نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 56(8) (2024) 1121-1136
DOI: 10.22060/mej.2025.23331.7746

Finite-element Simulation of Heat Transfer in Electroslag Welding

Ali Goldar , Eslam Ranjbarnodeh * , Emad Cheraghi Rizi

Department of Materials and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology

ABSTRACT: Electroslag welding is widely used in column joints. However, the process of electroslag welding has a higher heat input than other welding processes, which results in dramatic changes in microstructure and mechanical properties, especially grain size and toughness. These connections are very vulnerable when subjected to dynamic loads and earthquakes. Therefore, the study of heat transfers and its effect on the mechanical properties of these joints is important. Considering the importance of this, in the present study, a finite element model is proposed to study the thermal behavior of this process, then the accuracy of the model is measured according to the practical experiments of the microcontroller. For verification, several practical examples of welding were performed and then, to evaluate the size of the pit pool, welded sections of the macrovar were prepared to confirm the assumptions of the model. In the next step, the validated model is used to study the thermal behavior of the system and the distribution of temperature according to the variables of current, voltage and speed. In this regard, due to the complexity of the process, it is not possible to carry out all simulations with software menus, so much of the simulation was written with the language of the ANSYS software.

Review History:

Received: Jul. 09, 2024
Revised: Dec. 01, 2024
Accepted: Dec. 23, 2024
Available Online: Jan. 04, 2025

Keywords:

Finite-Element Simulation
Heat Transfer
Electroslag Welding
Welding Parameters

1- Introduction

The use of electroslag welding for creating thick sheet metal joints in large metal structures and pressure vessels has gained significant attention due to its high deposition rates and minimal need for skilled labor [1]. However, most experimental and numerical studies have focused on optimizing joint properties under various operating conditions, with limited research on the effects of key process parameters on the weld pool and heat-affected zone. Deb Roy et al. [2] studied welding variables' influence on temperature fields and dilution rates. Ritchie [1] examined process variables' effects on heat input and the heat-affected zone. Chen et al. [3] analyzed mechanical property losses and microstructural changes, while Deng and Kyoshima [4] simulated welding temperature fields, residual stress, and deformation. Kakizaki et al. [5] modeled post-welding cooling, and Delivari et al. [6, 7] studied molten fluid flow, electromagnetic currents, and heat flux. All these studies assumed plane symmetry, but the lack of problem simplifications and an optimal moving heat source has led to long solution times.

Finite element modeling and the ANSYS analytical tool have greatly simplified the implementation of this method on a personal computer scale [8], making them highly effective for thermal and mechanical analyses [9, 10]. In this study, the heat source is modeled as a volumetric heat flux, effectively capturing the characteristics of electroslag welding. This simplified model reduces problem complexity and solution time. A review of the literature reveals that the combined effects of current intensity, voltage, and welding speed have not been simultaneously studied. Thus, this paper examines their impact on the heat-affected zone size, maximum slag temperature, and temperature distribution.

2- Materials and Methods

A516 Gr 70 carbon steel parts were joined using the electroslag welding method, with a consumable nozzle feed wire. Joint scheme is brought in Figure 1 which is exactly similar to the model used in the finite-element simulation with the exceptipn that Due to the symmetry, only the right half was modeled in the Figure 1.

It is worth noting that the current, voltage, and welding speed are unique for each sample (Table 1).

Cross-sections were prepared for metallography.

In electroslag welding, the slag, initially melted by an electric arc, acts as electrical resistance. When current passes through it, heat is generated according to Joule's law (Equation 1), where R is resistance (Ω), I is current (A), and t is time (s).

$$Q = RI^2 = VIt \quad (1)$$

*Corresponding author's email: islam_ranjbar@aut.ac.ir

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.

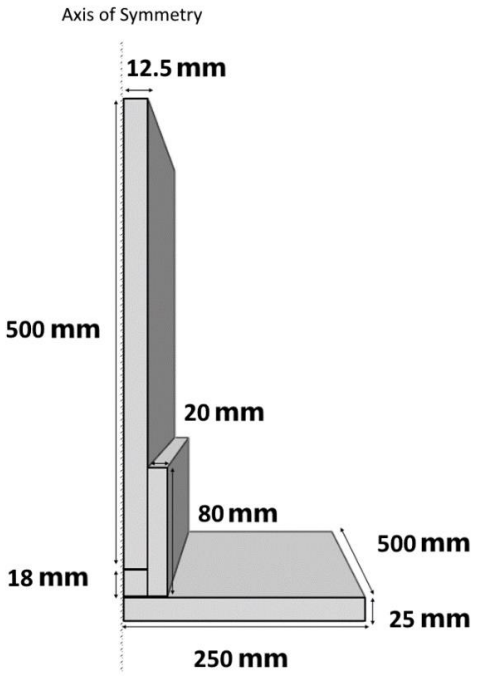


Fig. 1. Schematic of the right-hand side of the Electro Slag Welding symmetric model: view from the top (the welding direction in perpendicular to the screen)

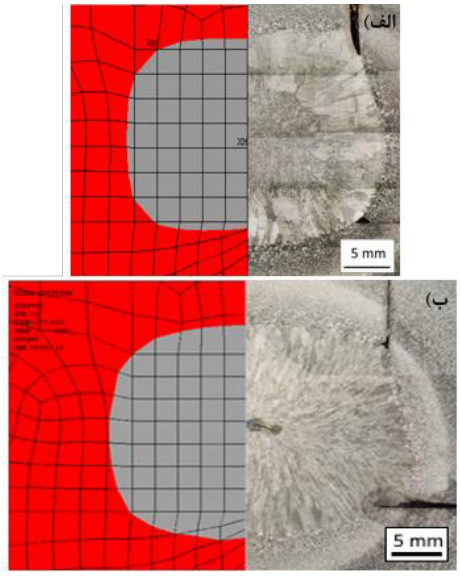


Fig. 2. Validating the finite element models: a) sample no. 1, b) sample no. 2

Table 1. Welding variables of the samples

Sample no.	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)
1	380	36	16
2	650	38	18

In the thermal model, the governing relationship for transient nonlinear temperature distribution studies is as Equation (2) [2].

$$\lambda_x\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)+\lambda_y\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\lambda_z\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+q_E=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

In the above equation, λ_i (I = x, y, z), T, ρ, and c represent the thermal conductivity, temperature, density, and specific heat capacity, respectively. q_E denotes the internal heat generation rate. It is assumed that the voltage drop occurs entirely in the slag layer, which is reasonable since the slag's electrical resistance is thousands of times higher than that of the metal. In the finite element model, the welding path is divided into small, equal-length sections (mesh blocks), each heated sequentially to simulate the moving heat source representing the welding passes. For simplicity, the slag layer and weld metal are treated as a single entity, and the element birth and death technique is used to model the welding process.

The volumetric heat flux is determined using Equation (3).

$$q_1=\eta^{U_I/V_H} \quad (3)$$

In the above equation, U is the arc voltage, I is the welding current, V_H is the heat source volume, and η is the arc efficiency. In the thermal analysis, it was assumed that all surfaces of the finite element model, except the symmetrical plate, lose heat through convection to the surrounding air at an ambient temperature of 25°C. The heat transfer coefficient for the weld and base metal in free air was taken as $15\,W/m^{\text{r}}K$, based on various measurements. The number of nodes is 37815 and the number of elements is 32825.

3- Results and Discussion

The simulated models were verified with real models to validate their accuracy (Figure 2) based on the size of the melt pools.

