

Important Parameters in Electrofusion Welding Process of Polymer Pipes: A Review

Pedram Malaekheh

Jahad Zamzam Plastic Industries Company, Laboratory Unit, P.O. Box.: 91735-464
Mashhad, Iran

Received: 20 April 2017, Accepted: 15 August 2017

Abstract

Electrofusion is among several techniques to join polymer pipes using special fittings. In electrofusion, polymer pipes and fittings are joined together through wires that are installed in their structures. The main difference between the two techniques of common heat fusion and electrofusion is in heat transfer mechanism. In heat fusion, a heating device is used to melt interfaces of the pipes and polymer fitting. In electrofusion, there is internal melting through a conductive substance inside the weld interface or melting by a conductive polymer. The heat is produced through electric current contacting conductive materials installed inside the fittings. In order to have desirable materials and useful products, design and installation is based on proper joints having passed good welding testing conditions. Methods of welding and joining are different and depend on parameters such as the type of polymer pipe, polymer structural changes, requirements imposed on interior or external pressure of the pipe, decreasing leakage, prohibition of strokes and longitudinal impact loads, performance and operational conditions, construction and installation operations and types of products that have to be joined together. In this paper a survey of electrofusion process on dimensional strength, parameters accounted for in joints' integrity and stability, mechanisms related to macromolecular magnitude of joint formation, diffusion of molecules in polymer structures, and formation or rupture of chemical bonds through different experimental and computational methods are reviewed based on researchers' findings.

Key Words

electrofusion,
polymer pipe,
molecular diffusion,
joint,
strength

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pedrammalaekheh@yahoo.com

مروری بر عوامل مؤثر بر فرایند جوش الکتریکی لوله‌های پلیمری

پدرام ملائکه

مشهد، شرکت صنایع پلاستیک جهاد زمزم مشهد، واحد آزمایشگاه، صندوق پستی ۹۱۷۳۵-۴۶۴

دریافت: ۱۳۹۶/۱/۳۱، پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۲۴

از جمله روش‌های اتصال لوله‌های پلیمری، جوش الکتریکی با اتصالات ویژه آن است. در جوش الکتریکی، لوله‌ها و اتصالات پلیمری با استفاده از سیم‌های تعبیه شده در ساختار آن‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند. تفاوت اصلی بین جوش گرمایی متعارف با جوش الکتریکی، در نحوه انتقال گرماست. در جوش گرمایی از ابزار گرم‌کن برای ذوب سطوح لوله و اتصال پلیمری استفاده می‌شود. اما در جوش الکتریکی که داخلی است، درون سطح اتصال جوش با یک رسانا یا پلیمر رسانا گرم می‌شود. با اتصال برق به مواد رسانای قرار گرفته در اتصالات، گرما به وجود می‌آید. برای دسترسی به مواد محصولات مطلوب، طراحی و نصب بر پایه اتصالات مناسبی انجام می‌شود که شرایط جوشکاری را به خوبی گذرانده‌اند. روش‌های جوش و اتصال، بسته به عواملی همچون نوع پلیمر به کار رفته در لوله، تغییرات ساختاری پلیمر، الزامات فشار داخلی یا خارجی لوله، کاهش نشتی، ممانعت از تکان‌ها و بارهای ضربه‌ای طولی، شرایط کاربردی و عملیاتی، نیازمندی‌های عملیات ساخت و نصب و نوع محصولاتی که باید جوش داده شوند، متغیر هستند. در این مقاله، بررسی فرایند جوش الکتریکی در بعد استحکام، عوامل مؤثر بر اتصال یکنواخت و پایدار از دیدگاه سازوکارهای تشکیل اتصال در مقیاس درشت‌مولکولی، نفوذ مولکولی در ساختار پلیمرها و تشکیل یا گسست پیوندهای شیمیایی از راه روش‌های متفاوت تجربی و محاسباتی ارائه شده از سوی پژوهشگران مرور شده است.

بسیار ش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال هفتم، شماره ۴

صفحه ۸۳-۹۳، ۱۳۹۶

ISSN: 2252-0449

چکیده



پدرام ملائکه

واژگان کلیدی

جوش الکتریکی،
لوله پلیمری،
نفوذ مولکولی،
اتصال،
استحکام

مقدمه

در موارد زیادی از کاربرد پلیمرها، اتصالات جوش الکتریکی درون سازه یا محصول وجود دارد که استحکام درازمدت، یکپارچگی و بدون نقص بودن سازه یا محصول، به استحکام و مقاومت آنها وابسته است. بنابراین، آگاهی از اینکه چگونه این اتصالات جوش الکتریکی استحکام خود را به دست می آورند، ارزشمند است. این موضوع می تواند به انتخاب مواد اولیه و شرایط مناسب فرایند اتصال دهی برای دستیابی به استحکام درازمدت اتصالات جوش الکتریکی کمک کند. در نتیجه، سازه یا محصول پلیمری یکپارچگی خود را برای برآورد عمر طراحی مطلوب حفظ می کند [۱].

جوش الکتریکی به عنوان جوش القایی مقاومتی نیز شناخته می شود. به دلیل کاربرد بسیار زیاد جوش الکتریکی در اتصال دهی لوله های زیر فشار و اتصالات پلی اتیلنی، بخش عمده پیشینه پژوهش ها به این پلیمر اختصاص دارد [۲]. سه فناوری کاملاً متفاوت در ساخت اتصالات جوش الکتریکی برای اتصال دهی الکتروهمجوشی لوله های پلیمری و به ویژه لوله های پلی اتیلن، با در نظر داشتن دیدگاه نفوذ مولکول های پلیمر، کاوش شده اند. اولین آنها جفت کننده های جوش الکتریکی ساخته شده از رزین پلی اتیلن رسانا با قابلیت بازیافت و دریافت گرما بوده است [۳].

فناوری بعدی اتصالات جوش الکتریکی که به صورت طرحی مفهومی ارائه شد، از سیم فلزی قفس مانندی بهره می برد که درون اتصال جاسازی یا تزریق شده و در وجه مشترک همجوشی قرار گرفته بود [۴]. در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی شرکت آمریکایی آزمایش های میدانی را با تعداد محدودی از اتصالات انجام داد که از فناوری جریان القایی بهره می بردند [۵]. روش سوم و نهایی که قدیمی ترین آنهاست و به عنوان طرح مفهومی برای اتصالات جوش الکتریکی لوله مطرح شد، از سیم های دارای مقاومتی بهره می برد که جاسازی یا تزریق شده بودند و به عنوان منبع گرما عمل می کردند [۶].

