دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان نامه:

بررسی هندسه لبه اتصال و پارامترهای تنظیمی در فرآیند جوشکاری با گاز محافظ (مطالعه موردی: لوله‌های انتقال گاز)

مولف:
رضا گل‌مزرجی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکانیک- گرایش ساخت و تولید

استاد راهنما:
دکتر فرهاد کلاهان

آبان 1390

بسم الله الرحمن الرحيم

((بسمه تعالی))

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان نامه: **بررسی هندسه لبه اتصال و پارامترهای تنظیمی در فرآیند جوشکاری با گاز محافظ (مطالعه موردی: لوله‌های انتقال گاز)**

نام نویسنده: **رضا گل‌مزرجی**

نام استاد راهنما: **دکتر فرهاد کلاهان**

دانشکده: **مهندسی**	گروه: **مهندسی مکانیک**	رشته تحصیلی: **مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)**
تاریخ تصویب: 1389/11/18		تاریخ دفاع: 1390/7/11
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ● دکتری ○		تعداد صفحات: 140

چکیده پایان نامه: امروزه جوشکاری با گاز محافظ و الکترود مصرفی یکی از مهمترین فرآیندهای جوشکاری به شمار می‌رود. جهت دستیابی به جوشی با کیفیت و نفوذ کامل، بویژه در جوشکاری ورق‌های ضخیم، انتخاب مناسب هندسه لبه اتصال و پارامترهای تنظیمی فرآیند ضروری است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر هندسه لبه و متغیرهای فرآیند جوشکاری بر روی هندسه گُرده جوش و عرض ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) می‌باشد. بدین منظور با استفاده از نتایج یک سری آزمایش حاصل از طراحی آزمایشات، و بهره‌گیری از روش‌های مدل‌سازی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌های معناداری میان ورودی-خروجی‌های فرآیند توسعه یافته است. آزمایشات بر روی ورق‌هایی به ضخامت 6 mm از جنس فولاد API 5LX42 که به طور گسترده در صنعت خطوط انتقال گاز استفاده می‌شود، انجام شد. مقایسه تحلیل‌های آماری و بررسی نتایج آزمایش، حاکی از آن است که مدل‌های شبکه عصبی نسبت به مدل‌های رگرسیونی، دقت برازش بیشتری دارند و لذا از آن به عنوان ابزار مدل‌سازی، جهت پیش‌بینی خروجی‌های فرآیند نسبت به تغییر ورودی‌های آن بهره گرفته شد.

در بخش پایانی این پژوهش با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی (SA)، یک تکنیک کارآمد فراابتکاری، شرایط بهینه فرآیند تعیین گردید. بهینه‌سازی متغیرهای ورودی بر پایه یک تابع هدف چند منظوره و برای دستیابی به جوشی با کیفیت مناسب گُرده جوش و کمترین عرض HAZ در SA انجام شده است. نتایج تحقیق ثابت می‌کند که روش پیشنهادی می‌تواند جهت بهبود کیفیت جوش با کمترین آسیب متالوژیکی در فلز پایه مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه:

1. جوشکاری با گاز محافظ
2. طراحی آزمایشات
3. مدل‌سازی رگرسیونی
4. شبکه عصبی مصنوعی
5. الگوریتم تبرید تدریجی

امضای استاد راهنما:

تاریخ: 1390/9/

اصالت اثر

اینجانب **رضا گل‌مزرجی** تأیید می‌نمایم مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب بوده و در صورت استفاده موردی از دست‌آوردهای پژوهشی دیگران مطابق مقررات با آنها ارجاع شده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرکی هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و قانونی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

امضاء دانشجو

رضا گل‌مزرجی **تاریخ**

امضاء استاد راهنما

فرهاد کلاهان **تاریخ**

تاییدیه گروه مکانیک

پایان نامه حاضر تحت عنوان :

بررسی هندسه لبه اتصال و پارامترهای تنظیمی در فرآیند جوشکاری با گاز محافظ (مطالعه موردی: لوله‌های انتقال گاز)

