



## طراحی بهینه هندسه و تحلیل المان محدود تنش در اتصال جوشی رینگ تقویتی داخلی به مخزن استوانه‌ای از جنس آلومینیوم پر استحکام

امیر راستی<sup>1\*</sup>، ایرج ستاری فر<sup>2</sup>، منوچهر صالحی<sup>3</sup> و وحید کریم نیا<sup>4</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>2</sup> استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

<sup>3</sup> دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

<sup>4</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

تاریخ دریافت: 1392/02/21؛ تاریخ بازنگری: 1392/11/21؛ تاریخ پذیرش: 1393/07/27

### چکیده

طراحی سازه‌های هوایی نیازمند وزن کمینه و در نتیجه طراحی بهینه است. مخازن جدار نازک استوانه‌ای یکی از پرکاربردترین این سازه‌ها می‌باشند که بهترین راه برای کاهش وزن این مخازن استفاده از رینگ‌های تقویتی است. در این پژوهش ابتدا بهینه‌سازی ابعاد رینگ تقویتی داخلی مخزن آلومینیومی تحت فشار، باهدف کمینه کردن وزن سازه به روش الگوریتم ژنتیک متصل به شبکه عصبی مورد مطالعه قرار گرفته است. در زمینه ایجاد اتصال بین تقویت‌کننده‌ها و مخزن، جوشکاری یکی از انعطاف‌پذیرترین روش‌ها است. اما این روش دارای اثراتی همچون تنش‌های پسماند و اعوجاج بوده که می‌توانند باعث نقص در سازه شوند. به همین منظور در قسمت دوم به‌منظور بررسی این اثرات از تحلیل المان محدود استفاده شده است. نتایج تحلیل نشان داد که رینگ تقویتی T شکل دارای بهترین جواب بوده که ابعاد بهینه آن تعیین و گزارش شده است. همچنین مشخص گردید که بزرگی تنش‌های پسماند در حد نصف تنش تسلیم فلز پایه بوده و در منطقه جوش، تنش پسماند محیطی کششی و تنش پسماند محوری در داخل مخزن کششی و در سطح خارجی فشاری می‌باشد. اثر خال‌جوش‌ها روی توزیع تنش به صورت قله‌های تنش نمایان شدند و اثر آن‌ها روی رینگ تقویتی و روی توزیع تنش محیطی بیشتر بود. **کلمات کلیدی:** مخزن استوانه‌ای جدارنازک؛ رینگ تقویتی T شکل؛ جوشکاری MAG؛ مدل گلداک؛ بهینه‌سازی بالگوریتم ژنتیک.

## 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

A. Rasti<sup>1\*</sup>, I. Sattari-Far<sup>2</sup>, M. Salehi<sup>3</sup> and V. Karimnia<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Ms.c., Mech. Eng., Amirkabir University, Tehran, Iran

### Abstract

Design of aerospace structures requires minimum weight and optimal design. Thin-wall pressure vessels are widely used in aerospace industries. The best method for the weight reduction of these structures is using stiffener rings. In present work, optimization of the internal stiffener ring dimensions used in the pressure vessel made of High Strength aluminium alloy has been studied by genetic algorithm and neural network, initially. The goal of the optimization is to minimize the structure weight. Welding is one of the most flexible methods for joining the stiffener and the vessel. However, This method produces the defects such as the residual stress and distortion and causes imperfection in the structure. the effects of these defects are studied by the finite element method. The analysis results show that T-shape stiffener ring is the optimal. The dimensions of this ring is determined and presented. Also, it indicates that the magnitude of the residual stress is half of the yield strength of base material. In the weld zone, hoop residual stresses are tensile while the tensile and compressive axial residual stresses occur on the inner and outer surface, respectively. The effect of tack welds appears on the stress distribution as stress peaks and are more severe on stiffener ring.

**Keywords:** Thin wall pressure vessel; T shape stiffener ring; MAG welding, Goldak Model; Genetic algorithm.

## 1- مقدمه

یکی از اصلی‌ترین اهداف در طراحی سازه‌های دریایی و هوافضا، کمینه کردن وزن سازه و درعین‌حال حفظ استحکام در برابر بارهای وارده می‌باشد. در مخازن تحت فشار استوانه‌ای، اولین گزینه بهره‌گیری از جنس سبک‌تر است. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا گزینه‌ی مناسبی برای این منظور می‌باشند. روش دیگر کاهش ضخامت و کاهش وزن، استفاده از مقاطع تقویتی است. در صنایع هوافضا به علت محدودیت‌های هندسی، بیشتر از رینگ‌های تقویتی داخلی استفاده می‌شود [1]. اولین قدم در به‌کارگیری این رینگ‌ها، طراحی بهینه آن‌ها بوده و قدم بعدی، ایجاد اتصال بین این تقویت‌ها و مخزن می‌باشد. در این بین جوشکاری با دارا بودن مزایایی همچون افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی، یکپارچگی سازه و صرفه‌جویی در زمان و هزینه، بهترین انتخاب است. اما از سوی دیگر این فرآیند باعث ایجاد کرنش‌های حرارتی در سازه شده و این کرنش‌ها موجب بوجود آمدن تنش می‌شوند. این مشکلات در مورد آلومینیوم به علت وجود خواصی مانند هدایت حرارتی و ضریب انبساط حرارتی بالا، حلالیت هیدروژن و اکسید آلومینیوم چند برابر است [2]. یک روش کم‌هزینه برای بررسی اثرات جوش، مدل‌سازی عددی می‌باشد. بسیاری از محققان در زمینه بهینه‌سازی طراحی پوسته‌های تقویت‌شده فعالیت کرده‌اند.

مورو<sup>1</sup> و همکاران [3]، یک طراحی سیستماتیک برای استوانه‌های تقویت‌شده با هندسه‌های مختلف و با تقویت مستطیلی در معرض بار ترکیبی محوری و شعاعی انجام دادند. پاپادراکاکیس<sup>2</sup> و همکاران [4] نشان دادند که الگوریتم‌های جستجوی احتمالی از نظر محاسباتی کارآمد هستند. صادقی‌فر و همکاران [5] باهدف بهینه‌سازی پوسته‌ی مدور استوانه‌ای تقویت‌شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روشی را برای یافتن وزن کمینه، حداکثر بار بحرانی کماتش و بررسی همزمان تقویت‌هایی با اشکال مختلف ارائه کردند. دامودار<sup>3</sup> و همکاران [6] طراحی بهینه‌ی پوسته‌های

کامپوزیتی با تقویت شبکه‌ای و انحنای متغیر را تحت بار محوری مورد مطالعه قرار دادند. تقویت‌کننده‌ها دارای مقطع مستطیل شکل بوده و متغیرهای طراحی شامل ارتفاع و ضخامت تقویت‌کننده‌ها و چیدمان آن‌ها (فاصله محوری و عرضی تقویت‌کننده‌ها) بودند. باقری و همکاران [7] بهینه‌سازی چند هدفه پوسته استوانه‌ای همگن، با تقویت‌های متعامد را توسط الگوریتم ژنتیک (GA) انجام دادند. بارهای کماتش محوری و شعاعی هدف بررسی بودند. آن‌ها از توابع ریتر و تقویت‌کننده‌های مستطیل شکل استفاده کردند.

