

بررسی پارامترهای موثر در فرآیند تولید افزایشی قوس الکتریکی با گاز محافظ بر دقت ابعادی دیواره با فلز پرکننده ER70S.

کیانا ارتش یار^۱؛ محمد عبادی تولایی^۲؛ امیررضا پلداغی^۳

^۱کیانا ارتش یار؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ kianaar79@gmail.com

^۲محمد عبادی تولایی؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ mohammadebadi.t@gmail.com

^۳امیررضا پلداغی؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ Poldaghia@gmail.com

* نویسنده مسئول: صادق الهامی جوشقان؛ Sadeghelhami@um.ac.ir

* نویسنده مسئول: فرهاد کلاهان؛ kolahan@um.ac.ir

چکیده

روش ساخت افزایشی قوس سیمی یکی از نوآورانه ترین روش ها در تولید قطعات فلزی به شمار می آید که به صورت لایه به لایه عمل می کند. در این فرآیند، سیم جوش به عنوان ماده اولیه به کار می رود و با استفاده از قوس الکتریکی، ذوب شده و به صورت لایه لایه بر روی سطح کار قرار می گیرد. این تکنیک به ویژه برای تولید قطعات بزرگ و پیچیده با سرعت بالا و هزینه های پایین بسیار مناسب است. در این پژوهش، فلز پایه پر کاربرد ST37 انتخاب شده و همچنین از سیم جوش ER70S به عنوان فلز پرکننده استفاده شده است. پارامترهای ورودی روش WAAM نظیر زاویه مشعل، دبی جریان گاز، شرایط محیطی، قطر الکترود، و فاصله الکترود تا قطعه کار ثابت در نظر گرفته شده اند. سرعت جوشکاری و ولتاژ جوشکاری به عنوان ورودی های متغیر در ماتریس آزمایش ها به روش طرح فول فاکتوریل انتخاب شده و داده های تجربی از طریق انجام آزمایش ها جمع آوری می شوند. سپس تأثیر این پارامترها بر دقت ابعادی و شکل لایه های جوش بررسی می شود. همچنین آزمایش شاهد انجام و نتیجه آن گزارش می شود. چالش اصلی در این پژوهش یافتن پارامترهای بهینه و دستیابی به بهترین شکل برای لایه های نشانده شده است. در نهایت با انجام آزمایش ها می توان به این نتیجه رسید که در ولتاژهای پایین و سرعت جوشکاری بالا، به دلیل ضخامت کمتر دیواره، امکان زوایه دار شدن دیواره یا ریختن لایه ها کمتر بوده و دقت ابعادی بیشتری نسبت به لایه نشینی با سرعت میز پایین و ولتاژ بالا خواهد داشت.

کلمات کلیدی: تولید افزایشی مبتنی قوس و سیم، دقت ابعادی در تولید افزایشی، فلز پرکننده ER70S، پردازش تصویر.

۱- مقدمه

ساخت افزایشی یا پرینت سه بعدی، فرآیندی است که در آن قطعات فیزیکی با قرار دادن لایه به لایه مواد بر روی یکدیگر ساخته می شوند. فرآیندهای ساخت افزایشی را می توان در دسته بندی های همجوشی بستر پودری، رسوب مستقیم انرژی، اکستروژن ماده، لایه لایه سازی ورق، پاشش مواد و پاشش چسب، طبقه بندی کرد. به طور کلی، تکنیک های ساخت افزایشی متمایز زیادی وجود دارد. این تکنیک ها از مواد متمایز مانند سرامیک، پلاستیک، فلز، مایع، پودر یا حتی سلول های زنده استفاده می کنند. چاپ سه بعدی به روش رسوب مستقیم انرژی (DED) یک فرآیند تولید افزایشی است که برای تعمیرات، افزودن ویژگی ها و تولید قطعات نهایی استفاده می شود. DED شامل دو دسته اصلی ذوب لیزر و الکترود و ذوب قوس الکتریکی است. این روش ها از انرژی برای ذوب و رسوب مواد فلزی به طور همزمان استفاده می کنند. تفاوت ها در شکل مواد (سیم یا پودر) و نوع منبع انرژی (لیزر، پرتو الکترونی، قوس الکتریکی، سرعت مافوق صوت یا گرما) است. یکی از زیرمجموعه های مهم این روش، ساخت افزایشی به کمک قوس الکتریکی است. روش ساخت افزایشی مبتنی بر قوس و سیم یکی از روش های ساخت افزایشی است که از قوس الکتریکی به عنوان منبع حرارت و سیم فلزی به عنوان ماده اولیه استفاده می کند. همچنین از گاز بی اثر برای جلوگیری از اکسیداسیون و بهبود خواص فلز استفاده می شود. این روش به دلیل توانایی تولید قطعات بزرگ و پیچیده با هزینه کمتر و سرعت بالاتر نسبت به روش های سنتی، مورد توجه قرار گرفته است.

