پژوهش های شیمی
C
R

جوشکاری لب به لب لوله‌های پلی اتیلنی، قسمت اول: بررسی تاثیر سنجه‌های جوشکاری و بهینه‌سازی فرایند

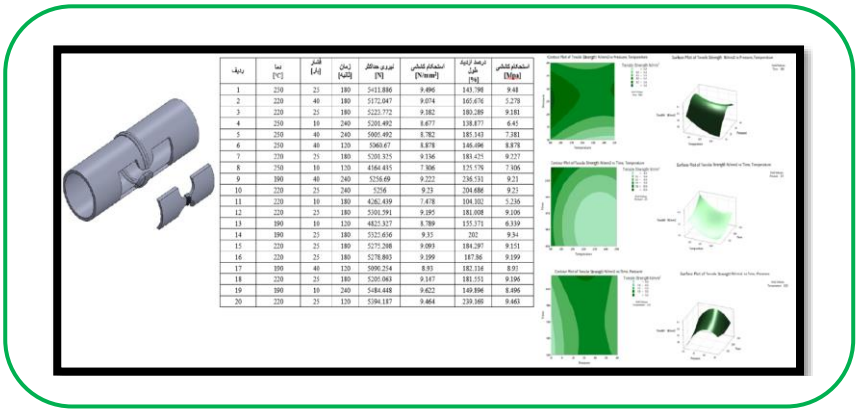
بهمن زارع کاظمیه[1]، امیر مصطفی پور[1*] و رضا نجار[2]

[1]تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، آزمایشگاه جوشکاری پیشرفته
[2]تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده شیمی، آزمایشگاه مبانی شیمی پلیمر

تاریخ دریافت: ۲۴ آذر ۱۴۰۳ **تاریخ پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۴۰۳**

چکیده: جوشکاری لب به لب یکی از روش‌های مهم اتصال لوله‌های پلی‌اتیلنی می‌باشد. علی‌رغم کاربرد زیاد این روش، هنوز مطالعه جامع و کاملی در مورد آن انجام نشده است. در این پژوهش بعد از طراحی آزمایش‌ها، آزمایش‌های تجربی در شرایط مختلف انجام شد و استحکام کششی جوش آنها با آزمون کشش به‌دست آمد. سپس، بر اساس نتایج تجربی تاثیر سنجه‌های جوشکاری مثل دما، فشار و زمان فرایند جوشکاری بر روی استحکام جوش بررسی شد. برای تحلیل بهتر نتایج، از شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس نیز استفاده شد. سپس با استفاده از روش رویه پاسخ، سنجه‌های جوشکاری بهینه‌سازی شد. الگوی بهینه‌سازی نشان داد که بیشینه استحکام کششی در شرایط جوشکاری دمای جوشکاری ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۲۳/۳۳ بار و زمان جوشکاری ۲۴۰ ثانیه به‌دست می‌آید که برابر ۱۰/۱۲۷ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج آزمون‌های عملی برای نقطه بهینه، نتایج الگو را تایید کرد و خطای آن ۳/۳ درصد بود. استحکام به‌دست آمده برای جوشکاری در شرایط بهینه حدود ۲ درصد بیشتر از استحکام ماده پایه بود.

کلید واژه: پلی‌اتیلن سنگین، لوله پلی‌اتیلنی، جوشکاری لب به لب، بهینه‌سازی سنجه‌ها



۱- مقدمه

امروزه تلاش‌های زیادی برای جا یگزینی لوله‌های پلی‌اتیلنی به‌جای لوله‌های فولادی در حال انجام است. از دلایل این کار می‌توان به هزینه پایین ساخت لوله‌ها، مقاومت شیمیائی و خوردگی بالا، آسانی جابجائی و نصب، عمر طولانی، انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه بالا و سهولت جوشکاری اشاره کرد. با توجه به کاربرد وسیع لوله‌های پلی‌اتیلن در انتقال آب، نفت و گاز در صنایع مختلف آب و فاضلاب، نفت و گاز و صنایع پالایشگاهی، اتصال این لوله‌ها نیز به موضوعی مهم تبدل شده است. برای جوشکاری این لوله‌ها از روش‌هائی مثل الکتروفیوژن، لب به لب ذوبی استفاده می‌شود. از میان این

روش‌ها، امروزه برای خطوط انتقال گاز، بیشتر از روش الکتروفیوژن استفاده می‌شود. ولی این روش دارای چند محدودیت می‌باشد که می‌توان به استحکام پائین این نوع اتصال و هزینه بالای آن اشاره کرد. از طرف دیگر بدلیل اختلاف در جنس کاپلر و جنس لوله‌ها، به مرور زمان و بدلیل اختلاف در میزان انبساط و انقباض آنها، نشتی ایجاد می‌شود. از طرف دیگر در ایران قسمت رابط یا کاپلر که بعنوان منبع حرارتی اتصال می‌باشد، بیشتر از خارج تهیه می‌شود که با توجه به مسائل تحریم‌های سیاسی و ارزبری آن مشکلاتی در خرید آن پیش می‌آید. از همه مهمتر بدلیل باقی ماندن المنت حرارتی در محل اتصال استفاده از روش‌های آزمون غیر مخرب این نوع اتصال‌ها، با محدودیت‌ها و مشکل‌هایی روبرو می‌باشد. برای حل این مشکل، بسیاری از صنایع، سعی در استفاده از روش جوشکاری لب به لب ذوبی بجای روش الکتروفیوژن دارند. مین کانگ و همکارانش [۱] در سال ۲۰۱۸، بررسی ریزساختاری اتصال لب به لب را در لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا با استفاده از پراکندگی اشعه ایکس با زاویه باز و کوچک، انجام دادند. در این پژوهش، جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری در منطقه ذوب مورد بررسی قرار گرفت. برای این‌کار آن‌ها از تغییر زوایه‌های تابش پرتو ایکس و با استفاده از پراکندگی پرتو ایکس با زاویه وسیع و کوچک در مکان‌های مختلف ناحیه ذوب استفاده کردند. نتایج کار نشان داد که بلورها در دو حالت مختلف جهت‌گیری داشتند. در جهت اول، زنجیره‌های پلیمری به موازات خط ذوب به طور پیوسته در سراسر ناحیه ذوب جهت‌گیری می‌کنند. در جهت دیگر، بلورها بسته به موقعیت در ناحیه ذوب در جهت‌های ویژه‌ای چیده می‌شوند. ترکیب فشار و جریان مذاب در طول فرآیند اتصال منجر به چنین ساختار پیچیده‌ای می‌شود. اینسون چو و همکارانش [۲] در سال ۲۰۲۰ به بررسی تحلیلی و تجربی استفاده از تقویت آلیاژ حافظه‌دار بر عملکرد اتصال‌های جوشی لب به لب در لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا پرداختند. در این پژوهش، یک سیم از جنس آلیاژ حافظه‌دار به عنوان محصورکننده و به‌صورت ژاکت در بیرون لوله‌ها و در نزدیکی محل جوش استفاده شد تا استحکام خمشی اتصال‌های جوشی لب به لب در لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا بهبود یابد. برای این منظور، بررسی‌های تحلیلی و تجربی برای حالتی که سیم آلیاژ حافظه‌دار در اطراف یک اتصال همجوشی لب به لب پیچیده می‌شود و فشار داخلی به لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا اعمال می‌شود، انجام شد. برای بررسی کارایی روکش سیمی آلیاژی حافظه‌دار بر عملکرد اتصال جوشی لب به لب در لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا، دو مورد اتصال لب به لب کامل و اتصال لب به لب با جوش ناقص مورد آزمایش قرار گرفت. تأثیر تعداد روکش سیمی آلیاژی بر روی اتصال¬های لوله و همچنین تأثیر سفتی خمشی مختلف سیم و لوله پلی‌اتیلن و قطرهای مختلف بررسی شد. تغییر شکل با استفاده از مبدل جابجایی ولتاژ خطی و آنالیز همبستگی تصویر دیجیتال در مکان‌های مختلف طول لوله اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، کرنش شعاعی لوله‌ها نیز با کرنش‌سنج الکترونیکی مقاومت اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان می‌دهد که روکش سیمی آلیاژ حافظه‌دار تأثیر قابل‌توجهی در حد ۳۳ درصد بر تقویت اتصال جوشی ناقص لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا دارد. سلیمان دوجی و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۹، تاثیر توزیع کربن سیاه بر ویژگی‌های لوله‌های پلی‌اتیلن و تخریب یکپارچگی اتصال¬های همجوشی لب به لب را مورد بررسی قرار دادند. آنها تأثیر توزیع کربن سیاه را بر تخریب ویژگی‌های مکانیکی اتصال¬های لب به لب و یکپارچگی مکانیکی کلی خطوط لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا بررسی کردند. در این پژوهش، لوله‌های پلی‌اتیلن با غلظت کربن سیاه مشابه اما توزیع‌های متفاوت با تجهیزات ترکیبی و اکستروژن در مقیاس صنعتی تولید شدند. نمونه‌های کششی به‌طور مستقیم از نمونه‌های لوله جوش‌خورده، نوردشده و تا شکستگی کشیده شدند. توزیع کربن سیاه در فاز میانی جوش لب به لب، در هر دو جهت محوری و شعاعی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. برای جوش‌های ساخته‌شده با لوله‌های پلی اتیلن با چگالی بالا با توزیع کربن سیاه ناهمگن، کاهش قابل توجهی در یکپارچگی اتصال، اندازه‌گیری شده به عنوان کار شکست، مشاهده شد. مشخص شد که عرض مناطقی که حاوی کربن سیاه نیستند می‌توانند به طور قابل‌توجهی در فاز میانی همجوشی لب به لب به دلیل برش بزرگ‌تر شوند، که منجر به شکست‌های شکننده در فاز میانی همجوشی لب به لب با بزرگی مرتبط با سطح ناهمگنی می‌شود. مایک تراوتن و همکارش [۴] در سال ۲۰۱۶ به آزمایش مکانیکی کوتاه‌مدت و بلندمدت برای ارزیابی تأثیر

