

# بررسی پارامترهای مؤثر بر جوش الکتریکی اتصالات پلی اتیلنی

## Studying the Effective Parameters on Welding of Polyethylene Joints

محمدحسین نوید فامیلی<sup>۱</sup>، مهرزاد مرتضایی<sup>۲\*</sup>، علیرضا شایق<sup>۱</sup>

۱- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۵۵/۱۱۱

۲- تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۱۷۷۴

دریافت: ۸۱/۹/۲۶، پذیرش: ۸۲/۴/۱

### چکیده

در این پژوهش، روش جوش الکتریکی که در آن جوش و اتصال لوله‌های گرم‌انرم به کمک جریان الکتریسیته انجام می‌گیرد بررسی شده و با مطالعه دما و فشار مذاب و تغییرات نیروی ظاهر شده در حین چرخه جوش سعی شده است تا الگوی مناسبی برای فرایند جوش الکتریکی ارائه شود. این بررسیها اثر زمان جوش، دما و فشار مذاب را روی فصل مشترک جوش و چگونگی افزایش نیروی اتصال را همراه با افزایش زمان جوش نشان می‌دهد. در روش مورد نظر یک لوله ماشین‌کاری شده در حفزه لوله ماشین‌کاری شده دیگر وارد و اتصال محکمی از همان جنس ساخته می‌شود. در محل اتصال محیط مقاوم الکتریکی وجود دارد که در اثر عبور جریان الکتریسیته گرم شده و باعث ذوب دو قطعه پلیمر مجاور، جوش خوردن آنها و ایجاد اتصالی محکم و بدون نشت و گرفتگی می‌شود. در این پژوهش، ابتدا اتصال صفحه‌های پلی اتیلن به روش جوش الکتریکی انجام و شرایط جوشکاری بهینه شده است. به موازات آن، اتصال صفحه‌های یاد شده به روش معمول و متداول جوش گرمایی نیز انجام شده و نتایج حاصل از دو روش با هم مقایسه می‌شوند. در مرحله بعد با اعمال شرایط بهینه جوش الکتریکی، اتصال لوله‌های پلاستیکی از همان جنس نیز انجام و نتایج ارائه می‌شوند.

### واژه‌های کلیدی

اتصال جوش الکتریکی، لوله پلی اتیلنی، جوش، الکتریسیته، جفت کننده

### مقدمه

بین قطعات در اثر عبور جریان الکتریکی متناوب سینوسی (معمولاً ۳۹/۵ V) از حلقه مقاوم گرمایی تولید می‌شود. برای کنترل انرژی کلی وارد شده به اتصال، معمولاً جریان الکتریکی را برای مدت زمان مشخص از سیم بیچ عبور می‌دهند [۱]. پژوهشگران نشان

اتصال لوله‌های گرم‌انرم به دلیل شرایط کاربرد و مقاومت آنها در برابر مواد شیمیایی همواره با اهمیت بوده است. یکی از روشهای اتصال که در اکثر شرایط قابل استفاده است، جوشکاری به روش جوش الکتریکی است. در فرایند جوش الکتریکی، انرژی لازم برای ایجاد اتصال

### Key Words

electro-fusion joint, polyethylene pipe, welding, electricity, coupler

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: m\_mortezaie@hotmail.com

می دهد، بلکه دمای پیوند را نیز بالا می برد و موجب تخریب پلیمر می شود. وقتی فرایند به زمان مشخص جوش می رسد، باید جریان سیم پیچ مقاوم گرمایی قطع شود تا پلیمر موجود در فصل مشترک سرد شود و فشار مذاب کاهش یابد. سرد شدن پلی اتیلن در نهایت باعث افزایش تبلور پلیمر می شود [۹].

کارهای انجام شده روی لوله ها و اتصالات با شکافهای مختلف نشان می دهد که کیفیت پیوند در شکافهای کوچک کمتر است و بعد به آرامی افزایش می یابد و نیروی پیوند برای شکافهای ۲ درصد بزرگتر ثابت نگه داشته می شود، اما بعد از آن نیروی پیوند با افزایش شکاف کاهش پیدا می کند. با افزایش شکاف بین لوله و رابط دوره تکوین افزایش و فشار نقطه اوج کاهش می یابد [۱۰، ۱۱].

پژوهشگران برای توصیف بیشتر اثر زمان جوش روی استحکام پیوند از دو روش نظری و تجربی استفاده کرده اند. مارشال و گاسگرو اتصالات رابط ۱۸۰ mm را با نیروی اندک بوجود آورده و نمونه های آزمایشی از اتصال تهیه کرده اند. آنها از روی حداکثر نیروی اندازه گیری شده، یک پارامتر مکانیکی سختی ( $K_C$ ) محاسبه کرده اند که نمودار  $K_C$  در برابر زمان ذوب یک دوران تکوین را قبل از اندازه گیری نیروی پیوند نشان می دهد و آن گاه با افزایش زمان جوش قبل از ناهموار شدن، نیروی اتصال زیاد می شود [۱۳-۱۱]. نیشیمورا و همکاران نیز در مورد اتصالات شبیه سازی شده جوش الکتریکی، برشهایی از اتصال تهیه کرده و نیروی کشیدگی و طول عمر در  $80^\circ C$  را برای زمانهای مختلف جوش و سرعتهای مختلف نیروی وارد شده، اندازه گیری کرده اند. نمودارهای رسم شده نیروی پیوندی در برابر زمان جوش مشابه بودند که آزمایشهای نیروی کشیدگی و طول عمر در  $80^\circ C$  یک دوره تکوین را قبل از افزایش نیروی پیوندی در اثر ازدیاد زمان جوش و بعد نیز یک قسمت مسطح را نشان می دهند [۱۴].

