

Review of effective factors in electro fusion welding process of polymer pipes

Pedram Malaekheh*¹

Mashhad- Jahad Zamzam Plastic Industries Co- Laboratory Unit-P.B. 91735-464

Abstract

Among the techniques for joining of polymer pipes, there is electro fusion and its special fittings. In electro fusion, polymer pipes and fittings are joined together through wires that are implanted in their structures. The main difference between common heat fusion and electro fusion is, in how heat transferred. In heat fusion, a heating device is used to melting pipe and polymer fitting interfaces, but in electro fusion, that is internal and melted through a conductive substance inside the weld interface or melted by a conductive polymer. Heat is produced through contacting of electric current to conductive materials that they implanted in fittings. In order to have desirable materials and effective products, design and installation is based on proper joints that they've passed good welding conditions. Methods of welding and joining, are different depends on parameters such as the type of polymer used in the pipe, polymer structural changes, requirements of interior or external pressure of pipe, decreasing leakage, prohibition of strokes and longitudinal impact loads, performance and operation conditions, needs of construction and installation operations, and types of products that they have to join to each other. In this paper survey of electro fusion process in strength dimension, parameters that affecting joints integrity and stability, from sight of mechanisms that related to macromolecular scale of joint formation, diffusion of molecules in polymer structures, and formation or rupture of chemical bonds through different experimental and computational methods that researchers suggested, have reviewed.

Key Words:

Electro fusion, Polymer Pipe, Molecular Diffusion, Joint, Strength

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

مرور عوامل موثر در فرآیند جوش الکتریکی لوله های پلیمری

* پدرام ملائکه

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

چکیده

از جمله روش های اتصال لوله های پلیمری، جوش الکتریکی، با اتصالات مخصوص به آن است. در جوش الکتریکی، لوله ها و اتصالات پلیمری با استفاده از سیم های تعبیه شده در ساختار آن ها به یکدیگر اتصال می یابند. تفاوت اصلی بین جوش گرمایی متعارف با جوش الکتریکی، در نحوه انتقال حرارت است. در جوش گرمایی از یک ابزار گرم کننده برای گداخت سطوح لوله و اتصال پلیمری استفاده می شود لیکن در جوش الکتریکی که داخلی است، توسط یک رسانا درون سطح اتصال جوش، و یا بوسیله پلیمر رسانا گرم می شود. حرارت با اتصال برق به مواد رسانای قرار گرفته در اتصالات بوجود می آید. برای دسترسی به موادی مطلوب و محصولاتی پربازده، طراحی و نصب، بر پایه اتصالات مناسبی استوار است که شرایط جوشکاری خوبی را گذرانده اند. روش های جوش و اتصال، بسته به عواملی همچون نوع پلیمر بکار رفته در لوله، تغییرات ساختاری پلیمر، الزامات فشار داخلی یا خارجی لوله، کاهش ناشی، ممانعت از تکان ها و بارهای ضربه ای طولی، شرایط کاربردی و عملیاتی، نیازمندی های عملیات ساخت و نصب و نوع محصولاتی که می بایست جوش داده شوند، متغیر هستند. در این مقاله بررسی فرآیند جوش الکتریکی در بعد استحکام، عوامل موثر در اتصال یکنواخت و پایدار از دیدگاه سازوکارهای تشکیل اتصال در مقیاس درشت مولکولی، نفوذ مولکولی در ساختار پلیمرها و تشکیل یا گسست پیوندهای شیمیایی از طریق روش های متفاوت تجربی و محاسباتی ارائه شده از سوی پژوهشگران مرور گردیده است.

کلمات کلیدی:

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

مقدمه

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

pedrammalaekhe@yahoo.com

در موارد زیادی از کاربرد پلیمرها، اتصالات جوش الکتریکی درون سازه یا محصول وجود دارد که استحکام دراز مدت، یکپارچگی و بدون نقص بودن سازه یا محصول؛ به استحکام و مقاومت آنها وابسته می باشد. بنابراین آگاهی از اینکه چگونه این اتصالات جوش الکتریکی استحکام خود را بدست می آورند، ارزشمند خواهد بود. این موضوع می تواند به انتخاب مواد اولیه و شرایط مناسب فرآیند اتصال دهی، برای دستیابی به استحکام دراز مدت اتصالات جوش الکتریکی یاری رساند. در نتیجه سازه یا محصول پلیمری یکپارچگی خود را برای برآورد عمر طراحی مطلوب حفظ خواهد کرد [۱].

جوش الکتریکی به عنوان جوش القایی مقاومتی نیز شناخته می شود. بدلیل کاربرد بسیار زیاد جوش الکتریکی در اتصال دهی لوله های تحت فشار و اتصالاتی از جنس پلی اتیلن، قسمت عمده سوابق تحقیق به این پلیمر پرداخته اند [۲]. سه فناوری کاملاً متفاوت در ساخت اتصالات جوش الکتریکی برای اتصال دهی الکتروگداختی لوله های پلیمری و به خصوص لوله های پلی اتیلن، با در نظر داشتن دیدگاه نفوذ مولکولهای پلیمر، مورد کاوش قرار گرفته اند. اولین آنها جفت کننده های جوش الکتریکی ساخته شده از رزین پلی اتیلن رسانا و با قابلیت بازیافت و وصول حرارت بوده است [۳]. فناوری بعدی اتصالات جوش الکتریکی که بصورت طرحی مفهومی ارائه شد، از یک سیم فلزی قفس مانند بهره می برد که درون اتصال جاسازی و یا تزریق شده بود و در وجه مشترک گداخت قرار گرفته بود [۴]. در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی یک شرکت آمریکایی آزمایشات میدانی را با تعداد محدودی از اتصالات که از فناوری جریان القایی بهره می بردند، انجام داد [۵].

