

بررسی رفتار خمشی اتصالات نیمه گیردار پیچی تقویت شده در اسکلت‌های فولادی

یوسف حسین زاده^{*}، محمد علی لطف‌اللهی یقین^{**} و محمدرضا فرج‌پور^{***}
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۴/۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۵/۱۶)

چکیده -

ABAQUS

واژگان کلیدی :

Investigation of Flexural Behavior of Stiffened Bolted Semi Rigid Connections in Steel Frames

Y. Hosseinzadeh, M. A. Lotfollahi Yaghin, and M. R. Farajpour

Department of Civil Engineering, University of Tabriz

Abstract: In this paper, the effect of stiffeners on static behavior of semi rigid beam to column bolted connections in steel frames was investigated. Also, finite element models of semi rigid stiffened bolted connections were made and compared with experimental results. In the analytical models, the material and end plate-column flange contact nonlinearities and geometrical discontinuities were taken into account. The results of parametric analyses by using ABAQUS were presented and the effect of various parameters on tension force distribution in bolt row, rotational stiffness and flexural durability were investigated. Due to the effects on flexural durability, rotational stiffness and connection behavior, it is necessary to consider the effects of panel zone and end plate stiffeners in design method.

*** - کارشناسی ارشد

** - استاد

* - استادیار

Keywords: end-plate connection, finite element analysis, tension stress distribution, steel frame, moment rotation curve, contact problem.

E	مدول الاستیسیته مصالح تیر	$M - \varphi_{ep}$	رابطه لنگر دوران اتصال در محل ورق انتهایی
$\bar{M}$	لنگر واحد روی محور قائم شاخص گیرداری	φ	دوران کل اتصال
	آیین نامه اروپا	$\bar{\varphi}$	دوران واحد روی محور افقی شاخص گیرداری
M_{con}	لنگر اتصال		آیین نامه اروپا
M_{pb}	لنگر پلاستیک تیر	φ_{ep}	دوران حاصل از تغییر شکل ورق اتصال
$M - \varphi$	منحنی لنگر دوران اتصال	φ_p	دوران پلاستیک تیر در سیستم قاب
$M - \varphi_s$	رابطه لنگر دوران اتصال در محل پانل جان ستون	φ_s	دوران حاصل از تغییر شکل پانل جان ستون در محل اتصال

۱- مقدمه

اتصالات خوب طراحی شده می‌توانند با مشارکت در رفتار غیر خطی قابهای فولادی، رفتار کلی سازه را بهبود بخشند. ظرفیت دورانی مناسب اتصالات پیچی این امکان را به آنها می‌دهد که به جای ایجاد ترک، با تغییر شکل غیر الاستیک و جذب انرژی، از تغییر مکان جانبی بیشتر قاب جلوگیری کرده 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 می‌دهد [۱-۳]. قبل از زلزله سال ۱۹۹۴ نورتریج، چنین تصور می‌شد که قاب با اتصالات جوشی، بهترین سیستم برای تحمل بارهای ثقیل و جانبی است. چنین انتظار می‌رفت که خرابی این قابها به تسلیم و کمانش موضعی در تیرها و ستونها و همچنین به جابه‌جایی نسبی کوچک ماندگار بین طبقات محدود شود [۴]. زلزله نورتریج باعث ایجاد خرابی در ناحیه جوش اتصالات و ایجاد ترک در ناحیه فولاد گرما دیده اعضای اتصال شد. از طرف دیگر به دلیل وجود امکان ساخت کارخانه‌ای اتصالات پیچی، ایمنی بالا، هزینه کم اجرا، سرعت مونتاژ بالا و کنترل کیفی آسان، اتصالات پیچی را مورد توجه روزافزون طراحان قرار داده است.

اتصالات پیچی با ورق انتهایی در سازه‌های فولادی به

صورت اتصالات خمشی به کار برده می‌شوند. در یک تقسیم بندی کلی، اتصالات پیچی با ورق انتهایی را می‌توان به دو گروه، اتصالات با ورق انتهایی بدون لبه^۱ و اتصالات با ورق انتهایی لبه دار^۲ تقسیم بندی کرد. هر یک از این دو دسته می‌تواند به صورت تقویت شده با سخت کننده و یا بدون تقویت، طراحی و اجرا شود.

در روشهای متداول طراحی قابهای فولادی، اتصالات تیر به ستون به صورت مفصلی یا گیردار کامل فرض می‌شوند. در سالهای اخیر به منظور شناخت رفتار واقعی اتصالات و تعیین میزان نیمه گیرداری آنها، مطالعه رفتار اتصالات مورد توجه محققان قرار گرفته است. کریشنامورتی با سرپرستی گروه تحقیقاتی انستیتوی AISC و انجمن مجریان ساختمانهای فولادی آمریکا^۳، اولین مطالعات را در زمینه رفتار و طراحی اتصالات پیچی انجام داده است. 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 (AISC 1980) به عنوان ضوابط طراحی اتصالات پیچی وارد شده است [۵].

شربورن و بهاری اتصالات پیچی را با نرم افزار اجزای محدود ANSYS^۴ مدل سازی کرده و رفتار دو بعدی آنها را بررسی کردند. آنها در تحقیقات خود تأثیر خصوصیات هندسی و

جدول ۱- مشخصات هندسی تیر و ستون (میلیمتر)

	ارتفاع پروفیل	ضخامت جان	عرض بال	ضخامت بال
تیر	۳۰۰	۸	۲۰۰	۱۲
ستون	۳۰۰	۸	۲۵۰	۱۲

امکانپذیر باشد. در این مقاله، برای بررسی تأثیر سخت کننده در رفتار اتصالات پیچی با ورق انتهایی، ۱۰ مدل اجزای محدود اتصال تیر به ستون ایجاد و با نرم افزار ABAQUS تحلیل شده است [۱۰]. در این مدل‌سازیها، تغییر شکل‌های بزرگ، خواص غیر خطی مصالح و غیر خطی هندسی در نظر گرفته شده است [۱۱]. رفتار اتصالات تقویت شده با سخت کننده‌های جان ستون و ورق انتهایی در حالت‌های مختلف با اتصالات تقویت نشده مقایسه شده است. مقاومت خمشی، سختی دورانی، منحنیهای لنگر-دوران و توزیع تنش کششی در ردیفهای مختلف پیچ در مدل‌های اجزای محدود تعیین و با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند. این تحقیق نشان داده است که استفاده از سخت کننده در اتصالات پیچی می‌تواند رفتار اتصال و درجه گیرداری آن را به میزان قابل توجهی تغییر دهد. پس اصلاح روشهای متداول طراحی برای لحاظ کردن اثر سخت کننده‌ها در رفتار اتصال، که معمولاً در فرایند طراحی نادیده گرفته می‌شود، ضرورت دارد.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

۱-۲- مشخصات هندسی مدلها

مشخصات هندسی تیر و ستون در ۱۰ مدل ایجاد شده، یکسان است. این مشخصات در جدول (۱) ارائه شده است. در مدل‌های اجزای محدود، تأثیر ضخامت ورق انتهایی، قطر پیچ، سخت کننده‌های ستون و سخت کننده‌های ورق انتهایی در مقاومت خمشی، سختی دورانی و نحوه توزیع تنش کششی پیچها بررسی شده است. برای این کار دو گروه مدل ایجاد شده است. گروه اول اتصالات با ورق انتهایی بدون لبه و گروه دوم اتصالات با ورق انتهایی لبه‌دار هستند. دو مدل FE و FS بدون لبه، به ترتیب با دو ردیف پیچ و بدون سخت کننده و سه ردیف پیچ و تقویت شده با سخت کننده در جان ستون‌اند. مدل EE دارای سه ردیف پیچ و بدون سخت کننده است.

