



بررسی امکان استفاده از مقاطع دایروی یا بیضوی در ورق مهاربندی میانی به عنوان فیوز (مستهلك کننده انرژی)

الهام بیطرف^{۱*}، حمیدرضا امیری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

* elham1312@yahoo.com

ارسال: مرداد ماه ۹۶ پذیرش: مهر ماه ۹۶

چکیده

قاب‌های مهارشده همگرا دارای سختی بالا در برابر بارهای جانبی می‌باشند. با این حال جذب انرژی در این قاب‌ها از طریق کماتش مهاربند فشاری انجام می‌شود که چندان مطلوب نیست. در این تحقیق امکان استفاده از پروفیل‌های لوله‌ای با بازشوهای دایروی و بیضوی به عنوان فیوز جاذب انرژی در صفحه اتصال مهاربندها به یکدیگر در قاب‌های مهارشده همگرا مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام تحقیق از روش اجزای محدود و نرم‌افزار اباکوس استفاده می‌شود. در ابتدا با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی موجود در ادبیات موضوع، صحت سنجی مدل‌سازی انجام شده و انطباق مناسبی میان نتایج حاصل از آزمایش و نتایج پیش‌بینی شده توسط روش اجزای محدود مشاهده شده است. در ادامه تأثیر متغیرهای مورد نظر تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج باهم مقایسه و نتیجه‌گیری انجام شده است. ملاحظه گردید در حالتی که از دو لوله جاذب انرژی سوراخ‌دار در دو جهت افقی و عمودی استفاده می‌شود مناسب‌ترین رفتار از لحاظ جذب انرژی و مقاومت در بین نمونه‌های قاب مهارشده همگرا حاصل می‌گردد.

کلمات کلیدی: قاب مهارشده همگرا، فیوز جاذب انرژی، مدل‌سازی اجزای محدود، پروفیل لوله‌ای.

۱. مقدمه

یکی از دستگاه‌های باربر جانبی رایج و مؤثر مقاوم در برابر زلزله، قاب‌های مهاربندی جانبی هستند. از ویژگی‌های مهم قاب‌های مهاربندی سختی مناسب و قابل توجه آن‌ها در مقایسه با قاب‌های خمشی است. توسعه و گسترش دستگاه‌های مهاربندی جانبی و جزئیات مناسب آن‌ها که از سال ۱۹۶۰ میلادی آغاز شده و تاکنون نیز تحقیقات در مورد آن‌ها ادامه دارد این امکان را فراهم کرد که دستیابی به یک سیستم با سختی و شکل‌پذیری مناسب میسر گردد. در زلزله سال ۱۹۷۱ سان فرناندو عملکرد رضایت‌بخش این سیستم باربر جانبی مورد توجه قرار گرفت. یکی از روش‌هایی که در افزایش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از فیوز است. این روش می‌تواند به این مهاربندها در افزایش شکل‌پذیری نیز کمک نماید و محل آسیب را از مهاربند به این عضو قابل تعویض منتقل نماید. یکی از محل‌هایی که در آن می‌توان از این فیوزها استفاده نمود ورق اتصال مهاربندها به یکدیگر است.

در این تحقیق امکان استفاده از عضو دایروی یا بیضی شکل به عنوان فیوز برای جذب انرژی زلزله در این نوع قاب‌های مهاربندی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سیستم‌ها (مستهلك کننده انرژی) می‌تواند آسیب را از نقاطی از سازه که قابلیت تعویض ندارند به نقاطی که قابل تعویض هستند انتقال دهد.

تاکنون در کشورهای مختلف جهان تحقیقات زیادی در زمینه‌ی این تجهیزات صورت پذیرفته اما استفاده از آن‌ها نیازمند صرف هزینه و همچنین تکنولوژی ساخت بالاست که در کشور ما به صرفه نیست لذا پیشنهاد سیستمی که بتواند در عین سادگی، از توان بالایی در استهلاک انرژی نیز برخوردار باشد ضرورت دارد. هدف اصلی از طرح پیشنهادی بررسی امکان استفاده از مقاطع دایروی و بیضی شکل در ورق گاست پلیت میانی و تعیین پارامترهای مورد نیاز برای انجام این کار می‌باشد.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

تاناکا و ساساکی در سال ۲۰۰۰ تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی پانل‌های برشی ساخته شده از فولاد با مقاومت بسیار کم (۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) انجام دادند. نمونه‌های مربعی و مستطیلی با و بدون سخت کننده مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه گرفته شد که منحنی‌های هیستریزس برای اغلب نمونه‌ها پایدار است. افت متوسطی در رفتار نمونه‌های پانل لاغر مشاهده گردید. هرچند تمامی نمونه‌ها مقدار قابل توجهی انرژی را قبل از بروز گسیختگی جذب نمودند [۱].

مک دانیل و همکاران در سال ۲۰۰۳ آزمایش‌هایی بر روی پانل‌های برشی برای کاربرد در پل‌ها انجام دادند. نتایج نشانگر جذب انرژی بالا و پایداری چرخه‌های هیستریزس در نمونه‌ها بوده است. گسیختگی نمونه‌ها در محل جوش اتفاق افتاد [۲]. مقالات بونتی و ماتاموروس در سال ۲۰۰۸ امکان استفاده از المان‌های فیوز در قاب‌های مهارشده همگرا را مورد بررسی قرار دادند. در روش پیشنهادی آن‌ها فیوز از میله‌های فولادی که در داخل پلیمر مدفون شده و توسط FRP محصور شده استفاده گردید. مطالعه آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها انجام شد و نتایج نشان داد که رفتار فیوز در کشش و فشار یکسان است و می‌تواند مقدار قابل توجهی انرژی را بدون گسیختگی جذب نماید [۳].

میرزا حسینی و همکاران در سال ۱۳۹۴ تأثیر حلقه‌ی فولادی در قاب‌های مهاربندی شده‌ی هم مرکز تحت زلزله‌های مصنوعی به روش موجک را مورد بررسی قرار دادند. حلقه‌ی فولادی یکی از انواع المان‌های جاذب انرژی است که در تحقیق مذکور به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. حلقه‌ی فولادی در هنگام وقوع زلزله از ورود سایر اعضا به ناحیه‌ی غیرخطی و کمانش در مهاربند جلوگیری می‌کند و یا آن را به تعویق می‌اندازد، در این تحقیق، ضمن مدل‌سازی و انجام آنالیز غیرخطی قاب‌های خمشی مهاربندی شده‌ی هم محور، تأثیر حلقه‌ی فولادی یک بار تحت زلزله‌های موجود و بار دیگر تحت زلزله‌های مصنوعی تولید شده به روش موجک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حلقه‌ی فولادی ضمن کاهش برش پایه، عملکرد مطلوبی در استهلاک انرژی خواهد داشت [۴]. محققان دیگری نیز روشی مشابهی برای افزایش جذب انرژی قاب مهارشده همگرا پیشنهاد نمودند [۵-۶-۷]. گیانوزی در سال ۲۰۱۶ امکان استفاده از پانل برشی مابین مهاربند‌های در قاب مهارشده همگرا را مورد بررسی قرار داد. در این سیستم یک فیوز به شکل پانل برشی مستطیلی به عنوان عضو جاذب انرژی مورد استفاده قرار گرفت. در شکل زیر قاب پیشنهادی قابل مشاهده است. نتایج بیانگر جذب انرژی بالا و مقاومت جانبی کافی قاب در برابر بار جانبی بوده است [۸].

۳. مواد و روش‌ها

برای انجام تحقیق از روش اجزای محدود استفاده خواهد شد. نرم افزار اجزای محدود اباکوس برای ساخت و تحلیل مدل‌ها استفاده می‌شود. برای اطمینان از دقت و صحت پیش‌بینی مدل‌های ساخته شده توسط نرم افزار ذکر شده، از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی استفاده خواهد شد. مدل‌ها مشابه نمونه آزمایش شده با ابعاد هندسی و مشخصات مصالح کاملاً یکسان ساخته شده

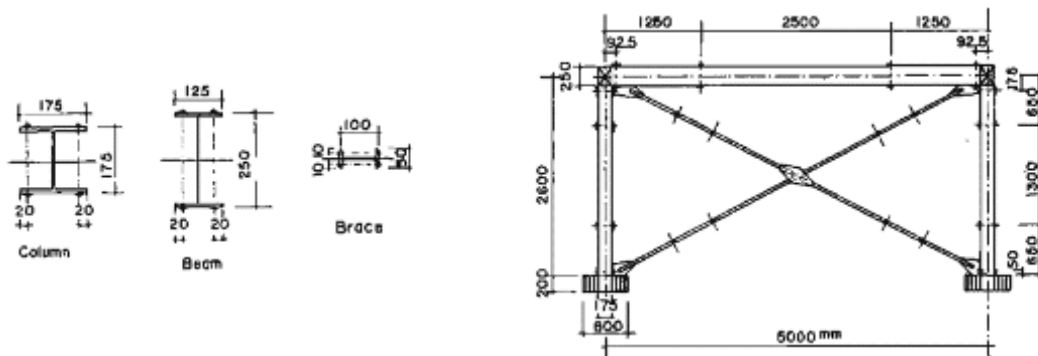
و تحت بارگذاری مشابه آزمایش مدل تحلیل می‌گردد و نتایج آزمایش با پیش‌بینی‌های حاصل از تحلیل مدل‌ها مقایسه می‌شود و در صورت انطباق، می‌توان به نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود اعتماد نمود.

۱.۳. صحت سنجی مدل اجزای محدود

در گام اول برای اطمینان از دقت و صحت پیش‌بینی مدل‌های اجزای محدود، مدل‌های ارائه شده در مراجع [۹] و [۱۰] با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله با نتایج مراجع ذکر شده مقایسه گردید.

۱.۱.۳. صحت سنجی قاب

برای انجام این کار از نتایج آزمایشات واکاباشی و همکاران [۹] بهره‌گیری خواهد شد. در شکل ۱ نمونه قاب مهاربندی شده همگرای آزمایش شده نمایش داده شده است. نمونه BMO برای صحت سنجی انتخاب شده است. مدل اجزای محدود با مشخصات ذکر شده در شکل ۱ ساخته شده و مشخصات مصالح نمونه آزمایشگاهی برای آن تعریف گردیده است. برای تعریف رفتار فولاد از مدل دوخطی با در نظر گرفتن غیرخطی شدن هندسی (تغییرشکل‌های بزرگ) استفاده شده است.



شکل ۱- نمونه قاب مهاربندی آزمایش شده توسط واکاباشی و مشخصات هندسی اعضا [۹]

مشخصات مصالح مطابق مشخصات ذکر شده در مقاله برای هر یک از اعضای تیر، مهاربند و ستون تعریف شده است. مشخصات مصالح در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح اعضا به کار برده شده در نمونه آزمایشگاهی [۱۵]

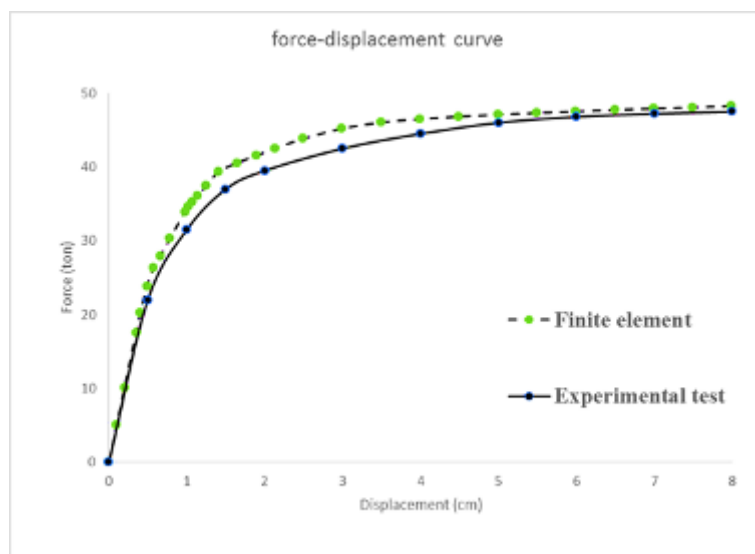
Speci- Men Name	Column					Beam					Brace				
	σ_v (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ϵ_u %	ϵ_{sl}/ϵ_y	E_{sl}/E	σ_v (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ϵ_u %	ϵ_{sl}/ϵ_y	E_{sl}/E	σ_v (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	ϵ_u %	ϵ_{sl}/ϵ_y	E_{sl}/E
BM 0	2.53	4.23	28.1	14.5	0.014	2.75	4.08	27.8	13.2	0.011	2.93	4.61	25.3	14.5	0.013

بارگذاری به صورت بارافزون در یک تحلیل استاتیکی به نمونه وارد شده است. مش بندی مدل با استفاده از المان‌های مستطیلی چهار گرهی (shell) انجام شده است و در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- مدل مش بندی شده نمونه مهاربندی شده

نتایج حاصل از مدل اجزای محدود با نتایج ثبت شده در آزمایش مقایسه شده که در شکل ۳ قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود، دو منحنی در بخش خطی کاملاً بر هم منطبق هستند. بعد از وقوع تسلیم در منحنی و بروز غیرخطی شدن، دو منحنی مقداری از هم فاصله می گیرند که حداکثر این اختلاف برابر ۸٪ می باشد. در بخش انتهایی دو منحنی انطباق کاملی دارند. با توجه به این مقایسه می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل سازی اجزای محدود قابل اعتماد بوده و می توان از این روش برای بررسی تأثیر متغیرهای تحقیق استفاده نمود.



