

Investigation of nonlinear behavior of Staggered Truss System

Jalal Zolfaghari¹, Mohammad Golmohammadi^{*2}, Majid Yaghoubi²

1- Master of Science in Structural engineering, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad university, Branch of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering and Architecture Department, Engineering Faculty, University of Torbat Heydarieh, Torbat Heydarieh

ABSTRACT

Staggered truss system is one of the types of lateral bracing systems in steel structures. In this system, lateral forces are transmitted through the rigid floor diaphragm between adjacent trusses. The columns of the staggered truss system are placed only in the outer walls and the middle columns are removed. Hence, a large open space without columns is achievable, which is architecturally appropriate. In this paper, the effect of geometric characteristics of staggered truss systems such as the ratio of the opening length, the type and arrangement of the side trusses in seismic performance is investigated using ETABS software. For this purpose, the ability of the analytical model was first validated to estimate the available experimental results. It was observed that the analytical result is in good agreement with the results of the Experimental model. Then, by examining several different models, the effect of the length of the middle opening was investigated on the seismic parameters of the Staggered truss system. The results showed that the ratio of the length of the middle opening is very important in seismic performance; So that this ratio can have a direct effect on the ductility and stiffness of the structure. Finally, the effect of truss type used in side openings was evaluated on the best span ratio based on the best level of seismic performance. In this paper, three types of structures are used: short, medium and high.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 April 2022

Revise Date: 08 June 2022

Accept Date: 28 June 2022

Keywords:

Staggered truss
Ductility
Stiffness
Behavior factor
Pushover

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.336026.2766>

*Corresponding author: Mohammad Golmohammadi.

Email address: m.golmohammadi@torbath.ac.ir

بررسی رفتار غیرخطی سیستم خرابی متناوب

جلال ذوالفقاری^۱، محمد گل محمدی^{۲*}، مجید یعقوبی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران و معماری، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران

چکیده

سیستم خرابی متناوب، یکی از انواع سیستم‌های مهاربند جانبی در سازه‌های فولادی به حساب می‌آید. در این سیستم، نیروهای جانبی از طریق دیافراگم صلب کف بین خرپاهای دو طبقه مجاور انتقال می‌یابد. ستون‌های سیستم خرابی متناوب تنها در دیواره‌های بیرونی جای گرفته و ستون‌های میانی حذف می‌گردند. از این رو، فضای باز بزرگ بدون ستون قابل دستیابی است که از نظر معماری مناسب می‌باشد. در بخش میانی خرپا، بازشویی به ارتفاع طبقه قرار می‌گیرد. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار ایتبس اثر مشخصه‌های هندسی خرابی متناوب نظیر نسبت طول بازشوی میانی به کناری، نوع و چینش خرپاهای کناری در عملکرد لرزه‌ای بررسی می‌گردد. برای این منظور، ابتدا توانایی مدل تحلیلی در تخمین نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی شد. ملاحظه گردید که پاسخ تحلیلی، تطابق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد. در ادامه، با بررسی چندین مدل مختلف اثر طول دهانه بازشوی میانی خرپا روی پارامترهای لرزه‌ای سیستم خرابی متناوب بررسی گردید. نتایج نشان داد که نسبت طول دهانه بازشوی میانی خرپا به طول دهانه‌های کناری، در عملکرد لرزه‌ای اهمیت زیادی دارد؛ به طوری که این نسبت می‌تواند تأثیر مستقیم بر روی شکل‌پذیری و سختی سازه داشته باشد. نهایتاً، روی بهترین نسبت دهانه بدست آمده مبتنی بر بهترین سطح عملکرد لرزه‌ای، اثر نوع خرابی به کار رفته در دهانه‌های کناری ارزیابی گردید. در این مقاله، سه نوع سازه کوتاه، متوسط و بلندمرتبه به کار گرفته شده است.

کلمات کلیدی: خرابی متناوب، دهانه میانی، شکل‌پذیری، سختی، ضریب رفتار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.336026.2766	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.336026.2766	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۰۷	۱۴۰۱/۰۴/۰۷	۱۴۰۱/۰۳/۱۸	۱۴۰۱/۰۱/۲۷
محمد گل محمدی			*نویسنده مسئول:			
m.golmohammadi@torbath.ac.ir			پست الکترونیکی:			

۱- مقدمه

سیستم سازه‌ای خرپای متناوب اولین بار در سال ۱۹۶۰ میلادی توسط محققین دانشگاه MIT و تحت حمایت شرکت U.S. STEEL ابداع شد. این سیستم نوین، از سختی و مقاومت مناسبی در برابر بارهای جانبی برخوردار است [1]. سیستم خرپای متناوب در یک جهت که معمولاً جهت عرضی ساختمان است، خرپایی بزرگ با طولی مساوی عرض ساختمان دارد. ارتفاع این خرپا به اندازه‌ی بلندی یک طبقه می‌باشد. تمامی طول دهانه‌ی بین دو ستون، توسط این خرپا پوشش داده می‌شود. نحوه‌ی قرارگیری خرپاها به صورت یک در میان (تکراری) در طبقه‌ها می‌باشد. این خرپاها فقط در دو انتهایشان توسط ستون‌های پیرامونی ساختمان نگهداری می‌شوند. در جهت طولی ساختمان نیز می‌توان از سایر سیستم‌های سازه‌ای مانند قاب‌های خمشی، قاب‌های مهاربندی شده همگرا یا واگرا جهت مقاومت در برابر بارهای جانبی استفاده نمود. عمده نیروهای اعضا در این سیستم سازه‌ای به غیر از تیرها نیروی محوری می‌باشد. پاسخ لرزه‌ای الاستیک و پلاستیک سیستم خرپای متناوب اولین بار به وسیله گوپتا^۱ انجام گرفت. کاربرد و انواع چینش خرپاهای متناوب توسط اسکالزی^۲ [2] مورد بررسی قرار گرفت و نکات مربوط به اجرای این نوع خرپاها ذکر گردید. تحقیق‌هایی نیز درباره‌ی عملکرد لرزه‌ای، با اعمال نیروی زلزله بر روی مدل مکانیکی صورت گرفته است. اصول پایه برای تحلیل الاستوپلاستیک، به منظور ارزیابی و تخمین ظرفیت لرزه‌ای سازه با سیستم خرپای متناوب در مرجع [3] انجام شده است. همچنین در مرجع [4] به تحلیل ویژگی‌های معماری این سیستم پرداخته شده است. افزون بر این، نکته‌های ویژه‌ای در ارتباط با طراحی ستون‌ها، کف ستون‌ها و خرپاها پیشنهاد شده و بحث مفصلی در مورد سختی برشی جانبی صورت پذیرفته است. از نظر اجرایی، پروژه‌هایی توسط هسلر^۳ [5] و کوهن^۴ [6] ساخته شده‌اند. استفاده از این سیستم در بسیاری از موارد برای سازه‌های بلند، به لحاظ اقتصادی گزینه‌ی بسیار مناسبی خواهد بود. با توجه به مطالعه‌های انجام گرفته، سیستم خرپای متناوب از لحاظ مقاومت در برابر بارهای جانبی، عملکرد بسیار مطلوبی دارد. در این بررسی‌ها چگونگی انتقال نیروی زلزله مشخص شده است. نقش بازشوی میانی در مرحله‌ی تشکیل مفصل پلاستیک بسیار حیاتی می‌باشد [7]. کیم^۵ و همکاران تحلیل‌هایی بر روی سازه‌هایی به ارتفاع ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه انجام دادند. با استفاده از نتایج این تحلیل‌ها رفتار سیستم خرپای متناوب مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی، مقایسه‌ی این سیستم با سیستم‌های مقاوم جانبی دیگر نظیر قاب‌خمش، قاب مهاربندی همگرا و واگرا بود. نتایج مقایسه نشان داد که: ۱- قاب خمشی بزرگ‌ترین ضریب رفتار را دارد؛ لذا سختی آن کم است و بهترین رفتار شکل‌پذیر را دارا می‌باشد. ۲- قاب مهاربندی همگرا بعد از رسیدن به حداکثر مقاومت الاستیک به طور ناگهانی افت می‌نماید. این افت ناشی از تغییرشکل‌های پلاستیک مفاصل می‌باشد. افزون بر این رفتار ترد و شکننده را، بعد از رسیدن به ماکزیمم مقاومت نشان می‌دهد. ۳- سیستم خرپای متناوب بیشترین مقاومت را دارا بوده و روند کاهش مقاومت پس از تشکیل مفاصل پلاستیک علی‌رغم سختی بالا تدریجی است و شکست آن به صورت ناگهانی نمی‌باشد. لذا می‌توان گفت سیستم خرپای متناوب شکل‌پذیری کافی را داراست [8]. ژو^۶ و همکاران به مطالعه بر روی رفتار سیستم خرپای متناوب در دو حالت، وجود بازشوی میانی و حذف بازشوی میانی پرداختند و جهت بهسازی و بهبود عملکرد این سیستم راهکارهایی شامل اضافه نمودن ستون در دو طرف بازشوی میانی، استفاده از کابل‌های کششی به جای ستون در طرفین بازشوی میانی، استفاده از مهارهای قطری اضافی در هر طبقه و جایگزین نمودن اعضای قطری خرپا به وسیله مهاربندهای کمانش‌تاب ارائه نمودند [9]. علاوه بر تحلیل‌های نرم‌افزاری و تئوری، مطالعه‌های گسترده آزمایشگاهی نیز صورت گرفته است. این آزمایش‌ها برای بررسی رفتار سیستم خرپای متناوب تحت بارهای زلزله انجام شده است. از جمله‌ی این مطالعه‌ها می‌توان به پژوهش آزمایشگاهی توسط ژو و همکارانش اشاره نمود. آنها یک ساختمان ۸ طبقه با مقیاس یک هشتم اندازه واقعی در آزمایشگاه ساختند. این ساختمان تحت بارهای جانبی رفت و برگشت قرار گرفت و رفتار لرزه‌ای آن شامل شکل‌پذیری، سختی، تغییرشکل‌های جانبی، جذب انرژی، مقاومت، به دقت مورد بررسی و ارزیابی واقع شد [9]، [10]. هنگ^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [11]، به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم خرپای متناوب با تغییر شکل خرپا پرداختند. نتایج نشان داد که سیستم

1 Gupta

2 Scalzi

3 Hassler

4 Cohen

5 Kim

6 Zhou

7 Hong

خرپای متناوب بدون اعضای قطری دارای مقاومت و سختی بالاتری در مقایسه با سایر سیستم‌های خرپای متناوب دارای اعضای قطری بودند. شت^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [12] به مقایسه رفتار سیستم‌های سازه‌ای شامل سیستم قاب خمشی، سیستم قاب خمشی با دیوار برشی، سیستم خرپای متناوب و سیستم خرپای متناوب با دیوار برشی پرداختند. برای این منظور از تحلیل‌های تاریخچه زمانی در نرم‌افزار SAP2000 استفاده نمودند. نتایج نشان داده که جابجایی راستای عرضی در سیستم خرپای متناوب به میزان ۲۸ تا ۷۶ درصد نسبت به سیستم قاب خمشی کاهش یافت. همچنین مشاهده گردید که سیستم خرپای متناوب با دیوار برشی کارآمدترین سیستم نسبت به سایر سیستم‌ها بود. در مطالعه مقایسه‌ای دیگری در سال ۲۰۲۱ توسط میستری^۹ و همکاران [13]، رفتار دو سیستم خرپای متناوب و سیستم خرپای متناوب با دیوار برشی تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج مشابه با کار شت و همکاران حاصل گردید.