بیش از چهار دهه است که سالم بودن برای مدت طولانی و استحکام و فشاری که سیستم لوله های پلاستیکی تحمل می کنند با اجرای آزمایشهای طول عمر بررسی می شود. یک لوله یا یک مجموعه اتصال و لوله با ترکیب ثابتی از فشار و گرما، تحت فشار قرار می گیرد تا به حالت تعادل برسد. این آزمایش برای ترکیبات گوناگون فشار درونی و گرما تکرار می شود. به کمک یک روش استاندارد و قیاسی می توان استحکام ۵۰ ساله ای را برای سیستم لوله از روی داده ها مشخص کرد و با این کار می توان فشار درونی و دوام قابلیت های یک سیستم را اندازه گرفت [۱۵، ۱۶]. اما، این روش بنا به دلایل زیر مطلوب نیست:

- پیوندهای صحیح جوش الکتریکی در طول قسمت درونی جوش از بین نمی روند، زیرا در حین آزمایش در دمای  $20^\circ C$  نرم و در  $80^\circ C$

داده اند که برای به حداکثر رسیدن استحکام پیوند در یک اتصال القایی جوش الکتریکی، انرژی جوش معمولاً  $3/9 J/mm^2$  است. البته، بسته به اجزای مختلف اتصال، انرژی جوش بین  $2$  تا  $13 J/mm^2$  نیز گزارش شده است. این انرژی باید به سرعت در محل اتصال پخش شود، در غیر این صورت قسمت درونی به میزان بیشتری گرم و تخریب می شود [۲]. در این شرایط دمای سیم، که از مقاومت گرمایی آن تخمین زده می شود، ممکن است تا  $100^\circ C$  بیشتر از دمای قسمت درونی باشد و دمای قسمت درونی در هر زمان دلخواه جوش با افزایش توان، زیاد شود.

در بیشتر مدلها، نوع اتصالات رابط را آزمایش می کنند و ساختار را متقارن محوری (axi-symmetric) در نظر می گیرند تا تجزیه و تحلیل آسانتر انجام گیرد. همچنین، حرکت مذاب در نظر گرفته نمی شود و تغییرات مهم از نظر خواص فیزیکی پلی اتیلن همراه با تغییر دما منظور می شوند [۳، ۴]. البته، برخی مطالعات از لحاظ عددی فرایند اتصال جوش الکتریکی را به شکل مدل ارائه می دهد و نیمرخ دما را پیش بینی می کند. اکثر فنون اختلاف محدود (finite difference) می توانند دو یا سه بعدی باشند و شکاف اتصال را در نظر نگیرند [۵-۷].

چرخه جوش الکتریکی، دمای پلی اتیلن را معمولاً تا  $200^\circ C$  بالا می برد و متوسط چگالی آن را تا ۲۰ درصد کاهش می دهد که در نتیجه فشار در محل اتصال بالا می رود، زیرا مناطق سرد و جامد مانع از حرکت حجم زیاد پلی اتیلن به بیرون از محل جوش می شوند. فشار مذاب تا حدود ۶ bar افزایش می یابد که در مورد اتصالات با نصب محکم (بدون شکاف) فشار مذاب می تواند بیشتر باشد [۸]. اگر نیروی پیوند به عنوان تابعی از زمان جوش در نظر گرفته شود، در کل چهار مرحله برای رشد نیرو مشاهده می شود:

الف - دوره تکوین: در این دوره که با پیوند فاقد نیرو مشخص می شود، با عبور جریان گرما پلیمر منبسط شده و شکاف اولیه پر می شود،

ب - تشکیل پیوند و جوش: در پایان دوره تکوین، شکاف بین لوله و رابط پر شده و پلیمر روی حفره اتصال دهنده و قسمت خارجی نوک لوله ذوب می شود و فشار قابل سنجش مذاب بوجود می آید،

ج - قسمت مسطح: در پایان مرحله تشکیل پیوند و مرحله جوش، حجم نسبتاً زیادی از رزین مذاب در قسمت درونی جوش بوجود می آید. در قسمت مسطح، حجم ماده مذاب، دمای سیمهای مقاوم گرمایی، فشار مذاب و دمای فصل مشترک تا حداکثر مقدار افزایش می یابد و

د - تخریب: در صورتی که زمان جوش بیشتر از زمان تعیین شده افزایش یابد، دوره زیاد گرما نه تنها کل انرژی الکتریکی را افزایش

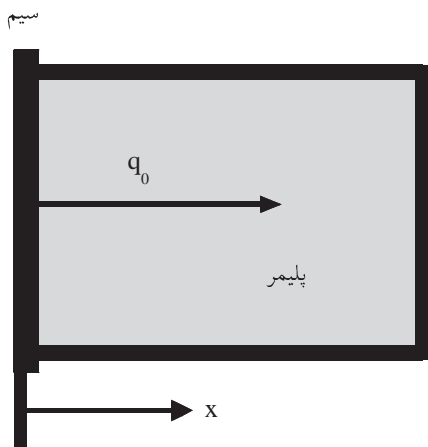
$$T(x, t) = T_0 + \frac{2q_0 \left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{0.5}}{kA} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0 x}{kA} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (4)$$

که در آن  $x$  عمق مورد نظر،  $t$  زمان اعمال انرژی،  $T_0$  دمای اولیه و  $T$  دمای خواسته شده است.

## تجربی

### مواد

باتوجه به کاربرد گسترده جوش الکتریکی در لوله‌های پلی اتیلنی سنگین مورد استفاده در طرحهای انتقال گاز، در این پژوهش از این ماده پلیمری استفاده شده است. این مواد منحصراً توسط شرکت ملی گاز ایران از شرکت سولوی اس آ به شکل گرانولهای سیاه در بسته‌بندی ۲۵ kg وارد می‌شود و دارای مشخصات زیر است: شماره شناسایی LIA۰۶۵۷۱، چگالی در دمای ۲۳ °C برابر ۰/۹۴۷۲ g/cm<sup>۳</sup>، زمان القاد در ۲۰۰ °C قابل قبول و شاخص جریان مذاب در ۱۹۰ °C برابر ۰/۶۷ g/۱۰ min. المان مورد استفاده در این پژوهش، المان کروم - نیکل ساخت کشور آلمان با مشخصات زیر است: ضخامت ۰/۳ mm، ترکیبات ۸۰ درصد کروم - ۲۰ درصد نیکل و مقاومت اسمی ۲۰/۳۱ Ω/m. لوله پلی اتیلنی مورد استفاده از پلی اتیلن یاد شده توسط شرکت لوله‌سازی آب حیات کرمان تولید شده است که قطر داخلی، قطر خارجی و ضخامت آن به ترتیب عبارتند از: ۱۸، ۲۵ و ۳/۵ mm.



شکل ۱- مدل یک بعدی محل جوش الکتریکی در صفحه‌های پلیمری.

