



Research Article

Numerical Study of Cyclic Behavior of Steel Column Base Angle Connections Using Taguchi Experimental Design

Iman Aghaei, Mahmoud Miri and Hamed Ghohani Arab*

Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Sistan and Baluchestan, Iran.

* corresponding author: (ghohani@eng.usb.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 28 May 2025

Revised: 12 August 2025

Accepted: 30 August 2025

Keywords:

Steel column base connection,
replaceable steel angle,
Finite Element Analysis(FEA),
cyclic behavior,
taguchi method.

Abstract

This study presents a numerical investigation into the cyclic behavior of steel column base connections equipped with replaceable yielding steel angles under cyclic loading conditions. Utilizing a combined methodology of finite element analysis through ABAQUS and the Taguchi design of experiments (DOE) approach, the research systematically evaluates the influence of three critical parameters: steel angle thickness, applied axial load ratio, and anchor bolt gauge distance from the column edge. The numerical model was rigorously validated against existing experimental results, demonstrating strong agreement and confirming its capability to accurately simulate the nonlinear hysteretic response of the connections. Nine strategically designed parameter combinations based on an L9 orthogonal array enabled an efficient exploration of the parameter space while capturing both individual and interactive effects. Statistical analysis via analysis of variance (ANOVA) identified the thickness of the steel angle as the most significant factor, accounting for approximately 59.43% of the variation in the maximum flexural moment capacity, followed by the gauge distance (24.95%) and axial load ratio (11.92%). The optimal parameter set—comprising a 10 mm angle thickness, 0.2 axial load ratio relative to column capacity, and 40 mm gauge distance—yielded a peak flexural moment capacity of 30.71 kN·m, closely matching the finite element prediction of 30.56 kN·m. Hysteresis curve analyses reveal enhanced energy dissipation capacity, increased initial stiffness, and improved ductility in the optimized configuration, although the connection behavior consistently remains within the pinned range as per ANSI/AISC 360-16 specifications. The concentrated plasticity in the replaceable angle elements effectively localizes damage, promoting easy post-earthquake repair without compromising the main structural components. A regression model derived from the DOE results facilitates reliable predictions of flexural capacity based on the aforementioned parameters, underscoring the practical utility of the Taguchi method in seismic design optimization. These findings provide critical insights into the design of resilient, low-damage steel column base connections capable of sustaining seismic demands while enhancing reparability and lifecycle performance.

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

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Aghaei, I., Miri, M. and Ghohani Arab, H. 2026. Numerical study of cyclic behavior of steel column base angle connections using taguchi experimental design, Sharif Civil Engineering Journal, 42(1), 31-43.
<https://doi.org/10.24200/sjce.2025.66939.3430>



مطالعه‌ی عددی رفتار چرخه‌ای اتصال‌های نبشی پایه‌ی ستون فولادی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی

ایمان آقایی، محمود میری و حامد قوهانی عرب*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

*نویسنده مسئول (ghohani@eng.usb.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی، شامل: ضخامت نبشی، نیروی محوری، و فاصله‌ی میل‌مهر از لبه‌ی ستون در رفتار چرخه‌ای اتصال‌های پایه‌ی ستون‌های فولادی با نبشی‌های تسلیم‌شونده و قابل تعویض پرداخته شده است. هدف اصلی، ارزیابی ظرفیت خمشی اتصال‌های مذکور تحت بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس بوده است. تحلیل آماری نتایج به روش تحلیل واریانس نشان داده است که ضخامت نبشی با سهم ۵۹/۴۳٪، بیشترین تأثیر را در افزایش ظرفیت خمشی داشته است؛ در حالی که فاصله‌ی میل‌مهر با ۲۴/۹۵٪ و نیروی محوری با ۱۱/۹۲٪ در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. معادله‌ی رگرسیونی توسعه‌یافته، رابطه‌ی بین پارامترهای ورودی و ظرفیت خمشی را با دقت بالا پیش‌بینی کرده است، که با نتایج مدل عددی تطابق نزدیکی داشته است. ترکیب بهینه با ضخامت نبشی ۱۰ میلی‌متر، نیروی محوری ۲۰٪، و فاصله‌ی میل‌مهر ۴۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر خمشی برابر با ۳۰/۷۱ کیلو نیوتن.متر را حاصل کرده است. رفتار اتصال در تمامی ترکیب‌ها در ناحیه‌ی مفصلی باقی مانده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

واژگان کلیدی:

اتصال‌های پایه‌ی ستون

فولادی،

نبشی فولادی قابل تعویض،

رفتار چرخه‌ای،

تحلیل اجزاء محدود،

روش تاگوچی.

۱. مقدمه

اتصال‌های پایه‌ی ستون در سازه‌های فولادی به‌عنوان واسط بین اعضاء قائم و فونداسیون، نقش کلیدی در انتقال نیروهای محوری، خمشی، و برشی ایفا می‌کنند و عملکرد صحیح آن‌ها، به ویژه در هنگام وقوع زلزله، نقش حیاتی در پایداری و ایمنی سازه دارد.^[۱-۳] در شرایط بارگذاری چرخه‌ای، اتصال‌ها باید ضمن انتقال مؤثر نیروها، شکل‌پذیری و مقاومت کافی داشته باشند، تا از انتقال آسیب به اعضاء اصلی سازه جلوگیری شود.^[۴-۶] اگرچه مطالعات گسترده‌ای روی اتصال‌های تیر-ستون انجام شده است، مطالعات مرتبط با اتصال‌های پایه‌ی ستون، به‌ویژه تحت بارگذاری چرخه‌ای، همچنان محدود باقی مانده‌اند.

طی سال‌های اخیر، استفاده از اتصال‌های کم‌آسیب^۱ مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. هدف از طراحی اخیر، محافظت از اعضاء اصلی سازه در برابر خرابی و فراهم کردن شرایطی برای تعمیر یا تعویض سریع قسمت‌های آسیب‌دیده، بدون لطمه به ستون‌ها یا پی سازه است. اتصال‌های کم‌آسیب در قالب روش‌هایی، نظیر: اتصال‌های اصطکاکی،^[۹-۶] استفاده از

کابل‌های پیش‌تنیده،^[۱۰-۱۲] و بهره‌گیری از میراگرهای تسلیم‌شونده،^[۱۳-۱۶] پیاده‌سازی می‌شوند. ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۲ و ۲۰۲۴)،^[۸، ۹] رفتار چرخه‌ای اتصال‌های اصطکاکی نامتقارن را در پایه‌ی ستون یک سازه‌ی سه‌طبقه بررسی کرده و نشان داده‌اند که اتصال‌های مذکور، نمودارهای هیستریزیس پرچمی شکل دارند. همچنین، در صورت تعویض پیچ‌ها و بارگذاری مجدد، عملکردی بدون کاهش مقاومت و سختی خواهند داشت. ایشان همچنین در مطالعاتی دیگر (۲۰۲۴)،^[۷] عملکرد اتصال‌های اخیر را تحت بارگذاری انفجاری و به‌صورت آزمایشگاهی و عددی ارزیابی کرده‌اند، که نتایج رضایت‌بخشی را نشان داده است. با این حال، پیچیدگی طراحی و هزینه‌ی بالای اجرا، کاربرد اتصال‌های اصطکاکی نامتقارن را در پروژه‌های عملی محدود کرده است. شن^۳ و همکاران (۲۰۲۴)،^[۱۱] پایه‌ی ستون با اتصال‌های خودمركزگرا و میله‌های مقاوم در برابر کماتش را تحت بار فشاری به‌صورت آزمایشگاهی و عددی تحلیل کرده و جذب انرژی و شکل‌پذیری را گزارش داده‌اند. همچنین عملکرد چرخه‌ای مطلوب و قابلیت بازگشت عملکرد سازه را گزارش کرده‌اند. کمپریدس^۴ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۰] اتصال‌های پایه‌ی ستون خودمركزگرا با مقاومت جزئی را معرفی و

³ Shen

⁴ Kamperidis

¹ Low Damage

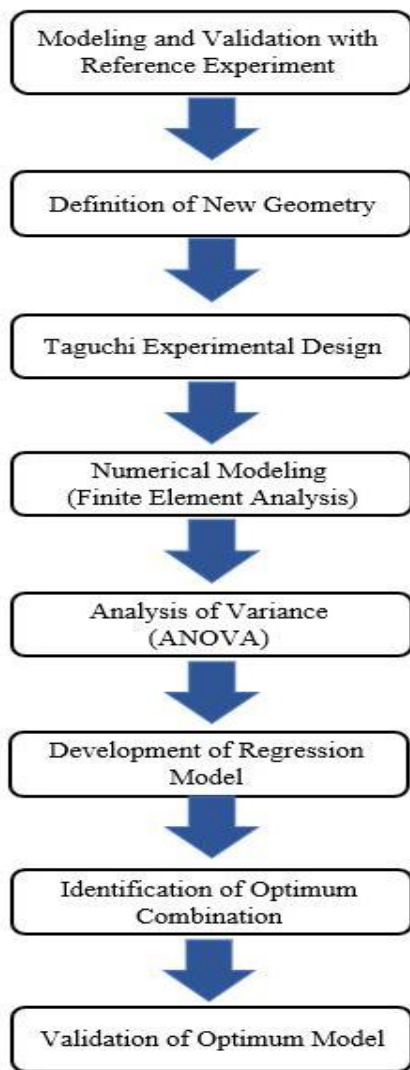
² Zhang

استناد به این مقاله:

آقایی، ایمان، میری، محمود و قوهانی عرب، حامد، ۱۴۰۵. مطالعه‌ی عددی رفتار چرخه‌ای اتصال‌های نبشی پایه‌ی ستون فولادی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی. مهندسی عمران

شریف، ۴۲(۱)، صص. ۳۱-۴۳. <https://doi.org/10.24200/j30.2025.66939.3430>





شکل ۱. فلوچارت فرآیند پژوهش حاضر.