Current values of 380, 650, and 800 A were applied to the moving heat source with a constant welding speed of 2.67 mm/s and voltage of 38 V. Figure 3 illustrates the impact of current on weld pool size, temperature distribution, and

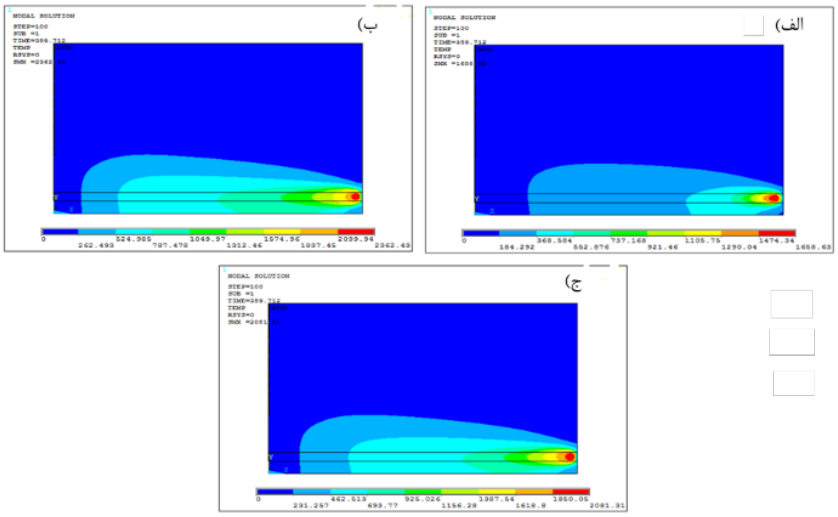


Fig. 3. Heat distribution and the peak slag temperature in welding currents of a) 380 A, b) 800 A, c) 650 A

maximum slag temperature. Increasing the current from 380 to 650 and 800 A raised the slag temperature from 1658 °C to 2081 °C and 2362 °C, respectively, highlighting the effect on heat transfer and slag temperature. The effect of heat source speed was also studied with speeds of 1, 1.2, and 1.39 mm/s, while keeping current at 380 A and voltage at 38 V. Lowering the speed increases heat input, as more heat is applied to the material. The maximum slag temperature decreased with increasing speed: 2162 °C at 1 mm/s, 2142 °C at 1.2 mm/s, and 2129 °C at 1.39 mm/s, confirming the theoretical trend. The impact of voltage changes from 38 to 40 and 42 V was also investigated at a speed of 1.39 mm/s and a current of 380 A. The maximum slag temperature increased from 2081 °C to 2142 °C and 2206 °C, respectively.

Although joints between parts were not modeled, the thermal cycles at key locations and the size of the melting zone closely match experimental measurements, indicating that the initial joints have a negligible impact on the thermal analysis.

4- Conclusions

This research successfully simulated heat transfer in the electroslag welding process using finite element analysis in ANSYS Mechanical APDL. The simulation results aligned closely with practical observations.

- A dynamic heat source model in ANSYS Mechanical APDL effectively simulated the welding process's input heat.
- The finite element model's accuracy was confirmed by comparing simulated weld pool dimensions with experimental samples.
- Variations in welding current, speed, and voltage showed corresponding changes in slag temperature, consistent with theoretical expectations.

References

[1] W. Ricci, T. Eagar, A parametric study of the electroslag welding process, Welding Research Supplement, 61(12) (1982) 397s-400s.

[2] T. Roy, J. Szekely, T. Eagar, Mathematical modeling of the temperature profiles and Weld dilution in electroslag welding of steel plates, Modeling of casting and welding processes, (1980) 197-212.

[3] S. Chen, J. Devletian, Microstructure and mechanical properties of electroslag welds in TI-6AL-4V alloy, Welding Journal, 69(9) (1990) 319-325.

[4] D. Deng, S. Kiyoshima, Numerical simulation of welding temperature field, residual stress and deformation induced by electro slag welding, Computational Materials Science, 62 (2012) 23-34.

[5] T. Kakizaki, S. Koga, H. Yamamoto, Y. Mikami, K. Ito, K. Yamazaki, S. Sasakura, H. Watanabe, Microstructure features and formation mechanism in a newly developed electroslag welding, Welding in the World, (2022) 1-12.

[6] A. Dilawari, J. Szekely, T. Eagar, Electromagnetically and thermally driven flow phenomena in electroslag welding, Metallurgical Transactions B, 9 (1978) 371-381.

[7] A. Dilawari, T. Eagar, J. Szekely, Analysis of Heat and Fluid Flow Phenomena in Electroslag Welding, Welding journal, 57(1) (1978) 24.

[8] E. Ranjbarnodeh, S. Serajzadeh, A. Hosein Kokabi, S. Hanke, A. Fischer, Finite element modeling of the effect of heat input on residual stresses in dissimilar joints, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 55 (2011) 649-656.

[9] H. Li, J. Iyama, Investigation on Fracture Behavior of Electroslag Welding Joint with High-Performance Steel, International Journal of Steel Structures, (2024) 1-10.

[10] K. Masubuchi, Analysis of welded structures: residual stresses distortion and their consequences, Elsevier, 2013.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۶، شماره ۸، سال ۱۴۰۳، صفحات ۱۱۲۱ تا ۱۱۳۶
DOI: 10.22060/mej.2025.23331.7746

شبیه‌سازی اجزا محدود انتقال حرارت در فرآیند جوشکاری سربارہ الکتریکی

علی گلدار، اسلام رنجبر نوده *، عماد چراغی ریزی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

خلاصه: جوشکاری سربارہ الکتریکی یک روش اتصال دهی قطعات ضخیم است که حرارت ورودی بیشتری نسبت به سایر فرآیندهای جوشکاری دارا است. این ویژگی باعث تغییرات چشم‌گیر در ریز ساختار و خواص مکانیکی، به خصوص اندازه دانه و چقرمگی می‌شود. بنابراین این اتصالات زمانی که تحت بارهای دینامیکی و زلزله قرار می‌گیرند، بسیار آسیب پذیرند. با توجه به اهمیت ذکر شده، در این پژوهش ابتدا یک مدل اجزا محدود جهت حل مسئله انتقال حرارت حین جوشکاری سربارہ الکتریکی ارائه می‌شود. به دلیل پیچیدگی‌های فرآیند امکان انجام تمام شبیه‌سازی با منوهای نرم افزار وجود ندارد، بنابراین بخش اعظم شبیه سازی با زبان طراحی پارامتریک نرم افزار انسیس نوشته می‌شود. در مدل اجزا محدود، منبع حرارتی به صورت یک شار حرارتی حجمی با دانسیته یکنواخت فرض می‌شود و با لحاظ کردن تقارن صفحه ای و مدل‌سازی نیمی از نمونه جوشکاری، سهولت حل مسئله انتقال حرارت به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. سپس صحت مدل مذکور به کمک آزمایش‌های تجربی و ارزیابی اندازه حوضچه جوش سنجیده می‌شود. در گام بعد، از مدل صحه‌گذاری شده جهت بررسی رفتار حرارتی سیستم و نحوه توزیع دما به عنوان تابعی از متغیرهای شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری استفاده می‌شود. مدل اجزا محدود به درستی رابطه حرارت ورودی، متغیرهای فرایند، خواص مواد و درجه حرارت سربارہ را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه ابعاد حوضچه جوش مدل‌سازی شده و حقیقی ثابت می‌کند که حداکثر اختلاف کمتر از ۱۳ درصد است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

کلمات کلیدی:
شبیه‌سازی اجزا محدود
انتقال حرارت
فرآیند جوشکاری سربارہ الکتریکی
فولاد ساده کربنی
متغیرهای فرآیند

۱- مقدمه

امروزه استفاده از روش جوشکاری سربارہ الکتریکی[1] به منظور ایجاد اتصالات ورق‌های ضخیم اسکلت‌های فلزی بزرگ و مخازن تحت فشار، علاقه بسیاری از محققان این حوزه را به خود جلب کرده است، زیرا که با استفاده از این روش اتصالاتی با نرخ رسوب بالا بدون نیاز به نیروی کار ماهر را می‌توان ایجاد نمود [۱]. این روش یکی از فرایندهای جوشکاری پربازده است و تا حدود ۲۰ کیلوگرم بر ساعت فلز در درز اتصال رسوب می‌دهد و به کمک آن می‌توان ورقه‌هایی به ضخامت ۹۰۰ میلی‌متر را بدون پخ سازی و با یک پاس جوش داد [۲]. این روش جوشکاری اولین بار توسط پاتون و همکاران توسعه داده شد [۳]. با این حال مطالعات تجربی و عددی انجام گرفته در این زمینه بیشتر برای ارزیابی و بهینه‌سازی خصوصیات فیزیکی ناحیه اتصال برای انواع شرایط عملیاتی بوده و تا کنون مطالعات اندکی در خصوص تاثیر پارامترهای اصلی فرآیند بر اندازه و شکل حوضچه جوش و ناحیه متاثر از حرارت صورت گرفته است. دب روی و همکارانش [۴] به بررسی تاثیر متغیرهای جوشکاری بر میدان‌های دمایی و تاثیر آن بر میزان رقت[2] در این روش جوشکاری پرداختند. ریچی [۱] تاثیر متغیرهای فرآیند بر میزان حرارت ورودی و شکل و اندازه ناحیه متاثر حرارت[3]، چن و همکاران [۵] افت خواص مکانیکی و تغیرات ریز ساختاری در حین جوشکاری سربارہ الکتریکی، دنگ و کیوشیما [۶] شبیه‌سازی عددی میدان دمایی جوشکاری، تنش پسماند و تغییر شکل ناشی از جوشکاری با سربارہ الکتریکی و تاثیر آن بر میزان خواص مکانیکی را مورد مطالعه قرار دادند، کاکیزاکی و همکاران [۷] مرحله خنک سازی بعد از جوشکاری را مدل کردند و دلیواری و همکاران [۸، ۹] آنالیز عددی جریان سیال مذاب، جریان الکترومغناطیسی و شار حرارتی در جوشکاری سربارہ الکتریکی را بررسی کردند. در تمام این پژوهش‌ها از

1 Electroslag welding

2 dilution

3 Heat-affected zone (HAZ)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Isam_ranjbar@aut.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.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد A516 گرید ۷۰

Table 1. Chemical composition of A516 Gr 70 steel

نوع فولاد- الکترود نواری	عناصر	سیلیسیم	منگنز	کربن	نیکل	کروم	مولیبدن	مس	فسفر	گوگرد	تیتانیوم
A516 Gr70		۰/۶	۱/۷	۰/۲۲	۰/۳	۰/۳	۰/۰۸	۰/۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳

تقارن صفحه ای بهره گیری شده است. حال آنکه عدم ساده سازی مسئله و عدم استفاده از منبع حرارتی متحرک بهینه موجب طولانی شدن زمان حل مسئله شده است.