نوآوری مقاله با توجه به تحقیقات پیشین، بررسی اثر شکل هندسه خرپا و تحلیل عملکردی خرپا بوده که در هیچ یک از پژوهش‌های گذشته این کار انجام نشده است. لذا در این مقاله، به ارزیابی تحلیلی مشخصه‌های لرزه‌ای سیستم خرپای متناوب پرداخته می‌شود. برای این منظور، ابتدا توانایی مدل تحلیلی، در برآورد یافته‌های آزمایشگاهی موجود بررسی می‌گردد. برای رسیدن به این هدف، یک سازه‌ی هشت طبقه در نرم‌افزار ایتبس^{۱۰} مدل‌سازی و نتایج بدست آمده با مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. سپس در ادامه به ارزیابی نسبت پهنای بازشوی میانی به پهنای خرپاهای کناری پرداخته و تأثیر آن بر عملکرد لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. نهایتاً، به ارزیابی نوع خرپا در دهانه‌های کناری پرداخته و عملکرد لرزه‌ای آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی نوع خرپاهای کناری بر روی سیستم خرپایی متناوب با بهترین نسبت پهنای بازشوی میانی به پهنای خرپاهای کناری به لحاظ سطح عملکرد است. مشخصات لرزه‌ای مورد بررسی در این مقاله شامل سختی، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و ضریب رفتار است. خاطر نشان می‌سازد که تمام این ارزیابی‌ها بر روی سازه‌های با تعداد طبقات ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه که نماینده‌ای از سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند مرتبه هستند، صورت می‌گیرد.

۲- راستی آزمایی مدلسازی

در این بخش یک مدل آزمایشگاهی جهت راستی‌آزمایی انتخاب می‌شود. سپس این مدل در نرم‌افزار ایتبس به صورت غیرخطی مدل‌سازی و تحلیل می‌گردد. نهایتاً پاسخ‌های بدست آمده از این مدل با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد.

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش از مدل آزمایشگاهی ژو [۹] مطابق شکل ۱ جهت راستی‌آزمایی استفاده می‌شود. این مدل یک سازه هشت طبقه فولادی دارای سیستم خرپای متناوب می‌باشد.



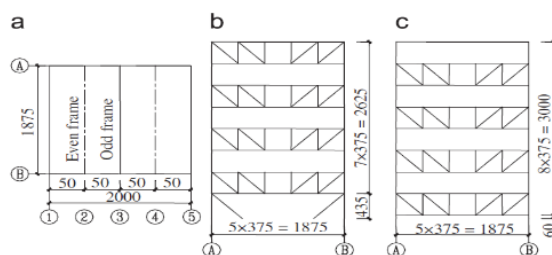
شکل ۱: مدل آزمایشگاهی [۹]

⁸ Sheth

⁹ Mistry

¹⁰ ETABS

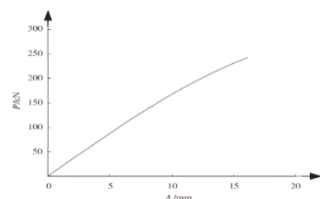
ابعاد پلان مدل آزمایشگاهی $2 \times 1/875$ متر بوده و از پنج قاب انتقالی با فاصله $0/5$ متر از یکدیگر تشکیل شده است. مطابق شکل ۲ ارتفاع مدل، ارتفاع طبقه، و دهانه‌ی خرپا به ترتیب برابر با 3 ، $0/375$ و $1/875$ متر است.



شکل ۲: پلان و نماهای مدل آزمایشگاهی (ابعاد برحسب میلی‌متر) [۹].

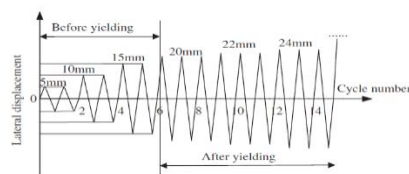
در نمونه‌ی آزمایشگاهی با احتساب مساحت هر طبقه $3/75$ متر مربع، وزن کل نمونه با در نظر گرفتن هشت طبقه باید 15 تن در نظر گرفته شود. در حالی که وزن ساخته شده نمونه‌ی آزمایشگاهی فقط $1/43$ تن می‌باشد. لذا برای جبران این اختلاف وزن، از بلوک‌های بتنی، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در روی سقف نمونه استفاده شده است.

قبل از این که نمونه تحت بارهای آزمایشگاهی قرار بگیرد، ابتدا بارهای استاتیکی به صورت تدریجی و مرحله‌ای به نمونه وارد می‌شود. افزون بر این تغییرشکل‌های حاصل از این بار استاتیکی ثبت می‌گردد. این روند بارگذاری تا زمانی که سازه در محدوده‌ی خطی باقی بماند ادامه می‌یابد. به محض ورود سازه به محدوده غیرالاستیک روند بارگذاری استاتیکی متوقف می‌شود. حال با داشتن میزان بار استاتیکی وارد شده و تغییر شکل‌های ناشی از آن منحنی بار-تغییر مکان در محدوده خطی مطابق شکل ۳ ترسیم می‌گردد.



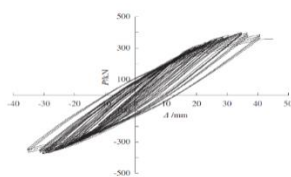
شکل ۳: منحنی بار-تغییر مکان در محدوده خطی نمونه‌ی آزمایشگاهی [۹].

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، زمانی که تغییر شکل به 16 میلی‌متر می‌رسد (نیروی جانبی 240 کیلو نیوتن)، سازه وارد مرحله پلاستیک و تشکیل مفاصل می‌گردد. شکل ۴ بارگذاری چرخه‌ای وارد شده به مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. واضح است که سازه بعد از سه سیکل بارگذاری وارد مرحله پلاستیک (تغییر مکان 16 میلی‌متر) می‌گردد.

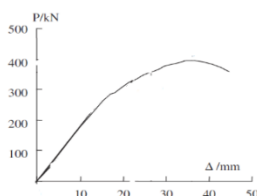


شکل ۴: سیکل بارگذاری نمونه‌ی آزمایشگاهی [۹].

با وارد شدن سازه به ناحیه پلاستیک روند بارگذاری به صورت تدریجی افزایش می‌یابد ولی تغییر شکل سازه از پنج میلی‌متر به دو میلی‌متر کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که سازه بعد از مرحله الاستیک با شکل پذیری مطلوب خود، تغییر شکل‌ها را کنترل می‌نماید. روند افزایش بارگذاری ادامه می‌یابد تا این که سازه در تغییر مکان 46 میلی‌متر به مرحله واژگونی می‌رسد. نمودار هیستریزس نمونه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۵ و همچنین نمودار ظرفیت آن در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۵: نمودار چرخه‌ای نمونه‌ی آزمایشگاهی [۹].



شکل ۶: منحنی ظرفیت نمونه‌ی آزمایشگاهی [۹].

۲-۲- مدل عددی

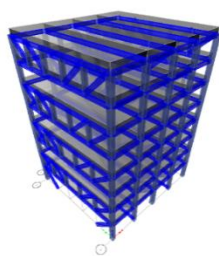
همانطور که قبلاً توضیح داده شد آنالیز غیرخطی نمونه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار ایتبس انجام می‌گردد. مدل الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد استفاده شده به ترتیب 2×10^5 مگاپاسکال و 0.3 می‌باشند. همچنین تنش جاری شدن فولاد 235 مگاپاسکال و تنش نهایی 375 مگاپاسکال است. دال مدل آزمایشگاهی از صفحه فلزی به ضخامت سه میلیمتر می‌باشد. جهت پوشش سقف از نبشی 25 میلیمتر در فواصل 375 میلیمتری به عنوان تیرچه‌های فرعی استفاده شده است. در نرم‌افزار ایتبس، سقف به صورت پرنشده^{۱۱} با اعمال بار مرده 500 کیلوگرم بر متر مربع مدل‌سازی شده است. اتصالات عضوهای خرپایی به صورت مفصل در نظر گرفته می‌شود. جوش کامل اتصالات پای ستون به یک سکوی فلزی، تکیه‌گاه گیردار را می‌سازد. جدول ۱ مشخصات مقاطع بکار رفته در نمونه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مقاطع در نظر گرفته شده در نرم‌افزار ایتبس مقاطع استاندارد AISC و بسیار نزدیک به مقاطع جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات اعضای فولادی نمونه‌ی آزمایشگاهی

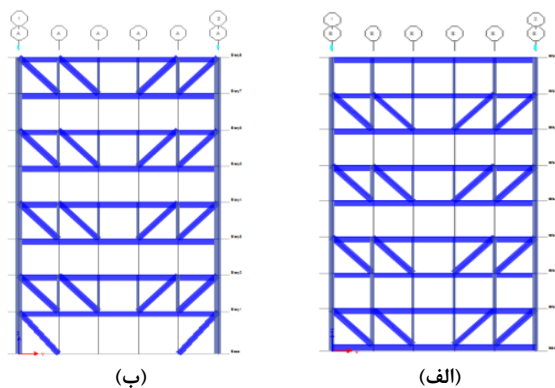
مقطع (میلیمتر)	اعضا خرپا
قوطی $60 \times 60 \times 2 \times 3$	ستونها
قوطی $40 \times 40 \times 2 \times 3$	یال‌های خرپا
قوطی $30 \times 30 \times 3 \times 3$	اعضا جان خرپا
قوطی $40 \times 40 \times 3 \times 3$	تیرهای جهت طولی
صفحه فلزی به ضخامت 3 میلیمتر	دال کف
نبشی $25 \times 25 \times 3$	تیرچه سقف

شکل ۷ مدل سه بعدی و شکل ۸ نماهای زوج و فرد سازه‌ی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ایتبس را نشان می‌دهد.

¹¹ unfilled

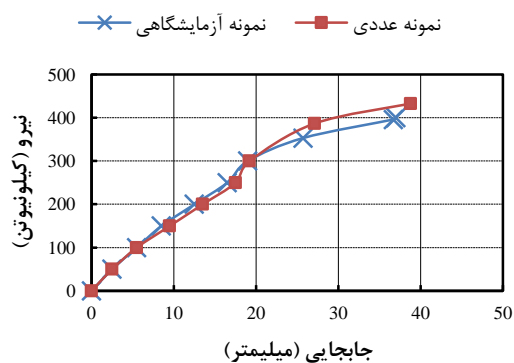


شکل ۷: مدل عددی در ایتبس.



شکل ۸: (الف) نمای فرد مدل عددی، (ب) نمای زوج مدل عددی.

شکل ۹، مقایسه بین منحنی‌های ظرفیت مدل عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که از انطباق مناسبی برخوردار هستند.



شکل ۹: نمودار ظرفیت نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی.

میزان خطای موجود در جدول ۲ آورده شده است. اختلاف موجود بین نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی، ناشی از متفاوت بودن شرایط تکیه‌گاهی و همچنین مشخصات مصالح به کار رفته می‌باشد.

