

رفتار لرزه‌ای صفحات اتصال انتهایی در قاب‌های فولادی با مهاربندی همگرا

علیرضا قلیچ خانی^۱، محمدرضا ادیب رضانی^{۲*}

۱ - کارشناس ارشد عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲ - استادیار، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

قاب مهاربندی همگرا یکی از سیستم‌های باربر جانبی پرکاربرد می‌باشد. مهم‌ترین ضابطه در طراحی اتصالات قاب مهاربند همگرای ویژه که آن را از سیستم معمولی متمایز می‌سازد، ضابطه خط آزاد خمش می‌باشد. مطابق این ضابطه، به منظور فراهم آمدن امکان چرخش آزادانه در انتهای مهاربند و در نتیجه افزایش شکل‌پذیری قاب، رعایت فاصله آزاد از انتهای مهاربند به اندازه ۲ برابر ضخامت ورق اتصال الزامی است. رفتار لرزه‌ای این نوع اتصال بصورت تک و دوپل جای بحث و بررسی فراوانی دارد. در این تحقیق مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای ورق‌های اتصال باریک شونده مربوط به یک قاب با مهاربندی همگرای ویژه در نرم افزار آباکوس انجام گرفته است. نمونه‌ها تحت بارگذاری تغییرشکل سیکلی غیرخطی با توجه به پروتکل آزمایش ATC-24 قرار گرفتند. رفتار لرزه‌ای اتصالات مورد بررسی از لحاظ ضریب شکل‌پذیری، تعداد سیکل قبل از گسیختگی، دررفت قبل از گسیختگی و مقاومت کششی و فشاری مورد مقایسه قرار گرفته است. پارمترهای اصلی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است عبارتند از فاصله آزاد خمش، ورق دوپل یا ورق تک و زاویه باریک شوندگی. از جمله نتایج به دست آمده این است که استفاده از ورق اتصال دوپل به جای ورق اتصال تک در قاب‌های مهاربندی همگرا توصیه نمی‌شود. ورق‌های اتصال دارای زاویه باریک شوندگی ۱۵ درجه دارای ظرفیت شکل‌پذیری و رفتار لرزه‌ای بهتری نسبت به ورق‌های اتصال دارای زاویه باریک شوندگی ۲۵ درجه هستند. برای ورق‌های اتصال تک با زاویه باریک شوندگی ۱۵ درجه فاصله آزاد خمش مناسب با توجه به نمونه‌های مورد مطالعه برابر (2t) به دست آمده است که منطبق بر مبحث ۱۰ نیست. برای ورق‌های اتصال تک با زاویه باریک شوندگی ۲۵ درجه فاصله آزاد خمش مناسب با توجه به نمونه‌های مورد مطالعه برابر 2t به دست آمده است که منطبق بر مبحث ۱۰ می‌باشد.

کلمات کلیدی: قاب مهاربندی همگرای ویژه، ورق اتصال تک و دوپل، ورق اتصال باریک شونده، فاصله آزاد خمش، ظرفیت شکل‌پذیری، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان.

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | |
|-------------------------------------|------------|---------------|-----------------|------------|------------|
| 10.22065/JSCE.2018.134111.1577 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| doi: 10.22065/JSCE.2018.134111.1577 | ۱۳۹۹/۰۱/۱۵ | ۱۳۹۹/۰۱/۱۵ | ۱۳۹۷/۰۹/۰۹ | ۱۳۹۷/۰۷/۱۸ | ۱۳۹۷/۰۳/۱۸ |
| محمدرضا ادیب رضانی | | | *نویسنده مسئول: | | |
| Mr_Adib@azad.ac.ir | | | پست الکترونیکی: | | |

Seismic Behavior of End Connection Plates in Concentrically Steel Braced Frame

Mohammad Reza Adib Ramezani^{*1} Alireza Ghelichkhani²

1 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2 Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the length of the gusset-plate hinge zone proposed by Iranian National Building Code (Part 10) for Special concentrically braced frames (SCBF). For this purpose, numerical studies were done on the seismic behavior of this frames using ABAQUS software. Numerical modelling procedure is validated using the reproduction of the results of an experimental study. A five story building with Special diagonal concentrically braced frames was modeled in ETABS software and a portal frame from the first story of the building was considered for investigation. The detailing of the frame was designed for tension and compression based on Iranian code. Seismic behavior of single and double tapered gusset plates with various connection angles and dimensions as well as various length of the hinge zones including $-3t$, $-2t$, $-t$, $0t$, t , $2t$ and $3t$ were investigated using nonlinear cyclic deformation loading to the ATC-24 test protocol. Seismic behavior of the connections were studied based on ductility, number of cycles before failure, drift before failure and tension and compression strength. Evaluation of the failure limit of the models was carried out using the concept of equivalent plastic strain. Based on the results of the investigated models it can be said that: It is not recommended to use double gusset plates instead of single ones for SCBFs. Gusset plates with a 15 degree angle of inclination have higher ductility capacity and better seismic behavior than ones with a 25 degree angle of inclination. For single gusset plates with a 15 degree angle of inclination, the appropriate length of the hinge zone is $-2t$, which is not consistent with Iranian code. For single gusset plates with a 25 degree angle of inclination, the appropriate length of the hinge zone is $2t$, which is consistent with the Iranian code.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 June 2018

Revise Date: 10 October 2018

Accept Date: 30 November 2018

Keywords:

Special concentrically braced frame, single and double gusset plate, tapered gusset plate, length of the gusset-plate, hinge zone, Ductility Capacity, Static cyclic loading, Iranian National Building Code (Part 10)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.134111.1577

*Corresponding author: Mohammad Reza Adib Ramezani
Email address: mr_adib@azad.ac.ir

۱- مقدمه

قاب‌های مهاربندی شده همگرا^۱ به عنوان سیستم باربر جانبی در سازه‌های فولادی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها اقتصادی هستند و به لحاظ مقاومت و سختی برای کاربرد لرزه‌ای مناسب می‌باشند. طبق این آیین‌نامه‌ها انتظار می‌رود که قاب‌های همگرای ویژه هنگامی که تحت اثر نیروهای زلزله طراحی قرار می‌گیرند تغییرشکل‌های غیر الاستیک قابل توجهی را تحمل کنند [۱].

