

بهینه‌سازی متغیرهای جوشکاری تعمیری TIG غیرهمجنس ورق فولاد کربنی A516 Grade 60 و فولاد ضدزنگ SS316 به روش تاگوچی و روش‌های آماری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
دانشجوی تحصیلات تکمیلی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

رسول محرمی*
بهمن علی‌نژاد

چکیده

جوشکاری به روش TIG یکی از فرآیندهای مهم در ایجاد اتصالات دائمی و تعمیر با کیفیت در سازه‌های فلزی به‌ویژه در تجهیزات صنایع نفت و گاز و هوافضا است. کیفیت به مقدار بسیار زیادی وابسته به انتخاب صحیح متغیرهای جوشکاری بوده و در صورت عدم انتخاب مقادیر بهینه، فرآیند ساخت همراه با مشکلات احتمالی و افزایش هزینه‌ها خواهد بود. در این مقاله هدف انتخاب پارامترهای بهینه جوشکاری TIG به‌منظور رسیدن به حداکثر استحکام مکانیکی اتصال و فلز جوش است. شدت جریان، سرعت جوشکاری، دبی گاز و قطر فیلر به‌عنوان متغیرهای مهم تأثیرگذار انتخاب شده و با طراحی آزمایش‌های مورد نیاز، بعد از ساخت نمونه‌های جوشکاری شده، بررسی تجربی استحکام انجام شده است. در این پژوهش از روش تاگوچی جهت طراحی و بهینه‌سازی و همچنین از روش‌های آماری برای اعتبار سنجی داده‌ها استفاده شده است. طبق نتایج در جوشکاری فولاد A516 به SS316 استفاده از جریان ۱۱۰ آمپر، قطر الکترود ۲/۵ میلی‌متر، دبی گاز ۱۲/۵ لیتر بر دقیقه و سرعت ۱۹۰ میلی‌متر بر دقیقه، استحکام جوش با افزایشی در حدود ۱۵ درصد به بیشینه مقدار خود رسیده است. **واژه‌های کلیدی:** جوشکاری تعمیری، غیر همجنس، بهینه‌سازی، روش تاگوچی، روش‌های آماری.

Optimization of TIG Repair Welding in Dissimilar Material Sheet, Carbon Steel A516 Grade 60 and Stainless Steel 316L by Taguchi and Statistical Method

R. Moharrami Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
B. Alinezhad Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract

The TIG welding is a commercial technique in joining of dissimilar metals in oil and gas industry. The quality of welded joints depends on proper selection of welding parameters. Dissimilar repair welding between sheets of austenitic stainless steel and carbon steel were considered in this article. The purpose of research is selection of optimal welding parameters in order to achieve maximum mechanical strength in the joint. Electrical current, welding speed, gas flow and filler diameter have been selected as considered parameters. In experimental study design of experiments has been performed by Taguchi method. After the preparation and welding of specimens, the tensile testis carried out. Obtained data export to statistical data analysis and optimal welding condition were estimated. To validate obtained data the analysis of variance were employed.

According to the results welding by 110 amperes, 2.5 electrode diameters, 12.5 l/m flow rate and 190mm/min welding speed reaches to maximum tensile strength in weld metal. By selecting appropriate values of process parameters, tensile strength increased about 15 percent.

Keywords: Repair Welding, Dissimilar, Optimization, Taguchi Method, Statistical Method

مطلوب کیفی هزینه‌های زیادی بابت تعمیر و یا تهیه مواد جایگزین ایجاد می‌گردد.

ارتقاء کیفیت اتصال جوشی برای سالیان طولانی از اولویت‌های تحقیقاتی مراکز دانشگاهی و صنعتی بوده و معیارهای مختلفی برای بررسی کیفیت یک اتصال جوشی بکار برده شده است. نتایج پژوهش‌های منتشر شده نشانگر آن است که بخشی از تحقیقات صنعتی در این رابطه به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر کیفیت جوش و بخشی دیگر به بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری مربوط بوده است [۱]. به دلیل اینکه هدف از ایجاد یک اتصال

۱- مقدمه

جوشکاری یکی از فرآیندهای اتصال دائمی پرکاربرد در صنعت است. جوشکاری TIG به دلیل کیفیت مناسب و اعوجاج کم، تمیز و بدون سرباره بودن، عدم پاشش مذاب و دیگر موارد کاربرد وسیعی در ایجاد اتصالات فلزی به‌ویژه در بین دو فلز غیرهمجنس دارد. کیفیت اتصال جوشی غیرهمجنس ایجاد شده تحت تأثیر تغییرات پارامترهای فرآیند جوشکاری در محدوده تعیین شده بوده و در صورت عدم رسیدن به نتایج

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r_moharrami@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹

جوشی به‌ویژه در مورد سازه‌های جوشکاری تحت بار، تحمل بارگذاری وارده و اطمینان از عملکرد آن است، استحکام کششی اتصال جوشی به‌عنوان یکی از شاخصه‌های مهم در بررسی کیفیت جوش مورد توجه محققان بوده است. در سال ۱۹۹۸ تارن سعی کردند تا هندسه جوش را در جوشکاری TIG به روش تاگوچی بهینه سازند [۲]. آن‌ها متغیرهای را که در هندسه جوش تأثیرگذار بود انتخاب کردند و با روش تاگوچی سعی در بهینه‌سازی و پیدا کردن بهترین پارامترها برای دست‌یابی به هندسه مناسب کرده جوش کردند.

