



اصلاح روش طراحی اتصالات مفصلی پیچی با در نظر گرفتن

اثر نیروهای اهرمی شدن

یوسف حسین زاده^۱، محمدرضا فرج پور^۲، محمدعلی لطف‌اللهی یقین^{۳*}

(دریافت ۸۹/۲/۲۸، پذیرش ۹۱/۹/۲۶)

چکیده:

در این مقاله با اصلاح روش تحلیل و طراحی اتصالات پیچی مفصلی با ورق انتهایی، روشی دقیق برای طراحی این نوع از اتصالات با فلسفه‌های طراحی حالات حدی (LRFD) و مقاومت مجاز (ASD) ارائه شده است. مدل‌های المان محدود اتصالات پیچی مفصلی با ورق انتهایی در چند هندسه مختلف ایجاد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده اند. اثر اهرمی شدن ورق در این مدل‌ها مورد توجه قرار گرفته است و از مدل‌های گسیختگی اتصال T جهت مقایسه سختی، تغییر شکل ورق اتصال و نحوه توزیع فشار تماسی بین صفحه ای حاصل از پدیده اهرمی شدن، استفاده شده است. با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک اتصالات مفصلی و T، روشی اصلاح شده برای محاسبه نیروهای اهرمی شدن ارائه و سپس روشی بهبود یافته برای طراحی اتصالات پیچی مفصلی با در نظر گرفتن اثرات 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 جهت طراحی اتصالات پیچی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

اتصال مفصلی پیچی با ورق انتهایی، مدل المان محدود، پدیده اهرمی شدن، مدل‌های گسیختگی

Improving Bolted Simple Connections Design Method in Regard With Effect of Prying Action

ABSTRACT:

This paper presents improving analyses and designs method of end plate bolted simple connections, which is an exact way for designing this type of connections with load and resistance factor design (LRFD) and allowed stress design (ASD) method. Besides, finite element models of end plate bolted simple connections in various geometry is made and compared with experimental results. Prying action effect in these models is regarded and failure models are used to computation stiffness. Also, deformation and distribution of surface press which result from prying action phenomena is used. With using the result from parametric analyses, an improved method is presented to computation prying action. Then, an improved method is proposed to design bolted simple connections in regard with prying action effect. Accuracy assessment of proposed method, will display efficiency and favor accuracy in designing bolted connections.

Keywords:

End Plate Bolted Simple Connections, Finite Element Model, Prying Action Phenomena, Failure Model

*۱. استادیار دانشکده فنی عمران دانشگاه تبریز hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. کارشناس ارشد سازه Mr.farajpour@yahoo.com

۳. استاد دانشکده فنی عمران دانشگاه تبریز Lotfollahi@tabrizu.ac.ir



اتصالات خوب طراحی شده می توانند با مشارکت در رفتار غیر خطی سازه، رفتار کلی آن را بهبود بخشند. محل اتصال تیر به ستون، مناسبترین نقطه برای تشکیل مفصل پلاستیک می باشد. ظرفیت دورانی مناسب اتصالات پیچی این امکان را به آنها می دهد که به جای ایجاد ترک، با تغییر شکل غیر الاستیک و جذب انرژی، از تغییر مکان جانبی بیشتر قاب جلوگیری نموده و نیاز به شکل پذیری در تیرها و ستونها را کاهش دهند. این موضوع لزوم وجود یک روش تحلیل و طراحی دقیق اتصالات را نشان می دهد. قبل از زلزله سال ۱۹۹۴ نورتریج، چنین تصور می شد که قاب با اتصالات جوشی، بهترین سیستم برای تحمل بارهای ثقلی و جانبی می باشد [۱]. چنین انتظار می رفت که خرابی این قابها به تسلیم و کماتش موضعی در تیرها و ستونها و همچنین به جابجایی نسبی کوچک ماندگار بین طبقات محدود شود. زلزله نورتریج باعث ایجاد خرابی در ناحیه جوش اتصالات و ایجاد ترک در ناحیه فولاد حرارت دیده اعضای اتصال شد. از طرف دیگر به دلیل وجود امکان ساخت کارخانه ای اتصالات پیچی، ایمنی بالا و هزینه کم اجرا، این نوع از اتصالات مورد توجه روزافزون طراحان قرار گرفته است.

کریشنامورتی با سرپرستی گروه تحقیقاتی انستیتیوی AISC و انجمن مجریان ساختمانهای فولادی (MBMA) در سال ۱۹۷۱ اولین مطالعات را در زمینه رفتار و طراحی اتصالات پیچی انجام داده است [۱۶، ۱۷، ۱۸]. کار تحقیقاتی او در دو زمینه نظری و تجربی پیش رفت و حاصل آن دهها گزارش، مقاله و پایان نامه بود. نتایج این تحقیقات در آیین نامه (1980) AISC به عنوان ضوابط طراحی اتصالات پیچی وارد شده است. با افزایش توانایی کامپیوترها در سال ۱۹۹۳، شربورن و بهاری [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷] با استفاده از نرم افزار ANSYS، مدل دو بعدی تنش مسطح اتصالات پیچی و سپس مدل سه بعدی آنها را ایجاد نمودند. ویلر با استفاده از نرم افزار ABAQUS، اتصالات تیر به ستون را برای یافتن فرمولهای طراحی آنها مدل نموده است [۸]. در

سال ۲۰۰۸، اوربوناس و آلفونساس در دانشگاه سالکوتکیای لیتوانی مطالعاتی را در زمینه اتصالات پیچی انجام دادند. اساس تحقیقات آنها بر پایه مدل مولفه آئین نامه اروپا بود و آنها صحت مدلسازی خود را بر اساس نتایج تجربی داسیلوا از دانشگاه پراگ ارزیابی کردند [۹]. در این مقاله نیز از این بانک اطلاعات آزمایشگاهی برای ارزیابی دقت مدل‌های المان محدود استفاده شده است.

روشهای طراحی اتصالات پیچی بر مبنای مدل دو بعدی تنش مسطح کریشنامورتی استوار است. پیشرفتهای اخیر در نرم افزارهای المان محدود و ابزارهای اندازه گیری دقیق این امکان را فراهم نموده است که با ارائه درک درستی از نحوه توزیع تنش، کرنش و رفتار اتصال، بهبود روشهای تحلیل و طراحی امکان پذیر باشد.

در این تحقیق رفتار اتصالات مفصلی پیچی با ورق انتهایی در دو حالت گونیا و زانویی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های اتصالات ایجاد شده بر اساس طبقه بندی آیین نامه اروپا (EC3)، مفصل کامل می باشند. بعد از ایجاد مدل المان محدود اتصالات، دقت مدل کامپیوتری با استفاده از داده های تجربی ارزیابی شده است. پس از اطمینان از صحت و ارزیابی دقت مدل‌های المان محدود، با تحلیل پارامتریک اتصالات مفصلی و مقایسه نتایج حاصل از اتصالات ساده T، عوامل مهم موثر در رفتار اتصالات شناسایی شده است. یکی از پارامترهای مهم موثر در رفتار اتصالات، پدیده اهرمی شدن می باشد. آیین نامه های طراحی روش دقیقی برای محاسبه نیروی اهرمی شدن ارائه نموده و فقط با افزایش ضریب اطمینان روشهای طراحی، درصد کاهش اثرات آن برآمده اند. این موضوع در برخی موارد باعث غیر اقتصادی شدن طراحی و غیر واقعی بودن رفتار پیش بینی شده برای اتصال شده و تغییر در رفتار کل سازه را منجر می شود. در ادامه تحقیق، با ارائه روشی برای محاسبه نیروهای اهرمی شدن، تاثیر نیروهای اهرمی شدن در رفتار اتصالات مفصلی بررسی و قوانین حاکم بر آن به صورت یک مدل ریاضی استخراج شده است. نتیجه این



مرحله از تحقیق، رایج روشی اصلاح شده برای اعمال اثر این نیروها در اتصالات مفصلی می باشد.

