

پیش‌بینی خواص مکانیکی آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیر خطی

مسعود محمودی^{۱*}، علی نادری بختیاری^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۲۴	<p>فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار از فرآیندهای تغییر فرم شدید پلاستیک جهت دستیابی به ساختار فوق ریزدانه است. در این مقاله به بررسی این فرآیند و تأثیر پارامترهای آن به کمک مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیر خطی پرداخته شده است. به منظور پیش‌بینی خواص مکانیکی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار از شبکه عصبی پس انتشار پیش‌خور استفاده شده است. پارامترهای زاویه کانال قالب، تعداد عبور و مسیر فرآیند به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی و پارامترهای استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی به‌عنوان خروجی‌های شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین رابطه بین پارامترهای ورودی با هر کدام از پارامترهای خروجی با استفاده از رگرسیون غیر خطی استخراج شده است. با مقایسه خروجی‌های شبکه عصبی و روابط برازش با نتایج تجربی مشاهده شد که هر دو مدل به‌طور مناسبی قابلیت پیش‌بینی خواص مکانیکی را دارند، هر چند مدل شبکه عصبی عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. در ادامه به کمک داده‌های توسعه‌داده‌شده توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی آموزش‌دیده، تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند بر استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که پارامترهای زاویه کانال قالب و تعداد عبور، تأثیر بیشتری را نسبت به مسیر فرآیند بر روی مقادیر خروجی دارند.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۰۲	
<p>واژگان کلیدی: تغییر شکل پلاستیک شدید، نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار، خواص مکانیکی، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون غیر خطی.</p>	

۱- مقدمه

در دهه اخیر، تغییر شکل پلاستیک شدید به‌عنوان یک روش مؤثر در تولید فلزات با ساختار در حد نانو معرفی شده است. تحقیقات وسیعی به‌منظور توسعه روش‌های تولید به روش تغییر شکل پلاستیک شدید و ایجاد فلزات با ساختار بسیار ریز با خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار خوب انجام شده است. اخیراً مواد فوق ریزدانه تولیدشده توسط فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که سبب ایجاد ساختار فوق ریزدانه و بهبود خواص مکانیکی محصول می‌شود. این فرآیند جهت شکل‌دهی پیوسته ورق،

تسمه و نوارهای فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار همانند فرآیند پرس‌کاری در کانال هم‌سان زاویه‌دار^۳ فرآیندی است که به کمک آن می‌توان بدون تغییر در سطح مقطع قطعه، کرنش‌های بزرگی را به ماده اعمال کرد [۱].

در این دهه محققان متعددی به بررسی فرآیند نورد در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار و میکروساختار نمونه‌های حاصل از آن پرداخته‌اند [۲ و ۳]. چانگ و همکاران [۴] در مقاله خود به تحلیل تغییر شکل آلومینیوم ۶۰۶۳ در فرآیند نورد در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار پرداخته‌اند. همچنین کنترل یکنواختی ضخامت را در این فرآیند مطالعه کرده‌اند [۵]. چنگ و همکاران [۶] قابلیت کشش ورق منیزیم AZ31

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mahmoodi@profs.semnan.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه سمنان

³ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

است [۱۳]. شبکه عصبی مصنوعی یک نوع از فناوری‌های پردازش اطلاعات است و به‌خوبی مسائلی را که در آن رابطه غیرخطی پیچیده‌ای میان متغیرهای ورودی و خروجی آن وجود دارد، حل می‌کند. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی جدید برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی خواص مواد و به‌عنوان یک جایگزین ارزان‌تر، آسان‌تر، کارآمدتر و بسیار قابل‌اطمینان برای تخمین خواص مکانیکی مواد با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی، شناخته می‌شود [۱۴].

مهم‌ترین مزیت شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با روش‌های مرسوم قدیمی سرعت بالا و حل روابط پیچیده است. هنگامی که شبکه عصبی مصنوعی به‌درستی آموزش دیده شود، قادر است با استفاده از پارامترهای ورودی داده‌شده به‌طور مناسبی پارامترهای خروجی موردنیاز را پیش‌بینی کند.

جانرودی و همکاران [۱۵] در مقاله خود به بررسی مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی فرآیند پرس‌کاری در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار با روش‌های آزمایشگاهی و اجزای محدود پرداخته است. همچنین در مقاله‌ای دیگر، اسماعیل‌زاده و همکاران نیز [۱۶] به آنالیز فرآیند پرس‌کاری در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و اجزای محدود پرداخته‌اند. چان و همکاران [۱۷] یک روش جامع را بر اساس شبیه‌سازی اجزای محدود و شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین پارامترهای طراحی توسعه داده‌اند. کین و همکاران [۱۸] از مدل شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور ارزیابی و پیش‌بینی رفتار تغییر شکل آلیاژ منیزیم ZK60 در حین تراکم داغ استفاده کرده‌اند. مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی رفتار تغییر شکل داغ آلیاژ آلومینیوم A356 توسط حق‌دادی و همکاران [۱۹] انجام شده است. شیخ و همکاران [۲۰] در مطالعات خود به تخمین رفتار جریان تنش آلیاژ AA5083 با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخته‌اند.

در این مقاله مدل قابل‌اعتمادی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی بر اساس پارامترهای فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار معرفی شده است. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، ارتباط میان پارامترهای حاکم بر فرآیند و خواص مکانیکی نمونه شامل استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفته است.

را که با فرآیند نورد در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار در دمای اتاق تولید شده است، مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها همچنین در تحقیقی که بر روی بهبود قابلیت کشش انجام دادند، مشخص کردند که دانه‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای ریز نشده است، همچنین تنش بالا و چکش‌خواری کم نمونه‌هایی که تحت فرآیند نورد در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار قرار گرفته‌اند، به‌علت حضور دوقلوبی‌ها است [۷]. در مقاله‌ای دیگر حسنی و همکاران [۸] تأثیر فرآیند نورد در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 را برای رسیدن به ساختار نانو مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین، حبیبی و همکاران [۹ و ۱۰] در مطالعه‌ای تأثیر فرآیند نورد در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار بر روی مس خالص، توانستند به ساختار نانو با استحکام و هدایت الکتریکی بالا دست پیدا کنند.

