



## مدل سازی ریاضی توزیع تنش های پسماند جوش محیطی لوله کم آلیاژ استحکام بالا خطوط انتقال گاز

مجید سبک روح<sup>1</sup>، محمدرضا فراهانی<sup>2\*</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی محلات، محلات

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* mrfarahani@ut.ac.ir, 1439957131، صندوق پستی

### چکیده

در این مقاله، توزیع تنش پسماند در دو راستای محیطی و محوری در مجاورت درز جوش محیطی لوله فولادی انتقال گاز بررسی گردید. ابتدا دو لوله فولادی با قطر خارجی 56 اینچ به صورت سر به سر جوش کاری شد. آزمون کرنش سنجی سوراخ برای اندازه گیری کرنش روی سطح خارجی لوله انجام گردید و مقادیر تنش پسماند با استفاده از نتایج کرنش براساس استاندارد ASTM 837 تعیین شد. سپس توزیع تنش پسماند با استفاده از توابع چند جمله ای و اسپلاین ارزیابی گردید. خوش رفتاری منحنی های چند جمله ای مراتب بالا و اسپلاین، صحت نتایج آزمون تجربی تنش پسماند را تایید می نماید. نتایج نشان می دهد چند جمله ای های درجه پایین تر رفتار مناسب تری در توزیع تنش های پسماند جوش کاری دارند. بنابر این عدم امکان استفاده از آزمون نیمه مخرب کرنش سنجی سوراخ در شرایط واقعی پروژه، می توان از این منحنی ها در بررسی و تخمین توزیع تنش های پسماند جوش کاری های مشابه استفاده کرد. پایدارترین منحنی تقریب چند جمله ای برای ارزیابی توزیع تنش پسماند محیطی و محوری به ترتیب برابر با مراتب 3 و 2 می باشد. نزدیکی و همواری منحنی توزیع تنش پسماند محوری نسبت به منحنی توزیع تنش پسماند محیطی نشان دهنده رفتار متعادل تر توزیع این تنش ها است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 بهمن 1396

پذیرش: 29 اسفند 1396

ارائه در سایت: 14 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

تنش پسماند

جوش محیطی لوله

آزمون کرنش سنجی سوراخ

فولاد کم آلیاژ استحکام بالا

توابع چند جمله ای و اسپلاین

## Mathematical modeling of residual stress distribution in girth welding of high strength low alloy steel gas pipelines

Majid Sabokrouh<sup>1</sup>, Mohammad Reza Farahani<sup>2\*</sup>

1- Faculty of Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran

2- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 29 January 2018  
Accepted 20 March 2018  
Available Online 04 May 2018

#### Keywords:

Residual stress  
Pipe girth welding  
Hole drilling strain gage test  
HSLA  
Spline and approximating polynomials

### ABSTRACT

In this paper, the numerical distribution of residual stresses in the girth weld was determined in two (hoop and axial) direction. Two API X70 steel pipes of 56 inch outside diameter were girth welded first. Hole drilling strain gage test were conducted for strain measurement on the external surface of the pipes. The values of residual stresses were determined then from strain data using ASTM 837 standard. The values of residual stresses were determined. Next, distribution of residual stresses was assessed using spline and approximating polynomials. The well-behaved spline and polynomials, confirm the accuracy of residual stress results from experiment. The result showed lower-order polynomials have more suitable behavior in residual stress distribution. Noting to impossibility of using semi-destructive hole drilling strain gage test in project's real situations, we can make use of these curves in assessing and estimating residual stresses distribution of similar welding. The most stable polynomial estimation curves for evaluating hoop and axial residual stress distribution are respectively third and second order. The closeness and uniformity of axial residual stress distribution curve compared to the hoop residual stress distribution curve is representative of more balanced behavior of these stresses distribution.

محصول تمام شده باعث افزایش توجه و استفاده روزافزون از فولادهای میکروآلیاژ شده است [3]. مکانیزم رسوب سختی از روش های اصلی استحکام بخشی در فولادهای میکروآلیاژها می باشد [4]. طولانی ترین شبکه خطوط لوله نفت و گاز در منطقه خاورمیانه را ایران دارد. در حال حاضر بیش از 80 درصد اتصالات در مونتاژ، به وسیله جوش انجام می شود. جوش کاری سر به سر حدود 25 درصد زمان لازم (بیشترین زمان کل ایجاد یک خط جدید لوله

### 1- مقدمه

ایران با دارا بودن 17 درصد از کل ذخایر گاز طبیعی جهان و 47 درصد از ذخایر منطقه خاور میانه از نظر ذخایر گاز طبیعی اولین کشور جهان محسوب می گردد [1]. مهم ترین و آسان ترین راه صدور گاز طبیعی، انتقال از طریق خط لوله می باشد. در این راستا بخش انتقال گاز با توسعه قابل توجه و روزافزون مواجه گردید [2]. افزایش رقابت در زمینه های کیفیت و قیمت

راستای محوری یک اتصال محیطی (سر به سر) بین دو لوله فولادی را نشان می دهد [9].

توزیع تنش پسماند با استفاده از استانداردهای مختلف بسیار متفاوت است. بنابراین نیاز به مطالعه بیشتر احساس می شود. در این مقاله با توجه به اهمیت تنش های پسماند سطحی در لوله های جدار نازک از آزمون کرنش سنجی سوراخ به عنوان مرسوم ترین روش اندازه گیری تنش پسماند استفاده شده است. این روش شامل نصب کرنش سنج، ایجاد یک سوراخ در نزدیکی کرنش سنج ها و اندازه گیری کرنش آزاد شده است. علی رغم ویژگی های منحصر به فرد آزمون روش کرنش سنجی سوراخ، این روش دارای محدودیت هایی نیز می باشد. بر اساس استاندارد<sup>2</sup>، فواصل بین کرنش سنج ها باید از دو سانتی متر بیشتر باشد. بنابر این نصب نزدیک به هم کرنش سنج ها از دقت نتایج ارزیابی شده می کاهد. علاوه بر این با توجه به ابعاد کرنش سنج ها، نزدیکی این نقاط به هم دارای محدودیت می باشد. همچنین این آزمون بسیار هزینه بر (خرید و نصب کرنش سنج ها) است. از سوی دیگر با استفاده از این آزمون تنها می توان تنش پسماند در نقاط مختلف را ارزیابی نمود و ترسیم منحنی توزیع تنش پسماند امکان پذیر نمی باشد.

