Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 641-644
DOI: 10.22060/mej.2020.18166.6752

# Investigation of the effect of welding path on residual stresses and deformations in peripheral welding of steel pipe

M. Kazemi

Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Malayer University, Malayer, Iran

**ABSTRACT:** In this paper, the effective factors in the welding process and its effects such as residual stresses in the peripheral welding process of a pipe have been investigated using Abaqus software. The analysis was performed in two stages, thermal and mechanical. First, in thermal analysis, the temperature distribution of the welding process was obtained, and then the obtained temperature field was used as a load in mechanical analysis to obtain the distribution of residual stresses and deformations. The effect of different parameters such as welding speed, heat input, and sequence of welding path on residual stress values and deformations were investigated. Results showed that with a 50% increase in electrode speed, tensile and compressive stresses on the outer surface of the pipe showed an increase of 43.47 and 15.15%, respectively. Also, a 20% increase in heat input led to a reduction of 2.6 and 18.18% in tensile and compressive stresses on the outer surface of the pipe. Also in this paper, an optimal path for peripheral welding of pipes is presented.

**Review History:**
Received: Mar. 26, 2020
Revised: May, 05, 2020
Accepted: Jun. 28, 2020
Available Online: Aug. 02, 2020

**Keywords:**
Welding
Residual stress
Temperature field
Thermal
Mechanical analysis

## 1- Introduction

Welding processes are one of the most common methods for connecting parts in various industries. Due to the non-uniform temperature change that occurs during welding, severe distortions and residual stresses occur in the welded parts [1]. Distortions cause residual stresses in parts that the presence of residual stresses, if they are tensile, significantly reduce their life [2, 3].

In this study, the residual stresses and distortions due to peripheral welding of a steel pipe were investigated and after examining various parameters such as welding speed, heat input and sequence of different path in each passes, an optimal model for reducing residual stresses and distortions has been presented, which has not been done in any research so far.

## 2- Preparing the Model

The considered model is a pipe with an outer diameter of 114 mm, an inner diameter of 108 mm and a thickness of 6 mm, which is shown in Fig. 1.

The pipe is made of SUS 304 stainless steel. The thermal and mechanical properties corresponding to the temperature of this metal are extracted from reference [4]. The speed of the electrode is 80 mm/min, the voltage in each of the welding passes is 9.5 V and the intensity of the ampere in the first pass is 140 and in the second pass is 160 A. Fig. 2 shows the number and arrangement of passes.

Simulation was performed non-coupled in two parts: thermal and mechanical analysis. The DC3D8 element, which is a hexagonal element with a degree of temperature freedom, was used for thermal analysis. Also, an element with stress release degrees (C3D8R element) was used for mechanical analysis. Six different modes were considered in two passes for pipes with geometric characteristics expressed at the beginning of the section. In this way, the pipe is first divided into 4 equal quarters and each quarter is considered a path. Depending on the speed of the electrode and the diameter of the tube, it takes 9 seconds to weld the entire tube. The cooling time between each path in the first pass is set to zero, but the cooling time between the first pass and the start of the second pass was set at 9 seconds. Also, the paths in the second pass were considered the same as the paths in the first pass, and the cooling time between the paths of the second pass was considered zero, and after the completion of the second pass, 9 seconds of cooling time was considered. Fig. 3 shows all the conditions considered for different paths and directions of peripheral pipe welding.

## 3- Results and Discussion

For the accuracy of the results, the conditions used were considered the same as the conditions used in [4] and after thermal and mechanical analysis, the results were compared with the experimental results. Fig. 4 shows the contours related to the axial residual stresses after the completion of the welding process in the six modes.

*Corresponding author's email: kazemii.m@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

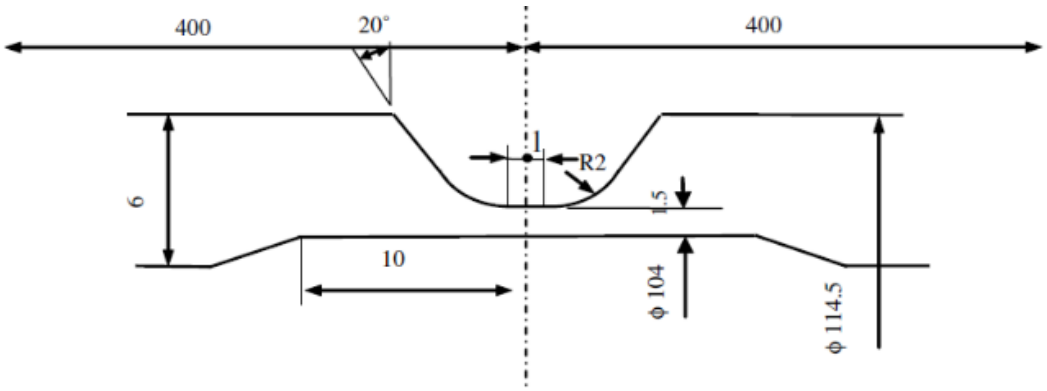



Fig. 1. Geometric dimensions of the desired pipe and weld line [4].

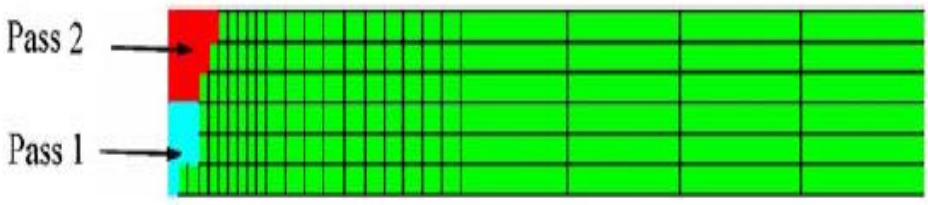



Fig. 2. Number and sequence of weld passes.

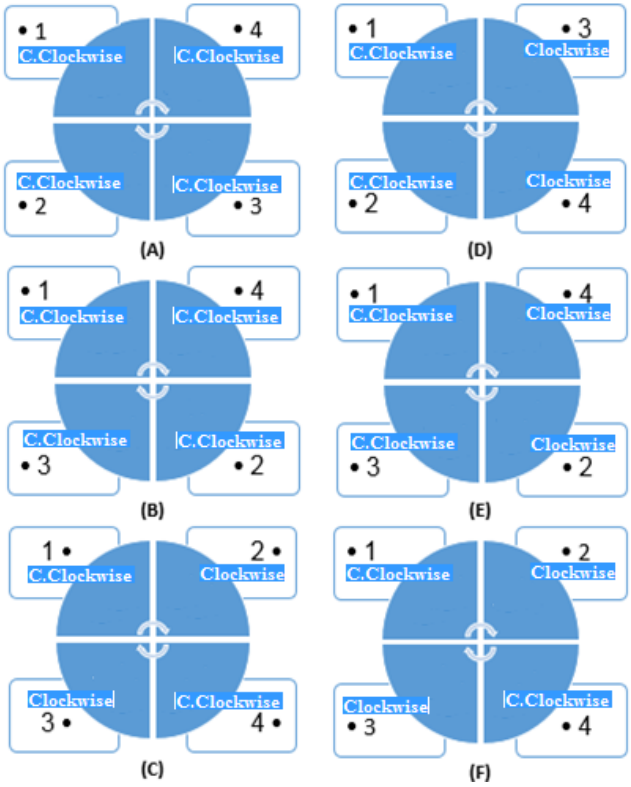



Fig. 3 . Six different modes of the welding.

