



Analysis of Variance of Residual Stress Distribution in Girth Welding of High Strength Low Alloy Steel Gas Pipeline

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sabokrouh M.¹ PhD,
Farahani M.R.*² PhD

How to cite this article

Sabokrouh M, Farahani M.R. Analysis of Variance of Residual Stress Distribution in Girth Welding of High Strength Low Alloy Steel Gas Pipeline. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1789-1795.

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

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

*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Kargar Shomali Avenue, Tehran, Iran. Postal Code: 1439957131

Phone: +98 (21) 88353893

Fax: -

mrfarahani@ut.ac.ir

Article History

Received: May 30, 2018

Accepted: January 19, 2019

ePublished: July 01, 2019

ABSTRACT

In this paper, the analysis of variance (ANOVA) of weld residual stress distribution (using the hole drilling strain gage method according to ASTM 837 standard) was investigated (in the hoop and axial direction of the 56-inch gas transmission). The results of ANOVA show that the best distribution curve of residual stress is the third order function (3 degree of freedom) in the distribution diagram of hoop and axial residual stresses. In this order, the p value of the hoop and axial residual stress is 0.044 and 0.001, respectively. This indicates the high reliability of the third order function. Also, the value of F and coefficient of determination of this order has an appropriate value. In addition, due to the high p value and low reliability, the 5-order approximation function is not a suitable residual stress distribution curve compared to the third order function. Order approximation functions (2 and 4) have lower reliability (higher p value) and lower F value than odd order (3 and 5). Despite having the highest freedom with the highest p (lowest reliability), the lowest F, and the lowest coefficient of determination, the second-order function, is the most inappropriate approximation function. Despite the existence of residual stress with respect to the zero experimental residual stress compared to the approximation function, the use of strain test in points far from the weld one and the base metal is not essential.

Keywords Residual Stress; ANOVA; Girth Weld; Hole Drilling Strain Gage Test; Approximation Functions

CITATION LINKS

[1] Novel study on keyhole less friction stir spot welding of Al 2024 reinforced with alumina nanopowder [2] Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds [3] Residual stresses in welded structures [4] Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel [5] Investigation of the effects of the weld groove shape on the residual stress formation in the butt-welded plates [6] A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes [7] Study on the new friction stir spot weld joint reinforcement technique on 5754 aluminum alloy [8] Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints [9] Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles [10] Investigation of weldability in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe [11] Experimental study of the weld microstructure properties in assembling of natural gas transmission pipelines [12] Correlation of microstructural and mechanical properties with residual stresses in multi-pass girth welding of 56-inche steel pipe of grade API X-70 [13] An evaluation of the effect of residual stresses on the static strength and dynamic toughness of multi-pass girth welding in Iranian natural gas transmission pipeline using new design criteria [14] Mathematical modeling of residual stress distribution in girth welding of high strength low alloy steel gas pipelines [15] Equivalence of anchored and ANOVA spaces via interpolation [16] Galerkin based generalized ANOVA for the solution of stochastic steady state diffusion problems [17] Process parameters optimization in friction stir welding by ANOVA

تحلیل واریانس توزیع تنش‌های پسماند جوش محیطی لوله کم‌آلیاژ استحکام بالا خطوط انتقال گاز

مجید سبک‌روح PhD

دانشکده مهندسی، مرکز آموزش عالی محلات، محلات، ایران

محمدرضا فراهانی * PhD

گروه مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، تحلیل واریانس توزیع تنش پسماند (با استفاده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ براساس استاندارد ASTM 837 جوش محیطی انتقال گاز در دو راستای محیطی و محوری لوله فولادی ۵۶ اینچی) بررسی شد. نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد در نمودار توزیع تنش‌های پسماند محیطی و محوری، بهترین منحنی توزیع تنش پسماند، تابع مرتبه ۳ (درجه آزادی ۳) است. در این مرتبه مقدار p تنش پسماند محیطی و محوری به ترتیب دارای ۰/۰۴۴ و ۰/۰۰۱ است. این مطلب نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای تابع مرتبه ۳ است. همچنین مقدار F و ضریب تعیین این مرتبه دارای مقدار مناسبی است. علاوه بر این تابع تقریب مرتبه ۵ نسبت به تابع مرتبه ۳ به علت بالا بودن مقدار p و قابلیت اطمینان پایین، منحنی توزیع تنش پسماند مناسبی نیست. توابع تقریب مرتبه زوج (۲ و ۴) نسبت به مرتبه فرد (۳ و ۵) دارای قابلیت اطمینان کمتر (p بالاتر) و F پایین‌تری هستند. تابع مرتبه ۲ علی‌رغم داشتن بیشترین آزادی، دارای بیشترین مقدار p (کمترین قابلیت اطمینان)، کمترین مقدار F و کمترین ضریب تعیین، نامناسب‌ترین تابع تقریب است. علی‌رغم وجود تنش پسماند با توجه به صفر شدن باقیمانده تنش پسماند تجربی نسبت به تابع تقریب، استفاده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در نقاط دور از منطقه جوش و فلز پایه ضروری نیست.

