



University Of Qom



Investigation of Structural Behavior in Base Plate Connections of Cruciform-Shaped CFST Columns under Cyclic Loading

Sepideh Rahimi¹

1. Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, No.C., Islamic Azad University, Noor, Iran. E-mail: sepideh.ahimi@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 Nov 2025
Revised 20 Jan 2026
Accepted 15 Feb 2026
Published 17 Feb 2026

Keywords:
Concrete-filled steel tube column,
Base plate connection,
Cruciform section,
Cyclic loading,
Finite element analysis.

ABSTRACT

Base plate connections are critical elements in structural systems, ensuring reliable load transfer and stability under lateral and seismic actions. In cruciform concrete-filled steel tubular (CFST) columns, the combined interaction of steel and concrete, along with the geometric complexity of the section, makes their design and analysis particularly demanding. This study presents a parametric investigation of the seismic behavior of base plate connections in cruciform CFST columns under cyclic loading. A finite element model was developed in Abaqus, incorporating nonlinear material properties, slip contact interactions, and explicit modeling of anchor bolts and steel-concrete interfaces. Three parameters were examined: base plate thickness (30–50 mm), anchor bolt diameter (20–30 mm), and axial load level. Overall, the findings highlight that base plate thickness is the most influential parameter for stiffness and strength enhancement, anchor bolt diameter primarily improves energy absorption and damping, and axial load ratio contributes to confinement and cyclic stability. The optimized combination of parameters is recommended to achieve superior seismic performance of CFST base connections with nonstandard geometries.

Cite this article: Rahimi S. Investigation of Structural Behavior in Base Plate Connections of Cruciform-Shaped CFST Columns under Cyclic Loading. Civil Infrastructure Researches. 2026; 12(1): 59-75. <https://doi.org/10.22091/cer.2026.14489.1664>



Introduction

Cruciform Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) columns benefit from the high compressive strength of concrete, which possesses greater load-bearing capacity than normal concrete due to confinement. Simultaneously, the surrounding steel provides desirable ductility and flexibility. These characteristics, combined with the cruciform geometry-involving the intersection of two perpendicular axes-lead to optimal stress distribution and enhanced overall structural stability.

However, the overall performance of these columns is highly dependent on how they connect to the foundation, typically achieved through a Base Plate. This connection is responsible not only for transferring gravity loads (such as structural weight) but also plays a crucial role in distributing lateral loads and moments, potentially influencing the overall seismic performance of the system. If inadequately designed, these connections can create weak points, leading to premature structural failure under cyclic loads. The objective of this research is to investigate this behavior more deeply and identify failure patterns, load capacity, and ductility indices for these column types to facilitate optimal seismic design.

Modeling Strategy and Verification

In the present study, the influence of three main parameters-the axial load ratio, the thickness of the base plate, and the diameter of the anchor bolts-on the hysteretic behavior, initial secant stiffness, equivalent viscous damping coefficient, and ultimate bending moment of column-plate connections in CFST systems was numerically analyzed. These parameters were selected based on their high sensitivity to initial lateral stiffness, load capacity, ductility, and the system's energy absorption capacity, as indicated in previous studies and similar experimental results.

Parametric Study

In total, models were simulated in the ABAQUS software. The results from one

laboratory specimen were used for the validation of the numerical and analytical models.

The results obtained from the analyses and the comparison of the hysteresis curves are as follows:

Effect of Axial Load Ratio

The highest impact of the axial load was observed in increasing stiffness, and this parameter plays a key role in improving the connection's dynamic performance.

Effect of Base Plate Thickness

In addition to increasing stiffness, the base plate thickness plays a significant role in controlling stress concentration and reducing the risk of plate buckling. With greater thicknesses, load transfer mechanisms and strain distribution in the plate and concrete are improved, preventing stress concentration at the connection interface.

Effect of Anchor Bolt Diameter

Increasing the anchor bolt diameter had the greatest effect on the equivalent viscous damping coefficient and energy dissipation during loading cycles. As the bolt diameter increased, the connection stiffness increased, but a reduction in ductility and an increase in stress concentrations beneath the base plate were observed, raising the risk of concrete crushing.

Pattern of Mechanism Formation and Joint Distribution

With increasing plate thickness, the base plate first yields under bending, followed by the anchor bolts yielding under shear and tension, ultimately leading to a balanced distribution of strain and stress across the section.

The anchor bolt diameter controls the shear and tensile capacity, and increasing the diameter leads to a reduction in localized stress concentrations and an increase in connection resistance.

Increasing the axial load reinforces concrete confinement and improves the

behavior of the plate and bolts, but additional stresses in the concrete beneath the base plate may lead to a risk of crushing.

Failure Mechanism

Failure mechanisms include yielding of the base plate, yielding or fracture of the anchor bolts, shear failure or pull-out of the bolts, and failure of the concrete beneath the plate.

In models with smaller base plate thicknesses, plate yielding occurs before bolt yielding, but as the thickness increases, the bolts yield earlier than the plate.

Conclusion

Overall, the base plate thickness has the greatest impact on increasing stiffness, ultimate flexural strength, and the damping coefficient, due to the increased moment of inertia and reduced localized plate bending. The anchor bolt diameter significantly affects ductility and energy dissipation in the connection, but its increase must be considered alongside stress concentration and the risk of concrete crushing. The axial load improves the connection stiffness and stress distribution by reinforcing concrete confinement, but its effect is less than that of the base plate thickness. The failure mechanism is shaped by plate yielding and bolt yielding, respectively influenced by the base plate thickness and anchor bolt diameter. Finally, the optimal design of CFST connections must consider these parameters and their interactive effects to achieve the highest load capacity and ductility, while identifying the preferred yielding pattern and controlling the failure mechanism toward ductile behavior (steel yielding) and away from brittle behavior.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■**No competing interests:** The author declare that she has no known competing financial interests or personal relationships that could

have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Sepideh Rahimi:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

بررسی رفتار سازه‌های اتصالات صفحه پای ستون در ستون‌های CFST با مقطع صلیبی تحت بارگذاری چرخه‌ای

سپیده رحیمی^۱

۱. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نور، دانشکده آزاد اسلامی، نور، ایران. رایانامه: sepideh.rahimi@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

چکیده

اتصالات صفحه پای ستون از اجزای حیاتی در انتقال بار و تضمین پایداری سازه‌ها تحت بارهای جانبی و لرزه‌ای به شمار می‌روند. در ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFST) با مقطع صلیبی، ترکیب رفتار فولاد و بتن همراه با ویژگی‌های هندسی خاص، تحلیل و طراحی این اتصالات را پیچیده‌تر می‌سازد. پژوهش حاضر با هدف بررسی پارامتریک رفتار سازه‌های اتصالات صفحه پای ستون در ستون‌های CFST صلیبی تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شد. بدین منظور، یک مدل اجزای محدود دقیق در نرم‌افزار آباکوس توسعه یافت که قابلیت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح، تماس لغزشی اجزا، و مدل‌سازی پیچ‌های مهار و نواحی تماس بتن و فولاد را دارا بود. سه پارامتر اصلی شامل ضخامت صفحه پای ستون (۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر)، قطر پیچ‌های مهار (۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر) و نیروی محوری ستون فولادی به‌صورت سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گرفتند. یافته‌ها بیانگر آن است که ضخامت صفحه پای ستون، مؤثرترین پارامتر در افزایش ظرفیت و سختی، قطر میل‌مهارها بیشترین اثر را در بهبود میرایی و جذب انرژی، و نسبت نیروی محوری نقش مهمی در محصورشدگی بتن و پایداری چرخه‌ای دارد. بهینه‌سازی همزمان این سه عامل، نقش مهمی در ارتقای عملکرد لرزه‌ای اتصالات صفحه پای ستون در ستون‌های CFST با مقطع صلیبی دارد.

کلیدواژه‌ها:

ستون فولادی پر شده با بتن،
مقطع صلیبی،
اتصال صفحه پای ستون،
بارگذاری چرخه‌ای،
تحلیل اجزای محدود.

استناد: رحیمی سپیده. بررسی رفتار سازه‌های اتصالات صفحه پای ستون در ستون‌های CFST با مقطع صلیبی تحت بارگذاری چرخه‌ای.

<https://doi.org/10.22091/cer.2026.14489.1664>. ۷۵-۵۹: (۱)۱۲؛ ۱۴۰۵. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی.

۱- مقدمه

ستون‌های CFST^۱ با مقطع صلیبی، به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین عناصر سازه‌ای در مهندسی عمران، مزایای منحصر به فردی را ارائه می‌دهند. این ستون‌ها با ترکیب بتن محصور در لوله فولادی، از مقاومت فشاری بالای بتن بهره می‌برند که به دلیل محصورشدگی، ظرفیت تحمل بار بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. همزمان، فولاد اطراف آن شکل‌پذیری و انعطاف‌پذیری مطلوبی را تأمین می‌کند، که این ویژگی‌ها در کنار هندسه صلیبی - که شامل تقاطع دو محور عمود بر هم است - منجر به توزیع بهینه تنش‌ها و افزایش پایداری کلی سازه می‌شود. چنین ترکیبی، این ستون‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای سازه‌های بلندمرتبه، پل‌ها و ساختمان‌های واقع در مناطق لرزه‌خیز تبدیل کرده است، جایی که بارهای جانبی مانند باد، زلزله یا بارهای دینامیکی دیگر، چالش‌های اصلی را ایجاد می‌کنند. با این حال، عملکرد کلی این ستون‌ها به شدت وابسته به نحوه اتصال آن‌ها به فونداسیون است، که معمولاً از طریق صفحه پای ستون^۲ صورت می‌گیرد. این اتصال نه تنها مسئول انتقال بارهای قائم (مانند وزن سازه) است، بلکه در انتشار بارهای جانبی و ممان‌ها نیز نقش کلیدی ایفا می‌کند و می‌تواند بر عملکرد لرزه‌ای کلی سیستم تأثیرگذار باشد. در صورت طراحی نامناسب، این اتصالات ممکن است نقاط ضعفی ایجاد کنند که منجر به شکست زودرس سازه تحت بارهای چرخه‌ای شود.