وجود یک منحنی مناسب توزیع تنش پسماند در تشخیص نقاط بحرانی (حداکثر و حداقل) تنش پسماند و نقطه ای که تنش پسماند صفر می شود (نقطه ای که تنش پسماند تغییر حالت داده و از حالت کششی به فشاری تبدیل می شود و بالعکس)، اهمیت دارد. شناسایی محل حداکثر تنش پسماند در تعیین ناحیه بحرانی (کاهش تنش طراحی) سازه اهمیت دارد. همچنین تشخیص محل نقطه فاقد تنش پسماند در تعیین منطقه ای که رفتار مکانیکی تغییر جهت می دهد، قابل توجه است. با توجه به وجود فازها و ساختارهای متفاوت (خواص مکانیکی متفاوت) در مناطق مختلف درز جوش و متاثر از حرارت (به ویژه در فولادهای میکرو آلیاژی)، اهمیت به دست آوردن توزیع تنش پسماند و تشخیص نقاط مذکور ارزش مضاعفی پیدا می نماید. از سوی دیگر مطابق با استاندارد مربوطه، آزمایش کرنش سنجی سوراخ فاقد قابلیت کالیبراسیون مشخص است. کالیبراسیون در این روش به صورت نسبی است و با استفاده از همگرا شدن به یک مقدار ثابت کرنش در حین فرآیند سوراخ کاری و تناسب این مقدار با مقادیر سایر نقاط آزمون کرنش سنجی سوراخ مشخص می گردد. با توجه به رفتار ذاتی خود متعادل شونده توزیع تنش های پسماند، تشکیل منحنی خوش رفتار می تواند صحت و دقت نتایج تجربی به دست آمده را تایید نماید. منحنی های خوش رفتار، منحنی های هستند که در اکثر نقاط پیوسته و مشتق پذیر بوده و دارای نقاط تیز نباشند. بنابراین چنانچه منحنی گذرنده از تمام نقاط آزمون تجربی خوش رفتار باشد، در تایید کیفی و کمی نتایج آزمون تجربی بسیار تاثیرگذار خواهد بود. از سوی دیگر چنانچه در قسمتی از منحنی نقاط تیز وجود داشته باشد، می توان نقطه مورد نظر را از لیست نتایج آزمون حذف کرد. ساده ترین روش ارزیابی توزیع تنش پسماند، تقریب با یک خط مستقیم است، اما با توجه به رفتار پیچیده توزیع تنش پسماند، درون یابی خطی دارای محدوده خطای گسترده ای می باشد. بنابراین استفاده از چند جمله های تقریب زنده روش مناسبی برای ارزیابی توزیع این نوع تنش ها است. بریکستد<sup>3</sup> و جوزفسون<sup>4</sup> توزیع تنش پسماند در جوش محیطی لوله فولادی زنگ نزن به ضخامت 40 میلی متر را با استفاده از تابع درجه 5 تقریب زدند. "شکل 2" مقایسه نتایج تابع تقریب با استاندارد<sup>5</sup> را نشان می دهد [10].

انتقال) را تشکیل می دهد و برای انجام آن نیاز به جوش کار ماهر با بالاترین درجه مهارت می باشد [5].

ممکن است جوش بدون عیب باشد، ولی بسیاری از عناصر شیمیایی آن سوخته باشد. جوش علاوه بر کیفیت ظاهری، باید سالم نیز باشد. به همین دلیل علاوه بر آزمون های غیرمخرب، نیاز به تایید سلامت به وسیله آزمون های مخرب مکانیکی (کشش، ضربه و سختی سنجی) و بررسی ریزساختارهای متالورژیکی (کوانتومتری و متالوگرافی) نیز ضروری است [6]. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم آلیاژ پر استحکام<sup>1</sup> که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می شود، اهمیت بیشتری دارد. در این گونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی مانند تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم تمایل بسیار زیادی به ترکیب با کربن و نیتروژن موجود زمینه دارند. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا اغلب حاوی مقادیر بسیار کمی نیوبیوم، وانادیم و تیتانیوم می باشد. این عناصر علاوه بر ریز دانه کردن ساختار، امکان سختی رسوب را نیز فراهم می آورند، حداکثر میزان کربن این فولادها کمتر از 0.2 درصد و مجموع عناصر آلیاژی آن ها کمتر از 2 درصد است [7].

برای آگاهی بیشتر از سلامت جوش، نیاز به آزمایش تکمیلی اندازه گیری تنش های پسماند می باشد. بررسی رفتار حین بهره برداری خطوط لوله انتقال گاز در حوزه تنش های بزرگ پسماند ناشی از فرآیند جوش کاری، مستلزم شناسایی توزیع این تنش ها و تاثیر آن بر رفتار متالورژیکی و مکانیکی می باشد. هنگامی که یک جسم دارای تنش پسماند تحت بارگذاری خارجی قرار می گیرد، تنش های ناشی از بار خارجی به این تنش ها افزوده می شود. در اتصالات استوانه ای رابطه تنگاتنگی بین تنش های محیطی و محوری وجود دارد. انقباض محیطی در این نوع جوش کاری باعث ایجاد خمش محوری در استوانه شده و تغییر شکل زاویه ای در عرض جوش باعث ایجاد تنش های محوری می شود [8]. علی رغم حجم بالای فعالیت های انجام گرفته در زمینه محاسبه تنش های پسماند جوشی در طی سال های اخیر، هنوز در این حوزه اتفاق نظر عمومی وجود ندارد. "شکل 1" نتایج بررسی انجام شده توسط موسسات و محققین مختلف در مورد توزیع تنش های پسماند جوشی در

