

## بررسی تأثیر ترتیب جوشکاری و فرآیند هیدروتست بر تنش‌های پسماند جوشی در لوله‌های فولادی زنگ‌نزن SUS304\*

محمد مشایخی<sup>(۱)</sup> هادی هدایتی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در تحقیق حاضر توزیع دما و تنش‌های پسماند در اتصال جوشی لوله‌های فولادی زنگ‌نزن SUS304 با تحلیل ترمو-الاستیک-پلاستیک و به روش عددی محاسبه شده است. این اتصال جوشی، یک اتصال لب به لب محیطی است که جوشکاری در دو پاس به روش قوس تنگستنی با گاز محافظ صورت گرفته است. فرآیند جوشکاری به صورت دو بعدی و سه بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS به کمک یک زیربرنامه به منظور اعمال شار حرارتی، شبیه‌سازی شده است. جهت مدل‌سازی پاس‌های جوش و ورود المان‌های مذاب به داخل حوضچه‌ی جوش از تکنیک تولد و مرگ المان‌ها سود برده شده است. پس از مدل‌سازی فرآیند، تأثیر ترتیب جوشکاری بر شکل‌گیری تنش‌های پسماند در لوله با در نظر گرفتن چهار نوع حرکت پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان تأثیر فرآیند هیدروتست پس از جوشکاری بر کاهش تنش‌های پسماند مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد انتخاب ترتیب مناسب جوشکاری می‌تواند تنش‌های پسماند کششی را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش و در مواقعی آن‌ها را به تنش‌های فشاری تبدیل نماید. همچنین، بارگذاری هیدروتست پس از فرآیند جوشکاری می‌تواند تا ۶۵ درصد تنش‌های پسماند جوشی را کاهش دهد.

**واژه‌های کلیدی** فرآیند جوشکاری چندپاسه، تنش‌های پسماند، ترتیب جوشکاری، فرآیند هیدروتست

## Effect of Welding Sequence and Hydrotest Process on Welding Residual Stresses in Stainless Steel SUS304 Pipes

M. Mashayekhi

H. Hedayati

**Abstract** In the present study, temperature fields and residual stress states in the weld joint of the stainless steel pipe are computed numerically using a thermo-elastic-plastic analysis. This weld joint is a circumferential butt-weld one and is done in two passes using gas tungsten arc welding. Welding procedure is simulated in two and three dimensions using a subroutine developed in finite element ABAQUS software for applying heat flux. Furthermore, the element birth and death technique is used to simulate weld passes and filler metal deposition into the weld pool. When the simulation is done, the effect of welding sequence on welding residual stresses are considered using four different welding sequences proposed. Finally, the effect of hydrotest process in decreasing the residual stresses is evaluated. The results of the simulation show that selecting a suitable welding sequence can substantially decrease the amount of tensile residual stresses and can change them to compressive stresses in certain situations. Also the results of this research show that applying a hydrotest pressure after welding process can reduce welding residual stresses up to 65%.

**Key Words** multi-pass welding process, residual stresses, welding sequence, hydrotest process

\* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸/۸/۱۹، نسخه پذیرش آن در تاریخ ۳/۳/۲۰۹۰ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۱۲/۴/۹۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

## مقدمه

به تنش‌های فشاری تبدیل نمود. بنابراین تخمین مقدار و توزیع تنش‌های پسماند جوشکاری، امری ضروری است.

توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به عوامل متعددی مانند: ابعاد قطعه، مشخصات ماده، شرایط تکیه‌گاهی، حرارت ورودی، تعداد پاس‌های جوش و ترتیب پاس‌ها بستگی دارد. از این رو، تخمین توزیع این تنش‌ها در جوشکاری چندپاسه بسیار پیچیده بوده و امکان حل تحلیلی معادلات حاکم به دلیل رفتار غیر خطی شدید وجود ندارد. از طرفی استفاده از روش‌های اندازه‌گیری تجربی نیز اغلب پرهزینه و زمان‌بر است. از این رو در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌های عددی به خصوص روش اجزای محدود، برای تحلیل فرآیند جوشکاری مورد توجه محققان قرار گرفته است.

مطالعه بر روی تنش‌های حرارتی گذرای فرآیند جوشکاری از سال ۱۹۳۰ آغاز گردید و اولین نتایج آن در سال ۱۹۳۶ ارائه شد. در این سال برای اولین بار از کامپیوتر برای تحلیل تنش‌های حرارتی استفاده شد [2]. پس از آن این تحقیقات گسترش بیشتری یافت و در اوایل دهه ۱۹۷۰، محققان توانستند با استفاده از روش اجزای محدود و با انجام تحلیل‌های ترمو-الاستو-پلاستیک، به محاسبه میدان‌های دمایی و تنش‌های پسماند جوشی بپردازند. به دلیل ضعف امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری موجود و همچنین هزینه بالا، بیشتر شبیه‌سازی‌های مرتبط با فرآیند جوشکاری در آن زمان به مدل‌های دوبعدی کرنش صفحه‌ای، تقارن محوری و مدل‌های ساده شده مانند مدل‌های سه‌بعدی پوسته‌ای محدود می‌شد.

در سال ۱۹۷۸ آندرسون [3] با استفاده از روش اجزای محدود دوبعدی، توزیع تنش پسماند در سطوح بالا و پایین یک صفحه پایه را در نزدیکی خط جوش، طی فرآیند جوشکاری زیرپودری، مورد

جوشکاری به عنوان یک روش اتصال قابل اعتماد و کارآمد در صنایع مختلف از جمله صنایع هوایی، اتومبیل‌سازی و کشتی‌سازی به شمار می‌رود. یکی از مسایل مهم در سازه‌های جوشکاری شده، وجود تنش‌های پسماند و اعوجاج حاصل از جوشکاری است. از مهم‌ترین عوامل ایجاد تنش‌ها و کرنش‌های پسماند در قطعات جوشکاری شده، تغییرات غیریکنواخت دمای سازه و کرنش‌های ناشی از ایجاد استحاله فازی هنگام یک سیکل حرارتی است. تنش پسماند اطراف جوش، یکپارچگی سازه را از بین می‌برد. از طرف دیگر تنش پسماند کششی بالا در نزدیکی ناحیه جوش باعث تردشدن و کاهش طول عمر سازه و بروز خوردگی تنش در طول سرویس‌دهی می‌شود. این تنش‌ها یکی از علل اصلی ایجاد ترک در محل جوش و ناحیه تحت تأثیر حرارت هستند. تنش‌های پسماند همچنین بر رشد ترک خستگی، تحت بارگذاری خارجی با دامنه کم، تأثیر قابل ملاحظه‌ای خواهند داشت [1]. در مخازن تحت فشار تأثیر اندک تنش پسماند بسیار مهم خواهد بود. اگر در قطعه، ترکی وجود داشته باشد، لازم است هنگام استفاده از روش‌های مکانیک شکست الاستیک خطی و یا شکست الاستیک-پلاستیک، تأثیر تنش پسماند نیز منظور شود [2].

وجود تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری نه تنها از مهم‌ترین علل بروز ترک در سازه و لوله‌های جوشکاری شده است، بلکه در مواقعی که محیط خورنده است باعث بروز ترک خوردگی تنشی (Stress corrosion crackin) - که یکی از رایج‌ترین مشکلات در خط لوله‌های انتقال نفت و گاز است - می‌گردد. برای جلوگیری از ترک خوردگی تنشی، لازم است تنش‌های پسماند را کاهش و در صورت امکان

ترتیب مناسب جوشکاری می‌تواند تا حد زیادی مقدار اعوجاج پس از جوشکاری لوله‌ها را کاهش دهد.

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر نوع حرکت الکتروود بر شکل‌گیری تنش‌های پسماند در اتصال لب به لب محیطی یک لوله فولادی، همچنین بررسی تأثیر فرآیند هیدروتست بر کاهش این نوع تنش‌هاست. برای این منظور در این پژوهش، چهار نوع حرکت الکتروود شامل: جوشکاری پیوسته محیطی (Progressive welding)، جوشکاری پس‌رو (معکوس) (Backstep welding)، جوشکاری پرشی (Jump welding) و جوشکاری دوالکتروود (Double electrode welding)، شبیه‌سازی شده است. در پایان فرآیند جوشکاری پس از هر شبیه‌سازی، یک مرحله بارگذاری هیدروتست به منظور کاهش تنش‌های پسماند ایجاد شده بر روی قطعه اعمال شده است. جهت ارزیابی صحت نتایج به دست آمده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل حاضر با نتایج تجربی که در این زمینه وجود دارد مقایسه شده است. اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند معمولاً با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ انجام می‌گیرد.

