

# تأثیر نیروهای اهرمی شدن در روند طراحی اتصالات نیمه‌گیردار پیچی

یوسف حسین‌زاده (استادیار)

محمد رضا فرج‌پور (کارشناس ارشد)

محمد علی لطف‌اللهی یقین\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران: شریف  
دوری ۲-۲۸۸، شماره‌ی ۴، ص. ۱۳-۳

در این نوشتار، با اصلاح روش تحلیل و طراحی اتصالات پیچی نیمه‌گیردار با ورق انتهایی، روشی دقیق برای طراحی این نوع اتصالات با فلسفه‌ی طراحی مقاومت مجاز (ASD) ارائه شده است. مدل‌های اجزای محدود اتصالات پیچی با ورق انتهایی در هندسه‌های مختلف ایجاد، دقت آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی، و به اثر اهرمی شدن ورق اتصال در این مدل‌ها توجه شده است. برای محاسبه‌ی سختی، تغییرشکل ورق اتصال و نحوه‌ی توزیع فشار تماسی بین صفحه‌ی حاصل از پدیده‌ی اهرمی شدن، از مدل‌های گسیختگی اتصال T در ترازهای مختلف ورق استفاده شده است و با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک اتصالات مفصلی، نیمه‌گیردار، T، روشی بهینه برای محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن ارائه و سپس روشی بهبودیافته برای طراحی اتصالات نیمه‌گیردار با در نظر گرفتن آثار نیروهای اهرمی شدن پیشنهاد شده است. ارزیابی دقت روش پیشنهادی در مقایسه با رفتار واقعی اتصال و روش‌های متداول طراحی، کارایی و دقت مناسب این روش را برای طراحی اتصالات پیچی نیمه‌گیردار ارائه شده نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: اتصال نیمه‌گیردار پیچی با ورق انتهایی، مدل اجزای محدود، پدیده‌ی اهرمی شدن، روش‌های تحلیل و طراحی اتصالات، مدل‌های گسیختگی، مکانیزم شکست.

hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir  
mr.farajpour@yahoo.com  
lotfollahi@tabrizu.ac.ir

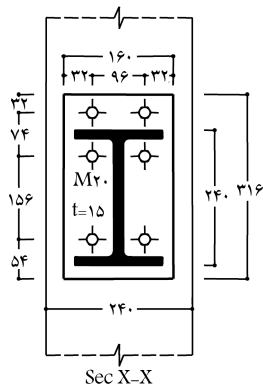
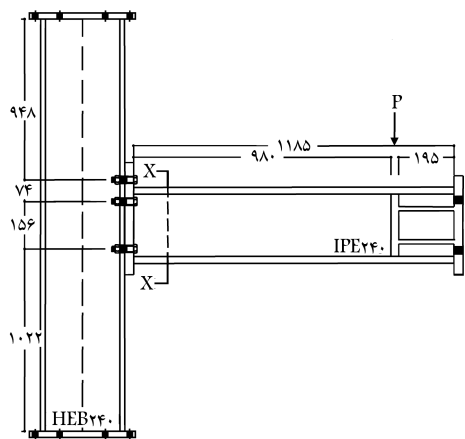
## مقدمه

آن‌ها انجام نشده بود. از آن پس به دلیل وجود امکان ساخت کارخانه‌ی اتصالات پیچی، کنترل کیفی مناسب، ایمنی بالا، و هزینه‌ی کم اجرا، این نوع اتصالات مورد توجه روزافزون طراحان قرار گرفته است. البته توجه به این نکته ضروری است که در برخی اجزای اتصالات پیچی ناگزیر از جوش نیز استفاده می‌شود. در صورت ساخت صنعتی اتصالات پیچی و کنترل کیفی مناسب محل‌های جوش کاری شده، می‌توان ایمنی این اتصالات را تضمین کرد. سرپرست گروه تحقیقاتی انستیتوی (AISC)<sup>[۱]</sup> و انجمن مجریان ساختمان‌های فولادی (MBMA)<sup>[۲]</sup>، اولین مطالعات را در زمینه‌ی رفتار و طراحی اتصالات پیچی انجام داده‌اند.<sup>[۵]</sup> این کار تحقیقاتی در دو زمینه‌ی نظری و تجربی پیش رفت و حاصل آن ده‌ها گزارش، مقاله، و پایان‌نامه بود، و نتایج آن در آیین‌نامه‌ی AISC (۱۹۸۰) به‌عنوان ضوابط طراحی اتصالات پیچی وارد شده است. با افزایش توانایی رایانه‌ها، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، مدل دو بعدی تنش سطح اتصالات پیچی و سپس مدل سه‌بعدی آن‌ها ایجاد شد؛<sup>[۶]</sup> و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، اتصالات تیر به ستون برای یافتن فرمول‌های طراحی آن‌ها مدل شد.<sup>[۷]</sup> در سال ۲۰۰۶، در دانشگاه سالکوتکیای لیتوانی محققان مطالعاتی در زمینه‌ی اتصالات پیچی انجام دادند.<sup>[۸]</sup> اساس تحقیقات آن‌ها بر پایه‌ی مدل مؤلفه‌ی

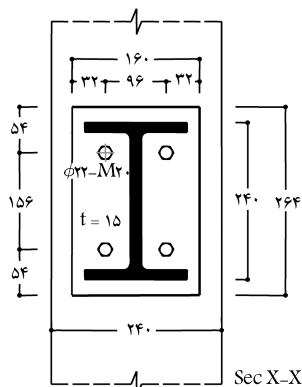
اتصالات خوب طراحی شده می‌توانند با مشارکت در رفتار غیرخطی سازه، رفتار لرزه‌ی آن را بهبود بخشند. محل اتصال تیر به ستون، مستعدترین نقطه برای تشکیل مفصل خمیری است. ظرفیت دورانی مناسب اتصالات پیچی این امکان را به آن‌ها می‌دهد که به جای ایجاد ترک، با تغییرشکل غیرکشسانی و جذب انرژی، از تغییر مکان جانبی بیشتر قاب جلوگیری کنند و نیاز به شکل‌پذیری در تیرها و ستون‌ها را کاهش دهند.<sup>[۳-۱]</sup> این موضوع لزوم وجود یک روش تحلیل و طراحی دقیق اتصالات را نشان می‌دهد. قبل از زلزله‌ی سال ۱۹۹۴ نورتریج، چنین تصور می‌شد که قاب با اتصالات جوشی، بهترین سیستم برای تحمل بارهای ثقلی و جانبی است.<sup>[۴]</sup> چنین انتظار می‌رفت که خرابی این قاب‌ها به تسلیم و کماتش موضعی در تیرها و ستون‌ها و همچنین به جابجایی نسبی کوچک ماندگار بین طبقات محدود شود. زلزله‌ی نورتریج باعث ایجاد خرابی در ناحیه‌ی جوش اتصالات و ایجاد ترک در ناحیه‌ی فولاد حرارت‌دیده‌ی اعضای اتصالاتی شد که در حین ساخت، کنترل کیفی مناسبی روی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۴/۱۴، اصلاحیه ۱۳۸۹/۸/۱۸، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۱۱.



شکل ۳. مشخصات هندسی اتصال نیمه‌گیردار گونیا (نمونه‌ی EE).

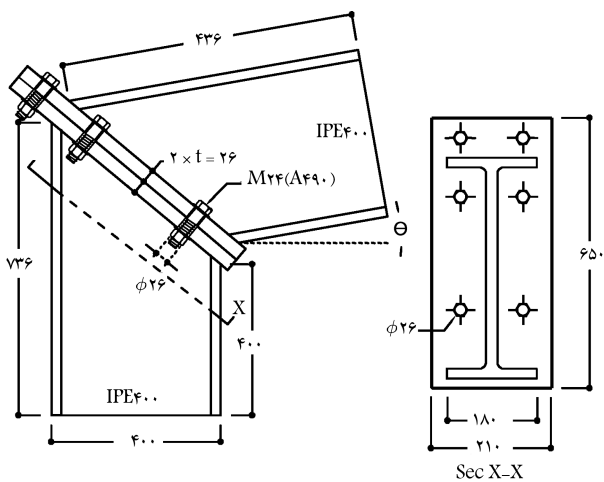


شکل ۴. مدل اتصال مفصلی (FE).

