

# بررسی رفتار اتصالات خورجینی تحت تأثیر مداوم بار ثقلی و جانبی

حسین بخشی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

فاطمه فقیه خراسانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه عمران، دانشگاه علوم تحقیقات، خراسان رضوی

مهراوه رخشانی مهر\* (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه الزهراء

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۶)  
دوری ۲-۳۳، شماره ۱/۱، ص. ۷۳-۸۰

در گذشته علی‌رغم ابهامات جدی در مدل‌سازی و رفتار لرزه‌یی، کاربرد اتصالات خورجینی بسیار متداول و طراحی آن‌ها برای ساده‌سازی به صورت مفصلی بوده است، که با توجه به رفتار نیمه‌صلب آن‌ها، برآورد نادرست نیروهای داخلی اعضا را به دنبال داشته است. علاوه بر این، با وجود مطالعات انجام شده، مطالعات پیرامون اثر توأم بار ثقلی و جانبی، که می‌تواند رفتار لرزه‌یی اتصال را تحت تأثیر قرار دهد، بسیار اندک است. در این نوشتار، تأثیر هم‌زمانی بارهای ثقلی و جانبی در رفتار نمونه‌های مختلف اتصال بررسی شده است. بدین منظور منحنی لنگر- دوران اتصالاتی با مشخصات متفاوت تحت بار ثقلی و جانبی چرخه‌یی ترسیم و برای به دست آوردن سختی اولیه و ثانویه‌ی اتصال، پوش منحنی هیستریزس رسم شده است. برای مطالعه‌ی شروع ترک‌خوردگی در اتصال، در المانی که بیشینه‌ی کرنش خمیری معادل را دارد، بیشینه‌ی تنش‌های فون میسز و هیدرواستاتیک و بیشینه‌ی کرنش خمیری معادل محاسبه شده است. در انتها، شاخص‌های سه‌محوره و کرنش خمیری معادل برای مقایسه‌ی اتصالات تعیین شده است.

واژگان کلیدی: اتصال خورجینی، بار چرخه‌یی، بار ثقلی، سختی اتصال، تحلیل شاخص خسارت.

## ۱. مقدمه

در مبحث دهم مقررات ملی ساختمانی ایران<sup>[۱]</sup> و آیین‌نامه‌ی سازه‌های فولادی AISC<sup>[۲]</sup>، گروه‌های اصلی اسکلت ساختمانی و مفروضات محاسباتی مربوط به آن، ملاک طراحی و محاسبه‌ی سازه‌ها قرار می‌گیرد. یکی از سیستم‌های سازه‌یی، که در گذشته به دلیل سهولت در اجرا و صرفه‌ی اقتصادی بیشتر در سازه‌های فولادی مورد استفاده قرار گرفته است، سیستم قاب با اتصال خورجینی است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده در اتصال خورجینی، تیرهای اصلی قاب‌ها به صورت یک‌سره از دو طرف ستون‌های یک‌سره عبور کرده و روی نبشی‌های نشیمن، که به ستون جوش شده‌اند، قرار می‌گیرند. همچنین دو نبشی نیز به بال‌های بالایی تیرها و وجه ستون جوش می‌شوند.<sup>[۳]</sup>

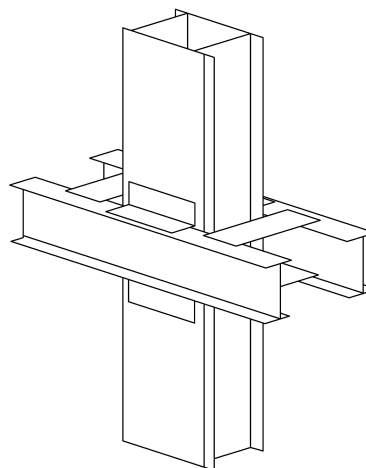
از آنجا که به دلیل مزیت‌های اجرایی و اقتصادی، اتصال خورجینی به طور وسیعی در ساخت‌وسازها مورد استفاده قرار گرفته است و منابع خارجی چندانی در ارتباط با آن در دسترس نیست، لزوم انجام مطالعات در مورد این اتصالات ضروری به نظر می‌رسد.

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱/۲۹، اصلاحیه: ۱۳۹۵/۴/۲، پذیرش: ۱۳۹۵/۴/۲۹

h.bakhshi@hsu.ac.ir  
ffkhorasani@gmail.com  
m.rakhshianimehr@alzahra.ac.ir

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، مقاومت اتصال خورجینی از مقاومت تیرهای اتصال کمتر است و اغلب شکست در اتصال رخ می‌دهد. نکته‌ی مهم‌تر اینکه حالت شکست اتصال از نوع تسلیم نیست و اتصال خیلی زود گسیخته می‌شود. با شکست اتصال، سازه باربری ثقلی خود را از دست می‌دهد و در نتیجه کل سازه فرو می‌ریزد. پس از زلزله‌ی منجیل و رودبار و تخریب بسیاری از سازه‌های فولادی، پژوهشگران بسیاری برای شناخت رفتار اتصال خورجینی تلاش کرده‌اند. این پژوهش‌ها به دو صورت آزمایشگاهی و تحلیل مدل رایانه‌یی انجام شده‌اند. برای نمونه، در سال ۱۳۷۰ با استفاده از امکانات آزمایشگاهی موجود در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، به طرح یک مدل آزمایشگاهی از اتصالات خورجینی پرداخته شده و نتایج نشان داده است که با استفاده از ورق‌های بالا و پایین، سختی اولیه بیش از ۷۰٪ و مقاومت نهایی ۲۵٪ افزایش می‌یابد.<sup>[۴]</sup> همچنین در یک کار آزمایشگاهی با ساختن ۵ نمونه سعی شده است که منحنی لنگر- چرخش و درجه‌ی گیرداری اتصال خورجینی را مشخص کنند. لذا روابطی برای طراحی اتصال خورجینی ساده ارائه شده است که به دلیل اینکه در روابط مذکور فرض بر حرکت صلب نبشی‌هاست، در حالی که نبشی‌ها رفتاری نرم دارند، روابط مذکور مخدوش هستند.<sup>[۵]</sup> در مطالعه‌ی



شکل ۱. چگونگی اجرای اتصال خورجینی.