### هندسه اتصال جوشی و پارامترهای جوشکاری

در تحقیق حاضر اتصال لب به لب محیطی دو لوله از جنس فولاد زنگ نزن SUS304 مورد بررسی قرار گرفته است. لوله‌ها دارای قطر خارجی ۱۱۴/۳ میلی‌متر، ضخامت ۶ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متر بوده و اتصال آن‌ها در دو پاس و به روش جوشکاری قوس تنگ‌سنجی با گاز محافظ انجام شده است [10]. شکل (۱) لوله‌های جوشکاری شده، پخ V شکل لوله و هندسه‌ی محل جوش را نشان می‌دهد. در شکل (۲) نیز ترتیب ته‌نشینی پاس‌های جوشی، نقطه‌ی شروع جوشکاری و جهت جوشکاری آمده است.

بررسی قرار داد. وی نشان داد استحاله‌های فازی طی سیکل سرد شدن، اثر مهمی بر روی تنش‌های پسماند دارد.

در سال ۱۹۹۶ مایکلریس [4] نشان داد که فرآیند هیدروتست، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری محیطی لوله‌ها را ۵۰ الی ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. کینگرن [5] نشان داد با افزایش فشار در فرآیند هیدروتست، تنش‌های پسماند جوشی کاهش بیشتری می‌یابد ولی از طرف دیگر افزایش بیش از حد فشار باعث خرابی لوله می‌گردد. از این رو فشار مناسب پیشنهادی وی برای این فرآیند فشاری است که بتواند تنش محیطی تا ۹۰ درصد حداقل تنش تسلیم را در لوله ایجاد کند.

بریکستاد و جوزفسون [6] با استفاده از یک مدل دوبعدی تقارن محوری و آنالیز غیر وابسته، توانستند تنش‌های پسماند جوشی را در اتصال چندپاسه لوله‌های جدار ضخیم محاسبه کنند. یاجیانگ [7]، 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 [8]، 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.

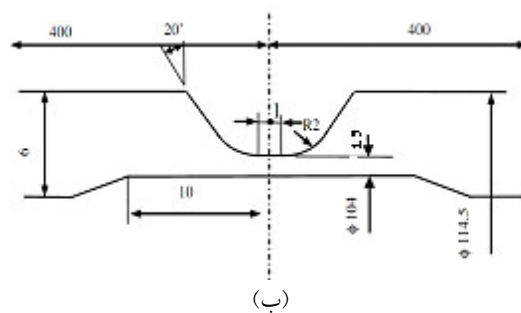
ستاری‌فر و جوادی [9]، تأثیر ۹ حالت مختلف جوشکاری را بر تغییر شکل‌های جوشی و تغییر قطر لوله، مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که انتخاب

برابر خوردگی تنش‌ی اشاره نمود. فلز پرکننده (سیم جوش) از جنس Y308L انتخاب شده است. تنش تسلیم سیم جوش تا دو برابر فلز پایه بوده و مقاومت در برابر ترک آن نیز بسیار بالا است. به علاوه سیم جوش از جوش‌پذیری خوبی برخوردار بوده و ظاهر خط جوش آن نیز مناسب است. همچنین مقاومت در برابر خوردگی بین‌دانه‌ای سیم جوش، با کم کردن محتوای کربن موجود در آن، در مقایسه با نمونه‌های دیگر این گروه مانند Y308 افزایش یافته است.

شرایط جوشکاری در جدول (۱)، و خواص ترمومکانیکی فلز پایه در شکل (۳) آمده است [10]. آن‌جا که در واقعیت استحکام فلز جوش نسبت به فلز پایه بیشتر است از این رو در مدل‌سازی نیز استحکام فلز جوش بالاتر در نظر گرفته شده است و سایر مشخصات خواص مکانیکی مشابه خواص فلز پایه منظور شده است.



(الف)

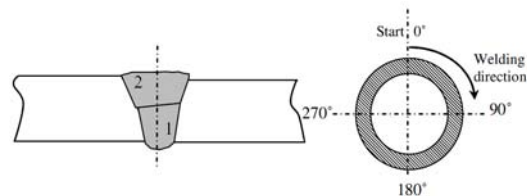


(ب)

شکل ۱ (الف) لوله‌های جوشکاری شده؛ (ب) هندسه‌ی ناحیه‌ی جوش [10]

جدول ۱ شرایط حاکم بر جوشکاری [10]

شماره پاس	شدت جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت الکتروود (mm/min)
۱	۱۴۰	۹/۵	۸۰
۲	۱۶۰	۹/۵	۸۰



شکل ۲ ترتیب پاس‌های جوشی، نقطه‌ی شروع و جهت

جوشکاری لوله‌ها [10]

### تحلیل اجزای محدود

در مدل‌سازی فرآیند جوشکاری، سه حوزه‌ی حرارت، متالورژی و مکانیک در تقابل با یکدیگر هستند. با انتخاب روش تحلیل برای آنالیز جوشکاری، چگونگی ارتباط این سه حوزه تعیین می‌شود. تقابل این سه حوزه بیانگر آن است که در شبیه‌سازی فرآیند لازم است دو دسته معادله‌ی دیفرانسیل حرارتی و مکانیکی به صورت همبسته حل گردند. از این رو در روش اجزای محدود از دو راهبرد کلی و مجزا برای تحلیل این فرآیند استفاده می‌شود.

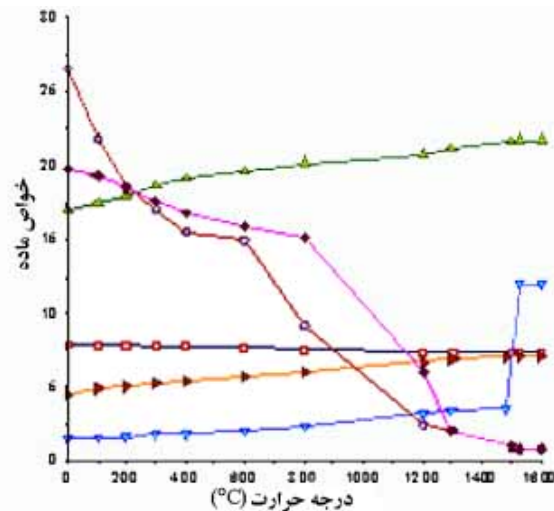
فولاد مورد استفاده در این تحقیق یک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی است که فولاد پایه‌ی نیکل نیز نامیده می‌شود. این فولاد یکی از پرکاربردترین فولادهای زنگ‌نزن است که به علت مشخصه‌های جوشکاری و شکل‌دهی ممتاز آن، در بازه‌ی وسیعی از محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله مشخصه‌های این فولاد می‌توان به مقاومت در برابر خوردگی، جوش‌پذیری عالی، شکل‌پذیری بالا و مقاومت در

حوزه‌های حرارتی و مکانیکی نیز بر روی یکدیگر تاثیرگذار هستند که این امر وابستگی معادلات مکانیکی و حرارتی در جسم را به دنبال دارد. شکل (۴) رابطه‌ی این سه حوزه و چگونگی تاثیر آنها بر یکدیگر را در فرآیند جوشکاری نشان می‌دهد [11]. از آنجا که در جوشکاری، گرمای حاصل از کرنش پلاستیک ناچیز بوده و می‌توان از اثر کرنش‌های سطحی بر ضریب انتقال حرارت سطوح صرف نظر کرد، معادلات مکانیکی و حرارتی را می‌توان به صورت مستقل حل نمود و از حل غیر وابسته سود برد.

روش غیر وابسته که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، از دو مرحله اساسی تشکیل شده است؛ در مرحله اول که تحلیل حرارتی مدل است با استفاده از مدل‌سازی حرارتی، یک تحلیل گذرای حرارتی انجام می‌شود. نتایج این تحلیل که تاریخچه حرارتی نقاط مختلف سازه است، در تحلیل مکانیکی به عنوان ورودی مسأله مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت با انجام یک تحلیل الاستیک-پلاستیک میدان تنش‌های پسماند به دست می‌آید. در شکل (۵) مراحل روش غیر وابسته نشان داده شده است.

