مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست و سوم، شماره۱، سال۱٤۰۲

طراحی پلاستیک جوش‌های گوشه تحت بار برون محور داخل صفحه

علیرضا رضائی[۱]، علیرضا معززی مهر طهران[۲]، شروین ملکی[۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

*smaleki@sharif.edu

تاریخ دریافت ۱٤۰۱/۰٤/۰۲ تاریخ پذیرش ۱٤۰۱/۰۹/۲۳

چکیده

هدف اصلی این پژوهش ارائه روشی ساده و در عین حال کارآمد برای محاسبه ظرفیت جوش‌های گوشه با بار برون محور داخل صفحه است. برای تعیین ظرفیت جوش گوشه با بارگذاری برون محور روش‌های مختلفی در طول زمان پیشنهاد شده است. در این میان روش‌های طراحی موجود مانند روش مرسوم الاستیک بسیار محافظ‌کارانه هستند و به دلیل عدم درنظرگیری شکل‌پذیری برای گروه جوش و سازگاری کرنشی با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی هماهنگی خوبی ندارند. از طرفی لحاظ نمودن موارد یاد شده برای تعیین ظرفیت پلاستیک یک گروه جوش با بار برون محور، مانند آنچه در روش مرکز آنی دوران صورت می‌گیرد، نیاز به محاسبات پیچیده دارد. از این رو در پژوهش حاضر روشی برای طراحی جوش گوشه معرفی می‌شود که با در نظرگیری خاصیت غیرالاستیک برای جوش، ضمن سادگی در استفاده، پیش‌بینی بسیار مناسبی از ظرفیت جوش ارائه می‌نماید. به طور مشخص روش پیشنهادی نسبت به روش الاستیک مرسوم در طراحی جوش گوشه بسیار دقیق‌تر بوده و نسبت به روش مرکز آنی دوران که محدودیت‌هایی در استفاده و پیچیدگی در محاسبات دارد، بسیار ساده‌تر است. روش پیشنهادی که تحت عنوان روش طرح پلاستیک جوش گوشه معرفی می‌شود، در مقایسه با نتایج روش مرکز آنی دوران درستی‌آزمایی و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: جوش گوشه، برون محوری داخل صفحه، روش طرح الاستیک، روش مرکز آنی دوران، روش طرح پلاستیک

۱- مقدمه

اتصال اعضای یک سازه فولادی به کمک ایجاد حرارت بالا و ذوب شدن موضعی فولاد در محل اتصال را جوشکاری می‌نامند. نوع جوش براساس جزئیات اتصال، محل جوش و پیش نیازهای آن، تعیین و طراحی می‌شود. جوش گوشه[۱] از ساده‌ترین و متداول‌ترین انواع جوش است که به دلیل مقاومت نسبتاً بالا و دارا بودن مزیت اقتصادی نسبت به جوش‌های دیگر به طور گسترده در اتصالات ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مقاومت جوش گوشه به مقاومت برشی مواد جوش (فلز پُرکننده) بستگی دارد. هنگامی که بارگذاری یک اتصال از ظرفیت جوش گوشه (مقاومت برشی) فراتر می‌رود، فرض می‌شود که شکست با گسیختگی جوش در صفحه گلوی مؤثر[۲] رخ می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، گلوی مؤثر جوش به عنوان کوتاه‌ترین فاصله از ریشه جوش تا

1 .Fillet weld
2 .Effective throat

سطح بزرگترین مثلثی که می‌تواند در پروفیل جوش محاط شود، تعریف می‌شود.

شکل ۱. هندسه جوش گوشه [1]

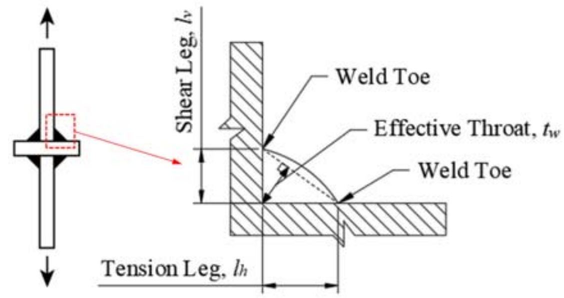


Fig. 1. Fillet weld geometry [1]

مقاومت جوش گوشه به طور مستقیم به جهت بارگذاری بستگی دارد، با تغییر جهت بارگذاری از ۰ تا ۹۰ درجه نسبت به راستای جوش مقاومت جوش گوشه افزایش و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد [2].

مقاومت کششی و فشاری جوش گوشه، بزرگ‌تر از مقاومت برشی آن است؛ بنابراین تنش‌های کنترل‌کننده برای طراحی مشخصات جوش، به صورت محافظه‌کارانه برحسب تنش‌های برشی روی سطح مقطع مؤثر جوش در نظر گرفته می‌شود. طبق آیین‌نامه AISC [3] و AWS [4] مقاومت طراحی یک خط جوش گوشه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\phi R_n = \phi F_{nw} A_{we} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) ϕضریب کاهش مقاومت (طبق آیین‌نامه[3]، ضریب کاهش مقاومت ۰/۷۵ درنظر گرفته می‌شود)، R_n مقاومت اسمی فلز جوش، F_{nw} تنش اسمی فلز جوش و A_{ew} سطح مقطع مؤثر جوش است. تنش اسمی جوش به لحاظ بار و حداقل مقاومت کششی فلز جوش وابسته است و طبق رابطه (۲) ارائه می‌شود:

$$F_{nw} = 0.60 F_{EXX} (1.0 + 0.50 \sin^{1.5} \theta) \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، θ زاویه بین بار و محور طولی جوش F_{EXX} مقاومت نهایی الکترود جوش است. بر این اساس، مقاومت طراحی جوش گوشه در بارگذاری عرضی یک و نیم برابر مقاومت طراحی نسبت به بارگذاری طولی است. با تغییر جهت بار از طولی به عرضی، تنش‌های برشی در جوش کاهش و تنش‌های کششی افزایش می‌یابد و باعث افزایش مقاومت طراحی می‌شود [5].

طراحی جوش گوشه برای اتصالاتی که در آن بار به صورت متمرکز و در امتداد با محور جوش قرار می‌گیرد، ساده است؛ زیرا جوش تحت تنش‌های برشی قرار می‌گیرد و شکست جوش به طور کامل توسط مقاومت برشی آن کنترل می‌شود. در بسیاری از اتصالات سازه‌ای، خروج از مرکزیت بار به صورت داخل و خارج از صفحه اجتناب‌ناپذیر است (شکل ۲). این خروج از مرکزیت‌ها باعث ایجاد تنش‌های پیچیده‌تری در جوش شده و می‌تواند منجر به کاهش یا افزایش ظرفیت اتصال شود.

