



بررسی الزامات ورق پیوستگی در اتصال تیر I-شکل به ستون I-شکل تقویت شده با ورق مضاعف

ابراهیم جهان بختی^۱، علیرضا رضاییان^۲، نادر فنائی^۳

چکیده

ورق‌های پیوستگی و ورق‌های مضاعف دو نوع سخت کننده داخلی در اتصالات صلب تیر به ستون می‌باشند که هر کدام برای هدف خاصی و در صورت لزوم تعبیه می‌شوند که از جمله آنها می‌توان به خمش موضعی بال و افزایش مقاومت برشی چشمه اتصال اشاره کرد. علاوه بر این ورق‌های مضاعف می‌توانند در ظرفیت باربری بال ستون هم سهم داشته باشند و در این مقاله سعی شده است که دیدی متفاوت از آیین نامه‌ها نسبت به ورق‌های مضاعف ارائه شود. لذا برای برای ستون I-شکل سخت شده با ورق مضاعف، ظرفیت باربری بال ستون در محل اتصال به بال تیر، با استفاده از تئوری خطوط تسلیم محاسبه شده است. سپس با توجه به اینکه یک تیر مشخص حداکثر بار فشاری و یا کششی قابل محاسبه‌ای را به بال ستون اعمال می‌کند، الزامات تعبیه ورق پیوستگی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به اتصالات متداول ستون‌های I-شکل، حداقل ضخامت مورد نیاز برای بال ستون در صورت عدم وجود ورق پیوستگی محاسبه شده است. در این مطالعه مشخص شد که ورق‌های مضاعف نقش قابل توجهی را در باربری بال ستون داشته و در بسیاری از اتصالات طراحی شده شامل ورق مضاعف، می‌توان از تعبیه ورق پیوستگی صرف نظر کرد.

واژگان کلیدی:

اتصال صلب، ورق پیوستگی، ورق مضاعف، تئوری خطوط تسلیم، ستون I-شکل

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ejahanbakhti@mail.kntu.ac.ir

۲. استادیار دانشکده عمران، گروه سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، Alireza.Rezaeian@Kiau.ac.ir

۳. استادیار دانشکده عمران، گروه سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fanaie@kntu.ac.ir