### تحلیل حرارتی

در فرآیند جوشکاری یک میدان گرمایی موضعی تا نقطه‌ی ذوب ماده و سپس سرمایش در ناحیه جوش ایجاد می‌شود. در این حالت توزیع دما در جسم غیر یکنواخت بوده و تابعی از مختصات مکانی و زمان خواهد بود. این حرارت‌دهی غیریکنواخت یکی از عوامل اصلی در ایجاد تغییر شکل‌های جوشی است. مسأله‌ی انتقال حرارت در جوشکاری، یک مسأله‌ی وابسته به زمان (Transient) است، از این رو معادلات انتقال حرارت در حالت وابسته به زمان برای تحلیل



نماد	خواص مواد	واحد
	تنش تسلیم	$\times 10^7 \text{ N/m}^2$
	مدول الاستیسیته	$\times 10^{10} \text{ N/m}^2$
	ضریب انبساط طولی	$\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	چگالی	$\times 10^5 \text{ kg/m}^3$
	ضریب رسانایی گرما	$\times 10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
	ظرفیت گرمایی ویژه	$\times 10^{-1} \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

شکل ۳ خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد SUS304 [10]

راهبرد اول شامل تحلیل فرآیند با در نظر گرفتن همزمان این دو حوزه است که به نام آنالیز وابسته (Couple\_analysis) شناخته می‌شود. راهبرد دوم، تحلیل فرآیند با در نظر گرفتن این دو حوزه به صورت مجزا است که تحت عنوان آنالیز غیر وابسته (UnCouple\_analysis) شناخته می‌شود. در فرآیند جوشکاری، حرارت باعث تغییرات متالورژیکی در ماده می‌شود که آن هم به نوبه‌ی خود بر روی حوزه‌های حرارتی و مکانیکی تاثیر می‌گذارد. همچنین

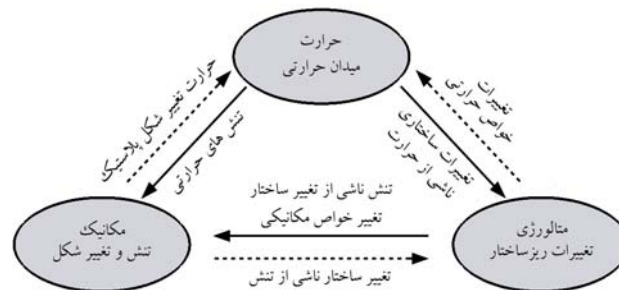
مشتقات معادله گرما نسبت به مختصات مکانی از مرتبه دوم و از نظر زمانی از درجه اول است، برای توصیف سیستم، دو شرط مرزی و یک شرط اولیه لازم است. شرایط مرزی متداول که معمولاً در مسایل حرارتی جوشکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت است:

- دمای سطح ثابت (شرط دیریشله):  $T = T_s$ .  
 - دمای سطح است.

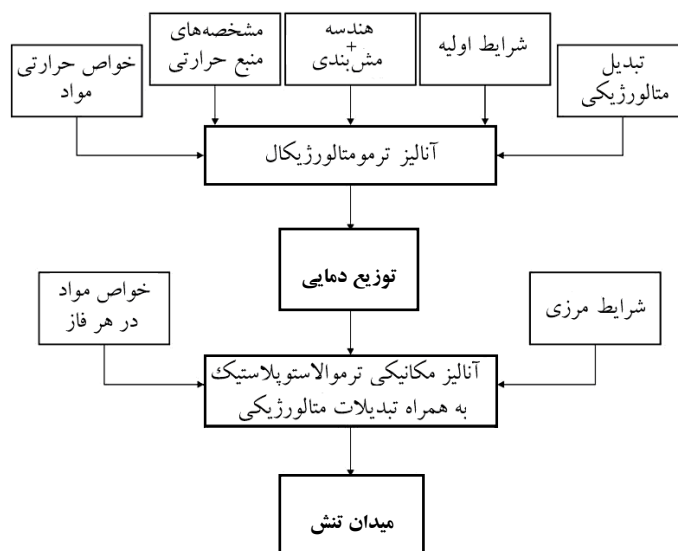
این فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از قانون فوریه و اصل بقای انرژی می‌توان معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت را مستقل از کرنش‌ها به صورت زیر بیان کرد [8]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{Q} \quad (1)$$

در این رابطه  $c$  ظرفیت گرمایی  $[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$ ،  $\rho$  چگالی  $[\text{kg}^{-1}.\text{m}^{-3}]$ ،  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی  $[\text{J.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}]$  و  $\dot{Q}$  نرخ تولید انرژی بر واحد حجم ماده  $[\text{W.m}^{-3}]$  است. از آنجایی که درجه‌ی



شکل ۴ تأثیر حوزه‌های مختلف بر یکدیگر در فرآیند جوشکاری [11]



شکل ۵ مراحل روش غیر وابسته برای محاسبه میدان تنش پسماند

- شار گرمایی معین (شرط نیومن) [8]:

$$\{q\}^T \{\eta\} = -q_s \quad (2)$$

$\eta$  بردار نرمال سطح،  $q$  چگالی جریان حرارتی و  $q_s$  شار گرمای ثابت در سطح است.

- سطح عایق‌بندی یا آدیاباتیک:

$$\{q\}^T \{\eta\} = 0 \quad (3)$$

- جابجایی روی سطح:

$$\{q\}^T \{\eta\} = h_c (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

$T_\infty$  دمای سیال در تماس با قطعه،  $T_s$  دمای سطح، و  $h_c$  ضریب انتقال حرارت جابجایی جسم و تابع درجه‌ی حرارت، موقعیت سطوح، سرعت سیال است.

- تشعشع روی سطح: انتقال حرارت تشعشعی سطح به وسیله‌ی قانون استفان بولتزمن محاسبه می‌شود:

$$\{q\}^T \{\eta\} = \varepsilon \sigma_{sb} (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (5)$$

$T_{sur}$  دمای محیط اطراف،  $\varepsilon$  ضریب صدور جسم و  $\sigma_{sb}$  ثابت استفان بولتزمن است. در ادامه پیاده‌سازی مدل حرارتی به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## تحلیل تنش

در تحلیل مکانیکی، تاریخچه‌ی دمایی به دست آمده از تحلیل حرارتی، به عنوان بارگذاری حرارتی به معادلات تحلیل مکانیکی اعمال می‌شود. تنش و کرنش حرارتی در هر مرحله‌ی زمانی محاسبه شده و حالت نهایی تنش پسماند با انباشته شدن تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی در پایان مرحله‌ی سرمایش به دست می‌آید.

در فرآیند جوشکاری که با تغییر شکل الاستیک-پلاستیک همراه است می‌توان از معادلات نرخی تنش-کرنش سود برد [12]:

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\varepsilon_{kl}^e = C_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p - d\varepsilon_{kl}^{th}) \quad (6)$$

$C_{ijkl}$  تانسور الاستیسیته و برای جسم همسان فقط شامل مدول یانگ و ضریب پواسون خواهد بود.  $d\varepsilon_{ij}^e$  کرنش الاستیک،  $d\varepsilon_{ij}^p$  کرنش پلاستیک،  $d\varepsilon_{ij}^{th}$  کرنش

حرارتی هستند.

در ناحیه پلاستیک از قوانین جریان مانند روابط پرائتل-راس استفاده می‌شود. با فرض قانون جریان شرکت‌پذیر، جریان پلاستیک در جهت عمود بر سطح تسلیم است. در این قانون فرض می‌شود کرنش پلاستیک جزئی  $d\varepsilon_{ij}^p$  در هر لحظه از بارگذاری متناسب با تنش‌های انحرافی است. در این صورت می‌توان کرنش پلاستیک جزئی را به صورت زیر به دست آورد:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_p^{eq}}{\sigma^{eq}} S_{ij} \quad (7)$$

که در آن:

$$d\varepsilon_p^{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p} \quad (8)$$

$$\sigma^{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (9)$$

شروع تغییر شکل پلاستیک در لحظه  $\sigma^{eq} = \sigma_{yp}$  است و مقدار  $\sigma_{yp}$  با دما تغییر می‌کند.

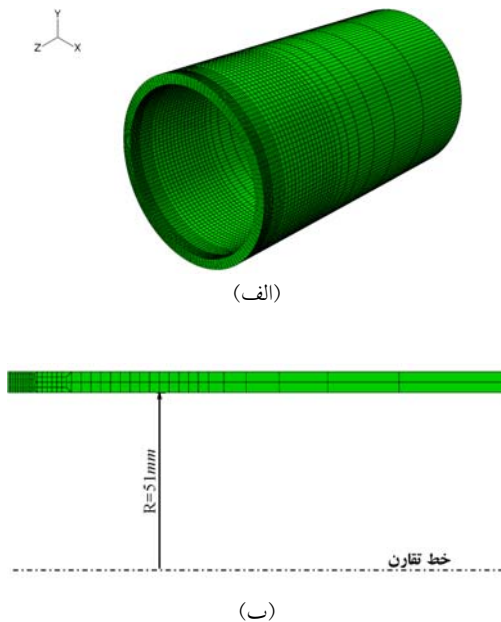
با افزایش کرنش پلاستیک، تنش تسلیم فلزات نیز افزایش می‌یابد. دو مدل کار سختی همسان و سینماتیک مدل‌های متداول در مدل‌سازی کار سختی فلزات هستند. در مدل کار سختی سینماتیک با افزایش کرنش پلاستیک، سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی جابه‌جا می‌شود. در مسایلی که فرآیند بارگذاری و باربرداری به صورت متوالی اتفاق می‌افتد، کار سختی سینماتیک، الگوی مناسب برای پیش‌بینی کار سختی است. هنگام جوشکاری هر المان از قطعه هنگام فرآیند گرم و سرد شدن تحت کشش و فشار متوالی قرار می‌گیرد، بنابراین به دلیل اعمال تنش‌های کششی و فشاری به صورت تناوبی به جسم، لازم است از الگوی کار سختی سینماتیک سود برده شود. از این رو در این تحقیق منحنی کار سختی سینماتیکی برحسب کرنش پلاستیک و در دماهای مختلف به نرم افزار معرفی شده است.