فولاد A516 دارای کربن اندک و چقرمگی خوب و قیمت ارزان است که باعث شده در ساخت مخازن تحت فشار به وفور مورد استفاده قرار گیرد. اما کم کربن بودن آن باعث شده تا از استحکام کششی بالایی برخوردار نباشد. به این دلیل معمولا در ساخت مخازن از ورق‌های ضخیم این گرید جهت جبران این کاستی استفاده می‌شود. اهمیت این موضوع باعث شده است تا بررسی رفتار حرارتی و آنالیز شکست مخازن تحت فشار از جنس فولاد A516 به کمک اجزا محدود مورد توجه محققان باشد [۱۰, ۱۱]. در روش جوشکاری سرباره الکتریکی به دلیل حرارت قابل توجهی که به فلز پایه وارد می‌شود و همچنین نرخ سردشدن پایین، منطقه متاثر از حرارت در اطراف فلز جوش بسیار گسترش می‌یابد و انعطاف محل اتصال ممکن است تنزل یابد [۱۲]. بنابراین رسیدن به درکی درست در رابطه با متغیرهای تاثیرگذار بر این فرایند اهمیت بالایی دارد. استفاده از روش‌های نوین نظیر شبیه‌سازی عددی این امکان را فراهم می‌سازد تا بدون ایجاد هزینه گزاف بتوان طرح ممکن را ایجاد کرد [۱۳]. مدلسازی اجزا محدود و ابزار تحلیلی انسیس در ساده‌سازی و قابل پیاده‌سازی بودن این روش در مقیاس رایانه‌های شخصی تاثیر به سزایی داشته است [۱۴] و برای تحلیل های حرارتی و مکانیکی قابل استفاده است [۱۵, ۱۶]. در پژوهش حاضر یک منبع حرارتی به صورت یک شار حرارتی حجمی مدل می‌شود که به خوبی ویژگی های منبع حرارتی جوشکاری سرباره الکتریکی را مدل می‌کند. ساده بودن این مدل باعث می‌شود تا از پیچیدگی‌های مسئله کاسته شود و زمان حل آن بسیار اندک باشد. با توجه به مقالات بررسی شده، چنین به نظر می‌رسد که تا کنون تاثیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری به‌طور همزمان بررسی نشده‌است. بنابراین در این مقاله به مطالعه این پارامترها بر اندازه منطقه متاثر از حرارت، حداکثر دمای سرباره و نحوه توزیع دما پرداخته شده است. به منظور بررسی رفتار حرارتی سیستم و نحوه توزیع دما با توجه به متغیرهای شدت جریان، ولتاژ و سرعت فرآیند ابتدا یک مدل اجزا محدود در به کمک زبان طراحی پارامتریک نرم افزار انسیس[1] کدنویسی می‌شود؛ سپس جهت تایید نتایج [۱۷] صحت مدل مذکور به کمک آزمایش‌های عملی سنجیده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

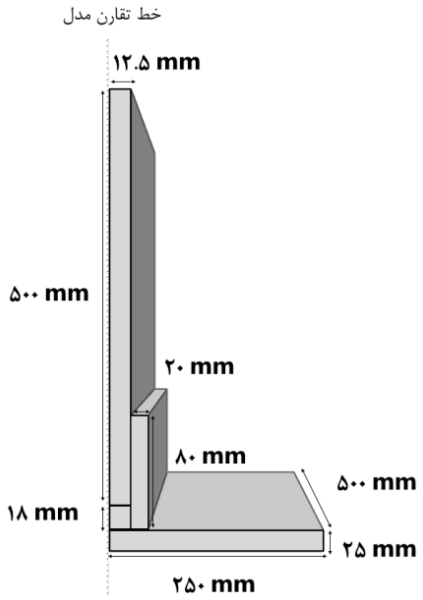
در این پژوهش قطعات فولاد ساده کربنی A516 گرید ۷۰ با نازل مصرفی به قطر ۱۸ میلی‌متر و سیم تغذیه مصرفی به قطر ۳/۲ میلی‌متر با روش جوشکاری سرباره الکتریکی به یکدیگر متصل شدند. ترکیب شیمیایی فولاد مدنظر به روش کوانتومتری مشخص شد و نتایج آن در جدول ۱ آمده است. نتایج آنالیز شیمیایی با مقادیر ذکر شده در استاندارد همخوانی داشت [۱۸]. شمای کلی طرح اتصال و محل قرارگیری فلز جوش در شکل ۱ آورده شده است. با توجه به متقارن بودن نمونه، تنها نیمه سمت راست مدلسازی شد و موقعیت خط تقارن در شکل ۱ قابل ملاحظه است. شایان ذکر است که آمپر، ولتاژ و سرعت جوشکاری برای هر نمونه منحصر به فرد است. متغیرهای جوشکاری استفاده شده در نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. جهت ارزیابی نمونه‌های آزمایش با روش جوشکاری سرباره الکتریکی، آزمایش ماکرو اچ جهت بررسی ریزساختار و محدوده منطقه متاثر از حرارت

1 Ansys Parametric Design Language

جدول ۲. مشخصه‌ها و پارامترهای تولید نمونه‌های مورد آزمایش

Table 2. Welding variables of the experimental samples

نمونه	ضخامت(mm)	سرعت(cm/min)	ولتاژ (ولت)	جریان (آمپر)
۱	۲۵	۱۶	۳۶	۳۸۰
۲	۲۵	۱۸	۳۸	۶۵۰



شکل ۱. مدل نیمه سمت راست از طرح اتصال نمونه جوشکاری سرباره الکتریکی؛ نمای بالا (جهت جوشکاری عمود بر صفحه است)

Fig. 1. Schematic of the right-hand side of the Electro Slag Welding symmetric model: view from the top (the welding direction in perpendicular to the screen)

انجام گردید. برای انجام آزمایش متالوگرافی نمونه‌هایی با ابعاد مشخص از مقطع جوشکاری شده توسط دستگاه برشکاری با جت آبی[1] تهیه شدند که به علت حجیم بودن، نمونه‌ها بدون نصب[2] مورد بررسی قرار گرفتند.

سپس سطح مقطع عرضی روکش و فولاد زیرین توسط سنگ‌زنی مغناطیسی جهت انجام فرآیند سنباده زنی و پولیش آماده‌سازی شد. در مرحله بعد عملیات سنباده‌زنی نمونه‌ها از سنباده‌های خشن تا نرم با شماره‌های به ترتیب ۸۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰، ۲۴۰۰ انجام گرفت.

1 Waterjet
2 Mount

سپس با دستگاه مخصوص پولیش و به کمک پودر آلومینای ۰/۵ میکرون، نمونه‌های مورد بررسی صیقلی شده و جهت انجام فرآیند حکاکی شیمیایی[3] آماده شدند. برای حصول یک ساختار مناسب از محلول حکاکی نایتال ۲٪ به مدت ۵ ثانیه استفاده شد.