امروزه در صنعت، داشتن دانش کاملی از خواص مکانیکی مواد برای طراحی قطعات، ابزارآلات و تجهیزات برای دستیابی به الزامات صنعتی و باقی‌ماندن در فضای رقابتی شدید، بسیار ضروری است. خواص مکانیکی مواد مختلف به‌طور قابل ملاحظه‌ای متأثر از پارامترهای فرآیند تولید است. این موضوع نیاز به انجام آزمون‌های و آزمایش‌های مقتضی متعدد را برای دستیابی به اطلاعات خواص مکانیکی نمونه‌های حاصل از فرآیندهای مختلف، جهت طراحی مناسب ایجاد می‌کند. به این منظور متخصصان با تغییر در پارامترهای حاکم بر فرآیند ساخت تلاش می‌کنند تا به بازدهی و خواص مکانیکی مطلوب مواد دست یابند. از سوی دیگر، هزینه‌های بالا، زمان‌بر بودن آزمون‌های آزمایشگاهی و نیاز به تجهیزات پیچیده، از مهم‌ترین مشکلات چنین آزمایش‌هایی است. مشکلات موجود در روش‌های آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌های ریاضی تجربی و تقریبی بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های متعارف را توجیه می‌کند. امروزه مزایای استفاده از مدل‌های ریاضی به‌ویژه شبکه عصبی مصنوعی^۱ برای بررسی اثر پارامترهای فرآیندهای تولید مختلف بر خواص مکانیکی به‌طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه محققان و صنعتگران در شاخه‌های مختلف علوم قرار گرفته است [۱۱ و ۱۲].

در سال‌های اخیر، شبکه عصبی مصنوعی در زمینه‌های متعددی از جمله تخمین و پیش‌بینی توابع استفاده شده

^۱ Artificial Neural Network (ANN)

روی نمونه‌های آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده است. نوارهای نمونه به ابعاد ۴۰ در ۴۰۰ میلی‌متر هستند و قبل از انجام آزمایش، به مدت یک ساعت تحت عملیات حرارتی در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته‌اند [۲۱]. نتایج استحکام کششی و درصد ازدیاد طول برای هر آزمایش با استفاده از ۲ تا ۳ آزمون کشش به دست آمده و نتایج سختی با انجام ۳ تا ۴ بار تست در نواحی نزدیک به سطح محاسبه و مقدار میانگین در نظر گرفته شده است.

فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار در دو مسیر (مسیرهای A و C) و در سه زاویه کانال (زوایای کانال ۱۱۰، ۱۲۰ و ۱۳۰ درجه) در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) برای عبورهای مختلف انجام شده است. در مسیر A نوار بدون چرخش در راستای نورد تغذیه می‌شود، در صورتی که در مسیر C نوار ۱۸۰ درجه در راستای نورد چرخیده می‌شود و سپس دوباره تحت فرآیند نورد قرار می‌گیرد. ضخامت کانال ورودی و خروجی ۲ میلی‌متر است. در حالی که، فاصله بین غلتک‌ها به منظور تغذیه ورق به داخل کانال و کاهش نیروی اصطکاک بین ورق و کانال، مقدار ثابت ۱/۹۵ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، این کاهش ضخامت به ورق اجازه می‌دهد به مقدار ۰/۰۵ میلی‌متر بعد از منطقه شکل‌دهی ضخیم‌تر شود و این مسئله امکان نورد چندمرحله‌ای به صورت پیوسته را ایجاد می‌کند.

۳- طراحی و آموزش شبکه عصبی مصنوعی

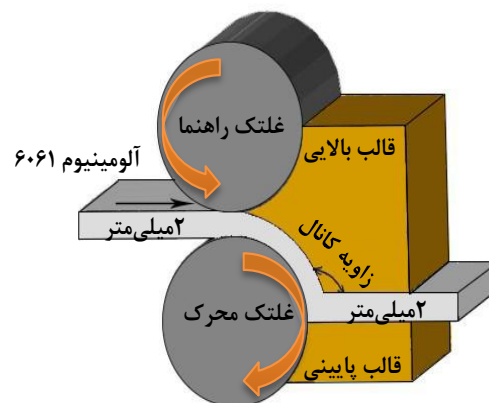
شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزارهای کلی برای مدل‌سازی توابع غیرخطی‌اند، به طوری که می‌توانند هر تابع غیرخطی را با هر سطح مطلوب از دقت تقریب بزنند.

انعطاف شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین توابع مختلف کاربردی، آن را به ابزار باارزشی در پردازش اطلاعات تبدیل کرده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت مدل‌سازی روابط پیچیده را دارد. ایده اصلی روش شبکه‌های عصبی مصنوعی شبیه به عملکرد مغز انسان است. شبکه‌های عصبی مصنوعی بر اساس ساختار و عملکرد سیستم عصبی بیولوژیکی است. یک نرون در هر لحظه تعداد زیادی سیگنال ورودی دریافت می‌کند، در حالی که فقط یک سیگنال خروجی ایجاد می‌کند. روند مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی به اختصار در شکل (۲) آورده شده است. شبکه عصبی توسط ویژگی‌های مهمی از قبیل معماری

همچنین، به کمک رگرسیون غیرخطی رابطه بین زاویه کانال و مسیر عبور برای هر یک از خواص مکانیکی نمونه تحت فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار آلومینیوم ۶۰۶۱ بیان شده است.

۲- فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار

فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار یکی از فرآیندهای شکل‌دهی پلاستیک شدید محسوب می‌شود که به کمک آن می‌توان ورق فلزی را تحت تغییر شکل برشی پیوسته قرار داد. شکل (۱) شماتیکی از تجهیزات فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار را نشان می‌دهد. فرآیند به کمک یک جفت غلتک و دو قالب بالا و پایین انجام می‌شود. در تجهیزات مورد استفاده، یک غلتک به عنوان محرک و دیگری به عنوان غلتک راهنما است. قالب‌های بالا و پایین دو کانال با ضخامت‌های نزدیک به هم تشکیل داده که ضخامت کانال خروجی نسبت به ضخامت کانال ورودی کمی بیشتر است. زاویه کانال (θ)، زاویه بین کانال ورودی و خارجی است. در این فرآیند نمونه بدون تغییر در سطح مقطع توسط تغذیه غلتک‌ها از میان کانال قالب عبور می‌کند و فرآیند تنها باعث ایجاد تغییر در ویژگی‌های نمونه می‌شود. این تغییرات ناشی از قرار گرفتن نمونه‌ها تحت تغییر شکل شدید برشی بزرگ با رفتار پیوسته هستند. تغییر شکل برشی عموماً در محل تقاطع دو کانال رخ می‌دهد. وقتی که نوار از ناحیه شکل‌دهی که محل تقاطع دو کانال ورودی و خروجی است عبور می‌کند، ضخامت اولیه خود را باز می‌یابد. این حقیقت که نوار فلزی، ضخامت اولیه خود را در خروجی قالب حفظ می‌کند، عملیات چندعبوری را در یک رفتار پیوسته امکان‌پذیر می‌سازد.



