ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(08):555-565

Investigation of the Effect of ND:YAG Laser Pulse Parameters and Compressive Force Applied to the Seam on Geometry and Strength of the Weld Joint in 316L Stainless Steel Thin-Walled Tube

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Nikravan A.R. [1],
Kolahan F[1*],
shariati M[1].

How to cite this article
Nikravan A R, Kolahan F, shariati M. Investigation of the Effect of ND:YAG Laser Pulse Parameters and Compressive Force Spplied to the Seam on Geometry and Strength of the Weld Joint in 316L Stainless Steel Thin-Walled Tube. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22 (08):555-565.

[1] Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

***Correspondence**
Address: Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
P.O.B. 91775-1111
kolahan@um.ac.ir

Article History
Received: October, 2021
Accepted: February 05, 2022
ePublished: July 15, 2022

ABSTRACT

Due to the importance of the joints in the pressurized instruments and the abilities of the laser welding in this study, the welding of AISI316L tubes have been studied and analyzed. In this regard a fixture has been drawn in order to positioning of the tubes and fixed on the welding desk. The welding input parameters includes the laser welding adjusting variables, includes (welding current, welding pulse width, and welding frequency). Moreover, the effect of the two other variables (rotating speed and the force applied to the welding seam) has also been studied. The welding output characteristics comprises the welding width, depth of penetration and welding strength. The experimental data has been collected using L27 Taguchi design. The relation between the process input variables and output characteristics has been established using different regression models. The modified second order models have been selected as the authentic representative of the process, due to the highest correlation coefficient value (R2adj>%94). Based on the analysis of variance (ANOVA) results, pulse width and welding current with 70% contribution have an influential effect on all the three response characteristics. Moreover, the seam force has only the influential effect on the depth of penetration and strength. Next, in optimization step based on the importance of the process characteristics (strength, depth of penetration, welding width), the optimized levels have been determined. At the end, the optimized condition has been conducted using laser welding, in comparison of which the samples in the design matrix, the welding depth has a close relation with the thickness of the wall, the welding boundaries smother and the strength has a close value to the base metal.

Keywords Laser Welding, Design of Experiments, Regression Modeling, and Analysis of Variance

CITATION LINKS

[1] Low-cycle fatigue behavior of 316L-type stainless steel in chloride solutions. [2] Laser tungsten inert gas, and metal active gas welding... [3] Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in aircraft pneumatic systems. [4] Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by... [5] Optimization of Nd:YAG laser welding parameters for sealing small titanium tube ends. [6] Study on laser welding of fuel clad tubes and end plugs made of modified 9Cr–1Mo steel for... [7] Study on Fiber Laser Welding Conditions for the Fabrication of a Nuclear Fuel Rod. [8] Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels. [9] Optimization of laser welding process parameters in dissimilar joint of stainless... [10] Optimization of laser butt welding parameters with multiple performance characteristics. [11] Laser welding of CP Ti to stainless steel with different temporal pulseshapes. [12] Mechanical constraint intensity effects on solidification cracking during laser... [13] Optimizing pulsed Nd:YAG laser beam welding process parameters to attain maximum ultimate tensile strength for... [14] Preplaced laser cladding of WC powder on Inconel 718 by Nd:YAG laser. [15] Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd: YAG laser beam. [16] Optimization of laser welding process parameters for super austenitic stainless steel using artificial neural networks and genetic algorithm. [17] Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4. [18] Prediction and optimization of process parameters to enhance the tensile strength of Nd:YAG laser welded super duplex stainless steel. [19] A hybrid Taguchi artificial neural network approach to predict surface roughness during electric discharge machining of titanium alloys. [20] Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate and surface roughness in wire cut machining of Ti-6Al-4V alloy.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی اثر پارامترهای لیزر ND:YAG پالسی و نیروی فشاری اعمالی به درز اتصال، بر هندسه و استحکام جوش در لوله جدار نازک فولاد زنگ نزن L316

علیرضا نیکروان
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
فرهاد کلاهان*
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
محمود شریعتی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

چکیده

به دلیل اهمّیت اتصال در تجهیزات تحت فشار و قابلیت‌های جوش لیزر، در این تحقیق به بررسی تجربی و تحلیل پارامترهای لیزر پالسی برای جوشکاری لوله‌های فولادی زنگ نزن AISI316L پرداخته‌ایم. در این راستا فیکسچری برای موقعیت دهی لوله، طراحی و پس از ساخت روی ماشین لیزر نصب گردید. متغیّرهای ورودی شامل پارامترهای تنظیمی پرتوی لیزر (شدت جریان، پهنای پالس، فرکانس) می‌باشند. همزمان با آن‌ها اثر دو پارامتر دیگر (سرعت دورانی و نیروی فشاری وارد به درز تماس دو لوله در حال جوشکاری) نیز بررسی شده است. متغیّرهای پاسخ (خروجی‌ها) شامل عرض، عمق نفوذ و استحکام جوش می‌باشند. داده‌های تجربی با اجرای آزمایش‌های طرح L۲۷ تاگوچی جمع آوری شدند. سپس با برازش توابع رگرسیونی مختلف بر داده‌ها، رابطه بین متغیّرهای ورودی با هر یک از مشخصه‌های خروجی برقرار گردید. توابع مرتبه دوم به دلیل کسب ضریب همبستگی تعدیل یافته بالا (R2adj>%94) به عنوان مدل‌های برتر خروجی‌ها برگزیده شدند. بر اساس تجزیه و تحلیل واریانس، دو پارامتر پهنای پالس و شدت جریان با مجموع بیش از ۷۰٪ مشارکت، در تغییر هر سه مشخصه خروجی تاثیر غالب دارند. همچنین نیروی اعمالی به درز تماس فقط بر عمق نفوذ و استحکام جوش موثر است. در بهینه سازی چند هدفه با توجه به ترتیب اهمّیت متغیّرهای خروجی (۱-استحکام، ۲-عمق نفوذ ۳-عرض جوش)، سطح بهینه پارامترهای ورودی تعیین گردید. در پایان نمونه بهینه‌ای با جوشکاری لیزر ساخته شد که در مقایسه با نمونه‌های طرح آزمایش، عمق نفوذ آن با ضخامت دیواره لوله متناسب‌تر، منحنی مرزهای جوش یکنواخت‌تر و استحکام آن به فلز پایه نزدیک‌تر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: جوشکاری لیزر، طراحی آزمایش، مدلسازی رگرسیونی، آنالیز واریانس، بهینه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵
*نویسنده مسئول: kolahan@um.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه با وجود دسترسی روز افزون به مواد جدید، قطعات فولادی کاربرد گسترده خود را حفظ کرده‌اند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی از جمله AISI316L به دلیل خواص مکانیکی و شیمیایی عالی و ویژگی‌های منحصربفرد در صنایع پالایشگاهی، هسته‌ای و دریایی مورد توجه می‌باشند[1]. جوشکاری فرآیندی رایج برای اتصال و آبندی لوله-ها و ساخت تجهیزات تحت فشار در صنایع مورد اشاره است. در این بین جوشکاری به کمک لیزر در بسیاری از کاربردها نسبت به دیگر روش‌های رایج جوشکاری قادر به تولید اتصالی با کیفیت بالاتر می‌باشد[2,3,4]. این مزیت به خصوص در جوشکاری لوله‌ها و مقاطع جدار نازک مشهودتر است. مهم‌ترین دلیل این برتری، انرژی بر واحد سطح بالاتر و خودکارسازی راحت‌تر فرآیند نسبت به دیگر روش‌ها می‌باشد.

