

Analytical Model for Applying the Effect of Prying Force in the Design of Bolted Connections

Alipoursajedi, S.¹, Sheidaii, M.R.², Hosseinzadeh, Y.^{3*}

1- Ph.D. Candidate, Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, , University of Urmia, Urmia, Iran

2- Professor, Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, , University of Urmia, Urmia, Iran

3- Associate Professor, Structural Eng. Dept., Faculty of Civil Engineering, , University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Prying action in bolted beam-to-column connections may cause brittle failure due to increasing the bolt force to a value greater than its design strength. In the most common design methods, the prying force is generally determined using analytical models. Existing analytical models are based on the research for the bolted connections with rolled T-stubs. In the end plate connections, the T-stub is fabricated by the complete joint penetration welding of steel plates. In this research, an analytical model is proposed for determining the prying force in built-up T-stubs. For this purpose, three specimens were tested under monotonic loading to determine the load-displacement relationship and the load-carrying capacity of T-stubs. An advanced non-linear finite element model was established to evaluate the load-carrying capacity of the bolted T-stubs, and it was validated using the experimental data. A parametric study was performed to evaluate the effects of geometric and mechanical properties of the connections on the magnitude and location of the prying force resultant, the eccentricity of the bolt force, and the location of plastic hinges. Consequently, a formula was proposed to determine the location of the prying force resultant. It was shown that a plastic hinge is formed at a distance of about 10 mm from the T-stub web. Also, it was shown that the eccentricity of the bolt force reduces the nominal capacity of the bolt by about 35%. With these data, a simplified analytical model was developed to predict the T-stub load-carrying capacity assuming the location determined for the bolt force, prying force, and plastic hinge. The magnitude of prying force and T-stub load-carrying capacity were determined using the proposed model. The results showed that by using the proposed model, an average of 10.6% improvement in the accuracy of the bolted T-stub load-carrying capacity determination is achieved.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 August 2021

Revise Date: 02 November 2021

Accept Date: 09 November 2021

Keywords: Bolted Connections
Prying Force
Failure Mechanism
Finite Element Model
Analytical Model
Built-up T-stub

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.299927.2533

*Corresponding author: Yousef Hosseinzadeh

Email address: hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir

مدل تحلیلی برای اعمال اثر نیروی اهرمی در طراحی اتصالات پیچی

سهیل علیپور ساجدی^۱، محمدرضا شیدایی^۲، یوسف حسین زاده^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

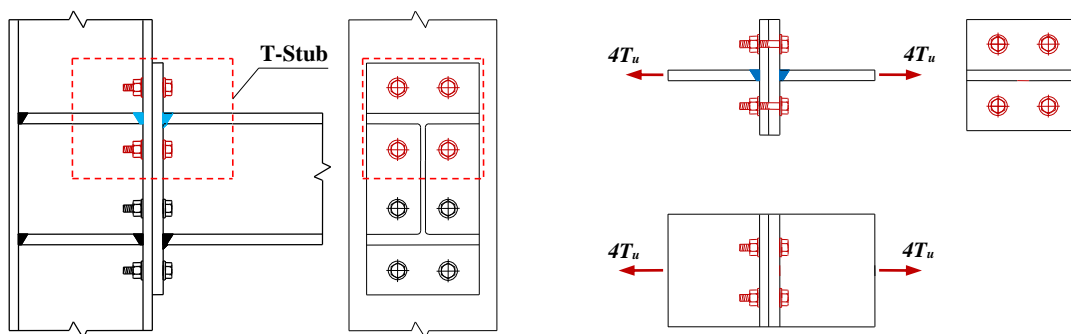
عملکرد اهرمی در اتصالات پیچی تیر به ستون، با افزایش نیروی پیچ به مقداری بیشتر از مقاومت طرح آن، می‌تواند باعث خرابی ترد اتصال شود. در روش مرسوم طراحی، نیروی اهرمی پیچ با استفاده از مدل‌های تحلیلی تعیین می‌شود. مدل‌های تحلیلی موجود، بر اساس تحقیقات روی اتصالات پیچی با قطعات T شکل نورد شده ایجاد شده‌اند. در اتصالات گیردار پیچی با ورق انتهایی، قطعه T با جوش نفوذی ورق‌های فولادی ایجاد می‌شود. در این تحقیق مدلی تحلیلی برای تعیین نیروی اهرمی در اجزای T شکل ساخته شده از ورق فولادی پیشنهاد شده است. به این منظور با ساخت و انجام آزمایش بر روی نمونه‌های اتصالات با اجزای T ساخته شده از ورق با مودهای گسیختگی شکل پذیر، رابطه نیرو-جابجایی، توزیع کرنش و ظرفیت اتصالات تعیین شد. با ایجاد مدل اجزای محدود اتصالات مورد بررسی و اعتبارسنجی آن با استفاده از داده‌های تجربی پژوهش، مطالعه پارامتریک برای ارزیابی تاثیر مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال در مقدار و موقعیت برآیند نیروی اهرمی، خروج از مرکزیت نیروی پیچ و موقعیت مفصل‌های پلاستیک انجام گرفت. رابطه‌ای برای تعیین موقعیت برآیند نیروی اهرمی تعیین شد. نشان داده شد که مفصل پلاستیک در فاصله حدود ۱۰ میلی‌متر از محل اتصال جان به بال T، شکل می‌گیرد. همچنین با تعیین مقدار میانگین برای خروج از مرکزیت نیروی پیچ، کاهش ظرفیت اسمی پیچ در حدود ۳۵ درصد به دست آمد. با این داده‌ها، مدل تحلیلی ساده شده برای پیش‌بینی ظرفیت اتصال با فرض موقعیت تعیین شده برای نیروی پیچ، نیروی اهرمی و مفصل پلاستیک، ایجاد شد. با استفاده از این مدل، مقدار نیروی اهرمی و ظرفیت اتصال پیچی تعیین گردید. نتایج بررسی نشان داد که با استفاده از مدل پیشنهادی، علاوه بر ساده نمودن فرآیند طراحی، به طور میانگین ۱۰/۶ درصد بهبود در دقت روش تعیین ظرفیت اتصال پیچی حاصل می‌شود.

کلمات کلیدی: اتصالات پیچی، نیروی اهرمی، مکانیزم خرابی، مدل اجزای محدود، مدل تحلیلی، قطعات T شکل ساخته شده از ورق.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.299927.2533	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.299927.2533	۱۴۰۱/۵/۰۱	۱۴۰۰/۸/۱۸	۱۴۰۰/۸/۱۸	۱۴۰۰/۸/۱۱	۱۴۰۰/۵/۲۴
				*نویسنده مسئول:		
				یوسف حسین زاده		
				پست الکترونیکی:		
				hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir		

۱- مقدمه

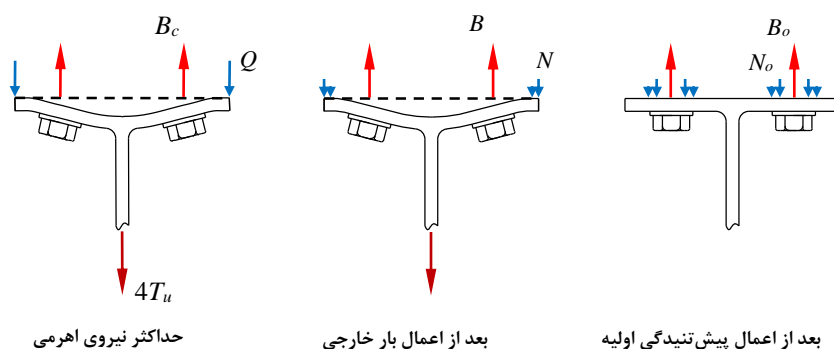
با شکست ترد اتصالات جوشی گیردار تیر به ستون در زلزله نورتریج، بیش از ۲۰۰ قاب فولادی دچار خرابی شد؛ این در حالی است که خرابی سازه‌های با اتصالات گیردار پیچی تیر به ستون کمتر بود [۱]. اتصال گیردار پیچی با ورق انتهایی مطابق شکل ۱، بر اساس تجربیات حاصل از زلزله‌های اخیر، به عنوان گزینه‌ای مناسب در طرح و اجرای سازه‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. ناحیه کششی این نوع از اتصالات، با قطعات T شبیه‌سازی می‌شود. این مدل، سازگاری خوبی با داده‌های تجربی داشته و در آیین‌نامه‌های Eurocode3 و AISC پذیرفته شده است [۲، ۳].



شکل ۱: جزء T شکل معادل قسمت کششی اتصالات گیردار پیچی با ورق انتهایی [۳].

با اعمال پیش تنیدگی اولیه پیچ در اتصال T، فشار تماسی به صورت متقارن در اطراف پیچ مطابق شکل ۲ توزیع می‌شود. در صورت وجود امکان تغییرشکل خمشی بال T، با اعمال و افزایش نیروی خارجی، نیروی فشاری به سمت لبه‌های بال تغییر موقعیت داده و کشش پیچ از B_0 به B تغییر می‌یابد. بیشترین مقدار نیروی اهرمی Q ، زمانی ایجاد می‌شود که تنها لبه‌های بال در تماس باشند. در این لحظه، نیروی پیچ (شامل اثر اهرمی) با BC نشان داده می‌شود. در لحظه گسیختگی اثر نیروی پیش تنیدگی تقریباً از بین رفته و نیروی هر پیچ برابر $T_u + Q$ خواهد بود که T_u سهم هر پیچ از نیروی خارجی وارد بر اتصال است [۴].

لحاظ نمودن نیروی اهرمی در تعیین نیروی کششی پیچ‌ها، بر اساس بخش J3.6 آیین‌نامه AISC [۵] ضرورت دارد. افزایش کشش پیچ در اثر پدیده اهرمی، باعث افزایش احتمال گسیختگی پیچ در مقاومتی کمتر از مقاومت طرح خواهد شد [۲]. از طرف دیگر در صورت لحاظ نمودن عمل اهرمی در طرح اتصال، ضخامت ورق کاهش و ظرفیت تغییرشکل پلاستیک اتصال افزایش می‌یابد [۶].



شکل ۲: پدیده اهرمی [۴].

در این مقاله، برای تعیین نیروی اهرمی و مقاومت اتصالات پیچی T شکل ساخته شده از ورق با جوش نفوذی، از مدل‌های تحلیلی و اجزای محدود به همراه آزمایش این اتصالات، استفاده شده است.