روش سوم و نهایی که قدیمی ترین آنها می باشد و به عنوان طرحی مفهومی برای اتصالات جوش الکتریکی لوله مطرح شد، از سیم های دارای مقاومت، که جاسازی و یا تزریق شده بودند و به عنوان منبع حرارت عمل می کردند، بهره می برد [۶].

بحث

جفت کننده های جوش الکتریکی حاوی یک المان حرارتی مارپیچ هستند. در اثر اتصال به جریان الکتریکی، گرمای لازم برای ذوب شدن دوسر لوله ها و فضای داخلی جفت کننده که روی آنها قرار گرفته است، فراهم می شود. این

جفت کننده ها، اتصالاتی 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 حرارت در آن ها است [۷].

جوش الکتریکی از دیدگاه نفوذ درشت مولکولی در ساختار پلیمرها

تعداد پنج رخداد مشخص در مرحله اول یا نهفتگی فرآیند جوش و اتصال دهی سطوح پلیمرها، از دیدگاه نفوذ درشت مولکولی شناسایی شده است: ۱- نوآرایی سطوح ۲- نزدیکی سطوح ۳- مرطوب شدن سطوح ۴- نفوذ و ۵- آرایش تصادفی که با یکدیگر به عنوان مرحله نهفتگی یاد می شوند، چرا که تغییرات ایجاد شده قابل رویت نیستند.

طی مرحله نهفتگی، انرژی الکتریکی تامین شده برای سیم پیچ مقاوم حرارتی، دمای سیم ها و پلیمر نزدیک آنها را بالا می برد. 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. نهایتاً مرطوب شدن دو سطح فراهم آمده شامل سطوح خارجی لوله پلیمری و قطر داخلی اتصال که برای ایجاد پیوند بهتر عاری از هرگونه آلودگی گردیده اند، اتفاق می افتد. طی این مرحله تعداد محدودی نفوذ مولکولی در امتداد سطوح رخ می دهد اما احتمالاً با عمق محدود می گردد و به اندازه ای نیست که به اتصال یک استحکام، قابل اندازه گیری بخشد [۱].

در مرحله بعد یعنی تشکیل اتصال و اختلاط، پیوند صورت پذیرفته، استحکام فزاینده و انعطاف پذیری را مطابق تصویر ۱ بدست می آورد که به دلیل افزایش نفوذ درشت مولکولی در امتداد سطح گداخت می باشد. پلیمری که در عرض سطوح نفوذ می کند در واقع زنجیره های کوچکی هستند که باعث ایجاد مواضع پل بندی برای اتصال جدید می شوند و بنابراین بصورت ذاتی به عنوان مولکول های اتصال دهنده در عرض اتصال عمل می کنند. کاربرد عبارت مولکول های اتصال دهنده در ساختار پلیمرها اساساً برای مولکول هایی است که ایجاد اتصال و پل بندی لایه های ضخیم بلورین در پلیمرهای نیمه بلورین عمده مثل پلی اتیلن را با انتقال بار از یک سطح ضخیم بلورین به طور مستقیم به سطح دیگری انجام می دهند [۱].

تصویر ۱- طرح کلی ارائه شده از فرآیند نفوذ درشت مولکولی در امتداد سطح گداخت [۱].

اتصالات جوش الکتریکی، استحکام اولیه خود را زمانی بدست خواهند آورد، که عمق نفوذ زنجیره های کوچک نفوذ کننده از مقدار بحرانی و لازم که برای درگیر شدن زنجیره ها نیاز است، بیشتر باشد. با افزایش زمان گداخت دمای سطح مشترک شروع به بالا رفتن می کند تا نفوذ بیشتر را فراهم کند و عمق نفوذ و متعاقباً استحکام و انعطاف پذیری اتصال جوش الکتریکی را افزایش دهد. مسافت عمق نفوذ متوسط زنجیره ها در امتداد سطح گداخت، سختی و استحکام اتصال دهی را تعیین می کند. مسافت عمق نفوذ متوسط زنجیره ها با جرم مولکولی پلیمر نسبت عکس دارد و بنابراین انواع با جرم مولکولی پایین با سرعت بیشتری در امتداد سطح مشترک نفوذ می کنند و باعث ایجاد نقایص شکننده در زمان های گداخت کم می شوند [۱،۲].

