



# مدل سازی و بهینه سازی دوهدفه در فرآیند لایه نشانی دومرحله ای تحت قید حداکثر حرارت مجاز

ایرج لیرابی<sup>1</sup>، حسین امیرآبادی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، hamirabadi@birjand.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 اردیبهشت 1394

پذیرش: 13 تیر 1394

ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:

لایه نشانی دومرحله ای

مدل سازی مهره جوش

ماشینکاری

بهینه سازی فرآیند

قید حرارتی

## چکیده

روش لایه نشانی دومرحله ای زیرشاخه ای از شیوه های ساخت سریع می باشد که در آن لایه ای از فلز مذاب بر روی زیرلایه نشانداده شده و با انباشته شدن لایه ها بر روی هم هندسه ی قطعه کامل می شود. نرخ رسوب بالا، ارزان بودن و دامنه ی کاربرد وسیع از خصوصیات این روش می باشد. جوشکاری و فرزکاری کف تراشی دو گام پیاده سازی روش لایه نشانی دومرحله ای می باشند. در مرحله ی جوشکاری، فلز توسط خطوط جوش بر روی سطح نشانداده می شود و در مرحله ی فرزکاری، لایه ی ساخته شده برای دستیابی به سطحی تخت و یکپارچه رویه برداری می شود. در این مقاله بهینه سازی فرآیند لایه نشانی دومرحله ای برای دستیابی به دو هدف متناقض و ناهم ساز مورد توجه قرار گرفته است. این دو هدف متناقض عبارت از کاهش حجم ماشینکاری و افزایش مساحت مهره ی جوش می باشند. بدین منظور، نخست مدل سازی هندسه مهره ی جوش با توجه به اثر هم پوشانی خطوط جوش متوالی صورت پذیرفته است. سپس شرایط دستیابی به لایه ی شبه تخت در مرحله ی جوشکاری بررسی شده و مدل مهره جوش برای کاهش حجم براده برداری تعمیم یافته است. سپس بهینه سازی مدل توسط الگوریتم ژنتیک با اعمال قیدهای فرآیندی و حرارتی صورت پذیرفته و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. در این مقاله با تعریف قید حرارتی، معیاری جدید برای یافتن پاسخ بهینه ی مدل دوهدفه ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد برای سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8 میلی متر، پارامترهای بهینه عبارت از سرعت تغذیه ی 8/6 m/min و سرعت پیشروی 0/6 m/min می باشند که بدون نقض قید حرارتی، نرخ رسوب 4224 mm<sup>3</sup>/min را ممکن می سازند.

## Multi-objective Modeling and Optimization of Hybrid Layered Manufacturing under Maximum Allowable Heat Constraint

Iraj Lirabi<sup>1</sup>, Hossein Amirabadi<sup>2\*</sup>

1- Department of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Department of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

\*P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, hamirabadi@birjand.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 08 May 2015  
Accepted 04 July 2015  
Available Online 15 August 2015

**Keywords:**  
Hybrid Layered Manufacturing  
Weld Bead Modeling  
Machining  
Optimization  
Heat Constraint

## ABSTRACT

Hybrid layered manufacturing is one of the key methods among rapid manufacturing techniques in which a layer of molten metal is deposited on the substrate and desired geometry is completed by stacking the layers. Low cost, high rates of deposition and great applicability are some of the characteristics of hybrid layered manufacturing. Welding and face milling are the two steps of the process. In welding phase, metal is built up by weld lines to cover a given surface and in milling phase weld beads are truncated to achieve a flat and integrated layer. The focus in this article is to optimize two contradictory objectives, namely reduction in machining volume and increase in deposition rate. Thus, the first task is to formulate the bead model considering the metal build-up effect. Then, the situation needed for achieving quasi-flat layers in welding phase is studied and the unified model is extracted. Moreover, GA is used to find optimum values for the proposed model based on heat and process constraints. Finally the model is verified and conclusions are drawn. This article presents a new criterion by defining the heat constraint for the multi-objective function. Results show that for the 0.8 mm wire ER70S6, optimum values are 8.6 m/min for wire speed and 0.6 m/min for torch speed that yield a deposition rate of 4224 mm<sup>3</sup>/min without violating heat constraint.

## 1- مقدمه

لایه نشانی دو مرحله ای<sup>1</sup> از جمله فرآیندهای ساخت سریع می باشد که قطعات

فلزی را با ترکیب فرآیندهای افزایشی و کاهششی ایجاد می نماید[1]. در این روش معمولاً از فرآیندهای جوش برای مرحله ی افزایشی استفاده می شود و طی آن هندسه ی تقریبی هر لایه با ساختار یک پارچه ای از فلز قابل دستیابی

1- Hybrid Layered Manufacturing

Please cite this article using:

I. Lirabi, H. Amirabadi, Multi-objective Modeling and Optimization of Hybrid Layered Manufacturing under Maximum Allowable Heat Constraint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 153-160, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 2 لایه ی نیمه ماشینکاری شده [4]



شکل 3 ساخت قالب به همراه سیستم خنک کاری [5]

## 2- مدل سازی هندسی جوش

پارامترهای فرآیند جوشکاری بر روی یکدیگر تاثیر متقابل دارند. به گونه ای که هر گاه یک پارامتر تغییر کند، دیگر پارامترها نیز دستخوش تغییر می شوند تا قوس الکتریکی پایدار بماند. در یک فرآیند جوشکاری کنترل شده، شکل مهره ی جوش تنها متأثر از قطر سیم پر کننده ( $d_o$ )، سرعت تغذیه ی سیم ( $v_w$ )، سرعت پیشروی جوشکاری ( $v_t$ ) و گام بین دو مهره ی جوش ( $P$ ) می باشد. برخی از مدل های جوش ارائه شده جنبه های مختلفی همچون رابطه ی بین پارامترهای فرآیند جوشکاری و هندسه ی مهره ی جوش را مد نظر قرار داده اند. این مدل ها سه پارامتر هندسی مهره ی جوش که عبارتند از عرض جوش ( $w$ )، ارتفاع جوش ( $h$ ) و عمق جوش (ناحیه ی نفوذ) را به عنوان خروجی های مدل در نظر می گیرند.

کلاهان و حیدری مدل سازی و بهینه سازی فرآیند جوشکاری با گاز محافظ و قوس الکتریکی را با استفاده از روش های آماری و الگوریتم شبیه سازی آنیلینگ مورد بررسی قرار دادند [6]. همچنین بسیاری از تیم های تحقیقاتی از مدل های شبکه ی عصبی مصنوعی به منظور پیش بینی پارامترهای هندسی مهره ی جوش [7-9] استفاده نموده اند. از سوی دیگر، اگر چه تمرکز در روش لایه نشانی دومرحله ای بر روی کاهش دورریز مواد در عملیات ماشینکاری می باشد، اما شکل مهره ی جوش نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. اکثر مدل های ارائه شده به مدل سازی مهره ی جوش تکی توجه نموده اند و رفتار تداخلی مواد در مهره های جوش متوالی را نادیده گرفته اند [4].

بسیاری از پژوهشگران استفاده از جوش قوس الکتریکی را برای ساخت قطعات بررسی نموده اند. تیم های تحقیقاتی دیکنز، پرینس، سانگ و کواچویچ [10-13] برخی از پیشگامان تحقیق در این زمینه می باشند. برخی از محققین هندسه ی مهره ی جوش را برای ساخت سریع بررسی نموده اند. اییتی و همکارانش [14] جوشکاری با قوس پلاسما را برای ساخت اشکال هندسی استفاده نموده اند. آنها در بررسی خود مهره جوش را به صورت منحنی دایروی دارای هم پوشانی در نظر گرفتند ولی توضیحی برای ماده انباشته در

است. روش قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی<sup>1</sup> از پرکاربردترین روشهای جوشکاری برای لایه نشانی و ساخت سریع می باشد. نرخ رسوب گزارش شده برای جوشکاری قوس الکتریکی در حدود 50 تا 130 گرم بر دقیقه می باشد که با مدیریت حرارتی درست این نرخ رسوب تا 800 گرم بر دقیقه نیز امکان پذیر است. این میزان در مقایسه با نرخ رسوب فرآیندهای جوشکاری لیزری و پرتوی الکترونی که به ترتیب حدود 2 تا 10 گرم در هر دقیقه می باشند، بسیار بیشتر است [2]. در شکل 1 مرحله ی افزایشی فرآیند لایه نشانی دومرحله ای نشان داده شده است.

