



بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر تنش‌های پسماند ناشی از جوش محیطی استوانه‌های جدارنازک از جنس آلیاژ آلومینیوم سری 5000

وحید کریم‌نیا¹، ایرج ستاری‌فر^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 4413-15875، sattari@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 06 آبان 1393

پذیرش: 08 دی 1393

ارائه در سایت: 25 بهمن 1393

کلید واژگان:

تنش پسماند

جوش محیطی

آلیاژ آلومینیوم سری 5000

تحلیل المان محدود

روش تاگوچی

چکیده

در این پژوهش، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری محیطی دو استوانه جدارنازک از جنس آلیاژ آلومینیوم سری 5000 با استفاده از مدلسازی المان محدود بررسی شده است. مدلسازی به صورت سه بعدی و در نرم‌افزار آباکوس از طریق تحلیل غیرکوپل حرارتی-مکانیکی انجام گرفته است. خواص موادی حرارتی و مکانیکی به صورت وابسته به دما تعریف شده است. تنش‌های پسماند توسط روش کرنش‌سنجی سوراخ اندازه‌گیری گردیده است. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود به کار رفته است. با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر عوامل مختلف هندسی، متغیرهای فرایند و خواص مکانیکی فلز پایه بر روی بیشینه تنش‌های پسماند محیطی و محوری بررسی شده است. باتوجه به تعداد عوامل مورد بررسی، آرایه L12 تاگوچی به کار رفته است. اثر هر یک از عوامل در دو سطح و با انجام 12 آزمایش مطالعه گردیده است. نتایج تحلیل آماری نشان داده است که در محدوده مورد بررسی، افزایش قطر خارجی، ضخامت، نرخ انرژی ورودی و استحکام تسلیم باعث افزایش بیشینه تنش‌های پسماند محوری و محیطی می‌گردد. با این وجود، افزایش تعداد برش‌های جوشکاری و تداخل اثر بین قطر خارجی و نرخ انرژی ورودی اثری کاهنده بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی دارند. همچنین، استحکام تسلیم ماده تأثیرگذارترین عامل بر روی بیشینه تنش پسماند محوری و محیطی می‌باشد.

Investigating the influence of effective parameters on the residual stresses in circumferentially arc welded thin walled cylinders of aluminum alloy series 5000

Vahid Karimnia, Iradj Sattari-Far*

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 4413-15875, Tehran, Iran, sattari@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 October 2014
Accepted 29 December 2014
Available Online 14 February 2015

Keywords:

Residual stresses
Circumferential weld
Aluminum alloy series 5000
Finite element method
Taguchi method

ABSTRACT

In this paper, the residual stresses due to circumferential arc weld of the thin walled cylinders have been investigated by using finite element method. The cylinders were of aluminum alloy series 5000. The 3D finite element models were developed in ABAQUS. The thermal-mechanical analysis was considered as uncoupled. The residual stresses were measured by using Hole drilling method. The experimentally measured data have been used to verify the result of finite element model. By using Taguchi method, the effect of geometrical, technological and material different factors have been investigated on the maximum residual stresses in the axial and hoop directions. Considering a number of factors, L12 Taguchi array has been selected. Each factor has been studied in two levels. The results of statistical analyses have shown that increasing the outer diameter, thickness, heat input rate and yield strength in the studied levels caused the axial and hoop maximum residual stresses to increase. However, increase of the section number and interaction between the outer diameter and heat input rate have led to a decrease in the maximum hoop residual stresses. Also, the yield strength of material was the most effective factor on maximum axial and hoop residual stresses.

1- مقدمه

می‌گردد. تنش‌های پسماند عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش استحکام خستگی، شکست ترد و ترک تنش-خوردگی¹ می‌شود [1].

جوشکاری دویی به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار می‌رود. به دلیل انبساط و انقباض غیریکتواخت ناشی از سیکل‌های گرم و سرد شدن حین جوشکاری تنش‌های حرارتی موضعی در جوش و نواحی نزدیک آن ایجاد

1- Stress Corrosion Cracking(SCC)

لی و همکارانش [8]، با استفاده از روش تاگوچی و شبیه‌سازی المان محدود، مدلی ریاضی را در جوش هیبریدی لیزر ورق‌هایی از جنس آلایژ آلومینیوم 5052 توسعه داده‌اند. آن‌ها اثر حرارت ورودی و سرعت جوشکاری را بر روی تنش پسماند و کرنش‌های پلاستیک بررسی نموده‌اند.

خان و همکارانش [9]، با استفاده از روش فاکتوریال کامل اثر پارامترهای فرایند را در جوشکاری لیزر فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی مطالعه کرده‌اند. آن‌ها با تعیین پارامترهای بهینه جوشکاری، مجموعه‌ای از روابط محاسباتی را ارائه نموده‌اند.

شبیه‌سازی المان محدود فرایند جوشکاری به صورت سه بعدی برای سازه‌های نسبتاً بزرگ نیاز به کامپیوترهایی با توان محاسباتی بالا دارند. با توجه به عدم دسترسی به چنین سیستم‌های کامپیوتری، اکثر مطالعات قبلی با فرضیات و ساده‌سازی‌هایی همراه بوده است. این ساده‌سازی‌ها باعث می‌شود که دقت نتایج کاهش یافته و بعضی از جزئیات مساله همچون خال جوش‌ها نادیده گرفته شود. از طرفی دیگر، اغلب تحقیقات در زمینه طراحی آزمایش بصورت تجربی انجام گرفته است. با توجه به هزینه بالای آزمایش‌های تجربی تعداد عوامل مورد بررسی نیز محدود است. در این مقاله با استفاده از کامپیوترهای با توان محاسباتی بالا دقت نتایج بهبود یافته و عوامل بیشتری مورد بررسی قرار گرفته است.

در مطالعه حاضر، تنش‌های پسماند ناشی از جوش محیطی استوانه‌های جدارنازک از جنس آلایژ آلومینیوم سری 5000 با استفاده از مدل‌سازی المان محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. بر همین اساس، ابتدا یک مدل مرجع المان محدود به صورت سه بعدی و در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی گردیده است. تنش‌های پسماند حاصل از شبیه‌سازی المان محدود مدل مرجع با داده‌های تست تجربی که از روش کرنش‌سنجی سوراخ¹⁰ بدست آمده اعتبارسنجی می‌گردد. سپس، طراحی آزمایش با استفاده از آرایه¹² تاگوچی و براساس شبیه‌سازی المان محدود انجام گرفته است. بیشینه تنش پسماند در جهات محیطی و محوری بعنوان متغیرهای پاسخ در نظر گرفته شده است. اثر عوامل مختلف هندسی، متغیرهای فرایند و خواص مکانیکی فلز پایه بر روی متغیرهای پاسخ بررسی شده است. با استفاده از تحلیل واریانس عوامل معنی‌دار مشخص گردیده و اثر هر یک از آن‌ها بر روی تنش‌های پسماند تعیین شده است.

2- مدل‌سازی المان محدود

به منظور شبیه‌سازی جوشکاری محیطی دو استوانه جدارنازک، یک مدل سه بعدی در نرم‌افزار آباکوس توسعه داده شده است [10]. ابعاد استوانه‌ها و جزئیات مربوط به موقعیت‌دهی آن‌ها در شکل 1 نمایش داده شده است. پدیده حرارتی-مکانیکی در حین جوشکاری با استفاده از تحلیل غیرکوپل شبیه‌سازی می‌شود. در تحلیل غیرکوپل، تحلیل حرارتی به منظور بدست آوردن تاریخچه دمایی جسم انجام گرفته و سپس نتایج حاصل از آن به عنوان بار حرارتی اولیه به تحلیل مکانیکی اعمال می‌گردد. به دلیل تقارن هندسی تنها نصف قطعه مدل شده است. شکل 2، مدل المان محدود سه بعدی را نشان می‌دهد.

