



بررسی اثر ترتیب و توالی مسیر جوشکاری بروی تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری ناپیوسته محیطی لوله فولادی

مهدی کاظمی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲

کلمات کلیدی:

جوشکاری

تنش پسماند

میدان دمایی

تحلیل حرارتی و مکانیکی

خلاصه: در این مقاله، عوامل موثر در فرایند جوشکاری و اثرات آن از جمله تنش‌های پسماند در فرایند جوشکاری محیطی یک لوله با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس بررسی شده است. تحلیل در دو مرحله حرارتی و مکانیکی صورت گرفت. ابتدا در تحلیل حرارتی، توزیع دما فرایند جوشکاری بدست آمد و سپس از میدان دمایی بدست آمده به عنوان بارگذاری در تحلیل مکانیکی جهت بدست آوردن توزیع تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌ها استفاده شد. تاثیر شرایط گوناگون و تغییر پارامترهای مختلف جوشکاری مانند سرعت جوشکاری، حرارت ورودی و ترتیب و توالی مسیر جوشکاری ناپیوسته بر مقادیر تنش پسماند و تغییر شکل‌ها بررسی شد. به طوری که با افزایش ۵۰ درصدی سرعت حرکت الکتروود، تنش‌های کششی و فشاری محیطی در سطح خارجی لوله دچار بیشترین تغییرات شدند و به ترتیب افزایش ۴۳/۴۷ و ۱۵/۱۵ درصدی را نشان دادند. همچنین افزایش ۲۰ درصدی حرارت ورودی جوش منجر به کاهش ۲/۶ و ۱۸/۱۸ درصدی تنش‌های کششی و فشاری محیطی در سطح خارجی لوله شد. در نهایت می‌توان گفت یکی از موثرترین راهکارها جهت کاهش اعوجاج‌های ناشی از جوشکاری ترتیب عملیات جوشکاری است و برای این منظور می‌توان با ناپیوسته کردن مسیر جوشکاری با متقارن کردن حرارت و کاهش گرادیان دمایی مقدار اعوجاج و تنش‌های پسماند ایجاد شده را بیشتر کاهش داد که در این مقاله برای جوش محیطی لوله یک مسیر بهینه نیز ارائه شد.

۱- مقدمه

مینیمم باشد. اعوجاج‌ها باعث ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات شده که وجود تنش‌های پسماند در صورتی که به صورت کششی باشند عمر قطعات را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند [۲] و [۳]. تنش‌های پسماند فشاری معمولاً تنش‌های مفیدی هستند که باعث افزایش عمر خستگی قطعات، کاهش احتمال ایجاد ترک و شکست ترد در قطعه می‌شوند اما تنش‌های پسماند کششی عموماً برای قطعات مضر می‌باشند و باعث کاهش استحکام قطعه می‌شوند [۴ و ۵]. در فرایند جوشکاری تنش‌های پسماند کششی سطحی و اعوجاج‌هایی که در قطعه ایجاد می‌شوند شکل اولیه قطعه را تغییر می‌دهند به همین دلیل بررسی این تنش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. تغییر دماهای شدیدی که در هنگام جوشکاری در قطعه ایجاد می‌شود باعث ایجاد کرنش‌های حرارتی در قطعه و ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک مخصوصاً در نواحی اطراف مسیر جوشکاری می‌شود

فرایندهای جوشکاری یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای اتصال قطعات در صنایع مختلف می‌باشد. به دلیل تغییر دمای غیر یکنواخت که در هنگام جوشکاری رخ می‌دهد، اعوجاج‌های شدید و تنش‌های پسماند در قطعه جوشکاری شده ایجاد می‌شود [۱]. اعوجاج عموماً به تغییر شکل‌هایی گفته می‌شوند که در قطعه پس از جوشکاری ایجاد شده و در قطعات باقی می‌مانند. در فرایندهای ساخت قطعات از جمله قالب گیری، نورد، کشش عمیق، برش، ماشین کاری قطعات و بسیاری فرایندهای دیگر اعوجاج‌ها به وجود می‌آیند. مسلماً هر چه مقادیر اعوجاج در قطعات کمتر باشد قطعه تولید شده دارای کیفیت بالاتری است. در فرایند جوشکاری نیز باید پارامترهای جوشکاری را به نحوی مناسبی انتخاب کرد تا مقادیر اعوجاج ایجاد شده در قطعات

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kazemi@malayeru.ac.ir



و به همین دلیل در نواحی مسیر جوشکاری تنش‌های شدید کششی ایجاد می‌شوند که قطعات عموماً نیز از همین ناحیه دچار شکست می‌شوند. همواره محققان بسیاری سعی داشته‌اند که مقدار اعوجاج و همچنین تنش‌های پسماند را با روش‌های مختلف اندازه‌گیری کنند و مقدار این تنش‌ها را در قطعات کاهش دهند. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با گذشت زمان ایجاد شدند اما اغلب روش‌ها پرهزینه و وقت‌گیر بودند. یکی از روش‌هایی که در چند سال اخیر مورد توجه خاصی قرار گرفته است استفاده از المان محدود است. این روش به دلیل هزینه کمی که نسبت به روش‌های دیگر دارد و همچنین آسان بودن بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر روی اعوجاج قطعات مورد توجه قرار گرفته است [۶-۸]. مدل‌های دوبعدی اولین مدل‌های ارائه‌شده برای شبیه‌سازی جوشکاری بودند [۹]. با توسعه روش‌های محاسبات عددی و نیز با پیشرفت‌های انجام‌شده در توان محاسباتی کامپیوترهای شخصی مدل‌های سه‌بعدی نیز در شبیه‌سازی جوش به کار گرفته شدند. جیانگ و همکاران [۱۰] مدل المان محدود جوشکاری نازل به مخزن استوانه‌ای و تأثیر سه حالت برای ترتیب جوشکاری روی تنش‌های پسماند اتصال جوش چندپاسه را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در حالت چهارجوشکار بیشترین تنش پسماند ایجاد می‌شوند در حالیکه در حالت تک‌جوشکار کمترین مقدار تنش پسماند ایجاد می‌شود. نتیجه دو جوشکار نیز نزدیک حالت چهار جوشکار بوده است. در بررسی ترتیب جوشکاری نیز تغییرات چندانی ملاحظه نشد. آنها نتیجه گرفتند که عوامل قیود هندسی، پخ جوشکاری و ترتیب جوشکاری اثر کمتری روی بیشترین تنش پسماند دارد. همچنین پارامترهای دیگری مانند دمای بین پاس و نرخ خنک‌کاری نیز پارامترهای موثرتری هستند. دانویرگا و همکاران با استفاده از روش اجزای محدود میدان دما و تنش‌های پسماند در یک جوش چندپاسه بر روی فولاد را پس از انجام اعتبارسنجی مورد بررسی و تحلیل قرار دادند [۱۱]. زنگ و همکارانش به پیش‌بینی آنالیز الاستوپلاستیک حرارتی آلیاژ آلومینیوم با استفاده از روش اجزای محدود جهت تجزیه و تحلیل اعوجاج‌ها و تنش‌های پسماند در یک فرایند جوشکاری ناپیوسته پرداختند [۱۲]. بریکستاد و جوزفسون [۱۳] با استفاده از یک مدل دوبعدی تقارن محوری و آنالیز غیروابسته توانستند تنش‌های پسماند جوشی را در اتصال چندپاسه لوله‌های جدار ضخیم محاسبه

کنند. یاجیانگ [۱۴] توزیع تنش‌های پسماند در اتصال جوشی صفحات فولادی با استحکام بالا را مورد بررسی قرار داد و نشان داد تنش عمود بر امتداد جوشکاری، اثر بیشتری روی ایجاد ترک نسبت به تنش در دو امتداد دیگر دارد. کرمانپور و همکارانش [۱۵]، تأثیر روش‌های مختلف اعمال حرارت ورودی به داخل ناحیه‌ی مذاب را با در نظر گرفتن ترکیب‌های متفاوتی از بارگذاری‌های سطحی، حجمی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که برای یک ورق با ضخامت کم، تاریخچه‌ی دمایی حاصله از بارگذاری تمام حجمی، بهترین تطابق را با اندازه‌گیری‌های تجربی خواهد داشت. برخلاف تأثیرات زیادی که تغییرات متالورژیکی ناحیه جوش در حین فرایند جوشکاری بر روی اندازه تنش پسماند و تغییر شکل‌ها دارند ولی مطالعات کمی در این زمینه انجام شده است [۱۶].

باتی و همکارانش [۱۷]، تأثیر خواص ترمومکانیکی مواد مختلف فولادی بر تنش‌های پسماند و اعوجاج‌های زاویه‌ای ناشی از جوش را در اتصالات T شکل بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که برای ارزیابی تنش‌های پسماند، بجز تنش تسلیم، می‌توان تمامی خصوصیات ترمومکانیکی را ثابت در نظر گرفت. همچنین برای پیش‌بینی اعوجاج‌های زاویه‌ای با دقت قابل قبول، باید از ظرفیت گرمایی، تنش تسلیم و ضریب انبساط حرارتی وابسته به دما در شبیه‌سازی‌های جوش استفاده کرد.