کلیدواژه‌ها: تنش پسماند، تحلیل واریانس، جوش محیطی، آزمون کرنش‌سنجی سوراخ، توابع تقریب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

* نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

تنش‌های پسماند به آن دسته از تنش‌ها اطلاق می‌شود که پس از انجام عملیات خاصی در جسم باقی بمانند و ناشی از بارگذاری خارجی نباشند. تنش‌های پسماند در حالت خودتعدالی بوده و برآیند نیروها و زوج نیروهای حاصل از این تنش‌ها صفر است. هنگامی که یک جسم دارای تنش پسماند تحت بارگذاری خارجی قرار می‌گیرد، تنش‌های ناشی از بار خارجی به این تنش‌ها افزوده می‌شود. بزرگی و توزیع تنش‌های پسماند قبل از ساخت، مشخص نیست و معمولاً به صورت کامل در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود [1]. به علت اثرات قابل توجه تنش‌های پسماند بر کارایی سازه، باید این تنش‌ها در انجام تحلیل‌های ایمنی مد نظر قرار گیرند. در اتصالات استوانه‌ای (لوله‌ها و مخازن تحت فشار) جهات طولی، عرضی و ارتفاع با جهات محیطی، محوری و شعاعی نشان داده می‌شوند. در این سازه‌ها رابطه تنگاتنگی بین تنش‌های محیطی و محوری وجود دارد. انقباض محیطی در این نوع جوشکاری باعث ایجاد خمش محوری در استوانه شده و تغییر شکل زاویه‌ای در عرض جوش باعث ایجاد تنش‌های محوری می‌شود. این مساله تاثیر فراوانی بر توزیع تنش‌های پسماند در این نوع از جوشکاری دارد. در حالت کلی، تنش‌های پسماند به دو گروه میکروسکوپی و ماکروسکوپی تقسیم می‌شوند. در مقیاس میکروسکوپی، تنش‌های پسماند بر اثر انواع عیوب متالورژیک ایجاد می‌شوند. ایجاد و توزیع تنش‌های پسماند میکروسکوپی موجود در جسم، بیشتر به فرآوری مواد اولیه بستگی داشته و اغلب در کل مواد به صورت پراکنده موجود است.

مکان‌های خالی، جابه‌جایی اتم‌ها، عیوب شبکه در اثر تغییر شکل و عیوب مرزانه‌ها از عوامل مهم بروز این نوع تنش‌ها هستند. در مقیاس ماکروسکوپی، گروهی از دانه‌ها یا قسمتی از قطعه، تحت تنش قرار دارد. تنش‌های پسماند ماکروسکوپی سبب ناهمگونی در رفتار مکانیکی قسمت‌های مختلف می‌شوند [2]. منابع این تنش‌ها بسیار متنوع است و می‌توان آنها را در سه مجموعه کلی مکانیکی، حرارتی و متالورژیک دسته‌بندی نمود. تنش‌های پسماند اغلب توسط ترکیبی از این سه نوع منبع ایجاد می‌شوند. تنش‌های پسماند متالورژیک اغلب از نوع تنش‌های پسماند میکروسکوپی است، ولی تنش‌های پسماند مکانیکی و حرارتی از نوع ماکروسکوپی به شمار می‌آیند. این مطلب با توجه به ویژگی و حساسیت فولادهای کم‌کربن پراستحکام (HSLA) که در خطوط لوله انتقال گاز طبیعی استفاده می‌شود، اهمیت بیشتری می‌یابد. در این گونه فولادها، عناصر میکروآلیاژی مانند تیتانیوم، وانادیم و نیوبیوم تمایل بسیار زیادی به ترکیب با کربن و نیتروژن موجود در زمینه دارند. چنانچه به میزان حرارت ورودی توجه نشود، عواقب تاثیرگذاری (مانند حل‌شدن و قرارگرفتن با توزیع غیریکنواخت) را به همراه خواهد داشت [3].

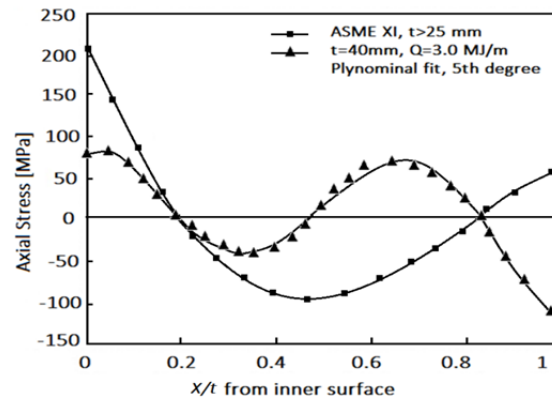
طولانی‌ترین شبکه خطوط لوله نفت و گاز در منطقه خاورمیانه را ایران دارد [4]. جوشکاری سرب‌سر حدود ۲۵٪ زمان لازم را تشکیل می‌دهد [5]. علی‌رغم ویژگی‌های منحصربه‌فرد آزمون روش کرنش‌سنجی سوراخ، این روش دارای محدودیت‌هایی نیز است. براساس استاندارد ASTM E 837، فواصل بین کرنش‌سنج‌ها باید از ۲ سانتی‌متر بیشتر باشد. همچنین این آزمون بسیار هزینه‌بر (خرید و نصب کرنش‌سنج‌ها) است. از سوی دیگر با استفاده از این آزمون تنها می‌توان تنش پسماند در نقاط مختلف را ارزیابی نمود. عملیات جوشکاری تا حد زیادی بر مبنای اطلاعات به دست آمده از روش‌های آزمون و خطا انجام می‌گیرد. این نتایج در تحلیل رفتارهای مکانیکی و متالورژیک جوش به ویژه در محث تنش‌های پسماند استفاده می‌شود. هاشمی و همکاران در سال ۲۰۱۳، بررسی تجربی جوش‌پذیری اتصال چندپاسه محیطی در لوله فولادی ترمومکانیکال ۵۶ اینچ ایکس ۷۰ را بررسی کردند [10]. سپس سبک‌روح و همکاران میکروساختار جوش سرب‌سر لوله فولادی ترمومکانیکال ۵۶ اینچ ایکس ۷۰ را مورد بررسی قرار دادند [11]. در ادامه، سبک‌روح و همکاران ارتباط ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش چندپاسه محیطی خطوط لوله ۵۶ اینچ فولادی ایکس ۷۰ را بررسی کردند [12]. با توجه به اهمیت تنش پسماند موضوع مطالعات بر محث تنش پسماند متمرکز شد. سبک‌روح و همکاران در سال ۲۰۱۶، اثر تنش‌های پسماند بر مقاومت استاتیکی و چقرمگی دینامیکی ناحیه جوش چندگذر محیطی در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران را ارزیابی نمودند. آنها معیارهای جدید طراحی در این زمینه ارائه دادند [13]. سپس در ادامه این پژوهش و در روند مطالعه جامع، جوش سرب‌سر لوله فولادی گرید ایکس ۷۰ (با قطر خارجی ۵۶ و ضخامت ۰/۷۸۰ اینچ) مورد استفاده در خطوط انتقال گاز طبیعی ایران) برای اولین بار مدل‌سازی ریاضی توزیع تنش‌های پسماند جوش محیطی لوله کم‌آلیاژ استحکام بالا را با استفاده از توزیع عددی میزان تنش پسماند با استفاده از داده‌های تجربی به منظور ارزیابی رفتار کیفی و کمی توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار دادند [14]. در این پژوهش ضریب تعیین در توابع تقریب توزیع تنش پسماند محیطی مرتبه ۵ الی ۲ به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۰/۶۷، ۰/۷۶ و ۰/۳۲ است. همچنین این مقادیر برای توابع توزیع تنش پسماند محوری به ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۹۷، ۰/۹۸ و ۰/۸۷ به دست

