

# مطالعه‌ی عددی اتصالی نوین به صورت کاملاً پیچی به منظور اتصال گیردار تیر به ستون با استفاده از مقاطع سپری شکل و نبشی جان

مهدی دره زرشکی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیررضا قیامی آزاد\* (استادیار)

مهدی قاسمیه (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (۱۰۹۹-۲، ص. ۳۸-۲، شماره ۲/۲، پژوهشی)

با توجه به تجربیات گذشته‌ی مهندسان، معمولاً اتصالات جوشی در هنگام زلزله، عملکرد مناسبی از خود نشان نمی‌دهند. با وجود این، در همه‌ی اتصالات گیردار از پیش تأیید صلاحیت شده‌ی موجود در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به نحوی از جوش استفاده شده است. به همین دلیل در نوشتار حاضر، به بررسی یک نوع اتصال گیردار کاملاً پیچی با استفاده از مقاطع سپری شکل و نبشی جان پرداخته شده است. ابتدا به کمک مدل سازی اجزاء محدود و روش اجزاء تشکیل دهنده، شیوه‌ی برای محاسبه‌ی سختی و مقاومت اتصال ارائه شده و پس از طراحی تعداد زیادی اتصال و محاسبه‌ی سختی آنها، با استفاده از الگوریتم یادگیری رگرسیون خطی چندگانه، یک مدل ساده برای محاسبه‌ی سختی اتصال ارائه شده است، که نتایج نشان دهنده‌ی خطای ناچیز مدل مذکور در محاسبه‌ی سختی اتصال است. همچنین اتصال مورد نظر از نظر صلابت نیز بررسی شده است، که نتایج نشان دهنده‌ی عملکرد صلب آن است.

واژگان کلیدی: روش اجزاء تشکیل دهنده، اجزاء محدود، یادگیری ماشین، مقاطع سپری شکل، اتصال کاملاً پیچی، سختی اولیه.

## ۱. مقدمه

قاب‌های خمشی متوسط و ویژه در گروه اتصالات‌های از پیش تأیید صلاحیت شده قرار گرفته باشد.

مهم‌ترین شاخص و امتیاز اتصال تیر به ستون به کمک سپری، میزان شکل پذیری و اتلاف انرژی آن در مقایسه با اتصالات‌های جوشی است.<sup>[۱]</sup> هوانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۲]</sup> با استفاده از سوراخ لویبایی در جان سپری، تأثیر طول سوراخ لویبایی را در میزان شکل پذیری و اتلاف انرژی اتصال بررسی کردند و دریافتند که عملکرد لرزه‌یی اتصال مذکور، عالی است. همچنین ونگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۳]</sup> با اختصاص طول تغییرشکل آزاد مناسب در جان سپری و استفاده از فولاد با نقطه‌ی تسلیم پایین، از سپری هم‌زمان به عنوان اتصال دهنده و فیوز مستهلک‌کننده‌ی انرژی استفاده کردند و دریافتند که اتصال مذکور دارای عملکرد خستگی عالی و ظرفیت بالای انرژی است.

به صورت کلی سه نوع مکانیزم خرابی در بال سپری ممکن است رخ بدهد، که وقوع هر کدام به مقاومت نسبی بین ورق و پیچ‌ها بستگی دارد.<sup>[۴]</sup> با توجه به شکل ۱، در مکانیزم ۱، مقاومت ورق در مقایسه با پیچ کم است و دو مفصل خمیری در ورق بال سپری تشکیل می‌شود. در مکانیزم ۲، مقاومت ورق و پیچ به یکدیگر نزدیک است

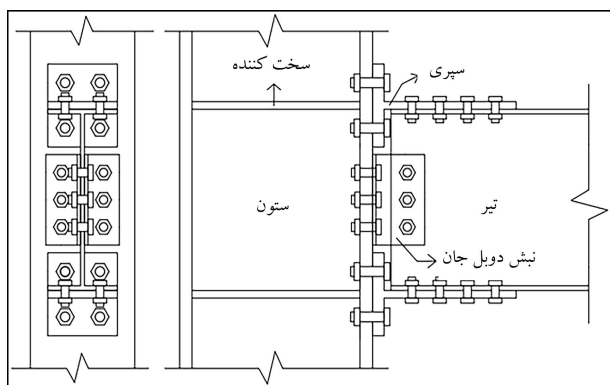
تجربه‌ی زمین لرزه‌ی نورریج<sup>۱</sup> (۱۹۹۴)، باعث کاهش اطمینان مهندسان از عملکرد اتصالات‌های جوشی در زلزله شده است. با بررسی ساختمان‌های تخریب شده مشخص شده است که اتصالات‌های خمشی جوشی عملکرد خوبی از خود نشان نداده و در سطح پایینی از شکل پذیری بدون شکل‌گیری مفصل خمیری دچار شکست شده‌اند. بیشتر خرابی‌های ساختمان ناشی از یک شکست ترد در اتصالات‌های جوشی بوده و فقط ۲ یا ۳ اتصال از بین تعداد زیادی اتصال بررسی شده، به تغییرشکل خمیری قابل توجهی رسیده‌اند. همچنین بیشتر مهندسان اعتقاد داشتند که آزمایش‌های کنترل کیفیت جوش، کارایی لازم را نداشته و نتوانسته‌اند به خوبی کیفیت جوش را ارزیابی کنند و به عنوان یک راهکار جایگزین، مهندسان تمایل بیشتری به استفاده از اتصالات‌های پیچی نشان داده‌اند.<sup>[۱]</sup> با توجه به این‌که در تمام اتصالات‌های از پیش تأیید صلاحیت شده‌ی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان،<sup>[۲]</sup> به نحوی از جوش استفاده شده است؛ در نتیجه، نیاز به یک اتصال گیردار کاملاً پیچی است، که برای استفاده در

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

DOI:10.24200/J30.2022.59751.3069

m.darrehzereshki@ut.ac.ir  
rghiami@ut.ac.ir  
m.hassemieh@ut.ac.ir



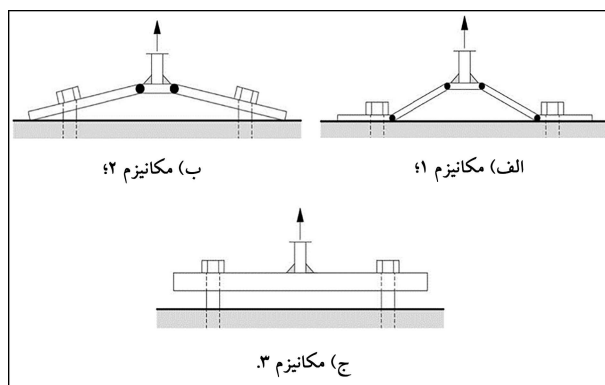
شکل ۲. جزئیات اتصال با سپری و نبشی جان.

همچنین هنتوش و عبود<sup>۸</sup> (۲۰۱۴)،<sup>[۱۷]</sup> با استفاده از مفاهیم روش اجزاء تشکیل دهنده، مدلی را برای توصیف رفتار و سختی سپری ساخته شده، که شامل تغییرشکل‌های کلی سپری و بال ستون است. ارائه کرده‌اند. مدل مذکور، رفتار غیرخطی، پیش‌تیدگی پیچ‌ها و اندرکنش تماسی آنها را در نظر گرفته است.

بر خلاف اتصال مورد مطالعه‌ی ایشان، که در آن از نبشی جان با پیچ و مهره برای انتقال برش تیر به ستون استفاده شده است، در مطالعاتی که در گذشته بر روی اتصال با استفاده از مقاطع سپری انجام شده است، در اغلب موارد، ساز و کاری برای انتقال برش در نظر گرفته نشده و یا این‌که در موارد اندکی، از ورق جان با جوش برای انتقال برش استفاده شده است.

آیین‌نامه‌های طراحی، اتصال‌هایی که بدون نیاز به انجام آزمایش و تهیه‌ی مدارک و فقط با تأمین الزامات و محدودیت‌های لازم، عملکرد لرزه‌ی مناسب دارند، را اتصال‌های از پیش تأیید شده می‌نامند. با توجه به موارد ذکر شده، هر سه مشخصه‌ی مقاومت، صلبیت و شکل‌پذیری به صورت متعادل در اتصال تیر به ستون به کمک سپری وجود دارد و مطالعات انجام شده بیان‌گر شکل‌پذیری مناسب اتصال تیر به ستون توسط سپری است. همچنین آیین‌نامه‌ی AISC،<sup>[۱۸]</sup> اتصال مذکور را در حالتی که از ورق جان برای انتقال برش استفاده شود، از پیش تأیید صلاحیت شده می‌داند. در نتیجه با توجه به موارد ذکر شده، تصمیم‌گیری در رابطه با قرار گرفتن یا قرار نگرفتن اتصال با استفاده از مقاطع سپری‌شکل و نبشی جان در گروه اتصال‌های از پیش تأیید صلاحیت شده‌ی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان،<sup>[۱]</sup> نیاز به بررسی بیشتری دارد.

