

Incorporating the Prying Force Effect in the Design of Four-Bolt End Plate Beam-to-Column Moment Connections

Gholipour Feizi, M.^{1*}, Hosseinzadeh, Y.², Sheidaii, M.R.³, Alipoursajedi, S.⁴

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sou.C., Islamic Azad University, Soufian, Iran

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

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

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

ABSTRACT

The failure of welded moment connections and the superior seismic performance of bolted moment connections in recent earthquakes have led to the increasing adoption of bolted connections in steel structures. The prying action in beam-to-column bolted moment connections can lead to brittle failure of connections. Conventional design methods mitigate this prying effect by using stiffeners or thicker endplates to reduce its influence. This study presents a method for determining the appropriate plate thickness and bolt diameter in a T-shaped bolted connection component by accounting for the prying effect. Furthermore, the moment connection design method outlined in the AISC code is extended to develop a new approach for designing four-bolt end plate connections that explicitly considers the prying action. A bolted moment beam-to-column connection has been designed using both the AISC prequalified moment connection design methodology and the proposed design approach. The performance of both connections is evaluated and compared using IDeaStatiCa software. The equivalent plastic strain of the designed connections, both with and without the application of prying force, is within the allowable limit. Incorporating the prying effect results in increased bolt diameter and decreased thickness of the beam-to-column endplate. This effect reduces contact pressure at the interface between the endplate and the column by approximately 23.57%. Additionally, in the analyzed connections, bolt tension and shear forces increase by approximately 25% and 45%, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 August 2025

Revise Date: 01 October 2025

Accept Date: 27 October 2025

Keywords:

Four-Bolt End Plate Moment
Connections
Prying Force
Analytical Model
Plastic Strain
Design of End Plate Moment
Connection

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.539009.3790

*Corresponding author: Mahdi Gholipour Feizi

Email address: gholipour.m@iau.ac.ir

اعمال اثر نیروی اهرمی در طراحی اتصالات تیر به ستون گیردار فلنجی چهار پیچی

مهدی قلی پور فیضی^{۱*}، یوسف حسین زاده^۲، محمدرضا شیدایی^۳، سهیل علیپور ساجدی^۴

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد صوفیان، دانشگاه آزاد اسلامی، صوفیان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

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

۴- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

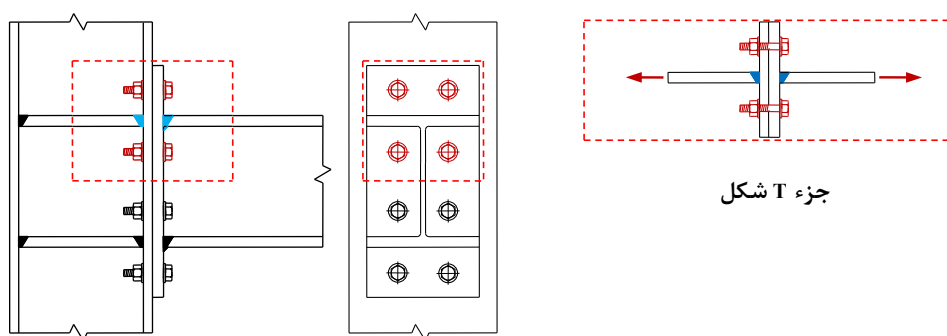
خرابی اتصالات گیردار جوشی و رفتار برتر اتصالات گیردار پیچی در زلزله‌های اخیر، موجب گسترش کاربرد اتصالات پیچی گردیده است. عملکرد اهرمی در اتصال پیچی تیر به ستون، با افزایش نیروی پیچ به مقداری بیشتر از مقاومت طرح آن، می‌تواند باعث خرابی ترد آن شود. در روشهای مرسوم طراحی، با استفاده از سخت کننده و یا صفحات با ضخامت زیاد، مقدار نیروی اهرمی کاهش داده شده و از اثر آن صرف نظر می‌شود. در این تحقیق روشی برای تعیین ضخامت ورق و قطر پیچ، در یک جزء T شکل اتصال پیچی با لحاظ کردن اثر نیروی اهرمی ارائه می‌شود. در ادامه با تعمیم شیوه طراحی اتصالات گیردار آئین‌نامه AISC، روشی جدید برای طراحی اتصال فلنجی چهار پیچی با لحاظ کردن نیروی اهرمی توسعه داده می‌شود. یک اتصال پیچی گیردار تیر به ستون، با استفاده از روش طراحی اتصالات از پیش‌تائید شده آئین‌نامه AISC و روش پیشنهادی طراحی گردیده و با استفاده از نرم افزار آیدیا استاتیکا طرح دو اتصال کنترل و با هم مقایسه می‌شود. کرنش پلاستیک معادل اتصالات طراحی شده با و بدون اعمال نیروی اهرمی، در حد مجاز می‌باشد. اعمال اثر اهرمی شدن، باعث افزایش قطر پیچ و کاهش ضخامت ورق اتصال تیر به ستون می‌شود. اعمال اثر اهرمی، باعث کاهش تنش تماسی در محل برخورد ورق انتهایی به ستون به اندازه ۲۳،۵۷ درصد می‌شود؛ همچنین در اتصالات مورد بررسی، باعث افزایش ۲۵ و ۴۵ درصد به ترتیب در نیروی کششی و برشی پیچ‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: اتصالات گیردار چهار پیچی فلنجی، نیروی اهرمی شدن، مدل تحلیلی، کرنش پلاستیک، طرح اتصال گیردار فلنجی

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|--|--------------------------------|--------------|---------------|------------|------------------------------------|------------|
| doi: | 10.22065/jsce.2025.539009.3790 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | 10.22065/jsce.2025.539009.3790 | ۱۴۰۵/۰۳/۳۱ | ۱۴۰۴/۰۸/۰۵ | ۱۴۰۴/۰۸/۰۵ | ۱۴۰۴/۰۷/۰۹ | ۱۴۰۴/۰۶/۰۱ |
| مهدی قلی پور فیضی gholipour.m@iau.ac.ir | | | | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | |

۱- مقدمه

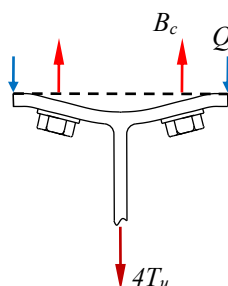
ناحیه کششی اتصالات گیردار تیر به ستون مطابق شکل ۱، به صورت قطعه T شکل با پیچ‌های بالا و پایین آن قابل شبیه‌سازی است. تحقیقات نشان داده است که این شبیه‌سازی سازگاری خوبی با نتایج آزمایشات دارد و در آیین‌نامه AISC و Eurocode3 پذیرفته شده است [۱]. سادگی در تعیین نیروی اهرمی و بسط مفاهیم بنیادی آن، از دلایل شبیه‌سازی قسمت کششی اتصالات پیچی با اجزای T شکل معادل می‌باشد.



جزء T شکل

شکل ۰: اتصال پیچی گیردار تائید صلاحیت شده با ورق انتهایی 4E یا BUEEP و جزء T شکل معادل قسمت کششی اتصال [۲].

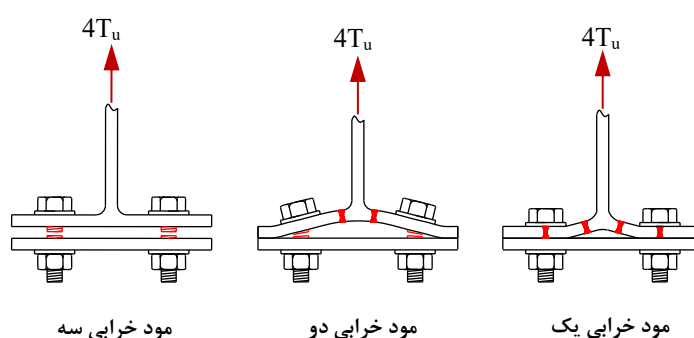
دیگرام جسم آزاد یک اتصال T شکل تحت کشش و پدیده اهرمی در شکل ۲ نشان داده شده است. با اعمال و افزایش نیروی خارجی، در صورت انعطاف پذیر بودن بال T و فراهم بودن امکان تغییرشکل خمشی، نیروی فشاری بین ورق‌های در تماس جزء T به دلیل اهرمی شدن ورق حول سر پیچ ایجاد می‌شود. بیشترین مقدار نیروی اهرمی Q ، زمانی ایجاد می‌شود که تنها لبه‌های بال، در تماس با سطح برخورد کننده باشد. در این لحظه، نیروی پیچ با B_c نشان داده می‌شود. با فرض اینکه اتصال از چهار پیچ تشکیل شده و بار $4T_u$ به صورت متقارن اعمال شود، سهم هر پیچ برابر T_u می‌باشد. در این لحظه نیروی پیچ B_c برابر $T_u + Q$ خواهد بود.



شکل ۲: حداکثر نیروی اهرمی و پدیده اهرمی [۳].

نتایج بررسی‌های تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد که اتصالات پیچی تحت اثر نیروی کششی در صورت چشم‌پوشی از پدیده اهرمی، مستعد خرابی در مقاومتی کمتر از مقاومت طرح خواهند بود. استفاده از ورق با ضخامت زیاد برای جلوگیری از ایجاد پدیده اهرمی و عدم نیاز به محاسبه نیروی اهرمی، به شکل‌پذیری کم و طرح لرزه‌ای نامناسب ختم می‌شود. بنابراین طراحی با استفاده از ورق‌های ضخیم توصیه نمی‌شود [۱]. در تعیین نیروهای کششی پیچ‌ها، لحاظ نمودن نیروی اهرمی بر اساس بخش J3.6 آیین‌نامه AISC [۴] ضرورت دارد. برای طرح اتصالات پیچی و محاسبه نیروی اهرمی، روشی در قسمت ۹ کتاب راهنمای ساخت سازه‌های فولادی AISC [۵] ارائه شده است.