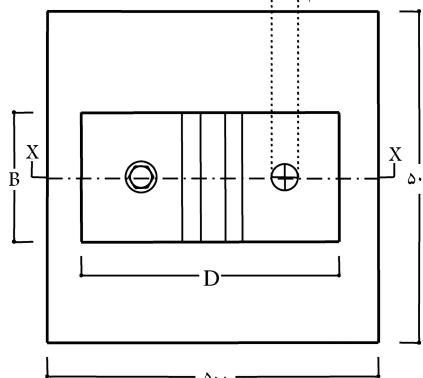
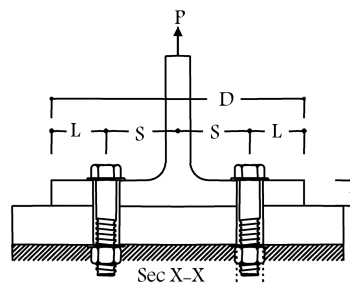
آئین‌نامه‌ی اروپا بود و آن‌ها صحت مدل‌سازی خود را براساس نتایج تجربی داسیلوا از دانشگاه پراگ ارزیابی کردند.<sup>[۹]</sup> در این نوشتار نیز از مدل‌های ارائه‌شده در این بانک اطلاعات آزمایشگاهی بدون تغییر در جزئیات و نحوه‌ی بارگذاری استفاده شده است. شکل‌های ۱ الی ۴ جزئیات این اتصالات را نشان می‌دهند.

با توجه به اینکه روش‌های طراحی اتصالات پیچی بر مبنای مدل دو بعدی تنش مسطح کرنش‌مورتنی استوار است، پیشرفت‌های اخیر در نرم‌افزارهای اجزای محدود و ابزارهای اندازه‌گیری دقیق این امکان را فراهم کرده است که با ارائه‌ی درک درستی از نحوه‌ی توزیع تنش، کرنش، و رفتار اتصال، بهبود روش‌های تحلیل و طراحی ممکن باشد.

در این نوشتار، رفتار اتصالات نیمه‌گیردار پیچی با ورق انتهایی در دو حالت گونیا و زانویی بررسی شده است.<sup>[۱۰]</sup> مدل‌های اجزای محدود اتصالات ایجادشده براساس طبقه‌بندی آئین‌نامه‌ی اروپا (EC 3)، به صورت مفصل و نیمه‌گیردار با درجه‌ی



شکل ۱. مدل اتصال نیمه‌گیردار زانویی (نمونه‌ی AA ۱۰° و AA ۲۰°).



شکل ۲. مدل اتصال T.

گیرداری بالا در نظر گرفته شده است. براساس آئین‌نامه‌ی اروپا، اتصالات با ۲ ردیف پیچ و ورق اتصال نرم به صورت مفصلی عمل می‌کنند و اتصالات با ۳ ردیف پیچ که ۲ ردیف آن در ناحیه‌ی کششی قرار دارد با ضخامت ورق مشخص دارای رفتار نیمه‌گیردار با درجه‌ی گیرداری زیاد است که می‌توان آن را عملاً گیردار در نظر گرفت. همچنین این دو مدل اتصال پیچی به صورت مفصل و گیردار کامل در نظر گرفته شده است.<sup>[۹]</sup> بعد از ایجاد مدل اجزای محدود اتصالات، دقت مدل رایانه‌ی با استفاده از داده‌های تجربی ارزیابی شده است. با تحلیل پارامتریک اتصالات نیمه‌گیردار و T، عوامل مهم مؤثر در رفتار اتصالات شناسایی شده است.<sup>[۱۰، ۱۱]</sup> یکی از پارامترهای مهم مؤثر در رفتار اتصالات، پدیده‌ی اهرمی شدن است. آئین‌نامه‌های طراحی، روش دقیقی برای محاسبه‌ی نیروی اهرمی شدن ارائه نکرده‌اند و فقط با افزایش ضریب

ساختار استفاده‌شده برای مدل‌سازی اجزای اتصال، حالت جسم جامد (SOLID) بوده است و خواص مکانیکی (منحنی تنش و کرنش) مصالح پیچ بر مقاومت A490 به صورت سه خطی با نیروی پیش‌تنیدگی ۱۵۰ کیلو نیوتن و فولاد نرمه‌ی تیر، ستون و ورق به صورت هفت خطی در نرم‌افزار معرفی شده است.<sup>[۱۸،۱۷]</sup> در مدل‌های اجزای محدود جوش به صورت پیوسته (TIE) مدل شده است تا تأثیری در رفتار اتصال و مکانیزم خرابی آن نداشته باشد. تماس بین صفحه‌ی اتصال و بال ستون به صورت تماس اصطکاکی مدل شده و برای شبکه‌بندی اتصال، از اجزای چهاروجهی مرتبه‌ی پایین نوع (C3D8R) در حالت تنش سه بعدی استفاده شده است. ابعاد مناسب اجزا با استفاده از تحلیل هم‌گرایی اعضا تعیین شده است. هر کدام از اجزای اتصال به صورت مستقل تحت شبکه‌بندی‌های مختلف تحت بارگذاری و تحلیل قرار گرفته و با ارزیابی دقت نتایج حاصل از تحلیل، اندازه‌ی اجزای مناسب تعیین شده است. نتایج تحلیل هم‌گرایی پیچ در جدول ۳ و هم‌گرایی تیر در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۵، مدل شبکه‌بندی‌شده‌ی اجزای محدود نمونه‌ی اتصال نیمه‌گیردار EE را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی دقت مدل‌های المان محدود، از نتایج دو حس‌گر نصب‌شده در فاصله‌ی ۸ سانتی‌متری (CH42) و یک متری اتصال (CH39) استفاده شده است. شکل ۶ محل نصب حس‌گرهای مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی تغییرمکان یک گره‌ی خاص حاصل از بارگذاری خمشی مدل اجزای محدود اتصال با نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. بیشترین مقدار خطا در مدل‌های اجزای محدود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، حدود ۰.۸٪ است.<sup>[۲۰]</sup>

### بررسی نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T

در این نوشتار، برای پی‌بردن به رفتار نیروهای اهرمی شدن، فشار بین صفحه‌ی ناشی از توزیع این نیروها در اتصالات T بررسی شده است. عوامل مؤثر در پدیده‌ی اهرمی شدن، شامل ضخامت و صلبیت صفحه‌ی اتصال، قطر و طول پیچ، موقعیت و هندسه‌ی سوراخ، خواص مکانیکی مصالح پیچ و نوع بارگذاری اتصال هستند. در این نوشتار، به تأثیر صلبیت ورق اتصال توجه و برای تعیین صلبیت ورق در اتصالات

اطمینان روش‌های طراحی، در صدد کاهش اثرات آن برآمده‌اند. این موضوع در برخی موارد باعث کاهش شکل‌پذیری مورد انتظار، غیرواقعی بودن رفتار پیش‌بینی‌شده برای اتصال، و تغییر در رفتار کل سازه می‌شود.<sup>[۱۳]</sup> در ادامه‌ی این نوشتار، تأثیر نیروهای اهرمی شدن در رفتار اتصالات نیمه‌گیردار بررسی و قوانین حاکم بر آن به صورت یک مدل ریاضی استخراج شده است. نتیجه‌ی این مرحله از نوشتار، ارائه‌ی روشی اصلاح‌شده برای اعمال اثر این نیروها در رفتار مدل‌های ارائه‌شده است. در ادامه، روش متداول تحلیل و طراحی اتصالات پیچی با فلسفه‌ی مقاومت مجاز (ASD) بررسی و دقت آن با نتایج تحلیل اجزای محدود ارزیابی شده است.<sup>[۱۵،۱۴]</sup> در نهایت، روشی اصلاح‌شده برای طراحی اتصالات پیچی نیمه‌گیردار با ۳ ردیف پیچ پیشنهاد و دقت این روش با استفاده از مدل‌های اجزای محدود ارزیابی شده است. البته ذکر این موضوع ضروری است که روش‌های پیشنهادی فقط در اتصالات تقویت‌نشده و تحت بارهای استاتیکی قابل استفاده بوده و در سایر اتصالات با پارامترهای متغیر و یا اتصالات تقویت‌شده تحت بارهای دینامیکی که در آن‌ها از سخت‌کننده استفاده شده است، نیاز به تحقیقات جامع آزمایشگاهی و عددی است. در هر حال روابط طراحی پیشنهادی در این‌نامه‌ها هنوز قابل استفاده است.

### مدل‌سازی اجزای محدود

سه گروه مدل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS تهیه شده است.<sup>[۱۶]</sup> برای شناسایی عوامل مؤثر در پدیده‌ی اهرمی شدن، انجام تحلیل پارامتریک و محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن، یک گروه از مدل‌های اجزای محدود اتصالات T با ضخامت متغیر ورق انتهایی ایجاد شده است. مدل‌های اجزای محدود اتصال مفصلی و نیمه‌گیردار زانویی، در دو حالت ۱۰ و ۲۰ درجه چرخش نسبت به حالت گونیا ایجاد شده‌اند. شکل‌های ۱ الی ۴ مدل‌های اجزای محدود و جدول‌های ۱ و ۲ مشخصات هندسی آن‌ها را نشان می‌دهند. از مدل‌های اتصال مفصلی با دو ردیف پیچ برای تحلیل هم‌گرایی اعضا و ارزیابی دقت مدل‌های اجزای محدود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است.<sup>[۱۹]</sup> در مدل‌های اجزای محدود، به رفتارهای غیرخطی هندسی، غیرخطی مصالح، و تغییرشکل‌های بزرگ توجه شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل‌های اجزای محدود اتصالات.

