مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1394، دوره 15، شماره 7، ص‌ص 149-159

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# مدل‌سازی ارتفاع جوش در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ در حضور نانوذرات $TiO_2$ توسط شبکه‌ی عصبی مصنوعی

مسعود آقاخانی[1*]، آرش نیک زاد[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* کرمانشاه، صندوق پستی 67346- 67149، m.aghakhani@razi.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 اسفند 1393

پذیرش: 17 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 10 خرداد 1394

*کلید واژگان:*

نانوذرات $TiO_2$

ماتریس طراحی دالرت

فرآیند GMAW

ارتفاع جوش

شبکه‌ی عصبی مصنوعی

**چکیده**

یکی از مشخصه‌های کیفیت اتصالات جوش شده در جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ ارتفاع جوش می‌باشد. این مقاله بر یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی که به منظور دستیابی به یک مدل با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ارتفاع جوش در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ با حضور نانوذرات $TiO_2$ انجام شد، تاکید دارد. برای مدل‌سازی، ولتاژ قوس، جریان جوشکاری، سرعت جوشکاری، درصد گاز آرگون در ترکیب گاز آرگون و دی‌اکسید کربن و ضخامت لایه‌ی نانوذرات $TiO_2$ به‌عنوان پارامترهای ورودی و ارتفاع جوش به‌عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شدند. در آزمایش‌ها ماتریس طراحی دالرت به‌منظور جمع آوری داده استفاده شد. مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی ایجاد شد و توسط 5 آزمایش خارج از ماتریس طراحی ارزیابی شد. نتیجه‌ی قابل توجه این مطالعه مکانیزم تمرکز قوس به علت اثرات متقابل بین پارامترهای ورودی جوشکاری و نانوذرات $TiO_2$ می‌باشد. علاوه براین نتایج نشان داد که افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات $TiO_2$ تا حدود 0/9 میلی‌متر ارتفاع جوش را افزایش داد درحالی‌که در ادامه با افزایش بیشتر ضخامت تا 1 میلی‌متر ارتفاع جوش کاهش یافت. در حقیقت این تغییر در ارتفاع جوش می‌تواند به علت آزاد شدن اکسیژن ناشی از تجزیه‌ی گرمایی نانوذرات $TiO_2$ و دی‌اکسید کربن روی سطح حوضچه‌ی مذاب باشد. اکسیژن کشش سطحی را تحت تأثیر قرار داد. در نهایت جهت جابجایی مارانگونی جریان سیال در حوضچه‌ی مذاب دچار تغییر شد و بر ارتفاع جوش تأثیر گذاشت. در روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی، میانگین مربعات خطا برای مجموعه‌ی آموزش0/0066، برای مجموعه‌ی ارزیابی 0/0063 و برای مجموعه‌ی آزمایش 0/0093 می‌باشد. درنهایت نتیجه گرفته شد که شبکه‌ی عصبی مصنوعی یک روش دقیق برای پیش‌بینی ارتفاع جوش می‌باشد.

# Modeling of weld height in gas metal arc welding process in the presence of $TiO_2$ Nano-Particles using artificial neural network

Masood Aghakhani*, Arash Nikzad

Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

* P.O.B. 67149- 67346, Kermanshah, Iran, m.aghakhani@razi.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 March 2015
Accepted 07 May 2015
Available Online 31 May 2015

*Keywords:*
$TiO_2$ Nano-Particles
Doehlert Design Matrix
GMAW Process
Weld Height
Artificial Neural Network

ABSTRACT

One of the quality characteristics of welded joints in gas metal arc welding (GMAW) is weld height (*WH*). This paper highlights an experimental study carried out to develop a model using artificial neural network (ANN) to predict *WH* in GMAW in the presence of $TiO_2$ nano-particles. For developing the model, the arc voltage, welding current, welding speed, percentage of Ar in Ar-$CO_2$ mixture and thickness of TiO2 nano-particles were considered as input parameters and WBH as the response. A Doehlert design matrix was employed in the experiments to generate experimental data. The ANN model was developed and validated by conducting five extra runs. The remarkable outcome of this study is the mechanism of arc constriction due to interacting effects between welding input parameters and $TiO_2$ nano-particles. Moreover, the results showed that increasing thickness of $TiO_2$ nano-particles up to almost 0.9 mm increased weld height, whereasits further increase up to 1.0 mm subsequently decreased weld height. In fact, this variation in weld height could be due to thermal dissociation of $TiO_2$ nano-particles and $CO_2$ releasing oxygen onto weld pool surface. Oxygen influenced surface tension. Consequently, direction of the Marangoni convection of fluid flow in weld pool was changed and as a result, affected *WH*. For ANN technique, $MSE_{train}$=0.0066, $MSE_{validation}$=0.0063 and $MSE_{test}$=0.0093. Finally, it is concluded that ANN is an accurate technique for predicting weld height.

## 1- مقدمه

امروزه جوشکاری یکی از صنایع مادر به حساب می‌آید و کمترین کارخانه یا کارگاه صنعتی را می‌توان یافت که از این صنعت بهره نبرده باشد. ازاین‌رو تلاش شده‌است تا خواص مکانیکی، کیفیت و هندسه‌ی جوش همواره بهبود

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Aghakhani, A. Nikzad, Modeling of weld height in gas metal arc welding process in the presence of TiO2 Nano-Particles using artificial neural network, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 7, pp. 149-159, 2015 (In Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]

یابد. اندازه‌ی کوچک و سطح بزرگ و اثرات حجم ذرات نانو، خواص مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی، نوری و فیزیک- شیمی منحصر به فردی را ارائه می‌دهد که آن‌ها را به مواد مناسبی برای کاربردهای متفاوت در صنایع دفاعی، الکترونیک، هوافضا و شیمیایی تبدیل کرده‌است [1]. در جوشکاری‌های قوس الکتریکی هندسه‌ی گرده‌ی جوش نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی جوش دارد [2]. برخی عناصر نظیر اکسیژن، سلنیوم و گوگرد به‌عنوان اجزای فعال سطح شناخته می‌شوند. موادی نظیر $TiO_2$، $SiO_2$، $Fe_2O_3$، $MgCO_3$، $Cu_2O$، NiO و $Cr_2O_3$ در سایر تحقیقات انجام‌شده به‌عنوان پوشش فعال روی سطح فلز بکار گرفته شده اند. پوشش فعال بر روی سطح فلز می‌تواند با تغییر جهت جریان سیال در حوضچه‌ی مذاب، تمرکز قوس و تغییر در اندازه‌ی دانه‌بندی بر هندسه و خواص مکانیکی جوش تأثیر بگذارد. بسیاری از محققین پوشش فعال را در برخی از فرآیندهای جوشکاری نظیر جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز محافظ، جوشکاری قوسی پلاسما و جوشکاری لیزر بکار برده اند [3, 4]؛ اما در مورد روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ[1] اقدامات قابل توجهی صورت نگرفته است؛ بنابراین نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان یک پوشش فعال در حوضچه‌ی مذاب فرآیند GMAW وارد و اثر آن بر هندسه‌ی گرده‌ی جوش بررسی شد. یکی از پارامترهای هندسه‌ی جوش که تحت تأثیر پارامترهای ورودی جوشکاری می‌باشد، ارتفاع جوش است. فتاحی و همکارانش، بهبود چقرمگی فلز جوش AWS E6010 را با اضافه کردن نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به پوشش الکترود گزارش کردند [5]. پال و مایتی اثر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم را بر روی خواص مکانیکی الکترود AWS E11018 M بررسی کردند و نتیجه گرفتند که انرژی ضربه‌ی شارپی بهتر شده‌است [6]. آقاخانی و همکارانش گزارش کردند که در فرآیند جوشکاری زیر پودری با افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا 0/2 mm نفوذ جوش ثابت ماند؛ اما با افزایش بیشتر ضخامت لایه‌ی نانوذرات تا 0/3 mm نفوذ جوش کاهش یافت که تا ضخامت 0/75 mm در همین مقدار ثابت ماند. افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات از 0/75 mm تا 0/8 mm افزایش چشمگیری در نفوذ جوش را نتیجه داد که تا ضخامت 1 mm در همین مقدار ثابت باقی ماند [2].

به پدیده جابجایی سیال بر اثر اختلاف کشش سطحی در مناطق مختلف جابجایی مارانگونی[2] گفته می‌شود. حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در حوضچه‌ی مذاب به علت ایجاد تغییر در جهت جابجایی مارانگونی، هندسه‌ی جوش را تحت تأثیر قرار می‌دهد [7]. به‌منظور جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی از طراحی آزمایش دالرت[3] استفاده و طبق ماتریس طراحی 31 آزمایش انجام شد. برای ورود نانوذرات در حوضچه‌ی مذاب از استون و چسب استفاده شد و بعد از حل کردن نانوذرات در استون و چسب، ورق‌های فولاد کم‌کربن با خمیر به‌دست آمده پوشش داده شدند [8]. به منظور اعتبار سنجی مدل بدست آمده، 5 آزمایش خارج از ماتریس طراحی انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها قطعات جوش‌شده برش خوردند و عملیات آماده‌سازی جهت متالوگرافی صورت گرفت. شبکه‌های عصبی مصنوعی[4] در بسیاری از زمینه‌های جوشکاری مورد استفاده قرار گرفته اند [9-12]. از این‌رو تلاش شد تا در این مقاله به‌کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی یک مدل ریاضی با دقت قابل قبول برای پیش‌بینی مقادیر ارتفاع جوش ارائه شود و تأثیر نانوذرات بر ارتفاع جوش، آثار متقابل پارامترهای جوشکاری و شکل قوس مورد بررسی قرار گیرد.

1- Gas Metal Arc Welding (GMAW)
2- Marangoni
3- Doehlert
4- Artificial Neural Network

## 2- طراحی آزمایش‌ها

انجام آزمایش همواره متضمن هزینه و زمان است. ازاین‌رو انجام آزمایش‌های مؤثـر که با صرف حداقل هزینه و زمان، بیشترین اطلاعات ممکن را نتیجه دهد، همواره مورد توجه محققین بوده‌است. اساساً طراحی آزمایش به دو دسته‌ی متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شود. طراحی متقارن به آن دسته از طراحی‌ها گفته می‌شود که پارامترهای مختلف آزمایش تعداد سطوح یکسانی دارند؛ اما در طراحی‌های نامتقارن تعداد سطوح پارامترهای مختلف با یکدیگر متفاوت است که این امکان را فراهم می‌سازد تا به پارامترهایی که از اهمیت بیشتری برخوردارند، توجه بیشتری شود [13]. در این مقاله از روش دالرت نوع D-1 که یک روش نامتقارن می‌باشد برای طراحی آزمایش استفاده شد. تمام طراحی‌های دالرت نوع D-1 از یک ماتریس اولیه ساخته می‌شوند که این ماتریس برای طراحی آزمایش با 5 فاکتور در شکل 1 نشان داده شده است. با استفاده از این ماتریس می‌توان طراحی کامل D-1 را، با کم کردن سطرها از یکدیگر و همچنین در نظر گرفتن قرینه‌ی سطرهای حاصل و حذف سطرهای تکراری، ایجاد نمود. وضعیت نهایی ماتریس طراحی با مقادیر کدشده برای 5 پارامتر ورودی در جدول 1 نشان داده شده است.