به همین دلیل در پژوهش حاضر، ابتدا در نرم‌افزار آباکوس<sup>۹</sup>، مدل اجزاء محدود شبیه‌سازی و در برابر نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. سپس با استفاده از مفاهیم آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳ بخش ۸-۱،<sup>[۱۳]</sup> روش اجزاء تشکیل دهنده برای اتصال پیشنهادی مطابق با شکل ۲ پیاده‌سازی و با چند مدل اجزاء محدود و آزمایشگاهی صحت‌سنجی صورت گرفته و در انتها، با توسعه‌ی نرم‌افزار در محیط اکسل به طراحی ۱۱۱۵ اتصال با مقطع سپری و نبشی جان پرداخته شده است، تا تمام حالت‌های ممکن را پوشش دهد. سپس به کمک روش اجزاء تشکیل دهنده، پارامترهای: سختی، لنگر تسلیم و دوران تسلیم اتصال استخراج و میزان صلبیت و شکل‌پذیری اتصال مذکور بررسی شده است، تا شناخت بهتری از آن حاصل شود. در انتها، از طریق روش یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های به دست آمده، یک فرمول ساده برای محاسبه‌ی سختی ارائه و نیز اتصال از نظر صلبیت طبقه‌بندی شده است. در شکل ۳ روند انجام پژوهش در قالب یک فلوچارت مشاهده می‌شود.



شکل ۱. انواع مکانیزم خرابی در بال سپری.<sup>[۷]</sup>

و خرابی شامل ترکیبی از تسلیم ورق و گسیختگی پیچ‌هاست. در مکانیزم ۳، مقاومت ورق بیشتر از پیچ‌هاست و در نتیجه، فقط پیچ‌ها دچار گسیختگی می‌شوند.<sup>[۷]</sup> تفاوت اصلی اتصال اخیر در مقایسه با اتصال‌های تیر به ستون به کمک ورق‌های بال، کمتر بودن مقاومت و سختی فنرهای معرف رفتار بال سپری در اتصال است و در نتیجه، صلبیت کمتری نسبت به سایر اتصال‌ها دارد. سختی فنرهایی که معرف میزان صلبیت اتصال هستند، به ضخامت سپری، موقعیت، اندازه و جنس پیچ‌های استفاده شده در اتصال سپری به ستون وابستگی شدیدی دارند.<sup>[۹-۸،۳]</sup> مطالعات زیادی در خصوص بررسی تأثیر پارامترهای سپری در سختی اتصال در گذشته انجام شده است، که می‌توان به مطالعات فرناندز<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵)،<sup>[۱۰]</sup> بر روی شکل‌پذیری مؤلفه‌های کششی اتصال اشاره کرد، که در آن، یک مدل برای پیش‌بینی پارامترهای کلیدی پاسخ نیرو- تغییرشکل سپری ارائه شده است.

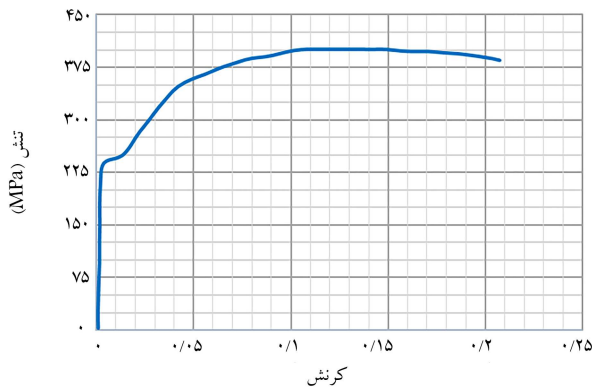
کنگ و کیم<sup>۵</sup> (۲۰۱۸)،<sup>[۱۱]</sup> با هدف پیش‌بینی سختی اولیه و لنگر نهایی اتصال با سپری، چندین شبیه‌سازی اجزاء محدود انجام دادند و یک مدل برای تعیین سختی اولیه و انواع مکانیزم‌های خرابی برای سپری تعیین کردند. اخیراً مطالعه‌ی بر روی تأثیر افزودن سخت‌کننده به بال سپری در میزان سختی اتصال انجام شده است، که نتایج آن نشان می‌دهد افزودن سخت‌کننده می‌تواند بین ۷ تا ۸ درصد، سختی اولیه‌ی اتصال را افزایش دهد.<sup>[۱۲]</sup>

رفتار یک سازه فولادی به طور قابل توجهی تحت تأثیر اتصال‌ها بین اعضاء فولادی است. به همین دلیل در آیین‌نامه‌ی اروپا، شماره‌ی ۳، بخش ۸-۱،<sup>[۱۳]</sup> توجه ویژه‌ی به پیش‌بینی رفتار دورانی اتصال صورت گرفته و روش اجزاء تشکیل دهنده<sup>۶</sup> را ارائه داده است. روش اخیر، مبتنی بر جداسازی اجزاء تشکیل دهنده‌ی اتصال به مجموعه‌ی از فنرها و اجزاء صلب است. در آیین‌نامه‌ی اشاره شده، فرمول‌هایی برای بررسی رفتار سپری با دو پیچ در هر ردیف ارائه شده است، اما برای سپری با ۴ پیچ در هر ردیف، مطالعات محدودی انجام شده است. به همین دلیل ماسیمو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۶]</sup> با مدل‌سازی اجزاء محدود به بررسی الگوی خط تسلیم مطابق با مکانیزم‌های تخریب متفاوت پرداخته و طول مؤثر سپری را با استفاده از یک رویکرد انرژی ارزیابی کرده‌اند.

یکی از مشکلات اتصال اخیر این است که اغلب پروفیل‌های نورد شده برای ساخت سپری برای استفاده در تیرهای عمیق مناسب نیستند. به همین دلیل مطالعه‌ی برای بررسی عملکرد اتصال مذکور توسط مقاطع سپری ساخته شده، برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط انجام شده و نتایج نشان داده است که مقاطع ذکر شده برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط مناسب هستند.<sup>[۱۴-۱۶]</sup>

جدول ۱. جزئیات قطعات مدل شده. [۴]

قطعه	مشخصات (mm)	مشخصات
ستون	عرض	۳۰۰
	ضخامت	۲۶
	عرض	۶۲۸
	ضخامت	۲۴
	طول	۱۰۶۰
تیر	عرض	۲۰۰
	ضخامت	۱۶
	عرض	۳۱۸
	ضخامت	۱۰
	طول	۱۳۵۱
سپری	طول	۲۷۰
	عرض	۲۰۰
	ضخامت	۲۹
	عرض	۳۰۰
	ضخامت	۲۰
	عرض	۲۰
پیچ	قطر پیچ [۱۹]	۲۲
	قطر سرپیچ [۱۹]	۳۸
	ضخامت سرپیچ [۱۹]	۱۴
	طول مغزی پیچ	۳۶
M۲۲	قطر سرپیچ [۱۹]	۲۷
	ضخامت سرپیچ [۱۹]	۴۹
	طول مغزی پیچ	۱۷
	طول مغزی پیچ	۶۵

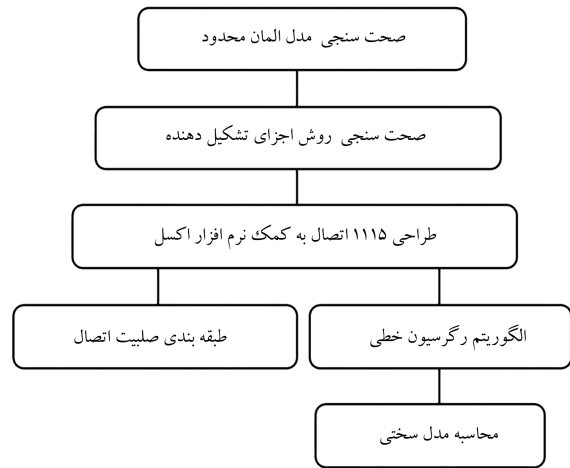


شکل ۴. نمودار تنش - کرنش فولاد Q235B.

ستون در نظر گرفته شده‌اند. تماس قائم از نوع تماس سخت<sup>۱۰</sup> و تماس مماسی از نوع پانالتی<sup>۱۱</sup> با ضریب اصطکاک ۰/۳۵ و با لغزش محدود<sup>۱۲</sup> در نظر گرفته شده است.

روش حل از نوع تحلیل استاتیکی بوده و برای جلوگیری از بروز مشکلات برهم‌کنش سطوح تماس در تحلیل اتصال، فرایند تحلیل به ۵ مرحله تقسیم شده است:

در مرحله اول، جابه‌جایی سپری‌های بالا و پایین به طور موقت محدود و یک بار محوری خیلی کوچک به تمام پیچ‌ها اعمال می‌شود تا تمام قطعات در تماس با



شکل ۳. فلوچارت روند انجام پژوهش.

## ۲. مدل‌سازی اجزاء محدود

برای محاسبه‌ی دقیق سختی و پیشینه‌ی ظرفیت لنگر اتصال با استفاده از مقاطع سپری و نبشی جان، تحلیل غیرخطی سه‌بعدی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام و دقت مدل با مقایسه‌ی خروجی مدل اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی، که توسط هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)، صورت گرفته بود (نمونه‌ی T-۰ با سوراخ استاندارد)، بررسی شده است.