روشهای متداول تحلیل و طراحی اتصالات پیچی با فلسفه‌های مقاومت مجاز (ASD) [۱۰] و حالات حدی (LRFD) [۱۱] بررسی شده و دقت هر یک با نتایج مدل المان محدود ارزیابی شده است. در نتیجه، روشی اصلاح شده برای طراحی اتصالات پیچی مفصلی پیشنهاد و دقت روش پیشنهادی با استفاده از مدل‌های المان محدود ارزیابی شده است.

۲- مدل‌سازی المان محدود

برای تعیین رفتار اتصالات پیچی مفصلی در حالت گونیا و زانویی، دو گروه مدل المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS تهیه شده است [۱۵، ۱۶]. همچنین به منظور شناسایی عوامل موثر در پدیده اهرمی شدن، انجام آنالیز پارامتریک و محاسبه نیروهای اهرمی شدن، یک گروه از مدل‌های المان محدود اتصالات T با ضخامت متغیر ورق ایجاد شده است. مدل‌های المان محدود اتصال مفصلی زانویی، در دو حالت ۱۰ و ۲۰ درجه چرخش نسبت به حالت گونیا ایجاد شده اند. شکل‌های ۱، ۲ و ۳ مدل‌های المان محدود و جدول ۱ و ۲ مشخصات هندسی آنها را نشان می‌دهند.

در مدل‌های المان محدود، رفتار غیر خطی هندسی، غیر خطی مصالح و تغییر شکل‌های بزرگ مورد توجه قرار گرفته است. ساختار استفاده شده برای مدل‌سازی اجزای اتصال، حالت Solid بوده و خواص مکانیکی مصالح پیچ پر مقاومت A490 به صورت سه خطی و فولاد نرمه ST37 تیر، ستون و ورق به صورت هفت خطی انتخاب شده است [۱۲]. در مدل‌سازی اتصال سعی شده است تمام جزئیات مد نظر قرار گیرد تنها در مورد مدل‌سازی جوش ساده سازی انجام شده است. جوش در مدل‌های المان محدود به صورت پیوسته با اتصال TIE مدل شده است. یعنی قطعاتی که با اتصال جوش به هم پیوند خورده اند به صورت یک تکه در نظر گرفته شده اند و از تاثیر جوش در رفتار مدل صرف نظر شده است. همچنین اتکای بین

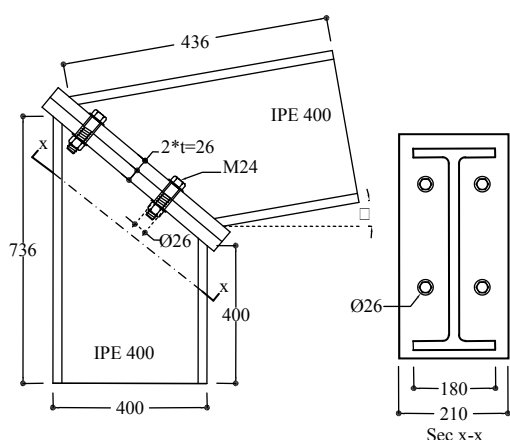
صفحه اتصال و بال ستون در نرم افزار به صورت سخت (HARD)، یعنی بدون قابلیت فرورفتن صفحات در هم تحت بارگذاری‌های بالا و همچنین بدون ضریب اصطکاک به صورت اتکای ساده و با خاصیت جداول‌نگی بعد از باربرداری تعریف شده است یعنی صفحات همانند حالت واقعی می‌توانند تحت کشش وارده از هم فاصله گرفته و دوباره به هم اتکا پیدا کنند. این نوع مدل‌سازی با توجه به تطابق آن با حالت واقعی، نتایج دقیقی از رفتار اتکا را حاصل می‌کند [۱۶]. جهت مش بندی اجزای اتصال، از مش‌های شش وجهی مرتبه پائین در حالت تنش سه بعدی استفاده شده است. جهت افزایش دقت مدل‌سازی، ابعاد مناسب المانها، با استفاده از آنالیز همگرایی اعضا تعیین شده است. هر کدام از اجزای اتصال به صورت مستقل تحت مش بندی‌های مختلف تحت بارگذاری و تحلیل قرار گرفته و با ارزیابی دقت نتایج حاصل از آنالیز، اندازه مش بندی مناسب آن قطعه تعیین شده است. نتایج آنالیز همگرایی پیچ در جدول ۳ و تیر در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۴ مدل مش بندی شده المان محدود نمونه اتصال مفصلی FE را نشان می‌دهد. بارگذاری مدل بصورت خمش خالص حاصل از زوج نیرو، در ۱۸ مرحله اعمال شده است. در مرحله تحلیل مدل خواص غیر خطی هندسی مدل‌ها در نظر گرفته شده است. جهت ارزیابی دقت مدل‌های المان محدود، از داده‌های آزمایشگاهی داسیلوا از دانشگاه پراگ [۹] استفاده شده است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و المان محدود، دقت مدل‌سازی اتصالات را نشان می‌دهد. مقایسه تغییر مکان یک گره خاص حاصل از بارگذاری خمشی مدل المان محدود اتصال مفصلی FE با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. جهت ارزیابی دقت مدل‌های المان محدود، از نتایج دو سنسور نصب شده در فاصله ۸ سانتیمتری (CH42) و یک متری اتصال (CH39) استفاده شده است. شکل ۵ محل نصب سنسورهای مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار خطا در مدل‌های المان در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، حدود ۸ درصد حاصل شده است.

جدول (۱) مشخصات هندسی مدل‌های المان محدود اتصالات مفصلی

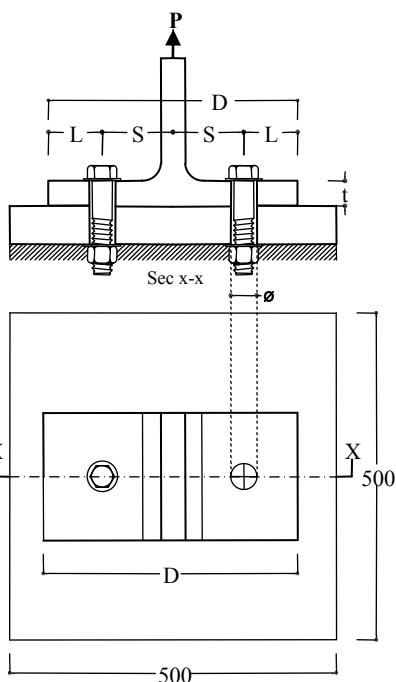
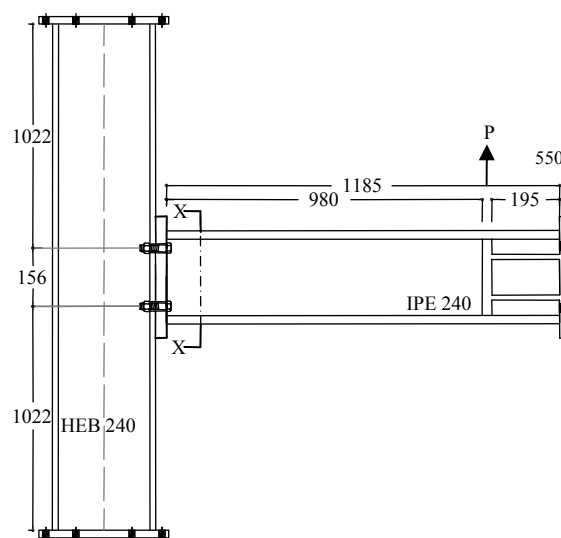
نوع پیچ	قطر پیچ	قطر سوراخ	طول تیر	طول ستون	پروفیل تیر	پروفیل ستون	ضخامت ورق اتصال t	زاویه نسبت به حالت گونیا □	نمونه
A490	20mm	22mm	1m	2.2m	IPE240	HEB240	8mm	0	FE
A490	24mm	26mm	0.4m	0.4m	IPE400	IPE400	26mm	10	A10
A490	24mm	26mm	0.4m	0.4m	IPE400	IPE400	26mm	20	A20

