

بررسی و مقایسه رفتار چرخه‌ای اتصالات صلب فولادی

Flange-Plate و Side-Plate

دکتر محسن ایزدی نیا، روح الله احمدی نیا

گروه عمران واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد، ایران

Email: rahmadinya59@gmail.com

چکیده

به دنبال مطالعات خرابی‌های زلزله نورتریج مشخص شد، آنچه در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها علاوه بر مقاومت و سختی بایستی در نظر گرفته شود، شکل‌پذیری است. در قاب‌های خمشی این انتظار وجود دارد که اتصال دارای رفتار شکل‌پذیر باشد و بتواند قبل از شکست تغییر شکل‌های پلاستیک قابل توجهی را تحمل کند. از جمله اتصالات پیشنهاد شده برای این منظور اتصال با صفحات کناری و اتصال ورق بال جوش شده توصیه می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد چرخه‌ای اتصالات تقویت شده با ورق کناری و ورق بال جوش شده بر اساس پارامترها و ضوابط ارائه شده در FEMA350 و FEMA351 می‌باشد. بدین منظور، اثر استفاده از ورق بال جوش شده و صفحات کناری بر رفتار اتصالات جوشی تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق پروتکل SAC مورد بررسی قرار گرفت، روش اجزاء محدود غیر خطی سه‌بعدی و نرم‌افزار ABAQUS برای آنالیزها انتخاب شد. بررسی نتایج مدل‌ها نشان داد که اتصال با صفحات کناری، در مقایسه با اتصال بهسازی نشده و همچنین اتصال تقویت شده با ورق بال جوش شده عملکرد مناسب‌تری برای دور کردن تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک از بر ستون می‌باشد.

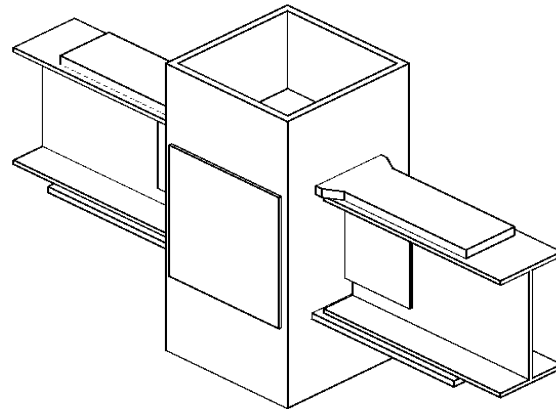
کلمات کلیدی: اتصال Flange-Plate، اتصال Side-Plate، رفتار چرخه‌ای، ورق بال جوش شده، صفحات کناری

۱- مقدمه

در دهه ۱۹۶۰ مهندسیین سازه بر این باور بودند که سیستم قاب‌های مقاوم خمشی فولادی با اتصالات جوشی (Steel Moment Resisting Frame) در رده شکل‌پذیرترین سیستم‌های سازه‌ای قرار دارند و اگر خسارت سازه‌ای رخ دهد محدود به جاری شدن اعضای قاب بوده و اتصالات آن به صورت الاستیک باقی می‌مانند. با وقوع زلزله نرتریج در ۲۷ ژانویه سال ۱۹۹۴ بسیاری از ساختمان‌ها که سیستم سازه‌ای آن‌ها از قاب مقاوم خمشی فولادی بود دچار شکست ترد در ناحیه اتصال تیر به ستون شدند. به دنبال مطالعات خرابی‌های زلزله نورتریج مشخص شد، آنچه در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها علاوه بر مقاومت و سختی بایستی در نظر گرفته شود، شکل‌پذیری است. این فلسفه جدید طراحی لرزه‌ای، به طراح این اجازه را می‌دهد که بخش‌هایی از سازه را ضعیف‌تر از بخش‌های دیگر طراحی نماید تا در هنگام زلزله این بخش‌های ضعیف حتماً وارد ناحیه پلاستیک شوند و باعث جذب و اتلاف انرژی زلزله گردند. از جمله اتصالات پیشنهادی بعد از زلزله نورتریج اتصال با صفحات کناری (Side-Plate) و اتصال با ورق بال جوش شده (Flange-Plate) می‌باشد. در ادامه به توضیح کامل این دو روش که از روش‌های بهسازی لرزه‌ای اتصالات گیردار فولادی بعد از زلزله نورتریج هستند پرداخته می‌شود [۱].

الف) اتصال تقویت شده با ورق روسری و زیرسری (Flange-Plate)