### مدل اجزای محدود

در این تحقیق از نرم افزار اجزای محدود [12] ABAQUS 6.8 برای مدل سازی و انجام تحلیل های مکانیکی و حرارتی استفاده شده است. مدل اجزای محدود سه بعدی اتصال و نمای برشی این مدل، در شکل (۶) نشان داده شده است. علاوه بر آن، یک مدل تقارن محوری دو بعدی نیز، مشابه با شکل (ب-۶) تهیه شده که از تعداد المان های بیشتری برخوردار است. لازم به ذکر است که مدل های مورد استفاده برای تحلیل های حرارتی و مکانیکی دارای توپولوژی یکسان است؛ یعنی از نظر شکل، تعداد المان های به کار رفته نظیر به نظیر یکسان بوده ولی نوع المان های به کار رفته در هر تحلیل متفاوت است. با توجه به وجود تقارن، تنها نیمی از هندسه، مدل سازی شده است. به علت وجود گرادیان شدید دما و تنش در منطقه متأثر از حرارت، در این ناحیه چگالی المان ها افزایش یافته است. برای افزایش سرعت همگرایی تحلیل و کاهش زمان حل، شبکه المان در نواحی دور از خط جوش با ابعاد بزرگتری اختیار شده است.

در این پژوهش به منظور مدل کردن پاس های جوشی از قابلیت تولد و مرگ المان ها استفاده شده است. با توجه به این که در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS حین حل امکان تولید یا حذف المان ها وجود ندارد، برای مدل کردن جوشکاری چند پاسه، از قابلیت تولد و مرگ المان ها استفاده می شود. در این روش تمامی المان ها از ابتدا ایجاد می شوند. به جای حذف المان هایی که هنوز الکتروود از روی آن ها عبور نکرده، از تکنیک مرگ المان ها استفاده می شود. برای مرگ المان ها، ضریبی کاهنده در سختی المان ها منظور شده است. همچنین جرم، گرمای ویژه و سایر اثرات المان های مرده نیز صفر در نظر گرفته می شود و جرم و انرژی المان های مرده در مجموع جرم و انرژی کل مدل محاسبه نمی شود. به طور مشابه به جای اضافه

کردن المان هایی که الکتروود از روی آن ها عبور می کند از قابلیت تولد المان ها استفاده می شود. در هنگام تولد المان ها، ضرایب سختی، جرم، نیروی المان به مقدار اولیه خود باز می گردند. بنابراین حل مساله به چند مرحله تقسیم شده و در هر مرحله گروه جدیدی از المان ها فعال می شوند. بازه ی زمانی هر مرحله برابر  $t_i = x_i / v$  است که  $x_i$  طول گروهی از المان ها است که باید در آن مرحله فعال شوند و  $v$  سرعت جوشکاری است.



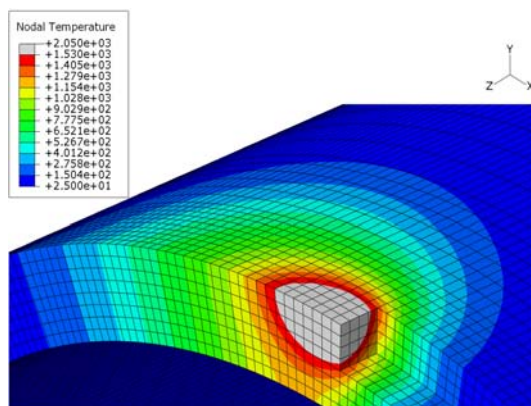
شکل ۶ (الف) شبکه بندی مدل سه بعدی؛ (ب) شبکه بندی مقطع حاصل از برش طولی

### مدل حرارتی

تحلیل حرارتی جوشکاری، یک تحلیل وابسته به زمان است. برای مدل کردن حرارت ورودی در مدل سازی فرآیند جوشکاری، دو روش متداول وجود دارد. اولین روش، حجم معینی از منطقه ی جوش در دمای مشخص قرار داده می شود تا حجم قابل قبولی از منطقه نفوذ را تشکیل دهد. در روش دوم، که روش واقع بینانه تری است، اعمال فلاکس حرارتی یا



(Anneal temperature) تعریف می‌شود. این دما در واقع جهت مدل نمودن تأثیرات ذوب شدن ماده، همچنان انجماد مجدد آن به کار می‌رود و برای مدل‌های پلاستیسیته میزز، جانسون-کوک و هیل قابل استفاده است. با تعریف دمای مذاب برای ماده در صورتی که هنگام حل، دما به این مقدار یا بالاتر از آن برسد، تأثیر کارسختی قبلی ماده با صفر کردن کرنش پلاستیک معادل از بین می‌رود؛ یعنی رفتار ماده پلاستیک، کامل فرض می‌شود. به علاوه برای مدل کار سختی سینماتیک، تانسور تنش برگشتی نیز معادل صفر قرار می‌گیرد. اگر دمای ماده به کمتر از دمای مذاب برسد، ماده دوباره سخت‌شوندگی خود را باز می‌یابد.



شکل ۷. تنشینی الکتروذوب شده و تشکیل حوضچه مذاب در حین پاس دوم جوشکاری

در بالای دمای ذوب و تغییر حالت فلز، مکانیزم انتقال حرارت همرفتی، فعال می‌شود. جهت مدل‌سازی انتقال حرارت همرفتی، ضریب حرارتی در بالای دمای ذوب تا سه برابر افزایش یافته است. البته باید توجه داشت که هر چه مقدار این ناپیوستگی در خواص ماده بیشتر شود، زمان تحلیل حرارتی نیز به علت غیرخطی شدن شدید معادلات به مراتب افزایش می‌یابد.

در مدل حرارتی سه‌بعدی از ۲۰۸۰۰ المان خطی مکعبی هشت‌گه‌ای حرارتی استفاده شده است. در مدل دوعبدهی ۷۳۷۳ المان تقارن‌محوری چهارگه‌ای حرارتی به کار رفته است. حرارت ناشی از قوس

مدل‌سازی منبع حرارت ورودی صورت می‌گیرد. در روش دوم، ابتدا مدل هندسی که متشکل از فلز پایه و جوش است تهیه شده و سپس یک شار حرارتی متحرک که نشان‌دهنده حرکت قوس الکتریکی بر روی مدل است به مدل اعمال می‌گردد. شار حرارتی می‌تواند به صورت سطحی، حجمی و یا سطحی-حجمی به مدل اعمال شود. شرایط مرزی نیز متناسب با شرایط جوشکاری، به صورت ترکیبی از اتلافات حرارتی تشعشعی و جابجایی تعیین می‌گردد. در سطح حوضچه مذاب و نواحی اطراف آن با دمای بالا، اتلاف حرارت تشعشعی و در نواحی دورتر از خط جوش با دمای پایین‌تر، اتلاف حرارت جابجایی شرایط مرزی حرارتی غالب خواهند بود. در این تحقیق به منظور اعمال شرایط مرزی حرارتی، مورد نظر - که ترکیبی از انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی کلیه سطوح با محیط اطراف است - از رابطه پیشنهادی آرگریس [13] استفاده شده است. در این رابطه ضریب انتقال حرارت ترکیبی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h = \begin{cases} 0.0668 T & (W/m^2) & 0 < T < 500 \text{ } ^\circ C \\ 0.231 T - 82.1 & (W/m^2) & T > 500 \text{ } ^\circ C \end{cases} \quad (10)$$

جهت مدل‌سازی ورود المان‌های مذاب به حوضچه جوش از تکنیک تولد المان‌های جوش استفاده شده است. برای این هدف در ابتدا کلیه المان‌های جوش را در حالت مرگ قرار داده و سپس المان‌های وارد شده از طریق ذوب الکتروذوب و صفحات، متولد می‌گردند. در شکل (۷) تنشینی الکتروذوب شده و تشکیل حوضچه مذاب حین پاس دوم جوشکاری دیده می‌شود.

