

## بررسی جداسازی پایه در بهبود رفتار ساختمان‌های فولادی تحت تاثیر اعمال زلزله‌هایی با زوایای مختلف

کوروش مهدی‌زاده\*

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

سیده وحیده هاشمی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

عباسعلی صادقی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

غلامرضا شویبری

استاد مدعو دانشگاه شهید بهشتی پردیس شهید عباسپور، دانشکده‌ی عمران آب محیط زیست، تهران، ایران

*ko\_ma751@mail.um.ac.ir*

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۰۷/۰۹

### چکیده:

جداسازی لرزه‌ای یک روش طراحی مقاوم در برابر زلزله است که بر اساس کاهش تقاضای لرزه‌ای به جای افزایش ظرفیت سازه‌ای می‌باشد. با توجه به کثرت مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی بررسی رفتار لرزه‌ای جداسازها تحت اثر زلزله، در این تحقیق، نقش جداساز پایه در بهبود رفتار ساختمان‌های فولادی تحت تأثیر اعمال زلزله‌هایی با زوایای مختلف با در نظر گرفتن اثر ارتفاع سازه و شکل پلان موردبررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، ساختمان‌های فولادی با و بدون جداساز پایه لاستیکی- سربی (LRB) به صورت سه‌بعدی با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ و پلان‌های منظم مربعی و مستطیلی مدل‌سازی شده‌اند و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها با توجه به زاویه‌ی اعمال ۴ زوج رکورد زلزله (۸ رکورد زلزله) نزدیک به گسل (۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) بر اساس دستورالعمل FEMA P695 تحت تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی در نرم‌افزار SAP2000 موردبررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ساختمان‌های فولادی تحت زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه دارای پاسخ‌های لرزه‌ای بزرگ‌تر و بحرانی‌تری بوده‌اند و تأثیر جداساز بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌ها در زوایای ۰ و ۳۰ درجه اندک و در زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه چشم‌گیرتر بوده است. استفاده از جداساز، تأثیر بسیار زیادی بر بهبود عملکرد و پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها داشته است. همچنین نتایج نشان داد که در اکثر رکوردها، ارتفاع بیش از شکل پلان بر پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده تأثیرگذار بوده است.

**کلید واژگان:** جداساز لاستیکی- سربی (LRB)، ارتفاع سازه، شکل پلان، زلزله‌ی نزدیک به گسل، زاویه‌ی زلزله

## ۱- مقدمه

کشور ایران با ساختار ویژه زمین‌ساختی، وجود گسل‌های فعال و لرزه خیزی در زمره‌ی مناطق با خطر بالای زلزله در جهان قرار دارد. در روش‌های متداول طراحی فرض می‌شود که در اثر زلزله انرژی قابل توجهی از زمین به ساختمان منتقل می‌شود. به همین دلیل سازه باید به نحوی طرح شود که ظرفیت پذیرش این نیروهای بزرگ را داشته باشد. یکی از این راهکارها، استفاده از جداساز لرزه‌ای پایه (LRB) می‌باشد. هدف از کاربرد این جداسازها کاهش مقدار انرژی است که در اثر زلزله به سازه منتقل می‌شود. با توجه به مطالعات زیادی که در زمینه‌ی بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده تحت زلزله-هایی با ماهیت‌های مختلف انجام گردیده است، در این تحقیق، تأثیر زاویه‌ی برخورد زلزله به سازه‌ها در دو حالت با و بدون جداساز به همراه در نظر گرفتن اثر ارتفاع و شکل پلان موردبررسی قرار گرفته است که در پژوهش‌های گذشته کمتر به آن پرداخته شده است.

یکی از چالش‌های همیشگی در طراحی لرزه‌ای، نبود آگاهی کافی از راستایی است که یک سازه تحت تحریک لرزه‌ای قرار می‌گیرد. در واقع، به علت عدم قطعیت‌های موجود در شرایط ساختگاه، فاصله‌ی کانونی و نیز مشخصه‌های انتشار موج به هنگام رخداد زلزله بعدی، منطقی است که فرض شود حرکت زمین ممکن است در هر امتدادی نسبت به سازه اعمال شود. در نتیجه عدم قطعیت‌های فوق، زاویه‌ی بحرانی تحریک ( $\theta_{CR}$ ) که باعث می‌شود نیاز لرزه‌ای یک پارامتر به حداکثر مقدار خود یعنی ( $R_m$ ) رسد، کم‌تر مورد توجه محققین بوده است. نظر به آنچه گفته شد، در تحقیق حاضر ابتدا تحقیقاتی بررسی می‌شوند که اثر زاویه‌ی تحریک را بر نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها مورد مطالعه قرار داده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در زمینه‌ی موردبحث، چنین استنباط می‌شود که بررسی اثرات زاویه‌ی تحریک بر پاسخ‌های لرزه‌ای در سازه‌های قاب خمشی فولادی با و بدون جداساز لرزه‌ای نیازمند یک مطالعه‌ی جامع است. ادامه مطالعات انجام‌شده در این زمینه مورد ارزیابی قرار گرفته است:

در شمار نخستین مطالعات مربوطه می‌توان به تحقیق Penzien and Watabe [۱] اشاره نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که در مورد یک تحریک، محورهای متعامدی وجود دارد که می‌توان مؤلفه‌های حرکت زمین را در امتداد آن‌ها ناهمبسته فرض نمود. این محورها در اصطلاح محورهای اصلی نامیده می‌شوند و با استفاده از آن‌ها می‌توان مقدار  $\theta_{CR}$  و  $R_m$  محاسبه نمود. نتایج تحقیق مذکور مبنای مطالعات گسترده‌ای قرار گرفت که در آن‌ها محاسبه‌ی پیشینه‌ی تقاضای لرزه‌ای بر اساس تحلیل طیف پاسخ (RSA) مورد توجه بوده است. با وجود مقبولیت و کاربرد فراوان روش RSA، شمار دیگری از محققین تحلیل خطی تاریخچه زمانی (LRHA) را برای محاسبه  $\theta_{CR}$  و  $R_m$  به کار گرفتند. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ی Marinilli and Lopez [۲] نشان داد که مقدار  $R_m$  در سیستم‌های ایده‌آل یک طبقه با استفاده از تحلیل LRHA قابل‌تعیین است و بر اساس نتایج تحلیل RSA می‌توان محدوده‌ی زوایای تحریک را کاهش داد. در همین زمینه Fernandez-Davila et al. [۳] اثر موقعیت حرکت زمین را بر حداکثر نیروی برشی در سازه‌های بتن‌آرمه با سیستم دوگانه مورد ارزیابی قرار دادند. نگارندگان تحقیق، با مبنا قرار دادن پیشینه‌ی تقاضای لرزه‌ای به روش LRHA به‌عنوان پاسخ دقیق، درستی نتایج به‌دست‌آمده از قواعد ترکیب متفاوت را مقایسه، و معایب یا مزایای هر قاعده را بررسی کردند. پژوهش Kalkan and Chopra [۴] نشان داد که بیشترین اثر زلزله بر سازه‌ها می‌تواند متفاوت از میزان شتاب مؤلفه‌های هم‌جهت و یا عمود

