



پیش بینی سختی در نانوکامپوزیت های Al-Al₂O₃ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با تغییر عوامل موثر در روش آلیاژسازی مکانیکی

علی شکوه فر^{۱*}، سعیده قربان پور^۲، سجاد نصیری خلیل آباد^۳، اشکان ذوالریاستین^۴، علی اصغر جعفری^۵

- ۱- استاد مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران
 - ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران
 - ۳- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
 - ۴- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران
 - ۵- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران
- * تهران، صندوق پستی ۱۹۳۹۵۱۹۹۹، shokuhfar@kntu.ac.ir

چکیده- در این پژوهش یک شبکه پیشرو با الگوریتم پس انتشار خطا، برای پیش بینی سختی نانوکامپوزیت های آلومینیوم-آلومینا، تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی، با استفاده از داده های موجود طراحی شد. مقدار و اندازه ذرات تقویت کننده، نیرو در آزمون سختی؛ همچنین برخی از عوامل موثر بر فرآیند آلیاژسازی به عنوان متغیرهای ورودی شبکه و سختی و ویکرز به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شدند. نرخ آموزش، تعداد لایه های پنهان و تعداد نرون ها با در نظر گرفتن مقدار و درصد خطا تعیین شدند. برای بررسی عملکرد شبکه، از میانگین مربعات خطا و نمودارهای رگرسیون استفاده شد. شبکه طراحی شده سختی و ویکرز داده های تست را با میانگین خطای ۲/۶۷ درصد (معادل ۲/۲۵ ویکرز) پیش بینی می نماید. با استفاده از مدل شبکه عصبی، سختی و ویکرز نانوکامپوزیت آلومینیوم-آلومینا، بدون نیاز به کارهای آزمایشگاهی پرهزینه، قابل پیش بینی می باشد. **کلیدواژگان:** نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی، میکرو سختی و ویکرز، آلیاژسازی مکانیکی، شبکه عصبی مصنوعی.

Prediction of hardness in Al-Al₂O₃ nanocomposite using artificial neural network with alternation in effective parameters of mechanical alloying method

A. Shokuhfar^{1*}, S. Ghorbanpour², S. Nasiri Khalil Abad³, A. Zolriasatein⁴, A.A. Jafari⁵

- 1- Prof., Materials Eng., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
 - 2- MSc Student, Mech. Eng., Faculty of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran
 - 3- PhD Candidate, Materials. Eng., Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
 - 4- PhD Candidate, Materials. Eng., Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
 - 5- Assoc. Prof., Mech. Eng., Faculty of Mech Eng, K. N. Toosi Univ of Tech, Tehran, Iran
- * P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran. shokuhfar@kntu.ac.ir

Abstract- In this study a feed forward back propagation artificial neural network (ANN) model was established to predict Vickers microhardness in aluminum-alumina nanocomposites which have been synthesized by mechanical alloying. Volume percent and size of reinforcement, force in microhardness test; and some of mechanical alloying parameters were used as the inputs and hardness was the output of the model. learning rate, hidden layers and number of neurons, were determined due to amount and percentage of errors. Regression analysis and mean squared error were used to verify the performance of neural network. Average error of predicted results was 2.67% or 2.25 Vickers. As can be expected, ANN methods reduce the expenses of experimental investigations, by predicting the optimum parameters.

Keywords: Aluminum Based Nanocomposite, Vickers Microhardness, Mechanical Alloying, Artificial Neural Network.

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت فناوری نیاز به مواد پیشرفته مهندسی با کارایی بالا و خواص مطلوب در بخش‌های مختلف صنعت افزایش یافته است. در میان این مواد پیشرفته نانوکامپوزیت‌ها جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. در میان انواع نانوکامپوزیت‌ها، نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل استحکام بالا با حفظ رفتار فلزی نظیر انعطاف‌پذیری مناسب، خواص الکتریکی و حرارتی مطلوب و نقطه ذوب نسبتاً بالا مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. انواع زمینه‌های فلزی نظیر آلومینیوم، مس، آهن، منیزیم، تیتانیوم و دیگر فلزات مورد بررسی قرار گرفته که نانوکامپوزیت‌های پایه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی به دلیل وزن کم، استحکام ویژه بالا و خواص مکانیکی عالی مانند استحکام تسلیم، استحکام نهایی، سختی، مقاومت به خستگی، مقاومت به سایش بالا، قابلیت ماشین‌کاری و ضریب انبساط حرارتی پایین بیشتر برای کاربردهای مختلف به ویژه در صنایع حمل و نقل و هوافضا پیشنهاد شده‌اند [۲،۱].