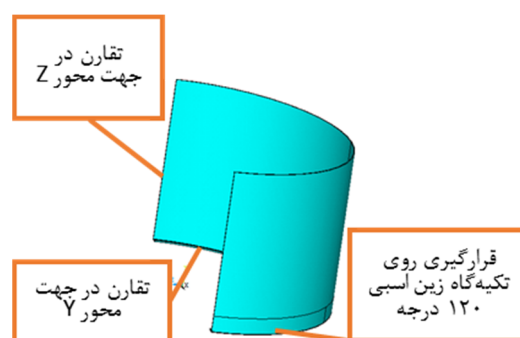
در زمینه مدل‌سازی فرآیند جوشکاری نیز تحقیقات زیادی انجام‌گرفته است. ستاری‌فر و همکاران [8] روش المان محدود را برای تحلیل رفتار ترمومکانیکی و تنش‌های پسماند در جوش لوله‌های فولادی مورد مطالعه قرار داده‌اند. تنگ<sup>4</sup> و همکاران [9] جوش سربه‌سر محیطی را در یک لوله فولادی از جنس SAE مورد بررسی کردند. مدل المان محدود سه بعدی متقارن و المان‌هایی از نوع پوسته‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. بریکستاد<sup>5</sup> و همکاران [10] مجموعه‌ای از جوش‌های سربه‌سر را که با تعداد پاس‌های مختلف از 4 تا 36 پاس ایجادشده، در لوله فولاد زنگ نزن مدل‌سازی کردند.

هدف از این پژوهش، تدوین فرآیند اتصال رینگ تقویتی داخلی به یک مخزن جدار نازک، از مرحله‌ی طراحی بهینه تا برقراری اتصال بین رینگ و مخزن توسط جوش محیطی می‌باشد. به همین منظور ابتدا با استفاده از مدل المان محدود و الگوریتم‌های احتمالی، روشی به‌منظور طراحی بهینه‌ی رینگ تقویتی ارائه گردیده است. در مرحله‌ی دوم به علت محدود بودن پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی جوش آلیاژهای آلومینیوم، هندسه‌ی خاص اتصال مورد بررسی و نیز باهدف بررسی اثرات جوشکاری بر سازه، توسعه یک مدل تحلیلی پارامتریک برای بررسی دقیق اثرات جوش بر سازه در نرم‌افزار ANSYS مورد توجه قرار گرفت. تحلیل با پیش‌فرض اتصال رینگ به وسیله‌ی جوش گوشه محیطی به مخزن استوانه‌ای آلومینیومی سری 5000 انجام گرفت. علت استفاده از جوش گوشه، اجرای آسان‌تر آن در عمل می‌باشد.

<sup>1</sup> Morrow<sup>2</sup> Papadarakakis<sup>3</sup> Damodar<sup>4</sup> Teng<sup>5</sup> Brickstad

## 2- نقش رینگ تقویتی

به منظور بررسی تأثیر رینگ تقویتی در کاهش وزن مخزنی با ضخامت 3 mm و تحت فشار هیدرواستاتیک، یک مدل مخزن استوانه‌ای از جنس آلومینیوم سری 5000 با تنش تسلیم 280 MPa و ضریب پواسون 0/33 و بدون رینگ تقویتی تحت فشار هیدرواستاتیک قرار داده شد و ضخامت مورد نیاز مخزن برای تحمل بار مذکور تعیین گردید. قطر و طول کلی مخزن 1 m در نظر گرفته شدند، اما به علت تقارن در جهت محوری و محیطی (نسبت به صفحه‌ای در زاویه 180° مخزن)، مدل المان محدود به صورت یک-چهارم در نظر گرفته شد. مخزن بر روی یک تکیه‌گاه زین‌ی با عرض 100 mm و زاویه 120° در وسط آن مقید گردید و تمام درجات آزادی آن گرفته شده است. شکل 1 شرایط مرزی اعمال شده بر روی مدل المان محدود را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

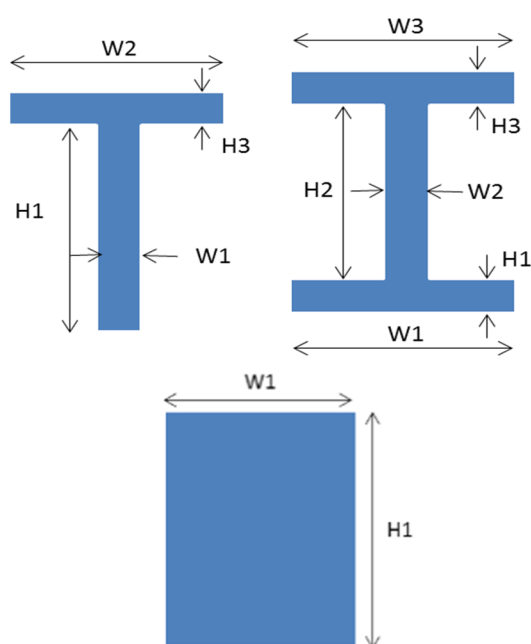


شکل 1- مدل یک چهارم استفاده شده در بهینه‌سازی و شرایط مرزی

دو نوع بار در محاسبات بر مخزن اعمال گردید؛ فشار داخلی مخزن به صورت هیدرواستاتیک به بزرگی 30000 Pa و وزن سازه. نتایج تحلیل المان محدود نشان داد که قطعه در محل تکیه‌گاه زین‌اسبی دارای تنش ون‌میسزی به بزرگی تنش تسلیم مخزن بوده و مخزن استوانه‌ای بدون رینگ تقویتی باید دارای ضخامت حداقلی 5 mm باشد. این نتیجه به معنی افزایش 60٪ وزن سازه در مقایسه با مخزنی به ضخامت 3 mm و دارای رینگ تقویتی است. این مقایسه تأثیر رینگ تقویتی در کاهش وزن مخازن جدار نازک را نشان می‌دهد.

