

# مطالعه عددی رفتار چرخه‌ای اتصالات نبشی پایه ستون فولادی با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی

ایمان آقائی<sup>۱</sup>، محمود میری<sup>۲</sup>، حامد قوهانی عرب<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری عمران- سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

## چکیده:

در این پژوهش، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی شامل ضخامت نبشی، نیروی محوری و فاصله میل‌مه‌ار از لبه ستون بر رفتار چرخه‌ای اتصالات پایه ستون‌های فولادی با نبشی‌های تسلیم‌شونده و قابل تعویض پرداخته شده است. هدف اصلی، ارزیابی ظرفیت خمشی این اتصالات تحت بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی و تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس است. تحلیل آماری نتایج به روش تحلیل واریانس نشان داد که ضخامت نبشی با سهم ۵۹/۴۳ درصد، بیشترین تأثیر را بر افزایش ظرفیت خمشی دارد، در حالی که فاصله میل‌مه‌ار با ۲۴/۹۵ درصد و نیروی محوری با ۱۱/۹۲ درصد در رده‌های بعدی قرار گرفتند. معادله رگرسیونی توسعه یافته، رابطه بین پارامترهای ورودی و ظرفیت خمشی را با دقت بالا پیش‌بینی کرد که با نتایج مدل عددی تطابق نزدیکی دارد. ترکیب بهینه با ضخامت نبشی ۱۰ میلی‌متر، نیروی محوری ۲۰ درصد و فاصله میل‌مه‌ار ۴۰ میلی‌متر، بیشینه لنگر خمشی برابر با ۳۰/۷۱ کیلونیوتن‌متر را حاصل کرد. رفتار اتصال در تمامی ترکیب‌ها در ناحیه مفصلی باقی مانده است.

## واژگان کلیدی:

اتصالات پایه ستون فولادی، نبشی فولادی قابل تعویض، رفتار چرخه‌ای، تحلیل اجزا محدود، روش تاگوچی

\* حامد قوهانی عرب، دانشیار گروه مهندسی عمران- دانشگاه سیستان و بلوچستان

ایمیل [ghohani@eng.usb.ac.ir](mailto:ghohani@eng.usb.ac.ir) (نویسنده مسئول مقاله)

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

I. Aghaei<sup>1</sup>, M. Miri<sup>2</sup>, H. Ghohani Arab<sup>3</sup>

1- Ph.D. Student in Structural Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Sistan and Baluchestan, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Sistan and Baluchestan, Iran.

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Sistan and Baluchestan, Iran

## 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.

**.Keywords:** Steel Column Base Connection, Replaceable steel angle, Finite Element Analysis (FEA), Cyclic behavior, Taguchi Method

## ۱. مقدمه

اتصالات پایه ستون در سازه‌های فولادی به عنوان واسط بین اعضای قائم و فونداسیون نقش کلیدی در انتقال نیروهای محوری، خمشی و برشی ایفا می‌کنند. عملکرد صحیح این اتصالات، به ویژه در هنگام وقوع زلزله، نقش حیاتی در پایداری و ایمنی سازه دارد [۳-۱]. در شرایط بارگذاری چرخه‌ای، اتصالات باید ضمن انتقال مؤثر نیروها، از شکل‌پذیری و مقاومت کافی برخوردار باشند تا از انتقال آسیب به اعضای اصلی سازه جلوگیری گردد [۴-۶]. اگرچه تحقیقات گسترده‌ای روی اتصالات تیر-ستون انجام شده، مطالعات مرتبط با اتصالات پایه ستون، به‌ویژه تحت بارگذاری چرخه‌ای، همچنان محدود باقی مانده‌اند.

طی سال‌های اخیر، استفاده از اتصالات کم‌آسیب<sup>۱</sup> مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. هدف از این نوع طراحی، محافظت از اعضای اصلی سازه در برابر خرابی و فراهم کردن شرایطی برای تعمیر یا تعویض سریع قسمت‌های آسیب‌دیده، بدون لطمه به ستون‌ها یا پی سازه می‌باشد. اتصالات کم‌آسیب در قالب روش‌هایی نظیر اتصالات اصطکاکی [۶-۹]، استفاده از کابل‌های پیش‌تنیده [۱۲-۱۰] و بهره‌گیری از میراگرهای تسلیم‌شونده [۱۳-۱۶] پیاده‌سازی می‌شوند. ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۲ و ۲۰۲۴) [۸ و ۹] رفتار چرخه‌ای اتصالات اصطکاکی نامتقارن را در پایه ستون یک سازه سه‌طبقه بررسی کردند و نشان دادند که این اتصالات دارای نمودارهای هیستریزس پرچمی شکل بوده و در صورت تعویض پیچ‌ها و بارگذاری مجدد، عملکردی بدون کاهش مقاومت و سختی دارند. آن‌ها همچنین در مطالعه‌ای دیگر [۷]، عملکرد این اتصالات را تحت بارگذاری انفجاری و بصورت آزمایشگاهی و عددی ارزیابی کردند که نتایج رضایت‌بخشی را نشان داد. با این حال، پیچیدگی طراحی و هزینه بالای اجرا، کاربرد این اتصالات را در پروژه‌های عملی محدود کرده است. شن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۴) [۱۱] پایه ستون با اتصالات خودمركزگرا و میله‌های مقاوم در برابر کماتش را تحت بار فشاری به‌صورت آزمایشگاهی و عددی تحلیل کردند و

جذب انرژی و شکل‌پذیری را گزارش دادند. همچنین عملکرد چرخه‌ای مطلوب و قابلیت بازگشت عملکرد سازه را گزارش کردند. کمپریدس<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸) [۱۰] اتصالات پایه ستون خودمركزگرا با مقاومت جزئی را معرفی کردند و به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. هدف آنها ارائه اتصالاتی با شکل‌پذیری و مقاومت بالا بود. اما این سیستم‌ها بدلیل طراحی پیچیده نیاز به تجهیزات تخصصی دارند. اتصالات کم‌آسیب با میراگرهای تسلیم‌شونده به دلیل توانایی در جذب انرژی و کاهش خرابی اعضای اصلی سازه، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. وانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۴) [۱۴]، یک اتصال پایه ستون خودمركزگرا با پیچ‌های آلیاژ حافظه‌دار و نبشی‌های قابل تعویض را پیشنهاد کردند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد وجود نبشی‌ها، ظرفیت خمشی پایه ستون را افزایش داده و نبشی‌های فولادی آسیب‌دیده می‌توانند به سرعت پس از زلزله بدون قطع عملکرد عادی ستون تعویض شوند. با این حال، استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار هزینه تولید را افزایش می‌دهد. ژیانو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۴) [۱۶] یک سیستم پایه ستون لغزشی بتن مسلح با میراگرهای فلزی مقاوم در برابر کماتش با شکل‌های مختلف را پیشنهاد کردند. این سیستم تحت بارگذاری چرخه‌ای، ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری عالی از خود نشان داد. با این حال، استفاده از بتن مسلح و میراگرهای پیچیده، چالش‌هایی در اجرا و هزینه ایجاد کرد.

