



## آنالیز عددی رفتار لرزه ای سیستم خرپای متناوب

\*مجید یعقوبی<sup>۱</sup>، مصطفی رزاز<sup>۲</sup>، حسن حاجی کاظمی<sup>۳</sup>

### چکیده

استفاده از سیستم خرپای متناوب فولادی (Steel staggered-truss system) در سازه های فولادی در چند دهه اخیر مطرح شده است. به دلیل ویژگی های منحصر به فرد و تنوع مدل ها و پارامترهای موثر بر رفتار این سیستم سازه ای، نیاز به استفاده از روش های عددی احساس می شود. از اینرو، در این مقاله با بهره جویی از تحلیل استاتیکی غیر خطی بارافزون توسط نرم افزار Abaqus، به بررسی تأثیر نوع خرپا در رفتار لرزه ای سیستم خرپای متناوب پرداخته شده است. برای این کار چندین نوع خرپا برای قرارگیری در سیستم خرپای متناوب ارائه شده است. ابتدا جهت اعتبار سنجی مدل اجزای محدود از یک نمونه آزمایشگاهی انجام شده در پژوهش های قبلی استفاده می شود. سپس به منظور بررسی کارایی هر نوع از خرپاهای پیشنهاد شده، سازه ی ۱۲ طبقه طرح و تحلیل می گردند. سپس، منحنی پوش آور و تغییر مکان نسبی طبقات برای هر حالت بدست می آید.

### کلمات کلیدی

سیستم خرپای متناوب فولادی، رفتار لرزه ای، آنالیز بارافزون، تغییر مکان طبقات، منحنی پوش آور.

\*۱. دانشجوی دکتری سازه دانشگاه فردوسی مشهد - [majidyaghoobi@yahoo.com](mailto:majidyaghoobi@yahoo.com)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه فردوسی مشهد - [mostafarazzaz@gmail.com](mailto:mostafarazzaz@gmail.com)

۳. استاد دانشگاه فردوسی مشهد - [hkazemi@um.ac.ir](mailto:hkazemi@um.ac.ir)

خرپا در رفتار لرزه ای سیستم خرپای متناوب پرداخته می شود. برای این هدف رفتار چندین نوع خرپا ارزیابی می گردد.

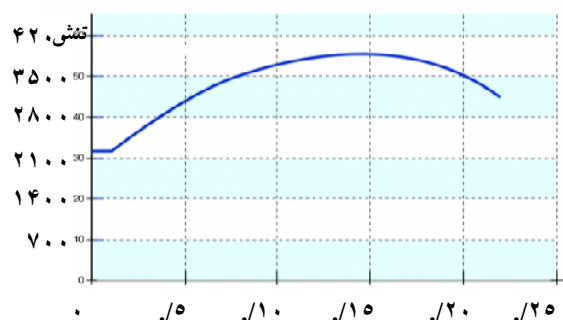
ظهور سیستم های خرپای متناوب، مربوط به دهه ی ۱۹۶۰ می باشد [۱]. شکل ۱ هندسه سیستم خرپای متناوب را نشان می دهد. در این سیستم ستون ها تنها در دیوارهای بیرونی جای گرفته اند و ستون های میانی معمول حذف شده اند. اخیراً این سیستم در بسیاری ساختمان ها به عنوان سیستم سازه ای اصلی به کار رفته است و کارایی و صرفه ی اقتصادی آن گزارش شده است [۲, ۳, ۴].

