

بهینه سازی خواص مکانیکی ورقهای فولادی AISI 304 جوشکاری شده به روش قوس الکتریکی تنگستن با استفاده از روش آنالیز گری

غلامرضا مرامی

محمدعلی صائمی صدیق*

فرید وکیلی تهامی

دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

جوشکاری آرگون یا جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن یکی از مهمترین روشهای جوشکاری در صنعت می باشد. با توجه به اهمیت کنترل پارامترهای این فرآیند جهت جلوگیری از بروز عیوب در حین جوشکاری، در این مقاله شدت جریان، دمای پیش گرم و سرعت پیشروی به عنوان پارامترهای ورودی آزمایشات انتخاب و سپس با استفاده از روش آنالیز گری مقادیر خروجی استحکام کششی، سختی و تغییر شکل زاویه ای قطعات جوشکاری شده ناشی از تنشهای حرارتی بهینه سازی می شوند. با محاسبه نسبت، ضریب و درجه گری توسط روابط مورد استفاده، نمودار گری برای هر سطح رسم می شود. در نهایت بر اساس نمودار گری میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر روی جوشکاری آرگون به صورت درصدی محاسبه و مقادیر بهینه عددی برای آنها و پارامترهای خروجی تعیین و سپس میزان تأثیر ورودی ها بر روی خروجی ها بدست آمد. آزمایشات عملی انجام شده بر اساس مقادیر بهینه ارائه شده در مقاله برای پارامترهای ورودی و خروجی صحت نتایج آنالیز گری را تأیید می نماید.

واژه های کلیدی: بهینه سازی، آنالیز گری، جوشکاری آرگون، فولاد AISI304.

Optimizing Mechanical Properties of AISI304 Steel Plates Welded by GTAW Method Using Grey Analysis

Gh. Marami

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

M.A Saeimi Sadigh

Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

F. Vakili-Tahanmi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Argon or Gas-Tungsten Arc welding (GTAW) is known as an important method of joining metals in industrial applications. Due to the importance of the controlling welding-parameters to prevent any defect formation during the process; in this research, weld-current, pre-heating temperature and electrode-traveling speed are adopted as the input welding-parameters. Then, using the Grey Analysis Method, the effect of the aforementioned welding-parameters on the ultimate-strength, hardness and angular distortions of the welded joints are obtained and optimized. Grey-diagrams are plotted by calculating the Grey-ratio, Grey coefficient and Grey-degree. Finally, based on these diagrams, the effect of the welding-input variables is established in percent and the optimum values are obtained with the effect of input parameters on the output values. Experimental tests are carried out based on the optimum values for the input and output parameters to verify the results of the Grey analyses.

Keyword: Optimization; Grey-analysis; GTAW; Steel AISI304.

۱- مقدمه

در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن همراه با گاز محافظ^۱ از الکتروود غیر مصرفی و گاز برای محافظت قوس الکتریکی و فلز مذاب استفاده می شود [۱]. با توجه به کیفیت مناسب، این نوع جوش ها کاربردهای زیادی داشته و در جوشکاری بیشتر فلزات نظیر آلومینیوم، تیتانیوم، فولاد زنگ نزن و... مورد استفاده قرار می گیرند. کیفیت و استحکام اتصال ایجاد شده در فرآیند جوش قوس الکتریکی

تنگستن به شکل هندسی، حوضچه مذاب و گرده جوش بستگی دارند. شکل هندسی حوضچه نیز به نوبه خود به پارامترهای ورودی جوشکاری مانند شدت جریان، سرعت پیشروی و دمای پیش گرم قطعه کار وابسته است [۱]. با توجه به تأثیر پارامترهای متعدد در نحوه اجرای جوشکاری و کیفیت جوش حاصل تحقیقات زیادی در جهت بهینه سازی پارامترهای ورودی فرآیند و کنترل آن انجام گرفته است. ردی و همکاران در سال ۱۹۹۸ به بهینه سازی تأثیر فرکانس پالسهای جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود تنگستن بر روی میکروساختار، سختی و استحکام کششی در آلیاژ ورق شکل آلومینیوم-لیتیم AA8090 پرداختند [۲]. تارنگ و یانگ نیز از روش تاگوچی و طراحی آرایه های متعامد برای بهینه سازی هندسه ریشه جوش در جوشکاری

^۱ Gas Tungsten Arc Welding

جدول ۱- اسامی فولاد زنگ نزن مورد نظر در استانداردهای مختلف

نام فولاد مورد نظر در استاندارد مورد نظر	نام استاندارد
1.4301	DIN-Germany
ASME SA213 - ASTM A193	United States

جدول ۲- عناصر تشکیل دهنده فولاد AISI 304 [۸]

Ni	Cr	Si	S	P	Mn	C	Fe
۸-۱۰/۵	۱۸-۲۰	۱	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۲	۰/۰۸	باقی مانده

