



بررسی عددی حذف ورق پیوستگی افقی در اتصال تیر به ستون در ستون‌های جعبه‌ای در سیستم‌های قاب

خمش فولادی

*سید علی رضوی طباطبائی^۱، محمدرضا رجایی^۲

چکیده

تعبیه و نصب ورق‌های پیوستگی افقی در داخل ستون‌های جعبه‌ای فولادی در سیستم‌های قاب خمشی فولادی نیازمند تمهیدات خاصی است که در بیشتر موارد به علت صعوبت دسترسی و هندسه و چیدمان ستون‌های جعبه‌ای فولادی، اقناع صحیح و کامل ضوابط طراحی لرزه‌ای را با چالش‌های بسیاری روبرو می‌کند. به منظور دستیابی به یک مسیر انتقال بار مناسب از تیر به ستون در ناحیه چشمه اتصال و همچنین سهولت اجرا در این مقاله استفاده از ورق سخت‌کننده قائم داخلی به جای ورق‌های پیوستگی افقی رایج و تعریض بال‌های تیر به عنوان یک راهکار جایگزین پیشنهاد شده است. نتایج استخراج شده از تحلیل عددی نمونه‌های پیشنهادی در این مقاله نمایانگر رفتار مناسب مدل‌های پیشنهاد شده در قیاس با نمونه رایج با ورق پیوستگی افقی است. جزئیات پیشنهادی از نقطه نظر عدم پدید آمدن سختی منفی و ظرفیت جذب نیروی بالاتر نسبت به نمونه مبنا تا حداکثر جابجایی ۰/۰۸ رادیان دارای توجیه است.

واژگان کلیدی:

قاب خمشی فولادی، ورق پیوستگی افقی، ورق سخت‌کننده قائم داخلی، ستون جعبه‌ای فولادی، تحلیل اجزای محدود

^۱ استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، arazavi@usc.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد زلزله، دانشگاه علم و فرهنگ، mrarajayee97@gmail.com



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



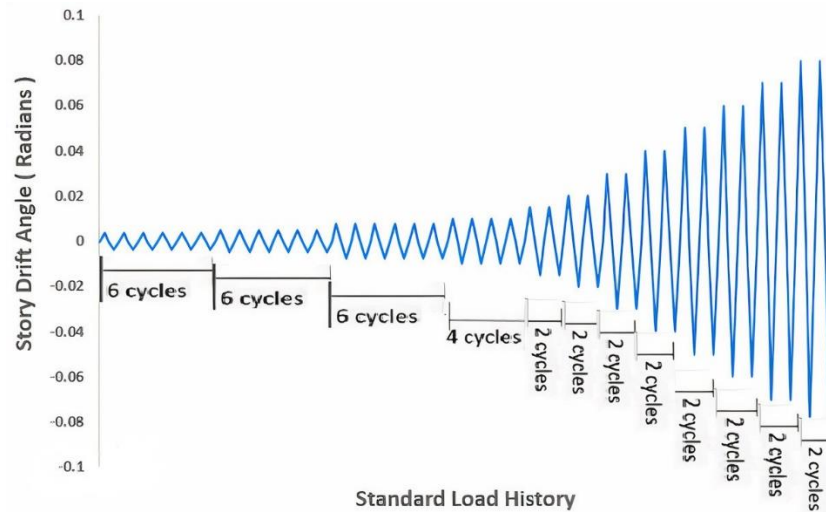
مقدمه

پس از وقوع زلزله نورث ریج سال ۱۹۹۴، در اکثر اتصالات پیش تأیید صلاحیت شده پیشنهادی توسط آیین نامه‌ها جهت ایجاد یک مسیر انتقال نیروی مناسب از تیر به ستون، به استفاده از ورق‌های پیوستگی افقی در داخل ستون‌ها نیاز است. ستون‌های جعبه‌ای به دلیل برابری شعاع ژیراسیون در دو محور، مقاومت پیچشی بیشتر نسبت به ستون‌های H شکل، دارا بودن مقاومت پس کمانش و همچنین شکل پذیری و جذب انرژی بالا مدت‌هاست که متناوباً در قاب‌های خمشی فولادی علی‌الخصوص در مناطق با لرزه خیزی زیاد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساساً هندسه‌ی بسته‌ی ستون‌های جعبه‌ای و دسترسی سخت به منظور مونتاژ و جوشکاری ورق‌های پیوستگی افقی در داخل آن‌ها موجب دشوار بودن و هزینه بر بودن عملیات ساخت این نوع از ستون‌ها شده‌است. همچنین صعوبت دستیابی به جوش نفوذی کامل، عدم امکان تعبیه ورق‌های پیوستگی افقی در ستون‌های با مقاطع کوچک، دشوار بودن عملیات ترمیم و اصلاح جوش ورق‌های پیوستگی افقی در صورت بروز عیوب جوش و ایجاد اعوجاج در بدنه ستون به دلیل عدم امکان جوشکاری همزمان وجوه مقابل ورق‌های پیوستگی را می‌توان به عنوان بارزترین معایب استفاده از ورق‌های پیوستگی افقی در داخل ستون‌های جعبه‌ای بیان کرد. استفاده از دو ورق مثلی در داخل ستون به جای ورق‌های پیوستگی رایج [۱]، استفاده از سخت کننده‌های ورق مثلی و مقاطع نبشی و T شکل [۲]، اتصالات درختی [۳]، اتصالات تقویت شده با ورق میانی [۴]، استفاده از ورق‌های قطری در گوشه‌های ستون [۵] و اتصال بدون ورق پیوستگی افقی رایج در ناحیه چشمه اتصال [۶] از جمله مطالعاتی است که پیش از این در زمینه مورد بحث در این مقاله مطرح شده‌است. بهره‌گیری از ورق سخت‌کننده قائم داخلی در داخلی ناحیه چشمه اتصال به همراه تعریض بال‌های تیر در ناحیه اتصال تیر به ستون علاوه بر آن که منجر به برطرف کردن چالش‌های استفاده از ورق پیوستگی افقی در اتصالات رایج خمشی و سهولت اجرا و نصب و فرآیند جوشکاری می‌شود، ایجاد یک مسیر انتقال بار مناسب از تیر به بال ستون و دور شدن حداکثری مفصل پلاستیک از بر ستون را نیز تضمین می‌نماید.