که توسط آقای رضا گل‌مزرجی تهیه و به هیات داوران ارائه شده، به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته مکانیک گرایش ساخت و تولید، مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

تاریخ دفاع: نمره: درجه ارزشیابی:

اعضای هیات داوران:

نام ونام خانوادگی	سمت	امضا
1- دکتر فرهاد کلاهان	استادراهنما	
2- دکتر محمد مزینانی	استاد ممتحن	
3- دکترعبدالرحمن جامی‌الاحمدی	استاد ممتحن	
4- دکتر محمدحسین ابوالبشری	نماینده تحصیلات تکمیلی	

تقدیم به :

پدر و مادرم عزیزم

آنان که هر چه دارم از برکت وجود آن‌هاست و تمام موفقیت‌های زندگیم، مرهون زحمات بی‌دریغ و دلسوزانه‌شان است.

همسر عزیزم

او که با ورودش به زندگیم معنای تازه‌ی عشق و محبت را زنده نمود.

و تقدیم به :

روان پاک عموی شهیدم

کسی که در اوان جوانی، در حالی که به تازگی به سن تکلیف رسیده بود، با ذره ذره وجودش، دین خود را نسبت به وطن و مردم میهنش ادا نمود.

روحش شاد و یادش گرامی باد.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس پروردگارجهانیان را که هرگاه او را خواندم، مرا اجابت نمود.

اکنون که کار نگارش این پایان نامه به سرانجام رسید، وظیفه دارم مراتب تقدیر وتشکر خود را از استاد بزرگوارم آقای **دکتر فرهاد کلاهان** بجای آورم. بدون شک انجام دقیق و موفقیت‌آمیزاین پژوهش بدون یاری بی‌دریغ ایشان و راهنمایی‌های ارزشمندشان میسر نبود.

همچنین از کلیه اساتید گران‌قدر و دوستان گرامی‌ام که به طور مستقیم و غیرمستقیم، مرا در انجام این پروژه و پیشبرد اهداف تحصیلی‌ام یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

به امید سعادت و توفیقات روزافزون

برای کلیه این عزیزان.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

1-1) کلیات 1
1-2) ضرورت تحقیق و مراحل اجرا 1
1-3) بیان مسئله 3
1-4) نگاهی اِجمالی برساختار پایان‌نامه 5
1-5) مروری بر تحقیقات انجام شده 6
1-5-1) مدل‌سازی برازشی (رگرسیونی) فرآیند 7
1-5-2) کاربرد هوش مصنوعی درمدلسازی وبهینه‌سازی فرآیند 8
1-5-3) بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های فراابتکاری 9

فصل دوم: مبانی جوشکاری

2-1) کلیاتی در ارتباط با جوشکاری 13
2-2) طبقه بندی فرآیندهای جوشکاری 13
2-3) جوشکاری با قوس الکتریکی 15
2-3-1) جوشکاری قوسی بدون گاز محافظ 15
2-3-1-1) جوشکاری قوس و الکترود روکش‌دار 16
2-3-1-2) جوشکاری زیر پودری 16
2-3-2)جوشکاری قوسی با گاز محافظ 16
2-3-2-1) جوشکاری با الکترود تنگستن 17
2-3-2-2) جوشکاری با قوس پلاسما 17
2-3-3) جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی 18
2-3-3-1) جوشکاری قوسی با گاز محافظ خنثی 18
2-3-3-2) جوشکاری قوسی با گاز محافظ فعال 18
2-4) تجهیزات فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی 19

