

رابطه لنگر - دوران در اتصالات پیچی تیر به ستون با ورق پیشانی هم تراز

محمد رضا بهاری

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

علی حسنی راد

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۲/۱۴ ، تاریخ تصویب ۸۱/۲/۲۸)

چکیده

در این مقاله پس از نگاهی گذرا به رفتار اتصالات در سازه‌های فولادی اتصال تیر به ستون با ورق پیشانی هم‌تراز تعریف و رفتار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد سپس لزوم استخراج منحنی‌های لنگر- دوران برای این اتصال بیان می‌شود. با ساخت مدل اجزاء محدود غیر ارتجاعی، اتصال دو طرفه تیر به ستون با ورق پیشانی هم‌تراز مدل سازی شده و پاسخ آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. با انجام مطالعات پارامتریک بر روی ۶۵ مدل اجزاء محدود، اثر پارامترهای مختلف بر رفتار اتصال بررسی می‌شود و در نهایت با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره خطی چهار ثابت رابطه ریچارد - ابوت برحسب پارامترهای موثر بر رفتار اتصال معرفی می‌شود که این رابطه منحنی لنگر- دوران را برای اتصال با مشخصات دلخواه ارایه می‌نماید

واژه های کلیدی: اتصالات پیچی ، ورق پیشانی ، اجزاء محدود ، نیمه صلب ، قاب فلزی

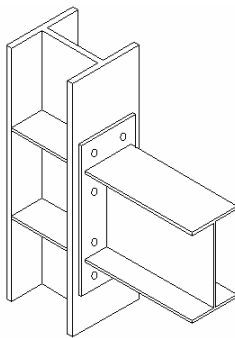
مقدمه

۳- کار در محل اجرای سازه باید به حداقل رسیده و به فعالیتهای ساده محدود گردد.
۴- طراحی اتصال باید حتی‌الامکان ساده (غیر پیچیده) باشد.
۵- مبنای اصول طراحی باید بیانگر رفتار واقعی اتصال باشد.
۶- رفتار اتصال در توزیع نیروها و رفتار کلی سازه قابل کنترل باشد.
به جهت عملکرد رفتار اتصال، اتصالات در سازه‌های فولادی به سه دسته مفصلی، نیمه‌گیردار و گیردار تقسیم می‌شوند. این تقسیم بندی از نظر "طراحی اتصال" و همچنین "تحلیل سازه قاب" صورت می‌گیرد. عامل اصلی که این دسته‌بندی را تفکیک می‌سازد رابطه "لنگر - دوران" گره است.

اتصال پیچی تیر به ستون با ورق پیشانی هم‌تراز یکی از متداولترین اتصالات پیچی تیر به ستون است. این اتصال یک اتصال نیمه‌گیردار است که تا کنون مطالعات آزمایشگاهی ([۹] و [۱۰]) و تحلیل‌های کامپیوتری [۱] جهت بررسی رفتار این اتصال صورت گرفته است، اما در این مطالعات چند نمونه خاص مورد بررسی قرار گرفته اند و نمی‌توان از نتایج آنها برای حالات متنوع هندسی و مادی استفاده نمود. در این مقاله پس از بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار این اتصال، تابعی استخراج می‌شود که بیانگر منحنی لنگر- دوران آن است بطور ایده‌آل اتصالات در سازه‌های فولادی باید شرایط ذیل را برآورده سازند:
۱- تعداد انواع اتصالات سازه باید حداقل باشد.
۲- هزینه ساخت و اجرا باید ارزان تمام شود.

اتصالات با ورق پیشانی بلند و هم تراز مطابق تقسیم بندی ارائه شده در شکل (۱) در رده سخت^۴ قرار می‌گیرند. اتصال با ورق پیشانی هم تراز متداولترین نوع اتصال پیچی تیر به ستون قابهای پرتال ساختمان‌های فولادی در اروپا و آمریکا است [۹].

در طراحی از قابلیت انتقال لنگر خمشی آن صرفنظر می‌شود. با آنکه این اتصال قابلیت انتقال لنگر از تیر به ستون را در حد کمتری (نسبت به لنگر کامل پلاستیک تیر) دارا می‌باشد، غالباً بعنوان یک اتصال ساده تلقی می‌گردد



شکل ۳: اتصال با ورق پیشانی بلند^۴

رفتار اتصالات با ورق پیشانی هم تراز

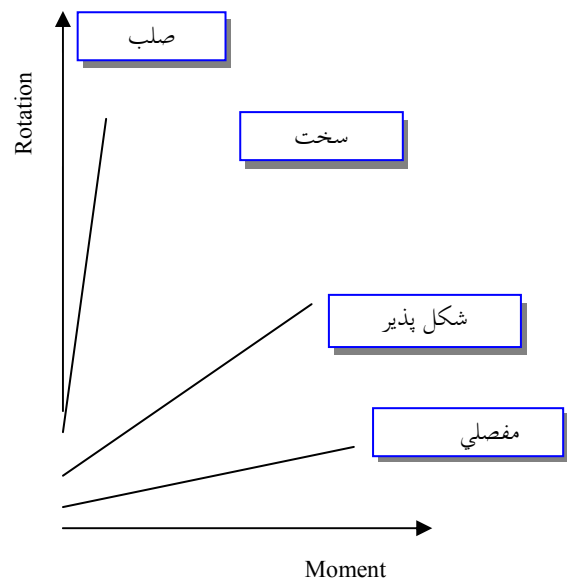
رفتار این اتصال بستگی به پارامترهای متعددی از جمله ضخامت ورق پیشانی، ضخامت بال ستون، آرایش پیچها، تعداد پیچها، مقاومت فولاد تیر، ستون و پیچ و ... دارد.

اگر از ورق پیشانی ضخیم استفاده شود خمش ورق ناچیز است، و خرابی^۵ غالباً بر اثر گسیختگی پیچها رخ می‌دهد (منحنی A شکل ۴). در این حالت باز توزیع نیروی پیچ به حداقل می‌رسد و دوران حول بال فشاری تیر رخ می‌دهد و تغییرات نیروی پیچ خطی است. هرچند سختی ستون در زاویه دوران نهائی مؤثر است اما زاویه دوران نهائی این اتصال با نیروی پیچها کنترل می‌شود. این نوع خرابی با توجه به ماهیت ناگهانی بودن آن خطرناک است و باید در طراحی از آن اجتناب نمود. منحنی B شکل (۴) نمایانگر منحنی لنگر دوران در حالتی است که خمش ورق تعیین کننده رفتار نهائی اتصال است. این حالت برای

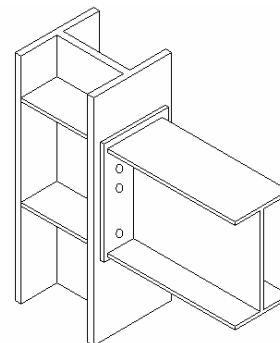
دوران در اینجا به معنی زاویه ناشی از تغییر شکل نسبی خط مرکزین اعضاء اتصال است. شکل (۱) این تقسیم بندی را نشان می‌دهد [۹].

معرفی اتصالات با ورق پیشانی^۱

اتصالات با ورق پیشانی شامل یک ورق پیشانی می‌باشند که در کارخانه به انتهای تیرجوش می‌شود و در محل اجرا، ورق پیشانی به ستون پیچ می‌گردد. پیچها غالباً تحت نیروی پیش کشیدگی قرار می‌گیرند. این نوع اتصالات به دو صورت با ورق پیشانی هم تراز و بلند بکار می‌روند که در اشکال (۲) و (۳) مشاهده می‌گردند:



شکل ۱: تقسیم بندی اتصالات از جهت عملکرد خمشی.



شکل ۲: اتصال با ورق پیشانی هم تراز^۲

۴- جاری شدن برشی جان ستون

۵- کمانش فشاری جان ستون

۶- لهیدگی جان ستون

۷- ترک خوردن جوش تیر به ورق پیشانی [۱۲]

موارد فوق پیچیدگی رفتار به ظاهر ساده این اتصال را روشن می‌سازد.

