



## مدل سازی تجربی و بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی آلیاژ آلومینیوم 5456 با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

محمدرضا سلیمانی یزدی<sup>1\*</sup>، منصور مردعلی زاده<sup>2</sup>، محمدعلی صفرخانیان<sup>3</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- استادیار، مهندس مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1338753381، soleymani@iuim.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 تیر 1394

پذیرش: 01 مرداد 1394

ارائه در سایت: 05 اسفند 1394

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اختلاطی

آلیاژ آلومینیوم 5456

اتصال لبه روی هم

شبکه عصبی مصنوعی

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، در سال 1991 توسط موسسه جوشکاری TWI به عنوان روشی برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم توسعه داده شد. در این پژوهش اتصال دهی ورق های آلیاژی آلومینیوم 5456 در حالت لبه روی هم، به گونه ای که ورق کار سرد شده H321 با ضخامت 5 میلی متر بر روی ورق آنیل با ضخامت 2.5 میلی متر قرار می گیرد، صورت پذیرفت و تأثیر همزمان پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه استقرار ابزار بر متغیرهای نیروی شکست و ارتفاع عیب هوک در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی مورد تحقیق قرار گرفت. پس از ارزیابی و تحلیل نمونه های جوشکاری شده، با استفاده از نتایج داده های تجربی، مدل سازی توسط شبکه عصبی پرسپترون چند لایه انجام و جهت صحت مدل آموزش دیده، چندین آزمون راست آزمایی صورت پذیرفت که نتایج نیروی شکست مدل آموزش دیده به طور میانگین با حالت تجربی در حدود 2.017 درصد خطا داشت. در ادامه مدل شبکه عصبی پرسپترون برای بررسی تأثیر میزان هر کدام از پارامترها، به صورت تکی و گروهی بر روی متغیرهای حالت فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی استفاده گردید که پارامتر سرعت دورانی بیشترین تأثیر و پارامتر زاویه استقرار ابزار کمترین تأثیر را نسبت به دو پارامتر دیگر بر روی خواص فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی در حالت لبه روی هم دارد.

## Experimental modeling and the effective analysis of friction stir welding parameters in 5456 aluminum alloy using artificial neural network

Mohamad Reza Soleymani Yazdi<sup>1\*</sup>, Mansour Mardalizadeh<sup>2</sup>, Mohamad Ali Safarkhanian<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Imam Hussein University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

3- Department of Material Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1338753381 Tehran, Iran, soleymani@iuim.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 26 June 2015

Accepted 23 July 2015

Available Online 24 February 2016

Keywords:

Friction Stir Welding

5456 Aluminum Alloy

Lap Joint

Artificial Neural Network

### ABSTRACT

Friction stir welding is a solid state process developed by the welding institute TWI in 1991, as a technique for welding aluminum alloys. In this research, lap joint welding of 5456 aluminum alloy was carried, so that the hard working H321 sheet with the thickness of 5 mm was placed on an annealed sheet with the thickness of 2.5 mm and has been investigating the simultaneous effects of parameters such as rotational speed, feed rate, and tool angle, on failure force parameters and the hook disadvantage height in friction stir welding were investigated. After evaluation and analysis of the welded samples; the modelling of multilayer perceptron neural network was carried out using experimental results, and for the purpose of the trained model verification, several verification models was performed where the results of failure force in training model show 2.017 percent average error with respect to the experimental results. Next, the multilayer perceptron neural network was used for investigating the effect of welding parameters as in single or group mode on welding mode variations, where rotational speed parameter has the greatest effect and tool angle has the least effect than the other two parameters in lap joint friction stir welding.

### 1- مقدمه

ساختمان سازی، مخازن نفت و گاز و خطوط لوله پرفشار که نیاز به مقاومت به خوردگی خوب همراه با استحکام مناسب دارند مورد استفاده قرار می گیرد. برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم بخصوص آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی بایستی گرمای ورودی از طریق فرایند جوشکاری مورد توجه قرار گیرد؛ زیرا در هنگام جوشکاری ذوبی افزایش گرمای ورودی سبب افزایش

آلیاژ آلومینیوم 5456 از خانواده آلومینیوم گروه 5000 و پر استحکام ترین آلیاژ تجاری غیر قابل عملیات حرارتی است که با اصلاح آلیاژ 5056 در سال 1956 تولید گردید. این آلیاژ حاوی 0.8% منگنز، 5% منیزیم و 0.1% کروم می باشد. این آلیاژ به طور گسترده ای در صنایع نظامی، صنایع خودروسازی،

Please cite this article using:

M.R. Soleymani Yazdi, M. Mardalizadeh, M.A. Safarkhanian, Experimental modeling and the effective analysis of friction stir welding parameters in 5456 aluminum alloy using artificial neural network, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

متالورژیکی و شکل‌گیری عیوب در ناحیه جوش، مورد تحقیق قرار گرفت. در آزمایش‌های تجربی، پس از بازرسی چشمی، سیر تکاملی درشت ساختار و ریزساختار عیوب ایجاد شده در ناحیه جوش و تحت تأثیر شرایط حاکم بر جوشکاری ارزیابی و بر اساس استاندارد AWS D17.3 [10] مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه در محیط نرم‌افزار متلب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌سازی و تأثیر پارامترها بر متغیرهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی صورت پذیرفت.

## 2- روش تحقیق

### 2-1- مواد اولیه مورد تحقیق

در این پژوهش، از دو ورق آلیاژ آلومینیوم 5456 با ضخامت ورق پایه (A) و متصل شونده (B) به ترتیب 5 و 2.5 میلی‌متر که در صنایع هوافضا کاربرد گسترده دارند، استفاده گردید. شایان‌ذکر است که اگرچه هر دو ورق از لحاظ آنالیز عنصری مشابه ولی از لحاظ تاریخچه عملیات حرارتی صورت گرفته متفاوت بودند. به گونه‌ای که ورق 5 میلی‌متری کار سرد شده H321، و ورق 2.5 میلی‌متری آنیل بود. از آنجا که نوع عملیات حرارتی انجام‌گرفته بر روی دو ورق متفاوت بود، سختی هر دو ورق به‌صورت مجزا توسط دستگاه سختی سنج برینل با ساچمه کاربید تنگستنی و نیروی 62.5 کیلوگرم انجام و آزمون کشش توسط دستگاه کشش با ظرفیت 20 تن، نرخ کرنش 2 میلی‌متر بر دقیقه و دقت اندازه‌گیری 0.1 نیوتن طبق استاندارد DIN EN 10002 صورت پذیرفت. آنالیز ترکیب شیمیایی به روش کوانتومتری و خواص مکانیکی هر دو ورق در جدول‌های 1 و 2 ارائه شده است.