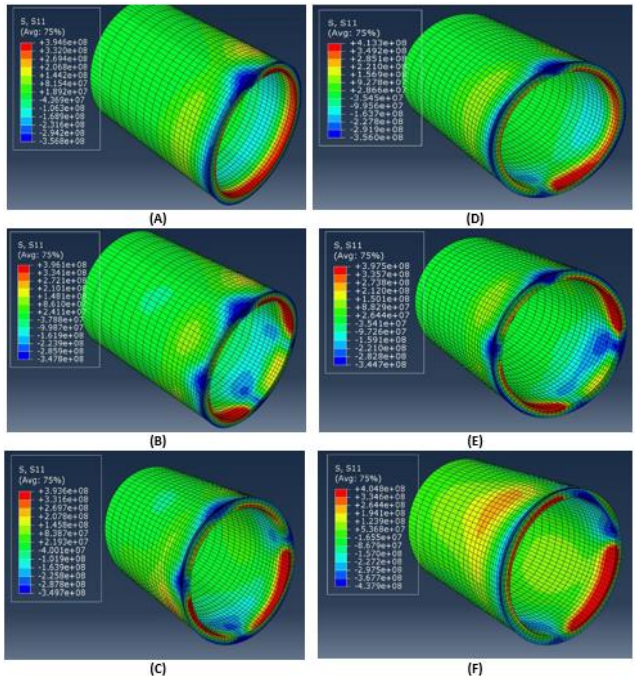



Fig. 4. Axial stress distributions of the welded pipe in different modes.

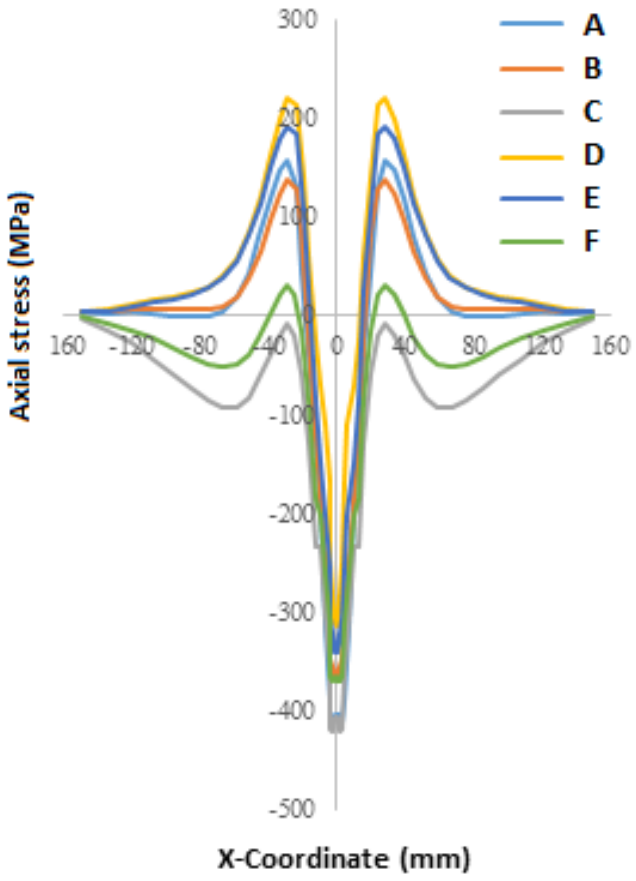



**Fig. 5. Axial stress distributions on the outside surface in different modes.**

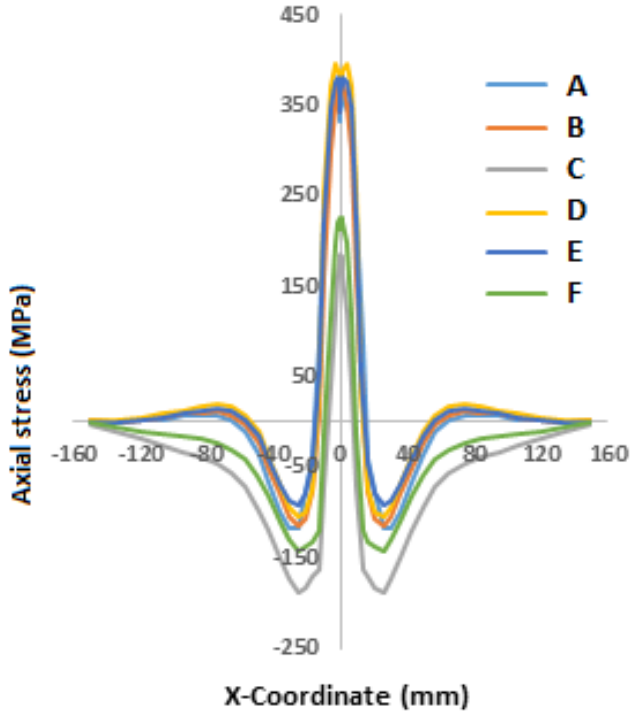



**Fig. 6. Axial stress distributions on the inside surface in different modes.**

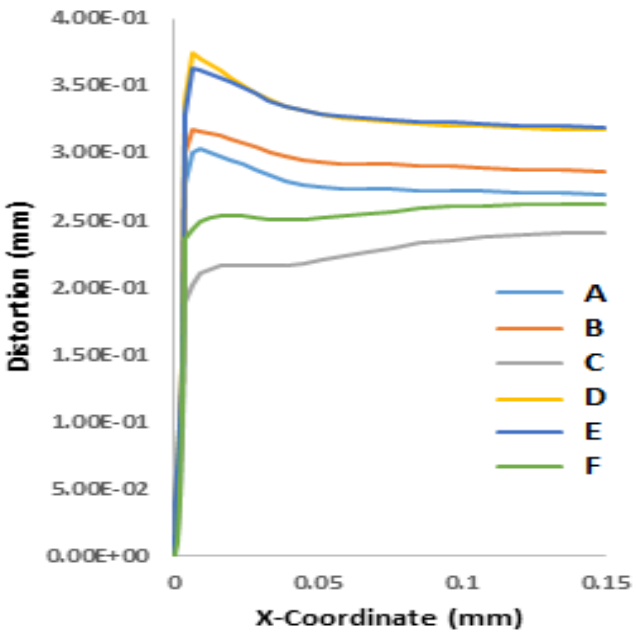



**Fig. 7. Comparison of longitudinal distortion on the inside surface in different modes.**

Figs. 5 to 7 show diagrams for comparing the various residual stresses and distortions created in the six modes considered.

Considering the different modes of peripheral welding of the pipe, it was found that the axial stress on the outer surface of the pipe in C mode has an optimal value so that all tensile stresses were converted to compressive stress and no tensile stress is created on the outer surface of the pipe. This is while the amount of compressive stress has not changed much compared to the reference state [4].

The axial stress on the inner surface in C mode has the lowest value and while compared to the reference mode [4], tensile and compressive stresses were reduced by 55% and 49.3%, respectively. Also, by comparing the distortion diagrams of different states, it is determined that mode C has the least distortion.

## 4- Conclusions

In this paper, the residual stresses and distortions due to peripheral welding of a steel pipe are investigated. After examining various parameters such as welding speed, heat input and sequence of different paths, an optimal model for reducing residual stresses and distortions is presented. The most important results are:

1- By comparing the simulation and experimental results, it was found that there is a good agreement between the results and the results of the performed model are reliable.

2- With a 50% increase in the speed of the electrode, the axial tensile and compressive stresses located on the inner and outer surfaces of the tube decreased, but the tensile and compressive stresses on the outer surface of the tube showed a significant increase.

3- The study of the effect of heat input showed that with a 20% increase in heat input:

A) Axial tensile and compressive stresses on the outer surface of the pipe increased and decreased, respectively, and the opposite was observed on the inner surface of the pipe.

B) Tensile and environmental compressive stresses on the outer and inner surfaces of the pipe were reduced.

