

The Effect of a Single Friction Pendulum Isolator on the Seismic Performance of Steel Diagrid Frames

Aref Hasanzadeh¹, Mehdi Dehestani^{2*}, Ali Seyedkazemi³

1- Master's Student, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

ABSTRACT

In recent years, a novel structural system known as the diagrid has been introduced, which is formed by a network of diagonal members surrounding the structure. This structural system exhibits low ductility and, due to its high stiffness and short period, experiences significant earthquake forces. Consequently, efforts to improve the seismic performance of these structural systems seem essential. This study investigates the impact of base isolation on the seismic performance of steel diagrid frames by incorporating a single friction pendulum isolator. To this end, 6-story and 12-story diagrid frames were initially designed and analyzed in the ETABS software without isolators, following the ASCE 7-22 and AISC360-16 standards, under three angles of 58, 73, and 78 degrees. Subsequently, for nonlinear time-history dynamic analyses, these frames were modeled in OpenSees software both with and without the isolator, in a two-dimensional framework. For the analyses, 11 pairs of far-field earthquake records based on FEMA P695 guidelines were used at a Maximum Considered Earthquake (MCE) hazard level. Output parameters including inter-story drift ratios, floor accelerations, base shear, and isolator displacements, were extracted from the program. The results demonstrated that the use of seismic isolation significantly enhances the seismic performance of diagrid frames. Additionally, the analysis of inter-story drift ratios revealed that by adding the seismic isolator to the non-isolated frames, the drift ratio of the 6-story frame decreased by approximately 73.9% on average, and the drift ratio of the 12-story frame decreased by approximately 75.4% on average. Thus, diagrid structures are less likely to collapse under MCE seismic events, effectively preventing structural failure.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 September 2024

Revise Date: 08 December 2024

Accept Date: 05 February 2025

Keywords:

Steel Diagrid Frames,
Nonlinear Time-history
Dynamic Analysis,
Base Isolation,
Single Friction Pendulum
Bearing,
Seismic Performance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.476698.3511

*Corresponding author: Mehdi Dehestani
Email address: dehestani@nit.ac.ir

تاثیر جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دایاگرید فولادی

عارف حسن‌زاده^۱، مهدی دهستانی^{۲*}، علی سیدکاظمی^۳

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲-استاد، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۳-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

چکیده

در سال‌های اخیر، سیستم سازه‌ای نوینی تحت عنوان دایاگرید معرفی شده است که به وسیله شبکه‌ای از اعضای قطری در پیرامون سازه تشکیل می‌شود. این سیستم سازه‌ای شکل‌پذیری پایینی داشته و به دلیل سختی بالا و زمان تناوب کم، نیروی زلزله ورودی به این سازه‌ها زیاد می‌باشد. بنابراین تلاش برای بهبود عملکرد لرزه‌ای این سیستم‌های سازه‌ای ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش به تأثیر جداسازی پایه بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دایاگرید فولادی با اضافه کردن جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا در نرم‌افزار ETABS قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه با سیستم دایاگرید تحت سه زاویه ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه بدون جداساز براساس آیین‌نامه‌های ASCE 7-22 و AISC360-16 طراحی و تحلیل گردیدند. سپس برای انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌زمانی غیرخطی، این قاب‌ها در نرم‌افزار OpenSees به صورت دو بعدی با حالت بدون استفاده از جداساز و بار دیگر با منظور نمودن جداساز مدل‌سازی شدند. برای انجام این تحلیل‌ها ۱۱ جفت رکورد زلزله حوزه دور براساس نشریه FEMA P695 و در سطح خطر زلزله MCE مورد استفاده قرار گرفتند. از خروجی‌های برنامه پارامترهای مورد نظر شامل نسبت دررفت طبقات، شتاب طبقات، برش پایه و تغییرمکان جداساز برداشت گردید. نتایج نشان دادند که استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دایاگرید می‌شود و از طرفی با بررسی نسبت دررفت طبقات، مشاهده شد که با اضافه نمودن جداساز لرزه‌ای به قاب‌های بدون جداساز نسبت دررفت طبقات در قاب ۶ طبقه به‌طور میانگین حدود ۷۳/۹ درصد و در قاب ۱۲ طبقه به‌طور میانگین ۷۵/۶۴ درصد کاهش یافت، به این ترتیب سازه‌های دایاگرید از ناحیه فروریزش تحت زلزله MCE فاصله می‌گیرند و از فروریزش سازه‌ها جلوگیری می‌شود.

کلمات کلیدی: قاب‌های دایاگرید فولادی، تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی غیرخطی، جداسازی پایه، جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی، عملکرد لرزه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.476698.3511	10.22065/jsce.2025.476698.3511	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۱/۱۷	۱۴۰۲/۰۹/۰۸	۱۴۰۲/۰۷/۰۱
مهدی دهستانی dehestani@nit.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

یکی از مؤثرترین سیستم‌های مقاوم باربر جانبی که نیازهای ساختمان‌های بلند را برآورده می‌سازد، سیستم‌های دایاگرید^۱ هستند. این سیستم‌ها نام خود را از ترکیب عبارت Diagonal Grid به معنای «شبکه اعضای قطری» گرفته‌اند [۱] و به نوع خاصی از خرپای فضایی اطلاق می‌شوند که از شبکه‌ای محیطی شامل خرپاهای مثلثی تشکیل شده‌اند [۲]. سیستم‌های دایاگرید، که به عنوان سیستم‌های نوین سازه‌ای شناخته می‌شوند، به‌طور مشابه با سیستم‌های لوله‌ای عمل می‌کنند و اعضای قطری در قالب شبکه‌های مثلثی در پیرامون سازه قرار می‌گیرند. این چیدمان، نه تنها عملکرد معماری مناسبی فراهم می‌آورد، بلکه به‌طور اساسی بر معیارهای زیبایی‌شناسی تأثیر می‌گذارد [۳]. استفاده از اعضای قطری در این سیستم‌ها، مقاومت برشی^۲ مورد نیاز را تأمین کرده و مطالعات بر روی انواع سیستم‌های لوله‌ای^۳ نشان داده‌اند که سیستم‌های لوله‌ای مهاربندی شده با اعضای قطری، به دلیل داشتن مقاومت برشی مؤثر، از کارایی بیشتری برخوردار هستند. این ویژگی‌ها موجب جلب توجه مهندسان به سیستم دایاگرید از جنبه‌های سازه‌ای و معماری شده است. هرچند سیستم دایاگرید اختراع جدیدی نیست و به دهه ۱۹۶۰ برمی‌گردد، استفاده از آن به دلیل پیچیدگی اتصالات و محدودیت‌های تکنولوژی در آن زمان محدود بود. با این حال، با پیشرفت روزافزون تکنولوژی و قابلیت ساخت اتصالات به‌صورت کارخانه‌ای، کاربرد این سیستم گسترش یافته است [۱]. در شکل ۱ نمونه برجسته‌ای از سازه دایاگرید نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختمان هرست مگزین، سال ۲۰۰۶ [۱]

نتایج تحقیقات آقای مون^۴ در سال ۲۰۰۸ نشان داد که زاویه بهینه برای اعضای قطری دایاگرید بین ۶۰ تا ۷۰ درجه است [۴]. رحیم‌زاده رفوئی و سیدکازمی در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی ضرایب عملکرد لرزه‌ای برای سیستم‌های سازه‌ای دایاگرید فولادی با استفاده از روش‌های FEMA P-695 و ATC-19 پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش ارتفاع سازه‌های دایاگرید، مقاومت بیش از حد، ضریب اصلاح پاسخ و شدت فروپاشی میانه کاهش می‌یابد، در حالی که ضریب شکل‌پذیری افزایش می‌یابد [۵]. محسنیان و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی قابلیت اطمینان لرزه‌ای و برآورد ضریب اصلاح پاسخ چندسطحی برای سیستم‌های سازه‌ای دایاگرید فولادی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که به دلیل سهم بیشتر مدهای بالاتر، به‌ویژه در سیستم‌های دایاگرید بلند، روش‌های تحلیل مبتنی بر توزیع بار جانبی مثلثی یا مد اول برای طراحی اولیه چنین سیستم‌هایی مناسب نیستند [۶]. سیدکازمی و رحیم‌زاده رفوئی در سال ۲۰۲۱

¹ Diagrid System

² Shear Strength

³ Tubular Structures

⁴ Moon

به مقایسه تحلیل استاتیکی پوش آور و روش‌های احتمالی مبتنی بر تحلیل دینامیکی افزایشی^۵ برای ارزیابی عوامل عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دایاگرید پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب R به دست آمده از طریق روش تحلیل استاتیکی پوش آور برای سیستم‌های دایاگرید فولادی محافظه کارانه بودند و روش احتمالی مبتنی بر تحلیل دینامیکی افزایشی ارزش منطقی تری برای ضریب R ارائه داد. علاوه بر این، روش ساده شده پیشنهادی با FEMA P-695 در پیش‌بینی ظرفیت فروپاشی مدل‌های دایاگرید هم‌خوانی داشت [۷].