۲- طراحی آزمایشات و نتایج

۲-۱- سطوح آزمایش

نظریهٔ آنالیز گری^۲ برای اولین بار توسط پروفسور جیولانگ دنگ در سال ۱۹۸۲ پیشنهاد شد [۸]. بر اساس این نظریه می‌توان، این روش را در مورد تمام سیستم‌هایی که دارای چندین هدف مختلف بوده و اطلاعات موجود برای دستیابی به یک جواب بهینه در آنها بر اساس سایر روشها بسیار کم یا غیر ممکن می‌باشد، به کار برد. بنابراین هدف نهایی در روش آنالیز گری تبدیل مسئله، به حالتی ساده و قابل درک است [۹]. بنابراین هر آزمایش بر حسب نیاز کاری و پارامترهای مؤثر در فرآیند، در سطوح مختلفی انجام می‌شود. در این مقاله سه پارامتر ورودی: سرعت پیشروی جوشکاری، شدت جریان و دمای پیش گرم انتخاب گردیده‌اند که در جدول (۳) سطوح مورد بررسی در آزمایش و مقادیر اولیه انتخاب شده برای آنها، نشان داده شده طوری که تمام آزمایشات حول این سطوح بوده است. البته اثر عوامل مختلف دیگر، مثل فاصله الکترود که پارامتر مهمی در جوشکاری می باشد نیز میتواند مورد بررسی قرار گیرد، چرا که با تغییر این فاصله مقدار مقاومت الکتریکی بین قطعه و الکترود تغییر کرده و در صورت ثابت نگاه داشتن آمپراژ، ولتاژ جوشکاری تغییر میکند. به همین دلیل میتوان اثر تغییر فاصله بین الکترود و قطعه را یا به صورت هندسی قبل و یا در حین جوشکاری تغییر داد و یا با تغییر آمپراژ، این موضوع را به صورت غیر مستقیم مورد بررسی قرار داد که در این تحقیق از روش دوم استفاده شده است.

جدول ۳- پارامترها و سطوح انتخاب شده در آزمایش

سطوح آزمایش				پارامترها
۴	۳	۲	۱	
۴	۳	۲	۱	سرعت پیشروی ($\frac{mm}{s}$)
—	۱۰۰	۹۰	۸۰	شدت جریان (A)
—	۲۰۰	۱۰۰	۲۵	دمای پیش گرم ($^{\circ}C$)

۲-۲- شرایط انجام آزمایش

برای انجام فرایند جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن بصورت

قوس الکتریکی با الکترود تنگستن استفاده نمودند [۳]. همچنین جوانگ و تارنگیز روش تاگوچی را برای بهینه سازی تأثیر تمام پارامترهای ورودی بر روی هندسه حوضچه مذاب در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن به کار بردند [۴]. فوجی و همکاران به بررسی و بهینه سازی مکانیزم استفاده از پنج نوع گدازآورا متفاوت بر روی نسبت عمق به عرض جوش در فولاد زنگ نزن SUS304 پرداخته‌اند [۵]. سامایو و همکاران نیز در سال ۲۰۰۵ مقایسه کاربرد دو روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و روش رویه پاسخ را در جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن مورد بررسی قرار دادند [۶]. مرامی و مصطفی‌پور نیز میزان اثر گذاری پارامترهای ورودی جوشکاری اتوماتیک قوس الکتریکی تنگستن را بر روی خواص مکانیکی جوش مورد بررسی قرار داده و از روش رویه پاسخ برای بهینه سازی پارامترها استفاده نمودند [۷].

در این مقاله با فرض پارامترهای شدت جریان، دمای پیش گرم و سرعت پیشروی به عنوان پارامترهای ورودی سعی شده تا با کاربرد تئوری آنالیز گری بر پایه داده‌های تاگوچی و استفاده از آرایه‌های متعامد مقادیر بهینه محاسبه شده و با استفاده از آن پارامترهای استحکام کششی، سختی و تغییر شکل زاویه‌ای قطعات جوشکاری شده بهینه سازی گردد. هدف این مقاله پیدا کردن شرایط بهینه (سرعت پیش‌روی، آمپراژ و دمای پیش گرم) برای جوشکاری است که منجر به بالاترین استحکام جوش گردد. البته پرواضح است که بهترین جوش، جوشی است که به شرایط فلز پایه نزدیکتر شود، ولی البته اگر دو قطعه جوش شده از نظر استحکام بررسی و مقایسه شوند، اساسی ترین آزمایش در زمینه مهندسی مکانیک آزمایش کشش است و جوشی برگزیده می شود که استحکام کششی بالاتری را بدهد. به همین منظور در این مقاله این دیدگاه مورد استفاده قرار گرفته است. البته در این میان سختی منطقه جوش نیز به دلیل ارتباط آن با حد استحکام لایه های مختلف می تواند به عنوان معیاری برای کیفیت جوش در نظر گرفته شود. مقدار اعوجاج یا تغییر شکل ناشی از جوشکاری نیز به عنوان یک معیار صنعتی در مقایسه جوش ها با کیفیت مختلف مورد توجه می باشد. به همین دلیل این سه پارامتر به عنوان معیارهای مقایسه در این مقاله در نظر گرفته شده اند. در آزمایشات انجام شده جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود تنگستن، قطعه کار انتخابی از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304 می‌باشد. از خواص این فولاد می‌توان به مقاومت به خوردگی و قابلیت شکل پذیری مناسب علیرغم داشتن خواص بالای مکانیکی اشاره نمود. جدول (۱) اسامی معادل این فولاد را در سایر استانداردها نشان می‌دهد. همچنین میزان درصد وزنی عناصر موجود در ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 304 در جدول (۲) نشان داده شده است [۹].

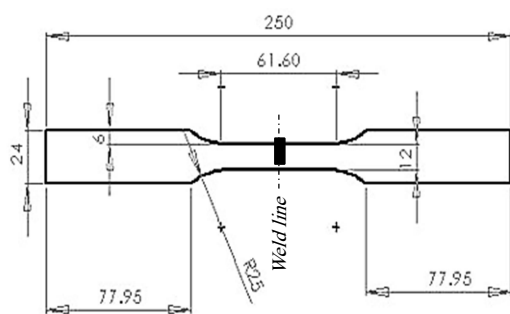
² Grey Analysis Method

¹ Flux

تنظیم مقدار توان ارسالی به بار است. بدین طریق باید با استفاده از فیدبک گرفته شده از طریق ارسال پالس توسط شفت اینکدر و تبدیل به واحد سرعت و مقایسه سرعت تنظیم شده در نرم افزار با کمک کامپیوتر و به کمک روتین^۳ PID جهت رسیدن به سرعت مطلوب تنظیم شود. پس از بدست آوردن سرعت واقعی حرکت بازوی اتوماتیک که در هر ثانیه ۱۰۰۰۰ بار انجام می گیرد، نتایج بدست آمده به حلقه بسته روتین PID تحویل شده و پس از محاسبات لازم به صورت نرم افزاری به PWM دستور کاهش یا افزایش سرعت تا رسیدن به سرعت و حد مطلوب را با روش مدولاسیون عرض باند میدهد. این مقدار براساس واحد ۰/۱ میلی متر بر ثانیه است و از ۰/۱ میلی متر بر ثانیه تا ۲۵ میلی متر بر ثانیه قابل تعریف است. ارتباط بازوی جوشکاری اتوماتیک کنترل شده با کامپیوتر از طریق RS-232 انجام می گیرد.

