

چکیده

اتصال صلب تقویت نشده جوشی (WUF-W) یکی از پرکاربردترین انواع اتصالات صلب فولادی در قاب‌های خمشی است. با وجود متداول بودن استفاده از ستون جعبه‌ای در ایران، به دلیل چالش‌های نصب ورق پیوستگی در ستون جعبه‌ای، توسعه روابط طراحی ستون‌های جعبه‌ای بدون ورق پیوستگی و ارائه راه‌های خلاقانه برای جایگزینی ورق پیوستگی در ستون جعبه‌ای همواره مورد توجه محققین، طراحان و سازندگان بوده است. در این پژوهش به منظور بررسی رفتار اتصال WUF-W تیر به ستون جعبه‌ای فاقد ورق پیوستگی، با تمرکز بر اثر عمق تیر بر رفتار اتصال، ۱۸ مدل تحت بارگذاری چرخه‌ای و بارگذاری تک‌آهنگ مورد مطالعه عددی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه با تعیین مقدار کمینه ضخامت وجه ستون مطابق با الزامات ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ایران، رفتار اتصالات بدون ورق پیوستگی در حدود ضوابط آیین‌نامه AISC 341-16 و مبحث دهم به نظر می‌رسد، اما با بررسی توزیع کرنش‌های پلاستیک معادل، حالت تغییر شکل یافته‌ی نمونه‌ها و صلیبت اتصالات مطالعه شده، مشخص شد که اتصالات بدون ورق پیوستگی به دلیل ناکافی بودن سختی دورانی کاملاً صلب نبوده و در زمره اتصالات نیمه‌صلب طبقه‌بندی می‌شوند؛ بنابراین به نظر می‌رسد که بهتر است تا مشابه با استانداردهای Eurocode 3 و AII، در مبحث دهم نیز ضوابط پذیرش اتصالات صلب بر اساس سختی دورانی بحث شود. همچنین مطالعه اثر عمق تیر بر رفتار اتصال نشان داد که اگرچه تغییر عمق تیر اثر چندانی بر الگوی منحنی هیستریزس در اتصالات بدون ورق پیوستگی ندارد، اما با کاهش ۴۶ درصدی عمق تیر توزیع کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال بال تیر به وجه ستون تا حدود ۵۵ درصد یکنواخت‌تر شده و همچنین صلیبت اتصالات از ۱۱ تا ۲۳ درصد افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: اتصال صلب WUF-W، ستون جعبه‌ای، ورق پیوستگی، صلیبت، بارگذاری چرخه‌ای.

اثر عمق تیر در رفتار اتصال صلب تقویت نشده‌ی جوشی به ستون جعبه‌ای فاقد ورق پیوستگی

فرزانه حامدی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

سیدبنیامین ادیب‌زاده (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران،
adibzadeh@edu.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از سویی، ساخت ستون جعبه‌ای به عنوان متداول‌ترین مقطع ستون فولادی در ایران و آسیا، با چالش‌های مهمی همراه است که یکی آنها نصب ورق پیوستگی در داخل ستون جعبه‌ای است [۳-۴]. روشن است که نصب ورق پیوستگی در ستون H یا صلیبی، به دلیل در دسترس بودن محل اتصال، ساده است. بلاجت [۵] در ۱۹۶۶ با استفاده از تئوری مفصل‌های گسیختگی و یک تحلیل کار مجازی برای

یکی از متداول‌ترین انواع اتصال صلب در سازه‌های فولادی اتصال صلب تقویت نشده‌ی جوشی (WUF-W) است و مطابق با بررسی اصغری [۱] در ۱۳۹۶ اجرای درختی این اتصال در سطح بسیار وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. خصوصاً با توجه به محدودیت‌های وضع شده در مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران در مورد استفاده از اتصال صلب جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری (WFP)، استفاده از اتصال WUF-W

است. البته رابطه (۲) در آیین‌نامه AISC 341-16 حذف شده و فقط رابطه (۳) باقی مانده است و برای در نظر گرفتن حداقل ضخامت وجه ستون، کنترل رابطه موجود در AISC 360-16 که تا حدودی شبیه به رابطه (۱) است و بعضی محدودیت‌های دیگر مد نظر قرار گرفته است [۷-۸]. در پیش‌نویس آیین‌نامه AISC 341-22 نیز رابطه (۳) برای ستون‌های جعبه‌ای ساخته شده از دو مقطع بال پهن و نه ستون‌های جعبه‌ای ساخته شده با ورق حفظ شده است [۹]. همچنین برای مقاطع جعبه‌ای انجام تحقیقات بیشتر جهت تعیین حداقل ضخامت وجه ستون پیشنهاد شده است [۷]. با این حال، در ویرایش پنجم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران که پیش‌نویس آن منتشر شده است، ضمن حذف هر دو رابطه (۲) و (۳)، نصب ورق پیوستگی برای تمامی اتصالات صلب تیر I شکل به ستون جعبه‌ای ساخته شده از ورق بدون توجه به ظرفیت وجه ستون الزامی شده است که با توجه به الزامات AISC-341-16 به نظر سخت‌گیرانه می‌آید [۷ و ۱۰].

تحقیقات آزمایشگاهی رودر [۱۱] در ۲۰۰۱ نشان داد که به‌طور متوسط، کاهش عمق تیر موجب افزایش ظرفیت نرمال‌شده‌ی دورانی اتصال (نسبت لنگر نهایی اتصال به لنگر پلاستیک تیر) می‌گردد. همچنین محدودیت ۹۲۰ میلی‌متر برای ارتفاع تیر و محدودیت ۲۵ میلی‌متر برای ضخامت بال تیر برای اتصالات WUF-W نیز از نتایج پژوهش مذکور است. اگرچه آیین‌نامه AISC 358-16 [۱۲] محدودیت ۹۲۰ میلی‌متر را برای تیرهای اتصال WUF-W تعیین نموده است، احمدی جزنی و حسینی هاشمی [۱۳] در ۲۰۱۰ طی پژوهشی آزمایشگاهی بر روی نمونه‌هایی با اتصال دو تیر و عمق تیر متغیر نشان دادند که به کارگیری تیرهایی با عمق ۱۰۰۰ میلی‌متر در اتصال WUF-W الزامات استاندارد AISC 341-16 را ارضا می‌نماید. هاوانگ و همکاران [۱۴] در ۲۰۱۰ در یک مطالعه آزمایشگاهی با مقایسه منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها نشان دادند که افزایش ارتفاع تیر در اتصال WUF-W موجب افت عملکرد چرخه‌ای اتصال می‌گردد. عملکرد چرخه‌ای اتصال با تحلیل عوامل مؤثر شامل سطح محصور در نمودار چرخه‌ای نرمال شده‌ی لنگر- دوران،

ستون جعبه‌ای، رابطه (۱) را جهت برآورد تقریبی ظرفیت اسمی وجه ستون فولادی جعبه‌ای بدون ورق پیوستگی برای تحمل نیروی کششی یا فشاری ناشی از لنگر وارده از تیر به ستون ارائه نموده است.

$$R_n = \frac{1}{6} \times F_y t_{fc} (b_{fc} + \frac{72t_{fc}^2}{b_{fc} - b}) \quad (1)$$

در این رابطه که با ضریب اطمینان ۲ و فرض‌های ساده‌کننده دیگر به دست آمده، F_y معرف تنش تسلیم، t_{fc} ضخامت وجه ستون، b_{fc} عرض وجه ستون و b عرض بال تیر می‌باشد. R_n ظرفیت اسمی وجه ستون برای تحمل نیروی کششی یا فشاری است که می‌تواند زوج نیروی کششی و فشاری (کوپل نیرو) متناظر با لنگر پلاستیک تیر فرض شود. ملاحظه می‌گردد که به دلیل تبدیل لنگر وارده به یک کوپل، اثر کمیت عمق تیر در رابطه (۱) وجود دارد. با این حال، مطابق با روابط ۱-۳-۸-۵ و ۱۰-۳-۸-۵ از ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و یا روابط E3-10 و E3-11 از آیین‌نامه AISC 341-10 که به ترتیب در روابط (۲) و (۳) قابل مشاهده هستند و مبنی حداقل ضخامت وجه ستون برای صرف‌نظر از نصب ورق پیوستگی هستند، عمق تیر تأثیری در محاسبه کمینه ضخامت وجه ستون ندارد. اگرچه در آیین‌نامه AISC 341-10 روابط (۲) و (۳) برای ستون‌های جعبه‌ای ساخته شده از دو مقطع H بیان شده‌اند، اما با وجود تفاوت در عملکرد چشمه اتصال، در ویرایش چهارم مبحث دهم عیناً همین روابط برای ستون‌های جعبه‌ای آورده شده است [۲ و ۶].

$$t_{cf} \geq 0.4 \sqrt{\left[1 - \frac{b_{bf}}{b_{cf}^2} (b_{cf} - \frac{b_{bf}}{4}) \right] 1.8 b_{bf} t_{bf} \frac{F_{yb} R_{yb}}{F_{yc} R_{yc}}} \quad (2)$$

$$t_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{12} \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳) t_{cf} حداقل ضخامت وجه ستون برای صرف‌نظر از نصب ورق پیوستگی، F_{yb} و F_{yc} حداقل تنش تسلیم فولاد برای تیر و ستون و R_{yb} و R_{yc} نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به حداقل تنش تسلیم تعیین شده فولاد تیر و ستون

دادند که اهمیت هندسه سوراخ دسترسی کمتر از عمق تیر و نسبت L/d نبوده و با رعایت ضوابطی برای هندسه سوراخ دسترسی نظیر طول قسمت مسطح و شیب قسمت پایانی سوراخ دسترسی، استفاده از تیر با عمق ۸۹۰ میلی‌متر بلامانع است. جهانبختی و همکاران [۲۱] در ۲۰۱۷ در یک پژوهش آزمایشگاهی بر روی اتصالاتی با نسبت‌های مختلف عمق تیر به عرض بال تیر نشان دادند که با حذف ورق پیوستگی از اتصال WUF-W تیر به ستون جعبه‌ای و افزایش ضخامت وجه ستون، اگرچه رفتار اتصال تا دوران نظیر تغییر مکان جانبی $0/04$ رادیان مطابق با الزامات آیین‌نامه AISC بوده است، اما در دوران $0/03$ رادیان در یکی از نمونه‌ها یک ترک مشاهده شده است. سیم و همکاران [۲۲] در ۲۰۱۷ طی یک پژوهش آزمایشگاهی بر روی نمونه‌هایی با مشخصاتی فراتر از محدودیت وزن واحد طول تیر و عمق تیر ۱۱۱۸ میلی‌متر، نشان دادند که در صورت استفاده از فولاد سخت کاری شده برای ساخت بال تیر، الزامات استاندارد AISC برای استفاده از اتصالات مذکور در قاب خمشی ویژه ارضا می‌گردد. جونگ و همکاران [۲۳] در ۲۰۱۹ در پژوهشی عددی با هدف ایجاد دو مفصل پلاستیک متوالی در اتصال WUF-W با تیری به عمق ۱۲۰۰ میلی‌متر نشان دادند که الزامات استاندارد AISC 358-16 برای قاب‌های خمشی متوسط ارضا می‌گردد. رینولدز و یوآنگ [۲۴] در ۲۰۱۹ طی یک مطالعه آزمایشگاهی رفتار دو اتصال صلب RBS به ستون با مقطع H و بدون ورق پیوستگی را در محدوده الزامات آیین‌نامه AISC 358 گزارش نمودند که در واقع تأییدی بر امکان طراحی اتصال WUF-W بدون نصب ورق پیوستگی است. با این حال، اثر تغییر عمق تیر بر رفتار اتصال مذکور مورد بررسی ایشان قرار نگرفته است. رضائیان و همکاران [۴] در ۲۰۲۰ با مطالعه سه مدل اتصال صلب از نوع تقویت نشده جوشی نشان دادند که با افزایش ضخامت وجه ستون، رفتار اتصال صلب تیر به ستون فاقد ورق پیوستگی تا دوران $0/06$ درصد در محدوده ضوابط آیین‌نامه AISC قرار گرفته و در نتیجه برای استفاده در قاب‌های متوسط و ویژه مناسب است. در آیین‌نامه AISC 358-16 که مربوط به

تشکیل مفصل پلاستیک در محل مناسب، چگونگی توزیع کرنش پلاستیک در محل اتصال، شکل‌پذیری، صلبیت و نسبت لنگر مقاوم اتصال به لنگر پلاستیک تیر مورد قضاوت قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد که بعضاً حذف یا جایگزینی ورق پیوستگی از ستون جعبه‌ای با سخت‌کننده بیرونی موجب بهبود عملکرد اتصال نیز می‌گردد. صنیعی‌نیا و همکاران [۱۵] در ۲۰۱۳ طی یک مطالعه‌ای عددی بر روی اتصالات WUF-W تحت بارگذاری دوسویه (بارگذاری به هر دو تیر متصل به ستون) پیشنهاد نمودند که به دلیل توسعه ترک‌ها در محل اتصال ورق پیوستگی به وجه ستون، بهتر است به جای ورق پیوستگی از سخت‌کننده خارجی استفاده شود. رضایی‌فر و یونسی [۱۶] در ۱۳۹۴ نشان دادند که استفاده از نوعی سخت‌کننده خارجی مثلثی شکل می‌تواند نیاز به نصب ورق پیوستگی را برطرف نماید. با این حال، بر اساس مقایسه منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها مشاهده شد که رفتار اتصالات دارای ورق پیوستگی نسبت به اتصالات دارای سخت‌کننده ابدعی، بهتر است. هان و همکاران [۱۷] در ۲۰۱۴ طی یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی اتصالات WFU-W نشان دادند نمونه‌ای با عمق ۸۹۰ میلی‌متر در دوران $0/03$ رادیان در ناحیه اتصال بال تیر به وجه ستون دچار شکست ترد شده و بنابراین شکل‌پذیری لازم برای کاربرد در قاب‌های ویژه خمشی را ندارد. ایشان در مطالعه‌ای عددی در ۲۰۱۶ نشان دادند که اصلاح هندسه سوراخ دسترسی در نمونه با عمق ۸۹۰ میلی‌متر منجر به ارتقای عملکرد نمونه شده و ضوابط به کارگیری آن در قاب خمشی ویژه ارضا می‌گردد [۱۸]. کافی و طریقی [۱۹] در ۱۳۹۵ به منظور اجتناب از بروز مشکلات جوشکاری ورق پیوستگی به وجه چهارم ستون، امکان جایگزینی ورق پیوستگی با دو ورق لب به لب مثلثی شکل داخلی را برای اتصال WUF-W، اتصال سطح مقطع کاهش یافته (RBS) و اتصال دارای ورق زیرسری و روسری (WFP) بررسی نمودند و در نهایت نتیجه گرفتند که ایده مذکور چندان راهگشا نبوده و نمونه‌های دارای ورق پیوستگی لچکی الزامات آیین‌نامه AISC 341 را ارضا نمی‌نمایند. هان و کیم [۲۰] در ۲۰۱۷ در یک مطالعه عددی نشان

