

Parametric and Statistical Analysis of Bolted Column Base Connections with Yielding Angles under Cyclic Loading about the Weak Axis

Iman Aghaei¹, Mahmoud Miri², Hamed Ghohani Arab^{3*}

1- Ph.D. Student, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Professor, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

3- Associate Professor, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT

Base plate connections are critical in transferring axial and lateral loads from steel columns to foundations, especially during seismic events. Recently, replaceable low-damage connections have gained attention for enhancing structural resilience. This study explores the seismic behavior of a bolted base connection with yielding angles that eliminate on-site welding and reduce column damage. The methodology involves three stages: (1) validating a finite element (FE) model using experimental data, (2) performing a parametric study via the Taguchi Design of Experiment (DoE) method to examine the effects of angle thickness, axial load level, and anchor bolt distance from the column flange, and (3) applying analysis of variance (ANOVA) and multiple regression to identify significant parameters and develop a predictive flexural capacity model. Results reveal that angle thickness is the most influential factor. All configurations showed semi-rigid to flexible rotational behavior, with notable energy dissipation under cyclic loading. The close agreement between numerical and statistical outcomes confirms both the accuracy of the FE model and the efficiency of the Taguchi method. The proposed regression equation serves as a practical tool for estimating connection strength in performance-based design. This research supports the development of advanced low-damage connection design strategies for steel structures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 July 2025

Revise Date: 01 September 2025

Accept Date: 20 September 2025

Keywords:

Column Base Connections
Yielding Angle
Finite Element Analysis (FEA)
Taguchi Method
Cyclic Loading

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.532398.3766

*Corresponding author: Hamed Ghohani Arab

Email address: Ghohani@eng.usb.ac.ir

تحلیل پارامتریک و آماری اتصال پایه ستون پیچ شده با نبشی تسلیم شونده تحت بارگذاری چرخه‌ای حول محور ضعیف

ایمان آقائی^۱، محمود میری^۲، حامد قوهانی عرب^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

اتصالات پایه ستون، به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی در سیستم‌های سازه‌های فولادی، نقش کلیدی در انتقال بارهای ثقلی و جانبی به فونداسیون ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، توجه به طراحی اتصالات کم‌آسیب و قابل تعویض، به‌ویژه در شرایط بارگذاری چرخه‌ای، افزایش یافته است. در این راستا، پژوهش حاضر به بررسی رفتاری یک نوع اتصال پایه ستون پیچ‌شونده با نبشی تسلیم‌شونده اختصاص دارد که با حذف جوشکاری در محل، ضمن تسهیل نصب، موجب کاهش آسیب‌های موضعی در ستون می‌شود. مطالعه حاضر شامل سه مرحله اصلی است: نخست، مدل اجزای محدود اتصال بر اساس داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. سپس، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوجی، تأثیر سه پارامتر کلیدی شامل ضخامت نبشی، نیروی محوری و فاصله میل‌مه‌ار بر رفتار چرخه‌ای اتصال مورد بررسی عددی قرار گرفت. در ادامه، تحلیل واریانس و مدل رگرسیونی برای ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها و پیش‌بینی پاسخ عملکردی توسعه داده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که ضخامت نبشی مهم‌ترین عامل مؤثر بر ظرفیت خمشی اتصال است. اتصال در تمامی ترکیب‌ها رفتار مفصلی از خود نشان داده و انرژی قابل توجهی را در چرخه‌های بارگذاری مستهلک نموده است. تطابق نزدیک بین نتایج عددی و آماری، دقت مدل‌سازی و کارآمدی تحلیل تاگوجی را تأیید می‌کند. همچنین، مدل رگرسیونی توسعه‌یافته، ابزار ساده و مؤثری برای برآورد ظرفیت اتصال در طراحی عملکردی ارائه می‌دهد. دستاوردهای این پژوهش، می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای طراحی اتصالات لرزه‌ای کم‌آسیب و ارتقاء آیین‌نامه‌های مرتبط با طراحی سازه‌های فولادی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: اتصال پایه ستون، نبشی تسلیم‌شونده، تحلیل اجزای محدود، روش طراحی آزمایش تاگوجی، بارگذاری چرخه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.532398.3766	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.532398.3766	۱۴۰۵/۰۲/۳۱	۱۴۰۴/۰۶/۲۹	۱۴۰۴/۰۶/۲۹	۱۴۰۴/۰۶/۱۰	۱۴۰۴/۰۴/۲۱
				*نویسنده مسئول:		
				حامد قوهانی عرب		
				Ghohani@eng.usb.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

اتصالات پایه ستون از مؤلفه‌های حیاتی در سازه‌های فولادی به‌شمار می‌روند که وظیفه‌ی انتقال بارهای ثقلی، جانبی و دینامیکی به فونداسیون را برعهده دارند. علاوه بر این، در مراحل اولیه‌ی ساخت، نقش مهمی در تثبیت موقت ستون‌ها ایفا می‌کنند و عملکرد صحیح آن‌ها، شرط لازم برای تأمین ایمنی، پایداری و دوام کل سازه محسوب می‌شود [۱]. رایج‌ترین نوع اتصال پایه در سازه‌های فولادی، اتصال صفحه‌پایه جوش‌شده است که به‌دلیل سادگی اجرا و مفهومی، سال‌هاست به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیستم، انتهای ستون به یک صفحه فولادی جوش می‌شود و این صفحه به وسیله‌ی میل‌مهارها به فونداسیون متصل می‌گردد [۲ و ۳].

با وجود تدوین آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های متعدد برای طراحی این نوع اتصال، مطالعات تجربی و میدانی گزارش داده‌اند که اجرای این اتصالات با چالش‌هایی جدی همراه است [۴]. از جمله این چالش‌ها می‌توان به شکل‌گیری تنش‌های پسماند، تأثیرات منفی حرارتی ناشی از جوشکاری، انحرافات هندسی ستون و دشواری‌های کنترل کیفیت در محل اشاره کرد. این عوامل منجر به افزایش هزینه اجرا، کاهش اطمینان‌پذیری سازه‌ای و پیچیدگی‌های نصب در شرایط کارگاهی شده‌اند [۵].

در پاسخ به این محدودیت‌ها، پژوهش‌های متعددی به بررسی و توسعه راهکارهای نوآورانه در طراحی اتصالات پایه ستون پرداخته‌اند. از جمله این راهکارها می‌توان به اتصالات اصطکاکی [۶-۹]، استفاده از کابل‌های پیش‌تنیده [۱۰ و ۱۱] و اتصالات با اجزای تسلیم‌شونده اشاره کرد [۱۲-۱۵]. در اتصالاتی که از نبشی‌های تسلیم‌شونده بهره می‌برند، ستون به‌جای جوشکاری، به‌وسیله‌ی یک جفت نبشی از طریق پیچ به فونداسیون متصل می‌شود. این رویکرد علاوه بر حذف اثرات مخرب ناشی از جوش، موجب تسهیل اجرا، کاهش پیچیدگی نصب، و افزایش قابلیت کنترل کیفیت در کارخانه و کارگاه می‌گردد. یافته‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که این نوع اتصال، تحت ترکیب نیروی محوری و خمش حول محور قوی، قادر است تا زاویه چرخش 0.06 رادیان، رفتار پایدار و شکل‌پذیر از خود نشان دهد [۱۶ و ۱۷]. با این حال، بررسی عملکرد این سیستم تحت خمش حول محور ضعیف، که در بسیاری از شرایط بارگذاری چرخه‌ای رخ می‌دهد، هنوز محدود بوده و به‌عنوان یک خلأ پژوهشی قابل توجه باقی مانده است.

در همین راستا، برزویی^۱ [۱۸] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، عملکرد اتصالات پایه ستون کم‌آسیب را با تمرکز بر نبشی‌های تسلیم‌شونده و تأثیر ضخامت و نیروی محوری مورد ارزیابی قرار داد. همچنین، هو و همکاران^۲ [۱۶ و ۱۷] اتصالات پیچی جدیدی را با استفاده از نبشی و ورق‌های برش‌گیر برای ستون‌های مقطع بال‌پهن طراحی کرده و پایداری هیستریزس، جذب انرژی مطلوب و قابلیت تعویض‌پذیری اجزا را گزارش کردند. وانگ و همکاران^۳ [۱۳] سیستم پایه ستون خودمرکزگرایی را با پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار ارائه دادند که امکان تمرکز آسیب در اجزای قابل تعویض و کاهش تغییرمکان پسماند را فراهم می‌سازد. لی و همکاران^۴ [۱۲] نیز در مطالعه‌ای، اتصال لغزشی با صفحات قابل تعویض را معرفی و اثربخشی آن را از نظر دقت پیش‌بینی ظرفیت خمشی و سختی مورد تأیید قرار دادند. مرور این ادبیات نشان می‌دهد که اغلب مطالعات یا به تحلیل‌های عددی ساده و تک‌متغیره بسنده کرده‌اند، یا صرفاً به روش‌های آزمایشگاهی محدود بوده‌اند [۱۹ و ۲۰].

در حالی که عملکرد واقعی اتصالات، تابعی از اثر متقابل چندین عامل کلیدی نظیر ضخامت اجزا، هندسه اتصالات، نیروی محوری و موقعیت میل‌مهارها است، مطالعات جامع که بتوانند به‌صورت سیستماتیک اثر متقابل این پارامترها را ارزیابی کنند، هنوز بسیار محدودند. افزون بر این، در بسیاری از تحقیقات پیشین، استفاده از روش‌های آماری برای استخراج الگوهای رفتاری و تدوین مدل‌های پیش‌بینی و نیز تحلیل میزان تأثیر هر پارامتر به‌طور محدود مورد توجه قرار گرفته است.

¹ Borzouie

² Hou & et al.

³ Wang & et al.

⁴ Li & et al.

پژوهش حاضر در راستای پر کردن این خلأ علمی، با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش‌ها^۵، به تحلیل پارامتریک و آماری اتصال پایه ستون پیچی با اجزای تسلیم‌شونده پرداخته است. در این راستا، سه پارامتر کلیدی شامل ضخامت نبشی، نیروی محوری و فاصله میل‌مه‌ار از لبه ستون، هرکدام در سه سطح، مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا علاوه بر تحلیل مستقیم، امکان مطالعه اثرات متقابل نیز فراهم گردد. روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد، کاهش چشمگیری در تعداد تحلیل‌ها ایجاد کرده و به حفظ دقت آماری و صرفه‌جویی در منابع محاسباتی منجر شده است.