در سال ۲۰۰۷ گریدهارن طی تحقیقاتی اثر برخی متغیرهای فرآیند را در جوشکاری فولاد ضدزنگ AISI304L بر استحکام کششی جوش مورد بررسی قرار دادند [۳]. همچنین آن‌ها در بررسی‌های خود با کاربرد روش مدل‌سازی ریاضی به‌وسیله آنالیز و تجزیه و تحلیل رگرسیون، روش تخمین مقدار نفوذ و عرض حوضچه جوش توسعه دادند. در سال ۲۰۱۰ قزوینلو و همکارانش مطالعاتی انجام دادند که در آن تأثیر زاویه الکتروود، قطر فیلر و نوع گاز محافظ بر مقدار نفوذ جوش در جوشکاری گاز محافظ نشان داده شده است [۴]. در سال ۲۰۱۰ کولاهان روشی برای تخمین و بهینه کردن پارامترهای فرآیند جوشکاری TIG را توسعه دادند که طی آن اثر پارامترهای جوشکاری با دقت بالای تخمین زده می‌شد. آن‌ها از روش‌های ریاضی برای مدل کردن و رسیدن به حالت بهینه کرده جوش استفاده کردند [۵]. آن‌ها توانستند حالتی بهینه پیدا کنند تا بهترین حالت ارتفاع و عرض جوش را به دست آورند. بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری اتصالات غیر آهنی در سال ۲۰۱۱ با پژوهش‌های کومار بر روی جوشکاری آلومینیوم دنبال شده است [۶]. در سال ۲۰۱۲ ساتیش و همکارانش مطالعاتی در رابطه با کیفیت جوش غیر هم‌جنس فولاد کربنی A106 و فولاد زنگ نزن SS304 در لوله و بهینه‌سازی آن انجام دادند که نتایج آن در صنایع نفت و گاز، صنایع شیمیایی و دیگر صنایع کاربرد زیادی دارد [۷]. ساتیش در این تحقیق از روش جوش TIG و روش تاگوچی جهت بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند استفاده کردند. در سال ۲۰۱۲ کومار آزمایشی را جهت حصول خواص مناسب در جوش TIG بر روی آلیاژ تیتانیوم از طریق تنظیم متغیرهای مناسب جوشکاری انجام داد. آزمایش با گاز محافظ مخلوطی از آرگون و هلیوم انجام شد و روش تاگوچی برای بررسی تأثیر هر کدام از متغیرها بر روی جوش بکار گرفته شد [۸].

بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی در کنار روش‌های دیگر به منظور رسیدن به کیفیت مناسب در اتصال جوشی در سال‌های اخیر نیز مورد توجه بوده است. گوش و همکاران در سالهای ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ با بررسی رفتار اتصال فولادهای زنگ نزن AISI 409 و AISI 316L اقدام به بهینه‌سازی اثر پارامترهایی چون شدت جریان، دبی گاز و فاصله نازل تا صفحه بر رفتار مکانیکی و میکرو ساختار منطقه اتصال هم‌جنس و غیر هم‌جنس این فولادها نمودند [۹، ۱۰]. همچنین ویرا و سیرانگن در سال ۲۰۱۶ و دیویدی و ویدارتی در سال ۲۰۱۷ جزء محققانی بودند که با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تاگوچی اقدام به بهینه‌سازی رفتار مکانیکی و متالورژیکی اتصال جوشی TIG برای مواد هم‌جنس و غیر هم‌

جنس نمودند [۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴]. در اغلب این پژوهش‌های یک ویژگی خاص در اتصالی مشخص مورد توجه قرار گرفته و با بررسی تجربی اثر پارامترهای مورد نظر بر رفتار اتصال جوشی، شرایط بهینه اجرای جوش مورد نظر تعیین شده است.

پژوهش حاضر برای دست‌یابی به رفتار مکانیکی بهینه اتصال غیر هم‌جنس فولاد کربنی A516 به فولاد زنگ نزن AISI316 در عملیات تعمیر بخشی از برج شیرین‌سازی گاز همراه نفت شرکت نفت فلات قاره در جزیره لاوان انجام شده است. با توجه به این که روش اجرای این فرایند جزء دانش فنی شرکت‌ها در تعمیرات صنعت نفت می‌باشد، پژوهش منتشر شده‌ای درباره بهینه‌سازی اتصال تعمیراتی معرفی شده وجود ندارد.

در طی این پژوهش هدف رسیدن به حداکثر استحکام اتصال با انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای فرآیند تعیین شده است. با توجه به اینکه هزینه پایین و سرعت عمل در انجام پروژه‌ها برای صنایع نفت و گاز بسیار حائز اهمیت است، در این تحقیق سعی بر آن شده است تا با استفاده از روش طراحی آزمایش^۱ و روش‌های آماری رگرسیون‌گیری^۲ و تجزیه و تحلیل واریانس^۳ علاوه بر کاعش تعدا نمونه‌های تست‌های تجربی، نقطه بهینه متغیرهای جوشکاری که شرایط بیشترین استحکام کششی اتصال تعریف شده به دست آید.