جدول (۲) مشخصات هندسی مدل‌های المان محدود اتصالات T

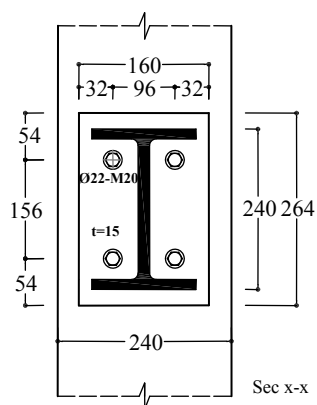
λ	نوع پیچ	قطر پیچ	قطر سوراخ	ابعاد ورق پایه	ضخامت ورق اتصال t	مدل
1.67	A490	20mm	22mm	500X500mm	20mm	P20M20
0.3	A490	20mm	22mm	500X500mm	35.2mm	P35.2M20
5	A490	20mm	22mm	500X500mm	2mm	P2M20



شکل (۲) مدل اتصال مفصلی زانویی (A10 & A20)



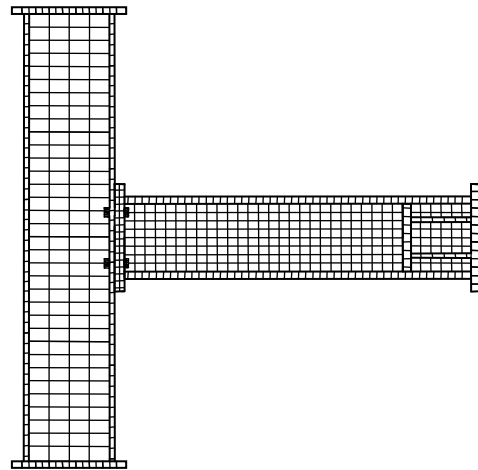
شکل (۳) مدل اتصال T



شکل (۱) مدل اتصال مفصلی گونیا (نمونه FE)



اتصال و E مدول الاستیسیته مصالح ورق می باشد. با توجه به این که قبلاً نیروهای اهرمی شدن فقط در اتصالات ساده T بررسی شده و فرمول عددی آن در دسترس است [۱۱]، برای تعیین نحوه تاثیر گذاری پارامترهای مختلف بخصوص صلبیت ورق اتصال در فرمول بندی کلی نیرو های اهرمی شدن، تحلیل مدل‌های المان محدود اتصال T با ضخامت متغیر ورق اتصال انجام شده است. مکانیزم شکست اتصالات T به صورت شکل ۸ می باشد. با بررسی منحنی ۹-الف و ۹-ب که تغییرات نیروهای اهرمی شدن را در اتصال T با ورق نیمه صلب نشان میدهد، ۴ مرحله متمایز در منحنی بار-اهرمی شدن و بار-جابجایی قابل تشخیص است. در این منحنی ها، در نقطه A نخستین نقاط پلاستیک در زیر جان اتصال تشکیل شده است. بخش A-O نمودار تغییر شکل خطی و الاستیک ورق اتصال را نشان می دهد. در مرحله A-B و B-C، تغییرات شدیدی در شیب منحنی مشاهده می شود. این بخش از بارگذاری نشان دهنده مراحل مکانیزم شکست اتصال می باشد. در نقطه B منحنی، مفصل پلاستیک پای جان اتصال گسترش یافته و یک افزایش شدید در تنش خط پیچ (خط F ورق اتصال) مشاهده می گردد. در نقطه C، مفاصل پلاستیک در خط پیچ در ورق اتصال ایجاد میگردد و نقاط محدودی از جان پیچ نیز تسلیم می شود ولی مفصل پلاستیک کامل در آن ایجاد نمی گردد. وقتی تنش در پیچ افزایش می یابد، تغییر شکل پیچ نیز متناسب با آن افزوده شده و جدا شدگی ورق اتصال از پی صلب افزایش و محل اثر برآیند نیروهای اهرمی شدن به لبه خارجی ورق منتقل می شود و به نسبت آن شیب نمودار بار-اهرمی شدن افزوده می شود. این اتصال بر اثر تسلیم ورق از ناحیه پای جان پروفیل T گسیخته شده است. با بررسی مدل‌های المان محدود، شکل مکانیزم شکست غالب اتصالات T با ورق انتهایی نیمه صلب، (۰,۵ < λ < ۱,۵) به صورت شکل ۸-ج می باشد. با بررسی منحنی های ۹-ج و ۹-د که مربوط به اتصالات T با ورق صلب (۰,۵ < λ < ۰,۳) است، سه مرحله متمایز در منحنی های بار-اهرمی شدن و بار-جابجایی قابل تشخیص



شکل (۴) مدل المان محدود نمونه اتصال مفصلی (FE)

۳- بررسی نیروهای اهرمی شدن

در طراحی اتصالات پیچی، صرفنظر نمودن از نیروهای اهرمی شدن باعث ایجاد خطا در طراحی می شود. در این تحقیق، جهت پی بردن به اثر رفتار نیروهای اهرمی شدن، فشار بین صفحه ای ناشی از توزیع این نیروهای در اتصالات T و مفصلی بررسی شده است. عوامل موثر در پدیده اهرمی شدن شامل ضخامت و صلبیت صفحه اتصال، قطر و طول پیچ، موقعیت و هندسه سوراخ، خواص مکانیکی مصالح پیچ و نوع بارگذاری اتصال می باشند. با توجه به زیاد بودن پارامترهای دخیل در نیروی اهرمی شدن، جهت محدود نمودن دامنه مطالعه، تاثیر صلبیت ورق اتصال مورد توجه قرار گرفته و از تاثیر سایر پارامترها صرف نظر شده است. واضح است که نتایج حاصله از این تحقیق نیز فقط در دامنه تغییرات صلبیت ورق اتصال معتبر می باشد.

جهت تعیین صلبیت ورق در اتصالات از ضریب λ استفاده شده است. این ضریب در مهندسی پی برای محاسبه صلبیت پی روی بستر الاستیک بکار برده می شود.

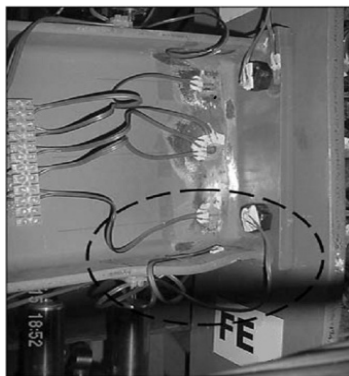
$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{K'_s}{4EI}} \quad (1)$$

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

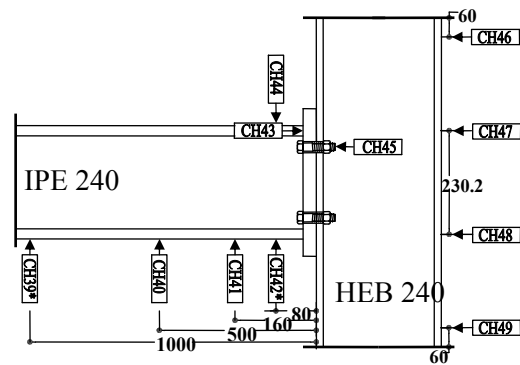
$$K_s = \frac{E}{2.4t} \quad (3)$$

در این رابطه، λ ضریب صلبیت ورق اتصال، B عرض ورق اتصال در جهت لنگر وارده به آن، t ضخامت ورق

