

تأثیر طول ناحیه ویژه و نحوه تقویت آن بر عملکرد لرزه‌ای سیستم خربای متناوب

علیرضا چمن مطلق^۱، حمیدرضا ناصری^۲، محسن خطیبی‌نیا^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه بیرجند

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند

* m.khatibinia@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۲/۳۱]

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۶/۰۸]

چکیده

سیستم خربای متناوب یکی از سیستم‌های باربر جانبی است که اعضای اصلی آن را خرپاها تشکیل می‌دهند. در این سیستم، وظیفه جذب انرژی و تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک برعهده ناحیه ویژه است، به‌طوری‌که با ایجاد مفاصل پلاستیک در این ناحیه، شکل‌پذیری سازه تأمین می‌شود. در این پژوهش، تأثیر طول این ناحیه و چگونگی تقویت آن بر عملکرد لرزه‌ای سیستم خربای متناوب بررسی شده است. به منظور بررسی این پارامترها، ابتدا مدل اجزاء محدود این سیستم در نرم‌افزار ABAQUS تهیه شده و درستی آزمایشی مدل‌سازی این سیستم کنترل شد. سپس، عملکرد لرزه‌ای این سیستم با در نظر گرفتن ناحیه ویژه با طول‌های مختلف و الگوهای تقویت پیشنهادی در این ناحیه ارزیابی شده است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد استفاده از نواحی ویژه با طول بزرگ باعث می‌شود که از کل ظرفیت سازه به طور کامل استفاده نشود؛ از این رو هنگام نیاز به بازشوهای بزرگ، این نواحی باید به‌طور مناسبی تقویت شود. در این مطالعه، الگوهای مختلف تقویت ناحیه ویژه از جمله تقویت یال‌ها، تقویت اعضای قائم ناحیه ویژه و طرح تقویت پیشنهادی راهنمای شماره ۱۴ آیین‌نامه AISC بررسی شده است. از آنجایی که مفاصل پلاستیک معمولاً در یال‌های خرپا تشکیل می‌شوند، پس تقویت یال‌ها بیشترین تأثیر را بر افزایش سختی اولیه و مقاومت سازه دارد. همچنین، به جای تقویت کلی یال می‌توان بخشی از دو انتهای ناحیه ویژه را تقویت نموده، به‌طوری‌که عملکرد آن مشابه تقویت کلی یال باشد.

واژگان کلیدی: سیستم خربای متناوب، طول ناحیه ویژه، تقویت، مفاصل پلاستیک.

۱- مقدمه

پارامترهای مختلفی از جمله ملاحظات سازه‌ای، معماری و اقتصادی نقش تعیین‌کننده‌ای را ایفا می‌کنند و هر کدام به‌گونه‌ای روی شکل‌پذیری و مقاومت کلی سازه، تأثیرگذار است. تاکنون سیستم‌های باربر جانبی متعددی برای مقابله با بارهای جانبی وارده

پایداری سازه در برابر نیروهای جانبی حاصل از زلزله و حفظ جان ساکنین آن از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در طراحی یک سازه است. در انتخاب یک سیستم باربر جانبی برای یک سازه،

به سازه معرفی شده‌اند که از میان آن‌ها سیستم‌های قاب مهاربندی همگرا و واگرا، قاب خمشی و سیستم دیوار برشی معمول و متداول‌تر است.

سیستم خرپای متناوب یکی از سیستم‌های باربر جانبی در سازه‌های فولادی است. این سیستم برای اولین بار در اواسط دهه ۱۹۶۰ به وسیله پژوهشگران دانشگاه MIT معرفی شد [1]. با وجود مدت‌زمان زیادی که از معرفی این سیستم سازه‌ای می‌گذرد، هنوز در همه مراجع و آیین‌نامه‌های طراحی به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی اصلی شناخته نشده و در بعد اجرایی نیز به‌صورت محدود در برخی از سازه‌های کشورهای آمریکا و کانادا مورد استفاده قرار گرفته است [2]؛ اما پس از زلزله سال ۱۹۹۴ نورث‌ریج، به دلیل مزایای فراوان سیستم خرپای متناوب، توجه به این سیستم به‌عنوان جایگزینی برای سیستم قاب خمشی افزایش یافت. پس از این زلزله، پژوهشی روی این سیستم و روابط حاکم بر آن به وسیله گوئل و ایتانی [3] و گوئل و باشا [4] صورت پذیرفت و این پژوهش‌ها زمینه انتشار راهنمای شماره ۱۴ آیین‌نامه AISC تحت عنوان سیستم خرپای متناوب در سال ۲۰۰۳ شد. با این وجود به دلیل ابهامات موجود در این راهنما، پژوهش‌های گسترده‌تری روی این سیستم انجام پذیرفت. به‌عنوان نمونه، پژوهشی به وسیله توپکایا^۱ و المز^۲ [5] روی روابط ارائه‌شده در راهنمای آیین‌نامه انجام پذیرفت. با این حال هنوز در مورد این سیستم ابهاماتی وجود دارد که باعث عدم پذیرش آن به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی اصلی شده است. این ابهامات در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ به وسیله چائو^۳ تشریح شد [6, 7]. با این وجود، پژوهش‌ها روی این سیستم سازه‌ای ادامه داشته به طوری که در سال‌های اخیر به وسیله پکان^۴ و همکاران [8, 9] و حیدری و قره‌باغی [10] در زمینه استفاده از اعضای کماتش ناپذیر در این سیستم مطالعاتی صورت پذیرفته است. پیشنهادهایی برای بهبود عملکرد این سیستم نیز به وسیله سیماساتین^۵ و همکاران [11] ارائه شده است. کیم^۶ و همکاران در رابطه با رفتار غیرالاستیک این سیستم و تعیین یک ضریب رفتار برای آن مطالعاتی را انجام دادند [12]. بهبود عملکرد

مؤثر بر این سیستم به‌صورت جداگانه بررسی شود.

در این پژوهش، تأثیر طول ناحیه ویژه و چگونگی تقویت آن بر عملکرد لرزه‌ای سیستم خرپای متناوب ارزیابی می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد در صورت استفاده از نواحی ویژه بزرگ، از کل ظرفیت سازه استفاده نشده و در صورت نیاز به بازشوهای بزرگ، این نواحی باید تقویت شوند. همچنین از میان الگوهای مختلف تقویت نیز، تقویت یال خرابا بیشترین تأثیر را بر سختی اولیه و مقاومت سازه دارد.

۲- سیستم خرپای متناوب

همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، هندسه و اجزای اصلی این سیستم را خراباها تشکیل می‌دهند.