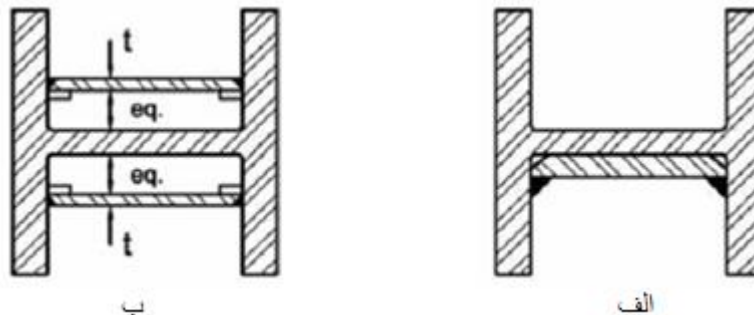
در طراحی اتصالات فولادی قاب خمشی قبل از زلزله نورتریج (۱۹۹۴)، اتصال سخت کننده های ستون عموماً جوش نفوذی کامل و طراحی محافظه کارانه داشتند. تمایل برای طراحی محافظه کارانه اتصال با توجه به اثر قابل توجه در توزیع تنش و کرنش در ناحیه چشمه اتصال، باعث شده بود که در جاهایی که نیازی به ورق پیوستگی نبوده، آنرا تعبیه کنند و اگر لازم هم بوده با ضخامتی بیشتر از آنچه که نیاز بوده در نظر گرفته شود. از آنجایی که اتصال این ورق ها به بال ستون با جوش نفوذی کامل صورت گرفته و این نوع جوش مستعد تمرکز تنش بوده و معمولاً در حین اجرا در ریشه دچار ترک می شود، در طی زلزله نورتریج بسیاری از اتصالات خمشی تیر به ستون دچار گسیختگی جوش شدند. برای یافتن مباحث سختگیرانه در مورد الزامات و معیارهای طراحی ورق های پیوستگی و مضاعف می توان به آیین نامه ویرایش ۱۹۹۲ مراجعه کرد [۱]. در طی سالهای ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲ معیارهای طراحی حذف شده و آیین نامه فقط به الزام تعبیه سخت کننده اشاره می کند [۲]. به طوریکه در آیین نامه ویرایش ۱۹۹۹ می توان مباحث مختصرتری در مورد این سخت کننده ها را به نسبت ویرایش قبلی آن و مباحث مفصل تری به نسبت ویرایش بعدی دید [۳]. جانسون (۱۹۵۹) پس از انجام تست های آزمایشگاهی و همچنین ترمبلی و همکاران (۱۹۹۵) با مقایسه گسیختگی اتصالات در زلزله نورتریج و رفتار مورد انتظار آنها، توصیه کردند که در اتصالات خمشی باید از ورق پیوستگی استفاده شو [۴]. کافمن و همکاران (۱۹۹۶) با تمرکز بر رفتار ترد و یا نرم اتصال، بیان کردند که اتصال با الکتروود با سختی بالاتر و دارای ورق پیوستگی دارای رفتار تردتری می باشد [۵]. رثودر (۱۹۹۷) با استفاده از تحلیل المان محدود، بهبود توزیع تنش در محل اتصال با تعبیه ورق پیوستگی را تأیید کرد [۶]. یی و همکاران (۱۹۹۸) توصیه کردند که برای پرهیز از شکست ترد، بهتر است بجای جوش شیاری با نفوذی کامل، از جوشه گوشه استفاده شود [۷]. انگلهارت (۱۹۹۹) با بررسی تست چند نمونه اتصال تیر به ستون با مقطع کاهش یافته تیر، توصیه کرد که ضخامت ورق پیوستگی برابر با ضخامت بال تیر باشد [۸]. ریکلس (۲۰۰۰) بیان داشت که در صورت تعبیه ورق های پیوستگی، اتصال رفتار لرزه ای بهتری دارد ولی در عین حال در صورتی که بال ستون ضخامت کافی داشته باشد، می توان از تعبیه آن صرف نظر کرد [۹]. الزامات تعبیه ورق پیوستگی در چشمه اتصال برای اولین بار توسط گراهام و همکاران (۱۹۶۰) ارائه شد [۱۰]. در این مقاله سعی بر آن است که در ادامه تحلیل گراهام و دید متفاوتی از آنچه که آیین نامه نسبت به ورق های مضاعف دارد، الزامات تعبیه ورق پیوستگی در اتصال تیر I-شکل به ستون I-شکل در حضور ورق های مضاعف بررسی شود.

۲- ورق های مضاعف

راهنمای شماره سیزدهم انجمن سازه و فولاد آمریکا [۱۱]، تمرکز تنش در چشمه اتصال صلب تیر به ستون را محدود به برش جان ستون در چشمه اتصال (panel-zone web shear)، کمناش موضعی بال ستون (local flange buckling)، تسلیم موضعی جان ستون (local web yielding)، لهیدگی جان ستون (web crippling) و کمناش جان ستون (web buckling) می داند. آیین نامه برای پرهیز از برش جان در چشمه اتصال، ورق های مضاعف و برای پرهیز از کمناش موضعی بال، ورق های پیوستگی و برای سایر موارد هر دو سخت کننده را پیشنهاد می کند. از آنجایی که تعبیه ورق مضاعف در

پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد

چشمه اتصال، مستقیماً باعث افزایش ظرفیت کششی و فشاری بال ستون شده و هم با ایجاد قید برای آن، باعث افزایش ظرفیت باربری بال می شود، لذا می تواند در جلوگیری از کماتش موضعی بال ستون نیز موثر باشد.