میرزا احمدی و همکاران [۱۸]، به بررسی تأثیر خواص مکانیکی و حرارتی در جوشکاری نقطه‌ای آلیاژ منیزیم به روش اجزای محدود پرداختند. آنها نشان دادند که هدایت حرارتی و مقاومت الکتریکی تأثیر معنی‌داری بر اندازه ناگت دارد و همچنین تنش تسلیم و مدول الاستیسیته تأثیر مهمی در توزیع تنش‌های پسماند دارند. علاوه بر این، خواص حرارتی و مکانیکی دیگر می‌تواند ثابت در نظر گرفته شود.

حبیبی و اسکندری [۱۹]، به بررسی توزیع حرارت و تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری سه مرحله‌ای در یک اتصال صلیبی از جنس فولاد ۵۲ پرداختند. مدل اجزای محدود آنها شامل خواص حرارتی و مکانیکی فلز پایه و فلز جوش به صورت تابعی از دما است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تنش‌های پسماند قابل توجهی در اتصال بعد از جوشکاری ایجاد می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که مدل بکاررفته می‌تواند پیش‌بینی خوبی از توزیع دما و تنش

و t زمان می باشد.

$$\begin{aligned} R_x &= -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \\ R_y &= -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2) \\ R_z &= -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned}$$

که در معادله (۲)، K_x ، K_y و K_z ضرایب هدایت حرارتی به ترتیب در راستاهای x ، y و z هستند. پارامترهای K_x ، K_y و K_z همگی تابعی از دما می باشند که باعث غیرخطی شدن معادلات انتقال حرارت در فرآیند جوشکاری می شوند.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

رابطه (۳) معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت در یک جسم جامد می باشد. معادلات انتقال حرارت گذرا را می توان به شکل ماتریسی به صورت معادله (۴) نوشت.

$$\bar{n}c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{i\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \bar{q} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، L عملگر برداری و v بردار سرعت انتقال جرم می باشد که به ترتیب به صورت معادلات (۵) و (۶) تعریف می گردند.

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix} \quad (6)$$

q بردار شار حرارتی و \bar{q} نرخ تولید حرارت در حجم واحد می باشد. همان گونه که بیان شد قانون فوریه برای ارتباط دادن بین بردار شار حرارتی با گرادیان حرارتی استفاده می شود. این معادله به شکل ماتریسی به صورت معادله (۷) نوشته می شود.

پسماند داشته باشد.

حبیبی و همکارانش [۲۰]، به بررسی آنالیز تنش، کرنش، جابجایی و پتانسیل الکتریکی یک استوانه توخالی ضخیم ساخته شده از مواد مدرج تابعی تحت بارهای مکانیکی و حرارتی پرداختند. آنها پس از استخراج و حل معادلات دیفرانسیل در حالت گذرا و اعمال شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی، اثر پارامترهای مختلف در این فرآیند از جمله ضریب هدایت حرارتی، مدول الاستیسیته، ضریب پیزوالکتریک و ثابتهای دی الکتریک را بررسی کردند.

با بررسی مطالعات انجام شده مشخص گردید که اثرات ناشی از فرایندهای جوشکاری موضوع مهمی است که محققین با استفاده از روش های تحلیلی، تجربی و عددی بدنبال کاهش مضرات این فرایندها بوده اند. در این تحقیق به بررسی تنش های پسماند و اعوجاج های ناشی از جوش دوپاسه محیطی یک لوله فولادی پرداخته شد و پس از بررسی پارامترهای مختلف از جمله سرعت جوشکاری، حرارت ورودی و ترتیب و توالی پاس های مختلف، یک الگوی بهینه جهت کاهش تنش های پسماند و اعوجاج های ناشی از جوش لوله مورد نظر ارائه شده است که تاکنون در هیچ تحقیقی این کار صورت نگرفته است. در واقع در این تحقیق نشان داده شده است که با تکه تکه کردن مسیر جوشکاری های محیطی نسبتا بلند و با در نظر گرفتن حالت های متفاوت برای نحوه ترتیب و توالی این مسیرهای تکه شده در هر پاس جوش می توان از مضرات فرایندهای جوشکاری کاست.

۲- معادلات تحلیل

۱-۲- معادلات مدل حرارتی

مساله حرارت در فرآیند جوشکاری یک مسأله انتقال حرارت گذرا می باشد. از این رو معادلات انتقال حرارت در حالت وابسته به زمان برای تحلیل این فرآیند مورد استفاده قرار می گیرد. معادله تعادل حرارتی به صورت معادله (۱) بیان می شود.

$$-\bar{n} \left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) = \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

در معادله (۱)، R_x ، R_y و R_z نرخ شار حرارتی در واحد سطح به ترتیب در راستاهای x ، y و z و $T(x, y, z, t)$ دما در هر لحظه، $Q(x, y, z, t)$ نرخ تولید حرارت اولیه، ρ چگالی ماده، C گرمای ویژه

می یابد. در نهایت کرنش گرمایی با استفاده از ضریب انبساط گرمایی وابسته به دما محاسبه می شود. جهت تحلیل مکانیکی معادله تعادل تنش با استفاده از معادله (۱۱) به دست می آید.

$$\nabla \sigma(r,t) + b(r,t) = 0 \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، σ بیانگر تنش، b نیروی حجمی و r بردار مختصات می باشد. همچنین معادله ساختاری مواد که بر پایه نظریه ترمو-الاستیک-پلاستیک استوار است در رابطه (۱۲) آورده شده است.

$$d\{\sigma\} = [D]d\{\varepsilon\} - \{C\}dT$$

$$\{C\} = -[D^e] \left\{ \{\alpha\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} \right\} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، $\{\sigma\}$ بردار تنش، $[D]$ ماتریس الاستیک-پلاستیک، $\{\varepsilon\}$ بردار کرنش، $[D^e]$ ماتریس الاستیسیته و $\{\alpha\}$ ضریب انبساط حرارتی می باشد.

۲-۳- اطلاعات بدست آمده از مدل المان محدود

مدل سازی المان محدود فرایند جوشکاری به روش کولپلینگ غیرمستقیم دارای دو مرحله است؛ در مرحله اول که تحلیل حرارتی مدل می باشد، با استفاده از مدل سازی حرارتی یک تحلیل گذرای حرارتی صورت می گیرد، نتایج این تحلیل در مرحله بعدی برای تحلیل مکانیکی مدل مورد استفاده قرار می گیرد.

در بخش تحلیل حرارتی مدل، ورودی های اصلی معادلات حاکم به سیستم و شرایط مرزی هستند؛ با اعمال این معادلات، معادلات حاکم مدل المان محدود به دست می آید که با حل این معادلات میدان دمایی مدل محاسبه می گردد. خروجی این آنالیز، دمای گره های مدل می باشد که به عنوان یکی از ورودی های مرحله بعدی (آنالیز مکانیکی) مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۱ الگوریتم حل معادلات المان محدود بصورت خلاصه آورده شده است.

۳- شبیه سازی

در این بخش اجزاء مختلف شبیه سازی مورد نظر آورده شده است.

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (7)$$

که در آن $[D]$ ماتریس ضریب هدایت حرارتی می باشد و بصورت معادله (۸) تعریف می شود.

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

با ترکیب روابط ۴-۸ رابطه (۹) بدست می آید.

$$\tilde{n}c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{t\}^T \{L\}T \right) = \{L\}^T ([D]\{L\}T) + \bar{q} \quad (9)$$

