

فرایند جوشکاری الکتروفیوژن لوله‌های پلی اتیلن با استفاده از ماده واسط بر پایه پلی اتیلن جهت کاهش احتمال جوش ناقص و ضعیف: بهینه سازی و شبیه سازی

نفر اول نام و نام خانوادگی دانشجو: عبدالعلی رحیمی مظفری abdolali rahimi mozaffari

abdolalirahimimozaffari@gmail.com

Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

نفر دوم (عهده دار مقاله) معصومه عمادی masoomeh emadi

ایمیل:

Ma.emadi@iau.ac.ir

آدرس دهی

Department of chemistry, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

نفر سوم

Bizhan Honarvar

ایمیل

honarvar2@gmail.com

آدرس دهی

Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

نفر چهارم

Moein Nabipour

ایمیل: nabipour@gmail.com

آدرس دهی

Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

چکیده:

در حال حاضر در ایران گاز طبیعی بعنوان منبع انرژی عمده در سبد انرژی مصرف کنندگان مورد استفاده قرار می گیرد. انتقال ایمن گاز از طریق شبکه توزیع متشکل از خطوط لوله زیرزمینی که عمده آنها از جنس پلی اتیلن است صورت می پذیرد. خطوط از جنس پلی اتیلن به مرور جایگزین خطوط از جنس فولادی با فشار پایین و متوسط شده و از مزایای آن مقاومت در مقابل خوردگی و سهولت در اجرای آن می باشد. اتصال این لوله ها با استفاده از جوشکاری لوله به کوپلرهای الکتروفیوژنی و یا از طریق اتصال لب به لب انجام می شود. در ابتدا حرارت ایجاد شده بخشی از اتصال را ذوب می کند. سپس مواد پلی اتیلن مذاب به سطح خارجی لوله درون کوپلر رسیده و لایه ای از آن را نیز به حالت مذاب در آورده و در شرایط دمایی و فشار منطقه ذوب؛ در اثر حرارت و فشار، امتزاج پلیمری صورت می گیرد. پس از خنک شدن یک جوش با استحکام بالا مورد انتظار می باشد که باید در آزمون های بررسی استحکام همچون آزمون لهیدگی مورد تایید باشد. اما یکی از موانع مهم در ایجاد جوش کامل و مستحکم، بروز عوامل ایجاد جوش ضعیف شامل فاصله بیش از حد یا غیر استاندارد بین لوله و اتصال در منطقه جوش، به صورت یک فضای خالی پر از هوا می باشد که مانع از انتقال حرارت کامل و طراحی شده از کوپلر به لوله خواهد شد. مطابق مطالعات انجام شده راهکار مناسب جهت حل چالش ایجاد فضای خالی در زمان جوش کاهش فاصله بین لوله و اتصال می باشد. بنابراین در این تحقیق از یک ماده واسطه بر پایه پلی اتیلن برای پرکردن فضای خالی بین لوله و کوپلر استفاده شده تا با انتقال حرارت بیشتر موجب ایجاد یک جوش با نقص کمتر در امتزاج و در نتیجه کاهش احتمال ایجاد جوش ناقص گردد. پدیده انتقال حرارت در حین فرآیند جوشکاری الکتروفیوژن در نرم افزار مهندسی COMSOL شبیه سازی شده، سپس پروفایل حرارتی سطح بیرونی اتصال و سطح داخلی لوله در حالت جوشکاری با فاصله کم بین لوله و اتصال در حد پایین استاندارد؛ سپس با اعمال فضای خالی قابل توجه در اثر فاصله حداکثری بین لوله و اتصال در حد بالای مجاز استاندارد و در نهایت با استفاده از مواد واسطه پلیمری بین لوله و اتصال از نرم افزار استخراج گردید، تا اثر ماده واسطه در ایجاد انتقال حرارتی متناسب نسبت به دو حالت فاصله حداقلی و حداکثری بین لوله و اتصال مقایسه گردد. از طرف دیگر اتصالاتی با این سه حالت تهیه و با لوله ها جوشکاری گردید تا این نمونه ها نیز با استفاده از روش دما نگاری از سطوح با دوربین IR با خروجی نرم افزار شبیه ساز مقایسه و بتوان نتایج حاصله را صحت گذاری نمود. به علاوه برای اثبات کیفیت جوشکاری با ماده واسطه

و تصدیق اثر آن بر کاهش احتمال بروز جوش ناقص و ضعیف؛ نمونه های جوشکاری شده برای **آزمون استحکام جوش یعنی آزمون** **لهیدگی سرجوش ارسال** و نتایج این آمون مخرب نیز بررسی و تحلیل شد. نتایج نشان داده است که با استفاده از ماده واسط در اتصالات دارای فاصله حداکثری با لوله، احتمال بروز جوش ناقص بسیار کاهش یافته و در **عین حال استحکام جوش** نیز در حد مطلوب می باشد.

کلیدواژه‌ها: جوشکاری الکتروفیوژن، پلی اتیلن، کوپلرهای الکتروفیوژن، ماده واسط جوشکاری، پروفایل دمایی، شبیه سازی

۱- مقدمه

جوشکاری الکتروفیوژن^۱ یکی از روش های اتصال ارزان و در عین حال ایمن لوله های پلی اتیلن است که به طور گسترده ای در صنایع مختلف، به ویژه در صنعت نفت و گاز برای اجرای شبکه های توزیع گاز و سیالات نفتی، مورد استفاده قرار می گیرد [1] و [2]. مزایای اولیه آن مقاومت در برابر خوردگی، سرعت بالای اجرا و نصب، کیفیت بالای کار و استحکام اتصال و قابلیت اطمینان می باشد که باعث ترویج این روش می شود [3] و [4]. این روش به تدریج در صنایع مختلف مانند آب و فاضلاب، صنایع شیمیایی و صنایع غذایی و صنایع دارویی و غیره نیز مورد استفاده قرار گرفت [5]. در حال حاضر تنوع اتصالات الکتروفیوژن افزایش یافته و اتصالات پیچیده تری برای کاربردهای خاص طراحی و تولید شده است [6] و [7] و [8]. تجهیزات جوشکاری الکتروفیوژن پیشرفته تر و دقیق تر شده و امکان کنترل بهتر پارامترهای جوشکاری فراهم شده است [7] و [9] و [10].

آزمایش های خاصی بر اساس استانداردهای تحویل گاز برای ارزیابی جوش به کار می رود. برخی از این آزمایش ها دامنه وسیعی دارند و نتایج آنها می تواند برای اندازه گیری چندین پارامتر استفاده شود [11] و [12]. با این حال، طبق استانداردها، آزمایش لهیدگی می تواند برای تأیید کیفیت و اعتبار کوپلر استفاده شود و یکی از قابل اعتمادترین آزمایش ها برای پروژه های صنعتی با استفاده از پلی اتیلن است [3] و [13] و [14]. آزمون لهیدگی پس از خنک شدن کامل کوپلر، بر اساس اندازه آن، دو یا چهار برش با ابعاد مشابه از کوپلر جدا شده و هر یک با یک گیره یا پرس هیدرولیک فشرده می شود [15] و [16] و [17]. پس از اینکه دو انتهای برش به مکان پیش بینی شده ای (بر اساس استاندارد) برسند، ابزار مناسبی برای ادامه کار استفاده می شود و از این طریق و استحکام جوش مورد ارزیابی قرار می گیرد [18] و [19].