۲- طرح مسئله و طرح آزمایش

برج شیرین‌سازی گاز یکی از برج‌های مهم در صنعت نفت است که وظیفه شیرین‌سازی گاز همراه نفت که عمدتاً از گازهای CO₂ و H₂S است را دارد. گازهای استحصالی از نفت برای سوخت توربین‌ها و یا دیگ‌های بخار استفاده می‌شود. در صورت عدم کارکرد درست این واحد، گاز به‌صورت ترش جهت سوختن به مشعل فرستاده می‌شود که در ضمن هدر رفت انرژی سبب آلودگی محیط‌زیست می‌شود، که اهمیت کارکرد مطمئن این واحد را دوچندان می‌کند. شکل ۱ مجموعه تجهیزات یک واحد شیرین‌سازی گاز همراه نفت را نشان می‌دهد.

¹Design of Experiment

²Regression

³Analysis of Variance ANOVA

جوش می‌شود که در نهایت در شکل گرده جوش تأثیر می‌گذارد و در عین حال باعث افزایش احتمال ورود ناخالصی‌ها در حوضچه جوش می‌گردد. علاوه بر دبی گاز محافظ، قطر فیلر نیز بواسطه اثرگذاری بر حجم فلز جوش بر رفتار مکانیکی اتصال موثر می‌باشند.

در این تحقیق برای انتخاب متغیرهای تأثیرگذار از روش تاگوچی برای طرح آزمایش استفاده شده است تا تهیه داده‌های مورد نیاز و انجام بهینه سازی بر اساس تحلیل رگرسیون، نقطه بهینه متغیرها معلوم گردد. در بخش بهینه سازی با توجه به وابستگی ضعیف پارامترهای انتخاب شده به یکدیگر با در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نویز (S/N^2) اقدام به بررسی عوامل بی‌نظمی شده و از در نظر گرفتن اثرهای متقابل بین عوامل صرف نظر می‌گردد. همچنین برای اطمینان از صحت بررسی‌های انجام شده با استفاده از روش‌های آماری مانند رگرسیون گیری و آنالیز واریانس داده‌ها اعتباری سنجی شده است.

در فرآیند تعمیر یا اتصال قطعات صنعتی با استفاده از تکنیک جوشکاری، برای ایجاد کیفیت مناسب، مقادیر پارامترهای فرایند باید در یک محدوده مشخص تنظیم گردند که این اطلاعات در مدارکی مثل WPS ارائه می‌گردد. برای تعیین شرایط بهینه جوشکاری در محدوده تعریف شده چهار مورد از پارامترهای جوشکاری و هر کدام در سه سطح مقداری مورد توجه قرار گرفته است. متغیرهای مورد نظر و مقادیر سطوح انتخابی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای مشخص شدن تعداد آزمایش‌ها از روش طرح آزمایش تاگوچی استفاده شده و با در نظر گرفتن ۳ سطح آزمایش و تعداد ۴ متغیر مستقل که در جدول شماره ۱ آمده است، طبق رابطه شماره ۱ تعداد آزمایش‌ها به تعداد ۹ مورد مشخص شده است. در رابطه (۱) N تعداد سطوح و F تعداد متغیرهای در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$X = (N-1) F + 1 \quad (1)$$

با استفاده از نرم‌افزار Minitab و طرح آزمایش تاگوچی، ماتریکس آزمایش‌ها مشخص شده است. ماتریس آزمایش‌های بدست آمده نشان‌دهنده ترتیب چیدمان متغیرها و سطوح آن است که باید در هر کدام از آزمایش‌های عملی کدام متغیرها انتخاب شود یا بر روی دستگاه جوش تنظیم گردد.

جدول ۱- متغیرها و سطوح انتخابی جوشکاری TIG

متغیرها	سطح 1	سطح 2	سطح 3
شدت جریان (Amps)	100	110	120
قطر فیلر (mm)	1.5	2	2.5
دبی گاز (lpm)	10	12.5	15
سرعت جوشکاری (mm/min)	190	200	210



شکل ۱- برج شیرین سازی گاز موضوع بررسی در این تحقیق

جداره بیرونی برج از فولاد کربنی و بخش‌های داخلی آن از فولاد زنگ نزن آستنیتی ساخته شده است که با روش جوشکاری به یکدیگر متصل می‌باشند. اتصال غیرهمجنس در موارد زیادی به دلایل گوناگونی دچار خوردگی و یا شکست ناشی از بارگذاری می‌گردد که تعمیر قسمت‌های آسیب دیده را ضروری مینماید. در عملیات تعمیر و بازسازی قطعات صنعتی از روش‌های جوشکاری و بصورت ویژه، بدلیل کیفیت بالای جوش، از روش جوشکاری TIG استفاده می‌شود.

طبق نتایج منتشر شده، در فرآیند جوشکاری انتخاب متغیرهای مناسب، تأثیر مستقیمی در استحکام کششی جوش دارد. متغیرهای انتخابی در این تحقیق شدت جریان (I)، سرعت جوشکاری (S)، دبی گاز (Q) و قطر فیلر (D) است که همان‌طور که در آزمایش‌ها عملی معلوم گردید تأثیر بسزایی در استحکام کششی داشته و تغییر در هر کدام از متغیرها بر نتیجه تست کشش اثرگذار می‌باشد.

شدت جریان و سرعت جوشکاری با تأثیرگذاری در تاریخچه دمایی اتصال عامل مهمی در تغییر خواص متالورژیکی و مکانیکی مواد در فلز جوش و مناطق مجاور محسوب می‌شود. این پارامترها بر روی استحکام تسلیم، استحکام کششی، چقرمگی، ریزساختار ماده (درشت‌دانه بودن، وسیع شدن ناحیه متأثر از گرما^۱ و ...) تأثیر می‌گذارد.