در مورد اتصالات صفحه پای ستون مطالعات زیادی انجام شده است که از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش انجام شده توسط رولر^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۵ اشاره کرد. آنها به تحلیل رفتار اتصالات صفحه پای ستون (CBP) در قاب‌های مقاوم خمشی فولادی پرداخته‌اند. این پژوهش با آزمایش چهار نمونه بزرگ‌مقیاس از

اتصالات CBP تحت بارگذاری ترکیبی محوری و بارهای جانبی دوجبهته انجام شد تا تأثیر تغییرات در الگوی میله‌های مهار و ضخامت صفحه پایه بررسی شود. نتایج نشان‌دهنده اهمیت الگوی میله‌های مهار و ضخامت صفحه پایه در بهبود عملکرد اتصالات CBP است و مرجع ارزشمندی برای توسعه طراحی این اتصالات در برابر بارهای لرزه‌ای و بادی ارائه می‌دهد، به‌ویژه در شرایط بارگذاری دوجبهته که کمتر مورد توجه قرار گرفته بود [۱]. از دیگر مطالعات در این زمینه می‌توان به مطالعه جیانگ و بیلا^۴ اشاره کرد. در این مطالعه به بررسی عددی عملکرد سازه‌ای اتصالات صفحه پای ستون فولادی تحت بارگذاری ترکیبی فشاری محوری و بارهای جانبی دوجبهته پرداخته شده است. این پژوهش با تمرکز بر تأثیر نیروهای چندجبهته، که شرایط بارگذاری لرزه‌ای را به طور دقیق‌تری بازنمایی می‌کنند، از رویکردهای سنتی که عمدتاً بارهای تک‌جبهته را در نظر می‌گیرند، فراتر رفته است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که آیین‌نامه‌های طراحی معمولاً سختی دورانی را در شرایط بارگذاری دوجبهته بیش از حد برآورد می‌کنند. این نتایج مبنایی برای بهبود آیین‌نامه‌های طراحی و بهینه‌سازی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب فولادی فراهم می‌کند [۲].

همچنین در زمینه ستون‌های CFST، می‌توان به مطالعه حسن^۵ و همکاران اشاره کرد. در این مطالعه به تحلیل عملکرد محوری ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقطع صلیبی پرداخته‌اند. این پژوهش با انجام سه آزمایش در مقیاس نصف اندازه واقعی، رفتار فشاری ستون‌های CFST با مقطع صلیبی را در سه پیکربندی مختلف بررسی کرده است: مقطع صلیبی بدون سخت‌کننده، مقطع صلیبی با سخت‌کننده و مقطع صلیبی چندسلول. این پژوهش امکان طراحی دقیق‌تر و بهینه‌تر ستون‌های CFST با مقطع صلیبی را فراهم می‌آورد و

^۴- Jiang and Billah

^۵- Hasan

^۱- Concrete Filled Steel Tube

^۲- Base Plate

^۳- Roller

پیکربندی چندسلولی به مراتب بهتر است. با انجام تحلیل پارامتریک بر روی ۱۳۴ مدل ستون مجهز به سخت‌کننده و ۱۳۴ مدل چندسلولی با پارامترهای مختلف، روش‌های طراحی برای محاسبه مقاومت و سختی فشاری محوری این نوع ستون‌ها پیشنهاد شد [۶].

مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که رفتار اتصالات صفحه پای ستون، چه در ستون‌های فولادی و چه در ستون‌های مرکب CFST، به شدت تحت تأثیر هندسه مقطع، ویژگی‌های مصالح، و جزئیات اجرایی اتصال قرار دارد. با وجود پژوهش‌های گسترده بر روی مقاطع دایره‌ای و مربعی، مطالعات بر روی ستون‌های CFST با مقطع صلیبی هنوز محدود بوده و به‌ویژه رفتار این اتصالات تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی به‌طور کامل شناخته نشده است. هدف این پژوهش، بررسی عمیق‌تر این رفتار و شناسایی الگوهای شکست، ظرفیت باربری و شاخص‌های شکل‌پذیری برای این نوع ستون‌ها است تا زمینه برای طراحی لرزه‌ای بهینه فراهم شود.

۲- مدل‌سازی

فرآیند ساخت مدل عددی در نرم‌افزار ABAQUS شامل تعریف هندسه ستون CFST با مقطع صلیبی، مدل‌سازی صفحه‌پایه و میل‌مهارها، تعیین خواص مصالح شامل رفتار غیرخطی فولاد و بتن، اعمال قیود و شرایط مرزی معادل مهار کامل در فونداسیون و تعریف پروتکل بارگذاری چرخه‌ای براساس الزامات آیین‌نامه AISC ۳۴۱-۲۰۱۶ است. این بخش شامل دو قسمت می‌باشد:

الف) رویکرد مدل‌سازی:

۱- طراحی هندسی: ابتدا هندسه ستون با مقطع صلیبی به‌صورت سه‌بعدی- شکل‌پذیر تعریف می‌شود. مقطع صلیبی حاصل از قرارگیری پنج ستون CFST مربعی است: یک ستون در مرکز و چهار ستون در پیرامون. ابعاد خارجی هر ستون ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت جداره فولادی ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته

می‌تواند به بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش وزن سازه‌ها کمک کند، در حالی که مقاومت در برابر آتش‌سوزی را نیز ارتقا می‌دهد [۳]. وو^۶ و همکاران، به بررسی تجربی و عددی رفتار و ظرفیت فشاری یک سیستم نوین ستون‌های فولادی پرشده با بتن با مقطع صلیبی پرداخته‌اند. این پژوهش با اجرای یک برنامه آزمایشی جامع شامل هفت آزمایش ستون کوتاه، آزمایش‌های تکمیلی بر روی خواص مواد و مدل‌سازی المان محدود آنها آغاز شد. نتایج نشان داد که تمامی نمونه‌های ستون کوتاه به دلیل کمانش موضعی فولاد و خردشدگی بتن دچار گسیختگی شدند. این مطالعه نشان می‌دهد که استاندارد اروپایی نسبت به استاندارد آمریکایی و چینی می‌تواند راهنمای قابل‌اعتمادتری برای طراحی این نوع ستون‌ها باشد [۴]. تائو^۷ و همکاران، به توسعه و تحلیل ستون‌های نوین فولادی پرشده با بتن و ستون‌های فولادی خالی (ST^۸) با مقطع صلیبی پرداخته‌اند. ستون‌های CFST شامل مقطع صلیبی معمولی، با سخت‌کننده و چندسلولی پرشده با بتن بودند، در حالی که ستون‌های ST شامل پیکربندی‌های مشابه اما بدون پرشدگی بتن بودند. در این مطالعه روابط ریاضی جدیدی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی ستون‌های CFST با مقطع صلیبی پیشنهاد شد که دقت بالایی در پیش‌بینی عملکرد این ستون‌ها ارائه می‌دهد [۵]. محققان دیگری نیز در مطالعه‌ای به بررسی آزمایشگاهی رفتار فشاری ستون‌های کوتاه CFST با مقطع صلیبی مجهز به سخت‌کننده و چندسلولی پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از سخت‌کننده‌های طولی یا پیکربندی چندسلولی به‌طور قابل‌توجهی مقاومت فشاری محوری، سختی و شکل‌پذیری ستون‌های CFST با مقطع صلیبی را بهبود می‌بخشد، به‌طوری که عملکرد مکانیکی

^۶- Wu

^۷- Tao

^۸- Structural Steel

محوری، یک ورق صلب صلیبی شکل (۶۵۰×۶۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۴۰ میلی‌متر) در بالای ستون نصب می‌شود.

شکل نهایی مونتاژ، مسیری پیوسته برای انتقال نیرو از محل اعمال بار جانبی و محوری تا فونداسیون ایجاد کرده و شرایط مرزی مشابه نمونه آزمایشگاهی را شبیه‌سازی می‌نماید تا رفتار واقعی تحت بارگذاری چرخه‌ای به‌طور دقیق قابل ارزیابی باشد (شکل ۲).

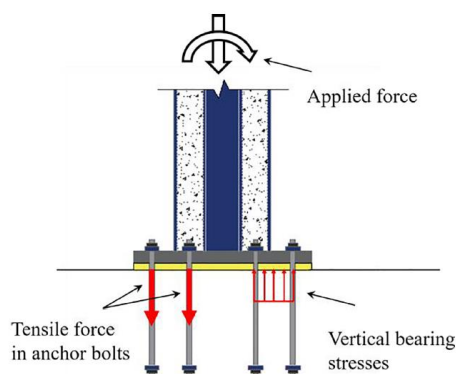
۲- تعریف اندرکنش‌ها: بین صفحه پایه و سخت‌کننده‌ها از قید اتصال صلب، بین صفحه زیرین پایه و سطح فونداسیون از تماس اصطکاکی و برای میلگردها در بتن فونداسیون از جاسازی کامل استفاده شد.

۳- مش‌بندی: از المان‌های حجمی هشت‌گرمی کاهش‌یافته (C3D8R) برای اجزای حجیم و از المان‌های میله‌ای دوگرمی (T3D2) برای میلگردها استفاده شد. در نواحی اطراف پیچ‌ها و لبه صفحه پایه، شبکه‌ای ریزتر اعمال گردید.