در مدل حرارتی، تغییر فاز جامد به مایع (ذوب) و بر عکس با اعمال گرمای نهان ذوب تعریف می‌گردد. به منظور معرفی ماده مذاب، برای خواص مکانیکی (پلاستیک) ماده، دمایی به عنوان دمای تابکاری

المان‌های به کار رفته در تحلیل مکانیکی مدل سه‌بعدی، المان مکعبی خطی هشت‌گره‌ای است. همچنین در مدل دوبعدی از المان‌های تقارن‌محوری دوخطی چهارگره‌ای استفاده شده است. در این تحقیق از مدل سختی سینماتیک به منظور در نظر گرفتن اثر باشینگر استفاده شده و ماده از معیار تسلیم فون‌میزز و قانون جریان تبعیت می‌کند. به دلیل پایین بودن درصد کربن موجود در فولاد زنگ‌نزن SUS304، از اثر استحاله‌های فازی چشم‌پوشی شده است.

برای اعمال شرایط مرزی مدل مکانیکی، تغییر مکان نقاط واقع بر خط مرکزی جوش در جهت طولی، برابر با صفر در نظر گرفته شده است. همچنین برای همگرایی مسأله و جلوگیری از حرکت صلب، تغییر مکان یک نقطه دلخواه از مدل در دو جهت عمود بر محور طولی لوله، صفر فرض شده است.

پس از انجام تحلیل مکانیکی، به منظور کاهش تنش‌های پسماند جوشی یک مرحله بارگذاری هیدروتست بر روی مدل اعمال گردیده است. بارهای وارد به لوله توسط فشار داخلی هنگام فرآیند هیدروتست، باعث ایجاد تنش کششی در جداره لوله می‌شود. این تنش‌ها به تنش‌های پسماند قبلی اضافه شده و با برداشتن فشار، این تنش‌ها نیز حذف می‌شوند.

برای لوله‌های جدار نازک، فشار مناسب برای فرآیند هیدروتست از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P = \frac{\sigma_t t}{r} \quad (13)$$

که  $t$  ضخامت دیواره لوله و  $r$  شعاع خارجی لوله و  $\sigma_t$  برابر  $0.95$  حداقل تنش تسلیم لوله انتخاب می‌شود.

## نتایج

**نتایج تحلیل حرارتی.** برای توصیف هر پاس جوشکاری در مدل دوبعدی لازم است منحنی‌های

جوشکاری متحرک به صورت یک منبع حرارتی حجمی متحرک با توزیع دوبیضی، مدل گلداک [14]، به مدل اجزای محدود اعمال شده است. برای این هدف زیربرنامه‌ای به زبان فرترن برای اعمال شار حرارتی به مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی تدوین شده است. برای مدل سه‌بعدی شار حجمی فوق به طور مستقیم و در مدل دوبعدی تصویر این شار در یک سطح مقطع طولی به مدل اعمال شده است. معادله شار حرارتی در قسمت جلو و عقب منبع حرارتی به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c_f^2} \quad (11)$$

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c_r^2} \quad (12)$$

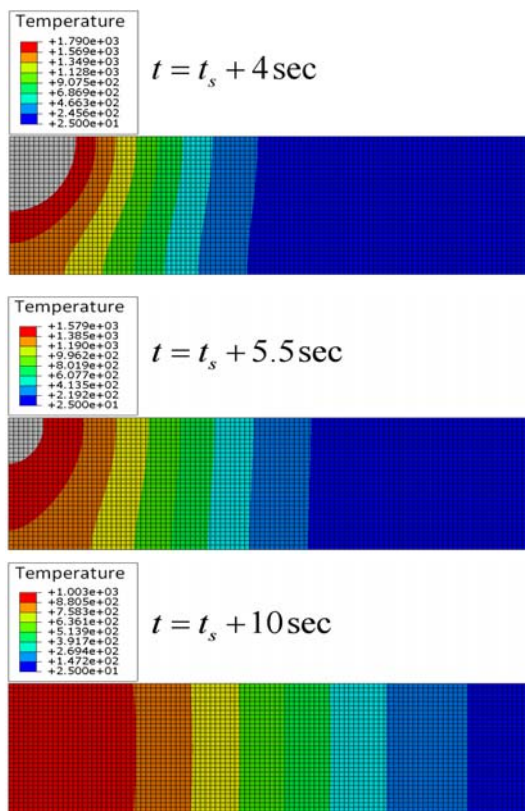
در روابط (11) و (12) مختصات مکانی  $x$  و  $y$  توابعی از زمان هستند و  $f_f = 1.4$ ،  $f_r = 0.6$  پارامترهای واقع بیان‌کننده ابعاد حوضچه مذاب هستند و به وسیله مشخصات سطح مقطع جوش در آزمایشگاه تعیین می‌گردند و یا از نتایج تجربی پیشنهادی گلداک [15] استفاده می‌شود.

## آنالیز مکانیکی

در تحلیل مکانیکی تاریخچه حرارتی به دست آمده از آنالیز حرارتی به عنوان یک بار حرارتی به سازه اعمال می‌گردد، سپس تنش و کرنش‌های حاصله در هر بازه زمانی با استفاده از یک آنالیز الاستیک-پلاستیک برای جسم محاسبه می‌شود. این عملیات تا سرد شدن قطعه تا دمای محیط ادامه می‌یابد. مقادیر محاسبه شده در مرحله نهایی، نشان‌دهنده تنش‌ها و کرنش‌های پسماند جوشی هستند.

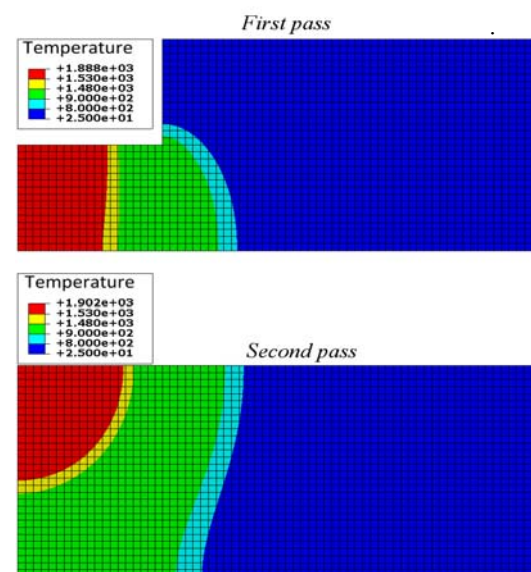
حرارتی و پس از آن، حرارت سریعاً در امتداد ضخامت (جهت  $y$ ) حرکت کرده و به سطح لوله می‌رسد. از آنجایی که انتقال حرارت جابه‌جایی با هوا در سطح نسبت به انتقال حرارت هدایتی ناچیز است از این لحظه به بعد انتقال حرارت در راستای عرضی (جهت  $x$ ) نقش مهمتری خواهد یافت.

شکل (۱۰) تاریخچه‌ی دمایی نقاطی از سطح داخلی لوله را هنگام اولین پاس جوشکاری تا ۲۰۰ ثانیه پس از شروع جوشکاری نشان می‌دهد. نقاط فوق به ترتیب در فواصل  $x_1 = 4.15\text{mm}$ ،  $x_2 = 7.15\text{mm}$  و  $x_3 = 14\text{mm}$  از خط تقارن جوش قرار دارند. متناظر با جوش داخل و خارج یک افزایش دما در هر نقطه دیده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود، این افزایش برای نقاط نزدیک به محل جوشکاری بیشتر است. حداکثر دما برای نقطه  $x_1$  به ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد.



شکل ۹ منحنی‌های توزیع دمای مدل دوبعدی برای چند ثانیه بعد از شروع پاس دوم جوشکاری

توزیع دما در زمان رسیدن به حداکثر خود یا اندکی پس از آن - که ابعاد حوضچه‌ی مذاب به حداکثر مقدار خود می‌رسد - ترسیم گردند. این منحنی‌های توزیع دما در واقع بیان‌گر مرز ناحیه‌ی مذاب و همچنین ناحیه‌ی تحت تاثیر حرارت با فلز مجاور هستند. در شکل (۸) منحنی‌های دما مربوط به پاس‌های اول و دوم جوشکاری برای مدل اجزای محدود حرارتی دوبعدی آمده است. در شکل (۸)، پنج منطقه با دمای متفاوت دیده می‌شوند که هر یک دربرگیرنده‌ی ناحیه‌ای مجزا با ساختار مولکولی متفاوت است. به عنوان مثال اولین منطقه از منحنی‌ها، مربوط به ناحیه‌ی مذاب و دومین منطقه، مربوط به ناحیه‌ی در حال تغییر فاز است. سومین و چهارمین منطقه از منحنی‌ها، ناحیه‌ی متاثر از حرارت را در بر می‌گیرند. آخرین منطقه از منحنی‌ها نیز شامل فلز پایه است.

