

ارزیابی اثر مهاربند دوبخشی و سه‌بخشی در بهبود رفتار لرزه‌ای قاب با مهاربندی

پشتیبان قوی

آرین فتاح زاده، علی بیگلری فدافن*

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

* biglari.a@gmail.com

چکیده

قاب‌های مهاربندی فولادی، از سیستم‌های مقاوم کارآمد در برابر بارهای لرزه‌ای هستند. با این وجود، قاب‌های مهاربندی فولادی چندطبقه در پاسخ به لرزش‌های شدید زمین، تمایل به تمرکز نیازهای لرزه‌ای در یک یا چند طبقه دارند. از این رو در سالیان اخیر مکانیزم‌هایی ارائه شده تا نیازهای غیرالاستیک را در ارتفاع سازه توزیع کند. سیستم قاب پشتیبان قوی از جمله تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه است. این سیستم با استفاده از یک خرپا الاستیک در ارتفاع سازه، بازتوزیع نیازها را در سایر طبقات انجام می‌دهد. در اکثر مطالعات صورت گرفته از مهاربندهای فولادی مرسوم به عنوان اتلاف انرژی استفاده شده است در حالی که به علت کمانش مهاربندها، در این سازه‌ها اتلاف انرژی مناسبی دیده نمی‌شود. در این مطالعه امکان بهبود رفتار قاب مهاربندی پشتیبان قوی با مهاربندهای هلالی شکل (دوبخشی) و مهاربند تراپوزاید (سه بخشی) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا به منظور انعطاف‌پذیری بیشتر در طراحی، مهاربند تراپوزاید معرفی شد و در انتها، امکان بهبود رفتار قاب مهاربندی پشتیبان قوی با اضافه نمودن مهاربند هلالی شکل و تراپوزاید با تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بود که استفاده از این مهاربندها، ضمن بهبود اتلاف انرژی سازه تا $440/9\%$ و افزایش ظرفیت برش قابل تحمل در سازه تا 57% ، سختی سازه را به شکل قابل توجهی افزایش نداده (حداکثر 14%) و نیروهای ایجاد شده در المان‌های خرپا الاستیک، توزیع یکنواختی را در ارتفاع سازه شکل می‌دهند.

کلمات کلیدی

مهاربند هلالی شکل، مهاربند تراپوزاید، قاب پشتیبان قوی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، بهبود رفتار.

از شیوه‌های خرابی مرسوم در ساختمان‌ها می‌توان به مکانیزم طبقه نرم اشاره کرد. در این مکانیزم خرابی، به علت از دست رفتن مقاومت جانبی یک طبقه، خرابی در سازه اتفاق افتاده و موجب عدم استفاده بهینه از ظرفیت سازه می‌شود. در سازه‌های مهاربندی فولادی مرسوم، ایجاد مکانیزم طبقه نرم در زمین‌لرزه‌های شدید محتمل است. تمرکز تغییر شکل در یک یا چند طبقه منجر به آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای شدید و یا موجب خرابی نابهنگام مهاربندها می‌شود؛ بنابراین بسیار مطلوب خواهد بود تا بتوان از تمرکز آسیب و همچنین طبقه نرم جلوگیری نمود [۱].

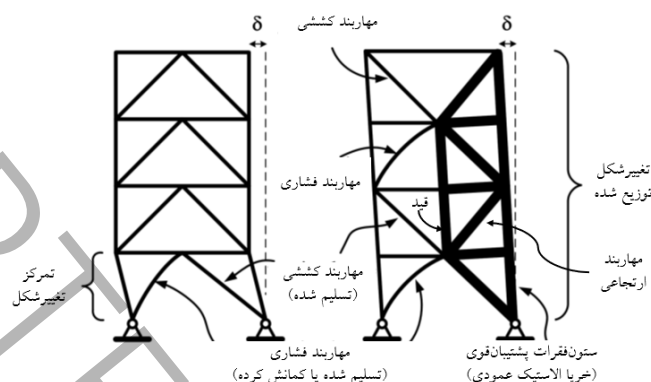
به منظور مقابله با این مکانیزم، سیستم‌های سازه‌ای متفاوتی ارائه و بررسی شده که از جمله آنها می‌توان به سیستم‌های دوگانه [۲]، قاب‌های مهاربندی زیپر [۳] و سیستم‌های ستون فقراتی [۴] اشاره کرد. سیستم‌های ستون فقراتی امکان توزیع تغییر مکان تحت مود اول را فراهم کرده و مانع تشکیل طبقه نرم می‌شوند. این سیستم‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود: الف) قاب‌های مهاربندی شده گهواره‌ای که در آن ستون‌ها امکان بلندشدگی دارند، ب) سیستم‌های چرخشی که حول یک نقطه ثابت در تراز پایه دوران می‌کنند. مطالعات انجام شده بر روی سیستم‌های گهواره‌ای بیانگر عملکرد مناسب این سیستم در جلوگیری از طبقه نرم بوده و همچنین رفتار مرکزگرایی (جابه‌جایی باقی مانده ناچیز) را از خود نشان داده است [۵]. در خصوص استفاده از قاب‌های ستون فقراتی چرخشی مطالعات قابل توجهی صورت گرفته است.

کو^۱ و همکاران [۶] استفاده از هسته صلب گهواره‌ای^۲ به منظور مقاوم‌سازی قاب‌های مهاربندی را معرفی کردند. در این روش یک هسته صلب با اتصال تکیه‌گاهی مفصلی (و یا اتصالات با مقاومت خمشی ناچیز) به قاب موجود متصل شده و یک ستون فقرات الاستیک^۳، صلب و پیوسته در ارتفاع سازه را تشکیل می‌دهد. این عمل، موجب بازتوزیع نیازهای جانبی در سازه شده و تغییر شکل یکنواختی در ارتفاع سازه ایجاد می‌شود. بلبو و روک^۴ [۷] به معرفی سیستم هسته گهواره‌ای مرکزگرا پرداختند. در این سیستم استفاده از کابل‌های پس‌تنیده در دو طرف هسته گهواره‌ای، عملکرد مرکزگرایی کسب می‌شود. چن^۵ و همکاران [۸] به معرفی سیستم ستون فقراتی کنترل شونده پرداختند. این سیستم از یک قاب فولادی مهاربندی صلب، ستون‌های کمانش‌تاب و قاب خمشی تشکیل شده است. ستون‌های کمانش‌تاب وظیفه اتلاف انرژی را به عهده دارد و بعد از زلزله قابل تعویض خواهد بود. قاب خمشی به نحوی طراحی می‌شود تا الاستیک باقی بماند تا تغییر شکل‌های باقی مانده کاهش پیدا کرده و بدون نیاز به نیروهای پس‌تنیدگی عملکرد مرکزگرایی ایجاد شود.

لای و ماهین^۶ [۹] سیستم پشتیبان‌قوی (شکل ۱) را معرفی کردند که شامل یک خرپا الاستیک، که وظیفه ایجاد تغییر شکل یکنواخت در سازه را داشته، به همراه بخش غیرخطی، که وظیفه اتلاف انرژی و تسلیم‌شدگی را به همراه دارد، است. ناحیه الاستیک این مهاربند شامل ستون، مهاربندهای ارتجاعی و قید است. این المان‌ها به نحوی طراحی می‌شوند که عملکرد الاستیک خود را حفظ نمایند. سیمپسون^۷ [۱۰] متوجه شد استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی سازه فعلی که تنها اثرات مود اول را در نظر می‌گیرد، امکان طراحی مناسب خرپا الاستیک فراهم نمی‌باشد و در مطالعه دیگری [۱۱] روش تحلیل پوش‌آور مودال ساده‌شده را پیشنهاد داد. مارتین و دیئرلین^۸ [۴] روش برهم‌نهی مودال اصلاح‌شده و فرامرزی و تقی‌خانی [۱۲] نیز روش طیف فرکانسی تسلیمی را پیشنهاد دادند. فرامرزی و تقی‌خانی نیز در مطالعه‌ای دیگر [۱۳] متوجه شدند افزایش طول ناحیه غیرارتجاعی و افزایش صلبیت خرپا الاستیک، موجب افزایش شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و همچنین افزایش ظرفیت فروریزش سازه می‌شود.

^۱ Qu^۲ Stiff Rocking Core^۳ Elastic Spine^۴ Blebo and roke^۵ Chen^۶ Lai and Mahin^۷ Simpson^۸ Martin and Deierlein

بخش غیرخطی در این سیستم از لحاظ شیوه پیکربندی، انعطاف‌پذیری زیادی داشته و می‌توان از شیوه‌های مختلف جذب انرژی از قبیل مهاربند معمولی، مهاربند کمانش‌تاب، میراگرهای ویسکوز و... استفاده کرد. مهاربندهای فولادی مرسوم به علت کمانش، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی پایینی دارند به همین خاطر امکان استفاده از المان‌های جاذب انرژی می‌تواند موجب بهبود قابل‌توجه رفتار سازه شود.



شکل ۱: مقایسه نحوه تشکیل مکانیزم در قاب مهاربند همگرا و قاب پشتیبان قوی [۹]

Fig. 1. Comparison of Mechanism Formation in a Concentrically Braced Frame and a Strongback Frame

به منظور بهبود رفتار سازه، رویکردهای مختلفی توسط مهندسين مورد ارزیابی قرار گرفته است که سیستم‌های کنترل سازه غیرفعال را می‌توان از محبوب‌ترین گزینه‌ها دانست [۱۴]. میراگرهای تسلیمی یکی از انواع سیستم کنترل سازه غیرفعال بوده که با استفاده از تغییر شکل‌های غیرارتجاعی مصالحشان، اتلاف انرژی را انجام می‌دهند. پیکربندی‌های مختلفی به منظور استفاده از این میراگرها معرفی شده که از میان آن‌ها می‌توان به میراگرهای افزایشده سختی و میرایی^۱ (ADAS) [۱۵]، مهاربندهای بیضی‌گون [۱۶] و مهاربند با عضو لوزی‌شکل [۱۷] اشاره کرد.

به منظور بهبود رفتار هیستریزس قاب مهاربندی پشتیبان قوی، استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب [۹، ۱۸] و لینک‌های برشی [۱۹] در مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی در پژوهش‌های متعددی به عنوان المان ناحیه غیرارتجاعی مورد استفاده قرار گرفته است. مهاربندهای کمانش‌تاب با وجود توانایی مناسب در اتلاف انرژی، امکان تعویض‌پذیری مناسبی نداشته و بعد از رخداد زلزله در صورت خرابی، نیاز به جایگزینی کامل دارند.

از جمله تکنولوژی‌هایی که برای بهبود رفتار سازه‌ها توسعه داده شده‌اند، می‌توان به مهاربندهای هلالی‌شکل^۲ اشاره کرد. این مهاربند که برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ معرفی شد [۲۰]، با داشتن هندسه منحنی و با ترکیب نمودن رفتار خمشی و محوری، منحنی رفتاری به شکل بومرنگ داشته و این امکان را برای طراحان فراهم کرده، تا طیف وسیعی از سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و توانایی اتلاف انرژی را با توجه به شرایط سازه، انتخاب کنند. همچنین این رفتار موجب شده تا امکان در نظرگیری حالت‌های عملکردی مختلف، برای این مهاربند مهیا شود. این موضوع آنجایی اهمیت پیدا می‌کند که عموماً رفتار سازه تحت نیروی جانبی، وابسته به رفتار مهاربندها بوده و استفاده از مهاربندی که منحنی رفتاری مشابه با منحنی مدنظر آیین‌نامه داشته باشد، می‌تواند در طراحی عملکردی، آزادی طراحی بیشتری را فراهم می‌کند.