جهت ارزیابی میزان تأثیرگذاری هر یک از متغیرها، از تحلیل واریانس^۶ بهره‌گرفته شده است. همچنین، به منظور ایجاد مدلی پیش‌بین برای استفاده در طراحی مهندسی، معادله‌ای رگرسیونی جهت تخمین ظرفیت خمشی بیشینه اتصال پایه استخراج گردیده است. تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام شده‌اند.

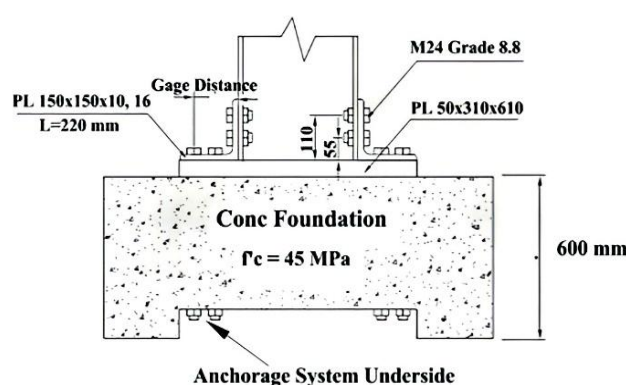
هدف اصلی این پژوهش، بررسی رفتار چرخه‌ای اتصال پایه ستون پیچ‌شونده در شرایط بارگذاری ترکیبی شامل نیروی محوری و خمش حول محور ضعیف با رویکردی آماری و عددی است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای طراحی سیستم‌های سازه‌ای مقاوم در برابر زلزله و توسعه آیین‌نامه‌های طراحی نوین در زمینه اتصالات کم‌آسیب مورد استفاده قرار گیرند.

۲- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

۲-۱- مدل‌سازی نمونه آزمایشگاهی

شکل ۱ جزئیات نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد بررسی توسط برزویی [۱۸] را نمایش می‌دهد. این نمونه شامل ستونی با مقطع I شکل از نوع یونیورسال^۷ (310UB46.2) و یک جفت نبشی است که بدون استفاده از جوش، تنها با پیچ‌های پر مقاومت به بال‌های ستون و ورق کف ستون متصل شده‌اند. در مدل اجزای محدود، فونداسیون به صورت یک صفحه فولادی صلب با شرایط مرزی گیردار در سطح زیرین مدل‌سازی گردید.

بر اساس نتایج گزارش‌شده از آزمایش، تغییر شکل نسبی بین نبشی‌ها و کف ستون ناچیز بوده است. در نتیجه، برای ساده‌سازی مدل عددی، اتصال بین نبشی‌ها و کف ستون به صورت قید Tie در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور جلوگیری از پیش‌شستون ناشی از جابجایی جانبی، درجه‌ی آزادی انتقالی در انتهای آزاد ستون حول محور قوی مقید گردید.



شکل ۱: اجزای اتصال پایه ستون با نبشی تسلیم‌شونده در مدل آزمایشگاهی [۱۸]

^۵ Taguchi

^۶ Analysis of Variance (ANOVA)

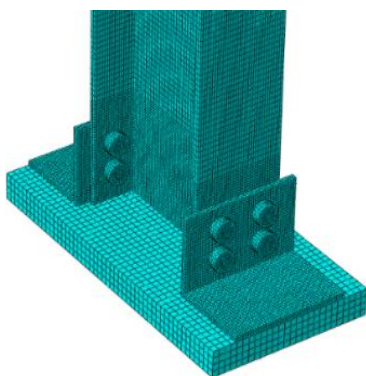
^۷ Universal section

مدل اجزای محدود با استفاده از المان‌های جامد هشت‌گره‌ی کاهش‌یافته (C3D8R) در محیط نرم‌افزار آباکوس [۲۱] ایجاد شد. تحلیل عددی به صورت شبه‌استاتیکی و در قالب حلگر ضمنی^۸ انجام گرفت تا از اثرات ناخواسته دینامیکی در فرآیند بارگذاری جلوگیری شود.

در مدلسازی اتصال پایه ستون، اندازه مش‌های مختلف با هدف کاهش زمان محاسبات و حفظ دقت شبیه‌سازی انتخاب شده است. اندازه مش در نبشی‌ها و محل پیچ‌ها برابر با ۴ میلی‌متر تعیین شده، در حالی که اندازه مش ستون به صورت تدریجی و متغیر از ۵ میلی‌متر در نزدیکی ناحیه اتصال تا ۱۰ میلی‌متر در محل اعمال بار تغییر یافته است. انتخاب مش ۴ میلی‌متر برای نواحی بحرانی مدلسازی، توازنی مناسب میان دقت لازم برای ثبت رفتار پلاستیک نبشی و هزینه محاسباتی ایجاد کرده است.

تحلیل حساسیت مش نشان داده است که مش‌های بزرگ‌تر قادر به توصیف دقیق تغییرشکل‌های پلاستیک نبوده و همگرایی مطلوب حاصل نمی‌شود. از سوی دیگر، مش‌های ریزتر با افزایش قابل توجه زمان محاسبات از نظر اقتصادی به صرفه نیستند. بنابراین، مش ۴ میلی‌متر بهترین گزینه برای دستیابی به صحت نتایج و بهینه‌سازی هزینه محاسباتی تلقی شده است. این انتخاب همچنین در سازگاری نزدیک نتایج مدل عددی با داده‌های تجربی مؤثر بوده است.

با توجه به تمرکز تنش و کرنش‌های پلاستیک در ضخامت نبشی‌ها، برای افزایش دقت مدلسازی در این ناحیه، از دو لایه مش در راستای ضخامت استفاده شد (مطابق با شکل ۲). این اقدام موجب افزایش دقت در ثبت توزیع تنش و کرنش در ناحیه‌ی بحرانی اتصال گردید.



شکل ۲: مش‌بندی مدل عددی

برای مدلسازی رفتار مصالح، از مدل سخت‌شدگی ایزوتروپیک دوخطی استفاده شد. مقادیر تنش تسلیم و مقاومت نهایی اجزا مطابق با داده‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شدند [۱۸]. بر این اساس، تنش تسلیم فولاد برابر با ۳۲۰ مگاپاسکال و مدول یانگ معادل ۲۱۰ گیگاپاسکال تعریف گردید. لازم به ذکر است که قبل از شروع فرآیند مدلسازی عددی، منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی^۹ استخراج شده از آزمایش‌ها به منحنی‌های تنش-کرنش واقعی^{۱۰} تبدیل شدند. این تبدیل به منظور وارد کردن مقادیر صحیح و قابل اتکا به نرم‌افزار آباکوس ضروری است، زیرا نرم‌افزار برای شبیه‌سازی دقیق رفتار ماده در ناحیه پلاستیک به داده‌های واقعی نیاز دارد. روابط ریاضی مشخصی برای تبدیل تنش و کرنش مهندسی به مقادیر واقعی به کار گرفته شده است که دقت مدل را در پیش‌بینی رفتار غیرخطی ماده بهبود می‌بخشد.

با توجه به اهمیت اثر متقابل بین اجزای اتصال در عملکرد چرخه‌ای آن، تماس بین سطوح به صورت Surface-to-Surface Contact مدلسازی شد. برای تماس بین نبشی‌ها و سطح ورق پایه، ضریب اصطکاک برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شد. همچنین، در راستای

^۸ Implicit solver

^۹ Engineering Stress-Strain

^{۱۰} True Stress-Strain

عمودی از شرط تماس سخت^{۱۱} استفاده شد تا از هم پوشانی یا عبور اجزا از مرز یکدیگر جلوگیری شود. در عین حال، امکان جداسازی سطوح در حضور نیروهای کششی مجاز در تحلیل تعریف گردید.

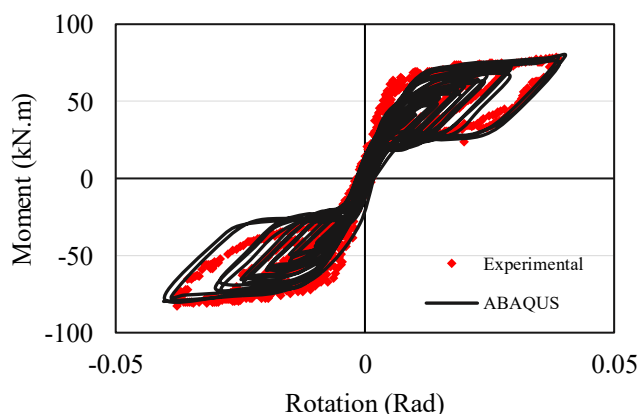
فرآیند بارگذاری در دو گام انجام شد:

- گام اول: بار عمودی یکنواخت به مقدار ۳۲۰ کیلونیوتن به سطح فوقانی ستون اعمال گردید. این مقدار معادل ۲۰ درصد ظرفیت محوری مقطع ستون بود و به منظور شبیه سازی اثر فشار محوری اولیه در اتصال لحاظ شد.
- گام دوم: بارگذاری افقی به صورت چرخه ای و مطابق با پروتکل آزمون تجربی به انتهای آزاد ستون اعمال گردید. حداکثر میزان دریافت در این بارگذاری برابر با ۰/۰۴ رادیان در نظر گرفته شد.

در مطالعه آزمایشگاهی مرجع [۱۸]، نمونه چهارم (Model No. 4) با نبشی هایی به ضخامت ۱۰ میلی متر و فاصله مرکز میل مهارها از ستون معادل ۱۱۰ میلی متر مورد بررسی قرار گرفته است. این نمونه به عنوان مدل مرجع آزمایشگاهی انتخاب گردیده و به دلیل وجود نیروی محوری در شرایط بارگذاری آن، مبنای تحلیل های عددی در پژوهش حاضر نیز قرار داده شد. تمرکز اصلی مطالعه بر تحلیل رفتار این نمونه مرجع است تا امکان مقایسه مستقیم و همخوانی دقیق بین نتایج عددی و داده های آزمایشگاهی فراهم گردد. جزئیات کامل تر مربوط به مشخصات هندسی، مصالح و روش آزمون در مرجع مذکور ارائه شده اند.

