



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Development of efficiency index for steel moment frames with Self-Centering Connections

Mohammad Bavandi<sup>1</sup>, Abdolreza S. Moghadam<sup>2\*</sup>, Mohammad Reza Mansoori<sup>3</sup>, Armin Aziminejad<sup>3</sup>

1- PhD Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

3- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Traditional earthquake-resistant systems are dependent on the inelastic response of the building members. These systems experience significant residual displacements after major earthquakes due to seismic energy distribution all over the building and make their repair uneconomical. Self-Centering systems in steel frame buildings omit residual displacements and concentrate building damage on Self-Centering connection and reduce the cost of repair. Due to the dispersion of the response of Self-Centering systems against different earthquakes, it is necessary to determine an index to control sensitivity of these systems against various records. In this paper, developing an efficiency index of steel moment frame systems with Self-Centering connections using the dispersion index's methodology is discussed. After performing the time history dynamic analyses of two steel buildings with 3 and 9 floors, six types of self-centering connections for each frame with seven dispersion indices were evaluated. Decreased dispersion of responses indicate that the system is more efficient. Among these, under the optimization of indices, it is tried to select an index with a better performance which resulted to CV index (coefficient of variation). Finally, the structure with the least dispersion of responses is selected from the viewpoint of efficiency. The selected model of this research for 3 and 9 story buildings is model M5 which is the fifth model of Moradi models.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 13 March 2020

Revise Date: 26 April 2020

Accept Date: 02 May 2020

### Keywords:

Self-Centering  
Efficiency Index  
Posttensioned  
Index of Dispersion  
Residual Response

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.223402.2106

\*Corresponding author: Abdolreza Sarvghad Moghadam.

Email address: moghadam@iiees.ac.ir

## تدوین شاخص کارایی قابهای خمشی فولادی دارای اتصالات مرکز گرا

محمد باوندی<sup>۱</sup>، عبدالرضا سروقدمقدم<sup>۲\*</sup>، محمد رضا منصوری<sup>۳</sup>، آرمین عظیمی نژاد<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### چکیده

سیستم های سنتی مقاوم در برابر نیروهای زلزله، وابسته به پاسخ های غیر الاستیک دراعضای ساختمانی می باشند. این سیستمها در سراسر ساختمان برای توزیع انرژی لرزه ای ممکن است جابجایی های پسماند قابل توجهی بعد از زلزله های بزرگ را تجربه کنند و باعث غیر اقتصادی شدن تعمیر در آنها شوند. سیستم های مرکز گرا در ساختمان های قاب فولادی تغییرمکان ماندگار را حذف خواهند کرد و خرابی ساختمان را در اتصالات مرکز گرا متمرکز می کنند و هزینه تعمیر را کاهش می دهند. با توجه به پراکندگی پاسخ سیستم های مرکز گرا در برابر زلزله های مختلف، تعیین شاخصی برای کنترل حساسیت این سیستم ها در برابر زلزله های مختلف الزامی است. در این مقاله به تدوین شاخص کارایی سیستم های قاب خمشی فولادی دارای اتصالات مرکز گرا با استفاده از متدولوژی شاخص های پراکندگی پرداخته شده است. بعد از انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی دو ساختمان ۳ و ۹ طبقه فولادی، شش نوع اتصال مرکز گرا برای هر قاب با هفت شاخص پراکندگی تحت ارزیابی قرار گرفته اند. کاهش میزان پراکندگی پاسخ ها نشان دهنده کاراتر بودن سیستم مورد بررسی می باشد. که از این بین تحت بهینه یابی شاخص ها، سعی در انتخاب شاخصی با عملکرد بهتر شده است. که این شاخص ضریب تغییرات (CV) می باشد. در انتها سازه ای از دیدگاه کارایی مورد قبول است که در ارزیابی مورد نظر به عنوان مدل منتخب با کمترین حساسیت نسبت به پراکندگی در پاسخ سازه معرفی شود. مدل منتخب در این تحقیق برای ساختمان های ۳ و ۹ طبقه مدل M5 می باشند که مدل پنجم از مدل های مرادی است.

کلمات کلیدی: مرکز گرا، شاخص کارایی، پس کشیدگی، شاخص پراکندگی، پاسخ ماندگار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2020.223402.2106	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.223402.2106	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۹/۰۲/۱۲	۱۳۹۷/۱۱/۲۸	۱۳۹۹/۰۲/۰۷	۱۳۹۸/۱۲/۲۳
عبدالرضا سروقدمقدم moghadam@iiees.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

امروزه نیاز به طراحی و اجرای سازه هایی با آسیب پذیری و خسارت کمتر و تعمیر آسان تر بعد از زلزله ی بزرگ، با توجه به تجارب بدست آمده از زلزله های گذشته در سرتاسر جهان، بسیار مهم و قابل بحث می باشد. در طول یک زلزله ی بزرگ، سیستم های سنتی مقاوم جانبی لرزه ای، خسارت جدی را در سیستم سازه ای تحمیل می کنند و جابه جایی های نسبی باقی مانده در سازه، تعمیر سازه را بعد از زلزله بسیار سخت و غیر اقتصادی می کند. یکی از مشکلات عمده اتصالات خمشی فولادی سنتی و متداول ایجاد تغییر مکان یا تغییر مکان نسبی پسماند پس از زلزله می باشد، که این مشکل با ارائه اتصالات تیر به ستون پس کشیده فولادی رفع شده است. مفهوم پس تنیدگی برای اولین بار برای سازه های پیش ساخته بتنی، پیش از کاربردهای آن برای ساختمانهای فولادی، مورد مطالعه قرار گرفت. دولان<sup>۱</sup> و همکاران [۱] اتصالات خمشی بتنی را مورد آزمایش قرار دادند، که شامل یک نمونه تیر پیش ساخته بتنی که به ستون پس تنیده شده بود. پس تنیدگی؛ شکل پذیری، مقاومت و سختی اولیه خوبی ارائه می دهد. چئوک<sup>۲</sup> و لئو<sup>۳</sup> [۲] به این نتیجه رسیدند که اتصالات بتن پیش ساخته تیر به ستون پس کشیده می تواند برای مناطق لرزه ای با خطر بالا مناسب باشد. مطالعات رایکلز و همکاران [۳] نشان دهنده پتانسیل کاربردی میله های پس کشیده در اتصالات فولادی برای مناطق با زلزله خیزی بالا هستند، آنها اتصالات تیر به ستون مرکزگرا با کابل های فولادی پس کشیده مقاومت بالا را پیشنهاد کردند، نبشی بالا و نشیمن پیچی به عنوان عناصر استهلاک انرژی نصب شده است. رایکلز و همکاران [۴] آزمون های تجربی بر روی نه اتصال پس کشیده در مقیاس بزرگ انجام دادند. پاسخ لرزه ای اتصالات تیر به ستون میانی، با پارامترهای طراحی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی رفتار نبشی در یک اتصال تیر به ستون پیچی، گارلوک و همکاران [۵] هفت نمونه نبشی پیچی را مورد آزمایش قرار دادند. تاثیر اندازه نبشی و طول نمونه پیچ بر سختی اتصال، مقاومت، ظرفیت استهلاک انرژی، و مقاومت در برابر خستگی با چرخه کم مورد بررسی قرار گرفت، گارلوک و همکاران [۶] طرح کلی برای روش طراحی لرزه ای مبتنی بر عملکرد برای سیستم قاب فولادی پس کشیده با نبشی بالا و نشیمن پایین را ارائه کردند. مرادی و اعلم<sup>۴</sup> [۷] اتصال پس کشیده فولادی با نبشی فوقانی و تحتانی ارائه شده توسط رایکلز را به روش اجزای محدود شبیه سازی کردند و دریافتند که استفاده از این روش مقرون به صرفه تر از مطالعات آزمایشگاهی می باشد. پیرمز و لیو<sup>۵</sup> [۸] اتصال مرکزگرا پس کشیده را با اطلاعات آزمایشگاهی موجود صحت سنجی کردند و سپس بر روی رفتار منحصر بفرد مدل عددی اتصال پس کشیده فولادی تحت بارگذاری غیرکنواخت ثقلی و حذف ناگهانی ستون تحقیقاتی انجام دادند. مرادی و همکاران [۹] عملکرد لرزه ای یک ساختمان قاب فولادی مرکز گرا، از مدل سازی تا ارزیابی خسارت اقتصادی را مورد بررسی قرار دادند. ژانگ<sup>۶</sup> و همکاران [۱۰] مطالعه تجربی در مورد قاب فولادی پیش ساخته مرکز گرا ویژه با اتصالات تیر به ستون حاوی دستگاه های اصطکاکی در جان تیر پیشنهاد کردند. راسموسن<sup>۷</sup> و همکاران [۱۱] به مدلسازی و بررسی رفتار قاب های فولادی سرد نورد شده دارای اتصالات مرکز گرای C شکل در قاب پرتال سوله ها پرداختند. در اتصالات پس کشیده فولادی مطابق شکل (۱)، کابل های پس کشیده با مقاومت بالا به موازات محور تیر تعبیه شده اند و بال های تیر را در مقابل بال های ستون فشرده می کنند. تحت گشتاور خمشی ناشی از بارگذاری لرزه ای، بازشدگی در سطح مشترک بال کششی تیر و بال ستون ایجاد می گردد. هنگامی که گشتاور خمشی به صفر برسد، بازشدگی نیز به صفر رسیده و تغییر شکل دائمی در سازه بوجود نمی آید. مهمترین مزیت اتصال تیر به ستون پس کشیده با نبشی فوقانی و تحتانی آن است که تیرها و ستون ها در کلیه مراحل بارگذاری ارتجاعی باقی می ماندند، در حالیکه نبشی های فوقانی و تحتانی رفتار خمیری داشته و انرژی را مستهلک می کنند. قاب ها با اتصالات پس کشیده اتلاف انرژی و شکل پذیری خوبی دارند و در عین حال که از قابلیت مرکزگرایی نیز برخوردارند، بنابراین تغییر مکان نسبی پسماند در قاب پس کشیده بسیار کم بوده و قابل صرف نظر می باشد ( نمودار لنگر-تغییر شکل این اتصالات پرچمی شکل خواهد شد )، بنابراین آسیب وارده به اعضای اصلی سازه ای در قاب پس کشیده پس از زلزله کمتر از قاب خمشی با اتصالات متعارف می باشد. استفاده از اتصالات پس کشیده فولادی نه تنها باعث

<sup>1</sup> W. Dolan

<sup>2</sup> Geraldine S. Cheok

<sup>3</sup> H. S. Lew

<sup>4</sup> M. Shahria Alam

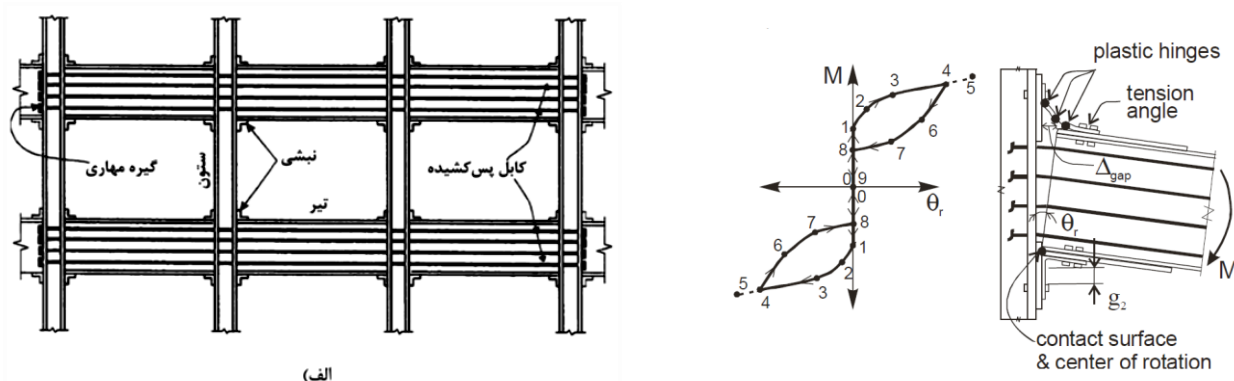
<sup>5</sup> Pirmoz, A. and M.M. Liu

<sup>6</sup> YanxiaZhang

<sup>7</sup> Rasmussen

افزایش ظرفیت لنگر نهایی و لنگر خمشی تیر خواهد شد بلکه ظرفیت اتلاف انرژی کل، سختی و مقاومت اتصال را نیز بهبود خواهد بخشید. همچنین این سیستم می تواند بعنوان یک روش بهسازی برای سازه های موجود در برابر زلزله مورد استفاده قرار گیرد.