ستون مجهز به نبشی تسلیم‌شونده پرداخته شده است. رویکرد اخیر ضمن کاهش تعداد آزمایش‌های موردنیاز، امکان تحلیل دقیق آثار متقابل پارامترها را فراهم کرده و راهکاری بهینه برای طراحی اتصال‌ها با هزینه‌ی محاسباتی پایین ارائه داده است. نتایج مطالعه‌ی حاضر می‌تواند به بهبود استانداردهای طراحی و افزایش ایمنی سازه‌های فولادی در برابر زلزله کمک کند.

در ادامه‌ی نوشتار حاضر، ابتدا مدل‌سازی عددی و راستی‌آزمایی آن با داده‌های آزمایشگاهی تشریح شده است. سپس، طراحی آزمایش به روش تاگوچی و تحلیل نتایج ارائه‌شده و درنهایت، پارامترهای بهینه برای دستیابی به بیشینه‌ی ظرفیت خمشی پیشنهاد شده است. در شکل ۱، فلوچارت کلی فرآیند تحلیل عددی و آماری اتصال‌های پایه‌ی ستون مشاهده می‌شود.

۲. مدل آزمایشگاهی و اجزاء محدود

۱.۲. مدل آزمایشگاهی

در شکل ۲، اجزاء نمونه‌ی آزمایشگاهی بررسی‌شده توسط برزویی (۲۰۱۵)،^[۱۷] مشاهده می‌شود. اتصال مذکور، شامل ستون با مقطع I شکل از نوع یونیورسال

به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرده‌اند. هدف آن‌ها ارائه‌ی اتصالی با شکل‌پذیری و مقاومت بالا بوده است. اما سیستم‌های ذکرشده به‌دلیل طراحی پیچیده، نیاز به تجهیزات تخصصی دارند. در سال‌های اخیر، به اتصال‌های کم‌آسیب با میراگرهای تسلیم‌شونده به‌دلیل توانایی در جذب انرژی و کاهش خرابی اعضاء اصلی سازه توجه شده است. وانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۴)،^[۱۴] یک اتصال پایه‌ی ستون خودمركزگرا با پیچ‌های آلایژ حافظه‌دار و نبشی‌های قابل تعویض را پیشنهاد کرده و نتایج آزمایش ایشان نشان داده است که وجود نبشی‌ها، ظرفیت خمشی پایه‌ی ستون را افزایش داده و نبشی‌های فولادی آسیب‌دیده توانسته‌اند به سرعت پس از زلزله بدون قطع عملکرد عادی ستون تعویض شوند. با این حال، استفاده از آلایژهای حافظه‌دار، هزینه‌ی تولید را افزایش می‌دهد. ژیانو^۲ و همکاران (۲۰۲۴)،^[۱۶] یک سیستم پایه‌ی ستون لغزشی بتن مسلح با میراگرهای فلزی مقاوم در برابر کماتش با شکل‌های مختلف را پیشنهاد کرده‌اند؛ که تحت بارگذاری چرخه‌ای، ظرفیت اتلاف انرژی، و شکل‌پذیری عالی از خود نشان داده است. با این حال، استفاده از بتن مسلح و میراگرهای پیچیده، چالش‌هایی در اجرا و هزینه ایجاد کرده است.

در مقابل، اتصال‌ها با نبشی تسلیم‌شونده به‌دلیل سادگی اجرا، هزینه‌ی پایین، و قابلیت تعویض آسان، به‌عنوان گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه و کارآمد برای پایه‌ی ستون‌های فولادی شناخته می‌شوند.^[۲۰-۱۷] برزویی^۳ (۲۰۱۵)،^[۱۷] به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی انواع اتصال‌های پایه‌ی ستون کم‌آسیب، از جمله اتصال‌ها با نبشی تسلیم‌شونده پرداخته و نشان داده است که افزایش ضخامت نبشی می‌تواند منجر به افزایش مقاومت خمشی (لنگر تسلیم و نهایی) و همچنین افزایش سختی دورانی اتصال شود، که اثری مشابه با قراردادن میل‌مهارهای نزدیک‌تر به وجه ستون است. اما اثر متقابل پارامترهایی، مانند نیروی محوری و فاصله‌ی میل‌مهارها بررسی نشده است. هو^۴ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۸] یک اتصال پیچی جدید با دو نبشی را برای ستون‌های بال‌پهن تحت بار فشار محوری و خمش حول محور قوی و ضعیف تحلیل کرده‌اند. اتصال به روشی شکل‌پذیر رفتار کرده و عملکرد اتلاف انرژی رضایت‌بخشی از خود نشان داده است، بدون اینکه هیچ‌گونه پارگی در اجزاء اتصال رخ دهد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که نسبت فشار محوری بیشتر در ستون، تمایل به ایجاد مقاومت جانبی بالاتری برای اتصال در محدوده‌ی چرخش اتصال داشته است. با این حال، مطالعه‌ی مذکور آثار متقابل پارامترها را در نظر نگرفته است.

با وجود پیشرفت‌های ذکرشده، چندین شکاف پژوهشی در ادبیات موجود وجود دارد. نخست، در بیشتر مطالعات پیشین، فقط یک یا دو پارامتر بررسی شده و تحلیل هم‌زمان آثار متقابل چندین پارامتر کلیدی کمتر صورت گرفته است.^[۱۷] همچنین، اعمال نیروی محوری می‌تواند موجب ایجاد رفتار خودمركزگرایی و بازگردانی اتصال به حالت اولیه شود، اما هم‌زمان ممکن است سختی برگشتی و جذب انرژی سیستم را کاهش دهد.^[۲۳] از سوی دیگر، رویکردهای آزمایشگاهی سنتی به‌دلیل هزینه و زمان بالا، توانایی بررسی ترکیب‌های متعدد پارامترها را ندارند.^[۲۷-۲۵]

در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی^۵ و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، به تحلیل هم‌زمان آثار سه پارامتر کلیدی (ضخامت نبشی، نیروی محوری، و فاصله‌ی میل‌مهار) در رفتار چرخه‌ای اتصال‌های پایه‌ی

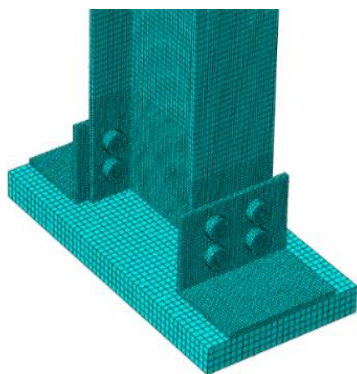
^۴ Hou

^۵ Taguchi

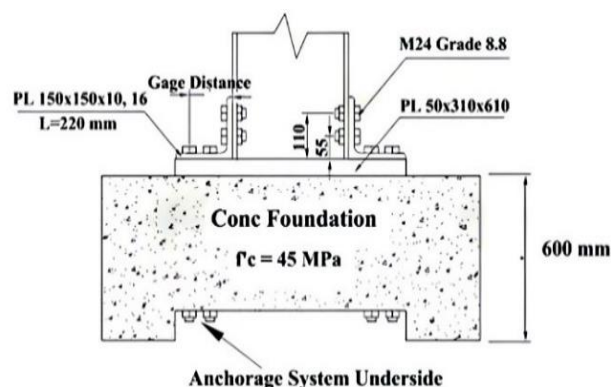
^۱ Wang

^۲ Xiao

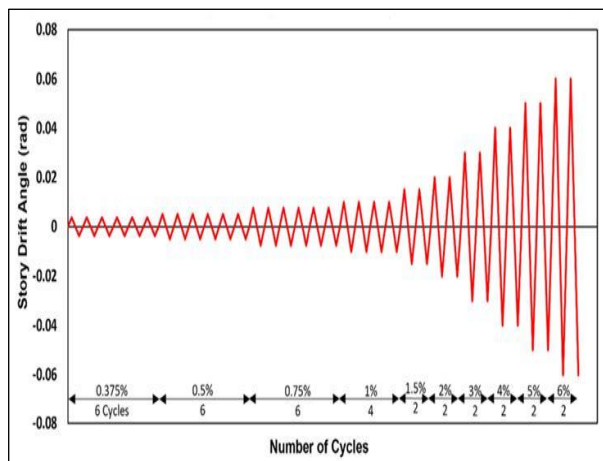
^۳ Borzouie



شکل ۳. مش بندی مدل عددی.



شکل ۲. اجزاء اتصال پایه ی ستون با نبشی تسلیم شونده در مدل آزمایشگاهی.^[۱۷]



شکل ۴. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای.^[۲۱]

برابر در نظر گرفته شده است،^[۱۷] به طوری که تنش تسلیم فولاد برابر با ۳۲۰ مگاپاسکال و مدول یانگ معادل ۲۱۰ گیگاپاسکال تعیین شده است. این تذکر لازم است که پیش از آغاز مدل سازی اجزاء محدود، مقادیر تنش- کرنش به دست آمده از آزمایش باید به مقادیر واقعی تبدیل شوند. تعامل بین اجزاء مختلف، تأثیر قابل توجهی در عملکرد چرخه‌ای پایه‌ی ستون دارد؛ بنابراین، تماس سطح به سطح (Surface-to-Surface Contact) همراه با مقدار ضریب اصطکاک ۰/۳ براساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی معتبر در مشابه-ترین شرایط تماس فولاد بر فولاد انتخاب شده است، تا دقت مدل سازی اندرکنش سطوح تماس تضمین شود.^[۲۰] در راستای قائم نیز شرط HardContact به کار رفته است، تا از نفوذ اجزا جلوگیری شود؛ در حالی که جداسازی در حضور نیروهای کششی مجاز در نظر گرفته شده است.

بارگذاری، ۲ گام داشته است: الف) بار عمودی به مقدار ۳۲۰ کیلونیوتن، که به سطح بالای ستون اعمال شده است، که این مقدار ۰/۲ از کل ظرفیت محوری ستون بوده است. ب) بارگذاری چرخه‌ای به صورت افقی به انتهای ستون اعمال شده و براساس پروتکل بارگذاری آزمایش بوده است. بیشینه‌ی نسبت دریافت رادیان بوده است. مطابق شکل ۴، پروتکل جابجایی چرخه‌ای براساس استاندارد ANSI/AISC ۳۴۱-۱۶ تنظیم و با توجه به ارتفاع ۱۲۰۰ میلی‌متر در آباکوس تعریف شده است.^[۲۱] پروتکل بارگذاری چرخه‌ای به صورت توالی جابجایی‌های افزایشی تعریف شده است، که شامل ۶ سیکل در سطوح دریافت ۰/۳۷۵، ۰/۵، و ۰/۷۵ درصد، ۴ سیکل در سطوح دریافت ۱٪، و ۲ سیکل در سطوح دریافت بالاتر بوده است. این پروتکل در نرم افزار آباکوس از طریق تعریف توابع دامنه‌ی Amplitude در ماژول بارگذاری اعمال شده است، تا رفتار چرخه‌ای اتصال پایه‌ی ستون شبیه سازی شود.