برای افزایش استحکام و بهبود دیگر خصوصیات اتصال‌های جوشی، تنظیم دقیق پارامترها فرآیند اهمّیت زیادی دارد. کیفیت اتصال ایجاد شده با جوشکاری لیزر به عوامل متعددی همچون نوع و نحوه پوشش گاز محافظ، مشخصه‌های پرتوی لیزر، سرعت جوشکاری و نرخ سرد شدن فلز جوش وابسته است. از این رو جنبه‌های مختلف این فرآیند توسط محققین همچنان در دست مطالعه است. در ادامه چند مورد از این مطالعات را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

کانلی و همکاران[5] مقدار بهینه پارامترهای لیزر ان دی یگ (ND:YAG) پالسی و سرعت چرخش را برای کاهش عرض جوش در لوله جدار نازک تیتانیمی تعیین نمودند. آن‌ها دریافتند موقعیت نقطه کانونی و پهنای پالس پرتو بیشترین تاثیر را بر عرض گرده جوش دارند. هرنس و همکاران[6] با مطالعه تجربی اثر پهنای پالس، فرکانس، حداکثر توان پرتو لیزر و انرژی پالس را بر عمق نفوذ، پهنا و میکرو سختی اتصال جوش درپوش فولادی 316LN به لوله سوخت راکتور را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در یک توان متوسط ثابت درصد همپوشانی پرتوهای لیزر بیشترین تاثیر را بر تغییر هندسه و ساختار متالورژیکی ناحیه جوش و تحت تاثیر حرارت دارد. هانگ و همکاران[7] اتصال درپوش به لوله زیرکونیم برای ساخت میله سوخت رآکتور را با فرآیند جوشکاری لیزر پالسی انجام دادند. در این تحقیق اثر سه پارامتر حداکثر توان، موقعیت نقطه کانونی و فرکانس پرتوی لیزر بر هندسه و میزان خوردگی اتصال تحت پوشش دو نوع گاز محافظ مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها دریافتند که افزایش حداکثر توان باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه متاثر از حرارت می‌شود. علاوه بر این میزان خوردگی جوش در نمونه‌های حفاظت شده با گاز آرگون و هلیم تفاوت چندانی ندارد. نهیل کومار و همکاران[8] با اجرای آزمایش‌های طرح مرکب مرکزی ((Central Composite Design (CCD)) و انجام تجزیه و تحلیل واریانس، اثر پارامترهای لیزر ان دی یگ پالسی را بر پهنا، استحکام کششی، ریز ساختار و میکرو سختی اتصال جوش در دو نوع فولاد زنگ نزن 304SS -316SS مورد مقایسه قرار دادند. در نتایج به ترتیب پهنای پالس و توان دو پارامتر با تاثیر غالب بر استحکام اتصال معرفی شده‌اند. سپس سطح بهینه پارامترهای مورد بررسی برای بهبود این خروجی‌ها تعیین شده است. پراباکارنا[9] و همکاران تاثیر پارامترهای انتخاب شده از لیزر گازی CO2 (توان، فاصله نقطه کانونی از سطح نمونه (focal distance)، سرعت جوشکاری) را با اجرای یکی از طرح‌های آزمایش تاگوچی بر هندسه و استحکام اتصال جوش ورق‌های غیر همجنس از فولاد زنگ نزن AISI316 و کربنی AISI1018 مورد بررسی قرار دادند. سپس با تحلیل سیگنال به نویز و آنالیز گری (grey relational) analysis (GRA))، سطوح

بهینه پارامترها را تعیین و تایید نمودند. علاوه بر این تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری در بهبود خواص مکانیکی و خوردگی جوش مثبت گزارش شده است. ساتیا و همکاران[10] درباره اثر توان، موقعیت نقطه کانونی پرتو لیزر گازی CO2 و سرعت جوشکاری، بر استحکام کششی و ابعاد هندسه جوش لب به لب ورق فولادی سوپر آستنیتی AISI904L تحقیق نمودند. آن‌ها پس از انجام آزمایش‌های تجربی بر مبنای طرح تاگوچی و آنالیز گری، مقدار بهینه پارامترها برای دستیابی به حداکثر استحکام کششی و بهبود هندسه اتصال را با استفاده از سه نوع گاز محافظ (آرگون، نیتروژن و هلیم) جداگانه تعیین نمودند. بر اساس تجزیه و تحلیل واریانس توان پرتو به عنوان موثرترین پارامتر بر مشخصه‌های مورد مطالعه شناسایی شده است. چن و همکاران[11] تفاوت تاثیر سه شکل متفاوت پالس پرتوی لیزر ان دی یگ، در جوشکاری نمونه‌هایی غیر همجنس از ورق‌های نازک تیتانیم به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را بر استحکام، عمق نفوذ و ریز ساختار اتصال رویهم بطور تجربی مورد بررسی قرار دادند. در نتایج تحقیق پالس‌هایی که حداکثر توان آن‌ها بصورت پله‌ای به صفر می‌رسد، نسبت به پالس‌های رایج مستطیلی باعث افزایش استحکام جوش تا ۷۰٪ استحکام تیتانیم خواهند شد. هانلی و همکاران[2] پس از مقایسه سه روش جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود تنگستنی (Gas Tungsten Arc Welding) (GTAW) و جوشکاری قوس با الکترود فلزی (Gas Metal Arc Welding) (GMAW) و لیزر برای اتصال ورق فولادی DP780 دریافتند که سطح مقطع جوش در نمونه‌های جوش قوس الکتریکی با الکترد تنگستنی بزرگترین و نمونه‌های جوش لیزر کوچکترین مقدار را دارند. علاوه بر این استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری لیزر و بعد از آن نمونه‌های جوشکاری قوس با الکترود تنگستنی بالاتر از نمونه‌های جوشکاری قوس با الکترود فلزی گزارش شده است. در هر سه روش جوشکاری کرنش ناحیه جوش کمتر از فلز پایه بوده است. همچنین اندازه سختی در نمونه‌های جوش لیزر بالاتر و پس از آن به ترتیب سختی نمونه‌های جوشکاری قوس با الکترود تنگستنی و قوس با الکترود فلزی قرار دارند. کاروالهو[3] و همکاران جوش طولی بدون درز ایجاد شده به دو روش جوشکاری قوس با الکترود تنگستنی و لیزر در لوله‌های تیتانیمی مربوط به تجهیزات انتقال هوای گرم در هواپیما را از نظر ابعاد هندسی، رفتار خستگی و ریز ساختار مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که عرض گرده جوش در نمونه‌های تولید شده با قوس الکترود تنگستنی پنج برابر بزرگتر از جوش لیزر می‌باشد. علاوه بر این عمر خستگی و میکرو سختی نمونه‌های جوش لیزر بالاتر از نمونه‌های جوشکاری با قوس الکترود تنگستنی گزارش شده است. وانگ و همکاران[12] به مطالعه تجربی تفاوت سه روش گیره‌بندی نمونه‌هایی از ورق آلومینیم آلیاژی ۶۰۱۳ برای جوشکاری لیزر درز لب به لب را بر میزان ترک‌های انجمادی مورد بررسی قرار دادند. در نتایج تحقیق گزارش شده که بستن هر دو ورق و حذف درجات آزادی آن‌ها در حین جوشکاری باعث افزایش تنش پسماند کششی و گسترش ترک انجمادی در اتصال می‌شود. بستن فقط یکی از دو ورق‌ها سبب کاهش رشد ترک می‌شود. همچنین عدم بستن ورق‌ها کمترین میزان ایجاد و رشد ترک را موجب می‌شود.

به دلیل کاربرد گسترده فولاد زنگ نزن AISI 316L در مخازن و لوله‌های تحت فشار و همچنین تفاوت تاثیر تابش لیزر بر سطح انحنادار نسبت به سطح تخت در این تحقیق جوشکاری لیزر لوله‌هایی از جنس این آلیاژ مورد مطالعه قرار گرفته است. وجه تمایز دیگر این تحقیق بررسی تاثیر همزمان پارامترهای لیزر پالسی و نیروی فشاری وارد به درز در حال جوشکاری بر ابعاد و استحکام اتصال لب به لب در لوله‌های فولادی زنگ نزن می‌باشد.

۲- رویکرد تحقیق

۲-۱- مواد و تجهیزات

نمونه‌های آزمایش با جوشکاری لیزر لوله بدون درز (Tube) از جنس فولاد زنگ نزن AISI316Lساخته شدند. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی این جنس لوله بر اساس استاندارد ASTM 269-15a و خواص مکانیکی و فیزیکی آن ارائه شده است.

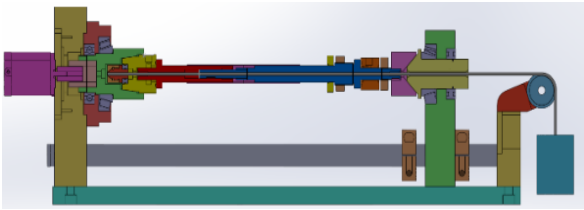
جدول ۱) ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ نزن[13] AISI316L

عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی
C	۰/۰۳۲	Si	۰/۴۶
Mn	۱/۷۵	Ni	۱۰/۴۷
P	۰/۰۴۵	Cr	۱۷/۲۱
S	۰/۰۳	Mo	۲/۱۴
خواص فیزیکی		خواص مکانیکی	
۷/۹۹ Kg/m³	دانسیته	۵۹۰MPa	استحکام نهایی
۰/۵ KJ/Kg	ظرفیت گرمایی ویژه	۲۹۰ MPa	تنش تسلیم
۱۶/۲ w/m.Ok	ضریب هدایت حرارتی	۱۴۳ HV	سختی
		٪ ۵۶	ازدیاد طول

متداول‌ترین نوع لیزر حالت جامد، لیزر ان دی یگ می‌باشد. در این نوع لیزر با افزودن نئودیم به یوتریم، آلومینیم و گارنت (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG))، ترکیب مورد نیاز برای ساخت ماده واسط تولید کننده پرتو فراهم شده است[14]. جوشکاری لوله‌ها برای ساخت نمونه توسط دستگاه لیزر ان دی یگ پالسی شرکت هرولیزر با قابلیت تولید پرتویی به طول موج ۱۰۶۰ نانومتر انجام شده است. در این دستگاه با تنظیم پارامتر فرکانس در بازه ۲۰۰۰-۱ هرتز، پهنای پالس۲۰ – ۰/۲ میلی ثانیه، پرتویی با انرژی پالس ۴۰-۰ ژول و توان متوسط خروجی ۰-۴۰۰ وات حاصل می‌شود. علاوه بر قابلیت حرکت میز در دو جهت x و y، لنز دستگاه در راستای عمود بر میز (جهت z) جابجا شد و در فاصله کانونی آن (۸۵ میلیمتر) پرتو با قطر ۰/۹ میلیمتر روی قطر خارجی لوله متمرکز گردید.