در این مقاله ولتاژ قوس (*V*)، جریان جوشکاری (*I*)، سرعت جوشکاری (*S*)، درصد گاز آرگون در ترکیب گازهای آرگون و دی‌اکسید کربن به‌عنوان گاز محافظ (*D*) و ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم روی سطح فلز (*B*) به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند. محدوده‌ی پارامترهای ورودی با روش اُفَت[5] تعیین شد. در روش اُفَت به‌جای تغییر همزمان همه‌ی پارامترها، فقط یکی از پارامترها تغییر می‌کند تا محدوده‌ی مناسبی برای پارامترهای ورودی پیدا شود.

طراحی دالرت برای 5 پارامتر ورودی، 3 پارامتر را 7سطحی، یکی را پنج-سطحی و دیگری را سه‌سطحی در نظر می‌گیرد [13]. با توجه به اهمیت پارامترهای ورودی، ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، جریان الکتریکی و سرعت جوشکاری 7سطحی، ولتاژ الکتریکی 5سطحی و درصد گاز آرگون در ترکیب گاز محافظ 3سطحی در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که فرآیند جوشکاری به‌صورت دستی انجام نشده است و از این رو سرعت جوشکاری توسط دستگاه قابل تنظیم می‌باشد. محدوده‌ی پارامترهای ورودی و تعداد سطوح آزمایش هر یک از آن‌ها در جدول 2 نشان داده شده‌است.

ارتفاع جوش (*WH*) که مطابق با شکل 2، به حداکثر فاصله عمودی بین سطح افقی قطعه برش خورده تا قسمت رسوب‌گذاری‌شده ناشی از ذوب سیم جوش اطلاق می‌شود، به‌عنوان متغیر خروجی محاسبه گردید.

وضعیت نهایی ماتریس طراحی با مقادیر واقعی در جدول 3 نشان داده شده است. آزمایش‌های اعتبارسنجی مطابق جدول 4 انجام شد.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0/5 & 0/866 & 0 & 0 & 0 \\ 0/5 & 0/289 & 0/817 & 0 & 0 \\ 0/5 & 0/289 & 0/204 & 0/791 & 0 \\ 0/5 & 0/289 & 0/204 & 0/158 & 0/775 \end{bmatrix}$$

**شکل 1** ماتریس اولیه‌ی طراحی دالرت نوع D-1 برای 5 فاکتور [13]

5- One-Factor-At-a-Time (OFAT)



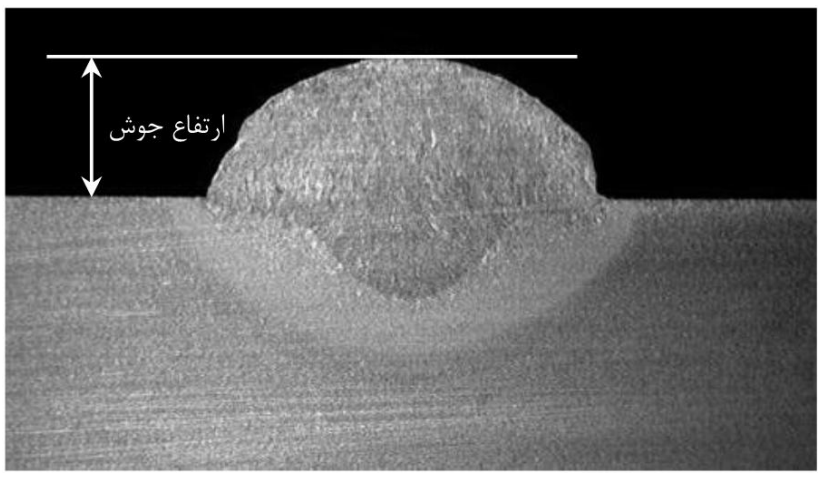
[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]

**جدول 1** ماتریس نهایی طراحی آزمایش دالرت با مقادیر کدشده

| شماره آزمایش | *V* (V) | *I* (A) | *S* (cm/min) | *B* (mm) | *D* (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0/5 | 0/866 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | -0/5 | 0/866 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0/5 | 0/289 | 0/817 | 0 | 0 |
| 6 | -0/5 | 0/289 | 0/817 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | -0/577 | 0/817 | 0 | 0 |
| 8 | 0/5 | 0/289 | 0/204 | 0/791 | 0 |
| 9 | -0/5 | 0/289 | 0/204 | 0/791 | 0 |
| 10 | 0 | -0/577 | 0/204 | 0/791 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | -0/612 | 0/791 | 0 |
| 12 | 0/5 | 0/289 | 0/204 | 0/158 | 0/775 |
| 13 | -0/5 | 0/289 | 0/204 | 0/158 | 0/775 |
| 14 | 0 | -0/577 | 0/204 | 0/158 | 0/775 |
| 15 | 0 | 0 | -0/612 | 0/158 | 0/775 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | -0/632 | 0/775 |
| 17 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | -0/5 | -0/866 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0/5 | -0/866 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | -0/5 | -0/289 | -0/817 | 0 | 0 |
| 21 | 0/5 | -0/289 | -0/817 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | -0/577 | -0/817 | 0 | 0 |
| 23 | -0/5 | -0/289 | -0/204 | -0/791 | 0 |
| 24 | 0/5 | -0/289 | -0/204 | -0/791 | 0 |
| 25 | 0 | 0/577 | -0/204 | -0/791 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0/612 | -0/791 | 0 |
| 27 | -0/5 | -0/289 | -0/204 | -0/158 | -0/775 |
| 28 | 0/5 | -0/289 | -0/204 | -0/158 | -0/775 |
| 29 | 0 | 0/577 | -0/204 | -0/158 | -0/775 |
| 30 | 0 | 0 | 0/612 | -0/158 | -0/775 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0/775 |

**جدول 2** پارامترهای ورودی جوشکاری

| نماد | | تعداد سطوح آزمایش | واحد | کمترین مقدار | بیشترین مقدار |
|---|---|---|---|---|---|
| جریان جوشکاری | *I* | 7 | آمپر | 100 | 140 |
| سرعت جوشکاری | *S* | 7 | cm/min | 14 | 30 |
| ولتاژ قوس | *V* | 5 | ولت | 20 | 24 |
| ضخامت نانو ذرات $TiO_2$ | *B* | 7 | میلی‌متر | 0 | 1 |
| درصد گاز آرگون در گاز محافظ | *D* | 3 | - | %20 | %80 |




**شکل 2** ارتفاع جوش

**جدول 3** ماتریس نهایی طراحی آزمایش دالرت با مقادیر واقعی

| شماره آزمایش | *V* (V) | *I* (A) | *S* (cm/min) | *B* (mm) | *D* (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 22 | 120 | 22 | 0/5 | 50 |
| 2 | 24 | 120 | 22 | 0/5 | 50 |
| 3 | 23 | 140 | 22 | 0/5 | 50 |
| 4 | 21 | 140 | 22 | 0/5 | 50 |
| 5 | 23 | 126/7 | 30 | 0/5 | 50 |
| 6 | 21 | 126/7 | 30 | 0/5 | 50 |
| 7 | 22 | 106/7 | 30 | 0/5 | 50 |
| 8 | 23 | 126/7 | 24 | 1 | 50 |
| 9 | 21 | 126/7 | 24 | 1 | 50 |
| 10 | 22 | 106/7 | 24 | 1 | 50 |
| 11 | 22 | 120 | 16 | 1 | 50 |
| 12 | 23 | 126/7 | 24 | 0/6 | 80 |
| 13 | 21 | 126/7 | 24 | 0/6 | 80 |
| 14 | 22 | 106/7 | 24 | 0/6 | 80 |
| 15 | 22 | 120 | 16 | 0/6 | 80 |
| 16 | 22 | 120 | 22 | 0/1 | 80 |
| 17 | 20 | 120 | 22 | 0/5 | 50 |
| 18 | 21 | 100 | 22 | 0/5 | 50 |
| 19 | 23 | 100 | 22 | 0/5 | 50 |
| 20 | 21 | 113/3 | 14 | 0/5 | 50 |
| 21 | 23 | 113/3 | 14 | 0/5 | 50 |
| 22 | 22 | 133/3 | 14 | 0/5 | 50 |
| 23 | 21 | 113/3 | 20 | 0 | 50 |
| 24 | 23 | 113/3 | 20 | 0 | 50 |
| 25 | 22 | 133/3 | 20 | 0 | 50 |
| 26 | 22 | 120 | 28 | 0 | 50 |
| 27 | 21 | 113/3 | 20 | 0/4 | 20 |
| 28 | 23 | 113/3 | 20 | 0/4 | 20 |
| 29 | 22 | 133/3 | 20 | 0/4 | 20 |
| 30 | 22 | 120 | 28 | 0/4 | 20 |
| 31 | 22 | 120 | 22 | 0/9 | 20 |

**جدول 4** آزمایش‌های اعتبار سنجی

| شماره آزمایش | *V* (V) | *I* (A) | *S* (cm/min) | *B* (mm) | *D* (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 22 | 120 | 22 | 0/5 | 80 |
| 2 | 22 | 120 | 22 | 1 | 80 |
| 3 | 22 | 120 | 22 | 0 | 80 |
| 4 | 22 | 106/7 | 24 | 0 | 50 |
| 5 | 22 | 106/7 | 24 | 0/5 | 50 |

## 3- مواد اولیه و تجهیزات

نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این تحقیق اروکسید دی‌اکسید تیتانیوم پی- 25[1] می‌باشد که پراکندگی بالایی دارد و طی فرآیند اروسیل[2] تولید شده‌است. این نانوذرات از شرکت دگوسا ای جی[3] آلمان خریداری شدند. نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم P25 اندازه ذرات اولیه‌ی متوسطی در حدود 21 nm و سطح ویژه ای در حدود 50 ($m^2/g$) دارد.

الکترود 1mm با روکش مسی مورد استفاده، از شرکت آریا نورین جوش

1- AEROXIDE TiO2 P 25
2- AEROSIL
3- Degussa AG



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]

(میکا) خریداری شد که درصد وزنی ارائه شده توسط شرکت سازنده، مطابق با استاندارد DIN 8559:SG2 است.