طبق قسمت ۲.۲.۴ این استاندارد، انتخاب اتصال دارای ورق پیوستگی سراسری منوط به استفاده از مصالح فولادی از نوع JSA-JIS G 3199 است که رده‌ای ضد پارگی لاملار می‌باشد [۲۹]. همچنین برخلاف آنچه در پیش‌نویس ویرایش پنجم از مبحث دهم ذکر شده است، استفاده از اتصال صلب تیر به ستون جعبه‌ای فاقد ورق پیوستگی مجاز بوده و در قسمت ۵.۲.۴ به مزیت اقتصادی و سرعت ساخت اتصالات بدون ورق پیوستگی صحنه گذاشته شده و برای محاسبه ظرفیت خمشی در اتصال مذکور روابط (۴) و (۵) توصیه شده است. رابطه (۴) در AIJ مشابه با رابطه (۱) با استفاده از تئوری مفصل‌های گسیختگی به دست آمده است. با این حال مقایسه ظرفیت خمشی چند مدل مطالعه شده در این پژوهش با روابط (۱) و (۴) نشان داد که ظرفیت به دست آمده از رابطه (۴) حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر از ظرفیت به دست آمده از رابطه (۱) است. در قسمت ۵.۲.۴ از توصیه‌نامه طراحی اتصالات در سازه‌های فولادی ژاپن (AIJ) روابط مشابهی برای اتصال تیر کامپوزیت به ستون جعبه‌ای نیز بحث شده است [۲۹].

$$jM_p = M_0 \cdot b_c \cdot h_b \left(\frac{4x + h_b + t_f}{x^2} + \frac{2}{h_b - t_f} \right) + \quad (4)$$

$$2h_b \left(x - \frac{m \cdot b_c}{2x} \right)^2 \frac{b \cdot t_f \cdot \sigma_y}{b_c} - 4b \cdot t_f \cdot b \cdot \sigma_y x^4 - 4M_0 \cdot b_c^2 \cdot x - b_c^2 \left\{ 2M_0 (h_b + t_f) + m^2 \cdot b \cdot t_f \cdot b \cdot \sigma_y \right\} = 0 \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)، jM_p ظرفیت اسمی لنگر پلاستیک اتصال، M_0 برابر با $0.25 \cdot t_f \cdot \sigma_y$ ، b_c عرض وجه ستون، h_b مساوی با ارتفاع جان تیر، t_f معرف ضخامت بال تیر به اضافه ساق جوش، h_b مساوی با عرض بال تیر، m برابر با نصف اختلاف بین عرض وجه ستون و عرض بال تیر، $b \cdot t_f$ معرف ضخامت بال تیر، t_f نشان‌دهنده ضخامت وجه ستون، $b \cdot \sigma_y$ معرف تنش تسلیم مصالح فولادی ستون و σ_y نیز برابر با تنش تسلیم مصالح فولادی تیر است و کمیت x از حل معادله درجه چهار رابطه (۵) به دست می‌آید.

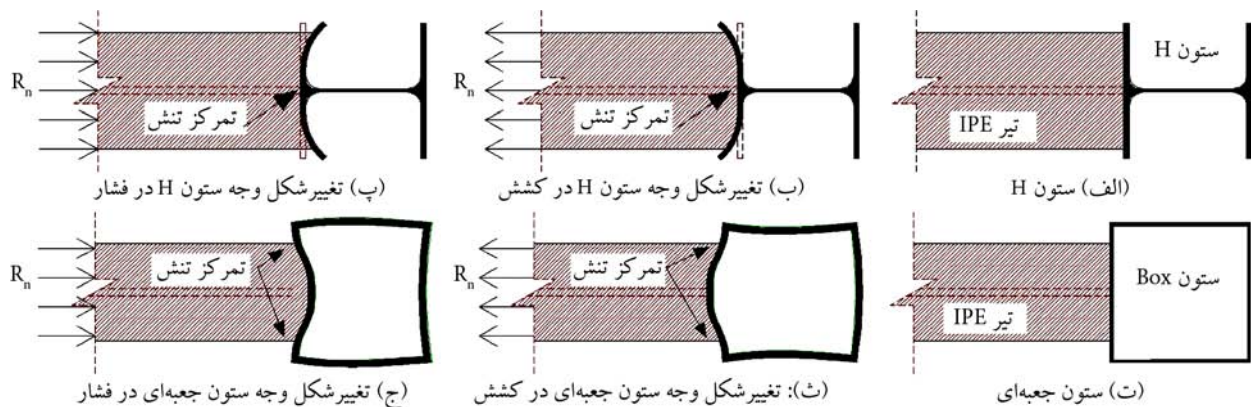
اتصالات از پیش تأیید شده می‌باشد، برای اتصال WUF-W ضوابطی ذکر شده است. از آن جمله، عمق تیر I شکل به ۹۲۰ میلی‌متر محدود شده است. همچنین حداقل نسبت دهانه به عمق تیر (L/d) در قاب‌های متوسط و ویژه به ترتیب ۵ و ۷ ذکر شده است [۱۲]. با این حال، مطالعات بیشتر در خصوص حداکثر عمق تیر و نسبت L/d در جریان است. به عنوان نمونه، حامدی و همکاران [۲۵] در ۱۳۹۹ طی یک پژوهش عددی نشان دادند که برای اتصال صلب پیچی به کمک زیرسری و روسری، افزایش کمینه‌ی L/d تا حدود ۳۰ درصد امکان‌پذیر است. نونز و همکاران [۲۶] در ۲۰۲۰ طی پژوهشی بر روی اتصال WUF-W تیر به ستون جعبه‌ای تو خالی نشان دادند که استفاده از سخت‌کننده خارجی در امتداد بال‌های تیر موجب ارتقای رفتار اتصال شده و امکان استفاده از این نوع اتصال صلب در نواحی لرزه‌ای وجود دارد. توئیزره و تاشکین [۲۷] در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که اتصال تیر IPE به یک ستون جعبه‌ای فاقد ورق پیوستگی تحت بارگذاری چرخه‌ای الزامات استاندارد Eurocode 3 را برآورده نکرده و در زمره اتصالات نیمه‌صلب طبقه‌بندی می‌شود. سپس با اضافه نمودن سخت‌کننده‌هایی نسبت به اصلاح اتصال اقدام نمودند. با این حال، اثر افزایش ضخامت وجه ستون و تغییر عمق تیر بر عملکرد اتصال مورد مطالعه نویسندگان قرار نگرفته است. شایان ذکر است در استاندارد Eurocode 3 [۲۸] بر اساس سختی دورانی اتصال تیر به ستون با مقطع H ، سه مدل اتصال تیر به ستون شامل صلب، نیمه‌صلب و مفصلی تعریف شده است. به دلیل مشابهت روش‌های اجرایی در کشورهای ایران و ژاپن، توجه به توصیه‌نامه طراحی اتصالات در سازه‌های فولادی ژاپن (AIJ) مفید به نظر می‌رسد. مطابق با ویرایش سال ۲۰۲۱ از این توصیه‌نامه، اتصالات صلب در سازه‌های فولادی دارای ستون جعبه‌ای در چهار مدل قابل استفاده هستند. اول اتصالات دارای ورق پیوستگی سراسری، دوم اتصالات دارای ورق پیوستگی داخلی، سوم اتصالات دارای ورق پیوستگی خارجی و چهارم، اتصالات فاقد ورق پیوستگی که برای هرکدام از این نوع اتصالات صلب ضوابط خاصی ذکر شده است [۲۹]. برای مثال،

۲- طرح مسئله، مواد و روش پژوهش

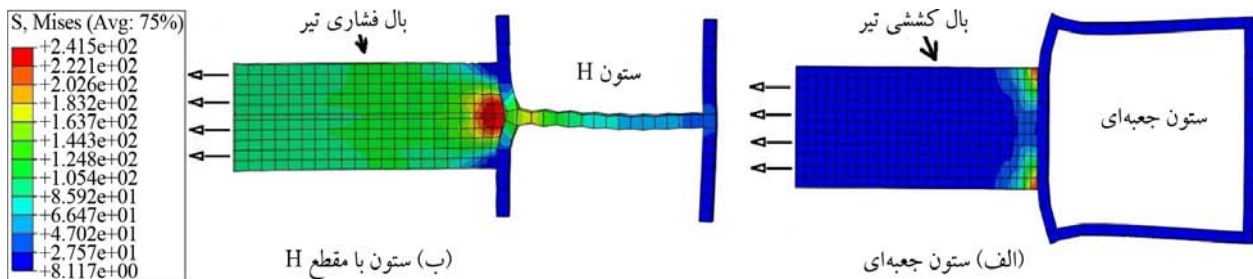
۲-۱- طرح مسئله

تحقیقات میدانی از تعدادی کارخانه‌های سازنده سازه‌های فولادی در ایران و بررسی منابع نشان داد که دو روش برای نصب ورق پیوستگی در ستون جعبه‌ای متداول‌تر است [۱]. در روش نخست و قدیمی‌تر، ابتدا ورق پیوستگی به سه وجه ستون جوش می‌شود. سپس وجه چهارم ستون به پلاک‌های حدود یک متری قطعه‌بندی شده و پس از نصب قطعه مربوط به چشمه اتصال به سه وجه دیگر، وجه چهارم ورق پیوستگی به قطعه مزبور جوش می‌شود. سپس پلاک‌های دیگر وجه چهارم با جوشکاری شیاری به یکدیگر متصل می‌شوند. روشن است که در این روش علاوه بر تحمیل هزینه‌های برشکاری و جوشکاری اضافی برای وجه چهارم ستون، جوشکاری ورق پیوستگی به وجه چهارم دستگیر بوده و به‌سختی انجام می‌شود و بازرسی جوش نیز به دلیل سخت بودن دسترسی چالش‌برانگیز است. همچنین، به دلیل جوشکاری شیاری با نفوذ کامل در قطعات پلاک شده وجه چهارم، در سازه تنش‌های پس‌ماند غیرضروری تولید می‌گردد که باعث کاهش ظرفیت ستون خواهد شد [۳۰]. در روش دوم و جدیدتر، برای اتصال وجه چهارم ورق پیوستگی به وجه چهارم ستون از روش جوشکاری سرباره الکتریکی استفاده می‌شود که ضمن تحمیل هزینه اضافی بر پروژه، به دلیل عدم دسترسی به محل جوشکاری، امکان بازرسی جوش سرباره الکتریکی نیز وجود ندارد [۱]. اگرچه در پیش‌نویس ویرایش پنجم مبحث دهم، احتمالاً با نگاهی به آیین‌نامه طراحی سازه‌های فولادی ژاپن (AIJ) [۲۹] استفاده از ورق پیوستگی سراسری به‌عنوان روشی برای اجتناب از چالش‌های مذکور مطرح شده است، اما به نظر می‌رسد که نصب ورق پیوستگی سراسری نیز به دلایل مختلف نظیر لزوم به‌کارگیری رده ضد پارگی لامیلار برای ورق پیوستگی سراسری و بیرون‌زدگی ورق پیوستگی سراسری از ستون، خالی از چالش نباشد. چالش‌هایی که ذکر شد، گوشه‌ای از انگیزه محققین و خصوصاً سازندگان سازه‌های فولادی برای ساخت ستون‌های فولادی جعبه‌ای بدون ورق

پیوستگی است؛ اما حذف ورق پیوستگی موجب کاهش سختی خمشی وجه ستون در قسمت میانی و در نتیجه توزیع نامتناسب تنش‌های کششی یا فشاری و نهایتاً ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های بال تیر می‌گردد [۳۱]. لذا تمرکز اصلی محققین بر تأمین سختی وجه ستون در امتداد بال‌های تیر است و یکی از ساده‌ترین راه‌ها، افزایش ضخامت وجه ستون است. همچنین توسعه روابط طراحی مربوط به اتصالات صلب بدون ورق پیوستگی در ستون جعبه‌ای توسط استاندارد AISC 341 [۷] توصیه شده است. در برخی آیین‌نامه‌های مختلف برای ضخامت وجه ستون‌های بدون ورق پیوستگی یک مقدار کمینه تعیین شده است. مطابق با روابط ۱-۳-۵ و ۱۰-۳-۸-۵ از ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و یا روابط E3-10 و E3-11 از آیین‌نامه AISC 341-10 [۶] که در روابط (۱) و (۲) قابل مشاهده بوده و مین حداقل ضخامت وجه ستون برای عدم نصب ورق پیوستگی هستند، عمق تیر تأثیری در محاسبه کمینه ضخامت وجه ستون ندارد. به دلیل عدم متداول بودن ستون جعبه‌ای در کشورهای اروپایی و آمریکایی، آیین‌نامه‌های اروپایی و آمریکایی نیز چندان به ستون جعبه‌ای نپرداخته‌اند و روابط ورق پیوستگی برای ستون‌های با مقطع H توسعه یافته است. ورق پیوستگی جهت کنترل توزیع کرنش‌های وجه ستون و جلوگیری از خمش موضعی وجه ستون در مقابل نیروی کششی و فشاری در محل اتصال بال تیر به وجه ستون مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱]. این در حالی است که رفتار چشمه اتصال در ستون جعبه‌ای و ستون با مقطع H متفاوت است [۱]. شکل (۱) طراحی ساده شده از تفاوت تغییر شکل وجه ستون بدون ورق پیوستگی با مقطع H و ستون جعبه‌ای را در مقابل نیروی کششی یا فشاری بال تیر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد محل تمرکز تنش در دو نمونه متفاوت است. شکل (۲) نیز تغییر شکل و تنش‌های دو مدل عددی فرضی از اتصال WUF-W دارای ستون جعبه‌ای و ستون با مقطع H را در دوران ۰/۰۰۵ رادیان با بزرگنمایی ۱۰۰ نشان می‌دهد که مبین تفاوت رفتار چشمه اتصال در دو نوع ستون است.