بارهای جانبی نیز تأثیر بهسازای به وسیله‌ی اضافه‌کردن مهاربند در بعضی دهانه‌ها در یک ساختمان ۴ طبقه بررسی شده،<sup>[۱۸]</sup> و همچنین تأثیر استفاده از دستک در کاهش تمرکز تنش‌های جوش، در اتصالات خورجینی مورد مطالعه قرار گرفته است.<sup>[۲۰]</sup> به‌طور کلی هدف عمده‌ی مطالعات صورت‌گرفته عبارت‌اند از:

۱. بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ی قاب‌های با اتصال خورجینی.
۲. تعیین درصد‌گیرداری اتصالات خورجینی با جزئیات مختلف.
۳. به‌دست‌آوردن منحنی لنگر - دوران در اتصال خورجینی با جزئیات و ابعاد متفاوت.
۴. تعیین حدی از سختی برای اتصال خورجینی.
۵. بررسی نحوه‌ی توزیع تنش و تغییرمکان‌ها در اجزاء اتصال و محدوده‌ی از تیر و ستون که مجاور اتصال است.

۶. درک بهتر رفتار این اتصال خورجینی تحت بارهای یکنواخت و چرخه‌ی و شناسایی نیازهای ویژه‌ی اتصال در طراحی به خصوص طرح لرزه‌ی آن.<sup>[۱۶]</sup>

در این نوشتار، در ادامه‌ی مطالعات پیشین، به منظور شناخت رفتار اتصال خورجینی تحت اثر توأم بارهای ثقلی و چرخه‌ی و بررسی تأثیر بارهای ثقلی در رفتار چرخه‌ی اتصالات تحت بارهای رفت و برگشتی، چند نمونه‌ی اتصال خورجینی با مقطع تیر، نبشی، و طول نبشی متفاوت تحت بار ثقلی و چرخه‌ی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و تحلیل شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی مذکور، رفتار چرخه‌ی اتصال و تنش‌های هر کدام از اعضا مورد بررسی قرار گرفته است. جوش‌ها به دلیل عدم تحمل کرنش زیاد زودتر از فولاد دچار ترک‌خوردگی می‌شوند، که برای بررسی شروع ترک‌خوردگی اتصال مقادیر کرنش خمیری معادل در اعضا محاسبه شده است. در نهایت، نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های مختلف مقایسه و آثار بارهای ثقلی در نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. مکانیزم انتقال نیرو در اتصالات

نیروهای مختلفی که توسط اتصالات تحمل و منتقل می‌شوند، عمدتاً عبارت‌اند از:

- نیروی برشی: در اتصالات ساده، عمده‌ی نیروی انتقالی نیروی برشی و تکیه‌گاهی است، که غالباً به دلیل خروج از مرکزیت بار، نیروی برشی همراه با لنگر خمشی و پیچشی خواهد بود.
- لنگرهای خمشی و پیچشی: معمولاً لنگرهای خمشی و پیچشی همراه با نیروی برشی در اتصال پدید می‌آیند.
- نیروی محوری: در برخی اتصالات مانند اتصال وصله‌ی ستون، اتصالات خرابایی و اتصالات بادبندها، نیرویی که از یک عضو به عضو دیگر منتقل می‌شود، به صورت نیروی محوری است و در بیشتر مواقع در چنین اتصالاتی نیروی برشی نیز در اتصال وجود دارد.<sup>[۸]</sup>

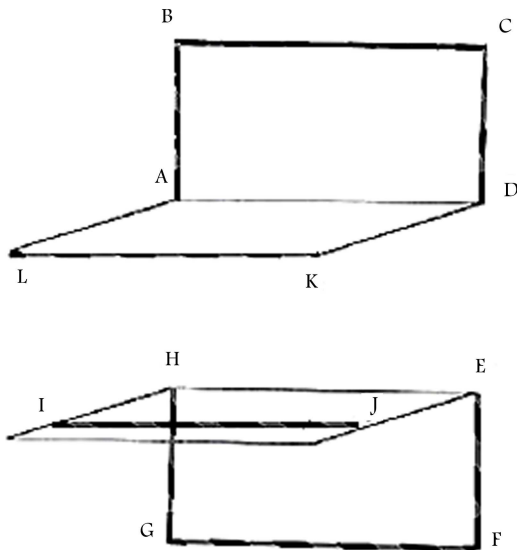
یکی از مواردی که در مورد اتصال خورجینی به درستی مشخص نشده است، نحوه‌ی انتقال لنگر در این اتصال است، که برای مشخص شدن نحوه‌ی انتقال نیرو، باید نحوه‌ی انتقال لنگر و بار قائم تیرها به نبشی و همچنین نحوه‌ی انتقال لنگر و بار قائم از نبشی به ستون بررسی شود.<sup>[۲۱]</sup>

دیگری نیز روی نمونه‌ی اتصال خورجینی، منحنی اولیه و مقاومت نهایی، رفتار اتصال تحت اثر بارهای رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفته است.<sup>[۷]</sup> همچنین در سال ۱۳۷۳، به صورت دینامیکی سه نمونه‌ی اتصال خورجینی در مقیاس یک دوم آزمایش شده و نتیجه نشان داده است که به‌طور کلی اتصال مذکور چه با شکست نرم و چه با شکست ترد در بارهای رفت و برگشتی مشکلات فراوانی دارد،<sup>[۸]</sup> و نیز در مطالعه‌ی دیگری به آنالیز دینامیکی غیرخطی قاب‌های خورجینی پرداخته شده است.<sup>[۹]</sup>

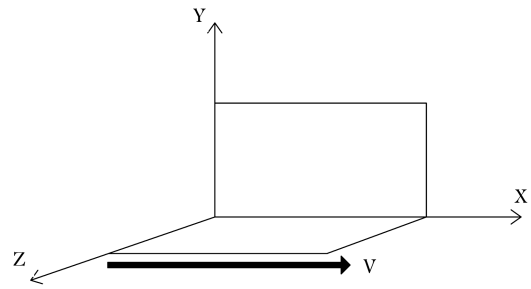
با استفاده از برنامه‌ی SAP نیز مدل‌های متنوعی از اتصالات خورجینی و صلب در محدوده‌ی ارتجاعی و تحت بارهای استاتیکی مورد مطالعه قرار گرفته و تغییرات سختی و تمرکز تنش‌ها به صورت کیفی بررسی شده است.<sup>[۱۰]</sup> همچنین آزمایش‌هایی برای تعیین درجه‌ی گیرداری، مقاومت نهایی، و شکل‌پذیری اتصالات خورجینی انجام شده است.<sup>[۱۱]</sup> یک برنامه‌ی رایانه‌ی نیز تهیه و به بررسی اثر سختی اتصال در توزیع نیروها در اعضا سازه پرداخته شده است.<sup>[۱۲]</sup>