پسماند، تشکیل منحنی خوش‌رفتار (پیوسته و مشتق‌پذیر) می‌تواند صحت و دقت نتایج تجربی به‌دست‌آمده را تایید نماید. بریکستند و جوزفسون، توزیع تنش پسماند در جوش محیطی لوله را با استفاده از تابع درجه ۵ تقریب زدند. نمودار ۱، مقایسه نتایج تابع تقریب با استاندارد ASME XI را نشان می‌دهد^[6]. چنانچه در درون‌یابی با استفاده از چندجمله‌ای‌ها با درجات بالا یک نقطه به نقاط اولیه اضافه شود، منحنی تقریب ناپایدار می‌شود و ممکن است، تابع درون‌یاب به‌دست‌آمده به کلی تغییر کند. برای رفع این مشکل از درون‌یابی چندجمله‌ای با درجات پایین‌تر استفاده می‌شود^[7]. در چندجمله‌ای با درجه پایین‌تر سایر نقاط به‌صورت کنترل‌کننده شکل منحنی عمل می‌کنند^[8]. زمانی یک منحنی تقریب، مناسب در نظر گرفته می‌شود که قدرت توضیح‌دهندگی آن که توسط ضریب تعیین اندازه‌گیری می‌شود، حتی‌الامکان بالا باشد^[9]. بنابراین بهترین توزیع عددی را منحنی مشخص می‌نماید که همراه با شاخص ضریب تعیین مناسب، دارای بالاترین درجه آزادی باشد.

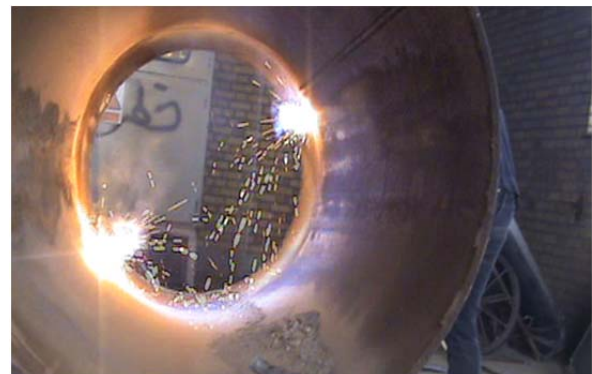
۲- تحلیل واریانس توابع توزیع تنش پسماند

در یک مدل برازش‌شده مناسب، باید تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی مدل کوچک و ناریب باشند. چنانچه نقاط مختلف در طول منحنی رگرسیون، داده‌ها به‌صورت سیستماتیک زیر و بالای خط برازش‌شده قرار داشته باشند، نشان‌دهنده وجود اربیبی در معادله برازش‌شده است. ضریب تعیین نمی‌تواند اربیب بودن مدل برازش‌شده را تعیین نماید. در حالت مطلوب نمودار باقیمانده‌ها، انتظار می‌رود باقیمانده‌ها رفتاری تصادفی و توزیع نرمال داشته باشند. لذا وجود این الگوها نشان‌دهنده یک برازش با صحت نامناسب است^[15]. برای بررسی مناسب بودن صحت یک مدل برازش‌شده، علاوه بر ضریب تعیین باید روند نمودار باقیمانده‌ها و ثابت بودن واریانس را در سطوح مختلف باید ارزیابی کرد. بنابراین در حالی که ضریب تعیین تخمینی از قدرت رابطه بین مدل و متغیر، پاسخ فراهم می‌کند، اما یک آزمون فرضیه رسمی برای این رابطه ارائه نمی‌دهد. لذا از آزمون F برای تعیین وجود رابطه معنی‌دار آماری استفاده می‌شود. صورت و مخرج F نسبت جمع مربعات بر درجه آزادی مربوطه است. به‌طور کلی، قدرت توضیحی کلی رگرسیون با تجزیه و تحلیل واریانس یک‌راهه سنجیده می‌شود. در تجزیه و تحلیل مقایسات بین آزمایشگاهی و مطالعات درون‌آزمایشگاهی (هنگامی که می‌خواهیم نتایج گروه‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کنیم) از روش تحلیل واریانس استفاده می‌شود. تحلیل واریانس از آزمون F برای بررسی آماری برابری میانگین‌ها استفاده می‌کند. در این آزمون کل جامعه به عوامل اولیه آن تجزیه می‌شود. می‌توان از این آزمون برای نشان دادن تفاوت معنی‌دار در مدل‌های رگرسیونی استفاده کرد. تحلیل واریانس از آزمون F برای تعیین اینکه آیا تغییرپذیری بین آزمایشگاهی بزرگ‌تر از تغییرپذیری درون‌آزمایشگاهی است، استفاده می‌کند^[16]. آماره F نسبت دو واریانس، تغییرپذیری بین میانگین نمونه‌ها تقسیم بر تغییرپذیری میانگین درون نمونه‌ها است. بنابراین صورت کسر، توصیف تفاوت بین تمام میانگین نمونه‌هاست و مخرج کسر، خطای استاندارد و تفاوت‌های ناشی از شانس را ارزیابی می‌کند. به‌دلیل تغییرپذیری غیرقابل کنترل و غیرقابل توضیح (اغلب غیرسیستماتیک) مخرج F، جمله خطا نامیده می‌شود. واریانس نشان می‌دهد تا چه اندازه داده‌ها از میانگین پراکنده شده است. مقادیر بزرگ‌تر واریانس نشان‌دهنده