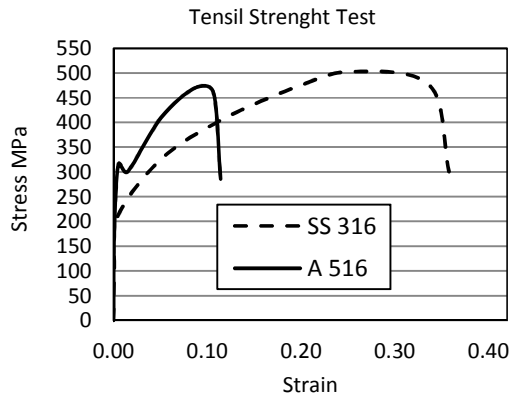
در فولادهای ضدزنگ، افزایش گرمای ورودی جوشکاری موجب کاهش تشکیل فریت می‌شود که سبب بهبود مقاومت به ضربه در دماهای پایین می‌شود و از طرفی باعث تأخیر در انجام حوضچه جوش می‌شود که این عامل باعث درشت‌دانه بودن و در نتیجه کاهش مقاومت به ضربه در دماهای پایین می‌شود. همچنین به واسطه گرمای ورودی زیاد، حجم فریت‌های دندریتی و اندازه مؤثر دانه در زمینه آستنیتی افزایش یافته و در نتیجه خواص استحکام کششی و ضربه دما پایین کاهش می‌یابد [۱۵-۱۶].

دبی گاز با محافظت مناسب از حوضچه جوش مانع از ورود ناخالصی‌ها می‌شود. البته دبی بالای گاز ورودی، باعث تلاطم حوضچه

²Signal to noise

¹Heat Affected Zone

پایه تهیه و در شرایط استاندارد تست گردید. شکل ۲ نتایج تست کشش بر روی مواد مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار تنش کرنش مهندسی حاصل از تست کشش

۳- روش انجام پژوهش

جهت اطمینان از حصول جوش مناسب، جوشکاری توسط جوشکار ماهر و باتجربه که دارای گواهینامه جوشکاری آرگون بوده و طبق کد ASME IX در محیط بدون وزش باد انجام شده است. نمونه‌ها از ورق هایی با ضخامت ۸ میلی‌متر تهیه شده و قطعات پس از برش در اندازه مورد نظر جهت جوشکاری با شرایط مشخص شده و یکسان آماده‌سازی گردید. دستگاه جوشکاری مورد استفاده از نوع TIG با جریان مستقیم ParsTigSQ-252 بوده و یک نمونه از قطعه جوشکاری شده در شکل شماره ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه قطعه جوشکاری شده در حال ساخت

بعد از تهیه اتصال جوشکاری شده، نمونه‌های تست کشش تخت از اتصال غیر همجنس در راستای عمود بر طول جوش به منظور بررسی کیفیت اتصال و همچنین نمونه های دیگر از فلز جوش با هدف بررسی

جدول ۲- ماتریس آزمایش‌ها بر اساس روش تاگوچی

ردیف	شدت جریان I	قطر فیلر F	دبی گاز G	سرعت جوشکاری S
X1	1	1	1	1
X2	1	2	2	2
X3	1	3	3	3
X4	2	1	2	3
X5	2	2	3	1
X6	2	3	1	2
X7	3	1	3	2
X8	3	2	1	3
X9	3	3	2	1

۱-۲- مواد به کاررفته در آزمایش

قبل از انجام جوشکاری روی قطعات، جهت اطمینان از اینکه مواد مورد استفاده عاری از عیوب متالورژیکی و مکانیکی است، ترکیب شیمیایی و همچنین استحکام کششی و استحکام تسلیم مواد به کار رفته با تست آنالیز کوانتومتری مشخص گردید. در جدول ۳ ترکیب شیمیایی فولاد ضدزنگ SS316 و در جدول ۴ ترکیب شیمیایی فولاد کربنی A516 Grade 60 به عنوان مواد پایه در ایجاد اتصال جوشی غیرهمجنس آورده شده است.

جدول ۳- ترکیب شیمیایی فولاد ضدزنگ SS316

عنصر	C	Mn	Si	Cr
درصد وزنی	0.08	2.00	0.75	18.00
عنصر	Ni	Mo	P	S
درصد وزنی	10.00	2.00	0.045	0.03

جدول ۴- ترکیب شیمیایی فولاد کربنی A516 Grade 60

عنصر	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
درصد وزنی	0.18	0.95	0.4	0.3	0.3	0.08
عنصر	P	S	Al	Cu	Ti	V
درصد وزنی	0.015	0.008	0.02	0.3	0.03	0.02

همچنین برای تهیه اطلاعات واقعی از استحکام و رفتار مکانیکی فولادها از تست کشش استفاده گردید که نتایج مربوط به فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- استحکام کششی و تسلیم مواد مورد استفاده

ماده	تنش نهایی (Mpa)	تنش تسلیم (Mpa)
SS316	515	205
A516 Grade 60	485	320

در انجام تست کشش از دستگاه تست کشش اونیورسال ۲۵ تن از شرکت سنتام استفاده شد و نمونه ها نیز طبق استاندارد مربوطه از فلز

در واقع نشان‌دهنده قدرت اثر سیگنال می‌باشد. در این تحقیق به علت استفاده از محدوده مناسب سطوح متغیرها نویز کمی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده آن است که نتایج حاصله در محدوده قابل قبول هستند. با محدوده مناسب و جواب‌های به‌دست‌آمده انتظار می‌رود روش تاگوچی مسئله را بهینه کند.