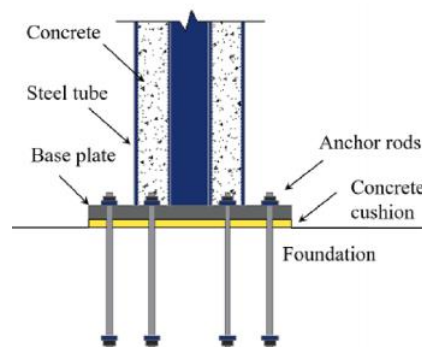
ب) تکمیل اطلاعات مدل‌های رفتاری و مشخصات مصالح:

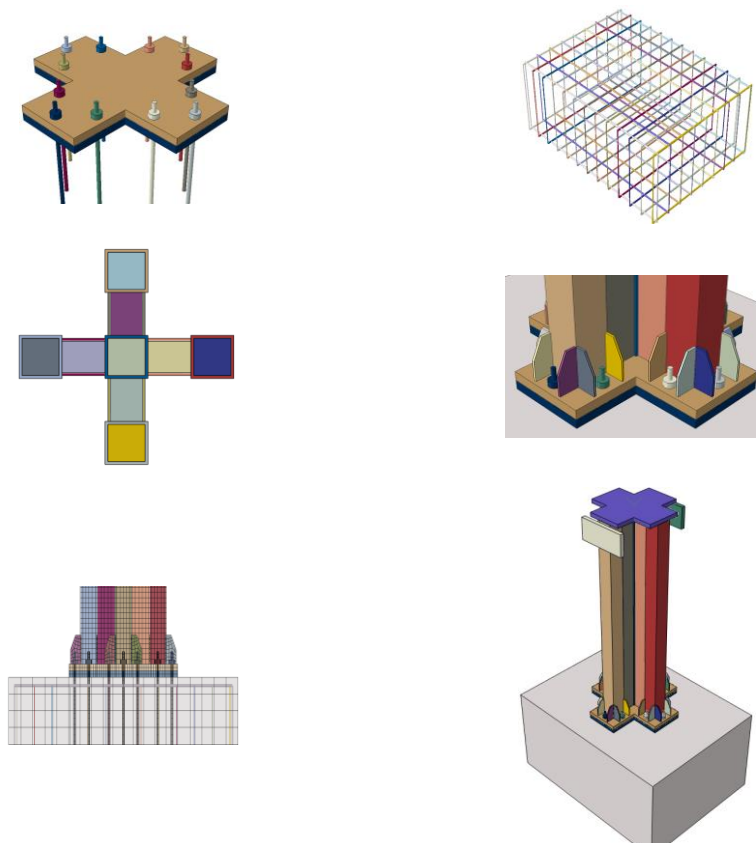
در این پژوهش، برای مدل‌سازی رفتار بتن داخل ستون‌های CFST با مقطع صلیبی و همچنین بتن فونداسیون غیرمحصور، از مدل آسیب پلاستیک بتن (CDP) در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد.

می‌شود. هسته بتن پرکننده با ابعاد خالص ۱۳۰×۱۳۰ میلی‌متر ترسیم می‌شود. جانمایی ستون‌های پیرامونی نسبت به ستون مرکزی با فاصله محوری ۳۰۰ میلی‌متر در هر راستا انجام می‌گیرد. برای اتصال هر ستون پیرامونی به ستون مرکزی، یک پانل کامپوزیتی فولاد- بتن- فولاد طراحی می‌شود که شامل دو ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و هسته بتنی با عرض ۱۳۰ میلی‌متر است (شکل ۱). فونداسیون با ابعاد ۲۰۰۰×۱۵۰۰ و ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌متر به‌صورت یک بلوک حجمی ترسیم می‌شود. میلگردهای طولی (قطر ۱۸ و فاصله ۲۰۰ میلی‌متر) و خاموت‌های عرضی (قطر ۱۰ میلی‌متر) به‌صورت المان میله‌ای مدل می‌شوند. ورق صفحه‌پای ستون (۶۵۰×۶۵۰ و ضخامت ۴۰ میلی‌متر) به‌عنوان یک المان حجمی سه‌بعدی جداگانه ایجاد شده و در محل تقاطع ستون صلیبی و فونداسیون جانمایی می‌شود. پیچ‌های مهاري ۲۰M (تعداد ۱۲ عدد) نیز با المان‌های المان حجمی مدل شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش و بهبود عملکرد موضعی پای ستون، ۲۴ سخت‌کننده دوزنقه‌ای (ابعاد ۹۰×۱۸۰ میلی‌متر، ضخامت ۱۰ میلی‌متر) به‌صورت المان حجمی مدل شده و در اطراف پایه هر ستون CFST جانمایی می‌شوند (۶ سخت‌کننده برای هر ستون). برای اعمال بارگذاری جانبی چرخه‌ای، دو ورق صلب مستطیلی (۵۰۰×۲۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۴۰ میلی‌متر) در طرفین بالای ستون صلیبی قرار داده می‌شوند. برای اعمال بار



شکل ۱- سیستم اتصال مورد بررسی در نمای کلی





شکل ۲- جزئیات مونتاژ کامل سیستم در بخش مونتاژ

جریان^۹ برابر ۰/۱ و نسبت fb_0/fc_0 برابر ۱/۱۶ انتخاب شد که با نتایج آزمایش‌های فشاری دوماحوره و تک‌محوره بتن در اتصالات مشابه همخوانی دارد [۸]. رفتار بتن فونداسیون در فشردگی با استفاده از یک رابطه تنش- کرنش توصیف می‌شود که به دو بخش تقسیم می‌شود:

شاخه صعودی (۱): توسط پوپوویس^{۱۰} پیشنهاد شده و برای توصیف رفتار بتن در فشار اولیه کاربرد دارد [۹]. منحنی تنش- کرنش تشکیل دهنده بتن تحت فشار را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد:

$$\sigma = f'_c \frac{K \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)}{1 + (K-1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^r} \quad (1)$$

این مدل ضمن برخورداری از دقت بالا، امکان شبیه‌سازی دقیق تغییرشکل‌های پلاستیک و فرآیند آسیب در بتن را تحت بارگذاری‌های غیرخطی، چرخه‌ای و شبه‌استاتیکی فراهم می‌کند. مدل CDP در محیط تحلیل ضمنی بر پایه مفاهیم رفتار پلاستیک آسیب‌دیده بوده و از معیار تسلیم Drucker-Prager بهره می‌برد که رفتار غیرخطی بتن را در حالت‌های فشاری و کششی به خوبی توصیف می‌کند. زاویه اتساع در این مطالعه برابر ۳۸ درجه در نظر گرفته شد که متناسب با رفتار بتن پرکننده در مقاطع CFST با مقطع صلیبی و نتایج گزارش شده در تحقیقات مشابه انتخاب گردید [۷]. پارامتر ویسکوزیته مقدار ۰/۰۰۱ به خود گرفت تا اثر نرخ کرنش در پایداری محاسباتی مدل لحاظ شود بدون آنکه منجر به اغتشاش در منحنی‌های هیستریزس گردد. نسبت K_c معادل ۰/۶۶۷ تعیین شد تا هندسه سطح تسلیم در شرایط تنش سه‌محوره به‌درستی بازنمایی شود. خروج از مرکز پتانسیل

^۹- Eccentricity

^{۱۰}- Popovics

است، ε_0 کرنش متناظر با مقاومت نهایی بتن محصور را نشان می‌دهد که به صورت تابعی از کرنش بتن بدون محصورشدگی ε_c و ضریب محصورشدگی γ تعریف شده است [۱۴].

در این مطالعه، رفتار مصالح فولادی (Box-End Plate-Stiffener و میل‌مهارها) مورد استفاده در اتصالات صفحه پای ستون ستون‌های CFST با مقطع صلیبی، براساس تئوری پلاستیسیته کلاسیک مایسز و معیارهای شکست پیشرفته مدل‌سازی شده است.

برای شبیه‌سازی دقیق این رفتار از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی^{۱۴} استفاده می‌شود. این مدل، که براساس تحقیقاتی مانند مدل چابوچ توسعه یافته، ترکیبی از دو نوع سخت‌شوندگی اصلی است. سخت‌شوندگی ایزوتروپیک به معنای افزایش اندازه سطح تسلیم ماده است. در این مطالعه، پارامترهای مصالح برای مدل ترکیبی سخت‌شوندگی برای فولاد درجه Q235B که مشابه فولاد ST37 است، مطابق با مقادیر ارائه شده توسط وانگ^{۱۵} و همکاران در جدول ۱ در نظر گرفته شده است [۱۵]. σ_0 نشان‌دهنده مقاومت تسلیم اسمی صفحه فولادی پرکننده است. پارامترهای Q_∞ و $biso$ نشان‌دهنده حداکثر تغییرات سطح تسلیم فولاد و نرخ تغییر آن هستند. γ نرخ تغییر تنش برگشتی فولاد است و C حاصل ضرب حداکثر تغییرات تنش برگشتی و γ است.

همچنین برای جلوگیری از گسیختگی غیرواقعی پیچ‌های مهاری تحت تغییرشکل‌های مکرر چرخه‌ای و شبیه‌سازی دقیق‌تر ظرفیت اتلاف انرژی آن‌ها، یک معیار آسیب مبتنی بر کرنش پلاستیک برای این المان‌ها در نظر گرفته شد. بر این اساس، از معیار ساده‌شده بائو-ویریکی استفاده گردید [۱۶]. در این معیار، آسیب زمانی آغاز می‌شود که کرنش پلاستیک معادل در المان به یک مقدار بحرانی مشخص (ε_f) برسد. مقدار کرنش شکست (ε_f) با

شاخه نرم‌کنندگی (۲): توسط سنز^{۱۱} معرفی شده (رابطه ۲) و برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار بتن در شرایط فشرددگی و کاهش سختی استفاده می‌شود [۱۰]. این رابطه همچنین توسط بال^{۱۲} و همکاران استفاده شده است و مزیت آن در توانایی بهتر شبیه‌سازی رفتار بتن در بخش نرم‌کنندگی است [۱۱].

$$\sigma = f'_c \frac{K \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)}{1 + A \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) + B \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2 + C \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^3} \quad (2)$$

برای توصیف دقیق رفتار بتن محصور، مدل هان روابط ریاضی تفکیک‌شده برای شاخه صعودی و شاخه پس از اوج مقاومت (نرم‌شوندگی) ارائه کرده است که به صورت تابعی از پارامترهای هندسی، مصالحی و بارگذاری تعریف می‌شوند. هان^{۱۳} و همکاران رفتار فشاری بتن پر شده در سازه‌های CFST را با رابطه (۳) معادل‌سازی کردند تا در تحقیقات اجزای محدود مورد استفاده قرار گیرد [۱۲ و ۱۳].