پلاستیک در پای جان ایجاد می گردد. گسیختگی اتصال با این میزان صلبیت ورق از خط پیچ ورق اتصال رخ می دهد. با توجه به نرم بودن و شکل پذیری بالای ورق، تغییر شکل اتصال در اثر بارگذاری در مرحله غیر الاستیک، به صورت منحنی درجه ۲ می باشد. با بررسی مدل‌های المان محدود، شکل ۸-ب شکل غالب مکانیزم گسیختگی اتصالات با ورق نرم است. با بررسی نتایج تحلیل پارامتریک اتصالات T، ملاحظه شده است که مقدار نیروهای اهرمی شدن ایجاد شده در اتصالات، رابطه مستقیم با صلبیت ورق اتصال دارد. در اتصالات با ورق صلب ($\lambda < 0.5$) مقدار نیروهای اهرمی شدن ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است. با کاهش صلبیت ورق اتصال، نیروهای اهرمی شدن افزایش می یابند. منحنی ($\lambda - Q/P$) نشان می دهد که شیب نمودار در اتصالات با ورقهای اتصال خیلی نرم ($\lambda > 4$) به صفر میل کرده و نیروهای اهرمی شدن ایجاد شده در این اتصالات ضریب ثابتی از بار خارجی اعمال شده به اتصال می باشند. همچنین ($\lambda = 1.67$) نقطه عطف این نمودار بوده و می توان آن را به عنوان مرز ورق های اتصال صلب و نرم در نظر گرفت (شکل ۱۱). همچنین تغییرات نیروهای اهرمی شدن متناسب با مکانیزم شکست ورق اتصال می باشد. در اتصالات با ورق ضخیم یا صلب با کاهش مقدار λ و کاهش نیروهای اهرمی شدن، مکانیزم شکست نوع (الف)، در اتصالات با ورق نرم، مکانیزم شکست (ب) و در اتصالات با ورق نیمه صلب مکانیزم شکست (ج) رخ داده است (شکل ۸).



شکل (۵) محل نصب سنسور ها در مدل آزمایشگاهی (۹)



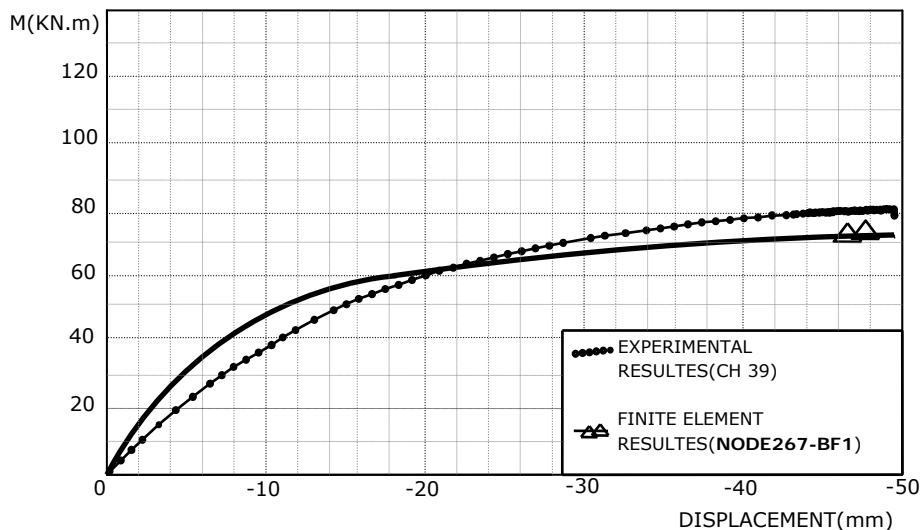
است. در مرحله $O-A1$ که منحنی در حالت خطی و الاستیک قرار داشته و در نقطه $A1$ نخستین مفاصل پلاستیک در ورق اتصال در پای جان پروفیل T ایجاد شده است. در نقطه $B1$ مفصل پلاستیک پای جان کامل شده و یک شیب تند در جهت افزایش تنش در محور پیچ مشاهده می شود. همچنین در این مرحله به دلیل پلاستیک شدن پای پروفیل T و کاهش طول اهرم و انتقال بار خارجی به طرف مرکز جان، شیب نمودار بار-اهرمی شدن تغییر می کند. در نقطه $C1$ ورق اتصال از ناحیه پای جان گسیخته می شود و نقاط محدودی از محور پیچ پلاستیک می شود ولی مفصل پلاستیک کامل در آن ایجاد نمی گردد. با بررسی مدل‌های المان محدود و منحنی بار-اهرمی شدن و بار-جابجایی اتصالات با ورق صلبی که در آنها ($0.3 < \lambda < 0.5$) می باشد، این نتیجه حاصل شده است که شکل ۸-الف شکل گسیختگی غالب این اتصالات بوده و گسیختگی سیستم از ناحیه پای جان اتصال است. در اتصالاتی که صلبیت ورق زیاد است ($\lambda > 3$) گسیختگی از مقطع پیچ بوده و در ورق اتصال مکانیزم شکستی رخ نمیدهد. همچنین با بررسی منحنی های ۹-ل و ۹-م که مربوط به اتصال با ورق نرم ($\lambda > 4$) است، سه مرحله متمایز در نمودار بار-اهرمی شدن و دو مرحله در نمودار بار-جابجایی مشاهده شده است. در این نمودارها، مرحله $O-A2$ مرحله کاملاً خطی و الاستیک و $A2-B2$ و $B2-C2$ مراحل مکانیزم شدن اتصال می باشد. در نقطه $A2$ نخستین نقاط پلاستیک در خط پیچ ورق اتصال (خط F) ایجاد گردیده است. با افزایش بارگذاری، در نقطه $B2$ نقاط

جدول (۳) نتایج آنالیز همگرایی پیچ

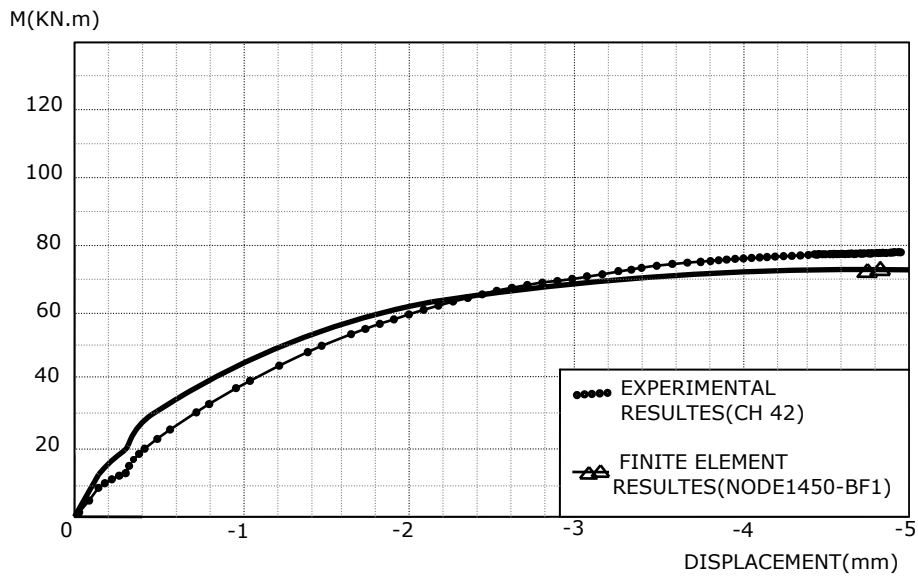
نمونه	بارگذاری N	شماره گره	تغییر مکان گره mm	حداکثر تنش فون میزس pa	اختلاف
نمونه ۱ SS:0.3	کششی P=5000	Sp1-65	-1.72×10^{-9}	9.173×10^3	-
	کششی P=1000	Sp1-65	-344×10^{-12}	1.825×10^3	-
نمونه ۲ SS:0.1	کششی P=5000	Sp1-65	-2.06×10^{-9}	9.586×10^3	16%
	کششی P=1000	Sp1-65	-413×10^{-12}	1.91×10^3	16.7%
نمونه ۳* SS:0.05	کششی P=5000	Sp1-65	-2.19×10^{-9}	9.47×10^3	5.6%
	کششی P=1000	Sp1-65	-4.38×10^{-12}	1.89×10^3	5.7%

