

## Seismic Behavior of buckling-restrained Braced Steel Frames (BRBF) with Reduced Beam Section (RBS) Connections

Mehdi Kouhdaragh

Department of Civil Engineering, Malekan Branch, Islamic Azad university, Malekan, Iran

Behnam Abdollah Nezhad

Department of Civil Engineering, Azarshahr branch, Islamic Azad university, Azarshahr, Iran

mehdi\_k550@yahoo.com

DOI: 10.30495/CIVIL.2022.698349

### Keywords:

Cyclic behavior,  
Steel frame,  
Buckling restrained  
Brace,  
Reduced beam section

### Abstract

In areas with high seismicity, structures need a resistant and load-bearing system against lateral forces caused by earthquakes. In addition to high stiffness and resistance to displacement caused by earthquakes, these systems must have good ductility and energy dissipation ability. Therefore, apply of the buckling-resistant braces (BRB) with reduced beam section (RBS) connections is recommended instead of the previous conventional braces. In this research, the cyclic behavior of the recommended system is investigated. The finite element method and ABAQUS software have been utilized for modeling and study of the numerical models. The investigated parameters include stress contour, cyclic response (force-displacement), stress in column, and beam. The results of numerical models indicate that by creating RBS with a length of  $0.85d$  to a shear radius of  $0.25bf$  compared to the  $0.2bf$  mode, the amount of stress in the beam increases by about 24%.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی با مهاربند مقاوم در برابر کماتش با اتصالات RBS

مهدی کوهدرق\*

استادیار گروه عمران، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان، ایران

بهنام عبدالله نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

mehdi\_k550@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۲۹ آذر ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۱۰ مهر ۱۴۰۱

### چکیده

در مناطق با لرزه خیزی بالا سازه‌ها نیازمند یک سیستم مقاوم و برابر در برابر نیروهای جانبی ناشی از زلزله می‌باشند. این سیستم‌ها علاوه بر سختی و مقاومت بالا در برابر جابجایی ناشی از زلزله، باید از شکل‌پذیری و توانایی استهلاک انرژی مناسبی برخوردار باشند. از این رو استفاده از بادبندهای بسیار مقاوم در برابر کماتش BRB و تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) به جای بادبندهای رایج، پیشنهاد می‌گردد. در این مقاله به بررسی رفتار سیستم به صورت چرخه‌ای پرداخته شده است. بنابراین جهت مدل‌سازی و بررسی مدل‌های عددی از روش المان محدود و نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. پارامترهای کانتور تنش، پاسخ چرخه‌ای (نیرو-جابجایی)، تنش در ستون و تیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل‌های عددی نشان می‌دهند با ایجاد RBS به طول  $0.85d$  به شعاع برش  $0.25bf$  نسبت به حالت  $0.2bf$  مقدار تنش در تیر در حدود  $24\%$  افزایش می‌یابد.

کلید واژگان: رفتار چرخه‌ای، قاب فولادی، مهاربند مقاوم، کماتش ناپذیر، مقطع کاهش یافته

## ۱- مقدمه

شناخت دقیق نیازهای یک سازه برای مقابله با نیروهای رفت و برگشتی (سیکلی) زلزله و تامین این نیازها در مرحله طراحی، موجبات افزایش ایمنی در سازه را فراهم می‌آورد. مقاومت، سختی و شکل پذیری، سه نیاز اصلی هر سازه قلمداد می‌شود و در این میان؛ شکل-پذیری موضوعی است که به گونه ای دارای محوریت بوده؛ از مبانی اساسی طراحی در بسیاری از آیین‌نامه‌های پیشرفته دنیا محسوب می-گردد [۱]. قاب فولادی با مهاربند ضربدری همگرا یا همان مهاربند ضربدری معمولی است. علی‌رغم اینکه از رایج‌ترین و محبوب‌ترین سیستم‌های سازه‌ای موجود در کشور می‌باشد، ولی در مناطق با لرزه خیزی بالا، به دلیل کماتش پذیری، پیشنهاد مناسبی نیست. چه، با وجود جذب انرژی خوب و طبعاً شکل پذیری مناسب برای قاب و نیز مقاومت و سختی نسبتاً مناسب برای مهاربند ضربدری همگرا؛ عملاً به علت کماتش مهاربند در اثر نیروهای فشاری، قدرت جذب انرژی و متعاقباً شکل پذیری در محدوده غیر ارتجاعی سیستم، به شدت تضعیف می‌گردد. نوع جدیدی از سیستم‌های مهاربندی همگرا تحت نام مهاربند کماتش ناپذیر یا مهاربند مقاوم در برابر کماتش است که با توجه به ممانعت از کماتش در مهاربند، قابلیت جذب انرژی خیلی بیشتر نسبت به سامانه‌های معمول مهاربندی همگرا دارد. همچنین شتاب وارده به سازه را به میزان قابل توجه کاهش می‌دهد و به دلیل کماتش تاب بودن آن، مهاربند در کشش و فشار تسلیم نمی‌شود. بدین ترتیب، قابلیت اتلاف انرژی و طبعاً شکل پذیری سیستم را بالا می‌برد که منجر به کاهش قابل ملاحظه پاسخ شتاب زلزله گردیده، نهایتاً سازه رفتار بسیار پایدارتری را از خود نشان می‌دهد [۲]. هنگام زلزله‌های نورتربیح (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵)، در حالیکه بسیاری از ساختمان‌ها برای جلوگیری از فروپاشی طراحی شده بودند، بطوری که بتوانند زندگی انسان‌ها را نجات دهند. با این وجود بازهم تعداد زیادی از ساختمان‌های فولادی متحمل آسیب و خسارت شدیدی شدند، تا جایی که سازه‌ها نابود شده بودند. بیشترین خسارت مشاهده شده به نظر می‌رسد در اثر گسیختگی شکننده در اتصالات جوشی تیر به ستون باشد. حال آنکه، چنین خسارت‌هایی برای سازه‌های فولادی قدیمی‌تر، که اجزای اتصال غیر انعطاف‌پذیری داشتند اجتناب ناپذیر بود، همچنین برای برخی ساختمان‌های نسبتاً جدید طراحی شده مطابق با دستور العمل‌های لرزه‌ای فعلی، انتظار می‌رود مطالعات بعدی اغلب بر فهم و درک علل خسارت به سازه‌های فولادی، ارزیابی پارامترهای اصلی که رفتار دوره‌ای اتصالات خمشی فولادی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و توصیه‌های بهسازی این اتصالات، متمرکز شده‌اند. برنامه‌های آزمایشگاهی ضروری و مهمی بر روی اتصالات تیر به ستون، در ایالات متحده آمریکا و ژاپن انجام گرفت، که عبارتند از: مقطع کاهش یافته تیر RBS، صفحات پوششی یا ماهیچه‌ای (اتصال ماهیچه‌ای) سوراخ بدون دسترسی جوش و بهبود حفزه (سوراخ) دسترسی جوش. اگر چه این اتصالات بهبود یافته عملکرد مطلوبی را در آزمایشگاه نشان دادند، طراحی لرزه‌ای این اجزا براساس ظرفیت چرخش پلاستیک اعضای اصلی داخلی قاب از جمله تیر و ستون، استوار است [۳].