قطعات پس از جوشکاری مطابق ابعاد نشان داده شده در شکل ۲ برای انجام تست کشش در جهت عرض جوش آماده سازی شدند که برای انجام این آزمایشات از استاندارد EN895 از سری استانداردهای DIN استفاده شد. ابتدا قطعات فرکاری شده و سپس با استفاده از سنباده اطراف آن جهت کاهش تمرکز تنش سمباده زنی شدند. سپس نمونه های آماده شده توسط دستگاه تست کشش مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۳ تصویر یکی از نمونه های جوش شده را نشان میدهد.

علاوه بر سنجش استحکام کششی نمونه ها، سختی مناطق مختلف نمونه ها با دستگاه سختی سنج ویکرز و همچنین تغییر شکل زاویه ای قطعات جوشکاری شده به وسیله دستگاه اندازه گیری پروفایل پروژکتور اندازه گیری شد. شکل ۴ نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمون کشش (نمونه ۱ از جدول ۴) را نشان میدهد.



شکل ۲- نمونه آماده سازی شده مطابق با DIN EN895



شکل ۳- نمونه های جوشکاری شده ورق AISI304

اتوماتیک بر روی فولاد زنگ نزن AISI 304 به ضخامت ۲ میلیمتر، یک بازوی جوشکاری ساخته شد که پس از طراحی و ساخت قسمتهای مکانیکی که در شکل (۱) آمده است، قسمت های کنترل سرعت با تعبیه شفت اینکدر^۱ از نوع EN50S8 در محور موتور جریان مستقیم^۲ با تغذیه ۱۱۰ ولت و کمک گرفتن از یک میکرو کنترلر از نوع ATMEGA8 که از خانواده AVR است، جهت کنترل سرعت و مسافت طی شده ساخته شد.



شکل ۱- بازوی اتوماتیک طراحی و ساخته شده

جهت محاسبات سرعت و مسافت طی شده در بازوی اتوماتیک به این اصل می پردازیم که با هر دور چرخ مکانیزم، بازوی اتوماتیک مسافتی به اندازه محیط چرخ طی خواهد کرد. به این ترتیب با ضرب محیط چرخ در تعداد دورهای آن در واحد زمان، می توان مسافتی که مکانیزم در واحد زمان طی می کند به دست آورد. شفت اینکدر به ازای هر دور چرخش موتور DC دسر خروجی ۲۵۰۰ پالس می دهد. قطر چرخ مورد استفاده ۶۷/۰۳۴ میلیمتر و طول کورس چرخ در هر دور حرکت ۲۱۰/۴۷۸ میلیمتر است. با استفاده از یک گیر بکس ۱/۸۰۰،

به ازای یک دور چرخش چرخ، خروجی شفت اینکدر حدود ۲۰۰۰۰۰۰ پالس خواهد بود. به عبارتی از ۲۱۰/۴۷۸ میلیمتر طول کورس چرخ ۲۰۰۰۰۰۰ پالس حاصل می شود. اگر عکس این رابطه را حساب کنیم میزان حرکت مکانیزم اتوماتیک در هر پالس مطابق با رابطه (۱) بدست می آید.

$$(1) \quad \text{پالس هر در بازو حرکت میزان} = \frac{2000000}{210.478} = 0.00010512 \text{ mm}$$

با انجام تنظیمات در میکرو کنترلر، زمان را بر روی ۰/۰۰۰۱ ثانیه تنظیم کرده یا به عبارتی میکرو کنترلر با توجه به پالسهای ارسالی و تعداد آن می تواند کلیه محاسبات شامل مسافت طی شده (X) و سرعت (V) را در زمان (T) طبق رابطه (۲) محاسبه و کنترل کند.

$$(2) \quad V = X/T$$

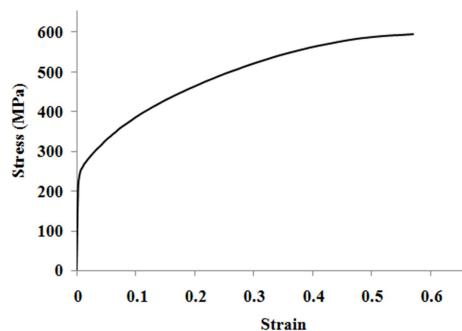
سیستم کنترل سرعت بازوی اتوماتیک جوشکاری به روش مدولاسیون عرض پالس است که به معنای تغییر دادن ضریب وظیفه یک سیگنال به منظور ارسال اطلاعات در یک کانال مخابراتی و یا

¹ Shaft Encoder

² DC : Direct Current

³ Proportional Integral Derivative

۱۱	۲	۱	۲
۱۲	۲	۴	۲
۱۳	۳	۲	۲
۱۴	۳	۳	۳
۱۵	۳	۲	۳
۱۶	۱	۲	۱
۱۷	۲	۱	۱
۱۸	۳	۴	۳



شکل ۴- نمودار تنش- کرنش نمونه ۱ از جدول ۴

همچنین لازم به ذکر است که آزمایشات باید طوری انتخاب شوند که حتی یک آزمایش تکراری هم وجود نداشته باشد. نتایج آزمایشات عملی انجام شده نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.