جدول ۲: مقدار خطای موجود بین نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی

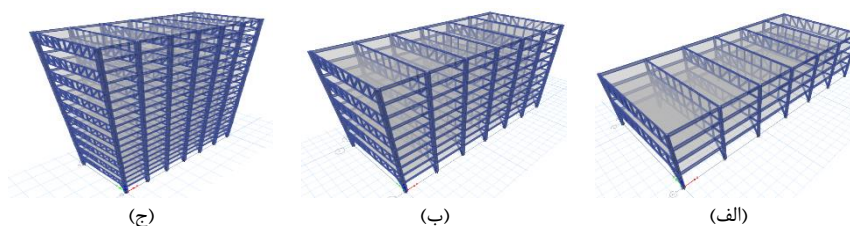
Δ_u	P_u	Δ_{max}	P_{max}	Δ_y	P_y	نمونه
۴۵	۳۳۷	۳۶/۷	۳۹۶	۲۵/۷	۳۵۳	آزمایشگاه
۴۲/۳	۳۵۲	۳۹/۹	۴۲۲	۲۷	۳۸۰/۵	عددی
۶	۴/۴۵	۸/۷۲	۶/۵۶	۵/۰۵	۷/۷۹	اختلاف (درصد)

۳- ارزیابی نسبت پهنای دهانه میانی به کناری

نرم افزار ایتبس نسخه ۲۰۱۵ جهت بررسی رفتار سیستم خرپای متناوب انتخاب گردید. با اعتبارسنجی مدل سازی در این نرم افزار ملاحظه شد که روش معرفی شده از دقت کافی برخوردار است، لذا در این پژوهش با استفاده از نرم افزار ایتبس که مبتنی بر روش اجزا محدود می باشد، رفتار سیستم خرپای متناوب مورد بررسی قرار می گیرد. در این بخش قصد بر آن است که اثر پهنای بازشوی خرپای میانی، در سیستم خرپای متناوب مورد مطالعه قرار داده شود. در این راستا سازه های ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه مدل سازی می گردد. در تمامی مدل ها پهنای بازشوی میانی دو، سه و چهار متر در نظر گرفته می شود. در این سازه ها توزیع نیروی برشی، تغییرمکان نسبی طبقات (دریفت طبقات)، نمودار پوش آور^{۱۲}، نحوه ی تشکیل مفاصل پلاستیک مقایسه خواهد شد. تحلیل این قسمت مبتنی بر آنالیز غیرخطی است.

۳-۱- معرفی مدل ها

جهت بررسی تأثیر دهانه میانی خرپا، سه سازه با تعداد طبقات ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه طراحی شده است. سیستم سازه ای در جهت Y از نوع خرپای متناوب و در جهت X از نوع قاب خمشی فولادی ویژه می باشد. تمامی سازه ها در پلان کاملاً مشابه و یکسان هستند. جهت محاسبه ضرایب زلزله، منطقه با خطر نسبی زیاد ($A=0.3g$)، نوع خاک تیپ III و ساختمان از نظر کاربری مسکونی با ضریب اهمیت متوسط ($I=1$) در نظر گرفته شده است. سازه های مورد بررسی در ابعاد و انداره های کاملاً مشابه با یک سازه ی حقیقی طراحی شده اند. دیافراگم سقف به صورت صلب فرض شده است. بار مرده طبقات ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع (سقف تیرچه و بلوک) و بار زنده طبقات با فرض کاربری مسکونی ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. کلیه ی سازه ها بر اساس آیین نامه AISC 360-10 طراحی می شوند. این آیین نامه بیشترین مطابقت را با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۲) دارد. ترکیب بارهای مورد استفاده در این آیین نامه بر اساس آیین نامه ASCE 7-10 می باشد که انطباق کاملی با مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۲) دارد. از آنجا که ضرایب بار در ترکیب بارهای طراحی به روش ASD و LRFD با هم متفاوت است، روش LRFD که بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۳۹۲) می باشد، انتخاب می گردد. جهت طراحی اعضا از ترکیب بارهای خودکار ایتبس استفاده شده است. در تشکیل ترکیب بارهای خودکار، نرم افزار ایتبس حالت های بار لرزه ای را در ضریب نامعینی P ضرب می نماید. در این پژوهش ضریب نامعینی برابر ۱/۲ در نظر گرفته شده است. نسبت مجاز نیروی موجود^{۱۳} در عضو به ظرفیت^{۱۴} عضو را بین ۰/۹۵ تا یک جهت طراحی اعضا، لحاظ شده است. در تمامی مدل ها ارتفاع طبقه اول ۴/۲۵ متر و سایر طبقات ۳/۲۰ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد پلان ۲۱×۴۸ متر در نظر گرفته می شود. هندسه ی مدل از ترکیب هفت قاب موازی با فواصل هشت متر از یکدیگر تشکیل شده است. این قاب های صفحه ای دارای خرپاهای متناوب در راستای قائم با دهانه ی ۲۱ متر می باشد. به منظور مدل سازی و تحلیل های غیرخطی، اختصاص مفاصل پلاستیک بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان ها نشریه ۳۶۰ ویرایش ۹۲ در نظر گرفته شده است [14]. شکل ۱۰ نمای سه بعدی سه مدل سازه را نشان می دهد.



شکل ۱۰: نمای سه بعدی (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

¹² Pushover

¹³ Demand

¹⁴ Capacity

۳-۲- مقاطع سازه‌ای

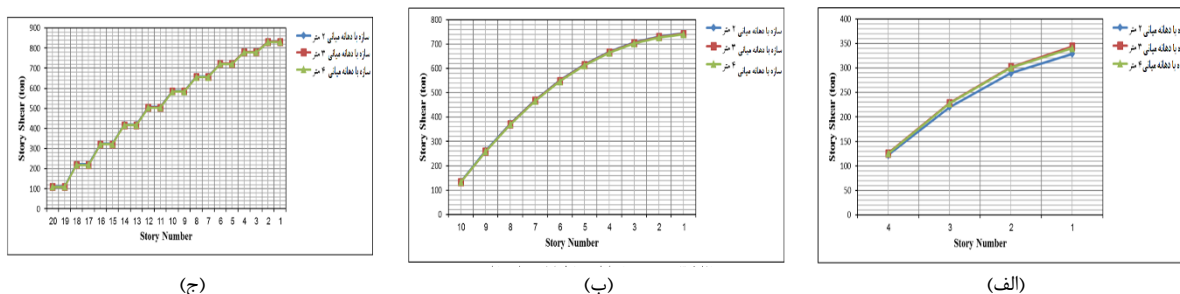
همانطور که قبلاً ذکر شد، بارگذاری ثقلی مطابق میث ششم مقررات ملی ساختمان (بارهای وارده بر ساختمان) بر روی سازه‌های مذکور صورت می‌گیرد. همچنین طبق استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، بارگذاری جانبی روی آن‌ها اعمال می‌گردد. سپس با استفاده از روش تحلیل استاتیکی معادل تحلیل و نیروهای داخلی اعضا بدست می‌آید. در جدول ۳ مقاطع تیر، ستون و اعضای سیستم خریای متناوب سازه‌های مورد بررسی ذکر شده است.

جدول ۳: مقاطع تیر، ستون و اعضای سیستم خریای متناوب سازه‌ها

سازه	اعضای قائم سیستم خریایی	اعضای افقی و مورب سیستم خریایی	تیرهای جهت سیستم قاب خمشی	ستون‌ها
۴ طبقه	HSS 200×200×12	WF 300×200×8×12	WF 600×200×11×17	H 400×400×30×50
۱۰ طبقه	HSS 200×200×12	WF 300×200×8×12	WF 600×200×11×17	H 600×600×30×50
۲۰ طبقه	HSS 200×200×12	WF 300×200×8×12	WF 600×200×11×17	H 800×800×30×50

۳-۳- بررسی توزیع نیروی برشی طبقات

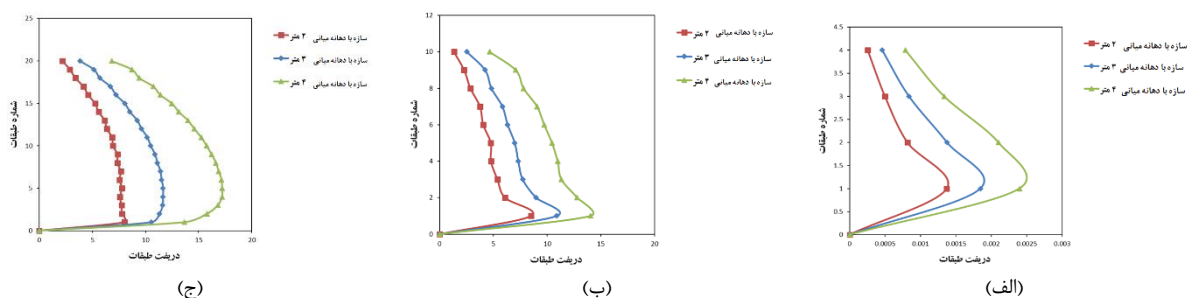
در این قسمت به بررسی توزیع نیروی برشی طبقات سازه‌های مورد بررسی برای همه مدل‌ها پرداخته می‌شود. توزیع نیروی زلزله طبقات بر اساس روش تحلیل استاتیکی معادل استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم محاسبه شده است. نیروی برشی تجمعی هر طبقه برای هر یک از سازه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: توزیع نیروی برشی طبقات به روش استاتیکی (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

۳-۴- بررسی تغییرمکان نسبی طبقات

این قسمت به بررسی تغییرمکان نسبی طبقات (دریفت طبقات) حاصل از تحلیل استاتیکی معادل می‌پردازد. تغییرمکان جانبی نسبی هر طبقه، اختلاف تغییرمکان‌های مراکز جرم کف در بالا و پایین آن طبقه می‌باشد. تغییرمکان جانبی نسبی هر طبقه، تغییرمکانی است که با فرض رفتار خطی سازه، زیر اثر بار جانبی زلزله تعیین شده باشد. در شکل ۱۲ نمودار تغییرمکان نسبی طبقات در راستای Y، برای همه مدل‌ها بر اساس روش استاتیکی معادل نشان داده شده است.



شکل ۱۲: تغییر مکان نسبی طبقات در راستای خرابای متناوب برای (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

همانطور که از نمودارهای تغییر مکان نسبی طبقات، قابل مشاهده است، تغییر مکان نسبی طبقات هر سه سازه با افزایش دهانه میانی خرابا در همه طبقات افزایش قابل توجهی داشته است.