### ۱.۲. هندسه‌ی مدل

قسمت‌های مدل شده، شامل: ستون، ورق پیوستگی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر، تیر، سخت‌کننده با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، مهار جانبی در محل اعمال بار به تیر برای جلوگیری از کمانش پیشگی - جانبی، سپری و پیچ‌ها با دو قطر متفاوت است. جزئیات هندسه‌ی مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۲.۲. مشخصات مصالح مدل

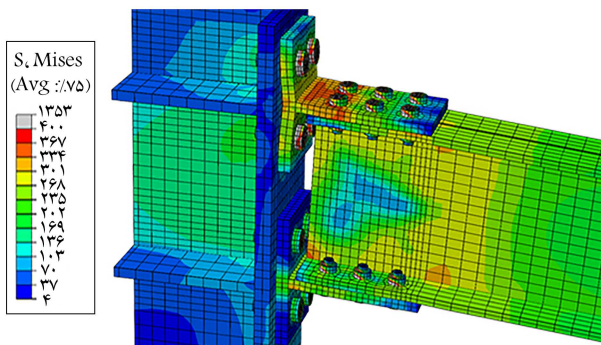
ستون، ورق پیوستگی، سپری، تیر و سخت‌کننده‌ی آن از فولاد با رده‌ی Q235B بودند و از پیچ‌های پر مقاومت کلاس ۱۰/۹ استفاده شده است. مقادیر دقیق تنش تسلیم، تنش کششی نهایی، درصد افزایش طول در لحظه‌ی گسیختگی (A) و نسبت پواسون ( $\nu$ ) مصالح از آزمایش کشش کوبن به دست آمده است، که در جدول ۲ ارائه شده و نمودار تنش - کرنش فولاد Q235B مطابق با شکل ۴ است.

### ۳.۲. شرایط مرزی و بارگذاری

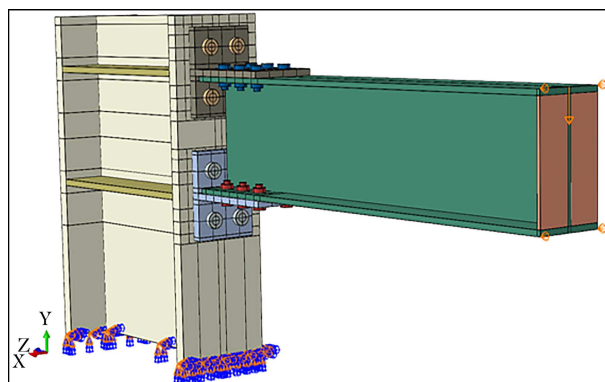
پای ستون به صورت کاملاً گیردار بوده و تمام درجه‌های آزادی انتقالی و دورانی آن بسته شده و انتهای دیگر آن، کاملاً آزاد بوده است. برای جلوگیری از کمانش پیشگی - جانبی اتصال، مطابق با تنظیم‌های آزمایشگاهی در انتهای آزاد تیر از تغییر شکل جانبی تیر جلوگیری به عمل آمده و بارگذاری به صورت تغییر شکل کنترل به انتهای تیر اعمال شده است (شکل ۵). تمام حالت‌های تماس، شامل: مغزی پیچ با دیواره‌ی سوراخ پیچ، سرپیچ با تیر، ستون و سپری، جان سپری با بال تیر و بال سپری با بال

جدول ۲. مشخصات مصالح فولاد سازه‌یی. [۴]

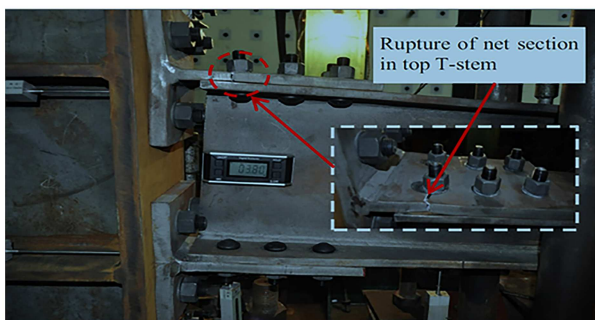
قطعه	Fy(MPa)	Fu(MPa)	A(%)	E(MPa)	$\nu$
ستون	۲۴۰	۴۰۰	-	۲۰۰/۰۰۰	۰/۳
جان تیر	۲۷۲/۶۴	۳۹۸/۱۴	۲۱/۵	۱۷۸/۰۰۰	۰/۳
بال تیر	۲۳۷/۳۱	۴۰۰/۷۲	۲۱/۴	۲۰۰/۰۰۰	۰/۲۷
جان سپری	۲۳۷/۲۲	۴۰۰/۵۹	۲۱/۲	۱۹۹/۰۰۰	۰/۲۸
بال سپری	۲۳۶/۵۲	۴۰۹/۹۵	۲۵/۱	۲۱۵/۰۰۰	۰/۲۹
M۲۲	۱۰۱۰	۱۱۲۲	۱۱/۸	۲۰۰/۰۰۰	۰/۳
M۲۷	۱۰۱۲	۱۱۲۴	۱۲/۴	۲۰۰/۰۰۰	۰/۳



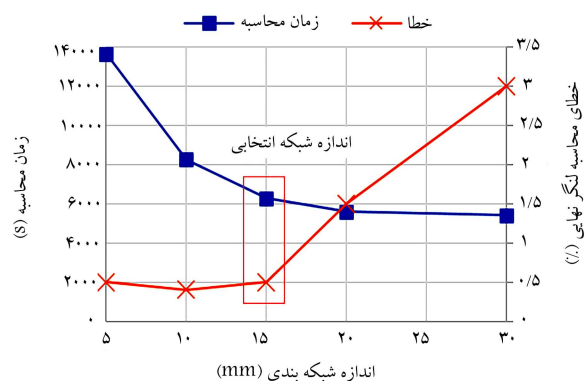
الف) توزیع تنش مدل المان محدود اتصال صحت سنجی؛



شکل ۵. جزئیات شرایط مرزی و بارگذاری اتصال در مدل اجزاء محدود.



ب) حالت گسیختگی در مدل آزمایشگاهی اتصال صحت سنجی. [۳۱]



شکل ۶. نتایج تحلیل حساسیت شبکه بندی سپری.

شکل ۷. توزیع تنش و حالت گسیختگی در مدل‌های اجزاء محدود و آزمایشگاهی.

شده است، که در آن، زمان محاسبه و میزان خطا مقدار مناسبی داشته است. همچنین برای پیچ‌ها از ابعاد شبکه‌ی ۵ میلی‌متر و برای تیر و ستون از ابعاد شبکه‌ی ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است.

## ۵.۲. نتایج اجزاء محدود

پس از تحلیل اتصال در نرم‌افزار برای اطمینان از صحت مدل‌سازی و تحلیل، لازم است نتایج اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و میزان خطا کنترل شود. مقایسه‌ی توزیع تنش و حالت گسیختگی اتصال مدل اجزاء محدود و آزمایشگاهی در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در هر دو مدل اجزاء محدود و آزمایشگاهی، حالت شکست اتصال، گسیختگی سطح مقطع خالص جان سپری بوده است. بال سپری و پیچ‌های آن تحت نیروی اهرمی شدیدی قرار گرفته و تغییرشکل زیادی را تجربه کرده‌اند.

برای محاسبه‌ی مقادیر لنگر و دوران اتصال با استفاده از مدل اجزاء محدود،

یکدیگر قرار بگیرند. در مرحله‌های دوم و سوم، به ترتیب محدودیت موقتی جابه‌جایی سپری‌های بالا و پایین برداشته می‌شود. در مرحله‌ی چهارم، نیروی پیش‌تنیدگی تا مقدار مورد نظر به پیچ‌ها اعمال می‌شود؛ و در مرحله‌ی پنجم، با حفظ نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها، بارگذاری تا لحظه‌ی رسیدن به جابه‌جایی مورد نظر در انتهای تیر ادامه می‌یابد.

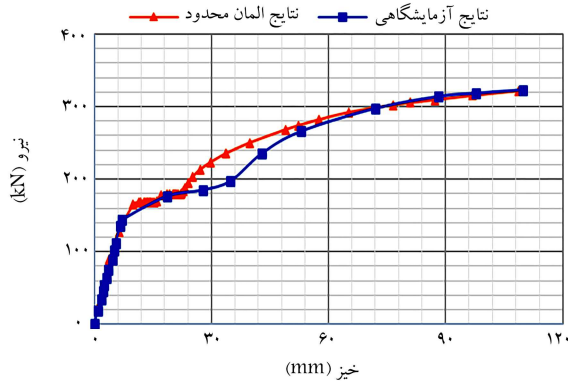
## ۴.۲. شبکه بندی مدل

برای مدل‌سازی تمام قطعات از اجزاء هشت‌گه‌ری مکعبی سه‌بعدی استفاده شده است. برای (CSDAR) انتخاب اندازه‌ی مناسب شبکه بندی قطعات اتصال، به تحلیل حساسیت نیاز است، که در شکل ۶ برای سپری، که مهم‌ترین قطعه است، نتایج آن ارائه شده است.

