

## بررسی و بهینه سازی پارامترهای موثر بر استحکام جوش نقطه ای لیزر پالسی Nd:YAG در ورقهای فولادی با استفاده از طراحی آزمایشات

عباسعلی حبیب الهی<sup>۱\*</sup>، نصرالله بنی مصطفی عرب<sup>۲</sup>، علی دهقانی<sup>۳</sup>، امیر علی نقی زاده<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، سرپرست تولید شرکت اخوان  
۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
۳- مدرس دانشگاه جامع علمی کاربردی، مرکز صنعتی ایران خودرو، تهران، ایران  
۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
\* پست الکترونیکی: abbasalihabibollahi@yahoo.com

### چکیده:

در این مقاله، فرآیند جوشکاری نقطه‌ای لیزر در ورق‌های فولادی زنگ نزن AISI304، که در صنایع مختلف استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای لیزر، کیفیت اتصالات به میزان زیادی به مقادیر پارامترهای تنظیمی وابسته است. از پارامترهای تنظیمی در روش جوشکاری نقطه‌ای لیزر می‌توان به توان ماکزیمم پالس، زمان پالس و ضخامت ورق اشاره کرد که در استحکام اتصال موثر بوده و در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مهمترین مشخصه کیفیت جوش در این روش، استحکام کششی- برشی است که در این تحقیق به عنوان معیار ارزیابی کیفیت جوش در نظر گرفته شده است. به منظور ایجاد رابطه ریاضی دقیق بین پارامترهای ورودی و متغیر پاسخ (استحکام کششی- برشی)، از روش طراحی آزمایشات و روش تحلیل رویه پاسخ استفاده شده است. پس از طراحی و اجرای آزمایش‌ها با استناد به تحلیل واریانس، مدل ریاضی منطبق بر فرآیند واقعی بدست آمده است. همچنین اعتبار مدل پیشنهادی به کمک روش‌های آماری تایید شده است. برای طراحی آزمایشات و تحلیل نتایج، از نرم افزار Minitab16 استفاده شده است. نتایج بدست آمده از انجام آزمایشات و تحلیل آنها، نشان داد که افزایش توان ماکزیمم پالس تا ۴۲۵۰ وات و زمان پالس پرتو لیزری تا ۳/۵ میلی ثانیه، بیشترین استحکام کششی- برشی (۲۲۰۰ کیلوگرم) ایجاد می‌کنند و اثر مرتبه دوم ضخامت ورق بیشترین تاثیر منفی را در استحکام کششی- برشی اتصال دارد.

### کلید واژگان:

جوش نقطه‌ای لیزر - طراحی آزمایش - رویه پاسخ - بهینه سازی - استحکام جوش

## Investigation and Optimization Of the Parameters Affecting the Strength Of Nd:YAG Pulsed Laser Spot Welding in Steel Sheet Using Design Of Experiments

Abbasali Habibollahi<sup>1\*</sup>, Nasrollah Bani mostafa Arab<sup>2</sup>, Ali Dehghani<sup>3</sup>, Amir Alinaghizadeh<sup>4</sup>

Master Science of Mechanical Engineering, Production Supervisor at AKHAVAN Co.Tehran,Iran  
Faculty Member-Lecturer at Shahid Rajaei Teacher Training University- Mechanical Engineering Department, tehran,iran  
Lecturer at University of Applied Sciences & Technology, Iran Khodro Industrial Center, Tehran, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

\*Email@address: abbasalihabibollahi@yahoo.com

### Abstract:

Welding plays an important role in manufacturing and it is a reliable and efficient joining process in which the coalescence of metals is achieved by fusion. Nowadays welding is as the main and most common process for joint of metals (and sometimes non-metals). Among the welding methods, Laser Beam Welding (LBW) has the potential of welding very small and precise components. Localized heating with solidification of the melt, makes the connection between parts. In this thesis, laser spot welding process, which is one of the varieties of LBW process, is studied. In fact the laser spot welding is a simple type of laser welding that is widely used in various industries. The low strength of joints can damage structures. Therefore it is important that the strength of the joint be estimated and optimized. In this research, investigation and optimization of the laser spot welding process using design of experiments and response surface method is considered. Three parameters (peak power, pulse duration and thickness) of the process at three levels were the input factors. Material of sheets that was used in this research is AISI 304 stainless steel. The response or output factor was tensile - shear strength. Minitab16 software was used for design of experiments and analysis of the results. Finally, results showed that increase the peak power until 4250 watt and pulse duration until 3/5 millisecond provide the most tensile - shear strength (2200 Kg), and Square of thickness has the most negative effect on tensile - shear strength of the joint.