آمده است. نتایج نشان می‌دهد توزیع تنش پسماند محیطی سطح خارج لوله کاملاً به‌صورت یک منحنی نرم و هموار است. این مطلب نشان‌دهنده کالیبراسیون مناسب دستگاه آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ است. در این مطالعه، ابتدا جوشکاری (براساس دستورالعمل ویژه جوشکاری) روی دو قطعه ۵۰ سانتی‌متری لوله فولادی ایکس ۷۰ با قطر ۵۶ و ضخامت ۷/۸۰ اینچ براساس استاندارد در ۹ پاس شامل پاس‌های ریشه، گرم، پرکن و سطح و به‌ترتیب با سه قطر الکتروود ۳/۲، ۴ و ۵ از ریشه تا سطح، توسط فرآیند جوشکاری قوسی الکتروود دستی پوشش‌دار صورت گرفت. شکل ۱، فرآیند جوشکاری و شکل ۲ ارزیابی تنش‌های پسماند در روی سطوح خارجی را نشان می‌دهد.



نمودار ۱) مقایسه منحنی تقریب مرتبه ۵ با منحنی استاندارد

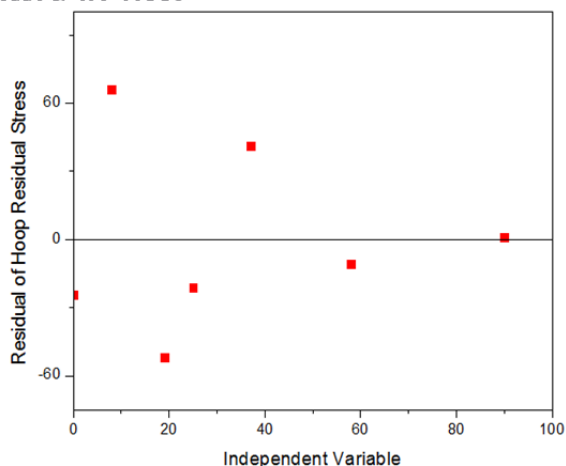


شکل ۱) جوشکاری سربه‌سر لوله

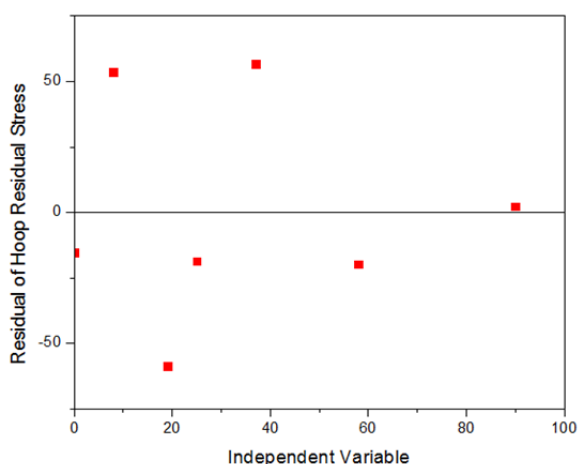


شکل ۲) آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ

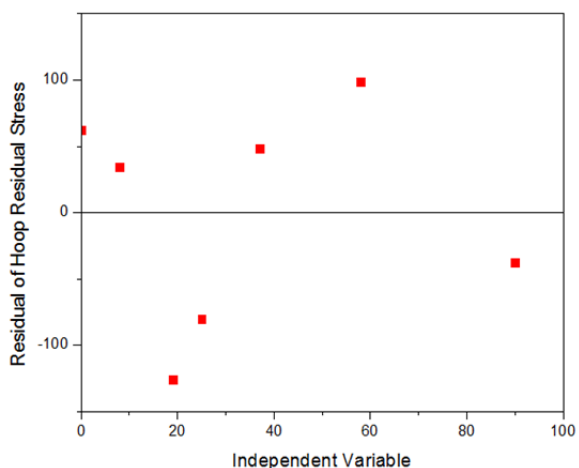
وجود یک منحنی مناسب توزیع تنش پسماند در تشخیص نقاط بحرانی تنش پسماند اهمیت دارد. مطابق با استاندارد مربوطه، آزمایش کرنش‌سنجی سوراخ فاقد قابلیت کالیبراسیون مشخص است. با توجه به رفتار ذاتی خود متعادل‌شونده توزیع تنش‌های



نمودار ۳) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۴



نمودار ۴) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۳



نمودار ۵) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۲

۳-۱- توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محوری

جدول ۲، تحلیل واریانس توزیع تنش پسماند محیطی در سطح خارجی لوله را نشان می‌دهد. نمودارهای ۹-۶، توزیع باقیمانده تنش پسماند محوری را به ترتیب با استفاده از توابع درجه ۵ الی ۲ نشان می‌دهد.