از آنجاییکه شیب حرارتی شدیدی در جوش و مناطق نزدیک آن وجود دارد از المان‌های ریزتری تا فاصله 10 میلی‌متری از مرکز خط جوش استفاده شده است. با دور شدن از این ناحیه، اندازه المان‌ها نیز افزایش می‌یابد.

جوشکاری محیطی استوانه‌های جدارنازک آلومینیومی، بطور گسترده‌ای در صنایع با فناوری بالا چون هوافضا، هسته‌ای و پالایشگاهی به کار می‌رود. بنابراین پیش‌بینی دقیق توزیع و مقدار تنش‌های پسماند جهت اطمینان از یکپارچگی سازه‌های جوشی از اهمیت زیادی برخوردار است. اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با روش‌های تجربی اغلب هزینه‌بر و وقت‌گیر است. روش المان محدود ابزاری کارآمد جهت بررسی رفتار حرارتی-مکانیکی سازه‌های جوشی است که در چند دهه اخیر به منظور پیش‌بینی اعوجاج و تنش‌های پسماند جوشی توسعه یافته است [2].

بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند در سازه جوشی به عوامل مختلفی چون ابعاد هندسی، خواص موادی و پارامترهای جوشکاری بستگی دارد. استفاده از روش طراحی آزمایش¹ راهکاری مفید و کارآمد جهت تعیین و بررسی اثر عوامل مؤثر و تداخل اثر آن‌ها بر روی تنش‌های پسماند است. در روش‌های طراحی آزمایش با انجام تعداد معدودی آزمایش نتایج مطلوب حاصل شده و در وقت و هزینه صرفه‌جویی می‌شود. یکی از روش‌های طراحی آزمایش روش تاگوچی² است. در این روش با استفاده از آرایه‌های ارتوگونال³، کمترین تعداد آزمایش مورد نیاز برای مجموعه‌ای از عوامل صورت می‌گیرد [3].

تاکنون مقالات متعددی در زمینه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند جوشی لوله‌ها و ورق‌های فولادی و اثر پارامترهای مختلف بر روی آن‌ها منتشر شده است. با این وجود، این موضوع در مورد آلایژهای آلومینیوم پر استحکام، بویژه در زمینه استوانه‌های جدارنازک، بسیار کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

چنگ [4]، تنش‌های پسماند را در جوش سرب‌سر آلایژهای آلومینیومی قابل عملیات حرارتی بدست آورده و تأثیر پخ اتصال⁴ را بر روی تنش پسماند مطالعه نموده است. نتایج وی نشان می‌دهد که به منظور کاهش تنش‌های پسماند لازم است که مقدار پخ اتصال مناسب انتخاب گردد.

جیمز و همکارانش [5]، تنش‌ها و کرنش‌های پسماند را با استفاده از روش آزمایشگاهی پراش سینکروترون⁵ در جوش سرب‌سر ورق‌های⁶ آلومینیومی 5083 بدست آورده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که تنش‌های پسماند عرضی و طولی بر روی مرکز خط جوش به ترتیب برابر 57 درصد و 45 درصد استحکام تسلیم می‌باشد.

راستی و همکارانش [6]، تنش‌های پسماند حاصل از جوش گوشه⁷ رینگ تقویتی به استوانه‌ای از جنس آلایژ آلومینیوم پر استحکام مطالعه نموده‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند که مقدار تنش‌های پسماند شعاعی ناچیز بوده در حالی که مقدار تنش‌های پسماند در جهت محیطی، به غیر از نقاط ابتدایی و انتهایی جوش، در حد نصف استحکام تسلیم فلز پایه است.

در زمینه کاربرد روش‌های طراحی آزمایش برای فرایندهای جوشکاری، اغلب مطالعات با استفاده از روش‌های تجربی صورت گرفته است. کوگانته و همکارانش [7]، روش فاکتوریال کامل⁸ را به منظور تعیین پارامترهای بهینه جوش میگ⁹ برای آلایژ آلومینیوم 5754 به کار برده‌اند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که انرژی ورودی و نرخ شارش گاز دو عامل تأثیرگذار بر روی استحکام کششی اتصال و عمق نفوذ جوش هستند.

1- Design Of Experiment (DOE)

2- Taguchi

3- Orthogonal

4- Groove

5- Synchrotron diffraction

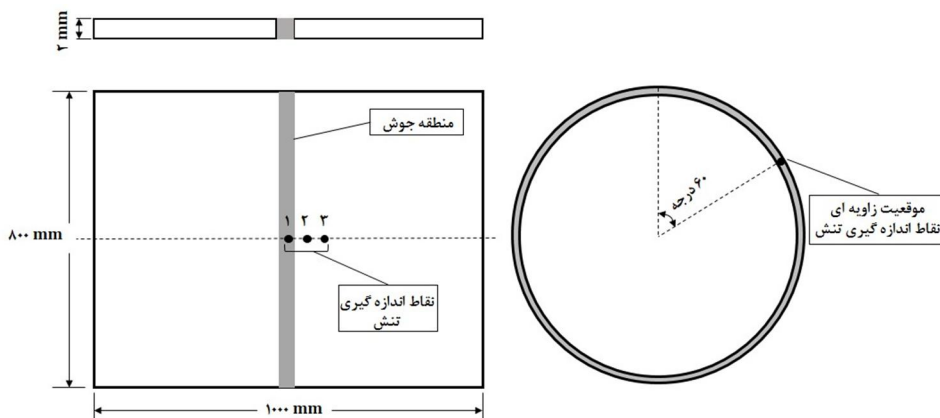
6- Plate

7- fillet

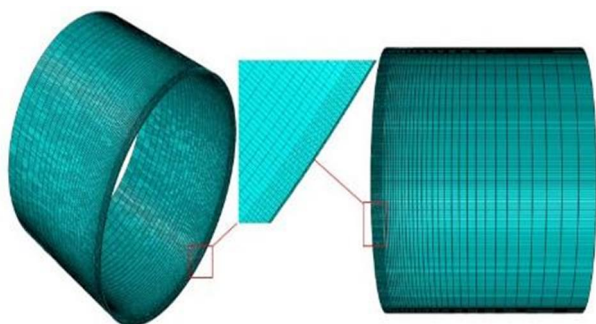
8- Full factorial

9- Metal Inert Gas (MIG)

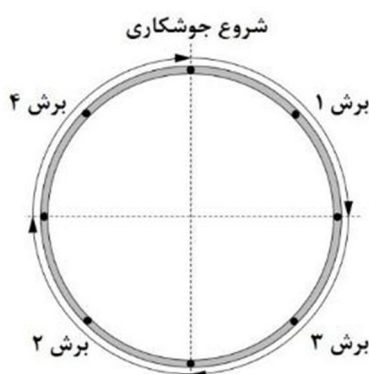
10- Hole Drilling



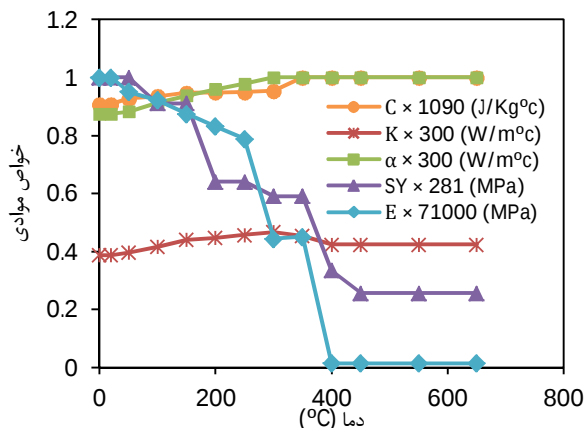
شکل 1 ابعاد هندسی استوانه‌ها و موقعیت نقاط اندازه‌گیری تنش پسماند



شکل 2 مدل المان محدود سه بعدی براساس تحلیل حساسیت مش



شکل 3 ترتیب جوشکاری و محل خال جوش‌ها



شکل 4 خواص حرارتی و مکانیکی برای آلایژ آلومینیوم سری 5000 [13]

