

بررسی شعاع گردشگی مناسب برای گوشه های بازشو، در قاب های خمشی فولادی دارای بازشو در جان تیر

وحید اکرمی^۱، سعید عرفانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

sderfani@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۲/۲۵]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۰/۲۴]

چکیده- ایجاد بازشو در جان تیرهای یک سیستم قاب خمشی فولادی ممکن است بنا به ضرورت ها و دلایل متفاوتی باشد. میزان شعاع گردشگی گوشه های بازشو در این نوع سازه ها می تواند تاثیر زیادی روی توزیع تنش و کرنش در اطراف بازشو داشته باشد. در این پژوهش، رفتار چرخه ای اتصالات خمشی با تیرهای دارای بازشو در جان با انجام تحلیل های المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از دو نوع بازشوی مربعی و مستطیلی استفاده شده است. بازشوهای مورد بررسی در این پژوهش فاقد سخت کننده های پیرامونی است. پدیده خرابی نمونه ها تحت خستگی کم تکرار با استفاده از مدل رشد چرخه ای حفره های شبیه سازی شده است. مدل های مورد بررسی، به صورت اتصالات T شکل حاصل از اتصال نصف تیر و نصف ستون های طبقات بالا و پایین است. نتایج تحلیل های المان محدود بر اساس پارامترهای رفتار چرخه ای (حد باربری و ظرفیت تغییر شکل)، اندیس خرابی خستگی در نقاط آسیب پذیر و همچنین میزان اتلاف انرژی صورت گرفته در مدت بارگذاری با هم مقایسه شده اند. طبق تحلیل ها، هر چه شعاع گردشگی در گوشه های بازشو بزرگتر انتخاب شوند، توزیع تنش و کرنش در اطراف بازشو مناسب تر خواهد بود. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین گزینه برای ایجاد بازشو در جان تیر، استفاده از بازشوی مستطیلی با بزرگترین شعاع ممکن در گوشه ها (سوراخ لویایی شکل) خواهد بود.

واژگان کلیدی- قاب خمشی فولادی، بازشو جان تیر، بارگذاری چرخه ای، خستگی کم تکرار.

۱- مقدمه

تیر بر اساس مشخصات سامانه تأسیسات ساختمان طراحی شده و تلاش می شود تا از تضعیف موضعی ناحیه بازشودار در سازه جلوگیری شود. اصول و ضوابط تحلیل و طراحی این نوع از بازشوها در محدوده تیر بوده و اثر وجود گشایش روی رفتار کلی قاب و سیستم سازه ای مورد بررسی قرار نمی گیرد [۱]. اما نوع نگرش دوم به وجود بازشو در جان تیر که به تازگی مطرح شده و کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، استفاده از این تضعیف موضعی برای بهبود رفتار لرزه ای قاب های خمشی فولادی است [۲]. به بیان دیگر در این نگاه، ایجاد گشایش در راستای بهبود رفتار لرزه ای قاب های خمشی فولادی و از طریق تضعیف موضعی تیرها در مقابل ستون و اتصالات مربوطه است. در این روش،

عواملی که ضرورت استفاده از تیرهای دارای بازشو در جان را پدید می آورند، از تنوع زیادی برخوردارند. نمونه ای از این ضرورت ها گنجانیدن تأسیسات ساختمان در داخل ضخامت سقف طبقه است، که با عبور دادن لوله ها از درون جان تیرها میسر می شود و در نتیجه کاهش ارتفاع طبقات سازه را به همراه دارد. به شکل کلی تا یک دهه اخیر، تنها نگرش موجود به وجود بازشو در جان تیر، نوعی ضعف تحمیلی در سازه بوده است که تنها برای پاسخ گویی به نیازها و الزامات اجرایی، معماری و اقتصادی طرح و به شکل خلاصه دلایل غیرسازه ای مورد استفاده قرار می گرفت. در این نوع نگاه، بازشو در جان

های بازشو، در قاب‌های خمشی فولادی دارای بازشو در جان تیر است.

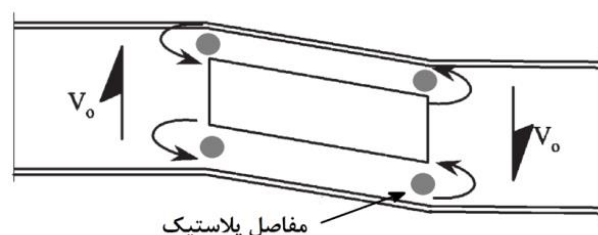
در این مقاله سعی شده است با انجام تحلیل‌های المان محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای، شناخت بیشتری از رفتار اتصالات خمشی با تیرهای دارای بازشو در جان به دست آمده و آثار ناشی از شعاع گردشگی گوشه‌های بازشو بررسی شود. برای این منظور دو گروه اتصال خمشی تیر به ستون با بازشوه‌های مربعی و مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بروز خرابی در نمونه‌ها با در نظر گرفتن خستگی به وسیله مدل رشد چرخه‌ای حفره‌های شبیه سازی شده است. آثار ناشی از میزان شعاع گردشگی گوشه‌های بازشو را می‌توان به دو بخش "آثار موضعی" و "آثار کلی" تقسیم بندی نمود. آثار موضعی این مسئله شامل چگونگی توزیع تنش، کرنش و اندیس خرابی خستگی در اطراف بازشو، و همچنین بر اتصال و کماتش موضعی جان تیر است. آثار کلی در بر گیرنده تاثیر شعاع گردشگی گوشه‌های بازشو بر رفتار چرخه‌ای اتصال، ظرفیت باربری و میزان اتلاف انرژی آن است. در ادامه، جزئیات مدل‌های المان محدود و نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها را می‌توان مشاهده نمود.

۲- مشخصات مدل‌های المان محدود

مدل‌های مورد بررسی در این مقاله به صورت اتصالات T شکل حاصل از اتصال نصف تیر و نصف ستون‌های طبقات بالا و پایین است. در این نمونه‌ها طول تیر برابر با ۲/۴ متر و طول هر کدام از نیم ستون‌های طبقات بالا و پایین برابر با ۱/۵ متر است. نمونه‌ای از این اتصال به همراه مشخصات بازشو مورد بررسی را می‌توان در شکل ۲ دید.

در این شکل، a عرض بازشو و r شعاع گرد شدگی گوشه بازشو است. به منظور استفاده بهتر از این پارامترها، آنها را به صورت $\gamma = a/H$ و $\lambda = 2r/h$ بی بعد می‌سازیم که در این روابط H ارتفاع تیر و h ارتفاع بازشو است. پارامترهای γ و λ علاوه بر اینکه معرف عرض و میزان گرد شدگی گوشه بازشو می‌باشند، به نوعی تعیین کننده شکل کلی بازشو نیز است. با ایجاد تغییرات در این دو پارامتر می‌توان بازشوهایی با اشکال مربع، مستطیل، دایره و لوبیایی را به دست آورد.