## 3- متغیرهای طراحی

به منظور بهینه‌سازی هندسه‌ی رینگ تقویتی، مقاطع مرسوم و مورد استفاده شامل مقاطع مستطیلی، I و T مشابه شکل 2 مورد بررسی قرار گرفتند. پارامترهای طراحی مطابق نمادهای مشخص شده در شکل مقطع I و طوری فرض گردید که بتوان همزمان مقاطع مستطیلی و T شکل را نیز بررسی کرد. پارامترها به منظور عملکرد بهتر الگوریتم، با تقسیم آن‌ها بر ضخامت مخزن بی‌بعد شدند.



شکل 2- پروفیل‌های رینگ تقویتی در نظر گرفته شده

جدول 1 پارامترهای طراحی و بازه‌ی مورد بررسی آن‌ها را با توجه به شکل 2 نشان می‌دهد. مدل‌سازی نیز برای مخزنی با ضخامت مخزن 3 mm مانند مرحله قبل انجام و یک رینگ تقویتی داخلی در وسط مخزن قرار داده شد. معیار عملکرد ون‌میسز برای ارزیابی مقادیر تنش معادل در مقایسه با تنش تسلیم آلومینیوم با اعمال ضریب اطمینان 1/5 استفاده گردید. به منظور مدل‌سازی و کاهش هزینه محاسباتی، از روش طراحی آزمایش تاگوچی<sup>1</sup> [11] بهره گرفته شد. 3 سطح برای هر 6 پارامتر هندسی لحاظ گردیده

<sup>1</sup> Taguchi

از ورود، به اعداد بین صفر و یک نرمال شده و توسط شبکه عصبی مدل‌سازی گردیدند. در این پژوهش از شبکه عصبی پس‌انتشارخطا استفاده گردید.

ورودی‌های این شبکه شامل پارامترهای ابعادی رینگ، و خروجی آن تنش ون‌میسز سازه بود. پس از سعی و خطا، ساختار دو لایه‌ای با 10 نرون در هر لایه دارای کمترین خطا بوده و به‌عنوان ساختار شبکه عصبی فرض شد. مقدار خطای مجاز برای آموزش در این شبکه  $10^{-5}$  در نظر گرفته شد. 80% داده‌ها برای آموزش شبکه و بقیه داده‌ها به‌منظور بررسی عملکرد آن استفاده گردید. در نهایت شبکه بدست آمده توانست به‌خوبی تنش سازه را بر اساس پارامترهای ابعادی رینگ تخمین بزند.

#### 5- بهینه‌سازی تک‌هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک

به‌منظور کمینه کردن سطح مقطع رینگ تقویتی، از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. مساحت رینگ به‌عنوان تابع هدف فرض شد. در بهینه‌سازی ابعاد رینگ، تنش ون‌میسز در مخزن با سطح مقطع بهینه پیشنهادی توسط الگوریتم، نیابستی از تنش تسلیم ماده (با لحاظ کردن ضریب ایمنی 1/5) بیشتر شود. این شرط در تابع محدودیت الگوریتم و با بهره‌گیری از مدل شبکه‌ی عصبی اعمال گردید. الگوریتم در هر مرحله، ابعاد بهینه حاصل را در مدل شبکه‌عصبی قرار داده و تنش آن را با تنش تسلیم ماده مقایسه می‌کند. در صورت قابل‌قبول بودن تنش مقطع بهینه، جواب قابل‌قبول و در غیر این صورت جواب رد می‌شود. جدول 2 مقادیر بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

#### جدول 2- پارامترهای بهینه بدست آمده از الگوریتم ژنتیک

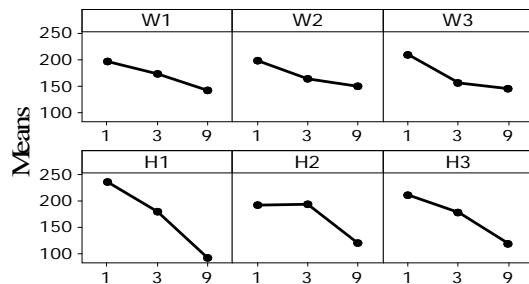
پارامتر	مقدار
تنش ون‌میسز	275 MPa
W1	3 mm
W2	3 mm
W3	9 mm
H1	10 mm
H2	5 mm
H3	6 mm
سطح مقطع رینگ	99 mm <sup>2</sup>

و از آرایه L27 بهره گرفته شد. شکل 3 تأثیر عوامل را بر روی تنش بیشینه مخزن نشان می‌دهد.

همان‌طور که از نمودار مشخص است، مجموع ارتفاع رینگ تقویتی (H1+H2+H3) و بعد از آن، عرض بالاترین قسمت رینگ دارای بیشترین تأثیر می‌باشند.

#### جدول 1- پارامترهای در نظر گرفته شده در بهینه‌سازی

پارامتر	حد پایین		حد بالا	
	حقیقی (mm)	بی‌بعد	حقیقی (mm)	بی‌بعد
W1	3	1	60	20
W2	3	1	60	20
W3	3	1	60	20
H1	3	1	60	20
H2	3	1	60	20
H3	3	1	60	20



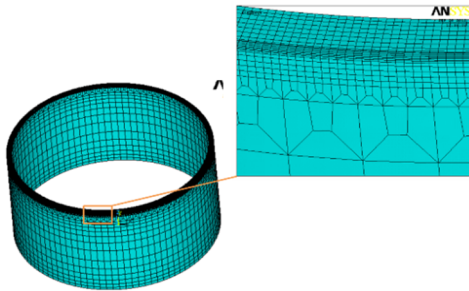
شکل 3- نمودار تأثیر پارامترهای طراحی

عرض قسمت پایینی مقطع نیز دارای کمترین نقش بود. پس زمانی که هدف بدست آوردن نسبت استحکام به وزن بیشینه باشد، می‌توان ارتفاع رینگ تا جای ممکن افزایش داد. اما به علت محدودیت‌های هندسی در بهینه‌سازی، قیود ابعادی مانند بیشینه ارتفاع مجاز رینگ وجود دارد. در نتیجه می‌توان در اولویت بعدی عرض قسمت بالایی را افزایش داد. با این توضیح، نتایج حاکی از بهینه بودن رینگی با سطح مقطع T شکل می‌کند.