شکل ۱: شماتیکی از فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه

در این مطالعه، از نتایج حاصل از انجام تجربی فرآیند بر

مخفی^۶، تعداد نرون‌ها در ورودی و لایه‌های مخفی و خروجی است. تعداد کم نرون‌های لایه مخفی ممکن است باعث خطای آموزش زیاد و خطای عمومیت بالا ناشی از زیر برازش^۷ و بایاس آماری بالا شود. برعکس، تعداد زیاد نرون‌های لایه مخفی باعث کاهش خطای آموزشی می‌شود، در حالی که ممکن است خطای عمومیت ناشی از بیش برازش^۸ و واریانس بالا وجود داشته باشد. در بیشتر موارد، تعداد بهینه نرون‌های لایه مخفی را می‌توان از طریق سعی و خطا به دست آورد.

انتخاب پارامترهای ورودی مناسب نقش مهمی در روش شبکه عصبی مصنوعی دارد و می‌تواند کیفیت پیش‌بینی را تحت تأثیر قرار دهد. بر اساس بررسی‌های عددی و تجربی، زاویه کانال، مسیر عبور و تعداد عبور، متغیرهای ورودی و شاخص ناهمگنی، متغیرهای خروجی شبکه، یعنی خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی نمونه مورد آزمایش هستند. به منظور در نظر گرفتن حالات مختلف، زوایای کانال برای هر آزمایش به ترتیب ۱۱۰، ۱۲۰ و ۱۳۰ درجه و هرکدام برای تعداد ۱، ۳ و ۵ عبور هستند.

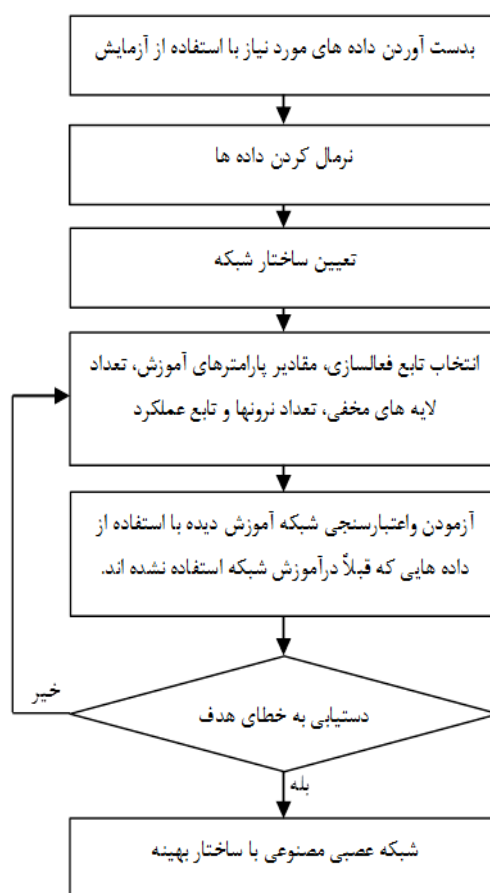
یک نرون^۹ المان پردازش پایه در مدل‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی است. در یک نرون، هر ورودی در وزن ایی ضرب شده، نتایج حاصل با یکدیگر و بایاس^{۱۰} جمع می‌شوند. تابع فعال‌سازی برای نرون‌های هر لایه مشخص و در محاسبه مجموع وزن‌های ورودی و بایاس برای تولید نرون خروجی استفاده می‌شود (رابطه (۱)).

$$O = \xi(WI + b) \quad (1)$$

که در آن O ، I ، b ، W و ξ به ترتیب مقدار خروجی، مقدار ورودی، بایاس، تابع وزن و تابع فعال‌سازی را نشان می‌دهند.

در این مطالعه از تابع تانژانت سیگموئید^{۱۱} به عنوان تابع فعال‌سازی نرون‌های لایه مخفی و تابع خطی^{۱۲} به عنوان تابع فعال‌سازی نرون‌های لایه خروجی استفاده می‌شود. همچنین، داده‌ها در بازه $[-1, 1]$ قبل از آموزش شبکه نرمال شده‌اند. نرمال کردن داده‌ها این اطمینان را حاصل می‌کند

شبکه، تابع فعال‌سازی^۱ و الگوریتم آموزشی، مشخص می‌شود. سطح پیچیدگی شبکه وابسته به تعداد لایه‌های مخفی^۲، تعداد نرون‌ها در ورودی و لایه‌های مخفی و خروجی است. تعداد کم نرون‌های لایه مخفی ممکن است باعث خطای آموزش زیاد و خطای عمومیت بالا ناشی از زیر برازش^۳ و بایاس آماری بالا شود. برعکس، تعداد زیاد نرون‌های لایه مخفی باعث کاهش خطای آموزشی می‌شود، در حالی که ممکن است خطای عمومیت ناشی از بیش برازش^۴ و واریانس بالا وجود داشته باشد. در بیشتر موارد، تعداد بهینه نرون‌های لایه مخفی را می‌توان از طریق سعی و خطا به دست آورد.



شکل ۲: روند آموزش شبکه عصبی

شبکه عصبی توسط ویژگی‌های مهمی از قبیل معماری شبکه، تابع فعال‌سازی^۵ و الگوریتم آموزشی، مشخص می‌شود. سطح پیچیدگی شبکه وابسته به تعداد لایه‌های

⁷ Under Fitting

⁸ Over Fitting

⁹ neuron

^۱ Bias

^۱ Tangent sigmoid^۱(TANSIG)

^۱ pure linear (PURÉLIN)

¹ Activation Function

² Hidden Layer

³ Under Fitting

⁴ Over Fitting

⁵ Activation Function

⁶ Hidden Layer

می‌آید.