عیوب در اتصال های همجوشی لب به لب در لوله‌های پلی‌اتیلن پرداختند. این مقاله روش‌های توسعه‌یافته برای عیوب شبیه‌سازی شده در اتصال¬های همجوشی لب به لب در لوله‌های پلی‌اتیلن، کار تجربی برای مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های استاندارد کوتاه‌مدت و بلندمدت مختلف بر روی اتصال¬های معیوب و بدون نقص و روش‌های توسعه‌یافته برای تعیین معیارهای پذیرش نقص را شرح می‌دهد. نتایج نشان داده است که متمایزترین آزمایش کوتاه مدت اتصال های همجوشی لب به لب در لوله‌های پلی‌اتیلن یک آزمایش کششی با استفاده از نمونه کمری است، مانند مواردی که در استانداردهای EN 12814-2، EN 12814-7 و ISO 13953 تعریف شده است و متمایزترین ویژگی، انرژی شکست نمونه است. مناسب‌ترین آزمایش بلندمدت برای اتصال¬های همجوشی لب به لب در لوله‌های پلی‌اتیلن نیز، همان‌طور که در استاندارد EN12814-3 تعریف شده است، آزمایش پارگی خزش کششی کل لوله است. این تنها آزمایش طولانی مدت کل لوله است که به طور مداوم رشد آهسته ترک را در اتصال ذوب شده ایجاد می‌کند، حتی اگر فاقد نقص باشد. جانگ سونگ کیم و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۹ به بررسی عملکرد جوشکاری لب به لب حرارتی لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا مدفون در نیروگاه هسته‌ای پرداختند. آنها در این مقاله تاثیر روش حرارت‌دهی را بر روی عملکرد حرارتی جوشکاری لب به لب حرارتی لوله‌های مدفون پلی اتیلن با چگالی بالا در کلاس ایمنی III بررسی کردند. در این پژوهش آنها در سه حالت حرارت‌دهی فشار بالا و فشار پائین مشخص شده در دو استاندارد ASME Code Case N-755-3 و ISO 21307 جوشکاری‌هائی انجام دادند و از طریق آزمایش‌های مختلف مثل ضربه کششی با سرعت بالا، آزمون خمش، کشش با شیار ناقص و خزش ناچدار، کیفیت جوش‌ها را بررسی کردند. از نتیجه آزمایش کشش شیاردار، مشخص شد که اتصال های ذوب‌شده، چقرمگی بسیار کمتری نسبت به مواد پایه دارند. همچنین مشخص شد که آزمایش کشش شیاردار نسبت به آزمون ضربه کششی با سرعت بالا و آزمون خمش در حللت حرارت‌دهی با استاندارد ASME Code Case N-755-3، نتایج بهتری را ارائه می‌کند. علاوه بر این، با توجه به عملکرد اتصال های ذوبی فشار پائین، روش ارائه‌شده در استاندارد ISO 21307 بهتر از روش موجود در Code Case N-755-3 می‌باشد. سااوراب پاتاک و همکارش [۶] در سال ۲۰۲۰ بهینه‌سازی فرآیندهای جوشکاری الکتروفیوژن و جوش سر به سر لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا را انجام دادند. در این پژوهش، بررسی‌های تجربی مربوط به جوشکاری الکتروفیوژن و جوش لب به لب لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا در ۹ حالت انجام و بهینه سازی سنجه‌های فرآیند جوشکاری انجام شد. در جوشکاری الکتروفیوژن سه سنجه فرآیند یعنی ولتاژ جوشکاری، زمان حرارت‌دهی و زمان خنک‌سازی و برای جوشکاری لب به لب سه سنجه دمای صفحه گرمایش، فشار در مرحله حرارت‌دهی و فشار نهائی به‌عنوان متغیرهای فرایند انتخاب شدند. سنجه خروجی نیز فقط استحکام کششی بود. نتایج کار نشان داد که در جوشکاری الکتروفیوژن، ولتاژ جوشکاری و در جوشکاری لب به لب فشار نهائی بیشترین تاثیر را داشت. هان شنگ لای و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۶ تاثیر عیوب بر شکست لوله پلی‌اتیلن با چگالی متوسط جوشکاری‌شده به روش لب به لب را مورد بررسی قرار دادند. لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی متوسط معمولاً با جوش لب به لب به هم جوشکاری می‌شوند. کیفیت اتصال¬های لوله جوشکاری‌شده به روش لب به لب به طور جدی تحت تأثیر عیوب داخلی لوله‌ها قرار می‌گیرد. در این مقاله، آزمون‌هائی مثل آزمون کشش، آزمایش ترکیدگی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمون کراش و آزمون خستگی برای بررسی تأثیر یک عیب جوشکاری بر کیفیت اتصال لوله‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که تحت بارگذاری کشش، فشار و خمش، اگر اندازه عیب کوچکتر از ۱۵ درصد ضخامت دیواره لوله بدون توجه به هندسه عیب باشد، شکست اتصال¬های تحت تأثیر عیب جوش تکی قرار نمی‌گیرد. آن‌ها برای ایجاد عیب مصنوعی، شیارهائی در وسط ضخامت لبه لوله‌ها ایجاد کرده و قطعه‌های فولادی با دو شکل کروی و تسمه‌ای داخل شیارها قرار دادند. با بررسی نتایج آزمون تنش-کرنش مشاهده شد که وجود عیوب به اندازه ۱۵ درصد ضخامت دیواره و یا کمتر، تاثیر چندانی بر روی استحکام جوش ندارد، ولی با افزایش اندازه نقص، افت ویژگی‌های مکانیکی مشاهده شد. نتایج حاصل از آزمون فشار نیز نشان داد که همین نقص به مقدار کم روی عملکرد ناحیه جوش اثر گذاشته و موجب شکست درناحیه