برای اینکه نتایج بدست آمده مستقل از ابعاد مش باشد، تحلیل حساسیت مش بر روی مدل صورت می‌گیرد. از دمای بیشینه در هنگام جوشکاری که بر روی مرکز خط جوش روی می‌دهد به عنوان پارامتری جهت انجام تحلیل حساسیت مش، استفاده گردیده است [11]. با ریزتر کردن مش‌ها، هنگامی که تعداد المان‌ها به 69000 می‌رسد دمای بیشینه تغییر محسوسی نمی‌کند. بنابراین، ابعاد مناسب برای المان‌های جوشی در جهات محیطی، محوری و ضخامت به ترتیب برابر 2، 1 و 1 میلی‌متر بدست می‌آید. المان‌های به کار رفته در تحلیل حرارتی از نوع DC3D8 و در تحلیل مکانیکی از نوع C3D8 می‌باشد [10]. جهت مدل کردن فلز پرکننده از روش تولد و مرگ¹ المان استفاده شده است [12]. در این روش، ابتدا، المان‌های منطقه جوش با اختصاص ماتریس سختی صفر غیرفعال می‌شوند. در هنگام جوشکاری با عبور منبع حرارتی از این ناحیه المان‌های جوشی به ترتیب فعال می‌شوند.

علاوه بر این، هشت خال جوش به فواصل مساوی از شروع جوش مدل شده است. جهت مدل‌سازی آن‌ها، همه المان‌های جوشی به غیر از خال جوش‌ها غیرفعال می‌گردند.

ترتیب² جوشکاری به گونه‌ای انجام گرفته است که کمترین اعوجاج و تغییر شکل در استوانه‌ها صورت بگیرد. شکل 3، محل خال جوش‌ها (دایره‌های تیره رنگ)، ترتیب و تعداد برش‌های جوشکاری را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

ماده به کار رفته در این پژوهش از جنس آلایژ آلومینیوم سری 5000 است. خواص حرارتی و مکانیکی به صورت وابسته به دما تعریف شده و مقادیر آن‌ها در شکل 4 آورده شده است. علاوه بر این، چگالی ماده برابر 2640 kg/m^3 ، گرمای نهان ذوب برابر 300000 J/kg در محدوده دمایی 570-620 درجه سانتی‌گراد و نسبت بواسون 0/33 است.

در ادامه، روابط تئوری حاکم بر تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی فرایند جوشکاری و چگونگی مدل‌سازی آنها شرح داده شده است.

3- تحلیل حرارتی

در حین جوشکاری، معادله حاکم بر تحلیل انتقال حرارت گذرا بصورت معادله (1) است:

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

1- Birth and death
2- Sequence

ترکیبی از ضریب همرفت و تشعشع در نظر گرفته شده و از طریق معادله (9) محاسبه می‌گردد [2]:

$$h_{\text{total}} = [h + \varepsilon \sigma (T + T_{\text{amb}})(T^2 + T_{\text{amb}}^2)] \quad (9)$$

که در آن h ضریب همرفتی و برابر $8 \text{ W/m}^2\text{C}$ ، ε قابلیت تشعشع جسم، σ ثابت بولتزمن، T دمای جسم و T_{amb} دمای محیط است [14].

جهت شبیه‌سازی منبع حرارتی گلدک، از زیر برنامه دیفلاکس² در نرم‌افزار آباکوس، استفاده گردیده است [10].

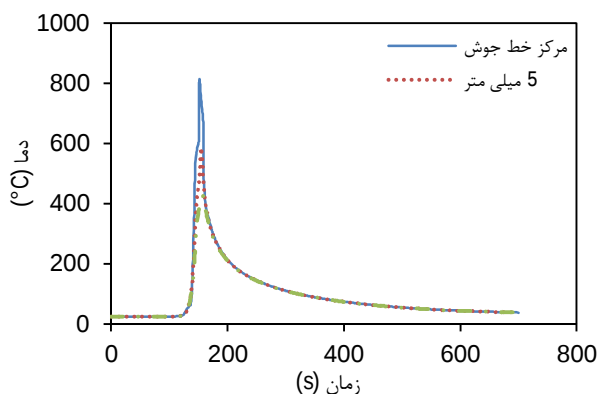
شکل 6 و شکل 7 نتایج حاصل از تحلیل حرارتی در نرم‌افزار آباکوس را برای مدل مرجع نشان می‌دهند. شکل 6، چرخه حرارتی در فواصل محوری (عمود بر خط جوش) مختلف از مرکز خط جوش و در فاصله محیطی 920 میلی‌متری (مقطع زاویه‌ای 60 درجه) از نقطه شروع نمایش می‌دهد. با توجه به شکل 6، مشاهده می‌شود که منبع حرارتی بعد از تقریباً 150 ثانیه به فاصله 920 میلی‌متری از نقطه شروع جوش رسیده و با عبور از آن، دما بر روی مرکز خط جوش به مقدار بیشینه (800°C) می‌رسد. پس از عبور منبع حرارتی از این نقطه، دما به سرعت کاهش می‌یابد. همچنین مشخص می‌گردد که با فاصله گرفتن از خط جوش دمای بیشینه به سرعت کاهش می‌یابد.

شکل 7 چرخه حرارتی را در فاصله محوری 5 میلی‌متری از مرکز خط جوش و فواصل زاویه‌ای 60، 150 و 210 درجه از نقطه شروع نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود الگوی تاریخچه دمایی در هر سه مقطع مشابه است.

همچنین مشخص می‌گردد که دمای بیشینه در فاصله محوری 5 میلی‌متری از مرکز خط جوش تقریباً برابر 600°C است. بنابراین، با توجه به دمای ذوب آلایژ آلومینیوم مورد بررسی، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه منطقه ذوب شده در هر استوانه حدوداً 5 میلی‌متر است.

جدول 1 پارامترهای مدل حجمی دوبیضی‌گون گلدک

پارامتر	مقدار
طول نیم بیض جلویی (mm)	5
طول نیم بیض عقبی (mm)	15
عرض منبع حرارتی (mm)	10
عمق منبع حرارتی (mm)	2
ضریب حرارتی در نیم بیضی جلویی	1.5
ضریب حرارتی در نیم بیضی عقبی	0.5



شکل 6 چرخه حرارتی در فواصل مختلف از مرکز خط جوش بر روی مقطع 60 درجه

که R_x ، R_y و R_z نرخ شار حرارتی به ازای واحد سطح در جهات x ، y و z دمای جاری، $T(x,y,z,t)$ نرخ تولید حرارتی داخلی، ρ چگالی، C گرمای ویژه و t زمان می‌باشد و طبق روابط (2) تا (4) داریم:

$$R_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$R_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3)$$

$$R_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4)$$

که k_x ، k_y و k_z ضریب هدایت حرارتی در جهات سه گانه می‌باشند.