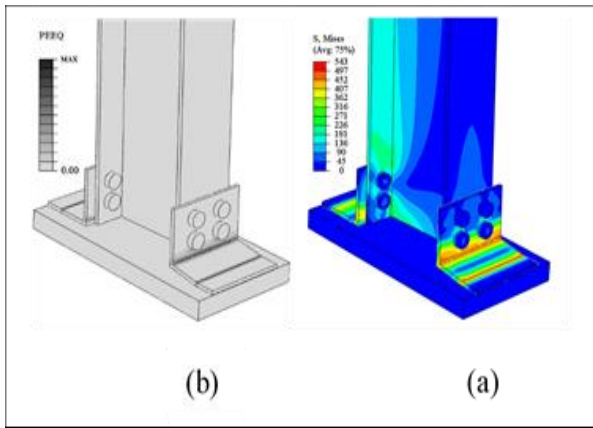
با نماد اختصاری 310UB46.2 و یک جفت نبشی است که به بال‌های ستون و کف ستون به وسیله‌ی پیچ‌های پرمقاومت متصل شده‌اند و از هیچ گونه جوش در آزمایش ذکر شده استفاده نشده است. مشخصات تمامی اجزاء اتصال در شکل ۲ نشان داده شده است. در بررسی آزمایشگاهی انجام شده بر روی اتصال اخیر، مدل شماره‌ی ۴ مرجع، دارای نبشی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز میل مهارها از ستون مقدار ۱۱۰ میلی‌متر است. جزئیات بیشتر در مرجع^[۱۷] ارائه شده است.

۲.۲. مدل اجزاء محدود

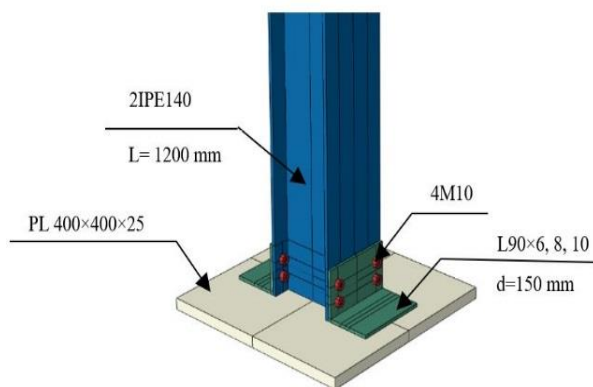
در مدل اجزاء محدود، فونداسیون به صورت یک صفحه‌ی فولادی مدل سازی و شرط مرزی گیردار در سطح زیرین آن اعمال شده است، تا ضمن حفظ دقت کافی، پیچیدگی و هزینه‌ی محاسباتی کاهش یابد و تأثیر آن در نتایج اتصال ناچیز باشد. از آنجا که نتایج آزمایش نشان می‌دهند که اتصال‌های نبشی به کف ستون تقریباً هیچ تغییر شکل نسبی از خود نشان نداده‌اند؛ بنابراین، اتصال‌های مذکور به صورت قیود Tie ساده سازی شده‌اند. درجه‌ی آزادی انتقالی در انتهای آزاد ستون حول محور ضعیف مقید شده است، تا از پیچش در اثر جابجایی جانبی جلوگیری شود.

مدل اجزاء محدود با استفاده از المان جامد هشت گره‌ی بی (C3D8R) در نرم افزار آباکوس،^[۲۸] مدل سازی شده است. تحلیل به صورت ضمنی، شبه‌استاتیکی و از نوع Static General برای کاهش اثر دینامیکی استفاده شده است. اندازه‌ی مش‌های مختلف برای کاهش زمان محاسبات اتخاذ شده است. اندازه‌ی مش نبشی‌ها و پیچ‌ها ۴ میلی‌متر و ستون دارای اندازه‌ی مش از ۵ تا ۱۰ میلی‌متر از ناحیه‌ی اتصال‌ها تا محل اعمال بارگذاری متغیر بوده است. اندازه‌ی مش ۴ میلی‌متر برای مدل سازی اتصال پای ستون در نرم افزار آباکوس انتخاب شده است، که تعادل مناسبی بین دقت شبیه سازی رفتار پلاستیک نبشی و هزینه‌ی محاسباتی ایجاد می‌کند. تحلیل حساسیت نشان داده است که مش‌های درشت تر قادر به توصیف دقیق تغییر شکل‌های پلاستیک نبوده و همگرایی مطلوبی نداشته‌اند، در حالی که مش‌های ریزتر به دلیل افزایش قابل توجه زمان محاسبات به صرفه نبوده‌اند. بنابراین، انتخاب مش ۴ میلی‌متر موجب تضمین درستی نتایج و بهینه سازی هزینه‌ی محاسباتی شده است. لذا، به دلیل تغییر شکل قابل توجه پلاستیک نبشی‌ها، در جهت ضخامت از دو لایه مش استفاده شده است (شکل ۳).

همچنین، یک مدل سخت شدگی ایزوتروپیک دوخطی برای تحلیل استفاده شده است.^[۲۹] مقادیر تنش تسلیم و مقاومت نهایی اجزا با داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۶. (a) توزیع تنش فون میسز؛ (b) کرنش پلاستیک معادل مدل اجزاء محدود.



شکل ۷. هندسه‌ی مدل عددی.

شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کرنش پلاستیک با افزایش میزان دریافت به‌صورت تدریجی افزایش یافته و ناحیه‌ی پلاستیک عمدتاً در محدوده‌ی نبشی‌های فولادی متمرکز شده است. این تمرکز کرنش در ناحیه‌ی مذکور نشانگر عملکرد مناسب نبشی‌ها به‌عنوان اجزاء جذب‌کننده‌ی انرژی و شکل‌پذیر در اتصال است.

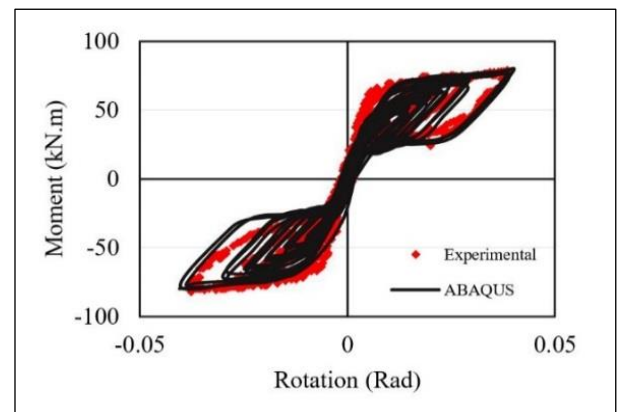
۴.۲. مدل اصلاح‌شده برای تحلیل پارامتریک

با توجه به رایج‌بودن طراحی ستون‌ها به شکل مرکب، از ستون با مقطع ۲IPE۱۴۰ و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر (فاصله از ورق پایه‌ی ستون تا نقطه‌ی اعمال بار) مدل‌سازی و تمامی جابجایی‌ها و دوران‌ها نسبت به ارتفاع مذکور محاسبه شده‌اند. ورق پایه‌ی ستون با ابعاد ۴۰۰×۴۰۰×۲۵ میلی‌متر و پیچ‌های اتصال نبشی به ستون با اندازه‌ی M۱۰ و از نوع A۳۲۵ در نظر گرفته شده‌اند. نبشی‌ها از نوع L۹۰ و با طول ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۷، هندسه‌ی مدل عددی مشاهده می‌شود.

خواص مکانیکی فولادها از نوع S۲۳۵ با مدول الاستیسیته‌ی ۲۰۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال تعریف شده است. پیچ‌ها از نوع A۳۲۵ با تنش تسلیم ۶۳۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۸۱۰ مگاپاسکال در کرنش ۲۵٪ در نظر گرفته شده‌اند.^[۲۱]

۳. طراحی آزمایش به روش تاگوچی

تحلیل پارامتری برای بررسی تأثیر سه متغیر اصلی در رفتار اتصال طراحی شده است. متغیرها شامل نیروی محوری (براساس نسبتی از ظرفیت فشار محوری



شکل ۵. منحنی هیستریزیس (لنگر- دوران) مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود.

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج لنگر خمشی مدل‌های آزمایشگاهی و 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

۳.۲. اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود

در شکل ۵، نمودار هیستریزیس حاصل از آزمایش‌های تجربی با خروجی‌های مدل اجزاء محدود مقایسه شده است. در جدول ۱، مقادیر لنگر در نقاط پیک از زاویه‌ی چرخش ۰/۱ تا ۰/۴ رادیان ارائه شده‌اند. انطباق زیاد نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی با اختلاف کمتر از ۷٪ در مقادیر اوج دقت و درستی مدل عددی را تأیید می‌کند. البته این میزان اختلاف در مقادیر لنگر و شیب نمودار هیستریزیس ناشی از ساده‌سازی‌های انجام‌شده در فرآیند مدل‌سازی و نادیده‌گرفتن ویژگی‌های آسیب‌دیدگی و شکست در اجزاست. این همخوانی حاکی از سازگاری فرضیات مدل‌سازی، از جمله خواص مواد، شرایط مرزی، و تماس‌های بین اجزا با شرایط واقعی است.