تفاوت اصلی در بارگذاری با خروج از مرکزیت داخل صفحه و خروج از مرکزیت خارج صفحه در تعیین ظرفیت جوش، قابلیت تغییرشکل جوش است. در حالتی که جوش تحت برش و پیچش (خروج از مرکزیت داخل صفحه) قرار دارد، جوش می‌تواند آزادانه در طول خود تغییر شکل دهد؛ اما در صورتی که اتصال تحت خمش و برش (خروج از مرکزیت خارج صفحه) قرار گیرد، قسمتی از جوش که تحت تنش فشاری قرار دارد به دلیل تماس با صفحات نمی‌تواند به صورت آزادانه تغییر شکل داشته باشد.

شکل ۲. نمونه اتصالات جوشی تحت خروج از مرکزیت

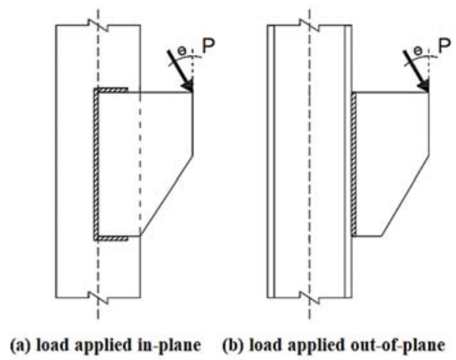
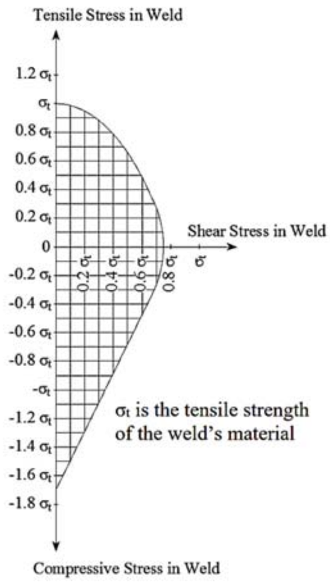


Fig. 2. Samples of eccentrically loaded welded joints

۲- مرور ادبیات

تحقیقات اولیه در مورد رفتار جوش گوشه بیشتر از سال ۱۹۳۰ میلادی شروع شد. این تحقیقات به توزیع تنش الاستیک، هم در طول جوش و هم در مقطع جوش مربوط بود. معیارهای طراحی جوش گوشه در اروپا از تحقیقات انجام شده توسط جنسن[1] [6] و کیست[2] [7] به روی جوش گوشه نشأت می‌گیرد. کیست با انجام آزمایش با محوریت جوش گوشه رابطه‌ای شبیه به معیار فون میزس[3] برای تعیین بار شکست در اتصالات جوشی ارائه کرد. روش او در طراحی جوش گوشه بر این فرض استوار بود که شکستگی جوش در بخش گلوی جوش رخ می‌دهد. وریدنبرگ[4] [8]، دریافت که صفحات گسیختگی همیشه با گلوی نظری منطبق نیستند. علاوه بر این وریدنبرگ تحقیقات کیست را با آزمایش‌ها و تحلیل‌های تکمیلی ادامه داد. مضافاً، وریدنبرگ دریافت که رفتار تجربی با هیچ یک از تئوری‌های شکست موجود سازگار نیست. به همین دلیل، یک راه حل تجربی اتخاذ شد. وریدنبرگ با استفاده از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، منحنی شکست شکل (۳) را برای طراحی جوش گوشه پیشنهاد کرد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، مقاومت برشی جوش گوشه ۰/۷۵ برابر مقاومت کششی تک محوری فلز جوش، در نظر گرفته شد. به علاوه، مطابق شکل (۳) جوش‌هایی که در گلوی مؤثر تحت فشار قرار می‌گیرند، ۷۰ درصد قوی‌تر از جوش‌های متناظر تحت کشش هستند.



شکل ۳. تنش حدی بحرانی بر اساس پژوهش وریدنبرگ [8]

Fig. 3. Fillet weld critical limiting stress according to Vreedenburgh [8]

آرچر[5] و همکاران [9] تئوری‌های شکست مختلف را با نتایج تجربی مقایسه کردند. آن‌ها به دنبال یافتن بهترین تئوری از نظر هماهنگی با یافته‌های واقعی بودند. تئوری‌های شکست شامل حداکثر تنش اصلی[6]، حداکثر تنش برشی[7] و فون میزس بود. به دلیل وجود خروج از مرکزیت کوچک بین بار و نیروی مقاوم، این مقایسه‌ها شامل محاسباتی بود که گشتاورهایی را در جوش در نظر می‌گرفت. آرچر و همکاران، پنج حالت مختلف (تئوری حداکثر تنش اصلی با در نظرگرفتن لنگر و بدون در نظرگرفتن لنگر، حداکثر تنش برشی با در نظرگرفتن لنگر و بدون در نظرگرفتن لنگر و تئوری فون میزس) را مورد مطالعه قرار دادند. بر این اساس روش حداکثر تنش برشی، در حالی که از لنگر موجود صرفه‌نظر شود، بهترین هماهنگی را با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی فراهم می‌آورد.

داوون و ویتوین[8] [10] ترکیب تنش‌های نرمال و برشی روی گلوی مؤثر نظری را با استفاده از معادله فون میزس توصیه کردند. از آنجایی که مشخص شد معیار تسلیم فون میزس که براساس مقاومت کششی ماده جوش است، محافظه‌کارانه است؛

1. Jensen
2. Kist
3. von-Mises
4. Vreedenburgh
5. Archer
6. maximum principal stress
7. maximum shear stress
8. Douwen and Witteveen

تنش مؤثر حاصل در یک ضریب همبستگی (β) وابسته به مقاومت فلز پایه ، ضرب شد. داوون و ویتوین این ضریب را برای فولاد St 37، ۰/۷ و برای فولاد St 52، ۰/۸۵ توصیه کردند.

برای بدست آوردن توزیع برشی یکنواخت در طول جوش، سوانل[1][11] گروه‌های جوش گوشه دایره‌ای شکل را در معرض گشتاورهای پیچشی قرار داد. مقاومت کششی تک محوری فلز جوش ٦٤/٤ (کی اس آی[2]) و میانگین تنش گسیختگی در گلوی جوش ۵۷/۰ بود که منجر به مقاومت برشی متوسط برابر با ۸۸/۵ درصد مقاومت کششی شد.

برای درک شکل‌پذیری جوش گوشه و تأثیر آن بر ظرفیت جوش، مطالعات تجربی برای تعیین رابطه بار-تغییر شکل جوش گوشه انجام شد. باتلر و کولاک[3] [2] رابطه بار-تغییرشکل جوش گوشه را به صورت تجربی برای جهت‌های بارگذاری مختلف اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دریافتند که مقاومت و شکل‌پذیری جوش به جهت بارگذاری بستگی دارد. آزمایش‌های اولیه انجام شده توسط باتلر و کولاک نشان می‌دهد که نسبت‌های مقاومت جوش‌های گوشه با زوایای بارگذاری ۳۰، ٦۰ و ۹۰ درجه به جوش‌های گوشه طولی (θ =0°) به ترتیب ۱/۳٤، ۱/٤۱ و ۱/٤٤ است.

