نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal(CPJ)

The Effect of Material and Specifications of Link Beam Variations on the Cyclic Performance of Eccentric Buckling Restrained Brace

Vahid Saberi[1]*, Hamid Saberi[2], Erfan Alipour[3] and Abbasali Sadeghi[4]

** 1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Eyvanakey University, Semnan, Iran*
saberi.vahid@gmail.com
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Eyvanakey University, Semnan, Iran
saberi.hamid@gmail.com
3- M.Sc, Department of Civil Engineering, Eyvanakey University, Semnan, Iran
alipour.erfan@yahoo.com
4- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
sss1991b@gmail.com

ABSTRACT
Due to the seismic dangers in the buildings, it is necessary that engineers consider newer and more suitable ways to resist against the seismic forces regularly. The Buckling Restrained Brace (BRB) are almost the new systems against the seismic forces that generally have more ductility in comparison with other lateral loading systems. In this study, the building 5 story with eccentric buckling restrained braces are designed by ETABS software and then two dimensional side frame is modelled by ABAQUS software in order to investigate the effect of material and specifications of link beam variations on the cyclic performance of eccentric buckling restrained brace. Therefore, first its link beam was modeled with soft steel ST37, then with high strength steel ST52 and finally with hardening bond and reduced surface area by 20%, 40% and 60% (6 models totally). The results show that the highest resistance is related to the sample whose link beam is with the stiffener. Also, the highest plasticity belongs to the model whose link beam is modeled with ST52.

Keywords:
Buckling Restrained Brace,Eccentric ,Link Beam,Cyclic Performance ,ABAQUS Software

All rights reserved to Civil & Project Journal.

نشریه عمران و پروژه (Civil & Project Journal(CPJ)) ISSN:2676-511X www.cpjournals.com
سال دوم، دوره ۲، شماره ۳، خرداد ۱۳۹۹،شماره پیاپی ۱۳،صفحه ۳۴ تا صفحه ۵۰

نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal(CPJ)

تأثیر تغییرات جنس و مشخصات تیر پیوند بر عملکرد چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب برون‌محور

وحید صابری[1*]، حمید صابری[2]، عرفان علی‌پور[3] و عباسعلی صادقی[4]

۱- استادیار، گروه عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران
saberi.vahid@gmail.com
۲- استادیار، گروه عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران
saberi.hamid@gmail.com
۳- کارشناس ارشد، گروه عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران
alipour.erfan@yahoo.com
۴- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
sss1991b@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۶ ***تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶***

چکیده

با توجه به خطرات ناشی از زلزله در ساختمان‌ها، لازم است مهندسان به‌طور مستمر روش‌های جدیدتر و مناسب‌تری برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای در نظر بگیرند. مهاربندهای کمانش‌تاب (BRB) یک سیستم نسبتاً جدید مقاوم در برابر نیروهای لرزه‌ای می‌باشند که به‌طورکلی دارای ساختار شکل‌پذیرتری نسبت به سایر سیستم‌های باربر جانبی، هستند. در این تحقیق، یک ساختمان ۵ طبقه با مهاربندهای کمانش تاب برون‌محور در نرم‌افزار ETABS طراحی و سپس قاب دو بعدی کناری در نرم‌افزار اجزا محدودی ABAQUS مدل‌سازی شده است تا بتوان تأثیر تغییرات جنس و مشخصات تیر پیوند بر عملکرد چرخه‌ای مهاربند کمانش‌تاب برون‌محور بررسی نمود. بدین منظور ابتدا تیر پیوند آن با فولاد نرمه ST37 سپس با فولاد پر مقاومت ST52 و نهایتاً تیر پیوند با سخت شونده و کاهش سطح جان به اندازه‌های ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ مدل‌سازی گردیده است (جمعاً ۶ مدل). نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌ای که تیر پیوند آن با سخت‌کننده می‌باشد، است. همچنین بیشترین میزان پلاستیک شدن به نمونه‌ای که تیر پیوند آن با فولاد ST52 مدل شده است، متعلق است.

کلمات کلیدی: مهاربند کمانش تاب، برون‌محور، تیر پیوند، عملکرد چرخه‌ای، نرم‌افزار *ABAQUS*.

۱- مقدمه

آسیب‌هایی که در برخی از زمین‌لرزه‌های اخیر، مانند نورثریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) به قاب‌های مهاربندی‌شده همگرای متداول واردشده، نگرانی‌های زیادی را درباره عملکرد لرزه‌ای این سیستم ایجاد کرده است. رفتار چرخه‌ای مهاربندهای متداول به دلیل کمانش مهاربند در فشار، بسیار نامنظم و ناپایدار بوده و زوال زیادی در مقاومت نشان می‌دهد. به دلیل رفتار چرخه‌ای پیچیده این مهاربندها، توزیع واقعی نیروهای داخلی و تغییر شکل‌ها در قاب مهاربندی‌شده با آنچه به‌وسیله روش‌های متداول طراحی پیش‌بینی می‌شود، بسیار متفاوت است. از سوی دیگر ملاحظات اجرایی معمولاً به طرح‌هایی منجر می‌شود که در آن‌ها ظرفیت مهاربندهایی که برای برخی طبقات انتخاب‌شده بسیار بیشتر از نیاز لرزه‌ای آن‌ها می‌باشد. درحالی‌که در طبقات دیگر، ظرفیت مهاربندها به نیاز لرزه‌ای آن‌ها بسیار نزدیک است. این دو عامل به همراه کاهش شدید مقاومت مهاربندها در مرحله پس کمانشی، باعث تمرکز خسارت در برخی از طبقات و در نتیجه افزایش نیاز لرزه‌ای مهاربندها در طبقات مذکور می‌گردد. چنین نیاز لرزه‌ای معمولاً در طراحی سازه پیش‌بینی‌نشده و در اکثر موارد بیش از ظرفیت لرزه‌ای مهاربندها و اتصالات آن است. در حال حاضر مهم‌ترین نگرانی درباره مهاربندهای متداول، گسیختگی آن‌ها بر اثر خستگی می‌باشد. تحقیقات بسیاری صرف بهسازی مهاربندهای همگرا جهت رسیدن به یک رفتار الاستوپلاستیک ایده‌آل گردیده است. برای رسیدن به این هدف لازم بود تا با استفاده از مکانیسم مناسبی از کمانش فشاری مهاربند که مانع از استهلاک انرژی مناسب در قاب می‌شد، جلوگیری شود و امکان تسلیم فشاری فولاد فراهم شود. مبانی اصلی عملکرد این مکانیسم، جلوگیری از وقوع کمانش هسته‌ی فولادی به‌منظور امکان وقوع پدیده‌ی تسلیم فشاری در آن و در نتیجه امکان جذب انرژی در این عضو از سازه می‌باشد. این امر با پوشاندن سراسر طول هسته‌ی فولادی در لوله‌ی فولادی پر شده با بتن یا ملات میسر می‌گردد. در این سیستم نیاز به فراهم آوردن یک سطح لغزش یا لایه ناپیوستگی بین هسته فلزی و بتن محصورکننده وجود دارد. هدف از این امر آن است که نیروی مهاربندی فقط توسط هسته‌ی فولادی تحمل شود. این مهاربندها، با نام مهاربندهای کمانش تاب گسترش‌یافته‌اند. در نتیجه مهاربندهای کمانش تاب به دلیل رفتار لرزه‌ای قابل‌قبول، سادگی اجرا و جا دادن آسان، هم برای ساختمان‌های فولادی و بتنی جدید و هم برای بهینه‌سازی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، چشم‌انداز مناسبی را نشان می‌دهند. قاب‌های دارای مهاربندهای کمانش تاب ، حالت خاصی از مهاربندهای هم‌محور یا همگرا هستند که شکل‌پذیری بیشتری داشته و از توانایی جذب انرژی بالایی برخوردارند (دیلمی و مهدوی‌پور، ۲۰۱۶).

