بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی- گروه مکانیک

عنوان پایان نامه:

بهینه‌سازی مشخصات مکانیکی و متالورژیکی فرآیند جوشکاری با گاز محافظ توسط روش‌های آماری و الگوریتم تبرید تدریجی

مؤلف:

محمد صادقی اول شهر

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش ساخت و تولید

استاد راهنما:

دکتر فرهاد کلاهان

شهریور ۱۳۹۰

فرم چکیده رساله تحصیلات تکمیلی	
نام دانشجو: **محمد**	نام خانوادگی دانشجو: **صادقی اول شهر**
استاد راهنما: **دکتر فرهاد کلاهان**	
دانشکده: **مهندسی** گروه: **مهندسی مکانیک** گرایش: **ساخت و تولید** مقطع: **کارشناسی ارشد**	
تاریخ دفاع: **۱۳۹۰/۶/۲۹**	تعداد صفحات: **۱۱۵**
عنوان پایان‌نامه: **بهینه‌سازی مشخصات مکانیکی و متالورژیکی فرآیند جوشکاری با گاز محافظ توسط روش‌های آماری و الگوریتم تبرید تدریجی.**	
کلمات کلیدی: **جوشکاری با گاز محافظ، طراحی آزمایشات، ناحیه متأثر از حرارت، سختی‌سنجی، چقرمگی، مدل‌سازی آماری، بهینه‌سازی، الگوریتم تبرید تدریجی.**	

چکیده:

فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ (GMAW) از روش‌های مهم در ایجاد اتصالات دائمی با کیفیت بالا در قطعات فلزی است. به طور کلی در فرآیندهای جوشکاری، هندسه و کیفیت اتصالات به میزان زیادی وابسته به مقادیر پارامترهای تنظیمی است. مهم‌ترین پارامترهای تنظیمی در روش جوشکاری GMAW، ولتاژ، سرعت جوشکاری، نرخ تغذیه سیم، نرخ جریان گاز و ترکیب گاز محافظ است. کیفیت جوش معمولاً توسط مشخصات مکانیکی و متالورژیکی جوش بیان می‌شود. هدف اصلی از این پایان‌نامه، تعیین ارتباط پارامترهای تنظیمی بر هندسه جوش، عرض ناحیه متأثر از حرارت، سختی جوش و میزان مقاومت به ضربه از طریق مدل‌سازی ریاضی است. در این راستا برای بدست آوردن داده‌های آزمایشگاهی مناسب و قابل استناد، از رویکرد طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شده و با توجه به ماتریس طرح استخراجی، آزمایشات صورت گرفته است. سپس به منظور ایجاد رابطه ریاضی دقیق بین پارامترهای ورودی جوشکاری GMAW و متغیرهای خروجی، مدل‌های ریاضی مبتنی بر روش‌های میان‌یابی، بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است. این مدل‌ها شامل توابع چند جمله‌ای خطی، درجه دوم و نمایی بوده‌اند. در مرحله بعد اعتبار مدل‌های پیشنهادی به کمک آزمون‌های آماری و با استناد بر رویکرد تحلیل واریانس (ANOVA) و سطح اطمینان ۹۵٪، تائید شده و بهترین مدل‌ها انتخاب گردیده است. مدل‌های انتخابی همچنین با استفاده از آزمایشات جدید، صحه‌گذاری شده‌اند. در نهایت مدل‌های برتر برای بهینه‌سازی در الگوریتم تبرید تدریجی (SA) مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا بهترین مجموعه از مقادیر پارامترهای تنظیمی با توجه به خروجی‌های مطلوب بدست آید. نتایج نهایی نشان دهنده کارایی و قابلیت مناسب مدل‌ها و روش بهینه‌سازی پیشنهادی است.

اصالت اثر

اینجانب **محمد صادقی اول شهر** تأیید می‌نمایم مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی بنده بوده و در صورت استفاده موردی از دستاوردهای پژوهشی دیگران مطابق مقررات با آن‌ها ارجاع شده است. همچنین این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرکی هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است و کلیه حقوق مادی و قانونی این اثر متعلق به دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

امضاء دانشجو

محمد صادقی اول شهر **تاریخ**

امضاء اساتید راهنما

فرهاد کلاهان **تاریخ**

تأییدیه گروه مکانیک

پایان نامه حاضر تحت عنوان :

"بهینه‌سازی مشخصات مکانیکی و متالورژیکی فرآیند جوشکاری با گاز محافظ توسط روش‌های آماری و الگوریتم تبرید تدریجی" که توسط آقای **محمد صادقی اول شهر** تهیه و به هیأت داوران ارائه شده، به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید، مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

تاریخ دفاع: نمره: درجه ارزشیابی:

اعضای هیأت داوران:

نام و نام خانوادگی **سِمت** **امضا**

۱- **دکتر فرهاد کلاهان**
استاد راهنما

۲- دکتر علی اکبر اکبری
استاد ممتحن

۳- دکتر محمد روغن‌گر رنجبر
استاد ممتحن

۴- دکتر عبدالرحمان جامی
نماینده تحصیلات تکمیلی

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

آنان که به امیدشان زندگی می کنم

تقدیم به برادر و خواهر مهربانم

که همواره راهنما و پشتیبانم هستند

تشکر و قدردانی

اکنون که با عنایت پروردگار کار نگارش این پایان نامه به سرانجام رسید، وظیفه می دانم مراتب تشکر و سپاس خود را از استاد بزرگوارم آقای دکتر فرهاد کلاهان بجای آورم. ایشان با دقت، دانش و تجربیات ارزشمند خود در طی مراحل انجام این پژوهش دلسوزانه یاری ام نمودند.

از اساتید محترم دفاع آقایان دکتر علی اکبر اکبری و دکتر محمد روغن گر رنجبر که زحمت نقد و بررسی این اثر را عهده دار بودند کمال تشکر را دارم. همچنین از دبیر و نماینده محترم تحصیلات تکمیلی آقای دکتر عبدالرحمان جامی سپاسگزاری می نمایم.

از خداوند متعال برای رهروان علم و معرفت آرزوی

موفقیت می نمایم.

