



## تحلیل تجربی و آماری فرآیند جوشکاری لیزر Nd:YAG پالسی برای بهینه‌سازی ابعاد اتصال در لوله جدار نازک فولاد زنگ نزن 316L

علی‌رضا نیک‌روان<sup>۱</sup>، فرهاد کلاهان<sup>۲\*</sup>، محمود شریعتی<sup>۳</sup>

۱- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: kolahan@um.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

به دلیل اهمیت کیفیت جوش در تجهیزات تحت فشار، در این تحقیق کاربرد لیزر Nd:YAG پالسی در جوشکاری لوله‌های فولادی جدارنازک AISI316L مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای ورودی شامل شدت جریان، پهنای پالس، فرکانس، سرعت دورانی و نیروی فشاری وارد به درز تماس دو لوله‌ی تحت جوشکاری هستند. عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض مقطع جوش دو مشخصه خروجی در نظر گرفته شدند. رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی با برازش رگرسیونی توابع بر داده‌های جمع‌آوری شده از طرح آزمایش مرکب مرکزی برقرار شد. بر اساس تجزیه و تحلیل واریانس، تأثیر نیروی فشاری وارد به درز بر نسبت عمق به عرض جوش ۲/۵٪ و مجموع تأثیر پهنای پالس و شدت جریان در تغییر هر یک از دو خروجی ۸۴٪ است. کامل شدن عمق نفوذ جوش و افزایش نسبت عمق به عرض جوش دو دستاورد مرحله بهینه‌سازی هستند. در پایان با هدف ارتقاء بیشتر کیفیت اتصال، بر اساس سطح بهینه پارامترها نمونه‌هایی داخل محفظه پر شده از آرگون جوشکاری لیزر شد. با این اقدام، نسبت عمق به عرض، استحکام کششی و کرنش شکست نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون، نسبت به نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در شرایط معمول (حفاظت از حوضچه مذاب با نازل آرگون) به ترتیب ۱۴٪، ۷٪ و ۳۷٪ افزایش یافتند.

### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۷ مرداد ۱۴۰۳

### کلیدواژگان:

جوشکاری لیزر

لوله فولادی زنگ نزن

طراحی آزمایش

مدل‌سازی رگرسیونی

## Experimental and statistical analysis of pulsed Nd:YAG laser welding process for dimension optimization of connection in the AISI 316L stainless steel thin-walled tube

Alireza Nikravan<sup>1</sup>, Farhad Kolahan<sup>2\*</sup>, Mahmoud Shariati<sup>3</sup>

1- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* Corresponding Author's Email: kolahan@um.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 18 May 2024

Accepted: 7 August 2024

#### Keywords:

Laser Welding

Stainless Steel Pipe

Design of Experiment

Regression Modeling

### Abstract

Due to the importance of the weld quality in pressurized equipment, this research investigates the application of Nd:YAG pulse laser in welding of thin-walled AISI316L steel pipes. The input parameters include current intensity, pulse width, frequency, rotational speed, and compressive force applied to the seam of the two tubes being welded. Depth of weld penetration and the weld depth-to-width ratio (aspect ratio) were selected as two output characteristics. The relationship between input and output parameters was obtained by fitting regression functions on the data of central composite design (CCD) of experiments. According to the analysis of variance, the influence of the ratio of compressive force applied to the weld seam to the aspect ratio is 2.5%, and total influence of pulse width and the current on each of the two outputs is 84%. Completion of the depth of penetration and increasing of the weld aspect ratio are two main findings of the optimization process. In the end, to improve the joint quality, based on the optimal level of the parameters, samples were laser-welded in a chamber filled with argon. With this regard, aspect ratio, tensile strength, and failure strain at the samples manufactured by optimum parameters in argon chamber, were improved by 14%, 7%, and 37% compared to samples in normal condition (protection of the molten pool with an argon nozzle), respectively.

### Please cite this article using:

Nikravan A, Kolahan F, Shariati M. Experimental and statistical analysis of pulsed Nd:YAG laser welding process for dimension optimization of connection in the AISI 316L stainless steel thin-walled tube. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jun 21;11(4):56-71. doi: 10.22034/IJME.2024.455648.1954 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

امروزه با وجود دسترسی روزافزون به مواد جدید، قطعات فولادی همچنان پرکاربرد هستند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی از جمله AISI 316L به دلیل داشتن خواص مکانیکی و شیمیایی عالی همراه با ویژگی‌های منحصربه‌فرد، در صنایع پالایشگاهی، هسته‌ای و دریایی مورد توجه هستند [۱]. جوشکاری فرآیندی رایج برای اتصال و آب‌بندی لوله‌ها و ساخت تجهیزات تحت فشار در این صنایع است. اتصال جوش لیزری در رقابت با اتصال سایر روش‌های رایج جوشکاری از کیفیت بالاتری برخوردار است [۲-۴]. برتری جوشکاری لیزر به واسطه تمرکز بالای انرژی بر واحد سطح، به خصوص در اتصال لوله‌ها و مقاطع جدارنازک مشهود است. کیفیت اتصال جوش لیزری علاوه بر انرژی پرتو به نحوه پوشش گاز محافظ، سرعت جوشکاری و نرخ سرد شدن جوش وابسته است. در این راستا جنبه‌های مختلف جوشکاری لیزر مورد توجه محققین قرار دارد. در ادامه تعدادی از پژوهش‌های مرتبط با این تحقیق بررسی شده است.

هانلی و همکاران [۲] پس از رقابت سه روش جوشکاری برای اتصال ورق‌های فولادی DP780 دریافتند که نمونه‌های جوشکاری با قوس الکترو تنگستنی<sup>۱</sup> او با پرتوی لیزر<sup>۲</sup> به ترتیب دارای بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین سطح مقطع جوش هستند. علاوه بر این استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری لیزر و بعد از آن نمونه‌های جوشکاری با قوس الکترو تنگستنی بیشتر از نمونه‌های جوشکاری با قوس الکترو فلزی<sup>۳</sup> گزارش شده است. همچنین کرنش طولی نمونه‌های هر سه روش جوشکاری کمتر از کرنش فلز پایه به دست آمده است. میانگین سختی در نمونه‌های جوش لیزر بیشترین مقدار و در نمونه‌های جوشکاری قوس با الکترو فلزی کمترین مقدار حاصل شده است. چن و همکاران [۵] در جوشکاری ورق تیتانیوم به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ تفاوت تأثیر سه نوع شکل پالس پرتوی لیزر ان دی یگ را بر استحکام، عمق نفوذ و ریزساختار اتصال روی هم، بررسی نمودند. بر اساس گزارش تحقیق پالس‌های پله‌دار در مقایسه با پالس‌های مستطیلی رایج باعث افزایش استحکام جوش تا ۷۰٪ استحکام تیتانیوم خواهند شد. هانگ و همکاران [۶] برای ساخت میله سوخت رآکتور، درپوش آن را به لوله زیرکونیومی به روش جوشکاری لیزر متصل نمودند. در این تحقیق تأثیر بیشینه توان، موقعیت نقطه کانونی و فرکانس پرتو بر ابعاد اتصال جوش لیزر و میزان خوردگی آن با استفاده از گاز محافظ آرگون و هلیوم مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش حداکثر توان، ناحیه متأثر از حرارت بزرگ می‌شود. علاوه بر این خوردگی اتصال جوش لیزر با گاز آرگون یا هلیوم تفاوت چندانی ندارد. کاروالهو و همکاران [۳] خط جوش ایجاد شده در طول لوله‌های تیتانیومی به روش جوشکاری با قوس الکترو تنگستنی و جوشکاری با پرتوی لیزر پیوسته را از نظر ابعاد هندسی، رفتار خستگی و ریزساختار مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که عرض مقطع جوش در نمونه‌های جوشکاری قوس الکترو تنگستنی ۵ برابر نمونه‌های جوشکاری پرتو لیزر است. علاوه بر این، عمر خستگی و میکرو سختی نمونه‌های جوش لیزری بالاتر از نمونه‌های جوش قوس الکترو تنگستنی گزارش شده است. کومار و همکاران [۷] با جمع‌آوری داده‌های طرح آزمایش مرکب مرکزی<sup>۴</sup> و انجام تجزیه و تحلیل واریانس، تأثیر پارامترهای پرتوی پالسی لیزر ان دی یگ را بر پهنا، میزان سختی و استحکام کششی اتصال جوش در فولادهای زنگ نزن SS304 و SS316 بررسی نمودند. در نتایج مشخص شد که پهنای پالس و توان پرتو تأثیر بیشتری بر استحکام اتصال دارند. در این تحقیق برای بهبود خروجی‌ها سطح بهینه پارامترها تعیین شده است.

