

«یادداشت تحقیقاتی»

کاربرد شبکه‌های عصبی جهت بررسی اثر ترکیب شیمیایی بر سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید API X65

سید حجت هاشمی^{۱*}، مسعود رخس خورشید^۲

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* shhashemi@birjand.ac.ir، ۹۷۱۷۵/۶۱۵ صندوق پستی

چکیده- در این پژوهش، از شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس‌انتشار خطا برای پیش‌بینی اثر ترکیب شیمیایی بر سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید API X65 استفاده شده است. فولاد مورد مطالعه به طور گسترده در خطوط انتقال گاز ایران به شکل لوله‌های قطور فولادی استفاده می‌شود. داده‌های تجربی با جداکردن نمونه از ۱۰۰ لوله ساخته‌شده در مقیاس صنعتی (با قطر خارجی ۱۲۱۹ mm، ضخامت دیواره mm ۱۴/۳ با ذوب و فرایند ساخت یکسان) و انجام آنالیز شیمیایی، تست سختی ویکرز و آزمون ضربه شاریپی روی این نمونه‌ها، مطابق الزامات تعیین شده در استاندارد API 5L، فراهم شد. درصد وزنی عناصر C، Si، Mn، P، S، Ni، Cr، Mo، Al، Cu، V، Ti، Nb و Ca در ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه به عنوان متغیرهای ورودی و عدد سختی ویکرز و انرژی ضربه شاریپی به عنوان متغیرهای خروجی در نظر گرفته شدند. از نمودار پراکندگی و معیارهای آماری ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطای نسبی (*MSRE*) برای ارزیابی شبکه استفاده شد. سپس با توجه به عملکرد دقیق شبکه عصبی توسعه داده‌شده از آن برای پیش‌بینی اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه شاریپی نمونه فولادی به صورت کمی استفاده شد. **کلیدواژگان:** شبکه عصبی، ترکیب شیمیایی، سختی ویکرز، انرژی ضربه شاریپی، فولاد میکروآلیاژی API X65.

«Research Note»

ANN model for investigation the effect of chemical composition on hardness and impact energy in API X65 microalloyed steel

S. H. Hashemi^{1*}, M. Rakhshkhorshid²

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

2- PhD Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

* P. O. B. 97175/615 Birjand, shhashemi@birjand.ac.ir.

Abstract-In this paper a neural network with a feed forward topology and a back propagation algorithm was used to investigate the effect of chemical composition on hardness and impact energy in API X65 microalloyed steel. Experimental data was obtained by cutting 100 specimens from pipes manufactured in industrial scale (with 1219 mm diameter, 14.3 mm wall thickness, with similar heats and manufacturing processes). The chemical analysis, Vickers hardness and Charpy impact tests were conducted then according to requirements specified by API 5L standard. The weight percent of C, Si, Mn, P, S, Ni, Cr, Mo, Al, Cu, V, Ti, Nb and Ca were considered as input parameters of the network; while Vickers hardness and Charpy impact energy were considered as output. Scatter diagrams and two statistical criteria: correlation coefficient and mean squared relative error were used to evaluate the prediction performance of developed ANN model. With regard to the exact performance of the developed neural network, it was used then to investigate the effect of chrome and vanadium on Vickers hardness and Charpy impact energy of tested steel. **Keywords:** Neural Network, Chemical Composition, Vickers Hardness, Charpy Impact Energy, API X65 Microalloyed Steel.

۱- مقدمه

فولاد میکروآلیاژی API X65 فولادی کربن- منگیزی است که با افزودن مقادیر کم عناصر میکروآلیاژی نیوبیوم، وانادیوم، تیتانیوم و آلومینیم بر استحکام آن افزوده شده است [۱،۲]. این فولاد به طور گسترده در خطوط پرفشار انتقال گاز ایران به شکل لوله های قطور فولادی استفاده می شود. مشخصات این فولاد با حداقل تنش تسلیم ۶۵ ksi توسط موسسه نفت آمریکا (API) استاندارد شده است [۳]. ترکیب مناسب استحکام، چقرمگی و قابلیت جوش پذیری از ویژگی های اصلی این فولاد است [۳،۴]. این فولاد با دو ریزساختار فریت-پرلیتی یا فریت سوزنی-باینیتی تولید می شود که ساختار دوم، به دلیل ترکیب بهتر استحکام و چقرمگی در خطوط انتقال انرژی، ارجحیت دارد [۵-۷].

به طور کلی در فولادهای API دستیابی به ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب با ترکیب مناسب عناصر میکروآلیاژی و عملیات ترمومکانیکی میسر است. ترکیب شیمیایی در طراحی زمان بندی نورد فولاد نقش مؤثری دارد. در واقع تعامل بین ترکیب شیمیایی فولاد و عملیات ترمومکانیکی مشخص کننده خواص مکانیکی نهایی فولادهای API است [۸-۱۰]. نورد کنترل شده در دو مرحله نورد خشن و نورد پرداخت انجام می شود. نورد خشن (اولیه)، در دمایی بالاتر از دمای عدم تبلور مجدد، انجام می گیرد که هدف از این مرحله دستیابی به ساختار ریزدانه ای از آستنیت تبلور مجدد یافته چندضلعی است. نورد پرداخت (نورد نهایی) در دمایی زیر دمای عدم تبلور مجدد (T_{NR}) و بالای Ar₃ (دمای شروع تبدیل فاز آستنیت به فریت) انجام می گیرد تا ریزساختار آستنیت پهنکی به دست آید. در این ریزساختار، با افزایش نسبت مرز به حجم دانه و تشکیل باندهای تغییر شکل، مکان های جوانه زنی فریت افزایش یافته و امکان ریزدانه شدن فولاد فراهم می شود. با سرد کردن سریع از بالای خط Ar₃ تا دمای کلاف پیچی بر مقدار ریزدانه شدن افزوده می شود [۱۱،۱۲].