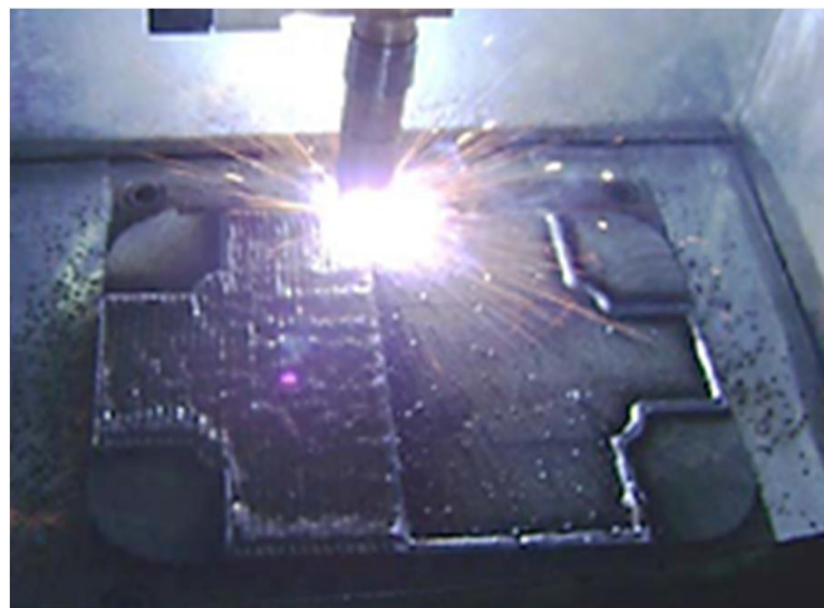
به منظور ساخت قطعات یکپارچه می توان از سیم های پر کننده ی همجنس ولی با قطرهای متفاوت استفاده نمود. سیم های با قطر بزرگتر را می توان برای پر کردن قسمت های داخلی هر لایه به کاربرد و سیم های دارای قطر کوچکتر را برای ایجاد مرز بیرونی هر لایه استفاده نمود. همچنین می توان برای ساخت مواد کامپوزیتی از سیم های دارای جنس های مختلف استفاده نمود [1].

در مرحله ی کاهشی، مقدار ماده ی اضافی در هر لایه توسط عملیات ماشینکاری زدوده می شود و به دنبال آن هندسه ی دقیق هر لایه بدست می آید. اگر چه دو مرحله ی کاهشی و افزایشی تفاوت های آشکاری با یکدیگر دارند ولی وجه مشترک آنها در سرعت بالای اجرای هر دو مرحله می باشد.

از سوی دیگر، امکان تشکیل لایه های اکسیدی بر روی سطح جوش وجود دارد که می تواند منجر به وقوع عیوب جوش در ساختار قطعه کار گردد. به منظور برطرف نمودن این مشکلات و نشان دادن لایه های بعدی بر روی لایه های پیشین از فرآیند فرزکاری کف تراشی برای حذف ناهمواری ها و قسمت های اکسیدی سطح جوش استفاده می شود.

اگر چه می توان پس از اعمال چند لایه بر روی هم نیز مرحله ی فرزکاری را انجام داد، اما با وجود کاهش بازدهی غالباً هر لایه پس از جوشکاری برای رفع عیوب احتمالی و دستیابی به قطعات یکپارچه مورد ماشینکاری قرار می گیرد. در شکل 2، لایه ای در مرحله ی ماشینکاری نشان داده شده است. در شکل 3 نیز یک قالب تزریق پلاستیک پس از تکمیل لایه ها و همچنین پس از ماشینکاری نشان داده شده است.

توانایی منحصربه فرد روش لایه نشانی دومرحله ای برای ساخت قطعات کامپوزیتی (ساخته شده از چند نوع فلز) که دارای هندسه ی پیچیده ای هستند به خوبی به اثبات رسیده است [4]. در ادامه به بررسی هندسه ی جوش در فرآیند لایه نشانی دومرحله ای پرداخته شده است.



شکل 1 مرحله ی رسوب جوش در فرآیند لایه نشانی دومرحله ای [3]

بنابراین داریم:

$$A = \frac{2hw}{3} = \frac{\pi v_w d_w^2}{4v_t} \quad (5)$$

با توجه به رابطه‌ی 5 عرض مهره‌ی جوش ( $w$ ) را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$w = \frac{3\pi v_w d_w^2}{8hv_t} \quad (6)$$

سوریاکومار و همکارانش [4] با استفاده از آزمایش‌های تجربی خود و انطباق نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایش و انجام رگرسیون مدل زیر را برای ارتفاع مهره جوش ارائه کرده‌اند.

$$h = C_1 v_w^2 + C_2 v_t^2 + C_3 v_w v_t + C_4 v_w + C_5 v_t + C_6 \quad (7)$$

همچنین برای فرآیند جوشکاری با استفاده از سیم جوش ER70S6 و با قطر سیم جوش 0/8 میلی‌متر ضرایب محاسبه‌ی  $h$  در معادله‌ی مربوطه به صورت زیر گزارش شده است [4]:

$$C_1 = 0.29945E - 02, \quad C_2 = 0.25610E + 01$$

$$C_3 = -0.13833E + 00, \quad C_4 = 0.18947E + 00$$

$$C_5 = -0.49778E + 01, \quad C_6 = 0.30299E + 01$$

چنان که در شکل 6 نشان داده شده است، مدل مهره‌ی جوش تکی همخوانی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد.

## 2-2- مدل رسوب جوش مهره‌های متوالی

در فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای، هر لایه توسط رسوب تعدادی از خطوط جوش دارای هم‌پوشانی تشکیل می‌شود که در ادامه از عملیات کف‌تراشی به منظور حذف برآمدگی‌های خطوط جوش استفاده می‌شود. ضخامت نهایی هر لایه ( $t$ ) در واقع ضخامت لایه پس از عملیات ماشینکاری می‌باشد. بازدهی فرآیند ( $\eta$ ) برابر با نسبت حجم برجامانده پس از ماشینکاری به حجم اولیه‌ی رسوب داده شده می‌باشد. مقدار  $\eta$  در واقع کارایی و بهره‌وری فرآیند را نشان می‌دهد. مقادیر  $t$  و  $\eta$  دو پارامتر کلیدی در فرآیند لایه‌نشانی دو مرحله‌ای می‌باشند.

کاروناکاران و همکارانش [5] برای تعریف اثر هم‌پوشانی خطوط جوش از مفهوم منحنی پر کننده استفاده نموده‌اند که در شکل 7 دو مهره‌ی جوش سهمی‌شکل متوالی به همراه منحنی پر کننده نشان داده شده است.

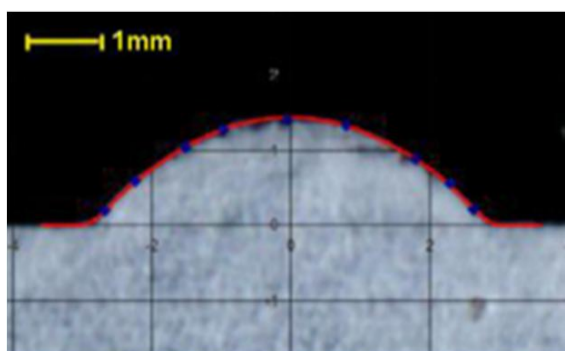
$\bar{P}_1$  و  $\bar{P}_2$  دو سهمی‌گون متوالی و  $\bar{C}$  منحنی پر کننده می‌باشند. روابط مربوط به هر کدام از این پارامترها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\bar{P}_1: y = h \left[ 1 - \left( \frac{2x}{w} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$\bar{P}_2: y = h \left[ 1 - \left( \frac{2(x-P)}{w} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\bar{C}: \left( x - \frac{p}{2} \right)^2 + (y - m)^2 = R^2 \quad (10)$$

در روابط بالا  $R$  شعاع منحنی پر کننده و  $m$  ارتفاع مرکز منحنی پر کننده می‌باشد. یافتن مقادیر  $R$  و  $m$  بر اساس پارامترهای هندسی جوش  $h$ ،  $w$  و  $P$  ضروری می‌باشد [4].