۵-۳- بررسی نمودار پوش آور

برای بررسی ضریب رفتار و شکل پذیری مدل های مورد بررسی، آن ها را تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار داده و نتایج حاصل با هم مقایسه می گردند. بنا بر بند ۳-۶ از پیوست دوم استاندارد ۲۸۰۰، سازه باید برای حداقل دو الگوی بار، شامل الگوی بار یکنواخت و الگوی متناسب با نیروی جانبی حاصل از تحلیل دینامیکی خطی طیفی با لحاظ آن تعداد از مودهای ارتعاشی که حداقل ۸۵ درصد از جرم سازه در تحلیل مشارکت کند، تحلیل گردد. لازم به ذکر است که توزیع بار یکنواخت عبارت است از توزیع متناسب با جرم بدون توجه به ارتفاع هر طبقه؛ بنابراین در تحلیل پوش آور ابتدا سازه تحت بارهای ثقلی و در مرحله بعد تحت بارهای جانبی قرار می گیرد. قبل از انجام تحلیل غیرخطی می بایست بار ثقلی به سازه اعمال شود. ترکیب بارهای ثقلی عبارتند از: (الف) $1.1D+0.275L$ ؛ (ب) $0.9D$ ؛ که در آن ها D بار مرده و L بار زنده می باشد. توزیع بار جانبی بر مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه در هنگام زلزله رخ خواهد داد، باشد و حالت های بحرانی تغییر شکل و نیروی محوری را در اعضا ایجاد نماید. بدین جهت باید حداقل دو نوع توزیع بار جانبی به شرح ذیل روی سازه اعمال گردد:

۱- توزیع متناسب با شکل مود اول در جهت مورد نظر،

۲- توزیع یکنواخت: در این حالت بار جانبی متناسب با وزن هر طبقه محاسبه می شود. چنانچه وزن تمام طبقات یکسان باشد توزیع در کل سازه به صورت مستطیلی خواهد بود،

۳- توزیع مثلثی معکوس: برای این منظور ابتدا تغییر مکان هدف بر اساس رابطه ارائه شده در پیوست (۲) استاندارد ۲۸۰۰ برای مدل های مختلف طبق رابطه (۱) محاسبه می گردد.

$$\delta_t = C_0 C_1 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

در رابطه (۱) T_e را می توان از رابطه (۲) بدست آورد:

$$T_e = T_i \times \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (2)$$

در رابطه (۲) T_i زمان تناوب اصلی ارتجاعی است که با تحلیل مدل سازه با فرض رفتار خطی سازه به دست می آید. K_i شیب مماس بر منحنی ظرفیت (سختی جانبی ارتجاعی) و K_e سختی جانبی مؤثر سازه می باشد.

جهت بدست آوردن شتاب طیفی S_a در استاندارد ۲۸۰۰ و نشریه ۳۶۰ دو فرمول آورده شده است:

$$S_a = A \times B \times I \quad \text{بر اساس سطح عملکرد ایمنی جانی (استاندارد ارد ۲۸۰۰)} \quad (۳)$$

$$S_a = A \times B \quad \text{بر اساس نشریه ۳۶۰} \quad (۴)$$

بر طبق استاندارد ۲۸۰۰ در ساختمان‌های با اهمیت متوسط و برای زلزله سطح بهره‌برداری (با دوره بازگشت ۴۷۵) و همچنین در ساختمان‌های با اهمیت خیلی زیاد و برای زلزله با دوره بازگشت ۲۴۷۵ باید عملکرد LS یا ایمنی جانبی را در نظر گرفت.

مقدار C_0 از جدول نشریه ۳۶۰ بدست می‌آید. مقدار C_1 را می‌توان از روابط زیر بدست آورد:

$$T_e \geq T_s \rightarrow C_1 = 1 \quad (۵)$$

$$T_e < T_s \rightarrow C_1 = \text{MAX} \left\{ 1 \text{ و } \frac{[1 + (R - 1) \times \frac{T_s}{T_e}]}{R} \right\} \quad (۶)$$

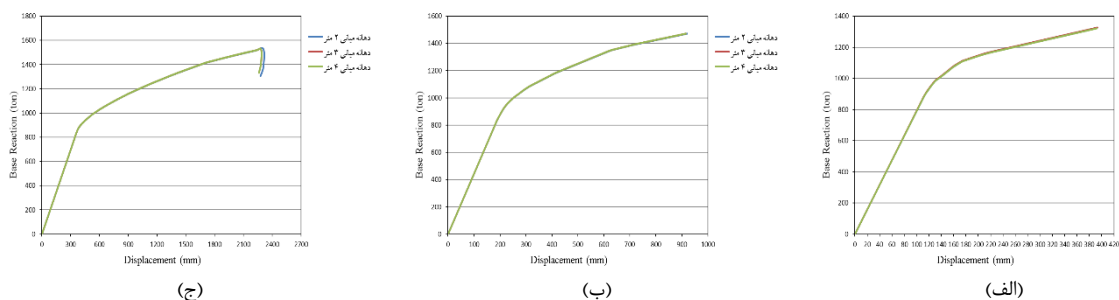
مقادیر C_0 و C_1 در این پژوهش برای تمامی مدل‌ها و در هر دو حالت قاب خمشی و قاب خرپایی به ترتیب برابر $1/3$ و $1/0$ بدست آمد. با نتایج محاسبات تغییرمکان هدف برای مدل‌های مختلف در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: مقدار تغییرمکان هدف

سازه	طول دهانه (متر)	تغییرمکان هدف قاب خرپایی (میلیمتر)	تغییرمکان هدف قاب خمشی (میلیمتر)
طبقه ۴	۲	۷۶/۳۵۸	۲۵۱/۷۸۵
	۳	۱۱۳/۰۶۰	۲۶۱/۶۲۳
	۴	۱۵۹/۴۰۶	۲۶۱/۱۰۰
طبقه ۱۰	۲	۲۵۵/۲۳۸	۶۱۳/۰۹۱
	۳	۳۶۹/۰۳۵	۶۱۰/۰۱۲
	۴	۵۳۵/۱۲۸	۶۱۰/۰۱۲
طبقه ۲۰	۲	۶۳۷/۳۶۵	۱۵۷۴/۲۹۳
	۳	۹۴۱/۶۴۲	۱۵۷۱/۷۸۵
	۴	۱۳۴۰/۴۲۳	۱۵۷۰/۹۴۷

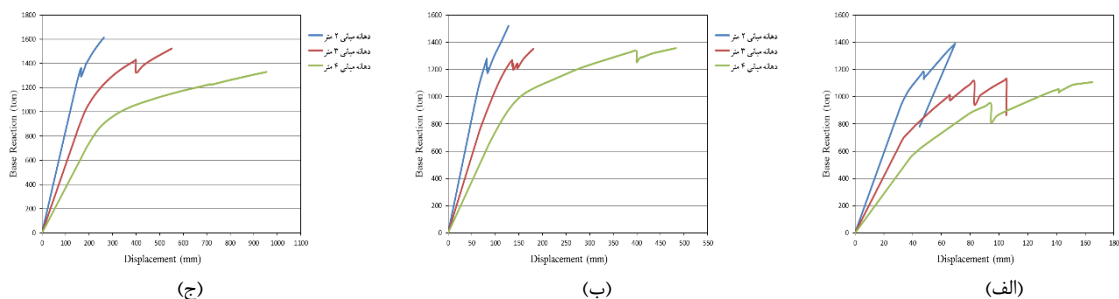
مطابق بند (۳-۷-۱) پیوست دوم استاندارد ۲۸۰۰، تغییرمکان بدست آمده از رابطه (۱) بایستی در ضریب $1/5$ ضرب شود و سازه برای رسیدن به این تغییرمکان بر اساس الگوهای بار رانده شود. نقطه کنترل در نرم‌افزار ایتبس در قسمت Monitored Displacement، که تغییر مکان هدف بر اساس آن کنترل می‌شود، تعیین می‌گردد. این نقطه بر روی تراز بام و نزدیک به مرکز جرم انتخاب می‌شود. مفاصل پلاستیک برای ستون‌ها در 5% و 95% طول ستون به صورت تلاش P-M2-M3، برای تیرها در 5% و 95% طول تیر به صورت تلاش M3 و برای اعضای مورب و قائم خرپا در 50% طول عضو بصورت تلاش P تعریف می‌شود.

در شکل ۱۳ نمودار پوش‌آور سازه‌ها برای دهانه‌های میانی دو، سه و چهار متری در جهت سیستم قاب خمشی نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است برای هر سه مدل، نمودار پوش‌آور بر روی هم منطبق هستند. چون سازه منظم است، تغییر در ابعاد دهانه‌ی میانی در جهت Y تأثیری در نمودار پوش‌آور جهت X ندارد.



شکل ۱۳: نمودار پوش آور در جهت X (سیستم قاب خمشی) (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

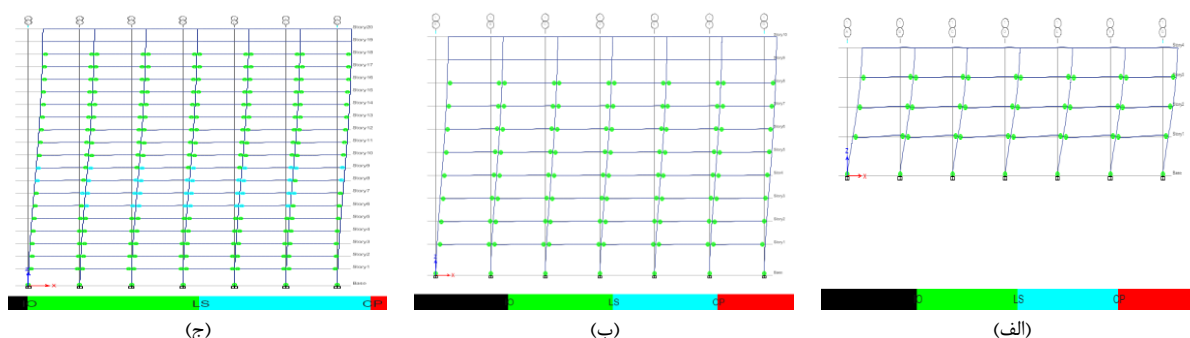
در شکل ۱۴ نمودار پوش آور سازه‌ها برای دهانه‌های میانی دو، سه و چهار متری در جهت سیستم خرابی متناوب نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است با افزایش دهانه‌ی میانی خرابی، سازه شکل پذیرتر شده و تغییر شکل‌های بیشتری را تجربه می‌کند.