پاسکال و همکاران تأثیر فرآیندهای مختلف جوشکاری در تولید افزایشی با قوس الکتریکی (WAAM) را بررسی کرده و دریافتند که این فرآیندها می توانند برای تولید قطعات بزرگ با خواص مکانیکی بالا به عنوان جایگزین روش های سنتی مورد استفاده قرار گیرند. دینوینتر و همکاران [۲] تأثیر پارامترهای فرآیندی در تولید افزایشی با قوس الکتریکی TIG را برای نمونه های ساخته شده با سیم جوش آلیاژ Hastelloy X و صفحه استیل ضد زنگ ۳۰۴ به عنوان زیرلایه بررسی کردند. آن ها از روش تاگوچی و تحلیل واریانس ANOVA برای تعیین تأثیر سرعت حرکت، نرخ تغذیه سیم، جریان و نرخ جریان آرگون بر پاسخ هایی مانند شکل و اندازه دیواره، زبری سطح، عمق نفوذ و ریزساختار استفاده کردند. نتایج مشخص کرد، افزایش سرعت حرکت یا کاهش جریان، عمق نفوذ را کاهش داده و زبری سطح را

افزایش می دهد. لامبباسه و همکاران [۳] تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری MIG را بر هندسه جوش در تولید افزایشی بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل هندسی دایره ای نسبت به مدل پارابولیک برای پیش بینی مقطع جوش دقیق تر است. همچنین، یک مدل نیمه تجربی توسعه داده شد که توانست با دقت بالایی مقطع جوش را پیش بینی کند. این مدل می تواند به بهبود انتخاب پارامترهای فرآیندی در تولید افزایشی کمک کرده و دقت در تولید را افزایش دهد. لاقی و همکاران [۴] به بررسی پارامترهای رسوب گذاری در فرآیند CMT پرداخته و نشان داد که جریان ۶۲ آمپر و سرعت حرکت ۸ میلی متر بر ثانیه در هر لایه و ۲۴ میلی متر بر ثانیه در انتقال بین لایه ها، بهترین هندسه جوش را ایجاد می کند. همچنین، رسوب گذاری با مسیر دوطرفه نسبت به مسیر یک طرفه، هندسه منظم تری تولید کرد. کارموهیلان [۵] به بررسی کنترل هندسه دیواره جوش در فرآیند تولید افزایشی با قوس و سیم از طریق انتخاب مناسب پارامترهای جوشکاری پرداخت و با استفاده از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، پارامترهای جوش برای دستیابی به هندسه دیواره مورد نظر پیش بینی کرد. نتایج پژوهش نشان داد که مدل ANN به خوبی قادر است پارامترهای جوش را بر اساس هندسه مشخص شده، به طور دقیق پیش بینی کند. کیم و همکاران [۶] به توسعه مدل های ریاضی برای پیش بینی هندسه دیواره جوش در جوشکاری GMA رباتیک پرداختند و از طراحی فاکتوریل به عنوان راهنمایی برای بهینه سازی پارامترهای فرآیند استفاده کردند. سه فاکتور شامل جریان قوس، ولتاژ جوشکاری و سرعت جوشکاری در مدل فاکتوریل گنجانده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای فرآیندی مانند جریان قوس، ولتاژ و سرعت جوشکاری، تأثیر بیشتری بر عرض و ارتفاع دیواره دارند و مدل های ریاضی می توانند به بهینه سازی کیفیت جوش کمک کنند. ییلدیز و همکاران [۷] تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند WAAM، مانند سرعت تغذیه سیم و نسبت آن به سرعت حرکت، بر هندسه جوش، ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای با استحکام بالا بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت سرعت تغذیه سیم به سرعت حرکت، عامل اصلی کنترل ورودی حرارت بود. افزایش حرارت باعث افزایش ابعاد جوش و کاهش سختی شد. کومار و همکاران [۸] از ساخت افزایشی GMAW برای رسوب دهی سوپرآلیاژ IN718 استفاده کردند. نتایج نشان دادند که با افزایش ورودی حرارت، ابعاد دیواره و پارامترهایی مانند عرض افزایش یافتند. در تحقیقی دیگر کومار و همکاران [۹] تأثیر پارامترهای جوشکاری بر عرض لایه رسوب داده شده در فرآیند WAAM بررسی کردند و همچنین روش تاگوچی برای بهینه سازی پارامترها شامل سرعت جوشکاری، سرعت تغذیه سیم و ولتاژ به کار بردند تا عیوبی مانند ترک و تخلخل در دیواره جوش کاهش یابد. نتایج نشان داد که کمترین عرض دیواره، با سرعت جوشکاری ۰.۵۵ متر در دقیقه، سرعت تغذیه سیم ۴ متر در دقیقه و ولتاژ ۱۸ ولت به دست آمد و بیشترین عرض دیواره، با سرعت جوشکاری ۰.۲۵ متر در دقیقه، سرعت تغذیه سیم ۸ متر در دقیقه و ولتاژ ۲۸ ولت، به دست آمد.