نمونه	زاویه‌ی نسبت به حالت گونیا	ضخامت ورق اتصال $t$	پروفیل ستون	پروفیل تیر	طول ستون	طول تیر	قطر سوراخ $\phi$	تعداد و قطر پیچ $M$	نوع پیچ
FE (گونبای مفصلی)	۰	۱۵ mm	HEB۲۴۰	IPE۲۴۰	۲٫۲ m	۱ m	۲۲ mm	۲*Φ۲۰ mm	A490
EE (گونبای نیمه‌گیرداری)	۰	۱۵ mm	HEB۲۴۰	IPE۲۴۰	۲٫۲ m	۱ m	۲۲ mm	۴*Φ۲۰ mm	A490
AA۱۰ (زانویی نیمه‌گیرداری)	۱۰	۲۶ mm	IPE۴۰۰	IPE۴۰۰	۰٫۴ m	۰٫۴ m	۲۶ mm	۴*Φ۲۴ mm	A490
AA۲۰ (زانویی نیمه‌گیرداری)	۲۰	۲۶ mm	IPE۴۰۰	IPE۴۰۰	۰٫۴ m	۰٫۴ m	۲۶ mm	۴*Φ۲۴ mm	A490

جدول ۲. مشخصات هندسی مدل‌های اجزای محدود اتصالات T.

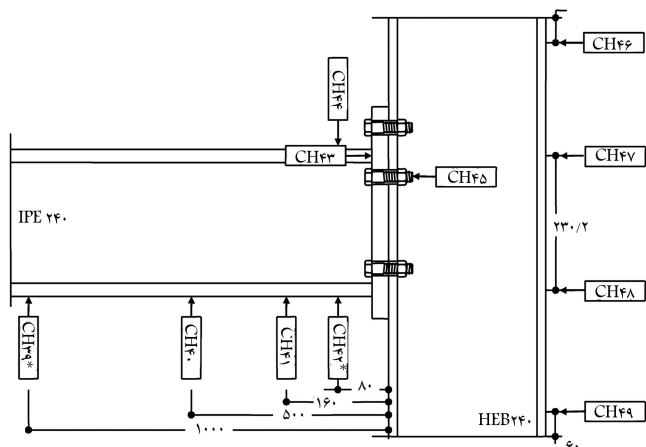
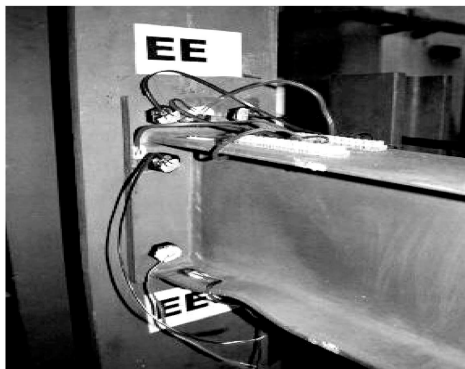
مدل	ضخامت ورق اتصال ( $t$ )	ابعاد ورق پایه	قطر سوراخ	قطر پیچ	نوع پیچ	$\lambda$
$P20M20$	۲۰ mm	۵۰۰ × ۵۰۰ mm	۲۲ mm	۲۰ mm	A490	۱٫۶۷
$P35,2M20$	۳۵٫۲ mm	۵۰۰ × ۵۰۰ mm	۲۲ mm	۲۰ mm	A490	۰٫۳
$P2M20$	۲ mm	۵۰۰ × ۵۰۰ mm	۲۲ mm	۲۰ mm	A490	۵

جدول ۳. نتایج تحلیل هم‌گرایی پیچ.

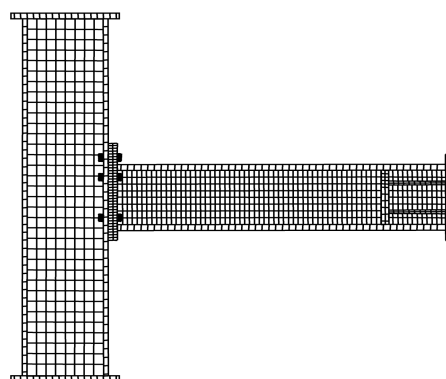
نمونه (m)	بارگذاری کششی (N) پیچ	شماره‌ی گره‌ی مورد بررسی	تغییر طول پیچ (mm)	بیشینه‌ی تنش فون میزس در مقطع پیچ (pa)	اختلاف تغییر طول
نمونه‌ی ۱	$P = 5000$	SP۱-۶۵	$1,72 \times 10^{-9}$	$9,173 \times 10^3$	-
نمونه‌ی ۳: اندازه‌ی مش	$P = 1000$	SP۱-۶۵	$3,44 \times 10^{-12}$	$1,825 \times 10^3$	-
نمونه‌ی ۲	$P = 5000$	SP۱-۶۵	$1,99 \times 10^{-9}$	$9,586 \times 10^3$	٪۱۶
نمونه‌ی ۱: اندازه‌ی مش	$P = 1000$	SP۱-۶۵	$4,13 \times 10^{-12}$	$1,91 \times 10^3$	٪۱۶,۷
نمونه‌ی ۳ (نمونه‌ی برگزیده)	$P = 5000$	SP۱-۶۵	$2,10 \times 10^{-9}$	$9,47 \times 10^3$	٪۵,۶
نمونه‌ی ۵: اندازه‌ی مش	$P = 1000$	SP۱-۶۵	$4,36 \times 10^{-12}$	$1,89 \times 10^3$	٪۵,۷

جدول ۴. نتایج تحلیل هم‌گرایی تیر.

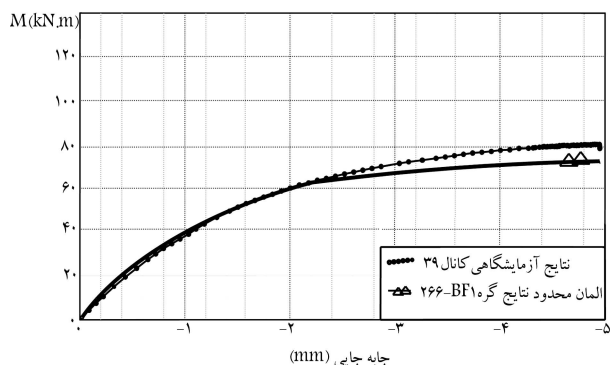
نمونه	بارگذاری خمشی تیر (N.m)	شماره‌ی گره‌ی مورد بررسی	تغییر مکان قائم تیر (mm)	اختلاف تغییر مکان
نمونه‌ی ۱	$M = 1000$	F۱,۱	$1,527 \times 10^{-9}$	-
نمونه‌ی ۵: اندازه‌ی مش	$M = 5000$	F۱,۱	$7,63 \times 10^{-9}$	-
نمونه‌ی ۲	$M = 1000$	F۱,۱	$1,65 \times 10^{-9}$	٪۸
نمونه‌ی ۲: اندازه‌ی مش	$M = 5000$	F۱,۱	$8,24 \times 10^{-9}$	٪۸
نمونه‌ی ۳ (نمونه‌ی برگزیده)	$M = 1000$	F۱,۱	$1,71 \times 10^{-9}$	٪۶
نمونه‌ی ۱: اندازه‌ی مش	$M = 5000$	F۱,۱	$8,73 \times 10^{-9}$	٪۶



شکل ۶. محل نصب حس‌گرها در مدل آزمایشگاهی. [۹]



شکل ۵. مدل اجزای محدود نمونه‌ی اتصال نیمه‌گیردار (EE).



شکل ۷. مقایسه‌ی نتایج اجزای محدود و آزمایشگاهی تغییر مکان گره در محل نصب حس‌گر CH۳۹.

از ضریب  $\lambda$  استفاده شده است (رابطه‌های ۱ الی ۳). این ضریب در مهندسی پی برای محاسبه‌ی صلبیت پی روی بستر کشسانی به‌کار برده می‌شود.

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{K'_s}{4EI}} \quad (1)$$

$$K'_s = K_s \times B \quad (2)$$

$$K_s = \frac{E}{2,4t} \quad (3)$$

در رابطه‌های ۱ تا ۳،  $\lambda$  ضریب صلبیت ورق اتصال،  $I$  ممان اینرسی ورق در جهت لنگر وارده،  $B$  عرض ورق اتصال در جهت لنگر وارده،  $t$  ضخامت ورق اتصال و  $E$  مدول کشسانی مصالح ورق است.