در مقابل، اتصالات با نبشی تسلیم‌شونده به دلیل سادگی اجرا، هزینه پایین، و قابلیت تعویض آسان، به‌عنوان گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه و کارآمد برای پایه ستون‌های فولادی شناخته می‌شوند [۱۷-۲۰]. برزویی<sup>۷</sup> (۲۰۱۵) [۱۷] به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی انواع اتصالات پایه ستون کم‌آسیب، از جمله اتصالات با نبشی تسلیم‌شونده پرداخته است و نشان داد 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 قرار دادن میل‌مهارها نزدیک‌تر به وجه ستون است. اما اثر

<sup>۴</sup> Kamperidis

<sup>۵</sup> Wang

<sup>۶</sup> Xiao

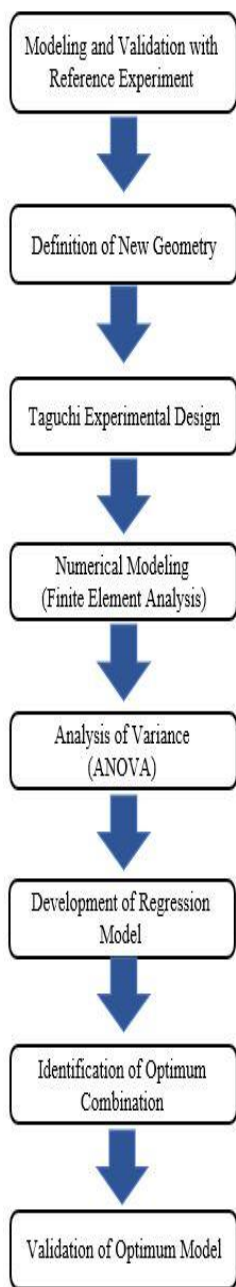
<sup>۷</sup> Borzouie

<sup>۱</sup> Low Damage

<sup>۲</sup> Zhang

<sup>۳</sup> Shen

بهینه برای دستیابی به حداکثر ظرفیت خمشی پیشنهاد می‌گردد. در شکل (۱) فلوچارت کلی فرآیند تحلیل عددی و آماری اتصالات پایه ستون آورده شده است.



شکل ۱. فلوچارت فرآیند پژوهش

متقابل پارامترهایی مانند نیروی محوری و فاصله میل‌مه‌ها بررسی نشد. هو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱) [۱۸ و ۲۱] یک اتصال پیچی جدید با دو نبشی را برای ستون‌های بال‌پهن تحت بار فشار محوری و خمشی حول محور قوی و ضعیف تحلیل کردند. اتصال به روشی شکل‌پذیر رفتار کرده و عملکرد اتلاف انرژی رضایت‌بخشی را از خود نشان داد، بدون اینکه هیچ گونه پارگی در اجزای اتصال رخ دهد. مشاهده شد که نسبت فشار محوری بیشتر در ستون، تمایل به ایجاد مقاومت جانبی بالاتری برای اتصال در محدوده چرخش اتصال دارد. با این حال، این مطالعه به بررسی اثرات متقابل پارامترها را در نظر نگرفت.

با وجود پیشرفت‌های ذکرشده، چندین شکاف پژوهشی در ادبیات موجود وجود دارد. نخست، اکثر مطالعات پیشین تنها یک یا دو پارامتر را بررسی کرده‌اند و تحلیل هم‌زمان اثرات متقابل چندین پارامتر کلیدی کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۷ و ۲۲]. 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 و ۲۴]. از سوی دیگر، رویکردهای آزمایشگاهی سنتی به دلیل هزینه و زمان بالا، توانایی بررسی ترکیب‌های متعدد پارامترها را ندارند [۲۵-۲۷].

این پژوهش با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی<sup>۲</sup> و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، به تحلیل هم‌زمان اثرات سه پارامتر کلیدی (ضخامت نبشی، نیروی محوری، و فاصله میل‌مه‌ها) بر رفتار چرخه‌ای اتصالات پایه ستون مجهز به نبشی تسلیم‌شونده می‌پردازد. این رویکرد ضمن کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز، امکان تحلیل دقیق اثرات متقابل پارامترها را فراهم کرده و راهکاری بهینه برای طراحی اتصالات با هزینه محاسباتی پایین ارائه می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود استانداردهای طراحی و افزایش ایمنی سازه‌های فولادی در برابر زلزله کمک کند.

در ادامه این مقاله، ابتدا مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی آن با داده‌های آزمایشگاهی تشریح می‌شود. سپس، طراحی آزمایش به روش تاگوچی و تحلیل نتایج ارائه شده و در نهایت، پارامترهای

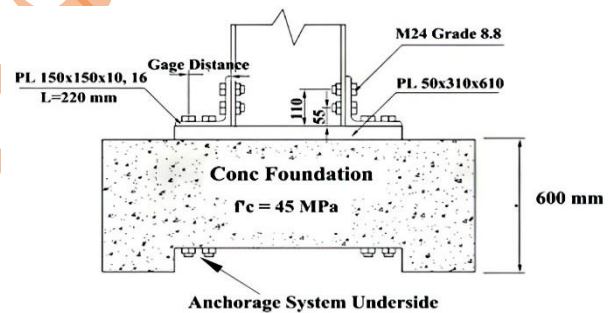
<sup>۱</sup> Hou

<sup>۲</sup> Taguchi

## ۲. مدل آزمایشگاهی و اجزای محدود

### ۱.۲. مدل آزمایشگاهی

شکل (۲) اجزای نمونه آزمایشگاهی بررسی شده توسط برزویی (۲۰۱۵) [۱۷] را نشان می‌دهد. این اتصال شامل ستون با مقطع I شکل از نوع یونیورسال با نماد اختصاری 310UB46.2 و یک جفت نبشی است که به بال‌های ستون و کف ستون بوسیله پیچ‌های پر مقاومت متصل شده‌اند و از هیچ گونه جوش در این آزمایش استفاده نشده است. مشخصات تمامی اجزای اتصال در شکل (۲) نشان داده شده است. در بررسی آزمایشگاهی انجام شده بروی این اتصال، مدل شماره ۴ مرجع، دارای نبشی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و فاصله مرکز میل‌مه‌ها از ستون مقدار ۱۱۰ میلی‌متر است. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۷] ارائه شده است.



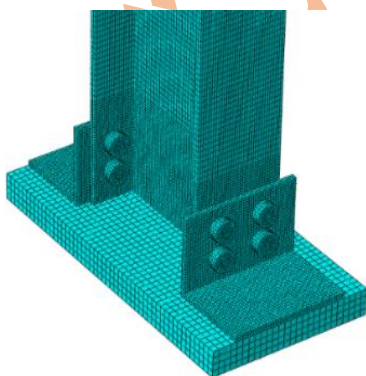
شکل ۲. اجزای اتصال پایه ستون با نبشی تسلیم شونده در مدل آزمایشگاهی [۱۷]

### ۲.۲. مدل اجزای محدود

در مدل اجزای محدود، فونداسیون به صورت یک صفحه فولادی مدل‌سازی شد و شرط مرزی گیردار در سطح زیرین آن اعمال شد تا ضمن حفظ دقت کافی، پیچیدگی و هزینه محاسباتی کاهش یابد و تأثیر آن بر نتایج اتصال ناچیز باشد. از آنجا که نتایج آزمایش نشان می‌دهد که اتصالات نبشی به کف ستون تقریباً هیچ تغییرشکل نسبی از خود نشان ندادند؛ بنابراین، این اتصالات به صورت قیود Tie ساده‌سازی شدند. درجه آزادی انتقالی در انتهای

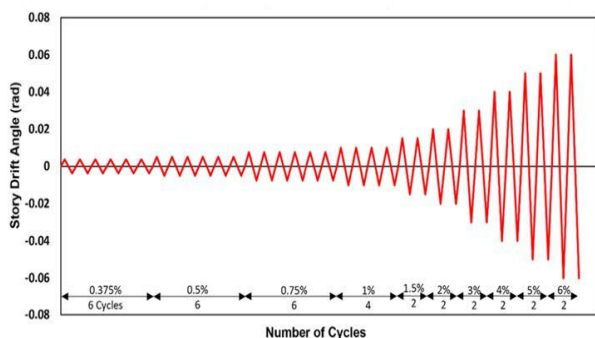
آزاد ستون حول محور ضعیف مقید شده تا از پیچش در اثر جابجایی جانبی جلوگیری شود.

