

basic design criteria for steel buildings with controlled rocking building

Mohammad Sadrara¹, Mahmood Hosseini^{2*}, Armin Aziminejad³

1- Ph.D. Candidate in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Eastern Mediterranean University (EMU),
Famagusta, Turkey

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The design philosophy in most building codes assumes that buildings may be damaged in severe earthquakes but should not collapse, ensuring the safety of occupants. However, this approach can still cause significant problems, as many buildings suffer damage and thousands of people may become homeless. A promising solution is to design and implement repairable and resilient buildings that can be reused by repairing only the damaged parts. Among these, rocking buildings are particularly important. In this study, buildings were first designed according to current regulations. Then, the same buildings were redesigned by adding energy-absorbing links at the bases of perimeter columns and removing the central columns of the ground floor. The models included buildings with 9, 12, and 15 stories and rectangular, square, hexagonal, and octagonal floor plans. Output of the maximum displacement of the roof, the relative displacement of floors, the moment capacity of the plastic joints and the acceleration of the roof have been calculated in different models and compared in different tables. By comparing the behavior of two types of systems, this research concluded that in the rocking buildings, the displacement of the roof is reduced by 45%, the relative displacement of floors is reduced by 50%, and the capacity of the created plastic joints is reduced by 40%. Also, at the end, a relationship is presented for the initial design of structures with rocking motion and with different plans.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 July 2025

Revise Date: 17 October 2025

Accept Date: 09 November 2025

Keywords:

Rocking building
Shear fuses at the foot of the column
Multifaceted plan
Non-stop use
Repairable and resilient buildings
Energy absorbing links.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.528613.3755

*Corresponding author: Mahmood Hosseini
Email address: mahmood.hosseini@emu.edu.tr

ضوابط اولیه طراحی ساختمان‌های فولادی دارای حرکت گهواره‌ای کنترل شده

محمد صدرآرا^۱، محمود حسینی^{۲*}، آرمین عظیمی نژاد^۳

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران، دانشکده عمران معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه مدیترانه شرقی، فاماگوستا، ترکیه

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

چکیده

فلسفه طراحی در آئین‌نامه‌های متداول بر این اساس است که ساختمان‌ها در زلزله‌های شدید آسیب ببینند ولی ویران نشوند و ایمنی جانی ساکنین ساختمان را به خطر نیندازند. اما این فلسفه طراحی می‌تواند مشکلات زیادی را ایجاد کند و سبب تخریب‌های گسترده شود. چرا که در هنگام وقوع زلزله ساختمان‌های زیادی دچار آسیب می‌شوند و هزاران نفر بی‌خانمان می‌شوند. یک ایده اساسی برای حل این مشکلات، طراحی و اجرای ساختمان‌های تعمیرپذیر و تاب‌آور است که بتوانند با تعمیر بخش‌های آسیب‌دیده که از قبل در آن‌ها طراحی شده است دوباره قابل استفاده باشند. یکی از مهمترین ساختمان‌های تعمیرپذیر و تاب‌آور ساختمان‌های با حرکت گهواره‌ای است. در این تحقیق ابتدا ساختمان‌هایی طبق آیین‌نامه طراحی شده و سپس همین ساختمان‌ها با اضافه کردن لینک‌های جاذب انرژی در پای ستون‌های پیرامونی و حذف ستون‌های میانی طبقه همکف، عملکرد گهواره‌ای در آن‌ها ایجاد شده است. ساختمان‌ها با سه نوع مدل سازی با تعداد طبقات ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه با پلان‌های مستطیل، مربع، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی انتخاب شده‌اند. خروجی مربوط به مقادیر ماکسیمم جابجایی بام، جابجایی نسبی طبقات، ظرفیت دوران مفاصل پلاستیک و شتاب بام در مدل‌های مختلف محاسبه شده و در جداول مختلف با هم مقایسه شده‌اند. این تحقیق با مقایسه رفتار دو نوع سیستم به این نتیجه رسیده است که در ساختمان‌های با عملکرد گهواره‌ای، جابجایی بام ۴۵ درصد کاهش، جابجایی نسبی طبقات ۵۰ درصد کاهش و ظرفیت دوران مفاصل پلاستیک ایجاد شده ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در پایان، رابطه‌ای برای طراحی اولیه سازه‌های با حرکت گهواره‌ای و با پلان‌های مختلف ارائه شده است.

کلمات کلیدی: حرکت گهواره‌ای، فیوزهای برشی در پای ستون، پلان چندوجهی، استفاده بی وقفه، ساختمان‌های تعمیرپذیر و تاب‌آور، لینک‌های جاذب انرژی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.528613.3755	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.528613.3755					
محمود حسینی					*نویسنده مسئول:	
mahmood.hosseini@emu.edu.tr					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در مقابل زلزله یکی از اهداف مهم آیین‌نامه‌های مختلف است. برای طراحی سازه‌های مقاوم در مقابل زلزله از مدل‌های طراحی مختلفی می‌توان استفاده کرد. در این میان می‌توان به سازه‌های با عملکرد مختلف اشاره کرد. برای مثال سازه‌های با جداساز لرزه‌ای در مقابل زلزله عملکرد خوبی دارند اما متأسفانه بین میلیون‌ها ساختمان تنها در تعداد معدودی کار شده است که علت آن گران بودن قطعات بکار رفته در سازه‌های جداساز لرزه‌ای است که باعث شده کمتر کسی در طراحی سازه‌های خود از سیستم جداساز لرزه‌ای استفاده کند. سیستم‌های کنترل فعال هم که هنوز آن طور که باید اجرایی نشده و بسیار پر هزینه است و در کل دنیا فقط چند تایی ساختمان به این روش ساخته شده است. در این میان سازه‌های تعمیر پذیر و تاب آور می‌توانند عملکرد مناسب تری داشته باشند که از این میان می‌توان به سازه‌های با حرکت گهواره‌ای اشاره کرد و در این تحقیق به بررسی رفتار این سازه‌ها پرداخته شده و بسته به نوع مدل سازی که در این مقاله به آن اشاره شده است رابطه ای برای طراحی سازه‌های با حرکت گهواره‌ای ارائه شده است.

۲- هدف و پیشینه تحقیق

هدف اصلی این مقاله بررسی و تحلیل سازه‌های فولادی با حرکت گهواره‌ای کنترل شده با فیوزهای برشی در پای ستون‌های طبقه همکف و پلان چند وجهی جهت استفاده از اتلاف انرژی این سیستم در بهسازی لرزه‌ای سازه می باشد. سازه‌های با حرکت گهواره‌ای در طول سالیان گذشته با عملکردهای مختلف به روش‌های مختلفی معرفی شده است.

در طی سال‌های گذشته در رابطه با ساختمان‌های با عملکرد گهواره‌ای تحقیقات مختلفی صورت گرفته که در ادامه برخی از آنها ارائه شده است. آزوهاراتا [۱] در سال ۲۰۰۲ ایده حرکت گهواره‌ای در قاب‌های دو بعدی را مطرح کرد و نشان داد که در اثر تغییر رفتار ساختمان از مود برشی به گهواره‌ای، میزان شتاب، تغییر مکان نسبی و برش پایه ساختمان کاهش و پیروی ساختمان افزایش می‌یابد. فیلیاترولت و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۴ در مقاله‌ای توسعه سیستم‌های مرکزگرای مقاوم در مقابل زلزله را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مقاله ذکر کردند که در اثر اعمال زلزله‌های مخرب ممکن است بسیاری از ساختمان‌ها خسارت ببینند و همچنین تغییر مکان در آنها افزایش یابد. این موضوع سبب توسعه سیستم‌های سازه‌ای مرکزگرا در سال‌های اخیر شده است که به ساختمان اجازه می‌دهد پس از یک زلزله مخرب به موقعیت اولیه خود برگردد که در این مقاله به بررسی روش‌های مختلف سیستم‌های مرکزگرا پرداخته شده است. اترتون و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۸ طرحی برای کنترل قاب فولادی با حرکت گهواره‌ای ارائه نمودند. آنها در طرح خود در ساختمان حرکت گهواره‌ای ایجاد کردند و ذکر کردند که قاب ساختمان پیشنهادی به پی‌گیردار نشده است و با کابل‌های پس‌کشیده امکان بازگشت به موقعیت اولیه هنگام حرکت گهواره‌ای میسر شده است. آنها نشان دادند که قاب فولادی مهاربندی شده پیشنهادی در حد الاستیک باقی می‌ماند و فیوزهای سازه‌ای که جهت جذب انرژی تعبیه شده‌اند قابلیت تعویض پذیری دارند. اترتون و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۰ طرحی را پیشنهاد نمودند که در آن قاب‌های فولادی مهاربندی شده دارای حرکت گهواره‌ای بوده و آسیب‌های سازه‌ای را به فیوزهای قابل تعویض هدایت می‌کنند. آنها در طرح خود نشان دادند که در هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ، تغییر مکان نسبی‌های پسماند سقف از بین می‌رود. اما به دلیل بکارگیری در قاب‌ها، آسیب به اجزای غیر سازه‌ای را منجر شده و به دلیل شرایط ویژه این قاب‌ها، صرفاً اجرای آزمایشگاهی و مدل‌های کوچک میسر بوده است. حسینی و نوروزی نژاد [۵] در سال ۲۰۱۲ در مقاله خود نوعی ستون تلسکوپی به همراه یک نوع جاذب انرژی در پایه ستون برای کنترل لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه طراحی نمودند که در قسمت وسط ساختمان در طبقه همکف قرار دارد و سبب ایجاد حرکت الکلنگی در ساختمان می‌شود. آنها سازه‌ای طراحی نمودند که در مقابل زلزله‌های مختلف رفتار خوبی از خود نشان می‌دهد و پس از زلزله‌های مخرب نیز نیاز به تخریب کلی ندارد و با تعمیرات جزئی می‌تواند به عملکرد خود ادامه دهد. حسینی و علوی [۶] در سال ۲۰۱۴ در مقاله‌ای یک نوع روش تعمیر پذیر با ساختمان‌های با حرکت الکلنگی و اتلاف انرژی برای مناطق لرزه‌ای در سطح پایه را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این پژوهش به این نتیجه رسیدند که روش حرکت گهواره‌ای و ساختمان‌های با

اتلاف انرژی در کاهش پاسخ لرزه‌ای در ساختمان‌های چند طبقه مزیت‌های زیادی دارند که استفاده از این سیستم می‌تواند توصیه خوبی برای ساختمان‌های نزدیک گسل‌های فعال، خصوصاً در شهرهای شلوغ باشد. افشاری و همکاران [۷] در مقاله‌ای در سال ۱۳۹۴ حرکت گهواره‌ای دیوار برشی را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله یک تحلیل تاریخچه زمانی بر روی یک قاب سه دهانه با یک دهانه دیوار برشی، یک بار در حالتی که تکیه‌گاه دیوار برشی گیردار باشد و بار دیگر با حرکت گهواره‌ای دیوار برشی مورد مطالعه قرار گرفته است و به منظور مقایسه رفتار دو سیستم پارامترهای نیروی محوری در ستون طبقه اول، تغییر مکان بام و شتاب افقی بیشینه طبقات مدنظر است. بلبو و راک [۸] در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۵ مقاومت لرزه‌ای را در سیستم هسته گهواره‌ای مرکزگرا مورد بررسی قرار دادند. بادیبدهای متعارف ظرفیت جابجایی نسبی را کاهش می‌دهند قبل از اینکه بادیبند کم‌انرژی کند و دچار خسارت شود و سختی و مقاومت خود را از دست دهد. آنها در این مقاله به این نتیجه رسیدند که سیستم‌های گهواره‌ای مرکزگرا می‌توانند در افزایش نیروی مقاوم جانبی بسیار موثر باشند. سانگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ در یک مطالعه آزمایشگاهی قاب بتنی پیش تنیده مرکزگرا را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مقاله به نتایج زیر رسیدند سیستم مرکزگرا پیش تنیده پیشنهاد شده که در اتصالات تیر به ستون و ستون به ستون به فونداسیون پیش تنیده شده‌اند، سبب اتلاف انرژی تعدیل شده و ظرفیت مرکزگرا مطلوب می‌شود. حسینی و ابراهیمی [۱۰] در سال ۲۰۱۵ در تحقیقی صفحات تسلیمی برای ستون‌های محصور در ساختمان‌های با حرکت گهواره‌ای جهت اتلاف انرژی زلزله پیشنهاد نمودند و به بررسی خواص آن با استفاده از تحلیل غیرخطی اجزا محدود پرداختند. آنها در این مطالعه تأکید کردند که با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان به راحتی ساختمان‌های تعمیرپذیری طراحی نمود که در هنگام زلزله‌های مخرب رفتار مناسبی از خود نشان می‌دهند. رهگذر و مقدم [۱۱] در سال ۲۰۱۶ در مقاله‌ای، نوعی قاب با حرکت گهواره‌ای به نام SC-CR SCBF را معرفی نمودند که مناسب برای قاب‌های متوسط و کونا مرتبه است و سبب کاهش آسیب‌های سازه‌ای می‌شود. اما سبب ایجاد تغییر شکل جانبی در بقیه قاب‌های ساختمان شده و در آنها تغییر مکان‌های جانبی بزرگ و بیش از حد ایجاد می‌کند که در نتیجه آن آسیب زیادی به اجزای غیر سازه‌ای وارد می‌شود. حسینی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۶ در مقاله‌ای عملکرد لرزه‌ای یک سیستم سازه‌ای نوآورانه با حرکت الکلنگی و ستون‌های با دمپر اصطکاکی در سطح پایه مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مقاله به این نتیجه دست یافتند که پاسخ لرزه‌ای در ساختمان چند طبقه کاهش یافته است. به طوری که مقدار جابجایی نسبی ۱۶ درصد میانگین کاهش یافته، شتاب نهایی در سطح طبقه ۱۳ درصد میانگین کاهش یافته و خسارات سازه‌ای، بین ۶۰ تا ۸۰ درصد و خسارات غیر ساختمانی تا ۵۵ درصد کاهش یافته است. گریگوران و مقدسی [۱۳] در سال ۲۰۱۷ در مقاله‌ای یک سیستم دیوار برشی جدید مقاوم در مقابل زلزله را معرفی کردند. آنها در این مقاله یک قاب خمشی با دیوار برشی گهواره‌ای (RWMF) جهت کاهش خسارت، جلوگیری از فروریزش و عملکرد مرکزگرا در زلزله‌های شدید معرفی نمودند. در این مقاله جزئیاتی که به کاهش خسارت کمک می‌کنند، ارائه شده است. همچنین در این مقاله یک کار به عنوان مثال برای تایید راه حل پیشنهادی ارائه شده است. خلخالی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۷ در مقاله‌ای ساختمان کوتاهی را طراحی نمودند و نشان دادند که ساختمان تمایلی به حرکت گهواره‌ای ندارد. سپس آن ساختمان را به چهار قسمت تقسیم کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ساختمان در اثر اعمال زلزله‌های مخرب رفتار خوبی از خود نشان می‌دهد. اما ستون‌های کناری در چهار کج ساختمان در طبقه همکف فشار زیادی را تحمل کرده و گاهی دچار آسیب می‌شوند. باپیر [۱۵] در سال ۲۰۱۷ در مطالعه‌ای طراحی لرزه‌ای ساختمان بتنی با قاب‌های گهواره‌ای را مورد بررسی قرار داد. او در این مطالعه به این نتیجه رسید که در اثر ایجاد رفتار گهواره‌ای در دیوار بتنی رفتار خوبی ایجاد می‌شود. وی در این مطالعه نشان داد که بخش‌هایی از ساختمان ممکن است آسیب‌های جزئی در عناصر غیرسازه‌ای داشته باشند که می‌توان بلافاصله پس از زلزله آن را برطرف کرد، اما این سیستم از آسیب‌دیدگی کامل ساختمان جلوگیری می‌کند و سطح عملکرد استفاده بی وقفه (IO) را برآورده می‌کند. محمدی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۹ در مقاله‌ای استفاده از ساختمان‌های مهاربندی شده فولادی با سیستم گهواره‌ای کنترل شده در مقاوم سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم گهواره‌ای کنترل شده برای بهبود پارامترهای پاسخ از جمله سطوح عملکرد ساختمان و کاربرد آن به عنوان یک رویکرد مقاوم‌سازی جایگزین است. حسینی و