## ۲ - تحلیل استاتیکی غیر خطی

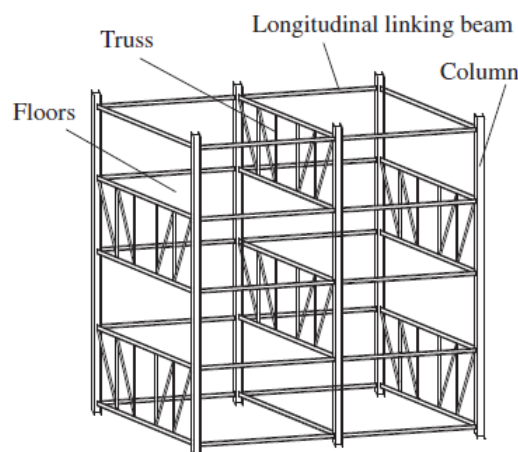
با توسعه مفاهیم طراحی لرزه ای، ابزار محاسباتی نیز توسعه یافته است. در این میان، روشهای تحلیل استاتیکی غیرخطی با توجه به سادگی، سرعت انجام و سادگی تفسیر نتایج، در مقایسه با روشهای تحلیل دینامیکی غیرخطی به سرعت مورد اقبال مهندسان واقع شده اند.

در چند سال اخیر روش تحلیل استاتیکی غیرخطی که عمدتاً از آن با لفظ Pushover یاد می شود، در تعیین نیاز لرزه ای سازه ها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. اساس کلی این روش بدین صورت است که یک مدل ریاضی غیرخطی از سازه تحت یک الگوی بار جانبی قرار گرفته و این بار جانبی با آهنگ ثابتی افزایش پیدا می کند. در طول فرایند افزایش صعودی بار جانبی، مقاومت و سختی اجزاء سازه در هر گام با توجه به منحنی رفتاری غیرخطی که از پیش برای آنها تعریف شده اصلاح می شود. اصلی ترین محصول این فرایند، منحنی تغییرات برش پایه در مقابل تغییر مکان بام می باشد، که به آن منحنی ظرفیت سازه گفته می شود که هر نقطه روی این منحنی بیان کننده یک حالت خسارت خاص برای سازه است [۶].

برای تعریف خصوصیات رفتار غیرخطی فولاد از منحنی های تنش - کرنش فولاد استفاده شده است که شکل آن در زیر آمده است.



شکل ۲. منحنی تنش - کرنش فولاد

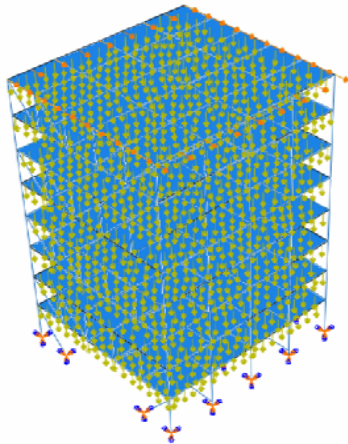


شکل ۱. سیستم خرپای متناوب

سیستم های خرپای متناوب برای سازه های با ارتفاع متوسط که فاصله ی کف تا کف معمولی دارند، مانند هتل ها، بیمارستان ها، آپارتمان ها و مانند این ها، مناسب اند. از آنجا که ستونهای این سیستم در محیط بیرونی قرار می گیرند، می توان در طرح سازه فضای باز بزرگ بدون ستون داشت. سیستم خرپای متناوب اقتصادی بوده و به سادگی قابل نصب و اجراست و در نتیجه ارزان تر از سایر سیستم های قابی تمام می شود. یک مزیت دیگر آن کارایی بالا جهت مقاومت در برابر بارهای جانبی ناشی از باد و زلزله می باشد. سختی سیستم، کنترل دررفت مطلوبی را برای بارهای باد و زلزله ایجاد می کند. افزون بر این، این سیستم ظرفیت جذب انرژی و شکل پذیری مناسبی تحت بارهای لرزه ای فراهم می نماید [۵].

در این مقاله با بهره جویی از تحلیل استاتیکی غیر خطی بارافزون توسط نرم افزار Abaqus، به بررسی تأثیر نوع

جهت مدل سازی تیر ها و ستون ها از جزء B31 استفاده شده است، که یک جزء تیری دو گرهی با ۶ درجه آزادی در هر گره می باشد. همچنین برای مدل سازی سقف از المان های هشت گرهی C3D8R استفاده شده است.