بر گسل لرزه‌زا باشد. در حالت تحلیل غیرخطی بیشترین اثر خرابی زلزله در زاویه‌ای مشاهده می‌گردد که زمان تناوب پالس آن به زمان تناوب اصلی سازه نزدیک‌تر باشد و همچنین بیشترین نیروهای اعضا و جابجایی نسبی طبقات تنها در یک زاویه مشاهده می‌شود که این زاویه باعث بحرانی‌تر شدن عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها می‌گردد و نیاز است با استفاده از تحلیل‌های غیرخطی محاسبه و مشخص گردد. مطالعه‌ی Mazza and Mazza [۵] نمونه‌ی دیگری است که در آن تأثیر موقعیت تحریک بر نیاز شکل‌پذیری بررسی شده است. در تحقیق مذکور با مدل‌سازی قاب‌های خمشی سه‌بعدی، به بررسی احتمال وجود مشخصه‌های پالس در مؤلفه‌های دوران یافته از تحریکات نزدیک به گسل پرداخته شده است. تحقیق Lagaros [۶] یک نمونه از مطالعاتی است که در آن با استفاده از این فن، تأثیر عدم قطعیت در تحریک لرزه‌ای و زاویه‌ی اعمال آن بر مقدار پیشینه‌ی بردار جابجایی نسبی ستون‌ها موردبررسی قرار گرفته است. پژوهش Reyes and Kalkan [۷] بر روی قاب‌های فولادی با مهاربند کمناش تاب نشان داده است که دوران مؤلفه‌های حرکت زمین به مؤلفه‌های عمود و موازی به راستای گسل، لزوماً منجر به ایجاد حداکثر تقاضای لرزه‌ای در یک سازه نخواهد شد که این موضوع به‌ویژه در محدوده‌ی رفتار غیرخطی سازه قابل‌مشاهده است. صادقی و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۰، عملکرد سازه‌های قاب خمشی فولادی سه‌بعدی با شکل‌پذیری ویژه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بار افزون و دینامیکی غیرخطی افزایشی با در نظر گرفتن زلزله‌های استاندارد FEMA P695 بررسی نمودند و در نهایت به‌منظور بررسی ظرفیت فروریزش آن‌ها از منحنی‌های شکست استفاده کردند. اثر زوال سختی و مقاومت المان‌های سازه را بر اساس نتایج مدل‌های آزمایشگاهی لحاظ کردند. نتایج نشان داد که ظرفیت فروریزش سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت زلزله‌های دور از گسل بیشترین و تحت زلزله‌های نزدیک گسل با پالس کمترین است و در بین آن‌ها سازه‌ی کوتاه مرتبه‌ی ۴ طبقه، ظرفیت فروریزش کمتری دارد. صابری و همکاران [۹] عملکرد قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۶ و ۹ طبقه را توسط تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی بار افزون و دینامیکی افزایشی (IDA) مورد ارزیابی قرار داده‌اند. از تحلیل‌های غیرخطی بار افزون با سه الگوی مختلف بار جانبی به‌منظور تعیین موقعیت محتمل مفاصل پلاستیک در لحظه‌ی فروریزش استفاده کردند تا بتوانند با بهره‌گیری از آن‌ها، مکانیسم‌های خرابی محتمل قاب‌های مذکور را مشخص نموده و از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی به‌منظور ارزیابی شدت‌های لرزه‌ای متناظر با شکل‌گیری هر یک از مکانیسم‌های خرابی استفاده کنند. مهدی‌زاده و همکاران [۱۰] نقش شکل‌پذیری در ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی فولادی ۵ طبقه را به‌صورت احتمالاتی بررسی کردند. نتایج ظرفیت فروریزش بالاتر و احتمال خرابی کمتر قاب خمشی فولادی ویژه را نسبت به قاب‌های خمشی متوسط و معمولی نشان داد.

در این تحقیق، به بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های سه‌بعدی فولادی با و بدون جداساز (LRB)، ۸ و ۱۲ طبقه دارای پلان‌های منظم مربعی و مستطیلی به روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت ۴ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل پرداخته شده است. تمام تحلیل‌های این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 [۱۱] انجام شده است. در نظر گرفتن راس‌های مختلف برخورد زلزله از مواردی است که در تحقیق‌های مشابه کمتر به آن پرداخته شده است.

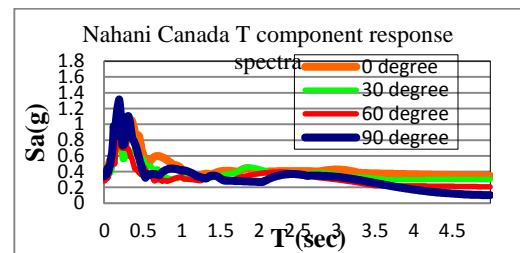
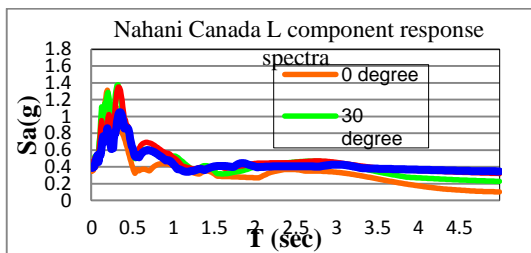
### ۲- معرفی زلزله‌های مورد مطالعه

استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار Matlab [۱۵] به دست آمده است. تأثیر دوران شتاب‌نگاشت‌ها بر طیف شتاب زلزله‌ها به دلیل کثرت زلزله‌های مورد استفاده در این تحقیق، تنها برای زوج رکورد زلزله‌ی نزدیک به گسل Nahanni Canada بر اساس شکل (۱) ارائه شده است.