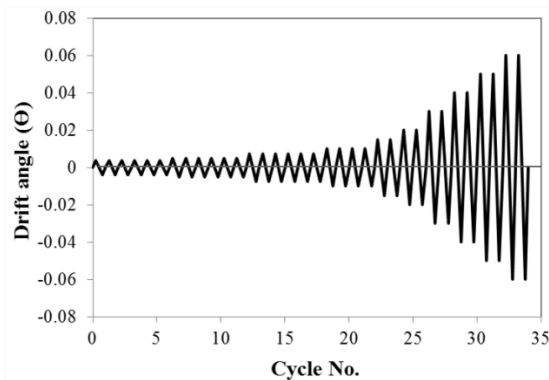
ناحیه دارای بازشو با تشکیل سازوکار ویراندل به صورت یک فیوز سازه‌ای وظیفه کاستن از تنش‌ها و کرنش‌های تحمل شده در محل اتصال تیر به ستون و همچنین انتقال مفصلات پلاستیک از ستون‌ها به تیرهای سازه را برعهده دارد [۳]. نمونه‌ای از تشکیل سازوکار ویراندل در ناحیه دارای بازشو تیر را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد.



شکل (۱) مکانیزم ویراندل در تیرهای دارای بازشو در جان

در هر دو نگرش بالا، شکل بازشوی مورد نظر باید به گونه‌ای انتخاب شود که ناحیه دارای بازشو تحت تنش‌های ناشی از بارگذاری چرخه‌ای دچار شکست نشوند. میزان شعاع گردشگی گوشه‌های بازشو در این نوع سازه‌ها می‌تواند تاثیر زیادی روی توزیع تنش و کرنش در اطراف بازشو داشته باشد. طبق استاندارد ASCE 23-97 شعاع گردشگی گوشه‌های بازشو باید کمینه دو برابر ضخامت جان تیر $(2t_w)$ یا 16 mm (هر کدام بزرگتر باشد) باشد [۴]. این الزام بر پایه نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده در مرجع [۵] استوار است که نشان می‌دهد؛ در صورت رعایت محدودیت عنوان شده، عمر خستگی تیر دارای بازشو کاهش چشمگیری نخواهد داشت. با وجود این مسئله، نشریه موسسه AISC که برای طراحی تیرهای فولادی و کامپوزیت دارای بازشو ارائه شده است استفاده از تیرهای دارای بازشو را در مواردی که عضو تحت بارگذاری خفیف با تکرار زیاد یا بارگذاری شدید با تکرار کم قرار گرفته است، مجاز نمی‌داند [۶]. این توصیه به دلیل این است که در زمان تهیه نشریه یاد شده، مرجع شماره [۵] تنها پژوهش قابل استناد در این زمینه برای کمیت تهیه کننده نشریه بوده است که اطمینان کافی در مورد رفتار ایمن این نوع سازه‌ها را برای کمیت ایجاد نکرده است. این مسئله نشان دهنده لزوم انجام پژوهش‌های تکمیلی در مورد شعاع گردشگی مناسب برای گوشه

بارگذاری نمونه‌ها به صورت چرخه‌ای و بر اساس تاریخچه بارگذاری ارائه شده در AISC 341-10 انجام شده است [۸]. طبق توصیه این استاندارد اتصال تیر به ستون باید با استفاده از تاریخچه بارگذاری نشان داده شده در شکل ۳ مورد ارزیابی قرار گیرد.

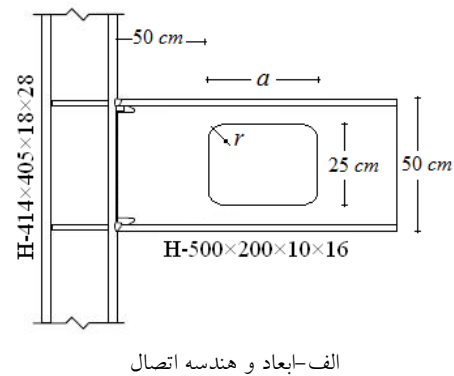


شکل (۳) تاریخچه بارگذاری AISC 341-10

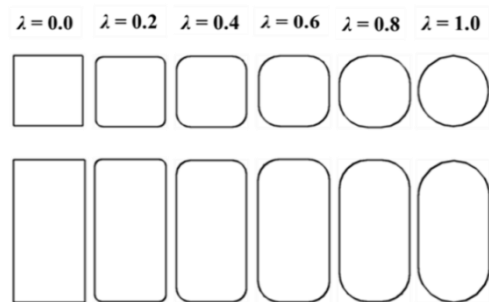
برای صرفه جویی در مدت زمان تحلیل‌ها، مدل‌های عددی یاد شده با استفاده از المان‌های دو بعدی ایجاد شدند. هرچند طبق مرجع [۹] عدم تقارن ناشی از مش‌بندی نامنظم و پلاستیک شدگی در دوران‌های کم برای بروز کماتش الاستوپلاستیک در دوران‌های بالا کافی است، اما برای اطمینان از بروز کماتش‌های موضعی به هنگام تحلیل، ابتدا مدل اتصال آنالیز کماتش شده و ضریب بسیار کوچکی از تغییرشکل دو مود اول کماتش به مدل اصلی اعمال شد. اندازه المان‌ها در گوشه‌های بازشو، سوراخ دسترسی جوش و همچنین در بر ستون برابر با ۰/۲ میلی‌متر است، که اندازه مشخصه مورد نیاز برای محاسبه خرابی به وسیله مدل رشد چرخه‌ای حفره‌ها است. اندازه المان‌ها در سایر نقاط برابر با ۲ سانتی‌متر انتخاب شد. شکل ۴-الف نمونه‌ای از مدل المان محدود به کار رفته در تحلیل‌ها را نشان می‌دهد.

برای اطمینان از دقت مدل المان محدود و مطابقت مشخصات رفتاری آن با سازه واقعی، نتایج حاصل از تحلیل عددی اتصال بدون بازشو نشان داده شده در شکل ۱-الف با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از مطالعات شینده و

در این پژوهش دو گروه اتصال خمشی تیر به ستون با بازشوهای مربعی ($\gamma = 0.5$) و مستطیلی ($\gamma = 1.0$) مورد بررسی قرار می‌گیرد که نمای آنها در شکل ۲-ب ارائه شده است.