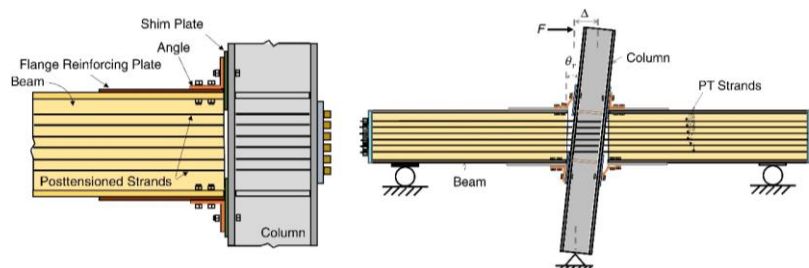
در این تحقیق سعی شده است ضمن اعتبار سنجی نمونه اتصال صلیبی تیر به ستون طبق مقالات گارلوک [۱۲]، رایکلز [۴]، مرادی [۱۳]، چند پارامتر تاثیرگذار بر پاسخ اتصالات پس کشیده فولادی انتخاب گردد و مطالعه پارامتریک بر روی نمونه اتصالات صحت سنجی شده با تعداد طبقات ۳ و ۹ طبقه مطابق ساختمان های گزارش SAC بر طبق نمونه های طراحی شده گارلوک [۱۴] انجام شود و با استفاده از آنالیز حساسیت مطابق شاخص های پراکندگی و استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم افزار OPENSEES روشی جهت تدوین شاخص کارایی برای این نوع اتصالات ارائه شود.



شکل ۱: الف) یک قاب مرکز گرا با کابلهای پس کشیده به همراه نبشی ها به عنوان میراگر انرژی، ب) یک اتصال بیرونی مرکز گرا از قاب در حال بارگذاری به همراه نمودار لنگر-دوران [۱۲].

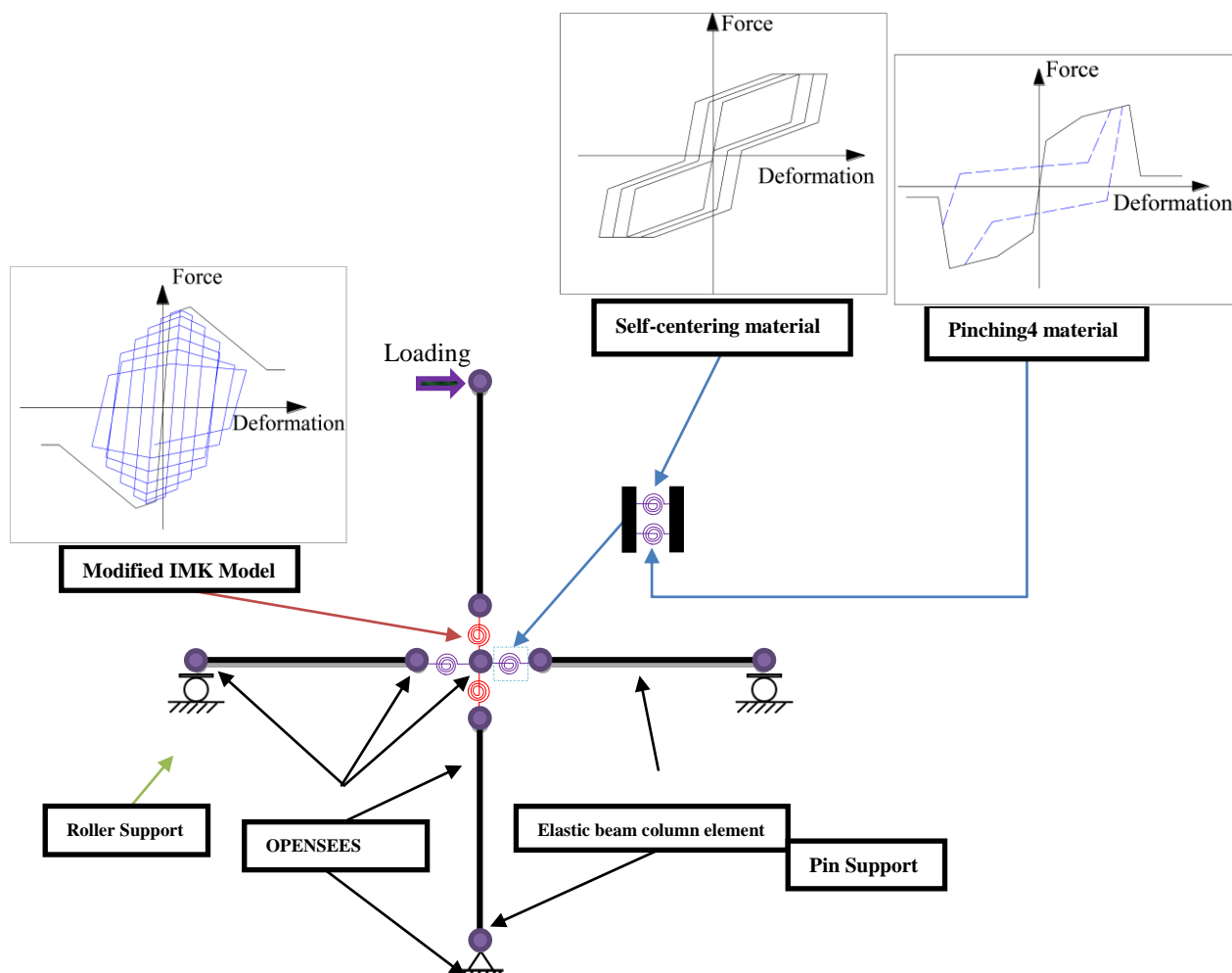
## ۲- اعتبار سنجی

مدل های مورد بررسی در این تحقیق پنج مدل اتصال صلیبی مطابق شکل (۲) می باشد، از جمله این مدل ها، مدل PC2, PC3, PC4 رایکلز [۴]، مدل 20s-18 گارلوک [۱۲] و مدل های M5, M1 مرادی [۱۳] می باشد. این اتصالات شامل کابل ها و پیچ های پر مقاومت، نبشی بالا و نشیمن، ورق پیشانی همچنین ورق های تقویتی بال تیر می باشند. تمامی اعضا به غیر از کابل ها و پیچ ها از فولاد ASTM A572 رده ۵۰ ساخته شده اند. پیچ ها از فولاد ASTM A490 و کابل ها از فولاد ASTM A416 هستند [۱۳، ۱۲، ۴]. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون المانها به ترتیب ۲۰۰ GPa و ۰٫۳ در نظر گرفته شده است. مدل سازی مطابق شکل (۳) در نرم افزار OPENSEES [۱۹] انجام شده است. در مدل سازی از المان های الاستیک برای تیر و ستون استفاده شده و در محل اتصال تیر به ستون از المان های موازی با مصالح Self-centering و Pinching4 [۱۹] و اتصال ستون ها با استفاده از مصالح Ibarra-Krawinkler [۱۷، ۱۹] تعریف شده است، تیرها بر روی تکیه گاه غلتکی و ستون بر تکیه گاه مفصلی قرار دارد. چهار مدل اول با نمودار چرخه ای با توجه به پروتکل های بارگذاری در مراجع ذکر شده [۱۲، ۴] و دو مدل مرادی [۱۳] با توجه به منحنی رفتاری و تحلیل استاتیکی غیر خطی مورد ارزیابی قرار گرفته اند.



شکل ۲: شکل شماتیک اتصال مورد بررسی و نحوه بارگذاری آن در آزمایشگاه [۱۳].

شکل (۳) چگونگی مدل سازی اتصال مرکز گرا در نرم افزار OPENSEES را بطور کامل شرح داده است. این اتصال در انتهای تیرها بر روی تکیه گاههای غلتکی و ستون در قسمت پایین با تکیه گاه مفصلی مقید شده است. بارگذاری این نوع اتصالات در انتهای بالایی ستون اعمال خواهد شد. همانطور که در قسمت قبل اشاره شده است برای سه نمونه رایکلز [۴] و یک نمونه اتصال گارلوک [۱۲] از تحلیل چرخه‌ای مطابق با پروتکل بارگذاری چرخه‌ای برای صحت سنجی این اتصالات استفاده شده و همچنین برای دو نمونه اتصال مرادی [۱۳] براساس تحلیل استاتیکی غیر خطی اعتبار سنجی نمونه های مورد مطالعه انجام شده است.



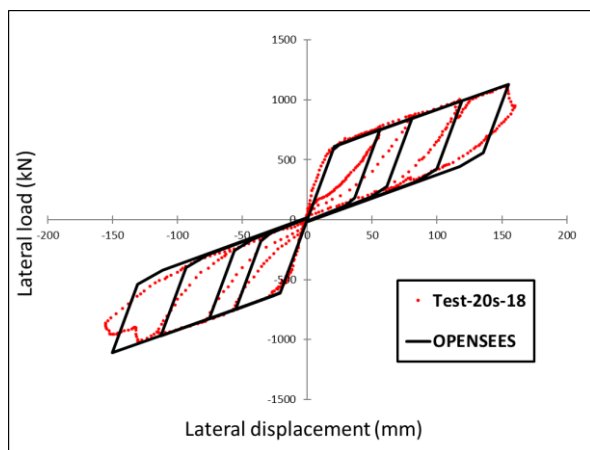
شکل ۳: شکل شماتیک اتصالات مورد بررسی در نرم افزار OPENSEES.

جدول ۱: نامگذاری و ترتیب اتصالات مورد بررسی در این تحقیق. [۴، ۱۲، ۱۳]

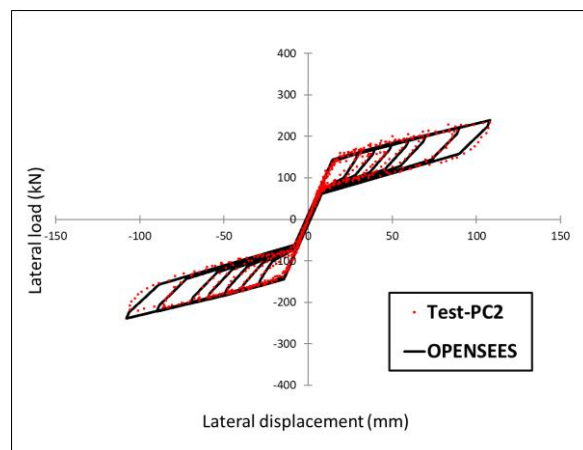
نام	ترتیب
M1	مدل ۱
M5	مدل ۲
20s-18	مدل ۳
PC2	مدل ۴
PC3	مدل ۵

PC4	مدل ۶
-----	-------

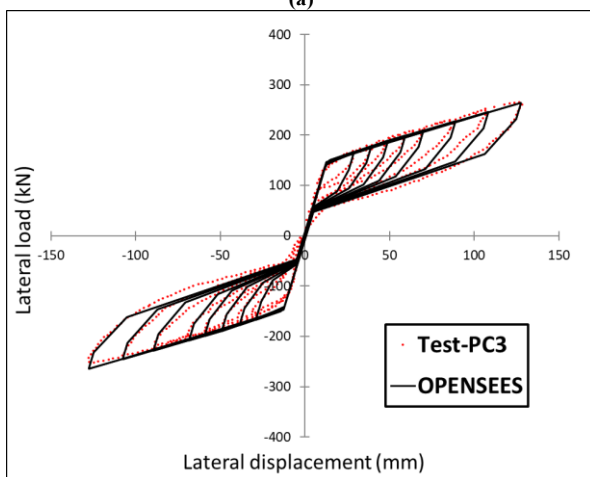
با توجه به نامگذاری و ترتیب مدل های مورد مطالعه در جدول (۱) مطابق اشکال (۱) شش نمونه اتصال صلیبی اعتبار سنجی شده ارائه شده است. در این اشکال نمونه های مرجع با رنگ قرمز و نمونه های مدل سازی شده در OPENSEES با رنگ سیاه مشخص شده اند.



