

# Numerical and experimental analysis of the parameters affecting the distortion phenomenon in the welding of wind turbine tower flange

Behrooz Shahriari<sup>a\*</sup>, Seyfollah Azimi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

## Original Article

Use your device to scan  
and read the article online



**Citation:** Shahriari B, Azimi S. Numerical and experimental analysis of the parameters affecting the distortion phenomenon in the welding of wind turbine tower flange. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(2):174-193.

 <https://10.52547/masm.3.2.174>

## KEYWORDS

Wind Turbine flange,  
Welding process,  
Welding distortion,  
Numerical and experimental  
investigation,  
Thermoelastic.

## ABSTRACT

In order to facilitate the transportation of the wind turbine tower, the tower is made of several separate parts and they are flanged to each other and fixed by the welding process. An unwanted consequence in the welding process is the distortion caused by the uneven distribution of heat in the flange. This consequence appears as residual stress and permanent deformations in the flange. In this research, the distortion in the welding of the wind turbine tower flange is studied. Numerical and experimental results show that the amount of heat flux has the greatest effect on flange distortion. By writing a subroutine and using repetition and conditional loops, the path of the welding nozzle is defined for the program and the amount of distortion caused by the heat distribution is predicted with appropriate accuracy. The comparison of numerical and experimental results shows that the difference of the displacement results depends on the cross-sectional area of the flange and its angular position. In the outer region of the flange, this difference is close to zero percent in all positions. In the middle areas of the cross-section in the angular position of 60 degrees, this difference is 33%, which has the lowest percentage difference compared to the positions of zero, 30 and 90 degrees. In the inner areas of the flange at an angular position of 30 degrees, the displacement difference is 14%, which is the least difference compared to other positions.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

Determining the optimum dimensions of the structure, welding temperature control and welding sequence are among the most important techniques to control distortion in welding. Qureshi [6] investigated the residual stresses and distortion caused by welding in cylindrical parts. Ramos et al. [9] analyzed T-shape welding using Sysweld software. Dahiya et al. [24] presented a mathematical modeling to predict the angular distortion in the welding of 6063 aluminum plates. Moslemi et al. [25] investigated the effect of welding sequence on induced residual stress and distortion in pipes. Li et al. [26] numerically and experimentally studied the effect of initial gap size on butt welding distortion and residual stress. In this research, relying on the numerical method and experimental test, a solution is presented to predict the distortion caused by the welding of wind turbine tower flanges.

\* Corresponding author. Tel.: +98-9131254280; Fax: +98-3145223176

E-mail address: shahriari@mut-es.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.3.2.174>

Received: July 07, 2023; Received in revised form: August 08, 2023; Accepted: August 19, 2023

© Author



## 2. Heat source model and material model

For variable flux with location, coding or subroutines must be used. In this research, the theoretical model that is used to estimate the heat flux in the welding process is the Goldak or volumetric flux model (Figure 1). The general equation for heat flux estimation given by Goldak is shown in Equation 1. The value of  $Q$  is measured from the output power of the welding machine. Goldak's parameters are derived from similar research. In this regard,  $\eta$  is the efficiency coefficient of the welding process,  $Q$  is the input heat to the welding pool, and  $f$ ,  $a$ ,  $b$  and  $c$  are Goldak parameters [27].

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} \eta Q f}{abc\pi\sqrt{\pi}} * e^{\left(\frac{3x^2}{a^2}\right)} * e^{\left(\frac{3y^2}{b^2}\right)} * e^{\left(\frac{3z^2}{c^2}\right)} \quad (1)$$

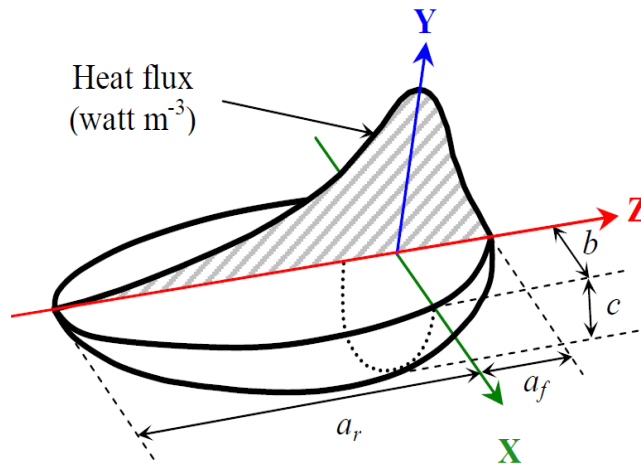


Figure 1. Double ellipsoid thermal model of Goldak [28]

The material of the S355J2 wind turbine flange is from the carbon steel group. The mechanical and physical properties of the material were extracted from reference [8] as a variable with temperature. These properties include Poisson's ratio, modulus of elasticity, thermal conductivity coefficient, plastic stress and strain, specific heat capacity and thermal expansion coefficient. The density of the material is also ( $\text{Ton/mm}^3$ ) 7800. Figure 2 shows a view of the shell connected to the flange modeled in the software.

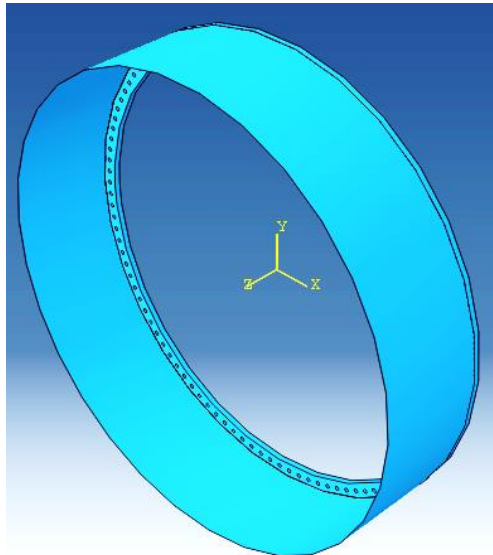


Figure 2. A view of the connection of the shell to the flange modeled in the software

## 3. Results of analysis and validation of results using tests

The heat flux distribution shown in Figure 3 has a good match with the Goldak model. Figure 4 shows the change of heat flux in terms of time for the selected nodal points.

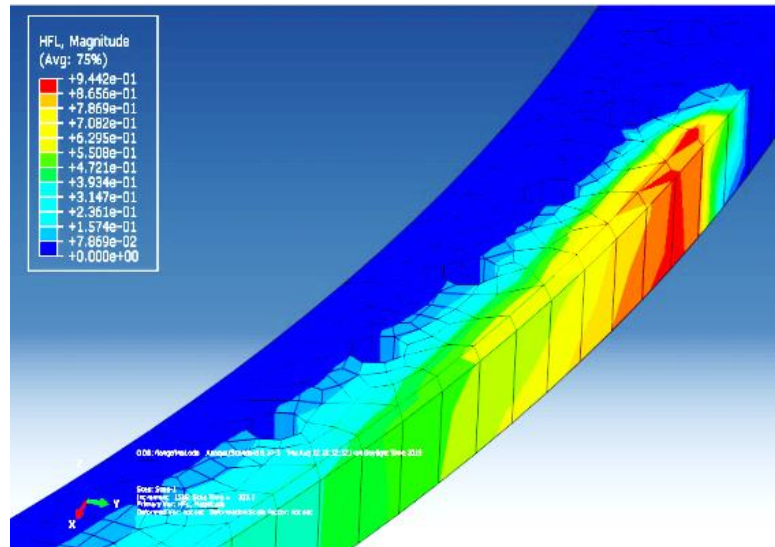


Figure 3. Heat flux distribution along the nozzle movement path

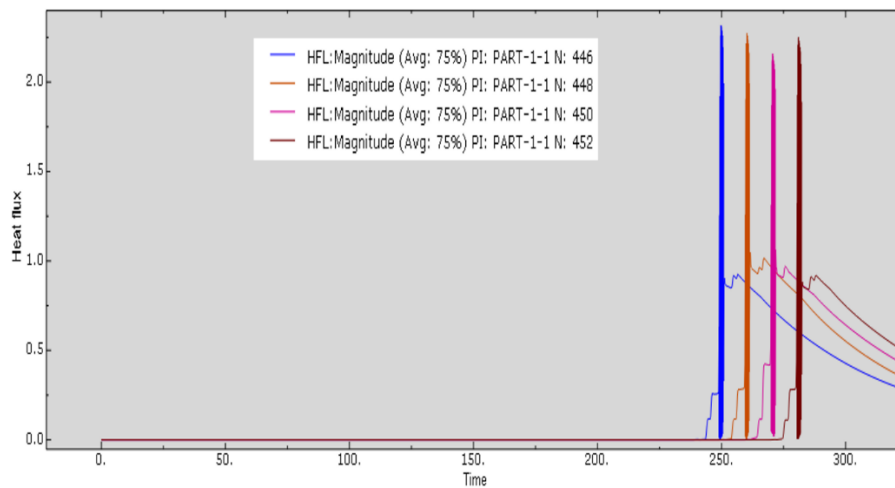


Figure 4. Change of heat flux in terms of time for selected nodal points

According to the analysis, the maximum deformation of the flange in the Z direction (extension perpendicular to the flange plane) is equal to 3.04 mm. This deformation of the flange is shown in Figure 5. According to von Mises equivalent stress distribution in Figure 6, the maximum stress value is 265 MPa. This maximum stress occurred locally in the flange holes.