در مدل‌های با پیشوند ES، ورق انتهایی لبه دار بوده و دارای ترکیبات مختلف از سخت کننده جان ستون و سخت کننده

مکانیکی پیچ و ورق اتصال را در رفتار کلی آن بررسی کردند [۶]. تحقیقات آنها نحوه توزیع فشار تماسی^۵ حاصل از نیروهای اهرمی شدن را در اتصالات پیچی نشان داد. آنها در تحقیقات خود ۳۴ مدل مختلف از اتصالات تقویت شده با ورق انتهایی لبه‌دار و ۱۹ مدل اتصال تقویت نشده با ورق انتهایی بدون لبه را ایجاد و بررسی کردند. ویلر با استفاده از نرم افزار ABAQUS، اتصالات تیر به ستون را برای یافتن فرمولهای طراحی آنها مدل کرده است [۷]. در سال ۲۰۰۶، اوربونس و آلفونساس در دانشگاه سالکوتکیای لیتوانی مطالعاتی را در زمینه اتصالات پیچی انجام دادند [۸]. اساس تحقیقات آنها بر پایه مدل مؤلفه^۶ 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 اجزای محدود استفاده شده است.

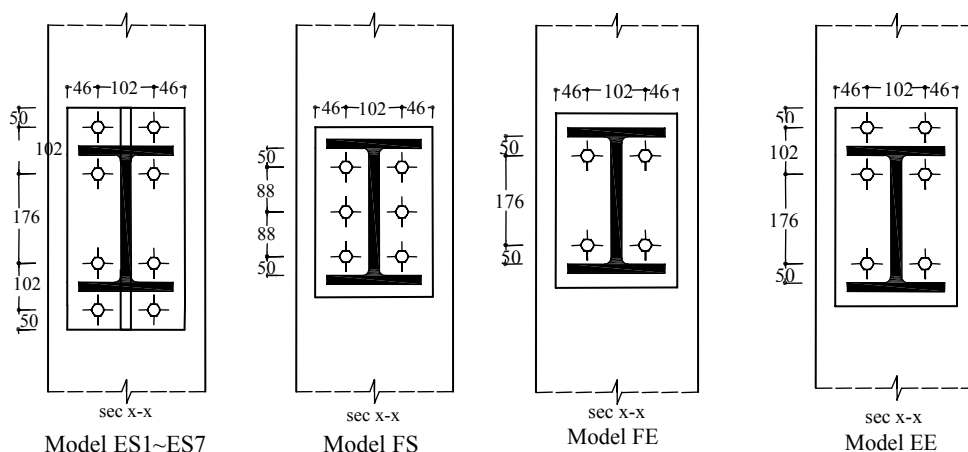
به دلیل فراوانی پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصالات و هزینه زیاد تحقیقات آزمایشگاهی، استفاده از روش اجزای محدود در تعیین رفتار و توسعه روشهای طراحی اتصالات اجتناب ناپذیر است. پارامترهایی مانند قطر پیچ، تعداد ردیفهای پیچ، فواصل و موقعیت سوراخ، نوع سوراخ، ضخامت ورق اتصال، میزان نیروی پیش تنیدگی پیچ، خواص مکانیکی پیچ و ضریب اصطکاک مابین ورق و بال ستون در رفتار اتصال مؤثرند.

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

جدول ۲- مشخصات هندسی مدل‌های اجزای محدود

نمونه	نوع اتصال	ضخامت ورق (mm)	قطر پیچ (mm)	تعداد پیچ	نیروی پیش تنیدگی (KN)	سخت کننده ستون	سخت کننده ورق
FE	flush*	۲۰	۲۰	۴	۱۵۵	no	-
EE	extended**	۲۰	۲۰	۶	۱۵۵	no	no
FS	flush	۲۰	۲۰	۶	۱۵۵	yes	-
ES1	extended	۲۰	۲۰	۸	۱۵۵	yes	yes
ES2	extended	۲۰	۲۰	۸	۱۵۵	yes	no
ES3	extended	۲۰	۲۰	۸	۱۵۵	no	yes
ES4	extended	۲۵	۲۰	۸	۱۵۵	yes	yes
ES5	extended	۲۰	۲۴	۸	۲۲۵	yes	yes
ES6	extended	۲۵	۲۴	۸	۲۲۵	yes	yes
ES7	extended	۱۶	۲۰	۸	۱۵۵	yes	yes

* اتصال با ورق بدون لبه، ** اتصال با ورق لبه دار.

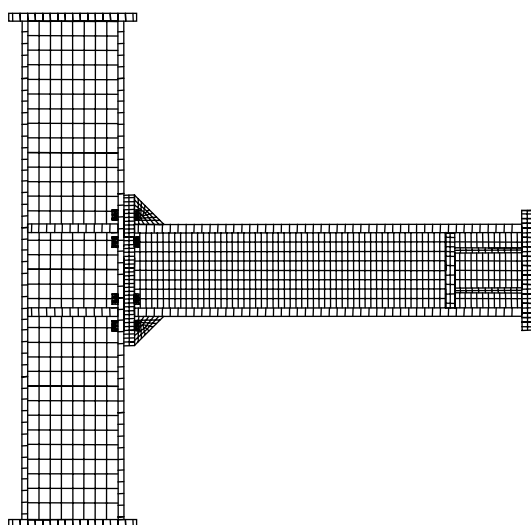


شکل ۱- مشخصات هندسی ورق اتصالات

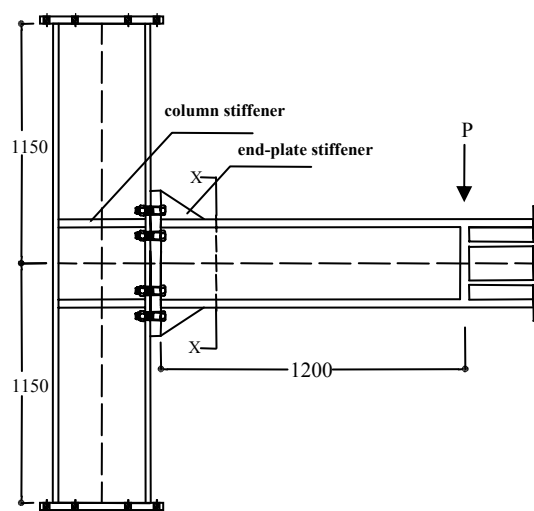
۲-۲- نحوه مدلسازی

برای مدلسازی اتصالات از نرم افزار ABAQUS 6.7.1 استفاده شده است. برای ایجاد اجزای اتصال، از اجزای SOLID استفاده شده است [۱۲]. در مدلسازی جوش نفوذی، از قید TIE نرم افزار برای یکپارچه کردن قطعات جوش کاری شده مانند سخت کننده‌ها، ورق انتهایی و اتصال بال به جان در تیر و ستون استفاده شده است. اتکای صفحه اتصال به بال ستون به صورت اتکای سخت اصطکاکی و با قابلیت جداشوندگی بعد از بار برداری تعریف شده است. اتکای بدنه پیچ به لبه داخلی

ورق اتصال‌اند. برای بررسی تأثیر ضخامت ورق و قطر پیچ در رفتار اتصالات، در مدل ES4 ضخامت ورق اتصال افزایش داده شده است. در مدل ES5 با ثابت نگه داشتن ضخامت ورق اتصال، قطر پیچ افزایش یافته است. در مدل ES6 قطر پیچ و ضخامت ورق اتصال همزمان افزایش داده شده‌اند. همچنین در مدل ES7 با ثابت نگه داشتن قطر پیچ، ضخامت ورق اتصال کاهش داده شده است. مشخصات دقیق مدل‌های اتصالات ایجاد شده در جدول (۲) ارائه شده است. شکل (۱) و (۲) نحوه بارگذاری و مشخصات هندسی مدل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مدل اجزای محدود و مش بندی اتصال ES1.



شکل ۲- مدل کلی اتصالات و نحوه بارگذاری

جدول ۳- نتایج تحلیل همگرایی پیچ

ابعاد مش (m)	بارگذاری کششی پیچ (N)	شماره گره مورد بررسی	تغییر طول کلی پیچ (mm)	حداکثر تنش فون میزس در محور پیچ (pa)	اختلاف در تغییر طول
۰/۰۰۳ متر	P=۵۰۰۰	Sp1-۶۵	$۱/۷۲ \times ۱۰^{-۹}$	$۹/۱۷۳ \times ۱۰^۳$	-
	P=۱۰۰۰	Sp1-۶۵	۳۴۴×۱۰^{-۱۲}	$۱/۸۲۵ \times ۱۰^۳$	-
۰/۰۰۲ متر	P=۵۰۰۰	Sp1-۶۵	$۲/۰۶ \times ۱۰^{-۹}$	$۹/۵۸۶ \times ۱۰^۳$	٪۱۶
	P=۱۰۰۰	Sp1-۶۵	۴۱۳×۱۰^{-۱۲}	$۱/۹۱ \times ۱۰^۳$	٪۱۶/۷
۰/۰۰۱ متر (مش انتخاب شده)	P=۵۰۰۰	Sp1-۶۵	$۲/۱۹ \times ۱۰^{-۹}$	$۹/۴۷ \times ۱۰^۳$	٪۵/۶
	P=۱۰۰۰	Sp1-۶۵	$۴/۳۸ \times ۱۰^{-۱۲}$	$۱/۸۹ \times ۱۰^۳$	٪۵/۷

محدود پیچ، مش بندی با ابعاد ۰/۰۰۱ متر انتخاب شده است. نتایج تحلیل همگرایی پیچ تحت بارگذاری کششی در جدول (۳) ارائه شده است. شکل (۳)، مدل اجزای محدود و نحوه مش بندی یکی از اتصالات را نشان می‌دهد.