جدول ۷ مقادیر به‌دست‌آمده سیگنال به نویز را نشان می‌دهد. حالت بهینه، استحکام بیشتر جوش است که به همین خاطر از بزرگ‌تر-بهرتر استفاده شده است و مقدار بهینه در یک نمودار چهارتایی ترسیم گردیده است. همان‌طور که در رابطه شماره ۲ آمده است نسبت سیگنال به نویز بیشتر مطلوب است.

جدول ۷- مقادیر سیگنال به نویز

Level	I	F	G	S
1	54.11	54.02	54.12	54.13
2	54.25	54.07	54.27	54.05
3	53.87	54.14	53.84	54.05
Delta	0.37	0.12	0.42	0.08
Rank	2	3	1	4

در جدول ۷ مقدار Delta بیانگر تفاوت بیشترین مقدار با کمترین مقدار است و یا بیانگر تفاوت میانگین داده‌ها است که در این تحقیق تفاضل بیشترین مقدار از کمترین مقدار مورداستفاده است. عدد Rank نشانگر سطوحی است که بالاترین مقدار سیگنال به نویز را دارند. برای به دست آوردن نسبت سیگنال به نویز، نسبت بزرگ‌تر-بهرتر از رابطه شماره (۴) استفاده شده است که برای رسیدن به آن نیاز به محاسبه میانگین انحراف مربعات مقدار بزرگ‌تر-بهرتر است که در رابطه شماره (۳) آمده است.

$$J = K \left(\frac{1}{Y^2} \right) K = B(Y)^2 \quad (2)$$

$$MSD = \frac{[\sum(\frac{1}{Y^2})]}{n} \quad (3)$$

$$S/N = -10A \log[MSD] = 10 \log \left[\frac{(\sum(\frac{1}{Y^2}))}{n} \right] \quad (4)$$

شکل ۵ با روش سیگنال به نویز در حالت بزرگ‌تر-بهرتر، نقاط بهینه را مشخص کرده است. در نمودارهای ارائه شده در شکل محور افقی سطوح آزمایش‌ها برای هرکدام از متغیرها است و محور عمودی مقدار به‌دست‌آمده سیگنال به نویز توسط نرم‌افزار است. چون هدف پیدا کردن مقدار بیشینه متغیرها است، با توجه به نمودار، نقاطی که مقادیر سیگنال به نویز بیشتری دارند، نقاط هدف هستند.

با توجه به نتایج بدست آمده متغیرهای بهینه با توجه به نمودار برای جوشکاری تعمیری TIG در ایجاد اتصال 316-A516 در محدوده مورد بررسی تعیین شده و در جدول ۸ ارائه شده است.

استحکام جوش تهیه گردید. شکل ۴ برخی از قطعات جدا شده تخت را پس از ماشینکاری و شماره‌گذاری و پس از تست کشش نشان می‌دهد. تست کشش نمونه جوشکاری شده با دقت بالایی انجام شده و استحکام کششی از تقسیم بیشترین نیروی مشاهده شده بر سطح مقطع قطعه در زمان شکست به‌دست آمده است.



شکل ۴- قطعات جوشکاری شده پس از تست کشش

شرایط تست کشش بر اساس استاندارد ASME قسمت QW-462 بوده و همچنین الزامات مربوط به QW-153 را پوشش می‌دهد. طبق استاندارد کیفیت اتصال ایجاد شده در صورتی قابل قبول خواهد بود که استحکام شکست از حداقل استحکام کششی فلز پایه یا از حداقل استحکام کششی فلز ضعیف‌تر و یا از حداقل استحکام کششی جوش درزمانی که استحکام جوش کمتر از فلز پایه است کم‌تر نباشد [۱۸]. در این بخش جهت اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمون در هر مورد به تعداد ۳ مورد تکرار شد و متوسط نتایج به‌عنوان نتایج تست کشش حاصل از انجام تست بر روی نمونه‌های جوشی ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج طبق ماتریس آزمایش‌های به‌دست آمده از تاگوچی در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- مقادیر استحکام نهایی به‌دست‌آمده از تست کشش

ردیف	شدت جریان I	قطر فیلر F	دبی گاز G	سرعت جوشکاری S	تنش نهایی (Mpa) T
X1	100	1.5	10	190	510.3
X2	100	2	12.5	200	516.9
X3	100	2.5	15	210	496.5
X4	110	1.5	12.5	210	522.1
X5	110	2	15	190	504.6
X6	110	2.5	10	200	520.4
X7	120	1.5	15	200	476.3
X8	120	2	10	210	494.9
X9	120	2.5	12.5	190	511.3

در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Minitab و بهینه‌سازی تاگوچی از طریق سیگنال به نویز و روش بزرگ‌تر-بهرتر، نقطه بهینه برای پارامترها و سطوح انتخابی به دست می‌آید. نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهنده نسبت سیگنال اصلی که سیگنال پاسخ یا متغیر پاسخ است به مقدار نویز بوده و