اتصال در استفاده طولانی مدت می‌گردد و همین طور، وجود این نقص موجب افزایش ترک به میزان ۰/۲ الی ۰/۵ درصد می گردد. کیلنگ ونگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ رفتار جوش لب به لب لوله‌های گاز طبیعی از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بالا را به روش آزمون غیرمخرب فراصوت مورد بررسی قرار دادند. پیرشدگی اتصال¬های جوشی، باعث تخریب ویژگی‌های مواد اتصال حرارتی می شود. استفاده از روش غیرخطی فراصوت به‌عنوان یک روش آزمون غیر مخرب برای ارزیابی آسیب پیرشدگی پیشنهاد شده است. آن‌ها اندازه‌گیری‌های فراصوت غیرخطی برای نمونه‌های جوشکاری را انجام دادند. امواج فراصوت هم‌ساز به دلیل آسیب‌های پیرشدگی ایجاد می‌شوند. سنجه آکوستیک غیرخطی، β، (ضریب کشسانی غیرخطی مرتبه دوم) بر اساس هم‌سازهای بنیادی و دوم محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که β به تغییرها در نمونه‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا تحت شرایط مختلف پیرشدگی، حساس است. نتایج این پژوهش نشان داد این روش غیرمخرب در ردیابی تغییرهای ریزساختاری در قطعات جوشکاری به دلیل پیرشدگی در طول فرآیند سرویس، مفید است. جین یانگ ژنگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۸ در یک مقاله مروری، آزمون غیرمخرب لوله‌های پلی‌اتیلن به‌کار رفته در نیروگاه‌های هسته‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار نشان می‌دهد روش بازرسی فراصوت به روش آرایه فازی، قابلیت بالائی برای تشخیص تمام عیوب به‌ویژه جوش سرد، در جوشکاری الکتروفیوژن و جوش لب به لب را دارد. ویجایان و همکاران [۱۰] به‌جای منبع حرارتی صفحه داغ در جوشکاری سر به سر، از تابش پرتو الکترونی استفاده کردند. نتایج کار نشان داد استحکام جوش کمتر از ماده پایه بوده و با افزایش شدت پرتو، تنش تسلیم جوش‌ها افزایش ولی درصد ازدیاد طول کاهش می‌یابد. هائو ولنگ و همکاران [۱۱] در مقاله مروری خود به بررسی سازوکارهای شکست، الگوهای تعیین عمر لوله، روش‌های بازرسی و تعمیر لوله‌های پلی‌اتیلنی خود پرداختند. آنها روش مرسوم برای اتصال لوله‌های پلی‌اتیلنی را روش جوش سر به سر معرفی کردند و از بین الگوهای شکست، الگوی آزمون هیدرواستاتیک و مکانیک شکست خطی الاستیک را مناسب تشخیص دادند. المومنی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۴ به الگوسازی تحلیلی رشد ترک در جوشکاری سر به سر لوله‌های پلی‌اتیلنی پرداختند. آنها از دو الگوی SCG و CL برای تحلیل رشد ترک استفاده کردند. مقایسه نتایج تجربی و نتایج حاصل از الگوهای تحلیلی نشان داد این دو الگو با دقت قابل قبولی می‌توانند رشد ترک‌های جوشکاری را پیش‌بینی کنند. ژن چائو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۴ به بررسی ویژگی‌های مکانیکی جوشکاری لوله‌های پلی‌تیلن جدار ضخیم پرداختند. آنها لوله‌ها را در سه شرایط مختلف از نظر دما، فشار و زمان خنک‌کاری جوشکاری کردند و استحکام کششی و انرژی شکست را بررسی کردند. نتایج کار نشان داد در بهترین شرایط جوشکاری، استحکام کششی در حد ماده پایه و در دو شرایط دیگر استحکام پائین‌تر از ماده پایه بود. ولی در هر سه شرایط جوشکاری، انرژی شکست کاهش یافته بود و در بهترین شرایط، انرژی شکست در حد ۵۲ درصد ماده پایه به‌دست آمد. علی‌رغم توانائی و کاربرد وسیع روش لب به لب، هنوز مطالعه جامع و کاملی در مورد این روش انجام نشده است. به این دلیل در این مقاله، تاثیر سنجه‌های جوشکاری لب به لب بر روی ویژگی‌های مکانیکی بررسی و سپس با استفاده از روش رویه پاسخ، بهینه‌سازی سنجه‌ها انجام شد. در ادامه آزمون‌های تکمیلی مثل آزمون مکانیک شکست، آزمون ضربه، خمش سه نقطه‌ای و آزمون هیدرواستاتیک جهت بررسی ویژگی‌های جوش در حالت بهینه جوشکاری انجام شد.

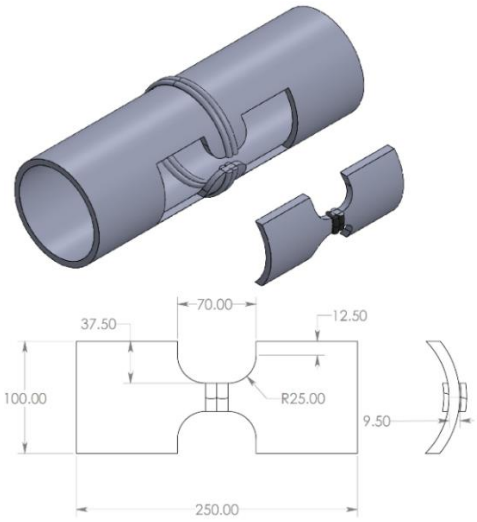
۲- مواد و روش ها

جنس لوله‌های مورد استفاده در این پژوهش، پلی‌اتیلن با چگالی بالا با گرید PE100 و قطر خارجی ۱۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد. برای اتصال لوله پلی‌اتیلنی به روش لب به لب، ابتدا لوله‌ها در دو فک ثابت و متحرک دستگاه جوش قرار می‌گیرند. سپس صفحه فلزی داغ مابین لوله قرار گرفته و دو سر لوله به صفحه چسبانده می‌شود تا در محل تماس لوله‌ها با صفحه داغ بر اثر حرارت و فشار اعمالی، برآمدگی مدور و یکنواختی با اندازه معین ایجاد گردد. سپس صفحه داغ جدا شده و دو سر لوله به همدیگر چسبانده شده و فشار به تدریج افزایش می‌یابد و تا خنک‌شدن محل جوش، ثابت نگه داشته می‌شود. از طریق تجربه‌های متخصصان مربوطه، استانداردهای موجود و طی آزمایش‌های تجربی متعدد، محدوده سنجه‌های جوشکاری یعنی دما، فشار و زمان

جوشکاری تعیین شد. جدول ۱ سه سطح انتخاب شده برای سه سنجه دما، فشار و زمان جوشکاری را نشان می‌دهد. با توجه به تعداد سنجه‌ها و سطوح آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و بر اساس روش رویه پاسخ، طراحی آزمایش‌ها در ۲۰ حالت مختلف انجام گرفت که ۶ آزمایش آن تکراری در نقطه مرکزی می‌باشد. در این پژوهش از روش طراحی مرکب مرکزی که یکی از روش‌های رایج طراحی درروش رویه پاسخ برای الگوسازی و بهینه‌سازی، استفاده شده است. برای این ۲۰ نمونه، آزمایش‌های عملی جوشکاری انجام و آزمون کشش روی آنها انجام گرفت. تعداد نمونه‌های کشش برای هر کدام از شرایط جوشکاری ۳ نمونه بود. بر اساس نتایج آزمون کشش، تاثیر سنجه‌ها بر روی استحکام جوش به‌دست آمد. برای بررسی استحکام کششی، نمونه‌ها مطابق استاندارد ملی INSO 17304 (شکل ۱) با استفاده از دستگاه واترجت برش داده شد و با دستگاه کشش مدل اِی‌آی-۷۰۰ ساخت تایوان و مطابق استاندارد گفته‌شده با سرعت کشش ۵ میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمون قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمون کشش، تاثیر سنجه‌ها بر روی استحکام جوش به‌دست آمد.

جدول ۱. سطوح و محدوده متغیرهای فرایند

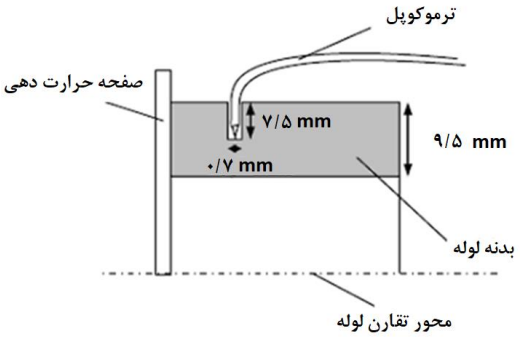
عامل‌ها	سطوح		
	-۱	۰	۱
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۹۰	۲۲۰	۲۵۰
فشار (بار)	۱۰	۲۵	۴۰
زمان (ثانیه)	۱۲۰	۱۸۰	۲۴۰



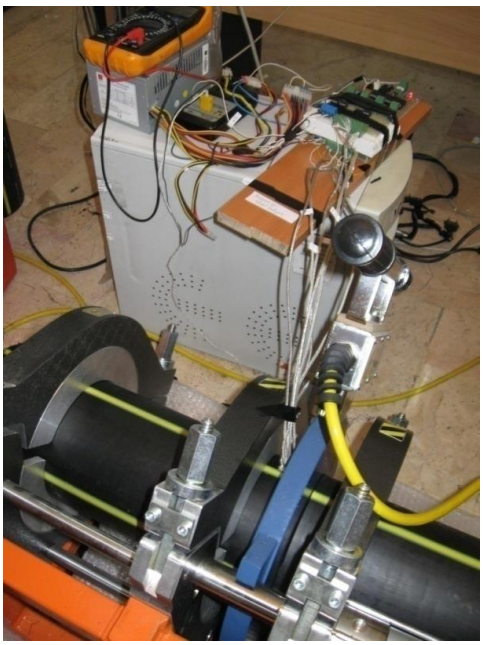
شکل ۱. نمونه آزمون کشش جوش لب به لب.