فهرست مطالب

2-5) مکانیزم انتقال فلز مذاب ازالکترود به حوضچه مذاب جوش 21
2-5-1) انتقال اسپری یاپرواز آزاد 23
2-5-2) انتقال اتصال کوتاه یا مدار بسته 24
2-5-3) انتقال قطره‌ای یا گلوله‌ای 24
2-5-4) انتقال پالسی یا ضربانی 25
2-6) متغیرهای موثر فرآیند 25
2-6-1) جریان الکتریکی (نوع، قطبیت ومقدار آمپراژ) 26
2-6-2) ولتاژ (طول قوس) 26
2-6-3) سرعت جوشکاری 26
2-6-4) جنس، قطر و سرعت تغذیه سیمجوش 27
2-6-5) گاز محافظ (نوع،خلوص، دبی و فشار گاز) 27
2-6-6) طول موثرسیم جوش 27
2-6-7) جهت‌گیری الکترود نسبت به قطعه کار و زاویه مشعل 28
2-7) مزایا و محدودیت‌های فرآیندهای جوشکاری MIG/MAG 28
2-8) هندسه و ایجاد شرایط پیش تنظیم مناسب لبه اتصال 30
2-8-1) هزینه تنظیم هندسه لبه 31
2-9) هندسه گرده جوش حاصل 33
2-10) ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) 33
2-10-1) ترک‌های متداول در HAZ 33
2-10-2) روش‌های کاهش حجم (عرض) ناحیه HAZ 34

فصل سوم: طراحی آزمایشات

3-1) ضرورت انجام طراحی آزمایشات 37
3-2) تاریخچه طراحی آزمایشات 37
3-3) تعاریف مهم درطراحی آزمایشات 38

فهرست مطالب

3-4) مراحل طراحی آزمایشات 39
3-4-1) مثالی در ارتباط بانحوه طراحی آزمایشات 42
3-5) بررسی روش‌های طراحی آزمایشات 42
3-5-1) طرح عاملی کامل 42
3-5-2) طرح مرکب مرکزی 43
3-5-3) روش سطح پاسخ 44
3-5-4) طرح‌های عاملی کسری قابل استفاده در فضای غیر منظم 46
3-5-4-1) طرح تاگوچی 46
3-5-4-2) طرح دترمینان بهینه 49
3-6) انتخاب طرح کارآمد جهت مدل‌سازی فرآیند مورد مطالعه 50

فصل چهارم: انجام آزمایشات و اخذ نتایج

4-1) مقدمه 54
4-2) قطعات آزمایش 54
4-3) لبه‌سازی قطعات با استفاده از دستگاه فرز 55
4-4) مشخصات دستگاه جوشکاری مورد استفاده 55
4-5) مشخصات میز و اینورتور تنظیم سرعت جوشکاری 57
4-5-1) فیکسچر نگه‌دارنده مشعل جوشکاری 58
4-6) تعیین پارامترهای مورد مطالعه و دامنه تغییر سطوح آن 58
4-6-1) حدود تغییرات متغیرهای مورد مطالعه 59
4-6-2) سایر ورودی‌های فرآیند 61
4-7) انجام تست‌های اصلی 62
4-8) نحوه اندازه‌گیری خروجی‌ها (مشخصات گُرده و HAZ) 64
4-8-1) برش نمونه‌ها با استفاده از اره لنگ 64
4-8-2) متالوگرافی 64