اسدی [۱۷] در سال ۱۳۹۸ در مطالعه‌ای ساختمان‌های فولادی تعمیر پذیر با پلان مستطیلی شکل با حرکت گهواره‌ای را تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک مورد ارزیابی اولیه قرار دادند. آن‌ها در مطالعه خود ساختمان‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه فولادی با پلان مستطیل شکل را بر اساس آیین‌نامه طراحی نمودند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از شتاب‌نگاشت زلزله‌های انتخاب شده به صورت سه مولفه ای تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار دادند. رهگذر [۱۸] در مقاله ای به بررسی طراحی بهینه قاب‌های با هسته گهواره‌ای عمودی مجزا (Vertical Isolated Rocking Core-Moment Frames) پرداخت تا ترکیبی از پارامترهای هندسی و سختی را پیدا کند که کمترین پاسخ جانبی، کمترین جابجایی رزیدویی و مطلوبیت لرزه‌ای را داشته باشد. نویسندگان با تحلیل عددی و به‌کارگیری بهینه‌سازی، نشان داد که چگونه توزیع سختی در هسته و قاب پیرامونی و نیز مقدار جداکننده/مکانیزم گهواره‌ای (rocking) بر رفتار سازه تأثیر می‌گذارد، به‌ویژه در کاهش نیروی پایه و جابجایی نسبی. رهگذر [۱۹] در مطالعه‌ای دیگر به ارزیابی قابلیت اطمینان لرزه‌ای هسته‌های فولادی کنترل‌شده با حرکت گهواره‌ای پرداخت، با تمرکز بر کاهش خسارات باقی‌مانده و کنترل بزرگای جابجایی جانبی. نتایج نشان داد که با طراحی مناسب لینک‌ها و کنترل مکانیزم گهواره‌ای، امکان دستیابی به پاسخ مقاوم با جابجایی کنترل‌شده و کاهش آسیب پس‌زلزله وجود دارد. این مقاله اهمیت طراحی دقیق مؤلفه‌های مقاوم‌سازی جانبی و شاسی صلب در جلوگیری از تغییر مکان‌های زیاد و حفظ ایمنی سازه را تأیید می‌کند. عبدالمحمدی [۲۰] در تحقیقی روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد را برای سازه‌های خودمرکز (self-centering) به‌روزرسانی کرد تا بتواند به‌صورت مؤثرتری پاسخ پس‌ازتغییرپذیری و میرایی را همراه با کنترل تغییر مکان‌های غیرمطلوب تضمین کند. تمرکز این مقاله بر تعامل بین سختی مفاصل، قابلیت برگشت‌پذیری و انرژی جذب‌شده است. داسیلوا و ژنگ [۲۱] در مقاله ای به ارائه مدل‌های جایگزین (surrogate models) برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای سازه‌های انعطاف‌پذیر چنددرجه آزادی که در پایه قابلیت حرکت گهواره‌ای دارند، پرداختند. مدل‌ها امکان برآورد سریع تغییر مکان طبقات، جابجایی نسبی و پاسخ مودال را بدون نیاز به شبیه‌سازی کامل تاریخچه‌زمانی فراهم می‌کنند. نتایج نشان داد که اعمال حرکت گهواره‌ای پایه در ترکیب با نرم‌افزارهای مدل‌سازی دقیق می‌تواند پاسخ کلی سازه را بهبود دهد و درصد خطای محاسبه تغییر مکان و جابجایی نسبی را در مقایسه با مدل‌های کامل کاهش دهد. آفانلیزاده و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای دو مورد عددی از قاب‌های مقاوم به لنگر با دیوارهای برشی مدولار که در پایه قابلیت حرکت گهواره‌ای دارند، مورد بررسی قرار دادند. یکی از نتایج کلیدی به آن دست یافتند این بود که وجود دیوار برشی rocking باعث غالب شدن مود اول بر پاسخ کلی قاب شده و توزیع تغییر مکان بین طبقات یکنواخت‌تر شده، که خطر وقوع soft-story را کاهش می‌دهد. این نتایج تأکید می‌کند که ساختارهایی با شاسی صلب و اجزای rocking می‌توانند توزیع سختی و پاسخ لرزه‌ای را طوری بهبود دهند که تغییر مکان نسبی و جابجایی طبقات پایین کمتر شده و آسیب کمتر شود.

در مطالعات و پژوهش‌های گذشته در رابطه با ساختمان‌های با پلان‌های چند ضلعی و دارای حرکت گهواره‌ای و ضوابط اولیه طراحی این مدل سازه‌ها مطالعاتی صورت نگرفته است. در این مطالعه تلاش شده است ابتدا با بررسی مقالات و مطالعات گذشته دید خوبی نسبت به ساختمان‌های با حرکت گهواره‌ای به وجود آید، سپس با بررسی دقیق مطالب، مشکلات و کم و کاست‌های مطالعات گذشته ریشه یابی شود و با ارائه ضوابط اولیه طراحی گام موثری در طراحی ساختمان‌های با حرکت گهواره‌ای برداشته شود.

۳- روش تحقیق

در این مقاله مدل‌سازی بر اساس طراحی سازه با حرکت گهواره‌ای انجام شده است. به این گونه که ساختمان‌های طراحی شده در این مقاله در طبقات ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه طراحی شده‌اند. ساختمان‌های با پلان‌های مربع، مستطیل، شش ضلعی و هشت ضلعی بوده و برای ایجاد حرکت گهواره‌ای، ستون‌های میانی طبقه همکف که متصل به زمین هستند حذف شده‌اند و سازه توسط ستون‌های پیرامونی در طبقه همکف به زمین متصل شده است. همچنین در طبقه اول ساختمان شاسی صلبی با مقاطع بادبندی در نظر گرفته شده است و طبقات بالایی به صورت عادی طراحی شده و روی شاسی صلب قرار گرفته است که به علت این که ستون‌های وسطی در طبقه همکف حذف شده

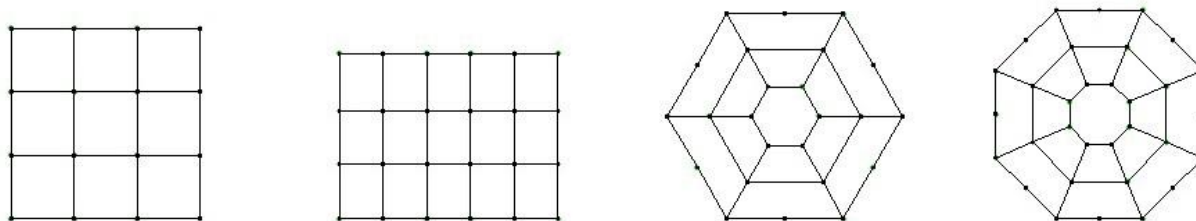
اند، شاسی صلب طراحی شده در سقف طبقه همکف به نوعی نقش فونداسیون را برای قاب طبقات یک به بالا ایفا میکند. به همین علت سازه در سقف طبقه همکف بصورت شاسی صلب طراحی شده است.

در سیستم پیشنهادی این مقاله، با حذف ستون‌های میانی طبقه همکف، انتقال بارهای ثقلی و جانبی تنها بر عهده ستون‌های کناری قرار می‌گیرد. این تغییر هندسی می‌تواند منجر به افزایش تغییرمکان جانبی و تمرکز نیرو در ستون‌های پیرامونی شود؛ بنابراین در طراحی چنین سازه‌ای، کنترل دقیق الزامات آیین‌نامه‌ای ضروری است.

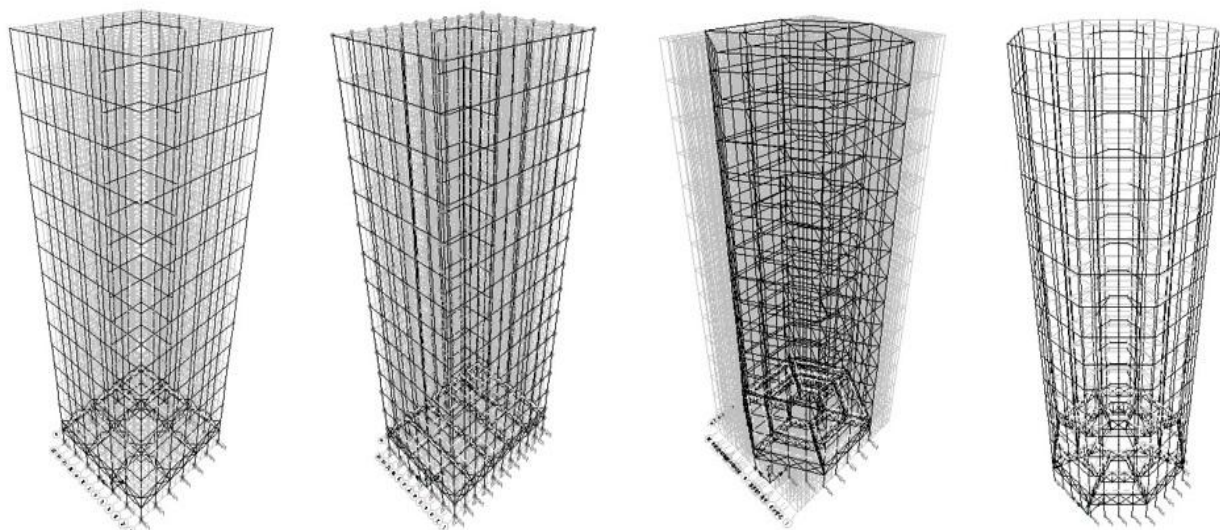
مطابق با آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران و AISC 360-10، مقاومت طبقه باید به‌گونه‌ای تأمین شود که ظرفیت برشی ستون‌های کناری و شاسی صلب در کف همکف پاسخگوی ترکیب بارهای ثقلی و جانبی باشد. همچنین محدودیت نرمی طبقه (Soft Story) باید کنترل گردد، به طوری که سختی جانبی طبقه همکف نسبت به طبقات بالاتر کمتر از ۷۰٪ نباشد. کنترل دررفت بین‌طبقه‌ای نیز براساس آیین‌نامه ۲۸۰۰، برای سازه‌های فولادی حداکثر ۲٪ ارتفاع طبقه مجاز است؛ در مدل‌های طراحی شده، دررفت طبقات پس از اعمال حرکت گهواره‌ای کنترل شده در همین حدود حفظ شده است.

در بخش مقاطع، تیرها از نوع نورد شده IPE و ستون‌ها از مقاطع H شکل (IPB) انتخاب شده‌اند. برای تأمین سختی کافی در شاسی صلب، از تیروورق‌های دوبل یا مقاطع مرکب استفاده شده است. مقاطع ستون‌های کناری در طبقه همکف با توجه به افزایش نیروهای محوری و برشی، به صورت مقاطع سنگین‌تر انتخاب گردید (مانند IPB 300 تا IPB 450 بسته به تعداد طبقات)، در حالی که در طبقات فوقانی از مقاطع سبک‌تر استفاده شده است. بادبندهای مورد استفاده در شاسی صلب نیز از دوبل نبشی یا ناودانی انتخاب گردیدند تا سختی جانبی لازم در قاب پیرامونی تأمین گردد.