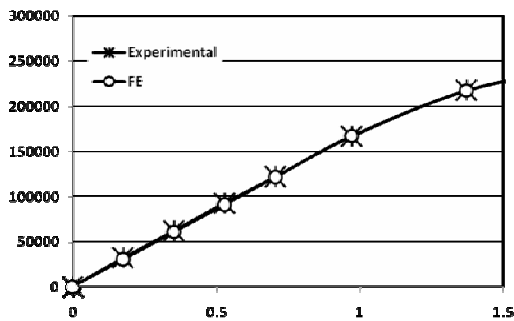


شکل ۴- سازه مدل سازی شده در نرم افزار Abaqus

### ۳- بررسی صحت مدل سازی

در این بخش پاسخ مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود. برای این کار از نتایج آزمایش رفتار لرزه ای سیستم خریای متناوب هشت طبقه فولادی با مدل مقیاس ۱/۸ که در آزمایشگاه انجام گرفته است بهره جویی می گردد [۷].

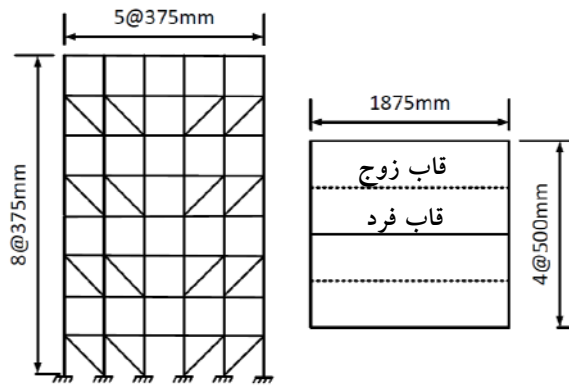
مدل آزمایشگاهی از یک سازه ی ۸ طبقه با مقیاس ۱/۸ و ابعاد پلان ۱۸۷۵×۲ متر به همراه پنج قاب انتقالی با فاصله ۰.۵ متر تشکیل شده است. ارتفاع مدل، ارتفاع طبقه و دهانه ی خریا به ترتیب برابر با ۳، ۰.۳۷۵ و ۱.۸۷۵ متر می باشند (شکل ۳). جزئیات مدل در جدول (۱) آمده است. منحنی بار- جابه جایی مدل های آزمایشگاهی و اجزای محدود در حالت بارگذاری یکنواخت در شکل (۵) ترسیم شده است. شکل (۵) مطابقت پاسخ اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۵. منحنی بار-تغییر مکان

### ۴- آنالیز عددی

در مدل آزمایشگاهی مقاطع اعضا قدری بزرگتر انتخاب شده بود که در نتیجه سختی بزرگتر و ضریب شکل پذیری کوچکتر را به دنبال داشت. از این رو مقاطع مدل FEM در آنالیز عددی به طور معقول طراحی می شوند. طراحی با استفاده از نرم افزار SAP2000 انجام می گیرد. ۷ مدل FEM تمام مقیاس با ابعاد پلان ۲۴×۱۶.۸ متر در نظر گرفته می شود. هندسه ی مدل از ترکیب پنج قاب موازی با فاصله های ۶ متر از هم تشکیل شده است. این قاب های صفحه ای دارای خریاهای متناوب در راستای قائم با دهانه ۱۶.۸ متر می باشند. نوع خریا در این سازه ها تغییر می کند و بدین صورت تأثیر هر یک از این خریاها بر روی رفتار سیستم ارزیابی می شود. شکل (۶) هندسه ی مدل ۱ را نشان می دهد. در ۶ مدل دیگر هندسه سازه مشابه مدل ۱ است و تنها در نوع خریای بکار رفته تفاوت