مناسب بودن فرایند و ترکیب صحیح عناصر در نظر گرفته شده را می توان با آنالیز شیمیایی (قابلیت جوش پذیری)، انجام تست کشش (استحکام و داکتالیته)، انجام آزمون ضربه شاریپی و تست وزنه سقوطی (چقرمگی) و انجام آزمون های سختی سنجی

(پرهیز از وجود نقاط سخت^۲) مطابق استاندارد API 5L ارزیابی کرد [۳،۴]. به منظور تعیین پارامترهای بهینه عملیات ترمومکانیکی برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در فولادهای API، مطالعات تجربی و آزمایشگاهی زیادی انجام شده است؛ یکی از موضوعات اصلی این تحقیقات بررسی تاثیر عناصر موجود در ترکیب شیمیایی فولاد است [۷، ۱۳-۱۶].

به منظور دستیابی به ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب (استحکام، چقرمگی، سختی و قابلیت جوشکاری) در تولید فولادها، به دانش وسیعی در مورد پارامترهای فرایند نیاز است. قطعاً طراحی فرایند و طراحی آلیاژ برای تهیه فولاد پیچیده بوده و به درک عمیقی از مفاهیم متالورژیکی در هر یک از مراحل تولید وابسته است. اخیراً از سیستم های یادگیری هوشمند نظیر شبکه های عصبی برای پیش بینی خواص مکانیکی فولادهای گوناگون، با توجه به طراحی آلیاژ و یا طراحی مسیر فرایند، استفاده شده است [۱۷-۲۰].

در تحقیق انجام شده توسط کال و دیگران، با انجام تست های نورد بر روی فولادی با گرید تجاری API X65 با پنج ترکیب شیمیایی مختلف، از شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته برای پیش بینی انرژی ضربه شاریپی، به عنوان تابعی از پارامترهای متالورژیکی و نورد، استفاده شده است [۲۱]. در مطالعه انجام شده توسط یانگ و دیگران، از شبکه عصبی برای پیش بینی انرژی ضربه شاریپی، به عنوان تابعی از متغیرهای تولید و ترکیب شیمیایی فولادهای عملیات حرارتی، استفاده شده است [۲۲].

در تحقیق حاضر، از یک شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس انتشار خطا، برای پیش بینی اثر ترکیب شیمیایی بر سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید API X65، استفاده شده است. نمودار پراکندگی و معیارهای آماری ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطای نسبی برای ارزیابی شبکه به کار رفته است. سپس با توجه به عملکرد دقیق شبکه عصبی آموزش داده شده از آن برای بررسی کمی اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه شاریپی استفاده شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر، نمونه هایی از ۱۰۰ لوله ساخته شده در مقیاس صنعتی (با جنس فولاد میکروآلیاژی

میکروآلیاژی با مقدار کربن کمتر از ۰/۱۲ درصد) در استاندارد API 5L و درصد عناصر شرکت کننده در فولاد مورد مطالعه، محاسبه شد و مقدار حداکثر ۰/۱۸ به دست آمد که از مقدار حداکثر (۰/۲۵) تعیین شده در استاندارد کوچک تر است.

جهت تعیین سختی فولاد در ناحیه فلز پایه نمونه های سختی سنجی از ۱۰۰ لوله مورد آزمایش تهیه شد. این نمونه ها از مقطع کامل جوش (شامل سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و درز جوش) ماشین کاری می شوند. در تحقیق حاضر، فقط داده های سختی سنجی مربوط به فلز پایه گزارش شده است. پس از تهیه نمونه، آزمایش سختی مطابق الزامات تعیین شده توسط استاندارد API 5L با ارجاع به استاندارد ASTM E 92 انجام شد. جهت آزمون سختی از دستگاه سختی سنج ویکرز مدل HTM با نیروی ۱۰ کیلوگرمی استفاده شد. نتایج سختی سنجی به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است. شایان ذکر است عدد ویکرز برای هر نمونه فولادی میانگین چند آزمون در ناحیه فلز پایه می باشد. همان طور که مشاهده می شود، انحراف معیار کوچک و بازه کم تغییرات از ویژگی های داده های حاصل است. نتایج تست سختی ویکرز با الزامات تعیین شده از سوی استاندارد API 5L (وجود نقاط سخت با ویکرز بالاتر از HV10 ۲۵۰ عیب محسوب می شود) برای گرید X65 مطابقت دارد.

