



## بکارگیری منطق فازی جهت پیش‌بینی هندسه جوش در جوشکاری زیرپودری فولاد API X65

محمد علی مرادپور<sup>۱\*</sup>، سید حجت هاشمی<sup>۲</sup> و خلیل خلیلی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۲</sup> استاد، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۳</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

### چکیده

جوشکاری زیرپودری از روش‌های مهم جوشکاری با نرخ رسوب بالا و کیفیت جوشکاری مناسب محسوب می‌شود که در جوشکاری ورق‌های ضخیم، مخصوصاً جوشکاری لوله‌های قطور انتقال نفت و گاز و مخازن تحت فشار کاربرد زیادی دارد. در این روش تنظیم دقیق پارامترهای جوشکاری جهت نیل به جوشکاری با کیفیت بالا، از اهمیت زیادی برخوردار است. عموماً تنظیم پارامترها بصورت سعی و خطا، با استفاده از مقادیر پیشنهادی سازندگان دستگاه و یا کتب فنی (مراجع جوشکاری) صورت می‌گیرد که روش دقیقی نمی‌باشد. در این تحقیق جهت پیش‌بینی دقیق هندسه گرده جوش، از منطق فازی استفاده شده است. بدین منظور آزمایش‌های عملی در شرایط مختلف جوشکاری بر روی ورق فولادی لوله‌های انتقال گاز از نوع API X65 انجام شد. سپس بر اساس اطلاعات تجربی بدست آمده، مدل فازی مطلوبی طراحی شد که ورودی‌های آن جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری و خروجی‌های آن عمق نفوذ جوش، پهنا و ارتفاع گرده جوش می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل ارائه شده، می‌تواند با دقت مطلوبی هندسه‌ی گرده جوش را تخمین بزند. بر این اساس می‌توان در شرایط مشابه و کنترل شده، از این مدل با اعمال تغییرات مورد نیاز برای تنظیم عملی پارامترهای جوشکاری خط تولید لوله‌های فولادی استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** هندسه‌ی جوش؛ جوشکاری زیرپودری؛ فولاد API X65؛ منطق فازی.

## Application of fuzzy logic for prediction of weld bead geometry in submerged arc welding of API X65 steel

M. A. Moradpour<sup>1,\*</sup>, S. H. Hashemi<sup>2</sup> and K. Khalili<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

<sup>2</sup> Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

<sup>3</sup> Associate Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

### Abstract

Submerged Arc Welding is one of the important welding processes with high deposition rate and high welding quality. This method of welding is largely used in welding of large-diameter gas transmission pipelines and high-pressure vessels. Selection of process parameters has great influence on the quality of welded joint. Generally, welding parameters are determined by trial and error, based on standard codes, handbooks and recommendations from manufacturer. However, this selection may not yield optimal and accurate welding performance. This study offers a technique, based on Fuzzy logic for weld bead geometry prediction. First, different welding parameters are set to perform different experiments on API X65 steel plates. Then weld bead geometry is measured experimentally. Base on the resulted data, the Fuzzy logic are used for prediction of weld bead geometry. The results show that the designed Fuzzy system can accurately predict the weld bead geometry parameters. This is promising as the developed model can be used in the actual pipe mill with applying required changes for selection of the real welding conditions.

**Keywords:** Weld bead geometry; Submerged arc welding; API X65 steel; Fuzzy logic.

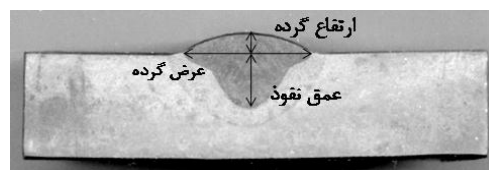
## ۱- مقدمه

روش‌های مرسوم برای تنظیم پارامترهای ورودی جوشکاری جهت به دست آوردن شکل مناسب گرده‌ی جوش، اغلب به صورت تجربی و یا بوسیله کتب فنی و اطلاعات مهندسی ارائه شده توسط برخی شرکت‌های صنعتی می باشد که با توجه به شرایط مختلف کاری، عموماً از دقت کافی برخوردار نیستند.

برای پیش‌بینی دقیق هندسه‌ی گرده‌ی جوش، جهت تنظیم بهتر پارامترهای ورودی فرآیندهای مختلف جوشکاری، استفاده از روش‌های جدید و مبتنی بر هوش مصنوعی، بسیار مفید و کارآمد است. تاکنون تلاش‌هایی در این زمینه صورت گرفته و در این راستا از شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۶</sup> و منطق فازی<sup>۷</sup> به عنوان روش‌های کاربردی در جهت مدل‌سازی فرآیندهای مختلف جوشکاری و تخمین هندسه‌ی گرده‌ی جوش استفاده شده است. در سال ۱۹۹۵ فتحی و لامبر<sup>۸</sup> [۱]، با استفاده از منطق فازی به محاسبه و بهینه کردن پارامترهای جوشکاری اشعه‌ی لیزر پرداختند. ناگش<sup>۹</sup> و همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۲، شبکه‌ی عصبی را برای پیش‌بینی هندسه‌ی جوش و عمق نفوذ در جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود پوشش‌دار<sup>۱۰</sup>، بدون در نظر گرفتن ساختار شبکه‌ی عصبی، بکار بردند. در سال ۲۰۰۴، کیم<sup>۱۱</sup> و همکارانش [۳] از شبکه‌ی عصبی برای بیان رابطه‌ی بین پارامترهای جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ<sup>۱۲</sup> با پهنا‌ی جوش استفاده کردند. در سال ۲۰۰۵، خو<sup>۱۳</sup> و همکارانش [۴] از منطق فازی به منظور پیش‌بینی و کنترل عرض جوش در جوشکاری قوس الکتریکی توسط ربات استفاده کردند. وو<sup>۱۴</sup> و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۶، یک مدل شبکه‌ی عصبی را برای نشان دادن ارتباط بین پارامترهای هندسی روی جوش با عمق نفوذ جوش ارائه دادند و از این شبکه جهت کنترل عمق نفوذ جوش بهره بردند. دوتا<sup>۱۵</sup> و کومار<sup>۱</sup> [۶] در سال ۲۰۰۷ با استفاده از شبکه‌های

جوشکاری زیرپودری<sup>۱</sup> از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های جوشکاری در صنایع مختلف می‌باشد. این روش جوشکاری، از قوس الکتریکی بین الکتروود بدون پوشش و قطعه‌کار، داخل پودر مخصوص جوشکاری تشکیل می‌شود. فرآیند جوشکاری زیرپودری عمدتاً برای جوشکاری با نرخ رسوب بالا و یا جوشکاری با نفوذ زیاد در سازه‌های بزرگ فولادی که مساعد برای جوشکاری خودکار می‌باشند، بکار می‌رود. از جمله‌ی مهم‌ترین و حساس‌ترین کاربردهای این روش جوشکاری، بکارگیری آن در جوشکاری لوله‌های قطور انتقال نفت و گاز می‌باشد. هزینه‌های بسیار زیادی که صرف تولید این لوله‌ها می‌شود، اهمیت پیش‌بینی و کنترل فرآیند جوشکاری آنها را افزایش می‌دهد.