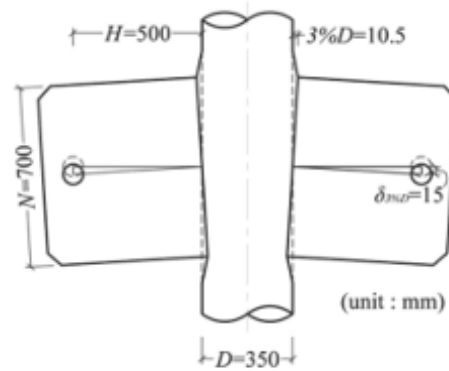
شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و نتایج پیش بینی شده توسط مدل اجزای محدود

۲.۱.۳ صحت سنجی مدل پروفیل لوله ای و ورق

در گام دوم به صحت سنجی نمونه مقطع لوله و صفحه فولادی پرداخته شد. آزمایشات انجام شده توسط لی و همکاران [۱۰] برای انجام صحت سنجی در این بخش انتخاب شد. نمونه آزمایش شده در تحقیق آزمایشگاهی مرجع و جزییات دستگاه آزمایش در شکل ۴ قابل مشاهده است.



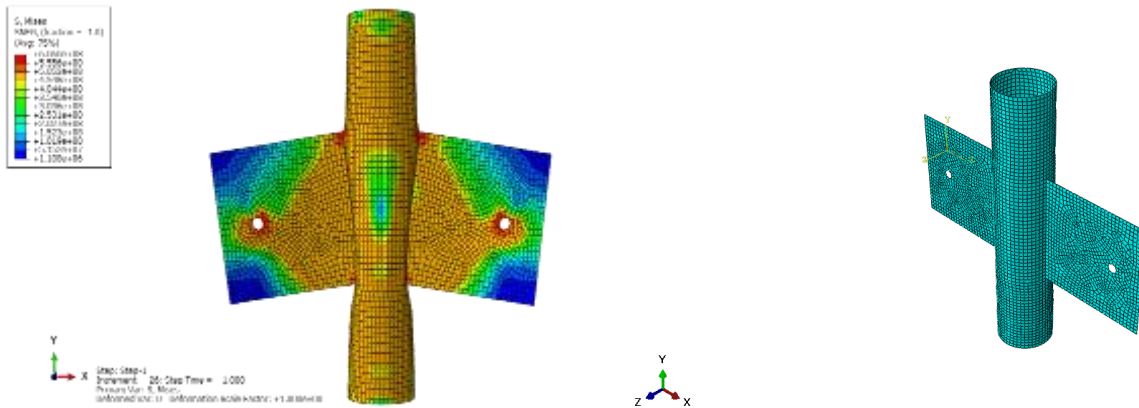
(a) Setup of test



(b) 3%D of LM-N700

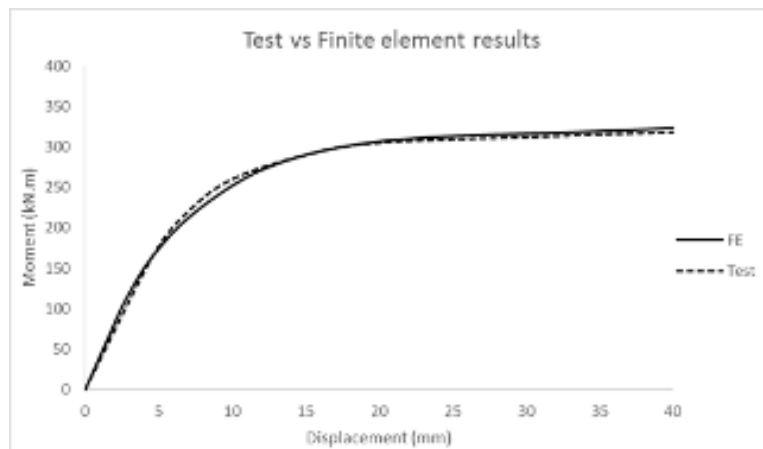
شکل ۴- جزئیات نمونه آزمایشگاهی و دستگاه انجام آزمایش [۱۰]

مدل اجزای محدود نمونه آزمایشگاهی با هندسه و مشخصات مصالح یکسان ساخته و تحلیل شد. مش بندی با استفاده از المان‌های مستطیلی چهار گرهی انجام شده است. مدل ساخته شده در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵- مدل اجزای محدود مش بندی شده و مدل تحلیل شده

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود دو نمودار هم در بخش خطی و هم در بخش غیرخطی انطباق بسیار خوبی داشته و حداکثر اختلاف دو منحنی برابر ۳٪ است. با توجه به این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی اجزای محدود می‌تواند با دقت مناسب و به‌طور قابل اطمینانی رفتار چنین اعضای را پیش‌بینی نماید.



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از مدل اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی

۴. نتایج و بحث

۱.۴. بررسی تأثیر متغیرهای تحقیق بر رفتار قاب مهار شده همگرا

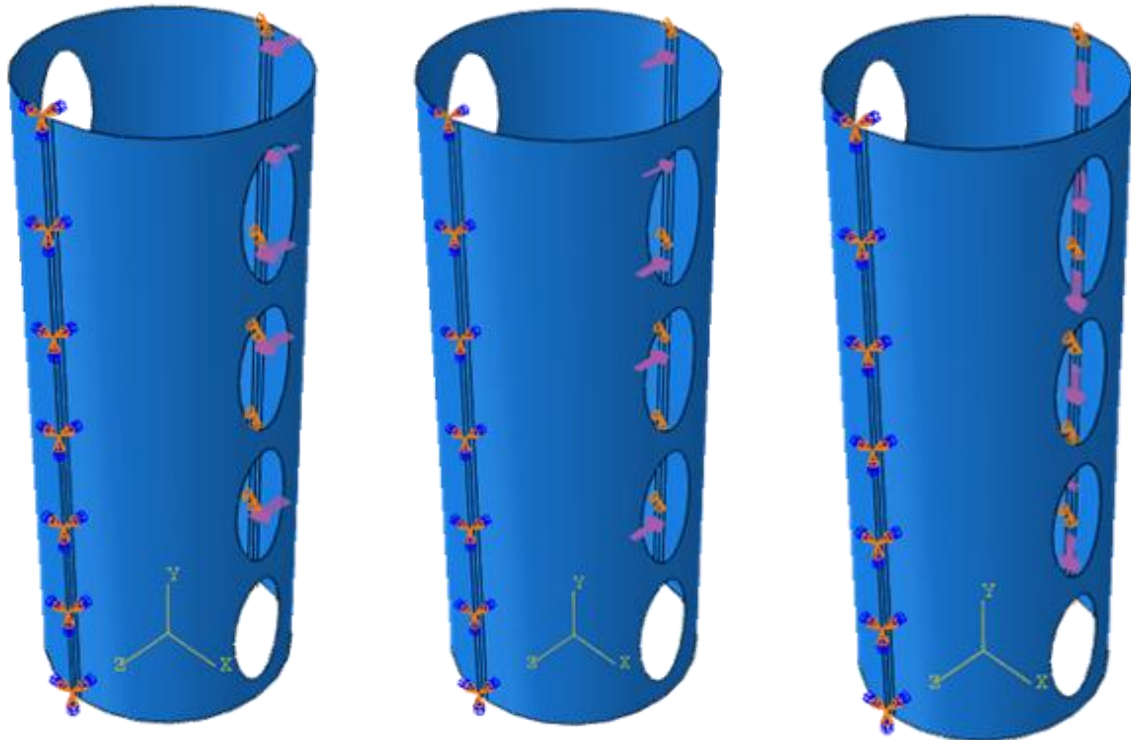
۱.۱.۴. بررسی تأثیر تعداد و شکل سوراخ‌های بیضی شکل در مقطع لوله‌ای

در این بخش قطعه‌ای لوله شکل از فولاد با طول ۱ متر و قطر ۴۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. سوراخ‌هایی با شکل، تعداد و اندازه‌های گوناگون در دو جهت عمودی و افقی در لوله ایجاد شده است. ۲۳ مدل ساخته شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است. فولاد استفاده شده از نوع ST37 ساخته شده است.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های لوله‌ای شکل

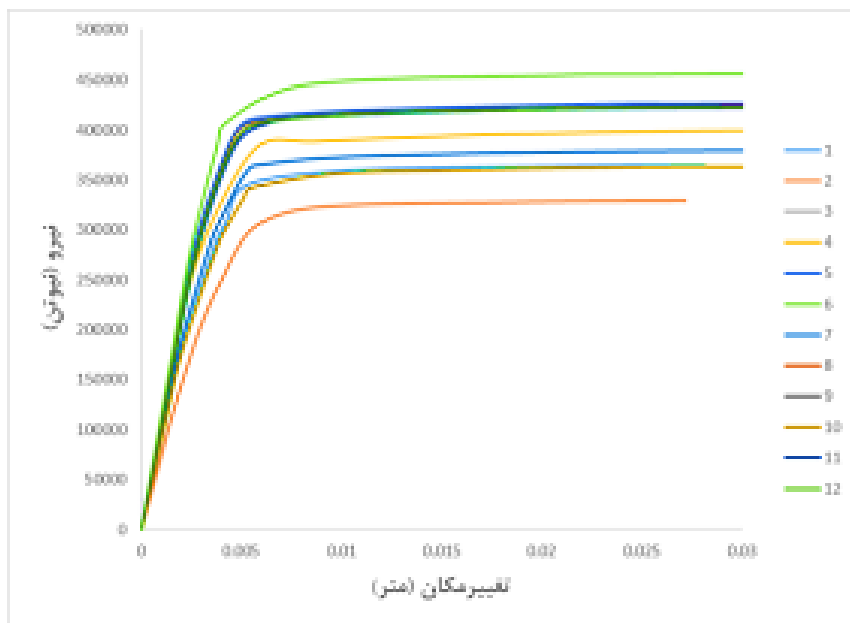
شماره مدل	جهت قرارگیری سوراخ‌ها	تعداد سوراخ‌ها	قطر بزرگ	قطر کوچک	فاصله سوراخ‌ها
۱	در جهت محور لوله	۴	۲۰	۱۰	۴
۲	در جهت محور لوله	۳	۳۰	۱۵	۲/۵
۳	در جهت محور لوله	۲	۴۰	۲۰	۶/۷
۴	در جهت محور لوله	۷	۱۰	۳	۲/۵
۵	در جهت محور لوله	۶	۱۰	۳	۵
۶	در جهت محور لوله	۵	۱۰	۳	۷/۵
۷	در جهت محور لوله	۵	۱۵	۳	۲/۵
۸	در جهت محور لوله	۴	۱۵	۳	۵
۹	در جهت محور لوله	۴	۱۵	۳	۷/۵
۱۰	در جهت محور لوله	۴	۲۰	۳	۲/۵
۱۱	در جهت محور لوله	۳	۲	۳	۵
۱۲	در جهت محور لوله	۳	۲۰	۳	۷/۵
۲-۱	در جهت عمود بر محور لوله	۸	۲۰	۱۰	۴
۲-۲	در جهت عمود بر محور لوله	۵	۳۰	۱۵	۲/۵
۲-۳	در جهت عمود بر محور لوله	۱۸	۱۰	۳	۲/۵
۲-۴	در جهت عمود بر محور لوله	۱۲	۱۰	۳	۵
۲-۵	در جهت عمود بر محور لوله	۱۰	۱۰	۳	۷/۵
۲-۶	در جهت عمود بر محور لوله	۱۸	۱۵	۳	۲/۵
۲-۷	در جهت عمود بر محور لوله	۱۲	۱۵	۳	۵
۲-۸	در جهت عمود بر محور لوله	۱۰	۱۵	۳	۷/۵
۲-۹	در جهت عمود بر محور لوله	۱۸	۲۰	۳	۲/۵
۲-۱۰	در جهت عمود بر محور لوله	۱۲	۲	۳	۵
۲-۱۱	در جهت عمود بر محور لوله	۱۰	۲۰	۳	۷/۵

هریک از این مدل‌ها تحت نیروهای کششی، فشاری و برشی قرار گرفته که در مجموع ۶۹ مدل تحلیل شده و نتایج استخراج شده است. شرایط تکیه‌گاهی و نحوه اعمال بار در شکل ۷ قابل مشاهده است. سمت چپ لوله‌ها تکیه‌گاه گیردار و سمت راست محل اعمال نیروست که در شکل با فلش نمایش داده شده است.