¹ -electrofusion welding

جوشکاری الکتروفیوژن لوله‌های پلی‌اتیلن مزایای متعددی را فراهم می‌آورد که قابلیت اطمینان و کیفیت فرآیند جوشکاری را بهبود می‌بخشد [1] و [9]؛ این مواد هنگام گرم شدن، ادغام بین اجزای پلی‌اتیلن و دیواره لوله را تقویت می‌کنند [20]. حضور آن‌ها توانایی پلی‌اتیلن ذوب شده را برای نفوذ عمیق به سطوح لوله و اتصالات افزایش می‌دهد که منجر به ایجاد مجموعه یکنواخت و قوی می‌شود [17] و [21]. استفاده از این مواد کمکی ممکن است قابلیت اطمینان کلی فرآیند جوشکاری الکتروفیوژن را افزایش داده و احتمال بروز نقص‌ها و نشت‌ها را کاهش دهد که برای حفظ یکپارچگی سیستم‌های توزیع گاز، آب و سایر کاربردها ضروری است [22] و [23]. یکی از موانع مهم در ایجاد جوش کامل و مستحکم، بروز عوامل ایجاد جوش ضعیف شامل فاصله بیش از حد یا غیر استاندارد بین لوله و اتصال در منطقه جوش، به صورت یک فضای خالی پر از هوا می‌باشد که مانع از انتقال حرارت کامل و طراحی شده از کوپلر به لوله خواهد شد. مطابق مطالعات انجام شده راهکار مناسب جهت حل چالش ایجاد فضای خالی در زمان جوش کاهش فاصله بین لوله و اتصال می‌باشد. بنابراین در این تحقیق از یک ماده واسطه بر پایه پلی‌اتیلن برای پرکردن فضای خالی بین لوله و کوپلر استفاده شده تا با انتقال حرارت بیشتر موجب ایجاد یک جوش با نقص کمتر در امتزاج و در نتیجه کاهش احتمال ایجاد جوش ناقص گردد. بنابراین استفاده از یک ماده پلیمری واسطه مبتنی پلی‌اتیلن خطوط لوله گاز مقاومت حرارتی ناشی از فضای خالی بین لوله و اتصال را حذف می‌کند. آزمونهای غیر مخرب^۲ از جمله آنالیزهای حرارتی با استفاده از دوربین مادون قرمز، فرآیند انتقال حرارت را به‌طور کامل بررسی می‌کند [16] و [5] و [12]. همچنین شبیه‌سازی فرایند جوش الکتروفیوژن قطعه کوپلر مورد مطالعه، بر اساس معادلات حاکم بر مسئله به دو روش یکی بدون ماده پلیمری واسطه (وجود هوا در حدواسط لوله و کوپلر) و در حالت دیگر با استفاده از ماده پلیمری چسبنده به نحوی که هیچ فاصله‌ای در حدواسط لوله و کوپلر وجود نداشته و اتصال کامل برقرار شده انجام شد و نتایج مورد تحلیل قرار گرفت.

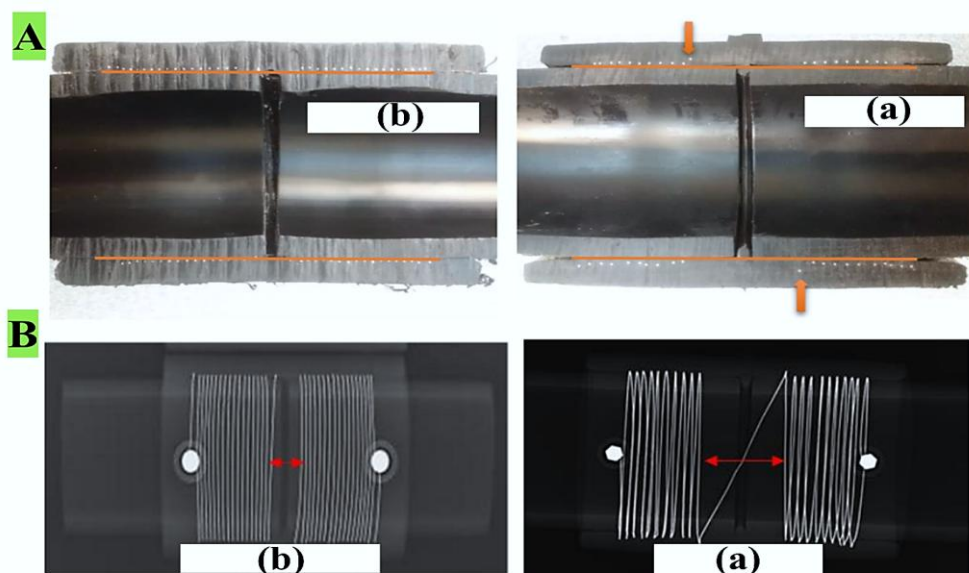
۲- تجربی

۲-۱- مواد و روش‌ها

کوپلر هدف: از دو برند کوپلر (الف) و (ب) مورد استفاده قرار گرفتند. برای این منظور، نمونه‌هایی از جوش میدانی جداگانه از هر برند تهیه شد. اطلاعات هندسی، فیزیکی و شرکتهای تامین کننده آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱ تصویر این دو برند و رادیوگرافی از آنها برای بررسی کیفیت سیم پیچ‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- برخی اطلاعات درباره دو نوع کوپلر با اندازه قطر ۶۳ میلی‌متر

اطلاعات نمونه	Coupler (a)	Coupler (b)
مشخصات اتصال	سپیدنام زاگرس ساخت ایران	پتروگاز پارسا ساخت ایران
ولتاژ الکتروپیوژن (volt)	۳۵	۳۸
قطر داخلی/ قطر خارجی/ طول	۱۱۳*۷۵*۶۳	۱۱۰*۷۶*۶۳
زمان الکتروپیوژن (s)	۱۳۰	۹۴
زمان خنک شدن (min)	۱۰	۱۰
ضخامت تقریبی سیم در سیم پیچ (mm)	۰.۵	۰.۴۵
تعداد دورهای سیم پیچ	۳۴	۳۶
وزن (g)	۱۵۴	۱۴۶



شکل ۱- مقایسه پیچش‌های دو برند از اتصالات میدانی (A) و تصویر رادیوگرافی دو برند از اتصالات میدانی (B)

گرانول پلی اتیلن سیاه با مشخصات Black Masterbatch Polyethylene(HDPE) PE100 for Gas Pipe توسط KPC تهیه

شد.