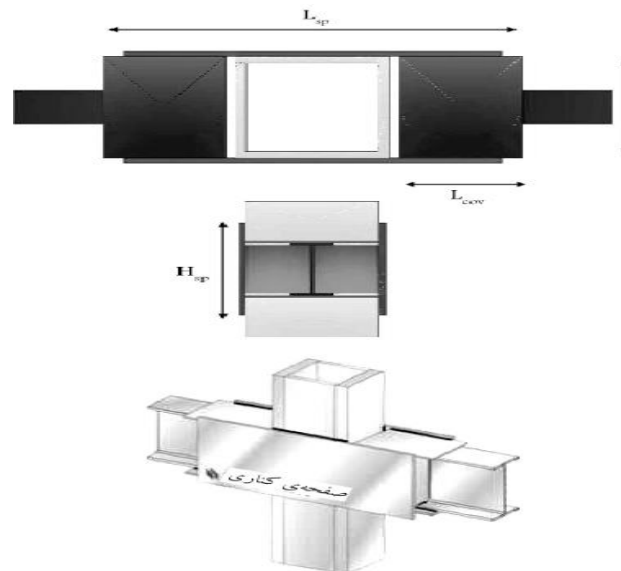
اتصال ورق بال جوش شده یکی از اتصالات تایید شده پس از زلزله نورتریج است. در این اتصال بال‌های تیر بطور مستقیم به بال ستون جوش نمی‌شود و اتصال از طریق ورق‌های اتصال بال انجام می‌شود. این ورق‌ها به هریک از دو بال تیر توسط جوش گوشه و به بال ستون توسط جوش شیاری با نفوذ کامل متصل می‌شوند. در ایران استفاده از این نوع اتصال متداول است و معمولاً به ورق جوش شده به بال بالایی و پایینی، به ترتیب ورق روسری و زیرسری گفته می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- اتصال با ورق روسری و زیرسری [۲].

ب) اتصال با صفحات کناری (Side-Plate)

پس از زلزله‌ی نورتریج، برای رفع مشکلات عمومی اتصال‌های خمشی در مقابل زلزله، اتصال جدیدی پیشنهاد شد و در آن از ایده‌ی حذف اتصال مستقیم بال تیر به بال ستون استفاده شد [۳]. این اتصال برای ستون‌های بال پهن و قوطی و ستون‌های با مقطع صلیبی پیشنهاد و در آن برخلاف روش‌های قبلی به جای استفاده از ۴ ورق در تراز بال‌های تیر، از ۲ صفحه‌ی کناری تمام عمق استفاده شده است. در این سیستم انتقال ممان خمشی از تیر به ستون به جای استفاده از مسیر اتصال مستقیم بال تیر به بال ستون از طریق صفحات کناری انجام می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- اتصال با صفحات کناری [۴].

ممان انتهایی تیر به صورت یک زوج نیرو در دو بال فوقانی و تحتانی تیر اثر می‌کند. این زوج نیرو از طریق جوش‌های گوشه به ورق‌های پوششی (ورق‌های تنظیم فاصله بین بال تیر و بال ستون) فوقانی تحتانی منتقل می‌شوند و سپس از طریق این دو صفحه به صفحه‌های کناری انتقال می‌یابند و در آخر نیز با جوش‌های گوشه به ستون منتقل می‌شوند. انتقال نیروی برشی نیز گرچه ممکن است مانند روش‌های متعارف از طریق جان تیر به ستون انجام شود ولی در سیستم پیشنهادی از طریق دو صفحه برشی مستطیل شکل که در دو طرف جان تعبیه شده‌اند انتقال می‌یابد [۵].

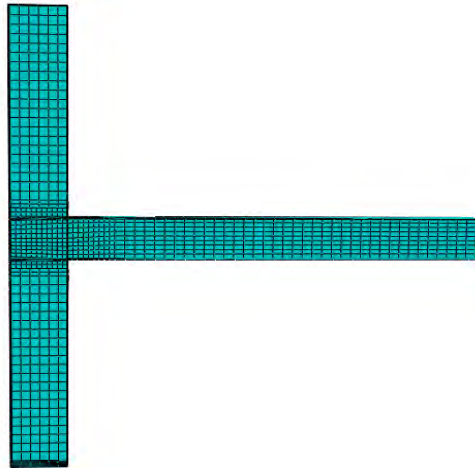
نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد استفاده از اتصال با صفحات کناری علاوه بر دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون امکان چرخش پلاستیک بیشتری به تیر می‌دهد [۶]. مطالعات فرانک و همکاران نشان داد، با استفاده از اتصال با صفحات کناری مفصل پلاستیک تیر در محلی دور از بر ستون بوجود می‌آید. همچنین با توجه به هندسه اتصال، مشکلات زیادی از جمله کندن بال ستون، تنش‌های ۳ محوره جوش بال تیر به بال ستون و کماتش ناحیه پانلی برطرف می‌شود [۷]. غلامی و همکاران [۸] در تحقیق خود به بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصالات تقویت شده با Flange-Plate پرداختند. در این تحقیق توصیه‌هایی برای طول ورق‌های روسری و زیر سری پیشنهاد شد. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از ورق‌های روسری و زیرسری علاوه بر دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون می‌تواند از شکست ترد اتصال جلوگیری کند.

با توجه به تفاوت بین پروفیل‌های فولادی و آیین‌نامه طراحی ایران و آمریکا و همچنین تحقیقات محدود انجام شده بر روی این اتصالات در ایران، بررسی پارامترها و ضوابط ارائه شده توسط آیین‌نامه آمریکا بر روی پروفیل‌های فولادی رایج در ایران ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد چرخه‌ای اتصال Side-Plate و Flange-Plate بر اساس پارامترهای و ضوابط ارائه شده در FEMA350 و FEMA351 [۹ و ۱۰]، بر روی پروفیل‌های فولادی ایران می‌باشد.