فهرست مطالب

3-8-4) استریوماکروسکوپ نوری 65

فصل پنجم: مدل‌سازی برازشی فرآیند جوشکاری

5-1) توسعه مدل‌های رگرسیونی (برازش ریاضی) 69
5-2) ساختار رگرسیون‌های چندمتغیره 69
5-3) کنترل مناسبت مدل‌های رگرسیونی 70
5-3-1) تحلیل واریانس وارزیابی ضرایب آماری 71
5-3-1-1) بررسی ضریب تعیین (ضریب همبستگی)..... 71
5-3-1-2) تحلیل ضرایب آماری نسبت واریانس وضریب احتمال 72
5-3-2) بررسی وتحلیل باقیمانده 74
5-4) بررسی میزان تأثیر هریک از پارامترهای ورودی برخروجی فرآیند 76
5-5) مدل‌سازی رگرسیونی عرض گُرده جوش 77
5-5-1) رگرسیون چندمتغیره خطی عرض گُرده 77
5-5-2) مدل رگرسیونی مرتبه دوم 79
5-6) مدل‌سازی رگرسیونی عمق نفوذ جوش..... 81
5-6-1) رگرسیون چندمتغیره خطی عمق نفوذ..... 81
5-6-2) مدل رگرسیونی چندجمله‌ای مرتبه دوم عمق نفوذ 83
5-7) مدل‌سازی رگرسیونی ارتفاع گُرده جوش..... 85
5-7-1) رگرسیون چندمتغیره خطی ارتفاع گُرده..... 85
5-7-2) مدل رگرسیون چندجمله‌ای مرتبه دوم ارتفاع 86
5-8) مدل‌سازی رگرسیون عرض ناحیه حرارت دیده..... 88
5-8-1) رگرسیون چندمتغیره خطی عرض HAZ 88
5-8-2) مدل رگرسیون چندجمله‌ای مرتبه دوم HAZ 90

فهرست مطالب

فصل ششم: مدل‌سازی فرآیند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

6-1) کلیات شبکه‌های عصبی 94

6-2) شبکه‌های عصبی مصنوعی 95

6-2-1) مفاهیم پایه درشبکه‌های عصبی مصنوعی 95

6-2-2) آموزش شبکه عصبی 97

6-2-2-1) آموزش نظارت شده 97

6-2-2-2) آموزش غیرنظارت شده 98

6-3) شبکه عصبی پرسپترون 98

6-3-1) پرسپترون تک‌لایه 99

6-3-2) شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) 99

6-3-2-1) آموزش درشبکه‌های پرسپترون MLP 101

6-4) پیاده سازی شبکه BP درنرم‌افزار MATLAB 104

6-5) مدل‌سازی فرآیند جوشکاری توسط شبکه عصبی مصنوعی 107

6-5-1) مدل‌سازی ANN برای عرض جوش 107

6-5-2) مدل‌سازی ANN برای عمق نفوذ جوش 108

6-5-3) مدل‌سازی ANN برای ارتفاع گُرده جوش 109

6-5-4) مدل‌سازی ANN برای عرض ناحیه حرارت دیده 110

6-6) بررسی اثر متقابل فاکتورهای مهم فرآیند جوشکاری 112

6-6-1) بررسی اثر متقابل ولتاژ و زاویه پَخ اتصال برعرض جوش 112

6-6-2) بررسی اثر متقابل سرعت جوشکاری و نرخ تغذیه الکترود برعمق نفوذ 113

6-6-3) بررسی اثر متقابل زاویه پَخ اتصال و نرخ تغذیه الکترود برارتفاع گُرده (BH) 114

6-6-4) بررسی اثرمتقابل ولتاژ و سرعت جوشکاری برعرض ناحیه HAZ 115

فهرست مطالب

فصل هفتم: بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری و اعتبارسنجی نتایج