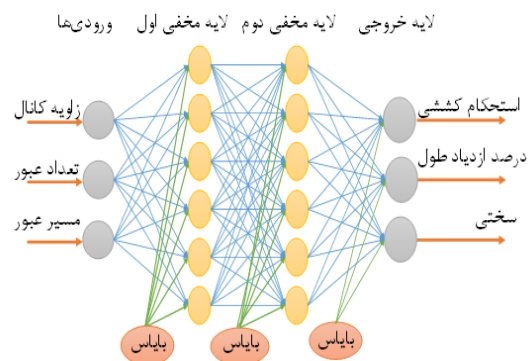
جدول ۱: نتایج آزمایش به‌عنوان داده‌های ورودی شبکه

شماره	مقادیر ورودی			مقادیر خروجی		
	زاویه کانال	تعداد عبور	مسیر فرآیند	استحکام (MPa)	درصد تغییر طول	سختی ویکرز
۱	۱۱۰	۱	۱	۱۷۶	۷/۷	۶۸
۲	۱۲۰	۱	۱	۱۷۵	۸/۲	۶۶
۳	۱۳۰	۱	۱	۱۷۰	۹/۱	۶۲
۴	۱۱۰	۱	۲	۱۷۶	۷/۷	۶۸
۵	۱۲۰	۱	۲	۱۷۵	۸/۸	۶۶
۶	۱۳۰	۱	۲	۱۷۰	۹/۱	۶۲
۷	۱۱۰	۳	۱	۱۸۷	۵/۸	۷۴
۸	۱۲۰	۳	۱	۱۸۴	۶/۵	۷۲
۹	۱۳۰	۳	۱	۱۷۲	۷/۱	۶۵
۱۰	۱۱۰	۳	۲	۱۸۸	۵/۱	۷۳
۱۱	۱۲۰	۳	۲	۱۸۶	۵/۷	۷۱
۱۲	۱۳۰	۳	۲	۱۷۳	۶/۷	۶۴
۱۳	۱۱۰	۵	۱	۲۰۱	۴/۵	۸۰
۱۴	۱۲۰	۵	۱	۱۹۷	۵/۲	۷۸
۱۵	۱۳۰	۵	۱	۱۸۴	۵/۸	۶۹
۱۶	۱۱۰	۵	۲	۲۰۲	۳/۹	۷۹
۱۷	۱۲۰	۵	۲	۱۹۹	۴/۱	۷۷
۱۸	۱۳۰	۵	۲	۱۸۶	۵/۵	۶۸
۱۹	۱۱۰	۰	۱	۱۶۶	۲۳	۵۸
۲۰	۱۲۰	۰	۱	۱۶۶	۲۳	۵۸
۲۱	۱۳۰	۰	۱	۱۶۶	۲۳	۵۸
۲۲	۱۱۰	۰	۲	۱۶۶	۲۳	۵۸
۲۳	۱۲۰	۰	۲	۱۶۶	۲۳	۵۸
۲۴	۱۳۰	۰	۲	۱۶۶	۲۳	۵۸

یکی از متداول‌ترین توابع عملکردی مورد استفاده در شبکه‌های عصبی پیش‌خور میانگین مربعات خطا و ضریب برازش^۴ است [۲۳]. در این مطالعه نیز از میانگین مربعات خطا و ضریب برازش برای بررسی عملکرد شبکه عصبی استفاده می‌شود. مقدار میانگین مربعات خطا و ضریب برازش به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) به دست

که شبکه عصبی مصنوعی به‌طور مؤثری بدون هیچ انحرافی آموزش داده می‌شود. هدف فرآیند آموزش دستیابی خطای نزدیک به صفر از طریق تطبیق مناسب پارامترهای آموزشی با به‌روزرسانی وزن‌ها است. در این تحقیق از الگوریتم پس انتشار لونبرگ-مارکواردت^۱ برای مدل‌سازی خواص مکانیکی نمونه مورد مطالعه، استفاده شده است. برای تخمین خواص مکانیکی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ تحت فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار، شبکه با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی، آموزش داده می‌شود، به‌صورتی که ۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش و بقیه داده‌ها برای آزمون و اعتبارسنجی شبکه استفاده می‌شود. داده‌های آزمایش تجربی به‌عنوان ورودی مدل در جدول ۱ نشان داده شده است.

در این مطالعه خواص مکانیکی آلومینیوم ۶۰۶۱ تحت فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار، با استفاده از شبکه چندلایه پرسپترون پیش‌خور^۲ که در شکل (۳) نشان داده شده، پیش‌بینی می‌شوند. این شبکه دارای توانایی بسیار خوبی در تخمین روابط غیرخطی است و یکی از رایج‌ترین مدل‌های شبکه عصبی مورد استفاده در کاربردهای مهندسی است [۲۲].



شکل ۳: شبکه چندلایه پرسپترون پیش‌خور با دو لایه مخفی و پنج نرون در هر کدام

یکی از متداول‌ترین توابع عملکردی مورد استفاده در شبکه‌های عصبی پیش‌خور میانگین مربعات خطا و ضریب برازش^۴ است [۲۳]. در این مطالعه نیز از میانگین مربعات خطا و ضریب برازش برای بررسی عملکرد شبکه عصبی استفاده می‌شود. مقدار میانگین مربعات خطا و ضریب برازش به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) به دست

^۴ Correlation coefficient

^۵ Mean Square Error (MSE)

^۶ Correlation coefficient

^۱ Levenberg- Marquardt back-propagation algorithm

^۲ Multi-layer perceptions (MLP)-feedforward network

^۳ Mean Square Error (MSE)

می‌آید.

برای به‌دست‌آوردن بهترین مدل برازش، دقت (تطابق) روابط نهایی به‌عنوان معیار در نظر گرفته می‌شود. به این منظور میانگین مربعات خطا (رابطه (۲)) و ضریب برازش (رابطه (۳)) محاسبه شده، مورد مقایسه قرار گرفتند. سرانجام، روابط (۵)، (۶) و (۷) به‌عنوان معادلات برازش شده با خطای کمتر برای استحکام کششی TS، درصد ازدیاد طول El و سختی H انتخاب شد.

$$TS = 165.7 + 0.2179N + \frac{0.488}{N - 4.833} + \frac{3.496N^2 - 1.437 - 16.6N}{0.0398N + 0.05835N^2 + 0.588Ne^{(0.2369\phi - 28.43)} - 1.564 - 0.2842e^{(0.2369\phi - 28.43)}} \quad (5)$$

$$El = 15.61 + 0.06462\phi + 14.22N^2 + 0.3904N^4 - 2.281 \times 10^{-10} e^{(2.297N)} - 26.02N - 0.01615N^5 - 3.496N^3 \quad (6)$$

$$H = 100.1 + 2.906N + \frac{0.2858}{13.43 + 0.4833N - 0.1225\phi} + 0.2632 e^{(52.17N + 4.203\phi + 0.003623N\phi^2 - 252.2 - 0.86956N\phi - 0.01751\phi)} - 0.3173\phi \quad (7)$$

که ϕ مشخص‌کننده زاویه کانال برحسب درجه و N تعداد عبور است. مقایسه معادله برازش با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد میانگین مربعات خطا برای رابطه برازش استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی به‌ترتیب ۰/۱۸۶۶۴، ۰/۰۵۶۲ و ۱/۶۸۸۳ و ضریب برازش آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹۷۹، ۰/۹۹۹۴ و ۰/۹۹۵۶ است. نتایج حاصل نشان می‌دهد روابط برازش به‌طور مطلوبی قادر به تخمین هر یک از خواص مکانیکی در نظر گرفته‌شده در این تحقیق را داراست.