در این تحقیق، به دلیل کمبود مقالات در زمینه بررسی دقت ابعادی دیواره، عرض و ارتفاع جوش، دو پارامتر مهم در جوشکاری مگ مورد بررسی قرار گرفته اند: سرعت جوشکاری و ولتاژ جوشکاری. اگر این دو پارامتر به درستی تنظیم نشوند، ممکن است عیوبی مانند سوراخ شدن فلز پایه، کج شدن و ریختن دیواره و افزایش عرض جوش رخ دهد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر تغییرات ولتاژ و سرعت جوشکاری برای درک بهتر فرآیند WAAM و بهبود کیفیت و کارایی قطعات تولید شده است. در نهایت، بهترین پارامترها انتخاب شده و با استفاده از ماتریس فول فاکتوریل، جدول پارامترها تشکیل می شود. نتایج آزمایش ها با نتایج مقالات مقایسه شده اند.

۲- مواد و روش تحقیق

ماده اولیه مورد استفاده در این تحقیق، ورق فولاد ST37 به روش نورد گرم به ضخامت ۶ میلی متر می باشد. برای انجام آزمایش ها، ابتدا ورق را به ابعاد ۴۰*۸۰ میلی متر برش زده و سپس با استفاده از سنگ زنی سطح رویه و زیرین آن عاری از چربی و آلودگی شده. جهت جلوگیری از ایجاد اعوجاج به دلیل حرارت در هنگام جوشکاری، چهار طرف قطعه پایه با استفاده از خال جوش تیگ به ورق بزرگتر جوش داده شد. سپس آزمایش ها با استفاده از میز مخصوص با سرعت، ارتفاع و زاویه تورچ قابل تنظیم انجام شد. جوشکاری با استفاده از فرآیند مگ انجام شده و از فلز پر کننده ER70S ۱.۲ میلی متر استفاده شده است. شکل ۱ نشان دهنده بستر آزمایش های این پژوهش است.



شکل ۱- بستر آزمایش های مورد استفاده برای انجام لایه نشانی

در این پژوهش، از میز جوشکاری با دو درجه آزادی و قابلیت حرکت خطی استفاده شده است. فرآیند لایه نشانی به صورت رفت و برگشتی با دستگاه جوش PARS MIG-SP501W و قطبیت معکوس انجام شده است. تغذیه حوضچه جوش از بالا و با گاز محافظ دی اکسید کربن با دبی ۱۳ لیتر بر دقیقه صورت گرفته است. عملیات جوشکاری در ۱۵ پاس رفت و برگشتی انجام شده و ارتفاع دیواره حاصل به ۲۰ میلی متر رسیده است. دمای بین پاسی ۱۵۰ درجه سانتی گراد فرض شده است. پارامترهای ثابت در جدول ۱ نمایش داده شده اند.