شکل ۱۴: نمودار پوش آور در جهت Y (سیستم خرابی متناوب) (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

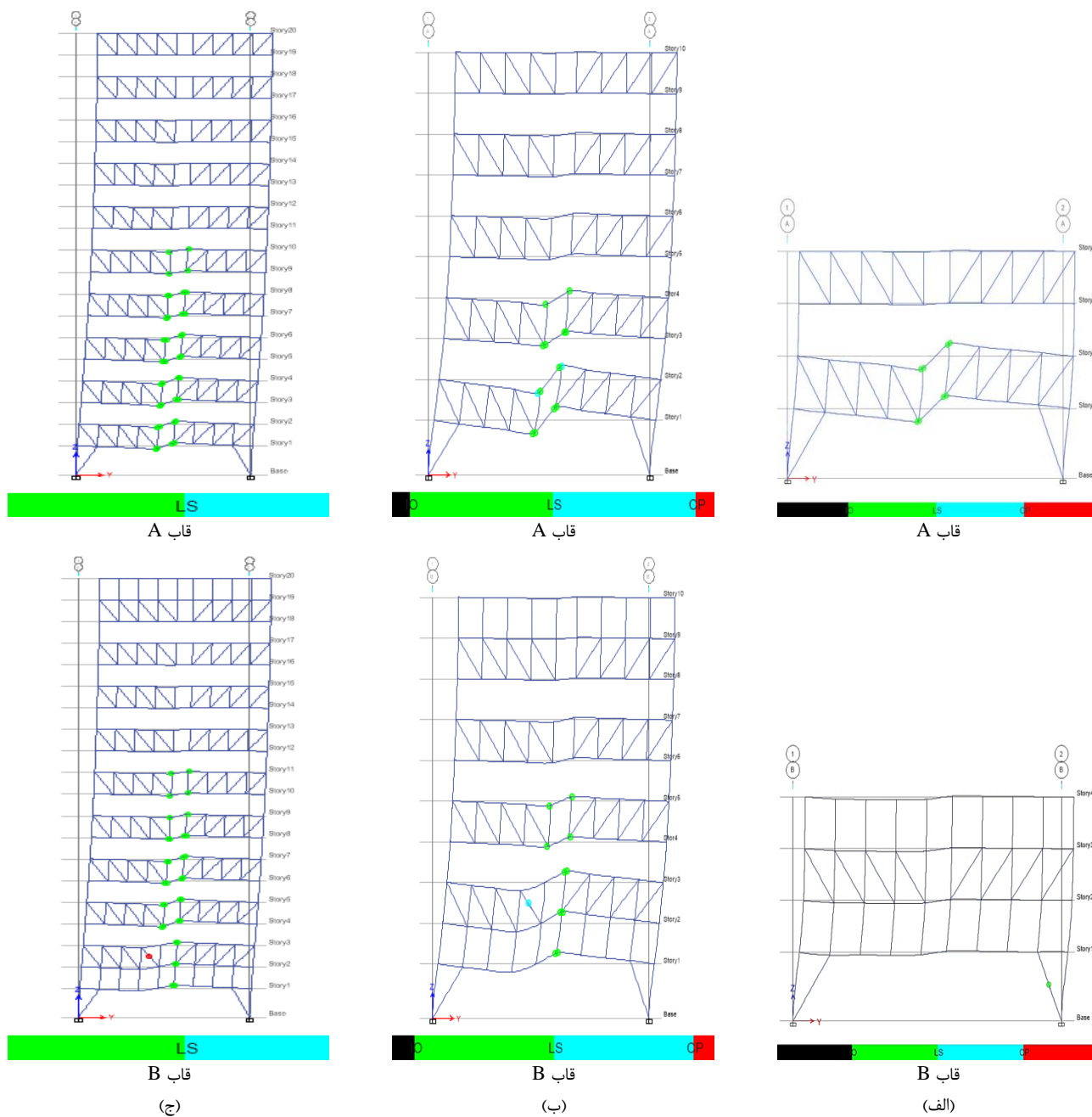
۳-۶- بررسی تشکیل مفاصل پلاستیک

در این قسمت به بررسی نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر، ستون و اعضای خرپا پرداخته می‌شود. در شکل ۱۵ نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در جهت سیستم قاب خمشی در قاب شماره (۱) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، مفاصل پلاستیک در تیرها تشکیل می‌گردد.

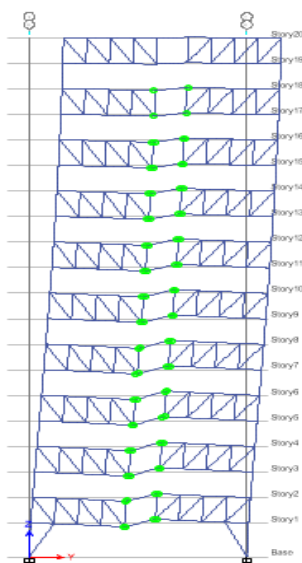


شکل ۱۵: نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک سازه در جهت سیستم قاب خمشی (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

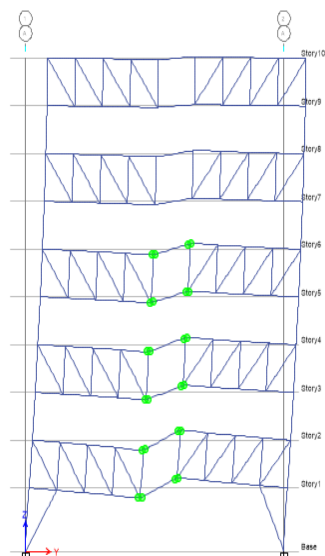
شکل ۱۶ تا شکل ۱۸ نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در جهت سیستم خرابی متناوب به ترتیب در دهانه‌ی میانی دو، سه و چهار متری در قاب شماره (A) و (B) نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌ها مشخص است، مفاصل پلاستیک بیشتر در دهانه‌ی میانی خرابی تشکیل می‌شوند. همچنین با افزایش ابعاد میانی خرابی، مفاصل پلاستیک در اعضای دیگر نیز تشکیل می‌گردد.



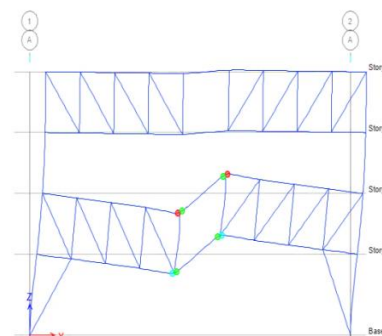
شکل ۱۶: نحوه‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک با دهانه‌ی میانی دو متر (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.



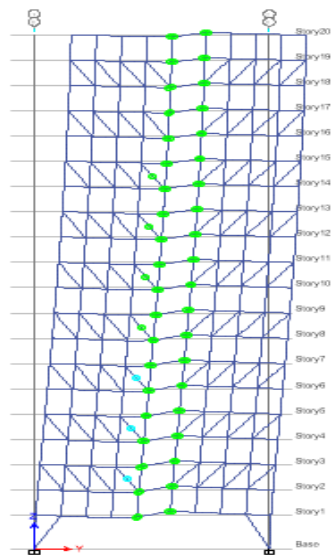
قالب A



قالب A

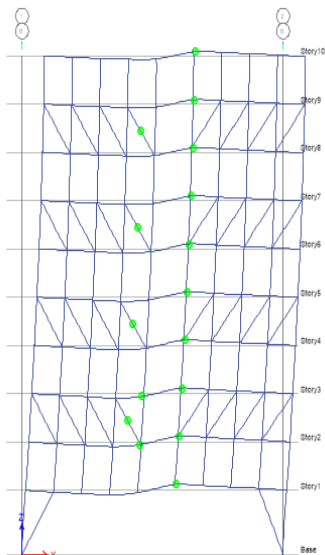


قالب A



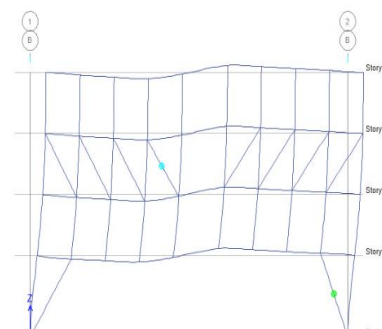
قالب B

(ج)



قالب B

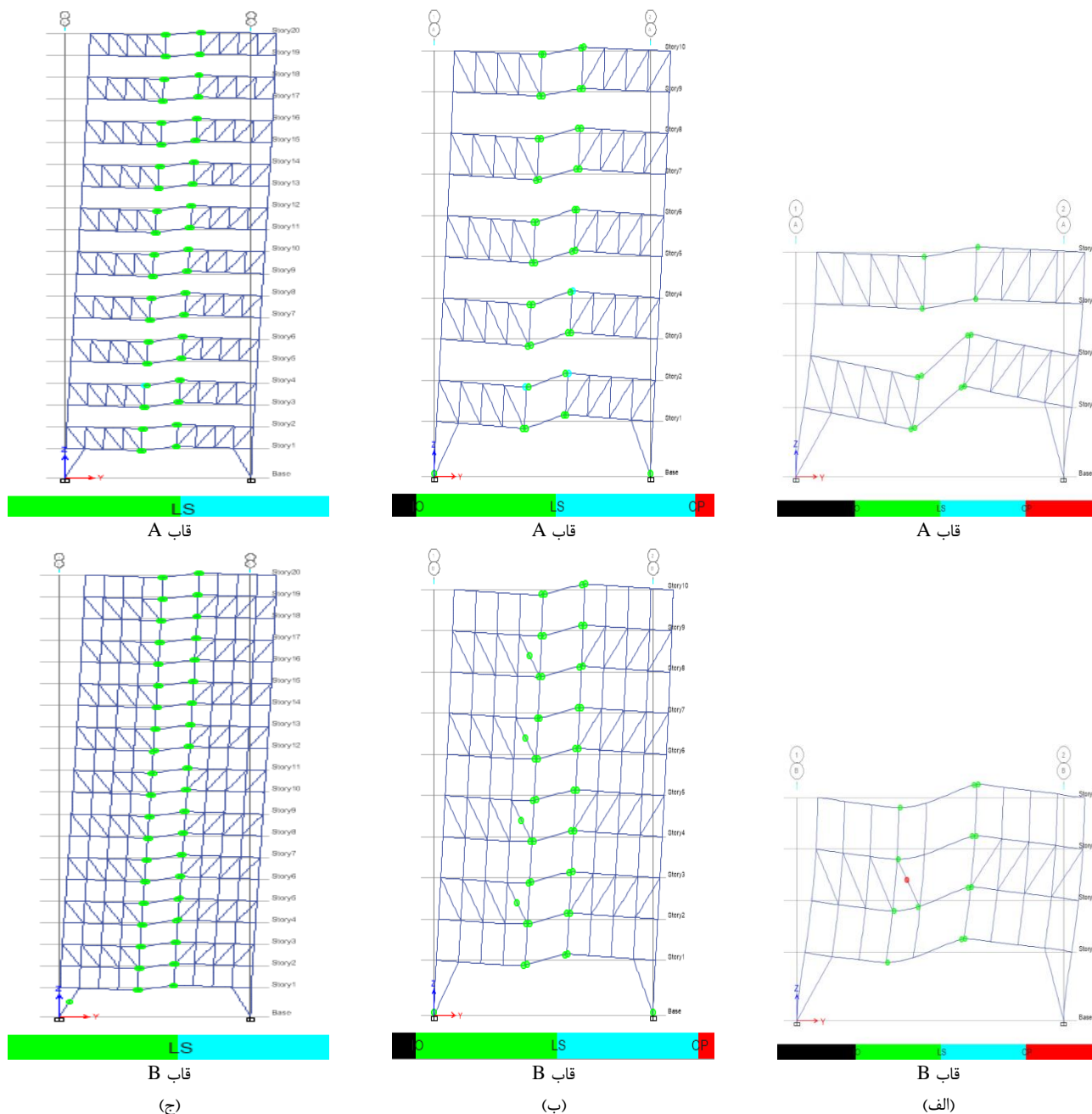
(ب)



قالب B

(الف)

شکل ۱۷: نحوه‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک با دهانه‌ی میانی سه متر (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.