جهت شبیه‌سازی منبع حرارتی در حال حرکت از مدل دو بیضی‌گون گلدک استفاده شده است. شکل 5 شماتیکی از مدل گلدک و پارامترهای ابعادی آن را نمایش می‌دهد. معادله توزیع منبع حرارتی گلدک در نیمه جلویی و پشتی به ترتیب در معادله‌های (5) و (6) آمده است [14]:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_f}{\pi\sqrt{\pi} a_f b c} \exp\left\{-3\left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right\} \quad (5)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_r}{\pi\sqrt{\pi} a_r b c} \exp\left\{-3\left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right\} \quad (6)$$

در روابط (5) و (6)، a_r و a_f ، b و c ثابت‌های ابعادی مدل گلدک بوده و به ترتیب برابر عمق منبع حرارتی، نصف عرض منبع حرارتی، طول نیم‌بیضی جلویی و عقبی می‌باشد.

f_r و f_f به ترتیب برابر ضریب توزیع حرارت در نیمه جلویی و پشتی است که بین آن‌ها رابطه (7) برقرار است [14]:

$$f_r + f_f = 2 \quad (7)$$

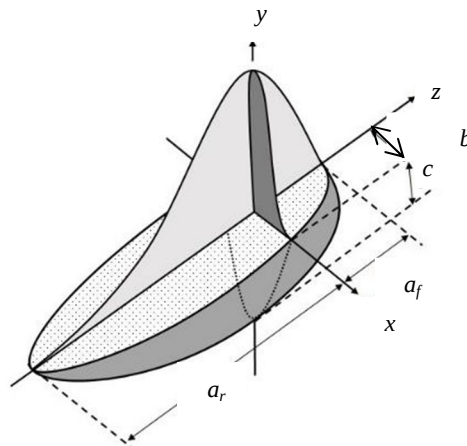
پارامترهای ابعادی مربوط به مدل گلدک در جدول 1 آورده شده است. این پارامترها با توجه به نمونه تجربی جوش شده استخراج گردیده است. η بازده قوس جوشکاری بوده و برای فرایند جوشکاری تیگ¹، 60% در نظر گرفته شده است [15].

Q حرارت ورودی کل است و با استفاده از (8) محاسبه می‌شود:

$$Q = V \cdot I \quad (8)$$

که V ولتاژ و I جریان جوشکاری است.

شرایط مرزی حرارتی به صورت انتقال حرارت همرفتی و تشعشع از همه سطوح به غیر از سطح تقارن انجام می‌گیرد. ضریب انتقال حرارت بصورت



شکل 5 مدل منبع حرارتی حجمی دوبیضی‌گون گلدک [14]

(60- مگاپاسکال) می‌رسد. بعد از این نقطه، دوباره تنش‌ها افزایش می‌یابند تا اینکه در فاصله 150 میلی‌متری به صفر می‌رسند. لازم به ذکر است که تنش‌های محوری بر روی سطح داخلی نیز از نوع کششی بوده و از لحاظ مقدار برابر تنش‌ها روی سطح خارجی است.

با توجه به شکل 10، بیشینه تنش پسماند محوری بر روی مرکز خط جوش اتفاق می‌افتد. تنش‌های پسماند محوری بر روی سطح خارجی از نوع فشاری بوده و بیشینه مقدار آن در حدود 170 مگاپاسکال است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با فاصله گرفتن از مرکز خط جوش بزرگی تنش‌های محوری کاهش یافته تا اینکه در فاصله تقریبی 50 میلی‌متری به صفر می‌رسند. همچنین، با بررسی شکل 9 و شکل 10 می‌توان دریافت که مقدار بیشینه تنش پسماند محوری بزرگتر از مقدار بیشینه تنش پسماند محیطی است.

با توجه به اینکه تنش‌های پسماند از لحاظ توزیع و مقدار در مقاطع مختلف دارای روند یکسانی هستند، بنابراین اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند در مقطع 60 درجه انجام گرفته که جزئیات آن در ادامه توضیح داده شده است.

5- بررسی‌های تجربی

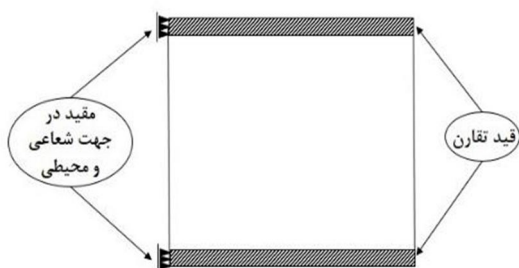
بررسی‌های تجربی با هدف بدست آوردن مقدار تنش‌های پسماند در جوش و مناطق اطراف آن انجام می‌گیرد. از این داده‌ها جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از المان محدود مدل مرجع استفاده می‌شود.

5-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

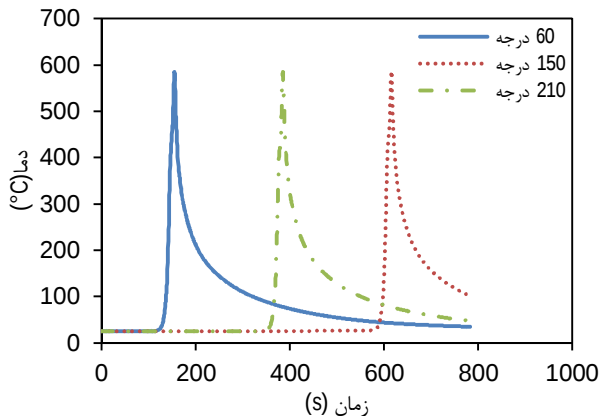
دو استوانه جدارنازک از جنس آلومینیوم سری 5000 مشابه ابعدی که در شکل 1 مشخص شده است، به همدیگر جوش شده‌اند. قبل از انجام جوشکاری، با توجه به ضخامت پایین استوانه‌ها و جلوگیری از اعوجاج ناخواسته آن‌ها، از یک رینگ دوتکه که به داخل استوانه‌ها جازده می‌شود، استفاده شده است. به منظور موقعیت‌دهی و ثابت نگه داشتن دو استوانه نسبت به هم، هشت خال جوش به فواصل مساوی ایجاد گردیده است (شکل 3). جهت انجام جوشکاری از فرایند تیگ با فلز پرکننده استفاده می‌گردد. با توجه به ضخامت پایین استوانه‌ها، جوشکاری در یک پاس انجام شده و شکل پخ به صورت عمودی می‌باشد. به منظور ایجاد تعادل حرارتی و به حداقل رساندن اعوجاج‌های جوشی، ترتیب انجام جوشکاری به صورت شکل 3 انجام می‌گیرد. جنس فلز پرکننده و پارامترهای جوشکاری در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 پارامترهای جوشکاری

فلز پرکننده	جریان (A)	ولتاژ (Volt)	قطبیت	سرعت جوشکاری (mm/s)
ER 5356	104	8	AC	6



شکل 8 شرایط مرزی مکانیکی اعمال شده بر روی مدل المان محدود



شکل 7 چرخه حرارتی جوش در فاصله 5 میلی‌متری از مرکز خط جوش بر روی مقاطع مختلف از شروع جوش

4- تحلیل مکانیکی

در تحلیل مکانیکی، از تاریخچه دمایی گرہ‌ها که توسط تحلیل حرارتی بدست آمده است بعنوان بارهای اولیه دمایی استفاده می‌شود. در این تحلیل، پارامترهای ابعدی المان‌ها مشابه تحلیل حرارتی است.

معادله تعادل حاکم بر تحلیل مکانیکی به صورت رابطه (10) بیان می‌شود [16]:

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \quad (10)$$

که σ_{ij} تانسور تنش و b_i نیروی حجمی¹ است.

مدل موادی به صورت الاستیک-پلاستیک حرارتی در نظر گرفته شده است. بر همین اساس، معیار تسلیم ون مسیز و قانون کرنش سختی ایزوتروپیک به کار رفته است. بنابراین، رابطه تنش-کرنش بصورت (11) و (12) بیان می‌گردد [16]:

$$[d\sigma] = [D^{ep}] [d\varepsilon] - [C^{th}] dT \quad (11)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (12)$$

که در آن‌ها، $[D^{ep}]$ ماتریس سختی الاستیک-پلاستیک، $[D^e]$ ماتریس سختی لاستیک، $[D^p]$ ماتریس سختی پلاستیک، $[C^{th}]$ ماتریس سختی حرارتی، $d\sigma$ نمو تنش، $d\varepsilon$ نمو کرنش و dT نمو دما است.

شرایط مرزی مکانیکی، در صفحه تقارن به نحوی است که در راستای محوری مقید شده است. به منظور ایجاد تعادل استاتیکی، در انتهای دیگر استوانه سه گرہ با فاصله زاویه‌ای 120 درجه در جهات شعاعی و محوری مقید گردیده است. شکل 8، نحوه اعمال شرایط مرزی مکانیکی را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

شکل 9 و شکل 10 به ترتیب توزیع تنش‌های پسماند محیطی و محوری را برای مدل مرجع در راستای محوری و فواصل مختلف از شروع جوش بر روی سطح خارجی استوانه نشان می‌دهد.