ترد و شکننده می‌شوند،

- در پیوندهای خوب جوش الکتریکی وقتی دما به ۸۰ °C می‌رسد، در طول بدنه اتصال دهنده به آهستگی ترکهایی ظاهر می‌گردد و  
- همین ترکها در ۸۰ °C طول عمر یک ساله دارند. به همین علت، آزمایش در فشار ثابت و درونی برای ارزیابی عوامل کنترل استحکام پیوند متداول نیست. معمولی‌ترین روش اندازه‌گیری استحکام پیوند، برش مقطعی از اتصالات تشکیل شده جوش الکتریکی است که همین مقاطع تحت آزمون کشش قرار می‌گیرند. اما، باید توجه داشت که آزمایشهای کوتاه مدت هنوز برای مدل کردن و پیش‌بینی استحکام بلندمدت پیوندهای جوش الکتریکی لوله‌ای مناسب نیستند و آزمایش فشار درونی اتصالات جوش الکتریکی در دمای ۸۰ °C لازم است تا اطمینان حاصل شود که پلیمر مورد نظر برای تولید اتصالات مقاومت خوبی در برابر رشد آهسته ترک دارد [۱۷، ۱۸].

### شیبه‌سازی ریاضی

شکل ۱ یک رشته سیم در ماتریس پلیمری را نشان می‌دهد. برای حل معادله انتقال گرما، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:  
- مدل در نظر گرفته شده یک جسم صلب است که دمای اولیه آن  $T_0$  در نظر گرفته می‌شود،  
- سطح جسم در ناحیه سیم پیچ در زمان  $t_0$  در معرض شار گرمایی  $q_0/A$  قرار می‌گیرد،  
- انتقال گرما یک بعدی و در جهت عمود بر سیم فرض می‌شود،  
- دمای سطح بیرونی صفحه همواره برابر با  $T_0$  است و  
- آثار تغییر فاز در نظر گرفته نشده است.  
با توجه به فرضیات بالا، معادله انتقال گرما به صورت زیر ساده می‌شود:

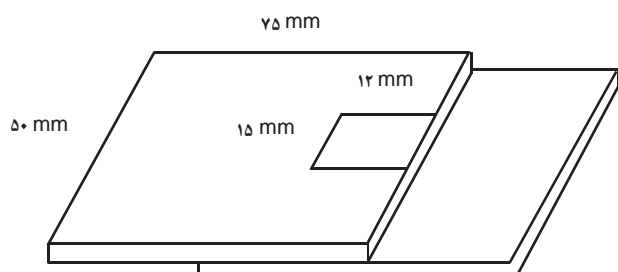
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

شرایط مرزی و اولیه برای معادله (۱) به قرار زیر است:

$$T(x, 0) = T_0 \quad (2)$$

$$\frac{q_0}{A} = k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (3)$$

که در آن  $q_0$  توان الکتریکی،  $k$  ضریب انتقال گرما و  $A$  سطح سیم انرژی دهنده است. با حل معادله انتقال گرما به روش لاپلاس جواب نهایی به شکل زیر خواهد بود [۱۹]:



شکل ۳- نمایی از صفحه‌های جوش داده شده و محل جوش.

اندازه ۳×۷۵×۵۰ mm برش داده می‌شود.

#### تهیه سیم پیچ مقاوم گرمایی

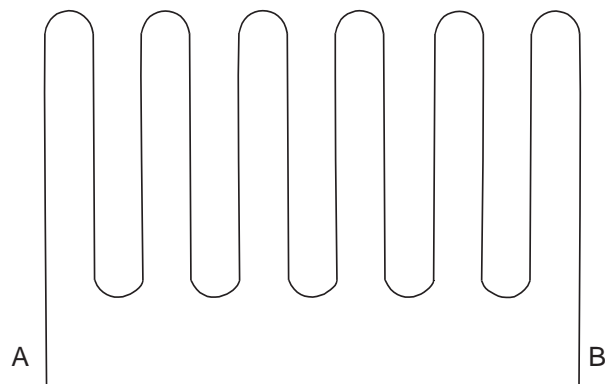
برای تهیه این سیم پیچ‌ها از ابزار تولید سیم پیچ ساخته شده بطور دستی استفاده می‌شود. به این منظور سیم مقاوم گرمایی یک در میان از میله‌های روبه‌روی هم عبور داده شده و بخوبی کشیده می‌شود تا شکل نهایی سیم پیچ را بخود گیرد. ابعاد سیم پیچ برای جوش صفحه‌ها ۱۱×۱۵ mm و برای جوش لوله‌ها ۱۲×۶۷ mm در نظر گرفته می‌شود. این اندازه‌ها با سعی و خطا بدست آمده است و برای انجام آزمون کشش مناسب است (شکل ۲).

در مرحله بعد، سیم پیچ تولید شده به مدت ۵ min زیر پرسی ۱۰۰ bar قرار داده می‌شود تا کاملاً مسطح گردد و ضخامت آن از ۰/۳ به ۰/۲ mm کاهش یابد و سطح تماس بیشتری پیدا کند.

#### فرایند اتصال صفحه‌ها به روش جوش الکتریکی

صفحه‌های پلی اتیلن که باید جوش داده شوند به اندازه‌های ۳×۵۰×۷۵ mm برش داده می‌شوند. طراحی جوشکاری این صفحه‌ها باید به گونه‌ای انجام پذیرد که آزمون کشش براحتی امکان پذیر باشد و نیرو در قسمت جوش داده شده متمرکز گردد تا شکست در این محل رخ دهد و قطعه جوشکاری شده از محلی به جز محل جوش دچار پارگی نشود. به این منظور، مساحت محل جوش کسری از مساحت هر صفحه در نظر گرفته می‌شود و همچنین دو طرف صفحه‌ها آزاد می‌ماند تا براحتی بین فکهای دستگاه کشش قرار گیرد و خطاهای آزمایش به حداقل برسد (شکل ۳).

برای شروع جوشکاری، سیم پیچ مسطح در قسمت تعیین شده برای جوشکاری، که در شکل ۲ به صورت خط چین نمایش داده شده است، بین دو صفحه قرار می‌گیرد و صفحه‌های پلاستیکی در دستگاه نگهدارنده، ثابت و بدون حرکت نگه داشته می‌شوند. برای ایجاد جریان الکتریکی، دو سر سیم پیچ به منبع تغذیه وصل شده و مطابق با طرح



شکل ۲- شکل ظاهری سیم پیچ.