۲-۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود

در شکل ۳، نمودارهای هیستریزس مدل سازی اجزای محدود و داده های آزمایشگاهی نشان داده شده است. در جدول (۱) مقادیر لنگر در نقاط پیک از زاویه چرخش ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ رادیان آورده شده است. انطباق زیاد نتایج مدل سازی عددی با داده های آزمایشگاهی با اختلاف کمتر از ۷ درصد در مقادیر اوج، دقت و صحت مدل عددی را تأیید می کند. البته این میزان اختلاف در مقادیر لنگر و شیب نمودار هیستریزس ناشی از ساده سازی های انجام شده در فرآیند مدل سازی و نادیده گرفتن ویژگی های آسیب دیدگی و شکست در اجزا می باشد. این همخوانی حاکی از سازگاری فرضیات مدل سازی، از جمله خواص مواد، شرایط مرزی و تماس های بین اجزا، با شرایط واقعی است. با وجود این، پاسخ کلی مدل عددی با روند و دامنه ی نتایج تجربی کاملاً سازگار است. پیکربندی هندسی و مشخصات مصالح ستون و اتصال بر اساس نمونه مرجع آزمایشگاهی انتخاب شد تا امکان اعتبارسنجی مستقیم مدل اجزای محدود فراهم گردد. در فرآیند صحت سنجی، نیروی محوری به صورت ثابت اعمال شد چرا که هدف این مرحله تطبیق پاسخ عددی با شرایط تجربی مرجع بود؛ در آزمون مرجع نیز بار محوری به عنوان نیروی ثقلی ثابت اعمال شده بود. نگه داشتن بار محوری ثابت در مرحله صحت سنجی امکان جداسازی اثر خطاهای مدل سازی (خواص تماس، مش بندی، مدل مصالح و نحوه اعمال بار جانبی چرخه ای) از اثرات تغییرات در بار محوری را فراهم می آورد.



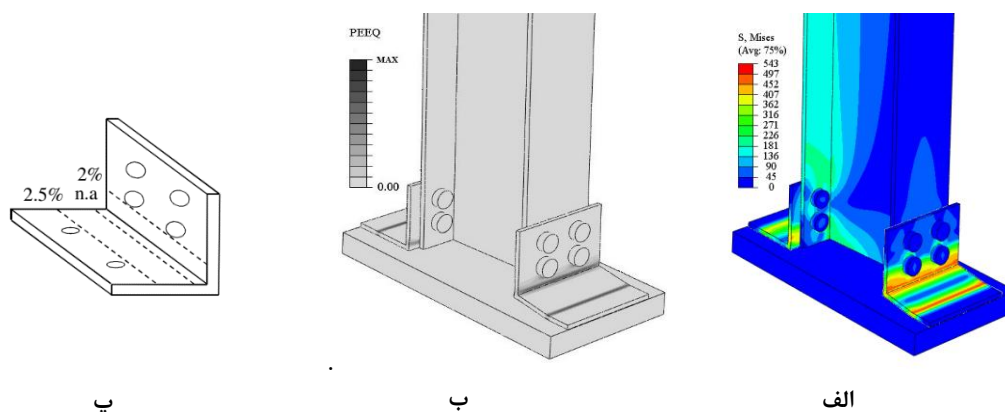
شکل ۳: منحنی هیستریزس (لنگر - دوران) مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود

¹¹ Hard Contact

جدول ۱: مقایسه عملکرد لنگر خمشی در مدل آزمایشگاهی و تحلیل عددی

Rotation (Rad)	Experimental: Moment (kN.m)	ABAQUS: Moment (kN.m)	Error percentage
0.01	68	63	7
0.015	69.5	65	6.5
0.2	71.2	68	4.5
0.3	73.4	70.5	4
0.4	78.95	78.9	0.06

شکل ۴ توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل^{۱۲} را در مدل عددی ارائه می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، در ناحیه اتصال دو خط ممتد و تیره قابل تشخیص است که نشان‌دهنده تمرکز کرنش پلاستیک و آغاز فرآیند تسلیم مصالح در این بخش‌ها می‌باشد. این نواحی دقیقاً با مناطقی انطباق دارند که در آن‌ها تنش فون میسز (شکل ۴-الف) به مقادیر بحرانی نزدیک شده و منجر به ایجاد گسیختگی یا پلاستیک‌شدگی موضعی می‌گردد. مقایسه این نتایج با شکل ۴-پ، که خطوط آن محدوده جاری شدن نبشی‌ها در مطالعات آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد، نشان می‌دهد که این تمرکز تغییر شکل‌ها عمدتاً در ناحیه نبشی‌های فولادی متمرکز است.

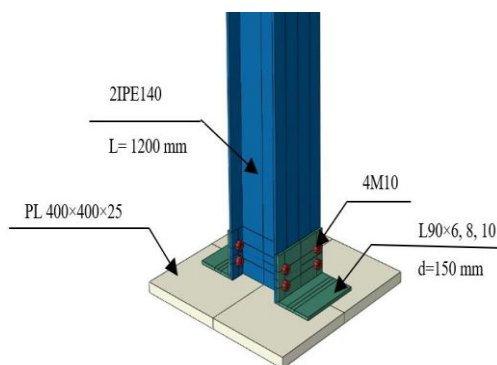


شکل ۴: الف) توزیع تنش فون میسز؛ ب) کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) مدل اجزای محدود و پ) ناحیه جاری شدن در مطالعه آزمایشگاهی [۱۸]

۲-۳- مدل اجزای محدود جهت مطالعه عددی

با توجه به کاربرد گسترده‌ی ستون‌های مرکب در سازه‌های فولادی، در این مطالعه از مدلی با مقطع مرکب 2IPE140 و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر (فاصله بین ورق پایه ستون تا نقطه اعمال بار) استفاده شده است. تمام تغییر مکان‌ها و چرخش‌ها نسبت به این ارتفاع محاسبه گردیده‌اند. ورق پایه ستون به صورت یک صفحه‌ی فولادی با ابعاد ۴۰۰×۴۰۰×۲۵ میلی‌متر مدل‌سازی شد. پیچ‌های اتصال بین نبشی‌ها و ستون از نوع M10 با کلاس مقاومتی A325 در نظر گرفته شده‌اند. نبشی‌ها نیز از نوع L90 با طول ۱۵۰ میلی‌متر انتخاب شدند. هندسه کلی مدل در شکل (۵) نمایش داده شده است.

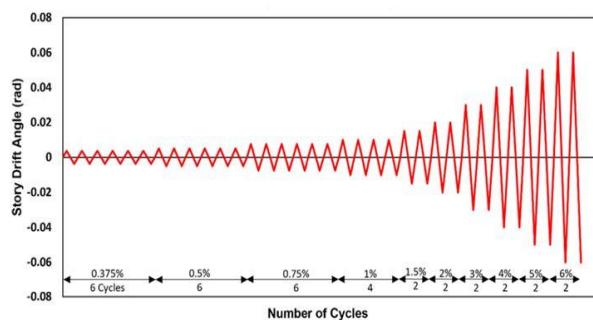
¹² Equivalent Plastic Strain (PEEQ)



شکل ۵: هندسه مدل عددی

خواص مکانیکی مصالح مطابق با استانداردهای متداول مهندسی سازه تعریف گردید. فولاد مصرفی از نوع S235 با مدول یانگ برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال لحاظ شد. برای پیچ‌ها، مشخصات مکانیکی مطابق با گرید A325 و شامل تنش تسلیم ۶۳۰ مگاپاسکال، تنش نهایی ۸۱۰ مگاپاسکال و کرنش نهایی ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است [۲۲].

فرآیند بارگذاری در دو گام اصلی تعریف گردید. در گام نخست، بار محوری قائم به صورت یکنواخت و معادل درصدی از ظرفیت فشار محوری ستون بر سطح فوقانی ستون اعمال شد تا اثر بار ثقلی در شرایط لرزه‌ای به درستی شبیه‌سازی گردد. در گام دوم، الگوی بارگذاری به صورت جابجایی چرخه‌ای مطابق با پروتکل استاندارد ANSI/AISC 341-16 [۲۳] تنظیم شده است. این پروتکل بر پایه‌ی نسبت جابجایی نسبی^{۱۳} تعریف شده و با در نظر گرفتن ارتفاع خالص ستون برابر با ۱۲۰۰ میلی‌متر، در نرم‌افزار آباکوس به صورت جابجایی کنترل‌شده در انتهای آزاد ستون و حول محور ضعیف اعمال گردیده و تا رسیدن به نسبت جابجایی نسبی ۰/۰۴ رادیان ادامه یافت. در این پژوهش، مقدار دوران اتصال به صورت دوران کل تعریف شده است که از تقسیم جابجایی جانبی رأس ستون بر ارتفاع مؤثر ستون به دست می‌آید. لازم به ذکر است که این تعریف شامل سهم الاستیک و پلاستیک تغییرشکل بوده و در تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی مشابه نیز به کار رفته است. جزئیات مراحل بارگذاری در شکل (۶) ارائه شده‌اند.



شکل ۶: پروتکل بارگذاری چرخه‌ای [۲۳]

۲-۴- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

به منظور تحلیل پارامتریک و بررسی تأثیر متغیرهای کلیدی بر رفتار چرخه‌ای اتصال پایه ستون، در این پژوهش از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از آرایه‌های متعامد، امکان تحلیل مؤثر سیستم‌های چندمتغیره را با حداقل تعداد تحلیل‌های عددی فراهم می‌کند. در مقایسه با سایر روش‌های متداول طراحی آزمایش نظیر طرح فاکتوریل کامل یا فاکتوریل کسری، روش تاگوچی از ساختاری ساده‌تر برخوردار بوده و ضمن کاهش قابل توجه تعداد آزمایش‌ها، قابلیت ارزیابی اثرات اصلی و تا حدی اثرات

¹³ Drift Ratio

متقابل متغیرها را فراهم می‌سازد. این ویژگی‌ها موجب شده است که روش تاگوچی به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای تحلیل مسائل مهندسی با محدودیت منابع محاسباتی مورد استفاده قرار گیرد [۲۴ و ۲۵].