در مطالعه‌ای که توسط فانگ^۶ و لیو^۷ در سال ۲۰۲۱ انجام شد، ویژگی‌های مکانیکی و روش‌های محاسبه تغییرشکل‌های سازه‌های دایاگرید فولادی در ساختمان‌های بلند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هنگامی که زاویه قطر به حدود ۵۵ درجه نزدیک می‌شود، تغییرات زاویه قطر تأثیر بیشتری بر سختی قائم سازه دایاگرید دارد. علاوه بر این، با افزایش ارتفاع طبقه، نسبت جابه‌جایی جانبی ناشی از تغییرشکل خمشی افزایش می‌یابد، در حالی که جابه‌جایی جانبی ناشی از تغییرشکل برشی به صورت خطی افزایش می‌یابد و همچنین مشاهده شد که هر چه تعداد اضلاع سازه دایاگرید بیشتر باشد، سختی برشی افقی سازه بیشتر است. به این معنا که هر چه شکل صفحه سازه به دایره نزدیک‌تر باشد، سختی برشی افقی سازه بیشتر می‌شود [۸]. لیو^۸ و همکاران در سال ۲۰۲۲ به برآورد شکنندگی لرزه‌ای سازه دایاگرید فولادی با آزمایش‌های مبتنی بر عملکرد برای ساختمان‌های بلند پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ستون‌های مورب پایین قبل از شکست، تغییر شکل آشکاری با چشم غیرمسلح دارند و می‌توان برخی هشدارهای خرابی را از قبل ارائه کرد. بر اساس نتایج تجربی، مقدار نسبت دررفت بین طبقات برای قضاوت در مورد تسلیم سازه فولادی دایاگرید ۰/۷۸ درصد و مقدار نسبت دررفت بین طبقات برای مقاومت در برابر فروپاشی ۱/۱۷ درصد توصیه می‌شود [۹]. روشنی در سال ۲۰۲۳ به ارزیابی عملکرد و محاسبه‌ی پایداری سازه‌های برجسته‌ی دایاگرید لوله‌ای بلندمرتبه با پیکربندی‌های مختلف پرداخت. بر اساس نتایج این تحلیل، عدم آگاهی کافی از کیفیت ساخت می‌تواند عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دایاگرید را تا ۶ درصد کاهش دهد [۱۰]. شکوهی‌متین و همکاران در سال ۲۰۲۴ به اثر هندسه پلان بر فروپاشی تدریجی ساختمان‌های بلند با سازه دایاگرید بر اساس تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی پرداختند. نتایج همچنین نشان می‌دهند که حذف ستون داخلی در طبقه اول منجر به فروپاشی تدریجی در هر سه شکل پلان مورد مطالعه می‌شود [۱۱]. سجودی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۲۴، به تأثیر زاویه پیکربندی بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های شبکه قطری بلند فولادی پرداختند. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند که در زوایای ۶۷/۴ و ۷۴/۵ درجه، سختی سازه بیشتر بوده ولی مقدار جابجایی طبقه پشت بام و نیز دوره تناوب سازه‌ها کمتر شده‌اند [۱۲].

جداسازهای لرزه‌ای یکی از مؤثرترین راهکارها برای کنترل غیرفعال سازه محسوب می‌شوند. جداسازی لرزه‌ای، که به دلیل کاربرد گسترده‌اش در پایه‌های سازه‌های ساختمانی، به عنوان جداسازی پایه نیز شناخته می‌شود، به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن کل یا بخشی از سازه به منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای در زمان زلزله، از زمین یا بخش‌های دیگر سازه جدا می‌شود [۱۳]، [۱۴]. ساختمان‌های پایه گیردار به طور مؤثر به زمین مهار شده و شرایطی را فراهم می‌آورند که در آن لرزش‌های ناشی از زلزله به طور مستقیم به سازه منتقل می‌شود. در مقابل، سیستم‌های جداسازی پایه قادرند با افزایش دوره تناوب ساختمان، نیروی جانبی زلزله منتقل شده به ساختمان را کاهش دهند. ساختمان‌های دارای سیستم‌های جانبی نسبتاً سخت معمولاً گزینه‌های بهتری برای به‌کارگیری جداسازی پایه هستند، زیرا روسازه‌های صلب آن‌ها امکان دستیابی به تغییرات بیشتر در دوره تناوب را فراهم می‌آورند [۱۵].

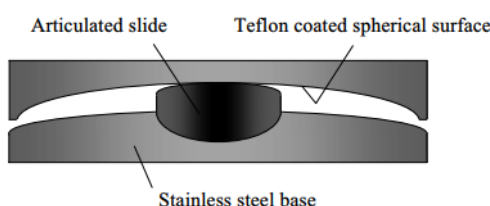
جداسازها انواع مختلفی دارند که یکی از انواع آن جداساز آونگ اصطکاکی تک‌قوسی می‌باشد. این نوع جداساز اصطکاکی دارای یک قسمت لغزنده مفصلی است که بر روی سطح کرووی از جنس فولاد حرکت می‌کند. جداسازهای آونگی اصطکاکی به کمک معادلات حرکتی مشابه با آونگ‌های معمولی توصیف می‌شوند و دوره تناوب ارتعاش آن‌ها رابطه مستقیمی با شعاع انحنا سطح تماس دارد. به این ترتیب، استفاده از صفحات با شعاع انحنا بزرگ، تغییر مؤثر دوره تناوب را در سازه‌هایی با دوره تناوب طولانی نیز ممکن می‌سازد [۱۶]. این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است.

⁵ Incremental Dynamic Analysis (IDA)

⁶ Fang

⁷ Liu

⁸ Liu



شکل ۲: جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی [۱۳]

تجمیلیان و خشنودیان در سال ۲۰۱۷ به تأثیر خروج از مرکزیت جرمی روسازه و خروج از مرکزیت جداسازها در تشدید رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با جداسازهای آونگ اصطکاکی سه قوسی پرداختند. نتایج نشان دادند که وجود خروج از مرکزیت جرمی در حالت وقوع پالس‌های پیش‌رونده شکست ناشی از اثر جهت‌پذیری می‌تواند دریافت سازه را به مقادیر نزدیک به میزان مجاز آیین‌نامه سوق دهد [۱۷]. تجمیلیان و محمودی در سال ۲۰۱۹ به مقایسه سازه‌های جداسازی شده بر روی انواع جداسازهای اصطکاکی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک پرداختند. با مقایسه عملکرد انواع جداسازهای طراحی شده، برای سازه‌های مورد نظر، نتایج نشان دادند که جداساز آونگ اصطکاکی سه قوسی نسبت به جداسازهای آونگ اصطکاکی تک قوسی و دوقوسی در کنترل جابجایی تراز جداسازی، شتاب و دریافت سازه بهتر عملکردده است [۱۸]. تجمیلیان و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای سازه‌های فولادی جداسازی شده با جداسازهای آونگی اصطکاکی تحت زلزله‌های حوزه دور پرداختند. نتایج نشان دادند که تمامی مدل‌ها بر اساس FEMA-P695 دارای کفایت در طراحی و احتمال فروریزش کمتر از ۱۰ درصد بودند [۱۹]. جلالی و همکاران در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی مقایسه‌ای پاسخ ساختمان‌های قاب مهاربندی شده با جداسازی پایه به وسیله جداسازهای آونگ اصطکاکی دوقوسی با در نظر گرفتن اثرات طراحی دو سطح شکل‌پذیری پرداختند. برای بررسی تأثیر شکل‌پذیری، پاسخ‌های لرزه‌ای هر دو سطح شکل‌پذیری معمولی و ویژه را محاسبه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که سطوح شکل‌پذیری تأثیر زیادی بر پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده از پایه دارند [۲۰].

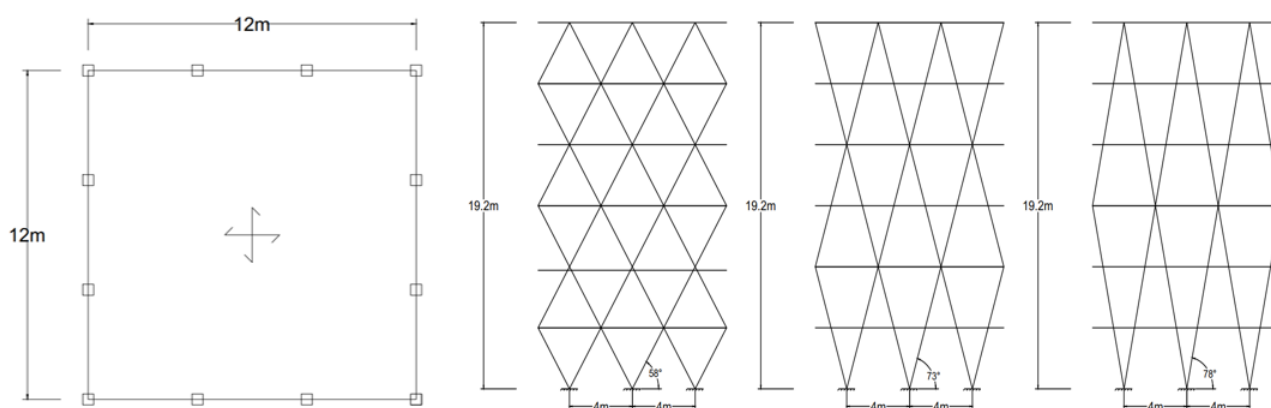
شکوری و همکاران در سال ۲۰۲۱ به اثرات شکل‌پذیری و نوع اتصال بر پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های پایه ثابت و جداسازی پایه با قاب‌های فولادی خمشی با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی غیرخطی ارزیابی پرداختند. نتایج نشان داد که شکل‌پذیری و انواع اتصال تأثیر قابل توجهی بر واکنش‌های لرزه‌ای ساختمان‌های با جداکننده پایه و با پایه ثابت دارند [۲۱]. هوانگ^۹ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به تأثیر مؤلفه عمودی زلزله بر پاسخ‌های سازه‌ای ساختمان‌های بلند که با جداسازهای لرزه‌ای آونگ اصطکاکی دوقوسی جداسازی شده‌اند پرداختند. نتایج نشان داد که در اغلب موارد، شتاب سقف در مقایسه با حالت پایه ثابت حدود ۶۰ درصد و نیروی برشی طبقه اول حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد [۲۲]. لی^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۲۳ عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه بر روی ریل با آزمایش میز تکانی را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که اگرچه لایه جداسازی پایه تأثیر محدودی بر کاهش فرکانس مد دارد، اما به طور قابل توجهی نسبت میرایی چند وجهی ساختمان بلندمرتبه را افزایش می‌دهد [۲۳]. ایمانی در سال ۲۰۲۴ به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی بر روی دو نوع جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی و آونگ اصطکاکی تک قوسی تحت زلزله‌های حوزه دور از گسل پرداخت. نتایج نشان داد که کارایی هر دو نوع جداساز با افزایش ارتفاع ساختمان کاهش پیدا می‌کند [۲۴].