تاکنون برای تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی از روش‌های ساخت مختلفی شامل آلیاژسازی مکانیکی^۱، تفجوشی نانو^۲، خللازایی اولتراسونیک^۳ و ریخته‌گری استفاده شده است. نکته مهم در تولید نانوکامپوزیت‌های فلزی با ذرات تقویت‌کننده سرامیکی، این است که ذرات سرامیک به‌طور یکنواخت در سراسر ماتریس توزیع شوند [۲]. از بین روش‌های ممکن برای تولید نانوکامپوزیت‌های با پایه فلزی، روش آلیاژسازی مکانیکی توزیع مناسب‌تری از نانو ذرات تقویت‌کننده در ماتریس ایجاد می‌کند [۴،۳].

تقویت ماتریس آلومینیومی با استفاده از یک فاز قوی‌تر مانند اکسیدها، کاربیدها و نیتrideها به عنوان تقویت‌کننده، ترکیبی از خواص ماتریس فلزی و تقویت‌کننده سرامیکی را ایجاد می‌کند که منجر به بهبود قابل ملاحظه خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت می‌شود [۵]. متداول‌ترین تقویت‌کننده‌ای که برای ماتریس آلومینیومی به کار می‌رود، کاربید سیلیکون (SiC) و آلومینا (Al_2O_3) است که به دلیل در دسترس بودن، قیمت پایین و ایجاد خواص مکانیکی مناسب می‌باشد [۶].

مطالعات زیادی بر روی ساختار و میزان سختی نانوکامپوزیت آلومینیوم- آلومینا انجام شده است [۵-۹]. در میان این پژوهش‌ها، پوپریر و همکارانش [۶] نشان دادند که با افزودن ۱۰ درصد حجمی آلومینا با اندازه متوسط ۴ نانومتر به ماتریس آلومینیوم، سختی نانوکامپوزیت به میزان ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

شبکه عصبی مصنوعی^۴ (ANN)، یک ابزار قدرتمند ریاضی است که امروزه در بسیاری از موارد از جمله در تولید و خواص مواد کاربرد پیدا کرده است [۱۱،۱۰]. شبکه عصبی مصنوعی از سیستم عصبی انسان الهام گرفته است و از المان‌هایی به نام نرون^۵ تشکیل شده که می‌توانند به صورت موازی عمل کنند. در شبکه عصبی، نرون‌ها به وسیله لینک‌هایی که دارای وزن هستند به یکدیگر مرتبط می‌باشند. تنظیم وزن‌ها به عهده تابع انتقال می‌باشد. در واقع تابع انتقال نقش مهمی در کیفیت پیش‌بینی شبکه دارد و با تنظیم مقدار وزن‌ها، باعث آموزش شبکه می‌شود [۱۰].

در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های موجود میکروسختی ویکرز برای نانوکامپوزیت آلومینیوم- آلومینا، یک شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس‌انتشار خطا طراحی شده است. از نمودارهای رگرسیون^۶ در مراحل آموزش، صحت‌سنجی و تست؛ میانگین مربعات خطا^۷ (MSE) و خطای داده‌های تست برای بررسی و تحلیل عملکرد شبکه عصبی طراحی شده، استفاده گردید. در مرحله تست، شبکه دارای میزان خطای قابل قبول بود. لذا شبکه عصبی طراحی شده قابلیت پیش‌بینی میکروسختی ویکرز در نانوکامپوزیت آلومینیوم- آلومینا در محدوده آموزش را دارا می‌باشد.