برای تحلیل بهتر تاثیر سنجه‌های جوشکاری، از شبیه‌سازی المان محدود در محیط نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. به‌دلیل تقارن لوله، از الگوی دوبعدی برای الگوسازی لوله استفاده شد. فرآیند حل مساله به صورت جفت جابه‌جایی و دما به‌دلیل ماهیت فرآیند حرارت‌دهی، برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. نوع المان مورد استفاده CAX4HT و CGAX4HT می‌باشدکه برای الگوسازی بارگذاری جفت دما و جابجایی مناسب است. برای تثبیت موقعیت صفحه حرارتی و جلوگیری از حرکت آن، صفحه در تمام جهت‌ها مقید شده است. برای تعریف لغزش ماده مذاب بر روی صفحه حرارتی در اثر جاری شدن سیال گرانرو در اثر بارگذاری انتهایی لوله، تماس بین لوله و صفحه به صورت لغزشی محدود در نظر گرفته شد. از قید Self Contact برای تعریف سطح‌های نزدیک به انتهای مذاب لوله و جلوگیری از ورود گرده تشکیل شده به داخل بدنه لوله استفاده شده است. دمای اولیه لوله برابر با ۲۵ درجه‌سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و دمای حرارت‌دهی به انتهای سطح تماس لوله و صفحه حرارتی اعمال شد. یک فشار عادی برابر با فشار حرارت‌دهی به صورت یکنواخت به انتهای لوله اعمال و فشار در مرحله دوم حرارت‌دهی نزدیک صفر انتخاب شد. رفتار ماده قبل از دمای ذوب به صورت الاستیک-پلاستیک است و تغییر شکل پلاستیک در پایین‌تر از ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر شکل غالب می‌باشد. بالاتر از دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، ماده ذوب شده و رفتار گرانرو رفتار غالب در ماده خواهد بود. برای الگوسازی رفتار ماده مذاب و منطقه حرارت‌دیده در آن، از ترکیب دو حالت الاستو ویسکوپلاستیک و حالت استاندارد الاستیک-پلاستیک ماده استفاده شد. بعد از معرفی سنجه‌های مختلف مثل ظرفیت گرمائی، چگالی و ضریب انساط حرارتی در دماهای مختلف جنس لوله، شبیه‌سازی المان محدود انجام شد. خروجی شبیه‌سازی توزیع دما، ضخامت لایه مذاب و مقدار ماده تغییر شکل یافته می‌باشد. برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی نیز از اندازه‌گیری تجربی دما استفاده شد. برای اینکار در ۷ نقطه و در فاصله‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر از لبه لوله و در عمق ۷/۵ میلی‌متر از سطح لوله، با ترموکوپل به قطر ۰/۷ میلی‌متر اندازه‌گیری دما انجام گرفت. در شکل ۲، طرحواره یک محل نصب ترموکوپل و در شکل ۳، نحوه

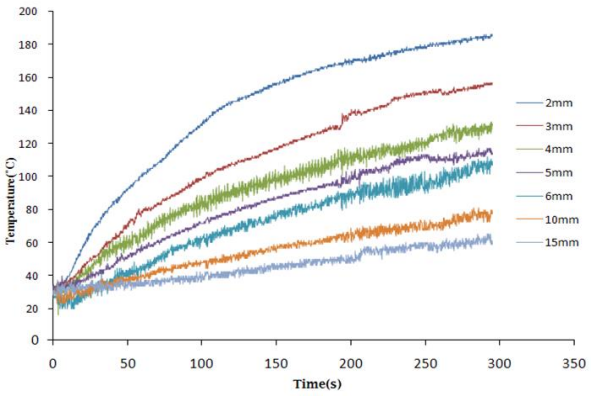
قرارگیری ترموکوپل‌ها در جوشکاری عملی نشان داده شده است. در شکل ۴، نتایج اندازه‌گیری دما در ۷ نقطه و برای جوشکاری در فشار ۲۵ بار و دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و تا زمان ۲۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد. بعد از شبیه سازی در شرایط دمای ۱۹۰ درجه‌سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار، نتایج شبیه سازی مطابق شکل ۵ حاصل شد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری دما در ۷ نقطه مورد نظر نشان می‌دهد که مقدارهای شبیه‌سازی شده هم‌خوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارند. بعنوان نمونه، منحنی دما در فاصله ۲ میلی‌متر در دو حالت اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی المان محدود در شکل ۶ آورده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد شبیه سازی با خطای بیشینه ۷/۳ درصد می‌تواند فرایند جوشکاری را شبیه‌سازی کند که مقدار خطای قابل قبولی می‌باشد.



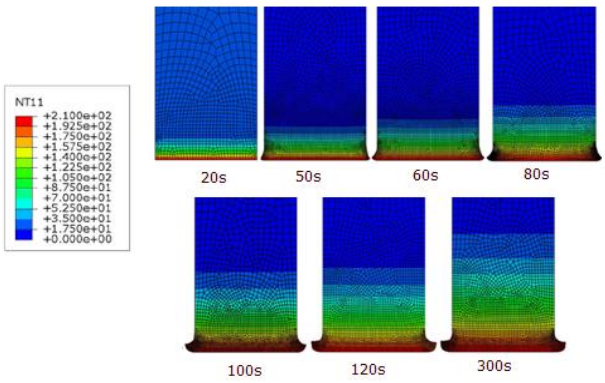
شکل ۲. نحوه قراردهی ترموکوپل‌ها.



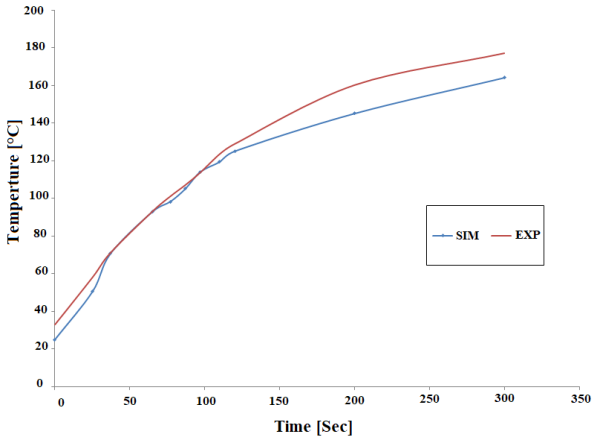
شکل ۳. اندازه گیری دما در ۷ نقطه به‌صورت تجربی.



شکل ۴. نتایج اندازه‌گیری دما در آزمایش تجربی برای جوشکاری در دمای ۱۹۰ درجه‌سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار.



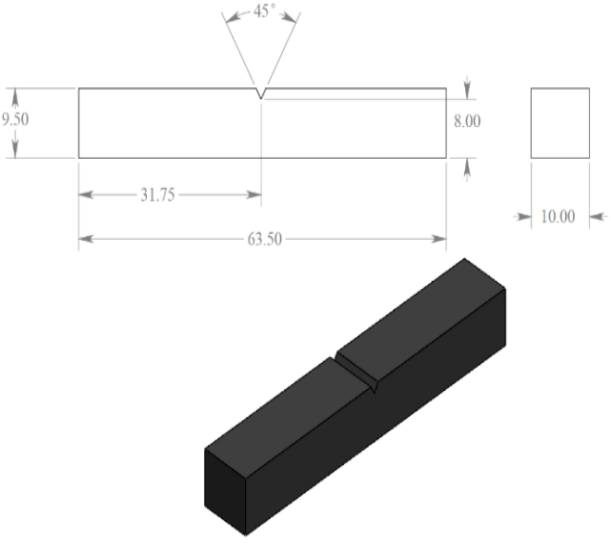
شکل ۵. نتایج شبیه سازی برای جوشکاری در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار.



