J. Analysis of Structure and Earthquake
Volum 21, Issue 2, summer 2024
Issn: 2821-0999
وبگاه مجله: www.civil-strj.maragheh.iau.ir
فصلنامه علمی آنالیز سازه - زلزله
دوره 21، شماره 2، تابستان 1403

Failure Mechanism Analysis of the Steel Beam to Reinforced Concrete Column Connection with through-plate and Buckling-Restrained Steel Plates

Omid Parvizi
Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran
Ahmad Maleki
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran
Mohammad Ali Lotfollahi Yaghin
Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Ad.maleki@iau.ac.ir

Keywords:
Steel beam to reinforced concrete column connection;
Buckling-restrained steel plates;
Parametric studies;
Numerical simulation;
Improvement of structural performance.

Abstract
This research investigates the behavior and failure mechanisms of steel beam connections to reinforced concrete columns using Buckling-Restrained Steel Plates (BRSP). These connections, as one of the most critical components of composite steel and concrete structures, play a vital role in force transfer and resistance to various loads, particularly dynamic loads such as earthquakes. The primary objective of this study is to analyze and enhance the performance of these types of connections under cyclic loading using numerical analyses. In this research, various parametric models were used to examine the impact of BRSP thickness on the hysteresis behavior and load-bearing capacity of the connections. Different BRSP thicknesses ranging from 5 to 25 mm were considered, and their effects on stress distribution and failure mechanisms were analyzed. The results of the parametric studies indicate that increasing the BRSP thickness improves stress distribution in the joint area of the concrete column and the beam-to-column connection. This improvement includes reducing stress concentration and increasing stress distribution uniformity, which can lead to a reduction in local failures and an overall increase in connection stability. In numerical simulation models, the use of BRSPs has created wider and more stable hysteresis loops, indicating increased energy absorption capacity and improved deformation behavior of the connections under cyclic loading. Failure modes were also comprehensively examined in this study. The results show that BRSPs can reduce the concentration of failures, increase bending resistance, and prevent buckling in steel beams. These findings highlight the importance of using BRSPs in enhancing structural performance and reducing potential failures under severe loading conditions. These results can serve as a foundation for further research in improving structural connections and developing innovative techniques to enhance the stability and durability of structures. Additionally, the findings of this research can serve as a guide for engineers in designing and implementing earthquake-resistant structures.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

تحلیل مکانیسم شکست اتصال تیر فولادی به ستون بتن آرمه با صفحات فولادی عبوری و ورق فولادی کمانش تاب

امید پرویزی
دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران
احمد ملکی
استادیار، گروه مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران
محمد علی لطف الهی یقین
استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
Ad.maleki@iau.ac.ir

تاریخ دریافت : 06 خرداد 1403 تاریخ پذیرش: 20 مرداد 1403

چکیده

این پژوهش به بررسی رفتار و مکانیزم‌های خرابی اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با استفاده از صفحات فولادی کمانش تاب (BRSP) می‌پردازد. این اتصالات به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای سازه‌های ترکیبی فولاد و بتن، نقش حیاتی در انتقال نیروها و مقاومت در برابر بارهای مختلف، به ویژه بارهای دینامیکی مانند زلزله دارند. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل و بهبود عملکرد این نوع اتصالات تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای با استفاده از تحلیل‌های عددی است. در این پژوهش، مدل‌های پارامتریک مختلفی برای بررسی تأثیر ضخامت BRSP ها بر رفتار هیسترزیس و ظرفیت باربری اتصالات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ضخامت‌های مختلف BRSP از 5 تا 25 میلی‌متر در نظر گرفته شده و اثرات آن‌ها بر توزیع تنش‌ها و مکانیزم‌های خرابی تحلیل شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های مطالعات پارامتری نشان می‌دهد که با افزایش ضخامتBRSP ، توزیع تنش در ناحیه چشمه اتصال ستون بتنی و اتصال تیر به ستون بهبود می‌یابد. این بهبود شامل کاهش تمرکز تنش و افزایش یکنواختی توزیع تنش‌ها است که می‌تواند به کاهش خرابی‌های موضعی و افزایش پایداری کلی اتصال منجر شود. در مدل‌های شبیه‌سازی عددی، استفاده از BRSP ها توانسته است حلقه‌های هیسترزیس پهن‌تر و پایدارتر را ایجاد کند که نشان‌دهنده افزایش ظرفیت جذب انرژی و بهبود رفتار تغییر شکل اتصالات تحت بارگذاری چرخه‌ای است. حالت‌های خرابی نیز به صورت جامع در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که BRSP ها می‌توانند تمرکز خرابی را کاهش داده، مقاومت خمشی را افزایش دهند و از وقوع کمانش در تیرهای فولادی جلوگیری کنند. این یافته‌ها نشان‌دهنده اهمیت استفاده از BRSP ها در بهبود عملکرد سازه‌ای و کاهش خرابی‌های احتمالی در شرایط بارگذاری شدید می‌باشد. این نتایج می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای تحقیقات بیشتر در زمینه بهبود اتصالات سازه‌ای و توسعه تکنیک‌های نوین برای افزایش پایداری و دوام سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، یافته‌های این پژوهش می‌توانند به عنوان راهنمایی برای مهندسان در طراحی و اجرای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به کار گرفته شوند.

کلید واژگان: اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح، صفحات فولادی کمانش تاب، مطالعات پارامتری، شبیه‌سازی عددی، بهبود عملکرد سازه‌ای

1- مقدمه

ارتباط بین تیرهای فولادی و ستون‌های بتن مسلح (RC) یک جزء حیاتی در اطمینان از یکپارچگی ساختاری و عملکرد سازه‌های مرکب است. در ساخت و ساز مدرن، سازه‌های هیبریدی که از مزایای هر دو ماده فولاد و بتن بهره‌مند می‌شوند، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز، به دلیل انعطاف‌پذیری و ویژگی‌های استهلاک انرژی بهتر، محبوبیت بیشتری پیدا کرده‌اند. یکی از روش‌های نوآورانه در این ارتباطات استفاده از صفحات عبوری و صفحات فولادی کمانش‌تاب است که هدف آن‌ها افزایش ظرفیت باربری و بهبود حالت‌های خرابی چنین اتصالاتی است. این مطالعه بر روی تحلیل حالت‌های خرابی اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با استفاده از صفحات عبوری و صفحات فولادی کمانش‌تاب تمرکز دارد. صفحات عبوری برای ایجاد مسیر مستقیم بار و بهبود انتقال برش بین تیر و ستون به کار می‌روند، در حالی که صفحات کمانش تاب برای جلوگیری از کمانش موضعی و افزایش ظرفیت استهلاک انرژی تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای طراحی شده‌اند. ترکیب این عناصر هدف کاهش حالت‌های خرابی متداول مانند کمانش زودرس، خرابی برشی و استهلاک ناکافی انرژی است که در حفظ یکپارچگی ساختاری در طول وقایع بارگذاری شدید مانند زلزله‌ها حیاتی هستند. تحلیل حالت‌های خرابی در این اتصالات هیبریدی برای درک رفتار آن‌ها تحت شرایط بارگذاری مختلف و بهینه‌سازی طراحی آن‌ها بسیار مهم است. این تحلیل شامل بررسی دقیق توزیع تنش، الگوهای تغییر شکل و تعامل بین اجزای فولاد و بتن می‌باشد. هدف شناسایی نقاط ضعف احتمالی در طراحی اتصال و پیشنهاد بهبودهایی است که می‌توانند به سازه‌های مقاوم‌تر و با دوام‌تر منجر شوند. شکل‌پذیری و استفاده از ظرفیت ناحیه خمیری در صفحات فولادی کمانش تاب (BRSP) نقش حیاتی در استهلاک انرژی زلزله ایفا می‌کند. این صفحات با بهره‌گیری از ناحیه خمیری خود، می‌توانند انرژی وارده را جذب کرده و از انتقال مستقیم آن به سایر اجزای سازه‌ای جلوگیری کنند. این ویژگی به‌ویژه در سازه‌های هیبریدی که ترکیبی از فولاد و بتن هستند، بسیار مهم است زیرا امکان ایجاد مفصل‌های پلاستیکی در نقاط معین و کنترل شده را فراهم می‌کند.

در این مقاله، تحلیل جامع حالت‌های خرابی اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با صفحات عبوری و صفحات فولادی کمانش تاب را ارائه می‌دهیم. از طریق ترکیبی از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی، هدف ما روشن‌سازی تعاملات پیچیده در این اتصالات و ارائه بینش‌هایی در مورد عملکرد آن‌ها تحت سناریوهای مختلف بارگذاری است. یافته‌های این مطالعه به توسعه راهبردهای طراحی مؤثرتر برای سازه‌های هیبریدی کمک می‌کند و ایمنی و قابلیت اطمینان آن‌ها را در عمل افزایش می‌دهد.