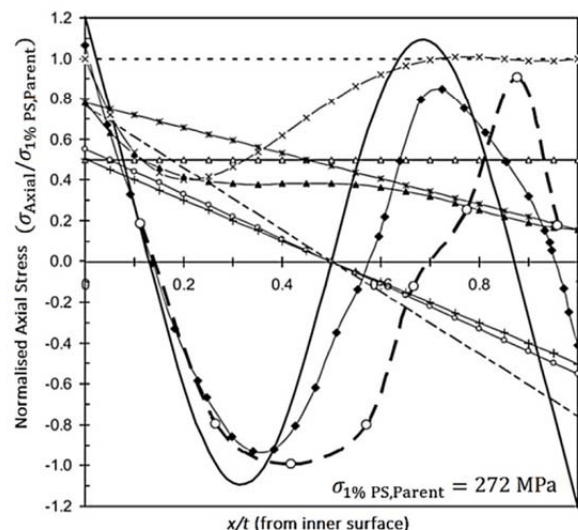


Fig. 1 Comparison of axial residual stresses distribution for a typical girth weld in various sources

شکل 1 مقایسه توزیع تنش های پسماند محوری برای یک نمونه اتصال سر به سر لوله در منابع مختلف

<sup>2</sup> ASTM E 837

<sup>3</sup> Brickstad

<sup>4</sup> Josefson

<sup>5</sup> ASME XI

<sup>1</sup> HSLA

برای شناسایی یک منحنی پایدار توزیع عددی مناسب باید معیاری را به عنوان شاخص (نزدیکی به مقادیر تجربی) در نظر بگیریم. زمانی یک منحنی تقریب، مناسب در نظر گرفته می شود که قدرت توضیح دهندگی آن، که توسط ضریب تعیین<sup>4</sup> اندازه گیری می شود، حتی الامکان بالا باشد [13]. ضریب تعیین، شاخصی است که نشان می دهد تا چه اندازه معادله منحنی تقریب، داده ها را با دقت برازش می کند. با محاسبه این ضریب می توان تعیین کرد که چند درصد از کل واریانس متغیر مستقل (فاصله از مرکز درز جوش) ناشی از واریانس متغیر وابسته (تنش های پسماند) است. این شاخص با رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \left(\frac{SSE}{SST}\right) \quad (1)$$

که SST و SSE به ترتیب مجموع توان دوم خطاها (فاصله منحنی تقریب تنش پسماند از مقادیر آزمون کرنش سنجی سوراخ) بدون استفاده از متغیر مستقل و با استفاده از متغیر مستقل است و SSR مجموع توان دوم رگرسیون نامیده می شود. بنابراین مقادیری که ضریب تعیین می تواند اختیار کند، بین صفر و یک می باشد. اگر زمانی که از متغیرهای مستقل استفاده می شود هیچ خطایی وجود نداشته باشد، این مقدار برابر یک است (دقیق ترین حالت ممکن) و اگر متغیرهای مستقل هیچ تاثیری بر برآورد خط رگرسیونی نداشته باشد، این مقدار برابر صفر است [14]. ضریب تعیین یک شاخص نسبی است. در نتیجه کران های بالا و پایین (یک و صفر) معنای ویژه ای ندارند. بنابراین در تشخیص منحنی پایدار تنش پسماند (برای استفاده در فرآیند جوش کاری مشابه)، بهترین توزیع عددی را منحنی مشخص می نماید که همراه با شاخص ضریب تعیین مناسب، دارای کم ترین مرتبه ممکن (بالاترین درجه آزادی) باشد.

با وجود توسعه روز افزون سخت افزاری و نرم افزاری در چند دهه اخیر، هنوز استفاده از روش های تجربی در مباحث جوش کاری اولین انتخاب است. چرا که عملیات جوش کاری خود تا حد زیادی بر مبنای اطلاعات به دست آمده از روش های آزمون و خطا انجام می گیرد. این نتایج در تحلیل رفتارهای مکانیکی و متالورژیکی جوش به ویژه در مبحث تنش های پسماند استفاده می شود.

لاوه<sup>5</sup> و همکارانش در سال 2006 تنش پسماند جوش سر به سر فولاد ایکس 70 را با قطر 275 میلی متر و 3 ضخامت مختلف با استفاده از روش تفرق نوترون مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن ها نشان می دهد که حداکثر تنش پسماند در لوله نازک تر اتفاق افتاده است [15]. رابین<sup>6</sup> و همکارانش در سال 2011 در خطوط لوله ایکس 70 با قطر 1016 و ضخامت 26 میلی متر با آگاهی از خواص مکانیکی و متالورژیکی فولاد به ارزیابی تنش های پسماند با استفاده از تفرق اشعه ایکس پرداختند [16]. این تحقیق نشان داد که حداکثر تنش های پسماند در راستای موازی منطقه متاثر از حرارت<sup>7</sup> کنار جوش اتفاق می افتد.

هاشمی و همکارانش در سال 2013 بررسی جوش پذیری اتصال چند پاسه محیطی در لوله فولادی ترمومکانیکال 56 اینچ ایکس 70 را بررسی کردند [17]. سبک روح و همکارانش در سال 2017 ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش چند پاسه محیطی خطوط لوله 56 اینچ فولادی ایکس 70 را بررسی کردند [18]. در ادامه این پژوهش و در روند مطالعه