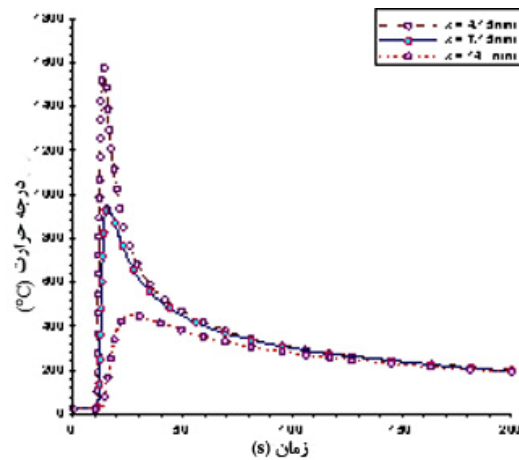


شکل ۸ حوضچه‌ی مذاب، ناحیه‌ی تحت تاثیر حرارت و نواحی مجاور در حین پاس‌های اول و دوم جوشکاری

شکل (۹) توزیع دما را برای زمان‌های بعد از شروع جوشکاری پاس خارجی نمایش می‌دهد. شکل - های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که هنگام اعمال شار

در شکل (۱۲) تاریخچه‌ی دمایی سه نقطه از نقاط واقع بر سطح داخلی لوله که در زاویه‌های  $90^\circ$ ،  $180^\circ$  و  $270^\circ$  و در فواصل یکسان از خط مرکزی جوش واقع شده‌اند، نشان داده شده است. حرکت قوس جوشکاری در طول محیط لوله، میدان دمایی کاملاً یکنواختی را به وجود آورده است و هر سه نقطه، تاریخچه‌ی دمایی تقریباً یکسانی را تجربه می‌کنند. این حالت زمانی امکان پذیر است که سرعت جوشکاری از سرعت پخش حرارت در امتداد جوشکاری، بیشتر باشد. بنابراین در این مسئله فرض تقارن صادق بوده و می‌توان از مدل دوبعدی تقارن محوری استفاده نمود. البته باید توجه داشت که یکنواختی میدان دمایی تنها در جوشکاری پیوسته محیطی برقرار بوده و در حالات دیگر حرکت الکتروود، این شرایط تقارن دمایی برقرار نخواهد بود.

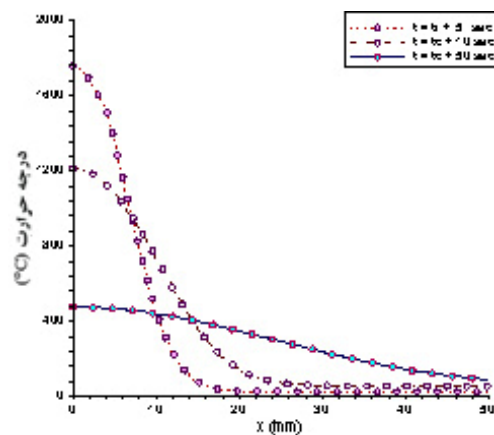
شکل (۱۳) تاریخچه‌ی دمایی نقطه‌ای واقع بر سطح داخلی لوله را هنگام اولین پاس جوشکاری که در زاویه‌ی  $180^\circ$  از نقطه‌ی شروع جوشکاری و در فاصله‌ی  $4/5 \text{ mm}$  از خط مرکزی جوش قرار دارد، تا  $400$  ثانیه پس از شروع جوشکاری نشان می‌دهد. در این شکل نتایج مربوط به مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی و همچنین نتایج تجربی مرجع [10] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مدل دو بعدی در مقایسه با مدل سه‌بعدی و نتایج تجربی افزایش دمای در حدود  $60$  درجه سانتیگراد معادل  $5$  درصد خطا را نشان می‌دهد. علت این افزایش دما را می‌توان به مدل‌سازی دو بعدی نسبت داد چرا که در مدل دوبعدی تقارن محوری، از انتشار حرارت در جهت عمود بر صفحه‌ی انتخابی صرف‌نظر شده است. از آنجا که انتقال حرارت هدایتی سهم بیشتری را در انتشار حرارت در مقایسه با انتقال حرارت جابجایی دارد، این امر باعث بالا رفتن دمای مدل دوبعدی در مقایسه با مدل سه‌بعدی مشابه



شکل ۱۰ تاریخچه‌ی دمایی نقاطی از سطح داخلی لوله هنگام اولین پاس جوشکاری در مدل دوبعدی

شکل (۱۱) دما را در سه زمان مشخص برای سطح داخلی لوله بر حسب فاصله از صفحه‌ی تقارن جوش نشان می‌دهد. در این شکل  $t_i$  زمان شروع پاس داخلی و  $t_0$  زمان شروع پاس خارجی جوشکاری را معرفی می‌کنند.

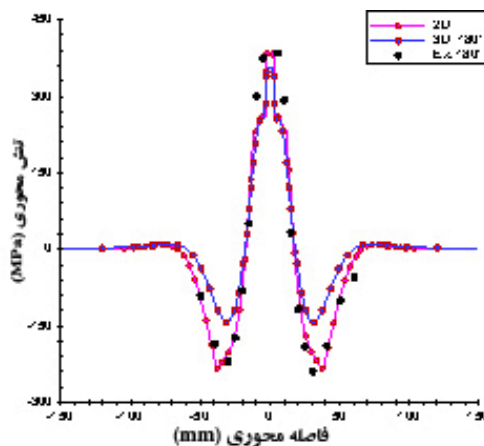
شکل (۱۱) نشان می‌دهد در سطح داخلی لوله با گذشت زمان، دمای نقاط نزدیک به ناحیه‌ی جوش به سرعت کاهش می‌یابد، در حالی که دمای نقاط دورتر افزایش می‌یابد؛ چرا که حرارت از طریق انتقال حرارت هدایتی از نواحی داغ نزدیک حوضچه‌ی مذاب به نواحی دورتر انتقال یافته است.



شکل ۱۱ توزیع دما در سه زمان مشخص بر روی سطح داخلی لوله بر حسب موقعیت X در مدل دوبعدی

می‌گردد.

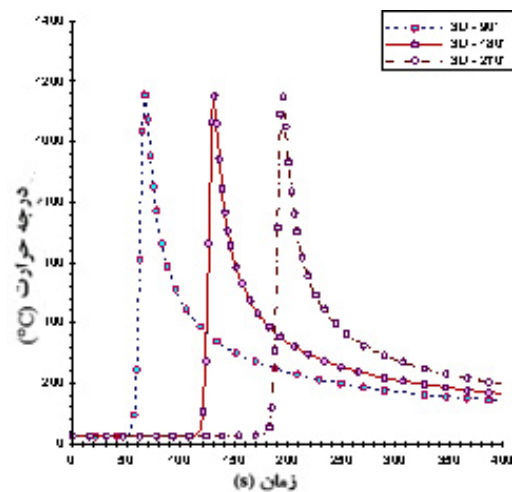
به ۱۰ Mpa می‌رسد در صورتی که این اختلاف در نتایج مدل دو بعدی به ۱۰ Mpa، یعنی کمتر از ۱۰ درصد می‌رسد. در ناحیه‌ی فشاری، تطابق نتایج مدل دو بعدی با نتایج تجربی بیشتر است. علت آن را می‌توان به چگالی بیشتر المان‌ها در مدل دو بعدی نسبت داد.



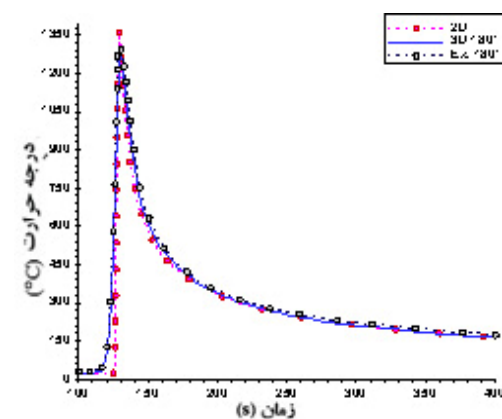
شکل ۱۴ توزیع تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی لوله

شکل (۱۵) توزیع تنش‌های محیطی را در سطح داخلی لوله برای مدل‌های دو بعدی، سه بعدی و تجربی نشان می‌دهد. هماهنگی با تنش‌های محوری، تنش‌های محیطی نیز در جوش و ناحیه‌ی اطراف آن کششی بوده و با فاصله گرفتن از این ناحیه این تنش‌ها تغییر ماهیت داده و از کششی به فشاری تبدیل می‌شوند.

بیشتر ترک‌های به وجود آمده در لوله‌های جوشکاری شده در سطوح داخلی آن‌ها، مشاهده می‌شود. این موضوع بیانگر وجود تنش‌های کششی در سطوح داخلی است. در سطح خارجی لوله، وضعیت کاملاً متفاوت بوده و ماهیت تنش‌ها تقریباً فشاری است؛ به گونه‌ای که تنش‌های محوری موجود در سطح خارجی لوله، در جوش و نواحی اطراف آن فشاری و با فاصله گرفتن از خط مرکزی، این تنش‌ها به تنش‌های کششی تبدیل می‌شوند. این وضعیت را می‌توان در شکل (۱۶) مشاهده نمود. این شکل توزیع تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله را نشان می‌دهد.