به منظور موقعیت‌دهی دقیق لوله، تنظیم سرعت چرخش آن و کنترل نیروی فشاری وارد به درز در حین جوشکاری، مکانیزمی مجهز به یک سرو موتور مطابق شکل ۱ (الف) طراحی و پس از

ساخت روی ماشین لیزر نصب گردید. سپس مانند شکل، دو لوله نمونه روی دو محور سنگ خورده دقیق با انطباق جذب روان جا خورده است. در مرکز یکی از محورها زبانه و در مرکز محور دیگر سوراخی ایجاد شده که پس از جفت شدن زبانه در سوراخ سطح مقطع دو لوله بصورت لب به لب تماس پیدا کرده و هم محور می‌شوند. در مرحله بعد با عبور یک کابل فلزی به قطر ۴ میلیمتر از سوراخ مرکزی محورها و قرار دادن سر آزاد آن‌ها مابین مرغک مخروطی و گلویی موتور تامین کننده دور، وزنه‌ای به انتهای کابل آویزان شده تا فشاری (برابر با حاصل تقسیم نیروی وزنه بر مساحت مقطع لوله) به درز تماس دو لوله در حال جوشکاری اعمال گردد. گاز محافظ بصورت همزمان از رو و زیر به خط جوش دمیده شده است. نرخ جریان گاز از نازل برای گاز دهی رو، ۱۸ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. علاوه بر این از مسیر سوراخ‌های انتقال گاز تعبیه شده در دو محور جاخورده در لوله‌ها تمامی فضای داخلی درز اتصال از زیر با نرخ جریان ۴ لیتر بر دقیقه تحت پوشش آرگون قرار گرفت.



(الف)

(ب)

شکل ۱) الف- مکانیزم موقعیت دهی و اعمال نیرو به درز اتصال ب- ماشین جوشکاری لیزر مجهز به مکانیزم ساخته شده

۲-۲- طراحی آزمایش‌ها

براساس تحقیقات جاری[15-18] و نتایج آزمایش‌های اولیه در این تحقیق پارامترهای تنظیمی لیزر شامل شدت جریان (I)، پهنای پالس (T) و فرکانس (F) به عنوان متغیّرهای ورودی مورد مطالعه انتخاب شدند. همزمان با آن‌ها سرعت چرخش لوله (R) و نیروی فشاری وزنه به سطح تماس درز (W) به عنوان دو عامل اثرگذار دیگر بررسی شدند. سطوح تغییر این پارامترها برای اجرای آزمایش های اصلی در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲) پارامترهای مورد بررسی و سطوح تغییر آن‌ها

پارامترها	متغیر نشانه	واحد	سطوح تغیر پارامتر		
			C3	C2	C1
شدت جریان جرقه	I	Amp	۱۲۰	۱۱۰	۱۰۰
زمان روشنی پالس	T	ms	۷/۵	۶	۴/۵
فرکانس	F	Hz	۱۶	۱۳/۸	۱۱/۶
سرعت چرخش	R	RPM	۵	۴	۳
نیروی اعمالی به درز جوش	W	kgF	۱۰	۵	۰

با توجه به تعداد پارامترهای مورد بررسی (۵ عدد) و سطوح تغییر آن‌ها (۳ عدد)، تعدادکل آزمایش‌ها قابل انجام برابر $۳^۵$=۲۴۳ می‌باشد. اجرای همه ترکیب‌های آزمایش به دلیل صرف هزینه و زمان زیاد منطقی نبوده و تضمینی برای اخذ نتایج دقیق‌تر نمی‌باشد.

رویکرد طراحی آزمایش‌ها ابزاریست که بر اساس آن با انجام تعداد محدودی آزمایش بررسی اثر پارامترها بر متغیّرهای پاسخ ممکن می‌شود. از این رو پس از بررسی طرح‌های آزمایش پرکاربرد، طرح تاگوچی به دلیل دستیابی به خروجی دقیق با منطق اجرای تعدادی از ترکیب‌های متفاوت‌تر آزمایش نسبت به دیگر طرح‌ها، برای جوشکاری نمونه‌ها انتخاب شد. طرح انتخابی(L27 تاگوچی) شامل ۲۷ ردیف آزمایش با سطح معیّن پارامترها در قالب جدول ۳ مشاهده می‌شود. این جدول پس از تشریح نحوه آماده‌سازی و جوشکاری نمونه‌ها و اندازه‌گیری مشخصه‌های خروجی (ابعاد و استحکام جوش) در پایان بخش ۴ تکمیل و ارائه شده است.

۳- آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

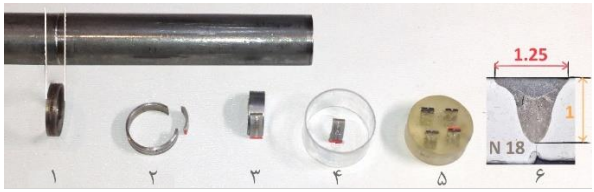
در مراحل ساخت نمونه‌های جوشکاری لیزر ابتدا از شاخه ٦ متری لوله‌ی بدون درز از جنس فولاد زنگ نزن AISI316L (با قطر خارجی ۲۵ و قطر داخلی۲۲/۵ و ضخامت دیواره ۱/۲۵ بر حسب میلیمتر) تعداد ٥٤ قطعه به طول ۱٤۰ میلیمتر به کمک فرآیند برشکاری سیمی با تخلیه الکتریکی جدا گردید. سپس به منظور حذف اثر جرقه‌های برشکاری، سطح مقطع دو طرف هر یک از لوله‌های برش خورده توسط فرآیند تراشکاری پرداخت و بر محور داخلی عمود شدند. لوله‌ها قبل از جوشکاری تمیز و چربی زدایی شدند.

در ادامه با جوشکاری لیزر لب به لب هر جفت لوله ۱٤۰ میلیمتری بر اساس پارامترهای تنظیمی جدول طرح (L27تاگوچی) تعداد ۲۷ نمونه به طول ۲۸۰ میلیمتر دارای جوش محیطی در وسط ساخته شد. به منظور تعیین ابعاد مقطع جوش نمونه‌ها، هر یک از آن‌ها تحت فرآیند برشکاری سیمی قرار گرفتند. علاوه بر این نمونه‌های برشکاری شده (سری اول)، برای اندازه‌گیری استحکام جوش در آزمون کشش مجددا یک مجموعه‌ی ۲۷ عددی دیگر (سری دوم) مانند نمونه‌های سری اول جوشکاری لیزر گردید.

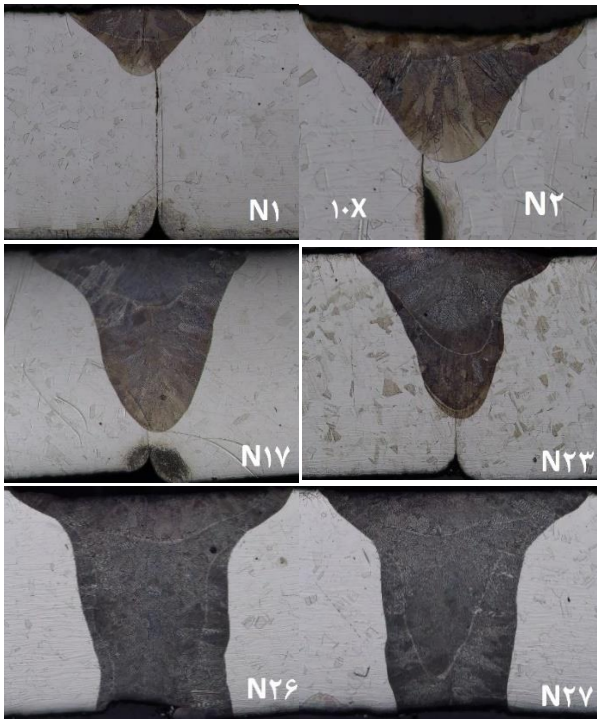
۴- اندازه‌گیری مشخصه‌های خروجی آزمایش‌ها