7-1) مسائل بهینه‌سازی چندمنظوره 118

7-1-1) روش میانگین وزنی پاسخ‌ها 119

7-1-2) روش کمترین مربع انحرافات 120

7-2) روش‌های بهینه‌سازی 121

7-3) الگوریتم تبرید تدریجی 122

7-3-1) تابع سرمایش (C(Ti)) 125

7-3-2) شرط توقف 125

7-4) بهینه‌سازی چند منظوره فرآیندجوشکاری با گاز محافظ 126

7-4-1) معرفی پارامترهای ورودی وتعریف روابط بهینه‌سازی 127

7-4-2) حل مسئله بهینه‌سازی جوشکاری به روش میانگین وزنی 128

7-4-3) حل مسئله بهینه‌سازی جوشکاری به روش میانگین مربعات انحراف 130

7-5) اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی 132

فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

8-1) بررسی نتایج و دستاوردهای تحقیق 135

8-2) پیشنهادات برای تحقیقات آینده 136

منابع و مراجع 137

فهرست اشکال

شکل (1-1) نمودار علت و معلوم فرآیند جوشکاری با گاز محافظ و الکترود مصرفی 5
شکل (1-2) طبقه‌بندی فرآیندهای جوشکاری بر اساس انرژی مصرفی 14
شکل (2-2) فرآیند جوشکاری قوسی با الکترود دستی روکش‌دار (SMAW) 16
شکل (2-3) تجهیزات مورد استفاده در فرآیند GMAW و مکانیزم ایجاد قوس 21
شکل (2-4) چهار روش (مکانیزم) انتقال مذاب به حوضچه جوش در فرآیند MIG/MAG 22
شکل (2-5) حوزه آمپر و ولتاژ در چهار نوع مکانیزم انتقال مذاب در جوشکاری GMAW 25
شکل (2-6) تأثیر ترکیب شیمیایی گاز محافظ بر شکل گُرده جوش حاصل 27
شکل (2-7) پنج نوع متداول وضعیت لبه‌های قطعات اتصال 29
شکل (2-8) مشخصات اتصال سربه‌سر جناقی (Vشکل) و شکل جوش حاصل 31
شکل (2-9) مشخصات هندسه مطلوب جوش جناقی یک‌طرفه طبق استاندارد API 1104.....32
شکل (3-1) مراحل انجام طراحی آزمایشات.....40
شکل (3-2) طرح مرکب مرکزی برای دو متغیر 46
شکل (3-3) نمونه‌ای از نمودارهای پاسخ سطح با کانتور مربوطه 48
شکل (3-4) طرح‌های متعامد تاگوچی 48
شکل (3-5) نماد علامت‌گذاری طرح‌های تاگوچی 49
شکل (3-6) مدل فرآیند مورد مطالعه (جوشکاری با گاز محافظ) 50
شکل (4-1) نمایی از دستگاه جوشکاری مورد استفاده در تحقیق.....56
شکل (4-2) سیستم نگه‌دارنده مشعل جوشکاری و میکروسوئیچ محدود کننده حرکت 59
شکل (4-3) انجام آزمایشات جوشکاری به صورت اتوماتیک 63
شکل (4-4) نمایی از تمامی قطعات جوش داده شده 63
شکل (4-5) نمونه‌ای از قطعات جوشکاری شده 64
شکل (4-6) استریوماکروسکوپ با بزرگنمایی تا 20 برابر 65
شکل (4-7) نمونه عکس جوش گرفته شده با دستگاه استریوماکروسکوپ 66
شکل (5-1) نمودار توزیع نرمال باقیمانده (هیستوگرام) مناسب. 74

شکل (5-2) توزیع نرمال باقیمانده و احتمال نرمال بودن مدل. 75
شکل (5-3) الگوهایی برای نمودار باقیمانده(الف- رضایت بخش، ب- قیفی شکل، ج- دوخم). 75
شکل (5-4) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل خطی مرتبه اول عرض گُرده جوش 78
شکل (5-5) نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تخمینی در مدل خطی مرتبه اول عرض گُرده..... 79
شکل (5-6) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل خطی مرتبه اول عرض گُرده جوش 80
شکل (5-7) نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تخمین زده شده در مدل مرتبه دوم عرض گُرده 80
شکل (5-8) میزان اثرگذاری پارامترهای مورد مطالعه بر عرض جوش 90
شکل (5-9) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل خطی مرتبه اول عمق نفوذ جوش 81
شکل (5-10) نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تخمین زده شده در مدل خطی مرتبه اول عمق نفوذ 82
نمودار (5-11) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل خطی مرتبه اول عرض گُرده جوش 82
شکل (5-12) نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تخمین زده شده در مدل مرتبه دوم عرض گُرده 84
شکل (5-13) میزان اثرگذاری پارامترهای مورد مطالعه بر عمق نفوذ جوش 84
شکل (5-14) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل خطی مرتبه اول ارتفاع گُرده جوش 84
شکل (5-15) نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تخمینی در مدل خطی مرتبه اول ارتفاع گُرده..... 86
شکل (5-16) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل خطی مرتبه اول عرض گُرده جوش..... 86
شکل (5-17) نمودار باقی‌مانده‌ها و مقادیر تخمین زده شده در مدل مرتبه دوم عرض گُرده جوش 87
شکل (5-18) میزان اثرگذاری پارامترهای مورد مطالعه بر ارتفاع گُرده جوش 88
شکل (5-19) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل خطی مرتبه اول عرض HAZ 88
شکل (5-20) نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تخمین زده شده در مدل خطی مرتبه اول HAZ 89
شکل (5-21) نمودار احتمال نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در مدل مرتبه دوم HAZ 90
شکل (5-22) نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر تخمین زده شده در مدل مرتبه دوم HAZ 91
شکل (5-23) تأثیر پارامترهای مورد مطالعه بر عرض ناحیه HAZ..... 91
شکل (6-1) بخش‌های مختلف سیستم خبره 95
شکل (6-2) مدل ریاضی و نحوه عملکرد یک نورون در شبکه 97
شکل (6-3) مدل شبکه پرسپترون تک لایه. 99
شکل (6-4) ساختار پرسپترون چندلایه با یک لایه نورون 100
شکل (6-5) شماتیک شبکه چندلایه BP برای فرآیند مورد مطالعه 101