در این مطالعه، سه متغیر مستقل شامل نیروی محوری (به‌صورت نسبی از ظرفیت فشاری محوری ستون)، ضخامت نبشی، و فاصله میل‌مه‌ار از لبه ستون انتخاب شده‌اند. در خصوص انتخاب پارامترها و تعداد سطوح، باید توجه داشت که سه متغیر کلیدی بر اساس مرور ادبیات موضوع و نتایج آزمایش‌های پیشین [۱۸] به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ظرفیت خمشی و رفتار هیستریزس اتصالات معرفی شده‌اند. این مقادیر بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی و محدودیت‌های اجرایی متداول انتخاب شده‌اند. انتخاب سه سطح برای هر پارامتر (به‌جای دو سطح یا بیش از سه سطح) به این دلیل صورت گرفته است که سه سطح حداقل تعداد سطوحی است که امکان بررسی روابط غیرخطی (مانند وجود نقطه بهینه یا رفتار غیرخطی ظرفیت اتصال) را فراهم می‌کند و در عین حال باعث افزایش بیش از حد تعداد آزمایش‌ها نمی‌شود [۲۴]. ظرفیت فشار محوری ستون برابر با ۶۷۹ کیلو نیوتن بوده و نیروی محوری در سه سطح شامل ۰، ۰/۱ و ۰/۲ از این ظرفیت بر سطح فوقانی ستون اعمال شد. هر یک از متغیرها دارای سه سطح مشخص بوده که در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند. چنانچه از طرح فاکتوریل کامل با سه سطح برای هر یک از سه پارامتر استفاده می‌شد، نیاز به ۲۷ تحلیل عددی مستقل وجود داشت که معادل حدود ۲۷۰ ساعت زمان محاسباتی بود. در مقابل، با بهره‌گیری از آرایه متعامد تاگوچی L9 تنها ۹ تحلیل عددی انجام شد و کل زمان محاسباتی به حدود ۹۰ ساعت کاهش یافت. به این ترتیب، استفاده از روش تاگوچی موجب صرفه‌جویی بیش از ۶۶ درصدی در زمان پردازش گردید [۲۶ و ۲۷]. این میزان صرفه‌جویی علاوه بر کاهش هزینه محاسباتی، امکان تمرکز بر تحلیل دقیق‌تر نتایج و بررسی رفتار غیرخطی اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای را فراهم ساخت. همچنین باید توجه داشت که در مسائلی با تعداد پارامترها یا سطوح بیشتر، مزیت روش تاگوچی در کاهش تعداد تحلیل‌ها و زمان محاسباتی به‌صورت نمایی افزایش خواهد یافت.

جدول ۲: متغیرها و سطح‌های آنها

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
Axial Load ratio	0	0.1	0.2
Thickness (mm)	6	8	10
Gage distance (mm)	40	50	60

فرآیند طراحی آرایه و تنظیم ترکیب متغیرها با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4 انجام شد و سپس مدل‌های عددی در نرم‌افزار آباکوس همانند جدول ۳ پیاده‌سازی شدند. برای هر ترکیب، خروجی‌هایی نظیر لنگر تسلیم، لنگر بیشینه، میزان جذب انرژی و ضریب میرایی معادل بودند که همگی نقش مهمی در توصیف رفتار هیستریزس اتصال دارند استخراج گردید. در این پژوهش به‌طور خاص، تحلیل بیشینه ظرفیت خمشی، مورد توجه قرار گرفته و امکان شناسایی عوامل غالب، ارزیابی تأثیر هر متغیر، و تعیین ترکیب موثر پارامترها را با روش تاگوچی و تحلیل واریانس فراهم ساخت. در نهایت، یک مدل رگرسیونی چند متغیره برای پیش‌بینی ظرفیت خمشی اتصال توسعه داده شد.

کاربرد روش تاگوچی در این پژوهش نه تنها موجب کاهش حجم محاسبات عددی شد، بلکه با بهره‌گیری از تحلیل واریانس، درک دقیق‌تری از تأثیرگذاری نسبی هر پارامتر فراهم گردید. استفاده از این رویکرد آماری در مسائل پیچیده‌ی مهندسی مانند طراحی اتصالات فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای، ابزار قدرتمندی برای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده و بهینه‌سازی طراحی ارائه می‌دهد. به‌طور خلاصه، طراحی آزمایش با روش تاگوچی در این مطالعه، زمینه‌ای برای تحلیل ساختاریافته و مقایسه‌پذیر رفتار اتصالات فراهم کرده که در ادامه، با تحلیل آماری و اعتبارسنجی مدل‌ها دنبال خواهد شد.

جدول ۳: ترکیب‌های طراحی آزمایش با روش تاگوچی

Sample No.	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)
1	0	6	40
2	0	8	50
3	0	10	60
4	0.1	6	50
5	0.1	8	60
6	0.1	10	40
7	0.2	6	60
8	0.2	8	40
9	0.2	10	50

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نمودارهای هیستریزیس

با هدف بررسی رفتار غیرخطی اتصال پایه ستون فولادی تحت اثر پارامترهای طراحی، مدل‌سازی عددی برای ۹ پیکربندی ترکیبی در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. متغیرهای کلیدی شامل ضخامت نبشی، نیروی محوری و فاصله میل‌مهار از لبه ستون بوده‌اند.

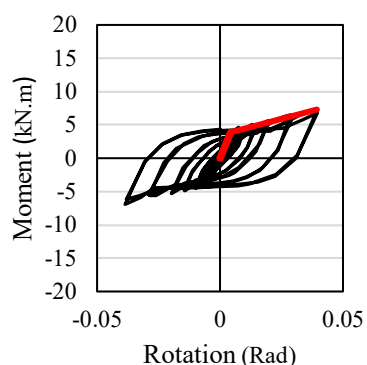
در شکل ۷، منحنی‌های هیستریزیس لنگر- دوران به همراه خطوط دوخطی ایده‌آل شده برای تمام ترکیب‌ها ارائه شده‌اند. این نمودارها بازتاب‌دهنده رفتار غیرالاستیک اتصال هستند و امکان تحلیل ویژگی‌هایی نظیر سختی اولیه، سختی ثانویه، شکل‌پذیری و ظرفیت نهایی خمشی را فراهم می‌سازند. توجه به این نکته ضروری است که محور افقی نمودارها نشان‌دهنده چرخش کل اتصال است، بنابراین مقادیر ارائه شده شامل تغییرشکل‌های الاستیک و پلاستیک بوده و شاخص مناسبی برای ارزیابی عملکرد کلی اتصال محسوب می‌شود.

بررسی نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت نبشی از ۶ به ۱۰ میلی‌متر، ظرفیت خمشی اتصال به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، ترکیب‌هایی که تحت نیروی محوری بیشتری قرار داشتند، عملکرد بهتری در تحمل لنگرهای بزرگ‌تر از خود نشان دادند. بررسی منحنی‌های هیستریزیس نیز حاکی از آن است که این ترکیب‌ها، علاوه بر افزایش ظرفیت، توانایی بالاتری در جذب انرژی دارند؛ موضوعی که از پهنای بیشتر منحنی‌های هیستریزیس و مقایسه آن‌ها با خطوط دوخطی استنباط می‌شود.

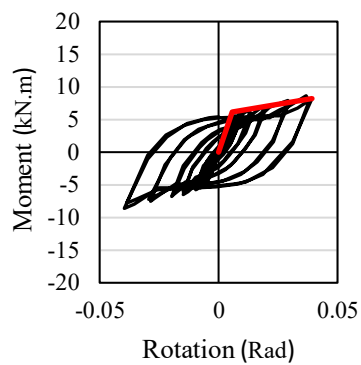
در همه نمونه‌ها، پدیده‌ی کاهش تدریجی سختی در چرخه‌های بارگذاری متوالی مشاهده شد؛ این موضوع به‌عنوان نشانه‌ای از آسیب تجمعی یا کاهش بازدهی رفتاری اتصال قابل تفسیر است. در برخی نمونه‌ها، به‌ویژه آن‌هایی که نیروی محوری بالاتری داشتند، پدیده‌ی جمع‌شدگی^{۱۴} در ناحیه‌ی مرکزی منحنی‌ها قابل تشخیص بود. این پدیده، که به‌علت تمایل به بازگشت به حالت اولیه پس از باربرداری رخ می‌دهد، کاهش نیروهای انتقالی و تغییر مکان باقی‌مانده را به دنبال دارد. این رفتار، مشابه آنچه در سیستم‌های خودمرکزگرای لرزه‌ای نظیر اتصالات با کابل‌های پیش‌تنیده مشاهده می‌شود، ظرفیت جذب انرژی در این شرایط را محدود می‌سازد.

¹⁴ Pinching

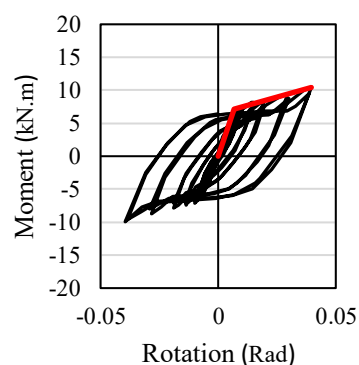
در مجموع، تفاوت در پاسخ‌های هیستریزیس میان ترکیب‌های مختلف، تأثیر مستقیم متغیرهای هندسی و شرایط بارگذاری بر رفتار لرزه‌ای اتصال را برجسته کرده و این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین، به‌ویژه پژوهش [۱۸] همخوانی دارد.