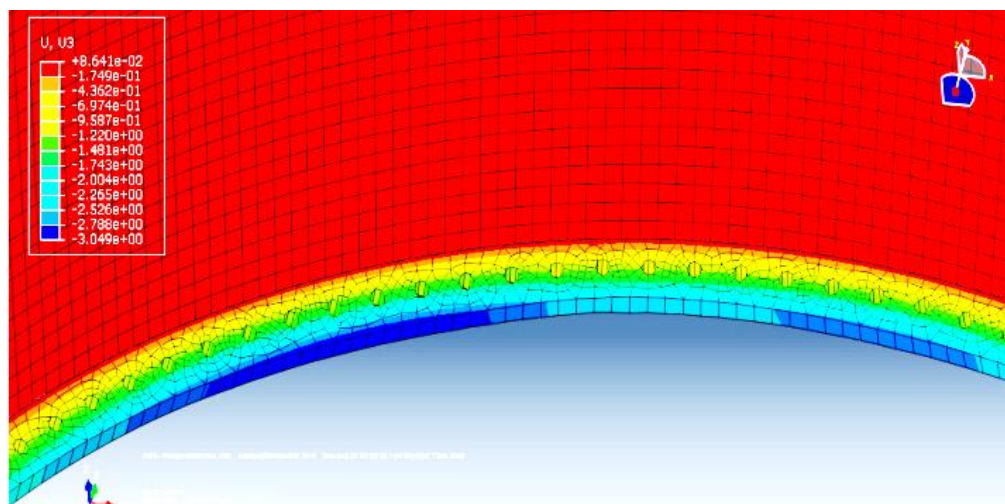


Figure 5. deformation in the Z direction, i.e. the extension perpendicular to the flange plane

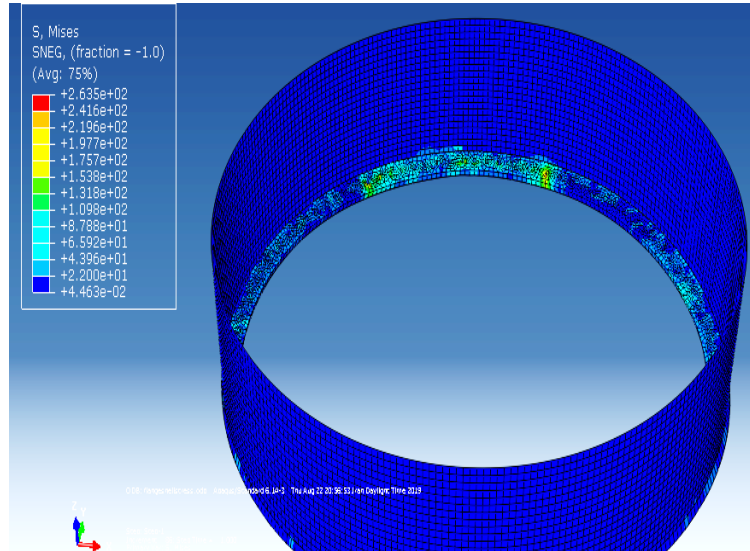


Figure 6. Von Mises stress distribution on the flange

Flange welding is done in one step from 0 to 90 degrees. Easy laser camera was used to measure horizontal, parallel and orthogonal deviations. To measure the flatness of one surface of the flange, according to Figure 7 (a), the laser source was set on a base in a suitable place along the surface of the flange. Then the detector was placed on the surface of the flange according to Figure 7 (b).

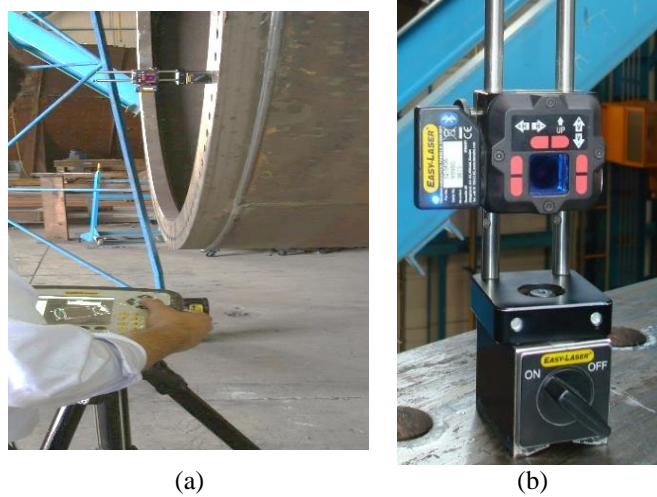


Figure 7. (a) Setting the source and detector, (b) placing the detector on the flange surface

After performing the initial settings of the camera and the detector, 12 to 16 data points are taken from the flange surface. This data is processed by the camera and the flatness of the flange surface is reported. The measurement points are specified in Figure 8.

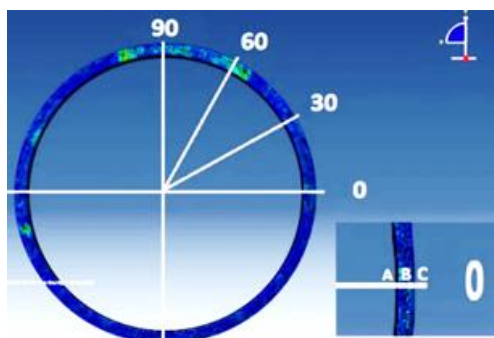


Figure 8. Specific points and angles selected for test direction measurement

At each angle shown, three points on the flange surface are marked A, B and C. Table 1 shows the comparison of test results and theory analysis along with the deviation of theory compared to the test.

**Table 1. Comparison of test results and theory analysis**

| Zero degree                         |      |      | 30 degree |                                     |      |      |      |
|-------------------------------------|------|------|-----------|-------------------------------------|------|------|------|
|                                     | A    | B    | C         |                                     | A    | B    | C    |
| Node number                         | 1585 | 1439 | 1561      | Node number                         | 69   | 2450 | 1081 |
| Theoretical displacement value      | 2.1  | 1.1  | 0         | Theoretical displacement value      | 2.2  | 1    | 0    |
| Test displacement value             | 1.4  | 0.6  | 0         | Test displacement value             | 1.9  | 0.5  | 0    |
| Percentage deviation of the results | 33%  | 45%  | 0%        | Percentage deviation of the results | 14%  | 50%  | 0%   |
| 60 degree                           |      |      | 90 degree |                                     |      |      |      |
|                                     | A    | B    | C         |                                     | A    | B    | C    |
| Node number                         | 1422 | 457  | 1532      | Node number                         | 1412 | 387  | 1532 |
| Theoretical displacement value      | 2.8  | 1.5  | 0         | Theoretical displacement value      | 2.7  | 1.5  | 0    |
| Test displacement value             | 2.1  | 1    | 0         | Test displacement value             | 0.5  | 0    | 0    |
| Percentage deviation of the results | 25%  | 33%  | 0%        | Percentage deviation of the results | 81%  | 100% | 0%   |

#### 4. Conclusion

Comparison of the results of theoretical and experimental analysis in this research shows that the difference in displacement results depends on the cross-sectional area of the flange as well as its angular position. In the outer region of the flange, this difference is close to zero percent in all angular positions. In the middle areas of the cross-section in the angular position of 60 degrees, this difference is 33%, which has the lowest percentage difference compared to the positions of zero, 30 and 90 degrees. In the inner areas of the flange at an angular position of 30 degrees, the displacement difference is 14%, which is the least difference compared to other positions.



## تحلیل عددی و تجربی عوامل مؤثر بر پدیده اعوجاج در جوش کاری فلنج برج توربین باد

بهروز شهرياری<sup>الف\*</sup>، سيفالله عظيمی<sup>ب</sup>

<sup>الف</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، اصفهان، ایران، [shahriari@mut-es.ac.ir](mailto:shahriari@mut-es.ac.ir)

<sup>ب</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، اصفهان، ایران، [azimi@mut-es.ac.ir](mailto:azimi@mut-es.ac.ir)

| واژگان کلیدی  | چکیده  |
|---|--|
| فلنج توربین باد، جوش کاری، اعوجاج جوش، تحلیل عددی و تجربی، ترموالاستیک. | جهت سهولت در حمل و نقل برج توربین باد، برج از چند بخش مجزا ساخته شده و به یکدیگر فلنج و به وسیله فرایند جوشکاری تثبیت می گردند. یک پیامد ناخواسته در فرایند جوش کاری، اعوجاج ناشی از توزیع ناهمگون حرارت در فلنج است. این پیامد به صورت تنش پسماند و تغییر شکل های دائمی در فلنج پدیدار می شوند. در این تحقیق اعوجاج در جوش کاری فلنج برج توربین باد مورد مطالعه قرار می گیرد. نتایج عددی و تجربی نشان می دهند که میزان شار حرارتی بیشترین تأثیر را روی اعوجاج فلنج دارد. با نوشتن یک سابروتین و استفاده از حلقه های تکرار و شرطی، مسیر حرکت نازل جوشکاری برای برنامه تعریف و با دقت مناسبی میزان اعوجاج ناشی از توزیع حرارت پیش بینی می شود. مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان می دهد که اختلاف نتایج جابجایی بستگی به ناحیه سطح مقطع فلنج و موقعیت زاویه ای آن دارد. در ناحیه بیرونی فلنج این اختلاف در تمام موقعیت ها نزدیک به صفر درصد است. در نواحی میانی سطح مقطع در موقعیت زاویه ای ۶۰ درجه این اختلاف ۳۳ درصد است که نسبت به موقعیت های صفر، ۳۰ و ۹۰ درجه کمترین درصد اختلاف را دارد. در نواحی داخلی فلنج در موقعیت زاویه ای ۳۰ درجه اختلاف جابجایی ۱۴ درصد بوده که نسبت به سایر موقعیت ها کمترین اختلاف را دارد. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶  |  |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷   |  |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸   |  |

### ۱- مقدمه

اعوجاج سازه یکی از پدیده های ناخواسته در فرایند جوش کاری قطعات است که طراحی، ساخت و مونتاژ قطعات را تحت تأثیر قرار می دهد. یکی از روش های اصلاح اعوجاج این است که اندازه و ابعاد قطعات را کمی بزرگتر انتخاب کرده و اجازه داده شود تا قطعه در اثر جوش کاری تغییر شکل دهد و پس از خاتمه جوش کاری، با عملیات ماشین کاری انحرافات ایجاد شده اصلاح گردد. اعوجاج در سازه های جوشکاری شده از انبساط و انقباض غیریکنواخت فلز جوش و فلز پایه به دلیل وجود گرادیان حرارتی ایجاد می شود. تنش های حاصل از کرنش های حاصل باعث ایجاد نیروهای داخلی می شوند و در نتیجه اعوجاج می شوند. مهم ترین عیبی که در زمان اعوجاج پیش می آید این است که ابعاد جوش ناهماهنگ هستند و به این ترتیب عملیات جوش زدن با مشکل روبرو می شود.

به طور کلی دو نوع اعوجاج در جوشکاری نمود بیشتری دارد، یکی اعوجاج داخل صفحه و دیگری خارج صفحه می باشند.

اعوجاج داخل صفحه از انقباض ابعاد ورق حاصل می‌شود و اعوجاج خارج از صفحه ناشی از کمانش و تغییر شکل زاویه‌ای ورق است. برای کنترل اعوجاج در جوشکاری چندین راهکار وجود دارد. تعیین ابعاد بهینه سازه، کنترل دمای جوش و توالی جوشکاری از مهم‌ترین این راهکارها می‌باشند.

گسترش روزافزون روش‌های عددی در کنار نرم‌افزارهای مهندسی با قابلیت‌های تخصصی می‌تواند ابزاری بسیار کارآمد برای پیش‌بینی رفتار سازه‌ها در حین جوش کاری باشد. بی‌شک هزینه انجام محاسبات مهندسی به مراتب کمتر از هزینه سعی و خطا در حین تولید محصول است. توزیع غیریکنواخت حرارت ناشی از جوش کاری می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های پسماند در سازه شود. در اکثر موارد این تنش‌ها با توجه به الزامات طراحی باید رهاسازی شود. بدین منظور لازم است قطعات با روش‌های خاص مانند عملیات حرارتی، تنش‌زدایی گردند.

نخستین تحقیقات در خصوص اعوجاج در جوش کاری در سال ۱۹۷۹ توسط کاسیاتوره [۱] انجام گردید. بررسی بر روی تأثیر حرارت در اطراف ناحیه جوش در سال ۱۹۹۲ توسط دیتز [۲] انجام شد. در سال ۱۹۹۹ تحقیقات دیگری توسط وراگه [۳] در راستای تهیه مدلی برای پیش‌بینی اعوجاج ناشی از جوش کاری انجام شد. در سال ۲۰۰۰ موسسه پی ای پی<sup>۱</sup> آخرین دستاوردها در مورد شبیه‌سازی جوش را در کتابی با همین عنوان ارائه نمود [۴]. جدیدترین عنوان منتشر شده در این حوزه، توسط ماندل [۵] تهیه شده است.

کروش [۶] به بررسی تنش‌های پسماند و اعوجاج ناشی از جوش کاری در قطعات استوانه‌ای پرداخته است. پائولو و همکاران [۷] اعوجاج در جوش لب‌به‌لب چند پاسه فولاد ساختمانی (ASTM A36) را بررسی نموده و به یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی اعوجاج در این نوع اتصال دست یافتند. مالکولم اسمیت و لیام گانوناب [۸] تحقیقات مشابهی روی تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌های ناشی از جوش روی ورق‌های تقویت شده انجام دادند.

راموس و همکاران [۹] با استفاده از نرم‌افزار سیسولد<sup>۲</sup> جوش T شکل را تحلیل کردند. هینز و همکاران [۱۰] اعوجاج ناشی از جوش نقطه‌ای را بررسی کرده و نشان دادند که جوش نقطه‌ای تأثیر قابل‌توجهی بر روی اعوجاج نمی‌گذارد. انصاری و باج پی [۱۱] تنش‌های باقیمانده و اعوجاج در جوش کاری با گاز محافظ از ورق‌های AA5052-AA6061 را توسط نرم‌افزار انسیس بررسی نمودند. چائوچن و سوارز [۱۲] تأثیر نوع و شکل اتصالات را روی اعوجاج ناشی از جوش با استفاده از روش غیرخطی ترموالاستوپلاستیک محاسبه کردند. دی یین دنگ [۱۳] بررسی تجربی و عددی اعوجاج جوش ناشی از جوش کاری قوس گاز محافظ را در اتصالات ورق نازک انجام داد. شادکام و همکاران [۱۴] اثر توالی جوش کاری بر اعوجاج با استفاده از تحلیل المان محدود در حوزه الاستیسیته و همچنین تأثیر شکل تقویت‌کننده‌ها را بررسی نمودند و تأثیر توالی اجرای جوش بر روی میزان اعوجاج را مشخص کردند. ربیعی زاده [۱۵] شبیه‌سازی عددی اعوجاج و تنش پسماند ناشی از جوش کاری تعمیراتی تیغه‌های نازل ردیف دوم توربین گازی Ruston TB4000 را انجام داد. ایرانمنش [۱۶] تأثیر ترتیب جوش کاری روی کاهش اعوجاج و تنش پسماند در سازه کشتی را بررسی نمود.

مزیدی [۱۷] با استفاده از تحلیل ترموالاستوپلاستیک و روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس، فرآیند جوش کاری را شبیه‌سازی نموده و به بررسی تأثیر ترتیب و توالی جوش کاری بر تنش‌های پسماند و اعوجاج حاصل از جوش کاری پرداخت. کرم‌کش [۱۸] روش عملی به‌منظور کنترل اعوجاج در جوش کاری ورق‌های نازک را تدوین نمود. نظری [۱۹] تحلیل المان محدود اعوجاج ناشی از جوش کاری مخازن کروی تیتانیومی را انجام داد. نوقایی و مشیدی [۲۰] به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس به شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری لب‌به‌لب دو لوله پرداختند. یافته‌های پژوهشی مرتضی درویشی [۲۱] در خصوص شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای مؤثر بر تنش‌های پسماند و اعوجاج ناشی از آن در جوش کاری الکتریکی در فولادها نشان می‌دهد که در محدوده بررسی هر چه سرعت جوش کاری بیشتر و اندازه پای جوش کوچک‌تر باشد، تنش‌های پسماند در قطعه افزایش و تغییرشکل در قطعه کاهش می‌یابد. امیرحسین صادقیان [۲۲] پیش‌بینی اعوجاج ناشی از جوش کاری در ورق‌های تقویت شده آلومینیوم ۵۰۸۳ به روش تغییرشکل ذاتی را بررسی نمود. وو و کیم [۲۳] یک مرور ادبیات جامع از تکنیک‌های مختلف برای

<sup>۱</sup> PEP (Professional Engineering Publishers)

<sup>۲</sup> SYSWELD

کاهش و بهینه‌سازی تغییر شکل ناشی از جوشکاری در مرحله طراحی و فرآیند تولید ارائه نمودند. آن‌ها بیان کردند که روش‌های تحلیل عددی المان محدود معمولاً برای پیش‌بینی اعوجاج جوش استفاده می‌شوند و می‌توانند هزینه کمتری نسبت به آزمایش‌های واقعی داشته باشند.

داهیا و همکاران [۲۴] مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی اعوجاج زاویه‌ای در جوشکاری صفحات آلومینیوم ۶۰۶۳ را ارائه کردند. مسلمی و همکاران [۲۵] تأثیر توالی جوش بر تنش پسماند القایی و اعوجاج در لوله‌ها را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که توالی‌های جوشکاری به‌طور قابل‌توجهی بر تنش‌های پسماند و بزرگی و توزیع اعوجاج تأثیر می‌گذارند. لی و همکاران [۲۶] تأثیر اندازه شکاف اولیه بر اعوجاج جوشکاری لب‌به‌لب و تنش پسماند را به‌صورت عددی و تجربی مطالعه کردند.

گرادیان‌های دمایی در فرایند جوش کاری از اهمیت فراوانی برخوردار است زیرا با بالا رفتن دما و توزیع غیریکنواخت دما، احتمال به وجود آمدن اعوجاج در ورق‌ها افزایش می‌یابد و اثرات اصلی اعوجاج از بین رفتن تِلرانس در اجزای جوشی می‌باشد. همچنین تغییر شکل اجزاء سازه باعث می‌شود تا سازه نتواند آن مقدار باری را که باید تحمل کند. در مورد فلنج‌ها برج این اعوجاج می‌تواند به‌صورت انحراف سطح فلنج به‌طرف داخل یا خارج از بدنه ظاهر شود. انحراف از میزان تِلرانس‌های مجاز دو پیامد ناخواسته اختلال در عملکرد اتصال و تنش‌های پسماند در قطعات را به همراه دارد. در این پژوهش با تکیه بر روش عددی و آزمون تجربی راهکاری برای پیش‌بینی اعوجاج ناشی از جوش کاری فلنج‌های برج توربین باد ارائه می‌شود و روشی با کمترین میزان اعوجاج را تعیین می‌گردد.