#### 4- مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌ی عصبی

شبکه‌های عصبی به خاطر ماهیت خود، شکل تابعی با انعطاف‌پذیری بالا را دارند و بهتر می‌توانند بر توابع پیچیده منطبق شوند [12]. داده‌های ورودی شبکه عصبی، نتایج آزمایش‌های تاگوجی [11] در نظر گرفته شد. این داده‌ها قبل

به علت شیب حرارتی بالاتر، در محل جوش از شبکه‌بندی ریزتری استفاده گردید، اما به علت بزرگ بودن ابعاد مدل، از 3 ردیف المان گذرای دوزنقه‌ای؛ یک ردیف در ضخامت مخزن و دو ردیف در راستای محیطی بهره گرفته شد. شکل 6 نحوه المان‌بندی قطعه را نشان می‌دهد. در مجموع 70000 المان سالیید<sup>1</sup> 8 گره‌ای در قطعه ایجاد شد.



شکل 6- نحوه‌ی شبکه‌بندی مدل المان‌محدود

### 7- تحلیل حرارتی

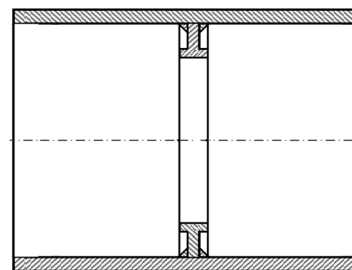
به علت اثر توزیع حرارت بر میکروساختار، کرنش، تنش و در نهایت در شکل‌گیری نقص در جوش [14]، در این پژوهش از مدل منبع حرارتی دو بیضی گلدک به صورت حجمی استفاده شد [15، 16]. مزیت این روش، امکان بهره‌گیری از المان‌های سطحی برای انتقال حرارت جابجایی می‌باشد [17]. مدل گلدک در شکل 7 نشان داده شده است.

به‌منظور شبیه‌سازی حرکت مشعل جوشکاری، یک زیر برنامه در محیط APDL<sup>2</sup> نرم‌افزار ANSYS نوشته شد تا در هر لحظه یک مبدأ مختصات در مرکز قوس در حال حرکت تعریف شود. بر روی این مختصات متحرک، 4 دستگاه مختصات دیگر برای تعریف 2 نیم بیضی جلویی و عقبی بر روی سطح و 2 ربع بیضی در راستای ضخامت تعریف گردید. المان‌هایی که در این 4 بیضی قرار گرفتند، انتخاب‌شده و بر حسب فاصله از مبدأ، حرارت بر روی آن‌ها اعمال شد. پارامترهای جوشکاری MAG<sup>3</sup> در نظر گرفته شده در جدول 3 آمده است. بازده جوشکاری نیز مشابه کارهای قبلی برابر با 50٪ در نظر گرفته شد [13].

### 6- مدل‌سازی المان‌محدود

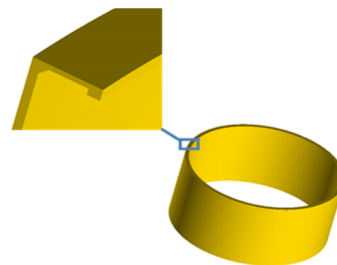
مدل‌سازی جوش به صورت غیرمستقیم در نرم‌افزار ANSYS صورت گرفت. به این منظور ابتدا تحلیل حرارتی انجام شد و میدان دمایی حاصل به‌عنوان ورودی تحلیل مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. پس از حل معادلات المان‌محدود حاصل، مقادیر تنش و جابجایی برای نقاط مختلف مدل بدست آمد. در جوشکاری، تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی در هر مرحله از تحلیل به گره‌ها اضافه گردید تا رفتار مدل قبل از مرحله دمایی کامل شود. برای اضافه نمودن فلز پرکننده از روش تولد و مرگ المان استفاده گردید [13].

در مدل‌سازی قطعه فرض شد که رینگ داخلی T شکل در مرکز محوری مخزن قرار دارد. شکل 4 سطح مقطع مخزن دارای رینگ داخلی در وسط آن را نشان می‌دهد. به علت تقارن موجود و باهدف کاهش زمان تحلیل المان‌محدود مطابق شکل 5، مخزن و رینگ به صورت نیمه مدل گردیدند. در واقع شبیه‌سازی با فرض جوشکاری همزمان دو طرف رینگ به مخزن انجام گرفت. طول گلوبی جوش گوشه نیز 3 mm فرض شد.



شکل 4- سطح مقطع کامل مخزن به‌همراه رینگ تقویتی

داخلی T شکل در مرکز



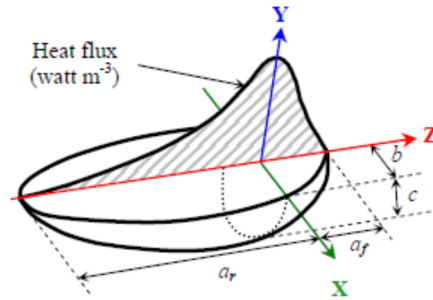
شکل 5- شماتیک نصف مخزن همراه با رینگ تقویتی

<sup>1</sup> Solid

<sup>2</sup> ANSYS Parametric Design Language

<sup>3</sup> Metal Active Gas

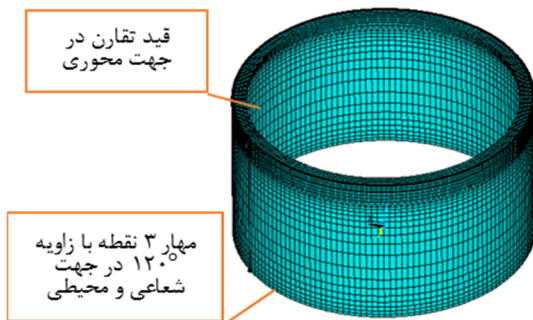
شکل 8 شرایط مرزی در تحلیل مکانیکی را نشان می‌دهد. ضریب پواسون 0/33 و ماده به صورت الاستیک-پلاستیک کامل فرض گردید. شکل 10 خواص حرارتی و مکانیکی اندازه‌گیری شده برای آلیاژ آلومینیوم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این داده‌ها به‌عنوان ورودی در مدل المان محدود وارد شدند.