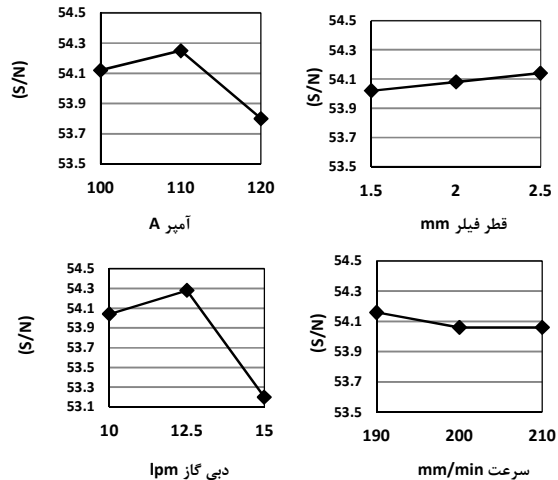
معادله برازش باید توانایی برازش داده‌ها را داشته باشد تا مقادیر P و ضریب تعیین مناسب مسئله استخراج شود. مقدار P نشان‌دهنده میزان شانس بودن اختلاف بین داده‌ها است. پایین بودن مقدار P برای هر متغیر نشان‌دهنده این است که متغیر مذکور با متغیر وابسته یا پاسخ، ارتباط مناسبی دارد و در نتیجه مدل با متغیرها به خوبی برازنده شده است. پس هر چه مقدار P کمتر باشد داده‌ها رابطه منطقی‌تر نسبت به هم دارند و احتمال تصادفی بودن داده‌ها کمتر است. مقدار P در جدول ۹ نشان داده شده است. در جدول ۹، Coef مقادیر ثابت، Coef خطای استاندارد هر تخمین، T آزمون T است و P درصد سهم را نشان می‌دهد. با استفاده از تخمین رگرسیون همخوانی استحکام کششی به دست آمده از آزمایش‌ها با تخمین نرم‌افزار بررسی می‌گردد.

جدول ۹- مقادیر ثابت تحلیل رگرسیون نرم‌افزار Minitab

Term	Coef	SE Coef	T ₁	P
Constant	1555.95	222.513	6.99262	0.020
T	-16.68	3.389	-4.92191	0.039
F	-628.00	149.946	-4.18817	0.053
G	35.08	9.285	3.77763	0.063
S	1.67	0.475	3.50862	0.073
I*F	7.52	1.607	4.67842	0.043
F*G	-15.39	4.065	-3.78555	0.063

همچنین برای بررسی قابلیت اطمینان محاسبات فوق نیاز به مشخص کردن ضریب تعیین می‌باشد که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مدل کردن صحیح داده‌ها و همچنین به دست آمدن معادله برازش مناسب است. در این بخش بدین منظور ضریب تعیین بالای ۸۰٪ مدد نظر قرار گرفته است [۱۹]. جدول شماره ۱۰ نشان‌دهنده مقادیر به دست آمده از تحلیل رگرسیون است که با نرم‌افزار Minitab تعیین شده است و نشان از همخوانی بسیار خوب داده‌های عملی و تحلیلی را دارد که با اختلاف بسیار کمی نشان می‌دهد تخمین نرم‌افزار با آزمایش‌ها عملی، جواب تقریباً یکسانی داده است.

در این تحقیق مقدار به دست آمده برای ضریب تعیین، برابر است با R- $Sq = 95.52\%$ یا ضریب تعیین که نشان از برازش درست داده‌ها است. همچنین برای اطمینان بیشتر به نتایج لازم است توزیع نرمال داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از ترسیم خط رگرسیون در نمودار توزیع نرمال استفاده شده که نشان دهنده توزیع نرمال و رفتار خطی داده‌ها می‌باشد.



شکل ۵- مقدار انتخاب شده متغیرها در برابر مقدار سیگنال به نوبز

جدول ۸- متغیرهای بهینه حاصل از روش تاگوچی

متغیرها	I	F	G	S
سطوح	110	2.5	12.5	190

با استفاده از تخمین تاگوچی مقدار استحکام کششی فلز جوش را برای ترکیب متغیر جدید به دست آمده، محاسبه گردید که عدد $T = 532.833$ حاصل شد. برای اعتبارسنجی تخمین نرم‌افزار، یک بار جوشکاری را با متغیرهای بهینه پیشنهادی نرم‌افزار طبق شرایط قبلی انجام و تست کشش طبق شرایط قبلی بر روی آن صورت گرفت که عدد استحکام کششی $T = 534.2$ حاصل شد که نشان‌دهنده تخمین مناسب انجام شده است که به عدد تجربی بسیار نزدیک است.

۳-۱- روش آماری اعتبارسنجی داده‌ها

در ادامه برای اعتبارسنجی داده‌ها از روش رگرسیون‌گیری استفاده شده است. برای رگرسیون‌گیری نیاز به معادله برازش^۱ مناسب است که از روش محاسبه تجربی قابل حصول است. معادله سازگار معادله‌ای است که جهت رسیدن به ضرایب ثابت مورد استفاده در رگرسیون‌گیری و پیدا کردن مقدار ضریب تعیین به کار می‌رود. معادله برازش باید به گونه‌ای پیدا شود که قابلیت برازش صحیح داده‌ها را دارا باشد. فرم کلی معادله برازش پیشنهادی و مورد استفاده در رابطه (۵) آمده است.