اما وابستگی نفوذ به زمان به گونه ای است که در دماهای پایین، زمان زیادی نیاز خواهد بود تا نفوذ چشم گیری از گونه های با جرم مولکولی بالا را شاهد باشیم. از این رو تاثیر دما برای بالا بردن میزان نفوذ بسیار حیاتی می باشد. در پایان مرحله تثبیت اتصال دهی، تمرکز و عمق زنجیره های در هم نفوذ کرده، به گونه ای است که استحکام سطح مشترک از استحکام پلیمر بین سیم های جوش فراتر می رود. استحکام اتصال دهی سپس با توجه به زمان گداخت تثبیت می شود. نقیصه شکست ترد در آزمون لایه برداری مشاهده شده است، که طی آن لوله از اتصال جفت کننده در امتداد صفحه فاصله زیادی گرفته و تنها میزان مقاومت موجود مربوطه به سیم های حرارت دهنده بوده و از جانب اتصال نبوده است. از آنجا که این سیم ها می توانند ۲۰ تا ۴۵٪ از صفحه را اشغال کنند، می توان نتیجه گرفت که سطح مشترک لوله و اتصال نیازی به دستیابی به مقاومت کامل رزین توده ندارد. بنابراین محتمل خواهد بود که میزان نفوذ درشت مولکولی در امتداد سطح مشترک لوله و اتصال، تراکم پیوند و اتصال مولکولی را افزایش دهد اما میزان این افزایش کمتر از آن است که در توده پلیمر یافت می شود [۲،۳].

مرحله پایانی خنک کاری در اتصال دهی به روش جوش الکتریکی برای فراهم آوردن یک اتصال خوب و مستحکم حیاتی می باشد. زنجیره هایی که در امتداد سطح مشترک نفوذ کرده اند، باید اکنون توسط یک قسمت و یا تمام کل زنجیره های شرکت کننده در سطوح ضخیم بلورین طرف دیگر سطح اتصال، به یکدیگر متصل شوند. این موضوع توسط تشکیل

اتصالات پل مانند به هم گره خورده مولکولی و قفل شدن آنها به سوی دیگر اتصال انجام می شود که طی آن، اتصال چقرمگی و استحکام خود را بدست می آورد. مولکول های اتصالات پل مانند، متبلور شده و به سمت دیگر متصل می شوند و بارها را در عرض اتصال منتقل می کنند؛ تا امکان تشکیل یک سامانه لوله پلیمری تحت فشار کاملاً یکپارچه فراهم شود [۳].

چنین سامانه های لوله پلیمری و به خصوص نوع پلی اتیلنی آن برای تحمل بارهایی در مدت زمان تا ۵۰ سال طراحی شده اند و این استحکام درازمدت را مولکول های اتصالات پل مانند فراهم می کنند. زمانی که فرآیند تبلور کامل شود عامل بالقوه ای برای استحکام وجود خواهد داشت. تصویر ۲ مقطع اتصال به روش جوش الکتریکی را نشان می دهد.

تصویر ۲-مقطع یک اتصال جوش الکتریکی [۷]

سیر تحولات روش های اتصال دهی پلیمرها

استوکز (Stokes) [۲] مرور جامعی بر روش های اتصال دهی پلاستیک ها و کامپوزیت های آنها شامل رزین های تمیز و بکر، آنهایی که شامل مقادیر کم اصلاح کننده های ضربه یا تاخیر اندازنده های اشتعال هستند، انواع کامپوزیت های پر شده با ذرات ریز، کامپوزیت های پر شده با قطعات خرد شده لیف، لیف مات پیوسته اتفاقی، بافت سبک مات و لیف یک سو را انجام داد. کار او با تاکید بر جوشکاری الکتریکی مواد گرمانرم انجام شد و روش های جوشکاری گوناگون پلیمرها با یکدیگر، به همراه فوائد و مضرات آنها به طور خلاصه ذکر شده و توضیح داده شدند. حاصل کار وی یک راهنما برای سابقه تحقیق جامع در این خصوص را فراهم ساخت.

عملکرد جوش الکتریکی در اتصال دهی لوله هایی ساخته شده از پلیمرهای متفاوت

وارد و اتکینسون (Ward & Atkinson) [۸] در مورد اتصال دهی لوله های پلی اتیلن جهت گرفته در دو محور تحقیق کردند. این محصولات از جور پلیمر پلی اتیلن سنگین توسط کشیده شدن در راستای محوری با یک قطر تقریباً ثابت تهیه شده بودند که سفتی محوری را افزایش داده، خواص مرزی را بهبود بخشیده و مقاومتی عالی نسبت به عوامل شیمیایی داشتند. بافت بسیار ریز الیافی این نوع لوله ها هنگامی که در معرض تنش فشاری عرضی قرار می گرفت، گرایش به

از هم جداشدگی در راستای طولی داشت. این تمایل به از هم گسیختگی به طور چشمگیری توسط کاربرد کوپلیمرهای پلی اتیلن کاهش می یافت. این لوله ها نشان دادند که روش جوش الکتریکی، اتصالاتی با چنان مقاومتی تولید می کند که در آزمون های کشش، نقیصه همیشه در اتصال و نه در محل وجوه مشترک، اتفاق می افتد. ریز بینی نوری و الکترونی، نواحی متفاوتی را در جوش ها آشکار کردند. شرایط جوشکاری بهینه تعیین شده و محل های اتصال در یک آزمون لهیدگی استاندارد مردود نشدند. تصویر ۳ نمونه های آماده شده در تحقیق آنها را نشان می دهد.