پراکندگی بیشتر است. در مقادیر کوچک F ، میانگین نتایج آزمایشگاه‌ها نزدیک به هم هستند، یعنی آنکه تغییرپذیری بین آزمایشگاهی نسبت به تغییرپذیری درون‌آزمایشگاهی عدد کوچکی می‌شود. زمانی که واریانس درون‌آزمایشگاهی زیاد (مخرج کسر) باشد، میانگین‌های به دست آمده در آزمایشگاه‌های مختلف نزدیک به هم است. در مقادیر بزرگ F ، میانگین نتایج آزمایشگاه‌ها با هم فاصله زیادی دارند، یعنی آنکه تغییرپذیری بین آزمایشگاهی نسبت به تغییرپذیری درون‌آزمایشگاهی عدد بزرگی شده است. p یک شاخص کاهش از قابلیت اطمینان بودن یک نتیجه است. هر چه این مقدار بزرگ‌تر باشد، اطمینان به واقعی بودن نتیجه کاهش می‌یابد [17]. به عبارت دیگر، احتمال خطایی را نشان می‌دهد که در پذیرفتن معتبر بودن نتایج وجود دارد. بنابراین با بودن مقدار F و پایین بودن مقدار p نشان‌دهنده ارزیابی توانمندی نمودارهای تنش پسماند F نسبت واریانس بین توابع تقریب (مجموع اثر توابع تقریب و تفاوت‌های ناشی از شانس) بر واریانس درون توابع تقریب (تفاوت‌های ناشی از شانس) است. تفاوت‌های ناشی از شانس نشان‌دهنده تفاوت محل اندازه‌گیری تنش پسماند تفاوت‌های فردی جوش، منطقه متأثر از حرارت و فلز و پایه و احتمالاً خطای آزمایش است. با توجه به وجود ۷ نقطه محل برای آزمون کرنش‌سنجی سوراخ، مقدار درجه آزادی کل برابر ۶ است. درجه آزادی مخرج برابر با درجه آزادی تابع تقریب بوده و درجه آزادی صورت برابر با مرتبه تابع چندجمله‌ای است.

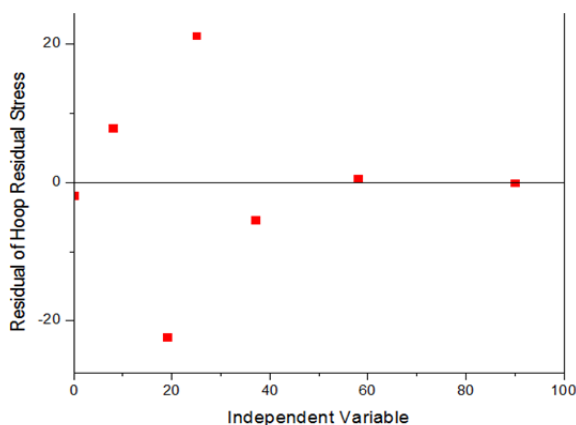
۳- تحلیل آماری توابع توزیع تنش پسماند

۳-۱- توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محیطی

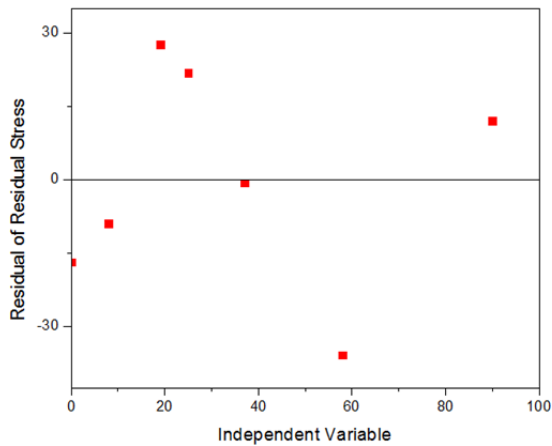
جدول ۱، تحلیل واریانس توزیع تنش پسماند محیطی در سطح خارجی لوله را نشان می‌دهد. نمودارهای ۵-۲، توزیع باقیمانده تنش پسماند محیطی را به ترتیب با استفاده از توابع درجه ۵ الی ۲ نشان می‌دهد.

جدول ۱) تحلیل واریانس توزیع تنش پسماند محیطی در سطح خارجی لوله

مرتبۀ درجه آزادی	مجموع مربعات	باقیمانده مجموع مربعات	میانگین مربعات	باقیمانده میانگین مربعات	آماره F	آماره p
۶	۹۰۵۴۴	۰	۱۵۰۹۰	-	-	-
۵	۸۹۴۹۷	۱۰۴۶	۱۷۸۹۹	۱۰۴۶	۱۷/۱۱	۰/۱۸۱
۴	۸۰۶۵۵	۹۸۸۸	۲۰۶۳	۴۹۴۴	۴/۰۷	۰/۲۰۶
۳	۸۰۰۴۵	۱۰۴۹۸	۲۶۸۱	۳۴۹۹	۷/۶۲	۰/۰۴۴
۲	۴۹۵۶۵	۴۰۹۷۸	۲۴۷۸۲	۱۰۲۴۴	۲/۴۱	۰/۲۰۴