جدول ۱- پارامترهای ثابت در روند انجام آزمایش ها

پارامتر	دبی گاز lit/min	قطر الکترو Mm	ترکیب گاز محافظ	قطر نازل گاز mm	زاویه نوک الکترو (درجه)
سطح	۱۳	۱.۲	CO ₂	۶.۴	۸۵

در ابتدا، آزمایش های اولیه برای تعیین شرایط بهینه جوشکاری انجام شد. در این آزمایش ها، پارامترهایی مانند سرعت میز، زاویه تورچ و نرخ تزریق سیم جوش تغییر داده شدند تا بهترین وضعیت از نظر پاشش قوس و میزان نفوذ تعیین شود. پس از بررسی نتایج، بهترین خط جوش انتخاب شد و پارامترهای آن به عنوان مبنای اصلی در نظر گرفته شد. زاویه نوک الکترو ۸۵ درجه انتخاب شد، زیرا در زاویه ۹۰ درجه کشیدگی لایه ها به سمت راست مشاهده شد، اما در ۸۵ درجه کیفیت خط جوش مطلوب بود. در شکل ۲، نمونه هایی از آزمایش های اولیه برای تعیین بهترین خط جوش، نشان داده شده است.



شکل ۲- آزمایش های اولیه

در این تحقیق، ماتریس آزمایش ها با استفاده از روش فول فکتوریل طراحی شد که برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بسیار مفید است. این ماتریس شامل دو پارامتر با سه سطح مختلف بود تا تأثیرات آن ها بر فرآیند لایه نشانی بررسی شود. در مجموع، ۹ ترکیب مختلف از پارامترها آزمایش شدند و نتایج به منظور شناسایی اثرات اصلی و متقابل تحلیل شدند. همچنین، برای تأیید نتایج، آزمایش ها با پارامترهای ۸ ولت و سرعت ۰.۳ سانتی متر بر ثانیه یکبار بار تکرار شد. در جدول ۲ ماتریس آزمایش ها نشان داده شده است.

جدول ۲- ماتریس آزمایش ها به روش فول فاکتوریل

شماره	متغیر پاسخ					پارامترهای ورودی تنظیمی
	بیشترین عرض جوش (mm)	کمترین عرض جوش (mm)	ارتفاع جوش (mm)	درصد دقت ابعادی	سرعت جوشکاری ($\frac{cm}{s}$)	ولتاژ (V)
۱					۰.۴	۷.۵
۲					۰.۴	۸
۳					۰.۳	۷.۵
۴					۰.۳	۸
۵					۰.۲	۸.۵
۶					۰.۴	۸.۵
۷					۰.۲	۸

۷.۵	۰.۲					۸
۸.۵	۰.۳					۹
۸	۰.۳					۱۰

پس از اتمام فرآیند جوشکاری و لایه‌نشانی، قطعه مورد نظر برش داده شد و بخشی از لایه‌ها و فلز پایه استخراج گردید. شکل ۳، نمونه‌ای از دیوارهای ایجاد شده در این تحقیق است. پس از برش، نمونه‌ها مانت شده و با استفاده از فرآیند سنباده‌کاری و پولیش‌کاری، سطح آن‌ها از هرگونه آلودگی پاکسازی شد. سنباده‌کاری طبق استاندارد ASTM انجام شده و به ترتیب از سنباده‌های ۱۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ استفاده شده است. در بخش پولیش‌کاری نیز از ماده ساینده آلومینیوم اکسید با قطر ۰.۵ میکرون استفاده شده است. در ادامه، نمونه‌ها با استفاده از اسید نایتال ۲ درصد شست‌وشو داده شدند. برای عکس‌برداری ماکرو از قطعات، از میکروسکوپ OLYMPUS-530 استفاده شد و تصاویر ماکرو به دست آمدند. لازم به ذکر است بررسی متالوگرافی سطح نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM vol 9 انجام گردید. شکل ۴ نشان دهنده نمونه قطعه مانت شده است.

