



Research Article

Comparison of Modal Performance of Steel Structures with Modern Braces with Finite Element Modeling Method in ABAQUS Software

Masoud Mahdavi¹ *

¹* - PhD student, Department of Structures, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 02 September 2025; Revised: 05 September 2025; Accepted: 07 October 2025; Published: 22 December 2025

Abstract

The use of modern bracing systems in steel structures is a common method for increasing the lateral stiffness of the structure. Braces, while reducing the displacement of the steel structure, also contribute greatly to increasing energy dissipation during earthquakes and severe storms. The possibility of repairing, equipping and, if necessary, replacing them after earthquakes and severe storms and damage to the braces is considered one of the advantages of this type of energy dissipation systems. Therefore, in the present study, steel frames with Diagonal, Chevron, Gate, Knee, Rhombus and X braces were designed using the finite element method and Abaqus software. The braced steel structures were subjected to modal analysis in the frequency domain and their 50 vibration modes were investigated. The results showed that in terms of modal performance parameters including von Mises stress, structural displacement, specific frequency and generalized mass, rhombus braces (26.26% reduction compared to the numerical average of other braces), gate (19.51% reduction), rhombus (12.77% reduction) and knee (11.11%) had the best performance, respectively. Also, the braced steel frames had the best performance in the rotational participation factor parameter in the horizontal, vertical and perpendicular directions with axial brace (0.079), X brace (0.088) and knee brace (0.051), respectively.

Keywords: Steel Structure, Structural Bracing System, Finite Element Method, Modal Analysis in the Frequency Domain, Modeling by Abaqus.

Cite this article as: Mahdavi M. (2025). 'Comparison of Seismic Performance of Steel Structures with Modern Braces with Finite Element Modeling Training in ABAQUS Software', *Civil and Project*, 7(10), e231600. doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2025.547517.1405>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

مقایسه‌ی عملکرد مودال سازه‌های فولادی دارای مهاربندهای نوین با روش مدلسازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس

مسعود مهدوی^{۱*}

*۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۱ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴ شهریور ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۵ مهر ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ دی ۱۴۰۴

چکیده

بکارگیری سیستم‌های مهاربندی نوین در سازه‌های فولادی، از روش‌های مناسب در افزایش سختی سازه است. مهاربندها ضمن کاهش جابجایی سازه فولادی، به افزایش استهلاک انرژی حین زلزله و طوفان نیز کمک می‌کنند. امکان تعمیر، تجهیز و در صورت نیاز، تعویض آن‌ها پس از وقوع زلزله و طوفان‌های شدید و بروز خرابی در مهاربندها، از جمله مزایای این نوع سیستم‌های استهلاک انرژی محسوب می‌شود. لذا در پژوهش حاضر، قاب‌های فولادی با مهاربندهای قطری، شورون، دروازه‌ای، زانویی، لوزی و ضربدری با روش المان محدود و توسط نرم‌افزار آباکوس طراحی شد. سازه‌های فولادی مهاربندی شده، تحت تحلیل مودال در حوزه‌ی فرکانسی قرار گرفته و ۵۰ مود ارتعاشی آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد از نظر پارامترهای عملکردی مودال شامل تنش وون میزس، جابجایی سازه، فرکانس ویژه و جرم تعمیم‌یافته، به ترتیب مهاربندهای لوزی (۱۲٪/۷۷ کاهش) و زانویی (۱۱٪/۱۱)، بهترین عملکرد را داشتند. همچنین، قاب‌های فولادی مهاربندی شده در پارامتر ضریب مشارکت دورانی در جهات افقی، عمودی و قائم به ترتیب با مهاربند محوری (۰/۰۷۹) مهاربند محوری (۰/۰۸۸) و مهاربند زانویی (۰/۰۵۱)، بهترین عملکرد را داشتند.

کلمات کلیدی: سازه فولادی، سیستم مهاربندی سازه، روش المان محدود، تحلیل مودال در حوزه فرکانسی، مدلسازی با آباکوس.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: M.Mahdavi@email.kntu.ac.ir

۱. مقدمه

مهاربندهای فولادی، یکی از رایج‌ترین سیستم‌ها برای افزایش سختی جانبی سازه هستند (Chou et al., 2023). طراحان سازه با توجه به عوامل مختلفی از جمله (الف) ارتفاع سازه، (ب) شدت لرزه‌خیزی، (ج) ترکیبات بار و (د) شرایط هندسی، از مهاربندهای مختلفی در سازه استفاده می‌کنند (Farheen & Akshara, 2023). لذا، انواع مختلفی از سیستم‌های مهاربندی در افزایش عملکرد لرزه‌ای سازه وجود دارد که می‌توان از آن‌ها در ساختار سازه‌ای (باربر جانبی) ساختمان استفاده کرد (Hamidi & Soleimani, 2023). لذا، مقایسه‌ی عملکرد مهاربندهای نوین، به شناخت مزایا و معایب مهاربندهای مختلف کمک می‌کند. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در طراحی و بهینه‌سازی مهاربندهای فولادی صورت گرفته که منجر به ایجاد و ظهور سیستم‌های نوین مهاربندی با رفتار لرزه‌ای بهبودیافته شده است (Honma et al., 2021). این سیستم‌ها شامل مهاربندهای کمانش‌ناپذیر (BRB)^۱، و میراگرهای اصطکاکی و هیستریزیس^۲ هستند که هر کدام با مکانیزم‌های متفاوتی، انرژی زلزله را مستهلک می‌کنند (Hormazabal et al., 2023). بررسی عملکرد این سیستم‌ها در قیاس با مهاربندهای مرسوم مانند مهاربندهای همگرا (CBF)^۳ و واگرا (EBF)^۴، می‌تواند راهگشای انتخاب بهینه‌ترین سیستم مهاربندی در شرایط مختلف طراحی باشد. لذا در این راستا و به منظور کمک به ایجاد پاسخ‌های دقیق و جامع منطبق با شرایط واقعی سازه، مدل‌سازی المان محدود، به عنوان یکی از روش‌های قدرتمند و پرکاربرد در تحلیل رفتار لرزه‌ای سازه‌ها شناخته می‌شود که امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار غیرخطی مصالح و اعضا را فراهم می‌کند (Li et al., 2022). نرم‌افزار آباکوس با قابلیت‌های پیشرفته در تحلیل‌های غیرخطی، ابزاری کارآمد برای ارزیابی عملکرد مهاربندهای نوین تحت بارهای دینامیکی محسوب می‌شود (Li et al., 2023). در پژوهش حاضر، با به‌کارگیری روش المان محدود در آباکوس، رفتار سازه‌های مجهز به انواع مهاربندهای نوین تحت اثر آنالیز مودال در حوزه‌ی فرکانسی بررسی خواهد شد تا با مقایسه‌ی پاسخ‌های لرزه‌ای، کارایی هر سیستم در بهبود عملکرد سازه ارزیابی شود. پژوهش شامل اهداف زیر است:

- الف- بررسی و مقایسه‌ی عملکرد مودال در بخش تنش وون میزس برای شش نوع مهاربند نوین،
- ب- بررسی و مقایسه‌ی عملکرد مودال در بخش تغییرمکان برای شش نوع مهاربند نوین،
- ج- بررسی و مقایسه‌ی عملکرد مودال در بخش جرم تعمیم‌یافته برای شش نوع مهاربند نوین،
- د- بررسی و مقایسه‌ی عملکرد مودال در بخش فرکانس ویژه برای شش نوع مهاربند نوین،
- ر- بررسی و مقایسه‌ی عملکرد مودال در بخش ضریب مشارکت میانگین برای مولفه‌های دروانی برای شش نوع مهاربند نوین.

۲. پیشینه پژوهش

ژنگ و همکاران^۵ (۲۰۲۴) عملکرد مهاربندهای ضربداری در قاب‌های فولادی را بررسی کردند. مطالعات با روش المان محدود (FEM)^۶ انجام شد. نتایج نشان داد مهاربندهای ضربداری باعث افزایش ۲۰٪ ظرفیت باربری سازه می‌شود. اولاه و همکاران^۷ (۲۰۲۴) قاب مهاربندی شده با سیستم شورون مجهز به میراگر فیوزدار ساندویچی قابل تعویض (SFD) را بررسی کردند. نتایج نشان داد تسلیم خمشی شکل‌پذیر فیوزها، شکست قاب‌های مهاربندی شده با سیستم SFD را کنترل می‌کند. همچنین، مشخص شد شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و ظرفیت تغییرشکل قاب‌های مهاربندی شده با سیستم SFD به ترتیب ۲، ۴/۷۳ و ۴/۵۹ برابر

^۱ Buckling Restrained Brace (BRB)
^۲ Friction and Hysteresis Dampers
^۳ Centrally Braced Frame (CBF)
^۴ Eccentrically Braced Frame (EBF)
^۵ Zheng et al.
^۶ Finite Element Model (FEM)
^۷ Ullah et al.