بحث

جفت کننده های جوش الکتریکی دارای المان گرمایی ماریچ هستند. در اثر اتصال به جریان الکتریکی، گرمای لازم برای ذوب دو سر لوله ها و فضای داخلی جفت کننده فراهم می شود که روی آنها قرار گرفته است. این جفت کننده ها، اتصالات پلیمری و محکم تر از بدنه هر دو لوله فراهم می کنند. همان طور که گفته شد، تنها تفاوت

بین جوش گرمایی معمولی با جوش الکتریکی، نحوه تأمین گرما در آنهاست [۷].

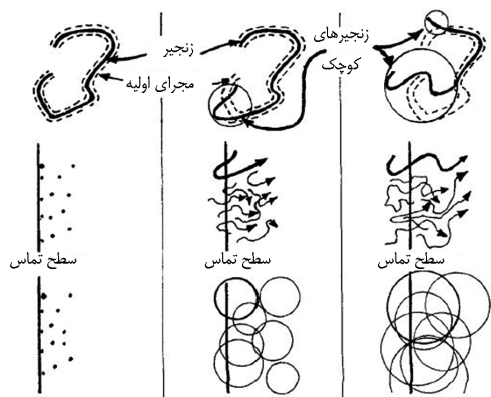
جوش الکتریکی از دیدگاه نفوذ درشت مولکولی در ساختار پلیمرها

پنج رخداد مشخص در مرحله اول یا نهفتگی فرایند جوش و اتصال دهی سطوح پلیمرها، از دیدگاه نفوذ درشت مولکولی شناسایی شده است:

- نوآرایی سطوح،
- نزدیکی سطوح،
- مرطوب شدن سطوح،
- نفوذ و
- آرایش تصادفی که با یکدیگر به عنوان مرحله نهفتگی یاد می شوند، چرا که تغییرات ایجاد شده قابل رؤیت نیستند.

طی مرحله نهفتگی، انرژی الکتریکی تأمین شده برای سیم پیچ مقاوم گرمایی، دمای سیم ها و پلیمر نزدیک آنها را افزایش می دهد. این موضوع باعث بازآرایی موضعی پلیمر اطراف سیم ها می شود. تداوم انرژی ورودی، پیوندهای ساختار پلیمر را از هم گشوده و باعث ایجاد شرایط نزدیکی و تماس سطوح می شود. در نهایت، مرطوب شدن دو سطح شامل سطوح خارجی لوله پلیمری و قطر داخلی اتصال اتفاق می افتد که برای ایجاد پیوند بهتر عاری از هرگونه آلودگی شده اند. طی این مرحله، تعداد محدودی نفوذ مولکولی در امتداد سطوح رخ می دهد، اما احتمالاً با عمق محدود می شود و به اندازه ای نیست که به اتصال استحکام قابل اندازه گیری بخشد [۱].

در مرحله بعد، یعنی تشکیل اتصال و اختلاط، پیوند ایجاد شده، استحکام فزاینده و انعطاف پذیری را مطابق شکل ۱ به دست



شکل ۱- طرح کلی ارائه شده از فرایند نفوذ درشت مولکولی در امتداد سطح همجوشی [۱].

می‌آورد که به دلیل افزایش نفوذ درشت مولکولی در امتداد سطح همجوشی است. پلیمری که در عرض سطوح نفوذ می‌کند، در واقع از زنجیرهای کوچکی تشکیل شده که باعث ایجاد مواضع پل‌بندی برای اتصال جدید می‌شوند. بنابراین، به‌طور ذاتی به‌عنوان مولکول‌های اتصال‌دهنده در عرض اتصال عمل می‌کنند. کاربرد عبارت مولکول‌های اتصال‌دهنده در ساختار پلیمرها اساساً برای مولکول‌هایی است که ایجاد اتصال و پل‌بندی لایه‌های ضخیم بلوری در پلیمرهای نیمه‌بلوری عمده مثل پلی‌اتیلن را با انتقال بار از سطح ضخیم بلوری به‌طور مستقیم به سطح دیگری انجام می‌دهند [۱].

اتصالات جوش الکتریکی، استحکام اولیه خود را زمانی به‌دست خواهند آورد که عمق نفوذ زنجیرهای کوچک نفوذکننده از مقدار بحرانی و لازم برای درگیر شدن زنجیرها بیشتر باشد. با افزایش زمان همجوشی، دمای سطح مشترک شروع به افزایش کرده تا نفوذ بیشتری را فراهم کند و عمق نفوذ و در پی آن، استحکام و انعطاف‌پذیری اتصال جوش الکتریکی را افزایش دهد. مسافت عمق نفوذ متوسط زنجیرها در امتداد سطح همجوشی، سختی و استحکام اتصال‌دهی را تعیین می‌کند. مسافت عمق نفوذ متوسط زنجیرها با جرم مولکولی پلیمر نسبت عکس دارد. بنابراین، انواع دارای جرم مولکولی کم با سرعت بیشتری در امتداد سطح مشترک نفوذ می‌کنند و باعث ایجاد نقص‌های شکننده در زمان‌های همجوشی کم می‌شوند [۱، ۲]. اما، وابستگی نفوذ به زمان به گونه‌ای است که در دماهای کم، زمان زیادی لازم است تا نفوذ از گونه‌های با جرم مولکولی زیاد به‌طور چشمگیر انجام شود. از این رو، اثر دما برای افزایش مقدار نفوذ بسیار حیاتی است.

در پایان مرحله تثبیت اتصال‌دهی، تمرکز و عمق زنجیرهای درهم نفوذی به گونه‌ای است که استحکام سطح مشترک از استحکام پلیمر بین سیم‌های جوش فراتر می‌رود. سپس، استحکام اتصال‌دهی با توجه به زمان همجوشی تثبیت می‌شود. نقیصه شکست ترد در آزمون لایه‌برداری مشاهده شده است که طی آن لوله از اتصال