۳- مراحل انجام بهینه سازی

۳-۱- آرایه‌های متعامد^۱

این آرایه‌ها داده‌هایی به صورت ماتریس $m \times n$ اند که سطریهای آن نشانگر تعداد آزمایشات بوده و ستون‌های آن نشانگر پارامترهای مورد آزمایش است. این ماتریس چگونگی چیدمان داده‌های اولیه و یا سطوح را در هر آزمایش، برای انجام چندین آزمایش بدون تکرار نشان می‌دهد. به این منظور ابتدا با استفاده از رابطه (۳) تعداد درجات آزادی در سیستم مورد بررسی تعیین می‌گردد:

$$DOF = 1 + \sum (\text{Degree of Freedom} \times \text{level}) \quad (3)$$

لذا تعداد درجات آزادی این سیستم از رابطه ۳ برابر هشت خواهد بود. با توجه به درجات آزادی سیستم، تعداد پارامترها و سطوح انتخاب شده، برای طراحی آزمایشات از آرایه متعامد اصلاح شده L_{18} استفاده گردید که توانایی طراحی چنین آزمایشی را دارد. چیدمان آزمایشات بر اساس آرایه متعامد L_{18} در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- چیدمان آرایه متعامد برای پارامترهای ورودی

Run	شدت جریان (A)	سرعت پیشروی (mm/s)	دمای پیش گرم (°C)
۱	۱	۱	۱
۲	۳	۱	۳
۳	۱	۴	۱
۴	۳	۳	۱
۵	۱	۲	۳
۶	۱	۴	۳
۷	۳	۱	۱
۸	۱	۳	۲
۹	۲	۲	۱
۱۰	۲	۳	۳

۳-۲- آنالیز گری^۲

در آنالیز گری، داده‌های با چند هدف به داده‌های تک هدف تبدیل می‌شوند تا نتیجه‌گیری و تحلیل داده‌ها پس از نرماله کردن آنها توسط نسبت گری و به دست آوردن ضریب و درجه گری آسانتر شده و بتوان تصمیم نهایی را بر اساس گراف گری رسم شده بر مبنای درجه گری برای هر سطح اتخاذ نمود و نتیجه بهینه که همان ترکیب بهینه پارامترهای انتخاب شده است را به دست آورد. در این میان می‌توان میزان تأثیر هر پارامتر را بر حسب درصد نیز در نتیجه نهایی محاسبه نمود.

۳-۳- تولید نسبت گری^۳

با توجه به این که پارامترهای دخیل در بهینه سازی، هر کدام دارای واحدهای متفاوتی بوده و از یک جنس نمی‌باشند، لذا مقایسه آنها با یکدیگر صحیح نیست. بنابراین به منظور فراهم نمودن امکان مقایسه، ابتدا باید پارامترها را نرماله نمود تا فرآیند مقایسه آنها درست و معنی دار گردد. بر همین اساس برای نرمالیزه کردن داده‌ها یکی از روابط (۴)، (۵) و یا (۶) به ترتیب زیر استفاده می‌شود. در حالتی که کمترین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ باشد از رابطه:

$$X_i^*(k) = \frac{\max X_i^0(k) - X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (4)$$

و زمانی که میانگین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ است از رابطه:

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i^0(k) - X_{ob}(k)|}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (5)$$

هنگامی که که بیشترین اندازه برای پارامترها بهترین پاسخ است از رابطه:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i^0(k) - \min X_i^0(k)}{\max X_i^0(k) - \min X_i^0(k)} \quad (6)$$

²- Grey Relational Analysis

³- Grey Relational Generating

¹ - Orthogonal Array

۳-۵- تعیین ضریب رابطه گری^۲

ضریب گری عددی بین صفر و یک بوده و نشانگر دوری و یا نزدیکی یک پارامتر به مقدار بهینه آن است. برای تعیین ضریب گری از فرمول (۸) استفاده می‌شود [۱۶-۱۹].

$$\xi_i(k) = \frac{A_{min} + \xi A_{max}}{A_{0i}(k) + \xi A_{max}} \quad (8)$$

که در آن پارامترهای Δ_{min} کمینه دنباله‌های انحراف پس از آنالیز گری، Δ_{max} بیشینه تقاضا ارزش داده‌ها پس از آنالیز گری، $\Delta_{0i}(k)$ تقاضا ارزش داده پس از آنالیز گری برای i امین پاسخ در k امین آزمایش و $\xi_i(k)$ ضریب گری می‌باشند. هر یک از پارامترهای رابطه (۸) به صورت جداگانه از روابط زیر به دست می‌آید [۱۶-۱۷]:

$$A_{max} = \max \max X_0^*(k) - X_i^*(k) \quad (9)$$

$$A_{min} = \min \min X_0^*(k) - X_i^*(k) \quad (10)$$

لازم به ذکر است که ضریب گری همواره عددی در بازه (۰ و ۱) خواهد بود و باید در فرمول (۸) به جای $\xi_i(k)$ جاگذاری شود. بر طبق منابع بررسی شده در این حالت مقدار بهینه ضریب گری عدد میانگین بین صفر و یک یعنی ۰.۵ انتخاب می‌شود [۱۶-۱۷].