بزرگتر از قاب مهاربندی شده با مهاربند شورون معمولی است. مهدوی و همکاران^۸ (۲۰۲۳) به بررسی ۱۰ نوع مهاربند پرکاربرد و نوین در سازه‌های فولادی شامل مهاربندهای دروازه‌ای، زبیر، واگرا با تیر پیوند عمودی و زانویی پرداختند. مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار SAP2000، و با روش استاتیکی غیرخطی انجام شد. نتایج نشان داد افزایش ارتفاع سازه باعث تغییرات زیادی در کارکرد مهاربندها در سازه‌های فولادی می‌شود. حمیدی و سلیمانی^۹ (۲۰۲۳) عملکرد لرزه‌ای مهاربند ضربدری در ارتقای بازده لرزه‌ای قاب خمشی فولادی را بررسی کردند. این بررسی با ۲۰ رکورد زلزله و روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار المان محدود اپنسیس^{۱۰} انجام شد. نتایج نشان داد مهاربند ضربدری موجب ارتقای عملکرد لرزه‌ای قاب فولادی می‌شود. لی و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۳) عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای شورون دارای تیرهای پیشنهادی را بررسی کردند. نتایج نشان داد مهاربند شورون پیشنهادی، توانسته تا عملکرد لرزه‌ای سازه فولادی را در معیارهای مختلف لرزه‌ای، به‌طور میانگین ۳۳٪ افزایش دهد. ژنگ و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۳) به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده شورون پرداختند. در این پژوهش، ۳ سیستم سازه‌ای نوین شامل قاب مهاربندی شده شورون قوسی (HZC)، قاب مهاربندی شده شورون چندمحوره (ZXC) و قاب مهاربندی شده با مهارهای تقویتی جانبی (ZCG) پیشنهاد شد. نتایج نشان داد عملکرد لرزه‌ای سیستم ZCG بهتر از سایر قاب‌های سیستم‌های مهاربندی پیشنهادی است. مهدوی و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد مهاربندهای دروازه‌ای و هشتی را مقایسه کردند. مدل‌سازی‌ها با نرم‌افزار آباکوس و روش المان محدود انجام شد. نتایج نشان داد مهاربند هشتی در مقایسه با مهاربند دروازه‌ای، تنش وون‌میزس کمتری (کاهش ۲۹/۱۸٪) و تغییرشکل کمتری (کاهش ۱۶/۶۹٪) در قاب فولادی ایجاد کرده است. رنجراج و همکاران^{۱۳} (۲۰۲۳) با انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، رفتار سازه‌های فولادی ۳، ۷ و ۱۰ طبقه را در صورت وجود و عدم وجود سیستم مهاربندی شورون، با به‌کارگیری نرم‌افزار STAAD Pro، بررسی کردند. نتایج نشان داد مهاربند شورون عملکرد لرزه‌ای سازه را به میزان مناسبی بهبود می‌بخشد. هونما و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۱) توانستند مهاربند زانویی مجهز به میراگر، پیشنهاد دهند. نتایج نشان داد ظرفیت خستگی اندک تحت بارگذاری چرخه‌ای در مهاربند زانویی را می‌توان با استفاده از منحنی خستگی نمونه‌ی شیاردار فولاد و قانون ماینر، پیش‌بینی کرد. ژانگ و همکاران^{۱۵} (۲۰۲۰) رفتار لرزه‌ای قاب فولادی مهاربندی شده با مهاربند کابلی دارای اتصالات پیچ و مهره‌ای (CBBSF) در شرایط وجود مهاربند ضربدری، بررسی کردند. نتایج نشان داد مهاربند عملکرد خوبی دارد و موجب ارتقای لرزه‌ای سازه فولادی شده است. فرهین و آکشارا^{۱۶} (۲۰۱۹) عملکرد مهاربندهای زانویی در قاب‌های فولادی با ابعاد مختلف را بررسی کردند. این پژوهش با روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی و تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شد. نتایج نشان داد مهاربندهای زانویی، عملکرد خوبی در قاب‌های فولادی با نسبت‌های مختلف طول دهانه بارگیر به ارتفاع طبقات دارند. ناگی‌کم^{۱۷} (۲۰۱۶) توانست تا سیستم مهاربندی لوزی‌شکل فولادی را پیشنهاد دهد که طراحی سیستم آن بر اساس تئوری سختی قاب کششی یک‌بعدی رسانی و شای^{۱۸} (۲۰۱۰) انجام شد.

با بررسی پژوهش‌های فراوانی شامل مهدوی و همکاران (۲۰۲۴)، ژائو و کیو^{۱۹} (۲۰۲۴)، چو و همکاران^{۲۰} (۲۰۲۳)، لی و همکاران (۲۰۲۳)، مهدوی و همکاران (۲۰۲۳)، ژنگ و همکاران (۲۰۲۳)، مهدوی و عزیززاده^{۲۱} (۲۰۲۰)، فرهین و آشکارا (۲۰۱۹)، ناگی‌کم (۲۰۱۶)، مشاهده شد در بسیاری از مطالعات انجام شده، تنها ۲ یا ۳ سیستم مهاربندی با یکدیگر مقایسه شده و

- Mahdavi et al.^۸
Hamidi & Soleimani^۹
Opensees^{۱۰}
Li et al.^{۱۱}
Zheng et al.^{۱۲}
Rangaraj et al.^{۱۳}
Honma et al.^{۱۴}
Zhang et al.^{۱۵}
Farheen & Akshara^{۱۶}
Nagy Kem^{۱۷}
Recski & Shai^{۱۸}
Zhao & Qiu^{۱۹}
Chou et al.^{۲۰}
Mahdavi & Azizzadeh^{۲۱}

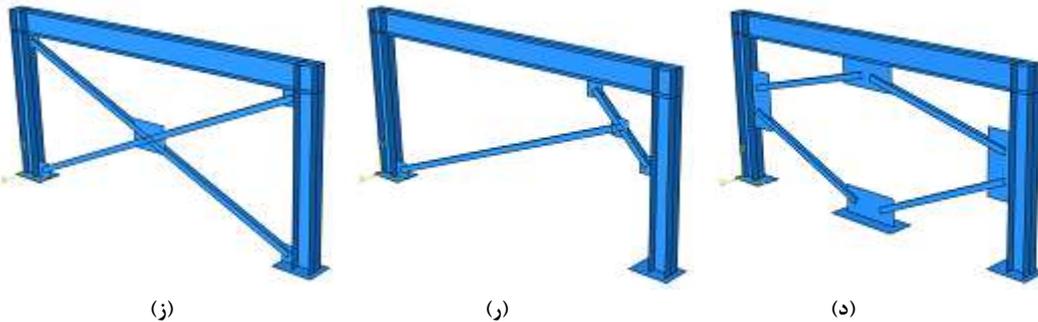
پژوهش‌های بسیار اندکی وجود دارد که چند نوع مهاربند را با یکدیگر مقایسه کرده باشد. همچنین در پژوهش‌های انجام شده، به‌طور عمده از روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی (اعمال بارگذاری جانبی) یا دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی (با به‌کارگیری شتابنگاشت‌های نزدیک یا دور از گسل) استفاده شده و سایر تحلیل‌های موجود همچون آنالیز مودال در حوزه‌ی فرکانسی، نادیده گرفته شده است. بنابراین، با توجه به مطالعات انجام شده، نوآوری‌های پژوهش حاضر، به شرح زیر است:

- مقایسه‌ی عملکرد مهاربندهای پرکاربرد در سازه‌ی فولادی شامل شورون، مورب، دروازه‌ای، زانویی و ضربدری. در پژوهش حاضر، ۶ سیستم مهاربندی پرکاربرد نوین بررسی شده که نتایج بسیار جدید و کاربردی برای مهندسان طراح سازه به همراه دارد.
- استفاده از روش تحلیل مودال در حوزه‌ی فرکانسی در انجام آنالیزهای نرم‌افزاری. از این روش در پژوهش‌های بسیار اندکی در سطح جهان برای بررسی عملکرد و مقایسه‌ی رفتار سازه‌های فولادی مهاربندی شده استفاده گردیده که انجام پژوهش حاضر با این روش را دارای جنبه‌ای نوآورانه کرده است.
- مدل‌سازی مهاربندهای پرکاربرد نوین با روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس^{۲۲}. سعی شده تا روند کلی مدلسازی نرم‌افزاری به همراه تصاویری از محیط نرم‌افزار، برای خوانندگان پژوهش ارائه شود تا جنبه‌ی آموزشی نیز به نتایج تحلیلی مقاله، افزوده شود.
- تعیین پارامترهای مختلف عملکردی در مهاربندهای فولادی از جمله تنش وون‌میزس، تغییرشکل، جرم مؤثر، ضریب مشارکت (در محورهای افقی، عمودی و قائم)، جرم تعمیم‌یافته و فرکانس ویژه. تعیین پارامترهای مودال در حوزه‌ی فرکانسی باعث می‌شود رفتار قاب‌های مهاربندی شده، به‌طور کامل بررسی شود و نتایج پژوهش، ضمن جامعیت دارای نوآوری‌های زیادی باشد.
- در مطالعات مشابه، معمولاً ۶ تا ۸ مود ارتعاشی سازه بررسی می‌شود و اثرات مودهای بالاتر در نظر گرفته نمی‌شود. در پژوهش حاضر، مودهای ارتعاشی متعدد در سازه‌های با سیستم مهاربندی نوین که دقت نتایج را افزایش، و میزان خطای احتمالی طی انجام مدلسازی و تحلیل را نیز کاهش داده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر، قاب‌های فولادی با ارتفاع یک طبقه در نرم‌افزار آباکوس ورژن ۳-۶.۱۲ و روش المان محدود، مدل‌سازی شده‌اند (Mahdavi, 2020). ارتفاع طبقه و طول دهانه‌ها یکسان و به ترتیب $\frac{3}{2}$ و $\frac{6}{6}$ متر است. در شکل ۱، مدل المان محدود شش نوع مهاربند مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر، نشان داده شده است، که در ادامه‌ی پژوهش، روند کلی مدلسازی آن‌ها، ارائه شده است.





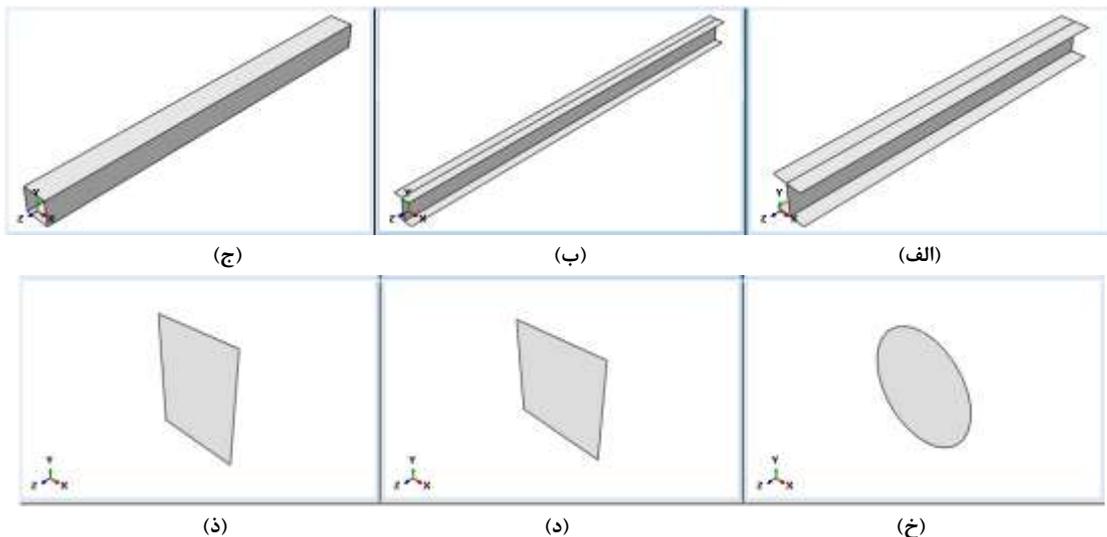
شکل ۱. مدل المان محدود از قاب‌های فولادی مهاربندی شده در نرم‌افزار آباکوس (الف) مورب، (ب) دروازه‌ای، (ج) آ- شورون، (د) لوزی، (ر) زانویی و (ز) ضربدری (نگارنده، ۱۴۰۴)