شکل ۱۸: نحوه‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک با دهانه‌ی میانی چهار متر (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

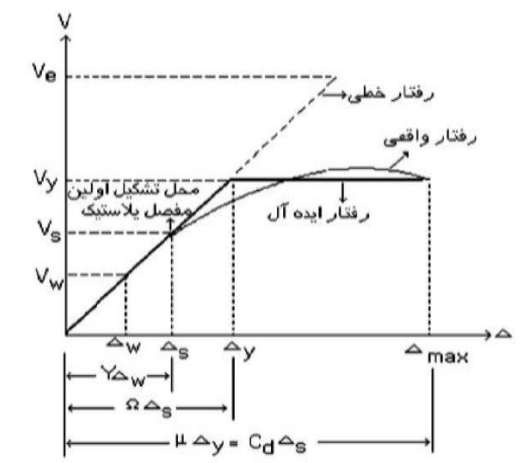
در این پژوهش برای تعیین ضریب رفتار خرابی متناوب از رابطه (۷) استفاده می‌شود. در این رابطه R ضریب رفتار تنش مجاز، R_{μ} ضریب کاهش ناشی از شکل‌پذیری، Ω_0 ضریب مقاومت افزون، و γ ضریب تنش مجاز سازه می‌باشد.

$$R = R_{\mu} \Omega_0 \gamma \quad (۷)$$

در سازه‌ها، ظرفیت تغییر شکل غیرارتجاعی به کمک ضریب شکل‌پذیری بیان می‌گردد. از این رو ضریب رفتار سازه مستقیماً به ضریب شکل‌پذیری آن بستگی دارد. نحوه ارتباط R و μ به عوامل مختلفی بستگی دارد. در سیستم‌های یک درجه آزادی، نوع مصالح، زمان تناوب سیستم، میرایی سیستم، نوع بارگذاری، مدل بار-تغییر شکل، عامل ناپایداری $P-\Delta$ ، وضعیت تکیه‌گاه (یا نوع خاک) بر رابطه R مؤثر

می‌باشند. بر پایه رابطه (۸)، ضریب شکل‌پذیری به صورت نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی Δ_{max} به تغییر مکان جانبی نسبی تسلیم Δ_y تعریف می‌شود. این پارامترها در شکل ۱۹ نشان داده شده‌اند.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (۸)$$



شکل ۱۹: منحنی رفتار غیرارتجاعی سازه.

برای محاسبه ضریب تنش مجاز از رابطه (۹) استفاده می‌شود. این رابطه نسبت نیرو در حد تشکیل اولین مفصل خمیری V_s به نیرو در حد تنش مجاز V_w را بیان می‌دارد (شکل ۱۹).

$$\gamma = \frac{V_s}{V_w} \quad (۹)$$

سازه‌ها به گونه‌ای طراحی می‌گردند که از مرحله ارتجاعی بالاتر نروند. در غیر این صورت در آن‌ها مفصل پلاستیک تشکیل خواهد شد. از این رو، سختی کلی سازه کاهش می‌یابد. تشکیل مفصل سبب ایجاد مکانیزم گردیده و سختی سازه به سمت صفر میل می‌کند. در این مرحله، در صورتی ظرفیت شکل‌پذیری نیز به انتها رسیده باشد، سازه منهدم خواهد شد. سازه‌ها در طی این روند، اضافه مقاومتی را تحمل خواهند کرد که در طراحی اولیه‌ی سازه به حساب نیامده و به مقاومت افزون معروف است. مقاومت افزون کل سازه به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد. این رابطه نسبت نیرو در حد تشکیل نقطه تسلیم V_y به نیرو در حد اولین مفصل پلاستیک V_s را نمایش می‌دهد.

$$\Omega_0 = \frac{V_y}{V_s} \quad (۱۰)$$

تغییر مکان جانبی نسبی حداکثر را می‌توان زمانی که حداکثر دریافت طبقات به ۲ درصد ارتفاع طبقه رسید مشخص نمود. در جدول ۵ به مقایسه‌ی پارامترهای ضریب رفتار (R)، اضافه مقاومت (Ω_0) و شکل‌پذیری (μ) برای دهانه‌های دو، سه و چهار متری در سازه‌های ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه پرداخته شده است.

جدول ۵: شکل پذیری، اضافه مقاومت و ضریب رفتار سازه‌ها

سازه	دهانه میانی	Δ_s	Δ_y	Δ_{max}	V_s	V_y	V_E	T	μ	Ω_0	R
۴ طبقه	۲ متر	۳۳	۴۷	۶۹	۶۲۵	۱۳۸۸	۱۳۰۷	۰/۵۳۵	۱/۴۷	۲/۲۲	۲/۰۹
	۳ متر	۳۴	۶۶	۱۰۵	۵۹۲	۱۱۳۰	۱۸۲۸	۰/۶۵۱	۱/۵۹	۱/۹۱	۳/۰۹
	۴ متر	۳۸	۹۴	۱۶۵	۵۸۸	۱۱۰۷	۳۳۵۱/۶	۰/۷۷۱	۱/۷۶	۱/۸۸	۵/۷۰
۱۰ طبقه	۲ متر	۶۴	۹۱	۱۲۸	۶۰۵	۱۵۲۰	۱۲۱۰	۱/۰۶۷	۱/۴۱	۲/۵۱	۲
	۳ متر	۶۶	۱۲۰	۱۸۰	۵۸۴	۱۳۵۲	۱۵۹۳	۱/۲۸۳	۱/۵۰	۲/۳۲	۲/۷۳
	۴ متر	۸۸	۳۰۰	۴۸۲	۶۵۴	۱۳۵۶	۳۵۸۲	۱/۵۴۶	۱/۶۱	۲/۰۷	۵/۴۸
۲۰ طبقه	۲ متر	۱۴۹	۱۸۹	۲۶۳	۵۶۲	۱۶۱۴	۹۹۲	۲/۰۲۸	۱/۳۹	۲/۸۷	۱/۷۷
	۳ متر	۱۸۴	۳۷۸	۵۵۱	۵۷۰	۱۵۲۴	۱۷۰۷	۲/۴۶۵	۱/۴۶	۲/۶۷	۲/۶۳
	۴ متر	۱۹۵	۶۰۲	۹۵۳	۵۹۱	۱۳۳۰	۲۸۸۸	۲/۹۹۲	۱/۵۸	۲/۲۵	۴/۸۹

از مقایسه نتایج جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که، با افزایش دهانه‌ی میانی از دو به سه و چهار متر، شکل‌پذیری افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش طبقات از چهار به ۱۰ و ۲۰ طبقه، شکل‌پذیری کاهش یافته است. متعاقباً، با افزایش دهانه‌ی میانی از دو به سه و چهار متر، اضافه مقاومت کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش طبقات از چهار به ۱۰ و ۲۰ طبقه، اضافه مقاومت افزایش یافته است. علاوه بر این ملاحظه می‌گردد که، با افزایش دهانه‌ی میانی از دو به سه و چهار متر، ضریب رفتار، افزایش می‌یابد. و همچنین با افزایش طبقات از ۴ چهار به ۱۰ و ۲۰ طبقه، ضریب رفتار کاهش یافته است.

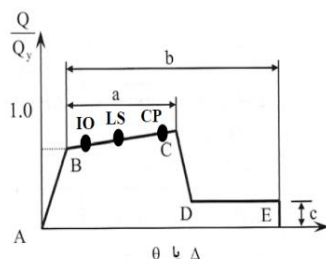
در جدول ۶ مقاومت نهایی و سختی اولیه سازه‌های چهار، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای بازشوی میانی دو، سه و چهار متر آورده شده است.

جدول ۶: مقاومت نهایی و سختی اولیه سازه‌های چهار، ۱۰ و ۲۰ طبقه با دهانه‌ی میانی مختلف

سازه	دهانه میانی	مقاومت نهایی (ton)	سختی اولیه (ton/mm)
۴ طبقه	۲ متر	۱۳۳۸	۱۸/۹۳۹
	۳ متر	۱۱۳۰	۱۷/۴۱۲
	۴ متر	۱۱۰۷	۱۵/۴۷۴
۱۰ طبقه	۲ متر	۱۵۲۱	۹/۴۵۳
	۳ متر	۱۳۷۱	۸/۸۴۸
	۴ متر	۱۳۵۷	۷/۴۳۲
۲۰ طبقه	۲ متر	۱۶۱۴	۳/۷۷۲
	۳ متر	۱۵۲۴	۳/۰۹۸
	۴ متر	۱۳۳۱	۳/۰۳۱

با توجه به جدول ۶ ملاحظه می‌شود که با افزایش پهنای بازشوی میانی، سختی اولیه کاهش می‌یابد. همچنین از بررسی مقاومت نهایی مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دهانه‌ی میانی خرپا مقاومت نهایی کاهش می‌یابد.

در این قسمت سطوح عملکرد مدل‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. خروجی‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی به گونه‌ای است که به کمک آن‌ها می‌توان وضعیت کلی سازه و همچنین اعضای آن را در مراحل مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی، به راحتی تشخیص داد. بر اساس آیین‌نامه‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، ساختمان‌هایی آسیب‌پذیر تلقی نمی‌شوند که، در روند انجام تحلیل و تا رسیدن تغییرمکان بام ساختمان به تغییرمکان هدف، هیچ مشکلی برای اعضای سازه به وجود نیاید. در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای (نشریه ۳۶۰)، حالت‌های مختلف عملکردی که ممکن است در اعضا به وجود آید به کمک شکل ۲۰ بیان می‌گردد.



شکل ۲۰: تغییر شکل اعضا و معیار پذیرش آنها.

در شکل ۲۰ محور قائم، بیان کننده عکس‌المعمل داخلی مربوط به حالت تسلیم آن است. و محور افقی، بیان گر تغییر مکان یا دوران عضو، متناسب با نوع عکس‌المعمل عضو می‌باشد. در صورتی که عضو بین A و B قرار گیرد، بیان گر رفتار ارتجاعی عضو و خدمت‌رسانی بی‌وقفه آن است. اگر رفتار عضو، در محدوده A و IO قرار گیرد به منزله این است که عضو در محدوده قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه قرار دارد. وارد شدن رفتار عضو به محدوده IO تا LS به این معنی است که عضو، قابلیت بهره‌برداری خود را از دست داده است ولی هنوز به مرحله ایمنی جانی نرسیده است. مرحله LS تا CP به معنی عبور از مرحله ایمنی جانی است. مرحله CP تا C عبور از مرحله فروریزش به شمار می‌آید. مراحل انتهایی در شکل ۲۰ عمدتاً مربوط به شرایط بعد از فروریزش است. در جدول ۷ الی

جدول ۹ سطوح عملکرد برای سازه‌های ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای دهانه‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۷: سطوح عملکرد سازه‌ی ۴ طبقه برای دهانه‌های مختلف

نتیجه	سطح عملکرد			دهانه میانی
	CP	LS	IO	
۲ متر	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۲ متر
۳ متر	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۳ متر
۴ متر	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۴ متر

جدول ۸: سطوح عملکرد سازه‌ی ۱۰ طبقه برای دهانه‌های مختلف

نتیجه	سطح عملکرد			دهانه میانی
	CP	LS	IO	
۲ متر	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۲ متر
۳ متر	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۳ متر
۴ متر	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۴ متر

جدول ۹: سطوح عملکرد سازه‌ی ۲۰ طبقه برای دهانه‌های مختلف

نتیجه	سطح عملکرد			دهانه میانی
	CP	LS	IO	
۲ متر	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۲ متر
۳ متر	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۳ متر
۴ متر	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	۴ متر