#### دستگاهها

برای شکل دهی صفحه‌های پلیمر از پرس هیدرولیک ساخت کشور آلمان با حداکثر فشار ۱۰۰ bar و حداکثر دمای قالب ۴۰۰°C، مجهز به سیستم خنک کننده با آب سرد استفاده شده است. برای تراش دادن انتهای لوله‌ها و صفحه‌های پلی اتیلن، دستگاه تراش مدل TN۵۰BR ساخت گروه ماشین سازی تبریز با حداکثر دور ۲۵۰ rpm بکار گرفته شده است. به منظور تأمین انرژی الکتریکی لازم برای فرایند جوش الکتریکی، از منبع ولتاژ ساخت صنایع الکترونیک ایران مدل ۸۳۰۳ با محدوده ولتاژ و جریان ۰-۴ V و ۰-۴ A استفاده شده است. برای ثابت و بی حرکت نگهداشتن صفحه‌های پلی اتیلن، دو صفحه فلزی با ابعاد ۱۷×۸۰×۱۷۰ mm که توسط پیچ و مهره روی هم محکم می‌شوند، به عنوان دستگاه نگهدارنده بکار گرفته شده است. به منظور تهیه سیم پیچ مورد استفاده در جوش صفحه‌های پلی اتیلن ابزار تولید سیم پیچ به صورت دستی ساخته شده که از یک صفحه چوبی و دو ردیف میله‌های نازک تشکیل شده است. فاصله دو ردیف از هم ۱۰ mm و فاصله میله‌ها در هر ردیف ۲ mm است. برای اندازه‌گیری کیفیت جوش، از یک دستگاه کشش اتوماتیک با قابلیت ثبت نتایج آزمایش استفاده شده است.

#### روشها

##### تهیه صفحه‌های پلی اتیلن

این صفحه‌ها از پلی اتیلن سنگین مخصوص تولید لوله‌های انتقال گاز با استفاده از دستگاه پرس گرم تولید می‌شوند. در این روش ابتدا قالب تا دمای ۲۰۰°C گرم می‌گردد. سپس، ۴۵ g گرانول پلی اتیلن سنگین داخل قالب ریخته می‌شود و پس از ۵ min فکهای پرس با فشار ۱۰۰ bar به مدت ۷ min بسته می‌شوند. بعد از این مرحله، سرد کردن قالب به وسیله گردش آب از میان صفحه‌های خنک کن به مدت ۱۰ min ادامه می‌یابد و در نهایت، قطعه تولید شده به آرامی از قالب جدا شده و به

جدول ۱ - شرایط جوشکاری صفحه‌های پلی اتیلن به روش جوش الکتریکی.

| کل انرژی جوش (J) | توان الکتریکی (W) | زمان جوشکاری (s) | مقاومت سیم ( $\Omega$ ) | جریان (A) | اختلاف پتانسیل (V) | نمونه |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------------|-----------|--------------------|-------|
| ۲۴۳              | ۸/۱               | ۳۰               | ۲/۵                     | ۱/۸       | ۴/۵                | E۱    |
| ۳۶۴              | ۸/۱               | ۴۵               | ۲/۵                     | ۱/۸       | ۴/۵                | E۲    |
| ۴۸۶              | ۸/۱               | ۶۰               | ۲/۵                     | ۱/۸       | ۴/۵                | E۳    |
| ۶۴۸              | ۸/۱               | ۸۰               | ۲/۵                     | ۱/۸       | ۴/۵                | E۴    |
| ۲۸۵              | ۹/۵               | ۳۰               | ۲/۶                     | ۱/۹       | ۵                  | E۵    |
| ۳۵۰              | ۱۰                | ۳۵               | ۲/۶                     | ۱/۹       | ۵                  | E۶    |
| ۴۵۰              | ۱۰                | ۴۵               | ۲/۵                     | ۲         | ۵                  | E۷    |
| ۵۰۰              | ۱۰                | ۵۰               | ۲/۵                     | ۲         | ۵                  | E۸    |
| ۵۷۸              | ۱۰/۵              | ۵۵               | ۲/۴                     | ۲/۱       | ۵                  | E۹    |
| ۲۴۰              | ۱۲/۱              | ۲۰               | ۲/۵                     | ۲/۲       | ۵/۵                | E۱۰   |
| ۳۴۵              | ۱۱/۵              | ۳۰               | ۲/۶                     | ۲/۱       | ۵/۵                | E۱۱   |
| ۴۲۳              | ۱۲/۱              | ۳۵               | ۲/۵                     | ۲/۲       | ۵/۵                | E۱۲   |
| ۴۸۴              | ۱۲/۱              | ۴۰               | ۲/۵                     | ۲/۲       | ۵/۵                | E۱۳   |
| ۲۵۸              | ۱۲/۹              | ۲۰               | ۲/۸                     | ۲/۱       | ۶                  | E۱۴   |
| ۳۳۲              | ۱۳/۲              | ۲۵               | ۲/۸                     | ۲/۵       | ۵/۵                | E۱۵   |
| ۳۹۶              | ۱۳/۲              | ۳۰               | ۲/۷                     | ۲/۲       | ۶                  | E۱۶   |

مستتر دید و کل انرژی مورد نیاز برای جوشکاری دربرگیرنده هر سه پارامتر جوشکاری یعنی اختلاف پتانسیل، شدت جریان و مدت زمان جوشکاری است (جدول ۱).

#### فرایند اتصال صفحه‌ها به روش جوش گرمایی

صفحه‌های مورد استفاده و محل جوش در این آزمایش، هم‌اندازه صفحه‌های جوش داده شده به روش جوش الکتریکی طراحی می‌شوند تا نتایج قابل مقایسه باشند. به این منظور صفحه‌های با ابعاد  $3 \times 50 \times 75$  mm بریده و محل جوش با ابعاد  $12 \times 15$  mm علامتگذاری می‌شوند. گرمای لازم برای جوشکاری به وسیله یک قطعه فلزی با ابعاد محل جوش، که به کمک فکهای پرس تا دمای  $200^\circ\text{C}$  گرم شده است، تأمین می‌شود و در یک مدت زمان معین صفحه‌ها گرم می‌شوند. سپس، صفحه‌ها به گونه‌ای روی هم قرار می‌گیرند که محل‌های جوش در دو صفحه بر هم منطبق باشند و در دستگاه نگهدارنده ثابت می‌شوند تا جوش محکم

آزمایش ولتاژ، جریان و مدت زمان جوشکاری تنظیم می‌شود. پس از گذشت مدت زمان معین، جریان الکتریسیته قطع و زمان خنک شدن قطعه شروع می‌شود. در پایان زمان سرمایش، قطعات جوش خورده به آرامی از دستگاه نگهدارنده خارج می‌شوند تا تحت آزمون کشش قرار گیرند.