۲- مدل‌سازی اتصال در نرم‌افزار ABAQUS

تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاءمحدود ABAQUS و با در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ غیرخطی و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی هندسی و غیر خطی مصالح در حالت تحلیل سه بعدی انجام گرفت. برای مدل‌سازی اتصال تیر به ستون از المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (S4R) استفاده گردید. المان‌بندی مدل بایستی به گونه‌ای باشد که نواحی حساس دارای المان‌های ریزتر بوده و به جای آن جهت افزایش سرعت در انجام

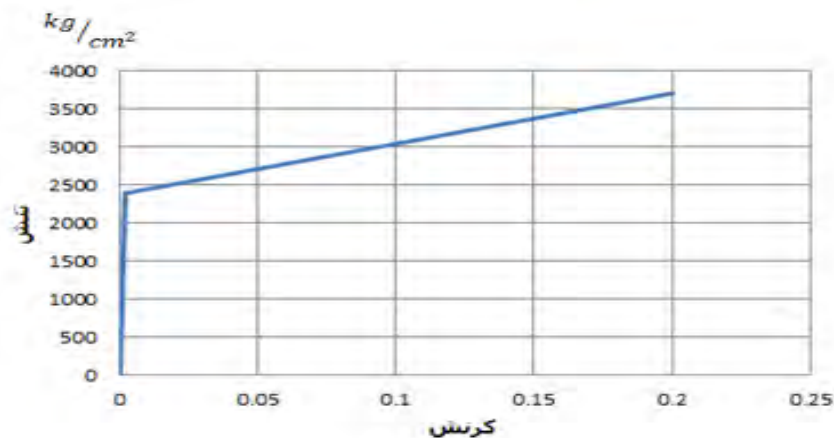
تحلیل، به نواحی غیرضروری المان بندی درشت اعمال گردد. مطابق شکل (۳) با توجه به حساسیت جوابها در ناحیه اتصال، المان بندی کوچکتر از سایر نواحی مدل انتخاب می گردد.



شکل ۳- تصویری از مدل اجزاء محدود یکی از نمونه ها.

۱-۲ مدل سازی مصالح

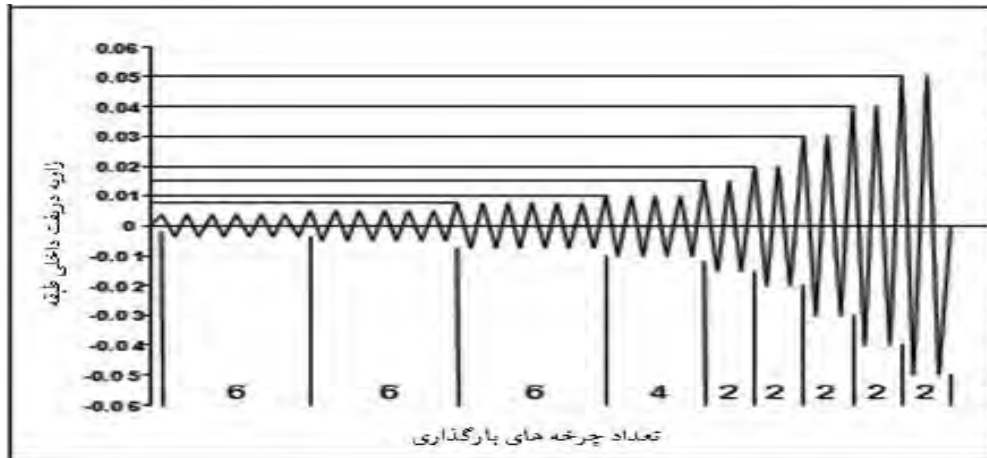
برای مقاطع فولادی به کار رفته در این تحقیق از فولاد با مقاومت تسلیم $2400 \frac{Kg}{cm^2}$ و مقاومت نهایی $3700 \frac{Kg}{cm^2}$ استفاده گردید. مدل سازی رفتار فولاد با استفاده از منحنی تنش - کرنش دو خطی فولاد (شکل ۴) و با استفاده از سخت شونده گی سینماتیک و معیار تسلیم فون میزز و با ضریب پواسون $0/3$ انجام گرفت.



شکل ۴- منحنی تنش - کرنش دو خطی فولاد مورد استفاده.

۲-۲ بارگذاری

بارگذاری چرخه‌ای به اتصال اعمال گردیده است، این بارگذاری به منظور بررسی اثر تکرار بارگذاری و باربرداری بر روی مقاومت اتصال براساس آیین‌نامه بارگذاری SAC [۱۱] مطابق شکل (۵) انجام می‌شود.



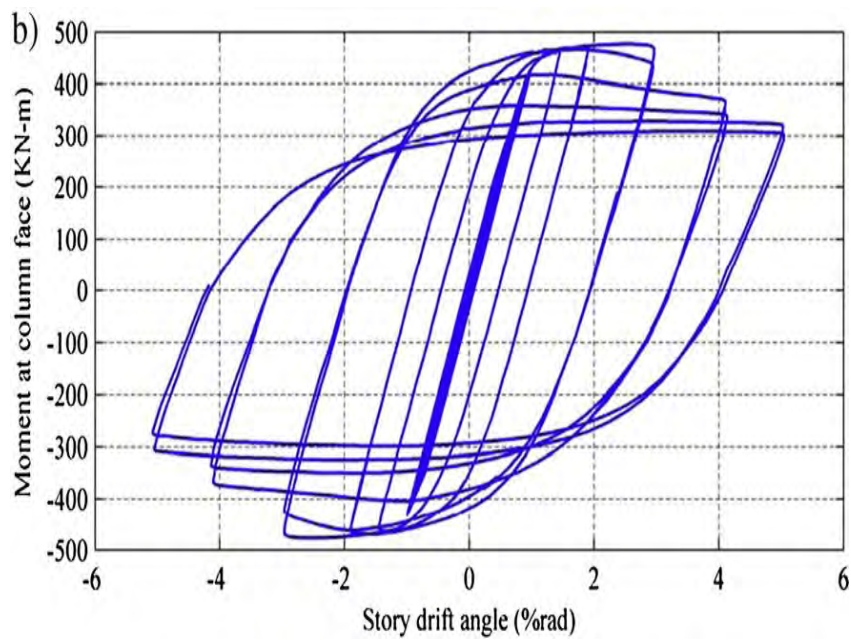
شکل ۵- بارگذاری استاندارد پیشنهادی SAC.