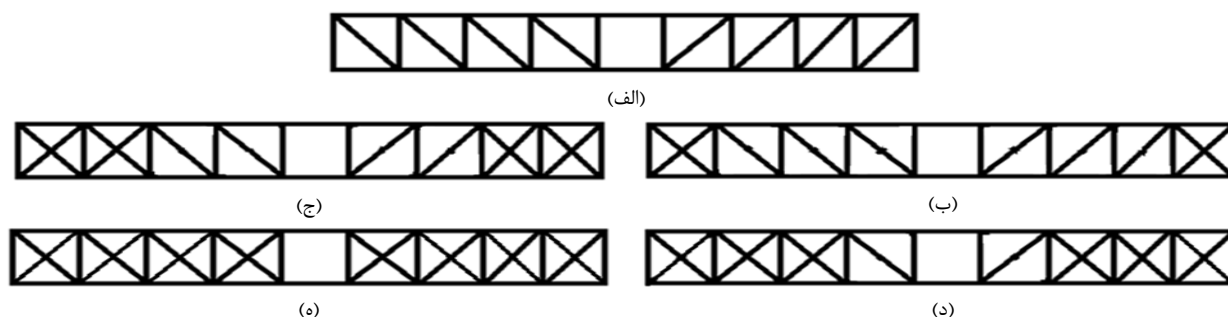
آیین نامه ۲۸۰۰ بهترین سطح عملکرد مربوط به ساختمان‌های مسکونی را ایمنی جانی توصیه می‌کند. لذا در این قسمت سازه‌ها از نظر بهترین سطح عملکرد انتخاب می‌شود. با توجه به این که سازه‌ی ۴ طبقه نماینده سازه کوتاه و سازه ۱۰ طبقه نماینده سازه متوسط و سازه ۲۰ طبقه نماینده سازه بلند در نظر گرفته می‌شود، در سازه‌ی ۴ طبقه با توجه به سطوح عملکرد برای دهانه‌های میانی دو، سه و چهار متری، بهترین سطح عملکرد مربوط به دهانه ۴ متر و در سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه بهترین سطح عملکرد مربوط به دهانه‌ی ۳ متر است.

۴- ارزیابی اثر چینش خرپا در دهانه‌های کناری

با توجه به نتایج بخش پیشین، بهترین سطح عملکرد، برای سازه چهار طبقه پهنای باز شو میانی چهار متر و برای سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه در سطح عملکرد ایمنی جانی، پهنای باز شو میانی ۳ متر حاصل گردید. در این بخش برای این سازه‌ها، نوع خرپا و همچنین چینش آن در دهانه‌های کناری تغییر داده می‌شود و رفتار لرزه‌ای این سیستم‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور، برای هر سازه پنج چینش مختلف در نظر گرفته خواهد شد. تحلیل‌های این قسمت بر اساس تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی است.

۴-۱- انواع چینش خرپا

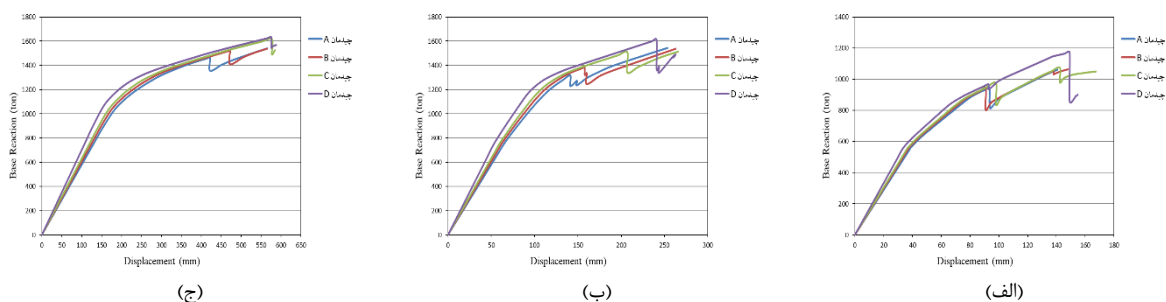
برای بررسی اثر چینش خرپا در دهانه‌های کناری، از پنج چینش مطابق شکل ۲۱ در تحلیل و آنالیز سازه‌ها استفاده شده است.



شکل ۲۱: انواع چینش خرپا (الف) چینش اصلی، (ب) چینش A، (ج) چینش B، (د) چینش C، (ه) چینش D.

۴-۲- ارزیابی نمودار پوش آور برای چینش‌های مختلف

جهت بررسی مشخصه‌های لرزه‌ای سازه‌ها از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. در شکل ۲۲ نمودار پوش آور سازه‌ها برای چینش‌های مختلف A، B، C و D در جهت سیستم خرابی متناوب نشان داده شده است.



شکل ۲۲: نمودار پوش آور برای چیدمان‌های مختلف سیستم خرابی متناوب (الف) سازه چهار طبقه، (ب) سازه ۱۰ طبقه، (ج) سازه ۲۰ طبقه.

۳-۴- ارزیابی چینش خرپا در دهانه‌های کناری

در جدول ۱۰ شکل پذیری، اضافه مقاومت و ضریب رفتار سازه‌ها برای چینش‌های مختلف دهانه‌های کناری آورده شده است.

جدول ۱۰: شکل پذیری، اضافه مقاومت و ضریب رفتار سازه‌ها

سازه	دهانه میانی	Δ_s	Δ_y	Δ_{max}	V_s	V_y	V_E	μ	Ω_0	R
۴ طبقه	اصلی	۲۸	۹۴	۱۶۵	۵۸۸	۱۱۰۷	۳۳۵۱/۶	۱/۷۶	۱/۸۸	۵/۷۰
	A	۳۶	۵۶	۱۳۰	۵۲۲	۱۰۳۰	۱۸۸۵	۲/۳۲	۱/۹۷	۳/۶۱
	B	۳۶	۶۰	۱۳۶	۵۲۲	۱۰۵۱	۱۹۷۲	۲/۲۷	۲/۰۱	۳/۷۸
	C	۳۶	۶۶	۱۴۲	۵۲۲	۱۰۷۴	۲۰۵۹	۲/۱۵	۲/۰۶	۳/۹۴
	D	۳۳	۷۴	۱۴۹	۵۵۶	۱۱۷۲	۲۵۱۰	۲/۰۱	۲/۱۱	۴/۵۲
۱۰ طبقه	اصلی	۶۶	۱۲۰	۱۸۰	۵۸۴	۱۳۵۲	۱۵۹۲/۷۳	۱/۵	۲/۳۲	۲/۷۳
	A	۶۳	۱۲۹	۲۶۲	۷۶۵	۱۵۲۱	۳۱۸۱/۴۳	۲/۰۳	۱/۹۹	۴/۱۶
	B	۶۰	۱۴۰	۲۶۲	۷۶۲	۱۵۱۰	۳۳۲۷/۴۰	۱/۸۷	۱/۹۸	۴/۳۷
	C	۵۹	۱۵۱	۲۶۲	۷۶۰	۱۴۹۵	۳۳۷۴/۹۲	۱/۷۴	۱/۹۷	۴/۴۴
	D	۵۳	۱۶۸	۲۶۲	۷۵۶	۱۴۹۱	۳۷۳۷/۲۱	۱/۵۶	۱/۹۷	۴/۹۴
۲۰ طبقه	اصلی	۱۸۴	۳۷۸	۵۵۱	۵۷۰	۱۵۲۴	۱۷۰۶/۹	۱/۴۶	۲/۶۷	۲/۹۹
	A	۱۷۳	۲۷۰	۵۶۴	۱۰۳۰	۱۵۳۸	۳۳۵۷/۹۲	۲/۰۹	۱/۴۹	۳/۲۶
	B	۱۶۶	۳۳۴	۵۶۴	۱۰۳۴	۱۵۳۸	۳۵۱۳/۱۱	۱/۶۹	۱/۴۹	۳/۴۰
	C	۱۶۰	۳۵۳	۵۸۷	۱۰۳۸	۱۵۶۹	۳۸۰۸/۱۶	۱/۶۶	۱/۵۱	۳/۶۷
	D	۱۵۴	۳۸۱	۵۹۰	۱۰۴۵	۱۵۷۹	۴۰۰۳/۵۷	۱/۵۵	۱/۵۱	۳/۸۳

با توجه به دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای (نشریه ۳۶۰) می‌توان سطوح عملکرد سازه را تعیین نمود. این موضوع در جدول ۱۱ تا

جدول ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۱۱: سطوح عملکرد سازه‌ی چهار طبقه برای دهانه‌های مختلف

نتیجه	سطح عملکرد			مدل
	CP	LS	IO	
اصلی	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
A	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
B	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
C	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
D	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش

جدول ۱۲: سطوح عملکرد سازه‌ی ۱۰ طبقه برای دهانه‌های مختلف

نتیجه	سطح عملکرد			مدل
	CP	LS	IO	
اصلی	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
A	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
B	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
C	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش
D	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش

جدول ۱۳: سطوح عملکرد سازه‌ی ۲۰ طبقه برای دهانه‌های مختلف

نتیجه	سطح عملکرد			مدل
	CP	LS	IO	
اصلی	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	اصلی
A	عدم پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	A
B	عدم پذیرش	عدم پذیرش	قابل پذیرش	B
C	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	C
D	قابل پذیرش	قابل پذیرش	قابل پذیرش	D

با توجه به جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که برای هر سه نوع سازه با سخت کردن دهانه‌های اطراف بازشوی میانی در سیستم خرابی متناوب، شکل‌پذیری سازه کاهش می‌یابد. چینش A بیشترین شکل‌پذیری را داشته و چینش D دارای کمترین شکل‌پذیری است. با سخت نمودن دهانه‌های اطراف بازشوی میانی اضافه مقاومت سازه افزایش می‌یابد. چینش D دارای بیشترین ضریب اضافه مقاومت می‌باشد. افزون بر این با سخت نمودن دهانه‌های اطراف بازشو میانی ضریب رفتار سازه افزایش می‌یابد. بنابراین در سازه‌های کوتاه در سیستم خرابی متناوب، چینش A بیشترین شکل‌پذیری را نتیجه می‌دهد. چینش D بیشترین اضافه مقاومت و ضریب رفتار را به خود اختصاص می‌دهد. از طرفی با سخت کردن دهانه‌های اطراف بازشوی میانی مفاصل بیشتری در دهانه‌ی میانی خرابا تشکیل می‌شود. و به ترتیب از چیدمان A تا D تعداد مفاصل پلاستیک در اعضای مختلف زیاد می‌گردد. در این حالت سازه از سطح عملکرد IO (بهره‌برداری بی‌وقفه) به سطح عملکرد CP (واژگونی) می‌رسد. لذا مطابق جدول ۱۱، چینش‌های اصلی، A و C، مطابق

جدول ۱۲، چینش‌های اصلی، A، B و C و مطابق

جدول ۱۳، چینش‌های اصلی، A و B دارای بهترین سطح عملکرد یعنی LS (ایمنی جانی) می‌باشند.