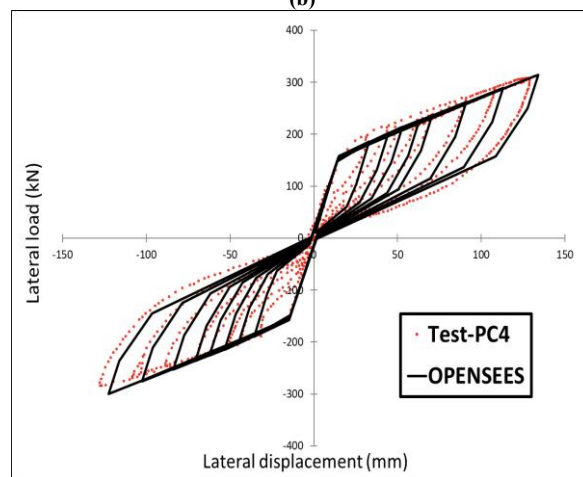
(a)



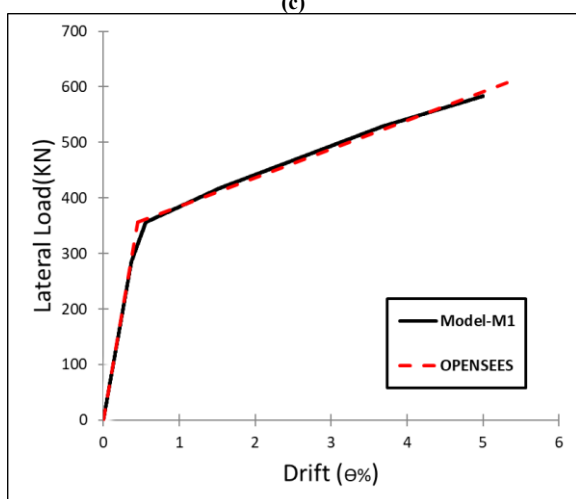
(b)



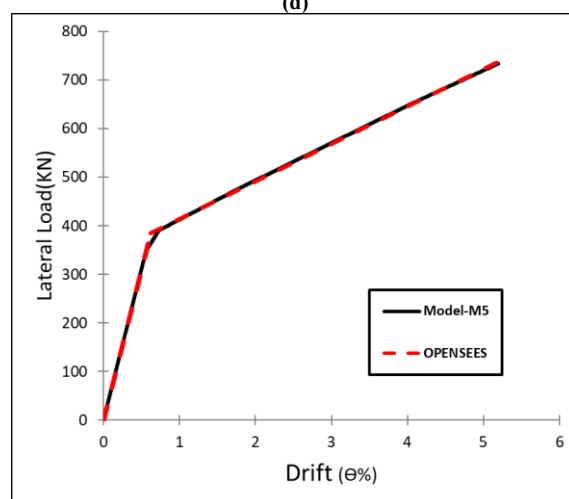
(c)



(d)



(e)

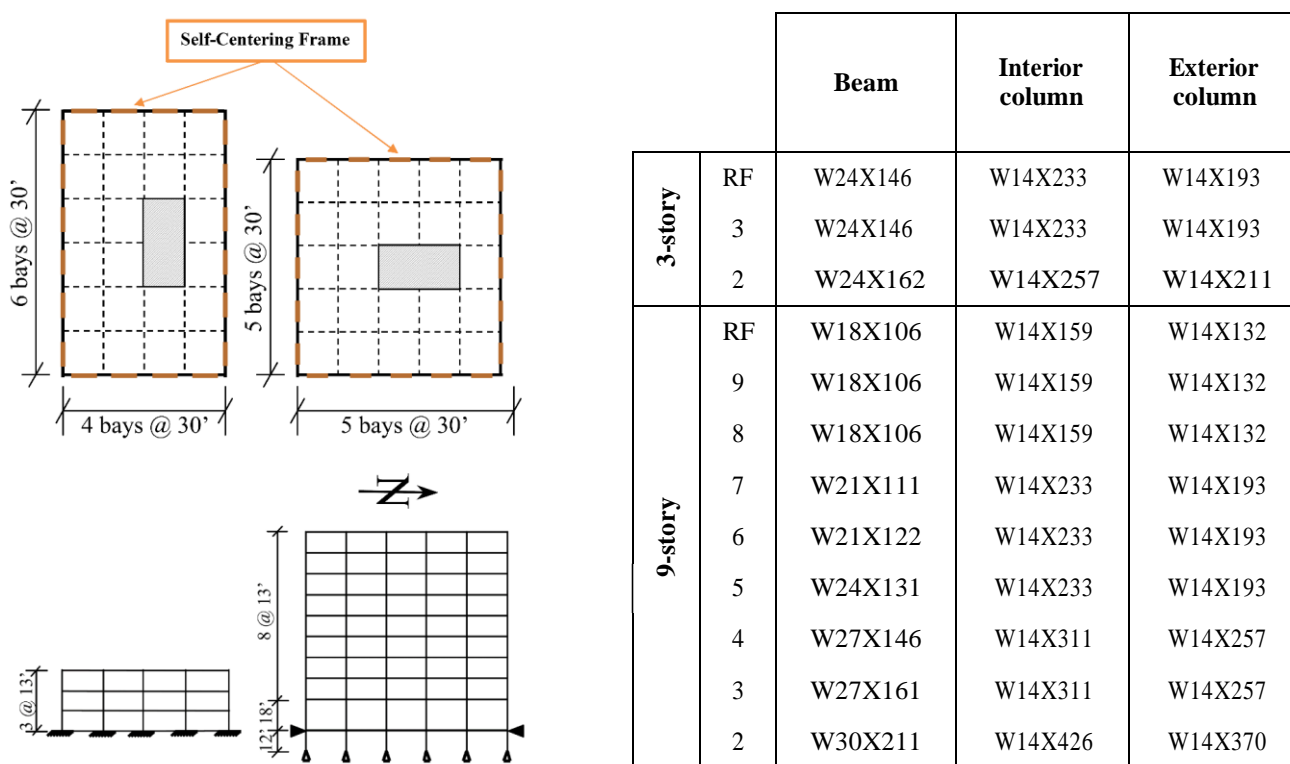


(f)

شکل ۴: صحت سنجی شش نمونه مورد ارزیابی با نرم افزار OPENSEES. به ترتیب (a) نمودار چرخه ای مدل گارلوک (b تا d) نمودار چرخه ای مدل های رایکلر (e, f) نمودار رفتاری مدل های مرادی.

## ۳- مدل‌های مورد ارزیابی

با توجه به صحت سنجی شش نمونه اتصال در نرم افزار OPENSEES این اتصالات در قابهای پیرامونی دو ساختمان سه بعدی قرار داده شده‌اند. این ساختمان‌های سه بعدی با تعداد طبقات ۳ و ۹ طبقه گزارش SAC [۱۵]، در نظر گرفته شده است. بنابراین برای هر دو ساختمان مورد نظر شش اتصال به عنوان عناصر مقاوم لرزه ای در قابهای پیرامونی قرار داده شده اند و بطور کلی ۱۸ مدل برای انجام ارزیابی و تحلیل انتخاب شده است. این دو ساختمان بر طبق فلوجارت طراحی گارلوک در سال ۲۰۰۷ [۶] که برای این نوع اتصالات ارائه کرده است طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقاطع تیر و ستون در هر دو ساختمان مطابق شکل (۵) ارائه شده است. در مدل سازی از مقاطع W در هر طبقه برای تیرها و ستون‌ها استفاده شده است، همچنین در مدل سازی در OPENSEES [۱۹] از سازه دو بعدی معادل همراه با leaning column که اثر P-Delta را معادل سازی می نماید، استفاده شده است. اتصالات مرکزگرا مطابق شکل (۵) در هر چهار قاب خارجی قرار دارند. مدل‌های مورد بررسی ساختمان اداری در شهر لس آنجلس با خطر لرزه خیزی زیاد و دارای خاک نوع سخت می باشند. بارگذاری این دو ساختمان‌ها از گزارش SAC تبعیت می کنند. [۱۵]



شکل ۵: دو مدل ساختمان‌های مورد ارزیابی در این تحقیق مطابق گزارش SAC. [۱۵، ۱۴]

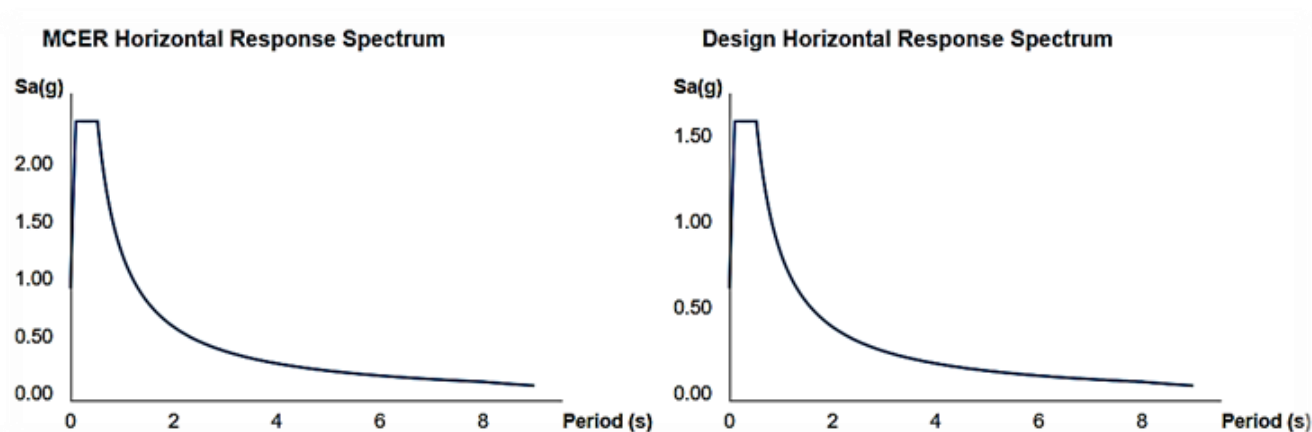
## ۴- پارامترهای لرزه ای در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

بر اساس گزارش FEMA P695 [۱۶]، ۱۱ زلزله دور از گسل انتخاب و با توجه به دو ساختمان مورد بررسی ضرایب مقیاس مطابق آیین نامه زلزله آمریکا (ASCE7-16) [۱۸]، تعیین و مطابق جدول زیر ارائه شده است. مطابق جدول (۲) ۱۱ رخداد زمین لرزه انتخابی با ذکر بزرگا، نام، تاریخ و محل وقوع رخداد آنها همچنین در دو ستون آخر ضریب مقیاس برای هر زلزله و هر ساختمان به طور کامل ارائه شده است. در شکل (۶) طیف طراحی بر اساس ناحیه مورد نظر که در لس آنجلس می باشد مطابق گزارشات سایت USGS [۲۰] ارائه گردیده که از این طیف برای مقیاس کردن رخدادها مطابق آیین نامه لرزه ای آمریکا [۱۸] استفاده شده است. شکل شماره (۷) پارامترهای لرزه ای مورد نیاز تحلیل بر مبنای ASCE7-16 [۱۸] را نشان می دهد.