^۱ Added Damping and Stiffness

^۲ Crescent-shaped brace

پالرمو^۱ و همکاران [۲۱] به بررسی آزمایشگاهی مهاربند هلالی شکل در مقیاس کوچک پرداختند. آن‌ها متوجه شدند این مهاربند در واقعیت نیز رفتاری مشابه با رفتار تئوری مورد انتظار داشته و امکان استفاده از آن به عنوان یک جایگزین مناسب برای مهاربندهای مرسوم و کمانش تاب وجود دارد.

مختاری و همکاران نیز به بررسی آزمایشگاهی مهاربند هلالی شکل در قاب دوطبقه مهاربندی پرداختند. آن‌ها در مطالعه نخست [۲۲] تنها در طبقه اول از مهاربند هلالی شکل استفاده کردند و به بررسی عملکرد مهاربند هلالی شکل در یک قاب واقعی پرداختند. نتایج این مطالعه بیانگر عملکرد مناسب و قابل انتظار این مهاربند در رفتار چرخه‌ای پایدار و جذب انرژی متوسط این سیستم بدون کاهش سختی و افت مقاومت قابل توجه بود. در این مطالعه مشخص شد که صفحات اتصال نقش قابل توجهی در پاسخ سیستم خواهند داشت. از دلایل این اتفاق می‌تواند ایجاد رفتار پلاستیک موضعی و اعمال بار قابل توجه در اطراف سوراخ صفحات اتصال (حتی در نیروهای جانبی کوچک) به علت فشار متمرکز وارد شده از پیچ‌ها باشد. همچنین تحلیل کرنشی مهاربند بیانگر اعمال کرنش متمرکز قابل توجه در محل زانویی مهاربند و تشکیل مفصل پلاستیک در این محل است. در مطالعه دوم [۲۳]، آن‌ها به بررسی قاب مهاربندی که در آن از مهاربند هلالی شکل در دو طبقه استفاده شده بود پرداختند. استفاده از مهاربند هلالی شکل در دو طبقه نیز عملکرد مناسب و قابل انتظار را نشان داده و تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و پیشبینی‌هایی تحلیلی وجود دارد.

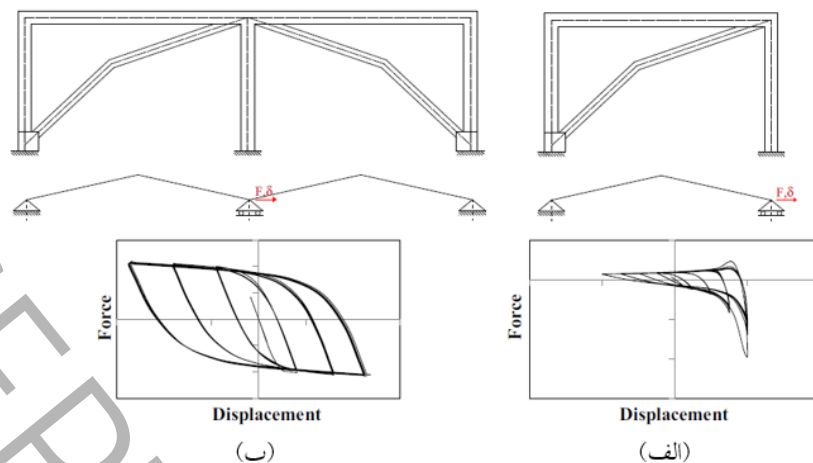
امکان استفاده از مهاربندهای هلالی شکل در قاب‌های مهاربندی فولادی اولین بار توسط پالرمو و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۴]. آن‌ها در این مطالعه امکان استفاده از مهاربند هلالی شکل به منظور جداسازی لرزه‌ای را بررسی نمودند. در این مطالعه در طبقه اول از مهاربند هلالی شکل و در سایر طبقات از مهاربند معمولی که الاستیک طراحی شده‌اند تشکیل شده است. در این سیستم امکان تجمع تغییر مکان‌ها غیرالاستیک را در طبقه اول فراهم نموده و از خرابی در سایر طبقات جلوگیری می‌شود. نتایج این مطالعه بیانگر عملکرد مناسب این سیستم و همچنین روش طراحی ارائه شده است.

در این پژوهش، ابتدا مروری بر رفتار مهاربند هلالی شکل و روابط تحلیلی آن صورت گرفته است. در ادامه مهاربند سه‌بخشی یا تراپوزاید به عنوان یک پیکربندی نوین معرفی شده و مزیت‌های اصلی آن در مقایسه با مهاربند هلالی شکل دویخشی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس رفتار این مهاربند از طریق تحلیل عددی ارزیابی شده و در پایان، امکان بهبود عملکرد قاب‌های مهاربندی پشتیبان قوی فولادی با افزودن مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزاید، همراه با کنترل نیروهای ایجاد شده در اعضای خرابای الاستیک، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مهاربند هلالی شکل

مهاربندهای هلالی شکل یک دستگاه فولادی هیستریزیس بوده که با استفاده از پروفیل‌های فولادی مرسوم درست شده است. این مهاربند با توجه به پیکربندی و شیوه قرارگیری در قاب، می‌تواند رفتار هیستریزیس متقارن یا نامتقارن را از خود نشان بدهد. در صورتی که از یک مهاربند مشابه شکل ۲-الف تشکیل شده باشد رفتار نامتقارن، و در صورتی که به صورت دوگانه و مشابه شکل ۲-ب استفاده شود رفتار متقارن خواهد داشت. رفتار مهاربند هلالی شکل به تنهایی بسیار نامتقارن است. علت این پدیده، سخت‌شوندگی قابل توجه این مهاربند در کشش و رفتار نرم در فشار است [۲۱]. در ادامه این بخش توضیحات تکمیلی در خصوص رفتار این مهاربند و روابط حاکم بر آن ذکر شده است.

^۱ Palermo

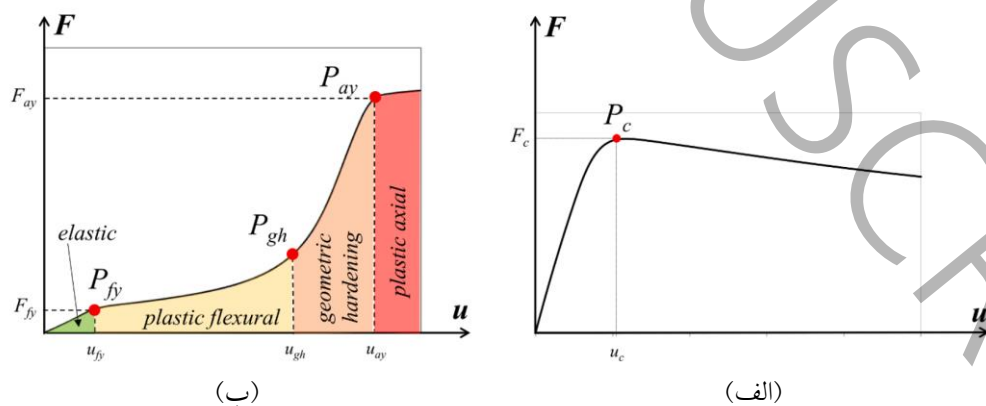


شکل ۲: (الف) مهاربند هلالی شکل به صورت تک در قاب به همراه رفتار هیستریزیس نامتقارن آن، (ب) مهاربند هلالی شکل به صورت دوگانه در قاب به همراه رفتار هیستریزیس متقارن آن [۲۱].

Fig. 2. (a) Single crescent-shaped brace in the frame with its asymmetric hysteresis behavior, (b) Dual crescent-shaped braces in the frame with their symmetric hysteresis behavior

۲-۱- رفتار مهاربند هلالی شکل

در شکل ۳ رفتار مهاربند هلالی شکل در حالت‌های فشاری و کششی نمایش داده شده است. در ابتدای رفتار فشاری، مهاربند در محدوده رفتار الاستیک قرار دارد تا زمانی که به نقطه تسلیم خمشی در ناحیه زانویی مقطع P_c برسد. پس از این نقطه، به دلیل اثرات غیرخطی هندسی مهاربند، نرم‌شدگی اتفاق می‌افتد. رفتار کششی مهاربند از چهار فاز تشکیل شده است. در فاز اول مهاربند در محدوده خطی و الاستیک عمل می‌کند تا زمانی که به نقطه تسلیم خمشی اولیه P_{fy} دست یابد، که این نقطه معادل با زمان تسلیم در ناحیه زانویی مقطع است. در فاز دوم، مهاربند در ناحیه شبه‌پلاستیک قرار گرفته و به واسطه خمیدگی و براساس سختی خمشی، رفتار خود را تا نقطه عملکردی کلیدی دوم P_{gh} ادامه می‌دهد. در فاز سوم مهاربند به علت اثرات سخت‌شوندگی هندسی غیرخطی (کاهش خروج از محوریت مهاربند)، سختی محوری مهاربند درگیر شده و افزایش ناگهانی سختی را در پی دارد تا به نقطه تسلیم نهایی (P_{ay}) با خروج از مرکزیت صفر برسد. در فاز چهارم با صاف شدن سطح مهاربند، مهاربند وارد ناحیه محوری پلاستیکی نهایی می‌شود [۲۵].

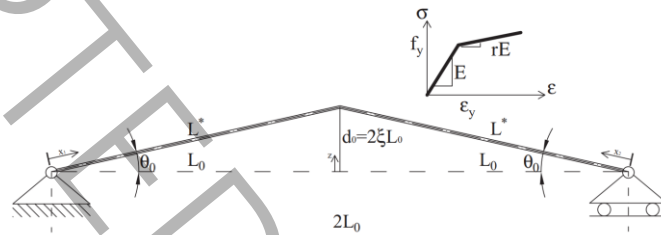


شکل ۳: پاسخ نیرو-تغییر مکان مهاربند هلالی شکل در: (الف) فشار، (ب) کشش [۲۳]

Fig. 3. Force-Displacement Response of the Crescent-Shaped Brace in: (a) Compression, (b) Tension

۲-۲- روابط حاکم بر رفتار مهاربند هلالی شکل

پالرمو و همکاران [۲۶] به ارزیابی رفتار الاستیک مهاربند هلالی شکل پرداختند و روابط سختی اولیه جانبی و مقاومت الاستیک سازه را براساس رفتار محوری و خمشی مهاربند محاسبه کردند. در پژوهش‌های آتی مشخص شد که می‌توان برای مهاربندهای دارای خروج از مرکزیت ۱۰٪ به بالا، از تغییرشکل‌پذیری محوری مهاربندها صرف نظر نمود [۲۱]. مختاری و همکاران [۲۲] به توسعه این روابط پرداختند که این روابط براساس مشخصات هندسی و پارامترهای ارائه شده در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: مشخصات هندسی مهاربند هلالی شکل بررسی شده توسط مختاری و همکاران [۲۲]

Fig. 4. Geometric Properties of the Crescent-Shaped Brace Studied by Mokhtari et al.