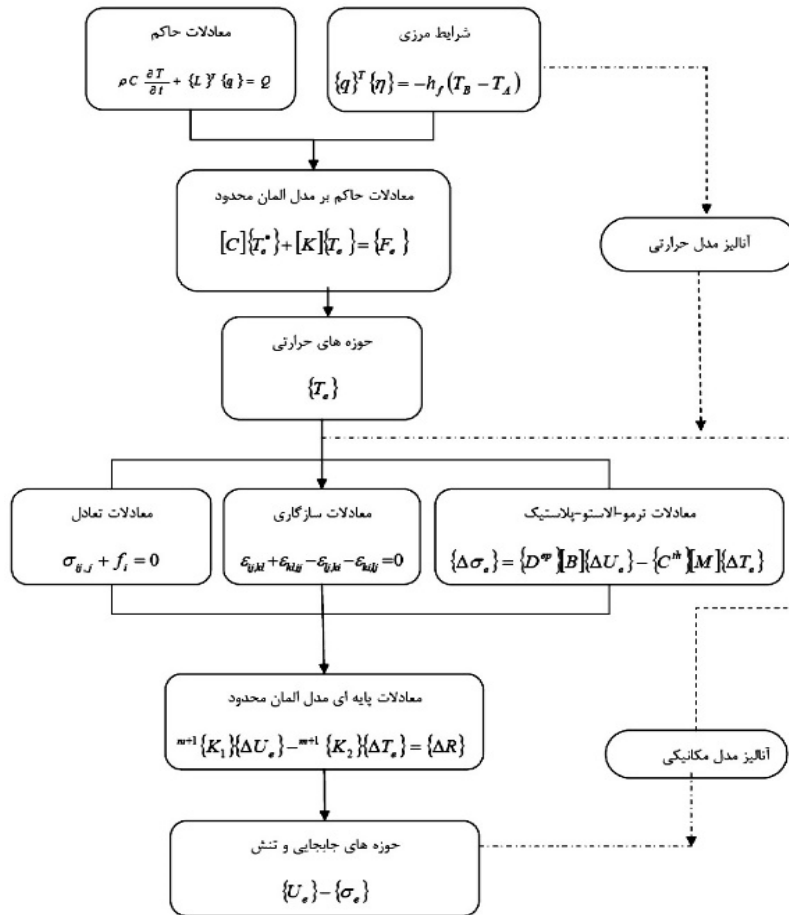
معادله (۹)، معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت در یک جسم جامد در مختصات کارتزین به فرم ماتریسی می باشد که با در نظر گرفتن شرایط مرزی و شرایط اولیه، این معادلات قابل حل می گردند.

۲-۲- معادلات مدل مکانیکی

از آنجا که در طول فرایند جوشکاری هیچ استحاله فازی حالت جامد در فلز زمینه و فلز جوش رخ نمی دهد، از این رو نرخ کرنش کل به صورت معادله (۱۰) بیان می شود.

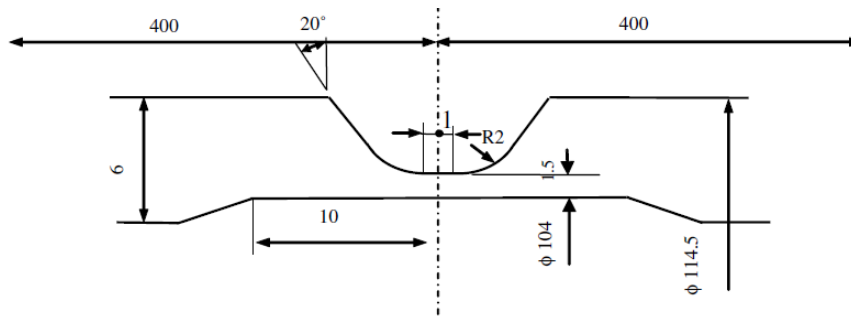
$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p + \dot{\varepsilon}^{th} \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰) عبارتهای اول، دوم و سوم در سمت راست معادله به ترتیب بیان کننده نرخهای کرنش الاستیک، پلاستیک و گرمایی هستند. کرنش الاستیک با استفاده از قانون هوک با در نظر گرفتن نسبت پواسون و مدول الاستیک وابسته به دما مدل شده است. رفتار پلاستیک ماده با در نظر گرفتن تابع تسلیم فون مایرز و کارسختی جنبشی دوخطی مدل می شود. از آنجا که در فرایند جوشکاری، ماده تحت کرنش های بالایی قرار نمی گیرد و تنها به دلیل گرم و سرد شدن، تحت تنش های تناوبی فشاری-کششی قرار می گیرد، از این رو باید اثر باوشینگر به عنوان یک اثر مهم در نظر گرفته شود. در نتیجه حالت کارسختی جنبشی اهمیت بیشتری



شکل ۱. الگوریتم حل معادلات المان محدود.

Fig. 1. Flowchart of solving finite element equations.



شکل ۲. ابعاد هندسی لوله مورد نظر و خط جوش [۲۱].

Fig. 2. Dimensions of welded pipe and shape of groove.

۲-۳- خواص ماده

در مدل حاضر لوله از جنس فولاد زنگ نزن SUS ۳۰۴ می باشد. خواص حرارتی و مکانیکی متناسب با دما این فلز از مرجع شماره ۲۱ استخراج و در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

۱-۳- هندسه مدل

مدل در نظر گرفته شده عبارتست از یک لوله با قطر خارجی ۱۱۴ میلیمتر، قطر داخلی ۱۰۸ میلیمتر و ضخامت ۶ میلیمتر که در شکل ۲ ابعاد هندسی لوله مورد نظر به همراه شکل منطقه جوش آورده شده است.

جدول ۱. خواص حرارتی فولاد زنگ‌نزن 304 SUS [۲۱]
Table 1. Thermal physical properties of SUS304

ضریب انبساط گرمایی (/°C)10e-6	گرمای ویژه J/(kg.°C)	رسانش گرمایی W/(m°C)	دما (°C)
۱۷	۴۶۲	۱۴/۶	۰
۱۷/۴	۴۹۶	۱۵/۱	۱۰۰
۱۸	۵۱۲	۱۶/۱	۲۰۰
۱۸/۶	۵۲۵	۱۸	۳۰۰
۱۹/۱	۵۴۰	۲۰/۸	۴۰۰
۱۹/۶	۵۷۷	۲۳/۹	۶۰۰
۲۰/۲	۶۰۴	۲۸	۸۰۰
۲۰/۷	۶۷۶	۳۳/۷	۱۲۰۰
۲۱/۱	۶۹۲	۳۹	۱۳۰۰
-	۵۰۶	۷۰	۱۴۰۰

جدول ۲. خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن 304 SUS [۲۱]
Table 2. Mechanical properties of SUS304

تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/m ³)	نسبت پواسان	دما (°C)
۲۶۵	۱۹۸	۷۹۰۰	۰/۲۹۴	۰
۲۱۸	۱۹۳	۷۸۸۰	۰/۲۹۵	۱۰۰
۱۸۶	۱۸۵	۷۸۳۰	۰/۳۱۰	۲۰۰
۱۷۰	۱۷۶	۷۷۹۰	۰/۳۱۸	۳۰۰
۱۵۵	۱۶۷	۷۷۵۰	۰/۳۲۶	۴۰۰
۱۴۹	۱۵۹	۷۶۶۰	۰/۳۳۳	۶۰۰
۹۱	۱۵۱	۷۵۶۰	۰/۳۳۹	۸۰۰
۲۵	۶۰	۷۳۷۰	۰/۳۴۲	۱۲۰۰
۲۱	۲۰	۷۳۲۰	۰/۳۶	۱۳۰۰
۱۰	۱۰	۷۳۲۰	۰/۳۷	۱۴۰۰

یک مدل ریاضی برای اعمال شار حرارتی حجمی بر روی قطعه کار مدل دو بیضی گلدک می باشد (شکل ۴).
برای مقادیر $z > 0$:

$$q_f(x, y, z) = \left(\frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi^{3/2}} \right) e^{\left(-\frac{3x^2}{a^2} \right)} e^{\left(-\frac{3y^2}{b^2} \right)} e^{\left(-\frac{3z^2}{c_r^2} \right)}$$

و برای مقادیر $z < 0$:

$$q_r(x, y, z) = \left(\frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi^{3/2}} \right) e^{\left(-\frac{3x^2}{a^2} \right)} e^{\left(-\frac{3y^2}{b^2} \right)} e^{\left(-\frac{3z^2}{c_r^2} \right)}$$

۳-۳- شرایط فرایند جوشکاری

در جوشکاری مورد نظر سرعت حرکت الکتروود ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه، ولتاژ در هر یک از پاس‌های جوشکاری ۹/۵ ولت و مقدار شدت آمپر در پاس اول ۱۴۰ و در پاس دوم ۱۶۰ آمپر در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ مشخصات فرایند جوش و در شکل ۳ تعداد و ترتیب پاس‌های انجام شده است.

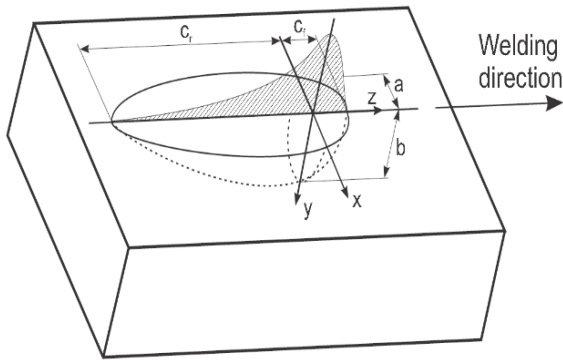
۴-۳- مدل‌سازی منبع حرارتی جوش

جهت مدل‌کردن منبع حرارتی معادلات مختلفی ارائه شده است.

جدول ۳. شرایط فرایند جوشکاری

Table 3. Welding condition.