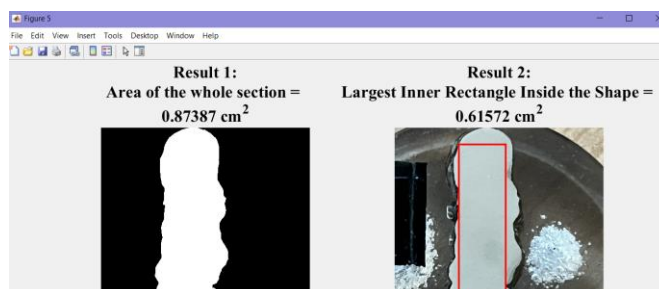


شکل ۳- نمونه دیواره ایجاد شده



شکل ۴- نمونه قطعه مانت شده

در نهایت، با بهره‌گیری از پردازش تصویر به کمک نرم‌افزار متلب، دقت ابعادی محاسبه شد. این محاسبه با تعیین بزرگترین مساحت مستطیل ایجاد شده در مقطع جوش، با در نظر گرفتن بیشترین ارتفاع، انجام شد. دقت ابعادی از تقسیم مساحت مستطیل به مساحت کل به دست آمد و به صورت درصد بیان گردید. خروجی نرم‌افزار در شکل ۵ واضح است. این کد MATLAB برای پردازش تصویر و تحلیل نواحی خاص، از جمله شناسایی نواحی رنگی و تاریک طراحی شده است. ابتدا تصویر اصلی خوانده و ناحیه مورد علاقه (ROI) انتخاب می‌شود. سپس بر اساس میانگین و انحراف معیار کانال‌های RGB، محدوده رنگی تعریف می‌شود تا پیکسل‌ها بر اساس این محدوده به سفید یا سیاه تبدیل شوند. تصویر به مقیاس خاکستری تبدیل شده و با فیلتر گوسی نویز آن کاهش می‌یابد. پس از آن، لبه‌ها با روش سوبل شناسایی شده و عملیات مورفولوژیکی برای بستن شکاف‌ها به کار می‌رود. برای شناسایی بزرگترین ناحیه متصل در تصویر باینری، از تابع bwlable برای برچسب‌گذاری اجزای متصل استفاده شده و تابع regionprops ویژگی‌هایی مانند مساحت و جعبه محدودکننده (BoundingBox)، نواحی را محاسبه می‌کند. این تابع اطلاعاتی از جمله مساحت، محیط، و مرکز اجزای متصل را استخراج می‌کند که سپس برای یافتن بزرگترین ناحیه و ترسیم یک مستطیل دور آن به کار می‌رود. هدف اصلی کد، شناسایی و اندازه‌گیری دقیق نواحی خاص در تصویر است.



شکل ۵- نتایج بخش پردازش تصویر

۳- نتایج و بحث

با توجه به جدول ۴، تاثیر پارامترهای ورودی بر خروجی ها بررسی شد. همچنین تحلیل های آماری بر روی پارامترهای خروجی با استفاده از نرم افزار Design Expert انجام شد و نتایج به شرح زیر بیان خواهد شد.

جدول ۴- نتایج به دست آمده از آزمایش ها

شماره	متغیر پاسخ					پارامترهای ورودی تنظیمی
	بیشترین عرض جوش (mm)	کمترین عرض جوش (mm)	ارتفاع جوش (mm)	درصد دقت ابعادی	سرعت جوشکاری ($\frac{cm}{s}$)	ولتاژ (V)
۱	۶.۴	۵.۴	۲۳.۳	۰.۵۶۳۵	۰.۴	۷.۵
۲	۷.۱	۵.۶	۲۲.۲	۰.۶۰۹۳	۰.۴	۸
۳	۷.۷	۶.۲	۲۱.۶	۰.۵۶۷۳	۰.۳	۷.۵
۴	۸.۱	۶.۶	۲۱.۹	۰.۶۱۸۲	۰.۳	۸
۵	۹	۷.۳	۲۷.۴	۰.۷۴۱۵	۰.۲	۸.۵
۶	۶.۷	۵.۴	۱۹.۹	۰.۷۰۴۶	۰.۴	۸.۵
۷	۸.۶	۷.۲	۲۶.۴	۰.۷۰۲۶	۰.۲	۸
۸	۸.۸	۷.۵	۲۳.۳	۰.۶۳۴۹	۰.۲	۷.۵
۹	۷.۹	۶	۲۱.۵	۰.۵۶۷۳	۰.۳	۸.۵
۱۰	۷.۹	۶.۶	۲۲.۴	۰.۶۲۱۸	۰.۳	۸