مهاربندها نقشی کلیدی در مقاومت جانبی قاب‌های مهاربندی همگرا ایفا می‌کنند. تسلیم کششی و تغییرشکل پس کمانشی مهاربندها موجب استهلاک انرژی هنگام زلزله می‌شود. مهاربندها به تیرها و ستون‌ها از طریق ورق‌های اتصال^۲ متصل می‌شوند. کمانش خارج از صفحه مهاربندها تغییرشکل‌های غیر الاستیک قابل توجهی را به ورق‌های اتصال تحمیل می‌کند. برای اطمینان از تسلیم مهاربند، مقررات آیین‌نامه‌های طراحی به گونه‌ای است که بایستی اتصالات قوی‌تر از مهاربند باشند چون که شکست اتصال باعث عملکرد لرزه‌ای ضعیف می‌شود. به علاوه ورق اتصال علاوه بر اینکه ظرفیت کششی و فشاری مهاربند را تحمل می‌کند، بایستی سازگار با دوران چرخه‌ای انتهایی مورد انتظار در یک مهاربند کمانش یافته نیز باشد. در نتیجه برای طراحی قاب مهاربند همگرای ویژه، بایستی مهاربند در فاصله‌ای به اندازه دو برابر ضخامت صفحه اتصال ($2t$) از خط تکیه گاهی ورق اتصال (خط آزاد خمش) قطع شود که به آن فاصله آزاد انتهایی گفته می‌شود [۲]. این فاصله آزاد انتهایی اجازه می‌دهد که دوران انتهایی ناشی از کمانش خارج از صفحه مهاربند بتواند انجام شود.

مطالعات زیادی در گذشته رفتار قابهای مهاربند همگرا را مورد بررسی قرار داده‌اند. اغلب آنها بر مهاربند یا مهاربند به همراه ورق اتصال متمرکز هستند. برای نمونه، در تحقیقی مهاربندهای بزرگ مقیاس تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند و مشخص شد که نسبت لاغری مهاربند مهم‌ترین پارامتر در رفتار هیستریزس مهاربندها می‌باشد [۳، ۴]. در بعضی کارها اندرکنش بین مهاربند، تیرها، ستون‌ها و تغییرشکل غیر الاستیک صفحه اتصال مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌چنین برای ارزیابی عملکرد اتصال، نتایج مطالعات آزمایشگاهی قدیمی با مدل‌های تحلیلی مقایسه شده است [۵، ۶]. لهما و رودر [۷] رفتار قابهای مهاربندی همگرا را با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس مورد مطالعه قرار دادند. اثر پارامتر اتصال بر عملکرد قاب مهاربندی همگرا با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود توسط یو [۷] مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های دیگر نشان داد که عملکرد لرزه‌ای قابهای مهاربندی همگرای ویژه متفاوت از فرضیات طراحی بدیهی انگاشته شده در آیین‌نامه‌های طراحی است و بنابراین انجام مطالعات وسیع‌تر در مورد الزامات طراحی ورق‌های اتصال توصیه شده است [۸]. این مطالعات نشان داد که در عملکرد مدل‌های طراحی رایج اختلافات زیادی وجود دارد و بنابراین مطالعات بیشتری به منظور پیش بینی دقیق رفتار لرزه‌ای این سیستم‌ها و اتصالاتشان لازم است.

هدف از این مطالعه بررسی ضابطه فاصله آزاد خمش برای مهاربندهای همگرای ویژه ذکر شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان بوده است. یک قاب یک دهانه یک طبقه با مهاربند همگرای ویژه برای حالت‌های مختلفی که منطبق با ضوابط آیین‌نامه بود طراحی شد. طراحی بر اساس ضوابط کشش و فشار انجام گرفت. در ادامه رفتار لرزه‌ای ورق‌های اتصال باریک شونده بصورت تک و دوپل با زاویه باریک شوندگی و ابعاد مختلف و نیز فواصل آزاد خمش متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. ورق‌های دوپل دارای ضخامت نصف ورق‌های نظیر تک بودند که به صورت دوپل در دو طرف مهاربند قرار گرفتند. رفتار لرزه‌ای اتصالات مورد بررسی از لحاظ مقاومت، شکل‌پذیری، تعداد سیکل قبل از گسیختگی، دریفت قبل از گسیختگی و مقاومت کششی و فشاری مورد مقایسه قرار گرفت تا اتصال‌های با عملکرد لرزه‌ای بهتر مشخص شود. برای ارزیابی حد نهایی عملکرد نمونه‌ها از مفهوم کرنش پلاستیک معادل بر پایه معادله اساسی ون مایسز استفاده شد.

1 Centrally Braced Frame (CBF)

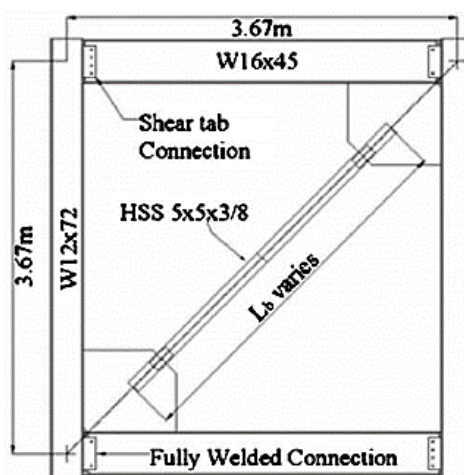
2 Gusset Plate

۲- طراحی ورق اتصال

طراحی نیرویی ورق اتصال بر اساس بند "۱۰-۳-۱۱ الزامات تکمیلی طراحی لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه" از مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲] و محاسبه ابعاد و اندازه‌های هندسی بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط آستانه اصل [۹] انجام شده است.

۳- مدل سازی عددی و اعتبارسنجی

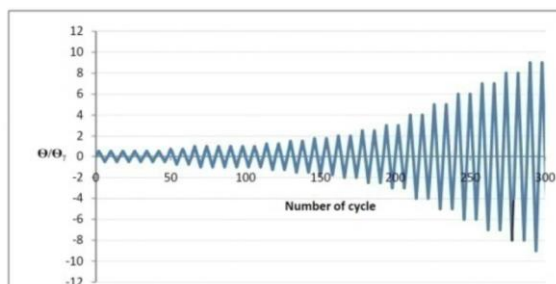
مدل مورد استفاده در صحت سنجی عبارت از مدل آزمایشگاهی یو و همکاران [۷] است. در شکل ۱ مدل ساخته شده در آزمایشگاه و همچنین مقاطع استفاده شده برای تیر و ستون و مهاربند نشان داده شده است. با استفاده از نمونه آزمایشگاهی نمونه عددی در نرم افزار آباکوس [۱۰] ساخته شد. برای آنالیز المان محدود از المان Shell برای مدل سازی کل اعضای قاب استفاده شد. این المان مستطیلی دارای ۴ گره می‌باشد و در هر گره دارای شش درجه آزادی است.



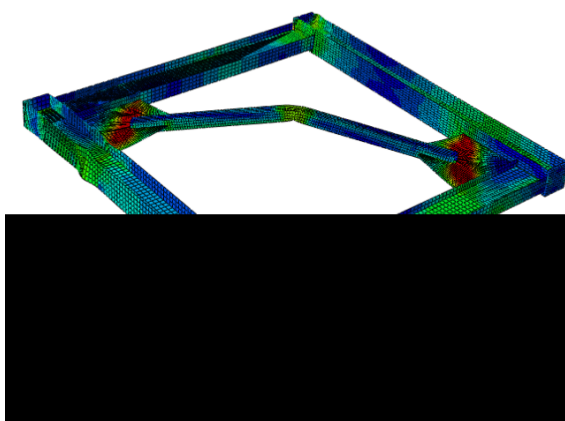
شکل ۱: نمونه قاب مهاربندی همگرای یو و همکاران [۷].