۳- صحت‌سنجی نتایج مدل سازی اجزا محدود با مدل آزمایشگاهی

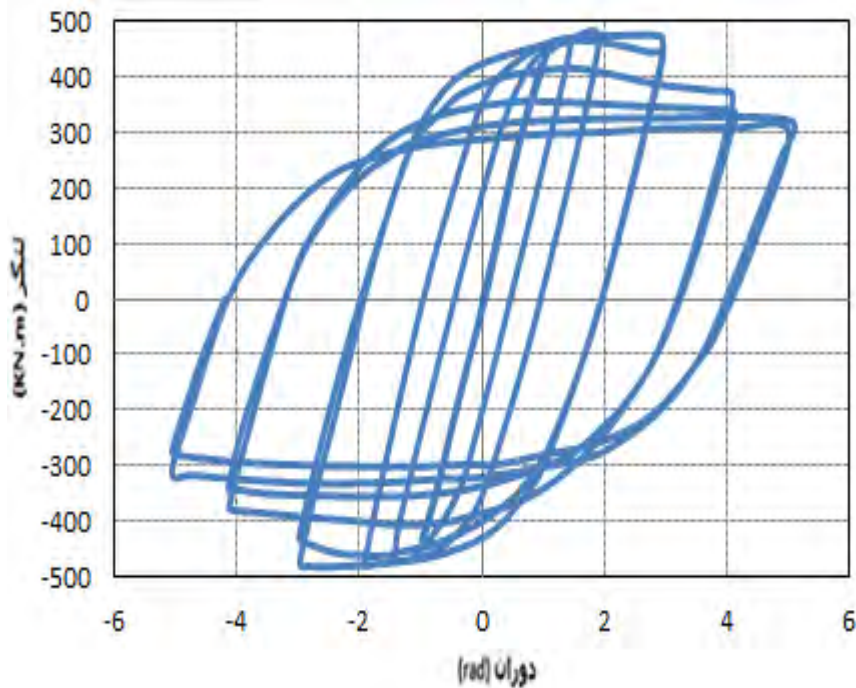
در این بخش برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی اجزا محدود با مدل آزمایشگاهی برای اتصال تقویت شده با flange plate، مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط غلامی و همکاران [۸] به عنوان نمونه مرجع اتصال، به منظور استفاده از صحت نتایج مدل‌سازی اجزا محدود در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است، مدل مورد نظر از زیرقابی شامل گره اتصال و یک نصفه دهانه تیر و دو نصفه ارتفاع ستون تشکیل شده است. نتایج مدل‌های اجزاء محدود با مدل‌های مرجع، به کمک نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS صورت گرفته است. مدل سازی در نرم‌افزار در محیط ۳ بعدی و به صورت solid صورت گرفته و قابلیت شکل‌پذیری نیز برای آن‌ها در نظر گرفته شده است. شکل (۶) تطابق بسیار مناسب نمودارهای بار- تغییر مکان دو نمونه آزمایشگاهی و اجزاء محدود را در نشان می‌دهد.



شکل (۶) شکل کلی و مشخصات نمونه آزمایشگاهی [۱۲]



(الف)



(ب)

شکل ۷- تطابق نتایج مربوط به منحنی‌های بار - تغییر مکان در مرکز ناحیه کاهش یافته (الف) مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۲]، (ب) مدل اجزاء محدود در تحقیق حاضر.

۴- مدل‌های مورد بررسی

مشخصات پروفیل‌های اتصال مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده‌اند که در ادامه به بررسی و مقایسه نتایج آنالیز چرخه‌ای این مدل‌ها پرداخته می‌شود.

جدول (۱) ابعاد پروفیل‌های تیر و ستون مورد مطالعه

نام مدل	نوع اتصال	مقطع تیر	مقطع ستون
مدل ۱	اتصال تقویت نشده	IPE270	IPB300
مدل ۲	اتصال تقویت شده با ورق کناری	IPE270	IPB300
مدل ۳	اتصال تقویت شده با ورق بال جوش شده	IPE270	IPB300