سختی داخل صفحه مهاربند (K_{IN})، مقاومت کششی الاستیک (F_{fy}) و حداکثر ظرفیت کششی (F_{ay}) مطابق روابط ۱ تا ۳ تعیین می‌شود:

$$K_{IN} = \frac{3 EJ \cdot \cos \theta_0}{8 L_0^3 \xi^2} \quad (1)$$

$$F_{fy} = \frac{M_y}{d_0} \cdot \gamma = \frac{W_e \cdot f_y}{d_0} \cdot \gamma = \frac{J \cdot f_y}{L_0 \cdot h \cdot \xi} \cdot \gamma \quad (2)$$

$$F_{ay} = A \cdot F_y \quad (3)$$

در روابط ارائه شده f_y تنش تسلیم فولاد، E مدول الاستیسیته فولاد، h ارتفاع مقطع، d_0 بازوی اهرمی، θ_0 زاویه انتهایی مهاربند با افق، J ممان اینرسی داخل صفحه مهاربند، W_e اساس مقطع الاستیک، γ میزان خروج از مرکزیت و L_0 تصویر افقی المان شیب‌دار (L^*) است. پارامتر γ ضریب اصلاح بوده و مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در معادله ۴، i شعاع ژیراسیون مقطع است.

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{h}{2L_0} \cdot \frac{2}{\xi} \cdot \left(\frac{i}{h}\right)^2} \quad (4)$$

مقاومت فشاری مهاربند (F_c) نیز از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$F_c = \frac{W_e \cdot f_y}{d_0} \cdot \lambda = \frac{J \cdot f_y}{L_0 \cdot h \cdot \xi} \cdot \lambda \quad (5)$$

در معادله ۵، λ ضریب اصلاح بوده و مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \frac{\beta}{1 + \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{f_y}{E} \cdot \frac{\beta \cdot L_0}{h \cdot \xi \cdot \cos^2 \theta_0}} \quad (6)$$

در معادله ۶، β ضریب شکل یا همان نسبت اساس مقطع پلاستیک به الاستیک است.

۳- مدل سازی مهاربند هلالی شکل

جهت ارزیابی رفتار مهاربندهای هلالی شکل، مدل سازی این مهاربند در نرم افزار OpenSees به صورت دویعدی انجام شد. جهت مدل سازی مهاربند از مصالح Steel02 و از المان dispBeamColumn با پنج نقطه انتگرال گیری استفاده شد. برای تعریف مقاطع المان ها نیز از مقاطع رشته ای یا فایبر^۱ استفاده شد. پارامترهای مدل سازی مصالح در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول پارامتر b نسبت سخت شوندگی کرنشی، یا به عبارتی نسبت مدول الاستیسیته پس از تسلیم و مدول الاستیسیته اولیه است. cR_1 و cR_2 پارامترهای کنترل کننده تغییر حالت الاستیک به پلاستیک، a_1 تا a_4 پارامترهای سخت شوندگی همگن هستند [۲۷]. همچنین به منظور بررسی گسیختگی های احتمالی از مصالح خستگی (Fatigue Material) استفاده شد و به علت نبود مطالعات کافی، از پارامترهای پیش فرض خود نرم افزار در نظر گرفته شد.

جدول ۱: پارامترهای مدل سازی مهاربند هلالی شکل

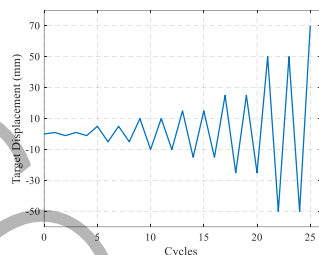
Table 1. Modeling Parameters of the Crescent-Shaped Brace

پارامتر مدل سازی	F_y (Mpa)	E (Mpa)	b	R_0	cR_1	cR_2	a_1	a_2	a_3	a_4
مقدار	۴۰۰	۲۰۰۰۰۰	۰/۰۱۱	۲۰	۰/۹۵	۰/۱۵	۰/۰۳	۱	۰/۰۲	۱

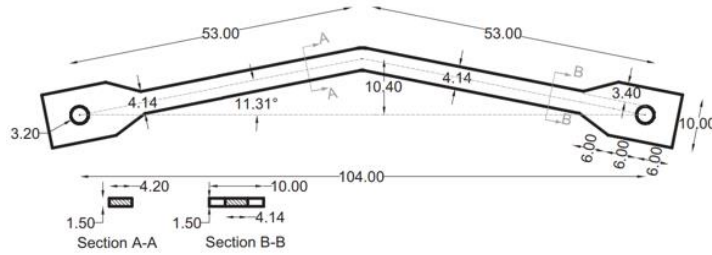
۳-۱- صحت سنجی مدل سازی مهاربند هلالی شکل

جهت صحت سنجی عملکرد مهاربند هلالی شکل، نتایج مدل سازی عددی توسط نرم افزار OpenSees با نتیجه نمونه های R1-T، R1-C و R1-R مدل آزمایشگاهی پالرمو و همکاران [۲۱] مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵-الف). نمونه های عنوان شده از نظر ابعادی و جنس مصالح مشابه یکدیگر هستند با این تفاوت که نمونه R1-T تحت بارگذاری کششی، نمونه R1-C تحت بارگذاری فشاری یک طرفه و نمونه R1-R تحت بارگذاری رفت و برگشتی مطابق پروتکل بارگذاری شکل ۵-ب قرار گرفته است.

^۱ Fiber Section



(ب)

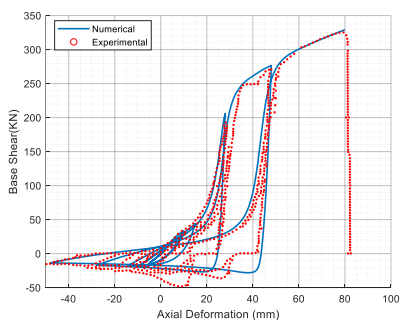


(الف)

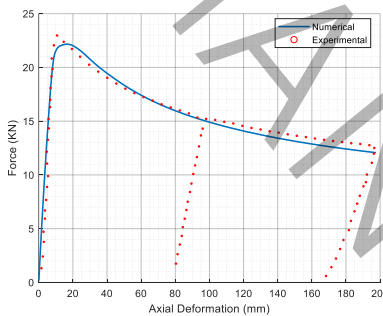
شکل ۵: (الف) مشخصات نمونه آزمایشگاهی پالرمو و همکاران، (ب) پروتکل بارگذاری [۲۱].

Fig. 5. (a) Details of the Experimental Specimen by Palermo et al. (b) Loading Protocol

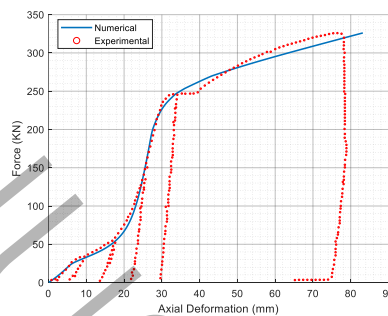
در شکل ۶ منحنی نیرو-تغییر مکان مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در بارگذاری های یکطرفه تطابق مناسبی بین نتایج مدل سازی عددی و نتایج نمونه آزمایشگاهی دیده می شود. در بارگذاری چرخه ای در بعضی قسمت های نمودار مدل آزمایشگاهی، برش پایه به صفر رسیده و سپس تغییر مکان مدنظر به آن اعمال شده است. از دلایل این اتفاق می توان به دستگاه انجام آزمایش اشاره کرد که بعد از انجام هر چرخه، باربرداری انجام شده و سپس چرخه بعدی آغاز شده است. در قسمت فشاری نمودار، تفاوت مقاومت قابل توجهی مشاهده می شود که علت آن، کمانش خارج از صفحه نمونه آزمایشگاهی به علت نسبت ارتفاع به عرض نامطلوب نمونه است. از آنجایی که مدل سازی عددی به صورت دو بعدی انجام شده است، رفتار خارج از صفحه مهاربند دیده نشده و در نتیجه کمانش خارج از صفحه در آن شکل نمی گیرد. در بخش کششی، رفتار نمونه آزمایشگاهی به خوبی توسط نرم افزار شبیه سازی شده است و در مجموع می توان اذعان داشت که نرم افزار اپنسیس با دقت قابل قبولی، امکان شبیه سازی رفتار مهاربند هلالی شکل را دارد.



(ج)



(ب)



(الف)

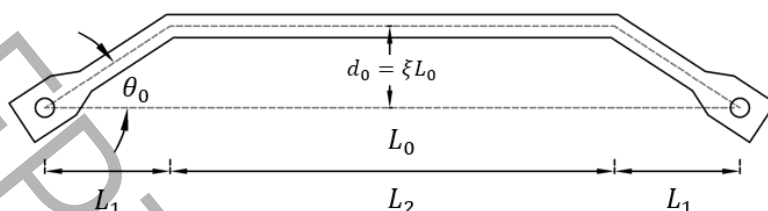
شکل ۶: منحنی نیرو-تغییر مکان مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی تحت بارگذاری (الف) کششی، (ب) فشاری، (ج) چرخه ای

Fig. 6. Force-Displacement Curve of the Numerical Model and Experimental Results under, (a) Tensile Loading, (b) Compressive Loading, (c) Cyclic Loading

۴- مهاربند سه بخشی یا تراپوزاید

در این بخش، ایده استفاده از مهاربند سه بخشی یا تراپوزاید مورد بررسی قرار می گیرد. هدف از این پیکربندی، تسهیل عملیات مقاوم سازی، افزایش انعطاف پذیری در طراحی و تعیین نحوه رفتار گسیختگی و امکان تعبیه بخش های تعویض پذیر است. در شکل ۷ هندسه مهاربند توسعه داده شده، نشان داده شده است. این مهاربند در مقایسه با مهاربند هلالی شکل به علت کاهش طول ناحیه شیب دار، با خروج از مرکزیت یکسان، زاویه انتهایی (θ_0) بیشتری دارد. با توجه به آنکه سخت شونده گی هندسی در زمانی رخ می دهد که تمام

بخش‌های مهاربند در یک راستا قرار گرفته‌اند (هنگام به صفر رسیدن خروج از مرکزیت، سختی محوری مهاربند در گیر می‌شود)، افزایش زاویه انتهایی باعث می‌شود مهاربند مورد نظر دیرتر به ناحیه سخت‌شوندگی هندسی برسد و همچنین در صورت استفاده از این مهاربند به منظور مقاوم‌سازی سازه‌های ساخته شده، طراح می‌تواند با توجه به ابعاد سازه، زاویه انتهایی را به نحوی تعیین نماید که امکان اجرا فراهم باشد.

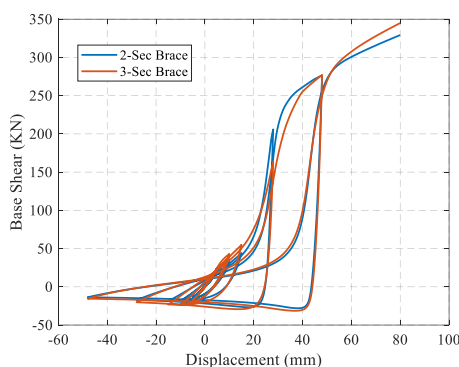


شکل ۷: هندسه مهاربند تراپوزاید

Fig. 7. Geometry of the Trapezoid Brace

به منظور مقایسه اولیه رفتار مهاربند هلالی شکل معمولی و مهاربند توسعه داده شده، یک نمونه مهاربند تراپوزاید توسعه داده شد. مصالح و ابعاد المان‌های مدل‌سازی این مهاربند مشابه مدل صحت‌سنجی شده بوده و در مجموع از ۶ المان (دو المان در هر بخش) استفاده شده است. این تعداد المان از آن جهت انتخاب شد که در صورت وقوع پدیده کماتش در بخش‌های مختلف (مخصوصاً بخش میانی)، اثرات آن در تحلیل دیده شود. در این نمونه خروج از مرکزیت ۷٪ و نسبت طول ناحیه شیب‌دار (L_1) ۲۰٪ طول کلی در نظر گرفته شده است. مقادیر گفته شده به نحوی تعیین شد تا فولاد مصرفی در دو نمونه تقریباً برابر باشد و همچنین رفتار غیرخطی در تمامی بخش‌های مهاربند توزیع شود. لازم به ذکر است با توجه به عدم وجود روابط حاکم بر رفتار مهاربند تراپوزاید، رفتار این مهاربند با استفاده از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و این مقادیر به علت رفتار متناسب‌تر نمونه و تشابه بیشتر با مهاربند هلالی شکل انتخاب شد.