در قسمت هایی که کمانش موضعی و رفتار غیر خطی اعضا مهم بود (مثل میانه مهاربند و قسمت ورق اتصال) از اندازه المان‌ها بطور تقریبی ۲۵ در ۲۵ میلیمتر (همان طور که در آزمایشات یو [۷] پیشنهاد شده بود) استفاده شد. شرایط مرزی استفاده شده برای مدل‌ها طبق مقاله صحت سنجی که عبارت از کار آزمایشگاهی یو و همکاران [۷] است، در نظر گرفته شده است. برای مطمئن شدن از کمانش خارج از صفحه مهاربند در مدل سازی المان محدود جابجایی اولیه ای در مرکز مهاربند اعمال شد [۱۱]. نمونه‌ها تحت بارگذاری تغییرشکل سیکلی غیرخطی با توجه به پروتکل آزمایش ATC-24 [۱۲] قرار گرفتند (شکل ۲).

در شکل ۳ وضعیت نهایی سازه را در در لحظه آخر بارگذاری مشاهده می‌کنیم. مقایسه وضعیت سازه مدل‌سازی شده عددی با مدل آزمایشگاهی مطابق شکل های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که نوع گسیختگی نمونه قاب دقیقاً مشابه با مدل سازی عددی می‌باشد. می‌توان گفت که مدل عددی در نحوه توزیع کمانش به درستی عمل کرده است.



شکل ۲: پروتکل بارگذاری ATC 24 [۱۲].



شکل ۳: وضعیت نمونه در لحظه آخر بارگذاری.

الف

ب

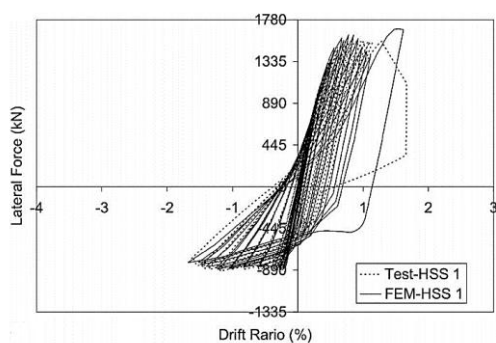
شکل ۴: مقایسه نتایج کمانش کلی، الف) آزمایش یو [۷] ب) مدل سازی با نرم افزار.

الف

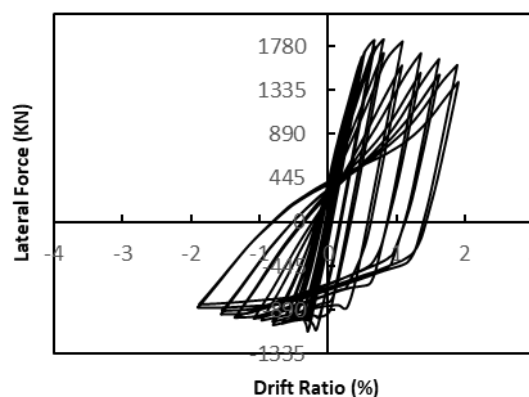
ب

شکل ۵: مقایسه نتایج کمانش مهاربند، الف) آزمایش یو [۷] ب) مدل سازی با نرم افزار.

حال با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بار-دریفت طبقه، مقادیر به دست آمده از تحلیل نمونه عددی را با نمونه آزمایشگاهی مطابق شکل ۶ مقایسه می کنیم. در قسمت کشش با اختلاف ۰.۸٪ و در قسمت فشار با حدود ۰.۶٪ اختلاف مدل عددی ساخته شده در نرم افزار به صورت مناسبی از لحاظ مقاومت رفتار این نمونه را پیش بینی می کند. با مقایسه نتایج بار-دریفت بین نمونه های عددی و آزمایشگاهی، مطابقت خوبی را بین چرخه های بارگذاری و سختی اولیه مشاهده می کنیم.



ب



الف

شکل ۶: مقایسه منحنی هیستریتیک حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی، الف) آزمایش یو [۷] ب) مدل سازی با نرم افزار.

۴- تحلیل شکست

در این تحقیق به منظور داشتن معیاری مناسب برای بررسی رفتار و شکل پذیری نمونه ها و پیش بینی عملکرد نهایی و شکست از مفهوم کرنش معادل پلاستیک (ϵ_{eqv}^{pl}) استفاده شده است. یو و همکاران [۱۱، ۱۳] از کرنش پلاستیک معادل به عنوان مشخص کننده شکست در

وسط مهاربند و نزدیکی های ورق اتصال در گوشه ها (اتصال آن به تیر یا ستون) استفاده کردند. برای محاسبه کرنش پلاستیک معادل از معادله کلی ون میززا استفاده کردند:

$$\varepsilon_{eqv}^{pl} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu)} \left[(\varepsilon_x^{pl} - \varepsilon_y^{pl})^2 + (\varepsilon_y^{pl} - \varepsilon_z^{pl})^2 + (\varepsilon_z^{pl} - \varepsilon_x^{pl})^2 + \frac{2}{3} (\gamma_{xy}^{pl^2} + \gamma_{yz}^{pl^2} + \gamma_{zx}^{pl^2}) \right]^{1/2} \quad (1)$$

که $\varepsilon_{x,y,z}^{pl}$ و مولفه های کرنش پلاستیک و ضریب پواسون می باشد. با اندازه گیری کرنش معادل پلاستیک در نمونه های آزمایشگاهی و مناطق بحرانی شکست و مشاهده این که در چه کرنش پلاستیکی این شکست ها نمایان می شوند، معیاری برای مشخص کردن مقدار بحرانی به منظور پیش بینی شکست در قاب های مهاربندی همگرای فولادی ارائه کردند. این معیار مقدار را برای پیش بینی شکست در وسط مهاربند برابر ۰/۲۷۱ و در قسمت اتصال ورق اتصال به تیر و ستون برابر ۰/۰۳۳ پیشنهاد می کند [۱۱، ۱۳]. در تحقیق حاضر مقدار کرنش پلاستیک معادل حاصل از رابطه (۱) در وسط مهاربند و در نزدیکی ورق اتصال در گوشه ها (اتصال به تیر یا ستون) جهت تعیین شکست به ترتیب در وسط مهاربند و در گوشه ورق اتصال به دقت رصد و محاسبه شده است. با رسیدن کرنش هر یک از مناطق فوق به کرنش های شکست فوق الذکر شکست مهاربند حادث شده است و ادامه تحلیل بعد از آن فاقد ارزش بوده و در نظر گرفته نشده است. مد شکست حاکم مربوط به حالاتی است که در سیکل بارگذاری کمتری به کرنش خرابی خود رسیده باشد.