تصویر ۳- آماده سازی نمونه های آزمون کشش الف) نمونه اتصال تهیه شده ب) آزمون تهیه شده [۸]

نیشی مورا (Nishimura) و همکارانش [۹] روش های ارزیابی اتصال دهی پلی بوتن با جوش الکتریکی و نتایج سنجش استحکام مکانیکی برای چنین اتصالاتی را توضیح دادند. دلیل انتخاب آنها خواص فوق العاده این پلیمر به خصوص مقاومت در برابر تنش ترک، شکستگی در اثر خزش در دماهای بالا و خواص حرارتی متفاوت آن بود. آنها به یک روش تعیین شرایط استاندارد ذوب بر مبنای رابطه بین زمان حرارت دهی و استحکام کشش پلیمر اشاره کردند. طی تحقیق آنها مشخص گردید پلی بوتن نسبت به سایر پلیمرها، احتیاج به توان تامین شده کمتری به ازاء واحد سطح ذوب، برای جوشی مناسب دارد. علاوه بر آن نیاز اتصال دهی به روش جوش الکتریکی به ناحیه سرد، تأیید شد.

تأثیر روش اتصال دهی بر روی شکستگی و خستگی مکانیکی لوله های پلی اتیلن سنگین (HDPE) بوسیله چن (Chen) و همکارانش [۱۰] مورد تحقیق قرار گرفت. بر خلاف لوله های سنتی و مرسوم پلی وینیل کلراید (PVC)، لوله های پلی اتیلن سنگین با استفاده از حلال ها به یکدیگر متصل نمی شوند. برای انجام آزمون لوله های پلی اتیلن سنگین با فناوری های جوش لب به لب و الکتریکی به یکدیگر متصل شدند. مقاومت خمش خستگی در شرایط عمر باقیمانده تا شکست، برای لوله های تحت فشار یک مقدار معین داشت و از لوله های بدون فشار بالاتر بود. مقاومت خستگی برای نمونه های جوش داده شده به روش لب به لب بیشتر از نمونه های روش جوش الکتریکی بود. لوله پلی اتیلن ساده و بدون جوش نیز مقاومت خمش خستگی بیشتری از همتای خود که با روش جوش لب به لب متصل شده بود، دارا بود. دلیل اختلاف ها در عمر خمش خستگی مشاهده شد و اختلاف های ذاتی در خصوصیات شکست نمایان شدند.

محرابی و بومن (Mehrabi & Bowman) [۱۱] جوشکاری الکتریکی لوله های پلی اتیلن شبکه ای شده را بررسی کردند. آنها آزمون هایی انجام دادند تا مشخص کنند که جفت کننده های جوش الکتریکی می توانند برای اتصال دادن لوله های پلی اتیلن شبکه ای شده بکار روند. دو نوع از لوله های پلی اتیلن در معرض دز های متفاوت (5-200 kGy) قرار داده شده و به یکدیگر متصل شدند. بر اساس نتایج تجربی محتوای ژل با مقدار دز تغییر می کرد (جدول ۱). تمامی محل های اتصال داده شده آزمون لهیدگی را، صرف نظر از محتوای ژل لوله های در معرض تابش گذراندند. همچنین مدت ۱۷۰ ساعت در معرض بار فرسایشی بودن را سپری کردند که یک شاخص برای استحکام اتصال منطقی بود. نتایج لوله های پلی اتیلن شبکه ای شده، انعطاف پذیری اتصال دهی به روش جوش الکتریکی را نمایان کرد و مجدداً نشان داد که فرآیند قادر به ایجاد اتصال بین یک محدوده وسیعی از رزین های پلی اتیلن می باشد.

جدول ۱- محتوای ژل به عنوان تابعی از دز برای لوله های پلی اتیلن قرار گرفته در معرض تابش [۱۱]

تأثیر تغییر عوامل موثر بر نتایج جوش الکتریکی پلیمرها در عملکرد آن و مقایسه با سایر روش ها

هیگوچی (Higuchi) و همکارانش [۱۲] زمان های خنک کاری مناسب برای جوش الکتریکی لوله های پلی اتیلن توزیع سوخت های گازی را بررسی کردند. مشاهدات آنها شامل تغییر شکل ناحیه مذاب، درجه تبلور، جهت گیری مولکولی، استحکام خزشی و خستگی کشش برای عملکرد دراز مدت پلیمر بود. تنها یک تفاوت جزئی در ساختار مولکولی مثل درجه بلورینگی مشاهده شد درحالیکه تفاوت های واضح و مشخصی در تغییر شکل، ریخت شناسی و استحکام خزشی کشش مشاهده گردید. تصویر ۴ نشان می دهد که اندازه قسمت های بلورین پلیمر (مناطق سفید رنگ) از قسمت الف تا پ با زیاد شدن زمان خنک کاری افزایش یافته است. بر پایه این نتایج تأثیر یک منحنی دما در حین فرآیند خنک کاری بر روی ناحیه مذاب شبیه سازی شد و نشان داد که حالت ناحیه ذوب زمانی که لوله در زیر خاک مدفون شده باشد، فاکتور اصلی تأثیرگذار بر روی استحکام خزشی کشش و به عبارتی عملکرد دراز مدت است. این تحلیل ها معیارهای انتخاب یک زمان خنک کاری مناسب را فراهم می کند.