علت انتخاب سطح خارجی جهت استخراج نتایج المان محدود این است که اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند بر روی این سطح صورت گرفته است.

در شکل 9، مشخص می‌شود که بیشینه تنش پسماند کششی محیطی حدوداً در فاصله 12 میلی‌متری از مرکز خط جوش روی داده و مقدار آن تقریباً برابر 105 مگاپاسکال است. پس از فاصله 12 میلی‌متری، مقدار تنش‌ها کاهش می‌یابد تا اینکه در فاصله تقریبی 40 میلی‌متری به کمینه مقدار خود

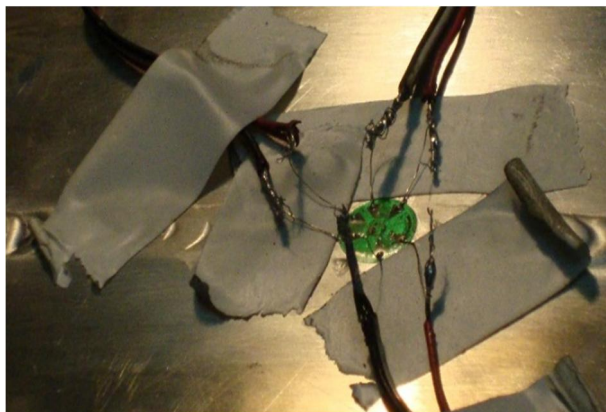
1- Body Force

بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. این تطابق نشان‌دهنده صحت فرض‌ها و اصول مدلسازی فرآیند است و بنابراین مدل‌های دیگر با هندسه‌های مشابه و شرایط مختلف را می‌توان با اطمینان از نتایج آن شبیه‌سازی کرده و به نتایج آن استناد نمود.

7- طراحی آزمایش

عوامل² مورد مطالعه شامل: قطر خارجی (DO)، ضخامت (TI)، طول مخزن (LE)، نرخ انرژی ورودی (Q)، تعداد خال جوش (TW)، ترتیب جوشکاری (SEQ)، تعداد برش³های جوشکاری (SEC) و استحکام تسلیم ماده (SY) هستند. چنانچه از روش فاکتوریال کامل استفاده شده و هریک از عوامل در دو سطح⁴ بررسی گردد، نیاز به 256 آزمایش است. که انجام این تعداد آزمایش، بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد. بنابراین، بجای آن از روش تاگوچی استفاده گردیده است. در روش تاگوچی، درجه آزادی آرایه اورتوگونال بایستی حداقل مساوی یا بزرگتر از تعداد عوامل باشد.

با توجه به اینکه در این پژوهش، 8 عامل مورد بررسی قرار گرفته است، از آرایه L₁₂ تاگوچی استفاده شده است. با این وجود، این آرایه تداخل اثرها را در نظر نمی‌گیرد و از طرفی دیگر 12 عامل را مورد مطالعه قرار می‌دهد. بنابراین، 3 عامل از آرایه L₁₂ حذف گردیده است. هریک از عوامل در دو سطح مطالعه شده است.

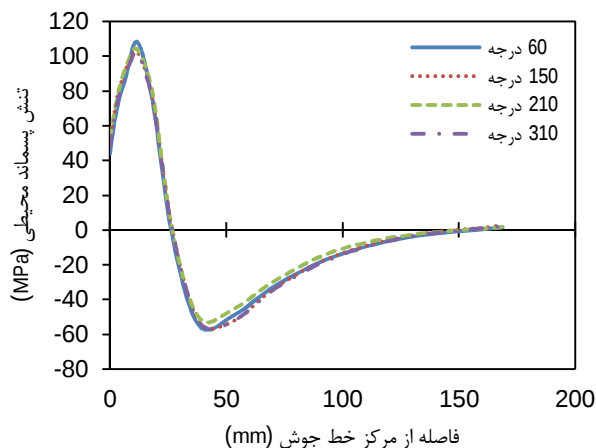


الف

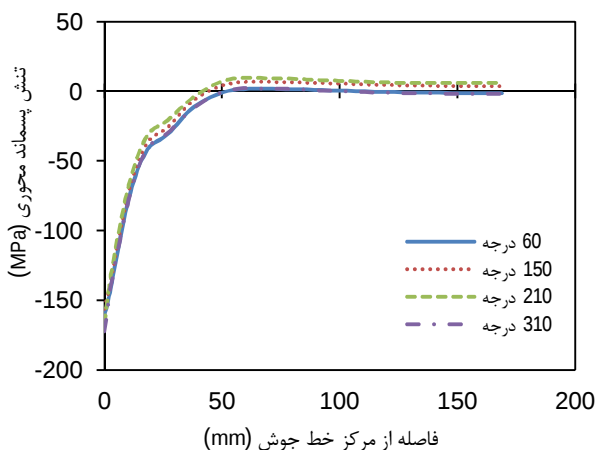


ب

شکل 11 اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با روش کرنش‌سنجی سوراخ الف، نصب کرنش‌سنج‌ها. ب، عملیات سوراخکاری



شکل 9 توزیع تنش‌های پسماند محیطی در راستای محوری برای مقاطع مختلف از شروع جوش بر روی سطح خارجی استوانه



شکل 10 توزیع تنش‌های پسماند محوری در راستای محوری برای مقاطع مختلف از شروع جوش بر روی سطح خارجی استوانه

2-5- اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند از روش کرنش‌سنجی سوراخ استفاده گردیده است. جزئیات مربوط به روش اندازه‌گیری و چگونگی انجام محاسبات مربوطه مطابق با استاندارد ASTM E837 انجام شده است [17]. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود اندازه‌گیری تنش پسماند در سه نقطه و بر روی سطح خارجی استوانه‌ها صورت گرفته است. کرنش‌سنج‌ها از نوع رزت 1 بوده و سوراخکاری، کرنش‌های آزاد شده اندازه‌گیری شده و با استفاده از روابط موجود در استاندارد ASTM E837 تنش‌های پسماند در جهت محوری و محیطی محاسبه می‌گردد. با توجه به اهمیت مقدار تنش پسماند در جوش و نواحی مجاور آن، سه نقطه 1، 2 و 3 به ترتیب بر روی مرکز خط جوش، فاصله 20 و 40 میلی‌متری از مرکز خط جوش موقعیت‌دهی شده‌اند. شکل 11 نمایی از فرآیند کرنش‌سنجی سوراخ را نمایش می‌دهد.

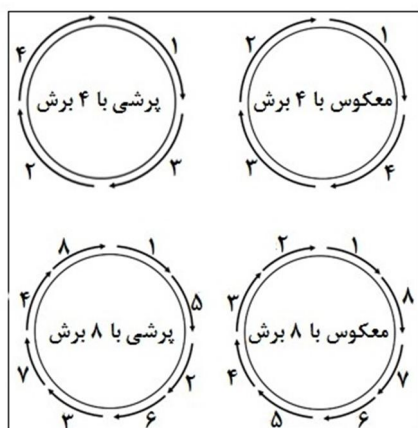
6- اعتبارسنجی مدل المان محدود

به منظور اعتبارسنجی مدل المان محدود، نتایج حاصل از مدل مرجع با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند در شکل 12 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که نمایان است تطابق خوبی از نظر توزیع و مقدار

پسماند محوری 33/62 و مقدار پارامتر P ، 0/0001 است. بنابراین، تنها 0/01 درصد احتمال خطا وجود داشته و مدل کاملاً معنی‌دار است. در مورد مدل بیشینه تنش پسماند محیطی، مقدار پارامتر F و پارامتر P بترتیب برابر 36/51 و 0/0006 است. بنابراین، احتمال بی معنی بودن مدل تنها 0/06 درصد است.