با بررسی نتایج تحلیل پارامتریک اتصالات T ملاحظه می‌شود که مقدار

صلب ( $\lambda = 0.5$ ) است، سه مرحله‌ی متمایز در منحنی‌های بار-اهرمی شدن و بار-جابجایی قابل تشخیص است. در مرحله‌ی O-A1 منحنی در حالت خطی و کشسانی قرار داشته و در نقطه‌ی A1 نخستین مفاصل خمیری در ورق اتصال در پای جان پروفیل T ایجاد شده است. در نقطه‌ی B1 مفصل خمیری پای جان کامل شده است و به دلیل خمیری شدن پای پروفیل T و کاهش طول اهرم و انتقال بار خارجی به طرف مرکز جان، شیب نمودار بار-اهرمی شدن تغییر می‌کند. با بررسی مدل‌های اجزای محدود و اتصالات با ورق صلبی که در آن‌ها ( $0.5 < \lambda < 0.7$ ) است، این نتیجه حاصل شده است که شکل ۱۰ الف، شکل گسیختگی غالب این اتصالات بوده و گسیختگی سیستم از ناحیه‌ی پای جان اتصال است. در اتصالاتی که صلبیت ورق زیاد است ( $\lambda > 0.7$ ) گسیختگی از مقطع پیچ بوده و در ورق اتصال مکانیزم شکستی رخ نمی‌دهد.

در منحنی‌های شکل ۱۳ که مربوط به اتصال با ورق نرم ( $\lambda = 4$ ) است، مرحله‌ی O-A2 مرحله‌ی کاملاً خطی و کشسانی و A2-B2 و B2-C2 مراحل مکانیزم شدن اتصال است. گسیختگی این اتصال از خط پیچ ورق اتصال رخ می‌دهد. با توجه به نرم بودن و شکل پذیری بالای ورق، تغییر شکل اتصال در اثر بارگذاری در مرحله‌ی غیرکشسانی، به صورت منحنی درجه‌ی ۲ است. شکل ۱۰ ب شکل غالب مکانیزم گسیختگی اتصالات با ورق نرم است.

### بررسی روش‌های متداول محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن

در سال ۱۹۹۱، فرمولی تقریبی برای محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن ارائه شد.<sup>[۱۹]</sup> در این فرمول که برای محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T تحت بارگذاری کششی ارائه شده است، صفحات اتصال کاملاً صلب فرض شده‌اند. رابطه‌ی ۴ فرمول تقریبی اسمیت را نشان می‌دهد.

$$Q = F \left[ \frac{100 \cdot b \cdot D^2 - 14 \cdot L \cdot t_f^2}{62 \cdot a \cdot D^2 - 21 \cdot L \cdot t_f^2} \right] \quad (4)$$

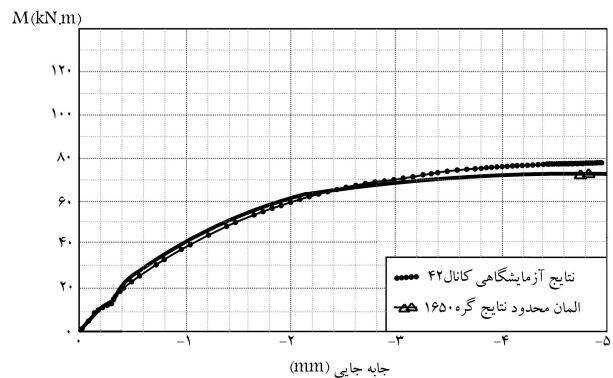
در رابطه‌ی ۴،  $D$  قطر اسمی پیچ،  $F$  نیروی کشش خارجی یک پیچ،  $t_f$  ضخامت ورق اتصال،  $b$  فاصله‌ی محور پیچ تا وسط جان پروفیل T،  $a$  فاصله‌ی محور پیچ از لبه‌ی خارجی صفحه و  $L$  نسبت طول ورق به تعداد ردیف پیچ است. با ارزیابی دقت این فرمول روی مدل‌های اجزای محدود اتصال T، خطایی در حدود ۱۶٪ در اتصالات با ورق کاملاً نرم ( $\lambda = 4$ ) و ۸٪ در اتصالات با ورق کاملاً صلب ( $\lambda = 0.5$ ) حاصل شده است. این خطاهای عددی تفاوت نتایج تحلیل اجزای محدود و رابطه‌ی اسمیت را نشان می‌دهد. به دلیل خطای بالای این فرمول، استفاده از این روش برای محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T توصیه نمی‌شود. در آیین‌نامه‌ی AISC-LRFD روشی تقریبی برای محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن ارائه شده است.<sup>[۱۵]</sup> در این روش، نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T با رابطه‌ی کلی ۵ محاسبه شده است.

$$Q = \beta \cdot \alpha \cdot \delta \cdot \rho \cdot \left( \frac{t}{t_c} \right)^2 \quad (5)$$

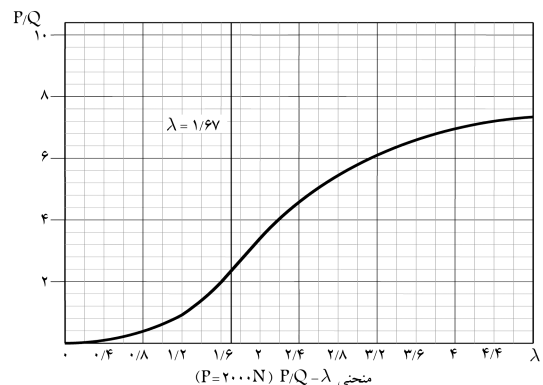
در این رابطه،  $Q$  نیروی اهرمی شدن یک پیچ،  $\beta$  کشش طراحی پیچ،  $\rho$  نسبت فاصله‌ی پیچ از جان سپری به فاصله‌ی پیچ از لبه‌ی ورق،  $\delta$  نسبت عرض خالص ورق به عرض اسمی آن،  $\alpha$  نسبت لنگر ورق اتصال در تراز پیچ (M1) به لنگر ورق در تراز جان سپری (M2)،  $t$  ضخامت ورق و  $t_c$  ضخامت مورد نیاز برای تحمل لنگر حاصل از بارگذاری خارجی است (شکل ۱۴). خطای این روش محاسباتی در

نیروهای اهرمی شدن ایجاد شده در اتصالات، رابطه‌ی مستقیم با صلبیت ورق اتصال دارد. در اتصالات با ورق صلب ( $\lambda < 0.5$ ) مقدار نیروهای اهرمی شدن ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. با کاهش صلبیت ورق اتصال، نیروهای اهرمی شدن افزایش می‌یابند. منحنی ( $\lambda = P/Q$ ) نشان می‌دهد که شیب نمودار در اتصالات با ورق‌های اتصال خیلی نرم ( $\lambda > 4$ ) به سمت صفر میل می‌کند و نیروهای اهرمی شدن ایجاد شده در این اتصالات ضریب ثابتی از بار خارجی اعمال شده به اتصال هستند. همچنین ( $\lambda = 1.67$ ) نقطه‌ی عطف این نمودار است و می‌توان آن را به منزله‌ی مرز ورق صلب و نرم در نظر گرفت (شکل ۹).

مکانیزم شکست اتصالات T به صورت شکل ۱۰ است. با بررسی شکل ۱۱ که تغییرات نیروهای اهرمی شدن و جابجایی بیشینه‌ی ورق اتصال در اعمال کشش خارجی را در اتصال T با ورق نیمه‌صلب نشان می‌دهد، ۴ مرحله‌ی متمایز در منحنی بار-اهرمی شدن و بار-جابجایی قابل تشخیص است. بخش A-O نمودار تغییر شکل خطی و کشسانی ورق اتصال را نشان می‌دهد. مرحله‌ی A-B و B-C، مراحل مکانیزم شدن اتصال است. در نقطه‌ی B منحنی، مفصل خمیری پای جان اتصال گسترش یافته است و یک افزایش شدید در تنش خط پیچ (خط F ورق اتصال) مشاهده می‌شود. در نقطه‌ی C، مفاصل خمیری در خط پیچ در ورق اتصال ایجاد و نقاط محدودی از جان پیچ نیز تسلیم می‌شوند؛ ولی مفصل خمیری کامل در آن ایجاد نمی‌شود. این اتصال بر اثر تسلیم ورق از ناحیه‌ی پای جان پروفیل T گسیخته شده است. با بررسی مدل‌های اجزای محدود، شکل مکانیزم شکست غالب اتصالات T با ورق انتهایی نیمه‌صلب، ( $1.5 < \lambda < 2$ ) به صورت شکل ۱۰ ج است. با بررسی منحنی‌های شکل ۱۲ که مربوط به اتصالات T با ورق