جدول (۴) نتایج آنالیز همگرایی تیر

نمونه	بارگذاری N.m	شماره گره	تغییر مکان mm	اختلاف
نمونه ۱ Ss:0/05	خمشی M=1000	F1.1	$1/527 \times 10^{-9}$	-
	خمشی M=5000	F1.1	$7/63 \times 10^{-9}$	-
نمونه ۲ SS:0/02	خمشی M=1000	F1.1	$1/63 \times 10^{-9}$	8%
	خمشی M=5000	F1.1	$8/13 \times 10^{-9}$	8%
نمونه ۳* SS:0/01	خمشی M=1000	F1.1	$1/48 \times 10^{-9}$	6%
	خمشی M=5000	F1.1	$7/44 \times 10^{-9}$	6%



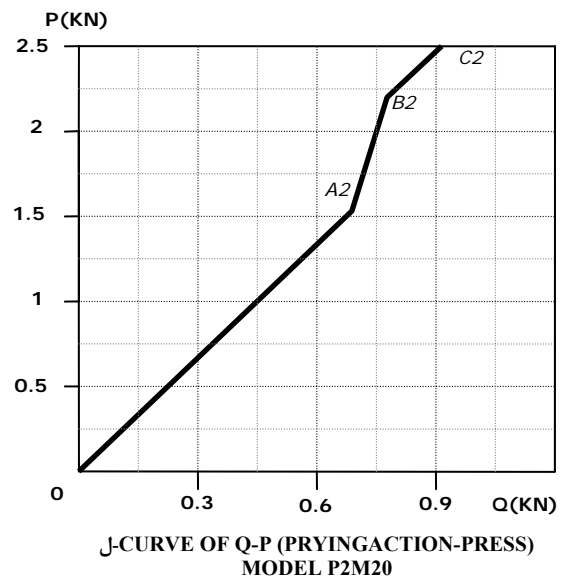
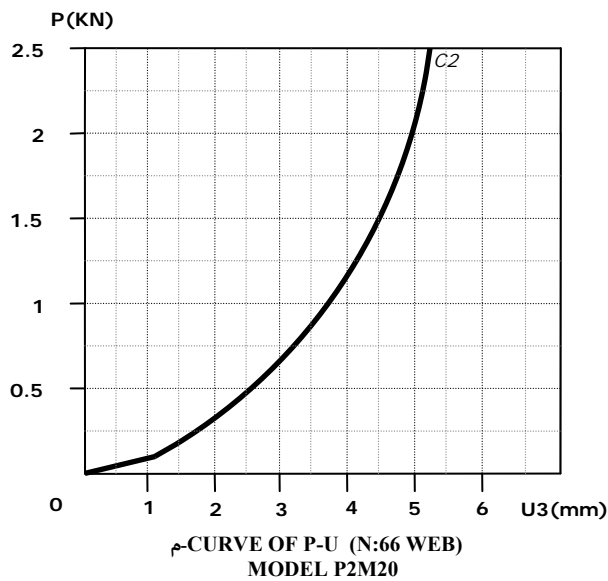
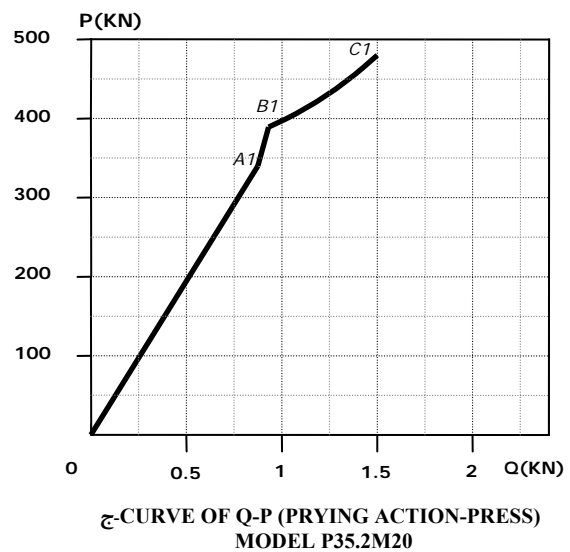
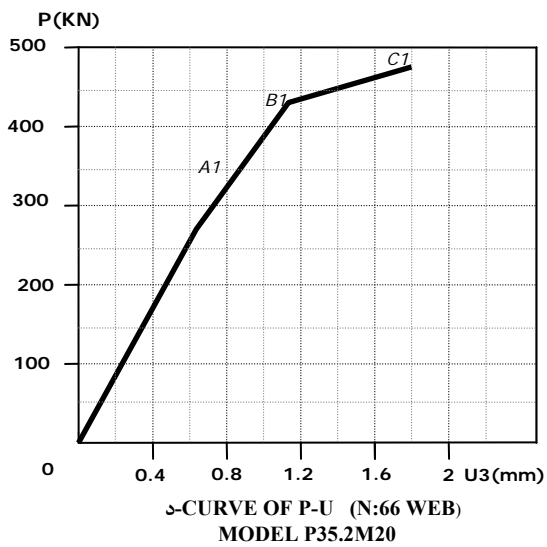
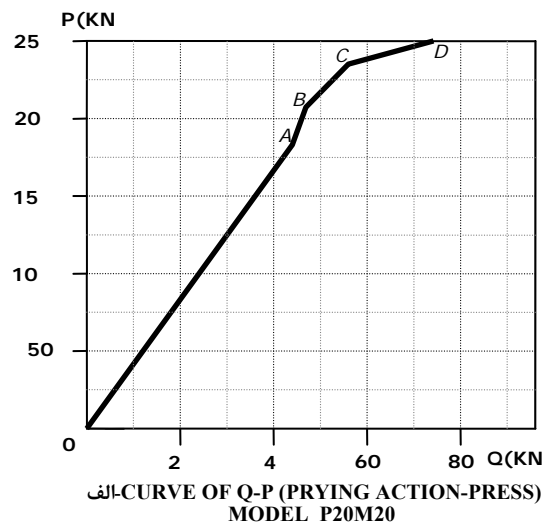
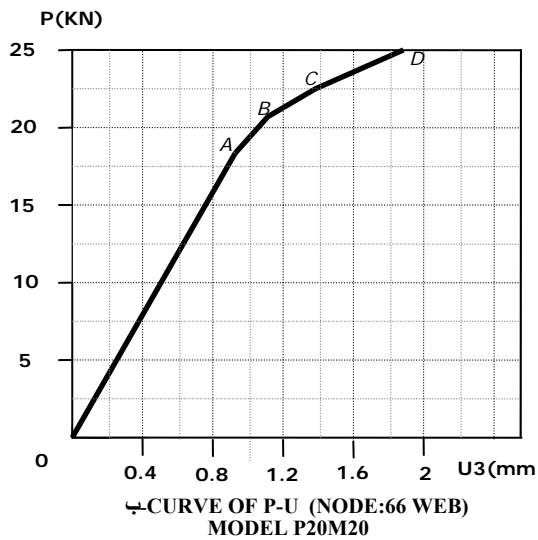
شکل (۶) مقایسه نتایج المان محدود و آزمایشگاهی تغییر مکان در محل نصب سنسور CH39