حلال پارازیلین بدون آب از برند مرک انتخاب شد و مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۲- آماده سازی ماده واسط پلیمری (فرمولاسیون ماده واسط)

در ابتدا گرانول های پلی اتیلن به ابعاد دانه بندی ۵ میلی متر (از نوع تولید لوله (HDPE^۳ PE100) را توسط دستگاه خردکن صنعتی، خرد کرده و سپس به پودر نرم تبدیل نموده و در مرحله بعد، حلال زایلن به آرامی در همزن به این پودر اضافه شده تا ماده پودری به خمیری متراکم تبدیل شود. فرآیند را ادامه داده تا مخلوط به یک ماده چسبنده با ویسکوزیته مناسب تبدیل شود؛ ویسکوزیته آمیزه به اندازه ای است که با اعمال یک لایه نازک به ضخامت ۱ میلی متر بر روی سطح داخلی اتصال روان نگردد. درصد حجمی حلال در آمیزه در محدوده ۱۷-۲۱ درصد است. در صورت سفتی آمیزه می توان حلال را اضافه نمود. افزودن حلال به پودر پلی اتیلن با حمام آب گرم به دمای حدود ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد رسانده می شود و در حین هم زدن، حلال افزوده می شود. هدف از این روش، ایجاد یک ترکیب چسبنده تخصصی است که بتوان به راحتی فضای خالی بین لوله و اتصال را پر نماید. پلی اتیلن پودری عامل اصلی اتصال را فراهم می کند، در حالی که حلال زایلن به تنظیم خواص رئولوژیکی ترکیب برای کارایی و چسبندگی بهینه در طول فرآیند نصب لوله در فرآیند آماده سازی جوش الکترو فیوژن کمک می کند [24]. ویسکوزیته آمیزه باید تحت کنترل قرار گیرد؛ در صورت روان بودن بیش از حد آمیزه به واسطه حلال زیاد، احتمال نشت ماده واسط در زمان جوشکاری از بین لوله و اتصال به بیرون از منطقه جوش و تخلیه و پاشش آن به بیرون زیاد خواهد بود که موجب اختلال در عملیات جوشکاری خواهد شد.

۲-۱-۳- استفاده از ماده واسط پلیمری بر روی لوله های پلی اتیلن

ابتدا نمونه هایی از لوله پلی اتیلن با مشخصات طول ۳۰۰ و قطر ۶۳ میلی متر و جنس HDPE PE100 GR B Pipe متناسب با اتصالات هدف، با دستگاه مخصوص برش کاری شد. در مرحله بعد پس از خراشیدن منطقه جوش در سر لوله ها با استفاده از اسکرابر خودکار؛ یک لایه نازک به ضخامت حدود یک میلی متر از ماده واسط پلیمری را با استفاده از یک تیغه نازک چوبی باریک به پهنای یک سانتی متر بر روی سطح خارجی لوله ها یا سطح داخلی اتصالات اعمال شد و سپس لوله و کوپلر به هم متصل شدند. به دلیل اینکه جنس این ماده واسط از پلی اتیلن و همجنس لوله و اتصالات بود، با سیستم سازگار بوده و به طور یکپارچه به عنوان بخشی از خود لوله ها ادغام می شود. از آنجایی که زایلن یک حلال سمی است، تمام احتیاط های ایمنی لازم رعایت شد و تنها مقدار بسیار کمی از آن استفاده شد. هنگامی که چسب به صورت خمیر اعمال می شود، خواص مضر آن مانند اشتعال پذیری از بین می رود. خمیری بودن ماده واسط این امکان را فراهم می کند که ماده چسبنده به راحتی بر روی نقاط اتصال لوله توزیع و اعمال شود. این کاربرد ماده واسط به تضمین یکپارچگی و قابلیت اطمینان کلی شبکه لوله پلی اتیلن نهایی پس از جوش الکترو فیوژن کمک می کند.

³ -high density poly ethylene

تأثیر ماده میانی به طور تجربی بررسی شد تا عملکرد کوپلر بهبود یابد و نتایج به صورت تجربی گزارش شده است. از آزمایش‌های ترموگرافی مادون قرمز به عنوان روش NDT^۴ و شاخص استفاده شد [25].

پس از مطالعات کتابخانه ای فرایند جوشکاری الکتروپیوژن و تأثیر پارامترهای مختلف، با انتخاب مواد مناسب پلیمری و فرموله کردن ماده واسطه، در بخش های بعدی شبیه سازی جوش الکتروپیوژن اتصال بر اساس معادلات حاکم با نرم افزار COMSOL در حالت های اتصالات استاندارد، اتصالات در حالت ناقص (اتصالات دارای لقی) و همچنین اتصالات ناقص پر شده با استفاده از ماده واسطه انجام می شود. سپس آزمون غیر مخرب ترموگرافی با استفاده از دوربین IR در این سه حالت انجام می شود. در ادامه برای بررسی میزان استحکام جوشکاری انجام شده آزمون مخرب لهدیگی انجام می شود که نتایج آزمون غیر مخرب و شبیه سازی را صحت گذاری می کند.

۲-۲- شبیه سازی نرم افزاری

۲-۲-۱- معادلات حاکم بر مسئله و شرایط مرزی

فیزیک مسئله شامل انتقال حرارت هدایتی درون جسم پلی اتیلنی و یک رشته (سیم پیچ) منبع حرارتی است. معادله انتقال حرارت سه بعدی حاکم بر روی کل سیستم داخلی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\rho C_p \frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T(\vec{x}, t)) = Q(\vec{x}, t)$$

در این رابطه ρ چگالی، C_p ظرفیت حرارتی در فشار ثابت، T دما، t زمان، $\vec{x}$ بردار مکان، k ضریب هدایت گرمایی و Q منبع حرارتی است. وا در اینجا T و Q با مکان و زمان تغییر می کنند. تابع Q صرفاً در مدت زمان پالس حرارتی و بر روی سیم پیچ به عنوان منبع حرارتی فعال شده و در بقیه زمان ها و مکان ها غیر فعال و برابر صفر است. شرایط مرزی و اولیه مکمل این معادله در جدول ۲ آورده شده است:

جدول ۲- شرایط مرزی و اولیه

شماره	دامنه	رابطه
۱	تمام دامنه (شرط اولیه)	$T(\vec{r}, 0) = T_0$
۲	سطح های در تماس با هوا	$-k \nabla T = h_j (T_j - T)$

⁴ -non destructive testing

$\nabla T = 0$	ابتدا و انتهای لوله ($@z = 0, L$)	۳
$Q=P(t)/V$	سیم	۴

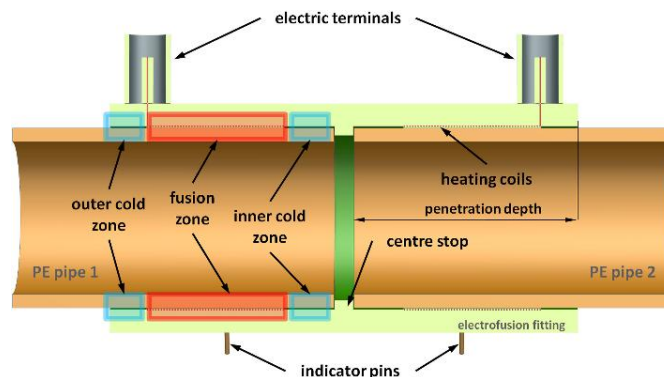
در جدول ۲، T_0 دمای اولیه، h ضریب انتقال گرما، P مقدار توان حرارتی تولید شده از طریق المنتها و V حجم کل سیم است. شرایط مرزی و اولیه مسئله مطابق جدول ۲ و شامل ۴ شرط اصلی است. شرط شماره ۱، نشان دهنده شرط هم دمایی اولیه، شرط شماره ۲ تبادل گرمایی بر روی سطح های در تماس با هوا شامل شش سطح مختلف را نشان می دهد. همچنین شرط شماره ۳ نشانگر عدم هدایت گرمایی در ابتدا و انتهای لوله است. در نهایت شرط شماره ۴ بیان کننده میزان حرارت ایجاد شده در منبع حرارتی است.