در این تحقیق، ابتدا ۴ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل بر اساس استاندارد FEMA P695 [۱۲] از پایگاه داده‌های لرزه‌ای PEER NGA [۱۳] استخراج و سپس در جدول (۱) معرفی شده و در ادامه پس از بررسی‌های لازم و انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، بر اساس PGA ابتدا بیشینه شتاب هر مولفه‌ی رکورد بر حسب g به دست آورده و سپس هر مولفه‌ی رکورد به شتاب g هم‌پایه می‌شود. مولفه‌های شتاب با استفاده از روش SRSS ترکیب شده و با توجه به تعداد رکوردها میان‌گیری و یا ماکزیمم به دست آورده و طیف متوسط استخراج می‌شود. طیف پاسخ شتاب آن‌ها در نرم‌افزار SeismoSignal [۱۴] ترسیم شده است و در نهایت دوران آن‌ها با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه با

جدول ۱- مشخصات زلزله‌های نزدیک به گسل

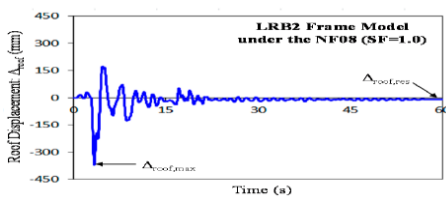
ID NO.	Earthquake			Recording Station	
	M	Year	Name	Name	Owner
1	7.0	1992	Cape Mendocino	Cape Mendocino	CDMG
2	6.8	1976	Gazli-USSR	Karakyr	----
3	6.5	1979	Imperial Valley-06	Bonds Corner	USGS
4	6.8	1985	Nahanni Canada	Sit 2	----



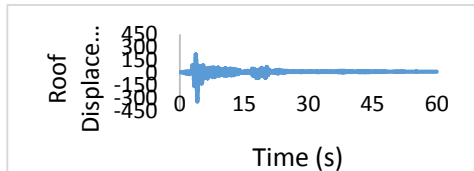
شکل ۱- تأثیر دوران شتاب‌نگاشت بر طیف شتاب زلزله نزدیک گسل Nahanni Canada

### ۳- اعتبار سنجی

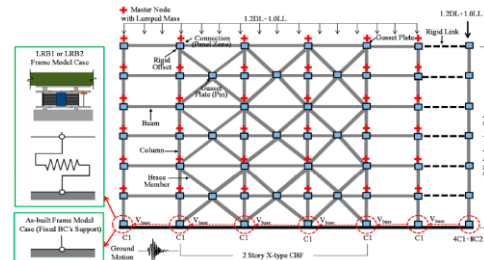
به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی جداساز لاستیکی-سربی (LRB) در نرم‌افزار SAP2000 از مدل موجود در مقاله‌ی Hu [۱۶] استفاده شده است. شکل (۲) قاب دو بعدی فولادی دارای جداساز را نشان می‌دهد. از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) صحت مدل‌سازی LRB با نرم‌افزار SAP2000 تأیید می‌شود و می‌توان با اطمینان به مدل‌سازی نمونه‌های سازه‌ای مورد مطالعه پرداخت.



شکل ۳- تاریخچه زمانی جابجایی بام قاب دارای جداساز بر اساس مقاله‌ی Hu [۱۶]



شکل ۴- صحت سنجی تاریخچه زمانی جابجایی بام قاب دارای جداساز با نرم‌افزار SAP2000



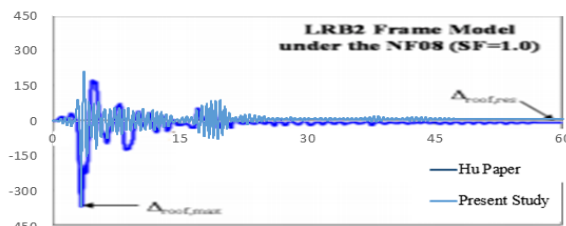
شکل ۲- نمای قاب دارای جداساز (LRB) بر اساس مقاله‌ی Hu [۱۶]

#### ۴- معرفی مشخصات مدل‌ها

در این تحقیق، ابتدا سازه‌های فولادی سه‌بعدی ۸ و ۱۲ طبقه با پلان‌های منظم مربعی و مستطیلی با و بدون جداساز پایه لاستیکی-سربی (LRB) در نرم‌افزار SAP2000 بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۷]، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۸] و نشریه‌ی ۵۲۳ [۱۹] طراحی شدند و سپس کنترل‌های لرزه‌ای مطابق استاندارد لرزه‌ای ایران ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۰] صورت گرفته است. در جدول (۲)، فرضیات مدل‌سازی سازه‌های فولادی موردنظر ارائه شده است.

جدول ۲- فرضیات مدل‌سازی سازه‌های فولادی مورد مطالعه

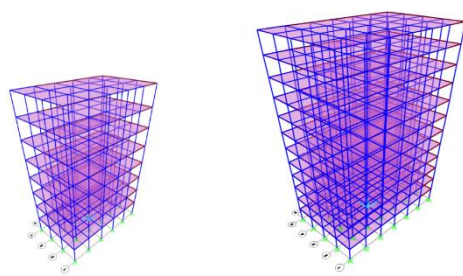
Story Dead Load	500 Kg/m <sup>2</sup>
Story Live Load	200 Kg/m <sup>2</sup>
Roof Dead Load	300 Kg/m <sup>2</sup>
Roof Live Load	150 Kg/m <sup>2</sup>
Square Plan Dimension (8 Story)	12*12 m
Square Plan Dimension (12 Story)	15*15 m
Rectangular Plan Dimension (8 Story)	15*9 m
Rectangular Plan Dimension (12 Story)	21*13 m
Height	3 m
Soil	II
Importance Index	1.0
Design Acceleration (A)	0.3
Behavior Index (Ru)	5
Yield Strength of Steel	2400 Kg/cm <sup>2</sup>
Ultimate Strength of Steel	3600 Kg/cm <sup>2</sup>



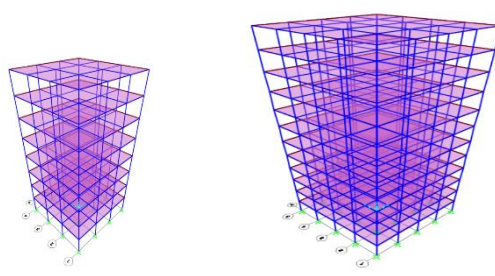
شکل ۵- صحت سنجی قاب دارای جداساز در مقاله‌ی Hu با نرم‌افزار SAP2000

طبقه با پلان مستطیلی مطابق شکل (۸) نشان داده شده است. در جدول (۳) مشخصات مقاطع طراحی شده برای کلیه‌ی سازه‌های مورد مطالعه مشخص شده است.