نمودار ۲) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۵



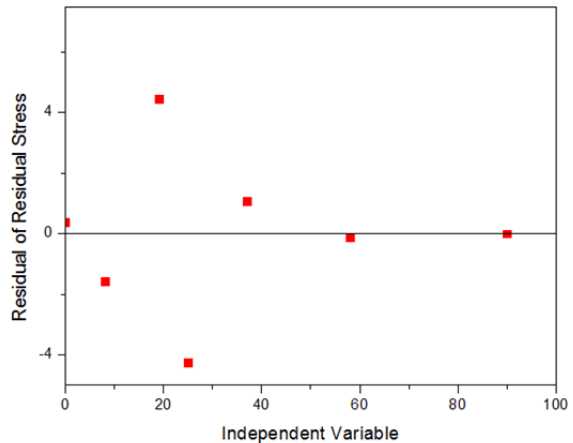
نمودار ۹) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۲

۴- بحث و بررسی

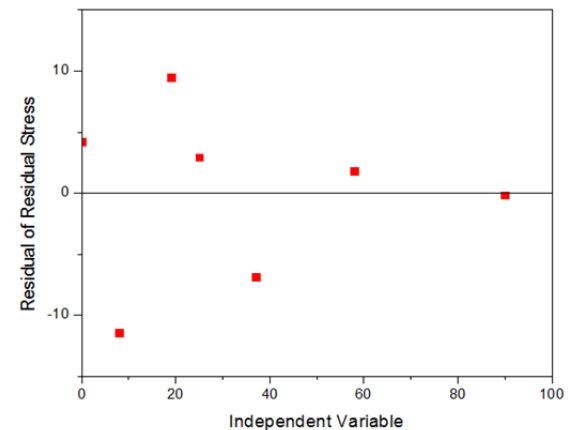
با توجه به فاقد درجه آزادی بودن تابع درجه ۶، p و F بی‌معنی است. در جدول ۱ برای توابع تقریب ۵ الی ۲ توزیع تنش پسماند محیطی، مقدار p به ترتیب ۰/۱۸۱، ۰/۲۰۶، ۰/۰۴۴ و ۰/۲۰۴ است. همچنین مقدار F به ترتیب ۱۷/۱۱، ۴/۰۷، ۷/۶۲ و ۲/۴۱ است. همان گونه که مشاهده می‌شود کمترین مقدار p در تابع مرتبه ۳ و در حد پایین‌تر از ۰/۰۵ ارزیابی شده است. این مقدار قابلیت اطمینان تابع درون‌یاب درجه سه را تایید می‌نماید. در این مقدار F در اختلاف مناسبی نسبت به یک محاسبه شده است. شایان ذکر است تابع مرتبه ۵ دارای بیشترین مقدار F (۱۷/۱۱) است. بیشترین ضریب تعیین (۰/۹۳) نیز در تابع مرتبه ۵ ارزیابی شده است. با این وجود با داشتن مقدار p (۰/۱۸۱) نمی‌توان قابلیت اطمینان مناسبی را برای این تابع ارزیابی نمود. این مقدار بیش از ۴ برابر تابع مرتبه ۳ است بنابراین بهترین و قابل اعتمادترین نمودار توزیع تنش پسماند محیطی تابع تقریب مرتبه ۳ است. شایان ذکر است توابع تقریب توابع مرتبه زوج ۴ و ۲ دارای مقدار مشابه p بالای ۰/۰۲ است. این مطلب نشان می‌دهد این توابع کمترین قابلیت اطمینان را دارند. در تابع مرتبه دو F و ضریب تعیین به ترتیب برابر با ۲/۴۱ و ۰/۳۲ هستند. با توجه به پایین بودن مشهود این مقادیر و همچنین عدم اطمینان قابل توجه، تابع مرتبه دو علی‌رغم داشتن بیشترین مقدار آزادی برای ارزیابی تنش پسماند محیطی، نمودار تقریب مناسبی نیست. همان گونه که در نمودارهای ۲-۴ مشخص بوده، در بیشترین فاصله از مرکز درز جوش (۹۰ میلی‌متر) باقیمانده تنش پسماند محیطی نقطه آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در حدود صفر است. بنابراین با توجه به نیمه‌مخرب بودن آزمون کرنش‌سنجی سوراخ و هزینه قابل توجه آن می‌توان با قابلیت اطمینان مناسبی از منحنی‌های تقریب استفاده نمود. شایان ذکر است در نمودار ۵، مقدار باقیمانده تنش پسماند محیطی قابل توجه است. این مطلب نامناسب بودن تابع مرتبه دو در ارزیابی تنش‌های پسماند محیطی را مجدداً تایید می‌نماید. شایان ذکر است در مرکز جوش تنش پسماند محیطی تجربی، از تابع تقریب مرتبه دو در حدود مقدار قابل توجه ۶۰ مگاپاسکال (باقیمانده تنش) بیشتر است. بنابراین علاوه بر موارد ذکر شده، این نمودار برای منطقه جوش بسیار خطرناک است. در تابع تقریب مرتبه ۳، مقدار داده تجربی در حدود ۲۰ مگاپاسکال کمتر از تابع تقریب است. این مقدار می‌تواند در افزایش ضریب اطمینان سازه موثر باشد. در جدول ۲ برای توابع

