



تحلیل پارامترهای فرآیند جوش کاری لیزر فولیل فولاد زنگ‌نزن توسط روش آماری رویه پاسخ به منظور اتصال صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری

محمدرضا پاکمنش^{1*}، مرتضی شمعانیان²، سعید اصغری³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان

2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 81955174، mr.pakmanesh@isrc.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای جوش کاری لیزر پالسی Nd:YAG بدون فلز پرکننده بر اتصال لبروی هم فولیل فولاد زنگ‌نزن 316L با ضخامت 100 میکرومتر جهت کاربرد در صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از ابزارهای آماری، آنالیز واریانس و نمودارهای مختلف جهت تحلیل داده‌ها توسط روش رویه پاسخ استفاده گردید. پارامترهای ورودی توان قله (130 تا 650 وات)، زمان روشنی پالس (1.5 تا 3.5 میلی‌ثانیه) و فرکانس جوش کاری (14 تا 18 هرتز) در نظر گرفته شد. روش آماری یادشده به خوبی توانست با توسعه چندجمله‌ای درجه دوم تأثیر پارامترهای جوشکاری را پیش‌بینی نماید؛ به طوری که مجموع خطا شامل خطای تکراریپذیری و خطای عدم تطابق برای مدل استحکام برشی، مدل بریدگی کنار جوش و مدل پرنشده‌گی جوش به ترتیب 2، 8 و 3 به دست آمد. عیوب بریدگی کنار جوش و نفوذ ناقص مهم‌ترین عوامل مؤثر بر استحکام برشی تشخیص داده شد. توان لیزر اصلی‌ترین پارامتر در این فرآیند برآورد گردید و اثر آن بر استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرنشده‌گی جوش به ترتیب 64٪، 62٪ و 66٪ محاسبه شد. در نهایت حداکثر استحکام برشی به میزان 522 مگاپاسکال در توان قله 260 وات، زمان روشنی پالس 3 میلی‌ثانیه و فرکانس 17 هرتز به دست آمد. در این حالت بریدگی کنار جوش به 3 میکرومتر رسید.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 دی 1396

پذیرش: 28 بهمن 1396

ارائه در سایت: 23 فروردین 1397

کلید واژگان:

جوش کاری لیزر پالسی

رویه پاسخ

عیوب جوش

استحکام برشی جوش

صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری

Analysis of the laser welding parameters of stainless steel foil by statistical response surface methodology for joining PEMFC bipolar plates

Mohammad Reza Pakmanesh^{1*}, Morteza Shamanian², Saeed Asghari³

1- Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran

2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3- Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran

* P.O.B. 81955174 Isfahan, Iran, mr.pakmanesh@isrc.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 13 January 2018

Accepted 17 February 2018

Available Online 12 April 2018

Keywords:

Pulsed laser welding

Response surface methodology

Weld defects

Shear strength

PEMFC bipolar plates

ABSTRACT

In the present study, the effect of parameters of autogenous pulsed Nd: YAG laser welding process on the lap joint of a 316L stainless steel foil with a thickness of 100 μm to be used as bipolar plates of polymeric fuel cell was investigated. For this purpose, the statistical tools, the analysis of variance and the various diagrams were used to analyze the data by response surface methodology. The peak power (130 to 650 W), pulse durability (1.5 to 3.5 ms), and welding frequency (14 to 18 Hz) were considered as input parameters. The mentioned statistical method was able to predict the effect of welding parameters by developing second-order polynomials, so that the total error including the repeatability error and the lack of fit error for shear strength model, weld undercut model, and weld underfill model obtained 2, 8 and 3, respectively. The defects of weld undercut and lack of penetration were identified as most important factors affecting the shear strength. The laser power is as the main parameter in this process and the impact of it on the shear strength of the weld, the weld undercut and the weld underfill is calculated 64, 62 and 66%, respectively. Finally, the maximum shear strength with the value of 522 MPa is achieved at a peak power of 260 W, pulsed duration of 3 ms and welding frequency of 17 Hz. In this case, the weld undercut is determined as 3 micrometers.

پلیمری¹ نسبت به سایر پیل‌های سوختی با توجه به جمع پارامترهایی نظیر

حجم و وزن کم، توان بالا و زمان راه‌اندازی سریع در لحظات مورد نیاز به

1- مقدمه

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت را

مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. پیل سوختی

¹ Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

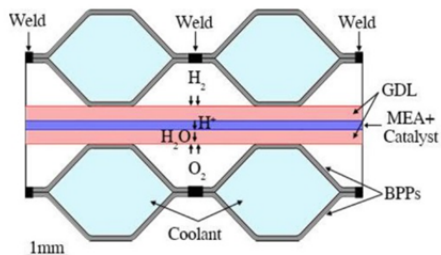


Fig 1 Schematic representation of a monocell in a PEMFC with metallic bipolar plates and its joining position

شکل 1 نمایش شماتیک از تک پیل در پیل سوختی پلیمری با صفحات دوقطبی فلزی و موقعیت جوش‌های آن

لیزر پالسی Nd:YAG فویل نازک فولاد زنگ‌نزن (AISI 316L) است. بریدگی کنار جوش عیبی است که توسط تشکیل گودی شیار ماندی در کنار جوش مشخص می‌شود و عیب پرنشستگی جوش به صورت کانال طولی سطحی عموماً در امتداد مرکز جوش تعریف می‌شود. مکانیزم بریدگی کنار جوش در جوش کاری لیزر پیچیده و مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده، اما تاکنون نتایج کاملاً رضایت‌بخشی گزارش نگردیده است [16]. تحقیقات نشان می‌دهد مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شکل‌گیری بریدگی کنار جوش در فرآیند جوش کاری لیزر، حرارت بیش از حد در لبه فلز پایه یا فلز جوش (پاس پیشین) [18,17]، میزان تنش برشی حاصل از گرادیان کشش سطحی در مذاب [19]، جوش کاری با سرعت بالا [20,16]، خواص ترشوندگی ضعیف [21] و حضور پوسته‌های اکسیدی سطحی [20] است. مقدار فلز پرکننده یکی دیگر از عوامل مؤثر بر بریدگی کنار جوش است. هنگامی که شرایط دیگر هیچ تغییری نکند، عمق بریدگی کنار جوش با افزایش مقدار فلز پرکننده کاهش می‌یابد. افزودن فلز پرکننده باعث کاهش روند جریان مذاب از حاشیه به مرکز حوضچه جوش می‌شود [18]، همچنین مطالعات نشان می‌دهد دلایل اصلی شکل‌گیری پرنشستگی جوش در جوش کاری لیزر را می‌توان انرژی ورودی بیشتر از حد موردنیاز برای یک نفوذ کامل [22]، موقعیت فوکاس نامناسب [23]، تبخیر و بیرون پاشیدن فلز جوش ناشی از تلاطم شدید مذاب در حوضچه جوش [24,22]، برش‌مرد، از آن‌جا که در جوش کاری لیزر پالسی، پارامترهای متعدد فرآیند از قبیل توان لیزر، زمان روشنی پالس، فرکانس، سرعت جوش کاری، اندازه نقطه کانونی پرتو لیزر، موقعیت کانونی پرتو لیزر نسبت به سطح نمونه و گاز خنثی (از لحاظ نوع، راستای دمش و فشار) می‌توانند بر خصوصیات جوش تولید شده تأثیرگذار باشند و ارزیابی اثر تک‌تک این پارامترها مستلزم انجام آزمایش‌های بسیار و صرف هزینه و وقت زیادی است؛ بنابراین انتخاب یک روش طراحی آزمایش⁷ مناسب و تعیین تابع هدف می‌تواند در حصول به این نتیجه بسیار مؤثر باشد. روش رویه پاسخ⁸ یکی از روش‌های کاربردی در طراحی آزمایش است. این روش ترکیبی از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که می‌تواند برای مدل‌سازی و تحلیل مسائل استفاده شود. روش یادشده در واقع مدلی ارائه می‌دهد که بر داده‌های به دست آمده از آزمایشات برازش می‌گردد. از مزایای استفاده از این روش تعیین کردن میزان اثرات اصلی، متقابل و درجه دوم پارامترهای ورودی، توسعه توابع ریاضی برای رسیدن به یک رابطه مؤثر بین پارامترهای ورودی و پاسخ‌ها و انجام حداقل تعداد آزمایش است. این روش دارای تکنیک‌های مختلفی است که تکنیک طراحی مرکب مرکزی⁹ از اعتبار بیشتری برخوردار است [25].

عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای کاربردهایی نظیر صنایع خودروسازی و هوا فضا مطرح است. این نوع پیل سوختی از اجزای اصلی صفحات دوقطبی¹ و مجموعه غشا-الکتروود شامل غشای الکتروولیت پلیمری²، کاتالیست³ و لایه‌های نفوذ گاز⁴ تشکیل شده است. هیدروژن به طور مداوم به الکتروود آند و هوا (اکسیژن) به الکتروود کاتد تزریق می‌شود و واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکتروودها انجام شده و جریان الکتریکی برقرار می‌گردد [2,1]. صفحات دوقطبی جریان الکتریکی را بین سل‌ها برقرار می‌کنند، مدیریت آب و دما را در سل بر عهده دارند و شرایط را برای گازهای واکنشگر یعنی هیدروژن و اکسیژن فراهم می‌کنند. این صفحات قطعه‌ای کلیدی در پیل‌های سوختی با غشا الکتروولیت پلیمری محسوب می‌شوند. در حدود 80% از وزن کل هر پیل سوختی شامل صفحات دوقطبی است و به طور کلی 45% از هزینه تولید پیل سوختی صرف تولید این صفحات می‌شود [4,3]. تاکنون پژوهش‌های مختلفی روی مواد کاندید جهت استفاده به عنوان صفحات دوقطبی از جمله صفحات گرافیتی، فلزات و کامپوزیت‌ها انجام شده است. گرافیت پرکاربردترین ماده برای ساخت این صفحات است، اما هزینه بالای ماشین کاری برای ایجاد کانال در این صفحات، خواص مکانیکی پایین، عدم یکنواختی توزیع واکنش‌گرها و دما به دلیل وجود این کانال‌ها در صفحات گرافیتی سبب جلب توجه محققین به صفحات دوقطبی فلزی شده است [5]. ویژگی صفحات دوقطبی فلزی علاوه بر رفع مشکلات یادشده، امکان استفاده از فویل‌های نازک و به تبع آن راحتی ایجاد کانال‌های توزیع توسط فرآیند شکل‌دهی، کاهش وزن مخصوص و هزینه‌ی تولید به نسبت کم است. بیشتر فلزات مورد تحقیق در این زمینه فولادهای زنگ‌نزن، آلایزهای نیکلی، آلایزهای تیتانیومی و آلایزهای آلومینیومی هستند. محدودیت استفاده آلایزهای نیکلی، آلایزهای تیتانیومی و آلایزهای آلومینیومی به ترتیب وزن بالا، هدایت الکتریکی پایین و مقاومت خوردگی کم در محیط پیل سوختی پلیمری است. فولادهای زنگ‌نزن علاوه بر برتری در زمینه‌های بالا دارای هزینه تولید به نسبت پایین‌تری نیز است. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی بهترین گزینه در میان فولادهای زنگ‌نزن است [7,6].

برای اتصال این صفحات نازک فلزی، جوش کاری پرتو لیزر به دلیل حرارت ورودی⁵ پایین، منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت باریک، اعوجاج کم، سرعت جوش کاری بالا، سهولت خودکارسازی و امکان جوش کاری به طور خودبه‌خود⁶ نسبت به سایر فرایندهای اتصال ارجحیت دارد [8-10]. استفاده از لیزر Nd:YAG به دلیل طول موج کوتاه‌تر نسبت به سایر منابع لیزر متداول و همچنین استفاده از تحریک به صورت پالسی نسبت به لیزر پیوسته، به دلیل توان متوسط لیزر مورد نیاز پایین‌تر و در نتیجه حرارت ورودی کمتر و زمان انجماد کوتاه‌تر بهترین انتخاب است [12,11]. شکل 1 موقعیت‌های برآورد شده این جوش بر صفحات دوقطبی فلزی در پیل سوختی پلیمری را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد، همچنین در این شکل اجزای اصلی و مکانیزم فرآیند به تصویر کشیده شده است.

در چندین پژوهش مختلف اثر جوش کاری لیزر پالسی Nd:YAG بر استحکام اتصال لبه روی هم فویل فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی بدون استفاده از آنالیز آماری مورد مطالعه قرار گرفته است [9,13-15]. ضرورت تحقیق حاضر اثر عیوبی نظیر بریدگی کنار جوش و پرنشستگی جوش در جوش کاری

¹ Bipolar Plates (BPPs)

² Membrane Electrode Assembly (MEA)

³ Catalyst

⁴ Gas Diffusion Layers (GDL)

⁵ Heat Input

⁶ Autogenous

⁷ Design of Experiment (DOE)

⁸ Response Surface Methodology (RSM)

⁹ Central Composite Design (CCD)

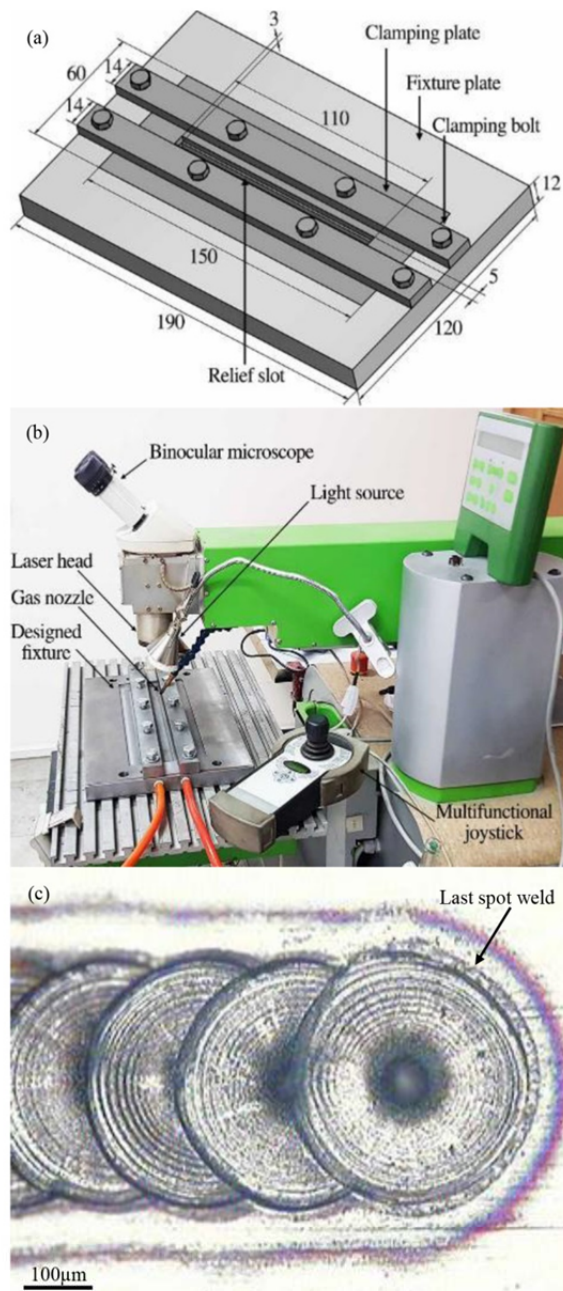


Fig. 2 a- Designed fixture, b- actual image and schematic images of laser welding process, c- image of the part of produced weld line

شکل 2 الف- قید و بست طراحی شده، ب- نمای واقعی از فرآیند جوشکاری لیزر و ج- تصویر قسمتی از خط جوش ایجاد شده

انجام شد. بدین منظور نمونه‌ها تا سنباده شماره 4000 سنباده‌زنی شده و سپس به وسیله پودر آلومینای 0.05 میکرومتری پولیش گردیده و توسط محلول $60\% \text{HNO}_3 + 40\% \text{H}_2\text{O}$ در ولتاژ 1.4 ولت به مدت 120 ثانیه با آند مشابه الکترواچ شدند.