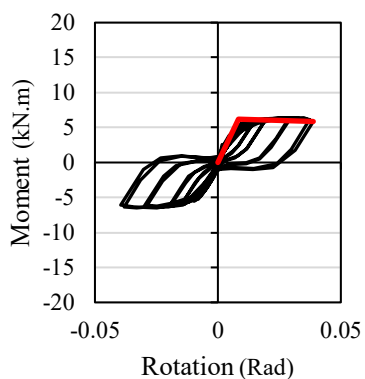
Model No.1



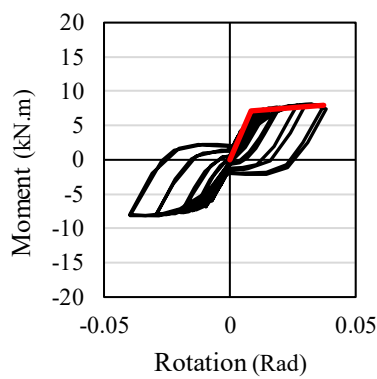
Model No.2



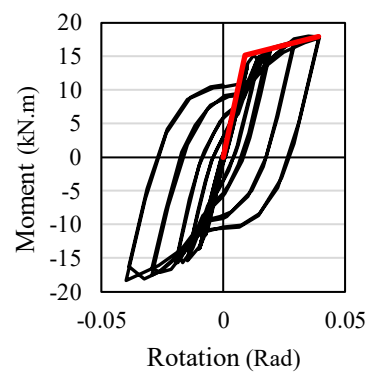
Model No.3



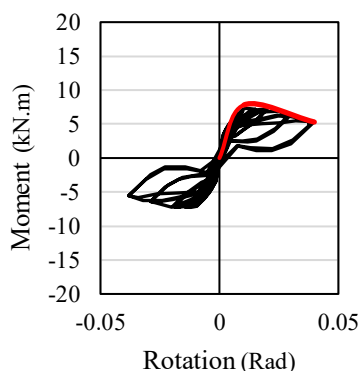
Model No.4



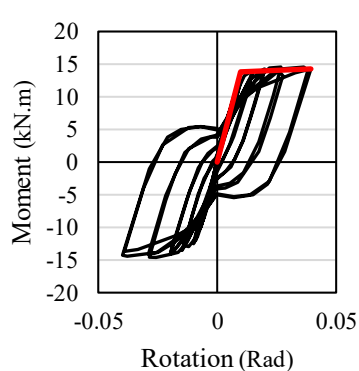
Model No.5



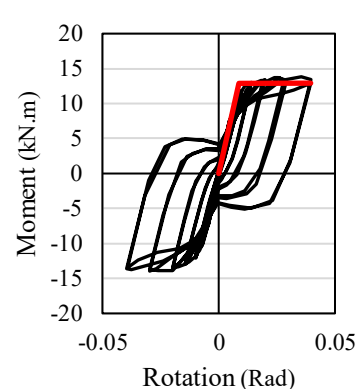
Model No.6



Model No.7



Model No.8



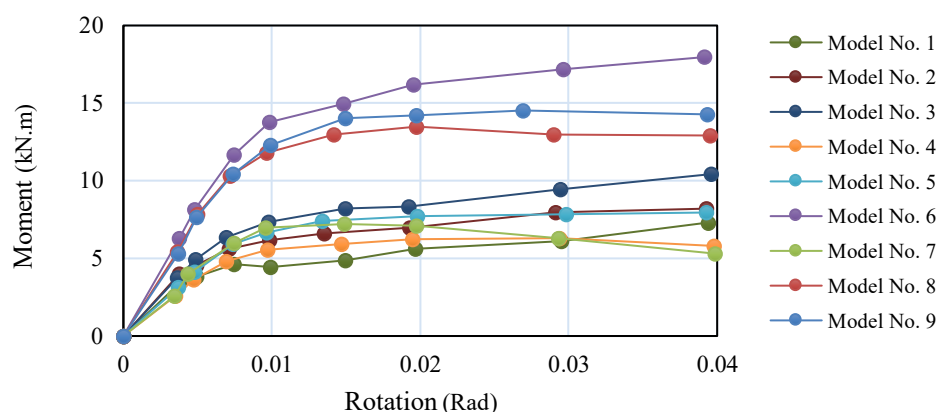
Model No.9

شکل ۷: نمودار هیستریزیس لنگر - دوران و دو خطی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی

۳-۱-۲- تحلیل منحنی رفتاری^{۱۵}

در شکل ۸، منحنی‌های رفتاری لنگر- دوران برای ۹ مدل عددی اتصال ارائه شده‌اند. این منحنی‌ها به خوبی مسیر رفتاری اتصال از ناحیه الاستیک تا ناحیه غیرخطی و رسیدن به ظرفیت نهایی را نمایش می‌دهند. در ابتدای بارگذاری، پاسخ اتصال تقریباً خطی بوده و معرف سختی اولیه‌ی بالا است. پس از تسلیم، سختی کاهش می‌یابد اما اتصال همچنان قادر به جذب بارهای بیشتر است.

از این منحنی‌ها می‌توان پارامترهای کلیدی نظیر سختی اولیه (K_i)، سختی ثانویه (K_s) و حداکثر لنگر قابل تحمل (M_u) را استخراج کرد. این اطلاعات برای ارزیابی شکل‌پذیری، مقاومت و رفتار هیستریزس سیستم اهمیت بالایی دارند و نقش مهمی در بهینه‌سازی طراحی دارند.



شکل ۸: منحنی رفتاری لنگر- دوران حاصل از تحلیل مدل‌های عددی

۳-۱-۳- انرژی مستهلک شده و صلبیت

به منظور سنجش توان اتصال در مستهلک‌سازی انرژی، مساحت زیر منحنی‌های هیستریزس در هر چرخه محاسبه و به‌عنوان انرژی مستهلک‌شده (E_d) ثبت شد. این پارامتر رابطه‌ی مستقیمی با پایداری لرزه‌ای و میزان جذب انرژی اتصال دارد.

برای تعیین صلبیت نسبی اتصال، شیب اولیه منحنی‌های لنگر- دوران استخراج شده و نسبت آن به سختی خمشی الاستیک مقطع ستون (EI/L) به‌عنوان شاخص صلبیت (R) معرفی گردید. برای دسته‌بندی رفتار اتصال، نتایج به‌دست‌آمده با مرزبندی ارائه‌شده در آیین‌نامه ANSI/AISC 360-16 [۲۸] مقایسه شدند. بر اساس این مرزبندی که در شکل (۹) نمایش داده شده، اتصالات در یکی از سه گروه صلب^{۱۶}، نیمه‌صلب^{۱۷} و مفصلی^{۱۸} طبقه‌بندی می‌شوند. این تقسیم‌بندی، بر پایه‌ی نسبت صلبیت اتصال به صلبیت خالص مقطع ستون استوار است و به‌عنوان معیاری کلیدی در انتخاب نوع اتصال در طراحی عملکردی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

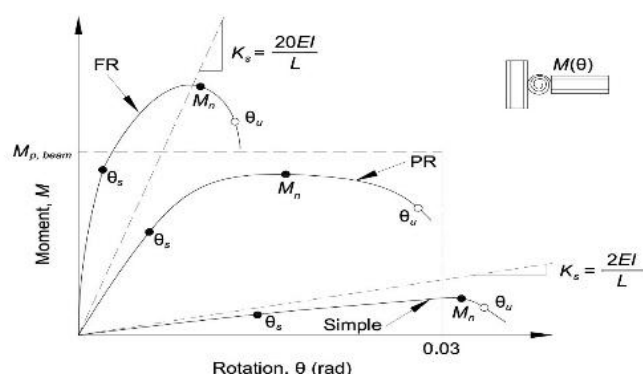
مقادیر نهایی شامل لنگر تسلیم، لنگر بیشینه، انرژی مستهلک‌شده (E_d) و ضریب صلبیت (R) برای ۹ پیکربندی عددی اتصال در جدول ۴ گزارش شده‌اند. میانگین لنگر بیشینه در این مدل‌سازی‌ها برابر با $10/4$ کیلونیوتن‌متر به‌دست آمده است که نشان‌دهنده‌ی توان کلی اتصال در برابر بارگذاری چرخه‌ای است. تمامی نمونه‌ها از نظر صلبیت در محدوده‌ی رفتار مفصلی قرار گرفته‌اند.

¹⁵ Backbone

¹⁶ Fully Restrained

¹⁷ Partially Restrained

¹⁸ Simple



شکل ۹: گستره صلبیت بر اساس ANSI/AISC 360-16 [۲۸]

این عملکرد مفصلی، که در طراحی اتصالات کم آسیب هدف گذاری می شود، موجب تمرکز تغییر شکل و جذب انرژی در نبشی ها شده و از انتقال آسیب به ستون یا فونداسیون جلوگیری می کند. چنین رفتاری، به ویژه در سازه های مقاوم در برابر زلزله، منجر به افزایش قابلیت تعمیر پذیری و کاهش خسارت کلی می گردد.

جدول ۴: پارامترهای خروجی برای مدل های عددی به روش تاگوچی

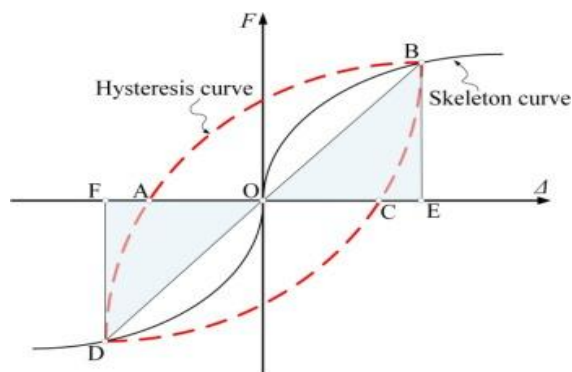
Sample No.	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	Energy Dissipation (kJ)	Rigidly
1	0	6	40	3.9	7.3	2.2	0.47
2	0	8	50	6.2	8.2	2.4	0.56
3	0	10	60	7.1	10.4	2.7	0.55
4	0.1	6	50	6.2	6.3	1.4	0.39
5	0.1	8	60	7.2	8	1.8	0.45
6	0.1	10	40	15.1	18	5	0.89
7	0.2	6	60	7.8	7.8	0.9	0.4
8	0.2	8	40	12.9	12.9	3.6	0.78
9	0.2	10	50	13.9	14.3	3.5	0.77
Average				8.9	10.4	2.6	0.58

۳-۱-۴- ضریب میرایی معادل

به عنوان یکی دیگر از شاخص های عملکردی، ضریب میرایی معادل ویسکوز برای هر سیکل بارگذاری محاسبه شد. این ضریب، با استفاده از رابطه (۱) بر اساس نسبت انرژی مستهلک شده (E_d) به انرژی الاستیک (E_s) در هر چرخه تعیین گردید. در شکل ۱۰ دیاگرام شماتیک این محاسبه ارائه شده است.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_d}{E_s} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{\Delta OBE} + S_{\Delta ODF}} \quad (1)$$