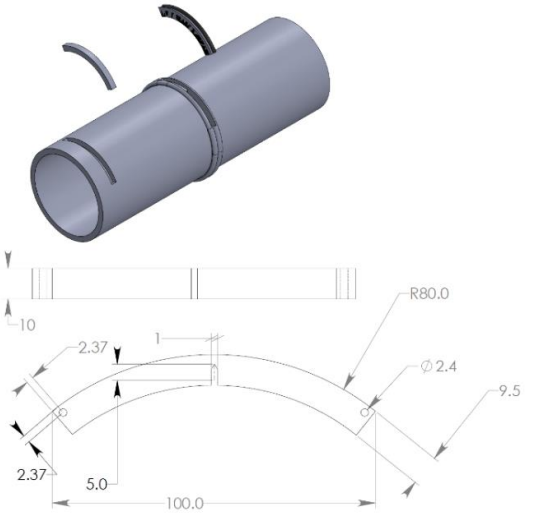
شکل ۶. مقایسه دما در دو حالت شبیه سازی و اندازه‌گیری تجربی در فاصله ۲ میلی‌متر و برای جوشکاری در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار.

در مرحله بعد، بهینه‌سازی فرایند در نرم افزار مینی‌تب انجام گرفت. جهت تائید شرایط بهینه، سه آزمایش تجربی جدید در شرایط بهینه به‌دست آمده، نیز انجام شد تا صحت شرایط بهینه مورد آزمون قرار گیرد. برای مطالعه بیشتر در شرایط بهینه حاصل، آزمون‌های مختلف تکمیلی انجام گرفت. یکی از آزمون‌های تکمیلی، آزمون ضربه بود. آزمون ضربه یکی از روش‌های استاندارد برای به دست آوردن انرژی شکست مواد در اثر تنش دینامیکی است. برای انجام این آزمون، نمونه‌ها مطابق شکل ۷ و طبق استاندارد ASTM D256 برش داده شد و با استفاده از دستگاه ناچزن، مطابق استاندارد، شیار وسط ایجاد شد. علاوه بر آزمون ضربه، آزمون مکانیک شکست نیز انجام شد. جهت انجام آزمون مکانیک شکست، ابتدا از ماده پایه و منطقه جوشکاری شده هر کدام چهار نمونه طبق استاندارد ASTM E399-90 (شکل ۸) جدا شد و تحت آزمون قرار گرفت. علاوه بر آزمون ضربه و شکست، روی نمونه تیر با شکاف روی لبه یا SENB با بارگذاری خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM E1820-20 نیز انجام گرفت (شکل ۹).

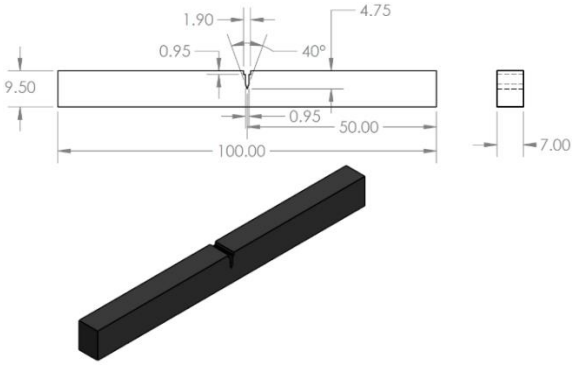
جهت انجام آزمون هیدرواستاتیک نیز مطابق استاندارد ملی ANSO14427-2، نمونه‌هائی به طول ۸۰۰ میلی‌متر از ماده پایه و لوله جوشکاری‌شده در شرایط بهینه آماده شد و تحت شرایط استاندارد و در فشار ۱۵ بار در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰۰ ساعت تحت آزمون قرار گرفت.



شکل ۷. نمونه آزمون ضربه ایزود.



شکل ۸. نمونه آزمون مکانیک شکست.



شکل ۹. نمونه آزمون خمش سه نقطه.

۳- نتایج و بحث

طبق طراحی آزمایش‌های انجام شده، جوشکاری در ۲۰ حالت به‌صورت عملی انجام شد که نتایج آزمون کشش آن در جدول ۲ آورده شده است. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب الگوسازی و تحلیل نتایج انجام شد. برای بررسی دقت و اعتبار الگو، می‌توان از روش‌های متعددی بهره برد. یکی از این روش‌ها مقایسه مقدارهای تخمین‌زده شده با الگو با مقدارهای تجربی به‌دست آمده از آزمایش‌ها می‌باشد. در شکل ۱۰، مقدارهای تجربی متغیر پاسخ برحسب مقدارهای پاسخ پیش‌بینی شده با الگو رسم شده‌اند. هر چه نقاط روی خط ۴۵ درجه بیشتر واقع شوند، الگو دقت بیشتری داشته و اعتبار آن‌هم بالا است. با توجه به نمودار مقایسه مقدارهای تجربی و پیش‌بینی‌شده، می‌توان دریافت که این مقدارها به هم نزدیک هستند و این بدین معنی است که الگو با دقت بالایی قادر به‌پیش بینی داده ها در نقاط دیگر نیز می‌باشد.

جدول ۲. نتایج آزمون‌های عملی برای شرایط طراحی آزمایش

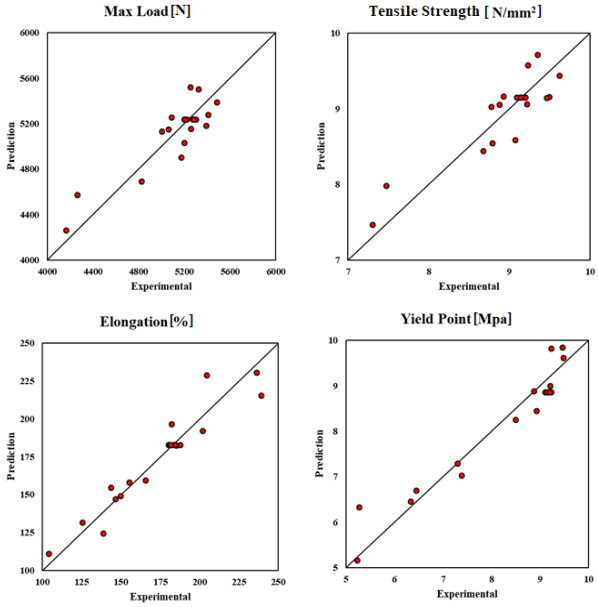
ردیف	دما (°C)	فشار (بار)	زمان (ثانیه)	نیروي بیشینه (N)	استحکام کششي (N/mm)	ازدیاد طول (%)	استحکام کششي (Mpa)
۱	۲۵۰	۲۵	۱۸۰	۵۴۱۱/۸۶۶	۹/۴۹۶	۱۴۳/۷۹۸	۹/۴۸
۲	۲۲۰	۴۰	۱۸۰	۵۱۷۲/۰۴۷	۹/۰۷۴	۱۶۵/۶۷۶	۵/۲۷۸
۳	۲۲۰	۲۵	۱۸۰	۵۲۲۳/۷۷۲	۹/۱۸۲	۱۸۰/۲۸۹	۹/۱۸۱
۴	۲۵۰	۱۰	۲۴۰	۵۲۰۱/۴۹۲	۸/۶۷۷	۱۳۸/۸۷۷	۶/۴۵
۵	۲۵۰	۴۰	۲۴۰	۵۰۰۵/۴۹۲	۸/۷۸۲	۱۸۵/۱۴۳	۷/۳۸۱
۶	۲۵۰	۴۰	۱۲۰	۵۰۶۰/۶۷	۸/۸۷۸	۱۴۶/۴۹۶	۸/۸۷۸
۷	۲۲۰	۲۵	۱۸۰	۵۲۰۱/۳۲۵	۹/۱۳۶	۱۸۳/۴۲۵	۹/۲۲۷
۸	۲۵۰	۱۰	۱۲۰	۴۱۶۴/۴۳۵	۷/۳۰۶	۱۲۵/۵۷۹	۷/۳۰۶
۹	۱۹۰	۴۰	۲۴۰	۵۲۵۶/۶۹	۹/۲۲۲	۲۳۶/۵۳۱	۹/۲۱
۱۰	۲۲۰	۲۵	۲۴۰	۵۲۵۶	۹/۲۳	۲۰۴/۶۸۶	۹/۲۳
۱۱	۲۲۰	۱۰	۱۸۰	۴۲۶۲/۴۳۹	۷/۴۷۸	۱۰۴/۱۰۲	۵/۲۳۶
۱۲	۲۲۰	۲۵	۱۸۰	۵۳۰۱/۵۹۱	۹/۱۹۵	۱۸۱/۰۰۸	۹/۱۰۶
۱۳	۱۹۰	۱۰	۱۲۰	۴۸۲۵/۳۲۷	۸/۷۸۹	۱۵۵/۳۷۱	۶/۳۳۹
۱۴	۱۹۰	۲۵	۱۸۰	۵۳۲۵/۶۵۶	۹/۳۵	۲۰۲	۹/۳۴
۱۵	۲۲۰	۲۵	۱۸۰	۵۲۷۵/۲۰۸	۹/۰۹۳	۱۸۴/۲۹۷	۹/۱۵۱
۱۶	۲۲۰	۲۵	۱۸۰	۵۲۷۸/۸۰۳	۹/۱۹۹	۱۸۷/۸۶	۹/۱۹۹
۱۷	۱۹۰	۴۰	۱۲۰	۵۰۹۰/۲۵۴	۸/۹۳	۱۸۲/۱۱۶	۸/۹۳
۱۸	۲۲۰	۲۵	۱۸۰	۵۲۰۵/۰۶۳	۹/۱۴۷	۱۸۱/۵۵۱	۹/۱۹۶
۱۹	۱۹۰	۱۰	۲۴۰	۵۴۸۴/۴۴۸	۹/۶۲۲	۱۴۹/۸۹۶	۸/۴۹۶
۲۰	۲۲۰	۲۵	۱۲۰	۵۳۹۴/۱۸۷	۹/۴۶۴	۲۳۹/۱۶۹	۹/۴۶۳