در این تحقیق از ورق فولاد کم کربن با ابعاد 8 mm × 50 mm × 100 mm استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول 5 ارائه شده‌است.

برای انجام فرآیند جوشکاری از دستگاه جوش پالس میگ TCK 600P که در شکل 3 نشان داده شده است، استفاده شد. این دستگاه در کشور ایران توسط شرکت صنایع جوش و برش کارا تولید می‌شود. سایر تنظیمات دستگاه به‌صورت زیر است.

نوع جریان: DC

پلاریته: معکوس

زاویه‌ی الکترود با قطعه: 90 درجه

## 4- انجام آزمایش‌ها

سطوح ورق‌های فولاد کم‌کربن در ابتدا کاملاً تمیز شد تا زنگ‌زدگی و سایر آلودگی‌ها از سطح آن پاک شود. نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به علت سبکی، وجود گاز محافظ و ضربه حاصل از قوس به‌راحتی از سطح قطعه پراکنده می‌شوند و این امکان وجود ندارد که بطور مستقیم روی قطعه کار پاشیده شوند. به همین دلیل این نانوذرات ابتدا در استون و چسب حل شدند. سپس قطعات با خمیر به‌دست‌آمده، در ضخامت‌های مختلف پوشش داده شدند. سپس روی قطعات شیاری به پهنای 1 cm توسط چسب کاغذی، با ارتفاع‌های متفاوت مطابق با ماتریس طراحی آزمایش، ایجاد شد. در محور این شیار، چسب کاغذی دیگری به پهنای 1 mm اضافه شد. سپس قطعات با خمیر به‌دست‌آمده پوشش داده شدند و درنهایت تمامی چسب‌های کاغذی از قطعه جدا شدند. به این ترتیب در محور شیار از تراکم خمیر به‌دست‌آمده کم شد تا پایداری قوس الکتریکی بهتر صورت گیرد. جوش‌ها طبق ماتریس طراحی به صورت مهره‌ای روی صفحه[1] زده شدند. سپس برای به‌دست آوردن یک نمونه‌ی عرضی روی هر قطعه دو برش عرضی زده شد. یکی از سطوح قطعه‌ی حاصل با سنباده‌زنی و اچ کردن در محلول 2% نایتال[2] به مدت 20 ثانیه، جهت انجام اعمال متالوگرافی و شناسایی مناطق مختلف جوش آماده‌سازی شد. شکل 4 تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی[3] از قطعه‌ی شماره‌ی 9 را نشان می‌دهد.

نتیجه‌ی حاصل از آنالیز تفکیک انرژی[4] از دو نقطه در شکل 4 الف)، در شکل 5 نشان داده شده است که ثابت می‌کند این دو نقطه و سایر نقاط مشابه آن‌ها ذرات دی‌اکسید تیتانیوم هستند. همچنین ابعاد ذرات نشان‌داده‌شده در شکل 4 ب) مبین این موضوع است که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بعد از ورود به حوضچه‌ی مذاب به یکدیگر چسبیده[5] نشده‌اند و در ابعاد نانو یعنی 100- 1 nm باقی مانده اند.

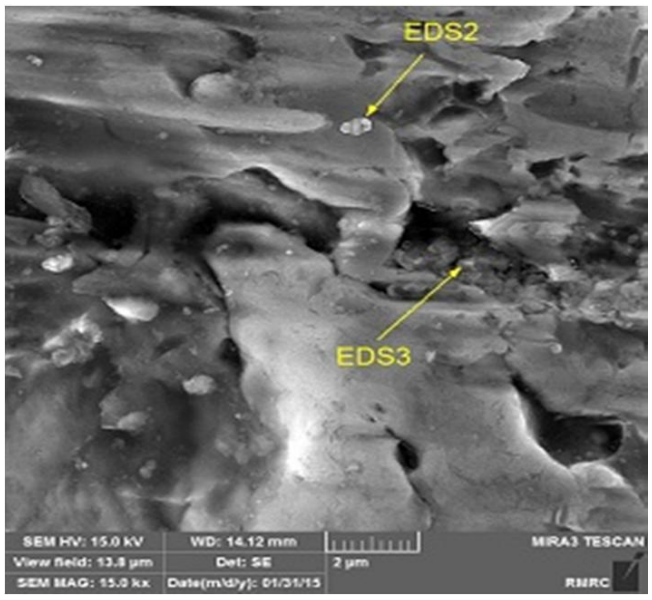
ارتفاع جوش مربوط به نمونه‌های جدول طراحی آزمایش به کمک میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد. برای این کار مقیاس میکروسکوپ به‌گونه‌ای تنظیم شد تا ضخامت ورق فولاد که 8 mm بود را به‌درستی نشان دهد.

**جدول 5** ترکیب شیمیایی ورق فولاد کم کربن

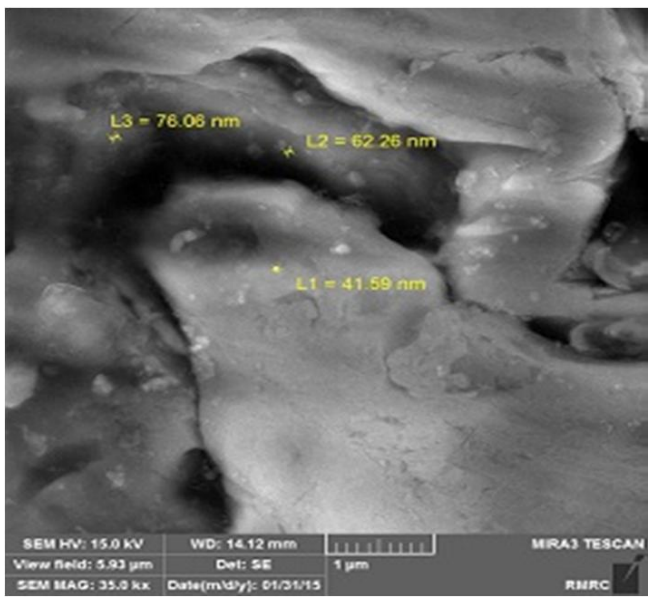
| اجزا | Cr | P | S | Si | Ti | Mn | C | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| درصد وزنی | 0/031 | 0/007 | 0/01 | 0/024 | 0/002 | 0/417 | 0/113 | به حد میزان |

1- Bead-On-Plate
2- Nital
3- Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)
4- Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
5- Agglomerated

**شکل 3** دستگاه جوش پالس میگ TCK 600P




الف) تصویر با بزرگنمایی 15000




ب) تصویر با بزرگنمایی 35000

**شکل 4** تصاویر FESEM از مناطق مختلف گرده‌ی جوش قطعه شماره‌ی 9

سپس با این مقیاس ارتفاع جوش محاسبه گردید. ارتفاع جوش قطعات آزمایش با استفاده از نرم‌افزار دیجی مایزر[6] اندازه‌گیری شد.

درصد وزنی و اتمی نقاط آنالیزشده در شکل 4 الف) در جدول 6 نشان داده شده است.

## 5- شبکه‌ی عصبی مصنوعی

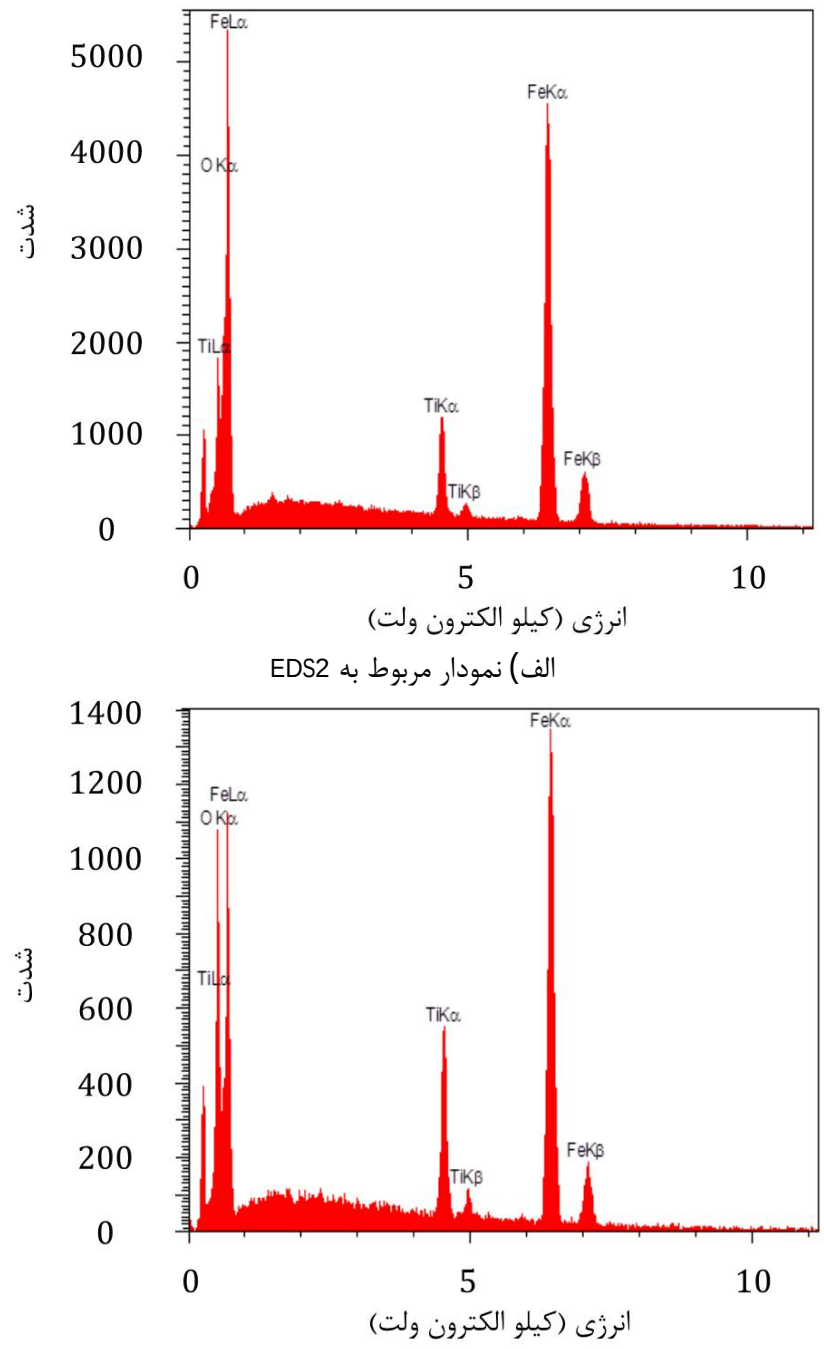
### 5-1- طراحی شبکه‌ی عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی از عناصر عملیاتی ساده‌ای ساخته می‌شوند که به صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند [14].