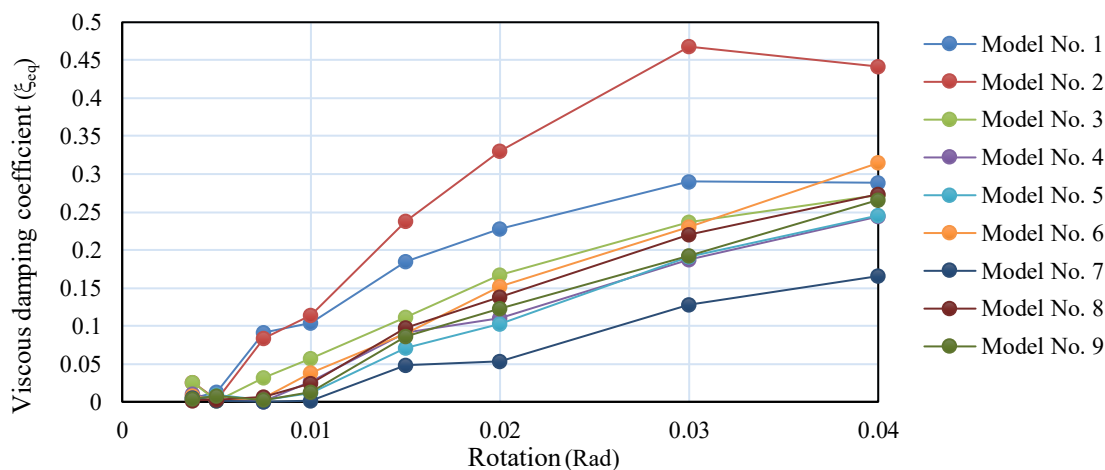
در نمودارهای هیستریزس، مساحت نواحی S_{ABC} و S_{CDA} بیانگر انرژی مستهلک شده در یک حلقه، و مساحت مثلث های قائم الزاویه $S_{\Delta OBE}$ و $S_{\Delta ODF}$ به ترتیب نشان دهنده انرژی الاستیک در مسیرهای رفت و برگشت بارگذاری هستند.



شکل ۱۰: دیاگرام تحلیل ضریب میرایی معادل ویسکوز

تحلیل مقادیر میرایی در شکل ۱۱ نشان داد که در نمونه‌های فاقد نیروی محوری، ضریب میرایی معادل بالاتر بوده است. این پدیده به دلیل حذف اثر جمع‌شدگی و گستردگی بیشتر منحنی‌های هیستریزس در این نمونه‌ها تفسیر می‌شود. به‌طور کلی، با افزایش دریافت، روند صعودی در ضریب میرایی مشاهده شده که بیانگر ظرفیت بالاتر جذب انرژی در جابجایی‌های بیشتر است.

شایان ذکر است که در برخی سطوح بارگذاری، با وجود افزایش دوران، مقدار میرایی معادل کاهش یافته است. این پدیده به کاهش سختی مؤثر اتصال در اثر تسلیم موضعی و تخریب تدریجی در چرخه‌های بزرگ‌تر مرتبط است. در چنین شرایطی، هرچند تغییر شکل کلی بیشتر است، اما نسبت انرژی مستهلک‌شده به انرژی الاستیک مرجع کاهش می‌یابد. این روند در مطالعات پیشین نیز گزارش شده و نشان می‌دهد که افزایش تغییر مکان الزاماً به افزایش میرایی منجر نمی‌شود، بلکه با آسیب‌دیدگی تدریجی اجزا، بازدهی میرایی کاهش می‌یابد. این نتایج حاکی از آن هستند که تحلیل میرایی، می‌تواند مکمل مؤثری برای ارزیابی عملکرد چرخه‌ای اتصالات، به‌ویژه در اتصالاتی با اجزای قابل تعویض و طراحی‌های کم‌آسیب باشد.



شکل ۱۱: ضریب میرایی معادل ویسکوز مدل‌های عددی

۴- تحلیل آماری نتایج

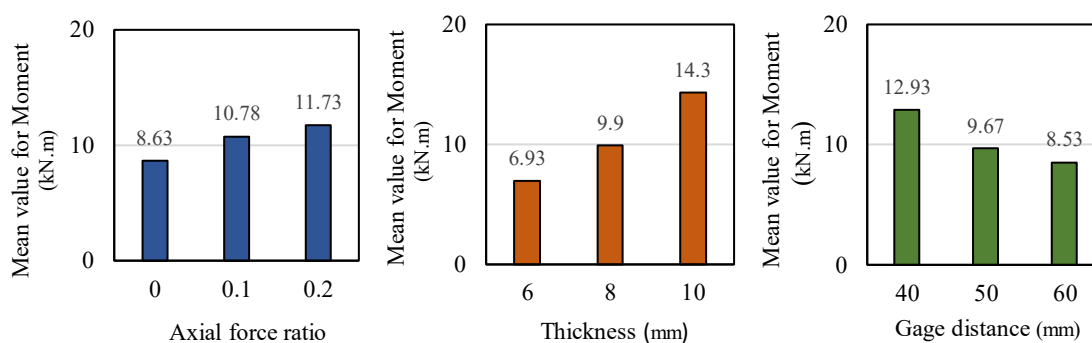
با هدف تحلیل سیستماتیک رفتار چرخه‌ای اتصال نبشی پایه ستون‌های فولادی، از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوجی به منظور شناسایی تأثیر کمی متغیرهای اصلی استفاده شد. این رویکرد، بر پایه‌ی شبیه‌سازی ۹ پیکربندی عددی طراحی‌شده بر اساس آرایه L9، امکان ارزیابی دقیق تأثیر سه پارامتر کلیدی شامل ضخامت نبشی، نیروی محوری و فاصله میل‌مه‌ار از لبه ستون را بر ظرفیت خمشی اتصال فراهم ساخت.

جهت تعیین میزان تأثیرگذاری هر عامل و بررسی اهمیت نسبی آن‌ها، تحلیل واریانس مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، برای پیش‌بینی دقیق پاسخ خمشی اتصال، یک مدل رگرسیونی چندمتغیره توسعه داده شد که می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در طراحی عملکردی اتصالات کم‌آسیب مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

۴-۱- تحلیل واریانس

تحلیل آماری در محیط نرم‌افزار Qualitek-4 انجام شده و خروجی‌های آن به‌صورت عددی و گرافیکی ارائه گردیده‌اند. شکل ۱۲ اثر سه متغیر کلیدی شامل نسبت نیروی محوری، ضخامت نبشی و فاصله مهاری پیچ‌ها را بر میانگین بیشینه لنگر خمشی نشان می‌دهد. مطابق این نتایج، افزایش محدود نیروی محوری و افزایش ضخامت نبشی موجب رشد قابل توجه ظرفیت خمشی اتصال شده، در حالی که افزایش فاصله مهاری پیچ‌ها اثر معکوس داشته و به کاهش ظرفیت منجر می‌شود.

همچنین شکل ۱۲ نشان می‌دهد که ضخامت نبشی مهم‌ترین عامل مؤثر بر ظرفیت خمشی اتصال پایه ستون است، به‌گونه‌ای که افزایش ضخامت از ۶ به ۱۰ میلی‌متر موجب بیش از دو برابر شدن ظرفیت خمشی از ۶/۹۳ به ۱۴/۳ کیلونیوتن‌متر گردید. در مقابل، افزایش فاصله مهاری پیچ‌ها از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر مقدار میانگین لنگر از ۱۲/۹۳ به ۸/۵۳ کیلونیوتن‌متر کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش فاصله گنج می‌تواند نقش موثری در بهبود ظرفیت خمشی داشته باشد. همچنین، اعمال بار محوری معادل ۰/۲ موجب رشد نسبی در ظرفیت خمشی شده است؛ به‌طوری‌که مقدار میانگین لنگر از ۸/۶۳ به ۱۱/۷۳ کیلونیوتن‌متر افزایش یافته است. هرچند این اثر مثبت است، اما شدت آن نسبت به سایر پارامترها کمتر بوده و نشان می‌دهد که نقش نیروی محوری در بهبود ظرفیت خمشی در این محدوده محدود است.



شکل ۱۲: نمودار میانگین بیشینه لنگر خمشی بر اساس متغیرها

یافته‌های جدول ۵ نیز این نتیجه را از دیدگاه کمی تأیید می‌کنند. بر اساس تحلیل واریانس، سهم هر متغیر در تغییرات پاسخ به شرح زیر است: ضخامت نبشی با سهم ۶۰/۷۴ درصد در رتبه نخست، فاصله میل‌مهاری با ۲۱/۸۵ درصد در رتبه دوم و نیروی محوری با ۹/۵۱ درصد در رتبه سوم قرار دارد.

جدول ۵: تحلیل واریانس (ANOVA) متغیرها بر اساس بیشینه لنگر خمشی

Parameters	Degrees of Freedom	Sum of squares	Variance	F-ratio	Significance (%)	Rank
Axial Load ratio	2	15.095	7.547	5.816	9.51	3
Thickness (mm)	2	82.428	41.214	31.758	60.74	1
Gage distance (mm)	2	31.315	15.657	12.065	21.85	2
Error	2	2.594	1.297	-	7.9	
Total	8	131.435	-	-	100	

شکل ۱۳ سهم نسبی هر یک از این پارامترها در تغییرات بیشینه لنگر خمشی را بر اساس تحلیل واریانس (ANOVA) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت نبشی با سهمی معادل حدود ۶۱ درصد تأثیرگذارترین عامل بر ظرفیت خمشی بوده است. پس از آن فاصله مهاری پیچ‌ها با سهمی حدود ۲۲ درصد و نسبت نیروی محوری با سهمی حدود ۹ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

مقایسه دو شکل ۱۲ و ۱۳ نشان می‌دهد که نتایج تحلیل واریانس با روندهای مشاهده‌شده در نمودارهای میانگین بیشینه لنگر خمشی همخوانی کامل دارد. به‌طور مشخص، تغییرات چشمگیر ظرفیت خمشی ناشی از افزایش ضخامت نبشی در شکل ۱۲ با سهم بالای این پارامتر در شکل ۱۳ تأیید می‌شود. همچنین اثر کاهنده افزایش فاصله مهاری پیچ‌ها و اثر نسبتاً محدود نیروی محوری در هر دو تحلیل به‌وضوح قابل مشاهده است.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که ضخامت نبشی مهم‌ترین عامل در بهبود ظرفیت خمشی اتصال است. در حالی که فاصله مهاری پیچ‌ها می‌تواند عملکرد خمشی را به‌طور معناداری تضعیف کند. نیروی محوری در محدوده‌های مورد بررسی اگرچه اثر ثانویه دارد، اما در ترکیب با سایر متغیرها می‌تواند در تغییر رفتار کلی اتصال مؤثر واقع شود.