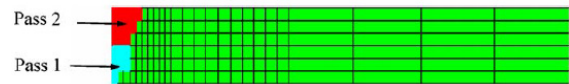
ولتاژ (V)	شدت جریان (A)	سرعت (mm/min)	حرارت ورودی (kJ/mm)	پاس
۹/۵	۱۴۰	۸۰	۰/۷	پاس اول
۹/۵	۱۶۰	۸۰	۰/۷۷	پاس دوم



شکل ۴. توزیع بیضیگون حرارت گلداک [۲۱].

Fig. 4. Goldak heat source with a double ellipsoidal distribution [21]

تغییرشکل یافته مشخص کند. روش دیگری نیز برای مدل سازی رسوب جوش وجود دارد که اصطلاحاً روش جداکردن نامیده می شود. در این روش تمام فلز جوش در ابتدای تحلیل مکانیکی در دمایی به نام دمای نرم شوندگی (نزدیک دمای ذوب) قرار داده می شود. از آنجا که در این دما تنش تسلیم خیلی پایین می باشد، عملاً اثر این المان ها در تحلیل حذف می گردد. با رسیدن منبع حرارتی به المان های مورد نظر، قید دمای بالا، از روی المان ها به توالی برداشته شده و با دمای واقعی حاصل از آنالیز حرارتی در آنالیز مکانیکی شرکت داده می شوند. در نرم افزار آباکوس امکان استفاده از هر دو روش ذکر شده برای رسوب فلز جوش یعنی المان های خاموش و المان های غیر فعال وجود دارد. در این تحقیق از روش المان های خاموش برای مدل سازی رسوب جوش استفاده شد. به طوری که در ابتدای مدل سازی کلیه المان های مربوط به فلز جوش ترسیم شده و خواص مکانیکی و حرارتی مربوط به الکتروود در مدل سازی المان محدود به آن اختصاص داده شده است ولی این المان ها قبل از شروع آنالیز از روی مدل حذف شده و در زمان آنالیز با رسیدن منبع حرارتی بر روی آنها به مدل المان محدود به صورت تدریجی اضافه می شوند. بنابراین المان های مربوط به فلز جوش از ابتدای آنالیز بر روی مدل المان محدود موجود می



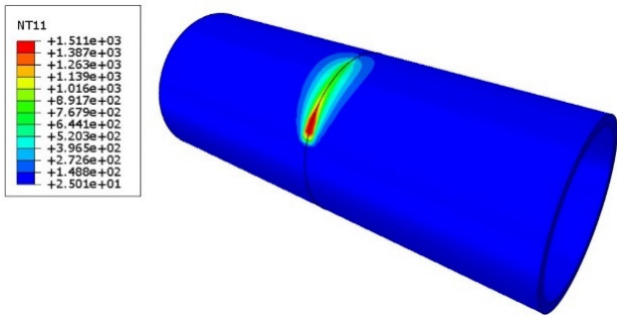
شکل ۳. تعداد و ترتیب پاس های انجام شده.

Fig. 3. Number and sequence of weld passes.

توزیع حرارتی ذکر شده ابتدا توسط گلداک و همکارانش ارائه شد اما بعدها این روابط با اضافه شدن برخی ضرایب اصلاح شدند. در این تحقیق از مدل گلداک جهت مدل سازی منبع حرارتی استفاده شد.

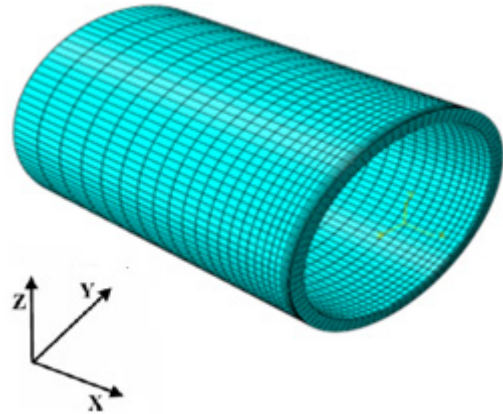
۳-۵- مدل سازی رسوب فلز پرکننده (تکنیک تولد و مرگ المان)

یکی از مهم ترین پارامترهای مدل سازی فرایند جوشکاری چگونگی مدل کردن رسوب فلز جوش می باشد. برای این منظور دو مدل اساسی وجود دارد که عبارتند از روش المان های خاموش و روش المان های غیرفعال در روش المان های خاموش تمامی گره ها و المان ها از ابتدا در مدل موجود می باشند، ولی المان های مربوط به فلز جوش که هنوز منبع حرارتی به آن ها نرسیده است دارای خواص مجازی هستند به طوری که تأثیری بر روی روند آنالیز نداشته باشند. در این روش با رسیدن منبع حرارتی بر روی المان های خاموش خواص واقعی المان ها نمایان می شود و این المان ها بدون تنش و کرنش وارد آنالیز می شوند، در روش المان های غیرفعال، المان های مدل شامل المان های مربوط به درز جوش نمی باشد. به عبارتی این المان ها در آنالیز شرکت داده نمی شوند. این المان ها در ابتدای آنالیز مشخص شده، ولی برای گره هایی که منبع حرارتی بر روی آن ها نرسیده، مجهول گرهی اختصاص نمی یابد. المان ها و گره های مذکور پس از رسیدن منبع حرارتی به آن ها، به آنالیز افزوده شده و ماتریس سفتی المان ها از نو محاسبه می گردد. روش المان های غیرفعال با این که باعث کاهش زمان محاسبات می گردد ولی در تغییر شکل های بزرگ با مشکلاتی همراه می باشد. چون روش عددی بکاررفته، باید این قابلیت را داشته باشد که مکان دقیق گره ها را با توجه به هندسه ی



شکل ۶. نمایی از حرکت الکترود در ثانیه ۰۲ پاس دوم با سرعت ۰۸۱ میلی متر بر دقیقه.

Fig. 6. A view of the movement of the electrode in the ۲۰th second of the second pass with a speed of ۱۸۰ mm/min



شکل ۵. مدل اجزای محدود لوله.

Fig. 5. 3-D finite element model.

جوش در روی سطح بیرونی لوله و در زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به محل شروع جوش روی میدهد به عنوان پارامتری جهت انجام تحلیل حساسیت مش در آنالیز حرارتی استفاده شد. با ریزتر کردن مشها، هنگامی که تعداد المان‌ها به ۱۹۲۰۰ میرسد دمای بیشینه تغییر محسوسی نمی‌کند. بنابراین، ابعاد مناسب برای المان‌های جوشی در جهات محیطی، ضخامت و محوری به ترتیب برابر $1/5 \times 1/5 \times 5/3$ میلی‌متر بدست می‌آیند.

۴- نتایج

۴-۱- صحت سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی نتایج، شرایط استفاده‌شده یکسان با شرایط به‌کاربرده‌شده در مقاله مرجع [۲۱] در نظر گرفته شد و پس از انجام آنالیزهای حرارتی و مکانیکی نتایج مربوط به تنش‌های پسماند لوله مورد نظر با نتایج تجربی مقایسه گردید. در شکل ۶ مسیر جوشکاری در پاس دوم به همراه میدان دمایی در یک لحظه خاص آورده شده است.

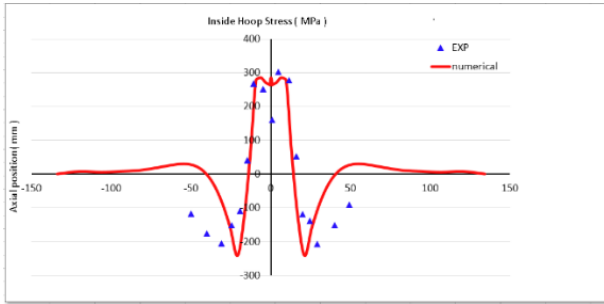
در شکل‌های ۷-۸ به ترتیب تنش‌های محوری روی سطح خارجی لوله و تنش‌های محیطی در سطح داخلی لوله با نتایج تجربی [۲۱] مقایسه شدند. همانطور که مشخص است انطباق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام‌شده، برقرار است و تاییدی بر صحت روش مدل‌سازی انجام‌شده می‌باشد.

همچنین مقادیر عددی نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی انجام‌شده با نتایج تجربی [۲۱] در جداول ۴ و ۵ مقایسه شده است.

باشند ولی تا زمانی که منبع حرارتی بر روی این المان‌ها نرسیده هیچ تنش و حرارتی در این المان‌ها بوجود نمی‌آید، وقتی فلاکس حرارتی بر روی المان‌های حذف‌شده مدل می‌رسد، المان‌های مربوط به فلز جوش در حالت آنیل‌شده (بدون تنش و بدون کرنش) به مدل المان محدود اضافه می‌شوند. اعمال شار حرارتی و انتقال حرارت جابجایی به ترتیب روی خط جوش و سطح لوله بصورت تعریف‌شده توسط کاربر با استفاده از کد فرترن انجام شد.