۴-۱- تعیین ابعاد مقطع جوش

برای تعیین عمق نفوذ و عرض مقطع جوش نمونه‌های سری اول مراحل نشان داده شده در شکل ۲ (الف) طی شد. ابتدا با فاصله ۳ میلیمتری از طرفین خط جوش هر یک از نمونه‌ها برشی توسط فرآیند برشکاری سیمی با تخلیه الکتریکی ایجاد شد. با این برشکاری جوش محیطی در وسط حلقه‌ی به طول ۶ میلیمتر از نمونه بلند جدا گردید. در مرحله ۲ با انجام دو برش قطری عمود بر هم یک چهارم حلقه خارج می‌شود. در مرحله ۳، جزء خارج شده با تکیه بر راهنمای نیم دایره‌ای هم قطر با داخل لوله، روی یک صفحه چسبانده شد. در مرحله ۴، قالب استوانه‌ای قرار گرفته در اطراف قطاع نمونه از رزین پلیمری پر شده است. در مرحله ۵، سطح برش نمونه جوش موجود در مانت پلیمری تا حد ۰/۵ میلیمتر سنباده‌زنی شد تا بر صفحه قطر لوله منطبق گردد. سپس با استفاده از خمیر ساینده درجه ۱ میکرون سطح نمونه پولیش ماشینی شد.



(الف)



(ب)

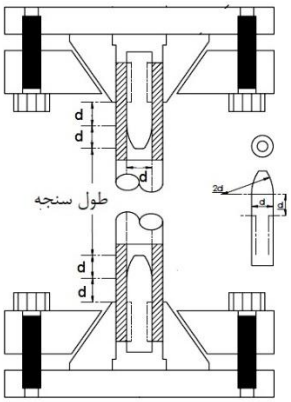
شکل ۲) الف- مراحل تعیین ابعاد مقطع جوش، ب- تصاویر مقطع جوش تعدادی از نمونه‌های طرح آزمایش تاگوچی (ملاک انتخاب داشتن یک ویژگی)

برای ظاهر شدن مقطع جوش، سطح پرداخت شده توسط محلول آگزالیک با ترکیب۱۰٪ (C2H2O4-2H2O) به مدت ۱۵ ثانیه با دستگاه استروئرز (Struers Lectropol-5) الکترواچانت شد. در مرحله ۶ از مقطع جوش به وسیله دوربین نصب شده روی میکروسکوپ نوری اولیمپوس با بزرگ نمایی۵۰ برابر مانند نمونه N۱۸ عکس برداری شد. اندازه‌گیری دو بعد پهنا و عمق جوش توسط نرم افزار آنالیز تصویر ام آی پی (MIP) انجام گردید. با این روش ابعاد مقطع جوش ۲۷ نمونه آزمایش تعیین و در ستون هفتم و هشتم جدول ۳ ثبت شد.

در شکل ۲ (ب) تصویر مقطع جوش ٦ نمونه انتخابی از جدول طرح آزمایش‌ها ارایه شده است. نمونه N۱ دارای کمترین عرض و عمق جوش است. در مقابل نمونه N۲٦ با بیشترین عرض و عمق، بزرگترین سطح مقطع جوش را دارد. نمونه N۲۷ در مقایسه با دیگر نمونه‌های با عمق نفوذ کامل (N۲۵ و N۲٦) از بالاترین نسبت عمق به عرض و بیشترین همگرایی در قسمت پایین مقطع برخوردار است. بنابراین نمونه N۲۷ کامل‌ترین مقطع جوش معرفی می‌شود. نمونه‌های N۱۷ و N۲۳ به ترتیب متقارن‌ترین و نامتقارن‌ترین مقطع جوش می‌باشند. نمونه N۲ با بزرگ نمایی ۱۰۰ برابر واضح‌ترین دانه‌بندی را نمایش می‌دهد.

۴-۲- آزمون کشش و تعیین استحکام جوش

آزمون کشش نمونه‌های سری دوم مطابق استاندارد ASTM -E8M-09 انجام شده است. بر اساس این استاندارد لوله‌های تا قطر ۲۵ میلیمتر با جا زدن پینی در هر طرف آن مانند شکل ۳ (الف) به ماشین کشش بسته می‌شوند.



(الف)

(ب)

شکل ۳) الف- نحوه آزمون کشش لوله، ب- لوله‌های جوشی آزمون کشش شده

این آزمون با دستگاه زوئیک (ZWICK/250) آلمان با سرعت ۳ میلیمتر بر دقیقه برای ۲۷ نمونه مطابق شکل ۳ (ب) انجام و مقدار آن در ستون آخر جدول ۳ ثبت گردید. در این ستون نمونه‌های آزمایش شماره N۱ و N۲۷ به ترتیب با ۱۵۱/۴۵۹ و ۵۶۲/۸۲۲ مگا پاسکال دارای کمترین و بیشترین استحکام کششی جوش می‌باشند.

جدول ۳) طرح آزمایش L۲۷ تاگوچی و پاسخ‌های خروجی

متغیّرهای ورودی					متغیّرهای خروجی اتصال جوش		
شماره آزمایش	W (kgF)	R (RPM)	F (Hz)	T (ms)	I (Amp)	عرض جوش(mm)	عمق نفوذ جوش (mm)	استحکام کششی (MPa)
$N_{۱}$	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۷۷	۰/۳۸	۱۵۱/۴۵
$N_{۲}$	۱	۱	۱	۱	۲	۰/۸۶	۰/۴۵	۱۶۸/۲۲
$N_{۳}$	۱	۱	۱	۱	۳	۰/۸۲	۰/۵۷	۱۹۵/۱۶
$N_{۴}$	۱	۲	۲	۲	۱	۱/۰۷	۰/۸۰	۲۸۷/۰۲
$N_{۵}$	۱	۲	۲	۲	۲	۱/۰۶	۰/۸۲	۲۶۲/۶۰
$N_{۶}$	۱	۲	۲	۲	۳	۱/۰۵	۰/۷۷	۳۱۹/۲۴
$N_{۷}$	۱	۳	۳	۳	۱	۱/۱۶	۰/۸۹	۳۰۷/۹۸
$N_{۸}$	۱	۳	۳	۳	۲	۱/۱۸	۰/۹۴	۳۳۵/۹۸
$N_{۹}$	۱	۳	۳	۳	۳	۱/۱۴	۰/۸۷	۳۲۱/۶۱
$N_{۱۰}$	۲	۱	۲	۳	۱	۰/۹۹	۰/۵۸	۲۰۷/۴۶
$N_{۱۱}$	۲	۱	۲	۳	۲	۰/۹۴	۰/۶۳	۲۷۰/۲۷
$N_{۱۲}$	۲	۱	۲	۳	۳	۰/۹۴	۰/۵۹	۲۷۵/۱۳
$N_{۱۳}$	۲	۲	۳	۱	۱	۱/۳۵	۰/۹۹	۳۵۶/۴۷
$N_{۱۴}$	۲	۲	۳	۱	۲	۱/۳۵	۰/۹۸	۴۲۰/۰۷
$N_{۱۵}$	۲	۲	۳	۱	۳	۱/۳۵	۱/۰۵	۴۳۶/۶۶
$N_{۱۶}$	۲	۳	۱	۲	۱	۱/۲۸	۰/۹۰	۲۵۵/۴۹
$N_{۱۷}$	۲	۳	۱	۲	۲	۱/۲۵	۱/۰۰	۳۲۳/۰۷
$N_{۱۸}$	۲	۳	۱	۲	۳	۱/۲۵	۱/۰۰	۳۵۷/۰۱
$N_{۱۹}$	۳	۱	۳	۲	۱	۱/۱۵	۰/۷۸	۲۷۲/۱۶
$N_{۲۰}$	۳	۱	۳	۲	۲	۱/۱۶	۰/۸۴	۳۱۲/۵۶
$N_{۲۱}$	۳	۱	۳	۲	۳	۱/۱۷	۰/۸۷	۳۱۹/۱۱
$N_{۲۲}$	۳	۲	۱	۳	۱	۱/۱۰	۰/۷۵	۳۴۹/۶۷
$N_{۲۳}$	۳	۲	۱	۳	۲	۱/۱۸	۰/۸۶	۳۷۳/۵۳
$N_{۲۴}$	۳	۲	۱	۳	۳	۱/۱۵	۰/۹۵	۳۸۲/۳۴
$N_{۲۵}$	۳	۳	۲	۱	۱	۱/۶۱	۱/۳۵	۵۵۸/۹۲
$N_{۲۶}$	۳	۳	۲	۱	۲	۱/۶۲	۱/۳۷	۵۵۰/۹۹
$N_{۲۷}$	۳	۳	۲	۱	۳	۱/۵۷	۱/۴۲	۵۶۲/۸۲

در ادامه تحقیق از داده‌های تجربی مندرج در جدول ۳ برای مدل‌سازی آماری و بهینه‌سازی مشخصه‌های اتصال جوش لیزر لوله‌های فولادی زنگ نزن AISI 316L استفاده شده است.