در همین راستا و بر اساس نتایج تجربی، مدل تحلیلی توسعه‌یافته توسط کاتو و موریتا[4][12] پیش‌بینی می‌کند که یک جوش گوشه با بار عرضی ٤٦ درصد قوی‌تر از همان جوش گوشه با بار طولی است.

معادلات طراحی جوش گوشه در آیین‌نامه طراحی فعلی فولاد آمریکا [3] و کانادا [13] از تحقیقات میازگا و کندی[5][5] در سال ۱۹۸۹ روی ٤۲ نمونه اتصال جوش گوشه نشأت می‌گیرد. بر پایه این تحقیقات با افزایش زاویه بارگذاری از صفر تا ۹۰ درجه، مقاومت جوش گوشه به تدریج به ۱/۵۰ برابر افزایش یافت. بدین ترتیب، میازگا و کندی روشی را برای پیش‌بینی مقاومت جوش‌های گوشه با جهت‌های مختلف بر اساس معیار شکست حداکثر تنش برشی پیشنهاد کردند. پس از آن لزیک[6] و کندی [14] در سال ۱۹۹۰ تحقیقات میازگا و کندی [5] را گسترش دادند و یک رابطه ساده که فقط تابعی از زاویه بارگذاری است ($1.0+0.50\sin^{1.5}\theta$) را پیشنهاد کردند. این رابطه به شکل یک ضریب به مقاومت جوش گوشه طولی اعمال می‌شود.

تحقیقات به روی جوش‌های گوشه تحت برش و پیچش در سال ۱۹۷۲ توسط باتلر، پال[7] و کولاک [15] آغاز شد. در این پژوهش، روش مرکز آنی دوران[8] (این روش در بخش ۳-۲ توضیح داده شده است) برای تعیین ظرفیت گروه جوش گوشه تحت برون محوری داخل صفحه پیشنهاد شد. این روش برای پیش‌بینی مقاومت مجموعه‌ای از ۱۳ نمونه آزمایشگاهی (شامل ۸ نمونه با یک خط جوش و ۵ نمونه جوش C-شکل) تحت برش و پیچش مورد استفاده قرار گرفت که میانگین مقاومت آزمایشگاهی به مقاومت پیش‌بینی‌شده ۰/۹۷۷ بدست آمد (بیشترین این نسبت ۱/۳٤۲ و کمترین آن ۰/۸۲۱ بوده است).

در سال ۱۹۷۹، با انجام ۱۱ آزمایش روی جوش گوشه (٦ نمونه جوش C-شکل، (۲) نمونه جوش مستطیلی، ۱ نمونه یک خط جوش قائم، ۱ نمونه دو خط جوش قائم و ۱ نمونه دو خط جوش افقی) تحت برون محوری داخل صفحه توسط سوانل و اسکیوز[9][16]، نشان داده شد که مقاومت پیش‌بینی‌شده با استفاده از روش مرکز آنی دوران تطابق قابل قبولی با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی دارند. در این آزمایش‌ها میانگین نسبت مقاومت آزمایش به مقاومت پیش‌بینی‌شده، ۱/۰۰۸ و انحراف معیار ۰/۰۸٤ بدست آمد.

تیملر[10] و کولاک [17] در سال ۱۹۸٤ از روش توسعه یافته توسط باتلر و همکاران برای پیش‌بینی مقاومت نهایی جوش

1 .Swannell
2. ksi
3. Butler and Kulak
4. Kato and Morita
5. Miazga and Kennedy
6. Lesik
7. Pal
8. Instantaneous Center of Rotation Method (IC Method)
9. Skewes
10. Timler

گوشه تحت خروج از مرکزیت داخل صفحه استفاده کرده و با انجام سه آزمایش (دوخط جوش موازی) به این نتیجه دست یافتند که تمام نتایج پیش‌بینی‌شده از مقاومت آزمایش کمتر بوده و درصد خطای بین این دو مقدار (بیشترین خطا ۱۱– وکمترین خطا ۱– درصد) در محدوده قابل قبول بوده است.

در سال ۱۹۹۰ لزیک و کندی [14] با جمع‌آوری آزمایش‌های انجام شده روی جوش‌های گوشه تحت خروج از مرکزیت داخل صفحه و با انجام تحلیل قابلیت اعتماد روی ۸ گروه جوش مختلف، جداولی برای طراحی با شاخص قابلیت اعتماد ٤/٥ ارائه کردند. جداول ارائه شده با جداول کمک طراحی راهنمای آیین‌نامه [18] حداکثر ۱۱ درصد اختلاف داشت.

در سال ۲۰۱٤، ۵ آزمایش روی جوش‌های گوشه تحت برون محوری داخل صفحه (سه نمونه یک خط جوش قائم و ۲ نمونه دو خط جوش افقی) توسط بیورک[1] و همکاران [19] انجام شد. در این مطالعه بیشترین مقدار نسبت لنگر مقاوم محاسبه شده در آزمایش به لنگر پلاستیک توسعه داده شده در همان پژوهش ۱/٤٦ و کمترین این مقدار ۰/۸۱ بدست آمد.

۳- روش‌های موجود طراحی

روش‌های طرح آیین‌نامه‌ای موجود برای تعیین ظرفیت جوش گوشه تحت بار برون محور داخل صفحه عبارت‌اند از: روش الاستیک و روش مرکز آنی دوران. روش الاستیک بسیار محافظه‌کارانه بوده و ظرفیت شکل‌پذیری را برای گروه جوش در نظر نمی‌گیرد. روش مرکز آنی دوران روش بسیار دقیق‌تری است، اما از ضعف‌های این روش می‌توان به پیچیدگی محاسبات آن اشاره کرد. کاستی‌های موجود در روش‌های طراحی فعلی انگیزه ارائه یک روش ساده و در عین حال کاربردی تحت عنوان روش طرح پلاستیک جوش گوشه را فراهم نمود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۳-۱ روش طرح الاستیک

متداول‌ترین روش در طراحی جوش‌ها روش طرح الاستیک است. همان‌گونه که در شکل (٤) نشان داده شده است، در این روش ابتدا با استفاده از اصل بر هم نهی، تمام نیروها به مرکز سطح جوش منتقل شده و به صورت ترکیبی از نیروهای برشی و لنگر پیچشی نشان داده می‌شوند. سپس با استفاده از روابط مکانیک جامدات نیروها به تنش‌های متناظر در سطح جوش تبدیل می‌شوند. تنش‌های حاصل در صورتی که در یک صفحه باشند با یکدیگر جمع جبری می‌شوند و در صورتی که در صفحات متعامد قرار گیرند با جذر مربعات برآیند آن‌ها محاسبه می‌شود. در نهایت بیشینه تنش موجود که همان مقاومت مورد نیاز جوش است، با ظرفیت جوش آیین‌نامه [3] رابطه (۱) ، مقایسه می‌شود. روابط زیر چگونگی کنترل مقاومت جوش گوشه تحت بار برون محور داخل صفحه را طبق روش الاستیک نشان می‌دهد:

$$\sqrt{\left(\frac{P_x}{A_{we}}+\frac{Ty}{I_p}\right)^2+\left(\frac{P_y}{A_{we}}+\frac{Tx}{I_p}\right)^2} \le \phi R_{Design\_Strength} \qquad (۳)$$

که در آن P نیروی برشی A_{we} سطح مقطع مؤثر جوش، T لنگر پیچشی، I_p ممان اینرسی قطبی، x دورترین فاصله افقی تا مرکز سطح جوش، y دورترین فاصله قائم تا مرکز سطح جوش و $R_{Design\_Strength}$ مقاومت طراحی جوش است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\phi R_{Design\_Strength} = \phi 0.60 F_{EXX} \qquad (٤)$$

در رابطه (٤) ϕ ضریب کاهش مقاومت و F_{EXX} مقاومت نهایی الکترود جوش است.