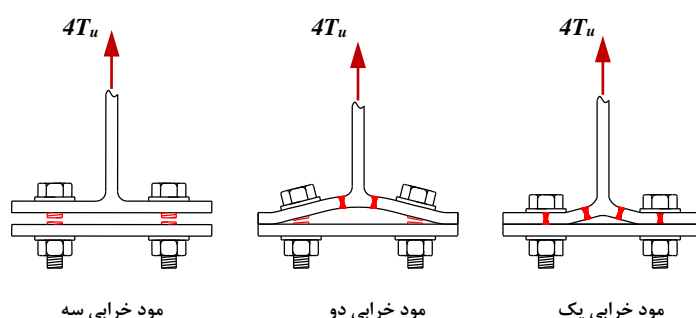
مدل‌های تحلیلی موجود، بر اساس حل معادلات تعادل اتصال T شکل بوده و دارای فرمول‌های پیچیده و نتایج محافظه‌کارانه می‌باشند. در حال حاضر برای طراحی اتصالات پیچی، روش طراحی قسمت ۹ راهنمای ساخت سازه‌های فولادی AISC [۷] مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل دارای پارامترهای زیاد و فرآیند طولانی طراحی، همراه با سعی و خطا می‌باشد. در این مدل برای انطباق بهتر نتایج مدل تحلیلی با داده‌های تجربی، حد گسیختگی Fu به جای حد تسلیم Fy ورق فولادی به کار رفته و به منظور لحاظ نمودن خمش پیچ، نیروی پیچ با خروج از مرکزیتی برابر شعاع پیچ اعمال می‌شود. تحقیقات به منظور ساده نمودن و افزایش دقت این مدل در حال انجام است. مدل تحلیلی هو و همکاران [۸]، بر اساس حل معادلات تعادل برخورد الاستیک اجزای اتصال و با در نظر گرفتن پیش‌تنیدگی اولیه پیچ و طول متغیر تماس ورق‌های بال می‌باشد. در این مدل، نشان داده شد که فرض لبه بال برای محل برآیند نیروی اهرمی در مدل‌های تحلیلی مرسوم، محافظه‌کارانه است. هوانگ و همکاران [۹] مدل تحلیلی ساده با فرضیاتی محافظه‌کارانه، برای تعیین کران پایین نیروی اهرمی در طرح اتصالات لوله‌ای را ارائه نمودند. در مدل تحلیلی پیشنهادی عبدالله و همکاران [۱۰]، ضمن بررسی تجربی و عددی تاثیر خمش پیچ در رفتار اجزای T، نشان داده شد که وجود لنگر خمشی در پیچ، از ظرفیت آن در حدود ۳۰ درصد کاهش می‌دهد و خمش پیچ می‌تواند با تغییر مد خرابی، باعث خرابی زود هنگام اتصال شود. با وجود دقت مناسب مدل عبدالله و همکاران، پیچیدگی این مدل مانع کاربرد آن شده است. برای تعیین نیروی اهرمی، از روش‌های مبتنی بر روش اجزای محدود نیز استفاده می‌شود. فرانسویلا و همکاران [۱۱] مدل اجزای محدود در محیط نرم افزار SAP2000 ایجاد نمودند. پیچیدگی این مدل، مانع کاربرد آن در طراحی روزمره شده است. گودریچ و همکاران [۳] برای پیش‌بینی رفتار و طراحی اتصالات گیردار پیچی، با ترکیب دو روش مولفه آیین‌نامه اروپا و اجزای محدود، از روشی به نام CBFEM استفاده نمودند. دقت این روش با استفاده از داده‌های تجربی و نتایج تحلیل اجزای محدود مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که خطای آن در پیش‌بینی ظرفیت تا ۲۵ درصد در جهت اطمینان می‌باشد. یانگ و همکاران [۱۲] از تحلیل اجزای محدود به منظور بهبود مدل محاسباتی نیروی اهرمی، استفاده نمودند. آنها خروج از مرکزیت نیروی پیچ را برابر $0.3d_b$ تعیین نمودند که d_b قطر پیچ است.

تحقیقات موجود در بررسی عملکرد اهرمی، بیشتر روی اجزای T شکل نورد شده تمرکز دارد. در طراحی اتصالات گیردار از پیش تایید شده با شکل‌پذیری متوسط و ویژه، برای اتصال بال تیر به ورق انتهایی (شکل ۱)، از جوش نفوذی کامل با جوش گوشه تقویتی با بعد ۸ میلیمتر استفاده می‌شود [۱۳]. در این حالت قطعه T از دو ورق جوش شده به هم با جوش نفوذی تشکیل شده است. هانتوچ و همکاران [۱۴] دو رابطه تجربی برای تعیین نیروی اهرمی در اتصالات پیچی قطعات T با بال ضخیم و اتصال جان به بال با جوش نفوذی کامل و گوشه پیشنهاد نمودند. آنها نشان دادند که در حالت استفاده از جوش نفوذی کامل، موقعیت مرکز مفصل پلاستیک در ۶۳۵ میلیمتری از سطح جان T قرار گرفته است. لیانگ و همکاران [۱۵] رفتار اتصالات با قطعات ساخته شده از فولاد Q340 و جوش گوشه را مطالعه نمودند. بزرا و همکاران [۱۶] تاثیر ضخامت بسیار زیاد بال بر رفتار قطعه T ساخته شده با جوش گوشه و پیچ شده به پایه صلب را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که ضخامت زیاد بال، مکانیزم جدیدی به صورت گسیختگی برشی یا کششی و برشی پیچ ایجاد می‌کند. در این حالت خطای روابط طراحی دو آیین‌نامه Eurocode-3 و AISC در تعیین ظرفیت اجزای T، به طور میانگین به ۹۲ درصد در جهت اطمینان می‌رسد.

در این تحقیق، مدل تحلیلی جهت تعیین نیروی اهرمی و ظرفیت اتصال پیچی با قطعات T شکل ساخته شده از ورق فولادی و جوش نفوذی ارائه می‌شود. این مدل ساده، با تعداد متغیرهای کمتر، در مرحله طراحی تصور روشنی از ایجاد نیروی اهرمی ارائه می‌کند. به این منظور با انجام آزمایش روی اتصالات پیچی با اجزای T شکل ساخته شده از ورق‌های فولادی و با استفاده از داده‌های تجربی آن، یک مدل اجزای محدود برای پیش‌بینی رفتار اتصال ایجاد شد. اتصال جان به بال قطعه T با استفاده از جوش نفوذی کامل برقرار شده است. پس از ارزیابی دقت مدل، مطالعه پارامتریک به منظور تعیین پارامترهای موثر بر رفتار اتصال انجام شد. معیارهایی برای تعیین موقعیت مفصل پلاستیک در محل اتصال جان به بال، خروج از مرکزیت نیروی پیچ و لنگر خمشی ایجاد شده در آن و موقعیت نیروی اهرمی تعیین شد. با معیارهای تعیین شده، مدل تحلیلی ساده برای تعیین ظرفیت اتصال و نیروی اهرمی پیشنهاد گردید. همچنین دقت مدل پیشنهادی در مقایسه با نتایج حاصل از مدل تحلیلی آیین‌نامه AISC [۷] و داده‌های تجربی ارزیابی شد.

۲- الگوهای گسیختگی اتصالات پیچی

در اتصالات پیچی با قطعات T شکل، احتمال ایجاد سه مد خرابی بر مبنای سختی نسبی ورق و پیچ وجود دارد [۹]. این سه الگوی خرابی در شکل ۳ نشان داده شده است. مد خرابی یک: در این حالت، ورق بال نسبتاً نازک و تغییرشکل ورق بیشتر از پیچ است. دو مفصل پلاستیک در بال T در محل اتصال بال به جان و در خط پیچ شکل می‌گیرد. خمش بال به شکل سهمی بوده و مکانیزم خرابی شکل‌پذیر است. مد خرابی دو: تغییرشکل ورق بال با تغییرشکل پیچ یکسان نبوده و با ایجاد یک مفصل پلاستیک در محل اتصال بال به جان، گسیختگی کششی پیچ اتفاق می‌افتد. در این مد خرابی، تغییرشکل خمشی پیچ قابل توجه است. بیشتر اتصالات در این محدوده عملکردی می‌باشند. مد خرابی سه: در ورق بال با ضخامت زیاد، تغییرشکل خمشی بال کوچک بوده و پیچ دچار گسیختگی کششی خواهد شد. مکانیزم خرابی ترد بوده و نیروی اهرمی ایجاد نمی‌شود.



شکل ۳: سه مد خرابی محتمل در اتصالات پیچی T شکل [۹].

۳- تعیین رفتار تجربی اتصالات پیچی با قطعات T شکل ساخته شده از ورق و مدل اجزای محدود

رفتار سه اتصال پیچی با قطعات T شکل ساخته شده از ورق، در آزمایشگاه سازه دانشگاه تبریز تعیین شد. هندسه و ابعاد قطعات T شکل ساخته شده از ورق‌های فولادی در شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده است. اتصال جان به بال T بر اساس ضوابط اتصالات از پیش تأیید شده با جوش نفوذی کامل و جوش گوشه پشت‌بند با بعد ۸ میلی‌متر برقرار شده است [۱۳]. جوش نفوذی با روش نیمه‌خودکار تحت حفاظت گاز و جوش گوشه با الکتروود دستی اجرا شد. ورق‌های اتصالات از محصولات فولاد مبارکه بوده و کوپن تست از مصالح ورق تهیه گردید. با استفاده از معادلات (۱) و (۲)، مقادیر تنش و کرنش مهندسی به مقادیر حقیقی تبدیل گردید.