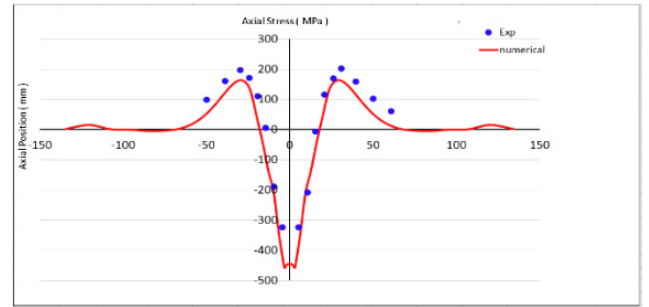
۳-۶- مدل اجزای محدود

در این تحقیق برای بخش آنالیز حرارتی مدل از المانی که دارای درجات آزادی دما باشد، استفاده شد. در نرم افزار المان محدود آباکوس برای این کار از المان DC3D8 که یک المان شش وجهی با درجه‌ی آزادی دما است، استفاده می‌شود. برای انجام آنالیز مکانیکی نیز از المانی که دارای درجات آزادی تنش (المان C3D8R) می‌باشد، استفاده شد. همچنین با اعمال نتایج حاصل برای دمای گره‌ها از آنالیز حرارتی به عنوان شرایط اولیه‌ی آنالیز مکانیکی انجام می‌شود. بدین ترتیب میزان و نحوه‌ی توزیع تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری محاسبه می‌شود. در شکل ۵ مدل اجزای محدود لوله مورد نظر آورده شده است. همچنین المان‌های به‌کاربرده‌شده از نوع آجری^۱ هستند و برای اینکه نتایج بدست‌آمده مستقل از ابعاد مش باشد، تحلیل حساسیت مش بر روی مدل صورت گرفت. از دمای بیشینه در هنگام جوشکاری که بر روی مرکز خط



شکل ۸. مقایسه تنش محیطی در سطح داخلی لوله.

Fig. 8. Comparison of hoop stress distribution on the inside surface.



شکل ۷. مقایسه تنش محوری در سطح خارجی لوله.

Fig. 7. Comparison of axial stress distribution on the outside surface.

جدول ۵. مقایسه تنش‌های کششی در سطوح خارجی و داخلی لوله

Table 5. Comparison of tensile stresses in the outside and inside surfaces of the pipe

ماکسیمم تنش کششی خارج لوله (مدل حاضر)	ماکسیمم تنش کششی خارج لوله [۲۱]	درصد خطا
-۴۲۶/۵	-۴۱۱/۳	۳/۶
ماکسیمم تنش کششی داخل لوله (مدل حاضر)	ماکسیمم تنش کششی داخل لوله [۲۱]	درصد خطا
-۱۵۴/۱۶	-۱۹۶/۵	۲۱/۵

جدول ۴. مقایسه تنش‌های فشاری در سطوح خارجی و داخلی لوله

Table 4. Comparison of compressive stresses in the outside and inside surfaces of the pipe

ماکسیمم تنش فشاری خارج لوله (مدل حاضر)	ماکسیمم تنش فشاری خارج لوله [۲۱]	درصد خطا
۱۸۹	۲۱۱	۱۰/۴۲
ماکسیمم تنش فشاری داخل لوله (مدل حاضر)	ماکسیمم تنش فشاری داخل لوله [۲۱]	درصد خطا
۳۵۲/۳	۳۵۱/۹	۰/۱

جدول ۶. پارامترهای فرایند در هردو سرعت ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی متر بر دقیقه

Table 6. Welding process parameters at both speeds of 120 and 180 mm / min

پاس	ولتاژ (ولت)	شدت جریان (آمپر)	بازده	حرارت ورودی
پاس اول	۱۴/۵	۱۰۵	٪۸۰	۱۲۱۸
پاس دوم	۱۴/۵	۱۳۰	٪۸۰	۱۵۰۸

۲-۴- بررسی پارامتری

در این بخش به بررسی پارامترهایی چون سرعت جوشکاری، میزان حرارت ورودی و ترتیب و توالی مسیرهای جوشکاری پرداخته شده است.

۲-۴-۱- اثر سرعت حرکت الکتروود

جهت بررسی اثر سرعت بر تنش‌های پسماند در سطوح داخلی و خارجی لوله از مشخصاتی که در جدول ۶ آورده شده است استفاده شد. با این تفاوت که یک بار سرعت حرکت الکتروود ۱۲۰ میلی‌متر بر

۴-۲-۲- اثر حرارت ورودی جوش

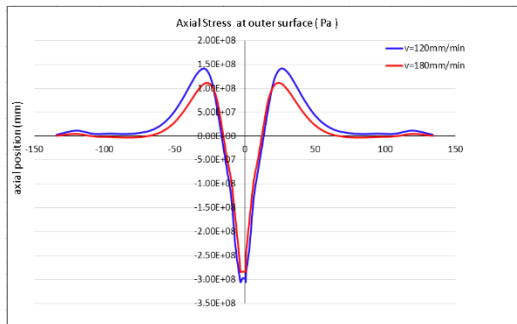
برای بررسی اثر حرارت ورودی با ثابت در نظر گرفتن سرعت جوش از مشخصات جداول ۷ و ۸ استفاده شد، با این تفاوت که میزان حرارت ورودی در حالت دوم ۲۰ درصد بیشتر از حالت اول فرض شده است. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ به مقایسه تنش محوری در سطح خارجی، تنش محوری در سطح داخلی لوله، تنش محیطی در سطح داخلی و تنش محیطی در سطح داخلی لوله پرداخته شده است.

با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ مشخص شد که با افزایش حرارت ورودی جوش مقادیر ماکزیمم و مینیمم تنش‌های محوری و محیطی در سطوح داخلی و خارجی لوله دچار تغییرات می‌شوند به طوری که افزایش ۲۰ درصدی حرارت ورودی جوش، تنش‌های کششی و فشاری محوری در سطح خارجی لوله به ترتیب افزایش ۱۰/۷۷ و کاهش ۱/۳۴ درصدی و در سطح داخلی به ترتیب

دقیقه و یک بار ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه فرض شده است. در شکل ۹ میدان دمایی ایجاد شده در یک زمان مشخص برای هر دو سرعت ذکر شده آورده شده است.

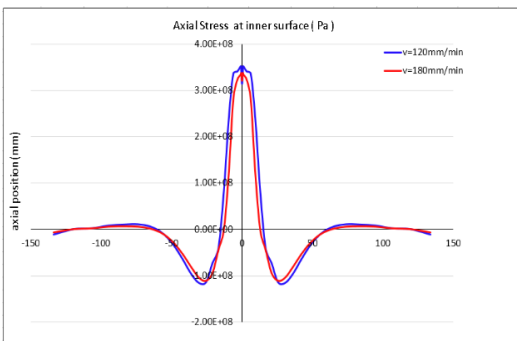
در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ به مقایسه تنش محوری در سطح خارجی، تنش محوری در سطح داخلی لوله، تنش محیطی در سطح داخلی و تنش محیطی در سطح داخلی لوله پرداخته شده است.

با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ مشخص شد که با افزایش سرعت حرکت الکتروود مقادیر ماکزیمم و مینیمم تنش‌های محوری و محیطی در سطوح داخلی و خارجی لوله دچار تغییرات می‌شوند به طوری که افزایش ۵۰ درصدی سرعت جوش منجر به کاهش تنش‌های کششی و فشاری محوری در سطح خارجی لوله به میزان ۲۰/۷ و ۶/۵ درصد و در سطح داخلی لوله نیز به ترتیب کاهش ۴/۲۸ و ۹/۰۹ درصدی مشاهده شد. همچنین در مورد تنش‌های کششی و فشاری محیطی در سطح خارجی لوله به ترتیب افزایش ۴۳/۴۷ و ۱۵/۱۵ درصد و در سطح داخلی لوله به ترتیب افزایش ۱۴/۳ و ۶/۵۲ درصدی ثبت گردید.



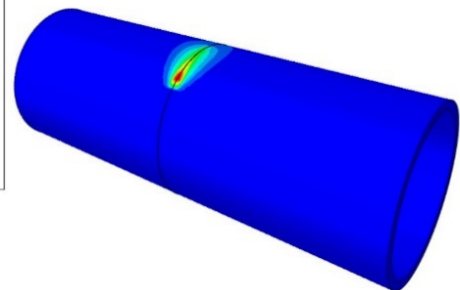
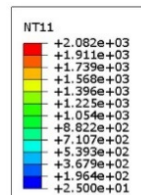
شکل ۱۰. مقایسه تنش محوری در سطح خارجی لوله در دو سرعت مختلف.

Fig. 10. Comparison of axial stress distribution on the outside surface at two different speeds.