2-تاریخچه تحقیق

از طریق تحقیقات تجربی، شیخ و همکاران [1] رفتار و عملکرد اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح (RCS) را بررسی کردند. در تحقیقات خود، 9 اتصال داخلی RCS در مقیاس ۳/۲ آزمایش شدند. بر اساس نتایج آن‌ها، دو حالت خرابی معمول شناسایی شد: خرابی برشی و خرابی ناحیه پانل. مطالعه تجربی شیخ و همکاران[1] با هشت مورد اضافی ادامه یافت، و دیرلاین و همکاران [2] معادلاتی برای اتصالات داخلی RCS بر اساس نتایج تجربی و مطالعات تحلیلی مربوطه پیشنهاد کردند. این معادلات، که توسط توصیه‌های طراحی ASCE برای اتصالات تیر–ستون تأیید شده‌اند، مقاومت اتصال اتصالات RCS را تخمین می‌زنند. بخشایش اقبالی و میرقادری [3] دو اتصال داخلی را در مقیاس ۴/۳ آزمایش کردند که تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای و یک بار محوری ثابت بر روی ستون قرار گرفتند. نمونه‌ها شامل تیرهای فولادی، یکی از نوع-I شکل و دیگری از نوع کانال بودند که به یک صفحه عمودی که از ستون بتن عبور می‌کرد از طریق مکانیزم صفحه عبوری متصل شده بودند. اتصالات برشی صلب برای جلوگیری از لغزش بین فولاد و بتن استفاده شدند، در حالی که صفحات پوششی فولادی برای افزایش مقاومت بتن و جلوگیری از جدا شدن احتمالی اتصالات برشی به کار رفتند. انتقال بار از طریق سه مکانیزم انجام شد: مکانیزم‌های درون صفحه‌ای صفحه عبوری و صفحات جانبی، و مکانیزم شفت بتن. تناسب اجزای اتصال بر اساس روش طراحی پیشنهادی منجر به تشکیل مفصل‌های پلاستیکی در تیرها شد، در حالی که اجزای اتصال بدون آسیب باقی ماندند. صفحه عبوری که با بتن یکپارچه شده بود، یک ناحیه پنل قوی با رفتار الاستیک فراهم کرد و اتصال پیشنهادی را به عنوان کاملاً مقید دسته‌بندی کرد. نمونه‌های آزمایش شده نمودارهای هیسترزیس دائمی بدون هیچ گونه نازک‌شدگی نشان دادند که نشان‌دهنده اثربخشی

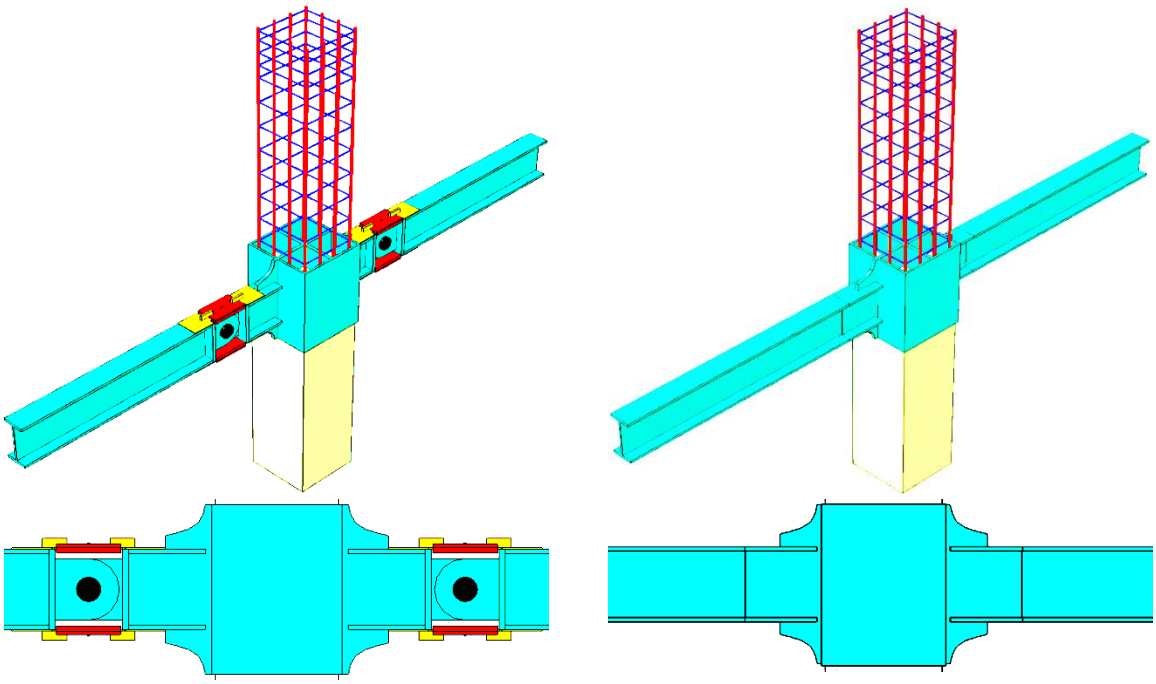
طراحی اتصال پیشنهادی بود. آزاد و همکاران [4] یک اتصال صفحه عبوری را به عنوان یک اتصال ممان بین تیرهای فولادی و مرکب به ستون‌های محصور پیشنهاد کردند. یک مدل عددی برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای این اتصال با استفاده از کد المان محدود LS-DYNA توسعه داده شد. اتصال صفحه عبوری در طول بارگذاری رفتار هیسترزیس پایدار نشان داد، با تشکیل مفصل پلاستیکی در تیر دور از سطح ستون، که منجر به کمینه‌سازی افزایش در ناحیه اتصال شد. در تحلیل، مشاهده شد که نیروهای درون صفحه‌ای در صفحه عبوری عمدتاً از طریق سه مسیر بار به ستون منتقل می‌شوند: خود صفحه عبوری، صفحات پوششی جانبی، و عمل شفت بتن. علاوه بر این، مطالعه به صورت عددی مکانیزم‌های انتقال بار از تیر مرکب فولاد–بتن به ستون محصور را بررسی کرد و تأثیر دال بتنی بر مسیرهای انتقال بار را نشان داد. با این حال، ذکر شد که این مکانیزم‌ها به تنهایی نمی‌توانند ممان پلاستیکی کامل تیر مرکب را به ستون منتقل کنند، و نیاز به درگیری عرض مؤثر کوچک‌تری در انتقال بار دارند. ژانگ و همکاران[5] مطالعه جامع‌ای بر رفتار اتصالات تیر مرکب فولادی–بتنی (SCCB) به ستون بتن مسلح (RC) در اتصالات خارجی با اتصال برشی تک‌صفحه (SPS) تحت بارگذاری یکنواخت انجام دادند. چهار اتصال SCCB به ستون RC در اتصالات خارجی ساخته شدند، با تغییر نسبت تقویت طولی و قطر پیچ‌های با مقاومت بالا به عنوان پارامترهای آزمون. این تحقیق شامل تحلیل حالت‌های خرابی، پاسخ‌های ممان–چرخش، توزیع تنش در طول عمق تیر مرکب، توزیع تنش در میلگردهای مهاری، و تأثیر پارامترها بود. علاوه بر این، مقاله تأثیر دال RC بر رفتار اتصال را مورد بحث قرار داد و مدل محاسباتی برای ارزیابی ظرفیت‌های ممان تسلیم و نهایی اتصال تحت ممان بالا بردن ارائه کرد که تأثیر دال RC را در نظر گرفت. نتایج آزمایش‌ها تأثیرات قابل توجهی از نسبت تقویت طولی، قطر پیچ‌های با مقاومت بالا، و حضور دال RC بر رفتار استاتیکی اتصالات SCCB به ستون RC با اتصالات SPS نشان دادند. لی و همکاران [6] توسعه سه اتصال جدید جداشدنی ستون بتن مسلح (RC) به تیر فولادی (RCS) را در این مطالعه ارائه دادند. از طریق ترکیبی از آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای و شبیه‌سازی‌های روش المان محدود (FEM)، عملکرد لرزه‌ای این اتصالات جداشدنی RCS، به همراه یک اتصال غیرقابل جدا شدن مرجع، به صورت عددی و تجربی بررسی شد. نتایج نشان داد که اتصالات جداشدنی RCS ظرفیت جانبی و جذب انرژی بهتری نسبت به اتصالات غیرقابل جدا شدن دارند. مدل‌های FEM، که با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده‌اند، به‌طور دقیق پاسخ‌های هیسترزیس و حالت‌های خرابی اتصالات جداشدنی RCS را پیش‌بینی کردند. مطالعات پارامتری انجام شده با مدل FEM معتبر نشان داد که در حالی که طول تیر تأثیر کمی بر عملکرد لرزه‌ای دارد، افزایش نسبت‌های طولی و عرضی به طور قابل توجهی ظرفیت جانبی اتصالات جداشدنی RCS را افزایش می‌دهد. گوان و همکاران [7] یک اتصال نوآورانه تیر–ستون بتن مسلح فولادی جزئی پیش‌ساخته (PPSRC) را معرفی کرده و تحقیقات تجربی بر عملکرد لرزه‌ای آن انجام دادند. چهار نمونه در مقیاس کامل تحت بارهای چرخه‌ای قرار گرفتند، با پارامترهای آزمون شامل نسبت فشرده‌سازی محوری، نوع بتن (بتن عادی یا بتن مسلح به الیاف فولادی)، و نوع اتصال (به صورت یکپارچه ریخته‌شده یا پیش‌ساخته). تحلیل نتایج آزمون شامل بحث‌ها و ارزیابی‌های حالت‌های خرابی، مقاومت، سختی، افت، استهلاک انرژی، و انعطاف‌پذیری بود. به طور خاص، اتصال پیشنهادی به طور مؤثر مکان مفصل پلاستیکی را از سطح اتصال دور کرده و از طریق قطع میلگردهای طولی منجر به مقاومت بالاتر، انعطاف‌پذیری بهتر، و ظرفیت استهلاک انرژی بیشتری نسبت به اتصال به صورت یکپارچه ریخته‌شده شد. علاوه بر این، افزودن الیاف فولادی به طور مؤثر رشد ترک‌ها را کنترل کرده و عملکرد اتصال را بهبود داد، هرچند افزایش بار محوری منجر به افزایش شکنندگی اتصال شد.

اتصال بین تیرهای فولادی و ستون‌های بتن مسلح (RC) نقشی محوری در تضمین یکپارچگی سازه و عملکرد کلی سازه‌های مرکب، به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز دارد. ماهیت ترکیبی این سازه ها از مزایای فولاد و بتن استفاده می کند و شکل پذیری، استحکام و اتلاف انرژی را افزایش می دهد. با این حال، مطالعات موجود چندین حالت شکست بحرانی را در چنین اتصالاتی برجسته کرده‌اند، از جمله شکست برشی و شکست ناحیه پانل [1]. درک و کاهش این حالت های شکست برای بهبود انعطاف پذیری و دوام سازه های کامپوزیتی ضروری است. علیرغم پیشرفت قابل توجه در این زمینه، از جمله توسعه معادلات برای تخمین استحکام مفصل [2] و بررسی انواع اتصالات [3,4]، چالش ها همچنان باقی است. به ویژه، توانایی انتقال کامل بارها و ممان ها در اتصالات هیبریدی تحت شرایط بارگذاری چرخه ای و لرزه‌ای هنوز به طور کامل درک نشده است.