2-3- طراحی آزمایش

به منظور بررسی اثر پارامترهای جوش کاری و ارائه مدل ریاضی برای استحکام برشی و عیوب جوش از روش رویه پاسخ با تکنیک طراحی مرکب مرکزی [1] کمک گرفته شد. سه پارامتر مستقل شامل توان قله لیزر، زمان روشنی پالس و فرکانس هر کدام در پنج سطح با تکرار کامل (به منظور تأمین دقت

در سال‌های اخیر محققان مختلف با استفاده از طراحی آزمایش برخی از جنبه‌های این فرآیند را بهینه‌سازی نموده‌اند [15, 26, 27]؛ اما تاکنون ارزیابی عیوب جوش کاری و اثرات آن مورد ارزیابی دقیق قرار نگرفته است؛ بنابراین در این تحقیق از روش رویه پاسخ با تکنیک طراحی مرکب مرکزی برای تعیین پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی اتصال و میزان عیوب جوش در فرآیند جوش کاری پرتو لیزر پالسی Nd:YAG بر فویل نازک فولاد زنگ‌نزن 316L و بدون فلز پرکننده استفاده شد.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- فرآیند جوش کاری لیزر

فویل فولاد زنگ‌نزن AISI 316L با ترکیب شیمیایی Fe-0.018C-17.35Cr-9.93Ni-2.10Mo و ضخامت 100 میکرومتر مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به کاربرد مورد نظر به عنوان صفحات دوقطبی، اتصال فویل‌ها به صورت لبه روی هم انتخاب شد. به منظور اتصال از فرآیند جوش کاری لیزر پالسی با منبع Nd:YAG با حداکثر توان متوسط 160 وات با توزیع گاوسی TEM00 و قطبش نوع P استفاده شد. پیش از جوش کاری تمام فویل‌های مورد استفاده با استون و الکل سفید به صورت مجزا برای 10 دقیقه تحت چربی‌زداییอัลتراسونیک قرار گرفتند. انجام چند جوش کاری مقدماتی نشان داد که وجود فاصله هوایی بین اعضای اتصال بیش از 10 میکرومتر سبب ایجاد سوراخ‌شدگی به جای جوش کاری در پارامترهای مشابه می‌شود. در نتیجه به منظور بستن محکم فویل‌ها در محل اتصال، نگهدارنده‌ای مطابق شکل 2 طراحی شد. در این شکل نحوه قرارگیری فویل‌ها و چگونگی انجام فرآیند جوش کاری نیز نشان داده شده است، همچنین این شکل قسمتی از خط جوش ایجاد شده شامل هم‌پوشانی مجموعه‌ای از جوش‌های نقطه‌ای توسط جوش کاری لیزر پالسی را نمایش می‌دهد. در این پژوهش محدوده کاری پارامترهای ورودی فرآیند با انجام چند جوش کاری مقدماتی به دست آمد. جدول 1 کلیه شرایط و حدود تنظیمات مورد استفاده را نشان می‌دهد. دامنه قابل دستیابی قطر پرتو لیزر در نقطه کانونی دستگاه مورد استفاده 0.2-2.0 میلی‌متر است که مقدار آن در حداقل حد ممکن یعنی 0.2 میلی‌متر انتخاب گردید و موقعیت این نقطه کانونی (نقطه تمرکز پرتو لیزر) بر سطح فویل [28] در نظر گرفته شد؛ دلیل این انتخاب دستیابی به کمترین پهنای جوش (در نتیجه حداقل اعوجاج) و رسیدن به حداکثر چگالی توان لیزر (در نتیجه افزایش بهره‌وری) است.

2-2- انجام آزمون

ابتدا فویل‌هایی با ابعاد 110×36 میلی‌متر مربع توسط دستگاه برش کاغذ بریده شد و به صورت لبه روی هم با میزان هم‌پوشانی 12 میلی‌متر تحت جوش کاری قرار گرفت، به طوری که کلیه جوش‌ها در جهت بافت نوردی فویل واقع شوند. پس از جوش کاری از هر مجموعه پارامتر تعداد سه نمونه آزمون برشی- کششی براساس روش تحقیق پینگ و همکاران [8] نمونه‌سازی گردید و سپس این نمونه‌ها تحت آزمون برشی- کششی توسط دستگاه یونیورسال کشش شیمادزو با دقت نیرویی 0.1% قرار گرفتند. آزمون با سرعت ثابت 0.1 میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت و میانگین نتایج سه نمونه برای حداکثر تنش که نمونه پیش از شکست تحمل می‌کند به عنوان استحکام برشی در هر پارامتر گزارش گردید.

در نهایت متالوگرافی به منظور تحلیل خواص میکروسکوپ نوری¹

¹ Optical Microscope (OM)

جدول 2 پارامترهای ورودی و سطوح طراحی آزمایش مورد استفاده
Table 2 Process variables and experimental design levels used

پارامتر	نماد	واحد	-2	-1	0	+1	+2
توان قله	P	W	130	260	390	520	650
زمان روشنی پالس	T_p	ms	1.5	2	2.5	3	3.5
فرکانس	f	Hz	14	15	16	17	18

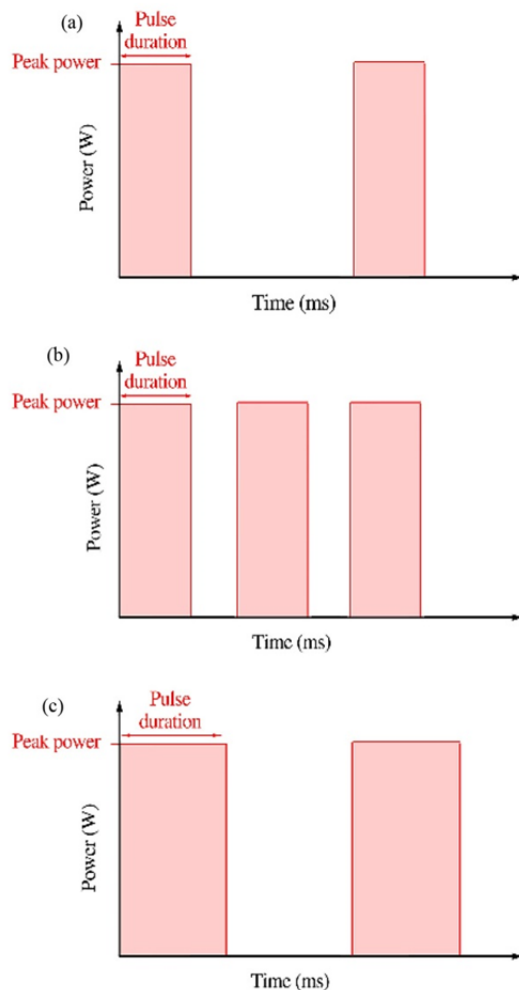


Fig. 3 a- simple demonstration of the pulse welding parameters, b- displaying an increase in the frequency in the constant pulse duration, and c- displaying the increase in the durability of the pulse at constant frequency

شکل 3 الف- نمایش ساده از پارامترهای جوش کاری پالسی، ب- نمایش افزایش فرکانس در زمان روشنی پالس ثابت و ج- نمایش افزایش زمان روشنی پالس در فرکانس ثابت

(UC) و پرنشده‌گی جوش (UF) گزارش گردید. همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده انرژی پالس (Ep) و حرارت ورودی (HI) به منظور ارزیابی اثر این عوامل نیز در این جدول آورده شده است.

3-1- آنالیز واریانس²

یکی از روش‌های متداول در بررسی تأثیر پارامترها استفاده از روش آنالیز واریانس است. پیش از آغاز این آنالیز باید معتبر بودن مدل توسط تحلیل

جدول 1 شرایط و پارامترهای انتخابی جوش کاری لیزر پالسی Nd:YAG
Table 1 All the conditions and limits for the settings being used.

پارامتر	مقدار
توان قله	130-650 W
زمان روشنی پالس	1.5-3.5 ms
فرکانس	14-18 Hz
سرعت جوش کاری	3.4 mm/s
اندازه نقطه پرتو لیزر	0.2 mm
زاویه پرتو لیزر	90°
فاصله کانونی	100 mm
موقعیت نقطه کانونی	سطح نمونه
گاز محافظ	آرگون 99.999%
نرخ دمش گاز	10 l/min
قطر نازل گاز	3.9 mm
زاویه نازل گاز	45°
زمان دمش گاز قبل از	10 s
زمان دمش گاز بعد از	5 s

مناسب) انتخاب گردید. محدوده انتخابی پارامترهای فرآیند، سطوح طراحی آزمایش، کدگذاری و ارزش واقعی این کدها در جدول 2 نشان داده شده است.

لازم به توضیح است که هر پالس جوش با دو پارامتر توان قله و زمان روشنی پالس مشخص می‌شود. توان قله ماکزیمم توان پرتوی لیزری است که در هر پالس بر نمونه تابیده می‌شود. زمان روشنی پالس زمانی است که این توان بر نمونه باقی می‌ماند و فرکانس تعداد این پالس‌ها را در واحد زمان مشخص می‌نماید که این سه پارامتر مستقل از یکدیگر هستند. شکل 3 به روشنی این پارامترها را در جوش کاری پالسی نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس در زمان روشنی پالس ثابت طبق شکل 3-b (نسبت به شکل 3-a) تعداد پالس‌ها در واحد زمان زیادتر می‌شود و با زیاد شدن زمان روشنی پالس در فرکانس ثابت مطابق با شکل 3-c (نسبت به شکل 3-a)، زمان باقی‌ماندن توان بر نمونه افزایش می‌یابد. چند جوش کاری مقدماتی با تغییر یکی از پارامترها و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها به منظور تعیین دامنه این پارامترها انجام شد. معیار انتخاب الف- حد پایینی توان لیزر و زمان روشنی پالس براساس نفوذ جوش در فصل مشترک دو فویل، ب- حد بالایی توان لیزر و زمان روشنی پالس با توجه به عدم مشاهده اعوجاج و عدم ایجاد سوراخ‌شدگی در جوش و ج- محدوده سرعت جوش کاری و فرکانس براساس دستیابی به بیشترین بهره‌وری و پیوستگی کامل بین لکه‌های جوش در فصل مشترک دو فویل در نظر گرفته شد. پیوستگی کامل بین لکه‌های جوش در فصل مشترک دو فویل با توجه به بررسی میکروسکوپی مقطع جوش در میزان هم‌پوشانی لکه‌ها در بالای 50% به دست آمد.