الف-ابعاد و هندسه اتصال



ب-پیکربندی بازشوها

شکل (۲) مشخصات اتصال مورد بررسی

شبیه‌سازی و تحلیل مدل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS صورت گرفته است. مصالح مورد استفاده در تحلیل‌ها بر اساس رفتار ترکیبی ایزوتروپیک-کینماتیک مدل سازی شده و پارامترهای آن طبق مشخصات مکانیکی مصالح فولادی ارائه شده در مرجع [۷] محاسبه شده است. مشخصات مکانیکی استفاده شده برای فولاد و جوش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات مکانیکی مصالح

مصالح	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u
فولاد	۲۰۶	۰/۳	۳۵۹/۹	۶۴۶/۶	۰/۲
جوش	۲۰۶	۰/۳	۳۹۱/۴	۶۱۵/۸	۰/۲

در مراجع [۱۱] و [۱۲] استوار می‌باشد. پژوهشگران این مراجع در پژوهش‌های روی خرابی فلزات شکل‌پذیر تحت بارگذاری کششی، به این نتیجه رسیدند که تشکیل ترک‌ها و وقوع خرابی در این مواد را می‌توان به صورت رشد حفره‌ها ذاتی موجود در ساختمان درونی ماده و در نهایت به پیوستن این حفره‌ها به همدیگر تفسیر نمود. بر اساس این پژوهش‌ها برای فلزات شکل‌پذیری مانند فولاد که تحت بارگذاری مونوتونیک کششی قرار گرفته‌اند، نرخ رشد حفره‌ها در یک میدان تنش سه محوری را می‌توان مطابق رابطه زیر بیان نمود:

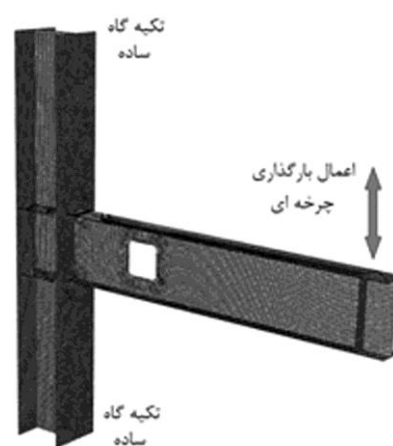
$$dr / r = C \exp(1.5T) d\epsilon_p \quad (1)$$

که در آن r شعاع لحظه‌ای حفره‌ها، C ثابت مصالح، T شاخص سه محوره بودن تنش (σ_m/σ_e) ، تنش میانگین، σ_e تنش موثر فون-مایسز و نهایتاً $d\epsilon_p$ نرخ رشد کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. با انتگرال‌گیری از رابطه بالا و انجام پاره‌ای ساده‌سازی‌ها، شاخص خرابی فلزات شکل‌پذیر تحت بارگذاری کششی به صورت زیر بیان می‌شود:

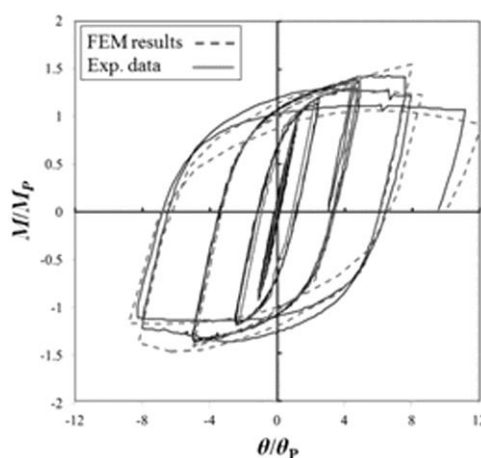
$$FI_{monotonic} = \frac{\int_0^{\epsilon_p} \exp(1.5T) d\epsilon_p}{\eta_{monotonic}} \quad (2)$$

صورت رابطه (۲) نشان دهنده میزان انبساط حفره‌ها در طول بارگذاری مونوتونیک کششی و مخرج این رابطه نشان دهنده اندازه بحرانی حفره‌ها است. بر اساس این رابطه، زمانی که مقدار عبارت $FI_{monotonic}$ برابر با ۱/۰ شود، اندازه حفره‌ها برابر با اندازه بحرانی بوده و خرابی در المان مورد نظر به وقوع می‌پیوندد. این معیار با وجود سادگی خود، اساس مدل‌سازی خرابی فلزات شکل‌پذیر در بسیاری از نرم‌افزارهای پیشرفته المان محدود است. به عنوان نمونه در نرم‌افزار آباکوس این معیار به هنگام تعریف مشخصات مکانیکی مصالح فولادی تحت عنوان شکست شکل‌پذیر^۲ قابل دسترسی است. با توجه به اینکه روابط حاصل از مدل VGM تنها برای بارگذاری‌های مونوتونیک کششی صادق است، در سال‌های اخیر تلاش‌های

همکاران [۱۰] مقایسه شده است. شکل ۴-ب مقایسه رفتار چرخه‌ای حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، نتایج حاصل از مدل عددی هماهنگی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.



الف-مدل المان محدود اتصال



ب-مقایسه رفتار چرخه‌ای

شکل (۴) صحت‌سنجی مدل المان محدود

۳- چگونگی مدل‌سازی خستگی

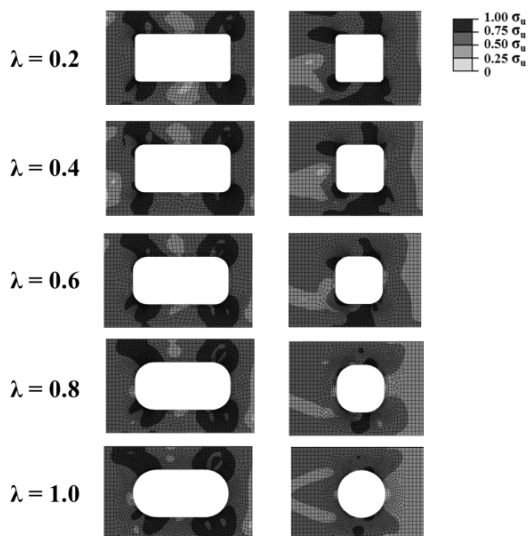
یکی از پرکاربردترین مدل‌های موجود برای شبیه‌سازی خستگی، مدل رشد حفره‌ها^۱ (VGM) در فلزات شکل‌پذیر است. اساس این مدل بر نتایج حاصل از مطالعات انجام شده

فشاری و $\eta_{monotonic}$ اندازه بحرانی حفره‌ها در بارگذاری مونوتونیک کششی است. مقدار پارامتر $\eta_{monotonic}$ برای مصالح فولادی و جوش به کار رفته در مدل‌های عددی این پژوهش به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۲/۳ و مقدار پارامتر λ برای هر دو نوع مصالح برابر با ۰/۱۵ استفاده شده است [۷]. مطالعات انجام شده در مراجع [۷] و [۱۴]، دقت مدل CVGM در قابلیت پیش‌بینی لحظه وقوع خرابی ناشی از بارگذاری چرخه‌ای در سازه‌های فولادی را به اثبات رسانده است. در این بخش از پژوهش حاضر، برای کنترل بروز خرابی ناشی از خستگی در محل اتصال تیر به ستون و همچنین نواحی گرد شدگی گوشه بازشو از مدل خرابی CVGM استفاده خواهد شد.