اهمیت استخراج منحنی‌های لنگر-دوران

از آنجا که سختی اتصالات تیر به ستون بر رفتار قاب فولادی تأثیر می‌گذارد، باید رفتار دقیق لنگر - دوران اتصال در تحلیل‌ها استفاده شود.
برای یافتن رفتار اتصالات نیمه گیردار دو راه وجود دارد:

۱- انجام مطالعات آزمایشگاهی

از جمله محدودیت‌هایی که مطالعات آزمایشگاهی با آن مواجه است تعداد زیاد پارامترهایی است که بر رفتار اتصال مؤثرند. این موضوع به ساخت نمونه‌های متعدد جهت استخراج رابطه $M - \phi$ برای اتصالات گوناگون می‌انجامد، که راه حلی غیراقتصادی و غیر عملی است. از طرفی ناهماهنگی‌هایی در اندازه‌گیری دوران اتصالات و مطالعات آزمایشگاهی وجود دارد که استفاده مبسوط از این راه حل را منتفی می‌گرداند.

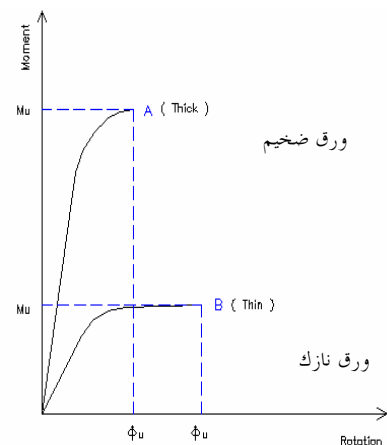
۲- استفاده از مدل‌های کامپیوتری

این روش شامل ساخت مدل‌هایی است که رفتار اتصال را بصورت واقعی مدل نمایند. این روش با توجه به پیشرفت چشمگیر نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای کامپیوتری در حال گسترش است. با ساخت مدل تحلیلی خوبی که بتواند رفتار اتصال را بخوبی بیان کند می‌توان تأثیر پارامترهای متعدد را بر رفتار اتصال بررسی کرد. این روش برای استخراج رفتار اتصالات کاملاً توجیه پذیر و اقتصادی می‌باشد.

تعریف دوران

در این مطالعه دوران در هر مرحله از بارگذاری با توجه به شکل (۵) معادل نسبت حداکثر جدائی^۷ ورق (و)

ورق‌های پیشانی نازک اتفاق می‌افتد و باز توزیع نیروی پیچ بدلیل خمش ورق قابل توجه است. در این حالت لنگر نهائی عموماً کمتر از حالت قبل (خرابی پیچها) است اما دوران نهائی بمراتب بیشتر است [۹].
تأثیر پارامترهای دیگر بسادگی اثر ضخامت ورق پیشانی نیست و پس از تحلیل مدل کامپیوتری بررسی می‌شوند. بدلیل تفاوت‌های هندسی و پاسخ متفاوت اتصالات پیچی، اتصالات با ورق پیشانی هم تراز در دو گروه ذیل مورد بررسی قرار می‌گیرند:



شکل ۴: اثر ضخامت ورق پیشانی بر رفتار اتصال.

الف- اتصالات سخت شده^۶

این اتصالات شامل یک ورق سخت کننده است که در داخل مقطع ستون و در امتداد بال‌های تیر به جان وبال ستون جوش می‌شود.

ب- اتصالات سخت نشده

در این نوع اتصالات هیچ سخت کننده‌ای در داخل مقطع ستون استفاده نمی‌شود. طبعاً انعطاف بال ستون در رفتار عمومی اتصال تأثیر بیشتری دارد و لازم است در این اتصالات به اهمیت اندرکنش بال ستون و ورق پیشانی توجه ویژه نمود. در این مقاله رفتار اتصالات سخت شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در اتصالات با ورق پیشانی، خرابی اتصال در اثر افزایش بار بر اثر وقوع یکی از پدیده‌های ذیل ایجاد می‌شود:

۱- شکست پیچها در کشش

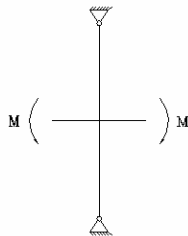
۲- تشکیل مکانیزم پلاستیک در ورق پیشانی

۳- تشکیل مکانیزم پلاستیک در بال ستون

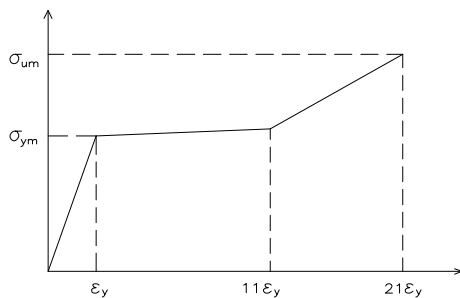
باشد، بنابراین فقط ۱/۴ اتصال مدل می‌شود و شرایط مرزی تقارن^{۱۰} بروی گره‌های موجود در این دو صفحه اعمال می‌گردد. برای مدلسازی اتصال از نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS 5.4 استفاده می‌شود.

خواص مواد

خواص کلیه موادی که در مدل وجود دارند بصورت ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. در این مدل از دو نوع منحنی تنش کرنش استفاده شده است: منحنی اول برای اعضایی است که از فولاد کم کربن (سازه‌ای) ساخته می‌شوند، که شامل بال و جان تیر و ستونها، ورق پیشانی و ورق سخت کننده ستون است (شکل ۷).



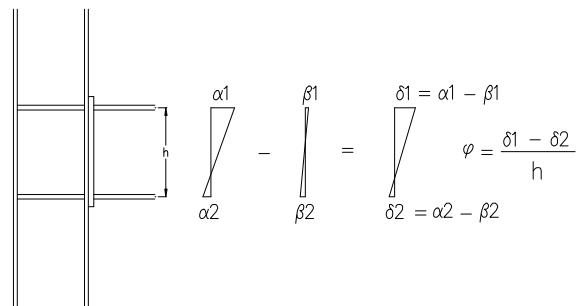
شکل ۶: شرایط مرزی .



شکل ۷: منحنی تنش کرنش فولاد سازه‌ای.

نه تغییر مکان) از بال ستون، به فاصله مرکز به مرکز بال بالا و پایین تیر تعریف می‌شود [۱].

در این شکل α_1 و α_2 به ترتیب تغییر مکان های متناظر با ورق در تراز بال بالا و پایین تیر و β_1 و β_2 به ترتیب تغییر مکانهای مشابه در بال ستون است. h فاصله مرکز به مرکز بال تیر بوده و φ دوران اتصال است. در حقیقت این تعریف معادل تعریف دوران خودگره است.



شکل ۵: تعریف دوران اتصال

توصیف مدل کامپیوتری

در ساختن مدل کامپیوتری از مراجع [۴] و [۵] و [۶] الهام گرفته شده است.

در این مقاله اتصالات سبک دو طرفه^۸ با ورق پیشانی هم تراز مورد بررسی قرار می‌گیرند. این اتصالات شامل دو ورق سخت کننده در امتداد بال فشاری و کششی تیر هستند که به بال و جان ستون جوش می‌شوند. ضمناً کلیه اتصالاتی که مورد بررسی قرار می‌گیرند دارای سه ردیف پیچ (جمعاً شش پیچ) می‌باشند.

شرایط مرزی^۹

شرایط مرزی ستون در فاصله قابل توجهی معادل حداقل دو برابر عمق تیر بالا و پایین، بصورت قیدهای مفصلی منظور شده است تا موجب ناپایداری سیستم نگردد. بنابراین شرایط مرزی در دو سر ستون بصورت شکل (۶) اعمال گشته است:

از آنجا که اتصالات دو طرفه مورد بررسی قرار می‌گیرند، اتصال دارای دو صفحه تقارن دارد، یک صفحه ماربرجان تیر بوده و صفحه دیگر عمود بر وسط جان ستون می

بدین منظور هر گره روی ورق پیشانی با یک المان link 10 به گره متناظرش روی بال ستون متصل گشت. این المان یک المان خرپای سه بعدی است که در دو حالت قابل استفاده است:

۱- فقط کشش ۲- فقط فشار

در حالت فقط کشش می‌تواند برای مدل کردن کابل یا زنجیر و در حالت فقط فشار بعنوان المان تماس (Gap) استفاده گردد. در این مطالعه برای مدل تماس بین ورق پیشانی و بال ستون از این المان بصورت فقط فشار استفاده می‌شود.