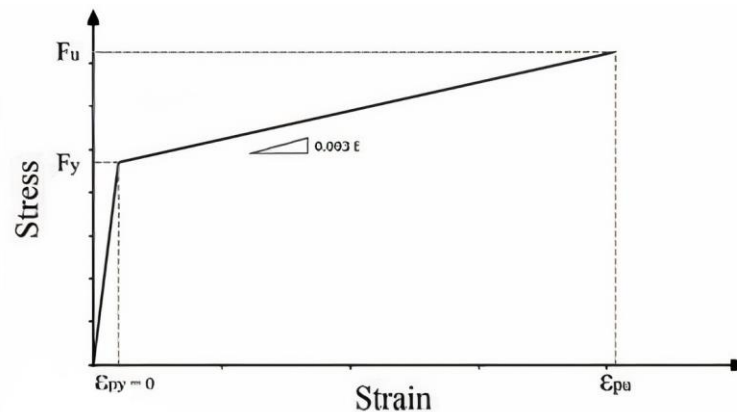
۱- روش تحقیق

در این پژوهش کلیه‌ی مدلسازی‌ها و تحلیل نتایج مربوط به آن‌ها توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود Abaqus [۷] انجام گرفته است. روش تحلیل عددی کلیه‌ی مدل‌ها، به صورت غیر خطی می‌باشد و از حلگر Abaqus standard / Implicit استفاده می‌شود. نوع استپی که برای تحلیل عددی غیر خطی استفاده شده‌است، از نوع Static / General می‌باشد. به منظور بارگذاری از پروتکل بارگذاری مربوط به قاب‌های خمشی ویژه و متوسط که در آیین نامه فولاد آمریکا (AISC341-22) [۸] ارائه شده‌است، استفاده می‌شود (شکل شماره ۱). به منظور تعریف رفتار غیر خطی فولاد نرمه تیپ ST-37 از نمودار تنش - کرنش رسم شده در (شکل شماره ۲) استفاده شده‌است. در این راستا تمامی مشخصات مربوط به ناحیه‌ی الاستیک مصالح فولادی برابر با مدول الاستیسیته $E=210\text{GPa}$ و ضریب پواسون $\nu=0.3$ در نظر گرفته شده‌است. تغییرات تنش - کرنش به صورت خطی و با شیب $0.003E$ لحاظ شده‌است. نمودار تنش - کرنش مفروض با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی کینماتیکی مصالح موجود و متناظر با تنش - کرنش واقعی در نرم‌افزار آباکوس اعمال شده‌است. مشخصات مقاطع فولادی به کاررفته در مدل‌های عددی اعم از تیرها، ستون‌ها، ورق‌ها و

... در (جدول شماره ۱) قابل مشاهده می‌باشد. همچنین هندسه‌ی تعریض بال‌های تیر در مدل‌های شماره ۳۰۲ و ۴ در (شکل شماره ۳) دیده می‌شود. در کلیه مدل‌ها بارگذاری مربوطه به صورت جابجایی کنترل به انتهای آزاد تیر وارد شده‌است و دو انتهای ستون به صورت مفصلی مقید شده‌است و در قسمت میانی و انتهایی تیر مهار جانبی تعبیه شده‌است. همچنین حضور ورق‌های صلبی در قسمت‌های فوقانی و تحتانی ستون جعبه‌ای و قسمت انتهایی تیر به منظور جلوگیری از بروز تمرکز تنش در حین بارگذاری پیشبینی شده‌است (شکل شماره ۴). دهانه‌ی آزاد تیر ۲/۵ متر و ارتفاع ستون ۳/۳ متر می‌باشد. به عنوان صحت سنجی یک مدل مرجع با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌است و با نتایج حاصله با مدل مرجع مقایسه گردیده‌است. نتایج نهایی حاکی از تشابه نسبی خوب میان آن‌ها می‌باشد [۹] (شکل شماره ۵).



شکل ۱ پروتکل بارگذاری آیین نامه فولاد آمریکا (AISC341-22) [۸]