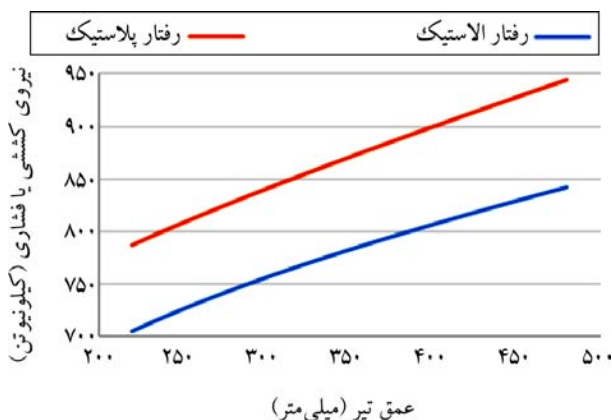


شکل (۱): طرحی از تغییر شکل و تنش در محل اتصال بدون ورق پیوستگی.



شکل (۲): تغییر شکل و تنش‌ها در محل اتصال دو مدل عددی.

متناظر با یک قاب فولادی کامل است. شکل (۴-الف) یک قاب را نشان می‌دهد که از نقاط عطف ستون طبقات جدا شده است. نظر به آنکه دو مثلث ABC و EFG متشابه هستند، رابطه (۱۱) دوران نظیر تغییر مکان جانبی قاب را نشان داده و لذا به منظور افزایش سرعت مدل‌سازی و پردازش عددی نمونه‌ها، به جای مدل‌سازی قاب کامل از نمونه ساده شده شکل (۴-ب) استفاده شده است.



شکل (۳): رابطه بیشینه نیروی وارد بر وجه ستون - عمق تیر D2.

روابط (۶) و (۷) مبین رابطه عمق تیر و لنگر الاستیک و روابط (۸) و (۹) نشان‌دهنده‌ی رابطه عمق تیر و بیشینه لنگر پلاستیک وارد بر وجه ستون هستند. رابطه (۱۰) نیز مبین نیروی کششی یا فشاری وارد بر وجه ستون است. نمودار شکل (۳) رابطه عمق تیر و نیروی کششی و فشاری وارد بر وجه ستون (کوپل نیرو) در محل بال کششی و فشاری تیر دسته D2 طبق جدول (۱) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش عمق تیر نیروی کششی و فشاری ناشی از لنگر خمشی تیر افزایش می‌یابد. از طرفی چنانچه منطبق ارائه شده برای طراحی ورق پیوستگی مبنی بر اهمیت میزان نیروی وارده بر وجه ستون مورد توجه قرار گیرد [۱ و ۳۱] به نظر می‌رسد کمیت عمق تیر نیز باید در روابط (۲) یا (۳) مؤثر باشد؛ بنابراین، جهت مطالعه اثر تغییر عمق تیر بر رفتار چرخه‌ای اتصال WUF-W به ستون جعبه‌ای فاقد ورق پیوستگی، در این مطالعه ۱۸ مدل اتصال فولادی مورد بررسی عددی در نرم‌افزار آباکوس قرار گرفته است. نمونه‌ها شامل دو نیم‌ستون و یک تیر طره بوده که مطابق با شکل (۴)

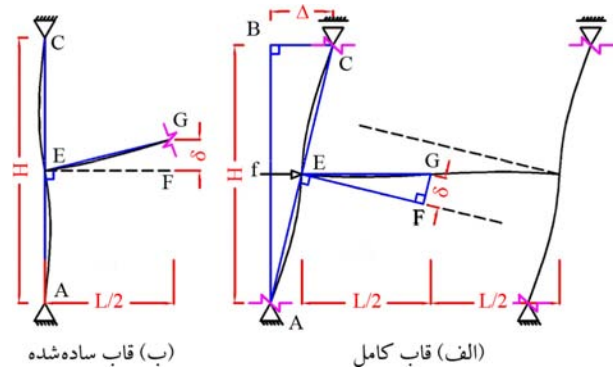
جدول (۱): مشخصات هندسی نمونه‌ها.

ورق پیوستگی	ستون		تیر		نمونه		
	t_{cp} (میلی‌متر)	t_c (میلی‌متر)	b_c (میلی‌متر)	b_f (میلی‌متر)	d (میلی‌متر)	نام نمونه	دسته بندی
۲۵	۱۵	۳۰۰	۱۶۰	۳۳۰	D1-1	D1	۱
ندارد	۲۵	۳۰۰	۱۶۰	۴۸۰	D1-2		۲
ندارد	۲۵	۳۰۰	۱۶۰	۴۳۰	D1-3		۳
ندارد	۲۵	۳۰۰	۱۶۰	۳۳۰	D1-4		۴
ندارد	۲۵	۳۰۰	۱۶۰	۲۸۰	D1-5		۵
ندارد	۲۵	۳۰۰	۱۶۰	۲۲۰	D1-6		۶
۲۵	۱۵	۳۰۰	۲۰۰	۳۳۰	D2-1	D2	۷
ندارد	۲۵	۳۰۰	۲۰۰	۴۸۰	D2-2		۸
ندارد	۲۵	۳۰۰	۲۰۰	۴۳۰	D2-3		۹
ندارد	۲۵	۳۰۰	۲۰۰	۳۳۰	D2-4		۱۰
ندارد	۲۵	۳۰۰	۲۰۰	۲۸۰	D2-5		۱۱
ندارد	۲۵	۳۰۰	۲۰۰	۲۲۰	D2-6		۱۲
۲۵	۱۵	۳۰۰	۱۲۰	۳۳۰	D3-1	D3	۱۳
ندارد	۲۵	۳۰۰	۱۲۰	۴۸۰	D3-2		۱۴
ندارد	۲۵	۳۰۰	۱۲۰	۴۳۰	D3-3		۱۵

$$\theta = \frac{\Delta}{H} = \frac{\delta}{L/2} \quad (11)$$

۲-۲- معرفی نمونه‌ها و تنظیمات مدل سازی

مشخصات هندسی ۱۸ نمونه مدل شده در جدول (۱) قابل مشاهده است. برای تمام نمونه‌ها طول تیر طره، طول ستون، عرض ستون، ضخامت بال تیر و ضخامت ورق اتصال جان، و به ترتیب برابر با ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۰۰، ۱۵ و ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده و نمونه‌ها در سه گروه دسته‌بندی شده‌اند که در هر گروه عرض بال تیر ثابت و عمق تیر تغییر می‌نماید. جهت مدل‌سازی رفتار مصالح از منحنی دوخطی استفاده شده است. تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش نهایی قطعات مختلف فولادی مطابق با مرجع صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۲۵۱ تا ۳۵۱ مگاپاسکال، تنش نهایی برابر با ۳۲۲ تا ۴۸۳ مگاپاسکال، کرنش نهایی برابر با ۰/۲ و ضریب پوآسون برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده و از المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای C3D8R و نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها استفاده گردیده است. در شکل (۵) تنظیمات بارگذاری، قيود و مش‌بندی مدل‌ها و در شکل (۶) بار چرخه‌ای اعمال شده به نمونه‌ها قابل مشاهده است. اگرچه بارگذاری نمونه تا دوران ۰/۰۴ رادیان کافی بود، اما جهت بررسی رفتار نمونه‌ها، بارگذاری



شکل (۴): ساده‌سازی نمونه‌ها.

در روابط (۶) تا (۱۱) M_p لنگر پلاستیک، M_y لنگر الاستیک، F_y تنش تسلیم فولاد، S اساس مقطع الاستیک، Z اساس مقطع پلاستیک، θ تغییرشکل دورانی اتصال، Δ تغییر مکان نسبی طبقه، H ارتفاع طبقه، L دهانه قاب از محور ستون‌ها و δ خیز نوک تیر است.

$$M_y = F_y S \quad (6)$$

$$S = \frac{bd^2}{6} - \frac{(b-t_w)(d-2t_f)^3}{6d} \quad (7)$$

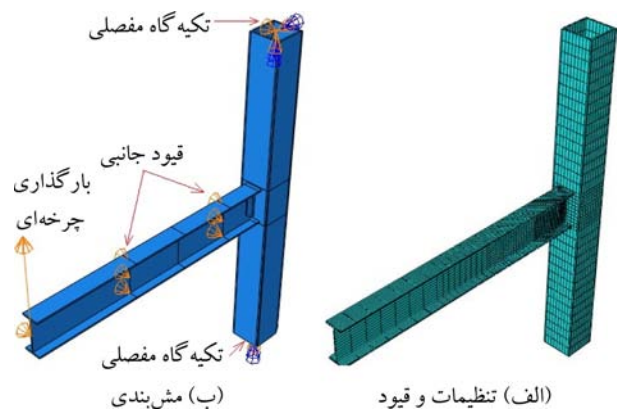
$$M_p = F_y Z \quad (8)$$

$$Z = bt_f(d-t_f) + 0.25t_w(d-2t_f)^2 \quad (9)$$

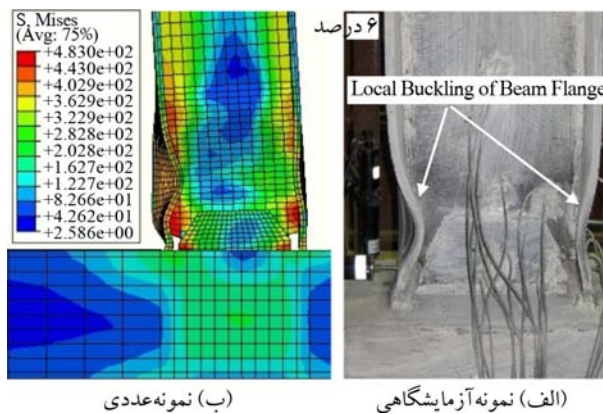
$$F = \frac{M}{d} \quad (10)$$

تا دوران ۰/۰۶ رادیان ادامه پیدا نمود. ضخامت وجوه ستون در نمونه‌های دارای ورق پیوستگی برابر با ۱۵ میلی‌متر و در نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی، بر اساس روابط ۱۰-۳-۸ و ۱۰-۳-۴ و ۵-۸-۳-۱۰ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران (ویرایش چهارم) محاسبه شده و پس از حدود ۲۵ درصد افزایش جهت تضمین رفتار مناسب، برابر با ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور محاسبه صلیبیت نمونه‌ها، تمام نمونه‌ها تا تغییر مکان ۱۵۹ میلی‌متر که معادل با دوران ۰/۰۶ رادیان است، تحت بارگذاری تک‌آهنگ (موتونیک) نیز قرار گرفته‌اند. تنظیمات مدل در بارگذاری یکنواخت، مشابه با بارگذاری چرخه‌ای است.

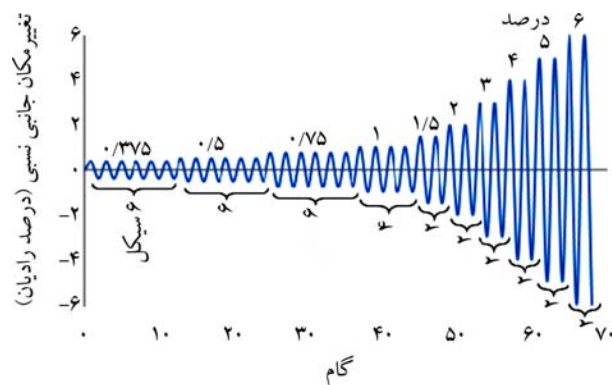
تا دوران ۰/۰۶ رادیان ادامه پیدا نمود. ضخامت وجوه ستون در نمونه‌های دارای ورق پیوستگی برابر با ۱۵ میلی‌متر و در نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی، بر اساس روابط ۱۰-۳-۸ و ۱۰-۳-۴ و ۵-۸-۳-۱۰ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران (ویرایش چهارم) محاسبه شده و پس از حدود ۲۵ درصد افزایش جهت تضمین رفتار مناسب، برابر با ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور محاسبه صلیبیت نمونه‌ها، تمام نمونه‌ها تا تغییر مکان ۱۵۹ میلی‌متر که معادل با دوران ۰/۰۶ رادیان است، تحت بارگذاری تک‌آهنگ (موتونیک) نیز قرار گرفته‌اند. تنظیمات مدل در بارگذاری یکنواخت، مشابه با بارگذاری چرخه‌ای است.



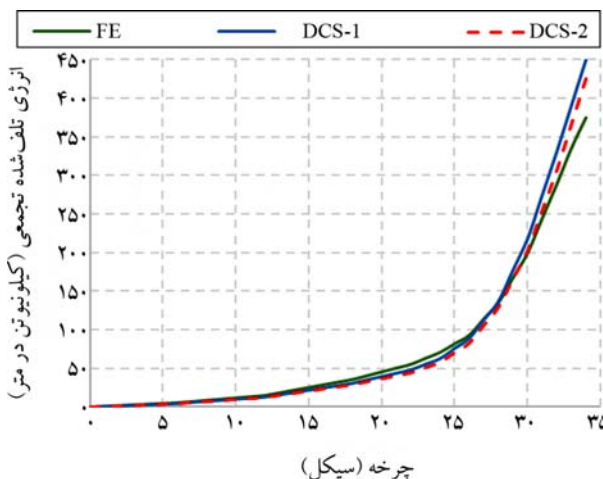
شکل (۵): مدل‌سازی نمونه‌ها.