### Keywords:

laser spot welding-design of experiments-response surface-optimization- strength

## ۱- مقدمه

جوش (طول، عرض، عمق جوش) در ورق AISI 304 به ضخامت ۲/۵ میلیمتر را پیش بینی کنند و در نهایت مقادیر بدست آمده را با مقادیر واقعی بدست آمده از آزمایش تجربی مقایسه کردند.

خرم<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ هندسه جوش در جوشکاری لیزر CO<sub>2</sub> در آلیاژ تیتانیوم- آلومینیوم را با روش آماری پاسخ سطح بهینه سازی کردند [۶]. آنها در مطالعات خود روی این آلیاژ که در صنایع پزشکی، هسته‌ای و هوافضا به فراوانی استفاده می‌شود، متمرکز کردند و پارامترهای موثر در هندسه جوش از قبیل: توان لیزر، سرعت جوشکاری و فاصله کانونی را بررسی و توسط روش پاسخ سطح بهینه سازی کردند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها در بهبود شرایط جوشکاری و کاهش هزینه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون نقطه جوش لیزر در فولاد زنگ نزن با روش روبه پاسخ بررسی نشده است که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

مواد استفاده شده در این تحقیق از جنس فولاد زنگ نزن AISI304 با مشخصات داده شده در جدول ۱- می‌باشد که یکی از معروفترین و پرکاربردترین آلیاژ در خانواده فولادهای زنگ نزن است و دارای خواصی از قبیل مقاومت به خوردگی خوب، شکل پذیری عالی، ساخت آسان و استحکام مناسب می‌باشد.

جدول ۱ عناصر آلیاژی و در صد وزنی آنها در فولاد AISI 304

عناصر آلیاژی	درصد وزنی %
C	۰.۰۸
Mn	۲
Si	۱
Cr	۱۸.۵
Ni	۸
P	۰.۰۴۵
S	۰.۰۳

ابعاد نمونه‌ها طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97، ۴۵×۱۰۵ میلیمتر می‌باشد. نحوه اتصال با توجه به شکل ۱- خواهد بود [۷]. این اتصال شامل ۳۵ میلیمتر همپوشانی ورق‌ها می‌باشد که از این قسمت در فیکسچر مخصوص که در ادامه نشان داده خواهد شد بسته می‌شود و نقطه جوشها در وسط این قسمت به طور یکسان در همه نمونه‌ها قرار می‌گیرد.

جوشکاری یک روش ساده و مؤثر در اتصال قطعات و اجزای صنعتی می‌باشد که از اهمیت بالایی در ساخت و تولید، برخوردار است. از بین روش‌های مختلف، جوشکاری لیزر (LBW)<sup>۱</sup> یک روش جوشکاری ذوبی سوراخ کلیدی<sup>۲</sup> است که با دانسیته توان بسیار بالایی به دست می‌آید و حاصل تمرکز باریکه قوی از پرتو لیزر بر روی نقطه بسیار کوچک می‌باشد که یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای اتصال ورق‌ها در صنعت ورق کاری است [۱]. در این روش مواد توسط پرتوی لیزر سریع ذوب شده و ممکن است قسمتی از آن بخار شود. این عمل باعث می‌شود که یک حفره حاوی بخار شکل گیرد که میزان جذب پرتو را افزایش می‌دهد. این حفره ی حاوی بخار فلز را سوراخ کلید می‌نامند. سرعت جوشکاری بالا، منطقه متأثر از حرارت<sup>۳</sup> باریک، پیچش کم، قابلیت اتوماسیون بالا و انعطاف پذیری در طراحی از جمله مزایای جوشکاری لیزر می‌باشند [۲]. به همین منظور نقطه جوش پالسی لیزر Nd:YAG<sup>۴</sup> در این مقاله با توجه به کاربردهای فراوان، این روش مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفته است. بدین منظور از روش طراحی آزمایشات<sup>۵</sup> (DOE) و تکنیکهای روبه پاسخ<sup>۶</sup> (RSM)، که جزء پرکاربردترین روش‌های آماری و بهینه سازی در حل مسائل مهندسی است، به کمک نرم افزار Minitab16 استفاده شده است. ریبوللا<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۵ کاربرد جوش لیزر و لحیم کاری لیزر Nd:YAG را، که در صنعت خودروسازی به صورت انبوه استفاده می‌شود، مورد مطالعه قرار دادند [۳]. آنها این روش را با سایر روش‌های رایج جوشکاری مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت تولید، استحکام و کیفیت جوش لیزر نسبت به سایر روش‌ها خیلی بالاست. بالا سوبرامانیان<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ بصورت تجربی و شبیه سازی عددی فرآیند جوشکاری لیزر را در ورق فولادی ضدزنگ ۳۰۴ بررسی کردند [۴]. در نهایت به این نتیجه رسیدند که پارامترهای بهینه برای دست یافتن به استحکام ماکزیمم این است که توان لیزر ۱۲۵۰ وات، سرعت جوشکاری ۷۵۰ میلیمتر بر دقیقه و زاویه تابیدن اشعه ۹۰ درجه باشد. سیوا شانموگام<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ روی هندسه جوش در فرآیند جوش نقطه ای لیزر مطالعاتی انجام دادند و این فرآیند را با روش المان محدود شبیه سازی کردند [۵]. آنها جوش لیزر Nd:YAG را که یکی از روشهای پرکاربرد است شبیه سازی کردند تا تاثیر پارامترهای ورودی از قبیل انرژی اشعه، زاویه تابش اشعه و زمان تابش اشعه را روی هندسه