یکی از اصلی‌ترین روش‌های غیرمستقیم حصول اطمینان از کیفیت مطلوب جوش، دستیابی به شکل مورد نظر هندسه‌ی گرده‌ی جوش می‌باشد. در فرآیندهای مختلف جوشکاری، هندسه‌ی گرده‌ی جوش<sup>۲</sup> با تنظیم پارامترهای موثر در فرآیند جوشکاری کنترل می‌شود. هندسه‌ی گرده‌ی جوش، شامل پارامترهایی مانند عمق نفوذ جوش<sup>۳</sup>، ارتفاع<sup>۴</sup> و پهنا‌ی گرده‌ی جوش<sup>۵</sup> است که در شکل ۱ نشان داده شده است. از سوی دیگر، اندازه‌گیری دستی ابعاد گرده‌ی جوش، زمان‌بر بوده و در برخی موارد (مخصوصاً در تعیین عمق نفوذ جوش)، نیاز به تخریب اتصال جوشی می‌باشد. در نتیجه تخمین دقیق هندسه‌ی گرده‌ی جوش به ازای پارامترهای تنظیم شده در فرآیند جوشکاری، برای دستیابی به کیفیت مطلوب جوش از اهمیت فراوانی برخوردار است.



شکل ۱- هندسه‌ی گرده‌ی جوش در مقطع ورق جوشکاری شده

<sup>6</sup> Artificial Neural Networks

<sup>7</sup> Fuzzy logic

<sup>8</sup> Lambrecht

<sup>9</sup> Nagesh

<sup>10</sup> Shielded Metal Arc Welding

<sup>11</sup> Kim

<sup>12</sup> Gas Metal Arc Welding

<sup>13</sup> Xue

<sup>14</sup> Wu

<sup>15</sup> Dutta

<sup>1</sup> Submerged Arc Welding

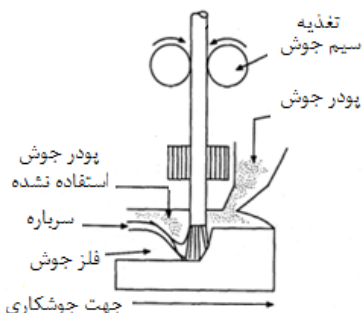
<sup>2</sup> Weld bead geometry

<sup>3</sup> Depth of penetration

<sup>4</sup> Weld bead height

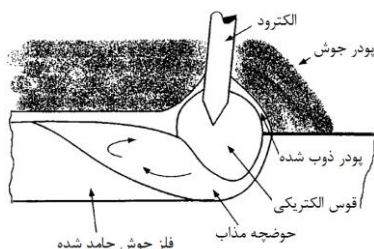
<sup>5</sup> Weld bead width

گسترده مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۲ این فرآیند جوشکاری به صورت کلی نشان داده شده است [۱۲].



شکل ۲- نمایش جزئیات فرآیند جوشکاری زیرپودری

در روش جوشکاری زیرپودری، اتصال فلز توسط گرمای حاصل از قوس الکتریکی بین الکترود بدون روکش و قطعه کار انجام می‌گیرد [۱۱-۱۵]. همچنین اتصال دو فلز به یکدیگر بدون اعمال فشار بوده و ماده‌ی پرکننده از ذوب الکترود، سیم جوش و یا پودر فلزی تامین می‌شود. در جوشکاری زیرپودری، پودر محافظ سه نقش مهم دارد: ۱- پایداری قوس الکتریکی، ۲- اثرگذاری بر خواص مکانیکی و شیمیایی، ۳- وابستگی کیفیت جوش به نحوه‌ی مراقبت و نگهداری قوس الکتریکی توسط پودر. در این روش، پودر جوشکاری روی محلی که باید جوشکاری شود ریخته و الکترود به آن محل نزدیک می‌شود. هنگامی که قوس الکتریکی تشکیل می‌شود، مقداری از عناصر موجود در پودر وارد فلز جوش می‌شوند و خواص آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، گرمای حاصل از قوس الکتریکی باعث می‌شود قسمتی از پودر ذوب شده و بصورت تفال جوشکاری روی فلز مذاب را بپوشاند.



شکل ۳- محافظت حوضچه‌ی مذاب در جوشکاری زیرپودری بوسیله پودر محافظ

عصبی، مدل‌سازی جوشکاری تنگستن با گاز محافظ<sup>۲</sup> را انجام دادند. کانتی<sup>۳</sup> و سرینی‌وازا<sup>۴</sup> [۷] در سال ۲۰۰۸ شبکه‌ی عصبی را در تخمین هندسه‌ی جوش در جوشکاری پالسی با گاز محافظ مورد استفاده قرار دادند. در سال ۲۰۱۰ نیز چندین تحقیق در این زمینه صورت گرفته است. بعنوان مثال، بالاسوبرامانیان<sup>۵</sup> و همکارانش [۸] به مدل‌سازی فرآیند جوشکاری پرتوی لیزری بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی پرداختند. ناگش و داتا<sup>۶</sup> [۹] پیش‌بینی هندسه‌ی جوش در جوشکاری تنگستن با گاز محافظ را با بکارگیری شبکه‌ی عصبی مورد تحقیق قرار دادند. در سال ۲۰۱۱ نیز آچرجی<sup>۷</sup> و همکارانش [۱۰] توانستند با بکارگیری شبکه‌ی عصبی، مدل مناسبی را جهت پیش‌بینی کیفیت جوش در جوشکاری لیزر بر روی ترموپلاستیک‌ها ارائه دهند.

در این تحقیق نیز تلاش شده است تا با استفاده از داده‌هایی که از طریق آزمایش‌های عملی بدست آمده‌اند، مدل مناسبی جهت پیش‌بینی هندسه‌ی گرده‌ی جوش در فرآیند جوشکاری زیر پودری فولاد با گرید API X65<sup>۸</sup> (فولاد لوله‌های خطوط انتقال گاز ایران)، به کمک منطق فازی ارائه شود.

## ۲- فرآیند جوشکاری زیرپودری

جوشکاری زیرپودری یکی از قدیمی‌ترین روش‌های جوشکاری خودکار می‌باشد که در سال ۱۹۳۰ معرفی شد [۱۱]. کاربردهای گسترده‌ی فرآیند جوشکاری زیرپودری، این روش را به یکی از مهم‌ترین روش‌های جوشکاری صنعتی تبدیل کرده است. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به جوشکاری فولادهای سازه‌ای، کم آلیاژ و پرآلیاژ و همچنین جوشکاری خط جوش‌های بلند و سازه‌های ضخیم اشاره کرد [۱۱]. ویژگی‌های فرآیند جوشکاری زیرپودری باعث شده تا در صنعت تولید لوله‌های خطوط انتقال نفت و گاز نیز بطور

<sup>1</sup> Kumar

<sup>2</sup> Tungsten Inert Gas Welding

<sup>3</sup> Kanti

<sup>4</sup> Srinivasa

<sup>5</sup> Balasubramanian

<sup>6</sup> Datta

<sup>7</sup> Acherjee

<sup>8</sup> American Petroleum Institute

نادرستی هر چیزی با درجه‌ی عضویت نشان داده می‌شود که مقدار آن بین صفر و یک است.

### ۳-۱- سامانه‌های استنتاج فازی<sup>۵</sup>

استنتاج فازی روش بیان رابطه‌ی بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم با استفاده از منطق فازی است. در واقع استنتاج فازی، یک مینا از اینکه تصمیم ما چه می‌تواند باشد، یا اینکه الگوی تصمیم‌گیری چه باشد را فراهم می‌کند. دو نوع سامانه-ی استنتاج فازی پرکاربرد شامل: ۱- ممدانی<sup>۶</sup> و اسیلیان<sup>۷</sup> [۱۸]، و ۲- سوگنو<sup>۸</sup> [۱۹] وجود دارد. این دو نوع سامانه در بسیاری از موارد شبیه هم هستند، ولی مهم‌ترین تفاوت بین این دو در خروجی آنها می‌باشد. در سامانه‌ی ممدانی، خروجی به صورت یک مجموعه‌ی فازی است که باید دفازی<sup>۹</sup> شود. اما در سامانه‌ی سوگنو، خروجی به صورت خطی یا ثابت است. پس از انتخاب سامانه‌ی استنتاج فازی مورد استفاده، مهم‌ترین مرحله دسته‌بندی داده‌ها و تعریف توابع عضویت<sup>۱۰</sup> برای مجموعه‌ی داده‌های ورودی و خروجی است. در ادامه نیز با در نظر گرفتن دسته‌بندی ایجاد شده، مجموعه‌ای از قوانین "اگر- آنگاه" برای ایجاد رابطه‌ای منطقی بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، تولید می‌شود.