شکل (۶): تغییر شکل و تنش.



شکل (۷): دستورالعمل بارگذاری طبق آیین‌نامه AISC 341-16.



شکل (۸): انرژی تلف شده تجمعی دو نمونه آزمایشگاهی و عددی.

۴-۲- راستی آزمایی

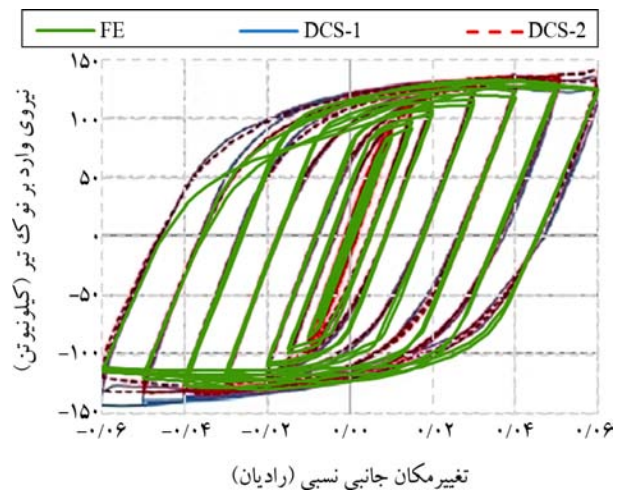
جهت راستی آزمایی از پژوهش‌های صنایعی نیا و همکاران [۳۲] استفاده شد. شکل (۷) نمونه تغییر شکل یافته با نام DCS از پژوهش مذکور و همچنین مدل عددی تغییر شکل یافته از آن در دوران

قاب‌های خمشی متوسط و ویژه را، عدم کاهش قابل توجه مقاومت اتصالات تا دوران‌های به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۴ عنوان نموده است [۲].

۳-۱- منحنی‌های هیستریزس، پوش و تغییر شکل نمونه‌ها

در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) به ترتیب منحنی‌های هیستریزس هر یک از نمونه‌ها در قالب سه دسته‌بندی جدول (۱) قابل مشاهده است. بررسی منحنی‌های هیستریزس نشان می‌دهد که تمام ۱۸ نمونه الزامات مبحث دهم برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه را ارضا می‌نمایند؛ یعنی بدون کاهش قابل توجه مقاومت توانایی نیل به دوران ۰/۰۴ رادیان را دارا هستند تا دوران ۰/۰۱ رادیان رفتاری تقریباً الاستیک داشته و از دوران ۰/۰۱ رادیان تا حداقل دوران ۰/۰۴ رفتاری پلاستیک دارند. با این حال، لنگر قابل تحمل در هیچ‌یک از نمونه‌های بدون ورق پیوستگی در دوران ۰/۰۱ رادیان که همان حد رفتار الاستیک است، به محدوده ۸۰ درصد لنگر پلاستیک تیر نمی‌رسند.

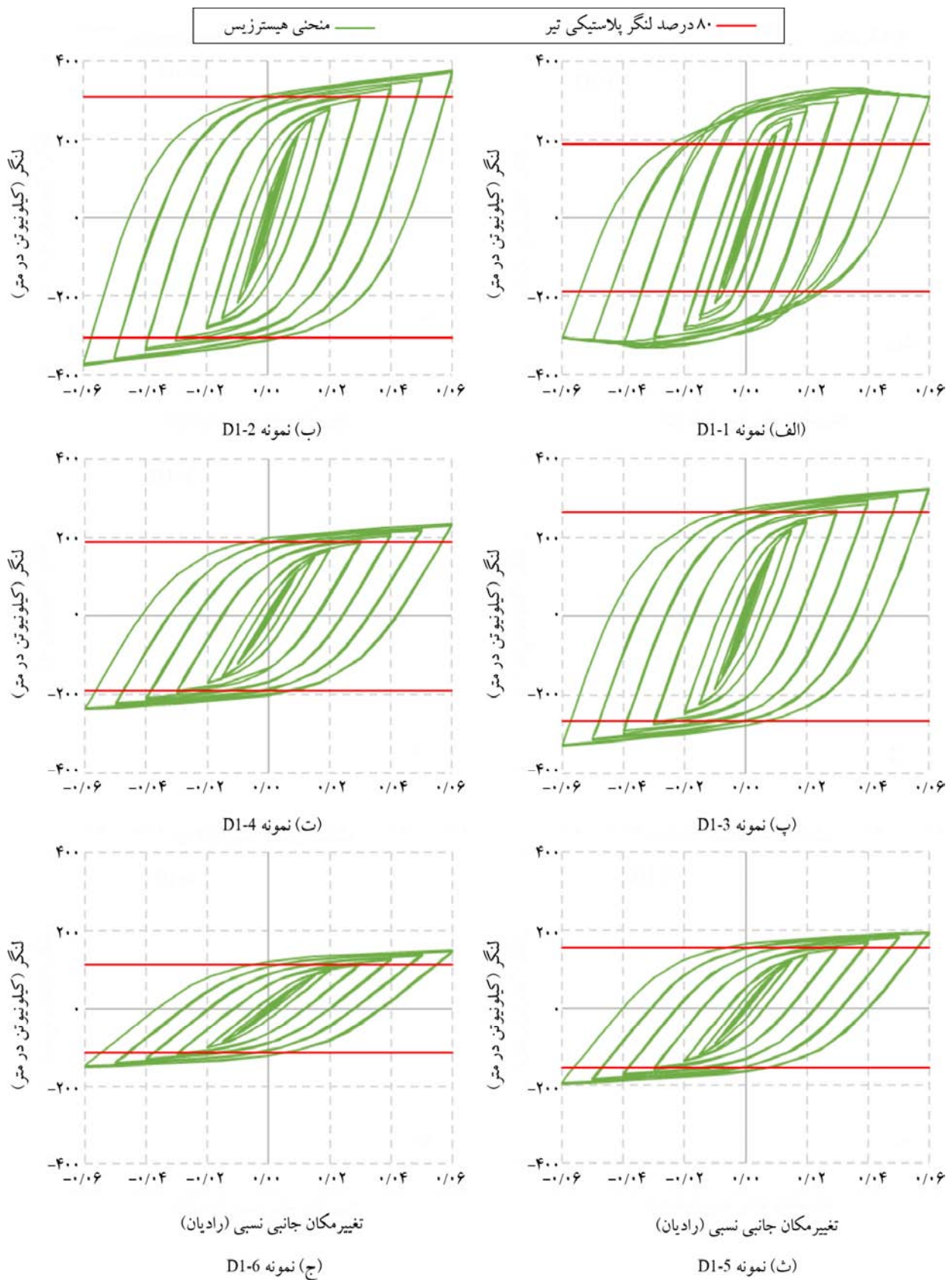
مطابق با استاندارد Eurocode 3 ظرفیت دورانی نهایی اتصال صلب به نسبت ارتفاع ستون به ارتفاع تیر (h_c/h_b) وابسته است [۲۸]؛ بنابراین کاهش نسبت h_c/h_b که با فرض ثابت بودن مقطع ستون به معنی افزایش عمق تیر است، مبین کاهش ظرفیت دورانی مورد انتظار برای اتصال می‌باشد و برخلاف استاندارد AISC یا مقررات ملی ایران، برای ظرفیت دورانی اتصال عددی ثابتی در نظر گرفته نشده است. با این حال بررسی نمودارهای شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) چنین رویکردی را تأیید نمی‌کند. ملاحظه می‌گردد که با وجود کاهش نسبت h_c/h_b ظرفیت دورانی اتصال تغییر قابل توجهی نمی‌کند. در نتیجه به نظر می‌رسد که رویکرد استاندارد AISC و مبحث دهم به واقعیت نزدیک‌تر باشد. همچنین در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) به ترتیب حالت تغییر شکل یافته و کانتور تنش فون میسز در دوران نظیر تغییر مکان جانبی برابر با ۰/۰۴ رادیان برای هر یک از نمونه‌ها بر اساس دسته‌بندی جدول (۱) قابل مشاهده است.



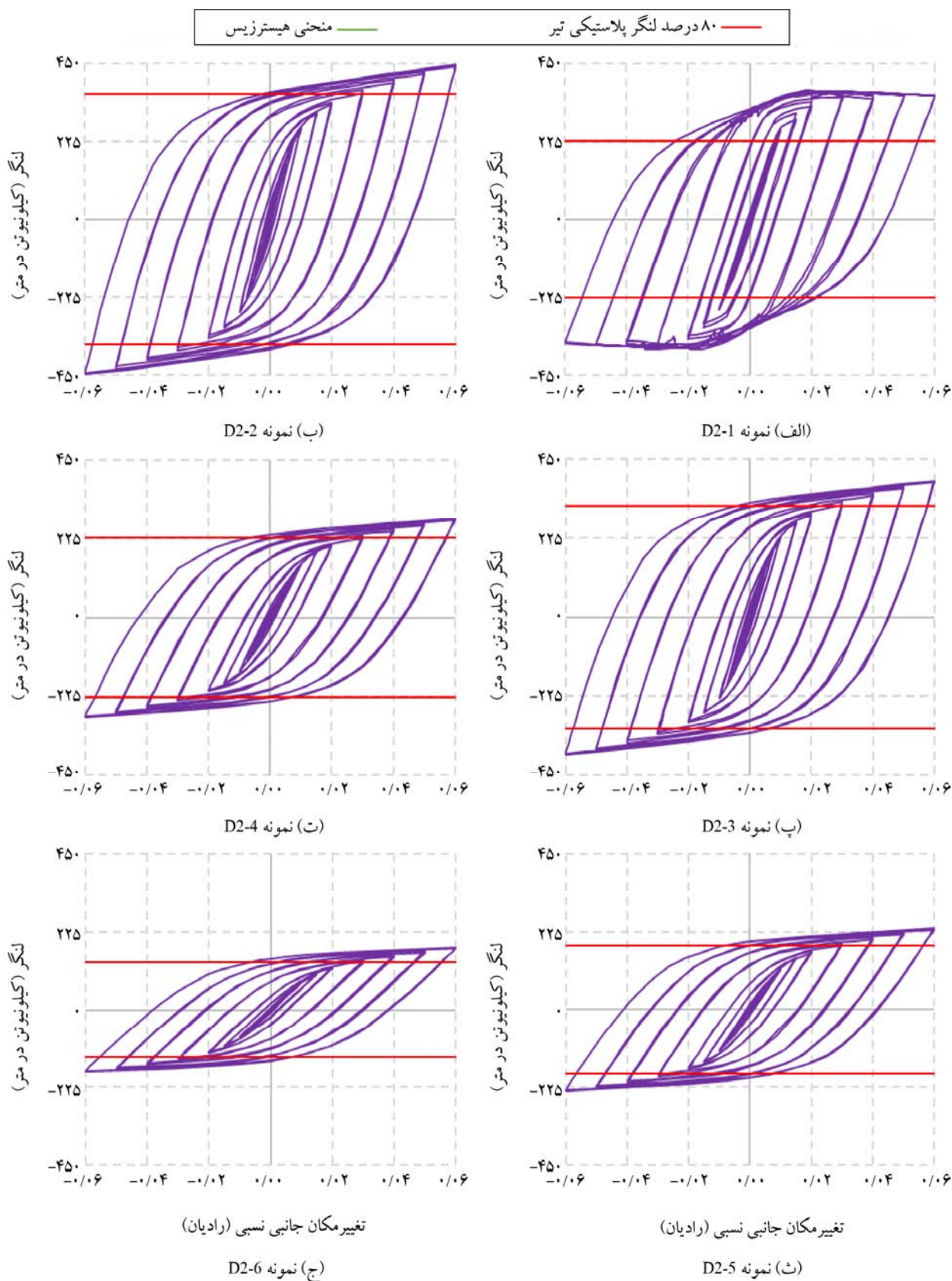
شکل (۹): منحنی هیستریزس نمونه عددی و دو آزمایش تجربی.