با توجه به موارد ذکر شده به لحاظ آیین‌نامه‌ای، علی‌رغم حذف ستون‌های میانی، سازه‌های گهواره‌ای با طراحی مناسب ستون‌های کناری و شاسی صلب، قادر به تأمین مقاومت طبقه، جلوگیری از ایجاد طبقه نرم و کنترل دررفت بین‌طبقه‌ای در حدود آیین‌نامه‌ای هستند. برای بررسی رفتار سازه با عملکرد گهواره‌ای، سازه‌های مشابه با عملکرد خمشی و به شکل متداول نیز با تشابه پلان و تعداد طبقات به عنوان سازه شاهد طراحی شده و مقادیر به دست آمده از نتایج تحلیل سازه شاهد با سازه با عملکرد گهواره‌ای مقایسه شده است. در پای ستون‌های طبقه همکف از فیوزهای برشی استفاده می‌گردد تا ضمن ایجاد حرکت گهواره‌ای و برگشت به حالت اولیه سازه و جلوگیری از بلند شدن بیش از حد سازه، قابلیت تعمیر پذیری داشته باشند تا بتوانند پس از جذب انرژی هنگام وقوع زلزله‌های مخرب و آسیب احتمالی مانند فیوز عمل کنند و با تعویض آنها و هزینه جزئی سازه به حالت اولیه برگردد تا سازه قابلیت استفاده بی وقفه داشته باشد. این فیوزها در واقع یک طرفه کار می‌کنند. به این گونه که در فشار مقاومت بسیار بالایی دارند و روی پی نشسته‌اند و کلیه بارهای ثقلی و برش پایه را تحمل می‌کنند. اما در کشش برای بار محدودی طراحی شده‌اند تا در هنگام وقوع زلزله و بلند شدن سازه بتوانند مانند فیوز عمل کنند و سبب اتلاف انرژی زلزله شوند. از نکات دیگر که در طراحی این سیستم نوین حائز اهمیت است اینکه فونداسیون سازه نیز باید طوری در نظر گرفته شود تا در مقابل حرکت گهواره‌ای سازه تغییری در رفتار سازه ایجاد نکند. به همین علت در طراحی سازه‌ها از خاک سخت استفاده شده است و سازه برای طراحی در مناطق با خاک سخت پیشنهاد می‌شود تا خاک زیر فونداسیون تاثیری در حرکت گهواره‌ای و نتایج مطالعه ایجاد نکند. پلان سازه‌های پیشنهادی و مدل سه بعدی مدل سازی سازه‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ آمده است.



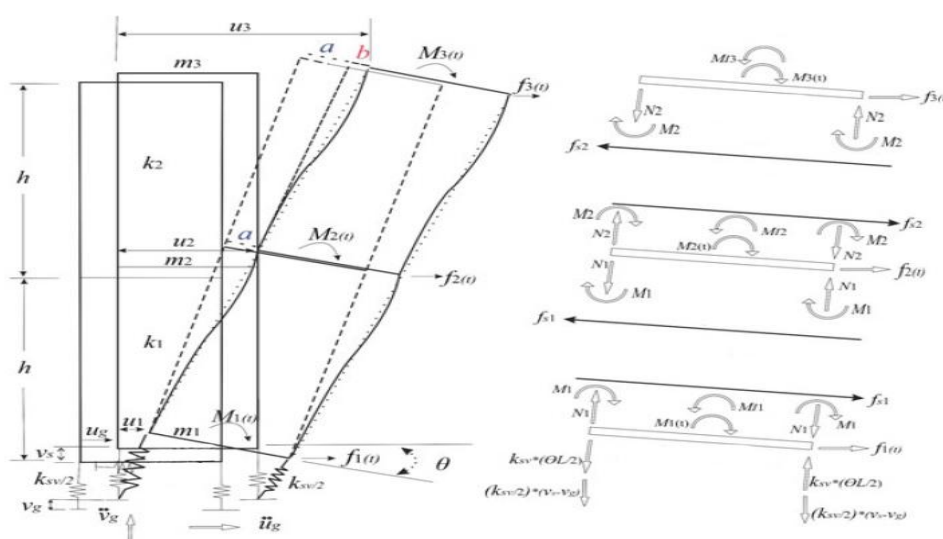
شکل ۱: شکل کلی پلان ساختمان‌های طراحی شده.



شکل ۲: شکل کلی سه بعدی ساختمان‌های ۱۵ طبقه.

توجیه علمی این سبک مدل سازی با چنین پلان‌هایی طراحی سازه‌ها با مقاطع مشابه و نزدیک برای به دست آوردن بهترین حالت مدل سازی سازه با حرکت گهواره ای است. به همین علت سازه‌های با مساحت یکسان و نزدیک به هم و همچنین سازه‌هایی با پلان‌های نزدیک به دایره انتخاب شده است که بتوان به راحتی حرکت گهواره ای را در آن‌ها ایجاد کرد و بتوان مقایسه لازم برای انتخاب سازه با بهترین شکل پلان را انجام داد.

پس از مدل سازی سازه‌ها با پلان‌های مختلف و تعداد طبقات ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه، مقاطع مورد نظر برای سازه‌ها بدست آمده و پس از طراحی سازه و تیپ کردن مقاطع در طبقات، سازه‌ها را با مقاطع بدست آمده به نرم افزار OpenSees منتقل شده تا سازه‌ها را در طی تحلیل تاریخچه زمانی و اعمال ۷ زلزله مورد بررسی قرار گیرد. در شکل‌های زیر گرافیک سازه‌های ۱۵ طبقه طراحی شده با جاذب‌های انرژی در پای ستون‌های همکف و با پلان‌های مختلف در نرم افزار SAP، نشان داده شده است. لازم به ذکر است در این مدل‌ها کلیه ستون‌های میانی طبقه همکف حذف شده و سازه روی ستون‌های پیرامونی که در پای آن‌ها لینک‌های جاذب انرژی در نظر گرفته شده، قرار دارد. دیاگرام کلی سازه با حرکت گهواره‌ای که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: شکل شماتیک رفتار سازه با حرکت گهواره‌ای. (۱۲)

در این پژوهش مدل سازی در دو دسته کلی انجام شده است. دسته اول مدل سازی مربوط به سازه‌های متداول هستند که از آنها به عنوان سازه شاهد نام برده شده است. سازه‌های شاهد در این تحقیق از سازه‌های با پلان مربع، مستطیل، شش ضلعی و هشت ضلعی و در طبقات مختلف ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه طراحی شده اند. سازه‌های شاهد به صورت سازه‌های متداول و مطابق آیین نامه طراحی شده اند و پای کلیه ستون های همکف گیردار بوده و قاب مورد استفاده در طراحی سازه، قاب خمشی می باشد. در دسته دوم در سازه‌های پیشنهادی در این تحقیق با تغییری که در سازه‌های شاهد ایجاد شده است، از سازه‌های با حرکت گهواره‌ای و با پلان مربع، مستطیل، شش ضلعی و هشت ضلعی و در طبقات مختلف ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه طراحی شده اند.

نحوه طراحی مدل‌های سازه‌ای به این گونه است که مدل‌ها بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) و همچنین AISC 360-10 برای طراحی فولاد شکل‌پذیر ساخته شدند. تحلیل بارگذاری ثقلی بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران انجام شد. و بارگذاری زلزله به صورت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از رکوردهای واقعی (۷ رکورد از حوزه دور و نزدیک) انجام گرفت. در این مقاله برای طراحی سازه های مقاوم در مقابل زلزله، از آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مختلفی استفاده شده است. برای طراحی لرزه‌ای از استاندارد ۲۸۰۰ است و برای انتخاب رکوردهای زلزله و مقیاس‌گذاری آنها از FEMA استفاده شده است. همچنین برای ضوابط طراحی لرزه‌ای قاب‌های فولادی ویژه و مقاطع فولادی از آیین نامه AISC استفاده شده است.

مشخصات سازه‌های طراحی شده سازه های ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه با پلان های مستطیلی، مربعی، شش ضلعی و هشت ضلعی. و با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی در مدل‌های مرجع و قاب گهواره‌ای کنترل شده با لینک‌های برشی در مدل‌های پیشنهادی می باشد. نوع تیر و ستون‌ها مقاطع نورد شده I شکل (IPE) برای تیرها و IPB یا H شکل برای ستون‌ها (بر اساس جدول اشتال) می باشد. بادبندها در شاسی صلب طبقه اول از مقاطع دبل نبشی (L) یا ناودانی استفاده شده است. فونداسیون نیز بر اساس خاک نوع III آیین‌نامه ۲۸۰۰. در نظر گرفته شده است. ($V_s = 175-375$ m/s).

مشخصات مودال سازه‌ها در ادامه ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات مودال سازه ۹ طبقه با پلان مربعی

مدل ۹ طبقه	پلان مربعی
پریود اصلی	۱.۲ ثانیه
مود اول	ارتعاش جانبی در راستای X (۶۵٪ مشارکت جرمی)
مود دوم	ارتعاش جانبی در راستای Y (۲۵٪ مشارکت جرمی)
مود سوم	پیچشی (۱۰٪ مشارکت جرمی)

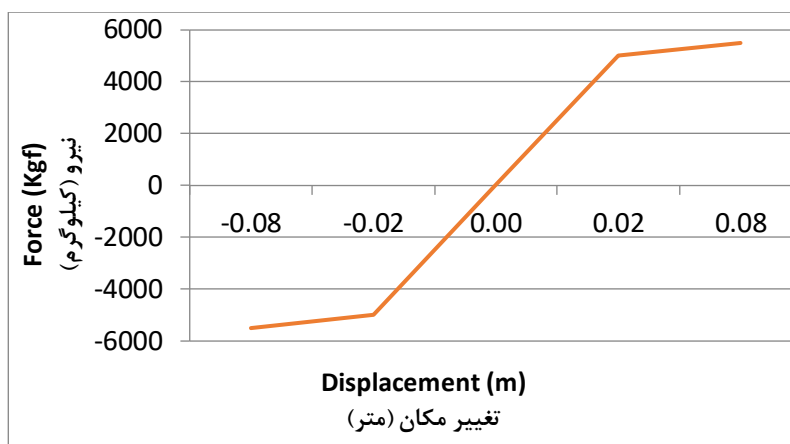
جدول ۲: مشخصات مودال سازه ۱۲ طبقه با پلان مستطیلی

مدل ۱۲ طبقه	پلان مستطیلی
پریود اصلی	۱.۶ ثانیه
مود اول	ارتعاش جانبی در راستای بلندتر مستطیل (۷۰٪ مشارکت جرمی).

جدول ۳: مشخصات مودال سازه ۱۵ طبقه با پلان هشت ضلعی

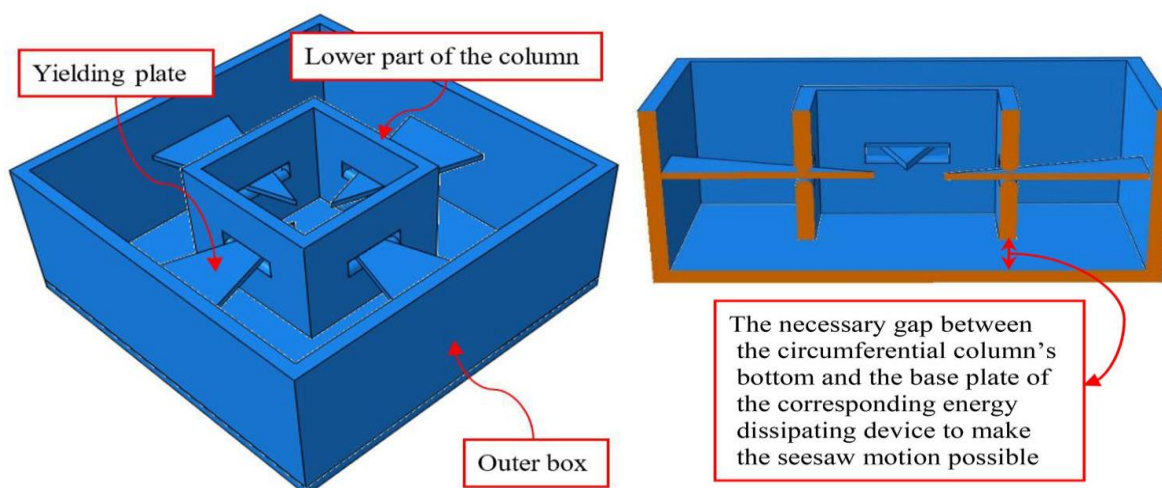
مدل ۱۵ طبقه	پلان هشت ضلعی
پریود اصلی	۲.۱ ثانیه
مود اول	ارتعاش جانبی متقارن (۶۰٪ مشارکت جرمی)
مود دوم	پیچشی (۲۰٪ مشارکت جرمی)