۳-۲- خواص مکانیکی مصالح

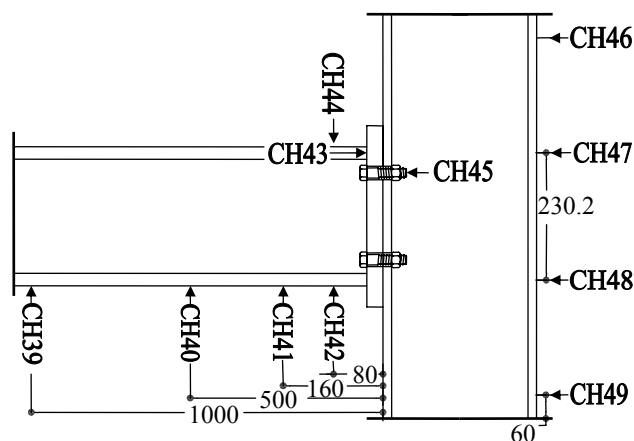
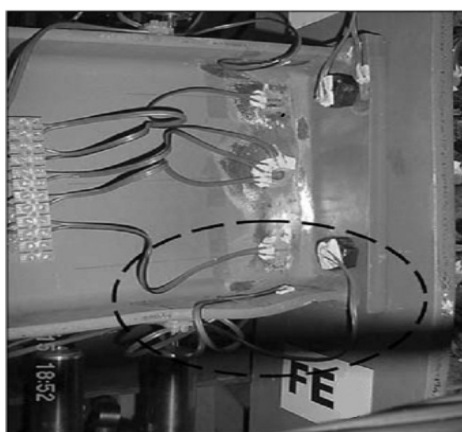
در مدل اجزای محدود، خواص مکانیکی مصالح ورق انتهایی، سخت کننده‌ها، تیر و ستون از فولاد نرمه ST37 به صورت ۷ خطی و با ضریب پواسون ۰/۳ به نرم افزار معرفی شده است. بر اساس نتایج کوپن تست، تنش تسلیم فولاد نرمه ۳۱۰ و مدول الاستیسیته آن ۱۹۰۷۰۷ مگاپاسکال در نظر گرفته

سوراخ نیز به صورت سخت و بدون ضریب اصطکاک^۷ مدل شده است. نیروی پیش تیدگی پیچها با استفاده از خواص گرمایی مصالح و با کاهش موضعی گرمای مصالح پیچ اعمال شده است.

برای مش بندی اجزای اتصال از مشهای شش وجهی مرتبه پایین استفاده شده است. برای تعیین اندازه دقیق مش بندی، تحلیل همگرایی اجزا انجام شده است [۱]. به عنوان نمونه، در تحلیل همگرایی پیچ، نیروی کششی ثابت به محور پیچ اعمال و تغییر طول پیچ در مش بندیهای مختلف اندازه‌گیری شده است. با مقایسه نتایج و با در نظر گرفتن زمان لازم برای تحلیل مدل، اندازه مش بندی مناسب انتخاب شده است. در مدل اجزای

جدول ۴- تغییرات تنش و کرنش مصالح پیچ پرمقاومت [۱۳]

تنش (Mpa)	۹۹۰	۱۱۶۰	۱۱۶۰
کرنش	۰/۰۰۴۸۳	۰/۱۳۶	۰/۱۵



شکل ۴- محل نصب حسگرهای جابه‌جایی در مدل آزمایشگاهی FE [۹]

محدود و مدل آزمایشگاهی را در دو حسگر فوق نشان می‌دهد. حداکثر خطای مدل اجزای محدود ۸ درصد تعیین شده است.

۲-۵- روش بارگذاری و تحلیل

در مرحله بارگذاری مدل‌های اجزای محدود، لنگر خارجی حاصل از بار نقطه‌ای در فاصله ۱۲۰ سانتیمتری ورق اتصال در ۱۸ مرحله به صورت پله‌ای به مدل اجزای محدود اعمال شده است. در تحلیل، خواص غیرخطی هندسی و تغییرشکلهای بزرگ در نظر گرفته شده است. برای تعیین نقطه گسیختگی^۸ اتصال، از معیار تسلیم فون میزس استفاده شده است.

۳- نتایج تحلیل اجزای محدود

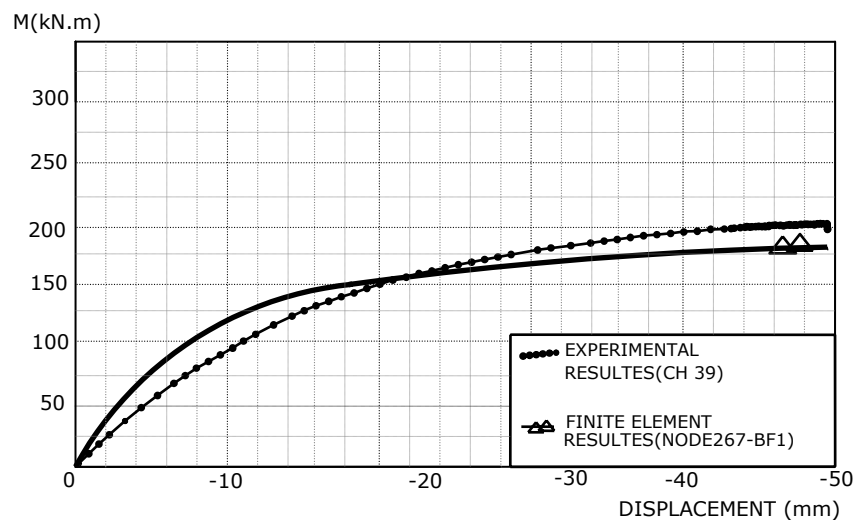
۳-۱- ظرفیت تحمل بار و مقاومت خمشی اتصالات

نمودار بار- جابه‌جایی اتصالات در شکل (۷) ارائه شده است. در این نمودار، جابه‌جایی محل اعمال بار مورد توجه قرار گرفته است. در جدول (۵)، ظرفیت تحمل بار و مقاومت خمشی اتصالات، حاصل از تحلیل اجزای محدود ارائه شده است. مدل ES1 که دارای سخت کننده جان ستون و ورق

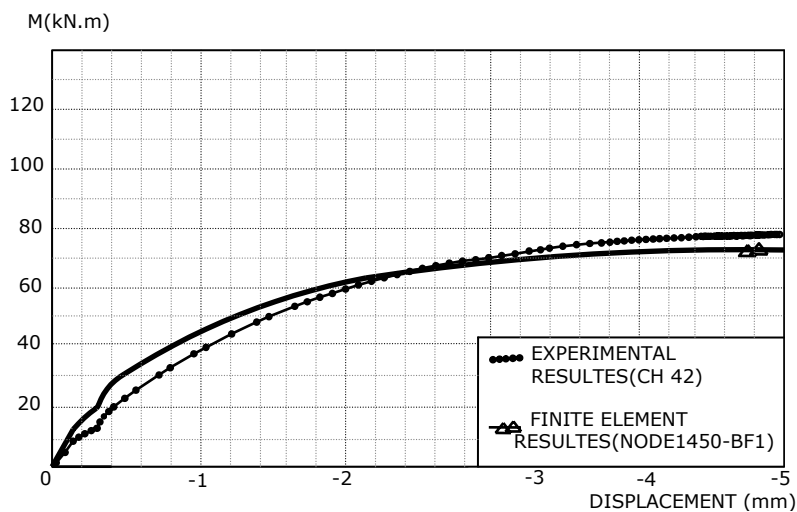
شده است [۱۳]. خواص مکانیکی مصالح پیچ پرمقاومت به انضمام سر پیچ و مهره آن از نوع A490 و یا CL10.9 بوده و به صورت ۳ خطی به نرم افزار معرفی شده است. جدول (۴) خواص مکانیکی مصالح پیچ را نشان می‌دهد. همچنین ضریب اصطکاک ورق انتهایی و بال ستون برابر ۰/۴۴ در نظر گرفته شده است [۸].