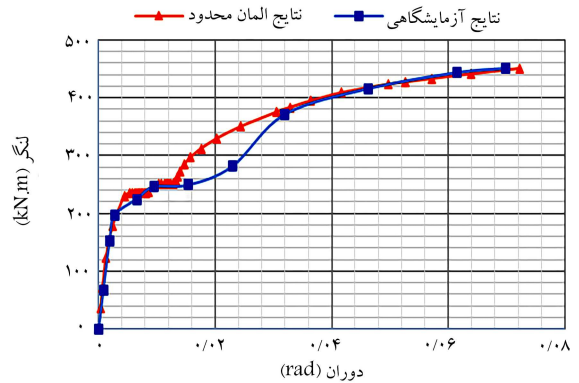
در نتیجه با توجه به شکل ۶، برای سپری از ابعاد شبکه‌ی ۱۵ میلی‌متر استفاده

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود.

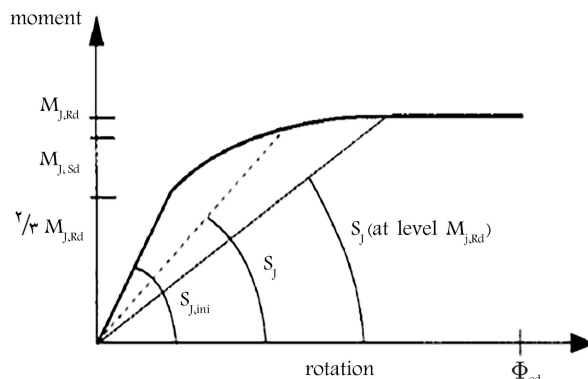
نمونه	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$M_u$ (kN.m)	$\varphi_u$ (rad)	$k_{j,s}$ (kN.m/rad)
آزمایشگاهی	۳۲۲	۱۰۹/۴	۴۵۰/۸	۰/۰۷	۸۲/۳۷۳
اجزاء محدود	۳۲۲/۷	۱۰۸/۲	۴۵۱/۸	۰/۰۷۲	۸۰/۰۰۰
درصد خطا	۰/۲	۱/۱	۰/۲	۲/۸	۲/۹



شکل ۹. نمودار نیرو - تغییرشکل مدل‌های آزمایشگاهی [۴] و اجزاء محدود.



شکل ۸. نمودار لنگر - دوران مدل‌های آزمایشگاهی [۴] و اجزاء محدود.



شکل ۱۰. جزئیات منحنی لنگر - دوران در روش اجزاء تشکیل‌دهنده. [۱۳]

می‌شود.  $M_{j,RD}$  لنگر تسلیم اتصال است، که از کمینه‌ی لنگر قابل تحمل توسط اجزاء به دست می‌آید  $S_j, S_{j,ini}$  و  $\phi_{cd}$  به ترتیب برابر با سختی اولیه، سختی سکانتی و بیشینه‌ی ظرفیت دورانی اتصال هستند.

در شکل ۱۱، هندسه و مدل مکانیکی اتصال در روش اجزاء تشکیل‌دهنده، نحوه‌ی قرارگیری فنرهای معرف هر جزء اتصال در مدل، نحوه‌ی دوران و بازوی لنگر اتصال مشاهده می‌شود.

### ۱.۳. سختی اجزاء اتصال

در جدول ۴، خلاصه‌ی اجزاء استفاده شده برای تعیین مقاومت و سختی اتصال پیچی با استفاده از مقاطع سپری‌شکل و نبشی جان ارائه و نیز جزئیات محاسبه‌ی سختی هر یک از فنرهای  $K_1$  الی  $K_{11}$  ارائه شده است (رابطه‌های ۴ الی ۱۲).

$$k_1 = \begin{cases} \frac{0.78 A_{stc}}{\beta Z_1} & \text{Unstiffened column} \\ \infty & \text{Stiffened column} \end{cases} \quad (4)$$

می‌توان از رابطه‌ی ۱ الی ۳ استفاده کرد: [۲۰]

$$M = P \times L_{load} \quad (1)$$

$$\theta_b = \arctan \left( \frac{\delta_1 - \delta_2 - \delta_{b,e1,1}}{L_{load}} \right) \quad (2)$$

$$\delta_{b,e1,1} = - \frac{PL_{load}^2}{3E_b I_b} \quad (3)$$

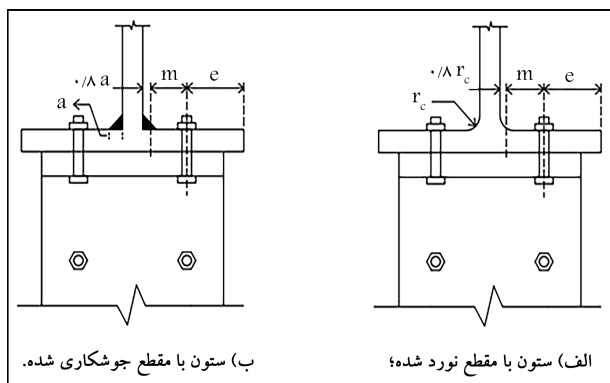
که در آنها،  $P$  نیروی وارده بر انتهای تیر،  $L_{load}$  فاصله‌ی انتهای تیر تا بر ستون که برابر با ۱۴۰ سانتی‌متر است،  $\delta_1$  خیز انتهای تیر در اثر بارگذاری،  $\delta_2$  خیز تیر در محل اتصال تیر به ستون،  $\delta_{b,e1,1}$  خیز کشسان تیر،  $E_b$  مدول کشسانی مصالح تیر و  $I_b$  ممان اینرسی تیر هستند.

نمودارهای لنگر - دوران و نیرو - تغییرشکل مدل اجزاء محدود به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج مذکور، مدل اجزاء محدود، دقت قابل قبولی دارد. در جدول ۳، خلاصه‌ی نتایج اجزاء محدود و آزمایشگاهی ارائه و درصد خطاها محاسبه شده است. در جدول اخیر،  $P_u$  بیشینه‌ی بار اعمال شده به انتهای تیر،  $\Delta_u$  بیشینه‌ی خیز انتهای تیر،  $M_u$  بیشینه‌ی لنگر اتصال،  $\varphi_u$  بیشینه‌ی دوران اتصال و  $k_{j,s}$  سختی سکانتی اتصال هستند.

### ۳. روش اجزاء تشکیل‌دهنده

آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳ بخش ۸-۱، [۱۳] روشی را با عنوان اجزاء تشکیل‌دهنده برای محاسبه‌ی مقاومت، سختی اولیه، سختی سکانتی و دوران اتصال ارائه داده است. بر اساس آیین‌نامه‌ی مذکور، روش ارائه شده زمانی خصوصیات اتصال را درست پیش‌بینی می‌کند که اتصال برای تشکیل مفصل خمیری در تیر طراحی شده باشد، ساز و کار مناسبی برای انتقال برش اتصال در نظر گرفته باشد و نیروی محوری اتصال کمتر از ۵٪ ظرفیت خمیری محوری تیر باشد.

جزئیات منحنی لنگر - دوران در روش اجزاء تشکیل‌دهنده در شکل ۱۰ مشاهده



شکل ۱۲. پارامترهای  $m$  و  $e$ .

$$k_{\tau} = \begin{cases} \frac{0.7 b_{eff,c,w,c} t_{wc}}{d_c} & \text{Unstiffened column} \\ \infty & \text{Stiffened column} \end{cases} \quad (5)$$

$$b_{eff,c,w,c} = t_w T + 2\sqrt{a_p} + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (6)$$

$$s = \sqrt{a_c} \text{ or } r_c \quad (7)$$

که در آنها،  $b_{eff,c,w,c}$  عرض مؤثر جان ستون در فشار،  $d_c$  عمق جان ستون،  $t_w T$  ضخامت جان سپری،  $a_p$  ضخامت گلوگاه مؤثر جوش اتصال سپری به بال آن،  $t_{fc}$  ضخامت بال ستون،  $s_p$  ضخامت مؤثر بال سپری،  $a_c$  ضخامت گلوگاه مؤثر جوش اتصال جان ستون به بال آن و  $r_c$  شعاع ماهیچه‌ی جان و بال ستون هستند.

$$k_{\tau} = \frac{0.7 b_{eff,t,w,c} t_{wc}}{d_c} \quad (8)$$

که در آن،  $b_{eff,t,w,c}$  عرض مؤثر جان ستون در کشش است، که باید برابر با طول مؤثر سپری معادل بال ستون در خمش ( $l_{eff}$ ) مطابق جدول ۶، در نظر گرفته شود. در صورت استفاده از ورق مضاعف، باید  $t_{wc}$  به  $2t_{wc}$  تغییر یابد.

$$k_{\tau} = \frac{0.9 l_{eff} t_{fc}^2}{m^3} \quad (9)$$

که در آن،  $l_{eff}$  برابر با کمترین مقدار طول مؤثر به دست آمده (انفرادی، گروهی، دایروی، غیردایروی) از جدول ۶ است، که در آن،  $p$  فاصله‌ی افقی میان مرکز سطح دو ردیف پیچ است و مقادیر  $m$  و  $e$  از شکل ۱۲ و همچنین مقدار  $\alpha$  از شکل ۱۳ قابل محاسبه هستند.