۴- نتایج تحلیل‌ها

۴-۱- توزیع تنش در اطراف بازشو

شکل ۵ توزیع تنش مایسز در اطراف بازشو را برای اتصالات با بازشوی مربعی و مستطیلی نشان می‌دهد. با توجه به گراف‌های ارائه شده برای بازشوهای مربعی می‌توان کاهش تمرکز تنش در اثر افزایش شعاع گردشدگی گوشه‌های بازشو را به وضوح دید. لیکن کاهش تمرکز تنش در نمونه‌های دارای بازشوی مستطیلی مشهود نیست.



شکل (۵) توزیع تنش در اطراف بازشو در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۰۴ رادیان

موفقیت آمیزی برای بسط و گسترش مدل رشد حفره‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای^۱ (CVGM) صورت گرفته است (مانند مرجع [۱۳]). در این مدل فرض می‌شود که شعاع حفره‌ها در نیمه کششی بارگذاری افزایش، و در نیمه فشاری کاهش می‌یابد:

$$dr / r = \text{sign}(T) \cdot C \exp(1.5T) d\epsilon_p \quad (۳)$$

بر اساس فرضیات این مدل، شاخص خرابی فلزهای شکل‌پذیر تحت بارگذاری چرخه‌ای را (که شاخص خستگی با تعداد دور بسیار کم^۲ نیز نامیده می‌شود) می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$FI_{cyclic} = \frac{VGD_{cyclic}}{\eta_{cyclic}} \quad (۴)$$

در رابطه بالا، صورت کسر نشان دهنده میزان تغییر در اندازه حفره‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای است، که به وسیله‌ی رابطه زیر بیان می‌شود. در این عبارت، انتگرال اول نمایانگر افزایش شعاع حفره‌ها در طی نیمه کششی بارگذاری و انتگرال دوم نشان دهنده کاهش حجم حفره‌ها تحت نیمه فشاری بارگذاری است:

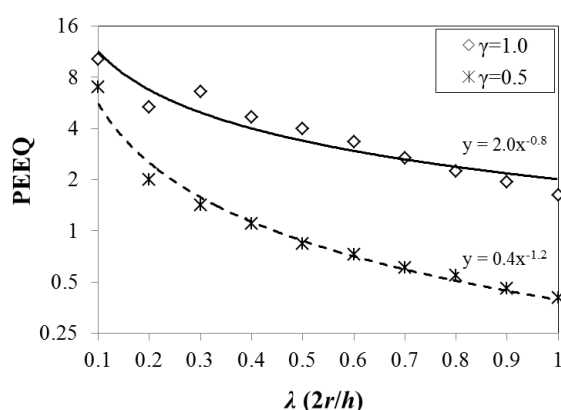
$$VGD_{cyclic} = \sum_{tensile} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \exp(1.5T) d\epsilon_p - \sum_{compressive} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \exp(1.5T) d\epsilon_p \geq 0 \quad (۵)$$

در رابطه (۴) مخرج کسر نشان دهنده اندازه بحرانی حفره‌ها است. برخلاف بارگذاری مونوتونیک که اندازه بحرانی حفره‌ها ثابت بود، در بارگذاری چرخه‌ای میزان اندازه بحرانی حفره‌ها بر اساس تاریخچه کرنش پلاستیک موجود در هر المان متغیر بوده و طبق رابطه زیر تعیین می‌شود:

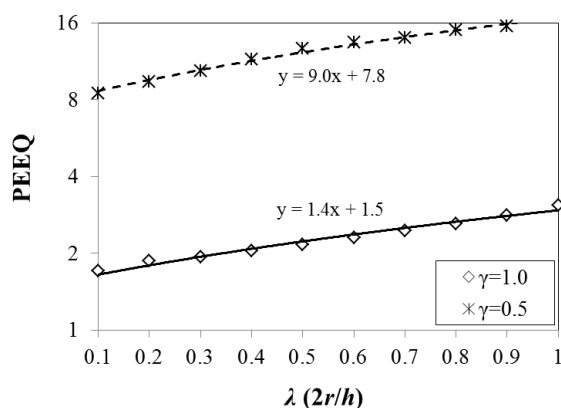
$$\eta_{cyclic} = \exp(-\lambda \epsilon_c) \cdot \eta_{monotonic} \quad (۶)$$

که در آن λ ثابت خرابی مصالح، ϵ_c کرنش پلاستیک معادل

بر اتصال، باعث کاهش تمرکز کرنش بوجود آمده، در اتصال و افزایش آن در گوشه های بازشو شده است. باید توجه نمود که این پدیده می تواند باعث کاهش در میزان ترک خوردگی جوش و بالطبع کاهش شکست ترد در اتصال شود. از میان مدل های این پژوهش، می توان اتصال با بازشوی لوبیایی ($\gamma = 1.0$, $\lambda = 1.0$) را بهترین اتصال از نظر توزیع کرنش های پلاستیک معرفی نمود چراکه این مدل کمترین مقدار کرنش پلاستیک تجمعی را به صورت با هم در گوشه های بازشو و همچنین بر اتصال دارد.



الف) گوشه های بازشو



ب) محل اتصال تیر به ستون

شکل (۶) بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی نمونه ها در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۰۴ رادیان

۴-۳- توزیع اندیس خرابی خستگی در نمونه ها

برای استفاده از مدل CVGM باید اندیس خرابی خستگی بر اساس حوزه تنش و کرنش بوجود آمده در هر مرحله از تحلیل و برای هر المان محاسبه می شد که بدین منظور از کدنویسی

این مسئله می تواند به دلیل تشکیل سازوکار ویراندل در مدل های با بازشوی مستطیلی باشد. تشکیل مفاصل پلاستیک در چهار گوشه بازشو (مفاصل پلاستیک ثانویه) را که نشان دهنده تشکیل سازوکار ویراندل است می توان در گراف های شکل ۵ دید. انتظار می رود تشکیل سازوکار ویراندل در این مدل ها، باعث اتلاف انرژی چرخه ای در مفاصل پلاستیک ثانویه و در نتیجه کاهش تمرکز کرنش در محل اتصال تیر به ستون (بر اتصال) شود.