از دیگر تحقیقات صورت گرفته در جوشکاری فولادهای زنگ نزن می‌توان به تحقیق سلطانی و همکاران [۴] اشاره نمود. در این تحقیق اتصال لب‌به‌لب ورق‌های فولادی AISI 304 به AISI 316L با دو روش جوشکاری پرتوی لیزر و جوشکاری قوس با الکترو تنگستنی ایجاد شد. در جوشکاری لیزر پالسی، اثر ولتاژ، توان متوسط، قطر نقطه کانونی و سرعت و در جوشکاری قوس با الکترو تنگستنی، اثر ولتاژ، شدت جریان و سرعت، بر مشخصه‌های اتصال (پهنای جوش، اندازه ناحیه تحت تأثیر حرارت و استحکام کششی) بررسی و مقایسه شده است. در نتایج این تحقیق، تشکیل ناحیه تحت تأثیر حرارت فقط در سمت فولاد AISI 304 گزارش شده است. علاوه بر این در حین جوشکاری نمونه‌ها با قوس الکترو تنگستنی، دمیدن گاز محافظ هم‌زمان از رو و زیر به خط جوش باعث کوچک‌تر شدن اندازه منطقه تحت تأثیر حرارت شده است. داس و همکاران [۸] برای ساخت الکترو باتری‌ها و خازن‌های ظرفیت بالا،

<sup>1</sup> Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

<sup>2</sup> Laser Beam Welding (LBM)

<sup>3</sup> Gas Metal Arc Welding (GMAW)

<sup>4</sup> Central Composite Design (CCD)

کاربرد جوشکاری لیزری در اتصال ۲۰ لایه روی هم از ورق فولادی 316L فوق نازک (به ضخامت  $25 \mu\text{m}$ ) به بستری هم‌جنس (با ضخامت  $0.2 \text{ mm}$ ) را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از پرتو لیزر آبی رنگ (دارای طول موج  $450 \text{ nm}$ ) تاثیر تغییر انرژی حرارتی بر واحد طول (با تنظیم توان در  $500 \text{ W}$  و تغییر سرعت خطی:  $6/5 - 7/5 - 8/5 - 9/5$  متر بر ثانیه) را بر ابعاد، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال تعیین نمودند. در تصاویر میکروسکوپی از مقاطع جوش مشخص شد که تغییرات انرژی ورودی بر عمق نفوذ جوش موثر و بر عرض مقطع جوش کم اثر است. علاوه بر این تغییر انرژی حرارتی در بازه مورد بررسی منجر به ایجاد ترک، تخلخل و پاشش مذاب نشد. در سرعت  $4/5$  متر بر ثانیه، عمق نفوذ جوش در لایه‌ها و بستر زیر آن‌ها کامل و نیروی برشی برای جدا سازی اتصال لایه‌ها بیشتر از نیروی برشی مربوط به نمونه‌های ساخته شده با دیگر سرعت‌ها گردید. در پایان این تحقیق تاکید شد که با تنظیم سرعت و کنترل انرژی حرارتی اتصال لایه‌های ورق‌های فوق نازک به یکدیگر امکان‌پذیر است. چنگ و همکاران [۹] تاثیر میزان انرژی حرارتی (متر/ژول) پرتوی لیزر پیوسته و چهار حالت انجام جوشکاری (صاف، افقی، عمودی از بالا به پایین و عمودی از پایین به بالا) را بر شکل ظاهری، میزان تخلخل و استحکام اتصال لب به لب در ورق اینکونل ۶۱۷ (به ضخامت  $3 \text{ mm}$ ) مورد بررسی قرار دادند. برای هر حالت جوشکاری دو نمونه یکی با مقدار انرژی حرارتی کم و یکی با انرژی حرارتی زیاد ساخته شد. بر اساس نتایج تحقیق با اعمال انرژی حرارتی کم (به دلیل کاهش حجم مذاب و پایداری سوراخ کلید) نمونه‌های جوشکاری شده در هر یک از چهار حالت جوشکاری از نظر ظاهر، میزان تخلخل و استحکام تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشتند؛ درحالی‌که مقداری از توان پرتو لیزر و سرعت که منجر به تولید انرژی حرارتی زیاد گردید، میزان تخلخل و ظاهر اتصال را در حالت‌های مختلف انجام جوشکاری تغییر داد. با اعمال حرارت زیاد، سطح جوش نمونه‌ها در حالت جوشکاری صاف و عمودی پایین به بالا، مقعر شد. علاوه بر این با اعمال حرارت زیاد در حین انجام جوشکاری افقی و عمودی رو به پایین، تخلخل ناشی از ناپایداری سوراخ کلید ایجاد و باعث افت خواص مکانیکی اتصال گردید. میرزالو و همکاران [۱۰] تاثیر پارامترهای تنظیمی پرتوی لیزر پالسی (فرکانس، زمان روشنی پالس و بیشینه توان) را بر استحکام و مشخصات ابعادی نقطه جوش اتصال روی هم ورق‌های نازک فولاد زنگ نزن AISI 316 بررسی نمودند. در این تحقیق با انجام ۹ آزمایش بر اساس طرح تاگوچی و آنالیز سیگنال به نویز سطح بهینه پارامترها برای دستیابی به حداکثر استحکام جوش و کاهش قطر نقطه جوش تعیین شده است. ژو و همکاران [۱۱] اثر انرژی پالس پرتوی لیزر بر ریزساختار و خصوصیات اتصال روی هم ورق فولادی هستلوی با ضخامت  $0.5 \text{ mm}$  به فولاد زنگ نزن  $304$  به ضخامت  $0.2 \text{ mm}$  را بررسی نمودند. همچنین تاثیر میزان انرژی در ایجاد روش انتقال حرارت از پرتو به نمونه (هدایت، تشکیل سوراخ کلید، نفوذ) را تعیین نمودند. بر اساس نتایج تحقیق با افزایش انرژی پرتو، پهنای مقطع جوش در درز میانی ورق‌ها و عمق نفوذ آن به‌طور خطی افزایش یافت. علاوه بر این، مقدار انرژی لازم برای افزایش استحکام کششی و تغییر مد شکست اتصال جوش از برشی به کششی مشخص گردید. چودزنسکی و همکاران [۱۲] به مطالعه تجربی جوشکاری لیزر پالسی بدون درز ورق‌های فولادی AISI 1005 با ضخامت  $1/7 \text{ mm}$  پرداختند. در این تحقیق با اجرای ۱۳ آزمایش بر اساس طرح باکس بهنکن تاثیر سه پارامتر بیشینه توان، قطر نقطه کانونی و پهنای پالس بر عمق نفوذ، سختی و استحکام جوش بررسی شده است. در نتایج مشخص شد که با افزایش پهنای پالس و کاهش قطر نقطه تمرکز پرتو (افزایش چگالی انرژی) عمق نفوذ جوش افزایش یافته است. علاوه بر این با رسم نمودار پارتو به ترتیب قطر نقطه اثر پرتو، بیشینه توان، پهنای پالس بر عمق نفوذ جوش تاثیر گذارند. به دلیل عدم دستیابی به نفوذ کامل بر اساس سطح بهینه پارامترها، جوشکاری دوطرفه انجام شد. در توزیع میزان سختی اتصال ایجاد شده با جوشکاری یک‌طرفه و دوطرفه تفاوت چندانی مشاهده نشده است. استحکام کششی نمونه حاصل از جوشکاری دوطرفه (نفوذ کامل) به  $90\%$  فلز پایه رسیده است. جی یانگ و همکاران [۱۳] تاثیر میزان انرژی حرارتی بر واحد طول ( $J/m$ ) و فشار محیط خلاء بر مشخصه‌های اتصال (جوش پذیری، ریزساختار و خواص مکانیکی) جوش لیزر بدون درز در ورق آلیاژ منیزیم AZ31 به ضخامت  $10 \text{ mm}$  را بررسی نمودند. آن‌ها با تغییر فشار محفظه جوشکاری لیزر در مقادیر  $50$ ،  $100$ ،  $10$  و  $1$  کیلوپاسکال و اعمال ۴ مقدار تغییر انرژی حرارتی (از طریق ثابت نگهداشتن توان پرتو در مقدار  $3 \text{ kW}$  و تغییر سرعت در مقادیر  $m/s$   $0.9$ ،  $1/2$ ،  $1/5$  و  $1/8$ ) ۲۰ نمونه ساختند. با انجام جوشکاری در فشار محیط  $100 \text{ kPa}$  (ناپایداری سوراخ کلید و آشفستگی جریان مذاب در حوضچه جوش بوسیله تصاویر دوربین سرعت بالا ثبت شد. در حالی‌که در فشار  $10 \text{ kPa}$  سوراخ کلید پایدار و جریان حوضچه آرام مشاهده شد. بر این اساس در تصاویر مقطع جوش نمونه‌ها مشخص شد که کاهش فشار از  $10 \text{ kPa}$  به  $1 \text{ kPa}$  و افزایش سرعت تا  $1/2$  متر بر ثانیه باعث افزایش عمق نفوذ، کاهش عرض جوش و عدم وجود عیوب داخلی در اتصال آلیاژ منیزیم شده است. با کاهش بیشتر فشار اتاقت جوشکاری از  $1 \text{ kPa}$  به  $0.1 \text{ kPa}$  علاوه بر کاهش عمق نفوذ جوش نمونه‌ها نسبت به عمق نفوذ نمونه‌های جوشکاری

شده در فشار ۱ kPa، مرزهای دو طرف مقطع جوش دچار انحنای شدید شدند. همچنین انجام جوشکاری در فشارهای کمتر از فشار محیط منجر به کاهش میانگین اندازه دانه تا ۴۵٪ و کاهش تخلخل گردید.