### ۳-۲- دسته‌بندی داده‌ها

یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در منطق فازی، اعمال دسته‌بندی به منظور تعریف توابع عضویت می‌باشد. فرآیند دسته‌بندی سعی دارد که یک مجموعه داده را به چندین دسته تقسیم کند، به طوری که داده‌های قرار گرفته در یک دسته با یکدیگر شبیه بوده و با دسته‌های دیگر متفاوت باشند. پس از دسته‌بندی مناسب اطلاعات، می‌توان با کمترین تعداد قوانین<sup>۱۱</sup>، رفتار داده‌ها را مدل کرد. ذکر این نکته نیز قابل اهمیت است که یافتن تعداد بهینه‌ی قوانین، یکی از نکات مهم منطق فازی می‌باشد که بطور مستقیم متأثر از نحوه‌ی

از مزیت‌های جوشکاری قوس الکتریکی زیرپودری نسبت به فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود روکش‌دار، می‌توان به عمق نفوذ بیشتر جوش، نرخ رسوب و سرعت جوشکاری بالاتر، بوجود نیامدن ترشحات جوشکاری<sup>۱</sup> و عدم نیاز به جوشکار ماهر اشاره کرد. همچنین مهم‌ترین محدودیت‌های این روش جوشکاری، هزینه‌ی بالای تجهیزات، لزوم رعایت زاویه‌ی افقی محل جوشکاری (جهت نگه‌داشتن پودر جوشکاری) و جوشکاری ورق‌هایی با حداقل ضخامت ۶/۴ میلی‌متر (به علت گرمای زیاد منتقل شده به ورق) می‌باشد.

در جوشکاری زیرپودری نیز همانند دیگر روش‌های جوشکاری، کیفیت جوش ایجاد شده را می‌توان با معیار شکل گرده‌ی جوش بررسی کرد [۱۲-۱۵]. هندسه‌ی گرده‌ی جوش شامل پارامترهایی مانند عمق نفوذ جوش، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش می‌باشد که می‌توان آن را با تغییر مقادیر پارامترهای موثر در فرآیند جوشکاری کنترل کرد. مهم‌ترین پارامترهای قابل تنظیم در فرآیند جوشکاری زیرپودری، شدت جریان<sup>۲</sup> و ولتاژ قوس الکتریکی<sup>۳</sup>، سرعت جوشکاری<sup>۴</sup>، شکل و قطر سیم جوشکاری، زاویه‌ی سیم جوش نسبت به سطح قطعه‌کار و نوع پودر می‌باشد که با تنظیم صحیح آنها، می‌توان شکل مورد نظر گرده‌ی جوش را بدست آورد.

### ۳-۳- منطق فازی

منطق فازی بعنوان مفهوم جدیدی در مقابل روش‌های متداول برای طراحی و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده به کار می‌رود. منطق فازی توسط لطفی‌زاده [۱۶] در مقاله‌ای با عنوان "سیستم‌های فازی" به صورت رسمی معرفی شد. لطفی‌زاده [۱۶ و ۱۷] بیان کرد که تئوری کلاسیک بیش از حد بر روی دقت تاکید داشته و از این جهت با سامانه‌های پیچیده و دنیای واقعی چندان سازگاری ندارد. منطق کلاسیک، هرچیزی را بر اساس یک سامانه‌ی دوتایی نشان می‌دهد (درست یا غلط، صفر یا یک)، اما در منطق فازی، درستی یا

<sup>5</sup> Fuzzy inference systems

<sup>6</sup> Mamdani

<sup>7</sup> Assilian

<sup>8</sup> Sugeno

<sup>9</sup> Non-fuzzy

<sup>10</sup> Membership functions

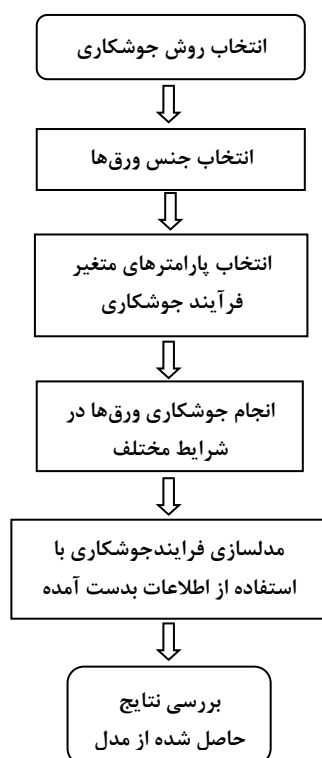
<sup>11</sup> Rules

<sup>1</sup> Spatter

<sup>2</sup> Arc current

<sup>3</sup> Arc voltage

<sup>4</sup> Welding speed



شکل ۴- نمودار گردش‌های مراحل انجام شده در این تحقیق

پس از جوشکاری برای مشخص شدن عمق نفوذ جوش، ورق‌ها برش خورده و پس از سمباده زنی در محلول نیتال<sup>۱</sup> ۳٪ اچ شده‌اند. با نمایان شدن عمق نفوذ جوش، پارامترهای عمق نفوذ (D)، پهنا (W) و ارتفاع گرده‌ی جوش (H) بوسیله کولیس (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری و ثبت شده است. پارامترهای متغیر تنظیم شده در فرآیند جوشکاری و هندسه‌ی گرده‌ی جوش حاصل شده از آن، در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

تجهیزات مورد استفاده جهت جوشکاری ورق‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۶- مدل فازی ارائه شده

در این تحقیق از جعبه ابزار منطق فازی نرم افزار متلب<sup>۲</sup> (نسخه ۲۰۱۰) جهت مدل‌سازی جوشکاری زیرپودری و

دسته‌بندی پارامترها است. در واقع تعداد کم قوانین "اگر-آنگاه"، نمی‌تواند مسئله را پوشش دهد و تعداد زیاد آن نیز باعث پیچیدگی رفتار مدل و در نتیجه باعث کارایی ضعیف مدل می‌شود.

#### ۴- روش تحقیق

جهت بررسی تاثیر پارامترهای ورودی فرآیند جوشکاری زیرپودری بر روی هندسه‌ی گرده‌ی جوش، آزمایش‌های عملی بر روی ورق فولادی صورت گرفته است. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، پارامترهای شدت جریان (I)، ولتاژ (V) و سرعت جوشکاری (S) بعنوان پارامترهای متغیر فرآیند در نظر گرفته شده‌اند. دیگر پارامترهای تاثیرگذار در فرآیند جوشکاری زیرپودری، در تمامی آزمایش‌ها ثابت بوده‌اند. نمودار گردشی ارائه شده در شکل ۴، مراحل صورت گرفته در این تحقیق، جهت جمع‌آوری داده‌ها به منظور مدل‌سازی فرآیند را نشان می‌دهد.