جدول 3 طراحی آزمایش براساس آرایه L_{12} تاگوچی

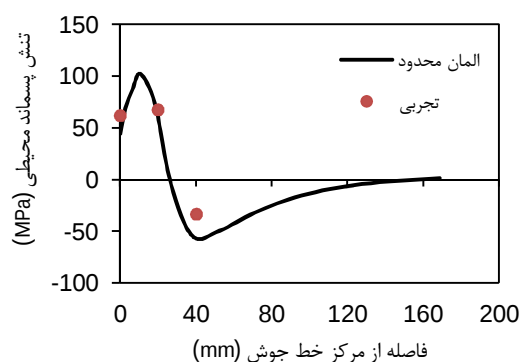
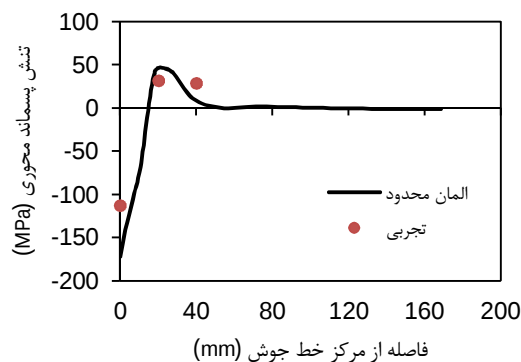
SY (MPa)	SEC	SEQ	TW	Q (W)	LE (m)	TI (mm)	DO (mm)	آزمایش
150	4	پرشی	8	300	1	2	400	1
300	8	معکوس	8	300	1	2	400	2
150	4	پرشی	16	600	2	2	400	3
300	8	پرشی	16	600	1	4	400	4
300	4	معکوس	16	300	2	4	400	5
150	8	معکوس	8	600	2	4	400	6
300	8	پرشی	8	600	2	2	800	7
150	8	معکوس	16	300	2	2	800	8
300	4	معکوس	16	600	1	2	800	9
300	4	پرشی	8	300	2	4	800	10
150	4	معکوس	8	600	1	4	800	11
150	8	پرشی	16	300	1	4	800	12



شکل 13 حالت‌های مختلف ترتیب و برش‌های چوشکاری در طراحی آزمایش

جدول 4 متغیرهای پاسخ حاصل از طراحی آزمایش

بیشینه تنش پسماند محوری (MPa)	بیشینه تنش پسماند محیطی (MPa)	آزمایش
66	38	1
103	59	2
82	53	3
152	95	4
131	82	5
101	56	6
161	97	7
71	50	8
167	104	9
182	128	10
124	72	11
114	60	12



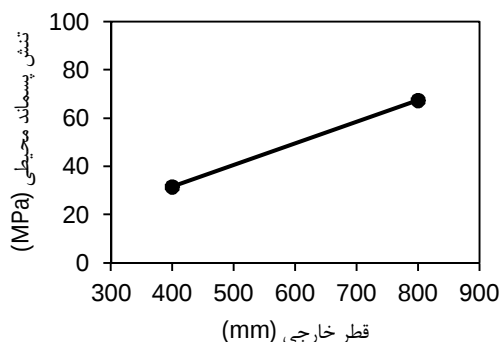
شکل 12 مقایسه تنش‌های پسماند ناشی از المان محدود با نتایج تجربی الف. تنش پسماند محوری ب. تنش پسماند محیطی

جدول 3، طراحی آزمایش براساس آرایه L_{12} تاگوچی را برای عوامل ورودی و سطوح مورد نظر نشان می‌دهد. بیشینه مقدار تنش پسماند در جهات محوری و محیطی به عنوان دو متغیر پاسخ¹ تعریف شده است. همچنین شکل 13 حالت‌های مختلف ترتیب و برش‌های چوشکاری را که در طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد. با انجام آزمایش‌ها طبق جدول 3، توزیع تنش‌های پسماند محیطی و محوری بدست آمده و بیشینه مقدار آنها به عنوان متغیر پاسخ برای هر یک از آنها استخراج می‌گردد. در جدول 4، متغیرهای پاسخ استخراجی آورده شده است.

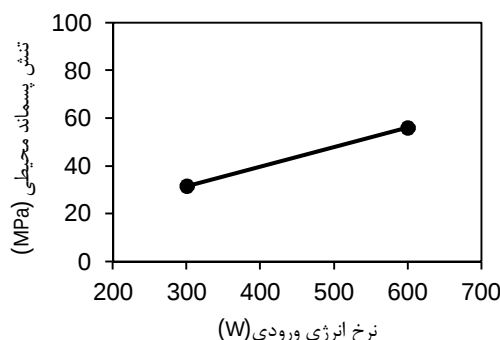
1-7- تحلیل واریانس

هدف از انجام تحلیل واریانس، تعیین عوامل مؤثر و میزان تأثیر آنها بر روی متغیر پاسخ است. به منظور تعیین عوامل معنی‌دار² و تعیین مدل مناسب از معیار آزمون F و ضریب همبستگی³ استفاده شده است. جهت انجام طراحی آزمایش و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت⁴ استفاده شده است. جدول 5 و جدول 6 تحلیل واریانس را به ترتیب برای مدل بیشینه تنش پسماند محوری و بیشینه تنش پسماند محیطی نشان می‌دهند. پارامتر F معیاری برای مقایسه انحراف معیار داده‌ها نسبت به انحراف معیار باقیمانده، پارامتر P نشان‌دهنده معنی‌دار بودن عامل است. مقادیر پارامتر P کمتر از 0/005، بیانگر معنی‌دار مدل و عامل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار پارامتر F برای مدل بیشینه تنش

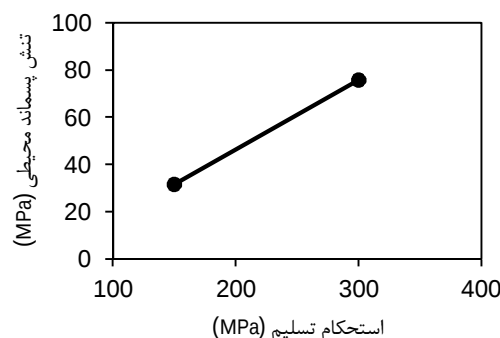
1- Response
2- Significance
3- R-Squared
4- Design Expert



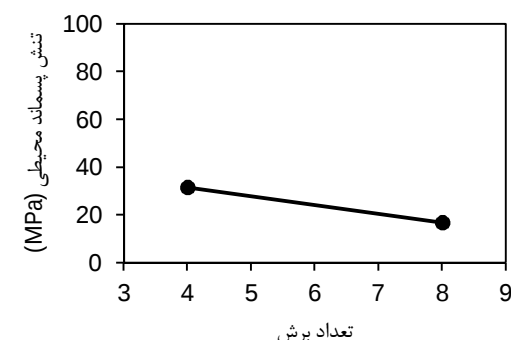
شکل 15 اثر قطر خارجی بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی



شکل 16 اثر نرخ انرژی ورودی بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی



شکل 17 اثر استحکام تسلیم ماده بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی



شکل 18 اثر تعداد برش بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی

همان‌طور که مشاهده می‌گردد افزایش سطح چهار عامل قطر خارجی، ضخامت، نرخ انرژی ورودی و استحکام تسلیم ماده منجر به افزایش متغیر پاسخ شده است. از اینرو، این عوامل نقش افزاینده بر روی تنش‌های پسماند محیطی دارند. با این وجود، افزایش تعداد برش‌های جوشکاری باعث کاهش

همچنین ضریب همبستگی برای مدل بیشینه تنش پسماند محوری و محیطی بترتیب برابر 0/9505 و 0/9777 بدست آمده است که نشان دهنده مناسب بودن مدل‌ها می‌باشد.