۲-۴- ارزیابی دقت مدل‌های اجزای محدود

دقت مدل‌های اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایشهای داسیلوا و همکاران [۹] ارزیابی شده است. به عنوان نمونه در مدل اتصال FE از دو حسگر جابه‌جایی CH39 و CH42 نصب شده در ۸ و ۱۰۰ سانتیمتری ورق اتصال استفاده شده است. شکل (۴) مدل آزمایشگاهی FE و محل نصب حسگرها را نشان می‌دهد. حسگر ۴۲ به دلیل نشان دادن تغییرشکلهای ستون و حسگر ۳۹ به دلیل نشان دادن جابه‌جایی حاصل از تغییرشکل ستون، تیر و اجزای اتصال و تمرکز خطا در نزدیکترین نقطه اعمال بار در فاصله ۱ متری ورق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل (۵) و (۶) مقایسه تغییرمکان حاصل از تحلیل اجزای



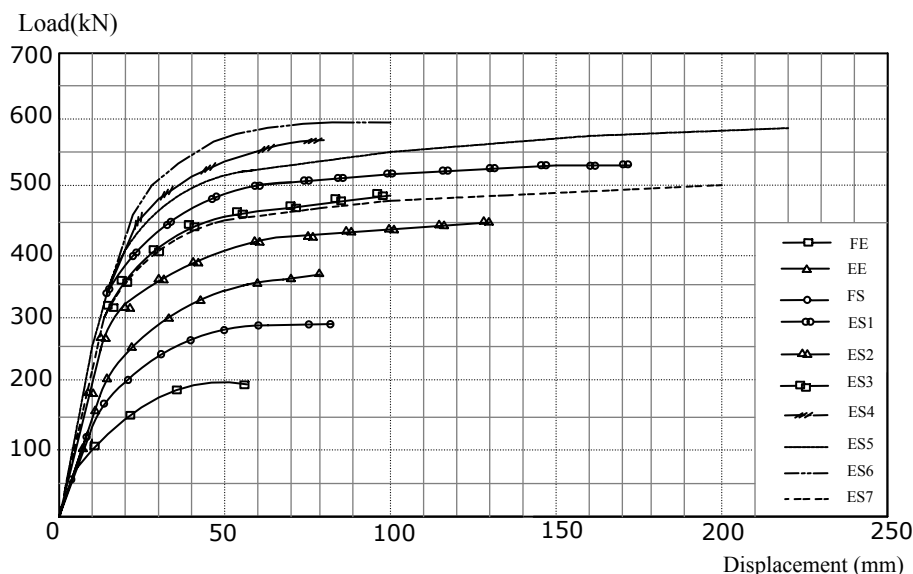
شکل ۵- مقایسه نتایج اجزای محدود و آزمایشگاهی در حسگر CH39



شکل ۶- مقایسه نتایج اجزای محدود FE و آزمایشگاهی در حسگر CH42.

جدول ۵- نتایج تحلیل اجزای محدود.

	مدل	مقاومت خمشی (kN.m)	مقایسه مقاومت خمشی با مدل ES1	طبقه بندی
۱	FE	۱۹۰	٪-۷۱	Semi rigid
۲	EE	۴۲۶	٪-۳۵	Semi rigid
۳	FS	۳۷۵	٪-۴۳	Semi rigid
۴	ES1	۶۶۵	٪۰/۰	Semi rigid
۵	ES2	۵۸۸	٪-۱۱/۸	Semi rigid
۶	ES3	۶۱۵	٪-۷/۳	Semi rigid
۷	ES4	۶۹۰	٪۴/۵	Semi rigid
۸	ES5	۷۰۹	٪۶/۳	Semi rigid
۹	ES6	۷۲۵	٪۹/۱	Semi rigid
۱۰	ES7	۶۲۷	٪-۵/۵	Semi rigid



شکل ۷- منحنی بار-تغییر مکان محل اعمال بار مدل‌های اجزای محدود.

اتصال است. در مدل ES6، قطر پیچ و ضخامت ورق همزمان افزایش یافته است و یک افزایش ۹/۵ درصدی در مقاومت خمشی اتصال حاصل شده است. در مدل ES7 ضخامت ورق اتصال کاهش پیدا کرده ولی کاهش چندانی در مقاومت خمشی اتصال ملاحظه نمی‌شود. در مقایسه مقاومت نمونه‌های ES2 و ES3 با مقاومت نمونه‌های ES4 و ES5، دیده می‌شود که تأثیر استفاده از سخت کننده در افزایش مقاومت خمشی بیشتر از تأثیر افزایش قطر پیچ و ضخامت ورق اتصال است به‌طوری که در حذف سخت کننده‌ها، در نمونه‌های ES2 و ES3 میزان کاهش مقاومت حدود ۱۰ درصد است.

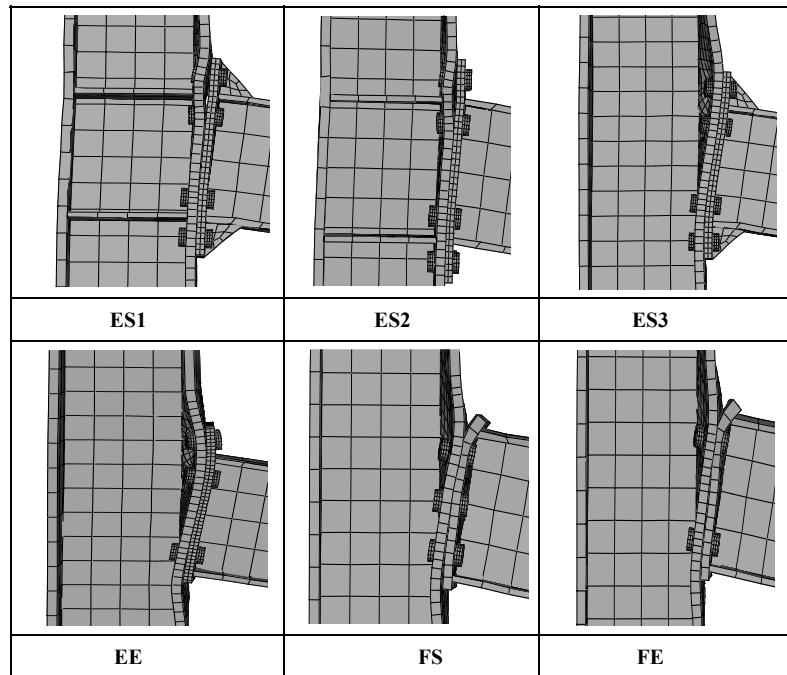
همان‌طوری که نمودارهای شکل (۷) نشان می‌دهد، مقاومت خمشی مدل‌های اجزای محدود اتصالات با ورق بدون لبه (FE و FS)، بسیار کمتر از سایر مدل‌هاست. بنابراین می‌توان فرض اتصالات مفصلی را در این نمونه‌ها صحیح دانسته و در تحلیل و طراحی از آن استفاده کرد.

اتصال مدل ES7 با ورق اتصال نرم و قطر پیچ زیاد و سخت کننده‌های ورق انتهایی و جان ستون، دارای مکانیزم شکست نرم، مقاومت خمشی و شکل پذیری مناسب است. در این اتصال شکست سیستم از ناحیه ورق اتصال بوده و نزدیکترین نتایج در پیش بینی تنش‌های وارده به پیچ را در

اتصال است، به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شده است. در سایر مدل‌ها نسبت به مدل ES1 یک یا چند پارامتر، از جمله ضخامت ورق انتهایی، قطر پیچ و موقعیت سخت کننده‌ها تغییر داده شده است.