در این پژوهش ابتدا سازه‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه با پلان مربع، مستطیل، شش ضلعی و هشت ضلعی که به صورت متداول (آیین نامه ای) طراحی شده اند را بر اساس روش تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار داده، سپس همان سازه‌ها به صورت سیستم پیشنهادی با استفاده از فیوزهای برشی پای ستون مورد ارزیابی قرار گرفته اند. سازه‌ها با استفاده از آیین نامه ۲۸۰۰ طراحی شده و سپس با استفاده از شتاب نگاشت های واقعی که به صورت سه مولفه ای به سازه اعمال می گردد، تحلیل شده و در ادامه به همین سازه قابلیت حرکت گهواره‌ای کنترل شده با استفاده از سیستم پیشنهاد شده اضافه می گردد و سازه به صورت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با همان شتاب نگاشت های اعمال شده مورد بررسی و سپس نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه می گردند. برای اختصاص دادن لینک‌های جاذب انرژی به ستون‌های طبقه همکف در نرم افزار OpenSees مقادیر مربوط به لینک‌ها که در نرم افزار SAP در نظر گرفته شده، مطابق شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴: نمودار دو خطی نیرو و جابجایی جاذب های انرژی استفاده شده در نرم افزار OpenSees

برای محاسبه نیروی وارد به هر لینک جاذب انرژی، در این مقاله وزن کلی ساختمان محاسبه شده و نیروی جانبی وارد به وسط هر ساختمان که یک دهم وزن کل ساختمان است در نظر گرفته شده و پس از ضرب در نصف ارتفاع ساختمان لنگر وارد به وسط ساختمان محاسبه می شود. پس از تقسیم عدد مربوطه بر طول یک وجه ساختمان و سپس تقسیم عدد فوق بر تعداد لینک های جاذب انرژی در یک وجه، نیروی وارد به هر لینک جاذب انرژی محاسبه می شود. در این مقاله فرض شده است به ازای نیروی وارد به هر لینک جاذب انرژی که به صورت تقریبی حدود ۵۰۰۰ کیلوگرم نیرو محاسبه شده، حداکثر جابجایی مجاز لینک جاذب انرژی ۲ سانتیمتر و به ازای بیشینه نیروی وارد به هر لینک جاذب انرژی برابر ۵۵۰۰ کیلوگرم نیرو، ماکسیسم جابجایی آن ۸ سانتیمتر باشد، که در شکل ۴ نشان داده شده است. این منحنی دو خطی بسیار نزدیک به منحنی نیرو جابجایی فولاد است. جابجایی حدود ۲۷ میلی متر (۲ سانتی متر) در لینک جاذب انرژی به عنوان مرز طراحی الاستیک در نظر گرفته شده است در حالی که جابجایی های بزرگ تر که ۸ سانتی متر است نشان دهنده رفتار پلاستیک و اتلاف انرژی قابل توجه است. برای ارتباط عددی دقیق با مشخصات فولاد تسلیم f_y و مقاومت نهایی f_u ، اگر از فولاد S355 استفاده شود تقریباً $f_y \approx 355 \text{ MPa}$ ، $f_u \approx 510 \text{ MPa}$ ، نیروی $5000 \text{ kgf} \approx 49.05 \text{ kN}$ و $5500 \text{ kgf} \approx 53.96 \text{ kN}$ هستند و تعیین تنش نسبت به سطح مقطع لینک نشان می دهد که مقدار وارد شده آن را به حد تسلیم یا نزدیک گسیختگی می رساند یا خیر.



شکل ۵: نمای سه بعدی (چپ) و برش (راست) صفحات تسلیم در نظر گرفته شده.

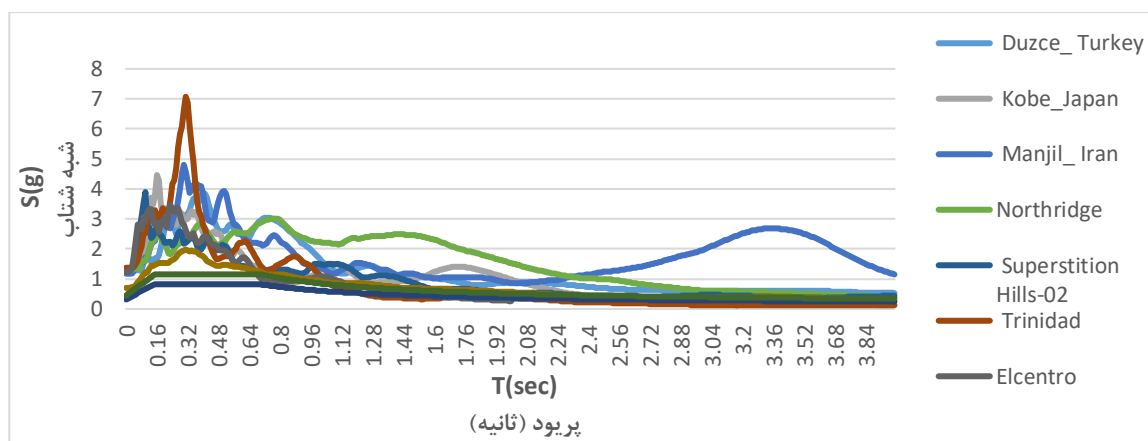
شکل ۵ شبیه سازی لینک‌های جاذب انرژی پیشنهادی در این مطالعه را نشان می‌دهد که قبلاً توسط کاظمی فرد و همکاران، طراحی شده اند. [۲۳]

در این پژوهش برای انتخاب شتابنگاشت‌های مورد نیاز جهت تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی از آیین‌نامه FEMA استفاده شده است. برای تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی از ۷ رکورد حوزه دور و نزدیک که ترکیبی از زلزله‌های با پالس و بدون پالس می‌باشند استفاده شده است و برای اینکه رفتار خاک تاثیر منفی روی عملکرد ساختمان با حرکت گهواره‌ای نداشته باشد، خاک منطقه مورد مطالعه خاک با تراکم متوسط در نظر گرفته می‌شود. در انتخاب رکورد زلزله‌های مختلف تلاش بر این است که مخرب ترین زلزله را به ساختمان اعمال کنیم. به همین علت پس از طراحی، پیوند ساختمان‌ها را بدست آورده و سپس با مراجعه به سایت PEER رکوردهایی انتخاب شده است که پس از کشیدن طیف شبه سرعت، پیوند غالب طیف رکورد مورد نظر نزدیک به پیوند ساختمان‌های طراحی شده باشد. در این مقاله از هفت شتابنگاشت استفاده شده است. همه زلزله‌های انتخاب شده مربوط به خاک نوع III هستند. علت استفاده از خاک نوع III این است که به دلیل اثرات تشدید در لایه‌های آبرفتی این نوع خاک، نیروی زلزله بیشتری به ساختمان وارد می‌شود و زلزله رفتار مخرب تری روی ساختمان خواهد داشت. سرعت موج برشی زلزله‌های استفاده شده همانطور که در جدول زیر آمده بین ۱۷۵ و ۳۷۵ متر بر ثانیه بوده و همگی از نوع گسل امتداد لغز بوده و مدت زمان شدید زلزله بیش از ده ثانیه دارند. شتابنگاشت‌های گزینش شده به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲: معرفی شتابنگاشت زلزله‌ها.

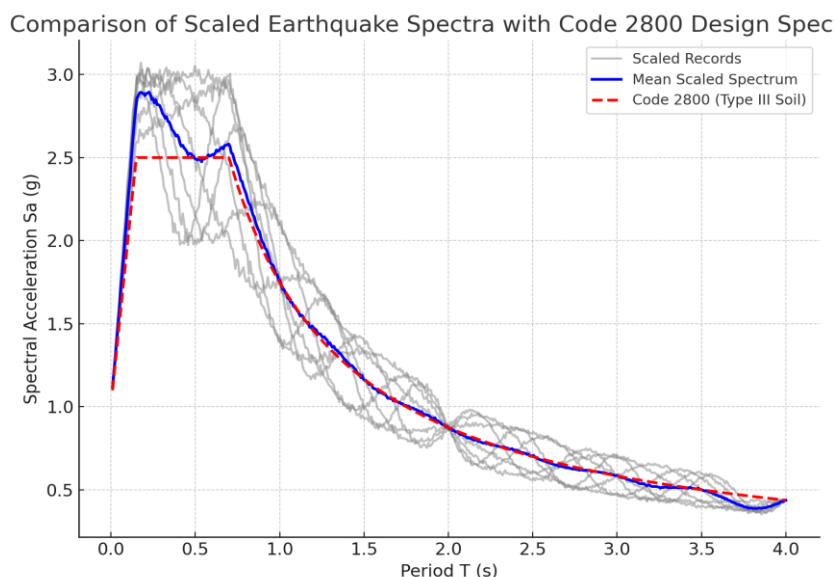
شماره	نام زلزله	سال	نام ایستگاه	بزرگی	شتاب ماکسیمم زمین	شبه سرعت
۱	Duzce_Turkey	۱۹۹۹	Duzce	۱۴/۷	۵۴/۰	۸۶/۲۸۱
۲	Elcentro	۱۹۴۰	Elcentro	۱۰/۷	۶۲/۰	۸۲/۲۷۶
۳	Kobe	۱۹۹۵	Abeno	۹۰/۶	۲۸/۰	۲۵۶
۴	Manjil	۱۹۹۰	Abhar	۳۷/۷	۲۷/۰	۶۴/۳۰۲
۵	Northridge	۱۹۹۴	Anaheim	۶۹/۶	۳۶/۰	۲۹/۳۶۹
۶	Superstition	۱۹۶۶	Brawley	۵۴/۶	۲۹/۰	۷۱/۲۰۸
۷	Trinidad	۱۹۸۰	Rio Dell...	۲۰/۷	۱۶/۰	۷۵/۳۱۱

تمام زلزله‌های انتخاب شده مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم مقیاس شده و سپس برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی به کار گرفته شده‌اند. در ابتدا تمام زلزله‌ها بر حسب حداکثر شتاب زمین (PGA) نرمال شده و به شتاب $1g$ رسیده‌اند. سپس در هر حوزه زلزله، طیف پاسخ شتاب هر ۷ زلزله برای هر یک از شتابنگاشت‌ها (مولفه‌های افقی زلزله) و با نسبت میرایی ۵ درصد ترسیم و با استفاده از جذر مجموع مربعات با هم ترکیب شده و با میانگین‌گیری از آن‌ها، یک طیف میانگین حاصل می‌شود. منحنی طیف میانگین این هفت شتابنگاشت در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: منحنی طیف میانگین.

در ادامه نمودارهای طیف شبه شتاب رکوردهای مقیاس شده در مقایسه با طیف ۲۸۰۰ در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷: منحنی طیف شبه شتاب رکوردهای مقیاس شده با طیف آیین نامه ۲۸۰۰.

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است مقادیر طیف شبه شتاب تا حد بسیار زیادی منطبق به طیف طرح آیین نامه ۲۸۰۰ است.

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

در ادامه مطالعه در ساختمان‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه ۶ پارامتر مقادیر بیشینه جابجایی بام، برش پایه، شتاب اعمالی به بام، تغییر مکان نسبی طبقات، نیروی محوری پای ستون و ظرفیت دوران مفاصل پلاستیک در اثر اعمال ۷ زلزله در ساختمان‌های شاهد، ساختمان با پلان مستطیلی، مربعی، شش ضلعی و هشت ضلعی با هم مقایسه شده است و علاوه بر این، مقایسه وزن ساختارهای حرکت مرجع و تکان دهنده در ادامه ارائه شده است. جدول ۳ به‌طور خاص وزن ساختارهای حرکت مرجع و تکان دهنده را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه وزن سازه شاهد و سازه با حرکت گهواره‌ای (تن نیرو).

سازه با پلان هشت ضلعی		سازه با پلان شش ضلعی		سازه با پلان مربعی		سازه با پلان مستطیلی		تعداد طبقات
سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	
۱۹۵/۵	۲۰۴/۴	۱۹۰/۱	۲۱۳/۲	۲۹۸/۵	۳۷۲/۲	۲۶۵/۱	۳۴۲/۴	۹
۲۴۴/۱	۲۵۱/۲	۲۳۲/۰	۲۶۵/۰	۳۵۶/۴	۴۸۹/۸	۳۲۵/۰	۴۹۸/۴	۱۲
۳۰۵/۸	۳۳۹/۰	۲۹۳/۳	۳۴۶/۴	۴۱۴/۳	۶۰۷/۵	۸۸۳/۹	۱۰۰۴/۴	۱۵

از آنجا که هدف مقایسه وزن سازه‌ها و استفاده از مقاطع فولادی بیشتر و هزینه بیشتر در سازه‌ها بوده و از آنجا که سازه‌ها ابتدا در نرم افزار SAP مدل سازی شده اند، مقادیر وزن سازه‌ها از نرم افزار SAP استخراج شده و در حالت مشابه با سازه شاهد مقایسه شده است. به همین علت اسکلت سازه که نشان از مقادیر فولادی مصرف شده در سازه دارد در نظر گرفته شده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که سازه‌های شاهد سنگین تر از سازه‌های با حرکت گهواره‌ای هستند و در نتیجه سازه‌های پیشنهادی با حرکت گهواره‌ای و لینک جاذب انرژی، سبک تر و مقرون به صرفه تر هستند.

در ادامه مقادیر بیشینه پاسخ ساختمان با پلان مربع، مستطیل، شش ضلعی و هشت ضلعی در مدل‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه در اثر اعمال ۷ زلزله در ساختمان شاهد و ساختمان با عملکرد گهواره‌ای در جداول مختلف نشان داده شده است. لازم به ذکر است پاسخ‌های بیان شده، در جداول، بر اساس ماکسیمم مقدار میانگین رکوردهاست. از آنجا که ۷ رکورد زلزله در نظر گرفته شده است ابتدا میانگین پاسخ ۷ رکورد زلزله برای هر سازه با تعداد طبقات ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه به دست آمد سپس ماکسیمم پاسخ در سازه‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه به عنوان ماکسیمم پاسخ در جداول نشان داده شده است.