شکل ۱. نمای کلی سیستم خرپای متناوب



Fig. 1. Staggered truss system

چگونگی اجرای این سیستم به این صورت است که در یک قاب، خرپایی به ارتفاع طبقه در طبقات زوج و در قاب مجاور خرپایی به ارتفاع طبقه در طبقات فرد قرار می‌گیرد. در این سیستم انتقال بارهای جانبی توسط سیستم کف از خرپای یک طبقه به خرپای مجاور طبقه زیرین صورت می‌پذیرد [15].

- 1 Topkaya
- 2 Ölmez
- 3 Chao
- 4 Pekcan
- 5 Simasathien
- 6 Kim

جذب انرژی زلزله از این طریق است [1]. همچنین در اعضای قائم اطراف ناحیه ویژه احتمال ایجاد مفصل پلاستیک نیز وجود دارد [16]. از طرف دیگر، در خرپاها باید یک بازشو با ابعاد کافی و مناسب به منظور ایجاد رفت و آمد وجود داشته باشد که ایده استفاده از ناحیه ویژه می تواند این نیاز را برطرف نماید. در هنگام طراحی نیز باید به این نکته توجه نمود که سایر اعضای خارج از ناحیه ویژه و اتصالات آن‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که تحت نیروی زلزله در ناحیه الاستیک باقی بمانند [1].

شکل ۳. چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک و تغییر شکل سیستم خرپای متناوب دارای ناحیه ویژه

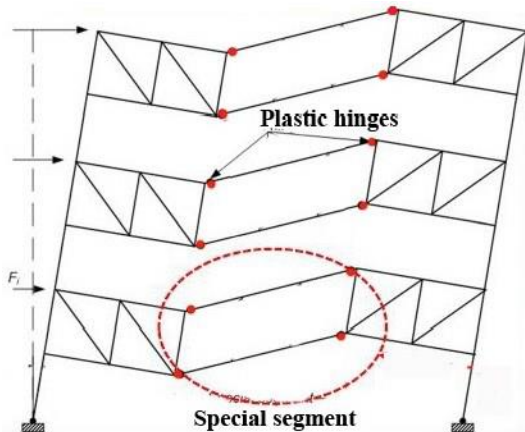


Fig. 3. Deformation and plastic hinges formation of Staggered truss system with special segment

با توجه به این که در سیستم خرپای متناوب، خرپاها تمام دهانه عرضی سازه را می پوشانند، بنابراین پلان سازه تقسیم به بخش‌های کوچک‌تری خواهد شد که این بخش‌ها تنها از طریق ناحیه ویژه به یکدیگر دسترسی خواهند داشت. هنگام طراحی یک سازه باید الزامات سازه‌ای و معماری همزمان در نظر گرفته شوند. به علت این که از این سیستم بیشتر برای بیمارستان‌ها و هتل‌ها و سایر کاربری‌هایی که فضاهای معماری بزرگ‌تری را نیاز دارند استفاده می‌شود، در مواردی این امکان وجود دارد که الزامات معماری، طراح سازه را مجبور به استفاده از نواحی ویژه بزرگ نماید. بنابراین در این مطالعه، ابتدا اثر طول ناحیه ویژه بر عملکرد لرزه‌ای سازه بررسی شده است و سپس الگوهایی برای تقویت محل ناحیه ویژه در مواردی که نیاز به تقویت است، ارائه شده است.

این سیستم برای سازه‌های دارای ارتفاع متوسط از جمله هتل‌ها، بیمارستان‌ها و خوابگاه‌ها مناسب است. در این سیستم به دلیل حذف ستون‌های میانی در قاب‌های سازه، فضای معماری بزرگی در سازه به وجود می‌آید. از طرف دیگر به دلیل کاهش تعداد ستون‌ها، حجم بتن موردنیاز برای فونداسیون کاهش یافته و باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان موردنیاز برای اجرای فونداسیون می‌شود. همچنین با کاهش تعداد ستون‌ها سهم بار ثقلی ستون‌ها افزایش یافته که باعث می‌شود برای کنترل نیروی بلندشدگی پی، دغدغه کمتری وجود داشته باشد [1]. برای افزایش قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتر سیستم خرپای متناوب ایده‌های مختلفی ارائه شده است. به عنوان نمونه از هندسه و نوع رفتار سیستم مهاربند و اگر تحت بار جانبی، در ساخت یک نوع از این سیستم الهام گرفته شده است. سیستم قاب مهاربندی و اگر علاوه بر دارا بودن سختی مناسب، به دلیل شکل هندسی خود و وجود ناحیه‌ای به نام تیر پیوند قادر به جذب انرژی بیشتری نسبت به مهاربندهای همگرا است. با توجه به شکل (۲)، این سیستم می‌تواند انرژی حاصل از زلزله را از طریق تغییر شکل‌های ایجاد شده در ناحیه تیر پیوند خود جذب نماید.

شکل (۲): نحوه تغییر شکل و جذب انرژی در قاب مهاربندی و اگر

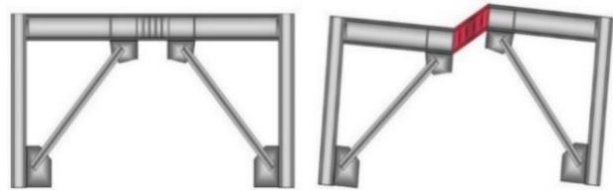


Fig. 2 . Deformation and energy absorption in EBF

بنابراین به منظور تأمین شکل‌پذیری مناسب در سیستم خرپای متناوب ناحیه‌ای به نام ناحیه ویژه در خرپاهای آن جایگذاری شده است. قرار دادن این ناحیه باعث افزایش شکل‌پذیری سازه شده و رفتاری مشابه سیستم مهاربندی و اگر حاصل می‌شود [5]. از مزایای این طرح پیشنهادی برای سیستم خرپای متناوب این است که می‌توان سازوکار خرابی سازه را در ناحیه ویژه کنترل نمود. درواقع برش در ناحیه ویژه از طریق خمش در یال‌ها انتقال می‌یابد. علاوه بر این، عملکرد سیستم همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، متکی بر تشکیل چهار مفصل پلاستیک در ناحیه ویژه و

۳- مدل سازی و درستی آزمایی مدل

فولاد مصرفی دارای مدول یانگ $2 \times 10^5 \frac{N}{mm^2}$ و ضریب پواسون برابر 0.3 است. همچنین تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد در این مطالعه به ترتیب برابر 235 و 375 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مدل اجزاء محدود این مدل آزمایشگاهی که در نرم افزار ABAQUS ساخته شده، در شکل (۵) نمایش داده شده است. در این مطالعه، بارگذاری چرخه‌ای مطابق شکل (۶) که در مرجع [17] استفاده شده است، برای درستی آزمایی مدل اجزاء محدود استفاده شده است.

