

بررسی و تحلیل تأثیر شرایط تولید بر مقاومت به ضربه فولادهای میکرو آلیاژی مورد استفاده در لوله سازی با استفاده از شبکه عصبی

حسین مناجاتی زاده^{۱*}، داوود آصفی^۲، ادیب قدمیاری^۳، محمد مهدی عقیده^۲، امیر انصاری پور^۲ و احمد رضا سلیمی^۲

چکیده

یکی از کاربردهای فولادهای میکرو آلیاژی، لوله‌های انتقال نفت و گاز است که با عنوان فولادهای API^۴ شناخته می‌شوند. این فولادها پس از فرآیندهای فولادسازی و ریخته‌گری مداوم از راه نورد گرم تولید می‌شوند و مقاومت در برابر ضربه یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نهایی آنها از لحاظ شرایط عملکرد است که در محصول نهایی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. مقاومت به ضربه یک ویژگی مکانیکی است که مورد تأثیر پارامترهای زیادی از ابتدا تا انتهای خط تولید می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از شبکه عصبی تأثیر پارامترهای تولیدی بر مقاومت به ضربه این فولادها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از 33 پارامتر تأثیرگذار همچون ترکیب شیمیایی و شرایط نورد گرم شامل: مقدار کرنش، نرخ کرنش و دمای تغییر شکل برای 122 نمونه مستقل استفاده گردید. برای بررسی خطا و افزایش دقت از دو تابع استفاده شده است که بر اساس اختلاف نتایج بدست آمده از شبکه عصبی و داده‌های حاصل از آزمون ضربه مورد مقایسه قرار گرفته اند. دو سامانه شبکه عصبی یکی با یک لایه مخفی و دیگری با دو لایه مخفی مورد بررسی قرار گرفتند. پس از آموزش شبکه عصبی، مشاهده شد که شبکه با دو لایه مخفی دارای کم‌ترین خطاست که برای بررسی شرایط متفاوت تولیدی بکار گرفته شد. نتایج نشان دادند که می‌توان از این سامانه در پیش بینی مناسب‌ترین پارامترهای تولیدی برای بهبود مقاومت به ضربه فولادهای تجاری میکرو آلیاژی استفاده نمود. همچنین، این سامانه نشان داد مهم‌ترین عوامل تولیدی موثر بر مقاومت به ضربه عبارتند از: مقدار کربن و نیوبیوم شمش، دمای ورق ورودی به نورد نهایی، دمای نورد نهایی و دمای کلاف پیچی؛ محدوده‌های بهینه در مقاله گزارش شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه عصبی، انرژی ضربه، فولاد میکرو آلیاژی.

1- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

2- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

3- کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان.

*. نویسنده مسئول مقاله: monajati@gmail.com

بررسی و تحلیل تأثیر شرایط تولید بر مقاومت به ضربه فولادهای...

پیشگفتار

انتقال نفت و گاز خام از راه خطوط لوله یکی از اقتصادی‌ترین راههای ممکن است. افزایش ظرفیت انتقال همراه با ایمنی و جلوگیری از ترک ترد یا نرم لوله از مهم‌ترین اهداف در صنایع لوله سازی جهت خطوط نفت و گاز است. بمنظور دستیابی به این هدف بیش‌تر از فولادهایی تحت استاندارد API استفاده می‌شود که از خانواده فولادهای $HSLA^1$ می‌باشند و در صنایع فولاد سازی نیز اصطلاحاً و به طور اختصار با همین نام API شناخته می‌شوند.

با افزایش فشار کاری و قطر لوله، ظرفیت انتقال نفت و گاز افزایش می‌یابد. افزایش فشار کاری و قطر لوله با افزایش استحکام لوله یا ضخامت امکان‌پذیر است [1-3]. با افزایش قطر، وزن لوله افزایش می‌یابد. اگر لازم باشد وزن لوله در یک قطر ثابت، 50٪ کاهش یابد، لازم است استحکام تسلیم دو برابر شود. این کاهش وزن باعث کاهش زیاد هزینه‌ها می‌گردد. این فولادها بایستی با داشتن همزمان استحکام تسلیم و نهایی بالا از مقاومت به ضربه بالایی برخوردار باشند. سابقه تولید این فولادها در ایران به صورت انبوه شامل گریدهای X42، X52 و گرید B می‌باشد. تلاش‌هایی برای تولید گریدهای بالاتر همچون API-X60 منجر به تولید محصولی با ویژگی کششی مد نظر مصرف کننده شده است، ولی به دلیل ویژگی‌های ضربه این گرید، قابل دسترسی نبوده است. عوامل متعددی بر ویژگی‌های ضربه تأثیر گذارند، ولی به طور مشخص و دقیق مقدار اثرگذاری و نوع تأثیر این علل اثبات نشده است.