شکل (۴) نتایج برازش را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به‌کمک نمودار رگرسیون برای خواص مکانیکی استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی نشان می‌دهد.

۴-۲- شبکه عصبی مصنوعی

در این مطالعه از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به منظور پیش‌بینی خواص مکانیکی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار استفاده شده است. به این منظور زوایای کانال و تعداد عبور و مسیرهای A و C (مسیر A عدد ۱ و مسیر C عدد ۲ در نظر گرفته شد) به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند. پس از طراحی و آموزش شبکه عصبی، با تغییر در تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها از طریق سعی و خطا شبکه

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - m_i)^2 \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 (P_i - \bar{P})^2}} \quad (3)$$

که در آن m_i مقادیر داده‌های آزمایشگاهی، P_i مقادیر پیش‌بینی‌شده، \bar{m} و \bar{P} به‌ترتیب مقادیر میانگین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی هستند. یکی از روش‌های بهبود عمومیت شبکه عصبی مصنوعی استفاده از تابع عملکرد اصلاح‌شده است. به‌کارگیری این تابع عملکرد باعث می‌شود تا شبکه مقادیر بایاس و وزن‌های کمتری داشته باشد و در نتیجه آن شبکه رفتار نرم‌تر با احتمال بیش‌تر برازش کمتر از خود نشان می‌دهد. به این منظور تابع عملکرد معمول (میانگین مربعات خطا) با افزودن یک عبارت ریاضی به نام میانگین مربعات وزن‌های شبکه، اصلاح می‌شود. تابع عملکرد اصلاح‌شده به‌صورت رابطه (۴) است.

$$MSE_{reg} = \rho MSE + (1 - \rho)MSW \quad (4)$$

که در این رابطه، MSE_{reg} تابع عملکرد اصلاح‌شده و ρ ضریب عملکرد است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- رگرسیون غیر خطی

در این مقاله علاوه بر شبکه عصبی مصنوعی، با استفاده از معادله رگرسیون غیرخطی مدل خواص مکانیکی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ تحت فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار، توسعه داده شده است. در این مطالعه، داده‌های آزمایشگاهی به‌عنوان الگوی برازش به کار گرفته شده است. از آنجا که تأثیر مسیر عبور فرآیند بر خواص مکانیکی نمونه حاصل نسبت به سایر پارامترهای ورودی فرآیند کمتر از سایر پارامترهای مؤثر بر فرآیند است، معادلات حاصل برای تخمین استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی، به‌صورت تابعی از زاویه کانال و تعداد عبور برای مسیر A استخراج شدند.

¹ Mean square network weights (MSW)

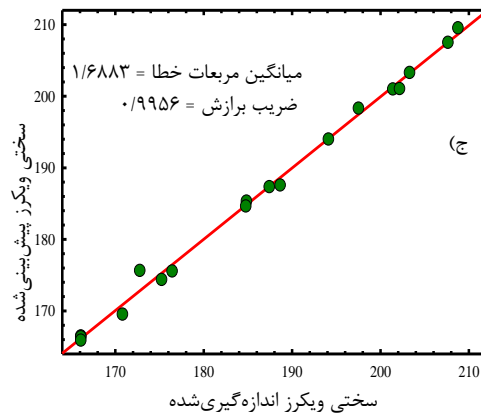
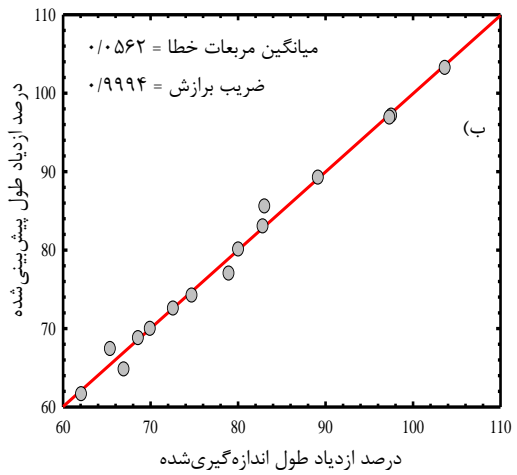
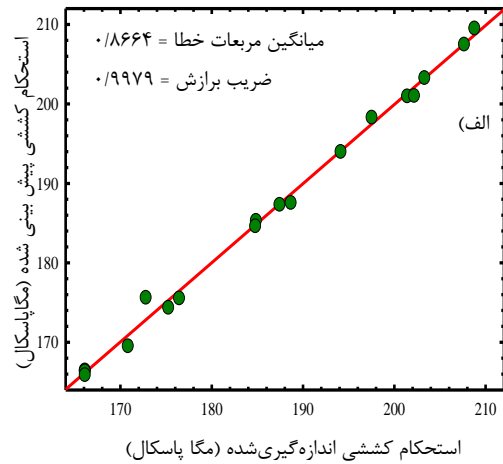
هم‌سان زاویه‌دار را نشان می‌دهد، به‌صورتی که برای شبکه‌های عصبی با ساختارهای متفاوت (تعداد مختلف لایه‌های مخفی و نرون) مقدار میانگین مربعات خطا و ضریب برازش مورد محاسبه و مقایسه قرار می‌گیرد و در نهایت شبکه‌ای با کمترین مقدار میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب برازش به‌عنوان شبکه عصبی مصنوعی با بهترین عملکرد انتخاب می‌شود.