شکل 6 انطباق مهره جوش پیش‌بینی شده و تصویر مقطع جوش [4]

ناحیه‌ی هم‌پوشانی ارائه نکردند. چان و همکارانش [7] تخمین سهمی‌شکل را برای مهره‌ی جوش ذکر کرده‌اند اما به جزئیات آن نپرداختند. برخی منابع نیز مهره‌ی جوش سهمی‌شکل را پیشنهاد نموده‌اند [10]. در ادامه‌ی این قسمت به بررسی هندسی مهره‌ی جوش تکی و متوالی سهمی‌شکل بر طبق مدل سوریاکومار [4] و کاروناکاران [5] پرداخته شده است.

## 2-1- مدل سهمی‌شکل مهره‌ی جوش تکی

لایه‌های ایجاد شده دارای برآمدگی‌هایی می‌باشند که در شکل 4 شماتیک سطح مقطع این برآمدگی‌ها نشان داده شده است.

مدل‌سازی مهره‌ی جوش به منظور برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند جوشکاری ضروری می‌باشد. پژوهشگران متعددی همچون تامیلاراسی، نارایان و سریراج [15-18] مدل‌سازی و بهینه‌سازی هندسی مهره‌ی جوش تکی را مورد بررسی قرار داده‌اند.

پروفیل مهره‌ی جوش مربوط به این برآمدگی‌ها در این مقاله به صورت سهمی و مطابق شکل 5 در نظر گرفته شده است.

پارامترهای  $a$  و  $c$  نشان داده شده در شکل 5 را می‌توان به فرم زیر بر حسب  $w$  و  $h$  بازنویسی کرد [4]:

$$a = h, \quad c = -\frac{4h}{w^2} \quad (1)$$

بنابراین فرم هندسی سهمی عبارتست از:

$$y = h \left[ 1 - \left( \frac{2x}{w} \right)^2 \right] \quad (2)$$

از سوی دیگر، نوشتن رابطه‌ی سهمی بر حسب پارامترهای ورودی فرآیند جوشکاری نیز مفید می‌باشد. با استفاده از مساوی قرار دادن مساحت سطح مقطع مهره‌ی جوش ( $A$ ) بدست آمده از رابطه‌ی هندسی با رابطه‌ی بدست آمده از پارامترهای فرآیند جوشکاری می‌توان پارامترهای مهره‌ی جوش را محاسبه نمود [4].

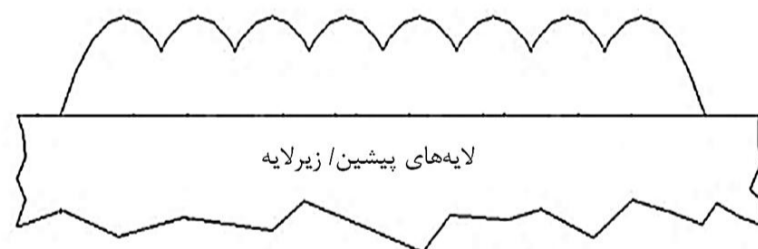
رابطه‌ی هندسی مهره‌ی جوش به صورت زیر می‌باشد:

$$A = \frac{2wh}{3} \quad (3)$$

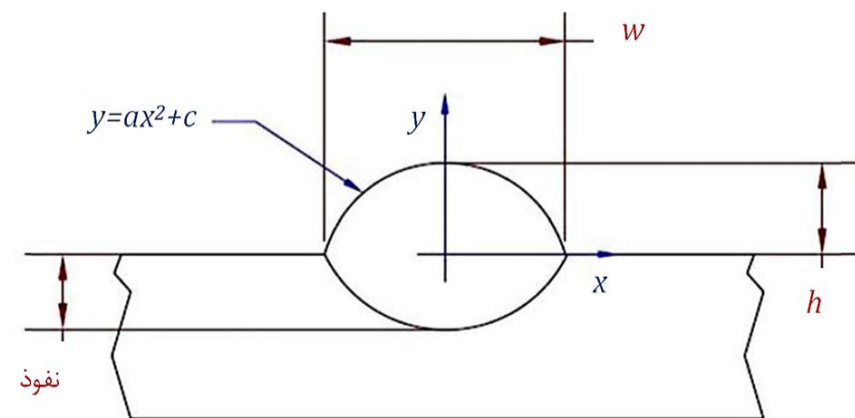
مساحت سطح مقطع مهره‌ی جوش بر حسب پارامترهای فرآیند جوشکاری نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$A = \frac{\pi v_w d_w^2}{4v_t} \quad (4)$$

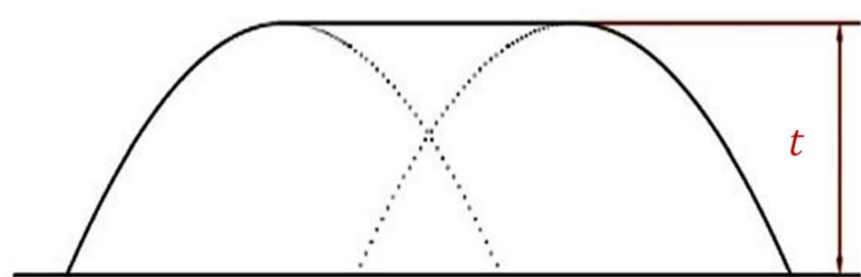
که در این رابطه  $v_w$  سرعت تغذیه‌ی سیم و  $v_t$  سرعت پیشروی جوشکاری می‌باشد.



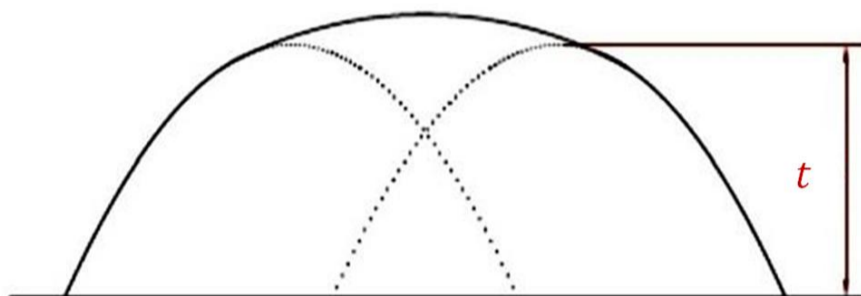
شکل 4 شماتیک سطح مقطع یک لایه‌ی رسوب داده شده پیش از ماشینکاری



شکل 5 مقطع مهره‌ی جوش سهمی‌شکل و معادله‌ی مربوطه [4]



(8-ج) منحنی تخت



(8-د) منحنی محدب

شکل 8 رفتار رسوب فلز در حالت های مختلف، الف: حجم هم پوشانی و فضای فرورفته، ب: مقعر، ج: تخت و د: محدب [4]

### 3-1- گام جوش بهینه

در گام های جوش بزرگ منحنی پر کننده  $\bar{C}$  به صورت مقعر بوده و با کاهش تدریجی گام، شعاع منحنی پر کننده افزایش می یابد تا این که منحنی تبدیل به خط صاف می شود که در این حالت  $R = \infty$  خواهد بود.

با کاهش بیشتر گام، شکل منحنی به صورت محدب در خواهد آمد. بنابراین زمانی که منحنی به شکل تخت باشد کمترین میزان ماشینکاری نیاز خواهد بود و با تبدیل منحنی به خط صاف حجم ماشینکاری لایه به طرز چشمگیری کاهش یافته و فرزکاری بیشتر جنبه ی حذف لایه های اکسیدی و ناخالصی های سطحی را پیدا می کند.