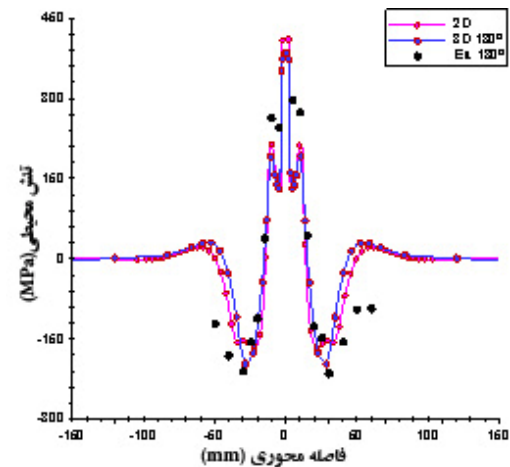
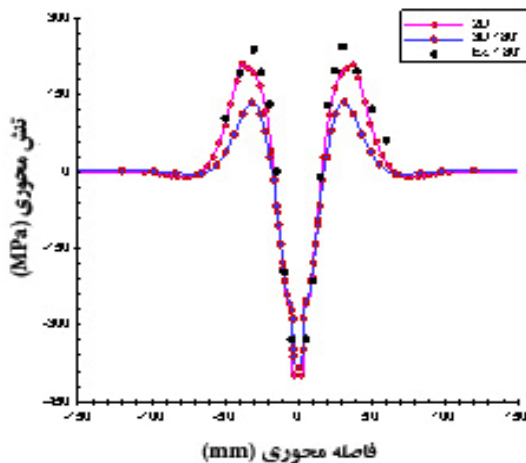
شکل ۱۲ تاریخچه‌ی دمایی سه نقطه در سطح داخلی لوله در موقعیت‌های  $90^\circ$ ،  $180^\circ$  و  $270^\circ$  در مدل سه بعدی



شکل ۱۳ تاریخچه‌ی دمایی نقطه‌ای واقع بر سطح داخلی لوله برای مدل‌های دو بعدی، سه بعدی و تجربی مرجع [10] هنگام پاس اول جوشکاری

**نتایج تحلیل مکانیکی.** در شکل (۱۴) توزیع تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی لوله برای مدل‌های دو بعدی و سه بعدی در مقایسه با نتایج تجربی مرجع [10] آمده است. مقایسه نتایج مدل‌های دو بعدی و سه بعدی در ناحیه‌ی کششی با نتایج تجربی، بیانگر نتایج قابل قبول در مدل‌سازی است. تفاوت حداکثر تنش کششی در مدل سه بعدی و نتایج تجربی حداکثر

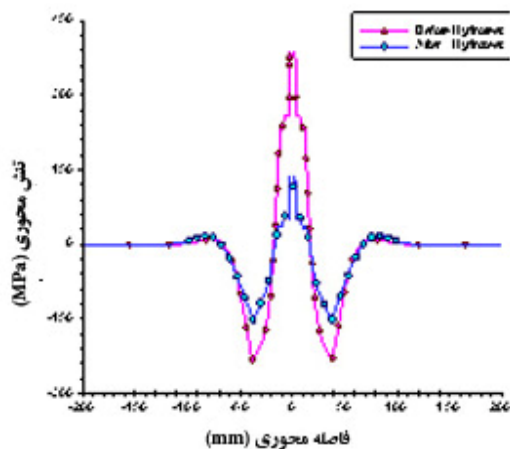
هیدرواستاتیکی بر روی مدل اعمال شده است. فشار داخلی اعمال شده به لوله هنگام فرآیند هیدروتست - که در حد تنش تسلیم لوله است - باعث ایجاد تنش کششی در جداره‌ی لوله می‌شود. با تجمع این تنش‌ها با تنش‌های پسماند قبلی، اثر تنش‌های پسماند کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵ توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطح داخلی لوله

شکل ۱۶ توزیع تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله

شکل (۱۷) تأثیر فرآیند هیدروتست بر تنش‌های پسماند محوری مدل دوبعدی را نشان می‌دهد. پس از اعمال فرآیند هیدروتست، حداکثر تنش پسماند محوری از ۴۰۰ Mpa در ناحیه جوش به ۱۴۰ Mpa یعنی تا ۶۵٪ کاهش یافته است.



شکل ۱۷ تأثیر فرآیند هیدروتست بر تنش‌های محوری در سطح داخلی لوله در مدل دوبعدی

مقایسه‌ی نتایج فوق با نتایج حاصل از بررسی تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی نشان می‌دهد که رفتار این دو تنش تقریباً عکس یکدیگرند. به بیان دیگر می‌توان گفت که توزیع تنش‌های پسماند محوری بر روی سطوح داخلی و خارجی لوله رفتار خمشی ایجاد می‌کند؛ چرا که در سطح داخلی تنش محوری کششی و در سطح خارجی تنش محوری فشاری دیده می‌شود. مدل دو بعدی در مقایسه با مدل سه‌بعدی نتایج بهتری را برای تنش پسماند پیش‌بینی می‌کند. مقدار حداکثر خطا برای تنش‌های کششی در مدل دو بعدی برابر با ۱۵ درصد خواهد بود.

**تأثیر فرآیند هیدروتست بر تنش‌های پسماند.** یکی از راهکارهای صنعتی برای کاهش تنش پسماند کششی استفاده از فرآیند هیدروتست است. پس از پایان مراحل ساخت قطعات سنگین مانند لوله‌های تحت فشار، تنش‌های پسماند متناهی در آنها باقی می‌ماند. به کمک فرآیند هیدروتست، تنش‌های پسماند را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهند. وجود تنش‌های پسماند بالا در یک سازه می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد. در این پژوهش، پس از انجام تحلیل مکانیکی، به منظور کاهش تنش‌های پسماند جوشی، یک مرحله بارگذاری

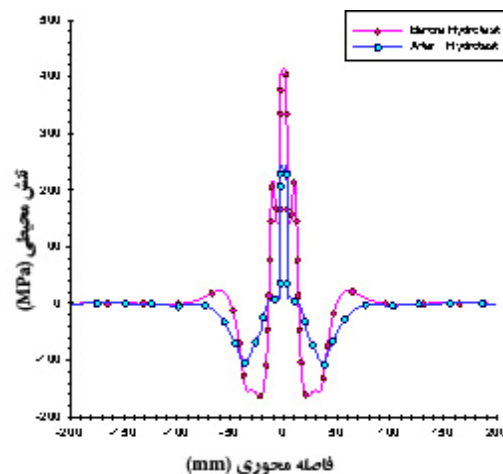
نیست در این موارد منظور نمی‌شود. از جمله آن‌ها می‌توان به مواردی از قبیل اثرات ابتدایی و انتهایی حرکت، اثر ترتیب حرکت الکتروود، اثرات ناشی از جوشکاری چندالکتروود و همچنین اثرات خال جوش زدن اشاره نمود.

از آنجایی که در بسیاری از موارد عملی، امکان جوشکاری پیوسته‌ی لوله‌ها به دلایلی از جمله: محدودیت‌های هندسی، ابعاد بزرگ لوله‌ها و یا استانداردهای ساخت لوله وجود ندارد، لازم است با انجام تحلیل‌های مناسب شکل‌گیری تنش‌های پسماند در سایر روش‌های جوشکاری بررسی شود. در این بخش، تاثیر نوع حرکت الکتروود بر شکل‌گیری تنش‌های پسماند در اتصالات لب به لب محیطی لوله‌های فولادی بررسی می‌شود.

در شکل (۱۹) ترتیب حرکت الکتروود در چهار روش مختلف جوشکاری محیطی لوله‌ها ارایه شده است. واضح است که میدان تنش پسماند ایجاد شده در هر روش متفاوت خواهد بود. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) تاثیر این چهار نوع حرکت الکتروود بر تنش‌های پسماند محوری سطح داخلی لوله در زوایای ابتدایی و یک زاویه‌ی میانی حرکت را نشان می‌دهند.