شکل ۵. مدل اجزاء محدود نمونه آزمایشگاهی

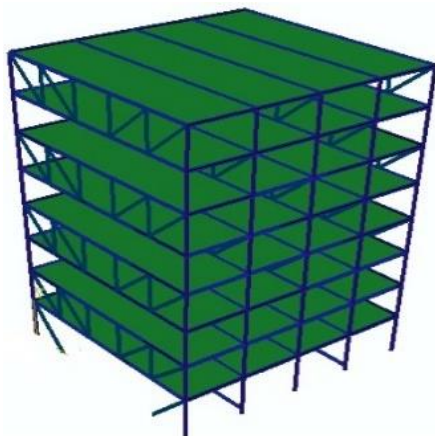


Fig. 5. The FE model of staggered truss system

شکل ۶. بارگذاری چرخه‌ای اعمالی به نمونه آزمایشگاهی [17]

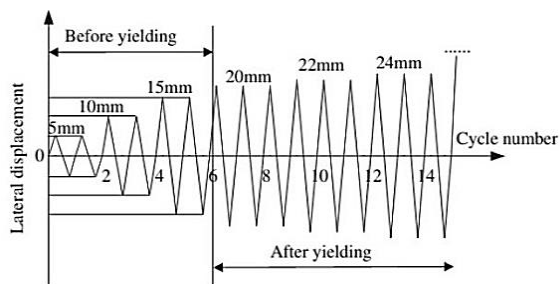


Fig. 6. The cyclic lateral loading history used in the test

نتایج مدل اجزاء محدود تحت این بارگذاری چرخه‌ای در نرم افزار ABAQUS به دست آمده و پوش حاصل از نمودار هیستریزس آن استخراج شده است. مقایسه نتایج نمونه اجزاء محدود با نمونه آزمایشگاهی و همچنین نمونه اجزاء محدود مطالعه شده به وسیله ژو و همکاران [17] در شکل (۷) نشان داده شده است.

به منظور دستیابی به اهداف تعیین شده در این پژوهش، مدل سازی سیستم خریای متناوب با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شده است. از این رو، برای مدل سازی از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. به منظور درستی آزمایی مدل اجزاء محدود، مدل آزمایشگاهی ارائه شده به وسیله ژو^۱ و همکاران [17] انتخاب شده است. نمونه آزمایشگاهی سیستم خریای متناوب در این مطالعه دارای ۸ طبقه بوده که با مقیاس ۱ به ۸ ساخته شده است. با توجه به شکل (۴)، مدل دارای ۵ قاب به فواصل ۰/۵ متر بوده و پلان آن دارای ابعاد $2 \times 1/875$ متر است. دهانه خریا، ارتفاع خریا و ارتفاع کل سازه به ترتیب برابر با $1/875$ ، $0/375$ و ۳ متر است [17]. کلیه اتصالات اعم از اتصالات خریا به ستون و اتصالات اعضای جان خریا و اتصالات پای ستون ها گیردار است. مشخصات مقاطع مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی در جدول (۱) نشان داده شده است.

شکل ۴. پلان نمونه آزمایشگاهی. (a) پلان. (b) قاب فرد. (c) قاب زوج. [17].

(ابعاد بر حسب میلی متر)

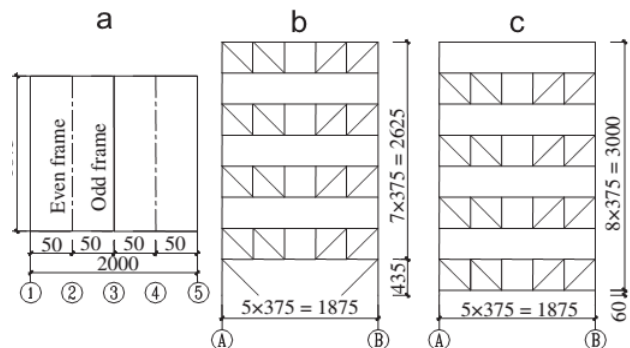


Fig. 4. Plan and elevation of the structural model. (a) plan layout, (b) odd frame, (c) even frame (mm)

جدول ۱. مشخصات مقاطع استفاده شده در نمونه آزمایشگاهی

Cross sections	Members
Box 60×60×3×3	Vertical
Box 40×40×3×3	Chords
Box 40×40×3×3	Longitudinal beam
Box 30×30×3×3	Web members
Plate 3mm	Slab

Table 1. members section used in the tested model

همچنین مقادیر تنش در اعضای سیستم خربای متناوب نمونه اجزاء محدود، در شکل (۸) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود بیشینه تنش ها در دو انتهای ناحیه ویژه به وجود آمده است.

شکل ۸ مقادیر تنش در اعضای سیستم خربای متناوب نمونه اجزاء محدود

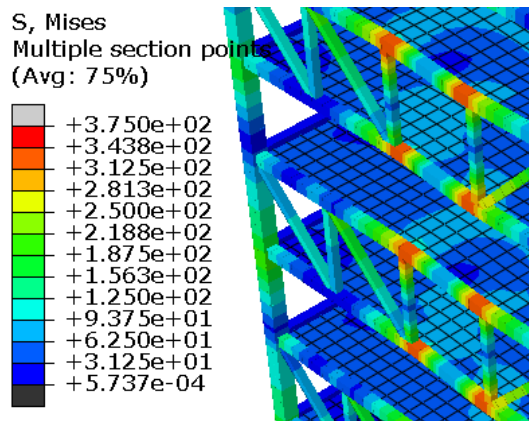


Fig. 8. Members stress values of Staggered truss system in finite element sample

۴- تأثیر طول ناحیه ویژه بر عملکرد لرزه ای سازه

در سیستم خربای متناوب، ناحیه ویژه مسئول تحمل تغییرشکل های غیرالاستیک در سازه بوده و جذب انرژی حاصل از بارهای جانبی، از طریق تشکیل مفاصل پلاستیک در این ناحیه صورت می پذیرد. علاوه بر این نقش مهم سازه ای، وظیفه دیگر ناحیه ویژه، تأمین راهرو و ایجاد سطح دسترسی بین قسمت های مختلف سازه است. از آنجایی که ممکن است نیازهای معماری، طراح سازه را مجبور به استفاده از نواحی ویژه با طول های بیشتر از حد معمول نماید، پس در این بخش، اثر طول ناحیه ویژه بر عملکرد لرزه ای سازه، بررسی می شود. بدین منظور، سیستم های خربای متناوب با طول های مختلف ناحیه ویژه که در شکل (۹) نشان داده شده اند، ارزیابی شده است.

مدل ها تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته و پوش حاصل از نمودار هیستریزس آن ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

شکل (۱۱) نیز، مقادیر تنش در اعضای سیستم خربای متناوب دارای طول های مختلف را زمانی که جابه جایی اعمالی به نمونه ها به میزان ۳۸ میلی متر رسیده است، نشان می دهد.