در مدل تحلیلی اتصال پیچی با قطعات T شکل، احتمال ایجاد سه مد خرابی بر مبنای سختی و مقاومت نسبی ورق و پیچ مطابق شکل ۳ وجود دارد. در مود خرابی یک، ورق بال نسبتاً نازک و تغییرشکل ورق بیشتر از پیچ است. مفصل پلاستیک در بال T و در دو نقطه محل اتصال بال به جان و در خط پیچ شکل می‌گیرد. در این مد خرابی مکانیزم شکل‌پذیر اتفاق می‌افتد و خمش بال به شکل سهمی است. در حالتی که تغییرشکل ورق بال با تغییرشکل پیچ یکسان باشد، با ایجاد یک مفصل پلاستیک در ورق بال در محل اتصال بال به جان و گسیختگی کششی در پیچ‌ها، مود خرابی دو ایجاد می‌شود. در این مود خرابی، تغییرشکل خمشی پیچ قابل توجه بوده و بیشتر اتصالات پیچی در این محدوده عملکرد می‌باشند. در ورق بال به طور نسبی ضخیم، تغییرشکل خمشی بال کوچک بوده و پیچ‌ها دچار گسیختگی کششی خواهند شد. در این حالت مود خرابی سه حاکم بر طرح بوده، مکانیزم ترد و نیروی اهرمی ایجاد نمی‌شود. دو مود خرابی یک و دو، رفتار شکل‌پذیر اتصال را به همراه دارند [۶]. موده‌های هدف در طرح اتصال، به منظور داشتن طرح شکل‌پذیر، مود یک و دو می‌باشد.



شکل ۳: سه مد خرابی محتمل در اتصالات پیچی T شکل [۶].

اجزای T شکل اتصالات پیچی به دلیل وجود تماس و برخورد بین ورق‌ها، رفتار مکانیکی پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. برای تحلیل این رفتار، در نظر گرفتن ضخامت ورق، موقعیت پیچ و مقدار پیش‌تنیدگی آن، مشخصات مکانیکی پیچ و ورق و برخورد بین اجزا ضرورت دارد. گزارش مطالعات تجربی و تحلیلی برای تعیین مقاومت، سختی و رفتار نیرو-جابجایی، اتصالات پیچی T شکل مورد شده یا ساخته شده از ورق با ضخامت بال متغیر، در ادبیات فنی موجود است و مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی مقاومت نهایی و نیروی اهرمی در مراجع گزارش شده است. برای تعیین نیروهای اهرمی مدل‌های اجزای محدود جامع یا ساده شده، معادلات تحلیلی و معادلات تجربی مختلفی پیشنهاد شده است.

در کتاب راهنمای ساخت سازه‌های فولادی AISC [۵]، برای طرح اتصالات پیچی از معادلات طراحی با لحاظ نمودن پدیده اهرمی استفاده شده است؛ در این روش، با وجود متغیرها و معادلات بسیار، حالت حدی تعیین‌کننده به صورت واضح، مشخص نمی‌باشد. بر اساس این روش، کارلولینی [۷] روشی متفاوت برای اعمال اثر اهرمی پیشنهاد نموده است که به درک بهتری از پدیده اهرمی می‌انجامد. مدل الاستیک او تنها در حالت حدی نهایی معتبر بوده و حد پایین ظرفیت را مشخص می‌کند.

هانوتچ و همکاران [۸] با استفاده از بررسی‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود، دو مدل برای تعیین مقاومت و نیروی اهرمی در اتصالات پیچی قطعات T با بال ضخیم و اتصال جان به بال با جوش نفوذی کامل و گوشه پیشنهاد نمودند. مطالعه پارامتریک برای تعیین تاثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی اتصال انجام شد. محدوده مورد بررسی این پارامترها در محدوده ضوابط روش‌های طراحی مرسوم می‌باشد. برای تعیین ظرفیت قطعات T با بال ضخیم و جوش نفوذی کامل یا گوشه، دو مدل پیشنهاد شد. حالت حدی خرابی از نوع تسلیم جزئی بال توأم با خرابی پیچ است. بر اساس نتایج این مطالعه، روش طراحی اصلاح شده با لحاظ حالت حدی خرابی تسلیم جزئی بال مقطع T و خرابی پیچ، ارائه شد.

یانگ و همکاران [۹] پژوهشی با هدف پیشنهاد یک مدل تحلیلی بهبود یافته برای تعیین سختی اولیه و ظرفیت باربری نهایی اتصالات T شکل پیچی به منظور توصیف بهتر پدیده پیچیده اهرمی انجام دادند. به این منظور آزمایش کششی سه اتصال انجام و مدل اجزای محدود آن تهیه شد. در این مطالعه تنها حالتی که در آن بال نسبتاً نازک و فاصله پیچ‌ها از هم زیاد است بررسی شد. معمولاً در این حالت، خرابی به شکل مکانیزم نوع یک اتفاق می‌افتد.

خانی و همکاران [۱۰] از روش‌های انرژی و اجزای محدود برای تعیین موقعیت دقیق و مقدار نیروی اهرمی شدن استفاده نمودند. روش پیشنهادی آنها، هنوز برای ایجاد روش‌های ساده و قابل استفاده در طراحی مهندسی، توسعه نیافته است. خانی و همکاران [۱۱، ۱۲] در ادامه تحقیقات خود سختی بال ستون را لحاظ نموده و تاثیر سختی بال ستون را در ایجاد برش در پیچ‌های اتصال، بررسی نمودند.

مدل‌های تحلیلی موجود برای تعیین نیروی اهرمی در روش مرسوم طراحی بر اساس تحقیقات روی اتصالات پیچی با قطعات T شکل نورد شده ایجاد شده است. در اتصالات تیر به ستون پیچی گیردار با ورق انتهایی، قطعه T با جوش نفوذی ورق‌های فولادی مطابق شکل ۱ ایجاد می‌شود. علیپور ساجدی و همکاران [۱۳] مدل تحلیلی بهبود یافته برای تعیین ظرفیت باربری نهایی اتصالات T شکل پیچی ساخته شده از ورق فولادی با هدف توصیف بهتر پدیده اهرمی پیشنهاد نمودند. مدل تحلیلی پیشنهادی آنها درک بهتری از پدیده اهرمی ارائه می‌دهد. این مدل در حالت حدی نهایی معتبر بوده و حد پایین ظرفیت را مشخص می‌کند. در این مقاله از این مدل در تحلیل و طراحی اتصالات گیردار چهار پیچی بدون سخت‌کننده استفاده می‌شود.

طراحی اتصالات گیردار تیر به ستون چهار پیچی بدون سخت‌کننده BUEEP یا 4E بر اساس روش آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] انجام می‌گیرد. در این روش، بر اساس تئوری خطوط تسلیم، اثر نیروی اهرمی لحاظ نمی‌شود. نتیجه طرح ورق با ضخامت قابل توجه و اتصال پیچی با نیروی اهرمی قابل چشم‌پوشی می‌باشد. هانتوچ و همکاران [۱۵] به منظور تعیین مقدار نیروی اهرمی در اتصالات طرح شده به این شیوه، مدل اجزای محدود برای قطعه T شکل این نوع اتصالات ایجاد نمودند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که حداکثر نیروی اهرمی با توجه به ضخامت قابل توجه بال T، برابر ۳٪ نیروی وارد بر پیچ بوده و مکانیزم از نوع خرابی در پیچ می‌باشد. همچنین نشان داده شد که سهم بال متصل به ستون از تغییر شکل ایجاد شده در قطعه T، حداکثر ۲۰٪ است. بنابر این در طراحی معمول با استفاده از ورق‌های ضخیم، جهت جلوگیری از ایجاد نیروی اهرمی در پیچ، بال سهم قابل توجهی در تغییر شکل پلاستیک ندارد.

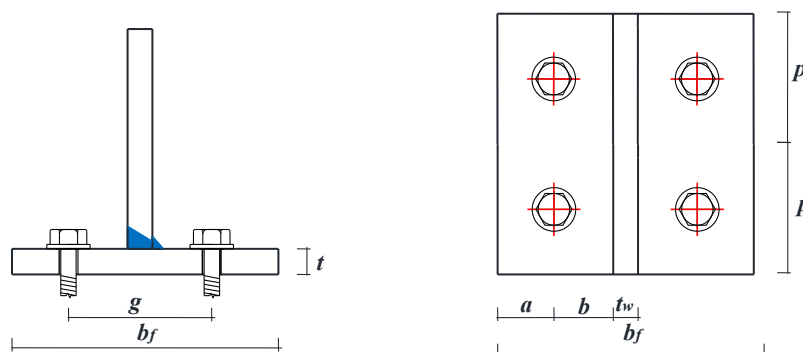
به منظور توسعه روشی برای طرح اتصال گیردار تیر به ستون فلنجی چهار پیچی با لحاظ نمودن اثر نیروی اهرمی، نخست در یک جزء T شکل، روشی برای تعیین ضخامت ورق و قطر پیچ با تعمیم نتایج پژوهش علیپور ساجدی و همکاران [۱۳] ارائه می‌شود. در ادامه با تعمیم شیوه طراحی اتصالات گیردار آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴]، روشی جدید برای تعیین ضخامت بال و قطر پیچ اتصال فلنجی چهار پیچی BUEEP با لحاظ کردن نیروی اهرمی شدن در فرآیند طرح اتصال ارائه می‌شود. دو اتصال پیچی گیردار تیر به ستون با و بدون لحاظ نیروی اهرمی، با استفاده از روش طراحی اتصالات از پیش‌تأیید شده آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] و روش پیشنهادی طراحی می‌شود. در خاتمه، با استفاده از نرم افزار آیدیا استاتیکا [۱۶] طرح دو اتصال کنترل و با هم مقایسه می‌شود.