<sup>1</sup> Laser Beam Welding

<sup>2</sup> Keyhole

<sup>3</sup> Heat Affected Zone

<sup>4</sup> Pulsed Laser Spot Welding

<sup>5</sup> Neodymium-doped Yttrium Aluminium garnet; Nd:Y3Al5O12

<sup>6</sup> Design Of Experiments

<sup>7</sup> Respons Surface Method

<sup>8</sup> Ribolla

<sup>9</sup> Balasubramanian

<sup>10</sup> shangman, siva

آنها نیز با توجه به استاندارد شرکت TRUMPF Laser Technology Center [۸] سازنده دستگاه لیزر مورد استفاده در این تحقیق و تجربه محقق، در سه سطح مطابق جدول ۳- انتخاب شده است.

جدول ۳ پارامترهای مستقل فرآیند و سطوح آنها

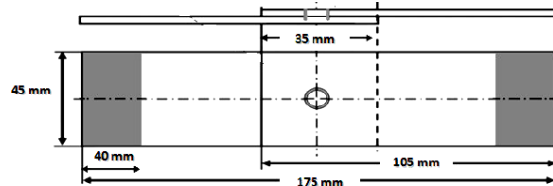
متغیر مستقل	نماد ریاضی	واحد	مربوطه	سطح	کد و
Variable	Notation	Unit			
Thickness	D	[mm]	0.5	0.6	0
Pulse duration	T	[ms]	2.5	3	3.5
Peak power	P	[W]	3250	3750	4250

### طراحی آزمایشات

بعد از انتخاب پارامترها و سطوح آنها، نوبت به طراحی آزمایش می‌رسد که در این قسمت به آن پرداخته شده است. همانطور که در قسمت قبل ذکر شد سه پارامتر (۱- توان ماکزیمم (Peak power) ۲- زمان پالس (Pulse duration) ۳- ضخامت ورق فولادی (Thickness)) به عنوان پارامترهای موثر در استحکام کششی - برشی، اتصال نقطه‌ای انتخاب شده و در سه سطح (+۱ و ۰ و -۱) به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند. با استفاده از نرم افزار Minitab 16 این آزمایش طراحی شده است.

جهت انجام آزمایشات از روش رویه پاسخ (RSM) و روش طراحی مرکب مرکزی<sup>۱</sup> (CCD) که ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آمار است، استفاده شده است. جدول ۴- آزمایش‌های طراحی شده را به صورت کد شده نشان می‌دهد. مطابق این جدول تعداد فاکتورها ۳ و تعداد تکرار آزمایش‌ها یک بار بوده و تعداد بلوک آن ۱ می‌باشد. تعداد نقاط کامل ۸، تعداد نقاط مرکزی ۳، تعداد نقاط محوری ۶ و تعداد نقاط مرکز محورها صفر بوده و مقدار  $\alpha$  برابر ۱ است. مقدار  $\alpha$  باید طوری انتخاب شود که نقاط پیشنهادی توسط نرم افزار داخل مکعب و به صورت اعداد صحیح باشد به همین دلیل این مقدار برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

در کلیه آزمایش‌ها فرکانس به طور ثابت ۱۰ هرتز در نظر گرفته شده است و همچنین شکل موج به صورت مربعی بوده و فاصله کانونی آن ۱۳۵mm می‌باشد. پارامتر ثابت دیگر نیروی مابین ورق هاست که با استفاده از فیکسچر ساخته شده، در تمامی آزمایش‌ها ثابت است. با توجه به ماهیت فرآیند که به صورت نقطه جوش می‌باشد، سرعت جوشکاری در همه آزمایش‌ها صفر می‌باشد. بعد از تنظیم پارامترها با