در مدل بیشینه تنش پسماند محوری، پارامترهای خطی قطر خارجی، ضخامت، نرخ انرژی ورودی و استحکام تسلیم ماده عوامل معنی‌دار هستند. در حالیکه در مورد مدل بیشینه تنش پسماند محیطی، علاوه بر پارامترهای فوق، پارامتر خطی تعداد برش‌های جوشکاری و پارامتر تداخل اثر قطربرونی - نرخ انرژی ورودی نیز جز عوامل معنی‌دار هستند. بقیه عوامل بررسی شده معنی‌دار نمی‌باشند. با مقایسه مقادیر ضرایب تأثیر، مشخص می‌گردد که استحکام تسلیم ماده تأثیرگذارترین عامل در هر دو مدل است.

2-2- اثر عوامل مؤثر بر روی متغیرهای پاسخ

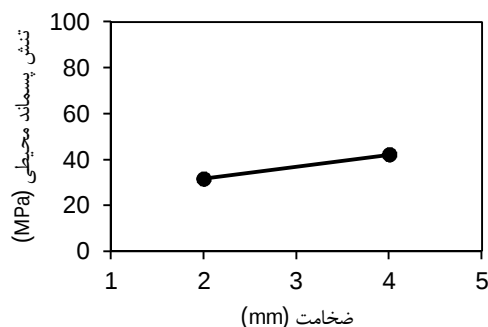
اثر عوامل مؤثر بر روی بیشینه مقدار تنش پسماند محیطی در شکل 14 تا شکل 19 و بر روی بیشینه مقدار تنش پسماند محوری در شکل 21 تا شکل 23 نشان داده شده است. در این شکل‌ها، محور افقی مقدار عامل در هر سطح و محور عمودی اثر اصلی¹ عامل در هر سطح را نشان می‌دهد.

جدول 5 تحلیل واریانس برای مدل بیشینه تنش پسماند محوری

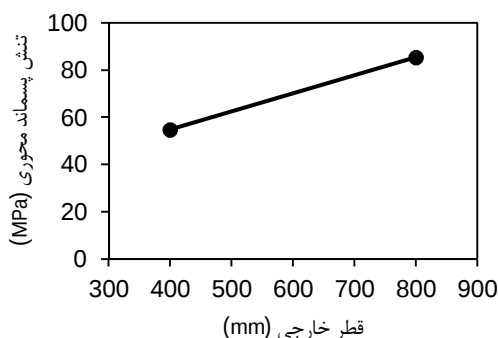
عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	پارامتر F	پارامتر P	ضریب تأثیر (%)
DO	2821/333	1	24/452	0/0017	17/28
TI	1976/333	1	17/129	0/0044	12/11
Q	1200	1	10/400	0/0146	7/35
SY	9520/333	1	82/512	< 0/0001	58/32
مدل	15518	4	33/623	0/0001	
باقیمانده	807/667	7			

جدول 6 تحلیل واریانس برای مدل بیشینه تنش پسماند محیطی

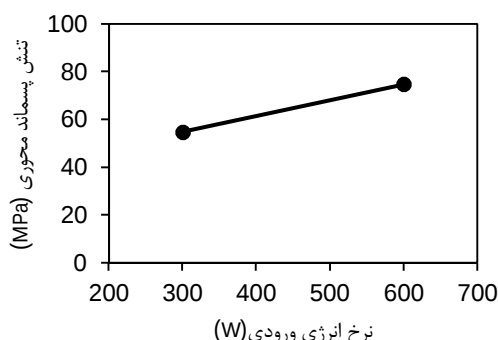
عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	پارامتر F	پارامتر P	ضریب تأثیر (%)
DO	1365/33	1	38/68	0/0016	16/80
TI	283/5	1	8/03	0/0365	3/49
Q	300	1	8/5	0/0332	3/69
SEC	565/79	1	16/03	0/0103	6/96
SY	5016/07	1	142/1	< 0/0001	61/72
DO-Q	420/5	1	11/91	0/0182	
مدل	7732/5	6	36/51	0/0006	
باقیمانده	176/5	5			



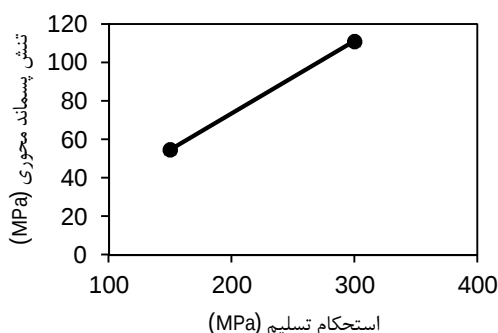
شکل 14 اثر ضخامت بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی



شکل 21 اثر قطر خارجی بر روی بیشینه تنش پسماند محوری



شکل 22 اثر نرخ انرژی ورودی بر روی بیشینه تنش پسماند محوری



شکل 23 اثر استحکام تسلیم ماده بر روی بیشینه تنش پسماند محوری

از بیشینه تنش پسماند محوری است. در حالیکه این موضوع در مورد عامل‌های قطر خارجی و نرخ انرژی ورودی برعکس می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده از طراحی آزمایش صرفاً در محدوده سطوح تعریف شده برای هر عامل معتبر می‌باشد.

8- نتیجه‌گیری

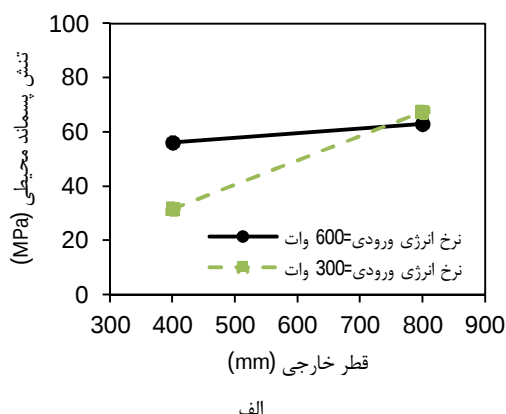
در این پژوهش، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری محیطی استوانه‌های جدارنازک از جنس آلایژ آلومینیوم سری 5000 با استفاده از مدل‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفته و اثر عوامل هندسی، متغیرهای فرایند و خواص مکانیکی فلز پایه بر روی آن توسط روش طراحی آزمایش تاگوچی مطالعه شده است. با ذکر این نکته که نتایج مربوط به طراحی آزمایش تنها در محدوده مورد بررسی صادق می‌باشد، نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- 1- افزایش قطر خارجی، ضخامت، نرخ انرژی ورودی و استحکام تسلیم ماده باعث افزایش تنش‌های پسماند محیطی و محوری می‌شوند.

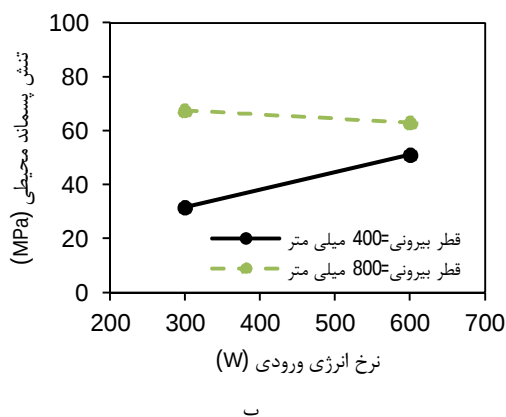
تنش پسماند محیطی گردیده است. علاوه بر این، از شکل 19 می‌توان دریافت با اینکه هریک از عوامل قطر خارجی و نرخ انرژی ورودی به تنهایی موجب افزایش تنش‌های پسماند محیطی می‌شوند ولی تداخل اثر این دو عامل نقش کاهنده‌ای بر روی آن دارد. بنابراین، جهت کمینه کردن تنش پسماند محیطی، بایستی اثر عوامل مؤثر افزایشدهنده و کاهنده همزمان مورد بررسی قرار گیرند.