۵-آنالیز واریانس و مدل‌سازی فرآیند

مدل‌های ریاضی ابزارهایی کارآمد جهت بررسی رفتار یک سیستم در شرایط مختلف هستند. این مدل‌ها جایگزین فرآیند واقعی برای پیش‌بینی خروجی‌ها می‌شوند. در مدل‌سازی رگرسیونی توابع مختلف بر داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی برازش می‌شوند. سپس با تحلیل واریانس علاوه بر انتخاب مدل برتر، سهم تغییرات مشاهده شده در نتایج آزمایش‌ها ناشی از سه عامل (تاثیر پارامترها، اثر متقابل پارامترها و خطا در انجام آزمایش‌ها) تفکیک می‌گردد[19].

از نظر آماری یک عامل در صورتی دارای اثر اصلی است که با تغییر آن میانگین متغیّر پاسخ (خروجی فرآیند) تغییر نماید. بر این اساس در روش تجزیه و تحلیل آماری واریانس به منظور شناسایی پارامترهای موثر بر خروجی مورد بررسی و ترتیب تاثیرگذاری آن‌ها شاخص آماری F_{value} هر پارامتر محاسبه می‌شود. اگر F_{value} بزرگتر از مقدار F_{α,f_1,f_2}، ($F_{value}>F_{\alpha,f_1,f_2}$) باشد تاثیرگذاری پارامتر بر خروجی فرآیند تایید می‌شود. مقدار F_{α,f_1,f_2} از جدول توزیع فیشر در سطح اطمینان ۹۵٪ (ضریب ریسک α=۰/۰۵)، درجه آزادی پارامتر (f_1) و درجه آزادی خطا (f2) استخراج می‌شود[20].

در این مرحله از تحقیق با نرم افزار مینی تب (Minitab 20.version4) توابع رگرسیونی خطی، لگاریتمی و مرتبه دوم بر داده‌های جدول ۳ برازش و تحلیل واریانس انجام شده است. از بین آن‌ها توابع مرتبه دوم به دلیل کسب ضریب همبستگی تعدیل یافته و بیش‌بینی شده بالاتر ($R^2adj>96\%$ و $R^2pre>94\%$) و توزیع یکنواخت‌تر باقیماندها به عنوان مدل‌های ریاضی سه مشخصه خروجی اتصال جوش لیزر لوله های فولادی زنگ نزن AISI 316L انتخاب شدند. در روابط (۱، ۲ و ۳) به ترتیب مدل‌های انتخابی مربوط به عرض، عمق نفوذ و استحکام کششی جوش ارایه شده‌اند.

$$Width\ Of\ Weld = -4.278 + 0.03451\,I + 0.2650\,T + 0.2174\,F + 0.1319\,R - 0.001667\,I*F - 0.03911\,T*R \quad (۱)$$

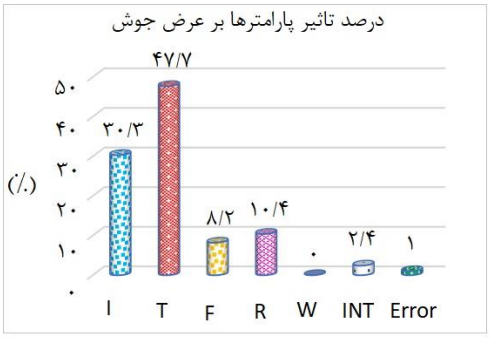
$$Depth\ Of\ Weld = -5.322 + 0.01493\,I + 0.14983\,T + 0.546\,F - 0.0835\,R + 0.00734\,W - 0.01857\,F*F \quad (۲)$$

$$UTS = 2386 - 31.67\,I - 477.9\,T + 35.50\,F + 16.81\,R + 4.692\,W - 15.55\,T*T + 6.513\,I*T \quad (۳)$$

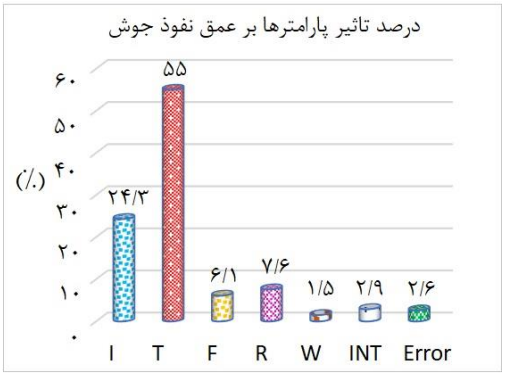
به عنوان نمونه فقط نتیجه آنالیز واریانس مربوط به عرض جوش در جدول (۴) ارائه شده است. در این جدول به غیر از پارامتر نیروی فشاری وارد به درز، ۴ پارامتر دیگر (شدت جریان، پهنای پالس، فرکانس و سرعت دورانی لوله) به دلیل ($F_{value}>F_{\alpha,f_1,f_2}$) بر عرض جوش موثرند و در مدل رگرسیونی (۱) حضور دارند.

در این مدل علاوه بر تاثیر تکی پارامترها، فرکانس با شدت جریان و پهنای پالس با سرعت چرخش لوله برای تغییر عرض جوش اثر متقابل دارند. در ستون آخر جدول (٤) میزان اثر اصلی پارامترها، اثر عوامل ناشناخته غیر قابل کنترل (خطا) و اثر متقابل پارامترها (INT) بر عرض جوش تعیین و در قالب نمودار درصد مشارکت شکل ٤ (الف) نشان داده شده‌اند.

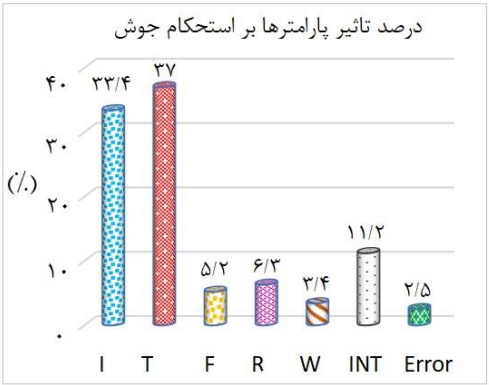
به طور مشابه برای دو خروجی دیگر (عمق نفوذ و استحکام جوش) آنالیز واریانس انجام و نمودار درصد مشارکت مربوطه در شکل ٤ (ب و ج) ارائه شده است. بر اساس نمودارهای شکل ٤ به ترتیب پهنای پالس، شدت جریان، سرعت دورانی لوله و فرکانس در تغییر هر سه مشخصه عرض، عمق نفوذ و استحکام جوش موثر هستند. حداکثر تاثیر پهنای پالس بر عمق نفوذ جوش ٥٥٪، شدت جریان بر استحکام ٣٣/٤٪، سرعت چرخش لوله بر پهنای جوش ١٠/٤٪ و فرکانس بر پهنای جوش ٨/٢٪ می‌باشد. مجموع تاثیر پارامترهای فرکانس، سرعت جوشکاری و نیروی وزنه وارد به درز بر مشخصه‌های خروجی کمتر از ٢٠٪، اثر متقابل پارامترها کمتر از ٣٪ و خطا در آزمایش‌ها کمتر از ٢/٥٪ می‌باشد.