۳-۱ تاثیر پارامترهای ورودی بر دقت ابعادی

از تحلیل های آماری مشخص می شود که ولتاژ جوشکاری با تاثیر ۷۲.۸۲٪ بیشترین تاثیر را بر دقت ابعادی دیواره ساخته شده دارد. این به این معناست که ولتاژ جوشکاری نسبت به سرعت جوشکاری نقش اصلی را در تعیین دقت نهایی ایفا می کند. سرعت جوشکاری نیز با تاثیر ۱۷.۴۳٪ تاثیر معناداری دارد، اما به میزان کمتری نسبت به ولتاژ جوشکاری. علت اصلی اینکه ولتاژ تاثیر بیشتری دارد، ممکن است به دلیل تاثیر مستقیم آن بر انرژی و شدت قوس الکتریکی باشد که به طور مستقیم در فرایند ذوب و شکل گیری مواد نقش دارد. کومار و همکاران [۱۰] نیز نتیجه گرفتند سرعت جوشکاری، همراه با سایر پارامترها مانند ولتاژ، بر هندسه جوش و ورودی حرارت تاثیر می گذارد و در نتیجه به طور قابل توجهی بر کیفیت جوش تاثیر می گذارند. افزایش سرعت حرکت منجر به کاهش ورودی حرارت می شود و در نتیجه بر عرض جوش و دقت ابعادی تاثیر می گذارد. همچنین پارم و همکاران [۱۱] از نتایج آزمایش های خود دریافتند که سرعت بالاتر جوشکاری با ولتاژ ثابت، ورودی حرارت را کاهش می دهد که منجر به دیواره های نازک تر و دقت ابعادی بهبود یافته می شود.

۳-۲ تاثیر پارامترهای ورودی بر ارتفاع کل لایه ها

تحلیل های آماری نشان می دهد که سرعت جوشکاری تاثیر عمده ای بر ارتفاع لایه های جوش دارد و ۶۳.۳۲٪ از تغییرات را توضیح می دهد. اثر مرتبه دوم سرعت جوشکاری نیز قابل توجه است و ۲۴.۴۱٪ از تغییرات را شامل می شود، که نشان دهنده اهمیت تاثیر غیر خطی آن است. همچنین، برهم کنش بین ولتاژ و سرعت جوشکاری تاثیر معناداری (۶.۵۸٪) دارد. در مقابل، ولتاژ جوشکاری فقط ۲.۳٪ تاثیر دارد و از نظر آماری معنادار نیست. به طور کلی، مدل ارائه شده مناسب و معنادار است و برای بهبود فرآیند، تمرکز باید بر بهینه سازی سرعت جوشکاری باشد. می توان نتیجه گرفت افزایش ولتاژ معمولاً منجر به افزایش طول قوس می شود که می تواند باعث ایجاد دیواره هایی عریض تر و صاف تر شود. این امر ممکن است به کاهش ارتفاع کلی لایه ها منجر گردد، زیرا مواد به طور گسترده تری پخش می شوند. از سوی دیگر با افزایش سرعت جوشکاری، ورودی حرارت به ازای هر واحد طول کاهش می یابد که در نهایت منجر به ایجاد دیواره هایی نازک تر و بلندتر می شود.

گائو و همکاران [۱۲] دریافتند افزایش ولتاژ با افزایش طول قوس همراه است که منجر به پخش بیشتر مواد مذاب در یک ناحیه وسیع تر

می شود. این پخش وسیع تر معمولاً ارتفاع کلی لایه ها را کاهش می دهد، زیرا جوش پهن تر شده و به صورت افقی گسترش می یابد.