باتوجه به بررسی‌ها و مطالعات گذشته، سیستم‌های دایاگرید به دلیل داشتن المان‌های قطری متعدد، سختی جانبی بالا و زمان تناوب اصلی کمی دارند و این امر باعث افزایش میزان انرژی ورودی ناشی از زلزله می‌شود. از سوی دیگر این سازه‌ها شکل‌پذیری و میزان استهلاک انرژی کمی دارند و به دلیل کماتش اعضای قطری امکان فروریزش آن‌ها در دریافت‌های پایین زیاد است؛ لذا به نظر می‌رسد استفاده از جداساز لرزه‌ای ایده مناسبی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای این سیستم سازه‌ای و کاهش آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر زلزله باشد. موضوعی که در پژوهش‌های قبلی زیاد به آن پرداخته نشده است، لذا؛ در این پژوهش به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دایاگرید فولادی با جداسازی پایه و مقایسه آن با حالت بدون جداسازی پایه پرداخته می‌شود.

⁹ Hoang
¹⁰ Li

۲- طراحی، مدل سازی قاب ها و صحت سنجی

نمونه های مورد نظر، طبق مطالعات رحیم زاده رفوئی و سید کاظمی [۵]، قاب های دایاگرید فولادی در دو تراز ارتفاعی ۶ و ۱۲ طبقه انتخاب شدند و زاویه اعضای قطری با محور افقی در ۳ حالت مختلف به صورت ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه منظور گردید. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، پلان انتخابی مربعی ساده به ضلع ۱۲ متر می باشد. تمامی اعضاء مقاوم باربر جانبی و ثقلی در محیط سازه قرار گرفته اند و هیچ قابی در داخل ساختمان ها وجود ندارد. ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر فرض شد. ارتفاع قاب های مدل به ترتیب برابر با ۱۹/۲ و ۳۸/۴ متر می باشد. اعضای قطری در فاصله ۴ متری از هم قرار گرفته اند. پیکربندی انتخاب شده برای قاب ها، در ساختمان ۶ طبقه عملکرد برشی و در ساختمان ۱۲ طبقه ترکیب عملکردهای خمشی و برشی را فراهم می کند و از نامنظمی در پلان بویژه نامنظمی های پیشگی جلوگیری می کند. برای طراحی اعضای قطری از مقاطع جعبه ای^{۱۱} و برای طراحی تیرها از مقاطع I شکل بال پهن استفاده شده است. این مقاطع به ترتیب با عناوین HSS Section و W Section در آیین نامه AISC360-16 [۲۵] شناخته می شوند. از آنجا که اتصال ها در سیستم دایاگرید در اغلب موارد به صورت کارخانه ای ساخته می شوند و صلبیت قابل توجهی دارند، در پژوهش حاضر نیز، اتصال ها بصورت صلب منظور گردید. فولاد مورد استفاده برای طراحی از نوع ASTM A992 با $f_y = 345 \text{ Mpa}$ بوده است. بارهای مرده و زنده به ترتیب $6/4 \text{ kN/m}^2$ و $2/45 \text{ kN/m}^2$ در نظر گرفته شده اند. سیستم بابر ثقلی سقف از نوع دال بتنی دو طرفه انتخاب شد تا بار ثقلی به طور یکسان روی تمامی قاب های دایاگرید محیطی توزیع شود.



شکل ۳: پلان و قاب های ۶ طبقه دایاگرید مورد مطالعه

بارگذاری لرزه ای و تحلیل بر اساس روش های استاتیکی معادل و دینامیکی طیفی طبق آیین نامه ASCE7-22 [۱۴] انجام شده است و برای طراحی از روش ضریب بار و مقاومت آیین نامه AISC360-16 [۲۵] استفاده شده است.

پارامترهای شتاب طیف طراحی بر اساس آیین نامه ای ASCE7-22 به صورت $S_{DS} = 1g$ و $S_{D1} = 0.6g$ در نظر گرفته شده اند. قاب های مورد نظر دارای ضریب اهمیت ۱ و بر روی خاک نوع D (خاک متراکم تا متوسط) با مقدار میرایی ۵ درصد منظور شدند. در این مطالعه، ضریب رفتار (R) بر اساس مطالعات کیم^{۱۲} و لی^{۱۳} برابر با ۳ تعیین شد [۲۶]. ضریب بزرگنمایی تغییر مکان نیز طبق دستورالعمل FEMA P-695 برابر ضریب رفتار و ۳ در نظر گرفته شد [۲۷]. پارامترهای تکمیلی، به ویژه در زمینه طراحی اعضای قطری، بر اساس سیستم قاب مهاربندی همگرای ویژه^{۱۴} بررسی و کنترل شدند. مدل قاب مورد نظر در نرم افزار ETABS طراحی و مدل سازی شده است و مقاطع مورد استفاده در قاب ۶ و ۱۲ طبق دایاگرید در جدول ۱ و ۲ درج گردیده است.

¹¹ Box

¹² Kim

¹³ Lee

¹⁴ Special Concentrically Braced Frames

جدول ۱: مشخصات مقاطع قاب ۶ طبقه دایاگرید

تیرها		اعضای مورب		طبقه
داخلی	خارجی	دهانه داخلی	دهانه خارجی	
W8×18	W8×13	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}, HSS6 \times 6 \times \frac{1}{2}$	۱
W8×18	W8×10	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	۲
W8×18	W8×13	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}, HSS5 \times 5 \times \frac{1}{2}$	۳
W8×18	W8×10	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	۴
W8×18	W8×13	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	۵
W8×18	W8×10	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	۶

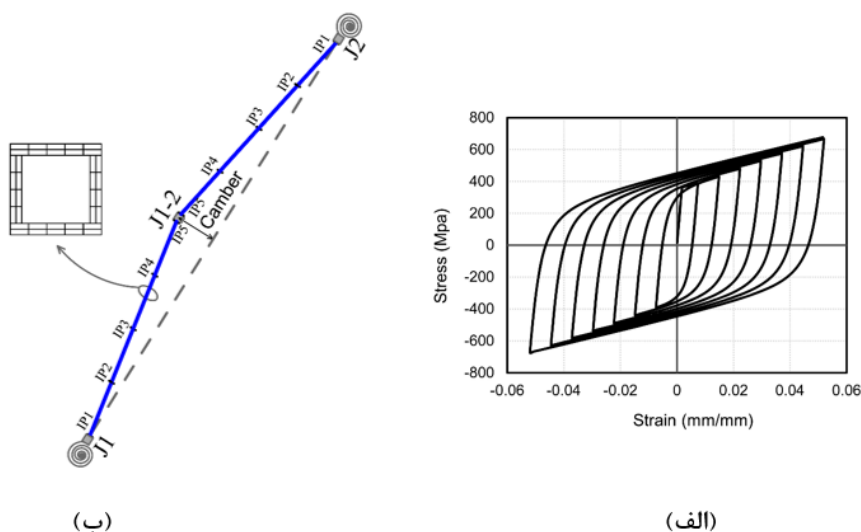
جدول ۲: مشخصات مقاطع قاب ۱۲ طبقه دایاگرید

تیرها		اعضای مورب		طبقه
داخلی	خارجی	دهانه داخلی	دهانه خارجی	
W8×18	W8×10	$HSS7 \times 7 \times \frac{1}{2}$	$HSS8 \times 8 \times \frac{5}{8}, HSS8 \times 8 \times \frac{1}{2}$	۱
W8×18	W8×10	$HSS7 \times 7 \times \frac{1}{2}$	$HSS8 \times 8 \times \frac{1}{2}$	۲
W8×18	W8×10	$HSS7 \times 7 \times \frac{1}{2}$	$HSS8 \times 8 \times \frac{1}{2}$	۳
W8×18	W8×10	$HSS6 \times 6 \times \frac{1}{2}$	$HSS7 \times 7 \times \frac{1}{2}$	۴
W8×18	W8×13	$HSS6 \times 6 \times \frac{1}{2}$	$HSS7 \times 7 \times \frac{1}{2}$	۵
W8×18	W8×10	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	$HSS6 \times 6 \times \frac{1}{2}$	۶
W8×18	W8×13	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	$HSS6 \times 6 \times \frac{1}{2}$	۷
W8×18	W8×10	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	$HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	۸
W8×18	W8×13	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}, HSS6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	۹
W8×18	W8×10	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	۱۰
W8×18	W8×13	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	۱۱
W8×18	W8×10	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	$HSS5 \times 5 \times \frac{5}{16}$	۱۲

برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی، از برنامه OpenSees بهره گرفته شد. جهت شبیه‌سازی خواص دینامیکی سازه در نرم‌افزار OpenSees، از روش جرم متمرکز در تراز طبقات استفاده و رفتار سقف‌ها به صورت صلب فرض شد. المان‌های به

کار رفته برای مدل‌سازی اعضا شامل المان‌های تیر و ستون غیرخطی با مقاطع از نوع فایبر می‌باشند. اتصالات تیر به ستون‌ها به صورت خمشی مدل‌سازی شده‌اند. برای شبیه‌سازی مشخصات مکانیکی مصالح فولادی، از مدل مصالح منگوتو-پینتو [۲۸] (مدل فولادی Steel02 در برنامه OpenSees) با ۲ درصد سخت‌شدگی کرنشی ایزوتروپیک استفاده شد. شکل ۴ - الف مدل رفتار چرخه‌ای مصالح استفاده شده را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی ستون‌های مورب به منظور لحاظ کردن اثرات کمانش، از فرمولاسیون هم - چرخشی^{۱۵} استفاده شد که اصلاح دقیقی از سختی سازه را در هر مرحله ارائه می‌دهد. شکل ۴ - ب مدل مورد استفاده برای کمانش اعضای قطری را نمایش می‌دهد. این مدل بر اساس مطالعات آزمایشگاهی اوریز^{۱۶} و همکاران [۲۹] انتخاب شده و بصورت زیر در برنامه OpenSees پیاده سازی شد:

- یک خیز^{۱۷} اولیه‌ای برابر با یک درصد طول عضو مورب در وسط دهانه عضو مورب در نظر گرفته شد.
- مختصات نقطه J-2 (شکل ۴ - ب) برای هر عضو مورب بدست آمد و سپس هر عضو مورب به صورت دو المان تیر - ستون غیرالاستیک مدل‌سازی شد.
- پنج نقطه انتگرال‌گیری در امتداد هر عضو در نظر گرفته شد تا در تفسیر نتایج از آن‌ها استفاده گردد.
- تعداد ده تا پانزده مقطع فایبر در کل مقطع هر عضو منظور شد تا در صورت نیاز بتوان کرنش‌های غیرخطی را در بخش‌های بحرانی اعضای مورب محاسبه نمود.