با استفاده از آزمایشهای اولیه به روش حدس و خطا تعدادی از پارامترها همچون شکل هندسی محل جوش، وضعیت سیم پیچ و مدت زمان سرد شدن قطعه بهینه شدند. در این حالت مساحت محل جوش برابر با  $15 \times 12$  mm در نظر گرفته شد. سیم پیچ به گونه طراحی می‌شود که مقاومت آن  $2/5$  تا  $2/8 \Omega$  باشد و مدت زمان مناسب برای سرد شدن قطعه  $60$  s است. پارامترهای مهم دیگر عبارتند از: اختلاف پتانسیل، شدت جریان منبع تغذیه و مدت زمان برقراری جریان الکتریسیته که به ترتیب در محدوده‌های  $4/5$  تا  $6$  V،  $1/8$  تا  $2/5$  A و  $30$  تا  $80$  s بررسی شدند. اختلاف پتانسیل و شدت جریان را می‌توان در توان الکتریکی

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون کشش روی صفحه‌های جوشکاری شده به روش جوش الکتریکی.

| مشاهدات             | دمای محاسبه شده<br>در $x = 0 \text{ mm}$<br>(°C) | دمای محاسبه شده<br>در $x = 1 \text{ mm}$<br>(°C) | نیروی شکستن<br>اتصال (N) | کل انرژی جوش<br>بر واحد سطح<br>(J/cm <sup>2</sup> ) | توان الکتریکی<br>بر واحد سطح<br>(W/cm <sup>2</sup> ) | زمان جوشکاری<br>(s) | نمونه |
|---------------------|--|--|--------------------------|---|--|---------------------|-------|
| جوش بدون نشتی       | ۱۷۳/۹۷   | ۱۰۲/۳۱   | ۶۱۹/۱                    | ۱۲۵   | ۴/۵  | ۳۰                  | E1    |
| جوش بدون نشتی       | ۲۰۵/۴۳   | ۱۱۹/۶۸   | ۷۲۰/۵                    | ۲۰۲/۵   | ۴/۵  | ۴۵                  | E2    |
| جوش بدون نشتی       | ۲۳۲/۱۹   | ۱۳۴/۳۳   | ۹۱۰/۷                    | ۲۶۹/۵   | ۴/۵  | ۶۰                  | E3    |
| جوش بدون نشتی       | ۲۶۳/۲۵   | ۱۵۷/۲۴   | ۱۱۵۲/۵                   | ۳۶۰   | ۴/۵  | ۸۰                  | E4    |
| جوش بدون نشتی       | ۲۰۲/۵۲   | ۱۲۰/۱۱   | ۸۴۵/۳                    | ۱۵۸/۵   | ۵/۵  | ۳۰                  | E5    |
| جوش بدون نشتی       | ۲۲۶/۹۱   | ۱۳۴/۸۲   | ۹۱۸/۱                    | ۱۹۴/۵   | ۵/۵  | ۳۵                  | E6    |
| کمی نشتی در محل سیم | ۲۵۲/۵۰   | ۱۴۹/۵۲   | ۱۲۴۲/۱                   | ۲۵۰   | ۵/۵  | ۴۵                  | E7    |
| نشتی زیاد           | ۲۶۴/۲۷   | ۱۵۶/۲۵   | ۱۴۰۸/۷                   | ۲۷۸   | ۵/۵  | ۵۰                  | E8    |
| بیرون زدن سیم پیچ   | ۲۸۹/۳۱   | ۱۷۷/۶۸   | ۱۷۶۹/۴                   | ۳۲۱   | ۵/۵  | ۵۵                  | E9    |
| جوش بدون نشتی       | ۳۳۳/۹۳   | ۱۳۷/۳۶   | ۹۲۳/۰                    | ۱۳۳/۵   | ۶/۶  | ۲۰                  | E10   |
| جوش بدون نشتی       | ۲۴۴/۰۴   | ۱۴۶/۹۳   | ۱۱۶۳/۴                   | ۱۹۷/۵   | ۶/۶  | ۳۰                  | E11   |
| نشتی زیاد           | ۲۷۴/۰۲   | ۱۶۵/۷۰   | ۱۳۸۷/۶                   | ۲۴۱   | ۶/۶  | ۳۵                  | E12   |
| بیرون زدن سیم پیچ   | ۲۹۰/۲۶   | ۱۷۵/۴۱   | ۱۵۹۹/۰                   | ۲۶۹   | ۶/۶  | ۴۰                  | E13   |
| نشتی در محل سیم     | ۲۳۷/۳۵   | ۱۴۰/۵۹   | ۱۱۰۴/۸                   | ۱۴۳/۵   | ۷/۳  | ۲۰                  | E14   |
| نشتی زیاد           | ۲۵۹/۲۶   | ۱۵۸/۱۵   | ۱۳۰۳/۱                   | ۱۸۵   | ۷/۳  | ۲۵                  | E15   |
| بیرون زدن سیم پیچ   | ۲۷۹/۹۱   | ۱۷۰/۸۸   | ۱۷۰/۷۲                   | ۲۲۰   | ۷/۳  | ۳۰                  | E16   |

#### فرایند اتصال لوله‌ها به روش جوش الکتریکی

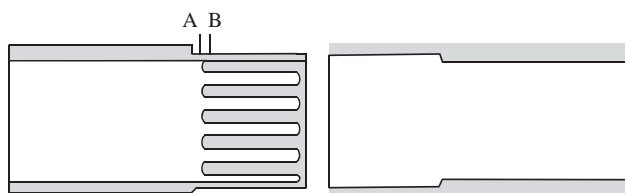
با بررسی نتایج حاصل از جوشکاری صفحه‌ها، محدوده شرایط بهینه برای جوش لوله‌ها معین می‌شود. مراحل انجام جوش الکتریکی روی لوله‌های پلاستیکی به شرح زیر است:

- ابتدا با استفاده از دستگاه تراش، سر یکی از لوله‌ها به شکل نوک (nipple) و سر لوله دیگر به شکل گودی (socket) تراش داده می‌شود، به طوری که ضخامت قسمت تراشیده شده از داخل یا بیرون

شود. پس از انجام آزمایش‌های اولیه، شرایط آزمایش معین می‌شود. در همه نمونه‌ها زمان سرمایش ۶۰ s در نظر گرفته شده است. سطح محل جوش برابر با سطح محل جوش در نمونه‌های جوش الکتریکی است. محدوده تغییرات دمای صفحه گرمایی و مدت زمان گرمادهی به ترتیب ۱۸۰ تا ۲۰۰ °C و ۲۵ تا ۴۰ s است. نمونه‌های جوشکاری شده به این روش H1 تا H6 نامگذاری شده‌اند.