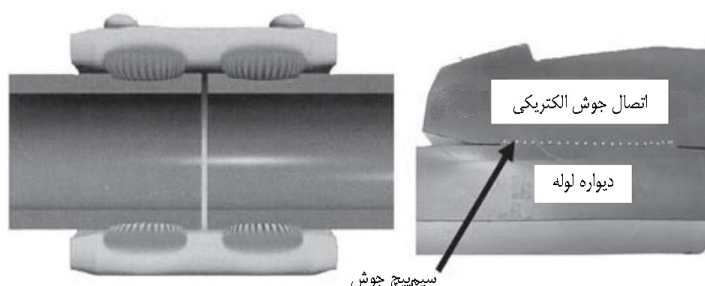
جفت‌کننده در امتداد صفحه فاصله زیادی می‌گیرد و تنها مقدار مقاومت موجود، به سیم‌های گرمادهنده مربوط بوده و از جانب اتصال نبوده است. از آنجا که این سیم‌ها می‌توانند ۲۰٪ تا ۴۵٪ از صفحه را اشغال کنند، می‌توان نتیجه گرفت، سطح مشترک لوله و اتصال نیازی به دستیابی به مقاومت کامل رزین توده ندارد. بنابراین احتمال دارد، مقدار نفوذ درشت مولکولی در امتداد سطح مشترک لوله و اتصال، تراکم پیوند و اتصال مولکولی را افزایش دهد. اما مقدار این افزایش کمتر از مقدار موجود در توده پلیمر است [۲، ۳].

مرحله پایانی خنک‌کاری در اتصال‌دهی به روش جوش الکتریکی برای فراهم‌آوردن اتصالی خوب و مستحکم، حیاتی است. زنجیرهایی که در امتداد سطح مشترک نفوذ کرده‌اند، باید اکنون با یک قسمت یا تمام زنجیرهای شرکت‌کننده در سطوح ضخیم بلوری طرف دیگر سطح اتصال، به یکدیگر متصل شوند. این موضوع با تشکیل اتصالات پل‌مانند به هم گره خورده مولکولی و قفل شدن آن‌ها به‌سوی دیگر اتصال انجام می‌شود که طی آن، اتصال چقرمگی و استحکام خود را به‌دست می‌آورد. مولکول‌های اتصالات پل‌مانند متبلور شده و به‌سمت دیگر متصل می‌شوند و بارها را در عرض اتصال منتقل می‌کنند تا امکان تشکیل سامانه لوله پلیمری زیر فشار کاملاً یک‌پارچه فراهم شود [۳].

چنین سامانه‌های لوله پلیمری، به‌ویژه نوع پلی‌اتیلنی آن برای تحمل بارهایی در مدت زمان تا ۵۰ سال طراحی شده‌اند. این استحکام درازمدت را مولکول‌های اتصالات پل‌مانند فراهم می‌کنند. زمانی که فرایند تبلور کامل شود، عامل بالقوه‌ای برای استحکام وجود خواهد داشت. شکل ۲ مقطع اتصال به‌روش جوش الکتریکی را نشان می‌دهد.

سیر تحول روش‌های اتصال‌دهی پلیمرها

روش‌های Stokes اتصال‌دهی پلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های آن‌ها را شامل رزین‌های تمیز و بکر دارای مقادیر کم اصلاح‌کننده‌های



شکل ۲- مقطع اتصال جوش الکتریکی [۷].

میکروسکوپی نوری و الکترونی، نواحی متفاوتی را در جوش‌ها آشکار کردند. شرایط جوشکاری بهینه تعیین شده و محل‌های اتصال در آزمون لهیدگی استاندارد مردود نشدند. شکل ۳ نمونه‌های آماده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

Nishimura و همکاران [۹] روش‌های ارزیابی اتصال‌دهی پلی‌بوتن با جوش الکتریکی و نتایج سنجش استحکام مکانیکی را برای چنین اتصال‌ی توضیح دادند. دلیل انتخاب آن‌ها خواص فوق‌العاده این پلیمر، به‌ویژه مقاومت در برابر تنش ترک‌برداری، شکستگی در اثر خزش در دماهای زیاد و خواص گرمایی متفاوت آن بود. آن‌ها به یک روش تعیین شرایط استاندارد ذوب بر مبنای رابطه بین زمان گرمادهی و استحکام کشش پلیمر اشاره کردند. طی پژوهش آن‌ها مشخص شد پلی‌بوتن نسبت به سایر پلیمرها، احتیاج به توان تامین شده کمتری به‌ازای واحد سطح ذوب، برای یک جوش مناسب دارد. افزون بر آن نیاز اتصال‌دهی به روش جوش الکتریکی به ناحیه سرد، تأیید شد.

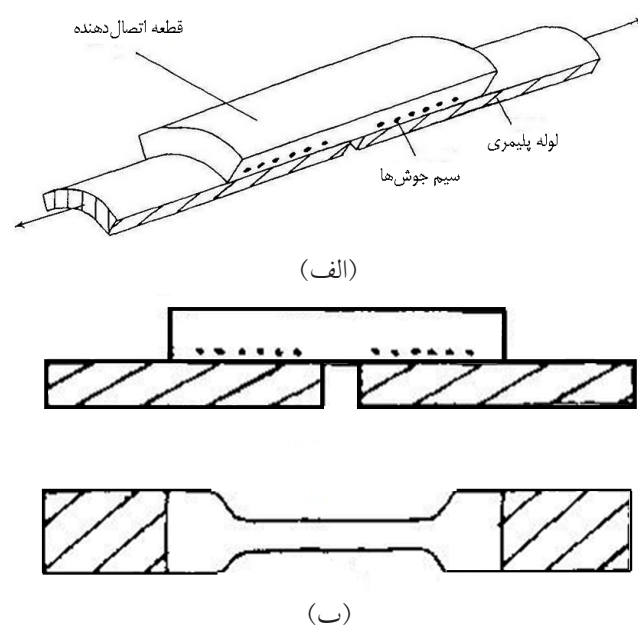
Chen و همکاران [۱۰] اثر روش اتصال‌دهی را بر شکستگی و خستگی مکانیکی لوله‌های پلی‌اتیلن پرچگالی بررسی کردند. برخلاف لوله‌های سستی و مرسوم پلی‌وینیل کلرید (PVC)، لوله‌های پلی‌اتیلن پرچگالی با استفاده از حلال‌ها به یکدیگر متصل نمی‌شوند. برای انجام آزمون، لوله‌های پلی‌اتیلن پرچگالی با فناوری‌های جوش لب‌به‌لب و الکتریکی به یکدیگر متصل شدند. مقاومت خمش خستگی در شرایط عمر باقی‌مانده تا شکست برای لوله‌های تحت فشار مقدار معینی داشت و از لوله‌های بدون فشار بیشتر بود. مقاومت خستگی برای نمونه‌های جوش داده شده به‌روشن لب‌به‌لب بیشتر از نمونه‌های روش جوش الکتریکی بود. لوله پلی‌اتیلنی ساده و بدون جوش نیز دارای مقاومت خمش خستگی بیشتری از همتای اتصال‌یافته با روش جوش لب‌به‌لب بود. دلیل این اختلاف در عمر خمش خستگی مشاهده و اختلاف ذاتی در ویژگی‌های شکست نمایان شد.