3- نتایج و بحث

ماتریس طراحی جهت انجام آزمایشات توسط نرم‌افزار مینی‌تب¹ مطابق جدول 3 به دست آمد. این طرح شامل هشت نقطه آزمایش عاملی در رئوس مکعب، شش نقطه آزمایش محوری و شش آزمایش در مرکز مکعب است که در کل بیست آزمایش طراحی شد. میانگین حداقل سه آزمون استحکام برشی (SL) و محل شکست نمونه‌ها در جدول 3 نشان داده شده است. در این جدول میانگین داده‌های ارزیابی شش نمونه برای هر یک از نتایج میزان هم‌پوشانی لکه‌های جوش (OL)، نفوذ جوش (DP)، بریدگی کنار جوش

² Analysis of Variance (ANOVA)

¹ Minitab

جدول 3 ماتریس طراحی مورد استفاده برای مدل سازی عیوب جوش و استحکام برشی جوش به همراه نتایج تجربی به دست آمده

Table 3 the design matrix used to models of the weld defects and weld shear strength and the experimental measured responses

ترتیب اجرا	پارامترهای ورودی			عوامل محاسباتی				نتایج تجربی			محل شکست*
	P (W)	T_p (ms)	f (Hz)	E_p (J)	HI (J/mm)	OL (%)	D_p (μ m)	UC (μ m)	UF (μ m)	S_L (MPa)	
1	390	2.5	16	1.0	4.6	55.2	200	8.1	5.9	505.3	F/W
2	650	2.5	16	^Δ 1.6	7.6	57.2	200	11.5	11.0	450.0	F/W
3	520	3.0	17	^Δ 1.6	7.8	61.4	200	11.8	4.0	470.7	F/W
4	390	3.5	16	1.4	6.4	62.5	200	12.0	0.5	497.4	F/W
5	520	2.0	17	^Δ 1.0	[□] 5.2	57.8	200	8.5	10.0	473.9	F/W
6	390	2.5	16	^Δ 1.0	4.6	55.1	200	8.0	5.8	506.3	F/W
7	130	2.5	16	0.3	1.5	55.1	132.5	0.6	0.0	482.8	F/B & R
8	260	2.0	17	0.5	2.6	54.4	127.5	3.0	0.5	490.2	F/B & R
9	390	2.5	18	1.0	[□] 5.2	60.9	200	9.8	5.0	506.4	F/W
10	390	2.5	16	1.0	4.6	55.1	200	8.0	6.0	504.6	F/W
11	390	2.5	16	1.0	4.6	55.1	200	8.1	5.7	506.0	F/W
12	520	3.0	15	^Δ 1.6	6.9	55.9	200	10.1	5.5	483.3	F/W
13	260	2.0	15	0.5	2.3	50.0	127.5	0.5	1.5	489.0	F/B & R
14	260	3.0	15	0.8	3.4	54.3	200	2.5	1.5	518.4	F/B
15	390	2.5	14	1.0	4.0	50.3	200	6.5	7.0	504.6	F/W
16	520	2.0	15	1.0	^Δ 4.6	52.1	200	6.8	11.7	485.4	F/W
17	390	1.5	16	0.6	2.7	50.1	112.5	1.0	2.5	467.6	F/B & R
18	390	2.5	16	1.0	^Δ 4.6	55.1	200	8.1	5.7	506.7	F/W
19	390	2.5	16	1.0	4.6	55.1	200	8.0	5.9	503.7	F/W
20	260	3.0	17	0.8	3.9	60.0	200	3.2	0.0	522.2	F/B

* F/W(F/B)=adjacent to the fusion line and weld metal (fusion line and base metal) , R=weld root

^Δ, ^Δ, [□] and [○] Represent the same values of pulsed energy or heat input, which their response values are different.

پالس و در نتیجه عدم پراکندگی مناسب داده‌هاست. پس از اطمینان از معتبر بودن مدل‌های یادشده توسط تحلیل نمودارهای باقی‌مانده برای ارزیابی سهم هر پارامتر از آنالیز واریانس گزارش شده در جدول‌های 4-6 استفاده شد. در این جداول همه اثرات اصلی، توان دوم و متقابل پارامترهای ورودی بر پاسخ نمایش داده شده است. جهت تخمین مقادیر پاسخ از روی پارامترهای ورودی، ضریب اطمینان 95% در نظر گرفته شد و مفهوم این ضریب اطمینان آن است که پارامترهایی که مقدار P-Value آن‌ها از 0.05 بیشتر باشد، اثر معناداری بر پاسخ‌ها ندارند و از مدل مربوطه حذف می‌شوند. این موضوع در ستون معناداری جداول یادشده با علامت + معرف مؤثر بودن و علامت - معرف کم اثر بودن مشخص شده است. به طور مثال در مدل استحکام برشی جوش دو پارامتر زمان روشنی پالس و توان قله، پارامترهای مرتبه اول و دوم مؤثر هستند و همچنین اثر متقابل $f \cdot P$ و $T_p \cdot P$ نیز جز عوامل تأثیرگذار است. در این جدول درجه آزادی (DF) مجموع مربعات تعدیل یافته (Adj SS)، میانگین مجموع مربعات (Adj MS) و نسبت واریانس (F-Value) به منظور محاسبه میزان اثر هر مؤلفه مورد استفاده قرار می‌گیرد [29,25]. مجموع خطا و ضریب تعیین (R^2) یکی دیگر از کمیت‌های صحت‌سنجی مدل است. براساس جداول آنالیز واریانس، مجموع خطا شامل خطای خالص⁵ (مربوط به اثر تکرار آزمایش‌ها) و خطای عدم تطابق⁶ برای مدل‌های استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرنشده‌گی جوش

نمودارهای باقی‌مانده بررسی شود. منظور از باقی‌مانده، تفاوت مقدار حاصله از آزمون‌های عملی با مقدار متناظر آن در نمودار برازش شده است. نمودارهای باقی‌مانده برای مدل‌های استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرنشده‌گی جوش در شکل 4 نشان داده شده است. طبق این شکل در تمام نمودارهای احتمال¹، خط وسط نشان‌دهنده مقادیر مورد انتظار توزیع نرمال و نقاط توپر نشان‌دهنده مقادیر باقی‌مانده است که نزدیک بودن این نقاط به خط بیان‌کننده نرمال بودن باقی‌مانده‌هاست. در نمودارهای بافت‌نگار² نیز داده‌ها تمایل به جمع شدن در اطراف مقدار میانه را دارند و هیچ‌گونه انحراف معناداری به چپ یا راست دیده نمی‌شود. همان‌طور که از تمام نمودارهای مقادیر باقی‌مانده در برابر مقادیر اندازه‌گذاری شده³ دیده می‌شود، نقاط به صورت تصادفی و راندوم توزیع شده‌اند. این موضوع مؤید مستقل بودن خطاهاست. نمودارهای پراکنش باقی‌مانده‌ها نسبت به ترتیب زمانی گردآوری داده‌ها⁴ نشان می‌دهد که اثرات سیستماتیک در نتایج نسبت به زمان گردآوری داده‌ها وجود ندارد؛ به عبارت دیگر روند خاصی دیده نمی‌شود که بتوان با آن فرض استقلال باقی‌مانده‌ها را رد کرد. در نتیجه با توجه به تحلیل‌های فوق، مدل‌های استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرنشده‌گی جوش معتبر است، اما اعتبار مدل‌سازی نفوذ جوش توسط تحلیل نمودارهای باقی‌مانده تأیید نشد. دلیل عدم تأیید این مدل طبق جدول 3 وجود داده‌های نفوذ ناقص فقط در مقادیر پایین توان قله و زمان روشنی