مدل اجزای محدود با استفاده از المان جامد هشت گرهی (C3D8R) در نرم افزار آباکوس [۲۸] مدل‌سازی شده است. تحلیل به صورت ضمنی، شبه استاتیکی و از نوع Static General برای کاهش اثر دینامیکی استفاده شد. اندازه مش‌های مختلف برای کاهش زمان محاسبات اتخاذ شد. اندازه مش نبشی‌ها و پیچ‌ها ۴ میلی‌متر و ستون دارای اندازه مش از ۵ تا ۱۰ میلی‌متر از ناحیه اتصالات تا محل اعمال بارگذاری متغیر است. اندازه مش ۴ میلی‌متر برای مدل‌سازی اتصال پای ستون در نرم‌افزار آباکوس انتخاب شد، که تعادل مناسبی بین دقت شبیه‌سازی رفتار پلاستیک نبشی و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند. تحلیل حساسیت نشان داد مش‌های درشت‌تر قادر به توصیف دقیق تغییرشکل‌های پلاستیک نبوده و همگرایی مطلوب نداشتند، در حالی که مش‌های ریزتر به دلیل افزایش قابل توجه زمان محاسبات به صرفه نبودند. بنابراین، انتخاب مش ۴ میلی‌متر موجب تضمین صحت نتایج و بهینه‌سازی هزینه محاسباتی شد. نبشی‌ها به دلیل تغییر شکل پلاستیک قابل توجه در جهت ضخامت از دو لایه مش استفاده شده است (شکل (۳)).



شکل ۳: مش‌بندی مدل عددی

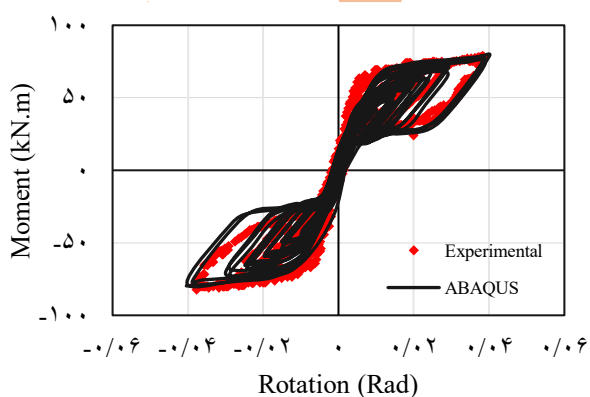
یک مدل سخت‌شدگی ایزوتروپیک دوخطی برای تحلیل استفاده شد [۲۹]. مقادیر تنش تسلیم و مقاومت نهایی اجزا با



شکل ۴. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای [۳۱]

### ۳.۲. اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

در شکل (۵)، نمودار هیستریزس حاصل از آزمایش‌های تجربی با خروجی‌های مدل اجزای محدود مقایسه شده‌اند. در جدول (۱) مقادیر لنگر در نقاط پیک از زاویه چرخش ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ رادیان آورده شده است. انطباق زیاد نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی با اختلاف کمتر از ۷ درصد در مقادیر اوج دقت و صحت مدل عددی را تأیید می‌کند. البته این میزان اختلاف در مقادیر لنگر و شیب نمودار هیستریزس ناشی از ساده‌سازی‌های انجام شده در فرآیند مدل‌سازی و نادیده گرفتن ویژگی‌های آسیب‌دیدگی و شکست در اجزا می‌باشد. این همخوانی حاکی از سازگاری فرضیات مدل‌سازی، از جمله خواص مواد، شرایط مرزی و تماس‌های بین اجزا، با شرایط واقعی است.



شکل ۵. منحنی هیستریزس (لنگر- دوران) مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود

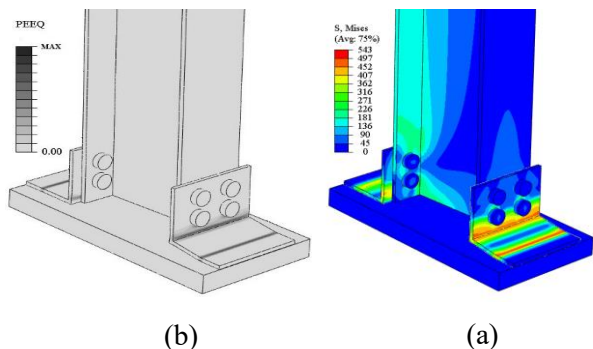
داده‌های آزمایشگاهی برابر در نظر گرفته شد [۱۷]. به طوری که تنش تسلیم فولاد برابر با ۳۲۰ مگاپاسکال و مدول یانگ معادل ۲۱۰ گیگاپاسکال تعیین گردید. لازم به ذکر است که پیش از آغاز مدل‌سازی اجزای محدود، مقادیر تنش- کرنش به دست آمده از آزمایش باید به مقادیر واقعی تبدیل شوند. تعامل بین اجزای مختلف تأثیر قابل توجهی بر عملکرد چرخه‌ای پایه ستون دارد؛ بنابراین، تماس سطح به سطح (Surface-to-Surface Contact) همراه با مقدار ضریب اصطکاک ۰/۳ بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی معتبر در مشابه‌ترین شرایط تماس فولاد بر فولاد انتخاب شده است تا دقت مدل‌سازی اندرکنش سطوح تماس تضمین شود [۳۰]. در راستای قائم نیز شرط HardContact به کار رفته تا از نفوذ اجزا جلوگیری شود، در حالی که جداسازی در حضور نیروهای کششی مجاز در نظر گرفته شده است.

بارگذاری دارای ۲ گام می‌باشد: الف) بار عمودی به مقدار ۳۲۰ کیلونیوتن که به سطح بالای ستون اعمال گردیده که این مقدار ۰/۲ از کل ظرفیت محوری ستون بوده است. ب) بارگذاری چرخه‌ای به صورت افقی به انتهای ستون اعمال گشته و بر اساس پروتکل بارگذاری آزمایش بوده است. حداکثر نسبت دریفت ۰/۰۴ رادیان است. همانند شکل (۴) پروتکل جابجایی چرخه‌ای بر اساس استاندارد ANSI/AISC 341-16 تنظیم شده و با توجه به ارتفاع ۱۲۰۰ میلیمتر در آباکوس تعریف شده است [۳۱]. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای به صورت توالی جابه‌جایی‌های افزایشی تعریف شده است که شامل ۶ سیکل در سطوح دریفت ۰/۳۷۵، ۰/۵، ۰/۷۵ درصد، ۴ سیکل در سطوح دریفت ۱ درصد و ۲ سیکل در سطوح دریفت بالاتر است. این پروتکل در نرم‌افزار آباکوس از طریق تعریف توابع دامنه Amplitude در ماژول بارگذاری اعمال شد تا رفتار چرخه‌ای اتصال پایه ستون شبیه‌سازی شود.