محمد صادقی اول شهر

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱: مقدمه **(۱-۷)**

۱-۱- اهمیت موضوع و ضرورت انجام پروژه ۱

۱-۲- مروری بر تحقیقات قبلی ۳

۱-۲-۱- بررسی پارامترهای مهم فرآیند جوشکاری با گاز محافظ ۳

۱-۲-۲- مدل‌سازی و پیش بینی خروجی‌های فرآیند ۴

۱-۲-۳- بهینه‌سازی فرآیند ۵

۱-۳- اهداف پروژه ۵

۱-۴- مراحل انجام تحقیق ۶

فصل ۲: فرآیندهای جوشکاری **(۸-۲۵)**

۲-۱- تکنولوژی جوشکاری ۹

۲-۲- روش‌های متداول جوشکاری ۱۰

۲-۳- جوشکاری قوس الکتریکی ۱۱

۲-۳-۱- جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی ۱۳

فصل ۳: طراحی آزمایشات **(۲۶-۳۷)**

۳-۱- تعریف طراحی آزمایشات ۲۷

۳-۲- چند تعریف در زمینه طراحی آزمایشات ۲۸

۳-۳- دستورالعمل‌هایی برای طراحی آزمایشات ۲۹

۳-۴- طرح و ماتریس آزمایشات ۳۱

۳-۴-۱- طرح عاملی کامل ۳۲

۳-۴-۲- طرح مرکب مرکزی ۳۳

۳-۴-۳- طرح تاگوچی ۳۴

۳-۵- طراحی آرایه متعامد تاگوچی برای مسئله جوشکاری ۳۶

فصل ۴: انجام آزمایشات و اخذ نتایج **(۳۸-۵۷)**

۴-۱- مقدمه ۳۹

۴-۲- مشخصات دستگاه جوشکاری ۳۹

۴-۳- مشخصات میز اتوماتیک ۴۱

۴-۴- جنس قطعه‌کار (ورق‌های فولادی) ۴۳

۴-۵- طراحی اتصال و آماده‌سازی قطعات ۴۴

۴-۶- تعیین سطوح پارامترهای مورد بررسی ۴۵

۴-۷- تنظیم دستگاه برای آزمایشات ۴۷
۴-۸- انجام آزمایش‌های اصلی ۴۸
۴-۹- متالوگرافی، آزمایش چارپی و اخذ نتایج ۴۹
فصل ۵: مدل‌سازی فرآیند **(۵۸-۸۲)**
۵-۱- رگرسیون یا مدل‌سازی ریاضی ۵۹
۵-۲- معرفی توابع مختلف رگرسیونی ۶۰
۵-۳- برآورد ضرایب مدل رگرسیونی ۶۱
۵-۴- کنترل فرضیات و سنجش اعتبار مدل‌های رگرسیونی ۶۲
۵-۴-۱- نرمال بودن باقی‌مانده‌ها ۶۲
۵-۴-۲- هم واریانس بودن یا مستقل بودن باقی‌مانده‌ها ۶۳
۵-۴-۳- معنی‌دار بودن مدل‌ها ۶۴
۵-۴-۴- بررسی میزان تبعیت مدل از داده‌های آزمایشی ۶۶
۵-۴-۵- بررسی میزان قابلیت مدل در پیش‌بینی فرآیند ۶۷
۵-۵- مدل‌سازی فرآیند جوشکاری ۶۷
۵-۵-۱- مدل‌سازی آماری برای ارتفاع گرده جوش (BH) ۶۸
۵-۵-۲- مدل‌سازی آماری برای عرض گرده جوش (BW) ۷۷
فصل ۶: بهینه‌سازی فرآیند **(۸۳-۹۹)**
۶-۱- کلیات ۸۴
۶-۲- دسته بندی مسائل بهینه سازی ۸۵
۶-۳- الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری ۸۷
۶-۳-۱- الگوریتم ژنتیک (GA) ۸۸
۶-۳-۲- الگوریتم جستجوگر ممنوعه (TS) ۸۹
۶-۳-۳- جستجوگر تبرید تدریجی (SA) ۸۹
۶-۴- انطباق الگوریتم تبرید تدریجی در این پژوهش ۹۵
۶-۴-۱- تعیین شرایط بهینه برای هندسه گرده جوش ۹۵
۶-۶- نتیجه گیری ۹۸
فصل ۷: جمع‌بندی مطالب و ارائه پیشنهادات **(۱۰۰-۱۰۳)**
۷-۱- بحث و بررسی نتایج ۱۰۱
۷-۲- پیشنهادات برای تحقیقات آینده ۱۰۳
پیوست‌ها **(۱۰۴-۱۱۲)**
الف- روش‌های جوشکاری قوس الکتریکی ۱۰۵
ب- جداول مفید ۱۱۱
منابع و مراجع **(۱۱۲-۱۱۵)**

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: تقسیم‌بندی روش‌های مختلف جوشکاری ۱۰
شکل ۲-۲: شماتیک جوشکاری ذوبی ۱۱
شکل ۲-۳: جوشکاری اصطکاکی ۱۱
شکل ۲-۴: جوشکاری مقاومتی ۱۱
شکل ۲-۵: جوشکاری قوس الکتریکی ۱۲
شکل ۲-۶: اساس جوشکاری با گاز محافظ [۱۶] ۱۵
شکل ۲-۷: تأثیر قطبیت سیم الکترود در نفوذ جوش [۱۶] ۱۶
شکل ۲-۸: نیروی مغناطیسی وارد بر قطرات [۱۶] ۱۷
شکل ۲-۹: انواع قوس‌های الکتریکی برای مقادیر متفاوت ولتاژ و جریان [۱۶] ۱۸
شکل ۲-۱۰: انتقال قطرات در قوس اسپری [۱۶] ۱۹
شکل ۲-۱۱: سطح مقطع سیم یکپارچه و توپر [۱۶] ۲۰
شکل ۲-۱۲: تعاریف: ۱- فاصله قطعه تا رأس تماس ۲- برآمدگی سیم ۳- طول قوس [۱۶] ۲۳
شکل ۲-۱۳: کاهش جریان جوشکاری با افزایش طول موثر سیم [۱۶] ۲۳
شکل ۲-۱۴: تأثیر موقعیت الکترود و تکنیک جوشکاری [۱۶] ۲۴
شکل ۳-۱: نمایش نقاط در طرح مرکب مرکزی [۱۹] ۳۳
شکل ۳-۲: فضای نامنظم جواب‌ها (پارامترهای با سطوح نابرابر) ۳۵
شکل ۳-۳: بدست آوردن آرایه داخلی ۳۷
شکل ۳-۴: انتخاب آرایه پیشنهادی ۳۷
شکل ۴-۱: نمایی از دستگاه جوشکاری مورد استفاده در تحقیق ۳۹
شکل ۴-۲: صفحه اصلی تنظیمات دستگاه ۴۰
شکل ۴-۳: سیستم تغذیه دستگاه جوشکاری ۴۰
شکل ۴-۴: نمایی از تجهیزات تنظیم گاز ۴۱
شکل ۴-۵: تنظیمات فرکانس دستگاه جوش ۴۲
شکل ۴-۶: سیستم نگه‌دارنده میز اتوماتیک جوشکاری ۴۳
شکل ۴-۷: طرح اتصال تحت استاندارد AWS D1.1 ۴۴
شکل ۴-۸: ایجاد پخ ۳۰ درجه بر روی قطعات ۴۴
شکل ۴-۹: نمایی از قطعات جوشکاری شده در آزمایشگاه ۴۹
شکل ۴-۱۰: سنگ‌زنی قطعات ماشینکاری شده ۵۰