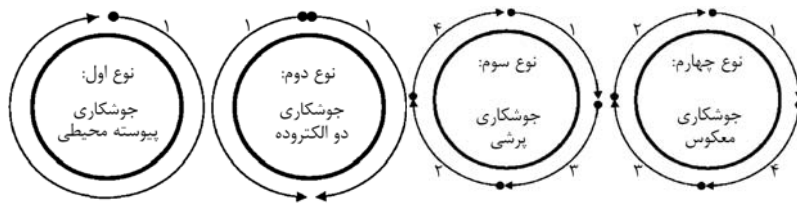
با مقایسه شکل‌های (۲۱) و (۲۰) می‌توان دریافت که بیشترین تاثیر حرکات فوق در نقاط ابتدایی و انتهایی حرکت خواهد بود؛ به طوری که در مواردی این تنش‌ها ماهیتی کاملاً فشاری پیدا می‌کنند. شکل (۲۱) نشان می‌دهد که در زوایای میانی حرکت، نتایج حاصله تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند و توزیع این تنش‌ها تقریباً یکسان باقی می‌ماند، چرا که تاثیر شار حرارتی در نقاط ابتدایی و انتهایی حرکت، بر میدان دمایی نقاط میانی ناچیز است. از آنجایی که میدان تنش‌های پسماند در هر نقطه رابطه‌ی مستقیم با میدان دمایی آن نقطه دارد، پس میدان تنش یکسان در نقاط میانی حرکت الکتروود قابل انتظار خواهد بود.

در شکل (۱۸) تاثیر فرآیند هیدروتست بر تنش‌های پسماند محیطی مدل دوبعدی نشان داده شده است. شکل (۱۸) نشان می‌دهد پس از اعمال فرآیند هیدروتست، حداکثر تنش پسماند محیطی در سطح داخلی نیز در ناحیه جوش از  $420 \text{ Mpa}$  به  $240 \text{ Mpa}$  (معادل ۴۳٪) کاهش یافته است.

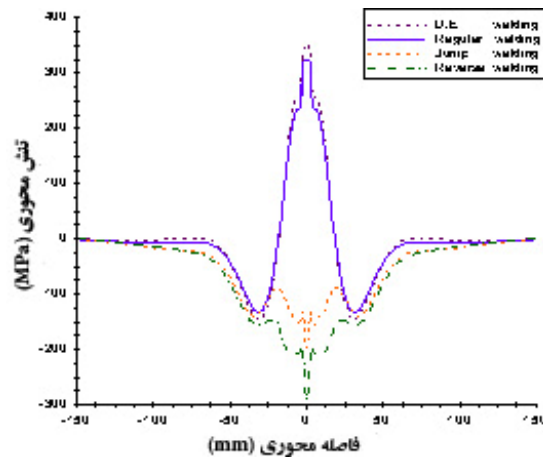


شکل ۱۸ تاثیر فرآیند هیدروتست بر تنش‌های محیطی در سطح داخلی لوله در مدل دو بعدی

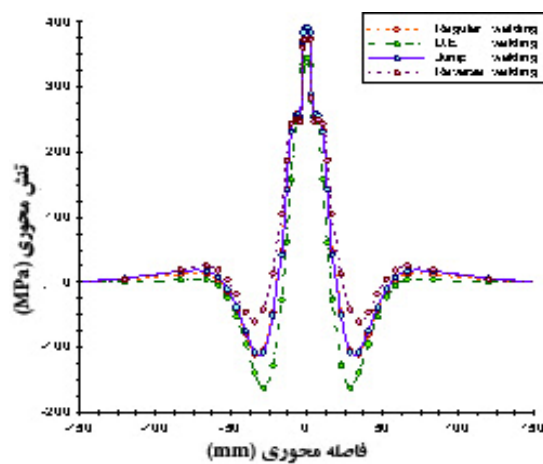
**بررسی تاثیر حرکت الکتروود بر شکل‌گیری تنش‌های پسماند.** در بیشتر شبیه‌سازی‌های عددی که تاکنون توسط پژوهشگران برای تعیین میدان تنش‌های پسماند جوشی صورت گرفته، از فرضیات ساده‌کننده‌ای برای کاهش ابعاد مسأله و حجم محاسبات استفاده شده است. این فرضیات اغلب شامل کاهش یک بعد از مسأله و تحلیل مسأله به صورت دوبعدی است. به بیان دیگر بیشتر محققین سعی نموده‌اند تا با توجه به شرایط حاکم بر تحلیل، مسأله‌ی سه‌بعدی حاکم را با یک تحلیل دوبعدی کرنش‌صفحه‌ای و یا تقارن‌محوری معادل‌سازی نمایند. هرچند در بسیاری از موارد نتایج حاصل از این ساده‌سازی‌ها نیازهای موجود را به خوبی برآورده می‌سازد، اما بسیاری از اثرات سه‌بعدی شبیه‌سازی که مدل دوبعدی قادر به پیش‌بینی آن‌ها



شکل ۱۹ ترتیب حرکت الکتروده در چهار روش جوشکاری محیطی لوله‌ها



شکل ۲۰ تأثیر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های محوری در سطح داخلی لوله در نقطه شروع جوشکاری



شکل ۲۱ تأثیر ترتیب جوشکاری بر تنش‌های محوری در سطح داخلی لوله در زاویه  $60^\circ$  از نقطه شروع جوشکاری



### نتیجه گیری

جوشکاری از جمله جوشکاری دو الکتروده، استفاده از این فرض قابل قبول نخواهد بود. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد بارگذاری هیدروتست می‌تواند تا ۶۵٪ تنش‌های پسماند جوشی را کاهش دهد. با توجه به تأثیر نوع حرکت الکتروده بر توزیع تنش‌های پسماند، می‌توان گفت بیشترین تأثیر نوع حرکت الکتروده در نقاط ابتدایی و انتهایی حرکت خواهد بود؛ حتی در مواردی ماهیت تنش‌ها در این نواحی از کششی به فشاری تغییر می‌یابد. در نقاط میانی حرکت الکتروده، توزیع تنش‌ها تقریباً یکسان باقی می‌ماند چرا که تأثیر شار حرارتی در نقاط ابتدایی و انتهایی حرکت بر میدان دمایی نقاط میانی ناچیز است.

در این پژوهش، مقدار تنش‌های پسماند حاصله از جوشکاری محیطی یک لوله فولادی زنگ‌نزن، تأثیر نوع حرکت الکتروده بر شکل‌گیری این تنش‌ها، همچنین تأثیر فرآیند هیدروتست بر کاهش این نوع تنش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های تجربی بیان‌گر دقت قابل قبول شبیه‌سازی‌هاست. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در حالت جوشکاری پیوسته محیطی با سرعت بالا (در مقایسه با سرعت پخش حرارت)، فرض مدل دوبعدی صادق بوده و می‌توان از مدل تقارن محوری سود برد ولی در سایر روش‌های

### مراجع

1. Shen, W.Y. and Clayton, P., "Fatigue of Fillet Welded A515 Steel", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 53(6), pp. 1007-1016, (1996).
2. Rybicki, E.F., Schmuser, D.W., Stonesifer, R.B., Groom, J.J. and Mishler, H.W., "A Finite Element Method for Residual Stress in Girth-Butt Welded Pipes", *ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 100, pp. 256-262, (1978).
3. Andersson, B. A., "Thermal Stresses in a Submerged-Arc Welded Joint Considering Phase Transformations", *Transactions of the ASME*, Vol. 100, pp. 356-362, (1978).
4. Michaleris, P., "Residual Stress Distributions for Multi-pass Welds in Pressure Vessel and Piping Components", *In Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Montreal, Canada, Vol. 327, pp. 17-27, (1996).
5. Qingren, X., Yaorong, F. and Chunyong, H., "The Measurement and Control of Residual Stress in Spiral Sub-merged Arc Welded Pipe", *forth International pipeline conference*, Alberta, Canada, pp. 615-622, (2002).
6. Brickstad, B. and Josefson, B.L., "A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 11-25, (1998).
7. Yajiang, L., Juan, W., Maoai, C. and Xiaoqin, S., "Finite Element Analysis of Residual Stress in the Welded Zone of a High Strength Steel", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 27(2), pp. 127-132, (2004).

8. Kermanpur, A., Shamanian, M. and Esfahani Yeganeh, V., "Three-Dimensional Thermal Simulation and Experimental Investigation of GTAW Circumferentially Butt-Welded Incoloy 800 Pipes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, pp. 295-303, (2008).
9. Sattari-Far, I. and Javadi, Y., "Influences of Welding Sequence on Welding Distortion in Pipes", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 265-274, (2008).
10. Deng, D. and Murakawa, H., "Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress in Multi-Pass Welds in Stainless Steel Pipe and Comparison with Experimental Measurements", *Computational Materials Science*, Vol. 37, pp. 269-277, (2006).
11. Lu, X., "Influence of residual stress on fatigue failure of welded joints", North Carolina State University, Ph.D. Thesis, (2002).
12. Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc. ABAQUS/standard user's manual, v. 6.8. Pawtucket, Rhode Island; (2004).
13. Argyris, J. H., Szimmat, J., and Willam, K., "Finite Element Analysis of Arc-Welding Process", *Numerical Method in Thermal Problems, Proceedings of the Third International Conference*, Seattle WA, Swansea UK, pp. 249-258, (1983).
14. Tsirkas, S.A., Papanikos, P. and Kermanidis, Th., "Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 134, pp. 59-69, (2003).
15. Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources", *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15, pp. 299-305, (1984).