

ارزیابی تأثیر امتداد نیرو بر روی مقاومت نهایی جوش های گوشه طولی و عرضی در اتصال ورق های پوششی با فولاد پر مقاومت

اباذر اصغری^{۱*}، محمدرضا علیمردانی^۲، حامد پاشائی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳۱۱۱۵۵، abazar.asghari@ut.ac.ir

چکیده

با پیشرفت صنعت عمران، استفاده از فولادهای پر مقاومت به مرور بیش تر شده است. فولادهای پر مقاومت به نسبت فولادهای مرسوم قابلیت تحمل تنش های بالاتری را دارند؛ با این وجود شکل پذیری آنها کم تر است. در حال حاضر به دلیل قیمت بالای آنها در صنایع خاص استفاده می شوند. اتصال دو قطعه فولادی نیازمند استفاده از جوش یا پیچ است. جوش گوشه ساده ترین و پرکاربردترین نوع جوش است. بنابراین بررسی این نوع جوش در فولادهای پر مقاومت دارای اهمیت بالایی است. همچنین جوش های گوشه می توانند با راستای نیرو زاویه های متفاوتی داشته باشند که می تواند در مقاومت آنها تأثیرگذار باشد. در این تحقیق به بررسی تأثیر زاویه راستای محور طولی جوش با راستای محور نیروی وارده پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا یک مدل آزمایشگاهی با در نظر گرفتن تأثیر خرابی در جوش با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل سازی و صحت سنجی شد؛ سپس نمونه ها تحت زاویه های مختلف تحلیل شدند؛ پس از آن حداکثر مقاومت جوش و میزان شکل پذیری آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقاومت پیشنهادی آیین نامه فولاد آمریکا برای جوش ها با زاویه های مختلف بررسی شد. نتایج حاصل از مدل سازی به طور میانگین ۱۴ درصد با نتایج آیین نامه اختلاف داشت. براساس نتایج این تحقیق، برخلاف فولادهای نرمه، با افزایش زاویه محور طولی جوش با راستای نیروی وارده، میزان شکل پذیری جوش افزایش می یابد.

واژگان کلیدی

جوش گوشه، فولاد پر مقاومت، زاویه جوش، شکل پذیری جوش گوشه، نرم افزار ABAQUS

Evaluating the effect of force direction on the ultimate strength of longitudinal and transverse fillet welds for high strength steel cover plate connection

A. Asghari, M.R. Alimardani, H. Pashaei

Abstract

With the advancement of the construction industry, the use of high-strength steel has gradually increased. High-strength steels can withstand higher stresses compared to conventional steels, yet they exhibit less ductility. Currently, due to their high cost, they are primarily utilized in specialized industries. Connecting two steel pieces requires the use of welding or bolts. Fillet welding is the simplest and most commonly used type of welding. Therefore, investigating this type of weld in high-strength steel is of great importance. Fillet welds can also have different angles in the direction of applied force, which itself affects their strength.

In this study, the influence of the welding angle on the axis of the applied force has been examined. First, an experimental model, considering the effect of defects in the weld, was modeled and validated using ABAQUS software. Subsequently, specimens were analyzed at various angles. The maximum strength of the weld and its ductility were investigated. Additionally, the recommended strength of the American steel code for welds at different angles was examined. The results showed a 14% average difference from the code. Unlike mild steels, an increase in the welding axis angle with the direction of the applied force increased the ductility of the fillet weld.

Keywords

Fillet Weld High-Strength Steel, Weld Angle, Fillet Weld Ductility, ABAQUS Software

اتصالات، یکی از مؤلفه‌های اصلی یک سازه بوده که در پژوهش، طراحی و ساخت مورد بحث و بررسی واقع می‌شود. طراحی اتصالات در سازه‌های فولادی، همواره باید با رجوع به مقررات و دستورالعمل‌های مربوطه که برای هر کشور توسط محققان آن زمینه تهیه و تدوین می‌شوند، انجام شود. اتصال اجزا و قطعات سازه‌ای نظیر تیر، ستون، مهاربند و اتصالاتی مانند نبشی، ورق زیرسری، روسری و گاست‌پلیت به یکدیگر امروزه به‌وسیله جوش و پیچ صورت می‌گیرد. در گذشته، عملکرد مکانیکی اتصالات جوشی تحت اثر بارگذاری استاتیکی [۱-۴]، بارگذاری خستگی [۵ و ۶] و بارگذاری ضربه مورد بررسی قرار گرفته است. چندین نتیجه نوآورانه و متنوع نسبت به فولادهای نرم به‌دست آمده است. به‌عنوان مثال، بار نهایی پیش‌بینی‌شده بر اساس دستورالعمل‌های طراحی فعلی همیشه محافظه‌کارانه بوده و ناحیه نرم‌شده^۱ در نزدیکی جوش تأثیر مخربی بر مقاومت نهایی جوش داشته است. همچنین با افزایش گرید فلز جوش، مقاومت کمی افزایش می‌یابد درحالی‌که میزان شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

جوش‌ها در سازه‌های فولادی عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ جوش شیاری و جوش گوشه. جوش گوشه به جوشی گفته می‌شود که وجوه جانبی دو قطعه روی هم را از طریق رسوب بر وجه هر قطعه متصل می‌نماید. جوش‌های گوشه به‌دلیل سهولت در اجرا امروزه متداول‌ترین نوع جوش در سازه‌های فولادی هستند و می‌توان گفت بیش از ۷۰ درصد از اتصالات جوشی در سازه‌های فولادی و صنعت ساختمان‌سازی از همین نوع هستند. امروزه تعیین دقیق توزیع تنش در جوش‌های گوشه حتی در اتصالات ساده امری پیچیده است. عوامل زیادی وجود دارند که بر رفتار سازه‌ای اتصالات جوش گوشه تحت بارگذاری استاتیکی تأثیر می‌گذارند [۷ و ۸]؛ ازجمله این عوامل می‌توان به مواردی مانند راستای بارگذاری (عرضی و طولی)، بعد جوش^۲، ضخامت صفحه اتصال^۳، نفوذ جوش^۴، فلز پرکننده^۵، نوع (گرید) فولاد^۶، عدم تطابق استحکام فلز جوش^۷ و

فاصله تماس بین دو صفحه اتصال‌شونده به‌وسیله جوش^۸ اشاره کرد.

تاجیک و همکاران عملکرد جوش‌های گوشه و جوش‌های شیاری با نفوذ کامل (CJP)^۹ در ناحیه چشمه اتصال یک ستون فولادی با مقطع قوطی‌شکل را بررسی کردند [۹]. در این تحقیق تست‌های آزمایشگاهی تحت اثر نیروهای برشی خالص با استفاده از دو نمونه با جوش‌های گوشه و CJP انجام شده است. نتایج تحقیق نشان داده است که هر دو نوع جوش، مقاومت قابل‌قبولی دارند. در این تحقیق از تکنیک تصویربرداری دیجیتال (DIC)^{۱۰} برای اندازه‌گیری تنش استفاده شده است. همچنین مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ABAQUS با استفاده از نتایج آزمایشات اعتبارسنجی شده است. در این مطالعه نشان داده شده که جوش‌های گوشه به‌طور متوسط ۲۲۱٪ مصالح جوش کم‌تری نسبت به جوش‌های CJP برای محدوده ضخامت‌های صفحات فولادی بین ۶ تا ۵۰ میلی‌متر نیاز دارند. این مورد بیان‌کننده آن است که جوش‌های گوشه از نظر استفاده، در دسته مواد مقرون‌به‌صرفه و کارآمد بوده و در نتیجه طرح مورد نظر به یک طرح اقتصادی‌تر منتهی می‌شود.