شکل ۴-۱۱: دستگاه پولیش به کار رفته ۵۰
شکل ۴-۱۲: نمونه‌ای از قطعات قبل و بعد از سنباده‌زنی ۵۰
شکل ۴-۱۳: نمای ماکروسکوپی نمونه قبل و بعد از فرآیند اچ کردن ۵۱
شکل ۴-۱۴: دستگاه میکروسکوپ استفاده شده ۵۱
شکل ۴-۱۵: نمایی از نرم‌افزار MIP استفاده شده برای اندازه‌گیری ۵۲
شکل ۴-۱۶: اندازه‌گیری ابعاد گرده جوش برای قطعه ماکرواچ شده ۵۲
شکل ۴-۱۷: منطقه متأثر از حرارت ۵۳
شکل ۴-۱۸: ابعاد اندازه‌گیری شده ناحیه متأثر از حرارت توسط نرم‌افزار ۵۳
شکل ۴-۱۹: دستگاه سختی سنج بکار رفته ۵۴
شکل ۴-۲۰: لوزی ایجاد شده روی قطعه (بزرگنمایی ۴۰۰ برابر) ۵۴
شکل ۴-۲۱: سختی‌سنجی نمونه‌ها (۵ نقطه در فاصله یک میلی‌متر زیر لبه) ۵۵
شکل ۴-۲۲: ابعاد نمونه‌های آزمایش ضربه مطابق استاندارد AWS B4.0 ۵۵
شکل ۴-۲۳: نمونه‌ای از قطعات آماده شده برای آزمایش ضربه ۵۵
شکل ۴-۲۴: دستگاه آزمایش چارپی استفاده شده ۵۶
شکل ۴-۲۵: نمونه‌ای از قطعات بعد از آزمایش ضربه ۵۶
شکل ۵-۱: هیستوگرام باقی‌مانده‌های نرمال در شرایط ایده‌آل ۶۳
شکل ۵-۲: نمودار احتمال باقی‌مانده‌های مناسب ۶۳
شکل ۵-۳: نمودار احتمال باقی‌مانده‌های نامطلوب ۶۳
شکل ۵-۴: باقی‌مانده‌ها با الگوی قابل قبول ۶۳
شکل ۵-۵: باقی‌مانده‌ها با الگوی دو خم ۶۳
شکل ۵-۶: باقی‌مانده‌ها با الگوی غیر خطی ۶۴
شکل ۵-۷: باقی‌مانده‌ها با الگوی قیفی ۶۴
شکل ۵-۸: پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند ۶۷
شکل ۵-۹: هیستوگرام باقی‌مانده‌ها ۷۰
شکل ۵-۱۰: پراکندگی مقادیر تخمین زده شده ۷۰
شکل ۵-۱۱: نمودار احتمال نرمال ۷۰
شکل ۵-۱۲: هیستوگرام باقی‌مانده‌ها ۷۳
شکل ۵-۱۳:پراکندگی مقادیر تخمین زده شده ۷۳
شکل ۵-۱۴: نمودار احتمال نرمال ۷۳
شکل ۵-۱۵: هیستوگرام باقی‌مانده‌ها ۷۶
شکل ۵-۱۶: پراکندگی مقادیر تخمین زده شده ۷۶
شکل ۵-۱۷: نمودار احتمال نرمال ۷۶
شکل ۵-۱۸:) هیستوگرام باقی‌مانده‌ها ۸۰