۵- مطالعات پارامتریک

یک ساختمان ۵ طبقه معمولی در نرم افزار تحلیل سازه مدل سازی شد. این ساختمان با مهاربندی های همگرای قطری با آرایش یکسان (شکل ۷) به صورت ویژه تحلیل و طراحی شد. سپس با توجه به طبقه پایین این ساختمان یک قاب یک دهانه یک طبقه در نظر گرفته شد. جزئیات این قاب برای حالت های مختلفی که منطبق با ضوابط آیین نامه بود طراحی شد. نمونه ای از مدل های تحلیل شده و شرایط مرزی در نظر گرفته شده در تحلیل ها در شکل ۸ آورده شده است.

برای ملموس شدن پارامترهای در نظر گرفته شده تصویری از ورق اتصال به همراه تیر و ستون مربوطه برای حالتی که خط مقاوم مفصل پلاستیک با تیر برخورد می کند به عنوان نمونه در شکل ۹ آورده شده است. اصلی ترین عاملی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است فاصله آزاد خمش است. بدین منظور فواصل مختلفی شامل $3t$ ، $2t$ ، t ، $0t$ ، $-t$ ، $-2t$ ، $-3t$ در نظر گرفته شد.

الف

ب

شکل ۷: ساختمان تحلیل شده در نرم افزار، الف) پلان، ب) تراز.

شکل ۸: نمونه‌ای از قابهای تحلیل شده و شرایط مرزی.

مورد مهم بعدی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است تاثیر استفاده از ورق دابل به جای ورق تک می‌باشد. به این صورت که ضخامت حاصل از طراحی در مورد ورق تک تقسیم بر دو شده و برای ضخامت ورق دابل در نظر گرفته شده است.

زوایای و مساوی هم در نظر گرفته شده است. پارمتر بعدی که در نظر گرفته شده است مقدار زوایای فوق می‌باشد که دو زاویه ۱۵ و ۲۵ درجه در نظر گرفته شده است. اسم گذاری نمونه‌ها به این صورت است که اسامی با Tap که مخفف کلمه tapered است شروع می‌شود سپس بعد از آن مقدار زاویه ذکر می‌شود. سپس یک خط تیره گذاشته شده و اسم با th که اول کلمه thickness است ادامه می‌یابد و بعد از آن ضخامت نمونه به میلی‌متر ذکر شده است، سپس یک خط تیره گذاشته شده و فاصله آزاد خمش در داخل پرانتز به صورت ضربی از t ضخامت ورق اتصال ذکر شده است سپس یک خط تیره گذاشته شده و انتهای اسم به یکی از حروف S یا D ختم می‌شود. حرف S اول کلمه single به معنی ورق تک و حرف D اول کلمه double به معنی ورق دابل است. بنابراین نمونه‌ای که دارای اسم Tap15-th16-(-2t)-S به معنی ورق اتصالی با زوایای و مساوی ۱۵ درجه، با ضخامت ۱۵ میلی متر، فاصله آزاد خمش 2t- و به صورت ورق تک می‌باشد.

شکل ۹: پارامترهای مورد استفاده برای تعیین مشخصات ورق اتصال.

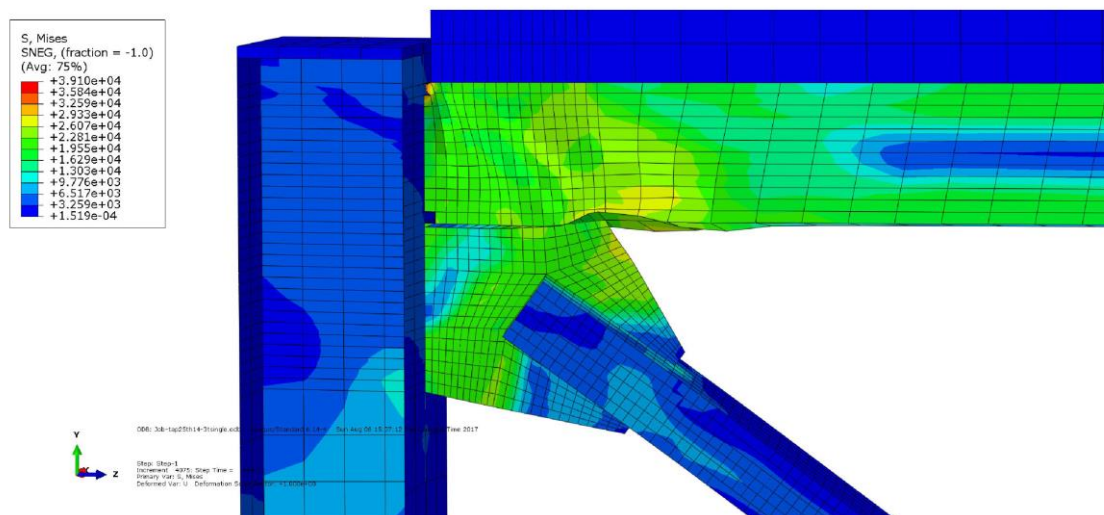
برای ورق‌های اتصال طراحی شده مقادیر a ، b ، L_W ، L_b و C و D به ترتیب برابر ۳۰، ۱۲۰، ۲۵۰، ۲۷۰، ۱۵۰ و ۱۷۰ میلی متر بوده و مقدار θ برابر ۳۷/۳ درجه به دست آمده است. باقی مشخصات مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همه ابعاد در جدول مذکور به میلی متر است. اسامی اختصاری نیز برای مدل‌ها انتخاب شده است که با M که اول کلمه Model است شروع می‌شود و سپس بعد آن یک عدد و سپس یکی از حروف S یا D که به ترتیب نشانگر ورق تک یا دوبل است آورده می‌شود. مثلاً $M1D$ نشانگر مدل اول از ورق‌های اتصال دوبل است.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های مورد استفاده در تحلیل