با گسترش لیزرهای رشته‌ای امروزه نسل جدیدی از آن‌ها با قابلیت ترکیب دو پرتو هم محور (یک پرتو در مرکز و یک پرتو در غشاء) ساخته شده است. به منظور بهبود کیفیت اتصال جوش‌های لیزری تحقیقاتی با به‌کارگیری از این نوع لیزر در حال گسترش است. از جمله این پژوهش‌ها به تحقیق ژو و همکاران [۱۴] می‌توان اشاره کرد. آن‌ها با تغییر جداگانه توان مرکزی و غشایی در مقادیر دلخواه اقدام به ساخت ۱۵ نمونه اتصال لب‌به‌لب در ورق فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به ضخامت ۴/۵ میلی‌متری نمودند. در نتایج مشخص شد با افزایش توان پرتوی غشایی نسبت به توان پرتوی مرکزی عرض جوش زیاد می‌شود؛ درحالی‌که با افزایش توان پرتوی مرکزی عمق نفوذ بیشتر شد. در ادامه این تحقیق با ثابت نگهداشتن انرژی حرارتی بهینه (مربوط به نمونه‌های با عمق نفوذ کامل) و تغییر توان دو پرتو (الف: توان پرتوی مرکزی بیشتر از توان پرتوی غشایی - ب: هر دو توان مرکزی و غشایی برابر - ج: توان غشایی برابر صفر) سه نمونه (الف، ب، ج) ساخته و از نظر میزان پاشش مذاب جوش، عرض مقطع جوش، اندازه دانه‌بندی، میکروسختی و استحکام مقایسه شدند. در هر سه نمونه عمق نفوذ جوش کامل شد. میزان پاشش مذاب جوش نمونه الف کمترین و جوش نمونه ج انگشتی شکل (باریک و کشیده) شد. میکروسختی ناحیه نقطه مرکزی جوش نمونه الف ۳۵٪ از فلز پایه بیشتر شد. استحکام کششی نمونه‌های الف، ب و ج به ترتیب به ۹۵٪، ۷۶٪ و ۶۲٪ استحکام فلز پایه رسید. با برتری نمونه الف نسبت به دیگر نمونه‌ها، مشخص شد؛ تأثیر توان پرتو غشایی در کنترل میزان پاشش مذاب و توان مرکزی در افزایش استحکام ورق‌های فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ بسیار مهم هستند. در پایان با انجام این تحقیق افزایش کیفیت اتصال در فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ ایجاد شده با جوشکاری لیزر هم محور دو پرتویی نسبت به جوشکاری لیزر تک پرتویی (توان پرتوی غشایی مساوی صفر) اثبات شد.

به دلیل کاربرد گسترده فولادهای زنگ‌نزن در ساخت تجهیزات تحت فشار و تفاوت تأثیر تابش لیزر بر سطوح انحنادار نسبت به سطح تخت، در این تحقیق جوشکاری لیزر لوله‌هایی از این نوع فولاد مورد مطالعه قرار گرفته است. وجه تمایز این تحقیق بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای تنظیمی پرتوی لیزر و نیروی استاتیکی وارد به درز در حال جوشکاری بر ابعاد مقطع اتصال جوش لب‌به‌لب در لوله‌های فولادی زنگ نزن AISI 316L است.

## ۲- رویکرد تحقیق

### ۲-۱- مواد و تجهیزات

نمونه‌های آزمایش با جوشکاری لیزر لوله‌های بدون درز از فولاد AISI 316L ساخته شدند. در جدول ۱ ترکیب عناصر این فولاد 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 316L [۱۵]

عناصر	درصد وزنی	عناصر	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	
دانسیته	۷۹۹۰ Kg/m <sup>3</sup>	استحکام نهایی	۵۹۰ MPa
ظرفیت گرمایی ویژه	۰/۵ KJ/Kg. k	تنش تسلیم	۲۹۰ MPa
ضریب هدایت حرارتی	۱۶/۲ w/m.k	سختی	۱۴۳ HV
		ازدیاد طول	۵۶٪

به منظور موقعیت‌دهی دقیق مقطع دو لوله، تنظیم سرعت چرخش آن‌ها و همچنین اعمال نیروی استاتیکی وارد به درز در حال جوشکاری، مکانیزمی مجهز به یک سروموتور مطابق شکل ۱ طراحی و پس از ساخت روی ماشین لیزر نصب گردید. در این مکانیزم ابتدا روی هر یک از دو محور لوله جازده می‌شود. 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 تماس یافته و هم‌محور می‌شوند؛ سپس کابل فلزی با قطر ۴ میلی‌متر از سوراخ مرکزی محورها عبور داده شده است. با قرار گرفتن مجموعه محوری، مابین مرغک سوراخ‌دار و گلوبی متصل به سروموتور، انتقال دور به لوله ممکن می‌شود. پس از عبور ادامه کابل فلزی از قرقره و آویزان نمودن وزنه استوانه‌ای به آن فشار استاتیکی (برابر وزن استوانه تقسیم بر مساحت مقطع لوله) روی سطح درز تماس دو لوله به هنگام جوشکاری توزیع می‌شود. گاز محافظ هم‌زمان از رو و زیر به درز محیطی لوله در حال جوشکاری دمیده شده است. نرخ جریان آرگون از خروجی نازل برای پوشش دهی نقطه فرود پرتو لیزر (liter/minute) ۱۸ تنظیم شد. علاوه بر این از مسیر سوراخ‌های انتقال گاز در محورها، محیط درز اتصال از زیر با نرخ جریان ۴ لیتر بر دقیقه تحت پوشش کامل آرگون قرار گرفت.



شکل ۱ مکانیزم نصب‌شده روی ماشین لیزر برای موقعیت‌دهی لوله و اعمال نیرو به درز تماس

پرباربردترین نوع لیزر حالت جامد، لیزر ان‌دی‌یگ می‌باشد. در این نوع لیزر با افزودن نئودیم به یوتریوم، آلومینیوم و گارنت، ماده فعال ساطع‌کننده پرتو ساخته می‌شود [۱۷]. در جوشکاری لوله‌های نمونه از ماشین لیزر ان‌دی‌یگ پالسی کمپانی هرولیزر با توانایی تولید پرتویی به طول موج ۱۰۶۰ نانومتر استفاده شده است. در این ماشین با تنظیم پارامترهای فرکانس در بازه ۲۰۰-۱ هرتز و پهنای پالس ۲۰-۰/۲ میلی‌ثانیه، پرتویی با انرژی پالس ۴۰-۰ ژول و توان متوسط ۴۰۰-۰ وات ساطع می‌شود. با حرکت میز ماشین در دو جهت X و Y و جابجایی عدسی در راستای عمود بر میز (جهت Z) در فاصله کانونی آن (۸۵ میلی‌متر) قطر نقطه تمرکز پرتو روی درز محیطی تماس دو لوله ۰/۹ میلی‌متر ایجاد شد.

## ۲-۲- طراحی آزمایش‌ها

با بررسی تعدادی از تحقیقات پیشین [۱۷-۲۱] و تجربه حاصل از پیش‌آزمایش‌ها، پارامترهای تنظیمی پرتوی لیزر ( شدت جریان (I)، پهنای پالس (T)، فرکانس (F) )، سرعت چرخش لوله (R) و نیروی استاتیکی وارد به سطح درز (W) به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند. سطوح تغییر این پارامترها برای اجرای آزمایش‌های اصلی در جدول ۲ تعیین شده است. با ۵ پارامتر مورد بررسی و ۳ سطح تغییر آن‌ها تعداد  $3^5=243$  ترکیب آزمایش قابل انجام است. با صرف هزینه و زمان زیاد، اجرای همه ترکیب‌های آزمایش ممکن است؛ اما تضمینی برای کسب نتایج دقیق‌تر نیست. طراحی آزمایش‌ها ابزاری است که به کمک آن با انجام تعداد محدودی آزمایش داده‌های کافی مورد نیاز برای مدل‌سازی فرآیند و بررسی اثر پارامترها بر خروجی مدنظر جمع‌آوری می‌شود. از بین روش‌های مختلف طراحی آزمایش‌ها، طرح مرکب مرکزی یکی از طرح‌های مفید و پرباربرد است. ویژگی این طرح، پیشنهاد تعدادی از ترکیب‌های مهم آزمایش برای اجرا است. همچنین در این طرح، آزمایش با سطح صفر پارامترها (نقطه مرکزی) چندین بار تکرار می‌شود [۱۲].

جدول ۲ پارامترهای انتخابی و سطوح تغییر آن‌ها

پارامترها	متغیر نشانه	واحد	سطوح تغییر پارامتر				
			۲	۱	۰	-۱	-۲
شدت جریان جرقه	I	Amp	۱۲۰	۱۱۵	۱۱۰	۱۰۵	۱۰۰
زمان روشنی پالس	T	ms	۸/۴	۷/۶	۶/۸	۶	۵/۲
فرکانس	F	Hz	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲
سرعت چرخش	R	RPM	۵	۴/۲۵	۳/۵	۲/۷۵	۲
نیروی اعمالی به درز جوش	W	kgF	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۰

در این پژوهش با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۱ برای پنج پارامتر مورد مطالعه با ۳ سطح تغییر، یک طرح مرکب مرکزی شامل ۳۲ آزمایش مطابق جدول ۳ برای ساخت نمونه‌های جوشکاری لیزر در نظر گرفته شد. این جدول پس از تشریح نحوه آماده‌سازی و جوشکاری نمونه‌ها و اندازه‌گیری ابعاد مقطع جوش آن‌ها در پایان‌بخش ۴ تکمیل و ارائه شده است.

### ۲-۳- آماده‌سازی و ساخت نمونه‌های آزمایش

در مرحله آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا از شاخه‌های ۶ متری لوله‌ی بدون درز فولادی AISI 316L (با ابعاد: قطر خارجی ۲۵، قطر داخلی ۲۲/۵ و ضخامت دیواره ۱/۲۵ برحسب میلی‌متر) ۷۰ قطعه به طول ۹۵ میلی‌متر به کمک فرآیند برشکاری سیمی بر پایه تخلیه الکتریکی (وایرکات) جدا گردید. سپس با فرآیند تراشکاری، مقطع لوله‌های برش خورده، پرداخت و بر محور داخلی عمود شدند. همچنین قبل از جوشکاری، مقطع لوله‌ها با استون چربی‌زدایی شدند. در ادامه با تنظیم پارامترهای لیزر بر اساس هر یک از ردیف‌های جدول ۳ و جوشکاری لب‌به‌لب هر جفت لوله‌ی برش خورده، نمونه‌ای به طول ۱۹۰ میلی‌متر دارای جوش محیطی در وسط مطابق شکل ۲ ساخته شد.