شکل (۷) مقایسه نتایج المان محدود و آزمایشگاهی تغییر مکان در محل نصب سنسور CH42

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

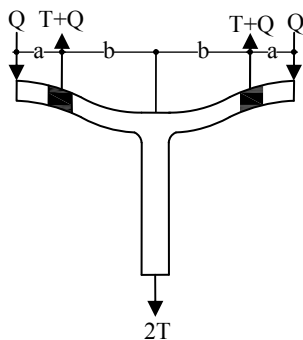
شکل (۸) مکانیزم شکست اتصالات T



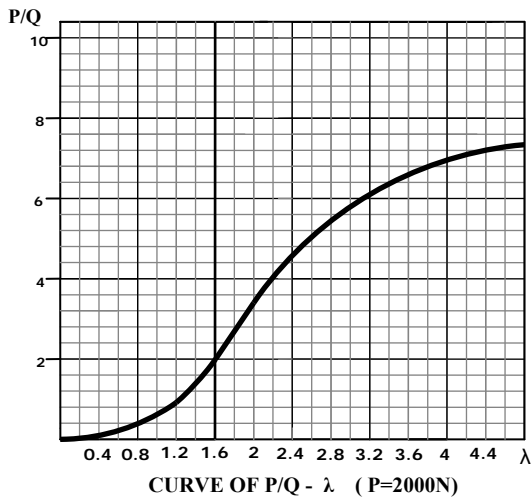
شکل (۹) نتایج آنالیز پارامتریک اتصال T

۴- محاسبه نیروهای اهرمی شدن

ضخامت مورد نیاز برای تحمل لنگر حاصل از بارگذاری خارجی است. این روش محاسباتی برای اتصالات T شکل ارائه شده است و خطای آن در اتصالات ایجاد شده با ورق نیمه صلب ($\lambda=1,67$) حدود ۴۰ درصد می باشد و با کاهش ضخامت و صلبیت ورق اتصال به خطای آن افزوده می شود. ولی در کل دقیقترین روش محاسبه نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T می باشد که تا کنون ارائه شده است.



شکل (۱۰) مشخصات هندسی روش محاسباتی AISC



شکل (۱۱) منحنی تاثیر صلبیت ورق اتصال

بر نیروهای اهرمی شدن

۵- روش اصلاح شده محاسبه نیروهای اهرمی شدن تفاوت عمده ای در توزیع فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی شدن در اتصالات مفصلی و اتصالات T وجود دارد. شکل ۱۲ توزیع فشار تماسی بین صفحات را در این اتصالات نشان می دهد.

فانلا و همکاران او در سال ۱۹۹۹ بررسی های گسترده ای در زمینه محاسبه نیروهای اهرمی شدن انجام داده اند که نتیجه کار آنها ارائه روشهایی تقریبی جهت محاسبه این نیروها در چند تیپ خاص از اتصالات T می باشد [۱۳]. اسمیت و همکاران فرمولی تقریبی جهت محاسبه نیروهای اهرمی شدن ارائه کرده اند [۱۴]. در این فرمول که برای محاسبه نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T ارائه شده است، صفحات اتصال کاملاً صلب فرض شده اند. پیچ های مورد استفاده از نوع A490 بوده و بارگذاری اتصال به صورت کشش خالص و از ناحیه جان پروفیل T می باشد. رابطه ۴ فرمول تقریبی اسمیت را نشان می دهد.

$$Q = F \left[\frac{100.b.D^2 - 14.L.t_f^2}{62.a.D^2 - 21.L.t_f^2} \right] \quad (۴)$$

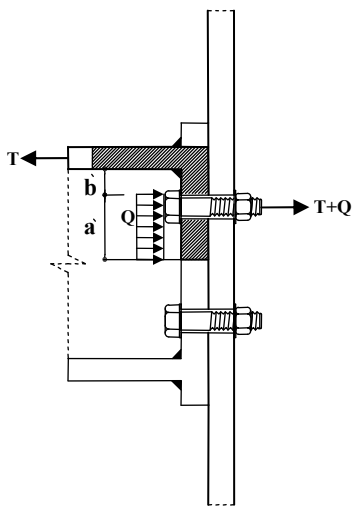
در رابطه (۴)، D قطر اسمی پیچ، F نیروی کشش خارجی یک پیچ، t_f ضخامت ورق اتصال، b فاصله پیچ تا وسط جان پروفیل تیر، a فاصله مرکز پیچ از لبه خارجی صفحه و L طولی از ارتفاع ورق اتصال است که شامل یک پیچ می شود ($L=h/n$). با ارزیابی دقت این فرمول روی مدل های المان محدود اتصال T ایجاد شده در این تحقیق، خطایی در حدود ۸۰ الی ۱۶۰ درصد در محاسبه نیروهای اهرمی شدن حاصل شده است.

در آیین نامه AISC-LRFD روشی برای محاسبه نیروهای اهرمی شدن ارائه شده است [۱۱]. در این روش، نیروهای اهرمی شدن برای اتصالات T با رابطه کلی ۵ محاسبه شده است.

$$Q = \beta \cdot \alpha \cdot \delta \cdot \rho \cdot \left(\frac{t}{tc} \right)^2 \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، Q نیروی اهرمی شدن یک پیچ، β کشش طراحی پیچ، ρ نسبت فاصله پیچ از لبه جان به فاصله پیچ از لبه ورق، δ ضریب عرض ورق یا نسبت عرض خالص ورق به عرض اسمی آن در ردیف سوراخ پیچ ها، α نسبت لنگر ورق اتصال در تراز پیچ (M1) به لنگر ورق در تراز جان (M2) در واحد عرض ورق، t ضخامت ورق و tc





شکل (۱۳) نبشی معادل ناحیه کشش اتصال مفصلی

در این رابطه، b' فاصله لبه داخلی پیچ از لبه بال کششی تیر و a' فاصله لبه داخلی پیچ از انتهای ناحیه فشار بین صفحه ای می باشد. a' ماکزیمم طول ممکنه برای گسترش فشار تماسی حاصل از پدیده اهرمی شدن در اتصالات مفصلی با دو ردیف پیچ می باشد. با محاسبه ضریب هندسی، پروسه زیر برای محاسبه نیروهای اهرمی شدن پیشنهاد می شود.

$$rut = \frac{M}{h} \times \frac{1}{n} \quad (۶)$$

$$\rho = \frac{b'}{a'} \quad (۷)$$

$$\delta = 1 - \frac{d'}{\rho} \quad (۸)$$

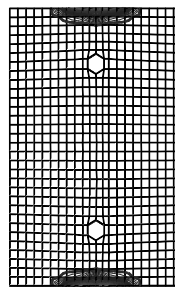
$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\phi ru}{rut} - 1 \right) \quad (۹)$$

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \left[\left(\frac{rut}{\phi ru} \right) \times \left(\frac{t_c}{t} \right)^2 - 1 \right] \quad (۱۰)$$

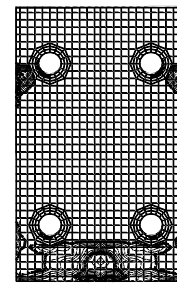
$$tc = \sqrt{4.44 - \phi rn.b'} / p.Fy \quad (۱۱)$$

$$Q = \phi rnt \left[\delta . \alpha . \rho . \left(\frac{t}{t_c} \right)^2 \right] \quad (۱۲)$$

در رابطه‌های فوق، Q نیروی اهرمی شدن یک پیچ، ϕrn کشش اسمی طراحی پیچ، rut کشش خارجی پیچ، t ضخامت ورق اتصال، t_c ضخامت اولیه ورق اتصال که با رابطه ۱۱ تعیین می شود. P سهم هر پیچ از عرض اسمی



(ب)



(الف)

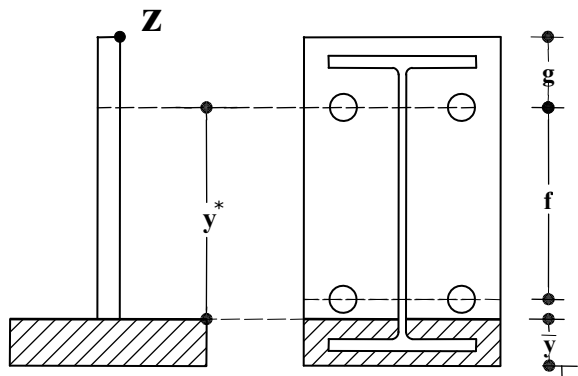
شکل (۱۲) توزیع فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی

شدن (الف) در اتصال مفصلی گونیا (ب) در اتصال T

در اتصالات T، فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی شدن در لبه خارجی ورق اتصال به وجود آمده و ضرایب هندسی فرمول AISC برای محاسبه این نیروها بر اساس شکل توزیع فشار تماسی به دقت تعیین شده است. با توجه به شکل توزیع فشار، ملاحظه می شود که محل اعمال فشار ناشی از نیروهای اهرمی شدن در اتصالات مفصلی نسبت به اتصالات T متفاوت است. دلیل این موضوع آن است که در اتصالات T، نیروی کششی به صورت متقارن توسط جان اتصال به ورق انتهایی منتقل شده و در آن خمش متقارن ایجاد می نماید ولی در اتصالات مفصلی، کشش حاصل از خمش خارجی اعمال شده توسط بال تیر به ورق منتقل شده و به دلیل خاصیت سخت کنندگی جان پروفیل تیر، خمش نامتقارن در ارتفاع ورق ایجاد می شود. این خمش نامتقارن باعث انتقال ناحیه فشار تماسی حاصل از نیروهای اهرمی شدن به طرف تار خنثی یا بال فشاری تیر می شود. جهت ارائه روشی برای محاسبه نیروهای اهرمی شدن در اتصالات مفصلی، نخست باید ضرایب هندسی فرمول AISC برای این نوع از اتصالات تعیین گردد. با توجه به شکل توزیع فشار تماسی اتصالات مفصلی و برازش اطلاعات حاصل از آنالیز پارامتریک اتصالات، ناحیه تحت کشش اتصال را می توان با یک نبشی معادل گرفت (شکل ۱۳). با تحلیل پارامتریک اتصالات مفصلی با صلبیت ورق متغیر، ضریب هندسی زیر حاصل شده است.

$$a' = 1.2 \times b' \quad (۵)$$

پیچ، می توان تنش کششی خالص حاصل از بارگذاری خارجی را با خطایی در حدود ۵ درصد محاسبه کرد (شکل ۱۴). این در حالی است که بر اساس تئوری متعارف روش مقطع معادل، تنش پیچ های ردیف کشش در دورترین فاصله مقطع معادل از تار خشی محاسبه می شود. در این حالت خطای حاصل از محاسبه تنشهای خالص خارجی وارده به مقطع پیچ کششی در بارگذاری کششی حدود ۲۰ درصد و در اندرکنش کشش و برش ۳۰ درصد در جهت اطمینان می باشد. در صورت عدم محاسبه نیروهای اهرمی شدن، خطای روش مقطع معادل متعارف در پیش بینی تنش کل وارده به مقطع پیچ بحرانی، در بارگذاری کششی حدود ۲۶ درصد و در اندرکنش کشش و برش ۳۶ درصد بدست آمده است.



شکل (۱۴) مقطع معادل پیچ کششی

جهت محاسبه تنش در خط تراز پیچ کششی در روش مقطع معادل اصلاح شده و همچنین تاثیر دادن پدیده اهرمی شدن در محاسبات، پروسه زیر پیشنهاد می شود.

$$b_e^2 = 2A_b \quad (13)$$

$$\frac{h - \bar{y}}{y} = \sqrt{\frac{b}{b_e}} \quad (14)$$

$$f_t' = \frac{M}{I_x} \cdot d_2 \quad (15)$$

با رابطه ۱۴ می توان موقعیت تار خشی را در مقطع معادل یافت. در این روابط، b_e عرض مقطع معادل، A_b سطح مقطع پیچ کششی، \bar{y} ارتفاع ناحیه فشار یا فاصله تار

ورق اتصال موازی با بال کششی، α ضریب هندسی اتصال مفصلی با دو ردیف پیچ و δ نسبت عرض خالص به عرض اسمی ورق اتصال موازی با بال کششی تیر در خط پیچ می باشد. همچنین با رابطه ۱۰ میتوان نیاز و یا عدم نیاز به محاسبه نیروهای اهرمی شدن را پیش بینی کرد. اگر $\alpha > 0$ باشد، نیروهای اهرمی شدن باید محاسبه شود و اگر $\alpha < 0$ باشد، میتوان از تاثیر نیروهای اهرمی شدن در محاسبات صرف نظر کرد. بر اساس تحلیلهای پارامتریک انجام گرفته در اتصالات مفصلی با ورق اتصال ضخیم، ($\lambda > 3, 0$)، همواره ضریب α منفی بوده و میتوان از نیروهای اهرمی شدن صرف نظر کرد. با ارزیابی دقت پروسه محاسباتی فوق در مدل های المان محدود اتصالات مفصلی در حالت گونیا، حداکثر خطا برابر با ۲ درصد و در اتصالات زانویی حداکثر خطا ۴ درصد بدست آمده است. البته باید توجه نمود که پروسه محاسباتی ارائه شده فقط در محدوده اتصالات مفصلی با هندسه بررسی شده در این تحقیق صادق می باشد. در سایر اتصالات پیچی می بایست ضرایب هندسی روش ارائه شده به دقت محاسبه گردد.

۶- اصلاح روشهای طراحی متعارف

روش طراحی با فلسفه های حالات حدی (LRFD) و روش طراحی مقطع معادل با فلسفه طراحی مقاومت مجاز (ASD)، از پرکاربردترین روشهای طراحی اتصالات پیچی می باشند. در روش طراحی حالات حدی بدون در نظر گرفتن اثر نیروهای اهرمی شدن در اتصالات مفصلی، ماکزیمم خطایی در حدود ۱۸ درصد در طراحی حاصل می شود. این خطا در خلاف جهت اطمینان بوده و ایمنی اتصالات طراحی شده با این روش را به مخاطره می اندازد. با وارد کردن اثر نیروهای اهرمی شدن، می توان خطای محاسبات را به کمتر از ۴ درصد کاهش داد. در این حالت، کشش کل وارده به پیچ، مجموع کشش حاصل از خمشی خارجی و کشش حاصل از نیروهای اهرمی شدن می باشد. در طراحی با روش مقطع معادل، با معادل قرار دادن مقطع پیچ کششی با مستطیل به عرض b_e در ارتفاع کل ورق اتصال و محاسبه تنش کششی خارجی در خط تراز خود



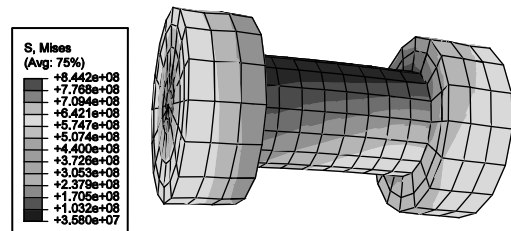
نتیجه گیری

در این تحقیق، رفتار اتصالات مفصلی پیچی با ورق انتهایی با دو ردیف پیچ در دو حالت گونیا و زانویی مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از ایجاد مدل‌های المان محدود اتصالات در نرم افزار ABAQUS، دقت مدل‌های کامپیوتری با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ارزیابی شده است. ماکزیمم خطای مدل‌های المان محدود ایجاد شده حدود ۸ درصد برآورد شده است. با تحلیل پارامتریک اتصالات، عوامل مهم موثر در رفتار اتصال شناسایی شده است. یکی از مهم ترین پارامترهای موثر در رفتار اتصال، پدیده اهرمی شدن می باشد که عدم توجه به آن در مرحله طراحی باعث ایجاد خطاهایی در محاسبات می شود. برای محاسبه نیروهای اهرمی شدن در اتصالات T دو روش تجربی وجود دارد که توسط اسمیت و آیین نامه AISC ارائه شده است. روش اسمیت در اتصالات ساده T دارای خطای بالایی می باشد و روش ارائه شده در آیین نامه AISC در اتصالات ساده T نتایج قابل قبولی بدست داده است. به همین دلیل جهت پی بردن به نحوه تنظیم فرمولبندی AISC، مدل‌هایی از اتصالات T با ضخامت ورق‌های متغیر ایجاد و تحت آنالیز پارامتریک قرار گرفته است. با بررسی مکانیزم شکست این اتصالات و ارزیابی تاثیر نیروهای اهرمی شدن در آن، این نتیجه حاصل شده است که میزان نیروهای اهرمی شدن رابطه مستقیم با صلبیت ورق اتصال داشته 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 می توان تحت شرایطی از اثر نیروهای اهرمی شدن صرف نظر کرد. همچنین رابطه نیروهای اهرمی شدن با مکانیزم شکست اتصالات کاملاً مشهود است. در اتصالات با ورق صلب شکست معمولاً از ناحیه پیچ رخ داده است. در اتصالات با ورق نرم شکست از ناحیه خط سوراخکاری پیچها در ورق رخ داده است. در اتصالات با ورق نیمه صلب بر اساس ضخامت ورق اتصال محل شکست ورق اتصال مابین خط سوراخکاری و جان T متغیر است. با بررسی مکانیزم شکست و برآزش اطلاعات حاصل از توزیع تنش بین صفحات در اتصالات