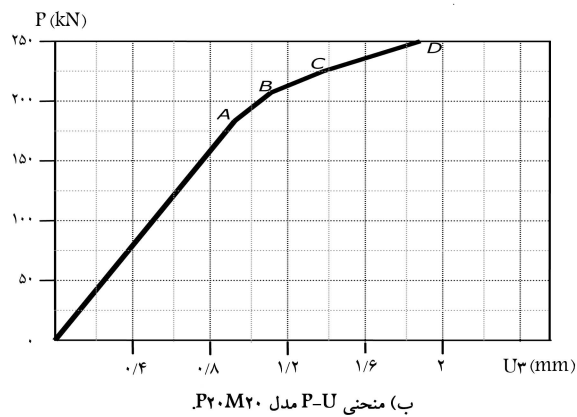
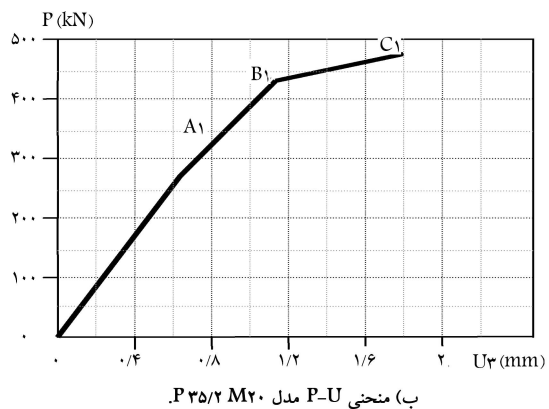
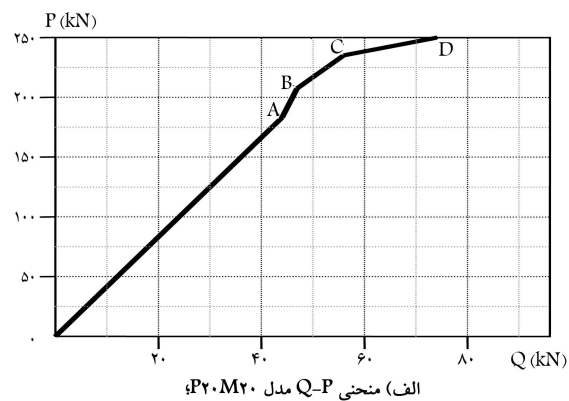
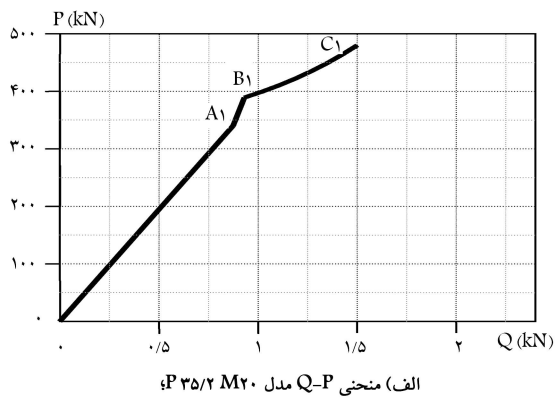
شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج اجزای محدود و آزمایشگاهی تغییر مکان گره در محل نصب حسگر CH۲۲.



شکل ۹. منحنی تأثیر صلبیت ورق اتصال بر نیروهای اهرمی شدن.

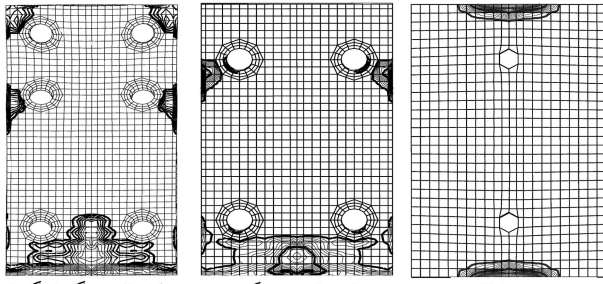
	ع	ب	الف
مکانیزم شکست			
خطوط تسلیم ورق اتصال			
مفاصل پلاستیک			
توزیع لنگر ورق اتصال			

شکل ۱۰. مکانیزم شکست اتصالات T.



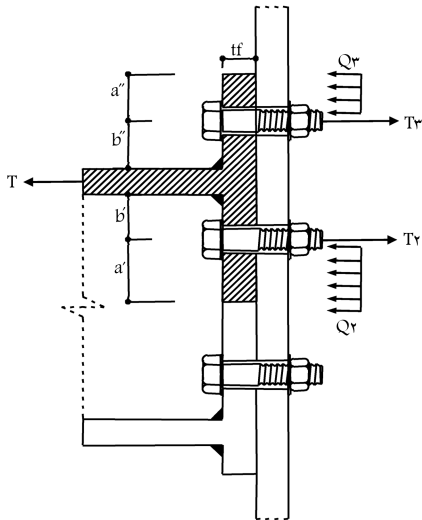
شکل ۱۲. نتایج تحلیل پارامتریک اتصال T با ورق کاملاً صلب.

شکل ۱۱. نتایج تحلیل پارامتریک اتصال T با ورق نیمه صلب.

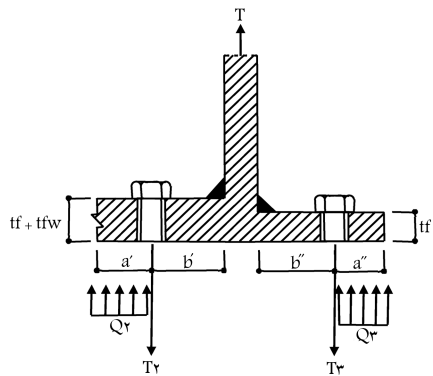


الف) اتصال نیمه گیردار گونیا؛ ب) اتصال مفصلی گونیا؛ ج) اتصال نیمه گیردار گونیا.

شکل ۱۵. توزیع فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی شدن.



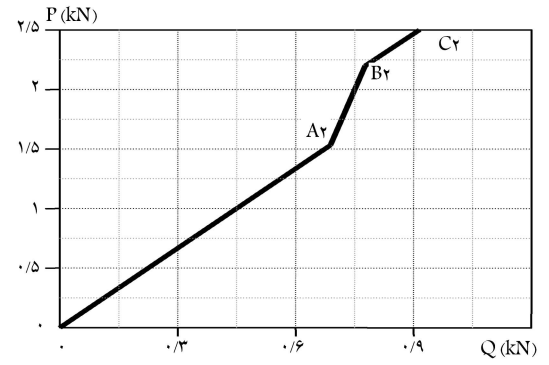
الف) نمودار آزاد سپری معادل ناحیه کششی ورق؛



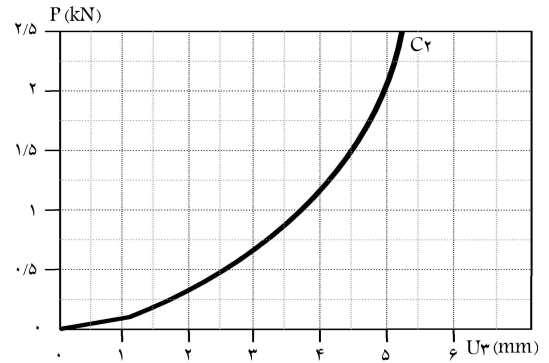
ب) اضافه ضخامت حاصل از خاصیت سخت کنندگی جان تیر  $t_{fw}$ .

شکل ۱۶. سپری معادل با ناحیه ی اعمال نیروهای اهرمی شدن.

از نیروهای اهرمی شدن در اتصالات مفصلی و نیمه گیردار نسبت به اتصالات T متفاوت است. در اتصالات مفصلی و نیمه گیردار، کشش حاصل از خمش خارجی اعمال شده از طریق بال تیر به ورق منتقل و به دلیل خاصیت سخت کنندگی جان پروفیل تیر، خمش نامتقارن در ارتفاع ورق ایجاد می شود. این خمش نامتقارن باعث انتقال ناحیه ی فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی شدن به اطراف بال کششی تیر می شود. ناحیه ی تحت کشش اتصال نیمه گیردار را می توان با یک سپری (T) با ضخامت بال های متفاوت معادل گرفت و نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک اتصالات T که قبلاً به آن اشاره شد را با تغییراتی به آن تعمیم داد. شکل ۱۶ الف ناحیه ی تحت کشش ورق اتصال و شکل ۱۶ ب شماتیک همان اتصال را با سپری معادل

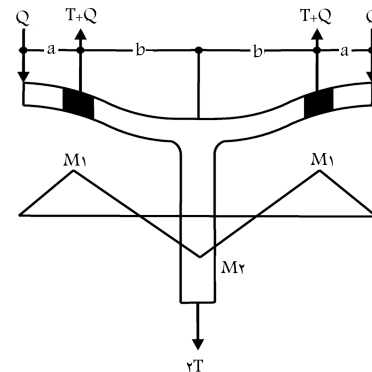


الف) منحنی Q-P مدل  $P_M 20$



ب) منحنی P-U مدل  $P_M 20$

شکل ۱۳. نتایج تحلیل پارامتریک اتصال T با ورق کاملاً نرم.