شکل ۲ نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی مورد استفاده

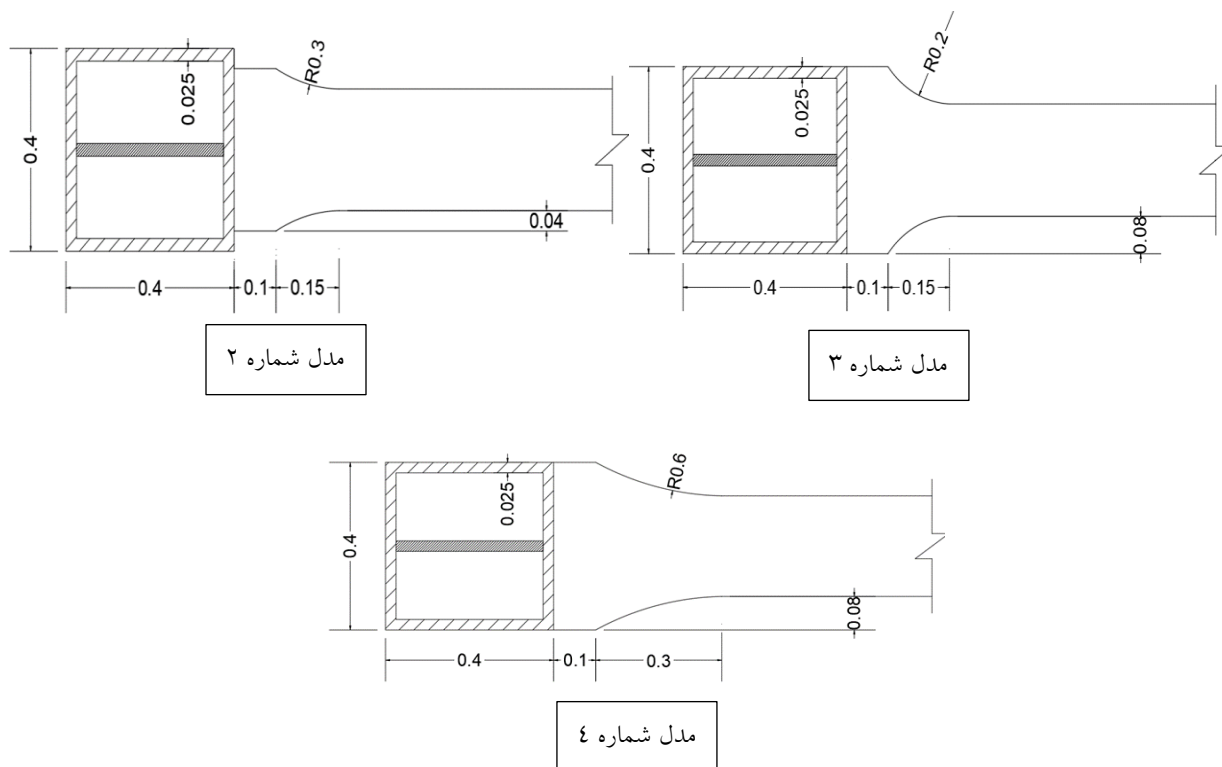


دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



جدول ۱ مشخصات ابعاد مقاطع فولادی به کاررفته در مدل‌های عددی

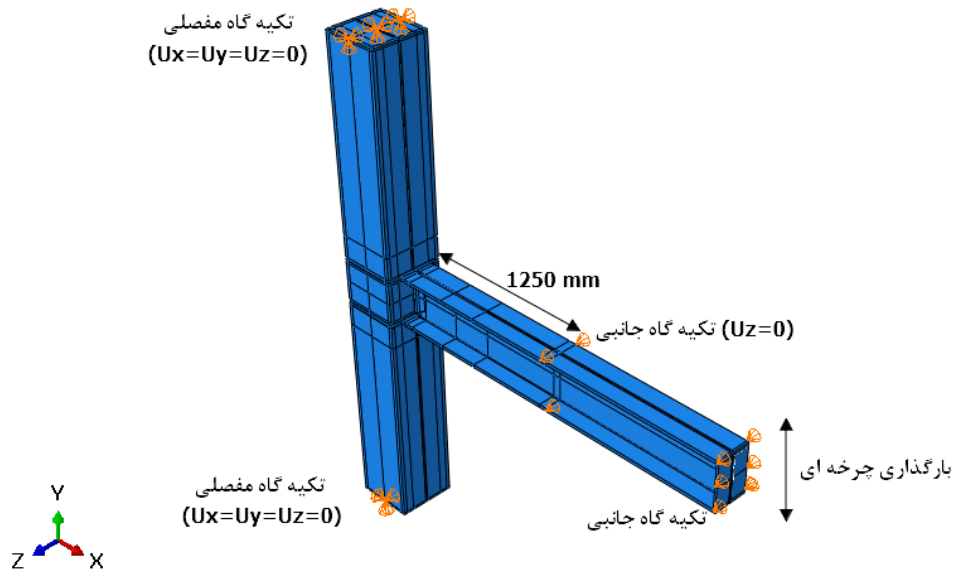
مدل	تیر		ستون (mm)	ورق پیوستگی (mm)	ورق سخت‌کننده قائم داخلی (mm)
	بال (mm)	جان (mm)			
شماره ۱	PL 240×20	PL 300×8	BOX 400×400×25	PL 350×350×25	–
شماره ۲	PL 240×20	PL 300×8	BOX 400×400×25	–	PL 640×350×25
شماره ۳	PL 240×20	PL 300×8	BOX 400×400×25	–	PL 640×350×25
شماره ۴	PL 240×20	PL 300×8	BOX 400×400×25	–	PL 640×350×25



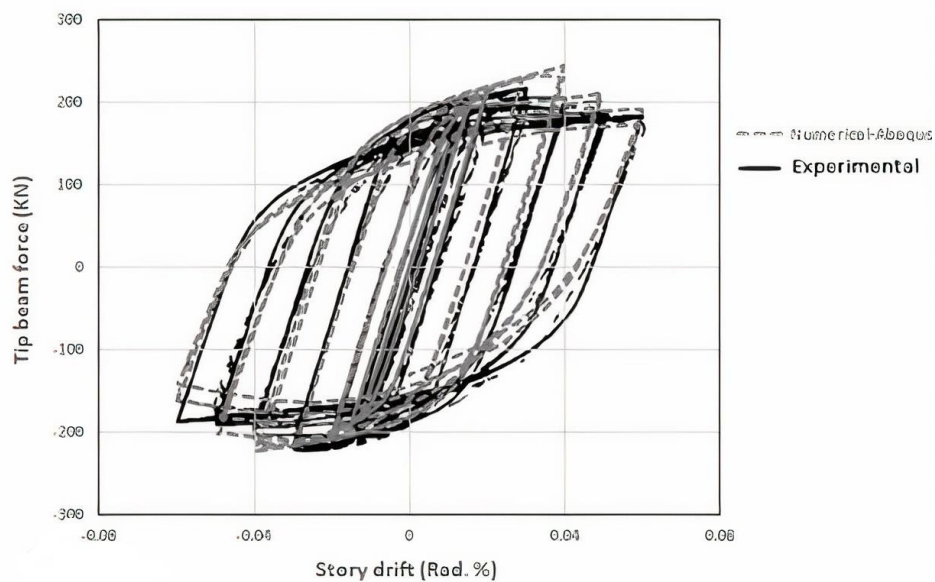
شکل ۳ هندسه‌ی تعریض بال‌های تیر در مدل‌های ۲ و ۴