6- Digimizer



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]




الف) نمودار مربوط به EDS2

ب) نمودار مربوط به EDS3

**شکل 5** آنالیز تفکیک انرژی از نقاط مختلف قطعه‌ی شماره‌ی 9

**جدول 6** نتایج حاصل از آنالیز تفکیک انرژی

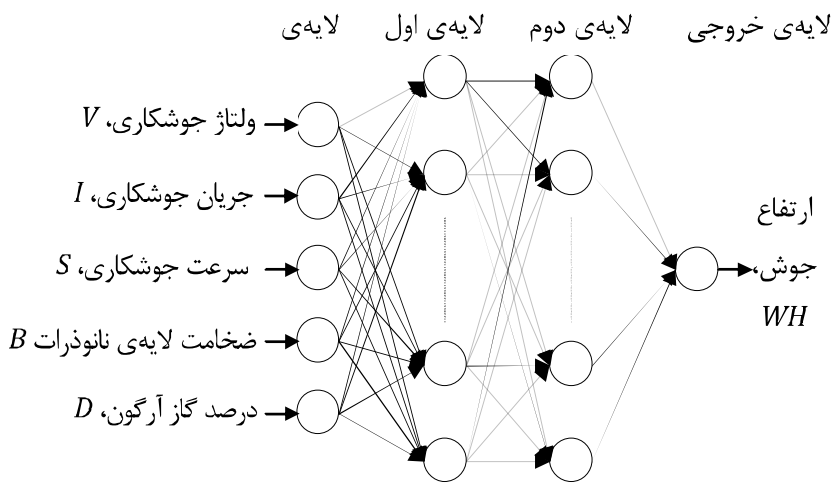
| EDS3 | | EDS2 | | |
|---|---|---|---|---|
| درصد اتمی | درصد وزنی | درصد اتمی | درصد وزنی | عنصر |
| 56/05 | 27/21 | 39/21 | 15/79 | O |
| 6/89 | 10/02 | 6/37 | 7/68 | Ti |
| 37/05 | 62/77 | 54/42 | 76/52 | Fe |
| 100 | 100 | 100 | 100 | کل |

از مزایای شبکه‌ی عصبی مصنوعی این است که مدل پیش‌بینی کننده می‌تواند با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، بدون در نظر گرفتن هیچ گونه فرض‌های ساده سازی ایجاد شود [12].

آموزش پس‌انتشار[1] یک فرآیند آموزش با سرپرست[2] می‌باشد که نیازمند اطلاع از ورودی‌ها و خروجی‌های مورد نظر در به‌دست آوردن مدل می‌باشد. در طی آموزش شبکه، خروجی شبکه با خروجی مورد نظر مقایسه می‌شود و وزن‌ها همزمان با آموزش شبکه به منظور حداقل کردن خطا اصلاح می‌شوند. سپس خطا درون شبکه در جهت عقب انتشار می‌یابد و وزن‌ها بر مبنای الگوریتم آموزش پس‌انتشار تغییر می‌کنند. این فرآیند آموزش یک فرآیند تکرارشدنی می‌باشد و آموزش زمانی که یکی از سطوح قابل قبول خطا به‌دست آید، متوقف خواهد شد. پس از فرآیند آموزش، هنگامی که یک ورودی جدید به شبکه‌ی آموزش‌داده‌شده اعمال شود، شبکه مطابق با اطلاعاتی که تاکنون به‌دست آورده است، پاسخ می‌دهد [9].

در این مقاله از یک شبکه‌ی پیش‌خور[3] پس‌انتشار باچهار لایه (لایه‌ی ورودی، دو لایه‌ی پنهان و لایه‌ی خروجی) استفاده شد. تعداد نرون‌های لایه‌ی ورودی و خروجی به ترتیب برابر با تعداد پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد که در این تحقیق برای لایه‌ی ورودی از پنج نرون و برای لایه‌ی خروجی از یک نرون استفاده شد. تعداد لایه‌های پنهان به طور ثابت دو لایه در نظر گرفته شد؛ اما تعداد نرون‌های هر لایه توسط حلقه‌ی تو در تویی که در کد نوشته‌شده اعمال گردید، تعیین شد. لایه‌ی پنهان اول دارای 11 نرون و لایه‌ی پنهان دوم دارای 14 نرون می‌باشند. نمای کلی شبکه‌ی عصبی مصنوعی در شکل 6 نشان داده شده است. برای آموزش شبکه از یکی از الگوریتم‌های آموزش شبه نیوتنی[4] با تنظیمات پیش‌فرض نرم‌افزار استفاده شد. تابع انتقال لایه‌ی اول و دوم پنهان تابع تانژانت هایپربولیک[5] و تابع انتقال لایه‌ی خروجی تابع انتقال خطی[6] بود. داده‌های ورودی به شبکه‌ی عصبی مصنوعی به سه مجموعه‌ی آموزش[7]، ارزیابی[8] و آزمایش[9] تقسیم‌بندی می‌شوند. از مجموعه‌ی آموزش در فرآیند یادگیری شبکه استفاده می‌شود. مجموعه‌ی ارزیابی در راستای جلوگیری از بیش‌برازش شبکه به کار گرفته می‌شود و مجموعه‌ی آزمایش کارایی شبکه‌ی نهایی را بررسی می‌کند [14].

به‌منظور بررسی میزان کارایی مدل به‌دست‌آمده 5 آزمایش خارج از محدوده‌ی ماتریس طراحی انجام شد که همراه با 31 آزمایش ماتریس طراحی به عنوان ورودی به شبکه عصبی داده‌شدند. در کد نوشته شده برای شبکه‌ی عصبی مصنوعی، تقسیم‌بندی داده‌ها به مجموعه‌های آموزش، ارزیابی و آزمایش به‌صورت تصادفی صورت گرفت. یکی از مشکلاتی که در طی آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی اتفاق می‌افتد بیش‌برازش[10] نامیده می‌شود. در این حالت خطا در مجموعه‌ی داده‌های آموزش به مقدار بسیار پایینی می‌رسد، اما زمانی‌که داده‌ی جدیدی به شبکه اعمال می‌شود مقدار خطا زیاد است. در واقع شبکه نمونه‌های مجموعه‌ی آموزش را به حافظه سپرده است و برای تعمیم[11] به حالت‌های جدید آموزش ندیده است. به منظور دستیابی به شبکه‌ای با تعمیم مناسب، در فرآیند آموزش شبکه از آموزش مجدد[12] استفاده شد. آموزش مجدد به این مفهوم می‌باشد که یک شبکه با معماری مشخص چندین بار تحت آموزش قرار گیرد تا شبکه‌ی بهتری یافت شود.




**شکل 6** شمای کلی شبکه‌ی عصبی مصنوعی استفاده شده

1- Backpropagation
2- Supervised

3- Feedforward
4- Trainbfg
5- Hyperbolic Tangent Sigmoid Transfer Function (tansig)
6- Linear Transfer Function (purelin)
7- Train Set
8- Validation Set
9- Test Set
10- Over Fitting
11- Generalization
12- Retrain



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]

در این مقاله هر معماری شبکه 100 بار آموزش مجدد شد که در هر مرحله‌ی آموزش بیشترین تعداد دفعاتی که مجموعه‌ی کامل داده‌ها تحت آموزش قرار گرفت[1] به طور پیش فرض 1000 بار بود. برای آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی از نرم‌افزار متلب[2] استفاده شد.

## 5-2- معیار پذیرش

عملکرد شبکه عصبی توسط یک سری از داده‌ها که در فرآیند آموزش شرکت نکرده‌اند، تحت عنوان مجموعه‌ی آزمایش تعیین می‌شود. در این مقاله برای پذیرش شبکه‌ی مورد نظر از تابع کارایی[3]، ضریب تعیین[4] و ضریب تعیین تعدیل‌شده[5] بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده استفاده شد. تابع کارایی مورد استفاده میانگین مربعات خطا[6] بود که با استفاده از رابطه‌ی (1) تعیین می‌شود [12]:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \quad (1)$$

که $y_i$ مقادیر اندازه‌گیری‌شده، $\hat{y}_i$ مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و $N$ تعداد داده‌های مورد بررسی می‌باشند.

ضریب تعیین بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده در آینده می‌باشد. این ضریب درواقع نتایج تقریبی پارامتر موردنظر در آینده را براساس مدل ریاضی تعریف‌شده که منطبق بر داده‌های موجود است، بیان می‌دارد. این فاکتور آماری در تحلیل شبکه‌های عصبی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد و با استفاده از رابطه‌های (2) تا (5) تعیین می‌شود [15]:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

که $\bar{y}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده می‌باشد.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (5)$$

ضریب تعیین ضعف‌هایی دارد. چون مقدار $SS_T = SS_R + SS_E$ پس مخرج کسر همواره ثابت می‌باشد. درنتیجه تغییرات کسر فقط تحت تأثیر $SS_R$ می‌باشد و این تغییر افزایشی است. پس زمانی‌که یک متغیر اضافه شود، تغییرات به خوبی منعکس نمی‌شود و $R^2$ عملکرد خوبی را نشان نمی‌دهد. مقدار $R^2_{adj}$ در واقع روشی برای اصلاح عملکرد $R^2$ از طریق اصلاح صورت و مخرج با تنظیم درجه‌ی آزادی مربوط به هر کدام می‌باشد. مقدار ضریب تعیین تعدیل‌شده از رابطه‌ی (6) محاسبه می‌شود [15]:

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1-R^2)(N-1)}{N-P-1} \quad (6)$$

که $N$ تعداد کل داده‌ها و $P$ تعداد متغیرهای مستقل می‌باشد.

در یک مدل‌سازی هرچقدر که مقادیر ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل‌شده بزرگ‌تر و به هم نزدیک‌تر باشند مدل به‌دست‌آمده قابل اعتمادتر است.

در برنامه‌ی نوشته شده برای شبکه‌ی عصبی مصنوعی ضریب تعیین به تفکیک برای داده‌های آموزش، ارزیابی، آزمایش و یک بار هم برای کل داده‌ها محاسبه گردید. ضریب تعیین تعدیل‌شده نیز برای کل داده‌ها محاسبه شد. معیار توقف برنامه ضریب تعیین بزرگ‌تر یا مساوی 90% برای داده‌های آموزش و کل داده‌ها، ضریب تعیین بزرگ‌تر یا مساوی 80% برای داده‌های ارزیابی و آزمایش و ضریب تعیین تعدیل‌شده‌ی بزرگتر یا مساوی 90% برای کل داده‌های به‌دست‌آمده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی قرار داده‌شد. مقدار قابل قبول برای تابع کارایی به تفکیک برای مجموعه‌های آموزش، ارزیابی و آزمایش کوچک‌تر یا مساوی 0/04 در نظر گرفته شد. در نهایت شبکه‌ای که در شرایط بالا صدق می‌کرد انتخاب شد و اطلاعات مربوط به بهترین دوره‌ی[7] آموزش آن، که کمترین مقدار تابع کارایی مربوط به مجموعه‌ی ارزیابی را در بین دوره‌های مختلف آموزش دارا بود، ذخیره شد. ضرایب تعیین، ضریب تعیین تعدیل‌شده و تابع کارایی مربوط به شبکه‌ی عصبی مصنوعی نهایی به ترتیب در جدول‌های 7 و 8 نشان داده شده است.