در شکل ۸ منحنی هیستریزیس دو نمونه نشان داده شده است. در مهاربند سه‌بخشی ابتدا تسلیم در بخش میانی رخ داد و سپس در بخش‌های کناری مشاهده شد. با توجه به آنکه زاویه انتهایی مهاربند سه‌بخشی، کمی بیشتر از مهاربند دوبخشی است، سخت‌شوندگی هندسی در این نمونه کمی دیرتر رخ می‌دهد. به علت خروج از مرکزیت کمتر به نسبت مهاربند دوبخشی، سختی اولیه و مقاومت فشاری مهاربند افزایش یافته است. همچنین این افزایش سختی، موجب افزایش مقاومت کششی نهایی نمونه نیز شده است. با توجه به توضیحات بیان شده، مشاهده می‌شود که روند خرابی در مهاربند سه‌بخشی توسعه داده شده مشابه مهاربند دوبخشی است و در مجموع می‌توان نتیجه گرفت رفتار کلی دو مهاربند مشابه هم است.



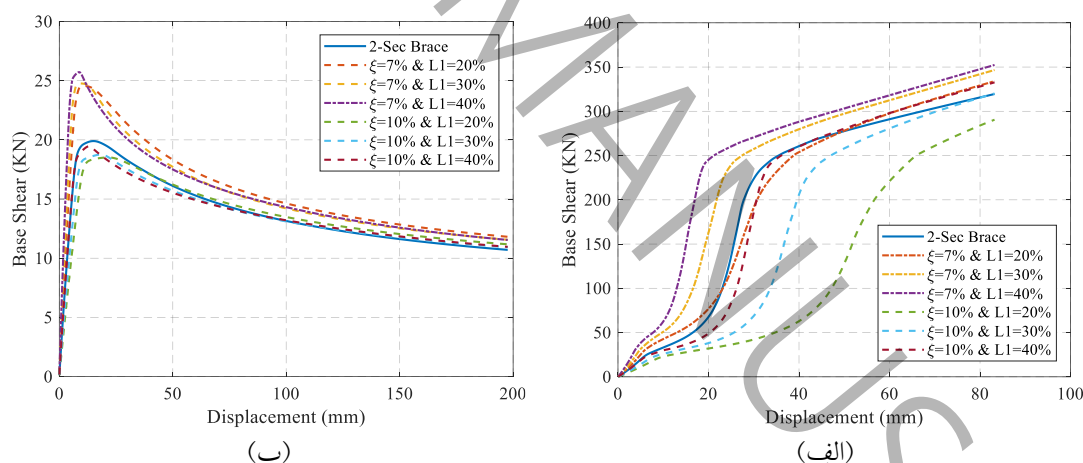
شکل ۸: مقایسه منحنی هیستریزیس مهاربند هلالی شکل معمولی و سه‌بخشی

Fig. 8. Comparison of Hysteresis Curves of the Crescent-Shaped Brace and the Three-Part Brace

۴-۱- ارزیابی انعطاف پذیری طراحی

به منظور ارزیابی تأثیر طول ناحیه شیب‌دار و همچنین میزان خروج از مرکزیت در رفتار مهاربند هلالی شکل، نمونه‌ها توسعه داده شد و برای خروج از مرکزیت ۷ و ۱۰ درصد، و نسبت طول ناحیه شیب‌دار (L_1) ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است مقادیر خروج از مرکزیت و نسبت ناحیه شیب‌دار دیگر به علت اختلاف قابل توجه در زاویه انتهایی و نتایج، در این بخش مورد ارزیابی قرار نگرفت و ارائه نتایج به مدل‌های گفته شده محدود شد.

در شکل ۹ منحنی نیرو-تغییر شکل یک‌طرفه نمونه‌ها نشان داده شده است. همچنین اختلاف سختی و مقاومت فشاری مهاربندهای سه‌بخشی در جدول ۲ با مهاربندهای دوبخشی مقایسه شده است. در بارگذاری کششی، در مجموع می‌توان گفت کاهش خروج از مرکزیت مهاربندها، موجب افزایش سختی اولیه مهاربند شده است. همچنین افزایش طول ناحیه شیب‌دار، موجب کاهش زاویه انتهایی و در نتیجه کاهش سخت‌شوندگی هندسی شده است. در مدل با خروج از مرکزیت ۱۰٪، افزایش طول ناحیه شیب‌دار موجب نزدیک شدن رفتار مهاربند تراپوزاید به مهاربند هلالی شکل شده است. در بارگذاری فشاری نیز کاهش خروج از مرکزیت موجب افزایش مقاومت فشاری مهاربند شده است. با افزایش طول ناحیه شیب‌دار، حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش پیدا کرده؛ اما افت مقاومت بیشتری رخ داده است. علت این اتفاق، تقدم تسلیم خمشی بخش میانی، در مهاربند با ناحیه شیب‌دار بزرگ‌تر است که بعد از آن تسلیم فشاری در سایر اجزای مهاربند رخ می‌دهد در حالی که با کاهش طول ناحیه شیب‌دار، از همان ابتدا تسلیم فشاری در بخش میانی رخ می‌دهد و مهاربند رفتار یکنواخت‌تری را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج کسب شده، می‌توان نتیجه گرفت رفتار این مهاربند به خوبی توسط مهندس طراح قابل کنترل بوده و انعطاف‌پذیری بالایی برای طراحی دارد.



شکل ۹: منحنی نیرو-تغییر شکل یک‌طرفه مهاربند تراپوزاید با بررسی اثرات هندسه (الف) رفتار کششی، (ب) رفتار فشاری.

Fig. 9. Monotonic Force-Displacement Curve of the Trapezoid Brace with Geometry Effects Analysis: (a) Tensile Behavior, (b) Compressive Behavior

جدول ۲: میزان تغییر سختی و مقاومت فشاری مهاربندهای تراپوزاید با بررسی اثرات هندسه (%)

Table 2. Percentage Change in Stiffness and Compressive strength of Trapezoid Braces with Geometry Effects Analysis (%)

L1/L0	$\zeta=7\%$			$\zeta=10\%$		
	٪۲۰	٪۳۰	٪۴۰	٪۲۰	٪۳۰	٪۴۰
$K_{IN}/K_{IN-2sec}$	+۲۸/۷	+۵۶/۸	+۹۷/۱	-۳۶/۹	-۲۲/۸	-۰/۰۱
F_c/F_{c-2sec}	+۲۳/۴	+۲۴/۵	+۲۹/۲	-۷/۰	-۵/۸	-۲/۲

۴-۲- تمرکز رفتار غیرخطی در بخش میانی

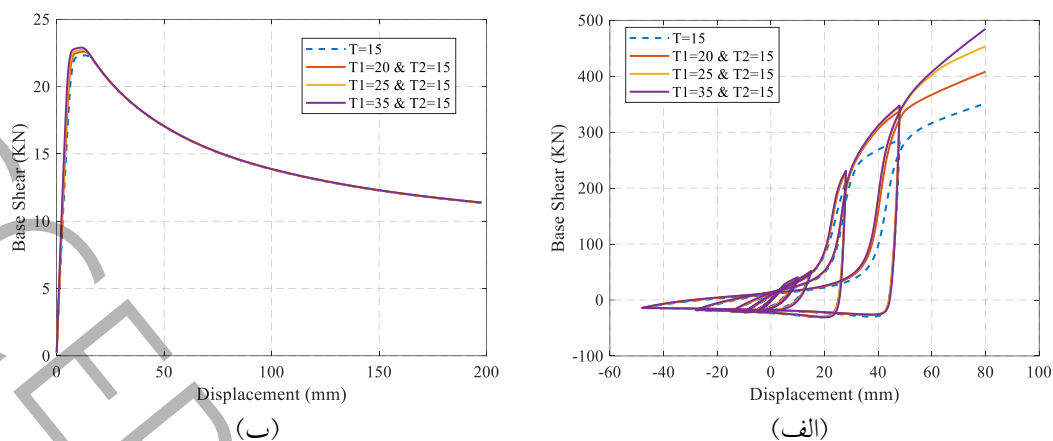
در این مهاربند می‌توان با افزایش صلبیت بخش‌های مختلف، خرابی را در بخش‌های مختلف متمرکز کرد. متمرکز نمودن خرابی در بخش میانی، ضمن کاهش طول ناحیه آسیب‌پذیر، از نظر اجرایی شرایط مناسب‌تری را برای تعویض بخش‌های آسیب‌دیده فراهم می‌کند. به‌منظور بررسی این پیکربندی، مدل‌ها در سه گروه با طول ناحیه میانی متفاوت توسعه پیدا کرد. در گروه اول طول بخش شیب‌دار به ترتیب به میزان ۳۰٪ طول کلی در نظر گرفته شد. به منظور استفاده از پروتکل بارگذاری چرخه‌ای، خروج از مرکزیت این مدل برابر با ۸٪ طول کلی قرار داده شد تا زاویه انتهایی مدل‌های توسعه داده شده، با مدل آزمایشگاهی تقریباً یکسان باشد. مدل‌ها با تفاوت ضخامت بخش‌های مختلف به منظور ارزیابی رفتار مهاربند، مطابق جدول ۳ توسعه داده شد. در مدل شماره ۱، ضخامت تمامی بخش‌ها ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا مبنای مقایسه با سایر مدل‌ها قرار بگیرد. در مدل‌های شماره ۲ تا ۴ نیز به ترتیب ضخامت بخش شیب دار برابر با ۲۰، ۲۵ و ۳۵ در نظر گرفته شد تا اثر میزان صلبیت این بخش بر رفتار مهاربند ارزیابی شود. افزایش ضخامت بدین منظور انجام شد تا ضمن افزایش صلبیت بخش‌های مختلف، ممان‌اینرسی و در نتیجه مقاومت خمشی این بخش‌ها دچار تغییر قابل توجه نشود. این موضوع از آنجایی اهمیت پیدا می‌کند که مطابق روابط ۱ تا ۵، ممان‌اینرسی مقطع تاثیر قابل توجهی بر رفتار این مهاربند داشته و مقایسه رفتار مهاربندها با یکدیگر به خوبی فراهم نمی‌شود.