خواص این المان همانند خواص فولاد سازه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. با این تفاوت که رابطه تنش- کرنش آن در تمام مراحل بارگذاری بصورت خطی (یک خط راست) باقی می‌ماند ($\sigma = E\varepsilon$). از آنجا که المان فقط فشار یک المان خرپا است، سختی آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K = \frac{EA}{L}$$

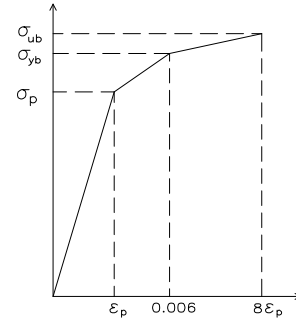
(۱)

سطح مقطع (A) و طول (L) این المان باید با توجه به دو عامل زیرانتخاب گردد:

الف - تغییر شکل نسبی دو گره المان (تغییر طول المان) در مقایسه با تغییر شکل‌های موجود کوچک باشد
ب - سختی زیاد موجب ناپایداری حل^{۱۱} مدل نگردد.

مش بندی

یکی از عوامل تعیین کننده در پاسخ یک مدل اجزاء محدود نحوه صحیح مش بندی قسمتهای مختلف مدل است. اگر تعداد المانها خیلی زیاد در نظر بگیریم مدت زمان حل مدل افزایش می‌یابد مضاف بر اینکه ساخت مدل مشکل‌تر می‌شود و اگر تعداد المانها برای مدل رفتار واقعی کافی نباشد، جواب‌های مدل بدور از واقعیت خواهد بود. لذا در این مطالعه ابتدا با کاهش تدریجی ابعاد المانهای شبکه و مقایسه نتایج، شبکه بهینه استخراج گردید و بقیه تحلیلها براساس آن دنبال شد. برای جزئیات بیشتر به [۱۴] مراجع شود.



شکل ۸: منحنی تنش کرنش فولاد پیچ.

منحنی دوم (شکل ۸) برای اعضای فولادی پیچ تعریف شده است که از نوع پر مقاومت است. در این منحنی σ_p حد پیش تنیدگی پیچ است و همانطور که ملاحظه می‌شود دامنه خمیری کمی دارد.

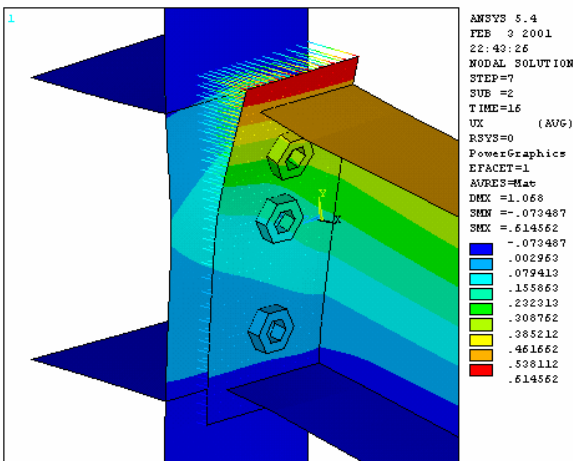
برای مدل کردن تیر، ستون، ورق پیشانی و ورق سخت کننده از المان Shell43 استفاده می‌شود.

سربپیچ و مهره آن توسط المان آجری شکل Solid45 مدل گشته است. از آنجا که سر و مهره پیچ در کلیه مراحل بارگذاری با ورق پیشانی در تماس کامل اند (پیچها پیش کشیده‌اند) لذا آنها را به ترتیب با ورق پیشانی و بال ستون بصورت متصل در نظر گرفته می‌شوند. یعنی گرهی که روی ورق پیشانی در محل گوشه و ضلع داخلی پیچ قرار دارد همان گرهی است که المان Solid45 بوسیله آن تعریف می‌شود.

جان پیچ توسط ۱۲ عنصر خرپائی موسوم به المان Link 8 مدل شده است. سطح مقطع هر یک از این ۱۲ عنصر برابر ۱/۱۲ سطح کشش پیچ در نظر گرفته می‌شود. پیش کشیدگی پیچها با اعمال کرنش اولیه در این المان قابل مدلسازی است. بدین معنی که قبل از بارگذاری به روی اتصال ابتدا با سعی و خطا (چند بار اجرای برنامه) مقدار کرنش اولیه‌ای که باعث ایجاد نیروی پیش کشیدگی مورد نظر در پیچها می‌شود بدست می‌آید.

مدل مرز مشترک ورق پیشانی و بال ستون (مدل تماس)

برای مدل کردن مرز مشترک ورق پیشانی و بال ستون از المان تماس سه بعدی link 10 استفاده می‌شود.



شکل ۱۱: تغییر شکل اتصال با ورق پیشانی ضخیم تحت بار نهایی.

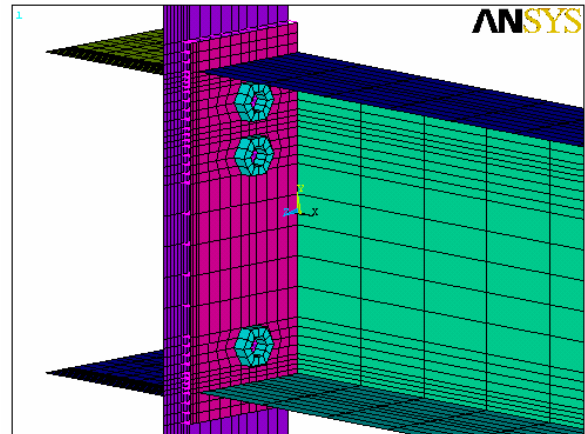
توزیع تنش‌ها

برای بحث پیرامون توزیع تنش‌ها در ورق پیشانی محورهای اصلی بصورت: محور X در امتداد تیر، محور Y در امتداد ستون و محور Z به صورت راستگرد با توجه به محورهای X, Y در نظر گرفته شده اند.

هرچند که تعریف دقیق ریاضی برای تمایز ورق پیشانی نازک با ضخیم وجود ندارد، لیکن ساده ترین معیار تفکیک این دو، مکانیزم تسلیم و خرابی اتصال است. چنانچه تسلیم اتصال بدلیل شکست پیچها اتفاق بیافتد و ورق پیشانی بصورت خط حول خط اثر بال فشاری تیر خم شود ورق ضخیم تلقی می شود. لیکن اگر همزمان با افزایش خمش، توزیع نیرو در ورق بصورت خمش های محلی در اطراف پیچها باشد و نیروهای اهرمی شدن قابل توجهی بوجود بیاید، ورق نازک تلقی می شود. با این تعریف، موضوع نازک یا ضخیم بودن ورق پیشانی میتواند نسبی تلقی گردد و ضمن بستگی به ابعاد هندسی اتصال از قطر پیچ، حضور یا عدم حضور سخت کننده بالهای ستون و نحوه اندرکنش ورق پیشانی- بال ستون تاثیر می پذیرد.

الف - ورق‌های پیشانی نازک

در این ورقها σ_x در کلیه مراحل بارگذاری در حد صفر باقی می‌ماند. σ_y در مراحل اولیه بارگذاری در اطراف ردیف اول پیچها بصورت متمرکز دیده می‌شوند و مقدار آن در حدی است که حتی در مراحل اولیه بارگذاری نیز ناحیه اطراف پیچها پلاستیک شده اند . در



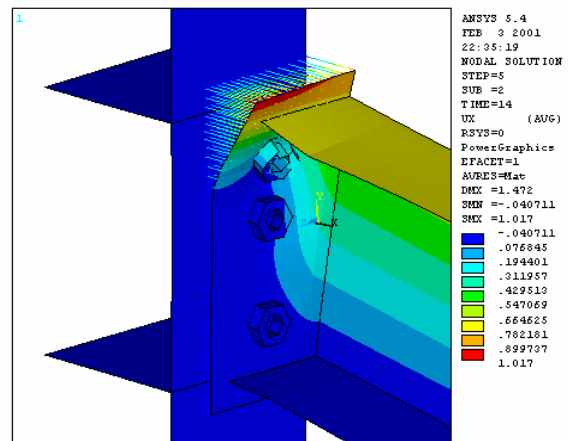
شکل ۹: مش بندی اتصال.

بارگذاری

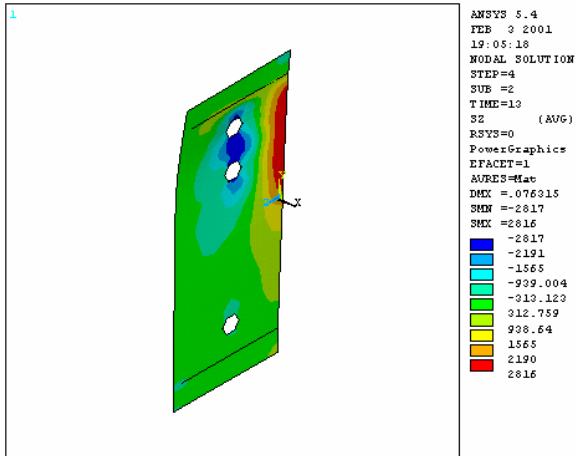
اتصال تحت اثر خمش خالصی که به تیر وارد می‌شود تحت مطالعه قرار می‌گیرد. خمش خالص بصورت کوپل نیرو در بالها ایجاد می‌گردد.