تعامل پیچیده بین اجزای فولاد و بتن، مطالعات تجربی و تحلیلی بیشتری را برای بهینه‌سازی طرح‌های اتصال و اطمینان از عملکرد قابل اعتماد در طول حوادث شدید ضروری می‌کند. ضرورت این تحقیق از نقش حیاتی اتصالات ستون تیر فولادی به بتن مسلح در تضمین یکپارچگی سازه سازه های مرکب، به ویژه در مناطق لرزه خیز ناشی می شود. مطالعات قبلی حالت های شکست رایج، مانند شکست برشی و شکست ناحیه پانل را شناسایی کرده اند که انعطاف پذیری این اتصالات را به خطر می اندازند. این مطالعه به طور مبتکرانه به این مسائل با ترکیب صفحات از طریق ورق های فولادی با کمانش برای افزایش ظرفیت باربری و اتلاف انرژی پرداخته است. صفحات عبوری یک مسیر مستقیم بار را فراهم می کنند و انتقال برشی را بهبود می بخشند، در حالی که صفحات مهار شده با کمانش از کمانش موضعی جلوگیری می کنند و عملکرد چرخه‌ای را افزایش می دهند. هدف این تحقیق با انجام تحلیل جامع حالت شکست از طریق شبیه‌سازی عددی، بهینه‌سازی طراحی اتصال و در نتیجه بهبود قابلیت اطمینان و دوام سازه‌های هیبریدی است. مدل‌های روش المان محدود معتبر و مطالعات پارامتری بینش‌های دقیقی را در مورد توزیع تنش، الگوهای تغییر شکل و مکانیسم‌های انتقال بار ارائه می‌دهند که در نهایت به استراتژی‌های طراحی مؤثرتر برای سازه‌های کامپوزیتی ایمن‌تر و انعطاف‌پذیرتر کمک می‌کنند.

3- اتصال پیشنهادی RCS

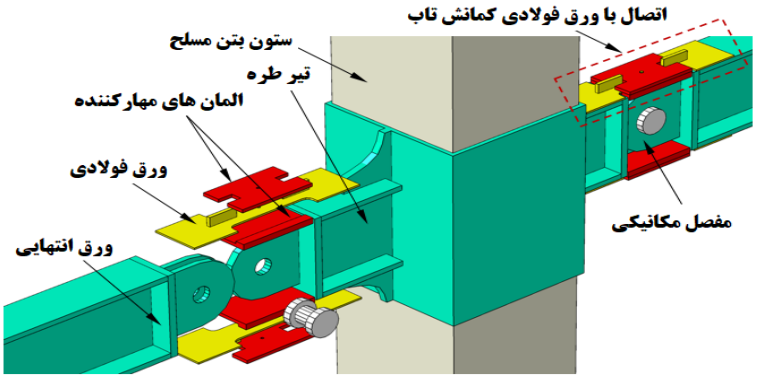
در این مطالعه، اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با استفاده از صفحات میانی و لولاهای مکانیکی بررسی شد. یک صفحه فولادی عمودی از ناحیه اتصال ستون عبور کرده و به صفحات فولادی اطراف که ستون را احاطه می‌کنند، جوش داده می‌شود. صفحه خارجی اتصال گسترش یافته و تیر به صفحه میانی متصل می‌شود، همان‌طور که در شکل 1(الف) نشان داده شده است. این طراحی شامل یک تیر فولادی است که مستقیماً به ستون بتنی متصل شده و هیچ عنصر واسط قابل مشاهده‌ای در این اتصال وجود ندارد. اتصال تیر به صفحه عبوری از طریق اتصال بال‌های تیر به دو طرف صفحه عبوری پس از برش جان تیر در این ناحیه انجام می‌شود. در صورت نیاز، صفحات اتصال جان و بال نیز می‌توانند برای اتصال تیر به صفحه عبوری استفاده شوند. اتصال بال تیر نیروهای کششی و فشاری را منتقل می‌کند، در حالی که اتصال جان نیروهای برشی را منتقل کرده و قسمت جان تیر را به صفحه عبوری متصل می‌کند. در این اتصال، تیر تقریباً ۲ سانتیمتر دورتر از سطح ستون قرار می‌گیرد، بنابراین هیچ اتصال مستقیمی بین تیر و ستون وجود ندارد. نیروهای حاصل از تشکیل لولای پلاستیک در داخل تیر به داخل صفحه عبوری منتقل شده و سپس به صفحات پوشش‌دهنده ناحیه اتصال منتقل شده و از طریق سخت‌کننده‌ها به ستون بتنی منتقل می‌شوند. نیروهای منتقل شده به صورت گشتاورهای لنگر به گره اتصال وارد می‌شوند. حضور صفحه عبوری در ناحیه اتصال باعث افزایش مقاومت خمشی و سختی تیر و ستون در ناحیه اتصال اطراف محور قوی تیر می‌شود. بنابراین، ناحیه اتصال تقویت شده و تشکیل لولای پلاستیک به داخل تیر منتقل می‌شود. شکل 1(ب) اتصال RCS پیشنهادی در این مطالعه را نشان می‌دهد. این طراحی شامل اجزای اضافی مانند صفحات و پیچ‌ها برای اتصال تیر فولادی به ستون بتنی است. این عناصر برای فراهم کردن اتصالی قوی‌تر و امن‌تر، با احتمال انتقال بهتر بار و بهبود عملکرد سازه‌ای در نظر گرفته شده‌اند. این روش مشابه شکل 1(الف) است با این تفاوت که دو انتهای تیر از یک اتصال مکانیکی استفاده می‌کنند، که تنها برش را به ستون منتقل می‌کند بدون هیچگونه لنگری به ناحیه اتصال و ستون، که منجر به افزایش اتلاف انرژی می‌شود .عنصر اصلی در انتقال بار از تیر به ستون یک صفحه فولادی عبوری از ستون است که کل نیروی حاصل از تشکیل لولای پلاستیک در تیر را به ستون منتقل می‌کند. به دلیل وجود این صفحه، شاهد افزایش مقاومت برشی ستون در گره اتصال خواهیم بود. برای ایجاد اتصال بین تیر (به عنوان عنصر فولادی) و ستون (به عنوان عنصر بتنی در ساختمان‌های مرکب)، از صفحات پوششی فولادی استفاده می‌شود که با سخت‌کننده‌ها به بتن متصل می‌شوند. با توجه به اینکه تنها بخش برهنه صفحه فولادی بین تیر و ستون وجود دارد، سختی خمشی و مقاومت در اطراف محور ضعیف تیر در ستون کاهش می‌یابد.



شکل 1- (الف) اتصال RCS با صفحه عبوری، و (ب) اتصال RCS پیشنهادی در مطالعه حاضر.

در اتصال پیشنهادی، عامل اصلی در انتقال نیرو از تیر به ستون، صفحات فولادی مقاوم در برابر کمانش و لولاهای مکانیکی هستند که مانند تکیه‌گاه‌های تیرهای پیوسته عمل می‌کنند و تنها برش را به ستون منتقل می‌کنند .جزء صفحه فولادی مقاوم در برابر کمانش به‌طور خاص برای جلوگیری از کمانش طراحی شده است، که یک حالت شکست است که در آن یک عضو سازه‌ای تحت تنش فشاری تغییر شکل می‌دهد.

عناصر مقاوم اجازه می‌دهند که صفحه فولادی بارهای فشاری بالاتری را بدون از دست دادن پایداری تحمل کند. در این روش، از سخت‌کننده‌ها نیز برای افزایش انتقال نیروی برشی به بتن ستون استفاده می‌شود. شکل ۲ جزئیات ناحیه اتصال و پیچیدگی آن را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه، دو طرف اتصال بال‌های دو تیر پیوسته توسط سخت‌کننده‌ها به هم متصل شده‌اند و همچنین به دلیل وجود اتصال مکانیکی، هیچگونه لنگری از تیر به ستون منتقل نمی‌شود.



شکل 2- جزئیات و پیکربندی اتصال RCS پیشنهادی

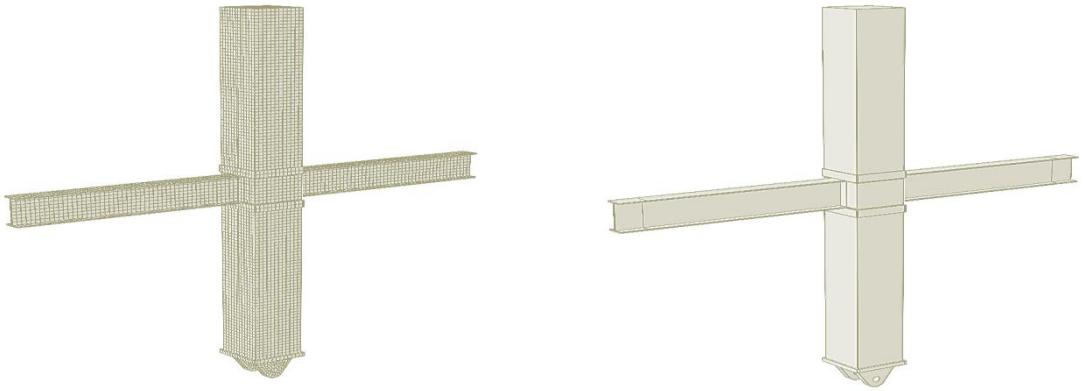
4- مدل‌سازی المان محدود (FE)

در نرم‌افزار آباکوس [8] از تکنیک‌های عددی متنوعی استفاده می‌شود. این پارامتر نشان‌دهنده روش خاصی است که توسط نرم‌افزار برای حل معادلات مربوط به عنصر هدف به کار می‌رود. روش‌های عددی مختلف، درجات متفاوتی از تقریب را به همراه دارند که بر سرعت محاسباتی تأثیر می‌گذارند. بنابراین، انتخاب روش مناسب مستلزم تعادل بین دقت و هزینه محاسباتی است. نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی‌های عددی غیرخطی مبتنی بر روش اجزای محدود را انجام می‌دهد. مدل‌سازی حالت‌های خرابی در این تحقیق بر اساس شرایط تغییر شکل صورت گرفته است. به‌طور خاص، تحلیل‌های عددی به منظور بررسی توزیع تنش‌ها، الگوهای تغییر شکل و رفتار هیسترزیس تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شده است. این روش‌ها به ما امکان می‌دهند تا رفتار واقعی اتصالات تحت شرایط بارگذاری دینامیکی را بهتر درک کنیم.