در مدل‌سازی نرم‌افزاری، از فولاد نوع St37 استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فولاد St37 در مدل‌سازی با تکنیک FEM (Mahdavi et al., 2023)

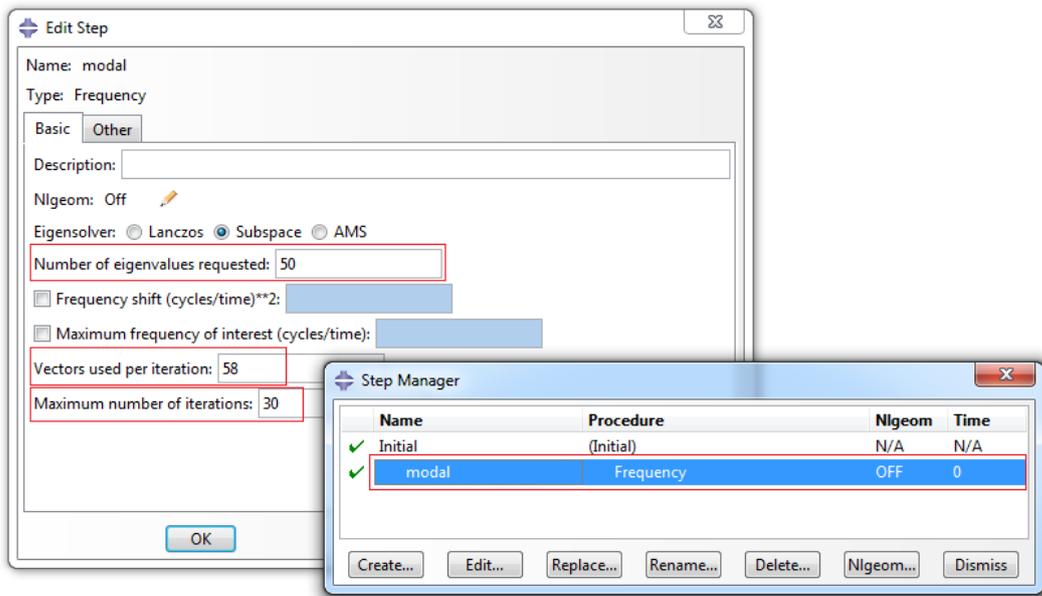
ضریب پواسون	حداکثر تنش کششی	تنش کششی موثر	حداقل تنش کششی	حداقل تنش تسلیم	پارامتر
۰/۳	$10^6 \times 27/6$ (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	$10^6 \times 27/6$ (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	$10^6 \times 27$ (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	$10^6 \times 24$ (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	مقدار عددی (واحد)

در مدل‌سازی نرم‌افزاری، در ماژول Part و گزینه‌ی Create Part، المان‌های لازم شامل ستون (3D)، تیر (3D)، مهاربند (3D) و صفحه‌ی اتصال (2D)، طراحی شد (شکل ۲). پس از مدل‌سازی اعضا، در ماژول Property و گزینه‌های Create Material، Assign Section و Create Section به ترتیب تعریف مصالح، تعریف مقاطع و اختصاص مقاطع المان‌ها به اعضا انجام شد. قاب‌ها بر حسب ساختارشان، در ماژول Assembly مونتاژ شدند (شکل ۱). همچنین لازم به ذکر است که اتصالات در تمام سازه‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده است.

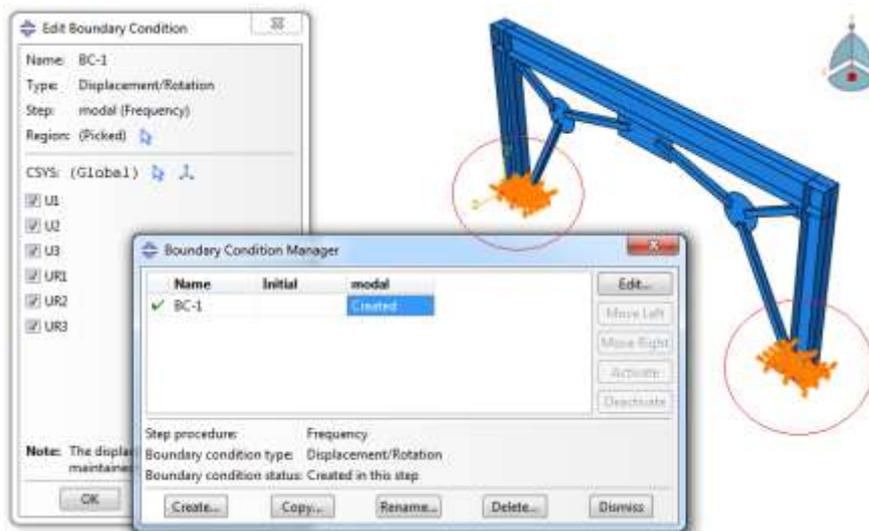


شکل ۲. المان‌های مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس برای ساخت قاب‌های فولادی مهاربندی شده (الف) ستون HE، (ب) تیر IPE، (ج) مهاربند BOX، (خ) صفحه اتصال دایره‌ای، (د) صفحه اتصال مربعی و (ذ) صفحه‌ی کف (نگارنده، ۱۴۰۴)

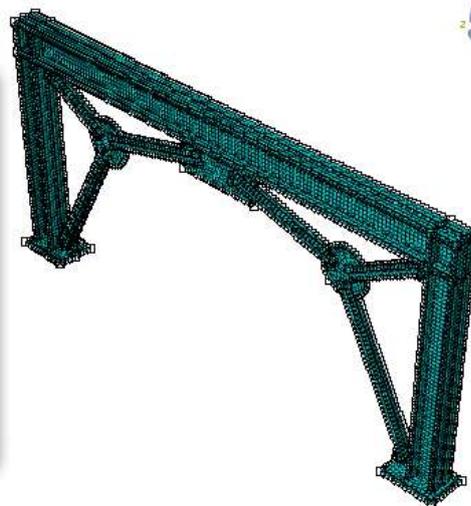
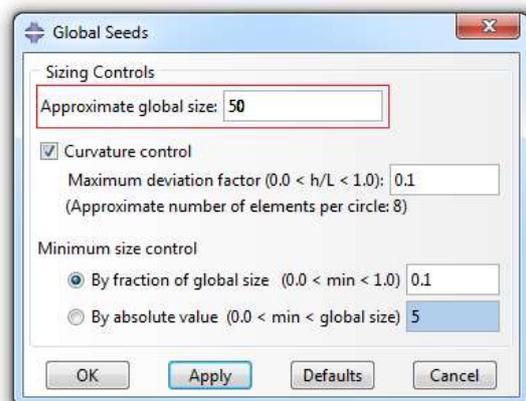
سپس، در ماژول Step، تحلیل از نوع مودال در حوزه‌ی فرکانسی انتخاب می‌شود. در پژوهش حاضر، ۵۰ مود ارتعاشی با ۵۰ مقدار ویژه، در قاب‌های مهاربندی برای انجام تحلیل، تعریف شده است. تعداد بردارها در هر تکرار و حداکثر تکرار ممکن، به ترتیب ۵۸ و ۳۰ در نظر گرفته شده که با کادر قرمز رنگ در شکل ۳ مشخص شده است.



شکل ۳. تعریف آنالیز مودال در حوزه فرکانسی و مشخصات آن در نرم افزار آباکوس (نگارنده، ۱۴۰۴) با توجه به اینکه جنس قاب مهاربندی شده از فولاد St37 است، لذا اندرکنش (اعمال در ماژول Interaction) بین اعضا صفر بوده و در مدلسازی در نظر گرفته نمی شود. در ماژول Load و گزینه ی Condition Create Boundary کف ستون ها در قاب های مهاربندی شده ی فولادی انتخاب می شوند و توسط تکیه گاه های گیردار به زمین متصل می شوند (شکل ۴).

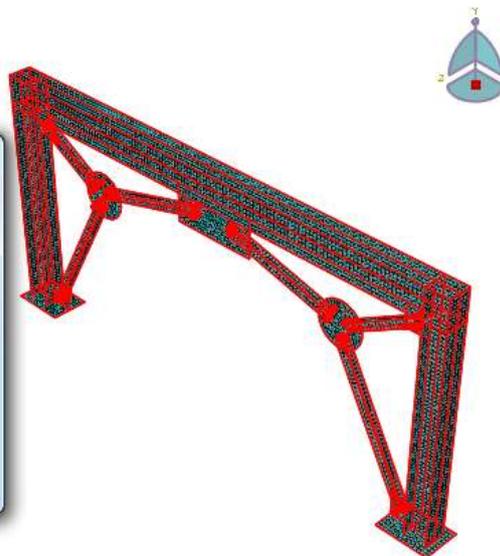
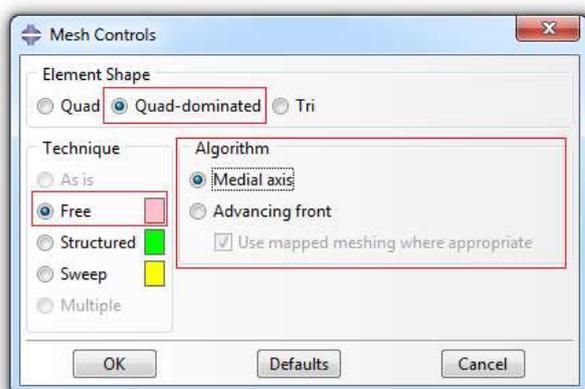


شکل ۴. تعریف تکیه گاه های گیردار برای قاب مهاربندی شده در نرم افزار آباکوس (نگارنده، ۱۴۰۴). سپس، مش بندی مدل ها انجام شد. ابعاد هر مش در گزینه ی Seed Part معادل ۵۰ میلیمتر تعیین شد (شکل ۵).