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شکل ۴ شرایط مرزی و بارگذاری در مدل های عددی



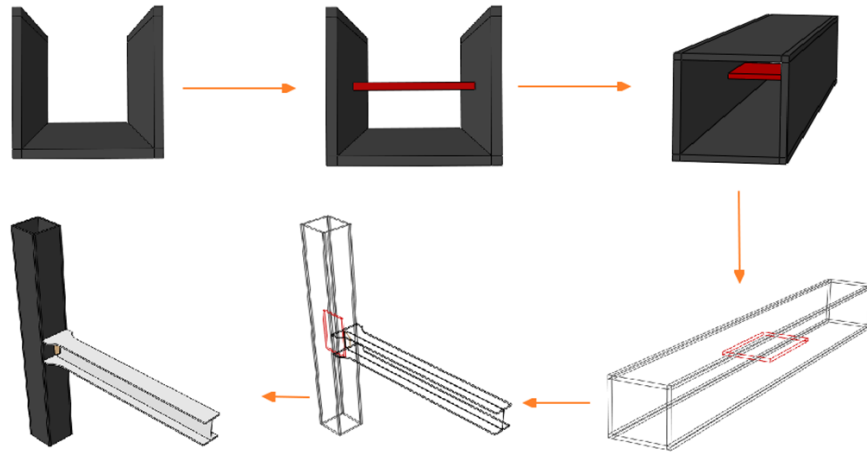
شکل ۵ نمودار هیستریزیس نیرو-جابجایی تا ۰/۰۶ رادیان حاصل از صحت سنجی با مقاله مبنا [۹]



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



به منظور ساخت اتصال پیشنهادی در این مقاله، ابتدا سه ورق ستون به یکدیگر جوش شده و شکل U را پدید می آورند. سپس ورق سخت کننده قائم داخلی به دو وجه داخلی بال های ستون به وسیله جوش کامل متصل می گردد و پس از آن ورق چهارم ستون که یکی از جان های ستون است در جای خود نصب می شود (شکل شماره ۶).