¹ Normal Probability Plots

² Histogram Plots

³ Versus Fits Plots

⁴ Versus Order Plots

⁵ Pure Error

⁶ Lack of Fit

جدول 4 نتایج آنالیز واریانس برای مدل استحکام برشی جوش

معناداری	P-	F-	Adj MS	Adj SS	DF	عامل
+	0.00	43.97	692.15	6466.98	9	مدل
-	0.354	0.94	14.84	14.84	1	f
+	0.00	53.12	836.22	836.22	1	Tp
+	0.00	117.65	1852.2	1852.23	1	P
-	0.845	0.04	0.64	0.64	1	$f \times f$
+	0.00	49.79	783.78	783.78	1	$Tp \times Tp$
+	0.00	147.21	2317.55	2317.55	1	$P \times P$
-	0.893	0.02	0.3	0.3	1	$f \times Tp$
+	0.028	6.64	104.47	104.47	1	$f \times P$
+	0.00	35.38	556.95	556.95	1	$Tp \times P$
			15.74	157.43	10	خطا
+	0.00	24.28	30.24	151.20	5	عدم
			1.25	6.23	5	خالص
				6624.41	19	مجموع

95.32%= $\text{adj}(R^2)$ و 97.54%= R^2

جدول 5 نتایج آنالیز واریانس برای مدل بریدگی کنار جوش

معناداری	P-	F-	Adj MS	Adj SS	DF	عامل
+	0.00	11.95	26.778	240.999	9	مدل
+	0.05	4.94	11.056	11.056	1	f
+	0.00	26.30	58.906	58.906	1	Tp
+	0.00	68.92	154.381	154.381	1	P
-	0.739	0.12	0.263	0.263	1	$f \times f$
-	0.115	2.97	6.663	6.663	1	$Tp \times Tp$
+	0.05	4.42	9.893	9.893	1	$P \times P$
-	0.696	0.16	0.361	0.361	1	$f \times Tp$
-	0.945	0.01	0.011	0.011	1	$f \times P$
-	0.334	1.03	2.311	2.311	1	$Tp \times P$
			2.24	22.401	1	خطا
+	0.00	1492.3	4.477	22.386	5	عدم
			0.003	0.015	5	خالص
				266.246	19	مجموع

83.84%= $\text{adj}(R^2)$ و 91.50%= R^2

جدول 6 نتایج آنالیز واریانس برای مدل پرشدگی جوش

معناداری	P-	F-	Adj MS	Adj SS	DF	عامل
+	0.00	33.01	25.337	228.029	9	مدل
+	0.02	7.66	5.881	5.881	1	f
+	0.001	22.71	17.431	17.431	1	Tp
+	0.00	201.11	154.381	154.381	1	P
-	0.965	0.00	0.002	0.002	1	$f \times f$
+	0.00	40.87	31.373	31.373	1	$Tp \times Tp$
-	0.518	0.45	0.344	0.344	1	$P \times P$
-	0.906	0.01	0.011	0.011	1	$f \times Tp$
-	0.783	0.08	0.061	0.061	1	$f \times P$
+	0.001	22.29	17.111	17.111	1	$Tp \times P$
			0.768	7.677	1	خطا
+	0.00	103.6	1.521	7.603	5	عدم
			0.015	0.073	5	خالص
				234.572	19	مجموع

93.81%= $\text{adj}(R^2)$ و 96.74%= R^2

تأثیرگذار بر آن است و خطای این مدل‌سازی حدود 2% محاسبه گردید. در نظر گرفتن همه اثرات اصلی، توان دوم و متقابل پارامترهای ورودی می‌تواند تحقیقات پیشین [14,8] در مورد بررسی اثر انرژی پالس به تنهایی را در

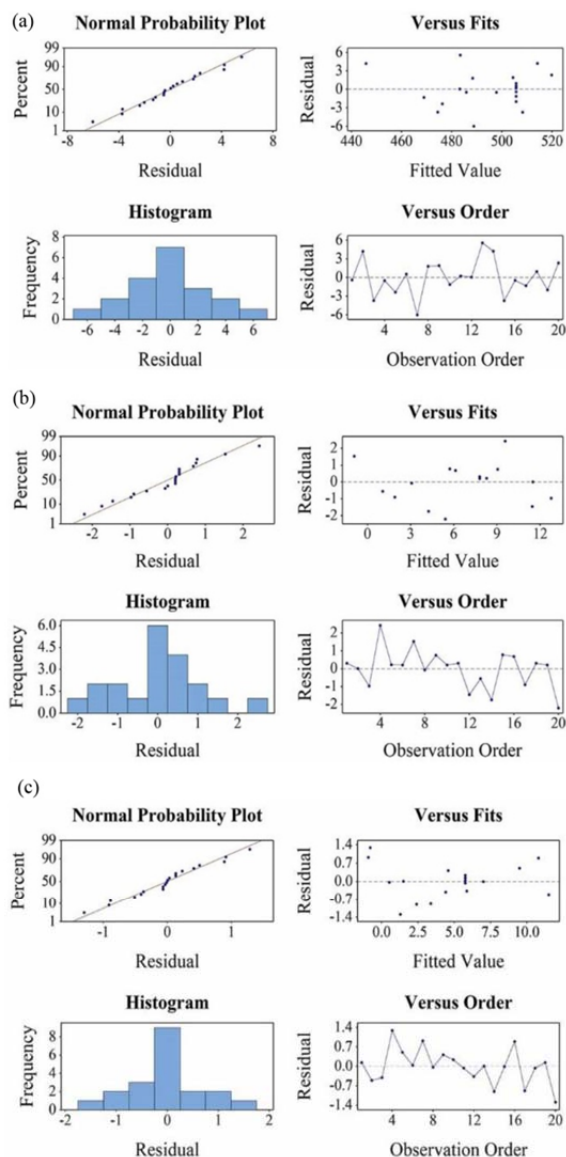


Fig. 4 the residual plots for the models of a- the weld shear strength, b- the weld undercut, and c- the weld underfill.

شکل 4 نمودارهای باقی‌مانده برای مدل‌های الف- استحکام برشی جوش، ب- بریدگی کنار جوش و ج- پرشدگی جوش.

به ترتیب 2، 8 و 3 به دست آمد و میزان ضریب تعیین برای مدل‌های ریاضی استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرشدگی جوش به ترتیب حدود 98%، 92% و 97% است که اختیار اعداد نزدیک به 100 نشان‌دهنده برازش خوبی برای مدل‌های یادشده است. با توجه به این که مقدار ضریب مجموع تعیین و ضریب مجموع تعیین تعدیل یافته (R^2) و ($\text{adj}(R^2)$) به هم نزدیک و مدل‌های ارائه شده دقیق و قابل اطمینان هستند.

3-2- بسط مدل ریاضی

نتایج حاصل از آنالیز واریانس در جدول 7 نشان داده شده است. برای نمونه در مدل استحکام برشی جوش، توان قله با مجموع اثر 64% و زمان روشنی پالس با مجموع اثر 25% مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر این مدل است. همچنین اثر متقابل دو پارامتر زمان روشنی پالس و توان لیزر که همان پارامتر شناخته شده انرژی پالس است، با تأثیر 8% تنها یکی از عوامل

موارد مشابه کامل‌تر کند. بررسی مقادیر انرژی پالس و حرارت ورودی آورده شده در جدول 3 نشان می‌دهد که برخی از شرایط مختلف جوش کاری دارای مقدار انرژی پالس و یا حرارت ورودی یکسانی، اما استحکام برشی آن‌ها متفاوت است. این نتایج نشان می‌دهد اثرات توان و زمان روشنی پالس را نمی‌توان به طور مستقل و یا حتی با ترکیب ساده‌ای از آن‌ها در قالب انرژی پالس و حرارت ورودی دقیقاً بررسی کرد. به همین دلیل در مواردی گزارش شده است که ارتباط معنی‌داری بین حرارت ورودی و خواص جوش وجود ندارد [30].

نتیجه این آنالیز برای مدل‌های استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرنشندگی جوش به ترتیب در روابط (3-1) براساس مقادیر کد شده نشان داده شده است که می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی نتایج در ازای پارامترهای ورودی استفاده کرد. همان‌طور که گفته شد عاملی که طبق جدول‌های 4-6 دارای P-Value بالاتر از 0.05 باشد، اثر معناداری بر پاسخ‌ها ندارد. برای نمونه فرکانس به تنهایی در محدوده انتخابی، اثر معناداری بر مدل استحکام برشی ندارد و از مدل مربوطه حذف می‌شود.

$$S_L(\text{MPa}) = 505.73 + 7.229T_p - 10.759P - 5.583T_p \times T_p - 9.601P \times P - 3.61f \times P - 8.34T_p \times P \quad (1)$$

$$UC(\mu\text{m}) = 7.752 + 0.743f + 1.564T_p + 2.645P - 0.669P \times P \quad (2)$$

$$UF(\mu\text{m}) = 5.766 - 0.606f - 1.044T_p + 3.10P - 1.117T_p \times T_p - 1.463T_p \times P \quad (3)$$

3-3- تحلیل داده‌ها

پس از مشخص شدن عوامل مؤثر، نمودار تأثیرات این عوامل برای مقایسه و بررسی نتایج در مدل‌های پرنشندگی جوش، بریدگی کنار جوش و استحکام برشی جوش استخراج گردید (شکل 5). این نمودارها نشان‌دهنده تغییرات یک پارامتر در نقطه میانی دو پارامتر دیگر (به طور پیش‌فرض) است.