در این حوزه، نرم‌افزار آباکوس روش‌های عددی برای مدل‌های FE غیرخطی را ابداع کرده است که بر پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای اتصالات بین تیرهای فولادی و ستون‌های بتن مسلح تمرکز دارند. برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای این اتصالات، از نمونه‌های آزمایشی علیزاده و همکاران [9] برای مدل‌سازی FE استفاده شده است. در مدل‌سازی FE از عناصری مانند اتصال بین تیرهای فولادی و ستون‌های بتن مسلح، ستون بتن، صفحات، میلگردهای تقویتی و تیرهای فولادی استفاده شد. برای مدل‌سازی تمامی اجزا، از عناصر هشت‌وجهی جامد با درجه آزادی انتقالی در هر گره استفاده شد، که یک روش یکپارچه‌سازی کامل خطی با عنوان 8DR3C در نرم‌افزار آباکوس می باشد. میلگردهای تقویتی با استفاده از عناصر تیر دو گره‌ای مدل‌سازی شدند که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی بود و به عنوان B31 در نرم‌افزار شناخته می‌شود. این عناصر حرکت در سه محور مختصاتی متعامد را فراهم می‌کنند و آن‌ها را برای تحلیل‌های مختلف شامل خطی، غیرخطی، پیچیده، تماس و تحلیل‌های پلاستیک با تغییرشکل‌های قابل توجه مناسب می‌سازند. در این مطالعه، حساسیت مش‌بندی مورد بررسی قرار گرفت تا استراتژی بهینه مش‌بندی تعیین شود [10]. شکل 3 هندسه و مش‌بندی مدل‌های اجزای محدود بر اساس نمونه‌های آزمایشی علیزاده و همکاران [9] را نشان می‌دهد. به طور خاص، حداکثر اندازه مش برای ستون‌ها 20 میلی‌متر تنظیم شد، همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است. برای تحلیل این مدل‌های اجزای محدود، از روش استاتیک غیرخطی (استاتیک عمومی) و روش حل نیوتون-رافسون استفاده شد [11,12]. برای مدل‌سازی غیرخطی فولاد، از مدل پلاستیسیته ترکیبی سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک استفاده شد که استفاده شد. در تحلیل اجزای محدود ما، مواد فلزی ابتدا به صورت الاستیک تا رسیدن به حد تسلیم آن‌ها در نظر گرفته شدند. سپس، به فاز تغییر شکل پلاستیک منتقل شدند. مدول الاستیسیته به مقدار 200 گیگاپاسکال و نسبت پواسون به مقدار 0.3 تنظیم شد. خواص مکانیکی مواد فولادی که از آزمایشات کششی توسط علیزاده و همکاران [9] به دست آمده‌اند، در جدول 1 فهرست شده‌اند. به طور خاص، مقادیر تنش تسلیم و مقاومت کششی نهایی که در مدل‌سازی FE استفاده شده‌اند، مطابق با تست کشش علیزاده و همکاران [9] تنظیم شدند.

جدول 1-خواص مکانیکی مواد فولادی مطابق با تست کشش علیزاده و همکاران [9]

المان	تنش تسلیم (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
بال تیر	356	493
جان تیر	369	496
میلگرد طولی φ18	523	669
خاموت φ10	408	615



(الف) (ب)

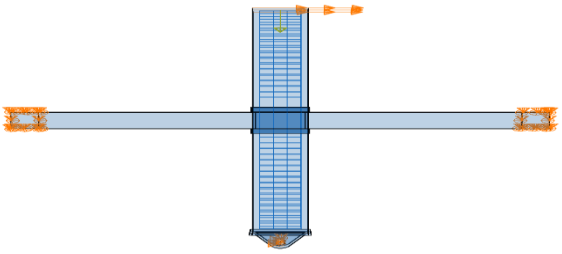
شکل 3- (الف) هندسه مدل المان محدود، (ب) مش بندی مدل المان محدود

در توزیع تنش و گسترش ترک در عناصر بتنی، نرم‌افزار آباکوس سه مدل ترک شامل ترک ترد، ترک پخش شده بتن و پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده ارائه می‌دهد. در این مطالعه، مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده (CDP) برای نمایش بتن در مدل‌سازی FE انتخاب شد. این مدل به خوبی ویژگی‌های غیرخطی فشاری و کششی عناصر بتنی تحت شرایط بارگذاری مختلف، اعم از مونوترونیک یا دینامیک، را به تصویر می‌کشد، به دلیل پایه‌گذاری آن بر پدیده‌های سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی مشاهده شده در مواد نیمه‌ترد مانند بتن مناسب می‌باشد [13]. در ستون بتن آرمه، ستون بتن با شبکه میلگردهای دارای تعامل می‌باشد، که این تعامل بین بتن و شبکه میلگردهای فولاد حالت تنش سه محوری را در هسته بتنی ایجاد می‌کند که به سطح مهار بتن بستگی دارد [14]. مندر و همکاران [15] رابطه تنش-کرنش خاصی برای ناحیه فشاری ماده بتن پیشنهاد کردند که در مدل‌سازی FE ما استفاده شد. مقاومت فشاری بتن، همان‌طور که در علیزاده و همکاران [9] گزارش شده، 50.8 مگاپاسکال است که در تحلیل FE ما ادغام شد. فرضیات مربوط به چگالی و نسبت پواسون ماده بتن به ترتیب 2400 کیلوگرم بر متر مکعب و 0.2 تنظیم شدند. مدل ماده CDP رفتار کششی بتن پس از شکست کششی را نیز شامل می‌شود. در اینجا، مقاومت کششی بتن تقریباً 10 درصد مقاومت فشاری یک محوری آن تخمین زده می‌شود که برابر با 5.1 مگاپاسکال است. پارامترهای پلاستیک اساسی، از جمله زاویه انبساط (ψ)، فاکتور شکل سطح تسلیم (K_c)، نسبت تنش شکست دو محوری (f_{b0}/f_c)، پارامتر ویسکوزیته (μ) و خارج از مرکزیت پتانسیل پلاستیک (e)، در جدول 2 فهرست شده‌اند [16].

جدول 2- پارامترهای پلاستیک مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده

زاویه انبساط	فاکتور شکل سطح تسلیم	نسبت تنش شکست دو محوری	پارامتر ویسکوزیته	خارج از مرکزیت پتانسیل پلاستیک
21°	0.667	1.16	0.1	0.0002

شکل 4 پیکربندی نمونه آزمایشی، همان‌طور که توسط علیزاده و همکاران [9] مستند شده، همراه با شرایط مرزی و بارگذاری اعمال شده به مدل‌های FE را نشان می‌دهد. شرایط مرزی و طرح بارگذاری مدل‌های FE به طور مستقیم از پیکربندی نمونه آزمایشی علیزاده و همکاران [9] اقتباس شده‌اند. مطابق با پیکربندی آزمایش آنها که در شکل 4 نشان داده شده، تکیه‌گاه‌های لولایی در پایه ستون استفاده شده‌اند، در حالی که تکیه‌گاه‌های غلتکی در انتهای تیرها قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، تکیه‌گاه‌های جانبی در وب تیرها گنجانده شده‌اند. نوع بارگذاری شامل بارگذاری چرخه‌ای و محوری در بالای ستون در مدل FE بود. نوع بارگذاری چرخه‌ای پروتکل مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشی توسط علیزاده و همکاران [9] از روش کنترل جابه‌جایی پیروی می‌کرد. بارگذاری چرخه‌ای در بالای ستون بود که بارگذاری محوری در جهت جابه‌جایی عمودی اعمال می‌شود.

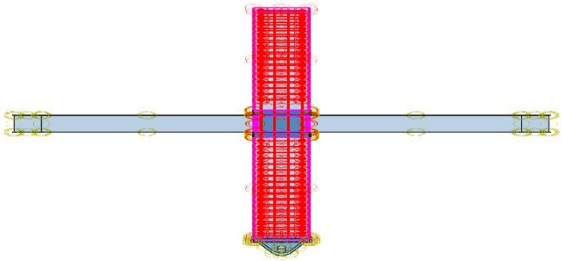


شکل 4–شرایط مرزی و بارگذاری مدل المان محدود

در برخورد با خواص تعامل در چارچوب مدل‌سازی، از روش تعامل سطح به سطح استفاده شد. این رویکرد تسهیل‌گر گنجاندن دو تعامل تماسی متمایز بود که رفتارهای مماسی و عمودی را مدیریت می‌کرد. با استفاده از روش تعامل سطح به سطح سخت، مدل‌سازی تلاش داشت تا نفوذ سطحی بین ستون بتنی و لوله فولادی در ناحیه پنل را به حداقل برساند، با استفاده از بینش‌های حاصل از مطالعات توسط مرجع [17]. علاوه بر این، تماس بین فولاد و بتن به عنوان سطح به سطح مدلسازی شد و مدل اصطکاک کولمب برای تعیین تنش برشی بحرانی، با معادله زیر:

$$\tau_{crit.}=\mu P \quad (1)$$

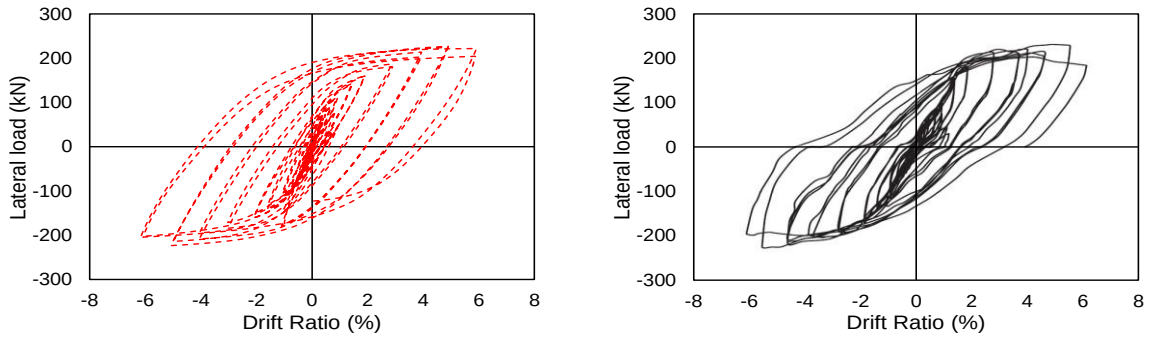
که در آن μ نمایانگر ضریب اصطکاک و P نشان‌دهنده فشار تماس است. ضریب اصطکاک 0.4 برای مشخص کردن تعامل بین فولاد و بتن به کار گرفته شد. علاوه بر این، تعامل بین میلگردهای تقویتی و ستون بتن، همراه با مدل مدفون در بتن در چارچوب مدل‌سازی گنجانده شده است. شکل 5 مدل مدفون شبکه میلگرد در ستون بتنی را نشان می‌دهد.



شکل 5– مدل مدفون شبکه میلگرد در ستون بتنی

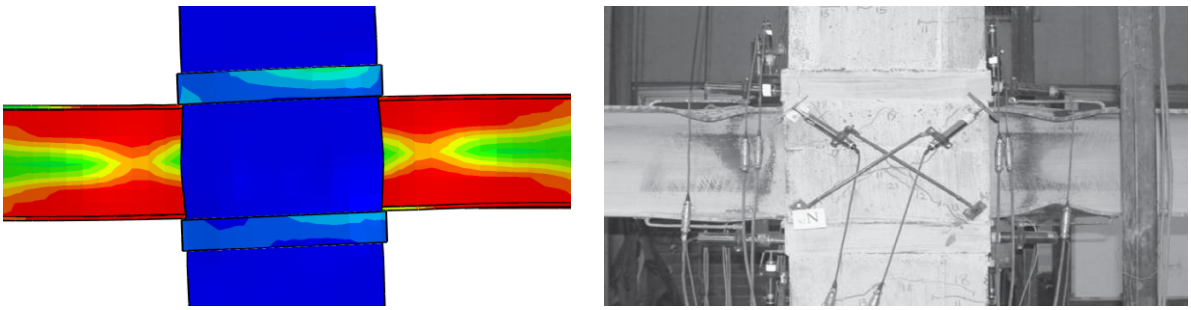
5- اعتبارسنجی مدل المان محدود

تأیید مدل‌های اجزای محدود در مقایسه با نتایج تجربی برای اطمینان از دقت و قابلیت اطمینان ضروری است. در این مطالعه، مدل‌های ارائه شده در بخش‌های قبلی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUSمورد تحلیل قرار گرفتند. این بخش تصمیم به انجام صحت‌سنجی نرم‌افزار آباکوس جهت مدل‌سازی نمونه‌های موجود صورت می‌پذیرد. با توجه به مدلسازی نمونه آزمایشی علیزاده و همکاران [9] در بخش قبل نتایج حاصل از رفتار چرخه‌ای نیرو–جابجایی و مکانیسم خرابی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. در شکل 6 منحنی چرخه‌ای نیرو–جابجایی حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. تطابق مداوم بین نتایج مدل‌های اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی، همان‌طور که توسط شکل 6 نشان داده شده است، دقت مدل‌های اجزای محدود ما برای اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح از طریق یک صفحه عبوری را تأیید می‌کند. شکل 7 به طور دقیق‌تر حالت‌های شکست مشاهده شده در هر دو مدل اجزای محدود و نمونه آزمایشی علیزاده و همکاران [9] را مورد بررسی قرار می‌دهد. شکل 6(الف) مناطق شکست نمونه آزمایش شده توسط علیزاده و همکاران [9] را نشان می‌دهد، در حالی که شکل 6(ب) نمودارهای کانتوری کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در مدل‌های اجزای محدود را به نمایش می‌گذارد. قابل توجه است که تمرکز کرنش پلاستیک معادل در اطراف صفحه اتصال وب به طور نزدیک نتایج تجربی را منعکس می‌کند. تطابق مداوم بین نتایج مدل‌های اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی، همان‌طور که توسط شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است، دقت مدل‌های اجزای محدود ما برای اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح از طریق یک صفحه عبوری را تأیید می‌کند.



(ب) (الف)

شکل 6: نمودار نیرو–جابجایی هیسترزیس (الف) نمونه آزمایشگاهی، (ب) مدل المان محدود

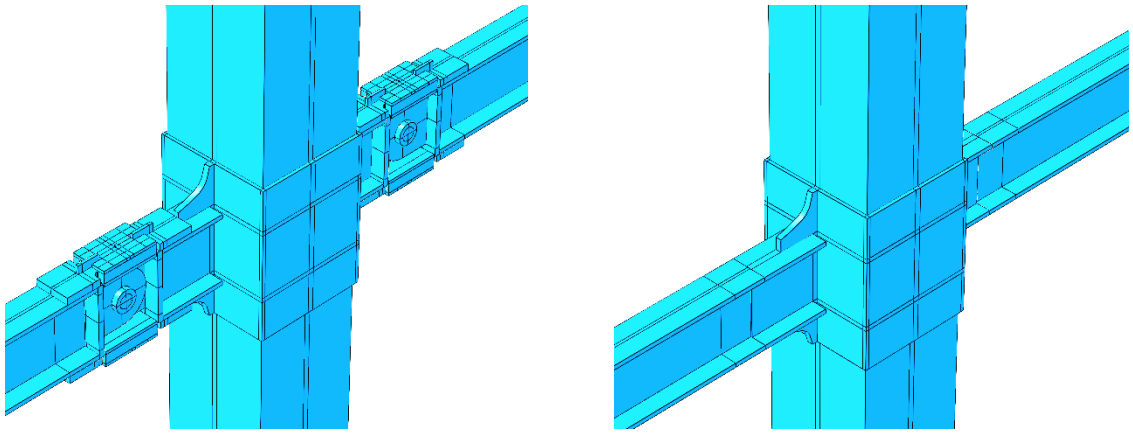


(ب) (الف)

شکل 7: حالت خرابی (الف) نمونه آزمایشگاهی، (ب) مدل المان محدود

6- مطالعات پارامتریک

مطالعات پارامتریک انجام شده در این پژوهش با هدف بررسی و مقایسه مکانیسم شکست اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با پیکربندی‌های صفحه عبوری، با و بدون اتصالات صفحات فولادی مهار شده در برابر کمانش (BRSP) انجام شده است. مدل‌های عددی مختلفی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ سازه‌ای توسعه یافته‌اند. جزئیات و نامگذاری این مدل‌های عددی در جدول 3 خلاصه شده و در شکل 8 نشان داده شده است. جدول 3 نمای کلی جامع از مدل‌های عددی استفاده شده در این مطالعه را ارائه می‌دهد، که شامل نوع اتصال تیر به ستون، وجود اتصال کمانش تاب و ضخامت ورق اتصال کمانش تاب استفاده شده در هر مدل می‌باشد. مدل‌ها به این صورت نامگذاری شده‌اند: RCS اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با اتصال صفحه عبوری بدون اتصال کمانش تاب، RCS-BRP-Xاتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با اتصال صفحه عبوری با اتصال کمانش تاب، که "X" ضخامت ورق اتصال کمانش تاب را نشان می‌دهد. ستون بتنی استفاده شده در مدل‌های عددی دارای مقطع 400 × 400 میلی‌متر و ارتفاع 3000 میلی‌متر با 12 میلگرد Φ18 برای همه مدل‌ها می‌باشد. تیر استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها دارای مقطعI شکل با ابعاد 230 × 130 × 10 × 15 میلی‌متر و طول 4000 میلی‌متر است. ضخامت ورق پوششی و صفحه عبوری در همه مدل‌ها یکسان بوده و به ترتیب 12 میلی‌متر و 20 میلی‌متر تنظیم شده است. برای مدل‌های شامل اتصال کمانش تاب، ضخامت صفحات فولادی متغیر بوده و از 5، 10، 15، 17، 20 و 25 میلی‌متر متغیر است. علاوه بر این، ضخامت ورق در اتصال مکانیکی در همه موارد 20 میلی‌متر فرض شده است.