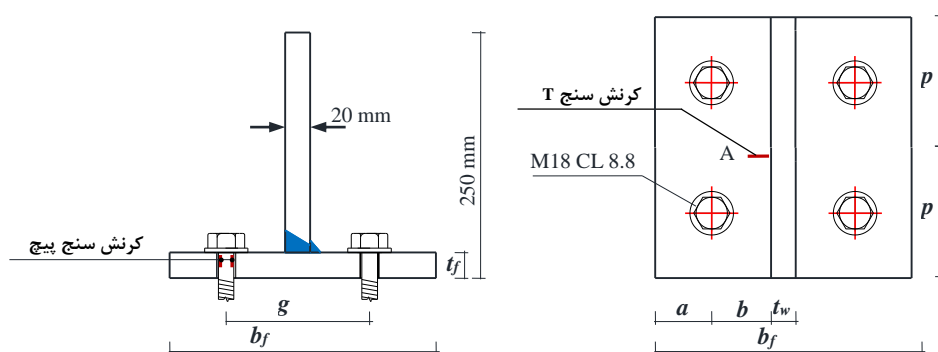
$$\sigma_T = (1 + \varepsilon_E)\sigma_E \quad (1)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E) \quad (2)$$

σ_E و ε_E تنش و کرنش مهندسی، σ_T و ε_T تنش و کرنش واقعی است [۱۷]. ورق به ضخامت ۸ میلی‌متر دارای پله پلاستیک معین می‌باشد. در ورق‌های ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر، نقطه تسلیم با استفاده از روش افسد در کرنش ۰/۰۰۲ تعیین شد. شکل ۵ الگوی خرابی مصالح مصرفی را نشان می‌دهد. نمونه‌های ورق، الگوی گسیختگی شکل‌پذیر و پیچ، الگوی خرابی ترد از خود نشان داد. تنش و کرنش واقعی تعیین شده فولاد و پیچ مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. پیش‌تیندگی اولیه پیچ‌ها برابر ۱۱۱/۹ کیلونیوتن اعمال و مقدار آن با ترگمتر کنترل شد. ابزار سنجش کرنش در نقطه A روی قطعه T و دو نقطه از محیط تنه پیچ، نصب شد. آزمایش در دستگاه UTM با سرعت ۱/۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام و رابطه نیرو- تغییرمکان اتصال به همراه تغییرات کرنش در دو نقطه از محیط پیچ اندازه‌گیری شد. شکل ۶ کرنش‌سنج‌های دیواره پیچ و کرنش‌سنج قطعه T در نقطه A را نشان می‌دهد.

۳-۱- مشاهدات و نتایج آزمایش

نمودار نیرو-جابجایی اتصالات پیچی در شکل ۷ و تغییرات کرنش در دو نقطه نصب کرنش سنج در محیط پیچ با افزایش نیروی وارد بر اتصال S165-12-18-8، در شکل ۸ نشان داده شده است. الگوی خرابی نمونه S165-8-18-8 با ضخامت بال ۸ میلیمتر، از نوع یک و الگوی خرابی نمونه‌های با ضخامت بال ۱۲ و ۱۵ میلیمتر از نوع دو می‌باشد. رفتار نمونه با ضخامت بال ۸ میلیمتر شکل‌پذیر بوده و شکل‌گیری دو مفصل پلاستیک مطابق شکل ۹ در بال آن ملاحظه شد. با ایجاد مفاصل پلاستیک و افزایش تغییرشکل، رفتار غشائی ورق بال، باعث افزایش ظرفیت اتصال می‌شود. افزایش شیب نمودار نیرو-جابجایی اتصال، تشدید رفتار غشایی بال را نشان می‌دهد. توقف آزمایش به دلیل محدودیت دستگاه UTM بود و تا توقف آزمایش در جابجایی ۱۱۱ میلیمتر، نمونه به افزایش مقاومت ادامه داد. نمونه‌های با ضخامت ۱۲ و ۱۵ میلیمتر، رفتار ترد در لحظه خرابی از خود نشان دادند و در هر دو اتصال، خرابی با شکست خمشی پیچ اتفاق افتاد. شکل ۱۰ نمونه اتصال S165-15-18-8 را در لحظه خرابی نشان می‌دهد.



شکل ۴: شکل هندسی و موقعیت نصب ابزار اندازه‌گیری.

جدول ۱: متغیرهای هندسی قطعات ساخته شده (mm).

Sample	t_f	b_f	p	g	b	d_b	Bolt Grade
S165-8-18-8	8	300	100	165	72.5	18	8.8
S165-12-18-8	12	300	100	165	72.5	18	8.8
S165-15-18-8	15	300	100	165	72.5	18	8.8

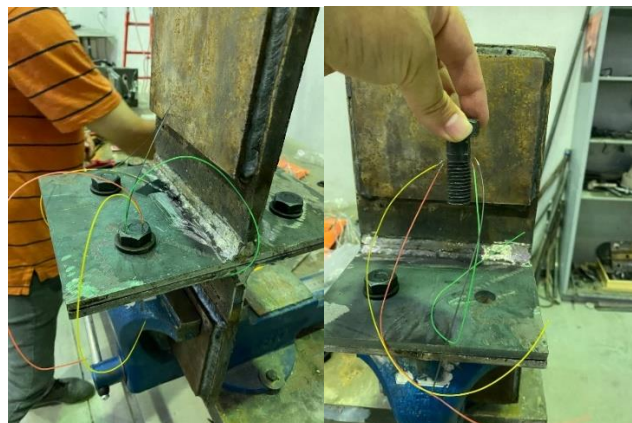
جدول ۲: مشخصات مکانیکی فولاد و پیچ مصرفی.

نمونه	E [GPa]	ε_y	F_y [MPa]	ε_u	F_u [MPa]
ورق به ضخامت ۸ میلیمتر	215.4	0.0014	300	0.25	500
ورق به ضخامت ۱۲ میلیمتر	209	0.0014	287	0.15	477
ورق به ضخامت ۱۵ میلیمتر	193	0.0014	271	0.19	471
پیچ به قطر ۱۸ میلیمتر	224.5	0.0032	776	0.11	971

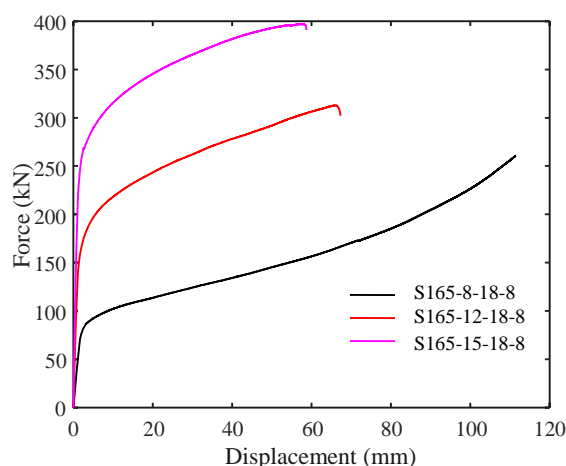


شکل ۵: الگوی خرابی نمونه‌های ورق و پیچ.

تغییرات کرنش در دو نقطه از محیط پیچ یکسان نمی‌باشد (شکل ۸)؛ در هر دو الگوی خرابی، این پدیده ملاحظه می‌شود. در این حالت لنگر خمشی در مقطع پیچ ایجاد می‌شود و تنش در دو نقطه واقع در دو سر قطر پیچ، به شکل قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر متفاوت است. در الگوی خرابی یک، لنگر کمتر بوده و پیچ در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. در این حالت کرنش کششی و فشاری به ترتیب برابر 0.0035 و 0.0015 - بوده و در محدوده الاستیک (0.0032) قرار می‌گیرد. در الگوی خرابی دوم، لنگر خمشی تنه پیچ قابل توجه بوده و کرنش در وجه کششی پیچ، همزمان با افزایش نیروی وارد بر اتصال افزایش می‌یابد. در این حالت کرنش تا کرنش گسیختگی افزایش یافته و پیچ در خمش مطابق شکل ۱۳ گسیخته می‌شود. کرنش سنج کششی تا کرنش 0.001 (بیشتر از کرنش نظیر تسلیم 0.0032) را ثبت نموده است. بنابر این، پیچ در ناحیه کششی به محدوده غیرالاستیک وارد شده است. به دلیل محدودیت دامنه عملکرد کرنش سنج، قبل از رسیدن به کرنش خرابی پیچ یعنی 0.0011 ، کرنش سنج دچار آسیب شد. کرنش فشاری ثبت شده 0.002 - می‌باشد. همانطوری که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، پیچ بعد از گسیختگی، از اتصال جدا شده است.



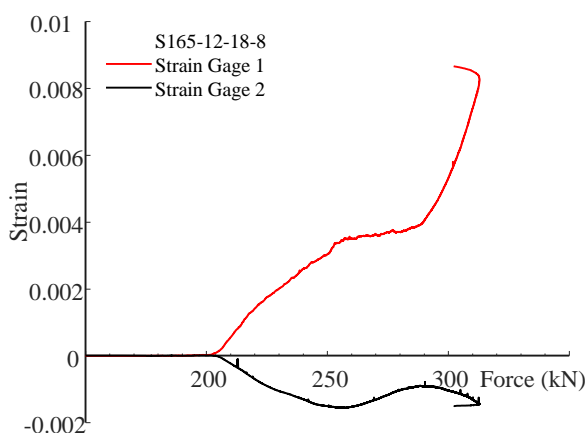
شکل ۶: کرنش سنج نصب شده در پیچ و بال قطعه T.



شکل ۷: نمودار نیرو-جابجایی اتصالات پیچی.

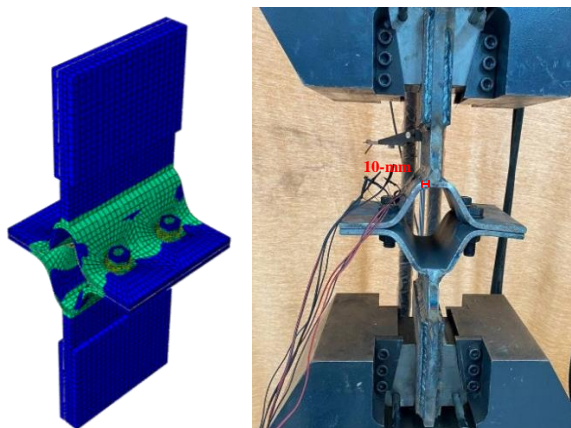
۳-۲- مدل اجزای محدود

مدل اجزای محدود اتصالات پیچی در نرم افزار ABAQUS (Ver. 2020) ایجاد شد. برای شبیه سازی قطعات T و پیچ از المان های مکعبی C3D8R هشت گرهی و انتگرال گیری با مرتبه کاهش یافته استفاده شد. در تحلیل غیرخطی سه بعدی اتصالات، تماس بین بال های قطعات T شکل و همین طور تماس بال T و پیچ لحاظ شد. پیش تنیدگی اولیه پیچ ها، به مقدار ۱۱۱/۹ کیلونیوتن با استفاده از امکانات بار پیچ نرم افزار ABAQUS اعمال شد. مولفه برخورد قائم سطوح اجزای اتصال، از نوع سخت و مولفه برخورد لغزشی آنها، از نوع اصطکاکی شبیه سازی شد. وضعیت سطوح در تماس، از نوع کلاس A (سطح فلز دار تمیز و رنگ نشده) با ضریب اصطکاک ۰/۳ تشخیص داده شد [۵]. مدل مصالح از نوع دوخطی و رفتار پلاستیک آن با سخت شوندهگی ایزوتروپیک شبیه سازی شد. مدل مصالح با سخت شوندهگی ایزوتروپیک انطباق خوبی با نتایج آزمایش دارد [۱۸]. در گام نخست تحلیل، پیش تنیدگی اولیه پیچ و در گام دوم، جابجایی افزایش یابنده تا خرابی اتصال اعمال شد. ابعاد مناسب در اجزای محدود بر اساس تحلیل حساسیت و تحلیل همگرایی مدل های اجزای محدود انتخاب شد. بر این اساس ابعاد اجزای محدود قطعه T و پیچ به ترتیب ۶ و ۲ میلی متر انتخاب شد. اتصال شامل ۱۷۵۰۴ المان می باشد. به منظور تعیین معیار خرابی در نرم افزار، حداکثر کرنش فولاد سازه ای به ۳۰ درصد محدود شد. همچنین معیار خرابی پیچ، رسیدن تنش به تنش گسیختگی در کل مقطع آن، تعیین شد [۳]. با استفاده از معادلات (۱) و (۲)، مقادیر تنش و کرنش مهندسی به مقادیر حقیقی تبدیل و در مدل اجزای محدود لحاظ گردید. مشخصات مصالح فولاد و پیچ مصرفی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد.