همچنین با استفاده از برنامه‌ی SAP، مدل یک دوم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مدل‌سازی شده و نتایج نشان داده است که بسامد مود اول در اتصال خورجینی به اتصال صلب خیلی نزدیک‌تر از اتصال مفصلی است.<sup>[۱۳]</sup> در سال ۱۳۷۴ نیز به بررسی رفتار اتصالات خورجینی تحت بارهای خستگی‌زا با چرخه‌های کم‌تواتر پرداخته شده است.<sup>[۱۴]</sup> همچنین روی چند نمونه‌ی اتصال خورجینی تحت بارهای رفت و برگشتی آزمایش‌هایی انجام شده و نتایج نشان داده است که تغییر طول نبشی باعث تغییر متناسب درصد‌گیرداری اتصال می‌شود.<sup>[۱۵]</sup> یک اتصال خورجینی ساده در مقیاس یک دوم نیز با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS تحت آنالیز غیرخطی با بارهای ثابت رفت و برگشتی قرار گرفته و در نهایت نتیجه‌گیری شده است که اتصالات خورجینی در ناحیه‌ی ارتجاعی، صلبیت بالایی دارد.<sup>[۱۶]</sup> در سال ۱۳۷۸ هم به آنالیز استاتیکی غیرخطی مدل‌های اجزاء محدود اتصال خورجینی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS پرداخته شده است.<sup>[۱۷]</sup>

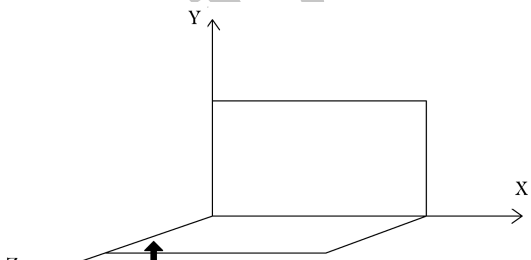
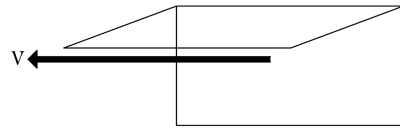
در بررسی رفتار غیرخطی اتصال خورجینی تحت لنگر خمشی نیز نتیجه گرفته شده است که در اتصال مذکور، تمرکز تنش در ناحیه‌ی جوش گوشه بوده و حضور تنش‌های هیدرواستاتیک در ناحیه‌ی مذکور باعث تردشدگی اتصال است. همچنین طول نبشی‌های بالا و پایین به همراه ارتفاع تیر، مؤثرترین عوامل در خصوصیات رفتاری اتصال است.<sup>[۱۸]</sup> در بررسی و اثبات ضعف اتصالات خورجینی در برابر



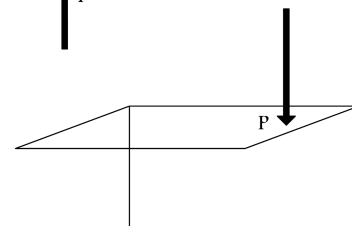
شکل ۴. محل جوشکاری نبشی به تیر و ستون در اتصال خورجینی.



شکل ۲. عملکرد پیچشی در پاسخ به زوج نیروی قائم.



شکل ۳. عملکرد برشی در پاسخ به زوج نیروی افقی.



### ۲.۲. نحوه‌ی انتقال لنگر و بار قائم از نبشی به ستون

محل جوشکاری نبشی به تیر و ستون در اتصال خورجینی مطابق با شکل ۴ است. مطابق شکل ۴، در خطوط LK و IJ، تیر به نبشی‌ها و در خطوط AB، BC، CD، HG، GF و EF، نبشی به ستون متصل شده‌است. طبق مطالعات پیشین، تمرکز تنش در نقاط D و H و همچنین در نقاط A و E در اثر لنگر ایجاد شده در نبشی رخ داده است و در واقع جوش این نقاط، بیشترین سهم را در انتقال لنگر بر عهده می‌گیرد. همچنین بیشترین تمرکز تنش در ۲ سانتی‌متری ابتدای جوش این نقاط رخ می‌دهد. تنش‌هایی که در خط جوش‌های قائم ایجاد می‌شوند، به سبب تنش‌های ناشی از تحمل نیروهای قائم  $P$  در محل نقطه‌ی جوش، تنش‌های ناشی از لنگری که توسط نیروی  $P$  حول محور  $x$ ها تولید می‌شود، تنش‌های ناشی از نیروی  $V$ ، تنش‌های ناشی از لنگر نیروی  $V$  حول محور  $y$ هاست.<sup>[۷]</sup>

### ۳. مدل‌سازی رایانه‌یی

با توجه به حالات بسیار متنوع یک اتصال نیمه‌صلب مانند اتصال خورجینی (تنوع در شماره‌ی تیر، شماره‌ی نبشی، طول نبشی، و...) انجام آزمایش برای کلیه‌ی شرایط و تعیین منحنی لنگر- دوران کاری غیرممکن است؛ بنابراین، با انجام صحت‌سنجی، اتصالات مختلف در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده‌اند. مدل المان محدود ارائه‌شده از لحاظ مشخصه‌ی ماده، دو بخش جوش و فولاد دارد. هر یک از این دو ماده به‌صورت هم‌وزن فرض شده و از تغییرات در خصوصیات آن‌ها در نواحی مختلف صرف‌نظر شده است. برای مدل‌سازی رفتار فولاد و جوش از مدل سخت‌شدگی ترکیبی<sup>۱</sup> با ارائه‌ی مدل رفتاری کامل فولاد و جوش با اثر سخت‌شدگی استفاده شده است. جهت تعیین مشخصات تنش- کرنش آن‌ها از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده‌ی در سال ۱۳۹۱<sup>[۲]</sup> استفاده شده است. برای اتصال جوش به فولاد از قید tie و قسمت‌هایی که در تماس با یکدیگر هستند، از hard contact استفاده شده است. المان‌های استفاده‌شده در مدل‌سازی، المان ۶ وجهی ۸ گره‌یی (C3D8R) است. برای اطمینان از صحت فرض‌های انجام‌شده، نتایج یک نمونه‌ی اتصال مدل‌سازی شده

### ۱.۲. نحوه‌ی انتقال لنگر و بار قائم تیرها به نبشی

با توجه به اینکه در اتصال خورجینی، تیرها روی نبشی‌ها قرار می‌گیرند، بار قائم ناشی از وزن سقف تقریباً به‌طور کامل توسط نبشی پایین تحمل می‌شود. اگر لنگر کامل وارد بر اتصال با  $M$  نمایش داده شود، عملکرد نبشی‌های اتصال را می‌توان مرکب از دو عملکرد پایه، که در شکل‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است، در نظر گرفت (رابطه‌ی ۱).<sup>[۲]</sup>

$$M = M_1 + M_2 = P.L + V.d \quad (1)$$

که در آن،  $M_1$  کوپل ناشی از نیروی  $P$ ،  $M_2$  کوپل ناشی از نیروی  $V$ ،  $L$  طول نبشی،  $d$  فاصله‌ی بین بال‌های دو نبشی.