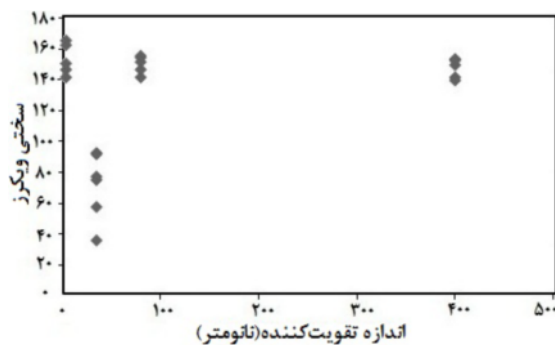
۲- طراحی شبکه عصبی

مدل‌سازی شبکه عصبی شامل مراحل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش و فرآوری داده‌ها، انتخاب پارامترهای شبکه شامل معماری شبکه و الگوریتم آموزش، صحت‌سنجی شبکه آموزش دیده شده توسط داده‌های تست و استفاده از شبکه برای پیش‌بینی داده‌ها می‌باشد [۱۲]. شبکه‌های عصبی با استفاده از

4. Artificial Neural Network
5. Neuron
6. Regression
7. Mean Squared Error

1. Mechanical Alloying
2. Nano Sintering
3. Ultrasonic Cavitation

می‌باشد که با یک روند سعی و خطا صورت می‌گیرد [۱۲، ۱۳].



شکل ۱ نمودار سختی نانوکامپوزیت بر حسب ابعاد تقویت‌کننده

در پژوهش حاضر یک شبکه عصبی پیش‌رو با الگوریتم پس‌انتشار خطا، به منظور پیش‌بینی میکروسختی نانوکامپوزیت پایه آلومینیوم، تقویت‌شده با نانوذره آلومینا، که با استفاده از آلیاژسازی مکانیکی و پرس گرم تولید شده‌اند، طراحی شده است. شبکه شامل یک لایه ورودی و یک لایه خروجی و دو لایه پنهان می‌باشد. متغیرهای ورودی؛ اندازه نانوذره، کسر حجمی آلومینا، زمان و سرعت آلیاژسازی مکانیکی، نسبت وزنی گلوله به پودر در فرایند آلیاژسازی مکانیکی و مقدار بار در تست میکروسختی و خروجی شبکه عدد تست میکروسختی ویکرز انتخاب شده است. بنابراین، لایه ورودی شامل ۶ نرون و لایه خروجی شامل ۱ نرون می‌باشد. در میان داده‌های جدول ۱ به صورت تصادفی، از ۱۴ سری داده برای آموزش شبکه و از ۲ سری داده برای تست شبکه و تعیین میزان کارآمد بودن شبکه استفاده شد. تعداد نرون‌های لایه پنهان طی فرآیند آموزش، با سعی و خطا و بررسی روند خطای داده‌های تست تعیین شدند. کد مربوط به مدل‌سازی شبکه در نرم‌افزار متلب^۱، نسخه R2010a نوشته شد.

۲-۲- روند آموزش شبکه

در مطالعه انجام شده، از الگوریتم لونیبرگ-مارکوات^۲ (LM) برای آموزش شبکه استفاده شده است [۱۳]. همچنین از تابع سیگموئید^۳ به عنوان تابع تحریک استفاده شد.

داده‌ها آموزش می‌یابند. از این رو داده‌های ورودی مناسب، منجر به آموزش صحیح شبکه و در نتیجه رسیدن به خروجی مناسب می‌شوند. آموزش شبکه از طریق تغییر وزن‌ها به صورت متناوب تا زمانی ادامه می‌یابد که خروجی شبکه تا حد ممکن به خروجی مطلوب نزدیک شود و شبکه به مقدار خطای قابل قبول برسد. پس از آموزش، شبکه قادر است تا با استفاده از الگویی که در مرحله آموزش به آن رسیده است، خروجی داده‌هایی را که آموزش ندیده، پیش‌بینی کند [۱۲].

برای آموزش شبکه از جفت داده‌های ورودی-خروجی استفاده می‌شود. این بدان معنا است که هرچه داده‌ها کامل‌تر و مناسب‌تر باشند، شبکه بهتر آموزش می‌یابد [۱۲]. در این تحقیق، داده‌ها از نتایج تست میکروسختی انجام شده بر روی نانوکامپوزیت آلومینیوم-آلومینا موجود در مراجع، استخراج شده‌اند.