بررسی شکل 5-a,b نشان داد با افزایش توان قله، پرنشندگی جوش و بریدگی کنار جوش زیاد می‌شود. براساس جدول 3 با ازدیاد توان قله از 130 به 650 وات (و در زمان روشنی پالس ثابت 2.5 میلی‌ثانیه)، میزان پرنشندگی جوش به ترتیب از 0 به 11 میکرومتر افزایش نشان می‌دهد. در این شرایط میزان بریدگی کنار جوش به ترتیب از 0.6 به 11.5 میکرومتر زیاد می‌شود. میزان تلاطم در حوضچه جوش با افزایش توان قله زیاد می‌شود؛ به طوری که در توان قله 650 وات پاشیدن مذاب به بیرون از حوضچه جوش به صورت پراکنش¹ در اطراف جوش دیده می‌شود و حتی در مواردی شرگی در کنار جوش² نیز مشاهده می‌گردد. این پدیده در نهایت باعث گودی سرتاسری³ حوضچه جوش می‌گردد. این مشاهدات با تحقیقات سایر محققین توافق دارد [32,31,22].

تحلیل آزمایش‌ها حاکی از آن است که با افزایش زمان روشنی پالس در توان قله ثابت 390 وات، پرنشندگی جوش ابتدا زیاد و سپس کاهش می‌یابد (شکل 5-a,b) در زمان روشنی پالس کم (1.5 میلی‌ثانیه) حوضچه جوش هنوز کل ضخامت اعضا را پر نکرده است و براساس تحقیقات هی [32] کوچک بودن حوضچه مذاب، سرعت چرخشی مذاب را محدود می‌کند، در نتیجه اثرات تلاطم بر حوضچه ناچیز است و در این حالت مقدار پرنشندگی جوش 2.5 میکرومتر اندازه‌گیری شد. با افزایش زمان روشنی پالس به 3.5 میلی‌ثانیه نیز به دلیل کاهش گرادیان دمایی، تلاطم در حوضچه جوش کم و در نتیجه پرنشندگی جوش به 0.5 میکرومتر کاهش می‌یابد، همچنین بررسی نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زمان روشنی پالس و ازدیاد حرارت در لبه

فلز پایه، بریدگی کنار جوش زیاد می‌گردد. میزان بریدگی کنار جوش در دامنه زمان روشنی پالس از 1.5 به 3.5 میلی‌ثانیه (و در توان قله ثابت 390 وات) به ترتیب از 1 به 12 میکرومتر افزایش می‌یابد (جدول 3).

مطالعه فرآیند نشان می‌دهد زمان خاموشی⁴ پالس با افزایش فرکانس کمتر می‌گردد، به عبارت دیگر میزان هم‌پوشانی پالس‌ها بیشتر می‌شود. افزایش هم‌پوشانی باعث پیشگرم شدن پالس بعدی توسط پالس پیشین می‌گردد؛ یعنی گرادیان دمایی در حوضچه جوش کاهش می‌یابد که نیروی محرکه تلاطم است و این موضوع باعث کاهش پرنشندگی جوش و افزایش بریدگی کنار جوش می‌گردد. اگرچه طبق نتایج حاصل از آنالیز واریانس ارائه شده در جدول 7 اثر تغییر فرکانس ناچیز است.

براساس شکل 5-c استحکام برشی با افزایش توان قله و زمان روشنی پالس ابتدا افزایش و سپس کاهش نشان می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهد، دلایل اصلی کاهش استحکام اتصالات جوش کاری شده شامل تنش پسماند، ناپیوستگی‌های میکروسکوپی در حوضچه جوش و منطقه متأثر از حرارت و همچنین عیوب جوش است [15]. در تحقیق حاضر سعی شد با انجام چند جوش کاری مقدماتی، حدود پایین و بالای پارامترهای جوش کاری برای طراحی آزمایش به گونه‌ای تنظیم گردد تا حداقل اعوجاج در نمونه‌ها پس از جوش کاری مشاهده شود، همچنین به دلیل ماهیت روش جوش کاری لیزر یعنی تمرکز حرارتی بالا، حرارت ورودی کم و نازک بودن فویل مورد استفاده، از مطالعه تنش پسماند جوش صرف‌نظر شد. مطالعات ریزساختاری نمونه‌ها نشان داد که جوش لیزر دارای منطقه متأثر از حرارت بسیار باریک و ناچیز است و هیچ نوع ترکی در این منطقه مشاهده نشد. در واقع سرعت سرد شدن زیاد جوش، رسوب‌گذاری در مرز دانه‌ها و احتمال ترک را به شدت کاهش می‌دهد. ریزساختار منطقه جوش به دلیل انجماد با نرخ سرد شدن بالا دارای مورفولوژی سلولی است و تغییر پارامترهای جوش کاری تأثیری بر تغییر مورفولوژی جوش ندارد. در این منطقه هیچ‌گونه تخلخل و آخال گازی مشاهده نشد که نشانه مؤثر بودن گاز محافظ است و هیچ ارتباط منطقی بین استحکام برشی و مطالعات ریزساختاری دیده نشد.

استحکام برشی جوش‌ها و محل شکست نمونه‌ها در جدول 3 آورده شده است. شکست کلیه نمونه‌ها از فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و کنار جوش اتفاق افتاد و هیچ‌گونه شکستی از وسط جوش دیده نشد. در جوش کاری لیزر پالسی، نوار جوش توسط هم‌پوشانی مجموعه‌ای از جوش‌های نقطه‌ای تولید می‌گردد. در مقادیر پایین توان قله و زمان روشنی پالس، نفوذ جوش در اتصال هنوز کامل نشده است. برای توان قله 260 وات، زمان روشنی پالس 2 میلی‌ثانیه و فرکانس 17 هرتز، نفوذ جوش در اتصال متغیر و از 110-140 میکرومتر و میزان بریدگی کنار جوش 3 میکرومتر اندازه‌گیری شد و استحکام برشی جوش 490 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. مشاهدات نشان داد که حالت شکست عموماً از نزدیک خط ذوب و فلز پایه و در مناطق با حداقل نفوذ از ریشه جوش ایجاد می‌شود و عیب غالبی که می‌تواند سبب کاهش استحکام برشی شود، نفوذ ناقص تشخیص داده شد و هیچ نشانه‌ای از شکست ناشی از بریدگی کنار جوش و پرنشندگی جوش دیده نشد (شکل 6-a). نفوذ جوش در اتصال در مقادیر بالاتر توان قله و زمان روشنی پالس کامل می‌گردد. بررسی شکست نمونه‌ها حاکی از آن است که پس از کامل شدن نفوذ جوش، استحکام برشی جوش با میزان بریدگی جوش ارتباط دارد و بریدگی کنار جوش با افزایش توان قله و زمان روشنی پالس افزایش می‌یابد. در توان قله 520 وات، زمان روشنی پالس 2 میلی‌ثانیه و فرکانس 17 هرتز، استحکام

¹ Sputter

² Weld Overlap

³ Rounded Bottom Underfill

⁴ Time Off

جوش اتفاق افتاد (شکل 6-b). در توان قله 520 وات، زمان روشنی پالس 3 میلی‌ثانیه و فرکانس 17 هرتز، استحکام برشی 471 مگاپاسکال و بریدگی کنار جوش 12 میکرومتر محاسبه شد و در این حالت نیز شکست نزدیک به خط ذوب و فلز جوش از بریدگی کنار جوش رخ داد (شکل 6-c). آزمایش‌ها نشان داد که مقدار بریدگی کنار جوش در برخی شرایط جوش کاری می‌تواند کم شود و استحکام برشی افزایش یابد. این شرایط نزدیک به نقطه حداکثر در شکل 5-c است. در توان قله 260 وات، زمان روشنی پالس 3 میلی‌ثانیه و فرکانس 17 هرتز، استحکام برشی به حداکثر خود یعنی 522 مگاپاسکال و بریدگی کنار جوش به 3 میکرومتر رسید. در این حالت شکست از نزدیک خط ذوب در فلز پایه اتفاق افتاد و هیچ نشانه‌ای از شکست ناشی از بریدگی کنار جوش دیده نشد (شکل 6-d)؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار

جدول 7 میزان اثر پارامترهای جوش کاری بر مدل‌های عیوب جوش و مدل استحکام برشی جوش

Table 7 Effect of welding parameters on models of weld defects and shear strength