## ۲- استراتژی حل

اعوجاج یک قطعه در داخل و اطراف یک اتصال جوشی، از سیکل حرارتی ناشی از ورودی حرارت شدید موضعی نتیجه می‌شوند. درجه حرارت بالای منبع حرارت، موجب تغییرات متالورژیکی در اطراف ناحیه جوش می‌شود. پیشینه حرارتی، یعنی زمان و مقدار ایجاد دمای بالا از یک طرف و زمان خنک شدن آن، ریزساختار و خواص مکانیکی ماده سازنده را در این شرایط تعیین می‌کند. در این راستا انتخاب یک مدل مناسب و به دنبال آن تحلیل دقیق سیکل حرارتی ضروری است. انتخاب مدل به تجربه طراح و همچنین به‌کارگیری مدل در موارد مشابه دارد. مدل انتخاب‌شده در این تحقیق، یک مدل رایج است که توسط محققان در موارد مختلفی با موفقیت به کار گرفته شده است.

بهترین روش برای شبیه‌سازی فرایند جوش کاری روش تولد و مرگ المان است. این روش کشیدگی جوش ناشی از انقباض حوضچه مذاب را به خوبی نشان می‌دهد. در واقع وقتی قطره‌های مذاب جوش به حوضچه وارد می‌شوند ابتدا یک گرادیان دمایی شدید در ناحیه متأثر از جوش ایجاد می‌کنند. این مذاب بعد از عبور نازل از آن ناحیه در اثر تبادل حرارت با محیط اطراف خود به آرامی سرد و منقبض می‌شود. اختلاف خواص مکانیکی فلز جوش و فلز پایه موجب می‌گردد تنش‌های حرارتی در کل سطح حرارت دیده ایجاد شود.

در مسئله مورد نظر در این پژوهش ابعاد درز اتصال جوش نسبت به فلنج بسیار کوچک‌تر است و در واقع کشیدگی ناشی از حوضچه مذاب فقط باعث انقباض طولی در امتداد پوسته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر انحرافات سطح فلنج ناشی از گرادیان دمایی ایجاد شده در فلنج است و اگر تغییر شکل‌های ناشی از این گرادیان دمایی محاسبه گردد با تقریب خیلی خوبی می‌توان اعوجاج ناشی از جوش کاری را در فلنج پیش‌بینی نمود. تحلیل تئوری این پژوهش با این فرضیه انجام شد و در مرحله تست‌های تجربی نیز مشخص گردید که با گرم کردن ناحیه جوش می‌توان انحرافات ایجاد شده را اصلاح نمود. این موضوع (یعنی توزیع مناسب دمای ناحیه جوش کاری) نکته کلیدی در تکنولوژی ساخت برج‌های توربین باد است. بر اساس فرضیه فوق، روش دوم یعنی سابروتین نویسی برای تحلیل نرم‌افزاری انتخاب گردید. سابروتین DFLUX به منظور اعمال شار حرارتی وابسته به مکان و زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به ماهیت فرایند جوش کاری باید منبع حرارتی که در مدل نرم‌افزاری استفاده می‌شود قابلیت اعمال شار حرارتی متغیر با زمان و موقعیت را دارا باشد. شار حرارتی متغیر با زمان در داخل نرم‌افزار قابل اعمال است. ولی برای

شار متغیر با مکان باید از کدنویسی یا سابروتین‌ها استفاده شود. در این حالت کد مربوطه به زبان فرترن<sup>۳</sup> نوشته می‌شود و سپس برای اعمال بار حرارتی فراخوانی می‌شود.

### ۳- تئوری حاکم بر مسئله

برای استخراج روابط تئوری مسئله مورد نظر باید یک مدل فیزیکی از مسئله با فرضیات مناسب تهیه و سپس مدل ریاضی از مدل فیزیکی استخراج و روابط رفتاری مدل فیزیکی تعیین شود. مسئله مورد نظر از دو مدل حرارتی و مکانیکی تشکیل شده است. قوس الکتریکی یک پدیده کوپل حرارت-سازه، غیرخطی مرتبه بالا با تولید حرارت متمرکز و گرادیان شدید دمایی ناشی از منبع تولید حرارت متغیر با مکان است. قانون بقای انرژی یا قانون اول ترمودینامیک، اصل فیزیکی است که برای توصیف ریاضی تاریخچه حرارتی جوش کاری بکار می‌رود. این قانون برای حجم محصور توسط سطح دلخواه که انتقال حرارت در آن از طریق رسانش صورت می‌گیرد، به صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد.

$$\rho T + c(T) \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \nabla \cdot q + Q(x,y,z,t) \quad (1)$$

نرخ انتقال حرارت در واحد سطح مورد با استفاده از قانون رسانش فوریه<sup>۴</sup> از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$q = -k(T) \cdot A \cdot \nabla T(x,y,z,t) \quad (2)$$

با قرار دادن رابطه ۲ در رابطه ۱:

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} + \hat{N}(k(T) \cdot A \cdot \nabla T(x,y,z,t)) = Q(x,y,z,t) \quad (3)$$

و درنهایت اگر هدایت حرارتی ثابت در نظر گرفته شود، رابطه ۳ به فرم زیر درمی‌آید:

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} + k(T) \cdot A \cdot \nabla^2 T(x,y,z,t) = Q(x,y,z,t) \quad (4)$$

در مدل مکانیکی تاریخچه حرارتی به دست آمده از آنالیز حرارتی به صورت بارگذاری حرارتی به مدل مکانیکی اعمال می‌شود، سپس می‌توان تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی را در هر نقطه زمانی محاسبه نموده و وضعیت نهایی تنش‌های پسماند را از مجموع تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی به دست آورد. در طول جوش کاری تنش‌های حرارتی از طریق توزیع حرارتی به دست آمده از مدل حرارتی محاسبه گردیده، سپس تنش‌های پسماند در هر نقطه دمایی به مقادیر این تنش‌ها در گره‌ها اضافه می‌گردد، قبل از اینکه نمو دمایی بعدی اعمال گردد. در مدل مکانیکی از دو دسته رابطه استفاده می‌شود، رابطه تعادل و روابط بنیادی که به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_v}{\partial x_j} + F_i \quad (5)$$

برای مسائل ترموالاستیک خطی، روابط تنش - کرنش بر حسب ثوابت لامه به صورت رابطه ۶ می‌باشد.

$$\sigma_v = \delta_v \lambda \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_v - \delta_v (3\lambda + 2\mu) \alpha T \quad (6)$$

$$\varepsilon_v = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

و درنهایت روابط جابجایی به فرم زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\delta \varepsilon_{kk}}{\delta x_i} + \mu \nabla^2 u_i - (3\lambda + 2\mu) \alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} + F_i \quad (8)$$

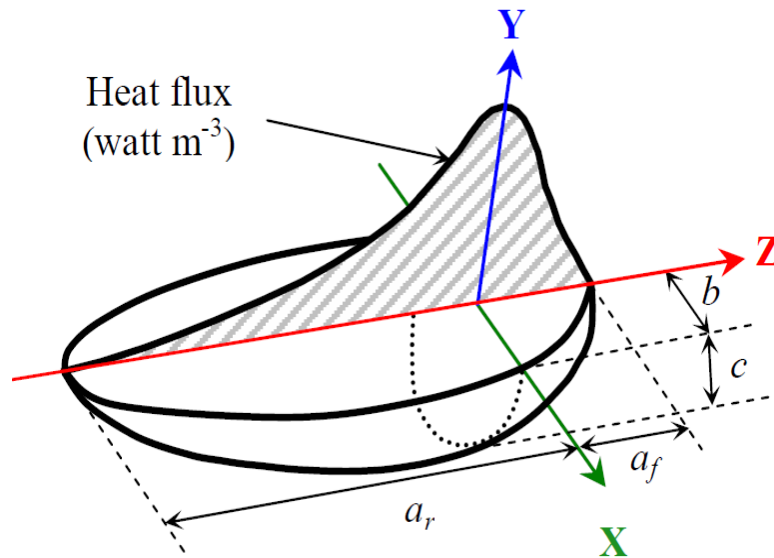
<sup>3</sup> Fortran

<sup>4</sup> Fourier law

#### ۴- مدل منبع حرارتی و مدل ماده

در این تحقیق مدل تئوری که برای تخمین شار حرارتی در فرایند جوش کاری استفاده می‌شود، مدل گلداک یا شار حجمی می‌باشد، (شکل ۱). در مدل حرارتی بیضی‌گون دوگانه گلداک<sup>۵</sup>، منبع گرمایی جوش کاری به صورت ترکیب دو بیضی‌گون متحرک (جلویی و پشتی) متصل به هم در نظر گرفته می‌شود. رابطه کلی برای تخمین شار حرارتی که توسط گلداک ارائه شده در رابطه ۹ نشان داده شده است. مقدار  $Q$  از توان خروجی دستگاه جوش اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای گلداک از تحقیقات مشابه استخراج شده است. در این رابطه  $\eta$  ضریب بازده فرایند جوش،  $Q$  حرارت ورودی به حوضچه جوش و  $f, a, b, c$  پارامترهای گلداک هستند [۲۷].