محرابی و Bowman [۱۱] جوشکاری الکتریکی لوله‌های پلی‌اتیلنی شبکه‌ای شده را بررسی کردند. آن‌ها آزمون‌هایی انجام دادند تا مشخص کنند، جفت‌کننده‌های جوش الکتریکی می‌توانند برای اتصال‌دهی لوله‌های پلی‌اتیلن شبکه‌ای شده به‌کار روند. دو نوع از لوله‌های پلی‌اتیلن در معرض دوزهای متفاوت (۵-۲۰۰ kGy) قرار داده و به یک‌دیگر متصل شدند. براساس نتایج تجربی، محتوای ژل با مقدار دوز تغییر کرد (جدول ۱). تمام محل‌های اتصال، آزمون لهیدگی را صرف‌نظر از محتوای ژل لوله‌های در معرض تابش، گذراندند. همچنین، مدت ۱۷۰ h در معرض بار فرسایشی بودن را

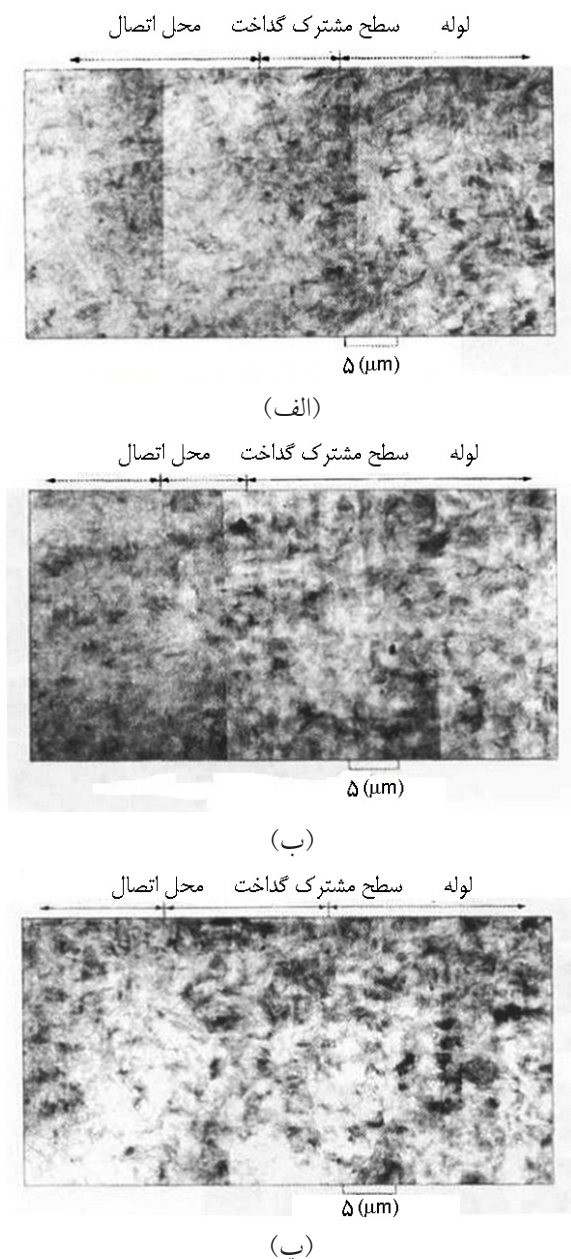
ضربه یا تأخیراندازهای اشتعال، انواع کامپوزیت‌های پر شده با ذرات ریز و پر شده با قطعات خرد شده لیف، لیف مات پیوسته اتفاقی، بافت سبک مات و لیف یک‌سو به‌طور جامع مرور کرد [۲]. کار او با تأکید بر جوشکاری الکتریکی مواد گرمانرم انجام شد و روش‌های جوشکاری گوناگون پلیمرها با یکدیگر، به همراه مزایا و معایب آن‌ها به‌طور خلاصه توضیح داده شدند. حاصل کار وی راهنمایی برای پیشینه پژوهش جوامع در این باره را فراهم ساخت.

عملکرد جوش الکتریکی در اتصال‌دهی لوله‌های ساخته شده از پلیمرهای متفاوت

Ward و Atkinson [۸] در باره اتصال‌دهی لوله‌های پلی‌اتیلن جهت‌یافته در دو محور پژوهش انجام دادند. این محصولات از هوموپلیمر پلی‌اتیلن پرچگالی (HDPE) با کشیده‌شدن در راستای محوری با قطر تقریباً ثابت، تهیه شده بودند. در نتیجه، در آن‌ها سفتی محوری افزایش یافت، مقاومت عالی نسبت به عوامل شیمیایی پیدا کردند و خواص مرزی بهبود یافت. بافت بسیار ریز الیافی این نوع لوله‌ها، هنگامی که در معرض تنش فشاری عرضی قرار گرفت، به ازشم جداشدگی در راستای طولی گرایش داشت. این تمایل به گسیختگی به‌طور چشمگیری با استفاده از کوپلیمرهای پلی‌اتیلن کاهش یافت. این لوله‌ها نشان دادند، مقاومت اتصالات ایجاد شده با روش جوش الکتریکی به گونه‌ای است که در آزمون‌های کشش، نقص همیشه در اتصال و نه در محل وجوه مشترک، اتفاق می‌افتد.



شکل ۳- آماده‌سازی نمونه‌های آزمون کشش: (الف) نمونه اتصال و (ب) آزمون تهیه شده [۸].



شکل ۴- مشاهدات میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM نمونه‌های: (الف) ۱ با زمان خنک‌کاری ۵ min، (ب) ۲ با زمان خنک‌کاری ۱۰ min و (پ) ۳ با زمان خنک‌کاری ۱۵ min [۱۲].

داده شده است. این پژوهشگران دریافتند، توان الکتریکی زیاد موجب ذوب مواد پلیمری در زمان کوتاه شده و این موضوع نبود امکان کنترل زمان جوش، احتمال سوختن مواد پلیمری و عدم یک‌نواختی، نشتی و تغییر شکل لوله را به دنبال دارد. همچنین، استفاده از توان الکتریکی کم، افزون بر نیاز به مدت زمان زیاد، گرمای بیشتری را هدر می‌دهد و جوش به شکل ناقص انجام می‌شود. در توان الکتریکی ثابت با افزایش زمان جوش، استحکام پیوند افزایش می‌یابد. ولی افزایش بیش از حد زمان جوش، موجب

جدول ۱- محتوای ژل به عنوان تابعی از دوز برای لوله‌های پلی اتیلن قرار گرفته در معرض تابش [۱۱].