۳- نتایج و بحث در خصوص نتایج

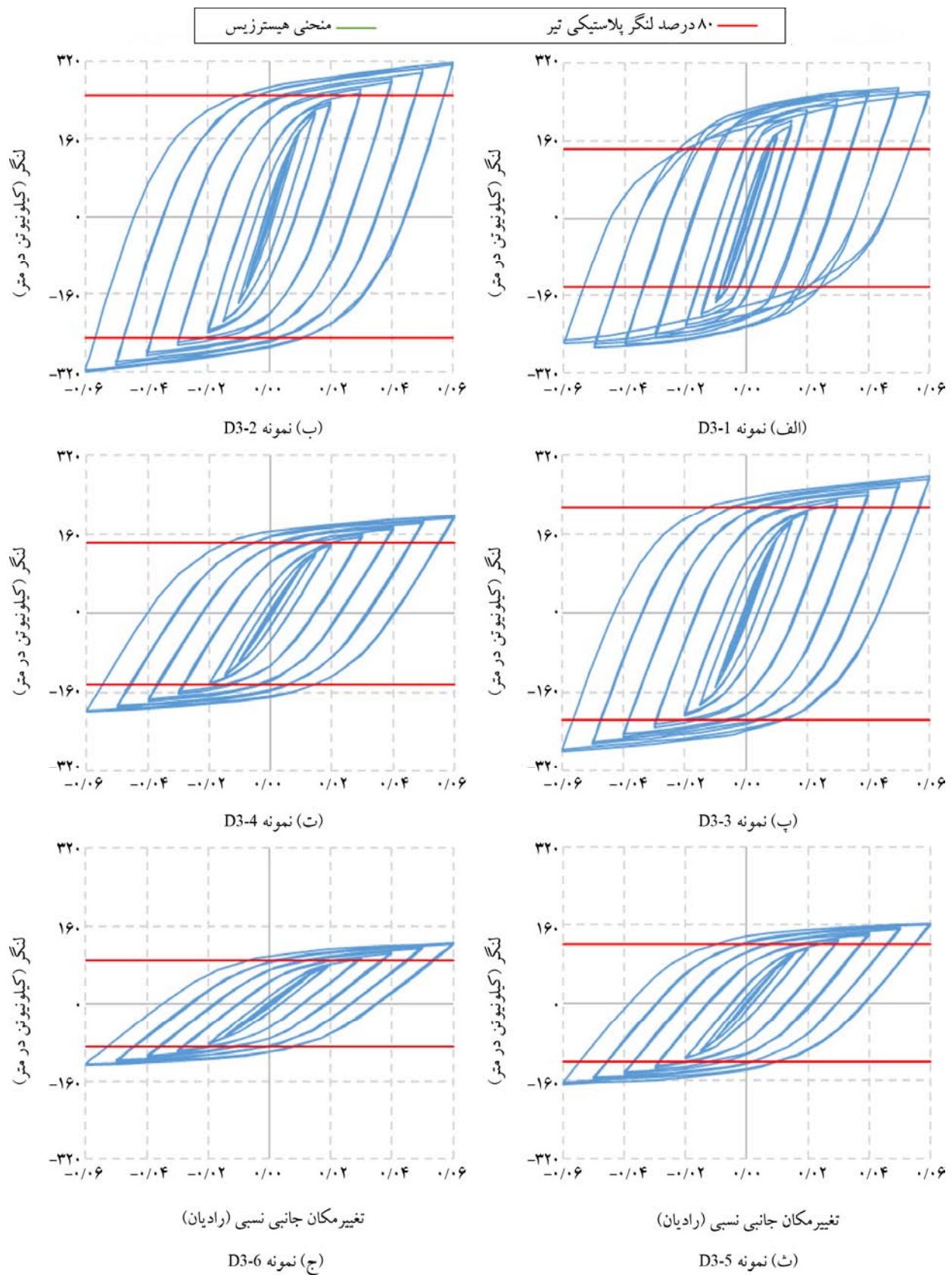
نتایج به دست آمده از تحلیل نمونه‌ها در قالب منحنی‌های هیستریزس، پوش منحنی هیستریزس، کانتورهای تنش در نمونه تغییر شکل یافته، شکل‌پذیری هر نمونه و کرنش‌های رخ داده در محل اتصال بال تیر به وجه ستون و همچنین بحث در خصوص هر کدام از موارد مذکور است. اگرچه مطابق با آیین‌نامه AISC 358-16 و همچنین مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران تمام نمونه‌ها جزو اتصالات صلب از پیش تأیید شده از نوع اتصال WUF-W هستند اما نظر به اهداف پژوهش، رفتار هر اتصال مطابق با آیین‌نامه AISC 341-16 بررسی شده است. مطابق با ضوابط آیین‌نامه مذکور، هر اتصال صلب باید توانایی تحمل دوران نظیر تغییر مکان جانبی برابر با ۰/۰۴ رادیان برای قاب‌های خمشی ویژه و ۰/۰۲ رادیان برای قاب‌های خمشی متوسط را با دارا بودن حداقل ۸۰ درصد ظرفیت خمشی پلاستیک تیر دارا باشند. البته در تفسیر دستورالعمل AISC 341 ذکر شده است که برای اتصالات صلب در قاب‌های خمشی ویژه باید ۷۵ درصد از دوران در محدوده فرار رجاعی رخ دهد. در مبحث دهم نیز برای قاب‌های خمشی ویژه همین تعبیر استفاده شده است. همچنین محل مفصل پلاستیک در بال تیر و نزدیک وجه ستون تعیین شده است. مبحث دهم مقررات ملی ایران با ارائه یک تعریف کیفی، شرط قابل قبول بودن اتصال صلب در



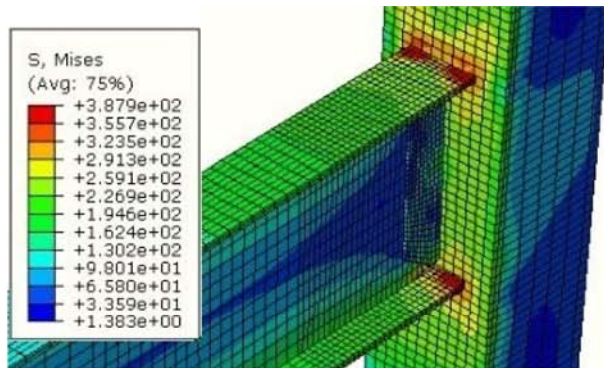
شکل (۱۰): منحنی هیستریزس نمونه‌های دسته ۱ (عرض بال تیر برابر با ۱۶۰ میلی‌متر).



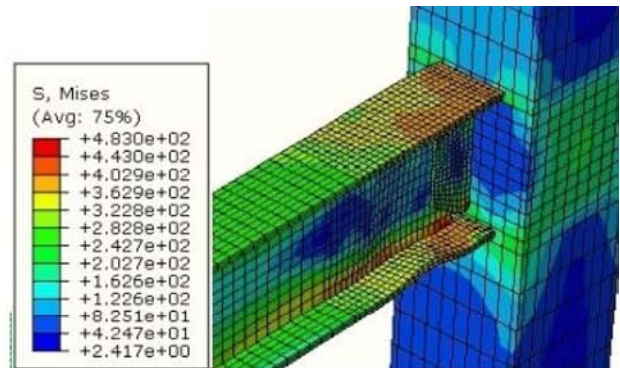
شکل (۱۱): منحنی هیستریزس نمونه‌های دسته ۲ (عرض بال تیر برابر با ۲۰۰ میلی‌متر).



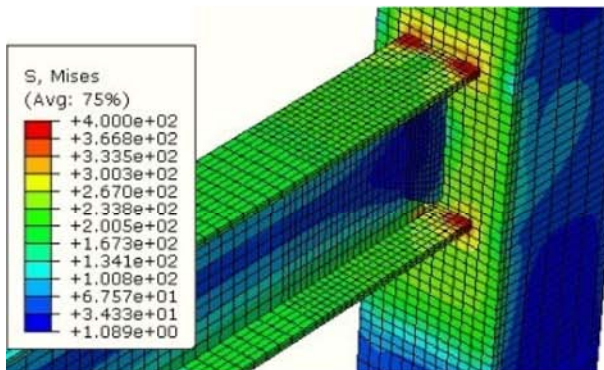
شکل (۱۲): منحنی هیستریزس نمونه‌های دسته ۳ (عرض بال تیر برابر با ۱۲۰ میلی‌متر).



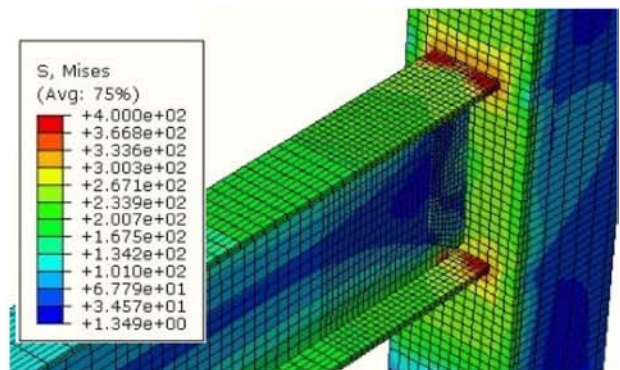
نمونه D1-2 (ب)



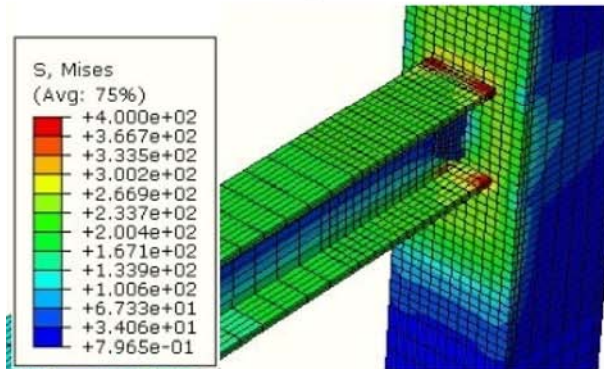
نمونه D1-1 (الف)



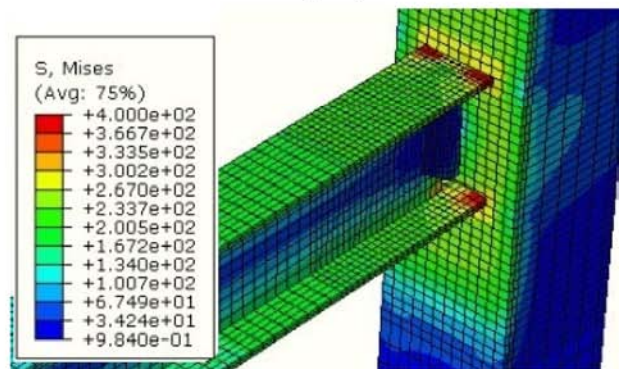
نمونه D1-4 (ت)



نمونه D1-3 (پ)

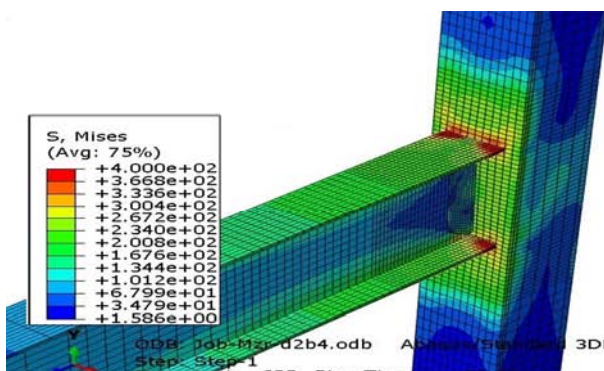


نمونه D1-6 (ج)

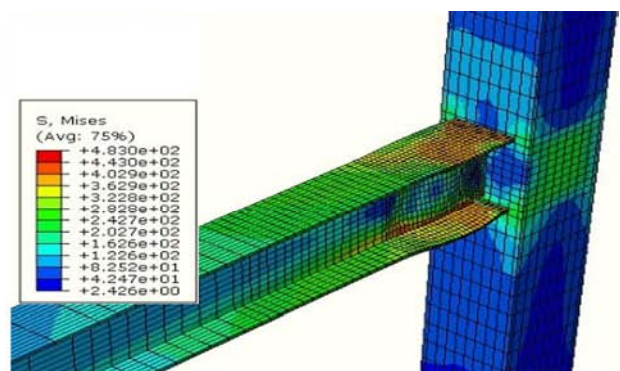


نمونه D1-5 (ث)

شکل (۱۳): تغییر شکل و کانتور تنش فون میسز برای نمونه‌های دسته ۱ (عرض بال تیر برابر با ۱۶۰ میلی‌متر) در دوران ۰/۰۴ رادیان.

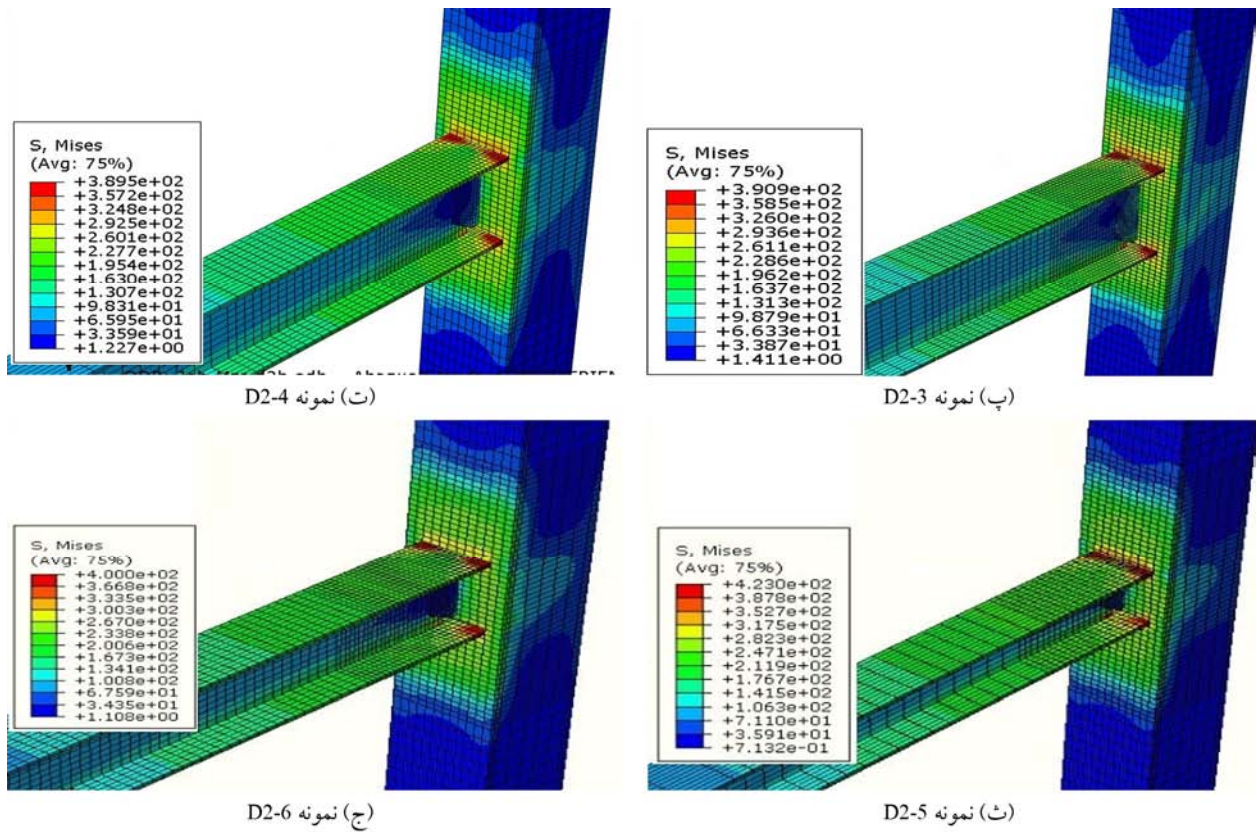


نمونه D2-2 (ب)