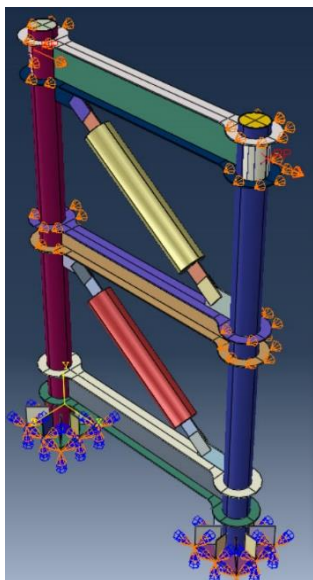
چگونگی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کماتش‌ناپذیر سه هسته‌ای پرداختند. به همین منظور در مطالعه فوق برای بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربندهای کماتش‌ناپذیر نک هسته‌ای و سه هسته‌ای پیشنهاد شد که در آن از سه هسته با تنش تسلیم متفاوت به صورت موازی استفاده شده است. نتایج مربوط به این مطالعه نشان می‌دهد حلقه هیستریزیس مهاربند سه هسته‌ای نسبت به مهاربند تک هسته‌ای ۱۶/۳٪ چاق‌تر و مساحت بیشتری دارد. این مطلب نمایان‌گر این است که مهاربند سه هسته‌ای از ظرفیت جذب و استهلاک انرژی بالاتر و عملکرد لرزه‌ای بهتری برخوردار است [۴]. کامگار و شمس به بررسی اثر بار انفجار بر پاسخ دینامیکی غیرخطی هسته فولادی مهاربندهای کماتش‌ناپذیر پرداختند و نشان دادند مهاربندها یکی از رایج‌ترین سامانه‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی هستند و عمده ضعف آن‌ها مربوط به کماتش عضو فشاری و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری عضو می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مدت زمان فاز مثبت سبب افزایش مقدار بیشینه تنش فشاری، میزان جابجایی ماندگار و میزان جذب انرژی در ناحیه فشاری و کاهش مقدار بیشینه تنش کششی در هسته مهاربند کماتش‌ناپذیر می‌شود [۵]. آلمدیا و همکاران به مقاوم سازی سازه بتنی با استفاده از مهاربند BRB پرداختند. نتایج نشان دادند با استفاده از مهاربندهای BRB می‌توان ظرفیت لرزه‌ای قاب‌های بتنی را افزایش داد همچنین روش موثری در جهت افزایش مقاومت، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و محدود کردن خرابی در سازه‌های موجود می‌باشد [۶].

## ۲- روند انجام مطالعه

قاب‌های فولادی خمشی از لحاظ شکل‌پذیری عملکرد بسیار مناسبی در برابر بارهای جانبی وارد دارند ولی این سیستم‌ها از مقاومت و سختی بسیار پایینی برخوردار هستند. از این رو جهت برطرف کردن مسئله سختی و مقاومت استفاده از قاب فولادی دارای مهاربندهای ضربدری پیشنهاد می‌گردد. از طرفی دیگر این سیستم‌ها نیز از سختی بالایی برخوردار می‌باشند و پارامتر شکل‌پذیری به علت نوع قرارگیری مهاربند محدود شده است. از این رو جهت حفظ مقاومت سازه برای تاکید بر شکل‌پذیری استفاده از مهاربندهای BRB پیشنهاد می‌گردد. نوآوری در این پایان نامه جهت تامین شکل‌پذیری و کنترل تنش در المان‌های مرزی اتصالات RBS به این سیستم اضافه و مدل سازی بخ صورت سه بعدی صورت خواهد پذیرفت.

ابتدا یک قاب فولادی با مهاربند BRBF را که در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته را تحت همان شرایط مدل سازی کرده و نتایج حاصله را با نتایج آزمایشگاهی کنترل می‌کنیم، تا از صحت سنجی اطلاعات و نحوه مدل‌سازی در کامپیوتر اطمینان حاصل نماییم. یک مدل را از نظر ابعاد هندسی و مشخصه‌های مدل‌سازی در نظر گرفته و برای پاسخ گویی به سوالات مطرح شده به نسبت شرایط پارامترها و متغیرهای مورد نظر تغییر داده و نتایج حاصله را در قالب‌های مختلف مقایسه و به سوالات مطرح شده پاسخ داده می‌شود. در مدل پیشنهادی قالب مدل اصلی همان قاب آزمایشگاهی خواهد بود سپس در اتصالات پارامترهای a، b و c تغییر و در نمودارها و کانتورهای تنش به تفسیر