۲- فرآیند طراحی پیشنهادی اتصال گیردار تیر به ستون با اعمال اثر اهرمی شدن

در این بخش، نخست با استفاده از مدل تحلیلی پیشنهادی علیپور ساجدی و همکاران [۱۳]، روش تعیین قطر پیچ و ضخامت ورق در جزء T شکل اتصالات پیچی توضیح داده می‌شود. از این روش در مثال حل شده پیوست ۱ برای تعیین ظرفیت یک جزء T شکل پیچی با ابعاد و هندسه معین استفاده شده است. در ادامه بخش، فرآیندی برای طراحی اتصال تیر به ستون گیردار فلنجی چهار پیچی BUEEP با اعمال اثر اهرمی شدن، پیشنهاد شده است. این فرآیند به همراه فرآیند طراحی آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] در طرح اتصال مثال پیوست ۲ به کار برده شده است. دو اتصال طراحی شده با اعمال اثر نیروی اهرمی در روش پیشنهادی و روش طرح آئین‌نامه، با استفاده از نرم‌افزار آیدیا استاتیکا [۱۶] شبیه‌سازی شده و توزیع تنش‌ها و کرنش‌های آنها تحت اثر لنگر و نیروی برشی مورد انتظار، مقایسه شده است.

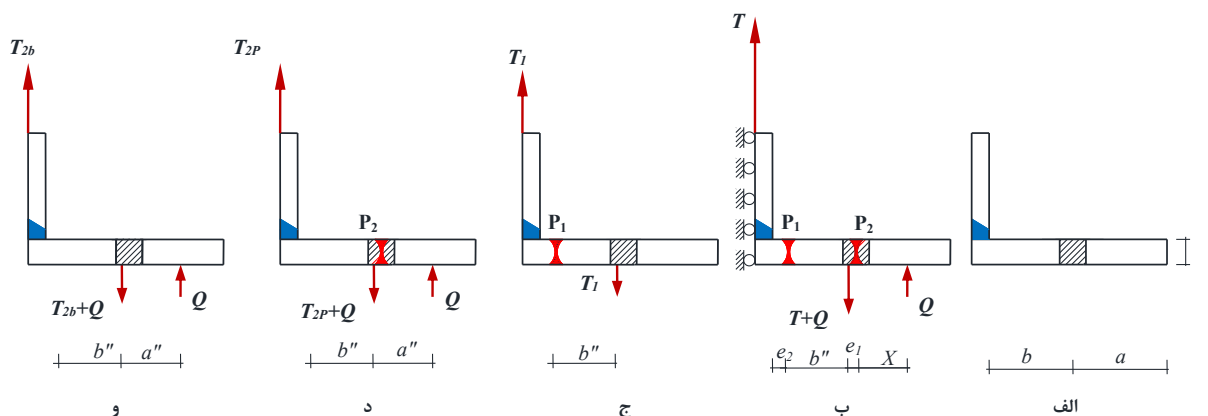
۱-۲- تعیین قطر پیچ و ضخامت ورق در جزء T شکل پیچی

پارامترهای هندسی و شکل کلی جزء T شکل اتصال پیچی در شکل ۴ نشان داده شده است. محدوده مجاز برای متغیرهای تعیین کننده ابعاد هندسی اتصال مورد بررسی، با توجه به مطالعه علیپور ساجدی و همکاران [۱۱]، با محدوده مجاز این کمیتها در آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] یکسان می باشد.



شکل ۴: پارامترها و شکل هندسی جزء T شکل پیچی [۱۳].

فرض آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] در طرح اتصال تیر به ستون، تمرکز ناحیه پلاستیک در تیر و ورق اتصال سمت تیر از یک طرف و سختی و مقاومت قابل توجه ورق پیوستگی، جان و بال ستون و در نتیجه عدم تسلیم آنها، از طرف دیگر می باشد؛ علیپور ساجدی و همکاران [۱۳] با حفظ مکانیزم خرابی مطلوب آئین نامه، روش طرح اتصال با در نظر گرفتن نیروی اهرمی را جایگزین روش خطوط تسلیم بدون لحاظ نیروی اهرمی نموده اند. در شکل ۵-الف، هندسه یک چهارم 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 ۵-ب نشان داده شده است. تقارن قطعه T با تکیه گاههای غلطکی شبیه سازی 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 می شود.



شکل ۵: مدل تحلیلی یک چهارم اتصال پیچی [۱۳].

مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال از روابط (۱) تا (۶) تعیین می‌شود.

$$d' = d_b + (2 \text{ or } 3) \quad (۱)$$

$$a \leq 1.25b \quad (۲)$$

$$\max(b) = 2 \times 1.75b \quad (۳)$$

$$a'' = e_1 + X \quad (۴)$$

$$b'' = b - e_1 - e_2 \quad (۵)$$

$$B' = 0.65 \times 0.75 (\pi d_b^2 / 4) F_{ub} \quad (۶)$$

d' قطر سوراخ استاندارد بوده و برای پیچ‌های به قطر ۲۴ میلیمتر یا کمتر، ۲/۰ میلیمتر و برای قطرهای بزرگتر، ۳/۰ میلیمتر بیشتر از قطر پیچ می‌باشد.

بر اساس روش پیشنهادی علیپور ساجدی و همکاران [۱۳]، مطابق شکل ۵، دو جزء نیروی ایجاد کننده مفصل پلاستیک P_1 یعنی T_1 و همچنین نیروی ایجاد کننده مفصل پلاستیک در خط پیچ P_2 یعنی T_{2p} ، از معادلات (۷) تا (۹) تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که T_{2b} با توجه به مود هدف گذاری شده خرابی، در این محاسبات تعیین کننده نمی‌باشد. بنابراین یک چهارم ظرفیت جزء T شکل یعنی T_u از رابطه (۱۰) محاسبه خواهد شد.

$$T_1 = \phi p t^2 F_u / 4b'' \quad (۷)$$

$$T_{2p} = \phi (p - d') t^2 F_u / (4b'') \quad (۸)$$

$$T_{2b} = (B' - T_1) / (1 + b'' / a'') \quad (۹)$$

$$T_u = T_1 + \min(T_{2b}, T_{2p}) = \phi F_u t^2 (p + (p - d')) (b'') \quad (۱۰)$$

F_u حد گسیختگی پیچ بوده و با استفاده از رابطه (۹) و با معلوم بودن نیروی وارد بر جزء T شکل، ضخامت ورق از معادله (۱۱) قابل تعیین است.

$$t = \sqrt{4T_u b'' / (\phi F_u (2p - d'))} \quad (۱۱)$$

بعد از تعیین ضخامت، مقدار نیروی اهرمی از معادله (۱۲) تعیین می‌شود.

$$q = T_{2p} b'' / a'' \quad (۱۲)$$

نتایج مطالعه پارامتریک علیپور ساجدی و همکاران [۱۳] نشان داد که موقعیت مفصل پلاستیک بال در الگوی خرابی قطعات T ساخته شده از ورق یعنی e_2 (شکل ۵-ب) برابر ۱۰ میلیمتر است. همچنین خروج از مرکزیت نیروی پیچ در الگوی خرابی یک قابل توجه و به طور میانگین برابر ۱.۵db می‌باشد. خروج از مرکزیت با کاهش مقدار g/t به شکل قابل توجه کاهش می‌یابد. برای g/t برابر ۱۱، حداکثر ۰.۳۹db و برای مقادیر کوچکتر به طور میانگین برابر ۰.۰۷db می‌باشد. در ادامه این پژوهش و برای الگوی خرابی دو، مقدار خروج از مرکزیت نیروی پیچ برابر ۰.۰۷db در نظر گرفته می‌شود. همچنین فاصله برآیند نیروی اهرمی از مرکز سوراخ یعنی X (شکل ۵-ب)، در لحظه خرابی و برای تمام نمونه‌ها تعیین شد. کمیت X تابع متغیر a/b بوده و از رابطه (۱۳) در الگوی خرابی دو تعیین شد.

$$X = 0.025 + 36.08a/b \quad R^2 = 0.8086 \quad p = 2.158 \times 10^{-6} \quad (۱۳)$$

بر اساس روابط و روش بالا، ظرفیت یک اتصال پیچی به عنوان نمونه تعیین و در پیوست این مقاله آمده است.

۲-۲- طراحی اتصال گیردار تیر به ستون پیچی با و بدون اعمال نیروی اهرمی

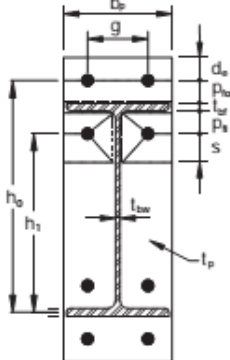
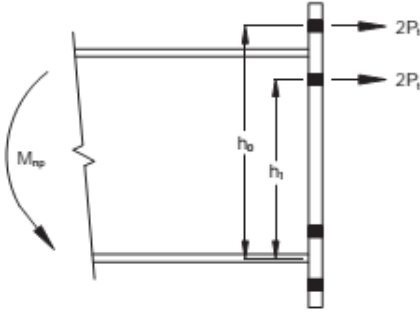
در این بخش فرآیند طراحی اتصالات گیردار پیچی با و بدون اعمال اثر اهرمی بیان می‌شود. در فرآیند طراحی اتصال گیردار AISC [۱۴]، از تئوری خطوط تسلیم استفاده شده و از اثر نیروی اهرمی چشم پوشی می‌شود. اتصال مورد بررسی در این مقاله، اتصال فلنجی چهار پیچی BUEEP می‌باشد. این اتصال در آئین‌نامه AISC [۱۴] با نماد 4E شناخته می‌شود. روشهای طراحی بر مبنای اصول مقاومت مصالح کلاسیک می‌باشد. فرآیند طراحی پیشنهادی در تمام گام‌ها مشابه روش آئین‌نامه بوده ولی اثر نیروی اهرمی در آن لحاظ شده است. لازم به ذکر است که محاسباتی مشابه برای بال ستون هم می‌توان انجام داد. در این پژوهش، فقط محاسبات سمت تیر انجام شده است.