4- According to the comparison of residual stress and distortion diagrams of different considered modes, it was found that C mode had the lowest amount of residual stress and distortion, so it is introduced as the optimal mode for peripheral welding of pipes.

## References

[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] 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.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*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) 641-644.*

**DOI:** 10.22060/mej.2020.18166.6752

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک، دوره ۵۳، شماره ویژه ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۷۳۵ تا ۲۷۵۰
DOI: 10.22060/mej.2020.18166.6752

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

مهدی کاظمی

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

**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 اجزامحدود 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 بدست‌آوردن توزیع تنش‌های پسماند و تغییرشکل‌ها 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 تغییرشکل‌ها بررسی شد. به‌طوری که با افزایش ۵۰ درصدی سرعت حرکت الکترود، 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 اعوجاج های ناشی از جوشکاری ترتیب عملیات جوشکاری است و برای این منظور می‌توان با ناپیوسته‌کردن مسیر جوشکاری با متقارن‌کردن حرارت و کاهش گرادیان دمایی مقدار اعوجاج و تنش‌های پسماند ایجادشده را بیشتر کاهش داد که در این مقاله برای جوش محیطی لوله یک مسیر بهینه نیز ارائه شد.

**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

## ۱- مقدمه

فرایندهای جوشکاری یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای اتصال قطعات در صنایع مختلف می‌باشد. به‌دلیل تغییر دمای غیر یکنواخت که در هنگام جوشکاری رخ می دهد، اعوجاج‌های شدید و تنش‌های پسماند در قطعه جوشکاری‌شده ایجاد می‌شود [۱]. اعوجاج عموماً به تغییر شکل‌هایی گفته می‌شوند که در قطعه پس از جوشکاری ایجاد شده و در قطعات باقی می مانند. در فرایندهای ساخت قطعات از جمله قالب گیری، نورد، کشش عمیق، برش، ماشین کاری قطعات و بسیاری فرایندهای دیگر اعوجاج‌ها به وجود می‌آیند. مسلما هر چه مقادیر اعوجاج در قطعات کمتر باشد قطعه تولید شده دارای کیفیت بالاتری است. در فرآیند جوشکاری نیز باید پارامترهای جوشکاری را به نحوی مناسبی انتخاب کرد تا مقادیر اعوجاج ایجادشده در قطعات 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 معمولا تنش‌های مفیدی هستند که باعث افزایش عمر خستگی قطعات، کاهش احتمال ایجاد ترک و شکست ترد در قطعه می شوند اما تنش‌های پسماند کششی عموماً برای قطعات مضر می باشند و باعث کاهش استحکام قطعه می شوند [۴ و ۵]. در فرایند جوشکاری تنش‌های پسماند کششی سطحی و اعواج هایی که در قطعه ایجاد می شوند شکل اولیه قطعه را تغییر می دهند به همین دلیل بررسی این تنش ها از اهمیت بالایی برخوردار است. تغییر دماهای شدیدی که در هنگام جوشکاری در قطعه ایجاد می شود باعث ایجاد کرنش های حرارتی در قطعه و ایجاد تغییر شکل های پلاستیک مخصوصاً در نواحی اطراف مسیر جوشکاری می شود

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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

و به همین دلیل در نواحی مسیر جوشکاری تنش‌های شدید کششی ایجاد می شوند که قطعات عموماً نیز از همین ناحیه دچار شکست می شوند. همواره محققان بسیاری سعی داشته اند که مقدار اعوجاج و همچنین تنش های پسماند را با روش های مختلف اندازه‌گیری کنند و مقدار این تنش ها را در قطعات کاهش دهند. روش های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش های پسماند با گذشت زمان ایجاد شدند اما اغلب روش‌ها پرهزینه و وقت‌گیر بودند. یکی از روش هایی 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 روش های دیگر دارد و همچنین آسان‌بودن 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 تاثیر سه حالت برای ترتیب جوشکاری روی تنش‌های پسماند اتصال جوش چندپاسه را بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که در حالت چهارجوشکار بیشترین تنش پسماند ایجاد می شوند در حالیکه در حالت تک‌جوشکاره کمترین مقدار تنش پسماند ایجاد می شود. نتیجه دوجوشکار 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. دا نوبرگا و همکاران با استفاده از روش اجزامحدود 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 اجزامحدود 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 تنش های 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]، تاثیر روش‌های مختلف اعمال حرارت ورودی به داخل ناحیه‌ی مذاب را با درنظرگرفتن 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 تاثیرات زیادی که تغییرات متالوژیکی ناحیه جوش در حین فرایند جوشکاری برروی اندازه تنش پسماند و تغییرشکل‌ها 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 که برای ارزیابی تنش‌های پسماند، بجز تنش تسلیم، می‌توان تمامی خصوصیات ترموکانیکی 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.

میرزااحمدی و همکاران [۱۸]، به بررسی تأثیر خواص مکانیکی و حرارتی در جوشکاری نقطه‌ای آلیاژ منیزیم به روش اجزامحدود 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 تنش های پسماند دارند. علاوه بر این، خواص حرارتی و مکانیکی دیگر می تواند ثابت در نظر گرفته شود.

حبیبی و اسکندری [۱۹]، به بررسی توزیع حرارت و تنشهای پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری سه مرحله‌ای دریک اتصال صلیبی از جنس فولاد ۵۲ پرداختند. مدل اجزاء 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

پسماند داشته باشد.

حبیبی و همکارانش [۲۰]، به بررسی آنالیز تنش، کرنش، جابجایی و پتانسیل الکتریکی یک استوانه توخالی ضخیم ساخته‌شده 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 فرایند از جمله ضریب هدایت حرارتی، مدول الاستیسیته، ضریب پیزوالکتریک و ثابتهای دی الکتریک را بررسی کردند.

با بررسی مطالعات انجام‌شده مشخص گردید که اثرات ناشی از فرایندهای جوشکاری موضوع مهمی است که محققین با استفاده از روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی بدنبال کاهش مضرات این فرایندها بوده‌اند. در این تحقیق به بررسی تنش‌های پسماند و اعوجاج‌های 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 پاس‌های مختلف، یک الگوی بهینه جهت کاهش تنش‌های پسماند و اعوجاج‌های 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 تکه‌تکه کردن مسیر جوشکاری‌های محیطی نسبتا بلند و با درنظرگرفتن حالت‌های متفاوت برای نحوه ترتیب و توالی این مسیرهای تکه شده در هر پاس جوش می توان از مضرات فرایندهای جوشکاری کاست.

## ۲- معادلات تحلیل

### ۲-۱- معادلات مدل حرارتی

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

$$-\tilde{n}C\left(\frac{\partial R_x}{\partial x}+\frac{\partial R_y}{\partial y}+\frac{\partial R_z}{\partial z}\right)+Q(x,y,z,t)=\quad \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} \qquad (۱)$$

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، $\rho$ چگالی ماده، $C$ گرمای ویژه و $t$ زمان می باشد.

$$R_X=-k_x\frac{\partial T}{\partial x}$$
$$R_y=-k_y\frac{\partial T}{\partial y} \qquad (۲)$$
$$R_z=-k_z\frac{\partial T}{\partial z}$$

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 توابعی از دما می‌باشند که باعث غیرخطی‌شدن معادلات انتقال حرارت در فرآیند جوشکاری می شوند.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{n}C\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial y}{\partial x}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\quad \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۳)$$

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

$$\tilde{n}c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\{i\}^T\{L\}T\right)+\{L\}^T\{q\}=\overline{q} \qquad (۴)$$

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.

$$\{L\}=\begin{Bmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\\ \frac{\partial}{\partial y}\\ \frac{\partial}{\partial z}\end{Bmatrix} \qquad (۵)$$

$$\{V\}=\begin{Bmatrix}V_x\\ V_y\\ V_z\end{Bmatrix} \qquad (۶)$$

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

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (۷)$$

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

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

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

$$\tilde{n}c\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{i\}^T \{L\}T\right) = \{L\}^T \left([D]\{L\}T\right) + \bar{q} \quad (۹)$$

معادله (۹)، معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال حرارت در یک جسم جامد در مختصات کارتزین به فرم ماتریسی می‌باشد که با درنظرگرفتن شرایط مرزی و شرایط اولیه، این معادلات قابل حل می‌گردند.