شکل ۱- شرایط مرزی ناحیه تکیه گاهی قاب

### ۳-۲ نحوه مش بندی در مدل سازی

آنالیزهای اولیه که به دفعات بر روی این مدل انجام شده است، کاملاً مشخص نمود که برای مدل سازی، پروفیل های فولادی و صفحات بارگذاری باید به صورت Solid ترسیم شود. همچنین برای مش بندی این عناصر از یک مش هم اندازه و منطبق، برای بهبود انجام آنالیز و ارائه خروجی های یکسان استفاده گردید. از این رو مش بندی از نوع المان های مکعبی هشت گرهی (Brick) با ابعاد انتخابی یکسان برای همه المان ها که با روش مش منظم به صورت سازه ای (Structural) و با بافت منظم هندسی در کل فضای سه بعدی مدل ایجاد شده است. در اولین گام، ابعاد و اندازه های مش بندی هر دو مدل، با مکعب هایی به ابعاد ۵ سانتی متری ایجاد شده بود که پس از تحلیل های متعدد با عدم همگرایی نتایج و توقف روند آنالیزها، ابعاد مش بندی را تا جایی کاهش داده شد که آنالیز به نتیجه برسد. ابعاد مش بندی در این آنالیز ۲ سانتی متر انتخاب شده که در تمامی تحلیل های دیگر از این ابعاد استفاده شده است. اعمال چنین روندی در جهت دقت مسائل و صحت سنجی نتایج با یکدیگر بوده است.

### ۳-۳ مقایسه نتایج مدل تحلیلی با داده های تجربی

برای بررسی صحت فرضیات مدل سازی و تأیید اعتبار مدل ساخته شده در نرم افزار باید با مدل آزمایشگاهی مقایسه کنیم. به همین منظور مطالعه ای که تحت عنوان مطالعه آزمایشگاهی و رفتار چرخه ای مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش در قاب های مختلط در سال ۲۰۱۴ توسط ژیا و همکاران انجام شد، مورد بررسی قرار گرفت که مطابق نمودار ۵ ملاحظه می گردد، اختلاف دو نمودار کمتر از ۱۰٪ است [۷].

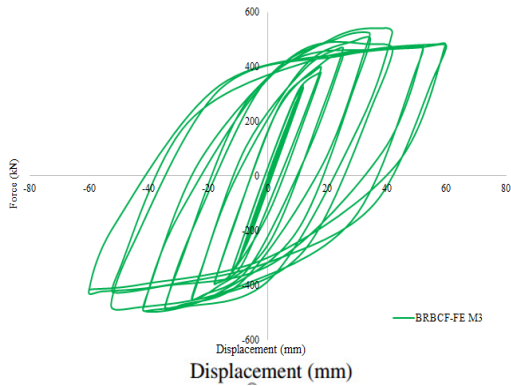
و بررسی اثر این اتصال پرداخته خواهد شد. نتایج این پایان نامه با نتایج سایر مقالات مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته، و نتیجه گیری خواهد شد. به طور خلاصه متغیرهای منحصر به فرد شامل تغییر در پارامترهای اتصال RBS و مشخصات هندسی و BRB می باشد.

### ۳- شیبیه سازی اجزای محدود

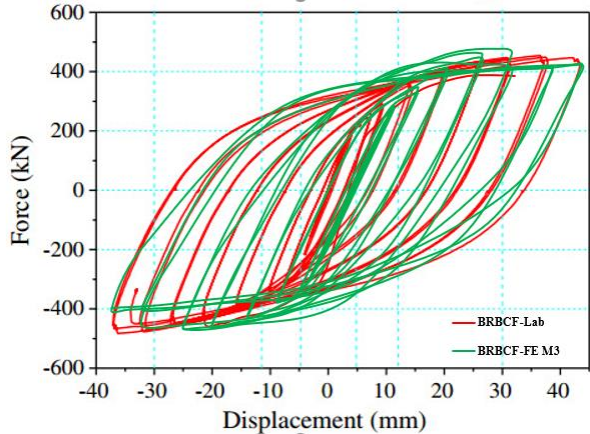
در تحقیق حاضر به منظور مدل سازی عددی قاب فولادی از نرم افزار عناصر محدود Abaqus 2017 استفاده شده است. برای مدل سازی تیر و ستون فولادی از المان Solid شش وجهی هشت گرهی، دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره با روش انتگرال گیری کامل خطی که در نرم افزار Abaqus با C3D8R نشان داده می شود، استفاده شده است. برای مدل کردن تماس بین پوسته فولادی می توان از المان سطح به سطح CONTACT در نرم افزار Abaqus بهره گرفت. المان اصطکاکی سطح به سطح CONTACT میان دو گره مجاور پوسته فولادی قرار داده شده و قادر است جدایش، لغزش و تماس بین دو گره را در طول بارگذاری مدل نماید. این المان فقط قادر است فشار در امتداد قائم و برش را در جهت مماسی سطوح انتقال دهد. در صورتی که این المان تحت کشش قرار گیرد، دیگر انتقال بار بین دو گره مجاور صورت نخواهد گرفت. مشخصات مصالح مورد بررسی در این طرح بر اساس فولادهای رایج Q235B که به صورت ورق های قابل جوش، بست و یا پروفیل های ساختمانی موجود می باشد، استفاده شده است. فولادهای نرمه دارای وزن مخصوص ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و با مدول الاستیک ۱۹۰ گیگاپاسکال که در حد جاری شدگی ۲۶۳۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع وارد فاز غیرخطی مصالح شده و نهایتاً در حدود کرنش برابر ۲۸ درصد که تنش ۳۷۹۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد، دچار گسیختگی می شود.

### ۳-۱ شرایط بارگذاری

بر اساس روند مدل سازی مشخصات هندسه ای مدل، مش بندی و شرایط مرزی در نخستین گام تحلیل (Initial Step)، تهیه و اعمال می گردد. مطابق شکل ۱ بادی در راستاهای حرکتی بیرون صفحه محدود بوده و حرکتی نخواهند داشت. همچنین برای اعمال بارگذاری چرخه ای، از بار انتقالی (از نوع جابجایی) استفاده خواهد شد. این بارها مطابق شکل ۱ به بالای قاب محل اتصال تیر به ستون اعمال و بارگذاری در گام اول از نوع استاتیکی می باشد.



