

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

سيد حجت هاشمی'\*، مسعود رخش خورشيد'

۱ - دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند ۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند shhashemi@birjand.ac.ir ،۹۷۱۷۵/۶۱۵

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، مطابق الزامات تعیین ۱۴/۳ با ذوب و فرایند ساخت یکسان) و انجام آنالیز شیمیایی، تست سختی ویکرز و آزمون ضربه شارپی روی این نمونهها، مطابق الزامات تعیین شده در استاندارد 5L API، فراهم شد. درصد وزنی عناصر ۲۰، S، P، Mn، Si، ک. P، Mn، فرایی روی این نمونهها، مطابق الزامات تعیین مورد مطالعه به عنوان متغیرهای ورودی و عدد سختی ویکرز و انرژی ضربه شارپی به عنوان متغیرهای خروجی درنظر 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 داده شده از آن برای پیشبینی اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه شارپی نمونه فولادی به صورت کمی استفاده شد. کلیدواژگان: شبکه عصبی، ترکیب شیمیایی، سختی ویکرز، انرژی ضربه شارپی، فولاد میکروآلیاژی API کار علی استفاده شد.

# «Research Note»

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

S. H. Hashemi<sup>1\*</sup>, M. Rakhshkhorshid<sup>2</sup>

Assoc. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran
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- منگنزی است که با افزودن مقادير كم عناصر ميكروآلياژي نيوبيوم، واناديوم، تيتانيوم و ألومينيم بر استحكام أن افزوده شده است[١،٢]. اين فولاد به طور گسترده در خطوط پرفشار انتقال گاز ایران به شكل لولههای قطور فولادی استفاده می شود. مشخصات این فولاد با حداقل تنش تسليم ۶۵ ksi توسط موسسه نفت آمريكا (API) استاندارد شده است[۳]. تركيب مناسب استحكام، چقرمگی و قابلیت جوش پذیری از ویژگیهای 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 دار د [۷–۷].

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 زمانبندی نورد فولاد نقش مؤثری دارد. در واقع تعامل بین ترکیب شیمیایی فولاد و عملیات ترمومکانیکی مشخص کننده خواص مكانيكي نهايي فولادهاي API است[٨-١٠]. 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 ریزدانهای از آستنیت تبلور مجدد یافته چندضلعی است. نورد پرداخت (نورد نهایی) در دمایی زیر دمای عدم تبلور مجدد (دمای شروع تبدیل فاز آستنیت به فریت)  $Ar_3$  ( $T_{NR}$ ) انجام می گیرد تا ریزساختار آستنیت پنکیکی بهدست آید. در این ریزساختار، با افزایش نسبت مرز به حجم دانه و تشکیل باندهای تغییر شکل، مکانهای جوانهزنی فریت افزایش یافته و امکان ریزدانهشدن فولاد فراهم می شود. با سردکردن سریع از بالای خط Ar<sub>3</sub> تا دمای کلاف پیچی بر مقدار ریزدانهشدن افزوده می شود [۱۲،۱،۱۱].

مناسببودن فرایند و ترکیب صحیح عناصر درنظر گرفته شده را می توان با آنالیز شیمیایی (قابلیت جوش پذیری)، انجام تست کشش (استحکام و داکتالیته)، انجام آزمون ضربه شارپی و تست وزنه سقوطی (چقرمگی) و انجام آزمونهای سختی سنجی

(يرهيز از وجود نقاط سخت<sup>7</sup>) 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 سیستمهای یادگیری هوشمند نظیر شبکههای عصبی برای پیشبینی خواص مکانیکی فولادهای گوناگون، با توجه به طراحی آلیاژ و یا طراحی مسیر فرایند، استفاده شده است[۱۷-۲۰].

در تحقیق انجامشده توسط کال و دیگران، با انجام تستهای نورد بر روی فولادی با گرید تجاری API X65 با پنج ترکیب شیمیایی مختلف، از شبکه عصبی رگرسیون تعمیمیافته برای پیشبینی انرژی ضربه شارپی، به عنوان تابعی از پارامترهای متالورژیکی و نورد، استفاده شده است[۲۱]. در مطالعه انجام شده توسط یانگ و دیگران، از شبکه عصبی برای پیشبینی انرژی ضربه شارپی، 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 پسانتشار خطا، برای پیشبینی 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 عصبي آموزش داده شده از آن براي بررسي کمّي اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه شارپی استفاده شده است.