### ۲-۲- معادلات مدل مکانیکی

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

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p + \dot{\varepsilon}^{th} \quad (۱۰)$$

که در رابطه (۱۰) عبارتهای اول، دوم و سوم در سمت راست معادله به ترتیب بیان‌کننده نرخهای کرنش الاستیک، پلاستیک و گرمایی هستند. کرنش الاستیک با استفاده از قانون هوک با درنظرگرفتن نسبت پواسون و مدول الاستیک وابسته به دما مدل شده است. رفتار پلاستیک ماده با درنظرگرفتن تابع تسلیم فون مایزز و کارسختی جنبشی دوخطی مدل می‌شود. از آنجا که در فرایند جوشکاری، ماده تحت کرنش‌های بالایی قرار نمی‌گیرد و تنها به دلیل گرم و سردشدن، تحت تنش‌های تناوبی فشاری- کششی قرار می‌گیرد، از این رو باید اثر باوشینگر به عنوان یک اثر مهم در نظر گرفته شود. در نتیجه حالت کارسختی جنبشی اهمیت بیشتری 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 می‌آید.

$$\nabla \acute{o}(r,t) + b(r,t) = 0 \quad (۱۱)$$

در معادله (۱۱)، $\sigma$ 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.

$$d\{\sigma\} = [D]d\{\varepsilon\} - \{C\}dT$$
$$\{C\} = -[D^e]\left(\{\infty\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}\right) \quad (۱۲)$$

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

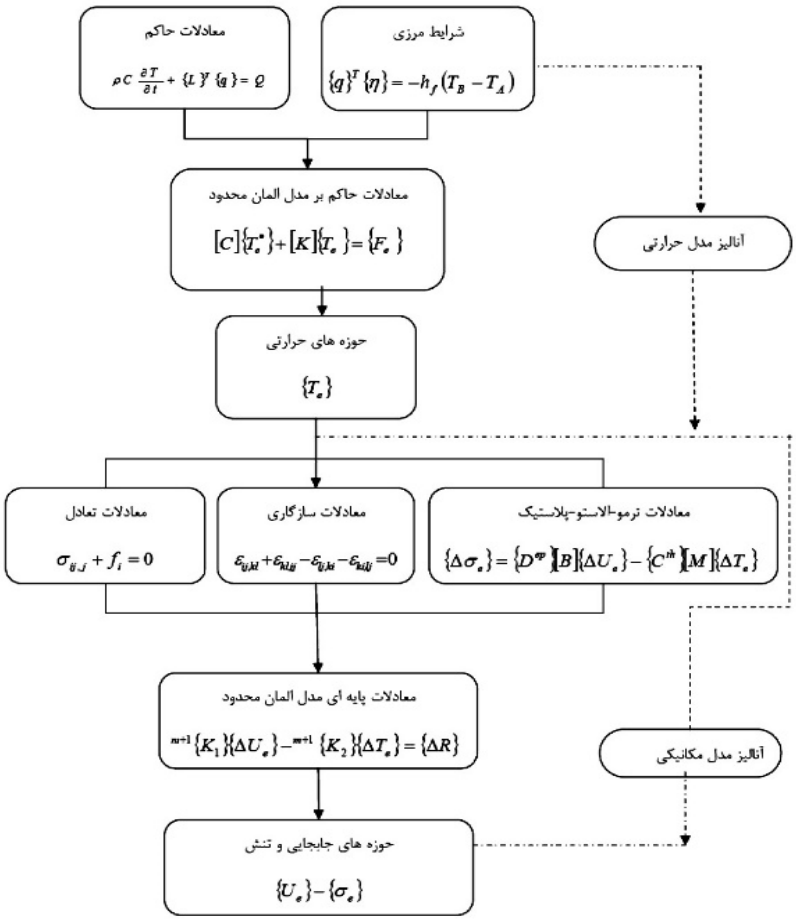
### ۲-۳- اطلاعات بدست آمده از مدل المان محدود

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

در بخش تحلیل حرارتی مدل، ورودی‌های اصلی معادلات حاکم به سیستم و شرایط مرزی هستند؛ با اعمال این معادلات، معادلات حاکم مدل المان محدود به دست می‌آید که با حل این معادلات میدان دمایی مدل محاسبه می‌گردد. خروجی این آنالیز، دمای گره‌های مدل می‌باشد که به عنوان یکی از ورودی‌های مرحلهٔ بعدی( آنالیز مکانیکی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱ الگوریتم حل معادلات المان محدود بصورت خلاصه آورده شده است.

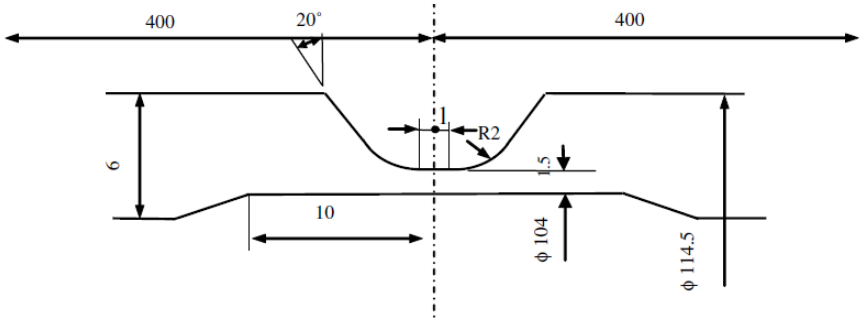
## ۳- شبیه‌سازی

در این بخش اجزاء مختلف شبیه‌سازی مورد نظر آورده شده است.




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.**

### ۳-۱- هندسه مدل

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

### ۳-۲- 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.

جدول ۱. خواص حرارتی فولاد زنگ‌نزن SUS 304 [۲۱]

**Table 1. Thermal physical properties of SUS304**

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

جدول ۲. خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن SUS 304 [۲۱]

**Table 2. Mechanical properties of SUS304**

| دما (◦C) | نسبت پواسان | چگالی (kg/m³) | مدول الاستیسیته (GPa) | تنش تسلیم (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۰/۲۹۴ | ۷۹۰۰ | ۱۹۸ | ۲۶۵ |
| ۱۰۰ | ۰/۲۹۵ | ۷۸۸۰ | ۱۹۳ | ۲۱۸ |
| ۲۰۰ | ۰/۳۱۰ | ۷۸۳۰ | ۱۸۵ | ۱۸۶ |
| ۳۰۰ | ۰/۳۱۸ | ۷۷۹۰ | ۱۷۶ | ۱۷۰ |
| ۴۰۰ | ۰/۳۲۶ | ۷۷۵۰ | ۱۶۷ | ۱۵۵ |
| ۶۰۰ | ۰/۳۳۳ | ۷۶۶۰ | ۱۵۹ | ۱۴۹ |
| ۸۰۰ | ۰/۳۳۹ | ۷۵۶۰ | ۱۵۱ | ۹۱ |
| ۱۲۰۰ | ۰/۳۴۲ | ۷۳۷۰ | ۶۰ | ۲۵ |
| ۱۳۰۰ | ۰/۳۶ | ۷۳۲۰ | ۲۰ | ۲۱ |
| ۱۴۰۰ | ۰/۳۷ | ۷۳۲۰ | ۱۰ | ۱۰ |

### ۳-۳- شرایط فرایند جوشکاری

در جوشکاری مورد نظر سرعت حرکت الکترود ۸۰ میلی‌متر بردقیقه، ولتاژدر هر یک از پاس‌های جوشکاری ۹/۵ ولت و مقدارشدت آمپردر پاس اول۱۴۰ 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.