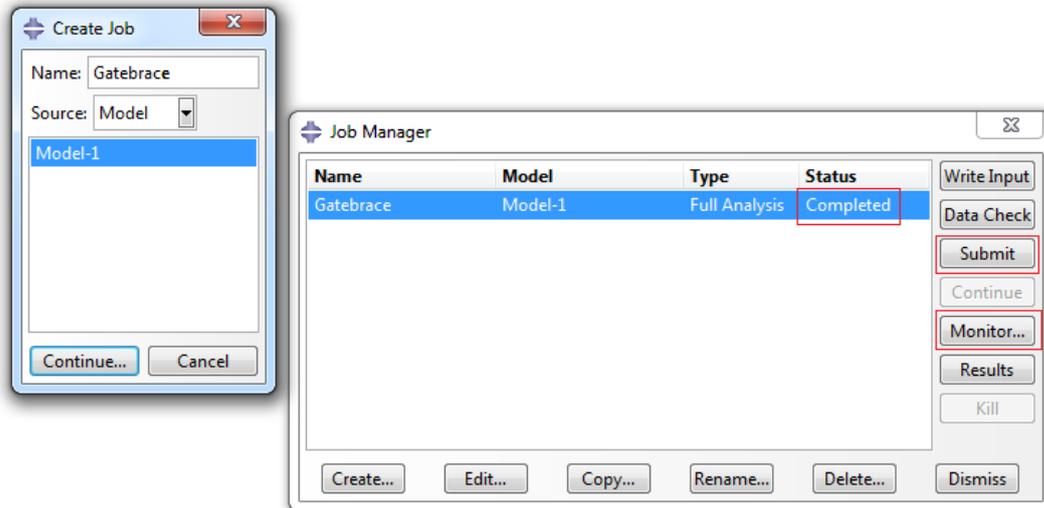
شکل ۵. تعریف ابعاد مش بندی برای قاب مهاربندی شده در نرم افزار آباکوس (نگارنده، ۱۴۰۴)

برای تعیین نوع مش و اعمال آن در مدل المان محدود قاب مهاربندی، از گزینه Assign Mesh Controls استفاده شد (شکل ۶). با انجام Verify Mesh امکان وجود خطا و عدم تطابق در مش بندی، بررسی و با گزینه های Assign Element Type و Part Mesh، شبکه بندی مش بندی موجود، در قاب مهاربندی شده ایجاد شد.



شکل ۶. تعریف مشخصات مش بندی برای قاب مهاربندی شده در نرم افزار آباکوس (نگارنده، ۱۴۰۴)

سپس، برای ایجاد فایل تحلیل در ماژول Job و گزینهی Create Job، یک فایل ایجاد کرده و با کلیک گزینهی Submit تحلیل شروع خواهد شد (شکل ۷). پس از انجام تحلیل و در صورت نتایج صحیح، گزینهی Completed در این بخش قابل مشاهده است. در صورت وجود هر نوع خطا و عدم دستیابی به نتایج مناسب در تحلیل نرم افزاری، خطای Aborted به جای Completed نمایش داده می شود که علت آن را در بخش Monitor در نوار سمت راست Job Manager می توان مشاهده کرد. بخش های مهم با کادر قرمز رنگ در شکل ۷ مشخص شده است.



شکل ۷. تعریف فایل تحلیل برای قاب مهاربندی شده و زیربخش‌های مهم آن در نرم‌افزار آباکوس (نگارنده، ۱۴۰۴)

به‌طور کلی، تحلیل مودال در حوزه فرکانسی، برای تعیین پارامترهای مودال شامل فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و پارامترهای عملکردی است. با توجه به اینکه داده‌های تجربی می‌تواند به صورت ضریب پاسخ فرکانسی (FRF)^{۲۳} یا ضریب پاسخ ضربه (IRF)^{۲۴} باشد، روش‌های مختلف تحلیل مودال در حوزه فرکانسی و زمان، در حال توسعه است (Sun & Li, 2023). تحلیل مودال در حوزه فرکانسی، بر حسب ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی، توسط مدل ریاضی پیشنهادی انجام شد. مدل پیشنهادی شامل درجات آزادی سازه، مدل میراشونده و تعداد مودهای ارتعاشی در حوزه فرکانسی است. فرضیات موجود در مدل پیشنهادی (مدل ریاضی)، شامل بهینه‌سازی منحنی پاسخ مودال است. بنابراین، وظیفه‌ی اصلی در تحلیل مودال، ایجاد یک فرآیند بهینه‌سازی منحنی برای تعیین پارامترهای مودال (با استفاده از نتایج آزمایشگاهی) است (Sun & Li, 2023; Ullah et al., 2024).

به‌طور کلی، دقت تحلیل مودال به کیفیت بهینه‌سازی منحنی فرکانس بستگی ندارد. افزایش دقت در پاسخ‌های فرکانسی، دقت در بهینه‌سازی منحنی عملکرد را افزایش می‌دهد. با تعریف یک مدل ریاضی مناسب و کامل، به نتایج بسیار بهتری در پاسخ فرکانسی دست خواهیم یافت. بنابراین، دقت نتایج افزایش می‌یابد. مجموعاً، اگر میرایی در سیستم با یک درجه آزادی توسط ماتریس میرایی نمایش داده شود، معادله حرکت به صورت معادله (۱) خواهد بود:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (1)$$

Frequency Response Function (FRF)^{۲۳}
Impact Response Factor (IRF)^{۲۴}

در این رابطه؛ M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی، K ماتریس سختی، x بردار جابجایی، \dot{x} بردار سرعت و \ddot{x} بردار شتاب است. همچنین، پاسخ معادله (۱) بر حسب مقادیر ویژه و بردار ویژه است. بردار ویژه، مودهای ارتعاشی را نشان می‌دهد (Sun & Li, 2023). ماتریس جرم تعمیم‌یافته به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$${}^{(2)}\hat{m} = \varphi^T \cdot M \cdot \varphi$$

در این رابطه؛ \hat{m} ماتریس جرم تعمیم‌یافته‌ی سیستم، φ ماتریس بردار ویژه و φ^T مبدل ماتریس است (Sun & Li, 2023). همچنین، بردار اثر، حرکت جسم صلب را در تمام حالات بررسی می‌کند. بردار اثر را به صورت زیر تعریف می‌شود:

$${}^{(3)}\bar{L} = \varphi^T \cdot M \cdot \bar{r}$$

در این رابطه؛ \bar{L} بردار ضرایب و \bar{r} بردار اثر است [۱۱]. ماتریس ضریب مشارکت مودال برای مود i ام توسط رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$${}^{(4)}\Gamma_i = (\bar{L}_i / \hat{m}_{ii})$$

در این رابطه؛ Γ_i ماتریس ضریب مشارکت مودال است. همچنین، جرم مودال مؤثر در مود i ام بر اساس رابطه (۵) تعیین می‌شود:

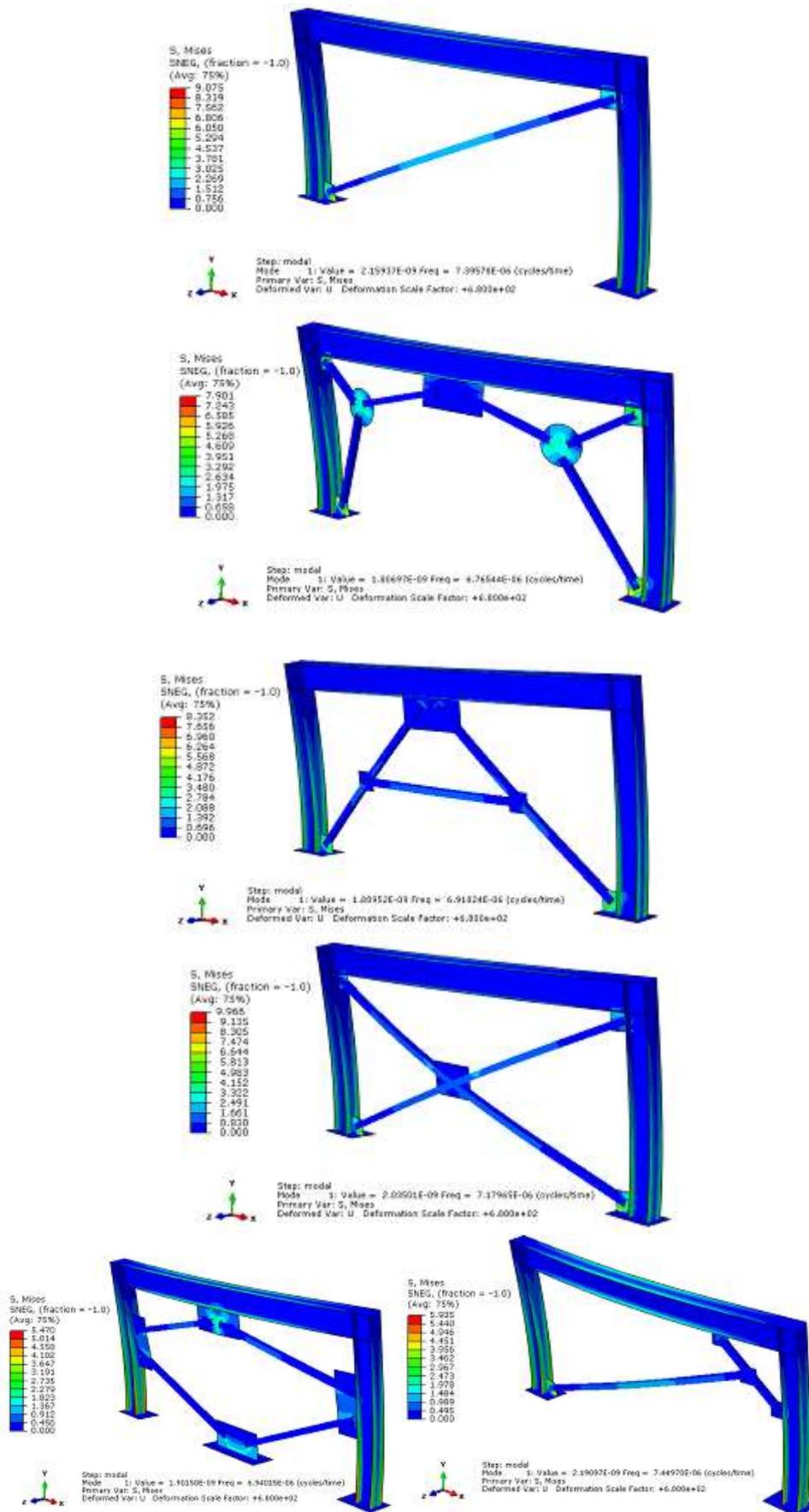
$${}^{(5)}m_{eff,i} = (\bar{L}_i^2 / \hat{m}_{ii})$$

در این رابطه؛ m_{eff} جرم مؤثر مودال است [۱۱].