۳- روش تحقیق اجزا محدود جوشکاری سرباره الکتریکی

شبیه‌سازی اجزا محدود انتقال حرارت در فرایند جوشکاری توانایی پیش‌بینی توزیع دما و میدان‌های تنشی ناشی از آن را دارا است. در این پژوهش به یک مدل حرارتی نیاز است. مدل حرارتی مورد استفاده در این

3 Chemical etching

پژوهش توسط دب روی و همکاران [۴] توسعه داده شده است. الگوی توزیع حرارت در مدل آنها از حل معادلات میدان الکتریکی حاصل شد. در روش جوشکاری سرباره الکتریکی، سرباره که ابتدا در اثر قوس الکتریکی موقت اولیه به صورت مذاب در می‌آید نقش مقاومت الکتریکی را ایفا کرده و با عبور جریان الکتریکی از آن، حرارت لازم برای ذوب الکترود مصرفی و سطوح لبه‌های قطعات مورد اتصال بر اساس قانون ژول (رابطه ۱) فراهم می‌شود که به ترتیب R مقاومت الکتریکی (اهم)، I شدت جریان الکتریکی (آمپر) و t زمان (ثانیه) است

$$Q = RI^2 = VIt \qquad (۱)$$

بنابراین می‌توان گفت این فرآیند، فرآیندی بین روش‌های قوسی و مقاومتی می‌باشد. حوضچه جوش بین سطوح لبه‌های قطعه‌کار و کفشک‌های مسی محصور است و مسیر پیشرفت جوشکاری در امتداد قائم است و همزمان با آن عملیات انجماد نیز شبیه ریخته‌گری مداوم ادامه می‌یابد. سرباره علاوه بر اینکه به عنوان یک مقاومت الکتریکی عمل می‌کند، محافظت منطقه مذاب حوضچه جوش و احتمالاً تصفیه مذاب را هم انجام می‌دهد. سرباره نه تنها نقشی در پایداری قوس ندارد بلکه باید به گونه‌ای عمل کند که قوس را خاموش نگه‌دارد [۱۹].

در مدل حرارتی، رابطه حاکم برای بررسی‌های توزیع دمای غیرخطی گذرا به صورت رابطه ۲ است [۴]

$$\lambda_x\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)+\lambda_y\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\lambda_z\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+q_E=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، $\lambda_i \ (\mathrm{i = x, y, z})$، T، ρ و c به ترتیب ضریب هدایت حرارتی، دما، دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه هستند. فرض می‌شود که هر دوی فلز پایه و فلز جوش، مواد همسان‌گرد هستند؛ به نحوی که ضرایب هدایت حرارتی در جهات x، y و z مقدار یکسانی دارد. q_E نرخ تولید حرارت درونی است. یک الکترود سیمی مصرفی به طور مداوم در یک حوضچه سرباره مذاب تغذیه می‌شود که با عبور جریان از الکترود از طریق حوضچه سرباره مذاب، یعنی رابط جوش به فلزات پایه به شیوه مقاومتی حرارت می‌بینند. در محاسبه الگوی تولید حرارت، می‌توان فرض کرد که تمامی افت ولتاژ در لایه سرباره اتفاق می‌افتد و این فرض منطقی است زیرا مقاومت الکتریکی فاز سرباره حدودا چند هزار برابر فلز است. طبق یک تحقیق قبلی، در خصوص فولاد کم کربن، دمای حمام ۱۹۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده در حالیکه دمای سطح تقریبا ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد است [۴]. این اطلاعات پیشنهاد می‌دهد که توزیع دما در حمام فلاکس مذاب تقریبا یکنواخت است. به علاوه، گرادیان دمایی در حوضچه جوش، بزرگ نیست. بنابراین طبق ویژگی توزیع دما در حمام سرباره مذاب و حوضچه جوش، به نظر مطلوب می‌رسد که منبع حرارت متحرک جوشکاری سرباره الکتریکی، یک شار حرارتی حجمی با دانسیته یکنواخت است. در مدل اجزا محدود، مسیر جوشکاری به چند بخش کوچک (بلوک‌های مش) با طول یکسان تقسیم شد و هریک از بلوک‌ها برای شبیه‌سازی منبع حرارتی متحرک، به طور ترتیبی حرارت داده شدند که حکم پاس‌های جوشکاری را داشت. منبع حرارتی متحرک شامل یک لایه سرباره و یک حوضچه مذاب است. حجم منبع حرارتی متحرک برابر حجم المان‌هایی است که لایه سرباره و حوضچه جوش متناظر را در یک بلوک مش تشکیل می‌دهند. در شبیه‌سازی کنونی، لایه سرباره و فلز جوش متمایز نشده و به صورت یکجا در نظر گرفته شده‌اند و از فناوری زاد و مرگ[1] المان برای مدلسازی فرآیند جوشکاری استفاده شده‌است.

در این شبیه‌سازی، شرایط جوشکاری تعریف شده در مدل اجزا محدود مشابه شرایط استفاده شده در مدل ساخته شده با اندازه واقعی است. شار حرارتی حجمی با استفاده از رابطه ۳ تعیین می‌شود [۱۹]

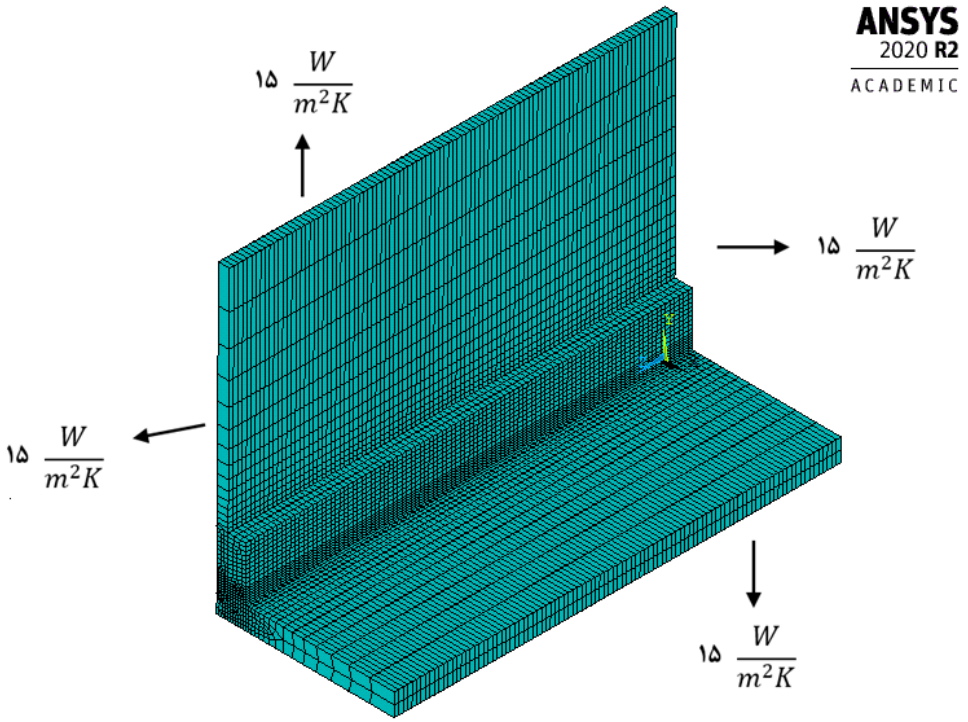
$$q_1 = \eta^{U_I/V_H} \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، U ولتاژ قوس، I جریان جوشکاری، V_H حجم منبع حرارت و η بازدهی قوس است. مقدار بازدهی قوس برای فرآیند جوشکاری سرباره الکتریکی برابر ۰/۹۵ فرض می‌شود [۱]. تعداد تقسیمات در جهت طولی ۴۰ است، بنابراین زمان حرارت دهی th برای هر بلوک مش طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود

$$th = L_W / (40\upsilon_W) \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، L_W طول کل خط جوشکاری که برابر با ۵۰۰ میلی‌متر

