۰/۹۶۷	۰/۳۱۶۳
۲	4 Story - BI-1	۰/۹۲۷۹	-۳/۸۷۸۷	۰/۲۲۳	۰/۳۲۳۲	۰/۳۹۴	۰/۳۲۳۲	۱/۱۲۸	۰/۳۲۳۲
۳	4 Story - BI-2	۰/۷۷۶۶	-۴/۵۸۵۸	۰/۴۰۰	۰/۳۶۳۲	۰/۸۱۷	۰/۳۶۳۲	>۱/۵	۰/۳۶۳۲
۴	4 Story - MSI-1	۰/۶۷۲۲	-۴/۸۴۹۶	۰/۵۱۵	۰/۳۷۵۸	۱/۱۷۳	۰/۳۷۵۸	>۱/۵	۰/۳۷۵۸
۵	4 Story - MSI-2	۰/۶۹۴۲	-۴/۸۱۵۱	۰/۴۹۹	۰/۳۷۴۱	۱/۱۰۶	۰/۳۷۴۱	>۱/۵	۰/۳۷۴۱
۶	4 Story - MSI-3	۰/۹۱۴۰	-۳/۵۹۷۷	۰/۱۶۰	۰/۳۰۶۲	۰/۲۸۴	۰/۳۰۶۲	۰/۸۴۱	۰/۳۰۶۲
۷	8 Story - BF	۰/۹۸۴۰	-۴/۱۲۲۴	۰/۱۹۸	۰/۳۳۹۸	۰/۳۵۵	۰/۳۳۹۸	۰/۹۶۵	۰/۳۳۹۸
۸	8 Story - BI-1	۱/۱۶۶۰	-۴/۱۴۳	۰/۲۳۹	۰/۳۴۲۸	۰/۳۷۸	۰/۳۴۲۸	۰/۸۸۳	۰/۳۴۲۸
۹	8 Story - BI-2	۰/۹۲۹۲	-۴/۷۶۰۶	۰/۳۶۲	۰/۳۷۹۸	۰/۶۵۹	۰/۳۷۹۸	>۱/۵	۰/۳۷۹۸
۱۰	8 Story - MSI-1	۰/۷۶۲۸	-۵/۲۲	۰/۳۹۴	۰/۳۸۸۹	۰/۸۲۵	۰/۳۸۸۹	>۱/۵	۰/۳۸۸۹
۱۱	8 Story - MSI-2	۰/۸۰۴۴	-۴/۹۴۷۲	۰/۳۸۶	۰/۳۸۷۴	۰/۷۷۹	۰/۳۸۷۴	>۱/۵	۰/۳۸۷۴
۱۲	8 Story - MSI-3	۰/۸۲۵۶	-۴/۱۹۱۶	۰/۱۶۴	۰/۳۳۸۹	۰/۳۱۶	۰/۳۳۸۹	۱/۳۸	۰/۳۳۸۹
۱۳	12 Story - BF	۱/۲۳۰	-۳/۶۰۲۰	۰/۹۲	۰/۳۱۵۴	۰/۱۶۵	۰/۳۱۵۴	۰/۴۴۰	۰/۳۱۵۴
۱۴	12 Story - BI-1	۱/۲۳۶۰	-۳/۴۸۵۶	۰/۱۴۵	۰/۳۱۱۰	۰/۲۰۷	۰/۳۱۱۰	۰/۴۶۱	۰/۳۱۱۰
۱۵	12 Story - BI-2	۱/۲۷۶۷	-۳/۹۶۸۹	۰/۲۰۹	۰/۳۴۷۸	۰/۳۱۷	۰/۳۴۷۸	۰/۶۸۸	۰/۳۴۷۸
۱۶	12 Story - MSI-1	۰/۵۳۹۶	-۴/۹۱۶۲	۰/۱۴۴	۰/۳۷۶۰	۰/۳۷۳	۰/۳۷۶۰	>۱/۵	۰/۳۷۶۰
۱۷	12 Story - MSI-2	۱/۱۹۹۹	-۴/۶۵۰	۰/۲۰۱	۰/۳۵۱۲	۰/۳۱۹	۰/۳۵۱۲	۰/۷۲۸	۰/۳۵۱۲
۱۸	12 Story - MSI-3	۰/۸۶۰۷	-۳/۸۴۸۶	۰/۷۲	۰/۳۱۸۰	۰/۱۶۰	۰/۳۱۸۰	۰/۴۹۸	۰/۳۱۸۰