جدول ۶- نسبت گری و تناضل ارزش داده

Run	استحکام کششی (MPa)	سختی قلم چوبی (HV)	سختی منطقه HAZ (HV)	سختی قلم پایه (HV)	اعوجاج زاویه ای (min)
1	0.16	0.47	0.53	0.60	0.21
2	0.44	0.14	0.40	0.94	0.00
3	0.64	0.00	0.49	0.30	0.99
4	0.08	0.18	0.11	0.98	0.73
5	0.05	0.73	0.19	0.20	0.69
6	1.00	1.00	0.44	1.00	0.22
7	0.34	0.31	1.00	0.48	0.34
8	0.52	0.06	0.07	0.88	0.10
9	0.09	0.63	0.01	0.82	0.27
10	0.21	0.37	0.19	0.00	0.23
11	0.26	0.65	0.70	0.56	0.55
12	0.54	0.59	0.31	0.88	0.76
13	0.26	0.06	0.07	0.70	1.00
14	0.00	0.76	0.06	0.78	0.40
15	0.21	0.69	0.00	0.80	0.69
16	0.01	0.55	0.04	0.50	0.47
17	0.26	0.98	0.44	0.38	0.23
18	0.04	0.16	0.51	0.76	0.12

۳-۶- درجه رابطه گری^۳

درجه گری پارامتری است که در کنار ضریب گری به آشکار

استفاده می‌شود که در این روابط پارامترهای $X_i^*(k)$ مقدار داده آنالیز گری برای i امین پاسخ در k امین آزمایش، $X_i(k)$ مقدار داده قبل از آنالیز و به صورت خام و $X_{ob}(k)$ مقدار داده میانگین آنالیز می‌باشد [۱۴]. از آنجایی که هدف این مقاله حصول به استحکام و سختی بالا می‌باشد، برای محاسبه ضریب گری از رابطه (۶) و برای محاسبه ضریب گری برای اعوجاج زاویه‌ای از رابطه (۴) استفاده می‌شود زیرا هر چه این مقدار کم باشد شرایط کار بهتر خواهد بود [۱۵-۱۴].

جدول ۵- نتایج آزمایشات انجام شده

Run	استحکام کششی (MPa)	سختی قلم چوبی (HV)	سختی منطقه HAZ (HV)	سختی قلم پایه (HV)	اعوجاج زاویه ای (min)
1	600.6	156	136	151	128
2	465.0	172	147	134	70
3	371.7	179	139	166	340
4	634.8	170	170	132	270
5	649.0	143	164	171	258
6	197.9	130	143	131	130
7	512.0	164	98	157	164
8	428.0	176	173	137	98
9	632.4	148	178	140	144
10	572.3	161	164	181	134
11	550.6	147	122	153	220
12	417.4	150	154	137	278
13	551.7	176	173	146	344
14	674.6	142	174	142	180
15	576.4	145	179	141	260
16	668.2	152	176	156	200
17	552.3	131	143	162	132
18	653.4	171	138	143	102

۳-۴- دنباله‌های انحراف^۱

برای اینکه بتوان درک درستی از نسبت گری ارائه کرد مقداری بعنوان تفاضل ارزش داده مطرح میشود که از رابطه (۷) قابل مقایسه است [۱۶-۱۷]:

$$\Delta_{0i}(k) = X_0^*(k) - X_i^*(k) \quad (7)$$

که در این روابط پارامترهای و $X_i^*(k)$ مقدار داده آنالیز گری برای i امین پاسخ در k امین آزمایش و $X_0^*(k)$ مقدار داده بهینه برای آنالیز می‌باشد که همان عدد ۱ است. نتایج حاصل از نسبت گری و تفاضل ارزش داده در جدول ۶ ارائه شده است.

²- Grey Relational Coefficient

³- Grey Relational Degree

¹- The Deviation Sequences

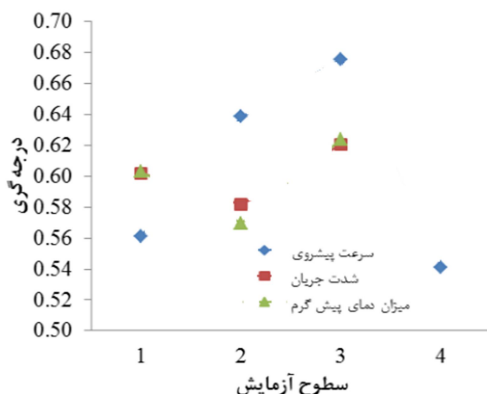
11	0.658	0.43	0.41	0.472	0.477	0.49
12	0.481	0.45	0.61	0.362	0.397	0.46
13	0.660	0.89	0.87	0.417	0.333	0.63
14	1.000	0.39	0.89	0.391	0.555	0.64
15	0.708	0.41	1.00	0.385	0.419	0.58
16	0.974	0.47	0.93	0.500	0.513	0.67
17	0.661	0.33	0.52	0.568	0.688	0.55
18	0.918	0.75	0.49	0.397	0.811	0.67

جدول ۸- درجه‌گری برای هر سطح

Max-Min	سطوح آزمایش				پارامترها
	4	3	2	1	
0.13	0.54	0.68	0.64	0.56	سرعت پیشروی (mm/s)
0.04		0.62	0.58	0.60	شدت جریان (A)
0.05		0.62	0.57	0.60	دمای پیش گرم (°C)

۳-۸- گراف‌گری

گراف‌گری در حقیقت نمودار جدول مربوط به سطوح و درجه‌گری برای هر سطح می‌باشد که به صورت نقطه به نقطه تعیین و سپس خط گذرنده از نقاط رسم می‌گردد. در این مقاله ابتدا گراف‌گری مورد نیاز برای هر یک از سطوح مورد بررسی با توجه به جداول حاصل برای هر سطح رسم شده و در نهایت هر سه نمودار در قالب یک نمودار نشان داده شده است. گراف‌گری به دست آمده برای هر پارامتر در تمامی سطوح به تفکیک در شکل ۵ نشان داده شده است. شیب تند این نمودار نشانگر حساسیت بالا بوده که با کاهش میزان شیب مقدار آن کاهش می‌یابد و اثر پارامتر در نتیجه آزمایشات کم رنگ‌تر می‌گردد.