جدول ۲) تحلیل واریانس توزیع تنش پسماند محوری در سطح خارجی لوله

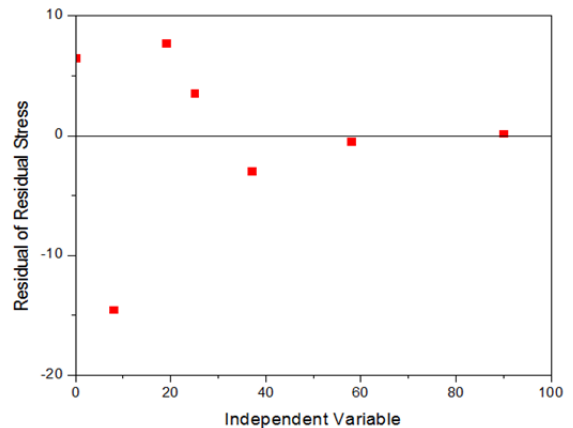
مرتبۀ	درجه آزادی	مجموع مربعات	باقیمانده مجموع مربعات	میانگین مربعات	باقیمانده میانگین مربعات	آماره F	آماره p
۶	۰	۳۶۷۴۹	۰	۶۱۲۴	-	-	-
۵	۱	۳۶۷۰۸	۴۱	۷۳۴۱	۴۱	۱۷۶	۰/۰۵۷
۴	۲	۳۶۴۵۳	۲۹۶	۹۱۱۳	۱۴۸	۶۱	۰/۰۱۶
۳	۳	۳۶۴۱۴	۳۳۴	۱۲۱۳۸	۱۱۱	۱۰۸	۰/۰۰۱
۲	۴	۳۳۷۰۶	۳۰۴۲	۱۶۸۵۳	۷۶۰	۲۲	۰/۰۰۶



نمودار ۶) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۵



نمودار ۷) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۴



نمودار ۸) توزیع باقیمانده تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با استفاده از تابع چندجمله‌ای درون‌یاب درجه ۳

به‌ترتیب دارای ۰/۰۴۴ و ۰/۰۰۱ است. این مطلب نشان‌دهنده قابلیت اطمینان مناسب تابع مرتبه ۳ است. مقدار F تابع توزیع تنش پسماند محیطی و محوری این مرتبه دارای مقدار مناسبی است. همچنین باقیمانده تنش پسماند تجربی نسبت به تابع تقریب ناچیز است.

۲- تابع تقریب مرتبه ۵ با درجه آزادی یک علی‌رغم داشتن بیشترین مقدار F و ضریب تعیین، به‌علت بالابودن مقدار p و قابلیت اطمینان پایین، نسبت به تابع مرتبه ۳، منحنی توزیع تنش پسماند مناسبی نیستند.

۳- توابع تقریب مرتبه زوج (۲ و ۴) نسبت به مرتبه فرد (۳ و ۵) منحنی تقریب مناسبی نیستند. این توابع دارای قابلیت اطمینان کمتر (p بالاتر) و F پایین‌تری هستند.

۴- با توجه به سفرشدن باقیمانده تنش پسماند تجربی نسبت به تابع تقریب (علی‌رغم وجود تنش پسماند)، استفاده از آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در نقاط دور از منطقه جوش و فلز پایه ضروری نیست.

۵- تابع مرتبه ۲ علی‌رغم داشتن بیشترین آزادی دارای بیشترین مقدار p (کمترین قابلیت اطمینان)، کمترین مقدار F و کمترین ضریب تعیین و در نتیجه نامناسب‌ترین تابع تقریب است. همچنین باقیمانده تنش پسماند تجربی نسبت به تابع تقریب در منطقه جوش و دورترین نقطه از جوش قابل توجه است.

۶- در مجموع، توابع تقریب توزیع تنش پسماند محوری نسبت به تنش پسماند محیطی مناسب‌تر است. این منحنی دارای p پایین‌تر و F و ضریب تعیین بالاتری نسبت به تنش‌های پسماند محیطی است.

تشکر و قدردانی: از همکاری مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون‌های غیرمخرب دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: گواهی می‌شود که در نگارش این مقاله کلیه اصول اخلاق در مهندسی رعایت شده است.

تعارض منافع: گواهی می‌شود که در نگارش این مقاله هیچ تعارضی در منافع نویسندگان وجود ندارد.

سهم نویسندگان: مجید سبک‌روح (نویسنده اول)، تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدرضا فراهانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)

منابع مالی: هزینه‌های این پروژه به صورت شخصی تأمین شده است.

منابع

- 1- Enami M, Farahani M, Farhang M. Novel study on keyhole less friction stir spot welding of Al 2024 reinforced with alumina nanopowder. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;101(9-12):3093-3106.
- 2- Bouchard PJ. Validated residual stress profiles for fracture assessments of stainless steel pipe girth welds. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2007;84(4):195-222.
- 3- Leggett RH. Residual stresses in welded structures. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2008;85(3):144-151.
- 4- Hashemi SH, Mohammadyani D. Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2012;98:8-15.