شکل ۲ نمونه‌های جوشکاری لیزر حاصل از اجرای طرح آزمایش CCD

### ۲-۴- تعیین ابعاد مقطع جوش نمونه‌ها

برای تعیین ابعاد مقطع جوش، ابتدا به فاصله ۳ mm در دو سمت خط جوش هر نمونه برشی به کمک فرآیند وایرکات ایجاد شد. با این برشکاری، جوش محیطی در وسط حلقه‌ی به طول ۶ میلی‌متر از نمونه بلند جدا گردید. سپس با ایجاد دو برش قطری عمود بر هم، یک‌چهارم حلقه برای عملیات پرداخت‌کاری در مانیت پلیمری قالب‌گیری شد [۲۲]. سطح برش نمونه قرارگرفته در مانیت با ۰/۵ میلی‌متر سنباده‌زنی بر صفحه قطر لوله منطبق گردید؛ سپس این سطح به وسیله ماشین پولیش و خمیر ساینده گرید ۱ میکرون پرداخت نهایی شد. برای ظاهر شدن مقطع جوش، سطح پولیش شده توسط محلول آگزالیک با ترکیب ۱۰٪ (C2H2O4-2H2O) به مدت ۱۵ ثانیه به کمک دستگاه استروئرز سری ۵، الکترواچ شد. در ادامه با استفاده از دوربین نصب‌شده روی میکروسکوپ نوری اولیمپوس با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر از مقطع جوش عکس‌برداری شد. در تصویر هر نمونه دو بعد پهنا و عمق نفوذ مقطع جوش توسط نرم‌افزار آنالیز تصویر اندازه‌گیری شد. با این رویه اندازه پهنا و عمق نفوذ جوش ۳۲ نمونه آزمایش تعیین و در دو ستون آخر جدول ۳ ثبت گردید. در ادامه تحقیق از داده‌های تجربی مندرج در جدول ۳ برای مدل‌سازی آماری فرآیند جوشکاری لیزر لوله‌های فولادی زنگ‌نزن AISI 316L استفاده شده است.

جدول ۳ طرح آزمایش‌های CCD و پاسخ‌های خروجی

شماره آزمایش	متغیرهای ورودی					متغیرهای خروجی	
	I (Amp)	T (ms)	F (Hz)	R (RPM)	W (kgF)	عمق نفوذ جوش (mm)	نسبت عمق به عرض جوش
N <sub>1</sub>	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۰/۴۷	۰/۳۹۱۶
N <sub>۲</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۸	۰/۴۷۵۴
N <sub>۳</sub>	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۸۹	۰/۶۷۹۳
N <sub>۴</sub>	-۱	۱	۱	-۱	۱	۰/۶۵	۰/۵۲۰۰
N <sub>۵</sub>	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۰/۳۸	۰/۳۵۸۴
N <sub>۶</sub>	۱	۱	-۱	۱	-۱	۰/۷۷	۰/۶۵۲۵
N <sub>۷</sub>	۱	-۱	۱	-۱	۱	۰/۵۸	۰/۴۸۳۳
N <sub>۸</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴۵	۰/۴۴۱۱
N <sub>۹</sub>	۰	۰	۰	۰	۲	۰/۶۳	۰/۵۲۹۴
N <sub>۱۰</sub>	-۱	-۱	۱	۱	۱	۰/۴۲	۰/۴۰۳۸
N <sub>۱۱</sub>	۰	۲	۰	۰	۰	۰/۸۱	۰/۶۶۳۹
N <sub>۱۲</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۰	۰/۴۶۲۹
N <sub>۱۳</sub>	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۰/۵۸	۰/۵۰۰۰
N <sub>۱۴</sub>	-۱	۱	۱	۱	-۱	۰/۵۴	۰/۴۵۷۶
N <sub>۱۵</sub>	۰	۰	۲	۰	۰	۰/۵۷	۰/۴۹۵۶
N <sub>۱۶</sub>	۱	-۱	۱	۱	-۱	۰/۵۳	۰/۴۱۰۸
N <sub>۱۷</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۹	۰/۵۰۰۰
N <sub>۱۸</sub>	-۱	۱	-۱	۱	۱	۰/۵۴	۰/۴۵۰۰
N <sub>۱۹</sub>	۲	۰	۰	۰	۰	۰/۸۵	۰/۵۴۸۳
N <sub>۲۰</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴۸	۰/۴۰۰۰
N <sub>۲۱</sub>	۱	۱	۱	-۱	-۱	۰/۹۸	۰/۶۴۱۸
N <sub>۲۲</sub>	۱	۱	-۱	-۱	۱	۰/۸۲	۰/۶۲۱۲
N <sub>۲۳</sub>	۰	۰	۰	۲	۰	۰/۵۲	۰/۴۴۸۲
N <sub>۲۴</sub>	۱	-۱	-۱	۱	۱	۰/۴۴	۰/۳۷۲۸
N <sub>۲۵</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵۴	۰/۴۲۸۵
N <sub>۲۶</sub>	۰	۰	-۲	۰	۰	۰/۴۹	۰/۴۱۵۲
N <sub>۲۷</sub>	۰	-۲	۰	۰	۰	۰/۲۸	۰/۲۳۷۲
N <sub>۲۸</sub>	-۲	۰	۰	۰	۰	۰/۳۹	۰/۳۳۶۲
N <sub>۲۹</sub>	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	۰/۳۳	۰/۲۸۴۴
N <sub>۳۰</sub>	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۰/۳۲	۰/۳۰۷۶
N <sub>۳۱</sub>	۰	۰	۰	-۲	۰	۰/۶۰	۰/۴۷۶۱
N <sub>۳۲</sub>	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴۹	۰/۳۷۶۹

### ۳- مدل‌سازی فرآیند و آنالیز واریانس

مدل‌های ریاضی بر پایه داده‌های تجربی، ابزارهایی کارآمد جهت بررسی رفتار یک سیستم در شرایط مختلف هستند. از این مدل‌ها برای پیش‌بینی خروجی یک فرآیند و بهینه‌سازی آن استفاده می‌شود. این نوع مدل‌ها به روش آماری رگرسیون ساخته می‌شوند. در این روش ابتدا بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی، ارتباط متغیرهای خروجی برحسب پارامترهای تنظیمی فرآیند با

توابعی همچون خطی، توانی، لگاریتمی برقرار می‌گردد. سپس با تحلیل واریانس علاوه بر بررسی دقت مدل، سهم تغییرات مشاهده شده در نتایج آزمایش‌ها ناشی از سه عامل (تأثیر پارامترها، اثر متقابل پارامترها و خطا در انجام آزمایش‌ها) تفکیک می‌گردد [۲۳]. از نظر آماری در صورتی که با تغییر مقدار یک پارامتر، میانگین متغیر پاسخ (خروجی فرآیند) تغییر نماید، آن پارامتر بر خروجی اثرگذار است. بر این اساس در روش تجزیه و تحلیل واریانس به منظور شناسایی پارامترهای مؤثر بر خروجی مورد بررسی و ترتیب تأثیرگذاری آن‌ها، آماره آزمون (F<sub>value</sub>) هر پارامتر محاسبه می‌شود. در صورتیکه F<sub>value</sub> بزرگ‌تر از مقدار F<sub>α, f1, f2</sub>، F<sub>α, f1, f2</sub> باشد تأثیرگذاری پارامتر بر خروجی فرآیند تأیید می‌شود. مقدار F<sub>α, f1, f2</sub> از جدول توزیع فیشر در سطح اطمینان ۹۵٪ (ضریب ریسک α=0.05)، درجه آزادی پارامتر (f1) و درجه آزادی خطا (f2) استخراج می‌شود [۲۴].

در این بخش از تحقیق در محیط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، توابع خطی، لگاریتمی و مرتبه دوم بر داده‌های جدول ۳ برازش و تحلیل واریانس آن‌ها انجام شد. تابع مرتبه دوم عمق نفوذ جوش و تابع 2FI نسبت عمق به پهنای جوش با کسب ضریب همبستگی تعدیل‌یافته و پیش‌بینی شده، بالاتر از ۹۰ درصد (R<sup>2</sup><sub>adj</sub>>91% و R<sup>2</sup><sub>pre</sub>>92%) و همچنین توزیع یکنواخت باقیمانده‌ها به‌عنوان مدل ریاضی هر یک از دو بعد مقطع جوش لب‌به‌لب لوله‌های فولادی زنگ‌نزن AISI 316L برگزیده و در روابط ۱ و ۲ ارائه شدند.

$$Depth\ Of\ Weld = 20.4262 - 0.2953 I - 0.7718 T - 0.4233 F - 0.02611 R + 0.00441 W + 0.00859 I * T + 0.00412 I * F + 0.000913 I^2 \quad (1)$$

$$Aspect\ Ratio = 2.7006 - 0.0269 I - 0.4690 T - 0.0264 F - 0.03368 W + 0.00567 I * T - 0.0032 T * W + 0.004263 F * W \quad (2)$$

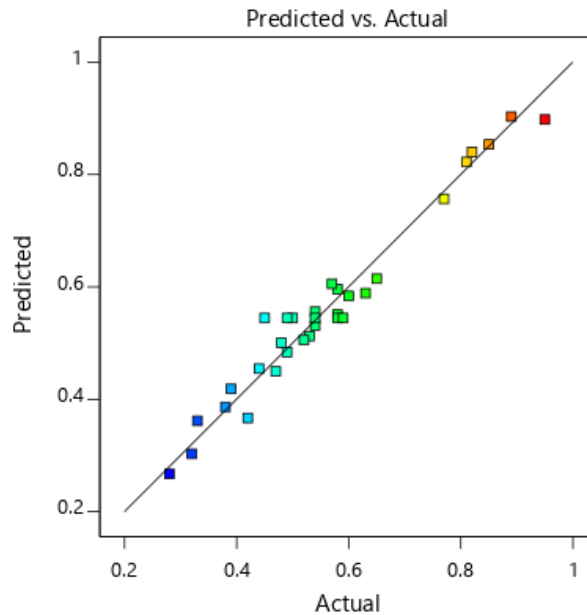
به‌عنوان نمونه فقط نتیجه آنالیز واریانس مدل مرتبه دوم عمق نفوذ جوش در جدول ۴ مشاهده می‌شود. در این جدول برای همه پارامترهای ورودی دو شرط آماری (F<sub>value</sub>>F<sub>α, f1, f2</sub> و P<sub>value</sub><0.05) برقرار است. بنابراین هر ۵ پارامتر مورد بررسی بر عمق نفوذ جوش مؤثرند و در رابطه ۲ حضور دارند. در این رابطه ریاضی علاوه بر اثر اصلی پارامترها، شدت جریان با دو پارامتر پهنای پالس و فرکانس برای تغییر عمق نفوذ جوش اثر متقابل دارند.