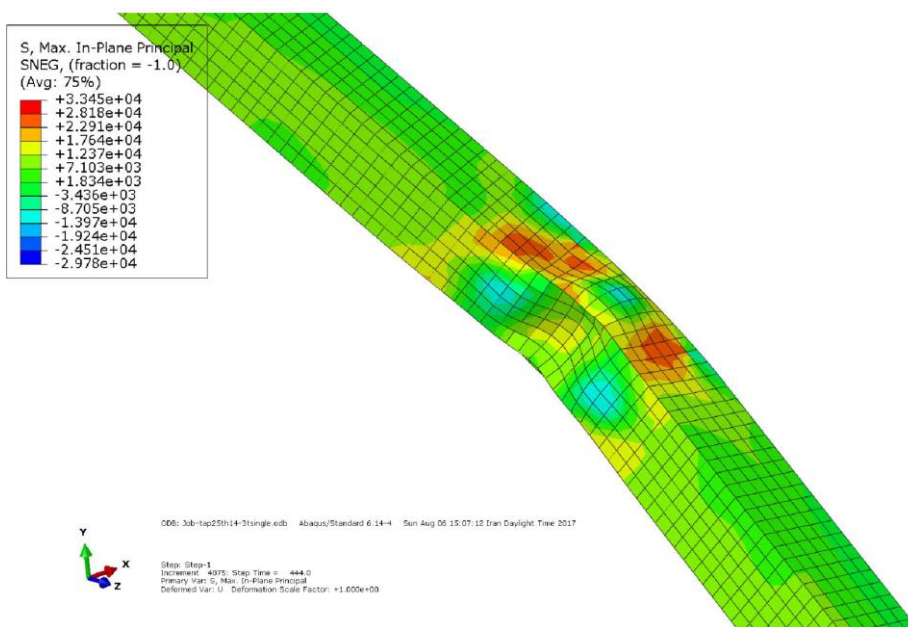
| اختصار | اسم | L_1 | L_2 | L_3 | L_4 | L_5 | L_6 | A | B |
|--------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| M1S | Tap15-th16-(-3t)-S | 143 | 182 | 141 | 109 | 286 | 117 | 208 | 254 |
| M2S | Tap15-th16-(-2t)-S | 143 | 195 | 151 | 109 | 303 | 124 | 214 | 261 |
| M3S | Tap15-th16-(-t)-S | 143 | 208 | 161 | 109 | 320 | 131 | 220 | 268 |
| M4S | Tap15-th16-(0t)-S | 143 | 221 | 171 | 109 | 337 | 138 | 226 | 275 |
| M5S | Tap15-th16-(t)-S | 143 | 234 | 181 | 109 | 354 | 145 | 232 | 282 |
| M6S | Tap15-th16-(2t)-S | 143 | 247 | 191 | 109 | 372 | 152 | 238 | 290 |
| M7S | Tap15-th16-(3t)-S | 143 | 260 | 201 | 109 | 389 | 159 | 244 | 297 |
| M8S | Tap25-th12-(-3t)-S | 143 | 229 | 120 | 109 | 347 | 76 | 296 | 336 |
| M9S | Tap25-th14-(-2t)-S | 143 | 236 | 124 | 109 | 357 | 78 | 302 | 342 |
| M10S | Tap25-th14-(-t)-S | 143 | 250 | 131 | 109 | 375 | 82 | 311 | 353 |
| M11S | Tap25-th14-(0t)-S | 143 | 264 | 138 | 109 | 393 | 86 | 321 | 364 |
| M12S | Tap25-th14-(t)-S | 143 | 277 | 146 | 109 | 411 | 90 | 331 | 374 |
| M13S | Tap25-th14-(2t)-S | 143 | 291 | 153 | 109 | 429 | 94 | 341 | 385 |
| M14S | Tap25-th14-(3t)-S | 143 | 311 | 163 | 109 | 455 | 99 | 355 | 401 |
| M1D | Tap15-th16-(-3t)-D | 143 | 182 | 141 | 109 | 286 | 117 | 208 | 254 |
| M2D | Tap15-th16-(-2t)-D | 143 | 195 | 151 | 109 | 303 | 124 | 214 | 261 |
| M3D | Tap15-th16-(-t)-D | 143 | 208 | 161 | 109 | 320 | 131 | 220 | 268 |
| M4D | Tap15-th16-(0t)-D | 143 | 221 | 171 | 109 | 337 | 138 | 226 | 275 |
| M5D | Tap15-th16-(t)-D | 143 | 234 | 181 | 109 | 354 | 145 | 232 | 282 |
| M6D | Tap15-th16-(2t)-D | 143 | 247 | 191 | 109 | 372 | 152 | 238 | 290 |
| M7D | Tap15-th16-(3t)-D | 143 | 260 | 201 | 109 | 389 | 159 | 244 | 297 |
| M4D | Tap15-th16-(0t)-D | 143 | 221 | 171 | 109 | 337 | 138 | 226 | 275 |
| M5D | Tap15-th16-(t)-D | 143 | 234 | 181 | 109 | 354 | 145 | 232 | 282 |
| M6D | Tap15-th16-(2t)-D | 143 | 247 | 191 | 109 | 372 | 152 | 238 | 290 |
| M7D | Tap15-th16-(3t)-D | 143 | 260 | 201 | 109 | 389 | 159 | 244 | 297 |
| M8D | Tap25-th12-(-3t)-D | 143 | 229 | 120 | 109 | 347 | 76 | 296 | 336 |
| M9D | Tap25-th14-(-2t)-D | 143 | 236 | 124 | 109 | 357 | 78 | 302 | 342 |
| M10D | Tap25-th14-(-t)-D | 143 | 250 | 131 | 109 | 375 | 82 | 311 | 353 |
| M11D | Tap25-th14-(0t)-D | 143 | 264 | 138 | 109 | 393 | 86 | 321 | 364 |
| M12D | Tap25-th14-(t)-D | 143 | 277 | 146 | 109 | 411 | 90 | 331 | 374 |
| M13D | Tap25-th14-(2t)-D | 143 | 291 | 153 | 109 | 429 | 94 | 341 | 385 |
| M14D | Tap25-th14-(3t)-D | 143 | 311 | 163 | 109 | 455 | 99 | 355 | 401 |

۶- تفسیر و تشریح نتایج

مدل سازی نمونه ها همانند توضیحات انجام یافته در بخش ۳ انجام گرفت. به عنوان نمونه کانتور تنش ون مایسز دو نمونه از ورق های اتصال تک و دوپل در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ آمده است. همان طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می شود، در ناحیه ورق اتصال بیشترین تنش در گوشه های ورق اتصال، محل اتصال ورق به تیر یا ستون و یا هردو، رخ داده است. شکل ۱۱ نیز نشان می دهد در عضو مهاربند حداکثر تنش در ناحیه وسط مهاربند رخ داده است. در ادامه نتایج حاصله مورد تشریح و بررسی قرار گرفته اند.



شکل ۱۰: کانتور تنش ون مایسز نمونه Tap25-th14-(-3t)-S در محل ورق اتصال.



شکل ۱۱: کانتور تنش ون مایسز نمونه Tap25-th14-(-3t)-S در وسط مهاربند.