شکل (6-6) الگوریتم برنامه ایجاد مدل شبکه عصبی مصنوعی 106
شکل (6-7) مقایسه نتایج پیش‌بینی بهترین شبکه عصبی برای عرض جوش (BW) 108
شکل (6-8) مقایسه نتایج پیش‌بینی بهترین شبکه عصبی عمق نفوذ (BP) 109
شکل (6-9) مقایسه نتایج پیش‌بینی بهترین شبکه عصبی ارتفاع گُرده (BH) 110
شکل (6-10) مقایسه نتایج پیش‌بینی بهترین شبکه عصبی عرض ناحیه HAZ 111
شکل (6-11) اثر متقابل فاکتورهای (°A) و (V) بر عرض جوش 113
شکل (6-12) اثر متقابل فاکتورهای (F) و (S) بر عمق نفوذ جوش 114
شکل (6-13) اثر متقابل فاکتورهای (°A) و (F) ارتفاع گُرده 115
شکل (6-14) اثر متقابل فاکتورهای (V) و (S) بر عرض HAZ 116
شکل (7-1) الگوریتم تبرید تدریجی (SA) 124
شکل (7-2) نمودار همگرایی SA برای تابع هدف میانگین وزنی پاسخ‌ها 130
شکل (7-3) نمودار همگرایی SA در بهینه‌سازی به روش میانگین مربع انحرافات 132

فهرست جداول

جدول (3-1) نمونه‌ای از عوامل اثرگذار و سطوح آنها در طرح عاملی 2^K 42
جدول (3-2) طرح آزمایش کامل برای 2 فاکتور دوسطحی 43
جدول (3-3) برخی از ماتریس‌های متعامد در طرح‌های تاگوچی 49
جدول (3-4) ماتریس طرح آزمایشات مورد استفاده در تحقیق 51
جدول (4-1) ترکیب شیمیایی و خواص فولاد API 5LX42 مورد استفاده در آزمایشات 55
جدول (4-2) مقادیر تنظیمی ولتاژ مدار باز دستگاه جوشکاری 57
جدول (4-3) مشخصات ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی الکترود به کار رفته در جوشکاری. 57