تحلیل‌ها نشان می‌دهند که نقش سخت کننده‌های ورق اتصال در افزایش مقاومت خمشی بیشتر از سخت کننده‌های جان ستون است. مدل ES2 دارای سخت کننده در جان ستون و مدل ES3 دارای سخت کننده‌های فوقانی و تحتانی ورق اتصال بوده و فاقد سخت کننده جان ستون است. در این دو مدل، مقاومت خمشی از مدل مبنای ES1 کمتر است. در مدل ES2 سخت کننده‌های ورق اتصال حذف شده است و مقاومت خمشی به میزان ۱۱/۸ درصد نسبت به مدل ES1 کاهش یافته است. این کاهش مقاومت در مدل ES3 برابر با ۷/۳ درصد است.

برای بررسی تأثیر ضخامت ورق اتصال و قطر پیچ، در مدل ES4 و ES5 که از ناحیه ورق اتصال و جان ستون تقویت شده‌اند به ترتیب ضخامت ورق اتصال و قطر پیچ افزایش پیدا کرده است، در این دو مدل، مقاومت خمشی نسبت به مدل مبنای ES1 حدود ۵ درصد افزایش پیدا کرده است. مقایسه دو مدل فوق نشان می‌دهد که تأثیر افزایش قطر پیچ در افزایش مقاومت خمشی اتصال بیشتر از تأثیر افزایش ضخامت ورق



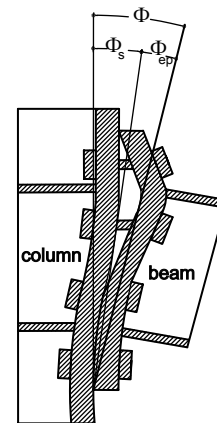
شکل ۸- تغییر شکل نهایی برخی از مدل‌های اجزای محدود تحت بارگذاری.

زاویه خط واصل لبه انتهایی بالهای تیر در محل اتصال است و از دو زاویه ϕ_s و ϕ_{ep} به ترتیب دوران ورق اتصال و دوران چشمه اتصال تشکیل شده است. شکل (۹) نحوه تغییر شکل دورانی اتصال با ورق انتهایی را نشان می‌دهد.

شکلهای (۱۰) تا (۱۴)، نمودارهای $M-\phi$ ، $M-\phi_s$ و $M-\phi_{ep}$ اتصالات را نشان می‌دهند. فرض شده است که اتصالات مورد بررسی در یک قاب مهار بندی نشده با طول تیر ۵ متر به کار برده شده‌اند. برای تعیین میزان گیرداری اتصال از ضوابط آیین نامه اروپا استفاده شده است [۱۴]. آیین نامه اروپا مرز اتصالات نیمه گیردار و گیردار را مشخص کرده است. این مرز بندی شامل یک منحنی سه خطی بدون بعد است. برای بررسی نیمه گیرداری یک اتصال، باید پارامترهای این منحنی بر اساس شرایط قاب تعیین شود. برای تعیین شرایط مرزی می‌توان از معادلات زیر استفاده کرد.

$$\bar{M} = \frac{M_{con}}{M_{pb}} \quad (1)$$

$$\bar{\phi} = \frac{\phi}{\phi_p} \quad (2)$$

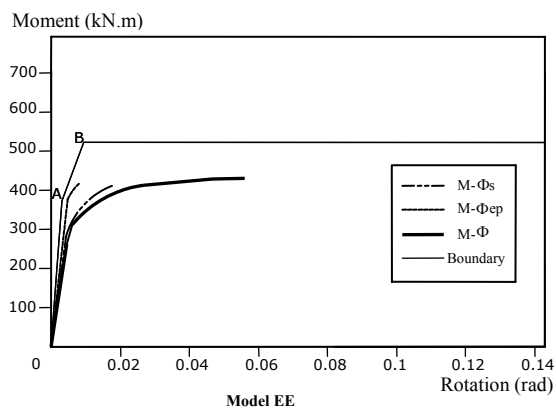
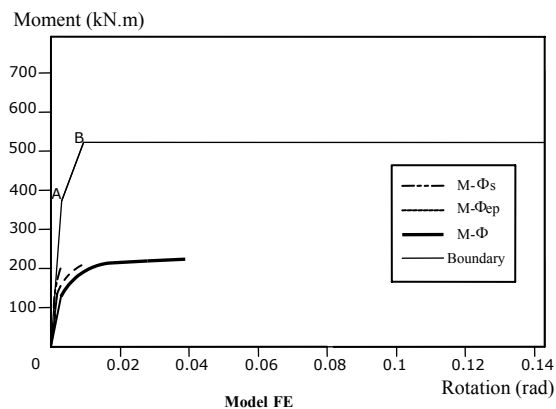


شکل ۹- دوران اتصال تحت خمش.

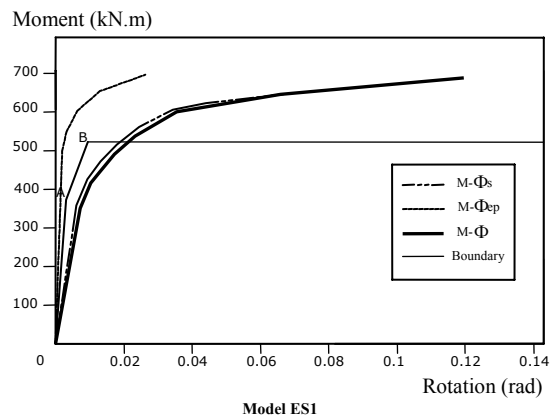
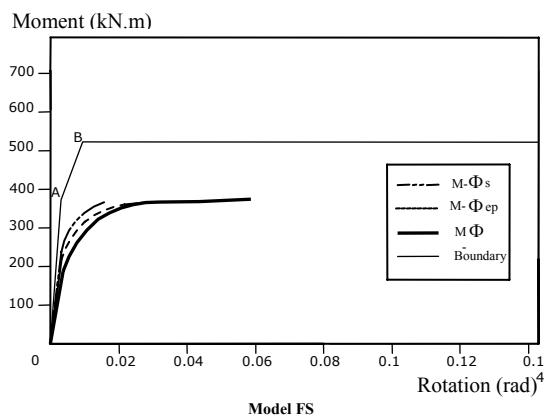
مقایسه با روشهای طراحی به دست می‌دهد. تغییر شکل نهایی مدل‌های اجزای محدود تحت بارگذاری خمشی در شکل (۸) نشان داده شده است.

۳-۲- رفتار لنگر-دوران اتصالات

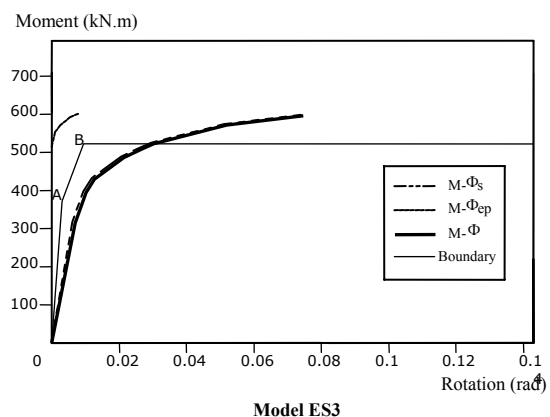
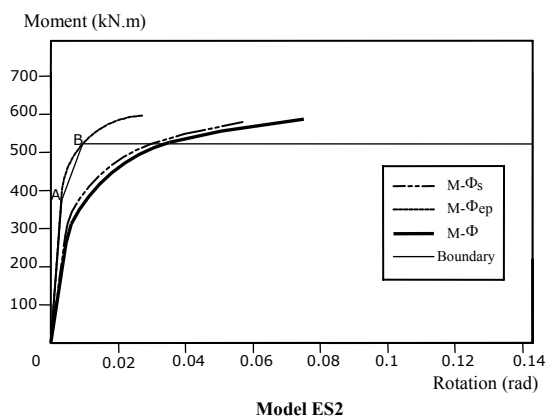
میزان گیرداری اتصالات با منحنی لنگر-دوران آنها تعیین می‌شود. ϕ زاویه دوران اتصال و یا تغییر زاویه خط محور تیر و ستون در محل اتصال است. در این مقاله، زاویه ϕ ، تغییر