روند آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی در شکل 7 نشان داده شده است. محور افقی در این شکل نشان‌دهنده‌ی تعداد دفعاتی است که شبکه با یک ساختار مشخص به‌طور کامل آموزش می‌بیند تا بهترین شبکه پیدا شود. ساختار شبکه‌ی نهایی در این مقاله 21 مرتبه به طور کامل آموزش داده شده که بهترین شبکه در تکرار پانزدهم به‌دست‌آمده است.

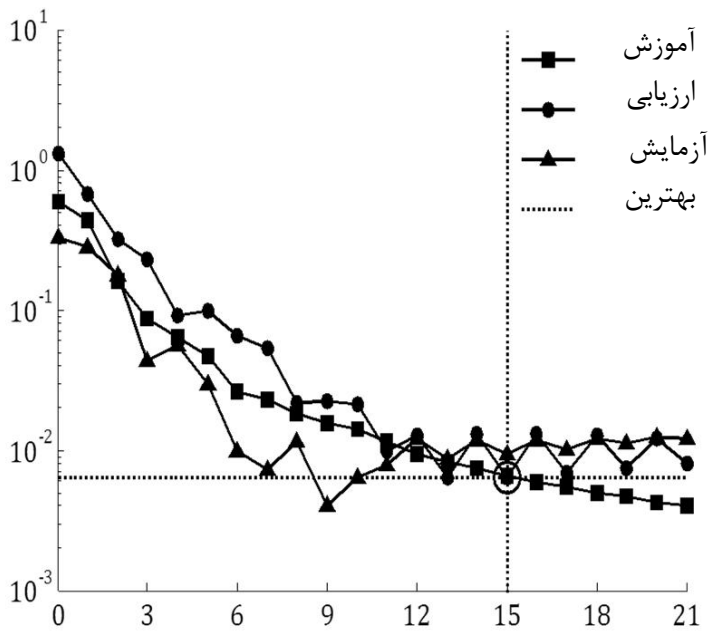
مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی مصنوعی و مقادیر واقعی به‌دست‌آمده از آزمایش برای کل داده‌ها در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده، چه برای مجموعه‌ی آموزش و ارزیابی و چه برای مجموعه‌ی آزمایش، انطباق خوبی با داده‌های واقعی دارند.

**جدول 7** ضرایب تعیین و ضریب تعیین تعدیل‌شده‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی نهایی

| | $R^2$ | $R^2_{adj}$ |
|---|---|---|
| مجموعه‌ی آموزش | 93/42 % | - |
| مجموعه‌ی ارزیابی | 92/86 % | - |
| مجموعه‌ی آزمایش | 89/32 % | - |
| کل داده‌ها | 92/87 % | 91/69 % |

**جدول 8** تابع کارایی شبکه‌ی عصبی مصنوعی نهایی

| | $MSE$ |
|---|---|
| مجموعه‌ی آموزش | 0/0066 |
| مجموعه‌ی ارزیابی | 0/0063 |
| مجموعه‌ی آزمایش | 0/0093 |

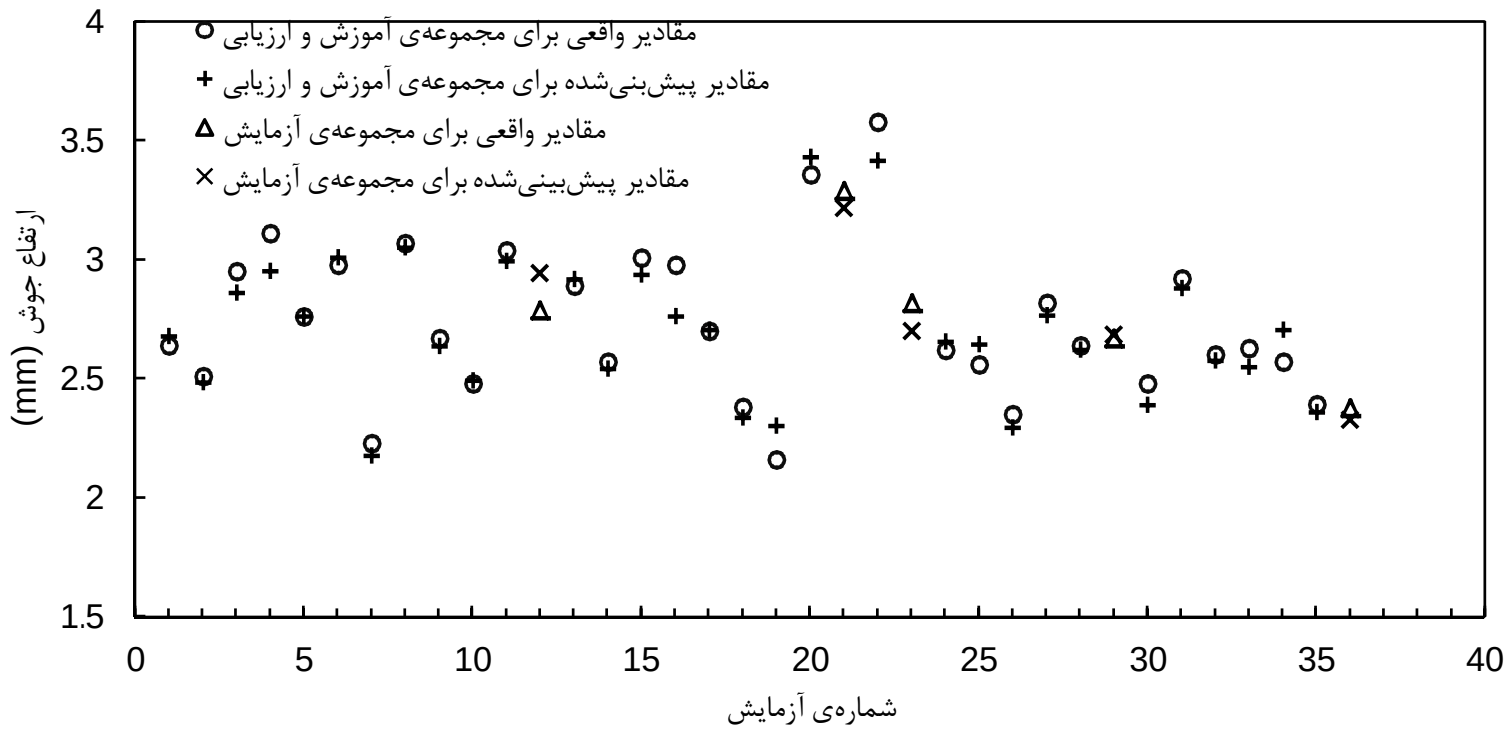



**شکل 7** روند آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی

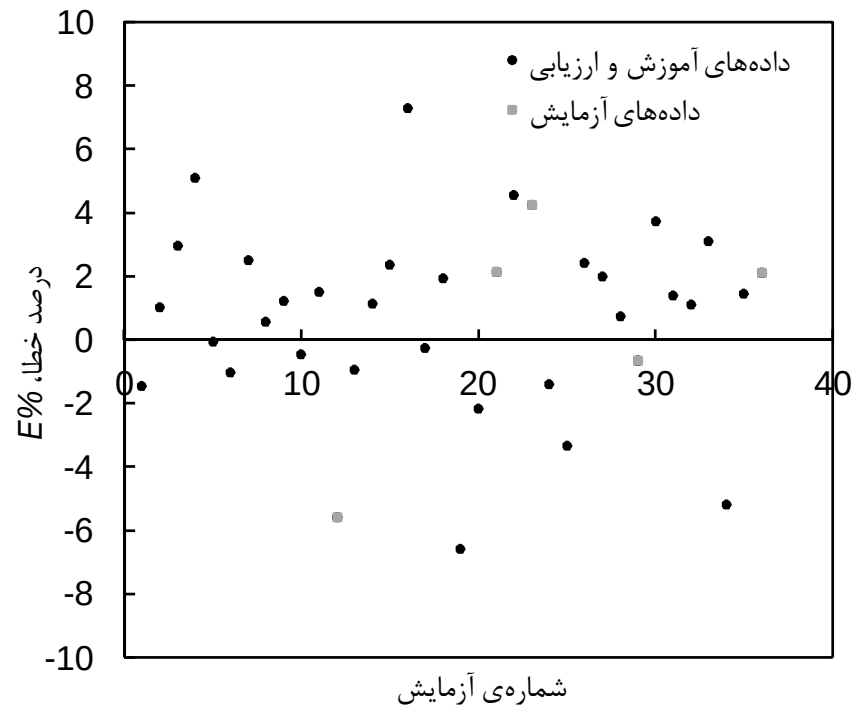
1- Net.trainparam.epochs
2- MATLAB R2011a, R2013a
3- Performance Function
4- Coefficient of Determination ($R^2$)
5- Adjusted Coefficient of Determination ($R^2_{adj}$)
6- Mean Squared Error (*MSE*)
7- Best Epoch



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]




**شکل 8** مقایسه‌ی مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای کل داده‌ها




**شکل 9** درصد خطای نسبی برای همه‌ی داده‌ها

درصد خطای نسبی برای کل داده‌ها در شکل شماره 9 نشان داده شده است. درصد خطای نسبی از رابطه‌ی (7) محاسبه می‌گردد.

$$\%E = \frac{\text{مقدار پیش‌بینی شده} - \text{مقدار واقعی}}{\text{مقدار واقعی}} \times 100 \qquad (7)$$

همانطور که مشاهده می‌شود قدرمطلق بیشترین درصد خطای نسبی از % 8 کمتر می‌باشد؛ بنابراین مدل به‌دست‌آمده از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است.