۲-۲-۲- شبیه سازی

مدل فوق یک مدل انتقال حرارت با معادلات مشتق جزئی، غیر متقارن، غیر خطی، با پارامترهای حرارتی (پلی اتیلن) متغیر با دما و شرایط مرزی مختلط است و در اطراف سیم پیچ، در یک ناحیه بسیار ریز، تغییرات حرارتی بسیار شدید رخ می دهد. از نرم افزار COMSOL نسخه 6.2 برای شبیه سازی استفاده گردید. شبیه سازی با و بدون استفاده از ماده واسط مطابق روابط و محاسبات انجام شد. در بخش نتایج به نتایج شبیه سازی پرداخته خواهد شد.

۲-۲-۳- ایجاد دامنه کوپلر و سیم پیچ

برای ایجاد هندسه کوپلر و سیم پیچ های درون آن از اندازه گیری ها و اطلاعات هندسی جمع آوری شده کارگاهی استفاده شد. برای رسم هندسه مربوط به کوپلر از دو استوانه، یکی برای پوسته اصلی و دیگری جهت خالی نمودن درون کوپلر با شعاع داخلی 31.5 mm و شعاع خارجی 39.3 mm استفاده شده است. همچنین برای رسم هر یک از لوله ها روند کاملاً مشابهی طی شد. اندازه گیری های کوپلر و لوله شبیه سازی شده بر اساس نمونه لوله و کوپلر مورد مطالعه و مطابق شکل ۲ انجام شده است.



شکل ۲- نمونه لوله و کوپلر مورد مطالعه

در مرحله شبیه‌سازی، تغییرات زیر در هندسه اتصال اعمال شد:

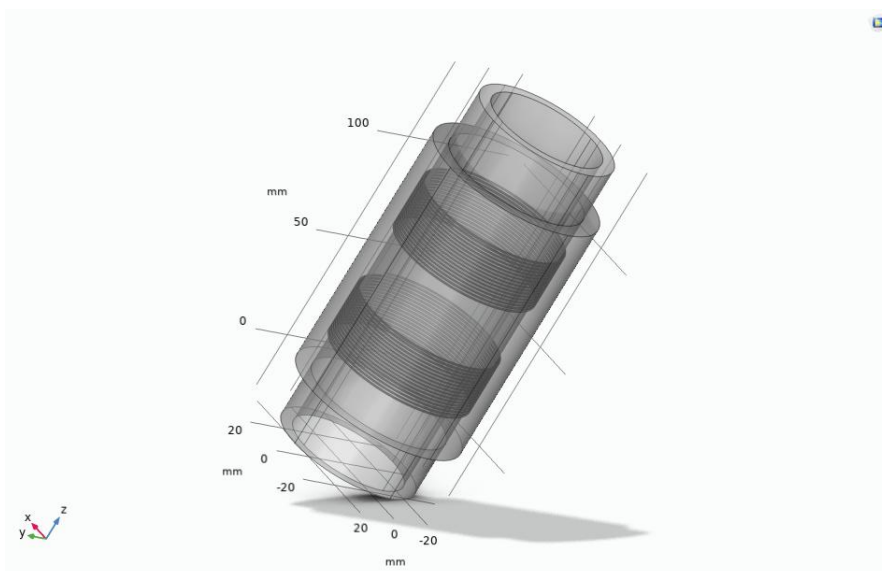
- افزودن یک محدودکننده در فضای بین دو لوله

- اصلاح شرایط مرزی برای دو نوار شعاعی کوپلر، با معرفی یک شرط جریان همرفت حرارتی

برای شروع از طریق رسم دو استوانه برای سطح بیرونی و درونی هر یک از لوله‌ها که درون کوپلر قرار می‌گیرند با اندازه‌های یکسان و شعاع خارجی 31.5 mm و شعاع داخلی 25 mm به فاصله 2.8 mm از هم قرار دارند. دلیل ایجاد این فاصله بخاطر Stopper تعبیه شده درون کوپلر است که برای یکسان قرار گرفتن لوله‌ها درون کوپلر تعبیه شده و از قرار گیری نامتقارن لوله‌ها درون کوپلر جلوگیری می‌کند.

دو هندسه بدنه پلی اتیلنی و سیم پیچ با هم ترکیب شده تا دامنه کلی را ایجاد کنند. از آنجایی که شبیه‌سازی و فرآیند انگیزش حرارتی برای مرحله بعد از جوشکاری صورت می‌گیرد، بنابراین لوله و کوپلر کاملاً بهم چسبیده‌اند و هیچ گونه فضای خالی بین این دو قرار ندارد. در شکل ۳ هندسه کلی سرجوش سالم را به صورت برش خورده برای دید بهتر، نشان داده شده است.

بر روی کوپلر از ۱۷ دور سیم پیچ در سمت چپ و راست بصورت کاملاً متقارن شبیه‌سازی شده با این تفاوت که در قسمت سمت راست المان فاصله 0.2 mm بین لوله و اتصال کوپلر خالی شده تا بعنوان فضای خالی^۵ مورد مطالعه قرار گرفته شده و فرض شده که این فضا با هوا پر شده است. در سمت چپ از ماده واسطی که از قبل آماده شده که از ترکیب پلی اتیلن و زایلین پوشش داده شده و آن فضای 0.2 mm وجود ندارد و لوله و اتصال کاملاً بهم چسبیده هستند. شبیه‌سازی با این دو تفاوت در ساختار کوپلر انجام می‌شود.



شکل ۳- هندسه کلی سرجوش سالم در محیط سه بعدی

خواص حرارتی پلی اتیلن HDPE مانند هدایت حرارتی، دانسیته و گرمای ویژه ثابت نیستند و با تغییرات دما تغییر میکنند، لذا خواص حرارتی لوله و کوپلر به صورت متغیر تعریف شدند و داده های آن مطابق اطلاعات چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت گرمایی، حرارت ثابت گردید. برای سیم پیچ ها از جنس مس هم از خواص حرارتی ثابت مربوط به آن تعریف شده است. مقادیر ولتاژ و مقاومت از طریق بارکد درج شده بر روی کوپلر تعیین می شوند. مطابق نمونه مورد استفاده در این پژوهش ولتاژ درج شده بر روی سرجوش 35 ولت و مقاومت 3.51 اهم است. از آنجایی که مقدار ولتاژ به سرجوش داده می شود. با این مشخصات حدود ۳۴۹ وات انرژی الکتریکی تولید می شود که این انرژی بصورت متقارن در هر دو سمت کوپلر بر روی المان و بصورت مساوی بین ۱۷ دور سیم پیچ سمت چپ و ۱۷ دور در سمت راست توزیع می شود.