### ۲- مواد و روش تحقیق

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر، نمونههایی از ۱۰۰ لوله ساختهشده در مقياس صنعتي (با جنس فولاد ميكروآلياژي

2. Hard Spots

۱۵۷

<sup>1.</sup> American Petroleum Institute

گرید API X65 با قطر خارجی mm ۱۲۱۹، ضخامت دیواره ۲رکیب شیمیایی به روش کوانتومتری انجام شد. مطابق ترکیب شیمیایی به روش کوانتومتری انجام شد. مطابق استاندارد API 5L، آنالیز شیمیایی باید حداقل شامل عناصر کربن، منگنز، فسفر، سولفور، کرم، نیوبیوم، مس، مولیبیدن، نیکل، سیلیسیوم، تیتانیوم، وانادیم، بور (در صورتی که آنالیز نیکل، سیلیسیوم، تیتانیوم، وانادیم، بور (در صورتی که آنالیز آن در آنالیز محصولات ضروری نیست) و تمامی عناصر آلیاژی، که در طول ساخت فولاد برای اهدافی غیر از اکسیژنزدایی اضافه میشوند، باشد[۳]. خلاصه آماری نتایج انجام آنالیز شیمیایی مطابق الزامات تعیینشده 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 انجامشده کمتر از ۱۰/۰۰ درصد بود).

جدول ۱ خلاصه آماری نتایج آنالیز شیمیایی به عنوان ورودی شبکه

میانگین ± انحراف معیار	محدوده	ترکیب شیمیایی (%wt)
•/••\* <u>+</u> •/•¥•	•/Y•_•/•۶١	С
•/•\Y±•/Y\•	•/ <b>٢</b> ۴•-•/١٨٧	Si
۰/۰۱۹±۱/۵۱۵	1/08+-1/48+	Mn
•/••\±•/•\•	•/• ١٣-•/••٧	Р
•/••\±•/••\	•/~•-•/•••	S
۰/۰۰۷±۰/۱۶۴	•/• 1 <i>۶</i> -•/••٩	Ni
•/••Y±•/••٣	•/\ <b>\</b> •-•/\ <b>\</b> •	Cr
•/•۲١±•/•١١	•/•• <b>\</b> -•/•••	Мо
•/••۴±•/•۳٩	•/•۴٧-•/•٣•	Al
۰/۰۰۲±۰/۰۱۶	•/•٢١-•/•١١	Cu
•/••7±•/•47	•/• <b>&amp;</b> •-•/• <b>*</b> •	V
•/••1±•/•1۴	•/• ) ٩-•/• ) )	Ti
•/••Y±•/•۴۴	•/• ۴٨-•/• ۴•	Nb
•/•••±•/•• \	•/••٢-•/•••	Ca

بررسی نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی (جدول ۱) نشان می دهد که نتایج با حدود بالای تعیین شده توسط استاندارد API برای گرید X65 (۲۶/۰۶ م) ۸۵ Mr، ۸۰/۰۶ P، (۱۰۳۰ مطابقت دارد Nb+Ti+V و ۲۱/۰۵ مطابقت دارد (با توجه به تبصره تعیین شده در استاندارد، به ازای کاهش (۱۰ درصدی در میزان بیشینه درصد کربن افزایش ۸۰/۰ درصدی در میزان منگنز مجاز خواهد بود). همچنین، مقدار کربن معادل، با توجه به رابطه ارائه شده (برای فولادهای

میکروآلیاژی با مقدار کربن کمتر از ۰/۱۲ درصد) در استاندارد API 5L و درصد عناصر شرکتکننده در فولاد مورد مطالعه، محاسبه شد و مقدار حداکثر ۰/۱۸ بهدست آمد که از مقدار حداکثر (۰/۲۵) تعیینشده در استاندارد کوچکتر است.

سید حجت هاشمی و همکار

جهت تعیین سختی فولاد در ناحیه فلز پایه نمونههای سختی سنجی از ۱۰۰ لوله مورد آزمایش تهیه شد. این نمونهها از مقطع كامل جوش (شامل سه ناحیه فلز پایه، ناحیه متاثر از حرارت و درز جوش) ماشین کاری می شوند. در تحقیق حاضر، فقط دادههای سختیسنجی 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 ویژگیهای دادههای حاصل است. نتایج تست سختی ویکرز با الزامات تعیین شده از سوی استاندارد API 5L (وجود نقاط سخت با ویکرز بالاتر از ۲۵۰ HV10 عیب محسوب می شود) برای گرید X65 مطابقت دارد.