با چرخش تیر در محل اتصال، یکی از بال‌های آن در کشش و دیگری در فشار قرار می‌گیرد. با توجه به متصل بودن این بال‌ها به نبشی بالا و پایین توسط جوش افقی در راستای  $x$ ، نیروی افقی متوسطی مانند  $V$  را می‌توان در طول نبشی‌ها در نظر گرفت. همچنین لنگر  $M_1$  ناشی از خاصیت اهرمی این اتصال است.

نظر صلبیت در زیر آستانه قرار گرفته باشد، رفتار آن در محدوده‌ی نیمه‌صلب قرار دارد و باید توسط مدل نیمه‌صلب تحلیل شود.<sup>[۲۳]</sup>

— رفتار لنگر - چرخش اتصال خورجینی و ممان نهایی: برای تعیین منحنی لنگر - دوران از مدل‌های ریاضی مختلفی استفاده شده است.<sup>[۲۴-۲۶]</sup> منحنی لنگر - چرخش اتصال از جمله مهم‌ترین عوامل رفتار اتصال است. به کمک این منحنی می‌توان میزان صلبیت، شکل‌پذیری، و قابلیت جذب انرژی اتصال را تعیین کرد. از عوامل و متغیرهای اصلی در این منحنی می‌توان به اندازه و طول نبشی‌ها و همچنین انواع تقویت اتصال اشاره کرد. براساس نتایج صورت‌گرفته، چرخش نهایی اتصال خورجینی بین  $0.2^\circ$  تا  $0.3^\circ$  رادیان است.<sup>[۲۲]</sup>

— لنگر تسلیم اتصال: لنگر تسلیم اتصال، لنگری است که در آن اولین نقطه از جوش اتصال به تنش تسلیم می‌رسد. در مطالعات انجام‌شده، لنگر تسلیم اتصال به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی و همچنین طراحی اتصال مورد استفاده قرار گرفته است.<sup>[۲۱]</sup>

— درصد گیرداری: برای محاسبه‌ی درصد گیرداری اتصال خورجینی در بیشتر مطالعات آزمایشی و تحلیل‌های رایانه‌ی انجام‌گرفته، از روش تلافی معادله‌ی خط تیر با منحنی لنگر - دوران اتصال استفاده می‌شود و نسبت لنگر تلافی به لنگر گیرداری تیر ( $M_{fa}$ ) به‌عنوان درصد گیرداری اتصال تعریف می‌شود. با توجه به نتایج و مطالعات ارائه‌شده، درصد گیرداری اتصال خورجینی بین  $25^\circ$  تا  $80^\circ$  درصد پیش‌بینی شده است، که به جزئیات اتصال از جمله طول و اندازه‌ی نبشی و مشخصات تیر بستگی دارد.<sup>[۶]</sup>

— نحوه‌ی شکست اتصال خورجینی: براساس آزمایش‌های مختلف انجام‌شده در بیشتر موارد، شکست در اتصال خورجینی از جوش اتصال آغاز می‌شود و در بیشتر مواقع حتی تا نقطه‌ی نهایی بارگذاری، شکست فقط در جوش مشاهده می‌شود و فقط در برخی موارد شکست در بال نبشی، آن هم در مراحل نهایی بارگذاری اتفاق می‌افتد. در مجموع می‌توان گفت اتصال خورجینی پس از بروز و گسترش ترک در اتصال نبشی‌ها رفتار مفصلی خواهد داشت. لذا در صورت عدم شکست، اتصال نبشی پایین به ستون و داشتن مقاومت لازم برای تحمل بار ثقلی می‌تواند بدون جذب لنگر فقط بار ثقلی را تحمل کند. بدیهی است در این حالت قاب با اتصال خورجینی نیاز به یک سیستم باربر لرزه‌ی دارد.<sup>[۲]</sup>

### ۲.۳. مختصات و پارامترهای موردنیاز

شماره‌ی مقطع تیر، شماره‌ی نبشی، طول نبشی، تأثیر هم‌زمان بار ثقلی و جانبی، و کیفیت جوش از مشخصات و مختصات لازم برای مدل‌سازی است.

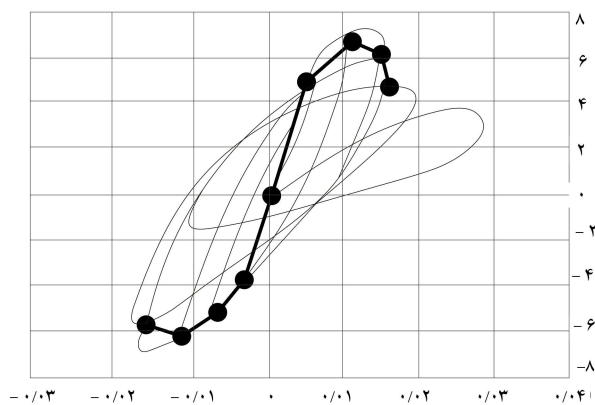
برای بررسی اتصالات، شاخص‌های خسارت متعددی مانند: شاخص‌های میسر، فشار کرنش خمیری معادل، گسیختگی، و سه‌محوره وجود دارد، که EL-Tawil آن‌ها را پیشنهاد کرده است.

— شاخص میسر (MI): شاخص میسر از تقسیم تنش میسر  $\sigma_v$  بر تنش تسلیم  $\sigma_y$  به‌دست می‌آید، و تنش میسر به‌صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

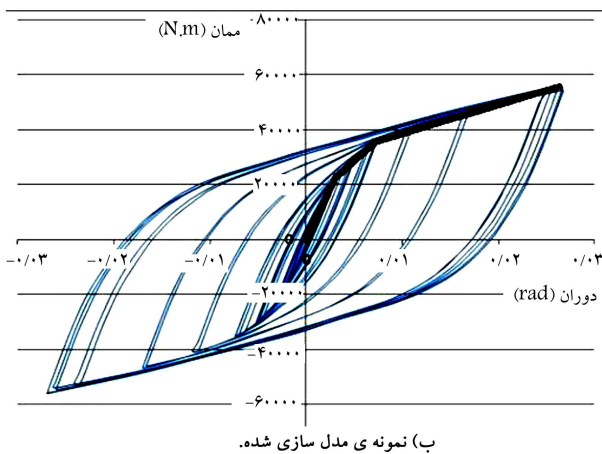
$$\sigma_v = \sqrt{3} j_z \tau \quad (2)$$

که در آن،  $j_z$  دومین تغییرناپذیر تانسور تنش انحراف است، که از رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید:

$$j_z = \sqrt{\frac{1}{6} [\sigma_1 - \sigma_2]^2 + [\sigma_1 - \sigma_3]^2 + [\sigma_2 - \sigma_3]^2} \quad (3)$$



الف) نمونه‌ی آزمایشگاهی؛



ب) نمونه‌ی مدل‌سازی شده.