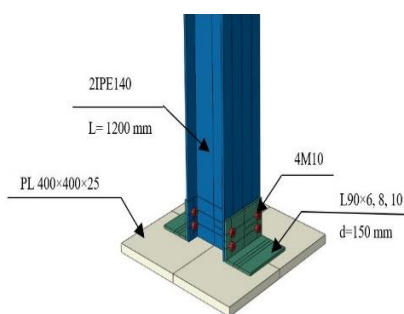
جدول ۱. مقایسه نتایج لنگر خمشی مدل آزمایشگاهی و عددی

جدول ۱. مقایسه نتایج لنگر خمشی مدل 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



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



شکل ۷. هندسه مدل عددی

خواص مکانیکی فولادها از نوع S235 با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال تعریف شده است. پیچ‌ها از نوع A325 با تنش تسلیم ۶۳۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۸۱۰ مگاپاسکال در کرنش ۲۵ درصد در نظر گرفته شده‌اند [۲۱].

### ۳. طراحی آزمایش به روش تاگوچی

تحلیل پارامتری برای بررسی تأثیر سه متغیر اصلی بر رفتار اتصال طراحی شده است. متغیرها شامل نیروی محوری (بر اساس نسبتی

شکل (۶) توزیع تنش فون میسز و کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در نرم‌افزار آباکوس را نمایش می‌دهد. شکل شماره ۴ (ب)، کانتور توزیع کرنش پلاستیک تجمعی (PEEQ) در مدل عددی را به صورت مقیاس خاکستری (از روشن تا تیره) نمایش می‌دهد. نواحی تیره رنگ در این تصویر معرف مناطقی هستند که ماده دچار کرنش پلاستیک شده و نشان‌دهنده نواحی جاری شدن و تغییر شکل غیر الاستیک است. در مقابل، بخش‌های روشن، نقاطی را نشان می‌دهند که کرنش پلاستیک صفر یا بسیار ناچیز داشته و از رفتار الاستیک پیروی می‌کنند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، دو خط تیره مشخص و ممتد در ناحیه اتصال وجود دارد که نمایانگر تمرکز کرنش پلاستیک و شروع رفتار تسلیم ماده در این بخش‌ها است. این نواحی دقیقاً منطبق بر مناطقی است که در آنها تنش فون میسز (شکل ۴ (الف)) به مقدار بحرانی خود نزدیک شده و موجب گسیختگی یا پلاستیک شدن موضعی می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کرنش پلاستیک با افزایش میزان دررفت به صورت تدریجی افزایش یافته و ناحیه پلاستیک عمدتاً در محدوده نبشی‌های فولادی متمرکز شده است. این تمرکز کرنش در ناحیه مذکور نشان‌دهنده عملکرد مناسب نبشی‌ها به‌عنوان اجزای جذب‌کننده انرژی و شکل‌پذیر در اتصال می‌باشد.

### ۴.۲. مدل اصلاح‌شده برای تحلیل پارامتریک

با توجه به رایج بودن طراحی ستون‌ها به شکل مرکب، از ستون با مقطع 2IPE140 و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر (فاصله از ورق پایه ستون تا نقطه اعمال بار) مدلسازی شده و تمامی جابه‌جایی‌ها و دوران‌ها نسبت به این ارتفاع محاسبه شده‌اند. ورق پایه ستون با ابعاد

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

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۱.۴. نمودارهای هیستریزیس

نتایج مدل‌سازی‌های عددی برای نمونه‌های طراحی شده در بخش ۳، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس استخراج شده و در این بخش ارائه و تفسیر شده‌اند. هدف، بررسی تأثیر ضخامت نبشی (۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر)، نیروی محوری (۰، ۰/۱ و ۰/۲ نسبت به ظرفیت فشار محوری ستون) و فاصله میل‌مه‌ارها (۴۰، ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر) بر رفتار چرخه‌ای اتصال پایه ستون‌های فولادی با نبشی بوده است. نمودارهای هیستریزیس لنگر-دوران به‌همراه منحنی‌های دوخطی ایده‌آل شده برای ۹ ترکیب عددی در شکل (۸) ارائه شده‌اند. این نمودارها بازتاب‌دهنده‌ی رفتار غیرخطی واقعی اتصالات 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

از ظرفیت فشار محوری ستون)، ضخامت نبشی و فاصله میل‌مه‌ارها از لبه ستون انتخاب شده‌اند. ظرفیت فشار محوری ستون برابر با ۶۷۹ کیلو نیوتن بوده است که نسبت نیروی محوری از صفر تا ۰/۲ اعمال گردیده است. هر متغیر دارای سه سطح می‌باشد که در جدول (۲) سطوح آنها نشان داده شده است. این متغیرها بر اساس اهمیت آنها در رفتار چرخه‌ای اتصالات 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 (۳<sup>۳</sup>) به ۹ کاهش داده و اثرات اصلی و تعاملات متغیرها را ارزیابی کرده است. مزیت این روش 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 سه دسته تقسیم می‌کند: «کمتر-بهرتر»، «بیشتر-بهرتر» و «اسمی-بهرتر». در این پژوهش، با هدف افزایش ظرفیت خمشی، دسته «بیشتر-بهرتر» انتخاب شده است [۲۵]. برای ارزیابی عملکرد، نسبت سیگنال به نویز (S/N) محاسبه شد که نشان‌دهنده تغییرات پاسخ نسبت به تنظیمات عوامل است. نسبت S/N بالاتر بیانگر تغییرات کمتر و عملکرد بهتر است [۲۷].

این ۹ ترکیب در نرم‌افزار Qualitek-4 طراحی و آنالیز شده و در جدول (۳) ارائه شده است. برای هر ترکیب، شبیه‌سازی در آباکوس اجرا شده و خروجی‌هایی نظیر بیشینه لنگر خمشی و انرژی جذب‌شده استخراج شده‌اند تا متغیرهای غالب شناسایی شوند.

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

خمشی از خود نشان داده‌اند؛ اما این اثر مثبت همواره مطلق نیست و در مواردی نظیر مدل شماره ۷، پارامترهایی مانند کاهش ضخامت و افزایش فاصله میل‌مه‌ها 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 گستردگی حلقه‌های هیستریزس و انطباق رفتار با منحنی‌های دوخطی استنباط می‌شود) در ترکیب‌هایی با نیروی محوری بالاتر بهبود یافته است. باید توجه داشت که اثر مثبت نیروی محوری بر جذب انرژی، تنها 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 و این موضوع بیانگر آسیب تجمعی یا کاهش بازدهی در رفتار چرخه‌ای اتصال است. این تفاوت‌های عملکردی نشان‌دهنده تأثیر مستقیم متغیرهای هندسی و بارگذاری بر رفتار چرخه‌ای اتصال بوده و با نتایج مطالعات پیشین نظیر [۱۷ و ۲۴] بخصوص اثر نیروی محوری بر ظرفیت خمشی سازه‌ها مطابقت دارد.

در این پژوهش، در جدول (۴)، نسبت شکل‌پذیری  $(\theta_u/\theta_y)$  اتصالات پایه ستون فولادی تحت تأثیر سه پارامتر کلیدی ضخامت نبشی، نیروی محوری اعمالی و فاصله میل‌مه‌ها بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد افزایش ضخامت نبشی باعث بهبود قابل توجه شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی اتصال می‌شود، در حالی که افزایش نیروی محوری به‌خصوص در ضخامت‌های کمتر، کاهش شکل‌پذیری را در پی دارد. فاصله میل‌مه‌ها 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 محدودکننده نیروی محوری بر ظرفیت دوران پلاستیک است. این نتایج همسو با الزامات کدهای لرزه‌ای، نشان‌دهنده قابلیت اتصالات در تحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک

با شکل‌پذیری زیاد، به ویژه در ترکیب بهینه پارامترها می‌باشند [۳۲].