۴. نتایج پژوهش

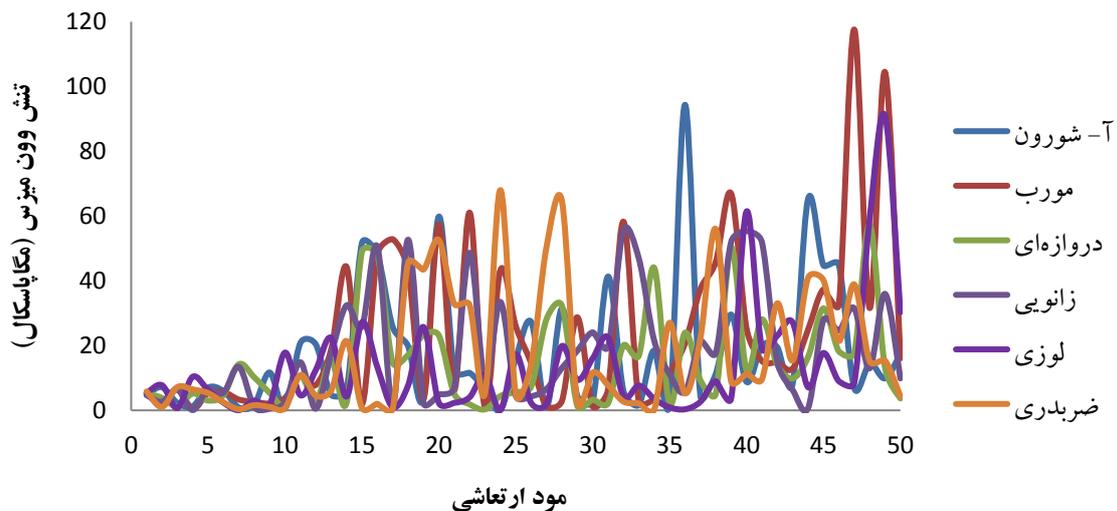
۱.۴. تنش وون میزس

در این بخش، تنش وون میزس در قاب‌های مهاربندی شده، ارائه و نتایج آن تحلیل خواهد شد. این معیار بیشتر در مصالح شکل‌پذیر مانند فولاد استفاده می‌شود. معیار تسلیم وون میزس بیان می‌کند اگر تنش وون میزس در یک ماده تحت بارگذاری، برابر یا بزرگتر از حد تسلیم آن ماده تحت کشش ساده باشد، آن ماده تسلیم خواهد شد. در شکل ۸، کانتور تنش وون میزس در قاب‌های مهاربندی شده، در مود اول ارتعاشی سازه طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی ارائه شده است.



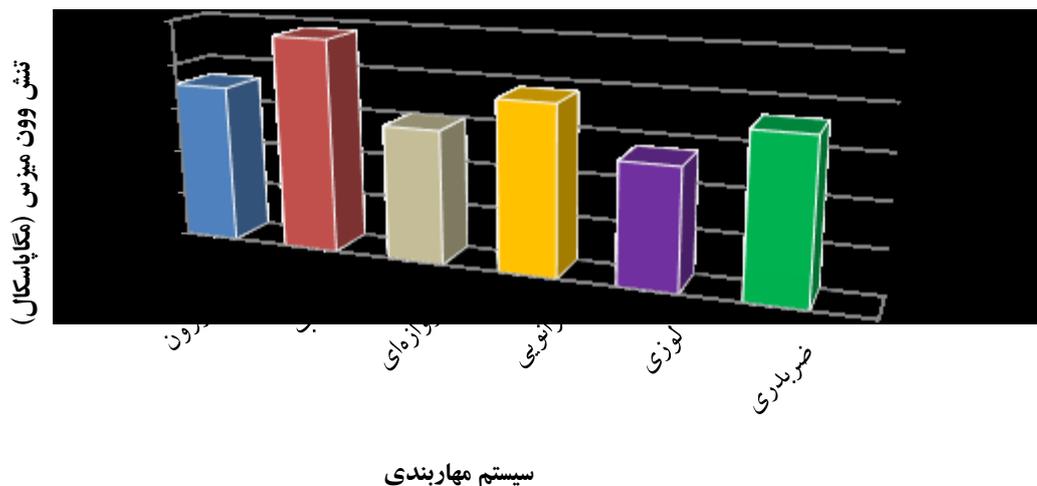
شکل ۸. تنش وون میزس در قاب‌های مهاربندی‌شده در مود اول ارتعاشی طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)

شکل ۸ نشان داد نوع مهاربند تأثیر زیادی بر تنش وون میزس در تحلیل مودال در حوزه فرکانسی دارد. نتایج تحلیل‌ها نشانگر این است قاب فولادی با مهاربند لوزی، کمترین تنش موجود (با بیشینه مقدار ۵/۴۷ مگاپاسکال) را دارد. قاب فولادی با مهاربند ضربدری، بیشترین تنش موجود را با بیشینه مقدار ۹/۹۶۵ مگاپاسکال دارد. برای ارزیابی تنش وون میزس در مودهای مختلف ارتعاشی سازه، نمودار تنش کفستون برای قاب‌های مهاربندی شده، در شکل ۹ ارائه شده است. به‌طور کلی، مقدار عددی تنش فشاری، منفی خواهد بود، اما تنش وون میزس دارای مقداری مثبت است، زیرا ریشه‌ی دوم مجموع مقادیر تنش به توان دو می‌رسد. در نتایج حاصل، می‌توان دید که تغییرات ناشی از تغییر سیستم مهاربندی، نسبتاً زیاد است. تأثیر نوع مهاربند در تغییرات تنش طی انواع دیگر تحلیل‌های غیرخطی مانند آنالیزهای استاتیکی غیرخطی و دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، بسیار مهم است.



شکل ۹. تنش وون میزس در قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)

شکل ۹ نشان داد عملکرد قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل‌های مودال، بسیار متفاوت است. با بررسی نمودار تنش وون میزس در حالات مختلف ارتعاشی (در شکل ۹)، نمی‌توان به نتیجه دقیقی دست یافت. میانگین تنش در زیر ستون، برای ۵۰ مود ارتعاشی سازه با مهاربندهای مختلف، در شکل ۱۰ ارائه شده است.

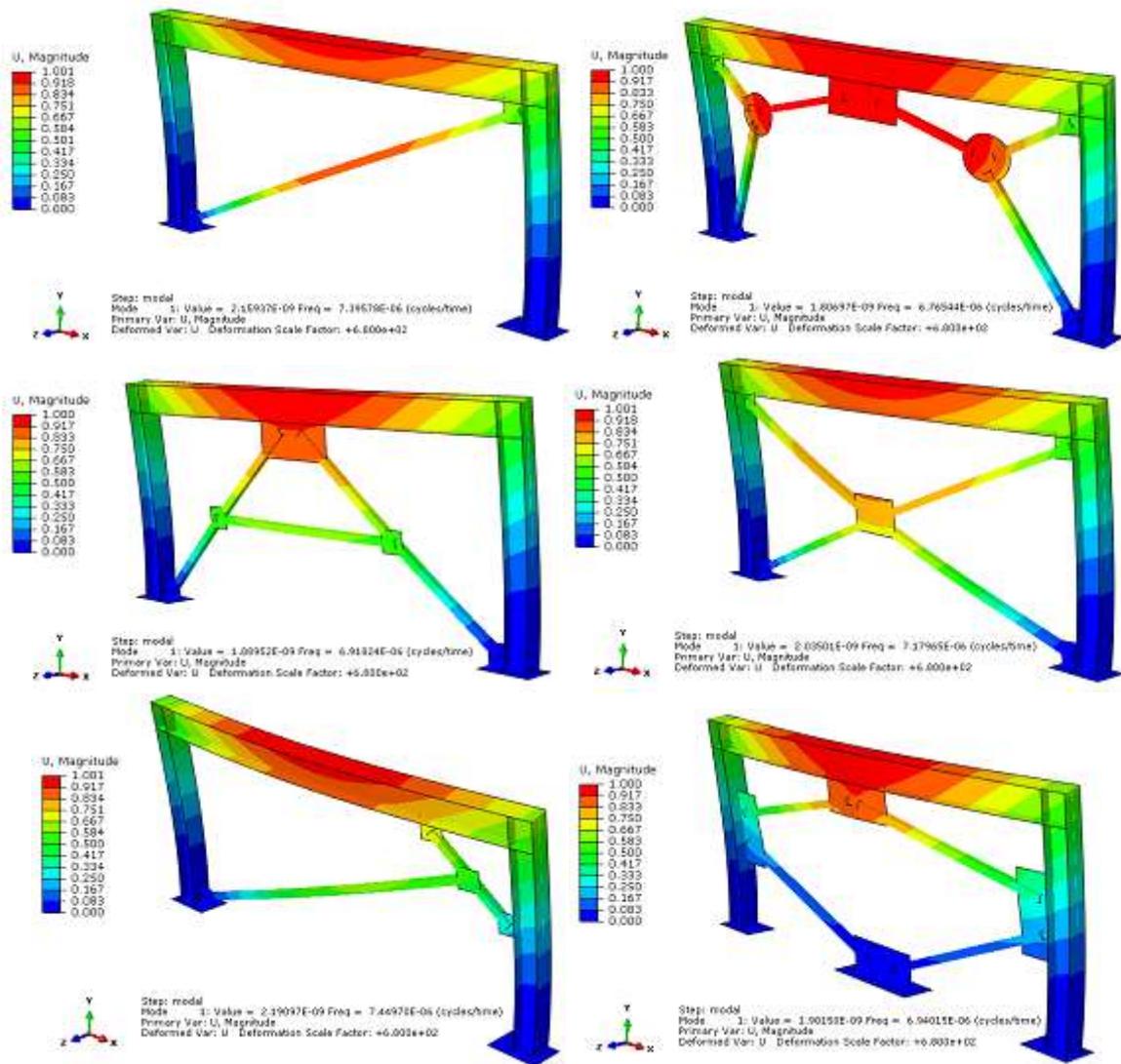


شکل ۱۰. میانگین تنش وون میزس در قاب‌های مهاربندی شده در ۵۰ مود ارتعاشی سازه (نگارنده، ۱۴۰۴)

شکل ۱۰ نشان داد قاب‌های فولادی با مهاربندهای لوزی و مورب به ترتیب کمترین (۱۳/۴ مگاپاسکال) و بیشترین (۲۳/۹ مگاپاسکال) تنش وون میزس را در ۵۰ مود ارتعاشی طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی دارند. استفاده از مهاربندهای لوزی در مقایسه با مهاربندهای آ-شورون، مورب، دروازه‌ای، زانویی و ضربدری به ترتیب باعث کاهش ۲۴/۲۹٪، ۴۳/۹۳٪، ۱۰/۰۷٪، ۲۸/۷۲٪ و ۲۴/۲۹٪ تنش وون میزس شده است.