شکل ۵- گراف‌گری رسم شده برای هر سطح

شدن بهتر موقعیت داده‌ها برای دستیابی به یک جواب بهینه کمک می‌نماید. این پارامتر توسط رابطه (۱۱) حاصل می‌گردد [۱۹-۱۸].

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \omega_j \zeta_{ij} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad (12)$$

که در آن ζ_{ij} نشانگر J امین ضریب گری است، γ_i نشان دهنده درجه‌گری و ω_i ضریب وزنی است که نشانگر وزن و یا اهمیت هر پارامتر می‌باشد جدول ۷ مقادیر درجه رابطه گری را با توجه به ضرایب گری انتخاب شده ارائه داده است.

۳-۷- درجه رابطه گری برای هر سطح

بر اساس درجه رابطه گری محاسبه شده برای هر آزمایش، در این مرحله درجه گری برای هر سطح توسط روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردد. به زبان ساده درجه گری برای هر سطح همان میانگین درجات گری می‌باشد [۱۴].

$$\bar{A} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \gamma_i \quad (13)$$

$$K = \frac{m}{n} \quad (14)$$

در روابط فوق $\bar{A}$ درجه گری برای هر سطح، k ضریب معادله، m تعداد آزمایشات و n تعداد سطوح می‌باشند. در جدول (۸) مقدار شاخصی به عنوان Max-Min برای داده‌های درجه رابطه گری ذکر شده است که همان تفاضل مقادیر بیشینه و کمینه درجه گری برای هر سطح می‌باشد. این مقدار نشانگر پایداری هر پارامتر است به این معنی که بالا بودن آن برای هر پارامتر نشانه ناپایداری و پایین بودن آن نشانگر پایداری آن پارامتر در سیستم می‌باشد [۱۴].

جدول ۷- درجه و ضریب گری

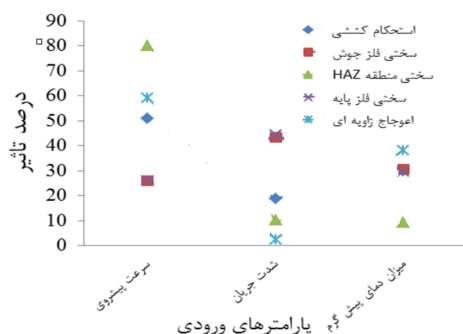
Run	ضریب گری					درجه‌گری
	استحکام کششی (MPa)	سختی فاز جوش (HV)	سختی منطقه HAZ (HV)	سختی فلز پایه (HV)	اوج زح زوای ای (min)	
1	0.763	0.51	0.48	0.455	0.703	0.58
2	0.532	0.77	0.55	0.347	1.000	0.64
3	0.440	1.00	0.50	0.625	0.337	0.58
4	0.857	0.73	0.81	0.338	0.407	0.63
5	0.903	0.40	0.73	0.714	0.422	0.65
6	0.333	0.33	0.52	0.333	0.695	0.44
7	0.594	0.62	0.33	0.510	0.593	0.53
8	0.491	0.89	0.87	0.362	0.830	0.68
9	0.850	0.44	0.97	0.379	0.649	0.65
10	0.700	0.57	0.73	1.000	0.682	0.73

۳-۱۱- گراف درصد تأثیر پارامترها^۲

این گراف در حقیقت نمودار جدول مربوط به جدول (۹) است که به صورت نقطه به نقطه تعیین و سپس خط گذرنده از نقاط رسم می-گردد. ابتدا گراف مورد نیاز برای هر یک از پارامترهای مورد بررسی رسم شده و در نهایت هر سه نمودار در قالب نمودار و شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۰- درصد تأثیر هر پارامترهای ورودی بر روی خروجی

خروجی ها ورودی ها	استحکام کششی (MPa)	سختی فلز جوش (HV)	سختی منطقه HAZ (HV)	سختی فلز پایه (HV)	اعوجاج زائویه ای (mm)
سرعت پیشروی (mm/s)	51.11	25.9 1	80.3 1	26.06	59.28
شدت جریان (A)	18.91	43.5 2	10.2 8	44.25	2.48
دمای پیش گرم (°C)	29.98	30.5 7	9.41	29.69	38.24



شکل ۶- گراف درصد تأثیر پارامترها

۴- تحلیل و نتیجه گیری

با تعیین درجات آزادی سیستم و تعداد سطوح مورد مطالعه که برای این آزمایش انتخاب شده بود، آرایه‌های متعامد متناظر L_{18} برای آزمایشات حاصل گردید. با محاسبه متوالی نسبت گری، ضریب گری و درجه گری بر حسب روابط به کار برده شده، در نهایت نمودار گری بر اساس درجات گری برای هر سطح رسم و بر اساس آن مقادیر بهینه عددی انتخاب شدند. با توجه به داده‌های جدول، درجه گری آزمایشی که دارای مقدار درجه‌گری بالاتری نسبت به بقیه آزمایشات است از همه بهتر بوده و حالت بهینه نسبت به بقیه آزمایشات می‌باشد [۱۴] که نتایج کلی آزمایشات انجام شده بشرح زیر است. براساس داده‌های جدول (۷)، آزمایش دهم دارای درجه گری بالاتری نسبت به بقیه آزمایشات بوده و نزدیکترین مقدار به عدد یک،

بر اساس این نمودار، با افزایش دمای پیش گرم از ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس شرایط آزمایش بدتر شده و در خروجی ها مقادیر ضعیف تری ظاهر میشود و با افزایش از ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه شرایط آزمایش بهتر میشود و خروجی ها مقادیر مطلوب تری را نشان میدهند و در کل برای دمای پیش گرم میزان ۲۰۰ بهتر از ۲۵ و انهم بهتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس است.

