

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

Abdolali Rahimi Mozaffari, Masoomeh Emadi*, Bizhan Honarvar and Moein Nabipour

Department of Chemical Engineering, Marv. C., Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

Ma.emadi@iaau.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2025.5619.3495

Received: February 10, 2025

Accepted: April 16, 2025

Introduction

Electrofusion welding of polyethylene (PE) pipes offers several advantages that enhance both the reliability and quality of the welding process. Furthermore, these materials strengthen the fusion between polyethylene components and the pipe wall when heated, increasing the ability of molten polyethylene to penetrate deeply into the surfaces of pipes and fittings. This results in a uniform and stronger bond. Additionally, the use of these auxiliary materials may improve the overall reliability of the electrofusion welding process and reduce the likelihood of defects and leaks, which is essential for maintaining the integrity of gas, water, and other distribution systems. This study investigates the use of a polymeric material based on the fittings of gas pipeline connections made from polyethylene to eliminate thermal resistance caused by the gap between the pipe and the fitting. Non-destructive testing, including thermal analyses using infrared cameras, thoroughly examines the heat transfer process. Additionally, the simulation of the electrofusion welding process for the coupler under study was conducted based on governing equations in two scenarios: one without a polymeric interlayer (with air in the gap between the pipe and coupler) and another using a bonding polymeric material to ensure no gap exists between the pipe and coupler, establishing a complete connection. The results were then analyzed [1,2].

Materials and Methods

Two brands of couplers (A) and (B) with different specifications (voltage, welding time, cooling time, coil thickness, and weight) were examined. Additionally, radiographic images were used to compare the quality of field joints. Fig. 1 shows the Comparison of the two brands of field joints.

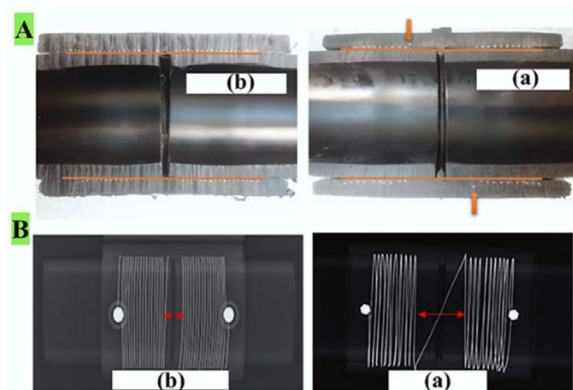


Fig. 1 Comparison of the twists of two brands of field joints (A) and radiographic images of two brands of field joints (B).

Preparation of Polymer Intermediary Material

Initially, polyethylene granules with a particle size of 5 millimeters (of the type used for pipe production (HDPE PE100)) are crushed using an industrial grinder and then converted into a fine powder. In the next stage, xylene solvent is gradually added to this

powder in a mixer until the powdered material transforms into a dense paste. Ultimately, the process continues until the mixture becomes an adhesive material with suitable viscosity.

Application of Polymer Intermediary Material

Samples of polyethylene pipes were cut using a specialized cutting machine. After scraping the welding area at the ends of the pipes with an automatic scrubber, a thin layer approximately one-millimeter-thick of the polymer interface material was applied to a width of one centimeter on the outer surface of the pipes or the inner surface of the fittings. Moreover, the pipe and coupler were subsequently connected. Additionally, since this interface material is made from the same polyethylene as the pipes and fittings, it is compatible with the system and integrates seamlessly as part of the pipes themselves

Software Simulation

A three-dimensional heat transfer equation was used for the system, including polyethylene and the heating coil. The boundary and initial conditions complementing this equation are provided in Table 1.

Table 1 Boundary and Initial Conditions.

Number	Domain	Relation
1	Entire domain (initial condition)	$T(r^{\rightarrow}, 0) = T_0$
2	Surfaces in contact with air	$-k\nabla T = h_j(T_j - T)$
3	Beginning and end of the pipe	$\nabla T = 0(@z = 0, L)$
4	Wire	$Q = P(t)/V$

COMSOL software version 6.2 was used to simulate heat transfer with and without the intermediary material. The geometry of the coupler and coil was created based on actual measurements.

Results and Discussion

Investigating the Impact of Intermediate Material on Temperature Increase Using IR Thermography

To conduct the non-destructive testing, the Fluke Ti32 IR camera was used. This camera records thermal profiles after pulse application and field welding data. Fig. 2 shows the field welding data and linear thermal profile.

Comparison of Temperature Profile Differences between Standard (reference) Welds, Defective Welds, and Welds with Interlayer Material

The temperature profiles for all three samples, both without interlayer material and with interlayer material, are presented in Fig. 3. The L0 graph corresponds to the healthy joint, showing a peak maximum temperature on both sides of the joint that is identical. In the L1

graph, the maxima are different, with the right side exhibiting greater spacing and a higher maximum compared to the left side. The last joint model with the application of interlayer material is shown in the L2 graph, which it presents a symmetrical and uniform diagram.

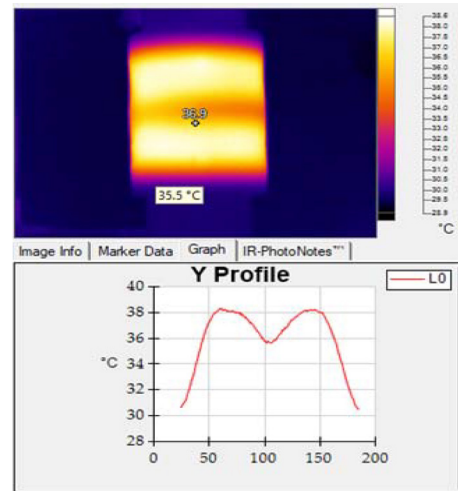


Fig. 2 IR Thermography field welding data and linear thermal profile.

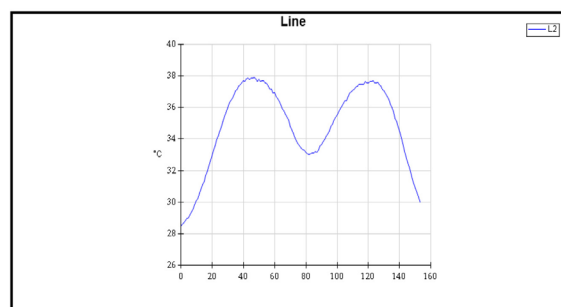
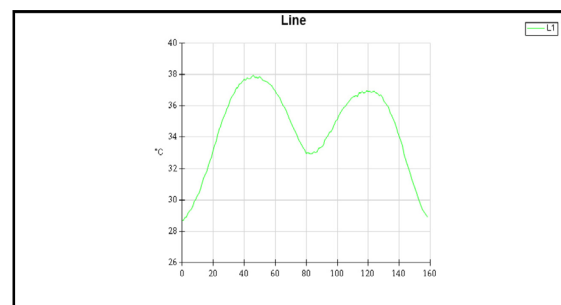
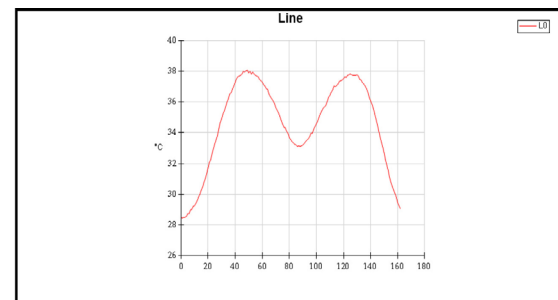


Fig. 3 Comparison of temperature profile differences.