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta(x-1)^n + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x &= \varepsilon / \varepsilon_0, \\ y &= \sigma / \sigma_0, \sigma_0 = f_c \\ \varepsilon_0 &= \varepsilon_c + 800 \zeta^{0.2} \times 10^{-6} \\ \varepsilon_c &= (1300 + 1.25 f_c) \times 10^{-6} \\ \eta &= 1.6 + 1.5 / x \\ \beta_0 &= (f_c)^{0.1} / [1.2(1 + \zeta)^{0.5}] \\ \zeta &= f_y A_s / f_{ck} A_c \end{aligned}$$

که در آن A_s و A_c به ترتیب پارامترهای مساحت بتن هسته و مساحت تیوب فولادی هستند. f_c و f_{ck} به ترتیب مقاومت مشخصه فشاری و مقاومت استوانه‌ای بتن هستند. قسمت نزولی منحنی تنش-کرنش مطابق با کد چینی است، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده

14- combined

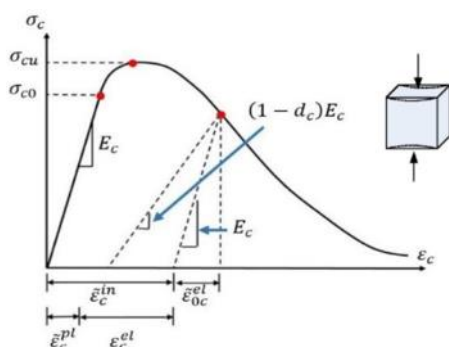
15- Wang

11- Saenz

12- Balan

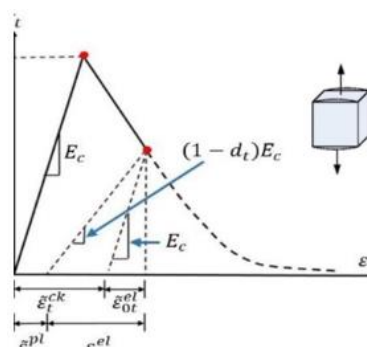
13- Han

حذف المان‌های پیچ پس از رسیدن به سطح آسیب بحرانی را فراهم می‌آورد.



رفتار فشاری بتن بارگذاری تک محوره

در نظر گرفتن نسبت تنش سه‌محوری و براساس کالیبراسیون با داده‌های آزمایشگاهی مشابه تعیین شد [۱۷]. این رویکرد امکان شبیه‌سازی تخریب پیشرونده و



رفتار کششی بتن بارگذاری تک محوره

شکل ۳- نمودار تنش- کرنش فشاری و کششی بتن [۱۵]

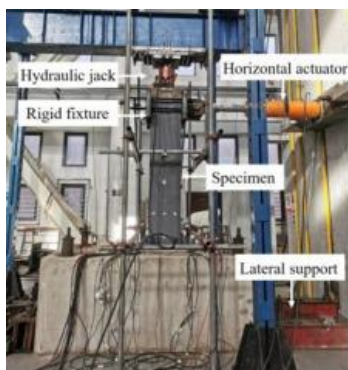
جدول ۱- پارامترهای مواد سخت شدن ترکیبی (ایزوتروپیک- سینماتیکی)

پارامتر	مقدار
Steel	Q235B
σ_{f0}/MPa	۲۴۰
b_{iso}	۱/۱
Q_{∞}/MPa	۱۶
C_1/MPa	۴۹۲۴
γ_1	۱۵۴
C_2/MPa	۳۱۰۱
γ_2	۱۲۰
C_3/MPa	۲۷۳۰
γ_3	۳۱
C_4/MPa	۱۴۵۰
γ_4	۲۶

با توجه ماهیت شبه‌استاتیکی بارگذاری، از یک گام زمان‌بندی خودکار^{۱۶} با حداکثر گام زمانی محدود شده استفاده شد. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای (براساس AISC341) به عنوان یک تاریخچه جابه‌جایی کنترل شده در نقطه اعمال بار جانبی تعریف گردید (شکل ۴). تحلیل با گام زمانی اولیه کوچک (در حدود 10^{-3} تا 10^{-2} از کل زمان تحلیل) آغاز گردید. نرم‌افزار به طور خودکار، اندازه گام را براساس میزان همگرایی در هر تکرار (با حداکثر ۵

در این مدل‌سازی، به منظور شبیه‌سازی دقیق رفتار سازه‌ای اتصال صفحه پای ستون CFST با مقطع صلیبی تحت بارگذاری چرخه‌ای، از بخش گام تحلیل نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. انتخاب نوع گام تحلیل، تحلیل پویای ضمنی بوده که به دلیل توانایی آن جهت در نظر گرفتن اثرات غیرخطی هندسی و رفتار وابسته به زمان برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای و بررسی پایداری عددی مدل مناسب است.

¹⁶- Automatic Time Incrementation



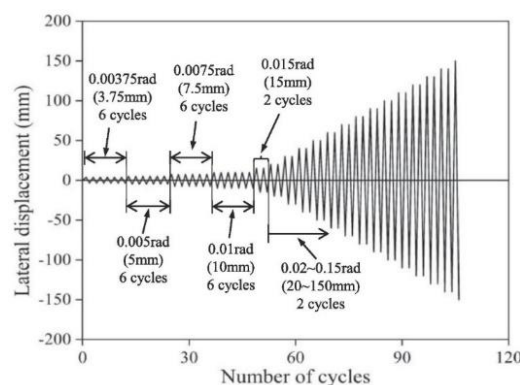
شکل ۵- نمونه ساخته شده در آزمایشگاه توسط چن و

همکاران [۲۰]

به‌منظور اطمینان از استقلال نتایج عددی از اندازه مش، یک تحلیل حساسیت مش با استفاده از شش اندازه مختلف المان انجام شد. در این تحلیل، مقدار لنگر خمشی نهایی حاصل از مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه المان، پاسخ عددی به‌صورت یکنواخت به مقدار آزمایشگاهی همگرا می‌شود. برای مش‌های درشت، اختلاف قابل‌توجهی بین نتایج عددی و مقدار آزمایشگاهی مشاهده شد، به‌طوری‌که در اندازه المان ۳۰ میلی‌متر خطای حدود ۶ درصد به دست آمد. با ریزتر شدن مش، این اختلاف به‌طور پیوسته کاهش یافته و در اندازه المان ۱۵ میلی‌متر به کمتر از ۲ درصد رسید. کاهش بیشتر اندازه المان تا ۸ میلی‌متر تنها بهبود جزئی در نتایج ایجاد کرد که نشان‌دهنده نزدیک شدن حل عددی به حالت همگرا است. براساس این نتایج، مشخص می‌شود که از اندازه المان ۱۵ میلی‌متر به پایین، تغییرات لنگر خمشی نهایی ناچیز بوده و نتایج عملاً مستقل از اندازه مش می‌باشند (جدول ۲). بنابراین، مش با اندازه المان ۱۵ میلی‌متر به‌عنوان مش بهینه انتخاب شد، زیرا ضمن حفظ دقت مناسب، هزینه محاسباتی کمتری نسبت به مش‌های ریزتر دارد (شکل ۶).

با توجه به اندازه مش انتخابی و مدل‌سازی عددی نمونه آزمایشگاهی، نتایج نشان داد که منحنی‌های گشتاور-دوران مدل‌های ساخته شده با منحنی‌های SP2

تکرار در هر افزایش زمان تنظیم می‌کرد. حداکثر اندازه گام زمانی به گونه‌ای محدود شد (۰/۱ تا ۰/۱) از مدت هر نیم‌چرخه) که در هر چرخه، حداقل ۲۰-۳۰ نقطه داده روی منحنی هیستریزس ثبت شود تا شکل حلقه‌ها به طور دقیقی نمایان گردد.



شکل ۴- بارگذاری چرخه‌ای طبق الگوی استاندارد

پیشنهادشده توسط استاندارد AISC341 [۱۸ و ۱۹]

۳- صحت سنجی

در راستای انجام این تحقیق، از مقاله چن^{۱۷} و همکاران برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی و تحلیلی استفاده شده است. در این مقاله، رفتار لرزه‌ای اتصالات پایه-ستون نمایان برای ستون‌های لوله‌ای فولادی پرشده با بتن با مقطع L شکل بررسی شده و مدل آزمایشگاهی SP2 به‌عنوان یکی از سه نمونه آزمایش‌شده، به دلیل شباهت‌های طراحی و مشخصات فنی با مدل‌های مورد مطالعه در تحقیق، برای اعتبارسنجی انتخاب شد. مدل SP2 در این مقاله، شامل یک ستون CFST با مقطع L شکل است که از سه لوله فولادی مربعی ۱۵۰×۱۵۰ با ضخامت ۱۰ میلی‌متر تشکیل شده و توسط دو صفحه فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به هم متصل شده‌اند (شکل ۵) [۲۰]. برای مش‌بندی، در نواحی بحرانی (اطراف پیچ‌ها، لبه صفحه پایه، محل اتصال سخت‌کننده‌ها) از مش با اندازه تقریبی ۸ تا ۳۰ میلی‌متر استفاده گردید.