$$\text{Fitness Function} = I + F + G + S + I * F + F * G \quad (5)$$

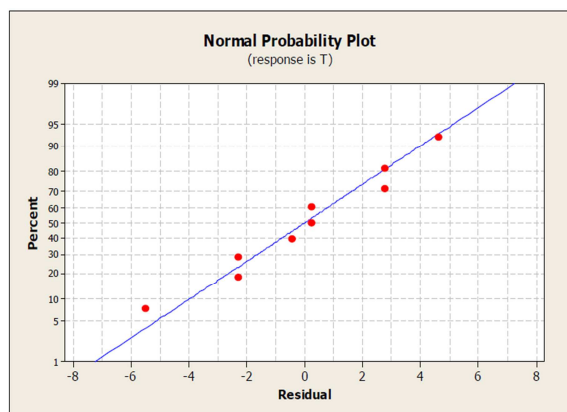
برای به دست آوردن معادله مورد نیاز، به علت وجود چند متغیر، از رگرسیون‌گیری غیرخطی که توانایی حل مسئله با چندین متغیر را دارد استفاده شده است. پس از رگرسیون‌گیری ضرایب ثابت معادله برازش مشخص می‌شود. معادله (۶) معادله رگرسیون را نشان می‌دهد.

$$T = 1555.95 - 16.681 I - 628 F + 35.0767 G + 1.6675 S + 7.51667 I * F - 15.3867 F * G \quad (6)$$

¹Fitness function

مستقل بودن داده‌ها در گروه‌های مختلف است و دیگر اینکه داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند [۲۰].

در مورد داده‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق در نمودار شماره ۲ معلوم گردید داده‌ها دارای توزیع نرمال هستند و همچنین نوع داده‌های انتخابی نشان از استقلال گروه‌ها دارد. در انتها از تجزیه و تحلیل واریانس استفاده شده است تا درصد وزنی نسبی هرکدام از متغیرها را در متغیر پاسخ معلوم شود. درصد وزنی نسبی متغیرها نشان‌دهنده مقدار تأثیر یک-یک متغیرها در متغیر وابسته است که در این تحقیق متغیر پاسخ، استحکام کششی است. بیشترین تأثیر را به ترتیب شدت جریان و سرعت جوشکاری بر استحکام کششی را دارد و کم‌ترین تأثیر را مقدار دبی گاز محافظ دارد. روش طراحی تاگوچی و تجزیه و تحلیل واریانس نشان می‌دهد لازم است در حین جوشکاری توجه بیشتری معطوف این دو عامل که بیشترین اثرگذاری را دارند گردد. جدول ۱۱ نتایج تجزیه و تحلیل واریانس را نشان می‌دهد



شکل ۶- نمودار احتمال نرمال به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Minitab

جدول ۱۰- تخمین رگرسیون حاصل از نرم‌افزار Minitab

ردیف	تنش نهایی (Mpa)	تخمین نرم‌افزار
T1	510.3	510.072
T2	516.9	522.406
T3	496.5	496.272
T4	522.1	519.347
T5	504.6	500.006
T6	520.4	517.647
T7	476.3	478.597
T8	494.9	495.356
T9	511.3	513.597

رفتار خطی داده‌ها نشان‌دهنده ارتباط مناسب داده‌ها با پاسخ است. همچنین نزدیکی داده‌ها به خط به معنی نزدیکی مقادیر تقریب زده شده به داده‌های معتبر ورودی و موجود می‌باشد. این نمودار فیلتر مناسبی برای نشان دادن داده‌هایی است ارتباط معناداری با یکدیگر ندارند. شکل ۶ احتمال توزیع نرمال داده‌ها را نشان می‌دهد که طبق نتایج بدست آمده داده‌ها رفتار خطی را نشان می‌دهند.

۳-۲- تجزیه و تحلیل واریانس

تجزیه و تحلیل واریانس مجموعه‌ای از مدل‌های آماری است که به بررسی میانگین در گروه‌ها و توابع وابسته به آن‌ها می‌پردازد. تجزیه و تحلیل واریانس به‌طور همزمان به دو یا چند متغیر مستقل می‌پردازد که نه‌تنها می‌تواند اثرات هر متغیر را به‌صورت جدا بررسی کند، بلکه می‌تواند تعامل اثر آن متغیرها را بررسی کند. شرط اجرای تجزیه و تحلیل واریانس

جدول ۱۱- تجزیه و تحلیل واریانس و درصد نسبی متغیرها

Sorce	DF	SS	Adj SS	Adj MS	F ₁	P	%variance
Regression	6	1651.97	1651.97	275.329	7.1106	0.128411	6.35
I	1	282.91	963.53	963.534	24.8842	0.037915	18.04
F	1	63.37	679.19	679.192	17.5408	0.052556	26.54
G	1	387.21	546.01	546.005	14.1011	0.064166	15.79
S	1	26.88	476.67	476.667	12.3104	0.072508	33.28
I*F	1	336.72	847.50	847.504	21.8876	0.042778	
F*G	1	554.88	554.88	554.882	14.3304	0.063235	
Error	2	177.44	77.44	38.721			
Total	8	1729.42					

[3] Giridharan, P. K. and N. Murugan., Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 40, No 5-6, pp 478-489, 2009.

[4] Ghazvinloo H. R, Honarbakhsh R. A and Shadfar N., Effect of the electrode to work angle, Filler Diameter and Shielding Gas on Weld Geometry of HQ 130 Steel Joints Produced by Robotic GMAW, Indian J. of Science and Technology, Vol 3, No1, pp 26-30, 2010.

[5] Kolahan F. and Heidari M., A New Approach for Predicting and Optimizing Weld Bead Geometry in GMAW, International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering, Vol 2, 2010.