#### ۵- شرایط آزمایش

در این تحقیق آزمایش‌های عملی بر روی ورق‌های فولادی از جنس فولاد API X65 انجام شده است. ویژگی‌های این نوع فولاد باعث شده تا بطور گسترده در ساخت لوله‌های خطوط انتقال نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی و همچنین نتایج بدست آمده از آزمون کشش فولاد مورد استفاده، در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

برای انجام آزمایش، ۵۰ ورق از فولاد مورد نظر به عرض ۱۰ سانتی‌متر، طول ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱۴/۳ میلی‌متر تهیه شده و پس از آماده‌سازی، تحت جوشکاری زیرپودری در شرایط مختلف کاری قرار گرفته‌اند. سیم جوش مورد استفاده برای جوشکاری ورق‌ها، سیم جوش جوشکاری زیرپودری با نام تجاری S2MO (EN 756, EN AWS A 5.23) ، 12070 و درصد وزنی عناصر آلیاژی سیم جوش: C:۰/۱ ، Si:۰/۱ ، Mn:۱/۰ و Mo:۰/۵) با قطر ۳/۲ میلی‌متر و پودر جوش مورد استفاده، پودر جوش استاندارد (AWS(A 5.17) ، DIN EN 760 & DIN 32522) ، A 5.23) با نام تجاری AMA OP 139 بوده است.

<sup>1</sup> Nital solution

<sup>2</sup> Matlab

جدول ۱- نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی فولاد API X65 و مقایسه‌ی آن با الزامات استاندارد API 5L

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Ti	Nb	Ca	پارامتر	نتایج آنالیز شیمیایی
۰/۰۷۰	۰/۲۱۰	۱/۵۱۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۱۶۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۰/۰۳۹	۰/۰۱۶	۰/۰۴۲	۰/۰۱۴	۰/۰۴۴	۰/۰۰۱		
۰/۲۶	۱/۴	-	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰	-	-	-	-	-	۰/۱۵ Ti-Nb	۰/۰۶ و ۰/۱۵ Ti-Nb	۰/۱۵ Ti-V	-	بیشترین درصد وزنی	الزامات استاندارد API 5L

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون کشش فولاد API X65 و مقایسه‌ی آن با الزامات استاندارد API 5L

استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	پارامتر	نتایج آزمایشگاهی
۳۵۸	۶۲۴	۳۴		
۴۵۰	۵۳۵	۲۴	بیشترین حد	
۶۰۰	۷۶۰	-	کمترین حد	الزامات استاندارد API 5L

جدول ۳- پارامترهای تنظیم شده در آزمایش‌های عملی و هندسه‌ی گرده‌ی جوش حاصل از آن

شماره آزمایش	پارامترهای تنظیم شده در فرآیند جوشکاری			پارامترهای هندسه جوش اندازه‌گیری شده		
	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت (cm/min)	عمق نفوذ (mm)	عرض (mm)	ارتفاع (mm)
۱	۴۰۰	۳۰	۳۶	۴/۸	۱۶/۰	۲/۴
۲	۴۵۰	۳۰	۳۶	۵/۷	۱۶/۸	۲/۶
۳	۵۰۰	۳۰	۳۶	۵/۳	۲۰/۳	۳/۰
۴	۵۵۰	۳۰	۳۶	۷/۴	۲۱/۵	۳/۲
۵	۶۰۰	۳۰	۳۶	۹/۳	۱۸/۷	۳/۴
۶	۴۰۰	۳۲	۳۶	۴/۸	۱۶/۹	۲/۵
۷	۴۵۰	۳۲	۳۶	۵/۷	۱۸/۰	۳/۲
۸	۵۰۰	۳۲	۳۶	۶/۱	۱۷/۳	۲/۹
۹	۵۵۰	۳۲	۳۶	۸/۷	۱۸/۷	۳/۲
۱۰	۶۰۰	۳۲	۳۶	۸/۴	۱۹/۱	۴/۱
۱۱	۴۰۰	۳۴	۳۶	۴/۷	۱۴/۷	۲/۷
۱۲	۴۵۰	۳۴	۳۶	۴/۹	۱۸/۲	۲/۴
۱۳	۵۰۰	۳۴	۳۶	۶/۵	۱۹/۴	۳/۱
۱۴	۵۵۰	۳۴	۳۶	۸/۷	۲۰/۶	۲/۷
۱۵	۶۰۰	۳۴	۳۶	۸/۲	۲۳/۰	۳/۴
۱۶	۴۰۰	۳۶	۳۶	۵/۱	۱۷/۳	۲/۷
۱۷	۴۵۰	۳۶	۳۶	۵/۱	۱۸/۵	۲/۴
۱۸	۵۰۰	۳۶	۳۶	۶/۸	۱۹/۶	۲/۷
۱۹	۵۵۰	۳۶	۳۶	۷/۰	۲۲/۳	۳/۲
۲۰	۶۰۰	۳۶	۳۶	۸/۲	۲۲/۹	۲/۴
۲۱	۴۰۰	۳۰	۴۶	۳/۶	۱۳/۴	۲/۱
۲۲	۴۵۰	۳۰	۴۶	۵/۴	۱۳/۰	۲/۲
۲۳	۵۰۰	۳۰	۴۶	۵/۶	۱۳/۹	۲/۳
۲۴	۵۵۰	۳۰	۴۶	۵/۹	۱۳/۱	۲/۵
۲۵	۶۰۰	۳۰	۴۶	۵/۹	۱۳/۲	۲/۶
۲۶	۴۰۰	۳۲	۴۶	۳/۳	۱۰/۱	۲/۱
۲۷	۴۵۰	۳۲	۴۶	۴/۸	۱۶/۸	۲/۱
۲۸	۵۰۰	۳۲	۴۶	۵/۲	۱۲/۷	۲/۱

ادامه‌ی جدول ۳

۲/۲	۱۲/۳	۶/۴	۴۶	۳۲	۵۵۰	۲۹
۲/۵	۱۴/۰	۶/۸	۴۶	۳۲	۶۰۰	۳۰
۲/۶	۱۰/۸	۵/۶	۴۶	۳۴	۴۰۰	۳۱
۲/۴	۱۱/۹	۴/۶	۴۶	۳۴	۴۵۰	۳۲
۲/۵	۱۳/۹	۶/۰	۴۶	۳۴	۵۰۰	۳۳
۲/۷	۱۳/۶	۷/۵	۴۶	۳۴	۵۵۰	۳۴
۲/۷	۱۴/۹	۷/۶	۴۶	۳۴	۶۰۰	۳۵
۲/۱	۱۲/۲	۵/۰	۴۶	۳۶	۴۰۰	۳۶
۲/۶	۱۲/۸	۵/۶	۴۶	۳۶	۴۵۰	۳۷
۲/۶	۱۳/۵	۵/۹	۴۶	۳۶	۵۰۰	۳۸
۲/۸	۱۴/۳	۶/۳	۴۶	۳۶	۵۵۰	۳۹
۳/۰	۱۴/۹	۷/۱	۴۶	۳۶	۶۰۰	۴۰
۲/۴	۱۲/۸	۵/۴	۴۹	۳۰	۴۰۰	۴۱
۲/۳	۱۵/۷	۵/۷	۴۹	۳۰	۴۵۰	۴۲
۲/۸	۱۵/۶	۶/۶	۴۹	۳۰	۵۰۰	۴۳
۲/۹	۱۷/۲	۶/۸	۴۹	۳۰	۵۵۰	۴۴
۲/۳	۱۶/۸	۹/۸	۴۹	۳۰	۶۰۰	۴۵
۲/۷	۱۴/۹	۵/۲	۴۹	۳۲	۴۰۰	۴۶
۲/۹	۱۴/۳	۶/۱	۴۹	۳۲	۴۵۰	۴۷
۲/۹	۱۵/۵	۷/۱	۴۹	۳۲	۵۰۰	۴۸
۳/۰	۱۴/۷	۶/۹	۴۹	۳۲	۵۵۰	۴۹
۳/۳	۱۷/۸	۸/۲	۴۹	۳۲	۶۰۰	۵۰

جریان از تابع گوسی<sup>۱</sup>، برای دسته‌بندی مقادیر ولتاژ از تابع دوزنقه‌ای<sup>۲</sup> و مثلثی<sup>۳</sup> و جهت دسته‌بندی مقادیر سرعت حرکت الکتروود جوشکاری، از تابع دوزنقه‌ای استفاده شده است. همچنین تابع مورد استفاده در دسته‌بندی مقادیر عمق نفوذ، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش، تابع مثلثی می‌باشد. توابع بکار رفته در دسته‌بندی پارامترهای ورودی و خروجی، بهترین عملکرد را در بین توابع موجود در جعبه ابزار منطق فازی نرم افزار متلب داشته‌اند.