در فرآیند طراحی پیشنهادی بدون استفاده از تئوری خطوط تسلیم، اتصال گیردار با اعمال اثر نیروی اهرمی طراحی می‌شود. در این حالت ضخامت ورق به گونه‌ای تعیین می‌شود که اتصال در مود اول یا دوم گسیخته شود. نیروی اهرمی ایجاد شده باعث افزایش قطر پیچ و کاهش ضخامت ورق نسبت به فرآیند طراحی آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] می‌شود. فرآیندهای طراحی آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] و پیشنهادی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: فرآیندهای طراحی آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] و پیشنهادی.

| فرآیند طراحی آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] | فرآیند طراحی پیشنهادی با لحاظ اثر نیروی اهرمی |
|--|--|
| گام ۱: لنگر مورد انتظار M_f در بر ستون تعیین می‌شود. در اتصال 4E، فاصله فاصله مرکز پلاستیک از وجه ستون حداقل دو مقدار $d/2$ یا $3b_{bf}$ می‌باشد. | گام ۱: لنگر مورد انتظار M_f در بر ستون تعیین می‌شود. در اتصال 4E، فاصله مرکز پلاستیک از وجه ستون حداقل دو مقدار $d/2$ یا $3b_{bf}$ می‌باشد. |
| گام ۲: انتخاب موقعیت پیچ و ابعاد ورق با در نظر گرفتن ملاحظات اجرایی. | گام ۲: انتخاب موقعیت پیچ و ابعاد ورق با در نظر گرفتن ملاحظات اجرایی. |
| گام ۳: قطر مورد نیاز پیچ از رابطه (۱۴) تعیین می‌شود. $d_{b,req} = \sqrt{\frac{2M_f}{\pi\phi_n F_{nt} (h_0 + h_1)}} \quad \phi_n = 0.9 \quad (14)$ مقادیر h_0 و h_1 مطابق شکل ۶ با استفاده از هندسه اتصال به دست می‌آید. F_{nt} تنش کششی اسمی پیچ می‌باشد. | گام ۳: نیروی ضریب‌دار بال تیر با استفاده از رابطه (۲۳) تعیین می‌شود. $F_{fu} = \frac{M_f}{d - t_{bf}} \quad (23)$ که در آن d عمق تیر و t_{bf} ضخامت بال تیر است. |
| گام ۴: انتخاب قطر d_b . | گام ۴: در گام چهارم فرآیند پیشنهادی طراحی اتصال گیردار، تعیین ضخامت ورق انتهایی و قطر پیچ در شش گام ذکر شده مدل علیپور ساجدی و همکاران [۱۳] که نحوه اعمال آن در پیوست ۱ ذکر شده است، انجام می‌شود. |
| گام ۵: ضخامت ورق انتهایی از رابطه (۱۵) تعیین می‌شود. در این معادله F_{yp} حد تسلیم ورق اتصال بوده و Y_p از شکل ۶ به دست می‌آید. $t_{p,req} = \sqrt{\frac{1.11M_f}{\phi_d F_{yp} Y_p}} \quad \phi_d = 1.0 \quad (15)$ | گام ۵: کنترل تسلیم برشی قسمت برجسته ورق انتهایی با استفاده از رابطه (۲۴) تعیین می‌شود: $F_{fu} / 2 \leq \phi_d (0.6) F_{yp} b_p t_p \quad (24)$ b_p عرض ورق انتهایی است که ۲۵ میلیمتر بیشتر از عرض بال تیر انتخاب می‌شود. در صورت عدم برقراری شرط (۲۴)، ضخامت یا حد تسلیم مصالح ورق افزایش داده می‌شود. |
| گام ۶: انتخاب ضخامت t_p ورق انتهایی. | گام ۶: کنترل گسیختگی برشی بخش برجسته ورق انتهایی با استفاده از رابطه (۲۵) تعیین می‌شود: $\frac{F_{fu}}{2} \leq \phi_n R_n = \phi_n (0.6) F_{up} A_n \quad (25)$ $A_n = t_p (b_p - 2(d_b + 3))$ در صورت عدم برقراری شرط (۲۵)، ضخامت یا حد تسلیم مصالح ورق افزایش داده می‌شود. |

| فرآیند طراحی پیشنهادی با لحاظ اثر نیروی اهرمی | فرآیند طراحی آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] |
|---|--|
| <p>گام ۷: مقاومت برشی گسیختگی پیچ‌های اتصال، با استفاده از ظرفیت پیچ‌های یک بال مطابق رابطه (۲۶) تامین می‌شود.</p> $V_u \leq \phi_n R_n = \phi_n (4) F_{nv} A_b \quad (26)$ <p>V_u مقاومت برشی مورد انتظار در انتهای تیر و F_{nv} مقاومت برشی اسمی پیچ است.</p> | <p>گام ۷: نیروی ضریب‌دار بال تیر از رابطه (۱۶) تعیین می‌شود.</p> $F_{fu} = \frac{M_f}{d - t_{bf}} \quad (16)$ <p>که در آن d عمق تیر و t_{bf} ضخامت بال تیر است.</p> |
| <p>گام ۸: کنترل مقاومت گسیختگی پارگی ورق انتهایی و بال ستون با استفاده از رابطه (۲۷) تعیین می‌شود. مقادیر ظرفیت لهیدگی جداره سوراخ و پیچ از روابط (۲۸) و (۲۹) به ترتیب برای پیچ‌های داخلی و خارجی به دست می‌آید.</p> $V_u \leq \phi_n R_n = \phi_n (2) r_{ni} + \phi_n (2) r_{no} \quad (27)$ $r_{ni} = 1.2 L_c t F_u < 2.4 d_b t F_u \quad (28)$ $r_{no} = 1.2 L_c t F_u < 2.4 d_b t F_u \quad (29)$ | <p>گام ۸: کنترل تسلیم برشی قسمت برجسته ورق انتهایی با استفاده از رابطه (۱۷):</p> $F_{fu} / 2 \leq \phi_u (0.6) F_{yp} b_p t_p \quad (17)$ <p>b_p عرض ورق انتهایی است که ۲۵ میلیمتر بیشتر از عرض بال تیر انتخاب می‌شود. در صورت عدم برقراری شرط (۱۷)، ضخامت یا حد تسلیم مصالح ورق افزایش داده می‌شود.</p> |
| <p>گام ۹: کنترل گسیختگی برشی بخش برجسته ورق انتهایی با استفاده از رابطه (۱۸):</p> $\frac{F_{fu}}{2} \leq \phi_n R_n = \phi_n (0.6) F_{up} A_n \quad (18)$ $A_n = t_p (b_p - 2(d_b + 3))$ <p>در صورت عدم برقراری شرط (۱۸)، ضخامت یا حد تسلیم مصالح ورق افزایش داده می‌شود.</p> | <p>گام ۹: مقاومت برشی گسیختگی پیچ‌های اتصال، با استفاده از ظرفیت پیچ‌های یک بال مطابق رابطه (۱۹) تامین می‌شود.</p> $V_u \leq \phi_n R_n = \phi_n (4) F_{nv} A_b \quad (19)$ <p>V_u مقاومت برشی مورد انتظار در انتهای تیر و F_{nv} مقاومت برشی اسمی پیچ است.</p> |
| <p>گام ۱۱: کنترل مقاومت گسیختگی پارگی ورق انتهایی و بال ستون با استفاده از رابطه (۲۰) تعیین می‌شود. مقادیر ظرفیت لهیدگی جداره سوراخ و پیچ از روابط (۲۱) و (۲۲) به ترتیب برای پیچ‌های داخلی و خارجی به دست می‌آید.</p> $V_u \leq \phi_n R_n = \phi_n (2) r_{ni} + \phi_n (2) r_{no} \quad (20)$ $r_{ni} = 1.2 L_c t F_u < 2.4 d_b t F_u \quad (21)$ $r_{no} = 1.2 L_c t F_u < 2.4 d_b t F_u \quad (22)$ | <p>گام ۱۰: مقاومت برشی گسیختگی پارگی ورق انتهایی و بال ستون با استفاده از رابطه (۲۰) تعیین می‌شود. مقادیر ظرفیت لهیدگی جداره سوراخ و پیچ از روابط (۲۱) و (۲۲) به ترتیب برای پیچ‌های داخلی و خارجی به دست می‌آید.</p> $V_u \leq \phi_n R_n = \phi_n (2) r_{ni} + \phi_n (2) r_{no} \quad (20)$ $r_{ni} = 1.2 L_c t F_u < 2.4 d_b t F_u \quad (21)$ $r_{no} = 1.2 L_c t F_u < 2.4 d_b t F_u \quad (22)$ |

| End-Plate Geometry and Yield Line Pattern | Bolt Force Model |
|---|---|
|  |  |
| End-Plate | $Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{p_H} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{p_{H0}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{2}{g} [h_1 (p_H + s)] \right]$ |
| | $s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \quad \text{Note: If } p_H > s, \text{ use } p_H = s.$ |

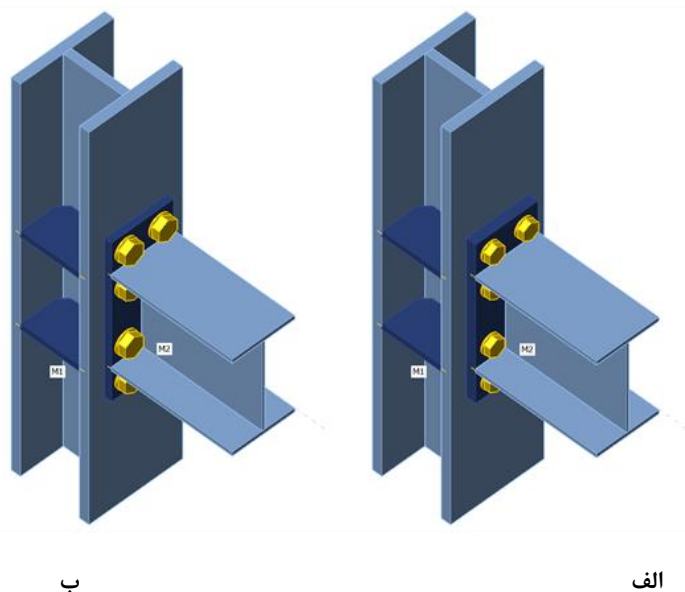
شکل ۶: اتصال پیچی 4E [۱۴].