۴-۲ تاثیر پارامترهای ورودی بر بیشترین عرض دیواره

تحلیل ANOVA نشان می دهد که سرعت جوشکاری با 93.03% تاثیر، بیشترین نقش را در تغییرات عرض دیواره جوش دارد و این تاثیر از لحاظ آماری معنادار است. در مقابل، ولتاژ جوشکاری با تاثیر 1.19% معنادار نیست. مدل به طور کلی معتبر بوده و برای بهبود نتایج، تنظیم دقیق سرعت جوشکاری توصیه می شود. ولتاژ بالا با افزایش طول قوس، باعث پخش بیشتر مواد مذاب و ایجاد دیواره وسیع تر می شود و سرعت پایین جوشکاری نیز با افزایش حرارت، دیواره جوش وسیع تر می کند. زیرا مواد فرصت کافی برای پخش شدن دارند. زین و همکاران [۱۳] نشان دادند که افزایش ولتاژ باعث افزایش طول قوس و پخش بیشتر فلز مذاب می شود، که در نتیجه عرض جوش را افزایش می دهد. همچنین، شوب و همکاران [۱۴] نتیجه گرفتند که سرعت جوشکاری کمتر با افزایش ورودی حرارت، زمان بیشتری برای پخش مواد مذاب فراهم کرده و منجر به تشکیل جوش پهن تر می شود.

۴-۵ تاثیر پارامترهای ورودی بر کمترین عرض دیواره

تحلیل های آماری نشان می دهد که سرعت جوشکاری با تاثیر 94.23% مهم ترین عامل در تغییرات کوچکترین عرض دیواره جوش است. در مقابل، ولتاژ جوشکاری با تاثیر تنها 0.48% تاثیر معناداری بر این ویژگی ندارد. مدل آماری کلی معتبر بوده و مقدار بالای F-value برای سرعت جوشکاری تأیید می کند که این پارامتر اصلی ترین عامل تأثیرگذار است. برای بهبود یا کنترل عرض دیواره جوش، تمرکز باید بر تنظیم دقیق سرعت جوشکاری باشد. ولتاژ پایین با کوتاه کردن طول قوس و سرعت بالای جوشکاری با کاهش ورودی حرارت، منجر به باریک تر شدن دیواره جوش می شوند. ، زیرا مواد فرصت کافی برای پخش شدن ندارند. جوزف و همکاران [۱۵] در نتایج خود نشان دادند، ولتاژ پایین طول قوس را کاهش می دهد و باعث ایجاد جوش باریک تر می شود، زیرا قوس متمرکزتر است و حرارت کمتری را در ناحیه کوچکتری منتقل می کند. همچنین احسان و همکاران [۱۶] بیان کردند، سرعت بالای جوشکاری ورودی حرارت به ازای هر واحد طول را کاهش می دهد و زمان کافی برای پخش مواد مذاب فراهم نمی کند، که منجر به ایجاد دیواره جوش باریک تر می شود.

۴- نتیجه و جمع بندی

در این مطالعه، دقت ابعادی، عرض و ارتفاع دیواره حاصل از فرآیند جوشکاری ER70S به روش قوس سیمی بررسی شد. تأثیرات سرعت و ولتاژ جوشکاری بر این پارامترها به طور جامع تحلیل گردید:

۴-۱ تاثیر بر دقت ابعادی

ولتاژ و سرعت جوشکاری به دلیل تاثیر بر میزان حرارت ورودی، نقش مهمی در دقت ابعادی دارند. با افزایش سرعت میز، حرارت ورودی کاهش یافته و دیواره ساخته شده باریک تر و دقیق تر می شود، در حالی که کاهش سرعت، حرارت ورودی را افزایش داده و دقت ابعادی کاهش می یابد. ولتاژ جوشکاری نیز به طور مشابه عمل می کند، به طوری که افزایش ولتاژ دقت ابعادی را کاهش و کاهش ولتاژ آن را افزایش می دهد. در مجموع، ولتاژ جوشکاری تأثیر بیشتری نسبت به سرعت بر دقت ابعادی دارد.

۴-۲ تاثیر بر عرض جوش

ولتاژ بالاتر منجر به افزایش طول قوس و ایجاد دیواره جوش وسیع تر می شود، در حالی که ولتاژ پایین تر باعث تولید دیواره های باریک تر می گردد. همچنین، سرعت بالاتر موجب کاهش عرض جوش و سرعت پایین تر باعث افزایش آن می شود. به طور کلی، تأثیر سرعت جوشکاری بر عرض جوش بیشتر از ولتاژ جوشکاری است.