شکل (۱). وضعیت قرارگیری ورق های مضاعف نسبت به جان. الف) اتصال ورق مضاعف در مجاورت جان

ب) اتصال ورق های مضاعف بصورت متقارن در دو طرف جان

طبق آیین نامه، تعبیه ورق های مضاعف در چشمه اتصال با حداقل ضخامت برابر با نصف ضخامت جان ستون در سه وضعیت، حالت اول اتصال ورق مضاعف در مجاورت جان ستون، در حالت دوم و سوم به ترتیب ورق های مضاعف بطور قرینه نسبت به جان در دو طرف جان و به فاصله یک سوم و دو سوم پهنای بال ستون، انجام می پذیرد [۱۱]. در صورت عدم تعبیه ورق های پیوستگی، ورق های مضاعف به اندازه ۱۵ سانتی متر در بالا و پایین چشمه اتصال ادامه می یابد [۱۲].

۳- ظرفیت باربری بال ستون

در آیین نامه برای کنترل الزام تعبیه ورق های پیوستگی در اتصال صلب تیر آی-شکل به ستون آی-شکل، دو رابطه (۱) و (۲) ارایه شده است [۱۲]. رابطه (۱) نتیجه تحقیقات تجربی و تحلیلی گراهام و همکاران (۱۹۶۰) و رابطه (۲) نتیجه تحقیقات آزمایشگاهی ریکلس و همکاران (۲۰۰۰) می باشد [۹ و ۱۰]. گراهام با استفاده از تئوری خطوط تسلیم، برای بال ستون I-شکل، ظرفیت باربری را محاسبه کرده و با در نظر گرفتن اتصالات کاربردی، محاسبات و فرضیاتی را در تحلیل خود لحاظ کرد. در این تحقیق در ادامه کار گراهام و محاسبات وی، برای ستون I-شکل تقویت شده با ورق های مضاعف (شکل (۱)) ظرفیت باربری بال ستون بر اساس تئوری خطوط تسلیم برای هر سه وضعیت قرار گیری ورق مضاعف نسبت به جان ستون، محاسبه شده است. با توجه به تقارن هندسی و بارگذاری نسبت به جان در اتصال تیر I-شکل به ستون I-شکل، قسمت اتصال بال ستون به جان آن همانند اتصال گیردار برای هر نیم بال عمل می کند شکل (۲). برای وضعیت شکل (۱) الف مطابق شکل (۲) با توجه به قرارگیری ورق مضاعف در کنار جان، وجود این سخت کننده در باربری نیم بال موثر نبوده و فقط در ظرفیت کششی



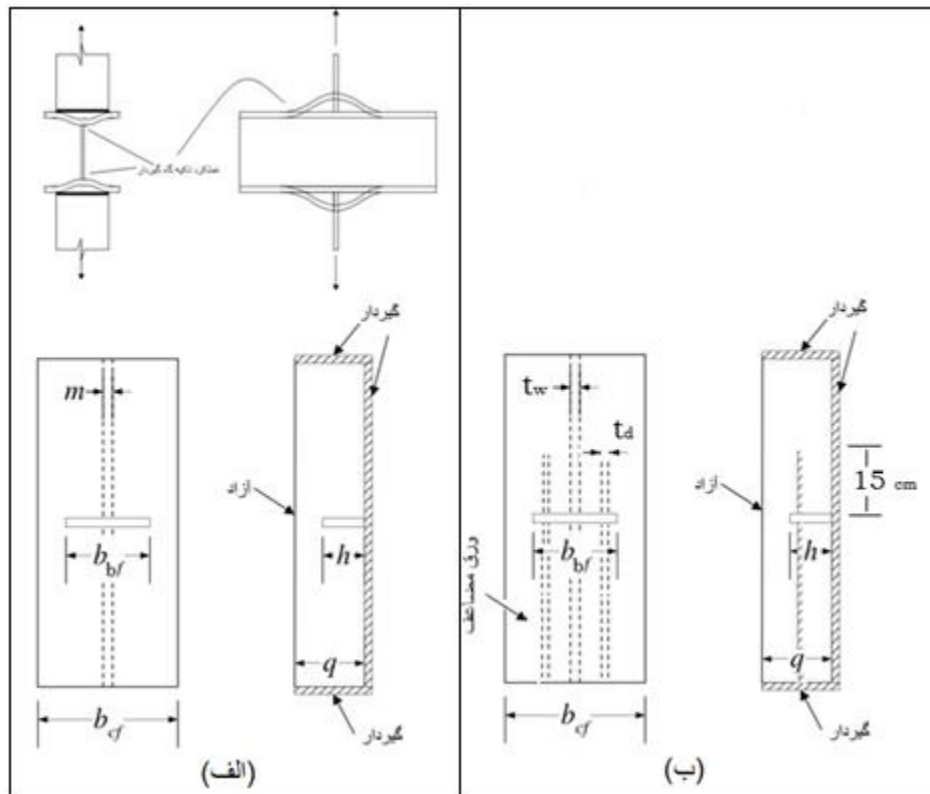
پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