### 2-2- تجهیزات و ابزار

برای انجام فرایند جوشکاری از دستگاه اتوماتیک جوشکاری اصطکاکی اختلاطی خطی در حالت نیمه اتومات استفاده شد. همچنین با توجه به نوع فرایند، ابزاری از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده گردید. ابزار مورد استفاده پس از طراحی و ماشینکاری جهت رسیدن به خواصی مانند سختی بالا، مقاومت به سایش و افزایش استحکام ابزار، تحت عملیات حرارتی سخت‌سازی قرار گرفت و سختی ابزار به میزان 50 HRC افزایش یافت. مشخصات ابزار مورد استفاده در شکل 2 و جدول‌های 3 و 4 آورده شده است. طراحی آزمایش بر اساس روش سطح پاسخ<sup>7</sup> و الگوی آماری مکعب مرکزی<sup>8</sup> و در سه سطح برای هر پارامتر انجام گرفت و همان‌طور که در جدول 5 نمایش داده شده است 16 آزمایش به دست آمد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده

نمونه	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Ti (%)
ورق A	0.03	0.084	0.208	0.630	4.911	0.101	0.03
ورق B	0.042	0.114	0.186	0.578	4.813	0.015	0.042

جدول 2 خواص مکانیکی مواد مورد استفاده

نمونه	سختی (HB)	درصد ازدیاد طول (%)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
ورق A	90	12	255	360
ورق B	80	16	210	325

پهنای ناحیه متأثر از حرارت شده و به دلیل تشکیل ساختار دندریتی و امکان ایجاد ترک گرم و تخلخل در ناحیه ذوب سبب کاهش خواص مکانیکی ناحیه اتصال می‌گردد [3-1].

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی<sup>1</sup> نوع خاصی از فرایند جوشکاری حالت‌جامد برای اتصال آلیاژهای فلزی می‌باشد که اولین بار در سال 1991 توسط توماس<sup>2</sup> و همکارانش در موسسه جوشکاری TWI<sup>3</sup> [4] انگلستان برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم ابداع گشت. این فرایند به‌واسطه مزایایی از قبیل عدم استفاده از مواد مصرفی، دارای تکنولوژی سبز، سازگار با محیط‌زیست، راندمان انرژی بالا و فراگیر، سرعت بالای تولید و عدم افت استحکام بعد از جوشکاری، در صنایع مختلف از آن استفاده می‌شود. اصلی‌ترین کاربرد این روش جوشکاری در صنایع مدرن هوافضا برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا است [5].

در شکل 1 تصویری از فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نشان داده شده است. در این روش با تماس شانه ابزار با سطح کار در حین چرخش ابزار، حرارت تولید شده و حرکت دورانی بین سبب تغییر شکل شدید مواد در محل اتصال می‌شود. بدین ترتیب همراه با آمیخته شدن مواد از دو قطعه در حال اتصال و از بین رفتن خط اتصال، تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می‌افتد. در قطعات جوشکاری شده با این فرایند می‌توان بر اساس تغییرات ایجاد شده در ریزساختار، سه ناحیه مجزای منطقه اتصال<sup>4</sup>، منطقه تحت تأثیر فرایند ترمومکانیکی<sup>5</sup> و منطقه متأثر از حرارت<sup>6</sup> تشخیص داد [5].

در تحقیقاتی امکان استفاده از شبکه عصبی برای محاسبه خواص مکانیکی و اندازه دانه در صفحات جوشکاری شده با روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بررسی گردید و نتایج نشان داد که روش شبکه عصبی می‌تواند به‌عنوان یک روش جایگزین در پیش‌بینی نتایج فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی استفاده شود [7,6].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی با طرح اتصال لبه روی هم، در هر دو سمت پیش‌رونده و پس‌رونده ناحیه متأثر از ترمومکانیکال، سطوح بین ورق بالایی و پایینی دچار تغییر شکل شده و در راستای فصل مشترک منحرف می‌شوند، در واقع مواد در ناحیه متأثر از ترمومکانیکال و همچنین مرز دکمه جوش با ناحیه متأثر از ترمومکانیکال، می‌توانند به سمت بالا و یا پایین فصل مشترک منحرف شوند. این فصل مشترک‌های منحرف‌شده عیب هوک نامیده می‌شوند [8].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی ورق‌های با ضخامت متفاوت آلیاژ آلومینیوم 5456 در طرح اتصال لبه روی هم، عیب هوک هم تراز با پارامتر ضخامت مؤثر ورق می‌باشد و هرگاه ارتفاع عیب هوک به اندازه‌ای باشد که در دکمه جوش، ضخامت مؤثر ورق از هر دو سمت یکسان باشد، می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت عدم وجود عیوب دیگر (نقص پیوند تماسی و تونلی) محل شکست در آزمون کشش برشی از ناحیه دکمه جوش نخواهد بود [9].

در این پژوهش بر پایه آزمایش‌های تجربی انجام‌گرفته در صنعت، فرایند اتصال دهی ورق‌های آلیاژی آلومینیوم 5456 در حالت لبه روی هم، به گونه‌ای که ورق کار سرد شده H321 با ضخامت 5 میلی‌متر بر روی ورق آنیل با ضخامت 2.5 میلی‌متر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت و تأثیر همزمان پارامترهای اصلی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (سرعت دورانی ابزار  $(\omega)$ ، سرعت پیشروی ابزار  $(v)$  و زاویه استقرار ابزار  $(\theta)$ ) بر خواص مکانیکی،

1. Friction Stir Welding (FSW)

2. Thomas

3. The welding institute

4. Stir Zone (SZ)

5. Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

6. Heat Affected Zone (HAZ)

7. Response Surface Method (RSM)

8. Central Composite Design (CCD)

میکروسکوپی از کلیه نمونه های جوشکاری شده، نمونه ای با ابعاد  $4 \times 1$  سانتی متر در راستای عمود بر خط جوش مطابق استاندارد AWS D 17.3 تهیه شد. جهت راحتی مطالعات میکروسکوپی، کلیه نمونه ها، مانده شده و سطح تمامی نمونه ها با سمباده های نرم تا مش 2000 صاف شد و سپس از پودر آلومینای 0.3 میکرون، جهت پولیش استفاده گردید. به منظور پدیدار شدن ناحیه جوش، از محلول اچ حاوی 50 میلی لیتر محلول پولتن، 25 میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ و 40 میلی لیتر از محلولی که حاوی 3 گرم اسید کرمیک در 10 میلی لیتر آب بود، استفاده گردید. لازم به ذکر است که محلول پولتن شامل 12 میلی لیتر اسید کلریدریک، 6 میلی لیتر اسید نیتریک، یک میلی لیتر اسید فلئوریک، و یک میلی لیتر آب بود [11].