شکل 7- مدل توزیع حرارتی گلدک دو بیضی [15]

جدول 3- پارامترهای جوشکاری

مقدار	کمیت
12 v	ولتاژ
130 A	شدت جریان
4 mm/s	سرعت جوشکاری
50%	بازده فرآیند



شکل 8- نمای ایزومتریک مخزن همراه با شرایط مرزی

### 9- اعتبارسنجی مدل المان محدود

جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود، از مدل ارائه شده توسط مالک<sup>1</sup> و همکاران [18] استفاده گردید. آن‌ها یک روش محاسباتی را برای تحلیل توزیع دما و تنش‌های پسماند حاصل از جوش استوانه‌های جدار نازک از جنس فولاد کم کربن ارائه نموده‌اند. مطالعات براساس شبیه‌سازی عددی بر روی یک مدل سه بعدی در نرم‌افزار ANSYS انجام‌گرفته و اثر پارامترهای بحرانی فرآیند جوشکاری بر روی تنش‌های پسماند جوشی بررسی شد. شکل 9 مدل المان محدود مورد استفاده برای اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. المان‌های به‌کاررفته در تحلیل حرارتی از نوع سالیید 70 و در تحلیل مکانیکی، سالیید 185 بودند. به‌دلیل شار حرارتی و درجه حرارت بالا در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت، از شبکه‌های نسبتاً کوچک‌تری در این مناطق استفاده شد. این شبکه‌ها توسط المان گذرای مثلثی به شبکه‌های بزرگ‌تر تبدیل شدند. دو خال جوش نیز در نقاط شروع و 180° مدل گردید. خواص موادی مطابق مرجع [18] در نظر گرفته شد.

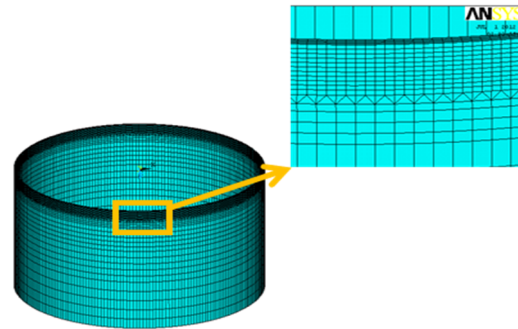
در تحلیل حرارتی از اتلاف حرارت تشعشع چشم‌پوشی گردید، و ضریب جابجایی 8 W/m<sup>2</sup>K، چگالی 2640 kg/m<sup>3</sup>، گرمای نهان ذوب 300000 J/kg و دمای ذوب و انجماد به ترتیب 570°C و 620°C در نظر گرفته شدند. از روش آنتالپی معادل برای اعمال گرمای نهان ذوب در نرم‌افزار ANSYS استفاده گردید. پارامترهای هندسی مدل گلدک نیز طوری انتخاب شدند که المان‌های جوش به‌همراه کمی از فلز پایه ذوب شوند. به همین منظور طول بیضی جلویی برابر نصف عرض جوش، طول بیضی عقبی برابر دو برابر عرض جوش، و b و c با توجه به ابعاد جوش انتخاب شدند.

### 8- تحلیل مکانیکی

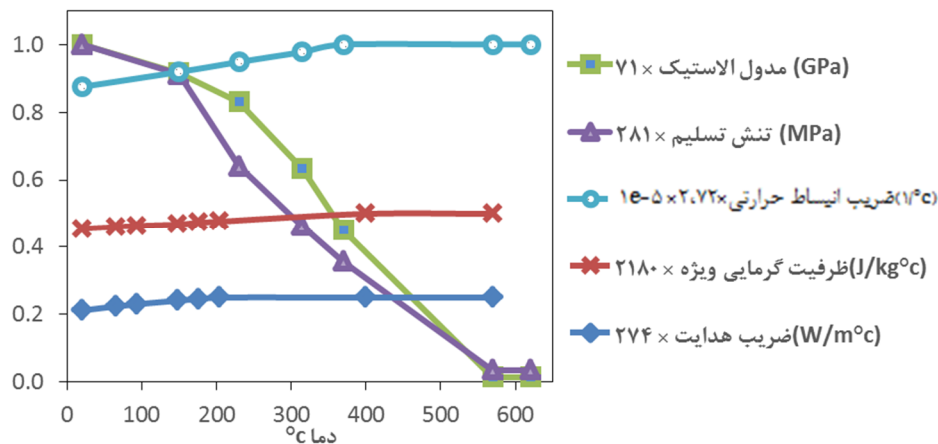
در تحلیل مکانیکی، تاریخچه دمایی بدست آمده از تحلیل حرارتی به صورت نیروی حجمی به گره‌های مدل المان محدود وارد گردید. از المان متناظر سالیید 185 با سه درجه آزادی استفاده شد. در روش تولد و مرگ المان‌ها، با بهره‌گیری از زیربرنامه نوشته‌شده در محیط APDL، ابتدا تمام المان‌های جوش، به جز 8 خال جوش اولیه غیرفعال شدند. سپس در هر مرحله و بعد از محاسبه دمای تمامی المان‌ها، آن دسته از المان‌هایی که به زیر دمای ذوب رسیدند، فعال شدند.

<sup>1</sup>Malek

در تحلیل حرارتی، اختلاف میانگین 2/68٪ و بیشینه اختلاف 6٪ بدست آمد، که نشان از تطابق خوب میان نتایج مدل المان محدود و مدل ارائه شده توسط مالک [18] دارد. شکل 11 مقایسه توزیع دما در زاویه‌ی 45° از شروع جوش و در دو زمان 39/27 s و 117/81 s را نشان می‌دهد. در تحلیل مکانیکی، یک طرف استوانه در تمام جهات و انتهای دیگر، در جهت محوری مقید شد. در ادامه توزیع تنش محوری و محیطی بر روی یک مسیر محیطی بر روی خط جوش و در داخل و خارج مخزن، بین مدل المان محدود و مقاله [18] مقایسه گردیده است.