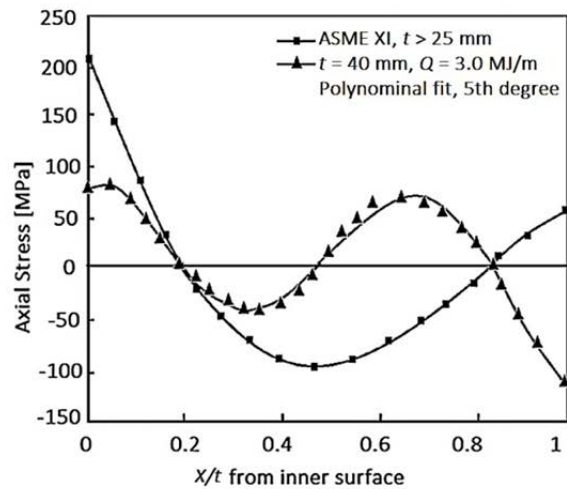


Fig. 2 comparing fifth order polynomial with standard curve

شکل 2 مقایسه منحنی تقریب مرتبه پنج با منحنی استاندارد

درون یابی با استفاده از چند جمله ای ها با درجات بالا با مشکلاتی همراه است. اولاً در این گونه چند جمله ای ها ممکن است، نوسانات تابع تقریب بسیار زیاد شده و خطای درون یابی به شدت بالا رود. ثانياً چنانچه یک نقطه به نقاط اولیه اضافه گردد، منحنی تقریب ناپایدار شده و ممکن است، تابع درون یاب به دست آمده به کلی تغییر کند. برای رفع این مشکل ها به ترتیب از اسپلاین ها و درون یابی چند جمله ای با درجات پایین تر استفاده می شود [11]. اسپلاین ها برخلاف چند جمله ای ها (که اطلاعات را به صورت کلی<sup>1</sup> درون یابی می کنند)، اطلاعات را به صورت موضعی<sup>2</sup> درون یابی می کنند. بنابر این چنانچه یک نقطه محل آزمون تجربی دارای خطا زیادی باشد، شکل منحنی تنها در آن قسمت تغییر خواهد کرد. این منحنی دارای معادلات پیچیده تری نسبت به منحنی چند جمله ای است. بنابراین در صورتی که تمام نقاط در محدوده مشخصی باشند، استفاده از منحنی چند جمله ای مرتبه حداکثر مقرون به صرفه تر می باشد.

در چند جمله ای با درجه پایین تر تعداد خمیدگی منحنی کاهش یافته و همچنین منحنی از تمام نقاط ورودی (داده های حاصل از آزمون تجربی) عبور نمی کند. بنابر این سایر نقاط به صورت کنترل کننده شکل منحنی عمل می کنند. این منحنی ها با توجه به افزایش درجه آزادی در صورت نزدیک بودن به مقادیر آزمون تجربی دارای پایداری بیشتری بوده و نسبت به ورود یک نقطه جدید تغییر حالت کمتری در آن ها اتفاق می افتد [12]. با توجه به تعدد پارامترهای موثر در فرآیند جوش کاری (حتی با دستورالعمل جوش کاری یکسان) تشکیل تنش های پسماند متفاوت اجتناب ناپذیر خواهد بود. بنابر این از منحنی های پایدار مناسب در ارزیابی توزیع تنش های پسماند فرآیند جوش کاری مشابه استفاده می شود. آزمون کرنش سنجی سوراخ نیمه مخرب بوده و در حین انجام پروژه واقعی قابلیت انجام ندارد. بنابراین در شرایط یکسان فرآیند جوش کاری می توان از منحنی پایدار توزیع تنش پسماند (درجه آزادی بالا) مناسب برای تخمین توزیع تنش پسماند شرایط واقعی استفاده کرد. بر طبق استاندارد<sup>3</sup> چنانچه داده تجربی وجود نداشته باشد، این توزیع عددی چند جمله ای می تواند برای یک مهندس جوش مجرب استفاده شود.

<sup>4</sup> R-Square

<sup>5</sup> Law

<sup>6</sup> Ruibin

<sup>7</sup> HAZ

<sup>1</sup> Global Interpolation

<sup>2</sup> Local Interpolation

<sup>3</sup> BS 7910

لوله را با استفاده از منحنی اسپلاین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این منحنی از 7 نقطه آزمون کرنش‌سنجی سوراخ عبور کرده است. با توجه به وجود 7 نقطه محل در آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در سطح خارجی لوله، توابع درون‌یاب چند جمله‌ای با درجات متفاوت برای ارزیابی رفتار توزیع تنش پسماند محیطی لوله (برحسب مقدار فاصله از مرکز درز جوش) در نظر گرفته شد. "شکل‌های 5 تا 7" توزیع تنش پسماند محیطی را به ترتیب با استفاده از توابع درجه 4 الی 2 نشان می‌دهد. جدول 1 خصوصیات و ضرایب توابع چند جمله‌ای درون‌یاب درجه 6 الی 2 توزیع تنش پسماند را در سطح خارجی لوله نشان می‌دهد.

**3-2- توزیع تنش‌های پسماند محوری**

"شکل 8" توزیع تنش پسماند محوری در مجاورت درز جوش در سطح خارجی لوله را با استفاده از منحنی اسپلاین نشان می‌دهد. "شکل‌های 9 الی 11" توزیع تنش پسماند محوری را به ترتیب با استفاده از توابع درجه 4 الی 2 نشان می‌دهد. جدول 2 خصوصیات و ضرایب توابع چند جمله‌ای درون‌یاب درجه 6 الی 2 توزیع تنش پسماند را در سطح خارجی لوله نشان می‌دهد.

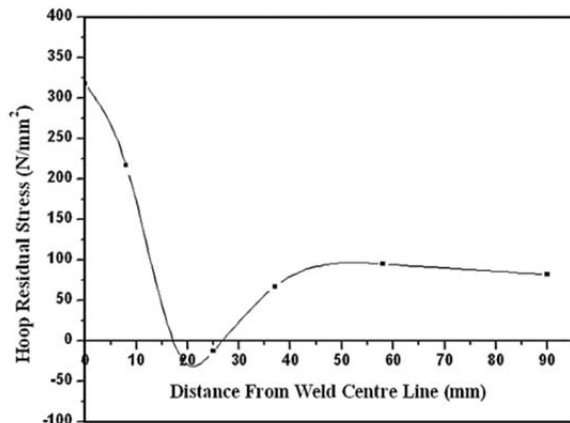


Fig. 4 hoop residual stresses distribution on pipe external surface using spline curve

شکل 4 توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از منحنی اسپلاین

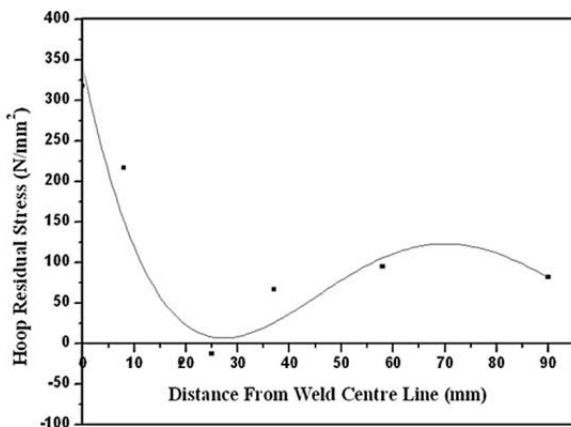


Fig. 5 hoop residual stresses distribution on pipe external surface using fourth order polynomial