جدول ۴ آنالیز واریانس عمق نفوذ جوش

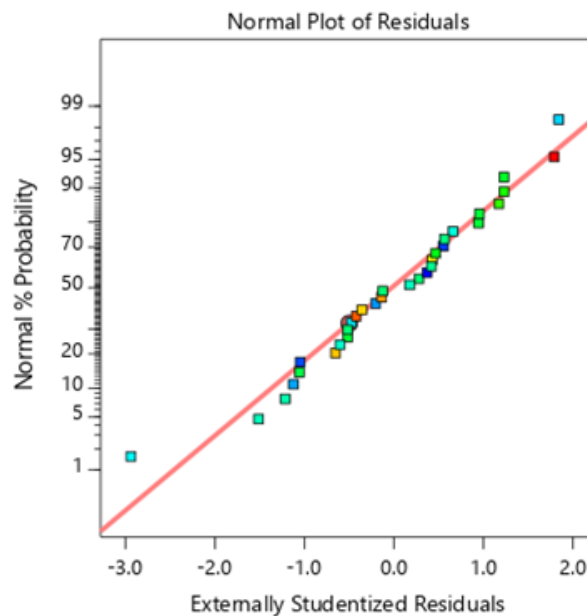
درصد مشارکت	آماره آزمون	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع ایجاد تغییر
CP (%)	F <sub>Value</sub>	Adj MS	SS	DF	Source
۹۳/۲	۷۱/۱۶	۰/۱۰۳۸	۰/۸۳۰۳	۸	مدل
۳۲/۵	۱۹۴/۶۰	۰/۲۸۳۸	۰/۲۸۳۸	۱	I
۵۳/۱۳	۳۱۶/۷۸	۰/۴۶۲۰	۰/۴۶۲۰	۱	T
۲/۲۲	۱۵/۲۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲	۱	F
۰/۷۰	۶/۳۱	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۹۲	۱	R
۱	۸/۰۲	۰/۰۱۱۷	۰/۰۱۱۷	۱	W
۱/۸	۱۲/۹۶	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۸۹	۱	T*I
۰/۴	۴/۶۷	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۸	۱	F*I
۱/۴	۱۰/۷۲	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۵۶	۱	I*I
		۰/۰۰۱۵	۰/۰۳۳۵	۲۳	خطا
			۰/۸۶۳۹	۳۱	مجموع
	R <sup>2</sup> (pred)=93.28%			R <sup>2</sup> (adj)=94.77%	

در شکل ۳ میزان انطباق عمق نفوذ پیش‌بینی شده با مدل برگزیده (رابطه ۱) بر مقدار واقعی حاصل از اجرای آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. در این نمودار، پراکندگی نقاط در نزدیکی خط انطباق کامل قرار دارند. همچنین در شکل ۴ توزیع باقیمانده‌های مدل مشخصه عمق جوش، وضعیت نرمالی را نشان می‌دهند. بنابراین هر دو نمودار دقت بالای مدل‌های برگزیده را تأیید می‌نمایند.





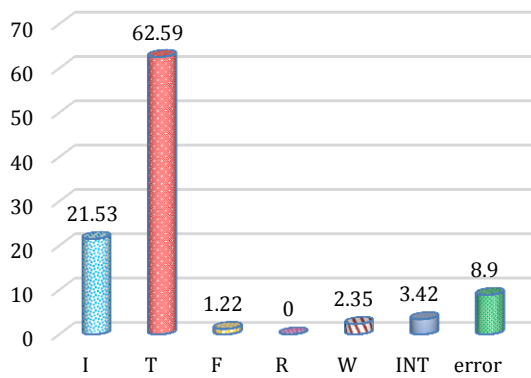
شکل ۳ نمودار میزان انطباق پیش‌بینی مدل عمق نفوذ بر مقدار آزمایش



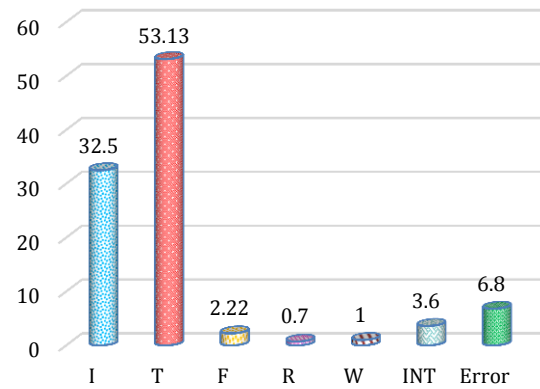
شکل ۴ نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌های مدل پیش‌بینی عمق نفوذ

با استفاده از داده‌های ستون آخر جدول ۴ میزان اثر اصلی پارامترها، اثر عوامل ناشناخته غیر قابل کنترل (خطا) و اثر متقابل پارامترها (INT) بر عمق نفوذ (نمودار الف) و همچنین بر نسبت عمق به عرض جوش (نمودار ب) در شکل ۵ نشان داده شده است. در این نمودارها دو پارامتر پهنای پالس و شدت جریان با مجموع بیش از ۸۵٪ مشارکت، بر هر دو مشخصه مورد بررسی تأثیر غالب دارند. البته تأثیر پهنای پالس بر عمق جوش ۱/۶ برابر و بر نسبت عمق نفوذ جوش ۳ برابر بیشتر از تأثیر شدت جریان بر این دو خروجی است. از آنجایی که بیشینه توان به شدت جریان تنظیمی دستگاه وابسته است و مقدار انرژی حرارتی پرتو در هر پالس برابر حاصل ضرب بیشینه توان در پهنای پالس است، بنابراین با افزایش شدت جریان و پهنای پالس انرژی حرارتی پرتو افزایش یافته و موجب افزایش عمق نفوذ جوش شده است. مجموع اثر اصلی سه پارامتر، فرکانس سرعت دورانی لوله در حین جوشکاری و نیروی فشاری وارد به درز بر دو مشخصه ابعادی مقطع جوش کمتر از ۴٪ حاصل شد. علاوه بر این اثر متقابل پارامترها (INT) و عوامل غیرقابل کنترل (خطا) بر این بعد جوش به ترتیب ۳/۵٪ و ۹٪ است.

(ب) درصد تاثیر پارامترها بر نسبت عمق به عرض جوش

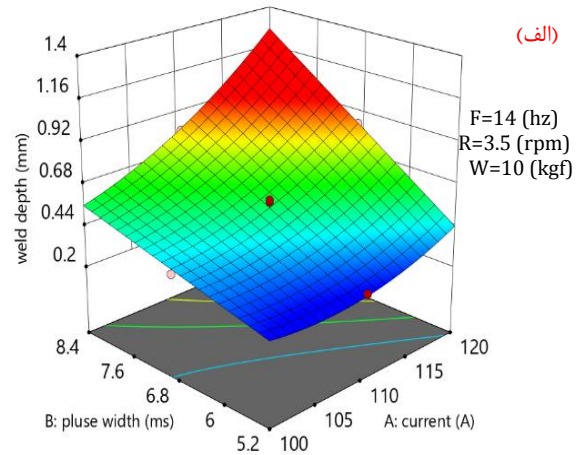
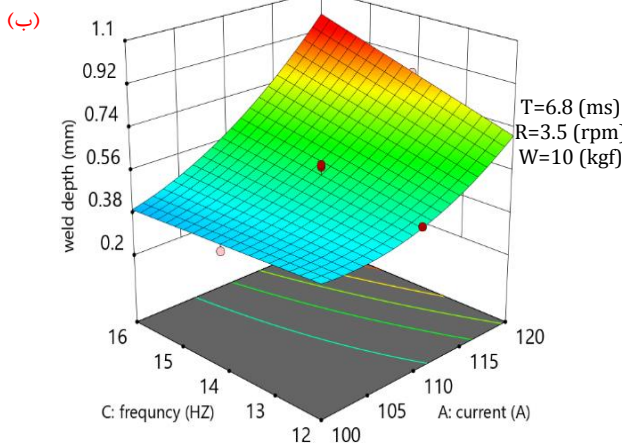


(الف) درصد تاثیر پارامترها بر عمق نفوذ جوش

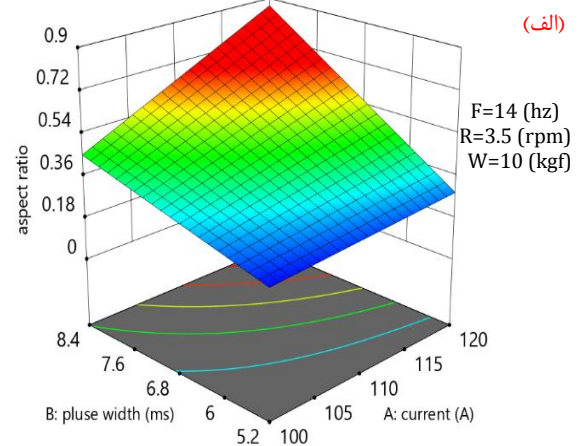
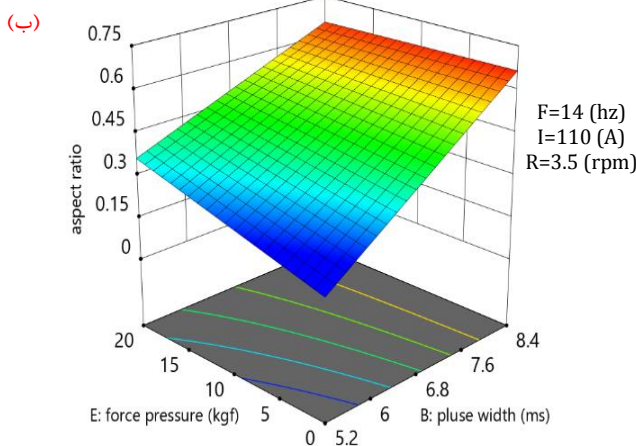


شکل ۵ میزان مشارکت (درصد تأثیرگذاری) پارامترها بر (الف) عمق نفوذ و (ب) نسبت عمق به عرض

در شکل‌های ۶ و ۷، اثر متقابل پارامترها بر عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض مقطع جوش مشاهده می‌شود. با استناد به این رویه‌ها افزایش هر سه پارامتر شدت جریان، پهنای پالس و فرکانس موجب افزایش عمق نفوذ جوش شده است.