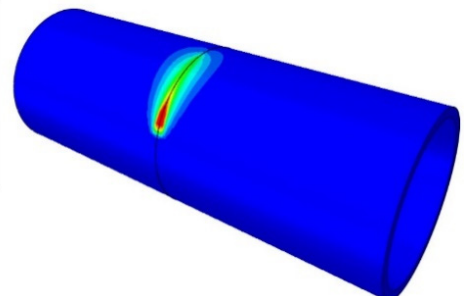
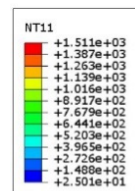


شکل ۱۱. مقایسه تنش محوری در سطح داخلی لوله در دو سرعت مختلف.

Fig. 11. Comparison of axial stress distribution on the inside surface at two different speeds.



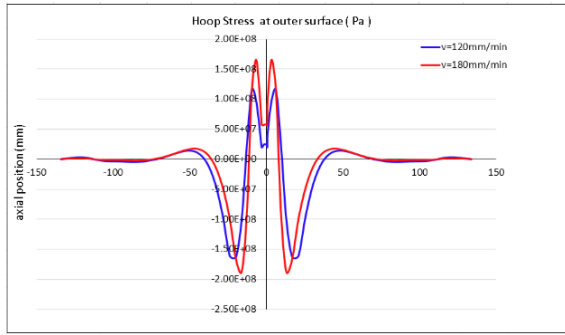
الف) ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه



ب) ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه

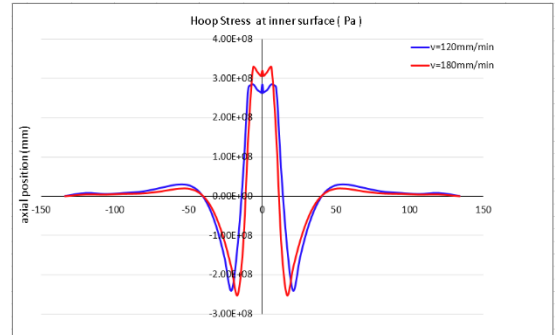
شکل ۹. نمایی از حرکت الکتروود در ثانیه ۲۰ پاس دوم با سرعت‌های مختلف.

Fig. 9. A view of the movement of the electrode in the 20th second of the second pass with various speed.



شکل ۱۳. مقایسه تنش محیطی در سطح خارجی لوله در دو سرعت مختلف.

Fig. 13. Comparison of hoop stress distribution on the outside surface at two different speeds.



شکل ۱۲. مقایسه تنش محیطی در سطح داخلی لوله در دو سرعت مختلف.

Fig. 12. Comparison of hoop stress distribution on the inside surface at two different speeds.

جدول ۷. پارامترهای جوش در حالت اول (1-Q)

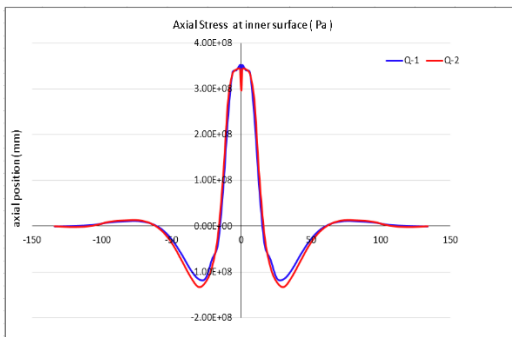
Table 7. Welding parameters in the first case (1- Q)

بازده	سرعت (mm/min)	شدت جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	پاس
٪۸۰	۱۲۰	۱۰۵	۱۴/۵	پاس اول
٪۸۰	۱۲۰	۱۳۰	۱۴/۵	پاس دوم

جدول ۸. پارامترهای جوش در حالت دوم (2-Q)

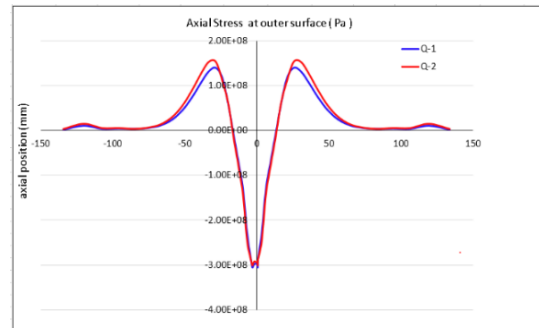
Table 8. Welding parameters in the seconde case (2- Q)

بازده	سرعت (mm/min)	شدت جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	پاس
٪۸۰	۱۲۰	۱۲۵	۱۴/۵	پاس اول
٪۸۰	۱۲۰	۱۵۶	۱۴/۵	پاس دوم



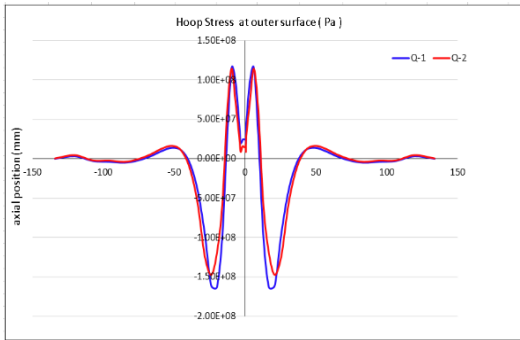
شکل ۱۵. مقایسه تنش محوری در سطح داخلی لوله در دو شدت جریان مختلف.

Fig. 15. Comparison of axial stress distribution on the inside surface at two different currents.



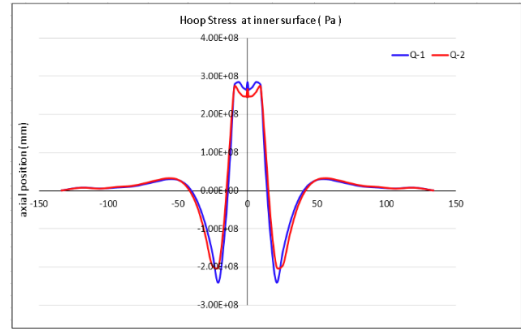
شکل ۱۴. مقایسه تنش محوری در سطح خارجی لوله در دو شدت جریان مختلف.

Fig. 14. Comparison of axial stress distribution on the outside surface at two different currents.



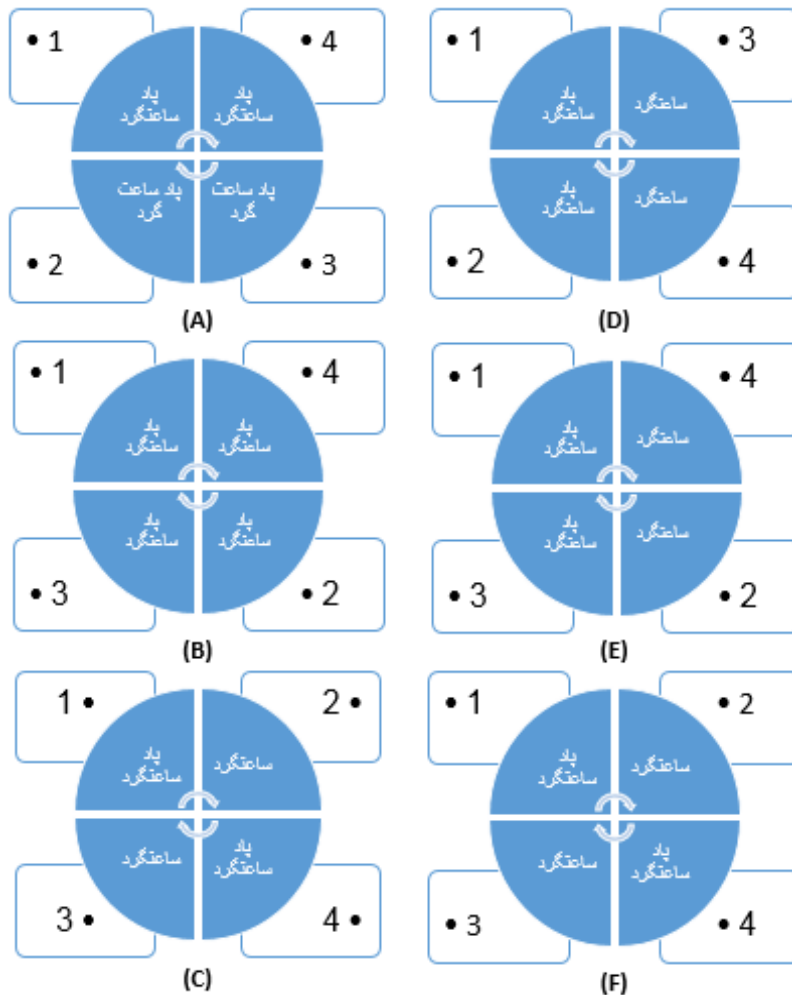
شکل ۱۷. مقایسه تنش محیطی در سطح خارجی لوله در دو شدت جریان مختلف.

Fig. 17. Comparison of hoop stress distribution on the outside surface at two different currents.