یاشینو و همکاران (۱۹۷۱)، آزمایش‌های چرخه‌ای بر روی دو نمونه‌ی به‌اصطلاح مهاربند با دیوار برشی انجام دادند، این آزمایش شامل یک مهاربند که در بردارنده‌ی صفحه‌ی فلزی صاف که داخل پانل بتن مسلح با و بدون مواد غیرچسبده قرار گرفته، صورت پذیرفته است. در نمونه‌ی آزمایشگاهی با مواد غیرچسبنده جابجایی جانبی ۱۵ میلی‌متر بین دو طرف و پانل محصور، بیشتر به وقوع پیوسته است. همچنین میزان جذب انرژی و ظرفیت تغییرشکل افزایش پیدا کرده است. بخش قابل توجه تحقیق اینیوو (۱۹۹۲)، بر روی عملکرد مهاربندهای کمانش تاب می‌باشد،او مدلی را که شامل صفحه فولادی که توسط پانل‌های بتنی پیش ساخته محصور شده بود، آزمایش کرد و تمرکز او بر روی بارهای محوری و توانایی تغییر شکل‌های کوچک مهاربند کمانش تاب بود. ژائو و همکاران (۲۰۱۲)، روی تأثیر دوران انتهایی مهاربند بر رفتار کمانشی مهاربندهای کمانش تاب با انتهای مفصلی مطالعاتی صورت دادند. تأثیر دوران انتهایی مهاربند بر رفتار کلی و پایداری مهاربندهای کمانش تاب موضوعی مرسوم و مهم در طراحی می‌باشد. به‌منظور بررسی بیشتر در این مورد، ۹ عدد مهاربند کمانش تاب مورد آزمایش قرار گرفتند و در هریک تأثیر دوران انتهای مهاربندها، فاصله بین هسته و قالب و سختی و مقاومت مورد بررسی قرارگرفت. هویدایی و رافضی (۲۰۱۲)، به بررسی رفتار کمانش کلی مهاربندهای کمانش تاب تمام فلزی پرداختند. یکی از الزامات اساسی برای رفتار مکانیکی مناسب مهاربندهای کمانش تاب تحت زلزله‌های شدید جلوگیری از کمانش کلی تا زمانی است که مقطع تغییرشکل پلاستیک و شکل‌پذیری زیادی را متحمل شود. این مقاله به بررسی اجزا محدود مقطع مهاربند تمام فلزی اختصاص دارد. مهاربند پیشنهاد شده دارای مقطع هسته یکسان اما دارای مکانیسم‌های جلوگیری کننده از کمانش متفاوت است. هدف این مطالعه انجام مطالعات تحلیلی بر روی مهاربندهای کمانش تاب با مقادیر متفاوت فاصله بین هسته و عنصر ممانعت کننده از کمانش می‌باشد. نتایج نشان داد که سختی خمشی این نوع مهاربندها می‌تواند به طرز چشمگیری رفتار کمانش کلی مهاربند را تحت تأثیر قرار

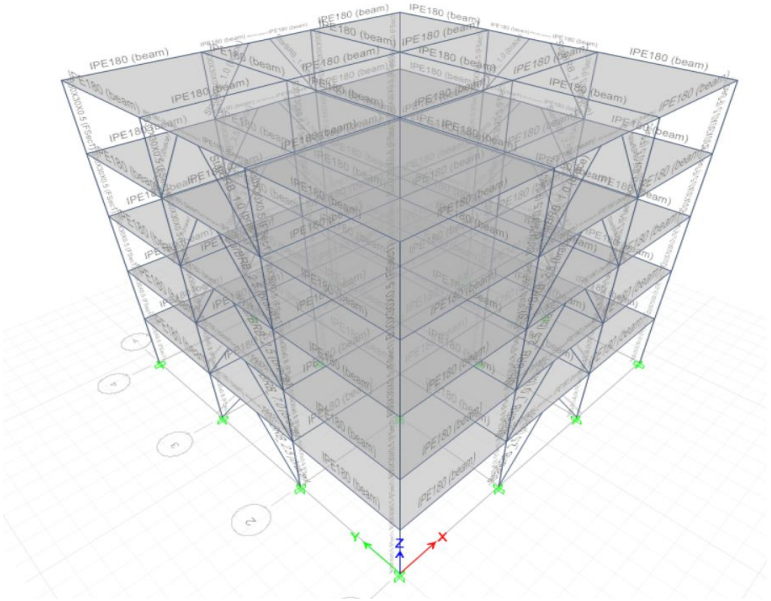
دهد. به‌علاوه، حداقل نسبت بار کمانش اویلر به مقاومت تسلیم هسته برای مقاصد طراحی پیشنهاد شد. این نسبت پارامتری اساسی است که کمانش مهاربندها را کنترل می‌کند. وانگ و همکاران (۲۰۱۲)، برای رفع معایب موجود در مهاربندهای کمانش تاب ازجمله تغییرشکل‌های ماندگار سازه پس از پایان بارگذاری و همچنین هزینه بر بودن تعویض اعضا پس از خرابی و جاری شدن هسته فولادی، به‌جای استفاده از فولاد در هسته جاری شونده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی استفاده کردند. این آلیاژها به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی از قبیل خاصیت فوق ارتجاعی و بازگردانندگی می‌توانند پس از تحمل تغییرشکل‌های بزرگ، حالت اولیه خود را بازیابی کنند. پیدرافیتا و همکاران (۲۰۱۳)، مهاربندی جدید برای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله ارائه دادند. نمونه‌ای تمام مقیاس از مهاربند پیشنهاد شده تحت تغییرمکان‌های چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت و پاسخ هیسترزیس نمونه‌ها برداشت شد. مهم‌ترین پارامترها نیروی تسلیم و تغییرمکان تسلیم بودند که می‌توان به‌صورت جملاتی ریاضی رفتار آن‌ها را تخمین زد. روش طراحی پیشنهادی این نوع مهاربندها می‌تواند با در نظر گرفتن تغییرشکل جانبی اولیه و فاصله بین هسته تسلیم‌پذیر و قسمت مقید کننده، کمانش این نوع مهاربندها را تعیین کند. رفتار هیسترزیس این نوع مهاربندها نیز با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدودی تعیین شد. قوان‌گو و همکاران (۲۰۱۴)، به بررسی تأثیر پارامترهای مدل مهاربند کمانش تاب بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ای پرداختند. در این تحقیق به بررسی حساسیت مدل‌های موجود در مورد مهاربندهای کمانش تاب به‌منظور فراهم نمودن وسیله‌ای جهت ارزیابی تأثیر پارامترهای ثابت این نوع مهاربندها بر رفتار سازه‌ای، پرداخته شد. با مدل‌سازی موردی یکی از آزمایش‌های قبلی، تأثیر کمانش‌های کلی و موضعی بر پارامترهای ثابت این نوع مهاربندها مشخص شد. مطالعه صورت گرفته راه را برای کاربرد این نوع مصالح و نحوه طراحی آن‌ها هموار کرده است. پن و همکاران (۲۰۱۶)، مطالعاتی روی ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های بتنی با مهاربندهای کمانش تاب انجام دادند. آن‌ها ۴ مدل شامل سیستم بدون مهاربند، سیستم با مهاربند کمانش تاب که دارای دو مرحله تسلیم است، مدل با *BRB* کوچک و مدل با *BRB* بزرگ را در نرم‌افزار آباکوس مدل کردند و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که، سیستم دارای مهاربند کمانش تاب که دارای دو مرحله تسلیم است، کارایی بهتری در برابر فروریزش طبقه ضعیف از خود نشان می‌دهد. دیلمی و مهدوی پور (۲۰۱۶)، در زمینه‌ی ارزیابی احتمالاتی نیاز لرزه‌ای دریفت پسماند قاب‌های مهاربندی‌شده با المان‌های کمانش تاب مطالعه شده است. در این مطالعه بیان‌شده است که مهاربندهای کمانش تاب به تنهائی به دلیل تنش تسلیم پائین تر هسته‌ی مهاربند زودتر تسلیم‌شده و متحمل کرنش‌های پسماند بزرگ‌تری می‌شوند. در این تحقیق با تعریف قاب‌هایی با مهاربندهای کمانش تاب دوگانه این مشکل و نقطه ضعف این قاب‌ها بررسی‌شده است. ماوریا و همکاران (۲۰۱۶)، مهاربندهای کمانش ناپذیری کوچکی با تنش تسلیم هسته‌ی کوچک‌تر و طول کوتاه پیشنهاد کردند که می‌توانند در سازه به‌عنوان فیوز و میراگر به کار روند. اوزجلیک و همکاران (۲۰۱۷)، مهاربند کمانش ناپذیری با شرایط اتصال متفاوت را به‌صورت آزمایشگاهی پیشنهاد کردند. نوآوری این تحقیق ایجاد محدودیت‌های بیشتر در بخش‌های مختلف اتصال مصالح به هم می‌باشد. این قیود باعث کاهش نقص‌های موضعی و کمانش‌های آنی در بعضی بخش‌های مهاربند می‌گردد. شن و همکاران (۲۰۱۷)، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های با مهاربندهای هم‌محور را با و بدون مهاربندهای کمانش تاب مطالعه کردند. نتایج تحقیق نشان داده است که قاب‌های با مهاربندهای کمانش تاب دریفت‌های پسماند را کنترل نموده و ظرفیت تسلیم و فروریزش سازه را افزایش داده‌اند. سانژینگ و همکاران (۲۰۱۸)، با بکار بردن آلیاژ حافظه‌دار در قاب‌های با مهاربندهای شورون هشتی کمانش ناپذیر، عملکرد قاب‌های با مهاربندهای کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار را مطالعه کردند. در این تحقیق عدم توانائی مهاربندهای کمانش تاب در مهار دریفت‌های پسماند بیان‌شده است، همچنین از توانائی این مهاربندها در کاهش دریفت طبقات تحت تحلیل‌های لرزه‌ای عنوان‌شده است.