۴-۲-۲- روش تعیین شرایط بررسی حرارتی

در دستیابی به شبیه سازی فوق، کل فرایند جوش الکتروفیوژن در این شبیه سازی حدود ۱۳۰ ثانیه و شامل گرم شدن و پس از آن فرایند سرد شدن و پایان واکنش جوش الکتروفیوژن در نظر گرفته شد. و البته در شبیه سازی کنونی تا ۶۰ ثانیه اولیه جوشکاری مورد بررسی قرار می گیرد و پروفایل دمایی در اثر آن تحلیل می گردد. خروجی شبیه سازی و توزیع دما در سرتاسر المان در بخش نتایج تفسیر می شود.

۳. نتایج و بحث

۳-۱-۱- بررسی تأثیر ماده میانی بر افزایش دما با استفاده از ترموگرافی IR

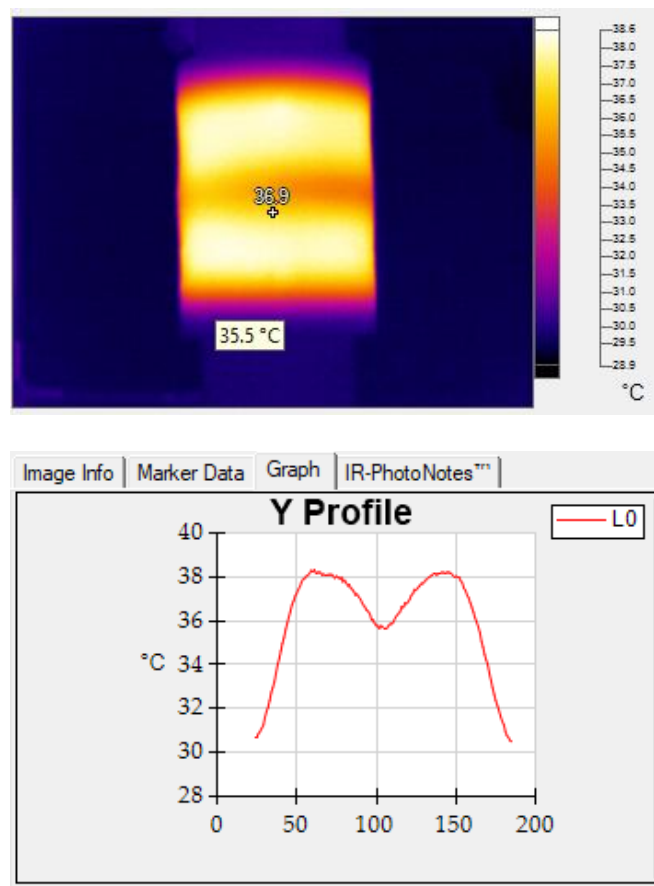
به منظور بررسی نمونه‌های اصلاح‌شده با ماده میانی، موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

الف- دمانگاری از سطح اتصال در زمان جوشکاری اتصالات سالم

ب- دمانگاری از سطح اتصال در زمان جوشکاری اتصالات ناقص با فاصله نامتعارف لوله از اتصال در منطقه جوش

ج- دمانگاری از سطح اتصال در زمان جوشکاری اتصالات ناقصی که فضای خالی فیما بین با ماده واسط پر شده است

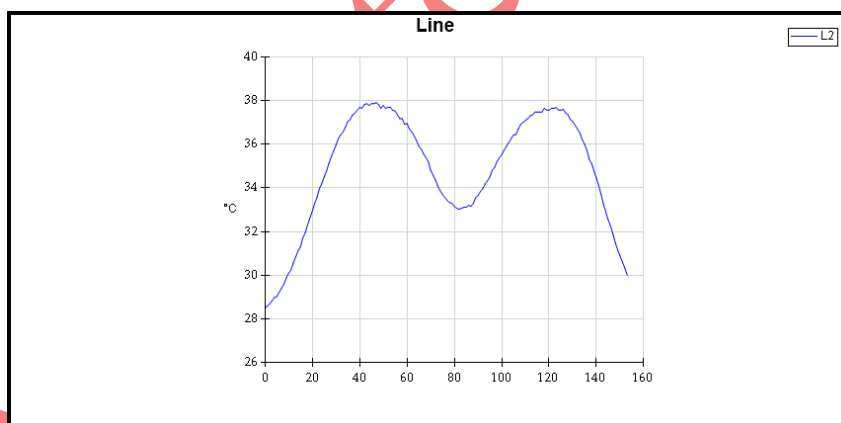
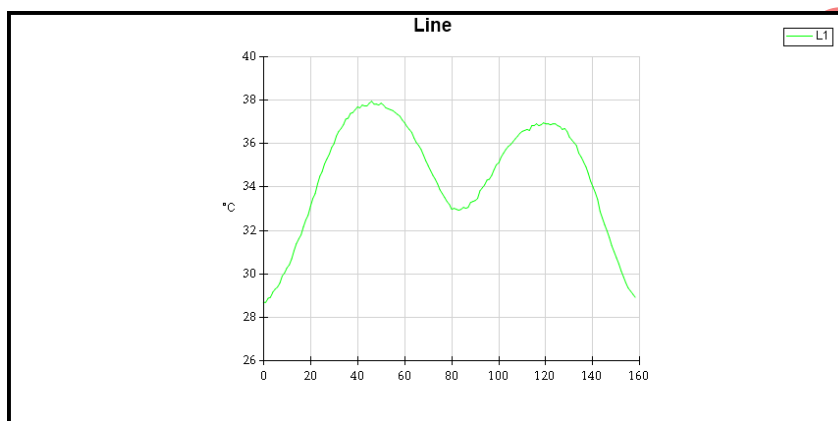
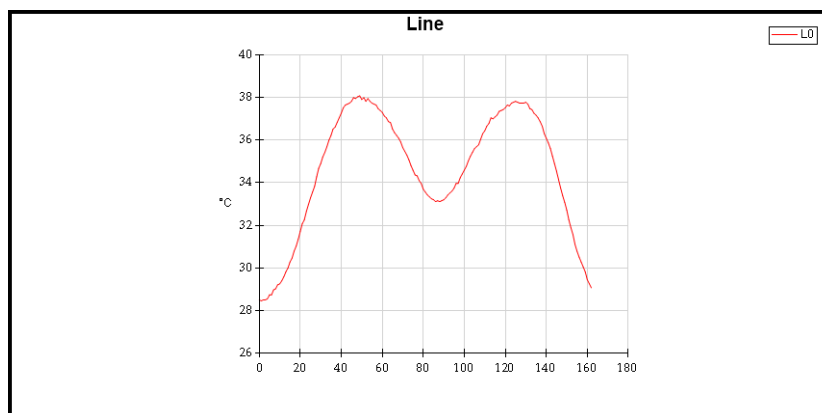
این بررسی‌ها بینش‌هایی در مورد تأثیرات ماده میانی بر جوش میدانی فراهم می‌آورد و امکان ارزیابی جامع تغییرات اعمال‌شده بر روی نمونه‌ها را فراهم می‌کند. برای بررسی آزمون غیر مخرب^۶ از دوربین IR مدل Fluke Ti32 استفاده شد. این دوربین پروفایل های دمایی را پس از اعمال پالس و داده‌های جوش میدانی را ثبت می‌کند. در شکل ۴ اطلاعات داده‌های جوش میدانی و پروفایل های دمایی خطی نشان داده شده است.