شکل ۵-۱۹: پراکندگی مقادیر تخمین زده شده ۸۰
شکل ۵-۲۰: نمودار احتمال نرمال ۸۰
شکل ۶-۱: دسته‌بندی روش‌های بهینه سازی [۳۱] ۸۵
شکل ۶-۲: نرخ رشد فضای جواب در مقایسه با تعداد متغیرها [۳۱] ۸۷
شکل ۶-۳: فلوچارت مربوط به نحوه عملکرد الگوریتم تبرید تدریجی ۹۱
شکل ۶-۷: نمودار همگرایی تابع هدف چند متغیره ۹۸
شکل الف-۱: جوشکاری با الکترود دستی ۱۰۵
شکل الف-۲: شماتیک جوشکاری زیر پودری ۱۰۶
شکل الف-۳: اجزاء تشکیل دهنده قوس پلاسما ۱۰۸
شکل الف-۴: جوشکاری با گاز محافظ و الکترود غیر مصرفی ۱۰۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: آرایه متعامد تاگوچی برای مسئله جوشکاری ۳۷
جدول ۴-۱: مشخصات موتور محرکه میز اتوماتیک ۴۱
جدول ۴-۲: ترکیب شیمیایی ورق‌های استفاده شده ۴۳
جدول ۴-۳: سطوح بالا و پایین پارامترهای ورودی جوشکاری ۴۷
جدول ۴-۴: ترکیبات محلول اچ ۵۱
جدول ۴-۵: داده‌های آزمایشگاهی اخذ شده ۵۷
جدول ۵-۱: مقادیر احتمال و ضریب تعیین برای مدل خطی ارتفاع گرده جوش ۶۸
جدول ۵-۲: آنالیز واریانس برای مدل خطی ارتفاع گرده جوش ۶۹
جدول ۵-۳: مقادیر احتمال برای مدل خطی اصلاح شده ۷۰
جدول ۵-۴: مقادیر احتمال و ضریب تعیین برای مدل درجه دوم ارتفاع گرده جوش ۷۱
جدول ۵-۵: آنالیز واریانس برای مدل درجه دوم ارتفاع گرده جوش ۷۲
جدول ۵-۶: مقادیر احتمال برای مدل درجه دوم اصلاح شده ۷۲
جدول ۵-۷: مقادیر احتمال و ضریب تعیین برای مدل لگاریتمی ارتفاع گرده جوش ۷۴
جدول ۵-۸: آنالیز واریانس برای مدل لگاریتمی ارتفاع گرده جوش ۷۵
جدول ۵-۹: مقادیر احتمال برای مدل لگاریتمی اصلاح شده ۷۵
جدول ۵-۱۰: مقایسه ضرایب همبستگی مدل‌های برازش شده برای ارتفاع گرده جوش ۷۶
جدول ۵-۱۱: مقادیر احتمال و ضریب تعیین برای مدل خطی عرض گرده جوش ۷۷
جدول ۵-۱۲: آنالیز واریانس برای مدل خطی عرض گرده جوش ۷۷
جدول ۵-۱۳: مقادیر احتمال و ضریب تعیین برای مدل درجه دوم عرض گرده جوش ۷۹
جدول ۵-۱۴: آنالیز واریانس برای مدل درجه دوم عرض گرده جوش ۷۹
جدول ۵-۱۵: مقادیر احتمال برای مدل درجه دوم اصلاح شده ۷۹
جدول ۵-۱۶: مقادیر احتمال و ضریب تعیین برای مدل لگاریتمی عرض گرده جوش ۸۱
جدول ۵-۱۷: آنالیز واریانس برای مدل لگاریتمی عرض گرده جوش ۸۱
جدول ۵-۱۸: مقایسه ضرایب همبستگی مدل‌های برازش شده برای عرض گرده جوش ۸۲
جدول ۶-۱: معرفی گام تغییرات و سطوح پارامترهای فرآیند ۹۶
جدول ۶-۲: پارامترهای اصلی الگوریتم ۹۶
جدول ۶-۳: تابع هدف در بهینه سازی هندسه گرده جوش ۹۶
جدول ۶-۴: تعیین مقادیر مطلوب هندسه گرده جوش ۹۷
جدول ب-۱: میزان سختی ویکرز بر اساس نیرو و قطر میانگین ۱۱۱

جدول ب-۲: توزیع مقادیر F برای سطح اطمینان ۹۵ درصد ۱۱۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱- اهمیت موضوع و ضرورت انجام پروژه

افزایش کیفیت محصولات و کاهش هزینه‌های ساخت را می‌توان به عنوان دو معیار اساسی افزایش بهره‌وری شرکت‌های تولیدی دانست. بدین منظور، صنایع مختلف برای توانایی رقابت در بازار، به سمت بهینه[1] کردن هر چه بیشتر فرآیندهای خود پیش می‌روند. از این رو بهینه‌سازی فرآیندها یکی از ضروری‌ترین کارها در صنعت امروز محسوب می‌شود. هدف از بهینه‌سازی فرآیندهای تولیدی، تنظیم هر چه دقیق‌تر مقادیر پارامترهای ورودی برای رسیدن به خروجی مطلوب است. در فرآیندهایی که پارامترهای ورودی زیاد باشند، رسیدن به پارامترهای بهینه مستلزم بررسی دقیق و علمی فرآیند است. برای تنظیم مناسب پارامترها، روش‌های آزمون و خطا اغلب پر هزینه، زمان بر و غیر دقیق هستند. در روش دیگر به کمک نرم افزارهای المان محدود، رفتار فرآیند مدل می‌شود، اما مشکل بودن تشخیص وابستگی و تخمین تئوری ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در یک فرآیند واقعی، پژوهشگران را بر آن داشته تا این ارتباط را از طریق تحلیل‌های آماری داده‌های آزمایشگاهی بدست آورند. این تکنیک‌ها شامل رگرسیون خطی و غیر خطی، روش سطح پاسخ و شبکه‌های عصبی است. در این میان، مدل‌سازی رگرسیونی ابزار مناسبی برای تعیین مقادیر صحیح پارامترهای تنظیمی به منظور دست‌یابی به خروجی‌های مطلوب می‌باشد. در این مدل‌ها امکان بهینه‌سازی فرآیند و نیز آنالیز حساسیت فراهم شده است. همچنین این مدل‌ها ابزار مناسبی برای فهم بهتر اثرات متغیرهای ورودی بر روی خروجی‌ها هستند.