دوز	محتوای ژل (%)					
	پلی اتیلن پرچگالی (HDPE)			پلی اتیلن چگالی متوسط (MDPE)		
	۱	۲	میانگین	۱	۲	میانگین
۰	-	-	-	-	-	-
۵	-	-	-	-	-	-
۱۰	-	-	-	-	-	-
۵۰	۹/۶	۲۱/۵	۱۵/۵	۳۰	۱۲/۸	۲۱/۵
۲۰۰	۶۲	۴۵	۵۳/۵	۵۶/۲	۳۹	۴۷/۶

سپری کردند که شاخصی برای استحکام اتصال منطقی بود. نتایج لوله‌های پلی اتیلن شبکه‌ای شده، انعطاف‌پذیری اتصال‌دهی به روش جوش الکتریکی را نمایان کرد و باز نشان داد، فرایند قابلیت ایجاد اتصال بین محدوده وسیعی از رزین‌های پلی اتیلن را دارد.

اثر تغییر عوامل مؤثر بر نتایج جوش الکتریکی پلیمرها بر عملکرد آن‌ها و مقایسه با سایر روش‌ها

Higuchi و همکاران [۱۲] زمان‌های خنک‌کاری مناسب برای جوش الکتریکی لوله‌های پلی اتیلنی توزیع سوخت‌های گازی را بررسی کردند. مشاهدات آن‌ها شامل تغییر شکل ناحیه مذاب، درجه تبلور، جهت‌گیری مولکولی، استحکام خزشی و خستگی کشش برای عملکرد درازمدت پلیمر بود. تنها تفاوت جزئی در ساختار مولکولی مثل درجه بلورینگی مشاهده شد. درحالی‌که تفاوت‌های واضح و مشخصی در تغییر شکل، شکل‌شناسی و استحکام خزشی کشش مشاهده شد. شکل ۴ نشان می‌دهد، اندازه قسمت‌های بلوری پلیمر (مناطق سفید رنگ) از قسمت الف تا پ با زیاد شدن زمان خنک‌کاری افزایش یافته است. بر پایه این نتایج اثر منحنی دما در مدت فرایند خنک‌کاری بر ناحیه مذاب شبیه‌سازی شد. این کار نشان داد، حالت ناحیه ذوب زمانی که لوله در زیر خاک مدفون شده باشد، عامل اصلی اثرگذار بر استحکام خزشی کشش، به عبارتی عملکرد درازمدت است. این تحلیل‌ها معیارهای انتخاب زمان خنک‌کاری مناسب را فراهم می‌کند.

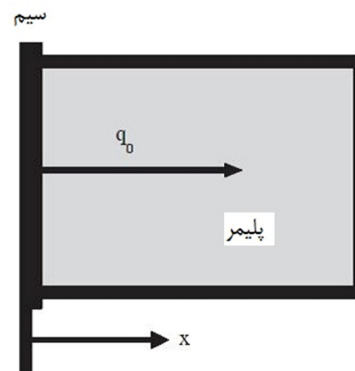
فامیلی و همکاران [۱۳] موضوع پژوهش خود را بررسی عوامل مؤثر بر جوش الکتریکی اتصالات پلی اتیلنی قرار دادند. برقراری پیوندهای صحیح پلیمری در این نوع جوش و مقاومت به رشد آهسته ترک در پلیمر مربوط به تولید اتصالات، از مسائل مورد توجه آن‌ها بود. نتایج کار آن‌ها با مدل یک‌بعدی در شکل ۵ نشان

جوش الکتریکی را مطالعه کردند که در معرض آلودگی قرار گرفته بود. پلی اتیلن به عنوان پلیمر قوی و قابل اطمینان با مقاومت بهتر در برابر رشد ترک در پلیمرها نسبت به پلی وینیل کلرید، مدنظر قرار گرفت. آزمون‌های فرسایشی گسترده ارتباط بین خرابی محل اتصال و فشار دینامیک تجربه شده در سامانه‌های توزیع را نشان داد. تحلیل نقص و شکست نهایی اتصالات با استفاده از روش‌های غیرمخرب فراصوت، مسیرهای منجر به شکست و ایجاد نقص در اتصالات را نشان داد که در شکل ۶ آمده است.

اثر عوامل محیطی بر جوش الکتریکی پلیمرها

بررسی اثر عوامل محیطی بر استحکام جوش الکتریکی لوله‌های پلی اتیلن توسط Abolabasi [۱۶] انجام گرفت. نتایج نشان داد، جوشکاری در دمای زیاد محیط احتمال ایجاد جوش با استحکام مکانیکی نامطلوب را در مقاطع پلیمری افزایش می‌دهد، اما به معنای قطعی به وجود آمدن جوش با استحکام نامناسب نیست. استحکام اتصال لوله‌های در پرتو فرابنفش به مقدار 700 h و بیشتر با وجود استفاده از کربن سیاه یا رنگ‌دانه‌ها به عنوان محافظت‌کننده در تولید آن‌ها نامطلوب بوده است که دلیل آن اکسایش و شکسته شدن زنجیرهای مولکولی پلیمر بوده است. همچنین، سایر نمونه‌هایی که به دلیل تمیزکاری نامناسب محل اتصال آن‌ها آغشته به ذرات خاک بوده است به جهت نبود امکان تماس مناسب و تشکیل پیوندهای مولکولی مؤثر دارای استحکام مکانیکی نامطلوب بودند.

این پژوهشگران [۱۷] در پژوهش دیگری اثر پرتو فرابنفش را بر جوش الکتریکی بررسی کردند. آن‌ها ابتدا به جوش الکتریکی لوله‌های پلی اتیلن که مدت زمان‌های متفاوت زیر تابش پرتو فرابنفش قرار گرفته بودند، اقدام کرده و سپس استحکام جوش اتصالات حاصل را با کمک آزمایش‌ها بررسی کردند. هدف بررسی



شکل ۵- مدل یک بعدی جوش الکتریکی [۱۳].

ایجاد ناشی و تغییر شکل لوله می‌شود.