به منظور جمع‌آوری داده‌ها، از مقالات معتبر موجود [۵-۹]، پژوهش‌هایی که در آن‌ها نانوکامپوزیت آلومینیوم-آلومینا به روش آلیاژسازی مکانیکی و پرس گرم تولید شده بودند، انتخاب شدند. با توجه به ورودی‌های شبکه مورد نظر، داده‌هایی که اطلاعات مربوط به آلیاژسازی مکانیکی (زمان، سرعت و نسبت وزنی گلوله به پودر) و اطلاعات مربوط به تقویت‌کننده (اندازه و مقدار نانوذره) و مقدار بار وارد شده در آزمون میکروسختی را به طور کامل دارا بودند، حفظ و بقیه داده‌ها از جامعه آماری حذف شدند.

برای داده‌هایی که تمامی اطلاعات ورودی را دارا بودند، نمودار متغیرها بر حسب سختی رسم شد. به جز در مورد اندازه نانوذره تقویت‌کننده، سایر نمودارها پراکندگی مناسبی داشتند. در مورد نمودار مربوط به اندازه نانوذره، داده‌های مربوط به اندازه ۴۰۰ نانومتر دارای پراکندگی زیادی نسبت به سایر داده‌ها بودند. لذا ۵ داده مربوط به اندازه ۴۰۰ نانومتر حذف شدند. شکل ۱ نمودار مربوط به بررسی پراکندگی داده‌ها را برای ابعاد نانوذره بر حسب سختی ویکرز نشان می‌دهد. همچنین جدول ۱، داده‌هایی را که در روند آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد.

۲-۱- معماری شبکه عصبی

منظور از معماری شبکه، در واقع تعیین تعداد لایه‌های پنهان و همچنین مشخص نمودن تعداد نرون‌ها در لایه‌های پنهان

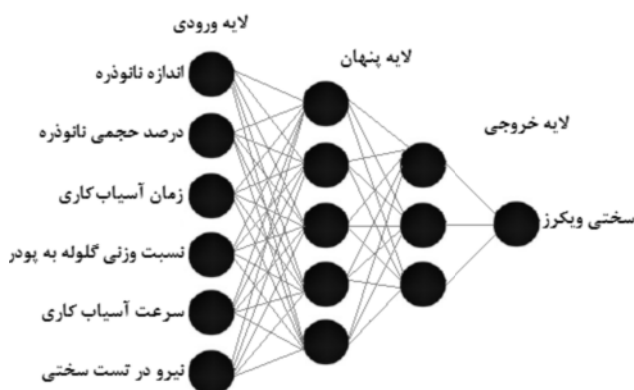
1. Matlab
2. Levenberg-Marquardt
3. Sigmoid

در مرحله آموزش شبکه، دیگر پارامترهای موثر بر آموزش مانند نرخ یادگیری^۲ و پارامتر مو^۳ نیز مورد بررسی قرار گرفتند. این پارامترها مشخص‌کننده میزان تغییرات وزن‌ها و بایاس می‌باشند. لذا تعیین دقیق آن‌ها به بهبود کارایی شبکه کمک می‌کند. پارامترهای گفته شده با توجه به وضعیت پیش‌بینی‌های شبکه در مرحله آموزش، تغییرات مقدار میانگین مربعات خطا برای داده‌های صحت‌سنجی و مقدار خطای داده‌های تست تغییر داده شدند تا مقدار مطلوب آن‌ها مشخص شد. برای شبکه طراحی شده در این پژوهش مقادیر مربوط به نرخ یادگیری و پارامتر مو به ترتیب 0.0001 و 0.01 در نظر گرفته شدند.

۲-۳- بررسی عملکرد شبکه

به منظور یافتن تعداد لایه‌های پنهان مناسب، شبکه با ۱، ۲ و ۳ لایه میانی آموزش داده شد. بهترین عملکرد و کمترین مقدار میانگین مربعات خطا مربوط به زمانی بود که از ۲ لایه میانی استفاده شد. همچنین برای یافتن تعداد بهینه نرون‌های لایه پنهان، تعداد نرون‌ها از ۲ تا ۸ تغییر یافت و مقدار MSE برای تمامی داده‌ها و درصد و مقدار خطا برای داده‌های تست بررسی شد. برای محاسبه مقدار خطا از رابطه ۲ استفاده شد. بهترین نتایج هنگامی حاصل شد که در لایه پنهان اول، ۵ نرون و در لایه پنهان دوم، ۳ نرون قرار داشت. بنابراین ساختار شبکه به صورت ۱-۳-۵-۶ طراحی شد. در شکل ۲، شبکه به صورت شماتیک نشان داده شده است.