شکل 9- نحوه شبکه‌بندی و مدل المان محدود استوانه جهت اعتبارسنجی



شکل 10- خواص حرارتی و مکانیکی مدل المان محدود

### 10- نتایج

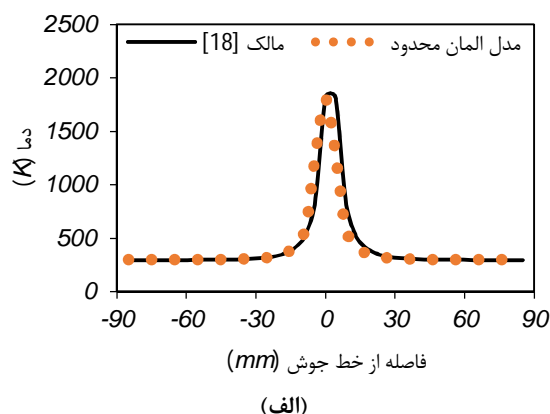
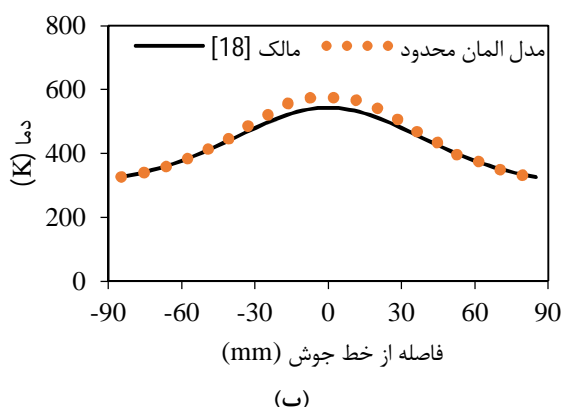
کل زمان حرارت‌دهی با سرعت جوشکاری 4 mm/s در حدود 785 s طول کشید، که به 900 مرحله تقسیم و بعد از اتمام، 5 مرحله اضافی برای خنک‌کاری قطعه به مدت 4000 منظور شد. در ادامه نتایج بدست آمده از مدل المان محدود به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

#### 10-1- توزیع حرارت در جوش

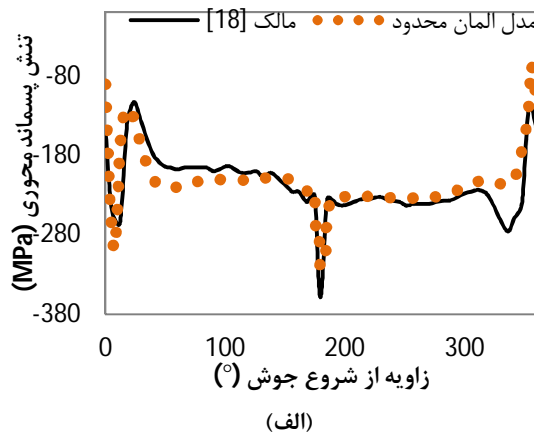
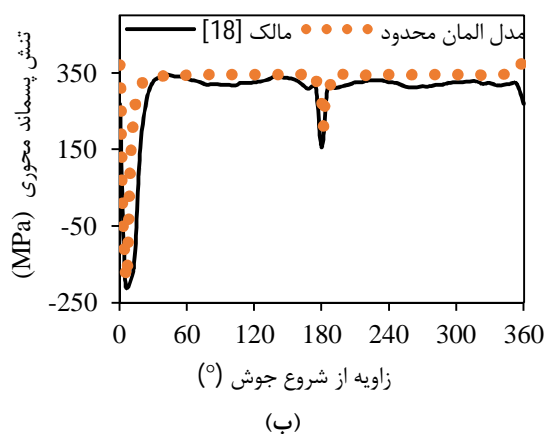
همان‌طور که گفته شد از توزیع حرارت گلداک متحرک به‌عنوان منبع حرارتی استفاده گردید. توزیع حرارت ناشی از این منبع حرارتی، بر روی المان‌های خط جوش در شکل 13 (الف) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تمام

مطابق شکل 12، نتایج حاکی از اختلاف میانگین 5٪، بیشینه 20٪ و انحراف استاندارد 15٪ بوده که نشان‌دهنده وجود اختلاف تنها در بعضی نقاط بوده و در کل تطابق خوبی مشاهده می‌شود.

با توجه به موضعی بودن این اختلاف نتایج، منشأ را می‌توان در تفاوت جزئی نحوه شبکه‌بندی و اندازه شبکه‌های مدل اعتبارسنجی و مقاله در این نواحی دانست. همچنین با توجه به اثر بالای خواص موادی بر روی نتایج، به‌ویژه تغییرات تنش تسلیم با دما و نیز تقریبی بودن مقادیر خواص موادی وارد شده در مدل المان محدود، اختلاف موجود میان نتایج قابل توجیه است.



شکل 11- مقایسه‌ی توزیع دمای مدل با مدل مالک [18] در زاویه  $45^\circ$  از ابتدای جوش و در زمان الف) s 39/27 ب) s 117/81



شکل 12- مقایسه‌ی توزیع تنش محوری بدست آمده توسط مدل المان محدود و توزیع تنش در مدل مالک [18] بر مسیر محیطی روی جوش الف) روی سطح خارجی ب) روی سطح داخلی

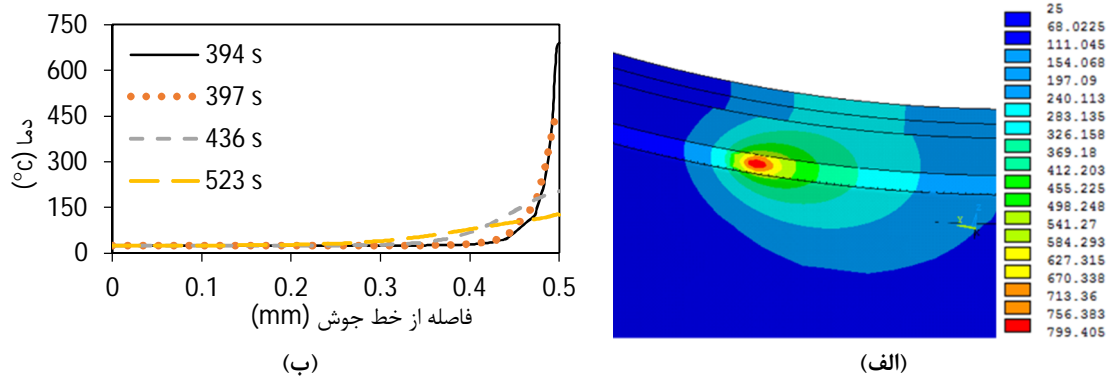
مطابق نتایج، تغییر شکل محیطی ناچیز بوده و تغییر شکل اصلی همان انقباض شعاعی می‌باشد. این تغییر شکل در محل رینگ تا 15٪ کاهش یافته و بیشترین مقدار خود را در فاصله 10 mm از رینگ تقویتی بدست می‌آورد. علامت این تغییر شکل، بیانگر جمع‌شدگی و کاهش شعاع در محل جوش و روی جداره مخزن می‌باشد. انبساط محوری نیز در محل خط جوش و رینگ تقویتی کمتر بوده و بزرگی ثابتی دارد. با دور شدن از محل رینگ تقویتی، افزایش ناگهانی در فاصله معینی (همانند تغییر شکل شعاعی) رخ داده و بزرگی آن در ادامه تا انتهای مخزن ثابت می‌ماند. مقدار این تغییر شکل در انتهای مخزن وابسته به درجه مهار مخزن است.