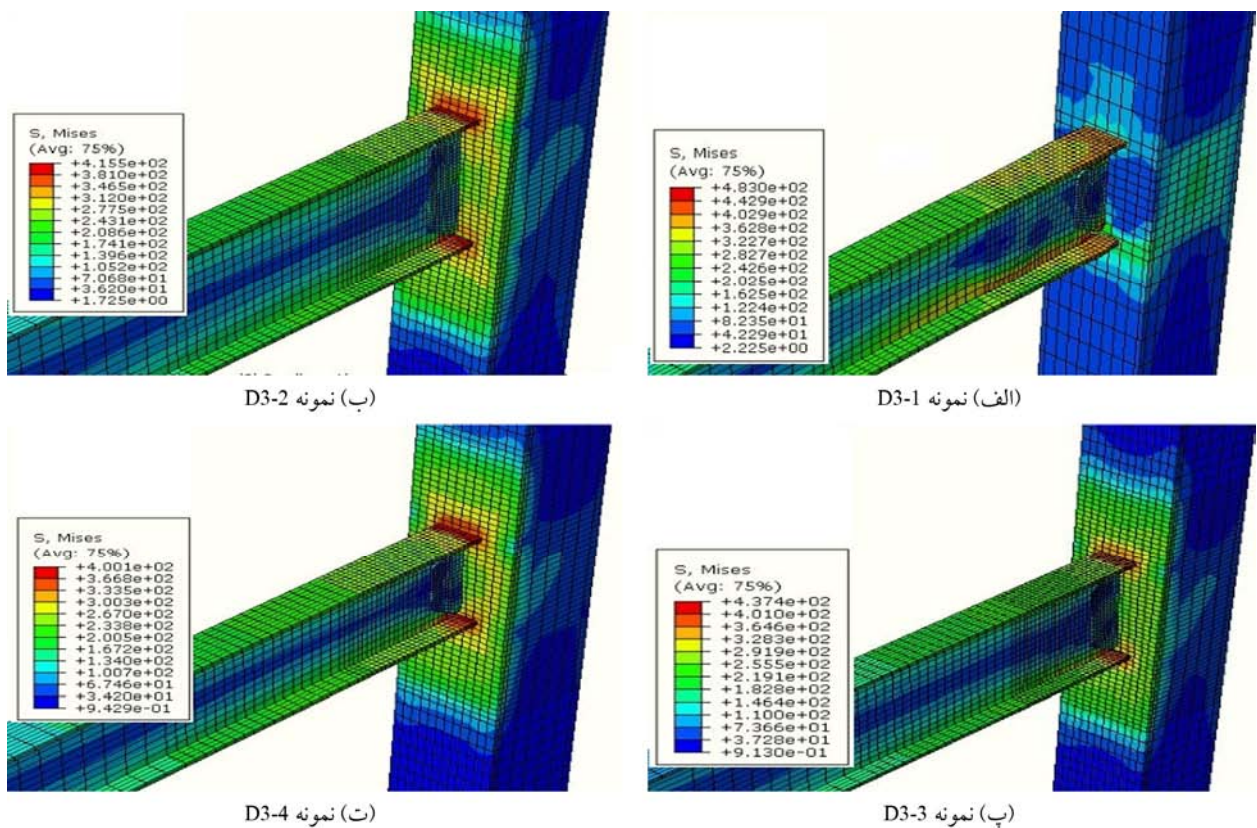


نمونه D2-1 (الف)

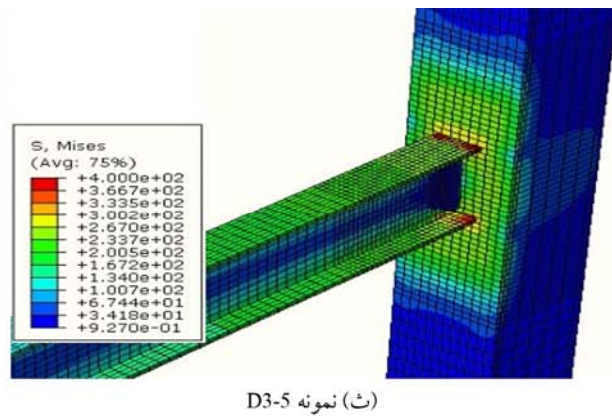
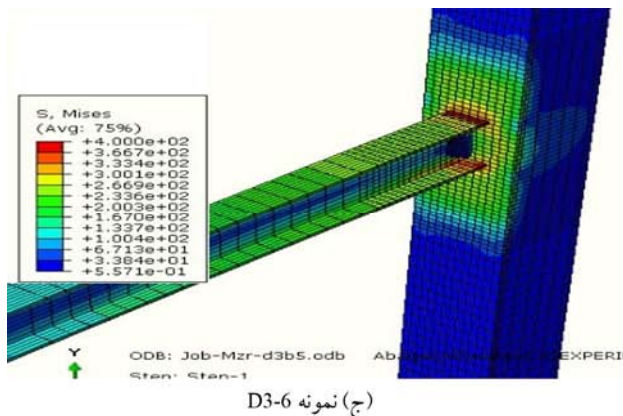
شکل (۱۴): تغییر شکل و کانتور تنش فون میسز برای نمونه‌های دسته ۲ (عرض بال تیر برابر با ۲۰۰ میلی‌متر) در دوران ۰/۰۴ رادیان.



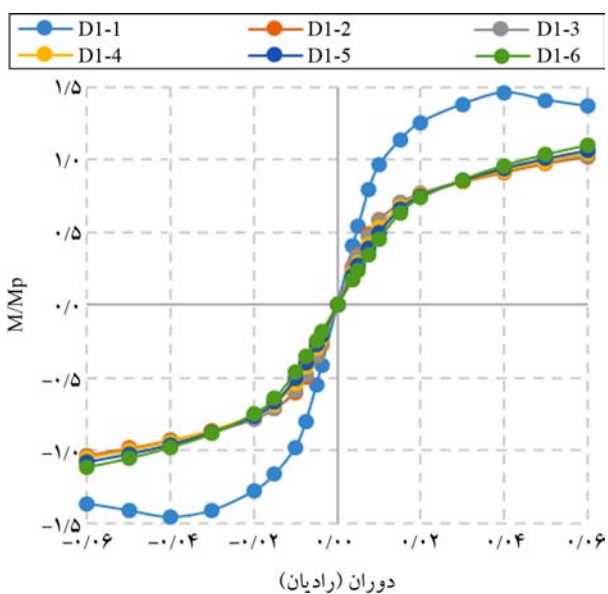
ادامه شکل (۱۴).



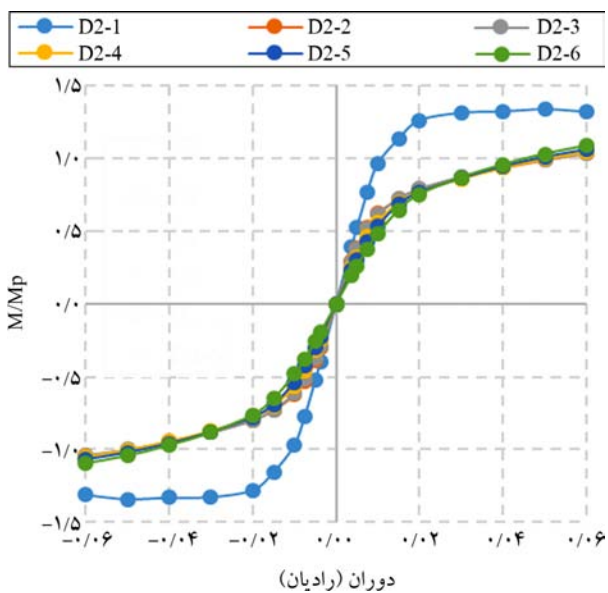
شکل (۱۵): تغییر شکل و کانتور تنش فون میسز برای نمونه‌های دسته ۳ (عرض بال تیر برابر با ۱۲۰ میلی‌متر) در دوران ۰/۰۴ رادیان.



ادامه شکل (۱۵).



شکل (۱۶): پوش منحنی هیستریزس نمونه‌های دسته ۱ (نرمال شده).

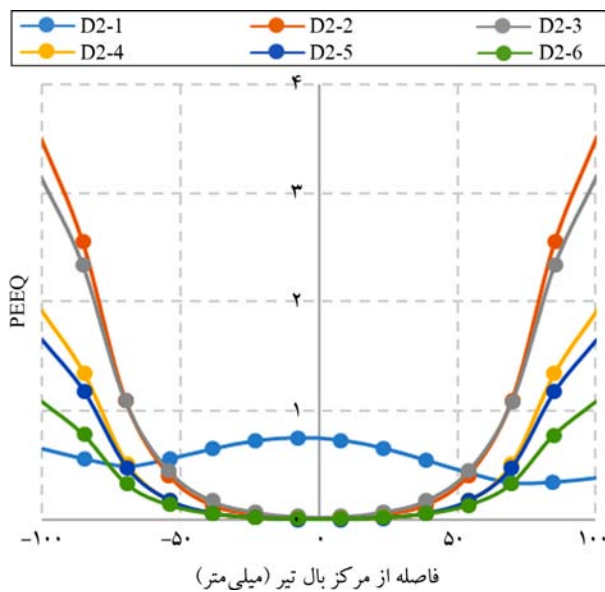


شکل (۱۷): پوش منحنی هیستریزس نمونه‌های دسته ۲ (نرمال شده).

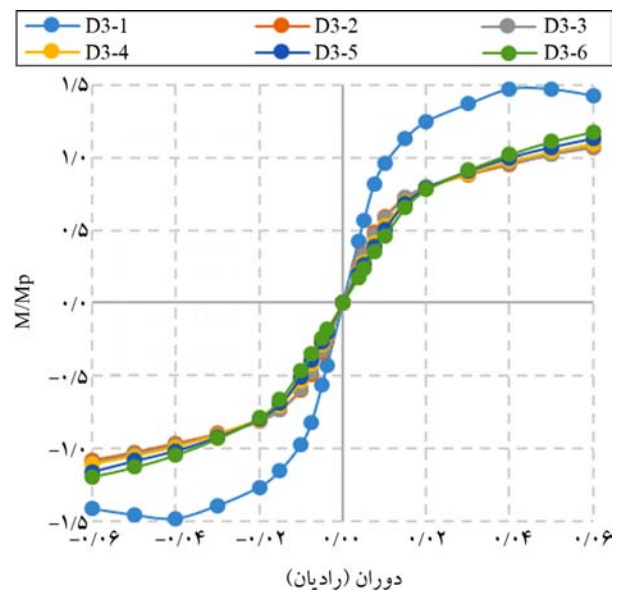
توزیع تنش‌ها و مود خرابی تمام نمونه‌ها در دوران‌های ۰/۰۱ رادیان و ۰/۰۲ رادیان نیز کنترل شده‌اند. با عنایت به شکل نمونه‌های بدون ورق پیوستگی واضح است که نمونه‌های مذکور دچار تمرکز تنش در گوشه‌های بال تیر هستند. همچنین با وجود بروز رفتار پلاستیک در تمام نمونه‌ها، قضاوت درباره تشکیل مفصل پلاستیک در نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی چندان ساده نیست؛ زیرا به دلیل عدم وجود ورق پیوستگی تنش‌های نسبتاً زیادی در وجه ستون به وجود آمده است. مطابق با بخش E3.6b از آیین‌نامه AISC 341-16 تمام نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی باید بدون افت بیشتر از ۲۰ درصد در مقاومت، توانایی تحمل تغییر شکل تا حداقل دوران ۰/۰۴ رادیان را دارا باشند [۷]؛ بنابراین به نظر می‌رسد که اتصالات مذکور با وجود چالش‌هایی درباره تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه بحرانی تیر قابلیت استفاده در قاب‌های خمشی ویژه را دارا هستند.

در خصوص محل تشکیل مفصل پلاستیک، به نظر می‌رسد که در اتصالات دارای ورق پیوستگی محل تشکیل مفصل پلاستیک با وجه ستون کمی فاصله دارد که با توجه به خطر شکست ترد در ناحیه جوش بال تیر به وجه ستون، مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

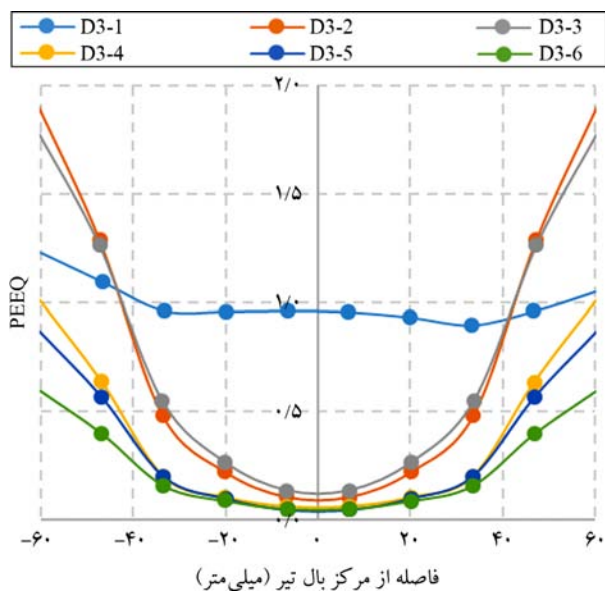
در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) پوش منحنی هیستریزس نرمال شده برای هر دسته از جدول (۱) قابل ملاحظه است که با بررسی آن به نظر می‌رسد که بین عمق تیر (d) و رفتار هیستریزس نمونه‌ها ارتباطی وجود ندارد؛ اما با دقت در شکل‌های (۱۹)، تا (۲۱) که معرف کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال بال تیر به وجه ستون



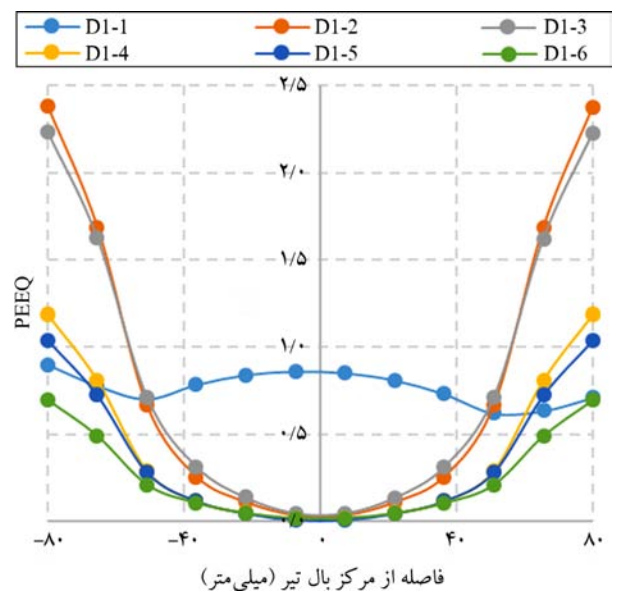
شکل (۲۰): کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال بال تیر مدل های D2.