کلیه مقادیر استخراج شده ساختمان‌های مدل سازی شده در اثر اعمال زلزله‌های مختلف به منظور مقایسه بیشتر در جداول نشان داده شده است و با مقایسه مقادیر سازه شاهد نسبت به سازه با عملکرد گهواره‌ای درصد تغییر پارامترهای پاسخ در اثر اعمال هر زلزله به دست می‌آید که در نتیجه گیری به آن اشاره شده است.

ماکسیمم مقادیر پاسخ سازه شاهد و سازه با حرکت گهواره‌ای در جداول ۴ تا ۷ نشان داده شده است.

جدول ۴: ماکسیمم پاسخ ساختمان شاهد با پلان مستطیل شکل.

تعداد طبقات	جابجایی نسبی طبقات (%)		برش پایه (کیلو نیوتن)		شتاب سقف (g)		تغییر مکان سقف (سانتیمتر)
	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	
۹	۴/۸	۳/۷	۴۰۴	۴۸۹	۹/۲	۹/۵	۸۹/۹
۱۲	۴/۱	۳/۵	۴۸۵	۵۳۹	۸/۵	۹/۴	۹۶/۹
۱۵	۷/۹	۴/۴	۲۱۰	۲۸۳	۶/۸	۶/۰	۲۰۲/۴
بیشینه	۷/۹	۴/۴	۴۸۵	۵۳۹	۸/۵	۹/۵	۲۰۲/۴

جدول ۵: ماکسیمم پاسخ ساختمان شاهد با پلان مربع شکل.

تعداد طبقات	جابجایی نسبی طبقات (%)		برش پایه (کیلو نیوتن)		شتاب سقف (g)		تغییر مکان سقف (سانتیمتر)	
	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد
۹	۴/۸	۲/۹	۴۲۱	۴۴۶	۸/۰	۸/۴	۸۵/۳	۵۰/۶
۱۲	۴/۰	۳/۲	۴۷۵	۵۲۱	۹/۰	۹/۸	۹۴/۶	۷۶/۹
۱۵	۷/۲	۳/۱	۲۲۹	۵۴۱	۶/۵	۷/۵	۱۹۳/۴	۱۲۱/۷
بیشینه	۷/۲	۳/۱	۴۷۵	۵۴۱	۹/۰	۹/۸	۱۹۳/۴	۱۲۱/۷

جدول ۶: ماکسیمم پاسخ ساختمان شاهد با پلان شش ضلعی.

تعداد طبقات	جابجایی نسبی طبقات (%)		برش پایه (کیلو نیوتن)		شتاب سقف (g)		تغییر مکان سقف (سانتیمتر)	
	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد
۹	۴/۰	۲/۰	۳۷۴	۴۴۴	۹/۲	۱۰/۵	۸۷/۱	۴۰/۸
۱۲	۳/۷	۲/۷	۴۶۶	۵۲۷	۹/۶	۹/۴	۹۱/۰	۷۲/۳
۱۵	۶/۸	۲/۴	۲۱۰	۵۵۸	۶/۹	۸/۴	۱۷۸/۹	۱۰۷/۹
بیشینه	۶/۸	۲/۷	۴۶۶	۵۵۸	۹/۶	۱۰/۵	۱۷۸/۹	۱۰۷/۹

جدول ۷: ماکسیمم پاسخ ساختمان شاهد با پلان هشت ضلعی.

تعداد طبقات	جابجایی نسبی طبقات (%)		برش پایه (کیلو نیوتن)		شتاب سقف (g)		تغییر مکان سقف (سانتیمتر)	
	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد	سازه با حرکت گهواره‌ای	سازه شاهد
۹	۴/۱	۱/۸	۳۵۸	۴۲۷	۹/۳	۱۱/۳	۷۹/۹	۳۷/۷
۱۲	۳/۸	۲/۶	۴۶۱	۵۴۰	۹/۷	۹/۴	۸۸/۴	۷۰/۸
۱۵	۴/۳	۲/۱	۲۷۴/۹	۵۸۵	۷/۳	۷/۹	۱۴۸/۴	۹۸/۱
بیشینه	۴/۳	۲/۶	۴۶۱	۵۸۵	۹/۷	۱۱/۳	۱۴۸/۴	۹۸/۱

با بررسی مقادیر به دست آمده از جداول ۴ تا ۷ مشخص می‌شود که هر چه پلان ساختمان از شکل مستطیل به شکل مربع، شش ضلعی و در نهایت به هشت ضلعی تبدیل می‌شود، جابجایی نسبی طبقات ۴۰ درصد کاهش، برش پایه ۸ درصد کاهش، شتاب بام ۲ درصد افزایش و تغییر مکان بام ۲۸ درصد کاهش یافته است.

در ادامه در جداول ۸ تا ۱۰ درصد تغییرات مقادیر در اثر تبدیل پلان ساختمان با عملکرد گهواره‌ای از مستطیل به مربع به شش ضلعی و شش ضلعی به هشت ضلعی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

جدول ۸: درصد تغییر پارامترهای مختلف در اثر تبدیل پلان ساختمان از مربع به مستطیل.

درصد تغییر	تغییر مکان نسبی	برش پایه	شتاب سقف	تغییر مکان سقف
از پلان مربع	۳۷/۵٪	۰/۵٪	۳٪	۱۲٪
به پلان مستطیل	افزایش	کاهش	کاهش	افزایش

جدول ۹: درصد تغییر پارامترهای مختلف در اثر تبدیل پلان ساختمان از شش ضلعی به مستطیل.

درصد تغییر	تغییر مکان نسبی	برش پایه	شتاب سقف	تغییر مکان سقف
از پلان شش ضلعی	۶/۳٪	۴٪	۹/۵٪	۲۶/۵٪
به پلان مستطیل	افزایش	کاهش	کاهش	افزایش

جدول ۱۰: درصد تغییر پارامترهای مختلف در اثر تبدیل پلان ساختمان از هشت ضلعی به مستطیل.

درصد تغییر	تغییر مکان نسبی	برش پایه	شتاب سقف	تغییر مکان سقف
از پلان هشت ضلعی	۷٪	۸٪	۱۶٪	۳۹٪
به پلان مستطیل	افزایش	کاهش	کاهش	افزایش

جداول ۴ تا ۱۰ مقایسه خوبی بین سازه های با پلان های مختلف است. وقتی شکل پلان از مربع و چندضلعی های متقارن (شش ضلعی و هشت ضلعی) به مستطیل تغییر می کند، به دلیل افزایش نسبت طول به عرض، سختی جانبی در راستای بلندتر کاهش یافته و پیوند اصلی سازه بزرگ تر می شود؛ این موضوع منجر به افزایش تغییر مکان نسبی طبقات و جابجایی بام می گردد. در مقابل، پلان های متقارن تر به دلیل توزیع یکنواخت تر سختی و جرم، رفتار مودال متعادل تری داشته و پاسخ جانبی کمتری نشان می دهند. تغییر در پیوند نیز سبب می شود سازه در بخش های مختلف طیف پاسخ قرار گیرد؛ در نتیجه برش پایه و شتاب بام در برخی موارد کاهش و در برخی موارد افزایش می یابد. همچنین کاهش تقارن و هم محوری مرکز جرم و سختی در پلان مستطیلی باعث تشدید اثرات پیچشی و نامنظمی می شود که خود سهمی در افزایش جابجایی ها دارد. بنابراین، درصد تغییرات مشاهده شده در جداول ناشی از ترکیب اثر هندسه پلان، تغییر پیوند مودال و توزیع نیروهاست.

در طراحی مدل های با حرکت گهواره ای، حذف ستون های میانی طبقه همکف باعث می شود انتقال بارهای ثقلی و جانبی به طور کامل بر عهده ستون های پیرامونی و قاب های متصل به سقف همکف قرار گیرد. به همین دلیل سقف طبقه همکف به صورت یک شاسی صلب طراحی می شود تا نقش یک فونداسیون معلق را برای طبقات بالایی ایفا کرده و ضمن تأمین سختی جانبی، مانع از تمرکز بیش از حد تغییر شکل ها در این تراز شود. عملکرد شاسی صلب مستقیماً بر رفتار لرزه ای کل سازه اثرگذار است و میزان تغییر مکان، سختی و مقاومت آن تعیین کننده قابلیت کنترل حرکت گهواره ای و کارایی لینک های جاذب انرژی خواهد بود. از این رو پس از تحلیل کلی پاسخ های لرزه ای،

بخش مهمی از مطالعه به بررسی دقیق رفتار شاسی صلب اختصاص یافته و با استفاده از نرم‌افزار Eviews و روش رگرسیون، رابطه بین پارامترهای اصلی مانند نیرو، جابجایی و طول دهانه با ممان اینرسی شاسی استخراج شده است تا بتوان ضابطه‌ای مهندسی برای طراحی بهینه آن ارائه داد.

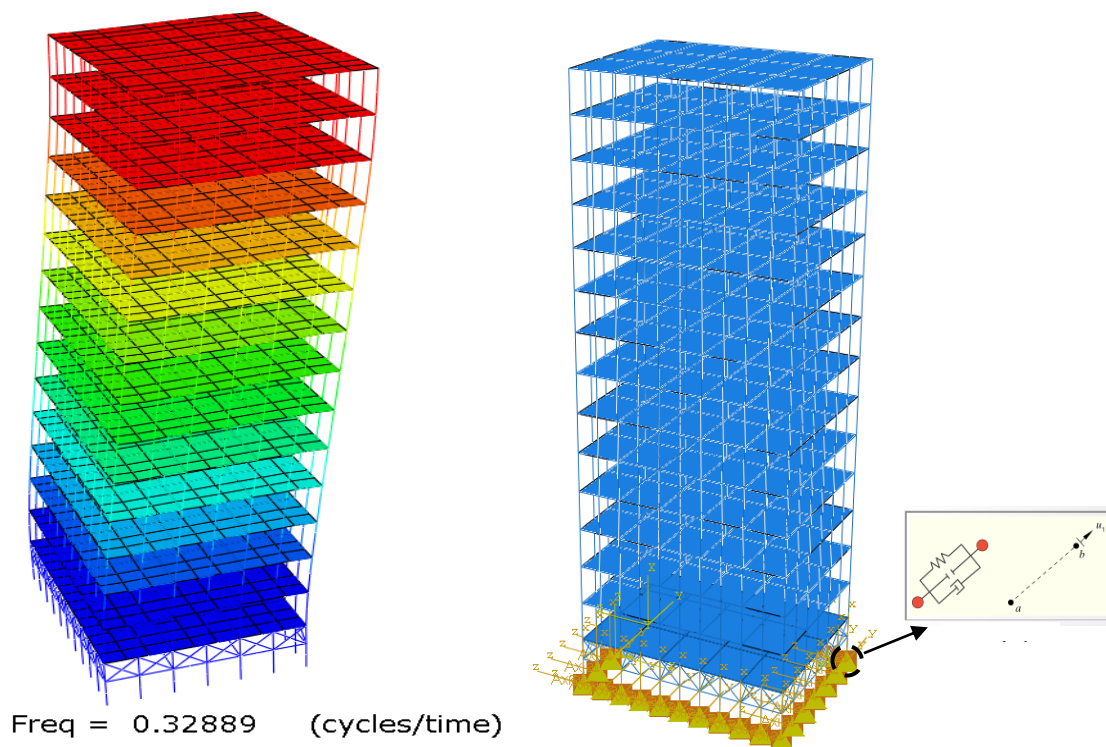
برای اطمینان از صحت نتایج عددی به دست آمده در نرم‌افزارهای SAP و OpenSees، یک مدل سه‌بعدی از سازه فولادی ۱۵ طبقه با پلان مستطیلی در نرم‌افزار ABAQUS ساخته و تحلیل شد. در این مدل، رفتار غیرخطی مصالح و المان‌ها لحاظ گردید و نتایج به صورت نمودارهای برش پایه-زمان، نیروی داخلی فنرهای معادل در پای ستون‌ها و همچنین تنش فون‌مایز در اعضای اصلی استخراج شد. خروجی‌های گرافیکی و نمودارهای خروجی نرم‌افزار ABAQUS در اشکال ۸ تا ۱۲ نشان داده شده است.

الف - برش پایه (Base Shear) :

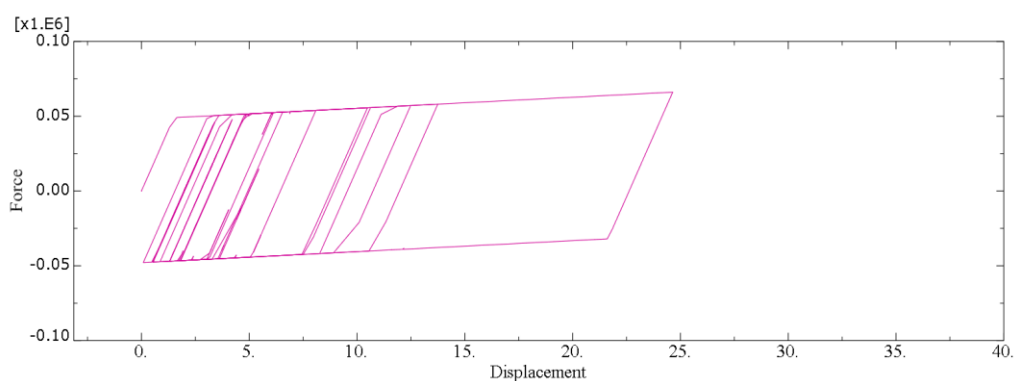
مقادیر برش پایه تحت زلزله Elcentro در هر دو راستای X و Y نشان داد که روند تغییرات و دامنه پاسخ بسیار نزدیک به نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار OpenSees است. هرچند مقادیر برش پایه در ABAQUS اندکی بالاتر ثبت شد (به دلیل مدل‌سازی دقیق تر تماس و رفتار غیرخطی مصالح)، اما الگوی کلی و ماکزیمم پاسخ‌ها همخوانی کامل با نتایج اصلی مقاله دارند. این مسئله تأیید می‌کند که افزایش نسبی برش پایه در سیستم گهواره‌ای که در مقاله گزارش شد، معتبر است.