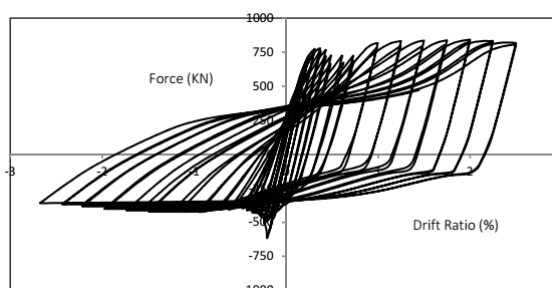
۶-۱ ورق اتصال تک

۶-۱-۱ زاویه باریک شونده ۱۵ درجه

در این بخش نتایج مدل‌های M1S تا M7S جهت بررسی اثر فاصله آزاد خمش آورده می‌شود. در شکل ۱۲ منحنی هیستریتیک یکی از این مدل‌ها به عنوان نمونه آورده شده است. در جدول ۲ نیز خلاصه رفتار این نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۲: خلاصه رفتار مدل‌های تک ورق با باریک شونده ۱۵ درجه

| مدل | مقاومت کششی (KN) | مقاومت فشاری (KN) | مد حاکم بر شکست در یفت در شکست (%) | تعداد سیکل‌ها قبل از شکست μ_C |
|--------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Tap15-th16-(-3t)-S | ۸۰۱ | ۶۰۴ | ۰/۷۰ | ۲۴ |
| Tap15-th16-(-2t)-S | ۸۳۱ | ۶۱۱ | ۱/۹۹ | ۳۵ |
| Tap15-th16-(t)-S | ۸۱۹ | ۶۰۷ | ۱/۲۳ | ۲۸ |
| Tap15-th16-(0t)-S | ۸۰۸ | ۵۶۵ | ۱/۱۹ | ۲۸ |
| Tap15-th16-(t)-S | ۸۳۶ | ۶۰۴ | ۱/۱۸ | ۲۸ |
| Tap15-th16-(2t)-S | ۸۴۶ | ۶۴۱ | ۱/۱۶ | ۲۹ |
| Tap15-th16-(3t)-S | ۸۴۵ | ۶۰۴ | ۱/۲۲ | ۲۹ |

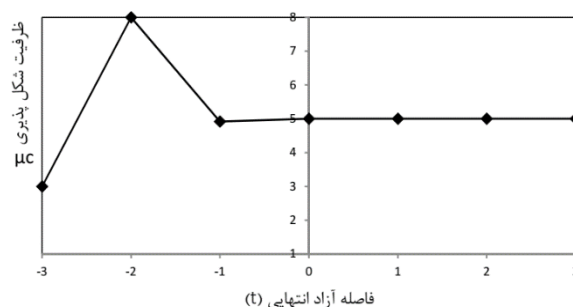


شکل ۱۲: نمودار هیستریتیک حاصل از تحلیل نمونه Tap15-th16-(-3t)-S

همان‌طور که از جدول مذکور مشاهده می‌شود اولاً مد حاکم بر شکست همه نمونه‌ها گسیختگی گوشه ورق اتصال بوده است. در بین نمونه‌های دارای فاصله آزاد انتهایی مثبت نمونه‌های Tap15-th16-(2t)-S و Tap15-th16-(3t)-S در بالاترین سیکل بین بقیه یعنی در سیکل ۲۹ دچار گسیختگی شده‌اند و بنابراین از رفتار لرزه‌ای مناسب‌تری برخوردارند. مقاومت فشاری Tap15-th16-(3t)-S سی و هفت کیلونیوتن بیشتر از Tap15-th16-(2t)-S است، بنابراین می‌توان گفت که در بین نمونه‌های دارای فاصله آزاد انتهایی مثبت نمونه Tap15-th16-(3t)-S دارای بهترین عملکرد است. در بین نمونه‌های دارای فاصله آزاد انتهایی منفی نمونه Tap15-th16-(-2t)-S دارای بالاترین سیکل قبل از خرابی است.

در بین همه نمونه‌های با زاویه باریک شونده ۱۵ درجه نمونه Tap15-th16-(-2t)-S در بالاترین سیکل یعنی چرخه ۳۵ دچار گسیختگی شده و دارای مقاومت لرزه‌ای بالاتری است. همان‌طور که دیده می‌شود نمونه مذکور دارای فاصله آزاد $2t$ می‌باشد. نمونه مذکور نسبت به نمونه توصیه شده آیین نامه که دارای فاصله آزاد انتهایی $2t$ است ۶ سیکل بارگذاری بیشتری را تحمل می‌کند. بنابراین به نظر می‌رسد فاصله آزاد توصیه شده توسط آیین نامه الزاما منجر به رفتار لرزه‌ای بهتری نمی‌شود.

نمودار ظرفیت شکل پذیری در مقابل فاصله آزاد انتهایی برای این نمونه‌ها در شکل ۱۳ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش فاصله آزاد انتهایی از $3t$ به $2t$ ظرفیت شکل پذیری شروع به افزایش کرده و از ۳ به حداکثر مقدار خود که برابر ۸ است می‌رسد، سپس با افزایش فاصله آزاد به t بعد از آن تا $3t$ ضریب شکل پذیری به مقدار ۵ کاهش یافته و ثابت می‌ماند. بنابراین می‌توان گفت که نمونه Tap15-th16-(-2t)-S که دارای فاصله آزاد انتهایی $2t$ است دارای بهترین عملکرد لرزه‌ای است. در مورد نتیجه به دست آمده می‌توان گفت که نمونه مذکور چون دارای زاویه باریک شونده ۱۵ درجه است بنابراین به ورق اتصال مستطیلی نزدیک‌تر است و می‌توان انتظار داشت که رفتار ورق‌های اتصال مستطیلی را از خود نشان دهد. از سوی دیگر رودر و همکاران [۱۳] نشان دادند که برای ورق‌های اتصال مستطیلی فاصله آزاد انتهایی بیضوی شکل مناسب است. از آنجا که فواصل آزاد انتهایی منفی مثل $2t$ مشابه فاصله آزاد بیضوی از نظر منفی بودن هستند، می‌توان استنتاج کرد که نتیجه حاصل منطقی است.



شکل ۱۳: نمودار فاصله آزاد انتهایی در مقابل ظرفیت شکل پذیری برای نمونه دارای ورق اتصال تک و زاویه باریک شونده ۱۵ درجه.

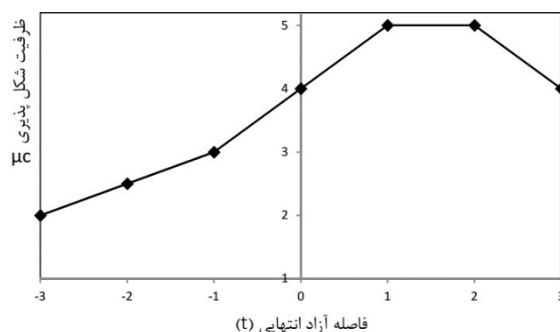
۶-۱-۲ زاویه باریک شونده ۲۵ درجه

در این بخش نتایج مدل‌های M8S تا M14S جهت بررسی اثر فاصله آزاد خمشی آورده می‌شود. در جدول ۳ خلاصه رفتار این نمونه‌ها آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش فاصله آزاد انتهایی تعداد سیکل‌ها قبل از شکست تا نمونه Tap25-th16-(t)-S و Tap25-th16-(2t)-S افزایش یافته است، به طوری که در بین نمونه‌های مورد بررسی مدل‌های Tap25-th16-(2t)-S و Tap25-th16-(t)-S دارای بالاترین سیکل موقع خرابی یعنی ۲۸ سیکل در بین نمونه‌ها هستند.