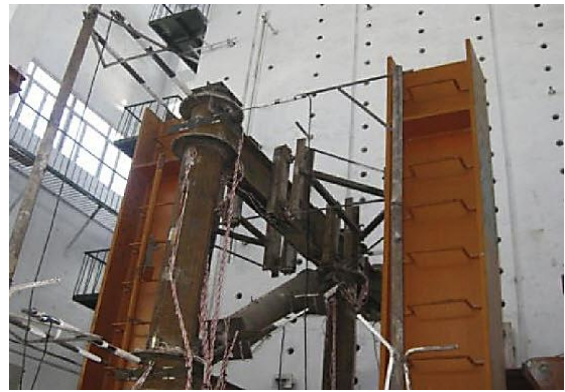
شکل (۵) نتایج چرخه‌ای نیرو-جابجایی مدل المان محدودی



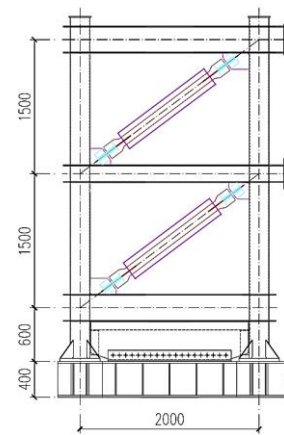
شکل (۶) نمودار چرخه‌ای مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

#### ۴- بررسی خروجی‌های حاصل از تحلیل

در شکل‌های ۷ الی ۱۱ کانتور تنش در المان‌های باربر سازه مد نظر در لحظه انتهایی بارگذاری برابر ۶۰ میلی‌متر نشان داده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ با تغییر مقدار مقاومت فشاری بتن، تغییری در مقدار تنش قاب فولادی ملاحظه نمی‌شود. در شکل ۹ با کاهش پارامتر  $b$  در ناحیه RBS کماتش جزئی در محل اتصال هسته فولادی به صفحه اتصال در طبقه دوم مشاهده می‌شود. در شکل ۱۰ نیز با افزایش فاصله مابین صفحه اتصال و هسته بتنی مقدار تنش در هسته فولادی در مهاربند BRB افزایش یافته است و در شکل ۱۱ به علت افزایش طول غلاف بتنی در مهاربند بتنی مقدار تنش در ستون‌های افزایش یافته است. در شکل ۱۲ مربوط به نمونه همسان‌سازی می‌باشد که در این شکل نیز کانتور تنش در اعضای سازه‌ای نشان داده شده و این مدل به عنوان مدل مینا می‌باشد و نتایج سایر مدل‌ها در این بخش و سایر بخش‌ها نسبت به این مدل مورد مقایسه و تفسیر قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۴-۶) ملاحظه می‌گردد؛ علاوه بر گسیختگی هسته فولادی در پای ستون نیز تسلیم فولاد مشاهده می‌گردد. با مشاهده مدل a213-b270-c30-L58 و کاهش فاصله هسته بتنی تا صفحه فولادی اتصال منجر به افزایش سختی محوری بادبند شده در نتیجه مقدار نیروی انتقالی به ستون‌های کناری افزایش یافته و در نتیجه منجر به گسیختگی ستون در ناحیه اتصال ستون به تیر در طبقه اول شده است. همچنین در مدل a213-b270-c30-L202 با افزایش فاصله هسته بتنی تا صفحه اتصال سختی مهاربند کاهش یافته بنابراین سیستم جهت مقابله با نیروی جانبی، سهم مشارکت سختی

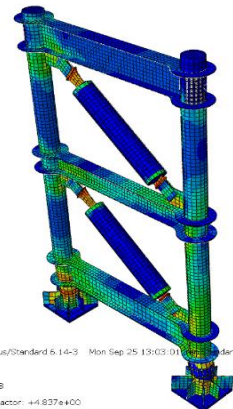
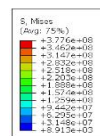


شکل (۲) مدل آزمایشگاهی ژیا و همکاران [۷]



شکل (۳) مشخصات هندسی قاب [۷]

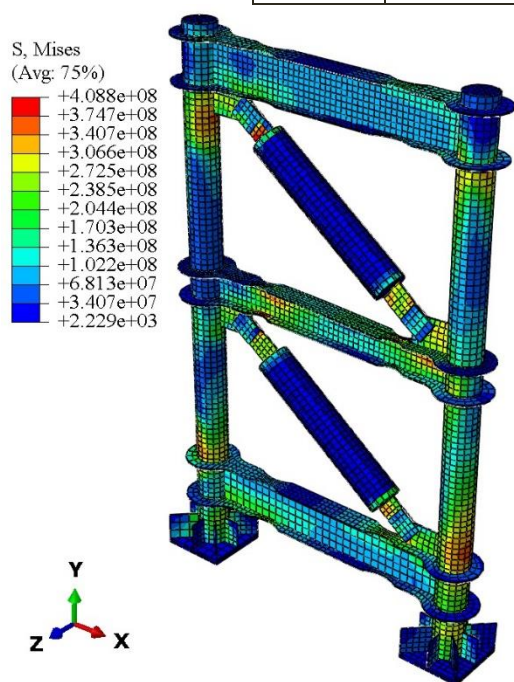
در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی قطر بیرونی تیوب فولادی BRB برابر ۲۱۹ میلی‌متر و عرض هسته داخلی برابر ۱۰۰ و با ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد. همچنین طول کلی مهاربند BRB برابر ۱۶۴۸ و طول تیوب فولادی برابر ۱۲۰۴ میلی‌متر می‌باشد. بتن استفاده شده در هسته داخلی BRB از نوع C30 و فولاد قاب فولادی از نوع Q235B می‌باشد. مقطع ستون دایروی ۴×۲۱۹ میلی‌متر و عرض دهانه ۲۰۰۰ و ارتفاع طبقات برابر ۱۵۰۰ میلی‌متر و همچنین مقطع تیر فولادی از نوع H194×150×6×9 می‌باشد.