شکل 5 توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چند جمله‌ای درون‌یاب درجه چهار

جامع جوش سر به سر لوله فولادی گرید ایکس 70 (با قطر خارجی 56 و ضخامت 0.780 اینچ مورد استفاده در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران) برای اولین بار توزیع عددی میزان تنش پسماند با استفاده از داده‌های تجربی بمنظور ارزیابی رفتار کیفی و کمی توزیع تنش پسماند (برحسب فاصله از مرکز درز جوش) و همچنین پیدا کردن نقاط بحرانی (حداکثر، حداقل و تنش صفر) با استفاده از توابع چند جمله‌ای مراتب 2 تا 6 و اسپلاین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**2- فرآیند جوش کاری، آزمون کرنش‌سنجی سوراخ و تعیین تنش پسماند**

جوش کاری (براساس دستورالعمل ویژه جوش کاری) بر روی دو قطعه 50 سانتی‌متری لوله فولادی ایکس 70 با قطر 56 و ضخامت 0.780 اینچ براساس استاندارد<sup>1</sup> در 9 پاس، شامل پاس‌های ریشه، گرم، پرکن و سطح و به ترتیب با سه قطر الکتروود 3.2، 4 و 5 از ریشه تا سطح، توسط فرآیند جوش کاری قوسی الکتروود دستی پوشش‌دار صورت گرفت.

برای به‌دست آوردن مقادیر تنش پسماند، مطابق با استاندارد، آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ روی سطح خارجی لوله ابتدا در منطقه متأثر از حرارت و در فواصل 4، 10، 22، 43 و 75 میلی‌متر از لبه درز جوش و سپس روی پاس‌های وسط و کنار درز جوش انجام شد. "شکل 3" تنش‌های پسماند محیطی و محوری سطح خارجی لوله در فواصل مختلف از مرکز درز جوش را نشان می‌دهد.

**3- توزیع تنش پسماند**

**3-1- توزیع تنش‌های پسماند محیطی**

"شکل 4" توزیع تنش پسماند محیطی در مجاورت درز جوش سطح خارجی

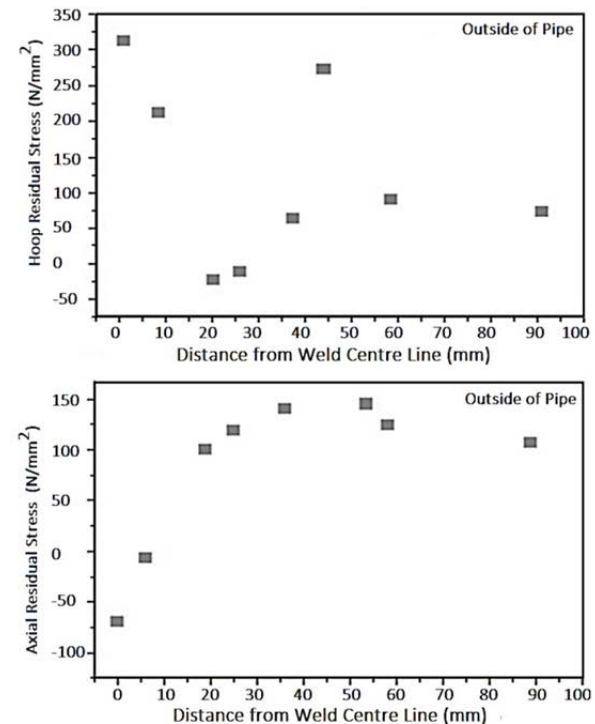


Fig. 3 hoop and axial residual stresses in different points of pipe

شکل 3 تنش‌های پسماند محیطی و محوری در نقاط مختلف سطح خارجی لوله

<sup>1</sup> API (American Petroleum Institute), AWS (American Welding Society)

تمام مقادیر به دست آمده از آن است. بنابراین با توجه به رفتار ذاتی خود متعادل شونده توزیع تنش های پسماند، خوش رفتاری این منحنی، صحت و

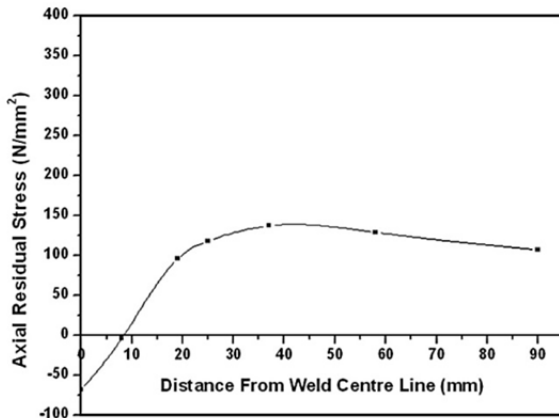


Fig. 8 axial residual stresses distribution using spline curve on pipe external surface

شکل 8 توزیع تنش های پسماند محوری با استفاده از منحنی اسپلاین در سطح خارجی

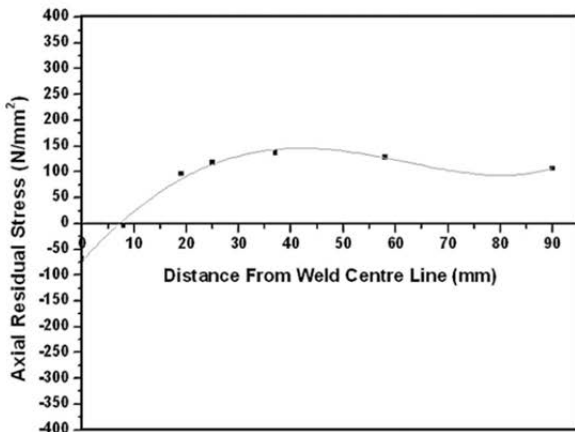


Fig. 9 axial residual stresses distribution on pipe external surface using fourth order polynomial

شکل 9 توزیع تنش های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چند جمله ای درون یاب درجه چهار