بررسی تغییرشکل‌های پسماند نشان داد که پارامترهای ابعادی نقش مهمی در پایداری چرخه‌ای اتصال دارند. افزایش ضخامت نبشی موجب کاهش تغییرشکل‌های باقیمانده و بهبود رفتار بازگشتی هیستریزس گردید، در حالی که افزایش فاصله مهاری پیچ‌ها تغییرشکل‌های پسماند را افزایش داد و منجر به کاهش پایداری اتصال شد. همچنین، حضور بار محوری تا ۰/۲ ظرفیت ستون، به دلیل افزایش سخت‌شوندگی مؤثر، روندی کاهنده در تغییرشکل‌های پسماند ایجاد کرد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که علاوه بر ظرفیت خمشی، کنترل تغییرشکل‌های دایمی نیز باید به عنوان شاخص مهم در طراحی این نوع اتصالات مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱۳: چارت دایره‌ای اهمیت متغیرهای تحلیل شده بر اساس بیشینه لنگر خمشی

۴-۲- ترکیب پارامتری مؤثر بر لنگر بیشینه

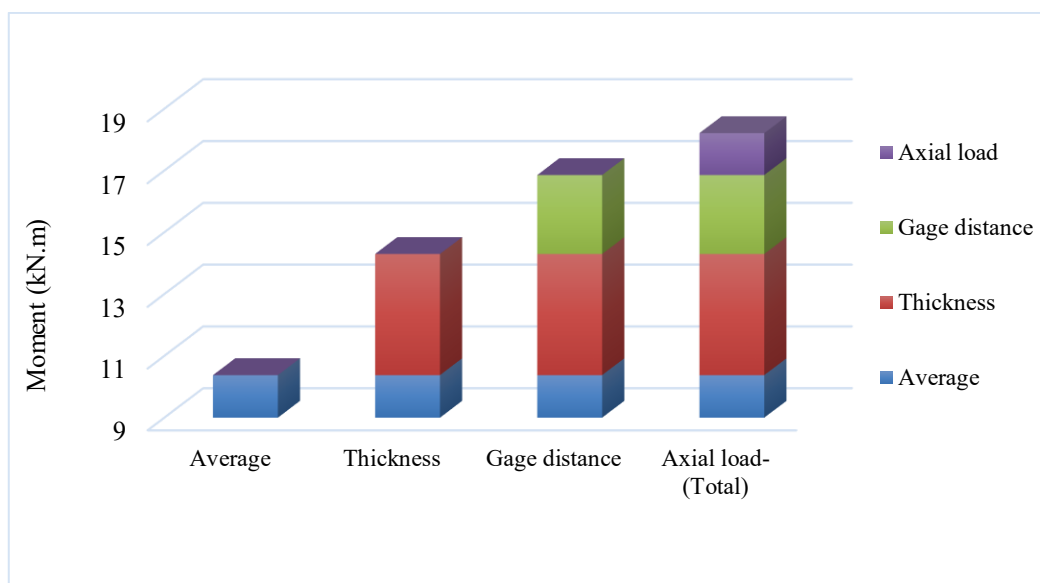
بر پایه‌ی نتایج تحلیل آماری، ترکیب پارامتری که بیشینه ظرفیت خمشی را حاصل کرده است، در جدول ۶ ارائه گردیده است. این پیکربندی شامل ضخامت نبشی برابر با ۱۰ میلی‌متر، فاصله میل‌مه‌ار برابر ۴۰ میلی‌متر و نیروی محوری معادل ۲۰ درصد ظرفیت فشار محوری ستون بوده و در بین ۹ مدل عددی طراحی شده، بالاترین عملکرد خمشی را داشته است.

بیشینه لنگر حاصل از این ترکیب برابر با ۱۸/۲۱ کیلونیوتن‌متر به دست آمده که نسبت به میانگین لنگر تمامی نمونه‌ها (۱۰/۳۸ کیلونیوتن‌متر)، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. به منظور ارائه درکی بصری از ترکیب بهینه، نمودار ستونی شکل ۱۴ نمایش سهم نسبی هر پارامتر را در این پیکربندی ارائه می‌دهد. ساختار لایه‌بندی رنگ‌ها در این نمودار، نقش هر متغیر را به وضوح تفکیک کرده است.

این تحلیل، علاوه بر شناسایی ترکیب مؤثر پارامترها، مبنای معتبری برای انتخاب هندسه و مشخصات فنی مناسب در طراحی اتصالات مقاوم در برابر زلزله فراهم می‌سازد.

جدول ۶: ترکیب پارامتری مؤثر متغیرها بر اساس بیشینه لنگر خمشی

Parameter	Level	Level description	Contribution (kN.m)
Axial Load ratio	3	0.2	1.355
Thickness (mm)	3	10	3.922
Gage distance (mm)	1	40	2.555
Total contributions from all parameters			7.831
Current grand average of performance for moment			10.377
Expected result at optimum conditions			18.209



شکل ۱۴: سهم نسبی هر یک از پارامترهای ورودی در ترکیب مؤثر بر ظرفیت خمشی اتصال بر اساس خروجی مدل‌های عددی

۳-۴- معادله رگرسیونی برای پیش‌بینی لنگر خمشی

در راستای توسعه‌ی یک مدل تحلیلی قابل اعتماد برای پیش‌بینی ظرفیت خمشی اتصال، از داده‌های حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود و طراحی آزمایش به روش تاگوچی، استفاده شده است. با تحلیل نتایج و به‌کارگیری روش رگرسیون خطی چندمتغیره، یک معادله‌ی پیش‌بینی برای بیشینه لنگر خمشی (M_u) به‌دست آمده است که می‌تواند در فاز طراحی مهندسی، به‌عنوان ابزار ساده و دقیق برای تخمین عملکرد اتصال در شرایط مختلف هندسی و بارگذاری مورد استفاده قرار گیرد.

این مدل بر پایه‌ی سه متغیر کلیدی شامل نسبت نیروی محوری به ظرفیت ستون (n)، ضخامت نبشی (t) و فاصله میل‌مهاری از بال ستون (g) فرموله شده است. معادله نهایی به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$M_u = 4.88 + 10.85 n + 2.018 t - 0.2420 g \quad (2)$$

که در آن:

M : بیشینه لنگر خمشی (بر حسب نیوتن‌متر)،

n : نسبت نیروی محوری به ظرفیت فشار محوری ستون (مقادیر ۰، ۰/۱ و ۰/۲)،

t : ضخامت نبشی (بر حسب میلی‌متر)،

g : فاصله میل‌مهاری از بال ستون (بر حسب میلی‌متر) است.

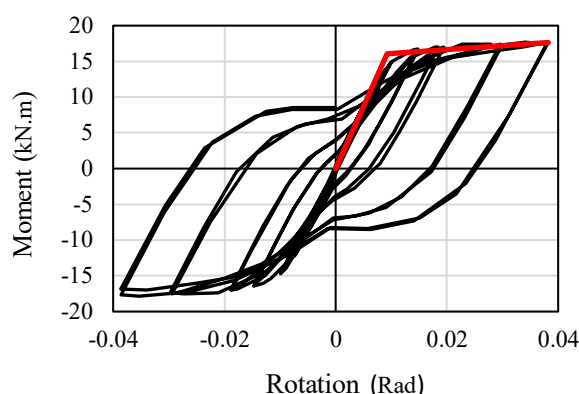
تحلیل ضرایب معادله نشان می‌دهد که اثر نیروی محوری (n) به‌عنوان متغیری با ضریب نسبتاً بالا، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش لنگر خمشی دارد، ضخامت نبشی (t) نیز اثر افزایشی دارد، هرچند با شدت کمتر و فاصله مهاری (g) به‌عنوان یک عامل کاهشنده در عملکرد خمشی شناخته می‌شود.

اعتبار این مدل به واسطه‌ی تطابق مناسب نتایج آن با داده‌های عددی، به‌ویژه در محدوده‌ی طراحی ارائه‌شده، تأیید شده و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مهندسی کارآمد برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی اتصال نبشی پایه ستون در سازه‌های فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۴- اعتبارسنجی مدل آماری با تحلیل عددی

به‌منظور ارزیابی دقت مدل آماری و معادله پیشنهادی، پیکربندی مؤثر شناسایی‌شده از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل عددی و مقادیر پیش‌بینی‌شده در جدول ۷ مقایسه شده‌اند. نمودار هیستریزیس و منحنی دوخطی متناظر با این ترکیب در شکل ۱۵ ارائه شده است.

بیشینه لنگر خمشی حاصل از مدل عددی برابر با ۱۷/۶۴ کیلونیوتن‌متر بوده که تنها ۳ درصد با مقدار پیش‌بینی‌شده اختلاف دارد. این سطح از انطباق، اعتبار مدل آماری را به‌طور کامل تأیید می‌کند. همچنین، پارامترهای مکمل مانند انرژی جذب‌شده و صلبیت اتصال نیز مقادیر قابل قبولی را نشان داده‌اند.

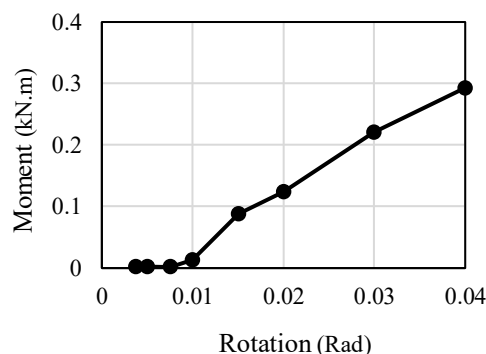


شکل ۱۵: نمودار هیستریزیس لنگر- دوران و دوخطی مدل عددی برای ترکیب پارامتری مؤثر

جدول ۷: پارامترهای خروجی از مدل عددی برای ترکیب پارامتری مؤثر

	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	Energy Dissipation (kJ)	Rigidly
Effective model	0.2	10	40	16.1	17.6	4.8	0.9

در ادامه، ضریب میرایی معادل برای این پیکربندی در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. این ضریب بیانگر پایداری رفتاری سیستم در برابر بارهای رفت و برگشتی است و نشان می‌دهد که اتصال، رفتار لرزه‌ای مطلوبی از خود نشان داده است. در مجموع، رویکرد آماری به کاررفته در این پژوهش، با تلفیق روش تاگوچی، مدل‌سازی عددی و رگرسیون چندمتغیره، ابزار قدرتمندی برای تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد اتصالات لرزه‌ای فراهم کرده است.