امروزه روش‌های جوشکاری به عنوان یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تولیدی شناخته می‌شوند. جوشکاری به منظور ایجاد اتصال دایمی مواد مهندسی (به خصوص فلزات) به یکدیگر انجام می‌گیرد به گونه‌ای که خواص اتصال حتی‌المقدور مشابه خواص ماده پایه باشد. امروزه با گسترش کاربرد فلزات در صنایع، استفاده از این فرآیندها افزایش چشمگیری یافته است. از این رو با توجه به اهمیت جوشکاری در تولید، دست‌یابی به کیفیت مناسب در آن بسیار ضروری به نظر می‌رسد. رسیدن به این کیفیت در گرو تنظیم هر چه بهتر پارامترهای ورودی فرآیند است، که نوع و تعداد این پارامترها با توجه به نوع جوشکاری می‌تواند متفاوت باشند.

جوشکاری دارای انواع مختلفی است. در این میان جوشکاری قوس الکتریکی یکی از روش‌های متداول و پر کاربرد است که خود شامل انواع متنوعی است. روش جوشکاری که در این تحقیق مورد

[1] Optimum

بررسی قرار گرفته جوشکاری قوس الکتریکی با استفاده از گاز محافظ[1] است که جزو فرآیندهای مهم در ایجاد اتصالات فلزی دائمی با کیفیت بالا به شمار می‌آید. این روش کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف، از جمله صنایع هوا و فضا، خودروسازی، تولید لوله و صنایع نفت، گاز و پتروشیمی دارد. با توجه به نیاز این صنایع به اتصالات دقیق و قابل اطمینان، اهمیت دست‌یابی به کیفیت مناسب در اتصالات بسیار ملموس‌تر می‌شود.

همان‌طور که ذکر شد برای دست‌یابی به کیفیت مطلوب جوش، پارامترهای ورودی باید به بهترین نحو تنظیم شوند. مهم‌ترین پارامترهای تنظیمی در روش جوشکاری $GMAW$، سرعت جوشکاری، ولتاژ، نرخ تغذیه سیم، فاصله مشعل[2] تا صفحه، زاویه مشعل نسبت به صفحه جوشکاری، ترکیب گاز محافظ و نرخ جریان گاز محافظ است. کیفیت جوش معمولاً توسط پارامترهای مختلفی چون هندسه گرده جوش، میزان مقاومت به ضربه، مقدار سختی جوش، عرض ناحیه متأثر از حرارت، مقاومت به کشش و مقاومت به خمش سنجیده می‌شود.

در کشور ایران صنعت نفت و گاز دارای جایگاه ویژه‌ای است، ولی متأسفانه به علت نبود داده‌های آزمایشگاهی مناسب و دقیق، در این زمینه کار زیادی صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت موضوع، لزوم بررسی و تحقیق مناسب در این حیطه کاملاً احساس می‌شود. لذا هدف اصلی از این تحقیق، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ برای کاربرد در خطوط انتقال گاز است. این تحقیق با توجه به مواد و شرایط جوشکاری در این زمینه و با حمایت شرکت گاز استان خراسان رضوی انجام یافته است. امید است که تحقیق انجام شده گامی هر چند کوچک در این زمینه بردارد. در این بررسی ابتدا به کمک تکنیک‌های طراحی آزمایشات[3] داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده و سپس با استفاده از این داده‌ها به منظور ایجاد رابطه ریاضی دقیق بین پارامترهای ورودی جوشکاری $GMAW$ و متغیرهای خروجی (ابعاد هندسی گرده جوش، عرض ناحیه متأثر از حرارت، سختی و مقاومت به ضربه)، مدل‌های ریاضی مبتنی بر روش‌های میان‌یابی، بر اساس داده‌های تجربی استخراج شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های میان‌یابی روش مدل‌سازی رگرسیونی می‌باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. برای استخراج مدل‌ها، طرح آزمایش تاگوچی مورد استفاده قرار گرفته است که داده‌های مورد نیاز را برای مدل‌سازی فراهم می‌نماید. مدل‌های ریاضی توسعه یافته ابزار مفید و مناسبی برای کنترل فرآیند و رسیدن به خروجی‌های مطلوب می‌باشد.