ب - نیروی داخلی فنرها (Energy Absorbing Links) :

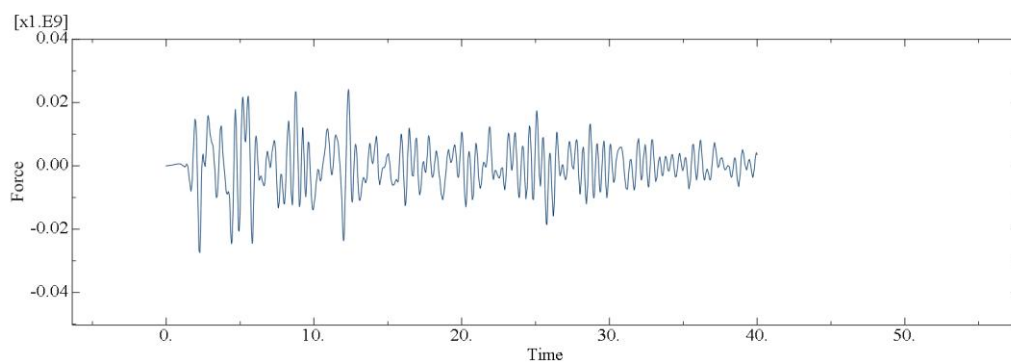
نمودار نیروی داخلی یکی از فنرهای پایه در مقابل جابجایی نشان می‌دهد که عملکرد غیرخطی فیوزهای برشی در ABAQUS به خوبی مدل شده و رفتار هیستریزس آن با فرضیات مقاله سازگار است. ظرفیت جذب انرژی این فنرها با نتایج تئوریک و روابط دوخطی معرفی شده در مقاله هم‌راستا بوده و نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی قابلیت انتقال انرژی زلزله به اجزای قابل تعویض را دارد.



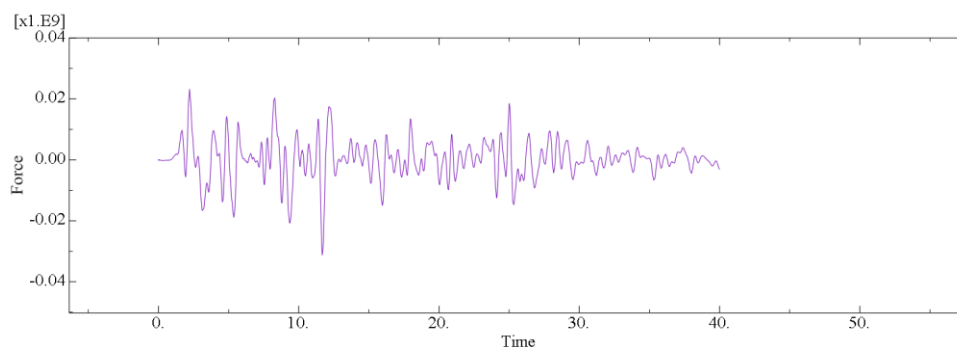
شکل ۸: سازه ۱۵ طبقه مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس با پلان مستطیلی.



شکل ۹: نیروی داخلی یکی از فنرها در مقابل جابجایی



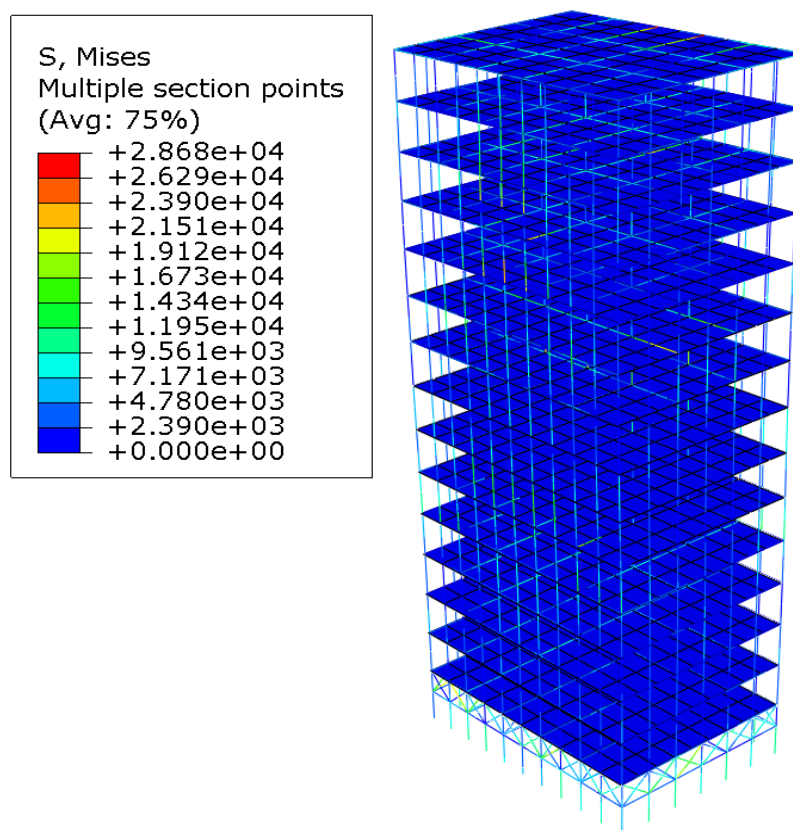
شکل ۱۰: برش پایه تحت زلزله Elcentro در راستای x



شکل ۱۱: برش پایه تحت زلزله Elcentro در راستای y

ج- تنش فون مایز (von Mises Stress) :

تحلیل تنش اعضای سازه‌ای بیانگر آن است که بیشترین تنش‌ها در نواحی پای ستون‌های کناری و محل اتصال تیرها به شاسی صلب متمرکز شده است، اما این مقادیر کمتر از تنش تسلیم فولاد انتخابی (S355) باقی مانده است. این موضوع با نتایج مقاله که نشان می‌داد مفاصل پلاستیک در سیستم گهواره‌ای کمتر تشکیل می‌شوند (حدود ۴۰٪ کاهش نسبت به سازه شاهد)، کاملاً مطابقت دارد.



شکل ۱۲: تنش فون مایز در اعضاء ساز

اعتبارسنجی عددی با نرم افزار ABAQUS نشان داد که روند کلی نتایج مقاله شامل افزایش برش پایه، کاهش جابجایی نسبی طبقات، کاهش تشکیل مفاصل پلاستیک و تمرکز انرژی در لینک‌های برشی کاملاً صحیح است. انطباق نتایج تحلیل اجزای محدود با تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی قبلی نشان‌دهنده اعتبار و صحت مدل‌سازی‌ها و استنتاج‌های مقاله است.

در ادامه در سازه با پلان مستطیلی در ساختمان‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه و شاسی صلب با دهانه‌های ۳، ۴ و ۵ دهانه، تیر وسط دهانه در هر شاسی صلب را بیرون کشیده و نیروی وارده به آن و جابجایی آن را برداشت می‌کنیم. سپس رابطه جابجایی تیر دو سر ساده را مطابق رابطه (۱) می‌نویسیم:

$$\kappa = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

همچنین طبق روابط تحلیل سازه، رابطه جابجایی تیر دو سر گیردار مطابق رابطه (۲) است:

$$x = \frac{PL^3}{192EI} \quad (2)$$

که در این روابط X جابجایی وسط تیر دو سر ساده و واحد آن سانتیمتر، P نیروی وارد به وسط تیر و واحد آن کیلوگرم نیرو، L طول دهانه و واحد آن سانتیمتر، E مدول یانگ و واحد آن کیلوگرم نیرو بر روی سانتیمتر مربع و I ممان اینرسی شاسی صلب و واحد آن سانتیمتر به توان ۴ می‌باشد. با توجه به این که جابجایی تیر و طول دهانه آن در نرم افزار استخراج شده است، می‌توان مقدار ممان اینرسی معادل شاسی صلب برای این سازه را به صورت تابعی از نیرو، جابجایی و طول دهانه به دست آورد. رابطه مدول یانگ و واحد آن به قرار رابطه شماره (۳) است.

$$E = 2.1 \times 10^6 \frac{kgf}{cm^2} \quad (3)$$

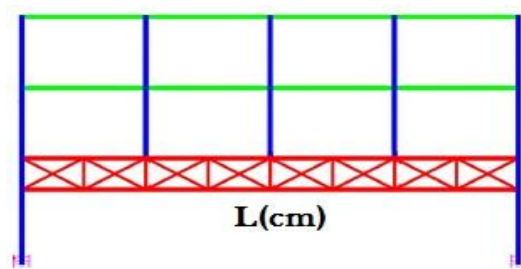
ساختمان‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه با طول تیر ۴ متری و تعداد ۳، ۴ و ۵ دهانه مدل‌سازی شده مقادیر مربوط به نیرو و جابجایی وارد به تیرها از نرم افزار استخراج شده و در جدول نشان داده شده است. ممان اینرسی تیر از رابطه (۴) به دست می‌آید. رابطه (۵) نیز ساده شده رابطه (۴) است. اگر مقادیر به دست آمده نیرو و جابجایی وارد به تیرها که از نرم افزار استخراج شده را در رابطه (۵) جایگذاری کنیم به رابطه (۶) خواهیم رسید و ممان اینرسی تیر بزرگ دهانه در سازه با حرکت گهواره ای به دست می‌آید.

$$I = (PL^3) / (192 \times 2.1 \times 1000000 \times X) \quad (4)$$

$$I_{eq} = (PL^3) / (40300000 \times X) \quad (5)$$

$$I = (246667 \times 2000^3) / (192 \times 2.1 \times 1000000 \times 0.9088) \quad (6)$$

شکل ۱۳ محل شاسی صلب و طول دهانه را نشان می‌دهد که با حرف L نشان داده شده است.

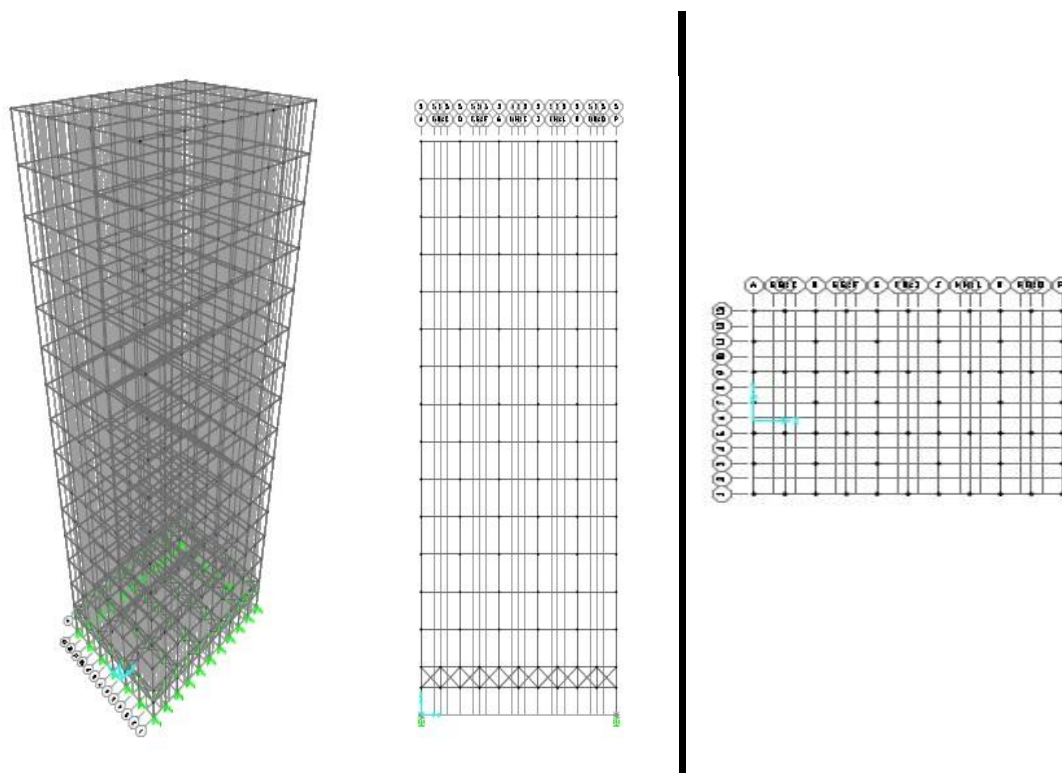


شکل ۱۳: برش عمودی از سازه با حرکت گهواره‌ای و لینک جاذب انرژی پای ستون و شاسی صلب خرابایی.

با جایگزین کردن مقدار نیرو و جابجایی بدست آمده از نرم افزار به معادله به دست آمده، ممان اینرسی برای یک قاب صلب در یک سازه با حرکت گهواره‌ای را می توان محاسبه کرد. این مقادیر که نشان دهنده مقاومت قاب صلب برای طراحی سازه با حرکت گهواره‌ای است، در ادامه برای سازه‌هایی با پلان های مختلف ارائه شده است.

سازه با پلان مستطیلی:

در شکل ۱۴، پلان مستطیلی، برش و شکل سه بعدی ساختمان ۱۵ طبقه با حرکت گهواره‌ای و شاسی صلب نشان داده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار Eviews ارائه شده است که تأثیر پارامترهای مختلفی مانند نیروی اعمالی تیر، جابجایی تیر و طول دهانه بر ممان اینرسی قاب صلب را نشان می دهد.