(الف) (ب)

شکل 8: جزئیات مدل‌های عددی مطالعات پارامتریک (الف) مدل اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با اتصال صفحه عبوری، (ب) مدل اتصال تیر فولادی به ستون بتن مسلح با اتصال صفحه عبوری با اتصال کمانش تاب

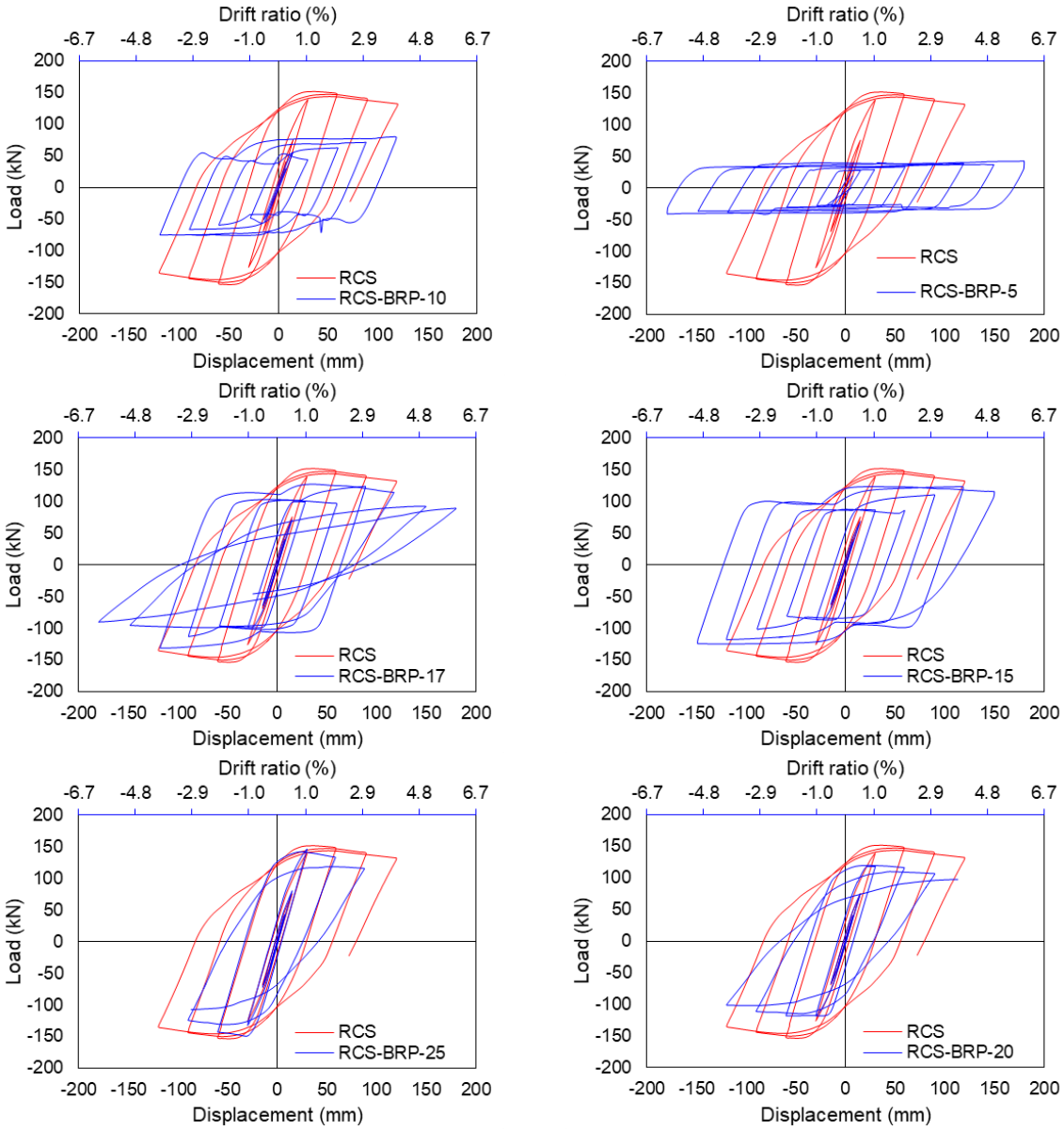
جدول 2: جزئیات و نامگذاری مدل‌های عددی

نام مدل‌ها	نوع اتصال تیر به ستون	صفحات فولادی مهار شده در برابر کمانش	ضخامت ورق کمانش تاب (میلیمتر)
RCS	اتصال صفحه عبوری	✗	–
RCS-BRP-05	اتصال صفحه عبوری و کمانش تاب	✓	5
RCS-BRP-10	اتصال صفحه عبوری و کمانش تاب	✓	10
RCS-BRP-15	اتصال صفحه عبوری و کمانش تاب	✓	15
RCS-BRP-17	اتصال صفحه عبوری و کمانش تاب	✓	17
RCS-BRP-20	اتصال صفحه عبوری و کمانش تاب	✓	20
RCS-BRP-25	اتصال صفحه عبوری و کمانش تاب	✓	25

7- نتایج و بحث

7-1- رفتار چرخه‌ای

رفتار هیسترزیس اتصالات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت است. رفتار هیسترزیس اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح از طریق مدل‌سازی اجزای محدود تحلیل شد و نتایج در شکل 9 نشان داده شده است. شکل 9 منحنی‌های هیسترزیس نیرو–جابجایی و منحنی‌های پوش آور را برای پیکربندی‌های مختلف اتصال، شامل مدل RCS و مدل‌های مختلف RCS-BRP با ضخامت‌های مختلف BRSP نشان می‌دهد. در مدل‌هایRCS-BRP ، با ضخامت‌های BRSP از 5 تا 17 میلی‌متر، حلقه‌های هیسترزیس پایداری قابل توجهی نسبت به مدل RCSنشان می‌دهند. این مشاهده نشان می‌دهد که استفاده از BRSPها عملکرد سازه‌ای اتصالات را بهبود می‌بخشد و به رفتار تغییر شکل پایدارتر و کنترل‌شده‌تری تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای منجر می‌شود.



شکل 9- مقایسه نمودار هیسترزیس مدل RCS با مدل‌های RCS-BRP

علاوه بر این، نمودارهای هیسترزیس در شکل 9 نشان می‌دهند که جابجایی مربوط به حداکثر نیروی برشی در مدل‌های RCS-BRP بیشتر از مدل RCS است. این نشان می‌دهد که اتصالات باBRSP ها می‌توانند جابجایی بیشتری را قبل از رسیدن به مکانیزم خرابی تحمل کنند. ظرفیت جابجایی افزایش یافته مشاهده شده در مدل‌های-RCS BRPنشان‌دهنده اثربخشیBRSPها در بهبود شکل‌پذیری و مقاومت اتصالات است. حلقه‌های هیسترزیس پایدار مشاهده شده در مدل‌هایRCS-BRP یک مکانیزم اتلاف انرژی کنترل‌شده‌تر را نسبت به مدل RCS پیشنهاد می‌دهند. این پایداری بهبود یافته به حضور BRSPها نسبت داده می‌شود که به توزیع مجدد نیروها کمک کرده و از شروع حالت‌های شکست شکننده جلوگیری می‌کنند. به طور کلی، تحلیل منحنی‌های هیسترزیس نشان می‌دهد که استفاده از صفحات فولادی مهار شده در برابر کمانش در اتصالات به بهبود عملکرد سازه‌ای منجر می‌شود که با پایداری بهبود یافته، ظرفیت جابجایی افزایش یافته و رفتار تغییر شکل کنترل‌شده مشخص می‌شود. این یافته‌ها اهمیتBRSP ها را در افزایش مقاومت لرزه‌ای اتصالات RCS برجسته می‌کنند و بینش‌های ارزشمندی برای طراحی و بهینه‌سازی این سیستم‌های سازه‌ای ارائه می‌دهند.

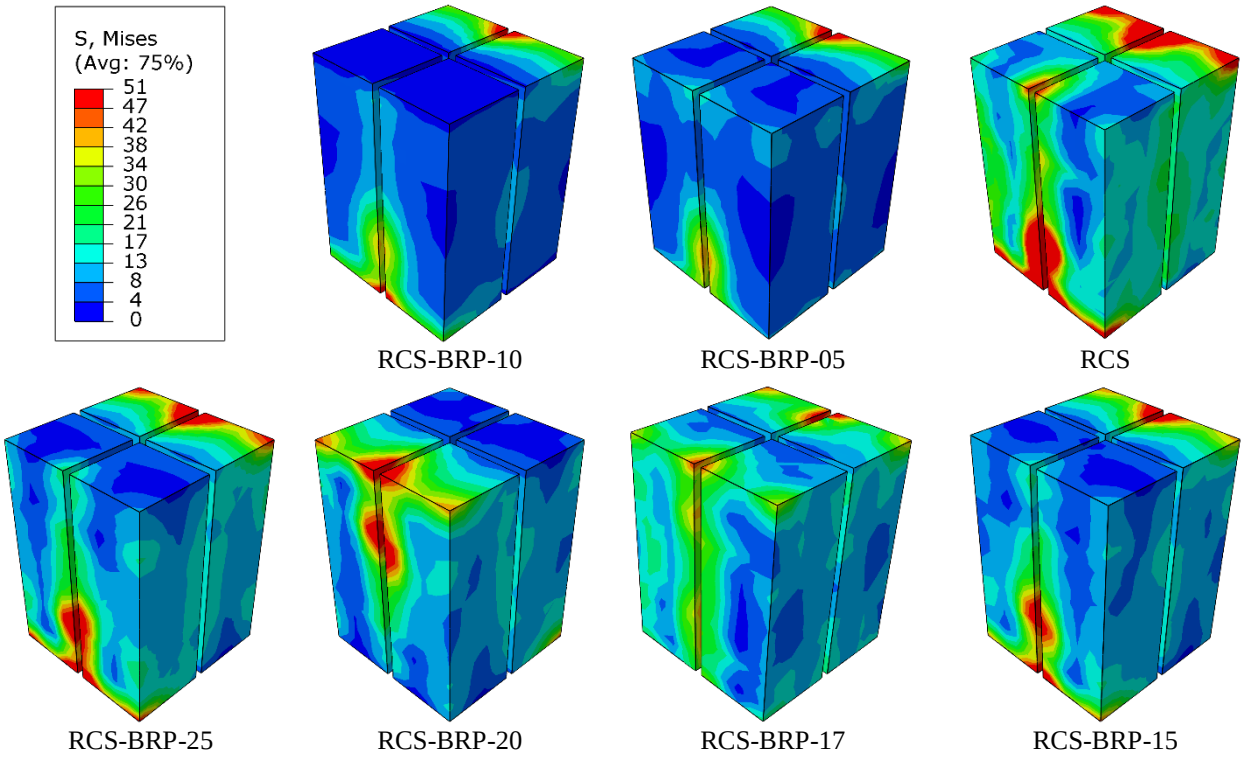
7-2- توزیع تنش

در این بخش، به بررسی توزیع تنش در مدل‌های پارامتریک پرداخته شده است. توزیع تنش‌ها در نواحی مختلف اتصالات، شامل اتصال تیر به ستون و چشمه اتصال ستون بتنی، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به دست آمده در نمودارها و جداول مربوطه ارائه شده است.