هندسه جوش تأثیر زیادی بر مقاومت اتصالات با جوش گوشه تحت بارگذاری چرخه‌ای خواهد داشت. مطالعات قابل‌توجهی برای بررسی اثر هندسه‌های جوش مختلف بر مقاومت در برابر خستگی و رفتار اتصالات جوش گوشه انجام شده است. **کاچزی^{۱۱} و همکاران** اثر پروفیل‌های با هندسه مختلف را بر روی اتصالات جوش گوشه بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت در برابر خستگی اتصالات جوش گوشه با پروفیل هندسی بهبودیافته بیش‌تر از همان اتصال با ابعاد جوش دیگر است [۱۰].

عمق نفوذ جوش بر مقاومت در برابر خستگی و رفتار اتصالات جوش گوشه به‌شدت مؤثر است. نتایج تحقیقات تجربی و عددی در زمینه اتصالات جوش گوشه نشان داده است که با افزایش عمق نفوذ جوش، مقاومت در برابر خستگی این اتصالات افزایش می‌یابد [۱۱]. در بارگذاری چرخه‌ای نیز، بهبود مقاومت در برابر خستگی اتصالات جوش گوشه با افزایش عمق

⁸ Contact Gap Size Between Two Plates

⁹ Complete Joint Penetration

¹⁰ Digital Image Correlation

¹¹ Caccese

¹ Softened Zone

² Weld Size

³ Plate Thickness

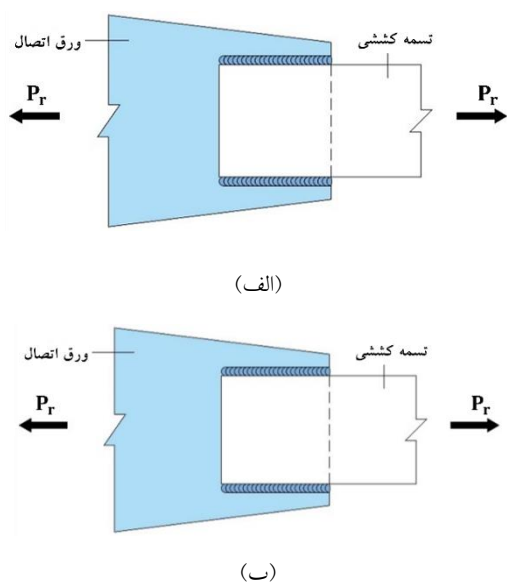
⁴ Weld Penetration

⁵ Filler Material

⁶ Steel Grade

⁷ Strength Mismatch of Weld Metal

در روش‌های محافظه‌کارانه ذکر شده برای تعیین مقاومت موجود جوش‌های گوشه طولی و عرضی فرض شده است اما گسیختگی در سطح مقطع مؤثر جوش رخ می‌دهد؛ اما آزمایش‌های گوناگون نشان داده است که در جوش‌های گوشه عرضی گسیختگی در سطحی غیر از سطح مقطع مؤثر جوش گوشه اتفاق می‌افتد و چون این سطح از سطح مقطع مؤثر جوش بزرگ‌تر است، از این رو مقاومت اسمی جوش‌های گوشه عرضی همواره بیش‌تر از مقاومت اسمی جوش‌های گوشه طولی است. یکی از دلایل این امر می‌تواند توزیع تنش در طول جوش‌های گوشه عرضی به صورت سهمی محدب باشد؛ درحالی‌که در جوش‌های گوشه طولی توزیع تنش در طول آن به صورت سهمی مقعر است. دلیل دیگر آن این است که در جوش‌های گوشه عرضی تنش در یکی از ساق‌ها به صورت برشی و در ساق دیگر به صورت کششی است؛ اما در جوش‌های گوشه طولی تنش در هر دو ساق به صورت برشی است. درواقع این دو عامل باعث می‌شوند در جوش‌های گوشه عرضی گسیختگی در سطحی غیر از سطح مقطع مؤثر جوش رخ بدهد و در نتیجه مقاومت اسمی آن‌ها نسبت به جوش‌های گوشه طولی بیش‌تر شود [۱۷].



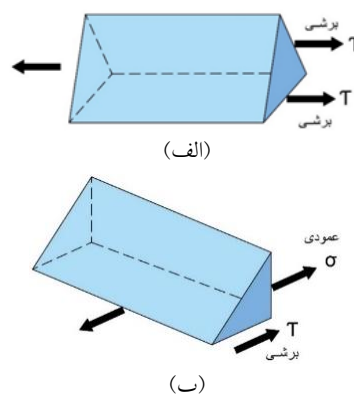
شکل ۱- جوش گوشه تحت اثر نیروی P_r : (الف) جوش گوشه طولی و (ب) جوش گوشه عرضی

نفوذ جوش و ضخامت مؤثر گلولی جوش در فولادهای با مقاومت بالا مشاهده شد [۱۲]. در مورد نفوذ جوش گوشه به صورت ناقص در اتصالات این نوع جوش تحت بارگذاری چرخه‌ای با شدت کم و زیاد، مشاهده شد که این امر بهبود قابل توجهی در مقاومت خستگی تحت بارگذاری چرخه‌ای با شدت کم نسبت به بارگذاری چرخه‌ای با شدت زیاد دارد [۱۳]. تحقیقات گوناگونی بر تأثیر گریدهای مختلف فولاد بر مقاومت در برابر خستگی و رفتار اتصالات جوش گوشه انجام شده است. از جمله این فولادها می‌توان به فولاد با مقاومت معمولی (فولاد نرمه) و فولاد با مقاومت بالا اشاره کرد. ^۱ **مچری** و ^۲ **کوشدی** [۱۴ و ۱۵]، آزمایش‌های خستگی را بر روی اتصالات صلیبی و فلنجی با مقاومت بالا و معمولی انجام دادند. استفاده از فولاد با مقاومت بالا در اتصالات صلیبی، مقاومت در برابر خستگی بیش‌تری نسبت به فولاد با مقاومت معمولی نشان داد. آن‌ها همچنین متوجه شدند که به کارگیری فولاد با مقاومت بالا منجر به مقاومت بهتر در برابر خستگی در اتصالات ضخامت کم‌تر صفحه و اندازه جوش می‌شود. برای اتصالات فلنجی با جوش گوشه، در هر دو مطالعه نتیجه گرفتند که تفاوت قابل توجهی در مقاومت در برابر خستگی و نرخ گسترش ترک بین فولاد با مقاومت بالا و معمولی وجود ندارد.

بر اساس رابطه بین امتداد بارگذاری و امتداد محور طولی جوش، دو دسته از اتصالات جوشکاری با جوش گوشه تعریف شدند. زمانی که راستای بارگذاری عمود بر راستای محور طولی جوش گوشه باشد، این جوش با نام "اتصالات جوشی با جوش گوشه عرضی" شناخته می‌شوند؛ درحالی‌که وقتی راستای بارگذاری موازی با راستای محور طولی جوش گوشه باشد، این جوش با نام "اتصالات جوشی با جوش گوشه طولی" شناخته می‌شوند. رفتار مکانیکی اتصالات جوشکاری با جوش گوشه عرضی از یک اتصال فولادی بازویی شکل توسط **سان** ^۳ و همکاران [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفت (شکل (۱)).

همان‌گونه که از اتصال شکل (۲-الف) ملاحظه می‌شود در جوش‌های گوشه طولی هم در ساق چسبیده به ورق تسمه و هم در ساق چسبیده به ورق اتصال، تنش ایجاد شده در جوش از نوع برشی است؛ درحالی‌که مطابق شکل (۲-ب) در جوش‌های گوشه عرضی تنش ایجاد شده در ساق چسبیده به ورق تسمه از نوع کششی و تنش ایجاد شده در ساق چسبیده به ورق اتصال از نوع برشی است.