تصویر ۴- مشاهدات میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM [۱۲]

نویدفامیلی (Navidfamili) و همکارانش [۱۳] موضوع تحقیق خود را بررسی عوامل موثر 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 یک بعدی تصویر ۵ نشان داده شده است که دریافتند توان الکتریکی زیاد موجب ذوب مواد پلیمری در زمان کوتاه شده و این امر عدم امکان کنترل زمان جوش، احتمال سوختن مواد پلیمری و عدم یکنواختی، نشستی و تغییر شکل لوله را به دنبال دارد. همچنین استفاده از توان الکتریکی پایین، علاوه بر نیاز به مدت زمان زیاد، حرارت بیشتری را هدر داده و جوش به صورت ناقص انجام می گردد. در توان الکتریکی ثابت با افزایش زمان جوش، استحکام پیوند افزایش می یابد ولی افزایش بیش از حد زمان جوش موجب ایجاد نشستی و تغییر شکل لوله می شود.

تصویر ۵- مدل یک بعدی جوش الکتریکی [۱۳]

بررسی عیوب و نقایص جوش الکتریکی پلیمرها

شی (Shi) و همکاران [۱۴] طبقه بندی عیوب و حالت های شکست جوش الکتریکی را برای لوله های پلی اتیلن متصل به یکدیگر مشخص کردند. آنها عیوب اتصالات جوش الکتریکی را به ۴ گروه دسته بندی کردند: سطح مشترک ذوب ضعیف، جوش بیش از اندازه و تخریب پلیمر، فضاهای خالی، حفرات و بدشکلی ساختاری، که دلایل ایجاد و تشکیل این عیوب را با جزئیات بررسی کردند. نتایج آزمون ها حاکی از آن بود که ۳ حالت اصلی شکست اتصالات جوش الکتریکی تحت فشار داخلی عبارت از: ترک خوردگی از طریق سطح مشترک ذوب پلیمرها، در سرتاسر اتصال و در حد واصل سیم های مسی می باشد.

طایفی (Tayefi) و همکاران [۱۵] نقایص منتج از خستگی و فرسودگی جوش الکتریکی که در معرض آلودگی قرار گرفته بود را مطالعه نمودند. پلی اتیلن به عنوان یک پلیمر قوی و قابل اطمینان با مقاومت بهتر در برابر رشد ترک در پلیمرها نسبت به پلی وینیل کلراید، مدنظر قرار گرفت. آزمون های فرسایشی گسترده ارتباط بین خرابی محل اتصال و فشار دینامیک

تجربه شده در سیستم های توزیع را نشان داد. یک تحلیل نقصیه و شکست نهایی اتصالات با استفاده از روش های غیرمخرب مافوق صوت، مسیرهای منجر به شکست و ایجاد نقص در اتصالات را چنان که در تصویر ۶ آمده است، نشان داد.

تصویر ۶- مثال هایی از اتصال دهی نامناسب با جوش الکتریکی، الف) عدم لایه برداری سطح لوله در محل اتصال، ب) لایه برداری بیش از اندازه سطح لوله در محل اتصال، پ) لایه برداری ناکافی سطح لوله در محل اتصال، ت) عدم قراردهی مناسب لوله در جفت کننده [۱۶]

تأثیر عوامل محیطی بر جوش الکتریکی پلیمرها

بررسی تأثیر عوامل محیطی بر استحکام جوش الکتریکی لوله های پلی اتیلن بوسیله ابوالعباسی (Abolabasi) [۱۶] انجام گرفت. نتایج وی نشان داد، جوشکاری در دمای بالای محیط احتمال ایجاد جوش با استحکام مکانیکی نامطلوب در مقاطع پلیمری را افزایش می دهد لیکن به معنای قطعی بوجود آمدن جوش با استحکام نامناسب نخواهد بود. استحکام اتصال لوله های تحت اشعه فرابنفش به میزان ۷۰۰ ساعت و بیشتر علی رغم استفاده از کرین سیاه و یا رنگدانه ها به عنوان محافظت کننده در تولید آنها نامطلوب بوده است که دلیل آن اکسیداسیون و شکسته شدن زنجیره های مولکولی پلیمر بوده است. همچنین سایر نمونه هایی که به بدلیل تمیزکاری نامناسب محل اتصال آنها آغشته به ذرات خاک بوده است به جهت عدم امکان تماس مناسب و تشکیل پیوندهای مولکولی موثر دارای استحکام مکانیکی نامطلوب بودند.

ابوالعباسی (Abolabasi) و همکاران وی [۱۷] در تحقیقی دیگر تأثیر اشعه فرابنفش بر جوش الکتریکی را بررسی نمودند. در این تحقیق، آنها ابتدا اقدام به جوش الکتریکی لوله های پلی اتیلن که در مدت زمان های متفاوت تحت تابش اشعه فرابنفش قرار گرفته بودند، نموده و سپس استحکام جوش اتصالات حاصل را با استفاده از آزمایشات مورد بررسی قرار دادند. هدف بررسی تأثیر هوازگی پلیمر بود که منجر به شکست پیوندهای شیمیایی آن می گردد. نتایج نشان دادند که استحکام با افزایش مدت زمان تابش اشعه فرابنفش کاهش می یابد و دلیل آن، اکسیداسیون 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 میزان تابش می باشد.