جدول (4-4) حدود تغییرات پارامترهای ورودی فرآیند 61
جدول (4-5) شرایط انجام آزمایشات و نتایج اخذ شده 67
جدول (5-1) خلاصه‌ای از تحلیل واریانس (ANOVA) در مدل‌سازی رگرسیون 73
جدول (5-2) تحلیل واریانس مدل رگرسیون خطی عرض گُرده (BW) 78
جدول (5-3) تحلیل واریانس مدل رگرسیون مرتبه دوم عرض گُرده (BW) 80
جدول (5-4) تحلیل واریانس مدل رگرسیون خطی عمق نفوذ (BP) 82
جدول (5-5) تحلیل واریانس مدل رگرسیون مرتبه دوم عمق نفوذ (BP) 83
جدول (5-6) تحلیل واریانس مدل رگرسیون خطی ارتفاع گُرده (BH) 85
جدول (5-7) تحلیل واریانس مدل رگرسیون مرتبه دوم ارتفاع گُرده (BH) 87
جدول (5-8) تحلیل واریانس مدل رگرسیون خطی عرض HAZ 89
جدول (5-9) تحلیل واریانس مدل رگرسیون مرتبه دوم عرض HAZ 91
جدول (6-1) توابع تبدیل مورد استفاده در شبکه عصبی و نمودار مربوط به آن‌ها 96
جدول (6-2) مقایسه قابلیت مدل‌سازی شبکه عصبی و رگرسیون مرتبه دوم BW 108
جدول (6-3) مقایسه قابلیت مدل‌سازی شبکه عصبی و رگرسیون مرتبه دوم BP 109
جدول (6-4) مقایسه قابلیت مدل‌سازی شبکه عصبی و رگرسیون مرتبه دوم BH 110
جدول (6-5) مقایسه قابلیت مدل‌سازی شبکه عصبی و رگرسیون مرتبه دوم HAZ 111
جدول (7-1) معرفی پارامترهای جوشکاری جهت بهینه‌سازی 127
جدول (7-2) نتایج بهینه‌سازی به وسیله SA به روش میانگین وزنی پاسخ‌ها 130
جدول (7-3) نتایج بهینه‌سازی SA به روش میانگین مربعات انحراف 131
جدول (7-4) مقایسه نتایج آزمایش و پیش‌بینی شده در شرایط بهینه 133

فصل اول:

مقدمه

1 - 1) کلیات

امروزه شرایط بازارهای رقابتی تولید، صنعت‌گران را بر آن داشته تا همه‌روزه به ایده‌هایی نو جهت ارتقاء کیفیت تولیدات خود بیاندیشند. هر فرآیند تولید دارای ویژگی‌های منحصر به فردی بوده و از ورودی و خروجی‌های مشخصی تشکیل یافته است. بی‌شک کیفیت محصولات تولیدی هر عملیات تولید به ورودی‌هایش نظیر مواد اولیه، انرژی و فرآیند مورد استفاده وابسته است، لذا ارتقاء مقرون به صرفه کیفیت محصول (محصولات) نهایی بدون تنظیم دقیق و مناسب ورودی‌های آن میسر نیست. نحوه تنظیم ورودی‌های یک فرآیند جهت نیل به خروجی‌های مطلوب، بهینه‌سازی فرآیند نامیده می‌شود.

فرآیندهای جوشکاری بدون شک پرکاربردترین روش‌های اتصال‌دهی می‌باشند، که همواره بخش اعظمی از فرآیندهای تولید در صنایع مختلف را به خود اختصاص می‌دهند. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد مطالعه فرآیندهای مختلف جوشکاری صورت گرفته است و همچنان ادامه دارد. اگر چه تحقیقات انجام شده منجر به درک بهتر از فرآیندها و افزایش بهره‌وری شده است، ولی به علت پیچیدگی و تنوع انواع روش‌های جوشکاری، همچنان در این زمینه کاستی‌های زیادی احساس می‌شود [1].

طرح مشکلاتی از قبیل عمرکوتاه‌تر اتصال جوش نسبت به مواد پایه، تغیر رفتار مکانیکی، فیزیکی و متالوژیکی مواد پس از جوشکاری و ... از یک سو و هزینه‌های بالای انجام عملیات، از سوی دیگر ضرورت انجام تحقیقات کاربردی در زمینه جوشکاری را دو چندان نموده است.