از روش‌های دیگر تعیین معنادار بودن و مناسب‌بودن الگو، استفاده از تحلیل آماری واریانس یا آنووا است. در این تحلیل، مقدار احتمال کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده این است که تغییرها در پاسخ به‌خوبی با الگوی به‌دست آمده توصیف شده است. به‌عبارت دیگر با در نظر گرفتن ۹۵ درصد سطح اطمینان برای پیش‌بینی الگو، اگر مقدار احتمال کمیتی از ۰/۰۵ کمتر باشد، تغییرهای آن بر روی الگو مؤثر می‌باشد. جدول ۳ نتایج تحلیل آماری واریانس را در پژوهش حاضر نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است مقدار احتمال الگو کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد که این مسئله بیانگر معنی‌دار و مناسب بودن الگو می‌باشد.

شکل ۱۱ نمودارهای دوبعدی (کانتور) و سه‌بعدی (رویه) پاسخ برای استحکام کششی را به‌صورت تابعی از متغیرهای مستقل نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که دیده می‌شود، استحکام جوش در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقدار را دارد. تاثیر دما در دماهای کمتر از ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد در نمودار مشاهده نمی‌شود. علت آن است که در آزمایش‌های تجربی و در دماهای کمتر از ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، جوش مناسبی تشکیل نشد. نتایج شبیه‌سازی المان محدود نیز این مسئله را تائید می‌کند. مطابق شکل ۱۲، در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در همه فشارها حتی در فشار بالا مثل ۴۰ بار، نفوذ حرارتی وجود دارد ولی حجم مذاب مناسب تشکیل نشده و هیچگونه تغییر شکلی در اثر فشار صفحه حرارتی ایجاد نشده است. از سوی دیگر، با افزایش دما از ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به بالا، استحکام کششی جوش کاهش می‌یابد. علت آن افزایش سیال‌بودن مذاب و خروج مذاب از منطقه جوش می‌باشد. در شکل ۱۳ نتایج شبیه‌سازی در دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار متوسط ۲۵ بار نشان داده شده است. همان‌طوری‌که دیده می‌شود، در دمای بالا، تغییر شکل زیاد بوده و مذاب از منطقه جوش تخلیه می‌شود. از سوی دیگر در دمای بالا، تخریب زنجیره‌های پلیمری نیز صورت می‌گیرد، لذا استحکام جوش با افزایش دما دچار کاهش می‌شود.

جدول ۳. مقدار احتمال برای پاسخ های مختلف

Source	DF	Max Load	Tensile Strength	Elongation	Yield Strength
Model	9	0.000	0.014	0.000	0.000
Linear	3	0.000	0.018	0.000	0.040
Temperature	1	0.002	0.036	0.002	0.160
Pressure	1	0.000	0.025	0.000	0.010
Time	1	0.173	0.087	0.173	0.941
Square	3	0.001	0.017	0.001	0.000
Temperature*Temperature	1	0.290	0.229	0.290	0.015
Pressure*Pressure	1	0.000	0.003	0.000	0.000
Time*Time	1	0.001	0.364	0.001	0.020
2-Way Interaction	3	0.187	0.121	0.187	0.054
Temperature*Pressure	1	0.277	0.088	0.277	0.640
Temperature*Time	1	0.942	0.887	0.942	0.016
Pressure*Time	1	0.060	0.079	0.060	0.161

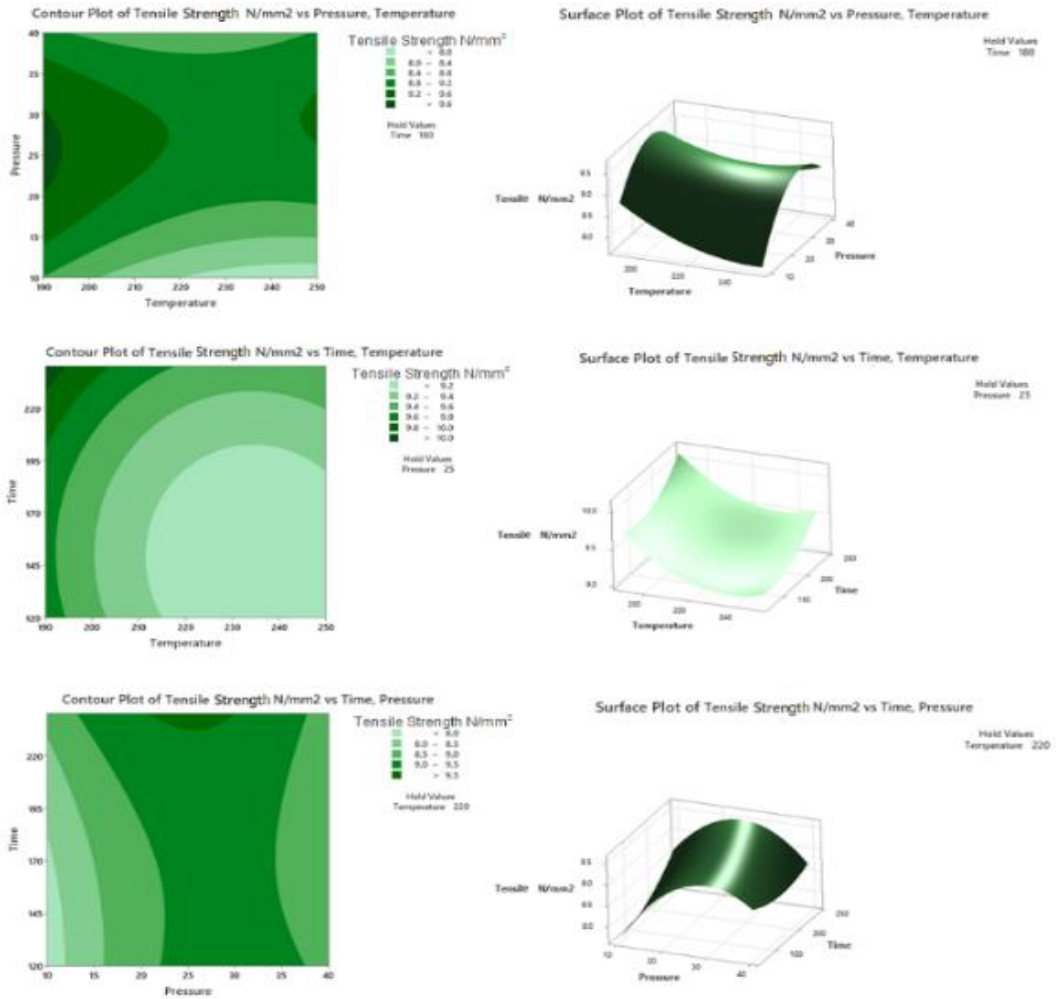


شکل ۱۰. مقایسه مقدارهای واقعی و مقدارهای محاسبه‌شده برای پاسخ های مختلف.