شکل ۷- شرایط مرزی و بارگذاری نمونه‌ها در سه حالت فشاری، کششی و برشی

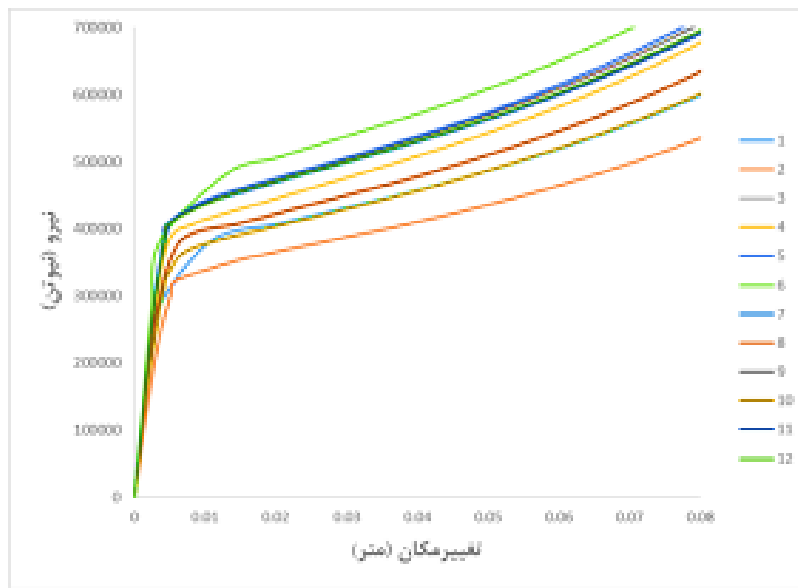
در اشکال ۸ تا ۱۰ نتایج حاصل از مدل‌ها در قالب نمودار نیرو-تغییر مکان برای سه حالت فشاری، کششی و برشی در نمونه‌های با سوراخ در جهت محور طولی لوله قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۸- منحنی نیرو-تغییر مکان برای حالت فشاری در نمونه‌ها با سوراخ در جهت محور لوله

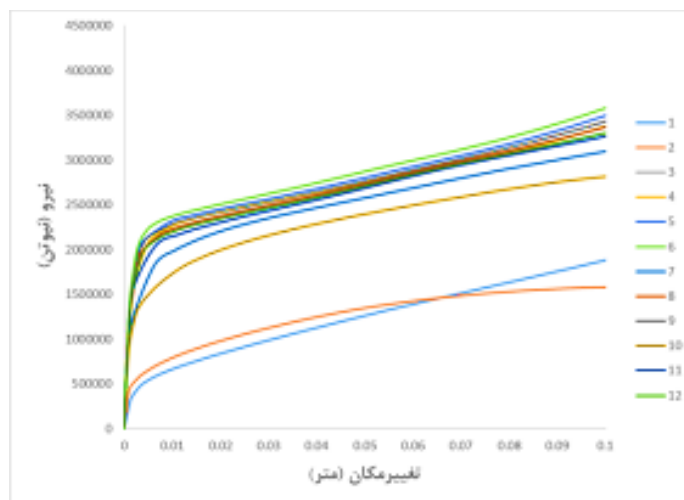
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود حداکثر مقاومت در برابر بار فشاری در نمونه ۶ اتفاق افتاده است که برابر ۴۵۵ کیلو نیوتن است. کمترین مقاومت در نمونه ۲ با مقدار ۳۲۸ کیلو نیوتن اتفاق افتاده است؛ بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش سطح سوراخ‌های به کار گرفته‌شده، مقاومت نمونه کاهش یافته است. این روند در مورد سختی نیز قابل مشاهده است

به طوری که سختی نمونه ۶ که بیشترین سختی مشاهده شده است برابر ۱۱۵۱۸۳ کیلونیوتن بر متر و برای نمونه ۲ که کمترین میزان سختی را دارد برابر ۷۵۳۶۹ کیلونیوتن بر متر است. میزان جذب انرژی در نمونه شماره ۶ حدود ۳۸٪ بیشتر از نمونه شماره ۲ است؛ بنابراین با ایجاد سوراخ‌های بیشتر با مساحت کمتر می‌توان رفتار شکل پذیرتری در لوله در فشار ایجاد کرد.



شکل ۹- منحنی نیرو-تغییر مکان برای حالت کششی در نمونه‌ها با سوراخ در جهت محور لوله

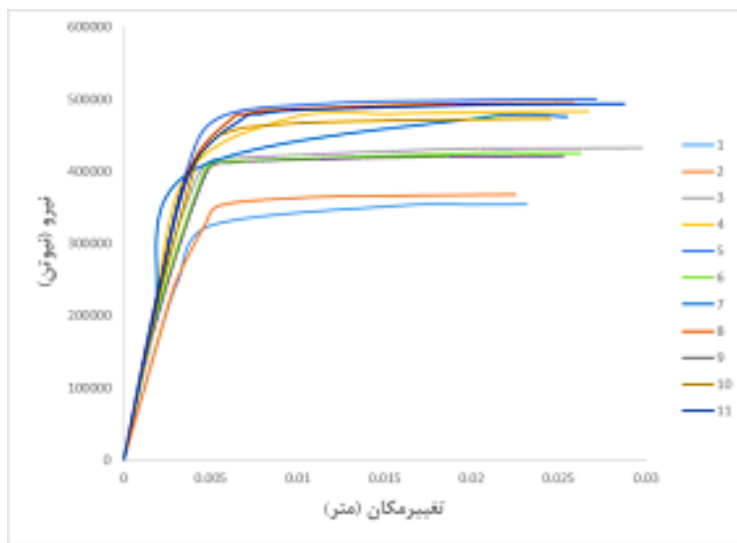
همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، جذب انرژی، مقاومت و سختی در حالت کششی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حالت بارگذاری فشاری است. سختی اولیه نمونه‌ها مشابه حالت فشاری است، اما بعد از شکست منحنی نیرو-تغییر مکان، منحنی کششی بالاتر از منحنی حالت بارگذاری فشاری ادامه می‌یابد. حداکثر مقاومت در برابر بار کششی نیز در نمونه ۶ اتفاق افتاده است که ۷۸٪ بیشتر از مقاومت این نمونه در حالت فشاری است. در اینجا نیز با افزایش سطح سوراخ‌های به کار گرفته شده، مقاومت نمونه کاهش یافته است. این روند در مورد سختی نیز قابل مشاهده است به طوری که سختی نمونه ۶ که بیشترین سختی مشاهده شده است برابر ۱۱۵۱۸۳ کیلونیوتن بر متر و برای نمونه ۲ که کمترین میزان سختی را دارد برابر ۷۵۳۶۹ کیلونیوتن بر متر است. میزان جذب انرژی در نمونه شماره ۶ حدود ۸۲٪ بیشتر از نمونه شماره ۲ است؛ بنابراین با ایجاد سوراخ‌های بیشتر با مساحت کمتر می‌توان رفتار شکل پذیرتری در لوله در کشش ایجاد کرد.



شکل ۱۰- منحنی نیرو-تغییر مکان برای حالت برشی در نمونه‌ها با سوراخ در جهت محور لوله

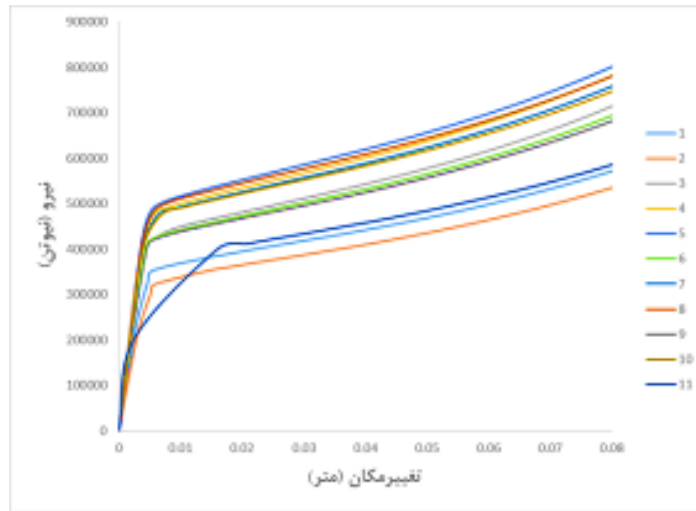
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، جذب انرژی، مقاومت و سختی در حالت برشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حالت بارگذاری فشاری و کششی است؛ بنابراین بهترین حالت جذب انرژی حالتی است که نمونه تحت برش عمل نماید. سختی اولیه نمونه‌ها بسیار بیشتر از حالت کششی است. حداکثر مقاومت در برابر بار برشی نیز در نمونه ۶ اتفاق افتاده است که ۴۰٪ بیشتر از مقاومت این نمونه در حالت کششی است. در اینجا نیز با افزایش سطح سوراخ‌های به کار گرفته شده، مقاومت نمونه کاهش یافته است. این روند در مورد سختی نیز قابل مشاهده است به‌طوری که سختی نمونه ۶ که بیشترین سختی مشاهده شده است برابر ۱۲۹۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر و برای نمونه ۱ که کمترین میزان سختی را دارد برابر ۶۱۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر است. میزان جذب انرژی در نمونه شماره ۶ حدود ۳۱٪ بیشتر از نمونه شماره ۱ است؛ بنابراین با ایجاد سوراخ‌های بیشتر با مساحت کمتر می‌توان رفتار شکل‌پذیرتری در لوله در برش ایجاد کرد.

در اشکال ۱۱ تا ۱۳ نتایج حاصل از مدل‌ها در قالب نمودار نیرو-تغییر مکان برای سه حالت فشار، کشش و برش در نمونه‌های با سوراخ عمود بر جهت لوله قابل مشاهده می‌باشند.



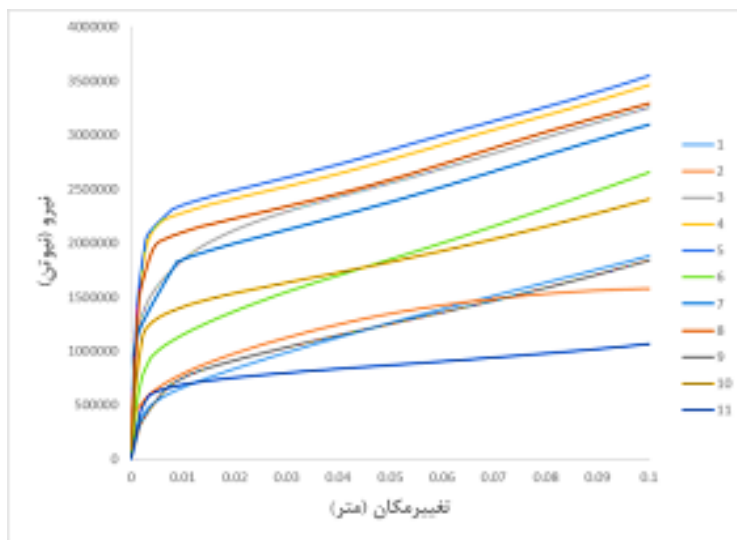
شکل ۱۱- منحنی نیرو-تغییر مکان برای حالت فشاری در نمونه‌ها با سوراخ عمود بر محور لوله

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در حالتی که قطر بزرگ سوراخ‌های بیضوی عمود بر محور لوله در نظر گرفته شده است، حداکثر مقاومت در برابر بار فشاری در نمونه ۵ اتفاق افتاده است که برابر ۵۰۰ کیلونیوتن است. این مقدار حدود ۱۰ درصد بیشتر از حداکثر مقاومت در حالتی بود که سوراخ‌ها در جهت محور لوله قرار داشتند. کمترین مقاومت در نمونه ۱ با مقدار ۳۵۳ کیلونیوتن اتفاق افتاده است؛ بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش سطح سوراخ‌های به کار گرفته شده، مقاومت نمونه کاهش یافته است. این روند در مورد سختی نیز قابل مشاهده است به‌طوری که سختی نمونه ۶ که بیشترین سختی مشاهده شده است برابر ۱۲۱۴۸۹ کیلونیوتن بر متر و برای نمونه ۱ که کمترین میزان سختی را دارد برابر ۸۳۱۴۲ کیلونیوتن بر متر است. میزان جذب انرژی در نمونه شماره ۵ حدود ۶۴٪ بیشتر از نمونه شماره ۱ است؛ بنابراین با ایجاد سوراخ‌های بیشتر با مساحت کمتر می‌توان رفتار شکل‌پذیرتری در لوله در فشار ایجاد کرد. همچنین ملاحظه گردید که رفتار نمونه‌ها در این حالت مناسب‌تر از وقتی است که سوراخ‌ها در جهت طولی لوله ایجاد شده بود.