تعداد دسته‌های فازی بکار گرفته شده جهت دسته‌بندی مقادیر ولتاژ، جریان و سرعت جوشکاری بترتیب ۳، ۵ و ۳ و تعداد دسته‌های در نظر گرفته شده جهت دسته‌بندی مقادیر عمق نفوذ، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش به ترتیب ۱۰، ۱۲ و ۹ دسته می‌باشد. در این تحقیق انتخاب تعداد دسته‌های فازی، بصورت آزمون و خطا بوده است. نحوه دسته‌بندی



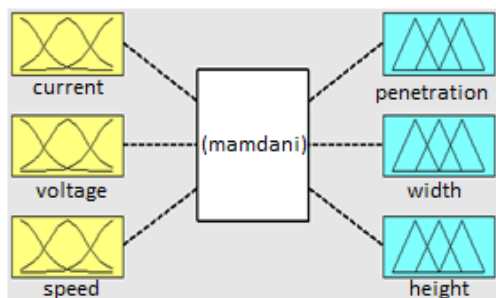
شکل ۵- دستگاه جوشکاری زیرپودری بکارگرفته شده در این تحقیق

پیش‌بینی هندسه گرده جوش استفاده شده است. شکل ۶، مراحل طراحی مدل فازی ارائه شده در این تحقیق را بصورت شماتیک نشان می‌دهد. همچنین شکل ۷، مدل فازی طراحی شده در نرم افزار متلب را نشان می‌دهد. در سیستم فازی طراحی شده، مقادیر ورودی جریان، ولتاژ و سرعت حرکت الکتروود جوشکاری به مقادیر فازی تبدیل می‌شوند و با استفاده از توابع فازی، یک درجه‌ی عضویت را به خود اختصاص می‌دهند. به منظور دسته‌بندی مقادیر مختلف

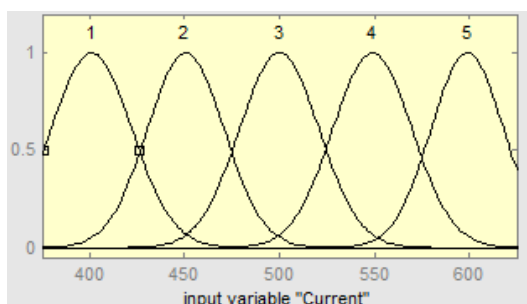
<sup>1</sup> Gaussian function

<sup>2</sup> Trapezoidal function

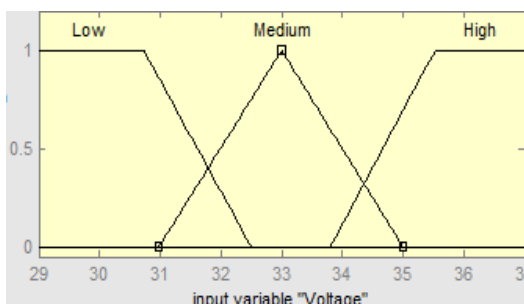
<sup>3</sup> Triangular function



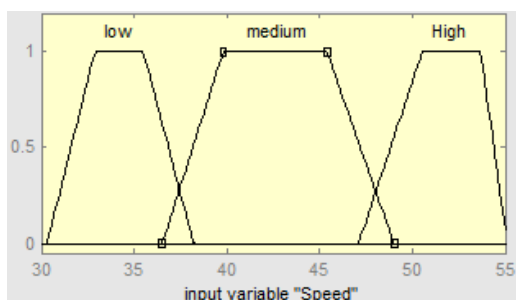
شکل ۷- مدل فازی طراحی شده در نرم افزار متلب



شکل ۸- دسته‌بندی مقادیر جریان



شکل ۹- دسته‌بندی مقادیر ولتاژ

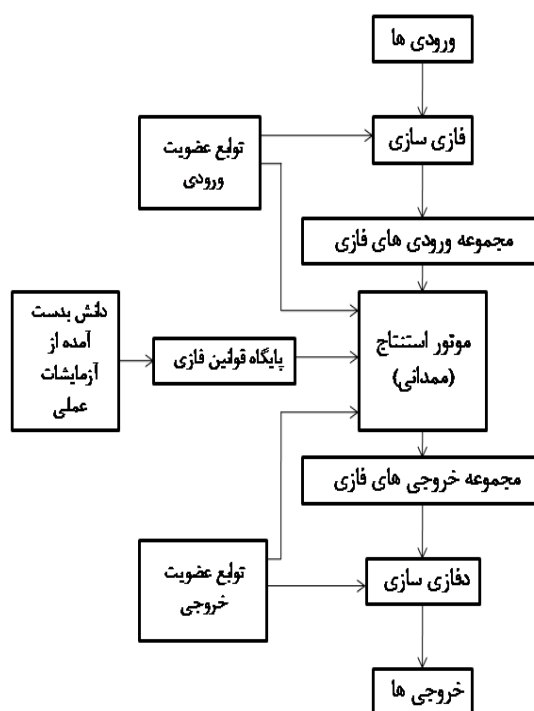


شکل ۱۰- دسته‌بندی مقادیر سرعت حرکت الکتروود جوشکاری

پارامترهای ورودی و خروجی و همچنین توابع مورد استفاده در آنها، در شکل‌های ۸ تا ۱۳ نشان داده شده است.

در سیستم فازی طراحی شده، برای ایجاد قوانین فازی، از دانشی که حاصل از انجام آزمایش‌های عملی می‌باشد استفاده شده است. در این راستا، ۳۵ دسته از اطلاعات ارائه شده در جدول ۳، به طور تصادفی انتخاب شده است و با توجه به آنها قوانین فازی ایجاد شده‌اند. ۱۵ دسته اطلاعات باقیمانده نیز جهت ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تعداد قوانین بکار رفته جهت مدل‌سازی جوشکاری زیرپودری، ۷۰ قانون می‌باشد.

در این تحقیق، موتور استنتاج ممدانی بکار گرفته شده است. مقادیر ورودی‌های فازی پس از ورود به موتور استنتاج و با اعمال قوانین فازی موجود، به خروجی‌های فازی تبدیل می‌شوند. در پایان نیز خروجی‌های فازی با استفاده از روش غیرفازی‌سازی محاسبه مرکز جرم، به مقادیر خروجی عمق نفوذ، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش تبدیل می‌شوند. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است، از میان روش‌های



شکل ۶- مراحل مختلف طراحی و بکارگیری مدل فازی



مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده‌ی عمق نفوذ جوش  $(A_p)$  بدست می‌آید.