[1] Gas Metal Arc Welding
[2] Torch
[3] Design of Experimental (DOE)

۱-۲- مروری بر تحقیقات قبلی

۱-۲-۱- بررسی پارامترهای مهم فرآیند جوشکاری با گاز محافظ

فرآیند جوشکاری با گاز محافظ دارای پارامترهای ورودی زیادی است که هر یک به نوبه خود بر روی کیفیت جوش تأثیر می‌گذارند. تشخیص چگونگی تأثیرگذاری هر پارامتر و اهمیت آن‌ها، کار دشواری است که نیاز به بررسی دقیق فرآیند از طریق طراحی آزمایشات و تحلیل‌های نرم افزاری دارد. در اینجا به چند نمونه از تحقیقات صورت گرفته که در این زمینه اشاره می‌شود.

لیاو[1] و همکارانش [۱]، تأثیر پارامتر جنس الکترود و ترکیب گاز محافظ را بر روی نرخ پاشیدن قطرات مذاب، ترکیب شیمیایی جوش و استحکام کششی اتصال بررسی نمود. نتایج نشان داد در جوشی که از الکترود توپر استفاده شده نسبت به الکترود یکپارچه نرخ پاشیدن کمتری اتفاق می‌افتد. همچنین ترکیب گاز محافظ بر روی استحکام کششی و استحکام نهایی اتصال تأثیری ندارد. سرینیواسا راو[2] و همکارانش [۲]، تأثیر پنج پارامتر نرخ تغذیه سیم، ضخامت ورق، فرکانس، جریان پایه و نسبت سرعت تغذیه سیم به سرعت جوشکاری را بر روی هندسه گرده جوش، عمق نفوذ و درصد برآمدگی گرده جوش بررسی نمودند. مشاهده شد که دو پارامتر نرخ تغذیه سیم و نسبت نرخ تغذیه به سرعت جوشکاری به ترتیب تأثیرگذارترین فاکتورها بر روی عمق نفوذ و درصد برآمدگی گرده هستند. در واقع در جریان‌های بالا، برای مقادیر زیاد نرخ تغذیه در سرعت‌های کم جوشکاری می‌توان به نفوذ مناسب و درصد برآمدگی کم دست یافت. همچنین با کاهش فرکانس جوشکاری، می‌توان به عمق نفوذ بهتری رسید. گولنک[3] و همکارانش [۳]، تأثیر ترکیب‌های متفاوت دو گاز محافظ هیدروژن و آرگون را در جریان‌های مشخص بر روی فولاد ضد زنگ $304L$ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار هیدروژن، چقرمگی جوش نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش مقدار هیدروژن به دلیل بالا رفتن دما، اندازه دانه‌ها نیز در ریزساختار افزایش می‌یابد. عرض گرده جوش و عمق نفوذ نیز با افزایش مقدار هیدروژن زیاد می‌شود. همچنین با استفاده از آزمایش سختی مشخص گردید که برای تمام نمونه‌ها مقدار سختی جوش بیشتر از خود قطعه کار است. کانان[4] و همکارانش [۴]، با استفاده از طرح مکعب مرکزی تأثیر چهار پارامتر زاویه مشعل، فاصله مشعل تا قطعه، نرخ تغذیه و سرعت جوشکاری را بر روی عمق نفوذ و ابعاد گرده جوش بررسی نمودند. در این راستا مشخص شد که با افزایش نرخ تغذیه سیم، ابعاد گرده جوش و عمق نفوذ

[1] Liao
[2] Srinivasa Rao
[3] Gülenç
[4] Kannan

زیاد می‌شود. با افزایش فاصله نیز مقدار ابعاد گرده جوش افزایش می‌یابد. همچنین میزان ارتفاع گرده و عمق نفوذ رابطه معکوسی با زاویه مشعل دارند.

۱-۲-۲- مدل‌سازی و پیش بینی خروجی‌های فرآیند

در بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای یک فرآیند بایستی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها یک ارتباط منطقی برقرار نمود. فرآیند جوشکاری پدیده‌ای پیچیده و غیر خطی است. از این رو بدست آوردن یک رابطه تحلیلی برای پیش‌بینی این فرآیند امری دشوار و حتی غیر ممکن خواهد بود. یکی از روش‌های کاربردی و مناسب برای ایجاد رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی یک فرآیند، روش‌های مدل‌سازی ریاضی مانند منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی و غیر خطی است. در این رویکرد یک رابطه ریاضی قابل تنظیم، داده‌های بدست آمده از آزمایشات را تخمین می‌زند تا بتوان توسط آن حالت‌های دیگر فرآیند که در آزمایشات بررسی نشده‌اند را نیز پیش‌بینی نمود. همچنین به منظور بهینه‌سازی فرآیند نیز می‌توان از این رابطه استفاده نمود.