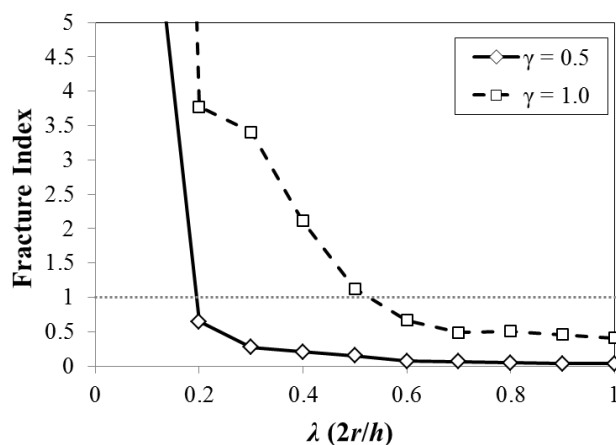
۴-۲- توزیع کرنش در اطراف بازشو و بر اتصال

چنانچه در بخش ۳ مقاله بیان شد، خرابی ناشی از خستگی تحت بارگذاری چرخه ای کم تکرار تا حد زیادی وابسته به میزان تمرکز کرنش های پلاستیک در مصالح سازه مورد بررسی است. به شکل کلی هرچه تمرکز کرنش در یک بخش از سازه بیشتر باشد، رشد ریز ترک ها و در نتیجه شروع پارگی سریع تر خواهد بود. شکل ۶ بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی نمونه ها را در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۰۴ رادیان نشان می دهد. نمودار شکل ۶-الف کرنش پلاستیک تجمعی در گوشه های بازشو و نمودار شکل ۶-ب کرنش پلاستیک تجمعی در بر اتصال را نشان می دهد.

همان گونه که از این نمودارها فهمیده می شود، برای هر دو نوع بازشوی مربعی و مستطیلی، افزایش شعاع گردشدگی گوشه بازشو باعث کاهش کرنش پلاستیک تجمعی در گوشه های بازشو و افزایش مقدار آن در بر اتصال می شود.

مسئله مهمی که در این نمودارها باید توجه شود، مقایسه کرنش پلاستیک تجمعی در گوشه های بازشو و بر اتصال است؛ که با مقایسه نمودارهای شکل ۶-الف و شکل ۶-ب می توان گفت که در مدل های با بازشوی مربعی، مقدار کرنش پلاستیک تجمعی در اتصال بسیار بیشتر از مقدار آن در گوشه های بازشو است، که نشان می دهد در این نمونه ها ناحیه اتصال آسیب پذیرتر است. برعکس برای مدل های با بازشوی مستطیلی مقدار کرنش پلاستیک تجمعی در گوشه های بازشو بیشتر از مقدار آن بر اتصال است. این مسئله به دلیل تشکیل سازوکار ویراندل در ناحیه بازشو، که با دور ساختن مفصل پلاستیک از

گوشه‌های بازشو را ارضا می‌نمایند، لیکن هنوز گوشه‌های بازشو در این مدل‌ها آسیب‌پذیر است. بنابراین باید گفت در صورتی که هدف از تعبیه بازشو در جان تیر، استفاده از مزیت رفتار ویراندل برای دستیابی به شکل‌پذیری بیشتر و تضمین عملکرد اتصال در دوران‌های بالا باشد، رعایت توصیه ASCE 23-97 در مورد کمینه شعاع گردشدگی گوشه‌های بازشو غیر محافظه کارانه بوده و استفاده از شعاع بیشتری لازم خواهد بود.

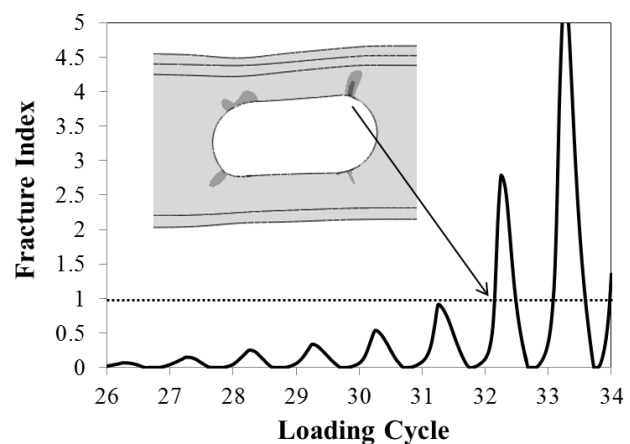


شکل (۸) بیشینه اندیس خرابی خستگی لبه بازشو در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۰۴ رادین

برای روشن‌تر شدن ارتباط بین شعاع گردشدگی در گوشه‌های بازشو و میزان دوران قابل تحمل به وسیله‌ی اتصال، بیشینه اندیس خرابی خستگی برای مدل‌های با بازشو مستطیلی در دوران‌های مختلف در جدول ۲ آورده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، با افزایش شعاع گردشدگی در گوشه‌های بازشو، بروز خرابی در این نواحی در دوران‌های بالاتری اتفاق می‌افتد.

لازم به ذکر است هرچند در اتصالات با بازشوی مربعی رعایت حداقل شعاع توصیه شده به وسیله‌ی ASCE 23-97 برای جلوگیری از بروز پارگی در گوشه‌های بازشو کافی است، لیکن از آنجاکه در این مدل‌ها خرابی در اتصال بروز می‌نماید، پس افزایش شعاع گردشدگی در گوشه‌های بازشو تأثیری بر ظرفیت دوران اتصال ندارد.

در محیط پایتون^۱ استفاده شد. این کد در هر قدم از تحلیل، میزان رشد حفره‌ها و اندازه بحرانی آن‌ها را در هر المان با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه نموده و طبق رابطه ۴ اندیس خرابی خستگی را به دست می‌آورد. وقوع خرابی در هر مدل زمانی گزارش می‌شود که اندیس خرابی خستگی در اولین المان از مقدار واحد تجاوز نماید. شکل ۷ نمونه‌ای از چگونگی رشد اندیس خرابی در گوشه بازشو برای مدل مستطیلی با $\lambda=1.0$ را نشان می‌دهد.

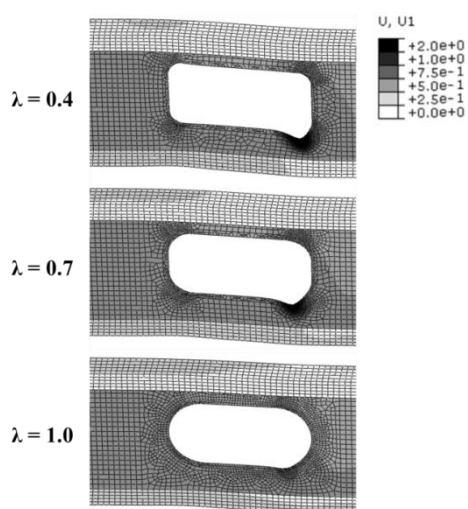


شکل (۷) نمونه‌ای از چگونگی رشد اندیس خرابی در گوشه بازشو برای مدل مستطیلی با $\lambda=1.0$

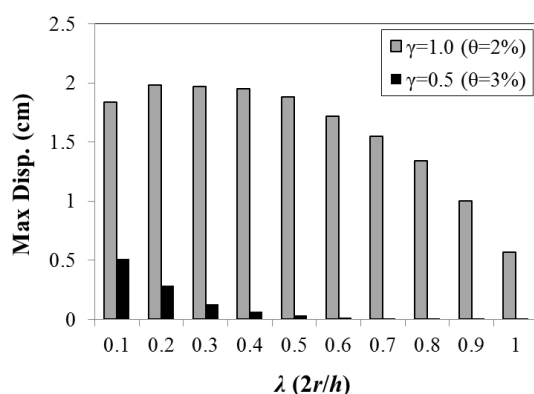
برای مقایسه بین مدل‌ها، بیشینه اندیس خرابی خستگی در لبه بازشو برای مدل‌های مختلف در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۰۴ رادین محاسبه و در شکل ۸ گزارش شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، برای هر دو نوع بازشو مربعی و مستطیلی، افزایش شعاع گوشه‌های بازشو کاهش در مقدار اندیس خرابی خستگی را در پی خواهد داشت. این کاهش در ابتدا سریع و پس از افت اندیس خرابی به کمتر از ۱/۰ کندتر است.