شکل ۴: (الف) رفتار چرخه‌ای مصالح (ب) مدل کمانش اعضای قطری در سیستم دایاگرید

همانطور که شکل ۴ - ب نشان می‌دهد، برای مدل‌سازی اتصال اعضای قطری به یک گره اصلی، از یک المان فنری دورانی با طول صفر استفاده شده است. سختی این المان، که نشان‌دهنده سختی اتصال است، مطابق با استاندارد AISC 360-16 [۲۵] به صورت $K_S = \alpha EI/L$ تعریف می‌شود. در این رابطه L طول عضو متصل به المان فنری، EI سختی خمشی عضو و α ضریبی است که درجه سختی اتصال را نشان می‌دهد. اگر $\alpha \geq 20$ ، اتصال به‌عنوان کاملاً صلب در نظر گرفته می‌شود، در حالی که برای α کمتر یا مساوی ۲، اتصال به حالت مفصلی تغییر می‌یابد. هر مقداری از α بین این دو محدوده، نشان‌دهنده اتصال نیمه صلب است. در این پژوهش، برای مدل‌سازی اتصال صلب، مقدار α برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است.

¹⁵ Co-rotational

¹⁶ Uriz

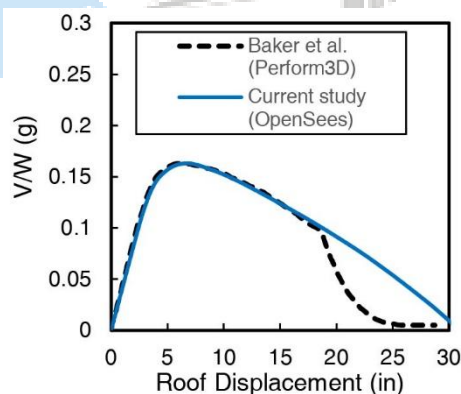
¹⁷ Camber

پس از اتمام فرآیند مدل سازی در نرم افزارهای ETABS و OpenSees، مقایسه ای بین زمان های تناوب قاب های مدل سازی شده در حالت بدون استفاده از جداساز در این دو نرم افزار انجام شد، که نتایج آن در جدول ۳ ارائه گردیده است. مشاهده می شود که زمان تناوب اصلی سازه ها در دو نرم افزار بسیار نزدیک به هم هستند و تفاوت چندانی ندارند.

جدول ۳. مقایسه دوره تناوب قاب ها در ETABS و OpenSees در حالت بدون جداساز

OpenSees	ETABS	مدل
۰/۴۳۵ ثانیه	۰/۴۳۵ ثانیه	۵۸ درجه
۰/۴۶۶ ثانیه	۰/۴۶۸ ثانیه	۷۲ درجه
۰/۵۳۹ ثانیه	۰/۵۴۶ ثانیه	۷۸ درجه
۱/۰۸ ثانیه	۱/۰۸ ثانیه	۵۸ درجه
۱/۱ ثانیه	۱/۰۳۷ ثانیه	۷۲ درجه
۱/۱۱۶ ثانیه	۱/۱۱۹ ثانیه	۷۸ درجه

جهت صحت سنجی روند مدل سازی و نتایج آنالیز غیرخطی، سازه دایاگرید ۸ طبقه استفاده شده در پژوهش بیکر^{۱۸} و همکاران [۳۰] مجدداً در نرم افزار OpenSees مدل سازی شد. در مدل دایاگرید ساخته شده در OpenSees، اثر $P-\Delta$ در تحلیل منظور گردید. برای این کار، از یک ستون مجازی^{۱۹} که با استفاده از المان های تراس^{۲۰} به قاب دایاگرید متصل شده است، استفاده گردید [۳۱]. نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل ها در شکل ۵ با یکدیگر مقایسه شده اند. نمودارها تطابق مناسبی را به ازای تغییر مکان های کمتر از ۱۸ اینچ نشان می دهند. لازم به ذکر است که تغییر مکان نهایی مرتبط با فروریزش در این مدل ها ۱۴ اینچ می باشد و اختلاف ایجاد شده در نمودارها به ازای تغییر مکان های بسیار بزرگ، می تواند بدلیل عدم همگرایی عددی ایجاد شده در تحلیل ها در نرم افزار مربوطه باشد.



شکل ۵: اعتبارسنجی مدل غیرخطی ساخته شده در OpenSees از طریق مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی

¹⁸ Baker

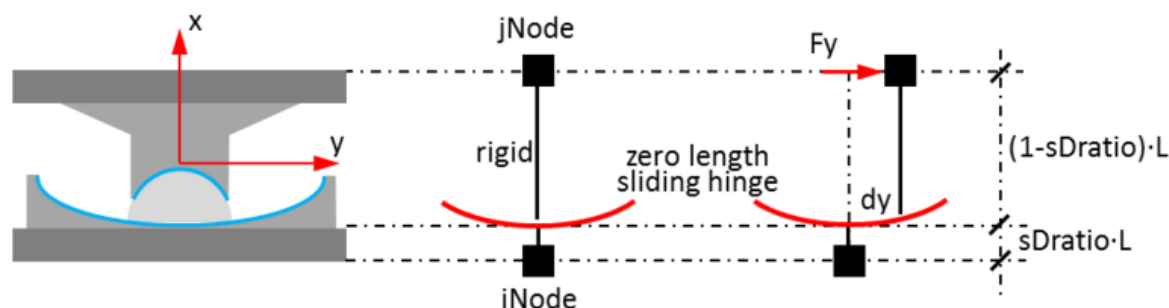
¹⁹ Leaning column

²⁰ Truss elements

۳- طراحی و مدل سازی جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی

۳-۱- روش مدل سازی جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی

برای مدل سازی جداساز تک قوسی در نرم افزار OpenSees از المان SingleFPBearing استفاده شده است و کد ارائه شده در برنامه OpenSees بر مبنای کارهای آزمایشگاهی انجام شده روی این نوع جداساز بوده است [۳۲]، [۳۳]، [۳۴]. این المان، ساختار جداساز را به صورت دو نقطه ای مدل می کند؛ نقطه اول (iNode) نمایانگر صفحه کروی لغزش و نقطه دوم (jNode) نشان دهنده لغزنده لولایی است. این المان بین دو نقطه تعریف شده و همچنین می تواند با طول صفر یا با طولی برابر با ارتفاع جداساز در نظر گرفته شود. در حالت دو بعدی، نیروی افقی جداساز برابر با مجموع نیروی اصطکاک حرکت و نیروی بازگرداننده، که به میزان جابجایی افقی وابسته است، تعریف می شود. نیروهای مرتبط با دو درجه آزادی دیگر جداساز (دوران و انتقال قائم)، توسط روابطی که توسط مواد تک محور^{۲۱} برای این درجات آزادی تعریف شده اند، محاسبه می شوند. در این نوع از جداسازها، به دلیل انحنای سطح لغزش، وزن سازه به عنوان نیروی بازگشت دهنده عمل می کند. همچنین در عمل برای کنترل پدیده بلندشدگی از یکسری قفل یا اجزا مکانیکی استفاده می شود، این اجزا به طور موثر نقش حفاظتی ایفا کرده و اطمینان حاصل می کنند که جداساز در شرایط بحرانی از جابجایی غیرمجاز جلوگیری کرده و عملکرد بهینه خود را حفظ نماید [۳۵]. لذا برای در نظرگیری اثرات پدیده بلندشدگی^{۲۲} ماده محوری تعریف شده (پارامتر P \$matTag در برنامه OpenSees) طوری اصلاح می شود که کشش تحمل نکند. شکل ۶ شماتیک ساختار المان موجود در نرم افزار OpenSees برای جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی را نشان می دهد. لازم بذکر است، در مدل سازی این نوع از جداساز با المان SingleFPBearing، به طور پیش فرض گشتاورهای ناشی از اثر P-Δ به طور کامل به سطح لغزشی مقعر (گره I در شکل ۶) منتقل می شوند. با این وجود، در مدل های مورد مطالعه در این پژوهش از آنجایی که شاخص پایداری (θ) طبق ASCE 7-22 [۱۴] کمتر از ده درصد است، اثر P-Δ ناچیز بوده و نادیده گرفته می شود. همچنین برای جلوگیری از ورود میرایی ویسکوز مصنوعی به سیستم جداسازی (که گاهی به آن "نشت میرایی در سیستم جداسازی" گفته می شود)، المان بکاررفته به صورت پیش فرض در میرایی ریلی مشارکت نمی کند [۳۵].



شکل ۶: شماتیک ساختار المان موجود در نرم افزار OpenSees برای جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی [۳۵]

۳-۲- مروری بر روند طراحی جداسازها براساس آیین نامه ها

گام های طراحی جداساز آونگ اصطکاکی یگانه بصورت زیر است [۱۴]، [۳۶]، [۳۷]:

(۱) دوره تناوب موثر با استفاده از رابطه (۱) بدست می آید که R شعاع انحنای سطح جداساز، T_D دوره تناوب موثر و g شتاب جاذبه ی

زمین می باشند.

²¹ UniaxialMaterials

²² Uplift

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

(۲) نسبت میرایی موثر از رابطه (۲) محاسبه می‌شود که ξ_{eff} نسبت میرایی موثر، μ_s ضریب اصطکاک لغزش، D تغییرمکان مورد نظر جداساز و R شعاع انحنای سطح جداساز می‌باشند.