### ۳-۴- مدل‌سازی منبع حرارتی جوش

جهت مدل‌کردن منبع حرارتی معادلات مختلفی ارائه شده است. یک مدل ریاضی برای اعمال شار حرارتی حجمی بر روی قطعه کار مدل دو بیضی گلداک می باشد (شکل ۴).

برای مقادیر $z>0$:

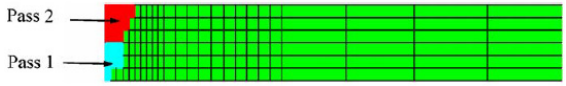
$$q_f(x,y,z)=\left(\frac{6\sqrt{3}f_fQ}{abc_f\pi^{3/2}}\right)e^{\left(-\frac{3x^2}{a^2}\right)}e^{\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right)}e^{\left(-\frac{3z^2}{c_f^2}\right)}$$

و برای مقادیر $z<0$:

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

جدول ۳. شرایط فرایند جوشکاری
Table 3. Welding condition.

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



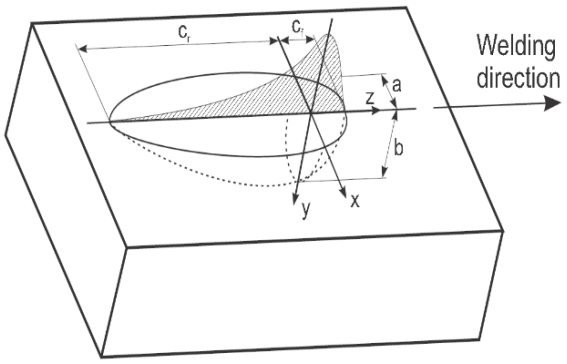

شکل ۳. تعداد و ترتیب پاس‌های انجام‌شده.

Fig. 3. Number and sequence of weld passes.

توزیع حرارتی ذکرشده ابتدا توسط گلداک و همکارانش ارائه شد اما بعدها این روابط با اضافه‌شدن برخی ضرایب اصلاح شدند. در این تحقیق از مدل گلداک جهت مدل‌سازی منبع حرارتی استفاده شد.

### ۳-۵- مدل‌سازی رسوب فلز پرکننده (تکنیک تولد و مرگ المان)

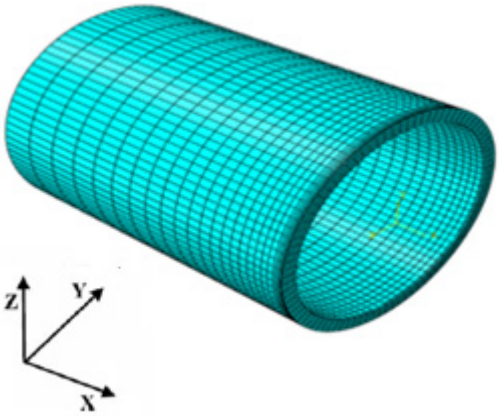
یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل‌سازی فرآیند جوشکاری چگونگی مدل‌کردن رسوب فلز جوش می‌باشد. برای این منظور دو مدل اساسی وجود دارد که عبارتند از روش المان‌های خاموش و روش المان‌های غیرفعال در روش المانهای خاموش تمامی گره‌ها و المان‌ها از ابتدا در مدل موجود می باشند، ولی المان‌های مربوط به فلز جوش که هنوز منبع حرارتی به آن‌ها نرسیده است دارای خواص مجازی هستند به‌طوری که تأثیری بر روی روند آنالیز نداشته باشند. در این روش با رسیدن منبع حرارتی بر روی المان‌های خاموش خواص واقعی المان‌ها نمایان می‌شود و این المان‌ها بدون تنش و کرنش وارد آنالیز می‌شوند، در روش المان‌های غیرفعال، المان‌های مدل شامل المان‌های مربوط به درز جوش نمی‌باشد. به عبارتی این المان‌ها در آنالیز شرکت داده نمی‌شوند. این المان‌ها در ابتدای آنالیز مشخص شده، ولی برای گره‌هایی که منبع حرارتی بر روی آن‌ها نرسیده، مجهول گرهی اختصاص نمی یابد. المان‌ها و گره‌های مذکور پس از رسیدن منبع حرارتی به آن‌ها، به آنالیز افزوده شده و ماتریس سفتی المان‌ها از نو محاسبه می‌گردد. روش المان‌های غیرفعال با این که باعث کاهش زمان محاسبات می گردد ولی در تغییر شکل‌های بزرگ با مشکلاتی همراه می‌باشد. چون روش عددی بکاررفته، باید این قابلیت را داشته باشد که مکان دقیق گره ها را با توجه به هندسه‌ی




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 مدل‌سازی رسوب جوش وجود دارد که اصطلاحاً روش جداکردن نامیده می‌شود. در این روش تمام فلز جوش در ابتدای تحلیل مکانیکی در دمایی به نام دمای نرم‌شوندگی (نزدیک دمای ذوب) قرار داده می شود. از آنجا که در این دما تنش تسلیم خیلی پایین می باشد، عملاً اثر این المان‌ها در تحلیل حذف می گردد. با رسیدن منبع حرارتی به المان‌های مورد نظر، قید دمای بالا، از روی المان‌ها به توالی برداشته شده و با دمای واقعی حاصل از آنالیز حرارتی در آنالیز مکانیکی شرکت داده می‌شوند. در نرم‌افزار آباکوس امکان استفاده از هر دو روش ذکرشده برای رسوب فلز جوش یعنی المان‌های خاموش و المان‌های غیر فعال وجود دارد. در این تحقیق از روش المان‌های خاموش برای مدل‌سازی رسوب جوش استفاده شد. به طوری که در ابتدای مدل‌سازی کلیه‌ی المان‌های مربوط به فلز جوش ترسیم شده و خواص مکانیکی و حرارتی مربوط به الکترود در مدل‌سازی المان محدود به آن اختصاص داده شده است ولی این المان‌ها 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 می‌شوند. بنابراین المان‌های مربوط به فلز جوش از ابتدای آنالیز بر روی مدل المان محدود موجود می




شکل ۵. مدل اجزامحدود لوله.

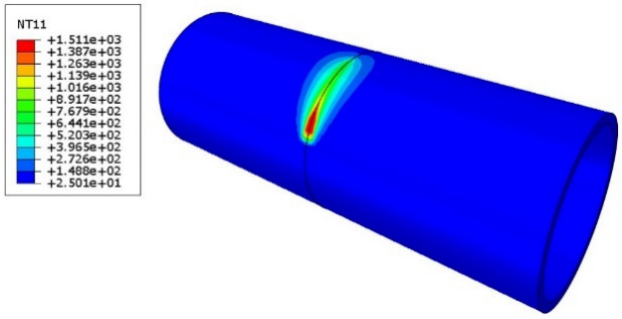
**Fig. 5. 3-D finite element model.**

باشند ولی تا زمانی که منبع حرارتی بر روی این المان‌ها نرسیده هیچ تنش و حرارتی در این المان‌ها بوجود نمی آید، وقتی فلاکس حرارتی بر روی المان‌های حذف‌شده‌ی مدل می‌رسد، المان‌های مربوط به فلز جوش در حالت آنیل‌شده (بدون تنش و بدون کرنش) به مدل المان محدود اضافه می شوند. 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 اجزامحدود

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*) می باشد، استفاده شد. همچنین با اعمال نتایج حاصل برای دمای گره‌ها از آنالیز حرارتی به عنوان شرایط اولیه‌ی آنالیز مکانیکی انجام می شود. بدین ترتیب میزان و نحوه‌ی توزیع تنش های پسماند و تغییر شکل‌های ناشی از جوشکاری محاسبه می شود. در شکل ۵ مدل اجزامحدود لوله مورد نظر آورده شده است. همچنین المان‌های بکاربرده‌شده از نوع آجری[1] 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

1 Brick




شکل ۶. نمایی از حرکت الکترود در ثانیه ۲۰ پاس دوم با سرعت ۱۸۰ 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**

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 ریزترکردن 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 ۵/۳×۱/۵×۱/۵ میلی‌متر بدست می‌آیند.