مطابق شکل ۱۱، با افزایش فشار از ۱۰ بار تا ۲۵ بار، استحکام افزایش می‌یابد، چرا که در فشار پائین نفوذ حرارتی کم بوده و حجم مذاب ناکافی است. ولی در فشار ۲۵ بار، حجم مذاب مناسب بوده و استحکام جوش بیشینه مقدار خود را دارد. ولی با افزایش فشار به‌دلیل خروج مذاب، دوباره استحکام کاهش می‌یابد. همان‌طوری‌که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، با افزایش زمان جوشکاری، استحکام کششی جوش بالا می‌رود. علت اصلی آن فرصت کافی برای تشکیل پیوند زنجیره‌های پلیمری در محل اتصال جوش پلی‌اتیلن و نفوذ حرارتی و تشکیل حجم مذاب مناسب می‌باشد.

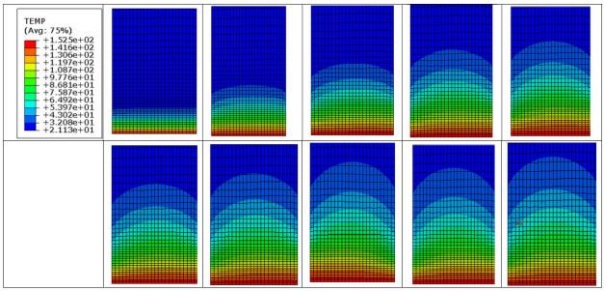
۳-۱- بهینه‌سازی سنجه‌ها

برای تعیین مقادیر بهینه سنجه برای حداکثر استحکام کششی از ابزار بهینه سازی نرم افزار مینی تب بهره گرفته شد.

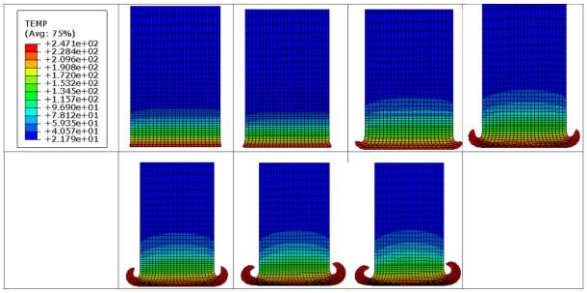


شکل ۱۱. نمودار دوبعدی و سه بعدی تأثیر سنجه‌های مختلف بر استحکام کششی.

مقادیر بهینه سنجههای ارائه شده توسط این ابزار در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۱۲. شبیه‌سازی لوله جوشکاری‌شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۰ بار.



شکل ۱۳. شبیه سازی لوله جوشکاری شده در دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار.

جدول ۴. مقادیر بهینه برای سنجه‌ها

دما (°C)	فشار (بار)	زمان (ثانیه)	استحکام کششی پیش‌بینی شده (N/mm^2)
۱۹۰	۲۳/۳۳	۲۴۰	۱۰/۱۲۷

برای تائید شرایط بهینه، چهار آزمایش تجربی در شرایط بهینه انجام شد. همان‌گونه که در جدول ۵ دیده می‌شود، نتایج عملی به‌دست آمده به صورت معناداری به نتایج پیش‌بینی شده نزدیک بوده و دارای ۳/۳ درصد خطا می‌باشد که خطای قابل قبولی است. این نتایج تجربی، صحت نتایج آزمایشگاهی و شرایط بهینه سازی را تایید می نماید.

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های عملی برای جوشکاری در شرایط بهینه

شماره آزمایش	اول	دوم	سوم	چهارم	مقدار میانگین
استحکام کششی (N/mm^2)	۹/۷۶۷	۱۰/۱۲۴	۹/۶۶۷	۹/۶۱۱	۹/۷۹۲

با بررسی نتایج آزمون کشش و مقایسه استحکام ماده پایه با ناحیه اتصال، میانگین استحکام کششی نمونه پایه ۹/۶۳۷ مگاپاسکال و میانگین استحکام منطقه جوش۹/۷۹۲ مگاپاسکال حاصل شد که در مقایسه با ماده پایه در حدود ۲ درصد افزایش پیدا کرده است که ناشی از تشکیل حجم مذاب کافی برای جوشکاری، اختلاط بهتر مواد خمیری شکل در ناحیه اتصال، تشکیل زنجیره‌های پلیمری جدید و تراکم بیشتر زنجیره‌ها در ناحیه اتصال و در نتیجه ایجاد پیوندهای عرضی جدید بین زنجیره‌های پلیمری تحت شرایط بهینه جوشکاری است که در نهایت تاثیر مثبتی روی استحکام نهایی محل اتصال دارد. در مراجع مشابه بهترین استحکام جوش در حد ماده پایه بود [۱۳]. درحالی‌که در شرایط بهینه‌سازی این پژوهش، استحکام ۲ درصد بیشتر از ماده پایه به‌دست آمد که نشان‌دهنده آن است که در صورت بهینه‌سازی صحیح سنجه‌ها، می‌توان استحکام جوش را بهبود داد. نتایج حاصل از آزمون ضربه برای ماده پایه و لوله جوشکاری شده در شرایط بهینه در جدول ۶ آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، دیده می‌شود که میانگین انرژی شکست در ماده پایه ۰/۷۶۶ ژول بوده که در نمونه جوشکاری‌شده به ۰/۸۰۰ ژول رسیده است که در حدود ۵ درصد افزایش پیدا کرده است. این افزایش ناشی از اختلاط مناسب مذاب، تغییر میزان بلورینگی و اندازه بخش‌های بلوری و به‌هم پیوستگی بیشتر بین آنها باشد.

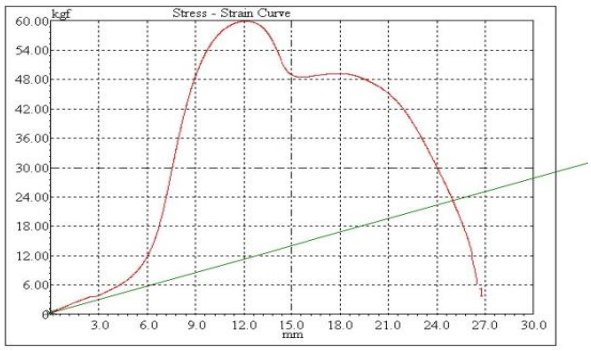
جدول ۶. نتایج آزمون ضربه ایزود

نمونه	انرژی شکست (E(j))	استحکام ضربه‌ای (Kj/m^{-2})
ماده پایه	۰/۷۶۶	۲۷۹۲۳
لوله جوشکاری شده در شرایط بهینه	۰/۸۰۰	۲۹۱۶۳

نتایج حاصل از آزمون مکانیک شکست برای ماده پایه و لوله جوشکاری شده در شرایط بهینه به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در حضور یک ترک اولیه مصنوعی، انرژی کرنش در لوله جوشکاری

افزایش یافته است و نمونه جوشکاری شده در تنش شکست ۲۳/۲۳۱ و نمونه ماده پایه در ۱۶/۷۹۱ مگاپاسکال دچار شکست شده‌اند. که نشان می‌دهد نمونه جوشکاری شده نسبت به ماده پایه حدود ۳۸ درصد بهتر در مقابل رشد ترک مقاومت می‌کند. که نشان‌دهنده کیفیت بالای جوشکاری و اختلاط مناسب مواد می‌باشد. در مقاله‌های مشابه استحکام به‌دست آمده در آزمون مکانیک شکست در لوله جوشکاری حدود ۱ درصد کمتر از ماده اولیه بود [۱۳]. که نشان می‌دهد در صورت بهینه‌سازی سنجهها، می‌توان تنش شکست جوش را بهبود داد.