تغییر شکل

با توجه به تفسیر کانتورهای تنش ، تغییر شکل ورق پیشانی خصوصاً" برای ورقهای نازک کاملاً سه بعدی است. تغییر شکل اتصال در دو حالت نازک و ضخیم در اشکال (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود که توضیح بیشتر برای تمایز آنها در بخش بعدی ارائه می شود.



شکل ۱۰: تغییر شکل اتصال با ورق پیشانی نازک تحت بار نهایی.



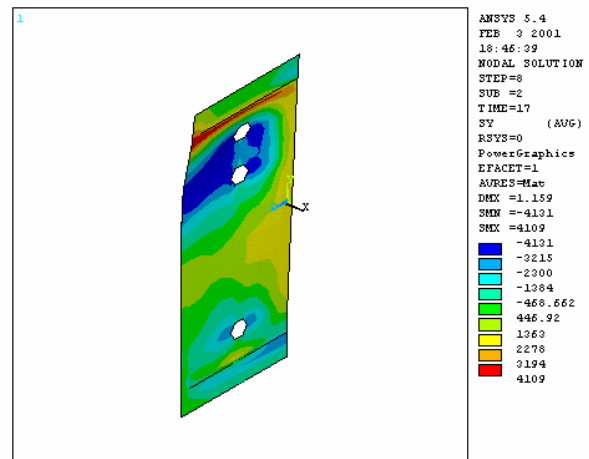
شکل ۱۳: توزیع تنش σ_z در مرحله بارگذاری نهائی در ورق پیشانی نازک.

ب - ورق‌های پیشانی ضخیم

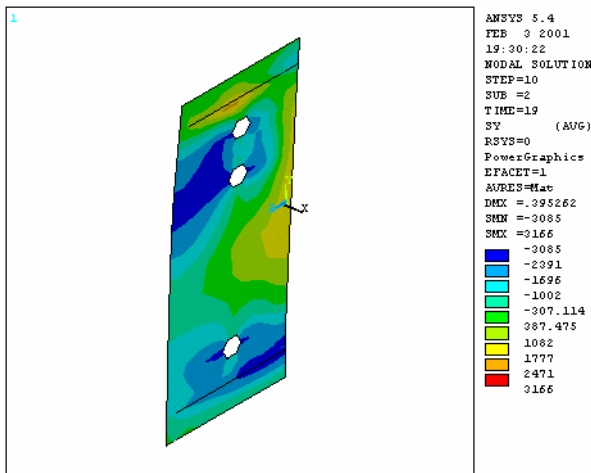
در کلیه مراحل بارگذاری ناچیز است σ_x در مراحل اولیه بارگذاری به صورت متـمرکز بعدی این ناحیه به طرف جوانب گسترده می‌شود. در مراحل نهایی بارگذاری نواحی میان پیچهای کششی ردیف اول و دوم و نیز پیچهای ردیف سوم و در مجاورت بال فشاری مقدار σ_y ماکزیمم است (شکل ۱۴). در مراحل اولیه بارگذاری به مقدار اندک در نزدیکی پیچهای کششی دیده می‌شود. در مراحل بعدی ناحیه میانی دو ردیف پیچ کششی و ناحیه کششی اطراف جان تنش قابل ملاحظه‌ای دارند. در مرحله نهایی بارگذاری علاوه بر ناحیه اطراف دو ردیف پیچهای کششی، نواحی اطراف جان تیر نیز به تنش نهایی رسیدند (شکل ۱۵). پارامترهای معرف اجزای اتصال در شکل (۱۶) نشان داده شده‌اند.

مراحل بعدی بارگذاری منطقه پلاستیک در اطراف ردیف اول پیچها گسترش یافته و مناطقی در نزدیکی بال کششی تیر نیز پلاستیک می گردند. در مرحله نهایی بارگذاری منطقه پلاستیک کل ناحیه اطراف مابین پیچهای ردیف اول و دوم را فرا می گیرد و در اطراف بال کششی تیر نیز منطقه پلاستیک دیده می‌شود (شکل ۱۲).

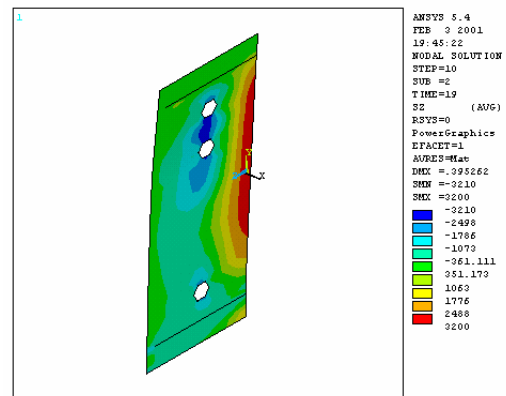
σ_z (منفی) در مراحل اولیه بار گذاری به مقدار زیادی در اطراف پیچهای کششی ردیف اول و σ_z (مثبت) به مقدار کمتر در مجاورت منطقه کششی جان دیده می‌شود. در مراحل بعدی بارگذاری منطقه پلاستیک در ناحیه میانی دو ردیف پیچهای کششی بیشتر گسترش یافته و در مجاورت قسمت کششی جان نیز گسترش ناحیه پلاستیک مشهود است. در مرحله آخر بارگذاری مقدار σ_z (منفی) به مقدار نهایی خود می‌رسد و در محدوده مجاور پیچهای ردیف اول و دوم دیده می‌شود. σ_z (مثبت) نیز که به مقدار نهایی خود رسیده است، تقریباً در سرتاسر ناحیه اطراف جان مشهود است (شکل ۱۳).



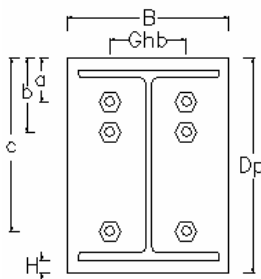
شکل ۱۴: توزیع تنش σ_y در مرحله بارگذاری نهائی در ورق پیشانی نازک .



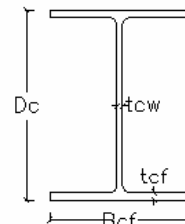
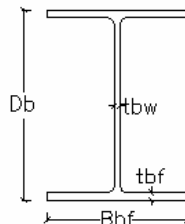
شکل ۱۵: توزیع تنش σ_z در مرحله بارگذاری نهایی در ورق پیشانی ضخیم .



شکل ۱۴: توزیع تنش σ_y در مرحله بارگذاری نهایی در ورق پیشانی ضخیم .



ال



الف) پارامترها:

شکل ۱۶: پارامترهای هندسی اجزاء اتصال .

ستون مورد استفاده از نوع 254×254 UC132 معادل و تیر از نوع 305×165 UB54 معادل است. در چهار مورد آزمایش فقط ضخامت ورق پیشانی تغییر می کند و بقیه شرایط یکسان است.

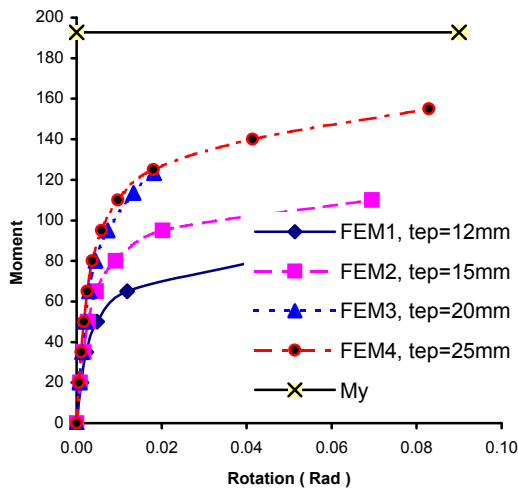
مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی

در سال ۱۹۸۶، جنکینز [۹] ۶ مورد اتصال با ورق پیشانی هم تراز و ۱۲ مورد اتصال با ورق پیشانی بلند را تحت خمش آزمایش نمود. از ۶ مورد آزمایش ورق پیشانی هم تراز نتایج ۴ مورد در مقاله وی آمده است.