^۱ Mecséri
^۲ Kövesdi
^۳ Sun



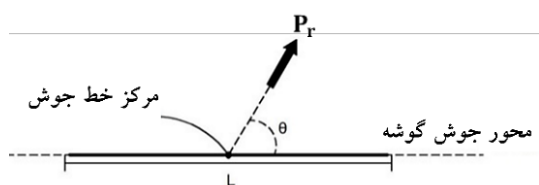
شکل ۲- نوع تنش ایجادشده جوش گوشه تحت اثر نیروی P_r :
(الف) جوش گوشه طولی و (ب) جوش گوشه عرضی

تأثیر بارگذاری زاویه‌دار یکی از مسائل و نگرانی‌های مهم در زمینه اتصالات فولادی به وسیله جوش گوشه است. برخی مطالعات نیز در این زمینه بر روی رفتار سازه‌ای جوش گوشه عرضی و طولی و اتصالات جوشی مورب تحت بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. باتلر^۱ و کولاک^۲ با ساخت و تست مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین استفاده از معادلات عددی بر روی جوش گوشه طولی و عرضی متوجه شدند که جوش گوشه عرضی دارای مقاومتی در حدود ۴۴ درصد بیش‌تر از جوش‌های طولی است [۱۸].

کمتکار^۳ بر روی مقاومت استاتیکی جوش گوشه طولی و عرضی محدب تحقیق کرد. او متوجه شد زمانی که زاویه بین محور جوش با مختصات بارگذاری از صفر به ۹۰ درجه تغییر می‌کند، مقاومت جوش گوشه در حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد [۱۹]. درایور^۴ و همکاران نمونه اتصالات آزمایشگاهی دارای جزئیات را به وسیله جوش گوشه عرضی شامل اتصال هم‌پوشانی‌شده و اتصال صلیبی را به منظور بارگذاری در حالت استاتیکی ساختند. عوامل متغیر مؤثر مختلف مانند فلز پرکننده، بعد جوش و روش جوشکاری در نظر گرفته شدند [۲۰]. نتایج آزمایش با آیین‌نامه فولاد آمریکا AISC 1999 [۲۱] و آیین‌نامه CSA-S16 [۲۲] کانادا مقایسه گردید. در خصوص مختصات بارگذاری مختلف، اتصالات جوشی دارای زاویه، مقاومت بیش‌تر و زاویه شکست کم‌تری نسبت به جوش‌های طولی و به‌طور عکس نسبت به جوش‌های عرضی از خود نشان دادند.

¹ Butler
² Kulak
³ Kamtekar
⁴ Driver

جوش‌های گوشه عرضی نسبت به جوش‌های گوشه طولی از شکل‌پذیری کم‌تری برخوردار بوده و از این‌رو در سازه‌های باربر لرزه‌ای، جوش‌های گوشه طولی ترجیح داده می‌شوند. آیین‌نامه AISC 360-16 [۲۳] به استناد تحقیقات باتلر و به تبعیت از آن مبحث دهم آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان [۲۴] در ویرایش پنجم خود به‌عنوان یک گزینه دیگر طراحی اجازه می‌دهند که هرگاه مطابق شکل (۳) یک خط جوش گوشه به طول L تحت اثر نیروی مورب که به مرکز آن وارد می‌شود قرار بگیرد، به‌بیان دیگر خط جوش گوشه، طولی نباشد، در این صورت تنش اسمی جوش گوشه مذکور را می‌توان از طریق رابطه (۱) تعیین نمود. با توجه به رابطه مذکور وقتی زاویه θ برابر ۹۰ درجه باشد (یعنی جوش گوشه عرضی باشد) در این صورت تنش اسمی آن $1/5$ برابر جوش‌های گوشه طولی خواهد بود. در این رابطه (F_{ue}) تنش نهایی جوش، (A_{we}) مساحت مؤثر جوش و (θ) زاویه محور جوش و امتداد محور نیرو است.



شکل ۳- جوش گوشه تحت نیروی مورب P_r وارد بر مرکز آن

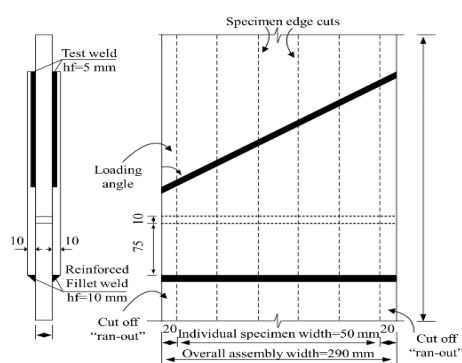
$$R_n = 0.6F_{ue}(1 + 0.5\sin^{1.5}\theta)A_{we} \quad (1)$$

سان و همکاران بر روی رفتار مکانیکی اتصال به وسیله جوش گوشه شامل مقاومت نهایی، مد گسیختگی، زاویه شکست جوش با متغیرهای مختلف نظیر بعد جوش و نرخ ناسازگاری فلز جوش مطالعه کردند [۱۶]. مطالعات آن‌ها نشان داد که افزایش در نرخ ناسازگاری مقاومت فلز جوش باعث افزایش در مقاومت استاتیکی اتصال به وسیله جوش گوشه می‌شود. طبق این تحقیقات، میانگین زاویه شکست در اتصالات هم‌پوشانی‌شده با جوش عرضی، اتصال صلیبی و اتصال هم‌پوشانی‌شده طولی به ترتیب برابر با $1/5$ ، $2/1$ ، و $5/1$ درجه است. محل شکست در جوش گوشه عرضی و طولی هم‌پوشانی‌شده بر روی فلز پایه مشاهده شد و در مقابل، در اتصال صلیبی محل شکست در ناحیه خط جوش به علت پدیده نرم‌شدگی و تأثیرات متالورژیکی دیده شد.

۲- مدل سازی

رن^۷ و همکاران [۳۰] سه قطعه فولادی را به وسیله جوش با طول های مختلف مورد آزمایش قرار دادند. مشخصات ابعادی نمونه مطابق شکل (۴) است. این قطعه اتصال پوششی جوشی است که در آن دو ورق بالا و پایین و یک ورق دیگر با استفاده از جوش گوشه به یکدیگر متصل شده اند. ضخامت های ورق های تحتانی و فوقانی برابر ۱۰ میلی متر، ورق میانی ۲۰ میلی متر و ضخامت جوش گوشه مورد نظر ۵ میلی متر است. پهنای ورق های فوقانی و تحتانی ۵۰ میلی متر بوده و پهنای ورق میانی برای کنترل مد خرابی بیش از ۳ برابر آن در نظر گرفته می شود. زاویه θ ، زاویه محور جوش با امتداد محور نیروی وارد بر آن است. ضمناً زاویه صفر درجه نمایانگر جوش گوشه طولی و زاویه ۹۰ درجه نمایانگر جوش گوشه عرضی است.

در این تحقیق تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام شده است و برای کاهش حجم عملیات تحلیل، نصف نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته و تحلیل از نوع Dynamic/Explicit بوده است. حلگر Dynamic/Explicit ABAQUS/Standard به صورت مناسب تری نسبت به حلگر ABAQUS/Standard می تواند مسائل با ماهیت غیرخطی مورد نظر را حل کند. علاوه بر آن حلگر Dynamic/Explicit ذاتاً برای حل مسائل با نرخ تغییرات بالا مانند مسائل شامل ضربه، برخورد و انفجار توسعه داده شده است. در شکل (۵) هندسه نمونه در زاویه صفر درجه محور طولی جوش با محور نیرو نمایش داده شده است. در جدول (۱) نیز ابعاد صفحات متصل به یکدیگر از طریق جوش گوشه نشان داده شده است.