مهاربند کمانش‌تاب در علم عمران موضوع نوین و جدیدی می‌باشد. در این تحقیق، جنس و مشخصات تیر پیوند مهاربند کمانش تاب برون‌محور در حوزه عملکرد چرخه‌ای مهاربندها با تکیه‌بر اعمال بار چرخه‌ای به سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد که در پژوهش‌های گذشته کمتر به این موضوع پرداخته‌شده است. جنبه‌ی مقایسه‌ی مهاربندهای کمانش تاب برون‌محور با تیرهای پیوند مختلف موضوع جدیدی در این حیطه می‌باشد.

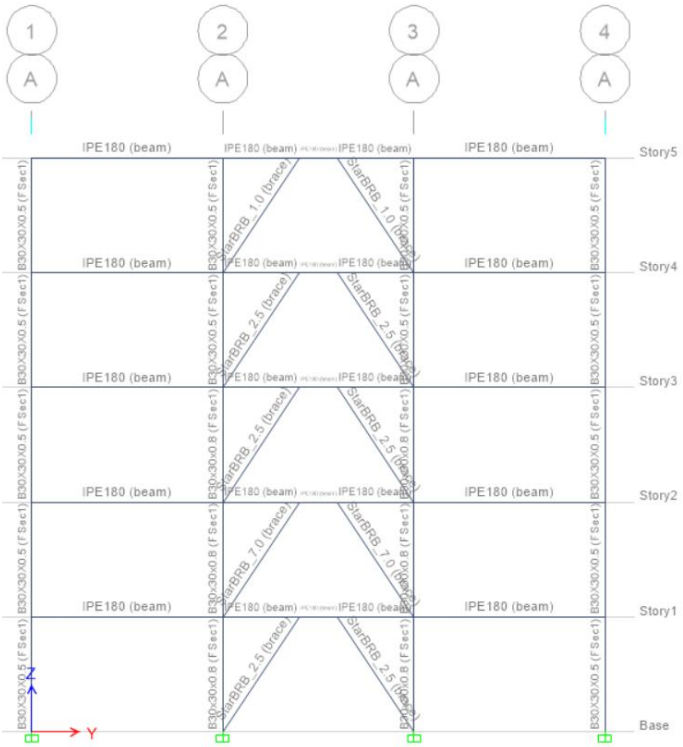
۲- روش تحقیق

عملکرد سیستم‌های جدید مقاوم در برابر نیروی جانبی به نحوی است که در هنگام وقوع زلزله، انرژی اعمال‌شده به سازه را جذب می‌کند. مهاربندهای کمانش تاب یکی از این سیستم‌های جدید می‌باشد. با توجه به لرزه‌خیزی کشور ایران، استفاده از سیستم‌های مهاربندی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله کاربرد فراوانی دارد. مهاربندهای معمولی رایج دارای سختی بالایی بوده ولی معایب زیادی هم دارند که مهم‌ترین آن‌ها مشکل ذاتی تفاوت رفتار در کشش و فشار می‌باشد. این مهاربندها می‌بایست تغییر مکان‌های بزرگ ناشی از زلزله را به‌صورت رفت و برگشتی در کشش به‌صورت محوری و در فشار به‌صورت مقاومت پس از کمانش تحمل کنند. کمانش مهاربندها در فشار باعث کاهش شدید مقاومت، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی در آن‌ها می‌شود. این نقطه ضعف، ایده اصلی استفاده از سیستم‌های مهاربندی مقاوم به کمانش را مطرح کرده است. مهاربندهای مقاوم به کمانش برای پاسخگویی به نیازهای طرح و با توجه به مزیت‌های اقتصادی ساخته‌شده‌اند. این مهاربندها نوع خاصی از مهاربندهای هم‌محور می‌باشد که از کمانش کلی مهاربند و کاهش مقاومت و سختی در آن‌ها جلوگیری شده است. المان‌های مهاربندی توانایی جاری شدن و تأمین رفتار یکسان در کشش و فشار و درنتیجه جذب انرژی در چرخه‌های پایدار را دارا می‌باشند.

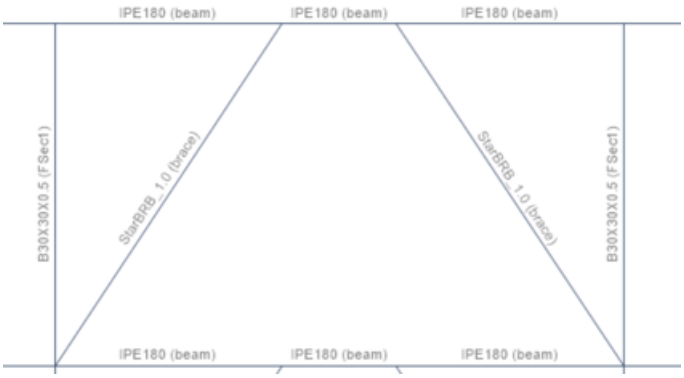
در این تحقیق، ابتدا یک ساختمان ۵ طبقه با مهاربندهای *BRB* و تیر پیوند به طول یک متر در نرم‌افزار *ETABS* طراحی گردید. سپس تیر پیوند ابتدا با فولاد *ST37* سپس با *ST52* و در مرحله‌ی بعد تیر پیوند با سخت شونده و کاهش سطح جان به اندازه‌های ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شد (جمعاً ۶ مدل). سازه‌ی ۵ طبقه به‌صورت مهاربندی *BRB* طراحی شده است، سازه دارای ۳ دهانه‌ی عرضی و طولی می‌باشد، طول دهانه ۵ متر و ارتفاع برابر ۳ متر می‌باشد. در ادامه در شکل‌های (۱) تا (۳) به ترتیب نمای سه بعدی سازه‌ی طراحی شده، نمای دو بعدی قاب کناری و جزئیات قاب مذکور ارائه شده است.