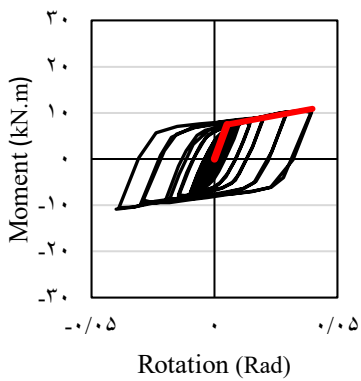
در اتصالاتی که تحت تأثیر نیروی محوری قرار دارند، پدیده جمع-شدگی (Pinching) در نمودارهای هیستریزس مشاهده می‌شود. این پدیده ناشی از وجود نیروی محوری است که با ایجاد خود مرکزگرایی در اتصال، موجب تمایل سازه برای بازگشت به وضعیت اولیه پس از باربرداری می‌شود. در چنین شرایطی، نیروی محوری از طریق اجزای پیش‌تنیده یا فشار محوری موجود در اتصال، سبب کاهش میزان تغییر مکان باقی‌مانده و کاهش نیروهای انتقالی در مرکز چرخه‌های بارگذاری می‌گردد. نتیجه این فرآیند، شکل‌گیری یک منحنی هیستریزس باریک در ناحیه مرکزی است که بیانگر کاهش سختی برگشتی و کاهش ظرفیت جذب انرژی در طی بارگذاری‌های چرخه‌ای است. این رفتار در سیستم‌های خود مرکزگرا مانند اتصالات با کابل‌های پیش‌تنیده به‌وضوح قابل مشاهده است.

#### ۲.۴. تحلیل عملکرد چرخه‌ای

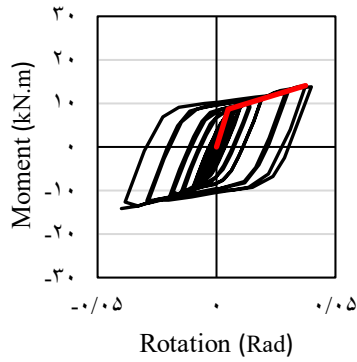
##### ۲.۴.۱. نمودارهای ساختاری

در شکل (۹) نمودارهای ساختاری مربوط به ۹ ترکیب مختلف اتصال ارائه شده است. در بخش ابتدایی نمودار و پیش از تسلیم نبشی‌ها، رفتار اتصال به‌صورت خطی بوده و نشان‌دهنده سختی اولیه بالاست. پس از رسیدن به نقطه‌ی تسلیم، رفتار وارد ناحیه پلاستیک شده و اتصال ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان می‌دهد. با افزایش بارگذاری، هرچند سختی اتصال کاهش می‌یابد، اما ظرفیت کلی باربری همچنان روند افزایشی دارد. با این حال، همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، برخی نمونه‌ها مانند مدل شماره ۷ به دلیل ویژگی‌های هندسی و بارگذاری، کاهش ظرفیت باربری و جذب انرژی دارند. این تفاوت‌ها ناشی از اثرات ترکیبی پارامترهای هندسی (ضخامت نبشی و فاصله میل‌مه‌ها) و

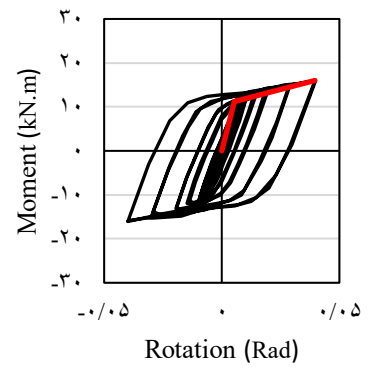
<sup>۱</sup> backbone



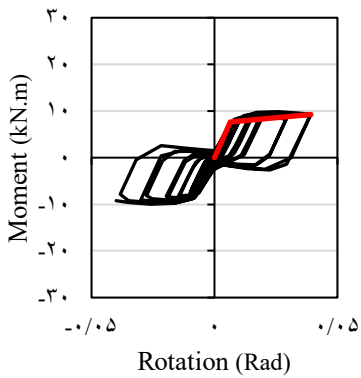
Model No.1



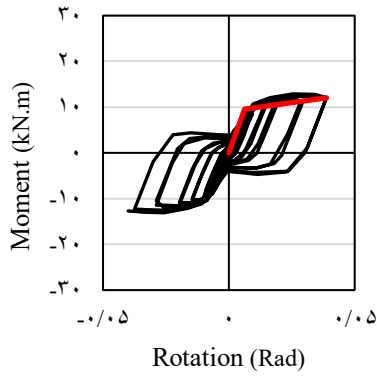
Model No.2



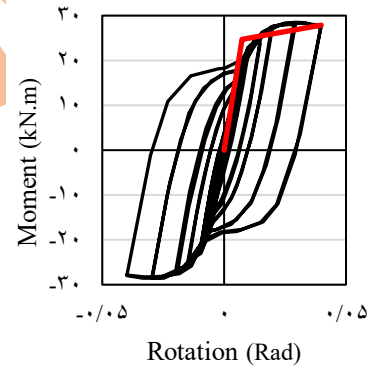
Model No.3



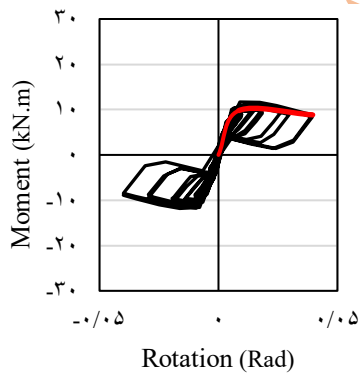
Model No.4



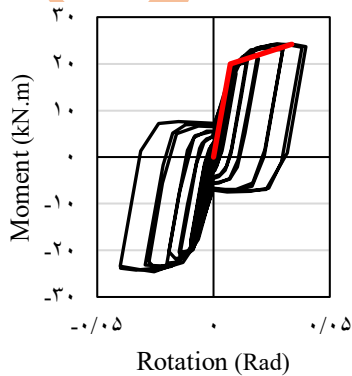
Model No.5



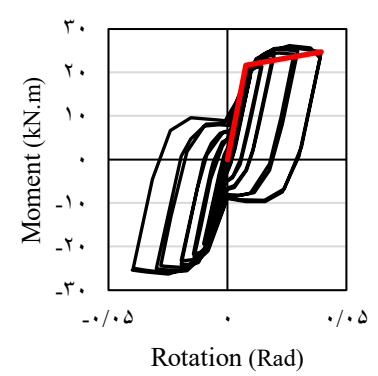
Model No.6



Model No.7



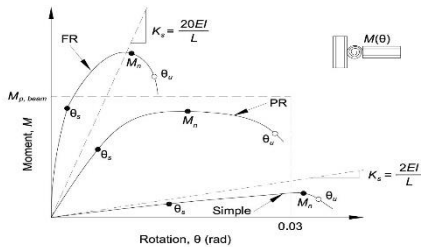
Model No.8



Model No.9

شکل ۸. نمودار هیستریزیس لنگر- دوران و دو خطی حاصل از تحلیل مدل‌های عددی

با استفاده از منحنی دوخطی ایده‌آل‌سازی شده تا نقاط تسلیم و نهایی به صورت دقیق تعیین شوند.