شکل (۴) کانتور تنش نمونه المان محدودی مدل ژیا و همکاران [۷]

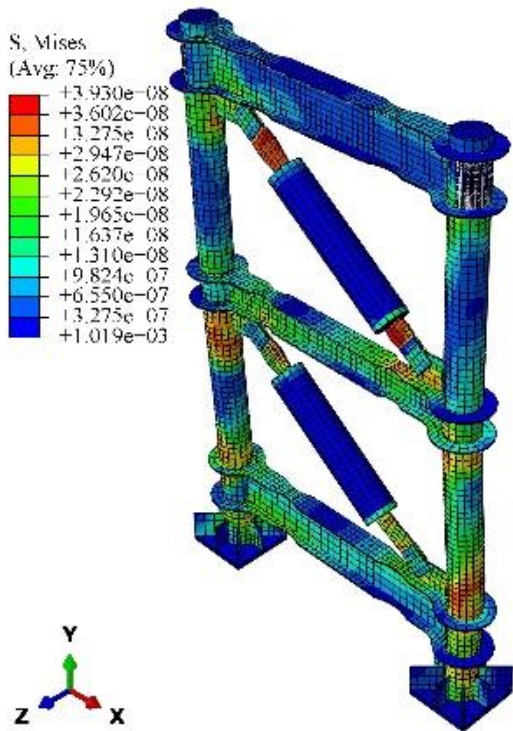
جدول ۱ مشخصات هندسی قاب فولادی

تیر میانی a,b,c	تیر بالا و پایین a,b,c	L	نوع مدل
-	-	132	Jia et. al
a=213 b=190 c=40	a=213 b=270 c=40	132	a213-b270-c40- L132
a=213 b=190 c=30	a=213 b=270 c=30	132	a213-b270-c30- L132
a=213 b=190 c=30	a=213 b=270 c=30	58	a213-b270-c30- L58
a=213 b=190 c=30	a=213 b=270 c=30	202	a213-b270-c30- L202
a=213 b=140 c=30	a=213 b=200 c=30	132	a213-b200-c30- L132

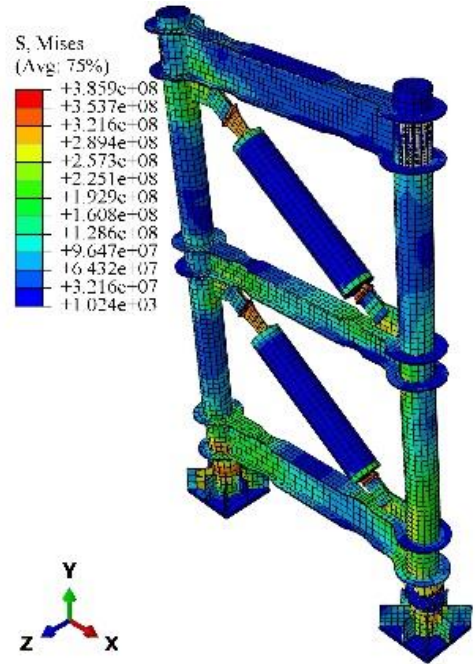


جانبی سازه افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار لنگر داخلی در ستون افزایش می‌یابد و مطابق شکل ۱۰ مقدار تنش در محل اتصال تیر به ستون افزایش می‌یابد. هدف اصلی استفاده از RBS در تیر، کاهش مقدار تنش در المان‌های اصلی قاب (ستون و تیر) می‌باشد. در مدل a213-b270-c40-L132 کاهش یافتگی در تیر نتوانسته، تنش در ستون را کاهش دهد، حتی مقدار تنش در محل اتصال تیر به ستون افزایش و همچنین تیر طبقه میانی دوران پیدا کرده است. مطابق مدل های پیشنهادی در مدل a213-b200-c30-L132 علاوه بر کاهش تنش در المان ستون کماتش موضعی در تیر و یا ستون مشاهده نمی‌گردد، و تقریباً در مقایسه با سایر مدل‌ها عملکرد مناسبی دارد.

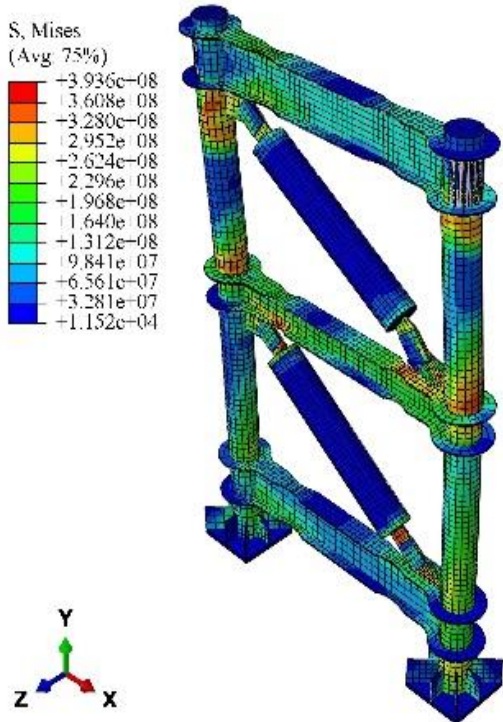
شکل (۷) کانتور تنش در المان قاب خمشی a213-b270-c40-L132



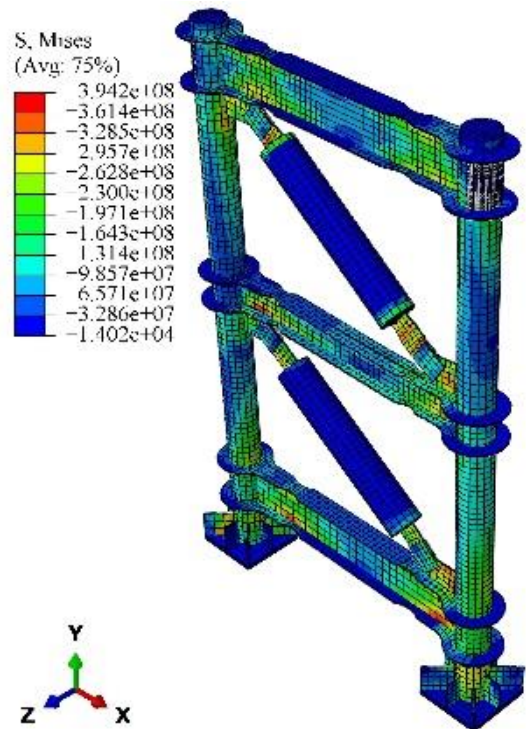
شکل (۱۰) کانتور تنش در المان قاب مهاربندی شده a213-b270-c30- L202