Temperature Mapping Analysis

To evaluate the results, the simulation provides access to the temperature map on the weld joint and other points. In thermography, access to the profiles of two key surfaces is crucial: the outer surface of the coupler and the area around the heating coil. Fig. 4 show the views of the temperature variations in the heating coils and polyethylene pipe over a 60-second period starting from the beginning of the welding process.

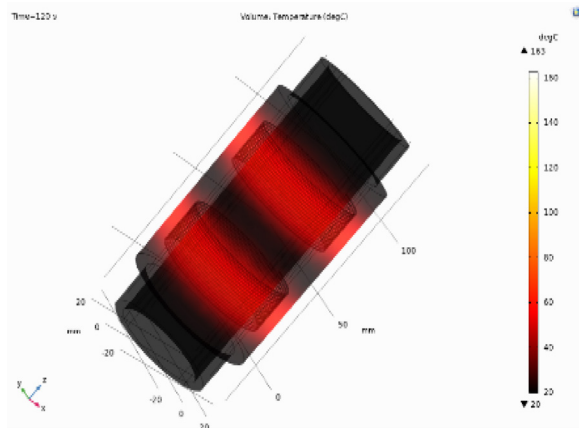


Fig. 4 Three-dimensional temperature profile around the heating coil over 60 seconds.

Fig. 5 shows the temperature profile of the standard connection surface, with the presence of air and a modified interlayer material at the interface between the pipe and the coupler. In the standard case, symmetry is evident on both sides. However, with the presence of air in the simulation element, asymmetry is clearly observable. Moreover, the existence of the air layer acts as a barrier to heat transfer between the pipe and coupler connection, resulting in a temperature drop and a difference in the peak of the internal temperature profile of the pipe on the right side compared to the curve on the left side. In another simulation scenario using adhesive interlayer material, due to the use of the interlayer and the absence of air, as well as the adhesion of the connection, the temperature profile becomes completely symmetrical, allowing for uniform heat transfer from both sides.

Destructive Testing

To evaluate the effectiveness of using the interlayer material, in addition to thermal footprint analysis at the joints, it is necessary to conduct a crush test according to the IGS-C-DN-003 quality control standard to assess the impact of the interlayer material. In this method, connections are safely cut longitudinally using a specialized saw in the workshop by an experienced operator, and then they are crushed in a strong vise to examine the weld strength. Fig. 6 shows the longitudinal cut samples of the joints for the crush test.

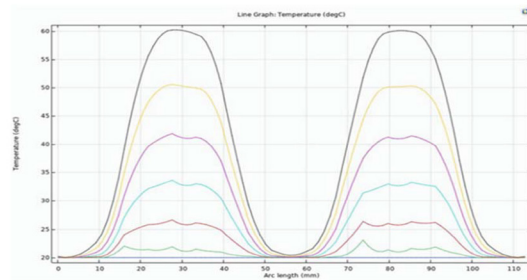
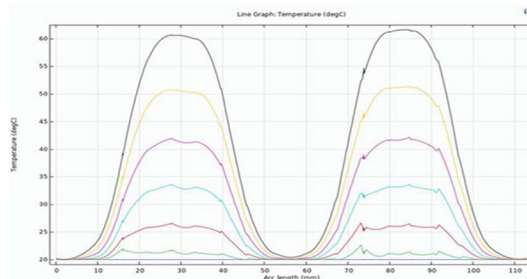
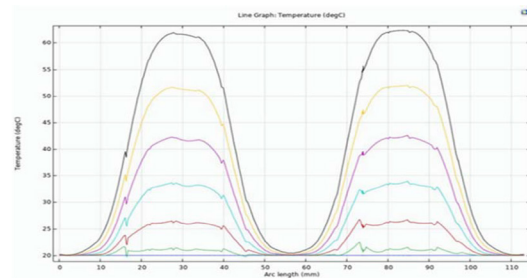


Fig. 5 the temperature profile of three different situation.



Fig. 6 Longitudinal cut samples of the joints for the crush test.

In the destructive crush test, no separation occurred with the interlayer material; however, in cases where air was present in the interlayer, separation did occur due to the crush test.

Conclusions

In this study, the effect of an intermediary material on the performance of electrofusion welding was investigated using thermographic analysis. Ultimately, the results demonstrated that thermography is an effective tool for evaluating the impact of various materials on the performance of electrical welding. This research successfully highlighted the positive influence of the intermediary material on improving the performance

of electrofusion welding. A three-dimensional simulation, incorporating nonlinear heat transfer equations and variable thermal parameters (specifically polyethylene), was conducted on a healthy weld joint

References

1. Ismoilovich, M. N. (2024). Further development of polymer pipe welding technology. Web of Technology: Multidimensional Research Journal, 2(12), 331-340.
2. Rasooly, M., Mohseni, E., & Hosseini, F. (2024). Arrangement of Nondestructive Tests for Technical Inspection Process of Electrofusion Weld in Gas Polyethylene Pipes. <https://doi.org/10.58286/29960>.