شکل ۷. مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود با نمونه آزمایشگاهی

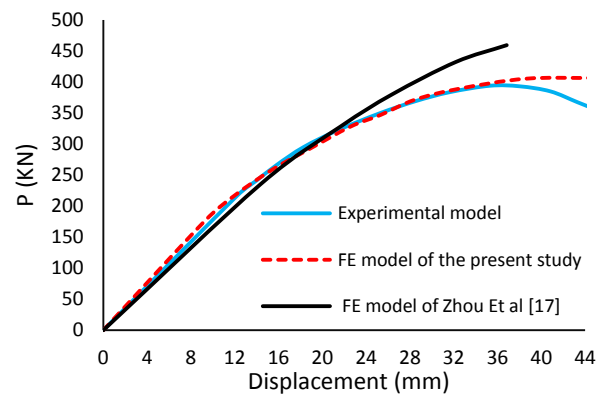


Fig. 7. Comparison of FE models results with experimental model

همان گونه که مشاهده می شود نتایج نمونه اجزاء محدود این پژوهش، هماهنگی قابل قبولی را با نمونه آزمایشگاهی [17] نشان می دهد. همچنین در این مدل به میزان زیادی نسبت به مدل اجزاء محدود ژو و همکاران [17] که در ناحیه غیرخطی نسبت به نمونه آزمایشگاهی دارای خطا است، رفتار غیرخطی بهبود یافته است.

به نظر می رسد علت بهبود رفتار غیرخطی مدل اجزاء محدود در این مطالعه نسبت به مدل ارائه شده در مرجع [17]، این است که در مدل اجزاء محدود ژو و همکاران [17]، به منظور اطمینان از این که تغییر مکان های اعمال شده به سازه از طرف جک هیدرولیکی استفاده شده در آزمایشگاه، دقیقاً در راستای محور عرضی سازه (محور y) بوده است، بنابراین کلیه درجات آزادی المان پوسسته سقف در تراز بام در مدل اجزاء محدود مقید شده و تنها درجه آزادی y آزاد بوده است. این در حالی است که باید در نرم افزار میان المان های تیر و المان سقف اندرکنش تعریف شود و به نوعی تغییر مکان ها به یکدیگر وابسته شوند. با توجه به این که یال های خربا و همچنین ناحیه ویژه با المان پوسسته اندرکنش خواهند داشت و همچنین در ناحیه ویژه تحت بار جانبی، امکان تغییر مکان یال ها در راستای ثقلی (راستای z) نیز وجود دارد، اگر سقف در این راستا دارای قید شود، یال خربا امکان تغییر مکان در راستای z را نداشته و تغییر شکل های یال خربا در این تراز دقیق مدل نشده و ظرفیت سازه به شکل صحیحی محاسبه نخواهد شد؛ بنابراین در مدل اجزاء محدود این پژوهش، این وضعیت اصلاح شده و تغییر مکان سقف تراز بام در راستای z آزاد است.

شکل (۱۱): مقادیر تنش در اعضای سیستم خرابی متناوب دارای طول‌های مختلف

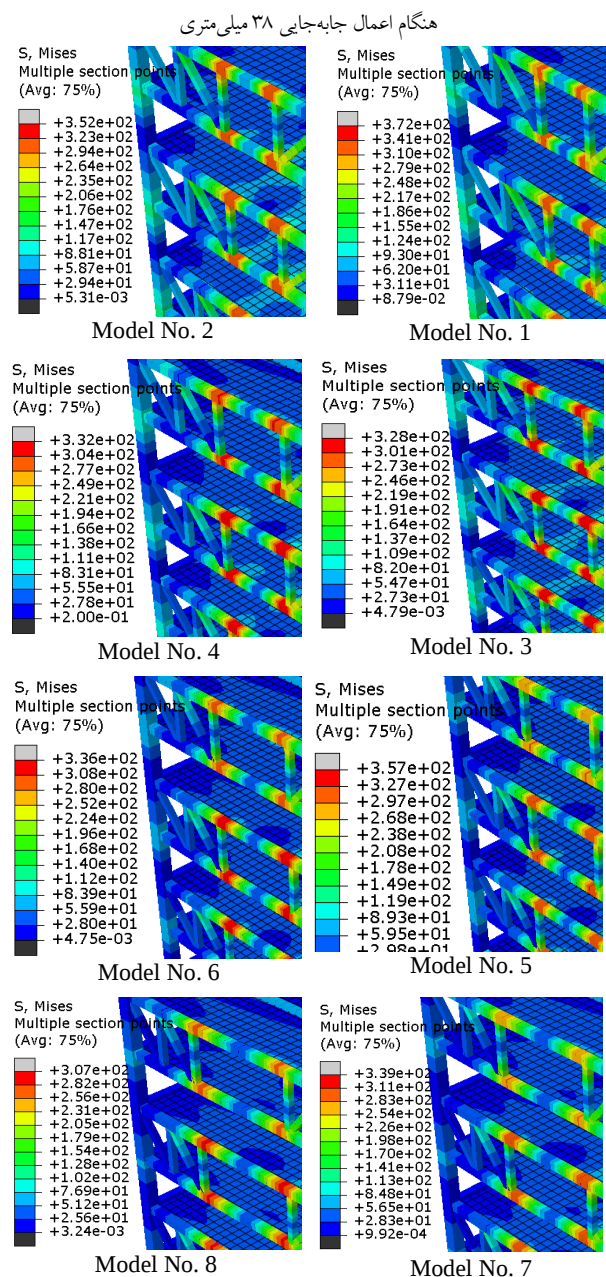


Fig. 11. Members stress values of Staggered truss system with different length when displacement reach to 38 mm.

جدول ۲. بیشینه مقاومت (P_{max}) و انرژی جذب شده به ازای طول نواحی ویژه مختلف

Model	Special segment length (mm)	P_{max} (KN)	drop in P_{max} (%)	Absorbed energy (KJ)	drop in absorbed energy (%)
1	375	404.4	----	12751	---
2	425	353	12.7	10935	14
3	475	303.8	24.8	9798	23
4	525	273.2	32.4	8574	33
5	575	261.4	35.3	6949	46
6	625	217.8	46.1	6566	48
7	675	208.7	48.3	6219	51
8	750	176.3	56.4	5013	60

Table 2. Maximum strength (P_{max}) and absorbed energy per different length of special segment

شکل (۹): مدل‌های دارای ناحیه ویژه با ابعاد متفاوت (ابعاد به میلی‌متر)