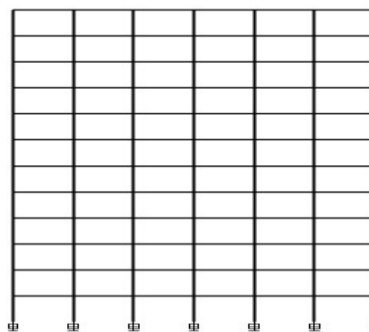
در ادامه نمای سه‌بعدی سازه‌های فولادی مورد مطالعه با پلان‌های مربعی و مستطیلی به ترتیب بر اساس شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده است. نحوه‌ی قرارگیری جداساز لاستیکی-سربی به‌عنوان نمونه در سازه‌ی ۱۲



شکل ۷- مدل‌های سه‌بعدی ۸ و ۱۲ طبقه با پلان مستطیلی



شکل ۶- مدل‌های سه‌بعدی ۸ و ۱۲ طبقه با پلان مربعی



شکل ۸- نحوه‌ی قرارگیری جداساز پایه

جدول ۳- مقاطع سازه‌های فولادی مورد مطالعه

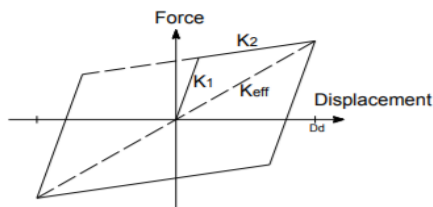
Plan	Column Sections	Beam Sections (Middle bay)	Beam Sections (Side bay)	Story
Square (8 St)	BOX 300*300*20	I350*170*15*20	IPE 400, IPE 360	1 <sup>st</sup> Four Story
	BOX 300*300*15	IPE400 IPE360	IPE240, IPE270	2 <sup>nd</sup> Four Story
Square (12 St)	BOX 350*350*20	IPE 360	IPE 360	All Stories
Rectangular (8 St)	BOX 300*300*15	I250*120*10*12	IPE 240	1 <sup>st</sup> Four Story
		IPE240	IPE220	2 <sup>nd</sup> Four Story
Rectangular (12 St)	BOX 300*300*15	I250*120*10*12	IPE 240	1 <sup>st</sup> Four Story
		IPE240	IPE220	Other Stories

جدول ۶- مشخصات جداساز [۲۱]

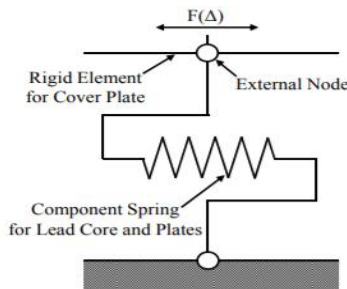
Bearing Properties (KN, mm)	
Gross Area, Ag	554177
Plug Area, Apl	15394
Rubber Area, Ar	538783
Total Rubber Thickness, Tr	500
Bonded Dimension	820
Bonded Area, Ab	528102
Net Bonded Area, Anet b	512708
Bonded Perimeter	2576

جدول ۷- مشخصات هیستریزس جداساز [۲۱]

Hysteresis Loop Properties (KN, mm)		
Characteristic Strength, Q <sub>d</sub>	123.2	$Q_d = A_{pl} \times \sigma_{pl}$
Post-Yield Stiffness, K <sub>p</sub>	0.43	$K_p = G_y A_r / T_r$
Elastic Stiffness, K <sub>e</sub>	3.81	$K_e = 25K_p, 6.5K_p [1 + 12A_{pl} / A_{net b}]$
Yield Displacement, D <sub>y</sub>	36.43	$D_y = Q / (K_e - K_p)$
Yield Force, F <sub>y</sub>	138.9	$F_y = Q + K_p D_y$
Maximum Force, F <sub>m</sub>	192.1	$F_m = Q + K_p D_m$
Effective Stiffness, K <sub>eff</sub>	1.20	$K_{eff} = F_m / D_m$
Area Hysteresis Loop, A <sub>h</sub>	60869	$A_h = 4Q_d (D_m - D_y)$
Equivalent Viscous Damping, β <sub>eff</sub>	0.315	$\beta_{eff} = A_h / 2\pi / K_{eff} D_m^2 = A_h / 2\pi / F_m D_m$



شکل ۹- رفتار دو خطی جداساز [۲۲]



شکل ۱۰- مدل فنر تحلیلی [۲۲]

در مورد مشخصات جداساز مورد استفاده در این تحقیق از مطالعه Providakis [۲۱] استفاده شده است. شرح مشخصات جداساز در جدول‌های (۴) تا (۷) و رفتار دو خطی جداساز لرزه‌ای به منظور مدل‌سازی در نرم‌افزار SAP2000 و مدل فنر تحلیلی به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) به‌طور کامل ارائه شده است:

جدول ۴- ابعاد جداساز مورد مطالعه [۲۱]

Isolator Dimensions	
Units:	mm
Plan Shape	Circular
Plan Dimension (d-B)	840
Rubber Cover Th.	10
No. of Rubber Layers	50
Rubber Layer Thickness, tr	10
No. of Mid. Steel Pl.	49
Mid. Steel Pl. Thickness, ts	2.0
Lead Core Diameter, dpl	140
Total Height	598

جدول ۵- مشخصات لاستیک استفاده شده در جداساز [۲۱]

Elastomer Properties (Material)		
Units:	MPa	KN, mm
Shear Modulus, G	0.4	0.0004
Material Constant, k	0.85	0.85
Elastic Modulus, E	1.35	0.00135
Bulk Modulus, E∞	1500	1.5
Damping	0.05	0.05
Lead Yield Strength, σpl	8	0.008

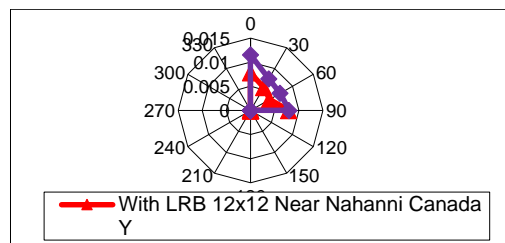
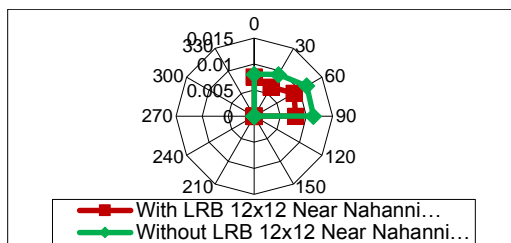
## ۵- ارائه‌ی نتایج تحلیل‌ها

فولادی با پلان مربعی با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ در دو حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای تحت دوران زوج شتاب‌نگاشت نزدیک گسل در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) و برای سازه‌های فولادی با پلان مستطیلی با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ در دو حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای تحت دوران ۴ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های (۱۱) الی (۱۴) مشخص می‌گردد که شکل پلان تأثیر بسزایی در کاهش پاسخ‌ها نداشته است و همچنین جابجایی نسبی سازه‌های فولادی در زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه بحرانی بوده است که با جدا سازی به روش LRB مقدار آن تقریباً بیش از ۱۰ درصد کاهش یافته است و همچنین مقدار جابجایی نسبی در زاویه ۰ درجه که در اکثر تحقیق‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اندک است و عملکرد ساختمان مناسب است. بررسی نتایج مرتبط با سایر زلزله‌ها نیز حاکی از این موضوع می‌باشد.