جدول ۲- شکست پیوندهای پلیمری توسط پرتوهای فرابنفش [۱۷]

بررسی تاثیر فاکتورهای مختلف در استحکام جوش الکتریکی پلیمرها

عراقی (Araqi) و همکارانش [۱۸] بررسی تاثیر فاکتورهای مختلف در استحکام لوله های پلی اتیلن جوشکاری شده به روش الکتریکی را انجام دادند. در تحقیق آنها تاثیر عوامل موثر بر جوشکاری با در نظر گرفتن پیوندهای دوگانه کربنی پلیمر مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور بررسی سطح با کمک ریزبینی نوری میدان دید نزدیک (NFSPM) انجام گرفت و بررسی جوش با کمک رادیوگرافی (RT) انجام شد. نتایج آزمون های کشش مطابق تصویر ۷ نشان داد که جوش ها در اثر تغییر شرایط استاندارد، استحکام بسیار ضعیفی از خود نشان داده و محل سیم ها در اتصال بعد از جوشکاری دچار اعوجاج می شوند.

تصویر ۷- منحنی نیرو بر حسب جابجایی مربوط به نمونه ها [۱۸]

مدلسازی، شبیه سازی و بهینه سازی فرآیند جوش الکتریکی پلیمرها

فرآیند جوشکاری و اتصال دهی به روش الکتریکی برای سیستم های لوله پلیمری توسط بومن (Bowman) [۱] مرور گردید. وی این کار را از طریق بررسی سوابق تجربی و تعدادی شبیه سازی های کامپیوتری مرتبط با دما و تغییرات فشار مذاب حین فرآیند ذوب انجام داد. بررسی های او منجر به شناسایی چهار مرحله کلیدی در فرآیند جوش شد. همچنین در مبحث ساز و کارهای تشکیل اتصالات الکتروگداخت در دیدگاه درشت مولکولی پلیمرها و تشریح توسعه استحکام آنها چهار نظریه شامل چسبندگی، تماس ویسکوالاستیک، نفوذ و فرآیند جریان توضیح داده شدند. از این میان نظریه فرآیند جریان، به دلیل به عدم وجود جریان در ناحیه مذاب کنار گذاشته شد. علاوه بر این نظریه تماس ویسکوالاستیک نیز باید نادیده گرفته می شد، چرا که نیروهای واندروالسی تنها سطوح را به یکدیگر می چسبانند و به تنهایی قادر به توسعه میزان انعطاف پذیری در اتصال دهی خوب نیستند.

فوجی کاکه (Fujikake) و همکارانش [۱۹] با یک مدل محاسباتی، تحلیل فرآیند جوش الکتریکی در سیستم های لوله کشی پلیمری را مورد پژوهش قرار دادند. در کار آنها یک روش شبیه سازی برای فرآیند که در آن رفتار گرما مکانیکی جفت شدن در نظر گرفته شده بود، با به کار گیری کدهایی بر مبنای روش المان محدود، ایجاد گردید. با این روش پیشینه

توزیع فشار سطح واسط و دما به عنوان پارامترهایی که نقش بحرانی در کیفیت محل اتصال دارند، می توانست محاسبه گردد. در سطح مشترک اتصال، دما بایستی از دمای ذوب پلیمر فراتر می رفت، اما با در نظر گرفتن این موضوع که باعث تخریب پلیمر نگردد، همچنین فشار بایستی کنترل می شد تا به حدی نرسد که رزین مذاب از لبه اتصال دهنده جاری شود. در ابتدا نتایج رایانه ای با داده های تجربی، در مقیاس کوچک مقایسه شد و مطابقت خوبی مشاهده گردید، سپس روش در مقیاس بزرگ به کار برده شد و طراحی بهینه صورت پذیرفت که منجر به توسعه و ایجاد یک اتصال مورد اطمینان گردید.

پیش بینی استحکام جوش پلیمرها با استفاده از یک تحلیل نفوذ پلیمری زنجیره ای و حرارتی توسط ازه کویه (Ezekoye) و همکارانش [۲۰] مورد کاوش قرار داده شد. دو مکتب فکری برای این موضوع وجود داشت: تحلیل ریزبینی رفتار زنجیره پلیمر و تحلیل درشت بینی خصوصیات توده پلیمر در حین جوشکاری. تحلیل ریزبینی بر پایه نظریه reptation ارائه شده از سوی دی جنس (De Gennes) بوده و بطور مبسوط توسط هر دو روش های تحلیلی و تجربی شرح داده شده است. تحلیل های درشت بینی، بطور تجربی استحکام را به عوامل مهم دمایی فرآیند ارتباط می دهند، اما اشاره ای به رفتار زنجیره های پلیمری نمی کنند. مطالعه آنها در پی ترکیب این دو سطح با استفاده از نظریه مذکور بود. نتایج مدل جدید یک روش برای پیش بینی استحکام بود که خصوصیات مواد پایه ای و سازنده را همچون شرایط مهندسی تحمیل شده در یک فرآیند جوشکاری واقعی در نظر می گرفت. نتایج نشان داد که مدل در پیش بینی گرایشات و اهداف کلی کارا بوده است و این موضوع بر اهمیت آزمایش اثرات انتقال حرارتی در هر فرآیند جوشکاری پلیمری می افزود. تصویر ۸ نشان می دهد که چگونه دماهای متوسط بالاتر منحنی خنک کاری، نرخ نفوذ زنجیره ای پلیمر و کیفیت جوش نتیجه شده را بهبود می دهد.