بعد از تعیین روش و پارامترهای مربوط به توزیع لوگ نرمال به ترسیم منحنی‌های شکست در سه سطح آسیب ناچیز، متوسط و زیاد برای مدل‌های دوبعدی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در شش حالت و تراز ارتفاعی در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ رسم گردیده است. با بررسی نمودارهای ۱۵ تا ۱۷ مشاهده می‌گردد احتمال خرابی متوسط در سازه‌های پایه ثابت ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب  $0/8g$ ،  $0/73g$  و  $0/4g$  نزدیک به یک می‌باشد. این مقادیر برای حالت قرارگیری جداساز در سطح زیرین طبقه اول (حالت MSI-1) در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه همواره بزرگ‌تر از  $1/5g$  می‌باشد.

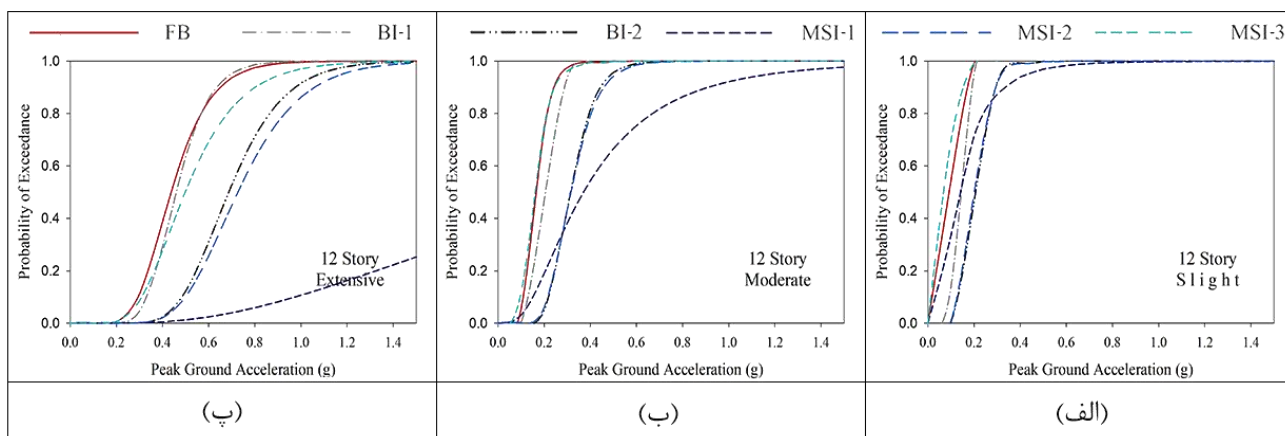




شکل ۱۵: منحنی‌های شکنندگی برای حالت‌ها و ترازهای ارتفاعی مختلف در سازه‌های ۴ طبقه و در حالت‌های خرابی (الف) ناچیز، (ب) متوسط، (پ) زیاد