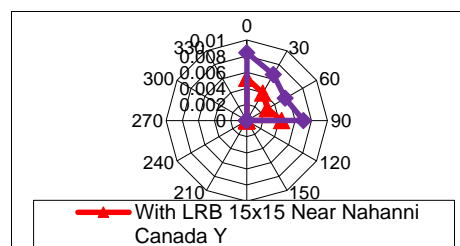
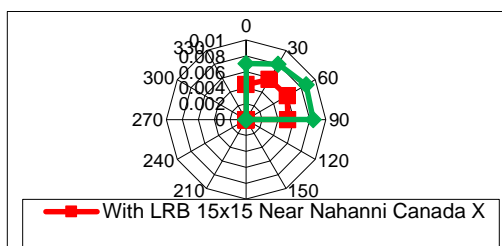
در این بخش، نتایج مربوط به تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخیچه زمانی ارائه شده است. در ادامه، پاسخ‌های لرزه‌ای (جابجایی نسبی بیشینه‌ی طبقات، شتاب بیشینه‌ی بام و جابجایی بیشینه‌ی بام) تحت ۴ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل مورد بحث قرار گرفته است. به دلیل کثرت نمودارها و محدودیت حجم مقاله تنها پاسخ‌های لرزه‌ای مذکور برای دو مؤلفه‌ی  $X$  و  $Y$  زلزله نزدیک به گسل Nahanni Canada استخراج و به صورت نمودار ارائه شده است. سایر نتایج به صورت خلاصه با عنوان میانگین پاسخ‌های لرزه‌ای در جدول‌های (۸) و (۹) ذکر شده است.

## ۵-۱- جابجایی نسبی

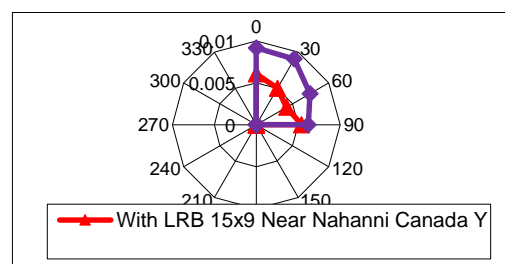
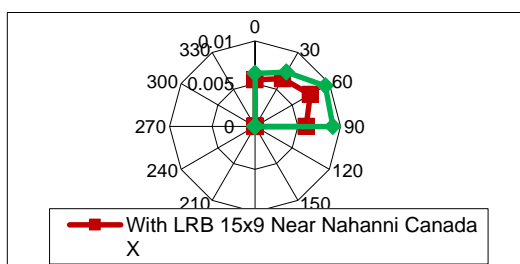
محاسبه‌ی جابجایی نسبی بیشینه‌ی طبقات در دو جهت  $X$  و  $Y$  با در نظر گرفتن دوران شتاب‌نگاشت‌ها با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه برای سازه‌های



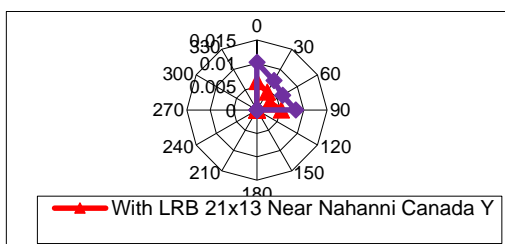
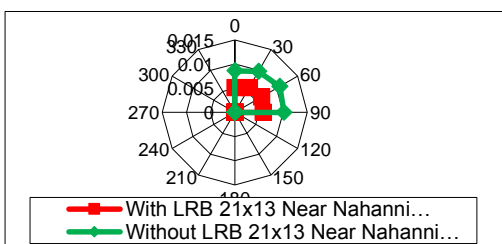
شکل ۱۱- جابجایی نسبی بیشینه‌ی طبقات سازه ۸ طبقه با پلان مربعی و دوران مؤلفه‌های  $L$  و  $T$  زلزله Nahanni Canada



شکل ۱۲- جابجایی نسبی بیشینه‌ی طبقات سازه ۱۲ طبقه با پلان مربعی و دوران مؤلفه‌های  $L$  و  $T$  زلزله Nahanni Canada



شکل ۱۳- جابجایی نسبی بیشینه‌ی طبقات سازه ۸ طبقه با پلان مستطیلی و دوران مؤلفه‌های  $L$  و  $T$  زلزله Nahanni Canada

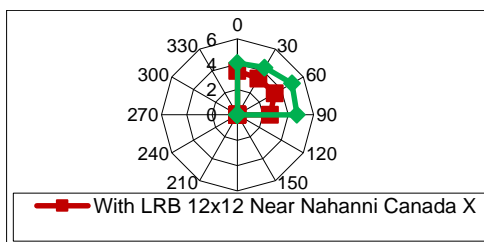


شکل ۱۴- جابجایی نسبی بیشینه‌ی طبقات سازه ۱۲ طبقه با پلان مستطیلی و دوران مؤلفه‌های  $L$  و  $T$  زلزله Nahanni Canada

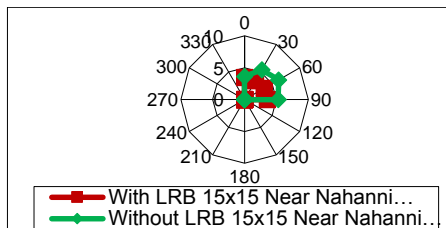
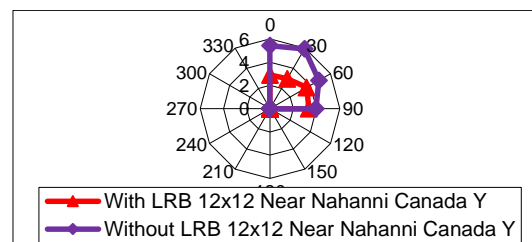
## ۵-۲- شتاب بام

شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های (۱۵) الی (۱۸) مشخص می‌گردد که ارتفاع سازه تأثیر بسزایی در افزایش پاسخ شتاب داشته است و تأثیر شکل پلان ناچیز است و همچنین شتاب بام سازه‌های فولادی در زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه بحرانی بوده است که با جداسازی به روش LRB مقدار آن تقریباً بیش از ۲۰ درصد کاهش یافته است و همچنین مقدار شتاب بام در زاویه ۰ درجه که در اکثر تحقیق‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد نسبت به سایر زوایای برخورد کم‌تر است. بررسی نتایج مرتبط با سایر زلزله‌ها نیز حاکی از این موضوع می‌باشد.