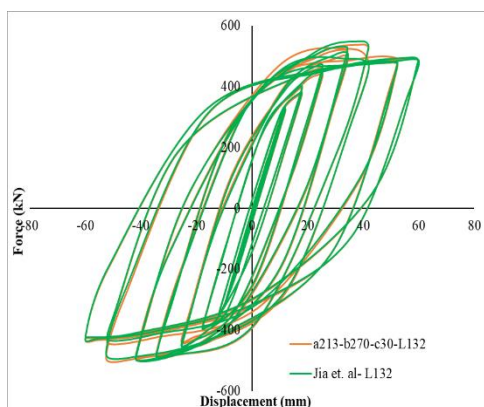
شکل (۸) کانتور تنش در المان قاب مهاربندی شده a213-b270-c30-L132



شکل (۱۱) کانتور تنش در المان قاب مهاربندی شده a213-b270-c30- L58

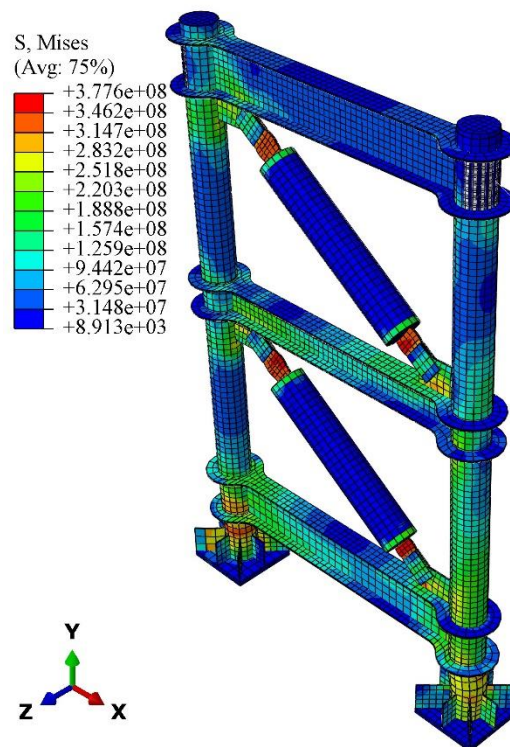


شکل (۹) کانتور تنش در المان قاب کمانش ناپذیر a213-b200-c30-L132



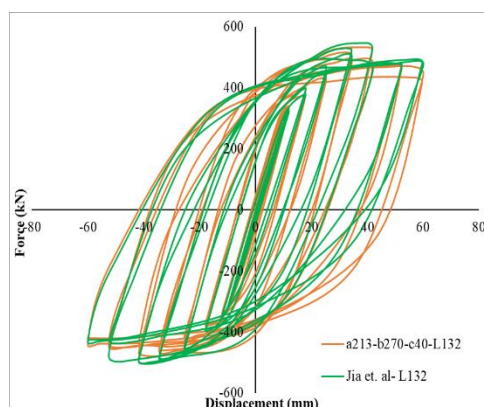
شکل ۱۴ پاسخ چرخه‌ای قاب کمناش‌ناپذیر Jia et. al-L=132 و a213-b270-c30-L132

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مربوط به مدل‌های a213-b270-c30-L58 و a213-b270-c30-L202 می‌باشد، که در هر دو مدل طول کاهش یافتگی برابر  $(0.85d)$  و شعاع برش در مقطع RBS برابر  $0.2b_f$  می‌باشد. تنها اختلاف هر دو نمونه در فاصله هسته بتنی بادبند BRB از محل صفحه اتصال می‌باشد که به ترتیب در مدل‌های فوق برابر ۵۸ و ۲۰۲ میلی‌متر می‌باشد. مطابق نمودار ۱۴ مربوط به نمونه a213-b270-c30-L58 با کاهش فاصله هسته بتنی با صفحه اتصال همچنین مطابق شکل ۱۰، با کاهش این فاصله سختی محوری مهاربند افزایش و به علت محدود شدن جابجایی قاب و کاهش امکان کمناش BRB در محل اتصال، نیروهای مضاعفی به المان‌های قاب، به ویژه ستون وارد می‌گردد. در نتیجه مقدار تنش در محل اتصال ستون به تیر و مهاربند مطابق شکل ۱۴ افزایش و قبل از رسیدن به حداکثر ظرفیت در بادبند، ستون تسلیم و منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب می‌گردد. در نمونه a213-b270-c30-L202 نیز با افزایش فاصله هسته بتنی از محل اتصال سختی محوری مهاربند کاهش و جهت باربری سیستم از سختی جانبی قاب استفاده می‌شود. در این مدل مطابق کل نمودار ۱۵ مقاومت مدل افزایش می‌یابد ولی با ملاحظه شکل ۹ مشاهده می‌شود به علت کاهش سختی مهاربند، گسیختگی ابتدا در مهاربندی طبقات بالایی محتمل می‌باشد و با گسیخته شدن مهاربند، ستون‌ها به مرز گسیختگی نزدیک می‌شوند. در شکل ۱۶ نیز مربوط به مدل a213-b200-c30-L132، مقدار طول کاهش یافتگی برابر  $(0.65d)$  در نظر گرفته شده است. در این مدل سختی و شکل پذیری تقریباً برابر مدل می‌باشد ولی مقاومت سازه در مدل a213-b200-c30-L132 برابر  $397\text{kN}$  و در مدل مینا  $528\text{kN}$ ، که در نمونه حاضر شاخص مقاومت نسبت به مدل مینا در حدود ۳۳٪ کاهش یافته است.