جدول ۳: نام مدل‌ها با بررسی اثرات توزیع رفتار غیرخطی در بخش میانی مهاربند تراپوزاید

Table 3. Model Names with evaluation of Nonlinear Behavior Distribution in the Central Section of the Trapezoidal Brace

بخش میانی			بخش شیب‌دار			نام مدل	شماره مدل
$J(mm^4)$	$A(mm^2)$	$T(mm)$	$J(mm^4)$	$A(mm^2)$	$T(mm)$		
۸۸۶۹۷/۴	۶۲۱	۱۵	۸۸۶۹۷/۴	۶۲۱	۱۵	T=15	۱
۸۸۶۹۷/۴	۶۲۱	۱۵	۱۱۸۲۶۳/۲۴	۸۲۸	۲۰	T1=20 & T2=15	۲
۸۸۶۹۷/۴	۶۲۱	۱۵	۱۴۷۸۲۹/۰۵	۱۰۳۵	۲۵	T1=25 & T2=15	۳
۸۸۶۹۷/۴	۶۲۱	۱۵	۲۰۶۹۶۰/۶۷	۱۴۴۹	۳۵	T1=35 & T2=15	۴

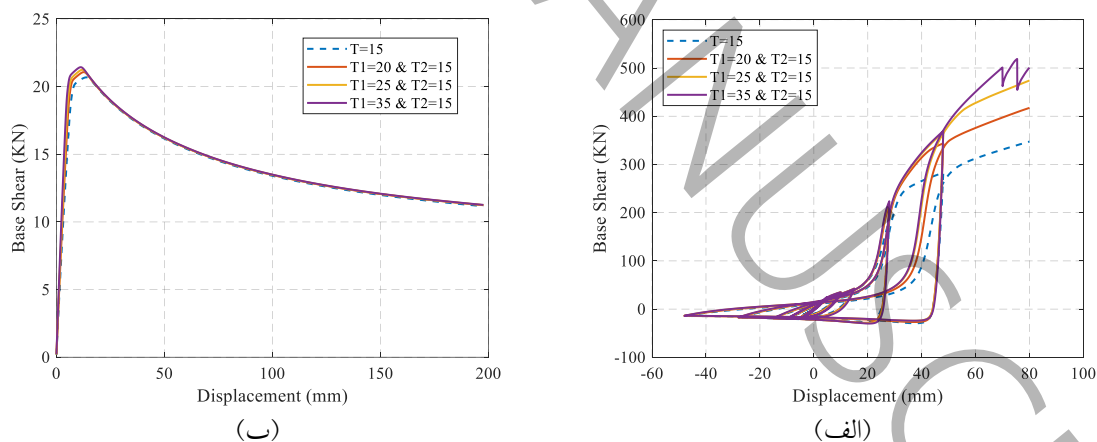
در شکل ۱۰ منحنی نیرو تغییرشکل مدل‌های گروه اول، با طول ناحیه شیب‌دار ۳۰٪ نشان داده شده است. با توجه به اینکه رفتار غیرخطی این مهاربند با تسلیم خمشی بخش میانی آغاز می‌شود، افزایش مساحت بخش‌های کناری موجب تفاوت قابل توجه در رفتار فشاری این مهاربندها نشده است. با افزایش ضخامت بخش‌های کناری، رفتار غیرخطی در این نواحی کاهش یافته و موجب افزایش کرنش در بخش میانی شده است به نحوی که در مدل با ضخامت ۳۵ میلی‌متر در بخش شیب‌دار، هیچگونه رفتار غیرخطی در این ناحیه مشاهده نشد اما کرنش بخش میانی از سایر مدل‌ها بیشتر بود. با این حال به علت طول قابل توجه بخش میانی، گسیختگی در این بخش رخ نداد. همچنین افزایش ضخامت این بخش‌ها موجب افزایش مقاومت کششی مهاربند، بعد از مرحله سخت‌شدگی هندسی شده است که رفتاری مشابه مهاربندهای مرسوم دارد.



شکل ۱۰: منحنی نیرو-تغییر شکل مهاربند تراپوزاید با بررسی با طول ناحیه شیب‌دار ۳۰٪ و خروج از مرکزیت ۸٪ طول کلی. (الف) رفتار هیستریزیس، (ب) رفتار فشاری.

Fig. 10. Force-Displacement Curve of the Trapezoidal Brace with Analysis of 30% Inclined Region Length and 8% Eccentricity of the Total Length: (a) Hysteresis Behavior, (b) Compressive Behavior

در گروه دوم، طول ناحیه شیب‌دار به میزان ۳۵٪ و خروج از مرکزیت مهاربند به میزان ۹٪ طول کلی در نظر گرفته شد و ضخامت بخش‌های مخالف، مانند گروه اول در نظر گرفته شد. در شکل ۱۱ منحنی نیرو-تغییر شکل مدل‌های گروه دوم نشان داده شده است. در این گروه نیز رفتار فشاری مهاربندها مشابه گروه اول است. با افزایش صلیبیت بخش شیب‌دار، کرنش‌های بخش میانی افزایش پیدا کرده و در نهایت در مدل با ضخامت بخش کناری ۳۵، در چرخه انتهایی گسیختگی در بخش میانی شروع شده است. در این مدل بخش‌های کناری، رفتار الاستیک از خود نشان داده است.

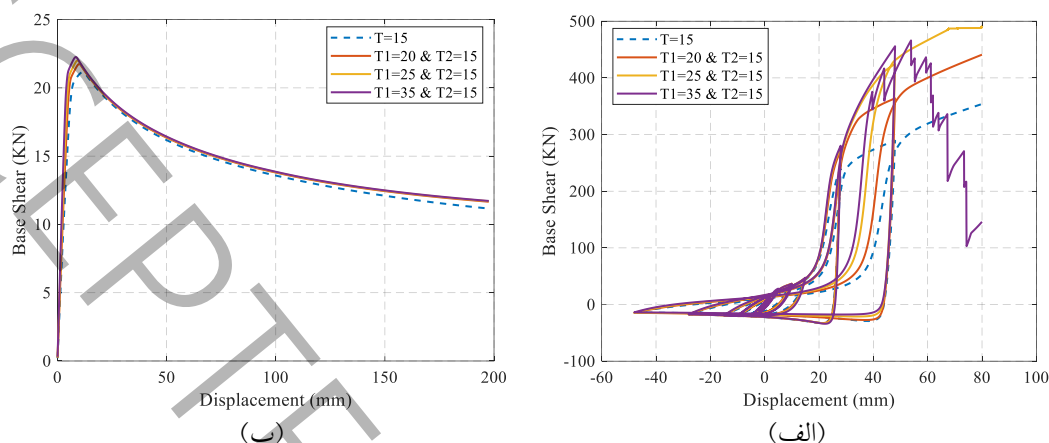


شکل ۱۱: منحنی نیرو-تغییر شکل مهاربند تراپوزاید با بررسی با طول ناحیه شیب‌دار ۳۵٪ و خروج از مرکزیت ۹٪ طول کلی. (الف) رفتار هیستریزیس، (ب) رفتار فشاری.

Fig. 11. Force-Displacement Curve of the Trapezoidal Brace with Analysis of 35% Inclined Region Length and 9% Eccentricity of the Total Length: (a) Hysteresis Behavior, (b) Compressive Behavior

در گروه سوم، طول ناحیه شیب‌دار به میزان ۴۰٪ و میزان خروج از مرکزیت مدل‌ها ۹٪ طول کلی در نظر گرفته شد و ضخامت بخش‌های مختلف مشابه گروه‌های قبلی در نظر گرفته شد. در شکل ۱۲ نتایج تحلیل رفتار فشاری و هیستریزیس این گروه آورده شده

است. کاهش طول بخش تسلیم شونده موجب افزایش کرنش اعمال شده در این ناحیه و نتیجه گسیختگی سریعتر مهاربندهای این گروه در مقایسه با گروه‌های قبلی می‌شود. در مدل با ضخامت بخش کناری ۲۵ میلی‌متر، در اواخر چرخه انتهایی گسیختگی رخ داده و در مدل با ضخامت ۳۵ میلی‌متر، به علت الاستیک ماندن بخش‌های کناری، گسیختگی بسیار زودتر از سایر نمونه‌ها آغاز شده است.



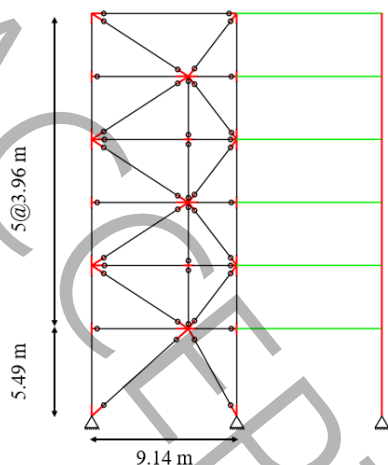
شکل ۱۲: منحنی نیرو-تغییر شکل مهاربند تراپوزاید با بررسی با طول ناحیه شیب‌دار ۴۰٪ و خروج از مرکزیت ۹٪ طول کلی. الف) رفتار هیستریزیس، ب) رفتار فشاری.

Fig. 12. Force-Displacement Curve of the Trapezoidal Brace with Analysis of 40% Inclined Region Length and 9% Eccentricity of the Total Length: (a) Hysteresis Behavior, (b) Compressive Behavior

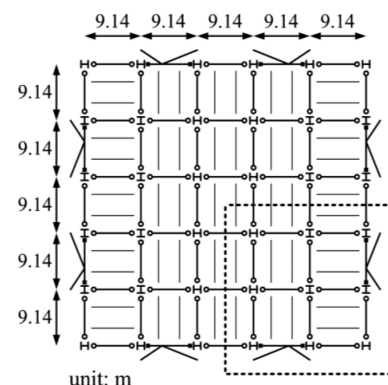
۵- بهبود رفتار قاب پشتیبان قوی با مهاربند هلالی شکل و تراپوزاید

قاب مهاربندی پشتیبان قوی شامل ناحیه ارتجاعی و ناحیه غیرارتجاعی است. ناحیه ارتجاعی به نحوی طراحی می‌شود تا رفتار الاستیک خود را حفظ نموده و ناحیه غیرارتجاعی وظیفه اتلاف انرژی را به عهده دارد. در این بخش امکان بهبود رفتار قاب پشتیبان قوی با اضافه نمودن مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزاید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جهت مدل‌سازی تمامی نمونه‌ها از نرم‌افزار OpenSees استفاده شد. قاب پشتیبان قوی ارائه شده در پژوهش لای و ماهین [۹] به عنوان نمونه مبنا قرار گرفت. مدل ارزیابی شده قاب مهاربندی پشتیبان قوی بوده که از مهاربندهای معمولی به عنوان مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی استفاده شده است. مدل ارائه‌شده یک ساختمان ۶ طبقه با کاربری اداری مطابق شکل ۱۲-الف بوده و مقاطع اعضای قاب مهاربندی در جدول ۴ ذکر شده است. بار مرده و زنده کف به ترتیب ۴/۸ و ۲/۴ کیلونیوتن بر مترمربع است. به جهت سادگی، به علت تقارن یک-چهارم سازه به صورت دو بعدی انجام شده است. جهت در نظرگیری اثرات پی-دلتا، یک ستون متکی به نمایندگی از سایر ستون‌های تحت بار ثقیل قرار داده شد. مساحت و ممان اینرسی این ستون برابر با مجموع مساحت و ممان اینرسی سایر ستون‌های گرانشی در مدل بوده و این ستون به وسیله المان خرابایی با سختی بسیار بالا به قاب اصلی متصل شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۳: (الف) پلان نمونه‌های قاب پشتیبان قوی بررسی شده [۹]، (ب) تصویر شماتیک مدل عددی ارائه شده

Fig. 13. (a) Plan of the Strongback Frame Samples Studied, (b) Schematic Diagram of the Proposed Numerical Model

جدول ۴: مشخصات مقاطع اعضای دهانه مهاربندی [۹]