1 Birth and death



شکل ۲. مش‌بندی و شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی

Fig. 2. Meshing and boundry conditions of the model

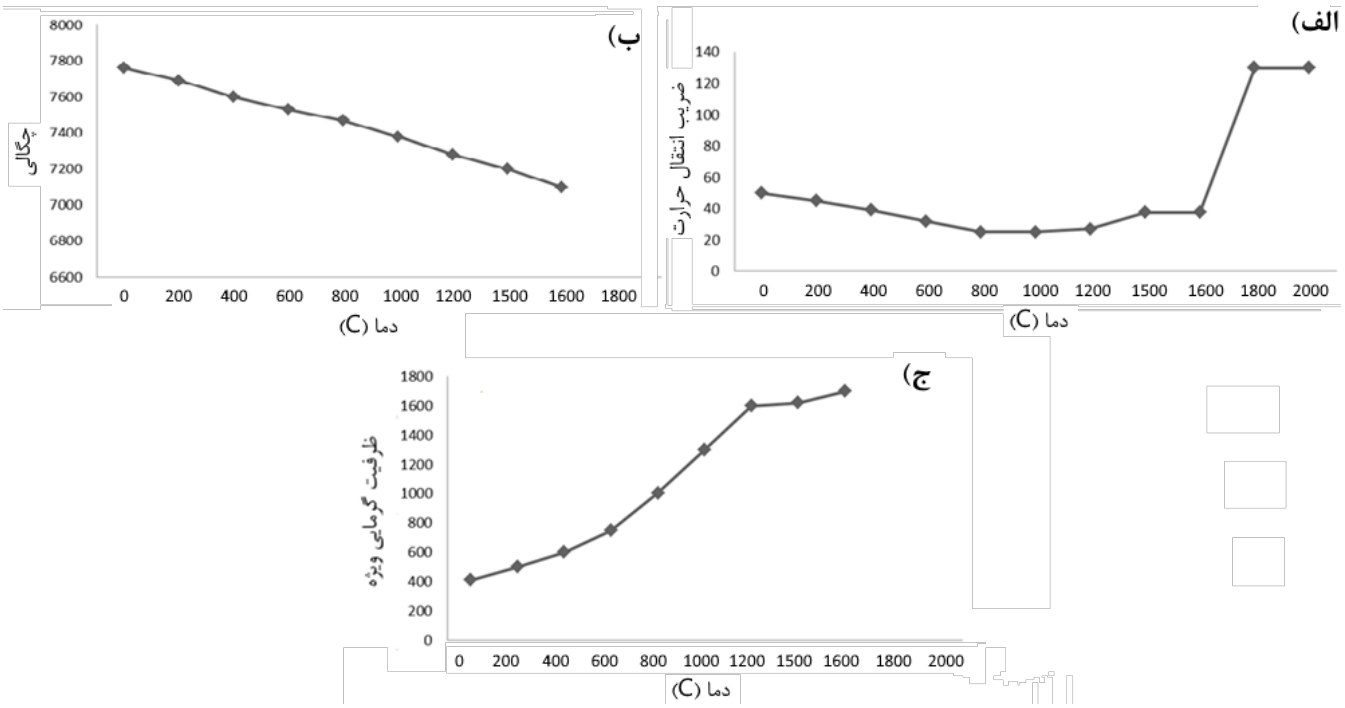
بوده و υ_W سرعت جوشکاری است. در کنار در نظر گرفتن منبع حرارت متحرک، اتلاف حرارتی به علت جابه‌جایی و تشعشع نیز در مدل المان محدود در نظر گرفته شد (رابطه ۵)

$$q_c = -h_c(T_s - T_0) \quad (۵)$$

در آنالیز حرارتی، فرض شد که به استثنای صفحه متقارن، برای تمامی سطوح دیگر مدل المان محدود، حرارت با جابه‌جایی به هوای اطراف اتلاف می‌شود. دمای محیط برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود. انتقال حرارت به‌دست‌آمده برای تبادل حرارت جوش و فلز پایه با هوای آزاد در اندازه‌گیری‌های مختلف مقدار $۱۵\,W/m^2K$ گزارش شده است. با توجه به تقارن هندسی، مکان خط جوشکاری و شرایط مرزی، تنها نیمی از مدل اتصال سرباره الکتریکی در این مطالعه استفاده شد. به منظور محاسبه عددی میدان دمایی، توزیع تنش پسماند و اعوجاج ناشی از فرآیند، مش ریزتری در منطقه جوش و مجاورت آن طراحی شد و با دور شدن از مرکز جوش، اندازه مش به طور تدریجی افزایش داده شد. برای تحلیل حرارتی سه‌بعدی، المان سالید ۷۰[1] با قابلیت انتقال حرارت سه‌بعدی و منبع حرارت متحرک به‌کار گرفته شد. حلگر نیوتون–رافسون برای حل معادلات غیرخطی در حالت گذرا استفاده شد. تعداد گره‌ها ۳۷۸۱۵ و تعداد المان‌ها ۳۲۸۲۵ است. شکل ۲ نمایی از شبکه بندی مدل و شرایط مرزی استفاده شده را نشان می‌دهد.

خواص حرارتی وابسته به دما از قبیل هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی در مدل المان محدود استفاده شدند (شکل ۳). خواص وابسته به دما از کتابخانه نرم‌افزار سیس‌ولد[2] که به طور آماده قابل دسترس بود، استخراج شد [۲۰]. باید تاکید کرد که خواص حرارتی سرباره با خواص حرارتی فولاد یکسان فرض شدند. درزهای بین دیافراگم و صفحه تقویت کننده یا صفحه پوسته در مدل با اندازه واقعی بسیار کوچک هستند. بنابراین از این فاصله‌ها در مرحله آنالیز حرارتی از مدل المان محدود صرف نظر می‌شود. در کنار میدان دمایی جوشکاری، رفتار ترمومکانیکی نیز با استفاده از یک فرمول بندی جفت شده دنباله‌ای آنالیز شد. مساله هدایت حرارتی به طور

1 Solid70
2 SYSWELD



شکل ۳. تغییرات خواص فولاد بر حسب دما (درجه سانتی‌گراد)؛ الف) ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)، ب) چگالی (kg/m^3)، ج) ظرفیت حرارتی ویژه (J/k)

Fig. 3. Temperature-dependent properties of the steel; a) heat transfer coefficient (W/m^2K), b) density (kg/m^3), c) specific heat capacity (J/k)

مستقل از مساله تنش–کرنش حل شد تا تاریخچه‌های دمایی به دست آیند. با این وجود در این فرمول بندی، سهم میدان دمایی موقت در آنالیز مکانیکی از طریق ثابت انبساط حرارتی و نیز خواص مکانیکی وابسته به دما از قبیل مدول یانگ، استحکام تسلیم و ضریب کرنش سختی را در نظر گرفته شد.

۴- نتایج و بحث

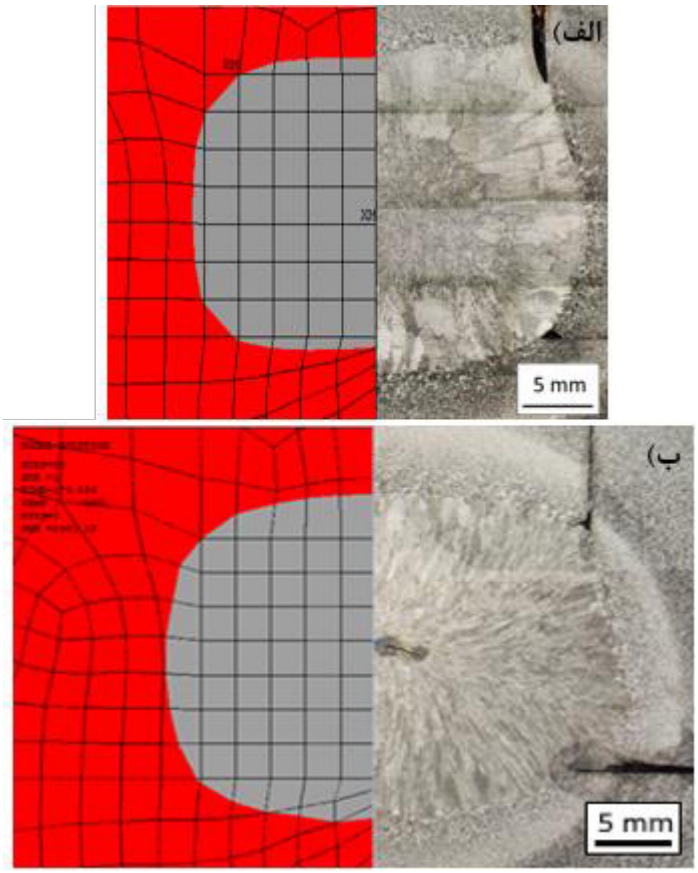
۴- ۱- صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده با آزمایش‌های تجربی

تمام مدل‌های شبیه‌سازی شده با مدل‌های واقعی برای صحه‌گذاری مدل شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. دو نمونه جوشکاری با پارامترهای مختلف تهیه شدند. متغیرهای فرایند برای هر نمونه در جدول ۲ آورده شده است. نمونه‌ها جهت بررسی با میکروسکوپ نوری، مورد ماکرواچ قرار گرفتند. شکل ۴ به مقایسه حوضچه جوش برای هر مدل شبیه‌سازی با نمونه واقعی آن می‌پردازد. دمای حوضچه جوش در مدل اجزا محدود، محدوده‌ای با حداکثر دمای بیشتر از ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است (منطقه خاکستری رنگ).