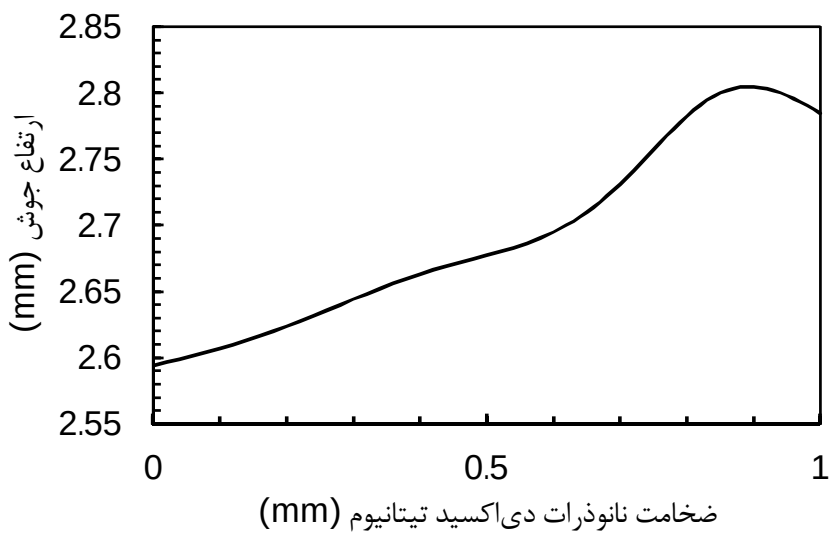
## 6- تجزیه و تحلیل داده‌ها

### 6-1- بررسی تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر ارتفاع جوش

نمودار تأثیر اصلی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر ارتفاع جوش در شکل 10 نشان داده شده است. برای رسم این نمودار ماتریس طراحی 5×51 جدیدی در نظر گرفته شد که پارامترهای ورودی ولتاژ قوس، جریان جوشکاری، سرعت جوشکاری و درصد گاز آرگون در ترکیب گاز محافظ برای همه‌ی آزمایش‌ها در سطح وسط خود، به ترتیب 22، 120، 22 و 50% قرار گرفتند و ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم از 0 تا 1mm با گام‌های 0/02 تغییر کرد.

گرادیان نیروی کشش سطحی روی سطح حوضچه‌ی مذاب، متغیر اصلی در تغییر شکل جابجایی مذاب می‌باشد. عموماً کشش سطحی با افزایش دما برای فلز خالص و بسیاری از آلیاژها کاهش می‌یابد ($\frac{\partial\gamma}{\partial T}<0$). در حوضچه‌ی مذاب برای چنین موادی کشش سطحی در قسمت‌های نسبتاً خنک لبه‌ی حوضچه‌ی مذاب، بیشتر از قسمت‌های مرکزی حوضچه‌ی مذاب می‌باشد و از این رو سیال از مرکز حوضچه‌ی مذاب به لبه‌ها جریان می‌یابد و این امر موجب کشیدگی جوش می‌شود. اجزای فعال سطح نظیر اکسیژن، سلنیوم و گوگرد می‌توانند ضریب دمایی کشش سطحی را برای آلیاژهای آهن از منفی به مثبت تغییر دهند ($\frac{\partial\gamma}{\partial T}>0$) [16-19] و در نتیجه جهت جریان سیال را در حوضچه‌ی مذاب همان‌گونه که در شکل 11 نشان داده شده‌است، دچار تغییر کنند [7]. در این حالت یک جوش نسبتاً عمیق و با ارتفاع بیشتر نسبت به قبل ایجاد می‌شود.

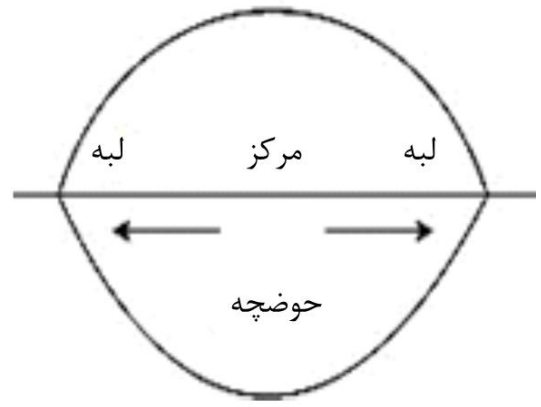
در آزمایش‌های انجام‌شده، اکسیژن موجود در حوضچه‌ی مذاب که حاصل از تجزیه‌ی پوشش نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و دی‌اکسید کربن موجود در گاز محافظ می‌باشد نقش مهمی به‌عنوان یک جزء فعال دارد و شکل جابجایی مارانگونی حوضچه‌ی مذاب را تغییر می‌دهد. تایماتسو و همکارانش [20] نشان دادند که اکسیژن در آهن خالص مذاب اگر در محدوده‌ی 150ppm- 350 باشد جهت مارانگونی را مرکزگرا می‌کند که در این محدوده ضریب دمایی کشش سطحی آلیاژ Fe-O مثبت می‌باشد؛ اما در خارج از این محدوده ضریب دمایی کشش سطحی منفی یا تقریباً صفر می‌باشد. این محدوده برای آلیاژهای مختلف متفاوت است که متأسفانه امکان آنالیز اکسیژن به‌منظور دستیابی به این محدوده وجود ندارد. نمودار به‌دست‌آمده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی به‌خوبی با این موضوع سازگاری دارد.



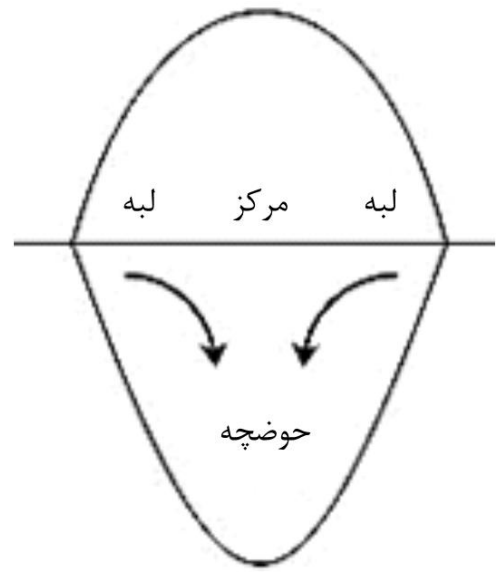

**شکل 10** تأثیر اصلی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر ارتفاع جوش



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]




الف) جابجایی سیال در حوضچه‌ی مذاب بدون عناصر فعال




ب) جابجایی سیال در حوضچه‌ی مذاب با عناصر فعال

**شکل 11** نمایش شماتیک جریان مارانگونی

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا حدود 0/9 mm، ابتدا بر ارتفاع جوش افزوده می‌شود. این موضوع به این علت است که ابتدا اکسیژن موجود در حوضچه‌ی مذاب در محدوده‌ی مناسب قرار می‌گیرد و جهت مارانگونی را مرکزگرا می‌کند که این امر موجب نفوذ عمیق‌تر و مرتفع‌تر شدن جوش می‌شود؛ اما با افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا 1 mm، اکسیژن از محدوده‌ی مناسب خارج و جهت مارانگونی برون‌گرا می‌شود و به‌تدریج از ارتفاع جوش کاسته می‌شود.

## 6-2- بررسی اثرات متقابل پارامترها

یکی از مزایای مدل‌سازی، بررسی آثار متقابل پارامترها با استفاده از مدل به‌دست‌آمده می‌باشد که این امر با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بسیار دشوار است. در این مقاله اثر متقابل ولتاژ قوس- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، جریان جوشکاری- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ، سرعت جوشکاری- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و درصد گاز آرگون در ترکیب گاز محافظ- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بررسی شدند. در بررسی اثر متقابل پارامترها، تمامی پارامترها در سطح وسط خود قرار می‌گیرند و فقط دو پارامتر که اثر متقابل آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است تغییر می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده به ترتیب در شکل‌های12- 15 نشان داده شده است.

انرژی قوس، انرژی داده‌شده به قطعه‌کار توسط جریان جوشکاری قبل از این‌که راندمان فرآیند در نظر گرفته شود، می‌باشد که در واحد طول جوش از رابطه‌ی (8) محاسبه می‌شود [21].

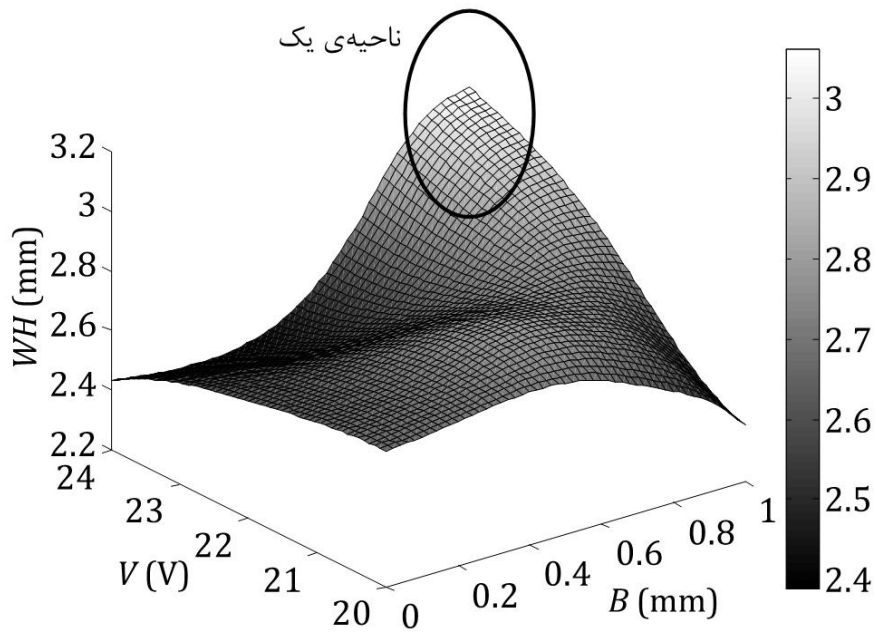
$$AE = 60\frac{VI}{S}\left(\frac{\text{J}}{\text{cm}}\right) \tag{8}$$

گرمای ورودی اثر راندمان فرآیند را بر انرژی، که در واقعیت به قطعه‌کار می‌رسد، در نظر می‌گیرد که از رابطه‌ی (9) محاسبه می‌شود [21].