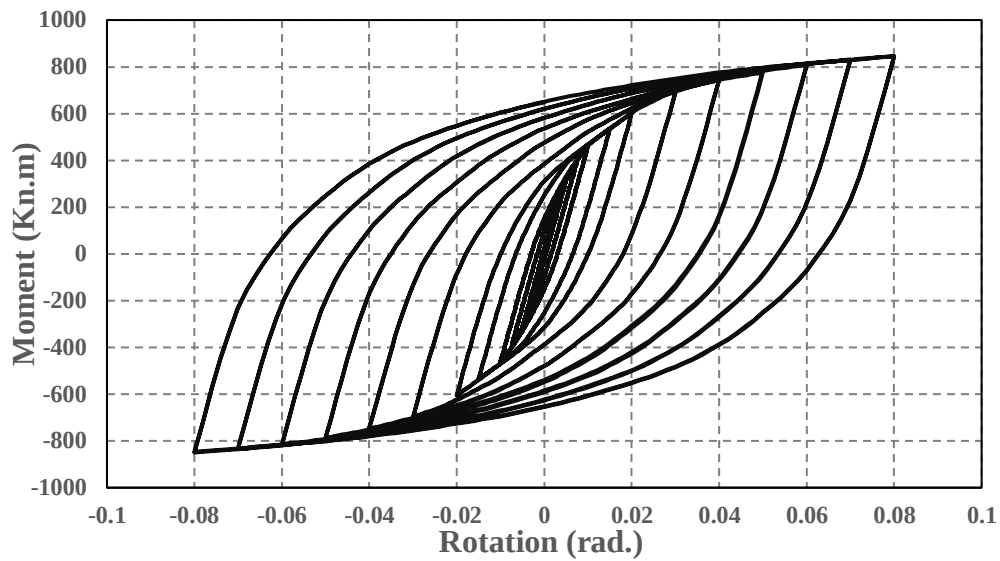
شکل ۶ مراحل ساخت اتصال پیشنهادی

۲- نتایج استخراج شده حاصل از تحلیل عددی مدل ها

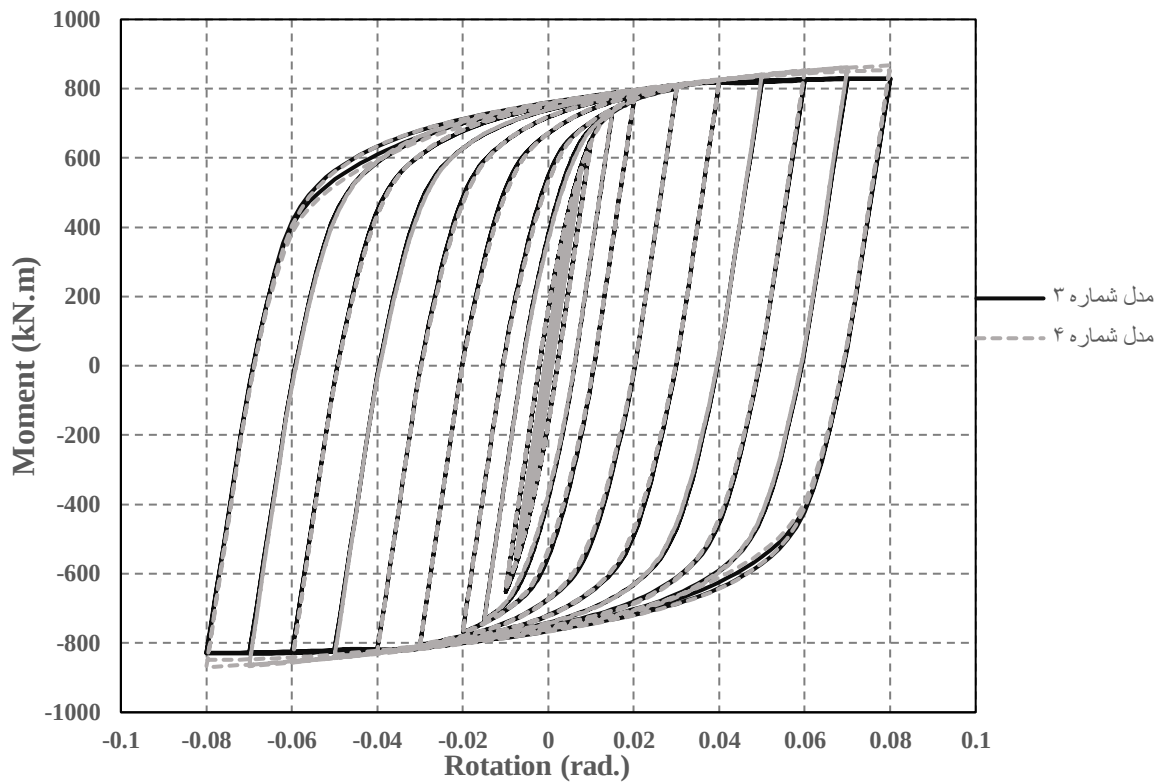
پس از انجام مدل سازی، هیستریزیس لنگر خمشی - جابجایی مدل های عددی تا حداکثر جابجایی ۰/۰۸ رادیان استخراج شده است. نتایج به دست آمده نشانگر عملکرد مطلوب اتصال پیشنهادی تحت بارگذاری چرخه ای است به طوری که در تمامی مدل های شماره ۳۰۲ و ۴ حداقل میزان افت مقاومت پس از جابجایی ۰/۰۸ رادیان مشاهده شده است (شکل های شماره ۷ و ۸). به منظور قیاس هر چه بهتر مدل های پیشنهادی در این مقاله با اتصال رایج خمشی مینا (مدل شماره ۱) مطالعه تطبیقی نمودارهای هیستریزیس لنگر خمشی - جابجایی حاصل از تحلیل عددی آن ها در قالب (شکل شماره ۹) آورده شده است. باتوجه به شکل شماره ۹ مدل های شماره ۳ و ۴ باتوجه به شباهتی که از منظر هندسه ی تعریض به یکدیگر دارند، رفتاری مشابه از خود بروز داده اند و به طور کلی از نظر جذب نیرو در سطوح بالاتری نسبت به مدل شماره ۱ قرار گرفته اند. مدل شماره ۲ نیز رفتار مطلوبی داشته است؛ اما به دلیل هندسه ی خاص نمودار لاغرتری نسبت به مدل شماره ۳ و ۴ گزارش شده است. نمایی کلی از کانتور تنش در مدل های شماره ۱ تا ۴ در شکل شماره ۱۰ مشاهده می شود. باتوجه به شکل شماره ۱۰ ایجاد مفصل پلاستیک در فاصله ی دورتر از بر ستون و ارضای قاعده ی تیر ضعیف - ستون قوی متناسب با پیش بینی های صورت گرفته قابل مشاهده است. به منظور حصول اطمینان از کفایت اتصالات از نقطه نظر دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون، یک خط مینا به صورت طولی در مرکز بال فوقانی تیر رسم شده است و از طریق نقطه یابی عملکرد اتصالات در ایجاد مفصل پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است (شکل شماره ۱۱). باتوجه به نتایج به دست آمده در اتصالات شماره ۳ و ۴ سیر صعودی میزان کرنش پلاستیک در فاصله ی دورتر از بر ستون نسبت به مدل شماره ۱ پدید آمده است.



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
 ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