با توجه به هندسه ی دو مهره جوش متوالی برای حالت منحنی تخت شرایط زیر به وجود خواهد آمد:

$$(11-الف) \quad \text{مساحت (EFG)} = \text{مساحت (HGJ)}$$

$$(11-ب) \quad \text{مساحت (EIG)} = \text{مساحت (HLG)}$$

$$(11-ج) \quad \text{مساحت (FIG)} = \text{مساحت (HLG)}$$

با محاسبه ی مساحت های مربوطه خواهیم داشت:

$$\int_0^{\frac{p}{2}} (h-y) dx = \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{w}{2}} y dx \rightarrow \int_0^{\frac{p}{2}} h dx = \int_0^{\frac{w}{2}} y dx \rightarrow \frac{hp}{2} = \frac{hw}{3}$$

$$p^* = \frac{2w}{3} \quad (11-د)$$

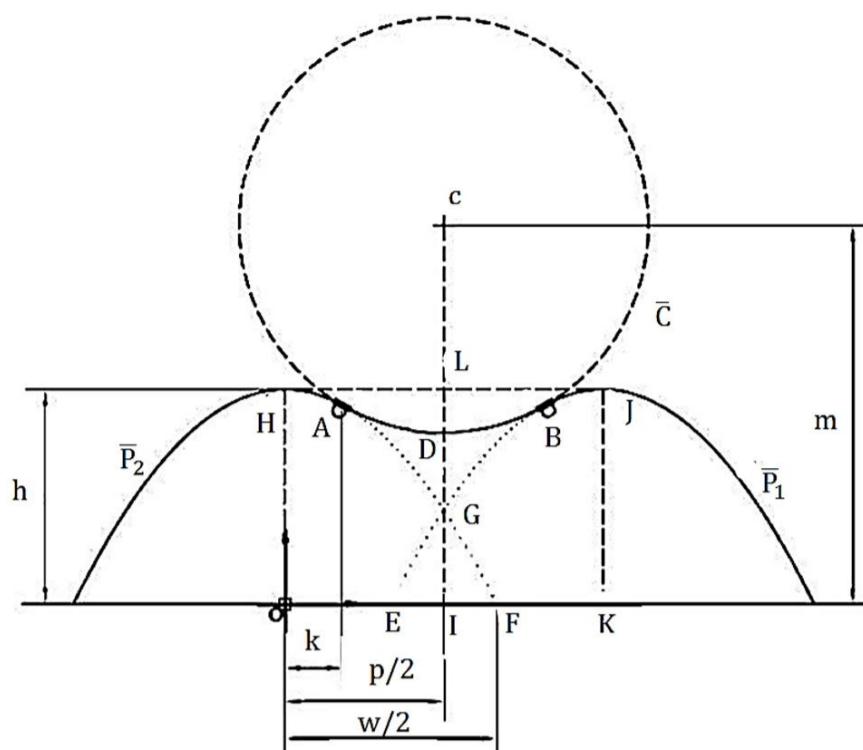
بنابراین برای تحقق هدف کاهش حجم ماشینکاری لازم است که گام جوش برابر با دو سوم عرض مهره ی جوش باشد [5].

### 3-2- افزایش مساحت مهره ی جوش

مساحت مهره ی جوش که مترادف با حجم رسوب فرآیند جوشکاری است، بر طبق معادله ی 3 رابطه ی مستقیمی با ارتفاع و عرض جوش دارا می باشد. از سوی دیگر، با توجه به هدف نخست که کاهش حجم ماشینکاری است، معادله ی 3 به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$A = \frac{2wh}{3} = p^* \times h \quad (12)$$

که در این رابطه  $p^*$  متناظر با گام جوش بهینه برای کمترین حجم ماشینکاری می باشد. بنابراین تنها پارامتر باقی مانده در معادله ی مربوطه که بتوان از آن برای افزایش مساحت مهره ی جوش استفاده نمود، پارامتر ارتفاع



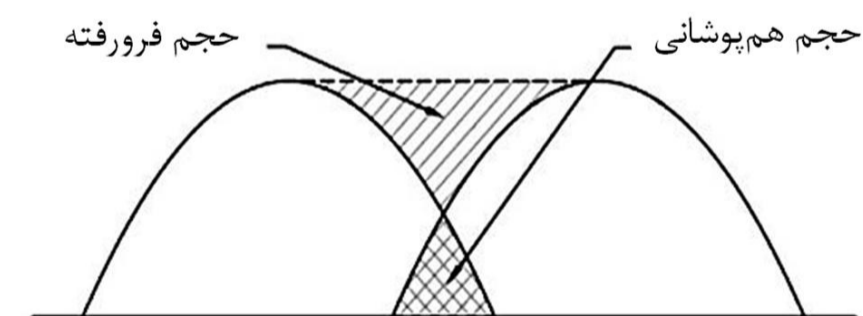
شکل 7 هندسه ی دو منحنی سهمی شکل دارای هم پوشانی و منحنی پر کننده [4]

### 3- تعریف مسئله ی بهینه سازی دوهدفه

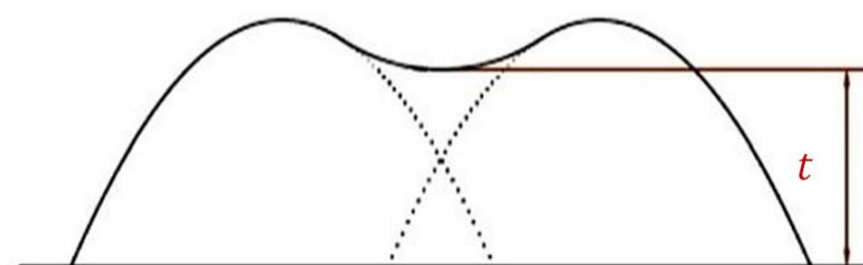
سرعت تغذیه ی سیم، سرعت پیشروی و گام جوشکاری سه پارامتر کلیدی فرآیند جوشکاری می باشند که بر اساس معیارهای جداگانه ی همچون کمترین حرارت ورودی، گستردگی توزیع حرارت، افزایش حجم رسوب و کاهش حجم ماشینکاری انتخاب می شوند.

سرعت تغذیه ی سیم مستقیماً بر روی حرارت ورودی فرآیند جوشکاری اثرگذار می باشد و به منظور کاهش اعوجاج و تنش های داخلی قطعات ساخته شده، سرعت تغذیه ی سیم تا حد مشخصی قابل افزایش می باشد. از سوی دیگر برای یک سرعت تغذیه ی سیم مشخص، مساحت مهره ی جوش وابسته به سرعت پیشروی جوشکاری خواهد بود، به گونه ای که با افزایش سرعت پیشروی مقطع جوش کوچکتر می شود و بالعکس [4].

یکی از مزایای افزایش سرعت پیشروی جوشکاری در توزیع حرارت بر روی ناحیه ای گسترده تر از سطح قطعه کار است که این مسئله البته منجر به کاهش بازدهی فرآیند خواهد شد. پارامتر اثرگذار دیگر گام خطوط جوشکاری  $P$  می باشد. فاصله ی گام بر روی شکل منحنی پر کننده تاثیرگذار می باشد و چنان که در شکل 8 نشان داده شده است، منجر به تحدب، تقعر و یا تخت شدن آن می شود.



(8-الف) حجم هم پوشانی و فضای فرورفته بین دو مهره ی جوش متوالی



(8-ب) منحنی مقعر

در این رابطه  $H$  حرارت ورودی بر حسب  $V \frac{kJ}{mm}$  ولتاژ قوس،  $I$  شدت جریان بر حسب آمپر ثانیه و  $v_t$  سرعت پیشروی جوشکاری بر حسب  $\frac{m}{min}$  می باشند.

با توجه به داده های مربوط به جریان و سرعت پیشروی برای سیم جوش 0/8 میلیمتری از جنس ER70S6 و با انجام برازش منحنی توسط جعبه ابزار cftool در نرم افزار متلب، منحنی چند جمله ای مرتبه ای دوم مناسب برای بیان رابطه ی میان جریان و سرعت تغذیه سیم استخراج گردید. رابطه ی رگرسیونی بدست آمده به صورت زیر می باشد:

$$I = -0.1665v_w^2 + 13.03v_w + 2.371 \quad (14)$$

در این معادله با توجه به تقریب انجام شده، واحد سرعت تغذیه ی سیم بر حسب متر بر دقیقه می باشد که متناظر با آمپر بر ثانیه خواهد بود. در شکل 10 نمودار مربوط به رابطه ی رگرسیونی بدست آمده نشان داده شده است.