Table 4. Section Properties of the Bracing Span Members

مهاربند ناحیه غیر خطی	قید	مهاربند ناحیه الاستیک	تیر	ستون	طبقه
HSS12x12x5/8	-	W14x132	W18x86	W14x342	۱
HSS10x10x5/8	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	W18x86	W14x342	۲
HSS9x9x5/8	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	W18x86	W14x342	۳
HSS9x9x5/8	HSS8x8x1/2	HSS10x10x1/2	W18x86	W14x132	۴
HSS8x8x1/2	HSS8x8x1/2	HSS10x10x1/2	W18x86	W14x132	۵
HSS7x7x1/2	-	HSS8x8x1/2	W18x86	W14x132	۶

جهت مدل‌سازی تمامی المان‌ها از مصالح Steel02 استفاده شد. جهت مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان forceBeamColumn و جهت مدل‌سازی مهاربندها از المان dispBeamColumn استفاده شده است. در این مدل برای مدل‌سازی ستون‌ها از دو المان و جهت مدل‌سازی مهاربندها از چهار المان استفاده شد و جهت در نظرگیری اثرات کمانش، نقص اولیه به میزان یک هزارم طول مهاربند، در وسط مهاربندها در نظر گرفته شد. در تمامی المان‌ها از ۵ نقطه انتگرال‌گیری استفاده شده است. جهت در نظرگیری مقاطع المان‌ها نیز از مقاطع رشته‌ای یا فایبر استفاده شد. اتصالات مفصلی به صورت کاملاً مفصلی و اتصالات گیردار جهت سادگی، به صورت صلب با استفاده از المان ZeroLength Element مدل‌سازی شد. تکیه‌گاه‌ها نیز به صورت مفصلی مدل شده است. در شکل ۱۳-ب تصویر شماتیک مدل عددی نشان داده شده است. به منظور ارزیابی امکان گسیختگی در مهاربندها، از مصالح خستگی (Fatigue Material) استفاده شد. رفتار مصالح نیز مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شد. در این جدول پارامتر m شیب منحنی کافین-مانسون در فضای لگاریتمی و E_0 مقدار کرنش گسیختگی در هر سیکل است.

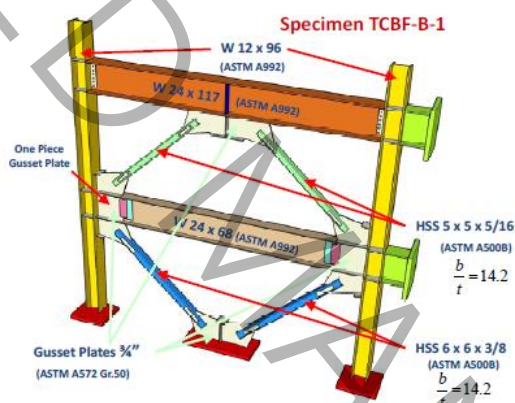
جدول ۵: پارامترهای مدل سازی مصالح تیر، ستون و مهاربند مدل عددی

Table 5. Modeling Parameters for the Materials of Beam, Column, and Brace in the Numerical Model

ε_0	m	a_4	a_3	a_2	a_1	cR_2	cR_1	R_0	b	E (Mpa)	F_y (Mpa)	پارامتر مدل سازی
۰/۰۹۹	-۰/۴۵۸	۱	۰/۰۲	۱	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۹۲۵	۱۸/۵	۰/۰۰۳	۲۰۰۰۰۰	۳۱۰	مقدار

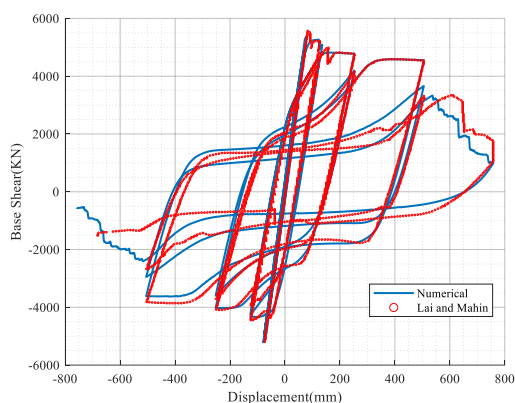
۵-۱- صحت سنجی قاب پشتیبان قوی

جهت صحت سنجی مدل عددی ارائه شده، نتایج تحلیل با نتایج مدل آزمایشگاهی قاب مهاربند فولادی دوطبقه لای و ماهین [۲۸] (شکل ۱۴) مقایسه شد (شکل ۱۵-الف). همچنین در ادامه نتایج مدل عددی قاب مهاربندی پشتیبان قوی پژوهش لای و ماهین [۹] و مدل این مطالعه مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۱۵-ب). نتایج صحت سنجی بیانگر تطابق مناسب میان نتایج مدل سازی عددی و مطالعات قبلی است.

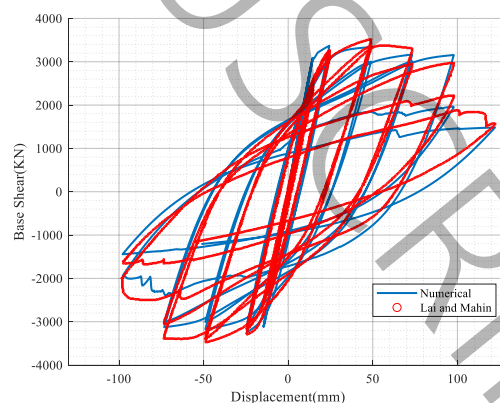


شکل ۱۴: مشخصات نمونه آزمایشگاهی لای و ماهین [۲۸]

Fig. 14. Experimental Specimen Detail of Lai and Mahin



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: نتایج صحت سنجی تحلیل چرخه ای نمونه الف) آزمایشگاهی، ب) عددی.

Fig. 15. Results of Cyclic Analysis Validation, (a) Experimental, (b) Numerical

۵-۲- بررسی امکان استفاده از مهاربند هلالی شکل به منظور بهبود رفتار سیستم پشتیبان قوی

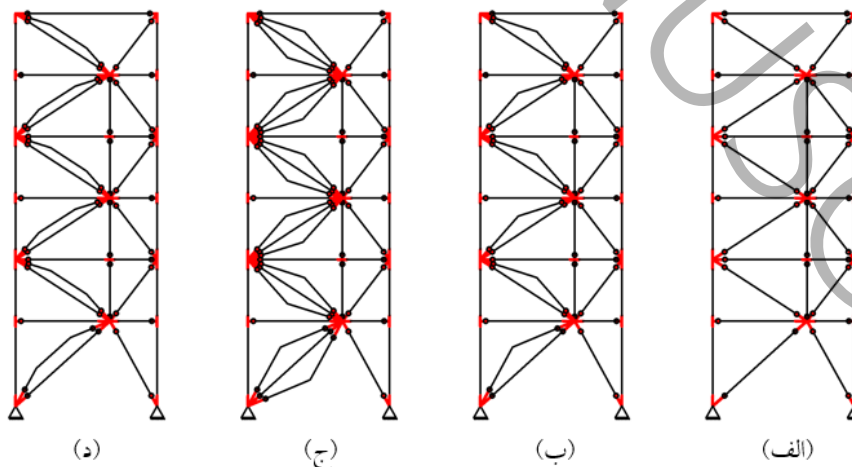
از مزایای مهاربند هلالی شکل می توان به قابلیت اتلاف انرژی در چرخه های اولیه و نیروی کم، و قابلیت تغییر شکل زیاد و رفتار مناسب در زلزله های بزرگ اشاره کرد. استفاده از این ویژگی به منظور مقاوم سازی سیستم مهاربند همگرای مرسوم می تواند به بهبود رفتار سازه کمک کرده و موجب بهبود رفتار و همچنین قابلیت شکل پذیری بیشتر در این سیستم سازه ای شود.

در شکل ۱۶ هندسه مدل ها و در جدول ۶ نام مدل ها به همراه توضیحات آن ها ارائه شده است. به منظور ارزیابی اضافه نمودن مهاربند هلالی شکل به قاب ستون فقراتی، مدل SBS-Base به عنوان مدل مرجع قرار گرفت و مهاربندهای دوبخشی و سه بخشی در ناحیه غیرارتجاعی به آن اضافه شد. به منظور مدل سازی مهاربندهای هلالی شکل از دو المان و از شش المان برای مدل سازی مهاربند هلالی شکل سه بخشی استفاده شد. این مقادیر به نحوه توسعه یافت تا مشکل همگرایی در فرآیند تحلیل به وجود نیاید. در مدل های دارای مهاربندی هلالی شکل دوبخشی از خروج از مرکزیت ۱۲/۵٪ و در مدل دارای مهاربند هلالی شکل سه بخشی از خروج از مرکزیت ۱۰٪ و طول ناحیه شیب دار ۳۰٪ استفاده شد. این مقادیر به نحوی در نظر گرفته شد تا سختی اولیه سازه به شکل قابل توجهی افزایش پیدا نکرده و مهاربندهای هلالی شکل، همزمان با مهاربندهای اصلی به اوج مقاومت خود نرسند. همچنین اعضای خرپا الاستیک به نحوی تغییر یافت تا عملکرد الاستیک خود را حفظ نماید.

جدول ۶: نام مدل ها با بررسی اثرات اضافه نمودن مهاربند دوبخشی و سه بخشی

Table 6. Model Names with evaluation of the Effects of Adding Two-part and Three-part Braces

نام مدل	توضیحات
SBS-Base	مدل اصلی و ارائه شده توسط لای و ماهین
SBS-C2S	قاب پشتیبان قوی با مهاربند هلالی شکل دوبخشی
SBS-2C2S	قاب پشتیبان قوی با مهاربند هلالی شکل دوبخشی دوگانه
SBS-C3S	قاب پشتیبان قوی با مهاربند سه بخشی یا تراپوزاید



شکل ۱۶: تصویر شماتیک مدل ها. الف) مدل SBS-Base، ب) مدل SBS-C2S، پ) SBS-2C2S، ت) مدل SBS-C3S

Fig. 16. Schematic Diagram of the Models: (a) SBS-Base, (b) SBS-C2S, (c) SBS-2C2S, (d) SBS-C3S

در تمامی مدل‌ها، به علت جلوگیری از رفتار نامناسب سازه، از مهاربندهای غیرارتجاعی همان طبقه به عنوان مقطع مهاربند هلالی شکل و تراپوزاید استفاده شد تا سختی و سطح مقطع مهاربندهای هلالی شکل، متناسب با مهاربند بکار رفته در همان طبقه باشد. همچنین از مصالح و المان‌های استفاده شده در مدل‌سازی مهاربندهای معمولی، به منظور مدل‌سازی مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزاید استفاده شد. لازم به ذکر است مشخصات غیرخطی استفاده شده در مدل‌سازی‌ها، به منظور ارزیابی رفتار محوری در مهاربندها و باتوجه به هندسه خاص آن‌ها توسعه داده شده است درحالی‌که مهاربندهای هلالی شکل و تراپوزاید، تحت اثر هم‌زمان نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی قرار می‌گیرند. مطابق صحت سنجی انجام شده، می‌توان انتظار داشت رفتار کلی این مهاربندها مشابه مدل‌سازی‌های صورت گرفته باشد؛ اما بررسی گسیختگی این مهاربندها و توسعه مصالح و المان‌های مدل‌سازی به منظور ارزیابی دقیق رفتار این مهاربند، می‌تواند در آینده مورد بررسی پژوهشگران قرار بگیرد. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای مطابق جدول ۷ در نظر گرفته شد.