شکل ۱: نمای سه بعدی سازه‌ی طراحی شده



شکل ۲: نمای دو بعدی قاب مذکور



شکل ۳: جزئیات قاب انتخاب‌شده

۳- مدل‌سازی نمونه‌های تیر پیوند مورد مطالعه

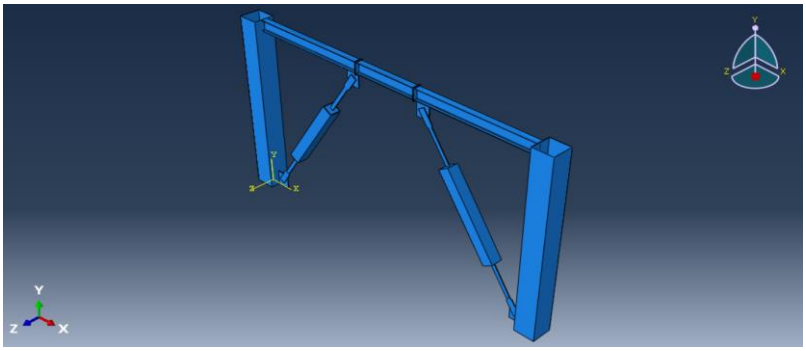
در این تحقیق به موارد ذیل پرداخته می‌شود:

- تاثیر تغییرات جنس و مشخصات تیر پیوند بر عملکرد چرخه ای مهاربند کمانش تاب برون‌محور.
- بررسی ظرفیت کمانشی مهاربند کمانش ناپذیر برون‌محور.
- بررسی تاثیرات نوع جنس تیر پیوند در کاهش خرابی مهاربند کمانش ناپذیر.
- بررسی میزان جذب انرژی و بررسی با قاب مهاربندی برون‌محور با مهاربند کمانش تاب با تغییر جنس و مشخصات تیر پیوند.

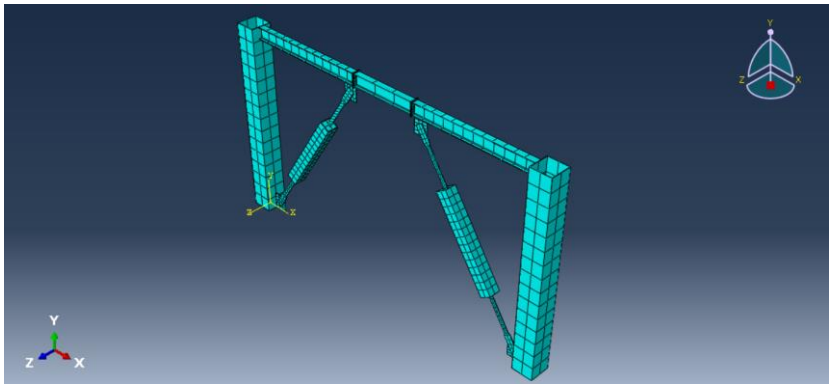
در ادامه، مدلسازی تیر پیوند با فولاد *ST37* سپس با *ST52* و در مرحله‌ی بعد تیر پیوند با سخت شونده و کاهش سطح جان به اندازه‌های ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ معرفی می‌شوند (جمعاً ۶ مدل).

الف) تیر پیوند با فولاد ST37:

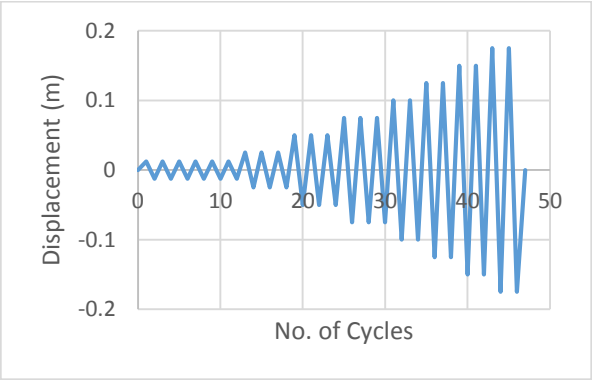
مراحل مدل‌سازی اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با تیر پیوندی از جنس *ST37* و نتایج تحلیل‌های غیرخطی در شکل‌های (۴) تا (۹) ارائه شده است.



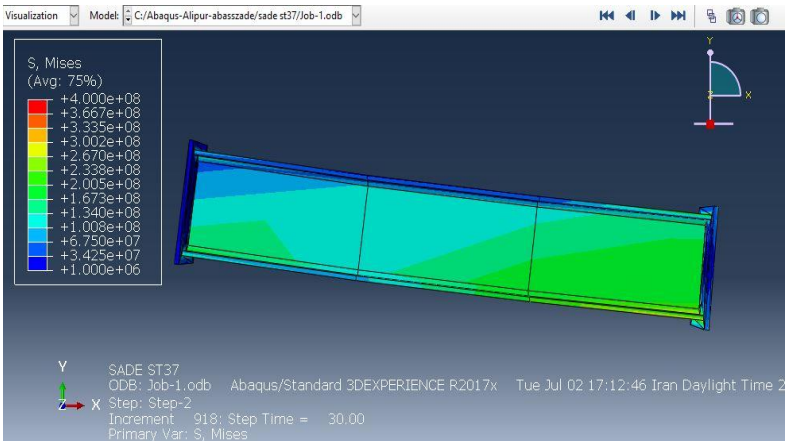
شکل ۴: مونتاژ نهایی نمونه‌ی مورد مطالعه با تیر پیوندی به جنس *ST37*



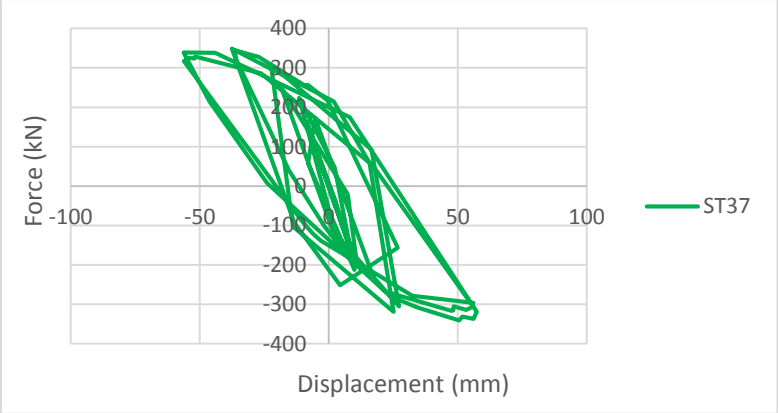
شکل ۵: مش بندی کامل نمونه‌ی مورد مطالعه با تیر پیوندی به جنس *ST37*



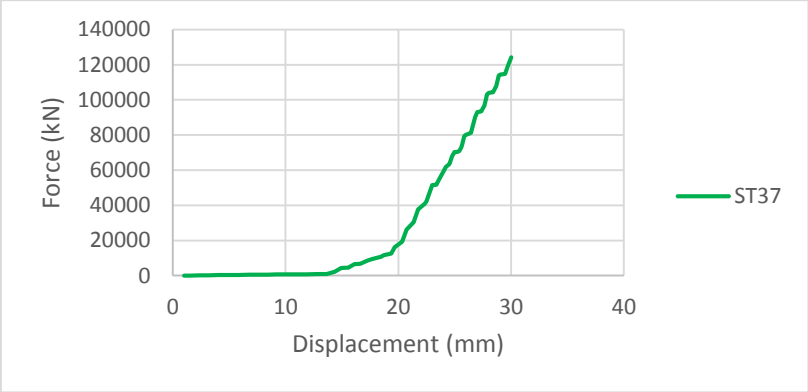
شکل ۶: جابه‌جایی بدست آمده بر مبنای استاندارد ATC24