از سوی دیگر، نمودار جریان-ولتاژ در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی به صورت ولتاژ ثابت می باشد [19]. در شکل 11 این نمودار و مناطق مختلف آن نشان داده شده است.

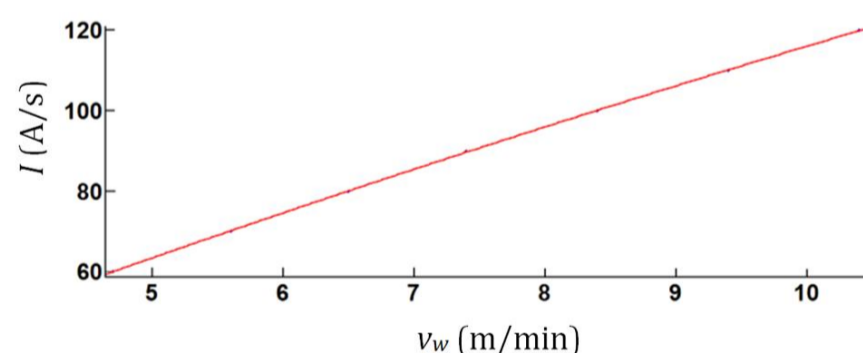
بنابراین، به منظور محاسبه ی حرارت ورودی جوش می بایست مقدار ولتاژ را نیز محاسبه نموده و در رابطه ی 13 جای گذاری کرد.

شایان ذکر است در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی ولتاژ به صورت مستقیم تنظیم نمی شود. بلکه با تنظیم نمودن شدت جریان، دستگاه به صورت خودکار ولتاژ لازم را برای قوس الکتریکی پایدار اعمال می نماید.

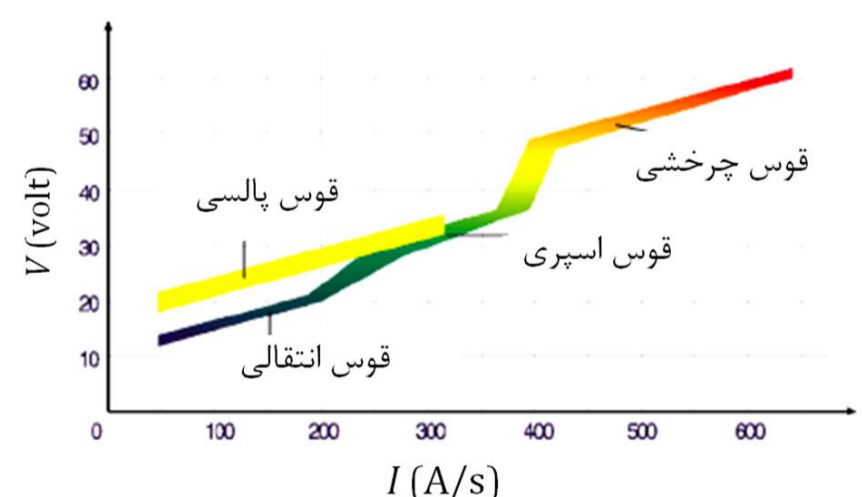
در این مقاله، با توجه به نمودار ارائه شده برای قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی در شکل 11، رابطه ی کاربردی زیر در بازه ی جریان 40 تا 300 آمپر به کمک رگرسیون خطی استخراج شده است:

$$V = 0.07I + 10.5 \quad (15)$$

در مقایسه با دیگر روش های انتقال فلز، در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکتروود مصرفی، روش اتصال کوتاه پالسی پایین ترین نرخ جریان و قطر الکتروود را دارا می باشد. بنابراین در این روش حوضچه ی ذوبی کوچک



شکل 10 منحنی رابطه ی سرعت تغذیه سیم و جریان



شکل 11 منحنی جریان-ولتاژ در فرآیند جوشکاری با گاز محافظ و الکتروود مصرفی [19]

مهره ی جوش ( $h$ ) می باشد. بنابراین، با شرط استفاده از گام جوش بهینه، تابع هدف اصلی در اینجا ارتفاع مهره ی جوش می باشد که طبق معادله ی 7 و بر اساس ثابت های مربوط به آن قابل محاسبه می باشد.

#### 4- قیدهای مسئله ی بهینه سازی دوهدفه

قیود در نظر گرفته شده برای بهینه نمودن رابطه ی 7 عبارت از قید پایداری قوس الکتریکی و قید حرارت ورودی جوشکاری می باشد. در ادامه به هر یک از آنها پرداخته شده است.

##### 4-1- قید پایداری قوس الکتریکی

برای دستیابی به قوس الکتریکی پایدار در فرآیند جوشکاری با سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8 میلیمتر می بایست شدت جریان بین 60 تا 120 آمپر ثانیه تنظیم شود. این بازه ی جریان متناظر با دامنه ی قابل انتخاب 4/7 تا 10/4 متر بر دقیقه برای سرعت تغذیه ی سیم و 0/6 تا 1/1 متر بر دقیقه برای سرعت پیشروی جوشکاری می باشد [4]. در شکل 9 نمودار قید پایداری قوس برای سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8 میلیمتر نشان داده شده است. منطقه ی هاشور خورده بازه ی قوس پایدار برای سیم جوش قطر 0/8 میلیمتر می باشد.

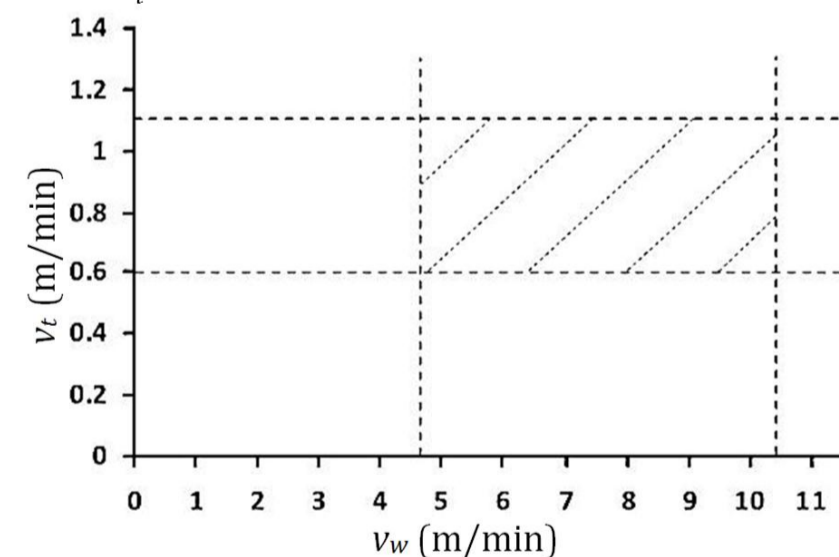
##### 4-2- قید حرارت ورودی جوش

در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود مصرفی و گاز محافظ شدت جریان جوشکاری رابطه ی مستقیمی با سرعت تغذیه و قطر سیم جوش دارد. برای مثال در مورد سیم جوش 0/8 میلیمتری از جنس ER70S6 رابطه ی بین سرعت تغذیه ی سیم و شدت جریان جوشکاری برای تشکیل قوس الکتریکی پایدار مطابق جدول 1 می باشد.

از سوی دیگر حرارت ورودی جوش که متاثر از سرعت تغذیه سیم و سرعت پیشروی جوشکاری است تاثیر بسیار زیادی بر روی ساختار متالورژیکی و خصوصیات مکانیکی لایه های تشکیل شده می گذارد. این پارامتر بر پیشگرم و دمای بین پاسی و در نتیجه بر ساختار و خواص فلز جوش و ناحیه HAZ تاثیر می گذارد.