$$(۲) \quad \text{پیش‌بینی شبکه عصبی} - \text{عدد سختی ویکرز آزمایشگاهی} = \frac{\text{مقدار خطا}}{\text{عدد سختی ویکرز آزمایشگاهی}}$$



شکل ۲ شماتیک شبکه عصبی پژوهش حاضر

جدول ۱ داده‌های استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی [۶،۵]

اندازه نانو ذره	درصد حجمی (نانومتر)	زمان آسیاب کاری (h)	نسبت وزنی گلوله به پودر	سرعت آسیاب (RPM)	بار در تست میکروسختی ویکرز (kg)	سختی میکروسختی ویکرز
۳۵	۰	۸	۱۵	۴۸۰	۰/۰۲۵	۳۶
۳۵	۱/۳۹	۸	۱۵	۴۸۰	۰/۰۲۵	۵۸
۳۵	۲/۱	۸	۱۵	۴۸۰	۰/۰۲۵	۷۵
۳۵	۲/۸	۸	۱۵	۴۸۰	۰/۰۲۵	۹۳
۳۵	۳/۵۲	۸	۱۵	۴۸۰	۰/۰۲۵	۹۲
۳۵	۴/۲۳	۸	۱۵	۴۸۰	۰/۰۲۵	۷۷
۴	۰	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۴۲
۴	۱	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۴۷
۴	۲	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۵۱
۴	۵	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۶۳
۴	۱۰	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۶۶
۸۰	۰	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۴۲
۸۰	۱	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۴۷
۸۰	۲	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۵۵
۸۰	۵	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۵۶
۸۰	۱۰	۵	۱۰	۱۲۰۰	۰/۰۵	۱۵۲

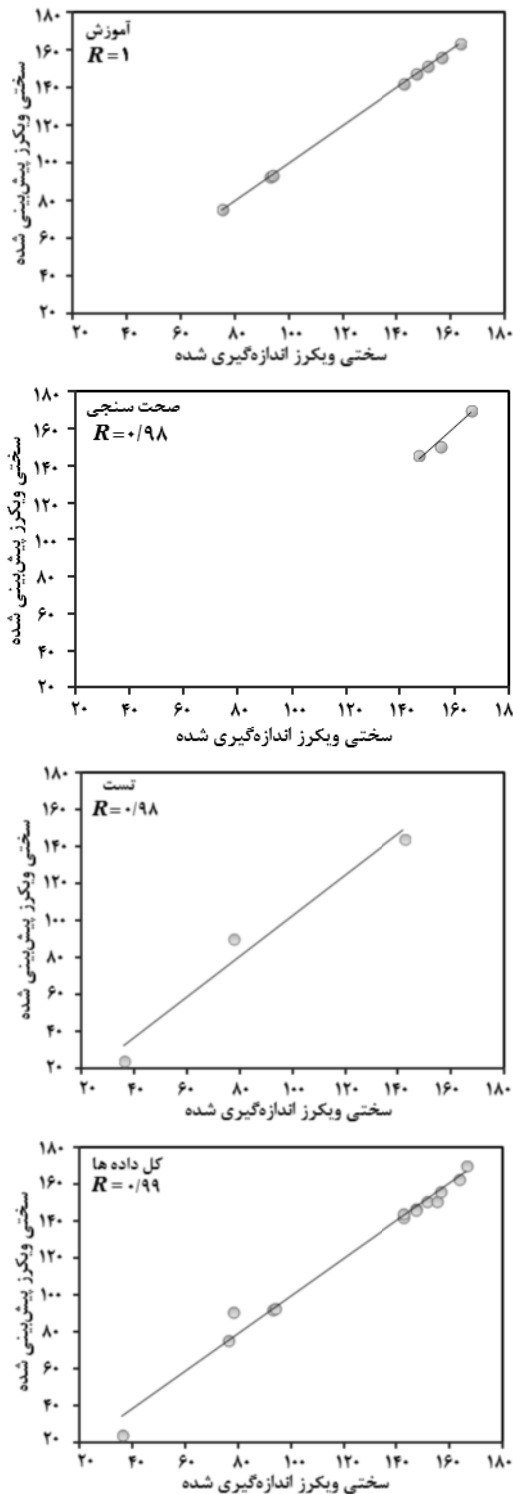
برای آموزش شبکه جهت پیش‌بینی سختی ویکرز، از ۱۴ سری داده استفاده شده است. از ۲ سری داده باقی‌مانده برای ارزیابی شبکه آموزش دیده استفاده شد. با استفاده از الگوریتم آموزش لونیگ-مارکوات، ابتدا وزن‌های اولیه و بایاس^۱ به صورت تصادفی به شبکه اختصاص یافت. سپس با ورود داده‌های ورودی و با در نظر گرفتن خروجی شبکه و مقایسه آن با خروجی مطلوب و با هدف کاهش مقدار خطا، وزن‌های اولیه تنظیم و اصلاح شدند که از این وزن‌های اصلاح شده در مراحل بعدی آموزش استفاده شد. در هر مرحله از آموزش، وزن‌ها با توجه به خروجی شبکه اصلاح شدند. با توجه به این که از مقدار میانگین مربعات خطای داده‌های صحت‌سنجی برای بررسی نحوه عملکرد شبکه استفاده شد، عمل اصلاح وزن‌ها تا زمانی که شبکه به MSE مطلوب برسد، ادامه یافت. مقدار میانگین مربع خطا با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. در رابطه ۱، N تعداد داده‌ها، t خروجی مطلوب و a مقدار پیش‌بینی شده توسط شبکه می‌باشد.