جدول ۲: زلزله های در نظر گرفته شده برای تحلیل تاریخچه زمانی و ضرایب مقیاس آنها. [۱۶]

ID No.	EARTHQUAKE			Recording Station			Scale Factor	
	M	YEAR	Name	Name	Owner	PGA	3 Story	9 Story
1	6.7	1994	Northridge	Beverly Hills-Mulhol	USC	0.516	1.689	2.458
2	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	USC	0.482	2.003	3.204
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	ERD	0.822	1.714	2.879
4	7.1	1999	Hector Mine	Hector	SCSN	0.336	3.437	3.437
5	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	UNAMUCSD	0.351	3.250	3.250
6	6.5	1979	Imperial Valley	ElCentroArray#11	USGS	0.379	4.403	4.403
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	CUE	0.509	3.521	3.699
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	CUE	0.243	3.803	4.142
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	ERD	0.357	2.410	2.323
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	KOERI	0.218	9.878	12.456
11	7.3	1992	Landers	Yermo FireStation	CDMG	0.244	4.232	4.232

در شکل (۶) طیف طراحی براساس ناحیه مورد نظر که در شهر لس آنجلس می باشد مطابق گزارشات USGS [۱۸] ارائه شده است که از این طیف برای مقیاس کردن رخدادهای مطابق آیین نامه لرزه ای آمریکا [۱۶] در مراحل تحلیل سازه های مورد نظر استفاده می شود.



شکل ۶: طیف DBE و MCE لس آنجلس بر مبنای ASCE7-16. [۲۰]

Search Information		Basic Parameters		
Address:	Los Angeles, CA, USA	Name	Value	Description
Coordinates:	34.0522342, -118.2436849	S <sub>S</sub>	1.974	MCE <sub>R</sub> ground motion (period=0.2s)
Elevation:	285 ft	S <sub>1</sub>	0.703	MCE <sub>R</sub> ground motion (period=1.0s)
Timestamp:	2020-02-29T23:03:10.093Z	S <sub>MS</sub>	1.974	Site-modified spectral acceleration value
Hazard Type:	Seismic	S <sub>M1</sub>	-	Site-modified spectral acceleration value
Reference Document:	ASCE7-16	S <sub>DS</sub>	1.279	Numeric seismic design value at 0.2s SA
Risk Category:	I	S <sub>D1</sub>	0.853	Numeric seismic design value at 1.0s SA
Site Class:	D			

شکل ۷: پارامترهای لرزه ای مورد نیاز تحلیل بر مبنای ASCE7-16. [۲۰]



شکل شماره (۷) بر مبنای ASCE7-16 [۱۸] پارامترهای لرزه ای مورد نیاز تحلیل را نشان می دهد. این پارامترهای نیاز لرزه ای برای انجام مقیاس کردن زمین لرزه های منتخب همچنین تحلیل مدل در نرم افزار OPENSEES را فراهم خواهند آورد.

## ۵- ارزیابی شاخص پراکندگی

هدف از این تحقیق آن است که، با استفاده از متدولوژی شاخص های پراکندگی روشی برای تدوین شاخص کارایی بدست آورده شود. این شاخص ها در تعیین حساسیت داده های پاسخ در هر ساختمان و تعیین مدل کارا بر حسب مدلی که شامل کمترین پراکندگی است مورد نیاز خواهند بود. برای این هدف به تعریف هفت شاخص پراکندگی پرداخته شده است که هر کدام با توجه به نقاط ضعف و قوتشان در تدوین شاخص کارایی کلی مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. شاخص های آمار توصیفی، مانند شاخص های تمرکز و یا اندازه های پراکندگی به منظور شناخت جامعه آماری به کار می روند. ولی استفاده از هر یک به تنهایی ممکن است نتیجه مناسبی نداشته باشد. توجه همزمان به معیارهای تمرکز و پراکندگی کمک می کند که جامعه آماری شناخته شده و رفتار آن بهتر قابل مقایسه و تحلیل باشد. در ادامه به بررسی و شناخت هفت شاخص پراکندگی مورد ارزیابی در این تحقیق پرداخته می شود.

**دامنه تغییرات:** یکی از روش های اندازه گیری پراکندگی بین داده ها، محاسبه «دامنه تغییرات» (Range) است. این شاخص، حداکثر میزان پراکندگی را نشان می دهد و برای محاسبه آن کافی است که تفاوت بین بزرگترین و کوچکترین مقدار را بدست آورد. اگر داده های  $a1, a2, a3, a4, a5$  باشند محاسبه دامنه تغییرات به صورت رابطه (۱) است.

$$R = \text{Max}(a1, a2, a3, a4, a5) - \text{Min}(a1, a2, a3, a4, a5) \quad (1)$$

**دامنه میان چارکی:** برای آنکه بتوان مشکل تاثیر پذیری دامنه تغییرات از مقدارهای بزرگ و کوچک را از بین برد، می توان فاصله بین بزرگترین و کوچکترین مقدار را براساس چارکها محاسبه کرد. به این ترتیب برای داده هایی که دارای مقدارهای دور افتاده هستند، فاصله بین چارک اول ( $Q1$ ) و سوم ( $Q3$ )، می تواند برآورد بهتری برای محاسبه حداکثر پراکندگی داده ها باشد. به این شاخص «دامنه میان چارکی» (InterQuartile Range - IQR) می گویند. و مطابق رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (2)$$

**متوسط قدر مطلق انحرافات از میانگین:** در شاخص قبلی پراکندگی را نسبت به نقطه ای خاص در نظر نمی گیرند. برای رفع این مشکل بهتر است نقطه ای از داده ها را به عنوان مرکز در نظر گرفت و فاصله بقیه داده ها را نسبت به آن سنجید. در محاسبه اندازه متوسط قدر مطلق انحرافات، اگر نقطه مرکزی، میانگین در نظر گرفته شود به آن «متوسط قدر مطلق انحرافات از میانگین» (Mean Deviation - MD) گفته می شود. البته ممکن است آن را با «قدر مطلق فاصله» (Absolute Difference from Mean - A.D) نیز نشان داد. برای محاسبه این شاخص مطابق رابطه (۳) کافی است میانگین داده ها ( $\bar{X}$ ) محاسبه شده و قدر مطلق فاصله آن ها نسبت به میانگینشان ثبت شود، سپس میانگین این فاصله ها حساب شود. در این رابطه  $n$  تعداد داده ها،  $X_i$  داده های مورد بررسی، و ( $\bar{X}$ ) میانگین داده ها می باشند. اگر به جای میانگین از میانه به عنوان نقطه مرکزی استفاده شود به آن متوسط قدر مطلق انحرافات (Median Absolute Difference - MAD) از میانه می گویند و مطابق رابطه (۴) محاسبه خواهد شد.

$$A.D = MD = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (3)$$

$$MAD = \frac{\sum |x_i - m|}{n} \quad (4)$$

**واریانس:** از آنجایی که کارهای محاسباتی نظیر انتگرال و مشتق برای تابع قدر مطلق با مشکلاتی همراه است، برای نامنفی کردن فاصله ها نسبت به میانگین، می توان از مربع آن ها استفاده کرد. به این صورت محاسبه میزان پراکندگی، «واریانس» (Variance)

می‌گویند. اگر میانگین جامعه آماری را با  $\mu$  نشان داده شود، شکل محاسباتی برای واریانس که با نماد  $Var$  یا  $\sigma^2$  مشخص می‌شود، به صورت رابطه (۵) است.

$$\sigma^2 = Var(x) = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n} \quad (5)$$

**انحراف معیار:** با توجه به اهمیت واحد اندازه‌گیری داده‌ها و شاخص مورد نظر کافی است که جذر واریانس را محاسبه کنیم تا واحد اندازه‌گیری این شاخص پراکندگی با واحد اندازه‌گیری داده‌ها یکی شود. به حاصل این کار «انحراف معیار» (Standard Deviation) می‌گویند. انحراف معیار جامعه آماری با  $\sigma$  و به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (6)$$

**ضریب تغییرات:** برای مقایسه پراکندگی دو گروه داده که با واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی جمع‌آوری شده باشند، از «ضریب تغییرات» (Coefficient of Variation- CV) استفاده می‌شود زیرا معیاری است که میزان نسبی پراکندگی را نشان می‌دهد. رابطه محاسباتی ضریب تغییرات به صورت رابطه (۷) می‌باشد.

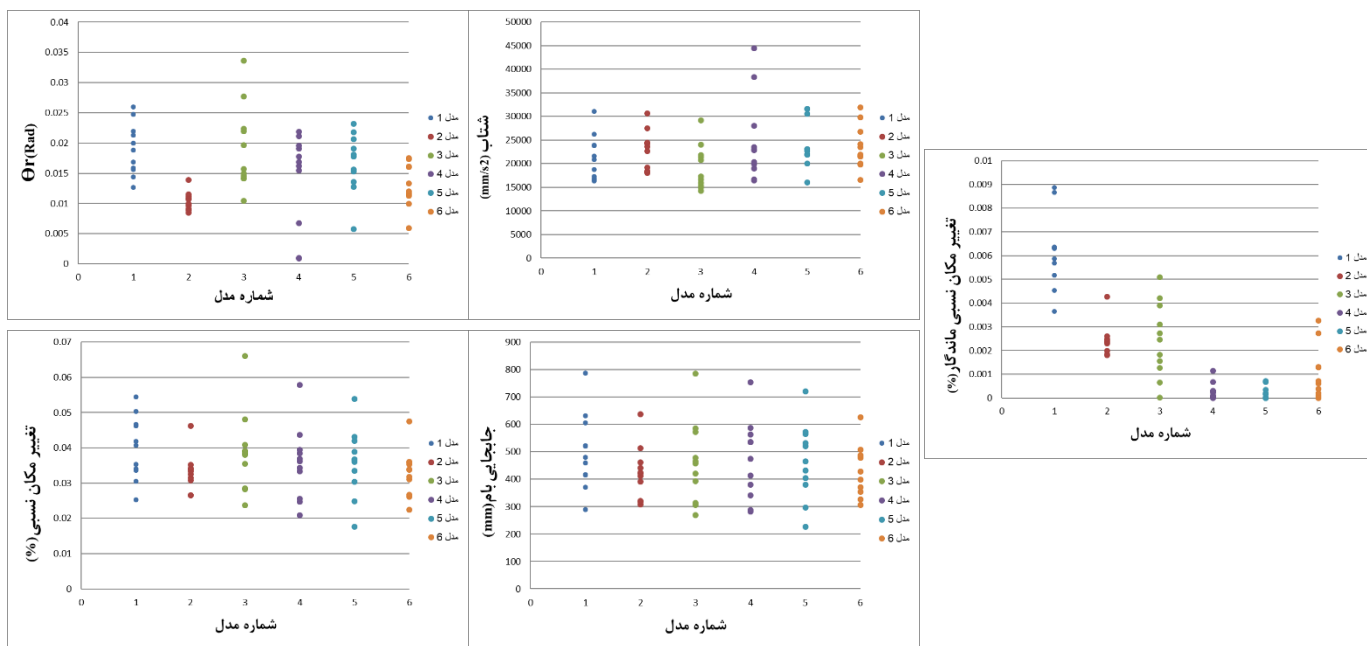
$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (8)$$