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

عبدالعلی رحیمی مظفری، معصومه عمادی*، بیژن هنرور و معین نبی‌پور

گروه شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

چکیده

در حال حاضر در ایران گاز طبیعی بعنوان منبع انرژی عمده در سید انرژی مصرف‌کنندگان مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتقال ایمن گاز از طریق شبکه توزیع متشکل از خطوط لوله زیرزمینی که عمده آنها از جنس پلی اتیلن است صورت می‌پذیرد. 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 می‌باشد. اتصال این لوله‌ها با استفاده از جوشکاری لوله به کوپلرهای الکتروفیوژنی و یا از طریق اتصال لب به لب انجام می‌شود. در ابتدا حرارت ایجاد شده بخشی از اتصال را ذوب می‌کند. سپس مواد پلی اتیلن مذاب به سطح خارجی لوله درون کوپلر رسیده و لایه‌ای 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 می‌گیرد. پس از خنک شدن یک جوش با استحکام بالا مورد انتظار می‌باشد که باید در آزمون‌های بررسی استحکام همچون آزمون لهیدگی مورد تأیید 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 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 واسط بر پایه پلی اتیلن برای پر کردن 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 نرم‌افزار مهندسی کامسول شبیه‌سازی 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 واسط پلیمری بین لوله و اتصال از نرم‌افزار استخراج گردید، تا اثر ماده واسط 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 لوله‌ها جوشکاری گردید تا این نمونه‌ها نیز با استفاده از روش دمانگاری از سطوح با دوربین مادون قرمز با خروجی نرم‌افزار شبیه‌ساز مقایسه شده تا بتوان نتایج حاصله را صحت‌گذاری نمود. به علاوه برای اثبات کیفیت جوشکاری با ماده واسط و تصدیق اثر آن بر کاهش احتمال بروز جوش ناقص و ضعیف؛ نمونه‌های جوشکاری شده برای آزمون استحکام جوش یعنی آزمون لهیدگی سرجوش ارسال و نتایج این آزمون 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 همزمان استحکام جوش نیز در حد مطلوب می‌باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری الکتروفیوژن، پلی اتیلن، کوپلرهای الکتروفیوژن، ماده واسط جوشکاری، پروفایل دمایی، شبیه‌سازی

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی Ma.emadi@iau.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2025.5619.3495)

مقدمه

جوشکاری الکتروفیوژن^۱ یکی از روش‌های اتصال ارزان و در عین حال ایمن لوله‌های پلی‌اتیلن است که به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف، به ویژه در صنعت نفت و گاز برای اجرای شبکه‌های توزیع گاز و سیالات نفتی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱ و ۲]. مزایای اولیه آن مقاومت در برابر خوردگی، سرعت بالای اجرا و نصب، کیفیت بالای کار و استحکام اتصال و قابلیت اطمینان می‌باشد که باعث ترویج این روش می‌شود [۳ و ۴]. 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 [۵]. در حال حاضر تنوع اتصالات الکتروفیوژن افزایش یافته و اتصالات پیچیده‌تری برای کاربردهای خاص طراحی و تولید شده است [۶-۸]. تجهیزات جوشکاری الکتروفیوژن پیشرفته‌تر و دقیق‌تر شده و امکان کنترل بهتر پارامترهای جوشکاری فراهم شده است [۹-۱۲].

آزمایش‌های خاصی بر اساس استانداردهای تحویل گاز برای ارزیابی جوش بکار می‌رود. برخی از این آزمایش‌ها دامنه وسیعی دارند و نتایج آنها می‌تواند برای اندازه‌گیری چندین پارامتر استفاده شود [۱۱ و ۱۲]. با این حال، طبق استانداردها، آزمایش‌های لهدیگی می‌تواند برای تأیید کیفیت و اعتبار کوپلر استفاده شود و یکی از قابل اعتمادترین آزمایش‌ها برای پروژه‌های صنعتی با استفاده از پلی‌اتیلن است [۳، ۱۳ و ۱۴]. آزمون لهدیگی 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 می‌شود [۱۵-۱۷]. پس از اینکه دو انتهای برش به مکان پیش‌بینی شده‌ای (بر اساس استاندارد) برسند، ابزار مناسبی برای ادامه کار استفاده می‌شود و از این طریق و استحکام جوش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۱۸ و ۱۹].

جوشکاری الکتروفیوژن لوله‌های پلی‌اتیلن مزایای

متعددی را فراهم می‌آورد که قابلیت اطمینان و کیفیت فرآیند جوشکاری را بهبود می‌بخشد [۱ و ۹]. این مواد هنگام گرم شدن، ادغام بین اجزای پلی‌اتیلن و دیواره لوله را تقویت می‌کنند [۱۲]. 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 [۱۷ و ۲۰]. 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 [۲۱ و ۲۲]. 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 [۹-۱۲، ۲۳-۲۵]. 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 واسط بر پایه پلی‌اتیلن برای پر کردن 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 [۲۶-۲۸]. بنابراین استفاده از یک ماده پلیمری واسط 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 [۵، ۱۳ و ۱۷]. همچنین شبیه‌سازی فرایند جوش الکتروفیوژن قطعه کوپلر مورد مطالعه، بر اساس معادلات حاکم بر مسئله به دو روش یکی بدون ماده پلیمری واسط (وجود

1. Electrofusion Welding
2. Non-Degradation Test (NDT)

استفاده قرار گرفتند. برای این منظور، نمونه‌هایی از جوش میدانی جداگانه از هر برند تهیه شد. اطلاعات هندسی، فیزیکی و شرکت های تأمین کننده آنها در **جدول ۱** ارائه شده است. **شکل ۱** تصویر این دو برند و رادیوگرافی از آنها برای بررسی کیفیت سیم‌پیچ‌ها را نشان می‌دهد. گرانول پلی‌اتیلن سیاه با مشخصات Black Masterbatch Polyethylene(HDPE) PE100 for Gas Pipe توسط KPC تهیه شد. حلال پارازیلین بدون آب از شرکت مرک انتخاب شد و مورد استفاده قرار گرفت.

هوا در حدواسط لوله و کوپلر) و در حالت دیگر با استفاده از ماده پلیمری چسبنده به نحوی که هیچ فاصله ای در حدواسط لوله و کوپلر وجود نداشته و اتصال کامل برقرار شده انجام شد و نتایج مورد تحلیل قرار گرفت.