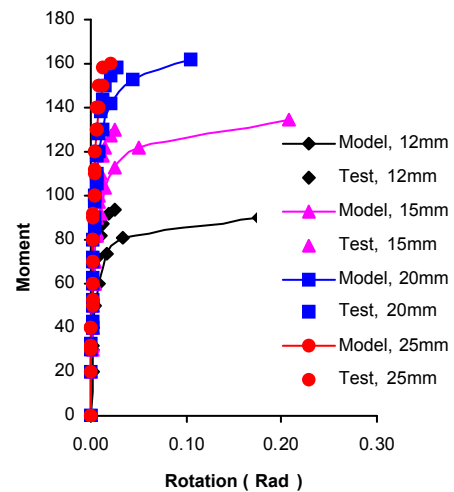
مقایسه نتایج تحلیل مدل اجزاء محدود با آزمایشات فیلیپس در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همچنانکه ملاحظه می‌شود سختی اولیه در مدل اجزاء محدود با نمونه‌های آزمایشگاهی برابر است. بین سختی نهایی مدل اجزاء محدود و نمونه‌های آزمایشگاهی نیز همسانی قابل قبولی دیده می‌شود. در قسمت غیر خطی منحنی رفتار، تفاوتها اعم از هندسی و مادی و نیز عدم دقتها در آزمایشات تاثیرات خود را بروز می‌دهند.

بررسی اثر پارامترها بر رفتار اتصال

پس از ساخت مدل اجزاء محدود سه بعدی کامپیوتری و مقایسه آن با نتایج تجربی که در بخشهای قبل توضیح داده شد، در این قسمت با ساخت مدل‌های گوناگون و تغییر پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصال تأثیرات آنها (بر پاسخ اتصال بررسی می‌شوند. تعداد کل مدل‌های اجزاء محدود ساخته شده ۶۵ عدد است که مشخصات بخشی از آنها در جدول (۱) در انتهای مقاله آورده شده است (برای اطلاعات بیشتر به [۱۴] مراجعه شود).

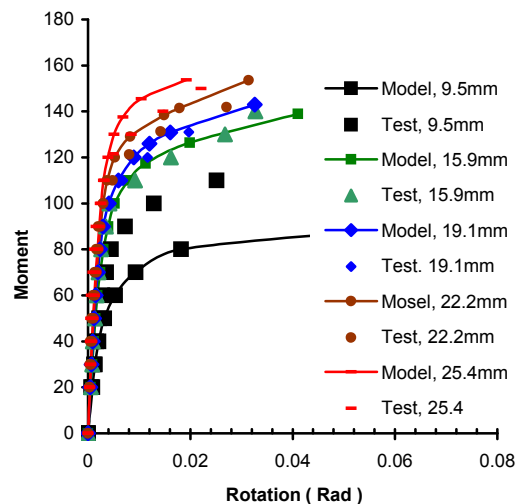


شکل ۱۹: تأثیر ضخامت ورق پیشانی.



شکل ۱۷: مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود با آزمایشات جنگینز.

شکل (۱۷) مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود حاصله را با نتایج آزمایشات فوق‌الذکر نشان می‌دهد. فیلیپس [۱۰] در سال ۱۹۸۱ یکسری آزمایش بر روی اتصالات با ورق پیشانی هم تراز انجام داد و اثر ضخامت ورق پیشانی را بر رفتار اتصال بررسی نمود. تیر مورد استفاده $W250 \times 33$ Grade300w با تنش تسلیم ۳۶۳ MPa (اندازه‌گیری شده) می‌باشد. هرچند که شماره ستون گزارش نشده است، اشاره گردیده که ستون سفت و ضخیم است.



شکل ۱۸: مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود با آزمایش فیلیپس.

۱- ضخامت ورق پیشانی

همچنانکه در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) و نیز (۱۹) دیده می‌شود با افزایش ضخامت ورق پیشانی، سختی اولیه اتصال (K_i) و سختی نهائی اتصال (K_p) افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت ورق پیشانی، لنگر نهائی اتصال نیز افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد افزایش ضخامت ورق پیشانی بیش از یک مقدار مشخص تأثیر چندانی در رفتار اتصال نخواهد داشت بدین معنی که سختی اولیه و نهائی و حتی مقاومت نهائی نیز تغییر چندانی نمی‌کنند. در این حالت گسیختگی بر اثر خرابی پیچ‌های کششی رخ می‌دهد.

۲- مشخصات تیر

چون از مقاطع استاندارد بعنوان تیر استفاده می‌گردد پارامترهای وابسته به تیر همانند ضخامت بال، جان، عرض بال و ... نمی‌توانند بطور مستقل در نظر گرفته شوند. مضاف بر اینکه با تغییر اندازه تیر بالا جبار ابعاد ورق پیشانی و ... هم تغییر می‌یابد. بنابراین پارامترهای وابسته به تیر بطور همزمان با متغیرهای دیگر در نظر گرفته می‌شود.

۳- ستون

در مدل‌های FEM12, FEM19, FEM20 جدول (۱) مشخصات اتصال ثابت بوده و فقط ستون تغییر می‌یابد. همچنانکه انتظار می‌رفت تغییر اندازه ستون‌های سخت شده تأثیر چندانی بر رفتار اتصال ندارد و منحنی‌های مربوط به سه اتصال تقریباً بر هم منطبق‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رفتار اتصال بطور عمده از مشخصات تیر و ورق پیشانی تأثیر می‌پذیرد.

۴ - پیچ

الف- قطر پیچ

شکل (۲۰) اثر قطر پیچ بر منحنی لنگر دوران اتصال را نشان می‌دهد. تغییرات هندسی اندکی که بین دو مدل FEM31, FEM32 وجود دارد فقط به جهت جای گرفتن سربیش بزرگتر بروی ورق پیشانی است. (که به ناچار تغییرات هندسی اندکی اعمال شده است).

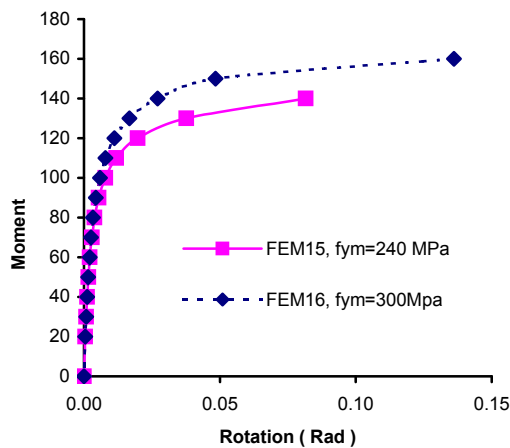
ب- مقاومت تسلیم و نهائی پیچ

همچنانکه در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود، افزایش مقاومت پیچ تأثیری در سختی اولیه اتصال ندارد اما لنگر نهائی اتصال را می‌افزاید. بعبارت دیگر بدلیل عدم تفاوت سختی پیچ، مقاومت اولیه اتصال تأثیر نمی‌پذیرد و

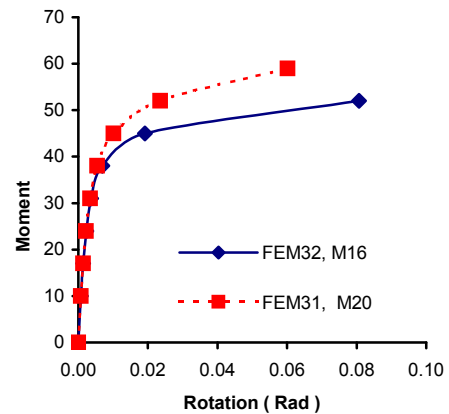
جدول ۱: مشخصات پارامترهای بکار رفته در ساخت مدل اجزاء محدود.

افزایش مقاومت فقط در مراحل غیرخطی و توسعه خمیری خود را نشان میدهد.

لنگر نهائی اتصال کمی افزایش می‌یابد. شکل (۲۲) نمونه ای از مقایسه این تاثیر در رفتار اتصال است.



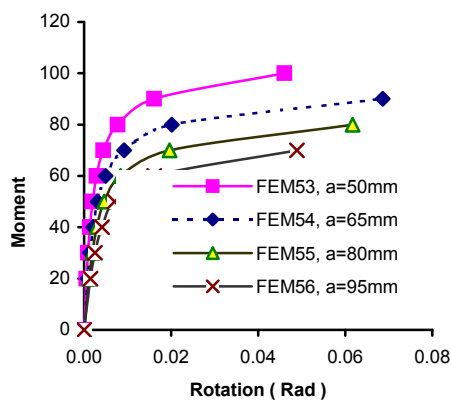
شکل ۲۲: تأثیر مقاومت فولاد بر رفتار اتصال .