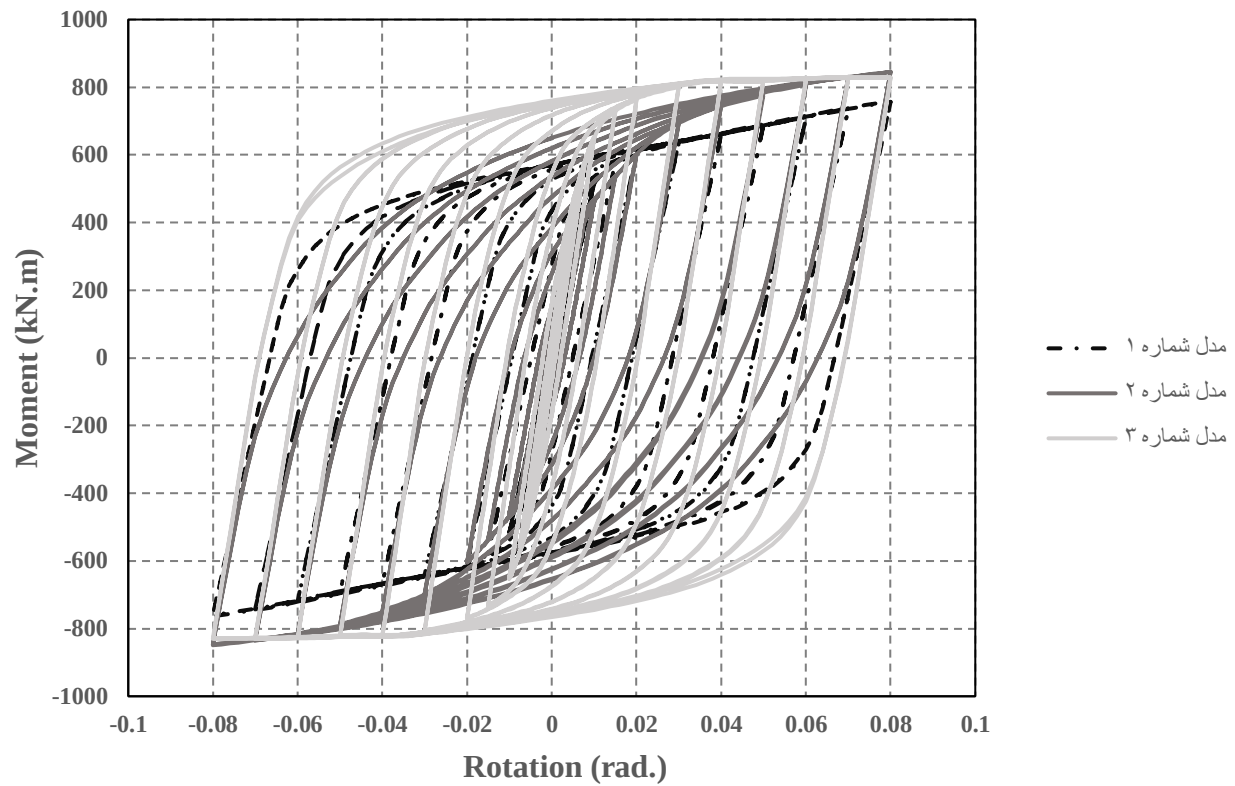
شکل ۷ نمودار هیستریزیس لنگرخمشی - جابجایی حاصل از تحلیل عددی مدل شماره ۲



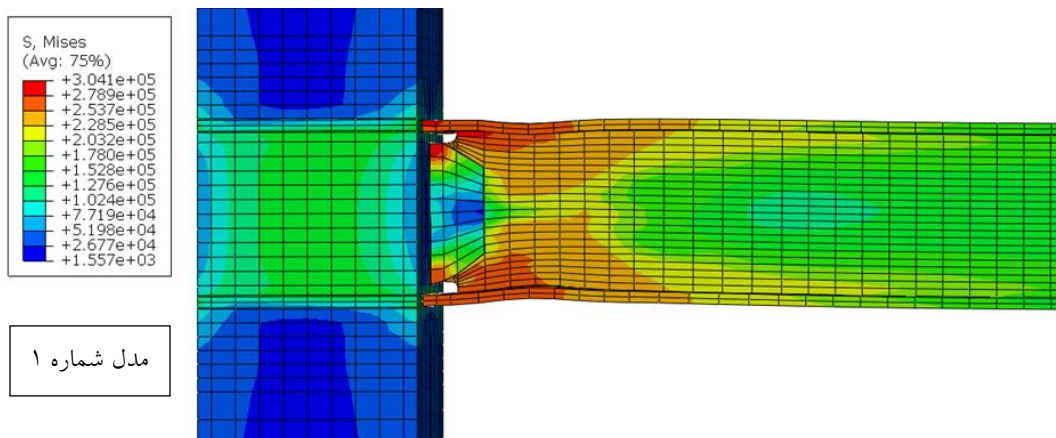
شکل ۸ نمودار هیستریزیس لنگرخمشی - جابجایی حاصل از تحلیل عددی مدل شماره ۳ و ۴