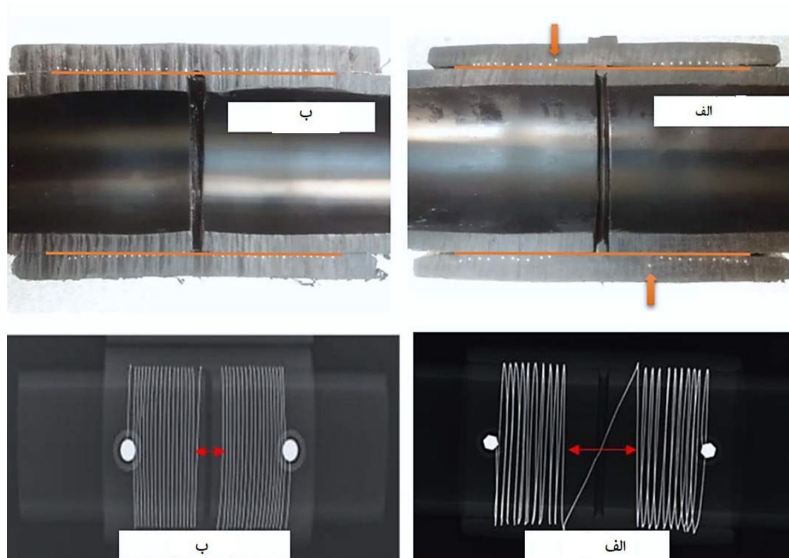
تجربی

مواد و روش‌ها

کوپلر هدف: از دو برند کوپلر (الف) و (ب) مورد

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

اطلاعات نمونه	کوپلر (الف)	کوپلر (ب)
مشخصات اتصال	سپیدنام زاگرس ساخت ایران	پتروگاز پارسا ساخت ایران
ولتاژ الکتروفیوژن (V)	۳۵	۳۸
قطر داخلی / قطر خارجی / طول (mm)	۱۱۳*۷۵*۶۳	۱۱۰*۷۶*۶۳
زمان الکتروفیوژن (s)	۱۳۰	۹۴
زمان خنک شدن (min)	۱۰	۱۰
ضخامت تقریبی سیم در سیم‌پیچ (mm)	۰/۵	۰/۵۴
تعداد دورهای سیم‌پیچ	۳۴	۳۶
وزن (g)	۱۵۴	۱۴۶



شکل ۱ مقایسه پیچش‌های دو برند از اتصالات میدانی (الف) و تصویر رادیوگرافی دو برند از اتصالات میدانی (ب)

آماده‌سازی ماده واسط پلیمری (فرمولاسیون ماده واسط)

در ابتدا گرانول‌های پلی‌اتیلن به ابعاد دانه بندی ۵ mm (از نوع تولید لوله (HDPE^۱ PE100) را توسط دستگاه خردکن صنعتی، خرد و سپس به پودر نرم تبدیل شده و در مرحله بعد، حلال زایلن به آرامی در همزن به این پودر اضافه شد تا ماده پودری به خمیری متراکم تبدیل شود. مخلوط به یک ماده چسبنده با ویسکوزیته مناسب تبدیل می‌شود؛ ویسکوزیته آمیزه به اندازه‌ای تنظیم می‌شود که با اعمال یک لایه نازک به ضخامت ۱ mm بر روی سطح داخلی اتصال روان نگردد. درصد حجمی حلال در آمیزه در محدوده ۲۱-۱۷٪ لحاظ شد. در صورت سفتی آمیزه حلال اضافه می‌شود. با افزودن حلال به پودر پلی‌اتیلن در حمام آب گرم به دمای حدود ۷۰ تا ۸۰ °C رسانده شد و در حین هم زدن، حلال افزوده می‌شود. هدف از این روش، ایجاد یک ترکیب چسبنده تخصصی است که بتوان به راحتی فضای خالی بین لوله و اتصال را پر نماید. پلی‌اتیلن پودری عامل اصلی اتصال را فراهم می‌کند، در حالی که حلال زایلن به تنظیم خواص رئولوژیکی ترکیب برای کارایی و چسبندگی بهینه در طول فرایند کمک میکند [۲۹]. 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 شده که موجب اختلال در عملیات جوشکاری می‌شود.

استفاده از ماده واسط پلیمری بر روی لوله‌های پلی‌اتیلن

ابتدا نمونه‌هایی از لوله پلی‌اتیلن با مشخصات طول ۳۰۰ mm و قطر ۶۳ mm و جنس HDPE PE100 GR B Pipe با دستگاه مخصوص متناسب با اتصالات هدف، با دستگاہ مخصوص برش کاری شد. در مرحله بعد پس از خراشیدن منطقه جوش در سر لوله‌ها با استفاده از اسکرابر خودکار؛ یک لایه نازک به ضخامت حدود ۱ mm از ماده واسط پلیمری را با استفاده از یک تیغه نازک چوبی باریک به پهنای ۱ cm بر روی سطح

خارجی لوله‌ها یا سطح داخلی اتصالات اعمال شد و سپس لوله و کوپلر به هم متصل شدند. به دلیل اینکه جنس این ماده واسط از پلی‌اتیلن و همچنین لوله و اتصالات بود، با سیستم سازگار بوده و به طور یکپارچه به عنوان بخشی از خود لوله‌ها ادغام می‌شود. از آنجایی که زایلن یک حلال سمی است، تمام احتیاط‌های ایمنی لازم رعایت شد و تنها مقدار بسیار کمی از آن استفاده شد. هنگامی که چسب به صورت خمیر اعمال می‌شود، خواص مضر آن مانند اشتعال‌پذیری از بین می‌رود. خمیری بودن ماده واسط این امکان را فراهم می‌کند 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 پلی‌اتیلن نهایی پس از جوش الکتروفیوژن کمک می‌کند. 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^۱ و شاخص استفاده شد [۳۰].

پس از مطالعات کتابخانه‌ای فرایند جوشکاری الکتروفیوژن و تأثیر پارامترهای مختلف، با انتخاب مواد مناسب پلیمری و فرموله کردن ماده واسط، در بخش‌های بعدی شبیه‌سازی جوش الکتروفیوژن اتصال بر اساس معادلات حاکم با نرم‌افزار COMSOL در حالت‌های اتصالات استاندارد، اتصالات در حالت ناقص (اتصالات دارای لقی) و همچنین اتصالات ناقص پر شده با استفاده از ماده واسط انجام شد. سپس آزمون غیر مخرب ترموگرافی با استفاده از دوربین IR در این سه حالت انجام گردید. در ادامه برای بررسی میزان استحکام جوشکاری انجام شده آزمون مخرب لهیدگی انجام شد که نتایج آزمون غیر مخرب و شبیه‌سازی را صحت‌گذاری می‌کند.

1. High Density Poly Ethylene

2. Non Destructive Testing

شبیه‌سازی نرم‌افزاری

معادلات حاکم بر مسئله و شرایط مرزی

فیزیک مسئله شامل انتقال حرارت هدایتی درون جسم پلی‌اتیلنی و یک رشته (سیم‌پیچ) منبع حرارتی است. معادله انتقال حرارت سه بعدی حاکم بر روی کل سیستم داخلی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\rho C_p \frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T(\vec{x}, t)) = Q(\vec{x}, t) \quad (1)$$

جدول ۲ شرایط مرزی و اولیه

شماره	دامنه	رابطه
۱	تمام دامنه (شرط اولیه)	$T(\vec{r}, 0) = T_0$
۲	سطح‌های در تماس با هوا	$-k \nabla T = h_j (T_j - T)$
۳	ابتدا و انتهای لوله (@z = 0, L)	$\nabla T = 0$
۴	سیم	$Q = P(t)/V$

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. در اینجا T و Q با مکان و زمان تغییر می‌کنند. تابع Q صرفاً در مدت زمان پالس حرارتی و بر روی سیم‌پیچ به عنوان منبع حرارتی فعال شده و در بقیه زمان‌ها و مکان‌ها غیر فعال و برابر صفر است. شرایط مرزی و اولیه مکمل این معادله در **جدول ۲** آورده شده است:

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 هم‌دمایی اولیه و شرط شماره ۲ تبادل گرمایی بر روی سطح‌های در تماس با هوا شامل شش سطح مختلف را نشان می‌دهد. همچنین شرط شماره ۳ نشانگر عدم هدایت گرمایی در ابتدا و انتهای لوله است. در نهایت، شرط شماره ۴ بیان‌کننده میزان حرارت ایجاد شده در منبع حرارتی است.