شکل ۲۰: تأثیر قطر پیچ بر رفتار اتصال .

۶- پارامترهای هندسی اتصال

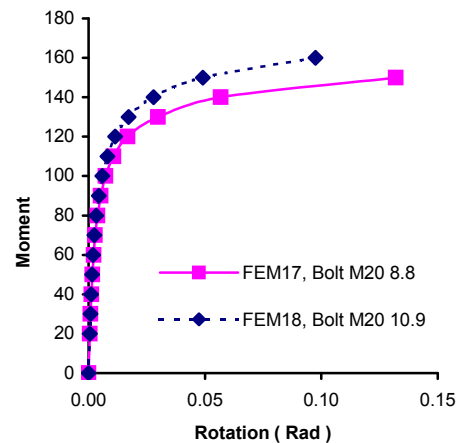
در این قسمت تاثیر برخی از پارامترهای هندسی اتصال که قبلاً" در شکل (۱۶) تعریف شده اند ارائه می‌گردد.



شکل ۲۳: تأثیر پارامتر a بر رفتار اتصال .

الف - پارامترهای a و b (به ترتیب فاصله اولین ردیف پیچها از لبه فوقانی ورق پیشانی)

معمولاً چون فاصله دو ردیف پیچهای کششی با یکدیگر کم است با تغییر پارامتر a پارامتر b نیز تغییر

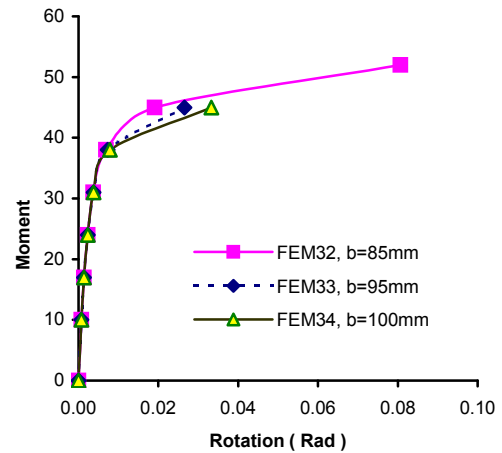


شکل ۲۱: تأثیر مقاومت پیچ بر رفتار اتصال .

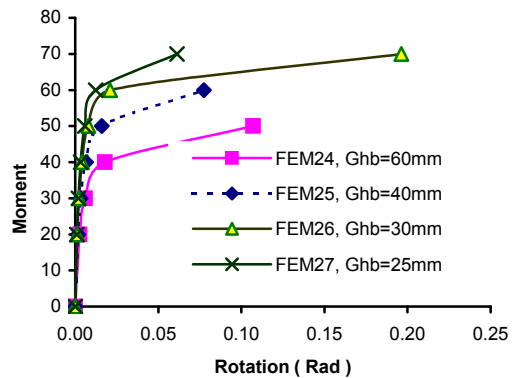
۵- مقاومت تسلیم و نهائی فولاد

همچنانکه انتظار می‌رود با افزایش مقاومت تسلیم فولاد چون شیب منحنی تنش- کرنش در ابتدا تغییر نمی‌کند، پاسخ اتصال نیز در اوایل منحنی لنگر- دوران بدلیل ذکر شده در بخش ۴ (ب) فوق تغییری ندارد و سختی اولیه اتصال تغییری نمی‌کند. اما سختی نهائی و

می‌یابد. مطابق شکل (۲۴) پارامتر b تأثیر چندانی بر رفتار اتصال ندارد بنابراین تغییرات در رفتار اتصال که با تغییر در پارامترهای a و b ایجاد می‌شود، منحصراً مربوط به پارامتر a است. همچنانکه در شکل (۲۳) ملاحظه می‌شود بهتر است ردیف اول پیچها حتی المقدور به بال کشش تیر نزدیکتر باشد.



شکل ۲۴: تأثیر پارامتر b بر رفتار اتصال .



شکل ۲۵: تأثیر پارامتر G_{hb} بر رفتار اتصال.

ج - پارامتر G_{hb} (فاصله افقی پیچها)

اثر پارامتر G_{hb} بر رفتار اتصال در شکل (۲۵) نمایش داده شده است. همچنان که دیده می‌شود هر چه فاصله افقی پیچها کمتر باشد سختی اولیه اتصال و همچنین لنگر نهائی اتصال بیشتر می‌شود.

استخراج تابع لنگر - دوران

تهیه و نگهداری رابطه لنگر- دوران برای تمام اتصالات با پارامترهای متنوع عملی و کاربردی نیست و با توجه به تنوع ابعاد و اندازه‌ها از لحاظ اقتصادی نیز غیرقابل توجیه است. بنابراین در این فصل یک تابع استاندارد ارائه می‌شود که بتوان با معرفی پارامترهای اولیه مؤثر بر رفتار اتصال، رابطه لنگر- دوران استخراج گردد.

با بکار بردن رابطه ریچارد و ابوت [۱۳] (که در سال ۱۹۷۵ برای تنش- کرنش پیشنهاد گردید منحنی لنگر - دوران اتصالات نیمه گیردار بصورت زیر خواهد شد:

$$M = \frac{k_1 \phi}{\left(1 + \left|\frac{k_1 \phi}{M_o}\right|^n\right)^{\frac{1}{n}}} + k_p \cdot \phi \quad (2)$$

که در آن $k_1 = k_i - k_p$:

k_i : شیب اولیه منحنی لنگر- دوران

k_p : شیب منحنی در قسمت انتهایی^{۱۲}

M_o : لنگر مینا که از تقاطع خط شیب اولیه و خط شیب

نهائی منحنی لنگر-دوران بدست می‌آید.

n : پارامتر شکل

پارامترهای فوق در شکل (۲۶) تعریف شده اند.

ب - پارامترهای c (فاصله آخرین ردیف پیچها از لبه فوقانی ورق پیشانی)، t_{sp} (ضخامت ورق سخت کننده

ستون)، B (عرض ورق پیشانی)، H و D_p

تغییر این پارامترها اثر چندانی بر رفتار اتصال ندارد و نمودارهای لنگر - دوران بر هم منطبق می‌شوند.

شکل ۲۶: تعریف پارامترهای منحنی لنگر- دوران

$$\bar{M} = \frac{k_{1n}}{\left(1 + |k_{1n}\phi|^n\right)^{\frac{1}{n}}} + k_{pn} \cdot \phi \quad (3)$$

که در آن $\bar{M} = \frac{M}{M_0}$ و $k_{1n} = k_{in} - k_{pn}$ و k_{pn}, k_{in} به ترتیب سختی اولیه و نهائی منحنی لنگر- دوران نرمال شده‌اند. منحنی‌های $\bar{M} - \phi$ در شکل (۲۸) نمایش داده شده‌اند. همچنانکه مشاهده می‌شود محدوده تغییرات M بسیار کاهش یافته است.