## ۶- تدوین شاخص کارایی برای اتصالات مرکز گرای پس کشیده

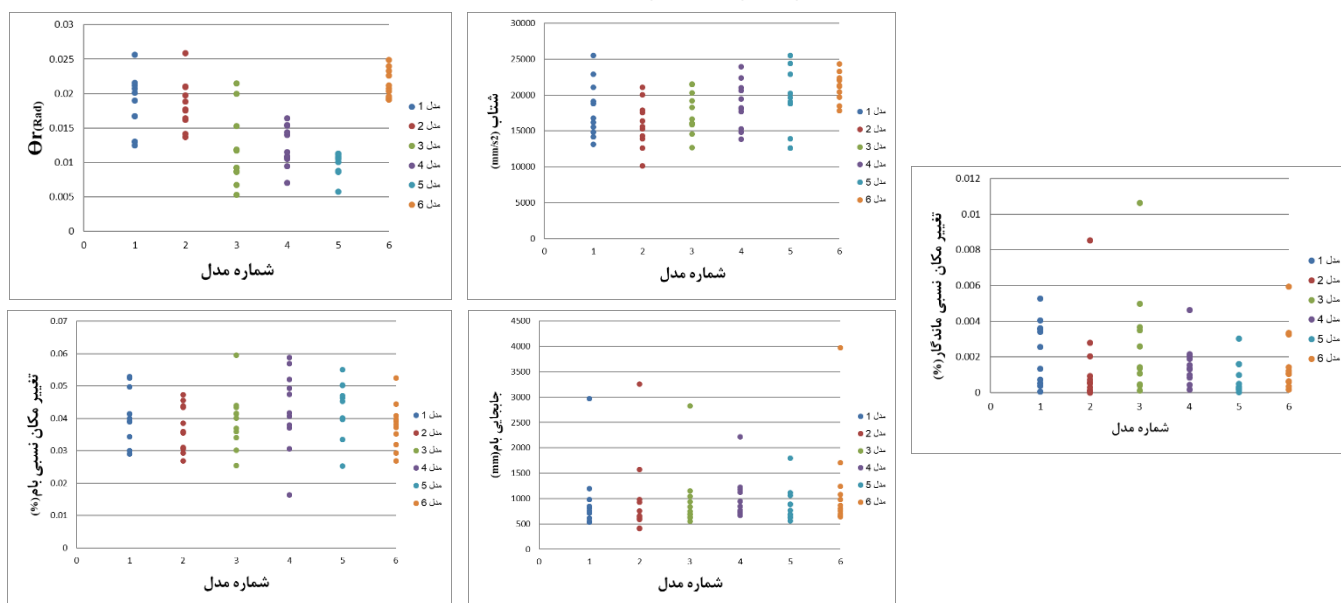
با توجه به شش مدل انتخابی از اتصالات مرکزگرا این اتصالات در قابهای پیرامونی ساختمان‌های ۳ و ۹ طبقه قرار داده شده‌اند و با توجه به روال طراحی انجام شده براساس روش گارلوک [۱۱] با دو ساختمان مورد ارزیابی آن، راستی آزمایی<sup>۸</sup> شده است و خروجی‌های مورد نظر بعد از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی در OPENSEES، استخراج و مطابق شکل‌های (۸ و ۹) ارائه شده است. بعد از اطمینان از مدل سازی و انجام تحلیل تاریخچه زمانی، خروجی پنج پاسخ برای محاسبه شاخص‌های پراکندگی استخراج شده‌اند. این پنج پارامتر پاسخ به ترتیب باز شدگی اتصال ( $\theta_r$ )، شتاب بام، تغییر مکان نسبی ماندگار، تغییر مکان نسبی بام، جابجایی طبقه بام که حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی تحت ۱۱ زلزله دور از گسل می‌باشند مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به این که هدف آنالیز حساسیت مدل‌های مورد بررسی تحت این زلزله‌ها است، برای تدوین شاخص کارایی با بهره‌گیری از هفت شاخص پراکندگی مطابق شکل‌های (۱۰ و ۱۱) تلاش به محاسبه تحلیل پارامتریک موازی بین معیارهای پراکندگی خواهد شد. داده خروجی با توجه به اهمیت آن از جهت ترتیب، تجمیع، تمرکز و بهره‌وری مابین اولویت‌های پراکندگی امتیاز دهی شده‌اند و از وزن دهی هر یک از ۳۵ عامل تاثیر گذار در این آنالیز به عنوان ضریب وزنی تبعیت می‌کنند. خروجی این تحلیل عددی می‌باشد که بیانگر سازه منتخب به عنوان کارا ترین مدل برگزیده خواهد بود. بنابراین شاخص کارایی برای اتصالات مرکز گرای پس کشیده به این شکل بیان خواهد شد که هر ساختمانی که بعد از اعمال زلزله‌های منتخب و تعیین پارامترهای پاسخ انتخابی دارای کمترین حساسیت نسبت به ورودی زلزله طبق آنالیز پراکندگی باشد، دارای کارایی بهتری خواهد بود.

داده‌های مربوط به آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی برای پنج پاسخ مورد نظر تحت ۱۱ زلزله منتخب در شکل‌های (۸ و ۹) نمایش داده شده است.

<sup>8</sup> Calibration



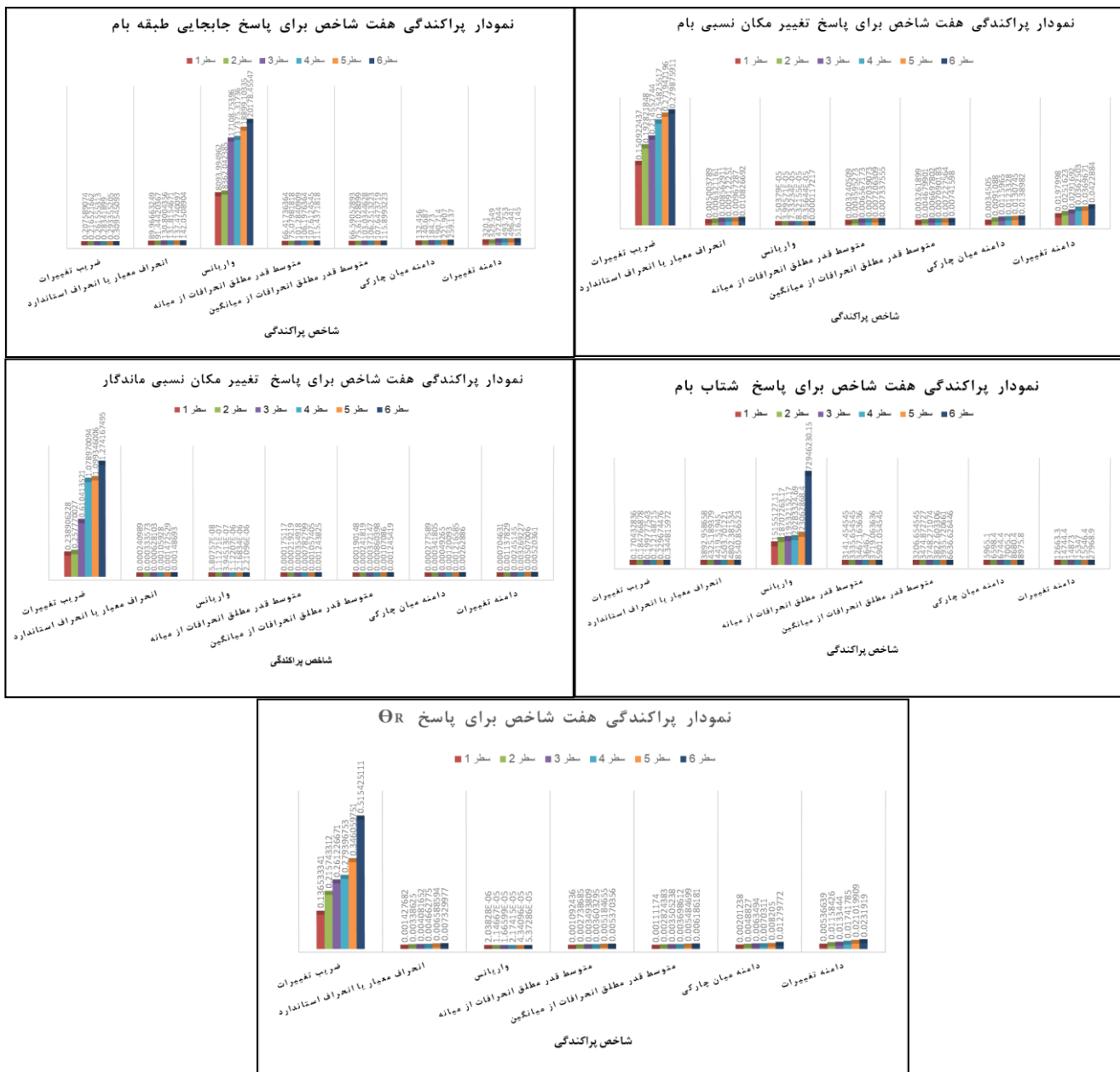
شکل ۸: داده های مربوط به پنج پاسخ ساختمان سه طبقه بر حسب ۱۱ زلزله دور از گسل.



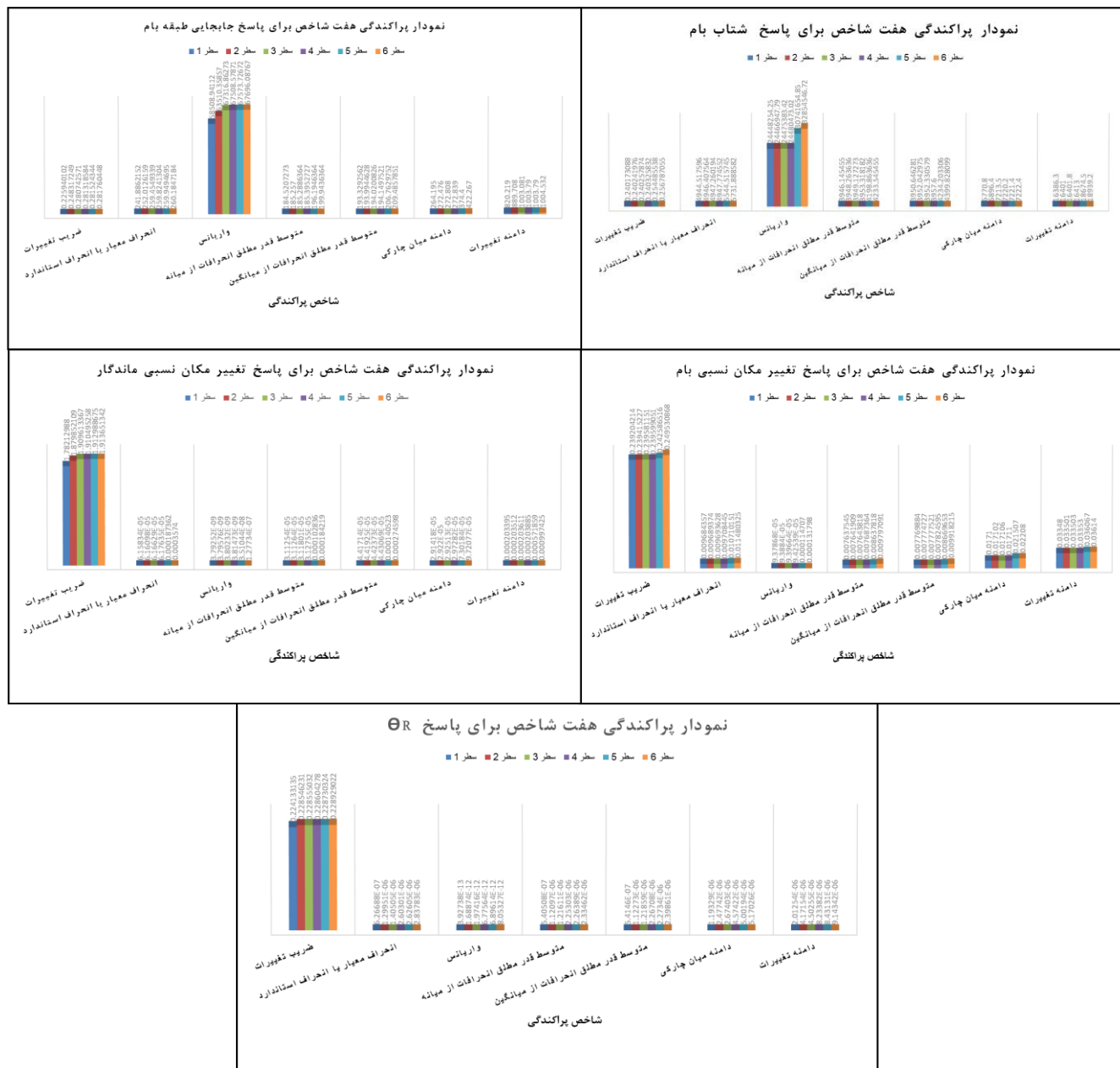
شکل ۹: داده های مربوط به پنج پاسخ ساختمان نه طبقه بر حسب ۱۱ زلزله دور از گسل.