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} \eta Q f}{abc\pi\sqrt{\pi}} * e^{\left(\frac{3x^2}{a^2}\right)} * e^{\left(\frac{3y^2}{b^2}\right)} * e^{\left(\frac{3z^2}{c^2}\right)} \quad (9)$$



شکل ۱ مدل حرارتی بیضی‌گون دوگانه گلداک [۲۸]

در شبیه‌سازی جوش کاری از قوانین متفاوتی برای ماده استفاده می‌شود. قوانین موجود برای ماده معمولاً شامل مدل صلب-کاملاً پلاستیک، مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک و یا مدل پلاستیک با اثر کرنش سختی می‌باشد، برای این مدل‌ها لازم است سطوح تسلیم مشخصی تعریف شود. خواص مکانیکی و فیزیکی ماده به صورت متغیر با دما در نظر گرفته می‌شود. جنس فلنج توربین باد S355J2 از گروه فولادهای کربنی است. خواص مکانیکی ماده در جداول ۱ تا ۶ آمده است.

جدول ۱ مدول الاستیسیته و ضریب پواسون [۲۹]

| E (MPa) | $\nu$ | T (°C) |
|---------|-------|--------|
| ۲۱۰۰۰۰  | ۰/۲۸  | ۰      |
| ۲۰۰۰۰۰  | ۰/۳۲  | ۲۰۰    |
| ۱۸۰۰۰۰  | ۰/۳۶  | ۴۰۰    |
| ۱۶۰۰۰۰  | ۰/۴۰  | ۶۰۰    |
| ۸۰۰۰۰   | ۰/۴۴  | ۸۰۰    |
| ۲۰۰۰۰   | ۰/۴۷  | ۱۰۰۰   |
| ۱۵۰۰۰   | ۰/۴۸  | ۱۲۰۰   |
| ۱۰۰۰۰   | ۰/۴۹  | ۱۴۰۰   |

<sup>5</sup> Goldak Double ellipsoidal heat source model

جدول ۲ تنش و کرنش پلاستیک [۲۹]

| Plastic Stress (MPa) | $\epsilon_p$ | T (°C) |
|----------------------|--------------|--------|
| ۲۸۰                  | ۰            | ۰      |
| ۳۲۰                  | ۳            | ۰      |
| ۲۵۰                  | ۰            | ۴۰۰    |
| ۳۰۰                  | ۳            | ۴۰۰    |
| ۴۰                   | ۰            | ۷۰۰    |
| ۴۵                   | ۳            | ۷۰۰    |
| ۲۰                   | ۰            | ۱۰۰۰   |
| ۲۵                   | ۳            | ۱۰۰۰   |
| ۱۰                   | ۰            | ۱۲۰۰   |
| ۱۵                   | ۳            | ۱۴۰۰   |

جدول ۳ ضریب رسانش گرمایی [۲۹]

| K (w/ mm °c) | T (°C) |
|--------------|--------|
| ۰/۰۵         | ۰      |
| ۰/۰۵         | ۲۰۰    |
| ۰/۰۴         | ۴۰۰    |
| ۰/۰۴         | ۶۰۰    |
| ۰/۰۳         | ۸۰۰    |
| ۰/۰۳         | ۱۰۰۰   |
| ۰/۰۲         | ۱۲۰۰   |
| ۰/۰۲         | ۱۴۰۰   |

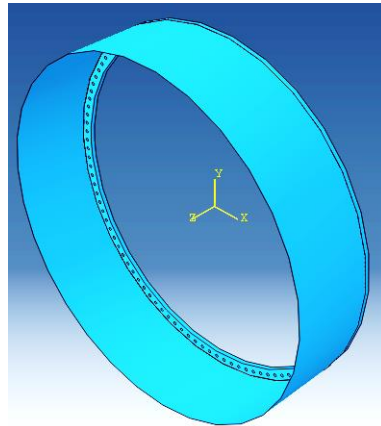
جدول ۴ ظرفیت گرمایی ویژه [۲۹]

| Cp (J/ ton °C) | T (°C) |
|----------------|--------|
| ۴۲۰۰۰۰         | ۰      |
| ۴۵۰۰۰۰         | ۱۰۰    |
| ۵۲۶۰۰۰         | ۳۰۰    |
| ۶۵۰۰۰۰         | ۵۰۰    |
| ۸۲۵۰۰۰         | ۷۰۰    |
| ۱۰۰۰۰۰۰        | ۱۰۰۰   |
| ۱۲۰۰۰۰۰        | ۱۴۰۰   |

جدول ۵ ضریب انبساط حرارتی [۲۹]

| $\alpha$ (1/°C) | T (°C) |
|-----------------|--------|
| ۱/۱۵E-۰۵        | ۰      |
| ۱/۵۰E-۰۵        | ۷۰۰    |
| ۲/۰۰E-۰۵        | ۱۴۰۰   |

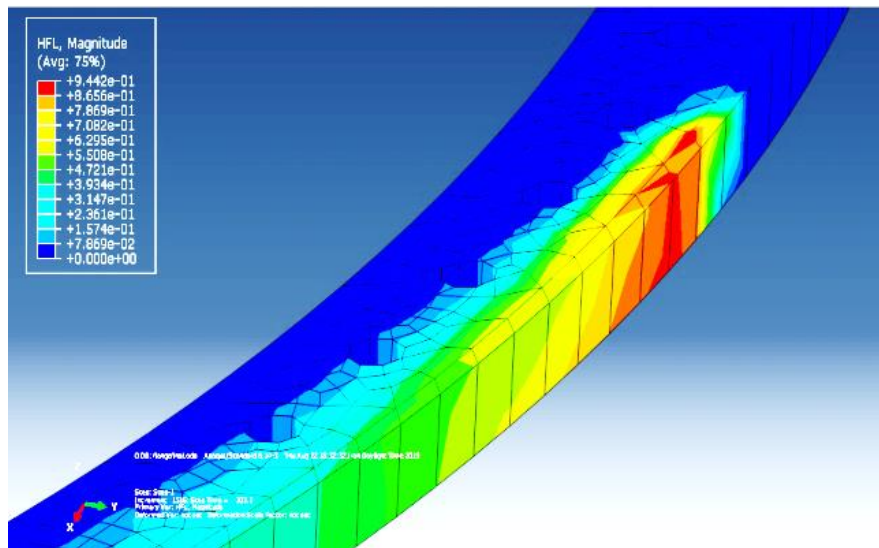
ضمناً چگالی ماده مورد نظر نیز  $7800 \text{ (Ton/mm}^3\text{)}$  در نظر گرفته می شود. در شکل ۲ نمایی از پوسته متصل به فلنج که در نرم افزار مدل شده، نمایش داده شده است.



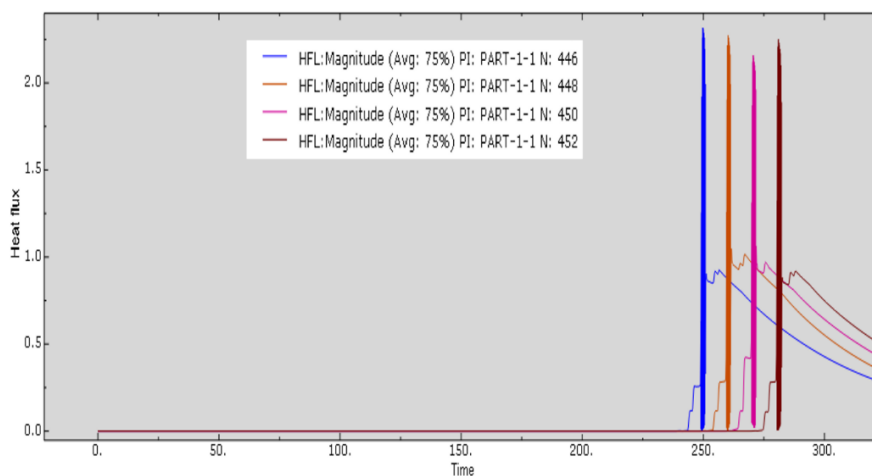
شکل ۲ نمایی از اتصال پوسته به فلنج مدل شده در نرم‌افزار

## ۵- نتایج تحلیل

توزیع شار حرارتی که در شکل ۳ نشان داده شده است، تطابق مناسبی با مدل گلدک دارد. شکل ۴ تغییر شار حرارتی برحسب زمان برای نقاط گرهی انتخاب شده را نشان می‌دهد.