شکل ۱۴. مشخصات هندسی روش محاسباتی AISC.

اتصالات با ورق نیمه صلب ( $\lambda = 1/67$ ) حدود ۴۰٪ است و با کاهش ضخامت ورق اتصال، خطای آن افزایش می یابد.

## نیروهای اهرمی شدن در اتصالات نیمه گیردار

تفاوت عمده یی در توزیع فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی شدن در اتصالات مفصلی و اتصالات گیردار و اتصالات T وجود دارد. شکل ۱۵ توزیع فشار تماسی بین صفحات را در این اتصالات نشان می دهد. در اتصالات T، فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی شدن در لبه ی خارجی ورق اتصال به وجود آمده و ضرایب هندسی فرمول AISC برای محاسبه ی این نیروها براساس شکل توزیع فشار تماسی تعیین شده است. با توجه به شکل توزیع فشار ملاحظه می شود که محل اعمال فشار ناشی

با استفاده از  $\alpha_i$  که ضریب توزیع تنش تماسی حاصل از اهرمی شدن است و از رابطه ۱۲ تعیین می‌شود، می‌توان نیاز و یا عدم نیاز به محاسبه نیروهای اهرمی شدن را پیش‌بینی کرد. اگر این ضریب مثبت باشند، نیروهای اهرمی شدن باید محاسبه شوند و اگر منفی باشند، می‌توان از تأثیر نیروهای اهرمی شدن در محاسبات صرف‌نظر کرد. در اتصالات نیمه‌گیردار با سه ردیف پیچ با ورق صلب،  $(\lambda > 0.7)$ ، همواره این ضریب برای هر دو ردیف پیچ منفی است و می‌توان از نیروهای اهرمی شدن آن‌ها صرف‌نظر کرد. با ارزیابی دقت روند محاسباتی فوق، بیشینه خطا در مدل‌های اجزای محدود اتصالات نیمه‌گیردار در حالت گونیا، برابر با ۴٪ و در اتصالات زانویی ۵٪ حاصل شده است.

### اصلاح روش‌های متعارف طراحی

روش طراحی با فلسفه‌های حالات حدی (LRFD) و روش طراحی مقطع معادل با فلسفه طراحی مقاومت مجاز (ASD)، از پرکاربردترین روش‌های طراحی اتصالات پیچی‌اند. در روش طراحی حالات حدی بدون در نظر گرفتن اثر نیروهای اهرمی شدن در اتصالات نیمه‌گیردار، بیشینه خطایی در حدود ۲۰٪ در طراحی حاصل می‌شود. این خطا در خلاف جهت اطمینان است و ایمنی اتصالات طراحی شده با این روش را به مخاطره می‌اندازد. آیین‌نامه‌ی AISC محاسبه‌ی این نیروها را با روشی مناسب ضروری می‌داند. [۱۵] با وارد کردن اثر نیروهای اهرمی شدن، می‌توان خطای محاسبات را به کمتر از ۸٪ کاهش داد. در این حالت، کشش کل وارده به پیچ، مجموع کشش حاصل از خمش خارجی و کشش حاصل از نیروهای اهرمی شدن است. در طراحی با روش مقطع معادل متعارف، با معادل قراردادن مقطع پیچ کششی با مستطیل به عرض  $b_e$  در ارتفاع کل ورق اتصال و محاسبه‌ی بیشینه تنش وارده به پیچ‌های کششی ردیف سوم در دورترین نقطه‌ی مقطع معادل (تراز  $z$  در شکل ۱۷)، خطایی در حدود ۲۵٪ در بارگذاری کششی پیچ و ۳۰٪ در اندرکنش برش و کشش در خلاف جهت اطمینان در پیش‌بینی تنش وارده به این ردیف پیچ حاصل شده است. این در حالی است که در این تپ از اتصالات نیمه‌گیردار، به دلیل خاصیت سخت‌کنندگی ورق جان پروفیل تیر و افزایش صلبیت ورق اتصال مابین دو بال کششی و فشاری تیر (شکل ۱۶ ب)، در مرحله‌ی گسیختگی میزان کششی بیشتر از کشش پیش‌بینی شده به پیچ‌های ردیف دوم اعمال و این ردیف پیچ در برخی موارد زودتر دچار شکست می‌شود (شکل ۱۸). در روش مقطع معادل متعارف علاوه بر عدم محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن، از خاصیت سخت‌کنندگی جان تیر نیز

که با در نظر گرفتن اضافه‌ی ضخامت حاصل از خاصیت سخت‌کنندگی جان تیر  $(t_{fw})$  حاصل شده است، نشان می‌دهد. با افزایش ضخامت جان تیر،  $t_{fw}$  افزوده و با افزایش صلبیت و ضخامت ورق، میزان نیروهای اهرمی شدن کاسته می‌شود. به همین ترتیب در سپری معادل، نیروهای اهرمی شدن پیچ‌های ردیف سوم  $(Q_3)$  به دلیل نرم‌تر بودن ورق آن از نیروهای اهرمی شدن پیچ‌های ردیف دوم  $(Q_2)$  بیشتر است. با این فرض اولیه و با تحلیل اتصالات با صلبیت ورق متغیر، ضریب هندسی پیچ‌های ردیف سوم از رابطه‌ی ۶ حاصل شده است.

$$a'' = 1.25 \times b'' \quad (6)$$

که در آن،  $b''$  فاصله‌ی لبه‌ی پیچ از لبه‌ی بال کششی تیر و  $a''$  فاصله‌ی لبه‌ی پیچ از انتهای ناحیه‌ی فشار بین صفحه‌ی است.  $a''$  بیشینه‌ی طول ممکن برای گسترش فشار تماسی حاصل از پدیده‌ی اهرمی شدن در پیچ‌های ردیف سوم اتصالات نیمه‌گیردار با سه ردیف پیچ را نشان می‌دهد و افزایش طول لبه‌ی ورق اتصال، تأثیری در مقدار آن ندارد. در پیچ‌های ردیف دوم، ضریب هندسی از رابطه‌ی ۷ حاصل می‌شود.

$$a' = 0.5 \times b' \quad (7)$$

در این رابطه،  $b'$  فاصله‌ی لبه‌ی پیچ ردیف دوم از لبه‌ی بال کششی تیر و  $a'$  فاصله‌ی لبه‌ی پیچ از انتهای ناحیه‌ی فشار بین صفحه‌ی است.  $a'$  بیشینه‌ی طول ممکن برای گسترش فشار تماسی حاصل از پدیده‌ی اهرمی شدن در پیچ‌های ردیف دوم اتصالات نیمه‌گیردار با سه ردیف پیچ است. شکل ۱۶ الف توزیع تنش را در این اتصالات نشان می‌دهد. با محاسبه‌ی ضریب هندسی، این روند برای محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن در هر ردیف موردنظر پیچ پیشنهاد می‌شود.

$$r_{ut} = \frac{M}{h} \times \frac{1}{n} \quad (8)$$

$$\rho_i = \frac{b'}{a'}, \quad \rho_i = \frac{b''}{a''} \quad (9)$$

$$\delta_i = 1 - \frac{d'}{p} \quad i = 2, 3 \quad (10)$$

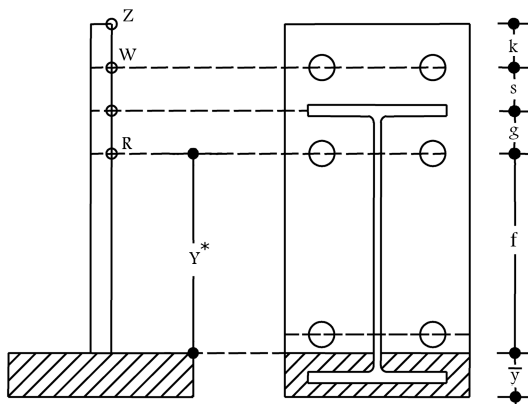
$$\beta = \frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\varphi_{rn}}{r_{ut}} - 1 \right) \quad (11)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\delta_i} \left[ \left( \frac{r_{ut}}{\varphi_{rn}} \right) \times \left( \frac{t_c}{t} \right)^2 - 1 \right] \quad (12)$$

$$t_c = \sqrt{4.44 - \varphi_{rn} \cdot b' / p \cdot F_y} \quad (13)$$

$$Q_i = \varphi_{rn} \left[ \delta_i \cdot \alpha_i \cdot \rho_i \cdot \left( \frac{t}{t_c} \right)^2 \right] \quad (14)$$