طرح یک اتصال پیچی فلنجی بدون سخت کننده با استفاده از فرآیند آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] و فرآیند پیشنهادی در پ-۲ مقاله آمده است.

۳-۲- مقایسه دو اتصال گیردار تیر به ستون طراحی شده با فرآیند آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] و فرآیند پیشنهادی

فرآیند پیشنهادی طرح اتصالات گیردار تیر به ستون فلنجی چهار پیچی BUEEP با اعمال اثر پدیده اهرمی به همراه فرآیند طراحی آئین نامه در بخش ۲-۲ آورده شد. در پیوست دوم مقاله، این فرآیند در مورد نمونه SC3 مرجع [۲] اعمال شد. نیاز طراحی یعنی لنگر و برش مورد انتظار در بر ستون، با اتصالی با استفاده از قطر پیچ ۳۶ میلیمتر و ورق به ضخامت ۲۲ میلیمتر در حالت لحاظ کردن عملکرد اهرمی و پیچ به قطر ۳۰ میلیمتر و ورق به ضخامت ۳۰ میلیمتر، در روش معمول طراحی تامین می شود. به منظور بررسی توزیع تنش و کرنش، هر دو اتصال با استفاده از نرم افزار آیدیا استاتیکا [۱۶] شبیه سازی شد. ابعاد کلی ستون در اتصالات مورد بررسی با ابعاد کلی نشان داده شده در شکل پ-۲-۱ یکسان است. به منظور بررسی رفتار ورق اتصال و پیچ، ضخامت بال ستون برابر ۳۰ میلیمتر و ضخامت جان آن ۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. همچنین از ورق های پیوستگی به ضخامت ۲۰ میلیمتر استفاده شد. روش طراحی بر مبنای ظرفیت در نرم افزار آیدیا استاتیکا [۱۶] با انتخاب تیر به عنوان عضو استهلاکی، انتخاب شد. آئین نامه AISC-LRFD 360-22 [۴] به عنوان آئین نامه طرح انتخاب شد. مدل های اتصالات تیر به ستون طراحی شده با استفاده از فرآیند طراحی آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] و پیشنهادی در شکل ۷ نشان داده شده است.

اتصال پیچی پیش تنیده مدل سازی شده، برخورد بین سطوح از نوع اصطکاکی، وضعیت سطح تماس ورق انتهایی با بال ستون از نوع کلاس A با ضریب اصطکاک ۰/۳، میزان پیش تنیدگی پیچ ها 0.55FuAb و اضافه قطر سوراخ ۳/۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. اتصال از نوع کناری و با فرض وجود تکیه گاه مفصلی در دو سر ستون، با اعمال برش و لنگر مورد انتظار در محل مفصل پلاستیک تیر با فاصله ۲۷۵ میلیمتر از مرکز ستون تحلیل شده است. مدل اجزای اتصال و پیچ به صورت سه بعدی با حداقل و حداکثر بعد مش به ترتیب ۱۰ و ۵۰ میلیمتر انجام شده است.



شکل ۷: اتصالات تیر به ستون مورد بررسی.

الف- اتصال طراحی شده با اعمال اثر اهرمی شدن و روش پیشنهادی ب- اتصال طراحی شده بدون اعمال اثر اهرمی شدن [۱۴].

مقادیر حداکثر تنش معادل، کرنش پلاستیک و تنش تماسی بین ورق‌های اجزای کلیدی اتصال در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌شود اعمال اثر اهرمی شدن و در نتیجه کاهش ضخامت ورق و افزایش قطر پیچ، باعث کاهش تنش تماسی در محل برخورد ورق انتهایی به ستون از ۱۳۶/۲ به ۱۰۴/۱ و به اندازه ۲۳/۵۷ درصد شده است. سایر کمیت‌های کلیدی طرح اتصال، قابل قبول بودن اتصالات طرح شده را نشان می‌دهد. توجه شود که کرنش پلاستیک معادل هر دو اتصال کمتر از پنج درصد و قابل قبول می‌باشد. در حالت کلی اعمال اثر پدیده اهرمی در طراحی، همانطوری که در شکل ۶ دیده می‌شود، با گسترش ناحیه کرنشهای پلاستیک، تراز آن از ۲/۱۹ به ۲/۵۷ و به اندازه ۱۴/۷ درصد، افزایش می‌دهد. همچنین بارگذاری اتصال تیر به ستون در حد لنگر و برش مورد انتظار، همانطوری که از کنتورهای تنش معادل شکل ۷ دیده می‌شود، علاوه بر ایجاد مفصل پلاستیک در تیر، باعث گسترش ناحیه پلاستیک در ورق اتصال، در حالت اعمال اثر پدیده اهرمی می‌شود.

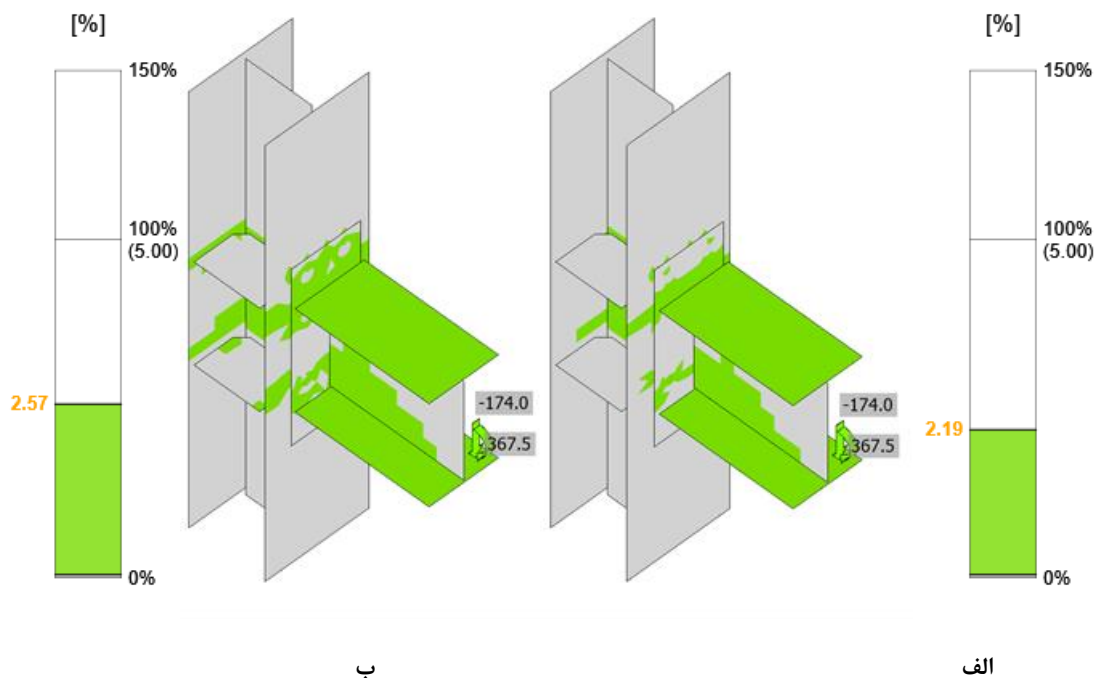
لحاظ نمودن اثر اهرمی در طرح اتصال همانطوری که از جدول ۲ و شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود، باعث کاهش جزئی در حداکثر تنش فون میزس ورق از ۳۳۰/۱ به ۳۲۸/۵ مگاپاسکال شده است. از طرف دیگر، کاهش قابل توجه ۲۳/۵۷ درصد در تنش تماسی بین ورق انتهایی و بال ستون به همراه ۵۷/۱۴ کاهش در کرنش پلاستیک، نشان دهنده افزایش حاشیه ایمنی ورق از حالت‌های محتمل خرابی است.

جدول ۲: تغییرات در مقادیر تنش، کرنش و تنش تماسی دو اتصال طرح شده با و بدون اعمال اثر نیروی اهرمی.

| اجزای اتصال | طرح با اعمال اثر اهرمی | | | طرح بدون اعمال اثر اهرمی | | | اختلاف % | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|---------------|-----------------|----------------|
| | σ_{Ed} MPa | ϵ_{PI} % | σ_{CEd} MPa | σ_{Ed} MPa | ϵ_{PI} % | σ_{CEd} MPa | σ_{Ed} | ϵ_{PI} | σ_{CEd} |
| بال ستون متصل به تیر | 327.9 | 0.3 | 103.7 | 328.2 | 0.5 | 95.5 | 0.09 | 40.00 | -8.59 |
| بال پائین تیر | 428.6 | 1.8 | 0.0 | 432.7 | 2.0 | 0.0 | 0.95 | 10.00 | - |
| بال بالای تیر | 435.3 | 2.2 | 0.0 | 441.4 | 2.6 | 0.0 | 1.38 | 15.38 | - |
| ورق انتهایی | 328.5 | 0.6 | 104.1 | 330.1 | 1.4 | 136.2 | 0.48 | 57.14 | 23.57 |