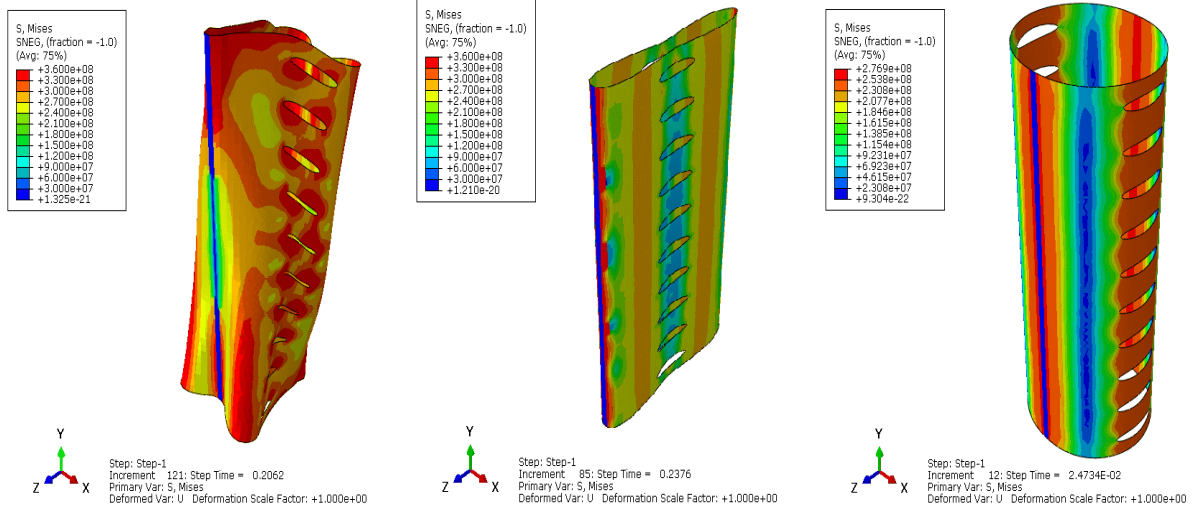
شکل ۱۲- منحنی نیرو-تغییر مکان برای حالت کششی در نمونه‌ها با سوراخ عمود بر محور لوله

همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود جذب انرژی، مقاومت و سختی در حالت کششی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حالت بارگذاری فشاری است. سختی اولیه نمونه‌ها مشابه حالت فشاری است، اما بعد از شکست منحنی نیرو- تغییر مکان، منحنی کششی بالاتر از منحنی حالت بارگذاری فشاری ادامه می‌یابد. حداکثر مقاومت در برابر بار کششی نیز در نمونه ۵ اتفاق افتاده است که ۶۵٪ بیشتر از مقاومت این نمونه در حالت فشاری است. در اینجا نیز با افزایش سطح سوراخ‌های به کار گرفته شده، مقاومت نمونه کاهش یافته است. این روند در مورد سختی نیز قابل مشاهده است به‌طوری‌که سختی نمونه ۵ که بیشترین سختی مشاهده شده است برابر ۱۱۵۱۵۴ کیلونیوتن بر متر و برای نمونه ۲ که کمترین میزان سختی را دارد برابر ۷۵۸۰۴ کیلونیوتن بر متر است. میزان جذب انرژی در نمونه شماره ۵ حدود ۱۰۳٪ بیشتر از نمونه شماره ۲ است؛ بنابراین با ایجاد سوراخ‌های بیشتر با مساحت کمتر می‌توان رفتار شکل‌پذیرتری در لوله در کشش ایجاد کرد.



شکل ۱۳- منحنی نیرو-تغییر مکان برای حالت برشی در نمونه‌ها با سوراخ عمود بر محور لوله

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، جذب انرژی، مقاومت و سختی در حالت برشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حالت بارگذاری فشاری و کششی است؛ بنابراین بهترین حالت جذب انرژی حالتی است که نمونه تحت برش عمل نماید. حداکثر مقاومت در برابر بار برشی نیز در نمونه ۵ اتفاق افتاده است که ۳۷۷٪ بیشتر از مقاومت این نمونه در حالت کششی است. در اینجا نیز با افزایش سطح سوراخ‌های به کار گرفته شده، مقاومت نمونه کاهش یافته است. این روند در مورد سختی نیز قابل مشاهده است به‌طوری که سختی نمونه ۵ که بیشترین سختی مشاهده شده است برابر ۱/۳۷ گیگانیوتن بر متر و برای نمونه ۱ که کمترین میزان سختی را دارد برابر ۲۵۵ مگانیوتن بر متر است. میزان جذب انرژی در نمونه شماره ۵ حدود ۲۳۲٪ بیشتر از نمونه شماره ۱ است؛ بنابراین با ایجاد سوراخ‌های بیشتر با مساحت کمتر می‌توان رفتار شکل‌پذیرتری در لوله در برش ایجاد کرد. در اشکال ۱۴ الی ۱۶ تغییر شکل نمونه ۲-۸ تحت بارهای فشاری، کششی و برشی قابل مشاهده است.



شکل ۱۶- کانتور تنش فون میزس در نمونه ۲-۸ تحت بار برشی از طرفین

شکل ۱۵- کانتور تنش فون میزس در نمونه ۲-۸ تحت بار کششی از طرفین

شکل ۱۴- کانتور تنش فون میزس در نمونه ۲-۸ تحت بار فشاری از طرفین

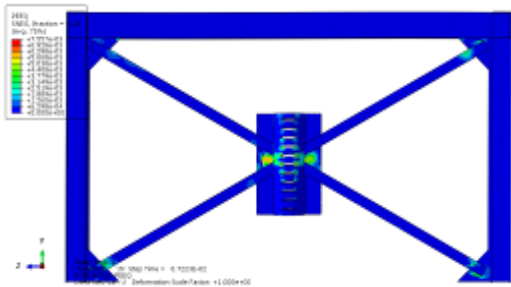
۲.۱.۴. بررسی رفتار قاب مهارشده همگرا با لوله مرکزی

بعد از بررسی رفتار لوله‌های سوراخ‌دار تحت نیروهای فشاری، کششی و برشی، به بررسی رفتار قاب مهارشده همگرا با لوله در مرکز مهاربندها پرداخته شده است. سه نوع قرارگیری لوله به‌طور افقی، عمودی و افقی و عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. سه نوع ترکیب سوراخ کاری برای لوله نیز استفاده شده و در مجموع ۹ قاب تحت بار بارافزون تحلیل شده‌اند. سه نوع شکل و فاصله سوراخ استفاده شده عبارت‌اند از سوراخ بیضوی ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۷/۵ سانتی‌متر، سوراخ بیضوی ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتی‌متر و سوراخ بیضوی ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتی‌متر. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌ها ارائه می‌شود.

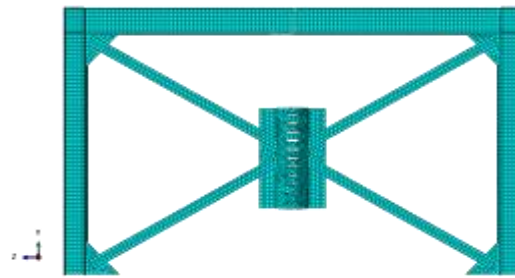
الف) لوله عمودی:

✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۷/۵ سانتی‌متر

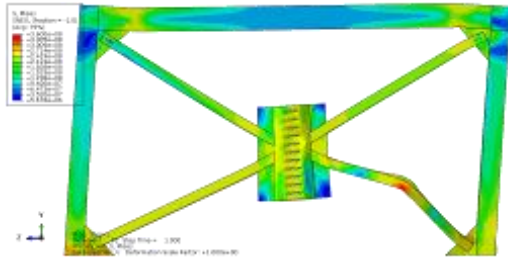
نمونه‌ای از قاب با لوله عمودی در شکل ۱۷ قابل مشاهده است. طول لوله ۱/۲ متر و قطر آن برابر ۰/۴ متر است. صفحه‌ای به طول ۱/۲ متر و عرض ۰/۸ متر برای اتصال لوله به مهاربندها مورد استفاده قرار گرفته است. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کمانش مهاربند در نمونه در دریفت حدود ۰/۵ درصد شروع شده و این کمانش باعث افت مقاومت نمونه در ادامه شده است. در شکل ۱۸ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه در مرحله شروع کمانش مهاربند قابل مشاهده است. کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دریفت ۰/۶/۲۵) در شکل ۱۹ قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۲۰ دیده می‌شود. در شکل ۲۱ نمودار دریفت-نیروی قاب قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دریفت ۰/۵ درصد به دلیل شروع کمانش مهاربند مقاومت قاب دچار افت شده است. رفتار نمونه به این دلیل مطلوب نیست و بیشترین جذب انرژی به دلیل کمانش مهاربند رخ داده است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۲۲ نمایش داده شده است.



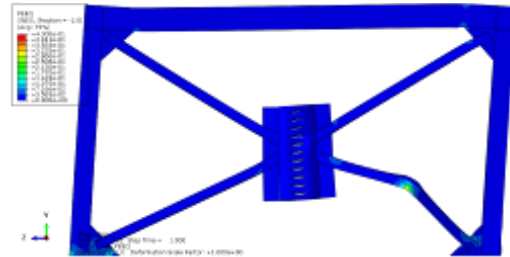
شکل ۱۸- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کمانش مهاربند



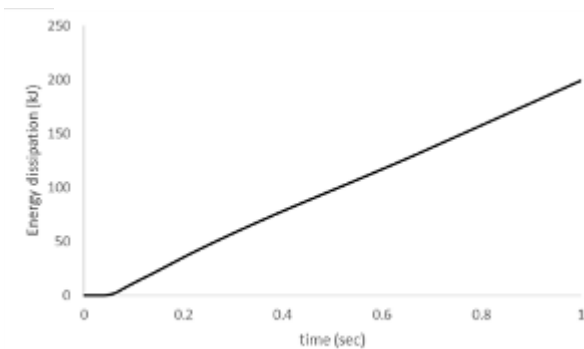
شکل ۱۷- مدل قاب مهاربندی شده با لوله عمودی



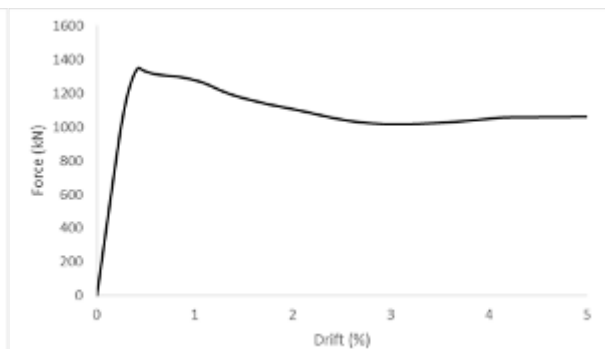
شکل ۲۰- کانتور تنش فون میزس در قاب



شکل ۱۹- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



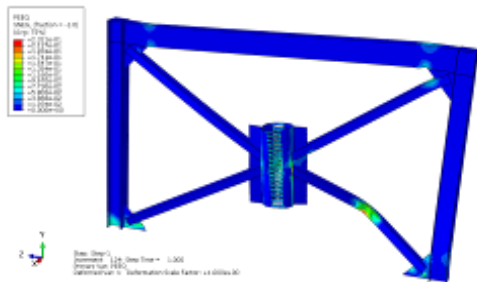
شکل ۲۲- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن قاب



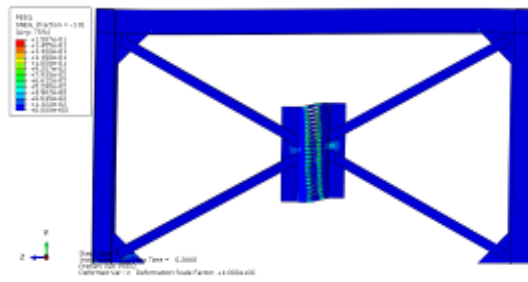
شکل ۲۱- نمودار نیرو-تغییر مکان در قاب

✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتیمتر

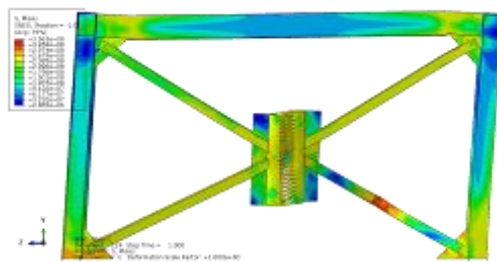
در این نمونه فاصله سوراخ‌ها از هم به ۲/۵ سانتی متر کاهش داده شده است تا مقطع لوله ضعیف‌تر شود و کمانش مهاربند دیرتر اتفاق بیفتد. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کمانش مهاربند در نمونه در دریفت حدود ۱/۶ درصد شروع شده و این کمانش باعث افت مقاومت نمونه در ادامه شده است. در شکل ۲۳ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه قبل از شروع کمانش مهاربند قابل مشاهده است. کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دریفت ۲۵/۶٪) در شکل ۲۴ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمانش در بادبند فشاری به وضوح قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۲۵ دیده می‌شود. در شکل ۲۶ نمودار دریفت-نیروی قاب قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دریفت ۱/۶ درصد به دلیل شروع کمانش مهاربند مقاومت قاب دچار افت شده است. رفتار نمونه به این دلیل چندان مطلوب نیست و بیشترین جذب انرژی به دلیل کمانش مهاربند رخ داده است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۲۷ نمایش داده شده است.