شکل ۵. منحنی لنگر - چرخش.

با نتایج نمونه‌ی آزمایش‌شده در سال ۱۳۹۱،<sup>[۲]</sup> مقایسه شده است. مطابق شکل ۵، ممان تسلیم نمونه‌ی مدل‌سازی‌شده، نصف نمونه‌ی آزمایش‌شده و چرخش تسلیم آن برابر نمونه‌ی آزمایش‌شده است، که با توجه به نکته‌ی اشاره‌شده، که در آزمایش ۲ تیر و در مدل‌سازی ۱ تیر وجود دارد، تطابق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد. در ادامه، برخی از مفاهیم استفاده‌شده در تحلیل نتایج بیان شده است.

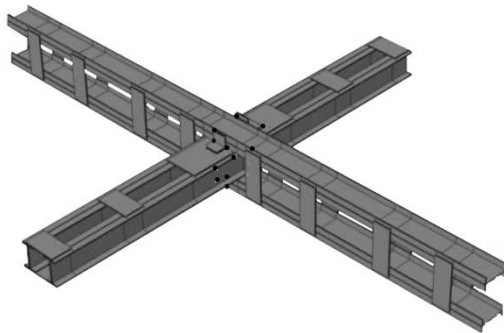
### ۱.۳. تعاریف و مفاهیم اساسی موردنیاز

— سختی اولیه‌ی اتصال: یکی از پارامترهایی که برای مدل‌سازی اتصال خورجینی در نرم‌افزارهایی مانند SAP موردنیاز است، سختی اولیه‌ی اتصال (شیب منحنی  $M - \theta$ : رابطه‌ی بین لنگر واراد بر اتصال و تغییر زاویه‌ی بین تیر و ستون به واسطه‌ی تغییر شکل ناحیه‌ی اتصال) است، که براساس نتایج مطالعات صورت‌گرفته، سختی اتصال خورجینی وابسته به اندازه و طول نبشی مورد استفاده و ارتفاع تیر است.

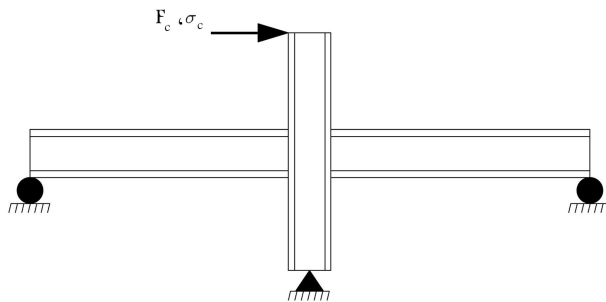
— سختی آستانه: در بررسی نقش سختی اتصال بر توزیع نیروهای داخلی در هر دو حالت بار ثقلی و بار زلزله مشاهده می‌شود که افزایش سختی اتصال موجب ایجاد تغییراتی در توزیع نیروی داخلی می‌شود. میزان این تغییرات با عبور از محدوده‌ی مشخصی به سمت صفر میل می‌کند و پس از آن تغییرات سختی، تأثیر محسوسی ندارد. حد مذکور، سختی آستانه نامیده می‌شود. اهمیت سختی آستانه در این است که چنانچه سختی اتصال بیشتر از سختی آستانه باشد، می‌توان رفتار اتصال را با تقریب کمی، به‌صورت صلب فرض کرد. همچنین چنانچه اتصال از

جدول ۱. معرفی نمونه‌های اتصال مورد مطالعه.

نمونه	مقطع تیر	نبشی بالا	طول نبشی بالا	نبشی پایین	طول نبشی پایین
S <sub>۱</sub>	IPE۱۸	L۸	LONG۱°	L۱۲	LONG۱°
S <sub>۲</sub>	IPE۱۸	L۶	LONG۱°	L۱۲	LONG۱°
S <sub>۳</sub>	IPE۱۸	L۸	LONG۱°	L۱۰	LONG۱°
S <sub>۴</sub>	IPE۱۸	L۶	LONG۱°	L۱۰	LONG۱°
S <sub>۵</sub>	IPE۱۸	L۸	LONG۱°	L۱۲	LONG۲°
S <sub>۶</sub>	IPE۱۸	L۸	LONG۱°	L۱۲	LONG۱°
S <sub>۷</sub>	IPE۱۸	L۸	LONG۱°	L۱۲	LONG۲°
S <sub>۸</sub>	IPE۲۲	L۸	LONG۱°	L۱۲	LONG۱°
S <sub>۹</sub>	CPE۱۶	L۶	LONG۱°	L۱۲	LONG۱°
S <sub>۱۰</sub>	CPE۸	L۸	LONG۱°	L۱۲	LONG۱°



شکل ۶. نمونه‌ی مدل‌سازی شده.



شکل ۷. شرایط مرزی تیر و ستون.

شده‌اند. برای جلوگیری از جابه‌جایی خارج از صفحه و غیرهمگون تیرهای دو طرف اتصال خورجینی، تیرها توسط ورق‌هایی به عرض ۱۰ سانتی‌متر، در فواصل ۳۵ سانتی‌متری از بالا و پایین به یکدیگر متصل شده‌اند. در مدل‌سازی نمونه‌ها از اندازه‌های واقعی استفاده شده است. شرایط مرزی اعمال شده مطابق شکل ۷ است.

معرفی نمونه‌ها در جدول ۱ براساس  $S_{n,L}$  و  $S_{n,G}$  صورت گرفته است، که  $n$  بیان‌گر شماره‌ی نمونه،  $G$  بیان‌گر بارگذاری توأم ثقلی و جانبی و  $L$  بیان‌گر بارگذاری جانبی تنهاست.

در این پژوهش، برای بررسی رفتار چرخه‌یی و به‌دست‌آوردن منحنی هیستریزس لنگر- دوران و رسم منحنی پوش برای تعیین سختی اولیه و ثانویه‌ی اتصالات مختلف طراحی شده، از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده و بار رفت و برگشتی زلزله به صورت جابه‌جایی متناظر با پروتکل بارگذاری ارائه شده مربوط به زلزله‌های دوران

-- شاخص فشار (PI): شاخص فشار به‌عنوان نسبت تنش هیدرواستاتیکی  $\sigma_m$  بر تنش تسلیم تعریف می‌شود، که تنش هیدرواستاتیکی مطابق رابطه‌ی ۴ به صورت منفی یک‌سوم تغییرناپذیر اول تانسور تنش تعریف می‌شود:

$$\sigma_m = \frac{-\sigma_{ii}}{3} \quad (4)$$

که در آن،  $\sigma_{ii}$  برابر با حاصل جمع ۳ تنش اصلی  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  است.