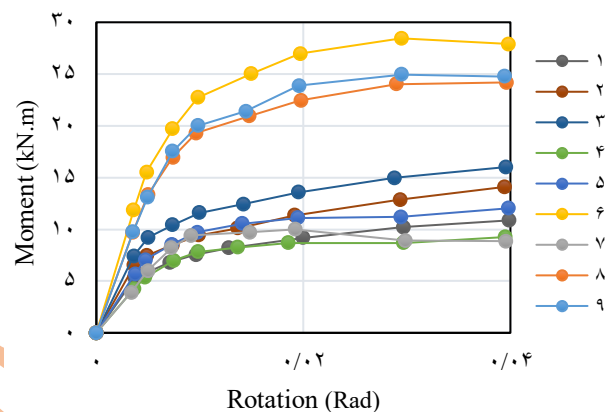
شکل ۱۰. گستره صلبیت بر اساس ANSI/AISC 360-16 [۳۳]

مقادیر لنگر ماکزیمم ( $M_{max}$ ) و تسلیم ( $M_y$ )، انرژی جذب‌شده ( $E_d$ ) و صلبیت ( $R$ ) اتصال برای ۹ ترکیب مختلف در جدول (۴) گزارش شده‌اند. میانگین بیشینه لنگر خمشی در این تحلیل‌های عددی به ۱۶/۶۶ کیلو نیوتن متر رسیده است، که نشان‌دهنده عملکرد کلی اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد. صلبیت اتصال در تمامی ترکیب‌ها در محدوده رفتار مفصلی قرار دارد. این رفتار اتصال با هدف طراحی اتصالات کم‌آسیب سازگار است. در تمامی مدل‌های مورد بررسی، ناحیه تمرکز تنش، تسلیم و آسیب به صورت یکنواخت و کنترل‌شده در اجزای نبشی متمرکز شده است و سایر اجزای اتصال از جمله ستون، صفحه پایه ستون فاقد خرابی بوده‌اند. این موضوع حتی در مدل‌هایی مانند مدل شماره ۷، که شدت آسیب در نبشی بیشتر بوده، نیز صادق است. بنابراین، عملکرد اتصال به‌گونه‌ای بوده که رفتار غیرخطی به اجزای قابل تعویض و طراحی‌شده برای تسلیم (نبشی‌ها) محدود شده و مکانیزم شکست در کنترل باقی مانده است.

#### ۳.۲.۴. ضریب میرایی معادل

به منظور ارزیابی دقیق رفتار چرخه‌ای اتصال در طول چرخه‌های بارگذاری، ضریب میرایی معادل ویسکوز برای هر سیکل بارگذاری محاسبه شده است. این ضریب برای ۹ ترکیب عددی مبتنی بر آرایه L9 استخراج گردیده و تغییرات آن بیانگر میزان اتلاف انرژی و پایداری عملکرد اتصال در برابر بارهای چرخه‌ای می‌باشد. ضریب

بار محوری است که می‌تواند باعث کاهش عملکرد در برخی موارد شود. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده پیچیدگی رفتار اتصالات تحت شرایط متغیر بوده و اهمیت تحلیل چند متغیری در تفسیر نتایج را برجسته می‌سازد. تحلیل دقیق این منحنی‌های ساختاری امکان استخراج پارامترهایی نظیر سختی اولیه، سختی ثانویه، ظرفیت نهایی باربری اتصال را فراهم می‌سازد. این اطلاعات نقش کلیدی در ارزیابی عملکرد چرخه‌ای و غیرخطی اتصالات سازهای دارند.



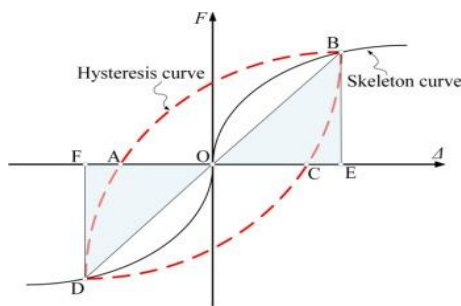
شکل ۹: نمودار ساختاری لنگر- دوران حاصل از ۹ مدل عددی

#### ۲.۲.۴. انرژی جذب شده و صلبیت

برای تحلیل نتایج، میزان انرژی جذب‌شده با محاسبه مساحت زیر نمودارهای هیستریزس لنگر-دوران در هر چرخه تعیین شده است. صلبیت اتصال نیز از طریق نسبت شیب اولیه نمودار لنگر-دوران به سختی خمشی ستون ( $\frac{EI}{L}$ ) به دست آمده است که بیانگر سختی دورانی اتصال در محدوده الاستیک می‌باشد. به منظور دسته‌بندی صلبیت اتصال، مقادیر محاسبه شده با مرزبندی استاندارد ارائه‌شده در ANSI/AISC 360-16 مقایسه شده‌اند [۳۳]. این مرزبندی، که در شکل (۱۰) نشان داده شده، گستره صلبیت را به سه دسته صلب (Rigid)، نیمه‌صلب (Semi-Rigid) و انعطاف‌پذیر (Flexible) تقسیم کرده و بر اساس نسبت صلبیت اتصال به صلبیت الاستیک ستون تعریف شده است. رفتار غیرخطی اتصال نیز

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

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 ۱۱. دیاگرام تحلیل ضریب میرایی معادل ویسکوز

نتایج تحلیل در شکل (۱۲) ارائه شده است. نمودار ضریب میرایی معادل، روند تغییرات اتلاف انرژی در هر سیکل را نشان می‌دهد. در برخی نمونه‌های بدون نیروی محوری، مقدار ضریب میرایی بیشتر است که به دلیل شکل یکنواخت‌تر و عدم وجود 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 می‌باشد. لذا تحلیل ضریب میرایی باید در کنار تحلیل هیستریزس به صورت مکمل بررسی شود.

میرایی معادل برای هر نمونه و هر سیکل بارگذاری با استفاده از روش انرژی هیستریزس محاسبه شد تا پایداری رفتار اتصال پایه ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی شود. ضریب میرایی معادل صرفاً به عنوان شاخصی برای مقایسه رفتار نسبی نمونه‌ها در تحلیل چرخه‌ای اعمال شده و به هیچ عنوان نمایانگر دقیق مقدار میرایی واقعی سازه نیست. ضریب میرایی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است که مطابق شکل (۱۱)، در آن  $(E_d)$ ، نمایانگر انرژی تلف شده در هر چرخه بارگذاری و  $(E_s)$  نشان‌دهنده انرژی الاستیک (مربوط به مثلث زیر منحنی الاستیک) است. این شاخص، معیاری معتبر برای سنجش ظرفیت استهلاک انرژی در رفتار هیستریزس اتصال به‌شمار می‌رود و نقشی کلیدی در تحلیل عملکرد چرخه‌ای سیستم ایفا می‌کند.

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

$S_{ABC}$  و  $S_{CDA}$ : مساحت ناحیه محصورشده در هر حلقه از نمودار هیستریزس از نقاط ABCA و CDAC.

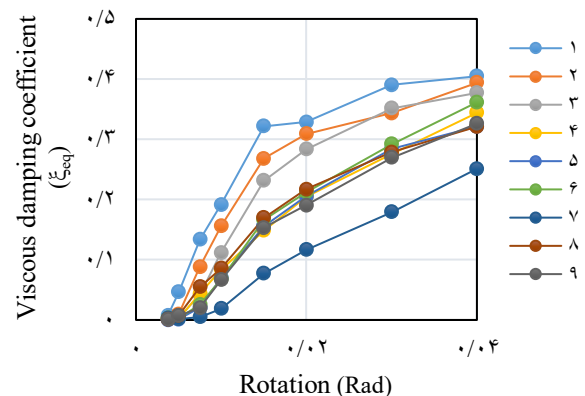
$S_{\Delta ODF}$  و  $S_{\Delta OBE}$ : مساحت مثلث‌های قائم‌الزاویه تشکیل شده در هر حلقه از نمودار هیستریزس از نقاط ODF و OBE.