شکل ۷: نمایش تنش ایجاد شده در تیر پیوند به جنس *ST37*



شکل ۸: نمودار هیسترزیس نیرو جابه‌جایی کل قاب

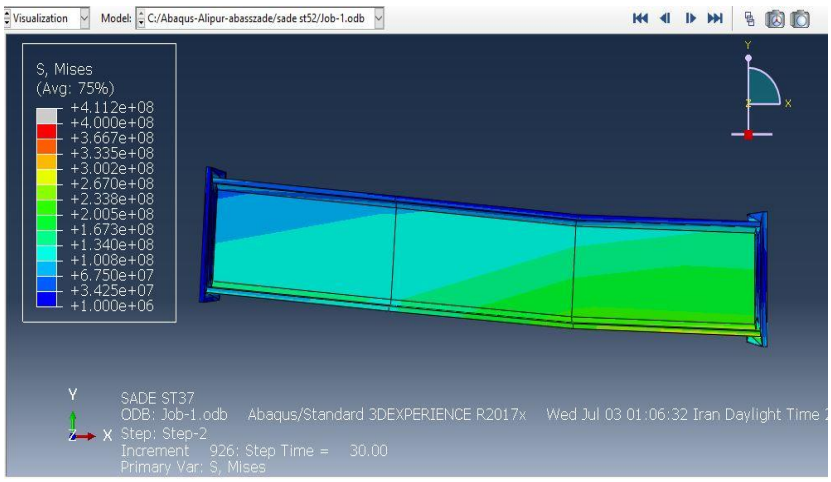


شکل ۹: نمودار تحلیل انرژی پلاستیسیته

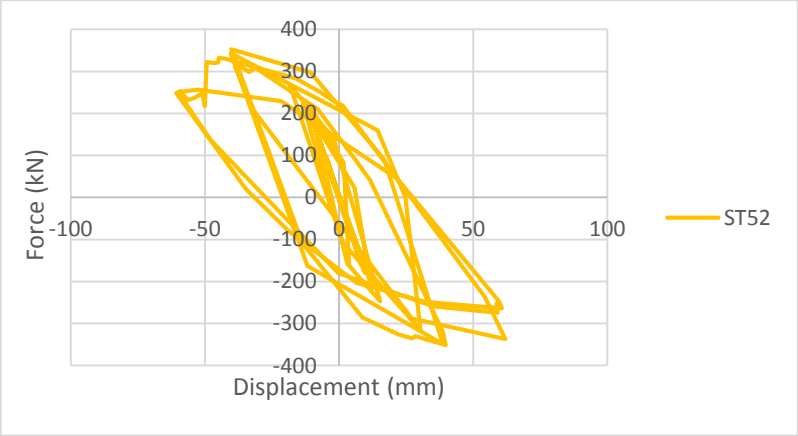
دوران در مدل اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با تیر پیوندی از جنس *ST37* برابر ۰٫۰۳۸ رادیان می‌باشد.

ب) تیر پیوند با فولاد ST52:

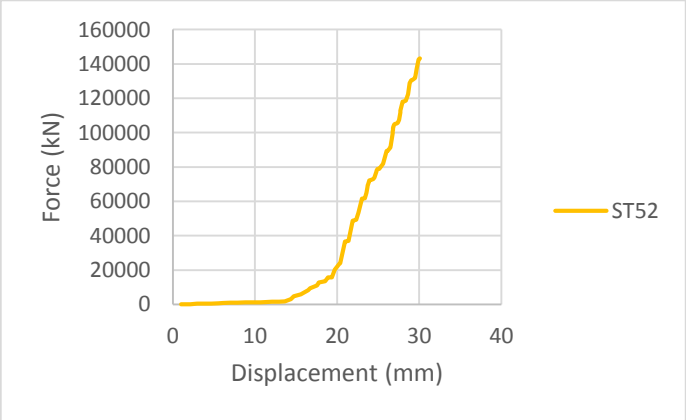
مراحل مدل‌سازی اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با تیر پیوندی از جنس *ST52* و نتایج تحلیل‌های غیرخطی در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است.



شکل ۱۰: نمایش تنش ایجاد شده در تیر پیوند به جنس *ST52*



شکل ۱۱: نمودار هیسترزیس نیرو جابه‌جایی کل قاب

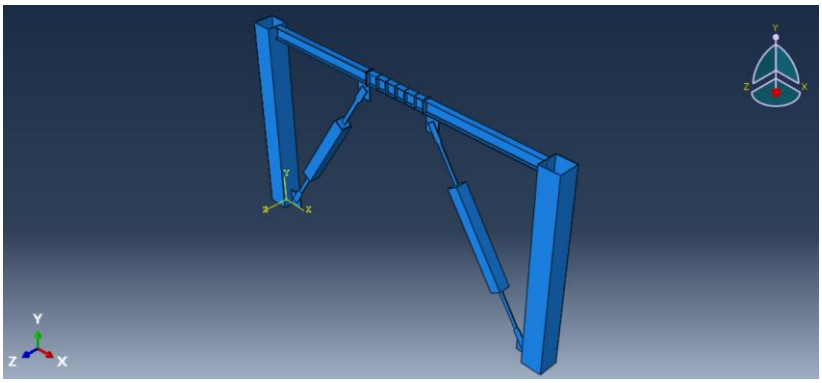


شکل ۱۲: نمودار تحلیل انرژی پلاستیسیته

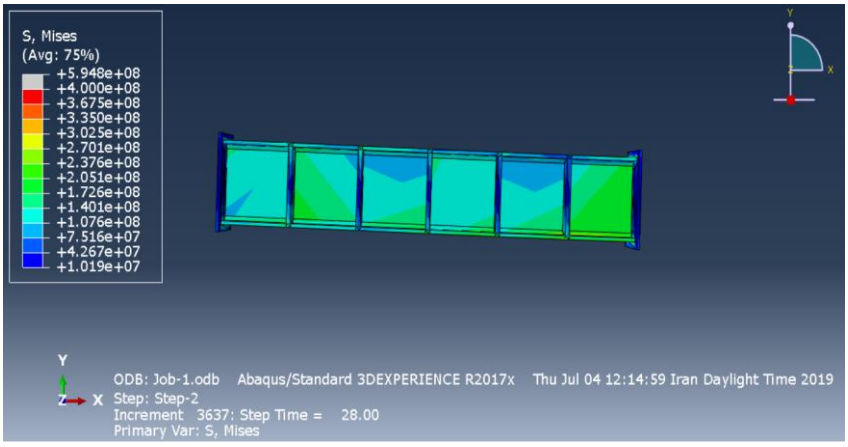
دوران در مدل اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با تیر پیوندی از جنس $ST۵۲$ برابر ۰٫۰۲۴ رادیان می‌باشد.

ج) تیر پیوند با سخت کننده:

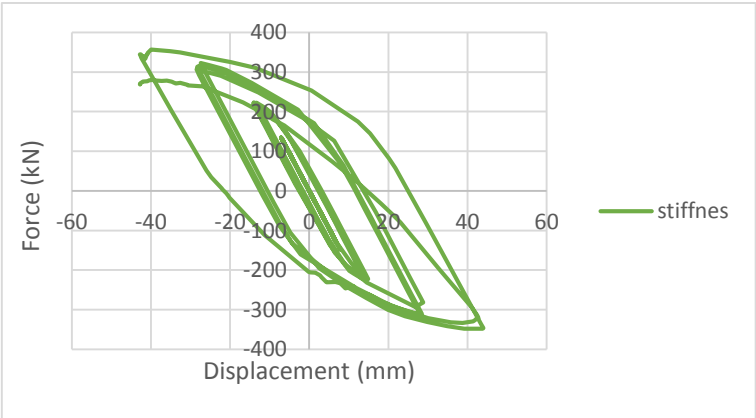
مراحل مدل‌سازی اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با تیر پیوند با سخت کننده و نتایج تحلیل‌های غیرخطی در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) ارائه شده است.