جدول ۲ خلاصه آماری نتایج تست های ویکرز و شارپی به عنوان خروجی شبکه

پارامتر خروجی	محدوده	میانگین $\pm$ انحراف معیار
انرژی شارپی (J)	۴۰۰-۳۱۹	۱۶/۸۳۱ $\pm$ ۳۶۶/۳۵
سختی ویکرز (HV10)	۲۲۸-۲۱۷	۱/۹۹۰ $\pm$ ۲۲۱/۴۲

در مرحله بعد نمونه های تست ضربه شارپی به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۵ میلی متر از ۱۰۰ لوله فولادی مطابق الزامات جدا شد. در استاندارد API 5L تست شارپی با ارجاع به استاندارد ASTM A 370 انجام می شود. در این استاندارد، نمونه ها به صورت محیطی از موقعیت ساعت ۳ (زاویه ۹۰ درجه نسبت به نقطه شروع درز جوش مارپیچ) استخراج شدند. در این آزمون شیار نمونه ها لزوماً در جهت طولی لوله می باشد.

تست ضربه (با استفاده از ماشین زوئیک با ظرفیت ۴۵۰ ژول) انجام گردید. در تحقیق حاضر، مطابق استاندارد API 5L تست ضربه شارپی در دمای ۰°C انجام شده است. تست ضربه

گرید API X65 با قطر خارجی ۱۲۱۹ mm، ضخامت دیواره ۱۴/۳ mm با ذوب و فرایند ساخت یکسان) جدا شده و آنالیز ترکیب شیمیایی به روش کوانتومتری انجام شد. مطابق استاندارد API 5L، آنالیز شیمیایی باید حداقل شامل عناصر کربن، منگنز، فسفر، سولفور، کرم، نیوبیوم، مس، مولیبدن، نیکل، سیلیسیوم، تیتانیوم، وانادیم، بور (در صورتی که آنالیز نمونه مقدار آن را کمتر از ۰/۰۰۱ درصد نشان دهد، ذکر مقدار آن در آنالیز محصولات ضروری نیست) و تمامی عناصر آلیاژی، که در طول ساخت فولاد برای اهدافی غیر از اکسیژن زدایی اضافه می شوند، باشد [۳]. خلاصه آماری نتایج انجام آنالیز شیمیایی مطابق الزامات تعیین شده از سوی استاندارد API 5L بر روی این ۱۰۰ نمونه شامل محدوده (حداقل-حداکثر)، میانگین و انحراف معیار در جدول ۱ نشان داده شده است (مقدار بور در آنالیز انجام شده کمتر از ۰/۰۰۱ درصد بود).

جدول ۱ خلاصه آماری نتایج آنالیز شیمیایی به عنوان ورودی شبکه

ترکیب شیمیایی (wt%)	محدوده	میانگین $\pm$ انحراف معیار
C	۰/۷۰-۰/۰۶۱	۰/۰۰۳ $\pm$ ۰/۰۷۰
Si	۰/۲۴۰-۰/۱۸۷	۰/۰۱۲ $\pm$ ۰/۲۱۰
Mn	۱/۵۶۰-۱/۴۶۰	۰/۰۱۹ $\pm$ ۱/۵۱۵
P	۰/۰۱۳-۰/۰۰۷	۰/۰۰۱ $\pm$ ۰/۰۱۰
S	۰/۳۰۰-۰/۰۰۰	۰/۰۰۱ $\pm$ ۰/۰۰۱
Ni	۰/۰۱۶-۰/۰۰۹	۰/۰۰۷ $\pm$ ۰/۱۶۴
Cr	۰/۱۸۰-۰/۱۵۰	۰/۰۰۲ $\pm$ ۰/۰۰۳
Mo	۰/۰۰۸-۰/۰۰۰	۰/۰۲۱ $\pm$ ۰/۰۱۱
Al	۰/۰۴۷-۰/۰۳۰	۰/۰۰۴ $\pm$ ۰/۰۳۹
Cu	۰/۰۲۱-۰/۰۱۱	۰/۰۰۲ $\pm$ ۰/۰۱۶
V	۰/۰۵۰-۰/۰۴۰	۰/۰۰۲ $\pm$ ۰/۰۴۲
Ti	۰/۰۱۹-۰/۰۱۱	۰/۰۰۱ $\pm$ ۰/۰۱۴
Nb	۰/۰۴۸-۰/۰۴۰	۰/۰۰۲ $\pm$ ۰/۰۴۴
Ca	۰/۰۰۲-۰/۰۰۰	۰/۰۰۰ $\pm$ ۰/۰۰۱

بررسی نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی (جدول ۱) نشان می دهد که نتایج با حدود بالای تعیین شده توسط استاندارد API برای گرید X65 ($C < ۰/۲۶$ ، $Mn < ۱/۴۵$ ، $P < ۰/۰۳۰$ ، $S < ۰/۰۳۰$ ، $Ti < ۰/۰۶$ و $Nb+Ti+V < ۰/۱۵$) مطابقت دارد (با توجه به تبصره تعیین شده در استاندارد، به ازای کاهش ۰/۰۱ درصدی در میزان بیشینه درصد کربن افزایش ۰/۰۵ درصدی در میزان منگنز مجاز خواهد بود). همچنین، مقدار کربن معادل، با توجه به رابطه ارائه شده (برای فولادهای

برای آموزش شبکه استفاده شد. با توجه به اینکه داده های ورودی در بازه ۰ و ۱ قرار داشتند، فقط داده های خروجی در بازه بین ۰ و ۱ نرمالیزه شدند. از تابع انتقال لجستیک سیگموئید در لایه پنهان و از تابع انتقال خطی در لایه خروجی استفاده شده است. تابع انتقال لجستیک سیگموئید مقادیر ورودی در بازه $-\infty$ تا $+\infty$ را در بازه بین ۰ تا ۱ فشرده می سازد و تابع انتقال خطی همان مقدار ورودی به تابع را به عنوان خروجی بر می گرداند. در شبکه های عصبی، با استفاده از یک تابع کارایی وزن ها و بایاس ها در جهت کمینه شدن تابع کارایی به روز می شوند. در این تحقیق، از تابع کارایی میانگین مجموع مربعات خطا MSE که تابع رایج مورد استفاده در شبکه های پیشرو می باشد استفاده شد.