المان‌های جوش به همراه تعدادی از المان‌های اطراف آن به دمای ذوب رسیده و اتصال به خوبی برقرار می‌شود. شکل 13 ب) نیز توزیع درجه حرارت را بر روی مسیر محوری در زاویه  $180^\circ$  نسبت به شروع جوش نشان می‌دهد. مطابق شکل، در زمان 394 s، منبع حرارت در زاویه  $180^\circ$  قرار داشته و در نتیجه، بیشینه دما بر روی مسیر اتفاق می‌افتد.

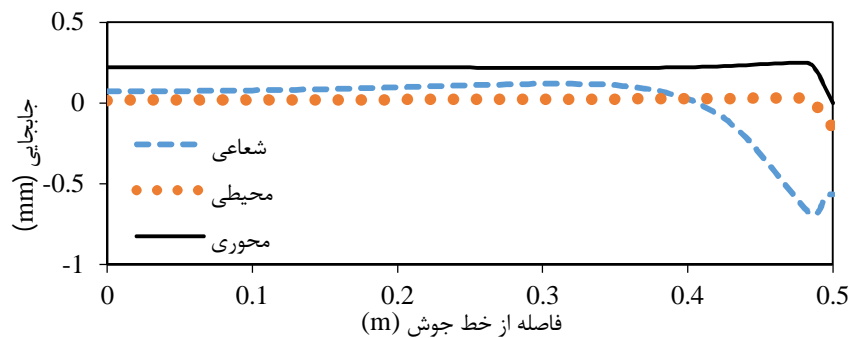
## 10-2- تغییر شکل‌های جوشی

در جوش‌های محیطی دو نوع تغییر شکل اصلی به وجود می‌آید؛ تغییر شکل شعاعی و محوری. الگوی اعوجاج بر روی مسیر محوری در شروع جوش، در شکل 14 آورده شده است.





شکل 13- الف) شکل منبع حرارتی 4 بیضی گلداک (ب) توزیع حرارت روی مسیر محوری در زاویه  $180^\circ$  در زمان‌های مختلف



شکل 14: توزیع اعوجاج جوشی بر روی مسیر محوری روی سطح خارجی مخزن در محل شروع جوش

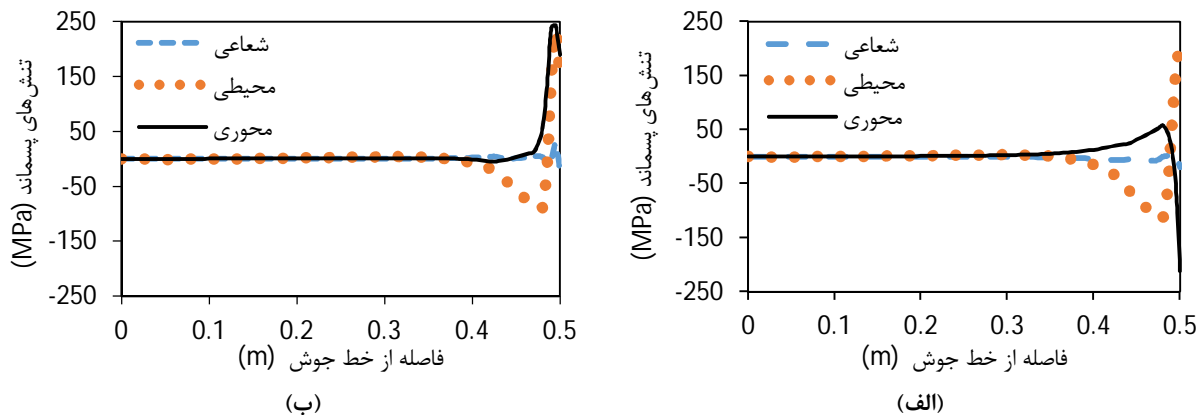
### 10-3- تنش‌های پسماند جوشی

تولید می‌شود. در نتیجه تغییرات خطی تنش محوری در راستای ضخامت، از کشش محوری در داخل به فشار محوری در خارج مخزن به وجود می‌آید. همچنین در سطح داخلی مخزن مطابق شکل 15 (ب) تنش‌های پسماند در محل رینگ تقویتی کاهش می‌یابند.

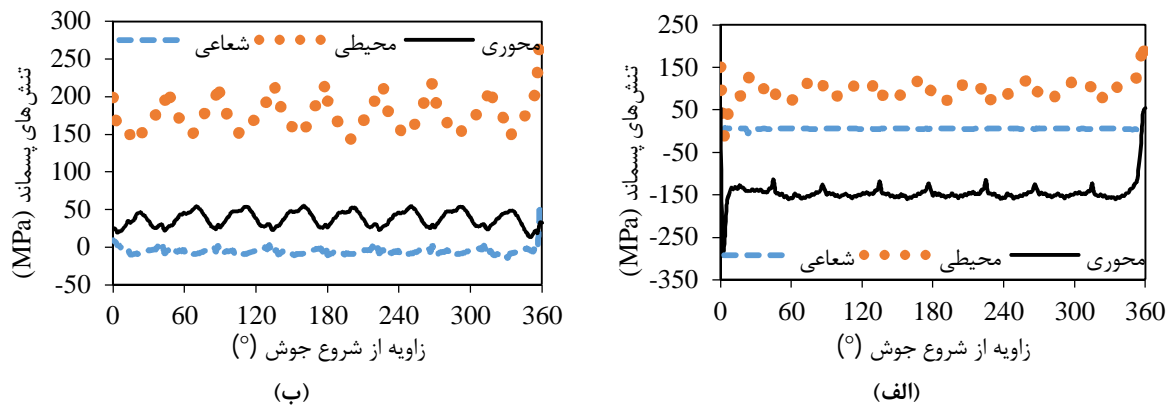
شکل 16 نیز توزیع تنش پسماند را بر روی یک مسیر محیطی مخزن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تنش محیطی در تمام ضخامت کششی بوده و مطابق بحث پیشین، تنش پسماند محوری در سطح داخلی مخزن، کششی و در سطح خارجی، فشاری است. همچنین اثر خال جوش‌ها به صورت قله‌های کوچک بر روی توزیع تنش پسماند ظاهر شده و بیشترین اثر را روی توزیع تنش پسماند محیطی و در محل رینگ تقویتی دارا می‌باشد.