در جدول ۱۴، مقاومت نهایی و سختی اولیه سازه‌های چهار، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای چینش‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۱۴: مقاومت نهایی و سختی اولیه سازه‌های چهار، ۱۰ و ۲۰ طبقه برای چینش‌های مختلف

سازه	چینش	مقاومت نهایی (ton)	سختی اولیه (ton/mm)
۴ طبقه	اصلی	۱۱۰۷	۱۵/۴۷
	A	۱۱۰۳	۱۴/۵۰
	B	۱۰۷۰	۱۴/۵۰
	C	۱۰۷۵	۱۴/۵۰
۱۰ طبقه	D	۱۱۷۲	۱۶/۸۵
	اصلی	۱۳۷۱	۸/۸۵
	A	۱۵۳۹	۱۲/۱۴
	B	۱۵۳۹	۱۲/۷۰
۲۰ طبقه	C	۱۵۱۴	۱۲/۸۸
	D	۱۶۱۲	۱۴/۲۶
	اصلی	۱۵۲۴	۳/۱۰
	A	۱۵۴۰	۵/۹۵
۲۰ طبقه	B	۱۵۳۹	۶/۲۳
	C	۱۶۱۷	۶/۴۹

با توجه به جدول ۱۴، چینش D بیشترین مقاومت نهایی و سختی اولیه را نتیجه می دهد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از سه نوع سازه با ارتفاع چهار، ۱۰ و ۲۰ طبقه استفاده گردید. در انتخاب این مدل ها، مدل چهار طبقه نماینده سازه‌ی کوتاه، مدل ۱۰ طبقه نماینده سازه متوسط و مدل ۲۰ طبقه نماینده سازه بلند می باشند. برای ارزیابی نسبت پهنای دهانه‌ی میانی خرپا به دهانه‌های کناری، با ثابت بودن عرض ساختمان، دهانه‌ی میانی خرپا به طول‌های دو، سه و چهار متر در نظر گرفته شد و مشخصات لرزه‌ای نظیر شکل پذیری، اضافه مقاومت، ضریب رفتار، مقاومت نهائی و سختی اولیه ارزیابی گردید. همچنین در این مقاله، برای سازه‌های ۴، ۱۰ و ۲۰ طبقه، اثر نوع خرپا در دهانه‌های کناری بررسی شد. در این بررسی نسبت دهانه‌ی مناسب بدست آمده از بخش سوم، برپایه‌ی سطح عملکرد قابل قبول آیین نامه، به کار گرفته شد. طبق توصیه آیین نامه ۲۸۰۰ بهترین سطح عملکرد، ایمنی جانی می باشد. از این رو سازه‌ی ۴ طبقه با پهنای میانی ۴ متر ارزیابی گردید. برای سازه‌های ۱۰ و ۲۰ طبقه نیز پهنای میانی ۳ متر گزینش شد. به منظور بررسی اثر نوع خرپا در دهانه‌های کناری، برای هر سازه، پنج چینش مختلف A، B، C و D مدل سازی شد. با توجه به خروجی‌های بدست آمده نتایج زیر حاصل گردید:

۱- با افزایش پهنای دهانه‌ی میانی خرپا از ۲ به ۳ و ۴ متر شکل پذیری سازه‌ها افزایش پیدا کرد. همچنین با افزایش ارتفاع طبقات از ۴ به ۱۰ و سپس ۲۰ طبقه از شکل پذیری کاسته شد.

۲- با افزایش پهنای دهانه‌ی میانی از ۲ به ۳ و ۴ متر اضافه مقاومت کاهش یافت و با افزایش طبقات از ۴ به ۱۰ و سپس ۲۰ طبقه اضافه مقاومت افزایش پیدا کرد.

۳- در مورد ضریب رفتار می توان گفت با افزایش پهنای دهانه میانی از ۲ به ۳ و ۴ متر ضریب رفتار افزایش می یابد. افزون بر این با افزایش تعداد طبقات از ۴ به ۱۰ و سپس ۲۰ طبقه، ضریب رفتار سازه کاهش پیدا کرد.

۴- هر چه پهنای دهانه میانی افزایش یابد، سختی اولیه‌ی سازه‌ها کمتر می گردد.

۵- از بررسی مقاومت نهایی مدل ها می توان دریافت که افزایش پهنای دهانه میانی خرپا، کاهش مقاومت نهایی سازه را در پی خواهد داشت.

۶- برای سازه‌های کوتاه در سیستم خرپای متناوب، جهت دستیابی به سطح عملکرد ایمنی جانی که توصیه آیین نامه ۲۸۰۰ می باشد، باید نسبت طول دهانه‌ی میانی به دهانه کناری برابر $1/88$ در نظر گرفته شود. در مورد سازه‌های متوسط و بلند، این نسبت برابر $1/33$ در نظر گرفته می شود.

۷- با سخت کردن دهانه‌های اطراف بازشوی میانی شکل پذیری سازه کاهش می یابد. به طوری که چینش A بیشترین شکل پذیری را نشان داد. چینش D کمترین شکل پذیری را به خود اختصاص داد.

۸- با سخت نمودن دهانه‌های اطراف بازشوی میانی اضافه مقاومت سازه افزایش می یابد. در این حالت چینش D دارای بیشترین ضریب اضافه مقاومت شد.

۹- ضریب رفتار سازه با سخت نمودن دهانه‌های اطراف بازشو افزایش پیدا کرد. بنابراین در سازه ۴ طبقه (کوتاه)، ۱۰ طبقه (متوسط)، ۲۰ طبقه (بلند)، که سیستم خرپای متناوب در آن‌ها استفاده شده باشد، چینش A دارای بیشترین شکل پذیری می باشد. افزون بر این، چینش D دارای بیشترین اضافه مقاومت و ضریب رفتار است. در تمامی سازه‌ها چینش D بیشترین مقاومت نهایی و سختی اولیه را به خود اختصاص داد.

۱۰- با سخت کردن دهانه‌های اطراف بازشوی میانی مفاصل بیشتری در تیرهای دهانه‌ی میانی خرابا تشکیل می‌شود. بنابراین، به ترتیب، از چینش A تا D تعداد مفاصل پلاستیک در اعضای مختلف زیاد می‌شود و سازه از سطح عملکرد IO (بهره‌برداری بی‌وقفه) به سطح عملکرد CP (واژگونی) می‌رسد.

۱۱- در سازه‌ی ۴ طبقه، سازه‌ی اصلی و چینش‌های A و B دارای سطح عملکرد ایمنی جانی می‌باشند. در سازه‌ی ۱۰ طبقه، سازه اصلی و چینش‌های A، B و C سطح عملکرد ایمنی جانی را دارا می‌باشند. همچنین در سازه‌ی ۲۰ طبقه سازه‌ی اصلی و چینش‌های A و B سطح عملکرد ایمنی جانی دارند.

۱۲- با مشاهده نمودارهای دررفت طبقات می‌توان دریافت که در سازه‌ی ۴ طبقه بیشترین دررفت، مربوط به طبقات میانی می‌باشد. در این حالت استفاده از چینش‌های مختلف منجر به پیدایش زود هنگام مفاصل پلاستیک در تیرهای ناحیه‌ی میانی می‌شود. در نتیجه سازه از تمام ظرفیت خود استفاده نخواهد کرد. در سازه ۴ طبقه، چینش B بیشترین دررفت در طبقات ۱ و ۲ را دارد. و با سخت کردن دهانه‌های کناری سازه تغییرشکل کمتری خواهد داشت. در سازه‌ی ۱۰ و ۲۰ طبقه بیشترین دررفت در یک‌سوم طبقات پائین اتفاق می‌افتد. افزون بر این، در سازه‌ی ۱۰ طبقه کمترین دررفت یک‌سوم میانی طبقات، مربوط به چینش D می‌باشد. در سازه‌ی ۲۰ طبقه بیشترین دررفت در طبقه پنجم و مربوط به چینش B مشاهده شد. نحوه‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک در تمام سازه‌ها روند مشابهی دارد؛ به طوری که با سخت کردن دهانه‌های اطراف ناحیه بازشو در خرپاها، مفاصل پلاستیک ابتدا در تیرهای این ناحیه تشکیل می‌شود و به سرعت در اعضای قائم و قطری خرپای متناوب گسترش می‌یابد.

مراجع

- [1] M. S. Construction, "Staggered Truss System Proves Economical For Hotels," 2000.
- [2] J. B. Scalzi, "The staggered-truss system: structural considerations," *AISC Eng. J.*, vol. 10, 1971.
- [3] S. D. A. E. Floors and N. W. S. S. Radiographic, "American Institute of Steel Construction."
- [4] R. D. Hanson and G. V. Berg, "Aseismic Design of Staggered Truss Buildings," *J. Struct. Div.*, vol. 100, no. 1, pp. 175–193, 1974.
- [5] A. E. Hassler, "Erecting the staggered truss system: A view from the field," *Eng. J. AISC*, vol. 23, no. 4, pp. 166–172, 1986.
- [6] M. P. Cohen, "Design solutions utilizing the staggered-steel truss system," *AISC Eng. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 97–106, 1986.
- [7] X. J. Li, "Investigation of the Plane Model of Steel Staggered Truss System," in *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 105, pp. 961–964.
- [8] J. Kim, J. Lee, and Y. Kim, "Inelastic behavior of staggered truss systems," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 16, no. 1, pp. 85–105, 2007.
- [9] X. H. Zhou, T. Mo, Y. J. Liu, Z. M. Yin, L. F. Lu, and Q. S. Zhou, "Experimental study on high-rise staggered truss steel structure," *J. Build. Struct.*, vol. 27, pp. 86–92, 2006.
- [10] X. Zhou, Y. He, L. Xu, and Q. Zhou, "Experimental study and numerical analyses on seismic behaviors of staggered-truss system under low cyclic loading," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 11, pp. 1343–1353, 2009.
- [11] Y.-S. Hong, E.-J. Yu, and C.-S. Rha, "Seismic Performance Evaluation of Staggered Truss System by the Shape of Truss," *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, vol. 30, no. 5, pp. 397–404, 2017.
- [12] V. H. Sheth, V. R. Panchal, and A. J. Wankawala¹⁺, "Comparative Study of Different Structural System with Steel Staggered Truss System."
- [13] D. Mistry, V. Agrawal, and V. Patel, "Comparative Study of Staggered Truss System With and Without Shear Wall," *Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol.*, vol. 4, no. 2, 2021.
- [14] D. of T. Office, *Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Buildings (Publication 360)-Develop Criteria and Earthquake Risk Reduction.* .
- [15] J. Kim, S. Kim, "Performance-based seismic design of staggered truss frames with friction dampers." *Thin-Walled Structures*, vol. 111, pp. 197–209, 2017.
- [16] Q. Liu, T. Liao, X. Peng, S. Xu, "Analysis of seismic performance of assembled steel structure staggered truss system." *2nd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing*", doi: 10.1088/1755-1315/783/1/012064.2021.
- [17] E. Wahyuni, Y. Tethool, "Effect of vierendeel panel width and vertical truss spacing ratio in staggered truss framing system under earthquake loads". *International Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 213–221, 2015.

- [18] K. Jijo John, S. Pradeep, "Behaviour of steel staggered truss system under seismic loading". *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 177–186, 2015.
- [19] K. Jinkoo, J. Yong, K. Hyunkoo, "Seismic Behavior Factors of RC Staggered Wall Buildings". *International Journal of Concrete Structure and Materials*, vol. 10, pp. 355–357, 2016.