۳-۹- درصد تأثیر پارامترها در حالت بهینه

درصد تأثیر هر پارامتر روی نتیجه آزمایش و حالت بهینه کلی با استفاده از فرمول (۱۵) و (۱۶) قابل محاسبه است.

$$\alpha_i = \left[\frac{N\bar{A}_{ij}}{\sum_{i=1}^m N\bar{A}_{ij}} \right] \times 100 \quad (15)$$

$$N\bar{A}_{ij} = (\text{Max}_{ij} - \text{Min}_{ij}) \quad (16)$$

که در فرمول بالا α درصد تأثیر پارامتر نام با سطح z در نتیجه آزمایش است و $N\bar{A}$ مقدار کمینه و بیشینه درجه گری برای هر سطح است. مقادیر درصد تأثیر پارامتر ها در نتیجه آزمایش در جدول (۹) آمده است.

جدول ۹- درصد تأثیر هر پارامتر در تعیین حالت بهینه

پارامتر	درصد تأثیر
سرعت پیشروی mm/sec	58.9478
شدت جریان (A)	17.18222
دمای پیش گرم (°C)	23.86998

۳-۱۰- درصد تأثیر هر پارامتر در خروجی آزمایشات^۱

درصد تأثیر هر پارامتر ورودی در پارامترهای خروجی را میتوان با استفاده از رابطه (۱۶) بدست آورد.

$$\bar{B} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \xi_i \beta_i \quad (17)$$

$$K = \frac{m}{n} \quad (18)$$

$$\beta_i = \left[\frac{N\bar{B}_{ij}}{\sum_{i=1}^m N\bar{B}_{ij}} \right] \times 100 \quad (19)$$

$$N\bar{B}_{ij} = (\text{Max}_{ij} - \text{Min}_{ij}) \quad (20)$$

در روابط فوق $\bar{B}$ درجه گری برای هر پارامتر، ξ ضریب گری، k ضریب معادله، m تعداد آزمایشات انجام شده با سطح n ، β درصد تأثیر پارامتر نام با سطح z و $N\bar{B}$ مقدار کمینه-بیشینه ضریب گری برای هر سطح است. مقادیر درصد تأثیر پارامتر ها در نتیجه آزمایش در جدول (۱۰) آمده است.

² - Parameters Effectiveness Graph

¹ - Value of Effectiveness of Each Parameter

حالت ایده آل درجه‌گیری می‌باشد. بنابراین آزمایش دهم بهترین حالت از نظر چیدمان سطوح آزمایش و بهترین پاسخ در میان سایر آزمایشات است و آزمایش ششم ضعیف ترین نتیجه ممکن را بدست داده‌اند. باتوجه به مطالب یاد شده در جدول (۸) سرعت برشی به دلیل بالا بودن مقدار شاخص Max-Min ناپایدار و شدت جریان به دلیل پایین بودن این مقدار پایدار است. به عبارت دیگر تغییرات سرعت برشی بین سایر پارامترها از اهمیت بیشتری نسبت به بقیه پارامترها برخوردار بوده و بیشترین اثر را در تغییر شرایط آزمایش دارد و شدت جریان نیز دارای کمترین تأثیر است.

با توجه به داده‌های جدول (۷) درجه‌گیری آزمایشی که دارای مقدار بالاتری نسبت به بقیه آزمایشات است از همه بهتر بوده و بهترین آزمایش نسبت به بقیه آزمایشات می‌باشد و بر اساس جدول (۸) هر سطحی از پارامترها که دارای درجه‌گیری بالاتری باشند بهترین سطح در میان سطوح انتخاب شده برای آزمایش می‌باشند. مقادیر بهینه به دست آمده برای سه پارامتر ورودی آزمایشات نیز در جدول (۱۱) نشان داده شده است. عکس مطلب بالا نیز صحیح است و جدول (۱۲) نامناسب ترین یا غیر بهینه ترین آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱ - حالت بهینه برای پنج پارامتر مورد بررسی

پارامترها	آزمایش بهینه	حالت بهینه
سرعت پیشروی (mm/s)	۳	۳
شدت جریان (A)	۹۰	۱۰۰
دمای پیش گرم ($^{\circ}C$)	۲۰۰	۲۰۰

جدول ۱۲ - حالت ضعیف برای پارامترهای مورد بررسی

پارامترها	نامناسب ترین آزمایش	نامناسب ترین حالت
سرعت پیشروی (mm/s)	۴	۴
شدت جریان (A)	۸۰	۹۰
دمای پیش گرم ($^{\circ}C$)	۲۰۰	۱۰۰

۱- با افزایش شدت جریان از ۸۰ تا ۹۰ آمپر شرایط آزمایش بدتر شده و در خروجی ها مقادیر ضعیف تری ظاهر میشود و با افزایش از ۹۰ تا ۱۰۰ آمپر شرایط آزمایش بهتر می‌شود و خروجی ها مقادیر مطلوب تری را نشان می‌دهند و در کل برای شدت جریان میزان ۱۰۰ بهتر از ۸۰ و ۸۰ بهتر از ۹۰ آمپر است.

۲- با افزایش دمای پیش گرم از ۲۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس شرایط آزمایش بدتر شده و در خروجی ها مقادیر ضعیف تری ظاهر میشود و با افزایش از ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه شرایط آزمایش بهتر میشود و خروجی ها مقادیر مطلوب تری را نشان میدهند و در کل برای دمای پیش گرم میزان ۲۰۰ بهتر از ۲۵ و انهم بهتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس است.