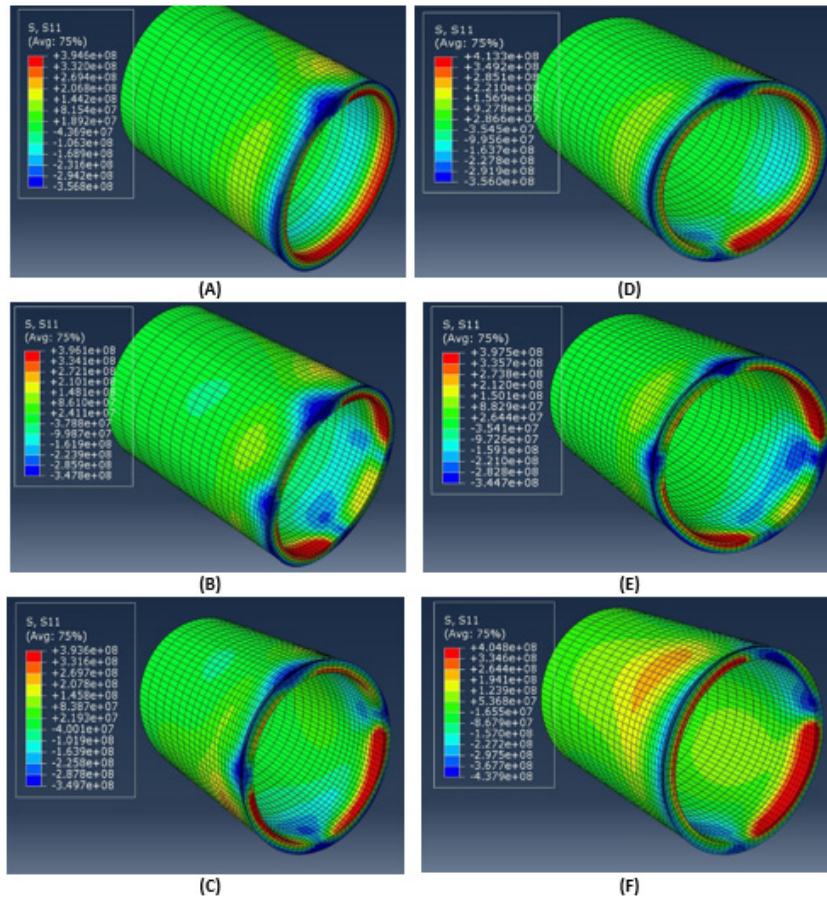
شکل ۱۶. مقایسه تنش محیطی در سطح داخلی لوله در دو شدت جریان مختلف.

Fig. 16. Comparison of hoop stress distribution on the inside surface at two different currents.



شکل ۱۸. حالات شش گانه در نظر گرفته شده مسیر جوش.

Fig. 18. Six cases of the considered welding path.



شکل ۱۹. کانتور تنش پسماند محوری لوله در حالت‌های مختلف.

Fig. 19. Axial stress distributions of the welded pipe in different cases.

پاس اول در نظر گرفته شد و زمان خنک‌کاری بین مسیرهای پاس دوم نیز صفر در نظر گرفته شده است و بعد از اتمام پاس دوم، ۹ ثانیه زمان خنک‌کاری در نظر گرفته شد. در شکل ۱۸ کلیه حالات در نظر گرفته شده برای مسیرها و جهات مختلف جوشکاری محیطی لوله آورده شده است.

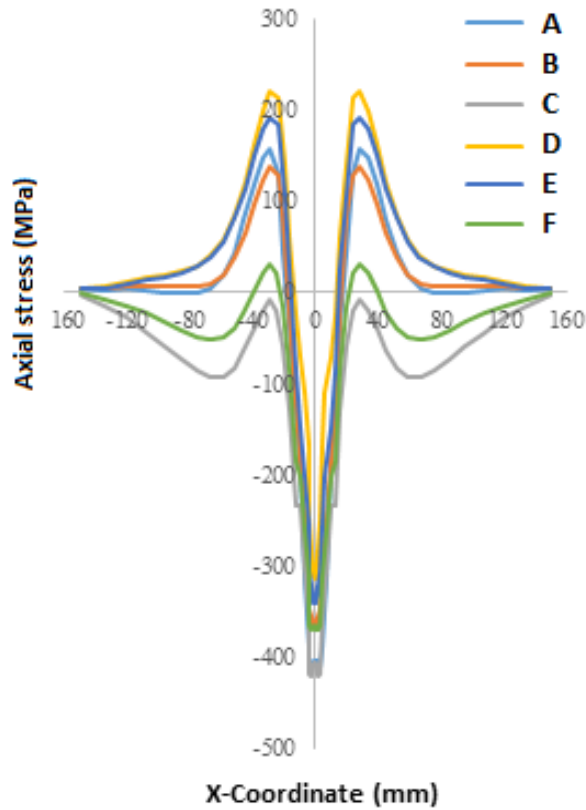
در شکل ۱۹ کانتورهای مربوط به تنش‌های پسماند پس از اتمام فرایند جوشکاری در مسیرهای شش‌گانه، آورده شده است. در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ نمودارهای مربوط به مقایسه تنش‌ها و اعوجاج‌های مختلف ایجاد شده در مسیرهای شش‌گانه، آورده شده است.

با در نظر گرفتن مسیرهای مختلف جوش محیطی لوله مشخص گردید که تنش محوری روی سطح خارجی لوله در حالت C مقدار بهینه را دارد به طوری که کلیه تنش‌های کششی نیز به تنش فشاری تبدیل شدند و هیچگونه تنش کششی به روی سطح خارجی لوله

کاهش ۱/۷۱ و افزایش ۱۳/۰۴ درصدی را نشان دادند. همچنین در مورد تنش‌های کششی و فشاری محیطی در سطح خارجی لوله به ترتیب کاهش ۲/۶ و ۱۸/۱۸ درصد و در سطح داخلی لوله نیز کاهش ۲/۵ و ۱۴/۸۹ درصدی را نشان دادند.

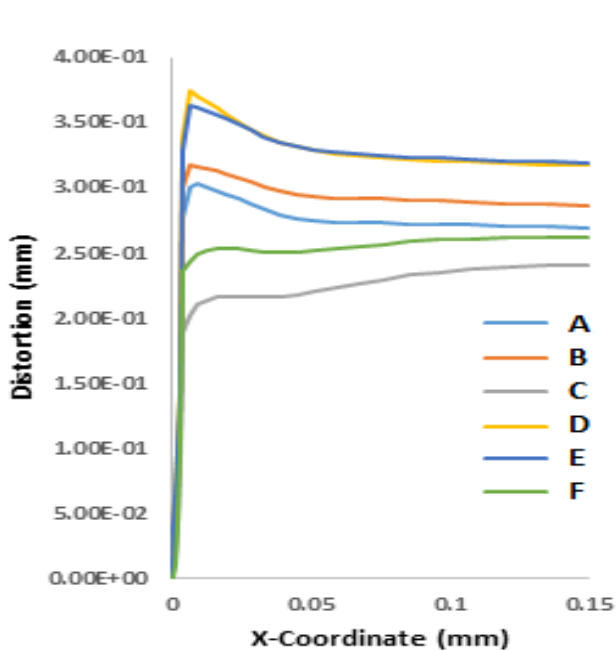
۴-۲-۳- اثر ترتیب و جهات مسیر جوش

در ادامه، شش حالت مختلف را در دو پاس برای لوله با مشخصات هندسی بیان شده در بخش ۳-۱ در نظر گرفته شد. به این صورت که برای جوشکاری لوله مورد نظر، ابتدا لوله به ۴ ربع مساوی تقسیم شده و هر ربع یک مسیر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به سرعت حرکت الکتروود و قطر لوله، ۹ ثانیه طول میکشد که کل لوله جوشکاری شود. زمان خنک‌کاری بین هر مسیر در پاس اول صفر در نظر گرفته شده است اما زمان خنک‌کاری بین پاس اول و شروع پاس دوم ۹ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین مسیرها در پاس دوم نیز همانند مسیرها در



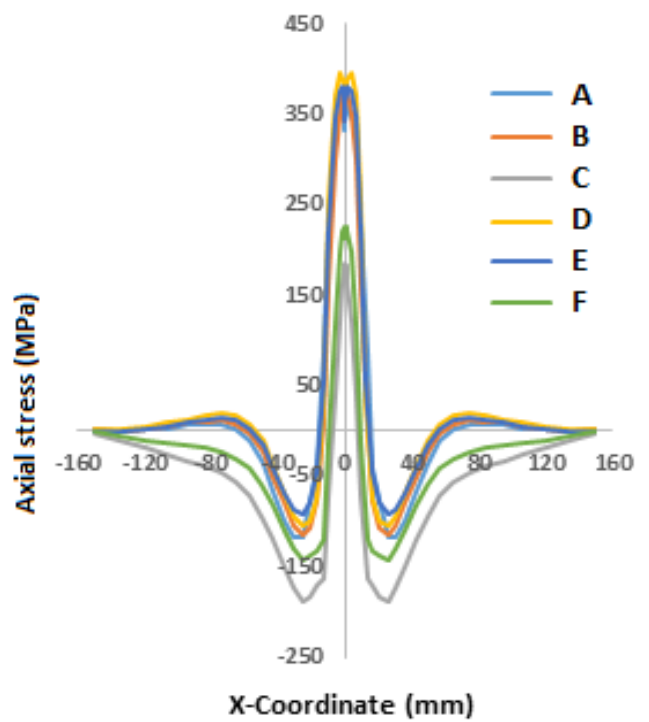
شکل ۲۰. تنش محوری روی سطح خارجی لوله در حالت‌های مختلف.