[6] Kumar P., Kolhe K.P., Morey S.J. and Datta C.K., Process parameters optimization of an aluminium alloy with pulsed gas tungsten arc welding (GTAW) using gas mixtures, Material and Science and Technology, Vol. 2, pp. 251-257, 2011.

[7] Sathish et al., Weld ability and process parameter optimization of dissimilar pipe joints using GTAW, International Journal of Engineering Research and Applications, Vol 2, No. 3, pp. 2525-2530, 2012.

[8] Kumar P. and Datta K., Pulsed parameters optimization of GTAW process for mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi method, International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, Vol 12, No.1, pp 75-80, 2012.

[9] Ghosh N., Kumar P. and Nandi G., Parametric optimization of dissimilar welding of AISI 409 stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using PCA method, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 75(1), pp.24-33, 2016.

[10] Ghosh N., Rudrapati R. , Kumar P. and Nandi G., Parametric Optimization of Gas Metal Arc Welding Process by using Taguchi method on Ferritic Stainless Steel AISI 409, Materials Today, Vol. 4(2), pp. 2213-2221, 2017.

[10] Vieira T., Voigt L., Enrique C. and Bohórquez N., Analysis of mean and RMS current welding in the pulsed TIG welding process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 231, pp. 449-455, 2016.

[11] Srirangan A. K. and Paulraj S, Multi-response optimization of process parameters for TIG welding of Incoloy 800HT by Taguchi grey relational analysis, Engineering Science and Technology, Vol. 19(2), pp. 811-817, 2016.

[12] Dwivedi K. D. and Srivastava A., Parametric Optimization of MIG Welding for Dissimilar Metals Using Taguchi Design Method, International journal of engineering sciences & research technology, Vol. 3(4), pp. 213-219, 2017.

[13] Vidyarthi R.S., Kulkarni A. and Dwivedi D.K., Study of microstructure and mechanical property relationships of A-TIG welded P91-316L dissimilar steel joint, Materials Science and Engineering: A, Vol. 695, pp. 249-257, 2017.

[14] Karimi Manesh M., I. Sattari Far and Omidvar H., Effects of Arc Heat Input and Welding Speed on the Cryogenic Impact Strength of Type 304L Austenitic Stainless Steel Weld Metal, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 205-213, 2015 (In Persian)

[15] Lampman S., Weld Integrity and Performance: A Source Book Adapted from ASM International Handbooks, Conference Proceedings, and Technical Books, ASM International, 1997.

[16] Ross, P.J., Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. McGraw-Hill, 1995.

[17] ASME IX Standard for welding Handbook. ASME press, 2012.

[18] Moreno C. J. and Samuel S. W., Sums of squares of integers, CRC Press, 2005.

[19] Fowlkes W.Y. and Clyde M. C., Engineering methods for robust product design. Addison-Wesley press, 1995.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی با تعداد آزمایش‌های کمتر به بهینه‌سازی شرایط جوشکاری پرداخته شده است. تحلیل آماری و تخمین نرم‌افزاری نتایج حاصل از آزمایش‌ها تجربی و همچنین روش به کار گرفته‌شده در بهینه‌سازی شرایط جوشکاری را تأیید کرد. بهترین شرایط جوشکاری برای اتصال SS316-A516 در محدوده تعیین شده برای پارامترهای موثر شامل، شدت جریان (Amps) 110، قطر فیلر 2.5 mm، نرخ جریان گاز (LPM) 12.5 و سرعت جوشکاری 190 mm/min است. روش‌های آماری رگرسیون و حداقل مربعات و آنالیز واریانس نشان از برازش درست داده‌ها و رفتار خطی داده‌ها در پاسخ به مستقل وابسته داشت که نتایج حاصل از آزمایش‌ها عملی را معتبر می‌کرد. همچنین تجزیه و تحلیل واریانس وزن نسبی مشارکت متغیرها نشان می‌دهد که سرعت جوشکاری و قطر فیلر برای شرایط آزمایش انجام شده بیشترین میزان تأثیر را داشتند. تحقیق فوق نشان داد روش تاگوچی برای شرایط جوشکاری تعیین شده مناسب است و با دقت بالایی توانایی تخمین و بهینه‌سازی شرایط مطرح‌شده در تحقیق را دارد.

۵- نمادها

I	شدت جریان (Amps)
G	دبی جریان گاز (Litr/min)
F	قطر فیلر (mm)
S	سرعت جوشکاری (mm/min)
T	استحکام کششی (Mpa)
N	تعداد سطوح
F	تعداد متغیر
X	تعداد آزمایش‌ها عملی
J	انحراف از هدف
K	ضریب انحراف
Y	ویژگی عملکردی
B	مساحت انحراف
Coef	مقادیر ثابت
Se Coef	خطای استاندارد هر تخمین
T1	آزمون توکی
P	درصد هر سهم
DF	درجه آزادی
Ss	مجموع مربعات
Adj SS	مجموع مربعات تعدیل شده
Adj MS	میانگین مربعات تعدیل شده
F _i	آزمون فیشر

۶- مراجع

[1] Roy R. K., A primer on the Taguchi method, SME Press, 2010.

[2] Tarnq, Y. S. and W. H. Yang., Optimization of the weld bead geometry in gas tungsten arc welding by the Taguchi method, The International Journal of advanced manufacturing technology, Vol 14, No 8, pp 549-554, 1998.