در این رابطه‌ها،  $r_{ut}$  کشش خارجی پیچ،  $M$  لنگر خارجی،  $h$  ارتفاع تیر،  $n$  تعداد پیچ کششی،  $\rho_i$  نسبت ضرایب هندسی که از رابطه‌ی ۶ و ۷ حاصل شده‌اند،  $\delta_i$  ضریبی است که از رابطه‌ی ۱۰ تعیین می‌شود،  $d'$  قطر سوراخ،  $P$  سهم هر پیچ از عرض ورق اتصال که از تقسیم عرض ورق به تعداد پیچ ردیف موردنظر حاصل می‌شود،  $\varphi_{rn}$  کشش اسمی طراحی پیچ،  $\alpha_i$  ضریب توزیع تنش تماسی حاصل از اهرمی شدن اتصال نیمه‌گیردار با سه ردیف پیچ در تراز موردنظر که از رابطه‌ی ۱۲ تعیین می‌شود،  $t$  ضخامت ورق اتصال،  $t_c$  ضخامت اولیه‌ی ورق اتصال که از رابطه‌ی ۱۳ تعیین می‌شود،  $F_y$  تنش تسلیم مصالح ورق و  $Q_i$  نیروی اهرمی شدن یک پیچ در ردیف موردنظر است ( $i$  نشان‌دهنده‌ی ردیف پیچ است).



شکل ۱۷. مقطع معادل پیچ کششی.



رابطه‌های ۱۷ الی ۱۹ استفاده کرد.

$$b_e^2 = 2A_b \quad (17)$$

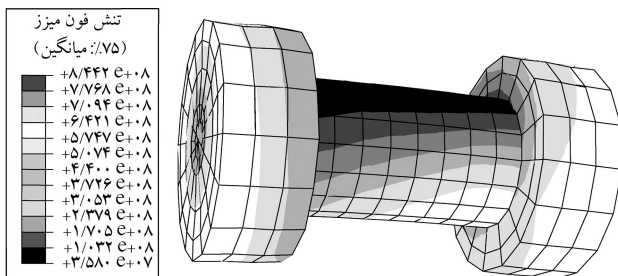
$$\frac{h - \bar{y}}{\bar{y}} = \sqrt{\frac{b}{b_e}} \quad (18)$$

$$f_{ti} = \frac{M}{I_x} \cdot di \quad (19)$$

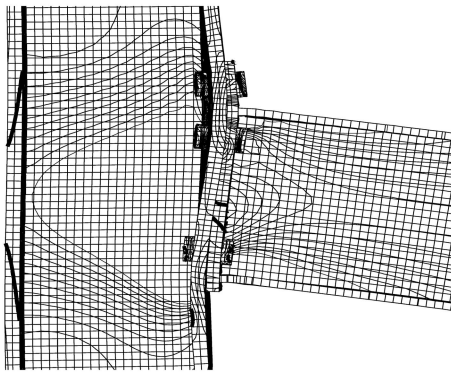
از رابطه‌های ۱۸ می‌توان موقعیت تار خنثی را در مقطع معادل یافت. در رابطه‌های ۱۷ الی ۱۹،  $b_e$  عرض مقطع معادل،  $A_b$  سطح مقطع هر پیچ کششی،  $\bar{y}$  ارتفاع ناحیه‌ی فشار یا فاصله‌ی تار خنثی از لبه‌ی فشاری ورق اتصال و  $b$  عرض ورق اتصال است. رابطه‌ی ۱۹ تنش کششی ناشی از خمش خارجی بدون در نظر گرفتن پدیده‌ی اهرمی شدن در مقطع پیچ ردیف دوم یا سوم را به دست می‌دهد. در رابطه‌ی ۱۹،  $M$  لنگر خارجی،  $I_x$  ممان اینرسی مقطع معادل و  $di$  فاصله‌ی پیچ ردیف کشش مورد نظر از تار خنثی است. برای محاسبه‌ی تنش کل وارده به مقطع پیچ از رابطه‌ی ۲۰ می‌توان استفاده کرد.

$$f_{ti} = f'_{ti} + f_{Qi} \quad (20)$$

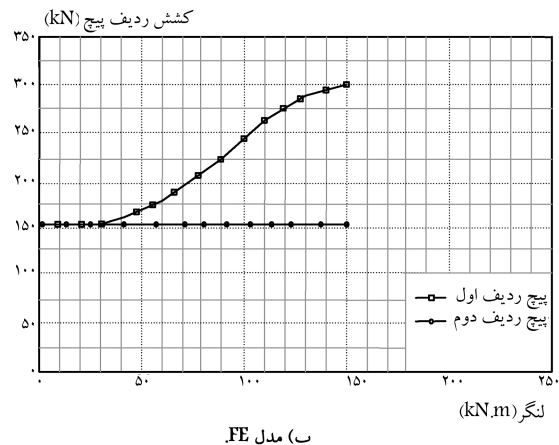
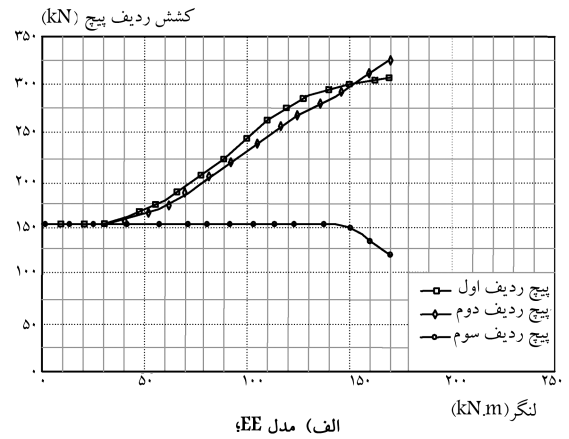
در این رابطه،  $f_{ti}$  تنش کل وارده به پیچ ردیف کشش مورد نظر،  $f'_{ti}$  تنش کششی حاصل از خمش خارجی محاسبه شده با روش مقطع معادل اصلاح شده که از رابطه‌ی ۱۹ محاسبه می‌شود و  $f_{Qi}$  تنش حاصل از نیروهای اهرمی شدن آن ردیف پیچ است که از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود. ردیف پیچ بحرانی در محاسبات ردیفی است که تنش کل وارده به آن طبق رابطه‌ی ۲۰ بیشتر باشد. با ارزیابی دقت این روش در اتصالات نیمه‌گیردار با سه ردیف پیچ در حالت گونیا و زانویی، بیشینه‌ی خطا در حدود ۸٪ در محاسبات حاصل شده است که در مقایسه با روش مقطع معادل متعارف، ۲۲٪ کاهش خطا را نشان می‌دهد. شکل ۱۹ کنترل تنش پیچ و شکل ۲۰ تغییر شکل اتصالات نیمه‌گیردار را تحت بارگذاری نشان می‌دهد.



شکل ۱۹. کنترل تنش پیچ کششی.



شکل ۲۰. تغییر شکل اتصال نیمه‌گیردار EE تحت بارگذاری.



شکل ۱۸. توزیع کشش ردیف‌های پیچ در مدل‌های المان محدود اتصالات مفصلی و نیمه‌گیردار گونیا.