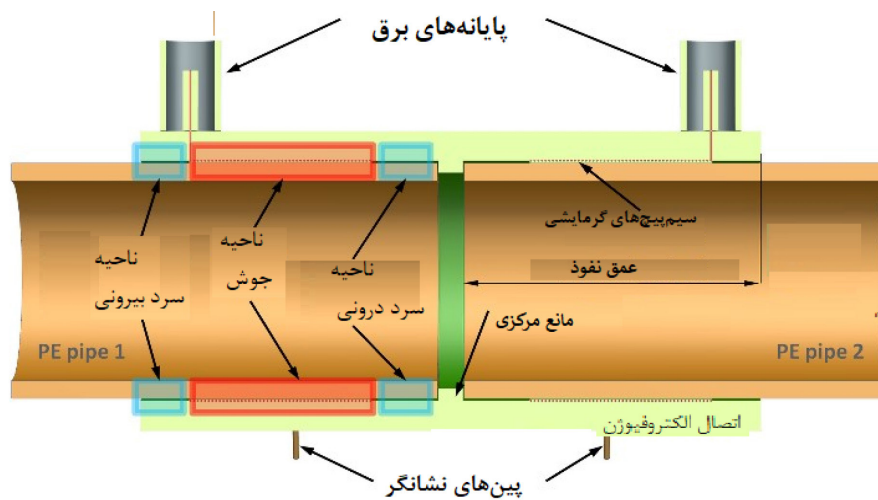
شبیه‌سازی

مدل فوق یک مدل انتقال حرارت با معادلات مشتق جزئی، غیر متقارن، غیرخطی، با پارامترهای حرارتی (پلی‌اتیلن) متغیر با دما و شرایط مرزی مختلط است و در اطراف سیم‌پیچ، در یک ناحیه بسیار ریز، تغییرات حرارتی بسیار شدید رخ می‌دهد. از نرم‌افزار COMSOL نسخه ۶/۲ برای شبیه‌سازی استفاده گردید. شبیه‌سازی با و بدون استفاده از ماده واسط مطابق روابط و محاسبات انجام شد. در بخش نتایج به نتایج شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد.

ایجاد دامنه کوپلر و سیم‌پیچ

برای ایجاد هندسه کوپلر و سیم‌پیچ‌های درون آن از اندازه‌گیری‌ها و اطلاعات هندسی جمع‌آوری 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 mm ۳۱/۵ و شعاع خارجی mm ۳۹/۳ استفاده شده است. همچنین برای رسم هر یک از لوله‌ها روند کاملاً مشابهی طی شد. اندازه‌گیری‌های کوپلر و لوله شبیه‌سازی شده بر اساس نمونه لوله و کوپلر مورد مطالعه و مطابق **شکل ۲** انجام شده است. در مرحله شبیه‌سازی، تغییرات زیر در هندسه اتصال اعمال شد:

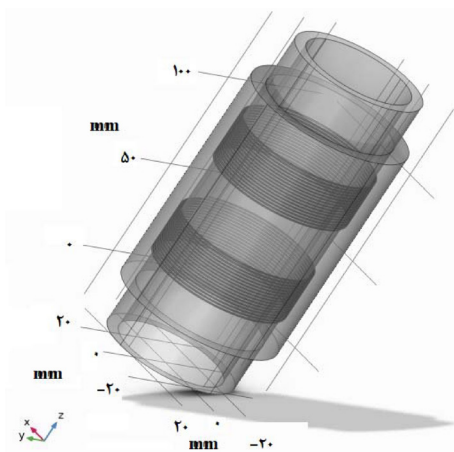
- افزودن یک محدودکننده در فضای بین دو لوله
 - اصلاح شرایط مرزی برای دو نوار شعاعی کوپلر، با معرفی یک شرط جریان همرفت حرارتی
- برای شروع از طریق رسم دو استوانه برای سطح بیرونی و درونی هر یک از لوله‌ها که درون کوپلر قرار می‌گیرند با اندازه‌های یکسان و شعاع خارجی mm ۳۱/۵ و شعاع داخلی mm ۲۵ به فاصله mm ۲/۸ از هم قرار دارند. دلیل ایجاد این فاصله به خاطر 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.



شکل ۲ نمونه لوله و کوپلر مورد مطالعه

ویژه و ضریب هدایت گرمایی، حرارت ثبت گردید. برای سیم‌پیچ‌ها 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 می‌شوند. مطابق نمونه مورد استفاده در این پژوهش ولتاژ درج شده بر روی سر جوش ۳۵ V و مقاومت $3/51 \Omega$ است. با این مشخصات حدود ۳۴۹ W انرژی الکتریکی تولید می‌شود که این انرژی به صورت متقارن در هر دو سمت کوپلر بر روی المان و بصورت مساوی بین ۱۷ دور سیم‌پیچ سمت چپ و ۱۷ دور در سمت راست توزیع می‌شود.



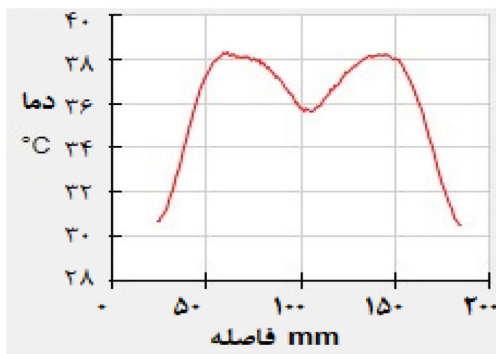
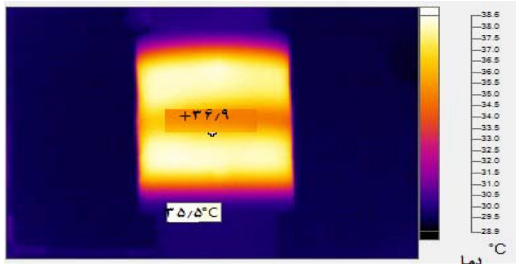
شکل ۳ هندسه کلی سر جوش سالم در محیط سه بعدی

دو هندسه بدنه پلی‌اتیلنی و سیم‌پیچ 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 چسبیده اند و هیچ گونه فضای خالی بین این دو قرار ندارد. در شکل ۳ هندسه کلی سر جوش سالم را به صورت برش خورده برای دید بهتر، نشان داده شده است.