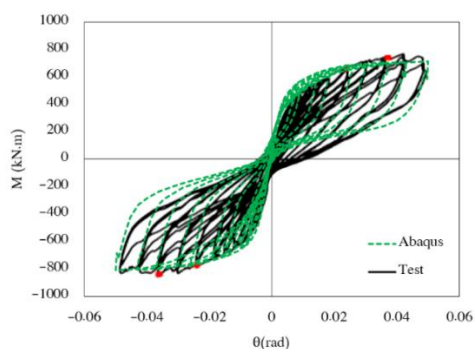
17- Chen

تطابق خوبی دارند، به‌ویژه در محدوده زوایای دوران تا 0.3° رادیان (شکل ۷).

جدول ۲- تحلیل حساسیت در مش‌بندی

اندازه المان (میلی متر)	لنگر خمشی نهایی (Kn.m)	درصد خطا نسبت به آزمایش
۳۰ (بسیار درشت)	۷۰۵/۴۰	-۵/۹۲
۲۵ (درشت)	۷۱۹/۵۰	-۴/۰۴
۲۰ (نیمه درشت)	۷۲۸/۸۰	-۲/۸۰
۱۵ (متوسط - مرجع)	۷۳۵/۰۲	-۱/۹۷
۱۰ (ریز)	۷۳۷/۹۵	-۱/۵۸
۸ (بسیار ریز)	۷۳۸/۹۱	-۱/۴۵
مقدار آزمایشگاهی	۷۴۹/۸۰	-

صرف بستن این فاصله و بازیابی تماس کامل می‌گردد که باعث ایجاد ناحیه‌ای با سختی ظاهری کم در نزدیکی محور تغییر مکان می‌شود.



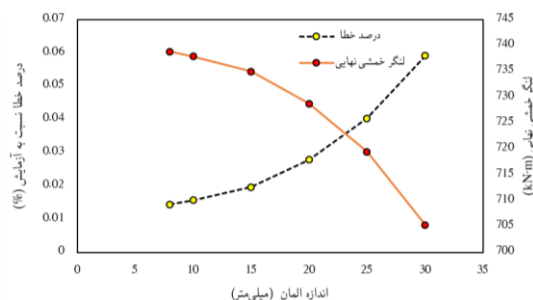
شکل ۷- پاسخ هیستریزیس مدل عددی و آزمایشگاهی SP2 در مطالعه چن و همکاران [۲۰]

این مکانیزم در مدل حاضر، به دلیل تعریف دقیق تماس اصطکاکی - جدایشی^{۱۹} بین سطوح مربوطه، به‌خوبی شبیه‌سازی شده است. منشأ اصلی پینچینگ، رفتار تماس بین اجزا بوده، نه رفتار ترک‌خوردگی چرخه‌ای در توده بتن. مدل نهایی نمونه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در انتهای بارگذاری در شکل ۸ ارائه شده است.

۴- بحث و نتایج مدل‌سازی

در مطالعه حاضر، تعداد ۱۸ مدل عددی مختلف طراحی و تحلیل شده است (جدول ۳). این مدل‌ها با

سختی دورانی اولیه مدل‌های عددی، که با استفاده از روش اجزای محدود محاسبه شد، در مقایسه با داده‌های SP2، خطایی کمتر از ۸ درصد نشان داد.



شکل ۶- تحلیل حساسیت در مش‌بندی

این تطابق به دلیل مدل‌سازی دقیق تماس بین صفحه پایه، بالشتک بتنی و پیچ‌های مهاری در نرم‌افزار آباکوس بود که شرایط تماس غیرخطی و رفتار مواد (فولاد Q345 و بتن C40) را به‌درستی در نظر گرفت.

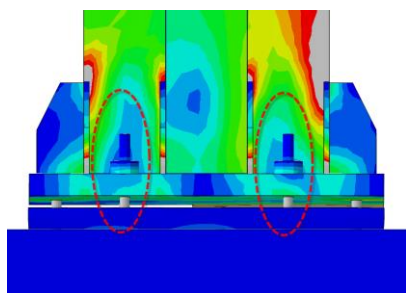
پینچینگ (باریک‌شدگی) مشاهده‌شده در حلقه‌های هیستریزیس، هم در نتایج آزمایشگاهی و هم در شبیه‌سازی عددی، عمدتاً ناشی از مکانیزم جدایش موضعی^{۱۸} بین صفحه پایه و سطح فونداسیون در ناحیه تحت کشش است. در چرخه‌های با دامنه بالا، پس از گسیختگی پیوند، یک فاصله در این ناحیه تشکیل می‌شود. در بارگذاری معکوس، بخش اولیه تغییر مجدداً

19- Frictional-Contact with Separation

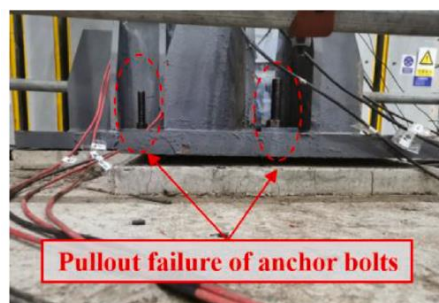
18- Gap Opening

هدف ارزیابی تأثیر سه پارامتر کلیدی بر پاسخ چرخه‌ای و شکل‌گیری حلقه‌های هیستریزیس طراحی شده‌اند. انتخاب این پارامترها براساس حساسیت بالای آن‌ها بر سختی

جانبی اولیه، ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی سیستم در مطالعات پیشین و نتایج آزمایشگاهی مشابه بوده است.



(ب)



(الف)

شکل ۸- مدل نهایی نمونه (الف) آزمایشگاهی و (ب) عددی [۲۰]

جدول ۳- پارامترها و ابعاد مدل‌های مورد مطالعه

شماره مدل	نام مدل	قطر پیچ مهرای (mm)	ضخامت صفحه پایه (mm)	نسبت بار فشاری محوری
۱	C-20-30-10	M20	۳۰	۰/۱
۲	C-20-30-20	M20	۳۰	۰/۲
۳	C-20-30-30	M20	۳۰	۰/۳
۴	C-20-40-10	M20	۴۰	۰/۱
۵	C-20-40-20	M20	۴۰	۰/۲
۶	C-20-40-30	M20	۴۰	۰/۳
۷	C-20-50-10	M20	۵۰	۰/۱
۸	C-20-50-20	M20	۵۰	۰/۲
۹	C-20-50-30	M20	۵۰	۰/۳
۱۰	C-30-30-10	M30	۳۰	۰/۱
۱۱	C-30-30-20	M30	۳۰	۰/۲
۱۲	C-30-30-30	M30	۳۰	۰/۳
۱۳	C-30-40-10	M30	۴۰	۰/۱
۱۴	C-30-40-20	M30	۴۰	۰/۲
۱۵	C-30-40-30	M30	۴۰	۰/۳
۱۶	C-30-50-10	M30	۵۰	۰/۱
۱۷	C-30-50-20	M30	۵۰	۰/۲
۱۸	C-30-50-30	M30	۵۰	۰/۳

محاسبه شدند. رابطه استاندارد محاسبه ضریب میرایی معادل ویسکوز (ξ_{eq}) براساس رابطه (۴) می‌باشد:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (۴)$$

که در آن، E_D کل انرژی اتلاف‌شده در یک چرخه کامل (مساحت حلقه هیستریزیس) و E_S انرژی کرنش الاستیک

در این مطالعه، ابتدا شاخص‌های کلیدی عملکرد سازه‌ای اتصالات صفحه پای ستون در ستون‌های CFST با مقطع صلیبی، شامل سختی سکانتی اولیه (K)، ضریب میرایی ویسکوز معادل (ξ) و لنگر خمشی نهایی (M)، براساس نتایج نمودارهای هیستریزیس مدل‌های عددی

متناظر (مساحت مثلث مربوط به حداکثر نیرو و جابه‌جایی شده‌اند، که بر پایه ترکیب پارامترهای قطر پیچ مهراری، در همان چرخه) است. ضخامت صفحه پایه و نسبت نیروی محوری به‌دست آمده‌اند. سختی سکانتی اولیه (K)، ضریب میرایی ویسکوز معادل (ب) و لنگر خمشی نهایی (M)، در جدول ۴ گزارش

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های مدل‌های مورد مطالعه

مدل عددی	ضریب میرایی ویسکوز معادل (درصد)	سختی سکانتی اولیه (کیلو نیوتن بر متر)	لنگر خمشی نهایی (کیلو نیوتن/متر)
C-20-30-10	۱۶/۹۸	۳۴/۷۵	۹۴۲/۰۲
C-20-30-20	۱۷/۵۵	۴۰/۲۸	۱۰۹۰/۷۵
C-20-30-30	۱۸/۱۲	۴۶/۰۶	۱۲۴۷/۱۸
C-20-40-10	۱۹/۲۳	۵۰/۸۸	۱۴۲۰/۰۱
C-20-40-20	۲۰/۰۲	۶۱/۲۱	۱۷۰۲/۴۸
C-20-40-30	۲۱/۴	۷۰/۶۳	۱۹۶۴/۴۵
C-20-50-10	۱۹/۷۸	۵۹/۳۱	۱۶۵۰/۰۱
C-20-50-20	۲۰/۵۱	۶۸/۶۵	۱۹۰۹/۴۷
C-20-50-30	۲۱/۹۹	۸۰/۶۸	۲۲۴۴/۰۴
C-30-30-10	۱۸/۰۵	۴۰/۲۵	۱۰۹۰/۰۳
C-30-30-20	۱۸/۸۷	۴۸/۱۴	۱۳۰۳/۵۸
C-30-30-30	۱۹/۶۴	۵۳/۹۹	۱۴۶۱/۸۸
C-30-40-10	۲۰/۳	۶۵/۶۳	۱۸۲۰/۰۲
C-30-40-20	۲۱/۰۷	۸۱/۷۶	۲۲۷۳/۹۱
C-30-40-30	۲۱/۹۵	۹۵/۱۰	۲۶۴۵/۱۳
C-30-50-10	۲۲/۰۳	۸۱/۲۵	۲۲۷۰/۰۱
C-30-50-20	۲۲/۹۱	۹۳/۵۱	۲۶۰۰/۹۳
C-30-50-30	۲۳/۸۸	۱۱۱/۷۸	۳۱۰۹/۰۲