شکل ۱۴: سازه با پلان مستطیلی.

در ادامه مقادیر به دست آمده از تجزیه و تحلیل سازه با پلان مستطیلی و رابطه بین پارامترهای مختلف، با استفاده از نرم افزار Eviews در جدول ۱۱ آمده است:

جدول ۱۱: مقادیر نیرو و جابجایی در دهانه‌های مختلف برای سازه با پلان مستطیلی.

تعداد طبقات	تعداد دهانه	طول دهانه (سانتیمتر)	نیرو (کیلوگرم)	تغییر مکان نسبی (سانتیمتر)	ممان اینرسی شاسی صلب (سانتیمتر مکعب)
۹	۳	۱۲۰۰	۲۴۶۶۶۷	۰/۹۰۸	۱۱۶۳۲۳۰/۹۵
۱۲	۳	۱۲۰۰	۲۹۸۹۰۱	۱/۱۰	۱۱۶۴۵۴۹/۳۵
۱۵	۳	۱۲۰۰	۲۹۶۰۹۶	۱/۲۶	۱۰۰۷۱۲۹/۲۵
۹	۴	۱۶۰۰	۲۹۵۸۶۶	۱/۳۱۹	۲۲۷۸۷۱۳/۳۱
۱۲	۴	۱۶۰۰	۳۵۴۶۰۸	۱/۵۰	۲۴۰۱۵۷۷/۹۹
۱۵	۴	۱۶۰۰	۳۷۹۸۲۷	۲/۰۰۴	۱۹۲۵۴۲۹/۱۴
۹	۵	۲۰۰۰	۲۳۷۹۷۵	۱/۷۰۸	۲۷۶۴۴۷۶/۶۹
۱۲	۵	۲۰۰۰	۲۷۹۷۳۶	۳/۱۲	۱۷۷۸۹۴۷/۹۰
۱۵	۵	۲۰۰۰	۳۳۰۹۱۹	۳/۷۰	۱۷۷۴۵۵۴/۹۱

نتایج جدول ۱۱ نشان می‌دهد که در سازه‌های مستطیلی، با افزایش تعداد دهانه‌ها و طول تیرها، ممان اینرسی معادل شاسی صلب به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که شاسی صلب در پلان‌های مستطیل نقش کلیدی در کنترل جابجایی تیرها و انتقال نیرو به ستون‌های کناری ایفا می‌کند. شکل ۱۴ نیز به‌خوبی نشان می‌دهد که در این پلان، تمرکز سختی در امتداد طول بلندتر مستطیل اهمیت زیادی دارد و هرچه دهانه‌ها افزایش یابند، رفتار قاب به سمت صلبیت و پایداری بیشتر حرکت می‌کند.

Estimation Command:

```
=====
LS I C P X L^3
```

Estimation Equation:

```
=====
I = C(1) + C(2)*P + C(3)*X + C(4)*L^3
```

Substituted Coefficients:

```
=====
I = -1362764.10404 + 15.0774207914*P - 1870725.22734*X + 0.00082203648567*L^3
```

Dependent Variable: I

Method: Least Squares

Date: 05/21/23 Time: 21:22

Sample: 1 9

Included observations: 9

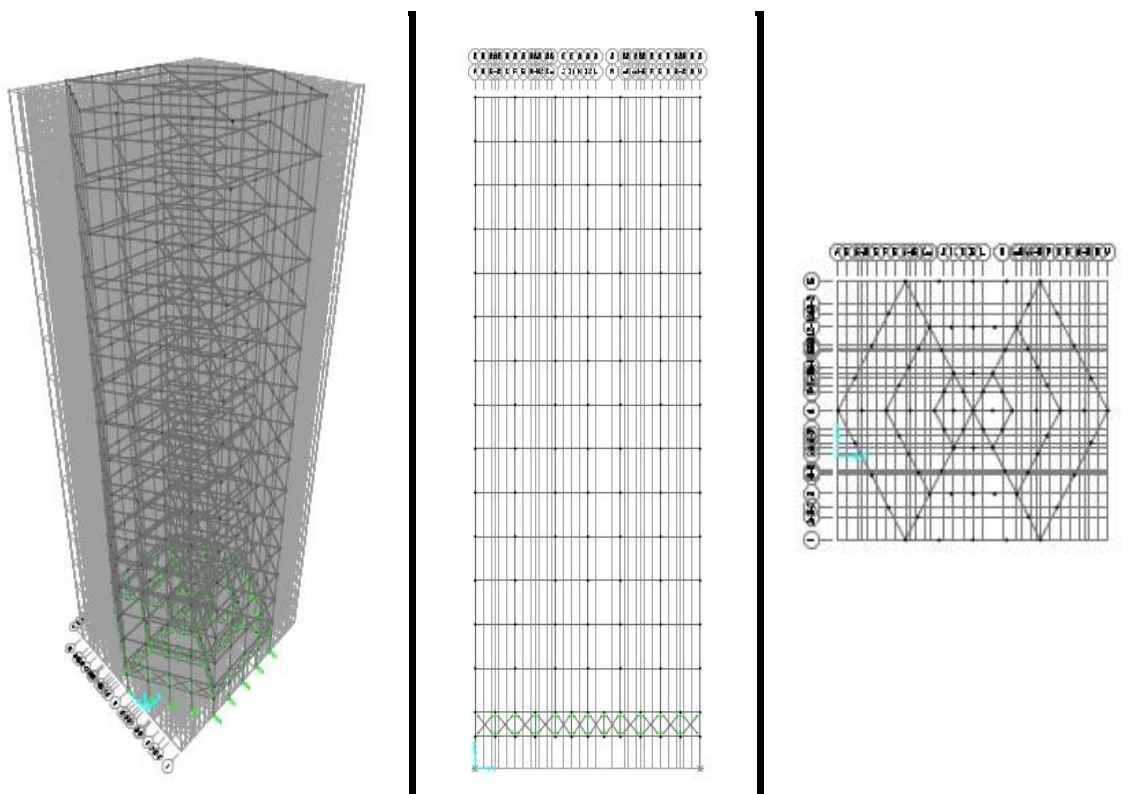
```
I = C(1) + C(2)*P + C(3)*X + C(4)*L^3
```

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-1362764.	839076.0	-1.624125	0.1653
C(2)	15.07742	2.833383	5.321349	0.0031
C(3)	-1870725.	237980.7	-7.860828	0.0005
C(4)	0.000822	8.03E-05	10.23200	0.0002

R-squared	0.956129	Mean dependent var	3528344.
Adjusted R-squared	0.929806	S.D. dependent var	1191173.
S.E. of regression	315590.3	Akaike info criterion	28.46338
Sum squared resid	4.98E+11	Schwarz criterion	28.55104
Log likelihood	-124.0852	Hannan-Quinn criter.	28.27422
F-statistic	36.32350	Durbin-Watson stat	1.882033
Prob(F-statistic)	0.000808		

سازه با پلان شش ضلعی:

در شکل ۱۵، پلان شش ضلعی، برش و شکل سه بعدی ساختمان ۱۵ طبقه با حرکت گهواره‌ای و شاسی صلب نشان داده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار Eviews ارائه شده است که تأثیر پارامترهای مختلفی مانند نیروی اعمالی تیر، جابجایی تیر و طول دهانه بر ممان اینرسی قاب صلب را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: سازه با پلان شش ضلعی.

در ادامه مقادیر به دست آمده از تجزیه و تحلیل سازه با پلان شش ضلعی و رابطه بین پارامترهای مختلف، با استفاده از نرم افزار Eviews در جدول ۱۲ آمده است:

جدول ۱۲: مقادیر نیرو و جابجایی در دهانه‌های مختلف برای سازه با پلان شش ضلعی.

تعداد طبقات	تعداد دهانه	طول دهانه (سانتیمتر)	نیرو (کیلوگرم)	تغییر مکان نسبی (سانتیمتر)	ممان اینرسی شاسی صلب (سانتیمتر مکعب)
۹	۳	۶۲۰	۹۰۲۲/۳۸	۰/۰۲۴	۲۲۲۲۱۰۴۲
۱۲	۳	۶۲۰	۱۸۴۸۴/۱۱	۰/۰۴۴۷	۲۴۴۴۲۴۹۷
۱۵	۳	۶۲۰	۱۹۵۶۰/۲۴	۰/۰۵۲۹	۲۱۸۵۶۱۱۹
۹	۴	۱۳۸۶	۵۶۲۶/۲۶	۰/۰۸۵۶	۴۳۴۰۲۵۴۵
۱۲	۴	۱۳۸۶	۷۲۱۶/۷۰	۰/۱۰۱	۴۷۱۸۳۰۹۷
۱۵	۴	۱۳۸۶	۸۶۱۱/۷۲	۰/۱۱۴۸	۴۹۵۳۵۵۷۲
۹	۵	۲۱۴۵	۸۱۱۷/۲۳	۰/۴۱۹۷	۴۷۳۴۰۲۱۷
۱۲	۵	۲۱۴۵	۱۰۸۸۱/۸۳	۰/۵۰۱۲	۵۳۱۴۳۷۵۵
۱۵	۵	۲۱۴۵	۱۳۷۰۳/۸۹	۰/۵۸۱۵	۵۷۶۸۴۰۱۹

جدول ۱۲ بیانگر آن است که در پلان شش ضلعی، با افزایش طول دهانه و تعداد دهانه‌ها، تغییر مکان نسبی تیرها نسبتاً کوچک باقی می‌ماند، در حالی که ممان اینرسی شاسی صلب رشد قابل توجهی دارد. این نشان دهنده توزیع متعادل نیروها در یک هندسه نزدیک به دایره است که باعث کاهش اثرات پیچشی و تمرکز تغییر شکل‌ها می‌شود. شکل ۱۵ این موضوع را تأیید می‌کند؛ در پلان شش ضلعی، سختی شاسی به طور یکنواخت در پیرامون قاب توزیع شده و این ویژگی منجر به بهبود عملکرد لرزه‌ای نسبت به پلان مستطیلی می‌گردد.

Estimation Command:

```
=====
LS I C P X L^3
```

Estimation Equation:

```
=====
I = C(1) + C(2)*P + C(3)*X + C(4)*L^3
```

Substituted Coefficients:

```
=====
I = 47806604 -1474.923*P +67958109*X -0.001175*L^3
```

Dependent Variable: I

Method: Least Squares

Date: 05/21/23 Time: 23:31

Sample: 1 9

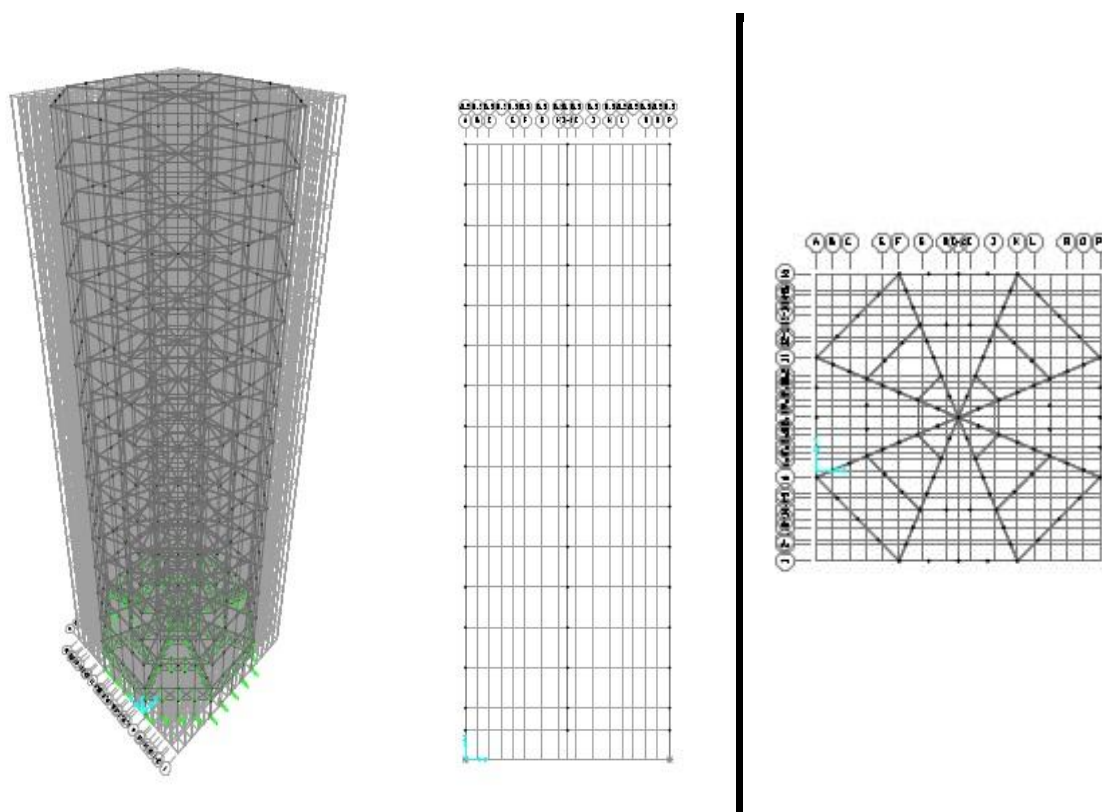
Included observations: 9

```
I = C(1) + C(2)*P + C(3)*X + C(4)*L^3
```

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	47806604	11949049	4.000871	0.0103
C(2)	-1474.923	923.6597	-1.596825	0.1712
C(3)	67958109	89821477	0.756591	0.4834
C(4)	-0.001175	0.004687	-0.250602	0.8121
R-squared	0.772390	Mean dependent var	40756540	
Adjusted R-squared	0.635825	S.D. dependent var	14034063	
S.E. of regression	8469128.	Akaike info criterion	35.04286	
Sum squared resid	3.59E+14	Schwarz criterion	35.13051	
Log likelihood	-153.6928	Hannan-Quinn criter.	34.85370	
F-statistic	5.655814	Durbin-Watson stat	1.452439	
Prob(F-statistic)	0.046057			

سازه با پلان هشت ضلعی:

در شکل ۱۶، پلان هشت ضلعی، برش و شکل سه بعدی ساختمان ۱۵ طبقه با حرکت گهواره‌ای و شاسی صلب نشان داده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار Eviews ارائه شده است که تأثیر پارامترهای مختلفی مانند نیروی اعمالی تیر، جابجایی تیر و طول دهانه بر ممان اینرسی قاب صلب را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: سازه با پلان هشت ضلعی.