شکل ۴- مشخصات ابعادی نمونه مورد بررسی رن و همکاران [۳۰]

شی^۱ و چن^۲ مطالعات عددی و آزمایشگاهی را بر روی اتصالات به وسیله جوش گوشه عرضی ساخته شده از فولاد پرمقاومت انجام و رفتار شکست آن ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که ترک ها در محل ریشه جوش گوشه انتشار یافته و در فلز جوش در اتصال هم پوشانی شده و صلیبی گسترش می یابند. علاوه بر این، رفتار شکست صلب اتصال هم پوشانی شده به وسیله جوش گوشه عرضی توسط آن ها مورد بررسی قرار گرفت [۲۵]. آن ها با انجام تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بر روی اتصالات به وسیله جوش گوشه ساخته شده از ورق های فولادی پرمقاومت با دو نوع فلز جوش به تحقیق و مطالعه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می دهد مدل های اجزای محدود قادر به پیش بینی زاویه شکست دقیق اتصالات به وسیله جوش گوشه هستند و میانگین زاویه شکست را از ۱۶/۵ درجه تا ۱۹ درجه برای جوش گوشه عرضی گزارش کردند.

نیه^۳ و دونگ^۴ یک تعریف و محاسبات جدید برای تنش برشی معرفی کردند. همچنین یک روش محاسبه به منظور ارزیابی مقاومت برشی استاتیکی اتصالات به وسیله جوش گوشه ارائه دادند [۲۶]. بر این اساس در این مطالعه مدل های اجزای محدودی برای جوش های گوشه طولی و عرضی توسعه یافتند و با نتایج مک کلان^۵ در زمینه تنش برشی و زوایای گسیختگی مورد صحت سنجی قرار گرفتند. جهت دستیابی به دانش نظری، آن ها روشی تحلیلی برای تنش نرمال ارائه دادند. هر دو روش اجزای محدود و روش تحلیلی دقیقاً نتایج مشابهی را برای اتصالات به وسیله جوش گوشه عرضی در حالت برشی نشان دادند [۲۷].

لو^۶ و همکاران مطالعات عددی و آزمایشگاهی خود را بر روی مقاومت کششی اتصالات جوشی با استفاده از روش تنش کششی انجام دادند [۲۸]. در این مطالعه جوش گوشه عرضی و طولی با متغیرهای مختلف شامل فلز پرکننده، فلز پایه، مقاومت مصالح، ضخامت ورق، روش جوشکاری و بعد (ضخامت) جوش مورد آزمایش قرار گرفته است. سایز و ابعاد جوش های عرضی و طولی با استفاده از راهنمای AWS B.4 [۲۹] طراحی شدند. نتایج نشان داد که زاویه شکست برای نمونه های برشی عرضی و طولی به ترتیب برابر با ۲۲/۵ و ۴۵ درجه هستند. علاوه بر این، آن ها معادلات طراحی برای تعیین مقاومت برشی اسمی اتصالات به وسیله جوش گوشه را ارائه دادند.

^۷ Ran

^۱ Shi

^۲ Chen

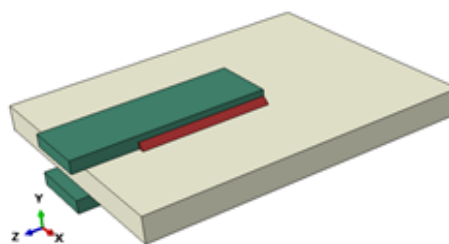
^۳ Nie

^۴ Dong

^۵ McClellan

^۶ Lu

در مدل آزمایشگاهی برای دستیابی به کیفیت اجرای بهتر جوش، ابتدا دو ورق به ورق فوقانی و تحتانی متصل شده و با ادامه جوش به آن دو ورق، طول مورد نظر جوشکاری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفته است.



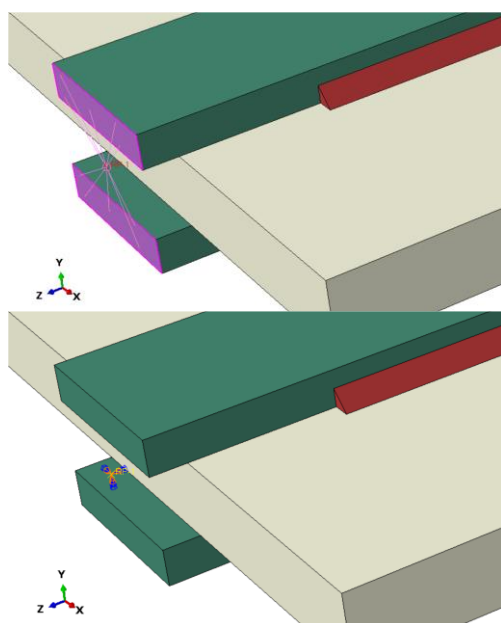
شکل ۵- هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار اجزای محدود در زاویه صفر درجه محور جوش با محور نیرو

جدول ۱- مشخصات ابعادی نمونه در زاویه صفر درجه محور جوش گوشه با محور نیروی وارده

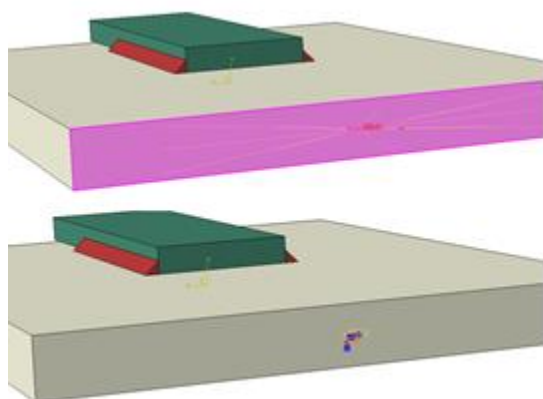
اجزای اتصال	ابعاد قطعه (mm)
صفحه فوقانی و تحتانی	
صفحه میانی	
جوش	

در مدل سازی عددی دو شرایط مرزی روی نمونه قرار داده شده است. شرایط مرزی اول در تکیه گاه آن، که تمامی درجات آزادی دو سطح انتهایی به نقطه RP1 نسبت داده شده و تمامی این درجات آزادی مقید شده اند (شکل ۶)). همچنین شرایط

مرزی دوم که باعث جابه جایی در سطح انتهایی است و تمامی درجات آزادی سطح انتهایی به نقطه RP2 نسبت داده شده و جز حرکت افقی (در اینجا راستای z) تمامی درجات آزادی مقید شده اند (شکل ۷)). توجه شود که جوش های گوشه با قید Tie به ورق های فوقانی و تحتانی متصل شده اند (یک بار به عنوان Master Surface در یک وجه و بار دیگر در وجه مخالف آن به عنوان Slave Surface).



شکل ۶- درجات آزادی نسبت داده شده دو سطح انتهایی به نقطه RP1 مقید شدن تمامی آنها



شکل ۷- درجات آزادی نسبت داده شده سطح انتهایی به نقطه RP2 مقید شدن تمامی آنها به جز درجه آزادی انتقالی در راستای z

و کشیدگی نهایی هر دو مصالح با توجه به میانگین و انحراف معیار آن‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که از این جدول مشاهده می‌شود، فلز مورد استفاده از نوع فولاد پرمقاومت است.