Fig. 20. Axial stress distributions of the welded pipe on the outside surface in different cases.



شکل ۲۲. مقایسه اعوجاج طولی در سطح داخلی لوله برای کلیه حالت‌ها.

Fig. 22 . Comparison of longitudinal distortion on the inside surface of the pipe in different cases.



شکل ۲۱. تنش محوری روی سطح داخلی لوله در حالت‌های مختلف.

Fig. 21. Axial stress distributions of the welded pipe on the inside surface in different cases.

تبدیل شدند. همچنین در مورد تنش محوری روی سطح داخلی می توان گفت که در حالت C کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است.

۵- با توجه به مقایسه نمودارهای تنش های پسماند و اعوجاج حالت های مختلف در نظر گرفته شده مشخص گردید که حالت C دارای کمترین مقدار تنش پسماند و اعوجاج بود بنابراین به عنوان بهینه ترین حالت برای جوش دوپاسه محیطی لوله معرفی می شود.

مراجع

- [1] J. Subramanian, S. Seetharaman, M. Gupta, Processing and properties of aluminum and magnesium based composites containing amorphous reinforcement: A review, *Metals*, 5 (2015) 743-762.
- [2] K. Masubuchi, J. Bryan, T. Muraki, Analysis of thermal stresses and metal movement during welding. *Asme Journal*, 97 (1975) 81-91.
- [3] H. Zhang, M. Wang, X. Zhang, Z. Zhu, T. Yu, G. Yang, Effect of welding speed on defect features and mechanical performance of friction stir lap welded 7B04 aluminum alloy, *Metals*, 6 (2016) 87-104.
- [4] Z. Zeng, X.B. Li, Y.G. Miao, G. Wu, Z.J. Zhao, Numerical and experiment analysis of residual stress on magnesium alloy and steel butt joint by hybrid laser-TIG welding, *Comput. Mater. Sci.*, 50 (2011) 1763-1769.
- [5] Y.B. Zhao, Z.L. Lei, Y.B. Chen, W. Tao, A comparative study of laser-arc double-sided welding and double-sided arc welding of 6 mm 5A06 aluminium alloy, *Mater. Des.*, 32 (2011) 2165-2171.
- [6] P. Carlone, R. Citarella, M. Lepore, G.S. Palazzo, A FEM-DBEM investigation of the influence of process parameters on crack growth in aluminum friction stir welded butt joints, *Int. J. Mater. Form*, 8 (2015) 591-599.
- [7] W. Jiang, Q. Fan, J. Gong, Optimization of welding joint between tower and bottom flange based on residual stress considerations in a wind turbine, *Energy* 35 (2010) 461-467.
- [8] H.C. Kuo, L.J. Wu, Prediction of deformation to thin ship panels for different heat sources, *J. Ship Prod*, 17 (2001) 52-61.
- [9] R. Koganti, A. Joaquin, M. Zaluzec, C. Karas, *Gas Metal*

ایجاد نمی شود. و این درحالی است که مقدار تنش فشاری نسبت به حالت مرجع [۲۱] تغییر چندانی نکرده است.

در مورد تنش محوری روی سطح داخلی می توان گفت که مقدار ماکزیمم این تنش بازهم در حالت C کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است و ضمن اینکه در مقایسه با حالت مرجع [۲۱] تنش های کششی و فشاری به ترتیب کاهش ۵۵ و ۴۹/۳ درصدی داشتند. همچنین با مقایسه نمودارهای مربوط به اعوجاج حالت های مختلف مشخص شده که حالت C کمترین اعوجاج را ایجاد کرده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تنش های پسماند و اعوجاج های ناشی از جوش دوپاسه محیطی یک لوله فولادی پرداخته شد و پس از بررسی پارامترهای مختلف از جمله سرعت جوشکاری، حرارت ورودی و ترتیب و توالی پاس های مختلف، یک الگوی بهینه جهت کاهش تنش های پسماند و اعوجاج های ناشی از جوش محیطی لوله مورد نظر ارائه شده است. مهمترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- با مقایسه نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی مشخص گردید که انطباق خوبی بین نتایج برقرار است و نتایج مدل انجام شده قابل اطمینان می باشد.

۲- با افزایش ۵۰ درصدی سرعت حرکت الکتروود تنش های کششی و فشاری محوری واقع در سطوح داخلی و خارجی لوله دچار کاهش شدند اما تنش های کششی و فشاری محیطی در سطح خارجی لوله افزایش قابل توجهی را از خود نشان دادند.

۳- بررسی اثر میزان حرارت ورودی جوش نشان داد که با افزایش ۲۰ درصدی حرارت ورودی جوش:

الف) تنش های کششی و فشاری محوری در سطح خارجی لوله به ترتیب افزایش و کاهش را نشان دادند و در سطح داخلی لوله عکس این روند مشاهده شد.

ب) تنش های کششی و فشاری محیطی در سطوح خارجی و داخلی لوله دچار کاهش شدند.

۴- با در نظر گرفتن مسیرهای مختلف جوش محیطی لوله مشخص گردید که تنش محوری روی سطح خارجی لوله در حالت C مقدار بهینه را دارد به طوری که کلیه تنش های کششی نیز به تنش فشاری

- Investigation of GTAW Circumferentially Butt-Welded Incoloy 800 Pipes". *Journal of Materials Processing Technology*, 99 (2008) 295-303.
- [16] T.J. Kim, B.S. Jang, S.W. Kang, Welding deformation analysis based on improved equivalent strain method to cover external constraint during cooling stage, *Int. J. Naval Archit. Ocean Eng*, 7 (2015) 805-816.
- [17] A.A. Bhatti, Z. Barsoum, H. Murakawa, I. Barsoum, Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion, *Int. J. Materials & Design*, 65 (2015) 878-889.
- [18] S. Mirzaahmadi, D. Afshari, Z. Barsoum, Investigating the effect of material properties on simulation of Mg alloy resistance spot welding process, *Int. J. Manufacturing Engineering*, 6 (2019) 53-60.
- [19] N. Habibi, H. Eskandari, Stress and temperature analysis in tubular x-joints using simufact welding, *Int. J. Welding Science and Technology*, 5 (2020) 61-75.
- [20] N. Habibi, S. Samawati, O. Ahmadi, Transient Thermal Stresses Analysis in a FPGM Cylinder, *Journal of Mechanics of Advanced Composite Structures*, 6 (2019) 81-94.
- [21] D. Deng, H. Murakawa, Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements, *Computational Materials Science*, 37 (2006), 269-277.
- Arc Welded (GMAW) Joint Strength Comparison of Aluminum Sheet (5754) and Extruded (6063) Alloys, ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 6 (2007) 715-723.
- [10] W. Jiang, K. Yahiaoui, Effect of welding sequence on residual stress distribution in a multipass welded piping branch junction, *international journal of pressure vessel and piping*, 95 (2012) 39-47.
- [11] J.A. Da Nóbrega, D.S. Diniz, A.A. Silva, T.M. Maciel, V. Albuquerque, J. Tavares, Numerical evaluation of temperature field and residual stresses in an API 5L X80 steel welded joint using the finite element method, *Metals*, 6 (2016) 28-39.
- [12] Z. Zeng, L.J. Wang, P.A. Du, X.B. Li, Determination of welding stress and distortion in discontinuous welding by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements, *Comput. Mater. Sci*, 49 (2010) 535-543.
- [13] B. Brickstad, B.L. Josefson, A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-pass Butt- Welded Stainless Steel Pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75 (1998) 11-25.
- [14] L. Yajiang, W. Juan, C. Maoai, S. Xiaoqin, Finite Element Analysis of Residual Stress in the Welded Zone of a High Strength Steel, *Bulletin of Materials Science*, 27(2) (2004) 127- 132.
- [15] A. Kermanpur, M. Shamanian, V. Esfahani Yeganeh, Three-Dimensional Thermal Simulation and Experimental

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Kazemi, Investigation of the effect of welding path on residual stresses and deformations in peripheral welding of steel pipe, *AmirKabir J. Mech. Eng.*, 53(Special Issue 4) (2021) 2735-2750.

DOI: [10.22060/mej.2020.18166.6752](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18166.6752)