#### آزمون کشش صفحه‌های جوش داده شده

برای انجام آزمون، نمونه‌های جوش داده شده از قسمت آزاد بین فکهای دستگاه کشش قرار داده می‌شود و با سرعت مناسب کشیده می‌شوند. پس از انجام آزمون کشش، نمونه‌هایی که از قسمتهایی غیر از محل جوش شکسته شده‌اند از رده خارج و فقط نمونه‌هایی که از محل جوش دچار شکست شده‌اند برای تعیین میزان استحکام جوش مورد بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۴- نحوه قرار گرفتن سیم پیچ روی نوک و جاسازی نوک در حفره.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} = 1.66 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$T_m = 135 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A = 12 \times 15 = 180 \text{ mm}^2 = 0.018 \text{ m}^2$$

در این معادلات  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $\rho$  چگالی و  $T_m$  دمای ذوب ماده پلیمری است. با توجه به اینکه فاصله بین هر دو رشته سیم ۲ mm است، حداکثر عمق ذوب (x) ۱ mm است و به دلیل قرار گرفتن دو صفحه در دو طرف سیم، توان ورودی به هر صفحه نصف توان ورودی به سیم پیچ است. حل معادله ۴ در شرایط یاد شده برای صفحه‌های جوشکاری شده منجر به تعیین دما در دورترین نقطه محل جوش نسبت به مرکز گرما (سیم گرمایی) خواهد شد. برای اطمینان از نسوختن و عدم تخریب پلیمر با قرار دادن  $x = 0$  در معادله ۴ دمای نزدیکترین نقاط به مرکز گرما (سیم گرمایی) نیز محاسبه خواهد شد (جدول ۲).

با توجه به دمای ذوب پلی اتیلن ( $T_m = 135 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$ )، دمای بدست آمده در ۱ mm از مرکز جوش نشان دهنده توافق خوب بین نتایج تجربی و مدل ریاضی است. بیشترین دمای محاسبه شده مربوط به نزدیکترین نقاط به مرکز گرماس است. مشاهده می شود در این محل برای همه نمونه‌ها، پلی اتیلن بطور کامل ذوب شده است و برای نمونه‌هایی که با توان زیاد جوشکاری شده‌اند، دمای این محل به اندازه کافی برای تخریب پلیمر زیاد است. بنابراین، با توجه به خواص پلیمر و دمای محیط به کمک مدل ریاضی بطور قابل قبول می توان زمان جوش مناسبی را برای توانهای جوشکاری متفاوت حدس زد.

اگر نمودار تغییرات نیروی شکست اتصال بر حسب مدت زمان جوشکاری و توانهای الکتریکی متفاوت رسم شود (شکل ۵) و با توجه به مشاهدات کیفی محل جوشکاری، می توان شرایط جوشکاری را به پنج ناحیه تقسیم بندی کرد:

ناحیه الف: در این ناحیه زمان جوشکاری بسیار کوتاه است و مشاهده می شود که:

- کنترل دقیق جوش امکان پذیر نیست،

- به علت سرعت جوشکاری، در محل جوش عدم یکنواختی

وجود دارد و

- برای ایجاد جوش در مدت زمان کوتاه، ناگزیر باید از توان

الکتریکی بیشتری استفاده کرد که این امر باعث افزایش بیش از حد

دمای سطح جوش شده و احتمال تخریب پلیمر افزایش می یابد.

ناحیه ب: در این ناحیه مدت زمان جوشکاری زیاد است، بنابراین انرژی

لوله کمی بیشتر از نصف ضخامت دیواره لوله و عمق تراش در حدود ۱۳ mm باشد.

- سیم پیچ های تهیه شده با ابعاد ۱۲×۶۷ mm روی نوک لوله نصب شده و سپس با دقت، طوری که سیم پیچ فشرده نشود، نوک لوله داخل حفره لوله دیگر قرار داده می شود (شکل ۴).

- مطابق روش جوشکاری صفحه های پلیمری، دو سر سیم پیچ به دستگاه منبع تغذیه وصل شده و نمونه های مختلف با شرایط متفاوت (مدت زمان جوشکاری ۳۰ تا ۸۰ s و توانهای الکتریکی ۴ تا ۵/۸ W) جوشکاری می شوند. نمونه های حاصل به صورت P1 تا P11 نامگذاری شدند.

### آزمون کشش لوله های جوش داده شده

برای انجام آزمون کشش روی لوله جوشکاری شده، ابتدا دو سر لوله به طول ۵ cm، به گونه ای که قسمت جوشکاری شده صدمه نبیند، پرس می شود تا مسطح شده و بین فکهای دستگاه کشش قرار گیرد. سپس، با تنظیم شرایط آزمون کشش انجام و نتایج مربوط به نمونه هایی که از قسمت جوشکاری شده شکسته اند ثبت می شود.

## نتایج و بحث

### اتصال صفحه های پلی اتیلن به روش جوش الکتریکی

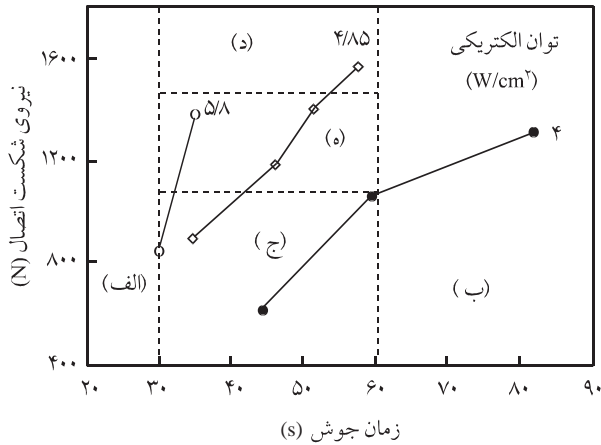
برای اینکه از نتایج آزمایش بتوان برای اندازه های مختلف محل جوش استفاده کرد، بهتر است شرایط آزمایش بر واحد سطح محل جوش تقسیم شود. بنابراین، می توان نتایج را براساس توان الکتریکی بر واحد سطح ( $\text{W/cm}^2$ ) و کل انرژی جوش را بر واحد سطح ( $\text{J/cm}^2$ ) بیان کرد (جدول ۲).