جدول ۷: تغییر مکان‌های سقف در نظر گرفته شده مطابق مدل عددی لای و ماهین [۹]

Table 7. Roof Displacements Considered According to the Numerical Model of Lai and Mahin

شماره ترتیب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تعداد چرخه	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
جابه‌جایی نسبی سقف هدف (%)	± 0.3	± 0.5	± 1.0	± 2.0	± 3.0	± 4.0	± 5.0

۱-۲-۵- نتایج تحلیل چرخه‌ای

در شکل ۱۷ منحنی هیستریزیس و در جدول ۸ حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم سازه نشان داده شده است. مدل پایه (SBS-Base) در اواخر چرخه نهم، بعد از گسیختگی تمام مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی با ناپایداری مواجه شد و تحلیل به اتمام رسید. اضافه کردن مهاربندی دوبخشی (مدل SBS-C2S) موجب افزایش $1.0/4\%$ حداکثر برش قابل تحمل، افزایش 1.0% سختی اولیه سازه نسبت به مدل پایه (SBS-Base) شده است. این تغییر موجب شده تا در انتهای چرخه نهم، 35% جذب انرژی نسبت به مدل پایه افزایش یابد. بعد از گسیختگی کامل مهاربندهای اصلی در دریافت 3% ، مهاربندهای هلالی شکل به مقاومت کششی حداکثر خود رسیده و مقاومت سازه را تامین می‌کنند و با توجه به آنکه مهاربندهای نیمی از طبقات هم‌زمان تحت کشش قرار گرفته است، مقاومت سازه در چرخه‌های انتهایی تقریباً معادل نصف حداکثر برش پایه مدل پایه است. لازم به ذکر است هیچکدام از مهاربندهای هلالی شکل در این تحلیل دچار گسیختگی نشده و تا انتهای تحلیل عملکرد خود را حفظ کردند و در مجموع موجب افزایش $202/5\%$ جذب انرژی شدند.

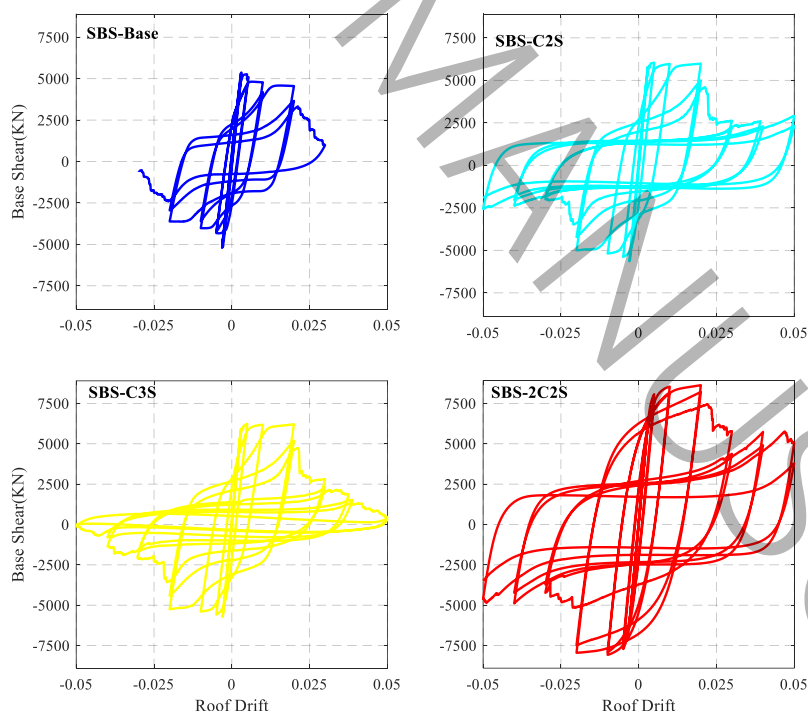
اضافه کردن مهاربندی سه‌بخشی (مدل SBS-C3S) موجب افزایش 13% حداکثر برش قابل تحمل، افزایش $10/9\%$ سختی اولیه سازه و کاهش قابل توجه دوره تناوب سازه نسبت به مدل پایه (SBS-Base) شده است. در این مدل به علت خروج از مرکزیت کمتر در مقایسه با مدل دارای مهاربند دوبخشی، سختی و برش پایه سازه افزایش بیشتری داشته و در چرخه‌های اولیه به علت مقاومت فشاری بالاتر، جذب انرژی بیشتری (41% افزایش جذب انرژی نسبت به مدل پایه در چرخه نهم) را نشان می‌دهد. در این مدل نیز مهاربندها در بعد از خرابی مهاربندهای اصلی به اوج مقاومت خود می‌رسند اما با این، وجود افت مقاومت قابل توجهی در این بخش مشاهده می‌شود که بیانگر خرابی مهاربندهای هلالی شکل است. علت این اتفاق، تجمع رفتار غیرخطی در ناحیه میانی، به علت مقاومت خمشی پایین مهاربند طبقات دوم تا ششم (دارای مقطع قوطی) است. در مجموع استفاده از مهاربند تراپوزاید موجب افزایش $134/8\%$ میزان جذب انرژی نسبت به مدل پایه شده است.

اضافه کردن مهاربندی دویخشی دوگانه (مدل SBS-2C2S) موجب افزایش ۵۷٪ حداکثر برش قابل تحمل سازه و افزایش ۱۳/۷٪ سختی اولیه سازه نسبت به مدل پایه (SBS-Base) شده است. این مدل در مقایسه به مدل‌های قبلی، جذب انرژی مناسب‌تر با رفتار تقریباً متقارن در کشش و فشار را در چرخه‌های اولیه از خود نشان داده است که از دلایل آن می‌توان به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری و کششی مهاربندهای هلالی شکل، به علت استفاده دوگانه آن‌ها اشاره کرد. این مدل تا چرخه نهم ۱۵۰٪ افزایش جذب انرژی را نسبت به مدل پایه نشان داده است. همچنین این مهاربند بعد از خرابی مهاربندهای اصلی، مقاومتی کمی بیشتر از مقاومت حداکثر مدل پایه را نشان می‌دهد که به علت دو برابر بودن مهاربندهای استفاده شده و افزایش مقاومت فشاری متناسب با این ساختار است. میزان جذب انرژی کلی این مدل در مقایسه با مدل پایه، ۴۴۰/۹٪ درصد افزایش داشته است.

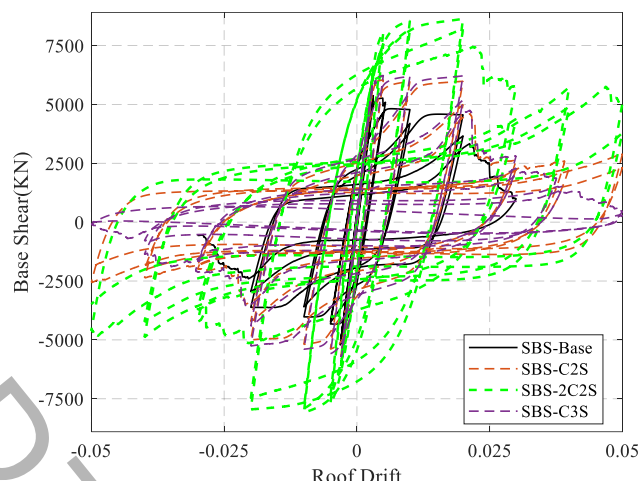
جدول ۸: حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم

Table 8. Maximum Base Shear and First and Second Mode Periods

نام مدل	حداکثر برش پایه (KN)	دوره تناوب سازه (Sec) مود اول	مود دوم
SBS-Base	۵۳۷۲	۰/۷۲۴	۰/۲۴۹
SBS-C2S	۶۰۴۲	۰/۶۸۶	۰/۲۳۳
SBS-2C2S	۸۶۳۳	۰/۶۷۳	۰/۲۲۸
SBS-C3S	۶۲۳۴	۰/۶۸۳	۰/۲۳۲



(الف)



(ب)

شکل ۱۷: منحنی هیستریزیس مدل‌ها، الف) به صورت جدا، ب) در کنار هم.

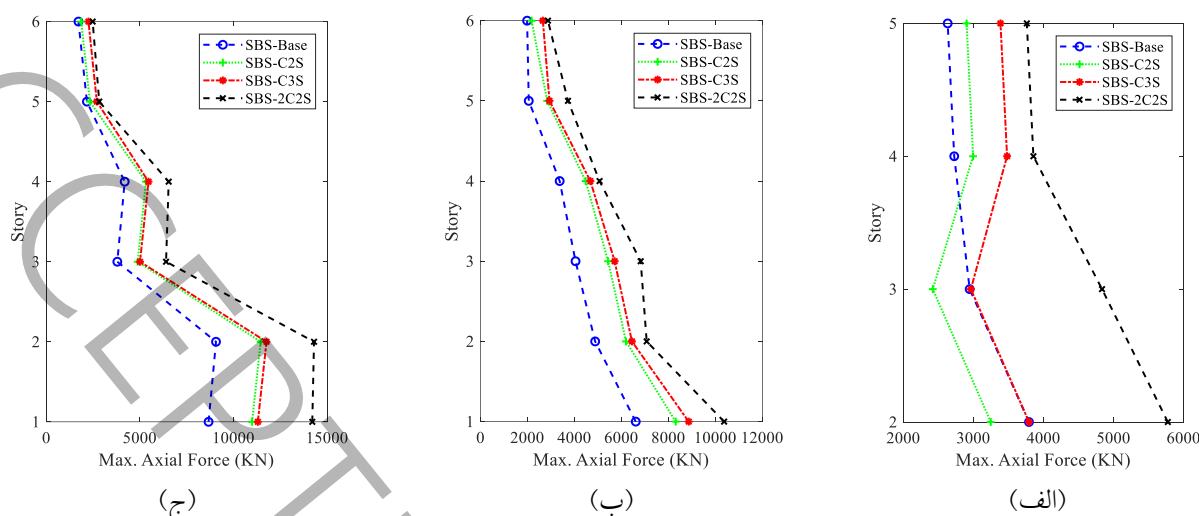
Fig. 17. Hysteresis Curves of the Models: (a) Separately, (b) Together

۵-۲-۲- نیروی ایجاد در اعضای خرپا الاستیک

در شکل ۱۸ حداکثر نیروی ایجاد شده در اعضای خرپا الاستیک نشان داده شده است. استفاده از مهاربند دوبخشی (مدل SBS-C2S)، در قیدها موجب کاهش نیرو به میزان ۱۶ و ۲۰ درصد در طبقات دوم و سوم، و افزایش ۹ و ۲ درصدی در طبقات چهارم و پنجم در مقایسه با مدل پایه شده است. از دلایل کاهش نیروی در طبقات دوم و سوم، می‌توان سختی بیشتر طبقات اول تا سوم، در مقایسه با سایر طبقات اشاره کرد. با توجه به اینکه مهاربندهای هلالی شکل مقطع مشابه به مهاربند همان طبقه دارند، و از طرفی سختی مهاربندهای طبقات اول تا سوم بیشتر از سایر طبقات است، در نتیجه سختی طبقات پایین بیشتر است و نرمی بیشتر طبقات بالاتر، موجب ایجاد نیروی بیشتری در قیدها ایجاد شده است. نیروی ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی نیز به ترتیب از طبقات اول تا پنجم به میزان ۲۶، ۲۶، ۳۳، ۳۲ و ۳۸ درصد افزایش داشته و در طبقه آخر تغییری نداشته است. همچنین نیروهای ایجاد شده در ستون متصل به خرپا الاستیک نیز از طبقه اول تا پنجم به میزان ۲۶٪ افزایش داشته و در طبقه آخر تغییری نکرده است. از دلایل این افزایش نیرو می‌توان به افزایش برش پایه سازه و در نتیجه اعمال نیروی بیشتر از سمت مهاربندهای غیرارتجاعی به خرپا الاستیک اشاره کرد.