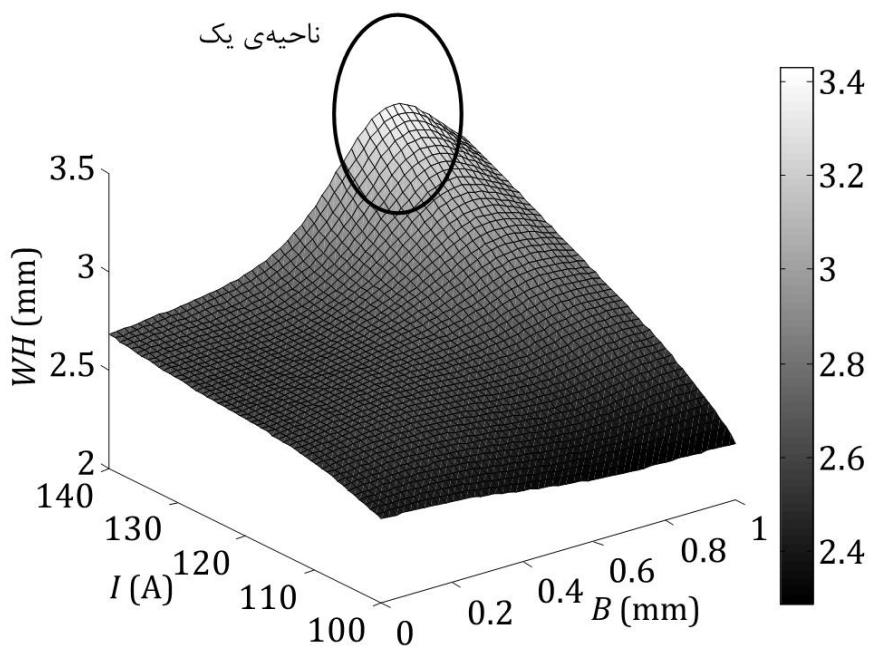
$$HI = kAE = k\,60\frac{VI}{S}\left(\frac{\text{J}}{\text{cm}}\right) \tag{9}$$

در رابطه‌ی (9)، $k$ راندمان روش جوشکاری مورد نظر می‌باشد. این راندمان در روش GMAW، 0/8 است [21].

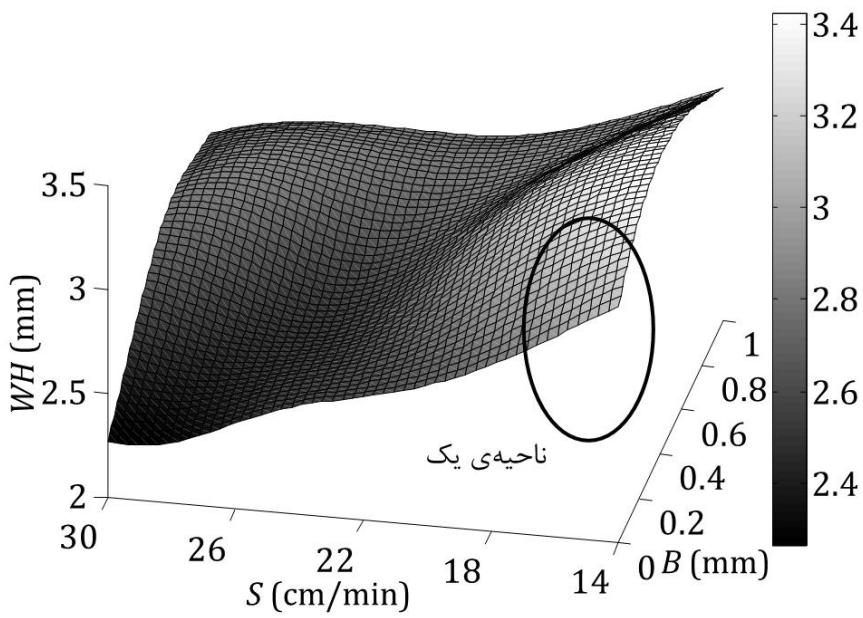
در شکل‌های 12 تا 14 در ناحیه‌ی 1 افزایش چشمگیری در ارتفاع جوش مشاهده می‌شود. این مسئله تحت تأثیر همزمان افزایش گرمای ورودی جوشکاری و پدیده‌ی مارانگونی در این ناحیه می‌باشد. در واقع با افزایش گرمای ورودی به حوضچه‌ی مذاب، حجم فلز مذاب ایجادشده بیشتر و در نهایت یک جوش با ابعاد هندسی بزرگتر ایجاد می‌شود. تأثیر اصلی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر ارتفاع جوش که در ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی بود و در شکل 10 نشان داده شد، به خوبی در این ناحیه دیده می‌شود.




**شکل 12** اثر متقابل ولتاژ قوس- ضخامت ماده نانو



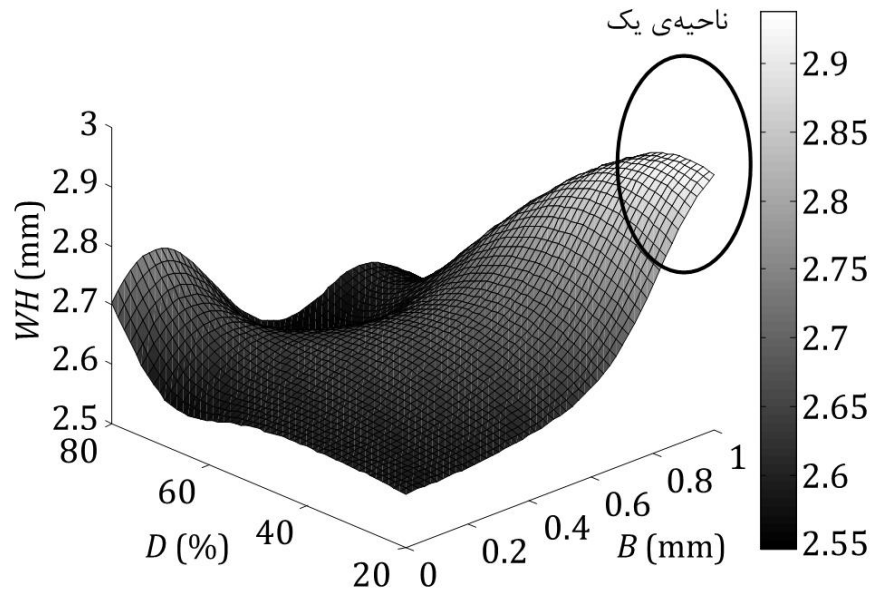

**شکل 13** اثر متقابل جریان جوشکاری- ضخامت ماده نانو



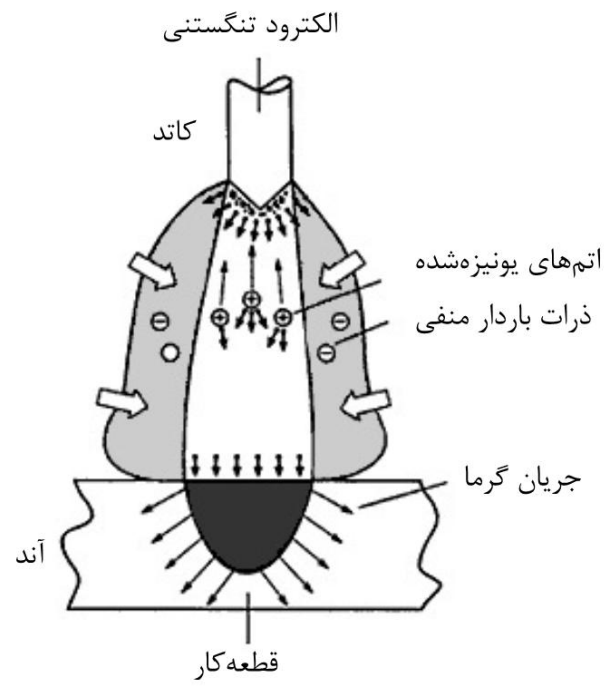

**شکل 14** اثر متقابل سرعت جوشکاری- ضخامت ماده نانو



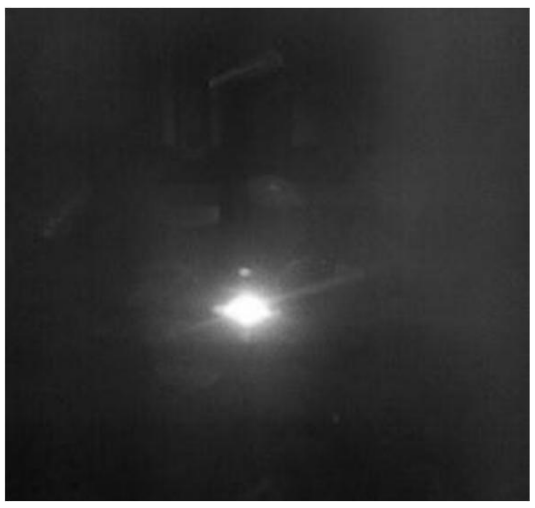
[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]




**شکل 15** اثر متقابل درصد گار آرگون- ضخامت ماده نانو




**شکل 16** مکانیزم تمرکز قوس در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز محافظ [22]



الف) شکل قوس بدون وجود نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم

ب) شکل قوس با وجود نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم

**شکل 17** حالت قوس در فرآیند GMAW

در شکل 15 در ناحیه‌ی 1 نیز افزایش چشمگیری در ارتفاع جوش مشاهده می‌شود. این موضوع به علت این است که در این ناحیه اکسیژن هم حاصل تجزیه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و هم حاصل تجزیه‌ی گاز دی‌اکسید کربن موجود در گاز محافظ می‌باشد؛ بنابراین غلظت اکسیژن افزایش می‌یابد و در محدوه‌ی مناسب برای تغییر جهت مارانگونی به حالت مرکزگرا قرار می‌گیرد که در نتیجه یک جوش با ارتفاع زیاد حاصل می‌شود.

در شکل 15 برخلاف شکل‌های 12- 14 گرمای ورودی جوشکاری ثابت است و فقط با تغییر درصد گاز آرگون موجود در گاز محافظ می‌توان به ارتفاع‌های متفاوتی برای جوش دست یافت.

## 6-3- تأثیر پوشش فعال بر شکل قوس

همان‌گونه که در شکل‌های 12- 15 نشان داده شده است، در ناحیه‌ی 1 اثر متقابل قوی بین پارامترهای ورودی جوشکاری و ضخامت لایه‌ی نانوذرات $TiO_2$ وجود دارد و افزایش چشمگیر در ارتفاع جوش مشاهده می‌شود. ازاین‌رو علاوه بر مکانیزم تغییر جهت جابجایی مارونگونی جریان سیال، مکانیزم تمرکز قوس نیز بر ارتفاع جوش تأثیر می‌گذارد. شکل 16 مکانیزم تمرکز قوس در فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی تنگستن با گاز محافظ را نشان می‌دهد که مشابه همین فرآیند در روش GMAW اتفاق می‌افتد. گاز محافظ در جوشکاری توسط گرما یونیزه می‌شود و به الکترون آزاد و یون‌های مثبت در ناحیه‌ی بیرونی‌تر قوس تبدیل می‌شود. پوشش تبخیرشده، قوس را توسط گرفتن الکترون‌های آزاد در نواحی بیرون‌تر قوس، متمرکز خواهد کرد. درواقع الکترون‌های آزاد بیرونی‌تر تمایل دارند که به مولکول‌های بخار شده و اتم‌های تجزیه‌شده‌ی خنثی جذب شوند و همان‌گونه که در شکل 16 نشان داده شده است این موضوع موجب تمرکز قوس می‌شود. پیوست الکترون فقط می‌تواند در نواحی پیرامون خنک‌تر که الکترون‌ها انرژی کمتری در یک میدان الکتریکی ضعیف دارند، انجام شود. به سمت مرکز قوس، جایی‌که میدان الکتریکی قوی، دمای بالا و الکترون‌های با انرژی زیاد وجود دارند، یونیزاسیون غالب خواهد بود؛ بنابراین محدود کردن جریان الکتریکی به ناحیه‌ی مرکزی قوس چگالی جریان الکتریکی را در پلاسما افزایش خواهد داد و در آند موجب یک قوس باریک‌تر و حوضچه‌ی جوش عمیق‌تر می‌شود [22]. تصاویر تهیه‌شده از حالت قوس که در شکل 17 ارائه شده اند به‌خوبی نشان می‌دهند که استفاده از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم موجب متمرکز شدن قوس می‌شود.