به منظور تعیین مقدار حرارت ورودی از فرمول زیر در جوشکاری قوسی استفاده شده است:

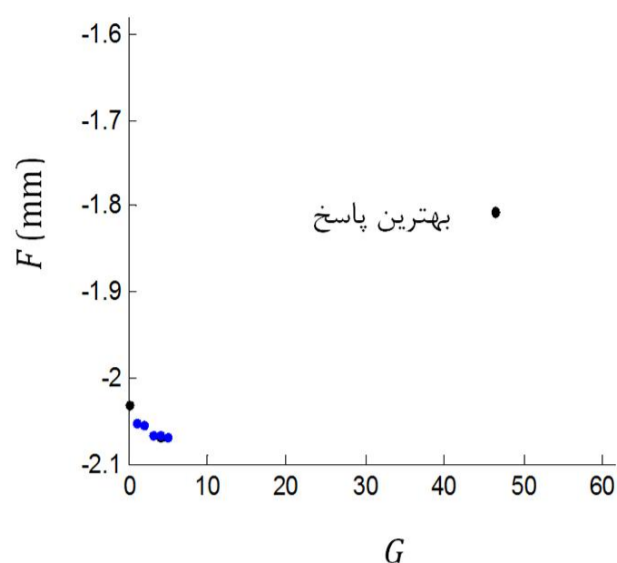
$$H = \frac{60VI}{10^6 v_t} \quad (13)$$



شکل 9 بازه ی قوس الکتریکی پایدار برای سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8

جدول 1 مقادیر متناظر جریان و تغذیه برای سیم 0/8 میلیمتری ER70S6 [4]

$I$ (Amps)	120	110	100	90	80	70	60
$v_w$ (m/min)	10/4	9/4	8/4	7/4	6/5	5/6	4/7



شکل 13 نموداری از روند یافتن بهترین پاسخ در GA

جدول 2 مقادیر مربوط به بهترین پاسخ الگوریتم ژنتیک

$v_w$ (m/min)	$v_t$ (m/min)
8/4	0/6

با توجه به پارامترهای ورودی بهینه‌ی پیشنهاد شده توسط الگوریتم ژنتیک، بیشترین ارتفاع دست‌یافتنی با توجه به قید حرارتی مسئله برابر با 2/07 میلیمتر در هر پاس جوشکاری می‌باشد.

در نتیجه پهنای جوش با توجه به رابطه‌ی 6، برابر با 5/1 میلیمتر بدست می‌آید. گام جوشکاری بهینه نیز مطابق رابطه‌ی 11، برابر با 3/4 میلیمتر می‌باشد. در نتیجه بیشترین مساحت بهینه‌ی مقید برای مهره‌جوش با توجه به رابطه‌ی 12 برابر با 7/04 میلیمتر مربع است. همچنین حرارت ورودی برای این حالت 0/175 کیلوژول بر میلیمتر خواهد بود.

نرخ رسوب جوش توسط رابطه‌ی زیر برای پاسخ بهینه بدست می‌آید:

$$V_d = A \cdot v_t \quad (17)$$

در این رابطه  $V_d$  نرخ رسوب،  $A$  مساحت مهره‌جوش و  $v_t$  سرعت پیشروی مشعل جوشکاری می‌باشد. با توجه به پارامترهای بهینه‌ی استخراج شده، نرخ رسوب جوش بهینه برابر با 4224 mm<sup>3</sup>/min بدست می‌آید.

## 5-2- اعتبارسنجی و بررسی نتایج

به منظور بررسی صحت روش و نتایج بدست آمده در این مقاله، از نتایج آزمایشگاهی جامع ارائه شده در پژوهش سوریاکومار [4] و همکارانش استفاده شده است. جدول 3 ارتفاع مهره‌جوش‌های مربوط به سیم‌جوش ER70S6 با قطر 0/8 میلیمتر و پارامترهای جوشکاری مربوطه را نشان می‌دهد. با نگاهی به نتایج آزمایش، تنها در مهره‌جوش‌های شماره‌ی 6، 7 و 14 مقادیر ارتفاع بالاتر از بهینه‌ی پیشنهادی می‌باشد که باید قید حرارتی در آنها بررسی شود. نتایج این بررسی در جدول 4 ارائه شده است.

با نگاهی به نتایج آزمایش، تنها در مهره‌جوش‌های شماره‌ی 6، 7 و 14 مقادیر ارتفاع بالاتر از بهینه‌ی مقید پیشنهادی می‌باشد که بایستی قید حرارتی را در آنها بررسی نمود. نتایج این بررسی در جدول 4 ارائه شده است. بنابراین عدم پذیرش پارامترهای متناظر با سه مهره‌جوش 6، 7 و 14 به عنوان مقادیر بهینه را چنان که نشان داده شده است، بایستی در نقض شدن قید حرارتی مسئله جستجو نمود. به طوری که قید حرارتی مسئله برابر با 0/18 کیلو ژول بر میلیمتر در نظر گرفته شده است و در سه جوش بررسی شده در جدول 4 مقدار حرارت تولید شده به مراتب بالاتر از حد مجاز مسئله است. بنابراین می‌توان کارآمدی رویکرد ارائه شده برای بهینه‌سازی دوهدفه فرآیند لایه‌نشانی دومرحله‌ای را با توجه به رعایت میزان حرارت ایجاد شده در مرحله‌ی جوشکاری به خوبی نشان داد.

و زودسردشونده بدست می‌آید. این خصوصیات روش اتصال کوتاه را برای کمینه‌سازی حرارت جوشکاری برجسته و کاربردی می‌سازد.

کمکو و همکارانش [20] میزان حرارت کمینه را در کار خود بین 0/155 تا 0/2 کیلو ژول بر میلیمتر گزارش نموده‌اند. با توجه به این که افزایش نرخ رسوب جوش منجر به افزایش حرارت ورودی می‌گردد، بنابراین در اینجا مقدار میانگینی برای حداکثر حرارت مجاز در این بازه انتخاب شده است تا بدون نقض قید حرارتی رسوب جوش تا حد امکان قابل افزایش باشد. حد وسط بازه‌ی ارائه شده توسط کمیکو 0/18 می‌باشد که از آن عنوان میزان حداکثر حرارت ورودی قابل قبول برای قید حرارت ورودی استفاده شده است:

$$H = \frac{60VI}{10^6 v_t} = < 0.18 \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (16)$$

با توجه به این که شدت جریان مطابق رابطه‌ی 14 تنها به پارامتر  $v_w$  وابسته می‌باشد، در نتیجه قید حرارتی مسئله که در رابطه‌ی 16 تبلور یافته است، تنها به دو پارامتر فرآیندی سرعت تغذیه‌ی سیم و سرعت پیشروی جوشکاری وابسته می‌باشد.

در رابطه‌ی 16 هر دو پارامتر بر حسب متر بر دقیقه می‌باشند. در شکل 12 نیز منحنی ترسیم شده از حرارت ورودی مطابق معادله‌ی 16 نشان داده شده است.

در ادامه بهینه‌سازی مدل پیشنهاد شده مورد بحث قرار گرفته است.

## 5- بهینه‌سازی مقید

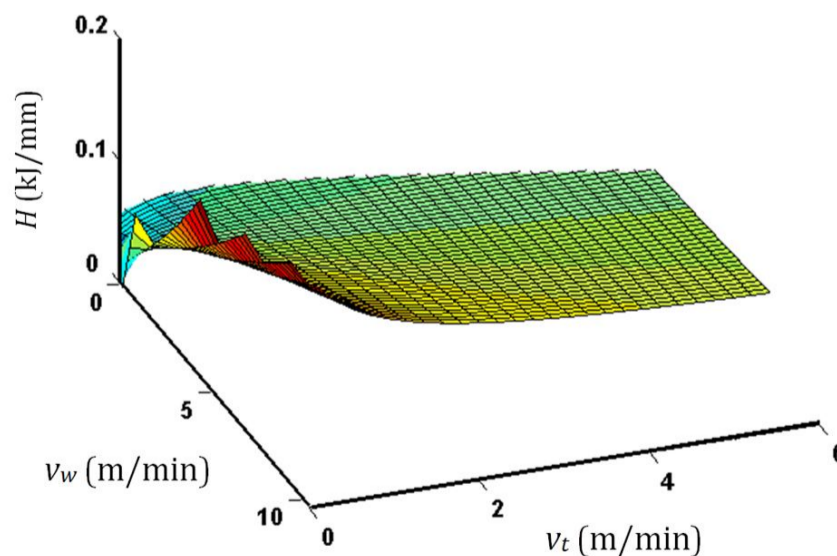
در اینجا به منظور یافتن پاسخ بهینه برای مسئله از روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای این منظور جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب بکار گرفته شده است.