صرف نظر شده است. این موضوع باعث ایجاد خطاهای بزرگی در جهت خلاف اطمینان در طراحی و عدم اعتمادپذیری اتصالات طراحی شده با این روش می‌شود. جهت اصلاح این روش، پیشنهاد می‌شود برای محاسبه‌ی تنش کششی وارده به پیچ ردیف سوم، از تراز خود پیچ (تراز W) استفاده شود (شکل ۱۷). در این حالت می‌توان کشش خالص وارده به این ردیف پیچ را با خطایی کمتر از ۶٪ محاسبه کرد. برای محاسبه‌ی کشش وارده به پیچ‌های ردیف دوم، با وارد کردن یک ضریب افزایش تنش برای اعمال اثر خاصیت سخت‌کنندگی ورق جان تیر، از تراز خود این پیچ‌ها در مقطع معادل استفاده شود (تراز R). براساس نتایج تحلیل پارامتریک، این ضریب افزایش تنش  $\alpha'$  برای پیچ‌های ردیف دوم پیشنهاد می‌شود.

$$\alpha' = 1.13 \quad (15)$$

$$f'_{t2} = f'_t \times \alpha' \quad (16)$$

در رابطه‌های ۱۵ و ۱۶،  $f'_{t2}$  تنش کششی خالص پیچ ردیف دوم بدون در نظر گرفتن اثر نیروهای اهرمی شدن و  $f'_t$  تنش محاسبه شده در تراز پیچ ردیف دوم (تراز R) در مقطع معادل است. با اعمال تنش در ترازهای فوق، می‌توان تنش کششی خالص حاصل از بارگذاری خارجی بدون در نظر گرفتن پدیده‌ی اهرمی شدن را محاسبه کرد. برای محاسبه‌ی تنش در روش مقطع معادل اصلاح شده در هر تراز می‌توان از

## نتیجه‌گیری

در این نوشتار، رفتار اتصالات نیمه‌گیردار پیچی با ورق انتهایی در دو حالت گونیا و زانویی بررسی شده است. بعد از ایجاد مدل‌های اجرای محدود اتصالات، دقت مدل‌های رایانه‌یی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارزیابی و بیشینه‌ی خطای مدل‌های المان محدود ایجاد شده حدود ۸٪ برآورد شده است. با تحلیل پارامتریک اتصالات نیمه‌گیردار، عوامل مهم مؤثر در رفتار اتصال شناسایی شده است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در رفتار اتصال، پدیده‌ی اهرمی شدن است که عدم توجه به آن در مرحله‌ی طراحی باعث ایجاد خطاهایی در محاسبات می‌شود. برای محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T دو روش تجربی وجود دارد. با بررسی روش محاسباتی اسمیت و AISC، میزان خطای محاسباتی روش اسمیت در مقایسه‌ی عددی با نتایج مدل‌سازی اجرای محدود، ۸۰ الی ۱۶۰ درصد است و میزان این خطا وابسته به صلبیت ورق اتصال است. در روش دوم در اتصالات با ورق نیمه‌صلب، خطا در حدود ۴۰٪ برآورد شده است. به‌منظور پی‌بردن به نحوه‌ی تنظیم فرمول‌بندی AISC، مدل‌هایی از اتصالات T با ضخامت ورق‌های متغیر ایجاد و تحت تحلیل پارامتریک قرار گرفته است. با بررسی مکانیزم شکست این اتصالات و ارزیابی تأثیر نیروهای اهرمی شدن در آن، این نتیجه حاصل شده است که میزان نیروهای اهرمی شدن رابطه‌ی مستقیم با صلبیت ورق اتصال دارد و با کاهش صلبیت ورق، بر میزان نیروهای اهرمی شدن افزوده می‌شود. همچنین در اتصالات با ورق خیلی نرم، مقدار نیروهای اهرمی شدن ایجاد شده، ضریب ثابتی از نیروهای خارجی

اعمال شده به اتصال است. در اتصالات با ورق خیلی صلب نیز می‌توان تحت شرایطی از اثر نیروهای اهرمی شدن صرف‌نظر کرد. با مقایسه‌ی توزیع تنش تماسی حاصل از پدیده‌ی اهرمی شدن در اتصالات مفصلی، نیمه‌گیردار و T، و معادل‌گرفتن ناحیه‌ی کششی ورق در اتصالات نیمه‌گیردار با سپری با ضخامت بال متغیر، ضریب هندسی ۱/۲۵ برای پیچ‌های ردیف سوم و ۰/۵ برای پیچ‌های ردیف دوم در این اتصالات پیشنهاد شده است. در محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن با روش بهبود یافته، بیشینه‌ی خطایی در حدود ۵٪ در پیش‌بینی این نیروها در اتصالات معرفی شده برآورد شده است. همچنین با استفاده از روش بهبود یافته، می‌توان نیاز و عدم نیاز به محاسبه‌ی نیروهای اهرمی شدن در اتصالات نیمه‌گیردار را پیش‌بینی کرد. با بررسی روش‌های متعارف طراحی اتصالات، دقت این روش‌ها در پیش‌بینی رفتار اتصال بررسی شده است. با در دست داشتن مقدار دقیق نیروهای اهرمی شدن، یک روش طراحی اصلاح شده بر مبنای روش مقطع معادل و با فلسفه‌ی مقاومت مجاز ارائه شده است.

با ارزیابی دقت روش اصلاح‌شده‌ی پیشنهادی با مدل‌های اجرای محدود، ۲۲٪ کاهش در خطای طراحی حاصل شده است. البته باید تأکید شود که نتایج ارائه‌شده در این نوشتار حاصل یک روش عددی و مقایسه‌ی بر مبنای مدل‌سازی اجرای محدود و نتایج آزمایشگاهی است که برای اتصالات با جزییات ارائه‌شده قابل استفاده است و برای این که بتوان از آن در شرایط متغیر استفاده کرد، لازم است یک کار تحقیقاتی جامع عددی و تجربی انجام شود. در هر حال، رابطه‌های ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ها هنوز قابل استفاده است.

## پانوشتها

1. American institute of steel construction
2. metal building manufacturers association

## منابع (References)

1. Simoes-Da-Silva, L.; Lima, L.; Vellasco, P.; De Andrade, S. and De Castro, R.A. "Nonlinear dynamic analysis of steel portal frames with semi-rigid connections", *Engineering Structures*, **30**(9), pp. 2566-2579 (2008).
2. Mirghaderi, S.R. and Dehghani Renani, M. "The rigid seismic connection of continuous beams to column", *Journal of Constructional Steel Research*, **64** (12), pp. 1516-1529 (2008).
3. Pirmoz, A.; Seyed Khoei, A.; Mohammadrezapour, E. and Saedi Daryan, A. "Moment-rotation behavior of bolted top-seat angle connections", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**, pp. 973-984 (2009).
4. Dubina, D. and Stratan, A. "Behavior of welded connections of moment resisting frames beam-to-column joints", *Engineering Structures*, **24**(11), pp. 1431-1440 (2002).

5. Krishnamurthy, N. "Modeling and prediction of steel bolted connection behavior", *Computers & Structures*, **11**(2), pp. 75-82 (1980).
6. Bahaari, M.R. and Sherburne Archibald, N. "Behavior of eight-bolt large capacity end-plate connections", *Computers & Structures*, **77**(3), pp. 315-325 (2000).
7. Wheeler, A.T.; Clarke, M.J. and Hancock, G.J. "FE modeling of four-bolt, tubular moment end-plate connections", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **126**(7), pp. 816-822 (2000).
8. Urbonas, K. and Daniunas, A. "Behavior of semi-rigid steel beam-to-beam joints under bending and axial forces", *Journal of Construction Steel Research*, **62**(12), pp. 1244-1249 (2006).
9. Simoes-da-Silva, L.; Lima, L.; Vellasco, P. and De Andrade, S. "Experimental behavior of end-plate beam to column joints under bending and axial force", *Eccs Technical Committee 10 "connections" twg10.2*, Department of Civil Engineering, University of Coimbra (2001).
10. Urbonas, K. and Daniunas, A. "Analysis of the steel frames with the semi-rigid beam-to-beam and beam-to-column knee joints under bending and axial forces", *Engineering Structures*, Article in press (2008).
11. Chakhari, J.; Daidié, A.; Chaiba, Z. and Guillot, J. "Numerical model for two-bolted joints subjected to com-

- pressive loading”, *Finite Elements in Analysis and Design*, **44**, pp. 162-173 (2008).
12. Al-Khatib, Z. and Bouchar, A., “Analysis of a bolted t-stub strengthened by backing-plates with regard to Eurocode 3”, *Journal of Constructional Steel Research*, **63**, pp. 1603-1615 (2007).
  13. Feng, F.; Dennis, L. and Jianqiao Y. “Parametric study of semi-rigid composite connections with 3-D finite element approach”, *Engineering Structures*, **29**(6), pp. 888-898 (2007).
  14. An American National Standard, ANSI/AISC 360-05, “specification for structural steel buildings” (2005).
  15. American Institute of Steel Construction, “Manual of steel construction, load and resistance factor design”, *Connections*, **2**, Chicago (2000).
  16. Abaqus Element Reference, *Abaqus Documentation*, Online help (2009).
  17. Gir~ao Coelho, A.M. and Bijlaard, F.S.K. “Experimental behaviour of high strength steel end-plate connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, **63**, pp. 1228-1240 (2007).
  18. Faella, C.; Piluso, V. and Rizzano, G. “Structural steel semi rigid connections: Theory, design and software”, CRC press, Florida, pp. 505-512 (2000).
  19. Smith, J.C., *Structural Steel Design LRF D Approach*, North Carolina State University, Wiley Inc (1991).
  20. Farajpour, M.R. “Effect of beam to column connections on seismic and static response of steel frames”, MSC thesis (2009).