شکل ۶ اثر متقابل (الف) شدت جریان و پهنای پالس، (ب) شدت جریان و فرکانس بر عمق نفوذ جوش



شکل ۷ اثر متقابل (الف) شدت جریان و پهنای پالس، (ب) پهنای پالس و نیروی وارد به درز بر نسبت عمق به پهنای جوش

## ۴- بهینه‌سازی مشخصه‌های اتصال جوش لیزر لوله

با افزایش عمق نفوذ جوش تا حد ضخامت ورق، استحکام اتصال افزایش می‌یابد. هم‌زمان با افزایش عمق نفوذ، پهنای جوش و منطقه متأثر از حرارت نیز بزرگ می‌شوند. گسترش ناحیه متأثر از حرارت موجب بروز ترک و افت کیفیت اتصال می‌شود. به دلیل تضاد در وضعیت مطلوب عمق نفوذ (مقدار بیشتر بهتر) با پهنای جوش (مقدار کمتر بهتر) و وابسته بودن این دو بعد جوش به هم، بهینه‌سازی آن‌ها ضروری است. در فرآیند بهینه‌سازی با جستجوی سطح بهینه پارامترهای ورودی هر دو مشخصه خروجی، عمق و نسبت عمق به عرض جوش برحسب میزان اهمیتشان به‌طور نسبی بهبود می‌یابند. در این بخش از تحقیق بهینه‌سازی دوهدفه جوشکاری لیزر لوله زنگ‌نزن AISI 316L با استفاده از مدل‌های رگرسیون برگزیده (روابط ۱ و ۲) در محیط نرم‌افزار دیزان اکسپرت انجام شده است. دو هدف برای بهینه‌سازی در جدول ۵ در نظر گرفته شده است. هدف اول بیشینه شدن نسبت عمق به عرض جوش و هدف دوم برابر شدن عمق نفوذ جوش با ضخامت دیواره لوله است. با اختصاص ضریب اهمیت ۶۰٪ برای عمق نفوذ و ۴۰٪ برای نسبت عمق به عرض، اولویت تحقق اهداف، تعیین شده است.

جدول ۵ اهداف بهینه‌سازی و میزان اهمیت متغیرهای خروجی

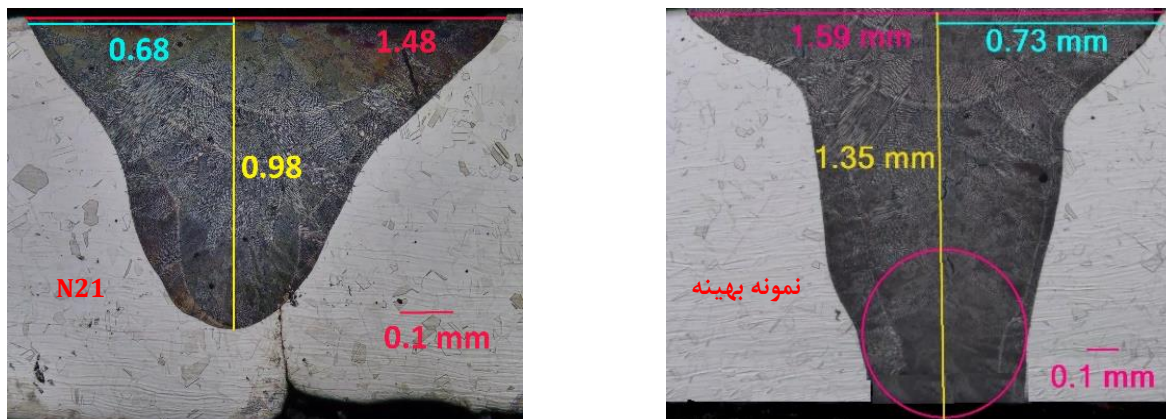
متغیرهای خروجی	تغییرات خروجی در جدول ۳		هدف بهینه مورد انتظار	ضریب وزنی
	حداقل	حداکثر		
پهنای جوش	۱/۰۲	۱/۴	بدون قید	۰٪
عمق جوش	۰/۲۸	۱/۲۸	رسیدن به ۱/۲۵mm	۶۰٪
نسبت عمق به عرض جوش	۰/۲۳۷	۰/۸۵	بیشینه شدن	۴۰٪

نتیجه بهینه‌سازی با دستیابی به ترکیب بهینه، در جدول ۶ ارائه شده است. به‌منظور سنجش اعتبار این ترکیب ابتدا چهار عدد نمونه بر اساس سطح بهینه پارامترها جوشکاری لیزر شد. سپس ابعاد مقطع جوش دو نمونه اندازه‌گیری و میانگین عمق و نسبت عمق به عرض در جدول ۶ با عدد ستاره‌دار ثبت شد. در این جدول پیش‌بینی عمق نفوذ و نسبت عمق به پهنای جوش با نرم‌افزار از مقدار واقعی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های بهینه (اعداد ستاره‌دار)، به ترتیب دارای میانگین خطا ۶٪ و ۲/۳٪ است. بنابراین با بیشینه خطای ۶٪ اعتبار ترکیب بهینه تأیید شد.

جدول ۶ معرفی ترکیب بهینه و اعتبارسنجی آن

مقدار بهینه خروجی‌ها	اعتبارسنجی ترکیب بهینه	نتیجه بهینه‌سازی (تعیین سطح بهینه پارامترها)				
		I	T	F	R	W
عمق جوش (mm)	پیش‌بینی نرم‌افزار	۱۱۷/۳	۸/۴	۱۵/۷	۳	۱۱/۴
نسبت عمق به عرض	آزمایش	Amp	ms	Hz	RPM	kgF
۰/۸۵	۱/۲۵	۰/۸۷*	۱/۳۳*	۲/۳٪	۶٪	خطا

در بین نمونه‌های طرح آزمایش‌ها (جدول ۳)، نمونه N21 عمق نفوذ و نسبت عمق به پهنای بیشتری دارد. بنابراین ابعاد جوش این نمونه با ابعاد یکی از نمونه‌های بهینه تولید شده طبق جدول ۶، مقایسه گردید. نتیجه این مقایسه در شکل ۸ نشان می‌دهد که دو مشخصه عمق نفوذ و نسبت عمق به پهنای جوش نمونه‌ی بهینه به ترتیب ۴۰٪ و ۲۸٪ از نمونه N21 بیشتر شده است.



شکل ۸ مقایسه ابعاد مقطع جوش نمونه N21 با یکی از نمونه‌های بهینه

### ۵- بهبود کیفیت جوش با پوشش دهی کامل آرگون

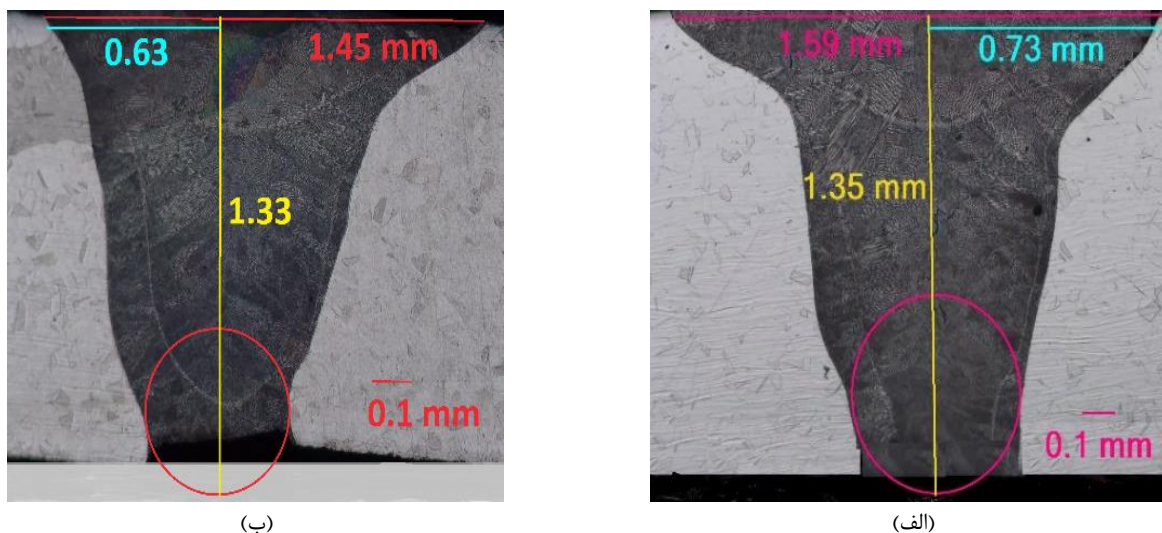
روش و مدت‌زمان پوشش‌دهی گاز آرگون از درز در حال جوشکاری دو عامل تأثیرگذار بر کیفیت اتصال هستند. تا این مرحله از تحقیق در هنگام جوشکاری هر یک از نمونه‌های طرح آزمایش (جدول ۳) و چهار نمونه بهینه (طبق جدول ۶) از نقطه‌ی مذاب محل فرود پرتو لیزر در برابر گازهای محیطی با نازل آرگون حفاظت شد؛ درحالی‌که کل محیط درز تماس دو لوله از زیر تحت پوشش آرگون قرار داشت.