(الف)



(ب)



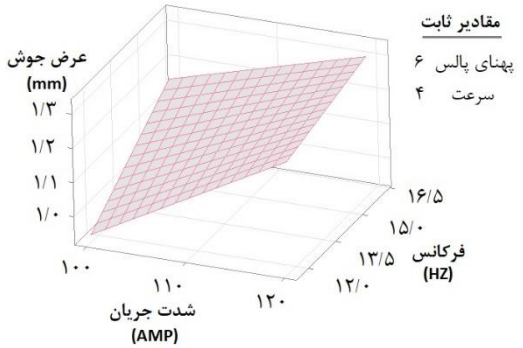
(ج)

شکل ۴) الف- درصد مشارکت (میزان تاثیرگذاری) پارامترها بر الف) عرض جوش ب- عمق نفوذ ج-استحکام جوش

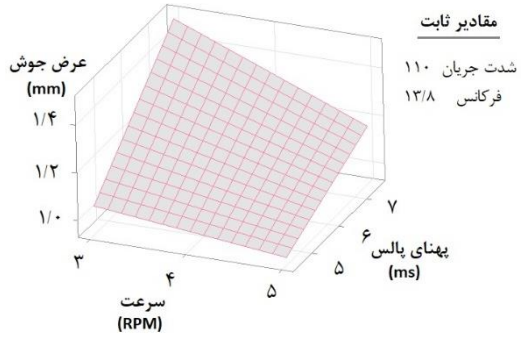
جدول ۴) آنالیز واریانس عرض مقطع جوش

منبع ایجاد تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره آزمون	درصد مشارکت
Source	DF	SS	Adj MS	F_{Value}	CP (%)
Modal	۶	۱/۲۲۵	۱/۲۲۵	۳۱٦/۹۳	۹۸/۹۶
I	۱	۰/۳۷۵	۰/۰۰۹	۱٤/۰۰	۳۰/۳۳
T	۱	۰/۵۹۰	۰/۰٦۹	۱۰۷/۸۸	٤۷/٦۸
F	۱	۰/۱۰۱	۰/۰۰۵	۸/۷۹	۸/۱۸
R	۱	۰/۱۲۸	۰/۰۰۷	۱۱/۸۸	۱۰/۳۷
F*I	۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰٤	٦/۲٦	۰/۳۳
R*T	۱	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	٤۰/۰٦	۲/۰۸
Error	۲۰	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲		۱/۰٤
Total	۲۶	۱/۲۳۸			
$F_{0.05,1,20}$= ۴/۳۵					

نیروی فشاری اعمالی به درز تماس دو لوله در حین جوشکاری بر عرض جوش بی‌اثر است و بیشترین تاثیر آن بر استحکام ٣/٤٪ است. نمودار اثرات متقابل شدت جریان با فرکانس و سرعت چرخش جوشکاری لوله با پهنای پالس بر مشخصه عرض جوش به ترتیب در شکل‌های ٥ و ٦ نشان داده شده است.

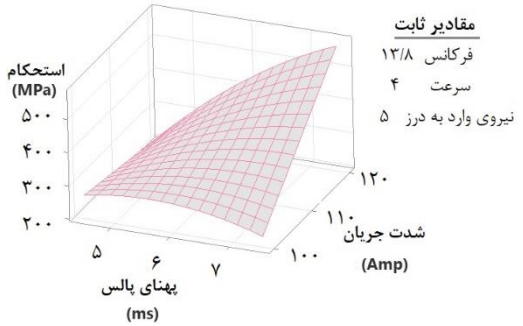


شکل ۵) اثر متقابل شدت جریان و فرکانس بر عرض مقطع جوش (برای سرعت ۴ دور بر دقیقه و پهنای پالس ۶ میلی ثانیه)



شکل ۶) اثر متقابل پهنای پالس و سرعت بر عرض مقطع جوش (برای شدت جریان ۱۱۰ آمپر و فرکانس ۱۳/۸ هرتز)

با استناد به این رویه‌ها کاهش عرض جوش با کاهش سه پارامتر پهنای پالس، فرکانس و شدت جریان و افزایش سرعت دورانی لوله ممکن می‌باشد. در شکل ۷ اثر متقابل پهنای پالس با شدت جریان بر استحکام جوش مشاهده می‌شود. بر اساس آن با افزایش این دو پارامتر استحکام جوش نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷) اثر متقابل پهنای پالس و شدت جریان بر استحکام جوش (برای سرعت ۴ دور بر دقیقه و فرکانس ۱۳/۸هرتز)

۶-تحلیل سیگنال به نویز (S/N)

در ادامه انجام آزمایش‌های طرح تاگوچی، سطح بهینه پارامترهای ورودی برای بهبود هر یک از متغیّرهای خروجی بدون اهمیت دادن به متغیر خروجی دیگر (بهینه سازی تک هدفه) با تحلیل سیگنال به نویز تعیین می‌شوند. در این راستا در مرحله اول به کمک توابع زیان، انحراف مقدار هر یک از خروجی‌های آزمایش‌ها از مقدار بهینه بدست می‌آید. این عمل در صورتی که کاهش مقدار خروجی مطلوب باشد از تابع زیان کمتر بهتر (L_{SB}) رابطه (٤) و اگر افزایش مقدار خروجی مطلوب باشد از تابع زیان بزرگتر بهتر (L_{HB}) رابطه (٥) انجام می‌شود. بنابراین در فرآیند جوشکاری لیزر لوله مقدار زیان پهنای جوش (کاهش آن بهتر) از رابطه (٤) و مقدار زیان استحکام کششی و عمق گرده جوش (افزایش آن بهتر) از رابطه (٥) برای هر یک از ۲۷ آزمایش جدول ۳ محاسبه گردید. در مرحله دوم میزان حساسیت هر خروجی به تغییر سطوح پارامترها با محاسبه نسبت سیگنال به نویز از رابطه (٦) تعیین شد.

$$L_{(sB)ij} = \frac{1}{r}\sum_{k=1}^{r}\left(y_{ijk}\right)^2 \Rightarrow L_{(sB)i1} = (weld\ width)^2 \quad (۴)$$

$$L_{(HB)ij} = \frac{1}{r}\sum_{k=1}^{r}\frac{1}{\left(y_{ijk}\right)^2} \Rightarrow L_{(HB)i2} = \frac{1}{(weld\ depth)^2} \quad (۵)$$

$$(S/N)_{ij} = -10\,log(L_{ij}) \quad (۶)$$

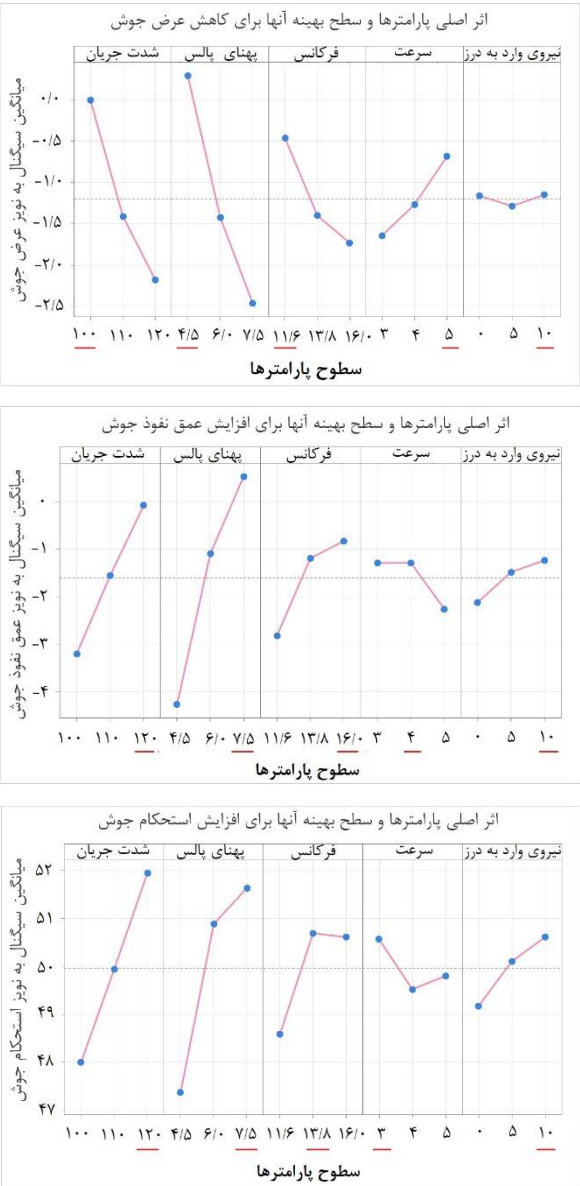
در روابط (۴ تا ۶) اندیس i شمارنده تعداد آزمایش‌های جدول طرح تاگوچی (۲۷..تا..۱=i)، j شمارنده تعداد متغیّر خروجی (عرض جوش (j=۱)، عمق نفوذ (j=۲) و استحکام کششی جوش (j=۳)) و k شمارنده دفعات انجام هر آزمایش (k=۱) می‌باشد. بدین ترتیب y_{ijk}، مقدار j مین متغیّر خروجی مربوط به آزمایش شماره i در تکرار k ام را بیان می‌نماید.

در مرحله سوم تحلیل تاگوچی از بین q سطح تغییر هر پارامتر ورودی تنها یکی از سطح‌ها در رسیدن خروجی مد نظر به وضعیت مطلوب به عنوان سطح موثرتر شناخته می‌شود. این سطح موثرتر پارامتر سطحی است که میانگین سیگنال به نویز خروجی به ازای آن سطح نسبت به دیگر سطوح بیشتر باشد. به این منظور از رابطه (۷) میانگین سیگنال به نویز j مین متغیّر پاسخ مربوط به آن تعداد (n) از آزمایش‌های جدول ۳ که پارامتر p ام آن در سطح تغییر q باشد محاسبه و نتیجه در نمودارهای شکل ۸ ارائه شده است[20]. در محور افقی این نمودارها سطح بهینه پارامترها (سطح با میانگین سیگنال به نویز بالاتر) با خط زیر از دیگر سطوح برجسته شده‌اند.

$$S/N_{(average)jpq} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S/N)_{ij} \quad (۷)$$

از بررسی نمودارهای شکل ۸ نتیجه می‌گیریم که چهار پارامتر پهنای پالس، شدت جریان، فرکانس و نیروی وارد به درز بر خلاف سرعت دورانی لوله در حال جوشکاری بر هر سه مشخصه خروجی تاثیر همسو دارند.