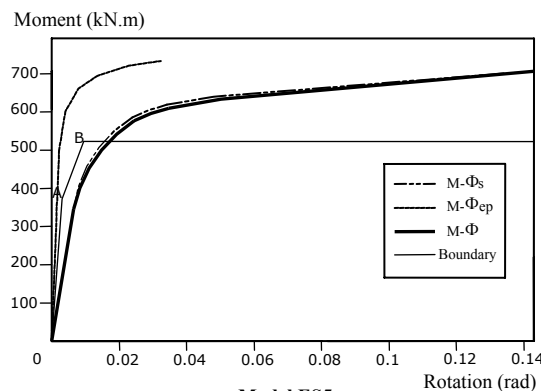
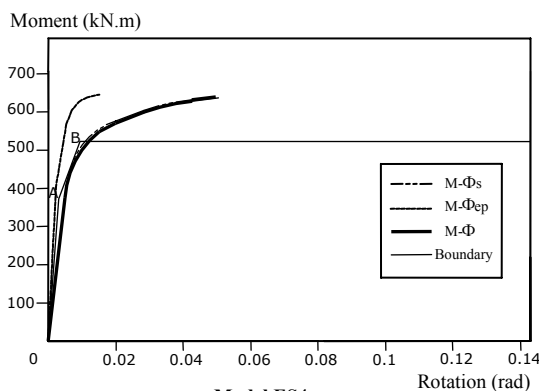
شکل ۱۰- منحنی لنگر-دوران مدل‌های اجزای محدود اتصالات EE و FE.



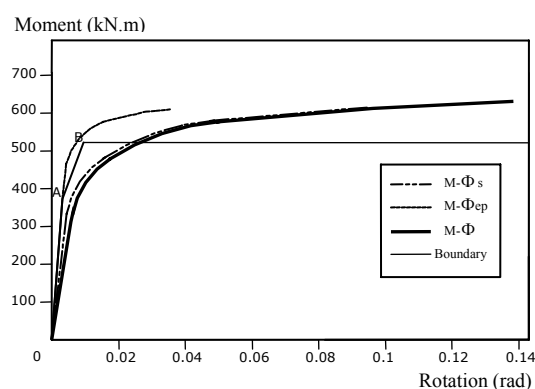
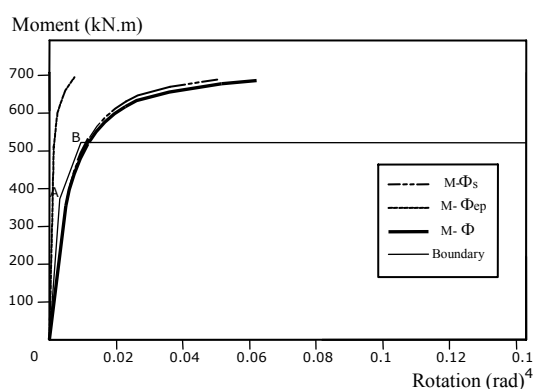
شکل ۱۱- منحنی لنگر-دوران مدل‌های اجزای محدود اتصالات ES1 و FS.



شکل ۱۲- منحنی لنگر-دوران مدل‌های اجزای محدود اتصالات ES2 و ES3.



شکل ۱۳- منحنی لنگر-دوران مدل‌های اجزای محدود اتصالات ES4 و ES5.



شکل ۱۴- منحنی لنگر-دوران مدل‌های اجزای محدود اتصالات ES6 و ES7.

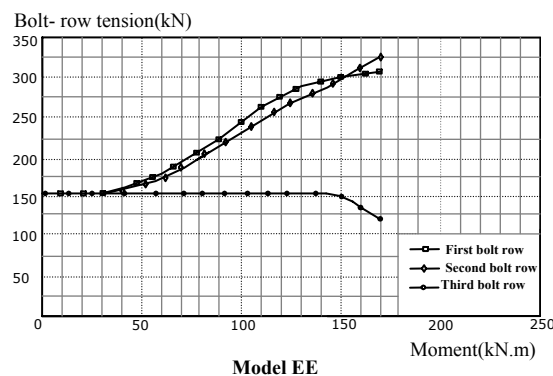
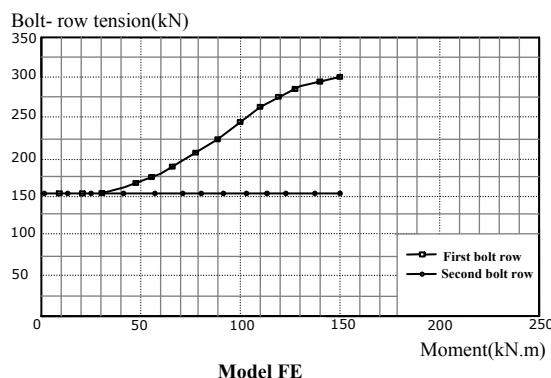
۲۶۱.۵ کیلونیوتن بر متر و دوران ۰.۰۰۷۳ رادیان معادل است. با مقایسه منحنی لنگر-دوران اتصالات مدل‌سازی شده با سیستم طبقه بندی آیین نامه اروپا، می‌توان تمام مدل‌ها را به صورت نیمه گیردار در نظر گرفت ولی بر اساس مشخصات هندسی هریک از مدل‌ها، درجه گیرداری آنها متفاوت است.

برای اتصالاتی با ورق بدون لبه FE و FS زاویه‌های Φ_{ep} و Φ_s در مراحل اولیه بارگذاری تقریباً برابرند ولی با افزایش بار، Φ_{ep} به شدت افزوده می‌شود و در تغییر شکل نهایی اتصال، بخش عمده دوران حاصل، ناشی از تغییر شکل ورق اتصال است. با مبنا قرار دادن مدل ES1 و مقایسه سایر مدل‌ها با آن، نتایج زیر حاصل شده است.

- مدل اتصال EE به دلیل داشتن سه ردیف پیچ و ورق بدون سخت کننده، دارای سختی دورانی کمتری نسبت به مدل مبنای ES1 است.

$$\Phi_p = \frac{M_{pb}}{\left[\frac{E I_b}{L_b} \right]} \quad (3)$$

در آیین نامه اروپا منحنی لنگر-دوران بر اساس $\bar{M}$ و $\bar{\Phi}$ و به صورت بی بعد تنظیم شده است. $\bar{M}$ لنگر بدون بعد روی محور قائم نمودار طبقه بندی آیین نامه اروپا، M_{con} لنگر وارد بر اتصال، M_{pb} برابر با ۲۶۱.۵ کیلونیوتن بر متر لنگر پلاستیک تیر، $\bar{\Phi}$ دوران بدون بعد روی محور افقی، Φ دوران اتصال تحت لنگر وارده، Φ_p برابر ۰.۰۶ دوران پلاستیک تیر و $E I_b / L_b$ برابر ۴۳۳۳ کیلونیوتن بر متر سختی خمشی تیر است. در نمودار طبقه بندی، نقطه A با مختصات $\bar{M} = 0.67$ و $\bar{\Phi} = 0.003$ و نقطه B، $\bar{M} = 1$ و $\bar{\Phi} = 0.13$ است. با توجه به معادلات ارائه شده، نقطه A برای این قاب، با لنگر ۱۷۷ کیلونیوتن بر متر و دوران ۰.۰۰۰۱۸ رادیان و نقطه B با لنگر



شکل ۱۵- توزیع کشش ردیفهای پیچ در مدل‌های اجزای محدود اتصالات FE و EE.

جان ستون بسیار صلبتر عمل می‌کنند، φ_s بخش عمده دوران

اتصال را شامل شده است و سهم φ_{ep} بسیار ناچیز است.

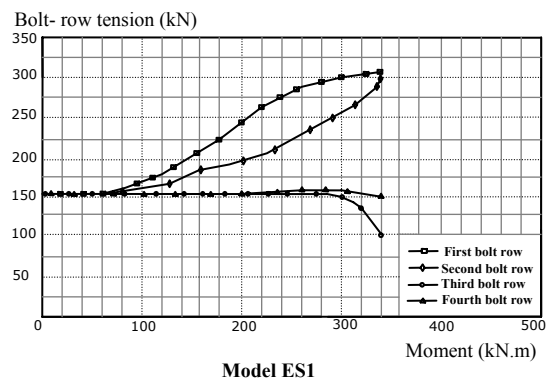
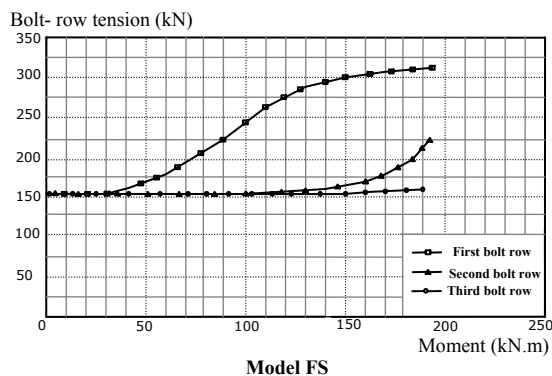
- در مدل ES7، با کاهش ضخامت ورق اتصال و افزایش جدادشدگی بین ورق و بال ستون، سختی دورانی اتصال کاهش یافته است. این اتصال سختی و تغییر شکل مناسبی را از خود نشان داده است.