و یا فشاری جان وارد حل شده است. با توجه به اینکه ورق مضاعف برای افزایش ظرفیت برشی جان ستون طراحی شده است لذا برای وضعیت شکل (۱). ب فاصله ورق های مضاعف از همدیگر حداکثر می تواند برابر با پهنای بال تیر باشد.

$$t_{cf} \geq 0.4 \sqrt{1.8 t_{fb} b_{fb} \frac{R_{yb} F_{yb}}{R_{yb} F_{yc}}} \quad (۱)$$

$$t_{cf} \geq \frac{b_{bf}}{6} \quad (۲)$$



شکل (۲). رسم شماتیک اتصال بال تیر به بال ستون و شرایط مرزی مسئله. (الف) برای وضعیت شکل (۱). الف
(ب) برای وضعیت شکل (۱). ب

با در نظر گرفتن شرایط تکیه گاهی و مکانیزم تسلیم شکل (۲). ب و شکل (۳). ب، قسمتی از بال تیر که دارای تکیه گاه آزاد می باشد (قسمت B، شکل (۳). ب) به نسبت قسمتی از بال که محدود به جان ستون و ورق مضاعف می باشد (قسمت A، شکل (۳). ب) ظرفیت باربری کمتری دارد. لذا وضعیتی که پهنای بال تیر بیشتر از فاصله بین دو ورق مضاعف باشد به نسبت وقتی که دقیقاً برابر این فاصله باشد، کنترل کننده طراحی می باشد. در این حالت برای ایجاد امکان محاسبات و با توجه به



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد

محافظه کارانه شدن طراحی، از امتداد ورق مضاعف در بالای بال تیر صرف نظر کرده و ارتفاع آن برابر با ارتفاع چشمه اتصال در نظر گرفته شده است. محاسبات نشان داد که قرارگیری ورق مضاعف در فاصله یک سوم پهنای بال و یا دو سوم آن در یک اتصال مشخص با توجه به عدم تغییر در مقدار کار خارجی و همچنین کار داخلی، تأثیری در ظرفیت باربری بال ستون ندارد. مکانیزم تسلیم برای وضعیت‌های شکل (۱) بر اساس تئوری خطوط تسلیم و با توجه به کمترین انرژی داخلی در شکل (۳) بصورت شماتیک نشان داده شده است. خطوط قرمز خط-چین و خطوط پر رنگ به ترتیب بیانگر لولای پلاستیک با ممان منفی و لولای پلاستیک با ممان مثبت می‌باشند. برای شکل (۳) الف کار خارجی و داخلی بترتیب در روابط ارائه شده است. از برابر قرار دادن آنها ظرفیت باربری بال ستون به شکل رابطه (۳) و بصورت ضریبی از تنش تسلیم فلز بال ستون و توان دوم ضخامت آن بدست آمد. ضریب C_1 که در رابطه (۳) دیده می‌شود، کاملاً وابسته به هندسه و شرایط مرزی در چشمه اتصال بوده و برای اتصالات متفاوت مقدار متفاوت و برای هرکدام از وضعیت‌های شکل (۱)، صورت متفاوتی دارد.