$$(۱) \quad MSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_i - a_i| \right)^2$$

1. Bias

2. Learning Rate
3. Mu Parameter

مقایسه می‌کند، این روند افزایش سختی با افزایش مقدار آلومینا را به خوبی پیش‌بینی می‌نماید.



شکل ۳ نمودارهای رگرسیون در مراحل آموزش، صحت‌سنجی، تست و کل داده‌ها

مقدار متوسط درصد خطا برای داده‌های تست، ۲/۶۷ درصد و مقدار میانگین مربعات خطا برای داده‌های صحت‌سنجی ۷/۷۶ بود که نشان می‌دهد شبکه برای پیش‌بینی سختی نانوکامپوزیت آلومینیوم-آلومینا دقت کافی دارد. شکل ۳ نمودارهای رگرسیون پیش‌بینی شبکه برای میکروسختی ویکرز را در مراحل آموزش، صحت‌سنجی و تست و همچنین برای کل داده‌ها در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

برای تعداد لایه‌های پنهان ۱، ۲ و ۳ مقدار و درصد خطا، میانگین مربعات خطا و روند آموزش شبکه بررسی شد. هنگامی که در شبکه از یک لایه پنهان استفاده شد، درصد خطا برای داده‌های تست در بهترین حالت از ۵/۳ درصد کمتر نشد در حالی که با افزایش لایه‌های پنهان به ۲ لایه، خطا ۲/۶۳ درصد کاهش یافت. با اضافه نمودن یک لایه پنهان دیگر، مجدداً خطا افزایش یافت. بنابراین از ۲ لایه پنهان استفاده شد. شکل ۴ مقایسه درصد خطا و MSE را برای تعداد لایه‌های پنهان مختلف نشان می‌دهد.

از ۱۴ سری داده برای آموزش شبکه استفاده شد. در مرحله آموزش نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی سختی اختلاف کمی داشت. شکل ۵ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شبکه و داده‌های آزمایشگاهی را در مرحله آموزش نشان می‌دهد.

داده‌های تست به صورت اتفاقی از بین داده‌های موجود انتخاب شده بودند و در مراحل قبلی شبکه این داده‌ها را آموزش ندیده بود. برای تشخیص این که آموزش شبکه به درستی صورت پذیرفته و نتایج پیش‌بینی شبکه قابل اطمینان است، پیش‌بینی‌های شبکه با مقادیر داده‌های واقعی مقایسه شدند. به این منظور مقدار و درصد خطا محاسبه شد. داده‌های تست به طور میانگین، ۲/۶۷ درصد یا ۲/۲۵ ویکرز خطا داشتند که مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین شکل ۶ مقایسه مقادیر پیش‌بینی شبکه و مقادیر داده‌های آزمایشگاهی را در مرحله تست نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود پیش‌بینی شبکه با مقدار واقعی اختلاف کمی دارد.