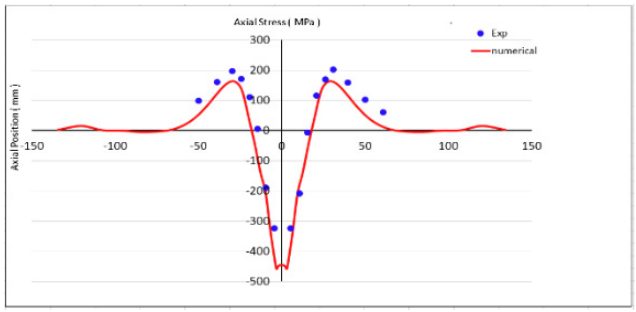
## ۴- نتایج

### 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.

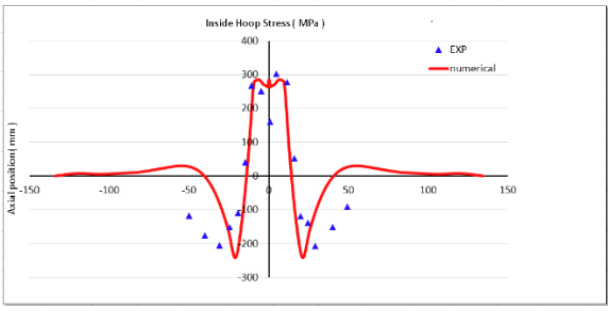
در شکل‌های ۸-۷ به ترتیب تنش‌های محوری روی سطح خارجی لوله و تنش‌های محیطی در سطح داخلی لوله با نتایج تجربی [۲۱] مقایسه شدند. همانطور که مشخص است انطباق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام‌شده، برقرار است و تاییدی بر صحت روش مدل‌سازی انجام‌شده می‌باشد.

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




شکل ۷. مقایسه تنش محوری در سطح خارجی لوله.

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




شکل ۸. مقایسه تنش محیطی در سطح داخلی لوله.

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

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**

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

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**

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

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 |

### ۴-۲- بررسی پارامتری

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

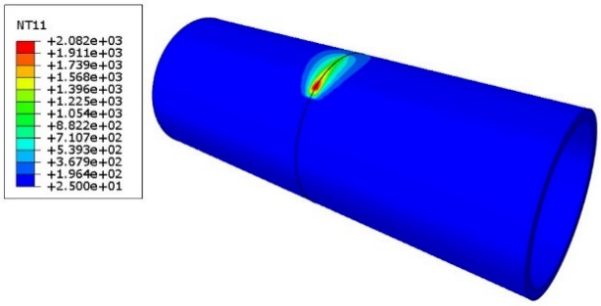
#### ۴-۲-۱- اثر سرعت حرکت الکترود

جهت بررسی اثر سرعت بر تنش های 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 الکترود ۱۲۰ میلیمتر بر

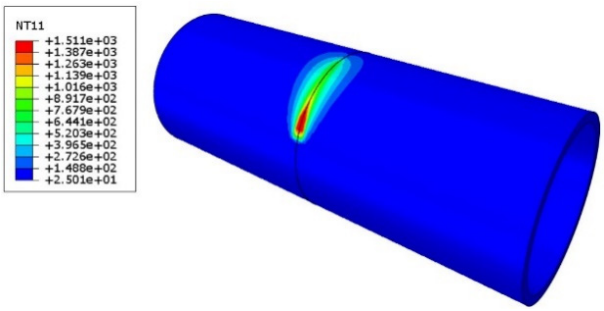
دقیقه و یک بار ۱۸۰ میلیمتر بر دقیقه فرض شده است. در شکل ۹ میدان دمایی ایجادشده در یک زمان مشخص برای هردو سرعت ذکرشده آورده شده است.

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 الکترود مقادیر ماکزیمم و مینیمم تنش‌های محوری و محیطی در سطوح داخلی و خارجی لوله دچار تغییرات می شوند به‌طوری 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.




**الف) ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه**




**ب) ۱۸۰ میلی‌متر بر دقیقه**

**شکل ۹. نمایی از حرکت الکترود در ثانیه ۲۰ پاس دوم با سرعت های مختلف.**

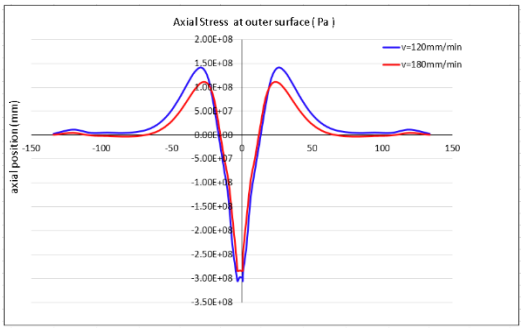
**Fig. 9. A view of the movement of the electrode in the 20th second of the second pass with various speed.**

### ۴-۲- ۲- اثر حرارت ورودی جوش

برای بررسی اثر حرارت ورودی با ثابت درنظرگرفتن 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.

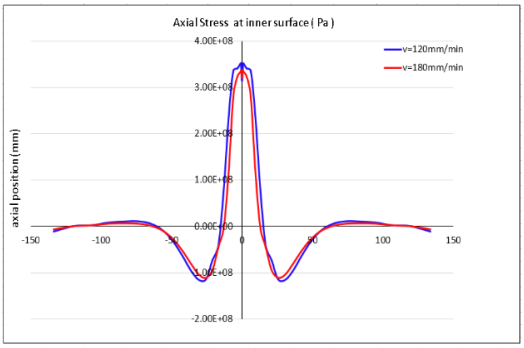
در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ به مقایسه تنش محوری در سطح خارجی، تنش محوری در سطح داخلی لوله، تنش محیطی در سطح داخلی و تنش محیطی در سطح داخلی لوله پرداخته شده است.

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 می شوند 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



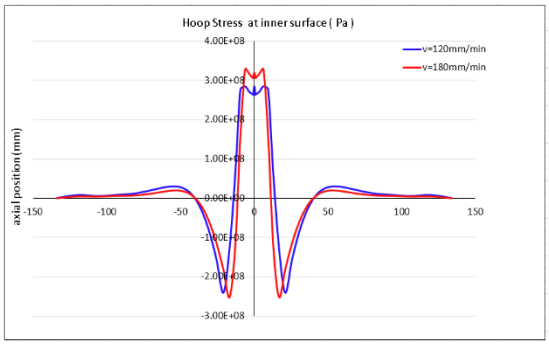

**شکل ۱۰. مقایسه تنش محوری در سطح خارجی لوله در دو سرعت مختلف.**

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



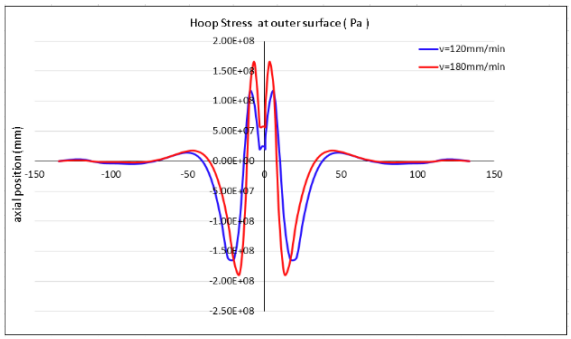

**شکل ۱۱. مقایسه تنش محوری در سطح داخلی لوله در دو سرعت مختلف.**

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




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.