با هدف افزایش کیفیت اتصال جوش، محفظه‌ای مطابق شکل ۹ برای انجام جوشکاری لوله در داخل آن، طراحی و ساخته شد. ویژگی این محفظه ایجاد پوشش کامل آرگون در بیرون و داخل لوله از شروع جوشکاری لیزر تا سرد شدن اتصال است. به این منظور ابتدا با جازدن لوله‌ای به طول ۱۴۰ mm روی هر یک از دو محور و عبور آن‌ها از سوراخ درپوش‌های دو طرف محفظه، درز تماس در داخل آن ایجاد شد. سپس به وسیله‌ی پمپ خلأ فشار داخل محفظه به  $-0.7$  bar کاهش یافت. در مرحله بعد با تزریق گاز آرگون فشار داخل از  $-0.7$  bar به  $+0.2$  bar افزایش داده شد. آنگاه با باز نمودن روزنه تعبیه شده در محفظه، گاز آرگون با نرخ  $15 \text{ Lit/min}$  به بیرون جریان یافت. سرانجام پس از تنظیم پارامترها طبق جدول ۶ و عبور پرتو از شیشه نصب شده در بالای محفظه و تمرکز آن روی درز، جوشکاری لیزر نمونه بهینه در داخل محفظه آرگون انجام شد. به این روش چهار نمونه بهینه با شرایط یکسان در داخل محفظه جوشکاری لیزر گردید.



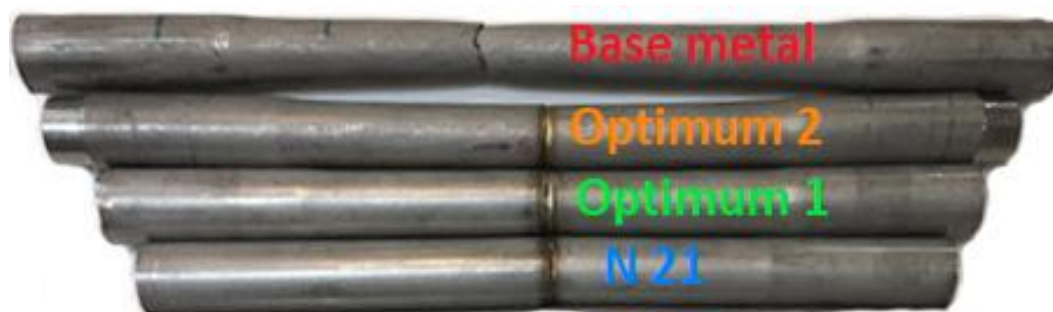
شکل ۹ ماشین جوشکاری لیزر مجهز به مکانیزم اعمال نیرو به درز و محفظه آرگون

در شکل ۱۰، ابعاد مقطع یکی از نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محیط با حفاظت از نقطه‌ی فرود پرتو به کمک نازل آرگون (مقطع الف) با ابعاد مقطع یکی از نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در داخل محفظه پرشده از آرگون (مقطع ب) مقایسه شده است. در قسمت ریشه جوش، قطر دایره همگرایی و عرض مقطع جوش مربوط به شکل ب کمی کوچک‌تر از شکل الف هستند. علاوه بر این در شکل ب منحنی مرزهای کناری جوش یکنواخت‌تر و فاقد واگرایی است. بنابراین مقطع جوش بهینه تولید شده در محفظه پرشده از آرگون (مقطع ب) مربوط به لوله‌ی مورد مطالعه در این تحقیق کیفیت بالاتری دارد.

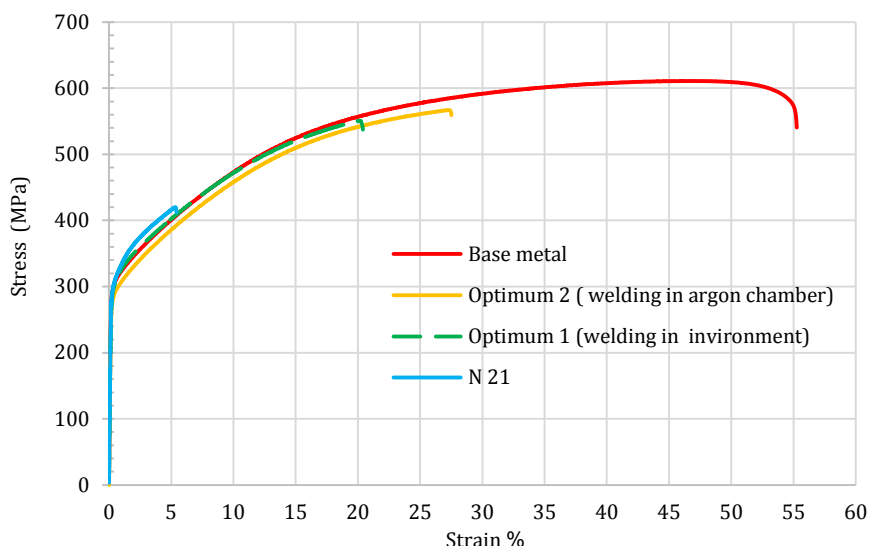


شکل ۱۰ ابعاد و هندسه مقاطع بهینه جوش لیزر لوله فولادی AISI 316L الف) جوشکاری در محیط با نازل آرگون و ب) جوشکاری در داخل محفظه پرشده از آرگون

در ادامه تحقیق، استحکام کششی فلز پایه، نمونه N21، دو عدد نمونه بهینه جوشکاری شده در داخل محفظه پرشده از آرگون و دو عدد نمونه بهینه جوشکاری شده در محیط (با حفاظت از نقطه‌ی فرود پرتو به کمک نازل آرگون)، تعیین شد. آزمون کشش این نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-E8M-09 به وسیله ماشین ZWICK/250 با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. در این استاندارد لوله‌های تا قطر ۲۵ میلی‌متر پس از جا زدن سنبه سوراخ‌گیر به ماشین کشش بسته می‌شوند. بنابراین خصوصیات اتصال جوش در تمام محیط لوله در تعیین استحکام نهایی جوش تأثیرگذار است. در حالی که در آزمون کشش ورق‌های جوشکاری شده بخش کوچکی از جوش برای آزمون جدا می‌شود. این تفاوت ابعادی نمونه تست کشش در لوله‌ها نسبت به ورق‌ها معمولاً منجر به عدم برابری استحکام جوش لوله‌ها با استحکام فلز پایه خواهد شد. در شکل ۱۱ به ترتیب از بالا، نمونه‌های آزمون کشش مربوط به فلز پایه، نمونه بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون، نمونه بهینه جوشکاری شده در محیط با نازل آرگون و نمونه N21 و در شکل ۱۲ نمودارهای تنش کرنش هر یک از آنها مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۱ لوله‌های جوشی پس از آزمون کشش



شکل ۱۲ نمودارهای تنش کرنش لوله بدون جوش و نمونه‌های بهینه جوشکاری لیزر لوله‌های فولادی زنگ نزن AISI 316L

طبق نمودار شکل ۱۲، استحکام فلز پایه ۶۰۶ MPa و کرنش شکست آن ۵۵٪ حاصل شد. دو نمونه بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون با میانگین استحکام ۵۷۵ MPa و کرنش نهایی ۲۷/۵٪ به ترتیب ۹۵٪ و ۵۰٪ استحکام و کرنش فلز پایه را بدست آوردند. همچنین دو نمونه بهینه جوشکاری شده در محیط با میانگین استحکام ۵۳۷ MPa و کرنش ۲۰٪ به ترتیب ۸۸/۶٪ و ۳۶/۳۶٪ استحکام و کرنش فلز پایه و ۹۳/۴٪ و ۷۲/۷٪ استحکام و کرنش نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون را کسب نمودند. علاوه بر این استحکام و کرنش نمونه‌ی N21 مربوط به جدول ۳ به ترتیب ۴۱۲ MPa و ۵/۴۲٪ حاصل شد. برتری ابعادی و استحکامی نمونه‌های جوشکاری شده در محفظه به غوطه‌وری آن‌ها در آرگون مربوط است. به این دلیل که آرگون از یک سو از نفوذ گازهای محیطی در جوش جلوگیری کرد و از سوی دیگر به سرد شدن کنترل شده جوش کمک نمود. هر دو اثر مثبت آرگون منجر به تولید اتصال جوش با ساختار متالورژی و دانه‌بندی همگن شد. بنابراین لوله‌های جوشکاری شده با پارامترهای بهینه در محفظه آرگون در رتبه اول و پس از آن، لوله‌های جوشکاری بهینه در محیط با حفاظت از نقطه فرود پرتو به کمک نازل آرگون قرار دارند.