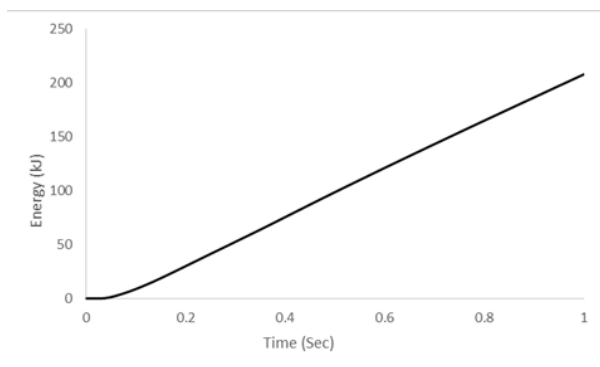
شکل ۲۴- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



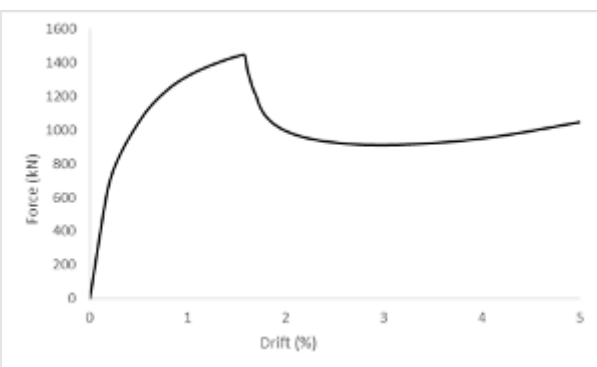
شکل ۲۳- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کمانش مهاربند



شکل ۲۵- کانتور تنش فون میزس در قاب



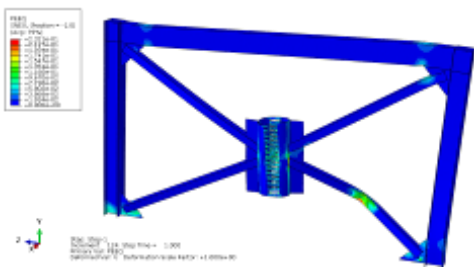
شکل ۲۷- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن در قاب



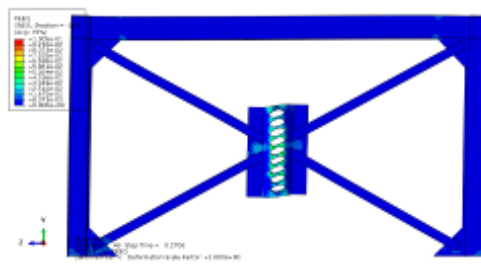
شکل ۲۶- نمودار نیرو-تغییر مکان در قاب

✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتی متر

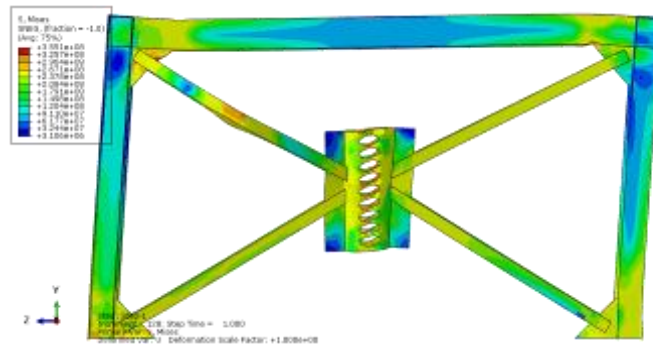
در این نمونه عرض سوراخ‌ها به ۱۰ سانتیمتر افزایش داده شده است تا مقطع لوله ضعیف‌تر شود و کماتش مهاربند دیرتر اتفاق بیفتد. فاصله سوراخ‌ها ۲/۵ سانتی‌متر است. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کماتش مهاربند بالایی در نمونه در دررفت حدود ۱/۷ درصد شروع شده و این کماتش باعث افت مقاومت نمونه در ادامه شده است. در شکل ۲۸ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه قبل از شروع کماتش مهاربند قابل مشاهده است. کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دررفت ۶/۲۵٪) در شکل ۲۹ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کماتش در باند فشاری بالایی به وضوح قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۳۰ دیده می‌شود. در شکل ۳۱ نمودار دررفت-نیروی قاب قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دررفت ۱/۷ درصد به دلیل شروع کماتش مهاربند فشاری بالایی، مقاومت قاب دچار افت شده است. رفتار نمونه به این دلیل چندان مطلوب نیست و بیشترین جذب انرژی به دلیل کماتش مهاربند رخ داده است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۳۲ نمایش داده شده است.



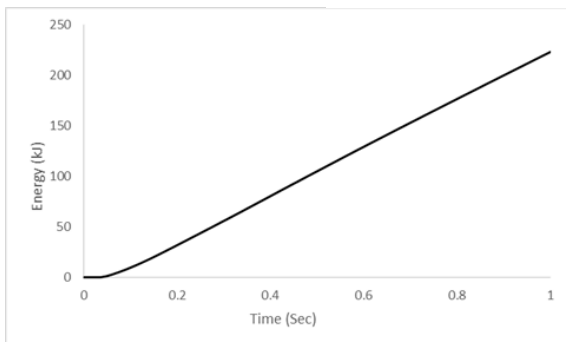
شکل ۲۸- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



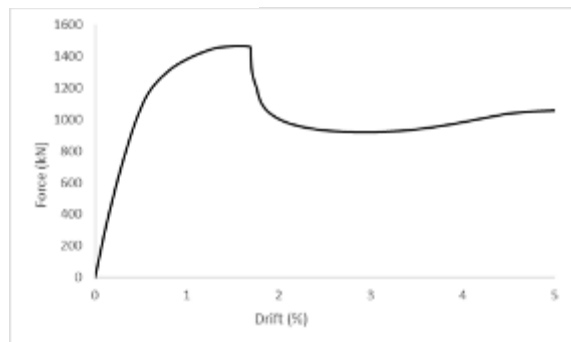
شکل ۲۹- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کماتش مهاربند



شکل ۳۰- کانتور تنش فون میزس در قاب



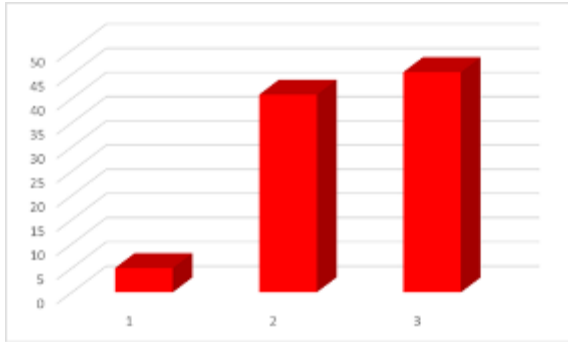
شکل ۳۲- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن در قاب



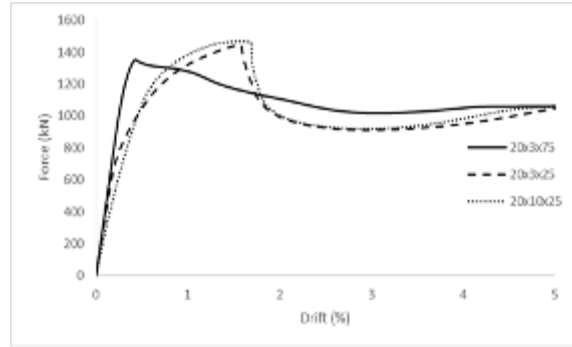
شکل ۳۱- نمودار نیرو-دررفت در قاب

✓ مقایسه رفتار سه نمونه

در شکل ۳۳ منحنی دریفت-نیروی نمونه‌ها باهم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه با سوراخ‌های ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر در فاصله ۲۵ میلی‌متری از هم بهترین رفتار است و کماتش مهاربند در دریفت ۱/۷ درصد آغاز شده است. در شکل ۳۴ میزان جذب انرژی نمونه قبل از آغاز کماتش پلاستیک مهاربند قابل مشاهده است. در اینجا نیز بهترین رفتار در نمونه سوم اتفاق افتاده است.



شکل ۳۴- مقایسه میزان جذب انرژی پلاستیک نمونه قبل از شروع کماتش مهاربند فشاری

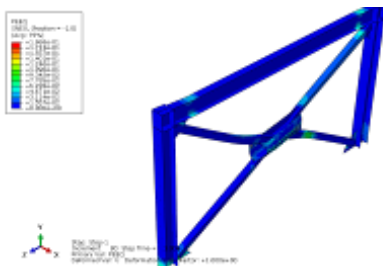


شکل ۳۳- منحنی نیرو-دریفت نمونه‌های اول تا سوم

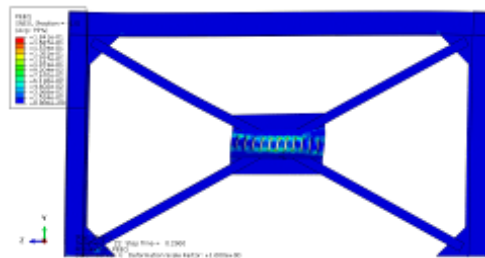
(ب) لوله افقی

✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۷/۵ سانتی‌متر

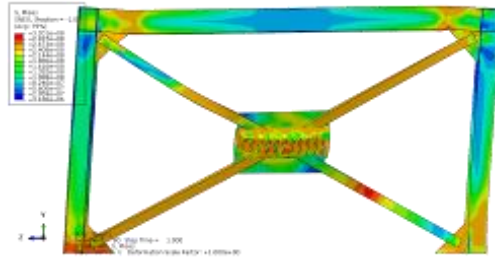
پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کماتش مهاربند در نمونه در دریفت حدود ۲/۱۵ درصد شروع شده و این کماتش باعث افت مقاومت نمونه در ادامه شده است. در شکل ۳۵ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه در مرحله شروع کماتش مهاربند قابل مشاهده است. کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دریفت ۲/۶/۲۵٪) در شکل ۳۶ قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۳۷ دیده می‌شود. در شکل ۳۸ نمودار دریفت-نیروی قاب قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دریفت ۲/۱۵ درصد به دلیل شروع کماتش مهاربند مقاومت قاب دچار افت شده است. رفتار نمونه با توجه به دریفتی که در آن کماتش اتفاق افتاده نسبتاً مناسب است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۳۹ نمایش داده شده است.