جدول ۲: روند سعی و خطا برای پیدا کردن تعداد بهینه لایه‌های مخفی و نرونها

تعداد لایه‌های مخفی	تعداد نرون‌های در هر لایه مخفی	میانگین مربعات خطا	ضریب برازش
۱	۲	۴/۶۱۲۷	۰/۹۸۶۳۹
۱	۳	۴/۳۶۷۸	۰/۹۸۷۱۵
۱	۴	۰/۷۶۰۳	۰/۹۹۷۲۳
۱	۵	۰/۴۲۷۵	۰/۹۹۸۴۹
۱	۶	۰/۱۵۳۷	۰/۹۹۹۳۴
۱	۷	۰/۵۸۷۳	۰/۹۹۷۸۴
۱	۸	۰/۵۳۹۸	۰/۹۹۷۴۶
۱	۹	۰/۴۶۵۳	۰/۹۹۸۲۸
۱	۱۰	۰/۵۱۱۳	۰/۹۹۷۸۸
۲	۲	۲/۰۳۷۹	۰/۹۹۳۶۲
۲	۳	۲/۶۱۷۶	۰/۹۹۱۱۸
۲	۴	۰/۴۷۹۷	۰/۹۹۸۳۹
۲	۵	۰/۰۱۷۲	۰/۹۹۹۸۶
۲	۶	۰/۱۲۲۵	۰/۹۹۹۵۱
۲	۷	۰/۳۳۷۳	۰/۹۹۸۶۹
۲	۸	۰/۸۳۵۵	۰/۹۹۷۷۵
۲	۹	۰/۴۱۲۲	۰/۹۹۸۱۹
۲	۱۰	۱/۶۵۹۲	۰/۹۹۰۴۵

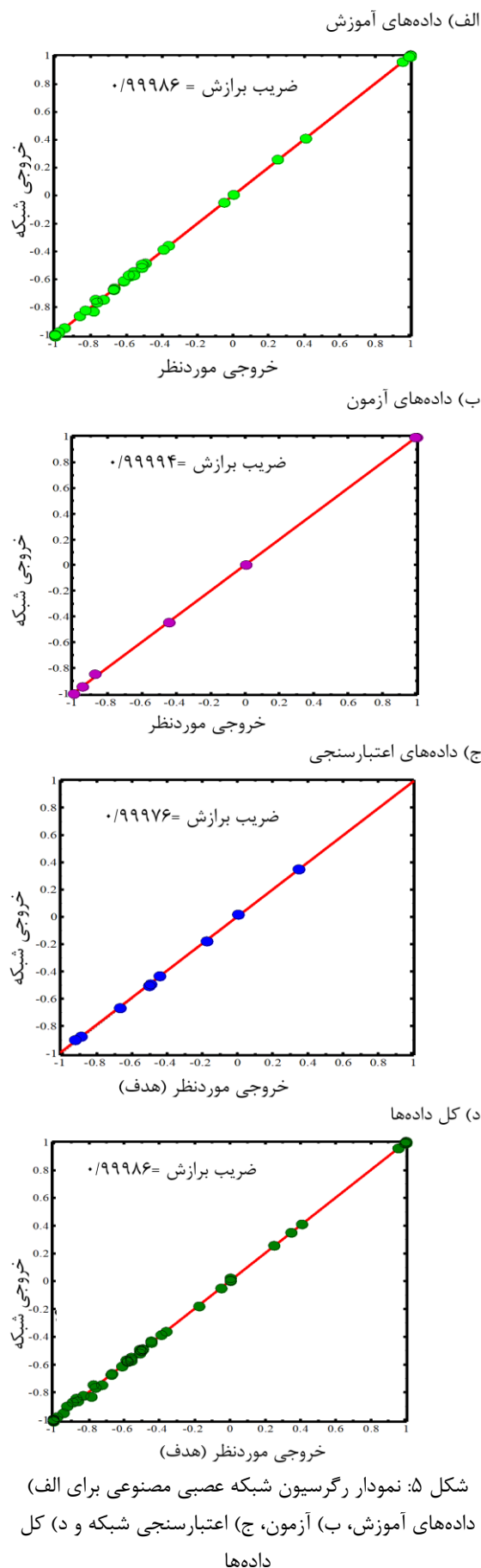
با بررسی عملکرد شبکه‌های مختلف مشخص می‌شود که شبکه چندلایه پرسپترون با ۲ لایه مخفی و تعداد ۵ نرون در هر یک از لایه‌های مخفی به‌عنوان شبکه با بهترین عملکرد برگزیده می‌شود (شکل (۳)). همان‌طور که در

با بهترین عملکرد انتخاب می‌شود.



شکل ۴: مقایسه نتایج برازش شده و نتایج تجربی به‌کمک نمودار رگرسیون برای خواص مکانیکی (الف) استحکام کششی، (ب) درصد ازدیاد طول و (ج) سختی

جدول ۲ روند سعی و خطا برای یافتن ساختار بهینه شبکه عصبی برای پیش‌بینی استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند نورد در کانال



جدول ۲ مشخص است، مقدار میانگین مربعات خطا برای شبکه منتخب در مقایسه با ساختارهای دیگر شبکه دارای کمترین مقدار یعنی 0.172 است. همچنین ضریب برازش بسیار نزدیک به ۱ است، که گواهی بر عملکرد خوب شبکه عصبی منتخب است.

در شکل (۵) نمودار رگرسیون برای داده‌های آموزش، آزمون، اعتبارسنجی و کلیه داده‌ها نشان داده شده است. در این نمودارها به‌خوبی انطباق داده‌های آزمایشگاهی (هدف) و خروجی‌های شبکه عصبی مصنوعی قابل مشاهده است. نمودار رگرسیون و مقادیر ضریب برازش برای داده‌ها، نبودن خطاهای بیش برازش و زیر برازش و همچنین آموزش مناسب شبکه را نشان می‌دهد.

خطای کم پیش‌بینی شبکه عصبی منتخب برای کلیه داده‌ها، گواهی بر قابل اعتماد بودن شبکه در تخمین خواص مکانیکی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ تحت فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه دار است. مقایسه داده‌های تجربی با خروجی مدل شبکه عصبی و رگرسیون غیرخطی نشان می‌دهد که هر دو مدل با دقت خوبی قابلیت پیش‌بینی خواص مکانیکی را دارند، اگرچه شبکه عصبی با توجه به مقادیر پارامترهای عملکرد استفاده شده در این مقاله عملکرد بهتری دارد.

پس از مشخص شدن عملکرد مناسب مدل شبکه عصبی، از شبکه برای توسعه و تخمین و تحلیل خروجی‌های شبکه عصبی، یعنی خواص مکانیکی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه دار کمک گرفته شده است. نتایج توسعه شبکه عصبی به‌منظور پیش‌بینی استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی به‌طور جداگانه در زوایای کانال مختلف از 110° تا 130° درجه و برای نمونه آنیل شده، ۱ عبور، ۳ عبور و ۵ عبور در شکل ۶ نشان داده شده است.