به منظور بهبود عمومیت شبکه از الگوریتم آموزش شبکه تنظیم بیزین استفاده شده است [۲۳]. این الگوریتم اولین بار توسط مک کی ارائه [۲۶] و توسط هاگان و فورسی در الگوریتم آموزش شبکه لونبرگ-مارکوات استفاده شده است [۲۷]. به منظور جلوگیری از بیش برآزش، از روش توقف زودرس استفاده شد و از ۱۰۰ آزمایش انجام شده (جدول ۱ و ۲)، ۶۰ آزمایش برای آموزش، ۲۰ آزمایش برای اعتبارسنجی و ۲۰ آزمایش برای تست شبکه (با انتخاب تصادفی) استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد شبکه از معیارهای مجذور میانگین مربعات خطای نسبی ($MSRE$) مطابق رابطه (۱) و ضریب همبستگی (R) مطابق رابطه (۲) استفاده شد:

$$MSRE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((V_{m,i} - V_{p,i}) / V_{m,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n V_{m,i} V_{p,i} - \sum_{i=1}^n V_{m,i} \sum_{i=1}^n V_{p,i}}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n V_{m,i}^2 - (\sum_{i=1}^n V_{m,i})^2][n \sum_{i=1}^n V_{p,i}^2 - (\sum_{i=1}^n V_{p,i})^2]}} \quad (2)$$

که در روابط فوق، $V_{m,i}$ مقدار واقعی داده i ام از متغیر V ، $V_{p,i}$ مقدار پیش بینی شده برای داده i ام متغیر V و n تعداد کل داده های متغیر V است. مقدار $MSRE$ برای داده های آموزش و تست شبکه هایی با ۴ تا ۲۴ گره در لایه میانی محاسبه شد. معین شد که شبکه با ۱۶ گره در لایه میانی دارای کمترین میزان خطا برای داده های تست است و افزایش تعداد این گره ها باعث بهبود نتایج شبکه برای داده های آموزش نمی شود. در نتیجه ساختار شبکه مورد استفاده ۲-۱۶-۱۴ می باشد.

برای هر لوله در ناحیه فلز پایه ۳ بار تکرار شد و مقدار میانگین آن به دست آمد.

نتایج تست ضربه شاری به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج با الزامات تعیین شده از سوی استاندارد API 5L (حداقل میانگین انرژی جذب شده توسط سه نمونه جدا شده از بدنه لوله باید ۴۰ ژول باشد) برای گرید X65 مطابقت دارد.

۳- مدل شبکه عصبی

۳-۱- معماری شبکه ارائه شده

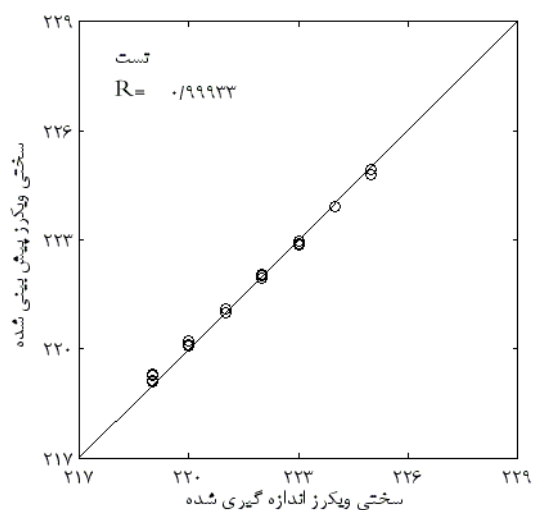
در تحقیق حاضر، از شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس انتشار خطا جهت پیش بینی سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید X65 استفاده شده است. این نوع شبکه قابلیت تخمین هر تابعی با نقاط ناپیوستگی نامحدود را دارد. در طراحی شبکه های عصبی پیشرو، اغلب از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان از توابع انتقال سیگموئیدی و یک لایه خروجی با تابع انتقال خطی استفاده می شود [۲۳]. تعداد گره ها در لایه های ورودی و خروجی به ترتیب برابر با تعداد ورودی ها و خروجی های شبکه تعیین می شوند. تعداد لایه های میانی معمولاً به قدرت بیش از ۲ یا ۳ لایه انتخاب می شوند و انتخاب تعداد لایه بیشتر منجر به بهبود عملکرد شبکه نمی شود [۲۴]. همچنین، نشان داده شده است که شبکه عصبی سه لایه (شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه مخفی) با تعداد نرون کافی در لایه پنهان قادر به مدل کردن هر تابع غیرخطی پیوسته می باشد [۲۵].