۳- با افزایش سرعت پیشروی از ۱ تا ۳ میلیمتر بر ثانیه شرایط آزمایش بهتر شده و در خروجی ها مقادیر مطلوب تری ظاهر میشود و با افزایش از ۳ تا ۴ میلیمتر بر ثانیه شرایط آزمایش بهتر میشود و

خروجی ها مقادیر ضعیف تری را نشان میدهند و در کل برای سرعت پیشروی مقدار ۳ بهتر از ۲، ۲ بهتر از ۱ و ۱ هم بهتر از ۴ میلیمتر بر ثانیه است.

۴- درصد بهبود شرایط کلی حاکم بر کار با افزایش سرعت برشی از ۱ تا ۲ میلیمتر بر ثانیه بیشتر از بهبود شرایط کار با افزایش از ۲ تا ۳ میلیمتر بر ثانیه است.

۵- سرعت پیشروی با تأثیر ۵۸/۹۵ درصدی بیشترین و شدت جریان با تأثیر ۱۷/۱۸ درصدی کمترین اثر را بر شرایط کلی آزمایش داشته‌اند.

۶- سرعت پیشروی با تأثیر ۵۴/۱۱ درصدی بیشترین و شدت جریان با تأثیر ۱۸/۹۱ درصدی کمترین اثر را بر استحکام کششی داشته‌اند.

۷- شدت جریان با تأثیر ۴۳/۵۲ درصدی بیشترین و سرعت پیشروی با تأثیر ۲۵/۹۱ درصدی کمترین اثر را بر یختی فلز جوش داشته‌اند.

۸- سرعت پیشروی با تأثیر ۸۰/۳۱ درصدی بیشترین و دمای پیش گرم با تأثیر ۹/۴۱ درصدی کمترین اثر را بر سختی منطقه HAZ داشته‌اند.

۹- شدت جریان با تأثیر ۴۴/۲۵ درصدی بیشترین و سرعت پیشروی با تأثیر ۲۶/۰۶ درصدی کمترین اثر را بر سختی فلز پایه داشته‌اند.

۱۰- سرعت پیشروی با تأثیر ۵۹/۲۸ درصدی بیشترین و شدت جریان با تأثیر ۲/۴۸ درصدی کمترین اثر را بر اعوجاج زاویه ای داشته‌اند.

۱۱- بر اساس گراف درصد تأثیر پارمترها مشاهده می‌شود که سرعت برشی بیشترین تأثیر را بر روی سختی منطقه متاثر از حرارت (HAZ) و شدت جریان کمترین تأثیر را بر روی اعوجاج زاویه ای دارد.

۵-مراجع

- [1] Weman K., Welding Processes Handbook. Wood Head Publishing Ltd., Abington Hall, USA, 2003.
- [2] Reddy G.M., Gokhale A.A. and Rao K.P., Optimization of pulse frequency in pulsed current gas tungsten arc welding of aluminium-lithium alloy sheets. *Materials Science and Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-66, 1998.
- [3] Tarnag Y.S. and Yang W.H., 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.
- [4] Juang S.C. and Tarnag Y.S., Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the Tungsten inert gas welding of stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, No. 1, pp. 33-37, 2002.
- [5] Lu v., Fujii H., Sugiyama H. and Nogi K., Mechanism and optimization of oxide fluxes for deep penetration in gas tungsten arc welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 34, No. 9, pp.1901-1907, 2003.
- [6] Davi Sampaio C., Cristiene V.G., Sebasti S.C. and Valtair A.F., Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization. *Material Processing Technology*, Vol. 160, No. 1, pp. 70-76, 2005.

[۷] مرامی غ.، مصطفی پور ا.، "بررسی پارامترهای ورودی جوشکاری اتوماتیک قوس الکتریکی تنگستن برروی خواص مکانیکی و بهینه سازی پارامترها به روش روبه

پاسخ: نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ۱۳۹۰.

- [8] ASM Handbook, Volume 20, *Materials Selection and Design*, pp. 646-850, 1997.
- [9] Deng J.L., Introduction to grey systems. *Journal of Grey System*, Vol.1, No.1, pp. 1-24, 1998.
- [10] Lin J.L. and Tarn Y.S., Optimization of the multi-response process by the taguchi method with grey relational analysis. *Journal of Grey System*, Vol.4, No. 4, pp. 355-370, 1998.
- [11] Caudas U. and Hascalik A., Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics. *Optics & Laser Technology*, Vol. 40, No.2, pp. 987-994, 2008.
- [12] Pan L.K., Wang C.C., Wei S.L. and Sher H.F., Optimizing multiple quality characteristics via Taguchi method-based grey analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. 1, pp. 107-116, 2007.
- [13] Tzeng C.J., Lin Y.H., Yan Y.K. and Jeng M.C., Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and grey relational analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 6, pp. 2753-2759, 2009.
- [14] Chin P.F., Manufacturing process optimization for wear property of fiber-reinforced poly Butylenes- Terephthalate composites with grey relational analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 254, No. 3, pp. 298-306, 2003.
- [15] Hsiao Y.F., Tarn Y.S. and Kung K.Y., Process parameter determining of linear motion guide with multiple performance characteristics by grey-based Taguchi method. *WSEAS Transactions on Mathematics*, Vol. 14, No. 1, pp. 778-785, 2007.
- [16] Lung K.P., Che C.W., Shien L.W. and Hai F.S., Optimizing multiple quality characteristics via Taguchi method-based grey analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. 1-3, pp. 107-116, 2007.
- [17] Lu H.S., Chang C.K., Hwang N.C. and Chung C.T., Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 8, pp. 3808-3817, 2009.
- [18] Kopac J. and Krajnik P., Robust design of flank milling parameters based on Grey-Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1-3, pp. 400-403, 2007.
- [19] Ersan A., Necip C. and Birgoren B., Design optimization of cutting parameters when turning hardened aisi 4140 steel (63hrc) with al₂o₃ + Tien mixed ceramic tool. *Journal of Materials and Design*, Vol. 28, No.5, pp.1618-1622, 2007.