## 5-1- بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

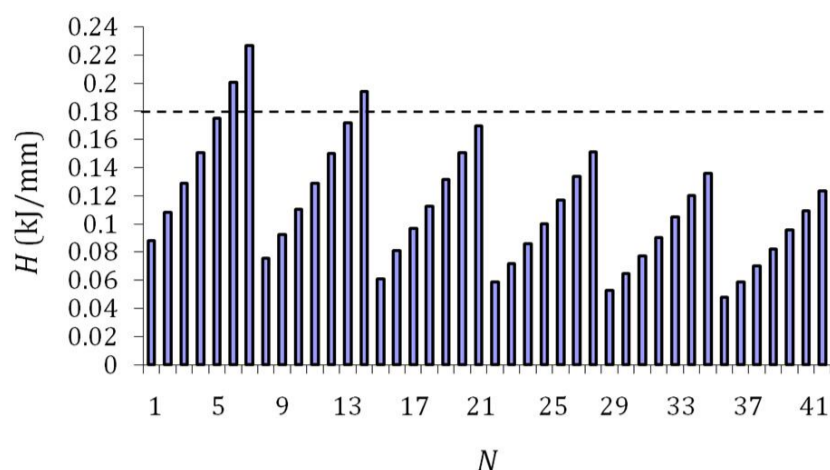
برای این منظور دو برنامه‌ی جداگانه برای تعریف تابع هدف و همچنین قید غیرخطی مسئله نوشته شده و به پنجره‌ی نوار ابزار GA در نرم‌افزار متلب وارد گردید. سپس کران‌های مسئله نیز برای نرم‌افزار تعریف شد. در گام بعد تنظیمات الگوریتم ژنتیک انجام شد.

اندازه‌ی جمعیت برابر با 20 و میزان عملگر پیوند برابر با 80 درصد انتخاب گردید. معیار پایان حل نیز بر اساس بهترین پاسخ برگزیده شد.

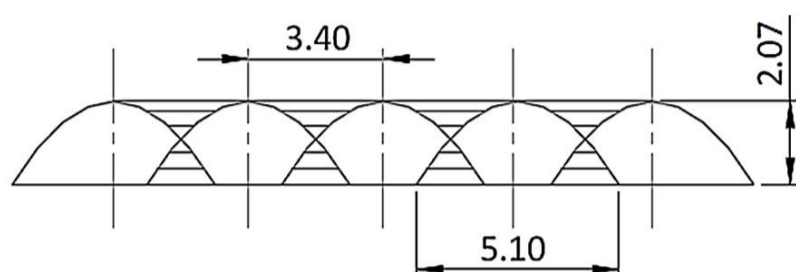
نمودار روند یافتن بهترین پاسخ برای یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل 13 نشان داده شده است. در این نمودار  $G$  معرف تعداد نسل و  $F$  بیانگر مقدار تابع شایستگی می‌باشد. با انجام شبیه‌سازی، الگوریتم ژنتیک بهترین پاسخ را با توجه به تابع هدف و قید در نظر گرفته شده مطابق جدول 2 پیشنهاد نموده است.



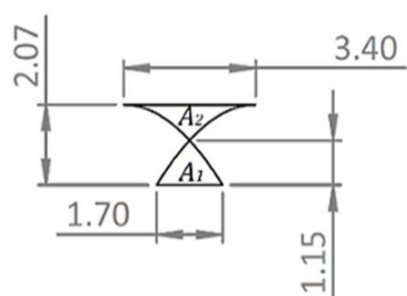
شکل 12 منحنی حرارت ورودی



شکل 15 حرارت تولید شده برای هر کدام از مهره جوش ها



شکل 16 شمایی از مقطع لایه ی بهینه با توجه به ناحیه ی هم پوشانی و ناحیه ی انباشت فلز (ابعاد به mm)

شکل 17 هندسه ی ناحیه ی هم پوشانی  $A_1$  و ناحیه انباشت فلز  $A_2$  برای مهره جوش بهینه (ابعاد به mm)

چنان که در شکل های 14 و 15 قابل مشاهده می باشد، همگام با افزایش سطح مقطع جوش، حرارت ورودی نیز افزایش می یابد. با توجه به قید حرارت ورودی که در شکل 15 به صورت خط چین افقی نشان داده شده است، نزدیک ترین گزینه ای که خط چین را قطع ننموده باشد، مهره جوش شماره 5 است که در واقع پاسخ بهینه ی الگوریتم ژنتیک نیز می باشد. همچنین، در این دو نمودار تاثیر افزایش نرخ پیشروی بر کاهش مساحت سطح مقطع جوش و کاهش حرارت ورودی در کل نمودار و تاثیر نرخ تغذیه ی سیم بر افزایش سطح مقطع جوش و حرارت ورودی در نمونه های دارای سرعت پیشروی یکسان به خوبی نمایان می باشد.

به منظور بررسی صحت نتایج مربوط به هدف کاهش حجم ماشینکاری، مساحت ناحیه ی هم پوشانی  $A_1$  و مساحت ناحیه ی انباشت فلز  $A_2$  برای مهره جوش بهینه محاسبه گردید. بدین منظور از نرم افزار سالیدورکس<sup>1</sup> برای اندازه گیری مساحت استفاده شده است. معادله ی سهمی مهره جوش بهینه برای تعریف در نرم افزار بر طبق رابطه ی 2 به صورت زیر بدست آمده است.

$$y = 2.07 \left( 1 - \left( \frac{x}{2.55} \right)^2 \right) \quad (18)$$

با ترسیم منحنی های جوش چنان که در شکل های 16 و 17 نشان داده شده است و انتخاب دستور اندازه گیری در نرم افزار سالیدورکس، نتایج زیر برای مساحت دو سطح بدست آمده است.

$$A_1 = A_2 = 1.04 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

بنابراین شرط کمترین حجم ماشینکاری نیز به طور کامل برآورده شده است.

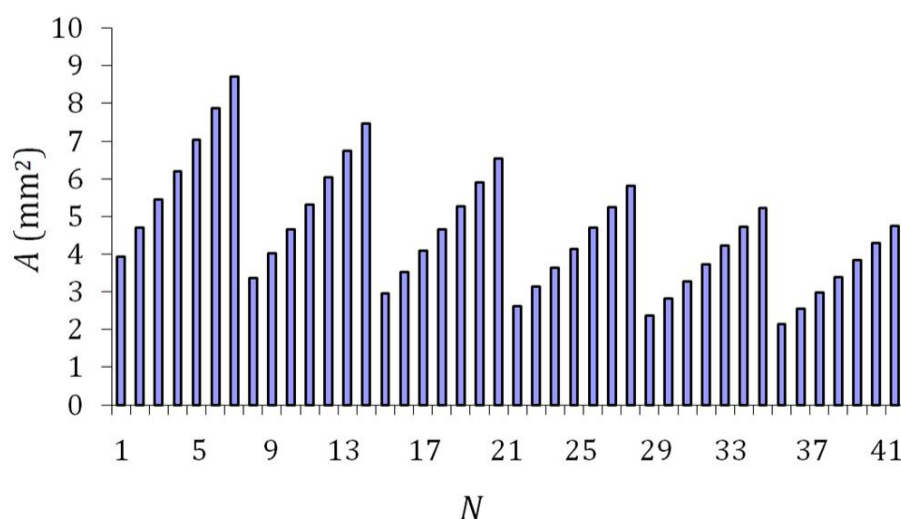
جدول 3 مقادیر تجربی بدست آمده برای سیم جوش 0/8 میلی متری ER70S6 [4]