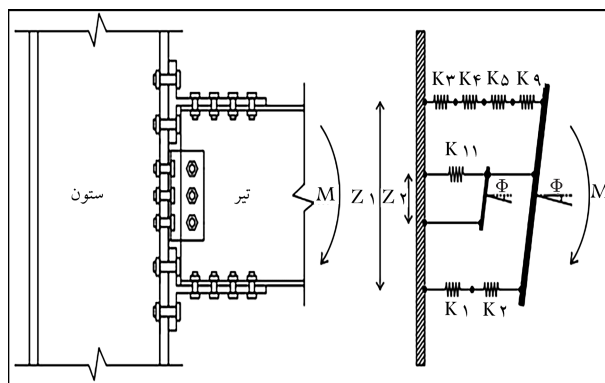
$$k_{\delta} = \frac{0.9 l_{eff} t_p^2}{b^3} \quad (10)$$

که در آن، پارامتر  $l_{eff}$  برابر با کمترین مقدار به دست آمده از الگوی دایروی و غیردایروی در جدول ۷ و  $t_p$  ضخامت بال سپری هستند. پارامترهای  $a, b, e, w, b_{fT}$  در جدول ۷ با استفاده از شکل ۱۴ قابل محاسبه هستند.

$$k_{\phi} = \frac{1/6 A_s}{L_b} \quad (11)$$

که در آن،  $A_s$  برابر با مجموع مساحت پیچ‌های اتصال بال سپری به ستون و  $L_b$  طول مغزی پیچ و نصف طول سرپیچ و مهره هستند:

$$k_{11} = \frac{0.9 l_{eff} t_a^2}{q^3} \quad (12)$$



شکل ۱۱. مدل مکانیکی اتصال در روش اجزاء تشکیل‌دهنده.

جدول ۴. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی اتصال.

فهر	اجزاء	
$K_1$	پنل جان ستون در برش	۱
$K_2$	جان ستون در فشار	۲
$K_3$	جان ستون در کشش	۳
$K_4$	بال ستون در خمش	۴
$K_5$	بال سپری در خمش	۵
$\infty$	بال و جان تیر در فشار	۶
$\infty$	جان سپری در کشش و فشار	۷
$\infty$	پیچ‌های اتصال جان سپری به بال تیر در برش	۸
$K_9$	پیچ‌های بال سپری در کشش	۹
$\infty$	لهیدگی و برش قالبی جان سپری و بال تیر	۱۰
$K_{11}$	نبشی جان در خمش	۱۱

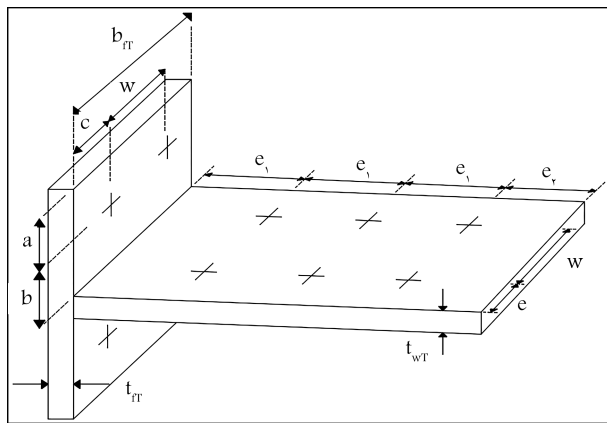
جدول ۵. مقادیر تقریبی پارامتر  $\beta$ .

مقدار $\beta$	حالت	هندسه اتصال
$\beta \approx 1$	$M_{b1,Ed}$	
$\beta = 0$	$M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$	
$\beta \approx 1$	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} > 0$	
$\beta \approx 2$	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$	
$\beta \approx 2$	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} = 0$	

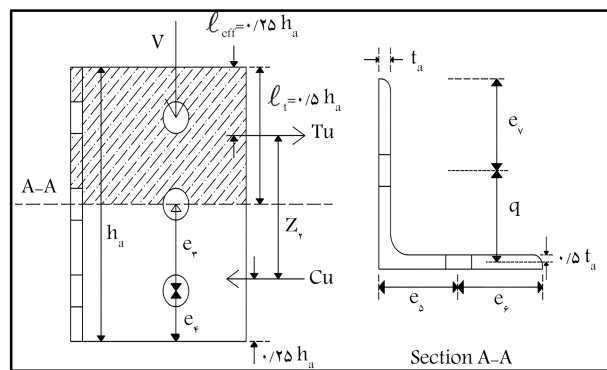
که در آن،  $A_{vc}$  مساحت جان ستون در برش و پارامتر  $\beta$ ، بیان‌گر هندسه و نحوه‌ی بارگذاری اتصال است (جدول ۵).  $Z_1$  بازوی لنگر اتصال است، که با استفاده از شکل ۱۱ قابل محاسبه است. در صورت استفاده از ورق مضاعف باید به  $A_{vc}$  مقدار  $w_z t_{wc}$  افزوده شود، که در آن  $t_{wc}$  ضخامت جان ستون و  $w_z$  عرض ورق مضاعف هستند.

جدول ۶. طول مؤثر بال ستون در خمش.

ردیف‌های پیچ به صورت انفرادی		ردیف‌های پیچ به صورت گروهی	
الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیردایروی $l_{eff,nc}$	الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیردایروی $l_{eff,nc}$
کمترین مقدار:	کمترین مقدار:	کمترین مقدار:	کمترین مقدار:
$4\pi m$	$2(\pi m + 1/25e)$	$2(\pi m + p)$	$2(2m + 0/625e + 0/5p)$
$2(\pi m + 2e_1)$	$2(2m + 0/625e + e_1)$	$2(2e_1 + p)$	$2(e_1 + 0/5p)$
<p><math>e_1</math> برابر با فاصله‌ی ردیف پیچ‌ها تا انتهای آزاد بال ستون در جهت محور طولی ستون است.                      طول مؤثر بال ستون در خمش برای ستون با سخت‌کننده                      ردیف‌های پیچ به صورت انفرادی</p>			
الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیر دایروی $l_{eff,nc}$		
کمترین مقدار: $4\pi m$ و $2(\pi m + 2e_1)$	$2(e_1 + \alpha m - (2m + 0/625e))$		
<p><math>e_1</math> برابر با فاصله‌ی ردیف پیچ‌ها تا سخت‌کننده‌ی ستون در جهت محور طولی ستون است.</p>			



شکل ۱۴. جزئیات هندسه‌ی بال سپری.



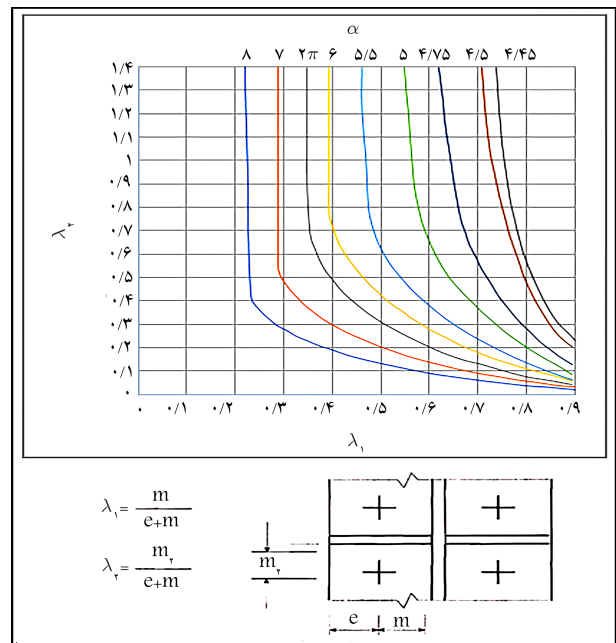
شکل ۱۵. جزئیات هندسه‌ی نبشی جان اتصال.

$$S_{j,ini} = \frac{E Z_1^*}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i}} + \frac{E Z_2^*}{k_{11}} \quad (13)$$

همچنین سختی متناظر اتصال در حالت تحلیل کشسان نیز با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ تعیین می‌شود:

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\eta} \quad (14)$$

پارامتر  $\eta$  ضریب اصلاح سختی است، که برای اتصال مورد مطالعه، می‌توان مقدار  $\eta$  را ۲ در نظر گرفت.<sup>[۱۲]</sup>



شکل ۱۳. پارامتر  $\alpha$  برای ستون با سخت‌کننده.<sup>[۱۴]</sup>

جدول ۷. طول مؤثر بال سپری.

الگوی دایروی $l_{eff,cp}$	الگوی غیردایروی $l_{eff,nc}$
کمترین مقدار:	کمترین مقدار:
$2\pi b$	$2(4b + 1/25a)$
$2(\pi b + w)$	$2(e + 2b + 0/625a) b_{fT}$
$2(\pi b + 2e)$	$2(0/5w + 2b + 0/625a)$
$l_{eff,1} = l_{eff,nc}, l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$	
$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$	

که در آن، مقادیر  $t_a, q$  و  $l_{eff}$  (طول مؤثر نبشی در خمش) از شکل ۱۵ به دست می‌آیند:

پس از محاسبه سختی تمام اجزاء، سختی اولیه اتصال به صورت رابطه‌ی

۱۳ محاسبه می‌شود:

## ۲.۳. مقاومت اجزاء

برای طراحی و محاسبه‌ی مقاومت تمام اجزاء اتصال به غیر از بال سپری می‌توان از روابط ارائه شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان<sup>[۱]</sup> استفاده کرد. برای محاسبه‌ی مقاومت بال سپری، ابتدا باید نیروی اهرمی<sup>۱۳</sup> ایجاد شده در آن را محاسبه کرد. نیروی کششی وارد شده بر بال سپری باعث بیرون کشیده شدن بال سپری در محدوده‌ی بین پیچ‌های آن و نیز سبب جدایشگی بال سپری از بال ستون می‌شود. با جدا شدن قسمت میانی بال سپری، لبه‌های آن به طرف داخل تغییر شکل می‌دهند و مانند یک اهرم به بال ستون فشار وارد می‌کنند. به واکنش تکیه‌گاهی فشار تماسی مذکور، نیروی اهرمی  $Q$  گفته می‌شود (شکل ۱۶ - الف).