تغییر در توزیع انرژی قوس تغییر شکل جوش را به دنبال دارد. به‌عبارت دیگر وجود پوشش فعال موجب افزایش مقدار چگالی انرژی منبع گرما و متمایل نمودن جریان فلز مذاب به سمت مرکز حوضچه‌ی مذاب همان‌گونه که در شکل 11 ب) نشان داده شده است می‌شود؛ بنابراین این الگوی جریان به طور مؤثر گرما را از بالای حوضچه‌ی مذاب به پایین حوضچه‌ی مذاب انتقال می‌دهد و منجر به ایجاد یک هندسه‌ی جوش نسبتاً باریک و عمیق با ارتفاع زیاد می‌شود [8].

## 7- نتیجه گیری

در این تحقیق ارتفاع جوش به کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی مدل‌سازی شد. البته سایر پارامترهای هندسی نظیر پهنای جوش، عمق نفوذ و درجه‌ی رقت نیز می‌توانند در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرند. مقدار تابع کارایی برای مجموعه‌های آموزش، ارزیابی و آزمایش به ترتیب برابر با 0/0066، 0/0063 و 0/0093 بود. مشاهده شد که قدرمطلق بیشترین درصد خطای نسبی از % 8 کمتر بود و از این‌رو نتایجی که از شبکه‌ی عصبی مصنوعی



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]

به‌دست آمد با داده‌های واقعی انطباق خوبی داشتند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی ارتفاع جوش از دقت بالایی برخوردار است.

پوشش نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و گاز دی‌اکسید کربن موجود در ترکیب گاز محافظ به علت حرارت ناشی از قوس تجزیه شد و موجب اضافه شدن عنصر اکسیژن در روی حوضچه‌ی مذاب گردید و جابجایی مارانگونی را تحت تأثیر قرار داد. اگر میزان اکسیژن موجود در حوضچه‌ی مذاب در محدوده‌ی مناسب باشد، جهت مارانگونی مرکزگرا می‌شود که منجر به ایجاد یک جوش با ارتفاع زیاد و پهنای کم می‌شود و اگر خارج از محدوده‌ی مناسب باشد، جهت مارانگونی برون‌گرا می‌شود که جوش با ارتفاع کم و پهنای زیاد را ایجاد می‌کند. نمودار به‌دست‌آمده از مدل‌سازی شبکه‌ی عصبی مصنوعی که در آن همه‌ی پارامترها در سطح وسط خود قرار دارند و فقط ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم متغیر است، به‌خوبی با این موضوع تطابق داشت. در ابتدا چون میزان اکسیژن در محدوده‌ی مناسب بود با افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا حدود 0/9 mm، نمودار سیر صعودی طی کرد و ارتفاع جوش افزایش یافت؛ اما با افزایش ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا 1 mm و خارج شدن میزان اکسیژن از محدوده‌ی مناسب نمودار سیر نزولی آغاز کرد و ارتفاع جوش به تدریج کاهش یافت.

با استفاده از مدل به‌دست‌آمده آثار متقابل ولتاژ قوس- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، جریان جوشکاری- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ، سرعت جوشکاری- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و درصد گاز آرگون در ترکیب گاز محافظ- ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که با افزایش گرمای ورودی جوشکاری و قرار گرفتن اکسیژن حاصل از تجزیه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم و گاز دی‌اکسید کربن موجود در گاز محافظ در محدوده‌ی مناسب، افزایش چشمگیری در ارتفاع جوش ایجاد شد. همچنین می‌توان با گرمای ورودی جوشکاری ثابت و تغییر درصد گاز آرگون موجود در ترکیب گازهای محافظ به ارتفاع‌های متفاوتی برای جوش دست پیدا کرد.

وجود پوشش فعال موجب تمرکز قوس شد و جریان فلز مذاب را به سمت مرکز متمایل کرد که در نهایت یک جوش نسبتاً باریک و عمیق با ارتفاع بیشتر ایجاد شد.

از جمله محدودیت‌هایی که در این تحقیق وجود داشت عدم امکان محاسبه‌ی درصد اکسیژن در منطقه‌ی مذاب بود.

پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات بعدی از نرم‌افزارهای المان محدود به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند GMAW در حضور نانوذرات استفاده شود. همچنین بررسی ریزساختار منطقه‌ی مذاب می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

## 8- فهرست علائم

| | |
|---|---|
| $AE$ | انرژی قوس در واحد طول |
| $B$ | ضخامت لایه‌ی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (mm) |
| $D$ | درصد گاز آرگون در گاز محافظ |
| $\%E$ | درصد خطای نسبی |
| $HI$ | گرمای ورودی در واحد طول |
| $I$ | جریان جوشکاری (A) |
| $k$ | راندمان قوس الکتریکی |
| $MSE$ | میانگین مربعات خطا |
| $N$ | تعداد داده‌های مجموعه‌ی مورد بررسی |
| $P$ | تعداد متغیرهای مستقل |
| $R^2$ | ضریب تعیین |
| $S$ | سرعت جوشکاری ($cmmin^{-1}$) |
| $SS$ | مجموع توان دوم |
| $T$ | دما (K) |
| $V$ | ولتاژ قوس (V) |
| $WH$ | ارتفاع جوش (mm) |
| $Y$ | نتایج حاصل از مدلسازی |
| $y_i$ | مقدار اندازه‌گیری شده |
| $\hat{y}_i$ | مقدار پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی مصنوعی |
| $\bar{y}$ | میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده |

**علایم یونانی**

| | |
|---|---|
| $\gamma$ | کشش سطحی ($Nm^{-1}$) |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| adj | اصلاح شده |
| E | خطا |
| i | شمارنده داده‌ها |
| R | رگرسیون |
| T | نهایی |

## 9- مراجع


[1] B. Chen, F. Han, Y. Huang, K. Lu, Y. Liu, L. Li, Influence of Nanoscale Marble (Calcium Carbonate $CaCO_3$) on Properties of D600R Surfacing Electrode, *Welding Journal, Research Supplement,* Vol. 88, pp. 99s-103s, 2009.

[2] M. Aghakhani, M. Ghaderi, A. Karami, A. Derakhshan, Combined effect of TiO2 nanoparticles and input welding parameters on the weld bead penetration in submerged arc welding process using fuzzy logic, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 70, No. 1-4, pp. 63-72, 2014.

[3] W. Lucas, D. Howse, Activating flux-increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes, *Welding & Metal Fabrication,* Vol. 64, No. 1, pp. 11-15, 1996.

[4] M. Kuo, Z. Sun, D. Pan, Laser welding with activating flux, *Science and Technology of Welding & Joining,* Vol. 6, No. 1, pp. 17-22, 2001.

[5] M. Fattahi, N. Nabhani, M. Vaezi, E. Rahimi, Improvement of impact toughness of AWS E6010 weld metal by adding $TiO_2$ nanoparticles to the electrode coating, *Materials Science and Engineering: A,* Vol. 528, No. 27, pp. 8031-8039, 2011.

[6] T. K. Pal, U. K. Maity, Effect of nano size $TiO_2$ particles on mechanical properties of AWS E 11018M type electrode, *Materials Sciences and Applications,* Vol. 2, No. 9, pp. 1285-1292, 2011.

[7] S. Lu, H. Fujii, H. Sugiyama, M. Tanaka, K. Nogi, Weld penetration and Marangoni convection with oxide fluxes in GTA welding, *Materials Transactions,* Vol. 43, No. 11, pp. 2926-2931, 2002.

[8] H.-Y. Huang, Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding, *Materials & Design,* Vol. 31, No. 5, pp. 2488-2495, 2010.

[9] M. Ahmadzadeh, A. Hoseini Fard, B. Saranjam, H. Salimi, Prediction of residual stresses in gas arc welding by back propagation neural network, *NDT & E International,* Vol. 52, pp. 136-143, 2012.

[10] K. Manikya Kanti, P. Srinivasa Rao, Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 200, No. 1, pp. 300-305, 2008.

[11] 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, No. 2, pp. 303-312, 2002.

[12] L. Tian, Y. Luo, Y. Wang, X. Wu, Prediction of transverse and angular distortions of gas tungsten arc bead-on-plate welding using artificial neural network, *Materials & Design,* Vol. 54, pp. 458-472, 2014.

[13] R. E. Bruns, I. S. Scarminio, B. de Barros Neto, *Statistical Design - Chemometrics*: Elsevier Science, 2006.




[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]

[14] M. Kia, Neural networks in MATLAB, Tehran: Publication Co. Daneshgahi Kian, 2012. (In persian)

[15] P. Legendre, L. F. Legendre, *Numerical ecology*: Elsevier, 2012.

[16] C. Heiple, P. Burgardt, Effects of $SO_2$ shielding gas additions on GTA weld shape, *Welding Journal, Research Supplement,* Vol. 64, No. 6, pp. 159s-162s, 1985.

[17] C. Heiple, J. Roper, Effect of selenium on GTAW fusion zone geometry, *Welding Journal, Research Supplement,* Vol. 60, No. 8, pp. 143s-145s, 1981.

[18] C. Heiple, J. Roper, R. Stagner, R. Aden, Surface active element effects on the shape of GTA, laser and electron beam welds, *Welding Journal, Research Supplement,* Vol. 62, No. 3, pp. 72s-77s, 1983.

[19] J. Roper, D. Olson, Capillarity effects in the GTA weld penetration of 21-6-9 stainless steel, *Welding Journal, Research Supplement,* Vol. 57, pp. 103s-108s, 1978.

[20] H. Taimatsu, K. Nogi, K. Ogino, Surface Tension of Liquid Fe-O Alloy, *Journal of High Temperature Society of Japan,* Vol. 18, No. 1, pp. 14-19, 1992.

[21] *What is the difference between heat input and arc energy?,* Accessed 2 March, 2015; http://www.twi-global.com/technical-knowledge/ faqs/ material-faqs/ faq-what- is- the- difference- between- heat-input-and-arc-energy/.

[22] D. Howse, W. Lucas, Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding, *Science and Technology of Welding & Joining,* Vol. 5, No. 3, pp. 189-193, 2000.



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.7.18.6 ]