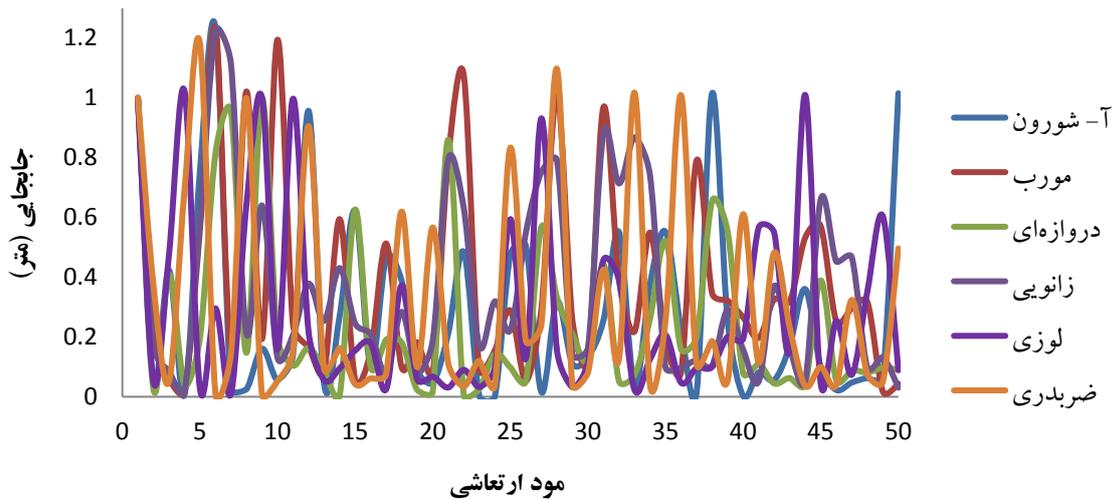
۲.۴. جابجایی

در شکل ۱۱، جابجایی قاب‌های مهاربندی شده با ۶ نوع سیستم مهاربندی مختلف، ارائه و تحلیل شده است.



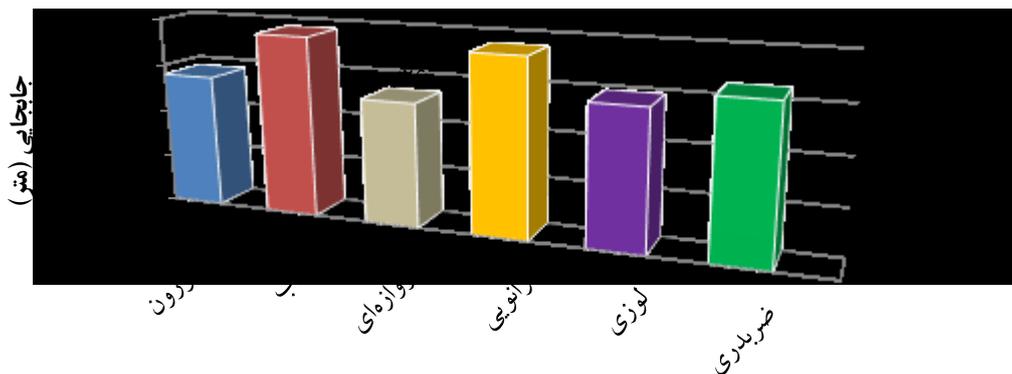
شکل ۱۱. جابجایی قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)

شکل ۱۱ نشان داد حداکثر جابجایی در المان تیر ایجاد شده است. حداکثر مقدار جابجایی در قاب‌های مهاربندی شده، تقریباً یکسان است. بنابراین، برای بررسی عددی جابجایی قاب‌های مهاربندی شده، نمودار جابجایی تیر در مودهای مختلف ارتعاشی، در شکل ۸ انجام شده است. پارامتر جابجایی، مناسب‌ترین معیار برای بررسی عملکرد دینامیکی سازه‌ها است. این پارامتر عملکرد کلی سازه را تحت بارگذاری غیرخطی نشان می‌دهد. برای سازه‌های با جرم توزیع شده، «جابجایی» متناسب با مختصات مکانی و زمانی در سازه است. بنابراین، سیستم مهاربندی مناسب در سازه، جابجایی سازه را کاهش داده و پایداری سازه را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۱. جابجایی المان تیر در قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)

شکل ۱۲ نشان داد تأثیر مهاربندها بر مقدار جابجایی، خصوصاً المان تیر، متفاوت است. برای انجام تحلیل عددی نتایج، میانگین جابجایی تیر در موده‌های ارتعاشی طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی، در شکل ۱۳ ارائه شده است.



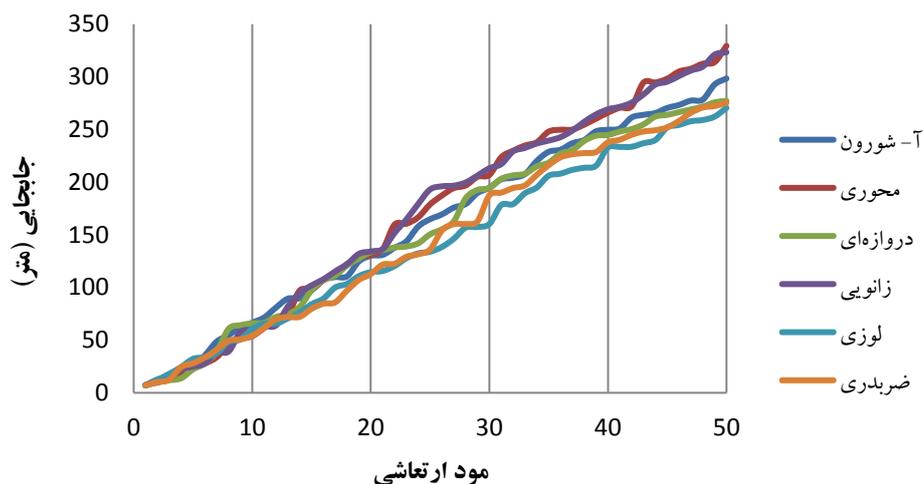
سیستم مهاربندی

شکل ۱۳. جابجایی المان تیر در قاب‌های مهاربندی شده در ۵۰ مود ارتعاشی سازه (نگارنده، ۱۴۰۴)

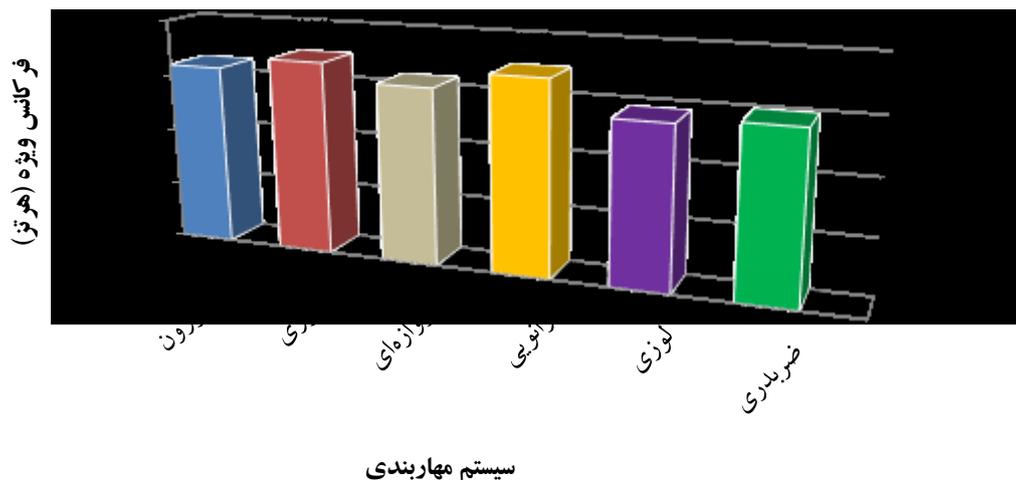
شکل ۱۳ نشان داد قاب فولادی با مهاربند دروازه‌ای، کمترین جابجایی تیر (۲۶ سانتی‌متر) را داراست. همچنین، قاب فولادی با مهاربند قطری، بیشترین جابجایی (۳۸ سانتی‌متر) را داراست. استفاده از مهاربند دروازه‌ای در مقایسه با مهاربندهای آ-شورون، قطری، زانوئی، لوزی و ضربدری به ترتیب باعث کاهش ۷/۱۴٪، ۳۱/۵۸٪، ۲۹/۷۳٪، ۱۰/۳۴٪ و ۱۸/۷۵٪ در جابجایی قاب‌های مهاربندی شده است. به‌طور کلی، تحلیل مودال می‌تواند امکان ایجاد جابجایی‌های بزرگ در سازه را نشان دهد. اگر بارگذاری استاتیکی یا دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی سازه انجام شود، عملکرد واقعی سازه تعیین‌کننده است. بنابراین، در پژوهش حاضر، جابجایی در بررسی عملکرد مودال سازه، بسیار کاربردی است و عملکرد واقعی سازه طی تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی به منظور انجام طراحی سازه، بسیار مهم‌تر خواهد بود. به بیان ساده، تحلیل مودال نتایج اولیه را برای بررسی عملکرد کلی مهاربندهای مورد نظر، تعیین می‌کند.