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.

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

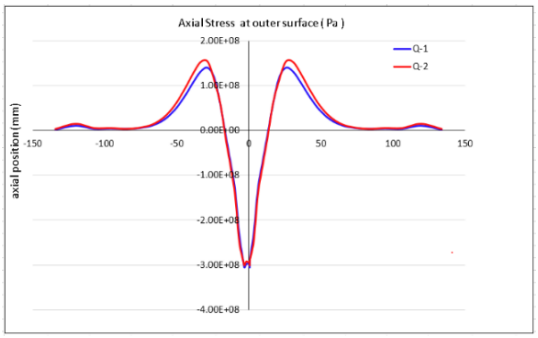
Table 7. Welding parameters in the first case (1- Q)

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

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

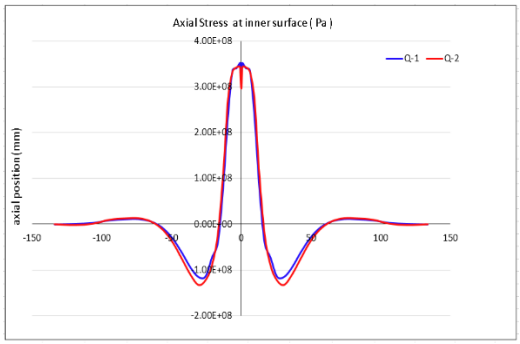
Table 8. Welding parameters in the seconde case (2- Q)

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



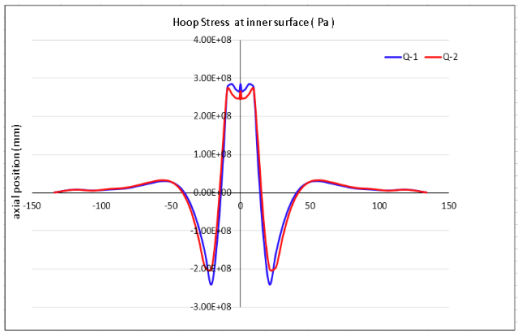

شکل ۱۴. مقایسه تنش محوری در سطح خارجی لوله در دو شدت جریان مختلف.

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



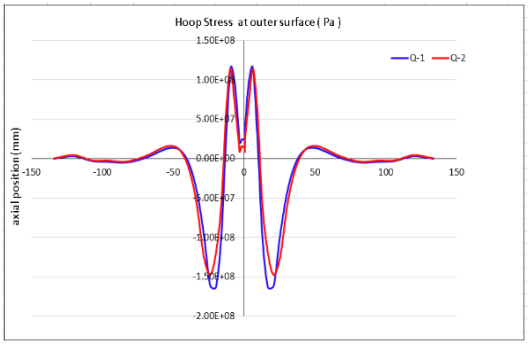

شکل ۱۵. مقایسه تنش محوری در سطح داخلی لوله در دو شدت جریان مختلف.

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



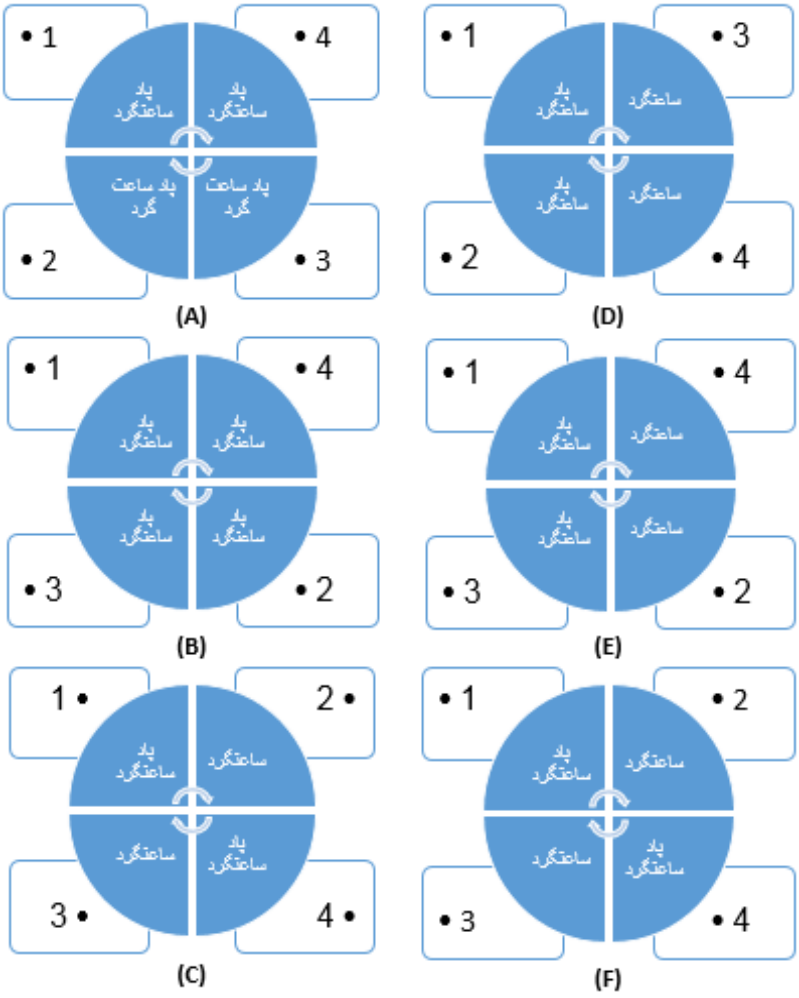

شکل ۱۶. مقایسه تنش محیطی در سطح داخلی لوله در دو شدت جریان مختلف.

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



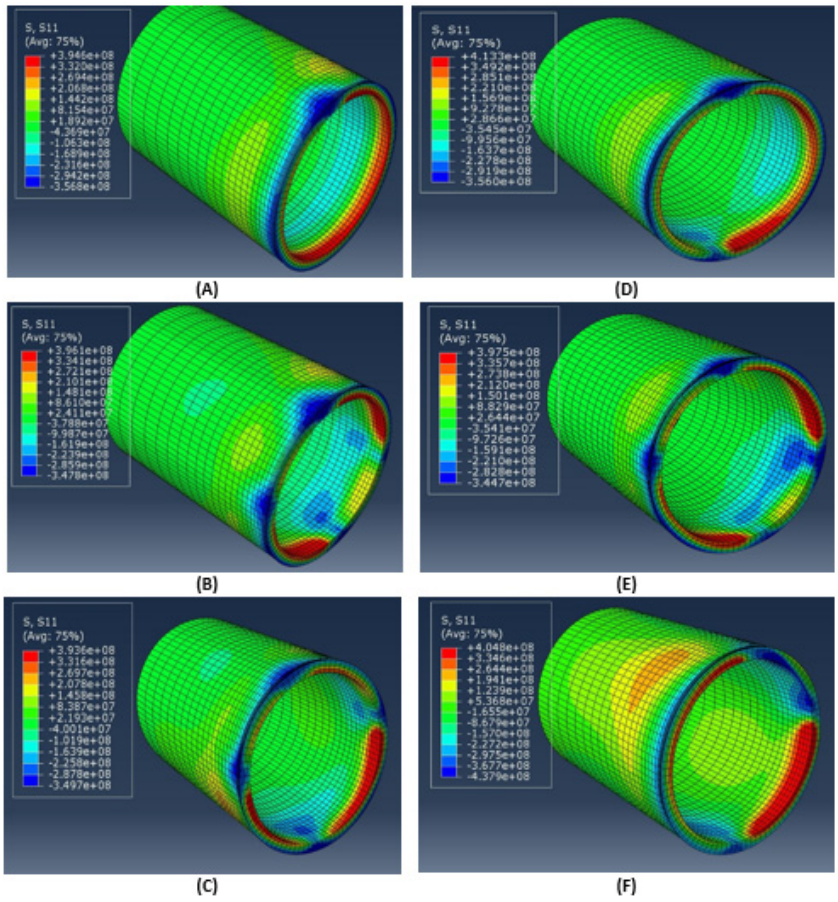

شکل ۱۷. مقایسه تنش محیطی در سطح خارجی لوله در دو شدت جریان مختلف.