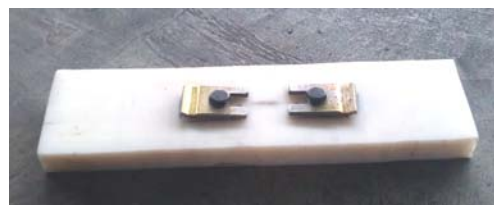
شکل ۱ ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش طبق استاندارد-ANSI/AWS/SAE/D8.9 [۷]۹۷

برای انجام جوشکاری از دستگاه لیزر پالسی TRUMPF مدل TruPulse 124 با مشخصات آورده شده، در جدول ۲- استفاده شده است.

جدول ۲ مشخصات دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها

۱۲۴	TruPulse
۱۰۶۴ nm	Wavelength
۱۴۰   ۱۲۵   ۱۱۰ W	Average power
۶   ۶   ۹ kW	Max. pulse power
۳۰   ۷۰   ۹۰ J	Max. pulse energy
۰.۳ ms - ۵۰ ms	Pulse duration
۱۶ mm•mrad	Beam quality
۴۰۰ $\mu$ m	Min. diameter laser light cable
۶ °C - ۲۸ °C	Cooling water temperature range

اشعه لیزر تولید شده در این دستگاه از نوع لیزر حالت جامدی Nd:YAG است که پرتوی آن بصورت پالسی، با فاصله کانونی 135 mm می‌باشد. در این آزمایش‌ها فاصله کانونی و نیروی بین ورقها به عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شده است بنابراین فیکسچر مخصوصی مطابق شکل ۲- طراحی و ساخته شد تا نیروی بین ورقها را ثابت نگه دارد.



شکل ۲ فیکسچر ساخته شده برای ایجاد نیروی ثابت بین ورقها

### ۳- پارامترها و سطوح آنها

در این مقاله استحکام کششی - برشی اتصال نقطه جوش تابع پاسخ می‌باشد و پارامترهای ورودی انتخاب شده، شامل ۱- توان ماکزیمم (Peak power)، ۲- زمان پالس (Pulse duration)، ۳- ضخامت ورق (Thickness) می‌باشند که با توجه به مقالات نوشته شده، تاثیر آنها در استحکام کششی - برشی اتصال به اثبات رسیده است. حدود

1 Central Composite Design

جدول ۵ نتایج بدست آمده از آزمون کشش برای استحکام کششی - برشی

Tensile - Shear Strength [kg]	Peak power [w]	pulse on time [ms]	Thickness [mm]	Blocks	Pt Type	Run Order
۱۱۴۶	۱	-۱	۱	۱	۱	۱
۸۹۸	-۱	۱	-۱	۱	۱	۲
۹۹۵	-۱	۱	۱	۱	۱	۳
۱۴۹۷	۰	۰	۰	۱	۰	۴
۱۰۲۵	۰	۰	-۱	۱	-۱	۵
۱۷۸۹	۱	۱	-۱	۱	۱	۶
۱۰۸۷	۰	۰	۱	۱	-۱	۷
۱۸۶۵	۱	۰	۰	۱	-۱	۸
۱۲۵۶	-۱	۰	۰	۱	-۱	۹
۱۶۵۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱۰
۷۶۰	-۱	-۱	-۱	۱	۱	۱۱
۱۳۶۰	۰	-۱	۰	۱	-۱	۱۲
۱۶۵۵	۰	۰	۰	۱	۰	۱۳
۷۵۰	-۱	-۱	۱	۱	۱	۱۴
۱۶۳۵	۰	۱	۰	۱	-۱	۱۵
۱۸۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
۱۵۵۴	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱۷

جدول ۶ آنالیز واریانس استحکام کششی - برشی نقطه جوش

منبع تغییر	ضرایب رگرسیون	مقدار T	مقدار P
مقدار ثابت	۱۵۳۲.۶۸	۳۴.۶۹۰	۰.۰۰۰
D	-۲۲.۵۰	-۰.۶۸۹	۰.۵۱۳
T	۱۵۷.۰	۴.۸۰۸	۰.۰۰۲
P	۳۵۱.۸۰	۱۰.۷۷۴	۰.۰۰۰
D*D	-۴۲۵.۶۸	-۶.۷۴۸	۰.۰۰۰
T*T	۱۵.۸۲	۰.۲۵۱	۰.۸۰۹
P*P	۷۸.۸۲	۱.۲۴۹	۰.۲۵۲
D*T	۶۸.۶۲	۱.۸۸۰	۰.۱۰۲
D*P	-۵۷.۶۳	-۱.۵۷۹	۰.۱۵۸
T*P	۶۶.۱۲	۱.۸۱۱	۰.۱۱۳