اگر شرایط بهینه بدست آمده در آزمایشهای تجربی جوش الکتریکی دو صفحه پلی اتیلن حاصل از جدول ۱ در معادله ۴ قرار داده شود، مشاهدات تجربی با مدل ریاضی قابل مقایسه خواهد بود. به این منظور مشخصات فیزیکی و گرمایی پلی اتیلن سنگین مورد استفاده به شرح زیر استخراج می شود [۲۰]:

$$k = 0.33 \text{ J (sm}^\circ\text{C)}^{-1}$$

$$C_p = 2093.25 \text{ J (kg}^\circ\text{C)}^{-1}$$

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$



شکل ۶- نمودار تغییرات نیروی شکست اتصال برحسب مدت زمان جوشکاری و توان الکتریکی بکار رفته در جوشکاری لوله‌های پلی اتیلن.

ناحیه ه: در این ناحیه انتخاب مناسب مدت زمان جوش و توان الکتریکی باعث ایجاد یک محل جوش با نیروی شکست اتصال (شاخص استحکام اتصال) زیاد، ظاهری مناسب و بدون عیب و نقص شده است.

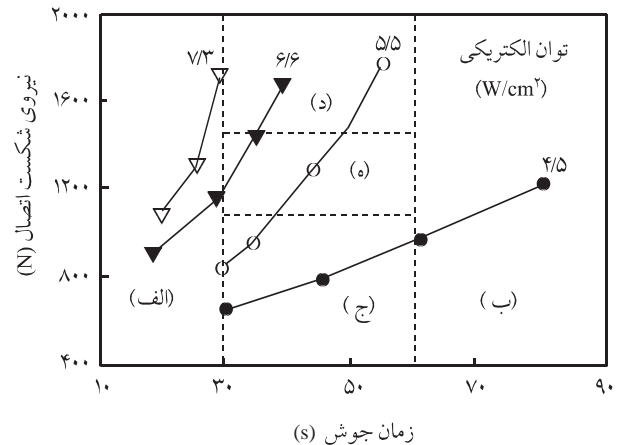
#### اتصال صفحه‌های پلی اتیلن به روش جوش گرمایی

جوش گرمایی صفحه‌های پلی اتیلن در شرایط مشابه با جوش به روش الکتریکی انجام می‌شود. نتایج حاصل از این روش در جدول ۳ آورده شده است.

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که فقط یک مورد جوش مناسب (نمونه H۳ با نیروی شکست اتصال ۱۱۷۵/۵N) ایجاد شده است که در مقایسه با جوش الکتریکی (نمونه EV با نیروی شکست اتصال ۱۲۴۲/N) ضعیفتر است. علاوه بر اینکه جوش به روش گرمایی پیچیده‌تر و

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون کشش روی صفحه‌های جوشکاری شده به روش جوش گرمایی.

| مشاهدات                    | نیروی شکست اتصال (N) | زمان گرمادهی (s) | دمای صفحه گرمایی (°C) | نمونه |
|----------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|-------|
| جوش ناقص                   | ۵۰۳/۲                | ۲۵               | ۱۸۰                   | H۱    |
| جوش ناقص با نشتی در لبه‌ها | ۶۸۰/۳                | ۳۵               | ۱۸۰                   | H۲    |
| جوش کامل بدون نشتی         | ۱۱۷۵/۵               | ۲۵               | ۱۹۰                   | H۳    |
| جوش با نشتی                | ۱۲۹۴/۴               | ۳۰               | ۱۹۰                   | H۴    |
| جوش با نشتی کامل           | ۱۴۸۹/۶               | ۴۰               | ۱۹۰                   | H۵    |
| جوش با نشتی کامل           | ۱۴۷۷/۶               | ۲۵               | ۲۰۰                   | H۶    |



شکل ۵- نمودار تغییرات نیروی شکست اتصال برحسب مدت زمان جوشکاری و توانهای الکتریکی متفاوت در جوشکاری صفحه‌های پلی اتیلن.

بیشتری به هدر رفته و کل انرژی که به مواد انتقال می‌یابد کاهش یافته است. بنابراین، جوش مناسب و مستحکمی ایجاد نخواهد شد و چنانچه برای جبران انرژی تلف شده از توان بیشتری استفاده شود، قرار گرفتن مواد پلیمری در دماهای بالا برای مدت زمان زیاد باعث تخریب آنها می‌شود.

ناحیه ج: در این ناحیه مدت زمان جوش مناسب است، اما کافی نبودن توان الکتریکی باعث ایجاد اتصالات ضعیفی می‌شود که از استحکام چندانی برخوردار نبوده و به آسانی از هم جدا می‌شوند.

ناحیه د: در این ناحیه نیز مدت زمان جوش مناسب است ولی افزایش بیش از حد توان الکتریکی در عین حال که باعث ایجاد یک اتصال محکم شده است، به دلیل ذوب شدن بیش از حد پلیمر، نشتی‌هایی در محل جوش بوجود آمده و در برخی از نمونه‌ها سیم پیچ از بین پلیمر بیرون زده است و شکل ظاهری محل جوش مناسب و صاف نیست.



جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون کشش روی لوله های پلی اتیلن جوشکاری شده به روش جوش الکتریکی.

| مشاهدات                 | نیروی شکست اتصال<br>(N) | کل انرژی جوش<br>(J) | زمان جوشکاری<br>(s) | چگالی<br>(W/cm <sup>2</sup> ) | نمونه |
|-------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------|
| جوش مناسب               | ۶۱۸/۰                   | ۷۲۰                 | ۴۵                  | ۴                             | P۱    |
| جوش مناسب               | ۱۰۸۵/۵                  | ۱۰۸۰                | ۶۰                  | ۴                             | P۲    |
| جوش با نشتی             | ۱۲۸۵/۱                  | ۱۴۴۰                | ۸۰                  | ۴                             | P۳    |
| جوش مناسب               | ۸۷۴/۲                   | ۷۵۶                 | ۳۵                  | ۴/۸۵                          | P۴    |
| جوش مناسب               | ۱۱۸۱/۲                  | ۹۲۴                 | ۴۵                  | ۴/۸۵                          | P۵    |
| جوش مناسب               | ۱۴۳۷/۴                  | ۱۰۰۸                | ۵۰                  | ۴/۸۵                          | P۶    |
| جوش با نشتی و تغییر شکل | ۱۵۸۲/۵                  | ۱۱۷۶                | ۵۵                  | ۴/۸۵                          | P۷    |
| جوش مناسب               | ۸۷۱/۱                   | ۵۸۵                 | ۳۰                  | ۵/۸                           | P۸    |
| جوش با نشتی             | ۱۳۸۳/۲                  | ۸۷۷                 | ۳۵                  | ۵/۸                           | P۹    |

مشکلتر از روش جوش الکتریکی است.