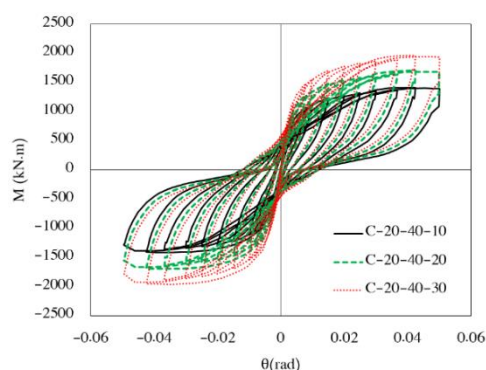
در شکل ۹- الف، برای مدل C-20-40-z در شکل ۹- ب نشان داده شده است.

به طور کلی، درصد تغییر شاخص‌ها با تغییر نیروی محوری از ۱۰ درصد به ۲۰ و ۳۰ درصد ظرفیت نهایی برای تمام ۱۸ مدل در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت نیروی محوری، سختی، میرایی و ظرفیت خمشی به شکل قابل‌توجهی بهبود یافته و نمودارهای هیستریزس پایدارتر می‌شوند. با این حال، نیروی محوری بالا علاوه بر اثرات مثبت بر کنترل تغییر شکل‌ها، می‌تواند باعث افزایش تنش موضعی در میل‌مهارها و لایه گروت

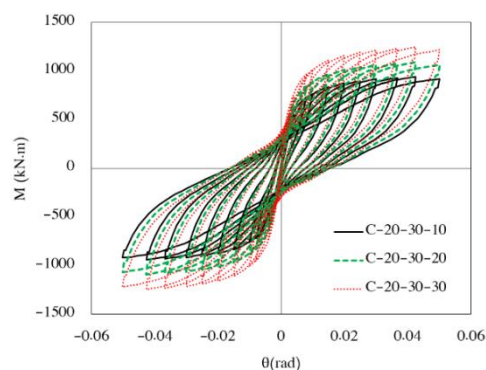
در ادامه، به حساسیت‌سنجی سه پارامتر اصلی (ضخامت صفحه پایه، نسبت نیروی محوری و قطر پیچ مهراری) پرداخته شده است تا تأثیر تغییرات هر پارامتر بر رفتار چرخه‌ای اتصال، از جمله توزیع تنش، اتلاف انرژی و پایداری هیستریزس، به صورت کمی و کیفی تحلیل گردد. این حساسیت‌سنجی با محاسبه تغییرات درصد شاخص‌ها در گروه‌های مدل انجام گرفته و نتایج آن در جداول و نمودارهای مربوطه ارائه شده است. در مورد تغییرات بار محوری، به عنوان نمونه منحنی هیستریزس در مدل C-20-30-z برای درصدهای مختلف بار محوری

شده و خطر آسیب یا گسیختگی موضعی را در شرایط

بارگذاری چرخه‌ای تشدید کند.



(ب)

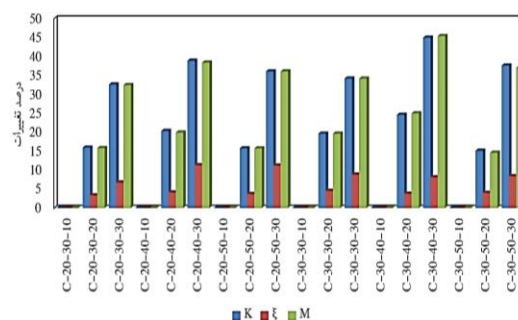


(الف)

شکل ۹- پاسخ هیستریزیس مدل‌های گروه (الف) C-20-30-Z و (ب) C-20-40-Z با تغییر نسبت نیروی محوری از ۰/۱ تا ۰/۳

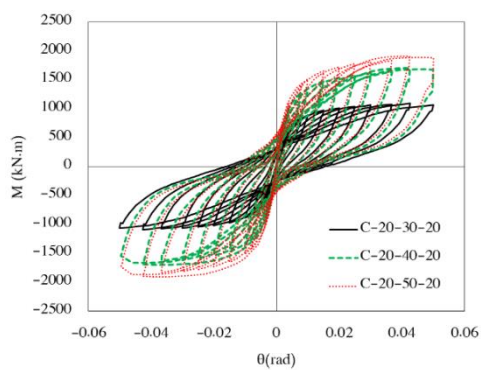
برای ضخامت‌های مختلف صفحه پای ستون در شکل ۱۱- الف، برای مدل C-20-X-20 در شکل ۱۱- ب نشان داده شده است. به طور کلی درصد تغییر شاخص‌ها با تغییر ضخامت صفحه پای ستون از ۳۰ تا ۵۰ میلیمتر برای تمام ۱۸ مدل در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. نتایج این روند، نشان دهنده گذار از رفتار انعطاف پذیر به صلب است؛ در صفحات ضخیم‌تر، تنش‌های فشاری در بتن هسته یکنواخت‌تر توزیع شده و اتلاف انرژی عمدتاً از طریق پلاستیک میل مهارها صورت می‌گیرد. با این حال، افزایش ضخامت تمرکز تنش بر میل مهارها و گروت را بالا می‌برد و خطر آسیب موضعی را افزایش می‌دهد. تحلیل درصدی تغییرات سختی، میرایی و ظرفیت خمشی نشان داد که میل مهارها در ضخامت بالاتر نقش گلوگاه سیستم را دارند و پایداری هیستریزیس را حفظ می‌کنند.

بنابراین انتخاب نسبت نیروی محوری بهینه، برای ایجاد تعادل میان ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و دوام اتصال، اهمیت بالایی در طراحی اتصالات ستون‌های CFST با مقطع صلیبی دارد.

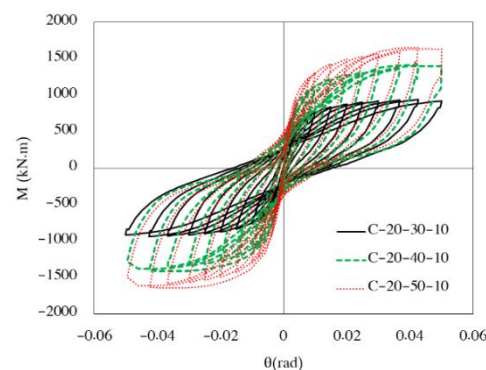


شکل ۱۰- درصد تغییر شاخص‌ها با تغییر نیروی محوری از ۱۰ درصد به ۲۰ و ۳۰ درصد ظرفیت نهایی

در مورد تغییرات ضخامت صفحه پای ستون، به عنوان نمونه منحنی هیستریزیس در مدل C-20-X-10



(ب)

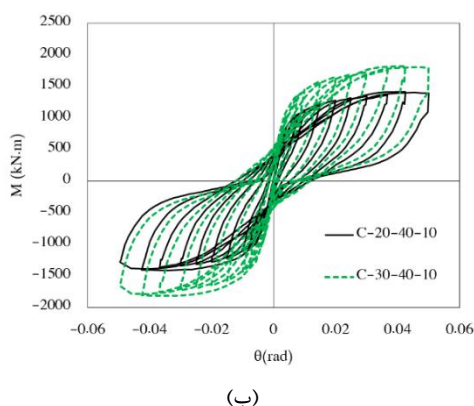


(الف)

شکل ۱۱- پاسخ هیستریزیس مدل‌های گروه (الف) C-20-X-10 و (ب) C-20-X-20 با تغییر ضخامت ۳۰ تا ۵۰ میلیمتر

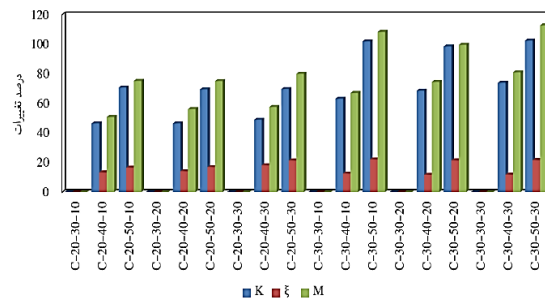
مختلف پیچ مهاری در شکل ۱۳- الف، برای مدل C-Y-40-10 در شکل ۱۳- ب نشان داده شده است.

به طور کلی، درصد تغییر شاخص‌ها با قطر پیچ میل مهار از M20 به M30 برای تمام ۱۸ مدل در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. افزایش قطر میل مهار باعث افزایش سختی سکانتی اولیه، ضریب میرایی ویسکوز معادل و ظرفیت خمشی نهایی می‌شود، زیرا انتقال تنش‌های کششی و برشی بهتر شده و محصورشدگی بتن تقویت می‌گردد.