در مدل مربوط به تنش پسماند محوری نیز چهار عامل قطر خارجی، ضخامت، نرخ انرژی ورودی و استحکام تسلیم ماده نقش افزایشدهنده بر تنش پسماند دارند. با این وجود، عامل معنی‌داری که نقش محدودکننده داشته باشد وجود ندارد.

با مقایسه نمودارهای مربوط به هر دو مدل مشاهده می‌گردد که اثر عامل ضخامت و استحکام تسلیم ماده بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی بیشتر

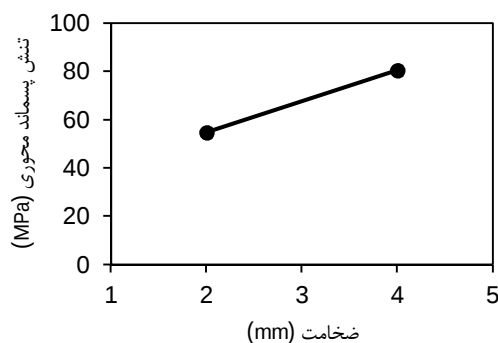


الف



ب

شکل 19 اثر تداخل اثر بین قطر خارجی و نرخ انرژی ورودی بر روی بیشینه تنش پسماند محیطی. الف-نرخ انرژی ورودی ثابت ب-قطر خارجی ثابت



شکل 20 اثر ضخامت بر روی بیشینه تنش پسماند محوری

پردازش‌های فوق سریع دانشگاه صنعتی امیرکبیر" در جهت اجرای شبیه‌سازی‌های المان محدود کمال تشکر را داشته باشند.

10- مراجع

- [1] I. Sattarifar and M. R. Farahani, "Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 86, pp. 723-731, 2009.
- [2] A. M. Malik, E. M. Qureshi, N. Ullah Dar, and I. Khan, "Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields," *Thin-Walled Structures*, vol. 46, pp. 1391-1401, 2008.
- [3] L. Condra, *Reliability Improvement With Design of Experiment*: CRC Press, 2001.
- [4] C. Cheng, "Butt-welding residual stress of heat treatable aluminum alloys," *Journal Of Materials Science & Technology*, vol. 23, pp. 217-222, 2007.
- [5] M. James, D. Hughes, D. Hattingh, G. Mills, and P. Webster, "Residual stress and strain in MIG butt welds in 5083-H321 aluminium: As-welded and fatigue cycled," *International Journal of Fatigue*, vol. 31, pp. 28-40, 2009.
- [6] I. S. A. Rasti, M. Salehi, V. Karimnia, "Optimal Design of Geometry and Finite Element Analysis of Stress in Welded Joint of Internal Stiffener Ring and Cylinder Made of High Strength Aluminium Alloy," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 4, pp. 13-23, 2014.
- [7] R. Koganti, A. Joaquin, M. Zaluzec, and C. Karas, "Gas Metal Arc Welded (GMAW) Joint Strength Comparison of Aluminum Sheet (5754) and Extruded (6063) Alloys," in *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2007, pp. 715-723.
- [8] J. Lee, K. Y. Lee, H. R. Kim, Y. W. Park, and C. Y. Song, "The use of Taguchi and approximation methods to optimize the laser hybrid welding of a 5052-H32 aluminium alloy plate," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 222, pp. 507-518, 2008.
- [9] M. M. A. Khan, L. Romoli, M. Fiaschi, G. Dini, and F. Sarri, "Experimental design approach to the process parameter optimization for laser welding of martensitic stainless steels in a constrained overlap configuration," *Optics & Laser Technology*, vol. 43, pp. 158-172, 2011.
- [10] "ABAQUS 6.12," in 1, ed. USA: Dassault Systems Simulia Corp., 2012.
- [11] N. U. Dar, E. M. Qureshi, and M. M. I. Hammouda, "Analysis of weld-induced residual stresses and distortions in thin-walled cylinders," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, pp. 1118-1131, 2009.
- [12] I. F. Fanous, M. Y. Younan, and A. S. Wifi, "Study of the effect of boundary conditions on residual stresses in welding using element birth and element movement techniques," *Journal of pressure vessel technology*, vol. 125, pp. 432-439, 2003.
- [13] J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby, "A new finite element model for welding heat sources," *Metallurgical transactions B*, vol. 15, pp. 299-305, 1984.
- [14] H. Moein and I. Sattari-Far, "Different finite element techniques to predict welding residual stresses in aluminum alloy plates," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, pp. 679-689, 2014.
- [15] P. Dutta, Y. Joshi, and C. Franche, "Determination of gas tungsten arc welding efficiencies," *Experimental thermal and fluid science*, vol. 9, pp. 80-89, 1994.
- [16] T.-L. Teng and C.-C. Lin, "Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, pp. 857-864, 1998.
- [17] ASTM Standard, "E837-08 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method," in *ASMT international*, West Conshohocken, PA, ed, 2008.

- 2- عوامل خطی طول استوانه، تعداد خال جوش و ترتیب جوشکاری اثر معنی‌داری روی بیشینه تنش پسماند محیطی و محوری ندارند.
- 3- افزایش تعداد برش‌های جوشکاری باعث کاهش تنش‌های پسماند محیطی می‌شود درحالی‌که این عامل بر روی تنش پسماند محوری اثر معنی‌داری ندارد. اثر این عامل بر روی تنش پسماند محیطی تقریباً 0/1 اثر استحکام تسلیم، 0/4 اثر قطر خارجی و 2 برابر اثر ضخامت و نرخ انرژي ورودی است.
- 4- تداخل اثر بین قطر خارجی و نرخ انرژي ورودی نقشی کاهنده بر روی تنش پسماند محیطی دارد با این وجود، این عامل بر روی تنش پسماند محوری اثری ندارد. این عامل از لحاظ اثر بر روی متغیر پاسخ، بعد از استحکام تسلیم، قطر خارجی و تعداد برش قرار گرفته است.
- 5- ضریب تأثیر استحکام تسلیم ماده بر روی بیشینه تنش پسماند محوری و محیطی به ترتیب برابر 58/32 درصد و 61/72 درصد است. بنابراین، مؤثرترین عامل بر روی تنش پسماند، استحکام تسلیم ماده می‌باشد.
- 6- در مورد تنش‌های پسماند محوری، عوامل خطی قطر خارجی، ضخامت و نرخ انرژي ورودی به ترتیب با ضریب تأثیر 17/28 درصد، 12/11 درصد و 7/35 درصد در درجه‌های بعدی اهمیت نسبت به استحکام تسلیم قرار دارند. با این وجود، در مورد تنش‌های پسماند محیطی، ضریب تأثیر برای عوامل خطی قطر خارجی، تعداد برش‌های جوشکاری، نرخ انرژي ورودی و ضخامت به ترتیب برابر 16/80 درصد، 6/96 درصد، 3/69 درصد و 3/49 درصد است.
- 7- در مورد تنش‌های پسماند محوری، اثر استحکام تسلیم بر روی متغیر پاسخ تقریباً 3/4 برابر قطر خارجی، 4/8 برابر ضخامت و 8 برابر نرخ انرژي ورودی است. درحالی‌که در تنش‌های پسماند محیطی، اثر استحکام تسلیم حدوداً 3/7 برابر قطر خارجی، 9 برابر تعداد برش‌ها، 12 برابر تداخل اثر قطر خارجی-نرخ انرژي ورودی، 16/7 برابر نرخ انرژي ورودی و 17/7 ضخامت می‌باشد.
- 8- با توجه به نتایج تحلیل واریانس، اثر قطر خارجی بر روی تنش‌های پسماند محیطی و محوری تقریباً یکسان است. با این وجود، اثر عوامل ضخامت و نرخ انرژي ورودی بر روی تنش پسماند محوری بترتیب در حدود سه برابر و دو برابر اثر آن‌ها بر روی تنش پسماند محیطی است.

9- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری "مرکز تحقیقات