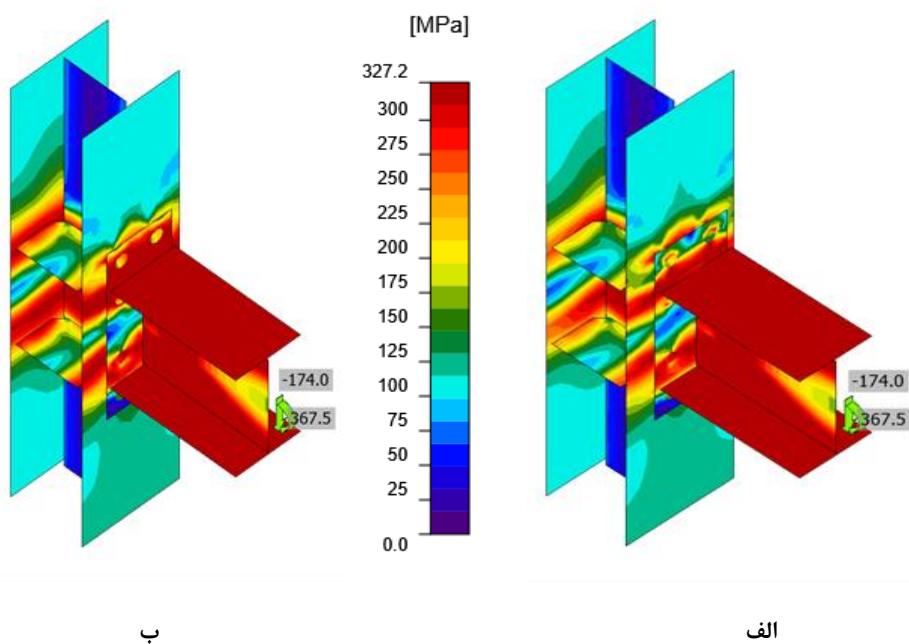
که در آن:

ϵ_{pl} کرنش پلاستیک
 $\sigma_{C_{Ed}}$ تنش تماسی بین ورق‌ها
 σ_{Ed} تنش معادل



شکل ۸: کرنش پلاستیک اتصالات تیر به ستون مورد بررسی.

الف- اتصال طراحی شده با اعمال اثر اهرمی شدن و روش پیشنهادی ب- اتصال طراحی شده بدون اعمال اثر اهرمی شدن [۱۴].

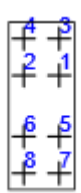


شکل ۹: تنش معادل اتصالات تیر به ستون مورد بررسی.

الف- اتصال طراحی شده با اعمال اثر اهرمی شدن و روش پیشنهادی ب- اتصال طراحی شده بدون اعمال اثر اهرمی شدن [۱۴].

در طرح اتصال با اعمال اثر پدیده اهرمی، نیروهای پیچها افزایش می‌یابد. جدول ۳ تغییرات ایجاد شده در نیروهای کششی و برشی پیچها را نشان می‌دهد. همانطوری که ملاحظه می‌شود اعمال اثر اهرمی در این اتصال خاص، باعث حدود ۲۵ درصد افزایش در نیروی کششی پیچها می‌شود. از طرف دیگر در این حالت در برخی پیچها، نیروی برشی تا ۴۵ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۳: تاثیر اعمال نیروی اهرمی بر نیروی کششی و برشی پیچها.

| شکل اتصال | پیچ | با لحاظ اهرمی | | بدون لحاظ اهرمی | | اختلاف | |
|---|-----|---------------|------|-----------------|------|--------|------|
| | | F_t | V | F_t | V | F_t | V |
| | | kN | kN | kN | kN | % | % |
|  | B1 | 516.4 | 47.7 | 372.8 | 26.2 | 27.8 | 45.1 |
| | B2 | 510.4 | 47.3 | 372.6 | 26.0 | 27.0 | 45.0 |
| | B3 | 494.5 | 87.9 | 373.3 | 71.8 | 24.5 | 18.3 |
| | B4 | 498.0 | 88.2 | 373.2 | 71.9 | 25.1 | 18.5 |
| | B5 | 0.0 | 20.2 | 0.0 | 14.0 | - | 30.7 |
| | B6 | 0.0 | 19.5 | 0.0 | 13.7 | - | 29.7 |
| | B7 | 0.0 | 66.7 | 0.0 | 56.4 | - | 15.4 |
| | B8 | 0.0 | 66.5 | 0.0 | 56.4 | - | 15.2 |

که در آن:

F_t نیروی کششی پیچ

V نیروی برشی پیچ

هزینه ساخت اتصال با استفاده از نرم‌افزار آیدیا استاتیکا [۱۶] در حالت بدون اعمال اثر اهرمی برابر ۳۵۰ دلار و با اعمال اثر اهرمی ۴۰۰ دلار و با اختلاف ۱۴/۲ درصد محاسبه شد. با وجود کاهش ضخامت ورق با اعمال اثر اهرمی، افزایش قطر پیچ و گران بودن قابل توجه هزینه واحد وزن پیچ نسبت به واحد وزن ورق، باعث افزایش هزینه ساخت اتصال در حالت اعمال اثر اهرمی گردیده است. لازم به ذکر است که در حالت عدم اعمال اثر اهرمی، ضخامت ورق افزایش یافته و در نتیجه، نیروی اهرمی کمتری تولید می‌شود. برای نتیجه‌گیری کلی درباره مزایا و معایب این دو روش، بررسی رفتار چرخه‌ای دو نوع اتصال طرح شده، ضرورت دارد.

۳- نتیجه گیری

فرآیندی برای طراحی اتصال تیر به ستون گیردار فلنجی چهار پیچی BUEEP با اعمال اثر اهرمی شدن، پیشنهاد شد. این فرآیند به همراه فرآیند طراحی آئین‌نامه AISC-358-22 [۱۴] برای طرح اتصال فلنجی چهار پیچی BUEEP به کار برده شد. دو اتصال طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار آیدیا استاتیکا [۱۶] شبیه‌سازی شده و توزیع تنش‌ها و کرنش‌های آنها تحت اثر لنگر و نیروی برشی مورد انتظار، مقایسه گردید. نتایج بررسی به شرح زیر می‌باشد.

۱- اعمال اثر اهرمی شدن باعث افزایش قطر پیچ و کاهش ضخامت ورق اتصال تیر به ستون می‌شود.

۲- در اتصال طراحی شده با اعمال اثر اهرمی، کاهش ضخامت ورق و افزایش قطر پیچ، باعث کاهش تنش تماسی در محل برخورد ورق انتهایی به ستون از ۱۳۶/۲ به ۱۰۴/۱ و به اندازه ۲۳/۵۷ درصد شده است.

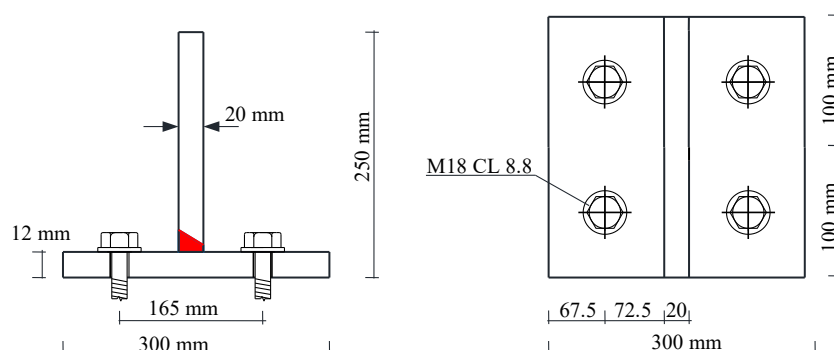
۳- کرنش پلاستیک معادل اتصالات طراحی شده با و بدون اعمال نیروی اهرمی، کمتر از پنج درصد و قابل قبول می‌باشد. سایر کمیت‌های کلیدی طرح اتصال، قابل قبول بودن اتصالات طرح شده در دو فرآیند را نشان می‌دهد.

۴- در طرح اتصال با اعمال اثر پدیده اهرمی، نیروهای پیچها افزایش می‌یابد. در اتصالات مورد بررسی، اعمال اثر اهرمی، باعث افزایش ۲۵ و ۴۵ درصد به ترتیب در نیروی کششی و برشی پیچها می‌شود.

۵- با وجود کاهش ضخامت ورق با اعمال اثر اهرمی، افزایش قطر پیچ و گران بودن قابل توجه هزینه واحد وزن پیچ نسبت به واحد وزن ورق، باعث افزایش هزینه ساخت اتصال در حالت اعمال اثر اهرمی گردیده است. لازم به ذکر است که در حالت عدم اعمال اثر اهرمی، ضخامت ورق افزایش یافته و در نتیجه، نیروی اهرمی کمتری تولید می‌شود. برای نتیجه‌گیری کلی درباره مزایا و معایب این دو روش، بررسی رفتار چرخه‌ای دو نوع اتصال طرح شده، ضرورت دارد.

پ-۱- مثال تعیین ظرفیت جزء T شکل اتصالات پیچی با مشخصات هندسی و مکانیکی معین

ظرفیت اتصال پیچی مطابق شکل پ-۱-۱ با استفاده از مدل علیپور ساجدی و همکاران [۱۳] تعیین می‌شود. مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح در جداول پ-۱-۱ و پ-۲-۱ آمده است.



شکل پ-۱-۱: ابعاد هندسی اتصال پیچی.

جدول پ-۱-۱: متغیرهای هندسی اتصال (mm).

| t_f | b_f | p | g | b | d_b | Bolt Grade |
|-------|-------|-----|-----|------|-------|------------|
| 12 | 300 | 100 | 165 | 72.5 | 18 | 8.8 |

جدول پ-۲-۱: مشخصات مکانیکی فولاد و پیچ مصرفی.

| نمونه | E | ϵ_y | F_y | ϵ_u | F_u |
|-------------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| | [GPa] | | [MPa] | | [MPa] |
| ورق به ضخامت ۱۲ میلیمتر | 209 | 0.0014 | 287 | 0.15 | 477 |
| پیچ به قطر ۱۸ میلیمتر | 224.5 | 0.0032 | 720 | 0.11 | 900 |

گام اول: مفصل پلاستیک P_1 در فاصله ۱۰ میلیمتری از جان T قرار دارد.

$$e_2 = 10 \text{ mm}$$

گام دوم: تعیین محل برآیند نیروی اهرمی X :

$$X = 0.025 + \frac{36.08a}{b} = 33.62 \text{ mm}$$

گام سوم: کاهش ظرفیت پیچ به دلیل خروج از مرکزیت و خمش پیچ و تعیین ظرفیت B' پیچ:

$$B' = 0.65 \times 0.75 (\pi d_b^2 / 4) F_{ub} = 111.65 \text{ kN}$$

گام چهارم: تعیین مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال:

$$d' = 20 \text{ mm}$$

$$a \leq 1.25b$$

$$\max(p) = 2 \times 1.75b$$

$$a'' = 0.5d_b + X = 42.62$$

$$b'' = b - e_1 - e_2 = 72.5 - 10 - 0.5 \times 18 = 53.5$$

$$B' = 111.65 \text{ kN}$$

گام پنجم: احتمال وقوع مد خرابی سوم در صورت مشخص بودن مقدار نیروی وارد بر اتصال کنترل می‌شود. در این مثال هدف تعیین نیرو است و نیازی به این گام وجود ندارد.