در سال‌های گذشته تلاش بسیاری انجام شده است تا تمامی این پارامترها به صورت مدل‌های ریاضی ارایه شوند، ولی متأسفانه تاکنون مدلی مناسب ارایه نشده است. برای غلبه بر این مشکل، در این پژوهش از شبکه عصبی استفاده شده است. شبکه عصبی بر اساس دریافت حجم زیادی از داده‌ها و ایجاد یک ارتباط منطقی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ایجاد می‌شود و توانایی تصحیح یا حتی جایگزینی فرمول‌های ریاضی را دارد. با استفاده از شبکه

عصبی و توسعه آن می‌توان شرایطی از تولید را طراحی و پیش‌بینی کرد که بتوان ویژگی‌های نهایی لازم برای تولید فولاد API-X60 یا حتی بالاتر را در فولاد بهبود بخشید. در این پژوهش با گرد آوری داده‌های تولیدی به عنوان شاخص‌های ورودی و نتایج آزمون ضربه در $20^\circ C$ به عنوان شاخص خروجی استفاده شده است.

روش پژوهش

داده‌های آزمایشگاهی

مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار در ویژگی‌های ضربه فولادهای API، ترکیب شیمیایی و پارامترهای نورد گرم می‌باشد [4-5]. نورد گرم این فولادها در دو مرحله کلی نورد خشن و نورد نهایی انجام می‌گیرد. نورد خشن در دو قفسه نورد به صورت رفت و برگشتی و در طی 6 پاس انجام می‌گیرد. در ادامه، شمش به قفسه‌های نورد نهایی وارد می‌شود که شامل هفت قفسه نورد پیاپی است. سپس طول یک میز خنک کن را همراه با پاشش آب طی کرده و وارد کلاف پیچ می‌شود. برای مدل کردن اثر این پارامترها، داده‌های ثبت شده فولاد API X60 در 122 نمونه مورد بررسی قرار گرفت. در جدول 1 مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در مراحل تولید (با حروف اختصاری) و مقادیر کم‌ترین، بیش‌ترین، میانگین و انحراف معیار آنها در نمونه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. همان گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، 33 پارامتر به عنوان داده‌های ورودی به شبکه هوشمند مورد استفاده قرار گرفته است (توضیح اینکه در بخش ترکیب شیمیایی، درصد تک تک عناصر و هم‌چنین، جمع‌ها و نسبت‌های مشخص شده هر کدام به صورت یک پارامتر جداگانه در نظر گرفته شده است). خروجی شامل میانگین سه بار آزمون ضربه در دمای $20^\circ C$ می‌باشد. این دما شرایط آزمایشی است که مشتری به آن نیاز دارد.

ویژگی‌های شبکه عصبی

یک شبکه عصبی مصنوعی^۲ ایده‌ای است برای پردازش داده‌ها که از سامانه عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش داده‌ها می‌پردازد. عنصر

¹ - High Strengh Low Alloy

² -Artificial Neural Network (ANN)

لایه با 19 نرون به ترتیب برابر 0/49 و 0/53 است. چگونگی بکارگیری داده‌های ورودی، تعداد لایه‌ها و داده‌های خروجی در شکل 1 نشان داده شده است. مقایسه بین داده‌های پیش‌بینی و محاسبه شده برای آزمون ضربه در شکل 2 نشان داده شده است.

نتایج و بحث

در بررسی نتایج بدست آمده از این پژوهش مشخص شد که مهم‌ترین پارامترهای تولیدی اثرگذار بر ویژگی‌های ضربه شامل مقادیر کربن و نیوبیوم، دمای ورودی به پاس اول نورد نهایی (FT1)، مقدار کرنش در پاس آخر نورد نهایی، دمای پاس آخر نورد نهایی (FT7) و دمای کلاف پیچی می باشد که در ادامه به بررسی هر کدام پرداخته می شود.