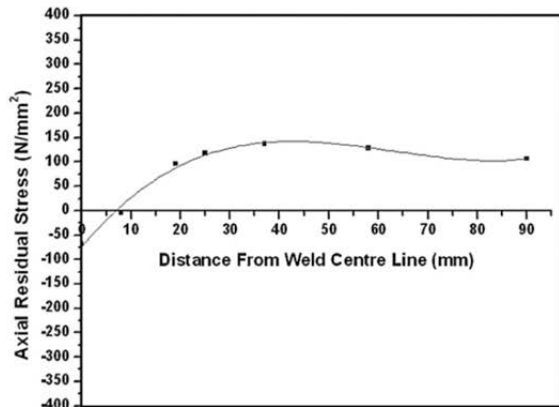


Fig. 10 axial residual stresses distribution on pipe external surface using third order polynomial

شکل 10 توزیع تنش های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چند جمله ای درون یاب درجه سه

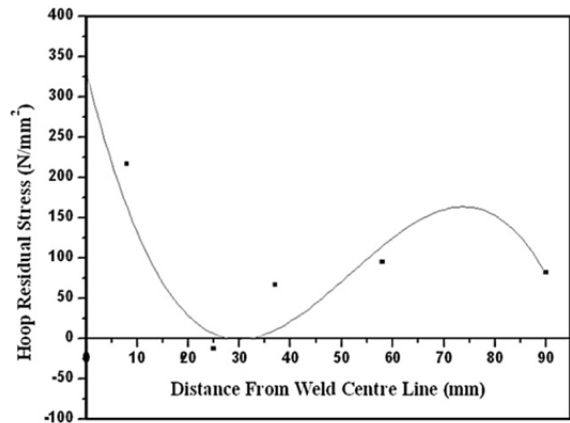


Fig. 6 hoop residual stresses distribution on pipe external surface using third order polynomial

شکل 6 توزیع تنش های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چند جمله ای درون یاب درجه سه

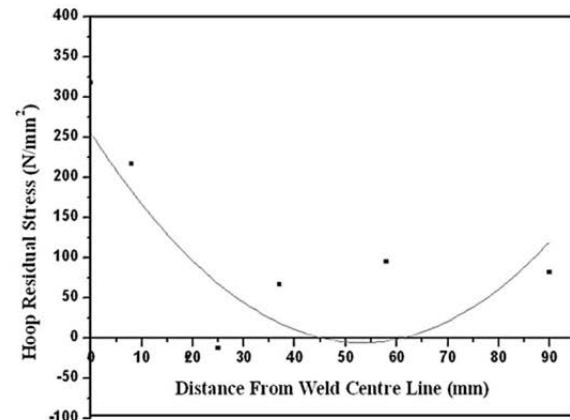


Fig. 7 hoop residual stresses distribution on pipe external surface using second order polynomial

شکل 7 توزیع تنش های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چند جمله ای درون یاب درجه دو

جدول 1 خصوصیات و ضرایب منحنی های چند جمله ای درون یاب برای تعیین توزیع تنش پسماند محیطی در سطح خارجی لوله

Table 1 Properties and coefficients of interpolation polynomial curves for determining hoop residual stress distribution on pipe external surface

مرتب	$F(x)=A_0+A_1 X^1+A_2 X^2+A_3 X^3+A_4 X^4+A_5 X^5+A_6 X^6$						ضریب تعیین	
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$		$A_6$
6	318	29	-8.84	0.55	-0.014	1.7E-4	-7.4E-7	---
5	319	1	-2.83	0.13	-0.002	1.1E-5	---	0.93
4	342	-30	0.92	-0.01	3.6E-5	---	---	0.67
3	333	-25	0.60	-0.003	---	---	---	0.76
2	255	-9	0.09	---	---	---	---	0.32

#### 4- بحث و بررسی

"شکل 7" توزیع تنش پسماند محیطی سطح خارج لوله را با استفاده از منحنی اسپلاین نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، این توزیع کاملاً به صورت یک منحنی نرم و هموار بوده (در تمامی نقاط پیوسته و مشتق پذیر است) و دارای هیچ نقطه تیزی نمی باشد. این مطلب نشان دهنده کالیبراسیون مناسب دستگاه آزمایش کرنش سنجی سوراخ و قابل قبول بودن