1 - 2) ضرورت تحقیق و مراحل اجرا

جوشکاری یکی از مهمترین فرآیندهای تولیدی به شمار می‌رود و به واسطه قابلیت اتصال‌دهی دائمی انواع مواد فلزی با خصوصیات متنوع از جمله سختی بالا و قابلیت هدایت حرارتی ضعیف، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. با توجه به پیشرفت روزافزون صنایع خودروسازی، لوازم خانگی، صنایع نفت و گاز و انرژی، لزوم استفاده از روش‌های جوشکاری اتوماتیک و یا نیمه اتوماتیک بر هیچ کس پوشیده نیست. در این میان جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود مصرفی[1] (GMAW) یکی از فرآیندهای پرکاربرد و قابل

[1] Gas Metal Arc Welding (GMAW)

انعطاف جهت مکانیزه شدن است. این روش در خودروسازی، صنایع نظامی، لوازم خانگی، صنایع نفت و گاز همچنین در ساختمان‌سازی کاربردهای بی‌شماری دارد. به دلیل مزایای آن نسبت به فرآیند جوشکاری قوسی با الکترود روکش‌دار[1] (که در حال حاضر پرکاربردترین فرآیند جوشکاری به شمار می‌رود)، و از جمله این مزایا به قابلیت اتوماسیون، عدم نیاز به تعویض الکترود، عدم حساسیت فرآیند به فاصله نازل از سطح کار و عدم وجود سرباره[2] می‌توان اشاره داشت. پیش‌بینی می‌شود که این روش رفته‌رفته جایگزین فرآیند مذکور شود [1].

از جمله صنایعی که در آن به انواع فرآیندهای جوشکاری و بویژه جوشکاری با گاز محافظ و الکترود مصرفی توجه خاصی شده می‌توان به صنایع نفت و گاز اشاره نمود. نیاز این صنایع به اتصالات دقیق و قابل اطمینان، اهمیت دستیابی به کیفیت مناسب از طریق بهینه‌سازی فرآیند را بسیار ملموس‌تر می‌سازد. اهمیت این موضوع زمانی آشکار می‌شود که یادآور شویم که در صورت نشت گاز و نفت از محل اتصالات و یا شیرآلات علاوه بر اتلاف هزینه‌های گزاف، ممکن است عواقب و خسارت‌های جانی و آلودگی‌های زیست محیطی در پی داشته باشد.

تنظیم پارامترهای ورودی فرآیندهای جوشکاری نقش مهمی در کیفیت اتصال ایفا می‌کند. ولتاژ، سرعت جوشکاری، نرخ تغذیه الکترود و ... از مهمترین پارامترهای تنظیمی در جوشکاری قوسی هستند. هر کدام از این فاکتورها به نوبه خود تأثیر به‌سزایی در کیفیت اتصال ایجاد شده ایفا می‌نمایند. به عنوان مثال با افزایش ولتاژ و نرخ تغذیه، نفوذ جوش بیشتر می‌شود. اما با وجود افزایش نفوذ، نمی‌توان با قاطعیت ادعا نمود که کیفیت واستحکام آن نیز افزایش می‌یابد. چرا که با افزایش عمق نفوذ و افزایش انرژی و نرخ تغذیه مذاب در حوضچه جوش، آسیب حرارتی و اعوجاج در فلز پایه نیز بیشتر خواهد شد. خصوصیاتی چون هندسه گرده جوش، خواص مکانیکی و متالوژیکی اتصال از جمله عوامل مهم در تعیین کیفیت جوش است [2].

گاهی در جوشکاری ورق‌های ضخیم، خصوصاً زمانی که دستیابی به تمام جهات لبه اتصال جهت جوشکاری وجود ندارد، جوشکاری حتی با بیشترین ظرفیت تجهیزات و در تعداد پاس‌های مختلف نمی‌تواند نفوذ کامل جوش و خواص مکانیکی مناسبی را تضمین کند. تغییر دستگاه‌ها و تدابیری همچون پیش‌گرم کردن قطعات

---

[1] Shielded Metal Arc Welding

[2] Slag