شکل ۴- دمانگاری از یک سر جوش برای تحلیل پروفیل حرارتی با استفاده از نرم افزار واسط دستگاه دمانگار Fluke SmartView

۳-۱-۲- مقایسه تفاوت‌های پروفایل دما بین جوش‌های استاندارد (مرجع)، جوش ناقص و جوش با ماده واسط

نمونه‌های سالم و استاندارد بعنوان نمونه مرجع، نمونه های ناقص و سپس نمونه های اصلاح شده با اعمال ماده واسط پلیمری تحت شرایط یکسان و با ابعاد مشابه تهیه شدند. اندازه‌گیری‌ها برای هر سه گروه از نمونه ها تحت شرایط یکسان از نظر ولتاژ اعمال شده، زمان جوشکاری و زمان نمونه‌برداری انجام شد.



شکل ۵- مقایسه تفاوت‌های پروفایل دما بین جوش‌های استاندارد (مرجع) L0، جوش ناقص L1 و جوش با ماده واسط L2

با استفاده از نرم افزار واسط دستگاه دمانگار Fluke SmartView

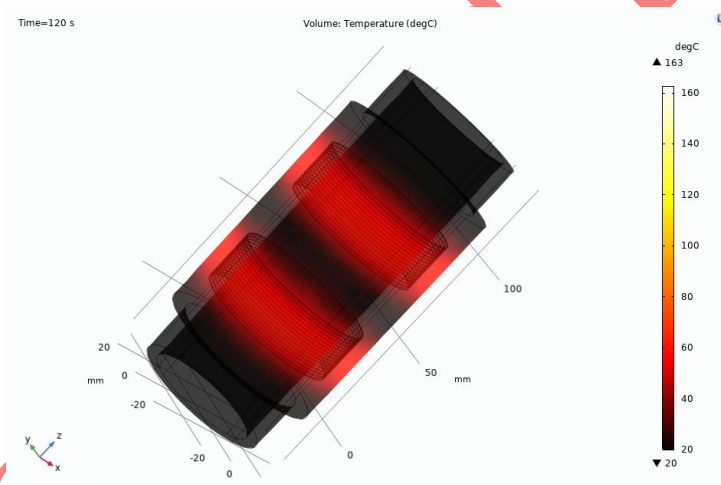
پروفایل های دمایی برای هر سه نمونه در شکل ۵ ارائه شده است. محور افقی مربوط به ابعاد طولی اتصال به میلی متر و محور عمودی دمای سطح اتصال به درجه سانتیگراد می باشد. دمانگاری از نمونه ها در زمان ۶۰ بعد از شروع جوشکاری صورت گرفته است. در شکل L0 مربوط به اتصال سالم قله بیشینه دمایی در هر دو سمت اتصال و بصورت یکسان می باشد. در نمودار L1 بیشینه

ها متفاوت و در سمت راست دارای لقی بیشتری است، بیشینه بالاتری نسبت به سمت چپ داشته است. همین مدل اتصال با اعمال ماده واسط در نمودار L2 با یک نمودار متقارن و همسان نشان داده شده است.

۳-۳- شبیه سازی

۱-۳-۳- بررسی نقشه دمایی

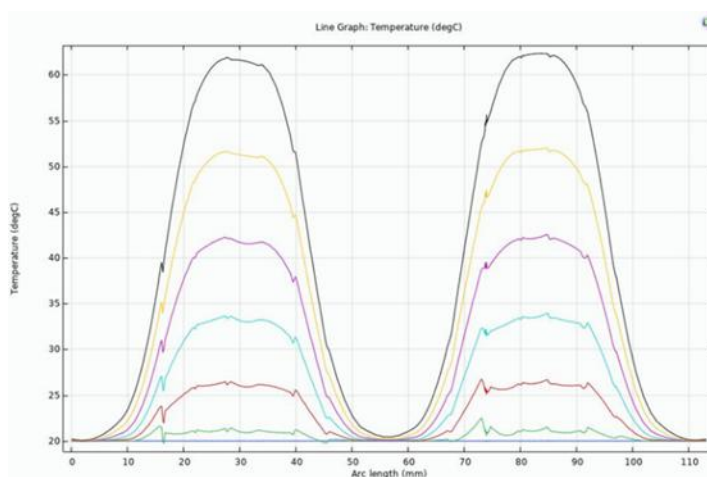
برای بررسی نتایج، شبیه سازی امکان دسترسی به نقشه دمایی روی سرجوش و دیگر نقاط را فراهم می کند. در روش دمانگاری دسترسی به پروفایل دو سطح بسیار مهم است. یکی سطح بیرون کوپلر، و دیگری اطراف سیم پیچ. شکل ۶ نمای سه بعدی از نحوه تغییرات دمایی در سیم پیچ ها و لوله پلی اتیلن از زمان شروع جوشکاری در بازه زمانی ۱۲۰ ثانیه، دیده می شود.



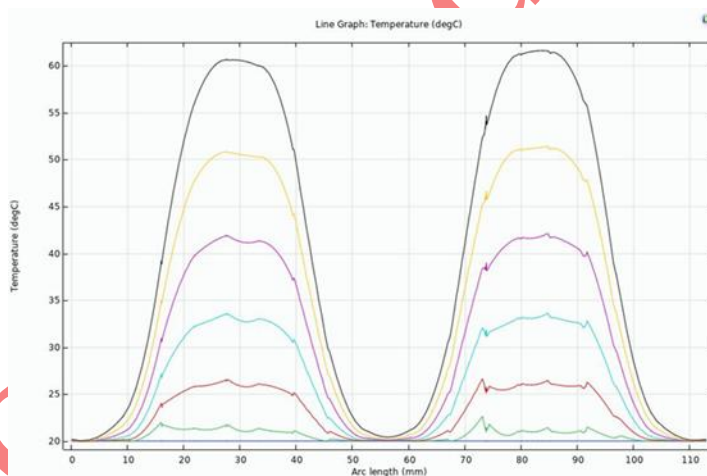
شکل ۶- پروفایل دمایی سه بعدی اتصال و لوله شبیه سازی شده

قله های موجود در پروفایل حرارتی، نشانگر نواحی مجاور به سیم پیچ و دره موجود در دندانها، نواحی بین سیم پیچ ها است که در شکل های ۷ و ۸ و ۹ دیده می شوند. شکل ۷ پروفایل دمایی سطح اتصال استاندارد و بدون وجود هوا در حد واسط اتصال لوله و کوپلر را نشان میدهد که در دو سمت تقارن مشهود است. در شکل ۸ به دلیل وجود هوا در قسمت راست (0.2 mm فضای

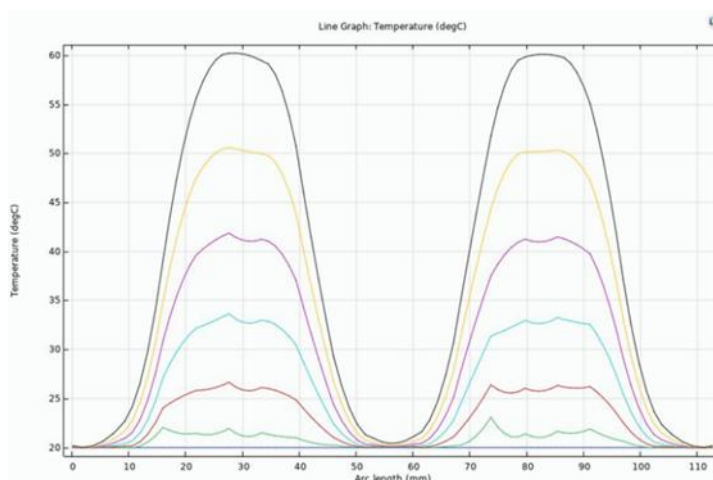
خالی) در نواحی مرزی حدود ۸۰ میلی متری از المان شبیه سازی، عدم تقارن بصورت واضح قابل مشاهده است در واقع وجود لایه هوا بعنوان یک مانع انتقال حرارت بین اتصال لوله و کوپلر، باعث افت دما و اختلاف در پیک در پروفایل داخلی سطح لوله سمت راست نسبت به منحنی سمت چپ شده است. محور افقی طول المان شبیه سازی را نشان می دهد.