### 3- نتایج و بحث

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی ناحیه جوش اصطکاکی اختلاطی را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است به علت تفاوت در ضخامت ورق های آلومینیومی جوشکاری شده، و تفاوت در حرارت ورودی همواره ناحیه جوش نامتقارن و با توجه به تغییرات ریزساختاری همواره چهار ناحیه دکمه جوش<sup>1</sup>، منطقه متأثر از حرارت، منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکال و فلز پایه<sup>2</sup> مشاهده گردید.

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی در حالت لبه روی هم، دو عامل ارتفاع هوک و جهت گیری فصل مشترک بر روی خواص مکانیکی ناحیه جوش تأثیر گذارند. در حقیقت ارتفاع عیب هوک، هم تراز با پارامتر ضخامت مؤثر ورق بوده و حداقل ضخامت ورق اندازه گیری شده از طریق اندازه گیری کوچک ترین فاصله بین فصل مشترک اتصال نیافته و بالای ورق بالایی یا پایین ورق پایینی ضخامت مؤثر ورق می باشد [12]. در این پژوهش با توجه به راست گرد بودن رزوه پین و دوران پاد ساعتگرد ابزار، سیلان عمودی مواد در دکمه جوش همواره به سمت بالا بود و ضخامت مؤثر ورق از طریق کم کردن ارتفاع عیب هوک از ضخامت کل ورق بالایی (5 میلی متر) به دست آمد. شکل 4 تصویر درشت ساختار و ریز ساختار میکروسکوپ نوری عیب هوک در نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای تنظیمی ( $\omega=750 \text{ rpm}$ ,  $v=50 \text{ mm/min}$ ,  $\theta=3^\circ$ ) را نشان می دهد. در این نمونه ارتفاع هوک در سمت پیش رونده 1.068 میلی متر و در سمت پس رونده 1.198 میلی متر مشاهده گردید.

### 4- مدل سازی فرایند و بررسی تأثیر پارامترها

شبکه های عصبی مصنوعی<sup>3</sup>، به طور گسترده در تحقیقات هوش مصنوعی<sup>4</sup> برای حل مسائل مختلف در علوم و در جایی که یک تابع تقریبی برای نگاشت غیرخطی بین پارامترهای ورودی و خروجی نیاز است، کاربرد دارند. حوزه کاربرد این شبکه ها بسیار گسترده است و کاربردهایی نظیر درون یابی<sup>5</sup>، تخمین<sup>6</sup>، آشکارسازی و ... را شامل می شود.

در شبکه های عصبی وزن های اولیه، انتخاب تابع فعال سازی و انتخاب تعداد نرون های<sup>7</sup> استفاده شده در لایه میانی (پنهان) به عنوان فاکتورهای یادگیری در نظر گرفته می شوند. شناخت و انتخاب صحیح این فاکتورها مهم بوده، زیرا آنها نه تنها بر روی همگرایی شبکه تأثیر داشته، بلکه بر روی دقت پیش بینی و تخمین نیز مؤثر می باشد [13].

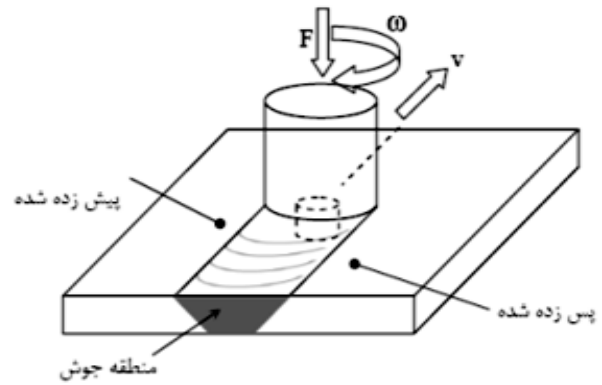


Fig. 1 Schematic drawing of friction stir welding [5]

شکل 1 تصویر کلی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی [5]

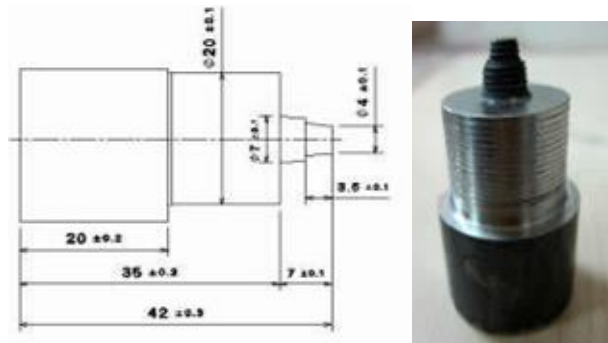


Fig. 2 The tool used in this work

شکل 2 ابزار مورد استفاده در این پژوهش

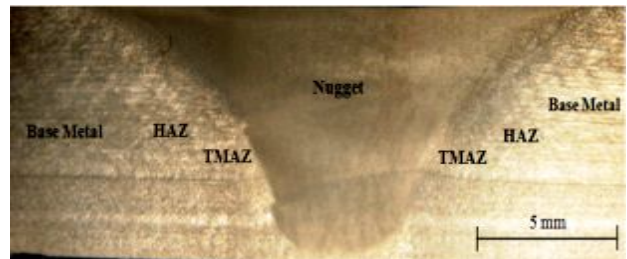


Fig. 3 an optical microscope image of the cross-section of weld

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی ناحیه جوش

جدول 3 ابعاد هندسی ابزار مورد استفاده در این پژوهش

Table 3 Geometric dimension tool used in this the research

قطر شانه (mm)	قطر کوچک پین (mm)	قطر بزرگ پین (mm)	ارتفاع پین (mm)	گام رزوه (mm)
20	4	7	7	0.8