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu_s}{\mu_s + \frac{D}{R}} \right) \quad (2)$$

با توجه به نسبت میرایی موثر و با استفاده از جدول ۱۷-۵-۱۷ فصل ۱۷ آیین‌نامه ASCE 7-22، ضریب میرایی بدست می‌آید [۱۴].

(۳) جابه‌جایی طرح و جابه‌جایی حداکثر به ترتیب از رابطه (۳) و (۴) بدست می‌آیند که D_D جابه‌جایی طرح، D_M جابه‌جایی حداکثر، B_D ضریب میرایی طرح، B_M ضریب میرایی حداکثر، T_D دوره تناوب موثر، g شتاب جاذبه‌ی زمین، S_{D1} شتاب طیف طراحی در ثانیه یکم، S_{M1} شتاب طیف طراحی در دوره تناوب کوتاه می‌باشند.

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{S_{D1} T_D}{B_D} \quad (3)$$

$$D_M = \frac{g}{4\pi^2} \frac{S_{M1} T_D}{B_M} \quad (4)$$

(۴) سختی موثر جداساز از رابطه (۵) محاسبه می‌شود که K_{eff} سختی موثر جداساز، W نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه، μ_s ضریب اصطکاک لغزش، D تغییرمکان مورد نظر جداساز، R شعاع انحنای سطح جداساز می‌باشند.

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu_s W}{D} \quad (5)$$

پس از محاسبه سختی موثر افقی جداگرهای اصطکاکی بایستی سختی قائم آن‌ها نیز تعیین گردد سختی قائم جداگرها با توجه به مشخصات آلیاژ بکار رفته در ساخت آن و همچنین هندسه نهایی جداگر از شرکت سازنده قابل حصول است. نکته مهم اینکه این سختی دارای مقدار بسیار بالایی می‌باشد. بنابراین عدد بزرگی به آن در نرم افزار اختصاص داده می‌شود.

(۵) تغییرمکان قائم جداساز از رابطه (۶) بدست می‌آید که δ_V تغییرمکان قائم جداساز، D تغییرمکان مورد نظر جداساز، R شعاع انحنای سطح جداساز می‌باشند.

$$\delta_V = \frac{D^2}{2R} \quad (6)$$

(۶) طبق رابطه (۷) برای اطمینان از اینکه سازه به نقطه اولیه خود باز می‌گردد، جابه‌جایی افقی ساختار تحت بار زلزله باید به گونه‌ای باشد که نیروی بازگرداننده بیشتر از نیروی اصطکاک باشد. یعنی:

$$\mu_s W \leq \frac{WD}{R} \rightarrow \mu_s \leq \frac{D}{R} \quad (7)$$

که D تغییرمکان مورد نظر جداساز، R شعاع انحنای سطح جداساز و μ_s ضریب اصطکاک لغزش می‌باشند.

مشخصات طراحی اولیه سیستم جداساز آونگ اصطکاکی یگانه براساس روابط بخش روابط طراحی گفته شده در بخش ۲-۳، محاسبه شده است و مقادیر آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات طراحی اولیه جداساز آونگ اصطکاکی یگانه

واحد	مدل ۱۲ طبقه دایاگرید			مدل ۶ طبقه دایاگرید			نماد	ویژگی‌ها
	۷۸ درجه	۷۳ درجه	۵۸ درجه	۷۸ درجه	۷۳ درجه	۵۸ درجه		
-	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	μ	ضریب اصطکاک
Sec	۳/۳۴۸	۳/۳	۳/۲۴	۱/۶۱۷	۱/۳۹۸	۱/۳۰۵	T_M	دوره تناوب موثر
m	۲/۷۸۸	۲/۷	۲/۶۱	۰/۶۵	۰/۴۸۶	۰/۴۳۵	R	شعاع انحنای جداساز
%	۲۰/۲	۲۰/۹	۲۲	۸/۹	۷/۴	۷/۱	ζ_{eff}	میرایی موثر
m	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲	D_D	جابه‌جایی طراحی
m	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۳۰	۰/۲۷۹	۰/۲۶	D_M	جابه‌جایی حداکثر
KN/m	۵۶۴/۰۱	۶۲۲/۷	۶۴۴/۳۷	۹۴۷/۸۸۴	۱۲۷۰/۰۲	۱۴۳۸/۵۹	K_{eff}	سختی موثر
Kg/m	2×10^9	2×10^9	2×10^9	2×10^9	2×10^9	2×10^9	K_V	سختی قائم
m	۱/۱۵	۱/۱	۱/۰۸	۰/۶	۰/۵۵	۰/۵۲	d	قطر تکیه‌گاه

۴- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در Opensees

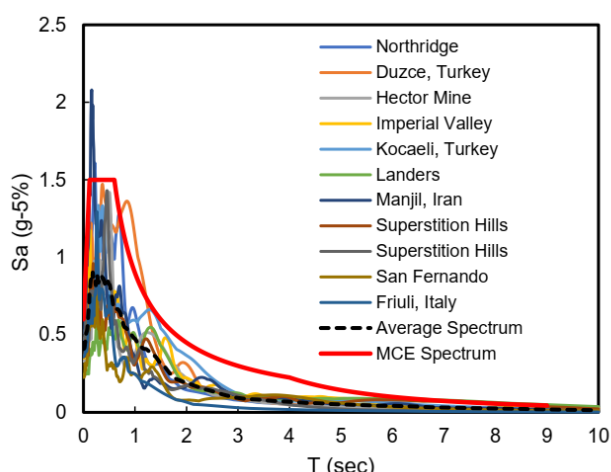
۴-۱- انتخاب شتابنگاشت‌ها و مقیاس آن‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد لرزه ای قاب‌های دایاگرید پایه ثابت و جداسازی شده در پایه از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی در نرم‌افزار OpenSees استفاده شد. برای این منظور از ۱۱ جفت شتاب نگاشت زلزله حوزه دور ارائه شده در دستورالعمل FEMA P695 [۲۷] بهره گرفته شد و رکوردهای زلزله برای سطح خطر MCE مقیاس شدند. مشخصات شتاب نگاشت‌ها در جدول ۵ ارائه شده‌اند. زلزله‌های انتخاب شده دارای ویژگی‌هایی از قبیل بزرگای ۶ تا ۸ ریشتر، محدوده فاصله از گسل در بازه ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر، متوسط سرعت موج برشی در محدوده ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه و بیشینه شتاب حرکت زمین در بازه بین ۰/۲g تا ۱g می‌باشند و لذا نزدیک به شرایط زلزله کنترل کننده ساختگاه انتخاب شده‌اند. برای تولید طیف‌های شتاب از نرم‌افزار Seismosignal و جهت مقیاس کردن رکوردها از نرم‌افزار Excel بهره گرفته شد. به منظور مقیاس کردن رکوردهای زلزله انتخابی برای سطح خطر MCE، از آیین‌نامه ASCE 7-22 [۱۴] استفاده شده است. شتاب نگاشت‌ها به نحوی مقیاس می‌شوند که طیف میانگین حاصل در محدوده زمان تناوبی 0.2T تا 2T برای حالت بدون جداساز و در محدوده زمان تناوبی 0.2T تا 1.25T برای حالت با جداساز، کمتر از ۹۰ درصد طیف پاسخ مربوط به

زلزله MCE نباشد (T معرف زمان تناوب اصلی سازه مورد نظر برای تحلیل دینامیکی است) [۱۴]. ضرایب مقیاس محاسبه شده برای قاب‌های ۶ طبقه در حالت بدون استفاده از جداساز در بازه ۲/۰۲ تا ۲/۰۳۱ و در حالت با استفاده از جداساز در بازه ۲/۰۳ تا ۲/۱۰۵ قرار دارند. در مورد قاب‌های ۱۲ طبقه ضرایب مقیاس در حالت بدون استفاده از جداساز در بازه ۲/۱۸۵ تا ۲/۲۳۱ و در حالت با استفاده از جداساز در بازه ۲/۸۸ تا ۲/۹۶۲ بدست آمدند. طیف پاسخ رکوردهای زلزله‌های انتخابی، طیف میانگین و طیف زلزله MCE در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۵: مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل استفاده شده برای تحلیل تاریخچه‌زمانی [۲۷]

ردیف	نام زلزله	بزرگی	سال	ایستگاه ثبت	فاصله از گسل (کیلومتر)	PGA (g)		PGV (cm/s)	
						مولفه ۱	مولفه ۲	مولفه ۱	مولفه ۲
۱	Northridge	۶/۷	۱۹۹۴	Canyon Country-WLC	۱۲/۴	۰/۴۰۴	۰/۴۷۲	۴۴/۳۸۴	۴۱/۱۲۸
۲	Duzce, Turkey	۷/۱	۱۹۹۹	Bolu	۱۲	۰/۷۳۹	۰/۸۰۶	۵۵/۹۳۴	۶۵/۸۸۳
۳	Hector Mine	۷/۱	۱۹۹۹	Hector	۱۱/۷	۰/۲۶۸	۰/۳۲۸	۲۶/۰۱۵	۴۴/۷۷۷
۴	Imperial Valley	۶/۵	۱۹۷۹	Delta	۲۳	۰/۲۳۶	۰/۳۵	۲۶/۳۲۵	۳۲/۹۹۹
۵	Kocaeli, Turkey	۷/۵	۱۹۹۹	Duzce	۱۵/۴	۰/۳۱۲	۰/۳۶۴	۵۸/۸۶۷	۵۵/۶۶۲
۶	Landers	۷/۳	۱۹۹۲	Yermo Fire Station	۲۳/۶	۰/۲۴۵	۰/۱۵۲	۵۱/۱۲۵	۲۹/۰۹
۷	Manjil, Iran	۷/۴	۱۹۹۰	Abbar	۱۲/۶	۰/۵۱۵	۰/۴۹۷	۴۲/۴۵۸	۵۰/۵۹۱
۸	Superstition Hills	۶/۵	۱۹۸۷	El Centro Imp. Co.	۱۸/۲	۰/۳۵۷	۰/۲۵۹	۴۸/۰۷۱	۴۱/۷۹۴
۹	Superstition Hills	۶/۵	۱۹۸۷	Poe Road (temp)	۱۱/۲	۰/۴۷۵	۰/۲۸۶	۴۱/۱۶۹	۲۹/۰۱۶
۱۰	San Fernando	۶/۶	۱۹۷۱	LA - Hollywood Stor	۲۲/۸	۰/۲۲۵	۰/۱۹۵	۲۱/۷۱۸	۱۶/۹۳۸
۱۱	Friuli, Italy	۶/۵	۱۹۷۶	Tolmezzo	۱۵/۸	۰/۳۵۷	۰/۳۱۵	۲۲/۸۵۰	۳۰/۵۲۱