مطابق داده های نشان داده شده در شکل ها (۸ و ۹) برای هر ساختمان مورد بررسی، پنج نمودار بدست آمده است که نشان دهنده خروجی پارامترهای تحلیل تاریخچه زمانی در برابر پنج پارامتر پاسخ می باشد. در بعضی از رکورد ها، خرابی ساختمان به علت تغییر مکان های زیاد مشاهده شده است که این مطلب با توجه به مطالعات گارلوک [۱۱] کاملاً طبیعی می باشد. از این خروجی ها در مرحله بعدی برای محاسبه هفت شاخص پراکندگی استفاده خواهد شد.

مطابق شکل های (۱۰ و ۱۱)، هفت شاخص پراکندگی را برای پنج پارامتر پاسخ محاسبه خواهد شد و در نمودار های میله ای بصورت کیفی و کمی برای دو ساختمان مذکور گزارش شده است. سطرهای یک تا شش نشان دهنده کمترین تا بیشترین مقدار پراکندگی برای هر شاخص بر حسب مدل های مورد بررسی می باشند و اعداد در هر ستون، مقادیر پراکندگی را در هر شاخص بیان می کند.



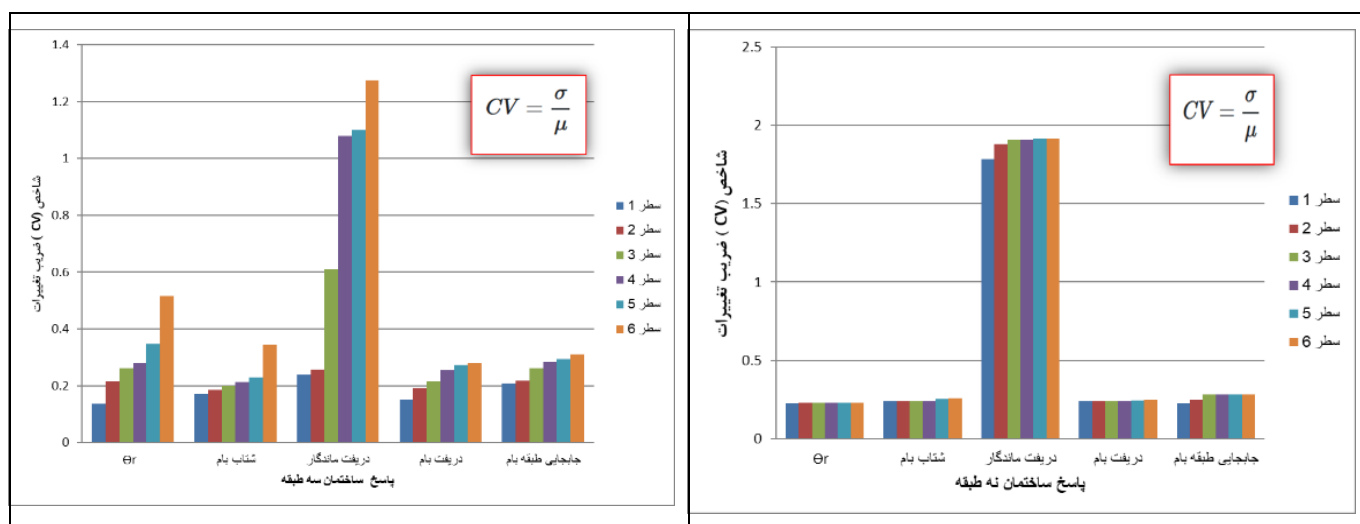
شکل ۱۰: نمودار های هفت شاخص پراکندگی برای ساختمان سه طبقه تحت ۱۱ زلزله دور از گسل.



شکل ۱۱: نمودارهای هفت شاخص پراکندگی برای ساختمان نه طبقه تحت ۱۱ زلزله دور از گسل.

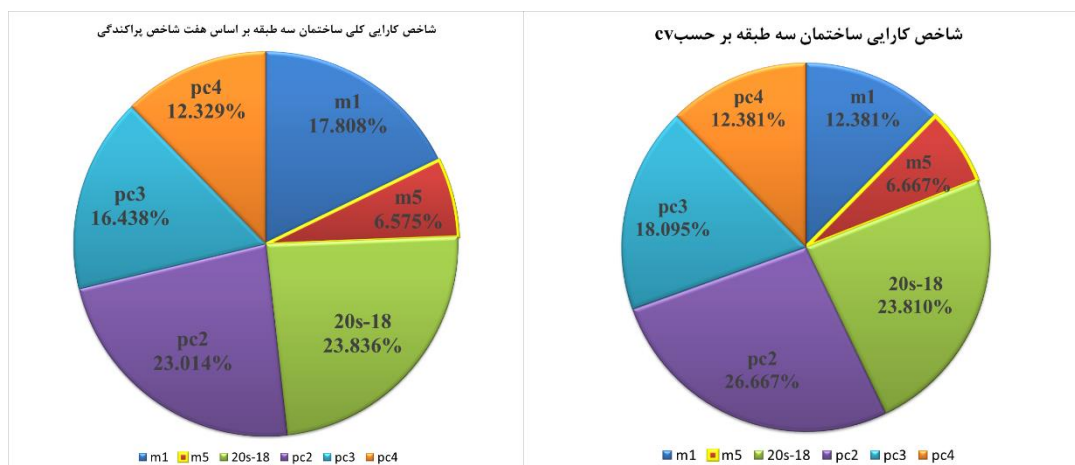
مطابق شکل های (۱۰ و ۱۱) مقادیر پراکندگی برای دو ساختمان مورد بررسی ارائه شده است و بر طبق آن معیار کلی برای تدوین شاخص کارایی بدست خواهد آمد. طبق این شکل ها در دو ساختمان ۳ و ۹ طبقه در مجموع تحت ۱۱ زلزله دور از گسل مقادیر هفت شاخص پراکندگی برای پنج پارامتر پاسخ محاسبه شده است. شاخص کلی کارایی در این مرحله محاسبه خواهد شد. روند تعیین شاخص بدین صورت است که در ۶ مدل ساختمان سه طبقه و همچنین ۶ مدل ساختمان نه طبقه این شاخص ها محاسبه می شوند و میزان هر کدام از پراکندگی ها از کم به زیاد تعیین خواهند شد. سپس با توجه به شدت و حساسیت مدل ها امتیاز دهی می شوند هر مدل دارای امتیاز یک تا شش خواهد بود ما بین این پاسخ ها برای هر سازه به میزان ۳۵ عامل تاثیر گذار وزن دهی می شوند و حاصل عددی خواهد بود که قرار است در انتها میزان کارایی آن سنجیده شود. هرچند این اعداد در هر مدل کمتر باشد نشان دهنده پراکندگی کمتر پاسخ ها نسبت به زلزله های مختلف می باشند، که این پاسخ ها حاصل تجمیع تمام زلزله ها در مرحله قبل هستند.

برای تدوین شاخص کارایی با توجه به روال قبلی طراحی، تحلیل سیستم و استفاده از آنالیز پراکندگی سعی بر آن شده که از تک شاخصی به نام CV که نماینده سایر شاخص‌ها می باشد استفاده شود. با توجه به نقش همه داده‌ها در محاسبه میزان پراکندگی، ثبات در هنگام تغییر واحد داده‌ها، امکان مقایسه بین دو گروه از داده‌ها با واحدهای متفاوت و همچنین وجه مقیاس بودن آن مابین همه پاسخ‌ها شاخص کارایی فقط بر اساس تک شاخص CV مطابق با شکل (۱۲) مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ضمن کاهش زمان آنالیز و کاهش حجم داده‌ها بتوان به عنوان شاخصی کارا آن را پذیرفت. ابتدا جذر واریانس محاسبه خواهد شد تا واحد اندازه‌گیری این شاخص پراکندگی با واحد اندازه‌گیری داده‌ها یکی شود. سپس می توان با توجه به مزیت اول که هم دیمانسیون بودن واحد‌های داده‌های ورودی و آنالیز انجام شده می باشد آن را تقسیم بر میانگین نمود. از آنجایی که صورت و مخرج این کسر هم واحد هستند، حاصل کسر مقداری بدون واحد است که به صورت درصد نیز می‌تواند بیان شود. در انتها برای شاخصی که از دیدگاه آنالیز آماری داده‌ای بی بعد و مقیاس شده مابین تمامی پاسخ‌ها باشد، دید کلی‌ای به نتیجه تحقیق ما خواهد داد و روند آنالیز شاخص کارایی را تسریع خواهد کرد. بنابراین برای گام آخر تنها شاخص CV بررسی می‌شود و در ادامه تحلیل داده‌ها در نمودار میله‌ای و دایره‌ای نشان داده شده است. در پایان با توجه به همه نتایج قبلی به تدوین شاخص کارایی از ابتدای مدل سازی تا انتخاب مدل برگزیده در این تحقیق پرداخته شده است. همچنین سطرهای یک تا شش نشان دهنده کمترین تا بیشترین مقدار پراکندگی برای هر شاخص بر حسب مدل‌های مورد بررسی می‌باشند.

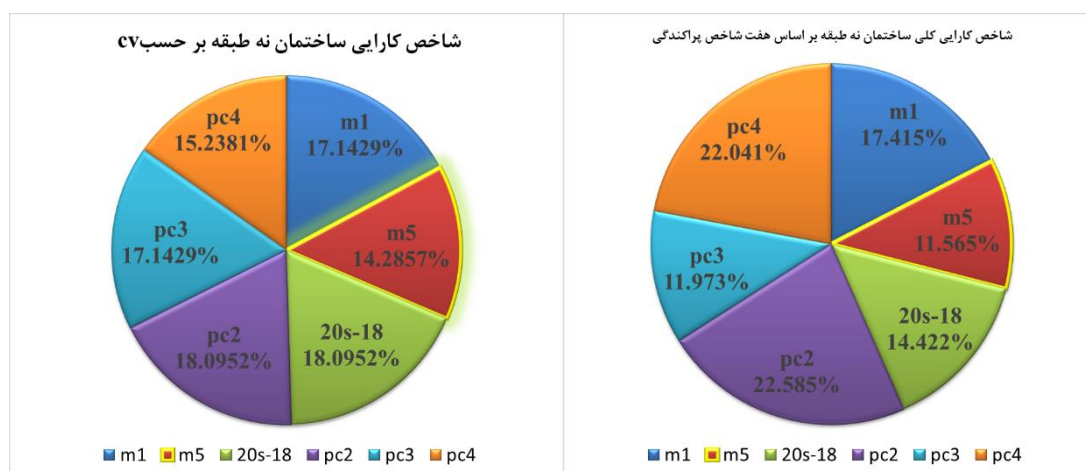


شکل ۱۲: نمودارهای شاخص CV برای دو ساختمان مورد بررسی در پنج پارامتر پاسخ انتخابی.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده در پارامترهای شاخص‌های پراکندگی طبق نمودارهای (۱۰ و ۱۱) میزان تغییرات پاسخ در ضریب تغییرات بسیار مشهود می‌باشد. بنابراین مطابق شکل (۱۲) روند تصمیم‌گیری برای تحلیل داده‌ها به علت کاهش حجم و زمان محاسبات به سمت تک شاخص پراکندگی معطوف شده است. این شکل‌ها شاخص CV را برای پنج پارامتر پاسخ در دو ساختمان نشان می‌دهند. علت این امر مقایسه با شاخص کارایی کلی و دیدن حساسیت تحلیل می‌باشد. همچنین بر طبق این شکل‌ها پاسخ دررفت ماندگار بیشتر حساسیت را در ضریب تغییرات از خود نشان داده است. از این رو برای مقایسه شاخص کل کارایی با شاخص CV که گام‌های تعیین شاخص کارایی را کوتاه‌تر خواهد کرد، این دو خروجی همزمان در نمودارهای دایره‌ای (۱۳ و ۱۴) نشان داده شده است.