مسئله مهم دیگری که در شکل ۸ باید توجه شود، مقدار شعاع گردشدگی قابل قبول برای گوشه‌های بازشو است. برای توضیح این مسئله لازم به گفتن است با وجود اینکه مدل‌های دارای بازشو مستطیلی با $\lambda=0.2$ ، $\lambda=0.3$ و $\lambda=0.4$ توصیه استاندارد ASCE 23-97 در مورد کمینه شعاع گردشدگی

ابتدا و انتهای تیرهای T شکل ثانویه و از طرف دیگر به دلیل کاهش تمرکز تنش و کرنش در گوشه های بازشو است.



الف- بروز کماتش موضعی در لبه بازشو



ب- بیشینه جابه جایی جانبی لبه بازشو

شکل (۹) تاثیر شعاع گردشگی گوشه بازشو بر کماتش موضعی جان تیر

۴-۵- رفتار چرخه ای نمونه ها

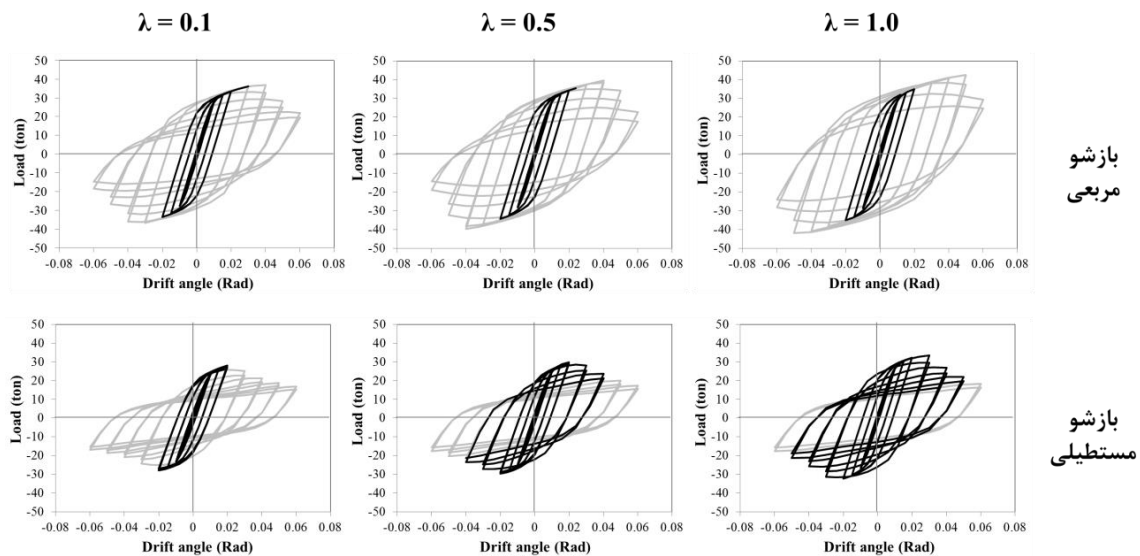
شعاع گردشگی گوشه های بازشو علاوه بر آثار موضعی در ناحیه تضعیف شده، تاثیراتی نیز بر رفتار کلی اتصال خواهد داشت. برای بررسی تاثیر شعاع گردشگی گوشه های بازشو بر رفتار عمومی اتصال، منحنی رفتار چرخه ای تعدادی از اتصالات با بازشوی مربعی و مستطیلی در شکل ۱۰ ارائه شده است. منحنی ها تا قبل از رسیدن اندیس خرابی خستگی در اولین المان به مقدار ۱/۰ با رنگ مشکی و پس از آن با رنگ خاکستری نشان داده شده اند. به شکل کلی بروز خرابی در اتصالات با بازشوی مربعی در محل اتصال تیر به ستون (در جوش ها) و در اتصالات با بازشوی مستطیلی در گوشه های بازشو بوده است.

جدول (۲) اندیس خرابی خستگی برای مدل های با بازشو مستطیلی در دوران های مختلف

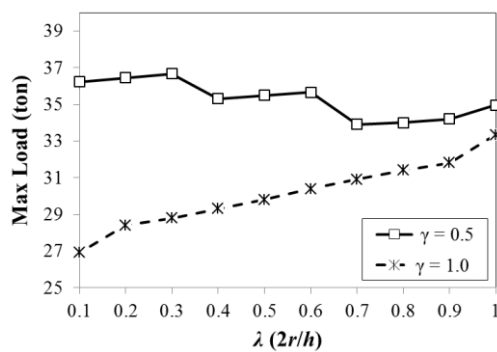
مدل	میزان دوران اتصال				
	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲
$\lambda=0.1$					۱/۰۹
$\lambda=0.2$				۱/۵۹	۰/۲۳
$\lambda=0.3$			۱/۱۳	۰/۵۷	۰/۱۹
$\lambda=0.4$			۱/۰۶	۰/۴۶	۰/۱۵
$\lambda=0.5$			۱/۱۲	۰/۳۵	۰/۱۳
$\lambda=0.6$		۱/۱۵	۰/۶۷	۰/۳۳	۰/۱۱
$\lambda=0.7$		۱/۲۲	۰/۴۹	۰/۲۶	۰/۰۹
$\lambda=0.8$		۱/۲۲	۰/۵۰	۰/۲۲	۰/۰۷
$\lambda=0.9$		۱/۰۲	۰/۴۶	۰/۲۳	۰/۰۶
$\lambda=1.0$	۲/۰۹	۰/۸۸	۰/۴۲	۰/۱۹	۰/۰۳