در ادامه مقادیر به دست آمده از تجزیه و تحلیل سازه با پلان هشت ضلعی و رابطه بین پارامترهای مختلف، با استفاده از نرم افزار Eviews در جدول ۱۳ آمده است:

جدول ۱۳: مقادیر نیرو و جابجایی در دهانه‌های مختلف برای سازه با پلان هشت ضلعی.

تعداد طبقات	تعداد دهانه	طول دهانه (سانتیمتر)	نیرو (کیلوگرم)	تغییر مکان نسبی (سانتیمتر)	ممان اینرسی شاسی صلب (سانتیمتر مکعب)
۹	۳	۵۹۱	۸۹۸۸/۱۵	۰/۱۰۴۴	۴۴۰۷۶۹۷
۱۲	۳	۵۹۱	۱۱۹۹۸/۱	۰/۱۴۰۶	۴۳۶۸۸۷۰
۱۵	۳	۵۹۱	۱۴۱۱۴/۵۸	۰/۱۷۹۳	۴۰۳۰۲۲۸
۹	۴	۱۳۲۳	۳۲۹۶۴/۶۵	۰/۵۰۶۴	۳۷۳۸۶۴۱۱
۱۲	۴	۱۳۲۳	۴۲۵۴۹/۶۹	۰/۶۴۱۸	۳۸۰۷۶۳۸۴
۱۵	۴	۱۳۲۳	۵۱۳۸۹/۱۶	۰/۷۶۷	۳۸۴۸۰۰۰۹
۹	۵	۲۰۵۴	۳۶۱۲۰/۲۶	۱/۲۴۴۲	۶۲۳۹۳۸۰۴
۱۲	۵	۲۰۵۴	۴۶۷۲۵/۶۷	۱/۵۷۹۶	۶۳۵۷۵۴۱۵
۱۵	۵	۲۰۵۴	۵۶۹۹۵/۲۵	۱/۹۰۳۹	۶۴۳۳۹۱۵۱

بر اساس جدول ۱۳، در پلان هشت ضلعی ممان اینرسی شاسی صلب به بیشترین مقدار در میان پلان‌ها می‌رسد و در عین حال تغییر مکان نسبی تیرها کنترل شده و محدود باقی می‌ماند. این نتایج بیانگر آن است که پلان هشت ضلعی به دلیل تقارن بالا و نزدیکی به شکل دایره، بهترین توزیع سختی و عملکرد لرزه‌ای را فراهم می‌کند. شکل ۱۶ نیز این یافته را به صورت بصری نشان می‌دهد و مشخص می‌سازد که در چنین هندسه‌ای، شاسی صلب علاوه بر تأمین مقاومت و سختی، اثرات پیچشی را به حداقل می‌رساند.

Estimation Command:

```
=====
LS I C P X L^3
```

Estimation Equation:

```
=====
I = C(1) + C(2)*P + C(3)*X + C(4)*L^3
```

Substituted Coefficients:

```
=====
I = -3860804 +1005.070*P -32873351*X +0.008365*L^3
```

Dependent Variable: I

Method: Least Squares

Date: 05/21/23 Time: 23:39

Sample: 1 9

Included observations: 9

$I = C(1) + C(2)*P + C(3)*X + C(4)*L^3$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-3860804.	2556011.	-1.510480	0.1913

C(2)	1005.070	144.1846	6.970718	0.0009
C(3)	-32873351	9597007.	-3.425375	0.0187
C(4)	0.008365	0.001275	6.558968	0.0012
R-squared	0.990187	Mean dependent var	35228663	
Adjusted R-squared	0.984299	S.D. dependent var	25709535	
S.E. of regression	3221451.	Akaike info criterion	33.10966	
Sum squared resid	5.19E+13	Schwarz criterion	33.19732	
Log likelihood	-144.9935	Hannan-Quinn criter.	32.92050	
F-statistic	168.1789	Durbin-Watson stat	2.075299	
Prob(F-statistic)	0.000019			

همانطور که در خروجی به دست آمده از نرم افزار Eviews نشان داده شده است برای سازه‌های با پلان مستطیل، شش ضلعی و هشت ضلعی روابط مورد نیاز برای بدست آوردن ممان اینرسی شاسی صلب به دست آمده است که می‌تواند برای طراحی سازه‌های با حرکت گهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نتیجه گیری

- نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که در ساختمان‌های مجهز به سیستم گهواره‌ای کنترل شده، حداکثر جابجایی بام به‌طور میانگین حدود ۴۵ درصد و تغییر مکان نسبی طبقات حدود ۵۰ درصد کمتر از ساختمان‌های متداول است. این کاهش چشمگیر بیانگر اثربخشی مکانیزم گهواره‌ای در کنترل تغییر شکل‌های کلی سازه از طریق تمرکز انرژی در فیوزهای برشی و لینک‌های جذب انرژی است. در میان پلان‌های مورد بررسی، ساختمان با پلان هشت ضلعی عملکرد لرزه‌ای بهتری از خود نشان داده و کمترین میزان تغییر مکان را تجربه کرده است.
- بر اساس نتایج، برش پایه در سازه‌های گهواره‌ای نسبت به سازه‌های متداول به‌طور میانگین ۲۵ درصد افزایش داشته است. این افزایش به دلیل انتقال سهم بیشتری از نیروهای جانبی زلزله به ستون‌های کناری است که هرچند ممکن است موجب افزایش نیاز به تقویت فونداسیون و اعضای قائم شود، اما در عوض سبب کاهش خسارت در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای و بهبود رفتار کلی سازه می‌گردد.
- ظرفیت دوران مفاصل پلاستیک در سیستم گهواره‌ای به‌طور میانگین ۴۰ درصد کمتر از سازه‌های شاهد به دست آمده است. این کاهش نشان‌دهنده محدودسازی نواحی غیرالاستیک و تمرکز تغییر شکل‌ها در اجزای قابل تعویض است که با اهداف طراحی سازه‌های تاب‌آور و تعمیرپذیر هم‌راستا می‌باشد و نشان‌دهنده عملکرد بهتر سازه با حرکت گهواره‌ای است.
- از منظر اقتصادی و اجرایی، ساختمان‌های دارای سیستم گهواره‌ای نسبت به سازه‌های متداول، سبک‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند. به‌کارگیری اجزای ساده‌تر و کم‌وزن‌تر در این سیستم، ضمن حفظ عملکرد لرزه‌ای مطلوب، به کاهش هزینه‌های ساخت، تعمیر و نگهداری منجر می‌شود.

- ۵- بررسی تأثیر شکل هندسی پلان نشان داد که پلان‌های متقارن تر مانند شش ضلعی و هشت ضلعی، رفتار لرزه‌ای بهینه‌تری نسبت به پلان‌های مستطیلی دارند. تغییر پلان از مربع یا چندضلعی متقارن به مستطیل منجر به افزایش قابل توجهی در جابجایی نسبی کف و تغییر مکان سقف و در عین حال کاهش برش پایه و شتاب سقف می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که توزیع یکنواخت سختی و جرم در پلان‌های متقارن، با کاهش اثرات پیچشی و پاسخ مودال نامتقارن، عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود می‌بخشد.
- ۶- تحلیل‌های آماری انجام شده در نرم‌افزار Eviews منجر به استخراج رابطه‌ای میان ممان اینرسی تیر دهانه بزرگ، بار وارد بر دهانه، جابجایی دهانه و طول دهانه گردید. این رابطه می‌تواند به عنوان مبنایی برای بهینه‌سازی طراحی تیرها و کنترل تغییر مکان‌ها در سیستم‌های گهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- [1] Azuhata, T., Midorikawa, M., Ishihara, T., Wada, A. (2002) Shaking Table Tests on Seismic Response Reduction Effects of Rocking Building Structural Systems. NIST Special Publication SP, 325-332.
- [2] Filiatrault, Andre, Restrepo. Jose and Christopoulos. Constantin, (2004) "Development of Self-centering Earthquake Resisting Systems" Canada: 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Paper No. 3393, August 1-6, 2004
- [3] Eatherton, M. R., Hajjar, J. F., Deierlein, G. G., Krawinkler, H., Billington, S. and Ma, X. (2008) Controlled rocking of steel-framed buildings with replaceable energy-dissipating fuses. In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, (pp. 12-17).
- [4] Eatherton, M. R., Hajjar, J. F., Deierlein, G. G., Krawinkler, H. and Ma, X. (2010) Hybrid simulation testing of a controlled rocking steel braced frame system. In Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Ontario, Canada, Paper No 734.
- [5] Hosseini. M, Noroozinejad Farsangi. E, (2012) "Telescopic columns as a new base isolation system for vibration control of high-rise buildings" Earthquakes and Structures, Vol. 3, No. 6 (2012) 853-867
- [6] Hosseini. M, and Alavi. Seyed Sasan, (2014) "A kind of repairable steel buildings for seismic regions based on building's rocking motion and energy dissipation at base level" International Journal of Civil and Structural Engineering, Volume 1 : Issue 3 [ISSN 2372 – 3971]
- [7] Afshari. M, Mohamadi. M, Sarvghadmoghaddam. A, (2015) " Seismic evaluation of shear wall rocking motion " 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE 7), May 2015 (in Persian) .
- [8] Blebo. Felix C, and Roke. David A, (2015) "Seismic-resistant self-centering rocking core system" Engineering Structures 101 ,193-204
- [9] Song Liang-Long, Guo Tong, Gu Yu, Cao Zhi-Liang, (2015) "Experimental study of a self-centering prestressed concrete frame subassembly" Engineering Structures, 88, 176-188, 2015.
- [10] Hosseini. M, and Ebrahimi. H, (2015) "Proposing a Yielding-Plate Energy Dissipating Connection for circumferential Columns of Steel Rocking Buildings and Investigating its Properties by Nonlinear Finite Element Analyses" 6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, August 1-2, 2015, University of Illinois, Urbana-Champaign, United States.
- [11] Rahgozar, N., S.Moghadam, A. and Aziminejad, A. (2016) Quantification of seismic performance factors for self-centering controlled rocking special concentrically braced frame, The Structural Design of Tall and Special Buildings

- [12] Hosseini, M, Fekri, M, Yekrangnia, M, (2016) "Seismic Performance of Innovative Roking System By Using Columns Equipped with Friction Dampers at Base Level" The Structural Design of Tall and Special Buildings
- [13] Grigorian, M, and Moghadasi, M.S, (2017) "Introducing a New Wall-Frame Earthquake Resisting System" Asian Journal of Civil Engineering (BHRC) VOL. 18, No. 3(2017), Pages 371-397
- [14] Khalkhali, M, Hosseini, M, (2017) "Dividing buildings sitecture into 4 interactive rocking parts to make IT repairable after ..." 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017 Santiago Chile, January 9th to 13th 2017
- [15] Bapir, Baban, (2017) "Seismic Design of Concrete Building with Rocking Frames" Dissertation submitted as part requirement for the Degree of Master of Science in Structural Engineering, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Civil Engineering Department of Structural Engineering, May 2017
- [16] Mohammadi, Hadiseh, Rostamkalaee, Soheil, S. Moghadam, Abdoreza, (2019) "Application of Steel Braced Structures with Controlled Rocking System in Seismic Retrofitting of Building" Tehran, Iran: 8th international conference on seismology & Earthquake Engineering, "SEE8", 11-13 nov 2019.
- [17] Hoseini, Mahmood, Asadi, Hamed, (2019) "Creating Repairable Steel Buildings with Rectangular Plan Based on Rocking Motion Subjected to Far- and Near-field Earthquake " Tehran: 10th National Conference on Structures(in Persian). and Steel,
- [18] Rahgozar, N. (2023). *Structural optimization of vertical isolated rocking core-moment frames. Journal of Vibration and Control. DOI: 10.1177/10775463221096882*
- [19] Rahgozar, N. (2021). *Reliability-based seismic assessment of controlled rocking steel cores (CRSCs). Science of the Total Environment. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151269* (مطابق شناسه S2352710221004812)
- [20] Abdolmohammadi, M. (2024). *Modified performance-based plastic design for self-centering structures. ScienceDirect. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.XXXXXX* (مطابق شناسه S014102962301564X)
- [21] Alvares da Silva, A. H., & Zhang, Y. (2024). *Surrogate models for seismic response analysis of flexible multi-degree-of-freedom structures rocking on their base. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Wiley Online Library*
- [22] Aghagholizadeh, M., & Others. (2024). *Overview and Analysis of Seismic Resilient Structures with Modular Rocking Shear Walls. (preprint). arXiv*
- [23] Kazemifar, H. Hossein, M. Nekooei, M. Hosseini Hashemi, B. (2019) Numerical Study of the Circumferential Fuses Used in Steel Repairable Buildings with Seesaw Motion, Latin American Journal of Solids and Structures, 16(3), e160