در شکل ۶، توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در نرم‌افزار آباکوس مشاهده می‌شود. شکل ۶ (b)، کانتور توزیع کرنش پلاستیک تجمعی (PEEQ) در مدل عددی را به صورت مقیاس خاکستری (از روشن تا تیره) نمایش می‌دهد. نواحی تیره‌رنگ در تصویر مذکور، معرف مناطقی هستند که ماده دچار کرنش پلاستیک شده است و نواحی جاری‌شدن و تغییرشکل غیرالاستیک را نشان می‌دهند. در مقابل، بخش‌های روشن، نقاطی را نشان می‌دهند که کرنش پلاستیک صفر یا بسیار ناچیز دارند و از رفتار الاستیک پیروی می‌کنند. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، دو خط تیره‌ی مشخص و ممتد در ناحیه‌ی اتصال وجود دارد که نمایانگر تمرکز کرنش پلاستیک و شروع رفتار تسلیم ماده در بخش‌های مذکور است. نواحی اخیر دقیقاً منطبق بر مناطقی هستند که در آن‌ها تنش فون میسز (شکل ۶ (a)) به مقدار بحرانی خود نزدیک و موجب گسیختگی یا پلاستیک‌شدن موضعی می-

بررسی تأثیر ضخامت نبشی (۶، ۸، و ۱۰ میلی‌متر)، نیروی محوری (۰، ۰/۱ و ۰/۲ نسبت به ظرفیت فشار محوری ستون)، و فاصله‌ی میل‌مهارها (۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر) در رفتار چرخه‌ای اتصال پایه‌ی ستون‌های فولادی با نبشی بوده است. نمودارهای هیستریزس لنگر- دوران به همراه منحنی‌های دوطبقی ایده-آل شده برای ۹ ترکیب عددی در شکل ۸ مشاهده می‌شوند.

نمودارهای ذکرشده، بازتاب‌دهنده‌ی رفتار غیرخطی واقعی اتصال‌ها هستند و تحلیل پارامترهایی، نظیر: سختی اولیه، سختی ثانویه، شکل‌پذیری، و ظرفیت نهایی خمشی را تسهیل می‌کنند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت خمشی ستون در ترکیب‌های مختلف، به‌ویژه با افزایش ضخامت نبشی از ۶ به ۱۰ میلی‌متر، به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. همچنین در بسیاری از مدل‌ها، ترکیب‌هایی با نیروی محوری فشاری بیشتر، عملکرد بهتری از لحاظ ظرفیت خمشی از خود نشان داده‌اند؛ اما این اثر مثبت همواره مطلق نبوده و در مواردی نظیر مدل ۷، پارامترهایی مانند کاهش ضخامت و افزایش فاصله‌ی میل‌مهارها موجب تضعیف عملکرد خمشی شده و تأثیر مثبت نیروی فشاری را خنثی کرده‌اند. این نکته بر اهمیت بررسی هم‌زمان و ترکیبی پارامترهای هندسی و بارگذاری در تحلیل رفتار سازه‌ای تأکید دارد. نتایج تحلیل آماری نیز این وابستگی متقابل بین پارامترها را تأیید می‌کند. علاوه بر این، ظرفیت جذب انرژی (که از گسردگی حلقه‌های هیستریزس و انطباق رفتار با منحنی‌های دوطبقی استنباط می‌شود) در ترکیب‌هایی با نیروی محوری بالاتر بهبود یافته است. باید توجه داشت که اثر مثبت نیروی محوری در جذب انرژی، فقط در شرایطی معتبر است که سایر پارامترهای هندسی کنترل شده باشند. با این حال، کاهش سختی در چرخه‌های بارگذاری متوالی در تمامی ترکیب‌ها مشاهده شده است؛ که بیانگر آسیب تجمعی یا کاهش بازدهی در رفتار چرخه-ای اتصال است. تفاوت‌های عملکردی اخیر، نشان‌دهنده‌ی تأثیر مستقیم متغیرهای هندسی و بارگذاری در رفتار چرخه‌ای اتصال است و با نتایج برخی مطالعات پیشین،^{[۱۷] و [۲۴]} بخصوص اثر نیروی محوری در ظرفیت خمشی سازه‌ها مطابقت دارد.

در پژوهش حاضر، در جدول ۴، نسبت شکل‌پذیری (θ_u/θ_y) اتصال‌های پایه‌ی ستون فولادی تحت تأثیر سه پارامتر کلیدی ضخامت نبشی، نیروی محوری اعمالی، و فاصله‌ی میل‌مهار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش ضخامت نبشی باعث بهبود قابل‌توجه شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی اتصال می‌شود؛ در حالی که افزایش نیروی محوری به‌خصوص در ضخامت‌های کمتر، کاهش شکل‌پذیری را در پی دارد. فاصله‌ی میل‌مهار، تأثیر کمتری نسبت به دو پارامتر دیگر دارد؛ اما تغییرات آن در ظرفیت خمشی مؤثر است. با توجه به طراحی آزمایش تاگوچی و تغییر هم‌زمان پارامترها، تفکیک دقیق اثر هر متغیر دشوار است، اما روند کلی حاکی از اهمیت بالای ضخامت نبشی و نقش محدودکننده‌ی نیروی محوری در ظرفیت دوران پلاستیک است. این نتایج همسو با الزام‌های کدهای لرزه‌ای، نشان‌دهنده‌ی قابلیت اتصال‌ها در تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک با شکل‌پذیری زیاد، به ویژه در ترکیب بهینه‌ی پارامترها هستند.^[۲۲]

در اتصال‌هایی که تحت تأثیر نیروی محوری قرار دارند، پدیده‌ی جمع‌شدگی (Pinching) در نمودارهای هیستریزس مشاهده می‌شود؛ که ناشی از وجود نیروی محوری است، که با ایجاد خود مرکزگرایی در اتصال، موجب تمایل سازه برای بازگشت به وضعیت اولیه پس از باربرداری می‌شود. در چنین شرایطی، نیروی محوری از طریق اجزاء پیش‌تنیده یا فشار محوری موجود در اتصال،

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

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

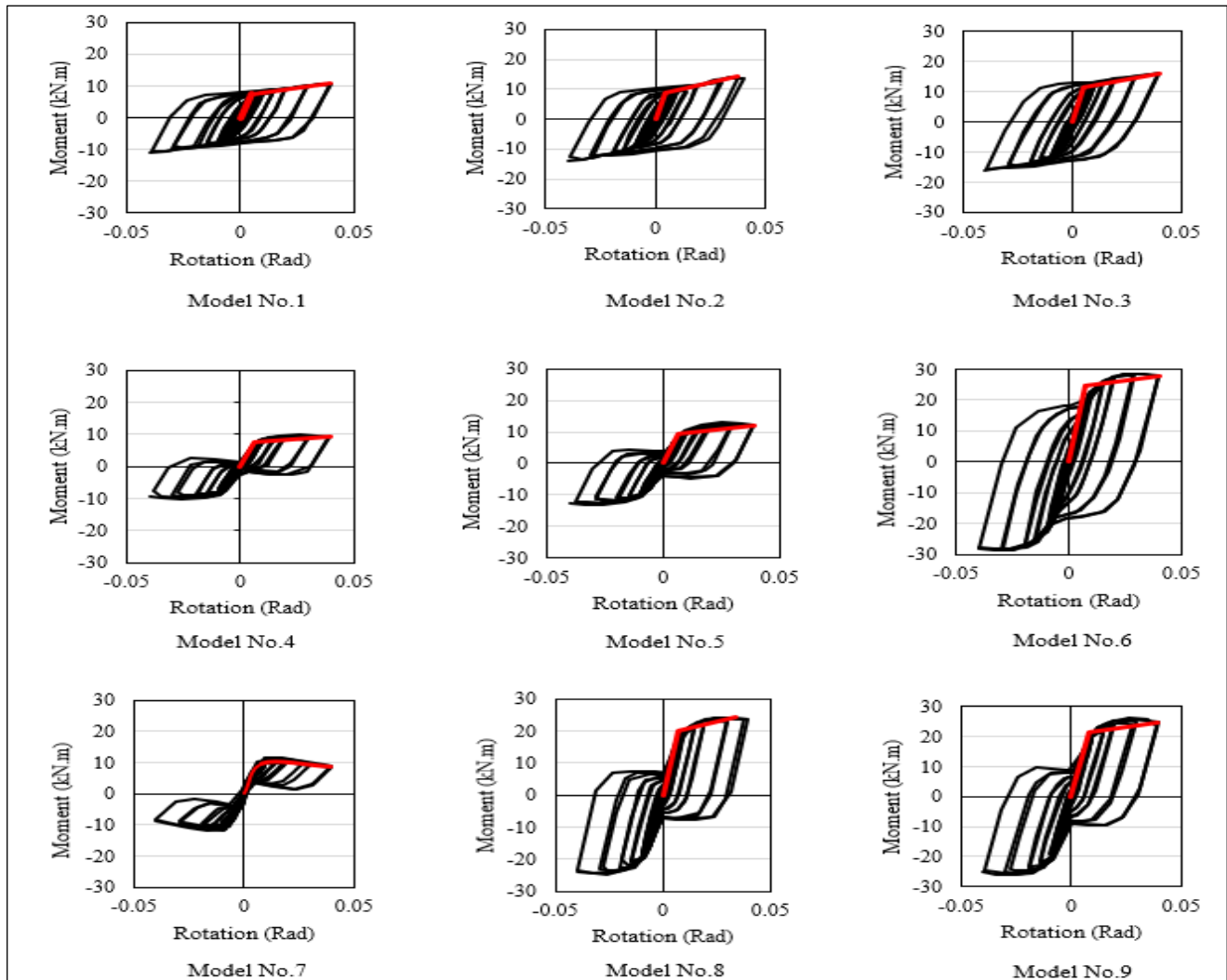
ستون)، ضخامت نبشی، و فاصله‌ی میل‌مهارها از لبه‌ی ستون انتخاب شده‌اند. ظرفیت فشار محوری ستون برابر با ۶۷۹ کیلو نیوتن بوده است، که نسبت نیروی محوری از صفر تا ۰/۲ اعمال شده است. هر متغیر، سه سطح داشته است، که در جدول ۲، سطوح آن‌ها ارائه شده است. متغیرهای مذکور براساس اهمیت آن‌ها در رفتار چرخه‌ای اتصال‌ها تعیین شده‌اند. برای کمینه‌سازی تعداد شبیه‌سازی‌ها، از روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد، تعداد آزمایش‌ها یا مدل‌های عددی را از ۲۷ (3^3) به ۹ کاهش داده و آثار اصلی و تعاملات متغیرها را ارزیابی کرده است. مزیت روش تاگوچی نسبت به رویکردهای سنتی، کاهش قابل‌توجه تعداد شبیه‌سازی‌ها و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان و منابع محاسباتی بدون کاهش دقت تحلیل است.^[۲۵] روش تاگوچی ویژگی‌های کیفی را به ۳ دسته تقسیم می‌کند: «کمتر-بهرتر»، «بیشتر-بهرتر»، و «اسمی-بهرتر». در پژوهش حاضر، با هدف افزایش ظرفیت خمشی، دسته‌ی «بیشتر-بهرتر» انتخاب شده است.^[۲۵] برای ارزیابی عملکرد، نسبت سیگنال به نویز (S/N) محاسبه شده است، که نشان‌دهنده‌ی تغییرات پاسخ نسبت به تنظیم‌های عوامل است. نسبت S/N بالاتر، بیانگر تغییرات کمتر و عملکرد بهتر است.^[۲۷]