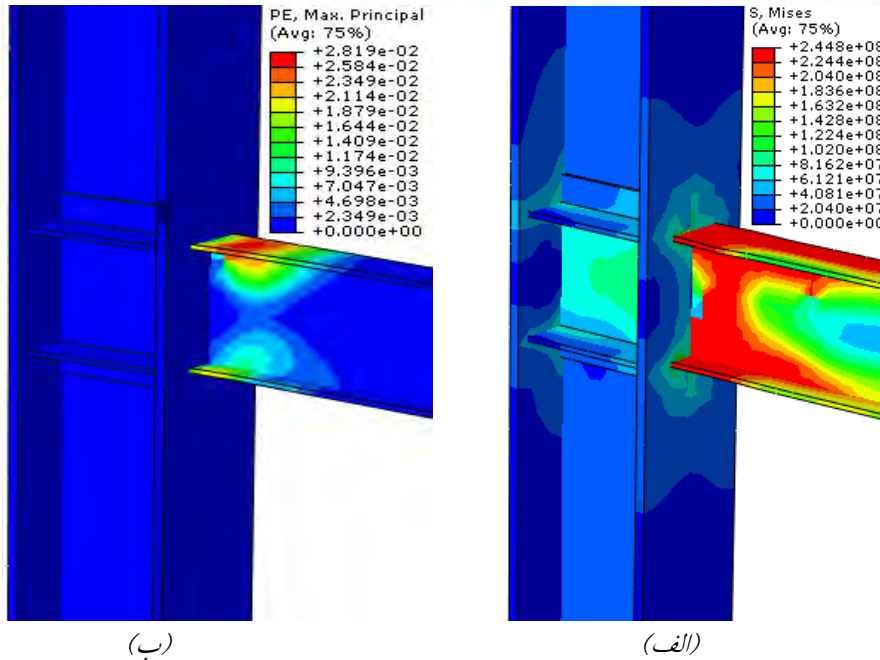
IPB300	IPE300	اتصال تقویت نشده	مدل ۴
IPB300	IPE300	اتصال تقویت شده با ورق کناری	مدل ۵
IPB300	IPE300	اتصال تقویت شده با ورق بال جوش شده	مدل ۶
IPB400	IPE330	اتصال تقویت نشده	مدل ۷
IPB400	IPE330	اتصال تقویت شده با ورق کناری	مدل ۸
IPB400	IPE330	اتصال تقویت شده با ورق بال جوش شده	مدل ۹
IPB400	IPE360	اتصال تقویت نشده	مدل ۱۰
IPB400	IPE360	اتصال تقویت شده با ورق کناری	مدل ۱۱
IPB400	IPE360	اتصال تقویت شده با ورق بال جوش شده	مدل ۱۲

۵- بررسی نتایج به دست آمده

به منظور اختصار برای مقایسه مدل‌های طراحی شده در این بخش مدل‌های ۱ (اتصال تقویت نشده)، ۲ (اتصال تقویت شده با ورق کناری) و ۳ (اتصال تقویت شده با ورق بال جوش شده) که از تیر با مقطع IPE270 و ستون به مقطع IPB300 طراحی شده است به صورت تصویر و نمودار ارائه خواهد شد و در پایان جدول نتایج تمام مدل‌ها به منظور مقایسه ارائه می‌شود.

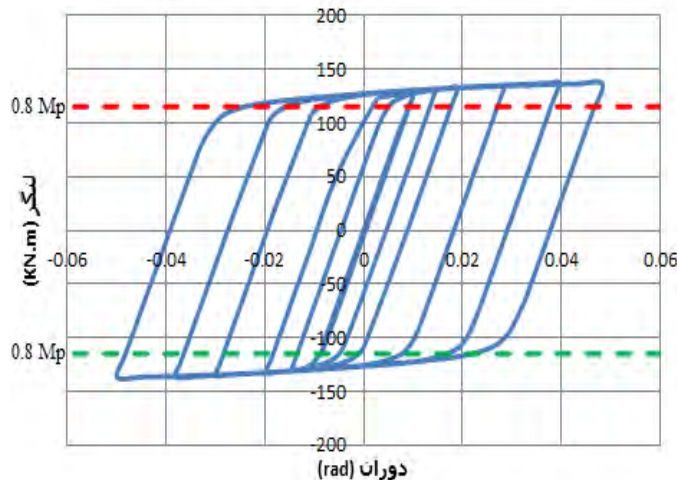
۴-۱- بررسی نتایج به دست آمده برای مدل ۱ (تقویت نشده)

همان‌طور که در شکل (۸-الف) مشخص است، تنش‌های فون میزز در ناحیه بحرانی بر ستون افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته و خطر شکست برای جوش دور از انتظار نخواهد بود. شکل (۸-ب) نیز به وضوح تمرکز کرنش‌ها را در فاصله نزدیک به بر ستون نشان می‌دهد.



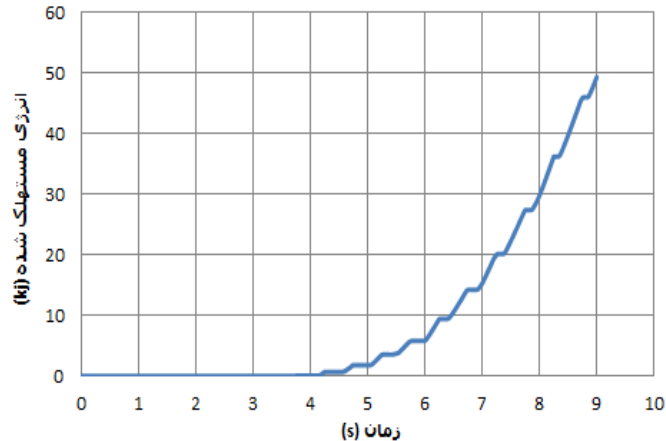
شکل ۸- رفتار مدل بدون کاهش بال در زاویه دریفت طبقه ۰/۰۵ رادیان، (الف) توزیع تنش‌های فون میز، (ب) توزیع کرنش‌های پلاستیک.