شکل (۱۲) کانتور تنش در المان قاب مهاربندی شده Jia et. al-L132

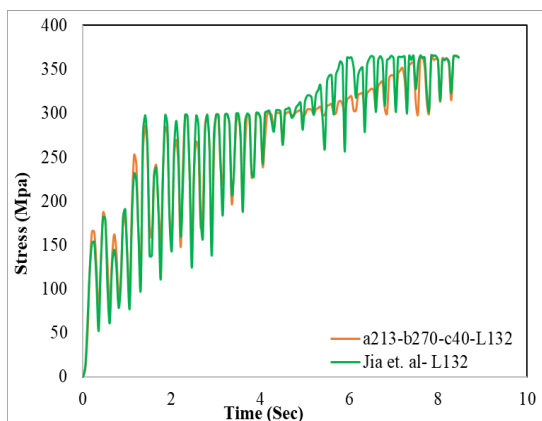
در شکل ۱۲ و ۱۳ طول کاهش یافتگی برابر بیشترین مقدار  $(0.85d)$  و شعاع برش در مقطع RBS به ترتیب برابر  $0.25b_f$  و  $0.2b_f$  می‌باشد. مطابق پاسخ شکل ۱۲ مربوط به نمونه a213-b270-c40-L132 در مقایسه با مدل مینا Jia et. al-L=132 از لحاظ سختی و مقاومت، کاهش مشاهده نمی‌گردد همچنین از لحاظ جابجایی حداکثر جابجایی برای مدل a213-b270-c40-L132 برابر ۴۸ میلی‌متر و در مدل مینا حداکثر مقدار جابجایی برابر ۳۵ میلی‌متر می‌باشد که از لحاظ شکل پذیری در حدود ۳۵٪ بهبود عملکرد مشاهده می‌شود. در شکل ۱۳ نیز همانطور که مشاهده می‌گردد، تقریباً پاسخ چرخه‌ای سازه در بررسی فاکتورهای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری تقریباً برابر مدل مینا می‌باشد.



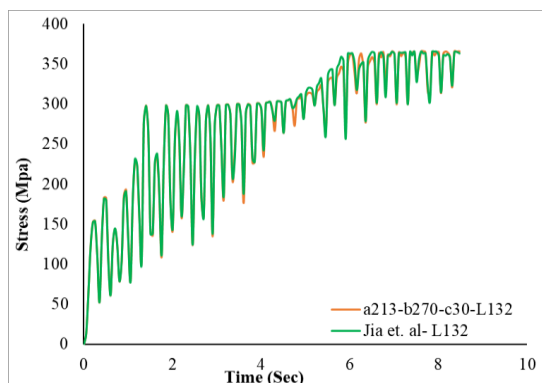
شکل ۱۳ پاسخ چرخه‌ای قاب کمناش‌ناپذیر Jia et. al-L=132 و a213-b270-c40-L132



در مدل a213-b270-c40-L132 برابر ۳۴۲kN می‌باشد که نسبت به نمونه مینا در حدود ۶٪ کاهش یافته است. همچنین نرخ رشد تنش در این نمونه نسبت به نمونه مینا کم‌تر می‌باشد. در شکل (۱۸) نیز نرخ رشد تنش برای نمونه a213-b270-c30-L132 ارائه شده که مطابق این نمودار مشاهده می‌گردد روند افزایش تنش در این مدل تقریباً مشابه مدل مینا می‌باشد.

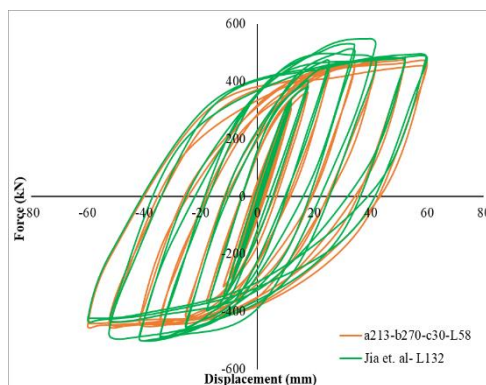


شکل ۱۸ توزیع تنش در المان‌های ستون در قاب‌های Jia et. al-L=132 و a213-b270-c30-L132

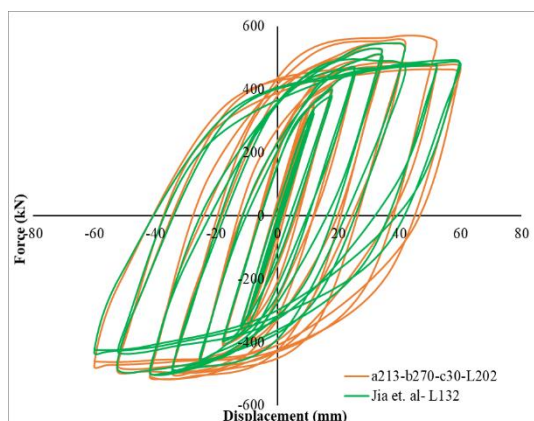


شکل ۱۹ توزیع تنش در المان‌های ستون در قاب‌های Jia et. al-L=132 و a213-b270-c30-L132

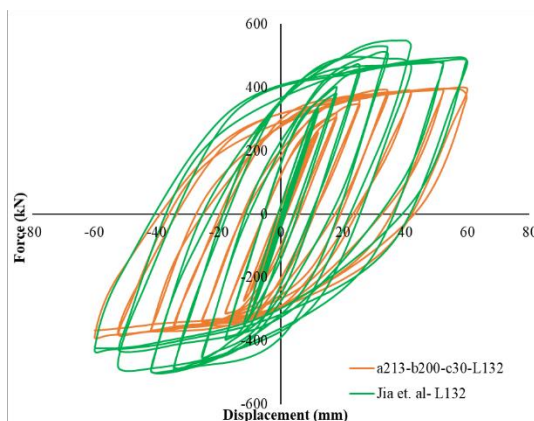
در شکل‌های (۱۹) الی (۲۱) نحوه رشد تنش در ستون‌ها به ترتیب در مدل‌های a213-b270-c30-L202، a213-b270-c30-L58 و a213-b270-c30-L132 نشان داده شده است. تقریباً در ۳ مدل مورد بررسی در این بخش ملاحظه می‌گردد؛ لحاظ کردن RBS در تیر، موجب کاهش تنش شده است. تقریباً در تمامی مدل‌ها تا لحظه ۴/۴۵ ثانیه تنش در مدل‌ها منطبق بر مدل مینا می‌باشد ولی با ادامه بارگذاری تا لحظه ۵/۵ ثانیه شیب روند افزایش تنش در مدل مینا نسبت به مدل‌های پیشنهادی افزایش یافته است و در انتهای بارگذاری تمامی مدل‌ها به یک تنش یکسان از لحاظ بزرگی می‌رسند.