جدول ۳: خلاصه رفتار مدل‌های تک ورق با باریک شونده ۲۵ درجه

| مدل | مقاومت کششی (KN) | مقاومت فشاری (KN) | مد حاکم بر شکست دررفت در شکست (%) | تعداد سیکل‌ها قبل از شکست μ_C |
|--------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Tap25-th12-(-3t)-S | ۵۸۹ | ۰/۴۰ | ۲۱ | ۲ |
| Tap25-th14-(-2t)-S | ۶۰۷ | ۰/۶۲ | ۲۳ | ۲/۵ |
| Tap25-th14-(-t)-S | ۶۱۲ | ۰/۷۳ | ۲۴ | ۳ |
| Tap25-th14-(0t)-S | ۶۱۲ | ۰/۹۸ | ۲۶ | ۴ |
| Tap25-th14-(t)-S | ۶۱۵ | ۱/۱۸ | ۲۸ | ۵ |
| Tap25-th14-(2t)-S | ۶۱۵ | ۱/۲۰ | ۲۸ | ۵ |
| Tap25-th14-(3t)-S | ۶۱۴ | ۰/۹۹ | ۲۶ | ۴ |

نمودار ظرفیت شکل پذیری در مقابل فاصله آزاد انتهایی برای این نمونه‌ها در شکل ۱۴ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش فاصله آزاد انتهایی از $-3t$ تا t ظرفیت شکل پذیری شروع به افزایش کرده و از $2t$ تا $5t$ می‌رسد، پس با افزایش فاصله آزاد تا $2t$ شکل پذیری ثابت و برابر 5 باقی می‌ماند، ولی با افزایش فاصله از $2t$ تا $3t$ ظرفیت شکل پذیری شروع به کاهش می‌کند و به 4 می‌رسد. بین نمونه‌های Tap25-th16-(2t)-S و Tap25-th16-(t)-S، مدل Tap25-th16-(2t)-S دارای دررفت در لحظه خرابی و مقاومت کششی بیشتری بوده است و می‌توان گفت به طور نسبی عملکرد بهتری داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه دارای فاصله آزاد انتهایی $2t$ دارای بهترین عملکرد لرزه‌ای است.



شکل ۱۴: نمودار فاصله آزاد انتهایی در مقابل ظرفیت شکل پذیری برای نمونه دارای ورق اتصال تک و زاویه باریک شونده ۲۵ درجه.

۲-۶ ورق اتصال دابل

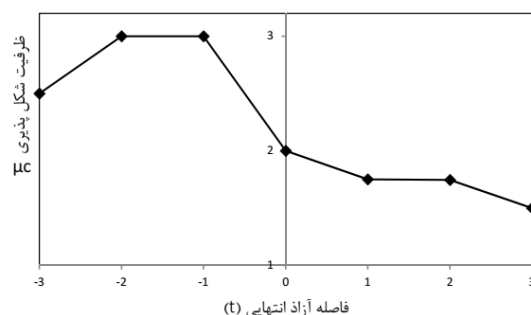
۲-۶-۱ زاویه باریک شونده ۱۵ درجه

در این بخش نتایج مدل‌های M1D تا M7D جهت بررسی اثر فاصله آزاد خمش آورده می‌شود. در جدول ۴ خلاصه رفتار این نمونه‌ها آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش فاصله آزاد انتهایی از $-3t$ تا $-2t$ تعداد سیکل‌ها قبل از شکست از 23 به 25

افزایش می یابد. در فاصله آزاد t - تعداد سیکل ثابت می ماند. با افزایش فاصله آزاد انتهایی به $0t$ و بیشتر از آن تا $3t$ تعداد سیکل ها قبل از خرابی شروع به کاهش می کند و به 17 سیکل برای مدل Tap15-th16-(3t)-D می رسد.

جدول ۴: خلاصه رفتار مدل های دوبل ورق با باریک شوندگی ۱۵ درجه

| مدل | مقاومت کششی (KN) | مقاومت فشاری (KN) | مد حاکم بر شکست دریافت در شکست (%) | تعداد سیکل ها قبل از شکست μC |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Tap15-th16-(3t)-D | ۷۲۷ | ۸۰۹ | ۰/۶۲ | ۲۳ |
| Tap15-th16-(2t)-D | ۷۳۸ | ۸۳۵ | ۰/۶۰ | ۲۵ |
| Tap15-th16-(t)-D | ۷۴۱ | ۸۱۸ | ۰/۷۲ | ۲۵ |
| Tap15-th16-(0t)-D | ۷۵۶ | ۷۹۳ | ۰/۴۲ | ۲۱ |
| Tap15-th16-(t)-D | ۷۵۶ | ۷۸۹ | ۰/۴۵ | ۲۰ |
| Tap15-th16-(2t)-D | ۷۶۹ | ۷۷۰ | ۰/۴۴ | ۱۸ |
| Tap15-th16-(3t)-D | ۷۷۵ | ۷۷۵ | ۰/۳۶ | ۱۷ |



شکل ۱۵: نمودار فاصله آزاد انتهایی در مقابل ظرفیت شکل پذیری برای نمونه دارای ورق اتصال دوبل و زاویه باریک شوندگی ۱۵ درجه.

نمودار ظرفیت شکل پذیری در مقابل فاصله آزاد انتهایی برای این نمونه ها در شکل ۱۵ رسم شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش فاصله آزاد انتهایی از $-3t$ تا $-2t$ ظرفیت شکل پذیری شروع به افزایش کرده و از $2/5$ تا 3 می رسد، پس با افزایش فاصله آزاد تا t - شکل پذیری ثابت و برابر 3 باقی می ماند، ولی با افزایش فاصله از $0t$ تا $3t$ ظرفیت شکل پذیری شروع به کاهش می کند و به $1/5$ می رسد. بنابراین می توان گفت که نمونه دارای فاصله آزاد انتهایی $-2t$ و $-t$ دارای بهترین عملکرد لرزه ای در بین این مدل ها هستند.

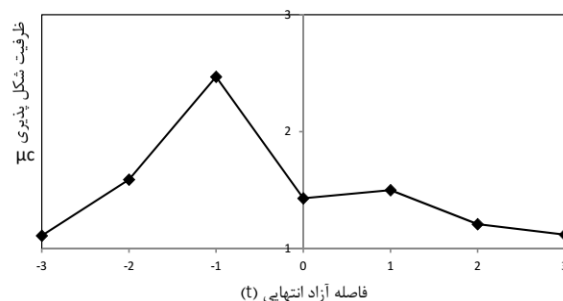
۶-۲-۲ زاویه باریک شوندگی ۲۵ درجه

در این بخش نتایج مدل های M8D تا M14D جهت بررسی اثر فاصله آزاد خمش آورده می شود. در جدول ۵ خلاصه رفتار این نمونه ها آورده شده است. همان طور که دیده می شود با افزایش فاصله آزاد انتهایی از $-3t$ تا $-t$ - تعداد سیکل ها قبل از شکست از 14 به 22 افزایش می یابد. با افزایش فاصله آزاد به $0t$ در فاصله آزاد t - تعداد سیکل ثابت می ماند. با افزایش فاصله آزاد انتهایی به $0t$ تعداد سیکل قبل از خرابی به 16 کاهش می یابد. با افزایش فاصله به $2t$ و $3t$ تعداد سیکل قبل از خرابی به 14 کاهش یافته است.