$$W_{int} = 2M_p \left[\frac{p}{x_1} + \frac{4q}{p} \right] \quad (۳)$$

$$W_{ext} = \frac{Q}{h} (h - x_1/2) \quad (۴)$$

$$Q = c_1 F_y t_f^2 \quad (۵)$$

مقدار ممان پلاستیک M_p بر اساس آیین نامه برای ورق با ضخامت t و تنش تسلیم F_y برابر با $\frac{1}{4} F_y t^2$ می‌باشد [۱۳]. ضریب C_1 در این رابطه (۳) برابر با رابطه (۴) می‌باشد:

$$c_1 = \frac{\left[\frac{\beta}{\eta} + \frac{4}{\beta} \right]}{\left(2 - \frac{\eta}{\lambda} \right)} \quad (۶)$$

$$\beta = \frac{p}{q} \quad (۷)$$

$$\lambda = \frac{h}{q} \quad (۸)$$

$$\eta = \frac{\beta}{4} \left[\left(\sqrt{(\beta)^2 + 8\lambda} \right) - \beta \right] \quad (۹)$$

برای شکل (۳) ب نیز از همین روش برای حل مسئله استفاده می‌کنیم و ظرفیت باربری کمانشی بال ستون را بدست آوردیم:

$$W_{int} = 2M_p \left[\frac{2p}{x_1} + \frac{p}{2x_2} + \frac{p}{2x_3} + \frac{4q}{p} \right] \quad (۱۰)$$

$$W_{ext} = \frac{Q}{h} \left[h - x_1 - \frac{x_2}{2} \right] \quad (۱۱)$$

$$Q = c_1 F_y t_f^2 \quad (۱۲)$$



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد

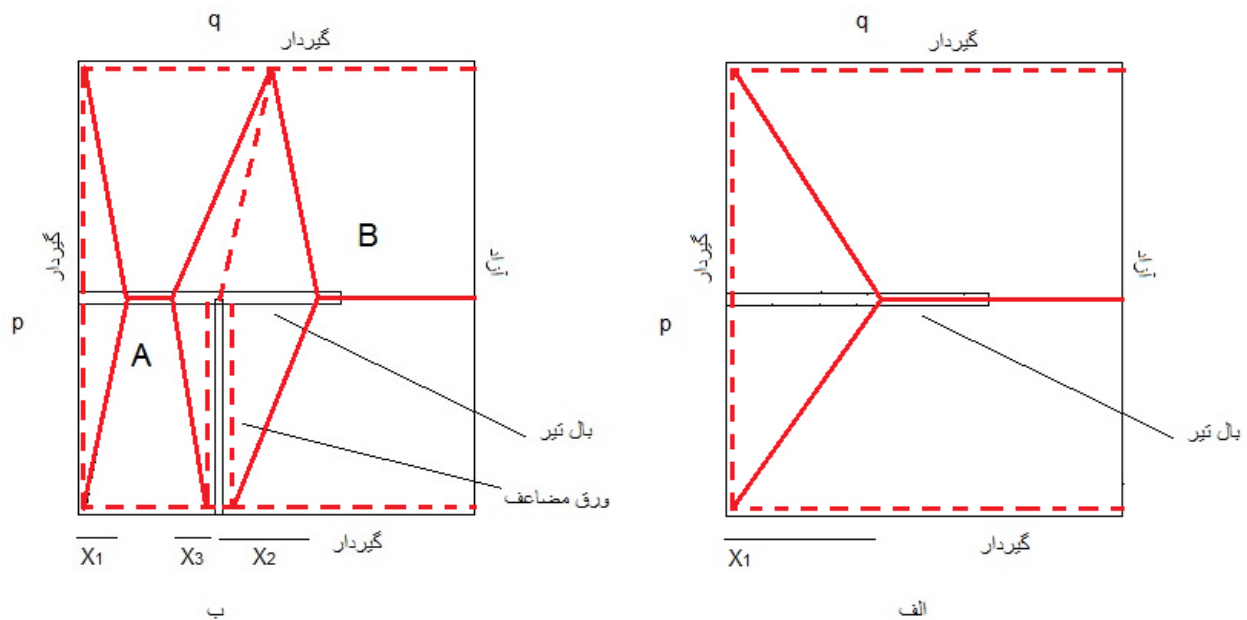


$$c_1 = \frac{1}{2} \frac{\left[\frac{2\beta}{\eta_1} + \frac{\beta}{\eta_2} + \frac{4}{\beta} \right]}{\left[1 - \frac{\eta_1 + \eta_2}{2\lambda} \right]} \quad (13)$$