برازش منحنی

برای برازش منحنی ریچارد-ابوت بر نقاط (\bar{M}, ϕ) که برای هر مدل اجزاء محدود استخراج شده‌اند بطریقه زیر عمل می‌شود:

ابتدا مقادیر k_{pn}, k_{in} با استفاده از نقاط اطلاعاتی (\bar{M}, ϕ) برای هر مدل بدست می‌آیند. سپس دو نقطه اطلاعاتی (\bar{M}_a, ϕ_a) و (\bar{M}_b, ϕ_b) را بدخواه انتخاب کرده و فرض می‌شود که منحنی ریچارد-ابوت از مرکز مختصات و این دو نقطه بگذرد؛ در این صورت داریم:

$$k_{bn} = \frac{\bar{M}_b}{\phi_b} \quad k_{an} = \frac{\bar{M}_a}{\phi_a} \quad (4)$$

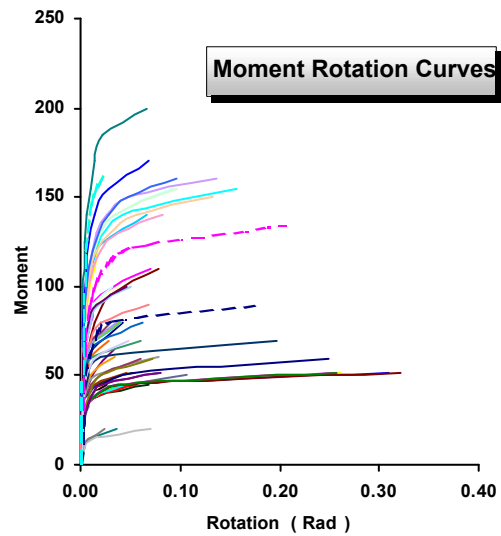
با تعریف متغیرهای A و B بصورت زیر خواهیم داشت:

$$A = \frac{k_{1n}}{k_{an} - k_{pn}} \quad B = \frac{k_{1n}}{k_{bn} - k_{pn}}$$

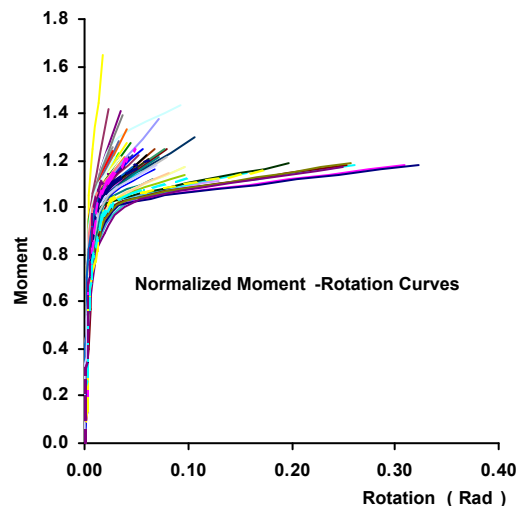
$$\Rightarrow A^n - 1 - \left(\frac{\phi_a}{\phi_b}\right)^n (B^n - 1) = 0 \quad (5)$$

با روش سعی و خطا و حل معادله فوق n بدست خواهد آمد. از آنجا که ممکن است که چند انتخاب برای (\bar{M}_a, ϕ_a) و (\bar{M}_b, ϕ_b) وجود داشته باشد به ازاء هر کدام از انتخاب‌ها، در صورت همگرا بودن حل n مربوطه بدست می‌آید. با یافتن ضریب همبستگی^{۱۳} رابطه ریچارد-ابوت بازای هر n ، هر کدام که ضریب

شکل (۲۷) نمودار M بر حسب ϕ را برای کلیه مدل های اجزاء محدود ساخته شده نمایش می‌دهد.



شکل ۲۷: محدوده تغییرات M بر حسب ϕ .



شکل ۲۸: منحنی‌های نرمال M بر حسب ϕ .

همچنانکه دیده می‌شود اتصالات متنوعی مورد بررسی قرار گرفته و محدوده تغییرات لنگر نهائی بسیار زیاد است. به منظور کاهش دامنه تغییرات M و یافتن رابطه بدون بعد، منحنی M با تقسیم آن بر لنگر مبنا (M_0) نرمال شده است. چون ϕ بدون واحد است نیازی به نرمال کردن آن نیست. حال رابطه ریچارد-ابوت به شکل زیر در می‌آید [۸]:

با انتخاب پارامترهای $\sigma_{yb}, \sigma_{ym}, G_{hb}, a, t_{ep}$ ،
 $d_b, D_c, B_{cf}, t_{cw}, t_{cf}$ ، تابع پارامتری K_{in} بصورت
 زیر در می‌آید:

$$K_{in} = \frac{13379.4 \cdot t_{bw}^{1.478} \cdot B_{bf}^{0.022} \cdot D_b^{0.894} \cdot t_{cf}^{0.808} \cdot D_c^{0.581} \cdot t_{ep}^{0.373}}{t_{bf}^{0.370} \cdot t_{cw}^{0.562} \cdot B_{cf}^{0.317} \cdot d_b^{1.018} \cdot a^{0.942} \cdot G_{hb}^{0.265} \cdot \sigma_{ym}^{0.975} \cdot \sigma_{yb}^{0.169}}$$

که ضریب همبستگی آن ۰/۸۴۱ می‌باشد.
 با انتخاب پارامترهای محدودتر $\sigma_{ym}, G_{hb}, a, t_{cf}$ ، و
 D_b, t_{bw}, t_{bf} به رابطه زیر می‌رسیم:

$$K_{in} = \frac{8606.7 \cdot t_{bw}^{1.999} \cdot D_b^{1.358} \cdot t_{cf}^{0.267} \cdot t_{ep}^{0.361}}{t_{bf}^{0.700} \cdot d_b^{1.091} \cdot a^{0.894} \cdot G_{hb}^{0.421} \cdot \sigma_{ym}^{1.131}} \quad (۱۰)$$

که ضریب همبستگی آن ۰/۸۰۵ است .

تابع پارامتری n

با انتخاب پارامترهای $\sigma_{yb}, \sigma_{ym}, G_{hb}, a, t_{ep}$ ،
 $d_b, D_c, B_{cf}, t_{cw}, t_{cf}$ و $D_b, B_{bf}, t_{bw}, t_{bf}$ تابع
 پارامتری n بصورت زیر در می‌آید:

$$n = \frac{123.1 \cdot t_{bf}^{2.144} \cdot B_{bf}^{1.093} \cdot t_{cf}^{1.042} \cdot D_c^{1.124} \cdot a^{0.768} \cdot G_{nb}^{0.566} \cdot \sigma_{yb}^{0.222}}{t_{bw}^{3.529} \cdot D_b^{2.248} \cdot t_{cw}^{1.492} \cdot B_{cf}^{0.984} \cdot d_b^{0.278} \cdot t_{ep}^{0.051} \cdot \sigma_{ym}^{0.417}}$$

که ضریب همبستگی آن ۰/۷۶۱ است و با انتخاب
 پارامترهای کمتر ضریب همبستگی بشدت کاهش
 می‌یابد . بنابراین ارایه رابطه‌ای بر حسب تعداد پارامتر
 کمتر باعث ایجاد رابطه‌ای با خطای زیادی خواهد بود .

تابع پارامتری K_{pn}

با انتخاب پارامترهای $\sigma_{ub}, \sigma_{um}, G_{hb}, b, a, t_{ep}$ ،
 $d_b, D_c, B_{cf}, t_{cw}, t_{cf}, D_b$ تابع
 B_{bf}, t_{bw}, t_{bf} و K_{pn} بصورت زیر در خواهد آمد:

$$K_{pn} = 1.683e - 3 \times \frac{t_{bf}^{5.276} \cdot t_{cf}^{2.453} \cdot B_{cf}^{1.690} \cdot D_c^{5.273} \cdot t_{ep}^{0.620} \cdot a^{0.197} \cdot b^{0.202}}{t_{bw}^{6.563} \cdot B_{bf}^{2.922} \cdot D_b^{3.869} \cdot t_{cw}^{4.669} \cdot d_b^{3.894} \cdot \sigma_{um}^{2.242}}$$

(۱۲)

همبستگی‌اش با نتایج مدل اجزا محدود بیشتر باشد
 بعنوان n نهائی انتخاب می‌گردد.

مقادیر M_o و K_{in} و K_{pm} و n به پارامترهای
 هندسی و پارامترهای مقاومت مصالح اتصال
 مربوط می شوند. بنابراین هر یک از آنها بر حسب
 حاصلضرب پارامترها به توان عددی که بیانگر میزان تأثیر
 آن است نشان داده می شوند[۸]:

$$M_o = \prod_{j=1}^m q_j^{aj} \quad K_{in} = \prod_{j=1}^m q_j^{bj}$$

$$n = \prod_{j=1}^m q_j^{cj} \quad K_{pn} = \prod_{j=1}^m q_j^{dj} \quad (۶)$$

q_j : پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصال

m : تعداد پارامترهای هندسی مؤثر

a_j, b_j, c_j, d_j : توان‌هایی که بیانگر ضریب تأثیر
 هر یک از پارامترهای هندسی‌اند.

با Ln گرفتن از طرفین روابط فوق داریم [۸]:

$$\ln M_o = a_1 \ln q_1 + a_2 \ln q_2 + \dots + a_m \ln q_m$$

$$\ln K_{in} = b_1 \ln q_1 + b_2 \ln q_2 + \dots + b_m \ln q_m$$

$$\ln n = c_1 \ln q_1 + c_2 \ln q_2 + \dots + c_m \ln q_m$$

$$\ln K_{pn} = d_1 \ln q_1 + d_2 \ln q_2 + \dots + d_m \ln q_m \quad (۷)$$

با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره^{۱۴}
 ضرایب a_j, b_j, c_j, d_j برای روابط متناظر با پارامترهای
 M_o, K_{in}, n و K_{ip} به شرح ذیل بدست می‌آید.