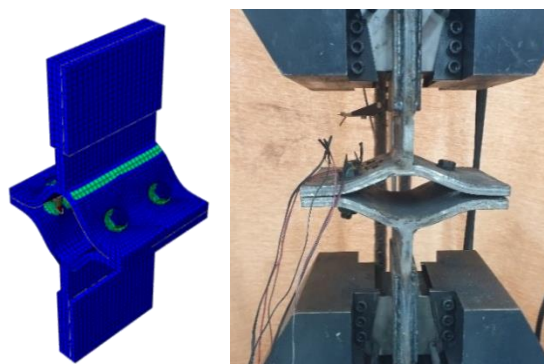
شکل ۸: رابطه نیروی وارد بر اتصال - کرنش در محیط پیچ نمونه S165-12-18-8.

الگوهای خرابی اتصالات پیچی در دو شکل ۹ و ۱۰ بر اساس داده‌های آزمایش و نتایج تحلیل نشان داده شده است. در مدل اجزای محدود نشان داده شده، اولین مرز کنترل تنش فون مایزس به تنش تسلیم مصالح ورق تنظیم شده است. بنابر این در مدل نشان داده شده، ناحیه تسلیم شده اتصال و شکل‌گیری مفصل پلاستیک مشخص می‌شود. مطابق شکل ۹، نمونه S165-8-18-8 با ایجاد دو مفصل پلاستیک در بال اتصال و در دو محل خط پیچ و نقطه اتصال جان به بال قطعه T دچار خرابی می‌شود. اتصالات S165-12-18-8 و S165-15-18-8، با ایجاد مفصل پلاستیک در محل اتصال جان به بال و گسیختگی پیچ، دچار خرابی می‌شوند. مرکز مفصل پلاستیک بال در فاصله ۱۰ میلی‌متر از محل اتصال جان به بال قرار گرفته است.

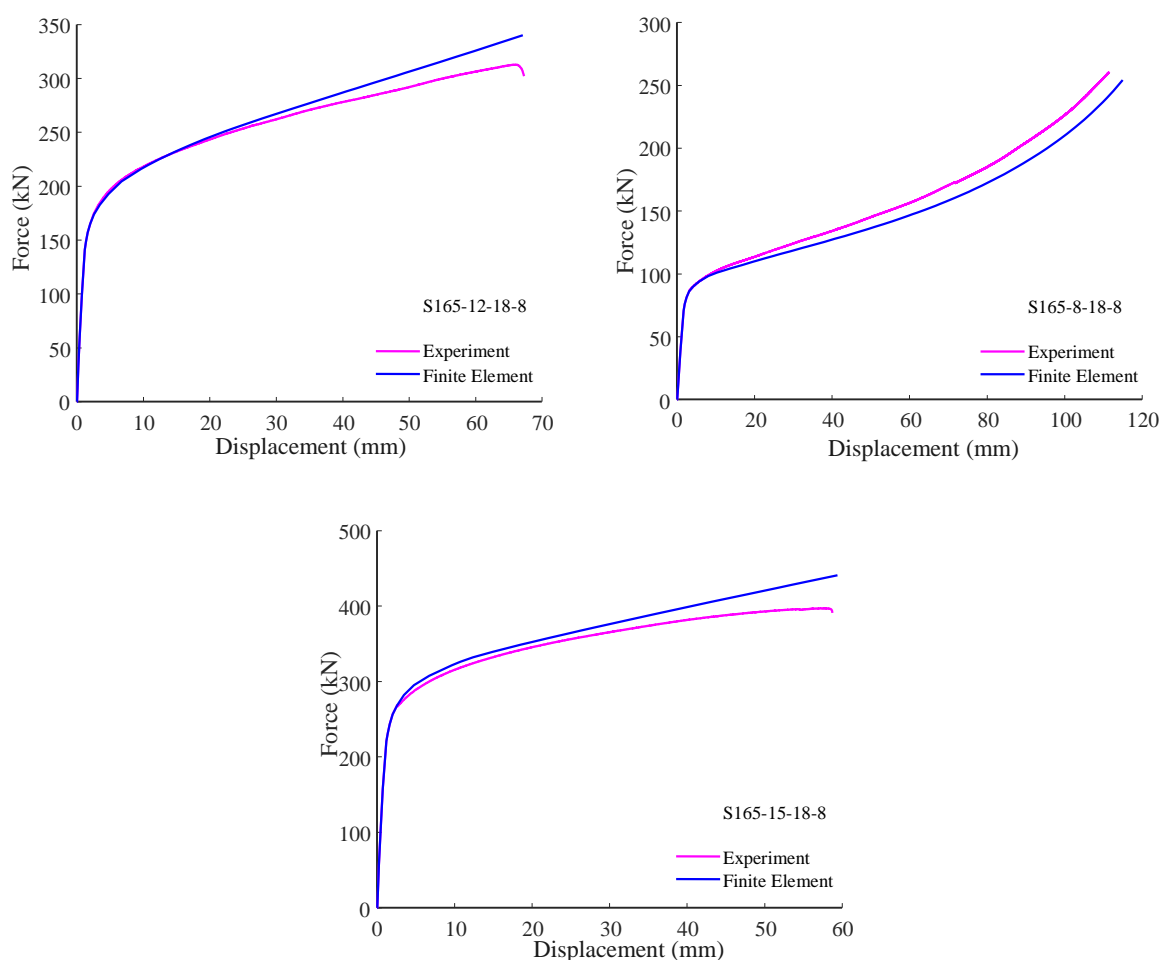


شکل ۹: خرابی نمونه S165-8-18-8 با دو مفصل پلاستیک در محل اتصال بال و جان و خط پیچ.

نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تحلیل اجزای محدود اتصالات و آزمایش در شکل ۱۱ به منظور مقایسه آورده شده است. ظرفیت و مودهای گسیختگی اتصالات، حاصل از آزمایش و تحلیل اجزای محدود در جدول ۳ مقایسه شده است. حداکثر خطای مدل اجزای محدود در نمونه S165-8-18-8 با مد خرابی نوع یک، ۲٫۹ درصد و در دو نمونه دیگر با مود خرابی دو، ۹٫۶ درصد می‌باشد. بنابر این، مدل اجزای محدود پیشنهادی دارای دقت مناسب جهت استفاده در مطالعه پارامتریک می‌باشد.



شکل ۱۰: خرابی نمونه S165-15-18-8 با مفصل پلاستیک در محل اتصال جان به بال و گسیختگی پیچ.

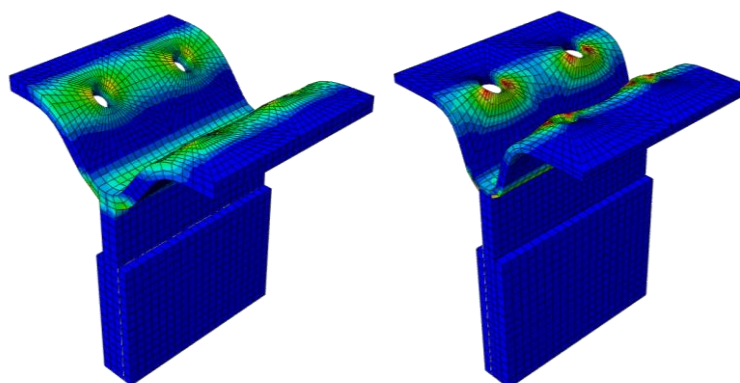


شکل ۱۱. نمودار نیرو-جابجائی حاصل از تحلیل اجزای محدود و آزمایش اتصالات پیچی.

توزیع کرنش پلاستیک تجمعی PEEQ در لحظه خرابی قطعه T و پیچ اتصال، در نمونه‌های S165-8-18-8 و S165-15-18-8، مطابق شکل ۱۲ می‌باشد. برای بال‌های با ضخامت ۸، ۱۲ و ۱۵ میلیمتر، حداکثر کرنش پلاستیک به ترتیب ۰٫۳۶۱۲، ۰٫۱۷۹۷ و ۰٫۲۹۱۲ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در نمونه با ضخامت ۸ میلیمتر، به دلیل شکل‌پذیری اتصال و تمرکز تغییرشکل در قطعات T، ورق‌ها کرنش پلاستیک قابل توجه تحمل می‌کنند. در پیچ‌ها، تمرکز تنش قابل توجه در محل تماس واشر با سر پیچ مشاهده می‌شود. مقدار کرنش پلاستیک تجمعی در تنه پیچ نمونه S165-8-18-8 با وجود تولید خمش، حدود ۰٫۰۹۱۷۷ و در نمونه S165-15-18-8، ۰٫۶۶۳۷ می‌باشد. تمرکز قابل توجه کرنش پلاستیک پیچ، در نتیجه خمش پیچ بوده و باعث گسیختگی خمشی مطابق شکل ۱۳ می‌شود. شکل ۱۴ نواحی در تماس بال‌های T را در لحظه خرابی نشان می‌دهد. با تغییر مود خرابی به نوع دوم در نمونه S165-15-18-8، ناحیه در تماس بال‌ها کاهش و میزان جداسازی بال‌ها افزایش می‌یابد. همچنین برآیند نیروهای تماسی به سمت نوک بال T تغییر موقعیت می‌دهد.