شکل ۷- شکل پروفایل دمایی سطح اتصال استاندارد در حد واسط اتصال لوله و کوپلر



شکل ۸- شکل پروفایل دمایی سطح اتصال با وجود هوا در حد واسط اتصال لوله و کوپلر



شکل ۹- شکل پروفایل دمایی سطح اتصال با ماده واسط و در غیاب هوا در حد واسط اتصال لوله و کوپلر

در حالت دیگر شبیه سازی بدون مانع هوا و در حالت اتصال کامل لوله و کوپلر با استفاده از ماده واسط چسبیده انجام شده است. همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می شود به دلیل استفاده از ماده واسط و عدم وجود هوا و بهم چسبیده بودن اتصال، پروفایل دمایی کاملاً متقارن شده و از هر دو طرف انتقال حرارت بصورت یکسان انجام می شود.

این موضوع در تصویر ترموگرافی غیر مخرب با IR نیز کاملاً مشهود است که یک طرف نسبت به طرف دیگر عدم تقارن پروفایل دمایی دارد. این مقایسه نشان می دهد که با پرکردن لایه هوا با ماده واسط انتقال حرارت بصورت یکسانی صورت گرفته و پروفایل دمایی یکنواخت شده است و در مقابل در حالت اصلاح نشده عدم تقارن در پروفایل دمایی در پالس ۶۰ ثانیه مشهود است.

۳-۴- آزمون مخرب

برای بررسی موفقیت در اجرای استفاده از ماده واسط علاوه بر تحلیل ردپای حرارتی در سرجوش ها، مطابق استاندارد کنترل کیفی نیاز به انجام آزمون لهیدگی^۷ مطابق استاندارد IGS-C-DN-003 می باشد تا میزان تاثیر اعمال ماده واسط مورد بررسی قرار گیرد. در این روش اتصالات با روش ایمن و توسط اره مخصوص در کارگاه به کمک کاربر مجرب برش طولی داده و سپس در گیره قوی لهیده شده، تا میزان استحکام جوش بررسی شود. شکل ۱۰ نمونه برش طولی سرجوش ها برای آزمون لهیدگی را نشان می دهد.



شکل ۱۰- نمونه برش طولی سرجوش ها برای آزمون لهیدگی

نتایج آزمون لهیدگی در نمونه های ایجاد شده در جدول ۳ ارائه شده است:

جدول ۳- نتایج آزمون مخرب لهیدگی نمونه ها

بهبود نتایج (درصد کاهش خرابی) d	سرجوش با ماده واسط c	سرجوش ناقص b	سرجوش سالم a	نوع اتصال	
$d = (c-b)/(10-b) \%$	۱۰	۱۰	۱۰	سپید نام زاگرس	تعداد اتصالات
	۱۰	۱۰	۱۰	پتروگاز پارسا	
۱۰۰	۱۰	۴	۱۰	سپید نام زاگرس	آمار نتایج مثبت دمانگاری
۷۱	۸	۳	۸	پتروگاز پارسا	
۸۳	۹	۴	۸	سپید نام زاگرس	آمار نتایج مثبت در تست لهیدگی
۵۷	۷	۳	۷	پتروگاز پارسا	

با استفاده از آزمون های غیر مخربی که با و بدون ماده واسط انجام گرفته نتایج آزمون غیر مخرب تایید شده است. در تست مخرب لهیدگی نیز با ماده واسط جدایش رخ نداده ولی در حالت وجود هوا در حد واسط اتصال، در اثر تست لهیدگی جدایش صورت گرفته است.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر ماده واسط بر عملکرد جوشکاری الکتروفیوژن با تحلیل ترموگرافیک با شبیه سازی و روش غیر مخرب ترموگرافیک IR بررسی شد. نتایج تحقیقات قبل نشان داد روش ترموگرافیک ابزاری مؤثر برای ارزیابی آسان تأثیر مواد مختلف بر عملکرد جوشکاری الکتریکی است [26]. این مقاله تأثیر مثبت یک ماده واسط بر عملکرد جوشکاری الکتروفیوژن را نشان می دهد.

نتیجه بهره گیری از ماده واسط بر پایه پلی اتیلن با نتایج شبیه سازی، آزمون غیر مخرب ترموگرافی و همچنین آزمون مخرب لهیدگی اتصالات جوشکاری شده مورد تایید قرار گرفت.

شبیه سازی برای مدل انتقال حرارت با معادلات مشتق جزئی، غیر متقارن، غیرخطی و پارامترهای حرارتی (پلی اتیلن) متغیر با دما، سه بعدی و شرایط مرزی در یک سرجوش سالم به عنوان مبنا انجام شد. در مطالعه حاضر برای سرجوش مورد مطالعه، شبیه سازی با زمان جوشکاری روی ۶۰ ثانیه محاسبه شد. زمان تحلیل نسبت به ولتاژ ورودی، هندسه و خواص سیم پیچ و پلی اتیلن مصرفی، و شرایط محیطی قابل تغییر است. در صورت نیاز می توان مدت زمان تحلیل را با توان کمتر و یا بالعکس تنظیم نمود. علاوه بر اینکه نتایج حاصل از عکسبرداری حرارتی بیانگر درستی استفاده از ماده واسط در بین لوله و اتصال می باشد، در نهایت با انجام آزمون های مخرب از جمله لهیدگی بر روی استحکام سرجوش این موضوع **تایید** می شود.

۵- منابع و مراجع

- [1] E. M. , F. H. , A. S. Meysam Rasooly, "Arrangement of Nondestructive Tests for Technical Inspection Process of Electrofusion Weld in Gas Polyethylene Pipes," *e-Journal of Nondestructive Testing*, 2025.
- [2] Mamasidikov Nomonjon Ismoilovich, "FURTHER DEVELOPMENT OF POLYMER PIPE WELDING TECHNOLOGY, Web of Technology," : *Multidimensional Research Journal*,, vol. Vol. 2 , no. No. 12, 2024.
- [3] M. S. T. Marjan Doaei, "Intelligent screening of electrofusion-polyethylene joints based on a thermal NDT method,," *Infrared Physics & Technology*,, Vols. Volume 90,, pp. Pages 1-7, 2018.
- [4] M. I. V. D. Donghu Zeng, An analytical mathematical model for melting layer thickness of HDPE pipes at thermal butt-fusion welding, *Book Welding and Related Technologies-Imprint CRC Press eBook*, 2025, p. Pages 4.
- [5] M. T. M. B. & L. Dominique Gueugnaut, ";Acceptance Criteria for Defects in Polyethylene Welds, Coupling Phased Array Ultrasonic Testing and Destructive Tests," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. Volume 44, 2025.
- [6] M. G. A. M. S. e. a. Shishesaz, "Stress analysis in the buried polyethylene pipes with viscoelastic behavior: a finite element study," *Discov Appl Sci*, vol. 6, no. 616, 2024.
- [7] Q. W. Q. X. e. a. Tianliang Chen, "Automatic detection of thermal fusion joints defects of high-density polyethylene gas pipes using ultrasonic total focusing method and deep learning," *Research Square* , 2024.