در تحقیق حاضر، از شبکه سه لایه استفاده شده است. شبکه از ۱۴ متغیر ورودی شامل درصد وزنی عناصر C، Si، Mn، P، S، Ni، Cr، Mo، Al، Cu، V، Ti، Nb و Ca در ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه و دو متغیر عدد سختی ویکرز و انرژی ضربه شاری تشکیل شده است. بنابراین، شبکه دارای ۱۴ گره در لایه ورودی و ۴ گره در لایه خروجی می باشد. تعداد گره های لایه پنهان طی آموزش و تست شبکه به دست آمده است.

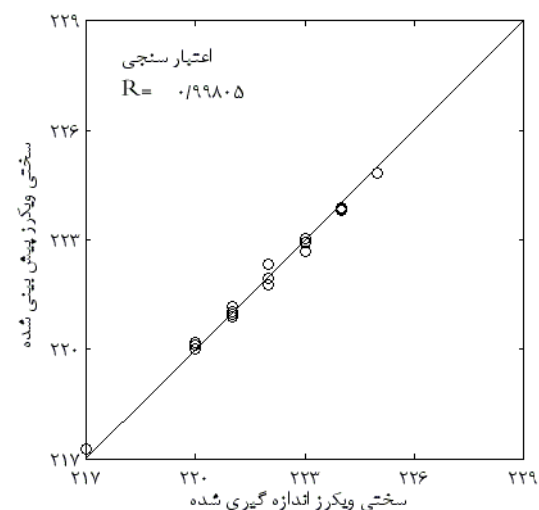
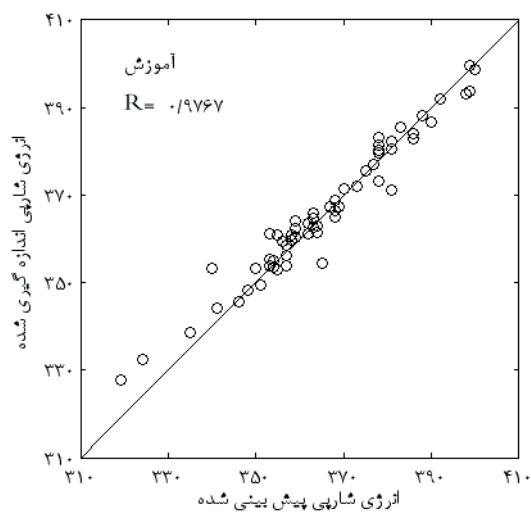
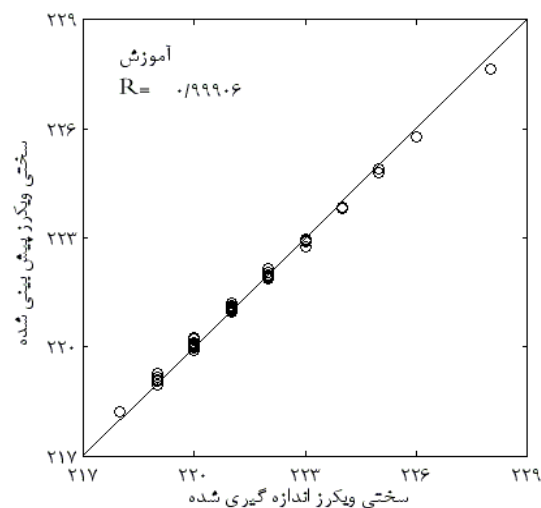
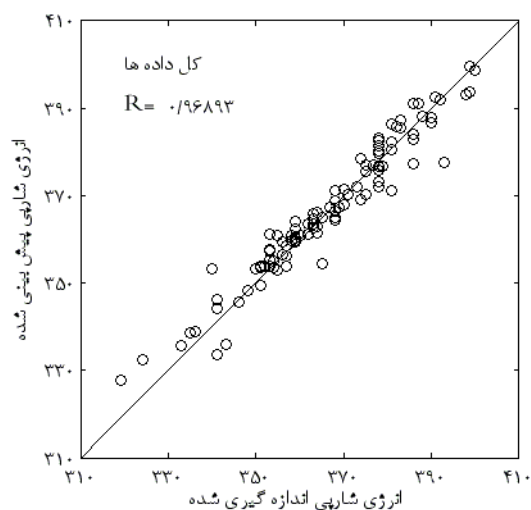
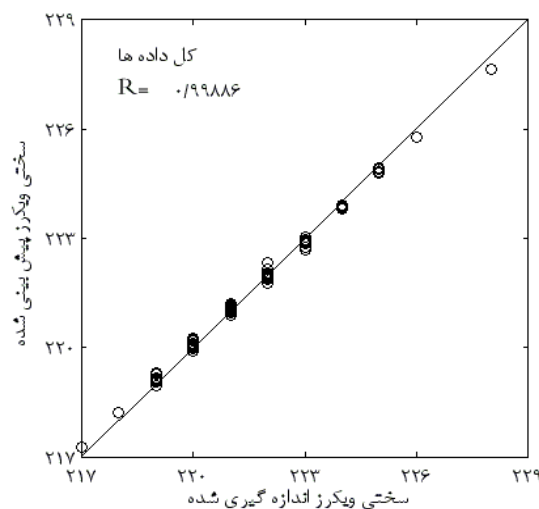
۳-۲- آموزش و تست شبکه

از نتایج آنالیز شیمیایی و آزمون های سختی ویکرز و ضربه شاری، که بر روی نمونه هایی در مقیاس صنعتی انجام شده،

نتایج پیش‌بینی شبکه برای سختی ویکرز و انرژی ضربه شاریپی برای کل داده‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است.