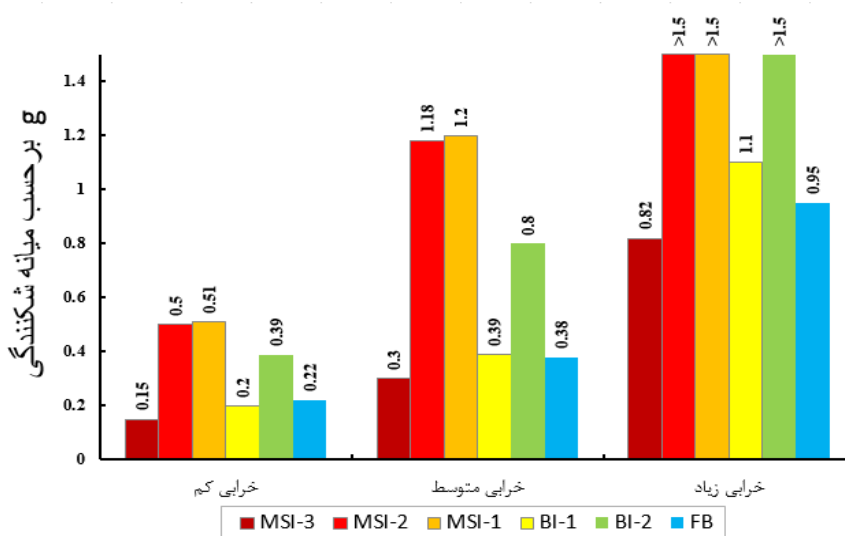
شکل ۱۶: منحنی‌های شکنندگی برای حالت‌ها و ترازهای ارتفاعی مختلف در سازه‌های ۸ طبقه و در حالت‌های خرابی (الف) ناچیز، (ب) متوسط، (پ) زیاد



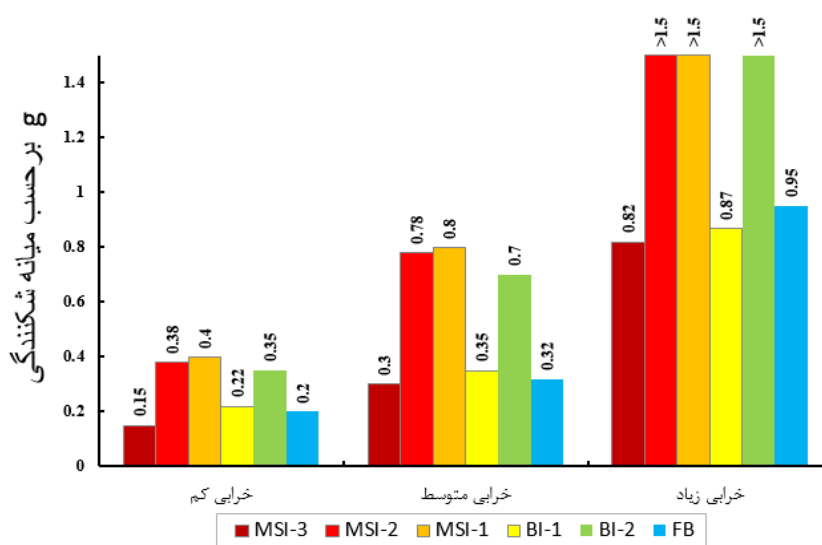
شکل ۱۷: منحنی‌های شکنندگی برای حالت‌ها و ترازهای ارتفاعی مختلف در سازه‌های ۱۲ طبقه و در حالت‌های خرابی (الف) ناچیز، (ب) متوسط، (پ) زیاد

۷-۲-۳- بررسی میانه شکنندگی

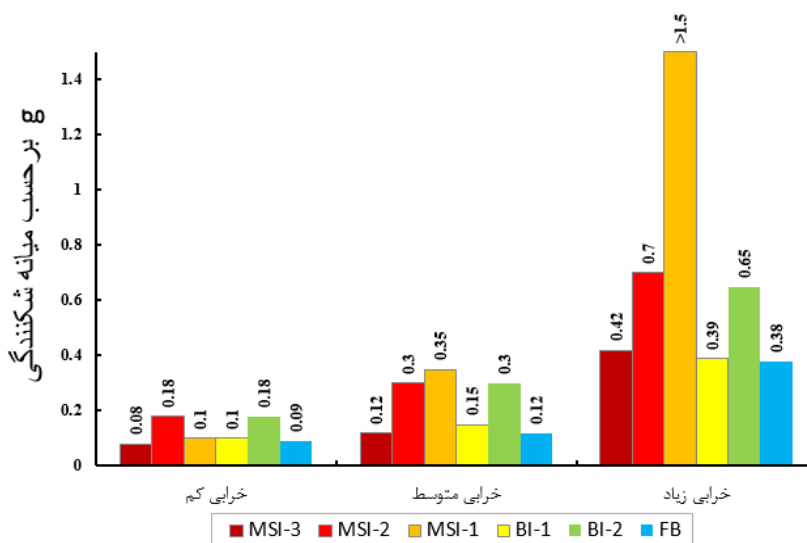
پس از رسم منحنی‌های شکنندگی، برای تحلیل کمی منحنی‌های شکنندگی با محاسبه میانه شکنندگی یا ۵۰ درصد احتمال خرابی در سطوح مختلف خرابی‌های در نظر گرفته شده می‌تواند شاخص مناسبی برای مقایسه رفتار سازه‌ها باشد. از این‌رو میانه شکنندگی برای حدود مختلف شکنندگی سازه‌ها، در نمودار میله ای شکل ۱۸ تا ۲۰ به همراه مقادیر مربوطه ارائه گردیده است.