طبق شکل (۶) - الف، نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد که مقادیر استحکام کششی در مسیر C افزایش بیشتری نسبت به مسیر A داشته است. بنا بر تحقیقات انجام شده کسر حجمی و سرعت تشکیل دانه‌ها و ریزدانه‌های هم‌محور در مسیر C بیشتر است و دانه‌ها اندازه ریزتری نسبت به دانه‌های حاصل از مسیر A دارند [۲۴]. همچنین با افزایش زاویه کانال از 110° به 130° درجه، استحکام ماده کاهش می‌یابد. کرنش سختی به خاطر تکثیر نابجایی‌ها و حرکت و قفل آن‌ها رخ داده، باعث افزایش استحکام می‌شود.

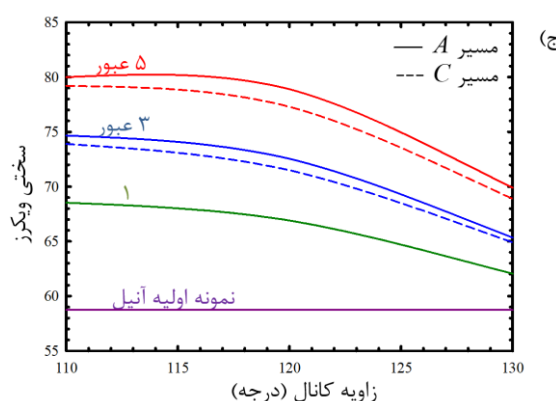
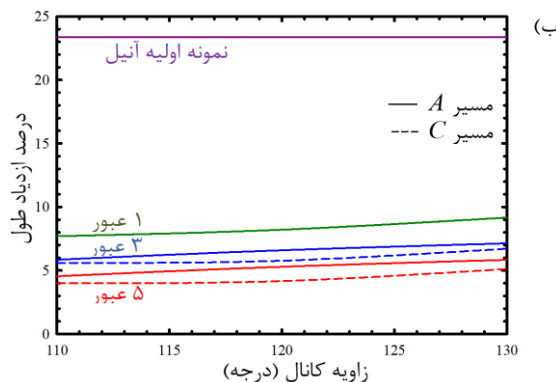
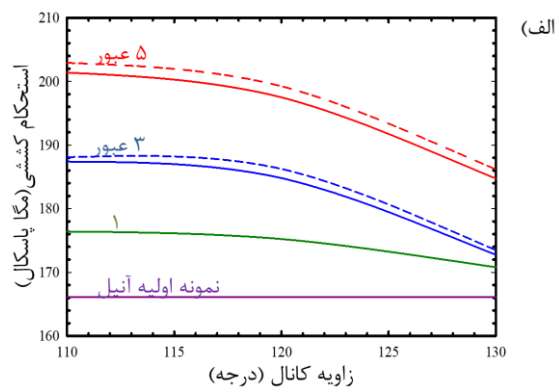
چگالی نابعایی‌ها اشباع شده، روند ریزدانی کند می‌شود. بعد از عبور اول، استحکام کششی و سختی با نرخ بسیار کمتری افزایش و درصد ازدیاد طول نیز به میزان بسیار کمی کاهش می‌یابد. دلیل آن نیز افزایش شدید کار سختی در عبورهای بعدی است. همچنین ریزدانه‌های تولید شده با مرزهای بزرگ زاویه مانع حرکت نابعایی‌ها می‌شود. با افزایش عبور، مکانیسم‌های دیگر تغییر شکل مثل لغزش مرزدانه‌ای و چرخش دانه‌ها آغاز می‌شود [۲۵]. البته کاهش در ازدیاد طول با افزایش تعداد عبور ادامه پیدا نخواهد کرد. چون با افزایش کرنش پلاستیک تجمعی، فرآیند تکثیر و از بین رفتن نابعایی‌ها به تعادل دینامیکی می‌رسد و اندازه دانه نیز به حداقل رسیده، کوچک‌تر نخواهد شد [۲۶].

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پرسپترون در زوایای کانال و مسیرها و تعداد عبورهای مختلف به منظور پیش‌بینی استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار، استفاده شده است.

همچنین با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی بین استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی و پارامترهای فرآیند روابطی به صورت جداگانه ارائه شد. عملکرد دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی نشان می‌دهد هر دو مدل با دقت مطلوبی قابلیت تخمین خواص مکانیکی را دارند، اگرچه مدل شبکه عصبی مصنوعی با دقت بیشتری پارامترهای خروجی را تخمین می‌زند. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از مدل‌های ریاضی به‌ویژه مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌توان بدون نیاز به آزمون‌ها و آزمایش‌های پرهزینه و وقت‌گیر، خواص مکانیکی نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند نورد در کانال هم‌سان زاویه‌دار را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد.

بررسی نتایج حاصل از توسعه خواص مکانیکی با استفاده از شبکه عصبی منتخب نشان می‌دهد استحکام کششی افزایش بیشتری در مسیر C نسبت به مسیر A داشته است و با کاهش زاویه کانال، استحکام ماده افزایش یافته، در صورتی که میزان تغییر طول در نمونه کاهش می‌یابد. همچنین تعداد عبورهای بیشتر باعث افزایش استحکام



شکل ۶: داده‌های توسعه داده شده به کمک شبکه عصبی مصنوعی (الف) استحکام کششی، (ب) درصد ازدیاد طول، (ج) سختی

همان‌طور که در شکل (۶) - ب ملاحظه می‌شود، میزان درصد ازدیاد طول با کاهش زاویه کانال در نمونه کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش ناگهانی درصد افزایش طول در عبور اول رخ می‌دهد. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که کاهش درصد ازدیاد طول با کاهش زاویه کانال با شیب ملایمی اتفاق می‌افتد. همچنین بیانگر این است که تأثیر تعداد عبور بیشتر از تأثیر زاویه کانال است. از شکل (۶) - ج استنباط می‌شود زاویه کانال با مقدار سختی رابطه عکس دارد. نتایج نشان می‌دهد افزایش شدید در سختی نمونه ۶۰۶۱ در عبور اول رخ می‌دهد. اما در عبورهای بیشتر،

کشش و سختی و کاهش درصد ازدیاد طول می‌شود که این تغییرات به‌ویژه در عبور اول بیشترین مقدار خود را دارد.