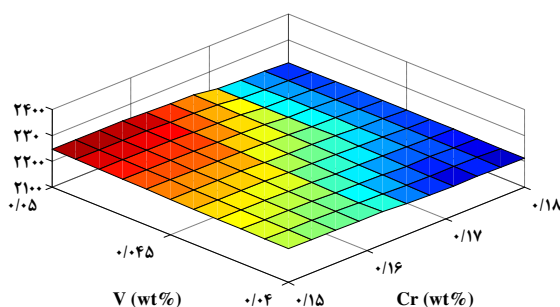
شکل ۱ نتایج ارزیابی عملکرد شبکه برای پیش‌بینی سختی ویکرز برای کل داده‌ها و داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و تست



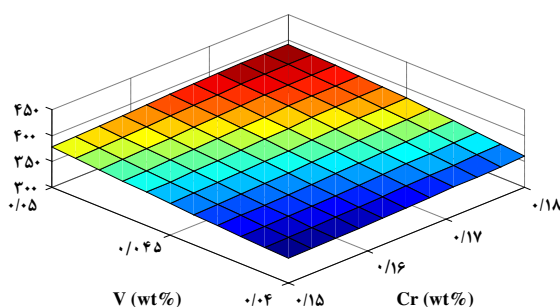
می‌کند. همچنین، مقادیر سایر عناصر (بر حسب درصد) برابر با مقدار میانگین حاصل از آنالیز شیمیایی در نظر گرفته شده است. با تقسیم بازه تغییرات هر یک از این دو عنصر به ۱۰ قسمت مساوی، در مجموع ۱۲۱ فولاد حاصل شده است. نتایج شبیه‌سازی سختی و انرژی ضربه شاری با استفاده از شبکه عصبی آموزش داده شده برای این گروه فولاد به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴ گروه فولاد طراحی‌شده به منظور بررسی اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه فولاد API X65

Mo	Ca	S	P	Mn	Si	C
۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۱/۵۱۵	۰/۲۱	۰/۰۷
V	Cr	Ti	Nb	Cu	Al	Ni
۰/۰۴-۰/۰۵	۰/۱۵-۰/۱۸	۰/۰۱۴	۰/۰۴۴	۰/۰۱۶	۰/۰۳۹	۰/۰۱۱

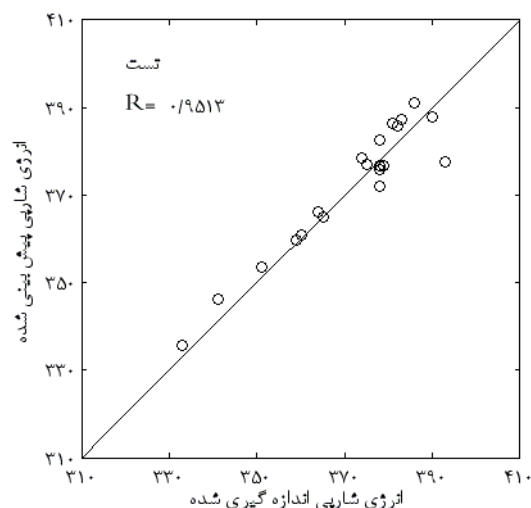
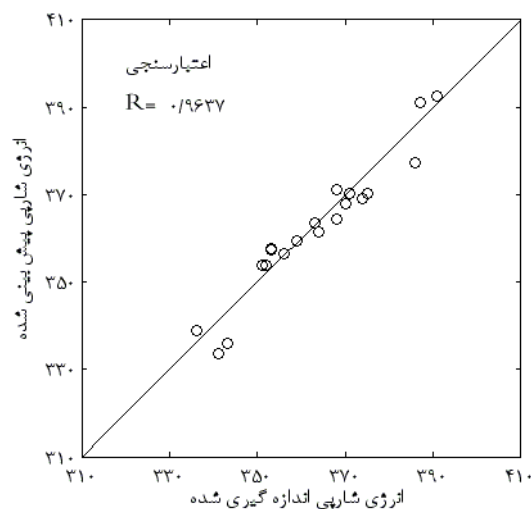


شکل ۳ اثر عناصر کرم و وانادیوم بر سختی فولاد API X65



شکل ۴ اثر عناصر کرم و وانادیوم بر انرژی شاری فولاد API X65

همچنین، با توجه به نتایج شبکه برای فولادهای طراحی‌شده در این گروه (شکل‌های ۳ و ۴)، اثر کمی کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه به‌طور خلاصه در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۲ نتایج ارزیابی عملکرد شبکه برای پیش‌بینی انرژی ضربه شاری برای کل داده‌ها و داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و تست

جدول ۳ مقادیر $MSRE$ و R محاسبه‌شده برای پیش‌بینی سختی ویکرز و انرژی ضربه شاری

پارامتر	$MSRE$	R
سختی ویکرز	۰/۰۰۱	۰/۹۹۹
انرژی ضربه شاری	۰/۰۱۳	۰/۹۶۹

۴- نتایج و بحث

به منظور بررسی اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی شکست، گروه فولادی مطابق جدول ۴ طراحی شد. در این گروه مقادیر کرم و وانادیوم (بر حسب درصد) بین مقادیر حداقل و حداکثر به‌دست آمده از آنالیز شیمیایی ۱۰۰ نمونه مورد مطالعه تغییر