منحنی های مراتب 4 و 3 (شکل 5 و 6) با درجه های آزادی به ترتیب برابر با 2 و 3 و پارامترهای ضریب تعیین به ترتیب برابر با 0.67 و 0.76 ارزیابی مناسبی از توزیع تنش های پسماند دارد. این منحنی ها نسبت به اضافه کردن نقاط آزمون تجربی جدید پایداری بیشتری دارند و برخلاف منحنی های چند جمله ای قبلی رفتار مناسبی را برای نقاط دورتر از مرکز درز جوش ارائه می دهند. با توجه به اینکه تابع مرتبه 3 با درجه آزادی بالاتر، پارامتر ضریب تعیین بیشتری دارد، به نظر می رسد این منحنی رفتار پایدارتر و مناسب تری در توزیع تنش های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله داشته باشد. همچنین این منحنی در فاصله نقاط دور از مرکز جوش رفتار هموارتر و منطقی تری نسبت به منحنی های درجه بالاتر دارد. منحنی مرتبه 2 (شکل 7) بیشترین درجه آزادی را دارد، اما با توجه به این که پارامتر ضریب تعیین آن برابر با 0.32 پایین می باشد، توزیع مناسبی را ارائه نمی دهد. بنابر این منحنی مرتبه 3 برای بررسی توزیع تنش های پسماند محیطی در فرآیند جوش کاری مشابه بهترین انتخاب است. در توزیع تنش های پسماند محوری، منحنی اسپلاین (همانند توزیع تنش های پسماند محیطی) خوش رفتار بوده و کالیبراسیون دستگاه، صحت و دقت نتایج را تایید می نماید (شکل 8). جدول 2 خصوصیات و ضرایب منحنی های چند جمله ای تقریب مراتب 6 الی 2 را نشان می دهد. منحنی چند جمله ای درجه 6 نیز به غیر از محدوده بین دو نقطه ای که بیشترین فاصله را از مرکز جوش دارند، رفتار مناسبی (بر خلاف توزیع تنش پسماند محیطی که در محدوده 3 نقطه آخر دارای رفتار مناسبی نیست) دارند. منحنی های درجه 5 الی 2 با درجات آزادی 1 الی 4 به ترتیب ضرایب تعیینی برابر با 0.97، 0.99، 0.97، 0.98 و 0.87 دارند. در نتیجه منحنی های درجه 2 و 3 با درجه آزادی بالا انتخاب مناسبی برای توزیع تنش های پسماند محوری به صورت پایدار می باشند. علاوه بر خوش رفتاری، نزدیکی پارامتر مذکور نشان دهنده رفتار قابل پیش بینی و مشخص منحنی توزیع تنش پسماند محوری است. بنابر این مشاهده می شود، منحنی توزیع تنش های پسماند محوری نسبت به تنش های پسماند محیطی رفتار متعادل تری دارد. در مجموع می توان نتیجه گرفت منحنی درجات 6، 5 و 3 توانسته اند توزیع تنش های پسماند محیطی در منطقه متاثر از حرارت کنار درز جوش را به صورت فشاری ارزیابی نمایند. این منحنی ها بازه فشاری شدن تنش پسماند را به ترتیب در فواصل 16.48 الی 26.60، 18.85 الی 31.11 و 27.92 الی 32.01 میلی متری از مرکز درز جوش نشان می دهند. در منحنی اسپلاین نیز در فاصله 17.2 میلی متری از درز جوش رفتار تابع از حالت کششی به فشاری تبدیل شده است. بنابر این با کاهش مرتبه منحنی ها این بازه کمتر شده و به منطقه دورتر از درز جوش منتقل می شود. مجموع این منحنی منطقه تنش پسماند فشاری را از فاصله 16.48 الی 32.01 میلی متری از مرکز درز جوش ارزیابی می نمایند. همچنین می توان منطقه تغییر حالت تنش های پسماند محوری (از فشاری به کششی) را مورد ارزیابی قرار داد. این بازه در منحنی های مراتب 6 الی 2 به ترتیب در فواصل 7.17، 8.25، 8.34 و 7.26 از مرکز درز جوش قرار دارد. منحنی اسپلاین نیز در فاصله 8.29 این تغییر حالت را داشته است. مقایسه منحنی های توزیع تنش های پسماند نشان می دهد، نقطه ابتدای تغییر حالت در منحنی های توزیع تنش های پسماند محیطی بیش از 11 میلی متر (16.48، 27.92) اختلاف دارد، در حالی که این اختلاف در توزیع تنش های پسماند محوری کمتر از 2 میلی متر (8.34، 8.86) است. این اختلاف موید نزدیکی و همگرایی بهتر تنش های پسماند محوری نسبت به محیطی است. همچنین حداکثر و حداقل مقدار خطای عدم تناسب منحنی توزیع (در بین نقاط آزمون دور از مرکز جوش) تنش پسماند

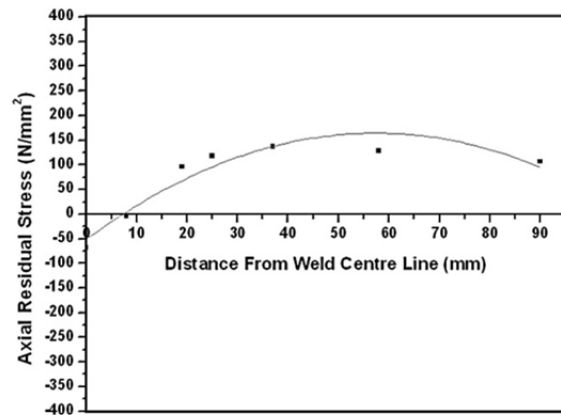


Fig. 11 axial residual stresses distribution on pipe external surface using second order polynomial

شکل 11 توزیع تنش های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چند جمله ای درون یاب درجه دو

جدول 2 خصوصیات و ضرایب منحنی های چند جمله ای درون یاب برای تعیین توزیع تنش پسماند محوری در سطح خارجی لوله

Table 2 Properties and coefficients of interpolation polynomial curves for determining axial residual stress distribution on pipe external surface

مرتبه	$F(x)=A_0+A_1X^1+A_2X^2+A_3X^3+A_4X^4+A_5X^5+A_6X^6$						ضریب تعیین	
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$		$A_6$
6	-68	0.04	1.69	-0.10	0.002	-3.4E-5	1.4E-7	0.99
5	-68	5.69	0.49	-0.02	3.9E-4	-1.9E-6	---	0.97
4	-72	11.09	-0.13	-3.9E-4	9.2E-6	---	---	0.98
3	-74	12.30	-0.21	0.001	---	---	---	0.87
2	-51	7.53	-0.06	---	---	---	---	0.99

دقت نتایج تجربی را تایید می نماید. در نتیجه به نظر می رسد، منحنی مناسبی برای ارزیابی توزیع تنش پسماند باشد. با توجه به محلی بودن تاثیر نقاط آزمون کرنش سنجی سوراخ، معادله نسبتاً پیچیده منحنی اسپلاین و همچنین افزایش پایداری، توابع درون یاب چند جمله ای مراتب 6 الی 2 (شکل های 5 الی 7 و جدول 1) به منظور بررسی توزیع تنش پسماند محیطی سطح خارجی لوله مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی چند جمله ای مرتبه 6، توزیع تنش پسماند در مناطق اطراف جوش را همانند منحنی اسپلاین به صورت یک منحنی خوش رفتار نشان می دهد. رفتار غیر قابل قبول توزیع تنش پسماند در بین نقاط دورتر (3 نقطه) از مرکز جوش به علت انتخاب فاصله بیشتر در محل آزمون کرنش سنجی سوراخ است. با توجه به این که درجه تابع حداکثر است (یک عدد از تعداد نقاط آزمایشگاهی کمتر است) و از تمام نقاط آزمون تجربی می گذرد، این تابع فاقد درجه آزادی است و در نتیجه پارامتر ضریب تعیین برای آن معنای خاصی پیدا نمی کند. به نظر می رسد این منحنی برای ارزیابی توزیع تنش های پسماند جوش کاری آزمون مذکور مناسب باشد، اما با توجه به این که در توابع مراتب بالا اضافه کردن یک نقطه آزمون جدید رفتار منحنی را کاملاً دگرگون می نماید، منحنی مراتب کمتر هم (برای شناسایی بهترین منحنی پایدار توزیع تنش پسماند) مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی مرتبه 5 با درجه آزادی 1 و پارامتر ضریب تعیین برابر 0.93 توزیع تنش پسماند نسبتاً مناسبی از مناطق نزدیک به جوش دارد، اما همانند منحنی قبل (با توجه به کم بودن درجه آزادی) رفتار ناپایداری نسبت به اضافه کردن یک نقطه آزمون جدید دارد. همچنین این منحنی همانند منحنی قبلی در نقاط دور از مرکز درز جوش ارزیابی مناسبی ندارد.