R-Sq = ۹۶.۷۱%      R-Sq(adj) = ۹۲.۴۹%

$$T-SS=1532.68-22.5D+157T+351.8P-425.68D^2+15.8T^2$$

$$+78.82P^2+68.6D \times T-57.63D \times P+66.12 T \times P$$

رابطه (۱)

در گام بعدی تحلیل، جملات غیر موثر را در جدول -Y که P-Value آنها از ۰/۰۵ بیشتر است، از مدل خارج ساخته و تحلیل مجدداً تنها بر اساس جملات موثر، که P-Value آنها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، انجام داده می‌شود. جدول -Y آنالیز واریانس اصلاح شده مدل

رعایت نکات حفاظتی، جوشکاری نمونه‌ها به طور در هم و رندوم انجام می‌شود، دلیل انجام رندوم آزمایش‌ها جلوگیری از خطاهای سیستماتیک، می‌باشد.

جدول ۴ طرح آزمایشات استخراج شده به صورت کد شده

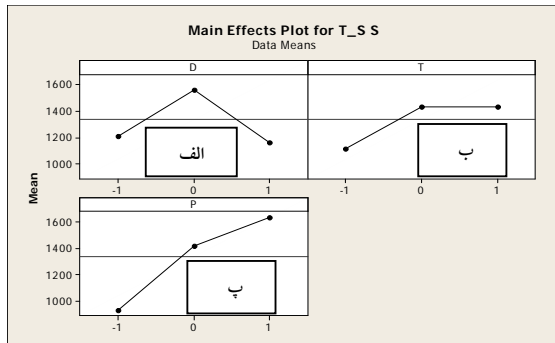
شماره آزمایش	ضخامت	زمان پالس	توان ماکزیمم
Experiment No.	Thickness [D]	Pulse on time [T]	Peak power [P]
۱	۱	-۱	۱
۲	-۱	۱	-۱
۳	۱	۱	-۱
۴	۰	۰	۰
۵	-۱	۰	۰
۶	-۱	۱	۱
۷	۱	۰	۰
۸	۰	۰	۰
۹	۰	۰	-۱
۱۰	۰	۰	۰
۱۱	-۱	-۱	-۱
۱۲	۰	-۱	۰
۱۳	۰	۰	۰
۱۴	۱	-۱	-۱
۱۵	-۱	۱	۱
۱۶	۱	۱	۱
۱۷	-۱	-۱	-۱

## ۵- تحلیل نتایج

جدول ۵ نتایج بدست آمده از آزمون کشش برای استحکام کششی - برشی را نشان می‌دهد. بعد از وارد کردن مقادیر اندازه گیری شده برای استحکام کششی - برشی اتصال در قسمت طراحی آزمایشات نرم افزار Minitab و آنالیز کردن نتایج توسط نرم افزار، جدول ۶ به دست آمد که به عنوان جدول آنالیز واریانس، ضرایب رگرسیون مدل را برای آزمایش طراحی شده نشان می‌دهد.

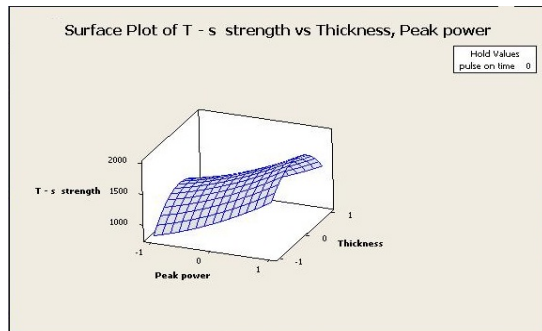
جدول ۶ ضرایب معادله رگرسیون مدل را در ستون دوم نشان می‌دهد، رابطه ۱- معادله رگرسیون نوشته شده، برای فرآیند شامل اثرات پارامترهای اصلی و اثرات متقابل پارامترها و اثرات مرتبه دوم آنها می‌باشد و بدون در نظر گرفتن P-Value و معنی دار بودن پارامترها نوشته شده است.