۳-۳- توزیع کشش در ردیفهای مختلف پیچ

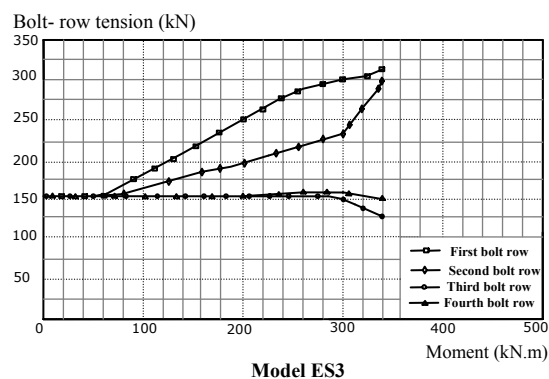
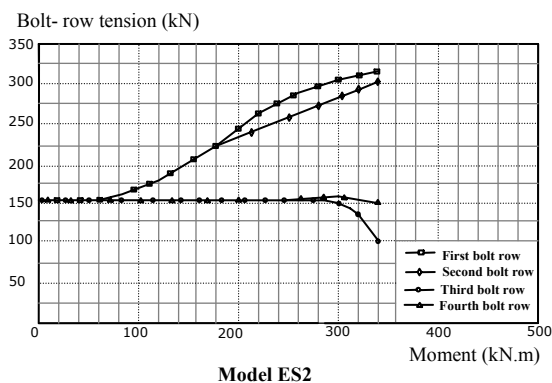
توزیع کشش ردیفهای مختلف پیچ، در شکلهای (۱۵) تا (۱۹) ارائه شده است. در این نمودارها ردیف ۱، ۲، ۳ و ۴ پیچ از طرف ناحیه تحت کشش ورق اتصال نامگذاری شده‌اند. در اتصال ES5 و ES6، وقتی مقدار کشش حاصل از نیروهای خارجی در پیچ به بیشتر از ۲۲۵ کیلو نیوتن یعنی کشش اولیه پیچ می‌رسد، جدادشدگی در ورق اتفاق می‌افتد. برای سایر مدل‌ها وقتی کشش خارجی از کشش پیش تنیدگی پیچ فراتر می‌رود، جدادشدگی در ورق اتفاق می‌افتد. با بررسی منحنیهای فوق، نتایج زیر حاصل شده است.

- برای اتصالات با ورق بدون لبه FE و FS، کشش وارد به پیچهای ردیف اول در مقایسه با سایر ردیفهای پیچ، در هر حالت بارگذاری دارای ماکزیمم مقدار بوده و این ردیف پیچ از لحاظ طراحی بحرانیتر است. در مراحل نهایی بارگذاری، کشش در پیچهای ردیف دوم به شدت افزوده می‌شود. در برخی اتصالات با ورق بدون لبه که در آنها

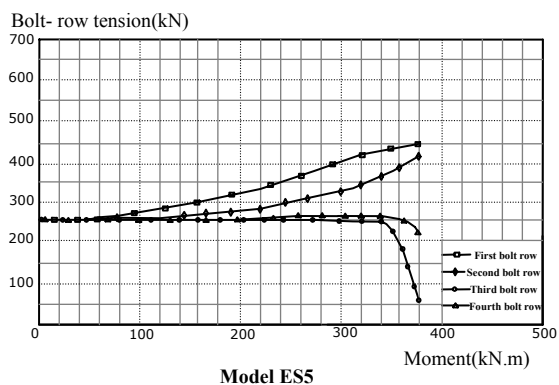
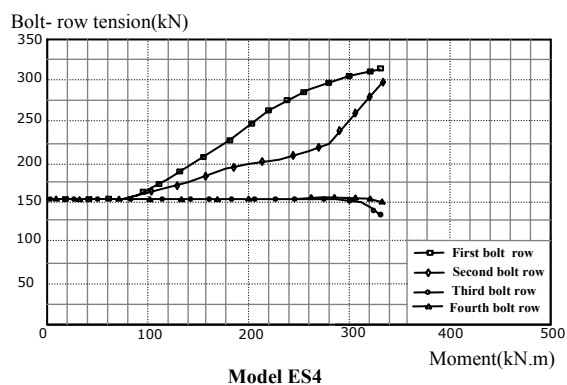
- در مدل ES2 که سخت کننده ورق اتصال حذف شده و فقط از ناحیه جان ستون تقویت شده است، سختی دورانی به میزان ۱۶٪ نسبت به مدل مبنا کاهش پیدا کرده است. در این اتصال به دلیل نرم بودن ورق اتصال، φ_{ep} بیشتر از مدل مبناست.
- در مدل ES3 که فقط دارای سخت کننده ورق اتصال است، سختی دورانی ۲۲ درصد کاهش پیدا کرده است. با توجه به سخت‌تر شدن ورق اتصال، مقدار دوران جان ستون در مقایسه با دوران ورق اتصال بیشتر بوده و دوران عمده اتصال حاصل از φ_s است.
- در مدل ES4، با افزایش ضخامت ورق اتصال، سیستم اتصال با ورق صلب و پیچ ضعیف حاصل شده و سختی دورانی افزایش یافته است. این مدل اتصال دارای مکانیزم شکست ترد بوده و گسیختگی سیستم از ناحیه پیچ است.
- در مدل ES5، با افزایش قطر پیچ و افزایش بار پیش تنیدگی آن، امکان جدادشدگی بین ورق انتهایی و بال ستون بسیار کم است. به همین دلیل دوران φ_{ep} بسیار ناچیز بوده و سختی دورانی سیستم افزایش پیدا کرده است. با مقایسه این مدل با مدل ES4 ملاحظه می‌شود که تأثیر صلبیت ورق انتهایی در سختی اتصال بیشتر از تأثیر قطر پیچ و نیروی پیش تنیدگی است.
- در مدل ES6، با افزایش همزمان قطر پیچ و ضخامت ورق اتصال، افزایش شدیدی در سختی دورانی اتصال حاصل شده است. با توجه به اینکه ورق اتصال و پیچها نسبت به پانل



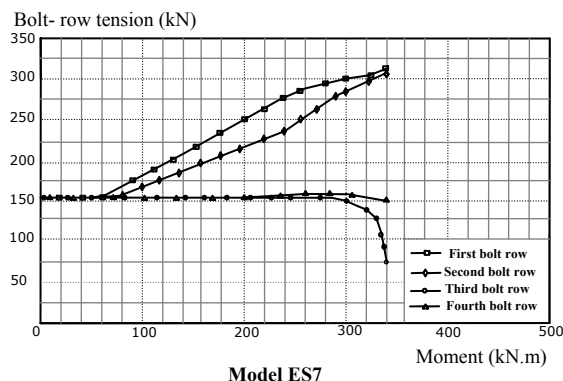
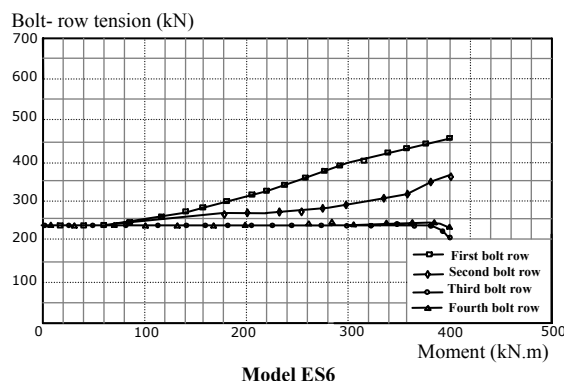
شکل ۱۶- توزیع کشش ردیفهای پیچ در مدل‌های اجزای محدود اتصالات FS و ES1.