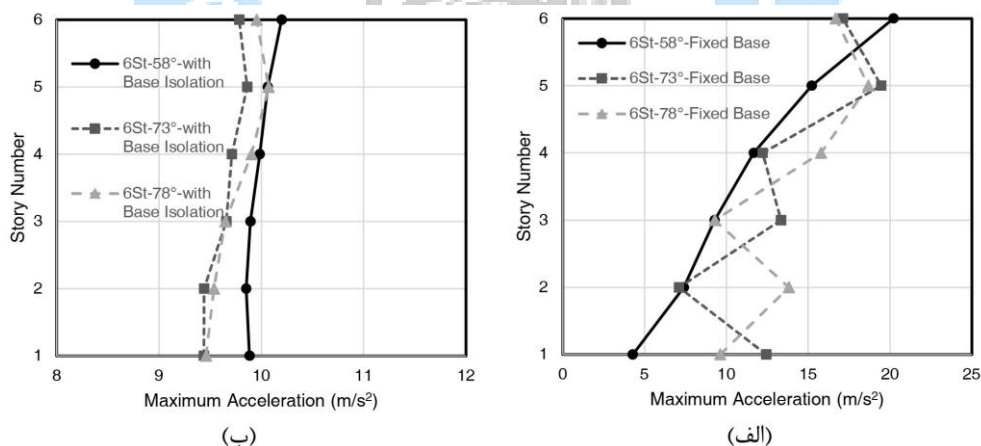


شکل ۷: طیف پاسخ رکوردهای زلزله، طیف میانگین و طیف زلزله MCE

سپس مدل‌ها در نرم افزار OpenSees تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی می‌شوند که نتایج آن در ادامه بحث می‌گردد.

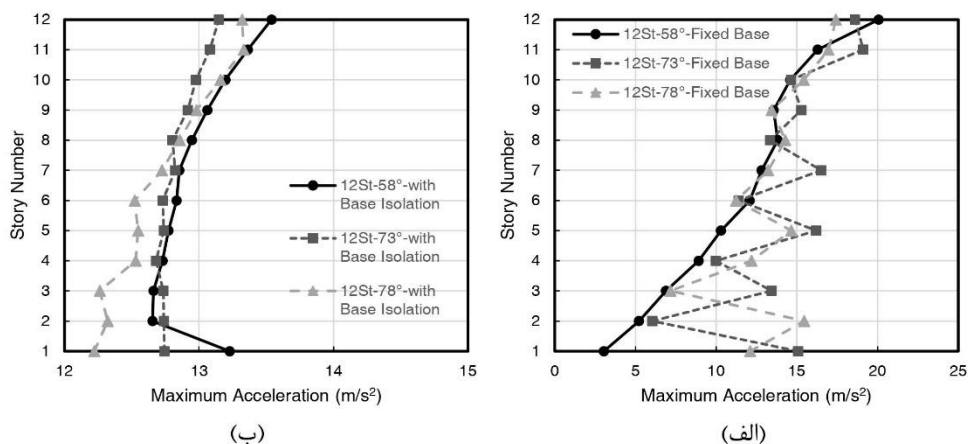
۲-۴- پیشینه شتاب طبقات قاب‌ها

شکل ۸ - الف - پیشینه شتاب طبقات برای قاب ۶ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را بدون جداسازی پایه نشان می‌دهد. شکل ۸ - ب - پیشینه شتاب طبقات برای قاب ۶ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را با جداسازی پایه نشان می‌دهد. پیشینه شتاب طبقات در قاب ۶ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به‌طور میانگین حدود ۴۸/۳۱ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت.



شکل ۸: مقایسه پیشینه میانگین شتاب طبقات برای قاب‌های ۶ طبقه: (الف) بدون جداسازی پایه، (ب) با جداسازی

شکل ۹ - الف - پیشینه شتاب طبقات برای قاب ۱۲ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را بدون جداسازی پایه نشان می‌دهد. شکل ۹ - ب - پیشینه شتاب طبقات برای قاب ۱۲ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را با جداسازی پایه نشان می‌دهد. پیشینه شتاب طبقات در قاب ۱۲ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به‌طور میانگین حدود ۲۹/۰۷ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت.

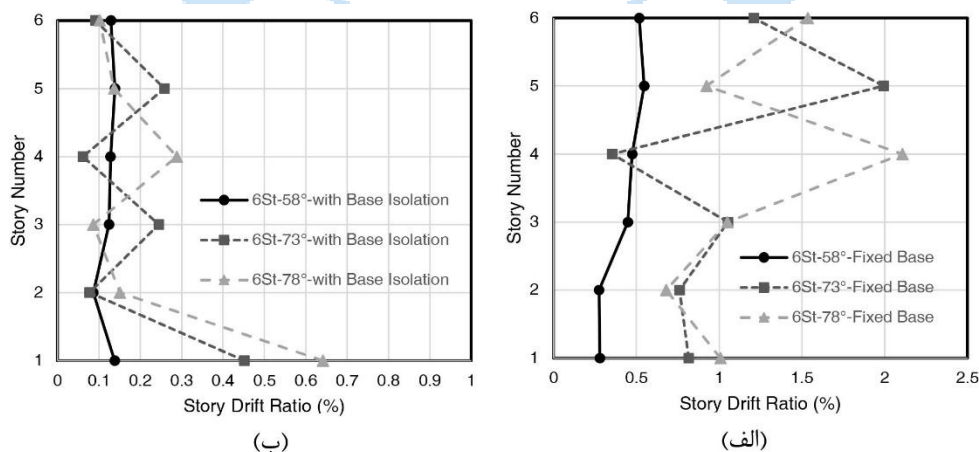


شکل ۹: مقایسه بیشینه میانگین شتاب طبقات برای قاب‌های ۱۲ طبقه: (الف) بدون جداسازی پایه، (ب) با جداسازی پایه

نتایج نشان می‌دهند که استفاده از جداساز پایه باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دایاگرید می‌شود و به طور مؤثری قاب را از حرکت زمین جدا می‌کند و انرژی لرزه‌ای را قبل از رسیدن به قاب فوقانی جذب و مستهلک می‌نماید. باید دقت شود که استفاده از جداساز پایه شتاب طبقات را کاهش می‌دهد که این امر موجب کاهش خسارت‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در هنگام زلزله می‌شود.

۳-۴- نسبت دریافت طبقات قاب‌ها

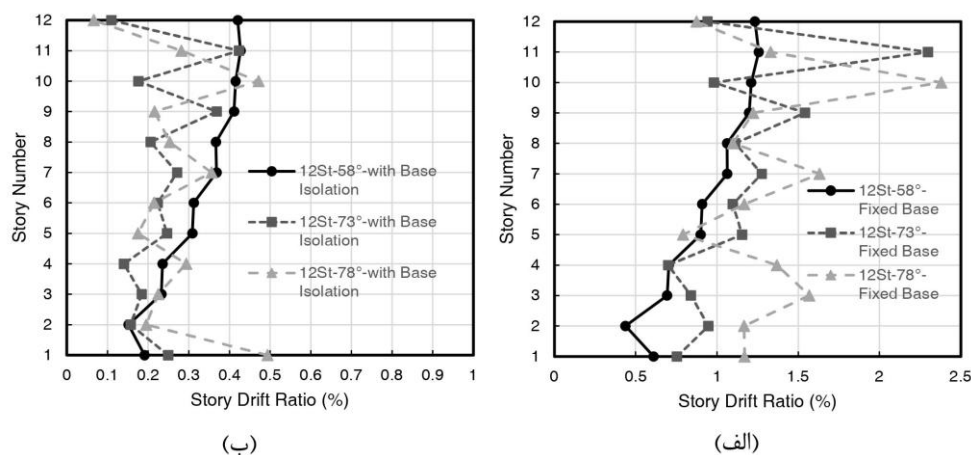
شکل ۱۰ - الف - نسبت دریافت طبقات برای قاب ۶ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را بدون جداسازی پایه نشان می‌دهد. شکل ۱۰ - ب - نسبت دریافت طبقات برای قاب ۶ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را با جداسازی پایه نشان می‌دهد. بیشینه نسبت دریافت طبقات در قاب ۶ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به‌طور میانگین حدود ۷۳/۹ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت. همچنین نتایج نشان می‌دهد در قاب ۶ طبقه با زاویه ۷۳ و ۷۸ درجه، دریافت در طبقه اول ماکزیمم شده و بالعکس در قاب ۶ طبقه با زاویه ۵۸ درجه دریافت در طبقات میانی ماکزیمم شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه اعضای قطری و کاهش سختی جانبی طبقه اول میزان دریافت در این طبقه بیشتر از سایر طبقات می‌باشد.



شکل ۱۰: مقایسه بیشینه میانگین دریافت طبقات برای قاب‌های ۶ طبقه: (الف) بدون جداسازی پایه، (ب) با جداسازی پایه

شکل ۱۱ - الف - نسبت دریافت طبقات برای قاب ۱۲ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را بدون جداسازی پایه نشان می‌دهد. شکل ۱۱ - ب - نسبت دریافت طبقات برای قاب ۱۲ طبقه تحت زوایای ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را با جداسازی پایه نشان می‌دهد. بیشینه نسبت

دریافت طبقات در قاب ۱۲ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به طور میانگین حدود ۷۵/۶۴ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت.