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




شکل ۱۸. حالات شش گانه درنظرگرفته‌شده 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.**

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.

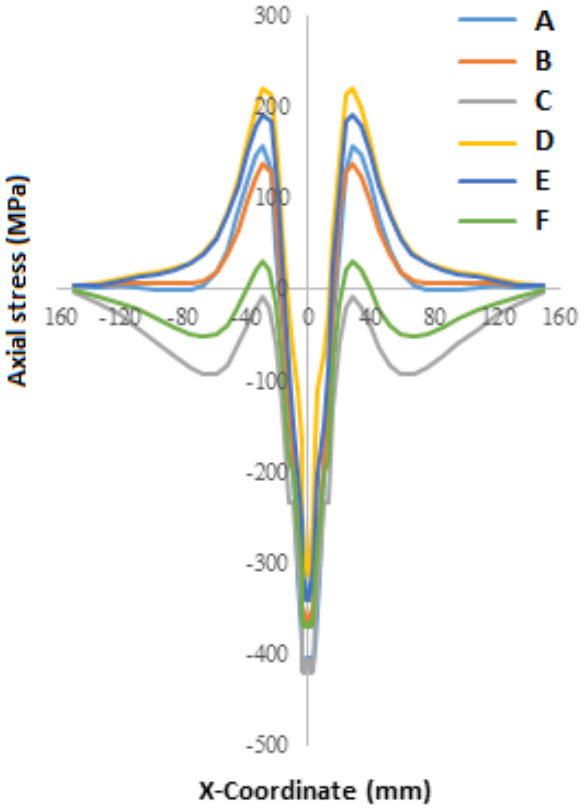
### ۴-۲- ۳- اثر ترتیب و جهات مسیر جوش

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 الکترود 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 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 درنظرگرفته‌شده 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.

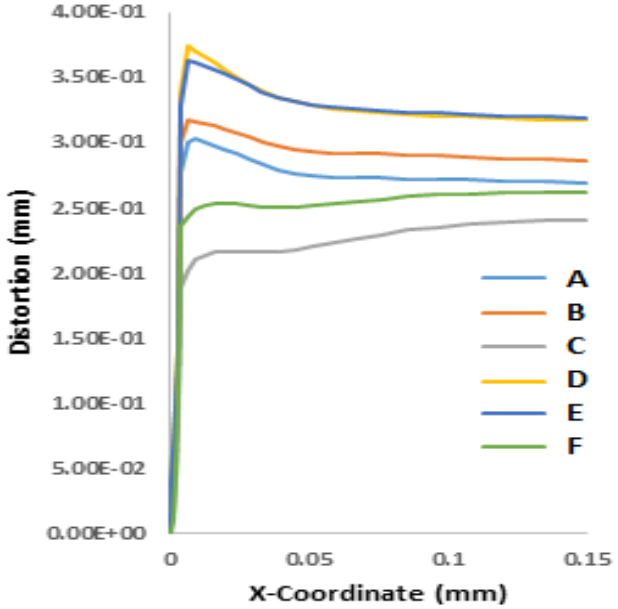
در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ نمودارهای مربوط به مقایسه تنش‌ها و اعوجاج‌های مختلف ایجادشده در مسیرهای شش‌گانه، آورده شده است.

با درنظرگرفتن 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



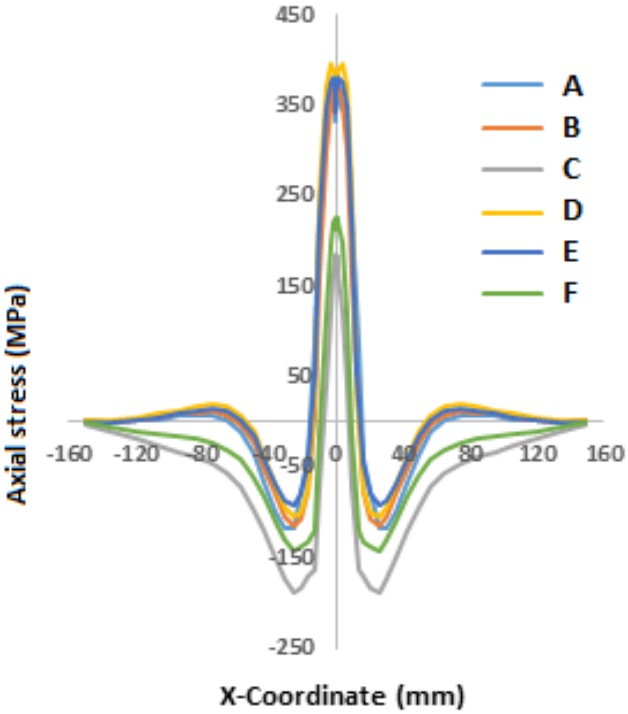

شکل ۲۰. تنش محوری روی سطح خارجی لوله در حالت‌های مختلف.

**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.**

ایجاد نمی‌شود. 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] تنش‌های کششی و فشاری به ترتیب کاهش ۵۵ و ۴۹/۳ درصدی داشتند. همچنین با مقایسه نمودارهای مربوط به اعوجاج حالت‌های مختلف مشخص شده که حالتC کمترین اعوجاج را ایجاد کرده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تنش‌های پسماند و اعوجاج‌های 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 پاس‌های مختلف، یک الگوی بهینه جهت کاهش تنش‌های پسماند و اعوجاج‌های ناشی از جوش محیطی لوله مورد نظر ارائه شده است. مهمترین نتایج بدست‌آمده عبارتند از:

۱- با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی مشخص گردید که انطباق خوبی بین نتایج برقرار است و نتایج مدل انجام‌شده قابل اطمینان می‌باشد.

۲- با افزایش ۵۰ درصدی سرعت حرکت الکترود تنش‌های کششی و فشاری محوری واقع در سطوح داخلی و خارجی لوله دچار کاهش شدند اما تنش‌های 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) تنش‌های کششی و فشاری محوری در سطح خارجی لوله به ترتیب افزایش و کاهش را نشان دادند و درسطح داخلی لوله عکس این روند مشاهده شد.

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

۴- با درنظرگرفتن 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. 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 حالت‌های مختلف درنظرگرفته‌شده مشخص گردید که حالت C دارای کمترین مقدار تنش پسماند و اعوجاج بود بنابراین به عنوان بهینه‌ترین حالت برای جوش دوپاسه محیطی لوله معرفی می‌شود.

## 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

Arc Welded (GMAW) Joint Strength Comparison of Aluminum Sheet (5754) and Exturded (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 stressdistribution in a multipass welded piping branch junction,international joiurnal 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 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.

**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