شکل ٤. نمایش پارامترهای روش الاستیک

[1] Björk

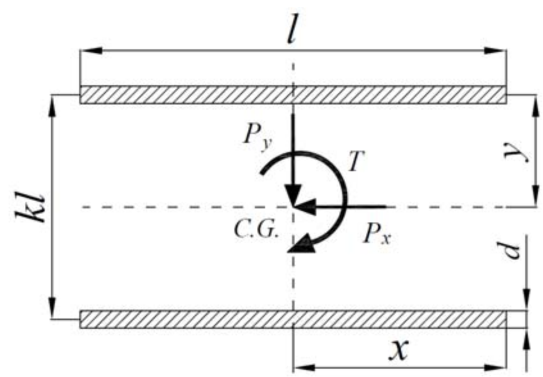


Fig. 4. Display of the elastic method's parameters

۳-۲ روش مرکز آنی دوران

همان‌گونه که اشاره شد روش الاستیک بسیار محافظه‌کارانه است و با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی سازگار نیست؛ اما روش مرکز آنی دوران، یا به اختصار روش IC، با نتایج آزمون سازگاری بسیار خوبی دارد. در روش IC نیروی هر واحد طول از المان جوش محاسبه شده و نیرو و لنگر مقاوم با محاسبه مجموع نیروی المان‌ها، تخمین زده می‌شود [20].

همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، روش IC با تقسیم جوش به المان‌های گسسته آغاز می‌شود. با افزایش تعداد المان‌ها دقت روش بیشتر می‌شود، به نظر می‌رسد که بیست المان منجر به نتایج خوبی برای بیشتر اتصالات می‌شود [20]. طبق روش IC نیروی هر المان جوش به صورت زیر قابل محاسبه است:

۱- یک مرکز آنی دوران (IC) در نظر گرفته می‌شود.

۲- فرض می‌شود که نیروی مقاوم در هر المان جوش به صورت عمود بر شعاع اتصال آن المان (d) به مرکز آنی عمل می‌کند.

۳- زاویه بین نیروی المان و محور جوش (θ) محاسبه می‌شود.

۴- از طریق روابط تجربی موجود، با استفاده از زاویه هر المان، تغییر شکل نهایی هر المان جوش محاسبه شده و از تغییر شکل نهایی جوش، نیروی هر المان به دست می‌آید.

۵- در مرحله نهایی باید معادلات تعادل استاتیکی توسط نیرو و لنگر مقاوم ایجاد شده ارضا شوند. از آنجا که تمام فواصل و زاویه‌ها تابعی از موقعیت مرکز آنی دوران (IC) هستند، این کمیت به صورت تکرارشونده انتخاب می‌شود تا زمانی که تعادل برقرار شود.

۶- نیروی مقاوم ایجاد شده که تمام معادلات استاتیکی را ارضا می‌کند، ظرفیت اسمی گروه جوش است.

شکل ۵. نمایی از روش مرکز آنی دوران

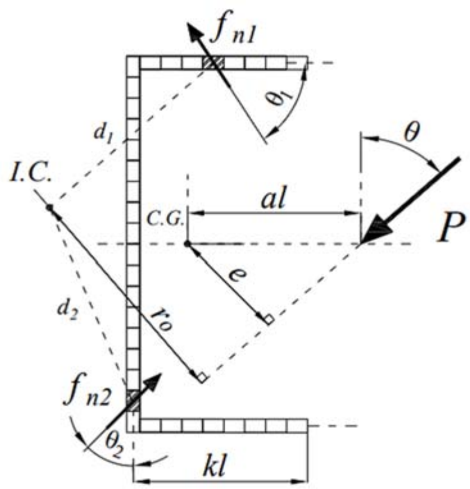


Fig. 5. A view of the Instantaneous Center of Rotation method

۴- روش پیشنهادی (روش طرح پلاستیک)

محاسبات این روش تشابه زیادی با روش الاستیک دارد. جهت کاربست آن در ابتدا با استفاده از اصل بر هم نهی، تمام نیروها به مرکز سطح جوش منتقل شده و به یک نیرو و یک لنگر پیچشی معادل تبدیل می‌شوند. در این روش با در نظرگیری قابلیت شکل‌پذیری برای جوش‌ها، فرض می‌شود که توزیع تنش در جوش‌ها زمانی که جوش به بیشترین تغییرشکل قابل تحمل می‌رسد، به صورت یکسان است. در این روش به جای استفاده از ممان اینرسی قطبی در محاسبه تنش ناشی از پیچش، مجموع اساس مقطع پلاستیک جوش در دو راستای x و y استفاده می‌شود. برای در نظرگیری جهت تنش، جمله مربوط به سهم پیچش در یک ضریب موقعیت ($\frac{x}{r}$ یا $\frac{y}{r}$) ضرب

می‌شود. تنش‌های ایجاد شده در یک جهت باهم جمع جبری شده و مجموع تنش‌های متعامد، با جذر مربعات در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در شکل (٦) نشان داده شده است، در صورت زاویه‌دار بودن بار، بار به دو راستای افقی و قائم تجزیه می‌شود. همچنین در این روش افزایش ظرفیت جوش‌های بارگذاری شده در جهت عرضی نیز لحاظ می‌شود (رابطه ۲). بر این اساس سهم مساحت ساق جوش‌های عمود بر محور بار با ضریب ۱/۵ تشدید می‌شوند. بدین ترتیب رابطه پیشنهادی روش پلاستیک تحت بار برون محور داخل صفحه به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$\sqrt{\left[(\frac{P_x}{A_{eff1}})+(\frac{T}{Z_x+Z_y}*\frac{y}{r})\right]^2+\left[(\frac{P_y}{A_{eff2}})+(\frac{T}{Z_x+Z_y}*\frac{x}{r})\right]^2}\le \phi R_{Design\_Strength}$$

(۵)

در رابطه بالا P و T به ترتیب نیروی برشی و لنگر پیچشی و Z مدول پلاستیک جوش است (زیروندهای x و y مقادیر هر کمیت را در راستا یا حول محور متناظر نشان می‌دهد). x و y به ترتیب فاصله افقی و قائم دورترین المان جوش تا مرکز سطح جوش و r نیز مجذور مربعات فواصل یاد شده است. همچنین A_{eff} مساحت مؤثر جوش مطابق رابطه زیر است (زیروندهای ۱ و ۲، مساحت مؤثر جوش را متناسب با مؤلفه نیروی برشی نشان می‌دهد):

$$A_{eff}=1.5A_{we}^{T}+A_{we}^{L} \qquad (٦)$$

در رابطه (٦)، A^{T}_{we} مساحت مؤثر جوش‌های عمود بر راستای نیروی برشی و A^{L}_{we} مساحت مؤثر جوش‌های همراستا با این نیرو است.