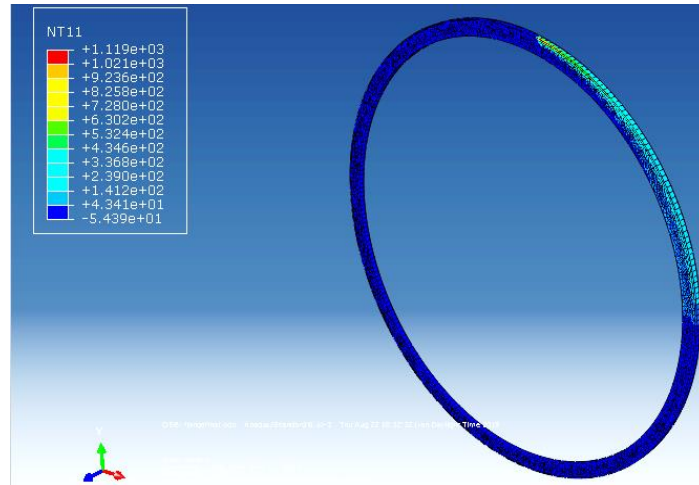


شکل ۳ توزیع شار حرارتی در امتداد مسیر حرکت نازل

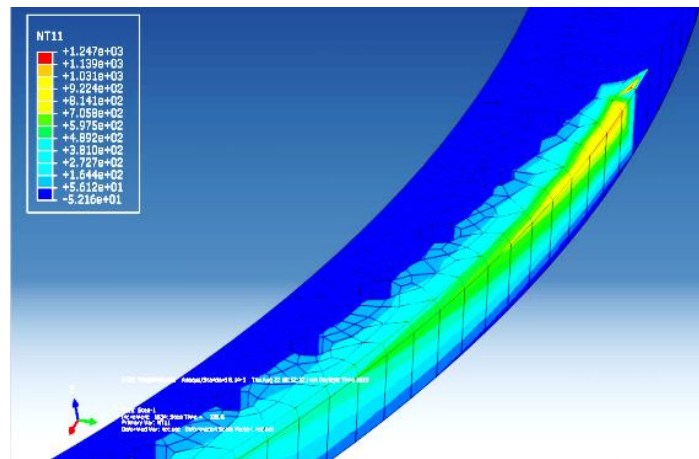


شکل ۴ تغییر شار حرارتی برحسب زمان برای نقاط گرهی انتخاب شده

میدان دما در مسیر حرکت نازل جوش کاری در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۶ توزیع دما را در مسیر حرکت نازل نشان می‌دهد.

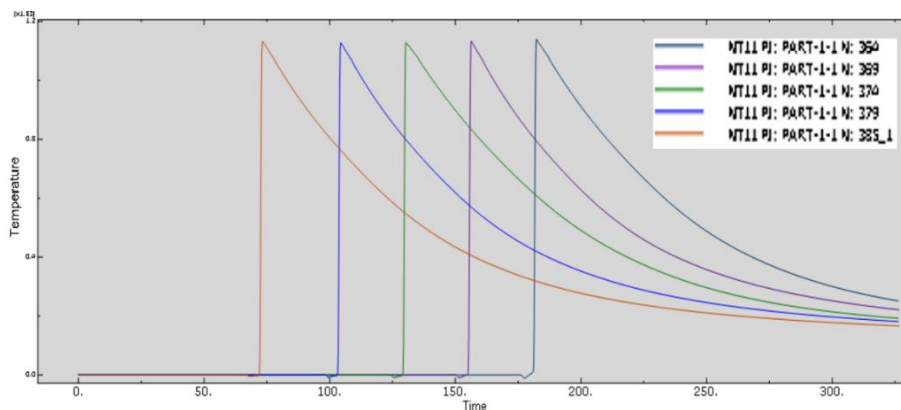


شکل ۵ میدان دما در مسیر حرکت نازل جوش کاری فلنج



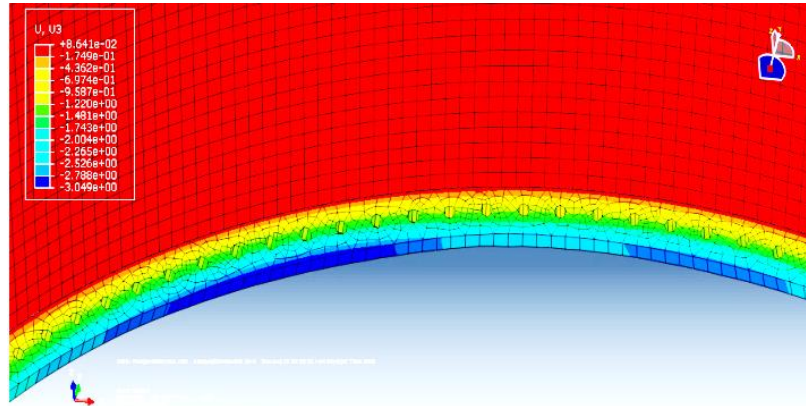
شکل ۶ توزیع دما در مسیر حرکت نازل جوش کاری فلنج

نمودار زمانی تغییرات دما در چهار نقطه مطابق شکل ۷ است.



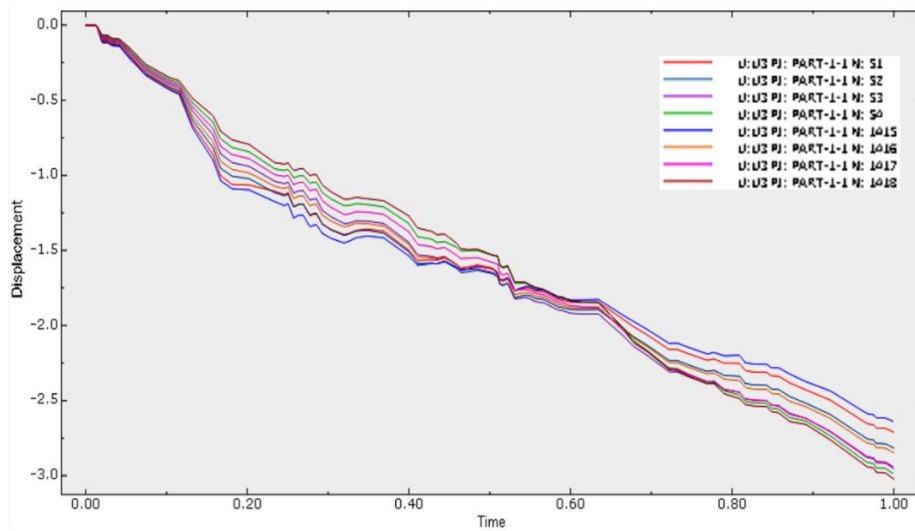
شکل ۷ همگرایی نتایج توزیع دما در چهار نقطه روی فلنج

طبق تحلیل انجام شده بیشترین میزان تغییر شکل فلنج در راستای Z (امتداد عمود بر صفحه فلنج) برابر ۳/۰۴ میلی‌متر می‌باشد. این تغییر شکل فلنج در شکل ۸ نشان داده شده است.

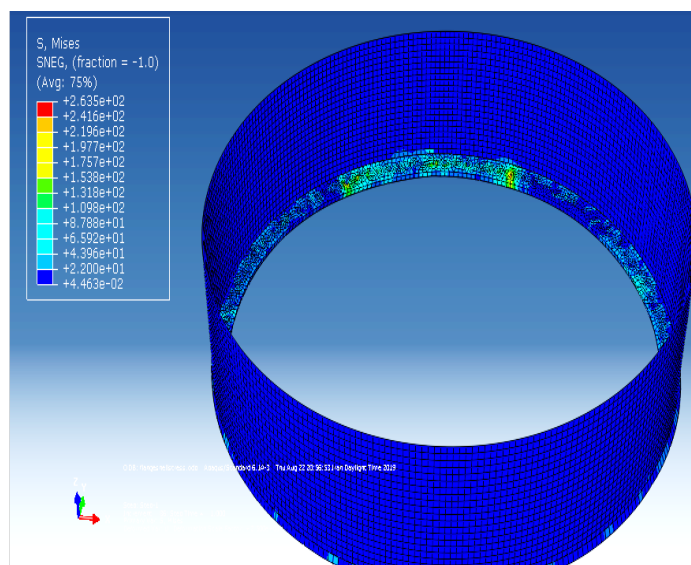


شکل ۸ تغییر شکل در راستای Z یعنی امتداد عمود بر صفحه فلنج

به منظور بررسی دقیق تر تغییر شکل‌ها در طی فرایند، جابجایی تعدادی از نقاط لبه داخلی فلنج در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ تغییر شکل در امتداد Z برای نقاط منتخب روی فلنج



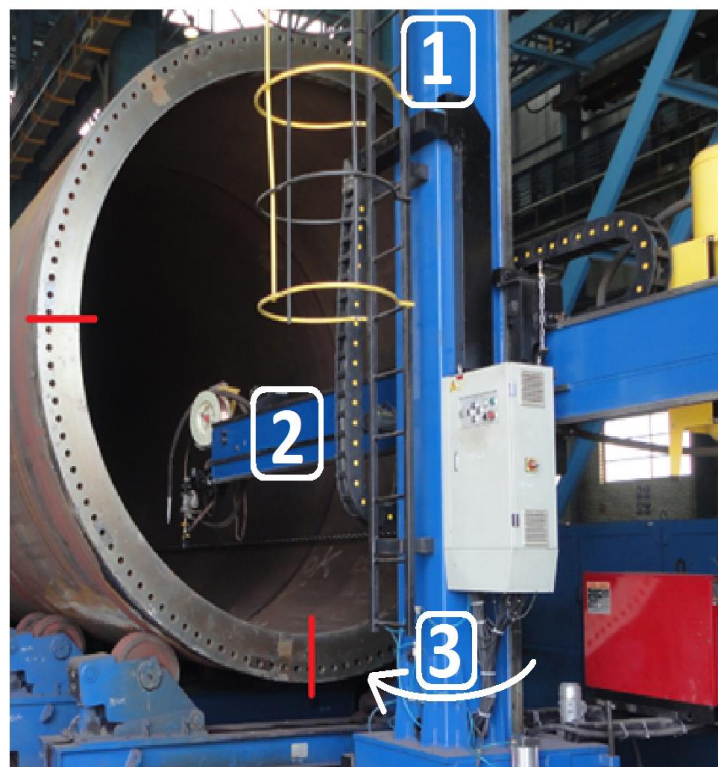
شکل ۱۰ توزیع تنش فون میزز روی فلنج

## ۶- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از تست

در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده از تست پرداخته می‌شود. در این مرحله جوش کاری یک فلنج برج توربین باد در یک پاس توسط دستگاه جوش زیرپودری انجام می‌شود. در حین انجام فرایند دمای قسمت‌هایی از فلنج اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. پس از پایان جوش کاری، تختی سطح فلنج توسط دوربین ایزی لیزر اندازه‌گیری و تغییر شکل‌ها گزارش می‌گردد. جوش کاری فلنج در یک مرحله از زاویه ۰ تا ۹۰ درجه انجام می‌شود. برای کنترل حرکت برج در حین چرخش از چند مجموعه دستگاه گرداننده استفاده می‌شود. کنترل میزان تختی سطح فلنج با دوربین لیزری گزارش می‌گردد.