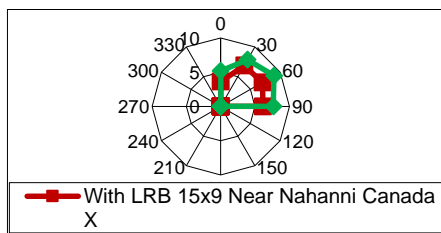
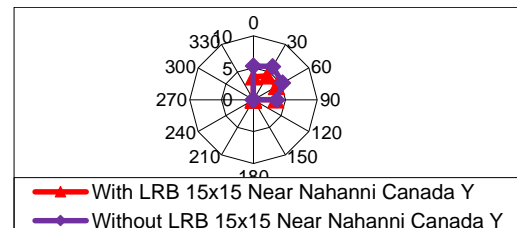
محاسبه‌ی شتاب بیشینه‌ی بام در دو جهت X و Y با در نظر گرفتن دوران شتاب‌نگاشت‌ها با زوایای برخورد ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه برای سازه‌های فولادی با پلان مربعی با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ در دو حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای تحت دوران ۴ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک گسل در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) و برای سازه‌های فولادی با پلان مستطیلی با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ در دو حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای تحت دوران ۴ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل در



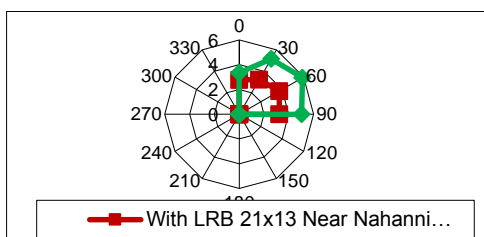
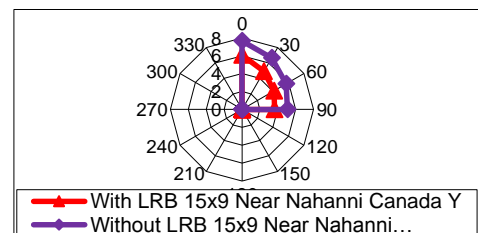
شکل ۱۵- شتاب بیشینه‌ی بام سازه ۸ طبقه با پلان مربعی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



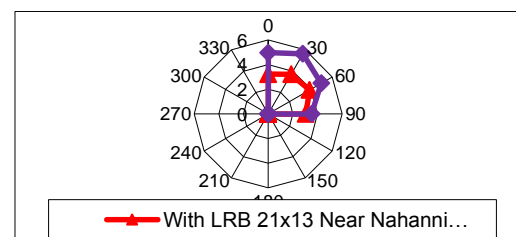
شکل ۱۶- شتاب بیشینه‌ی بام سازه ۱۲ طبقه با پلان مربعی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



شکل ۱۷- شتاب بیشینه‌ی بام سازه ۸ طبقه با پلان مستطیلی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



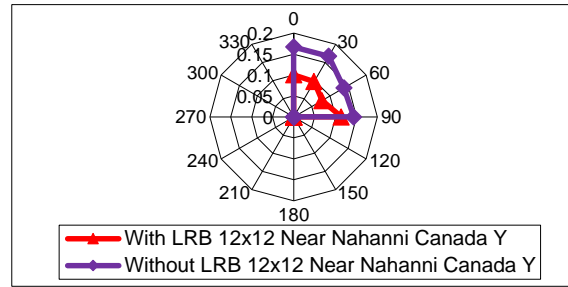
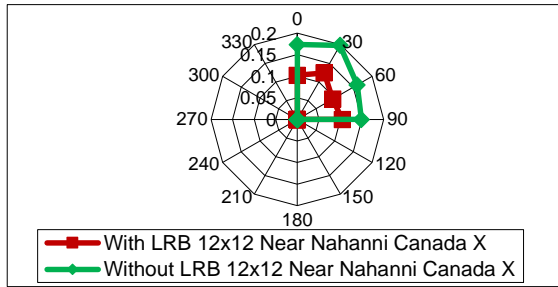
شکل ۱۸- شتاب بیشینه‌ی بام سازه ۱۲ طبقه با پلان مستطیلی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



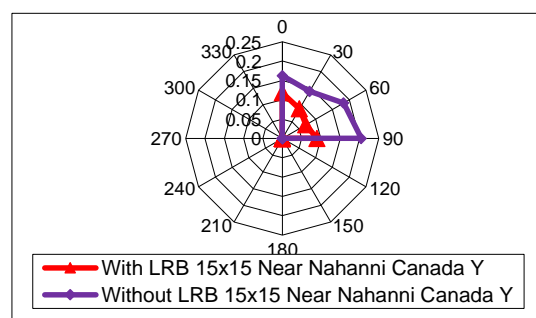
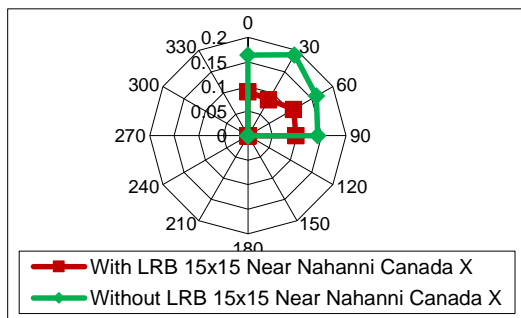
۳-۵- جابجایی بام

نزدیک به گسل در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های (۱۹) الی (۲۲) مشخص می‌گردد که ارتفاع سازه نسبت به شکل پلان تأثیر بسزایی در افزایش پاسخ جابجایی داشته است و همچنین جابجایی بام سازه‌های فولادی در زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه بزرگ‌تر بوده و تقریباً عملکرد آن‌ها بحرانی‌تر بوده است که با جداسازی به روش LRB مقدار آن تقریباً بیش از ۳۰ درصد کاهش یافته است و همچنین مقدار جابجایی بام در زوایای ۰ و ۳۰ درجه نسبت به سایر زوایای برخورد کم‌تر است. بررسی نتایج مرتبط با سایر زلزله‌ها نیز این موضوع را تأیید می‌نماید.

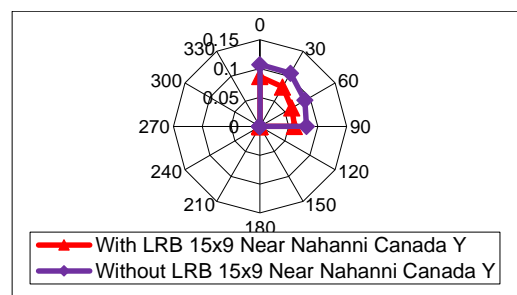
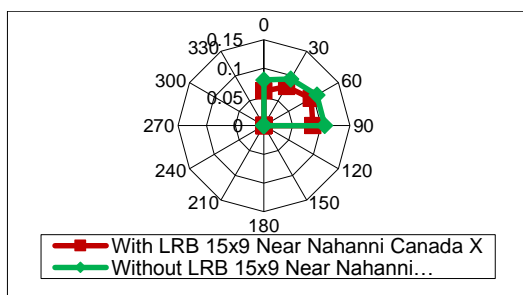
بررسی جابجایی بیشینه‌ی بام نسبت به تراز پایه در دو جهت X و Y با در نظر گرفتن دوران شتاب‌نگاشت‌ها با زوایای برخورد ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه برای سازه‌های فولادی با پلان مربعی با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ در دو حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای تحت دوران ۴ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) و برای سازه‌های فولادی با پلان مستطیلی با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ در دو حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای تحت دوران ۴ زوج شتاب‌نگاشت