روی کوپلر ۱۷ دور سیم‌پیچ در سمت چپ و راست بصورت کاملاً متقارن مدلسازی شده است. در سمت راست المان فاصله $0/2 \text{ mm}$ بین لوله و اتصال کوپلر خالی شده تا به عنوان فضای خالی^۱ مورد مطالعه قرار داده شود. فرض شده که این فضا با هوا پر شده است. در سمت چپ با ماده واسط که ترکیبی پلی‌اتیلن و زایلن است فضای $0/2 \text{ mm}$ پوشش داده شده و و لوله و اتصال کاملاً بهم چسبیده هستند. شبیه‌سازی با این دو تفاوت در ساختار کوپلر انجام می‌شود.

خواص حرارتی پلی‌اتیلن 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 داده‌های آن مطابق اطلاعات چگالی، ظرفیت گرمایی

نمونه‌های ناقص و سپس نمونه‌های اصلاح‌شده با اعمال ماده واسط پلیمری تحت شرایط یکسان و با ابعاد مشابه تهیه شدند. اندازه‌گیری‌ها برای هر سه گروه از نمونه‌ها تحت شرایط یکسان از نظر ولتاژ اعمال‌شده، زمان جوشکاری و زمان نمونه‌برداری انجام شد.



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

پروفایل‌های دمایی برای هر سه نمونه در شکل ۵ ارائه شده است. محور افقی مربوط به ابعاد طولی اتصال به میلی‌متر و محور عمودی دمایی سطح اتصال به درجه سانتیگراد می‌باشد. دمانگاری از نمونه‌ها در زمان ۶۰ s بعد از شروع جوشکاری صورت گرفته است. شکل ۵-الف مربوط به اتصال سالم است، قله بیشینه دمایی در هر دو سمت اتصال و به صورت یکسان می‌باشد. در نمودار شکل ۵-ب بیشینه‌ها 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 شکل ۵-ج با یک نمودار متقارن و همسان نشان داده شده است.

روش تعیین شرایط بررسی حرارتی

در دستیابی به شبیه‌سازی فوق، کل فرایند جوش الکتروفیوژن در این شبیه‌سازی حدود ۱۳۰ s و شامل گرم شدن و پس از آن فرایند سرد شدن و پایان واکنش جوش الکتروفیوژن در نظر گرفته شد. البته در شبیه‌سازی کنونی تا ۶۰ s اولیه جوشکاری مورد بررسی قرار می‌گیرد و پروفایل دمایی در اثر آن تحلیل می‌گردد. خروجی شبیه‌سازی و توزیع دما در سرتاسر المان در بخش نتایج تفسیر می‌شود.

نتایج و بحث

آزمایش غیرمخرب

بررسی تأثیر ماده میانی بر افزایش دما با استفاده از

ترموگرافی IR

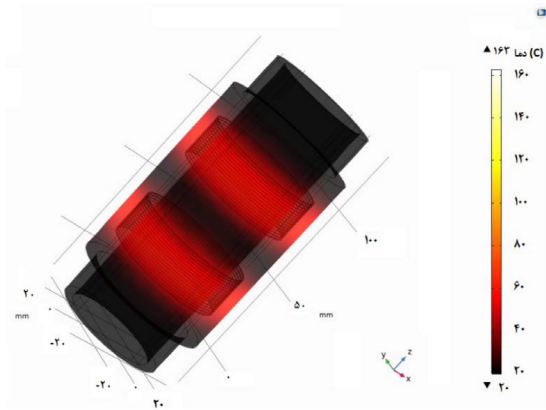
به منظور بررسی نمونه‌های اصلاح‌شده با ماده میانی، موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است: الف- دمانگاری از سطح اتصال در زمان جوشکاری اتصالات سالم

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

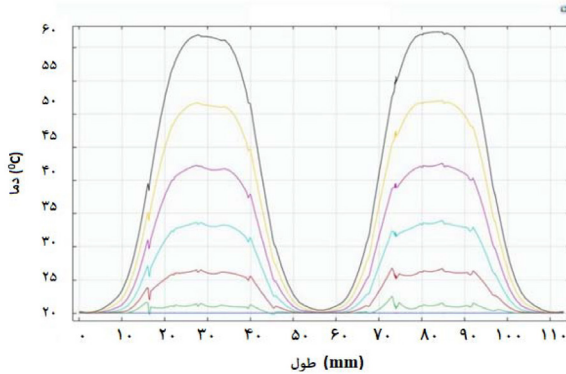
ج- دمانگاری از سطح اتصال در زمان جوشکاری اتصالات ناقصی که در فضای خالی با ماده واسط پر شده است

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 از دوربین IR مدل Fluke Ti32 استفاده شد. این دوربین پروفایل‌های دمایی را پس از اعمال پالس و داده‌های جوش میدانی را ثبت می‌کند. در شکل ۴ اطلاعات داده‌های جوش میدانی و پروفایل‌های دمایی خطی نشان داده شده است.

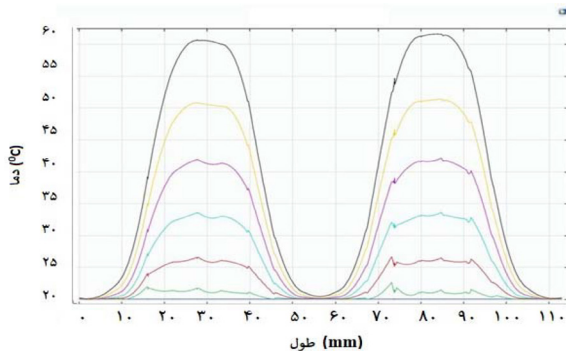
مقایسه تفاوت‌های پروفایل دما بین جوش‌های استاندارد (مرجع)، جوش ناقص و جوش با ماده واسط نمونه‌های سالم و استاندارد بعنوان نمونه مرجع،



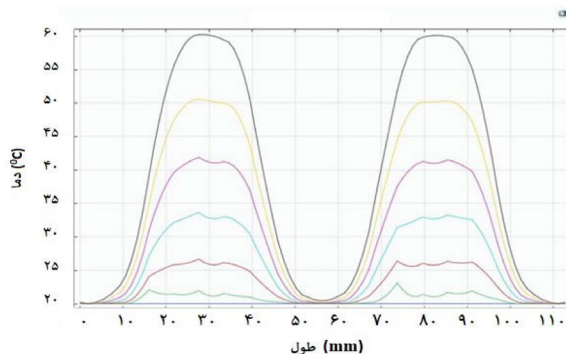
شکل ۶ پروفایل دمایی سه بعدی اتصال و لوله شبیه‌سازی شده