در نمودار مربوط به فاصله میل‌مه‌ارها، مقدار میانگین لنگر برای سطح ۴۰ میلی‌متر، ۲۱/۱۹ کیلونیوتن متر با پراکندگی محدود بوده که قابل قبول است و نشان می‌دهد داده‌ها به خوبی حول میانگین متمرکز هستند. این ویژگی تأکید می‌کند که میانگین‌های به دست آمده، نماینده قابل اعتمادی از عملکرد سیستم در سطوح مختلف پارامترها می‌باشند.

تحلیل سطوح مختلف هر پارامتر به روشنی نمایش می‌دهد با افزایش فاصله میل‌مه‌ارها از ۴۰ به ۶۰ میلی‌متر، بیشینه لنگر خمشی به‌طور منظم کاهش یافته و در تمام سطوح، مقادیر هر ستون، نشان‌دهنده اختلاف معنادار و پایدار است. افزایش ضخامت از ۶ به ۱۰ میلی‌متر، بیشینه لنگر را از ۱۰/۵ به ۲۳/۱۴ کیلونیوتن متر افزایش داده و مقدار ستون در سطح ۱۰ میلی‌متر، دلالت بر بازیابی حداکثر ظرفیت خمشی با پراکندگی کم داده‌ها دارد. نسبت نیروی محوری بالاتر نیز منجر به رشد چشمگیر میانگین لنگر خمشی شده درحالی که پراکندگی داده‌ها نسبتاً ثابت و محدود است. تفسیر این نتایج این است که عملکرد مدل عددی و روش طراحی آزمایش‌ها تاگوجی برای پیش‌بینی مقادیر بیشینه لنگر به دلیل خطای معیار پایین، قابل قبول است. این مسئله نشان می‌دهد که روند مشاهده‌شده در نمودارها واقعی بوده و حاصل تصادف یا نویز داده‌ها نیست.

نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز (S/N) نیز در شکل (۱۴) ارائه شده و الگوی مشابهی را تأیید می‌کند که کیفیت و پایداری پاسخ بیشینه لنگر خمشی را در برابر خطاهای احتمالی نشان می‌دهد. جدول (۵) تحلیل واریانس (ANOVA) را گزارش کرده و اهمیت نسبی و رتبه هر متغیر را مشخص می‌کند. بر اساس این تحلیل، ضخامت نبشی با مقدار ۵۹/۴۳ درصد اهمیت، رتبه اول را داشته است و پس از آن فاصله 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 نشان داده شده است.

ترکیب بهینه در جدول (۶) نشان می‌دهد که با اعمال سطح پیشنهادی برای هر متغیر، چه میزان تغییر در لنگر ایجاد می‌شود. در این ترکیب، پیش‌بینی می‌شود مقدار ۱۴/۰۵۶ کیلونیوتن متر به میانگین لنگر (۱۶/۱۶ کیلونیوتن متر) افزوده شود. به‌طور خاص، با



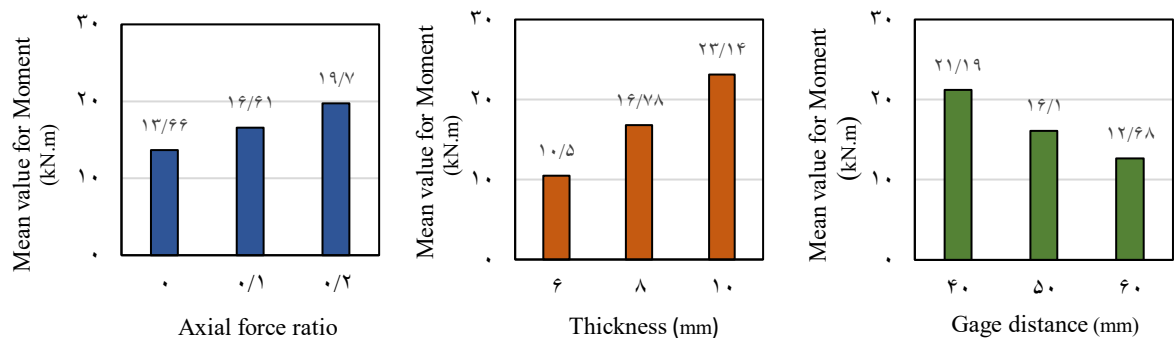
شکل ۱۲. ضریب میرایی معادل ویسکوز مدل‌های عددی

## ۵. تحلیل آماری نتایج

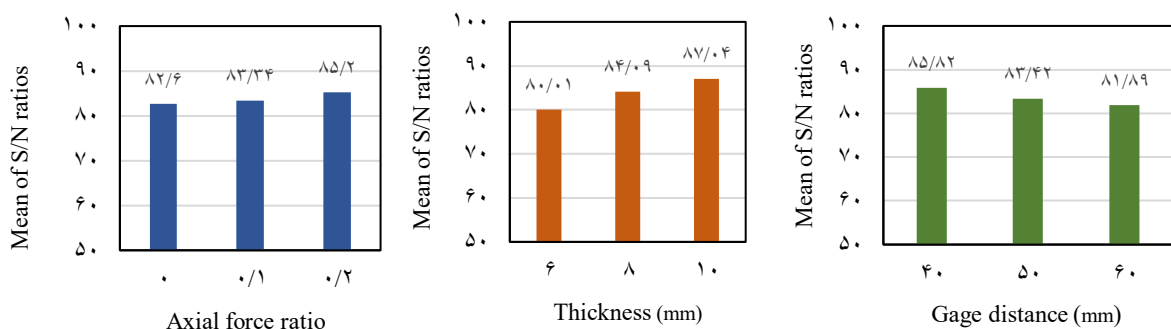
هدف از تحلیل آماری در این پژوهش، بررسی دقیق اثر پارامترهای مختلف بر رفتار چرخه‌ای اتصال نبشی پایه ستون‌های فولادی با استفاده از روش تاگوجی است. این تحلیل با طراحی ۹ نمونه آزمایشی، امکان ارزیابی تأثیر عوامل کلیدی مانند نیروی فشار محوری، ضخامت نبشی و فاصله میل‌مه‌ارها را بر ظرفیت خمشی فراهم کرده است. با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

### ۱.۵. تحلیل واریانس

تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4 انجام شده است و نتایج آن به‌صورت زیر ارائه گردیده‌اند. نمودار میانگین بیشینه لنگر خمشی بر اساس سه متغیر در شکل (۱۳) ترسیم شده است و نشان می‌دهد که ضخامت نبشی بیشترین تأثیر را بر 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) بوده است. کوتاهی نسبی این نوارها نشان‌دهنده دقت مدلسازی و پایایی نتایج عددی است. به‌طور مثال،



شکل ۱۳. نمودار میانگین بیشینه لنگر خمشی بر اساس متغیرها



شکل ۱۴. نمودار میانگین نسبت سیگنال به نویز بر اساس متغیرها

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	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	

#### ۲.۵. معادله رگرسیون نهایی برای پیش‌بینی لنگر خمشی

با استفاده از تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود و به‌کارگیری روش طراحی آزمایش تاگوچی، معادله‌ای رگرسیونی برای پیش‌بینی بیشینه لنگر خمشی به‌دست آمده است. این معادله بر اساس سه پارامتر کلیدی مدل (نیروی محوری، ضخامت نبشی، فاصله میل‌مهار) فرموله شده و به شکل رابطه (۲) است:

اعمال نیروی محوری ۲۰ درصد، ضخامت ۱۰ میلی‌متر و فاصله مهاری ۴۰ میلی‌متر، پیش‌بینی می‌شود مقدار بیشینه لنگر خمشی به ۳۰/۷۱ کیلونیوتن متر برسد. این موضوع به‌وضوح تأثیر هم‌زمان سه متغیر مورد بررسی را بر عملکرد دینامیکی اتصال نشان می‌دهد.