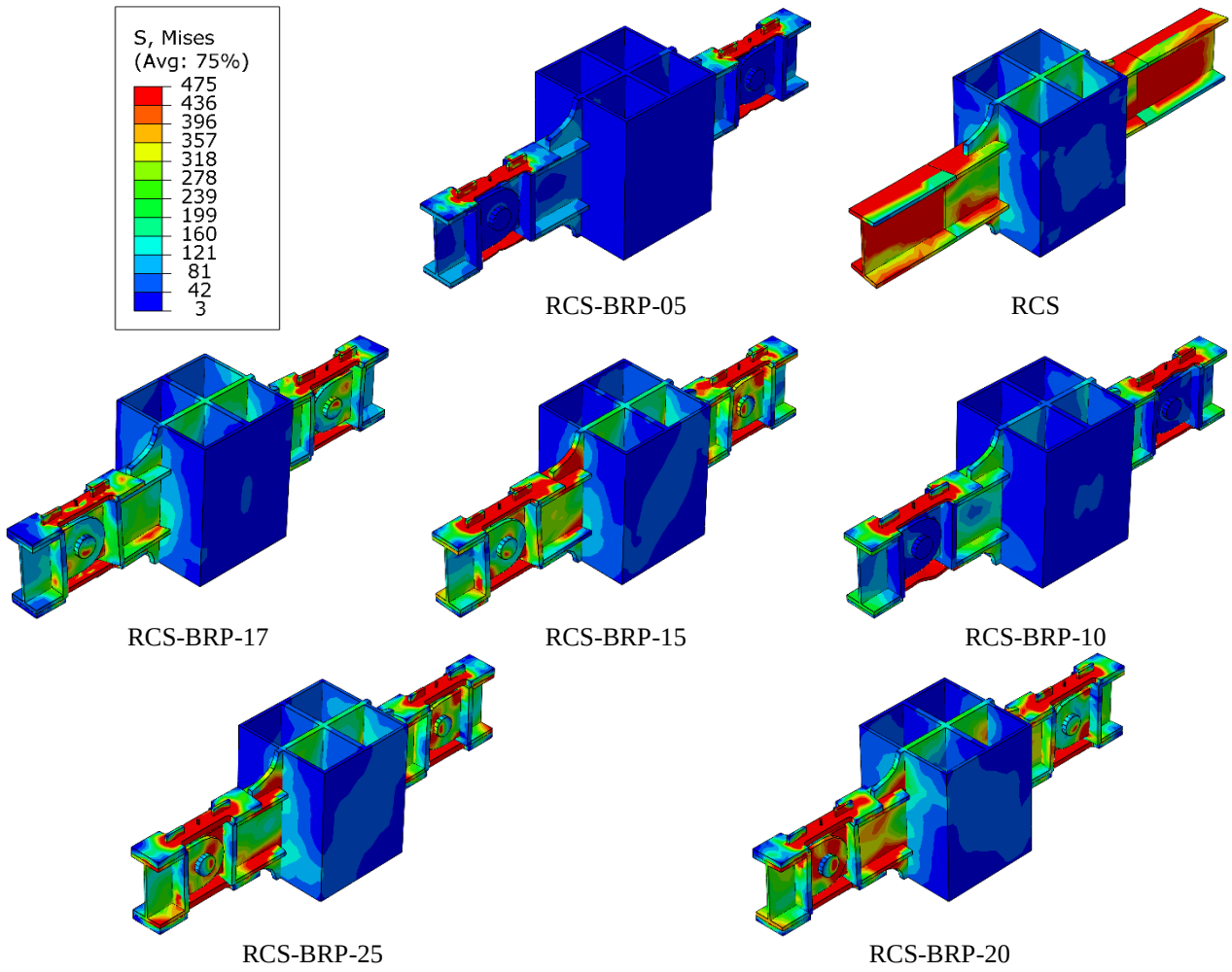
شکل 10 توزیع تنش در چشمه اتصال ستون بتنی برای مدل‌های پارامتریک مختلف را نشان می‌دهد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که با افزایش ضخامتBRSP، توزیع تنش در این ناحیه بهبود می‌یابد. این بهبود شامل کاهش تمرکز تنش و افزایش یکنواختی توزیع تنش‌ها در ناحیه اتصال است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که استفاده از BRSPها می‌تواند به کاهش خرابی‌های موضعی در ناحیه چشمه اتصال کمک کند.

شکل 11 توزیع تنش در اتصال تیر به ستون برای مدل‌های پارامتریک مختلف را نشان می‌دهد. در این بخش نیز مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامتBRSP، توزیع تنش در ناحیه اتصال بهبود یافته و تنش‌ها به صورت یکنواخت‌تری در ناحیه تیر و ستون توزیع می‌شوند. این یکنواختی در توزیع تنش‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد کلی اتصال و افزایش ظرفیت باربری آن کمک کند.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که استفاده از BRSPها با ضخامت‌های بیشتر می‌تواند به بهبود قابل توجهی در توزیع تنش‌ها در نواحی مختلف اتصالات منجر شود. این بهبود شامل کاهش تمرکز تنش، افزایش یکنواختی توزیع تنش‌ها و در نهایت افزایش ظرفیت باربری و پایداری اتصالات تحت بارهای دینامیکی است.



شکل 10- توزیع تنش در چشمه اتصال ستون بتنی مدل‌های پارامتریک



شکل 11–توزیع تنش دراتصال تیر به ستون مدل‌های پارامتریک

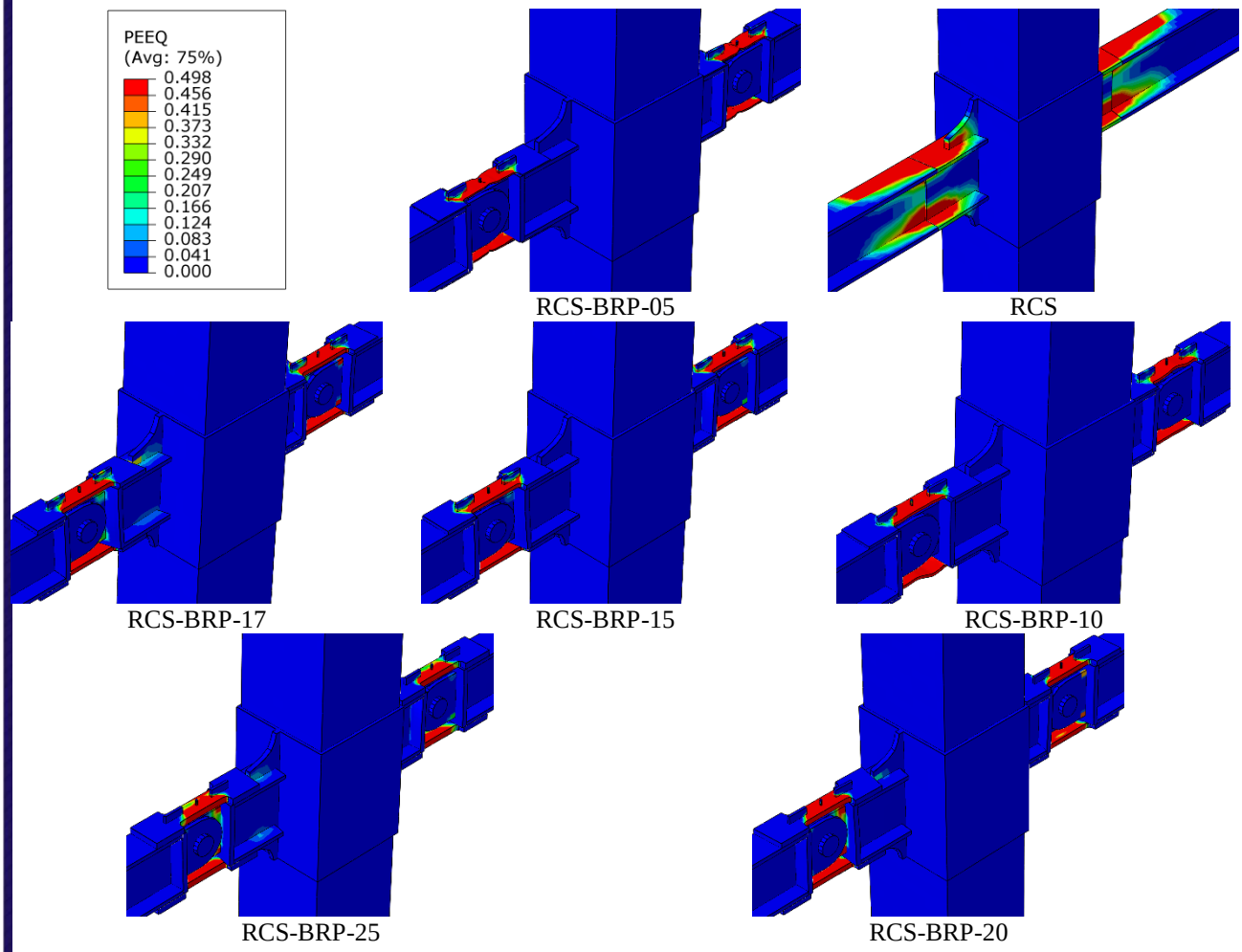
7-3- حالت‌های خرابی

در این بخش، حالت‌های خرابی اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با استفاده از تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، شناسایی و تحلیل مکانیزم‌های خرابی در اتصالات تحت بارگذاری‌های مختلف به منظور بهبود طراحی و افزایش دوام و پایداری سازه‌ها است.