تأثیر مقدار کربن و نیوبیم

پارامترهای گوناگونی بر انرژی ضربه تأثیر می‌گذارد. این پارامترها با تأثیر بر ریزساختار باعث تغییر در انرژی ضربه می‌شوند. کاهش کربن باعث کاهش درصد حجمی پرلیت می‌شود. از سوی دیگر، بر اساس پژوهش‌های انجام شده، با کاهش کربن امکان تشکیل ذرات فاز ثانویه و آستنیت باقی‌مانده کاهش یافته و در نتیجه، انرژی ضربه افزایش می‌یابد [9-10]. هم‌چنین، نیوبیم به دلیل اینکه باعث به تأخیر افتادن تبلور دوباره در آستنیت تغییر شکل یافته و هم‌چنین، رسوب سختی می‌شود، به گونه متناوب در فولادهای خط لوله بکار می‌رود. افزایش نیوبیم تا 0/1 درصد وزنی باعث افزایش انرژی ضربه می‌شود. نیوبیم یکی از قوی‌ترین عناصر تشکیل دهنده کربونیتريد می‌باشد [11-12]. کربونیتريد نیوبیم ممکن است در حین استحاله در آستنیت و یا پس از کامل شدن استحاله در فریت رسوب کند. در حالت محلول، نیوبیم دمای Ar_3 و نرخ جوانه‌زایی فریت را کاهش می‌دهد. بنابراین، منحنی CCT را به زمان‌های طولانی‌تر و دماهای پایین‌تر سوق می‌دهد [12].

در این پژوهش بر اساس ستون آخر جدول 1 شاخص‌های گوناگون تولیدی و محدوده تغییرات کربن از 0/146 تا 0/061 درصد وزنی و تغییرات نیوبیم از

کلیدی این ایده، ساختار جدید سامانه پردازش داده‌هاست. این سامانه از شمار زیادی عناصر پردازشی به هم پیوسته تشکیل شده (نرون) که برای حل یک مسأله با هم هماهنگ عمل می‌کند. ANNها، نظیر انسان‌ها با مثال یاد می‌گیرند. یک ANN برای انجام وظیفه‌ای مشخص، مانند شناسایی الگوها و دسته بندی داده ها، در طول یک پروسه یادگیری، تنظیم می‌شود [7].

در بسیاری از مسایل پیچیده ریاضی که به حل معادلات بفرنج غیر خطی منجر می‌شود، یک شبکه عصبی چند لایه می‌تواند به سادگی با تعریف اوزان و توابع مناسب مورد استفاده قرار گیرد. توابع فعالیت گوناگونی به فراخور اسلوب مسأله در نرون‌ها بکار می‌روند. در این نوع شبکه‌ها از یک لایه ورودی جهت اعمال ورودی‌های مسأله، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی که در نهایت پاسخ‌های مسأله را ارائه می‌کنند، استفاده می‌شود.

تأثیر تعداد لایه‌های مخفی و نورون‌های هر لایه بر دقت شبکه به گونه‌ای گسترده بررسی شده است [7]. عموماً دو تابع متفاوت برای بررسی خطای شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شود. این دو تابع شامل Etr (اختلاف بین داده‌های واقعی و محاسبه شده) و Etest (اختلاف بین داده‌های واقعی و محاسبه شده که در آموزش شبکه بکار نرفته است) می‌باشد. دو سامانه شبکه عصبی در این پژوهش بکار گرفته شده است. نخستین سامانه شامل یک لایه مخفی (SL) است که با تغییر تعداد نرون‌ها از 5 تا 30 مورد بررسی قرار گرفت. سامانه شامل 19 نرون با مقادیر Etr (اختلاف بین داده های واقعی و محاسبه شده) و Etest (اختلاف بین داده های واقعی و محاسبه شده که در آموزش شبکه به کار نرفته است) به ترتیب برابر 1/49 و 3/53 بدست آمد. در سامانه دیگر از دو لایه مخفی استفاده می‌شود (2L). بررسی‌های پژوهشگران دیگر نشان می‌دهد که مدل دو لایه برای شبکه BP (back-propagation) دارای خطایی کمتر است [7-8]. مقادیر Etr و Etest برای هر دو مدل نسبت به تعداد نورون‌های متفاوت برای آزمون ضربه محاسبه شده و دیده شد که مدل دو لایه مخفی دارای خطای کمتری است. با افزایش نرون تا 19 این مقدار کاهش می‌یابد و پس از آن خطا افزایش می‌یابد. مقادیر Etr و Etest برای سامانه دو

انجام نشده و با افزایش کرنش اندازه دانه فولاد کاهش یافته است که این خود باعث افزایش انرژی ضربه می‌شود. این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارد.