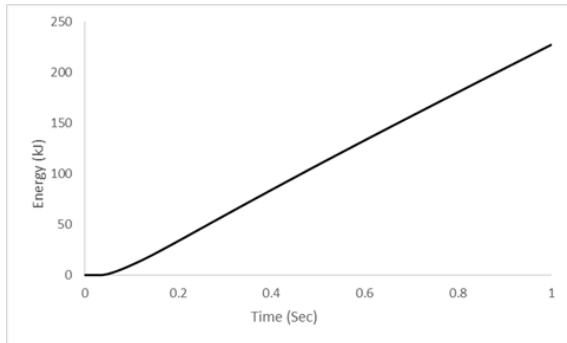
شکل ۳۶- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب در انتهای بارگذاری



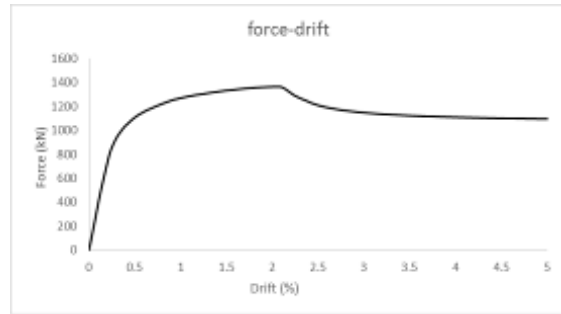
شکل ۳۵- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کماتش مهاربند



شکل ۳۷- کانتور تنش فون میزس در قاب



شکل ۳۹- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن در قاب



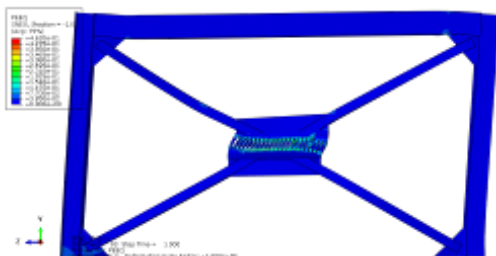
شکل ۳۸- نمودار نیرو-تغییر مکان در قاب

✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتی متر

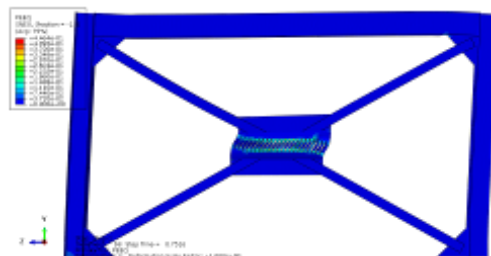
در این نمونه فاصله سوراخ‌ها از هم به ۲/۵ سانتی متر کاهش داده شده است تا مقطع لوله ضعیف تر شود و کمانش مهاربند دیرتر اتفاق بیفتد. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کمانش مهاربند در نمونه در دررفت بیش از ۵ درصد شروع شده و بنابراین تأثیر چندانی در عملکرد نمونه نداشته است. با این حال به دلیل سطح مقطع کم لوله در خط افقی وسط آن، سطحی ضعیف از لحاظ برشی تشکیل شده که از ابتدا مقاومت نمونه را کاسته است. در شکل ۴۰ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه قبل از شروع کمانش مهاربند قابل مشاهده است.

کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دررفت ۶/۲۵٪) در شکل ۴۱ قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود کمانش در بادبند فشاری چندان قابل توجه نیست. کانتور تنش فون میزس در شکل ۴۲ دیده می شود.

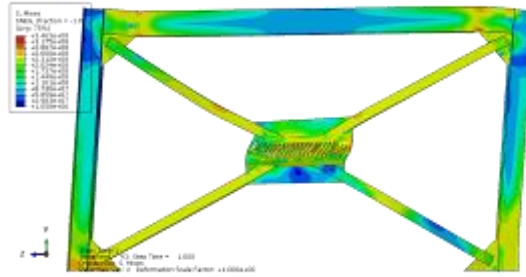
در شکل ۴۳ نمودار دررفت-نیروی قاب قابل مشاهده است... رفتار نمونه به دلیل عدم کمانش مهاربند فشاری مطلوب است اما مقاومت نمونه نسبت به نمونه قبلی چندان قابل توجه نیست. انرژی جذب شده قاب در شکل ۴۴ نمایش داده شده است.



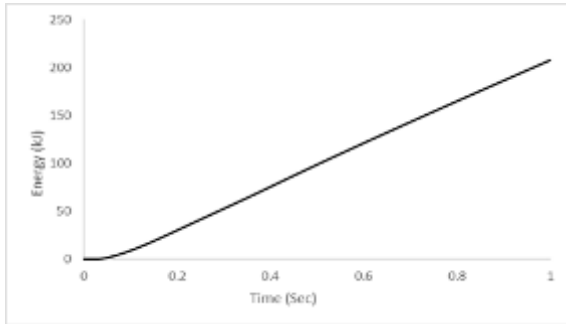
شکل ۴۱- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



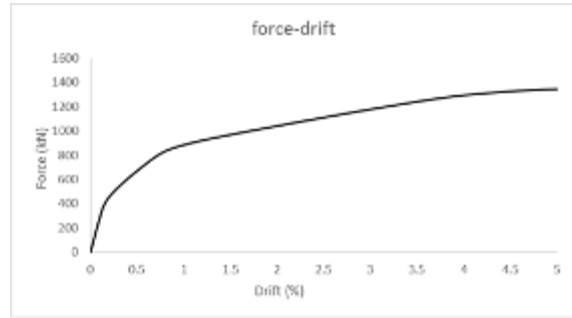
شکل ۴۰- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کمانش مهاربند



شکل ۴۲- کانتور تنش فون میزس در قاب



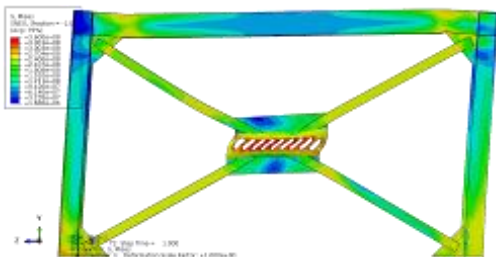
شکل ۴۳- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن در قاب



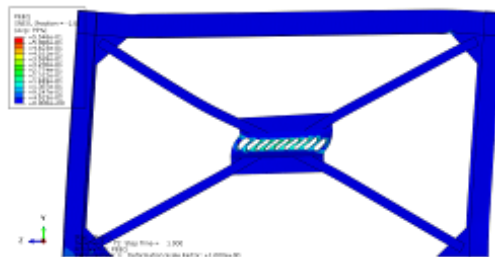
شکل ۴۴- نمودار نیرو-دریفت در قاب

✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتیمتر

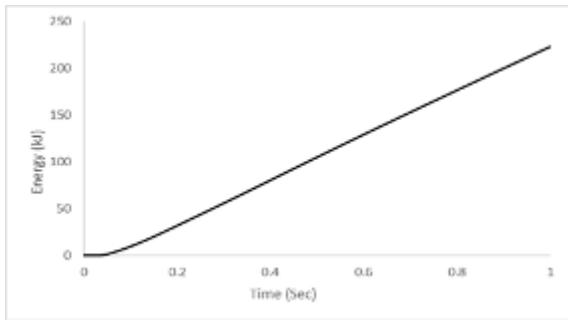
در این نمونه عرض سوراخ‌ها به ۱۰ سانتیمتر افزایش داده شده است تا مقطع لوله ضعیف‌تر شود و کماتش مهاربند دیرتر اتفاق بیفتد. فاصله سوراخ‌ها ۲/۵ سانتیمتر است. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کماتش مهاربند فشاری در این نمونه مشاهده نشد. در شکل ۴۵ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه در انتهای بارگذاری قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۴۶ دیده می‌شود. در شکل ۴۷ نمودار دریفت - نیروی قاب قابل مشاهده است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۴۸ نمایش داده شده است.



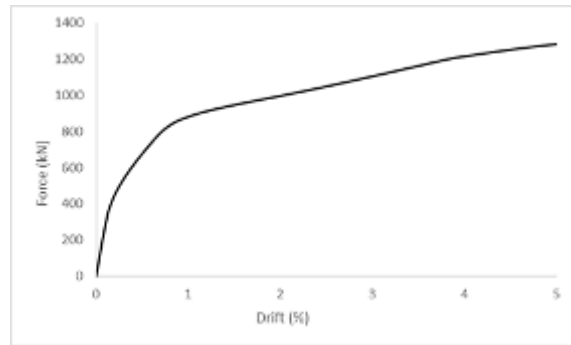
شکل ۴۵- کانتور تنش فون میزس در قاب



شکل ۴۶- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



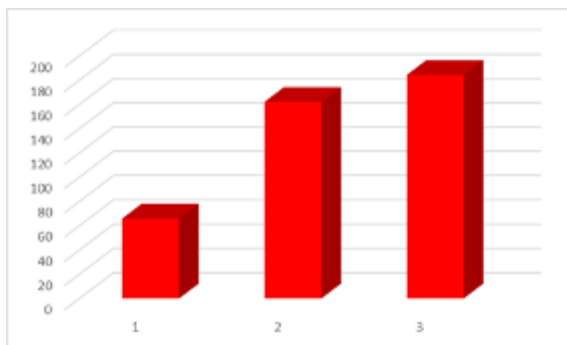
شکل ۴۸- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدگی در قاب



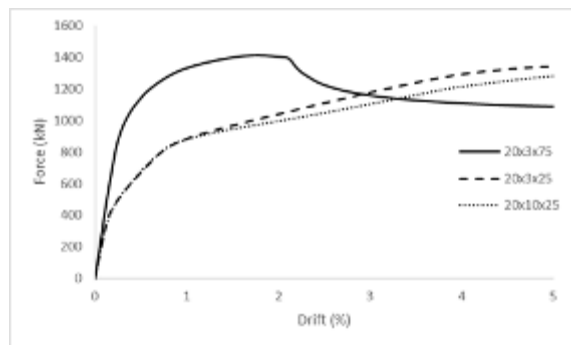
شکل ۴۷- نمودار نیرو-دریفت در قاب

✓ مقایسه رفتار سه نمونه

در شکل ۴۹ نمودار دریفت-نیروی نمونه‌ها باهم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌ها با سوراخ‌های ۲۰ در ۳ سانتیمتر در فاصله ۷۵ میلی‌متری از هم بهترین رفتار حاصل شده است و کماتش مهاربند تا دریفت ۱/۲٪ مشاهده نشده است. در خصوص شاخص مقاومت، نمونه اول مقاومت بیشتری از دو نمونه دیگر دارد که دلیل آن بیشتر بودن سطح مقطع لوله در این نمونه به دلیل فاصله بیشتر سوراخ‌ها از هم است. در شکل ۵۰ میزان جذب انرژی نمونه قبل از آغاز کماتش پلاستیک مهاربند قابل مشاهده است. در اینجا بهترین رفتار از لحاظ جذب انرژی در نمونه سوم اتفاق افتاده است.



شکل ۵۰- مقایسه میزان جذب انرژی پلاستیک نمونه قبل از شروع کماتش مهاربند فشاری



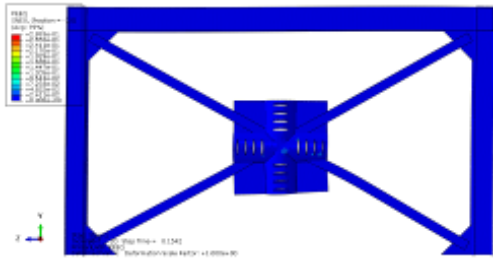
شکل ۴۹- منحنی نیرو-دریفت نمونه‌های اول تا سوم

(ج) لوله افقی و عمودی

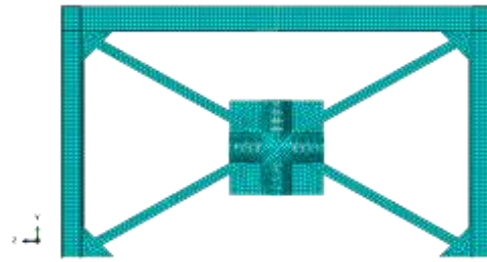
✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۷/۵ سانتی‌متر

نمونه‌ای از قاب با لوله افقی و عمودی در شکل ۵۱ قابل مشاهده است. طول لوله‌ها ۱/۲ متر و قطر آن‌ها یکسان و برابر ۰/۴ متر است. صفحه‌ای به طول ۱/۲ متر و عرض ۱/۲ متر برای اتصال لوله به مهاربندها مورد استفاده قرار گرفته است. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کماتش مهاربند در نمونه در دریفت حدود ۱ درصد شروع شده و این کماتش باعث افت مقاومت نمونه در ادامه شده است. در شکل ۵۲ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه در مرحله شروع کماتش مهاربند قابل مشاهده است. کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دریفت ۶/۲۵٪) شکل ۵۳ قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۵۴ دیده می‌شود. در شکل ۵۵ نمودار دریفت-نیروی قاب قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دریفت ۱ درصد به دلیل شروع کماتش مهاربند مقاومت قاب دچار افت تدریجی شده است.