برای محاسبه‌ی نیروی اهرمی می‌توان از روش نایر - بیرکومو - مانس<sup>[۲]</sup> استفاده کرد. پژوهشگران مذکور برای تعیین نیروی اهرمی سپری با پیچ  $A490$ ، رابطه‌ی ۱۵ را ارائه کرده‌اند:

$$Q = F \left[ \frac{100bd_b^2 - 14b_w t_{FT}^2}{62ad_b^2 + 21b_w t_{FT}^2} \right] \quad (15)$$

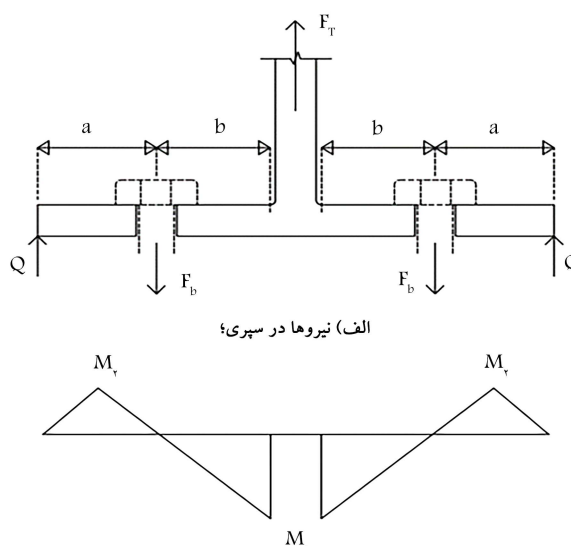
که در آن،  $F$  و  $b_w$  به ترتیب نیروی خارجی وارد بر هر پیچ و عرض برابر آن هستند. پس از محاسبه‌ی نیروی اهرمی، برای محاسبه‌ی مقادیر لنگر  $M_1$  و  $M_2$  در شکل ۱۶ - ب می‌توان از روابط ۱۶ و ۱۷ استفاده کرد:

$$M_1 = Fb' - Qa', \quad M_2 = Qa' \quad (16)$$

$$a' = a + \frac{db}{\gamma}, \quad b' = b - \frac{db}{\gamma} \quad (17)$$

بزرگ‌ترین مقدار  $M_1$  و  $M_2$  ملاک تعیین ضخامت بال سپری خواهد بود. زمانی طراحی بال سپری و پیچ‌های آن بهینه خواهد بود که دو مقدار  $M_1$  و  $M_2$  تا حد ممکن به یکدیگر نزدیک باشند. در انتها لازم است که ظرفیت کششی پیچ‌های بال سپری برای مجموع نیروهای خارجی و اهرمی کنترل شود. رابطه‌ی ۱۸:

$$F + Q \leq \phi R_{nt} \quad (18)$$



شکل ۱۶. عمل اهرمی در بال سپری.

پس از محاسبه‌ی مقاومت تمام اجزاء، مقاومت اتصال با استفاده از رابطه‌ی ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$M_{j,Rd} = \min(R_{u,i}) \times \chi \quad (19)$$

## ۳.۳. صحت‌سنجی روش اجزاء تشکیل‌دهنده

به منظور بررسی صحت روش استفاده شده، نتایج حاصل از روش اجزاء تشکیل‌دهنده با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)<sup>[۴]</sup> و دوان و جیانگ<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۵)<sup>[۲۱]</sup> مقایسه شده است. همچنین برای اطمینان بیشتر، پس از صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود، نتایج دو مدل اجزاء محدود با روش اجزاء تشکیل‌دهنده مقایسه شده است. جزئیات هندسه‌ی مدل‌های اجزاء محدود در جدول ۸ ارائه شده است. پارامترهای ارائه شده در جدول ۸ برابر با مدل آزمایشگاهی هوانگ و همکاران (۲۰۱۸)<sup>[۴]</sup> در نظر گرفته شده است.

نتایج صحت‌سنجی روش اجزاء تشکیل‌دهنده در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از جدول ۹ نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش اجزاء تشکیل‌دهنده در پیش‌بینی سختی اتصال است. خطای بیشتر روش مذکور در محاسبه‌ی سختی برای نمونه‌های آزمایشگاهی می‌تواند به این دلیل باشد که هر دو نمونه از زبانه‌ی برشی برای انتقال برش تیر به ستون استفاده نشده و مشکلاتی مانند تأخیر برش باعث افزایش خطا شده است. با توجه به این‌که روش‌های مدل‌سازی اجزاء محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی، برخلاف روش اجزاء تشکیل‌دهنده، زمان‌بر و نیازمند به صرف هزینه‌ی زیاد بوده است، روش ارائه شده با خطای قابل قبول می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای به دست آوردن مشخصات اتصال باشد.

## ۴. مطالعه‌ی پارامتریک با استفاده از روش یادگیری

### ماشین (ML) ۱۵

پس از صحت‌سنجی روش ارائه شده، برای مطالعه‌ی پارامتریک روی اجزاء اتصال، به کمک برنامه‌نویسی در اکسل، ابتدا ۱۱۱۵ اتصال با تغییر در ابعاد تیر به صورت ظرفیتی طراحی شده است. در طراحی اخیر، ارتفاع تیر از ۳۵ تا ۶۵ سانتی‌متر، عرض بال تیر از ۱۲ تا ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت بال تیر از کمیته‌ی آیین‌نامه تا ۵/۰ سانتی‌متر بیشتر از آن متغیر بوده‌اند و ضخامت جان تیر برابر کمیته‌ی آیین‌نامه در نظر گرفته شده است. سپس با اعمال الگوریتم‌های یادگیری ماشین روی داده‌ها، سعی شده است برای پیش‌بینی سختی اولیه‌ی اتصال، یک فرمول ساده ارائه شود.

در پژوهش حاضر، از روش یادگیری نظارت شده و الگوریتم یادگیری رگرسیون خطی چندگانه استفاده شده و با استفاده از روش معادلات نرمال پارامترهای مدل سختی به دست آمده است، که در ادامه، به صورت مختصر به آن اشاره شده است.

$$x = \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^m & x_2^m & \dots & x_n^m \end{bmatrix} \quad (20)$$



جدول ۸. جزئیات هندسه‌ی مدل اجزاء محدود.

قطعه	مدل ۱ (mm)	مدل ۲ (mm)
ستون (با سخت‌کننده)	$H700 \times 300 \times 24 \times 36$	$H700 \times 300 \times 24 \times 36$
تیر	$H450 \times 200 \times 10 \times 11$	$H500 \times 200 \times 11 \times 13$
	۱۹۴۷	۱۹۴۳
$l_{load}$	۲۰۰۰	
$b_{fT}$	۲۰۰	
w	۱۰۰	
e	۵۰	
a	۵۲	
b	۵۲	
سپری (شکل ۱۴)	$e_1$	۷۰
	$e_2$	۵۰
	$t_{wT}$	۲۰
	$t_{fT}$	۳۳
پیچ بال سپری	۲۷M	۲۷M
پیچ جال سپری	$8 \times M22$	$8 \times M24$
مدل	$2L150 \times 100 \times 10$	
$h_a$	۱۹۰	۲۳۰
q	۴۵	
$e_2$	۶۰	۷۰
$e_3$	۳۵	۴۰
$e_5$	۹۰	۹۷
$e_6$	۶۰	۵۳
$e_7$	۵۰	
پیچ	۲۰M	۲۲M

جدول ۹. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود با روش اجزاء تشکیل دهنده.

مدل	سختی سکانتی (kN.m/rad)	
	اجزاء تشکیل دهنده	آزمایشگاهی و اجزاء محدود
هوانگ و همکاران <sup>[۴]</sup>	۷۲/۸۶۸	۸۲/۳۷۳
دوان و همکاران <sup>[۲۱]</sup>	۷۵۲۷	۶۸۴۸
مدل ۱	۱۴۶/۵۶۶	۱۴۴/۰۰۰
مدل ۲	۱۹۲/۹۳۱	۱۹۰/۰۰۰

$$X\theta = y \rightarrow X^T X\theta = X^T y \rightarrow$$

$$(X^T X)^{-1}(X^T X)\theta = (X^T X)^{-1}X^T y \rightarrow \theta = (X^T X)^{-1}X^T y \quad (23)$$

که در رابطه‌ی ۲۰،  $X$  ماتریس متغیرهای مستقل است، که در آن  $n$  بیان‌گر تعداد متغیرهای مستقل و  $m$  بیان‌گر تعداد نمونه‌های آموزش است. در رابطه‌ی ۲۱،  $\theta$  ماتریس پارامترهای مدل سختی است، که از یادگیری ماشین به دست می‌آید. در رابطه‌ی ۲۲،  $y$  ماتریس متغیرهای وابسته است و با استفاده از رابطه‌ی ۲۳ می‌توان پارامترهای مدل سختی را به دست آورد.