۹ ترکیب مذکور در نرم‌افزار ۴- Qualitek طراحی و آنالیز و در جدول ۳ ارائه شده‌اند. برای هر ترکیب، شبیه‌سازی در آباکوس صورت گرفته و خروجی‌هایی، نظیر بیشینه‌ی لنگر خمشی و انرژی جذب‌شده استخراج شده‌اند، تا متغیرهای غالب شناسایی شوند.

۴. نتایج و بحث

۴.۱. نمودارهای هیستریزس

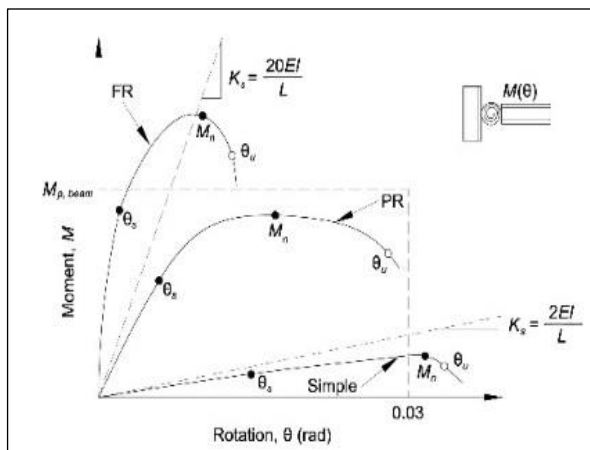
نتایج مدل‌سازی‌های عددی برای نمونه‌های طراحی‌شده در بخش ۳، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس استخراج و در بخش حاضر، ارائه و تفسیر شده‌اند. هدف،



شکل ۸. نمودارهای هیستریزیس لنگر- دوران و دوخطی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی.

جدول ۴. پارامترهای خروجی از مدل‌های عددی برای ۹ ترکیب تاگوچی.

Sample No.	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	Absorbed energy (kJ)	Rigidly	$\frac{\theta_u}{\theta_y}$
1	0	6	40	7.44	10.86	4.86	0.76	7.8
2	0	8	50	8.59	14.1	5.7	0.95	7.8
3	0	10	60	11.27	16.01	6.4	1.1	7.2
4	0.1	6	50	7.64	9.26	3.1	0.62	6
5	0.1	8	60	9.57	12.03	4	0.8	6.2
6	0.1	10	40	24.7	28.5	10.5	1.75	3.9
7	0.2	6	60	9.78	9.99	2.1	0.61	2.1
8	0.2	8	40	20	24.2	8.1	1.45	4.6
9	0.2	10	50	21.64	24.94	8.4	1.46	5
Average				13.4	16.66	5.91	1.1	5.6
Variance					7.29	2.73		



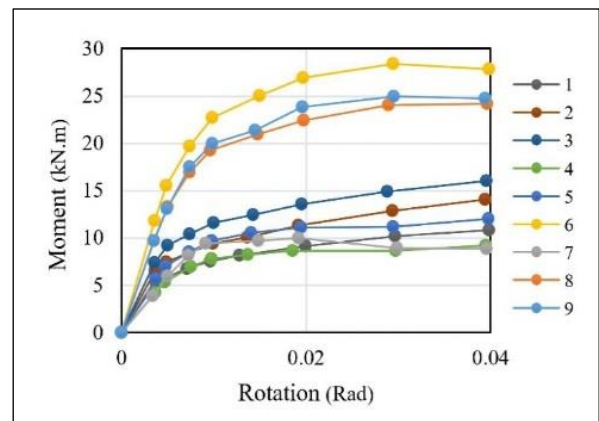
شکل ۱۰. گستره‌ی صلبیت بر اساس استاندارد ۳۶۰-۱۶ ANSI/AISC [۳۳].

(Flexible) تقسیم کرده و براساس نسبت صلبیت اتصال به صلبیت الاستیک ستون تعریف شده است. رفتار غیرخطی اتصال نیز با استفاده از منحنی دوخطی ایده‌آل‌سازی شده است، تا نقاط تسلیم و نهایی به‌صورت دقیق تعیین شوند.

مقادیر لنگر بیشینه (M_{max}) و تسلیم (M_y)، انرژی جذب‌شده (E_d)، و صلبیت (R) اتصال برای ۹ ترکیب مختلف در جدول ۴ گزارش شده‌اند. میانگین بیشینه‌ی لنگر خمشی در تحلیل‌های عددی مذکور به ۱۶/۶۶ کیلو نیوتن.متر رسیده است، که نشانگر عملکرد کلی اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای است. صلبیت اتصال در تمامی ترکیب‌ها در محدوده‌ی رفتار مفصلی قرار داشته است. این رفتار اتصال با هدف طراحی اتصال‌های کم‌آسیب سازگار است. در تمامی مدل‌های بررسی‌شده، ناحیه‌ی تمرکز تنش، تسلیم، و آسیب به‌صورت یکنواخت و کنترل‌شده در اجزاء نبشی متمرکز شده است و سایر اجزاء اتصال از جمله ستون، صفحه‌ی پایه‌ی ستون فاقد خرابی بوده‌اند. این موضوع حتی در مدل‌هایی مانند مدل ۷، که شدت آسیب در نبشی بیشتر بوده است، نیز صادق است. بنابراین، عملکرد اتصال به‌گونه‌ای بوده است که رفتار غیرخطی به اجزاء قابل‌تعویض و طراحی‌شده برای تسلیم (نبشی‌ها) محدود شده و مکانیزم شکست در کنترل باقی مانده است.

۳.۲.۴. ضریب میرایی معادل

به‌منظور ارزیابی دقیق رفتار چرخه‌ای اتصال در طول چرخه‌های بارگذاری، ضریب میرایی معادل ویسکوز برای هر سیکل بارگذاری برای ۹ ترکیب عددی مبتنی بر آرایه‌ی L_9 استخراج شده و تغییرات آن بیانگر میزان اتلاف انرژی و پایداری عملکرد اتصال در برابر بارهای چرخه‌ای بوده است. ضریب میرایی معادل برای هر نمونه و هر سیکل بارگذاری با استفاده از روش انرژی هیستریزس محاسبه شده است، تا پایداری رفتار اتصال پایه‌ی ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی شود. ضریب میرایی معادل فقط به‌عنوان شاخصی برای مقایسه‌ی رفتار نسبی نمونه‌ها در تحلیل چرخه‌ای اعمال شده و به هیچ عنوان نمایانگر دقیق مقدار میرایی واقعی سازه نبوده است. ضریب میرایی با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است، که مطابق شکل ۱۱، در آن، (E_d) نمایانگر انرژی تلف‌شده در هر چرخه‌ی بارگذاری و (E_s) نشان‌گر انرژی الاستیک (مربوط به مثلث زیر منحنی الاستیک) است. شاخص مذکور، معیاری معتبر برای سنجش ظرفیت استهلاک انرژی در رفتار هیستریزس اتصال به‌شمار می‌رود و نقشی کلیدی در تحلیل عملکرد چرخه‌ای سیستم ایفا می‌کند.



شکل ۹. نمودار ساختاری لنگر- دوران حاصل از ۹ مدل عددی.

سبب کاهش میزان تغییرمکان باقی‌مانده و کاهش نیروهای انتقالی در مرکز چرخه‌های بارگذاری می‌شود. نتیجه‌ی فرآیند اخیر، شکل‌گیری یک منحنی هیستریزس باریک در ناحیه‌ی مرکزی است، که بیانگر کاهش سختی برگشتی و کاهش ظرفیت جذب انرژی در طی بارگذاری‌های چرخه‌ای است. این رفتار در سیستم‌های خود مرکز‌گرا، مانند اتصال‌ها با کابل‌های پیش‌تنیده به‌وضوح مشاهده می‌شود.