خطای بین اندازه حوضچه جوش واقعی و حوضچه جوش شبیه‌سازی شده در جدول ۳ آورده شده است. اختلاف موجود بین مدل‌های تجربی و شبیه‌سازی را می‌تواند ناشی از خواص ترموفیزیکی ماده در دماهای بالا و وابستگی آن‌ها به دما باشد. عدم شبیه‌سازی حرکت سیال نیز، کالیبره نبودن دستگاه‌های مورداستفاده در جوشکاری و عدم نشان‌دادن صحیح متغیرهای جوشکاری نیز دلایل دیگری برای این اختلاف است. باتوجه‌به مسائل گفته‌شده و درصد خطای مورد قبول بین اندازه‌های مدل واقعی و نمونه شبیه‌سازی‌شده صحت مدل تأیید می‌شود.

۴- ۲- تاثیر تغییر شدت جریان، سرعت حرکت منبع و ولتاژ بر توزیع دما

حرارت حاصل از جوشکاری از رابطه ۱ به دست می‌آید. در این رابطه شدت جریان به طور مستقیم بر حرارت ورودی تاثیرگذار است و با افزایش شدت جریان، مقدار حرارت ورودی حاصل از جوشکاری به نمونه افزایش



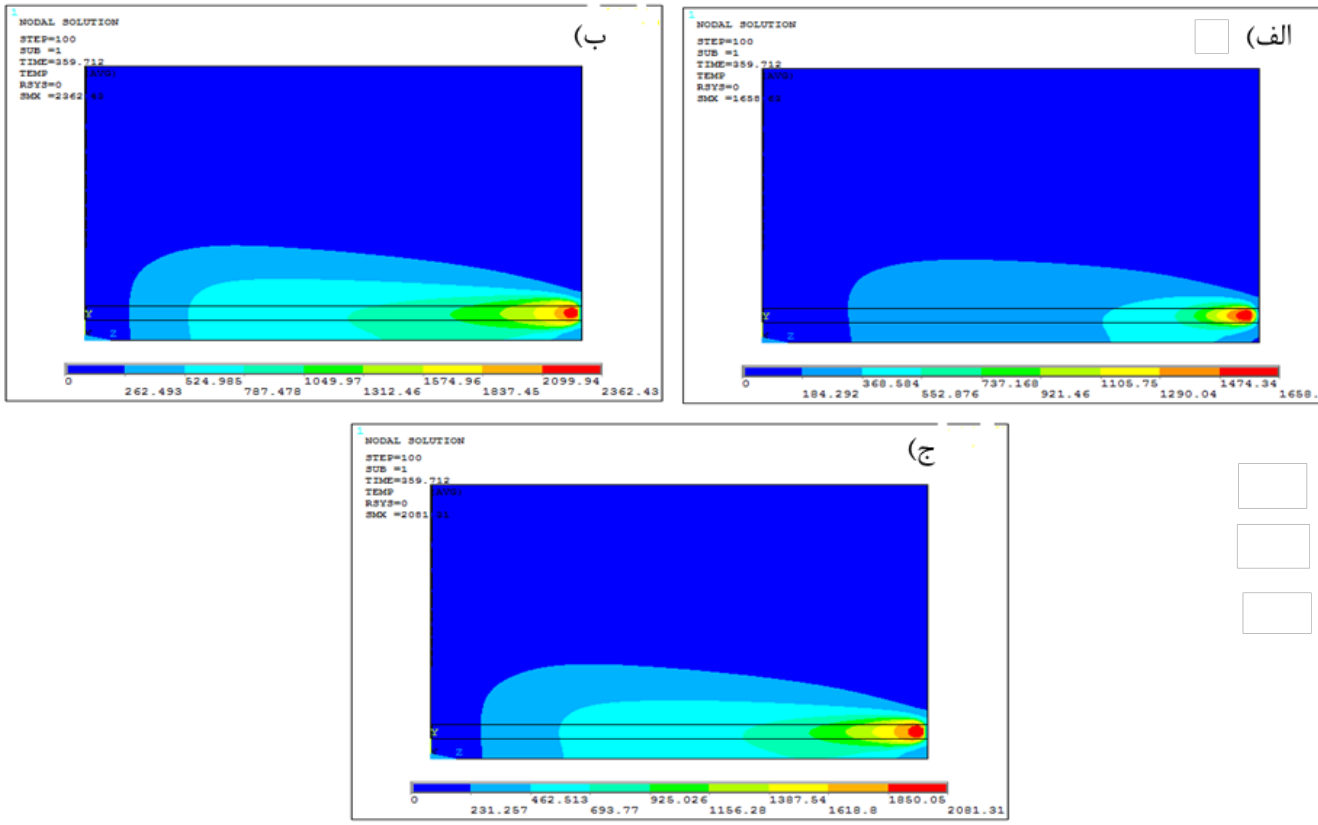
شکل ۴. مقایسه نمونه آزمایشی با مدل اجزا محدود؛ الف) نمونه شماره ۱، ب) نمونه شماره ۲

Fig. 4. Validating the finite element models: a) sample no. 1, b) sample no. 2

جدول ۳. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

Table 3. Comparison of experimental and numerical results

نمونه	مدل تجربی		مدل شبیه‌سازی		اختلاف	
	ارتفاع حوضچه (میلی‌متر)	طول حوضچه (میلی‌متر)	ارتفاع حوضچه (میلی‌متر)	طول حوضچه (میلی‌متر)	ارتفاع حوضچه (٪)	طول حوضچه (٪)
۱	۲۳/۳	۳۰/۰	۲۱/۴	۲۷/۲	۸/۱۵	۹٫۳۳
۲	۲۷/۳	۳۵/۰	۲۷/۶	۳۰/۶	-۱/۰۹	۱۲/۵۷



شکل ۵. توزیع حرارت و حداکثر دمای سرباره در شدت جریان الف) ۳۸۰ آمپر، ب) ۸۰۰ آمپر و ج) ۶۵۰ آمپر

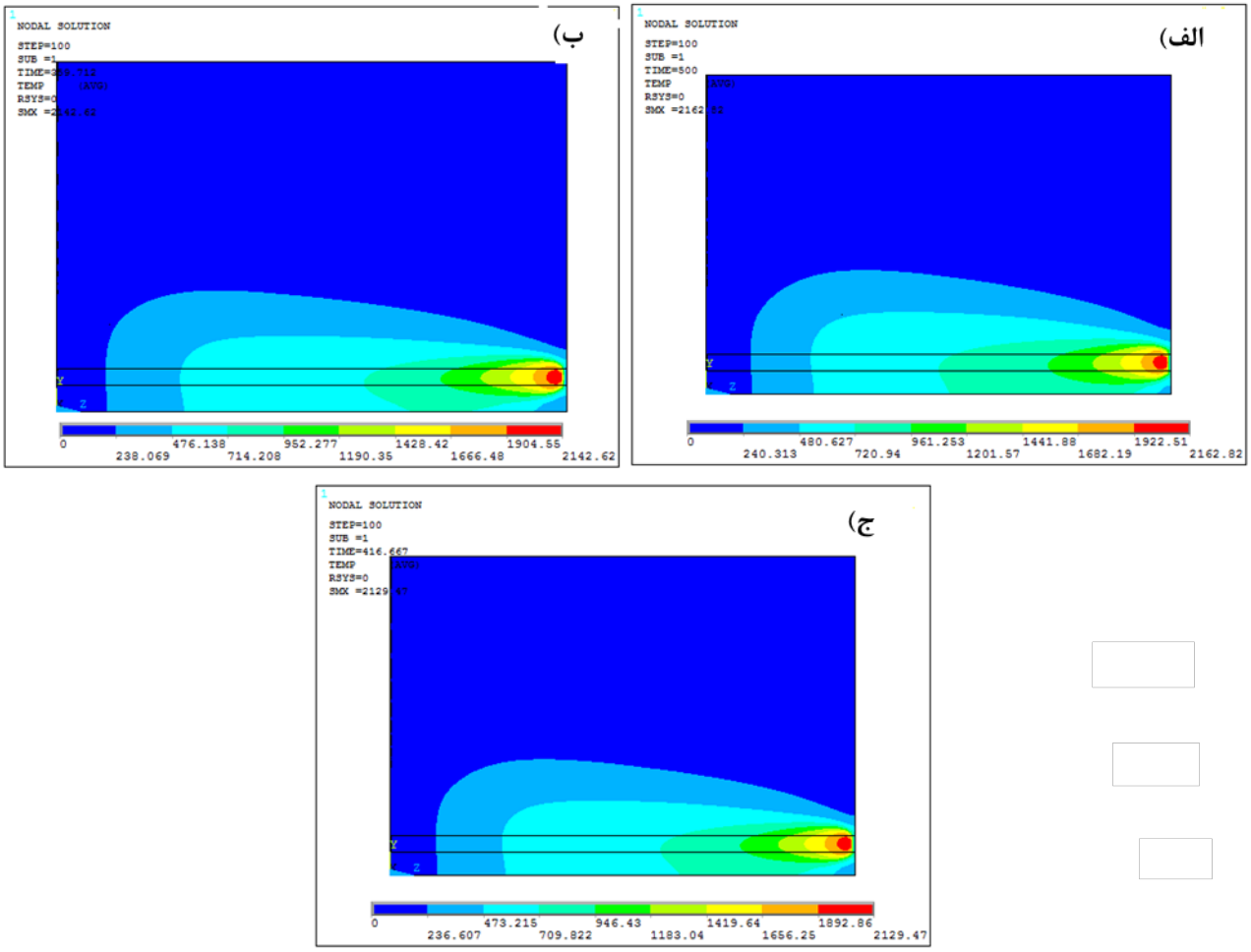
Fig. 5. Heat distribution and the peak slag temperature in welding currents of a) 380 A, b) 800 A, c) 650 A