۴-۴- کماتش موضعی جان تیر

با بریدن جان تیر، ناحیه دارای بازشو تبدیل به دو تیر ثانویه T شکل می شود که تنش های خمشی و برشی تیر از طریق آن ها به سمت تکیه گاه منتقل می شود. نیروهای داخلی تیر اصلی برای عبور از محل بازشو در هر کدام از تیرهای T شکل بالا و پایین تولید نیروهای ثانویه ای می نمایند. به عنوان نمونه، عمده نیروی خمشی تیر اصلی از طریق تبدیل به نیروهای کششی و فشاری موجود در تیرهای ثانویه، به سمت دیگر بازشو منتقل می شود. به این ترتیب تیر ثانویه ای که تحت نیروی محوری فشاری قرار می گیرد، ممکن است دچار کماتش موضعی شود. شکل ۹، تاثیر شعاع گردشگی گوشه بازشو بر روی کماتش موضعی جان تیر را نشان می دهد. اعداد ارائه شده در شکل ۹-ب، نشان دهنده بیشینه جابه جایی جانبی لبه بازشو است. نتایج برای بازشو مستطیلی در انتهای دریف ۲٪ و برای بازشو مربعی در انتهای دریف ۳٪ نمایش داده شده است. این مسئله به دلیل آن است که کماتش موضعی جان تیر در اتصال با بازشوی مربعی دیرتر از اتصال با بازشوی مستطیلی آغاز می شود. چنانچه مشاهده می شود، افزایش شعاع گردشگی در گوشه های بازشو باعث کاهش کماتش موضعی در جان تیر می شود. این مسئله از طرفی به دلیل افزایش ممان اینرسی در



شکل (۱۰) نمودار چرخه‌ای اتصالات با بازشوی مربعی و مستطیلی



شکل (۱۱) بیشینه بار جانبی بدست آمده از نمودار چرخه‌ای با در نظر گرفتن اندیس خرابی خستگی

با توجه به شکل ۱۱، در اتصال با بازشوی مستطیلی افزایش شعاع گردشگرگی در گوشه‌های بازشو افزایش ظرفیت باربری اتصال را در پی دارد. این مسئله می‌تواند متأثر از زمان بروز کماتش موضعی در جان تیر باشد که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت. به این معنی که افزایش شعاع گردشگرگی گوشه‌های بازشو باعث به تاخیر افتادن کماتش موضعی در جان تیر می‌شود که این مسئله به نوبه خود ظرفیت باربری اتصال را افزایش می‌دهد. بر خلاف اتصالات با بازشوی مستطیلی، از آنجاکه بروز خرابی در اتصالات با بازشوی مربعی در بر اتصال و در دوران کمتری می‌باشد، این اتصالات قبل از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری خود دچار خرابی می‌شوند پس اثر افزایش شعاع گردشگرگی در گوشه‌های بازشو بر ظرفیت باربری اتصال در این مدل‌ها معلوم نیست.

اولین مسئله‌ای که می‌توان در شکل ۱۰ بررسی کرد، تاثیر شعاع گردشگرگی گوشه‌های بازشو بر ظرفیت باربری اتصال و تفاوت در ظرفیت باربری اتصالات با بازشوی مربعی ($\gamma = 0.5$) و مستطیلی ($\gamma = 1.0$) است. با توجه به اینکه مساحت ناحیه تضعیف شده در بازشوی مستطیلی بیشتر از بازشوی مربعی می‌باشد، انتظار می‌رود که ظرفیت باربری اتصالات با بازشوی مربعی بیشتر از اتصالات با بازشوی مستطیلی باشد. با در نظر گرفتن نمودارهای خاکستری (بدون در نظر گرفتن اندیس خرابی خستگی) در شکل ۱۰، می‌توان گفت که ظرفیت باربری اتصالات با بازشوی مربعی تقریباً ۹/۳ تن بیشتر از ظرفیت اتصالات با بازشوی مستطیلی است. این کاهش ظرفیت به وسیله‌ی پژوهش‌های مختلف دیگری که فاقد معیار مناسبی برای تشخیص خرابی در نمونه‌ها است نیز گزارش شده است. لیکن با در نظر گرفتن اندیس خرابی خستگی در این نمودارها (نمودار مشکی) نتایج دیگری قابل استخراج است. شکل ۱۱ بیشینه بار جانبی به دست آمده از نمودار چرخه‌ای نمونه‌ها را با در نظر گرفتن اندیس خرابی خستگی نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، تفاوت در ظرفیت باربری اتصالات با بازشوی مربعی و مستطیلی کمتر از مقدار یاد شده است، که افزایش شعاع گوشه‌های بازشو باعث کاهش هر چه بیشتر این اختلاف نیز می‌شود.

مستطیلی مشهود نیست.

۲- برای هر دو نوع بازشوی مربعی و مستطیلی، افزایش شعاع گوشه های بازشو باعث کاهش کرنش پلاستیک تجمعی و اندیس خرابی خستگی در گوشه های بازشو و افزایش مقدار آن در بر اتصال می شود.

۳- در مدل های با بازشوی مربعی مقدار کرنش پلاستیک تجمعی و اندیس خرابی خستگی در بر اتصال بیشتر از مقدار آن در گوشه های بازشو و برای نمونه های با بازشوی مستطیلی به صورت عکس این مسئله است.

۵- در صورتی که هدف از تعبیه بازشو در جان تیر، استفاده از مزیت رفتار ویراندل برای دستیابی به شکل پذیری بیشتر اتصال باشد، رعایت توصیه ASCE 23-97 در مورد کمینه شعاع گردشگی گوشه های بازشو غیر محافظه کارانه بوده و استفاده از شعاع بیشتری لازم خواهد بود.

۴- افزایش شعاع گردشگی در گوشه های بازشو باعث کاهش کمناش موضعی در جان تیر می شود.

۵- با افزایش مساحت ناحیه تضعیف شده از ظرفیت باربری اتصال کاسته می شود. به همین دلیل ظرفیت باربری اتصالات با بازشوی مربعی بیشتر از اتصالات با بازشوی مستطیلی است.

۶- شکل پذیری اتصالات با بازشوی مستطیلی در اثر افزایش شعاع گردشگی گوشه بازشو افزایش می یابد. طبق نتایج به دست آمده، بهترین گزینه برای ایجاد بازشو در جان تیر، استفاده از سوراخ لوبیایی است.

۶- مراجع

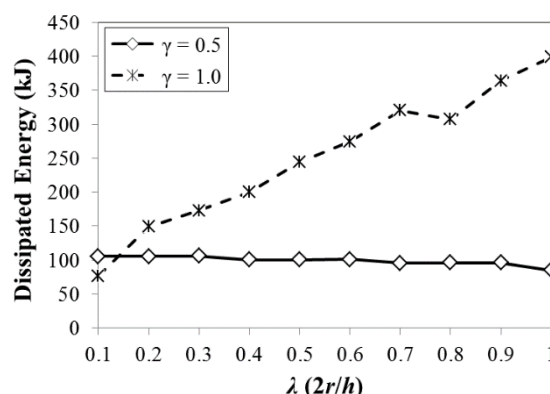
[۱] بابازاده ناصری؛ عطا؛ تأثیر ایجاد گشایش در جان تیر در عملکرد قاب های خمشی فولادی؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۰.

[2] Erfani; S.; Babazadeh Naseri; A.; Akrami; V.; "The Beneficial Effects of Beam Web Opening in Seismic Behavior of Steel Moment Frames," *International Journal of Steel and Composite Structures*, 13 (1), 2012, pp 35-46.