۲.۴. تحلیل عملکرد چرخه‌ای

۱.۲.۴. نمودارهای ساختاری^۶

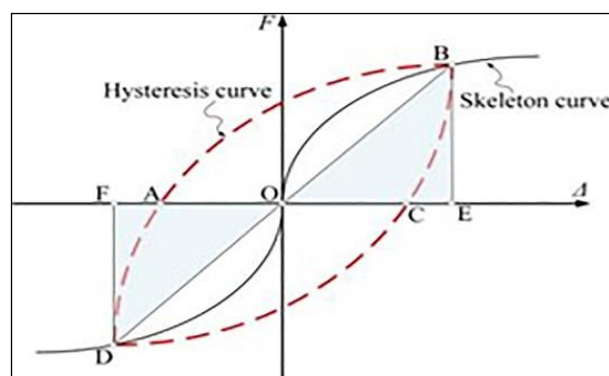
در شکل ۹، نمودارهای ساختاری مربوط به ۹ ترکیب مختلف اتصال مشاهده می‌شود. در بخش ابتدایی نمودار و پیش از تسلیم نبشی‌ها، رفتار اتصال به‌صورت خطی بوده است، که نشان می‌دهد سختی اولیه بالا بوده است. پس از رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، رفتار وارد ناحیه‌ی پلاستیک شده و اتصال ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان داده است. با افزایش بارگذاری، هر چند سختی اتصال کاهش یافته است، اما ظرفیت کلی باربری همچنان روند افزایشی داشته است. با این حال، مطابق شکل ۹، برخی نمونه‌ها مانند مدل ۷ به دلیل ویژگی‌های هندسی و بارگذاری، کاهش ظرفیت باربری و جذب انرژی داشته‌اند. این تفاوت‌ها ناشی از آثار ترکیبی پارامترهای هندسی (ضخامت نبشی و فاصله‌ی میل‌مه‌ار) و بار محوری است، که می‌تواند باعث کاهش عملکرد در برخی موارد شود. تفاوت‌های ذکرشده بیانگر پیچیدگی رفتار اتصال‌ها تحت شرایط متغیر است و اهمیت تحلیل چندمتغیری در تفسیر نتایج را برجسته می‌سازد. تحلیل دقیق منحنی‌های ساختاری مذکور، امکان استخراج پارامترهایی نظیر: سختی اولیه، سختی ثانویه، و ظرفیت نهایی باربری اتصال را فراهم می‌سازد؛ که نقش کلیدی در ارزیابی عملکرد چرخه‌ای و غیرخطی اتصال‌های سازه‌ای دارند.

۲.۲.۴. انرژی جذب‌شده و صلبیت

برای تحلیل نتایج، میزان انرژی جذب‌شده با محاسبه‌ی مساحت زیر نمودارهای هیستریزس لنگر- دوران در هر چرخه تعیین شده است. صلبیت اتصال نیز از طریق نسبت شیب اولیه‌ی نمودار لنگر- دوران به سختی خمشی ستون ($\frac{EI}{L}$) به‌دست آمده است، که بیانگر سختی دورانی اتصال در محدوده‌ی الاستیک است. به‌منظور دسته‌بندی صلبیت اتصال، مقادیر محاسبه‌شده با مرزبندی استاندارد ارائه‌شده در استاندارد ۳۶۰-۱۶ ANSI/AISC مقایسه شده‌اند. [۳۳] این مرزبندی، که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، گستره‌ی صلبیت را به سه دسته‌ی: صلب (Rigid)، نیمه‌صلب (Semi-Rigid)، و انعطاف‌پذیر

۵. تحلیل آماری نتایج

هدف از تحلیل آماری در پژوهش حاضر، بررسی دقیق اثر پارامترهای مختلف در رفتار چرخه‌ای اتصال نبشی پایه‌ی ستون‌های فولادی با استفاده از روش تاگوچی است؛ که با طراحی ۹ نمونه‌ی آزمایشی، امکان ارزیابی تأثیر عوامل کلیدی، مانند: نیروی فشار محوری، ضخامت نبشی، و فاصله‌ی میل‌مه‌ارها را در ظرفیت خمشی فراهم کرده است. با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA)، می‌توان میزان تأثیر هر عامل و تعاملات آن‌ها را در عملکرد چرخه‌ای به‌صورت کمی تعیین کرد. همچنین، می‌توان با مدل رگرسیونی، رابطه‌ی بین متغیرها و ظرفیت خمشی را فرموله ساخت، که به پیش‌بینی رفتار اتصال و بهبود طراحی سازه‌ها در برابر بارهای زلزله کمک می‌کند.



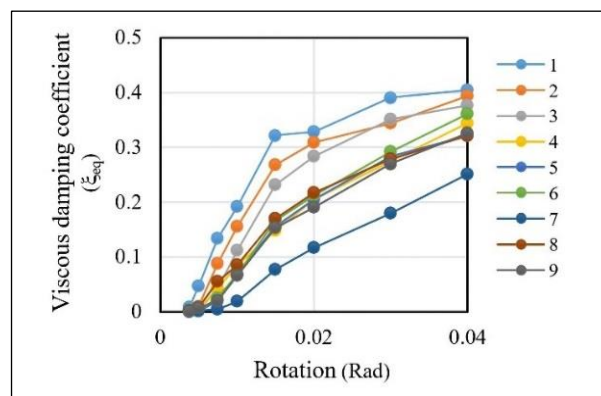
شکل ۱۱. دیاگرام تحلیل ضریب میرایی معادل ویسکوز.

۱.۵. تحلیل واریانس

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار ۴ Qualitek صورت گرفته و نتایج آن به این صورت ارائه شده‌اند:

نمودار میانگین بیشینه‌ی لنگر خمشی براساس سه متغیر در شکل ۱۳ ترسیم شده است و نشان می‌دهد که ضخامت نبشی، بیشترین تأثیر را در افزایش میانگین لنگر داشته است؛ زیرا شیب تغییرات آن بیشتر از سایر متغیرها بوده است. در هر سه نمودار، مقادیر خروجی (Error Bar) مستقیم روی هر ستون درج شده است، که بیانگر پراکندگی داده‌ها حول میانگین‌ها (۱۶/۶۶) است. کوتاهی نسبی نوارهای مذکور نشانگر دقت مدل‌سازی و پایایی نتایج عددی است. به‌طور مثال، در نمودار مربوط به فاصله‌ی میل‌مه‌ارها، مقدار میانگین لنگر برای سطح ۴۰ میلی‌متر، ۲۱/۱۹ کیلونیوتن.متر با پراکندگی محدود بوده است، که قابل قبول است و نشان می‌دهد داده‌ها به خوبی حول میانگین متمرکز هستند. این ویژگی تأکید می‌کند که میانگین‌های به‌دست‌آمده، نماینده‌ی قابل‌اعتمادی از عملکرد سیستم در سطوح مختلف پارامترها هستند.

تحلیل سطوح مختلف هر پارامتر به روشی نشان می‌دهد که با افزایش فاصله‌ی میل‌مه‌ارها از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر خمشی به‌طورمنظم کاهش یافته و در تمام سطوح، مقادیر هر ستون، نشانگر اختلاف معنادار و پایدار است. افزایش ضخامت از ۶ به ۱۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر را از ۱۰/۵ به ۲۳/۱۴ کیلونیوتن.متر افزایش داده و مقدار ستون در سطح ۱۰ میلی‌متر، دلالت بر بازایی بیشینه‌ی ظرفیت خمشی با پراکندگی کم داده‌ها دارد. نسبت نیروی محوری بالاتر نیز منجر به رشد چشمگیر میانگین لنگر خمشی شده است؛ در حالی که پراکندگی داده‌ها نسبتاً ثابت و محدود بوده است. تفسیر نتایج دلالت بر قابل‌قبول‌بودن عملکرد مدل عددی و روش طراحی آزمایش تاگوچی برای

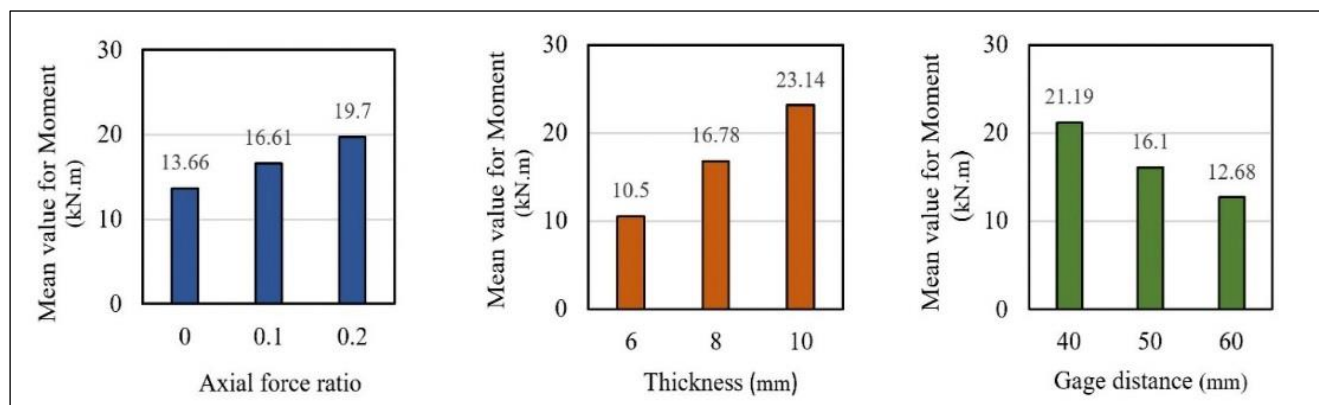


شکل ۱۲. ضریب میرایی معادل ویسکوز مدل‌های عددی.

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

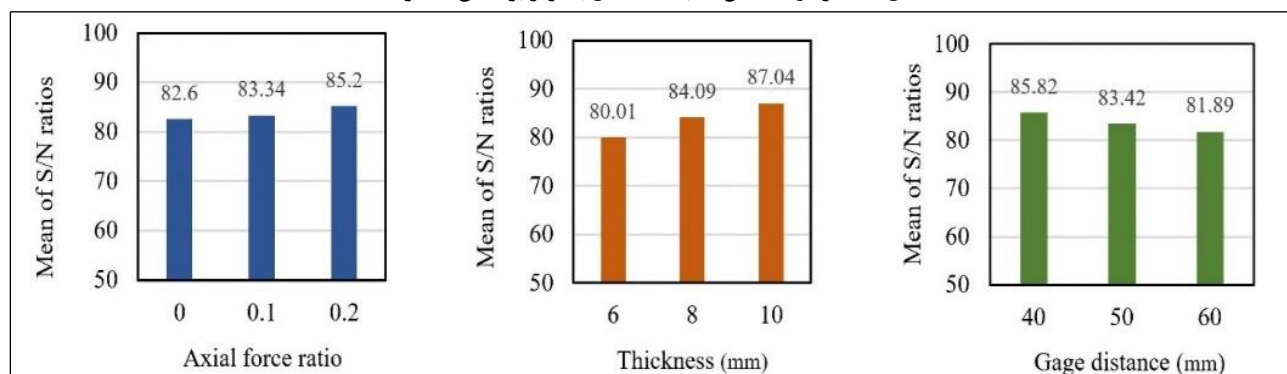
که در آن، S_{ABC} و S_{CDA} : مساحت ناحیه‌ی محصورشده در هر حلقه از نمودار هیستریزس از نقاط ABCA و CDAC؛ و S_{AOBE} و S_{AODF} : مساحت مثلث‌های قائم‌الزاویه تشکیل‌شده در هر حلقه از نمودار هیستریزس از نقاط OBE و ODF هستند.