۶- مراجع

- [1] Sedighi, M., Mahmoodi, M., "Residual Stresses Evaluation in Equal Channel Angular Rolled Al 5083 by IHD Technique: Investigation of Two Calculation Methods", *Material and Manufacturing Process*, Vol. 28, No.1, 2013, pp. 85–90.
- [2] Nam, C.Y., Han, J.H., Chung, Y.H., Shin, M.C., "Effect of precipitates on microstructural evolution of 7050 Al alloy sheet during equal channel angular rolling", *Material Science and Engineering A*, Vol. 347, 2003, pp. 253–257.
- [3] Chen, Z., Cheng, Y., Xia, W., (2007). "Effect of Equal-Channel Angular Rolling Pass on Microstructure and Properties of Magnesium Alloy Sheets". *Material and Manufacturing Process*, Vol. 22, No. 1, pp. 51–56.
- [4] Chung, Y.H., Park, J., Lee, K.H., "An Analysis of Accumulated Deformation in the Equal Channel Angular Rolling (ECAR) Process", *Metals and Materials International*, Vol. 12, No. 4, 2006, pp. 289–292.
- [5] Chung, Y.H., Park, J.W., Lee, K.H., "Controlling the Thickness Uniformity in Equal Channel Angular Rolling (ECAR)", *Materials Science Forum*, vol. 539–543, 2007, pp. 2872–2877.
- [6] Cheng, Y.Q., Chen, Z.H., Xia, W.J., "Drawability of AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling at room temperature", *Materials Characterization*, Vol. 58, No. 7, 2007, pp. 617–622.
- [7] Cheng, Y.Q., Chen, Z.H., Xia, W.J., Zhou, T., "Improvement of Drawability at Room Temperature in AZ31 Magnesium Alloy Sheets Processed by Equal Channel Angular Rolling", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 17, No. 1, 2008, pp. 15–19.
- [8] Hassani, F. Z., Ketabchi, M., "Nano grained AZ31 alloy achieved by equal channel angular rolling process", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 21, 2011, pp. 6426–6431.
- [9] Habibi, A., Ketabchi, M., Eskandarzadeh, M., "Nano-grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by equal channel angular rolling process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 6, 2011, pp. 1085–1090.
- [10] Habibi, A., Ketabchi, M., "Enhanced properties of nano-grained pure copper by equal channel angular rolling and post-annealing", *Materials and Design*, Vol. 34, 2012, pp. 483–487.
- [11] Zhangtt, H., Huangt, S. H., "Applications of neural networks in manufacturing : a state-of-the-art survey", *International Journal of Production Research*, vol. 33, No. 3, 1995, pp. 705–728.
- [12] Shi, X., Zeng, W., Sun, Y., Han, Y., Zhao, Y., Guo, P., "Microstructure-Tensile Properties Correlation for the Ti-6Al-4V Titanium Alloy", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, No. April 2015, pp. 1754–1762.
- [۱۳] س.م. کیا، شبکه‌های عصبی مصنوعی در MATLAB، انتشارات دانشگاهی کیان، ویرایش دوم، ۱۳۹۳.
- [14] Sadati, S.H., kaklar, J.A., Gajar, R., Application of Artificial Neural Networks in the Estimation of Mechanical Properties of Materials, *Artificial Neural Networks-Industrial and control Engineering Applications*, Prof. K. Suzuki (Ed.), ISBN: 978-953-307-220-3, InTech, 2011.
- [15] Djavanroodi, F., Omranpour, B., Sedighi, M., "Artificial Neural Network Modeling of ECAP Process", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 3, 2013, pp. 276–281.
- [16] Esmailzadeh, M., Aghaie Khafri, M., "Finite element and artificial neural network analysis of ECAP", *Computational Materials Science*, Vol. 63, 2012, pp. 127–133.
- [17] Chan, W.L., Fu, M.W., Lu, J., "An integrated FEM and ANN methodology for metal-formed product design, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, No. 8, 2008, pp. 1170–1181.
- [18] Qin, Y.J., Pan, Q.L., He, Y.B., Li, W.B., Liu, X.Y., Fan, X., "Artificial Neural Network Modeling to Evaluate and Predict the Deformation Behavior of ZK60 Magnesium Alloy During Hot Compression", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 7, 2010, pp. 539–545.
- [19] Haghdadadi, N., Khalesian, A.R., Abedi, H.R., "Materials and Design Artificial neural network modeling to predict the hot deformation behavior of an A356 aluminum alloy", *Materials and Design*, Vol. 49, 2013, pp. 386–391.
- [20] Sheikh, H., Serajzadeh, S., "Estimation of flow stress behavior of AA5083 using artificial neural networks with regard to dynamic strain ageing effect", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, No. 1–3, 2008, pp. 115–119.
- [۲۱] م. محمودی، «تأثیر پارامترهای فرآیند نورد در کانال‌های هم‌سان زاویه‌دار بر تنش‌های پسماند و خواص مکانیکی ساختاری آلیاژهای

آلومینیوم، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۳.

[۲۲] ی. دادگر اصل، م. تاجداری، ح. مسلمی نائینی و همکاران، (۱۳۹۴). «پیش‌بینی مقدار گشتاور مورد نیاز در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی شکل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی»، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۹۹، شماره ۹، ۱۳۹۴، ص ۱-۶.

[۲۳] ع. شکوه‌فر، س. قربان‌پور، س. نصیری خلیل‌آباد و همکاران، (۱۳۹۲). «پیش‌بینی سختی در نانو کامپوزیت‌های $Al-Al_2O_3$ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با تغییر عوامل مؤثر در روش آلیاژسازی مکانیکی»، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۱۳، ۱۳۹۲، ص ۲۶-۳۲.

[24] Dobatkin, S.V., Szpunar, J.A., Zhilyaev, A.P., Cho, J.Y., Kuznetsov, A.A., "Effect of the route and strain of equal-channel angular pressing on structure and properties of oxygen-free copper, Mater", Materials Science and Engineering: A, Vol. 462, No. 1-2, 2007, pp. 132-138.

[25] Meyers, M.A., Mishra, A., Benson, D.J., "Mechanical properties of nanocrystalline materials", Progress in Materials Science, Vol. 51, 2006, pp. 427-556.

[26] Lee, J., Suh, J., Ahn, J., "Work-Softening Behavior of the Ultrafine-Grained Al Alloy Processed by High-Strain-Rate, Dissimilar-Channel Angular Pressing", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 34, 2003, pp.625-632.