**جدول ۲** خلاصه آماری نتایج تستهای وبکرز و شارپی به عنوان خروحی شبکه

میانگین ± انحراف معیار	محدوده	پارامتر خروجی
18/XT1±T88/TD	4219	انرژی شارپی (J)
1/99+±771/47	778-218	سختی ویکرز (HV10)

در مرحله بعد نمونههای تست ضربه شارپی به ابعاد ۵۵×۱۰×۱۰ میلیمتر از ۱۰۰ لوله فولادی مطابق الزامات جدا شد. در استاندارد API 5L تست شارپی با ارجاع به استاندارد شد. در استاندارد، نمونهها به مورت محیطی از موقعیت ساعت ۳ (زاویه ۹۰ درجه نسبت به نقطه شروع درز جوش مارپیچ) استخراج شدند. در این آزمون شیار نمونهها لزوماً در جهت طولی لوله میباشد.

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 C°۰ انجام شده است. تست ضربه

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

نتایج تست ضربه شارپی 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 جداشده 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 پسانتشار خطا جهت پیشبینی سختی و انرژی ضربه فولاد میکروآلیاژی گرید API X65 استفاده شده است. این نوع شبکه قابلیت تخمین هر تابعی با نقاط ناپیوستگی نامحدود را دارد. در طراحی شبکههای عصبی پیشرو، اغلب از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان از توابع انتقال سیگموییدی و یک لایه خروجي با تابع انتقال خطي استفاده مي شود [٢٣]. تعداد گرهها در لایههای ورودی و خروجی بهترتیب برابر با تعداد ورودیها و خروجىهاى شبكه تعيين مىشوند. تعداد لايههاى ميانى معمولاً بهندرت بیش از ۲ یا ۳ لایه انتخاب می شوند و انتخاب تعداد لايه بيشتر منجر به بهبود عملكرد شبكه نمى شود [۲۴]. همچنین، نشان داده شده است که شبکه عصبی سهلایه (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 پيوسته ميباشد [٢۵].

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

۲-۲- آموزش و تست شبکه

از نتایج آنالیز شیمیایی و آزمونهای سختی ویکرز و ضربه شارپی، که بر روی نمونههایی در مقیاس صنعتی انجام شده،

مهندسی مکانیک مدرس دورهٔ ۱۲ شمارهٔ ٤، آبان ۱۳۹۱

برای آموزش شبکه استفاده شد. با توجه به اینکه دادههای ورودی در بازه ۰ و ۱ قرار داشتند، فقط دادههای خروجی در بازه بین ۰ و ۱ نرمالیزه شدند. از تابع انتقال لجستیک سیگمویید در لایه پنهان و از تابع انتقال خطی در لایه خروجی استفاده شده است. تابع انتقال لجستیک سیگمویید مقادیر ورودی در بازه  $\infty$ - تا  $\infty$ + را در بازه بین  $\cdot$  تا 1 فشرده میسازد و تابع انتقال خطی همان مقدار ورودی به تابع را به عنوان خروجی بر می گرداند. در شبکههای عصبی، با استفاده از یک تابع کارآیی وزنها و بایاسها در جهت کمینهشدن تابع کارایی بهروز می شوند. در این تجقیق، از تابع کارآیی میانگین مجموع مربعات خطا MSE که تابع رایج مورد استفاده در شبکههای پیشرو می باشد استفاده شد.

به منظور بهبود عمومیت شبکه از الگوریتم آموزش شبکه تنظيم بيزين استفاده شده است[٢٣]. اين الگوريتم اولينبار توسط مککی ارائه [۲۶] و توسط هاگان و فورسی در الگوریتم آموزش شبکه لونبرگ-مارکوآت استفاده شده است[۲۷]. به منظور جلوگیری از بیشبرازش، از روش توقف زودرس استفاده شد و از ۱۰۰ آزمایش انجامشده (جداول 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:

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

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

 $V_{c,i}$ ، V مقدار واقعی داده i ام از متغیر  $V_{m,i}$  مقدار واقعی داده iمقدار پیشبینی شده برای داده i ام متغیر V و n تعداد کل دادههای متغیر V است. مقدار MSRE برای دادههای آموزش و تست شبکههایی 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 دادههای تست است و افزایش تعداد این گرهها باعث بهبود نتایج شبکه برای دادههای آموزش نمی شود. در نتيجه ساختار شبكه مورد استفاده ۲-۱۶-۱۴ می باشد.