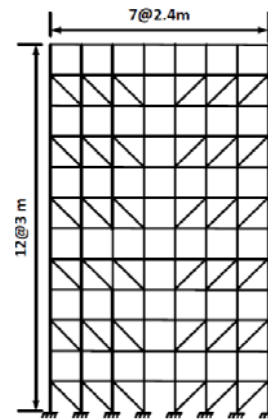


شکل ۳. پلان و نمای مدل آزمایشگاهی

جدول ۱. مقاطع بکار رفته در مدل آزمایشگاهی

Members	Cross section
Vertical	□150×150×6×6
Chord	□150×150×6×6
Web member	□150×150×6×6
Longitudinal beam	□150×150×6×6
Longitudinal junior beam	L25×25×3

دارند. ۷ نوع خرپای بکار رفته در آنالیز عددی در شکل (۷) می آیند.



شکل ۶. هندسه قاب های فرد در مدل ۱

جدول ۲. مقاطع بکار رفته در مدل تحلیلی

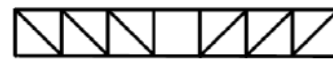
Member	Cross section
column	HP14×89
chord	W10×89
Web member	□150×150×6×6
Longitudinal beam	W8×15

## ۵ - نتایج عددی و تحلیل رفتار

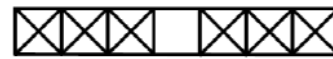
### ۵ - ۱ - منحنی های پوش آور

مدل های پیشنهادی در نرم افزار Abaqus مدل سازی شده و نمودارهای بار- تغییر مکان برای هر نمونه رسم شده اند. شکل (۸) منحنی های پوش آور مدل های تحلیل شده را نشان می دهد. در این نمودار مدل ۲ سختی اولیه بیشتری را نسبت به سایر مدل ها داراست. همچنین مدل های ۲، ۳ و ۶ سختی ثانویه ی بیشتری را نسبت به مدل های دیگر نشان می دهند. از سوی دیگر، مدل ۳ بیشترین مقاومت نهایی را دارا می باشد. در مدل های ۴، ۵ و ۷ به علت کماتس ستون های طبقه اول سازه قادر نخواهد بود تا از تمام ظرفیت خود استفاده نماید. از اینرو، در این مدل ها سازه تغییرشکل های بزرگی را نشان می دهد.

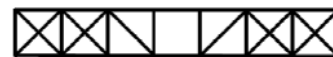
شکل (۹) نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل های بررسی شده را نشان می دهد. همانطور که در این شکل پیداست با سخت تر کردن دهانه های اطراف ناحیه بازشو در خرپاها، مفاصل پلاستیک به سرعت در تیرهای این ناحیه تشکیل می شوند (همانند مدل های ۲، ۴ و ۵).