شکل (۱۸): پوش منحنی هیستریزس نمونه های دسته ۳ (نرمال شده).



شکل (۲۱): کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال بال تیر مدل های D3.

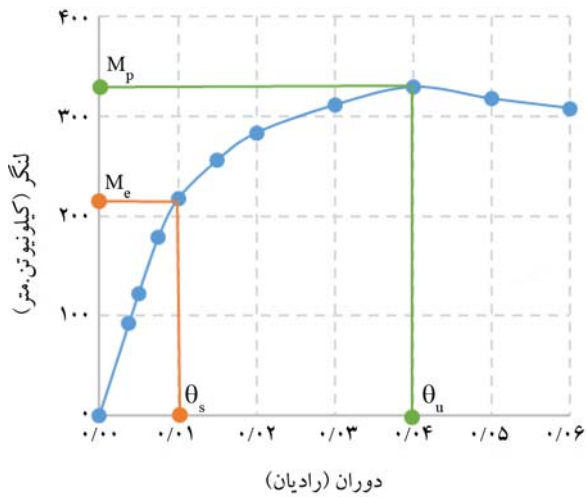


شکل (۱۹): کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال بال تیر مدل های D1.

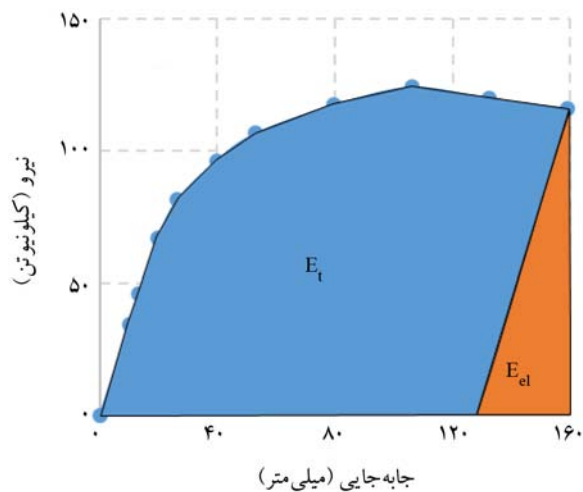
با توجه به مجموعه نتایج به دست آمده از منحنی های هیستریزس، کانتور تنش ها و کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال بال تیر به وجه ستون، به نظر می رسد که اگرچه تمام نمونه ها حداقل الزامات آیین نامه مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و همچنین ضوابط آیین نامه AISC 341 را ارضا می نمایند اما منحنی هیستریزس تولید شده در نمونه های دارای ورق پیوستگی در مقایسه با نمونه های مشابه بدون ورق پیوستگی دارای مساحت محصور بیشتر و افت مقاومت در چرخه های انتهایی هستند که مبین

در دوران ۰/۰۴ رادیان برای هر دسته از جدول (۱) است، به نظر می رسد که با کاهش عمق تیر، توزیع کرنش پلاستیک معادل در طول محل اتصال بال تیر به وجه ستون یکنواخت تر می شود. شایان ذکر است که در دوران ۰/۰۲ رادیان نیز تقریباً همین نتایج برای توزیع کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال تیر به ستون مشاهده شد. با این حال، مشاهده گردید که در دوران ۰/۰۱ رادیان، توزیع کرنش پلاستیک معادل در طول محل اتصال تیر به ستون یکنواخت تر است.

است، مقدار شاخص شکل پذیری متداول و شاخص شکل پذیری نامان برای نمونه D1-1 مطابق با نمودارهای شکل (۲۲) به ترتیب برابر با ۵/۳ و ۳/۹۴ به دست می‌آید.



(الف) شاخص شکل پذیری متداول



(ب) شاخص شکل پذیری نامان جیانگ

شکل (۲۲): شاخص شکل پذیری برای نمونه D1-1.

مطابق با استاندارد Eurocode 3 و با توجه به شکل (۲۰) به شرطی می‌توان یک اتصال را صلب محسوب نمود که در ناحیه ۱ از نمودار شکل (۲۳) قرار داشته باشد. ناحیه ۲ اتصالات نیمه‌صلب و محدوده‌ی ۳ معرف اتصالات مفصلی است [۲۸]. برای محاسبه سختی دورانی اتصال نیز ضوابطی عنوان شده است. با این وجود، روابط موجود در Eurocode 3 تنها برای اتصالات دارای ستون با مقطع H قابل استفاده است. در این پژوهش، برای محاسبه صلیبت

تشکیل مفصل پلاستیک در تیر بوده و نشان‌دهنده رفتار مناسب‌تری است. همچنین توزیع تنش‌ها در محل اتصال بال تیر به وجه ستون در نمونه‌های دارای ورق پیوستگی تقریباً یکنواخت است که نشان‌دهنده‌ی رسیدن تمام طول محل اتصال به حالت پلاستیک قبل از گسیختگی است. در بین نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی نیز پوش نرمال شده منحنی چرخه‌ای وابستگی مشهودی به عمق تیر ندارد. با این حال، مطابق با نمودارهای شکل‌های (۱۹) تا (۲۱)، افزایش عمق تیر موجب توزیع نامناسب‌تر تنش‌ها در محل اتصال بال تیر به وجه ستون و ایجاد تمرکز تنش در گوشه بال‌های تیر می‌گردد و با کاهش حدود ۴۶ درصدی عمق تیر، کرنش پلاستیک معادل حدود ۵۵ درصد کاهش یافته و یکنواخت‌تر می‌گردد؛ بنابراین به نظر می‌رسد که می‌توان جهت منظور نمودن اثر عمق تیر، در رابطه ۱۰-۸-۴ مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران یک ضریب اصلاحی در نظر گرفت. این ضریب اصلاحی باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود که عمق تیر و حداقل ضخامت وجه ستون رابطه‌ای مستقیم با یکدیگر پیدا نمایند.

۳-۲- شکل پذیری و صلیبت نمونه‌ها

برای بررسی شکل پذیری نمونه‌ها از شاخص متعارف شکل پذیری که در رابطه (۱۲) تعریف شده استفاده می‌شود. جهت در نظر گرفتن شکل پذیری بر پایه مفهوم جذب انرژی نیز از شاخص نامان و جیانگ [۳۳] استفاده شده است که در رابطه (۱۳) قابل مشاهده است.

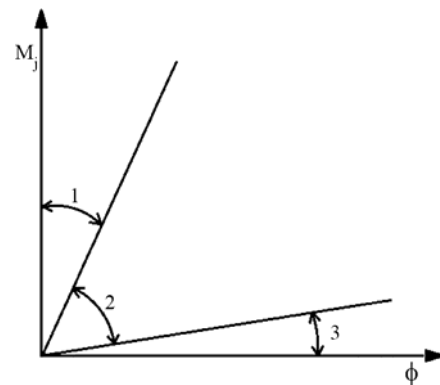
$$\mu = \theta_u / \theta_s \quad (12)$$

$$\mu_n = \frac{1}{2} \left(\frac{E_t}{E_{el}} + 1 \right) \quad (13)$$

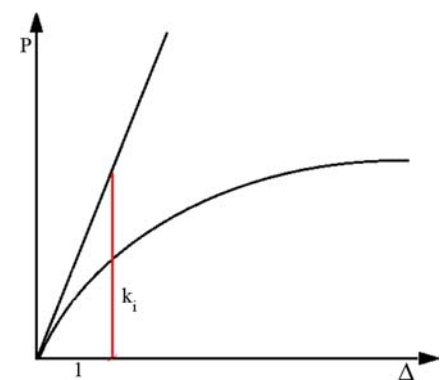
در رابطه (۱۲)، μ نشان‌دهنده‌ی شاخص شکل پذیری، θ_s دوران متناظر با لنگر الاستیک و θ_u دوران نهایی اتصال است. همچنین در رابطه (۱۳)، μ_n شاخص شکل پذیری نامان، E_t کل سطح زیر نمودار منحنی بار-تغییر شکل و E_{el} سطح زیر قسمت باربرداری منحنی بار-تغییر شکل است. برای مثال، با توجه به شکل (۲۲) که پوش منحنی هیستریزس یکی از نمونه‌های دسته ۱

جدول (۲): شکل پذیری و صلیبت نمونه‌ها.

صلیبت (درصد)	شکل پذیری		نمونه		
	رابطه ۱۱	رابطه ۱۰	نام نمونه	دسته بندی	ردیف
۹۲	۳/۹	۵/۳	D1-1	D1	۱
۴۶	۳/۱	۷	D1-2		۲
۴۶	۳/۱	۶	D1-3		۳
۴۷	۳	۵	D1-4		۴
۴۹	۲/۸	۴	D1-5		۵
۵۳	۲/۳	۳/۳	D1-6		۶
۹۰	۲/۶	۵	D2-1	D2	۷
۵۵	۳/۷	۸	D2-2		۸
۵۲	۳/۸	۷/۵	D2-3		۹
۵۳	۳/۴	۶	D2-4		۱۰
۵۶	۳	۴/۷	D2-5		۱۱
۵۹	۲/۶	۴	D2-6		۱۲
۹۴	۲	۵/۳	D3-1	D3	۱۳
۴۳	۳/۳	۸	D3-2		۱۴
۴۴	۳/۱	۷	D3-3		۱۵
۴۵	۲/۷	۶/۱	D3-4		۱۶
۴۸	۲/۵	۵	D3-5		۱۷
۵۳	۲/۲	۴/۲	D3-6		۱۸



شکل (۲۳): طبقه بندی اتصالات صلب، نیمه صلب و مفصلی [۲۸].



شکل (۲۴): تعیین درصد صلیبت برای اتصالات صلب [۳۳].

با عنایت به شکل (۲۴) با محاسبه سختی تیر و سختی ستون‌ها به دست آمده است. I_c ، I_b به ترتیب برابر با ممان اینرسی تیر و ممان اینرسی ستون، L_b طول تیر طره، L_c فاصله دو نقطه عطف ستون‌ها و E برابر با مدول الاستیسیته فولاد است.

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که شکل پذیری نمونه‌های بدون ورق پیوستگی تفاوت چندانی با نمونه‌های دارای ورق پیوستگی ندارد. با این حال، با توجه به شکل تغییر شکل یافته‌ی نمونه‌ها به نظر می‌رسد که شکل پذیری نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی تا حدودی ناشی از تغییر شکل وجه ستون است که به روشنی رفتاری نامطلوب تلقی می‌شود [۲]. به منظور محاسبه صلیبت، تمام نمونه‌ها تحت بارگذاری منوتونیک تا دوران ۰/۰۶ رادیان قرار گرفتند. همچنین اگرچه برای محاسبه صلیبت از منحنی تولید شده بر اثر بارگذاری تک‌آهنگ (منوتونیک) استفاده شده است، اما مقایسه منحنی مذکور با پوش منحنی هیستریزس

یک اتصال از روش مورد استفاده توسط رضایی فر و همکاران [۳۴] استفاده شده است. در این روش، مطابق با شکل (۲۴) برای محاسبه سختی خمشی تئوریک یک اتصال، با ترسیم منحنی نیرو-تغییر مکان و رسم خط مماس بر منحنی، با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) نسبت به محاسبه نسبت صلیبت اقدام شده است. اتصالاتی که صلیبت بیش از ۹۰ درصد داشته باشند، صلب محسوب می‌شوند و در غیر این صورت در زمره اتصالات نیمه صلب طبقه بندی می‌شوند. شاخص شکل پذیری همه نمونه‌ها مطابق با روابط (۱۲) و (۱۳) و همچنین درصد صلیبت نمونه‌ها طبق روابط (۱۴) و (۱۵) در جدول (۲) آورده شده است.

$$R = \frac{k_i}{k_{total}} \times 100 \quad (14)$$

$$k_{total} = \frac{12EI_b I_c}{4L_b^3 I_c + L_b^2 L_c I_b} \quad (15)$$

که در آنها R معرف صلیبت اتصال، k_i سختی اتصال و k_{total} برابر با سختی تئوریک اتصال دارای صلیبت ۱۰۰ درصد است و

شود. همچنین اگرچه به نظر می‌رسد که اتصالات بدون ورق پیوستگی در زمره اتصالات کاملاً صلب محسوب نمی‌شوند، اما با توجه به تعیین حداقل ضخامت وجه ستون برای نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی به نظر می‌رسد که افزایش ضخامت وجه ستون احتمالاً منجر به افزایش سختی دورانی اتصال خواهد شد. با توجه به آنکه صلیب اتصالات دارای ورق پیوستگی هم حدود ۹۰ درصد محاسبه می‌گردد، بنابراین به نظر می‌رسد که بهتر است برای محاسبه صلیب نمونه‌های فاقد ورق پیوستگی، به جای استفاده از رابطه (۱۳)، k_{total} برابر با سختی دورانی اتصال دارای ورق پیوستگی فرض شود. در خصوص تغییر عمق تیر، بررسی توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه‌ها نشان داد که مطابق با انتظار قبلی، افزایش عمق تیر منجر به کاهش عملکرد اتصالات WUF-W بدون ورق پیوستگی می‌گردد. مطالعه شکل‌پذیری اتصالات نشان می‌دهد که با دو برابر شدن عمق تیر، شکل‌پذیری نمونه‌ها تا حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد؛ اما بررسی صلیب اتصالات نشان داد که با کاهش عمق تیر، صلیب اتصالات افزایش می‌یابد؛ یعنی با دو برابر شدن عمق تیر تا حدود ۲۰ درصد صلیب اتصالات کاهش یافته که تقریباً با نسبت افزایش نیروی کششی یا فشاری در مقابل افزایش عمق تیر برابری دارد. با این حال، بررسی منحنی چرخه‌ای اتصالات بدون ورق پیوستگی و مقایسه شکل‌پذیری آنها ارتباط خاصی را بین عمق تیر و عملکرد اتصال صلب WUF-W نشان نمی‌دهد. همچنین کاهش ۴۶ درصدی در عمق تیر موجب بهتر شدن توزیع کرنش پلاستیک معادل تا ۵۵ درصد در محل اتصال بال تیر به وجه ستون می‌گردد. پیشنهاد می‌گردد در خصوص اتصالات نیمه‌صلب تیر به ستون جعبه‌ای فاقد ورق پیوستگی تحقیقات بیشتری صورت گیرد و در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران نیز به این اتصالات پرداخته شود.