$h$ (mm)	$v_t$ (m/min)	$v_w$ (m/min)	$h$ (mm)	$v_t$ (m/min)	$v_w$ (m/min)	
1/001	0/9	4/7	22	1/451	0/6	4/7
1/001	0/9	5/6	23	1/571	0/6	5/6
1/108	0/9	6/5	24	1/813	0/6	6/5
1/152	0/9	7/4	25	1/686	0/6	7/4
1/282	0/9	8/4	26	2/06	0/6	8/4
1/316	0/9	9/4	27	2/09	0/6	9/4
1/498	0/9	10/4	28	2/553	0/6	10/4
0/724	1	4/7	29	1/436	0/7	4/7
1/023	1	5/6	30	1/53	0/7	5/6
1/154	1	6/5	31	1/604	0/7	6/5
1/307	1	7/4	32	1/734	0/7	7/4
1/198	1	8/4	33	1/905	0/7	8/4
1/277	1	9/4	34	1/847	0/7	9/4
1/470	1	10/4	35	2/189	0/7	10/4
0/784	1/1	4/7	36	1/171	0/8	4/7
0/982	1/1	5/6	37	1/304	0/8	5/6
1/138	1/1	6/5	38	1/423	0/8	6/5
1/185	1/1	7/4	39	1/460	0/8	7/4
1/210	1/1	8/4	40	1/523	0/8	8/4
1/289	1/1	9/4	41	1/661	0/8	9/4
1/394	1/1	10/4	42	1/997	0/8	10/4

جدول 4 اعتبارسنجی مدل با مقایسه ی مهره جوش های مردود و مهره جوش بهینه

$H$ (kJ/mm)	$V$ (volt)	$I$ (A/s)	$h$ (mm)	$v_t$ (m/min)	$v_w$ (m/min)	
0/175	17/5	100/075	2/07	0/6	8/4	جوش 5
0/2005	18/2	110/14	2/09	0/6	9/4	جوش 6
0/2265	18/9	119/883	2/553	0/6	10/4	جوش 7
0/194	18/9	119/883	2/189	0/7	10/4	جوش 14

در شکل 14 و 15 به ترتیب مقادیر محاسبه شده برای مساحت مهره جوش و حرارت تولید شده برای تک تک مهره جوش های ارائه شده در جدول 3 آورده شده است.  $N$  بیانگر شماره ی مهره جوش می باشد. در شکل 16 نیز شمایی از لایه ی نهایی نشان داده شده است. همچنین در شکل 17 هندسه ی ناحیه ی هم پوشانی دو مهره جوش مجاور و ناحیه ی انباشت فلز برای پاسخ بهینه آورده شده است.



شکل 14 مساحت مهره جوش های بررسی شده

1- SolidWorks

- [4] S. Suryakumar et al, Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing, *Computer-Aided Design*, Vol. 43, pp. 331–344, 2011.
- [5] K. Karunakaran, S. Suryakumar, V. Pushpa, S. Akula, Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, pp. 490–499, 2010.
- [6] F. Kolahan, M. Heidari, Modeling and Optimization of Gas Metal Arc Welding Process Using Statistical Methods and Simulated Annealing Algorithm, *Journal of Faculty of Mechanical Eng. of Tabriz University*, Vol. 40, No. 1, 2010. (In Persian)
- [7] B. Chan, J. Pacey, M. Bibby, Modelling gas metal arc weld geometry using artificial neural network technology, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 38, No.1, pp. 43–51, 1999.
- [8] D. Nagesh, G. Datta, Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal arc welding using artificial neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, pp. 303–12, 2002.
- [9] I. Kim, J. Son, C. Park, I. Kim, H. Kim, An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in gma welding process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, pp. 113–8, 2005.
- [10] J. Spencer, P. Dickens, C. Wykes, Rapid prototyping of metal parts by three dimensional welding, *I MECH E Journal of Engineering Manufacture Part B*, Vol. 212, pp. 175–82, 1998.
- [11] R. Merz, F. Prinz, K. Ramaswami, M. Terk, L. Weiss, Shape deposition manufacturing, In, *Proceedings of solid freeform symposium*, pp. 1–8, 1994.
- [12] A. Song, S. Park, Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, pp. 35–40, 2006.
- [13] R. Kovacevic, Rapid prototyping technique based on 3D welding, *NSF design & manufacturing grantees conference*, 1999.
- [14] W. Aiyiti, W. Zhao, B. Lu, Y. Tang, Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 165–72, 2006.
- [15] P. Thamilarasi S. Ragunathan, E. Mohankumar, Modeling and Analysis of the Weld Bead Geometry in Robotic Gas Metal Arc welding by using Taguchi Techniques, *International Journal of Research in Mechanical Engineering*, Vol. 2, Issue 2, pp.88-93, 2014.
- [16] K. Narayan C. Ramakrishna, M. Sarcar, K.M. Rao., Optimization of CO2 Welding Process Parameters for Weld Bead Penetration of SS41 Mild Steel Using Response Surface Methodology, *IJRMET*, Vol. 4, Issue spl., pp. 27-30 2013.
- [17] P. Sreeraj, T. Kannan, S. Maji, Prediction and optimization of weld bead geometry in gas metal arc welding process using RSM and fmincon, *Journal of Mechanical Engineering Research*, Vol. 5, pp. 154-165, 2013.
- [18] P. Sreeraj, T. Kannan, S. Maji, Prediction and Control of Weld Bead Geometry in Gas Metal Arc Welding Process Using Simulated Annealing Algorithm, *International Journal Of Computational Engineering Research*, Vol. 3 Issue. 1, pp. 213-222, 2013.
- [19] *Digitally controlled GMA power sources*, Accessed November 2014; [https://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-1712A58FB7944912-/fronius\\_usa/04\\_digital\\_geregelte\\_msg\\_stromquellen\\_gb.pdf](https://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-1712A58FB7944912-/fronius_usa/04_digital_geregelte_msg_stromquellen_gb.pdf)
- [20] I. Kmecko, D. Hu, and R. Kovacevic, Controlling Heat Input, Spatter and Weld Penetration in GMA Welding For Solid Free Form Fabrication, *The 10th Solid Freeform Fabrication Symposium*, The University of Texas, 1999.

در قسمت بعد به نتیجه گیری و جمع بندی مطالب پرداخته شده است.

## 6- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله به مطالعه و بررسی مراحل ساخت افزایشی و کاهشی در فرآیند لایه نشانی دومرحله ای برای دستیابی به هندسه ی قطعه پرداخته شده است. برای این منظور در ابتدا به توانمندی های فرآیند اشاره گردید و در ادامه به دو گام کلیدی در این فرآیند که عبارتند از مرحله ی جوشکاری و مرحله ی ماشینکاری، پرداخته شد. سپس صورت مسئله که شامل رسیدن به دو هدف متناقض کاهش حجم ماشینکاری و افزایش حجم رسوب جوش می باشد، بیان گردیده و به دنبال آن روابط ریاضی-تحلیلی پایه ریزی شد. پس از دستیابی به تابع هدف، قیده های مسئله که شامل قیده های فرآیندی و حرارتی می باشند نیز تعریف و به بدنه ی مسئله افزوده شدند.

کلیدی ترین قید مورد بررسی حرارت جوشکاری می باشد که با ادغام روابط موجود این قید تنها به دو پارامتر اصلی جوشکاری وابسته گردید. سپس با برنامه نویسی در محیط نرم افزار متلب و استفاده از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی تابع هدف مقید صورت پذیرفت. در گام آخر نیز با استفاده از داده های تجربی موجود از فرآیند جوشکاری مربوطه، اعتبارسنجی نتایج نیز به انجام رسید. چنان که این مقایسه کارآیی و اعتبار مدل و روش ارائه شده را به خوبی نشان می دهد. همچنین با استفاده از نرم افزار طراحی سه بعدی، هندسه ی بهینه بررسی شده و تحقق هدف کمترین حجم ماشینکاری تایید گردید. با توجه به نتایج، مقادیر سرعت تغذیه و سرعت پیشروی بهینه در فرآیند لایه نشانی دومرحله ای برای سیم جوش ER70S6 با قطر 0/8 mm به ترتیب برابر با 8/4 m/min و 2/07 m/min پیشنهاد شده است و ارتفاع جوش بهینه ی مقید نیز برابر با 0/6 بدست آمده است.

## 7- مراجع

- [1] K. Karunakaran, A. Sreenathbabu, P. Vishal, Hybrid layered manufacturing: direct rapid metal tool-making process, *I MECH E Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, No. B12, pp. 1657–65, 2004.
- [2] A. Sreenathbabu, KP. Karunakaran, C. Amarnath, Statistical process design for hybrid adaptive layer manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 4, pp. 235–48, 2005.
- [3] K. Karunakaran, S. Suryakumar, Vishal Pushpa, Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing, *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 45, pp. 690–703, 2009.