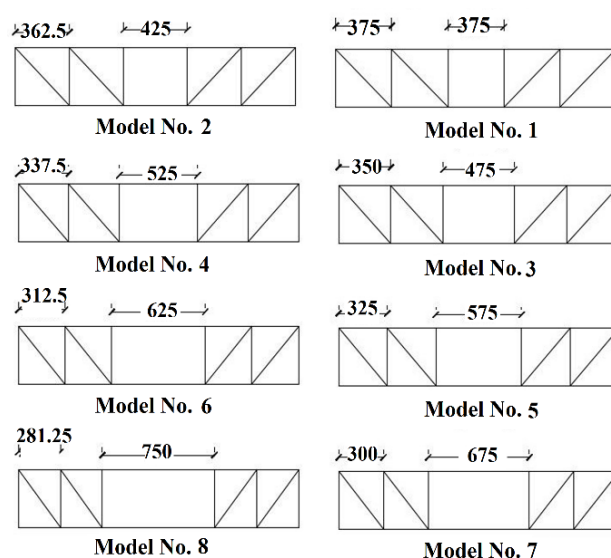


Fig. 9. Models with different dimensions of special segment (mm)

شکل ۱۰. پوش حاصل از نمودار هیستریزیس سیستم خرابی متناوب با طول‌های مختلف ناحیه ویژه

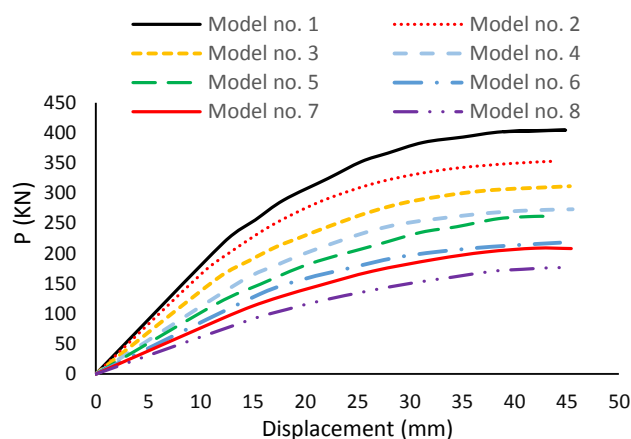


Fig. 10. Skeleton curves obtained from hysteretic curve of Staggered truss system with different dimensions of special segment

نتایج نشان می‌دهد در یک بارگذاری چرخه‌ای به میزان ۴۶ میلی‌متر، مدل‌های دارای طول ناحیه ویژه کوچک‌تر، سختی اولیه و مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهند.

بیشینه مقاومت (P_{max}) و انرژی جذب شده سیستم به ازای طول نواحی ویژه مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است.

در مدل شماره ۹ فقط یال خرپا و در مدل شماره ۱۰ تنها اعضای قائم مجاور ناحیه ویژه تقویت شده‌اند. همچنین در مدل شماره ۱۱ از طرح تقویت پیشنهاد شده توسط راهنمای شماره ۱۴ آیین‌نامه AISC [1] استفاده می‌شود. مطابق شکل (۱۲)، در طرح پیشنهادی آیین‌نامه، اعضای یال و اعضای قائم در ناحیه ویژه و همچنین پانل‌های مجاور ناحیه ویژه تقویت شده‌اند. برای بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه با الگوهای ارائه شده، سازه تحت بارگذاری چرخه‌ای شکل (۵) ارزیابی شده است. شکل (۱۳) مقادیر تنش در اعضای سیستم خرابی متناوب دارای الگوهای مختلف تقویت را زمانی که جابه‌جایی اعمالی به نمونه‌ها به میزان ۳۸ میلی‌متر رسیده است، نشان می‌دهد. نتایج پوش حاصل از نمودار هیستریزس سازه‌ها نیز در شکل (۱۴) نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات تقویت ناحیه ویژه در سیستم خرابی متناوب			
model	Special segment length (mm)	مقطع یال ناحیه ویژه	مقطع قائم مجاور ناحیه ویژه
8	750	Box 40×40×3	Box 30×30×3
9	750	Box 40×40×4	Box 30×30×3
10	750	Box 40×40×3	Box 30×30×4
11	750	Reinforcing according to AISC guide No. 14 proposed plan. used section: Box 40×40×4	

Table 3. Reinforcement specifications of special segment in staggered truss system

شکل ۱۲. طرح پیشنهادی راهنمای شماره ۱۴ آیین‌نامه AISC برای

تقویت ناحیه ویژه [1]

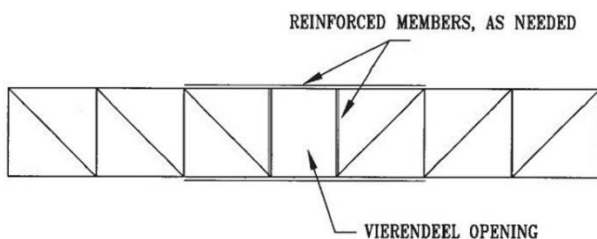


Fig. 12. AISC guide No. 14 proposed plan for reinforcing special segment

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در مدل شماره ۹، با تقویت یال‌های خرپا نسبت به مدل شماره ۸ که در آن تقویتی صورت نپذیرفته است، سختی اولیه و مقاومت افزایش یافته است. با این حال

همان‌گونه که در جدول (۲) نیز مشاهده می‌شود، افزایش طول ناحیه ویژه باعث کاهش P_{max} شده است. به عنوان نمونه با افزایش دو برابری طول ناحیه ویژه نسبت به مدل مرجع (مدل ۱)، P_{max} و میزان جذب انرژی سیستم به ترتیب به میزان ۵۶/۴ و ۶۰ درصد کاهش یافته است.

به طور کلی مدل‌های دارای طول ناحیه ویژه بزرگ‌تر، تحت نیروی کمتری وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند. علت این امر می‌تواند این باشد که هنگام استفاده از نواحی ویژه با طول بزرگ‌تر، بارهای ثقلی و جانبی که به ناحیه ویژه اعمال می‌شوند افزایش یافته و باعث می‌شوند که مفاصل پلاستیک زودتر از حالتی که از ناحیه ویژه با طول کمتر استفاده شده است تشکیل شود؛ بنابراین با توجه به این‌که هرچه طول ناحیه ویژه بزرگ‌تر باشد سازه سریع‌تر وارد ناحیه غیرخطی خواهد شد. همچنین سازه در زلزله‌های خفیف‌تر و تحت نیروی کمتری دچار تغییرشکل‌های پلاستیک شده و علاوه بر این‌که از کل ظرفیت سازه استفاده نخواهد شد، این ناحیه آسیب‌دیده نیز باید تعمیر شود که هزینه اضافی را به کارفرمایان تحمیل خواهد نمود. پس به منظور استفاده از بیشینه ظرفیت این سیستم باید حتی‌الامکان از نواحی با طول ناحیه ویژه کوچک‌تر استفاده نمود. با این حال باید الزامات معماری نیز در نظر گرفته شده و در صورت نیاز به ناحیه ویژه با طول زیاد، این ناحیه به‌طور مناسبی تقویت شود.