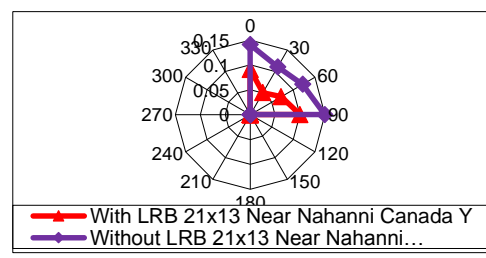
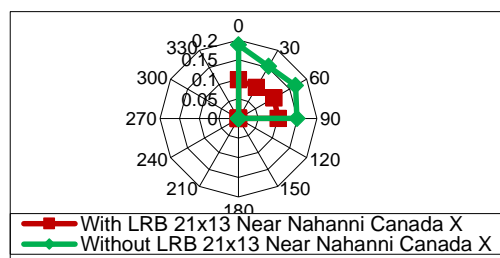
شکل ۱۹- جابجایی بیشینه‌ی بام سازه ۸ طبقه با پلان مربعی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



شکل ۲۰- جابجایی بیشینه‌ی بام سازه ۱۲ طبقه با پلان مربعی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



شکل ۲۱- جابجایی بیشینه‌ی بام سازه ۸ طبقه با پلان مستطیلی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



شکل ۲۲- جابجایی بیشینه‌ی بام سازه ۱۲ طبقه با پلان مستطیلی و دوران مؤلفه‌های L و T زلزله Nahanni Canada



میانگین پاسخهای لرزه‌ای سازه‌های فولادی با و بدون جداساز لرزه‌ای با پلان‌های مربعی و مستطیلی تحت زوایای مختلف برخورد ۸ شتاب‌نگاشت زلزله‌های نزدیک به گسل به صورت خلاصه در دو جهت X و Y در جدول‌های (۸) و (۹) ارائه شده است:

جدول ۸- میانگین پاسخهای لرزه‌ای سازه‌ها با پلان مربعی با و بدون جداساز تحت زلزله‌های نزدیک گسل

Model	Seismic Responses	with or without Isolator	0 Degree		30 Degree		60 Degree		90 Degree	
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Square Plan-8 Story (with & without Isolator)	Drift	With Isolator	0.012	0.015	0.012	0.014	0.015	0.019	0.017	0.016
		Without Isolator	0.017	0.02	0.019	0.019	0.022	0.023	0.024	0.023
	Roof Displacement (m)	With Isolator	0.12	0.17	0.12	0.16	0.2	0.21	0.22	0.18
		Without Isolator	0.2	0.22	0.22	0.24	0.3	0.28	0.28	0.26
	Roof Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	With Isolator	8.8	9.1	7.5	8.9	9	9.5	8.5	8.2
		Without Isolator	9.2	9.3	8.5	9	9.9	10.1	11	10.9
Square Plan-12 Story (with & without Isolator)	Drift	With Isolator	0.01	0.017	0.013	0.016	0.013	0.014	0.016	0.015
		Without Isolator	0.02	0.022	0.023	0.025	0.03	0.028	0.029	0.03
	Roof Displacement (m)	With Isolator	0.2	0.21	0.22	0.16	0.25	0.22	0.16	0.2
		Without Isolator	0.26	0.25	0.28	0.24	0.29	0.33	0.3	0.28
	Roof Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	With Isolator	6	6.8	9.5	8.5	8.2	8.8	10.1	9.5
		Without Isolator	7.7	7.9	10.2	9	10.2	10.5	10.5	10.6

جدول ۹- میانگین پاسخهای لرزه‌ای سازه‌ها با پلان مستطیلی با و بدون جداساز تحت زلزله‌های نزدیک گسل

Model	Seismic Responses	with or without Isolator	0 Degree		30 Degree		60 Degree		90 Degree	
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Rectangular Plan-8 Story (with & without Isolator)	Drift	With Isolator	0.008	0.01	0.01	0.017	0.014	0.018	0.02	0.022
		Without Isolator	0.019	0.021	0.022	0.024	0.03	0.031	0.03	0.032
	Roof Displacement (m)	With Isolator	0.12	0.16	0.2	0.21	0.2	0.21	0.22	0.24
		Without Isolator	0.22	0.24	0.26	0.25	0.28	0.28	0.29	0.3
	Roof Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	With Isolator	9.2	7.9	9.9	8.5	9.6	10.2	7.8	8.5
		Without Isolator	9.9	9.3	9.1	9.1	10.1	10.4	11	10.9
Rectangular Plan-12 Story (with & without Isolator)	Drift	With Isolator	0.015	0.011	0.018	0.014	0.015	0.01	0.013	0.016
		Without Isolator	0.021	0.022	0.022	0.019	0.017	0.016	0.022	0.023
	Roof Displacement (m)	With Isolator	0.14	0.17	0.2	0.2	0.2	0.2	0.22	0.19
		Without Isolator	0.2	0.21	0.25	0.28	0.26	0.27	0.29	0.3
	Roof Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	With Isolator	6.6	7.3	6.1	6.5	10.9	11.1	7.7	8.3
		Without Isolator	8	9.7	7.7	8	12.1	12	9.5	10

## مراجع

- [1] Penzien J, Watabe M. Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1975; 3 (4): 365-373.
- [2] Marinilli A, Lopez OA. Evaluation of critical responses and critical incidence angles obtained with RSA and RHA. *Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering*; 2008; Beijing, China.
- [3] Fernandez-Davilla I, Cominetti S, Cruz EF. Considering the bi-directional effects and the seismic angle variations in building design. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*; 2000; Paper No. 0435; Auckland, New Zealand.
- [4] Kalkan E, Chopra AK. Modal-pushover based ground-motion scaling procedure. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 2011; 137 (3): 289-310.
- [5] Mazza F, Mazza M. Nonlinear modeling and analysis of R.C. framed buildings located in a near-fault area. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2012; 6 (1): 346-354.
- [6] Lagaros ND. The impact of the earthquake incident angle on the seismic loss estimation. *Engineering Structures*. 2010; 32 (6): 1577-1589.
- [7] Reyes JC, Kalkan E. Significance of rotating ground motions on behavior of symmetric- and asymmetric-plan structures: part 1. Single-story structures. *Earthquake Spectra*. 2015; 31 (3): 1591-1612.
- [8] Saberi V, Saberi H, Sadeghi A. Collapse Assessment of Steel Moment Frames Based on Development of Plastic Hinges. *Journal of Science and Technology*. 2020. (In Persian).
- [9] Sadeghi A, Hashemi S, Mehdizadeh K. Probabilistic Assessment of Seismic Collapse Capacity of 3D Steel Moment-Resisting Frame Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2020. (In Persian).
- [10] Mehdizadeh K, Karamodin A, Sadeghi A. Progressive Sidesway Collapse Analysis of Steel Moment-Resisting Frames Under Earthquake Excitations. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. 2020; 44: 1209-1221.
- [11] Habibullah A. SAP-Three Dimensional Analysis of Building Systems. Manual. Computers and Structures Inc., Berkeley, California.  
<https://www.csiamerica.com/>
- [12] FEMAP695. P695. Quantification of Building Seismic Performance Factors, Federal Emergency Management Agency (FEMA). 2009; Document No (2009), FEMA.
- [13] PEER Ground Motion Database. Pacific Earthquake Engineering Research Centre, Web Site:  
[http://peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database](http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database)
- [14] SeismoSignal. Constitutes a simple, yet efficient, package for the processing of strong-motion data. SeismoSoft's Ltd. 2018.  
<https://www.seisomsoft.com/>
- [15] MATLAB (matrix laboratory). multi - paradigm numerical computing environment and proprietary programming language developed by MathWorks. 2018 .  
<https://www.mathworks.com/help/matlab/>