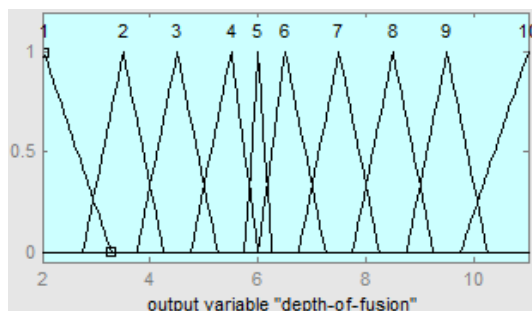
جدول ۴- مقادیر خطای نسبی مدل فازی با بکارگیری روش‌های مختلف غیرفازی سازی

شماره	روش غیرفازی سازی	میانگین درصد خطای نسبی
۱	Centroid	۴/۳۵
۲	Bisector	۱۵/۵۴
۳	Mom	۸/۱۴
۴	Lom	۱۰/۳۳
۵	Som	۹/۰۶

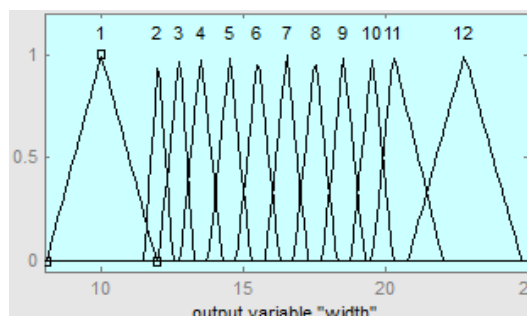
### ۷- نتایج

پس از طراحی و پیاده‌سازی مدل فازی، عملکرد این مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای دستیابی به میزان توانایی مدل فازی در تخمین هندسه‌ی گرده‌ی جوش، میانگین خطای نسبی حاصل از پیش‌بینی مدل محاسبه شده است. در این راستا، مقادیر جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری در ۱۵ مجموعه از داده‌هایی که به منظور ارزیابی مدل و بطور تصادفی انتخاب شده‌اند، به مدل فازی داده شده و پارامترهای پیش‌بینی شده توسط این مدل با مقادیر واقعی حاصل از آزمایش‌های عملی مقایسه شده است. نتایج حاصله از پیش‌بینی هندسه‌ی گرده‌ی جوش به ازای داده‌های آزمون مدل و خطای نسبی حاصل از هر پیش‌بینی، در جدول ۵ ارائه شده است. نمودارهای رسم شده در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶، مقایسه‌ی بین مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل فازی و مقادیر حاصل از آزمایش‌های عملی را نشان می‌دهند. همچنین عملکرد مدل طراحی شده در پیش‌بینی مقادیر هندسه‌ی گرده‌ی جوش به ازای داده‌های آموزش مدل و داده‌های آزمون آن، بطور جداگانه در شکل‌های ۱۷ تا ۲۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۶ دیده می‌شود، میانگین خطای نسبی تخمین عمق نفوذ، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش توسط مدل فازی طراحی شده، به ترتیب برابر با ۵/۱۲٪، ۳/۸۱٪ و ۴/۱۱٪ می‌باشد.

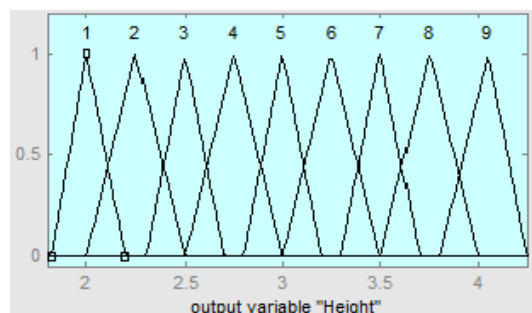
با توجه به شکل‌های ۱۴ تا ۲۲، مشاهده می‌شود مقادیر پیش‌بینی شده‌ی هندسه‌ی گرده‌ی جوش به ازای داده‌های آموزش مدل، نزدیک به مقادیر بدست آمده از آزمایش‌های عملی می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که فرآیند آموزش مدل ارائه شده، به نحو مطلوبی صورت گرفته است.



شکل ۱۱- دسته‌بندی مقادیر عمق نفوذ جوش



شکل ۱۲- دسته‌بندی مقادیر عرض گرده‌ی جوش



شکل ۱۳- دسته‌بندی مقادیر ارتفاع گرده‌ی جوش

غیرفازی سازی موجود در جعبه ابزار منطق فازی، روش محاسبه‌ی مرکز جرم کمترین مقدار میانگین خطای نسبی را برای مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل فازی بدست می‌آورد. خطای نسبی در هر یک از پیش‌بینی‌ها از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید:

$$\text{خطای نسبی اندازه‌گیری} = \frac{\Delta A}{A} \quad (1)$$

$$\Delta A = |A - A_p| \quad (2)$$

که در آن  $A$ ، مقدار واقعی عمق نفوذ جوش و  $\Delta A$ ، خطای مطلق در هر پیش‌بینی می‌باشد که از قدر مطلق اختلاف بین

بر اساس مقادیر مختلف ولتاژ، آمپراژ و سرعت جوشکاری روی ۵۰ ورق فولادی مستطیل شکل از نوع API X65 انجام شد. سپس مقطع جوشکاری در محلول نایتال حکاکی گردید. پس از مرئی شدن مقطع جوش، عمق نفوذ، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش بصورت دستی با کولیس (با دقت ۰/۱ میلی متر) اندازه گیری شد. در ادامه با استفاده از اطلاعات تجربی بدست آمده، مدل فازی مطلوبی طراحی شد که ورودی‌های آن جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری و

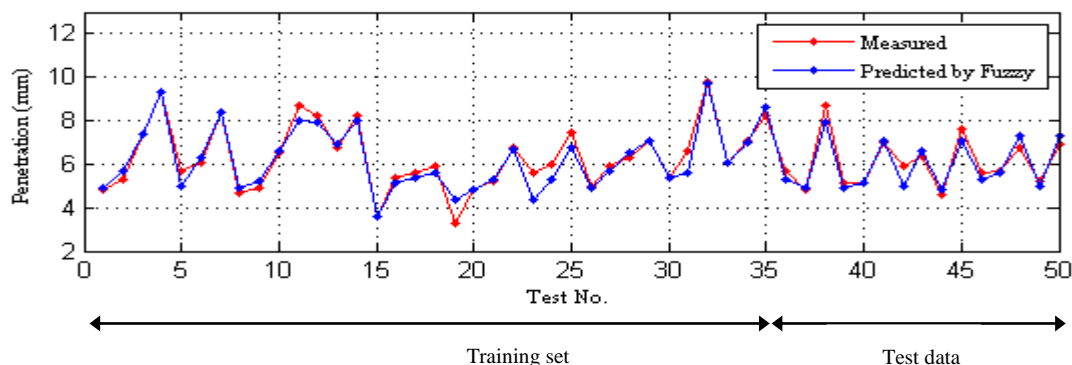
با توجه به جداول ۵ و ۶، مشاهده می شود که میانگین خطای نسبی تخمین عمق نفوذ، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش با بکارگیری مدل فازی ارائه شده، به ترتیب ۵/۱۲٪، ۳/۸۱٪ و ۴/۱۱٪ می‌باشد. بدین ترتیب میانگین خطای نسبی کل مدل فازی پیشنهاد شده برابر ۴/۳۵٪ می‌باشد.