جدول 4 مقادیر اعمال شده پارامترها جهت طراحی آزمون

Table 4 The values are applied to design of the test

پارامترهای جوشکاری	واحد	حداقل	حداکثر
سرعت دورانی ابزار	rpm	250	750
سرعت پیشروی ابزار	mm/min	25	75
زاویه ابزار با قطعه کار	degree	2	4

پس از آماده سازی مواد، گیره بندی ورق ها و تنظیم پارامترها، سعی شد تا جوشکاری همه نمونه ها تحت شرایط یکسانی انجام شوند، به این ترتیب که سرعت ورود ابزار به قطعه کار 20 میلی متر بر دقیقه، مدت زمان توقف ابزار قبل از حرکت و جوشکاری 15 ثانیه، میزان نفوذ شانه ابزار 0.2 میلی متر بود؛ همچنین جهت دوران ابزار با توجه به راست گرد بودن رزوه ابزار، پاد ساعتگرد و جهت جوشکاری، عمود بر جهت نورد ورق ها بود. در نهایت برای مطالعات

1. Nugget  
2. Base Metal  
3. Artificial Neural Networks (ANN)  
4. Artificial Intelligence  
5. Interpolation  
6. Estimation  
7. Neurons

جدول 5 نتایج تجربی بررسی‌های متالوگرافی و مکانیکی

Table 5 The Experimental Results Metallography and mechanical analysis

نتیجه 3	نتیجه 2	نتیجه 1	پارامتر 3	پارامتر 2	پارامتر 1	شماره آزمایش
ارتفاع هوک در سمت پس‌رونده H(RS)	ارتفاع هوک در سمت پیش‌رونده H(AS)	نیروی شکست (T)	زاویه ابزار ( $\theta$ )	سرعت پیشروی ابزار (V)	سرعت دورانی ابزار ( $\omega$ )	
mm	mm	N	degree	mm/min	Rpm	
1.85	1.309	18800	2	25	750	1
0.765	0.518	19500	3	50	500	2
0.418	0.171	19300	4	25	750	3
0.157	0.106	15000	2	75	250	4
0.725	0.592	16300	3	25	500	5
0.442	0.211	16200	4	50	500	6
0.783	0.101	13200	4	75	250	7
0.543	0.318	17000	3	75	500	8
0.769	0.475	18100	2	75	750	9
0.656	0.327	17200	4	75	750	10
0.271	0.127	15000	3	50	250	11
0.855	0.606	19100	2	50	500	12
0.575	0.382	19700	2	25	250	13
1.198	1.068	20700	3	50	750	14
0.765	0.518	19500	3	50	500	15
0.971	0.775	20700	4	25	250	16

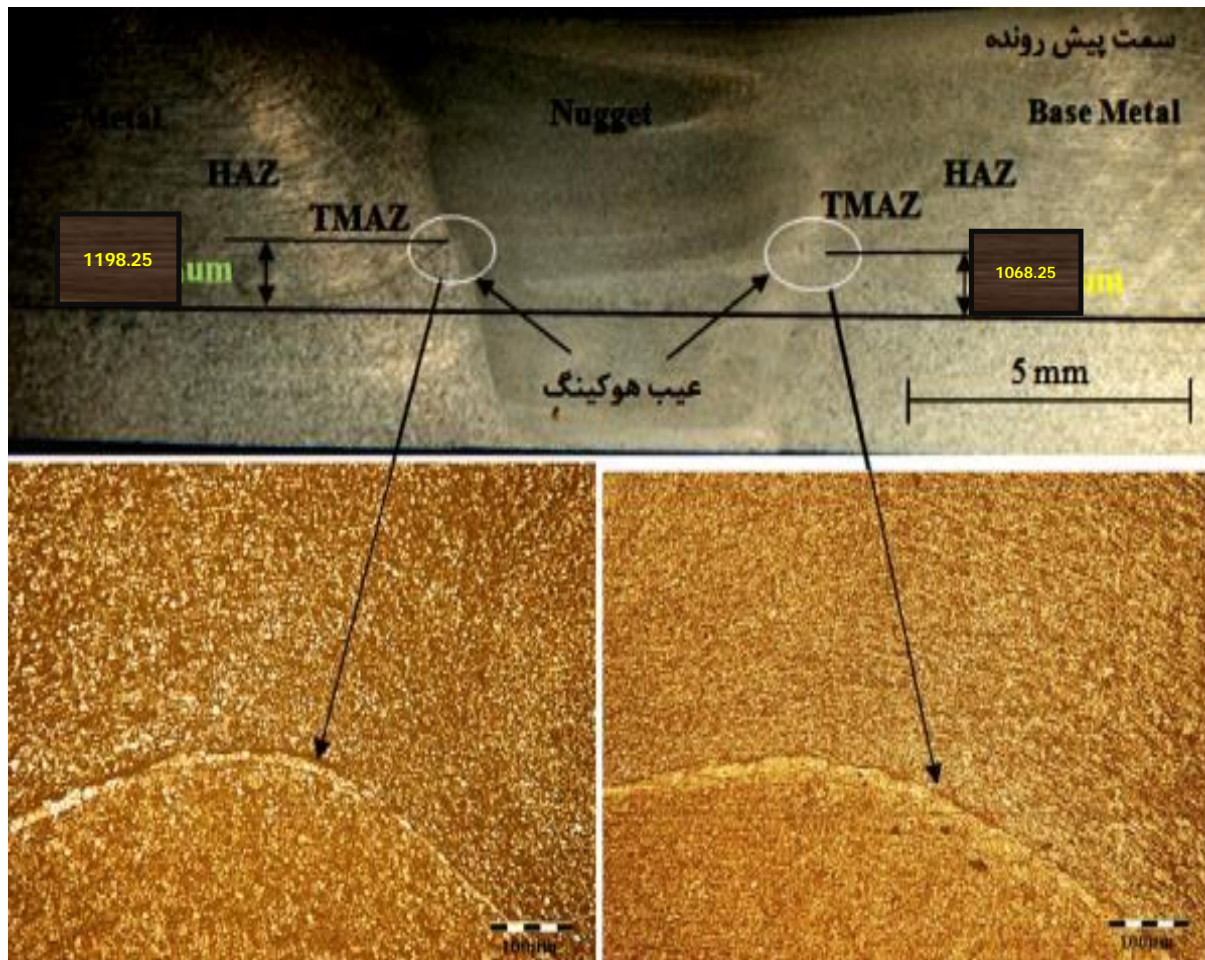


Fig. 4 Image Macro and Micro structure of Defect Hook

شکل 4 تصویر درشت و ریزساختار نوری عیب هوک

لوونبرگ<sup>3</sup>، استفاده گردید. از الگوریتم یادگیری مارکوات- لوونبرگ که یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد است، به دلیل اینکه آموزش شبکه را بسیار سریع انجام داده و سطح خطای موجود را حداقل می‌سازد، برای بهنگام سازی وزن‌های شبکه عصبی مصنوعی و رسیدن به تعداد مناسب لایه میانی و تعداد