تابع پارامتری M_o

با انتخاب پارامترهای $\sigma_{ym}, G_{hb}, a, t_{ep}, d_b, t_{cf}$ ،
 D_b, B_{bf}, t_{bf} به رابطه زیر می‌رسیم .

$$M_o = \frac{0.187 \cdot B_{bf}^{0.751} \cdot D_b^{1.821} \cdot t_{cf}^{0.114} \cdot d_b^{1.115} \cdot t_{ep}^{0.587} \cdot \sigma_{ym}^{0.910}}{t_{bf}^{0.219} \cdot a^{0.710} \cdot G_{hb}^{0.178}}$$

(۸)

ضریب همگرایی برای رابطه فوق ۰/۹۵۱ است

تابع پارامتری K_{in}

روابط بدست آمده.

خلاصه و نتیجه گیری

همچنان که از نظر گذشت اتصالات با ورق پیشانی هم‌تراز معرفی و ضمن مقایسه مدل اجزاء محدود پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی و اطمینان از صحت نتایج رفتار این اتصال بررسی شد.

پس از شرح مودهای خرابی این اتصال در بارهای نهائی برای اتصال با ورقهای نازک و ضخیم معلوم گشت که این اتصال رفتار نسبتاً پیچیده‌ای دارد. برای وقوف بر رفتار این اتصال نیمه‌گیردار نیاز به منحنی لنگر - دوران آن می باشد که با توجه به عوامل متعددی که بر رفتار آن موثرند، استفاده از مدل‌های کامپیوتری (در مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی) بعنوان تنها راه عملی جهت استخراج این منحنی‌ها باقی پیشنهاد گردید. بنابراین با ساخت ۶۵ مدل اجزاء محدود غیرارتجاعی که خواص غیر خطی مادی و هندسی را نیز در بر می‌گیرند، پارامترهای موثر بر رفتار اتصال شناخته شد. در مقایسه پاسخ مدل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی نزدیکی رفتار مدل اجزاء محدود با رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از رابطه توانی ریچارد - ابوت و انجام رگرسیون چند متغییره خطی تابعی بر حسب پارامترهای تشکیل دهنده اتصال بدست آمد که رابطه لنگر - دوران را برای

هر اتصال دو طرفه سخت شده با ورق پیشانی هم‌تراز با دقت قابل توجهی ارائه می‌کند.

منحنی‌های لنگر دوران می توانند جهت پیش‌بینی رفتار اتصال و همچنین استفاده در تحلیل قابهای فولادی شامل این اتصالات به کار گرفته شوند.

که ضریب همبستگی رابطه فوق ۰/۴۸۸ می‌باشد. هر ترکیب دیگر از انتخاب پارامترها موجب کاهش شدید ضریب همبستگی خواهد شد.

کم بودن ضریب همبستگی به دلیل تغییر نوع خرابی^{۱۵} در مدل‌های مختلف است که در آنها مقدار K_{pn} تفاوت فاحشی دارد.

مقایسه تحلیلی نتایج

بمنظور ارائه مثالی از دقت روابط فوق الذکر، در این قسمت نتایج مدل اجزاء محدود FEM28 با روابط بدست آمده مقایسه می‌شود. با استفاده از روابط ارائه شده پارامترهای اصلی مورد استفاده بشرح ذیل محاسبه می‌شوند.

$$M_0 = 36.97$$

$$K_{in} = 310.41$$

$$n = 1.635$$

$$K_{pn} = 4.53$$

$$K_{In} = 310.41 - 4.53 = 305.88$$

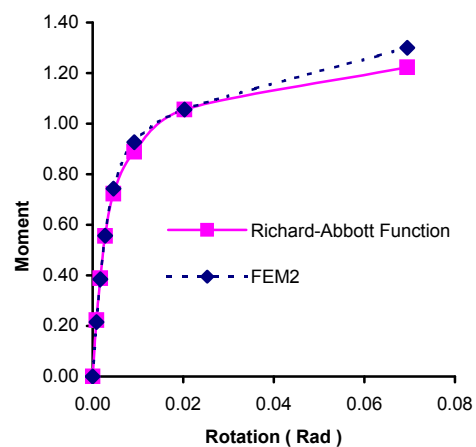
(۱۳)

با جایگذاری این پارامترها در رابطه ریچارد - ابوت خواهیم داشت :

$$\bar{M} = \frac{305.88\phi}{(1 + (305.88\phi)^{1.635})^{1/1.635}} + 4.53\phi$$

(۱۴)

مقایسه منحنی حاصل از این رابطه و اجزاء محدود در شکل (۲۹) ارائه شده است که حاکی از صحت روابط فوق می باشد.



شکل ۲۹: مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود با

مراجع

- ۱- بهاری، م. ر. "تحلیل کامپیوتری اتصالات پیچی با ورق پیشانی هم تراز." نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۱، شماره ۲، صفحات ۹-۱۸، آذر (۱۳۷۷).
- ۲- صادق آذر، م. "کتاب سازه های فولادی." جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- 3 - Aggarwal, A. K. (1994). "Comparative tests on endplate beam- to- column connections." *Journal of Constructional steel Research*, Vol. 30, PP. 151-175, U.k.
- 4 - Bahaari, M. R. and Sherbourne, A. N. (1994). "3D simulation of end- plate bolted connections." *Journal of structural Engineering , ASCE*, Vol. 120, No. 11 , PP. 3122.3136, USA.
- 5 - Bahaari, M. R. and Sherbourne, A. N. (1995). "Structural behavior of endplate connected to stiffened column." *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 122, No. 8, PP. 926-935, USA.
- 6 - Bahaari, M. R. and Sherbourne, A. N. (1996). "3D simulation of bolted connections to unstiffened columns : part 2: Extended Endplate connections." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 40, No. 3, PP. 184-224, U.K.
- 7 - Bahaari, M. R. and Sherbourne, A. N. (1997). "Finite element prediction of end - plate bolted connection behavior. I: parametric study." *Journal of Structural Engineering ,ASCE*, Vol. 123, No. 2, PP. 157-164.
- 8 - Bahaari, M. R. and Sherbourne, A. N. (1997). "Finite element prediction of end -plate bolted connection behavior. II: analytic formulation." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 2, PP. 165-175.
- 9 - Jenkins,W. M., Tong,C. S. and Presott, A. T. (1986). "Moment - transmitting endplate connections in steel construction and a proposed basis for flush endplate design." *The Structural Enginee*, Vol. 64A, No. 5, PP. 121-132.
- 10 - Phillips, J. and Packer, J. A. (1981). "The effect of plate Thickness on Flush Endplate Connections." *In Joirnts in Structural Steelwork, Supplementary Paper, Proc. of the Int'l Conf. held at Tesside Polytechnic, Cleveland, April6-9, Pentech Press*, PP. 6.77-6.92.
- 11 - Shi, Y. J., Chan, S. L. and Wong, Y. L. (1995). "Modeling for moment- rotation characteristics for end - Plate connections." *Journal of Structural Engineering ,ASCE*, Vol. 11, No. 12, PP. 1300-1306, USA.
- 12 - Yee, Y. L. Melchers R. E. (1988). "Moment - rotation curves for bolted connections." *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 3.
- 13 - Richard, R. M. and Abbot, B. J. (197۵) . "Versatile elastic- plastic stress- strain formula." *J. Engrg. Mech. Div., ASCE*, Vol. 101, No.4, PP.511-515
- ۱۴ - حسینی راد، ع. "رابطه لنگر - دوران در اتصالات پیچی تیر به ستون با ورق پیشانی تراز." پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه ، دانشکده فنی، دانشگاه تهران (۱۳۷۹).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1 – End-Plate | 11 – III Condition |
| 2 – Flush End-Plate | 12 – Strain Hardening Slope of Connection |
| 3 – Extended End-Plate | 13 – Correlation Factor |
| 4 – Stiff | 14 – Multiple Linear Regression |
| 5 – Failure | 15 - Failure |
| 6 – Stiffened | |
| 7 – Separation | |
| 8 – Two Way Connection | |
| 9 – Boundary Conditions | |
| 10 – Symmetry Boundary Condition | |
-