۴-۳ تاثیر بر ارتفاع جوش

ولتاژ بالاتر موجب کاهش ارتفاع لایه به دلیل پخش بیشتر مواد می شود، در حالی که ولتاژ پایین تر منجر به تولید دیواره های بلندتر و باریک تر می شود. همچنین، سرعت بالاتر منجر به کاهش ارتفاع و سرعت پایین تر به افزایش آن منجر می گردد. تأثیر سرعت جوشکاری بر ارتفاع لایه ها نیز بیشتر از ولتاژ است. کنترل دقیق ولتاژ و سرعت برای حفظ یکنواختی ارتفاع لایه ها و یکپارچگی ساختاری قطعات بسیار حائز اهمیت است.

در نهایت، نتایج نشان می دهند که بهینه سازی ولتاژ و سرعت جوشکاری به طور مستقیم بر دقت، عرض و ارتفاع دیواره ها در فرآیند WAAM تأثیر می گذارد و کنترل مناسب این پارامترها برای تولید قطعات با کیفیت ضروری است.

تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از دکتر کلاهان و مهندس فارسی باف که با تلاش های بی وقفه خود در انجام آزمایشات و فراهم سازی محیط مناسب نقش بسزایی داشتند. همچنین قدردانی ویژه از تیم و دانشگاه فردوسی بابت حمایت های بی دریغ در تمامی مراحل پروژه به عمل می آید.

مراجع

- [1] Paskual, A., P. Álvarez, and A. Suárez, "Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing". *Procedia Cirp*, 2018. **68**: p. 358-362.
- [2] Dinovitzer, M., et al., "Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure". *Additive Manufacturing*, 2019. **26**: p. 138-146.
- [3] Lambiase, F., S.I. Scipioni, and A. Paoletti, "Accurate prediction of the bead geometry in wire arc additive manufacturing process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022. **119**(11): p. 7629-7639.
- [4] Laghi, V., et al., "Assessment of design mechanical parameters and partial safety factors for Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel". *Engineering Structures*, 2020. **225**: p. 111314.
- [5] Karmuhilan, M., "Intelligent process model for bead geometry prediction in WAAM." *Materials Today: Proceedings*, 2018. **5**(11): p. 24005-24013.
- [6] Kim, I.-S., et al., "Sensitivity analysis for process parameters in GMA welding processes using a factorial design method". *International Journal of machine tools and manufacture*, 2003. **43**(8): p. 763-769.
- [7] Yildiz, A.S., et al., "Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. **108**: p. 3391-3404.
- [8] Kumar, P., R.K.R. Singh, and S.K. Sharma, "Effect of welding parameters on bead characteristics and mechanical properties of wire and arc additive manufactured inconel 718." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2023. **237**(7): p. 1668-1691.
- [9] Kumar, C.B. and V. Anandakrishnan, "Experimental investigations on the effect of wire arc additive manufacturing process parameters on the layer geometry of Inconel 825". *Materials Today: Proceedings*, 2020. **21**: p. 622-627.
- [10] Kumar, S., C. Pandey, and A. Goyal, "Microstructure and mechanical behavior of P91 steel dissimilar welded joints made with IN718 filler. " *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021. **190**: p. 104290.
- [11] Pramod, R., et al., "Formability studies on plasma arc welded duplex stainless steel 2205 sheet. " *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2020. **51**(2): p. 163-173.
- [12] Guo, B., et al., "Weld deviation detection based on wide dynamic range vision sensor in MAG welding process". *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2016. **87**: p. 3397-3410.
- [13] Zin, M. and W. Sutapun. "Study of parameter affecting morphology of electrospun poly (lactic acid)(PLA) fibers loaded with Ag/CaCO3 filler. " in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022. IOP Publishing.
- [14] Shoeb, M., M. Parvez, and P. Kumari, "Effect of MIG welding input process parameters on weld bead geometry on HSLA steel. " *Int. J. Eng. Sci. Technol*, 2013. **5**(1): p. 200-212.
- [15] Joseph, A., et al., "Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape. " *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005. **10**(3): p. 311-318.
- [16] Ahsan, M.R., et al., Erratum to: "Mechanisms of weld pool flow and slag formation location in cold metal transfer (CMT) gas metal arc welding (GMAW). " *Weld. World*, 2017. **61**(6): p. 1287.