با توجه به جدول ۱، با افزایش کسر حجمی نانوذره در نانوکامپوزیت، سختی افزایش می‌یابد. شکل ۵ که مقادیر پیش‌بینی شبکه و مقادیر حاصل از آزمایش‌های تجربی را

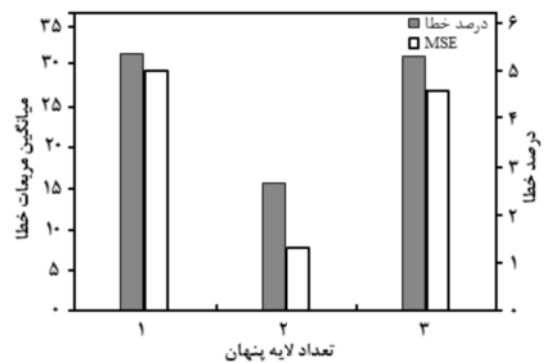
صحت‌سنجی، تست و کل داده‌ها به ترتیب برابر با ۱، ۰/۹۸، ۰/۹۸ و ۰/۹۹ بودند که این مقادیر نشان‌دهنده آموزش خوب شبکه و در نتیجه قابل اعتماد بودن نتایج می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

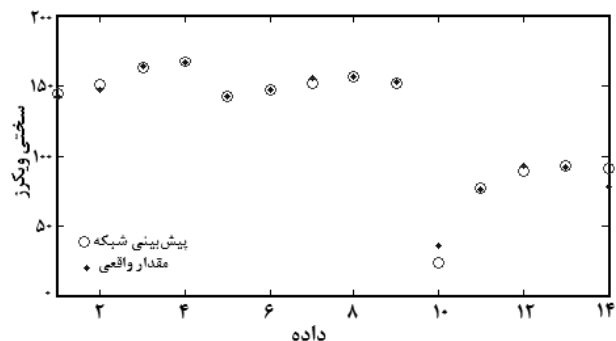
در این پژوهش یک شبکه عصبی پیش‌رو با الگوریتم پس‌انتشار خطا برای پیش‌بینی سختی ویکرز نانوکامپوزیت آلومینیوم-آلومینا با توجه به مقدار و اندازه نانوذره سرامیکی، پارامترهای آلیاژسازی و نیرو در تست سختی مورد استفاده قرار گرفت. برای اطمینان از عملکرد صحیح شبکه عصبی، نمودارهای رگرسیون در مراحل آموزش، صحت‌سنجی و تست و همچنین مقدار میانگین مربعات خطا، مورد بررسی قرار گرفتند. میانگین درصد خطای پیش‌بینی شبکه برای داده‌های تست، ۲/۶۷ درصد یا ۲/۲۵ ویکرز و میانگین مربعات خطا در مرحله صحت‌سنجی ۷/۷۶ بود. این نتایج برای شبکه‌ای با ۲ لایه پنهان، که تعداد نرون‌ها در لایه‌های میانی به ترتیب ۵ و ۳ بودند، حاصل شد. با توجه به نمودارهای پراکندگی و همچنین مقدار و درصد خطا در مرحله تست، عملکرد شبکه برای پیش‌بینی سختی نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی، تقویت شده با نانو ذره سرامیکی آلومینا، خوب ارزیابی شد. از آنجا که در شبکه عصبی این پژوهش اندازه و درصد حجمی نانوذره و ویژگی‌های آسیاب‌کاری مکانیکی و همچنین نیروی وارد شده در آزمایش سختی به عنوان ورودی در نظر گرفته شدند، بنابراین شبکه طراحی شده برای پیش‌بینی سختی با تغییر پارامترها در محدوده مطالعه شده قابل استفاده خواهد بود.