مصالح مورد استفاده برای فلز پایه از نوع فولاد پرمقاومت با نام Q890D و فلز جوش از نوع ER96-G است. مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول تنش تسلیم، تنش نهایی، نسبت این دو تنش، کرنش نهایی

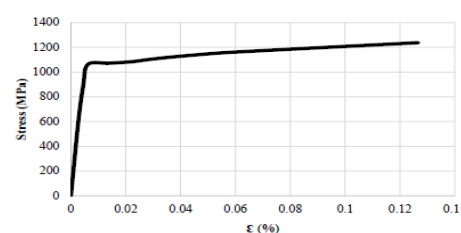
جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده رن و همکاران [۳۰]

مصلح	مقدار	تنش تسلیم f_y^b or f_y^w (MPa)	تنش نهایی f_u^b or f_u^w (MPa)	نسبت تنش تسلیم به تنش نهایی $\frac{f_y}{f_u}$	کرنش نهایی ε_p^u ($\mu\epsilon$)	کشیدگی نهایی A_b or A_w (%)
Q890D	μ	۱۱۱۴/۴	۱۱۴۵/۳	۰/۹۷۳	۶۴۲۰۰	۱۲/۵
	σ	۲۲/۶۷	۶/۹۵	۰/۰۱۷	۳۵۳۴	۱/۱
	ν	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۱۷	۰/۰۵۵	۰/۰۸۸
ER96-G	μ	۹۶۸	۱۰۵۲	۰/۹۱۲	۱۰۴۱۷۲	۲۲/۰۷
	σ	۳۷/۸۲	۲۶/۰۴	۰/۰۱۵	۸۰۸۰	۱/۱۳
	ν	۰/۰۴۵	۰/۰۲۸	۰/۰۱۷	۰/۰۷۸	۰/۰۵۱

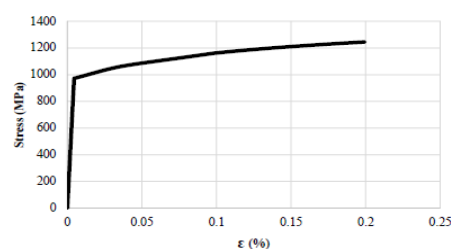
۳- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود از نمونه آزمایشگاهی رن و همکاران [۳۰] استفاده شده است (شکل (۹)). مش‌ها همگی از نوع C3D8R هستند. ابعاد مش برای صفحات فوقانی و تحتانی ۱۰ میلی‌متر، صفحه میانی ۲۰ میلی‌متر و جوش ۲ میلی‌متر انتخاب شده است. ابعاد مش پس از آنالیز حساسیت مدل اجزای محدود به ابعاد آن و انتخاب بهترین بعد مش، متناسب با دقت نتیجه و بار محاسباتی بود. بعد مش در جوش تأثیر به‌سزایی در سختی نمونه و دقت نتایج داشت. نمونه آزمایشگاهی زاویه صفر درجه محور جوش با محور نیرو برای صحت‌سنجی انتخاب شده است. نتیجه صحت‌سنجی نمودار نیرو-جابجایی مطابق شکل (۱۰) است. حداکثر نیرو کم‌تر از ۱۰ درصد اختلاف داشته و شروع افت نمونه کاملاً منطبق است. همچنین در شکل (۱۱) توزیع تنش حاصل از جابه‌جایی در مدل به هنگام شروع خرابی نشان داده شده است. در این شکل تنش‌ها به حداکثر خود رسیده و در میانه جوش قابل مشاهده است و در شکل (۱۲) توزیع خرابی در ابتدای خرابی یک المان نشان داده شده است (عدد ۱ بیش‌ترین خرابی و صفر کم‌ترین را نشان می‌دهد).

همچنین نمودار تنش-کرنش واقعی مصالح Q690D و ER96-G در شکل (۸) نشان داده شده است. توجه شود که کرنش نهایی فلز جوش حدود ۲ برابر فلز پایه است. همچنین مقدار مقاومت هر دو مصالح حدود ۱۲۰۰ MPa است. جهت مدل‌سازی دقیق‌تر یک خرابی از نوع Ductile Damage نیز برای فلز جوش با ضریب خرابی در جابه‌جایی ۰/۲ اضافه شده و همچنین ضریب اصطکاک ۰/۳۵ به‌صورت عمودی و مماسی و به‌عنوان General Contact در نظر گرفته شده است.



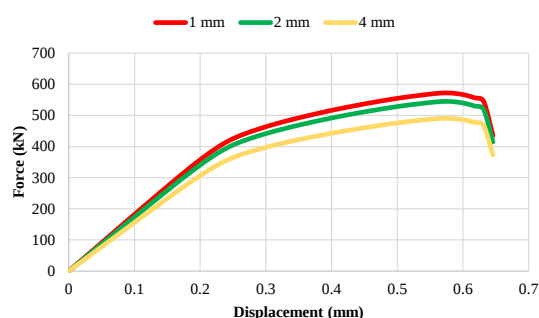
(الف)



(ب)

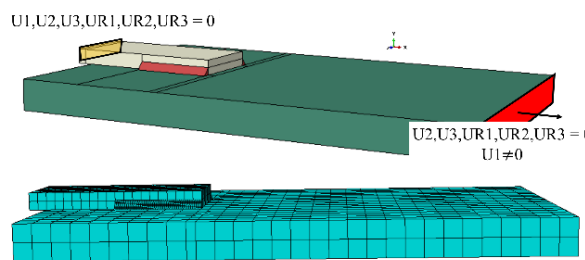
شکل ۸- نمودار تنش-کرنش واقعی مصالح: (الف) Q690D و (ب) ER96-G

در جدول (۳) توزیع تنش در اتصال و توزیع خرابی در جوش در زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با امتداد محور نیرو نشان داده شده است. همچنین نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های فوق در شکل‌های (۱۴) الی (۱۷) ارائه شده است. افزایش مقدار نیرو در زاویه ۳۰ درجه از سایر نمونه‌ها بیش‌تر است. مقدار نیروی متفاوت در این حالت‌ها به دلیل طول جوش متفاوت آن‌ها است. البته مقایسه بهتر را می‌توان با مقدار تنش‌ها انجام داد چراکه با تقسیم نیرو به مساحت‌های مؤثر هر جوش عملاً مقدار طول جوش آن‌ها یکسان‌سازی می‌شود. تقریباً تمامی موارد، حدود جابه‌جایی ۰/۵ میلی‌متر را متحمل شده‌اند. در جدول (۴) خصوصیات شاخص نمودارها شامل مقدار حداکثر نیرو، مساحت مؤثر هر خط جوش، حداکثر تنش (حاصل تقسیم حداکثر نیرو به مساحت مؤثر) نشان داده شده است. این شیب حساسیت بالایی به اندازه‌ی مش جوش گوشه دارد. بنابراین آنالیز حساسیت جوش گوشه مطابق شکل (۱۳) برای زاویه صفر درجه نشان داده شده است. برای تأمین دقت مناسب جواب‌ها و همچنین محاسبات سریع‌تر، اندازه‌ی مش جوش گوشه برابر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

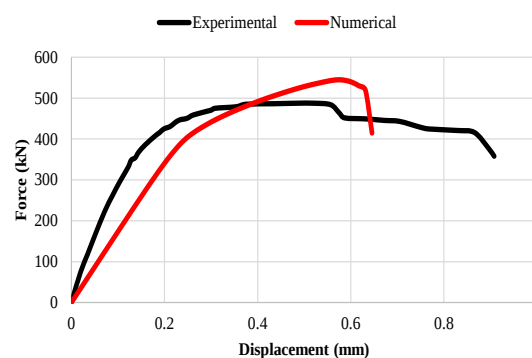


شکل ۱۳- آنالیز حساسیت اتصال با جوش گوشه

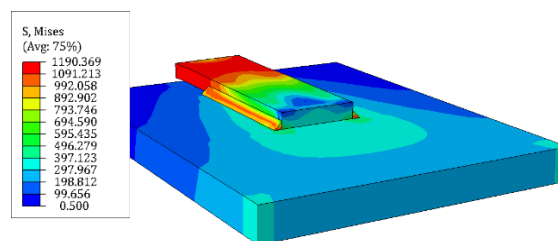
در تمامی مدل‌ها می‌توان گفت تنش جوش گوشه به حداکثر خود رسیده است و به غیر از زاویه صفر درجه مقدار تنش ورق‌های اتصال حتی به تنش حداکثر خود نرسیده و عملاً الاستیک باقی مانده است. همچنین مقادیر خرابی در سطح مؤثر جوش تقریباً در میانه جوش اتفاق افتاده که خود نشان از شروع شکست و خرابی از این قسمت جوش دارد.