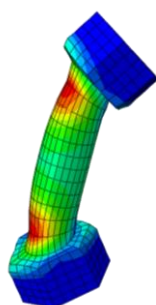
جدول ۲: مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با داده‌های آزمایش.

نمونه	داده‌های آزمایش		مدل اجزای محدود		اختلاف ظرفیت مدل با نمونه آزمایش %
	ظرفیت نمونه [kN]	مود خرابی	ظرفیت مدل [kN]	مود خرابی	
S165-8-18-8	260	1	254	1	2.3
S165-12-18-8	313	2	337	2	7.7
S165-15-18-8	397	2	435	2	9.6

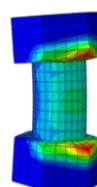


S165-15-18-8

S165-8-18-8



S165-15-18-8

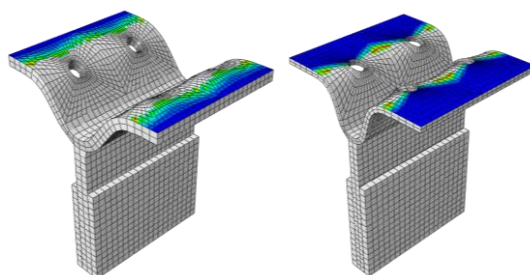


S165-8-18-8

شکل ۱۲: توزیع کرنش پلاستیک تجمعی اتصالات S165-15-18-8 و S165-8-18-8 در لحظه خرابی.



شکل ۱۳: گسیختگی پیچ تحت تاثیر کشش و خمش در اتصال S165-15-18-8.



S165-15-18-8

S165-8-18-8

شکل ۱۴: ناحیه در تماس اتصالات S165-15-18-8 و S165-8-18-8 در لحظه خرابی.

۴- مطالعه پارامتریک

مطالعه پارامتریک با هدف بررسی تاثیر ضخامت بال، موقعیت پیچ، نوع مصالح و قطر پیچ بر روی مد خرابی، ظرفیت اتصال، مقدار و محل برآیند نیروی اهرمی و خروج از مرکزیت نیروی پیچ، با تحلیل ۲۲ نمونه اتصال پیچی انجام گرفت. مشخصات هندسی اتصال پیچی و نتایج تحلیل اجزای محدود در جدول ۴ آمده است. حد تسلیم و گسیختگی مصالح پیچ و فولاد مطابق جدول ۵ انتخاب شد. ϵ_p کرنش پلاستیک در مقاومت نهایی است. a , b , d_f , d_b , p , t_f و b به ترتیب قطر پیچ، پهنای بال T، عرض بارگیر یک پیچ، فاصله مرکز سوراخ پیچ از لبه T، ضخامت بال T و فاصله مرکز سوراخ پیچ تا سطح جان T می‌باشد. ضخامت جان ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. δ_u , T_u , X و e_1 به ترتیب ظرفیت اتصال پیچی، جابجایی در لحظه خرابی، نیروی اهرمی ایجاد شده در یک پیچ، فاصله برآیند نیروی اهرمی از مرکز سوراخ پیچ و خروج از مرکزیت پیچ می‌باشد. این متغیرها در شکل‌های ۴ و ۱۹ نشان داده‌اند. فاصله مفصل پلاستیک بال از جان T (e_2) در اتصالات با مکانیزم خرابی یک یا دو، برابر ۱۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

جدول ۴: ابعاد هندسی اتصالات T مطالعه پارامتریک (mm).

Sample	ابعاد هندسی [mm]						Bolt Grade	الگوی خرابی	تحلیل اجزای محدود						
	t_f	b_f	p	g	b	d_b			a/b	g/t_f	T_u [kN]	δ_u [mm]	Q [kN]	X [mm]	e_1 [mm]
C165-10-24-8	10	300	100	165	72.5	24	8.8	1	0.93	16.5	171	120	165	-12.3	1.96 d_b
C165-12-24-8	12	300	100	165	72.5	24	8.8	1	0.93	13.8	175	105	157	9.5	1.22 d_b
C165-15-24-8	15	300	100	165	72.5	24	8.8	2	0.93	11.0	181	72	143	17.8	0.39 d_b
C165-20-24-8	20	300	100	165	72.5	24	8.8	2	0.93	8.3	207	33	103	21.9	0.01 d_b
C165-25-24-8	25	300	100	165	72.5	24	8.8	2	0.93	6.6	217	18	114	37.1	0.04 d_b
C165-30-24-8	30	300	100	165	72.5	24	8.8	2	0.93	5.5	244	21	66	35.9	0.06 d_b
C165-35-24-8	35	300	100	165	72.5	24	8.8	2	0.93	4.7	280	21	47	45.6	0.06 d_b
C165-40-24-8	40	300	100	165	72.5	24	8.8	3	0.93	4.1	307	18	3	67.5	0.00
C165-45-24-8	45	300	100	165	72.5	24	8.8	3	0.93	3.7	318	15	0	67.5	0.00
C165-50-24-8	50	300	100	165	72.5	24	8.8	3	0.93	3.3	320	14	0	67.5	0.00
C165-25-16-8	25	300	100	165	72.5	16	8.8	3	0.93	6.6	121	14	18	67.5	0.00
C165-25-20-8	25	300	100	165	72.5	20	8.8	2	0.93	6.6	161	14	38	37.7	0.04 d_b
C165-25-27-8	25	300	100	165	72.5	27	8.8	2	0.93	6.6	260	20	145	37.0	0.03 d_b
C165-25-24-10	25	300	100	165	72.5	24	10.9	2	0.93	6.6	263	17	115	26.3	0.03 d_b
C110-20-24-8	20	300	100	110	45	24	8.8	2	2.11	5.5	254	12	59	95.0	0.00
C150-20-24-8	20	300	100	150	65	24	8.8	2	1.15	7.5	225	29	88	55.7	0.00
C200-20-24-8	20	300	100	200	90	24	8.8	2	0.56	10.0	161	34	122	11.6	0.02 d_b
C240-20-24-8	20	300	100	240	110	24	8.8	2	0.27	12.0	109	34	215	15.9	0.02 d_b
C110-20-24-10-100	20	300	100	110	45	24	10.9	2	2.11	5.5	173	36	239	65.6	0.07 d_b
C110-20-24-10-250	20	300	250	110	45	24	10.9	2	2.11	5.5	213	9	206	69.0	0.00
C110-20-24-10-300	20	300	300	110	45	24	10.9	2	2.11	5.5	222	8	196	60.9	0.00
C110-20-24-10-400	20	300	400	110	45	24	10.9	2	2.11	5.5	238	7	177	88.5	0.01 d_b

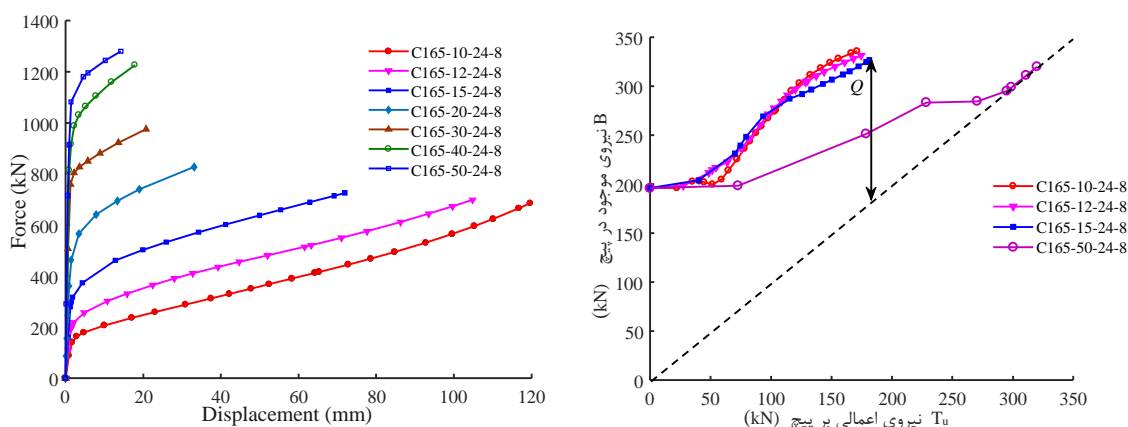
جدول ۵: مشخصات مکانیکی فولاد و پیچ در مطالعه پارامتریک عددی.

نمونه	E	Fy	Fu	ϵ_p
	[GPa]	[MPa]	[MPa]	
ورق	226	315.9	640	0.08
پیچ 8.8	210	640	800	0.11
پیچ 10.9	210	940	1040	0.11

۴-۱- تاثیر ضخامت بال بر روی مود خرابی، ظرفیت اتصال و نیروی اهرمی

نمودار نیرو-جابجایی اتصال پیچی با تغییر ضخامت بال در محدوده ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل، نمودار جابجایی انتهای جان قطعه T در مقابل نیروی وارد بر آن نقطه رسم شده است. همچنین در این شکل رابطه بین نیروی اعمال شده به یک پیچ اتصال یعنی T_u و نیروی تولید شده در آن یعنی B رسم شده است. اختلاف نیروی وارد شده از قطعه T و تولید شده، مقدار نیروی اهرمی Q تولید شده در پیچ را نشان می‌دهد. همانطوری که از جدول ۴ و نمودار شکل ۱۵ دیده می‌شود، با افزایش ضخامت بال، مود خرابی از یک تا سه تغییر می‌یابد. با تغییر مود خرابی، ظرفیت اتصال افزایش و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. بعد از ضخامت ۴۰ میلی‌متر،

این افزایش مشهود نمی‌باشد. دلیل این امر تبدیل مود خرابی به مود سه می‌باشد و در ضخامت بزرگتر از این مقدار، ورق اتصال صلب عمل نموده و حالت حدی خرابی، با گسیختگی پیچ اتفاق می‌افتد. در ضخامت کم و الگوی خرابی یک و دو، ضخامت بال، پارامتر اصلی تاثیرگذار بر مقاومت اتصال است و در این محدوده، افزایش ضخامت، روشی موثر برای افزایش ظرفیت اتصال است. تغییرات نیروی اهرمی ایجاد شده در پیچ در فرایند تحلیل اجزای محدود، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مقدار نیروی اهرمی، از مقدار نیروی پیش‌تنیدگی پیچ در پایان گام نخست تحلیل شروع می‌شود. با افزایش ضخامت، مقاومت خمشی بال افزایش و نیروی اهرمی کاهش می‌یابد. در ضخامت ۵۰ میلیمتر، نیروی اهرمی در لحظه خرابی صفر و برای ضخامت ۱۰ میلیمتر، بیشترین مقدار یعنی ۱۶۵ کیلو نیوتن برابر ۴۸/۹ درصد نیروی موجود در پیچ است. با تعریف شکل پذیری اتصال به صورت نسبت جابجایی لحظه گسیختگی به جابجایی تسلیم، شکل پذیری اتصال از ۷۲/۸ در ضخامت ۱۰ میلیمتر به ۶/۴ در ضخامت ۵۰ میلیمتر کاهش می‌یابد.