شکل ۱۱: مقایسه بیشینه میانگین دریافت طبقات برای قاب‌های ۱۲ طبقه: (الف) بدون جداسازی پایه، (ب) با جداسازی پایه

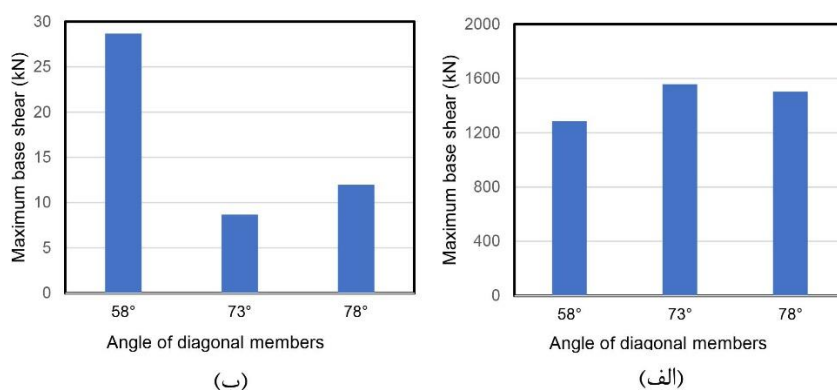
این کاهش در نسبت‌های دریافت طبقات نشان‌دهنده این است که جداسازی پایه به طور مؤثر تغییر شکل تجربه شده توسط قاب در هنگام بارگذاری جانبی، مانند فعالیت‌های لرزه‌ای، را به حداقل می‌رساند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از جداساز پایه باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دایاگرید می‌شود و به طور مؤثری قاب را از حرکت زمین جدا می‌کند و انرژی لرزه‌ای را قبل از رسیدن به قاب فوقانی جذب و مستهلک می‌نماید. باید دقت شود که استفاده از جداساز پایه نسبت دریافت طبقات را کاهش می‌دهد و این امر موجب بهبود ایمنی و مقاومت ساختمان‌ها در برابر نیروهای لرزه‌ای در هنگام زلزله می‌شود.

بر اساس پژوهش آزمایشگاهی لیو^{۲۳} و همکاران در سال ۲۰۲۲ به این نتیجه رسیدند سازه‌های دایاگرید در نسبت دریافت ۰/۷۸ درصد به تسلیم می‌رسند و در نسبت دریافت ۱/۱۷ درصد فروریزش آن‌ها اتفاق می‌افتد [۹]. نمودارهای بخش نسبت دریافت طبقات، متوسط بیشینه نسبت دریافت حاصل از رکوردهای مختلف در قاب ۶ و ۱۲ طبقه دایاگرید را نشان می‌دهند. در قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه دایاگرید بدون استفاده از جداساز، با افزایش زاویه اعضای مورب قاب‌ها، بیشینه نسبت دریافت افزایش می‌یابد. بر این اساس می‌توان اظهار نظر کرد که قاب‌ها تحت زلزله‌های MCE دچار فروریزش می‌گردند. در صورتیکه با اضافه نمودن سیستم جداساز لرزه‌ای به قاب دایاگرید ۶ و ۱۲ طبقه بدون جداساز بر اساس نمودارهای آن بخش ملاحظه می‌گردد متوسط بیشینه نسبت دریافت حاصل از رکوردهای مختلف به میزان قابل توجهی کاهش یافت و قاب‌ها از ناحیه فروریزش به ناحیه مناسبی از نظر پایداری نزدیک گردیدند. مقایسه‌ی این نسبت‌ها نشان می‌دهد مقادیر تقاضای نسبت دریافت و فروریزش در قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه دایاگرید به همراه جداساز از مقادیر مجاز کمتر بوده و هدف پژوهش حاصل گردید. همان‌طور که در بالاتر ذکر شد با افزایش زاویه اعضای مورب قاب‌ها، بیشینه نسبت دریافت افزایش می‌یابد و قاب‌ها در ناحیه تسلیم هم قرار می‌گیرند که با استفاده از جداساز لرزه‌ای نسبت دریافت کاهش قابل توجهی دارد و نکته جالب توجه این است که قاب‌ها به حد تسلیم هم نمی‌رسند.

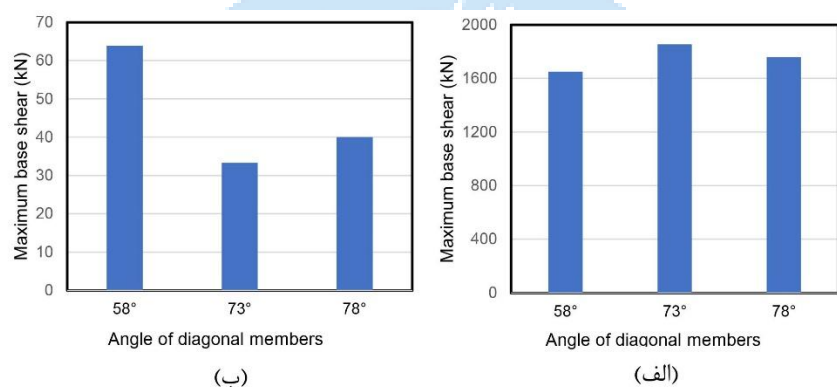
۴-۴- میانگین برش پایه قاب‌ها

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مقایسه برش‌های پایه تحت رکوردهای مختلف در حالت بدون استفاده از جداسازی پایه و در حالت با استفاده از جداسازی پایه برای قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه به ترتیب با زاویه‌های ۵۸، ۷۳ و ۷۸ درجه را نشان می‌دهد. این نمودارها نتایج تحلیل‌ها را برای میانگین برش پایه در دو حالت بدون جداساز و با جداساز تحت سطح خطر MCE به تصویر می‌کشند.

²³ Liu



شکل ۱۲: مقایسه میانگین برش پایه برای قاب‌های ۶ طبقه: (الف) بدون جداسازی پایه، (ب) با جداسازی پایه



شکل ۱۳: مقایسه میانگین برش پایه برای قاب‌های ۱۲ طبقه: (الف) بدون جداسازی پایه، (ب) با جداسازی پایه

میانگین برش پایه در قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به‌طور میانگین حدود ۹۰ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت. با توجه به اینکه استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث کاهش قابل توجه برش ورودی به قاب می‌شود، نتایج نشان می‌دهند که استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث بهبود عملکرد قاب‌های دایاگرید می‌شود.

۴-۵- تغییر مکان جداساز

بر اساس تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده در نرم‌افزار OpenSees می‌توان نتیجه گرفت که میانگین بیشینه تغییر مکان جداساز تحت رکوردهای انتخابی در سطح خطر MCE، در قاب ۶ طبقه دایاگرید با مقایسه زوایا مختلف به ترتیب با افزایش زاویه میانگین بیشینه تغییر مکان جداساز افزایش می‌یابد که در زاویه ۵۸ درجه مقدار آن ۰/۲۴۸ متر، در زاویه ۷۳ درجه مقدار آن ۰/۲۴۹ متر و در زاویه ۷۸ درجه مقدار آن ۰/۲۶ متر می‌باشد. همچنین در قاب ۱۲ طبقه دایاگرید نیز با مقایسه زوایا مختلف به ترتیب با افزایش زاویه میانگین بیشینه تغییر مکان جداساز افزایش می‌یابد که در زاویه ۵۸ درجه مقدار آن ۰/۵۲۹ متر، در زاویه ۷۳ درجه مقدار آن ۰/۵۳۳ متر و در زاویه ۷۸ درجه مقدار آن ۰/۵۵۱ متر می‌باشد. همچنین با افزایش ارتفاع که در واقع می‌توان گفت با افزایش دوره تناوب قاب‌ها، مشاهده شده که تغییر مکان جداساز افزایش یافته است.

جدول ۶: میانگین بیشینه تغییر مکان جداساز تحت رکوردهای انتخابی در سطح خطر MCE

واحد	طبقه ۱۲	قاب ۱۲	قاب ۶ طبقه دایاگرید	زاویه
متر		۰/۵۲۹	۰/۲۴۸	۵۸ درجه
متر		۰/۵۳۳	۰/۲۴۹	۷۳ درجه
متر		۰/۵۵۱	۰/۲۶	۷۸ درجه

۵- نتیجه گیری

هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر جداسازی پایه بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دایاگرید فولادی است. برای این منظور، مدل‌های قاب دایاگرید فولادی در دو حالت بدون جداسازی پایه و با جداسازی پایه و حالت‌های مختلف زوایای قطری تحت آنالیز دینامیکی غیرخطی بررسی شده‌اند خلاصه نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- بر مبنای مقایسه‌ای که با مطالعات آزمایشگاهی محققان دیگر در مورد فروریزش سازه‌های دایاگرید و بر اساس معیار دررفت طبقات انجام شد، نتایج نشان داد که ساختمان‌های دایاگرید بدون استفاده از جداساز لرزه‌ای در زلزله سطح خطر MCE دچار فروریزش می‌شوند و اضافه کردن جداساز آونگ اصطکاکی یگانه باعث جلوگیری از فروریزش تحت زلزله‌های MCE می‌شود، بطوریکه ماکزیمم نسبت دررفت طبقات در قاب‌های جداسازی شده پایه در مقایسه با قاب‌های پایه گیردار در مدل ۶ طبقه بطور میانگین از مقدار ۱/۵۴ درصد به مقدار ۰/۴۱ درصد و در مدل‌های ۱۲ طبقه بطور میانگین از مقدار ۱/۹۷ درصد به مقدار ۰/۴۴ درصد کاهش پیدا کرد. به این ترتیب سازه‌های دایاگرید از ناحیه فروریزش تحت زلزله MCE فاصله می‌گیرند و از فروریزش سازه‌ها جلوگیری می‌شود.
- بیشینه شتاب طبقات در قاب ۶ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به‌طور میانگین حدود ۴۸/۳۱ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت. همچنین در قاب ۱۲ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به‌طور میانگین حدود ۲۹/۰۷ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت. میانگین برش پایه نیز در قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه دایاگرید در حالت با استفاده از جداساز به‌طور میانگین حدود ۹۰ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از جداساز کاهش یافت. نتایج نشان دادند که استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث بهبود عملکرد قاب‌های دایاگرید می‌شود.
- جداسازی پایه در سیستم سازه‌ای دایاگرید باعث می‌شود دررفت طبقات و شتاب طبقات در ارتفاع سازه بطور یکنواخت توزیع گردند و این امر موجب کاهش خسارت‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در هنگام زلزله می‌گردد.
- تغییر ارتفاع روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های دایاگرید تأثیر زیادی دارد، بطوریکه با اضافه کردن جداساز لرزه‌ای در مدل ۱۲ طبقه نسبت دررفت بیشتر از مدل ۶ طبقه کاهش می‌یابد، این امر مربوط به رفتار این سیستم‌ها است، زیرا رفتار ساختمان ۱۲ طبقه خمشی-برشی است و رفتار ساختمان ۶ طبقه برشی می‌باشد. لذا نسبت دررفت قاب ۱۲ طبقه بدون استفاده از جداساز به مراتب بیشتر از قاب ۶ طبقه است و در نتیجه کاهش نسبت دررفت با استفاده از جداساز در قاب ۱۲ طبقه بیشتر مشهود است.