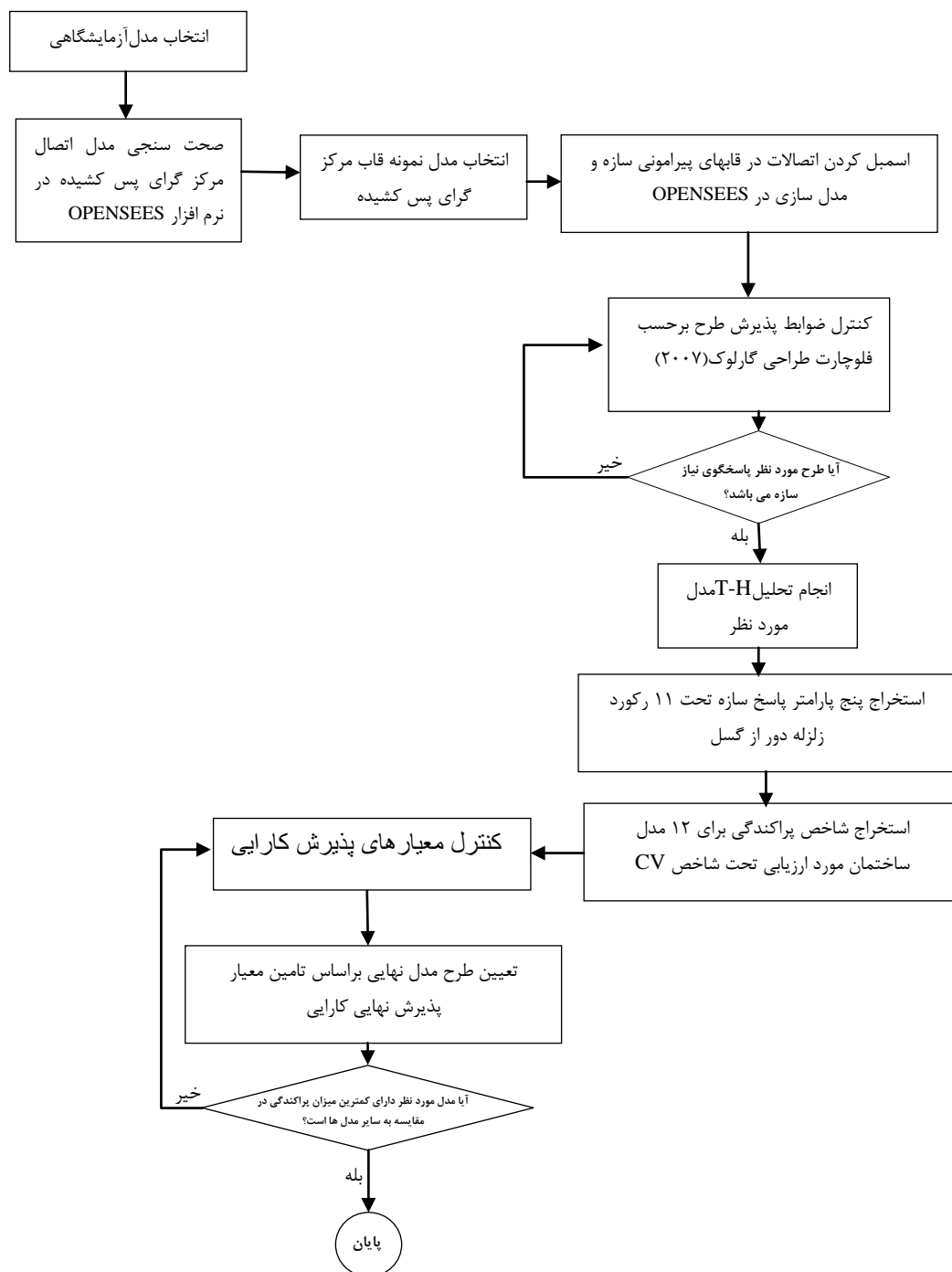


شکل ۱۳: تعیین مدل برگزیده شاخص کارایی مطابق با تمامی شاخص ها و شاخص CV برای ساختمان سه طبقه.



شکل ۱۴: تعیین مدل برگزیده شاخص کارایی مطابق با تمامی شاخص ها و شاخص CV برای ساختمان نه طبقه.

در نمودارهای دایره ای (۱۳ و ۱۴) میزان پراکندگی طبق هفت شاخص که مبین شاخص کلی کارایی می باشد برای شش مدل ساختمان ۳ و ۹ طبقه (در مجموع ۱۲ مدل ساختمان مرکز گرا) محاسبه شده است و به علت مقایسه میزان پراکندگی این مدل ها بصورت درصد نشان داده شده است که درصد کمتر نشان دهند میزان پراکندگی کمتر می باشد همچنین با توجه به داده های شاخص CV میزان پراکندگی ۱۲ مدل ساختمان، بر طبق این شاخص محاسبه و بصورت درصد ارائه گردیده است برای بهینه سازی زمان و حجم محاسبات و ارائه الگوی مناسب برای تدوین شاخص کارایی مقایسه ای بین دو روش تحلیل داده ها انجام شده است. بر طبق این نمودارها درصدهای مشارکت هر مدل در هر ساختمان بر حسب شاخص کل و شاخص CV ارائه شده است. نمونه ای که حساسیت کمتری در تحلیل پراکندگی از خود نشان دهد به عنوان مدل برگزیده انتخاب خواهد شد. ارزیابی صورت گرفته نشان می دهد شاخص کارایی بر حسب معیار CV با توجه به کاهش زمان تحلیل و محاسبات نتیجه مشابه ای را با شاخص کلی نتیجه می دهد. بنابر این در نتیجه گیری تدوین شاخص کارایی از معیار ضریب تغییرات برای تعیین مدل کارا استفاده می شود. مطابق ارزیابی صورت گرفته از شش مدل اتصال در ساختمان های ۳ و ۹ طبقه مدل M5 از این دو ساختمان به عنوان مدل منتخب نتیجه شده است که پنجمین مدل از مدل های ۳۲ گانه مرادی می باشد. این مدل در ارزیابی کارایی دارای کمترین میزان پراکندگی نسبت به پنج مدل دیگر بوده است. مطابق شکل (۱۵) فلوجارت کلی برای تدوین و انتخاب مدل کارا بر اساس ارزیابی ساختمان های مرکز گرای پس کشیده ارائه شده است. در هر قسمت اگر اهداف مورد نظر تامین نشوند می بایست سازه مورد نظر اصلاح و مجدد مورد ارزیابی قرار گیرد. در انتها خروجی این فلوجارت کارترین مدل را از دیدگاه شاخص کارایی معرفی خواهد کرد.



شکل ۱۵: فلوچارت ارزیابی و تدوین شاخص کارایی ساختمان های مرکز گرای پس کشیده.

## ۷- نتیجه گیری

با توجه به هفت شاخص پراکندگی برای تدوین شاخص کارایی کلی اتصالات مرکز گرا و ارزیابی دو ساختمان ۳ و ۹ طبقه، پراکندگی داده ها مطابق با ضریب تغییرات، انحراف معیار یا انحراف استاندارد، واریانس، متوسط قدر مطلق انحرافات از میانه، متوسط قدر مطلق انحرافات از میانگین، دامنه میان چارکی و دامنه تغییرات محاسبه شده و پراکندگی داده ها مطابق با ۱۱ زلزله تحت پنج پارامتر



پاسخ که هر کدام می توانند معرف تاثیرات عناصر سازه ای و غیر سازه ای در سازه باشند محاسبه گردیده است. بر طبق ارزیابی انجام شده در این تحقیق نتیجه گیری و پیشنهادات به صورت زیر ارائه خواهد شد :

۱- بر طبق شاخص کلی کارایی، سازه ای دارای شاخص کارایی بهتری می باشد که در چرخه ارزیابی پراکندگی دارای کمترین حساسیت به زلزله و کمترین پراکندگی داده ها را از خود نشان دهد. مطابق نمودار دایره ای شکل (۱۳ و ۱۴) حاصل ۴۲۰ داده محتمل از داده های تحلیل و همچنین امتیاز دهی مدل برای ساختمان مورد بررسی بصورت درصد ارائه شده است. درصد پایین تر، نشانه کمترین پراکندگی داده ها می باشد که در سازه ۳ و ۹ طبقه مدل M5 برگزیده این ارزیابی شده اند.

۲- طبق آنالیز شاخص CV، بر اساس ۸۴ داده ورودی که میزان آن نسبت به شاخص کلی کارایی ۸۰ درصد کاهش را نشان می دهد، به نتایج مناسبی برای ساختمان ۳ و ۹ طبقه دست یافته شده است. دیدگاه تدوین شاخص در این مرحله نشان می دهد ساختمان های ۳ و ۹ طبقه، مشابه شاخص کلی کارایی مدل منتخب ارزیابی، همان M5 بوده است.

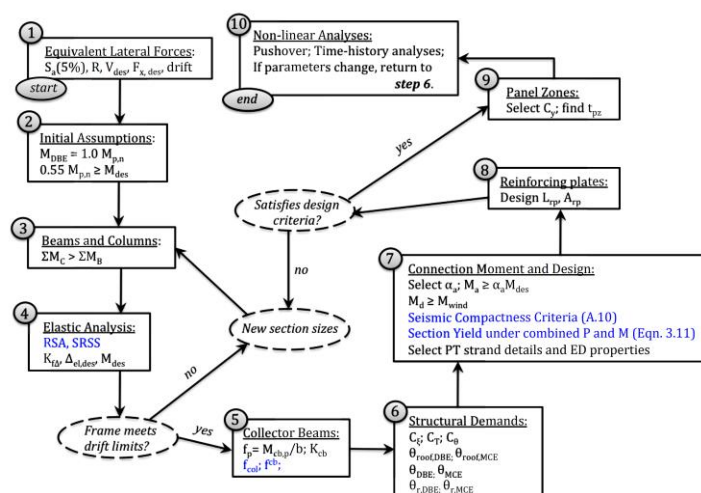
۳- با مطالعه انجام شده مطابق شکل (۱۲) برای تمامی پنج پارامتر پاسخ و مشاهده حساسیت این پاسخ ها در ضریب تغییرات، مشاهده شده است که آنالیز حساسیت داده ها در تغییر مکان نسبی ماندگار دارای بیشترین حساسیت نسبت به چهار پارامتر دیگر می باشد که کاملاً تاثیر این پارامتر را در ارزیابی کلی نشان می دهد. بطور متوسط اختلاف بین ۶۲ تا ۹۸ درصد از سایر پارامترهای پاسخ در دو ساختمان ۳ و ۹ طبقه مشاهده شده است.