در شکل شماره (۷) روند انجام روش ارائه شده در این مقاله به صورت فلوچارت آورده شده است.

شکل ٦. شماتیک روش طرح پلاستیک پیشنهادی

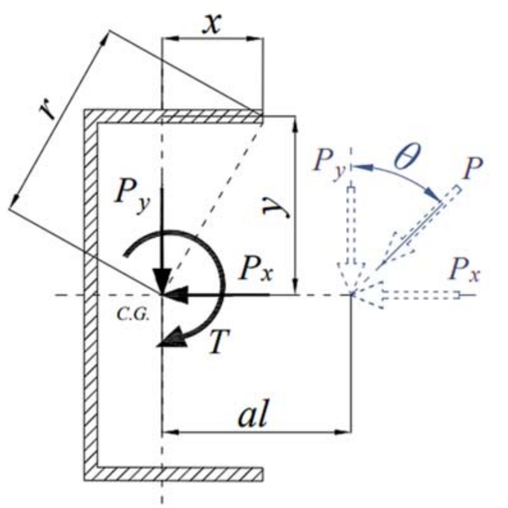


Fig .6. Schematic of the proposed plastic design method

شکل ۷. فلوچارت روش طرح پلاستیک

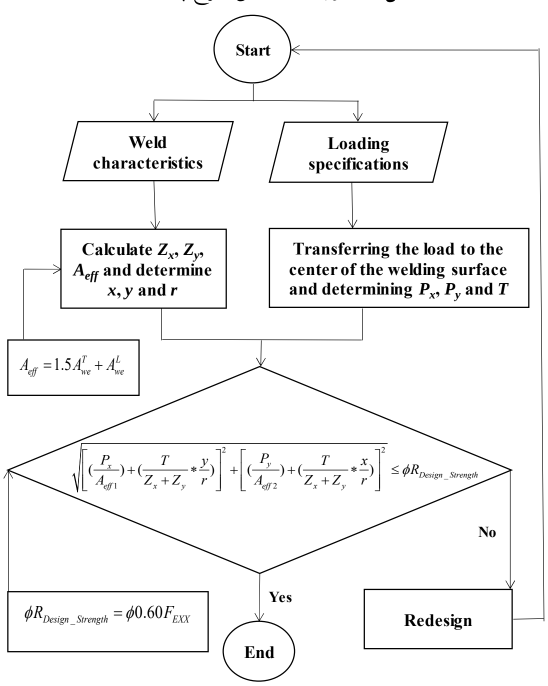


Fig. 7. Flowchart of the plastic design method

۵- مقایسه روش‌ها و جمع‌بندی

برای بررسی روش پیشنهادی، با انتخاب ۸ شکل جوش مختلف که منطبق بر شکل‌های ارائه شده در راهنمای آیین‌نامه AISC [18] هستند، مقاومت پلاستیک جوش‌ها تحت خروج از مرکزیت‌های متغیر بدست آمده است. در ادامه این مقادیر با

مقاومت بدست آمده از روش مرکز آنی دوران و روش الاستیک مقایسه می‌شود. شکل (۸)، تصویر جوش‌های مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. در این شکل، l طول جوش، k پارامتر ثانویه شکل جوش، a نسبت خروج از مرکزیت به طول جوش ($\frac{e_x}{l}$) و θ زاویه بار نسبت به راستای قائم است. در این مقایسه طول تمام جوش‌ها (l) ۸ سانتی‌متر، بُعد جوش (d) ۵ میلی‌متر، پارامتر ثانویه (k) برابر با ۰/۵ و نوع الکترود E60 با مقاومت نهایی کششی ۴۲۰ مگاپاسکال است. برای بررسی اثر زاویه اعمال بار بر نتایج، سه زاویه بارگذاری صفر، ۴۵ و ۷۵ درجه در نظر گرفته شده است. شکل (۹)، این مقایسه را برای زاویه صفر درجه، شکل (۱۰)، برای زاویه ۴۵ و شکل (۱۱)، این مقایسه را برای زاویه ۷۵ درجه نشان می دهد.

برای هر کدام از زاویه‌های بارگذاری مختلف، ۸ نمودار ترسیم شده است. نمودارها مقدار بار نهایی (P) قابل تحمل بدست آمده از روش الاستیک (*P_Elastic*، نمودار آبی رنگ)، روش مرکز آنی دوران (*P_IC Method*، نمودار قرمز رنگ) [18] به علاوه محدوه‌های ۱۰ درصد بالا و پایین مقاومت حاصل از روش مرکز آنی دوران (0.9*P_IC Method*، 1.1*P_IC Method*، نمودار های خطچین) و مقاومت روش پلاستیک پیشنهادی (*P_Plastic*، نمودار مشکی رنگ) را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل‌های (۹ الی ۱۱) ملاحظه می‌شود، تقریباً در تمام موارد بار نهایی حاصل از روش پلاستیک پیشنهادی از بار نهایی بدست آمده از روش مرکز آنی دوران قدری کمتر بوده و نسبت به این روش محافظه‌کارانه قلمداد می‌شود. به‌طور دقیق‌تر بار نهایی به دست آمده از روش پلاستیک در اکثر مواقع حول ۱۰ درصد ظرفیت باربری حاصل از روش IC قرار می‌گیرد. از این بابت دقت روش پیشنهادی قابل‌توجه است. دقت نسبی روش پیشنهادی ضمن مقایسه با مقادیر حاصل از روش الاستیک آشکارتر نیز می‌شود. با این وصف روش پلاستیک پیشنهادی که حجم محاسباتی مشابه با روش الاستیک دارد. نتایج بسیار نزدیک به روش IC و به مراتب بهتر از روش الاسیتک را ارائه می‌دهد.