بدین صورت که با افزایش آن‌ها عرض، عمق نفوذ و استحکام جوش افزایش می‌یابند. این افزایش باعث بهبود عمق نفوذ و استحکام جوش و نامطلوب شدن عرض جوش می‌شود. بنابراین همانطور که



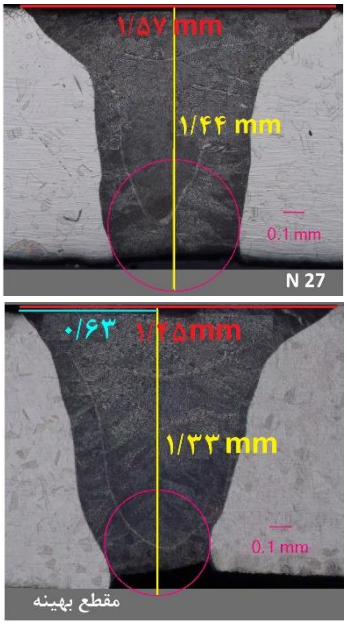
شکل ۸) نمودار اثرات اصلی پارامترها و سطح بهینه آن‌ها برای بهبود هر یک از مشخصه‌های خروجی

در شکل مشاهده می‌شود میانگین سیگنال به نویز برای بهبود عرض جوش (کاهش آن مطلوب) در سطح کم پارامترهای شدت جریان، پهنای پالس و فرکانس بیشتر است. سرعت دورانی لوله برای افزایش عمق نفوذ و استحکام جوش باید ۳ دور بر دقیقه و برای کاهش عرض جوش ۵ دور بر دقیقه تنظیم شود. اعمال فشار ۱۰ کیلوگرم نیرو به سطح تماس درز در حال جوشکاری بر عرض جوش تاثیری ندارد اما عمق نفوذ و استحکام جوش را بهبود می‌دهد.

۷-بهینه‌سازی چند هدفه مشخصه‌های اتصال جوش لیزر

عمق نفوذ در اتصالات جوشی با استحکام رابطه مستقیم دارد. اما با افزایش عمق نفوذ پهنای گرده جوش و ناحیه متاثر از حرارت نیز بزرگ می‌شوند. در جوشکاری مقاطع نازک هدف ایجاد اتصالی با عمق نفوذ برابر با ضخامت قطعه، پهنای گرده جوش کمتر و استحکام برابر با فلز پایه می‌باشد. همانطور که اشاره شد به دلیل تضاد در وضعیت مطلوب عمق نفوذ و استحکام (مقادیر بیشتر بهتر) با عرض جوش (مقادیر کمتر بهتر) و تاثیر همسو سه پارامتر پر اثر (پهنای پالس، شدت جریان و فرکانس) بر این مشخصه‌های خروجی، دستیابی همزمان به بهینه مطلق تک تک خروجی‌ها غیر ممکن است. اما با انجام بهینه‌سازی چند هدفه بر حسب میزان اهمّیت مشخصه‌های خروجی، سطح بهینه پارامترهای ورودی برای دستیابی همزمان به بهینه نسبی از مشخصه‌های خروجی تعیین می‌شوند. بهینه‌سازی چند هدفه جوشکاری لیزر لوله زنگ نزن AISI316L با استفاده از مدل‌های رگرسیونی (روابط ۵، ٦، ۷) و بر اساس تابع مطلوبیت در محیط نرم افزار مینی تب (Minitab 20.version4) انجام شده است.در این نرم افزار با اختصاص ضرایب وزنی۷۰ %، ۵۰ % و ۳۰ % به ترتیب، میزان اهمّیت استحکام، عمق نفوذ و پهنای مقطع جوش تعیین گردید. نتیجه بهینه سازی در جدول ۵ با معرفی ترکیب بهینه (شدت جریان۱۲۰ آمپر، پهنای پالس ۷/۵ میلی ثانیه، فرکانس۱٦ هرتز، سرعت محیطی لوله ۳/۷ دور بر دقیقه، نیروی وارد به درز ۱۰ کیلوگرم نیرو) ارایه شده است.

به منظور صحه‌گذاری (اعتبار سنجی) ترکیب بهینه، بر اساس پارامترهای پیشنهادی جدول ۵، نمونه بهینه‌ای با جوشکاری لیزر ساخته شد. سپس مشخصه‌های خروجی این نمونه اندازه‌گیری و ثبت گردید. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر خطای اندازه‌گیری شده بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی ٦٪ می‌باشد. بنابراین اعتبار ترکیب بهینه تایید می‌شود. در شکل ۹، مقطع جوش نمونه N27 به دلیل داشتن عمق نفوذ کامل و استحکام کششی بالاتر نسبت به دیگر نمونه‌های طرح آزمایش (جدول۳) برای مقایسه با نمونه بهینه نمایش داده شده است.



شکل ۹) مقطع جوش نمونه بهینه و نمونه شماره N۲۷ از جدول طرح آزمایش

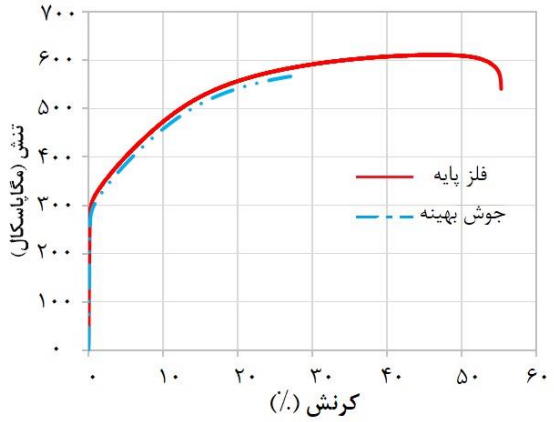
همانطور که مشاهده می‌شود قطر دایره همگرایی در پایین و عرض مقطع جوش در بالا برای نمونه بهینه کوچکتر است. علاوه بر این منحنی دیواره‌های جوش در نمونه بهینه یکنواخت و همگراتر می‌باشد.

در شکل ۱۰ نمودار آزمون کشش فلز پایه و اتصال جوش بهینه با هم مقایسه شده‌اند. با استناد به آن تنش تسلیم مربوط به جوش نمونه بهینه به تنش تسلیم فلز پایه بسیار نزدیک است. همچنین استحکام کششی نمونه بهینه (٥٦٦/٨٨ مگا پاسکال) به ۹۲٪ استحکام فلز پایه (٦١٠/٩٣ مگاپاسکال) رسیده است.

علت اختلاف ۸ درصدی استحکام جوش نمونه بهینه نسبت به فلز پایه از یک سو به تغییرات ریز ساختاری فلز جوش، تشکیل منطقه متاثر از حرارت و وجود تمرکز تنش در محل اتصال مربوط می‌باشد. از سوی دیگر طبق استاندارد ASTEM-E8M-09 لوله‌ی مورد استفاده در این مقاله (دارای قطر خارجی ۲۵ میلیمتر) با اندازه کامل تحت آزمون کشش قرار گرفته است. بنابراین خصوصیات اتصال جوش در ابعاد بزرگتری ارزیابی شده و این مسئله بر استحکام نهایی

جدول ۵) نتایج بهینه سازی چند هدفه فرآیند جوشکاری لیزر لوله جدارنازک فولادی زنگ نزن L316

سطح بهینه پارامترها (ترکیب بهینه)					اعتبار سنجی	مقادیر حاصله برای خروجی‌ها		
I	T	F	R	W		استحکام جوش (MPa)	عمق نفوذ گرده جوش (mm)	عرض گرده جوش (mm)
۱۲۰	۷/۵	۱۶	۳/۷۲	۱۰	مقدار پیش بینی	۵۴۴/۲۷۷	۱/۳۳	۱/۵۲۷
					مقدار آزمایش عملی	۵۶۶/۹۸	۱/۳۳	۱/۴۵
					خطا	۴ %	۰ %	۶ %



شکل ۱۰) نمودار تنش کرنش لوله فولادی L316 بدون جوش (فلز پایه) و لوله با جوش بهینه

لوله با جوش بهینه تاثیرگذار می‌باشد. در حالی‌که اگر به جای جوشکاری لوله، جوشکاری ورق مورد مطالعه باشد؛ بخش کوچکی از جوش در نمونه آماده شده برای آزمون کشش ارزیابی می‌گردد. به دلایل فوق در شرایط مساوی (ضخامت ورق با دیواره لوله و تنظیم پارامترها یکسان باشد) احتمال برابری استحکام کششی جوش بهینه با استحکام فلز پایه، در ورق‌ها بیشتر از لوله‌های تست شده در اندازه کامل است.