و عملی این افزایش استحکام با افزایش توان پالس، این است که هرچه قدر توان پالس افزایش یابد، با زمان یا ضخامت ثابت، مساحت حوضچه مذاب جوش افزایش یافته و ابعاد نقطه جوش بزرگتر شده و کیفیت و استحکام اتصال افزایش می یابد. همچنین افزایش توان موجب می شد که انرژی اشعه لیزر افزایش یابد و عمق جوش افزایش یابد و حوضچه مذاب به وجود آمده در سوراخ کلید، به راحتی به ورق زیرین رسیده و بعد از انجماد استحکام افزایش یابد. در صورت بالا بودن زمان پالس نیز انرژی اشعه بالاتر رفته و مساحت حوضچه مذاب بیشتر می شود که استحکام اتصال در نتیجه آن افزایش می یابد.



شکل ۳ اثر پارامترهای اصلی بر استحکام اتصال در جوشکاری نقطه ای لیزر

شکل-۴ رویه پاسخ استحکام کششی- برشی جوش را بر اساس ضخامت ورق و توان ماکزیمم پالس نشان می دهد. این شکل که از تغییر پارامترهای توان ماکزیمم پالس اشعه و ضخامت ورق و ثابت نگه داشتن پارامتر زمان پالس در سطح صفر حاصل گردیده است، رویه ای گذرانده شده است و تاثیر تغییر این دو پارامتر را بر استحکام کششی - برشی جوش در فضای متغیرها، به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۴ رویه پاسخ استحکام کششی- برشی جوش بر اساس ضخامت ورق و توان

ماکزیمم

با توجه به شکل می توان تاثیر توان ماکزیمم و ضخامت را در استحکام تفسیر کرد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش توان استحکام کششی - برشی اتصال افزایش می یابد. استحکام اتصال در سطح متوسط ضخامت ورق، بیشترین مقدار خود را داشته و تاثیر ضخامت ورق به خوبی در آن مشهود است که از سطح پایین خود تا سطح

استحکام کششی - برشی را بر مبنای جملات موثر، بیان می کند. با توجه به این جدول نیز مدل ریاضی یا معادله رگرسیون اصلاح شده بر حسب پارامترهای موثر نوشته می شود که در رابطه-۲ آورده شده است.

جدول ۷ آنالیز واریانس اصلاح شده مدل استحکام کششی - برشی

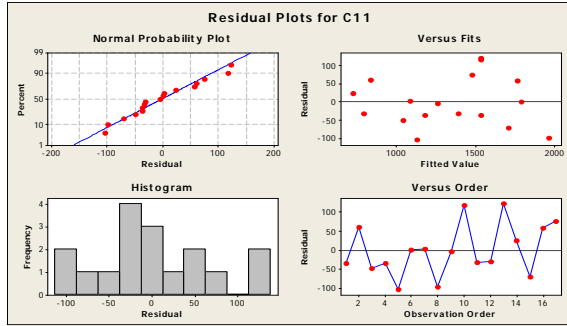
منبع تغییر	ضرایب رگرسیون	مقدار T	مقدار P
مقدار ثابت	۱۵۵۹.۷۱	۳۲,۲۹۰	۰,۰۰۰
D	-۲۲.۵۰	-۰.۵۵۷	۰,۵۸۸
T	۱۵۷.۰۰	۳.۸۸۵	۰,۰۰۲
P	۳۵۱.۸۰	۸.۷۰	۰,۰۰۰
D*T	-۳۷۷.۰۱	-۵.۹۸۶	۰,۰۰۰
R-Sq = ۹۱.۳۷%		R-Sq(adj) = ۸۸.۴۹%	

مقدار  $R^2$  در جدول آنالیز واریانس اصلاح شده برحسب پارامترهای موثر، معادل ۹۱/۳۷٪ بیان شده است که نشان دهنده پوشش ۹۱/۳۷٪ داده ها توسط تحلیل انجام شده است که از مقدار  $R^2$  کمتر شده، ولی این کاهش چند درصدی معمول بوده و غیر طبیعی نمی باشد [۹]. معادله رگرسیون اصلاح شده در رابطه-۲ مشاهده می شود که استحکام کششی- برشی اتصال جوش نقطه ای را بر حسب مقادیر واقعی نشان می دهد.

$$T-SS = 1559.71 - 22.50 \cdot D + 157 \cdot T + 351.8 \cdot P - 377.01 \cdot D^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

این معادله، مدل نهایی برای فرآیند محسوب می شود و پاسخ بهینه به کمک این معادله توسط نرم افزار محاسبه و رویه های پاسخ برای پارامترهای فرآیند جوشکاری نقطه ای لیزر رسم می شود که در ادامه یکی از رویه های پاسخ آورده شده و مورد بحث قرار گرفته است.