-- شاخص گسیختگی (RI): که به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$RI = \frac{PEEQ}{\varepsilon_r} \quad (5)$$

که در آن،  $\varepsilon_r$  کرنش گسیختگی، PEEQ کرنش خمیری معادل است، که از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$PEEQ = \sqrt{\left[ \frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p \right]} \quad (6)$$

که در آن،  $\varepsilon_{ij}^p$  برابر با مؤلفه‌ی کرنش خمیری است. می‌توان PEEQ را به صورت خروجی از نرم‌افزار دریافت کرد.

-- شاخص کرنش خمیری معادل (PEEQI): که به صورت رابطه‌ی ۷ بیان می‌شود:

$$PEEQI = \frac{PEEQ}{\varepsilon_y} \quad (7)$$

که در آن،  $\varepsilon_y$  کرنش تسلیم است.

-- شاخص سه‌محوره (TI): شاخص سه‌محوره به صورت تقسیم حاصل تنش هیدرواستاتیک بر تنش میسنز تعریف می‌شود.

شاخص‌های معرفی شده در این قسمت، شاخص‌هایی هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان رفتار اتصالات را تحت بارگذاری‌های مختلف تفسیر کرد. به‌عنوان مثال، هر چه شاخص RI، عدد بزرگ‌تری باشد، پتانسیل رخداد شکست بالاتر می‌رود و هنگامی که RI برابر ۱ می‌شود، گسیختگی رخ داده است. البته در سازه‌های تحت بار چرخه‌یی، به دلیل بزرگ‌بودن مقادیر کرنش خمیری معادل، استفاده از شاخص‌های جایگزین پیشنهاد می‌شود. شاخص تنش خمیری معادل به‌عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری شکل‌پذیری در سطح موضعی به‌کار می‌رود و بزرگ‌بودن آن نشان‌دهنده‌ی افزایش کرنش‌های خمیری ایجاد شده و در نتیجه افزایش احتمال وقوع شکست چه به صورت ترد و چه به صورت شکل‌پذیر است. در شاخص میسنز چنانچه عدد به دست آمده، مقداری بزرگ‌تر از ۱ باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که در اتصال، رفتارها غیرخطی شده‌اند و بزرگ‌بودن آن نمایان‌گر تنش‌های غیرخطی بیشتر است. البته این شاخص‌ها، بیشتر برای مقایسه‌ی نسبی رفتار اتصالات تحت بارگذاری‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند و به صورت منفرد، بیان‌گر وقوع شکست در اتصال نیستند. [۱۷]

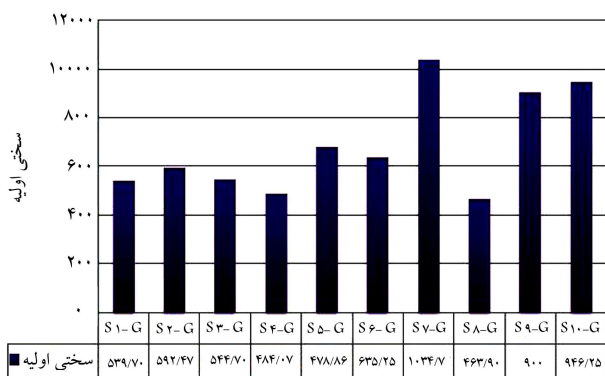
### ۳.۳. معرفی نمونه‌ی اتصالات

در این نوشتار، ۱۰ نمونه‌ی اتصال مطابق با جدول ۱، ابتدا تحت بارگذاری هم‌زمان ثقلی و جانبی و بار دیگر تحت بارگذاری جانبی تنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، نمونه‌ها به صورت صلبیی و شامل ۲ عدد تیر هستند، که توسط نبشی‌هایی به ورق اتصال یک ستون دوپل متصل

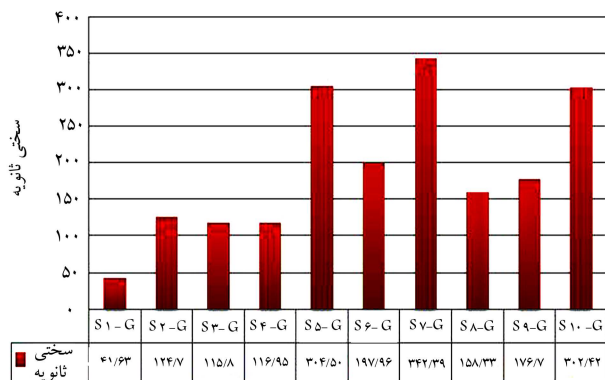
جدول ۲. سیکل‌های تغییر مکان در حالت رفت و برگشتی متناظر با پروتکل بارگذاری SAC.

Number of cycles, n	Peak deformation	Load Step
۶	۰٫۰۰۳۷۵	۱
۶	۰٫۰۰۵	۲
۶	۰٫۰۰۷۵	۳
۴	۰٫۰۱	۴
۲	۰٫۰۱۵	۵
۲	۰٫۰۲	۶
۲	۰٫۰۳	۷

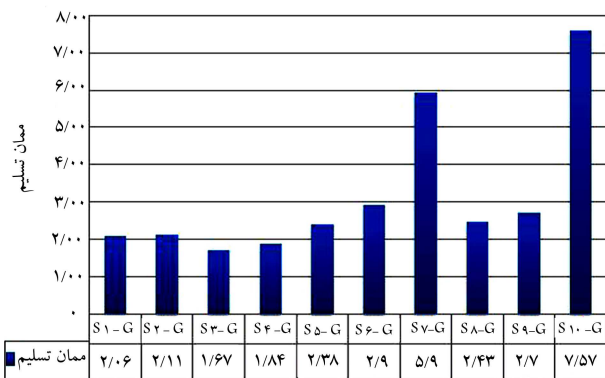
Continue with increments in of ۰٫۰۱, and perform two cycles at each step



شکل ۸. مقدار سختی اولیه.



شکل ۹. مقدار سختی ثانویه.



شکل ۱۰. مقدار ممان تسلیم.

در شکل ۹، مقدار سختی ثانویه اتصالات مختلف مورد بررسی نوشتار حاضر تحت بارگذاری هم‌زمان ثقلی و جانبی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بررسی سختی ثانویه برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش هم‌زمان طول نبشی بالا و پایین و یا افزایش طول نبشی پایین بیشترین تأثیر را در افزایش سختی ثانویه اتصال دارد. در شکل ۱۰، مقدار ممان تسلیم اتصالات مختلف مورد بررسی نوشتار حاضر تحت بارگذاری هم‌زمان ثقلی و جانبی با یکدیگر مقایسه شده است. با مشاهده‌ی مقادیر ممان تسلیم در اتصالات مختلف مورد بررسی نتیجه گرفته شده است که افزایش هم‌زمان طول نبشی بالا و پایین، بیشترین نقش را در افزایش ممان تسلیم اتصال دارد. در شکل ۱۱، مقدار شاخص TI بیشینه‌ی اتصالات مختلف مورد بررسی نوشتار حاضر تحت بارگذاری هم‌زمان ثقلی و جانبی با یکدیگر مقایسه شده است.