۳.۴. فرکانس ویژه

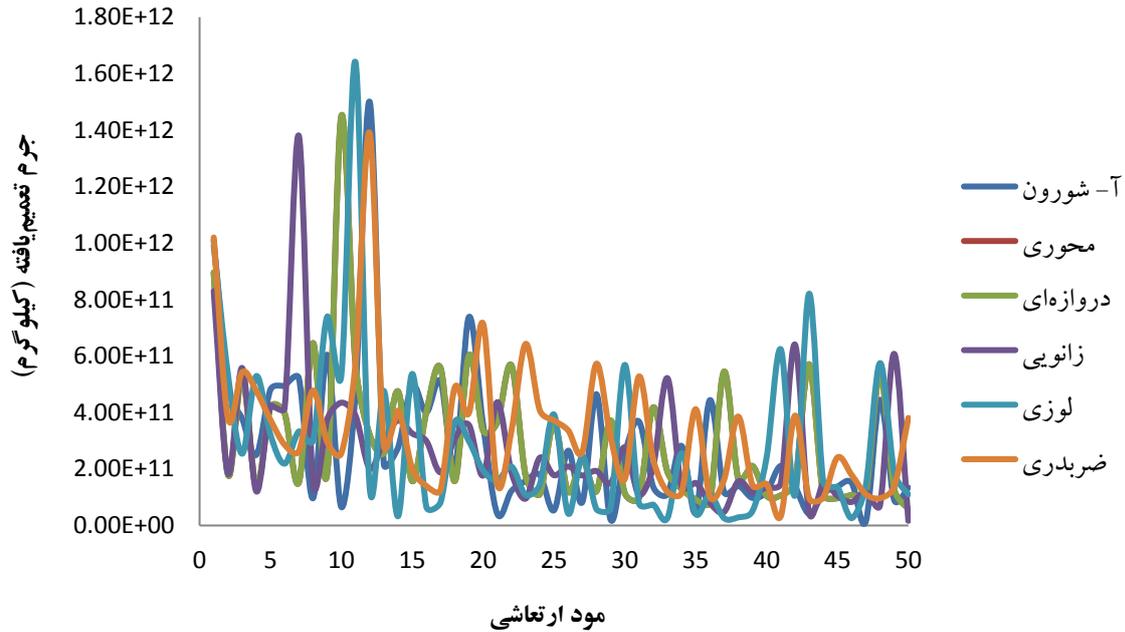
در این بخش، فرکانس ویژه در قاب‌های مهاربندی شده، ارائه و نتایج آن تحلیل خواهد شد. ابتدا در شکل ۱۴، فرکانس ویژه در ۵۰ مود ارتعاشی سازه‌های مهاربندی شده، به صورت گراف صعودی ارائه شده است.



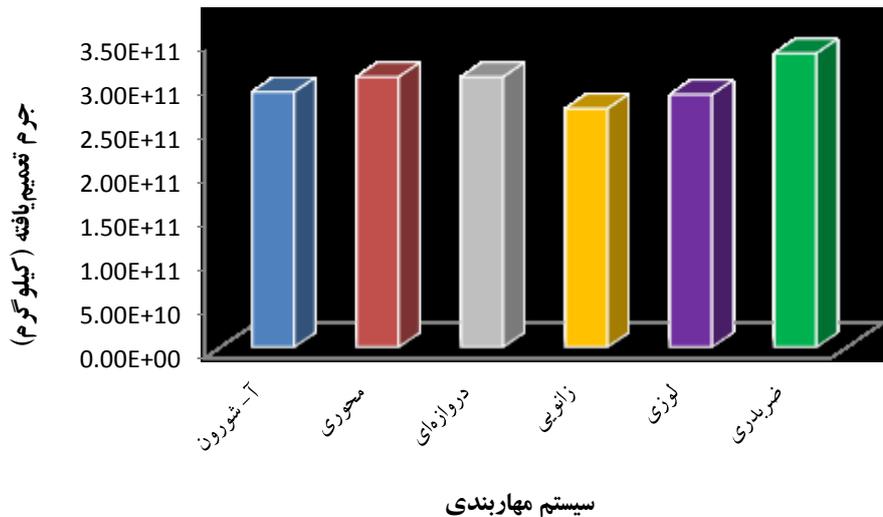
شکل ۱۴. فرکانس ویژه در قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل‌های مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)
 شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تأثیر مهاربندها بر فرکانس ویژه در قاب‌های مهاربندی شده متفاوت است. در شکل ۱۵، تحلیل‌های عددی فرکانس ویژه در قاب‌های مهاربندی شده مختلف ارائه شده است. شکل ۱۵ نشان می‌دهد قاب فولادی با مهاربند لوزی، کمترین میانگین فرکانس ویژه در ۵۰ مود ارتعاشی سازه (۱۴۲ هرتز) را دارد. همچنین، قاب‌های فولادی با مهاربندهای مورب و زانویی بیشترین مقادیر میانگین فرکانس ویژه (۱۷۱ هرتز) را دارند که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.



شکل ۱۵. میانگین فرکانس ویژه در قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)
۴.۴. جرم تعمیم یافته
 در این بخش، جرم تعمیم یافته در قاب‌های مهاربندی شده، ارائه و نتایج آن تحلیل خواهد شد. ابتدا در شکل ۱۶، فرکانس ویژه در ۵۰ مود ارتعاشی سازه‌های مهاربندی شده، به صورت گراف صعودی ارائه شده است.



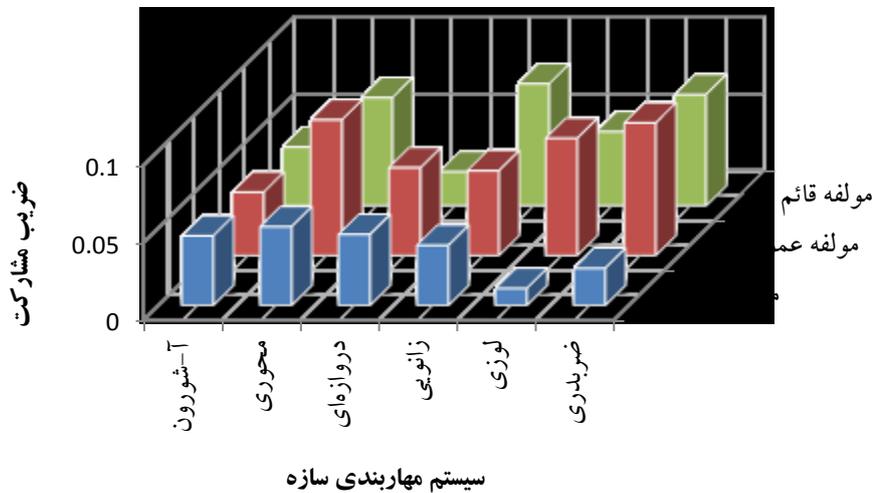
شکل ۱۶. میانگین جرم تعمیر یافته در قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)
 شکل ۱۶ نشان داد جرم تعمیر یافته در قاب‌های مهاربندی شده، بسیار متفاوت است. لذا برای تحلیل عددی نتایج، میانگین جرم تعمیر یافته‌ی قاب‌های مهاربندی شده، در شکل ۱۷ ارائه شده است.



شکل ۱۷. میانگین جرم تعمیر یافته در قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)
 شکل ۱۷ نشان داد قاب فولادی با مهاربند ضربدری، بیشترین جرم تعمیر یافته ($3/35 \times 10^{11}$ کیلوگرم) را دارد. قاب فولادی با مهاربند زانوئی، کمترین جرم تعمیر یافته ($2/72 \times 10^{11}$ کیلوگرم) را دارد. به‌طور کلی، جرم تعمیر یافته به انرژی جنبشی سازه بستگی دارد. هرچه جرم تعمیر یافته‌ی سازه بیشتر باشد، انرژی جنبشی آن نیز بیشتر است. لذا، انرژی جنبشی در قاب مهاربندی شده‌ی ضربدری بیشتر از سایر قاب‌های مهاربندی شده‌ی مورد بررسی است.

۵.۴. ضریب مشارکت

در این بخش، ضریب مشارکت در قاب‌های مهاربندی شده در شکل ۱۸، ارائه و مقایسه خواهد شد.

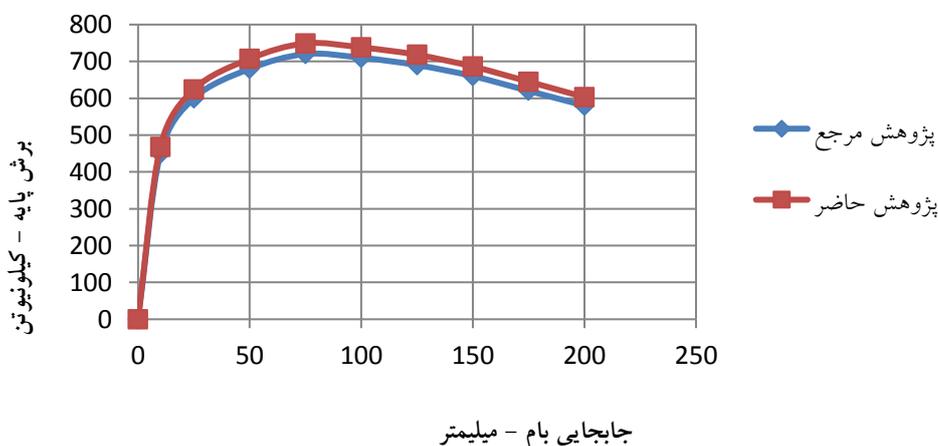


شکل ۱۸. ضریب مشارکت میانگین برای مولفه‌های دورانی در راستاهای افقی، عمودی و قائم در قاب‌های مهاربندی شده طی تحلیل مودال در حوزه فرکانسی (نگارنده، ۱۴۰۴)

شکل ۱۸ نشان داد نوع سیستم مهاربندی، تأثیر زیادی بر ضریب مشارکت قاب‌های فولادی دارد. ضرایب مشارکت، اسکالرهایی بدون بعد هستند که تعامل بین مودها و متغیرهای یک سیستم خطی را اندازه‌گیری می‌کنند. ضریب مشارکت مودال، معیاری است که نشان می‌دهد یک مود معین، چقدر در پاسخ سازه هنگام قرار گرفتن در معرض تحریک نیرو-جابجایی در یک جهت خاص، نقش دارد. در محورهای افقی، عمودی و قائم، نتایج متفاوتی به دست آمد و نتایج و تحلیل‌های عددی در شکل ۱۸ ارائه شد. ضرایب مشارکت مودال، اسکالرهایی هستند که تعامل بین مودها و تحریک جهت‌دار را در یک قاب مرجع معین، اندازه‌گیری می‌کنند. مقادیر بزرگتر نشان دهنده سهم بیشتر در پاسخ دینامیکی است. شکل ۱۸ نشان داد قاب‌های فولادی ضریب مشارکت در مولفه‌های دورانی حول محورهای افقی، عمودی و قائم به ترتیب با مهاربند محوری (۰/۰۷۹) مهاربند محوری (۰/۰۸۸) و مهاربند زانویی (۰/۰۵۱) بیشترین مقادیر و بهترین تاثیر در تحلیل مودال در حوزه فرکانسی را دارند.