$$\eta_1 = \frac{\beta}{2} \left[\left(\sqrt{(3\beta)^2 + 2} \right) - 3\beta \right] \quad (14)$$

$$\eta_2 = \frac{\beta}{4} \left[\left(\sqrt{\left(\frac{3}{2}\beta \right)^2 + 12\lambda} \right) - \frac{3}{2}\beta \right] \quad (15)$$

$$\beta = \frac{p}{q} \quad \text{و} \quad \lambda = \frac{h}{a} \quad (16)$$



$$q = (b_{cf}/2) - (t_w/2)$$

$$h = (b_{bf}/2) - (t_w/2)$$

$$p = 12t_{cf}$$

$$b_{cf} = \text{column flange width}$$

$$b_{bf} = \text{beam flange width}$$

$$t_{cf} = \text{column flange thickness}$$

شکل (۳). خطوط تسلیم شکل گرفته بر روی یک نیم بال

الف. وضعیتی که ورق‌های مضاعف به جان متصل شده. ب. وضعیتی که ورق‌های مضاعف در دو طرف جان بصورت متقارن تعبیه شده

اگر بار قابل انتقال از بال تیر را R_n در نظر گرفته و از طرف دیگر ظرفیت کششی (یا فشاری) بال ستون در محل اتصال به بال تیر را شامل ظرفیت کششی (یا فشاری) جان تیر و ورق‌های مضاعف و همچنین ظرفیت باربری کمانشی بال ستون در نظر گرفته و ضریب کاهش برابر $0/8$ را برای ظرفیت باربری بال ستون اعمال کنیم [۱۰]، داریم:

$$R_n = 0.8 [t_w t_{bf} F_{yc} + 2(t_d t_{bf} F_{yc}) + 2(c_1 t_{cf}^2 F_{yc})] \quad (17)$$



نتایج تحقیق های تجربی نشان می دهد که در اتصالات کاربردی حداقل مقدار برای $\frac{t_w t_b f F_{yc}}{R_n}$ برابر ۰/۱۵ می باشد [۱۰]. با توجه به الزامات آیین نامه ای برای حداقل ضخامت مجاز ورق های مضاعف، برای $\frac{t_d t_b f F_{yc}}{R_n}$ نیز همین مقدار در نظر گرفته می شود، لذا داریم:

$$0.8 = \left[2 \left(\frac{c_1 t_{cf}^2 F_{yc}}{R_n} \right) \right] \quad (18)$$

آیین نامه مقدار حداکثر بار وارد شده از بال تیر به بال ستون را برابر $1.8 F_{yb} t_{fb} b_{fb}$ میداند [۱۳]. با در نظر گرفتن نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به تنش تسلیم اسمی تحت عنوان R_y خواهیم داشت:

$$t_{cf} = \sqrt{\frac{0.8}{2c_1} 1.8 t_{fb} b_{fb} \frac{R_{yb} F_{yb}}{R_{yb} F_{yc}}} \quad (19)$$

برای وضعت شکل (۱) الف، مقدار c_1 برای اتصالات کاربردی، از مقدار ۳/۵ تا ۵ متغیر است [۱۰]. اگر برای محافظه کارانه ترین حالت، مقدار ۳/۵ در نظر گرفته شود، داریم:

$$t_{cf} \geq 0.34 \sqrt{1.8 t_{fb} b_{fb} \frac{R_{yb} F_{yb}}{R_{yb} F_{yc}}} \quad (20)$$