شکل ۸ تصویر شماتیک جوش‌های مورد مطالعه

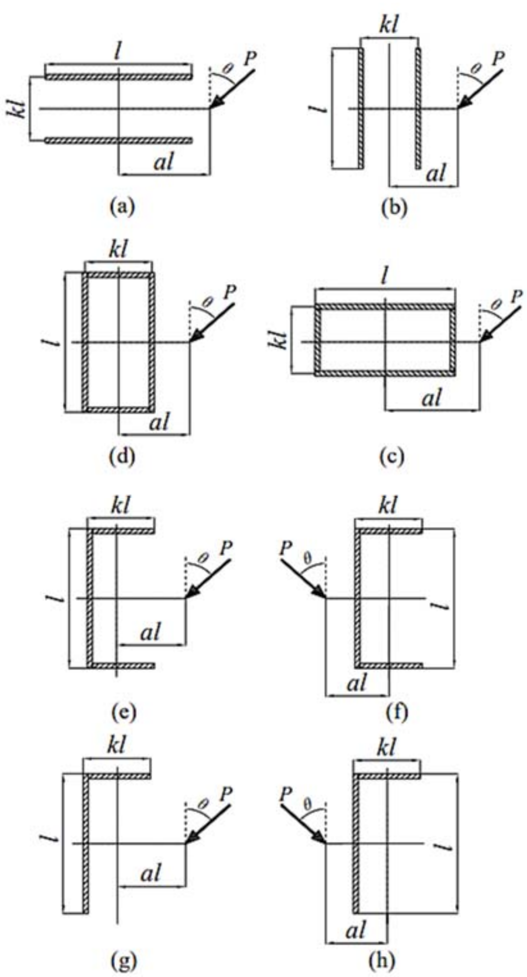


Fig. 8. Schematic view of the studied welds

شکل ۹. نمودارهای مقایسه روش پیشنهادی برای زاویه صفر درجه

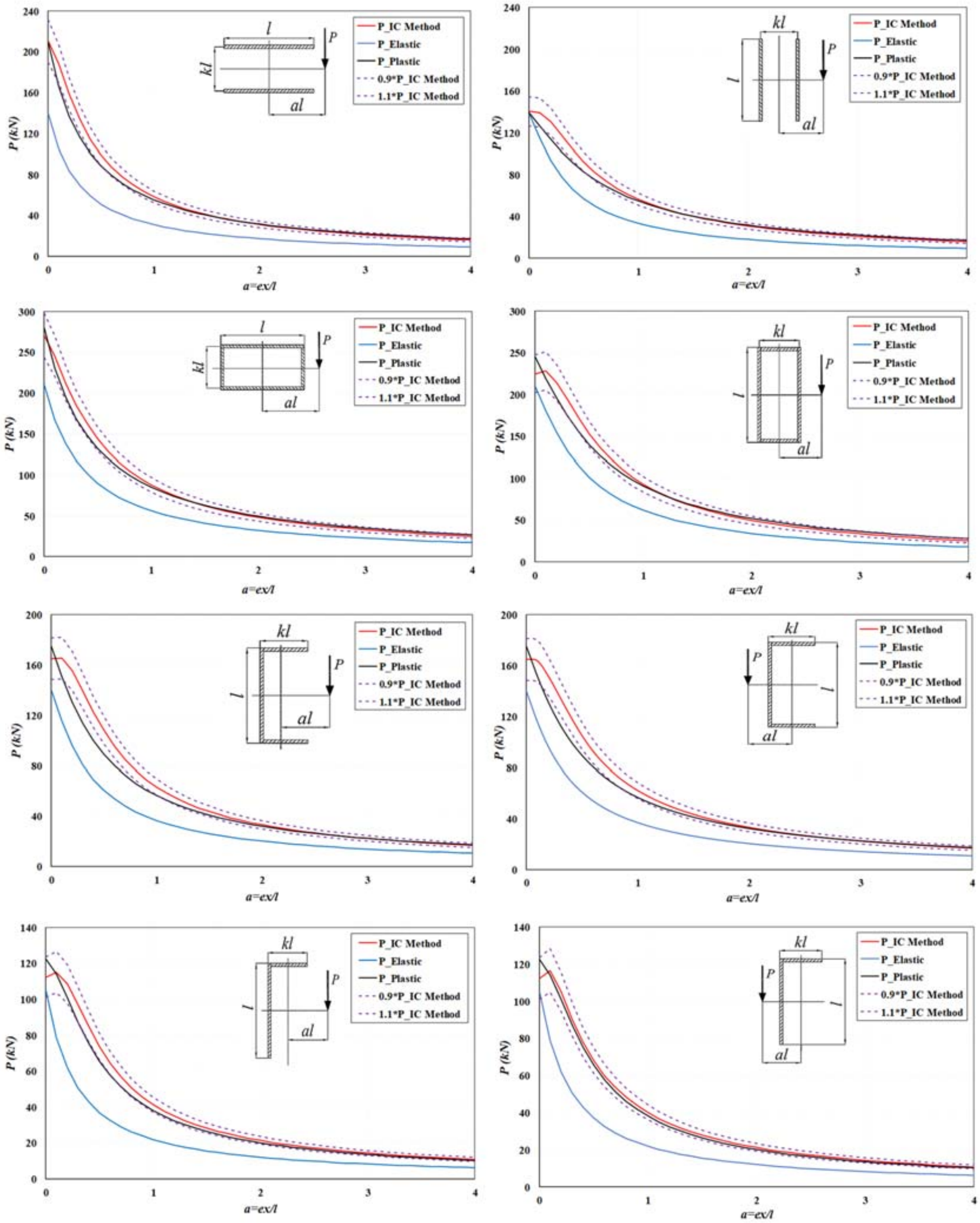


Fig. 9. Comparison diagrams of the proposed method for Θ=0˚

شکل ۱۰. نمودارهای مقایسه روش پیشنهادی برای زاویه ٤٥ درجه

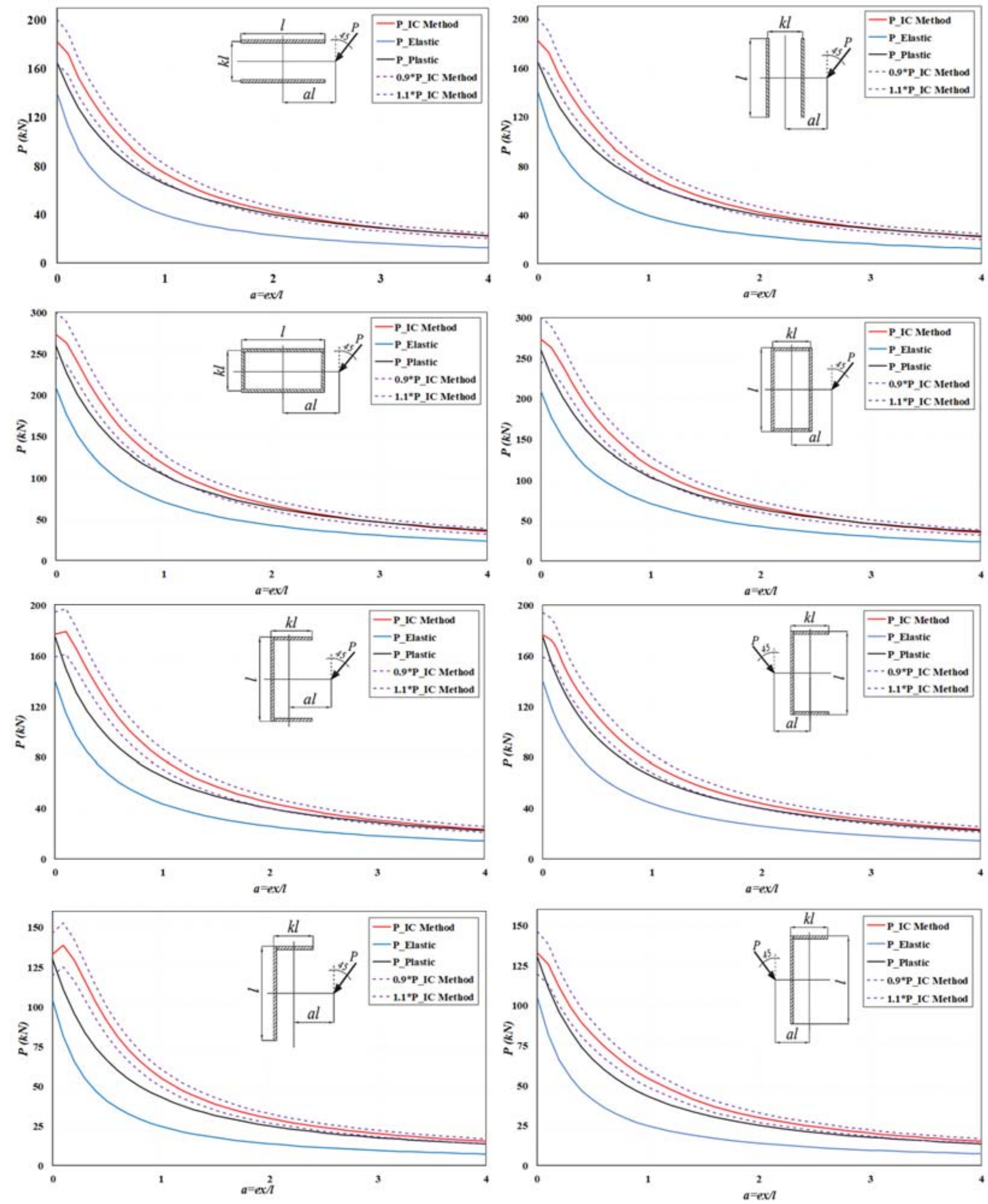


Fig. 10. Comparison diagrams of the proposed method for $\Theta = 45^{\circ}$

در بررسی دقت روش پیشنهادی برای زاویه‌های بارگذاری مختلف، بهترین نتایج برای زاویه صفر درجه حاصل شده است. هرچند در دو زاویه دیگر (٤٥ و ٧٥ درجه) نیز نتایج قابل قبول است. همچنین لازم به توضیح است که از بین پارامترهای دخیل در مسئله، هنگام مطالعات پارامتری انجام شده در پژوهش حاضر، اثر زاویه بارگذاری از سایر موارد بیشتر بوده است و به همین دلیل به آن