بررسی عیوب و نقص‌های جوش الکتریکی پلیمرها

Shi و همکاران [۱۴] طبقه‌بندی عیوب و حالت‌های شکست جوش الکتریکی را برای لوله‌های پلی اتیلن متصل به هم مشخص کردند. آن‌ها عیوب اتصالات جوش الکتریکی را به ۴ گروه دسته‌بندی کردند:

- ۱- سطح مشترک ذوب ضعیف،
 - ۲- جوش بیش از اندازه و تخریب پلیمر،
 - ۳- فضاهای خالی و
 - ۴- حفره‌ها و بدشکلی ساختاری.
- آن‌ها دلایل ایجاد و تشکیل این عیوب را با جزئیات بررسی کردند. نتایج آزمون‌ها حاکی از آن بود که ۳ حالت اصلی شکست اتصالات جوش الکتریکی در اثر فشار داخلی عبارت از ترک‌خوردگی از راه سطح مشترک ذوب پلیمرها، در سرتاسر اتصال و در حد واصل سیم‌های مسی است.
- طایفی و همکاران [۱۵] نقص‌های ناشی از خستگی و فرسودگی



شکل ۶- مثال‌هایی از اتصال‌دهی نامناسب با جوش الکتریکی: (الف) عدم لایه‌برداری، (ب) لایه‌برداری بیش از اندازه، (پ) لایه‌برداری ناکافی سطح لوله در محل اتصال و (ت) عدم قراردهی مناسب لوله در جفت‌کننده [۱۴].

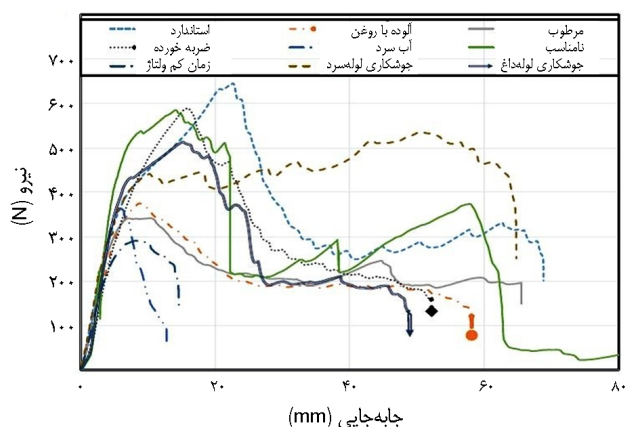
جدول ۲- شکست پیوندهای پلیمری با کمک پرتوهای فرابنفش [۱۷].

نوع پیوند	انرژی لازم برای شکست پیوند (kJ/mol)	طول موج دارای انرژی لازم برای شکست پیوند (nm)
C=C	۶۱۳	۲۰۰
C—C	۳۱۴	۳۵۰
C—H	۴۱۳	۱۲۵
C—O	۳۲۰	۳۳۰
C=O	۷۳۰	۱۶۴

نظریه تماس گرانشی نیز باید نادیده گرفته می‌شد، چرا که نیروهای واندروالسی تنها سطوح را به یکدیگر می‌چسبانند و به‌تنهایی قابلیت افزایش انعطاف‌پذیری در اتصال‌دهی خوب را ندارند.

Fujikake و همکاران [۱۹] با مدل محاسباتی، تحلیل فرایند جوش الکتریکی را در سامانه‌های لوله‌کشی پلیمری پژوهش کردند. در کار آنها روش شبیه‌سازی فرایند که در آن رفتار گرمای مکانیکی جفت‌شدن در نظر گرفته شده بود، با به‌کارگیری کدهایی بر مبنای روش اجزای محدود، ایجاد شد. با این روش، پیشینه توزیع فشار سطح واسط و دما به‌عنوان پارامترهای دارای نقش بحرانی در کیفیت محل اتصال، محاسبه شدند. در سطح مشترک اتصال، دما باید از دمای ذوب پلیمر فراتر رود. اما با در نظر گرفتن موضوع لزوم عدم تخریب پلیمر، فشار باید کنترل می‌شد تا به حد جریان‌یافتن رزین مذاب از لبه اتصال نرسد. ابتدا، نتایج رایانه‌ای با داده‌های تجربی، در مقیاس کوچک مقایسه شد که مطابقت خوبی داشتند. سپس، روش در مقیاس بزرگ به‌کار برده شد و طراحی بهینه انجام پذیرفت که به توسعه و ایجاد اتصال مطمئنی منجر شد.

پیش‌بینی استحکام جوش پلیمرها با استفاده از تحلیل نفوذ پلیمری زنجیری و گرمایی را Ezekoye و همکاران [۲۰] مطالعه کردند.



شکل ۷- منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی نمونه‌ها [۱۸].

اثر هوازدهی پلیمر بود که به شکست پیوندهای شیمیایی آن منجر می‌شود. نتایج نشان دادند، استحکام با افزایش مدت تابش پرتو فرابنفش کاهش می‌یابد و دلیل آن، اکسایش و شکست پیوندهای مولکولی C-H پلیمر بود که در جدول ۲ میزان طول موج لازم برای آن آمده است و نسبت به سایر پیوندها نیازمند کمترین مقدار تابش است.

اثر عوامل مختلف بر استحکام جوش الکتریکی پلیمرها

Araqi و همکاران [۱۸] اثر عوامل مختلف را بر استحکام لوله‌های پلی‌اتیلن جوشکاری شده با روش الکتریکی بررسی کردند. در پژوهش آنها اثر عوامل مؤثر بر جوشکاری با در نظر گرفتن پیوندهای دوگانه کربنی پلیمر بررسی شد. بدین منظور، سطح با کمک میکروسکوپی نوری میدان دید نزدیک (NFSPM) مطالعه و جوش با کمک پرتونگاری (RT) بررسی شد. نتایج آزمون‌های کشش در شکل ۷ نشان داد، جوش‌ها در اثر تغییر شرایط استاندارد، استحکام بسیار ضعیفی نشان داده و محل سیم‌ها در اتصال پس از جوشکاری دچار واپیچش می‌شوند.

مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایند جوش الکتریکی پلیمرها

Bowman فرایند جوشکاری و اتصال‌دهی به روش الکتریکی برای سامانه‌های لوله پلیمری را بررسی کرد [۱]. وی این کار را با مطالعه سوابق تجربی و تعدادی شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای مرتبط با دما و تغییرات فشار مذاب در مدت فرایند ذوب انجام داد. بررسی‌های وی به شناسایی چهار مرحله کلیدی در فرایند جوش منجر شد. همچنین، در مبحث سازوکارهای تشکیل اتصالات الکتروهمجوشی در دیدگاه درشت‌مولکولی پلیمرها و تشریح توسعه استحکام آنها چهار نظریه شامل چسبندگی، تماس گرانشی، نفوذ و فرایند جریان توضیح داده شدند. از این میان نظریه فرایند جریان، به دلیل عدم وجود جریان در ناحیه مذاب کنار گذاشته شد. افزون بر این،

خروج پلیمر مذاب می شوند. نتایج حاصل از مدل سازی با روش اجزای محدود اتصالات جوش الکتریکی با نتایج آزمایش های واقعی مقایسه شد. کیفیت مکانیکی قطعات جوش خورده از راه انجام آزمون تنش اندازه گیری شد.

بهینه سازی فرایند جوش الکتریکی، با استفاده از روش به هم پیوسته عددی و تجربی کاری پژوهشی بود که Tillier و همکاران [۲۲] انجام دادند. این مسئله به منظور کمک به درک منشأ تعدادی از عیوب مشخص شده و برای بهینه سازی و پیش بینی کیفیت جوشکاری انجام شد. مدل عددی آن ها که شاخص کیفیت جوش را بر مبنای نفوذ مولکولی داخلی پلیمر محاسبه می کرد، قابلیت پیش بینی خوب و منطقی این موضوع را داشت که آیا جوش اتفاق می افتد یا خیر و به شرایط جوشکاری تحمیل شده بستگی داشت.

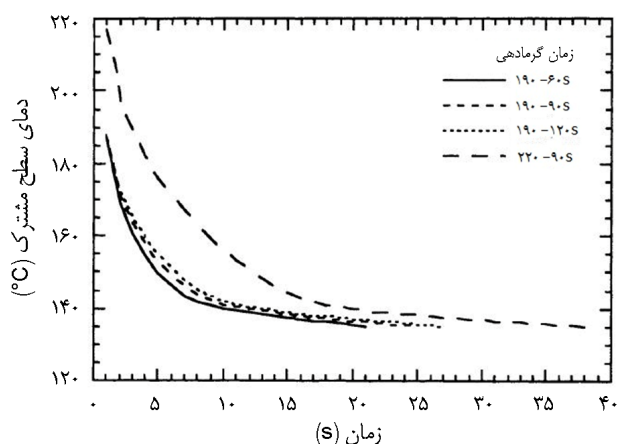
Chebbو همکاران فرایند جوش الکتریکی لوله های پلی اتیلنی را به لحاظ عددی و تجربی [۲۳] مطالعه کردند. این کار با فراهم کردن ابزارهای مطالعه تجربی و سه بعدی به روش اجزای محدود دارای قابلیت تولید و بازسازی قسمت عمده پدیده رخ داده در حین فرایند جوش الکتریکی، انجام شد. نسخه ویژه ای از نرم افزار شبیه سازی مدل سه بعدی اجزای محدود، ایجاد شد تا به کمک آن عوامل دخیل در ساختار اتصالات همچون خواص گرمایی پلی اتیلن و تنظیمات الکتریکی و هندسی در نظر گرفته شوند. از دیدگاه عددی، یک شبکه (Mesh) به خوبی ساده شده و بسیار ناهمسانگرد مناسب اعمال شد تا به خوبی شرایط تماس بین منبع گرمایی و پلی اتیلن را که رسانندگی گرمایی کمی دارد و به تبع آن گرادیان های دمایی زیادی ایجاد می کند، مشخص و ضبط کند. نتایج محاسبه شده با داده های تجربی مقایسه شدند و سازگاری بسیار خوبی در شرایط دمایی و توزیع شکست فاز مایع به دست آمد.

نتیجه گیری

اثر عواملی چون دما، زمان همجوشی و خنک کاری، فشار مذاب و تغییرات استحکام که در حین چرخه جوش الکتریکی پلیمرها اتفاق می افتند، با دیدگاه عمده نفوذ درشت مولکولی مرور و بازبینی شد. پیشینه ها بیانگر توافق خوب و جامعی در موضوع چگونگی اثر زمان جوش بر دما و فشار مذاب در سطح مشترک جوش هستند و اینکه چگونه استحکام محل اتصال که در زمان خنک شدن ارزیابی می شود، با افزایش زمان همجوشی با پیوندهای مولکولی مستحکم بهبود می یابد. فرایند جوش الکتریکی پلیمرها بر اساس

دو اندیشه برای این موضوع وجود داشت: تحلیل میکروسکوپی رفتار زنجیر پلیمر و تحلیل ماکروسکوپی ویژگی های توده پلیمر در مدت جوشکاری. تحلیل میکروسکوپی بر پایه نظریه خزش گرمایی زنجیر (reptation) ارائه شده از سوی De Gennes بوده و به طور گسترده با هر دو روش های تحلیلی و تجربی شرح داده شده است. تحلیل های ماکروسکوپی، به طور تجربی استحکام را به عوامل مهم دمای فرایند ارتباط می دهند، اما اشاره ای به رفتار زنجیرهای پلیمری ندارند. مطالعه آن ها در پی ترکیب این دو سطح با استفاده از نظریه مزبور بود. نتایج مدل جدید روشی برای پیش بینی استحکام بود که خواص مواد پایه و سازنده را همچون شرایط مهندسی تحمیل شده بر فرایند جوشکاری واقعی در نظر می گرفت. نتایج نشان داد، مدل در پیش بینی گرایش ها و اهداف کلی کارا بوده است. این موضوع بر اهمیت آزمایش آثار انتقال گرما در هر فرایند جوشکاری پلیمر می افزود. شکل ۸ نشان می دهد، چگونه دماهای متوسط بالاتر منحنی خنک کاری، سرعت نفوذ زنجیر پلیمر و کیفیت جوش حاصل را بهبود می دهند.

تحلیل اثر فضای خالی ایجاد شده میان لوله پلیمری و اتصال دهنده در فرایند جوش الکتریکی را ریاحی و همکاران [۲۱] انجام دادند. تماس گرمایی باعث می شود تا انرژی گرمایی حاصل از سیم جوش در پلیمر توزیع شود و حوضچه مذاب پلیمری را در سطح مشترک همجوشی ایجاد کند. مقدار انرژی ورودی که به درستی مشخص و کاملاً کنترل شده، به همراه رسانندگی گرمایی کم پلیمر، کمک می کند تا لوله و اتصال دهنده، مذاب پلیمر را دربرگیرند. با گرمایش بیشتر حوضچه، مقدار مذاب پلیمری افزایش می یابد تا فشار مذاب را به عنوان عامل اصلی ایجاد پیوند در پلیمرها فراهم سازد. نواحی سرد نیز در این میان نقش بسزایی دارند، چرا که همچون سدی مانع



شکل ۸- منحنی دمای سطح مشترک در برابر زمان برای چند ترکیب زمان گرمادهی و دمای گرم کن [۲۰].