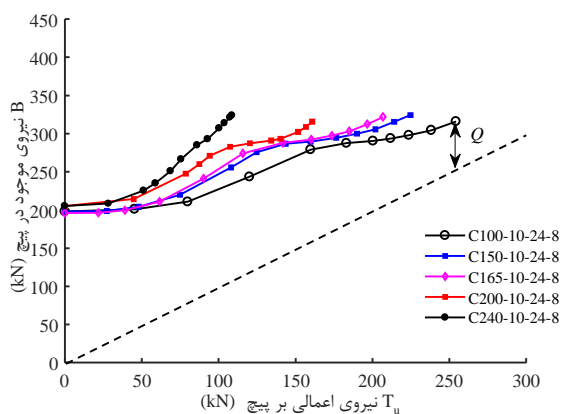
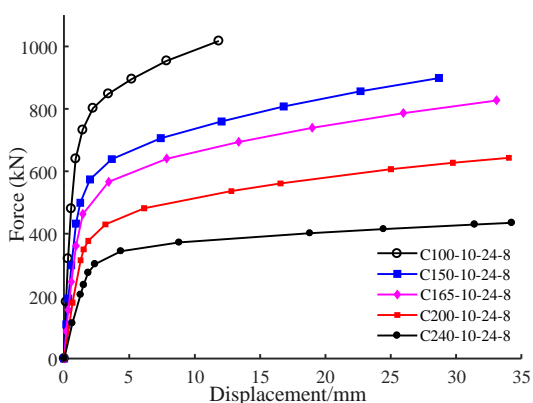


شکل ۱۵: تاثیر ضخامت بال بر روی ظرفیت اتصال و نیروی اهرمی پیچ.

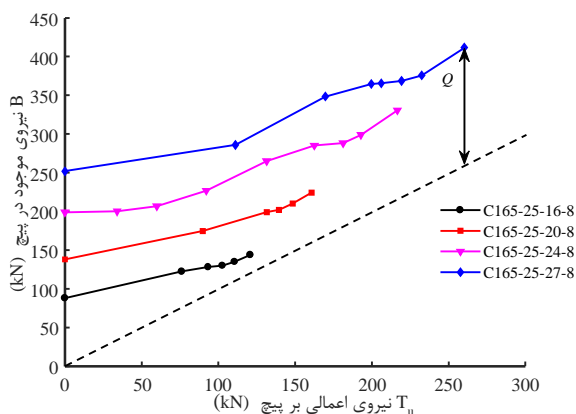
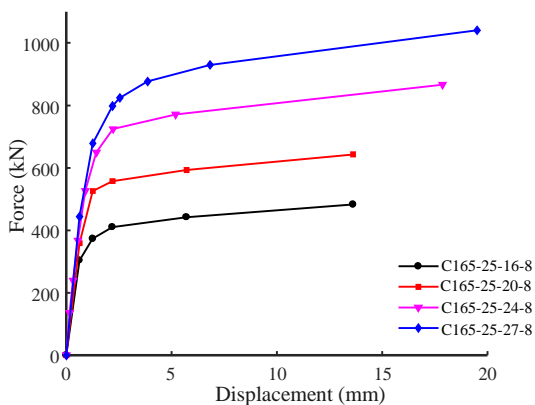
۴-۲- تاثیر موقعیت، قطر و سهم بارگیری پیچ بر روی مود خرابی، ظرفیت اتصال و نیروی اهرمی

نمودارهای شکل ۱۶ تاثیر فاصله پیچ‌ها از همدیگر (شکل ۴) را در ظرفیت و مقدار نیروی اهرمی اتصالات با ضخامت بال ثابت نشان می‌دهد. مود خرابی اتصالات تغییر نمی‌نماید و با افزایش g ، بازوی اهرم افزایش یافته و در ایجاد مفصل پلاستیک اول بال، تسریع می‌شود. نکته جالب توجه، عدم تغییر مقدار نیروی اهرمی در لحظه خرابی اتصالات است. بنابر این افزایش g روشی موثر برای کاهش نیروی اهرمی نمی‌باشد. ظرفیت اتصال پیچی رابطه عکس با مقدار g دارد. کمیت g/t_f عامل تعیین کننده در نوع الگوی خرابی است. همانطوری که از جدول ۴ دیده می‌شود، برای مقادیر g/t_f بزرگتر از ۱۳/۸ الگوی خرابی از نوع یک، برای مقادیر کوچکتر از ۴/۱ الگوی خرابی از نوع سه و برای مقادیر بین این دو مقدار الگوی خرابی از نوع دو می‌باشد.

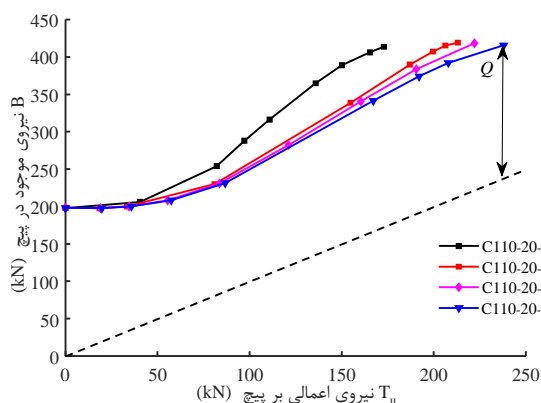
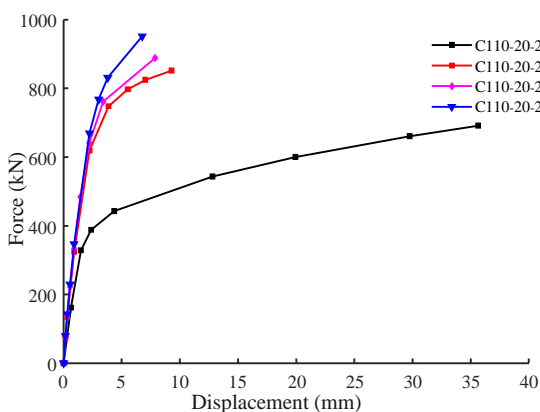
تاثیر افزایش قطر پیچ از ۱۶ به ۲۷ میلیمتر بر ظرفیت اتصال و مقدار نیروی اهرمی ایجاد شده پیچ، در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با افزایش قطر، الگوی خرابی از مود سه به مود دو تغییر یافته است. در این حالت ظرفیت و نیروی اهرمی افزایش می‌یابد. تاثیر افزایش عرض بارگیری پیچ در شکل ۱۸ نشان داده شده است. با افزایش سهم بارگیری از ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلیمتر، ظرفیت اتصال ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر سهم بارگیری، تاثیر قابل توجهی در افزایش ظرفیت ندارد. افزایش سهم بارگیری با افزایش ظرفیت خمشی بال، فاصله بین لحظه وقوع مفصل پلاستیک در بال و گسیختگی پیچ را کاهش داده، افت قابل توجه در شکل پذیری را سبب می‌شود. در نمونه‌های مورد بررسی، تغییر در مکانیزم خرابی ملاحظه نشد ولی افزایش بیشتر سهم بارگیری پیچ می‌تواند با کاهش این فاصله، سبب ایجاد مکانیزم ترد از نوع الگوی خرابی سوم شود. نکته قابل توجه دیگر، تغییر نیافتن نیروی اهرمی با تغییرات عرض بارگیری پیچ است.



شکل ۱۶: تاثیر موقعیت پیچ بر روی ظرفیت اتصال و نیروی اهرمی پیچ.



شکل ۱۷: تاثیر قطر پیچ بر روی ظرفیت اتصال و نیروی اهرمی پیچ.



شکل ۱۸: تاثیر عرض بارگیری پیچ بر روی ظرفیت اتصال و نیروی اهرمی پیچ.

۴-۳- موقعیت مفصل پلاستیک، محل اثر نیروی اهرمی و خروج از مرکزیت نیروی پیچ در اتصالات مورد بررسی

آزمایش و مطالعه پارامتریک انجام گرفته در این پژوهش نشان داد که موقعیت مفصل پلاستیک بال در الگوی خرابی قطعات T ساخته شده از ورق یعنی e_2 (شکل ۱۹-ب) برابر ۱۰ میلی‌متر است. همچنین مطابق جدول ۴، خروج از مرکزیت نیروی پیچ و خمش پیچ در الگوی خرابی یک قابل توجه و به طور میانگین برابر $1.5d_b$ می‌باشد. خروج از مرکزیت با کاهش مقدار g/t به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ برای g/t برابر ۱۱/۰ حداکثر برابر $0.39d_b$ و برای مقادیر کوچکتر به طور میانگین برابر $0.07d_b$ تغییر می‌کند. بنابر این در ادامه این پژوهش و برای الگوی خرابی دو، مقدار خروج از مرکزیت نیروی پیچ برابر $0.07d_b$ در نظر گرفته می‌شود.

در مطالعات اجزای محدود فاصله برآیند نیروی اهرمی از مرکز سوراخ یعنی X (شکل ۱۹-ب)، در لحظه خرابی و برای تمام نمونه‌ها تعیین شد. لازم به ذکر است که در مدل‌های تحلیلی رایج، موقعیت نیروی اهرمی در لبه بال $T (X=a)$ فرض می‌شود. آنالیز حساسیت کمیت X برای تمام متغیرهای هندسی و مکانیکی اتصال بررسی شده در مطالعه پارامتریک (مطابق با جدول ۴)، با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شد. ملاحظه گردید که این کمیت تابع متغیر a/b است و رابطه (۳) برای الگوی خرابی دو تعیین شد.

$$X = 0.025 + 36.08a/b \quad R^2 = 0.8086 \quad p = 2.158 \times 10^{-6} \quad (3)$$

برای اتصالات مورد بررسی در بخش مدل تحلیلی این پژوهش، این مقدار به طور میانگین برابر با $0.5a$ به دست آمد که نزدیک به مقدار محافظه کارانه تعیین شده هوانگ و همکاران [۹] در بال‌های انعطاف‌پذیر اتصالات لوله‌ای یعنی $0.6a$ می‌باشد.