مدل ۱



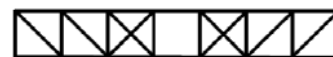
مدل ۲



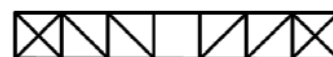
مدل ۳



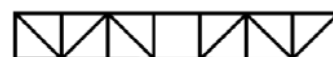
مدل ۴



مدل ۵

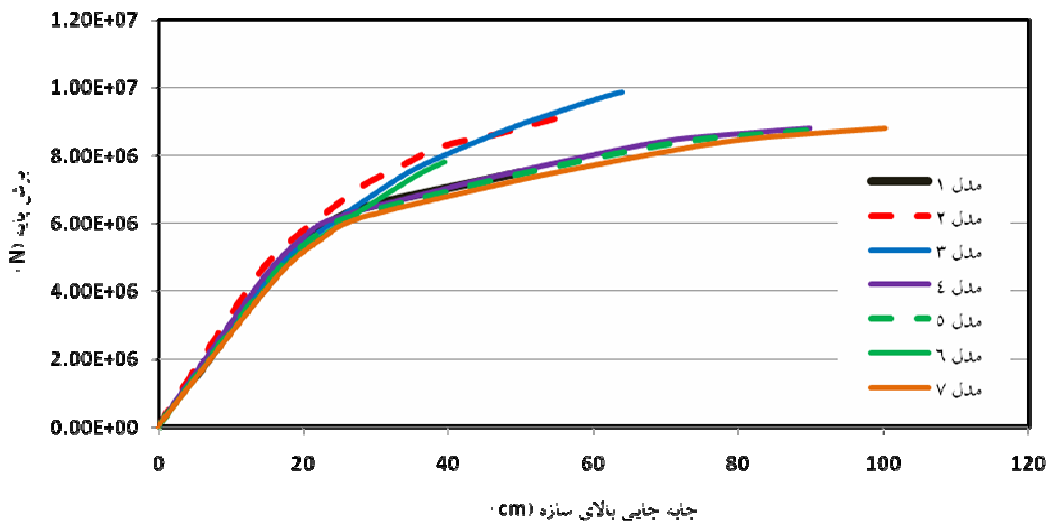


مدل ۶

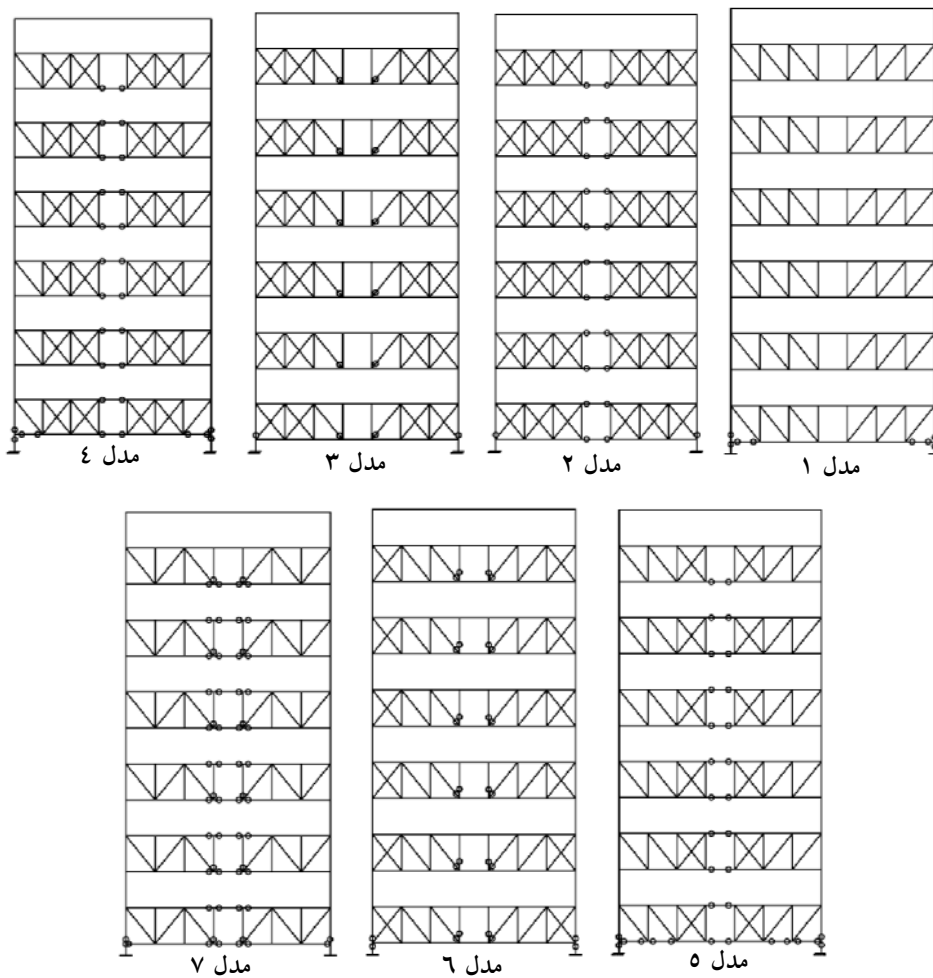


مدل ۷

شکل ۷. هندسه هفت مدل خرپای بررسی شده



شکل ۸. منحنی بار- تغییر مکان مدل های تحلیلی



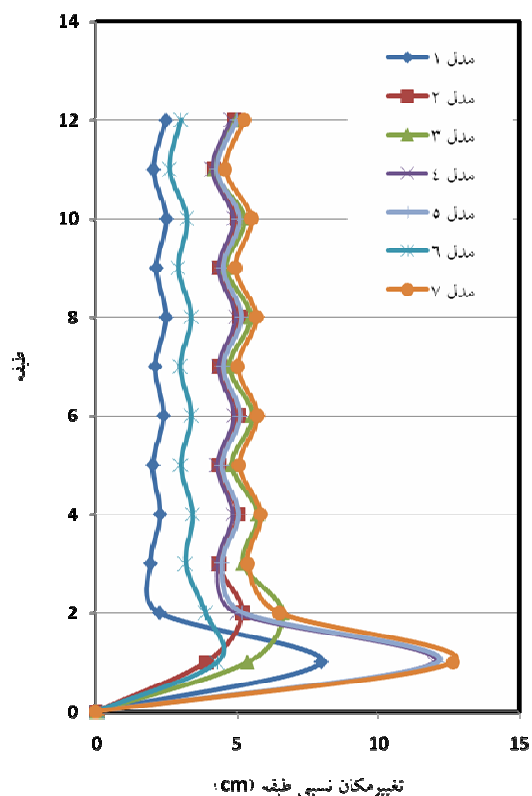
شکل ۹. محل های تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل های تحلیلی

مدل های ۲، ۴ و ۵ دیده شد سخت کردن نواحی اطراف دهانه میانی (بازشو) منجر به پیدایش زود هنگام مقاصل پلاستیک در تیرهای ناحیه میانی می شود. در نتیجه سازه از تمام ظرفیت خود استفاده نخواهد کرد.

با کمی دور کردن موقعیت این دهانه های ضربدری رفتار بسیار بهبود می یابد. این بهبود رفتار در مدل های ۳ و ۶ دیده می شود.

### ۵-۲- تغییر مکان نسبی طبقات

شکل (۱۰) نمودار تغییر مکان نسبی طبقات را نشان می دهد. در مدل های ۱، ۴، ۵ و ۷ به دلیل کمناش ستون های طبقه اول، تغییر مکان این طبقه بزرگ است.



شکل ۱۰. تغییر مکان نسبی طبقات

### ۶- نتیجه گیری

بر پایه ی مطالعات انجام گرفته با توزیع مناسب سختی در شکل هندسی خرپا می توان رفتار سازه های خرپای متناوب را بهبود بخشید. تحقیقات نشان می دهد که سخت کردن دهانه های کناری و دور از دهانه میانی عملکرد بهتر سازه را موجب می گردد. این کار مانع از کمناش ستون های طبقه های پایینی می شود. همچنین همانطور که در

### مراجع

- [1] High-rise housing in steel—the staggered truss system. Research Report (R67-7 Civil Engineering), Department of Architecture and Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1967.
- [2] A. Brazil, Staggered truss system proves economical for hotels. Modern Steel Construction, American Institute of Steel Construction: Chicago, September 2000.
- [3] R.J. Mcknamara, Aladdin Hotel. Modern Steel Construction, American Institute of Steel Construction: May 1999.
- [4] BS. Pollak, M. Gustafson, Complex apartments. Modern Steel Construction, American Institute of Steel Construction: Chicago, Fall 2004.
- [5] N. Wexler, FB. Lin, Steel design guide series 14: staggered truss framing Systems AISC; 2003.
- [6] F. Naeim, The seismic design hand book, chapter 15, Performance Based Seismic Engineering, Van Nostrand, 2000.
- [7] X. Zhou, Y. He, L. Xu, Q. Zhou, “Experimental study and numerical analyses on seismic behaviors of staggered-truss system under low cyclic loading”, Thin-Walled Structures 47 (2009), pp. 1343–1353