تصویر ۸- منحنی دمای سطح مشترک در مقابل زمان برای چندین ترکیب زمان حرارت دهی و دمای گرمکن [۲۰]

تحلیل تاثیر فضای خالی که بین لوله پلیمری و اتصال دهنده در فرآیند جوش الکتریکی ایجاد می شود را ریاحی (Riahi) و همکارانش [۲۱] انجام دادند. تماس حرارتی باعث می شود تا انرژی گرمایی حاصل از سیم جوش در پلیمر توزیع شود و یک حوضچه مذاب پلیمری را در سطح مشترک گداخت ایجاد نماید. یک مقدار انرژی ورودی که به درستی مشخص و کاملاً کنترل شده، به همراه هدایت حرارتی پایین پلیمر، کمک می کند تا لوله و اتصال دهنده، مذاب پلیمر را در بر گیرند.

با گرمایش بیشتر حوضچه، میزان 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 خروج پلیمر مذاب می شوند. نتایج حاصل از مدل سازی با روش المان محدود اتصالات جوش الکتریکی با نتایج آزمایشات واقعی مقایسه شد. کیفیت مکانیکی قطعات جوش خورده از طریق انجام آزمون تنش اندازه گیری گردید.

بهینه سازی فرآیند جوش الکتریکی، با استفاده از یک روش بهم پیوسته عددی و تجربی کاری تحقیقاتی بود که تیلیر (Tillier) و همکاران [۲۲] انجام دادند. این مسئله به منظور کمک به درک منشاء تعدادی از عیوب مشخص شده و برای بهینه سازی و پیش بینی کیفیت جوشکاری صورت پذیرفت. مدل عددی آنها که یک شاخص کیفیت جوش را بر مبنای نفوذ مولکولی داخلی پلیمری محاسبه می کرد، قادر به پیش بینی خوب و منطقی این موضوع بود که آیا جوش اتفاق خواهد افتاد یا خیر، و بستگی به شرایط جوشکاری تحمیل شده داشت.

مطالعه فرآیند جوش الکتریکی لوله های پلی اتیلنی به لحاظ عددی و تجربی توسط چبو (Chebbo) و همکارانش [۲۳] انجام پذیرفت. مطالعه آنها با فراهم نمودن ابزارهای مطالعه تجربی و سه بعدی به روش المان محدود که قادر به تولید و بازسازی قسمت عمده پدیده اتفاق افتاده در حین یک فرآیند جوش الکتریکی بود، انجام شد. یک ویرایش مخصوص از نرم افزار شبیه سازی مدل سه بعدی المان محدود، ایجاد شد تا به کمک آن عوامل دخیل در ساختمان اتصالات همچون خصوصیات حرارتی 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 گردید تا به خوبی شرایط تماس بین منبع حرارتی و پلی اتیلن که هدایت حرارتی پایینی دارد و به تبع آن گرایان های دمایی بالایی ایجاد خواهد کرد را، 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 بدست آورده شد.

نتیجه گیری

تأثیر عواملی همچون دما، زمان گداخت 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 گردید. سوابق بیانگر توافقی خوب و جامع در

موضوع چگونگی تاثیر زمان جوش بر روی دما و فشار مذاب در سطح مشترک جوش هستند و اینکه چگونه استحکام محل اتصال که در زمان خنک شدن آن ارزیابی می شود، هنگامی که زمان گداخت افزایش می یابد، با پیوندهای مولکولی مستحکم بهبود می یابد. فرآیند جوش الکتریکی پلیمرها بر اساس ایجاد و توسعه استحکام محل اتصال با افزایش زمان گداخت، به چهار مرحله تقسیم می شود. برای تشکیل یک اتصال به روش جوش الکتریکی هیچ گونه حرکت و جابجایی مذاب پلیمر نیاز نیست، چرا که استحکام لازم توسط نفوذ مولکولی در عرض سطح مشترک حاصل می شود و بایستی شرایط یک نفوذ مولکولی خوب را فراهم نمود. اطمینان از کاربرد زمان گداخت مناسب پلیمر نیز حیاتی می باشد چرا که زمان های کوتاه منجر به ایجاد اتصالاتی ضعیف و شکننده شده و زمان بیش از اندازه نیز منجر به ایجاد تخریب و تضعیف پلیمر سطح مشترک گداخت می شود. اتصالات جوش الکتریکی که به درستی آماده سازی شده باشند از استحکام و یکپارچگی بالایی برخوردار هستند و در اثر قرار گرفتن در معرض اعمال فشار داخلی در سطح مشترک جوش در حین آزمون فشار در دماهای ۲۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد که خواص مهم پلیمرها از جمله حداقل استحکام مورد نیاز و مقاومت در برابر خزش را محک می زنند، تخریب نمی شوند. در صورت بروز نقیصه در یک اتصال جوش الکتریکی خوب، نوع شکست چقرمه و منعطف خواهد بود و شکست از محل سطح مشترک لوله و اتصال دور خواهد بود. بروز رفتار خوب و مقاوم از محل اتصال داده شده، تضمین کننده عملکرد میدانی خوب خواهد بود، کما اینکه هم اکنون این بازخورد مثبت ضامن توسعه روزافزون استفاده از اتصالات جوش الکتریکی در شبکه های لوله های تحت فشار پلیمری می باشد.