## ۶- نتیجه‌گیری

فرآیند جوشکاری لیزر یکی از روش‌های اتصال دائم با کاربرد روزافزون است. علی‌رغم انجام تحقیقات متعدد در جوشکاری ورق‌ها، بررسی مشخصه‌های اتصال جوش در لوله‌ها کمتر مورد توجه بوده است. بنابراین در این پژوهش جوشکاری لیزر لوله‌های فولادی زنگ‌نزن AISI 316L مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا با جوشکاری لیزر تعدادی لوله بر مبنای طرح آزمایش مرکب مرکزی، ۳۲ نمونه ساخته و ابعاد مقطع اتصال آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس با مدل‌سازی رگرسیونی و تحلیل‌های آماری اثر اصلی و متقابل پارامترهای پرتوی لیزر (پهنای پالس، شدت جریان و فرکانس) و همچنین سرعت دورانی لوله و نیروی وارد به درز، بر دو مشخصه ابعادی مقطع جوش (عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض) تعیین گردید. بر این اساس نتایج زیر حاصل شد:

- دو پارامتر پهنای پالس و شدت جریان با مجموع بیش از ۸۰٪ مشارکت در تغییر عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش به ترتیب بیشترین تأثیر را دارند. علاوه بر این با افزایش پهنای پالس، شدت جریان و فرکانس، هر دو مشخصه ابعادی مقطع جوش افزایش می‌یابند.
- با افزایش سرعت دورانی لوله‌ی در حال جوشکاری عمق نفوذ جوش کاهش یافت. در حالی که این پارامتر بر نسبت عمق به عرض مقطع جوش بی‌تأثیر بود.
- تأثیر افزایش نیروی وارد بر درز در افزایش عمق نفوذ و نسبت عمق به عرض جوش به ترتیب ۱٪ و ۲/۳٪ مشاهده شد؛ اما این نیرو در افزایش استحکام اتصال تأثیر بیشتری داشت.

در ادامه تحقیق با انجام بهینه‌سازی چندهدفه سطح بهینه پارامترها برای بهبود نسبی دو مشخصه خروجی، برحسب درصد اهمیت آن‌ها (عمق نفوذ ۶۰٪ و نسبت عمق به عرض ۴۰٪) تعیین شد. بر اساس ترکیب بهینه (شدت جریان ۱۱۷/۳ آمپر، پهنای پالس ۸/۴ میلی‌ثانیه، فرکانس ۱۵/۷ هرتز، سرعت دورانی لوله ۳ دور بر دقیقه، نیروی وارد به درز ۱۱/۴ کیلوگرم نیرو) نمونه‌هایی جوشکاری لیزر شد؛ سپس ابعاد اتصال چند نمونه بهینه با نمونه دارای عمق نفوذ بالاتر در جدول طرح آزمایش‌ها (نمونه N21) مقایسه گردید. عمق نفوذ جوش و نسبت عمق به عرض نمونه‌های بهینه به ترتیب ۴۰٪ و ۲۸٪ از مقادیر متناظر در نمونه N21 افزایش یافته‌اند. بنابراین با کامل شدن نفوذ جوش (برابر شدن عمق نفوذ با ضخامت دیواره لوله ۱/۲۵ mm) اعتبار ترکیب بهینه تأیید شد.

در پایان با هدف ارتقاء کیفیت اتصال جوش چند نمونه بر اساس سطح بهینه پارامترها در داخل محفظه‌ای پر شده از آرگون جوشکاری لیزر شد. در این روش، درز محیطی تماس دو لوله از شروع جوشکاری تا سرد شدن کامل، از رو و زیر در آرگون غوطه‌ور بود. آنگاه نمونه‌های بهینه جوشکاری لیزر در داخل محفظه پر شده از آرگون با نمونه‌های بهینه جوشکاری لیزر در محیط (حفاظت از نقطه فرود پرتو به کمک نازل آرگون) و با نمونه فلز پایه از نظر ابعادی و استحکامی مقایسه شدند. با افزایش ۱۴ درصدی عمق به عرض مقطع جوش نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون نسبت به عمق به عرض مقطع جوش نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محیط، این مشخصه ابعادی بهبود یافت. عرض کمتر در قسمت ریشه جوش و عدم واگرایی منحنی مرزهای دو طرف مقطع جوش دو برتری دیگر نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون نسبت به نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محیط هستند. همچنین استحکام و کرنش شکست نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون به ترتیب ۷٪ و ۳۷٪ از استحکام و کرنش شکست نمونه بهینه جوشکاری شده در محیط بیشتر شد. دلیل استحکام بالاتر نمونه‌های بهینه جوشکاری شده در محفظه آرگون نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده در محیط، احتمالاً به تاثیر همزمان نیروی وارد به درز (۱۱/۴ kgF) و آرگون موجود در محفظه مربوط است. این تاثیر همزمان منجر به کاهش تنش پسماند و ایجاد ساختار همگن در جوش شده است. به طور کلی نتایج تجربی و تحلیلی کارایی و دقت رویکرد ارائه شده در این تحقیق را تأیید می‌نمایند.

## References

- [1] Unigovski YB, Lothongkum G, Gutman EM, Alush D, Cohen R. Low-cycle fatigue behavior of 316L-type stainless steel in chloride solutions. *Corrosion Science*. 2009 Dec 1;51(12):3014-20. doi: 10.1016/j.corsci.2009.08.035
- [2] Lee JH, Park SH, Kwon HS, Kim GS, Lee CS. Laser, tungsten inert gas, and metal active gas welding of DP780 steel: comparison of hardness, tensile properties and fatigue resistance. *Materials & Design*. 2014 Dec 1;64:559-65. doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.065
- [3] Carvalho SM, Baptista CA, Lima MS. Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in aircraft pneumatic systems. *International Journal of Fatigue*. 2016 Sep 1;90:47-56. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.04.018
- [4] Soltani HM, 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 Oct 30;767:112-21. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.06.302
- [5] Chen HC, Bi G, Lee BY, Cheng CK. Laser welding of CP Ti to stainless steel with different temporal pulse shapes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016 May 1;231:58-65. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.12.016
- [6] Hong J, Joung CY, Kim KH, Heo SH, Kim HG. Study on fiber laser welding conditions for the fabrication of a nuclear fuel rod. *International journal of precision engineering and manufacturing*. 2014 Apr;15:777-81. doi: 10.1007/s12541-014-0399-5
- [7] 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 Feb 1;88:24-39. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.08.018
- [8] Das A, Fritz R, Finuf M, Masters I. Blue laser welding of multi-layered AISI 316L stainless steel micro-foils. *Optics & Laser Technology*. 2020 Dec 1;132:106498. doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106498
- [9] Cheng H, Kang L, Pang J, Xue B, Du D, Chang B. Effect of the welding position on weld quality when laser welding Inconel 617 Ni-based superalloy. *Optics & Laser Technology*. 2021 Jul 1;139:106962. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.106962
- [10] Mirzaloo M, Modabberifar M, Taheri M, Alighoorchi I, Karian A. Experimental investigation of the effects of laser parameters on the strength and size of the weld nugget in laser spot welding of stainless steel sheet 316. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Jul 23;8(5):23-9. [In Persian]

- [11] Zhou S, Wang B, Wu D, Ma G, Yang G, Wei W. Effect of pulse energy on microstructure and properties of laser lap-welding Hastelloy C-276 and 304 stainless steel dissimilar metals. *Optics & Laser Technology*. 2021 Oct 1;142:107236. doi: [10.1016/j.optlastec.2021.107236](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107236)
- [12] Chludzinski M, Dos Santos RE, Churiaque C, Fernández-Vidal SR, Ortega-Iguña M, Sánchez-Amaya JM. Pulsed laser butt welding of AISI 1005 steel thin plates. *Optics & Laser Technology*. 2021 Feb 1;134:106583. doi: [10.1016/j.optlastec.2020.106583](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106583)
- [13] Jiang Y, Jiang M, Chen X, Chen A, Ma S, Jiang N, Zhang S, Wang Z, Lei Z, Chen Y. Vacuum laser beam welding of AZ31 magnesium alloy: Weld formability, microstructure and mechanical properties. *Optics & Laser Technology*. 2024 Feb 1;169:110115. doi: [10.1016/j.optlastec.2023.110115](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110115)
- [14] Xie W, Tu H, Nian K, Zhang D, Zhang X. Microstructure and mechanical properties of Flexible Ring Mode laser welded 304 stainless steel. *Optics & Laser Technology*. 2024 Jul 1;174:110563. doi: [10.1016/j.optlastec.2024.110563](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110563)
- [15] 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 & Laser Technology*. 2018 Jul 1;103:300-10. doi: [10.1016/j.optlastec.2017.12.042](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.12.042)
- [16] Javid Y, Ghoreishi M, Torkamany MJ. Preplaced laser cladding of WC powder on Inconel 718 by laser. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 Sep 10;15(7):98-106. [In Persian]
- [17] Harinath YV, Gopal KA, Murugan S, Albert SK. Study on laser welding of fuel clad tubes and end plugs made of modified 9Cr-1Mo steel for metallic fuel of Fast Breeder Reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 2013 Apr 1;435(1-3):32-40. doi: [10.1016/j.jnucmat.2012.12.023](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.12.023)
- [18] Sathiya P, Panneerselvam K, Jaleel MA. Optimization of laser welding process parameters for super austenitic stainless steel using artificial neural networks and genetic algorithm. *Materials & Design (1980-2015)*. 2012 Apr 1;36:490-8. doi: [10.1016/j.matdes.2011.11.028](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.028)
- [19] Han Q, Kim D, Kim D, Lee H, Kim N. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012 May 1;212(5):1116-22. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2011.12.022](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.12.022)
- [20] Sivagurumanikandan N, Saravanan S, Kumar GS, 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 Mar 1;157:833-40. doi: [10.1016/j.ijleo.2017.11.146](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.146)
- [21] Panahi Liavoli R, Bakhshi Jooybari M, Gorji H, Mirnia M. Experimental investigation of formability of laser tailor welded steel blanks in single point incremental forming. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Oct;6(6):25-33. [In Persian]
- [22] Nikravan AR, Kolahan F, Shariati M. 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. *Modares Mechanical Engineering*. 2022 Aug;22(8):555-65. doi: [10.52547/mme.22.8.555](https://doi.org/10.52547/mme.22.8.555) [In Persian]
- [23] Kumar S, Batish A, Singh R, Singh TP. 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 Jul;28:2831-44. doi: [10.1007/s12206-014-0637-x](https://doi.org/10.1007/s12206-014-0637-x)
- [24] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. John Wiley & sons; 2017.