شکل ۱۵ پاسخ چرخه‌ای قاب کمانش‌ناپذیر Jia et. al-L=132 و a213-b270-c30-L58



شکل ۱۶ پاسخ چرخه‌ای قاب کمانش‌ناپذیر Jia et. al-L=132 و a213-b270-c30-L202



شکل ۱۷ پاسخ چرخه‌ای قاب کمانش‌ناپذیر Jia et. al-L=132 و a213-b200-c30-L132

### بررسی توزیع تنش (تنش - زمان) در المان‌های ستون

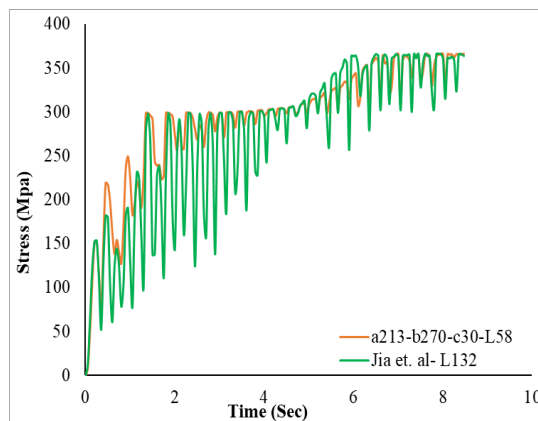
در این قسمت به بررسی تنش ون مایسس در ستون‌های مدل‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود. در شکل (۱۷) و (۱۸) کانتور تنش برای دو نمونه a213-b270-c30-L132 و a213-b270-c40-L132 ارائه شده است. مطابق نمودار شکل (۱۷) حداکثر مقدار تنش در ستون‌های مدل مینا برابر ۳۶۳kN می‌باشد و این مقدار در زمان متناظر نمونه مینا

۴- چنگویی، ع، رهگذر، م، ایزدی‌نیا، م، مطالعه آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کمانش‌ناپذیر سه هسته‌ای، مجله علمی- پژوهشی مهندسی عمران مدرس، دوره بیستم، شماره ۵، ۱۳۹۹.

۵- کامگار، ر، شمس، غ، تاثیر بار انفجار بر پاسخ دینامیکی غیر خطی هسته فولادی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر، مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری‌های پدافند نوین، سال نهم، شماره ۱، ۱۳۹۷.

6- Almeida A, Ferreira R, Proença JM, Gago AS. Seismic retrofit of RC building structures with Buckling Restrained Braces. Engineering Structures. 2017 Jan 1;130:14-22.

7-Jia M, Lu D, Guo L, Sun L. Experimental research and cyclic behavior of buckling-restrained braced composite frame. Journal of constructional steel research. 2014 Apr 1;95:90-105.



شکل ۲۰ توزیع تنش در المان‌های ستون در قاب‌های a213-b270-c30-L58 و L=132 Jia et. al-

### ۵- نتیجه‌گیری

- ۱- با کاهش فاصله هسته بتنی تا صفحه فولادی اتصال منجر به افزایش سختی محوری بادبند شده و در نتیجه منجر به گسیختگی ستون در ناحیه اتصال ستون به تیر در طبقه اول شده است.
- ۲- با افزایش فاصله هسته بتنی تا صفحه اتصال سختی مهاربند کاهش یافته بنابراین مقدار لنگر داخلی در ستون افزایش و مقدار تنش در محل اتصال تیر به ستون افزایش می‌یابد.
- ۳- با ایجاد RBS با طول کاهش یافتگی برابر بیشترین مقدار (0.85d) و شعاع برش در مقطع RBS برابر 0.25b<sub>f</sub> در مقایسه با مدل مینا از لحاظ سختی و مقاومت، کاهش مشاهده نمی‌شود، ولی که از لحاظ شکل‌پذیری در حدود ۳۵٪ بهبود عملکرد مشاهده می‌شود.
- ۴- با طول کاهش یافتگی برابر (0.65d) سختی و شکل‌پذیری تقریباً برابر مدل مینا می‌باشد ولی مقاومت سازه در حدود ۳۳٪ کاهش یافته است.
- ۵- مطابق نتایج حداکثر مقدار تنش در ستون‌ها، در مدل با طول RBS (0.85d) و شعاع برش 0.25b<sub>f</sub>، نسبت به نمونه مینا در حدود ۶٪ کاهش یافته است.

### منابع

- ۱- دهقانی، م، حیدری نژاد، ا، بررسی رفتار مهاربند دروازه‌ای، مجله دانش نما، شماره ۲۸، ۱۳۸۸، صفحات: ۱۲۵-۱۳۲.
- ۲- عنایت، ش، اعتمادی، م، ارزیابی جذب انرژی لرزه‌ای و پاسخ شتاب زلزله در قاب‌های دو بعدی فولادی مفصلی ۵ و ۱۰ طبقه مجهز به مهاربند ضربردی همگرا و مهاربند کمانش تاب و مهاربند میراگرا اصطکاکی، دهمین سمپوزیوم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی، مشهد، ایران، ۵ آذر، ۱۳۹۴.
- ۳- افتخاری، م، بررسی شکل‌پذیری اعضای ساخته شده از فولاد پر مقاومت و مقایسه آن با فولاد نرمه، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، ۱۳۸۶.