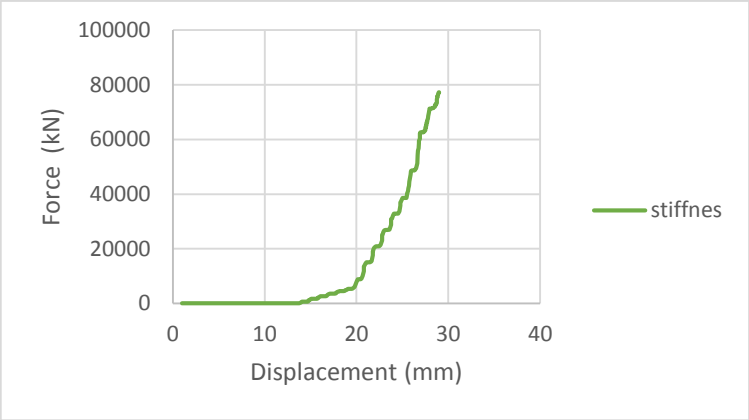
شکل ۱۳: مونتاژ نهایی نمونه‌ی مورد مطالعه با سخت کننده



شکل ۱۴: نمایش تنش ایجاد شده در تیر پیوند با سخت کننده



شکل ۱۵: نمودار هیسترزیس نیرو جابه‌جایی کل قاب

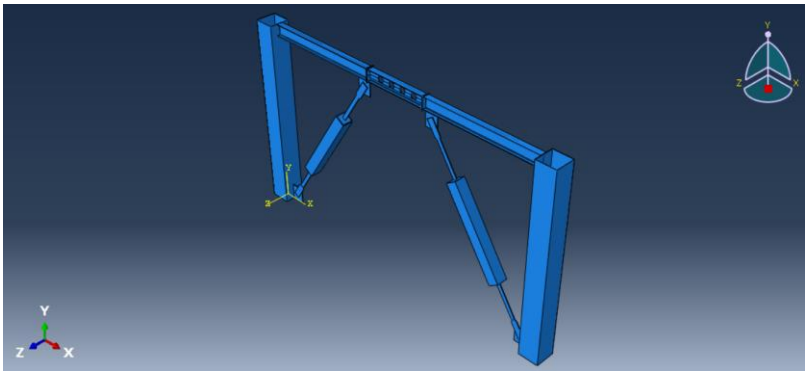


شکل ۱۶: نمودار تحلیل انرژی پلاستیسیته

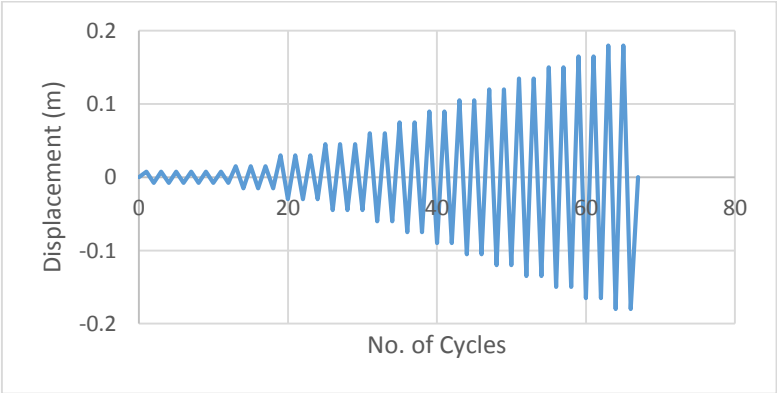
دوران در مدل اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با تیر پیوندی با سخت کننده برابر ۰٫۰۱۷ رادیان می‌باشد.

چ) تیر پیوند با ۲۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند:

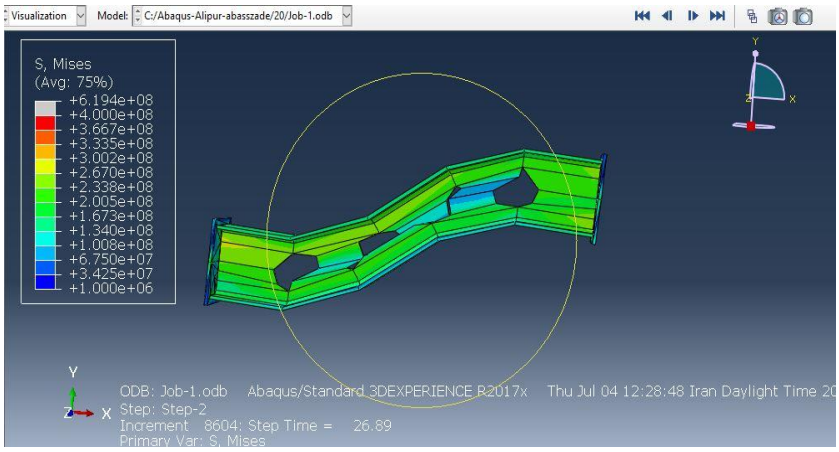
مراحل مدل‌سازی اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با ۲۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند و نتایج تحلیل‌های غیرخطی در شکل‌های (۱۷) تا (۲۱) ارائه شده است.



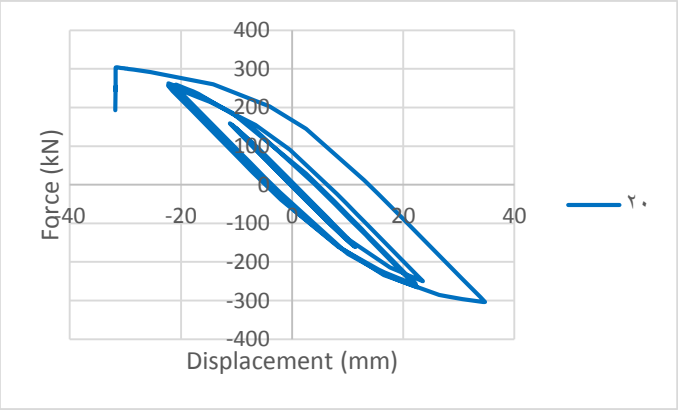
شکل ۱۷: مونتاژ مونتاژ نهایی نمونه‌ی مورد مطالعه با ۲۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند



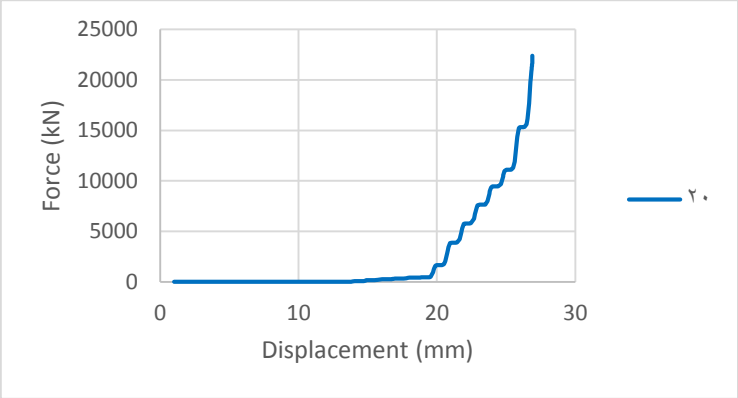
شکل ۱۸: جابه‌جایی بدست آمده بر مبنای استاندارد ATC24