مطابق آئین‌نامه AISC حداکثر مقدار کاهش مقاومت اتصال در بر ستون در ۰/۰۴ زاویه دریفت (زاویه دریفت کل)، نباید از ۲۰٪ لنگر پلاستیک مقطع تجاوز نماید [۱۲]. در شکل (۹) نیز نمودار لنگر - دوران مدل آورده شده است، در این نمودار مشاهده می‌گردد که در هیچ یک از چرخه‌های بارگذاری، افت مقاومت رخ نداده است و لذا ضوابط آئین‌نامه AISC برآورده می‌شود.



شکل ۹- منحنی لنگر- دوران مدل بدون کاهش بال در زاویه دریافت طبقه ۰/۰۵ رادیان.

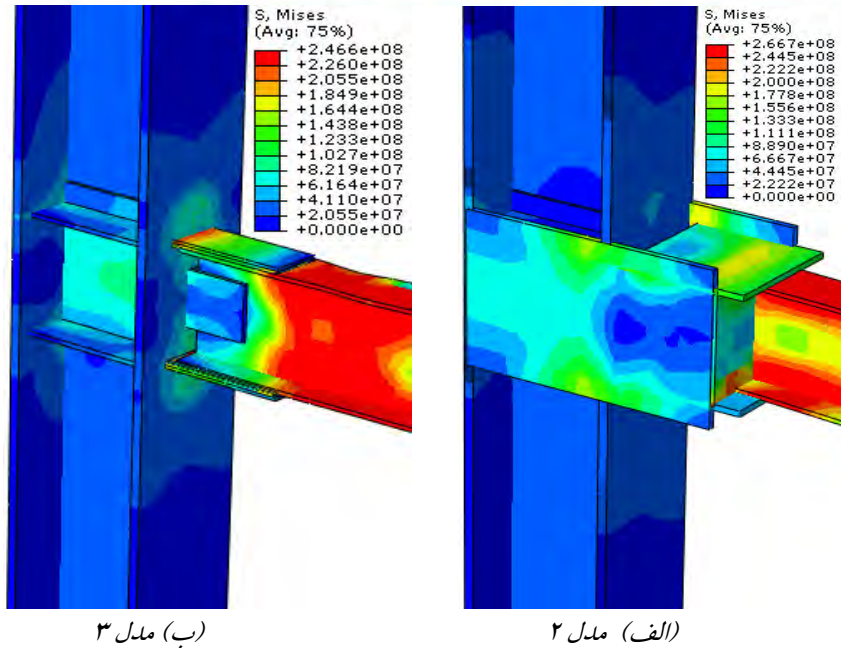
نمودار اتلاف انرژی برای مدل ۱ در شکل (۱۰) آورده شده است که استهلاك انرژی برابر $48/532 \text{ KJ}$ را نشان می دهد.



شکل (۱۰) نمودار استهلاك انرژی مدل بدون کاهش بال

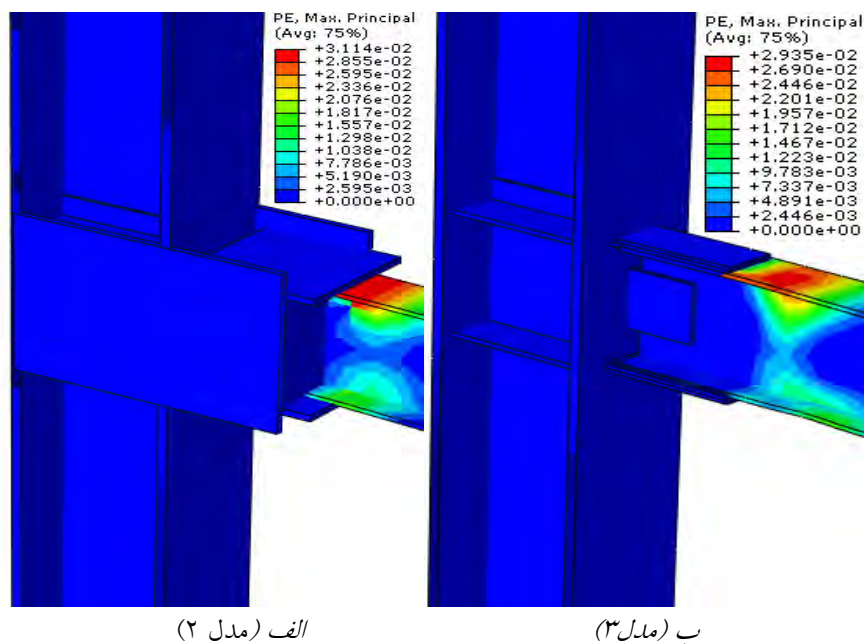
۲-۴- بررسی نتایج به دست آمده برای مدل های ۲ و ۳

شکل (۱۱) توزیع تنش های فون میز در زاویه دریافت طبقه ۰/۰۵ رادیان را نشان می دهد، در این شکل مشاهده می گردد که مدل ۲ (اتصال تقویت شده با ورق کناری) عملکرد مناسب تری نسبت به مدل ۳ (با ورق بال جوش شده) در دور کردن تنش ها از محل اتصال از خود نشان داده است.