تقریب ۵ الی ۲، توزیع تنش پسماند محوری مقدار p به‌ترتیب ۰/۰۵۷، ۰/۰۱۶، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۶ است. همچنین مقدار F به‌ترتیب ۱۷۶، ۶۱ و ۱۰۸ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار p در توزیع تنش پسماند محوری نسبت به تنش پسماند محوری کاهش مشهودی داشته است. این کاهش نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بیشتر نمودار توزیع تنش پسماند محوری نسبت به محیطی است. کمترین مقدار p در تابع مرتبه ۳ و در عدد قابل توجه ۰/۰۰۱ ارزیابی شده است. این مقدار بهترین قابلیت اطمینان را تابع درون‌یاب درجه سه معرفی می‌نماید. در این مقدار F در اختلاف مناسبی نسبت به یک محاسبه شده است. شایان ذکر است تابع مرتبه ۵ دارای بیشترین مقدار F (۱۷۶) است. بیشترین ضریب تعیین (۰/۹۹) نیز در تابع مرتبه ۵ (بیشتر از ۰/۱ نسبت به تابع مرتبه ۳) ارزیابی شده است. با این وجود مقدار p حدود ۵۷ برابر تابع مرتبه ۳ است. بنابراین بهترین و قابل اعتمادترین نمودار توزیع تنش پسماند محوری، تابع تقریب مرتبه ۳ است. شایان ذکر است توابع تقریب توابع مرتبه زوج (۲ و ۴) دارای مقدار F بیشتری نسبت به توابع درجه فرد است. این مطلب نشان‌دهنده مناسب‌تر بودن تابع مرتبه فرد نسبت به توابع مرتبه زوج است. با توجه به پایین‌بودن مشهود مقدار F و ضریب تعیین، تابع مرتبه دو (علی‌رغم داشتن بیشترین مقدار آزادی و قابلیت اطمینان قابل توجه) برای ارزیابی تنش پسماند محوری، نمودار تقریب مناسبی نیست. همان‌گونه که در نمودارهای ۸-۶ مشخص است در بیشترین فاصله از مرکز درز جوش (۹۰ میلی‌متر)، باقیمانده تنش پسماند محوری نقطه آزمون کرنش‌سنجی سوراخ در حدود صفر است. بنابراین با توجه به نیمه‌مخرب‌بودن آزمون کرنش‌سنجی سوراخ و هزینه قابل توجه آن، می‌توان با قابلیت اطمینان مناسبی از منحنی‌های تقریب استفاده نمود. شایان ذکر است در نمودار ۹، مقدار باقیمانده تنش پسماند محوری قابل توجه است. این مطلب نامناسب‌بودن تابع مرتبه دو در ارزیابی تنش‌های پسماند محوری را مجدداً تأیید می‌نماید. شایان ذکر است در مرکز جوش تنش پسماند تجربی، تابع تقریب مرتبه ۲ دارای باقیمانده تنش بیشتری است. در تابع تقریب مرتبه ۳، مقدار داده تجربی حدود ۶ مگاپاسکال نسبت به تابع تقریب اختلاف دارد. این مقدار ارزیابی مناسب تابع تقریب مرتبه ۳ در ارزیابی تنش‌های پسماند محوری در منطقه جوش را تأیید می‌نماید.

۵- نتیجه‌گیری

روش آزمون تجربی کرنش‌سنجی سوراخ در ارزیابی تنش پسماند دارای محدودیت‌هایی (مانند بیش از ۲ سانتی‌متر نبودن فواصل بین کرنش‌سنج‌ها و هزینه بالا) است. از سوی دیگر، با استفاده از این آزمون تنها می‌توان تنش پسماند در نقاط مختلف را ارزیابی نمود. برای بررسی مناسب‌بودن صحت یک مدل برازش‌شده، علاوه بر ضریب تعیین باید روند نمودار باقیمانده‌ها و تحلیل واریانس را در سطوح مختلف نیز ارزیابی کرد. در این تحقیق برای اولین بار براساس نتایج تجربی، تحلیل واریانس توزیع تنش پسماند بر درز جوش و منطقه متأثر از حرارت دو قطعه لوله ۵۶ اینچ فولادی اینچ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل واریانس تنش پسماند محیطی و محوری در جوش سربه‌سر فولاد خطوط لوله انتقال گاز را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱- تابع مرتبه ۳ با درجه آزادی ۳ بهترین منحنی توزیع تنش پسماند است. مقدار p تنش پسماند محیطی و محوری این مرتبه

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. 2017;231(6):1039-1047.

12- Sabokrouh M, Hashemi SH, Farahani MR. Correlation of microstructural and mechanical properties with residual stresses in multi-pass girth welding of 56-inche steel pipe of grade API X-70. Petroleum Research. 2013;23(76):65-79. [Persian]

13- Sabokrouh M, Hashemi SH, Farahani MR. An evaluation of the effect of residual stresses on the static strength and dynamic toughness of multi-pass girth welding in Iranian natural gas transmission pipeline using new design criteria. Petroleum Research. 2016;26(87):24-36. [Persian]

14- Sabokrouh M, Farahani MR. Mathematical modeling of residual stress distribution in girth welding of high strength low alloy steel gas pipelines. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(7):226-232. [Persian]

15- Hinrichs A, Schneider J. Equivalence of anchored and ANOVA spaces via interpolation. Journal of Complexity. 2016;33:190-198.

16- Chakraborty S, Chowdhury R. Galerkin based generalized ANOVA for the solution of stochastic steady state diffusion problems. Probabilistic Engineering Mechanics. 2017;50:36-44.

17- Durga Prasad MVR, Namala KK. Process parameters optimization in friction stir welding by ANOVA. Materials Today Proceedings. 2018;5(2 Pt 1):4824-4831.

5- Farahani M, Hakkak Zargar S, Akbari D. Investigation of the effects of the weld groove shape on the residual stress formation in the butt-welded plates. Scientia Iranica Transactions B: Mechanical Engineering. 2016;23(5):2230-2237.

6- Brickstad B, Josefson BL. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 1998;75(1):11-25.

7- Andalib H, Farahani M, Enami M. Study on the new friction stir spot weld joint reinforcement technique on 5754 aluminum alloy. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018;232(17):2976-2986.

8- Mohammadzadeh Jamalian H, Farahani M, Besharati Givi MK, Aghaei Vafaei M. Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H₃₄ aluminum welded joints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;83(1-4):611-621.

9- Tabasi M, Farahani M, Besharati Givi MK, Farzami M, Moharami A. Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ₃₁ magnesium alloy using SiC nanoparticles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;86(1-4):705-715.

10- Hashemi SH, Sabokrouh M, Farahani MR. Investigation of weldability in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe. Modares Mechanical Engineering. 2013;13(4):60-73. [Persian]

11- Sabokrouh M, Hashemi SH, Farahani MR.