شکل ۱۹: نمایش تنش ایجاد شده در تیر پیوند با ۲۰ درصد کاهش سطح جان



شکل ۲۰: نمودار هیسترزیس نیرو جابه‌جایی کل قاب

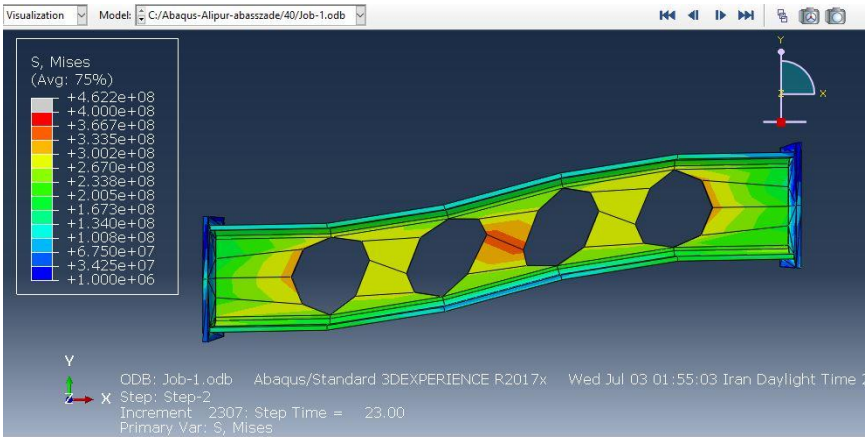


شکل ۲۱: نمودار تحلیل انرژی پلاستیسیته

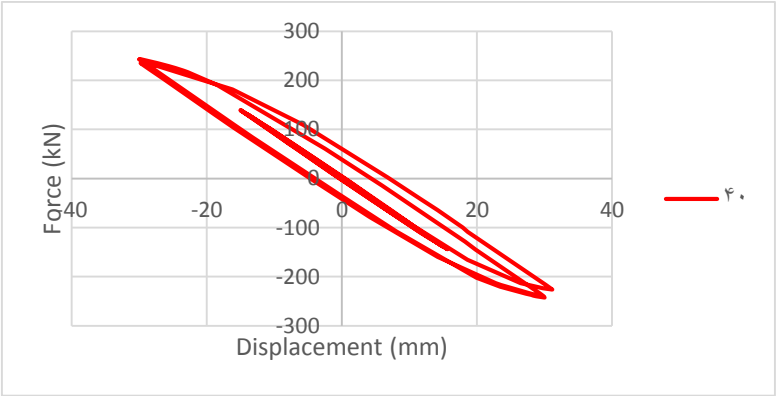
دوران در مدل اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با ۲۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند برابر ۰٫۰۵ رادیان می‌باشد.

چ) تیر پیوند با ۴۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند:

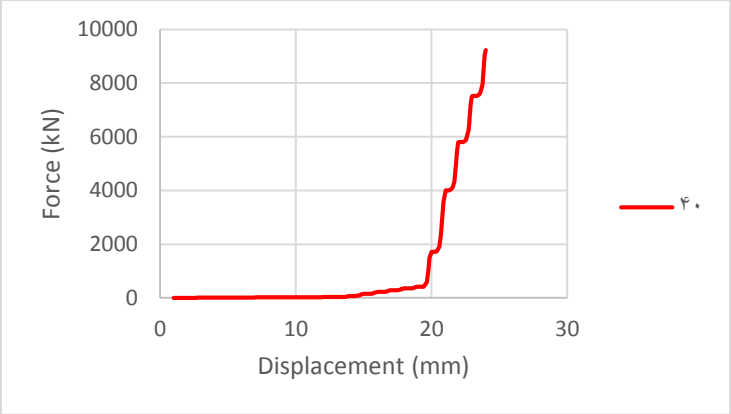
مراحل مدل‌سازی اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با ۴۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند و نتایج تحلیل‌های غیرخطی در شکل‌های (۲۲) تا (۲۴) ارائه شده است.



شکل ۲۲: نمایش تنش ایجاد شده در تیر پیوند با ۴۰ درصد کاهش سطح جان



شکل ۲۳: نمودار هیسترزیس نیرو جابه‌جایی کل قاب

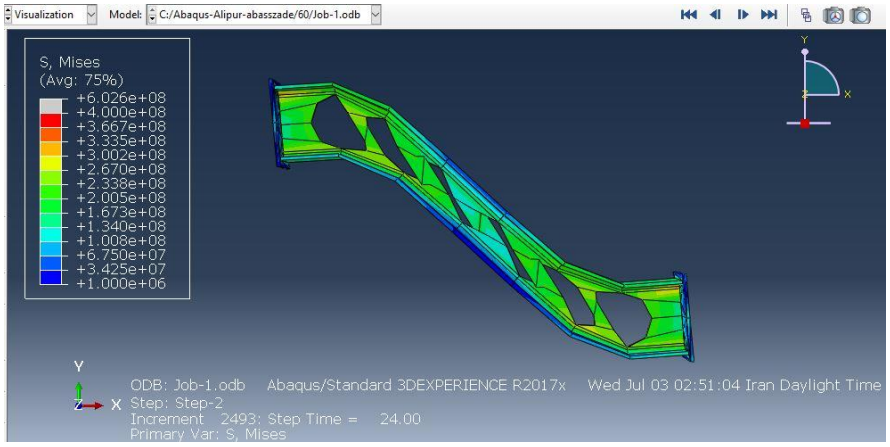


شکل ۲۴: نمودار تحلیل انرژی پلاستیسیته

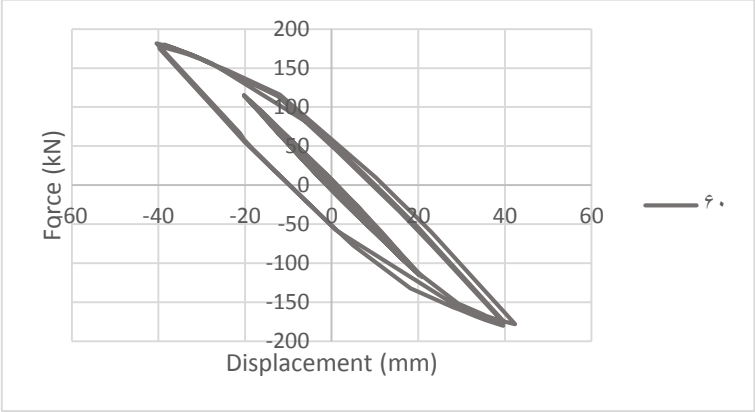
دوران در مدل اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با ۴۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند برابر ۰٫۰۶۲ رادیان می‌باشد.

چ) تیر پیوند با ۶۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند:

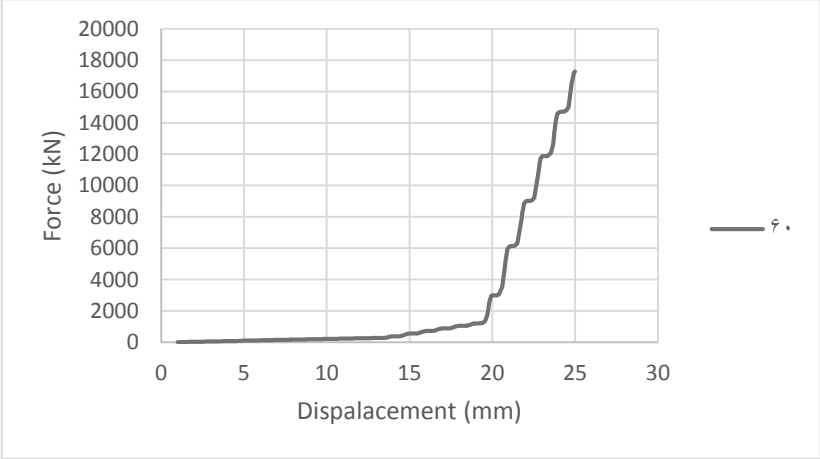
مراحل مدل‌سازی اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با ۶۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند و نتایج تحلیل‌های غیرخطی در شکل‌های (۲۵) تا (۲۷) ارائه شده است.