اعمال فشار داخلی در سطح مشترک جوش در مدت آزمون فشار در دماهای ۲۰ و ۸۰°C که خواص مهم پلیمرها، از جمله حداقل استحکام لازم و مقاومت در برابر خزش را محک می‌زنند، تخریب نمی‌شوند. در صورت بروز نقص در اتصال جوش الکتریکی خوب، نوع شکست چقرمه و انعطاف‌پذیر است و شکست از محل سطح مشترک لوله و اتصال دور خواهد بود. بروز رفتار خوب و مقاوم از محل اتصال یافته، تضمین‌کننده عملکرد میدانی خوب است، کمالینکه هم اکنون این بازخورد مثبت ضامن توسعه روزافزون استفاده از اتصالات جوش الکتریکی در شبکه‌های لوله‌های زیر فشار پلیمری است.

مراجع

- Bowman J., A Review of the Electrofusion Joining Process for Polyethylene Pipe Systems, *J. Polym. Eng. Sci.*, **37**, 674-691, 1997.
- Stokes V.K., Joining Methods for Plastics and Plastic Composites: An Overview, *J. Polym. Eng. Sci.*, **29**, 1310-1324, 1989.
- Vandeput M., Criteria for Fusion Joints, A General Overview, *10th Plast. Fuel Gas Rpe. Symposium*, Arlington, 66, 1987.
- Stuart J.M., Phelps B., and Rice N.L., Fusion Welding of Polyethylene Pipe Using an Inductive Heating Method, *Proceeding The Use of Plastics and Rubber in Water and Effluents*, London, 31 and 1, The Plastic and Rubber Institute, February 1982.
- Tight T., Smart Heat Induction Fusion Joining of Polyethylene Gas Pipe-Results of GRI Sponsored Project, *Plastics Pipes VIII 1992, Conference Proceeding Eindhoven*, Paper E 1/3, 9, London, 21-24 September 1992.
- Ewing L. and Maine L., The Electrofusion of PE Gas Pipe Systems in British Gas, *Proceedings of 8th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, Arlington, 57, 1983.
- Radozowski T., Shahnoshi M., and Zamanzadeh S.E., *Handbook of Polyethylene Pipe (Persian)*, Avand Plast Kerman Co, Dariche No, Tehran, 1-594, 2013.
- Atkinson J.R. and Ward I.M., The Joining of Biaxially Oriented Polyethylene Pipes, *J. Polym. Eng. Sci.*, **29**, 1638-1641, 1989.
- Nishimura H., Nakashiba A., Kawakami R., and Inoqu F., Evaluation of Polybutene Electrofusion Joint Performance, *J. Polym. Compos.*, **14**, 473-480, 1993.
- Chen H., Scavuzzo R.J., and Srivatsan T.S., Influence of Joining on the Fatigue and Fracture Behavior of High Density Polyethylene Pipe, *J. Mater. Eng.*, **6**, 473-480, 1997.
- Mehrabi H.A. and Bowman J., Electrofusion Welding of Cross-Linked Polyethylene Pipes, *Iran. Polym. J.*, **6**, 195-203, 1997.
- Higuchi Y., Nishimura H., Inoqu F., Ishikawa T., and Miyaki S., Investigation of Appropriate Cooling Times for Electrofusion Jointing of PE Pipes for Gas Distribution, *J. Polym. Eng. Sci.*, **42**, 382-394, 2002.
- Navidfamili M.H., Mortezaei M., and Shaye A., Studying the Effective Parameters on Welding of Polyethylene Joints (*Persian*), *J. Polym. Sci. Technol.*, **3**, 147-156, 2003.
- Shi J., Zheng J., Guo W., and Qin Y., Defects Classification and Failure Modes of Electrofusion Joint for Connecting Polyethylene Pipes, *J. Appl. Polym. Sci.*, **124**, 4070-4080, 2012.
- Tayefi P., Beck B.M.S., and Tomlinson R.A., Fatigue Failure of Polyethylene Electrofusion Joints Subject to Contamination, Fracture, Fatigue, Failure, and Damage Evolution, *Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, United Kingdom, 197-202, 2014.
- Abolabasi F., Studying Effects of Circumference Conditions on Mechanical Strength of Electrofusion Welding in PE Pipes, *First National Festival of Oil and Gas and Petrochemical*, Mahshahr, 1-5, 27 February, 2014.
- Abolabasi F., Nazarimarvan M., and Rezavand S.A., Study-

- ing of UV Effect on Decohesion and Bending Strength of Electrofusion Welding in PE Pipes for Gas, *Second Scientific and Engineering Conference of Process*, Tehran, 1-7, 22 May, 2014.
18. Araqi A., Akhbarizadeh A., and Paydar M.H., Studying Effects of Different Parameters on Strength of PE Pipes Welded with Electrofusion and Butt fusion, *J. Adv. Des. Manufact. Technol. (Persian)*, **4**, 9-20, 2015.
19. Fujikake M., Fukumura M., and Kitao K., Analysis of the Electrofusion Joining Process in Polyethylene Gas Piping Systems, *J. Comput. Struct.*, **64**, 939-948, 1997.
20. Ezekoye O.A., Lowman C.D., Fahey M.T., and Hulmelow A.G., Polymer Weld Strength Predictions Using a Thermal and Polymer Chain Diffusion Analysis, *J. Polym. Eng. Sci.*, **38**, 976-991, 1998.
21. Riahi M., Arab H., and Faraji Ghanati M., Impact Analysis of Clearance Occurring Between Polymeric Pipe and Connector in the Process of Electrofusion (EF) Weldment of Pipes, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, **63**, 329-335, 2012.
22. Tillier Y., Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., and Gueugnaud D., Electrofusion Welding Process Optimization Using a Coupled Numerical and Experimental Approach, *Int. J. Polym. Proc.*, **5**, 566-573, 2015.
23. Chebbo Z., Vincent M., Boujlal A., Gueugnaud D., and Tillier Y., Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes, *J. Polym. Eng. Sci.*, **55**, 123-131, 2015.