۵- تقویت ناحیه ویژه

همان‌گونه که در بخش قبل ذکر شد استفاده از ناحیه ویژه با طول بزرگ مطلوب نیست، اما گاهی الزامات معماری و نیاز به بازشوهای بزرگ طراح را مجبور به استفاده از نواحی ویژه بزرگ می‌نماید. یکی از روش‌های بهبود عملکرد سازه هنگام استفاده از نواحی ویژه با طول زیاد، تقویت این ناحیه است. بدین منظور، در این پژوهش الگوهای مختلف برای تقویت ناحیه ویژه و اثر آن بر عملکرد لرزه‌ای سازه، ارزیابی می‌شود. مدل بدون تقویت همان مدل شماره ۸ بوده که طول ناحیه ویژه آن ۷۵۰ میلی‌متر است. در این پژوهش، سه نوع الگوی تقویت ناحیه ویژه (مدل‌های شماره ۹، ۱۰ و ۱۱) ارائه شده است. مشخصات این الگوها در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۴. بیشینه مقاومت (P_{max}) و انرژی جذب شده سیستم به ازای

الگوهای مختلف تقویت ناحیه ویژه

Absorbed energy (KJ)	Increase in P_{max} (%)	P_{max} (KN)	Increase in Moment of inertia (%)	Type and location	Model
5013	----	176.3	---	---	8
5930	22.8	216.5	23.5	chord	9
5013	0.9	177.9	20.4	vertical	10
6500	25.4	221	23.5	AISC guide No. 14 proposed plan	11

Table 4. Maximum strength (P_{max}) and absorbed energy per different special segment reinforcement patterns

همان گونه که از جدول (۴) نیز مشاهده می‌شود، تا جابه‌جایی ۴۶ میلی‌متری اعمالی به مدل‌ها، با تقویت عضو قائم تغییری در P_{max} و میزان انرژی جذب شده حاصل نمی‌شود. علت این امر این است که همان‌طور که از سیستم خرابی متناوب انتظار می‌رود شکل‌پذیری سیستم از طریق تغییرشکل در یال خراب و ایجاد مفاصل پلاستیک در این نواحی تأمین می‌شود و اگرچه احتمال وقوع مفاصل پلاستیک در اعضای قائم نیز وجود دارد اما تقویت این اعضا با توجه به این‌که مسئول اصلی تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک سازه بر عهده اعضای یال بوده و مفصل پلاستیک در این اعضا تشکیل می‌شود، چندان تأثیری بر روی عملکرد لرزه‌ای سازه ندارد. مدل شماره ۱۱ که اعضای آن بر اساس طرح پیشنهادی آیین‌نامه تقویت شده‌اند، نسبت به مدل ۸، سختی اولیه و مقاومت بیشتری را نشان می‌دهد. با این حال مدل شماره ۱۱ نسبت به مدل شماره ۹ که در آن فقط اعضای یال تقویت شده بودند، تغییر اندکی را در رابطه با P_{max} و میزان جذب انرژی نشان می‌دهد، که بیانگر این است که تقویت پانل‌های کنار ناحیه ویژه بر سختی اولیه و مقاومت سازه تأثیر چندانی نداشته است. به‌عنوان نتیجه کلی تقویت اعضای قائم و پانل‌های کناری ناحیه ویژه تأثیری نامحسوسی بر ظرفیت سازه داشته و تنها تقویت یال ناحیه ویژه بر روی رفتار سازه تأثیر زیادی خواهد داشت و پیشنهاد آیین‌نامه برای تقویت پانل‌های کناری ناحیه ویژه فقط به دلیل مباحث اجرایی سازه از قبیل طول قطع تئوری و عملی مقاطع بوده است. با توجه به این‌که در

در مدل شماره ۱۰ که در آن فقط اعضای قائم مجاور ناحیه ویژه تقویت شده‌اند هیچ‌گونه تغییری نسبت به مدل شماره ۸ مشاهده نمی‌شود و این بدین مفهوم است که تقویت عضو قائم تأثیری بر عملکرد لرزه‌ای سازه و سختی و مقاومت اولیه آن نداشته است. همچنین بیشینه مقاومت (P_{max}) و انرژی جذب شده مدل‌ها با الگوهای مختلف تقویت ناحیه ویژه در جدول (۴) ارائه شده است.

شکل ۱۳. مقادیر تنش در اعضای سیستم خرابی متناوب دارای الگوهای

مختلف تقویت هنگام اعمال جابه‌جایی ۳۸ میلی‌متری

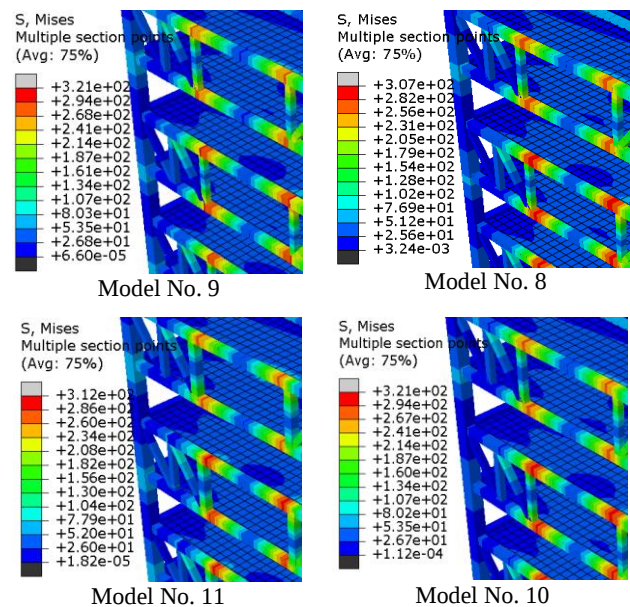


Fig. 13. Members stress values of Staggered truss system with different reinforcement patterns, when displacement reach to 38 mm