نتیجه فولاد ریزدانه تر شده و چقرمگی (افزایش انرژی ضربه شاری) فولاد بهبود می یابد [۲۹، ۲۰۱]. نتایج حاصل از شبکه عصبی (شکل ۴ و جدول ۵) نشان می دهد که با افزایش ۰/۰۱ درصدی در مقدار وانادیوم سختی به مقدار (HV10) ۱/۳ (معادل ۰/۶ درصد نسبت به میانگین) افزایش و انرژی ضربه شاری به مقدار ۳۳ ژول (معادل ۹ درصد نسبت به میانگین) افزایش می یابد.

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، از شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس انتشار خطا برای پیش بینی اثر ترکیب شیمیایی بر سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید API X65 استفاده شد. عملکرد شبکه توسط نمودارهای پراکندگی و معیارهای آماری ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطای نسبی (MSRE) مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به عملکرد دقیق شبکه عصبی توسعه داده شده از آن برای پیش بینی اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه شاری استفاده گردید. مشاهده شد کرم و وانادیوم به ترتیب باعث کاهش و افزایش جزیی سختی فولاد API X65 می گردند. همچنین، با افزایش درصد عناصر کرم و وانادیوم چقرمگی ضربه (انرژی ضربه شاری) این فولاد افزایش می یابد. وانادیوم نسبت به کرم تأثیر بیشتری بر افزایش انرژی ضربه فولاد مورد مطالعه دارد.

۶- تشکر و قدردانی

از شرکت لوله و تجهیزات سدید به لحاظ همکاری در انجام آنالیز شیمیایی و نیز انجام آزمایش های مکانیکی فولاد API X65 قدردانی می گردد.

۷- مراجع

- [1] Verlinden B., Driver J., Samajdar I., Doherty R. D., *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*, London, Elsevier, First Edition, 2007.
- [2] Davis J. R., *Alloying: Understanding the Basics*, USA, ASM International, 2001.
- [3] API Specifications 5L, *Specifications for Line Pipe*, 44th Edition, American Petroleum Institute, USA, 2007.
- [4] Reip C. P., Shanmugam S., Misra R. D. K., "High Strength Microalloyed CMn(V-Nb-Ti) and CMn(V-Nb) Pipeline Steels Processed Through CSP Thin-Slab Technology: Microstructure,

جدول ۵ اثر کمّی عناصر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه شاری

عنصر	سختی ویکرز	انرژی ضربه شاری
افزایش ۰/۰۱ درصدی کرم	کاهش کمتر از ۱ (HV10)	۶ ژول افزایش
افزایش ۰/۰۱ درصدی وانادیوم	افزایش به مقدار ۱/۳ (HV10)	۳۳ ژول افزایش

۴-۱- اثر کمّی کرم بر سختی و انرژی ضربه فولاد

میکروآلیاژی گرید API X65

کرم در شرایط وجود کربن کافی در ترکیب شیمیایی فولاد باعث افزایش سختی می گردد [۲۸]. بررسی عددی نتایج حاصل از شبکه (شکل ۳) نشان می دهد که با افزایش ۰/۰۱ درصدی در مقدار کرم، سختی به مقدار جزیی (HV10) ۰/۸ (معادل ۰/۴ درصد نسبت به میانگین) کاهش می یابد که می تواند ناشی از نبود کربن کافی (کمتر از ۰/۰۸ درصد) در ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه باشد. اثر کرم بر افزایش انرژی ضربه شاری را می توان در مطالعه انجام شده توسط یانگ و دیگران بر روی فولادهای عملیات حرارتی شده مشاهده کرد [۲۲]. در مورد اثر کرم بر انرژی ضربه شاری فولاد مورد مطالعه یا سایر گریدهای مشابه گزارشی در دسترس نیست. نتایج شبکه عصبی نشان می دهد که با افزایش ۰/۰۱ درصدی در مقدار کرم انرژی ضربه شاری به مقدار ۶ ژول (معادل ۱/۶ درصد نسبت به میانگین) افزایش می یابد (شکل ۴).

۴-۲- اثر کمّی وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه فولاد

میکروآلیاژی گرید API X65

در مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط لی و ملبورن، اثر وانادیوم بر سختی ویکرز فولادهای بینیتی، با توجه به وجود یا عدم وجود نیتروژن در ترکیب شیمیایی فولاد، به صورت افزایش سختی به مقدار (HV10) ۳۵-۴۰ به ازای افزایش ۰/۲۰ درصدی در مقدار وانادیوم یا به عبارت دیگر افزایش (HV10) ۰/۱۷-۰/۲۰ به ازای افزایش ۰/۰۱ درصدی در مقدار وانادیوم گزارش شده است [۲۹]. در مورد اثر وانادیوم بر سختی فولاد مورد مطالعه یا سایر گریدهای مشابه گزارشی در دسترس نیست. وانادیوم در فولادهای ترمومکانیکال با بالا بردن دمای عدم تبلور مجدد و پایین آوردن دمای استحاله آستنیت به فریت محدوده تشکیل آستنیت پهنیکی شکل را افزایش می دهد. در