در این پژوهش برای مدل‌سازی و پیش‌بینی فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، توسط برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب، از شبکه عصبی پرسپترون پیشخور<sup>1</sup> پس انتشار خطا<sup>2</sup> با الگوریتم یادگیری مارکوات-

3. Levenberg-Marquardt Algorithm (LM)

1. Feed Forward  
2. Error Back propagation



به گونه ای که دو ورق به طور کامل در راستای فصل مشترک از هم جدا شده اند. دلیل این شکست وجود عیب نقص پیوند تماسی در صفحه فصل مشترک می باشد.

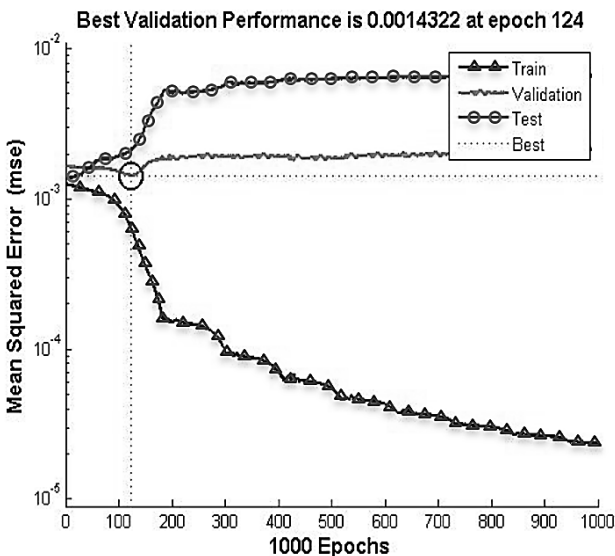


Fig. 5 The diagram of the Final mean square error

شکل 5 نمودار مربع میانگین خطای نهایی

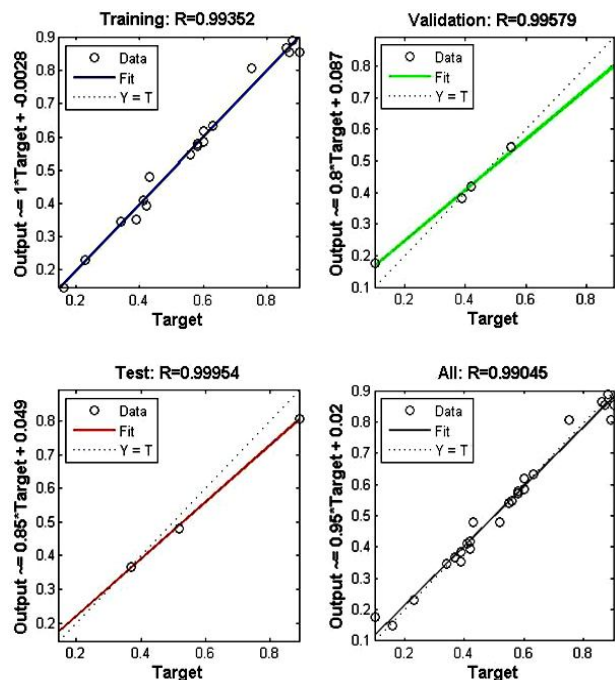


Fig. 6 Analysis of the performance of the trained ANN

شکل 6 تجزیه و تحلیل عملکرد شبکه عصبی آموزش دیده

جدول 6 مقایسه نتایج شبکه عصبی با مقادیر تجربی نیروی شکست

Table 6 Comparing the experimental results of the failure force with the Result neural network

خطا (%)	نتایج مدل شبکه عصبی	نتایج تجربی T(N)	زاویه استقرار (°)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)
1.27	19549	19800	3	25	250
2.62	19574	20100	2	25	500
2.14	20061	20500	4	25	500
2.04	19693	19300	4	50	750

گه، استفاده می شود [14].

به همین منظور جهت مدل سازی و آموزش شبکه عصبی، سه پارامتر سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه استقرار ابزار به عنوان پارامترهای ورودی و سه پارامتر مقدار نیروی شکست و ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش رونده و پس رونده به عنوان پارامتر خروجی به شبکه داده شدند. در واقع این شبکه دارای سه ورودی و سه خروجی بود. برای آموزش شبکه عصبی از تابع trainlm و نرخ آموزش<sup>1</sup> 0.06 و تعداد 1000 تکرار<sup>2</sup> استفاده شد. داده های هر آزمایش به عنوان یک سری نمونه های آموزشی، شبکه عصبی را آموزش داده و در حقیقت شبکه عصبی به وسیله داده های هر آزمایش یک خروجی به دست آورده و با مقایسه آن با مقدار واقعی همان آزمایش، مقدار خطا را محاسبه می کرد و با توجه به خطای به دست آمده، مقادیر وزنی گره های مدل خود را تغییر داده تا در نهایت مقدار خطا از مقدار تعیین شده در شبکه کمتر شود. مقدار خطا در این شبکه 10<sup>-7</sup> در نظر گرفته شد و مقدار تلو رانس 0.001 لحاظ گردید.