شکل-۳ اثر پارامترهای اصلی بر استحکام جوش در جوشکاری نقطه ای لیزر را نشان می دهد. همانطور که در شکل-۳(الف) مشاهده می شود، ضخامت ورق (D) در مقدار مینیمم و ماکزیمم خود دارای استحکام کمتری می باشد، علت آن این است که در صورت کم بودن ضخامت ورق، سوراخ کلیدی ایجاد شده توسط اشعه لیزر قبل از انجماد و تشکیل اتصال از طرف دیگر ورق خارج شده و سوراخهایی در محل اتصال ایجاد می شود که موجب ضعیف شدن اتصال در ورقهای با ضخامت کم می شود. کاهش استحکام در ضخامتهای بالای ورق هم به دلیل عدم ایجاد سوراخ کلید توسط اشعه لیزر و نرسیدن مذاب به حد کافی به ورق زیرین است. مطابق شکل-۳(ب) با افزایش زمان پالس، استحکام در ابتدا با شدت بیشتری بالا می رود ولی با روند افزایش زمان پالس، شیب و شدت افزایش استحکام کمتر می شود، چون با افزایش زمان پالس، زمان برای انجماد کاهش یافته و مذاب قبل از انجماد و ایجاد اتصال از سمت دیگر ورق خارج شده و کیفیت اتصال با شیب کمتری افزایش می یابد. شکل-۳(پ) نشان می دهد که با افزایش توان، استحکام کششی- برشی اتصال افزایش می یابد و توجه فیزیکی



شکل ۶ توزیع باقیمانده‌های استحکام کششی - برشی اتصال نقطه جوش

#### ۶- اعتبار سنجی مدل ریاضی بدست آمده

برای تعیین اعتبار مدل به دست آمده در رابطه-۲، پنج آزمایش با پارامترهایی که در محدوده پارامترهای انتخاب شده برای آزمایش‌های طراحی شده است، با شرایط یکسان نسبت به ۱۷ آزمایش اجرا شده، انجام می‌شود. این آزمایش‌ها باید با ترکیب پارامترهای غیر تکراری و داخل حدود تعیین شده باشد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول-۸ آورده شده است.

جدول ۸ درصد خطاها در آزمون‌های اعتبارسنجی

شماره آزمایش	پارامتر ضخامت	پارامتر زمان	پارامتر توان	استحکام حاصل از مدل	استحکام آزمایش	درصد خطا
۱	۰/۷	۲/۵	۳۲۵۰	۹۵۲	۱۰۰۵	۵/۵۶
۲	۰/۵	۳	۳۲۵۰	۷۹۲	۸۵۳	۷/۷
۳	۰/۷	۳	۴۲۵۰	۱۴۳۵	۱۵۱۲	۵/۳۶
۴	۰/۶	۲/۵	۴۲۵۰	۱۶۷۴	۱۷۵۴	۴/۷۷
۵	۰/۷	۳/۵	۳۷۵۰	۱۲۵۵	۱۳۱۷	۴/۹۴

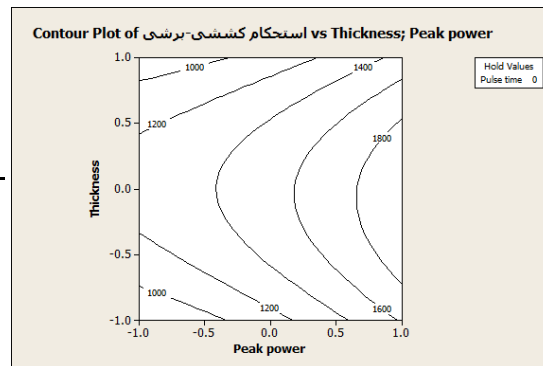
با توجه به درصد خطاهای بدست آمده که کمتر از ۱۰٪ هستند، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل شده، دارای صحت می‌باشد.

#### ۷- بهینه سازی

- آزمایش‌های طراحی شده به خوبی نشان داد که استحکام کششی - برشی اتصال وابسته به پارامترهای توان ماکزیمم پالس، زمان پالس و ضخامت ورق بوده و تحت تاثیر تغییرات آنها قرار می‌گیرد.
- افزایش توان ماکزیمم پالس تا ۴۲۵۰ وات، در زمان و ضخامت با سطح متوسط باعث بالا رفتن استحکام کششی - برشی اتصال تا ۱۹۶۰ کیلوگرم می‌شود.
- افزایش زمان پالس تا ۳/۵ میلی ثانیه در توان و ضخامت با سطح متوسط باعث بالا رفتن استحکام کششی - برشی اتصال تا ۱۷۰۰ کیلوگرم می‌شود.
- توان ماکزیمم پالس، با توجه به جداول آنالیز واریانس، بیشترین تاثیر مستقیم در استحکام کششی - برشی دارد.