استفاده از مهاربند سه‌بخشی (مدل SBS-C3S)، در قیدها موجب کاهش نیرو به میزان ۲ درصد در طبقات دوم و سوم، و افزایش ۲۳ درصد در طبقات چهارم و پنجم در مقایسه با مدل پایه شده است. این مهاربند نیز رفتار تقریباً مشابهی به مدل قبلی داشته و به علت سختی بیشتر مهاربندهای هلالی شکل، نیروی بیشتری به خرپا الاستیک اعمال شده است. نیروی ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی نیز به ترتیب از طبقات اول تا ششم به میزان ۳۴، ۳۲، ۴۰، ۳۸، ۴۳ و ۲۳ درصد افزایش داشته است. همچنین نیروهای ایجاد شده در ستون متصل به خرپا الاستیک در طبقات اول تا چهارم به میزان ۳۰٪ و در طبقات پنجم و ششم به ترتیب ۱۷ و ۲۱ درصد افزایش داشته است. از دلایل این افزایش نیرو نسبت به مدل قبل، می‌توان به افزایش برش پایه سازه و در نتیجه اعمال نیروی بیشتر از سمت مهاربندهای غیرارتجاعی به خرپا الاستیک اشاره کرد.

استفاده از مهاربند دوبخشی دوگانه (مدل SBS-2C2S)، در قیدها از طبقه دوم تا پنجم به ترتیب موجب افزایش نیروی ۳۳، ۴۸، ۲۳ و ۲۳ درصدی نیرو در مقایسه با مدل پایه شده است. این افزایش نیرو به علت رفتار این مدل بعد از خرابی مهاربندهای اصلی، و در زمان کشش حداکثر مهاربندهای هلالی شکل شکل گرفته است و از آنجایی که با افزایش طبقات، سطح مقطع مهاربندها کاهش پیدا میکند، نیروی ایجاد شده در قیدها نیز کاهش پیدا کرده است. نیروی ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی نیز به ترتیب از طبقات اول تا ششم به میزان ۵۵، ۵۱، ۷۰، ۵۵، ۸۰ و ۳۳ درصد افزایش داشته است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز به ترتیب ۵۳، ۵۷، ۶۸، ۵۵، ۲۲ و ۳۳ درصد افزایش داشته است.



شکل ۱۸ : حداکثر نیروی ایجاد شده در مدل‌های دارای مهاربند دوبخشی و سه‌بخشی در: (الف) قیدها (طبقات دوم تا پنجم)، (ب) مهاربندهای ارتجاعی، (ج) ستون متصل به خرپا الاستیک

Fig. 18. Maximum Force Generated in the Models with Two-part and Three-part Braces in: (a) Tiess (Second to Fifth Stories), (b) Elastic Braces, (c) Column Connected to the Elastic Truss

۶- نتیجه‌گیری

قاب مهاربندی پشتیبان قوی با مهاربند فولادی مرسوم، شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی مناسبی ندارد. در این پژوهش ضمن معرفی پیکربندی جدید مهاربند هلالی شکل به منظور انعطاف‌پذیری بیشتر در طراحی، امکان بهبود رفتار چرخه‌ای مهاربند فولادی با اضافه کردن مهاربند هلالی شکل مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه نتایج به‌دست آمده به‌صورت خلاصه بیان شده است:

- رفتار مهاربند سه‌بخشی یا تراپوزاید به‌خوبی توسط مهندس طراح، به‌وسیله تغییر پارامترهای اساسی از جمله میزان خروج از مرکزیت و طول ناحیه شیب‌دار قابل تعریف بوده و انعطاف‌پذیری مناسب‌تری را برای طراح فراهم می‌آورد. همچنین ویژگی‌های رفتار این مهاربند از جمله سختی و سخت‌شوندگی هندسی، متناسب با روابط ارائه شده برای مهاربند هلالی شکل دوبخشی بوده و می‌توان با مطالعه این روابط، رفتار مهاربند را تنظیم نمود.
- کاهش طول ناحیه غیرخطی در مهاربندهای تراپوزاید، موجب شده تا گسیختگی در مهاربندها زودتر رخ داده و که نیاز به توسعه این مهاربند با اضافه کردن المان جاذب انرژی و یا جایگزینی آن با بخش میانی، این رفتار بهبود پیدا کند.
- اضافه کردن مهاربند هلالی شکل و تراپوزاید به سیستم مهاربند پشتیبان قوی تماماً فولادی، سختی اولیه سازه را به میزان قابل توجه افزایش نداده (بین ۱۰ تا ۱۴ درصد) و با افزایش جذب انرژی تا میزان ۴۴۰/۹٪، رفتار مطلوبی را از خود نشان داده است.
- مهاربند تراپوزاید در مقایسه با مهاربند هلالی شکل دوبخشی، به علت توزیع رفتار غیرخطی در ناحیه کوچک‌تر، زودتر دچار گسیختگی شده است. به‌منظور بهبود شکل‌پذیری مهاربندهای تراپوزاید، می‌توان با استفاده از مهاربند با مقطع I شکل، ظرفیت خمشی مقطع را بالا برده تا ناحیه میانی که تحت تأثیر خمش و نیروی محوری است، دیرتر دچار خرابی شده و خرابی در سطح مهاربند توزیع شود.
- استفاده از مهاربند دوبخشی دوگانه، بهبود رفتار قابل توجهی را نشان داده است که این موضوع، به علت بهبود رفتار فشاری مجموع دو مهاربند، در مقایسه با استفاده از یک مهاربند است.

- استفاده از مهاربند هلالی شکل یا تراپوزاید، باتوجه به اختلاف قابل توجه در مقاومت فشاری و کششی، موجب ایجاد لنگر قابل توجه در خرابا الاستیک شده است. استفاده از یک مهاربند هلالی شکل یا تراپوزاید در هر طبقه موجب افزایش نیرو تا ۴۰ درصد و استفاده از مهاربند هلالی شکل دوگانه تا ۸۰٪ در المان ها، افزایش نیرو داشته است که سهم مهاربندهای ارتجاعی و ستون در تحمل این نیرو، بیشتر از قیدها است.

مراجع

- [1] C.-H. Chen, Performance-based seismic demand assessment of concentrically braced steel frame buildings, University of California, Berkeley, 2010.
- [2] S. Kiggins, C.-M. Uang, Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system, *Engineering Structures*, 28(11) (2006) 1525-1532.
- [3] R. Tremblay, L. Tirca, Behaviour and design of multi-storey zipper concentrically braced steel frames for the mitigation of soft-storey response, in: *STESSA 2003-Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, Routledge, 2018, pp. 471-477.
- [4] A. Martin, G.G. Deierlein, Generalized modified modal superposition procedure for seismic design of rocking and pivoting steel spine systems, *Journal of Constructional Steel Research*, 183 (2021) 106745.
- [5] L. Wiebe, C. Christopoulos, R. Tremblay, M. Leclerc, Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame. 1: Concept, modelling, and low-amplitude shake table testing, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(7) (2013) 1053-1068.
- [6] B. Qu, F. Sanchez-Zamora, M. Pollino, Transforming Seismic Performance of Deficient Steel Concentrically Braced Frames through Implementation of Rocking Cores, *Journal of Structural Engineering*, 141(5) (2015) 04014139.
- [7] F.C. Blebo, D.A. Roke, Seismic-resistant self-centering rocking core system, *Engineering Structures*, 101 (2015) 193-204.
- [8] T. Takeuchi, X. Chen, R. Matsui, Seismic performance of controlled spine frames with energy-dissipating members, *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015) 51-65.
- [9] J.-W. Lai, S.A. Mahin, Strongback System: A Way to Reduce Damage Concentration in Steel-Braced Frames, *Journal of Structural Engineering*, 141(9) (2015) 04014223.
- [10] B.G. Simpson, Higher-mode force response in multi-story strongback-braced frames, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(14) (2020) 1406-1427.
- [11] B.G. Simpson, D. Rivera Torres, Simplified modal pushover analysis to estimate first-and higher-mode force demands for design of strongback-braced frames, *Journal of Structural Engineering*, 147(12) (2021) 04021196.
- [12] M.S. Faramarzi, T. Taghikhany, Direct performance-based seismic design of strongback steel braced systems, in: *Structures*, Elsevier, 2020, pp. 482-495.
- [13] M.S. Faramarzi, T. Taghikhany, A comparative performance-based seismic assessment of strongback steel braced frames, *Journal of Building Engineering*, 44 (2021) 102983.
- [14] M.D. Symans, M.C. Constantinou, Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, *Engineering Structures*, 21(6) (1999) 469-487.
- [15] D.R. Sahoo, T. Singhal, S.S. Taraithia, A. Saini, Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers, *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015) 247-257.
- [16] S. A. Mohebi, S. M. Zahrai, R. Raoufi, Seismic evaluation of steel structures retrofitted with supplemental elliptical damper, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(8) (2023) 1677-1700 (in Persian).
- [17] Gh. Pachideh, M. Gholhaki, M. A. Kafi, Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 4557-4576 (in Persian).

- [18] B.G. Simpson, S.A. Mahin, Experimental and Numerical Investigation of Strongback Braced Frame System to Mitigate Weak Story Behavior, *Journal of Structural Engineering*, 144(2) (2018) 04017211.
- [19] A. Soleymani, H. Saffari, A novel hybrid strong-back system to improve the seismic performance of steel braced frames, *Journal of Building Engineering*, 84 (2024) 108482.
- [20] T. Trombetti, S. Silvestri, G. Gasparini, I. Ricci, Stiffness-strength-ductility-design approaches for crescent shaped braces, *The Open Construction & Building Technology Journal*, 3(1) (2009).
- [21] M. Palermo, L. Pieraccini, A. Dib, S. Silvestri, T. Trombetti, Experimental tests on Crescent Shaped Braces hysteretic devices, *Engineering Structures*, 144 (2017) 185-200.
- [22] E. Mokhtari, V. Laghi, M. Palermo, S. Silvestri, Quasi-static cyclic tests on a half-scaled two-storey steel frame equipped with Crescent Shaped Braces, *Engineering Structures*, 232 (2021) 111836.
- [23] E. Mokhtari, M. Palermo, V. Laghi, A. Incerti, C. Mazzotti, S. Silvestri, Quasi-static cyclic tests on a half-scaled two-storey steel frame equipped with Crescent Shaped Braces at both storeys: Experimental vs. numerical response, *Journal of Building Engineering*, 62 (2022) 105371.
- [24] M. Palermo, I. Ricci, S. Gagliardi, S. Silvestri, T. Trombetti, G. Gasparini, Multi-performance seismic design through an enhanced first-storey isolation system, *Engineering Structures*, 59 (2014) 495-506.
- [25] M. Palermo, V. Laghi, G. Gasparini, S. Silvestri, T. Trombetti, Analytical estimation of the key performance points of the tensile force-displacement response of Crescent Shaped Braces, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 148 (2021) 106839.
- [26] M. Palermo, S. Silvestri, G. Gasparini, T. Trombetti, Crescent shaped braces for the seismic design of building structures, *Materials and Structures*, 48 (2015) 1485-1502.
- [27] S. Mazzoni, OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, (2006).
- [28] J.-W. Lai, Experimental and analytical studies on the seismic behavior of conventional and hybrid braced frames, UC Berkeley, 2012.