در این پژوهش از تعداد کل 16 نمونه، 70 درصد برای آموزش شبکه، 15 درصد برای اعتبار سنجی شبکه و 15 درصد برای آزمودن شبکه استفاده شد. پس از چندین آزمون سعی و خطا و بررسی مدل های شبکه عصبی با ساختمان های مختلف که در این مقاله آورده نشده است، ساختار دو لایه با 10 نرون در لایه اول و 5 نرون در لایه دوم، دارای کمترین خطا شد و به عنوان بهترین ساختار شبکه عصبی در نظر گرفته شد. جهت محاسبه و اطمینان از میزان دقت مدل آموزش دیده، پس از مدل سازی و آموزش شبکه، توسط یک سری داده از آزمایش های دیگر عملکرد آن تست گردید. بدین صورت که شبکه داده های این آزمایش ها را گرفته و مقدار نیروی شکست و ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش رونده و پس رونده را پیش بینی می کرد. سپس این مقادیر با مقادیر واقعی جهت راست آزمایی مدل آموزش دیده مقایسه گردید همان طور که در شکل 5 مشاهده می شود میانگین مربع خطای نهایی کوچک بود. هر دو خطای آزمون و خطای اعتبار سنجی دارای ویژگی های مشابه بودند. در رگرسیون خطی بین خروجی های شبکه و اهداف مربوطه مطابق شکل 6، آهنگ خروجی هدف، دارای آموزش، آزمون و اعتبار سنجی بسیار خوبی بود، و مقدار رگرسیون برای پاسخ کل، کمی بیش از 0.99 بود.

در جدول 6 نتایج نیروی شکست به دست آمده از مدل شبکه عصبی با نتایج حاصل از آزمایش های تجربی مقایسه گردیده است. همان طور که مشاهده می شود، مدل شبکه عصبی به طور میانگین حدود 2.0175 درصد با حالت تجربی اختلاف دارد. همچنین در جدول های 7 و 8 نتایج ارتفاع هوک به دست آمده از مدل شبکه عصبی با نتایج حاصل از آزمایش های تجربی ارتفاع هوک در هر دو سمت پیش رونده و پس رونده مقایسه گردیده است. همان طور که مشاهده می شود مدل شبکه عصبی در پیش بینی نتایج ارتفاع هوک در سمت پیش رونده و پس رونده به ترتیب، به طور میانگین حدود 9.617 و 5.5 درصد با حالت تجربی اختلاف دارند.

شکل 7 تصویر محل شکست نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای ( $\omega=250 \text{ rpm}$ ,  $V=25 \text{ mm/min}$ ,  $\theta=3^\circ$ ) و شکل 8 تصویر محل شکست نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای ( $\omega=750 \text{ rpm}$ ,  $V=50 \text{ mm/min}$ ,  $\theta=4^\circ$ ) را که از فصل مشترک شکسته شده اند، نشان می دهد.

مطابق این شکل ها، شکست در داخل دکمه جوش اتفاق افتاده است؛

1. Learning rate  
2. Epoch

عیب نقص پیوند تماسی، در حقیقت با کاهش سطح مقطع جوش، اثری مخرب بر روی خواص مکانیکی دارد. در واقع عیب نقص پیوند تماسی باعث کاهش عرض ناگت و مقاومت شده و در نتیجه شکست از ناحیه فصل مشترک اتفاق افتاده است.

شکل 9 تصویر محل شکست نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای  $(\omega=500 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta=4^\circ)$  را نشان می دهد. همان طور که در شکل 9 مشاهده می شود در این نمونه شکست از فلز پایه ورق 2.5 میلی متر اتفاق افتاده است.

این نمونه علاوه بر اینکه دارای ارتفاع هوک مناسب بود، ضخامت مؤثر ورق بالایی نیز در این نمونه کافی و مناسب جهت تحمل نیروی کششی بود. همچنین شیب ملایم عیب هوک نیز سبب گردید که در این نمونه، شکست از ناحیه جوش اتفاق نیفتد و از آنجا که استحکام ورق آنیل و نازک 2.5 میلی متری، کمتر از ورق 5 میلی متری کار سرد شده بود، لذا نمونه از فلز پایه ورق 2.5 میلی متری آنیل دچار شکست شد.

شکل 10 تصویر محل شکست نمونه جوشکاری شده تحت پارامترهای  $(\omega=500 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta=2^\circ)$  را نشان می دهد. همان طور که در شکل 10 مشاهده می شود این نمونه از هوک سمت پس رونده ورق 5 میلی متر شکسته شده است. این نمونه به دلیل ارتفاع هوک بسیار زیاد (به علت حرارت و سیلان عمودی زیاد) و کاهش شدید ضخامت مؤثر ورق 5 میلی متر، از سمت پس رونده ورق 5 میلی متر شکسته شده است.

پس از آموزش شبکه عصبی به منظور پیش بینی و بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، مدل سازی شبکه عصبی به طور جداگانه و چندگانه بر روی نیروی شکست و ارتفاع هوک در هر دو سمت

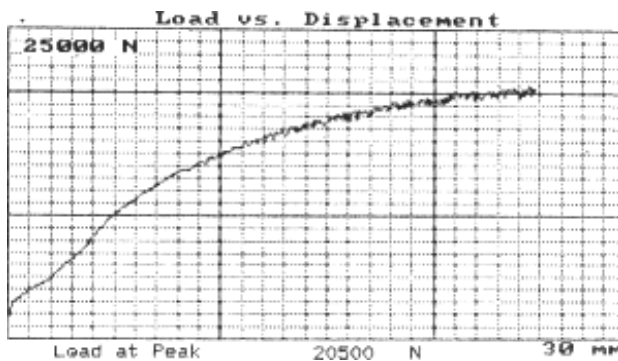
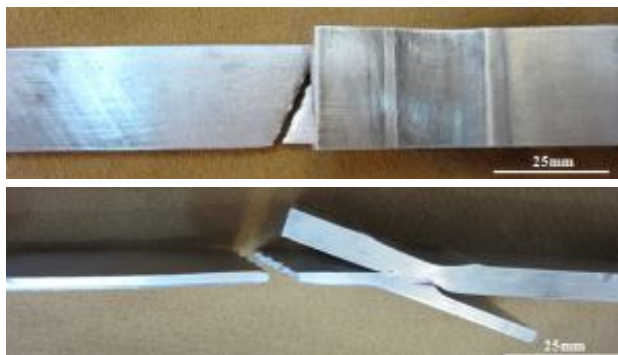


Fig. 9 Failure analysis of the failure Zone in the specimen under parameters  $(\omega =500 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta =4^\circ)$

شکل 9 شکست نگاری محل شکست در نمونه تحت پارامترهای  $(\omega=500 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta =4^\circ)$