پرداخته شده است. در واقع سایر موارد همچون اثر طول جوش (l)، بُعد جوش (d)، پارامتر ثانویه (k) و مقاومت کششی فلز جوش نیز مطالعه شده است؛ اما به دلیل حساسیت بسیار کم نتایج روش پلاستیک به این پارامترها از ارائه نموارهای متناظر صرفه نظر شده است.

شکل ۱۱. نمودارهای مقایسه روش پیشنهادی برای زاویه ۷۵ درجه

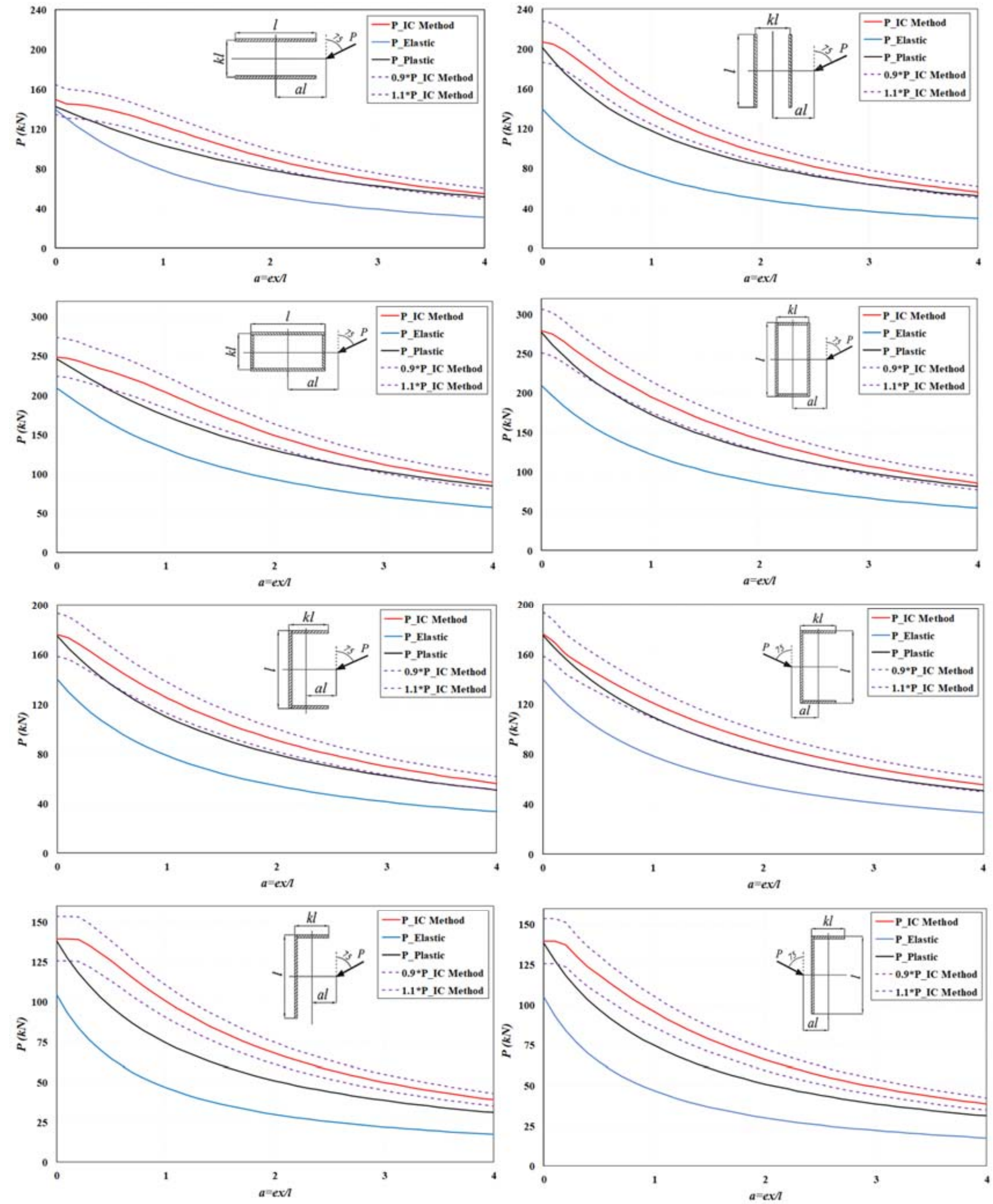


Fig. 11. Comparison diagrams of the proposed method for ϴ =75˚

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارائه روش جدیدی در طراحی جوش‌های گوشه تحت بار برون محور داخل صفحه پرداخت. بدین منظور ضمن بیان روش پیشنهادی (روش طرح پلاستیک)، کارآیی و دقت آن در مقایسه با دو روش طرح آیین‌نامه‌ای موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا ۸ شکل جوش موجود در راهنمای آیین‌نامه AISC [18] انتخاب و مقاومت

پیشنهادی جوش‌ها به ازای خروج از مرکزیت‌های متفاوت محاسبه شد.