۴- به عنوان پیشنهاد مطابق با شاخص جدید کارایی اثر ترکیبی ساختمان های مرکز گرا به همراه سایر وسایل مستهلک کننده انرژی را، می توان مورد ارزیابی قرار داد. بر طبق مدل های منتخب در دو ساختمان در حالت سازه ترکیبی و مرکز گرای تنها، مقایسه ای انجام شود تا بدین طریق مزایا و معایب آن از جهت افزایش و کاهش پاسخ ها، همچنین صرفه اقتصادی آن بر حسب آنالیزهای ریسک مورد ارزیابی قرار گیرد.

## ۹- پیوست ها

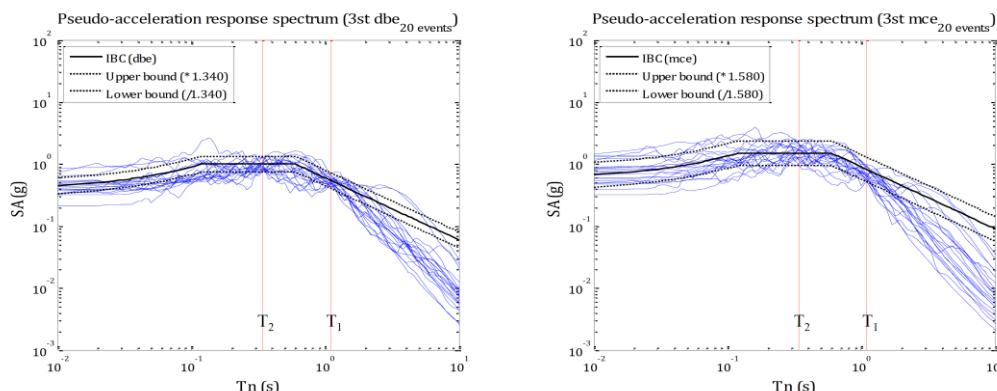
### پیوست الف - فلوجارت طراحی گارلوک

مطابق با روند طراحی گارلوک برای اتصالات مرکز گرای پس کشیده فلوجارت طراحی این اتصالات مطابق شکل (الف-۱) می باشد.

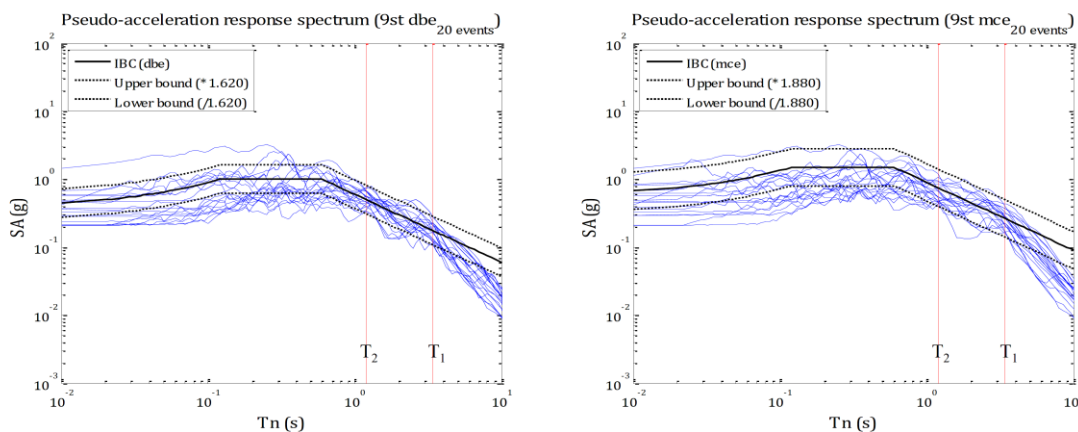


شکل الف-۱: فلوجارت طراحی اتصالات مرکز گرای پس کشیده. [۶]

پیوست ب- تعیین طیف طراحی

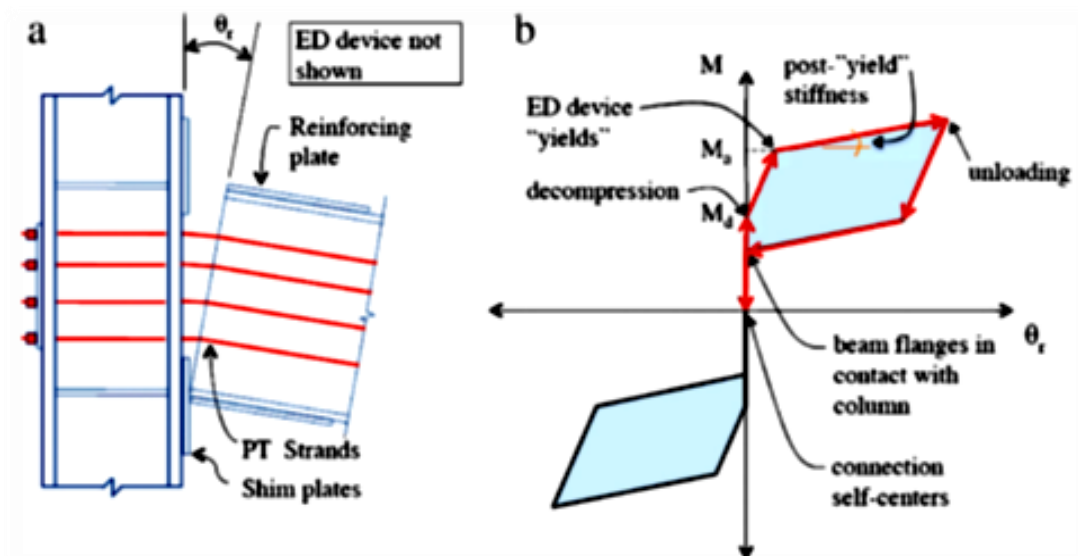


شکل ب-۱: طیف پاسخ شبه شتاب برای تعیین حرکت طبیعی زمین برای سازه سه طبقه. [۱۱]



شکل ب-۲: طیف پاسخ شبه شتاب برای تعیین حرکت طبیعی زمین برای سازه ۹ طبقه. [۱۱]

پیوست پ- پارامترها و فرمولهای طراحی اتصال مرکز گرا



شکل پ-۱: اتصال مرکز گرا و نمودار لنگر-انحنای پرچمی شکل و نحوه تغییر رفتار اتصال در مراحل طراحی. [۱۱]

شکل (پ-۱) اتصال مرکز گرا و نمودار لنگر-انحنای پرچمی شکل مربوط به مراحل طراحی اتصالات گارلوک [۹] را نشان می‌دهد. پارامترهای تاثیر گذار در روند طراحی از تغییر مکان بام در حالت زلزله MCE و DBE مطابق رابطه (پ-۱) و (پ-۲)، تغییر مکان نسبی تقاضای بام طبقات در دو سطح زلزله MCE و DBE مطابق رابطه (پ-۳) و (پ-۴)، تغییر مکان نسبی بام در حالت زلزله MCE و DBE مطابق رابطه (پ-۵) و (پ-۶) و برش پایه در اتصالات مرکز گرا مطابق رابطه (پ-۷) و (پ-۸) می‌باشند. [۹]

$$\Delta_{roof,DBE} = C_{\xi} C_T R \Delta_{el-dss} \quad (\text{پ-۱}) \quad \theta_{r,DBE} = \theta_{DBE} - \frac{C_{\theta} V_{DBE}}{K_f \Delta h_f} \quad (\text{پ-۵})$$

$$\Delta_{roof,DBE} = 1.5 C_{\xi} C_T R \Delta_{el-dss} \quad (\text{پ-۲}) \quad \theta_{r,MCE} = \theta_{MCE} - \frac{C_{\theta} V_{MCE}}{K_f \Delta h_f} \quad (\text{پ-۶})$$

$$\theta_{DBE} = \frac{C_{\xi} C_T R \Delta_{el-dss}}{h_f} \quad (\text{پ-۳}) \quad V_{DBE} = \Omega_{DBE} \times V_{DBE} \quad (\text{پ-۷})$$

$$\theta_{MCE} = \frac{1.5 C_{\xi} C_T R \Delta_{el-dss}}{h_f} \quad (\text{پ-۴}) \quad V_{MCE} = \Omega_{MCE} \times V_{MCE} \quad (\text{پ-۸})$$

$C_{\theta}$  (ضریب اصلاح پیوند)،  $C_T$  (ضریب اصلاح میرایی)،  $C_{\xi}$  (ضریب تغییر مکان نسبی)،  $h_f$  (ارتفاع سازه)

$K_f \Delta$  (سختی اولیه)،  $\Omega_{DBE}$  (ضریب اضافه مقاومت)،  $V$  (برش پایه)،  $\Delta_{el-dss}$  (جابجایی طبقه بام)

## مراجع

- [1] Dolan, C.W., J.F. Stanton, and R.G. Anderson. (1987). *Moment resistant connections and simple connections*. PCI Journal. 32(2), p. 62-74.
- [2] Cheok, GS, Lew, H. (1991). *Performance of precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading*. PCI Journal. 36(3), p. 56-67.
- [3] M. Ricles, Richard Sause, Members, Maria M. Garlock and Chen Zhao. (2001). *Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames*. Journal of Structural Engineering. 127(2), p. 113-121.
- [4] J. M. Ricles, R. Sause, S. W. Peng and L. W. Lu, M. (2002). *Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections*. Journal of Structural Engineering. 128(7), p. 850-859.
- [5] Garlock, M.M., J.M. Ricles, and R. Sause. (2003). *Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connections*. Journal of structural Engineering. 129(12), p. 1615-1625.
- [6] Garlock, M.M., R. Sause, and J.M. Ricles. (2007). *Behavior and design of posttensioned steel frame systems*. Journal of Structural Engineering. 133(3), p. 389-399.
- [7] Moradi, S. and M.S. Alam. (2016). *Ansys modeling of post-tensioned steel beam-column connections under cyclic loading*. in 5th International Structural Specialty Conference, CSCE, London.
- [8] Pirmoz, A., & Liu, M. M. (2016). *Finite element modeling and capacity analysis of post-tensioned steel frames against progressive collapse*. Engineering Structures. 126, p. 446-456.
- [9] Ingquan Guan, Henry Burton, Saber Moradi. (2018). *Seismic performance of a self-centering steel moment frame building: From component-level modeling to economic loss assessment*, Journal of Constructional Steel Research, 150, P. 129-140.
- [10] Zhang, Y., Li, Q., Zhuge, Y., Liu, A., & Zhao, W. (2019). *Experimental study on spatial prefabricated self-centering steel frame with beam-column connections containing bolted web friction devices*. Engineering Structures. 195, p. 1-21.

- [11] Rasmussen, K. J. (2019). Behaviour and modelling of connections in cold-formed steel single C-section portal frames. *Thin-Walled Structures*. 143, p. 106233.
- [12] Garlock, M.M., J.M. Ricles, and R. Sause. (2005). *Experimental studies of full-scale posttensioned steel connections*. *Journal of Structural Engineering*. 131(3), p. 438-448.
- [13] Moradi, S. and M.S. Alam. (2017). *Lateral Load-Drift Response and Limit States of Posttensioned Steel Beam-Column Connections: Parametric Study*. *Journal of Structural Engineering*. 143(7), p. 04017044
- [14] Herning, G.M. (2011). *Reliability-based evaluation of seismic design and performance of steel self-centering moment-resisting frames*. Doctoral dissertation, Princeton University, 265, 3459192.
- [15] FEMA 355C. (2000). *State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [16] FEMA P695. (2009). *Quantification of building seismic performance factors*, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [17] A. Gupta, H. Krawinkler. (1998). *Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures*, PhD Thesis, Stanford University.
- [18] ASCE 7-16. (2016). *Minimum design loads for buildings and other structures*, Reston, VA.
- [19] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott and G.L. Fenves. (2006). *The open system for earthquake engineering simulation (OPENSEES) user command-language manual*.
- [20] USGS, (2020), ASCE 7 Hazard Tool, [www.asce7hazardtool.online](http://www.asce7hazardtool.online).