شکل ۱۷- توزیع کشش ردیفهای پیچ در مدل‌های اجزای محدود اتصالات ES2 و ES3.



شکل ۱۸- توزیع کشش ردیفهای پیچ در مدل‌های اجزای محدود اتصالات ES4 و ES5.



شکل ۱۹- توزیع کشش ردیفهای پیچ در مدل‌های اجزای محدود اتصالات ES6 و ES7.

مجموع کشش خالص حاصل از خمش خارجی و کشش حاصل از نیروهای اهرمی شدن آن ردیف پیچ است. در مرحله طراحی اتصالات در نظر گرفتن اثر نیروهای اهرمی شدن ضروری است مگر در شرایط خاصی که به دلیل صلبیت بالا و عدم شکل پذیری ورق بتوان از این نیروها صرف نظر کرد [۱۵].

۴- نتیجه گیری

اتصالات سازه‌های فولادی دارای رفتار نیمه گیردار بوده و در مرحله تحلیل و طراحی در نظر گرفتن تأثیر رفتار اتصال بر رفتار کل سازه ضروری است. نتایج تحلیل اجزای محدود اتصالات تقویت شده نشان داد که استفاده از سخت کننده‌های جان ستون و ورق انتهایی می‌تواند رفتار اتصال را تحت تأثیر قرار داده و مقاومت خمشی و سختی دورانی آن را تغییر دهد.

اتصالاتی که دارای ورق انتهایی بدون لبه‌اند، به دلیل عدم امکان استفاده از سخت کننده‌های ورق انتهایی و شکل پذیری بالای اتصال، دارای دورانه‌های بزرگ ناشی از تغییر شکل ورق بوده و چندان از تغییر شکل ستون تأثیر نمی‌پذیرند. این اتصالات دارای درجات پایین گیرداری بوده و توزیع تنش کششی ردیفهای پیچ نزدیک به حالت پیش بینی شده روشهای طراحی است. این نوع از اتصالات پیچی را می‌توان در مرحله تحلیل و طراحی به صورت اتصال مفصلی در نظر گرفت.

در اتصالات با ورق انتهایی لبه دار تقویت شده، رفتار اتصال متأثر از ضخامت ورق، قطر پیچ و نحوه به‌کارگیری سخت

ضخامت و صلبیت ورق زیاد است، ناحیه فشار بین صفحه‌ای به منتهی علیه ورق منتقل شده و تمام ردیفهای پیچ تحت کشش قرار می‌گیرند. ولی کشش وارده به پیچ ردیف دوم بسیار ناچیز خواهد بود. در این اتصالات، مرکز دوران ورق، خط بال فشاری تیر است.

- در مدل اتصال EE، که دارای سه ردیف پیچ است، با توجه به اینکه از هیچ نوع سخت کننده‌ای استفاده نشده است، بر اثر خاصیت سخت کنندگی جان پروفیل تیر، در مراحل نهایی بارگذاری، نیروی کششی بیشتری به پیچهای ردیف دوم وارد شده و در مرحله طراحی، این ردیف پیچ بحرانیتر است.

- در مدل‌های ES1، ES3 تا ES6، که در آنها از سخت کننده‌های جان ستون و ورق انتهایی استفاده شده است، کشش وارده به پیچهای ردیف اول بیشتر از سایر ردیفهاست. مرکز دوران این اتصالات در خط بال فشاری تیر قرار دارد.

- برای مدل ES2 که در آن فقط از سخت کننده جان ستون استفاده شده است، مقدار کشش وارده به پیچهای ردیف دوم و اول تقریباً برابر است.

- در مدل ES7، کشش پیچهای ردیف اول بیشتر است ولی در بارگذاریهای نزدیک به بار گسیختگی اتصال، کشش در پیچهای ردیف دوم بیشتر شده و نیروی کششی برابر با پیچهای ردیف اول به آن وارد می‌شود.

قابل توجه است که کشش وارده به هر یک از ردیفهای پیچ،

کننده‌هاست. در اتصالاتی که در آنها از سخت کننده‌های جان ستون استفاده شده است، ورق اتصال دارای دوران غالب بوده و تغییر شکل اتصال ناشی از کشش و تغییر طول پیچ و تغییر شکل موضعی ورق اتصال است. این اتصالات دارای مکانیزم شکست نرم بوده و گسیختگی از ناحیه ورق انتهایی رخ می‌دهد. در اتصالاتی که در آنها از سخت کننده‌های ورق اتصال بهره برده شده است، به دلیل صلبیت ورق اتصال، تغییر شکل اتصال و دوران آن از تغییر شکل جان ستون ناشی شده و در این اتصالات باید مکانیزم شکست ترد پیچ کششی کنترل شود. در صورتی که هدف از طراحی، ایجاد اتصالی با دوران کم باشد، استفاده از اتصالات با ورق انتهایی لبه دار که در آن از سخت کننده‌های ورق و جان ستون استفاده شده است مناسب‌ترین گزینه است. در صورتی که هدف از طراحی ایجاد اتصالی با شکل پذیری بالا و مکانیزم شکست نرم باشد، استفاده

از اتصالات تقویت شده از ناحیه پانل جان ستون با ضخامت ورق انتهایی کم و قطر پیچ زیاد توصیه می‌شود. ضخامت ورق و قطر پیچ مورد استفاده در اتصال می‌تواند رفتار دورانی اتصال را تحت تأثیر قرار دهد ولی اثر تغییر در ضخامت ورق از تغییر قطر پیچ در رفتار اتصال و درجه گیرداری آن بیشتر است. بررسی منحنی کشش وارده به ردیفهای مختلف پیچ نشان داد که در اتصالات با ورق بدون لبه تقویت نشده، توزیع کشش ردیفهای پیچ با فلسفه طراحی مطابقت دارد ولی در اتصالات با ورق لبه دار تقویت نشده، در برخی حالات، کشش وارده به ردیفهای پیچ از فلسفه طراحی تبعیت نکرده و تنشهای پیش بینی نشده به برخی از ردیفهای پیچ وارد می‌شود. همچنین در صورت استفاده از اتصالات تقویت شده محاسبه نیروهای اهرمی شدن با روشی مناسب و بررسی دقیق میزان گیرداری اتصال و در نظر گرفتن تأثیر آن در روش طراحی ضروری است.

واژه نامه

- | | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|
| 1. flush end plate | 3. MBMA | 5. contact press | 7. friction coefficient |
| 2. extended end plate | 4. finite element | 6. component method | 8. failure point |

مراجع

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*, Vol. 30, 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*, Vol. 64, 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*, Article in press.
4. Dubina, D., and Stratan, A., "Behavior of Welded Connections of Moment Resisting Frames Beam-to-Column joints," *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1431-1440, 2002.
5. Krishnamurthy, N., "Modeling and Prediction of Steel Bolted Connection Behavior," *Computers & Structures*, Vol. 11, No. 2, pp. 75-82, 1980.
6. Bahaari, M.R., and Sherburne, Archibald, N., "Behavior of Eight-Bolt Large Capacity end-Plate Connections," *Computers & Structures*, Vol. 77, 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, Vol. 126, No. 7, 2000, pp. 816-822.
8. Urbonas, K., Daniunas, A., "Behavior of Semi-Rigid Steel Beam-to-Beam Joints under Bending and Axial Forces," *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 62, 2006, pp. 1244-1249.
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. Abaqus Element Reference, "Abaqus Documentation," Online Help, 2009.
11. 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*.
12. Chakhari, J., Daidié, A., Chaiba, Z., and Guillot, J., "Numerical Model for Two-Bolted Joints Subjected to Compressive Loading," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 44, pp. 162 – 173, 2008.
13. Girão Coelho, A.M., and Bijlaard, F.S.K., "Experimental Behaviour of High Strength Steel End-Plate Connections," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, pp. 1228–1240, 2007.
14. Eurocode 3, "Design of Steel Structures, Part 1,1: General Rules and Rules for Buildings," ENV 1993-1-1, Brussels, 1992.
۱۵. فرج پور، م. ر.، "اثر رفتار اتصالات تیر به ستون در پاسخ لرزه‌ای و استاتیکی قابهای فولادی،" پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.