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران

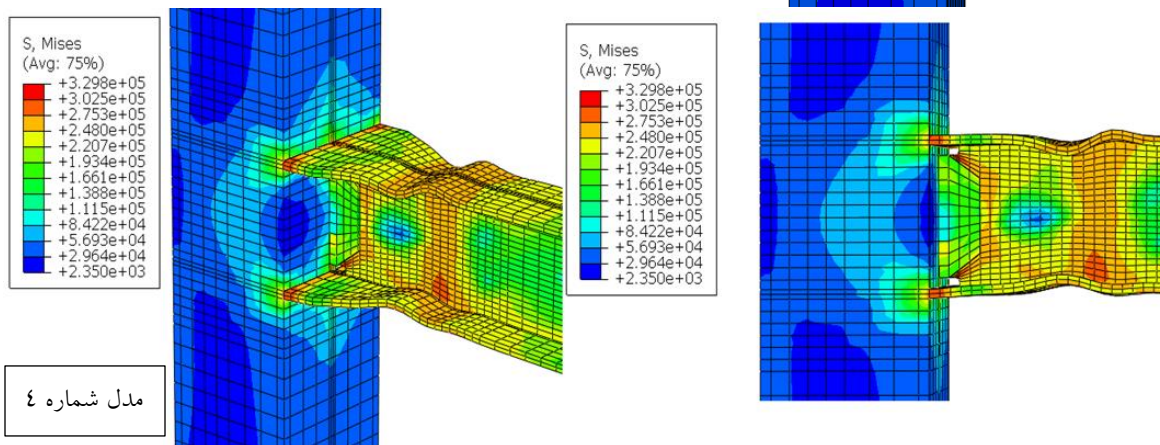
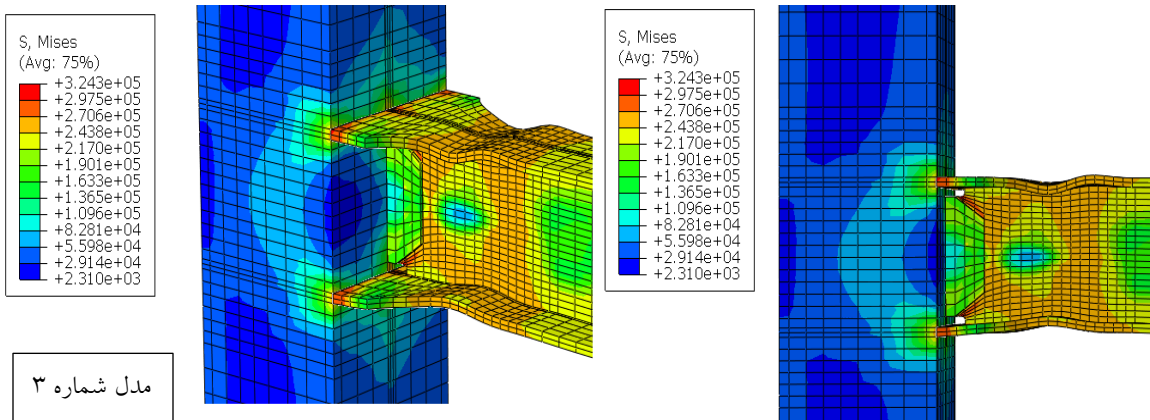
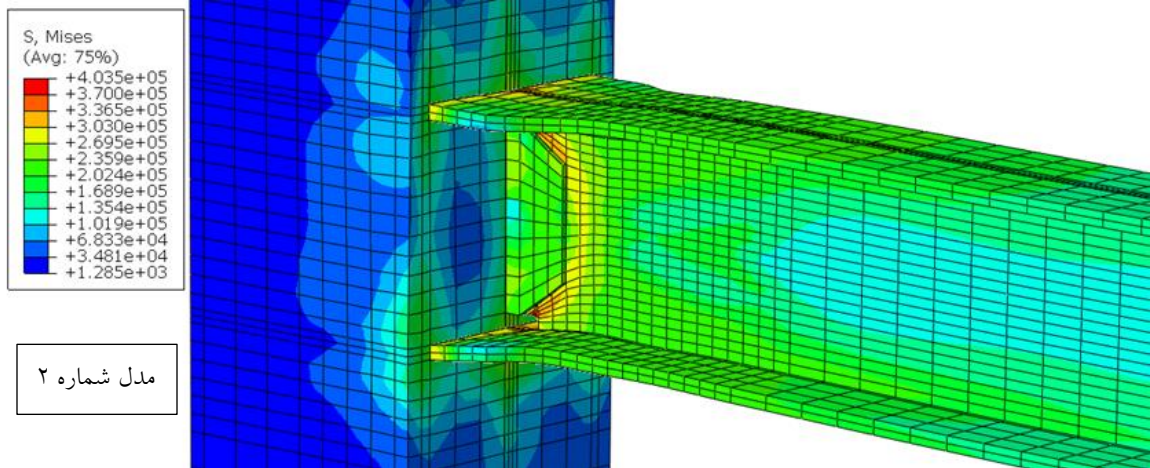


شکل ۹ نمودار هیستریزیس لنگر خمشی - جابجایی حاصل از مطالعه تطبیقی مدل‌های ۲، ۱ و ۳





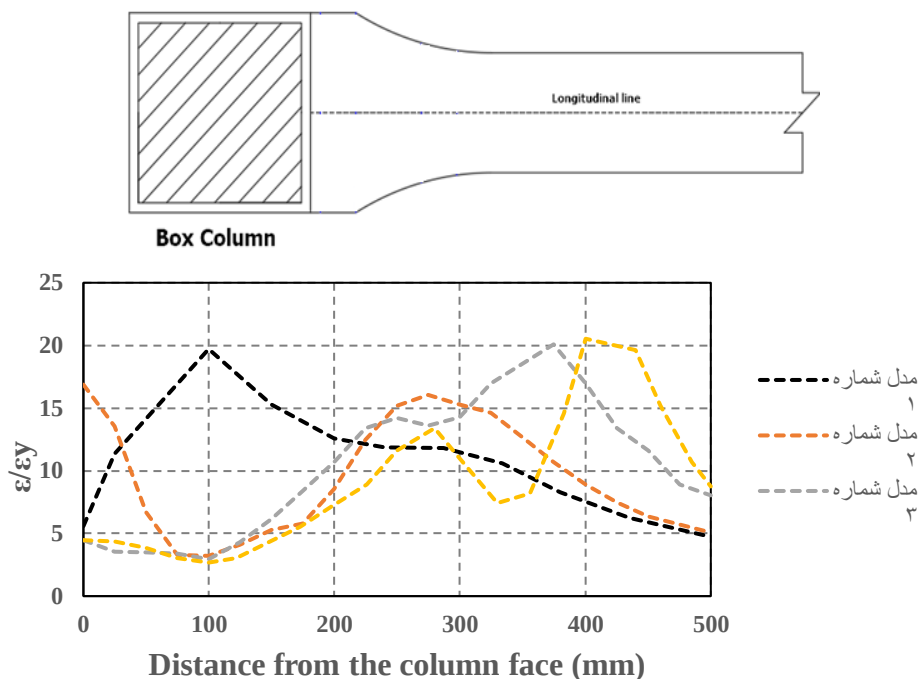
دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شکل ۱۰ نمایی از کانتور تنش در مدل‌های شماره ۱ تا ۴ پس از جابجایی ۰/۰۸ رادیان (واحد: kN/m^2)



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی ۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