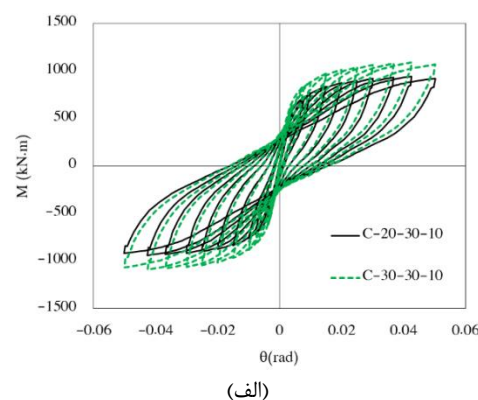
شکل ۱۳- پاسخ هیستریزس مدل‌های گروه صفحه ستون به ضخامت (الف) ۳۰ میلیمتر و (ب) ۴۰ میلیمتر و تغییر قطر پیچ از M20 به M30

با این حال، ضخامت صفحه و کیفیت گروت همچنان نقش محدودکننده دارند و تمرکز تنش موضعی را در صفحات نازک افزایش می‌دهند. کانتورهای تنش وان میس برای اعضای بتنی در شکل ۱۵- الف و برای اعضای فولادی سخت کننده، اعضای فولادی صفحه پای ستون و پیچ‌های مهاری در شکل ۱۵- ب نشان داده شده است. در اکثر مدل‌ها، تسلیم ابتدا در ناحیه خمش صفحه پای ستون، مجاورت سخت‌کننده‌ها و در دنباله آن، در پیچ‌های مهاری تحت کشش رخ داد. در مدل‌های با صفحه نازک‌تر، ناحیه تسلیم در صفحه گسترده‌تر بود. تسلیم در مقطع فولادی ستون (CFST) به طور گسترده رخ نداده و ظرفیت خمشی ستون محفوظ مانده است که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب اتصال در انتقال بار است.

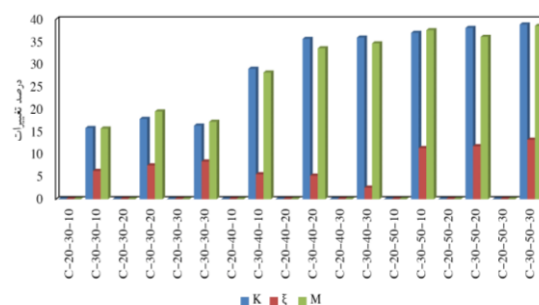


شکل ۱۲- درصد تغییر شاخص‌ها با تغییر ضخامت پای ستون از ۳۰ به ۴۰ و ۵۰ میلیمتر

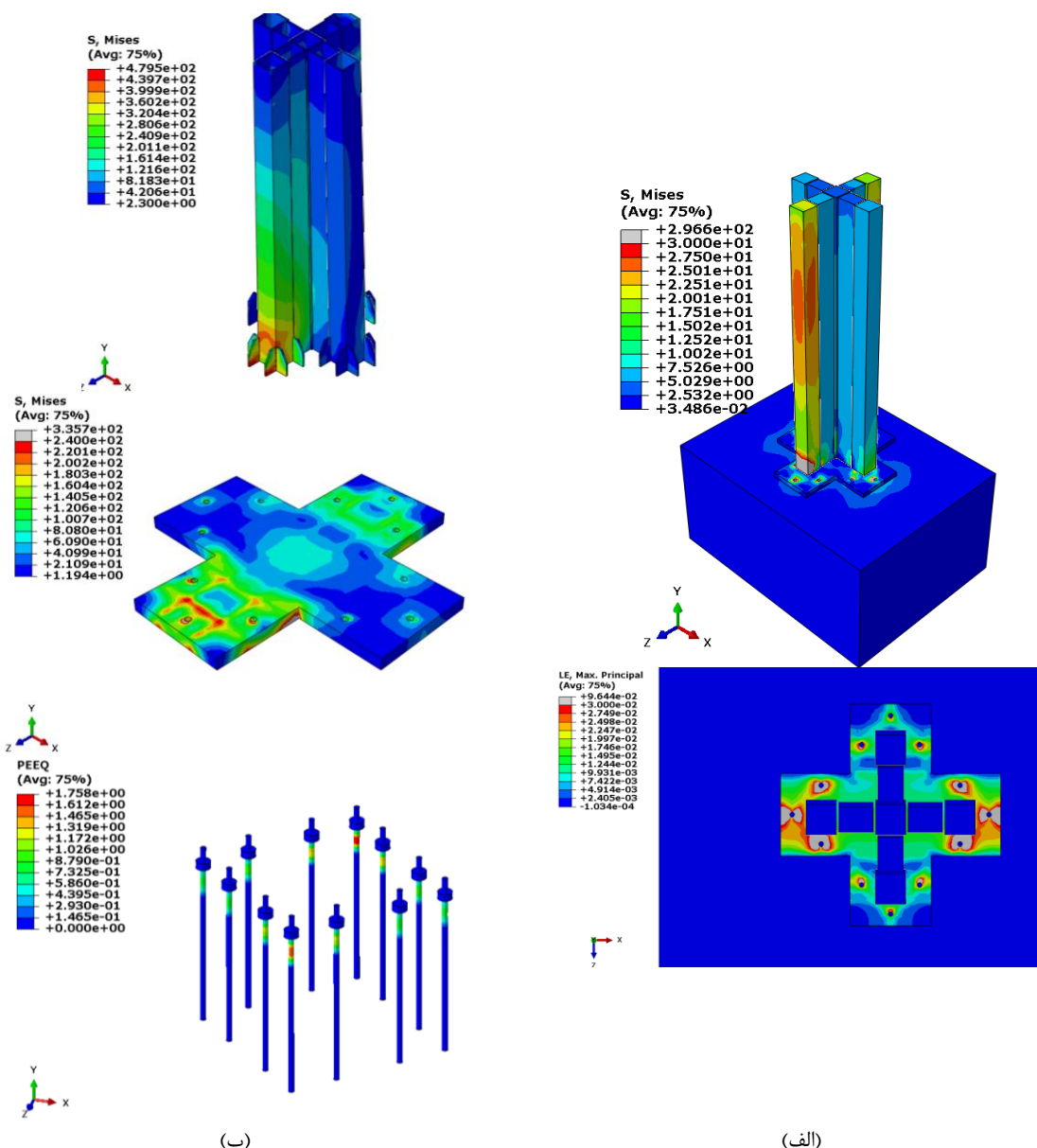
در مورد تغییرات قطر پیچ مهاری، به عنوان نمونه منحنی هیستریزس در مدل C-Y-30-10 برای قطرهای



میل‌مهاری کوچک (M20) موجب تمرکز تنش، توزیع ناهمگن فشار و خمش موضعی صفحه می‌شوند و عملکرد سازه‌های محدودتری ایجاد می‌کنند. در مقابل، میل‌مهاری بزرگتر (M30) سختی و ظرفیت گشتاور را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهند و نمودار هیستریزس پایدارتر و اتلاف انرژی بیشتر از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک میل‌مهاری ایجاد می‌کنند.



شکل ۱۴- درصد تغییر شاخص‌ها با تغییر قطر پیچ از M20 به M30



شکل ۱۵- کانتور تنش در اعضای (الف) بتنی (هسته بتنی و فونداسیون) و (ب) فولادی (پروفیل فولادی، صفحه پای ستون و میل مهار)

یابد. بدین ترتیب، سناریوهای عددی تعریف شده همسو با اصول طراحی لرزه‌ای و فلسفه «شکل‌پذیری پیش از شکست ترد» بوده و نتایج به‌دست آمده قابلیت اتکا و تعمیم برای شرایط عملی را دارند. نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مقایسه منحنی‌های هیسترزیس به شرح زیر است:

۱- تأثیر نسبت نیروی محوری

الف) افزایش نیروی محوری باعث افزایش قابل توجه در سختی سکانتی اولیه می‌شود که در بازه ۱۵ تا ۳۵ درصد تغییر یافته است. این اثر به دلیل

به‌طور مشخص، تغییر ضخامت صفحه پای ستون با تأکید بر کنترل محل تشکیل مفصل پلاستیک و جلوگیری از مکانیزم‌های شکست شکننده (مانند شکست برشی ناگهانی پیچ‌ها یا خردشدگی بتن) در نظر گرفته شد. همچنین بازه تغییر قطر پیچ‌ها با هدف ارزیابی ظرفیت برشی و کششی میل‌مهار و نقش آن در پخش تنش‌ها در بتن و صفحه در نظر گرفته شد. نسبت نیروی محوری نیز بر مبنای محدوده‌های قابل‌قبول در طراحی ستون‌های پرشده از بتن انتخاب گردید تا اثر واقعی محصورشدگی و توزیع تنش‌ها در مقطع CFST بازتاب

افزایش محصورشدگی بتن و بهبود توزیع تنش در مقطع صلیبی CFST است.

(ب) بیشترین تاثیر نیروی محوری در افزایش سختی مشاهده شده است و این پارامتر نقش کلیدی در بهبود عملکرد دینامیکی اتصال دارد.

(پ) با افزایش نیروی محوری، ضریب میرایی ویسکوز معادل نیز به میزان ۵ تا ۱۲٪ افزایش یافته که ناشی از بهبود اتلاف انرژی در بتن محصور و پیچها است.

(ت) لنگر خمشی نهایی نیز تا حدود ۲۰ تا ۴۰٪ افزایش یافت، که نشاندهنده تقویت ظرفیت باربری اتصال تحت بارگذاری ترکیبی است.

۲- تأثیر ضخامت صفحه پای ستون

(الف) افزایش ضخامت صفحه پای ستون به طور متوسط موجب افزایش ۳۰ تا ۷۵٪ در سختی سکانتی اولیه و همچنین افزایش ۱۰ تا ۲۰٪ در ضریب میرایی ویسکوز معادل شده است.

(ب) بیشترین افزایش ظرفیت خمشی نهایی (۵۰ تا ۸۰ درصد) نیز به دلیل ضخامت بیشتر صفحه رخ داده است که با افزایش ممان اینرسی صفحه و کاهش خمش موضعی مرتبط است.