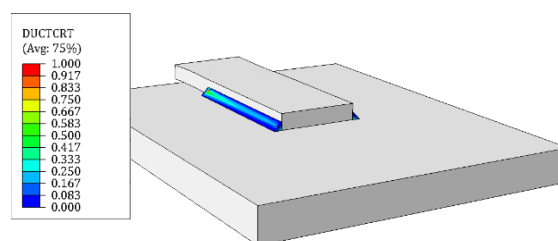
شکل ۹- مدل‌سازی نمونه مورد بررسی رن و همکاران [۳۰]



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابه‌جایی مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی رن و همکاران [۳۰]



شکل ۱۱- تنش حاصل از نمونه ۱ در زاویه صفر درجه به هنگام خرابی اولین المان در اتصال



شکل ۱۲- خرابی المان‌های جوش در زاویه صفر درجه

۴- نتایج

در ادامه برای زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه محور جوش با امتداد نیرو مطابق صحت‌سنجی صورت‌گرفته، مدل‌سازی‌ها انجام شد. همچنین ابعاد مش مشابه صحت‌سنجی در نظر گرفته شد.

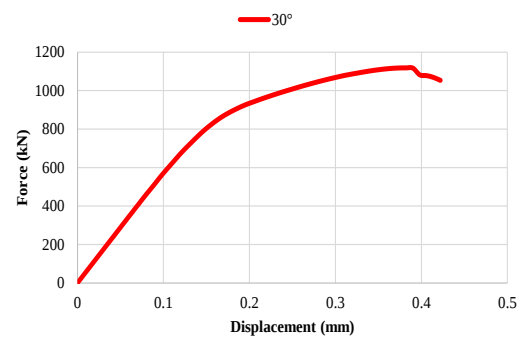
۵- بحث و بررسی

تحلیل‌های فوق نشان داد که توزیع تنش روند سریع‌تری را در فلز جوش طی کرد و افزایش تنش در جوش گوشه به نسبت تنش صفحات اتصال سریع‌تر بود و زودتر به حداکثر مقدار خود رسید. همچنین طراحی این اتصالات به گونه‌ای بود که جوش زودتر از صفحات به گسیختگی برسد که نحوه توزیع تنش در مهم را در پی دارد. خرابی و شکست در جوش، ابتدا از محل تقاطع جوش گوشه به دو صفحه میانی و فوقانی یا میانی و تحتانی شروع شده و سپس به سایر نقاط گسترش می‌یابد؛ چراکه در این محدوده شدت تمرکز تنش بسیار بالاست. در مدل‌ها با توجه به نتایج حاصل‌شده از مدل‌سازی‌های عددی، در جدول (۴) حداکثر مقدار نیرو، حداکثر مقدار تنش، میزان شکل‌پذیری جوش (توجه شود برای محاسبه میزان شکل‌پذیری عرض مؤثر جوش مورد استفاده قرار گرفته است، شکل (۱۸)) و مقایسه با مقاومت اسمی ارائه‌شده در آیین‌نامه فولاد آمریکا نشان داده شده است.

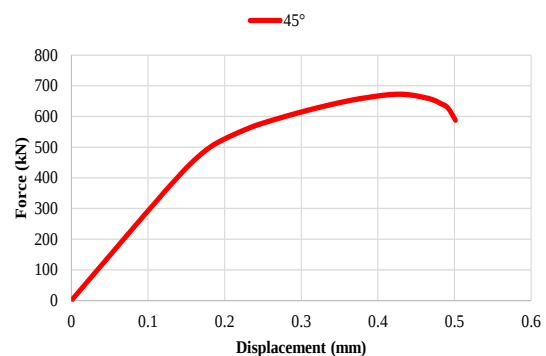
با توجه به آیین‌نامه فولاد آمریکا، برای فلزهای با تنش تسلیم تا ۷۰۰ مگاپاسکال می‌توان از رابطه (۱) جهت محاسبه مقاومت اسمی فلز جوش استفاده کرد. در جدول (۴) حالت صفر درجه، به عنوان حالت مبنا انتخاب شده و نسبت دیگر حالت‌ها به حالت صفر در ستون بعدی این جدول نشان داده شده است تا از این طریق بتوان مقایسه مناسبی با آیین‌نامه فولاد آمریکا داشت. در ستون بعدی این نسبت با توجه به آیین‌نامه فولاد آمریکا (رابطه (۱)) محاسبه شده است. با توجه به جدول (۴) این مقدار برای فولادهای پرمقاومت با خطا روبه‌رو بوده که این خطا در حدود ۱۴ درصد است.

مورد فوق در شکل (۱۹) به خوبی آشکار است. همچنین مشاهده می‌شود، مقدار شکل‌پذیری با افزایش زاویه افزایش می‌یابد. این موضوع برخلاف فولادهای با مقاومت معمولی و روزمره است. چراکه در این مواد با افزایش زاویه محور جوش نسبت به راستای نیروی وارده، مقدار شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. شاید بتوان گفت با فولادهای با مقاومت بالا کرنش کم‌تر فولاد نسبت به فلز جوش باعث می‌شود شکل‌پذیری با افزایش نیرو، افزایش یابد.

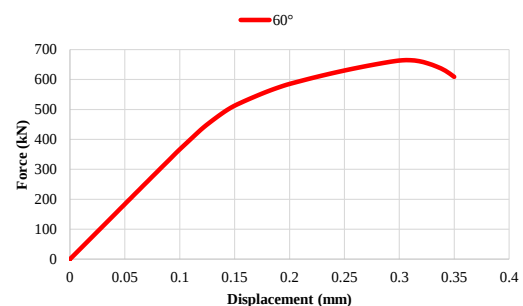
با در نظر گرفتن مقدار مساحت تئوری خط جوش A_t مقدار تنش در هر خط جوش در شکل (۲۰) نشان داده شده است. در این شکل تمامی تنش‌های متحمل‌شده از تنش نهایی جوش بالاتر



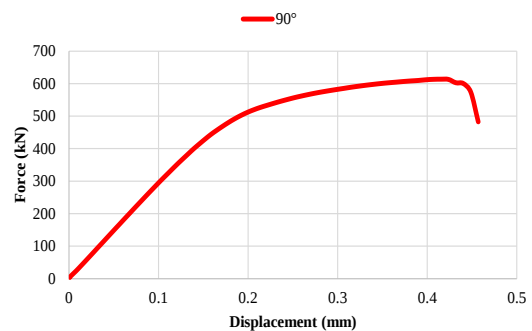
شکل ۱۴- منحنی نیرو-جابه‌جایی مدل عددی و آزمایشگاهی با زاویه ۳۰ درجه