توزیع تنش پسماند نیز در نقاط حساس جوش بر روی مسیرهای محوری و بر روی دو سطح خارجی و داخلی مخزن در شکل 15 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش پسماند شعاعی در طول مسیر محوری ناچیز بوده و تنش پسماند محیطی به ترتیب دارای مقادیر کششی و فشاری بالا در نزدیک خط جوش می‌باشد. روند مشابهی برای کاهش و معکوس شدن بزرگی تنش در توزیع تنش پسماند محوری نیز مشاهده می‌شود، با این تفاوت که این مؤلفه تنش پسماند در سطح داخلی، کششی و در سطح خارجی مخزن، فشاری است.

در واقع هنگام خنک‌کاری سازه و به علت انقباض منطقه جوش و اطراف آن، قطر کلی مخزن در این بخش‌ها کوچک‌تر شده و به علت این تغییر شکل، یک ممان خمشی



شکل 15: توزیع تنش پسماند روی مسیر محوری بر دیواره مخزن در شروع جوش روی الف) سطح خارجی ب) سطح داخلی



شکل 16: توزیع تنش پسماند بر روی مسیر محیطی در محل رینگ تقویتی روی الف) سطح خارجی، ب) سطح داخلی

## 11- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، ابتدا یک روش به‌منظور طراحی بهینه رینگ تقویتی داخلی مخزن تحت فشار آلومینیومی سری 5000 ارائه گردید. سپس نتایج ابعادی بدست‌آمده توسط مدل المان محدود بررسی شد و خطای روش مشخص گردید. در مرحله دوم یک روش محاسباتی بر اساس تحلیل المان محدود برای پیش‌بینی توزیع دمایی و توزیع اعوجاج و تنش پسماند ناشی از جوش محیطی رینگ تقویتی داخلی بهینه به مخزن آلومینیومی، توسعه داده شد و با مدل مشابه ارائه‌شده توسط مالک و همکاران [18] اعتبارسنجی گردید. بطور کلی نتایج زیر بدست آمد:

1- در تحلیل تاگوچی [11] نشان داده شد که ارتفاع رینگ تقویتی دارای بیشترین تأثیر و عرض ناحیه‌ی فوقانی آن، در درجه دوم تأثیرگذاری قرار دارند. همچنین به علت

وجود محدودیت ارتفاع در شرایط واقعی نتیجه گرفته‌شده که رینگ T شکل بهینه‌ترین مقطع است.  
 2- نتایج بهینه بدست‌آمده توسط الگوریتم ژنتیک نیز بیانگر بهینه بودن رینگ تقویتی T شکل و خطای 2٪ الگوریتم ژنتیک بود.  
 3- در جوش، به‌طور کلی دو نوع اعوجاج اصلی به وجود آمد؛ تغییر شکل محوری و تغییر شکل شعاعی. این تغییر شکل‌ها در محل رینگ تا 15٪ کاهش را تجربه کرده و با فاصله گرفتن از رینگ تقویتی افزایش یافتند.  
 4- تنش‌های پسماند در جوش محیطی از دو جهت حائز اهمیت بود؛ تنش پسماند محیطی که در تمام ضخامت قطعه کششی و بزرگی آن در حد نصف استحکام تسلیم فلز پایه بوده و تنش پسماند محوری که در منطقه جوش، در دیواره داخلی مخزن کششی و در دیواره

- [7] Bagheri M, Jafari AA (2007) Multi objective optimization of orthogonally stiffened cylindrical shells for buckling loads. Int Conf on Multidis Des Opt and App. Besancon, France.
- [8] Sattari-Far I, Farahani M (2009) Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt welded pipe. Int Jour Pres Ves and Pip 86: 723-731.
- [9] Teng T, Cheng L (1998) Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds. Int Jour of Pres Ves and Pip 75: 857-864.
- [10] Brickstad B, Josefson B (1998) A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes. Int Jour of Pres Ves and Pip.75: 11-25.
- [11] Taguchi G, Yokoyama Y (1993) Taguchi methods: design of experiments, Amer Supplier Inst.
- [12] منهایج م ب (1389) هوش محاسباتی. مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [13] عطارها م ج (1388) تحلیل المان محدود جوش ذوبی به منظور تعیین یک سیستم مانیتورینگ دما جهت کنترل کیفیت جوش در حین جوشکاری. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [14] Kamala V, Goldak J (1993) Error due to two dimensional approximations in heat transfer analysis of welds. Wel Jour 72(9):440-446.
- [15] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M (1984) A new finite element model for welding heat sources. Met Trans 15: 299-305.
- [16] Goldak J, Bibby M, Moore J (1986) Computer modeling of heat flow in welds. Met Trans 17(3): 587-600.
- [17] Lin M, Eager T (2005) Influence of arc pressure on weld pool geometry. Wel Jour 64(6): 163-169.
- [18] Malik AM, Qureshi EM, UllahDar N, Khan I (2008) Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields. Thi Wal Struct 46: 1391-1401.

خارجی آن فشاری بوده، ولی در مناطق دورتر از منبع حرارتی، این مؤلفه به سمت صفر میل کرده و به جز ابتدا و انتهای جوش در باقی طول جوش، روند ثابتی را دارا بود.

- 5- بزرگی تنش پسماند محوری در این مدل کمتر از تنش پسماند محیطی است. علت این تفاوت را می‌توان در مقید شدن انتهای مخزن تنها در جهات محیطی و شعاعی و آزاد بودن در جهت محوری دانست. همچنین روی جداره داخلی مخزن، تنش‌های پسماند در محل رینگ تقویتی با کاهش روبرو شدند.
- 6- خال جوش‌ها در توزیع تنش پسماند محیطی و بر روی رینگ تقویتی بیشترین تأثیر را داشتند. علت این امر را می‌توان مقید کردن رینگ تقویتی تنها به وسیله‌ی این خال جوش‌ها دانست، درحالی‌که مخزن در انتهای خود نیز مقید می‌باشد.

## مراجع

- [1] Dwight J (1999) Aluminum design and construction, Taylor & Francis Group.
- [2] Mathers G (2002) The welding of aluminum and its alloys. Woodhead Publishing Ltd.
- [3] Morrow WM, Schmit LA (1968) Structural synthesis of a stiffened cylinder. NASA CR.
- [4] Papadrakakis M, Tsompanakis Y, Lagaros ND (1999) Structural shape optimization using evolution strategies. Eng Opt Jour 31: 515-540.
- [5] Sadeghifar M, Bagheri M, Jafari A (2010) Multiobjective optimization of orthogonally stiffened cylindrical shells for minimum weight and maximum axial buckling load. Thi Wal Struct 48: 979-988.
- [6] Damodar RA, Navin J (2001) Optimal design of grid stiffened panels and shells with variable curvature. Compos Struct 53: 173-80.