شکل ۲۵: نمایش تنش ایجاد شده در تیر پیوند با ۶۰ درصد کاهش سطح جان



شکل ۲۶: نمودار هیسترزیس نیرو جابه‌جایی کل قاب

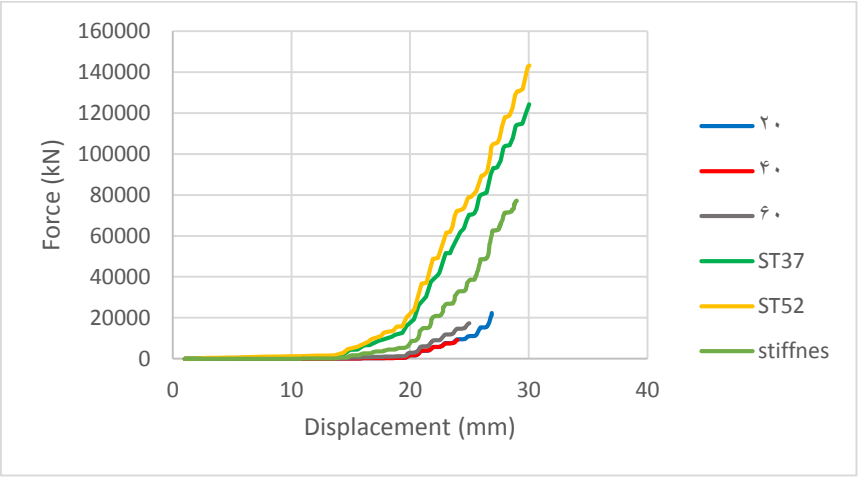


شکل ۲۷: نمودار تحلیل انرژی پلاستیسیته

دوران در مدل اجزا محدودی مهاربند کمانش تاب برون‌محور با ۶۰ درصد کاهش سطح جان تیر پیوند برابر ۰٫۰۴۹ رادیان می‌باشد.

۴- مقایسه نتایج انرژی

در این تحقیق، تیر پیوند ابتدا با فولاد *ST37* سپس با *ST52* و در مرحله‌ی بعد تیر پیوند با سخت شونده و کاهش سطح جان به اندازه‌های ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ مدل‌سازی شده است (جمعاً ۶ مدل). در ادامه مطابق شکل (۲۸)، مقایسه‌ی تحلیل انرژی پلاستیسیته در نمونه‌های مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۲۸: مقایسه تحلیل انرژی پلاستیسیته در نمونه‌های مختلف

با توجه به شکل (۲۸) می‌توان دریافت که با بررسی انرژی پلاستیسیته، نمونه‌ی ST52، دارای بیشترین مقاومت و به ترتسب نمونه‌ی ST37 ، نمونه با سخت کننده و نمونه‌هایی با کاهش ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد سطح مقطع می‌باشند.

۵- نتیجه‌گیری

با توجّه به تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی انجام‌شده در این تحقیق، مهم‌ترین یافته‌های حاصل به شرح ذیل قابل ذکر می‌باشد:

می‌توان دریافت که از دید فنی نمونه‌ی دارای سخت کننده دارای بیشترین مقاومت و به ترتسب نمونه‌ی ST52، نمونه‌ی ST37 ، نمونه با کاهش ۲۰ درصدی مقطع، نمونه با کاهش ۴۰ درصدی مقطع و نمونه با کاهش ۶۰ درصدی سطح مقع می‌باشد.

از دید اقتصادی نمونه دارای سخت‌کننده از لحاظ اقتصادی مناسب نیست زیرا با افزایش زیاد هزینه در مقابل افزایش ناچیز استهلاک رو به رو می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه‌ی کمی دوران و اتلاف انرژی مدل‌های مورد مطالعه در مقایسه با مدل تیر پیوند با فولاد ST37

شرح مدل	۲۰ درصد کاهش مقطع	۴۰ درصد کاهش مقطع	۶۰ درصد کاهش مقطع	فولاد ST37	سخت‌کننده
دوران	۳۱.۵۸	۶۳.۱۶	۲۸.۹۵	-۳۶.۸۴	-۵۵.۲۶
اتلاف انرژی	-۸۱.۹۸	-۹۲.۵۸	-۸۶.۱۱	۱۵.۱۶	-۳۷.۸۴

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود با افزایش درصد در کاهش مقطع تیر پیوند، زوایه‌ی دوران در تیر پیوند افزایش و اتلاف انرژی کاهش پیدا می‌کند.

با تبدیل فولاد ST37 به ST52 نیز تیر پیوند تردتر شده و زاویه‌ی دوران آن کاهش ولی به دلیل افزایش مقاومت این مصالح اتلاف انرژی بیشتر شده است.

اضافه نمودن سخت‌کننده نیز به تیر پیوند ST37 سبب کاهش دوران (ترد شدن) و کاهش اتلاف انرژی گردیده است.
با توجه به ارقام و تفسیر فوق بهینه‌ترین مدل، تیر پیوند با فولاد ST52 می‌باشد.

مراجع

- Canxing, Q., Yichen, Z., Han, L., Bing, Q., Hetao, H., Li, T. (2018), Seismic performance of Concentrically Braced Frames with non-buckling braces, Engineering Structures, Volume 154, 93-102.
- Deylami A. , Mahdavipour M.A Probabilistic seismic demand assessment of residual drift for Buckling-Restrained Braced Frames as a dual system, Structural Safety, Volume 58, January 2016, Pages 31-39.
- Hoveidae, N., Rafezy, B.,(2012). Overall Buckling Behavior of All Steel Buckling Restrained Braces, Journal of Constructional Steel Research , Vol. 79, pp. 151-158.
- Inoue, K. Sawaizumi, S. and Higashibata, Y. (1992). Bracing Design Criteria of the Reinforced Concrete Panel Including Unbonded Steel Diagonal Braces, Journal of Structural and Construction Engineering, vol. 1, pp. 41–49.
- Maurya A ,Eatherton M.R., Ryota Matsui. R., Florig S.H. (2016), Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as structural fuses, Journal of Constructional Steel Research, Volume 127, Pages 54-65.
- Nazarimofrad, E., Shokrgozar, A., (2019), Seismic performance of steel braced frames with self-cantering buckling-restrained brace utilizing superelastic shape memory alloys, Struct Design Tall Spec Build.
- Ozcelik, R., Dikiciasik, E., Erdil, F. (2017), The development of the buckling restrained braces with new end restrains, Journal of Constructional Steel Research, Volume 138, 208-220.
- Peng Pan , Wei Li , Xin Nie , Kailai Deng , Jiangbo Sun, (2016). Seismic performance of a reinforced concrete frame equipped with a double-stage yield buckling restrained brace, journal of The Structural Design of Tall and Specia , vol. 26.
- Piedrafita, D., Cahis, X., Simon, E., (2013). A New Modular Buckling Restrained Brace for Seismic Resistant Buildings, Engineering Structures, Vol. 56, pp. 1967-1975.
- Quan Gu, Alessandro Zona, Yi Peng, Andrea Dall'Asta, (2014). Effect of buckling-restrained brace model parameters on seismic structural response, Journal of Constructional Steel Research, Volume 98, Pages100-113.
- Shen, J., Seker, O., Akbas, B., Seker, P., Momenzadeh, S.B., Faytarouni, M. (2017), Seismic performance of concentrically braced frames with and without brace buckling, Engineering Structures, Volume 141, 461-481.
- Wang, C., Usami, T., Funayama, J., (2012). Evaluation the Influence of Stoppers on the Low-Cycle Fatigue Properties of High Performance Buckling Restrained Braces, Engineering Structures, Vol. 41, pp. 167-176.
- Yashino T, Karino Y., (1998). Experimental Study on Shear Wall with Braces: Part 2. Summaries of Technical Papers of Annuals Meeting, Vol. 11. Architectural Institute of Japan Engineering Section; 1971. P 403-4.
- Zhao, J., Wu, B., Ou, J., (2012). Effect of Brace End Rotation on the Global Buckling Behavior of Pin-Connected Buckling Restrained Braces with End Collars, Engineering Structures, Vol. 40, pp. 240-253.