جدول 7 مقایسه نتایج شبکه عصبی با مقادیر واقعی ارتفاع هوک سمت پیش رونده

Table 7 Comparing the experimental results height Hook Defect in AS with the Result neural network

سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه استقرار (°)	نتایج تجربی H(mm)	نتایج مدل شبکه عصبی H(mm)	خطا (%)
250	25	3	0.639	0.596	6.73
500	25	2	0.952	0.844	11.34
500	25	4	0.717	0.624	12.97
750	50	4	0.565	0.607	7.43

جدول 8 مقایسه نتایج شبکه عصبی با مقادیر واقعی ارتفاع هوک سمت پس رونده

Table 8 Comparing the experimental results height Hook Defect in RS with the Result neural network

سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	زاویه استقرار (°)	نتایج تجربی H(mm)	نتایج مدل شبکه عصبی H(mm)	خطا (%)
250	25	3	0.639	0.596	3.93
500	25	2	0.952	0.844	12.87
500	25	4	0.717	0.624	2.33
750	50	4	0.565	0.607	2.87

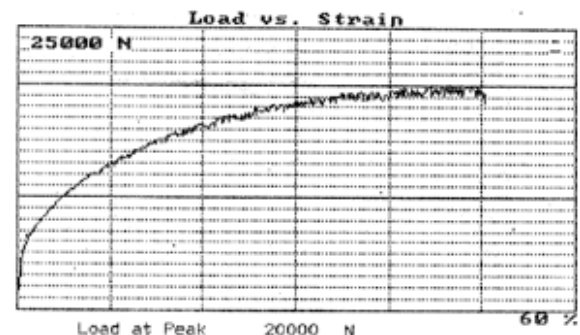


Fig. 7 Failure analysis of the failure Zone in the specimen under parameters  $(\omega =250 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta =3^\circ)$

شکل 7 شکست نگاری محل شکست در نمونه تحت پارامترهای  $(\omega=250 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta =3^\circ)$

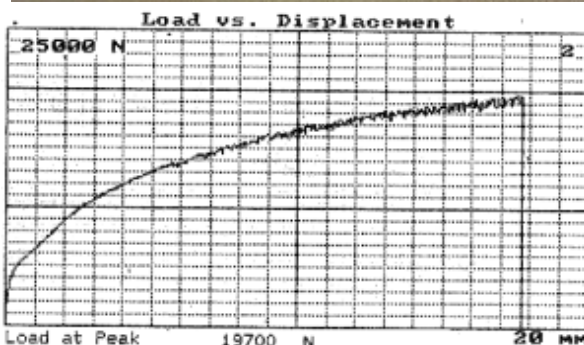


Fig. 8 Failure analysis of the failure Zone in the specimen under parameters  $(\omega =500 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta =2^\circ)$

شکل 8 شکست نگاری محل شکست در نمونه تحت پارامترهای  $(\omega=500 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta =2^\circ)$

کاهش یافت. در فاز دوم نیز هر بار با حذف دو پارامتر، مدل سازی شبکه با در نظر گرفتن یک ورودی انجام پذیرفت. در این مرحله نیز همچنان حذف سرعت دورانی ابزار نسبت به دو پارامتر دیگر، خطای شبکه را بیشتر افزایش داد. در این مرحله نیز کمترین خطای شبکه در صورت عدم حضور زاویه استقرار ابزار مشاهده گردید. با توجه به جدول 9 و بر اساس مجموع خطاهای متوسط خروجی می توان نتیجه گرفت، پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه استقرار ابزار به ترتیب بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی و همچنین شکل گیری و ارتفاع هوک در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی دارند.

### 5- نتایج

در این پژوهش با استفاده از شبکه عصبی، مدل سازی و بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر روی ورقهای آلومینیومی 5456 با ضخامت متفاوت مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت؛ که نتایج به صورت خلاصه در زیر آمده است:

- وجود عیب هوک در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی ورقهای با ضخامت متفاوت در طرح اتصال لبه روی هم، به عنوان یک فاکتور مردود کننده اتصال جوشی شناخته نمی شود و در واقع ارتفاع و جهت گیری آن می باشد که بر روی نتایج آزمایش کشش تأثیر گذاشته و تعیین کننده کیفیت اتصال می باشد.

- افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار (افزایش گام جوشکاری)، سبب افزایش حرارت ورودی، افزایش سیلان عمودی مواد و در نتیجه افزایش ارتفاع هوک و کاهش ضخامت مؤثر ورق شده، و باعث می شود شکست از منطقه ترمومکانیکال، جایی که بیشترین حرارت ورودی به آنجا وارد می شود اتفاق بیفتد.

- پیش بینی شبکه عصبی بسیار نزدیک به نتایج آزمایش تجربی بود و نتایج نیروی شکست مدل آموزش دیده به طور میانگین با حالت تجربی در حدود 2.0175 درصد خطا داشت.

- مدل شبکه عصبی مصنوعی به خوبی میزان تأثیرگذاری پارامترهای فرایند جوشکاری را ارائه داد و بر همین اساس سرعت دورانی بیشترین تأثیر و زاویه استقرار ابزار کمترین تأثیر را بر روی متغیرهای فرایند جوشکاری داشتند.

- تأثیر تغییرات زاویه استقرار ابزار بر روی گرمای ورودی و میزان سیلان عمودی مواد ناچیز بوده و تغییرات ارتفاع هوک و نیروی شکست با تغییر زاویه استقرار ابزار زیاد محسوس نیست.

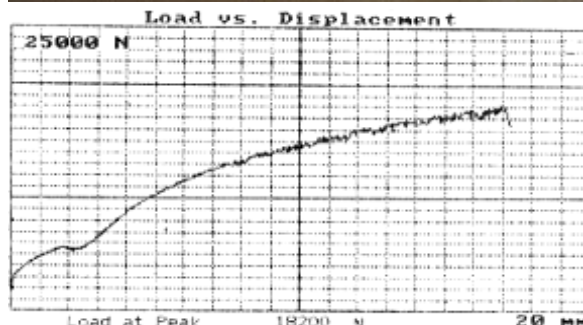


Fig. 10 Failure analysis of the failure Zone in the specimen under parameters ( $\omega=750$  rpm,  $V=50$  mm/min,  $\theta=4^\circ$ )

شکل 10 شکست نگاری محل شکست در نمونه تحت پارامترهای ( $\omega=750$  rpm,  $V=50$  mm/min,  $\theta=4^\circ$ )

پیش رونده و پس رونده، ابتدا پس از آزمایش های مختلف که در اینجا آورده نشده است، بهترین مدل شبکه عصبی با استفاده از داده های آزمایش ها، با ساختار دو لایه پنهانی، با 10 نرون در لایه اول و 5 نرون در لایه دوم، به دست آمد و سپس با حذف یک و دو پارامتر بر اساس طراحی آزمایش کامل، مدل سازی شبکه عصبی انجام پذیرفت [15-17].