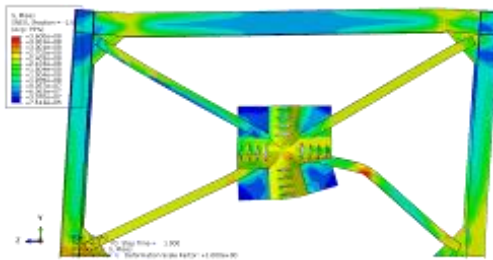
رفتار نمونه به این دلیل چندان مطلوب نیست و بخش قابل توجهی از جذب انرژی به دلیل کماتش مهاربند رخ داده است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۵۶ نمایش داده شده است.



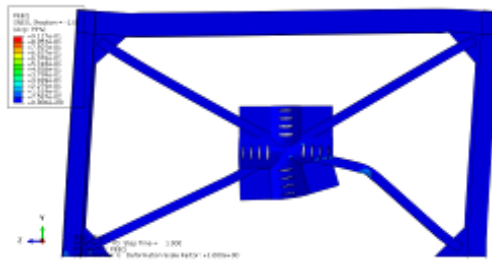
شکل ۵۲- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کماتش مهاربند



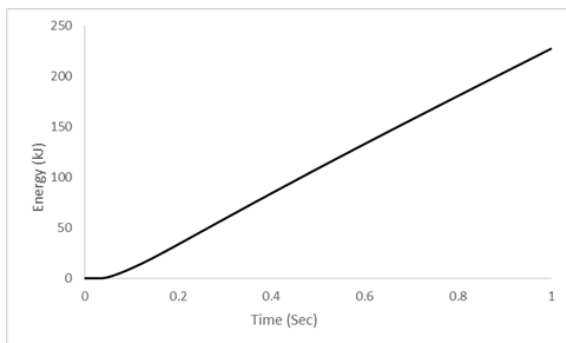
شکل ۵۱- مدل قاب مهاربندی شده با لوله عمودی



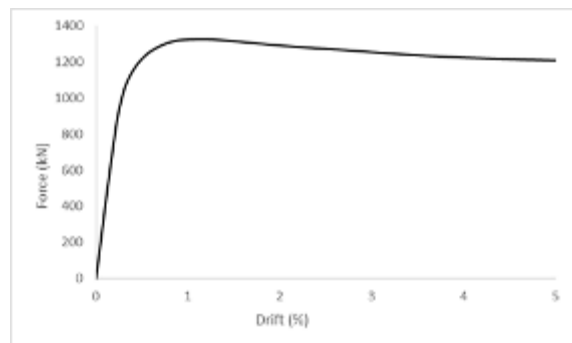
شکل ۵۴- کانتور تنش فون میزس در قاب



شکل ۵۳- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



شکل ۵۶- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن در قاب

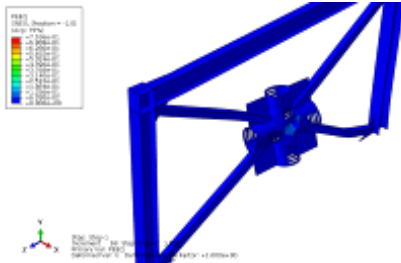


شکل ۵۵- نمودار دررفت-تغییر مکان در قاب

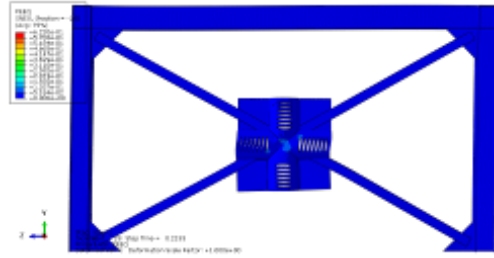
✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتی متر

در این نمونه فاصله سوراخ‌ها از هم به ۲/۵ سانتی متر کاهش داده شده است تا مقطع لوله ضعیف تر شود و کماتش مهاربند دیرتر اتفاق بیفتد. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کماتش مهاربند در نمونه در دررفت حدود ۱/۳۳ درصد شروع شده و این کماتش باعث افت مقاومت نمونه در ادامه شده است. در شکل ۵۷ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه قبل از شروع کماتش مهاربند قابل مشاهده است.

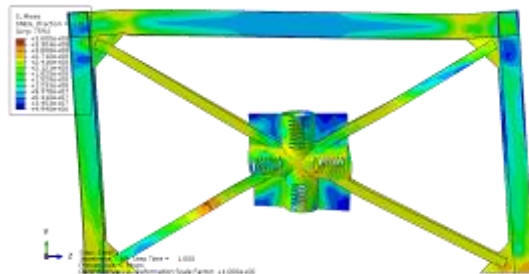
کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دریفت ۶/۲۵٪) در شکل ۵۸ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمانش در بادبند فشاری به‌وضوح قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۵۹ دیده می‌شود. در شکل ۶۰ نمودار دریفت-نیروی قاب قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دریفت ۱/۳۳ درصد به دلیل شروع کمانش مهاربند مقاومت قاب دچار افت شده است. رفتار نمونه به این دلیل چندان مطلوب نیست و بیشترین جذب انرژی به دلیل کمانش مهاربند رخ داده است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۶۱ نمایش داده شده است.



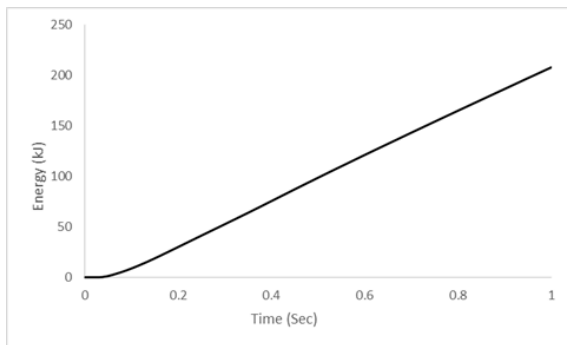
شکل ۵۸- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



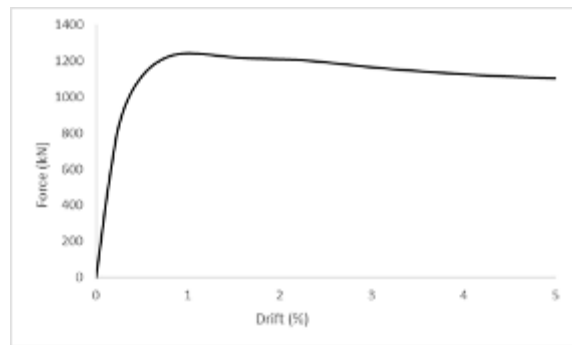
شکل ۵۷- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کمانش مهاربند



شکل ۵۹- کانتور تنش فون میزس در قاب



شکل ۶۱- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن در قاب

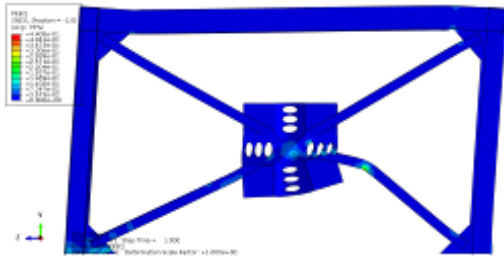


شکل ۶۰- نمودار نیرو-دریفت در قاب

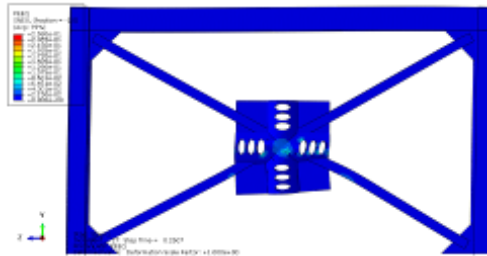
✓ لوله با سوراخ ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتی‌متر

در این نمونه عرض سوراخ‌ها به ۱۰ سانتیمتر افزایش داده شده است تا مقطع لوله ضعیف‌تر شود و کمانش مهاربند دیرتر اتفاق بیفتد. فاصله سوراخ‌ها ۲/۵ سانتی‌متر است. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی، نتایج در قالب کانتور کرنش پلاستیک معادل و کانتور تنش فون میزس و نیز نمودار نیرو-تغییر مکان قاب استخراج شده است. کمانش مهاربند بالایی در نمونه در دریفت حدود ۱/۶ درصد شروع شده و این کمانش باعث افت مقاومت نمونه در ادامه شده است. در شکل ۶۲ محل جاری شدن و مقدار کرنش پلاستیک در هر نقطه قبل از شروع کمانش مهاربند قابل مشاهده است.

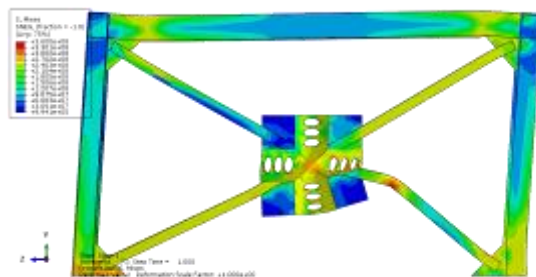
کانتور کرنش پلاستیک معادل در انتهای بارگذاری (دریفت ۶/۲۵٪) در شکل ۶۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمناش در بادبند فشاری بالایی به‌وضوح قابل مشاهده است. کانتور تنش فون میزس در شکل ۶۴ دیده می‌شود. در شکل ۶۵ نمودار دریفت-نیروی قاب قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود در دریفت ۱/۶ درصد به دلیل شروع کمناش مهاربند فشاری بالایی، مقاومت قاب دچار افت شده است. رفتار نمونه به این دلیل چندان مطلوب نیست و بیشترین جذب انرژی به دلیل کمناش مهاربند رخ داده است. انرژی جذب شده قاب در شکل ۶۶ نمایش داده شده است.



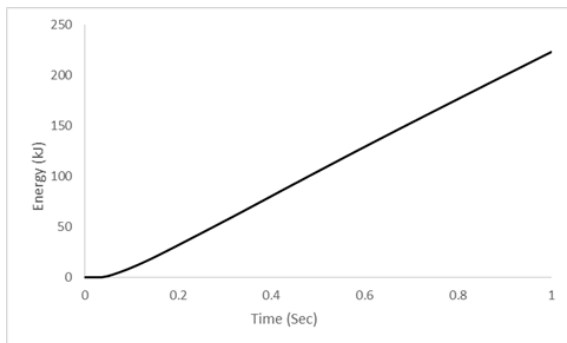
شکل ۶۳- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب



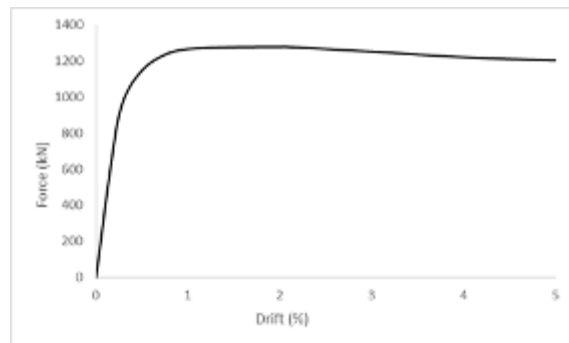
شکل ۶۲- کانتور کرنش پلاستیک معادل در قاب قبل از شروع کمناش مهاربند



شکل ۶۴- کانتور تنش فون میزس در قاب



شکل ۶۶- جذب انرژی ناشی از پلاستیک شدن قاب

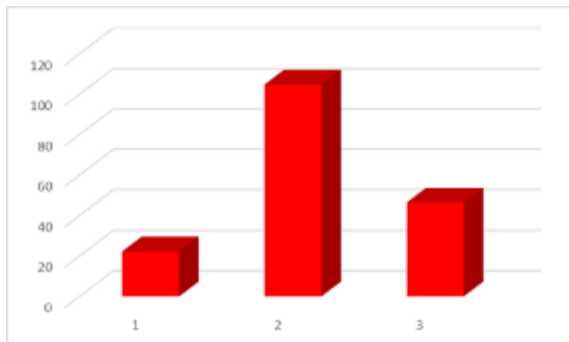


شکل ۶۵- نمودار نیرو-دریفت در قاب

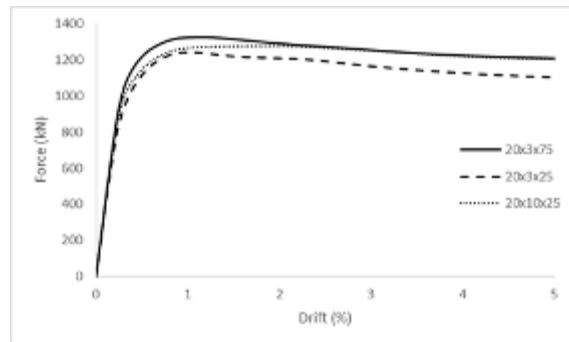
✓ مقایسه رفتار سه نمونه

در شکل ۶۷ منحنی دریفت-نیروی نمونه‌ها باهم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه با سوراخ‌های ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر در فاصله ۲۵ میلی‌متری از هم بهترین رفتار حاصل شده است و کمناش مهاربند در دریفت ۱/۶ درصد آغاز شده است. افت منحنی نیز با شیب اندکی انجام می‌شود. در نمونه اول مقاومت بالاتری حاصل شده اما شیب افت منحنی پس از کمناش بادبند فشاری تندتر است.