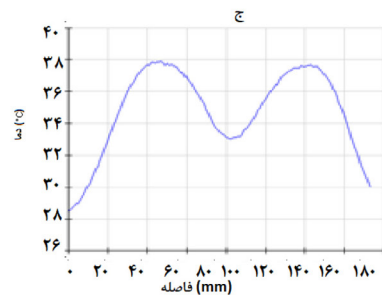
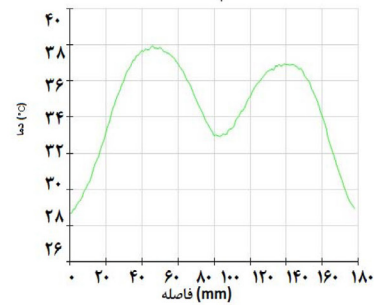
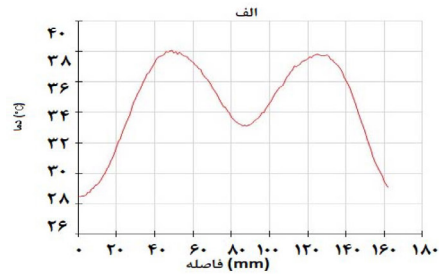
شکل ۷ پروفایل دمایی سطح اتصال استاندارد در حد واسط اتصال لوله و کوپلر



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



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



شکل ۵ مقایسه تفاوت‌های پروفایل دما بین جوش‌های الف: استاندارد (مرجع)؛ ب: جوش ناقص؛ ج: جوش با ماده واسط (با استفاده از نرم‌افزار دستگاه دمانگار (Fluke SmartView)

شبیه‌سازی

بررسی نقشه دمایی

برای بررسی نتایج، شبیه‌سازی امکان دسترسی به نقشه دمایی روی سر جوش و دیگر نقاط را فراهم می‌کند. در روش دمانگاری دسترسی به پروفایل دو سطح بسیار مهم است. یکی سطح بیرون کوپلر، و دیگری اطراف سیم‌پیچ. شکل ۶ نمای سه بعدی از نحوه تغییرات دمایی در سیم‌پیچ‌ها و لوله پلی‌اتیلن از زمان شروع جوشکاری در بازه زمانی ۱۲۰ s، دیده می‌شود.

قله‌های موجود در پروفایل حرارتی، نشانگر نواحی مجاور به سیم‌پیچ و دره موجود در دندان‌ها، نواحی بین سیم‌پیچ‌ها است که در شکل‌های ۷ تا ۹ دیده می‌شوند.

گرفته و پروفایل دمایی یکنواخت شده است و در مقابل در حالت اصلاح نشده عدم تقارن در پروفایل دمایی در پالس ۶۰ s مشهود است.

آزمون مخرب

برای بررسی موفقیت در اجرای استفاده از ماده واسط علاوه بر تحلیل ردپای حرارتی در سرجوش‌ها، مطابق استاندارد کنترل کیفی نیاز به انجام آزمون لهیدگی^۱ مطابق استاندارد IGS-C-DN-003 می‌باشد تا میزان تاثیر اعمال ماده واسط مورد بررسی قرار گیرد. در این روش اتصالات با روش ایمن و توسط اهر 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 سرجوش‌ها برای آزمون لهیدگی را نشان می‌دهد. نتایج آزمون لهیدگی در نمونه‌های ایجاد شده در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱۰ نمونه برش طولی سرجوش‌ها برای آزمون لهیدگی

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 (۲ mm) فضای خالی) در نواحی مرزی حدود ۸۰ mm از المان شبیه‌سازی، عدم تقارن بصورت واضح قابل مشاهده است. در واقع وجود لایه هوا به عنوان 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 شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در حالت دیگر شبیه‌سازی بدون مانع هوا و در حالت اتصال کامل لوله و کوپلر با استفاده از ماده واسط چسبنده انجام شده است. همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود 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 می‌شود.

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 می‌دهد که با پرکردن لایه هوا با ماده واسط انتقال حرارت به صورت یکسانی صورت

جدول ۳ نتایج آزمون مخرب لهیدگی نمونه‌ها

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

جوشکاری شده مقایسه شد و اثرگذاری آن مورد تایید قرار گرفت.

شبهه‌سازی 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 مینا انجام شد. در مطالعه حاضر برای سرجوش مورد مطالعه، شبهه‌سازی با زمان جوشکاری روی ۶۰ s محاسبه شد. زمان تحلیل نسبت به ولتاژ ورودی، هندسه و خواص سیم‌پیچ و پلی اتیلن مصرفی، و شرایط محیطی قابل تغییر است. در صورت نیاز می‌توان 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 می‌باشد، در نهایت با انجام آزمون‌های مخرب از جمله لهیدگی بر روی استحکام سرجوش این موضوع تایید می‌شود.

با استفاده از آزمون‌های 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.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر ماده واسط بر عملکرد جوشکاری الکتروفیوژن با تحلیل ترموگرافیک با شبهه‌سازی 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 [۳۱]. این مقاله تأثیر مثبت یک ماده واسط بر عملکرد جوشکاری الکتروفیوژن را نشان می‌دهد. بهره‌گیری از ماده واسط بر پایه پلی اتیلن با نتایج شبهه‌سازی، آزمون غیر مخرب ترموگرافی و همچنین آزمون مخرب لهیدگی اتصالات