گام ششم: ظرفیت با در نظر گرفتن مود خرابی دو یا سه کنترل می‌شود. ظرفیت تامین شده بال بدون در نظر گرفتن پدیده اهرمی

T_1 :

$$T_1 = \phi p t^2 F_u / (4b'') = 28.9 \text{ kN}$$

اضافه ظرفیت تامین شده اتصال به واسطه نیروی اهرمی T_2 :

$$T_{2p} = \phi(p - d') t^2 F_u / (4b'') = 23.11 \text{ kN}$$

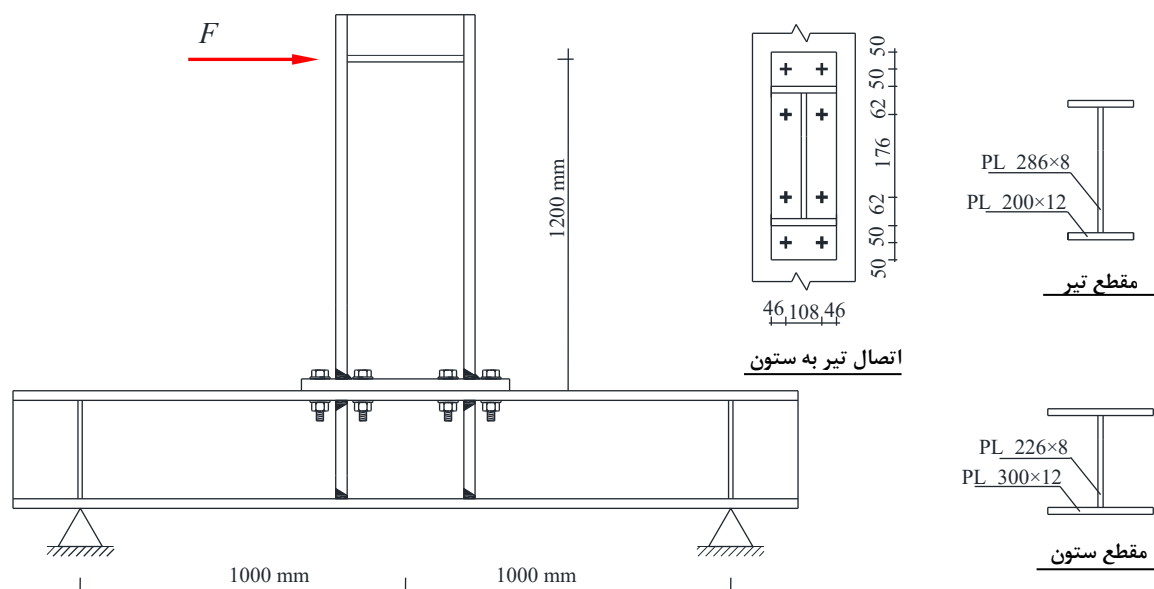
$$T_{2b} = (B' - T_1) / (1 + b'' / a'') = 36.69$$

$$T_u = T_1 + \min(T_{2b}, T_{2p}) = \left(\frac{208.04}{4} \right)$$

$$Q = (T_u - T_1) b'' / a'' = 29.01 \text{ kN}$$

پ-۲- مثال طراحی اتصال گیردار پیچی با و بدون لحاظ عملکرد اهرمی

در اتصال گیردار پیچی تیر به ستون 4E شکل پ-۲-۱ با شکل پذیری ویژه، ابعاد هندسی تیر، ستون و موقعیت پیچها، معلوم است و ضخامت ورق انتهایی و قطر پیچ تعیین می‌شود. گرید پیچها CL10.9 و مشخصات مصالح مطابق جدول پ-۲-۱ می‌باشد. ابعاد تیر و ستون و مشخصات مصالح، مربوط به نمونه SC3 مرجع [۲] می‌باشد.



شکل پ-۲-۱: اتصال پیچی مثال پ-۲.

جدول پ-۲-۱: مشخصات مصالح اتصال گیردار پیچی.

| E | ϵ_y | F_y | ϵ_u | F_u |
|---------|--------------|-------|--------------|-------|
| [GPa] | | [MPa] | | [MPa] |
| 204.227 | 0.0018535 | 363.6 | 0.17357 | 536.6 |

طراحی اتصال:

مدول پلاستیک تیر $Z_p = 706453 \text{ mm}^3$

لنگر پلاستیک مقطع $R_y = 1.15$

مرکز مفصل پلاستیک $M_p = Z_p F_y = 706453 \times 363.6 = 319.52 \times 10^6 \text{ N.mm}$

$\min(0.5d, 3b_{bf}) = 150 \text{ mm}$

در شکل پ-۲-۲، وضعیت تیر و موقعیت مفاصل پلاستیک آن نشان داده شده است.

لنگر ایجاد شده در محل مفصل پلاستیک $M_{pr} = 1.2R_y M_p$

برش در محل مفصل پلاستیک $V_{pr} = \frac{2M_{pr}}{2100} = 210 \text{ kN}$

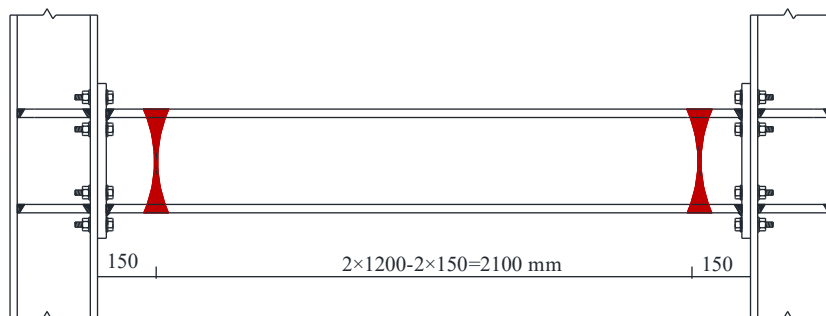
لنگر مورد انتظار در بر ستون $M_f = M_{EXP} = 472 \text{ kN.m}$

برش مورد انتظار در بر ستون $V_{EXP} = 210 \text{ kN}$

بار ضریب دار بال کششی تیر $F_{fu} = \frac{M_f}{d - t_{bf}} = 1640 \text{ kN}$

نیروی کششی وارد بر یک پیچ $T_u = \frac{1640}{4} = 410 \text{ kN}$

ادامه طرح گام به گام اتصال برای دو روش آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] و پیشنهادی در جدول پ-۲-۲ آمده است.



شکل پ-۲-۲: موقعیت ایجاد مفاصل پلاستیک.

جدول پ-۲-۲: طراحی اتصال گیردار مثال تیر به ستون پیوست ۲.

| فرآیند طراحی آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] | فرآیند طراحی پیشنهادی با لحاظ اثر نیروی اهرمی |
|---|---|
| گام ۱: لنگر و برش مورد انتظار در بر ستون | گام ۱: لنگر و برش مورد انتظار در بر ستون |
| $M_f = 472 \text{ kN.m}$ $V_{EXP} = 210 \text{ kN}$ | $M_f = 472 \text{ kN.m}$ $V_{EXP} = 210 \text{ kN}$ |
| فاصله مرکز پلاستیک از وجه ستون: | فاصله مرکز پلاستیک از وجه ستون: |
| $\min\left(\frac{310}{2}, 3 \times 200\right) = 155 \text{ mm}$ | $\min\left(\frac{310}{2}, 3 \times 200\right) = 155 \text{ mm}$ |