۵. صحت‌سنجی

برای انجام این بخش، از پژوهش مهدوی و همکاران (۲۰۲۴) برای بررسی تاثیر افزایش نسبت ابعاد دهانه بارگیر به ارتفاع طبقه در قاب‌های دارای مهاربند شورون استفاده شد. برای مقایسه نتایج از نمودار پوش‌اور در پژوهش مرجع و پژوهش حاضر استفاده شد که در شکل ۱۹ ارائه شده است.



شکل ۱۹- مقایسه نتایج پژوهش‌های مرجع و حاضر برای صحت‌سنجی مدل (نگارنده، ۱۴۰۴)

بدین منظور، تحلیل استاتیکی غیرخطی برای بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه فولادی با مهاربند شورون در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. ارتفاع طبقه در قاب فولادی ۳ متر، دهانه بارگیر ۴ متر و فولاد از جنس St37 است. مدلسازی با روش المان محدود است. نتایج نشان داد اختلاف دو نمودار حدود ۴٪ است که درستی مدلسازی المان محدود را نشان داد.

۵. نتیجه‌گیری

مقایسه‌ی عملکرد سیستم‌های مهاربندی در سازه‌های فولادی، یکی از مباحث مهم در عملکرد سازه است. لذا، در پژوهش حاضر، ۶ سیستم مهاربندی جدید و پرکاربرد در سازه‌های فولادی، با تحلیل‌های مودال در حوزه فرکانسی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، بررسی شد. مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر، به شرح زیر است:

- نتایج نشان داد کاهش تنش وون میزس باعث کاهش نیروهای غیرخطی در قاب فولادی مهاربندی شده در طول تحلیل مودال در حوزه فرکانسی شد. لذا، احتمال ایجاد آسیب به سازه، کاهش و پایداری سازه افزایش یافت. همچنین، مهاربند مورب باعث شد قاب مهاربندی شده طی طول تحلیل مودال، در ۵۰ مود ارتعاشی، بیشترین تنش متوسط را داشته باشد. هندسه‌ی مهاربند لوزی باعث شد نیروهای غیرخطی به‌طور مناسب‌تری به ستون‌ها منتقل شده و عملکرد مهاربند لوزی نسبت به سایر مهاربندها مناسب‌تر بود.
- نتایج نشان داد قاب فولادی کمترین میانگین جابجایی را در ۵۰ مود ارتعاشی داشته باشد. هندسه‌ی مناسب مهاربند دروازه‌ای باعث شد تیر افقی طی تحلیل‌های مودال در حوزه فرکانسی، در ۵۰ مود ارتعاشی، جابجایی کمتری داشته باشد. لذا در این بخش، عملکرد مهاربند دروازه‌ای نسبت به سایر مهاربندهای موجود در پژوهش، مناسب‌تر بود. همچنین، عملکرد مهاربند لوزی نیز مناسب بود.
- نتایج نشان داد مهاربند لوزی باعث شد قاب فولادی کمترین محتوای فرکانسی را داشته باشد. همچنین، مهاربند ضربدری عملکردی مشابه مهاربند لوزی داشت. با این حال، مهاربندهای مورب و زانویی باعث شدند که قاب فولادی مهاربندی شده، بیشترین مقادیر فرکانس ویژه را داشته باشد.
- نتایج نشان داد مهاربند زانویی باعث شد قاب فولادی مهاربندی شده، کمترین مقدار را داشته باشد. همچنین، جرم تعمیم‌یافته در مهاربند لوزی برابر با مهاربند زانویی بود. با این حال، مهاربند ضربدری باعث شد قاب فولادی بیشترین جرم تعمیم‌یافته را داشته باشد. افزایش جرم تعمیم‌یافته در هنگام زلزله یا طوفان‌های شدید باعث افزایش نیروهای لرزه‌ای و امکان ایجاد خسارات به سازه می‌شود.
- نتایج نشان داد حول محورهای افقی، عمودی و قائم، به ترتیب مهاربندهای محوری، محوری و زانویی باعث شدند که قاب‌های فولادی مهاربندی شده، بیشترین مقادیر پاسخ مودال را داشته باشد.

فهرست منابع

- [1] Chou, C.C., Nian, P., Zhao, G.S., 2023. Cyclic test and finite element analysis of a steel double K-braced frame with laterally-restrained plates for RC building retrofit. *Thin-Walled Structures*. 189, e110918.
- [2] Farheen, F., Akshara, S.P., 2023. Comparison of Seismic Performance of Knee Braces in Steel Frames with Y Shaped Eccentric Braces. *Structural Engineering and Construction Management*. 1, 551–62.
- [3] Hamidi, H., Soleimani, R., 2023. Extending substitute frame model as a rapid supersede for moment frames and X-braced structures in seismic response estimations. *Structures*. 56, e105040.
- [4] Honma, S., Ebato, K., Harada, Y., 2021. Ductile steel knee brace with built-in comb-shaped seismic damper. *Journal of Construction Steel Research*. 184, 106765.

- [5] Hormazabal, M.F., Barontini, A., Masciotta, M.G., Oliveira, D.V.A., 2023. Non-parametric algorithm for time-dependent modal analysis of civil structures and infrastructures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 204, e110802.
- [6] Li, B., Wang, Z., Fan, Y., Pan, J., Wang, P., Zhou, Z., 2022. A Technique for Optimizing the Sequences Yielding under Load of Concentrically-Braced Steel Frames. *Buildings*. 12, e1656.
- [7] Li, H., Zhang, W., Zeng, L., 2023. Seismic assessment of chevron braced frames with differently designed beams. *Structures*. 49, 1028–43.
- [8] Mahdavi, M., 2023. Evaluating the Seismic Performance of Modern Concentrically Braces with the Finite Element Method. *Advance Researches in Civil Engineering*, 5(3), 68-76.
- [9] Mahdavi, M. (2023). Comparing the Performance of Steel, Wooden and Aluminum Beams in Structural Connections during Static Analysis. *Advance Researches in Civil Engineering*, 5(4), 1-9.
- [10] Mahdavi, M., Azizzadeh, R., 2020. *Structural Bracing Systems*. LAP Lambert Academic Publishing. 1, 108.
- [11] Mahdavi, M., Babaafjaji, A., Hosseini, S. R., 2023. Evaluation and Comparison of Seismic Performance in Irregular Steel Structures with Modern Concentrically Braces. *Computational Engineering and Physical Modeling*. 6(4), 57-76.
- [12] Mahdavi, M., Chaghakaboodi, S., Farsi, N., Eric Annune, J., 2024. Evaluation and Comparison of Seismic Performance in Perforated Steel Plate Shear Walls (PSPSW) with Regular Holes Using Modal Analysis. *Buildings*. 6(7), e200453.
- [13] Mahdavi, M. 2023. Comparing the Performance of Diagonal, A-Chevron, Gate, Knee, Rhombus and X braces with the Finite Element Method. *Advanced Structural Mechanics*, 1(3), 210-228.
- [14] Mahdavi, M., Hosseini, S., Babaafjaji, A., 2023. Modelling and Comparison of Plastic Performance in Ten Types of New Steel Braces under Pushover Analysis. *Computational Engineering Physical Modelling*. 6, 79-97.
- [15] Mahdavi, M., Hosseini, S.R., Babaafjaji, A., 2023. Investigating the Performance of Modern Concentrically Braces during Modal Analysis in the Frequency Domain with the Finite Element Method. *Advanced Structural Mechanics*. 1, e11600.
- [16] Mahdavi, M., Hosseini, S.R., Babaafjaji, A., 2024. Evaluating the Effect of Span Length on the Seismic Performance of a Steel Structure with a Chevron Brace by Finite Element Method. *Eurasian Journal of Science and Technology*. 4, 271–82.
- [17] Mahdavi, M. (2020). Assessing the Impact of Underground Cavities on Buildings with Stepped Foundations on Sloping Lands. *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 163, International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 14(7), 234–8.
- [18] Nagy Kem, G., 2016. Bracing rhombic structure by one-dimensional tensegrities. *Meccanica*, 1, e215.
- [19] Rangaraj, B., Nalinaa, K., Ashokkumar, M., Deepalakshmi, P., Rishika, S., Vaishnavi Devi, M.S., 2023. Comparative analysis of unbraced and chevron braced steel buildings of different storeys. *Materials Today Proceedings*. 10, e1016.
- [20] Recski, A., Shai, O., 2010. Tensegrity frameworks in one-dimensional space. *European Journal of Combinatorics*. 31, e1072–9.
- [21] Sun, M., Li, Q., 2023. Reliable modal estimation of high-rise structures via synergistic usage of multiple stabilization diagram-based operational modal analysis techniques. *Structures*. 56, e105051.
- [22] Ullah, R., Vafaei, M., Alih, S.C., Waheed, A., 2024. Investigating the seismic response of chevron braced frame equipped with a replaceable sandwiched fused damper. *Journal of Building Engineering*. 86, 108928.
- [23] Zhang, A., Liu, X., Wang, Y., Shang, Z., Yu, C., Bai, Z., 2020. Seismic behavior of an X-deployed cable-braced bolt-assembly steel frame. *Journal of Construction Steel Research*. 170, e106132.
- [24] Zhao, J., Qiu, H., 2024. Numerical and analytical studies for a novel steel brace retrofit system. *Journal of Construction Steel Research*. 212, e108284.