شکل ۸: نمودار میانه شکنندگی برای سازه ۴ طبقه



شکل ۱۹: نمودار میانه شکنندگی برای سازه ۸ طبقه



شکل ۲۰: نمودار میانه شکنندگی برای سازه ۱۲ طبقه

به کمک نمودارهای میانه شکنندگی شکل ۱۸ تا ۲۰ مشاهده می‌گردد در سطح آسیب کم مدل های MSI-2 و MSI-1 بیشترین شتاب را در میانه شکنندگی قاب های ۴ و ۸ طبقه دارند. هنگامیکه ارتفاع سازه به ۱۲ طبقه افزایش می یابد، دو حالت MSI-2 و BI-2 بیشترین شتاب را در میانه شکنندگی دارا می باشند.

همچنین در سطح آسیب متوسط حالت MSI-1 در هر سه تراز ارتفاعی برتری داشته که نشان می دهد حالت MSI-1 می تواند در سطوح خسارت متوسط بهتر از سایر حالات عمل کند.

برای حالت خرابی زیاد نیز مشابه دو حالت خرابی متوسط رفتار قاب ها در حالت MSI-1 بهترین نتایج را دارد. با این تفاوت که در قاب ۱۲ طبقه در حالت خرابی زیاد تفاوت زیادی بین حالت MSI-1 با سایر حالات بوجود می آید که این امر برتری این حالت را در میان سایر چیدمان های میان طبقه ای و پای ستونی نشان می دهد.

## ۸- نتیجه گیری

در این مطالعه ۱۸ نمونه سازه بتنی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه جداسازی شده و پایه ثابت با دو تراز ارتفاعی و پنج آرایش در نحوه قرارگیری برای جداسازهای لاستیکی با هسته سربی در نرم افزار Opensees مدل سازی شد و تحت اثر رکوردهای مختلف زمین لرزه ای و با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفت به گونه ای که در نهایت بهترین تراز ارتفاعی و آرایش در بین حالات ممکن در بهبود پاسخ و عملکرد رفتاری مطلوب تر بین سازه های جداسازی شده نسبت به یکدیگر مشخص شد. نتایج پژوهش بصورت زیر خلاصه می گردد:

- با مقایسه نمودارهای حاصل از تحلیل IDA مشخص شد رکوردهای حوزه نزدیک با بیشینه شتاب واقعی پاسخ های بیشتری نسبت به رکوردهای حوزه دور ایجاد می در نمایند اما در بیشینه شتاب های زمین با مقادیر یکسان، این رکوردهای حوزه دور خواهند بود که پاسخ های بیشتری را ارائه خواهند کرد.
- همچنین حالت معمول قرارگیری جداساز (حالت BI-1) کاهش بیشتری را در برش پایه به نسبت حالات دیگر بوجود آورد. نتایج نشان می دهد که قرارگیری جداسازها در سطح زیرین طبقه اول (MSI-1 و MSI-2) ماکزیمم دریفت طبقات و برش پایه را نسبت به سازه های پایه ثابت به نصف کاهش داده است.