در مجموع 7 آزمایش حاصل گردید که در هر آزمایش بهترین ساختار شبکه انتخاب و متوسط خطای یادگیری شبکه به دست آمد و تأثیر پارامترها بر روی فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بررسی گردید. میزان تأثیر پارامترها به همراه متوسط خطای هر آزمایش در جدول 9 نشان داده شده است.

همان طور که در جدول 9 مشاهده می شود، در فاز اول، هر بار با حذف یکی از پارامترها، شبکه با در نظر گرفتن دو ورودی از سه ورودی، طراحی و آموزش داده شد و بیشترین خطا هنگامی مشاهده گردید که پارامتر سرعت دورانی از بین ورودی های شبکه حذف شد. در این مرحله پس از حذف پارامتر سرعت دورانی، مجموع خطاهای متوسط خروجی برابر با 15.063 درصد گردید. بعد از این پارامتر، حذف پارامتر سرعت پیشروی، بیشترین خطا را در مدل سازی شبکه به وجود آورد.

همچنین در همین فاز مشاهده گردید که کمترین خطا مربوط به وقتی است که پارامتر زاویه استقرار ابزار حذف شده، که با توجه به مقدار متوسط خطاهای مدل سازی، مجموع خطاهای متوسط خروجی به میزان 6.96 درصد

جدول 9 بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری به کمک شبکه عصبی

Table 9 The Effect of welding parameters using neural network

شماره مدل	ساختار شبکه	ورودی ها		متوسط مربع خطاها (mse)	مجموع خطاهای متوسط خروجی (%)
		سرعت دورانی ( $\omega$ )	سرعت پیشروی (v)		
1	3*10*5*3	I	I	0.000434	3.49
2	2*15*10*3	-	I	0.099265	15.063
3	2*15*8*3	I	-	0.07178	10.9
4	2*10*7*3	I	I	0.045853	6.96
5	1*8*3	-	-	0.15956	24.22
6	1*10*3	-	I	0.137127	20.8
7	1*10*3	I	-	0.122018	18.52

1 وجود پارامتر (ورودی مدل)

- عدم وجود پارامتر (ورودی مدل)

**6- تقدیر و تشکر**

از زحمات و همکاری کارکنان محترم کارگاه آدیش و آزمایشگاه مهندسی مواد صنایع صنم بخصوص جناب آقایان مهندسین رنجبرکی، رضایی، دهقانی، قاسمی، تطهیری و عزیزاده که در انجام آزمایش‌ها پشتیبان اینجانب بودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

**7- مراجع**

- [9] H. Shirazi, S.H. Kheirandish, M.A. Safarkhanian, The effect of speed welding of Friction stir welding (FSW) on the microstructure in Lap-Joint of sheets aluminum alloy with different thickness, *Proceedings of The 3<sup>rd</sup> International Conference on Material Heat treatment*, Isfahan, Iran, May 30-31, 2012. (in Persian)
- [10] American Welding Society (AWS) Committee D17.3, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications, Edition.1, No. 17.3. 2009.
- [11] M. Kathleen, Metals Handbook: Metallography and Microstructure, *American Society for Metals (ASM)*, Vol. 9, Ninth Edition, pp. 352-354, 1985.
- [12] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 519, Issues. 1-2, pp. 19-26, 2009.
- [13] I.S. Kim, J.S. Son, C.E. Park, I.J. Kim, An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in Arc welding process, *Materials Processing Technology*, vol. 159, Issues. 1, pp. 113-118, 2005.
- [14] M.T. Hagan, M. Menhaj, Training feed-forward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 5, No. 6, pp. 989-993, 1999.
- [15] M.R. Soleymani Yazdi, M. Mardalizadeh, M. Moodi, The optimization Of Resistance Seam welding process on sheets aluminum 5083 and 5456 using genetic algorithms, *Proceedings of The 3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, Tehran, Iran, December 27 - 29, 2011. (in Persian)
- [16] R. Azouzi, M. Guillot, On-Line Prediction Of Surface Finish And Dimensional Deviation In Turning Using Neural Network Based Sensor Fusion, *Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 9, pp. 1201-1217, 1997.
- [17] H. Amini, M. R. Soleymani Yazdi, H. Dehghan, Optimization Of Process Parameters In WEDM Of TiB2 Nano Composite Ceramic, *Journal of Engineering Manufacture, Part B Of IMechE*, Vol. 225, Issue. 12, pp. 2220-2227, 2011.
- [1] C. Menzemer, T.S. Srivatsan, The effect of environment o fatigue crack growth of behavior of aluminum alloy 5456, *Materials Science and Engineering*, A271, pp. 188-195, 1999.
- [2] A. Kumar, P. Shailesh, S. Sundarraj, Optimization of magnetic arc oscillation process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments, *Materials and Design*, Vol. 29, No. 10, pp.1904-1913, 2008.
- [3] H.B. Chen, K. Yan, T. Lin, S.B. Chen, Y. Zhao, The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 433, No. 1, pp. 64-69, 2006.
- [4] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. T. smith, C.J. Dawes, International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application, No. 9125978.8, 1991.
- [5] R.S. Mishra, Z.Y. Mab, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [6] H. Okuyucu, A. Kurt, E. Arcaklioglu, Artificial neural network application to the Frictions stir welding of aluminum Plates, *Materials and Design*, Vol. 28, No.1, pp. 78-84, 2007.
- [7] L. Fratini, G. Buffa, D. Palmeri, Using a neural network for predicting the average grain size in friction stir Welding processes, *Computers & Structures*, Vol. 87, Issues 17-18, pp. 1166-1174, 2009.
- [8] L. Dubourg, A. Merati, M. Jahazi, Process optimization and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 7, pp. 3324-3330, 2010.