(پ) ضخامت صفحه پای ستون علاوه بر افزایش سختی، نقش مهمی در کنترل تمرکز تنش و کاهش خطر کمانش صفحه ایفا می کند.

(ت) با ضخامت های بیشتر، مکانیزم های انتقال بار و توزیع کرنش در صفحه و بتن بهبود یافته و از تمرکز تنش در محل اتصال جلوگیری می شود.

۳- تأثیر قطر پیچ مهار

(الف) افزایش قطر پیچ از M20 به M30 تأثیر قابل توجهی در افزایش سختی سکانتی اولیه (بین ۱۵ تا ۴۰٪) و ضریب میرایی ویسکوز معادل (بین ۶ تا ۱۳٪) داشته است.

(ب) بیشترین افزایش ظرفیت خمشی نهایی در بازه ۱۵ تا ۳۸٪ برای افزایش قطر پیچ میل مهار مشاهده شده که ناشی از انتقال بهتر تنش های کششی و برشی و توزیع یکنواخت تر کرنش ها در اتصال است.

(پ) این افزایش به دلیل ظرفیت بالاتر برشی و کششی میل مهارهای بزرگتر برای انتقال بهتر تنش های خمشی و برشی و توزیع یکنواخت تر کرنش ها در مقطع می باشد.

(ت) بزرگتر شدن قطر پیچ مهار بیشترین تأثیر را بر ضریب میرایی ویسکوز معادل و اتلاف انرژی در چرخه های بارگذاری داشته است.

(ث) با افزایش قطر پیچ، سختی اتصال افزایش یافته ولی کاهش شکل پذیری و افزایش تمرکز تنش ها در بتن زیر صفحه پای ستون مشاهده شده است که خطر خردشدگی را افزایش می دهد.

۴- مقایسه کلی پارامترها

(الف) بیشترین تأثیر در افزایش سختی سکانتی اولیه مربوط به ضخامت صفحه پای ستون است (تا ۷۵٪)، پس از آن نسبت نیروی محوری (تا ۳۵٪) و در نهایت قطر پیچ مهار (تا ۴۰٪) قرار دارند.

(ب) بیشترین افزایش در ظرفیت خمشی نهایی و ضریب میرایی ویسکوز معادل با افزایش ضخامت صفحه پای ستون حاصل شده است (تا ۸۰٪ ظرفیت و بیش از ۲۰٪ میرایی).

(پ) قطر پیچ مهار بیشترین تأثیر را بر اتلاف انرژی (ضریب میرایی) داشته و به دلیل بهبود عملکرد پیچها در انتقال بار، نقش کلیدی در شکل پذیری اتصال دارد.

(ت) نسبت نیروی محوری نیز علاوه بر افزایش سختی، باعث بهبود محصورشدگی و مقاومت بتن شده ولی تأثیر کمتری نسبت به ضخامت صفحه در ظرفیت خمشی نهایی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌های عددی جامعی برای تحلیل رفتار هیستریزیس اتصال صفحه پای ستون CFST با مقطع صلیبی تحلیل شدند. به طور کلی، ضخامت صفحه پای ستون بیشترین تاثیر را در افزایش سختی، مقاومت خمشی نهایی و ضریب میرایی دارد که به دلیل افزایش ممان اینرسی و کاهش خمش موضعی صفحه است. قطر پیچ مهاري تاثیر مهمی بر شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در اتصال دارد، ولی افزایش آن باید با ملاحظات مربوط به تمرکز تنش و خطر خردشدگی بتن همراه باشد. نیروی محوری با تقویت محصورشدگی بتن، بهبود توزیع تنش و افزایش سختی اتصال را به همراه دارد ولی تاثیر آن کمتر از ضخامت صفحه پای ستون است. مکانیزم شکست به صورت تسلیم صفحه و پیچ‌ها به ترتیب تحت تاثیر ضخامت صفحه و قطر پیچ مهاري شکل می‌گیرد. در نهایت، طراحی بهینه اتصالات CFST باید با در نظر گرفتن این پارامترها و تاثیرات متقابل آنها، به منظور حصول بالاترین ظرفیت باربری و شکل‌پذیری و در عین حال شناسایی الگوی تسلیم ترجیحی و کنترل مکانیزم خرابی به سمت رفتار شکل‌پذیر (تسلیم فولاد) و دوری از رفتار شکننده باشد.

۵- روند تشکیل مکانیزم و توزیع مفصل‌ها

الف) با افزایش ضخامت صفحه، ابتدا صفحه پای ستون تحت خمش و سپس پیچ‌های مهاري تحت برش و کشش قرار می‌گیرند و نهایتاً توزیع کرنش و تنش در مقطع متعادل می‌شود.

ب) قطر پیچ مهاري نقش کنترل‌کننده در ظرفیت برشی و کششی دارد و افزایش قطر منجر به کاهش تمرکز تنش‌های موضعی و افزایش مقاومت اتصال می‌شود.

پ) افزایش نیروی محوری باعث تقویت محصورشدگی بتن و بهبود رفتار صفحه و پیچ‌ها می‌شود، اما تنش‌های اضافی در بتن زیر صفحه پای ستون ممکن است باعث خطر خردشدگی شود.

۶- مکانیزم شکست

الف) مکانیزم‌های شکست شامل تسلیم صفحه پای ستون، تسلیم یا شکست پیچ‌های مهاري، شکست برشی یا بیرون‌کشیدگی پیچ‌ها، و شکست بتن زیر صفحه است.

ب) در مدل‌های با ضخامت صفحه پای ستون کمتر، تسلیم صفحه پیش از تسلیم پیچ‌ها رخ می‌دهد، ولی با افزایش ضخامت، پیچ‌ها زودتر از صفحه تسلیم می‌شوند.

References

- [1] Roller K, Billah AHMM, Bin Kabir MA, Elshaer A, Iqbal A. Experimental investigation of exposed column base plate connections subjected to combined axial load and biaxial bending. *Engineering Structures*. 2025; 342: 120890. doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120890
- [2] Jiang S, Billah AHMM. Finite element simulation and parametric study of exposed column base plate connections under axial compression and Bi-directional lateral loading. *Journal of Building Engineering*. 2025; 111: 113188. doi: 10.1016/j.job.2025.113188
- [3] Hasan MM, Tao Z, Ghafar WA, Huangfu S-E, Zhang Z. Investigating the axial compressive behavior of cruciform CFST columns: An experimental study. *Structures*. 2024; 69: 107538. doi: 10.1016/j.istruc.2024.107538
- [4] Wu L, Han G, Oluwadahunsi S, Sun Y. Compressive capacity of cruciform-shaped concrete-filled steel tubes. *Structures*. 2024; 69: 107592. doi: 10.1016/j.istruc.2024.107592
- [5] Tao Z, Hasan MM, Han D, Qin Q, Abdul Ghafar W. Study of the Axial Compressive Behaviour of Cross-Shaped CFST and ST Columns with Inner Changes. *Buildings*. 2023; 13(2): 423. doi: 10.3390/buildings13020423
- [6] Zheng Y, Lin Y, Ma S. Axial compressive behavior of stiffened and multi-cell cross-shaped CFST stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 213: 108399. doi: 10.1016/j.jcsr.2023.108399
- [7] Genikomsou AS, Polak MA. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged

- plasticity model in ABAQUS. Engineering structures. 2015; 98: 38-48. doi: **10.1016/j.engstruct.2015.04.016**
- [8] Alfara B, López-Almansa F, Oller S. New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures. Engineering Structures. 2017; 132: 70-86. doi: **10.1016/j.engstruct.2016.11.022**
- [9] Popovics S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. Cement and concrete research. 1973; 3(5): 583-599. doi: **10.1016/0008-8846(73)90096-3**
- [10] Sanz LP. Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi and Krishnan. Journal of American Concrete Institute. 1964.
- [11] Balan TA, Spacone E, Kwon M. A 3D hypoplastic model for cyclic analysis of concrete structures. Engineering Structures. 2001; 23(4): 333-342. doi: **10.1016/S0141-0296(00)00048-1**
- [12] Han LH, Wang WD, Zhao XL. Behaviour of steel beam to concrete-filled SHS column frames: Finite element model and verifications. Engineering Structures. 2008; 30(6): 1647-1658. doi: **10.1016/j.engstruct.2007.10.018**
- [13] Han LH, Yao GH, Tao Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. Thin-Walled Structures. 2007; 45(1): 24-36. doi: **10.1016/j.tws.2007.01.008**
- [14] Mohurd A. Code for design of concrete structures GB 50010-2010. China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese), 2010.
- [15] Wang M, Yang W, Shi Y, Xu J. Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials. Journal of Constructional Steel Research. 2015; 107: 194-210. doi: **10.1016/j.jcsr.2015.01.007**
- [16] You YC, Lee D. Effect of anchors on the seismic performance of exposed column-base plate weak-axis connections. Journal of Building Engineering. 2020; 32: 101803. doi: **10.1016/j.jobe.2020.101803**
- [17] You YC, Lee D. Development of improved exposed column-base plate strong-axis joints of low-rise steel buildings. Journal of Constructional Steel Research. 2020; 169: 106062. doi: **10.1016/j.jcsr.2020.106062**
- [18] Aichouche MEA, Abidelah A, Bouchair A, Kerdal DED, Seghir A, and Vatansever C. Effects of stiffeners on anchor rod flexural strength in column base-plate connections. Journal of Constructional Steel Research. 2024; 222: 108983. doi: **10.1016/j.jcsr.2024.108983**
- [19] AISC. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-22). American Institute of Steel Construction, 2022; 1-460.
- [20] Chen Z, Xu J, Zhou T, and Su J. Seismic research on column base joint of L-shaped CFST columns under cyclic loading. Structures. 2022; 45: 1212-1224. doi: **10.1016/J.ISTRUC.2022.09.095**