عامل (%)	UC	UF	SL
مجموع اثر توان قله	62	66	64
مجموع اثر زمان روشنی پالس	25	21	25
مجموع اثر فرکانس	4	3	1
اثر انرژی پالس	0	7	8
خطای مدل‌سازی	8	3	2

برشی جوش 474 مگاپاسکال و بریدگی کنار جوش 8.5 میکرومتر به دست آمد و در این حالت شکست نزدیک به خط ذوب و فلز جوش از بریدگی کنار

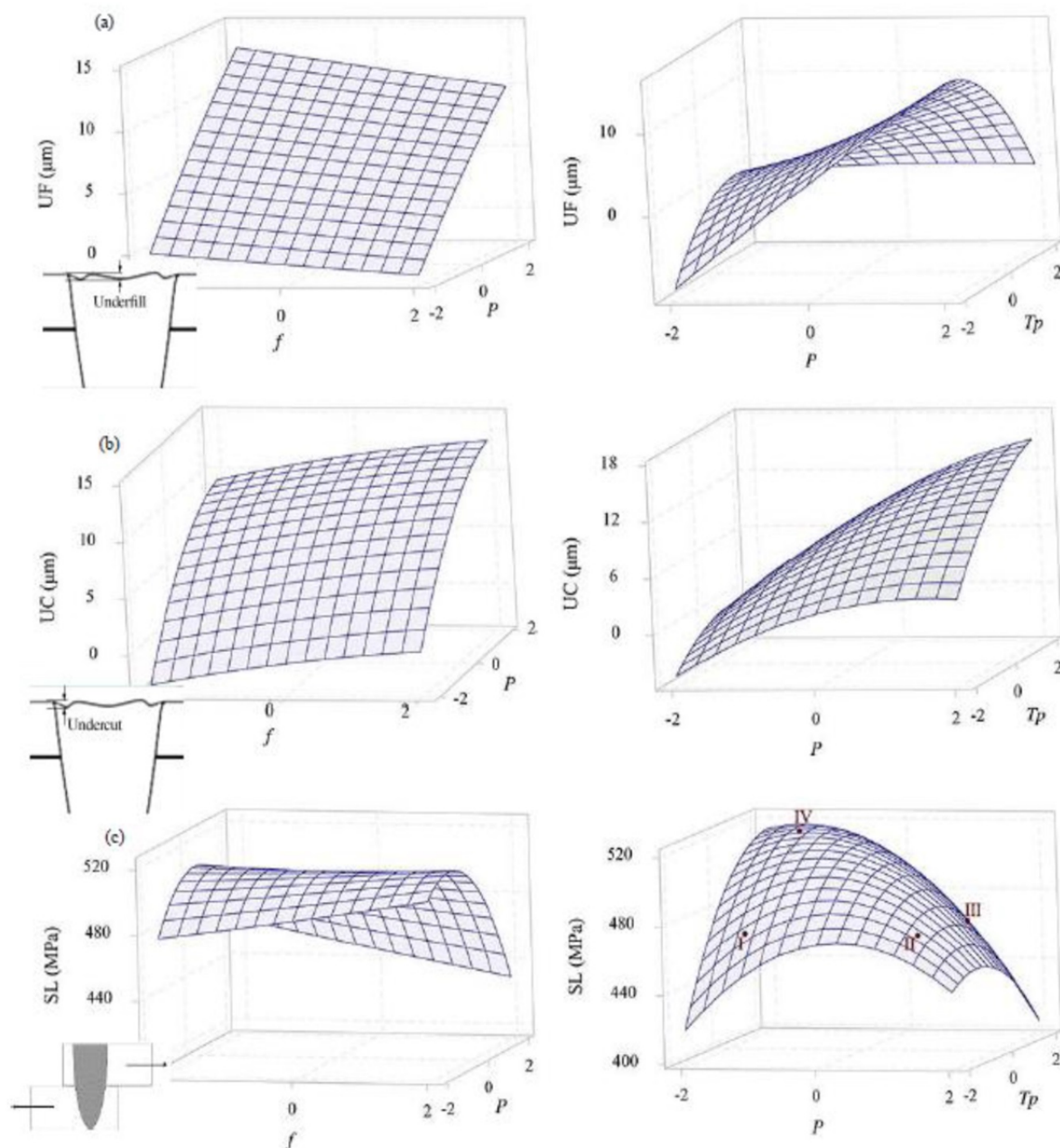


Fig. 5 Surface plots of the models of a- the weld underfill, b- weld undercut and c- the shear strength, respectively, peak power-pulse durability and peak power-frequency

شکل 5 نمودار سطحی مدل‌های الف- پرنشده‌گی جوش، ب- بریدگی کنار جوش و ج- استحکام برشی جوش برحسب به‌ترتیب توان قله- زمان روشنی پالس و توان قله- فرکانس

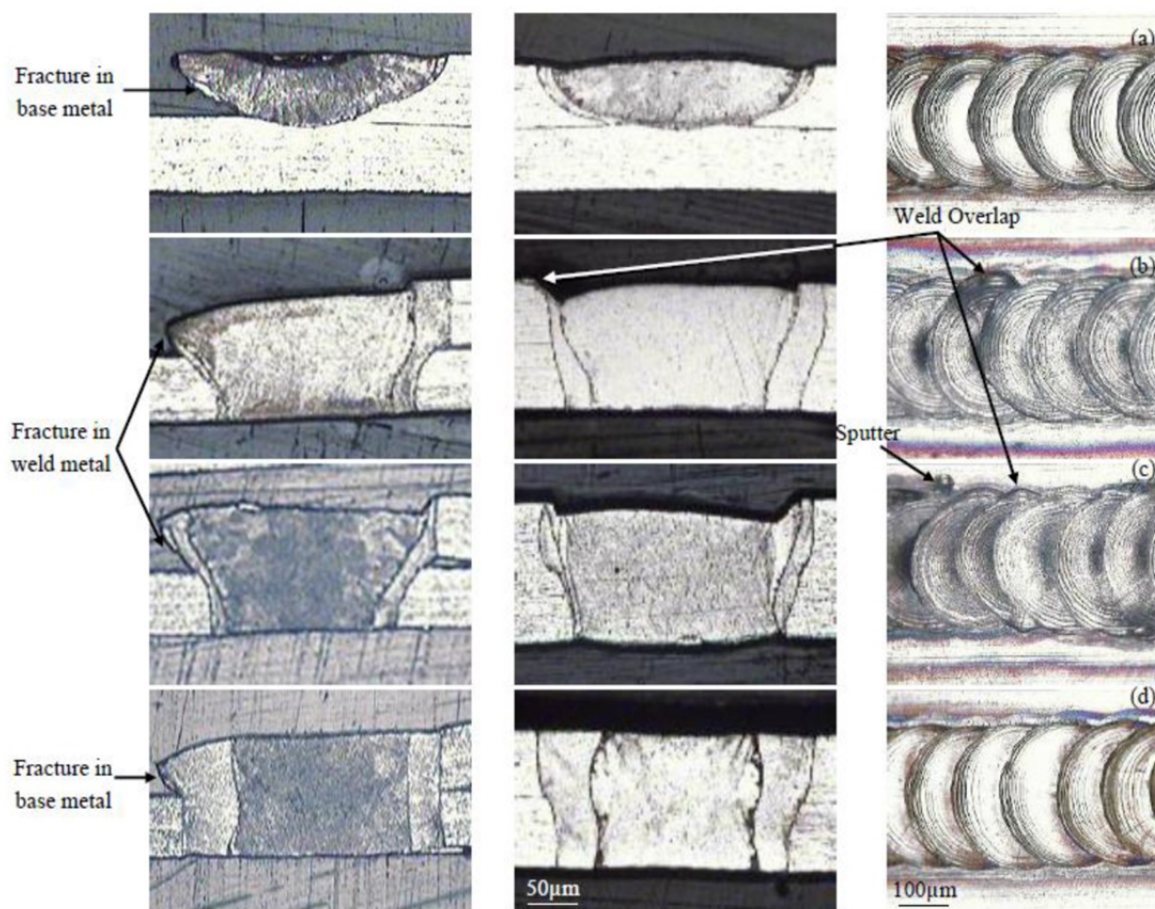


Fig. 6 Optical microscopy images of the weld surface, the weld section and the fracture position a- point I, b-, point II, c- point III, and d- the point IV shown in Fig. 5 (welding conditions of the point I equal to $Tp=2ms$ and $P=260W$, the point II equal to $Tp=2ms$ and $P=520W$, the point III equal to $Tp=3ms$ and $P=520W$ and the point IV equal to $Tp=3ms$ and $P=260W$).