نتایج ارائه شده در جدول های (۸) و (۹) نشان می دهد که ارتفاع سازه نسبت به شکل پلان تأثیر گذارتر است و عملکرد سازه ها تحت زوایای برخورد ۶۰ و ۹۰ درجه در زلزله های نزدیک به گسل بحرانی تر بوده اند که جداساز به عنوان روشی به منظور بهسازی لرزه ای سازه ها باعث کاهش پاسخ های و بهبود رفتار سازه های مورد مطالعه گردیده است.

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار لرزه ای سازه های فولادی با سیستم قاب خمشی با شکل پذیری متوسط با تعداد طبقات ۸ و ۱۲ با پلان های منظم مربعی و مستطیلی در دو حالت با و بدون جداساز لرزه ای (LRB) تحت ۸ رکورد نزدیک به گسل (۴ زوج شتاب نگاشت) در راستاهای مختلف (۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفته اند. طراحی و تحلیل های غیرخطی سازه ها در نرم افزار SAP2000 انجام گردید. هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر زاویه ای اعمال شتاب نگاشت ها به سازه های مورد نظر در ۴ حالت ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه بوده است. پس از انجام تحلیل ها و بررسی نتایج می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- شکل پلان سازه های فولادی مورد مطالعه با و بدون جداساز لرزه ای (مستطیلی یا مربعی) در نتایج به دست آمده تأثیر محسوسی نداشته است.
- با افزایش ارتفاع سازه های فولادی مورد مطالعه، پاسخ های سازه ای بحرانی تر شده است که استفاده از جداساز تقریباً بیش از ۲۵ درصد پاسخ های لرزه ای را کاهش داده است.
- میزان پاسخ های لرزه ای در زوایای برخورد ۰ و ۳۰ درجه نسبت به ۶۰ و ۹۰ درجه به صورت میانگین کم تر بوده است بنابراین پاسخ های لرزه ای بررسی شده در زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه، بحرانی تر بوده اند. به عنوان مثال میانگین جابجایی نسبی بیشینه ی طبقات در سازه فولادی ۸ طبقه با پلان مربعی تحت مؤلفه X زلزله های نزدیک گسل در حالت ۶۰ درجه نسبت به ۰ درجه در حالت با جداساز تقریباً ۲۰ درصد و در حالت بدون جداساز ۳۳ درصد بزرگ تر بوده است و میانگین شتاب بیشینه ی بام در سازه فولادی ۸ طبقه با پلان مربعی تحت مؤلفه X زلزله های نزدیک گسل در حالت ۶۰ درجه نسبت به ۰ درجه در حالت با جداساز ۲ درصد و در حالت بدون جداساز ۱۵ درصد افزایش یافته است و میانگین جابجایی بیشینه ی بام در سازه فولادی ۸ طبقه با پلان مربعی تحت مؤلفه X زلزله های نزدیک گسل در حالت ۶۰ درجه نسبت به ۰ درجه در حالت با جداساز ۴۰ درصد و در حالت بدون جداساز ۳۳ درصد افزایش یافته است.
- نتایج نشان داد که استفاده از جداساز پایه باعث بهبود پاسخ های لرزه ای در راستاهای مختلف اعمال شتاب نگاشت گردیده است. بیشترین کاهش پاسخ های لرزه ای به صورت میانگین در اثر اعمال زلزله های نزدیک به گسل با زوایای بحرانی ۶۰ و ۹۰ درجه رخ داده است.

- [16] Hu JW. Response of Seismically Isolated Steel Frame Buildings with Sustainable Lead-Rubber Bearing (LRB) Isolator Devices Subjected to Near-Fault (NF) Ground Motions. *Sustainability*. 2015; 7 (1): 111-137.
- [17] INBC. Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6. 2013. (In Persian).
- [18] INBC. Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10. 2013. (In Persian).
- [19] Code 523. Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings, Office of Deputy for Strategic Supervision Bureau of Technical Execution System. 2010. (In Persian).
- [20] BHRC. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800. 2014. (In Persian).
- [21] Providakis CP. Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations. *Journal of Engineering Structures*. 2008; 30 (5): 1187-1198.
- [22] Sharbatdar MK, Hoseini Vaez SR, Ghodrati Amiri G, Naderpour H. Seismic Response of Base-Isolated Structures with LRB and FPS under near Fault Ground Motions. *Journal of Procedia Engineering*. 2011; 14: 3245-3251.

## Investigation of the Base Isolation in Improving the Behavior of Steel Buildings subjected to Earthquakes applied with Different Angles

Kouros Mehdi-zadeh\*

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

Seyede Vahide Hashemi

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Abbasali Sadeghi

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Gholamreza Shobeyri

Faculty of Civil, Water and Environmental Eng., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ko\_ma751@mail.um.ac.ir

### Abstract

Seismic isolation is an earthquake resistant design method based on reducing seismic demand instead of increasing structural capacity. With regard to the multiplicity of studies conducted to investigate the seismic behaviour of isolators under the effect of earthquakes, in this study, role of the base isolator in improving the behaviour of steel structures under the influence of earthquakes with different angles was investigated along with considering the effect of structural height and plan shape. In the present study, steel structures with and without Lead Rubber Bearing (LRB) base isolator are modelled in 3D with 8 and 12 stories and square and rectangular plans. The seismic performance of these buildings has been reviewed and compared according to 4 pairs of near-fault earthquake records (8 records) with angles ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ ) based on FEMA P695 instruction under the nonlinear dynamic time history analyses in SAP2000 software. The results showed that steel structures at angles of  $60^\circ$  and  $90^\circ$  had larger and more critical seismic responses. Based on results, the effect of seismic isolator on reducing the seismic responses of buildings at angles of  $0^\circ$  and  $30^\circ$  was low, while at the angles of  $60^\circ$  and  $90^\circ$  was more significant. The use of separators had a great impact on improving the performance and seismic responses of structures. The results also presented that in most records, the height of the structure was more effective than the plan shape regarding the seismic responses of the isolated structures.

**Keywords:** Lead Rubber Bearing (LRB), Structural Height, Plan Shape, Near-Fault Record, Earthquake Angle.