در تست کشش یک نمونه‌ی دارای جوش، سهم تغییر شکل پذیری فلز جوش از قسمت‌های دیگر نمونه کمتر است. در صورتی که استحکام فلز جوش نتواند به استحکام فلز پایه برسد کرنش کلی نمونه جوشی با کرنش فلز پایه برابر نخواهد شد. بنابراین در این تحقیق اتصال جوش بهینه در لوله فولادی زنگ نزن مورد مطالعه از نظر ابعادی (عرض و عمق نفوذ) و استحکام نسبت به تمامی نمونه‌های آزمایش برتر می‌باشد و با فلز پایه رقابت نزدیکی دارد.

۸-نتیجه‌گیری

فرآیند جوشکاری لیزر یکی از روش‌های اتصال دائم با کاربرد روز افزون می‌باشد. اما مطالعات انجام شده برای شناخت این فرآیند و بررسی اثر پارامترهای آن بر مشخصه‌های اتصال ایجاد شده در لوله‌ها محدود است. بنابراین در این پژوهش جوشکاری لیزر لوله‌های فولادی زنگ نزن AISI316L مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا بر اساس رویکرد طراحی آزمایش‌ها و اجرای طرح $L_{۲۷}$ تاگوچی دو سری ۲۷ عددی نمونه ساخته شد. سپس با مدل‌سازی، تحلیل‌های آماری و سیگنال به نویز اثر پارامترهای مهم پرتوی لیزر (پهنای پالس، شدت جریان، فرکانس) و سرعت دورانی لوله بر سه مشخصه خروجی اتصال (عرض، عمق نفوذ مقطع جوش و استحکام کششی جوش) در لوله‌های فولادی زنگ نزن L۳۱۶ تعیین گردید. همزمان با این پارامترها برای اولین بار تاثیر نیروی وارد به درز در حال جوشکاری بر مشخصه‌های مذکور بررسی شد. در ادامه برخی از نتایج مهم این تحقیق بیان شده است.

• دو پارامتر پهنای پالس و شدت جریان با مجموع بیش از ۷۰٪ مشارکت، در تغییر سه مشخصه عرض، عمق نفوذ و استحکام جوش بیشترین تاثیر را دارند. همچنین با افزایش پهنای پالس، شدت جریان و فرکانس این سه مشخصه خروجی افزایش می‌یابند.

• پارامتر سرعت دورانی لوله‌ی در حال جوشکاری با سه مشخصه خروجی رابطه معکوس دارد. علاوه بر این تاثیر تغییر سرعت بر عرض جوش بیشتر از تاثیر آن بر عمق و استحکام می‌باشد.

• با افزایش نیروی فشاری به درز تماس دو لوله در حال جوشکاری، عمق نفوذ و به خصوص استحکام اتصال بیشتر شده اما عرض جوش تغییری نخواهد کرد.

در پایان با انجام بهینه سازی چند هدفه، سطح بهینه پارامترها برای بهبود نسبی سه مشخصه خروجی بر حسب درصد اهمّیت آنها (استحکام (۷۰٪) ، عمق نفوذ (۵۰٪)، عرض جوش(۳۰٪) تعیین گردید. سپس نمونه‌ای بر اساس ترکیب بهینه (شدت جریان۱۲۰ آمپر، پهنای پالس ۷/۵ میلی ثانیه، فرکانس۱۶ هرتز، سرعت دورانی لوله ۳/۷ دور بر دقیقه، نیروی وزنه وارد به درز ۱۰ کیلوگرم نیرو) جوشکاری لیزر شد و مشخصه‌های اتصال آن با نمونه کامل‌تر طرح آزمایش‌ها ($N_{۲۷}$) مقایسه گردید. افزایش استحکام جوش نمونه بهینه تا ۹۰٪ استحکام فلز پایه، نزدیک‌تر شدن عمق نفوذ جوش به ضخامت دیواره لوله و یکنواختی منحنی مرز مشترک جوش با فلز پایه، از جمله دستاوردهای بهینه‌سازی می‌باشند. بطور کلی نتایج محاسباتی و آزمایش‌های تجربی مبین کارآمدی و دقت رویکرد پیشنهادی در این تحقیق می‌باشد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده ایشان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی: توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

1 -Unigovski Ya.B, Lothongkum G, Gutman E.M, Alush D , Cohen R. Low-cycle fatigue behavior of 316L-type stainless steel in chloride solutions, Corrosion Science. 2009;51:3014-3020.

2 -Lee J. H, Park S.H, Kwon H. S, Kim G.S, Lee C.S. Laser tungsten inert gas, and metal active gas welding of DP780 steel: Comparison of hardness, tensile properties and fatigue resistance. Materials and Design. 2014;64:559-565.

3 -Carvalho S.M, Baptista C.A.R.P, Lima M.S.F. Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in

aircraft pneumatic systems, International Journal of Fatigue. 2016;90:47-56.
4 -Soltani H. M, Tayebi M. Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding, Journal of Alloys and Compounds. 2018;767:112-121.
5 -Lee H. K, Han H. S, Son K. J, Hong S.B. Optimization of Nd:YAG laser welding parameters for sealing small titanium tube ends, Materials Science and Engineering. 2006;A 415:149-155.
6 -Harinath Y.V, Gopal K.A, Murugan S, Albert S.K. Study on laser welding of fuel clad tubes and end plugs made of modified 9Cr–1Mo steel for metallic fuel of Fast Breeder Reactors small titanium tube ends, Journal of Nuclear Materials. 2013;435:32-40.
7 -Hong J. Joung C. Y, Kim K. H, Heo S.H. Study on Fiber Laser Welding Conditions for the Fabrication of a Nuclear Fuel Rod, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing. 2014;15:777-781.
8 -Kumar N, Mukherjee M, Bandyopadhyay A. Comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels, Optics & Laser Technology. 2017;88:24-39 .
9 -Prabakaran M.P, Kannan G.R. Optimization of laser welding process parameters in dissimilar joint of stainless steel AISI316/AISI1018 low carbon steel to attain the maximum level of mechanical properties through PWHT, Optics and Laser Technology. 2019;112:314-322.
10 -Sathiya P, Abdul Jaleel M.Y, Katherasan D. Shanmugarajan B. Optimization of laser butt welding parameters with multiple performance characteristics, Optics & Laser Technology. 2011;43:660-673.
11 -Chen H.c, Bi G, Lee B. Y, Cheng C. K. Laser welding of CP Ti to stainless steel with different temporal pulse shapes, Journal of Materials Processing Technology. 2016;231:58-65 .
12 -Wang X, Lu F, Wang H. P, Cui H, Tang X, Wu Y. Mechanical constraint intensity effects on solidification cracking during laser welding of aluminum alloys, Journal of Materials Processing Technology. 2015;218:62-70.
13 -Torabi A, Kolahan F. Optimizing pulsed Nd:YAG laser beam welding process parameters to attain maximum ultimate tensile strength for thin AISI316L sheet using response surface methodology and simulated annealing algorithm, Optics and Laser Technology. 2018;103:300-310.
14 -Javid Y, Ghoreishi M, Torkamany M. J. Preplaced laser cladding of WC powder on Inconel 718 by Nd:YAG laser, Modares Mechanical Engineering, 2015;15(7):98-106, (In Persian).
15 -Han W, Byeon J, Park K. Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd: YAG laser beam, Journal of Materials Processing Technology. 2001;113 (1):234–237.
16 -Sathiya P, Panneerselvam K, Jaleel M.A. Optimization of laser welding process parameters for super austenitic stainless steel using artificial neural networks and genetic algorithm, Mater. Des. 2012;36:490–498.
17 -Han Q, Kim D, Kim D, Lee H, Kim N. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4, J. Mater. Process Technol. 2012;212 (5):1116–1122.
18 -Sivagurumanikandan N, Saravanan S, Kumar G.S, Raju S, Raghukandan K. Prediction and optimization of process parameters to enhance the tensile strength of Nd:YAG laser welded super duplex stainless steel, Optik . 2018;157:833–840.
19 -Kumar S, Batish A, Singh R, Singh T. P. A hybrid Taguchi artificial neural network approach to predict surface roughness during electric discharge machining of titanium alloys, Journal of Mechanical Science and Technology. 2014;28(7):2831-2844.
20- Nikravan A.R, Kolahan F. Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate and surface roughness in wire cut machining of Ti-6Al-4V alloy, Modares Mechanical Engineering, 1394;15(9):141-152. (in persian).