این دستگاه مطابق شکل ۱۱ از یک بوم و یک ستون تشکیل شده است که نازل جوش در انتهای بوم نصب می‌گردد. طراحی این دستگاه به گونه‌ای است که نازل جوش قابلیت حرکت در راستای محورهای اول و دوم (در صفحه متشکل از بوم و ستون) و چرخش حول ستون را فراهم می‌سازد. در این شکل ناحیه ۱ ستون با قابلیت تغییر موقعیت عمودی (با دامنه ۵ متر و سرعت ۸۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) و چرخش (۱۸۰ درجه ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد و سرعت دورانی ۰/۰۷ تا ۰/۷۵ دور بر دقیقه) است. ناحیه ۲ بیم افقی با قابلیت تغییر موقعیت افقی (با دامنه ۴ متر و سرعت ۱۵۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) می‌باشد. همچنین ناحیه ۳ پایه ستون با قابلیت چرخش است.

برای اندازه‌گیری انحرافات تختی، توازی و تعامد از دوربین ایزی لیزر استفاده گردید. این تجهیز قابلیت اندازه‌گیری انحراف در ابعاد بسیار بزرگ (تا ۱۰۰ متر) را دارا است. دوربین ایزی لیزر بر مبنای ارسال اشعه لیزر به آشکارساز و برگشت آن به آن منبع کار می‌کند. بر اساس طول موج گسیل شده، فاصله رفت و برگشت موج سنجیده می‌شود. همچنین برای اندازه‌گیری توازی که دسترسی هم‌زمان به دو سطح وجود ندارد می‌توان از آینه برای انحراف اشعه استفاده نمود. در شکل ۱۲ اجزای دوربین ایزی لیزر مورد استفاده در تحقیق نشان داده شده است. چهار جز اصلی دوربین ایزی در شکل ۱۲ مشخص شده‌اند. شماره ۱ ریموت کنترل و سیستم پردازنده نام دارد. شماره ۲ بخش فوقانی آشکارساز لیزر و شماره ۳ بخش پایینی آشکارساز لیزر است. شماره ۴ نیز منبع ایجاد اشعه لیزر است.



شکل ۱۱ دستگاه جوش زیر پودری مورد استفاده در تحقیق و سه بخش اصلی آن



شکل ۱۲ اجزای دوربین ای‌بی‌لیزر مورد استفاده در تحقیق

برای اندازه‌گیری میزان تختی یک سطح از فلنج، مطابق شکل ۱۳ (الف) منبع لیزر روی یک پایه در محل مناسبی در امتداد سطح فلنج تنظیم گردید. سپس آشکارساز مطابق شکل ۱۳ (ب) روی سطح فلنج قرار داده شد.



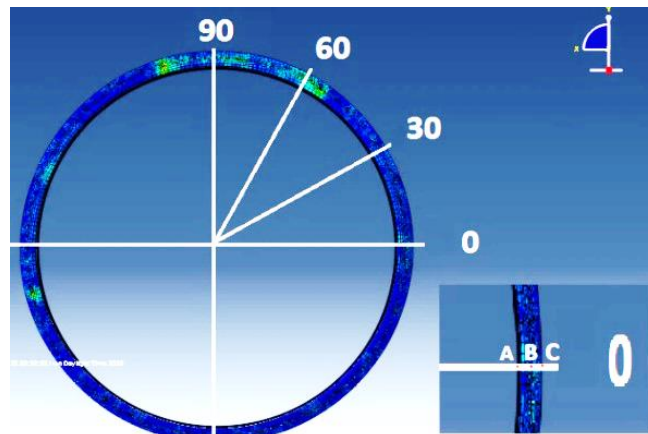
(ب)



(الف)

شکل ۱۳ (الف) تنظیم منبع و آشکارساز، (ب) استقرار آشکارساز روی سطح فلنج

بعد از انجام تنظیمات اولیه دوربین و آشکارساز، تعداد ۱۲ تا ۱۶ نقطه از سطح فلنج داده برداری می‌شود. این داده‌ها توسط دوربین پردازش و میزان تختی سطح فلنج گزارش داده می‌شود. نقاط اندازه‌گیری در شکل ۱۴ مشخص شده است.



شکل ۱۴ نقاط و زوایای خاص انتخاب شده برای اندازه گیری جهت تست

در هر زاویه نشان داده شده سه نقطه روی سطح فلنج با A، B و C مشخص شده است. در جدول ۶ مقایسه نتایج تست و تحلیل تئوری به همراه انحراف تئوری نسبت به تست آورده شده است.

جدول ۶ مقایسه نتایج تست و تحلیل تئوری

| زاویه ۰ درجه        | A    | B    | C    |
|---------------------|------|------|------|
| شماره نود           | ۱۵۸۵ | ۱۴۳۹ | ۱۵۶۱ |
| مقدار جابجایی تئوری | ۲,۱  | ۱,۱  | ۰    |
| مقدار جابجایی تست   | ۱,۴  | ۰,۶  | ۰    |
| درصد انحراف نتایج   | ٪۳۳  | ٪۴۵  | ٪۰   |
| زاویه ۳۰ درجه       |      |      |      |
| شماره نود           | ۶۹   | ۲۴۵۰ | ۱۰۸۱ |
| مقدار جابجایی تئوری | ۲,۲  | ۱    | ۰    |
| مقدار جابجایی تست   | ۱,۹  | ۰,۵  | ۰    |
| درصد انحراف نتایج   | ٪۱۴  | ٪۵۰  | ٪۰   |
| زاویه ۶۰ درجه       |      |      |      |
| شماره نود           | ۱۴۲۲ | ۴۵۷  | ۱۰۷۱ |
| مقدار جابجایی تئوری | ۲,۸  | ۱,۵  | ۰    |
| مقدار جابجایی تست   | ۲,۱  | ۱    | ۰    |
| درصد انحراف نتایج   | ٪۲۵  | ٪۳۳  | ٪۰   |
| زاویه ۹۰ درجه       |      |      |      |
| شماره نود           | ۱۴۱۲ | ۳۸۷  | ۱۵۳۲ |
| مقدار جابجایی تئوری | ۲,۷  | ۱,۵  | ۰    |
| مقدار جابجایی تست   | ۰,۵  | ۰    | ۰    |
| درصد انحراف نتایج   | ٪۸۱  | ٪۱۰۰ | ٪۰   |

## ۷- نتیجه گیری

بررسی نتایج تحلیل تئوری و تجربی در این تحقیق نشان می دهد که میزان شار حرارتی بیشترین تأثیر را روی اعوجاج فلنج دارد. همان گونه که از رابطه گلداک استنباط می شود، مقدار شار حرارتی وابستگی زیادی به شدت حرارت ورودی به حوضچه جوش است. شدت حرارت ورودی هم وابسته به ولتاژ و آمپر جوشکاری است. لذا در شرایطی که دستورالعمل جوشکاری به جوشکار اجازه بدهد می توان مقدار این پارامترها را کاهش داد. ولی عموماً تغییر هر کدام از پارامترهای مذکور در کیفیت جوش مؤثر است و این راه حل همیشه جوابگو نیست. روش استاندارد برای کاهش حرارت ورودی به حوضچه، توزیع مناسب حرارت

ورودی است. به عبارت دیگر اگر جوشکاری با ترتیب و توالی مناسب انجام شود، حجم اعوجاج و تنش پسماند ایجاد شده در قطعات به مراتب کاهش می‌یابد. پژوهش حاضر با تدوین روشی برای تخمین توزیع حرارت، قابلیت پیش‌بینی هر نوع ترتیب و توالی در جوشکاری را ایجاد می‌نماید. با توجه به سابروتین نوشته شده و استفاده از حلقه‌های تکرار و شرطی می‌توان مسیر حرکت نازل جوشکاری برای برنامه تعریف نمود و با دقت نسبتاً مناسبی میزان اعوجاج ناشی از توزیع حرارت را پیش‌بینی کرد. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل تئوری و آزمایش نشان می‌دهد که میزان اختلاف نتایج جابجایی بستگی به ناحیه سطح مقطع فلنج و همچنین موقعیت زاویه‌ای آن دارد. در ناحیه بیرونی فلنج این اختلاف در تمام موقعیت‌های زاویه‌ای نزدیک به صفر درصد است. در نواحی میانی سطح مقطع در موقعیت زاویه‌ای ۶۰ درجه این اختلاف ۳۳ درصد است که نسبت به موقعیت‌های صفر، ۳۰ و ۹۰ درجه کمترین درصد اختلاف را دارد. در نواحی داخلی فلنج در موقعیت زاویه‌ای ۳۰ درجه اختلاف جابجایی ۱۴ درصد بوده که نسبت به سایر موقعیت‌ها کمترین اختلاف را دارد.