شکل ۱۴. پوش حاصل از نمودار هیستریزس نمونه‌های تقویت شده

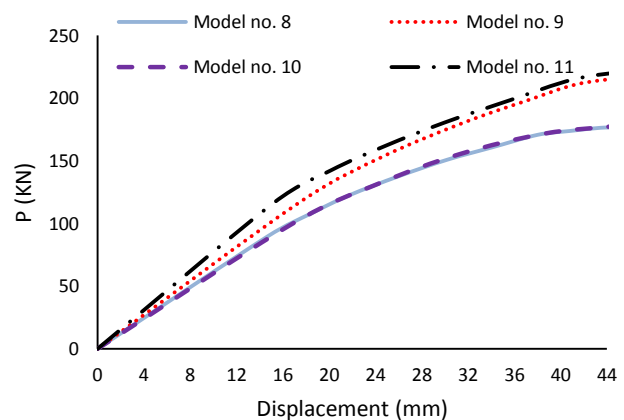


Fig. 14. Skeleton curves obtained from hysteretic curve of reinforced patterns

همان گونه که مشاهده می شود، می توان به جای تقویت کل یال ها، انتهای یال ها و محل تشکیل مفاصل پلاستیک را تقویت نمود و بدین طریق هم به عملکرد مطلوب دست یافت و هم میزان مصرف فولاد مورد نیاز برای تقویت یال را کاهش داد. نکته ای که ذکر آن ضروری به نظر می رسد این است که این نگرانی وجود دارد که اگر دو انتهای یال به مقدار زیادی تقویت شده و به حدی سخت شوند که مفاصل پلاستیک به جای آن که در دو انتها تشکیل شوند، بعد از نقاط تقویت شده ایجاد شود چه اتفاقی رخ خواهد داد؟ پاسخ این است که اولاً با توجه به این که لنگر خمشی در دو انتهای ناحیه ویژه بیشینه بوده و در وسط این ناحیه به مقدار صفر می رسد احتمال وقوع این امر اندک است. به عبارتی با نزدیک شدن به مرکز ناحیه ویژه، لنگر حاصل از نیروی زلزله کاهش می یابد و بنابراین در این نقاط مقاطع دیرتر به حد جاری شدن و تشکیل مفصل پلاستیک می رسند. از طرف دیگر به دلیل این که اعضای خارج از ناحیه ویژه طوری طراحی می شوند که در حالت الاستیک باقی بمانند در طرح تقویت مذکور و در صورت سخت کردن بیش از حد نقاط تقویت شده، مفاصل پلاستیک در خارج از این ناحیه رخ نخواهند داد و همان طور که بیان شد تنها احتمال وقوع آن در خارج از بخش تقویت شده مطابق شکل (۱۷) وجود دارد.

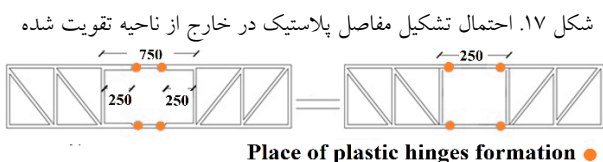


Fig . 17. Possibility of plastic hinges formation outside the reinforced area

با این حال حتی اگر این وضعیت رخ داده و مفصل پلاستیک به دلیل تقویت بیش از حد بخشی از یال، در خارج بخش تقویت شده تشکیل شود، چندان مشکلی رخ نخواهد داد؛ زیرا به عنوان نمونه اگر فرض شود در مدل ۱۲ اعضای یال به حدی تقویت شده که مفصل پلاستیک در نقاط مشخص شده در شکل (۱۵) رخ دهند، می توان گفت مدل تبدیل به خریای متناوبی با طول ناحیه ویژه کوچک تر شده است که همان طور که در بخش (۴) هم نتیجه گرفته شد باعث افزایش سختی و مقاومت اولیه

سیستم خریای متناوب انتظار می رود مفاصل پلاستیک در دو انتهای یال بالایی و پایینی خریا ایجاد شوند، پس این ایده که شاید بتوان به جای تقویت کل یال ها، فقط نقاطی خاص از یال ها یعنی محل تشکیل مفاصل پلاستیک را تقویت نموده و در فولاد مصرفی برای تقویت سازه صرفه جویی نمود، به ذهن خطور می نماید. پس طرح تقویت دیگری که در شکل (۱۵) نیز نشان داده است پیشنهاد می شود. در این طرح تقویت، تنها بخشی از یال های خریا تقویت شده است.

شکل ۱۵. الگوی تقویت ارائه شده برای تقویت بخشی از یال ها

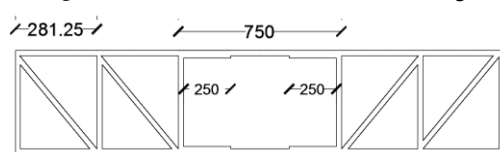


Fig. 15. The reinforcement pattern provided to reinforcement part of the chords

جدول (۵)، جزئیات تقویت مدل شماره ۱۲ را نشان می دهد.

شکل (۱۶) پوش حاصل از نمودار هیستریزس نمونه تقویت شده مطابق جدول (۵) را نشان می دهد.

جدول (۵): نحوه و محل تقویت مقاطع اعضای مدل شماره ۱۲

Reinforcement location	chord section	Special segment length (mm)	Model
one third of the chord length From the two ends	Box 40×40×4	750	12

Table 5. sections reinforcement type and position in model No.12

شکل ۱۶. پوش حاصل از نمودار هیستریزس مدل های ۱۱ و ۱۲

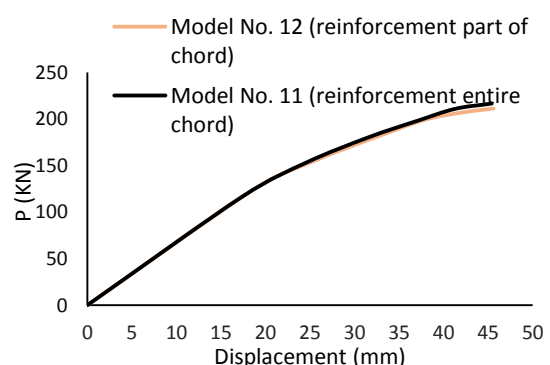


Fig. 16. Skeleton curves obtained from hysteretic curve of Model No. 11 and Model No. 12

Research Report No. UMCEE 94-29, The University of Michigan, Department of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, MI, 1994.

[5] H. D. Ölmez, C. Topkaya, "A numerical study on special truss moment frames with Vierendeel openings," J. Const. St. Research, vol. 67, no. 4, pp. 667-677, 2011.

[6] S. H. Chao, S. C. Goel, "Performance-based plastic design of seismic resistant special frames," Research report No. UMCEE 06-03. Ann Arbor MI: Department of Civil & Environmental Engineering, University of Michigan, 2006.

[7] S. H. Chao, S. C. Goel, "Performance-based seismic design of special truss moment frames (STMFs)," Presentation at 4ICEE, Taipei, Taiwan, 2006.

[8] G. Pekcan, A. M. Itani, C. Linke, "Damage avoidance design of special truss moment frames with energy dissipating devices," J. Const. Steel. Research, vol. 65, no. 6, pp. 1374-1384, 2009.

[9] G. Pekcan, A. M. Itani, C. Linke, "Enhancing seismic resilience using truss girder frame systems with supplemental devices," J. Const. Steel. Research, vol. 94, pp. 23-32, 2014.

[10] A. Heidari, S. Gharehbaghi, "Seismic performance improvement of special truss moment frames using damage and energy concept," Earthq. Eng. Struct. Dyn, Vol. 44, no. 7, pp. 1055-1073, 2014.

[11] S. Simasathien, S. H. Chao, K. Moore, and T. Okazaki, "Modified structural layouts for staggered truss framing systems used in seismically active areas," Conf. Earthquake. Eng, 2014.

[12] J. Kim, L. Joonho, H. Kang, "Inelastic behavior of staggered truss systems," Wiley. Intersc, Struct, vol. 6, no. 1, pp. 85-105, 2007.