شکل ۱۵- منحنی نیرو-جابه‌جایی مدل عددی و آزمایشگاهی با زاویه ۴۵ درجه



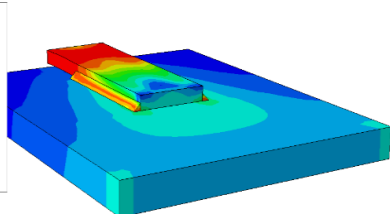
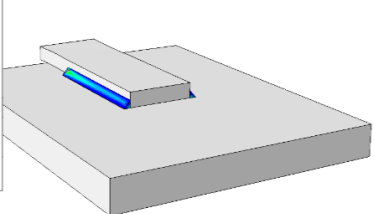
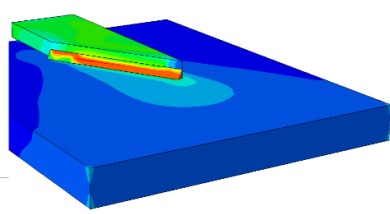
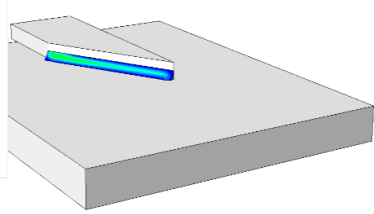
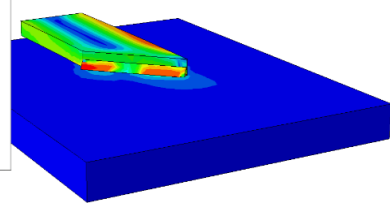
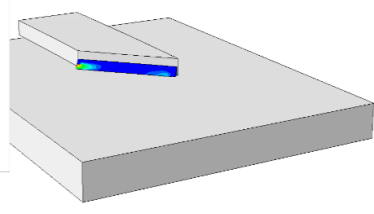
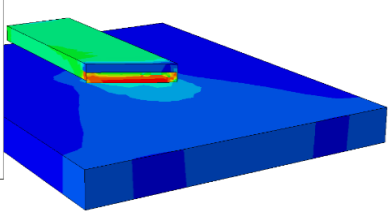
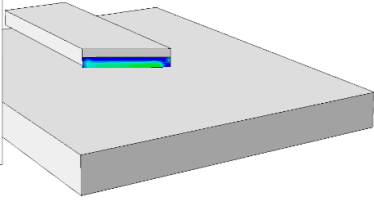
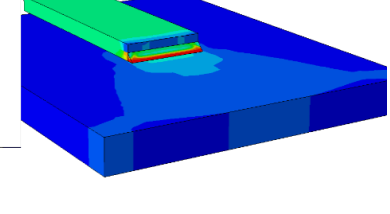
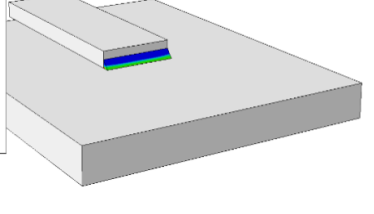
شکل ۱۶- منحنی نیرو-جابه‌جایی مدل عددی و آزمایشگاهی با زاویه ۶۰ درجه



شکل ۱۷- منحنی نیرو-جابه‌جایی مدل عددی و آزمایشگاهی با زاویه ۹۰ درجه

است. بالاتر بودن مقدار تنش از مقدار تنش موجود نشان از تفاوت در سطح مقطع حقیقی و سطح مقطع شکست دارد. پیش‌بینی می‌شود با در نظر گرفتن سطح مقطع شکست، این مقدار کم‌تر از تنش نهایی فلز جوش شود.

جدول ۳- توزیع تنش در اتصال و توزیع خرابی در جوش در زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با امتداد محور نیرو در لحظه شروع خرابی

توزیع تنش در لحظه اولین خرابی المان (۱ حداکثر خرابی و ۰ حداقل خرابی)	توزیع خرابی در جوش	زاویه (درجه)
 S, Mises (Avg: 75%) 2190.369 1091.213 992.058 892.902 793.746 694.590 595.435 496.279 397.123 297.967 198.812 99.656 0.500	 DUCTCRT (Avg: 75%) 1.000 0.917 0.833 0.750 0.667 0.583 0.500 0.417 0.333 0.250 0.167 0.083 0.000	صفر
 S, Mises (Avg: 75%) 1165.965 1068.824 971.683 874.543 777.402 680.261 583.121 485.980 388.839 291.698 194.558 97.417 0.276	 DUCTCRT (Avg: 75%) 1.000 0.917 0.833 0.750 0.667 0.583 0.500 0.417 0.333 0.250 0.167 0.083 0.000	۳۰
 S, Mises (Avg: 75%) 1147.684 1052.047 956.410 860.774 765.137 669.500 573.864 478.227 382.591 286.954 191.317 95.681 0.044	 DUCTCRT (Avg: 75%) 0.868 0.796 0.723 0.651 0.579 0.506 0.434 0.362 0.289 0.217 0.145 0.072 0.000	۴۵
 S, Mises (Avg: 75%) 1164.163 1067.166 970.170 873.174 776.177 679.181 582.185 485.188 388.192 291.196 194.199 97.203 0.206	 DUCTCRT (Avg: 75%) 1.000 0.917 0.833 0.750 0.667 0.583 0.500 0.417 0.333 0.250 0.167 0.083 0.000	۶۰
 S, Mises (Avg: 75%) 1166.363 1069.184 972.005 874.826 777.647 680.468 583.289 486.110 388.931 291.752 194.573 97.394 0.215	 DUCTCRT (Avg: 75%) 1.000 0.917 0.833 0.750 0.667 0.583 0.500 0.417 0.333 0.250 0.167 0.083 0.000	۹۰

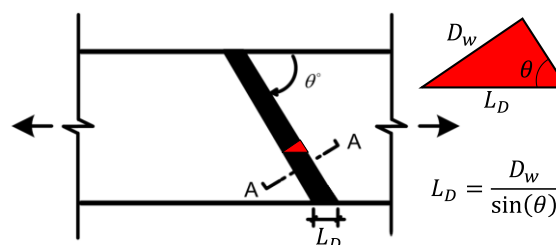
جدول ۴- مقاومت و شکل پذیری مدل های عددی

زاویه جوش با امتداد نیرو	حداکثر نیرو (kN)	مساحت موثر (mm ²)	حداکثر تنش (MPa)	$\frac{P_{\theta}}{P_0}$	مقدار پیش بینی $\frac{P_{\theta}}{P_0}$ با رابطه (۱)	درصد تفاوت	شکل پذیری $\frac{\Delta u}{L_n}$ (%)
۰°	۵۴۵	۴۲۴/۲۰	۱۲۸۴	۱/۰۰	۱/۰۰	-	-
۳۰°	۱۱۱۷	۸۴۸/۴۰	۱۳۱۷	۱/۰۳	۱/۱۸	۱۲/۸۴	۴/۱۴
۴۵°	۶۷۳	۴۹۹/۹۲	۱۳۴۵	۱/۰۵	۱/۳۰	۱۹/۲۵	۵/۹۴
۶۰°	۶۳۶	۴۰۸/۲۲	۱۵۶۰	۱/۲۱	۱/۴۰	۱۳/۴۰	۶/۰۴
۹۰°	۶۱۴	۳۵۳/۵۰	۱۷۳۵	۱/۳۵	۱/۵۰	۹/۹۲	۸/۶۰

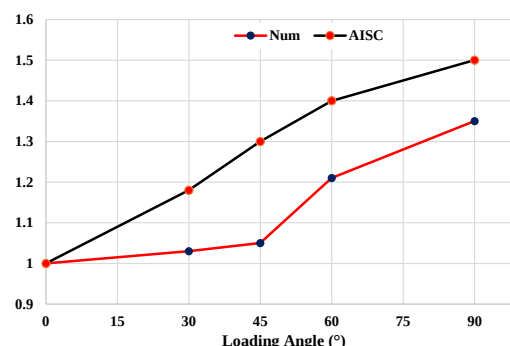
۶- نتیجه گیری

در ابتدا یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. از ویژگی های آزمایش می توان به استفاده از فولاد پرمقاومت Q890D و جوش ER96-G اشاره کرد. مدل اجزای محدود ایجاد شد و نتایج تطابق داده شد؛ سپس مدل آزمایشگاهی صحت سنجی شد. مدل های عددی با در نظر گرفتن زاویه های مختلف محور طولی جوش (زاوای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) با امتداد نیرو ساخته شد.