۵- مدل تحلیلی برای تعیین ظرفیت کششی اتصال پیچی

مدل تحلیلی بهبود یافته برای تعیین ظرفیت باربری نهایی اتصالات T شکل پیچی با هدف توصیف بهتر پدیده اهرمی در این پژوهش پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی راهنمای آئین‌نامه AISC [۷] با وجود متغیرها و معادلات بسیار، حالت حدی تعیین کننده به صورت واضح، مشخص نمی‌باشد. مدل تحلیلی پیشنهادی این مقاله درک بهتری از پدیده اهرمی ارائه می‌دهد. این مدل در حالت حدی نهایی معتبر بوده و حد پایین ظرفیت را مشخص می‌کند. نیروی پیچ در لبه سوراخ فرض می‌شود. هدف از ارائه این مدل تحلیلی، بهبود نتایج تحلیل ظرفیت اتصال پیچی است. در مدل تحلیلی پیشنهادی این پژوهش، ظرفیت اتصال در شش گام تعیین می‌شود. متغیرهای مدل تحلیلی در شکل ۱۹ توضیح داده شده است.

گام اول: تعیین موقعیت مفصل پلاستیک P_1

گام دوم: تعیین محل برآیند نیروی اهرمی X

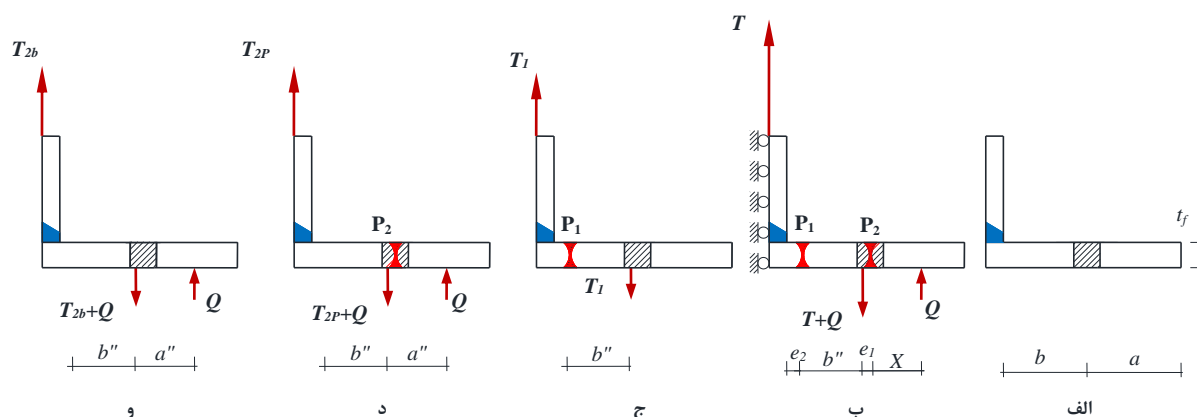
گام سوم: کاهش ظرفیت پیچ به دلیل خروج از مرکزیت و خمش پیچ و تعیین ظرفیت B' پیچ. این گام می‌تواند در تغییر مود خرابی یک به دو تعیین کننده باشد. پیشنهاد می‌شود در تعیین ظرفیت پیچ از ظرفیت اسمی بدون کاهش مقاومت استفاده شود. تنش حداکثر ایجاد شده در تنه پیچ و خروج از مرکزیتی برابر 0.07 قطر پیچ مطابق رابطه (۴) به تنش حداکثر ناشی از نیروی محوری بدون خروج از مرکزیت ارتباط داده می‌شود.

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A_b} + \frac{Pe}{S} = \frac{P}{A_b} + \frac{P(0.07d_b)}{(\pi d_b^3/32)} = \frac{P}{A_b} (1 + 0.07 \times 8) = 1.56\sigma_{av} \quad (4)$$

σ_{av} و σ_{max} تنش حداکثر و میانگین موجود در مقطع پیچ است. بنابر این وجود خمش در پیچ، به طور میانگین ۳۵ درصد ظرفیت پیچ را کاهش می‌دهد.

در شکل ۱۹-الف، هندسه نصف قطعه T نشان داده شده است. a و b به ترتیب فاصله لبه قطعه تا مرکز سوراخ و فاصله مرکز سوراخ تا محل اتصال بال به جان قطعه T است. مدل تحلیلی اتصال پیچی در شکل ۱۹-ب نشان داده شده است. تقارن قطعه T با تکیه‌گاههای

غلطکی شبیه‌سازی شده است. بسته به ابعاد قطعه و پیچ، احتمال ایجاد مفصل پلاستیک در نقاط P_1 و P_2 وجود دارد. نیروی پیچ با خروج از مرکزیت e_1 ، مفصل پلاستیک محتمل P_1 با خروج از مرکزیت e_2 و برآیند نیروی اهرمی در فاصله X از مرکز سوراخ اعمال می‌شود.



شکل ۱۹: مدل تحلیلی اتصال پیچی.

گام چهارم: مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال از روابط (۵) تا (۱۰) تعیین می‌شود.

$$d' = d_b + (2 \text{ or } 3) \quad (۵)$$

$$a \leq 1.25b \quad (۶)$$

$$\max(b) = 2 \times 1.75b \quad (۷)$$

$$a'' = e_1 + X \quad (۸)$$

$$b'' = b - e_1 - e_2 \quad (۹)$$

$$B' = 0.65 \times 0.75(\pi d_b^2/4)F_{ub} \quad (۱۰)$$

d' قطر سوراخ استاندارد بوده و برای پیچ‌های به قطر ۲۴ میلیمتر یا کمتر، ۲۱۰ میلیمتر و برای قطرهای بزرگتر، ۳۱۰ میلیمتر بیشتر از قطر پیچ و F_{ub} حد گسیختگی پیچ می‌باشد.

گام پنجم: احتمال وقوع مد خرابی سوم کنترل می‌شود. مطابق رابطه (۱۱)، مقاومت طرح در محل مفصل پلاستیک P_1 ، برابر لنگر ضریب‌دار می‌باشد (شکل ۱۹-ب) و حداقل ضخامت بال جهت تحمل بار ضریب‌دار T_u ، بدون ایجاد نیروی اهرمی از رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

$$T_u b'' \leq \phi M_p = (0.9pt^2/4)F_u \quad (۱۱)$$

$$t_{np} = \sqrt{(4b''T_u/(\phi p F_u))} \quad (۱۲)$$

از F_u به جای F_y به منظور انطباق نتایج مدل با داده‌های تجربی استفاده شده است [۷]. در صورتی که ضخامت بال بیشتر از t_{np} باشد، خروج از مرکزیت e_1 و نیروی اهرمی حذف و مود خرابی سه حاکم است. برای ضخامت‌های کوچکتر از این مقدار، گام بعدی اجرا می‌شود.

گام ششم: برای ضخامت بال کمتر از t_{np} ظرفیت با در نظر گرفتن مود خرابی دو یا سه کنترل می‌شود. ظرفیت تامین شده بال بدون در نظر گرفتن پدیده اهرمی T_1 (شکل ۱۹-ج)، از تعادل لنگر ضریب‌دار با مقاومت طرح در مفصل پلاستیک P_1 مطابق روابط (۱۳) و (۱۴) تعیین می‌شود.

$$T_1 b'' = \phi(pt^2/4)F_u \quad (۱۳)$$

$$T_1 = (\phi pt^2 F_u / (4b'')) \quad (۱۴)$$

اضافه ظرفیت تامین شده اتصال به واسطه نیروی اهرمی (T_2)، می تواند باعث ایجاد مفصل پلاستیک در نقطه P_2 یا گسیختگی پیچ شود. نیروی لازم برای ایجاد مفصل پلاستیک در نقطه P_2 با استفاده از تعادل جسم آزاد قطعه، مطابق شکل ۱۹-د، از روابط (۱۵) و (۱۶) تعیین می شود.

$$T_{2P}b'' = \emptyset(p - d')t^2/4F_u \quad (15)$$

$$T_{2P} = \emptyset(p - d')t^2F_u/(4b'') \quad (16)$$

در صورتی که مفصل پلاستیک در نقطه P_2 شکل نگیرد، گسیختگی پیچ رخ خواهد داد. در این حالت با در نظر گرفتن تعادل لنگر حول محور پیچ مطابق رابطه (۱۷)، مقدار نیروی اهرمی از رابطه (۱۸) تعیین می شود.

$$Qa'' = T_{2b}b'' \quad (17)$$

$$Q = T_{2b}b''/a'' \quad (18)$$

نیروی تولید شده در پیچ از رابطه (۱۹) تعیین می شود.

$$B_1 = T_{2b} + Q = T_{2b}(1 + b''/a'') \quad (19)$$

حداکثر B_1 برابر ظرفیت مانده در پیچ یعنی $B'-T_1$ می باشد. در این حالت مقادیر B' و T_{2b} از روابط (۲۰) و (۲۱) تعیین می شود.

$$B' - T_1 = T_{2b}(1 + b''/a'') \quad (20)$$

$$T_{2b} = (B' - T_1)/(1 + b''/a'') \quad (21)$$

حداقل دو مقدار T_{2P} یا T_{2b} تعیین کننده مود خرابی یعنی به ترتیب مود یک یا دو می باشد. بنابر این ظرفیت نهایی اتصال از معادله (۲۲) و مقدار نیروی اهرمی از رابطه (۲۳) تعیین می شود.

$$T_u = T_1 + \min(T_{2b}, T_{2P}) \quad (22)$$

$$Q = (T_u - T_1)b''/a'' \quad (23)$$

ظرفیت اتصالات پیچی آزمایش شده، با استفاده از دو مدل تحلیلی AISC [7] و پیشنهادی مقاله تعیین شد. الگوی خرابی اتصالات مورد بررسی از نوع دو می باشد. مشخصات اتصالات در جداول ۱ و ۲ آمده است. نتیجه تحلیل ظرفیت اتصالات با اعمال اثر نیروی اهرمی در جدول ۶ آمده است. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از فرضیات مدل تحلیلی AISC، یعنی $b''=b-0.5d_b$ و $a''=a+0.5d_b$ ، $X=a$ ، $e_1=0$ ، نتایج مدل تحلیلی پیشنهادی با نتایج مدل AISC یکسان خواهد بود. با این تفاوت که محاسبات مدل پیشنهادی ساده تر بوده و فرآیند محاسبات به سادگی قابل درک است. داده های آزمایش به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شده است. در انجام محاسبات مدل تحلیلی پیشنهادی، با استفاده از نتایج مطالعه پارامتریک و نتایج آزمایش، e_2 برابر ۱۰/۱۰ میلی متر انتخاب شد. موقعیت برآیند نیروی اهرمی یعنی X با استفاده از رابطه تعیین شده در مطالعه پارامتریک یعنی رابطه (۳) تعیین شد. از مقاومت اسمی پیچ برای محاسبات استفاده شد. به منظور لحاظ نمودن تاثیر خمش پیچ در کاهش ظرفیت با استفاده از نتایج مطالعه پارامتریک، داده های آزمایش و رابطه (۴)، ظرفیت اسمی پیچ ۳۵ درصد کاهش داده شد. از مقاومت حقیقی تعیین شده ورق ها مطابق جدول ۲، در تعیین ظرفیت اتصال پیچی استفاده شد. مقایسه نتایج تحلیل ظرفیت نشان می دهد که مدل پیشنهادی با وجود سادگی نسبت به مدل تحلیلی AISC، به دلیل توانایی در اعمال محل دقیق برآیند اهرمی، خمش پیچ و محل ایجاد مفصل پلاستیک در محل اتصال جان به بال، دقت در تعیین ظرفیت را به طور میانگین ۱۰/۶ درصد نسبت به مدل تحلیلی AISC بهبود می بخشد.