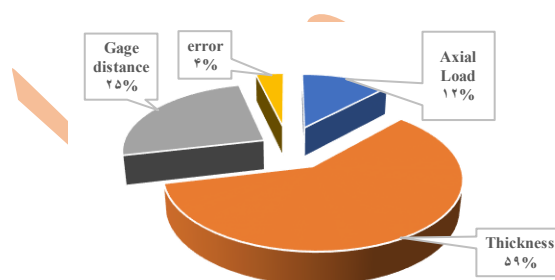
$$M = 8653 + 30250 n + 3275 t - 424.6 g \quad (2)$$

M: بیشینه لنگر خمشی (N.m)

n: نسبت نیروی محوری (۰/۱، ۰ و ۰/۲)

t: مقدار ضخامت نبشی (mm)

g: فاصله میل‌های مهاری از بال ستون (mm)



شکل ۱۵. چارت دایره‌ای اهمیت متغیرهای تحلیل شده بر اساس بیشینه لنگر خمشی

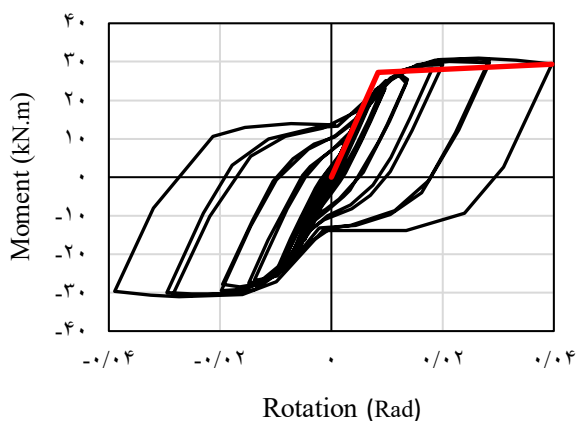
### ۳.۵. اعتبارسنجی تحلیل تاگوچی

برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل واریانس نمونه‌های طراحی شده با روش تاگوچی و ارزیابی دقت پیش‌بینی ترکیب بهینه ارائه شده در جدول (۵)، این نمونه در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. 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 بیشینه لنگر خمشی پیش‌بینی شده (۳۰/۷۱ کیلونیوتن‌متر) و نتیجه مدل عددی اجزای محدود (۳۰/۵۶ کیلونیوتن‌متر) مشاهده شد که دقت بالای تحلیل تاگوچی و مدل عددی را تأیید می‌کند. همچنین، معیارهای دیگر مانند انرژی جذب شده و صلبیت برای این ترکیب محاسبه و گزارش شده‌اند که نشان‌دهنده رفتار چرخه‌ای بهبودیافته با صلبیت مفصلی است.

ضریب میرایی معادل در شکل (۱۷) ارائه شده است. روش تاگوچی با کاهش تعداد مدل‌های عددی به ۹ نمونه و ارائه معادله رگرسیون و اعتبارسنجی موفق، کارایی بالایی در بهینه‌سازی و پیش‌بینی لنگر ماکزیمم را نشان داده است.

جدول ۶. ترکیب بهینه متغیرها بر اساس بیشینه لنگر خمشی

Parameter	Level	Level description	Contribution (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 ۱۶. نمودار هیستریزیس لنگر-دوران و دوخطی مدل عددی برای ترکیب بهینه متغیرها

جدول ۷. پارامترهای خروجی از مدل عددی برای ترکیب بهینه

	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

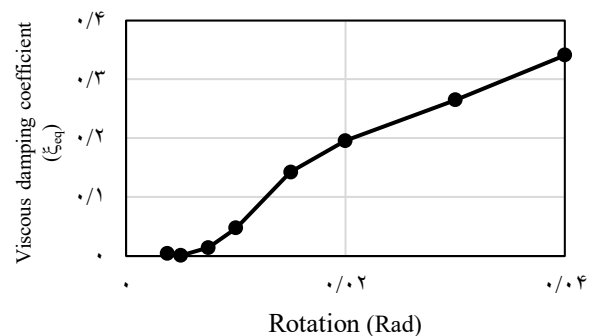
(مانند ضخامت کم نبشی و فاصله زیاد میل‌مهاریها)، بار محوری می‌تواند زمینه‌ساز زوال زود هنگام رفتار اتصال شود. ترکیب بهینه منجر به بهبود سختی اولیه، افزایش شکل‌پذیری و ارتقاء عملکرد اتصالات در برابر بارهای چرخه‌ای می‌شود. هرچند طبق ضوابط استاندارد ANSI/AISC 360-16، رفتار اتصالات در محدوده مفصلی باقی ماندند، اما همین امر نیز با هدف طراحی اتصالات کم‌آسیب، مطلوب تلقی می‌شود.

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

برای توسعه این پژوهش در مطالعات آتی به بررسی متغیرهایی نظیر ویژگی مکانیکی مختلف برای نبشی‌ها یا استفاده از اشکال دیگر میراگرهای تسلیم شونده در اتصال پرداخت تا بتوان عملکرد چرخه‌ای را بهبود بخشید. همچنین بررسی عملکرد اتصالات پای ستون تحت خمش حول محور ضعیف نیز می‌تواند اطلاعات بیشتری از رفتار آن بدست بدهد.

## 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 rotational stiffness on seismic behavior



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

## ۶. نتیجه گیری

این پژوهش با هدف تحلیل رفتار چرخه‌ای اتصالات پایه ستون فولادی مجهز به نبشی تسلیم‌شونده و قابل تعویض، تأثیر سه پارامتر کلیدی شامل ضخامت نبشی، نیروی فشار محوری و فاصله میل‌مهاری را به صورت هم‌زمان و ترکیبی مورد بررسی قرار داد. برای این منظور، از تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس و روش طراحی آزمایش تاگوچی بهره گرفته شد. نتایج مدل‌سازی عددی پس از اعتبارسنجی با داده‌های آزمایشگاهی، از دقت و تطابق بالایی برخوردار بود.

تحلیل آماری نتایج به روش ANOVA نشان داد که ضخامت نبشی بیشترین سهم را در افزایش ظرفیت خمشی اتصال دارد (۵۹/۴۳ درصد)، در حالی که فاصله میل‌مهاری (۲۴/۹۵ درصد) و نیروی محوری (۱۱/۹۲ درصد) در رده‌های بعدی قرار گرفتند. ترکیب بهینه با ضخامت نبشی ۱۰ میلی‌متر، نیروی محوری ۲۰ درصد و فاصله میل‌مهاری ۴۰ میلی‌متر، بیشینه لنگر خمشی برابر با ۳۰/۷۱ کیلونیوتن‌متر را به همراه صلبیت مناسب و ظرفیت بالای جذب انرژی (۱۰/۱۲ کیلوژول) حاصل کرد. این مقادیر با نتایج مدل عددی به خوبی تطابق داشتند (۳۰/۵۶ کیلونیوتن‌متر).

تحلیل نمودارهای هیستریزیس و منحنی‌های دوخطی نشان داد تأثیر مثبت بار محوری بر عملکرد اتصالات، مشروط به وجود شرایط هندسی و سازه‌ای مناسب است و در صورت وجود ضعف هندسی

- of the steel moment frames. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35(2.1), p. 83-92. [in Persian].  
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.jobe.2024.108778](https://doi.org/10.1016/j.jobe.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.jobe.2024.109474](https://doi.org/10.1016/j.jobe.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.