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح جوش، مقطع جوش و موقعیت شکست الف- نقطه I، ب- نقطه II، ج- نقطه III و د- نقطه IV نشان داده شده در شکل 5 (شرایط جوش کاری نقطه I برابر $P=260W$ و $Tp=2ms$ ، نقطه II برابر $P=520W$ و $Tp=2ms$ ، نقطه III برابر $P=520W$ و $Tp=3ms$ و نقطه IV برابر $P=260W$ و $Tp=3ms$ می‌باشد).

بریدگی کنار جوش یادشده تأثیری بر استحکام برشی ندارد.

بررسی کرد.

- مهم‌ترین عوامل مؤثر بر استحکام برشی، بریدگی کنار جوش و نفوذ ناقص تشخیص داده شد.

- در توان قله و زمان روشنی پالس پایین (به ترتیب 260 وات و 2 میلی‌ثانیه) به علت وجود عیب نفوذ ناقص، در مواردی شکست از ریشه جوش اتفاق افتاد و استحکام برشی جوش 490 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

- در توان قله بالا (520 وات) و زمان روشنی پالس پایین و بالا (2 و 3 میلی‌ثانیه)، استحکام برشی به ترتیب 474 و 471 مگاپاسکال و بریدگی کنار جوش به ترتیب 8.5 و 12 میکرومتر به دست آمد و شکست از بریدگی کنار جوش رخ داد.

- حداکثر استحکام برشی به میزان 522 مگاپاسکال در توان قله 260 وات، زمان روشنی پالس 3 میلی‌ثانیه و فرکانس 17 هرتز به دست آمد. در این حالت بریدگی کنار جوش به 3 میکرومتر رسید و شکست از نزدیک خط ذوب در فلز پایه رخ داد.

5- مراجع

- [1] G. Hoogers, *Fuel Cell Technology Handbook*, pp. 3-5, New York: CRC press, 2014.
- [2] C. Rayment, S. Sherwin, *Introduction to Fuel Cell Technology*, pp. 11-12, Notre Dame: University of Notre Dame, 2003.

4- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین هدف این پژوهش بررسی اثر پارامترهای جوش کاری شامل توان لیزر، زمان روشنی پالس و فرکانس و استخراج معادله ریاضی برای استحکام برشی و عیوب جوش است و براساس این تحلیل‌های آماری نتایج زیر به دست آمد:

- مدل‌های ریاضی توسعه داده شده دارای دقت بسیار خوبی برای فرآیند جوش کاری لیزر پالسی است، به طوری که خطای مدل‌های استحکام برشی، بریدگی کنار جوش و پرنشده جوش به ترتیب 2%، 8% و 3% به دست آمد.

- توان لیزر مهم‌ترین پارامتر در جوش کاری لیزر برآورد گردید و اثر آن بر استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرنشده جوش به ترتیب 64%، 62% و 66% محاسبه شد.

- زمان روشنی پالس دومین پارامتر مؤثر مدل‌ها محسوب شد و تأثیر آن بر استحکام برشی جوش، بریدگی کنار جوش و پرنشده جوش به ترتیب 25%، 22% و 21% به دست آمد.

- اثرات توان و زمان روشنی پالس را نمی‌توان به طور مستقل و یا حتی با ترکیب ساده‌ای از آن‌ها در قالب انرژی پالس و حرارت ورودی دقیقاً

- welding based on moveless TIG welding, *Transactions of Joining and Welding Research Institute*, Vol. 39, pp. 197-198, 2010.
- [19] C. E. Albright, S. Chiang, High-speed laser welding discontinuities, *Laser Applications*, Vol. 1, No. 1, pp. 18-24, 1988.
- [20] J. Karlsson, P. Norman, A. F. Kaplan, P. Rubin, J. Lamas, A. Yanez, Observation of the mechanisms causing two kinds of undercut during laser hybrid arc welding, *Applied Surface Science*, Vol. 257, No. 17, pp. 7501-7506, 2011.
- [21] P. F. Huang, C. Tang, Z. Y. Lu, Fundamental research on the mechanism of high-speed welding undercut, *Advanced Materials Research*, Vol. 287-290, pp. 2152-2155, 2011.
- [22] J. Zhu, L. Li, Z. Liu, CO₂ and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy, *Applied Surface Science*, Vol. 247, No. 1, pp. 300-306, 2005.
- [23] J. Karlsson, C. Markmann, M. M. Alam, A. F. Kaplan, Parameter influence on the laser weld geometry documented by the matrix flow chart, *Physics Procedia*, Vol. 5, pp. 183-192, 2010.
- [24] X. Cao, M. Jahazi, Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd: YAG laser, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 47, No. 11, pp. 1231-1241, 2009.
- [25] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Eighth Edition, pp. 478-544, New York: Wiley, 2013.
- [26] A. Olabi, K. Benyounis, M. Hashmi, Application of response surface methodology in describing the residual stress distribution in CO₂ laser welding of AISI304, *Strain*, Vol. 43, No. 1, pp. 37-46, 2007.
- [27] A. Ruggiero, L. Tricarico, A. Olabi, K. Benyounis, Weld-bead profile and costs optimisation of the CO₂ dissimilar laser welding process of low carbon steel and austenitic steel AISI 316, *Optics and Laser Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 82-90, 2011.
- [28] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology, statistical modelling and optimization, *Latin Solids and Structures*, Vol. 14, No. 3, pp. 464-484, 2017.
- [29] S. M. Kowalski, D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments, Minitab Companion*, 7th Edition, pp. 76-88, New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [30] A.-M. El-Batahy, Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels, *Materials Letters*, Vol. 32, No. 2, pp. 155-163, 1997.
- [31] A. Paul, T. DebRoy, Free surface flow and heat transfer in conduction mode laser welding, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 19, No. 6, pp. 851-858, 1988.
- [32] X. He, *Heat transfer, fluid flow and mass transfer in laser welding of stainless steel with small length scale*, PhD Thesis, Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, 2006.
- [3] H. Tsuchiya, O. Kobayashi, Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve, *Hydrogen Energy*, Vol. 29, No. 10, pp. 985-990, 2004.
- [4] S. Dhakate, R. Mathur, B. Kakati, T. Dhami, Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell, *Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 17, pp. 4537-4543, 2007.
- [5] S. Heidari, E. Afshari, Comparison between different models of polymer membrane fuel cell using a metal foam as a flow distributor, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 333-343, 2015. (in Persian فارسی)
- [6] H. Tawfik, Y. Hung, D. Mahajan, Metal bipolar plates for PEM fuel cell—a review, *Power Sources*, Vol. 163, No. 2, pp. 755-767, 2007.
- [7] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, Bipolar plates for PEM fuel cells: A review, *Hydrogen Energy*, Vol. 30, No. 12, pp. 1297-1302, 2005.
- [8] D. P'ng, P. Molian, Q-switch Nd: YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 486, No. 1, pp. 680-685, 2008.
- [9] V. A. Ventrella, J. R. Berretta, W. De Rossi, Pulsed Nd: YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils, *Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 14, pp. 1838-1843, 2010.
- [10] M. Moradi, M. Ghoreishi, Influences of laser welding parameters on the geometric profile of Ni-base superalloy Rene 80 weld-bead, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1-4, pp. 205-215, 2011.
- [11] A. H. Faraji, M. Goodarzi, S. H. Seyedein, C. Maletta, Investigation of the capability of hybrid Nd: YAG - TIG welding against Nd: YAG laser welding process for aluminum foam sandwich panels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 349-356, 2016. (in Persian فارسی)
- [12] F. Liang, H. Chendong, Z. Yansong, H. Wei, P. Linfa, *Laser weld-bonding method of bipolar plate of fuel cell*, CN Patent No. 102581487 A, 2012.
- [13] V. A. Ventrella, *Pulsed Nd: YAG laser applied in microwelding*, Dan C. Dumitras (Eds.), *Nd YAG Laser*, pp. 255-278, China: In Tech publisher, 2012.
- [14] V. A. Ventrella, J. R. Berretta, W. de Rossi, Application of pulsed Nd: YAG laser in thin foil microwelding, *Materials and Product Technology*, Vol. 48, No. 1-4, pp. 194-204, 2014.
- [15] K. Benyounis, A.-G. Olabi, M. Hashmi, Multi-response optimization of CO₂ laser-welding process of austenitic stainless steel, *Optics & Laser Technology*, Vol. 40, No. 1, pp. 76-87, 2008.
- [16] T. Nguyen, D. Weckman, D. Johnson, H. Kerr, High speed fusion weld bead defects, *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 11, No. 6, pp. 618-633, 2006.
- [17] I. Eriksson, J. Powell, A. Kaplan, Measurements of fluid flow inside laser welding keyholes, *Science and Technology of Welding & Joining*, Vol. 16, pp. 636-41, 2011.
- [18] Z. Lu, P. Huang, S. Chen, Y. Li, Mechanism of undercut in high speed