محیطی بسیار بیشتر از تنش پسماند محوری است.

### 5- نتیجه گیری

تنش های پسماند ناشی از جوش کاری باعث کاهش تنش طراحی خطوط لوله های قطور و پرفشار انتقال گاز طبیعی شده و لزوماً باید در تحلیل ایمنی سازه لحاظ شوند. تعیین و بررسی توزیع این تنش ها خصوصاً در جوش کاری محیطی لوله ها که اغلب در محیط کنترل نشده و به صورت دستی چند پاسه انجام می شود، حیاتی است. در این تحقیق برای اولین بار براساس نتایج تجربی، توزیع عددی تنش پسماند بر درز جوش و منطقه متأثر از حرارت دو قطعه لوله 56 اینچ فولادی (از نوع درز جوش مارپیچ) با گرید ایکس 70 و ضخامت 0.780 اینچ (که براساس دستورالعمل ویژه شرکت ملی گاز ایران جوش کاری گردیده اند) مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مقادیر تنش پسماند در نقاط مشخص توسط آزمون کرنش سنجی سوراخ محاسبه گردید. سپس توزیع عددی تنش پسماند روی سطح خارجی لوله با استفاده از توابع چند جمله ای مراتب 2 تا 6 و اسپلین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی توزیع عددی تنش پسماند در جوش سر به سر فولاد میکروآلیاژی خطوط لوله انتقال گاز را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- 1- با استفاده از یک منحنی تقریب مناسب می توان منحنی نتایج شبیه سازی را با روند تغییر نتایج تجربی مقایسه نمود.
- 2- خوش رفتاری منحنی های چند جمله ای مراتب بالا و اسپلین، صحت و دقت نتایج آزمون تجربی تنش پسماند را تایید می نماید.
- 3- با توجه به رفتار پایدار چند جمله ای های مناسب مراتب پایین تر و عدم امکان استفاده از آزمون نیمه مخرب کرنش سنجی سوراخ در شرایط واقعی پروژه، می توان از این منحنی ها در بررسی و تخمین توزیع تنش های پسماند جوش کاری های مشابه استفاده کرد.
- 4- پایدارترین منحنی تقریب چند جمله ای برای ارزیابی توزیع تنش پسماند محیطی و محوری به ترتیب برابر با مراتب 3 و 2 می باشد.
- 5- نزدیکی و همواری منحنی توزیع تنش پسماند محوری نسبت به منحنی توزیع تنش پسماند محیطی نشان دهنده رفتار متعادل تر توزیع این تنش ها است.

### 6- مرجع

- [1] S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, No. 98, Vol. 98, pp. 8-15, 2012.
- [2] S. H. Hashemi, D. Mohamaadyani, M. Pouranvari, S. M. Mousavizadeh, On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 32, No. 1, pp. 33-40, 2009.
- [3] A. Fragieli, R. Schouwenaarf, R. Guardián, R. Perez, Microstructural characteristics of different commercially available API 5L X65 steels, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, Vol. 8, No.1, pp. 115-119, 2005.
- [4] F. B. Pickering, The spectrum of microalloyed high strength low alloy steels in HSLA steels technology and applications, *International Conference on Technology and Applications of HSLA Steels*, Philadelphia: ASM, pp.1-31, 1983.
- [5] T. Goldman, *New Joining Technology for Metal Pipe in the Construction Industry*, Break-through Strategy Committee, Texas, pp. 1-25, 2003.
- [6] M. C. Zhao, K. Yang, Y. Shan, The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel, *Materials Science and Engineering*, Vol. 335, No. 1, pp. 14-20, 2002.
- [7] W. W. Bose-Filho, A. L. M. Carvalho, M. Strangwood, Effect of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds, *Materials Characterization*, Vol. 58, No.1, pp. 29-39, 2007.
- [8] R. H. Leggatt, Residual stresses in welded structures, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, No. 3, pp. 141-151, 2008.
- [9] R. P. G. Bouchard, Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel Pipe Girth Welds, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, No. 4, pp. 195-222, 2007.
- [10] B. Brickstad, B. L. Josefson, A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 1, pp. 11-25, 1998.
- [11] S. S. Rao, *Engineering Optimization Theory and Practice*, Fourth Edition, pp. 85-118, New Jersey: Wiley, 2009.
- [12] K. Lee, *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, First Edition, pp. 108-132, Addison Wesley: Reading, MA, 1999.
- [13] D. Montgomery, E. Peck, G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, Fifth Edition, pp. 65-83, New Jersey: Wiley, 2012.
- [14] S. Weisberg, *Applied Linear Regression*, Third edition, pp. 91-101, New Jersey: Wiley, 2005.
- [15] M. Law, H. Prask, V. Luzin, T. Gnaeupel-Herold, Residual stress measurements in coil, linepipe and girth welded pipe, *Materials Science and Engineering*, Vol. 437, No. 1, pp. 60-63, 2006.
- [16] G. Ruibin, Z. Yiliang, X. Xuedong, S. Liang, Y. Yong, Residual stress measurement of new and In-Service X70 pipelines by X-ray diffraction method, *NDT&E International*, Vol. 44, No. 5, pp. 397-393, 2011.
- [17] S. H. Hashemi, M. Sabokrouh, M. R. Farahani, Investigation of welding in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 60-73, 2013. (in Persian)
- [18] M. Sabokrouh, S. H. Hashemi, M. R. Farahani, Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231, No. 6, pp. 1039-1047, 2017.