پلی اتیلن، نتیجه گیری نهایی به شرح زیر است:

- توان الکتریکی زیاد، موجب ذوب مواد پلیمری در زمان کوتاه می شود که این امر عدم کنترل زمان جوش، احتمال سوختن مواد پلیمری و عدم یکنواختی، نشتی و تغییر شکل لوله را به دنبال خواهد داشت.

- برای ذوب کامل محل جوش با استفاده از توان الکتریکی کم مدت زمان زیادی لازم است و در این شرایط گرمای بیشتری به هدر می رود و جوش به صورت ناقص انجام می شود.

- در توان الکتریکی ثابت با افزایش زمان جوش، استحکام پیوند افزایش می یابد، ولی افزایش بیش از حد زمان جوش موجب ایجاد نشتی و تغییر شکل لوله می شود.

- به دلیل نزدیکی بیش از حد شرایط جوشکاری به یکدیگر، تغییرات اندک در شرایط جوشکاری باعث تفاوت عمده در نتایج خواهد شد، بنابراین بهینه سازی شرایط و انجام آزمایشهای جوش مستلزم دقت فراوان است.

- مشاهدات و نتایج بدست آمده از جوش صفحه های پلی اتیلن بطور قابل قبول مؤید مدل های ریاضی ساده و یک بعدی است.

- پیشنهاد می شود به منظور ایجاد یکنواختی در ناحیه جوش در جوشکاری الکتریکی از مش های جوش الکتریکی توری شکل استفاده شود. همچنین، حل معادله های ریاضی چند بعدی با در نظر گرفتن اثر نفوذ مولکولی در استحکام جوش، بسیار راه گشا خواهد بود.

### اتصال لوله های پلی اتیلن به روش جوش الکتریکی

با استفاده از نتایج آزمایشهای جوشکاری صفحه های پلی اتیلن، روش جوش الکتریکی به دلیل نتایج بهتر و سادگی فرایند برای جوشکاری لوله های پلی اتیلن در نظر گرفته شد و طراحی آزمایش انجام گردید (جدول ۴).

مشاهده می شود که شرایط انتخاب شده برای جوشکاری مناسب است، مشروط به اینکه مدت زمان جوش از حد معینی فراتر نرود و مشکل نشتی و غیریکنواختی بوجود نیاید. با رسم نمودار نیروی شکست اتصال (به عنوان شاخص استحکام جوش) بر حسب مدت زمان جوشکاری و توان الکتریکی بکار رفته می توان تحلیل مناسبی از شرایط جوشکاری ارائه کرد (شکل ۶).

با توجه به شکل ۶ و مشاهدات انجام شده، شرایط نمونه P۶ (مدت زمان ۵۰ s و توان الکتریکی ۴/۸۵ W/cm<sup>2</sup>) بهترین شرایط جوشکاری است، زیرا علاوه بر اینکه اتصال ایجاد شده از استحکام زیادی برخوردار است، نمای ظاهری محل جوش نیز مناسب است.

### نتیجه گیری

بر اساس مطالعات و اطلاعات بدست آمده از نمونه های جوشکاری شده در این پژوهش درباره روش جوش الکتریکی برای اتصال لوله های

## مراجع

1. Usclat D., Producing a Good Joint Electrofusion Fittings, *Proceedings of 9th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, 57, Louisiana, 1985.
2. Nishimura H. and Nakakura M., Effect of Design Factors of EF Joints on Fusion Strength, *Proceedings of 11th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, 99, San Francisco, 1989.
3. Kanninen M.F., A Theoretical and Experimental Evaluation of the Long Term Integrity of an Electrofusion Joint, *Proceedings of 8th Plastics Pipes*, B2/3, Koningshof, 1992.
4. Nakashiba A. and Nishimura H., Fusion Simulation of Electrofusion Joint for Gas Distribution, *Polym. Eng. Sci.*, **33**, 1146-1151, 1993.
5. Nishimura H., Inoue F. and Ishikawa T., Design of EF Joints and Evaluation of Fusion Strength Using Fusion Simulation Technology, *Proceedings of International Gas Research Conference*, London, 1992.
6. Nussbaum M., Meister E. and Dufour D., *Modelling Method for the Design of Electroweldable Polyethylene Parts*, Gaz de France, Paris, 1989.
7. O'Donoghue P.E., Results of a Thermo-mechanical Analysis Model for Electrofusion Joining of PE Gas Pipes, *Proceedings of International 12th Fuel Gas Pipe Symposium*, 331, Boston 1991.
8. Ibid, Nussbaum M., Electrofusion of Polyethylene: How and Why, 324, Boston, 1991.
9. Bowman J., A Review of the Electrofusion Joining Process for Polyethylene Pipe Systems, *Polym. Eng. Sci.*, **37**, 674-691, 1997.
10. Usclat D., Characteristics of a Good Joint with Electrofusion Fittings, *Proceedings of 6th International Conference on Plastic Pipes*, 31A, Paris, 1985.
11. Marshal G.P. and Cosgrove B.G., The Use of a Fracture Mechanics Approach for Assessment of EF Welding of MDPE, *Proceedings of Advances in Joining Plastics and Composites*, Bradford, 1991.
12. Bowman J., Procedures for Quantifying the Strength of Electrofusion Joints, *Proceedings of 8th Plastics Pipes*, B2/5, Koningshof, 1992.
13. Bowman J., The Assessment of the Strength of EF Joints, *Proceedings of 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, 311, Boston, 1991.
14. Masaki A., Verification of EF Joint Fusion Strength Evaluation Using Model Specimen, *Proceedings of 12th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, 298, Boston, 1991.
15. Gaube E., Thermoplastic Pipes: Experience of 20 Years of Creep Rupture Testing, *Kunststoffe*, **66**, 2-7, 1976.
16. Plastic Pipes for the Transport of Fluids, Standard Extrapolation Method, ISO Dp9080.2, 1987.
17. Ewing L and Maine L., The Electrofusion of PE Gas Pipe Systems in British Gas, *Proceedings of 8th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, Louisiana, 1983.
18. Nakano T., Strength Evaluation of EF Joints in Polyethylene Gas Piping Systems, *Proceedings of 11th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, 112, San Francisco, 1989.
19. Holman J.P., *Heat Transfer*, 8th ed., Mc Graw-Hill, New York, 1997.
20. Perry R.H., *Chemical Engineering Handbook*, 5th ed., Mc Graw-Hill, New York, 1947.