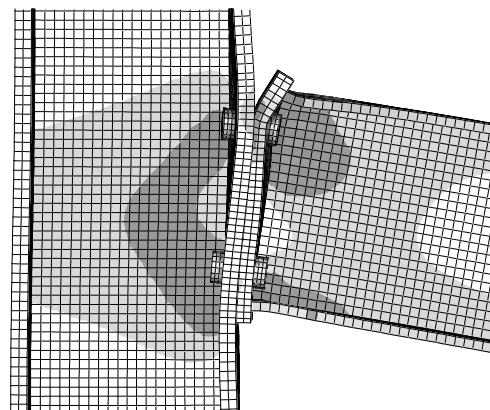
خشتی از لبه فشاری پایین اتصال و b عرض ورق اتصال می باشد. رابطه ۱۵ تنش کششی ناشی از خمش خارجی بدون در نظر گرفتن پدیده اهرمی شدن را در مقطع پیچ نشان می دهد. در این رابطه M لنگر خارجی، I_x ممان اینرسی مقطع معادل و d_2 فاصله پیچ ردیف کشش از تار خشتی می باشد. برای محاسبه تنش کل وارده به مقطع پیچ باید از رابطه زیر استفاده نمود.

$$f_t = f_t' + f_0 \quad (16)$$

در این رابطه f_t تنش کل وارده به پیچ ردیف کشش، f_t' تنش کششی حاصل از خمش خارجی محاسبه شده با روش مقطع معادل اصلاح شده و f_0 تنش حاصل از نیروهای اهرمی شدن می باشد. با ارزیابی دقت این روش در اتصالات مفصلی با دو ردیف پیچ در حالت گونیا و زانویی، حداکثر خطا در حدود ۵ درصد در محاسبات حاصل شده است که در مقایسه با روش مقطع معادل متعارف، ۲۱ درصد کاهش خطا را نشان می دهد. شکل ۱۵ کنترل تنش پیچ و شکل ۱۶ تغییر شکل اتصالات مفصلی را تحت بارگذاری نشان می دهد.



شکل (۱۵) کنترل تنش پیچ کششی



شکل (۱۶) تغییر شکل اتصال مفصلی تحت بارگذاری

عدم نیاز به محاسبه نیروهای اهرمی شدن در اتصالات مفصلی با دو ردیف پیچ را پیش بینی کرد. با بررسی روشهای متعارف طراحی اتصالات، دقت این روشها در پیش بینی 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 فلسفه مقاومت مجاز ارائه شده است. با ارزیابی دقت روش اصلاح شده پیشنهادی در مدل‌های المان محدود، ۲۱ درصد کاهش در خطای طراحی اتصالات مفصلی با دو ردیف پیچ حاصل شده است.

مفصلی با دو ردیف پیچ و مقایسه نتایج با اتصالات T، ضریب هندسی ۱,۲ برای اتصالات مفصلی با دو ردیف پیچ پیشنهاد شده است. باید توجه شود ضریب هندسی حاصله فقط در اتصالات با هندسه ارائه شده و با دو ردیف پیچ قابل استناد است و در سایر اتصالات با هندسه های متفاوت نیازمند تحقیق و تخصیص ضریب هندسی دقیقتری می باشد. در محاسبه نیروهای اهرمی شدن در اتصالات بررسی شده با روش بهبود یافته، خطایی در حدود ۲ درصد در پیش بینی این نیروها برآورد شده است. همچنین با استفاده از روش بهبود یافته، می توان نیاز و یا

مراجع

- plate beam to column joints under bending and axial force, Eccs technical committee10 "connections" twg10.2, Department of civil engineering -university of Coimbra.
- 10-American institute of steel construction, ANSI/AISC 2005, Specification for structural steel building, pp 360-05.
 - 11-American Institute of Steel Construction. 2000, Manual of steel construction, Load and resistance factor design, Vol 2, connections, Chicago.
 - 12-Kouhi, Kortessmaa, 1990, Strength tests on bolted connection using high-strength steels (HSS STEELS) as a base material, VTT Research Notes 1185, Espoo 1990.
 - 13- Faella, C.,Piluso, V, and Rizzano, G. 2000, Structural steel semi rigid connections: Theory, design and software, CRC press, Florida, PP 505.
 - 14-J. C. Smith, 1991, Structural steel design lrfd approach, North Carolina State University, Wiley Inc.
 - 15-Abaqus Element Reference, 2008, Abaqus 6.71 documentation, Online help.
 - 16-Krishnamurthy, N. 1980, Modeling and prediction of steel bolted connection behavior, Computers & Structures, Vol.11, No. 2, PP. 75-82.
 - 17- Krishnamurthy, N., and Graddy, D.E. 1976, Correlation between 2- and 3- dimensional finite element analysis of steel bolted end-plate connections, Computers & Structures, Vol.6 , PP. 381-389.
 - 18-Krishnamurthy, N., Huang, H. T., Jeffrey, P. K. and Avery, L. K. 1979, Analytical M-θ curves for end-plate connections, Journal of the Structural Division, Vol.105, No. ST1, PP. 133-145.
 - 19-Farajpour, M. R., 2010, Effect of beam to column connections on static and seismic response of steel frames, Msc thesis.
 - 1- Bruce, F.M., Clinton, O.R, Staley, D.L., and Kazuhiko, K. 2000. Performance of PR moment frame buildings in UBC seismic zones 3 and 4. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.126, No.1: 108-116.
 - 2- Bahaari, Mohammed, R, and Sherbourne, Archibald, N. 2000. Behavior of eight-bolt large capacity end-plate connections. Computers & Structures, Vol.77: 315-325.
 - 3- Bahaari, Mohammed, R, and Sherbourne, Archibald, N . 1991, 3D simulation of bolted connections to unstiffened columns- II. Extended end plate connections. Journal of Constructional steel Research, Vol. 40, No.3: 189-223.
 - 4- Bahaari, Mohammed, R, and Sherbourne, Archibald, N. 1996. Structural behavior of end-plate bolted connections to stiffened columns. Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No.8: 926-935.
 - 5- Sherbourne, A.N., and Bahaari, Mohammed, R. 1994. 3D Simulation of end-plate bolted connections. Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.11: 3122-3136.
 - 6- Sherbourne, A.N., and Bahaari, Mohammed, R., 1996, 3D Simulation of bolted connections to unstiffened columns- I: T-stub connection, Journal of Constructional Steel Research, Vol.40, No.3: 169-187.
 - 7- Sherbourne, A.N., and Bahaari, Mohammed, R., 1997, Finite element prediction of end-plate bolted connection behavior, I: Parametric study, Journal of Constructional Steel Research, Vol.40, No.3: 169-187.
 - 8- Wheeler, A. T., Clarke, M. J., and Honcock, G.J., 2000, FE Modeling of four-bolt, tubular moment end-plate connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.126, No.7: 816-822.
 - 9- L. Simoes da Silva, L. lima, P. Vellasco and S. Andrade, 2001, Experimental behavior of end-