- نمودارهای میانه شکنندگی نشان داد که حالت قرارگیری جداساز در سطح زیرین طبقه اول (MSI-1) نسبت به سایر حالات برتری داشته و سازه قادر است شتاب بیشتری را در سطوح مختلف خسارت تجربه نماید. این امر هرچه ساختمان بلندتر و سطح خسارت بیشتر می شود، خود را بهتر نشان می دهد.
- بطور کلی با در نظر گرفتن تمامی جوانب، نتایج نشان داد که قرارگیری جداسازها در سطح زیرین طبقه اول و به ترتیب در حالت های MSI-1 و MSI-2 بهترین عملکرد رفتاری در کاهش پاسخ های مورد نظر بین سازه های جداسازی شده نسبت به یکدیگر را دارا هستند.

## مراجع

- [1] Taghavi, A.M. and Zamani\_Beydokhti, E. (2018). Dynamic responses of base\_isolated and fixed RC buildings under near fault and far field earthquakes. In: Proceedings of the 11th International Congress on Civil Engineering, Tehran: Tehran University, 8 pages.
- [2] Taghavi, A.M. and Zamani\_Beydokhti, E. (2018). The effect of isolators positioning at different heights on seismic response of RC buildings. In: Proceedings of 2<sup>nd</sup> national conference on applied researches in structural engineer and construction management, Tehran: Sharif University, 14 pages.
- [3] Heaton, T.H. and Hall, J.F. (1995). Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw7.0 blind thrust earthquake. *Science*, 267 (5195), pp 206–211.
- [4] IAEA, (2002). Verification of analysis methods for predicting the behavior of seismically isolated nuclear structures, final report of a coordinated research project 1996–1999. Tech. Rep. IAEATECDOC-1288, IAEA, Vienna, Austria.
- [5] Medel-Vera, C. and Ji, T. (2015). Seismic protection technology for nuclear power plants: a systematic review. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 52 (5), pp 607–632.
- [6] Arati, P., Jianchun, L. and Yancheng, L. and Nicos, M. and Yang, Y. (2016). Comparative Studies of Base Isolation Systems featured with Lead Rubber Bearings and Friction Pendulum Bearings. *Applied Mechanics and Materials*, 846, pp 114–119.
- [7] Komur, M.A. (2015). Soft-Story Effects on the Behavior of Fixed-Base and LRB Base-Isolated Reinforced Concrete Buildings. *Arab J Sci Eng*, 41, pp 381–392.
- [8] Jangid, R.S. (2005). Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering Structures*, 27, pp 349–359.
- [9] Su, L. and Ahmadi, G. and Tadjbakhsh, I. (1989). Comparative study of base isolation systems. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 1989; 115:1976–92.
- [10] Fan, FG. and Ahmadi, G. (1990). Multi-story base-isolated buildings under a harmonic ground motion Part II: a comparison of various systems. *Nuclear Engineering and Design*, 123, pp 14–26.
- [11] Shrimali, MK. and Jangid, RS. (2002). A comparative study of performance of various isolation systems for liquid storage tanks. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2, pp 91–573.
- [12] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L., and Jeremic B., (2007). OpenSEES Command Language Manual. [13] Tavakoli, H.R., Naghavi, F. and Goltabar, A.R. (2014). Dynamic response of base-fixed and isolated building frames under far- and near-fault earthquake. *Arab J Sci Eng*, 39, pp 2573–2585.
- [14] F.J. Vecchio, M.B. Emara, Shear Deformation in Reinforced Concrete Frames, *ACI Structural*, 89 (1992) 1.
- [15] Vamvatsikos, D. and Cornell, C (2004). Applied incremental dynamic analysis. *Earthq Spectra*, 20 (2), pp 523–553.
- [16] HAZUS-MH MR5, Multi-Hazard loss Estimation Methodology: Earthquake Model. (2003). Department of Homeland security, FEMA, Washington, D.C.
- [17] Nielson, B.G, (2005). Analytical Fragility curves for highway bridges bridges in moderate seismic zones. A Thesis presented for PHD degree. School of civil and environmental engineering Georgia institute of Technology, 400 pp.
- [18] Cornell, A. C., Jayaler, F., Hamburger, R. O., and Foutch, A. D. (2002). Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *J. Struct. Eng.*, 10.1061/ (ASCE) 0733-9445(2002)128:4(526), 526–533