بر این اساس با وجود آنکه روش جدید نسبت به روش طرح الاستیک جوش‌ها حجم محاسباتی یکسانی دارد، پیش‌بینی بسیار نزدیک‌تری به روش مرکز آنی دوران یا روش IC (که خود هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد) ارائه می‌نماید. در واقع دقت روش پیشنهادی در اغلب موارد حدود ۹۰ درصد روش IC است. این در حالی است که روش طرح پلاستیک پیشنهادی به دلیل سهولت در استفاده در مقایسه با روش مرکز آنی دوران مزیت محاسباتی قابل توجهی را نیز به طراحان عرضه می‌دارد.

۷- مراجع

[1] J. Thomas, “Design of Single-Sided Fillet Welds Under Transverse Loading,” 2021.

[2] L. J. Butler and G. L. Kulak, “Strength of fillet welds as a function of direction of load,” *Weld. J.*, vol. 50, no. 5, pp. 231s-234s, 1971.

[3] AISC, “Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-16,” *Am. Inst. Steel Constr.*, 2016.

[4] AWS, “American National Standard,” AWS D1.1/D1.1M:2006, Structural Welding Code *Steel*. 2018.

[5] G. S. Miazga and D. J. L. Kennedy, “Behaviour of fillet welds as a function of the angle of loading,” *Can. J. Civ. Eng.*, 1989.

[6] C. D. Jensen, “Combined stresses in fillet welds,” *J. Am. Weld. Soc. Vol*, vol. 13, no. 1934, pp. 17–21, 1934.

[7] N. C. Kist, “Berechnung der Schweissnähte unter Berücksichtigung konstanter Gestaltänderungsenergie,” 1936.

[8] C. G. J. Vreedenburgh, “New principles for the calculation of welded joints,” *Int. Shipbuild. Prog.*, vol. 1, pp. 200–223, 1954.

[9] F. E. Archer, H. K. Fischer, and E. M. Kitchen, *The Strength of Fillet Welds*. University of New South Wales, 1964.

[10] J. Witteveen and A. A. van Douwen, “Voorstel tot Wijziging van de ISO-formule voor lasberekeningen in een op de vloeihypothese van Huber-Hencky aansluitende formule,” *Overdr. uit Lastechniek, 32e jaargang No. 6, Uitgevers Wyt-Rotterdam*, 1966.

[11] P. Swannell, “Deformation of Longitudinal Fillet Welds Subjected to a Uniform Shearing Intensity,” *Br. Weld. J.*, vol. 15, no. 3, p. 120, 1968.

[12] B. Kato and K. Morita, “Strength of transverse fillet welded joints,” *Weld. J.*, vol. 53, no. 2, pp. 59s-64s, 1974.

[13] CSA-S16-19, “Design of steel structures,” *Toronto, ON*, 2019.

[14] D. F. Lesik and D. J. L. Kennedy, “Ultimate strength of fillet welded connections loaded in plane,” *Can. J. Civ. Eng.*, 1990.

[15] L. J. Butler, S. Pal, and G. L. Kulak, “Eccentrically Loaded Welded Connections,” *J. Struct. Div.*, 1972.

[16] P. Swannell and I. C. Skewes, “Design of welded brackets loaded in-plane: elastic and ultimate load techniques,” *Aust Weld Res*, 1979.

[17] G. L. Kulak and P. A. Timler, “Tests on eccentrically loaded fillet welds.,” 1984.

[18] AISC, “Steel Construction Manual 15th Edition,” *J. Chem. Inf. Model.*, 2017.

[19] T. Björk, T. Penttilä, and T. Nykänen, “Rotation capacity of fillet weld joints made of high-strength steel,” *Weld. World*, 2014.

[20] G. D. BRANDT, “General solution for eccentric loads on weld groups.,” Eng J Aminst steel constr, 1982.

Plastic design of fillet welds under in-plane eccentric loads

Alireza Rezaei[1], Alireza Moazezi Mehretehran[2], Shervin Maleki[3*]

1-Master of Science student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology
2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology
3- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

***smaleki@sharif.edu**

Abstract

The main purpose of this study is to provide a simple and efficient method for calculating the capacity of fillet welds subjected to in-plane eccentric loads. Various methods have been proposed to determine the capacity of fillet welds under such circumstances over time. The existing design methods, such as the conventional elastic method, are very conservative and do not match the test results well due to neglecting of ductility and strain compatibility of the weld group. On the other hand, the instantaneous center of rotation method (IC) considers the above parameters but requires complex calculations. Therefore, in the present study, a method for the design of the fillet welds is introduced which considers the inelastic properties of the welds in a simple manner, while provides a very good prediction of the weld group capacity. The proposed method is much more accurate than the conventional elastic method in the design of fillet welds and is much simpler than the IC method which has limitations in use and complexity in calculations. In this method, considering the ductility for welds, it is assumed that the stress distribution in welds is uniform when the weld reaches its maximum bearable deformation.

The performance of the proposed method which is called Plastic Design Method has been compared and evaluated in comparison with the prequalified IC method. To this end, 8 different configurations of weld groups from the AISC Manual were selected and their capacities were calculated for different amount of load eccentricity. Accordingly, despite the fact that the new method has almost the same computational cost of the elastic design method, it offers more accurate strength predictions of the weld groups. For all considered cases, the ultimate loads obtained from the proposed plastic method are just slightly different from those of the IC method and they are mainly on the safe side. To be more precise, the accuracy of the results calculated by the proposed method is within 90% of those of the IC method.

In accordance with the authors' parametric studies on the factors affecting the results of the plastic design method (e.g., the angle of loading (θ), the weld length (l), the weld throat thickness (d), the secondary parameter (k) and the tensile strength of the welded metal), it was found that the angle of loading has the most profound effect. Therefore, the influence of loading angle on the predicted results was included. Accordingly, three different loading angles (i.e., zero, 45 and 75 degrees) were chosen and the weld groups capacities were calculated in each case. The corresponding results showed that as the loading angle increases, the accuracy of the results decreases and the most accurate predictions are obtained for the case of zero angle loading as compared with those of the IC method. Nevertheless, the predictions are still in an acceptable range for non-zero angles. It is also worth mentioning that irrespective of the loading angle, the new plastic method strength predictions are always far better than those of the conventional elastic design method.

Keywords: fillet weld, in-plane eccentricity, elastic design method, Instantaneous center of rotation method, plastic design method