۵) تغییر زاویه اعضای دایاگرید روی رفتار لرزه‌ای این سیستم مجهز به جداساز لرزه‌ای تاثیر قابل توجهی دارد، بطوریکه با افزایش زاویه از ۵۸ درجه به ۷۸ درجه میزان کاهش نسبت دریفت قاب ۶ و ۱۲ طبقه دایاگرید ابتدا افزایش داشته و سپس کاهش می‌یابد.

۶) براساس تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که میانگین بیشینه تغییر مکان جداساز تحت رکوردهای انتخابی در سطح خطر MCE، در قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه دایاگرید با افزایش زاویه اعضای قطری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع و در نتیجه افزایش دوره تناوب قاب‌های دایاگرید، تغییر مکان جداساز نیز افزایش پیدا می‌کند.

لازم بذکر است، مطالعه حاضر جزء مطالعات اولیه در مورد عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دایاگرید مجهز به جداساز آونگ اصطکاکی بشمار می‌رود. لذا موضوعات بررسی نشده بسیاری در این حوزه وجود دارد که نیاز است در تحقیقات جداگانه‌ای به آن‌ها پرداخته شود. از آن جمله می‌توان به تأثیر افزایش ارتفاع روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دایاگرید مجهز به جداساز آونگ اصطکاکی، بررسی مقادیر انرژی مستهلک شده در جداگرها، تحلیل حساسیت پاسخ‌ها به نشت میرایی و تغییرات سختی در سیستم جداساز و ... اشاره داشت.

مراجع

- [1] Boake, T. M. (2014). *Diagrid Structures: Systems, Connections, Details*.
- [2] Jani, K., & Patel, P. V. (2013). Analysis and design of diagrid structural system for high rise steel buildings. *Procedia Engineering*, 51, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.015>
- [3] Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural developments in tall buildings: Current trends and future prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205–223. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5027>
- [4] Moon, K. S. (2008). Optimal grid geometry of diagrid structures for tall buildings. *Architectural Science Review*, 51(3), 239–251. <https://doi.org/10.3763/asre.2008.5129>
- [5] Rofooei, F. R., & Seyedkazemi, A. (2020). Evaluation of the seismic performance factors for steel diagrid structural systems using FEMA P-695 and ATC-19 procedures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(10), 4873–4910. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00876-2>
- [6] Mohsenian, V., Padashpour, S., & Hajirasouliha, I. (2020). Seismic reliability analysis and estimation of multilevel response modification factor for steel diagrid structural systems. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101168>
- [7] Seyedkazemi, A., & Rofooei, F. R. (2021). Comparison of static pushover analysis and IDA-based probabilistic methods for assessing the seismic performance factors of diagrid structures. *Scientia Iranica*, 28(1A), 124–137. <https://doi.org/10.24200/SCI.2019.51555.2250>
- [8] Fang, D., & Liu, C. (2021). Mechanical characteristics and deformation calculation of steel diagrid structures in high-rise buildings. *Journal of Building Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103062>
- [9] Liu, C., Fang, D., Zhao, L., & Zhou, J. (2022). Seismic fragility estimates of steel diagrid structure with performance-based tests for high-rise buildings. *Journal of Building Engineering*, 52. doi:10.1016/j.jobe.2022.104459
- [10] Roshani, M. (2023). Performance assessment and calculation of robustness of high-rise diagrid tube structures with various configurations. *Structures*, 54, 898–917. doi:10.1016/j.istruc.2023.05.068
- [11] Shokoohmatin, M., Hosseini, M., & Firoozi Nezamabadi, M. (2024). The Effect of Plan Geometry on Progressive Collapse of Tall Buildings with Diagrid Structure Based on Nonlinear Static and Dynamic Analyses. *International Journal of Steel Structures*, 24(2), 217–230. doi:10.1007/s13296-023-00801-8

- [12] SojoudiZadeh, R., Milanchian, R., Azizian, H., & Beirami Shahabi, A. (2024). Effect of Configuration Angle on Seismic Performance of Tall Steel Diagrid Frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(12), 94–105. doi:10.22065/jsce.2023.375578.2989
- [13] Cheng, F., Jiang, H., & Lou, K. (2008). *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control* (1st ed.). Boca Raton: CRC Press. doi:10.1201/9781420008173
- [14] American Society of Civil Engineers. (2021). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784415788
- [15] Shauhaibar, C., et al. (2013). *2012 IBC SEAOC Structural/Seismic Design Manual Volume 5: Examples for Seismically Isolated Buildings and Buildings with Supplemental Damping*. Victor Graphics.
- [16] Buckle, I. G., Dicleli, M., & Constantinou, M. C. (2006). *Seismic Isolation of Highway Bridges*. Federal Highway Administration and Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- [17] Tajammolian, H., & Khoshnoudian, F. (2017). Seismic behavior of asymmetric structures supported on TCFP bearings subjected to simplified near-fault pulses. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(Special Issue 1), 48–57. doi:10.22065/jsce.2017.86483.1197
- [18] Tajammolian, H., & Mahmoodi Sarkhoni, R. (2019). Comparison of the behavior of isolated structures mounted on different types of friction isolators subjected to near-field earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Special Issue 3), 205–220. doi:10.22065/jsce.2018.114655.1436
- [19] Tajammolian, H., Afrough, S., & Yazdin, M. (2020). Seismic Fragility Assessment of Steel Structures Supported on Friction Pendulum Isolators Subjected to Far-Field Ground Motions. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(2), 95–114. doi:10.22065/jsce.2018.119247.1465
- [20] Jalali, Y., Amiri, G. G., & Shakouri, A. (2021). Comparative response assessment of base-isolated braced-frame buildings considering effects of ductility design. *Journal of Building Engineering*, 43. doi:10.1016/j.job.2021.103110
- [21] Shakouri, A., Amiri, G. G., & Salehi, M. (2021). Effects of ductility and connection design on seismic responses of base-isolated steel moment-resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106647. doi:10.1016/j.soildyn.2021.106647
- [22] Hoang, P. H., Phan, H. N., & Nguyen, V. N. (2021). On the Influence of the Vertical Earthquake Component on Structural Responses of High-Rise Buildings Isolated with Double Friction Pendulum Bearings. *Applied Sciences*, 11(9), 3809. doi:10.3390/app11093809
- [23] Li, J., Luo, W., Liang, Q., Wang, D., Zhou, Y., & He, Z. (2023). Shaking table test of seismic performance of high-rise over-track building with base isolation. *Journal of Building Engineering*, 75. doi:10.1016/j.job.2023.106749
- [24] Eimani Kalehsar, H. (2023). Evaluating the Effect of Using Lead Rubber Seismic Isolator System and Friction Pendulum System with Different Periods in Improving the Seismic Behavior of Steel Framed Buildings. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(10), 24–48. doi:10.22065/jsce.2023.382356.3017
- [25] American Society of Civil Engineers. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings: Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings Dated and All Previous Versions Approved by the Committee on Specifications*.
- [26] Kim, J., & Lee, Y. H. (2012). Seismic performance evaluation of diagrid system buildings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(10), 736–749. doi:10.1002/tal.643
- [27] FEMA. (2009). *FEMA P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington, DC.
- [28] Menegotto, M., & Pinto, P. E. (1973). Method of Analysis for Cyclic Loaded R. C. Plane Frame Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behaviour of Elements under Combined Normal Force and Bending. *Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, International Association for Bridge and Structural Engineering, 11, 15–22.
- [29] Uriz, P., Filippou, F. C., & Mahin, S. A. (2008). Model for Cyclic Inelastic Buckling of Steel Braces. *Journal of Structural Engineering*. doi:10.1061/ASCE0733-94452008134:4619
- [30] Baker, W., Besjak, C., Sarkisian, M., Lee, P., & Doo, C. S. (2010). Proposed methodology to determine seismic performance factors for steel diagrid framed systems. CTBUH Technical Paper. Council of Tall Buildings and Urban Habitat, Chicago, Illinois.
- [31] Asadi, E., & Adeli, H. (2018). Seismic performance factors for low- to mid-rise steel diagrid structural systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(15). doi:10.1002/tal.1505
- [32] Zayas, V. A., Low, S. S., & Mahin, S. A. (1990). A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 6(2), 317–333. doi:10.1193/1.1585573
- [33] Schellenberg, A. H., Becker, T. C., & Mahin, S. A. (2017). Hybrid shake table testing method: Theory, implementation and application to midlevel isolation. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(5). doi:10.1002/stc.1915
- [34] Zayas, V. A., et al. (1987). *The FPS Earthquake Resisting System: Experimental Report*. Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- [35] Schellenberg, A. (2014). *Single Friction Pendulum Bearing Element*. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Single_Friction_Pendulum_Bearing_Element

- [36] Chen, W., & Scawthorn, C. (2003). Earthquake Engineering Handbook. 1st ed. Boca Raton: CRC Press. doi:10.1201/9781420042443
- [37] FEMA. (2000). FEMA 356: Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, DC.