میانی دارای شیب افزایشی بوده و از سطح میانی تا سطح ماکزیمم خود دارای شیب منفی می‌باشد که استدلال و توجیه فیزیکی آن خارج شدن مذاب از سطح زیرین ورق در ضخامت پایین و عدم رسیدن کامل مذاب به سطح ورق زیرین در ورق ضخیم‌تر می‌باشد. در این شکل زمان پالس در سطح صفر، ثابت در نظر گرفته شده است.

شکل-۵ منحنی تراز<sup>۱</sup> استحکام کششی - برشی اتصال ایجاد شده توسط جوش نقطه ای لیزر را بر اساس ضخامت ورق و توان ماکزیمم نشان می‌دهد. این شکل حاصل تصویر کردن رویه پاسخ شکل-۴ بر روی صفحه ضخامت ورق - توان ماکزیمم می‌باشد. این منحنی به خوبی روند تغییرات استحکام کششی - برشی نقطه جوش را بیان می‌کند. معادلات حاکم بر این منحنی‌ها، معادله رگرسیون رابطه-۲ می‌باشد.



شکل ۵ منحنی تراز استحکام کششی - برشی نقطه جوش بر اساس ضخامت ورق و توان ماکزیمم

باقیمانده‌ها تخمینی از خطای آزمایشات هستند که از تفریق پاسخ مشاهده شده از مقدار تخمین زده شده بدست می‌آیند [۱۰]. شکل-۶ توزیع باقیمانده‌ها را برای استحکام کششی - برشی اتصال نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که باقیمانده‌ها در اطراف خط قطری پراکنده شده‌اند و توزیعی نرمال دارند.

این شکل گویای این مطلب است که فرضیات اولیه استفاده شده در آنالیز واریانس صحیح می‌باشد. لذا معادله ریاضی حاصله، مدل مناسبی برای پیش‌بینی و بررسی اثر پارامترها می‌باشد. به منظور قضاوت در مورد نرمال بودن باقیمانده‌ها می‌توان از هیستوگرام باقیمانده‌ها نیز استفاده کرد، همانطور که از نمودار هیستوگرام پیداست که پراگندگی باقیمانده‌ها بیشتر اطراف نقطه صفر قرار گرفته و نشان دهنده نرمال بودن فرآیند می‌باشد.

[5] Siva Shanmugam G. Buvanashakaran K. Sankaranarayananamy "Some studies on weld bead geometries for laser spot welding process using finite element analysis" *Materials and Design* 34, pp.1124-1132, 2012.

[6] Khorram. A, Ghoreishi. M "Optimization of Bead Geometry in CO<sub>2</sub> Laser Welding of Ti 6Al 4V Using Response Surface Methodology" *Advanced Materials Research* 76, pp. 383-390, 2011

[7] Masoumi. M, S.P.H. Marashi, M. Pouranvari, J. Sabbaghzadeh, "Assessment Of The Effect Of Laser Spot Welding Parameters On The Joint Quality Using Taguchi Method" *METAL journal* 19, 2009.

[8] David Havrilla "Design for laser welding", TRUMPF Laser Technology Center, 2012.

[9] Khuri. A.I, Cornell. J.A, "Response Surfaces Design and Analysis", 2nd ed., New York, Marcel Dekker, 1996.

[10] Montgomery M. RH "Response Surface Methodology", J. Wiley & Sons Interscience Publication, 2002.

(۵) زمان پالس با توجه به جداول آنالیز واریانس، درجه دوم اهمیت، برای افزایش استحکام کششی - برشی اتصال دارد.  
(۶) افزایش توان تا ۴۲۵۰ وات و زمان پالس تا ۳/۵ میلی ثانیه باعث افزایش استحکام کششی - برشی اتصال تا ۲۲۰۰ کیلوگرم می شود.

#### مراجع :

[1] Leonard P. Connor, R. L.Brien, American Welding Society, "Welding Handbook: Welding processes", American Welding Society, 1991.

[2] Dawes. Christopher "Laser Welding Technology" 2nd edition, American Technical Society, Abington Publishing, 1998.

[3] Ribolla. A, G.L. Damoulis, G.F. Batalha "The use of Nd:YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white" *Journal of Materials Processing Technology* 40, pp. 1120-1127, 2005.

[4] Balasubramanian, k.r, siva shangman, "Numerical And Experimental Investigation Of Laser Beam Welding Of AISI 304 Stainless steel Sheet" *Advances in production engineering & Management* 34 ,pp. 875-883 , 2008