مراجع

- [1]. Rasooly, M., Mohseni, E., & Hosseini, F. (2024). Arrangement of nondestructive tests for technical inspection process of electrofusion weld in gas polyethylene pipes. *e-Journal of Nondestructive Testing - ISSN 1435-4934* - www.ndt.net.
- [2]. Ismoilovich, M. N. (2024). FURTHER development of polymer pipe welding technology. *Web of Technology: Multidimensional Research Journal*, 2(12), 331-340.
- [3]. Doaei, M., & Tavallali, M. S. (2018). Intelligent screening of electrofusion-polyethylene joints based on a thermal NDT method. *Infrared Physics & Technology*, 90, 1-7. doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.030.
- [4]. Zeng, D., Iurzhenko, M., & Demchenko, V. (2025). An analytical mathematical model for melting layer thickness of HDPE pipes at thermal butt-fusion welding. In *Welding and Related Technologies* (pp. 111-114). CRC Press. ISBN 978-1-032-85176-1.
- [5]. Gueugnaut, D., Tessier, M., Bechroui, M., & Lopitiaux, A. (2025). Acceptance Criteria for Defects in Polyethylene Welds, Coupling Phased Array Ultrasonic Testing and Destructive Tests. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 44(1), 26.
- [6]. Shishesaz, M., Gatea, A. H., Moradi, S., & Yaghoubi, S. (2024). Stress analysis in the buried polyethylene pipes with viscoelastic behavior: a finite element study. *Discover Applied Sciences*, 6(11), 616.
- [7]. Chen, T., Wang, Q., Xiao, Q., Wang, H., & Liu, Y. (2024). Automatic detection of thermal fusion joints defects of high-density polyethylene gas pipes using ultrasonic total focusing method and deep learning. doi.org/10.21203/rs.3.rs-5395473/v1.
- [8]. Xiang, G., Hu, Y., Zeng, S., Shi, J., & Zheng, J. (2021, July). Demonstration of Intelligent Welding Machine for Polyethylene Pipe. In *Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 85321, p. V002T03A009). American Society of Mechanical Engineers. doi.org/10.1115/PVP2021-62014.
- [9]. Tutunchi, A., Eskandarzade, M., Aghamohammadi, R., Masalehdan, T., & Osouli-Bostanabad, K. (2022). Risk assessment of electrofusion joints in commissioning of polyethylene natural gas networks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 196, 104627. doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104627.
- [10]. Kanninen, M. F., Buczala, G. S., Kuhlman, C. J., Green, S. T., Grigory, S. C., O'Donoghue, P. E., & McCarthy, M. A. (1992). A theoretical and experimental evaluation of the long term integrity of an electrofusion joint.

Proceedings of Plastics Pipes VIII, B2.

- [11]. Elsheikh, A. H. (2023). Applications of machine learning in friction stir welding: Prediction of joint properties, real-time control and tool failure diagnosis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105961. doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105961.
- [12]. Najafabadi, M. K., & Hosseini, F. Optimization of Cooling Time of Polyethylene Electrofusion Joints in the Natural Gas Industry on the Basis of DSC Method with Computerized Simulation. Available at SSRN 4865276. Available at SSRN 4865276.
- [13]. Starostin, N. P., Vasileva, M. A., & Ammosova, O. A. (2019, November). Management of thermal process for polyethylene gas pipes welding with built-in heater. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1392, No. 1, p. 012086). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/1392/1/012086.
- [14]. Sarambale, D. S., & Shinde, D. K. (2017). Electro-fusion joint failure polyethylene pipes analysis and its simulation using finite element analysis. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(12), 51-55.
- [15]. Peacock, A. (2000). *Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications*. CRC press..
- [16]. Alavijeh, M. S., Scott, R., Seviaryn, F., & Maev, R. G. (2022). Application of a chord transducer for ultrasonic detection and characterisation of defects in MDPE butt fusion joints. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 64(10), 560-565. doi.org/10.1784/insi.2022.64.10.560.
- [17]. Gierulski, M. P., Tomlinson, R., & Troughton, M. (2022). Electrofusion welding and reinforced thermoplastic pipes—A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 41(3-4), 147-163. doi.org/10.1177/07316844211051207.
- [18]. Mehrabi, H. A., & Bowman, J. (1997). Electrofusion welding of cross-linked polyethylene pipes. *Iranian Polymer Journal*, 6, 195-204.
- [19]. Shapheek, M., & Shrivastava, N. (2020). Optimization of cooling time for polyethylene fusion joints. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1267-1272. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.152.
- [20]. Cruz, E. D. D., Prasetyo, Y. T., Ayuwati, I. D., Cahigas, M. M. L., & Nadlifatin, R. (2024, December). A Conjoint Analysis on the Preference of Pipe Welding Materials and Procedures. In *2024 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 0058-0062). IEEE.
- [21]. Gao, G., Tian, X., Luo, T., Li, C., & Gao, J. (2023, April). Study on Structural Aging and Gas Leakage Failure Behavior of Electrofusion Socket of Buried Polyethylene Gas Pipes. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2468(1). 012119. IOP Publishing.
- [22]. Zisopol, D. G., Minescu, M., Iacob, D. V., & Voicu, N. (2024). Study of the tensile strength and shore hardness behavior of PE100 SDR11 electrofusion welded and artificially aged pipes. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 14566-14571. doi.org/10.48084/etasr.7444.
- [23]. An, M., Cui, B., & Duan, X. (2022, March). Preparation and applications of linear low-density polyethylene. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2229, No. 1, p. 012009). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/2229/1/012009.
- [24]. Moini Jazani, O., Khalafi, R., Khosravi, M., Hassanpour, M.R., Dadkhah, D., Mostafaeian, M., Salehi, M.M. and Riazi, H., (2015). A Review of Manufacturing Process of Polyethylene Pipe and Connectors for Applying in High-Pressure Natural Gas Pipelines. *Journal of Particle Science and Technology*, 1(3), pp.129-140. doi:10.22104/jpst.2015.136.
- [25]. Bathaee, S. A., Nourouzi, S., Jamshidi Aval, H., & Seyf, S. (2018). Comparison and Study of Coating Properties of Three-layer Polyethylene, Polyurethane and Fusion Bonded Epoxy for Pipelines. *Journal of Petroleum Research*, 28(97-4), 139-150., doi: https://doi.org/10.22078/pr.2018.2837.2315.
- [26]. Pathak, S., & Pradhan, S. K. (2020). Experimentation and optimization of HDPE pipe electro fusion and butt fusion welding processes. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2925-2929. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.517.
- [27]. Chebbo, Z., Vincent, M., Boujlal, A., Gueugnaut, D., & Tillier, Y. (2015). Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes. *Polymer Engineering & Science*, 55(1), 123-131. doi.org/10.1002/pen.23878.
- [28]. Wysocka-Fotek, O., Maj, M., & Oliferuk, W. (2015). Use of pulsed IR thermography for determination of size and depth of subsurface defect taking into account the shape of its cross-section area. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60. doi:10.1515/amm-2015-0181.
- [29]. Onuegbu, G. C., & Onuoha, C. (2017). Transport behaviour of xylene through compatibilized low density polyethylene composite. *European Journal of Engineering and Technology*. 5(3). ISSN 2056-5860.
- [30]. Azad, M. J., & Tavallali, M. S. (2019). A novel computational supplement to an IR-thermography based non-destructive test of electrofusion polyethylene joints. *Infrared Physics & Technology*, 96, 30-38. doi.org/10.1016/j.infrared.2018.10.031.
- [31]. Mansouri, S., & Tavallali, M. S. (2019). Heat transfer approximate modeling, parameter estimation and thermography of thermal pulsing in electrofusion joints of gas pipelines. *Infrared physics & technology*, 98, 354-