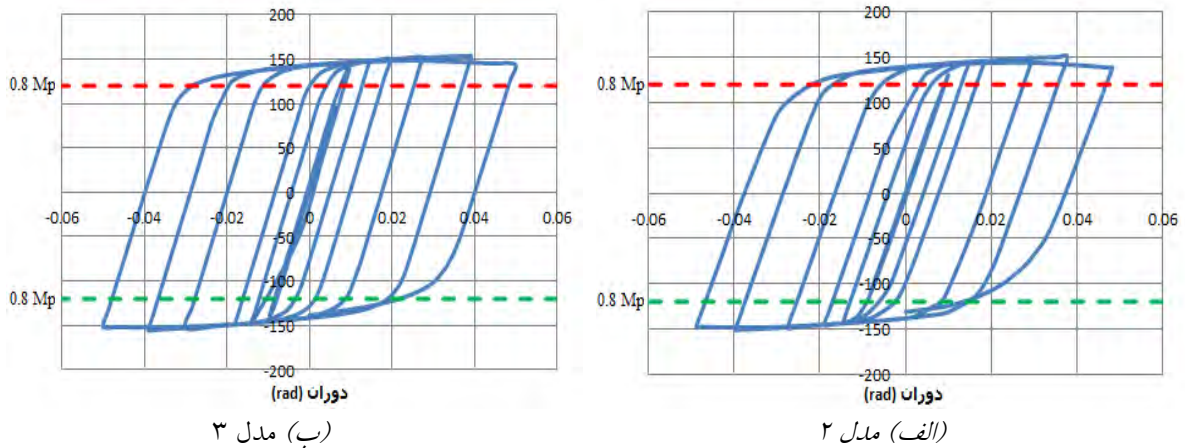
شکل ۱۱- توزیع تنش‌های فون میزز در مدل‌ها، (الف) اتصال Side-Plate، (ب) اتصال Flange-Plate

با توجه به توزیع کرنش‌های پلاستیک مدل‌ها در شکل (۱۲) مشخص می‌شود که بیشترین کرنش پلاستیک در فاصله مناسب از بر ستون رخ داده است، همچنین با مقایسه مدل‌ها دیده می‌شود که مدل ۲ عملکرد مناسب‌تری نسبت به مدل ۳ برای دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون از خود نشان داده است.



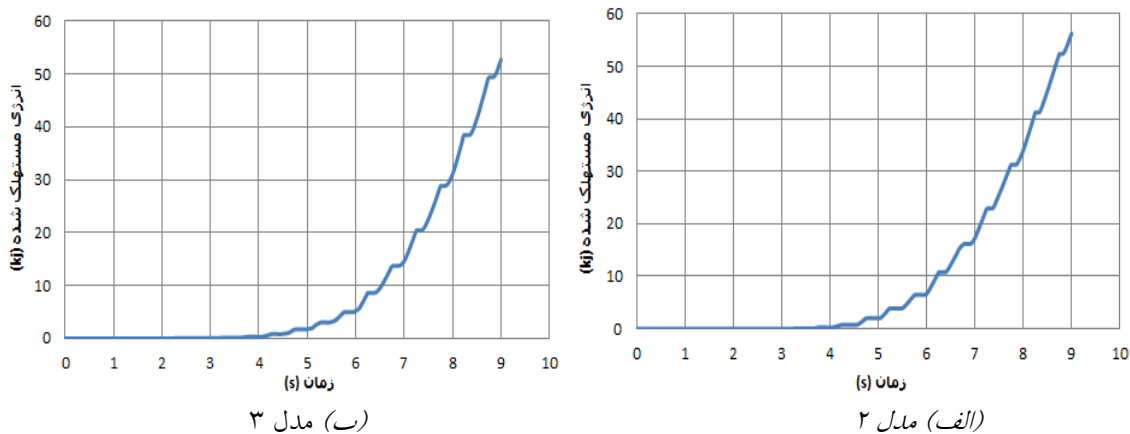
شکل (۱۲) توزیع کرنش‌های پلاستیک در مدل‌های ۲ و ۳، (الف) اتصال Side-Plate، (ب) اتصال Flange-Plate

طبق منحنی‌های لنگر- دوران مدل‌های ۲ و ۳ در شکل (۱۳)، هر دو مدل ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه AISC را به خوبی برآورده می‌نماید.



شکل (۱۳) منحنی لنگر- دوران مدل‌های ۲ و ۳ تحت بار چرخه‌ای، (الف) اتصال Side-Plate، (ب) اتصال Flange-Plate

شکل (۱۴) انرژی مستهلک شده - زمان می‌باشد. طبق نمودار، میزان استهلاک انرژی برای مدل ۲ بیشتر از مدل ۳ می‌باشد.



شکل (۱۵) نمودار استهلاک انرژی، (الف) اتصال Side-Plate، (ب) اتصال Flange-Plate

نتایج آنالیز کل مدل‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طوری که از نتایج جدول مشخص می‌باشد مدل‌های تقویت شده با با ورق کناری، بهترین عملکرد را از خود نشان داده‌اند.

آنالیز مدل‌ها.