گسل توسط SAC (نمونه‌ی آزمایشگاهی AISC seismic provision) که در حقیقت جایگزین جهت نیاز لرزه‌ی واقعی است (جدول ۲)،<sup>[۱۵]</sup> توسط شرایط مرزی جابه‌جایی در نقطه‌ی در انتهای تیر که در سطح مقطع به صورت نقطه‌ی مرجع تعریف شده است، اعمال شده است. در حقیقت این نحوه‌ی اعمال بار باعث می‌شود که هیچ‌گونه لنگری در انتهای تیر ایجاد نشود. برای در نظر گرفتن شرایط غیرخطی گزینه‌ی Nlgeom در step فعال شده است. همچنین به دلیل در نظر گرفتن بار ثقلی، بار ۲۱۰۰۰۰ نیوتن بر متر مربع به صورت گسترده بر روی تیرها و بار محوری ۲۱۰۰۰۰ نیوتن بر متر مربع بر روی سر ستون اعمال شده است.<sup>[۲۸]</sup>

#### ۴. تحلیل و تفسیر نتایج

از آنجا که هدف پژوهش حاضر، مطالعه‌ی رفتار اتصال خورجینی و تأثیر حضور بار ثقلی در مشخصه‌های اتصال است، با مدل‌سازی نمونه‌های مختلف اتصالات خورجینی، برای تمامی آن‌ها منحنی لنگر - دوران تحت بار جانبی چرخه‌ی و بار ثقلی تحت تحلیل پوش‌آور رسم شده و برای به دست آوردن سختی اولیه (K) و سختی ثانویه اتصال (KS)، منحنی پوش لنگر - دوران اتصال از متصل کردن نقاط بیشینه‌ی هیستریزس در هر چرخه‌ی بارگذاری رسم شده است. در اعضاء اتصال، در المانی که بیشینه‌ی کرنش خمیری معادل را داشته است، بیشینه‌ی تنش فون میسز MAX( $\sigma_v$ ) و بیشینه‌ی تنش هیدرواستاتیک MAX( $\sigma_m$ ) و بیشینه‌ی کرنش خمیری معادل PEEQ<sub>max</sub> برای تیر، ستون، و خط جوش‌های بحرانی در نبشی بالا و پایین از نرم‌افزار قرانت شده و شاخص‌های سه‌محوره (TI) و کرنش خمیری معادل (PEEQI)؛ برای مقایسه‌ی اتصالات محاسبه شده است. برای محاسبه‌ی دوران اتصال از تغییر شکل مقطع عرضی تیر به علت تغییر مکان نقاط بالایی و پایینی مقطع مجاور اتصال استفاده شده ( $\frac{\Delta_1 - \Delta_2}{H_{beam}}$ ) و از تغییر شکل مقطع عرضی ستون ناشی از تغییر مکان مقطع ستون در طرفین ناحیه‌ی اتصال به دلیل کوچکی صرف‌نظر شده است. در شکل ۸، مقدار سختی اولیه‌ی اتصالات مختلف مورد بررسی نوشتار حاضر، تحت بارگذاری هم‌زمان ثقلی و جانبی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

با توجه به سختی اولیه‌ی محاسبه‌شده برای اتصالات مورد بررسی، افزایش هم‌زمان طول نبشی بالا و پایین و استفاده از تیر لانه‌زنبوری بیش از سایر موارد باعث افزایش سختی اولیه اتصال می‌شود.

TI و بالابودن آن از عدد ۰/۶ را دارد. در شکل ۱۲، مقدار شاخص PEEQI پیشینه‌ی اتصالات مختلف مورد بررسی نوشتار حاضر تحت بارگذاری هم‌زمان ثقلی و جانبی با یکدیگر مقایسه شده است.

با بررسی شاخص گسیختگی PEEQI در تیرهای اتصالات مختلف مشاهده شده است که افزایش طول نبشی بالا و پایین بیشترین تأثیر را در افزایش شاخص PEEQI داشته است.

با بررسی شاخص گسیختگی PEEQI در نبشی بالا در اتصالات مختلف مشاهده شده است که افزایش طول نبشی پایین و استفاده از تیر لانه‌زنبوری، بیشترین تأثیر را در افزایش شاخص PEEQI داشته است.

با بررسی شاخص گسیختگی PEEQI در نبشی پایین در اتصالات مختلف مشاهده شده است که افزایش ارتفاع تیر و افزایش طول نبشی بالا، بیشترین تأثیر را در افزایش شاخص PEEQI داشته است.

## ۵. نتیجه‌گیری

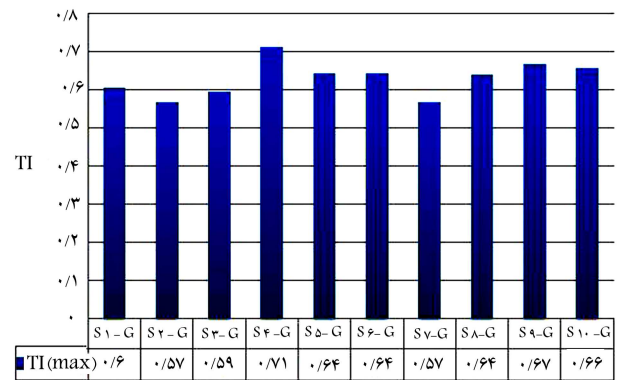
نتایج حاصل پس از بررسی و مقایسه‌ی کلی اتصالات مدل‌سازی شده به این شرح است:

۱. افزایش نسبت طول نبشی به اندازه‌ی نبشی و همچنین افزایش مدول مقطع کسسان تیر باعث کم‌رنگ شدن تأثیر بار ثقلی بر روی مشخصه‌های رفتاری اتصال (سختی اولیه، سختی ثانویه و ممان تسلیم) می‌شود.