نتایج تحلیل در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود؛ که در آن، نمودار ضریب میرایی معادل، روند تغییرات اتلاف انرژی در هر سیکل را نشان می‌دهد. در برخی نمونه‌های بدون نیروی محوری، مقدار ضریب میرایی بیشتر بوده است، که به‌دلیل شکل یکنواخت‌تر و نبود جمع‌شدگی در منحنی‌های هیستریزس است. این موضوع الزاماً به معنای جذب انرژی بیشتر در مجموع سیکل‌ها نیست. بلکه بیانگر پایداری پاسخ چرخه‌ای و یکنواختی در هر سیکل است. لذا تحلیل ضریب میرایی باید در کنار تحلیل هیستریزس به‌صورت مکمل بررسی شود.



شکل ۱۳. نمودار میانگین بیشینه‌ی لنگر خمشی براساس متغیرها.

شکل ۱۴. نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز براساس متغیرها.

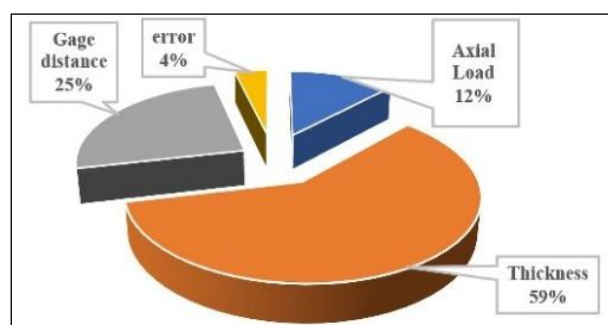


جدول ۵. تحلیل واریانس (ANOVA) متغیرها براساس پیشینه‌ی لنگر خمشی.

Parameters	Degrees of Freedom	Sum of squares	Variance	F-ratio	Significance (%)	Rank
Axial Load ratio	2	56.671	27.335	13.919	11.92	3
Thickness (mm)	2	256.826	28.413	65.386	59.43	1
Gage distance (mm)	2	110.104	55.052	28.031	24.95	2
Error	2	3.927	1.963	-	3.69	
Total	8	425.53	-	-	100	

جدول ۶. ترکیب بهینه‌ی متغیرها براساس پیشینه‌ی لنگر خمشی.

Parameter	Level	Level description	Contri-Bution(kN.m)
Axial Load ratio	3	0.2	3.041
Thickness (mm)	3	10	6.481
Gage distance (mm)	1	40	4.534
Total contributions from all parameters			14.056
Current grand average of performance for moment			16.655
Expected result at optimum conditions			30.711



شکل ۱۵. چارت دایره‌ای اهمیت متغیرهای تحلیل‌شده براساس پیشینه‌ی لنگر خمشی.

۲.۵. معادله‌ی رگرسیون نهایی برای پیش‌بینی لنگر خمشی

با استفاده از تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزاء محدود و به‌کارگیری روش طراحی آزمایش‌ها، معادله‌ی رگرسیونی برای پیش‌بینی لنگر خمشی به‌دست آمده است (رابطه ۲)؛ که بر اساس سه پارامتر کلیدی مدل (نیروی محوری، ضخامت نبشی، و فاصله‌ی میل‌مه‌ار) فرموله شده است:

$$M = 8653 + 30250 n + 3275 t - 424/6 g \quad (2)$$

که در آن، M پیش‌بینی لنگر خمشی (N.m)، n نسبت نیروی محوری (۰، ۰/۱)،

پیش‌بینی مقادیر پیشینه‌ی لنگر به دلیل خطای معیار پایین دارد. این مسئله نشان می‌دهد که روند مشاهده‌شده در نمودارها واقعی است و حاصل تصادف یا نویز داده‌ها نیست.

نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز (S/N) نیز در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود و الگوی مشابهی را تأیید می‌کند؛ که کیفیت و پایداری پاسخ پیشینه‌ی لنگر خمشی را در برابر خطاهای احتمالی نشان می‌دهد. در جدول ۵، گزارش تحلیل واریانس (ANOVA) ارائه و اهمیت نسبی و رتبه‌ی هر متغیر مشخص شده است. براساس تحلیل اخیر، ضخامت نبشی با مقدار ۵۹/۴۳ اهمیت، رتبه‌ی اول و پس از آن فاصله‌ی مه‌اری و نیروی محوری به ترتیب با ۲۴/۹۵ و ۱۱/۹۲ درصد در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند، که در شکل ۱۵ به‌صورت بصری مشاهده می‌شوند.

ترکیب بهینه در جدول ۶ نشان می‌دهد که با اعمال سطح پیشنهادی برای هر متغیر، چه میزان تغییر در لنگر ایجاد می‌شود. در ترکیب اخیر، پیش‌بینی شده است که مقدار ۱۴/۰۵۶ کیلو نیوتن.متر به میانگین لنگر (۱۶/۱۶ کیلو نیوتن.متر) افزوده شود. به‌طور خاص، با اعمال نیروی محوری ۲۰٪، ضخامت ۱۰ میلی‌متر، و فاصله‌ی مه‌اری ۴۰ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود مقدار پیشینه‌ی لنگر خمشی به ۳۰/۷۱ کیلو نیوتن.متر برسد. این موضوع به‌وضوح تأثیر هم‌زمان سه متغیر بررسی‌شده را در عملکرد دینامیکی اتصال نشان می‌دهد.

جدول ۷. پارامترهای خروجی از مدل عددی برای ترکیب بهینه متغیرها.

	Axial Load ratio	Thickness (mm)	Gage distance (mm)	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	Absorbed energy (kJ)	Rigidly
Optimal model	0.2	10	40	27.28	30.56	10.12	1.72

۶. نتیجه‌گیری

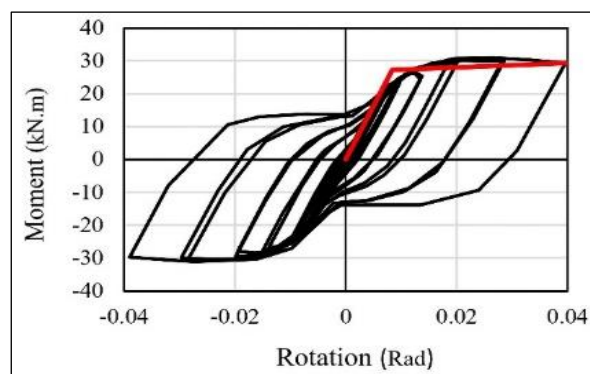
در پژوهش حاضر، با هدف تحلیل رفتار چرخه‌ای اتصال‌های پایه‌ی ستون فولادی مجهز به نبشی تسلیم‌شونده و قابل تعویض، تأثیر سه پارامتر کلیدی، شامل: ضخامت نبشی، نیروی فشار محوری، و فاصله‌ی میل‌مه‌ار به‌صورت هم‌زمان و ترکیبی بررسی شده است. برای این منظور، از تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس و روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی پس از اعتبارسنجی با داده‌های آزمایشگاهی، دقت و تطابق بالایی داشته‌اند.

تحلیل آماری نتایج به‌روش ANOVA نشان داده است که ضخامت نبشی، بیشترین سهم را در افزایش ظرفیت خمشی اتصال داشته است (۵۹/۴۳٪)؛ در حالی که فاصله‌ی میل‌مه‌ار (۲۴/۹۵٪) و نیروی محوری (۱۱/۹۲٪) در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. ترکیب بهینه با ضخامت نبشی ۱۰ میلی‌متر، نیروی محوری ۲۰٪ و فاصله‌ی میل‌مه‌ار ۴۰ میلی‌متر، بیشینه‌ی لنگر خمشی برابر با ۳۰/۷۱ کیلو نیوتن‌متر را به همراه صلبیت مناسب و ظرفیت بالای جذب انرژی (۱۰/۱۲ کیلوژول) حاصل کرده است. این مقادیر با نتایج مدل عددی به‌خوبی تطابق داشته‌اند (۳۰/۵۶ کیلو نیوتن‌متر).

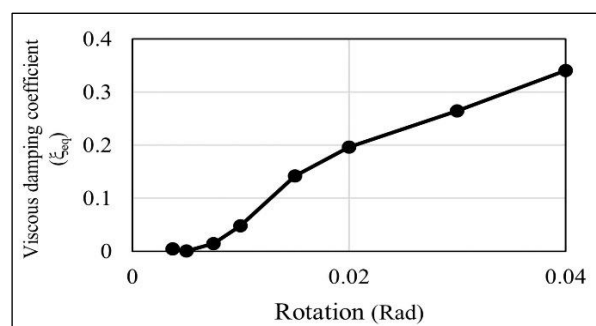
تحلیل نمودارهای هیستریزیس و منحنی‌های دوخطی نشان داده است که تأثیر مثبت بار محوری در عملکرد اتصال‌ها، مشروط به وجود شرایط هندسی و سازه‌ای مناسب است و در صورت وجود ضعف هندسی (مانند ضخامت کم نبشی و فاصله‌ی زیاد میل‌مه‌ارها)، بار محوری می‌تواند زمینه‌ساز زوال زود هنگام رفتار اتصال شود. ترکیب بهینه، منجر به بهبود سختی اولیه، افزایش شکل‌پذیری، و ارتقاء عملکرد اتصال‌ها در برابر بارهای چرخه‌ای می‌شود. هر چند طبق ضوابط استاندارد ۱۶-۳۶۰-ANSI/AISC، رفتار اتصال‌ها در محدوده‌ی مفصلی باقی مانده‌اند، اما همین امر نیز با هدف طراحی اتصال‌های کم‌آسیب، مطلوب تلقی می‌شود.