## ۸- فهرست علائم

| متغیر                                | نماد            |
|--------------------------------------|-----------------|
| نرخ انتقال حرارت در واحد سطح         | $q$             |
| توان حرارتی                          | $Q$             |
| چگالی                                | $\rho$          |
| ظرفیت گرمایی                         | $C, c$          |
| زمان                                 | $t$             |
| ضریب رسانندگی حرارتی                 | $k$             |
| ضریب هدایت جابجایی                   | $hf$            |
| دما                                  | $T$             |
| مساحت                                | $A$             |
| شعاع                                 | $r$             |
| نیرو بر واحد جرم                     | $Fi$            |
| مؤلفه جابجایی                        | $ui$            |
| تنش                                  | $\sigma v$      |
| حجم                                  | $V$             |
| سرعت زاویه‌ای                        | $\omega$        |
| ضریب انبساط حرارتی                   | $\alpha$        |
| مؤلفه کرنش                           | $\epsilon u$    |
| عملگر نابلا                          | $\nabla$        |
| ماتریس جابجایی                       | $B$             |
| المان دیفرانسیلی حجم کنترل           | $dv$            |
| انرژی کرنشی داخلی یا کار داخلی سیستم | $U$             |
| کار خارجی انجام شده روی سیستم        | $P$             |
| بردار کرنش                           | $\epsilon$      |
| بردار تنش                            | $\sigma$        |
| کرنش الاستیک                         | $\epsilon^{el}$ |
| کرنش حرارتی                          | $\epsilon^{th}$ |
| ماتریس سختی ماده                     | $D$             |
| بردار جابجایی                        | $w$             |
| بردار نیروی شتاب                     | $F^a$           |
| کسینوس هادی بردار نرمال بر سطح       | $N$             |
| ثابت روزنتال                         | $k$             |
| ثوابت مدل گلداک                      | $a, b, c, f$    |
| ثابت لامه                            | $\lambda, \mu$  |

## Authorship Contribution Statement

Dr. Behrooz Shahriari



**Biography:** B. Shahriari was born in Isfahan, Iran in 1975. He received the B.S. in Mechanical Engineering and MSc. and PhD degrees in Aerospace Engineering from Malek Ashtar University of Technology in 2002 and 2012 and 2016, respectively. His current research interests are structural optimization and artificial intelligence.

**Contribution Statement:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Testing, Software, Visualization, Writing - original draft, Writing - review & editing.

Seifallah Azimi



**Biography:** S. Azimi received her MSc in Mechanical Engineering from Malek-Ashtar University of Technology. His field of research is structural design and analysis, and manufacturing.

**Contribution Statement:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Testing, Software, Visualization, Writing - original draft.

## ۹- مراجع

- [1] Cacciatorep J, Morante R. Analytical Modelling of Structural Distortion in Ship Structures Produced by Welding, Electric Boat Division, General Dynamics, 1979.
- [2] Radaj D. Heat Effects of Welding Temperature Field, Residual Stress, Distortion; Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] Verhaeghe G. Predictive Formulae for Weld Distortion: A Critical Review; Wood head Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 1999.
- [4] PEP (Professional Engineering Publishers). Recent Advances in Welding Simulation; IMechE Seminar Publications, 2000.
- [5] Mandal NR. Welding Techniques, Distortion Control and Line Heating; Alpha Science International Limited, 2009.
- [6] Ejaz-Qureshi M. Analysis of Residual stresses And Distortion In Circumferentially Welded Thin-walled Cylinders, Department of Mechanical Engineering, College of Electrical and Mechanical Engineering, National University of Sciences and Technology, Rawalpindi, Pakistan, 2008.
- [7] Adamczuk PC, Machado IG, Mazzaferro JAE. Methodology for predicting the angular distortion in multi-pass butt-joint welding. Journal of Materials Processing Technology. 2017; 240:305-313.
- [8] Gannon L, Liu Y, Pegg N, Smith M. Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates Marine Structures. 2010; 23(3):385-404.
- [9] Ramos HME, Tavares SMO, deCastro PMST. Numerical modelling of welded T-joint configurations using SYSWELD. Science and Technology of Materials. 2018; 30(1):6-15.
- [10] Heinze C, Schwenk C, Rethmeier M. The effect of tack welding on numerically calculated welding-induced. Journal of Materials Processing Technology. 2012; 212(1):308-314.
- [11] Bajpei T, Chelladurai H, Ansari MZ. Experimental investigation and numerical analyses of residual stresses and distortions in GMA welding of thin dissimilar AA5052-AA6061 plates. Journal of Manufacturing Processes. 2017; 25:340-350.
- [12] Chen, BQ, Soares CG. Effects of plate configurations on the weld induced deformations and strength of fillet-welded plates. Marine Structures. 2016; 50:243-259.

- [13] Deng D, Zhou Y, Tao B, Xiaozhan L. Experimental and numerical investigations of welding distortion induced by CO<sub>2</sub> gas arc welding in thin-plate bead-on joints. *Materials & Design (1980-2015)*.2013; 52:720-729.
- [14] Shadkama S, Ranjbar E, Iranmanesh M. Effect of sequence and stiffener shape on welding distortion of stiffened panel. *Journal of Constructional Steel Research*.2018; 149:41-52.
- [15] Rabieizadeh MS, Hejazi E, Lari-Baqal S M, Numerical Simulation of Distortion and Residual Stress Due to Repair Welding of Ruston TB4000 Second Row Nozzle Blades, First International Conference on Advanced Materials and Equipment Mechanics, Shahid Chamran University, Ahvaz, 2016. (in Persian)
- [16] Iranmanesh M, Azad N. Investigation of the effect of welding sequence on reducing distortion and residual stress in ship structure Review study. 4th International Conference on Offshore Industries, Iranian Marine Engineering Association, Tehran, 2011. (in Persian)
- [17] Mazidi M, Khidmati MR. Estimation of Distortion in Sheet Welding in Butt Joint with Different Sequences and Sequences. 18th Marine Industries Conference, Kish Island, Iranian Marine Engineering Association, 2016. (in Persian)
- [18] Karamkesh M, Karamkesh S A, Haji-Bagheri A, Timnak F. Implementation of practical method with the help of modeling and welding sequence to control thin sheet distortion. 9th Annual Congress of Iranian Association of Metallurgical Engineers, Shiraz University, Faculty of Engineering, Shiraz, 2005. (in Persian)
- [19] Nazari Y, Shakhesi S, Hatami A, Noghabi M. Finite Element Analysis of Distortion Due to Welding of Titanium Spherical Tanks Used in Space Industries, Iran National Conference on Mechanical and Electrical Engineering Science and Technology, Tehran, 1394. (in Persian)
- [20] Noghabi M, Mashidi H. Investigation of Distortion Due to Butt Welding Process of Two Pipes Using Finite Element Analysis, The First National Conference on Axial Development of Civil Engineering, Architecture, Electrical and Mechanics of Iran, Golestan University, Gorgan, 2014. (in Persian)
- [21] Darvishi M, Solhjooi N, Ghasemi B. Simulation and Study of Parameters Affecting Residual Stresses and Its Complexity in Electrical Welding in Steels. 2nd National Conference on Manufacturing Engineering, Islamic Azad University, Najafabad , 2009. (in Persian)
- [22] Sadeghian AH, Ranjbarodeh I, Mirsalehi SE. Prediction of welding distortion in 5083 reinforced aluminum sheets by intrinsic deformation method, International Conference on Electrical, Computer and Mechanical Engineering of Iran, Permanent Secretariat of the Conference, Tehran, 1397. (in Persian)
- [23] Chunbiao Wu, Kim J W. Review on Mitigation of Welding-Induced Distortion Based on FEM Analysis. *Journal of Welding and Joining*. 2020; 38(1):56-66.
- [24] Dahiya K, Mehrotra P, Khanna P. Mathematical modelling to predict angular distortion in MIG welding of aluminium 6063 plates, *Materials Today: Proceedings*.2022; 62(6):3183-3188.
- [25] Moslemi N, Abdi B, Gohari S, Sudin I, Redzuan N, Ayob A, Ahmed M, Rhee S, Burvill C. Influence of welding sequences on induced residual stress and distortion in pipes. *Construction and Building Materials*. 2022; 342(Part A):127995.
- [26] Xixian Li, Long Hu, Deng D. Influence of contact behavior on welding distortion and residual stress in a thin-plate butt-welded joint performed by partial-length welding. *Thin-Walled Structures*, 2022; 176, 109302.
- [27] Goldak John A, Akhlaghi Mehdi. *Computational welding mechanics*, Springer, 2005.
- [28] Beygi Reza, Eduardo Marques, Lucas F. M. da Silva. *Computational Concepts in Simulation of Welding Processes*, Springer, 2022.
- [29] Harvey Philip D. *Engineering Properties of Steel*, ASM International, 2011.