برای وضعیت شکل (۱) ب مقدار c_1 برای اتصالات کاربردی، از مقدار ۲۵ تا ۵۵ متغیر می باشد. اگر در محافظه کارانه ترین حالت، مقدار ۲۵ در نظر گرفته شود، داریم:

$$t_{cf} \geq 0.13 \sqrt{1.8 t_{fb} b_{fb} \frac{R_{yb} F_{yb}}{R_{yb} F_{yc}}} \quad (21)$$

۴- نتایج

تعبیه ورق های مضاعف با افزایش قابل توجه در ظرفیت کششی یا فشاری، این امکان را ایجاد می کند که تعبیه ورق های پیوستگی الزام نداشته باشد. نتایج نشان می دهد که تعبیه ورق های مضاعف در مجاورت جان ستون، تأثیر به مراتب کمتری به نسبت وضعیتی دارد که این ورقها به صورت متقارن در دو طرف جان ستون تعبیه شوند. با توجه به اینکه عملکرد برشی ورق های مضاعف در دو حالت فوق الذکر یکسان می باشد ولی وضعیتی که ورق های مضاعف به صورت متقارن در دو طرف جان ستون تعبیه شوند، قابلیت بیشتری در افزایش ظرفیت کمانش جانبی بال ستون دارد، پیشنهاد می شود که ورق های مضاعف به صورت متقارن در دو طرف جان ستون تعبیه شوند. طبق محاسبات تحلیلی انجام شده در این تحقیق و اتصالات کاربردی در تیر I-شکل به ستون I-شکل، اگر از ورق های مضاعف به صورت متقارن در دو طرف جان ستون استفاده شود، نیازی به تعبیه ورق های پیوستگی جهت کنترل کمانش جانبی بال ستون نمی باشد.



پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی سازه و فولاد



مراجع:

- 1-AISC (1992). "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," AISC, Chicago, Illinois.
- 2-AISC (1997). "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," AISC, Chicago, Illinois.
- 3-AISC (1999). "Load and Resistance Factor Design Specification For Structural Steel Buildings," AISC, Chicago, Illinois.
- 4-Johnson, L.G. (1959a). "Tests on Welded Connections between I-Section Beams and Stanchions," British Welding Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 38-46.
- 5- Kaufmann, E. J., Xue, M., Lu, L. W., and Fisher, J. W. (1996b). "Achieving Ductile Behavior of Moment Connections," Modern Steel Construction, June, pp. 38-42.
- 6- Roeder, C. W. (1997). "An Evaluation of Cracking Observed in Steel Moment Frames," Proceedings of the ASCE Structures Congress, Kempner, L., Brown, C. (eds.), Portland, Oregon, April 13-16, 1997, ASCE, New York, New York, pp. 767-771.
- 7- Yee, R. K., Paterson, S. R., and Egan, G. R. (1998). "Engineering Evaluations of Column Continuity Plate Detail Design and Welding Issues in Welded Steel Moment Frame Connections," Welding for Seismic Zones in New Zealand, Aptech Engineering Services, Inc., Sunnyvale, California.
- 8- Engelhardt, M. D., Shuey, B. D., and Sabol, T. A. (1997). "Testing of Repaired Steel Moment Connections," Proceedings of the ASCE Structures Congress, Kempner, L., Brown, C. (eds.), Portland, Oregon, April 13-16, 1997, pp. 408-412.
- 9- Ricles, J. M., Mao, L., Kaufmann, E. J., Lu, L., and Fisher, J. W. (2000). "Development and Evaluation of Improved Details for Ductile Welded Unreinforced Flange Connections," SAC BD 00-24, SAC Joint Venture, Sacramento, California.
- 10- Graham, J. D., Sherbourne, A. N., Khabbaz, R. N., and Jensen, C. D. (1960). "Welded Interior Beam-to-Column Connections," Welding Research Council, Bulletin No. 63, pp. 1-28
- 11- AISC (2003). "13th Steel Guide Design Series," AISC, Chicago, Illinois.
- 12- AISC (2010). "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," AISC, Chicago, Illinois.
- 13- FEMA (2000a). "State-of-the-Art Report on Connection Performance," Report No. FEMA 335D, SAC Joint Venture, Sacramento, California.