شکل ۱۶: ضریب میرایی معادل ویسکوز مدل‌های عددی برای ترکیب پارامتری مؤثر

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور ارتقاء عملکرد چرخه‌ای اتصالات پایه ستون فولادی، نوعی اتصال پیچ‌شونده با نبشی تسلیم‌شونده مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد تحقیق شامل صحت‌سنجی مدل عددی اجزای محدود بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مدل‌سازی پارامتریک با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، تحلیل آماری و توسعه‌ی مدل پیش‌بینی بود. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، نتایج کلیدی زیر حاصل گردید:

- صحت سنجی مدل عددی نشان داد که مدل اجزای محدود توسعه یافته، قادر به بازتولید دقیق رفتار هیستریزیس اتصال بوده و اختلاف آن با نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۷ درصد بود. توزیع کرنش و تنش در مدل عددی نیز با مفاهیم مهندسی تسلیم مطابقت داشت.
 - تحلیل پارامتریک با روش تاگوچی و نتایج تحلیل واریانس حاکی از آن بود که ضخامت نبشی با سهمی معادل ۶۱ درصد مهم ترین عامل در افزایش ظرفیت خمشی اتصال محسوب می شود، در حالی که فاصله میل مهارها با سهم ۲۲ درصد و نسبت نیروی محوری با سهم ۹ درصد در رتبه های بعدی قرار دارند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در کنار افزایش ضخامت که به هزینه اجرایی منجر می شود، تغییر در فاصله میل مهارها نیز بدون تحمیل هزینه اضافی می تواند موجب افزایش چشمگیر ظرفیت خمشی گردد.
 - بررسی ترکیب های پارامتری مختلف نشان داد که پیکربندی شامل ضخامت نبشی ۱۰ میلی متر، فاصله میل مهار ۴۰ میلی متر و نسبت نیروی محوری ۰/۲ بیشینه ظرفیت خمشی برابر با ۱۸/۲ کیلونیوتن متر ایجاد کرده است که حدود ۸۰ درصد بیشتر از میانگین سایر ترکیب ها (۱۰/۴ کیلونیوتن متر) می باشد.
 - رفتار مفصلی اتصال در تمامی ترکیب ها تأیید شد. همچنین با تمرکز تغییر شکل در نبشی ها، موجب عملکرد کم آسیب اتصال و جلوگیری از خرابی ستون یا فونداسیون می شود. چنین رفتاری برای سیستم های مقاوم در برابر زلزله بسیار مطلوب است.
 - ضریب میرایی معادل به عنوان شاخص عملکرد دینامیکی، مقادیر مناسبی را نشان داد که با ویژگی های جذب انرژی در چرخه های رفت و برگشتی سازگار است.
 - معادله رگرسیونی پیشنهادی توانست ظرفیت خمشی اتصال را با خطایی کمتر از سه درصد نسبت به نتایج عددی پیش بینی کند. این معادله یک ابزار ساده و کاربردی برای استفاده مهندسان طراح در تخمین ظرفیت خمشی اتصالات تحت شرایط هندسی و بارگذاری مختلف فراهم می سازد.
 - نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از اتصال پایه پیچ شونده با نبشی تسلیم شونده، به شرط طراحی دقیق پارامترهای هندسی، می تواند گزینه ای مناسب و کم هزینه برای توسعه اتصالات کم آسیب و قابل تعویض در سازه های فولادی باشد.
- برای توسعه ی این پژوهش در مطالعات آتی، پیشنهاد می شود عملکرد این نوع اتصال تحت اثرات ترکیبی نیروی محوری و خمش حول محورهای قوی و ضعیف، با در نظر گرفتن اشکال مختلف سخت کننده، مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از سخت کننده های متنوع می تواند تأثیر بسزایی در بهبود ویژگی های ظرفیت خمشی، میرایی و افزایش صلبیت اتصال داشته باشد.

مراجع

- [1] Kanvinde, A.M., Jordan, S.J., and Cooke, R.J., (2013). Exposed column base plate connections in moment frames — Simulations and behavioral insights. *Journal of Constructional Steel Research*. 84: p. 82-93.
- [2] Cui, Y., Wang, F., Li, H., and Yamada, S., (2019). Rotational behavior of exposed column bases with different base plate thickness. *Steel and Composite Structures, An International Journal*. 32(4): p. 497-507.
- [3] Fasaei, M.A.K., Banan, M.R., and Ghazizadeh, S., (2018). Capacity of exposed column base connections subjected to uniaxial and biaxial bending moments. *Journal of Constructional Steel Research*. 148: p. 361-370.
- [4] Fisher, J.M. and Kloiber, L.A. (2006), *Base plate and anchor rod design*, American Institute of Steel Construction.
- [5] Ekhlesi, F., Saberi, H., Ahmadvand, M., and Saberi, V., (2020). Parametric Investigation of Cyclic Behavior of Bolted End plate Connections. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 7(2): p. 181-201.
- [6] Aghaei, I. and Miri, M., *Experimental and analytical investigation of asymmetric friction connections in steel column bases*, in *13th International Congress on Civil Engineering*. (2023).
- [7] Zhang, R., Liu, J., Xu, J., and Jia, L.-J., (2024). Low-damage performance of blast resilient steel rocking column base with friction connection. *Thin-Walled Structures*. 197: p. 111598.
- [8] Zhang, R., Xie, J.-Y., Chouery, K.E., Liu, J., Jia, L.-J., Xiang, P., Zhao, X., Macrae, G.A., Clifton, G.C., and Dhakal, R.P., (2022). Strong axis low-damage performance of rocking column-base joints with asymmetric friction connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 191: p. 107175.

- [9] Zhang, R., Yan, Z., Xie, J.-Y., Liu, J., Jia, L.-J., Xiang, P., Zhao, X., Macrae, G.A., Clifton, G.C., Dhakal, R.P., and Ramhormozian, S., (2024). Weak axis low-damage performance of seismic resilient rocking steel column base with friction connection. *Journal of Building Engineering*. 86: p. 108778.
- [10] Kamperidis, V.C., Karavasilis, T.L., and Vasdravellis, G., (2018). Self-centering steel column base with metallic energy dissipation devices. *Journal of Constructional Steel Research*. 149: p. 14-30.
- [11] Shen, P., Yang, P., Chen, Y., Yang, Y., and Zhou, J., (2024). Seismic performance of self-centering steel column base with buckling-restrained bars. *Journal of Building Engineering*. 91: p. 109474.
- [12] Li, Y.-W. and Koetaka, Y., (2022). Steel rocking column bases with replaceable cover plates: Cyclic loading behaviour and practical design. *Engineering Structures*. 264: p. 114467.
- [13] Wang, B., Zhu, S., Chen, K., Qiu, C.-X., and Chen, P., (2024). Damage-free self-centering steel columns incorporating SMA bolts and replaceable steel angles. *Engineering Structures*. 321: p. 119000.
- [14] Mohammadi, M. and Afkaneh, N., (2022). On the seismic performance of a New low damage Structure; Moment Resisting Frame with Post-Tensioned Connections and Frictional Braces. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9(7): p. 65-85.
- [15] Xiao, G., Wang, H., Pan, P., Pan, H., He, R., and Tian, G., (2024). Development of self-centering and energy-dissipating dual-stage reinforced concrete rocking column-base system. *Engineering Structures*. 321: p. 118943.
- [16] Hou, H., Sun, B., Qu, B., Wang, C., Zhang, S., and Liang, Y., (2021). Testing of bolted base connections for wide-flange columns under combined axial compression and weak-axis lateral forces. *Journal of Constructional Steel Research*. 179.
- [17] Hou, H., Wang, C., Qu, B., and Liang, Y., (2021). Cyclic testing of bolted base connections for wide-flange columns. *Engineering Structures*. 235.
- [18] Borzouie, J., (2015). Low damage steel base connections.
- [19] Izadinia, M. and Taravat, M., (2021). Finite element analysis of steel beam-hollow column angle connection with blind bolts. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 7(4): p. 5-19.
- [20] Saberi, H., Saberi, V., Yazdaninejad, M., and Sadeghi, A., (2022). Investigation of Cyclic Behavior on Types of Reduced Beam Section Moment Connections in Flange. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9(4): p. 25-43.
- [21] ABAQUS, F., (2014). ABAQUS 6.14 Documentation. *Dassault Syst Provid Google Scholar*. 12: p. 129-130.
- [22] Hosseini, S. and Hosseini, M., (2021). Evaluation of the response of BFP and WFP connections under the blast loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 7(Special Issue 4): p. 64-81.
- [23] (AISC), A.I.o.S.C., (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-16)*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [24] Madani, T., Boukraa, M., Aissani, M., Chekifi, T., Ziadi, A., and Zirari, M., (2023). Experimental investigation and numerical analysis using Taguchi and ANOVA methods for underwater friction stir welding of aluminium alloy 2017 process improvement. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 201: p. 104879.
- [25] Nagaraja, B., Almeida, F., Yousef, A., Kumar, P., Ajaykumar, A.R., and Al-Mdallal, Q., (2023). Empirical study for Nusselt number optimization for the flow using ANOVA and Taguchi method. *Case Studies in Thermal Engineering*. 50: p. 103505.
- [26] Oymak, M., Yıldırım, H., Yıldız, M., Özcan, B., Çelebi, Y., Çelebi, M.A.E., and Çelik, V., (2024). Parameter Sensitivity Analysis for Machining Operation of Autofrettaged Cylinder Using Taguchi Method. *Applied Sciences*. 14(13): p. 5523.
- [27] Sharifi, H., Adib, A., Ahmadi, Z., Gemikonakli, E., and Shahedi Asl, M., (2024). Taguchi optimization of mask stereolithographic 3D printing parameters for tensile strengthening of functionally graded resins. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 18(7): p. 4899-4910.
- [28] (AISC), A.I.o.S.C., (2016). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.