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-21

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







**شکل۲** نتایج ارزیابی عملکرد شبکه برای پیشبینی انرژی ضربه شارپی برای کل دادهها و دادههای آموزش، اعتبارسنجی و تست

جدول ۳ مقادیر MSRE و R محاسبه شده برای پیشبینی سختی

ویکرز و انرژی ضربه شارپی

	_	
R	MSRE	پارامتر
•/९९९	• / • • ١	سختي ويكرز
•/٩۶٩	۰/۰۱۳	انرژی ضربه شارپی

#### 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

سید حجت هاشمی و همکار

می کند. همچنین، مقادیر سایر عناصر (بر حسب درصد) برابر با مقدار میانگین حاصل از آنالیز شیمیایی درنظر 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 شارپی 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

Мо	Ca	S	Р	Mn	Si	С
•/••٣	•/••1	•/••1	۰/۰۱	1/212	۰ / ۲ ۱	•/•¥
V	Cr	Ti	Nb	Cu	Al	Ni
۰/۰۴ -۰/۰۵	•/1۵ -•/1A	•/•14	•/•۴۴	۰/۰۱۶	•/•٣٩	•/• ١١



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



شکل ۴ اثر عناصر کرم و وانادیوم بر انرژی شارپی فولادAPI X65

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

181

انرژی ضربه شارپی	سختي ويكرز	عنصر
۶ ژول افزایش	کاهش کمتر از (HV10)	افزایش ۰/۰۱ درصدی کرم
۳۳ ژول افزایش	افزایش به مقدار ۱/۳ (HV10)	افزایش ۱ ۰/۰ درصدی وانادیوم

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

۴-۱- اثر کمّی کـرم بـر سـختی و انـرژی ضـربه فـولاد 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) ۸/۰ (معادل ۶/۰ 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 شارپی 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 شارپی 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 شارپی به مقدار ۶ ژول (معادل ۱/۶ درصد نسبت به میانگین)

# ۲-۴- اثر کمّی وانادیوم بر سختی و انرژی ضـربه فـولاد میکروآلیاژی گرید API X65

در مطالعه آزمایشگاهی انجامشده 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) ۴۰–۳۵ به ازای افزایش ۲۰۲۰ درصدی در مقدار وانادیوم یا به عبارت دیگر افزایش 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 بالابردن دمای عدم تبلور مجدد و پایین آوردن دمای استحاله آستنیت به فریت محدوده تشکیل آستنیت پنکیکی شکل را افزایش میدهد. در

نتیجه فولاد ریزدانهتر شده و چقرمگی (افزایش انرژی ضربه شارپی) فولاد بهبود مییابد [۲۹،۲،۱]. نتایج حاصل از شبکه عصبی (شکل ۴ و جدول ۵) نشان میدهد که با افزایش ۱/۰ درصدی در مقدار وانادیوم سختی به مقدار (HV10) ۱/۳ (معادل ۱/۶ درصد نسبت به میانگین) افزایش و انرژی ضربه شارپی به مقدار ۳۳ ژول (معادل ۹ درصد نسبت به میانگین) افزایش مییابد.

#### ۵- نتیجهگیری

در تحقیق حاضر، از شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پسانتشار خطا برای پیشبینی 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 پیشبینی اثر کرم و وانادیوم بر سختی و انرژی ضربه شارپی استفاده گردید. مشاهده شد کرم و وانادیوم بهترتیب باعث کاهش و افزایش جزیی سختی فولاد وانادیوم چقرمگی ضربه (انرژی ضربه شارپی) این فولاد افزایش مییابد. 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 آزمایشهای مکانیکی فولاد API X65 قدردانی می گردد.

#### ۷- مراجع

- 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,

#### سید حجت هاشمی و همکار

- [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., Yilmaz 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, pp119-142.
- [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.