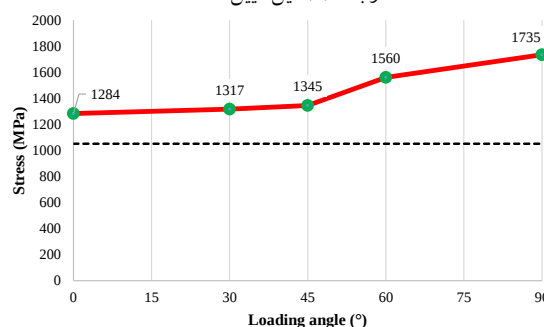
مصلح با در نظر گرفتن خرابی جوش آنالیز شد و نتایج در قالب نمودارهای نیرو-جابجایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز، عدم تطابق آن با حدود آیین نامه فولاد آمریکا را نشان می داد. این تفاوت به طور میانگین حدود ۱۴ درصد است. همچنین نتایج نشان داد برخلاف فولادهای نرمه، در فولادهای با مقاومت بالا با افزایش زاویه محور طولی جوش با امتداد نیروی وارد بر اتصال، شکل پذیری جوش افزایش می یابد. زیرا در فولادهای با مقاومت بالا کرنش کم تر فولاد نسبت به کرنش فلز جوش باعث می شود میزان شکل پذیری جوش افزایش یابد.



شکل ۱۸- محاسبه عرض مؤثر جوش برای تعیین شکل پذیری



شکل ۱۹- تفاوت نتایج مدل سازی با نتایج AISC با توجه به رابطه (۱) این آیین نامه



شکل ۲۰- مقدار تنش جوش در زاویه های مختلف با امتداد نیرو

- Using Normal and High Strength Steels", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 64, pp. 511-523.
- [15] Mecséri, B.J., and Kövesdi, B. (2017), 09.09:"Experimental fatigue analysis of high strength steel structures", *ce/papers*, Vol. 1(2-3), pp. 2424-2433.
- [16] Sun, F.F., Ran, M.M., Li, G.Q., and Wang, Y.B. (2019), "Mechanical behavior of transverse fillet welded joints of high strength steel using digital image correlation techniques", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 162, pp. 105710.
- [۱۷] اباذر اصغری، اصول و مبنای طراحی سازه‌های فولادی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۹.
- [18] Butler, L.J., and Kulak, G.L. (1971), "Strength of fillet welds as a function of direction of load", *Welding Journal*, Vol. 50(5), p. 231s-234s.
- [19] Kamtekar, A.G. (1987), "The strength of inclined fillet welds", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 7(1), pp. 43-54.
- [20] R. G. Driver, G. Y. Grondin, and K. F. Ng, "Behaviour of transverse fillet welds," 2002.
- [21] Design, A.S., (1999), Specification for structural steel buildings, AISC, December, 27.
- [22] Committee C., and others. Association, C.S. (1990), CAN/CSA-S16. 1-M89. Limit States Design of Steel Structures. Asso, Can. Norm.
- [23] B. ANSI, (2016), "AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings," Chicago AISC.
- [۲۴] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی). تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. ۱۴۰۱.
- [25] Shi, G., and Chen, Y. (2018), "RETRACTED: Investigation of ductile fracture behavior of lap-welded joints with 460 MPa steel", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 21(9), pp. 1376-1387.
- [26] Nie, C., and Dong, P. (2012), "A traction stress based shear strength definition for fillet welds", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47(8), pp. 562-575.
- [27] McClellan, R.W. (1990), "An Evaluation of the Fillet Weld Shear Strength of Flux Cored Arc Welding Electrodes", in *National Shipbuilding Research Program (NSRP) 1990 Ship Production Symposium*.
- [28] Lu, H., Dong, P., and Boppudi, S. (2015), "Strength analysis of fillet welds under longitudinal and transverse shear conditions", *Marine Structures*, Vol. 43, pp. 87-106.
- [29] American Welding Society, (2007), American Welding Society. Committee on Mechanical Testing of Welds and American Welding Society. Technical Activities Committee, Standard methods for mechanical testing of welds. American Welding Society.
- [30] Ran, M.M., Zhao, C., Sun, F.F., Li, G.Q., Wang, Y.B., and Lyu, Y.F. (2021), "Experimental study on the strength and fracture behaviour of fillet welded joints made of high strength steel under multiple loading angles", *Thin-Walled Structures*, Vol. 169, pp. 108295.
- [1] Björk, T., Ahola, A., and Tuominen, N. (2018), "On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel", *Weld. World*, Vol. 62, pp. 985-995.
- [2] Werner, B., Heyer, H., and Sander, M. (2016), "Experimental and numerical investigation of fracture in fillet welds by cross joint specimens", *Procedia Structural Integrity*, Vol. 2, pp. 2054-2067.
- [3] Peltoniemi, T., and others. (2016), "The effect of stress concentration on the ultimate capacity of welded joints made of ultra-high strength steel".
- [4] Ameri, A.A.H., Davison, J.B., and Susmel, L. (2015), "On the use of linear-elastic local stresses to design load-carrying fillet-welded steel joints against static loading", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 136, pp. 38-57.
- [5] Shiozaki, T., Yamaguchi, N., Tamai, Y., Hiramoto, J., and Ogawa, K. (2018), "Effect of weld toe geometry on fatigue life of lap fillet welded ultra-high strength steel joints", *International Journal of Fatigue*, Vol. 116, pp. 409-420.
- [6] Skriko, T., Björk, T., and Nykänen, T. (2014), "Effects of weaving technique on the fatigue strength of transverse loaded fillet welds made of ultra-high-strength steel", *Weld. World*, Vol. 58, pp. 377-387.
- [7] Torabian, S., Xiao, F., Haws, R.B., and Schafer, B.W. (2018), "Design of transverse fillet welds in the lapped joints of thin steel plates", *International Journal of Steel Structures*, Vol. 18, pp. 337-348.
- [8] Sachin, P., and Vyavahare, A.Y. (2015), "Effect of Gap on Strength of Fillet Weld Loaded in Out-of-Plane Bending", in *Advances in Structural Engineering: Materials*, Vol. 3, pp. 2409-2416.
- [9] Tajik, N., Mirghaderi, S.R., Asghari, A., and Hamidia, M. (2024), "Experimental and numerical study on weld strengths of built-up steel box columns", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 213, pp. 108362.
- [10] Caccese, V., Blomquist, P.A., Berube, K.A., Webber, S.R., and Orozco, N.J. (2006), "Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes", *Marine structures*, Vol. 19(1), pp. 1-22.
- [11] Kainuma, S., and Mori, T. (2006), "A fatigue strength evaluation method for load-carrying fillet welded cruciform joints", *International journal of Fatigue*, Vol. 28(8), pp. 864-872.
- [12] Ahola, A., Björk, T., and Barsoum, Z. (2019), "Fatigue strength capacity of load-carrying fillet welds on ultra-high-strength steel plates subjected to out-of-plane bending", *Engineering Structures*, Vol. 196, pp. 109282.
- [13] Hanji, T., Miki, C., and Saiprasertkit, K. (2012), "Low-and high-cycle fatigue behaviour of load-carrying cruciform joints containing incomplete penetration and strength mismatch", *Weld. World*, Vol. 56, pp. 133-146.
- [14] Mecséri, B.J., and Kövesdi, B. (2020), "Fatigue Properties of Cruciform and Flange-Gusset Joints