[13] J. Kim, L. Joonho, Y.M. Kim, "Seismic retrofit of special truss moment frames using viscous dampers," J. Const. Steel. Research, vol. 123, pp. 53-67, 2016.

[14] C. Chang, W. Zhang, "Comparative experimental investigation on steel staggered-truss constructed with different joints in fire," Thin. Struct, vol. 49, no. 11, pp. 1442-1451, 2011.

[15] H. Saffari, V. Vahdatizadeh, "Investigation of ductility and behavior factor of staggered truss system" The fourth meeting on the design of buildings against earthquake (Standard 2800), Building and Housing Research Center, 2009. (In Persian)

[16] S. J. Jordan, S. Elfass, and G. Pekcan, "Seismic response investigation of special truss moment frame subassemblies under quasi-static loading," Earthq. Eng. Symposium. Young Researchers. Seattle, Washington, 2007.

[17] X. H. Zhou, Y. J. He, L. Xu, Q. S. Zhou, "Experimental study and numerical analyses on seismic behaviors of staggered-truss system under low cyclic loading," Thin. Struct, vol. 47, no. 11, pp. 1343-1353, 2009

خواهد شد؛ بنابراین به‌طور کلی تقویت یال باعث افزایش سختی و مقاومت سازه خواهد شد. با این‌حال این نکته را نیز باید مدنظر قرار داد که تقویت اعضای ناحیه ویژه به صورتی نباشد که عملکرد فیوز مانند ناحیه ویژه دچار اختلال شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش چگونگی تقویت اعضا و همچنین طول ناحیه ویژه سیستم خرابای متناوب و تأثیر آن‌ها بر عملکرد لرزه‌ای سازه بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نواحی ویژه با طول‌های بیش از حد معمول برای افزایش سطح دسترسی و فضاهای معماری سازه باعث کاهش عملکرد مطلوب سازه می‌شود به‌طوری‌که با افزایش طول ناحیه ویژه سازه تحت نیروی کمتری وارد ناحیه غیرخطی شده و از کل ظرفیت سازه استفاده نخواهد شد. با این‌حال در برخی از موارد که نیاز به افزایش طول ناحیه ویژه است که می‌توان این ناحیه را به‌طور مناسبی تقویت نمود. نتایج نشان می‌دهند تنها تقویت اعضای یال خرابا در افزایش سختی اولیه و مقاومت سازه تأثیرگذار بوده و طرح‌های تقویتی همچون تقویت اعضای قائم و یا طرح تقویت پیشنهادی راهنمای شماره ۱۴ آیین‌نامه AISC در عملکرد لرزه‌ای سیستم تأثیر زیادی ندارند. با این‌حال می‌توان به منظور کاهش مصرف فولاد موردنیاز برای تقویت یال خرابا، تنها دو انتهای یال خرابا را که در آن‌ها مفاصل پلاستیک تشکیل می‌شود تقویت نموده و به همان عملکرد مطلوب به دست آمده هنگام تقویت کلی یال دست‌یافت. با این‌حال شایان توجه است که تقویت ناحیه ویژه نباید به‌گونه‌ای انجام پذیرد که عملکرد فیوز مانند ناحیه ویژه زیر سؤال رفته و وضعیتی مشابه تیر قوی - ستون ضعیف در سازه به وجود آید.

References

۷- مراجع

- [1] AISC, "Steel design guide 14: staggered truss framing system," American Institute of Steel Construction, Chicago, USA, 2003.
- [2] J. Kim, J. Lee, B. Kim, "Seismic retrofit schemes for staggered truss structures," Eng. Struct, vol. 102, pp. 93-107, 2015.
- [3] S. C. Goel, and A. M. Itani, "Seismic-resistant special truss moment frames," J. Eng. ASCE, vol. 120, no. 6, pp. 1781-1797, 1994.
- [4] H. S. Basha, S. C. Goel, "Seismic resistant truss moment frames with ductile vierendeel segment",

Effect of special segment length and its strengthening pattern on seismic performance of staggered-truss system

Alireza. Chaman Motlagh¹, Hamidreza. Naseri², Mohsen. Khatibinia^{3*}

1- M.Sc. of Structural Engineering, Department of Civil Eng., Faculty of Engineering, University of Birjand

2- Assistant Prof., Department of Civil Eng., Faculty of Engineering, University of Birjand

3- Associate Prof., Department of Civil Eng., Faculty of Engineering, University of Birjand

* m.khatibinia@birjand.ac.ir

Abstract:

The staggered-truss system has been proposed as a lateral load resisting system in the structural steel framing for high-rise buildings, which was developed in Massachusetts Institute of Technology in 1960s. The system consists of a series of storey-high trusses spanning the total width between two rows of exterior columns and arranged in a staggered pattern on adjacent column lines. the system has the columns only on the exterior walls of the building, the usual interior columns are omitted. Thus, the staggered-truss system can provide a full width of column-free area. In the system, the role of energy absorption and endurance of inelastic deformations is responsible for the special segment of truss, so that the ductility of structure is provided by the development of plastic hinges in this region. Although, in the special segment of truss an opening near the center of span must be provided to permit a width and height of sufficient proportions which is used as a corridor. Hence, the effects of this opening must be investigated in the performance of this system.

In this study, the effects of the special segment length and its strengthening pattern on the seismic performance of staggered-truss system are investigated. In order to achieve this purpose, an 8-storey steel staggered-truss system with a 1/8-scaled studied in work of Zhou et al. [14] is selected and considered subjected to the low cyclic loading. First, the finite element (FE) model of this structure, in which both the material and geometric nonlinearity, is provided in ABAQUS software, and the validation of the model is controlled by experimental and numerical study and of Zhou et al. [14]. The results of modeling this structure show that the FE model of this structure has appropriately accuracy. Then, the seismic performance of the system is evaluated by considering the various lengths of the special segment and the proposed strengthening patterns in the special segment. The results of the evaluation show that the use of special segments with great length make the entire structural capacity is not fully utilized. Hence, when the large opening is required the regions must be properly strengthened.

In this study, different patterns of the special segment, including strengthening of chords, strengthening of vertical members of the special segment and the strengthening pattern proposed by the Manual Number 14 of AISC code are investigated. Since the plastic hinges are usually formed at the chords of the truss, the strengthening of chords has the greatest effect on increasing the initial stiffness and strength of structure. Instead of the strengthening of the total length of the chord, a part of both ends of the special segment is also strengthened, so that its performance is as same as that of the strengthening of the total chord. It is noted that the strengthening of the special segment is one of the ways to increase the initial stiffness and resistance structure, but this strengthening must not omit the performance of the fuse in the truss system, and the conditions of strong beam and weak column are provided. Based on the FE analytical results, the suggestions of this study can be considered for the design of staggered-truss system.

Keywords: Staggered-Truss system, Length of special segment, Strengthening, Plastic hinges.