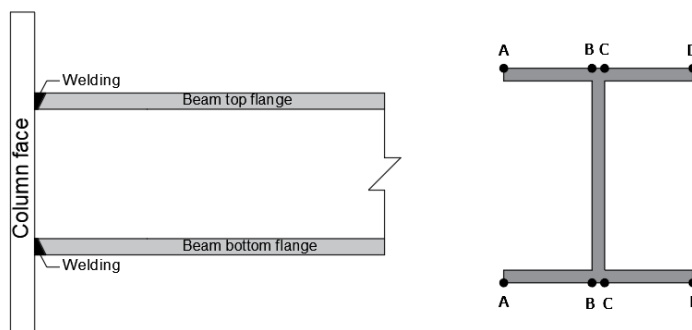
شکل ۱۱ نمودار مقایسه تطبیقی توزیع کرنش پلاستیک بر روی بال تیر به صورت طولی در مدل‌های عددی پس از جابجایی 0.08 Rad

۳- بررسی شاخص شکست جوش

به منظور بررسی شکل پذیری و ارزیابی نحوه و میزان ایجاد شکست در جوش نفوذی در ناحیه‌ی اتصال بال‌های تیر به بال ستون از شاخص شکست جوش استفاده می‌گردد (رابطه ۱) و (شکل شماره ۱۲).

(۱)

$$RI = \frac{PEEQ}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}})}$$



شکل ۱۲ نقاط مورد بررسی برای مقایسه شاخص شکست جوش در مدل‌های ۱ تا ۴



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



شاخص شکست جوش	نقطه (بال تحتانی تیر)	مدل
0.059	A	شماره ۱
0.429	B	
0.606	C	
0.069	D	
1.595	A	شماره ۲
0.687	B	
0.664	C	
1.613	D	
0.551	A	شماره ۳
0	B	
0	C	
0.573	D	
0.713	A	شماره ۴
0.005	B	
0.004	C	
0.761	D	

۴- نتیجه گیری

اتصالات پیشنهادی دارای ظرفیت جذب انرژی بالا، زوال مقاومت و سختی پایین و عملکردی مناسب در کنار فراهم نمودن امکان اجرای آسان، سریع و بهینه است. استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله در مواردی که اتصال منتهی به بال ستون به صورت کامل با آن هم تراز نشود و حدود ۸۰ درصد آن را در برگیرد (مدل شماره ۲)، از نظر سختی نسبت به سایر مدل‌ها در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد. به طور کلی استفاده از تعریض بال‌های تیر علاوه بر آن که موجب دور شدن مفصل پلاستیک از بر ستون شده است و تیر مطابق انتظار در نواحی بعد از شعاع تعریض، دچار کماتش موضعی گشته است. ایجاد شعاع خم و تعریض باعث ایجاد کمترین میزان افت مقاومت در نمودارهای استخراج شده است. مدل شماره ۲ بحرانی‌ترین نتایج را از نظر شاخص شکست جوش نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. این موضوع نشانگر آن است که احتمال بروز شکست‌های ترد در جوش نفوذی در این نواحی بسیار بالاست و باید تمهیدات مربوط به عملیات جوشکاری در این مدل با حساسیت و تمرکز مناسب‌تر و بیشتری صورت پذیرد. رفتار مدل‌های شماره ۳ و ۴ بسیار مشابه می‌باشد و در نواحی کناری جوش بحرانی‌تر گزارش شده است. در مدل شماره ۲ میزان تفاوت مصالح



دوازدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد
و اولین کنفرانس ملی نوردکاران فولادی
۲۰ تا ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ - هتل المپیک - تهران



فولاد مصرفی با مدل مبنا (مدل شماره ۱)، بسیار ناچیز و در مدل‌های شماره ۳ و ۴ به ترتیب در حدود ۱۰ و ۱۷ درصد افزایش پیدا می‌کند.

به‌طور کلی روش پیشنهاد شده می‌تواند جایگزین مناسبی برای ورق‌های پیوستگی افقی در ستون‌های جعبه‌ای قلمداد شود.

به‌منظور انجام بررسی‌ها و مطالعات برای تحقیقات آتی موضوعات ذیل پیشنهاد می‌گردد:

- بررسی رفتار چشمه اتصال و ورق سخت‌کننده قائم داخلی تحت خمش دومحوره
- بررسی اتصالات پیشنهادی تحت شیوه‌های گوناگون اعمال بار لرزه‌ای در جهت‌های مختلف
- بررسی بارگذاری متعامد با تعبیه چند ورق قائم داخلی به‌صورت موازی در ناحیه چشمه اتصال

منابع

- 1- Saffari, H., A. Hedayat, and G.N. SOLTANI, *New alternatives for continuity plates in I-beam to box columns connections*. 2015.
- 2- Ting, L., N. Shanmugam, and S. Lee, *Box-column to I-beam connections with external stiffeners*. Journal of Constructional Steel Research, 1991. **18**(3): p. 209-226.
- 3- Chen, C.-C., C.-C. Lin, and C.-H. Lin, *Ductile moment connections used in steel column-tree moment-resisting frames*. Journal of Constructional Steel Research, 2006. **62**(8): p. 793-801.
- 4- Mirghaderi, S.R., S. Torabian, and F. Keshavarzi, *I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column*. Engineering Structures, 2010. **32**(8): p. 2034-2048.
- 5- Torabian, S., S.R. Mirghaderi, and F. Keshavarzi, *Moment-connection between I-beam and built-up square column by a diagonal through plate*. Journal of Constructional Steel Research, 2012. **70**: p. 385-401.
- 6- Rezaeian, A., E. Jahanbakhti, and N. Fanaie, *Numerical study of panel zone in a moment connection without continuity plates*. Journal of Earthquake Engineering, 2020: p. 1-19.
- 7- Abaqus, *the finite element analysis software*
- 8- AISC341-22, *Seismic provisions for structural steel buildings*.
- 9- Saneei Nia, Z., et al., *Seismic performance and comparison of three different I beam to box column joints*. Earthquake engineering and engineering vibration, 2014. **13**: p. 717-729.