در شکل ۶۸ میزان جذب انرژی پلاستیک مهاربند قابل مشاهده است. در اینجا نیز بهترین رفتار در نمونه دوم اتفاق افتاده است.



شکل ۶۸- مقایسه میزان جذب انرژی پلاستیک نمونه قبل از شروع کمانش مهاربند فشاری



شکل ۶۷- منحنی نیرو-دریفت نمونه‌های اول تا سوم

۳.۱.۴. مقایسه رفتار ۹ مدل قاب

در شکل ۶۹ مقایسه منحنی دریفت-نیروی ۹ مدل در نظر گرفته شده تا دریفت ۳ درصد قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رفتار نمونه‌های قاب با لوله عمودی به دلیل افت ناگهانی مقاومت و کمانش بادبند فشاری مناسب نیست. در نمونه‌های افقی وقتی فاصله سوراخ‌ها ۲/۵ سانتی‌متر است، سطح ضعیف از لحاظ برشی در لوله تشکیل شده که باربری مجموعه را به شدت کاهش داده است. در نمونه اول افقی که در آن فاصله سوراخ‌ها ۷/۵ سانتی‌متر است، رفتار نمونه تا دریفت ۲/۱ درصد قابل قبول است اما بعد از آن افت منحنی مقاومت به صورت نسبتاً ناگهانی آغاز می‌شود.

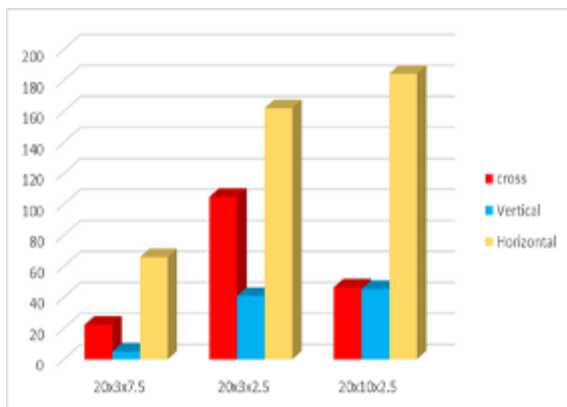
در نمونه‌های با لوله افقی و عمودی، شیب افت منحنی بسیار ملایم است به طوری که باربری دچار اختلال نشده و رفتار شکل‌پذیری حاصل شده است. در بین این نمونه‌ها، نمونه با فاصله سوراخ‌های ۷/۵ سانتی‌متر بیشترین مقاومت را در منحنی دریفت-تغییر مکان داشته است. وقتی فاصله سوراخ‌ها به ۲/۵ سانتی‌متر کاهش داده شده، مقاومت حداکثر اندکی کاهش داشته (حدود ۰/۴٪) ولی شیب افت منحنی مقاومت کاهش یافته است.

با توجه به مطالب ذکر شده، به نظر می‌رسد از دیدگاه منحنی نیرو-تغییر مکان، نمونه با لوله افقی با فاصله سوراخ ۷/۵ سانتی‌متر و نمونه‌های با لوله‌های افقی و عمودی با سوراخ‌های ۲۰ در ۳ سانتی‌متر و فاصله ۲/۵ و لوله‌های افقی و عمودی با سوراخ‌های ۲۰ در ۱۰ سانتی‌متر و فاصله ۲/۵ سانتی‌متر رفتار بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته‌اند.

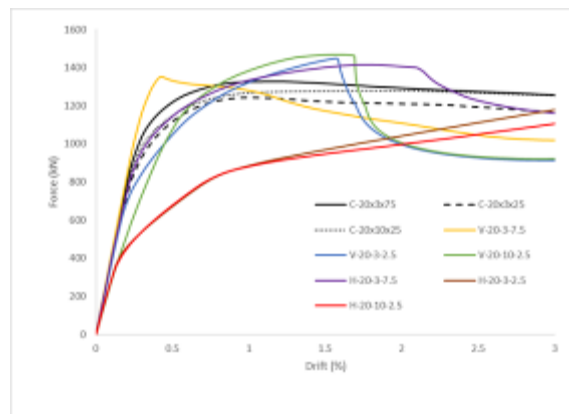
در شکل ۷۰ مقدار انرژی جذب شده قبل از کمانش مهاربند فشاری در نمونه‌ها قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌های با لوله افقی به دلیل عدم کمانش بادبند تا مراحل پایانی تحلیل، جذب انرژی بالایی دارند. باین حال به دلیل عدم وجود مقاومت کافی در دو نمونه دوم و سوم این دسته، رفتار این دو نمونه قابل قبول نیست و تنها نمونه اول این گروه با فاصله سوراخ‌های ۷/۵ سانتی‌متری رفتار مناسبی داشته است.

نمونه‌های با لوله‌های افقی و عمودی نیز جذب انرژی مناسبی داشته‌اند و بهترین نمونه این گروه از لحاظ جذب انرژی نمونه دوم است. با توجه به تفاوت کم مقاومت نمونه‌های اول و دوم این گروه و جذب انرژی بسیار بالاتر نمونه دوم این گروه نسبت به نمونه اول، نمونه دوم این گروه یعنی نمونه با سوراخ‌های ۲۰ در ۳ سانتی‌متر با فاصله ۲/۵ سانتی‌متر را می‌توان بهترین قاب از لحاظ مقاومت و جذب انرژی دانست.

در نمونه‌های با لوله عمودی، جذب انرژی از نمونه‌های مشابه دو گروه دیگر پایین‌تر است. با توجه به مقاومت کم نمونه‌های این گروه، استفاده از لوله در محل تقاطع مهاربندها به صورت عمودی توصیه نمی‌شود.



شکل ۷۰- مقایسه میزان جذب انرژی پلاستیک نمونه قبل از شروع کمانش مهاربند فشاری



شکل ۶۹- منحنی نیرو-دریافت نمونه‌های اول تا نهم

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق موارد ذیل به عنوان نتیجه‌گیری قابل ارائه می‌باشد.

- همان‌طور که انتظار می‌رفت، بحرانی‌ترین حالت بارگذاری نمونه‌ای لوله سوراخ‌دار، حالت بارگذاری فشاری است. با افزایش سطح سوراخ و کاهش فواصل سوراخ‌ها مقاومت نمونه لوله سوراخ‌دار کاهش می‌یابد و از این دو متغیر می‌توان برای به دست آوردن ظرفیت مناسب لوله سوراخ‌دار با توجه به مشخصات مهاربندها و تیر و ستون استفاده نمود. به نظر می‌رسد استفاده از سوراخ‌های بیضی با قطر بزرگ در جهت عمود بر محور لوله مناسب‌ترین حالت را ایجاد می‌نماید.
- رفتار نمونه‌های قاب با لوله عمودی به دلیل افت ناگهانی مقاومت و کمانش بادبند فشاری مناسب نیست. در نمونه‌های با لوله عمودی، جذب انرژی از نمونه‌های مشابه دو گروه دیگر پایین‌تر است. با توجه به مقاومت کم نمونه‌های این گروه، استفاده از لوله در محل تقاطع مهاربندها به صورت عمودی توصیه نمی‌شود.
- در نمونه‌های افقی وقتی فاصله سوراخ‌ها ۲/۵ سانتی‌متر است، سطح ضعیف از لحاظ برشی در لوله تشکیل شده که باربری مجموعه را به شدت کاهش داده است. در نمونه اول افقی که در آن فاصله سوراخ‌ها ۷/۵ سانتی‌متر است، رفتار نمونه تا دریافت ۲/۱ درصد قابل قبول است اما بعد از آن افت منحنی مقاومت به صورت نسبتاً ناگهانی آغاز می‌شود.
- با لوله افقی به دلیل عدم کمانش بادبند تا مراحل پایانی تحلیل، جذب انرژی بالایی دارند. باین حال به دلیل عدم وجود مقاومت کافی در دو نمونه دوم و سوم این دسته، رفتار این دو نمونه قابل قبول نیست و تنها نمونه اول این گروه با فاصله سوراخ‌های ۷/۵ سانتیمتری رفتار مناسبی داشته است.
- در نمونه‌های با لوله افقی- عمودی، شیب افت منحنی بسیار ملایم است به طوری که باربری دچار اختلال نشده و رفتار شکل‌پذیری حاصل شده است. در بین این نمونه‌ها، نمونه با فاصله سوراخ‌های ۷/۵ سانتیمتر بیشترین مقاومت را در منحنی دریافت-تغییر مکان داشته است. وقتی فاصله سوراخ‌ها به ۲/۵ سانتیمتر کاهش داده شده، مقاومت حداکثر اندکی کاهش داشته (حدود ۰/۴٪) ولی شیب افت منحنی مقاومت کاهش یافته است.
- نمونه‌های با لوله‌های افقی- عمودی نیز جذب انرژی مناسبی داشته‌اند و بهترین نمونه این گروه از لحاظ جذب انرژی نمونه دوم است. با توجه به تفاوت کم مقاومت نمونه‌های اول و دوم این گروه و جذب انرژی بسیار بالاتر نمونه دوم این گروه نسبت

به نمونه اول، نمونه دوم این گروه یعنی نمونه با سوراخ‌های ۲۰ در ۳ سانتیمتر با فاصله ۲/۵ سانتی‌متر را می‌توان بهترین قاب از لحاظ مقاومت و جذب انرژی دانست.

۷- از دیدگاه منحنی نیرو- تغییر مکان، نمونه با لوله افقی با فاصله سوراخ ۷/۵ سانتیمتر و نمونه‌های با لوله‌های افقی- عمودی با سوراخ‌های ۲۰ در ۳ سانتیمتر و فاصله ۲/۵ سانتیمتر و ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر و فاصله ۲/۵ سانتیمتر رفتار بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته‌اند.

۶. مراجع

1. Tanaka, K., and Sasaki, Y, (2000). Hysteretic Performance of Shear Panel Dampers of Ultra Low-Yield Strength Steel for Seismic Response Control of Buildings, 1-8.
2. McDaniel, C. C., Uang, C.-M., and Seible, F., (2003). Cyclic Testing of Built-Up Steel Shear Links for the New Bay Bridge." Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 129(6), 801-809.
3. Bonetti S.A., Matamoros A.B., (2008). FUSE ELEMENTS FOR SPECIAL CONCENTRICALLY BRACED FRAMES, 14th world conference on earthquake engineering.
۴. میرزاحسینی م.، کافی م.ع.، وهدانی ر.، (۱۳۹۴). تأثیر حلقه‌ی فولادی در قاب‌های مهاربندی‌شده‌ی هم‌مرکز تحت زلزله‌های مصنوعی به روش موجک، مجله علمی پژوهش شریف، دوره ۳۱.۲، شماره ۲.۱ صفحه ۵۵-۶۳.
5. Kafi, M.A., (2007). Experimental and analytical investigation of steel ring ductility", Ph.D. Dissertation, Iranian university of science and technology.
6. Malek, S., Pabsang, P. and Lohghalam, A (2006). Introducing a new inactive dissipate system and comparing it with TADAS dissipate", First International Congress on Seismic Retrofitting, Amirkabir University of Technology, Tehran. Iran.
7. Motamedi, M. and Hafezi, M. (2012). Analytical study of steel ring connections as hysteretic metallic damper", 15th World Conference in Earthquake Engineering, Lisbon.
8. Giannuzzi D., (2016). Experimental and Computational Investigation of the Performance of the Braced Ductile Shear Panel, PhD dissertation, Minnesota University.
9. WAKABAYASHI, Minoru; MATSUI, Chiaki; MINAMI, Koichi; MITANI, Isao, Inelastic (1974). Behavior of Full-Scale Steel Frames with and without Bracings, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, 24(1): 1-23
10. Swoo-Heon Lee, Kyung-Jae Shin¹, Hee-Du Lee, Woo-Bum Kim, and Jae-Guen Yang, (2012). Behavior of Plate-to-Circular Hollow Section Joints of 600 MPa High-Strength Steel, International Journal of Steel Structures, Vol 12, No 4, 473-482.