یکی از حالت‌های خرابی متداول در اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح، خرابی برشی است. این نوع خرابی معمولا در ناحیه پانل اتصال رخ می‌دهد و ناشی از تمرکز تنش‌های برشی بالا در این ناحیه است. شکل 12 توزیع کرنش پلاستیک معادل و نواحی تمرکز خرابی را در مدل‌های پارامتریک مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از صفحات فولادی کمانش تاب می‌تواند تمرکز خرابی را کاهش داده و توزیع یکنواخت‌تری از خرابی را در ناحیه اتصال فراهم کند. خرابی خمشی نیز یکی دیگر از حالت‌های خرابی در این نوع اتصالات است که عمدتا به دلیل ناکافی بودن مقاومت خمشی تیر یا ستون رخ می‌دهد. در مدل‌های شبیه‌سازی‌های عددی، مشاهده شده است که افزایش ضخامت BRSPمی‌تواند مقاومت خمشی تیرها و ستون‌ها را افزایش داده و از وقوع خرابی خمشی جلوگیری کند. شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی هیسترزیس را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که بهبود قابل توجهی در عملکرد خمشی اتصالات با افزایش ضخامت BRSP را نشان می‌دهد.

خرابی کمانشی، خصوصا در تیرهای فولادی، از جمله حالت‌های خرابی بحرانی است که می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد کلی اتصال را تحت تأثیر قرار دهد. تحلیل‌ها نشان داده‌اند که استفاده از BRSP ها می‌تواند به طور مؤثری از وقوع کمانش در تیرهای فولادی جلوگیری کرده و پایداری سازه‌ای را بهبود بخشد. نتایج تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که استفاده از صفحات فولادی کمانش تاب در اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح می‌تواند به طور قابل توجهی حالت‌های خرابی متداول مانند خرابی برشی، خمشی و کمانشی را کاهش داده و عملکرد کلی سازه را بهبود بخشد. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان راهنمایی برای مهندسان در طراحی و بهینه‌سازی اتصالات سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرند و به افزایش دوام و پایداری سازه‌ها، خصوصا در مناطق زلزله‌خیز، کمک کنند.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزایش ضخامت صفحات فولادی کمانش تاب (BRSP) تا یک مقدار بهینه منجر به بهبود عملکرد سازه‌ای و افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود. با این حال، افزایش بیش از حد ضخامت این صفحات می‌تواند مشکلاتی از جمله افزایش وزن سازه، پیچیدگی در نصب و افزایش هزینه‌ها را به همراه داشته باشد. بنابراین، برای هر پروژه خاص، باید یک تحلیل دقیق برای تعیین مقدار بهینه ضخامت صفحات صورت گیرد. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، افزایش قابل توجه ظرفیت جذب انرژی و بهبود رفتار تغییر شکل اتصالات تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط صفحات فولادی کمانش تاب (BRSP) است. تحلیل‌های هیسترزیس نشان داد که این صفحات با ایجاد حلقه‌های هیسترزیس پهن و پایدار، می‌توانند به طور موثری انرژی زلزله را مستهلک کنند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که BRSP ها می‌توانند تغییر شکل‌های پلاستیکی بزرگتری را بدون وقوع خرابی تحمل کنند، که این امر به بهبود رفتار کلی سازه تحت بارگذاری چرخه‌ای منجر می‌شود. این ویژگی‌ها، BRSP را به عنوان یک گزینه موثر برای افزایش مقاومت و دوام سازه‌ها در برابر زلزله معرفی می‌کند.



شکل 12- حالت خرابی مدل‌های پارامتریک

8- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی رفتار و مکانیزم‌های خرابی اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با استفاده از صفحات فولادی کمانش تاب (BRSP) پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از BRSP ها به طور قابل توجهی می‌تواند عملکرد اتصالات را بهبود بخشیده و حالت‌های خرابی را کاهش دهد. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که صفحات فولادی کمانش تاب (BRSP) با بهره‌گیری از ناحیه خمیری خود می‌توانند به طور موثری انرژی زلزله را جذب کنند. شکل‌پذیری بالای این صفحات باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی و کاهش خرابی‌های موضعی می‌شود. در بررسی رفتار هیسترزیس، مشاهده شد که حلقه‌های هیسترزیس پهن‌تر و پایدارتر ایجاد شده توسط BRSP ها نشان‌دهنده افزایش ظرفیت استهلاک انرژی است.تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش، شامل اعتبارسنجی تکنیک شبیهسازی و توسعه مدل های عددی بوده است. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت BRSP ها منجر به کاهش تمرکز تنش‌ها و افزایش یکنواختی توزیع تنش‌ها در نواحی مختلف اتصالات می‌شود. این بهبودها به خصوص در ناحیه چشمه اتصال ستون بتنی و اتصال تیر به ستون مشهود است. همچنین، نتایج حاکی از آن است که استفاده از BRSP ها می‌تواند از وقوع خرابی‌های برشی، خمشی و کمانشی جلوگیری کرده و پایداری سازه‌ای را بهبود بخشد. مدل‌های پارامتریک مورد استفاده در این پژوهش نشان دادند که ضخامت‌های مختلف BRSP تأثیرات متفاوتی بر روی رفتار اتصالات دارند. به طور کلی، ضخامت‌های بیشتر BRSP ها به بهبود عملکرد اتصالات کمک می‌کنند، اما انتخاب ضخامت بهینه باید با توجه به معیارهای اقتصادی و سازه‌ای انجام شود. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که صفحات فولادی کمانش تاب (BRSP) با بهره‌گیری از ناحیه خمیری خود می‌توانند به طور موثری انرژی زلزله را جذب کنند. شکل‌پذیری بالای این صفحات باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی و کاهش خرابی‌های موضعی می‌شود. در بررسی رفتار هیسترزیس، مشاهده شد که حلقه‌های هیسترزیس پهن‌تر و پایدارتر ایجاد شده توسط BRSPها نشان‌دهنده افزایش ظرفیت استهلاک انرژی است. در نهایت، این پژوهش اهمیت استفاده از BRSP ها را در طراحی و بهینه‌سازی اتصالات سازه‌ای برجسته می‌کند و می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مهندسان در بهبود عملکرد سازه‌ها، به ویژه در مناطق زلزله‌خیز، مورد استفاده قرار گیرد. توصیه می‌شود که در طراحی‌های آینده، به استفاده از BRSP ها توجه ویژه‌ای شود تا سازه‌ها بتوانند عملکرد بهتری تحت بارهای دینامیکی و شرایط زلزله داشته باشند. این نتایج می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای تحقیقات بیشتر در زمینه بهبود اتصالات سازه‌ای و توسعه تکنیک‌های نوین برای افزایش پایداری و دوام سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

[1] Sheikh TM, Deierlein GG, Yura JA, Jirsa JO. Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part 1. J Struct Eng 1989;115:2858–76. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:11(2858).

[2] Deierlein G, Krawinkler H, Ma X, Eatherton M, Hajjar J, Takeuchi T, et al. Earthquake resilient steel braced frames with controlled rocking and energy dissipating fuses. Steel Constr 2011;4:171–5. https://doi.org/10.1002/stco.201110023.

[3] Bakhshayesh Eghbali N, Mirghaderi SR. Experimental investigation of steel beam to RC column connection via a through-plate. J Constr Steel Res 2017;133:125–40. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.007.

[4] Azad S, Mirghaderi SR, Epackachi S. Numerical investigation of steel and composite beam-to-encased composite column connection via a through-plate. Structures 2021;31:14–28. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.01.040.

[5] Zhang J, Hu X, Gong S, Wu J, Zhu W, Ren C. Experimental investigation of steel-concrete composite beam to reinforced-concrete column joints with single plate shear connection. Eng Struct 2021;245:112906. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112906.

[6] Li W, Ye H, Liu H, Chen B. Development and testing of demountable RC column-to-steel beam connections under cyclic loading. Soil Dyn Earthq Eng 2022;159:107342. https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2022.107342.

[7] Guan M, Xiao J, Wang Y, Zhang Y, Liang Z, Lai Z. Seismic behavior of innovative precast hybrid steel reinforced concrete beam-column connections. J Constr Steel Res 2023;203:107817. https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2023.107817.

[8] ABAQUS-6.14. Standard user's manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. 2014.

[9] Alizadeh S, Attari NKA, Kazemi MT. The seismic

performance of new detailing for RCS connections. J Constr Steel Res 2013;91:76–88. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.08.010.

[10] Zirakian T, Zhang J. Study on seismic retrofit of structures using SPSW systems and LYP steel material. Earthq Struct 2016;10:1–23. https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.1.001.

[11] El-Kholy AM, Mourad SA, Shaheen AA, Mohamed YA. Finite element simulation for steel tubular members strengthened with FRP under compression. Struct Eng Mech 2019;72:569. https://doi.org/10.12989/SEM.2019.72.5.569.

[12] Abderahmane S, Mokhtar BM, Smail B, Wayne SF, Zhang L, Belabbes BB, et al. Experimental and numerical disbond localization analyses of a notched plate repaired with a CFRP patch. Struct Eng Mech 2017;63:361. https://doi.org/10.12989/SEM.2017.63.3.361.

[13] Adibi M, Talebkhaha R, Yahyaabadib A. Simulation of cyclic response of precast concrete beam-column joints. Comput Concr 2019;24:223–36. https://doi.org/10.12989/cac.2019.24.3.223.

[14] Sasmal S, Novák B, Ramanjaneyulu K. Numerical analysis of under-designed reinforced concrete beam-column joints under cyclic loading. Comput Concr 2010;7:203–20. https://doi.org/10.12989/cac.2010.7.3.203.

[15] Mander JB, Priestley MJN, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. J Struct Eng 1988;114:1804–26. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).

[16] Liu D, Li H, Ren H. Study on the performance of concrete-filled steel tube beam-column joints of new types. Comput Concr 2020;26:547–63. https://doi.org/10.12989/cac.2020.26.6.547.

[17] Campione G, Scibilia N. Beam-column behavior of concrete filled steel tubes. Steel Compos Struct 2002;2:259–76. https://doi.org/10.12989/scs.2002.2.4.259.