- [17] Hosseini S. M. K., Zarei-Hanzaki A., Yazdan Panah M. J., Yue S., "ANN Model for Prediction of the Effects of Composition and Process Parameters on Tensile Strength and Percent Elongation of Si-Mn TRIP Steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 374, 2004, pp. 122-128.
- [18] Xu L., Xing J., Wei S., Zhang Y., Long R., "Artificial Neural Network Prediction of Retained Austenite Content and Impact Toughness of High-Vanadium High-Speed Steel (HVHSS)", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 433, 2006, pp. 251-256.
- [19] Ozerdem M. S., Kolukisa S., "Artificial Neural Network Approach to Predict Mechanical Properties of Hot Rolled, Nonresulfurized, AISI 10xx Series Carbon Steel Bars", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, 2008, pp. 437-439.
- [20] Botlani Esfahani M., Toroghinejad M. R., Key Yeganeh A. R., "Modeling the Yield Strength of Hot Strip Low Carbon Steels by Artificial Neural Network", *Materials & Design*, Vol. 30, 2009, pp. 3653-365.
- [21] Çöl M., Ertunç H. M., Yılmaz M., "An Artificial Neural Network Model for Toughness Properties in Microalloyed Steel in Consideration of Industrial Reduction Conditions", *Materials and Design*, Vol. 28, 2007, pp. 488-495.
- [22] Yang Y. Y., Mahfouf M., Panoutsos G., "Development of a Parsimonious GA-NN Ensemble Model with a Case Study for Charpy Impact Energy Prediction", *Advances in Engineering Software*, Vol. 42, 2011, pp. 435-443.
- [23] MATLAB® Software, R2008a, Neural Network Toolbox, User's Guide, 2008.
- [24] Hagan M. T., Demath H. B., Beale M., *Neural Network Design*, Boston, PWS Publications, 1996.
- [25] Hornik K., "Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks", *Neural Networks*, Vol. 4, No. 2, 1991, pp. 251-257.
- [26] MacKay D. J. C., *Bayesian Methods for Adaptive Models*, PhD Thesis, California Institute of Technology, 1991.
- [27] Foresee F. D., Hagan M. T., "Gauss-Newton Approximation to Bayesian Regularization", *Int. Joint Conf. on Neural Networks*, Vol. 1, 1997, pp. 1930-1935.
- [28] Ginzburg V. B., Ballas R., *Flat Rolling Fundamentals (Manufacturing Engineering and Materials Processing)*, New York, Marcel Dekker Inc., 2000.
- [29] Weng Y., Dong H., Gan Y., *Advanced Steels: The Recent Scenario in Steel Science and Technology*, Beijing, China, Springer-Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, 2011.
- Precipitation and Mechanical Properties", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 424, 2006, pp. 307-317.
- [5] Smith Y. E., Coldren A. P., Cryderman R. L., *Toward Improved Ductility and Toughness*, Climax Molybdenum Company (Japan) Ltd., Tokyo, 1972, pp. 119-142.
- [6] Xiao F., Liao B., Ren D., Shan Y., Yang K., "Acicular Ferritic Microstructure of a Low-Carbon Mn-Mo-Nb Microalloyed Pipeline Steel", *Materials Characterization*, Vol. 54, 2005, pp. 305-314.
- [7] Bakkaloğlu A., "Effect of Processing Parameters on the Microstructure and Properties of an Nb Microalloyed Steel", *Materials Letters*, Vol. 56, 2002, pp. 263-272.
- [8] Hulka K., Gray M., *High Temperature Processing of Line-Pipe Steels*, 2006.
- [9] Hillenbrand H. G., Gras M., Kalwa C., *Development and Production of High Strength Pipeline Steels*, 2006.
- [10] Calvo J., Jung I. H., Elwazri A. M., Bai D., Yue S., "Influence of the Chemical Composition on Transformation Behavior of Low Carbon Microalloyed Steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 520, 2009, pp. 90-96.
- [11] Korczak P., "Modeling of Steel Microstructure Evolution During Thermo-Mechanical Rolling of Plate for Conveying Pipes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, 2004, pp. 432-435.
- [12] Mousavi Anijdan S. H., Yue S., "The Necessity of Dynamic Precipitation for the Occurrence of No-Recrystallization Temperature in Nb-Microalloyed Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, 2011, pp. 803-807.
- [13] Zhao M. C., Yang K., Shan Y., "The Effects of Thermo-Mechanical Control Process on Microstructures and Mechanical Properties of a Commercial Pipeline Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 335, 2002, pp. 14-20.
- [14] Xiao F. R., Liao B., Shan Y. Y., Qiao G. Y., Zhong Y., Zhang C., Yang K., "Challenge of Mechanical Properties of an Acicular Ferrite Pipeline Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 431, 2006, pp. 41-52.
- [15] Beidokhti B., Koukabi A. H., Dolati A., "Effect of Titanium Addition on the Microstructure and Inclusion Formation in Submerged Arc Welded HSLA Pipeline Steel", *Materials Processing Technology*, Vol. 209, 2009, pp. 4027-4035.
- [16] Show B. K., Veerababu R., Balamuralikrishnan R., Malakondaiah G., "Effect of Vanadium and Titanium Modification on the Microstructure and mechanical Properties of a Microalloyed HSLA Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, 2010, pp. 1595-1604.