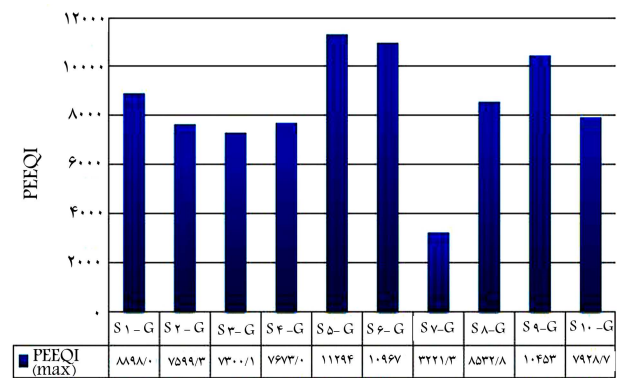
۲. با بررسی شاخص گسیختگی TI در نمونه‌های مورد بررسی مشاهده شده است که افزایش طول نبشی بالا اگر چه باعث افزایش سختی اتصال شده است، ولی با توجه به شاخص TI احتمال شکست در ستون در محل اتصال را به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌دهد. همچنین افزایش ارتفاع تیر، تأثیر قابل توجهی در افزایش شاخص TI در ستون در محل اتصال داشته است.

۳. با بررسی شاخص گسیختگی PEEQI در نمونه‌های مورد بررسی مشاهده شده است که مقدار شاخص PEEQI در ستون، در نمونه‌های مختلف مقدار قابل توجهی نیست.

۴. با مشاهده‌ی نمونه‌های مختلف به طور کلی می‌توان گفت در نظر گرفتن بار ثقلی، بدترین تأثیر را در طراحی جوش‌ها دارد و نادیده گرفتن آن می‌تواند سبب شکست زود هنگام جوش و خسارت جبران‌ناپذیری شود.



شکل ۱۱. مقدار شاخص TI پیشینه.



شکل ۱۲. مقدار شاخص PEEQI پیشینه.

در بررسی شاخص گسیختگی TI در تیرهای اتصالات مختلف مشاهده شده است که افزایش ارتفاع تیر و افزایش طول نبشی پایین، بیشترین تأثیر را در افزایش شاخص مذکور داشته است.

در بررسی شاخص گسیختگی TI در نبشی بالا در اتصالات مختلف مشاهده شده است که مقدار شاخص ذکر شده به طور کلی در این عضو بالاست و افزایش طول نبشی پایین و استفاده از تیرهای لانه‌زنبوری سبب بالا رفتن مقدار شاخص TI از عدد ۰/۶ شده است.

در بررسی شاخص گسیختگی TI در نبشی پایین در اتصالات مختلف مشاهده شده است که افزایش طول نبشی بالا، بیشترین تأثیر را در افزایش مقدار شاخص

## پانویس

1. combine

- Eftekhari, M. "Check members ductility of high strength steel and comparing them with soft steel", Master's Thesis, (2007).
- Amiri Hormozaki, H.R. "Saddle connections common behavior under low loads sweep with a staggering number and how to defeat them", PhD Thesis, Tarbiat Modarres University (2012).
- Salagegheh, A. "Study of saddle connection behavior and strengthen in steel frame structures", Master's Thesis, Sistan and Baluchestan University (2011).

## منابع (References)

- Design and Implementation of Steel Buildings, National Building Regulations, 10th Topic (1392).

5. Karami, R. "Mechanical properties of saddle connections", Master's Thesis, Sharif University of Technology (1991).
6. Tahooni, Sh. and Farjoodi, J. "The reported study of rigidity saddle connections", Islamic Revolution Housing Foundation (1992).
7. Hosseinkhani, A. "Saddle connections", Master's Thesis, Islamic Azad University, South Branch (1992).
8. Ghane, A. "Study of the dynamic behavior of structures by saddle connecting", Master's Thesis, Sharif University of Technology (1994).
9. Fallah, A.A. "Nonlinear dynamic analysis of V semi-rigid connections under earthquake loads", Master's Thesis, University of Science and Industry (1994).
10. Tarighat, A. "Study the elastic behavior of saddle connections", Master's Thesis, Tehran University (1994).
11. Yaghubi Sarsakhti, M. "Study of all joints in steel frames and evaluate the experience and the theoretical behavior of conventional saddle connections", Master's Thesis, Shiraz University (1994).
12. Moghaddam, H. and Kouhian, R. "Strength steel structures with semi-rigid connections (saddle connections) under earthquake loads", International Institute of Seismology and Engineering Earthquake (1995).
13. Maleki, M. "Study of saddle connection performance under dynamic loads", Master's Thesis, Amirkabir University of Technology (1995).
14. Piroozbakht, S. "Dynamic behavior and hysteresis cycle of saddle connections in steel frames under fatigue loads with limited cycles", Master's Thesis, Shiraz University (1995).
15. Mazrouee, A. and Mostafavi, H. "Ways of improving saddle connections", The Second Workshop of Saddle Connections, Building and Housing Research Center (1992).
16. Arbabi, F. "Nonlinear deformation of satchel connections", *J. of Seismology and Earthquake Eng.*, Iran, **1**(1), pp. 51-57 (1998).
17. Sadeghian, P. "Saddle connections", Sharif University of Technology (1999).
18. Moghaddam, H., Rahmani, A. and Harati, M. "Saddle connection nonlinear behavior under bending moment", *International Conference on Modern Research in Civil Engineering*, Architectural and Urban Development, Tehran (2015).
19. Abbaslou, A., Mahyar, P. and Nabizadeh Rafsanjani, H. "Evaluation and seismic rehabilitation of steel structure by using nonlinear static analysis method", *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development*, Tabriz, Iran (18-19 December 2013).
20. Watar, M.G., Davari, S.M. and Shayesteh, A. "The effect of using of picket on welding reducing the stress concentration in saddle connection", *The Second National Conference on Structure-Earthquake-Geotechnic*, Mazandaran (2012).
21. Moayyed Alami, A. "Saddle connection structures Seismic reinforcement", Sharif University of Technology (2000).
22. Alavi, S.A. "Study of saddle connections momentarily behavior under cyclic loads", Mazandaran University of Science and Technology (2006).
23. Moghaddam, H. asan, *Earthquake Engineering, fundamentals and application*, farhang pub, Tehran (2002).
24. Chen, W.F., N Kishi, seiriyyid steel beam-to-column connection, *Journal of Constructional structural Engineering*, **115**, (1989).
25. Chen, W.F. and Kishi, N. "Semi-rigid steel beam to-column building connections date and modeling", *Journal of Straction Engineering, ASCE*, **115**(1), pp. 105-119 (January 1989).
26. Kishi, N. and Chen, W.F., Matsuoka, K.G. and Nomachi, S.G., "Moment-rotation relation of semi-rigid connections with angle", *Journal of Straction Engineering, ASCE*, **116**(7), pp. 1813-1834 (1 January 1990).
27. Dardaie Jooghan, S. "Damage index values in direct connections with sheet steel flange on the frame", Tarbiat Modarres University (2010).
28. Faghih Khorasani, F. "A study on the cyclic behavior of ordinary saddle connection in the present of gravity loads", Islamic Azad University Science and Research Branch- Khorasan Razavi (2013).