در بررسی‌های انجام شده روی جوشکاری با گاز محافظ، ناگش[1] و همکارانش [۵]، با استفاده از روش طراحی آزمایشات فاکتوریل کسری تأثیر پارامترهای سرعت و ولتاژ جوشکاری، نرخ جریان گاز و فاصله مشعل تا قطعه را بر روی عمق نفوذ و ابعاد هندسی گرده جوش نبشی بررسی نمود. همچنین با استفاده از روش مدل‌سازی رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی شکل و ابعاد هندسی گرده جوش را پیش‌بینی نمودند. گنجیگاتی[2] و همکارانش [۶]، نیز تأثیر پارامترهای سرعت جوشکاری، ولتاژ مدار باز، نرخ تغذیه سیم، نرخ جریان گاز، زاویه مشعل و فاصله مشعل تا قطعه را بر روی عرض و ارتفاع گرده و نیز عمق نفوذ بررسی نمودند. آن‌ها برای هر پارامتر دو سطح در نظر گرفتند و با استفاده از روش فاکتوریل کامل تمام حالت‌های ممکن را آزمایش نمودند سپس با مدل‌سازی رگرسیونی برای هر یک از خروجی‌ها یک مدل ریاضی معرفی نمودند. سون‌مون[3] و همکارانش [۷]، پارامترهای سرعت، ولتاژ، نرخ جریان گاز و فاصله مشعل تا قطعه را به عنوان ورودی در نظر گرفتند و با استفاده از روش طراحی آزمایشات فاکتوریل کسری تأثیر آن‌ها را بر روی عرض عمودی و افقی گرده، ارتفاع گرده و عمق نفوذ بررسی نمودند. در این راستا از روش مدل‌سازی شبکه‌های عصبی استفاده نمودند.

[1] Nagesh
[2] Ganjigatti
[3] Soon moon

۱-۲-۳- بهینه سازی فرآیند

اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری با گاز محافظ مربوط به خصوصیات ظاهری و هندسه گرده جوش می‌باشد. به عنوان نمونه کوریا[1] و همکارانش [۸]، با استفاده از روش پاسخ سطح و الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی عرض گرده، ارتفاع گرده و عمق نفوذ جوش پرداختند بدین منظور پارامترهای ولتاژ، سرعت جوشکاری و نرخ تغذیه سیم را به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفتند.. آن‌ها از میزان درصد تحدب (تقسیم ارتفاع به عرض گرده) به عنوان معیار بهینه‌سازی برای ابعاد گرده جوش استفاده نمودند. پایوا[2] و همکارانش [۹]، با به‌کارگیری روش طراحی آزمایشات مکعب مرکزی و با انتخاب پارامترهای جریان پایه، جریان حداکثر و سرعت تغذیه سیم به عنوان ورودی، به بهینه سازی چندگانه فرآیند جوشکاری با گاز محافظ پالسی پرداختند. آن‌ها پارامترهای ارتفاع و عرض گرده جوش، عمق نفوذ، سطح ناحیه جوش و درصد برآمدگی گرده را با به‌کارگیری روش سطح پاسخ بهینه نمودند. کارینو[3] و همکارانش [۱۰]، سعی کردند با انجام آزمایشات محدود و به‌کارگیری روش رگرسیون غیرخطی و منطق فازی فرآیند جوشکاری با گاز محافظ را مدل‌سازی و بهینه‌سازی نمایند. به این منظور پارامترهای سرعت جوشکاری، نرخ تغذیه سیم و ولتاژ را به عنوان ورودی در نظر گرفتند. همچنین از فاکتور نرخ رسوب مذاب به عنوان معیار افزایش بهره‌وری جوش استفاده کردند.

۱-۳- اهداف پروژه

همان‌طور که ذکر شد در زمینه بهینه‌سازی مشخصات مکانیکی و متالورژیکی جوشکاری با گاز محافظ (به خصوص بر روی آلیاژ بکار گرفته شده در این تحقیق) تحقیقات خاصی انجام نشده است بدین منظور در این تحقیق سعی شده تا با کار آزمایشگاهی دقیق و علمی اهداف تعیین شده زیر بر آورده شود.

۱- بررسی و تعیین میزان تأثیر پارامترهای تنظیمی جوشکاری بر مشخصات مکانیکی و متالورژیکی اتصال شامل هندسه گرده جوش، عرض ناحیه متأثر از حرارت، میزان سختی جوش و مقاومت به ضربه.
۲- بسط و ایجاد مدل‌های ریاضی مبتنی بر نتایج آزمایشات عملی به منظور تبیین رابطه دقیق بین پارامترهای ورودی و مشخصه‌های خروجی.

[1] Correia
[2] Paiva
[3] Carrino