۵- مراجع

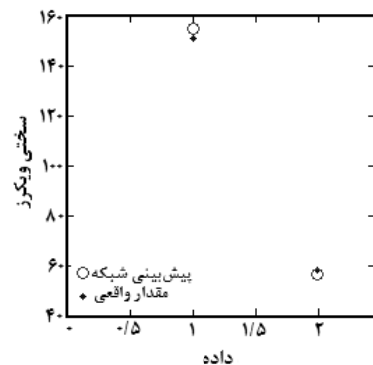
- [1] Ahamed H., Senthilkumar V., "Experimental investigation on newly developed ultrafine-grained aluminium based nano-composites with improved mechanical properties", *Materials and Design*, Vol. 37, 2012, pp. 182-192.
- [2] El-Daly A.A., Abdelhameed M., Hashish M., Daoush W.M., "Fabrication of silicon carbide reinforced aluminum matrix nanocomposites and characterization of its mechanical properties using non-destructive technique", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 559, 2013, pp. 384-393.
- [3] Bera S., Chowdhury S.G., Estrin Y., Manna I, "Mechanical properties of Al7075 alloy with nano-



شکل ۴ مقایسه درصد خطا و میانگین مربعات خطا برای تعداد لایه‌های پنهان متفاوت



شکل ۵ نتایج پیش‌بینی شبکه در مرحله آموزش



شکل ۶ نتایج پیش‌بینی شبکه در مرحله تست

همچنین با کاهش سرعت آسیاب‌کاری، به دلیل کاهش برخوردهای مؤثر، مقدار سختی کاهش می‌یابد. در این مورد نیز شبکه روند کاهش سختی را به خوبی پیش‌بینی می‌نماید. در مراحل آموزش، صحت‌سنجی و تست و همچنین برای کل داده‌ها، نمودار رگرسیون که نشان‌دهنده پراکندگی داده‌ها در حالت پیش‌بینی و مقادیر واقعی بود، مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر R در این نمودارها در مراحل آموزش،

- subsequent casting”, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, Vol. 25, 2013, pp. 75–80.
- [9] Mahboob H., Sajjadi S. A., Zebarjad S. M., “synthesis of $Al-Al_2O_3$ nano-composite by mechanical alloying and evaluation of the effect of ball milling time on the microstructure and mechanical properties”, *The International Conference on MEMS and Nanotechnology*, ICMN'08, 2008.
- [10] Zhu J., Shi Y., Feng X., Wanga H., Lu X., “Prediction on tribological properties of carbon fiber and TiO_2 synergistic reinforced polytetrafluoroethylene composites with artificial neural networks”, *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp.1042–1049.
- [11] Rashidi A.M., Hayati M., Rezaei A., “Application of artificial neural network for prediction of the oxidation behavior of aluminized nano-crystalline nickel”, *Materials and Design*, Vol. 42, 2012, pp. 308–316.
- [12] Dini G., Najafizadeh A., Monir-Vaghefi S.M., Ebnonnasir A., “Predicting of mechanical properties of Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels using neural network modeling”, *Computational Materials Science*, Vol. 45, 2009, pp. 959–965
- [13] Jiang Z., Gyurova L., Zhang Z., Friedrich K., Schlarb A.K., “Neural network based prediction on mechanical and wear properties of short fibers reinforced polyamide composites”, *Materials and Design*, Vol. 29, 2008, pp. 628–637.
- ceramic oxide dispersion synthesized by mechanical milling and consolidated by equal channel angular pressing”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 548, 2013, pp. 257–265.
- [4] Kollo L., Leparoux M., Bradbury C.R., Jaggi C., Carreno-Morelli E., Rodriguez-Arbaizar M., “Investigation of planetary milling for nano-silicon carbide reinforced aluminium metal matrix composites”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 489, 2010, pp. 394–400.
- [5] Tabandeh Khorshid M., Jenabali Jahromi S.A., Moshksar M.M., “Mechanical properties of trimodal Al matrix composites reinforced by nano- and submicron-sized Al_2O_3 particulates developed by wet attrition milling and hot extrusion”, *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 3880–3884.
- [6] Poirier D., Drew R. A.L., Trudeau M.L., Gauvin R., “Fabrication and properties of mechanically milled alumina/aluminum nanocomposites”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, 2010, pp. 7605–7614.
- [7] Hosseini N., Karimzadeh F., Abbasi M.H., Enayati M.H., “Tribological properties of $Al6061-Al_2O_3$ nanocomposite prepared by milling and hot pressing”, *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 4777–4785.
- [8] Hossein-Zadeh M., Razavi M., Mirzaee O., Ghaderi R., “Characterization of properties of $Al-Al_2O_3$ nano-composite synthesized via milling and