ReportNo	Width	Thickness mm	Area mm²	Speed mm/min	Max Load kgf	ISO 527 MPa	Tensile Strength MPa	Elongation at Break %
base	10.000	3.500	35.000	2.000	59.926	42.283	16.791	30.822



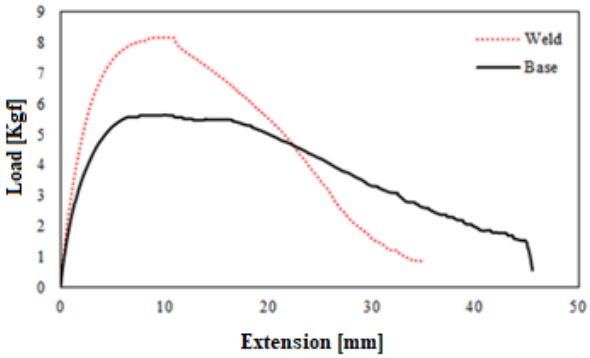
شکل ۱۵. نمودار آزمون مکانیک شکست برای نمونه ماده پایه.

ReportNo	Width	Thickness mm	Area mm²	Speed mm/min	Max Load kgf	ISO 527 MPa	Tensile Strength MPa	Elongation at Break %
weld	10.000	3.500	35.000	2.000	82.913	90.293	23.231	25.983



شکل ۱۶. نمودار آزمون مکانیک شکست برای نمونه جوشکاری شده در شرایط بهینه.

نتایج آزمون خمش سه نقطه نیز در شکل ۱۷ آورده شده است. همان‌طورکه دیده می‌شود، در آزمون خمش سه نقطه و در حضور ترک اولیه، میزان افزایش طول در بیشینه استحکام نمونه جوشکاری در حدود ۱۰/۲۵ میلی‌متر و در ماده پایه ۱۰/۰۵ میلی‌متر است که میزان افزایش تغییر طول نمونه در بیشینه استحکام در نمونه جوشکاری شده نسبت به ماده پایه حدود ۲ درصد افزایش یافته است. همچنین بیشینه نیروی قابل تحمل برای نمونه جوشکاری برابر ۸/۱۷۵ کیلوگرم نیرو و برای ماده پایه برابر ۵/۸۹ نیوتن بود که افزایش ۳۸ درصدی استحکام خمشی برای نمونه جوشکاری‌شده را نشان می‌دهد. برای تحلیل این نتایج، آزمون‌های پلیمری انجام شد که نشان دادند اختلاط مواد مناسب بوده و ضخامت مناسبی از مذاب در محل اتصال تشکیل و شرایط تراکم زنجیره‌های پلیمری و درصد بلورینگی در محل اتصال و در شرایط بهینه جوشکاری بهبود می‌یابد. البته بعد از بیشینه نیروی تحمل، نمونه جوشکاری‌شده نسبت به ماده پایه، زودتر به حالت گسیختگی می‌رسد. سطح زیر منحنی نمودار نیرو – جابجائی برابر انرژی لازم برای شکست نمونه است که برای نمونه جوشکاری شده این عدد برابر ۱۷۵/۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع و برای ماده پایه ۱۷۷/۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع است که برای نمونه جوشکاری‌شده ۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که نمونه جوشکاری‌شده مقاومت بالاتری نسبت به رشد ترک دارد و ۳۸ درصد بیشتر مقاومت می‌کند و شروع رشد ترک در کرنش‌های بالا و در نیروهای خارجی بالاتری رخ می‌دهد. ولی بعد از شروع رشد ترک اولیه، ترک راحت‌تر رشد کرده و شکست در کرنش پائین‌تری رخ می‌دهد.



شکل ۱۷. نمودار آزمون خمش سه نقطه برای ماده پایه و نمونه جوشکاری شده در شرایط بهینه.

برای آزمون هیدرواستاتیک نیز مطابق استاندارد، نمونه ها در ۱/۵ برابر فشار اسمی یعنی ۱۵ بار و به مدت ۱۰۰ ساعت تحت آزمون قرار گرفتند که نتایج آزمون نشان می‌دهد هم نمونه جوشکاری شده و هم ماده پایه دچار پاره‌گی یا افت فشار نشدند. یعنی کیفیت و استحکام جوش طبق استاندارد مورد تائید می‌باشد. بعد از اتمام آزمون، فشار لوله جوشکاری‌شده افزایش یافت تا لوله دچار پاره‌گی شود. طبق شکل ۱۹ دیده می‌شود که با افزایش فشار بدون آنکه محل جوش آسیب ببیند در بدنه لوله باد شدگی ایجاد شد که اصطلاحا به نوک قناری موسوم است. این نوع تغییر شکل نشان از سالم بودن جوش و استاندارد بودن جنس لوله است که در فشارهای بسیار بالا بجای ترکیدگی و نشت سیال داخل لوله، حالت تغییر شکل نرم یا همان نوک قناری ایجاد می‌شود.



شکل ۱۹. تغییر شکل نمونه جوشکاری شده در فشار بالا.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، تاثیر سنجه‌های جوشکاری لب به لب بر ویژگی‌های مکانیکی لوله‌های پلی‌اتیلن بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که سه سنجه دما، فشار و زمان جوشکاری تاثیر معناداری بر روی استحکام اتصال دارند. بهینه‌سازی سنجه‌ها نشان داد بهترین شرایط جوشکاری در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۲۳/۳۳ بار و زمان جوشکاری ۲۴۰ ثانیه حاصل شد. که این مقدارها متفاوت از مقدارهای به‌کار رفته در مراجع موجود بود. در این شرایط استحکام جوش در حد ۹/۷۹۲ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت به استحکام ماده پایه ۲ درصد بیشتر می‌باشد. در حالی‌که استحکام جوش در مراجع مشابه پائین‌تر از ماده پایه و یا در بهترین شرایط در حد ماده پایه گزارش شده است. این مطلب نشان می‌دهد در صورت استفاده از روش‌های بهینه سازی، می‌توان با جوشکاری در شرایط بهینه استحکام جوش را بهبود داد. سپس در شرایط بهینه آزمون‌های مختلف تکمیلی انجام گرفت. طبق آزمون ضربه میانگین انرژی شکست در نمونه جوشکاری شده به ۰/۸ ژول می‌رسد که افزایش ۵ درصدی نسبت به ماده پایه را نشان می‌دهد. آزمون مکانیک شکست نیز نشان داد تنش شکست در نمونه جوش ۳۸ درصد بیشتر از ماده پایه می‌باشد. در نتایج آزمون هیدرواستاتیک نیز در فشار ۱/۵ برابر، هیچگونه تغییرشکل یا نشتی در لوله جوشکاری‌شده مشاهده نگردید. که نشان‌دهنده جوشکاری مناسب و قابل قبول در شرایط بهینه می‌باشد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز و همچنین مدیریت محترم شرکت پالایش نفت تبریز سپاسگزاری می شود.

عهده دار مکاتبات

تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، آزمایشگاه جوشکاری پیشرفته،
پیام نگار: a-mostafapur@tabrizu.ac.ir

مراجع

[1] M. Kang, S. Choi, H. Song, J. Appl. Polym. Sci., **135**, 45668 (**2018**).
[2] E. Choi, A. Ostadrahimi, H. Young, J. Intell. Mater. Syst. Struct., **31**, 2029 (**2020**).
[3] S. Deveci, N. Antoni, B. Eryigit, Polym. Degrad. Stab., **148**, 75 (**2018**).
[4] M. Troughton, A. Khamsehnezhad, Proceeding of ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, (**2016**).
[5] J. S. kim, Y. J. Oh, S. W. Choi, C. Jang, Nucl. Eng. Technol., **51**, 1142 (**2019**).
[6] S. Pathak, S. K. Pradhan, Mater. Today, **27**, 2925 (**2020**).
[7] H. S. Lai, N. N. Tun, K. B. Yoon, S. H. Kil, Int. J. Press. Vessels Pip., **139**, 117 (**2016**).
[8] Q. Wang, H. Zhou, J. Xie, X. Xu, Int. J. Press. Vessels Pip., **189**, 104272 (**2021**).
[9] J. Zheng, Y. Zhang, et.al, Front. Mech. Eng., **13**, 535 (**2018**).
[10] V. Vijayan, P. Pokharel, M. Kang, S. Choi, Radiat. Phys. Chem., **122**, 108 (**2016**).
[11] H. Wang, J. Shah, S. Hawwat, Q. Huang, A. Khatami, J. Pipeline Sci. Eng., **4**, 100174 (**2024**).
[12] A. Almomani, A. Hamid, I. Mourad, Int. J. Solids Struct., **301**, 112970 (**2024**).
[13] Zh. Wang, S. Zhang, J. Qie, Q. You, L. Xu, Q. Zhang, Polym. Test., **135**, 108448 (**2024**).