می‌یابد. این افزایش حرارت به افزایش ابعاد حوضچه جوش و همچنین عمق نفوذ و بالارفتن دمای بیشینه نمونه منجر می‌شود.

پس از تایید شدن مدل، تغییرات شدت جریان جوشکاری (تحت آمپرهای ۳۸۰، ۶۵۰، ۸۰۰) بر منبع حرارت متحرک اعمال گردید. سرعت و ولتاژ جوشکاری ثابت و به ترتیب برابر ۲/۶۷ میلی‌متر بر ثانیه و ۳۸ ولت فرض شدند. تاثیر تغییر شدت جریان بر اندازه حوضچه جوش، توزیع دما و حداکثر دمای سرباره در آخرین مرحله حل مسئله جوشکاری در شکل ۵ نمایش داده شده است. می‌توان تغییرات دمای حداکثر در سرباره و همچنین نحوه انتقال دما را با هم مقایسه کرد، تغییر آمپر از ۳۸۰ به ۶۵۰ و ۸۰۰ آمپر باعث شد که حداکثر دمای سرباره به ترتیب از ۱۶۵۸ درجه سانتی‌گراد به ۲۰۸۱ و ۲۳۶۲ درجه سانتی‌گراد تغییر کند.

متغیر مورد بحث بعدی سرعت حرکت منبع حرارتی است. با کاهش سرعت حرکت منبع حرارتی، در هر لحظه حرارت بیشتری بر المان‌های زنده‌شده وارد می‌شود که به افزایش کل حرارت ورودی به قطعه منجر می‌شود. تغییرات سرعت از ۱ به ۱/۲ و ۱/۳۹ میلی‌متر بر ثانیه اعمال گردید. در این بررسی شدت جریان و ولتاژ جوشکاری به ترتیب در مقدار ۳۸۰ آمپر و ۳۸ ولت ثابت فرض شدند. نتایج حاصل از آن در اندازه حوضچه جوش، توزیع دما و حداکثر حرارت سرباره در شکل ۶ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه دمای سرباره در سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه برابر ۲۱۶۲، ۱/۲ میلی‌متر بر ثانیه برابر ۲۱۴۲ و ۱/۳۹ میلی‌متر بر ثانیه برابر ۲۱۲۹ درجه سانتی‌گراد بود. روند کاهشی دمای حداکثر با فرضیات نظری مطابقت دارد.

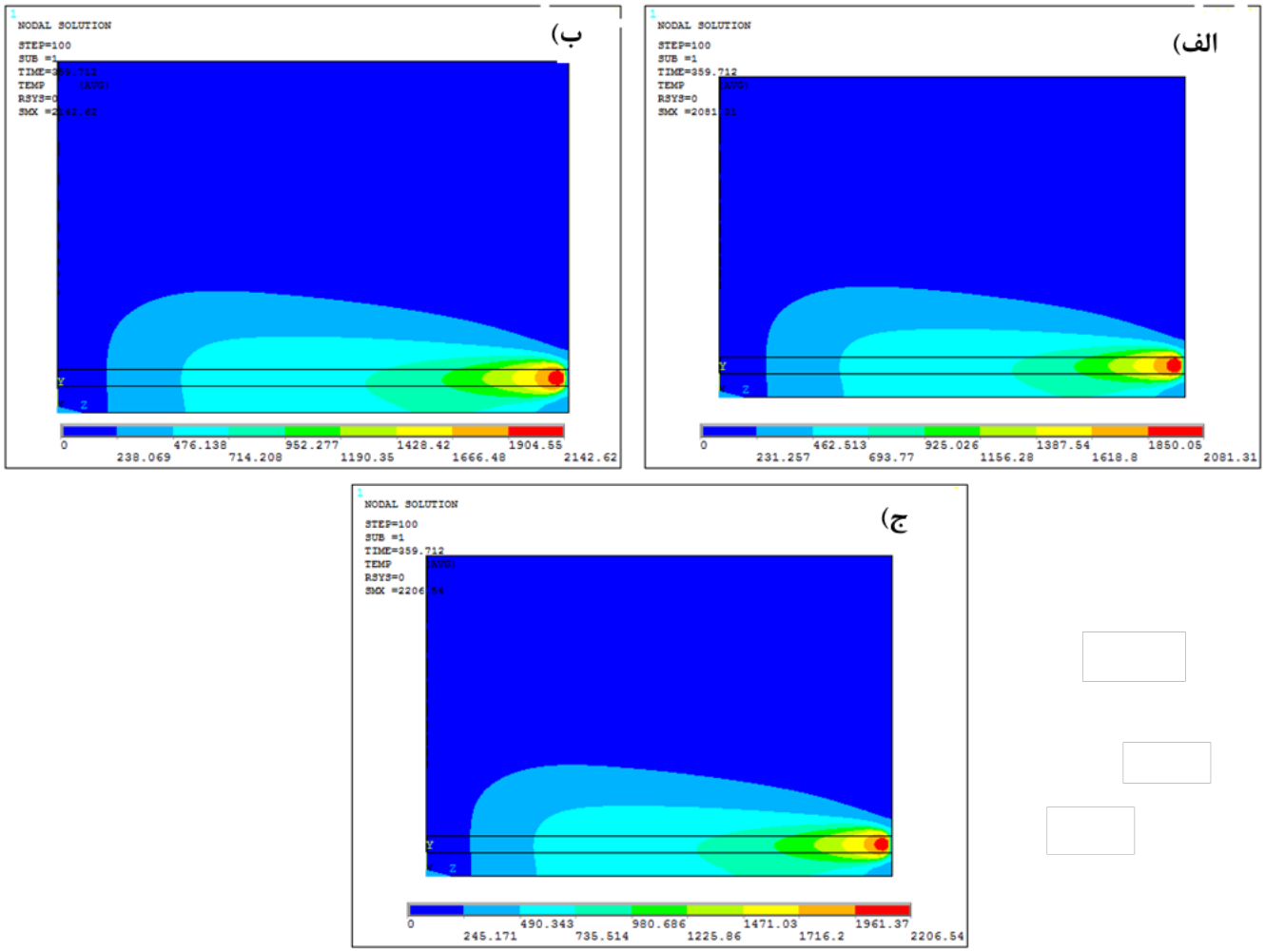
همچنین تاثیر تغییر ولتاژ از ۳۸ به ۴۰ و ۴۲ در شکل ۷ نشان داده شده است. این مجموعه از بررسی‌ها در سرعت جوشکاری ۱/۳۹ میلی‌متر بر ثانیه و شدت جریان ۳۸۰ آمپر انجام شدند. همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر حرارت سرباره به ترتیب از ۲۰۸۱ به ۲۱۴۲ و ۲۲۰۶ درجه سانتی‌گراد تغییر کرد.