مراجع

1. Asghari, A. (2018) *Steel Structures Design*. 3, AUP. Iran (in Persian).
2. INBC (4th Ed.) (2013) *Iranian National Building Code, Part 10 (Steel Building Design and*

برای هر نمونه نشان داد که اختلاف قابل توجهی وجود نداشته و بنابراین امکان استفاده از پوش منحنی هیستریزیس بار-تغییر مکان برای محاسبه صلیب اتصالات وجود دارد. مقایسه صلیب نمونه‌ها نشان می‌دهد که کاهش ۴۶ درصدی در عمق تیر منجر به افزایش صلیب نمونه‌ها از ۱۱ تا ۲۳ درصد شده است. نهایتاً به نظر می‌رسد که اگرچه اتصالات بدون ورق پیوستگی صلیب کافی را ندارند، اما افزایش حداقل ضخامت وجه ستون موجب افزایش سختی دورانی مورد نیاز برای اتصالات بدون ورق پیوستگی و امکان به کارگیری آنها در قاب خمشی خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با تمرکز بر اثر عمق تیر (d) بر رفتار اتصال صلب تقویت‌نشده جوشی تیر به ستون جعبه‌ای ارائه گردید، ۱۸ مدل رایانه‌ای تحت بارگذاری تک‌آهنگ و چرخه‌ای مورد مطالعه عددی قرار گرفتند.

تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد که اگرچه تمام مدل‌های بدون ورق پیوستگی الزامات آیین‌نامه AISC 341-16 و همچنین مبحث دهم مقررات ملی ایران را تأمین می‌نمایند اما منحنی هیستریزیس نمونه‌های دارای ورق پیوستگی دارای سطح محصور بیشتر بوده و پس از نیل به ظرفیت دورانی اتصال با افت مقاومت مواجه می‌گردد. بررسی تغییر شکل نمونه‌ها و توزیع کرنش پلاستیک معادل در محل اتصال بال تیر به وجه ستون نشان داد که مطابق با انتظار قبلی، در مدل‌های بدون ورق پیوستگی در ناحیه گوشه بال تیر تمرکز تنش وجود دارد و محل تشکیل مفصل پلاستیک دقیقاً در محل اتصال بال تیر به وجه ستون است که با وجود عدم منع در مقررات مبحث دهم، به نظر نامطلوب است. با وجود شکل‌پذیری نسبتاً مناسب تمام نمونه‌ها و با توجه به عدم طرح دقیق این نوع اتصال در استاندارد Eurocode 3، می‌توان نتیجه گرفت که اتصالات بدون ورق پیوستگی به دلیل سختی دورانی ناکافی، صلب محسوب نشده و در زمره اتصالات نیمه‌صلب قابل طبقه‌بندی هستند؛ بنابراین به نظر می‌رسد که جا دارد در مبحث دهم مقررات ملی ایران نیز ضوابط اتصالات نیمه‌صلب توسعه داده

14. Hwang, S.H., Moon, K.H., Han, S.W., and Lee, J.Y. (2010) Inelastic cyclic loading test on welded unreinforced flange-welded web (WUF-W) Moment Connections. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, **26**(10), 61-66 (in Korean).
15. Sanieei Nia, Z., Ghasemieh, M., and Mazroi, A. (2013) Panel zone evaluation of direct connection to box column subjected to bidirectional loading. *Struct. Design Tall Spec. Build.*, **23**(11), 833-853.
16. Rezaifar, O. and Younesi, A. (2016) Investigation of the behavior of the joints of the beam to box column by using the triangular perimeter plates and internal continuity. *2nd National Conference on Iranian Structural Engineering*, Tehran.
17. Han, S.W., Moon, K.H., and Jung, J. (2014) Cyclic performance of welded unreinforced flange-welded web moment connections. *Earthquake Spectra*, **30**(4), 1663-1681.
18. Han, S.W., Jung, H., and Ha, S.J. (2016) Seismic performance of wuf-w moment connections according to access hole geometries. *Earthquake Spectra*, **32**(2), 909-926.
19. Kafi, M.A. and Tarighi, P. (2017) Evaluation of using triangular plates as continuity plates in box column section in prequalified welded connections under cyclic loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, **3**(4), 120-138.
20. Han, S.W. and Kim, N.H. (2017) Permissible parameter ranges of access hole geometries for wuf-w connections. *Earthquake Spectra*, **33**(2), 687-707.
21. Jahanbakhti, E., Fanaie, N., and Rezaeian, A. (2017) Experimental investigation of panel zone in rigid beam to box column connection. *Journal of Constructional Steel Research*, **137**, 180-191.
22. Sim, H.B., Ballantyne, G., Chen, A., and Uang, C.M. (2017) Effect of beam tension on cyclic performance of WUF-W steel moment connection. *Journal of Structural Engineering*, **143**(9), DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001833.
23. Jung, S.H., Alemayehe, R.W., Park, M.W., and Ju, Y.K. (2019) Beam-column connection with 1200 mm deep multi-reduced taper beam for *Construction*. Tehran (in Persian).
3. Torabian, Sh., Mirghaderi, S.R., and Keshavarzi, F. (2012) Moment-connection between I-beam and built-up square column by a diagonal through plate. *Journal of Constructional Steel Research*. **70**, 385-401.
4. Rezaeain, A., Jahanbakhti, E., and Fanaie, N. (2020) Numerical Study of Panel Zone in a Moment Connection without Continuity Plates. *Journal of Earthquake Engineering*. Taylor and Francis Group. DOI:10.1080/13632469.2019.1695021.
5. Blodgett, O.W. (1972) *Design of Welded Structures*. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. Ohio.
6. ANSI/AISC 341-10 (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, Illinois.
7. ANSI/AISC 341-16 (2016) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, USA.
8. ANSI/AISC 360-16 (2016) *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, USA.
9. ANSI/AISC 341-22 (2021) *Public Review draft of Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, USA.
10. INBC (5th Ed.) (2020) *Initial Draft of Iranian National Building Code, Part 10 (Steel Building Design and Construction)*, Tehran (in Persian).
11. Roeder, C.W. (2001) *Connection Performance State of Art Report. (FEMA Rep. No. 355D)* Federal Emergency Agency, Washington DC.
12. ANSI/AISC 358-16 (2016) *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. American Institute of Steel Construction, USA.
13. Ahmady Jazany, R. and Hosseini Hashemi, B. (2010) Experimental study on the continuity plate configuration effect on seismic behavior of panel zone with unequal beam depth. *14th European Conference on Earthquake Engineering*, Republic of Macedonia.

- Tendons, Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), Belgium, 379-386.
34. Rezaifar, O., Yousefi, S.H. Yoonesi, A., and Gholhaki, M. (2019) Analytical study of seismic behavior types of the arrangement effect on the continuity plates in rigid connection between beam to concrete filled steel tube (CFST) columns. *Ferdowsi Civil Engineering*, **31**(1), 127-140.
 24. Reynolds, M. and Uang, C.M. (2019) *Alternative Weld Details and Design for Continuity Plates and Doubler Plates for Applications in Special and Intermediate Moment Frames*. Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
 25. Hamedi, F., Rahmani, K., and Adibzadeh, S.B. (2020) Cyclic behavior of bolted flange plate moment connection. *Modares Civil Engineering Journal*, **20**(6), 47-61 (in Persian).
 26. Nunez, E., Lichtemberg, R., and Herrera, R. (2020) Cyclic performance of end-plate biaxial moment connection with HSS columns. *Metals*, **10**(11), Doi10.3390/met10111556.
 27. Twizere, M. and Taskin, K. (2021) Numerical Analysis of Square Hollow Column-Beam Connections by Abaqus. *Journal of Science and Technology*, **22**(1), 55-63.
 28. EN 1993-1-8 (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8: Design of Joints*. European Committee for Standardization, Brussels.
 29. Architectural Institute of Japan (AIJ) (2021) *Recommendation for Design of Connections in Steel Structures*; Architectural Institute of Japan (AIJ): Tokyo, Japan (in Japanese).
 30. Li, L., Zheng, F.H., Zhang, H.D., and Fu, Y.Q. (2021) Effect of residual stress in longitudinal and transverse weld on global stability of box section steel column. *The 10th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE 2021)*, Ukraine.
 31. Azhari, M. and Mirghaderi, S.R. (2015) *Steel Structures Design – Seismic Design Division. Vol. 4*. Arkan-Danesh, Iran (in Persian).
 32. Saneei Nia, Z., Ghasemieh, M., and Mazroi, A. (2013) WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading. *Journal of Constructional Steel Research*, **88**, 90-108.
 33. Naaman, A.E. and Jeong, S.M. (1995) *Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP*

Effect of Beam Depth on the Behavior of Welded Unreinforced Flange-Welded Rigid Connection to Box Column without Continuity Plate

Farzaneh Hamedi¹ and Seyed Benyamin Adibzadeh^{2*}

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
2. Ph.D. Candidate of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran,
*Corresponding Author, email: b.adibzadeh@edu.ikiu.ac.ir

The Welded Unreinforced Flange-Welded (WUF-W) connection is one of the most applicable rigid connections used in moment frames. On the other hand, applying built-up box columns is conventional in Iran and Asian countries. Considering the challenges of installing the continuity plates inside the built-up box columns, developing the seismic design equation of minimum face thickness of box column in the connections without continuity plates and trying to reach some creative solutions for eliminating the continuity plates have always been hot topics for researchers, designers, and steel structure industries. It is worth mentioning that due to the lack of use of built-up box columns in European and American countries, European and American standards have not dealt with the criteria of the seismic design of the continuity plates in built-up box columns. Although the AIJ code has proposed a pair of through diaphragms instead of continuity plates to solve the challenges of installing the continuity plates in built-up box columns, and this method has been considered by Iranian researchers, it seems that because of the risk of completely cutting the column section and protruding the continuity plate from column face level, this method has low chance to be widespread used. Regarding the fact that the behavior of the panel zone of H section and box section columns are different, developing the seismic design equations for minimum thickness of column face in built-up box columns without continuity plates have been advised in AISC 341-16. The motivation of developing the seismic design equation of box column face thickness increases when considering that 5th draft edition of the 10th part of the Iranian National Building Code (Steel Building Design and Construction) clarifies that all rigid connections of I beam to box columns, regardless of the column face thickness, must have continuity plates which seems strict. On the other hand, by converting the beam extreme moment to a compression-tension couple force, it seems that the depth of the beam has influence on the nominal capacity of column face resistance.

Therefore, in this numerical study, 18 samples have been modeled to investigate the behavior of WUF-W rigid connection to built-up box columns as well as the probable effect of beam depth on the behavior of WUF-W rigid connection of I beam to box columns. The models have been loaded under cyclic loading and monotonic loading corresponding to the AISC 341-16 protocol. The loading has been continued up to 0.06 radian rotation and the frames have been simplified to a console beam and a column. To verify the modeling, the experimental study of Saniee Nia et al. has been used.

The results show that although all the models without continuity plates apparently pass the provisions of AISC 341-16 and the 4th edition of the 10th part of the Iranian National Building Code, more attention to details displays some problems. In all samples without continuity plates, the column thickness has been almost 25% over designed, to guarantee the appropriate behavior. But focusing on the equivalent plastic strain at the beam flange edge at loading steps shows the disproportionate spread of plastic strain along the beam flange edge. The plastic hinge is located at the end of beam at the intersection of beam and column face and the column face is partially deformed, which is not desirable. The models without continuity plate have lack of enough rotational stiffness, which does not represent rigid connections but semi-rigid joints. It seems that, unlike what was expected, the beam depth has no obvious effect on the pattern of hysteresis curves of the models without continuity plates like Eurocode 3. However, by 46% decreasing in beam depth, the equivalent plastic strain at the beam flange edge becomes more uniform up to

55% and the rigidity increases up to 23%. Finally, it seems that increasing the thickness of the box column face will lead to increase the rigidity and therefore, it is recommended to develop the seismic design equations to determine the minimum face thickness of the box column in the connection without continuity plates. Finally, it is suggested to address semi-rigid connections in the AISC 341 and in the Iranian National Building Code, 10th part.

Keywords: WUF-W, Box Column, Continuity Plate, Rigidity, Cyclic Loading.