برای کاهش خطا و آموزش بهتر مدل، لازم است با استفاده از رابطه‌ی ۲۴ بر روی داده‌ها نرمال‌سازی انجام شود تا متغیرهای ورودی بی‌مقیاس شوند و در دامنه‌ی کوتاه‌تری (۰ تا ۱) قرار بگیرند.

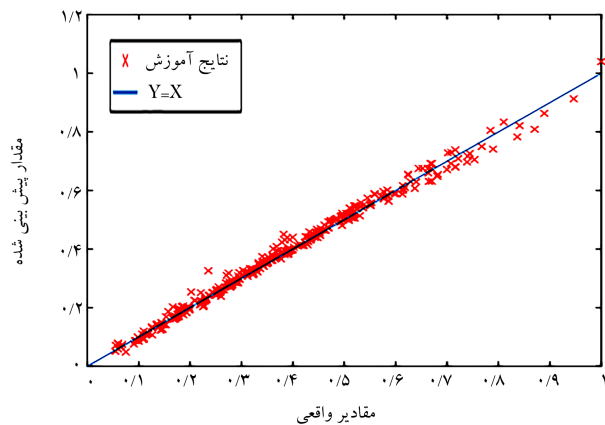
$$z_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (24)$$

برای ارزیابی عملکرد رگرسیون خطی و محاسبه‌ی خطای آموزش می‌توان از دو روش ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) <sup>۱۶</sup> و  $R^2$  استفاده کرد (رابطه‌های ۲۵ و ۲۶):

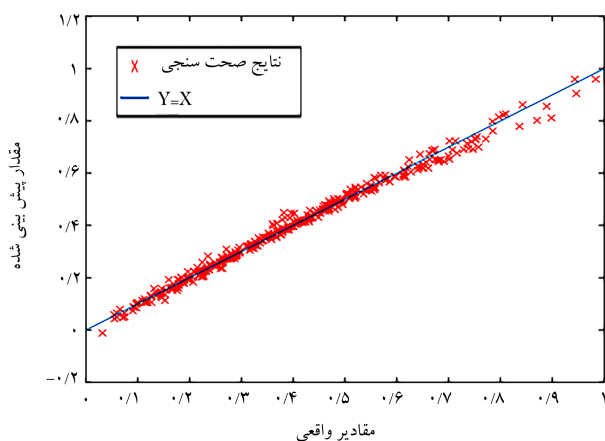
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y^i - h(x^i))^2} \quad (25)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$y = \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^n \end{bmatrix} \quad (22)$$



شکل ۱۷. دیاگرام پراکنش نمونه‌های آموزش.



شکل ۱۸. دیاگرام پراکنش نمونه‌های صحت‌سنجی.

آموزش و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ مشاهده می‌شود. تجمع نتایج در نزدیکی خط با زاویه‌ی ۴۵ درجه ( $y=x$ )، نشان‌دهنده‌ی عملکرد خوب یادگیری ماشین است. با توجه به رابطه‌ی ۲۸ با مقایسه‌ی ضرایب پارامترهای مستقل، ارتفاع تیر و قطر پیچ اتصال بال سپری به بال ستون، بیشترین تأثیر مثبت را در میزان سختی اتصال دارند. همچنین فاصله‌ی افقی مرکز سطح پیچ بال سپری تا جان ستون و فاصله‌ی قائم مرکز سطح پیچ بال سپری تا جان سپری بیشترین تأثیر منفی را در سختی اتصال دارند. به همین صورت می‌توان تأثیر بقیه‌ی متغیرهای ورودی را بررسی کرد. لازم به ذکر است که رابطه‌ی ۲۷ را همانند روش اجزاء تشکیل‌دهنده، فقط می‌توان برای به دست آوردن سختی اتصال، که برای تشکیل مفصل خمیری در تیر طراحی شده است و از نبشی برای انتقال برش جان تیر بهره می‌برد، استفاده کرد.

## ۵. طبقه‌بندی اتصال از نظر صلبیت

آین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳، ۱۳<sup>[۱۳]</sup> کمیت بدون بُعد  $k_b$  را برای طبقه‌بندی اتصال پیشنهاد کرده است، که به صورت رابطه‌ی ۲۹ تعیین می‌شود:

$$k_b = \frac{S_{j,ini}}{EI_b/L_b} \quad (29)$$

جدول ۱۰. جزئیات محاسبه‌ی پارامترهای رابطه‌ی ۲۷.

$z_1 = \frac{h_b^2 - 1225}{3000}$	ارتفاع تیر
$z_2 = \frac{h_c - 20}{30}$	ارتفاع ستون
$z_3 = \frac{b_{fc} - 22}{18}$	عرض بال ستون
$z_4 = \frac{t_{fc} - 1/6}{0.18}$	ضخامت بال ستون
$z_5 = \frac{t_{wc} - 0.17}{0.17}$	ضخامت جان ستون
$z_6 = \frac{t_c}{1/4}$	ضخامت ورق مضاعف
$z_7 = \frac{m - 2/5}{1/18}$	فاصله‌ی افقی مرکز پیچ تاجان ستون
$z_8 = \frac{b_{fT} - 17}{18}$	عرض بال سپری
$z_9 = \frac{t_{fT} - 2/2}{1/18}$	ضخامت بال سپری
$z_{10} = \frac{a - 2/6}{1/9}$	فاصله‌ی قائم مرکز پیچ تا لبه‌ی بال سپری
$z_{11} = \frac{b - 2/5}{1/17}$	فاصله‌ی مرکز پیچ تا جان سپری
$z_{12} = d_b - 2$	قطر پیچ‌های اتصال بال سپری به بال ستون
$z_{13} = \frac{w - 7/8}{6/9}$	فاصله‌ی افقی مرکز تا مرکز پیچ‌های بال سپری
$z_{14} = \frac{q - 2/2}{1/1}$	فاصله‌ی پیچ نبشی تا بر ساق آن + نصف ضخامت نبشی

جدول ۱۱. نتایج عملکرد رگرسیون خطی.

مقدار	پارامترهای ارزیابی ML
۰/۰۱۵	آموزش RMSE
۰/۰۱۸	صحت‌سنجی RMSE
۰/۹۹۳	آموزش $R^2$
۰/۹۹۰	صحت‌سنجی $R^2$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y^i - h(x^i))^2}{\sum_{i=1}^m (y^i - \bar{h}(x^i))^2} \quad (26)$$

که در رابطه‌ی ۲۵، تابع  $h(x^i)$  بیان‌گر مقدار خروجی تابع حاصل از یادگیری ماشین به ازاء نمونه‌ی  $i$  است. در رابطه‌ی ۲۶، هر چه مقدار  $R^2$  به ۱ نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر خطای کمتر آموزش است. به منظور بررسی میزان تعمیم‌پذیری مدل ارائه شده و صحت‌سنجی آن، با استفاده از ۶۰٪ نمونه‌ها، آموزش صورت گرفته و سپس با استفاده از بقیه‌ی نمونه‌ها، صحت‌سنجی انجام شده است. مدل به دست آمده از یادگیری ماشین برای محاسبه‌ی سختی اتصال در رابطه‌ی ۲۷ ارائه شده است:

$$S_{j,ini} (kg \cdot \frac{cm}{rad}) = 5/54 \times 10^9 Z_j + 12/01 \times 10^8 \quad (27)$$

نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای  $z_1$  تا  $z_{14}$  در رابطه‌ی ۲۸ در جدول ۱۰ ارائه شده است (واحد تمام پارامترها سانتی‌متر است).

$$Z_j = -0/083 + 0/9 z_1 - 0/221 z_2 - 0/033 z_3 + 0/391 z_4 + 0/109 z_5 + 0/292 z_6 - 0/573 z_7 - 0/033 z_8 + 0/137 z_9 + 0/088 z_{10} - 0/312 z_{11} + 0/776 z_{12} - 0/161 z_{13} - 0/034 z_{14} \quad (28)$$

نتایج عملکرد رگرسیون خطی و خطای آموزش با دو روش RMSE و  $R^2$  در جدول ۱۱ برای نمونه‌های آموزش و صحت‌سنجی ارائه شده است، که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بسیار خوب یادگیری ماشین است. همچنین نمودار پراکنش برای نمونه‌های

جدول ۱۲. نتایج طبقه‌بندی اتصال بر حسب صلبیت.