| فرآیند طراحی پیشنهادی با لحاظ اثر نیروی اهرمی | فرآیند طراحی آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] |
|--|---|
| <p>گام ۲: انتخاب موقعیت پیچ و ابعاد ورق</p> $h_0 = 354 \text{ mm}$ $h_1 = 242 \text{ mm}$ | <p>گام ۲: انتخاب موقعیت پیچ و ابعاد ورق</p> $h_0 = 354 \text{ mm}$ $h_1 = 242 \text{ mm}$ |
| <p>گام ۳: تعیین نیروی ضریب‌دار بال تیر</p> $F_{fu} = \frac{M_f}{d - t_{bf}} = 1640 \text{ kN}$ | <p>گام ۳: قطر مورد نیاز پیچ</p> $d_{b, req} = 27.33 \text{ mm}$ |
| <p>گام ۴: در گام چهارم فرآیند پیشنهادی طراحی اتصال گیردار، تعیین ضخامت ورق انتهایی و قطر پیچ در شش گام ذکر شده مدل علیپور ساجدی و همکاران [۱۳] که نحوه اعمال آن در پیوست ۱ ذکر شده است، انجام می‌شود.</p> <p>گام ۴-۱ (گام اول مدل تحلیلی)</p> | <p>گام ۴: انتخاب قطر</p> $d_b = 30 \text{ mm}$ |
| <p>گام ۴-۲ (گام دوم مدل تحلیلی)</p> $X = 0.025 + \frac{36.08a}{b} = 0.025 + \frac{36.08 \times 50}{50} = 36.11 \text{ mm}$ | <p>گام ۵: تعیین ضخامت ورق انتهایی</p> $S = 73.48$ $Y_p = 2024.71$ $t_{p, req} = 26.67 \text{ mm}$ |
| <p>گام ۴-۳ (گام سوم مدل تحلیلی)</p> $B' = 0.65 \times 0.75 (\pi d_b^2 / 4) F_{ub} = 496 \text{ kN}$ | <p>گام ۶: انتخاب ضخامت ورق انتهایی</p> $t_p = 30 \text{ mm}$ |
| <p>گام ۴-۴ (گام چهارم مدل تحلیلی)</p> <p>تعیین مشخصات هندسی و مکانیکی اتصال:</p> $d' = 36 + 3 = 39 \text{ mm}$ $a \leq 1.25b$ $\max(p) = 2 \times 1.75b$ $a'' = 0.5d_b + X = 0.5 \times 36 + 36.11 = 54.11 \text{ mm}$ $b'' = b - e_1 - e_2 = 50 - 10 - 0.5 \times 36 = 22$ $B' = 496 \text{ kN}$ | <p>گام ۷: نیروی ضریب‌دار بال تیر</p> $F_{fu} = 1640.4 \text{ kN}$ |
| <p>گام ۴-۵ (گام پنجم مدل تحلیلی): نیازی وجود ندارد.</p> <p>گام ۴-۶ (گام ششم مدل تحلیلی)</p> $T_1 = \frac{0.9 \times 100 \times 22^2 \times 536.6}{4 \times 22} = 265.6 \text{ kN}$ $T_{2p} = \frac{0.9 \times (100 - 38) \times 22^2 \times 536.6}{4 \times 22} = 164.68 \text{ kN}$ $T_{2b} = \frac{496 - 265.6}{1 + \frac{22}{54.11}} = 163.80 \text{ kN}$ $T_u = T_1 + \min(T_{2b}, T_{2p}) = 265.6 + 163.8 = 429.4 \text{ kN}$ <p>مقدار نیروی اهرمی پیچ:</p> $Q = (T_u - T_1) b'' / a'' = 163.8 \times \frac{22}{54.11} = 66.59 \text{ kN}$ <p>ظرفیت سهم این پیچ اتصال 429.4 kN بوده و بیشتر از بار ضریب‌دار سهم این پیچ یعنی 390.77 kN می‌باشد. در این حالت حداکثر نیروی ایجاد شده در پیچ، کمتر از ظرفیت پیچ است.</p> $B = T_u + Q = 429.4 + 66.59 = 496 \text{ kN} = B'$ | |

| فرآیند طراحی آئین نامه AISC-358-22 [۱۴] | فرآیند طراحی پیشنهادی با لحاظ اثر نیروی اهرمی |
|--|---|
| <p>گام ۸: کنترل تسلیم برشی قسمت برجسته ورق انتهایی</p> $\frac{1640.4}{2} \leq 1 \cdot 0.6 \cdot 363.6 \cdot 200 \cdot 30$ $820.2 \leq 1308.9 \text{ kN} \quad \checkmark$ | <p>گام ۵: کنترل تسلیم برشی قسمت برجسته ورق انتهایی</p> $F_{fu} / 2 \leq \phi_d (0.6) F_{yp} b_p t_p$ $\frac{1640.4}{2} \leq 1.0 \cdot 0.6 \cdot 363.6 \cdot 200 \cdot 22$ $820.2 \leq 960 \text{ kN} \quad \checkmark$ <p>بنابر این اتصال با ورق به ضخامت ۲۲ میلیمتر و پیچ به قطر ۳۶ میلیمتر جوابگوی نیاز طراحی در این حالت می باشد.</p> |
| <p>گام ۹: کنترل گسیختگی برشی بخش برجسته ورق انتهایی</p> $A_n = 4020 \text{ mm}^2$ $\frac{1640.2}{2} \leq 0.9 \cdot 0.6 \cdot 536.6 \cdot 4040$ $820.2 \leq 1164.8 \text{ kN} \quad \checkmark$ | <p>گام ۶: کنترل گسیختگی برشی بخش برجسته ورق انتهایی</p> $A_n = t_p (b_p - 2(d_b + 3))$ $A_n = 22(200 - 2(36 + 3)) = 2684 \text{ mm}^2$ $820 \leq 0.9 \cdot 0.6 \cdot 536.6 \cdot 2684 = 777.7 \text{ kN} \quad \checkmark$ <p>با اختلاف ۵ درصد خطا پذیرفته می شود.</p> |
| <p>گام ۱۰: مقاومت برشی گسیختگی پیچ های اتصال، با استفاده از ظرفیت پیچ های یک بال</p> $210 \leq 0.9 \cdot 4 \cdot 45 \cdot 1 \cdot 706.8$ $210 \leq 1145 \text{ kN} \quad \checkmark$ | <p>گام ۷: مقاومت برشی گسیختگی پیچ های اتصال، با استفاده از ظرفیت پیچ های یک بال</p> $209976 \leq 0.9 \cdot 4 \cdot 1000 \cdot 1017.8 = 3664080 \text{ N}$ $209.976 \leq 3664.08 \text{ kN} \quad \checkmark$ |
| <p>گام ۱۱: کنترل مقاومت گسیختگی پارگی ورق انتهایی و بال ستون. مقادیر ظرفیت لهدگی جداره سوراخ و پیچ های داخلی و خارجی</p> $210 \leq 0.9 \cdot 2(1159 + 647)$ $210 \leq 3250 \text{ kN} \quad \checkmark$ $r_{ni} = 1.2 \cdot 79 \cdot 30 \cdot 536.6 < 2.4 \cdot 30 \cdot 30 \cdot 536.6$ $r_{ni} = 1159056 \text{ N}$ $r_{no} = 1.2 \cdot 33.5 \cdot 30 \cdot 536.6 < 2.4 \cdot 30 \cdot 30 \cdot 536.6$ $r_{no} = 647139 \text{ N}$ | <p>گام ۸: کنترل مقاومت گسیختگی پارگی ورق انتهایی و بال ستون. مقادیر ظرفیت لهدگی جداره سوراخ و پیچ های داخلی و خارجی</p> $210 \leq 0.9 \cdot 2(1020 + 432)$ $210 \leq 2613 \text{ kN} \quad \checkmark$ $r_{ni} = 1.2 \cdot 73 \cdot 22 \cdot 536.6 < 2.4 \cdot 36 \cdot 22 \cdot 536.6$ $r_{ni} = 1019969 \text{ N}$ $r_{no} = 1.2 \cdot 30.5 \cdot 22 \cdot 536.6 < 2.4 \cdot 36 \cdot 22 \cdot 536.6$ $r_{no} = 432070 \text{ N}$ |
| <p>بنابر این بدون لحاظ نمودن عملکرد اهرمی پیچ های به قطر ۳۰ میلیمتر و ورق به ضخامت ۳۰ میلیمتر، پاسخگوی نیاز طراحی یعنی لنگر و برش مورد انتظار در بر ستون می باشد.</p> | <p>بنابر این با لحاظ نمودن عملکرد اهرمی پیچ های به قطر ۳۶ میلیمتر و ورق به ضخامت ۲۲ میلیمتر، پاسخگوی نیاز طراحی یعنی لنگر و برش مورد انتظار در بر ستون می باشد.</p> |

مراجع

- [1] Bai, R., Chan, S.-L., & Hao, J.-P. (2015). Improved design of extended end-plate connection allowing for prying effects. *Journal of Constructional Steel Research*, 113, 13-27.
- [2] Gödrich, L., Wald, F., Kabeláč, J., & Kuřiková, M. (2019). Design finite element model of a bolted T-stub connection component. *Journal of constructional steel research*, 157, 198-206.
- [3] Segui, W. T. (2012). *Steel design*. Fifth ed. United States of America: Cengage Learning. 752.
- [4] ANSI/AISC-360-22. (2022). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- [5] AISC. (15th Ed. 2017). *Steel Construction Manual*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- [6] Huang, F., Zhang, D., Hong, W., & Li, B. (2017). Mechanism and calculation theory of prying force for flexible flange connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, 97-107.
- [7] Carlo Lini, P. (2016). *A Slightly Longer Look at Prying*. Retrieved from: https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/archives/2016/07/a-slightly-longer-look-at-prying_july-2016.pdf

- [8] Hantouche, E. G., Kukreti, A. R., Rassati, G. A., & Swanson, J. A. (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), 04014102.
- [9] Yang, J.-G., Kim, H.-K., Park, J.-H., & Back, M.-C. (2013). Analytical models for the initial axial tensile stiffness and ultimate tensile load of a T-stub, including the effects of prying action. *International Journal of Steel Structures*, 13(2), 341-352.
- [10] Khani, R., Hosseinzadeh, Y., & Asl, M. H. (2023b). Investigating the prying force magnitude and location in the T-stub connection based on the energy method. *Engineering structures*, 280, 115655.
- [11] Khani, R., Hosseinzadeh, Y., & Asl, M. H. (2023a). Improving the T-stub component behavior tied to a rigid base. *Journal of Constructional Steel Research*, 211, 108199.
- [12] Khani, R., Hosseinzadeh, Y., D'Aniello, M., & Asl, M. H. (2024). Nonlinear response of coupled and tied-to-rigid base T-stub connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 215, 108550.
- [13] Alipour Sajedi, S., Sheidaii, M. R., & Hosseinzadeh, Y. (2022). Analytical Model for Applying the Effect of Prying Force in the Design of Bolted Connections. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(5), 39-57.
- [14] ANSI/AISC-358-22. (2022). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, including Supplement No. 1*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- [15] Hantouche, E. G., Rassati, G. A., Kukreti, A. R., & Swanson, J. A. (2012). Built-up T-stub connections for moment resisting frames: Experimental and finite element investigation for prequalification. *Engineering structures*, 43, 139-148.
- [16] IDeaStatiCa. (2025). *Connection design*. IDEA StatiCa.