جدول (۲) نتایج

نام مدل	دور نمودن تنش‌ها از برستون	دور نمودن کرنش‌های پلاستیک از برستون	لنگر ماکزیمم (kN.m)	میزان استهلاک انرژی (kj)	برآورد رفتار کلی اتصال
مدل ۱	نامناسب	نامناسب	۱۳۳	۴۹	نامناسب
مدل ۲	مناسب	مناسب	۱۵۱	۵۷	مناسب
مدل ۳	نامناسب	نسبتاً مناسب	۱۵۲	۵۳	نامناسب
مدل ۴	نامناسب	نامناسب	۱۶۲	۵۶	نامناسب
مدل ۵	مناسب	مناسب	۱۸۶	۶۵	مناسب
مدل ۶	نامناسب	نسبتاً مناسب	۱۸۲	۶۳	نامناسب
مدل ۷	نامناسب	نامناسب	۱۹۲	۶۴	نامناسب
مدل ۸	مناسب	مناسب	۲۱۶	۷۸	مناسب
مدل ۹	نامناسب	نسبتاً مناسب	۲۱۷	۸۵	نامناسب
مدل ۱۰	نامناسب	نامناسب	۲۳۰	۸۴	نامناسب
مدل ۱۱	مناسب	مناسب	۲۵۱	۹۳	مناسب
مدل ۱۲	نامناسب	نسبتاً مناسب	۲۵۷	۱۰۱	نامناسب

۵- نتیجه گیری

- مطابق آئین‌نامه AISC حداکثر مقدار کاهش مقاومت اتصال در برستون در ۰/۰۴ زاویه دریافت (زاویه دریافت کل)، نباید از ۲۰٪ لنگر پلاستیک مقطع تجاوز نماید. همه مدل‌ها مورد بررسی ضوابط لرزه‌ای آئین‌نامه AISC را به خوبی برآورده می‌نمایند.
- با توجه به منحنی‌های هیستریزیس لنگر- دوران، در تمامی مدل‌ها مقدار لنگر در وجه ستون در زاویه دوران ۰/۰۴ رادیان از ۸۰٪ لنگر پلاستیک بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این اتصالات بر اساس آئین‌نامه AISC اتصالاً کاملاً شکل‌پذیر با قابلیت استفاده در قاب‌های خمشی ویژه است.
- با توجه به منحنی‌های هیستریزیس لنگر- دوران به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود مشاهده می‌شود که در تمامی مدل‌ها مقاومت اتصال از ظرفیت خمشی تیر بیشتر است، بنابراین این اتصالات کاملاً مقاوم می‌باشند.

- در مدل تقویت نشده بیشترین تنش در ناحیه اتصال رخ داده است، در صورتی که در مدل‌های تقویت شده با ورق کناری و ورق بال جوش شده کانتور تنش‌ها در فاصله مناسب از بر ستون رخ داده است ضمناً مدل‌های تقویت شده با ورق کناری عملکرد مناسب‌تری برای دور کردن تنش‌ها از بر ستون از خود نشان دادند.

- برای مدل تقویت نشده بیشترین کرنش پلاستیک در ناحیه نزدیک به بر ستون رخ داده است، اما کانتور کرنش‌های پلاستیک در مدل‌های تقویت شده با ورق بال جوش شده و ورق کناری در فاصله مناسب از بر ستون رخ داده است.

۷- مراجع

- [1] Lee, C.H., and Jong, H.J., "Cyclic seismic testing of steel moment connections reinforced with welded straight haunch", Journal of Structural Engineering, 2003, Elsevier, pp. 1743-1753..
- [2] Chen SJ, Yeh CH, Chu JM. Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance. J Struct Eng, ASCE1996;122(11):1292-9.
- [3] El-Tawil S, Mikesell T, Vidarsson E, Kunnath S. "Strength and ductility of FR welded-bolted connections". SAC Report no. 98-01, Sacramento (CA): SAC Joint Venture; 1998.
- [4] Chi B, Uang C-M. "Seismic retrofit study on steel moment connections for the Los Angeles department of public works headquarters building." Report no. TR-2000/14. San Diego (La Jolla, CA): University of California; 2000.
- [5] Jalali, S.A., Banazadeh, M., Abolmaali, A., Tafakori, E. "Probabilistic seismic demand assessment of steel moment frames with side-plate connections", Scientia Iranica A (2012) 19 (1), 27-40.
- [۶] واثقی امیری، جواد. و نقی‌پور، مرتضی. رحمانی، زهره، "تعیین ضریب رفتار در سیستم‌های دوگانه با اتصال صفحات کناری"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال هشتم، شماره ۲۱، تابستان ۱۳۸۹.
- [۷] ناطق‌الهی، فریبرز. و طباطبایی، زهرا، "معرفی اتصالات خمشی تیر به ستون قوطی فولادی با استفاده از صفحات کناری"، مجله مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۲۶، شماره ۱، ص ۱۳-۲۰.
- [8] Gholami, M., Deylami, A., Tehranizadeh, M. " Seismic performance of flange plate connections between steel beams and box columns", Journal of Constructional Steel Research (2013) 84, 36-48.
- [9] FEMA 350. Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings. Washington (DC), 2000.
- [10] FEMA 351. Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment frame buildings. Washington (DC), 2000
- [11] SAC 97-02, Protocol for fabrication, inspection, testing, and documentation of beam-column connection tests and other experimental specimens, No. SAC/BD-97-02, Version 1.1, 1997.



[12] ANSI/AISC 341-10, Seismic provisions for structural steel buildings. Chicago (IL): American institute of steel construction, Inc.; 2010.

[13] ABAQUS/PRE. Users manual. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., 1997.