[3] Aschheim; M.A.; "Moment-Resistant Structure, Sustainer and Method of Resisting Episodic Loads"; *United States*, Patent No. 6,012,256, 2000.

[4] ASCE 23-97; *Proposed Specification for Structural Steel Beams with Web Opening*; American Society of

مسئله دیگری که در شکل ۱۰ باید مورد توجه قرار گیرد، افزایش میزان شکل پذیری و اتلاف انرژی اتصالات با بازشوی مستطیلی در اثر افزایش شعاع گردشگی گوشه بازشو است. شکل ۱۲ میزان انرژی تلف شده به وسیله نمونه ها در دوره رفتار چرخه ای را نشان می دهد. این مقادیر برای هر نمونه تا لحظه بروز خرابی محاسبه شده است. چنانچه ملاحظه می شود، با افزایش شعاع گوشه های بازشو در اتصالات با بازشوی مستطیلی میزان انرژی تلف شده افزایش و در اتصالات با بازشوی مربعی این مقدار ثابت مانده است. این مسئله در اثر تفاوت در محل بروز خرابی در اتصالات با بازشوی مربعی و مستطیلی بوجود می آید. به عنوان یک قانون کلی می توان گفت که اگر میزان تضعیف در جان تیر به اندازه ای باشد که محل بروز خرابی به داخل تیر انتقال یابد، افزایش شعاع گردشگی در گوشه های بازشو باعث کاهش تمرکز کرنش و در نتیجه کاهش اندیس خرابی در این نواحی شده پس شکل پذیری و انرژی تلف شده به وسیله اتصال را افزایش خواهد داد.



شکل (۱۲) انرژی تلف شده طی بارگذاری چرخه ای

۵- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی عددی شعاع گردشگی مناسب برای گوشه های بازشو، در قاب های خمشی فولادی دارای بازشو در جان تیر می پردازد. برای این منظور دو گروه اتصال خمشی تیر به ستون با بازشوی مربعی و مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج به دست آمده از تحلیل ها عبارتند از:

۱- در اتصالات با بازشوی مربعی با افزایش شعاع گوشه های بازشو تمرکز تنش در ناحیه تضعیف شده کاهش می یابد. این مسئله به دلیل بروز سازوکار ویراندل در اتصالات با بازشوی

- [11] Rice; J.R.; Tracey; D.M.; "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields"; *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.17, 1969.
- [12] Hancock; J.W.; Mackenzie; A.C.; "On the Mechanics of Ductile Failure in High-Strength Steel Subjected to Multi-Axial Stress States"; *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 24, 1976.
- [13] Kanvinde; A.M.; Deierlein; G.G.; *Micro-mechanical Simulation of Earthquake Induced Fracture in Steel Structures*; Blume Center TR 145. Stanford University, Stanford, CA, 2004.
- [14] Fell; B.V.; *Large-Scale Testing and Simulation of Earthquake-Induced Ultra Low Cycle Fatigue in Bracing Members Subjected to Cyclic Inelastic Buckling*; Ph.D. Dissertation, University of California, Davis, 2008.
- Civil Engineers (ASCE), 1997.
- [5] Frost; R.W.; Leffler; R.E.; "Fatigue Tests of Beams with Rectangular Web Holes"; *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 97, no. ST2, 1971.
- [6] Darwin; D.; *Steel and Composite Beams with Web Openings*; Steel Design Guide Series 2, American Institute of Steel Construction (AISC), 2003.
- [7] Zhou; H.; Wang; Y.; Shi; Y.; Xiong; J.; Yang; L.; "Extremely Low Cycle Fatigue Prediction of Steel Beam-to-Column Connection by Using a Micro-Mechanics Based Fracture Model"; *International Journal of Fatigue*, Vol 48, 2012.
- [8] ANSI/AISC 341; *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*; American Institute of Steel Construction (AISC), 2010.
- [9] Prinz; G.S.; Richards; P.W.; "Eccentrically braced frame links with reduced web sections"; *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, 2009.
- [10] Shinde; H.; Kurobane; Y.; Azuma; K.; Dale; K.; "Additional Full-scale Testing of Beam-to-Column Connections with Improvements in Welded Joints," *Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 2003.

A Numerical Investigation on the Appropriate Corner Radii of Beam Web Opening in Steel Moment Frames

V. Akrami¹, S. Erfani^{2*}

1 Ph D candidate, Faculty of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Technology

2 Assistant Prof., Faculty of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Technology

sderfani@aut.ac.ir

Abstract:

Web openings may be provided in structural floor beams for different purposes. The corner radii of web openings can have a significant effect on stress and strain concentrations around the opening. AISC's design guide for steel and composite beams with web openings states that web openings are not recommended for members subjected to significant high cycle low stress or low cycle high stress fatigue loading even if a rational corner radii is provided for web openings. This is because, at the time the specification was written, there were only limited references available to the committee which indicates the need for further studies in this field.

In this paper, effect of opening corner radii on cyclic behavior of steel moment connections with Reduced Web Beam Section (RWBS) is investigated using finite element analysis. For this purpose, a T shaped moment connection (without web opening) which has been tested under cyclic loading by another author is used as the reference model. To see effect of opening corner radii, the reference model is considered with square and rectangular web openings of different corner radii. Fracture initiation in models is simulated using Cyclic Void Growth Model (CVGM) which is based on micro void growth and coalescence. According to this model, fracture under cyclic loading is predicted to occur when the void size exceeds the critical value.

Based on the results, for both square and rectangular openings the maximum equivalent plastic strain and fracture index at the opening corners will decrease as the opening corner radii increase. For openings with small corner radii the fracture index at corners will be very high. This is in accordance with recommendation of ASCE 23 97 which indicates that these configurations should not be used in real practice. However, it should be noticed that in the case of rectangular opening the damage index at the corners may be greater than unity even if ASCE 23 97 limitations are met. This means that if it is intended to achieve high rotation capacity at RWBS connections, ASCE 23 97 requirement about minimum corner radii may be non conservative. As another result, as the opening corner radii increase local buckling around the web opening occurs at higher rotations. In addition to the local effects, the choice of opening corner radii can also affect the global behavior of RWBS connections. In the case of rectangular perforation, as the opening corner radii increase the load carrying and rotation capacity of connection increase too. This is because in these models, the weakening area prevents welds from failure and fracture occurs in the opening corners. As a result, as the opening corner radii increase the fracture index at opening corners decreases and hence the connection can undergo higher rotation capacities. This is not true for square perforation where fracture occurs at connection welds and the connection rotation capacity makes no change as the opening corner radii increase. As a general recommendation it can be said that web openings with the largest corner radii (elongated circular holes) is the best case for perforated steel connections.

Keywords: Moment Frame, Beam Web Opening, Cyclic Void Growth Model, Low Cycle Fatigue.