مراجع

- 1-Bowman J., A Review of the Electrofusion Joining Process for Polyethylene Pipe Systems, *J. Polym. Eng. Sci.*, **37**, 674-691, 1997.
- 2-Stokes V.K., Joining Methods for Plastics and Plastic Composites: An Overview, *J. Polym. Eng. Sci.*, **29**, 1310-1324, 1989.
- 3-Vandeput M., Criteria for Fusion Joints, a General Overview, *Tenth. Plastic. Fuel. Gas. Rpe. Symposium.*, Arlington, 66, 1987.
- 4-Stuart J.M., Phelps B., and Rice N.L., Fusion Welding of Polyethylene Pipe Using an Inductive Heating Method, *The Use of Plastics and Rubber in Water and Effluents*, London, 311, 1982.
- 5-Tight T., Smart Heat Induction Fusion Joining of Polyethylene Gas Pipe-Results of GRI Sponsored Project, *Plastics Pipes WZZ*, London, E 1 f 3, 1992.
- 6-Ewing L. and Maine L., The Electrofusion of PE Gas Pipe Systems in British Gas, *Roc. Eighth Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, Arlington, 57, 1983.
- 7-Radozowski T., Shahnoshi M., and Zamanzadeh S.E., *Handbook of Polyethylene Pipe (Persian)*, Avand Plast Kerman Co, Dariche No, Tehran, 1-594, 2013.
- 8-Atkinson J.R. and Ward I.M., The Joining of Biaxially Oriented Polyethylene Pipes, *J. Polym. Eng. Sci.*, **29**, 1638-1641, 1989.
- 9-Nishimura H., Nakashiba A., Kawakami R., and Inoqu F., Evaluation of Polybutene Electrofusion Joint Performance, *J. Polym. Compos.*, **14**, 473-480, 1993.
- 10- 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.
- 11-Mehrabi H. A., and Bowman J., Electrofusion Welding of Cross-Linked Polyethylene Pipes, *Iran. Polym. J.*, **6**, 195-203, 1997.
- 12-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.

- 13- Navidfamili M.H., Mortezaei M., and Shayeq A., Studying the Effective Parameters on Welding of Polyethylene Joints (Persian), *J. Polym. Sci. Technol.*, **3**, 147-156, 2003.
- 14- 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.
- 15-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.
- 16-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.
- 17-Abolabasi F., Nazarimarvian M., and Rezavand S.A., Studying 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 (Persian), *J. Adv. Design. Manuf. Technol.*, **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 Gueugnaut 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., Gueugnaut D., and Tillier Y., Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes, *J. Polym. Eng. Sci.*, **55**, 123-131, 2015.

جدول ۱- محتوای ژل به عنوان تابعی از دز برای لوله های پلی اتیلن قرار گرفته در معرض تابش [۱۱]

دز	پلی اتیلن دانسیته بالا HDPE			پلی اتیلن دانسیته متوسط MDPE		
	محتوای ژل (%)			محتوای ژل (%)		
	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

جدول ۲- شکست پیوندهای پلیمری توسط پرتوهای فرابنفش [۱۷]

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

تصویر ۱- طرح کلی ارائه شده از فرآیند نفوذ درشت مولکولی در امتداد سطح گداخت [۱].

تصویر ۲- مقطع یک اتصال جوش الکتریکی [۷]

تصویر ۳- آماده سازی نمونه های آزمون کشش الف) نمونه اتصال تهیه شده ب) آزمون تهیه شده [۸]

تصویر ۴- مشاهدات میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM [۱۲]

تصویر ۵- مدل یک بعدی جوش الکتریکی [۱۳]

تصویر ۶- مثال هایی از اتصال دهی نامناسب با جوش الکتریکی، الف) عدم لایه برداری سطح لوله در محل اتصال، ب) لایه برداری بیش از

اندازه سطح لوله در محل اتصال، پ) لایه برداری ناکافی سطح لوله در محل اتصال، ت) عدم قراردهی مناسب لوله در جفت کننده [۱۴]

تصویر ۷- منحنی نیرو بر حسب جابجایی مربوط به نمونه ها [۱۸]

تصویر ۸- منحنی دمای سطح مشترک در مقابل زمان برای چندین ترکیب زمان حرارت دهی و دمای گرمکن [۲۰]

در این شماره