جدول ۶: مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با داده های آزمایش.

نمونه	مدل اجزای محدود		مدل تحلیلی AISC [7]		مدل تحلیلی پیشنهادی	
	داده های آزمایش	مدل اجزای محدود	مدل تحلیلی AISC [7]	اختلاف	مدل تحلیلی پیشنهادی	اختلاف
	$4T_u$ [kN]	$4T_u$ [kN]	$4T_u$ [kN]	%	$4T_u$ [kN]	%
S 165-12-18-8	313	337	175.24	44.0	207.99	33.5
S 165-15-18-8	397	435	270.36	31.9	312.76	21.2

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل تحلیلی ساده‌ای برای تعیین ظرفیت اتصالات پیچی با لحاظ نمودن پدیده اهرمی پیشنهاد شد. اتصالات T مورد بررسی، قسمت کششی اتصالات از پیش تأیید شده تیر به ستون بوده و با جوش نفوذی ورق‌های فولادی ساخته شده‌اند. نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

با انجام آزمایش روی اتصالات پیچی با قطعات T شکل، روابط نیرو-جابجایی و توزیع کرنش در اتصالات، برای دو مد خرابی یک و دو تعیین شد. مشخصات ورق‌های فولادی، پیچ‌های اتصال، ظرفیت اتصال و کرنش در دو نقطه از محیط پیچ و محل اتصال جان به بال تعیین شد. اتصال جان به بال قطعه T از نوع نفوذی با جوش پشت بند گوشه بود. مدل اجزای محدود با دقت مناسب، جهت انجام مطالعه پارامتریک ایجاد شد. حداکثر خطای مدل اجزای محدود ۹/۶ درصد می‌باشد.

در مطالعه پارامتریک، تاثیر ضخامت ورق، قطر و مقاومت پیچ، فاصله پیچ‌ها از هم و سهم بارگیر هر پیچ در ظرفیت اتصال، مقدار نیروی اهرمی، خروج از مرکزیت نیروی پیچ و موقعیت مفاصل پلاستیک تعیین شد. بررسی‌ها نشان داد که مفصل پلاستیک محل اتصال جان به بال قطعه T، در فاصله ۱۰/۰ میلی‌متر از جان قطعه T ایجاد می‌شود.

در الگوهای خرابی یک و دو با افزایش ضخامت بال، ظرفیت اتصال افزایش و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد. در ضخامت کم و الگوی خرابی یک و دو، ضخامت بال، پارامتر اصلی تاثیرگذار بر مقاومت اتصال است و در این محدوده، افزایش ضخامت، روشی موثر برای افزایش ظرفیت اتصال است. در الگوی خرابی سه با افزایش ضخامت بال، بدون افزایش ظرفیت اتصال، نیروی اهرمی کاهش می‌یابد. در الگوی خرابی یک، سهم عملکرد اهرمی در افزایش نیروی محوری پیچ می‌تواند به ۴۸/۹ درصد نیروی موجود در پیچ افزایش یابد. بررسی‌ها نشان داد که شکل‌پذیری اتصال از ۷۲/۸ در الگوی خرابی یک به ۶/۴ در الگوی خرابی دو کاهش می‌یابد.

کمیت g/t_f عامل تعیین کننده نوع الگوی خرابی است. برای مقادیر g/t_f بزرگتر از ۱۳/۸، الگوی خرابی از نوع یک، برای مقادیر کوچکتر از ۴/۱، الگوی خرابی از نوع سه و برای مقادیر بین این دو مقدار، الگوی خرابی از نوع دو می‌باشد. ظرفیت اتصال پیچی رابطه عکس با مقدار g دارد و مقدار نیروی اهرمی در لحظه خرابی اتصالات با تغییر g ، تغییر پیدا نمی‌کند. بنابر این افزایش g روشی موثر برای کاهش نیروی اهرمی نمی‌باشد.

مطالعه پارامتریک انجام گرفته نشان داد که خروج از مرکزیت پیچ، با کاهش مقدار g/t به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ این مقدار برای g/t کمتر از ۱/۱۰، به طور میانگین برابر $0.07d_b$ می‌باشد. در الگوی خرابی دو، خروج از مرکزیت ایجاد شده و خمش پیچ، باعث ۳۵ درصد کاهش در ظرفیت پیچ می‌شود.

آنالیز حساسیت کمیت X (موقعیت نیروی اهرمی) برای تمام متغیرهای هندسی و مکانیکی اتصالات انجام شد. ملاحظه گردید که این کمیت وابستگی زیاد به متغیر a/b دارد. رابطه‌ای برای تعیین موقعیت برآیند نیروی اهرمی در الگوی خرابی دو تعیین شد. برای اتصالات مورد بررسی، این مقدار به طور میانگین برابر با $0.5a$ به دست آمد.

با استفاده از نتایج مطالعه پارامتریک، مدل تحلیلی و فرآیند گام به گام به منظور تعیین ظرفیت اتصال با لحاظ نمودن نیروی اهرمی پیشنهاد شد. مدل پیشنهادی برای دو اتصال با مود خرابی نوع دو اعمال شد. نتایج تحلیل ظرفیت با نتایج مدل تحلیلی AISC [۷] و داده‌های تجربی مقایسه شد. مدل پیشنهادی در ضمن سادگی، دقت در تعیین ظرفیت را نسبت به مدل AISC به مقدار ۱۰/۶ درصد بهبود می‌بخشد.

برای افزایش بیشتر دقت مدل پیشنهادی، نیاز به مطالعات بیشتر و اعمال اضافه مقاومت حاصل از عملکرد غشایی بال می‌باشد که تاکنون در مدل‌های تحلیلی موجود در منابع علمی، اعمال نشده است. همچنین با تعیین مقدار نیروی اهرمی با استفاده از مدل تحلیلی پیشنهادی، نیاز به تحقیقات بیشتر جهت اعمال مدل پیشنهادی در فرآیند طراحی اتصالات از پیش تأیید شده و ارزیابی تاثیر اعمال اثر اهرمی در رفتار اتصال و قاب می‌باشد.

مراجع

1. Miller, D.K. (1998). Lessons learned from the Northridge earthquake. *Engineering structures*, 20 (4-6): p. 249-260.
2. Bai, R., S.-L. Chan, and J.-P. Hao. (2015). Improved design of extended end-plate connection allowing for prying effects. *Journal of Constructional Steel Research*, 113 p. 13-27.
3. Gödrich, L., F. Wald, J. Kabeláč, and M. Kuříková. (2019). Design finite element model of a bolted T-stub connection component. *Journal of Constructional Steel Research*, 157 p. 198-206.
4. Segui, W.T., (2012), *Steel design*. Fifth ed. United States of America: Cengage Learning. 752.
5. ANSI/AISC-360-16, *Specification for Structural Steel Buildings in American Institute of Steel Construction*, Chicago-Illinois. 2016.
6. Carlo Lini, P. (2016). *A Slightly Longer Look at Prying*. Available from: https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/archives/2016/07/a-slightly-longer-look-at-prying_july-2016.pdf.
7. AISC, (2017), *Steel Construction Manual, 15th Ed.*: American Institute of Steel Construction, Chicago.
8. Hu, D., J. Papadopoulos, and G.G. Adams. (2020). Prying action in an elastic T-stub tensile connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 169 p. 106027.
9. Huang, F., D. Zhang, W. Hong, and B. Li. (2017). Mechanism and calculation theory of prying force for flexible flange connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 132 p. 97-107.
10. Abidelah, A., A. Bouchaïr, and D.E. Kerdal. (2014). Influence of the flexural rigidity of the bolt on the behavior of the T-stub steel connection. *Engineering structures*, 81 p. 181-194.
11. Francavilla, A.B., M. Latour, V. Piluso, and G. Rizzano. (2015). Simplified finite element analysis of bolted T-stub connection components. *Engineering structures*, 100 p. 656-664.
12. Yang, J.-G., J.-H. Park, H.-K. Kim, and M.-C. Back. (2013). A prying action force and contact force estimation model for a T-stub connection with high-strength bolts. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 12 (2): p. 309-316.
13. ANSI/AISC-358-16, *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplement No. 1*. 2018, American Institute of Steel Construction, Chicago.
14. Hantouche, E.G., A.R. Kukreti, G.A. Rassati, and J.A. Swanson. (2015). Prying models for strength in thick-flange built-up T-stubs with complete joint penetration and fillet welds. *Journal of Structural Engineering*, 141 (2): p. 04014102.
15. Liang, G., H. Guo, Y. Liu, D. Yang, and S. Li. (2019). A comparative study on tensile behavior of welded T-stub joints using Q345 normal steel and Q690 high strength steel under bolt preloading cases. *Thin-Walled Structures*, 137 p. 271-283.
16. Bezerra, L.M., J. Bonilla, W.A. Silva, and W.T. Matias. (2020). Experimental and numerical studies of bolted T-stub steel connection with different flange thicknesses connected to a rigid base. *Engineering structures*, 218 p. 110770.
17. Bruneau, M., C.M. Uang, and S. Rafael Sabelli, (2011), *Ductile design of steel structures*. Second ed.: McGraw-Hill Education.
18. Wang, W., C. Zhang, Z. Li, and X. Gan. (2021). A Study on the Application of Two Different Material Constitutive Models Used in the FE Simulation of the Cyclic Plastic Behavior of a Steel Beam-Column T-Stub Connection. *Advances in Civil Engineering*, 2021.