#### ۸- نتیجه گیری

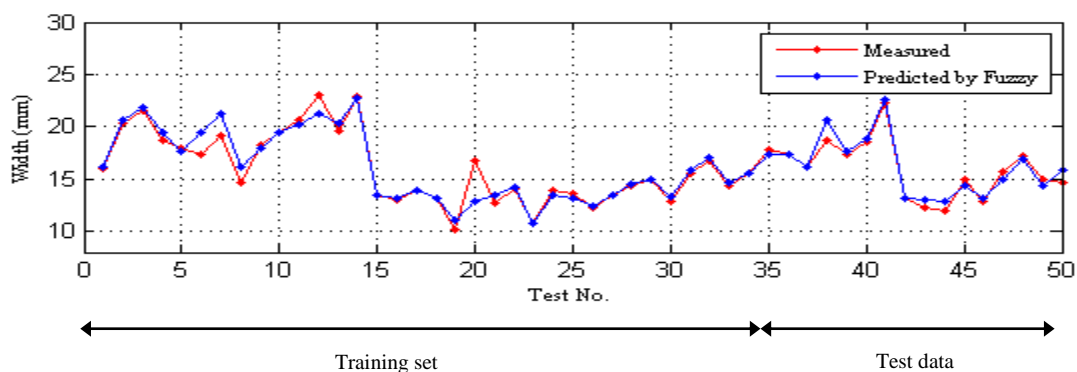
در این تحقیق از منطق فازی جهت پیش‌بینی دقیق هندسه گرده جوش در جوشکاری زیرپودری استفاده شد. ابتدا آزمایش‌های عملی با استفاده از دستگاه جوشکاری خودکار و

جدول ۵- نتایج حاصل از پیش‌بینی هندسه گرده جوش توسط مدل فازی

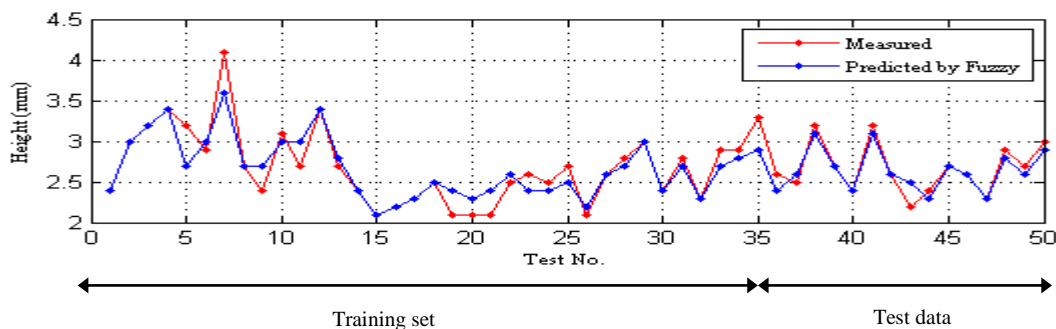
شماره آزمایش	مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی هندسه جوش			مقادیر پیش‌بینی شده‌ی هندسه‌ی جوش توسط مدل فازی			درصد خطای نسبی حاصل از پیش‌بینی
	عمق نفوذ (mm)	عرض جوش (mm)	ارتفاع جوش (mm)	عمق نفوذ (mm)	عرض جوش (mm)	ارتفاع جوش (mm)	
۱	۵/۷	۱۶/۸	۲/۶	۵/۳	۱۷/۳	۲/۴	۷/۷
۲	۴/۸	۱۶/۹	۲/۵	۴/۹	۱۶/۱	۲/۶	۴/۰
۳	۸/۷	۱۸/۷	۳/۲	۷/۹	۲۰/۷	۳/۱	۳/۱
۴	۵/۱	۱۷/۳	۲/۷	۴/۹	۱۷/۶	۲/۷	۰/۰
۵	۵/۱	۱۸/۵	۲/۴	۵/۱	۱۸/۸	۲/۴	۰/۰
۶	۷/۰	۲۲/۳	۳/۲	۷/۱	۲۲/۶	۳/۱	۳/۱
۷	۵/۹	۱۳/۲	۲/۶	۵/۰	۱۳/۱	۲/۶	۰/۰
۸	۶/۴	۱۲/۳	۲/۱	۶/۶	۱۳/۰	۲/۵	۱۲/۶
۹	۴/۶	۱۱/۹	۲/۴	۴/۸	۱۲/۹	۲/۳	۴/۲
۱۰	۷/۶	۱۴/۹	۲/۷	۷/۱	۱۴/۴	۲/۷	۳/۷
۱۱	۵/۶	۱۲/۸	۲/۶	۵/۳	۱۳/۱	۲/۶	۰/۰
۱۲	۵/۷	۱۵/۷	۲/۳	۵/۶	۱۵/۰	۲/۳	۰/۰
۱۳	۶/۸	۱۷/۲	۲/۹	۷/۳	۱۶/۹	۲/۸	۳/۴
۱۴	۵/۲	۱۴/۹	۲/۷	۵/۰	۱۴/۳	۲/۷	۳/۷
۱۵	۶/۹	۱۴/۷	۳/۰	۷/۳	۱۵/۹	۲/۹	۳/۳



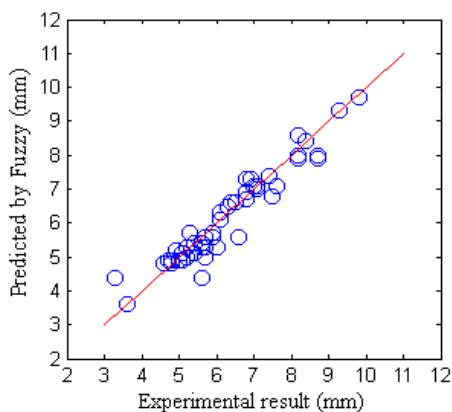
شکل ۱۴- مقایسه مقادیر عمق نفوذ جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی با مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده به ازای داده‌های آموزش و داده‌های آزمون مدل



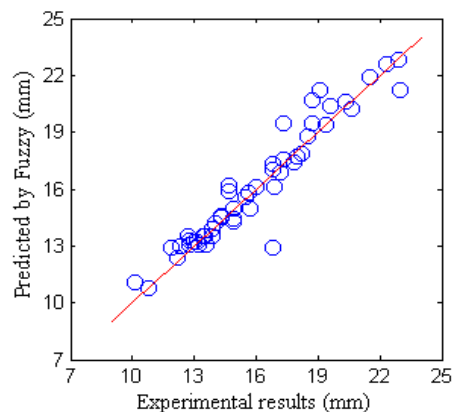
شکل ۱۵- مقایسه مقادیر عرض گرده جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی با مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده به ازای داده‌های آموزش و داده‌های آزمون مدل



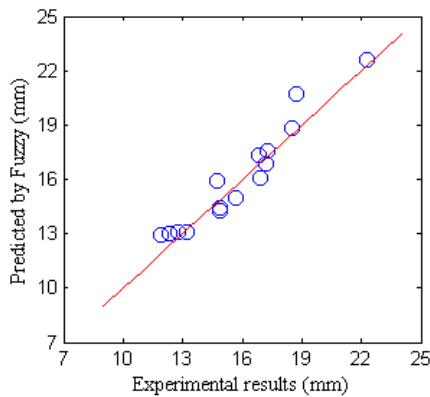
شکل ۱۶- مقایسه مقادیر ارتفاع گرده جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی با مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده به ازای داده‌های آموزش و داده‌های آزمون مدل



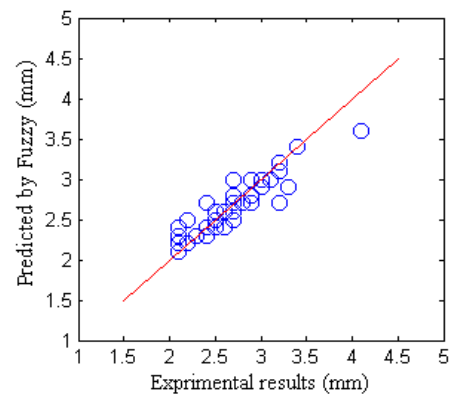
شکل ۱۸- مقادیر عمق نفوذ جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی بر حسب مقادیر حاصل از آزمایش‌های عملی برای داده‌های آموزش