شکل ۶. توزیع حرارت و حداکثر دمای سرباره در سرعت الف) ۱ میلیمتربر ثانیه، ب) در سرعت ۱/۲ میلیمتر بر ثانیه و ج) در سرعت ۱/۳۹ میلیمتر بر ثانیه

Fig. 6. Heat distribution and the peak slag temperature in welding speeds of a) 1 mm/s, b) 2/1 mm/s, c) 39/1 mm/s

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش می‌توان استنتاج کرد که رویکرد محاسباتی کنونی، یک روش امکان‌پذیر برای پیش‌بینی میدان دمایی جوشکاری اتصالات مختلف با جوشکاری سرباره الکتریکی در شرایط گوناگون است. با وجود اینکه درزهای بین قطعات در مدل اجزا محدود کنونی مد نظر قرار نگرفتند، سیکل‌های حرارتی در چندین مکان شاخص و اندازه منطقه ذوب با اندازه‌گیری‌های حاصل از آزمایش بسیار نزدیکند. این بدان معناست که درزهای اولیه بر نتایج آنالیز حرارتی تاثیر ناچیزی دارند. حین جوشکاری، شیار با فلز جوش پر شده و بعداً به منطقه ذوب تبدیل شد. به علاوه، به علت حرارت ورودی بزرگ، بخشی از فلز پایه در دیافراگم و صفحه تقویت کننده در نزدیکی شیار نیز ذوب شدند. بنابراین بخشی از درز اولیه محو شده و به منطقه ذوب تبدیل شد. دمای حداکثر در نزدیکی درزهای باقیمانده تقریبا پیوسته است. این بدان معناست که سرعت‌های نفوذ دما هم در جهت صفحه پوسته (سمت صفحه تقویت کننده) و هم در جهت دیافراگم در امتداد درزها حین فرآیند جوشکاری تقریبا یکسان بوده است. بر اساس بحث فوق به نظر می‌رسد که با وجود صرف نظر کردن از درزها در مدل اجزا محدود، نتیجه آنالیز حرارتی تغییر عمده‌ای نخواهد کرد. با وجود اینکه درز اتصال تأثیری بر میدان دمایی ندارد، اما شاید بر تنش پسماند و اعوجاج ناشی از جوشکاری موثر باشد. ماهیتاً درز یک فاق است که می‌تواند منجر به تمرکز تنش شود. در اتصال سرباره الکتریکی نوک درز (نزدیک سمت فلز جوش) در نزدیکی مرز منطقه ذوب قرار دارند که اغلب چقرمگی کمی دارد.



شکل ۷. توزیع دما و حداکثر حرارت سرباره در ولتاژ الف) ۳۸ ولت، ب) ۴۰ ولت و ج) ۴۲ ولت

Fig. 7. Heat distribution and the peak slag temperature in welding voltages of a) 38 V, b) 40 V, c) 42 V

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی مسئله انتقال حرارت در فرایند جوشکاری سرباری الکتریکی با موفقیت انجام شد. روش تحلیلی اجزا محدود به کمک زبان زبان طراحی پارامتریک نرم افزار انسیس در نرم‌افزار انسیس پیاده‌سازی شد که به ساده‌سازی و حل سریع مسوله کمک شایانی کرد. نتایج تحلیلی نرم افزار کاملاً با آنچه به صورت عملی صورت پذیرفت تطابق داشت. از این رو می‌توان به درک درستی از کنترل فرآیند از نظر انتخاب حرارت ورودی، ولتاژ سرعت، خواص مواد دست یافت. با انتخاب پارامترهای صحیح می‌توان حداقل اندازه منطقه متاثر از حرارت و حداقل هزینه را بدست آورد. لذا با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان قبل از شروع جوشکاری درک درستی از چگونگی انتقال حرارت در هر نقطه، اندازه منطقه متأثر از حرارت، دمای سرباره و زمان جوشکاری داشت. اندازه منطقه متاثر از حرارت با افزایش ولتاژ، افزایش شدت جریان و کاهش سرعت حرکت منبع افزایش می‌یابد. نتایج برجسته این پژوهش به شرح زیر بودند:

- مدلسازی یک منبع حرارتی متحرک به منظور حل مسئله حرارتی فرایند جوشکاری سرباره الکتریکی در زبان طراحی پارامتریک نرم افزار انسیس

با موفقیت انجام شد که به خوبی حرارت ورودی فرایند جوشکاری را شبیه‌سازی می‌کرد.

- با مقایسه ابعاد حوضچه جوش حاصل از شبیه‌سازی و ابعاد حوضچه نمونه‌های تجربی، صحت مدل اجزا محدود تایید شد.
- با اعمال تغییرات در مدل اجزا محدود مشاهده شد که تغییر آمپر از ۶۵۰ به ۸۰۰ و ۳۸۰ آمپر باعث گردید حداکثر حرارت سرباره از ۲۰۸۱ به ۲۳۶۲ و ۱۶۵۸ درجه سانتی‌گراد تغییر کند. همچنین تغییر سرعت از ۱/۳۹ میلی‌متر بر ثانیه به ۱/۲ و ۱ میلی‌متر بر ثانیه باعث شد تا حداکثر دمای سرباره از ۲۱۲۹ درجه سانتی‌گراد به ۲۱۴۲ و ۲۱۶۲ درجه سانتی‌گراد تغییر کند. علاوه بر این تغییر ولتاژ از ۳۸ به ۴۰ و ۴۲ نشان داد که حداکثر حرارت سرباره از ۲۰۸۱ به ۲۱۴۲ و ۲۲۰۶ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده‌است. این تغییرات با دانسته‌های نظری مطابقت داشت.

منابع

[1] W. Ricci, T. Eagar, A parametric study of the electroslag welding process,Welding Research Supplement, 61(12) (1982) 397s-400s.

[2] K.E. Banks, Welding electrode with a fluoride based slag system, Google Patents, 1982.

[3] A. Kharicha, E. Karimi-Sibaki, M. Wu, A. Ludwig, J. Bohacek, Review on Modeling and Simulation of Electroslag Remelting,steel research international, 89(1) (2018) 1700100.

[4] T. Roy, J. Szekely, T. Eagar, Mathematical modeling of the temperature profiles and Weld dilution in electroslag welding of steel plates,Modeling of casting and welding processes, (1980) 197-212.

[5] S. Chen, J. Devletian, Microstructure and mechanical properties of electroslag welds in TI-6AL-4V alloy, Welding Journal, 69(9) (1990) 319-325.

[6] D. Deng, S. Kiyoshima, Numerical simulation of welding temperature field, residual stress and deformation induced by electro slag welding,Computational Materials Science, 62 (2012) 23-34.

[7] T. Kakizaki, S. Koga, H. Yamamoto, Y. Mikami, K. Ito, K. Yamazaki, S. Sasakura, H. Watanabe, Microstructure features and formation mechanism in a newly developed electroslag welding,Welding in the World, (2022) 1-12.

[8] A. Dilawari, J. Szekely, T. Eagar, Electromagnetically and thermally driven flow phenomena in electroslag welding,Metallurgical Transactions B, 9 (1978) 371-381.

[9] A. Dilawari, T. Eagar, J. Szekely, Analysis of Heat and Fluid Flow Phenomena in Electroslag Welding,Welding journal, 57(1) (1978) 24.

[10] H.K. Parmar, G. Acharya, S. Jani, Failure Analyses of 16 mm Thick SA 516 GR 70 Auto Clave,Technology, 12(1) (2022) 21-30p.

[11] K. Roy, P. Ramkumar, Finite element analysis of pressure vessel with different end connections, in: AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, 2024.

[12] J. Iyama, Y. Matsumoto, T. Ishii, H. Shimokawa, M. Nikaido, S. Yamada, Fracture strength of electroslag welding joint with high-performance steel,Journal of Constructional Steel Research, 153 (2019) 495-508.

[13] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources,Metallurgical transactions B, 15 (1984) 299-305.

[14] E. Ranjbarnodeh, S. Serajzadeh, A.h. Kokabi, S. Hanke, A. Fischer, Finite element modeling of the effect of heat input on residual stresses in dissimilar joints,The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 55 (2011) 649-656.

[15] H. Li, J. Iyama, Investigation on Fracture Behavior of Electroslag Welding Joint with High-Performance Steel,International Journal of Steel Structures, (2024) 1-10.

[16] K. Masubuchi, Analysis of welded structures: residual stresses distortion and their consequences, Elsevier, 2013.

[17] E. Ranjbarnodeh, ANSYS for Welding Engineers, Amirkabir University of Technology, 2018 (In Persian).

[18] A. A516/A516M-01, Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower Temperature Service, (2001).

[19] A.h. Kokabi, Welding Technology, Azadeh Publication, 2013 (In Persian).

[20] R. Conte, D.R. Izquierdo, G. Francesco, Submerged arc welding process: a numerical investigation of temperatures, displacements, and residual stresses in ASTM A516-Gr70 corner joined samples,The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 127(11) (2023) 5437-5448.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Goldar, E. Ranjbarnodeh, E. Cheraghi Rizi, Finite element Simulation of Heat Transfer in Electroslag Welding, Amirkabir J. Mech Eng., 56(8) (2024) 1121-1136.

DOI: 10.22060/mej.2025.23331.7746

این صفحه عمداً خالی است