طول تیر اتصال $L_b$ (cm)	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰
کمینه‌ی مقدار $k_b$	۳۶	۲۳	۱۹
میانگین $k_b$	۳۷/۱	۳۱/۸	۲۶/۵
درصد اتصال صلب	٪۱۰۰	٪۹۷	٪۶۱
درصد اتصال نیمه‌صلب	٪۰	٪۳	٪۳۹
درصد اتصال ساده	٪۰	٪۰	٪۰

## ۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک نوع اتصال کاملاً پیچی گیردار تیر به ستون با استفاده از مقاطع سپری‌شکل و نبشی جان بررسی شده است. ابتدا به کمک مدل‌سازی اجزاء محدود و روش اجزاء تشکیل‌دهنده سعی شد تا سختی اولیه و لنگر تسلیم اتصال بررسی شود. سپس به کمک روش یادگیری ماشین، یک فرمول ساده برای برآورد سختی اتصال مذکور ارائه و در انتها، میزان صلبیت آن بررسی شده است. با توجه به کارهای انجام شده، این نتایج به دست آمده است:

- با استفاده از روش اجزاء تشکیل‌دهنده ارائه شده، سختی اتصال محاسبه و با مقایسه‌ی روش مذکور با چند مدل آزمایشگاهی و اجزاء محدود صحت‌سنجی شده است. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش اجزاء تشکیل‌دهنده در پیش‌بینی سختی اتصال است. با توجه به این‌که روش مدل‌سازی اجزاء محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی زمان‌بر و نیازمند به صرف هزینه‌ی زیاد هستند، روش ارائه شده با خطای قابل قبول می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای به دست آوردن مشخصات اتصال باشد.
- با توجه به مدل اجزاء محدود، در اتصال مورد نظر، بال سپری و پیچ‌های آن تحت نیروی اهرمی شدیدی قرار می‌گیرند و تغییرشکل در بال سپری و کشیدگی در پیچ‌های آن قابل توجه است.
- با اعمال الگوریتم یادگیری ماشین روی داده‌ها، یک فرمول ساده برای محاسبه‌ی سختی اتصال به دست آمد. خطای آموزش با استفاده از دو روش RMSE و  $R^2$  برای نمونه‌های آموزش و صحت‌سنجی محاسبه شد، که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بسیار خوب فرمول ارائه شده در پیش‌بینی سختی اتصال است.
- با توجه به سختی اولیه‌ی به دست آمده از روش اجزاء تشکیل‌دهنده، اتصال مورد نظر بر اساس صلبیت آن دسته‌بندی شد، که با توجه به نتایج به دست آمده، عملکرد اتصال به صورت صلب است و قابلیت استفاده در قاب خمشی متوسط (IMF) و قاب خمشی ویژه (SMF) را دارد.

که در آن،  $E$  مدول کشسانی فولاد تیر اتصال و  $I_b$  و  $L_b$  به ترتیب ممان اینرسی و طول تیر هستند.  $EI_b/L_b$  ضریب صلبیت تیر متصل به اتصال است.  $S_{j,ini}$  سختی اولیه‌ی اتصال است، که از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید.

آیین‌نامه‌ی اروپا شماره‌ی ۳،<sup>[۱۳]</sup> برای قاب‌هایی با حرکت جانبی (مهار نشده)، در صورتی که مقدار  $k_b$  بزرگ‌تر از ۲۵ باشد، اتصال را صلب فرض می‌کند و در صورتی که مقدار  $k_b$  کوچک‌تر یا مساوی ۰/۵ باشد، در گروه اتصال‌های ساده (مفصلی) قرار می‌دهد. چنانچه مقدار  $k_b$  برای اتصالی در یک قاب مهار نشده‌ی عددی بین ۰/۵ و ۲۵ باشد، در گروه اتصال نیمه‌صلب قرار می‌گیرد. برای اتصال‌ها، قاب‌هایی با حرکت جانبی مقید (مهار شده)، در صورتی که  $k_b$  بزرگ‌تر یا مساوی ۸ باشد، در گروه اتصال‌های صلب قرار می‌گیرد.

با توجه به مفاهیم ارائه شده و با استفاده از سختی اتصال به دست آمده از روش اجزاء تشکیل‌دهنده برای ۱۱۱۵ اتصال طراحی شده، در این‌جا به طبقه‌بندی اتصال از نظر صلبیت پرداخته شده است. نتایج طبقه‌بندی صلبیت اتصال برای قاب‌های مهار نشده با سه طول تیر متفاوت در جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج طبقه‌بندی نشان می‌دهد که اتصال اخیر برای طول تیر اتصال بزرگ‌تر یا مساوی ۶ متر به صورت صلب عمل می‌کند. بالای ۶۰٪ از اتصال‌های طراحی شده، برای طول تیر ۵ متر عملکرد صلب داشته‌اند. هر چند که با توجه به مقدار کمینه و میانگین به دست آمده برای مقدار  $k_b$ ، می‌توان نتیجه گرفت که اتصال‌های قرار گرفته در گروه نیمه‌صلب برای تیر با طول ۵ متر نیز عملکردی بسیار نزدیک به اتصال صلب دارند و می‌توان از خطای آن صرف‌نظر کرد.

با توجه به این‌که تمام اتصال‌ها به صورت ظرفیتی طراحی و سپس با روش‌های ارائه شده، سختی آنها محاسبه و کنترل شده است؛ لذا با توجه به نتایج طبقه‌بندی اتصال در بخش حاضر، اتصال به صورت هم‌زمان دارای صلبیت و مقاومت کامل

## پانویس‌ها

1. Northridge
2. Huang
3. Weng
4. Fernandez
5. Kong & Kim

6. component method for steel joint
7. Massimo
8. Hantouche & Abboud
9. Abaqus
10. hard contact
11. penalty
12. finite sliding
13. prying force

14. Jiang
15. machine learning
16. root mean square error
17. intermediate moment frame
18. special moment frames

### (References) منابع

1. Earthquake Engineering Research Center, "SAC phase 1 analytical studies of building performance [interne]", *SAC Steel Project* (2004).
2. Office of National Building Regulations of Iran, "Topic 10 design and execution of steel buildings", 4<sup>th</sup> edition, Iran Development Publishing, p.316 (in Persian) (2013).
3. Azhari, M. and Mirghaderi, R. "Design of steel structures by LRFD and ASD method", 1<sup>st</sup> ed., *Arkan danesh*, p. 878 (in persian) (2014).
4. Huang, J., Wang, J., Chen, W. and et al. "Cyclic performance of double tee connections with short slotted holes", *J. Constr. Steel Res.*, **145**, pp. 254-265 (2018).
5. Wang, M., Dong, K. and Liu, M. "Damage control mechanism and seismic performance of a steel moment connection with replaceable low-yield-point steel double T-stub fuses", *Thin-Walled Struct.*, **157**, pp.107143 (Dec 2020).
6. Massimo, L., Gianvittorio, R., Aldina, S. and et al. "Experimental analysis and mechanical modeling of T-stubs with four bolts per row", *J. Constr. Steel Res.*, **101**, pp. 158-174 (2014).
7. Timmers, R. "Generalized method for identifying yield-line patterns in T-stubs using discontinuity layout optimization", *Eng. Struct.*, **244**, pp.112802 (2021).
8. Pachideh, G., Kafi, M. and Gholhaki, M. "Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater", *Structures*, **28**, pp. 467-481 (Dec 2020).
9. Pachideh, G., Gholhaki, M. and Kafi, M. "Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper", *Steel Compos Struct.*, **36**(2), pp. 197-211 (Jul 2020).
10. Fernandez-Ceniceros, J., Sanz-Garcia, A., Antoñanzas-Torres, F. and et al. "A numerical-informational approach for characterising the ductile behaviour of the T-stub component. Part 1: refined finite element model and test validation", *Eng. Struct.*, **82**, pp. 236-248 (2015).
11. Kong, Z. and Kim, S.E. "Numerical estimation for initial stiffness and ultimate moment of T-stub connections", *J. Constr. Steel Res.*, **141**, pp. 118-131 (2018).
12. Harsha, R.H. and Manasa, K.P. "Numerical study on double tee connections with rib stiffener and shear tab", *In proceedings of the International Conference on Systems, Energy & Environment (ICSEE), GCE Kannur, Kerala* (Aug 2019).
13. CEN. EN 1993-1-8, "Eurocode 3: design provisions of steel structures, part 1.8: design of joints", (2005).
14. Girão Coelho, A.M., Simões Da Silva, L. and Bijlaard, F.S.K. "Finite-element modeling of the nonlinear behavior of bolted T-stub connections", *J. Struct. Eng.*, **132**(6), pp. 918-928 (2006).
15. Hantouche, E.G., Rassati, G.A., Kukreti, A.R. and et al. "Built-up T-stub connections for moment resisting frames: experimental and finite element investigation for prequalification", *Eng. Struct.*, **43**, pp. 139-148 (2012).
16. Yuan, H.X., Hu, S., Du, X.X. and et al. "Experimental behaviour of stainless steel bolted T-stub connections under monotonic loading", *J. Constr. Steel Res.*, **152**, pp. 213-224 (2019).
17. Hantouche, E.G. and Abboud, N.H. "Stiffness modeling of bolted thick built-up T-stub connections including secondary prying effect", *J. Constr. Steel Res.*, **95**, pp. 279-289 (2014).
18. ANSI/AISC-358-16, "Steelmoment frames for prequalified connections", 2016, *Ansi/Aisc*, pp. 358-416 (2018).
19. Ansi, B18.2.3.7M, "Metric heavy hex structural bolts", American National Standards Institute, Standards, American, *Society of Mechanical Engineers [ASME]*, **f**, pp. 9-16 (1979).
20. Girão Coelho, A.M. and Bijlaard, F.S.K. "Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections", *J. Constr. Steel Res.*, **63**(9), pp. 1228-1240 (2007).
21. Duan, Q.C. and Jiang, C.R. "Research on the behavior of beam-to-column T-connections of steel frame", *Building Structure*, **35**, pp. 39-40 (In Chinese) (2005).