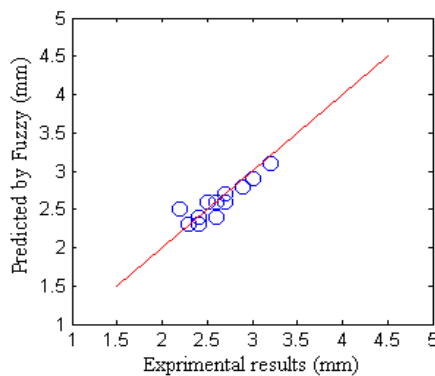
شکل ۱۷- مقادیر عرض گرده جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی بر حسب مقادیر حاصل از آزمایش‌های عملی برای داده‌های آموزش



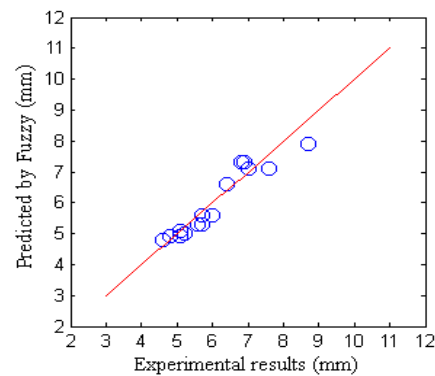
شکل ۲۰- مقادیر عرض گرده جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی برحسب مقادیر حاصل از آزمایش‌های عملی برای داده‌های آزمون



شکل ۱۹- مقادیر ارتفاع گرده جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی برحسب مقادیر حاصل از آزمایشات عملی برای داده‌های آموزش



شکل ۲۲- مقادیر ارتفاع گرده جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی برحسب مقادیر حاصل از آزمایش‌های عملی برای داده‌های آزمون



شکل ۲۱- مقادیر عمق نفوذ جوش پیش‌بینی شده توسط مدل فازی برحسب مقادیر حاصل از آزمایش‌های عملی برای داده‌های آزمون

برای مدل‌سازی جوشکاری زیرپودری استفاده کرد. بر این اساس با معلوم بودن پارامترهای ورودی (جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری)، می‌توان پارامترهای خروجی (عمق نفوذ، پهنا و ارتفاع گرده جوش) را پیش‌بینی کرد. استفاده از مدل طراحی شده، باعث کاهش هزینه‌های ناشی از عدم کیفیت مورد نظر جوشکاری و اتلاف وقت در فرآیند تولید می‌شود. شایان ذکر است که در جوشکاری زیر پودری (مشابه سایر فرایندهای جوشکاری) متغیرهای کاری بسیار زیاد است. به همین جهت در تحقیق حاضر فقط اثر سه متغیر ولتاژ جوشکاری، آمپراژ جوشکاری و سرعت حرکت الکتروود مورد نظر قرار گرفته و مقادیر بهینه شده برای شرایط اولیه ثابت و داده شده شامل فلز پایه، الکتروود و پودر انتخابی است. بدیهی

جدول ۶- میانگین درصد خطای نسبی پیش‌بینی هندسه گرده جوش به ازای مقادیر داده‌های آزمون مدل

پارامترهای پیش‌بینی شده	درصد میانگین خطای نسبی
عمق نفوذ جوش	۵/۱۲
عرض جوش	۳/۸۱
ارتفاع جوش	۴/۱۱
کل مدل	۴/۳۵

خروجی‌های آن عمق نفوذ جوش، پهنا و ارتفاع گرده‌ی جوش می‌باشد. نتایج بدست آمده بیانگر این مطلب است که مدل ارائه شده در این تحقیق، توانایی بالایی در تخمین دقیق هندسه جوش در جوشکاری ورق‌های فولادی استفاده شده را دارد. با توجه به دقت بالای مدل طراحی شده، می‌توان از آن

- [8] Balasubramanian K, Buvanashakaran G, Sankaranraynasamy K (2010) Modeling of laser beam welding of stainless steel sheet butt joint using neural networks. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3: 80–84.
- [9] Nagesh D, Datta G (2010) Genetic algorithm for optimization of variables for height to width ratio and application of ANN for prediction of bead geometry for TIG welding process. *Applied soft computing* 10: 897–907.
- [10] Acherjee B, Mondal S, Tudu B, Misra D (2011) Application of artificial neural network for predicting weld quality in laser transmission welding of thermoplastics. *Applied soft computing* 11: 2548–2555.
- [11] Howard Cary B (1979) *Modern welding technology*. Prentice Hall: Englewood Cliffs.
- [12] Kumanan S, Dhas J, Gowthaman K (2007) Determination of submerged arc welding process parameters using taguchi method and regression analysis. *Indian Journal of Material Engineering and Materials Science* 14: 177–183.
- [13] Dhas J, Kumanan S (2010) Weld quality prediction of submerged arc welding process using a function replacing hybrid system. *Advances in Production Engineering and Management* 5: 5–12.
- [14] Yang L, Bibby M, Chandel R (2003) Linear regression equations for modeling the submerged arc welding process. *J Mater Prod Tec* 39: 33–42.
- [15] Gupta V, Parmar R (1986) Fractional factorial techniques to predict dimensions of the weld bead in automatic submerged arc welding. *Journal of Institution of Engineers* 70: 67–71.
- [16] Zadeh A (1965) Fuzzy sets. *Information and Control* 8: 338–353.
- [17] Zadeh A (1975) The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences* 8: 199–249.
- [18] Mamdani E, Assilian S (1975) An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic control. *International Journal Man-Machine Studies* 7: 1–13.
- [19] Sugeno M (1985) *Industrial applications of fuzzy control*. Elsevier publication co.
- است در صورت تغییر این پارامترها (بعنوان مثال تغییر در ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فولاد یا تغییر در ابعاد فلز پایه)، خروجی‌های مسئله نیز لزوماً ثابت نخواهند ماند.
- ۹- تشکر و قدردانی**
- از شرکت لوله و تجهیزات سدید تهران به لحاظ فراهم نمودن فولاد API X65 و همکاری در انجام جوشکاری زیرپودری قدردانی و تشکر می‌گردد.
- مراجع**
- [1] Fathi M, Lambrecht M (1995) A fuzzy logic system to calculate and optimize parameter for an electron beam welding machine. *Fuzzy Sets and Systems* 69: 3–13.
- [2] Nagesh D, Datta G (2002) Prediction of weld bead geometry in shielded metal-arc welding using artificial neural networks. *Int J Mater Prod Tec* 79: 1–10.
- [3] Kim I, Son J, Lee S, Yarlaga P (2004) Optimal design of neural networks for control in robotic arc welding. *International Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 20: 57–63.
- [4] Xue Y, Kim I, Son J, Park M (2005) Fuzzy regression method for prediction and control the bead width in the robotic arc welding process. *J Mater Process Tech* 164: 1134–1139.
- [5] Wu C, Gao J, Zhao Y (2006) Neural Network for weld penetration control in gas tungsten arc welding. *Journal of Acta Metall Sin* 19: 27–33.
- [6] Dutta P, Kumar D (2007) Modeling of TIG welding process using conventional regression analysis and neural network-based approaches. *J Mater Process Tech* 184: 56–68.
- [7] Kantti K, Srinivasa P (2008) Prediction of bead geometry in pulsed GMA welding using back propagation neural network. *J Mater Process Tech* 200: 300–305.