- [8] G. H. Y. Z. S. S. J. & Z. J. Xiang, "Demonstration of Intelligent Welding Machine for Polyethylene Pipe." Proceedings of the, " *Computer Technology and Bolted Joints*, vol. Volume 2, 2021.
- [9] M. E. R. A. T. M. K. O.-B. Abolfazl Tutunchi, "Risk assessment of electrofusion joints in commissioning of polyethylene natural gas networks," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. Volume 196, 2022.
- [10] M.F.Kanninen et al., "'A theoretical and Experimental Evaluation of the long term Integrity of an Electrofusion Joint,'" in *Plast. Rubber Inst*, London, 1992.
- [11] A. Elsheikh, " Applications of machine learning in friction stir welding: Prediction of joint properties, real-time control and tool failure diagnosis," *Eng Appl. Artif. Intell.*, vol. 121, p. p. 105961, 2023.
- [12] F. Hosseini and M. Khanian Najafabadi, "Optimization of Cooling Time of Polyethylene Electrofusion Joints in the Natural Gas Industry on the Basis of DSC Method with Computerized Simulation," *Journal of Pipeline Science & Engineering*, p. 25, 2024.
- [13] M. A. V. a. O. A. A. N. P. Starostin, " "Management of thermal process for polyethylene gas pipes welding with built-in heater,'" in *J. Phys. Conf. Ser*, 2019.
- [14] S. D S and D. K. Shinde, "Electro-Fusion Joint Failure Polyethylene Pipes Analysis and its Simulation using Finite Element Analysis," *International Journal of Food Engineering*, vol. 5, no. 12, pp. 51-55, 2017.
- [15] A Peacock, "Handbook of Polyethylene: Structures ,", CRC Press, 2000.
- [16] M. e. a. Alavijeh, " Application of a chord transducer for ultrasonic detection and characterisation of defects in MDPE butt fusion joints.," *INSIGHT*, , vol. 64(10), pp. p. 560-565., 2022. .
- [17] . P. G. Maciej, T. Rachel and T. Mike , "Electrofusion welding and reinforced thermoplastic pipes – A review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 41, no. 3-4, 2021.
- [18] H. a. J. B. Mehrabi, "Electrofusion welding of cross-linked polyethylene pipes," *Iranian Polymer Journal*, , pp. 195-204, 1997.
- [19] M. a. N. Shrivastava, " "Optimization of cooling time for polyethylene fusion joints,'" *Materials Today's*,, Vols. vol. 28, Part 2, pp. 1267-1272., 2020.
- [20] "a Technical Committee, Working Group for Joining of Plastics," The German Welding Society,, DIE VERBINDUNGS SPEZIALISTEN, 2016, July.
- [21] Y. T. P. I. D. A. M. M. L. C. a. R. N. E. D. D. Cruz, "A Conjoint Analysis on the Preference of Pipe Welding Materials and Procedures," Bangkok, Thailand, 2024.
- [22] Guanling Gao et al, "Study on Structural Aging and Gas Leakage Failure Behavior of Electrofusion Socket of Buried Polyethylene Gas Pipes," *J. Phys*, 2023 .

- [23] D. M. M. I. D. a. V. N. Zisopol, "Study of the Tensile Strength and Shore Hardness Behavior of PE100 SDR11 Electrofusion Welded and Artificially aged Pipes," *Engineering Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no. 3, p. 14566–14571, 2024.
- [24] G. a. C. O. Onuegbu, "Transport behaviour of xylene through compatibilized low density polyethylene composite.," *European Journal of Engineering and Technology*, vol. Vol 5(3), 2017.
- [25] M. S. T. M. Javadi Azad, "A novel computational supplement to an IR-thermography based non-destructive test of electrofusion polyethylene joints," *Infrared Physics & Technology*, vol. Volume 96, pp. Pages 30-38, 2019.
- [26] "S. Mansouri and M. SadeghTavallali, "Heat transfer approximate modeling, parameter estimation and thermography of thermal pulsing in electrofusion joints of gas pipelines,"," *Infrared Physics & Technology*, no. Elsevier Sci. direct, 2019.
- [27] S. K. P. Saurabh Pathak, "Experimentation and optimization of HDPE pipe electro fusion and butt," *Materials Today: Proceedings 27 ()*, pp. 2925-2929, 2020.
- [28] M. V. Y. T. Ziad Chebbo, "Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes," *Engineering, Materials Science*, 2015.
- [29] O. M. M. a. W. O. Wysocka-Fotek, "Use Of Pulsed IR Thermography For Determination Of Size And Depth Of Subsurface Defect Taking Into Account The Shape Of Its Cross-Section Area.,," vol. 60, no. (2):, p. p. 615., 2015..
- [30] M. B. C. a. X. D. An, "Preparation and applications of linear low-density polyethylene.. ,," in *in J. Phys. Conf. Ser IOP Publishing.*, 2022.

Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes Using Material-Based Polymer for Enhanced Joint Strength: Optimization and Simulation

Natural gas is currently utilized as a major energy source in the energy mix of consumers. The safe transportation of gas is conducted through underground polyethylene pipeline networks. Over time, polyethylene pipes have gradually replaced low and medium-pressure steel pipes due to their advantages, including corrosion resistance and ease of installation. The connection of these pipes is typically achieved using electrofusion couplers or through butt fusion, where a heating wire generates the necessary heat for melting and mixing in the weld area. Initially, the heat generated melts part of

the coupler, allowing the molten polyethylene to reach the surface of the pipe within the coupler, melting a layer of it as well. Under specific temperature and pressure conditions, polymer mixing occurs, resulting in a high-strength weld upon cooling.

One significant issue leading to weak welds is the non-standard gap between the pipe and coupler, which creates an air-filled void that hinders heat transfer from the coupler to the pipe. This paper introduces an intermediate material compatible with the materials of both the pipe and coupler to fill the void between them, enhancing heat transfer and facilitating the formation of a strong weld. The electrofusion welding process was simulated using engineering software, analyzing thermal profiles under standard conditions and with the presence of a void. These complete and incomplete thermal profiles were validated against actual welding tests conducted under standard conditions with and without the polyethylene intermediate material. Finally, the strength of samples that incorporated the intermediate material in their welding was assessed through standard destructive testing. The results indicate that utilizing the intermediate material significantly reduces the likelihood of incomplete welds while ensuring that weld strength meets established standards and requirements.

Keywords: Electrofusion welding, polyethylene, electrofusion couplers, welding filler material, thermal profile, simulation