جدول ۵: خلاصه رفتار مدل‌های دوپل ورق با باریک شونده‌گی ۲۵ درجه

| مدل | مقاومت کششی (KN) | مقاومت فشاری (KN) | مد حاکم بر شکست در یفت در شکست (%) | تعداد سیکل‌ها قبل از شکست μ_C |
|--------------------|------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Tap25-th12-(-3t)-D | ۷۴۵ | ۷۱۰ | ۰/۲۸ | ۱۴ |
| Tap25-th14-(-2t)-D | ۸۴۸ | ۷۶۷ | ۰/۴۰ | ۱۸ |
| Tap25-th14-(-t)-D | ۸۶۸ | ۷۸۶ | ۰/۶۲ | ۲۲ |
| Tap25-th14-(0t)-D | ۸۲۴ | ۷۶۷ | ۰/۳۶ | ۱۶ |
| Tap25-th14-(t)-D | ۸۴۰ | ۶۱۵ | ۰/۳۵ | ۱۷ |
| Tap25-th14-(2t)-D | ۷۷۶ | ۷۱۴ | ۰/۳۰ | ۱۴ |
| Tap25-th14-(3t)-D | ۷۸۱ | ۷۱۹ | ۰/۲۸ | ۱۴ |

نمودار ظرفیت شکل پذیری در مقابل فاصله آزاد انتهایی برای نمونه‌های دارای ورق اتصال دوپل و زاویه باریک شونده‌گی ۲۵ درجه در شکل ۱۶ رسم شده است. همانطور که دیده می‌شود با افزایش فاصله آزاد انتهایی از $-3t$ تا $-t$ ظرفیت شکل پذیری شروع به افزایش کرده و از $1/11$ تا $2/47$ می‌رسد، سپس با افزایش فاصله آزاد به $0t$ و t شکل پذیری به $1/43$ کاهش و سپس به $1/5$ افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله آزاد به $2t$ و $3t$ ضریب شکل پذیری شروع به کاهش کرده است.



شکل ۱۶: نمودار فاصله آزاد انتهایی در مقابل ظرفیت شکل پذیری برای نمونه دارای ورق اتصال دوپل و زاویه باریک شونده‌گی ۲۵ درجه.

۷- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بررسی ضابطه فاصله آزاد خمش برای مهاربندهای همگرای ویژه بوده است. بدین منظور مطالعات عددی بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مهاربندی همگرای ویژه انجام شد و رفتار لرزه‌ای ورق‌های اتصال باریک شونده بصورت تک و دوپل با زاویه باریک شوندگی و ابعاد مختلف و نیز فواصل آزاد خمش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده بر اساس بارگذاری رفت و برگشتی با توجه به پروتکل آزمایش ATC-24 [۱۲] بوده است. از مطالعه حاضر می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- ۱- استفاده از ورق اتصال دوپل به جای ورق اتصال تک برای ورق اتصال قابهای مهاربندی همگرا توصیه نمی‌شود.
- ۲- ورق‌های اتصال دارای زاویه باریک شوندگی ۱۵ درجه دارای ظرفیت شکل پذیری و رفتار لرزه‌ای بهتری نسبت به ورق‌های اتصال دارای زاویه باریک شوندگی ۲۵ درجه هستند.
- ۳- برای ورق‌های اتصال تک با زاویه باریک شوندگی ۱۵ درجه فاصله آزاد خمش مناسب با توجه به نمونه‌های مورد مطالعه برابر $2t$ - به دست آمده است که منطبق بر مبحث ۱۰ نیست.
- ۴- برای ورق‌های اتصال تک با زاویه باریک شوندگی ۲۵ درجه فاصله آزاد خمش مناسب با توجه به نمونه‌های مورد مطالعه برابر $2t$ - به دست آمده است که منطبق بر مبحث ۱۰ می‌باشد.
- ۵- برای ورق‌های اتصال دوپل با زاویه باریک شوندگی ۱۵ درجه فاصله آزاد خمش مناسب با توجه به نمونه‌های مورد مطالعه برابر $2t$ - و t - به دست آمده است که منطبق بر مبحث ۱۰ نیست.
- ۶- برای ورق‌های اتصال دوپل با زاویه باریک شوندگی ۲۵ درجه فاصله آزاد خمش مناسب با توجه به نمونه‌های مورد مطالعه برابر t - به دست آمده است که منطبق بر مبحث ۱۰ نمی‌باشد.

مراجع

- [1] AISC, (2005). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction.
- [2] MHUD, (2012). *Iranian National Building Code, part 10, steel structure design*. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development (In Persian).
- [3] Shaback, B. and Brown, T. (2003). Behaviour of square hollow structural steel braces with end connections under reversed cyclic axial loading. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30 (4), 745-753.
- [4] Black, R.G.; Wenger, W.A. and Popov, E.P. (1980). *Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversals*. Washington, DC. : National Science Foundation and American Iron and Steel Inst.
- [5] Roeder, C.; Lehman, D. and Yoo J.H. (2009). Performance Based Seismic Design of Braced-Frame Connections. In: *Proc of the 7th Pacific Structural Steel Conference*. Chicago: American Society of Civil Engineers (AISC), 24-27.
- [6] Roeder, C.W.; Lehman, D.E. and Yoo J.H. (2005). Improved seismic design of steel frame connections. *International Journal of Steel Structures*, 5 (2), 141-153.
- [7] Yoo J.H.; Lehman, D.E. and Roeder, C.W. (2008). Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (6), 607-623.
- [8] Uriz, P. and Mahin, S.A. (2008). Seismic vulnerability assessment of concentrically braced steel frames. *International Journal of Steel Structures*, 4 (4), 239-248.
- [9] Astaneh-Asl, A.; Cochran, M. and Sabelli, R.B. (2006). *Seismic Detailing of Gusset Plates for Special Concentrically Braced Frame*. Structural steel educational council.
- [9] Astaneh-Asl, A.; Cochran, M. and Sabelli, R.B. (2006). *Seismic Detailing of Gusset Plates for Special Concentrically Braced Frame*. Structural steel educational council.
- [10] Dassault Systemes Simulia Corp. (2011). *Abaqus Version 6.11 Documentation*. RI.
- [11] Yoo, J.H. (2006). *Analytical investigation on the seismic performance of special concentrically braced frames*. Dissertation title. Ph.D. Thesis. University of Washington, Department of Civil Engineering.
- [12] Krawinkler, H. (1992). *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures*. Structural steel educational council.
- [13] Yoo, J.H.; Roeder, C.W. and Lehman D.E. (2008). Analytical performance simulation of special concentrically braced frames. *Journal of structural engineering*, 134 (6), 881-889.