معادله‌ی رگرسیون پیشنهادی، ابزار دقیقی برای پیش‌بینی بیشینه‌ی لنگر فراهم کرده است، که دقت آن با اعتبارسنجی تأیید شده است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که روش تاگوچی در کاهش تعداد آزمایش‌ها و مدل‌های عددی و بهینه‌سازی عملکرد چرخه‌ای اتصال‌ها مؤثر بوده است و کاربرد آن می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش ایمنی سازه‌ها شود.

توصیه می‌شود برای توسعه‌ی پژوهش حاضر در مطالعات آتی، به بررسی متغیرهایی، نظیر ویژگی‌های مکانیکی مختلف برای نبشی‌ها یا استفاده از شکل‌های دیگر میراگرهای تسلیم‌شونده در اتصال پرداخته شود، تا بتوان عملکرد چرخه‌ای را بهبود بخشید. همچنین بررسی عملکرد اتصال‌های پای ستون تحت خمش حول محور ضعیف نیز می‌تواند اطلاعات بیشتری از رفتار آن به‌دست دهد.



شکل ۱۶. نمودار هیستریزیس لنگر - دوران و دوخطی مدل عددی برای ترکیب بهینه متغیرها.



شکل ۱۷. ضریب میرایی معادل ویسکوز مدل‌های عددی برای ترکیب بهینه.

و ۰/۲)، مقدار ضخامت نبشی (mm)، و g فاصله‌ی میل‌های مه‌اری از بال ستون (mm) هستند.

۳.۵. اعتبارسنجی تحلیل تاگوچی

برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل واریانس نمونه‌های طراحی‌شده با روش تاگوچی و ارزیابی دقت پیش‌بینی ترکیب بهینه‌ی ارائه‌شده در جدول ۵، نمونه‌ی مدل عددی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. نمودار هیستریزیس و منحنی دوخطی آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۷ گزارش شده و تطابق نزدیک بین مقدار بیشینه‌ی لنگر خمشی پیش‌بینی‌شده (۳۰/۷۱ کیلو نیوتن‌متر) و نتیجه‌ی مدل عددی اجزاء محدود (۳۰/۵۶ کیلو نیوتن‌متر، دقت بالای تحلیل تاگوچی و مدل عددی را تأیید می‌کند. همچنین، معیارهای دیگر مانند انرژی جذب‌شده و صلبیت برای ترکیب مذکور محاسبه و گزارش شده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی رفتار چرخه‌ای بهبودیافته با صلبیت مفصلی است. ضریب میرایی معادل در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. روش تاگوچی با کاهش تعداد مدل‌های عددی به ۹ نمونه و ارائه‌ی معادله‌ی رگرسیون و اعتبارسنجی موفق، کارایی بالایی در بهینه‌سازی و پیش‌بینی لنگر بیشینه را نشان داده است.

References- منابع

1. Kanvinde, A.M., Jordan, S.J. and R.J. Cooke., 2013. Exposed column base plate connections in moment frames — Simulations and behavioral insights. *Journal of Constructional Steel Research*, 84: p. 82-93. DOI: [10.1016/j.jcsr.2013.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.02.015).
2. Lim, W. Y., Lee, D. and You, Y. C., 2017. Exposed column-base plate strong-axis connections for small-size steel construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, pp. 286-296. DOI: [10.1016/j.jcsr.2017.06.018](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.018).
3. Sivandi-Pour, A., Gerami, M. and Taghdisi, M., 2019. Assessment of the effect of column base connection rotation. DOI: [10.24200/j30.2018.2132.2103](https://doi.org/10.24200/j30.2018.2132.2103).
4. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A., 2021. An experimental study on cyclic performance of the geometrically prismatic concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(2), pp. 629-638. DOI: [10.1007/s40996-020-00410-z](https://doi.org/10.1007/s40996-020-00410-z).
5. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A., 2021. Impact of temperature rise on the seismic performance of concrete-filled double skin steel columns with prismatic geometry. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(4), pp. 2800-2815. DOI: [10.1520/jte20200037](https://doi.org/10.1520/jte20200037).
6. Aghaei, I. and Miri, M., 2023. Experimental and analytical investigation of asymmetric friction connections in steel column bases. *13th International Congress on Civil Engineering*, [in Persian]. <https://civilica.com/doc/1853046>.
7. Zhang, R., Liu, J., Xu, J. and Jia, L., 2024. Low-damage performance of blast resilient steel rocking column base with friction connection. *Thin-Walled Structures*, 197, pp. 111598. DOI: [10.1016/j.tws.2024.111598](https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111598).
8. Zhang, R., Xie, J., Chouery, K., Liu, J., Jia, L., Xiang, P., Zhao, X., MacRae, G., Clifton, G. C., Dhakal, R., Ramhormozian, S. and Yan, Z., 2022. Strong axis low-damage performance of rocking column-base joints with asymmetric friction connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 191, pp. 107175. DOI: [10.1016/j.jcsr.2022.107175](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107175).
9. Zhang, R., Yan, Z., Xie, J., Liu, J., Jia, L., Xiang, P., Zhao, X., MacRae, G., Clifton, G. C., Dhakal, R. and Ramhormozian, S., 2024. Weak axis low-damage performance of seismic resilient rocking steel column base with friction connection. *Journal of Building Engineering*, 86, pp. 108778. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.108778](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108778).
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, pp. 14-30. DOI: [10.1016/j.jcsr.2018.06.027](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.027).
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, pp. 109474. DOI: [10.1016/j.jobbe.2024.109474](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109474).
12. Gerami, M. and Khatami, M., 2017. The effects of initial post tensioning force on seismic behavior of steel moment resisting frames by post-tensioned connections. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(1.1), pp. 107-115. [in Persian]. DOI: [10.24200/j30.2017.1101](https://doi.org/10.24200/j30.2017.1101).
13. Li, Y. W. and Koetaka, Y., 2022. Steel rocking column bases with replaceable cover plates: Cyclic loading behaviour and practical design. *Engineering Structures*, 264, pp. 114467. DOI: [10.1016/j.engstruct.2022.114467](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114467).
14. 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, pp. 119000. DOI: [10.1016/j.engstruct.2024.119000](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119000).
15. Wang, X. T., Xie, C.T., Lin, L.L. and Li, J., 2019. Seismic behavior of self-centering concrete-filled square steel tubular (CFST) column base. *Journal of Constructional Steel Research*, 156, pp. 75-85. DOI: [10.1016/j.jcsr.2019.01.025](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.025).
16. 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, pp. 118943. DOI: [10.1016/j.engstruct.2024.118943](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118943).
17. Borzouie, J., 2015. low damage steel base connection. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
18. Hou, H., Wang, C., Qu, B. and Liang, Y., 2021. Cyclic testing of bolted base connections for wide-flange columns. *Engineering Structures*, 235, pp. 112024. DOI: [10.1016/j.engstruct.2021.112024](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112024).
19. Bagheri, S. and Vafi Tabrizi, N., 2014. Evaluation of partial rigidity of simple steel frames with angle connections under gravity loads. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 30(1.2), pp. 137-146. [in Persian].
20. Tarighi, P., Kafi, M.A. and Vahdani, R., 2024. Experimental investigation of the performance of

- replaceable-rigid connection. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 39(4), pp. 3-17. [in Persian].
21. 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, pp. 106547. DOI: [10.1016/j.jcsr.2021.106547](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106547).
22. Meng, B., Du, Q., Zhong, W., Tan, Z. and You, K., 2024. Performance analysis of novel double web V-bending angle-steel connections against progressive collapse. *Structures*, 59, pp. 105705. DOI: [10.1016/j.istruc.2023.105705](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105705).
23. Sun, D., Yang, Y., Miao, J., Feng, S. and Xue, W., 2024. Moment-rotation model of self-centering (SC) column base with web-friction-device (WFD) and stiffener-steel (SS) angles. *Journal of Constructional Steel Research*, 219, pp. 108801. DOI: [10.1016/j.jcsr.2024.108801](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108801).
24. Sun, D., Yang, Y., Ma, Y., Xue, Y., Yu, Y. and Feng, S., 2022. Seismic behavior of self-centering column base with replaceable stiffener angle steels. *Thin-Walled Structures*, 181, pp. 110113. DOI: [10.1016/j.tws.2022.110113](https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110113).
25. Aabid, A., Ibrahim, Y., Hrairi, M. and Ali, J.S.M., 2023. Optimization of structural damage repair with single and double-sided composite patches through the finite element analysis and taguchi method. *Materials*, 16(4), pp. 1581. DOI: [10.3390/ma16041581](https://doi.org/10.3390/ma16041581).
26. Mohammad Bagheri, S., Naderi, M., Vajdi, M., Sadegh Moghanlou, F. and Tarlani Beris, A., 2023. Numerical optimization of sample and die geometric parameters to increase the attainable temperature during spark plasma sintering of TiC ceramics. *Synthesis and Sintering*, 3(4). DOI: [10.53063/synsint.2023.34179](https://doi.org/10.53063/synsint.2023.34179).
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), pp. 4899-4910. DOI: [10.1007/s12008-024-01839-6](https://doi.org/10.1007/s12008-024-01839-6).
28. Abaqus, F., 2014. ABAQUS 6.14 Documentation. *Dassault Syst Provid Google Scholar*, 12, pp. 129-130.
29. Wei, J. P., Tian, L.M., Guo, Y., Qiao, H.Y., Jiao, Z.A. and Bao, Y., 2022. Design and cyclic behavior of a bidirectional double-hinge steel column base. *Structures*, 43, pp. 1573-1591. DOI: [10.1016/j.istruc.2022.07.052](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.052).
30. He, X., Ke, K., Guo, L., Yam, M.C.H. and Wang, Z., 2021. A replaceable fuse steel-concrete composite connection: Force transfer mechanism and design considerations. *Journal of Constructional Steel Research*, 183, pp. 106760. DOI: [10.1016/j.jcsr.2021.106760](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106760).
31. AISC 341, 2016. Seismic provisions for structural steel buildings, ANSI/AISC. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL.
32. ASCE 41, 2017. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, Standard ASCE/SEI 41-17. American society of civil Engineers, pp. 623.
33. AISC 360, 2016. Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-16). American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.