تأثیر دمای پایانی نورد گرم و دمای کلاف پیچی

برای بررسی تأثیر دمای کلاف پیچی (CT) و آخرین پاس نورد گرم (FT) از داده‌های ستون آخر جدول 1 استفاده شده است. بر اساس شکل 5 تغییرات انرژی ضربه با دمای CT ارتباط عکس دارد، به گونه‌ای که با کاهش این دما انرژی ضربه افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که مناسب‌ترین دما برای دمای نهایی نورد گرم بین $800-840^{\circ}\text{C}$ و برای کلاف پیچی 560°C می‌باشد. علت افزایش انرژی ضربه با کاهش دمای کلاف پیچی به نرخ خنک کاری مربوط می‌شود؛ در زیر این دما منطقه دو فاز است. نورد شدن در منطقه دو فاز به منزله تشکیل فریت در کنار آستنیت است. این دو ریزساختار در کنار هم پس از سرد شدن تشکیل ساختارهایی متفاوت و اندازه دانه متفاوت می‌کنند. در نتیجه، خواص به شدت افت می‌کند، ولی با افزایش نرخ خنک کاری ساختارهایی همچون فریت سوزنی تشکیل شده و همچنین، دانه‌ها ریزتر می‌شوند. این تغییرات ریزساختاری منجر به افزایش انرژی ضربه می‌شود [18-20].

نتیجه‌گیری

- با توسعه شبکه عصبی و استفاده از 33 پارامتر موثر تولیدی چون ترکیب شیمیایی، شرایط نورد گرم مقاومت به ضربه فولاد API X60 پیش‌بینی شده است. این نتایج با داده‌های واقعی همخوانی دارد.
- بر اساس نتایج بدست آمده مدل دو لایه مخفی دارای خطای کم‌تری است و با افزایش نوروں تا 19 این مقدار کاهش می‌یابد.
- بیش‌ترین انرژی ضربه در نمونه فولاد API-X60 حاوی 0/06 درصد وزنی کربن و 0/04 درصد وزنی نیوبیم بدست آمد.
- بر اساس نتایج بدست آمده مقدار کرنش آخرین پاس نورد نهایی تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های

0/001 تا 0/05 درصد وزنی انتخاب شده است. در شکل 3 تأثیر مقدار کربن و نیوبیم بر انرژی ضربه، نشان داده شده است. در این شکل کاملاً آشکار است که با افزایش کربن انرژی ضربه کاهش می‌یابد. علت کاهش انرژی ضربه با افزایش احتمال حضور آستنیت باقیمانده بیش‌تر شده و در نتیجه، می‌تواند باعث تشکیل مناطقی از مارتنزیت و یا سمنتیت شود و در نهایت، چقرمگی کاهش می‌یابد. در این حالت به علت تولید ریزساختار فریت نرم و مارتنزیت پراکندگی خواص وجود دارد [13-14]. بر اساس شکل 3 با افزایش نیوبیم تا 0/04 درصد وزنی، انرژی ضربه افزایش یافته و با افزایش مقدار نیوبیم به مقادیر بالاتر، انرژی ضربه کاهش می‌یابد. این کاهش به علت ثابت بودن دمای نهایی نورد گرم است. همان‌گونه که گفته شد، با کاهش دمای Ar_3 دمای نهایی نورد گرم بایستی کاهش یابد. با افزایش دمای نورد نهایی ویژگی‌های ضربه کاهش می‌یابد و این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت دارد.

تأثیر دمای ورودی به نورد نهایی و آخرین کرنش در نورد خشن

انتخاب دمای ورودی به نورد نهایی و محدوده دمایی که ورق وارد نورد نهایی می‌شود، از جمله موثرترین پارامترها بر ریزساختار است. کیم و همکارانش نشان داده‌اند که برای بدست آوردن ساختار ریز دانه باید نورد نهایی در زیر دمای تبلور دوباره انجام گیرد [15]. در این ناحیه به دلیل اینکه تبلور دوباره رخ نمی‌دهد، در حین نورد دانه‌ها کشیده شده و دانسته نابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش شمار پاس‌های نورد، کرنش اعمالی بیش‌تر شده و باعث افزایش مکان‌های بالقوه جوانه‌زنی برای دانه‌های فریت پس از عبور از دمای یوتکتوئید می‌شود. در نتیجه، دانه‌های فریت ریز شده و انرژی ضربه افزایش می‌یابد [14-17].

در این پژوهش بر اساس ستون آخر جدول 1 دمای ورودی به نورد نهایی (FT_1) 970°C و آخرین کرنش در نورد خشن (FS_7) 5/4 انتخاب شده است. بر اساس شکل 4 با افزایش کرنش و کاهش دما، انرژی ضربه افزایش یافته است. با توجه به مطالب عنوان شده در بالا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در زیر دمای 1050°C تبلور دوباره

قدردانی و تشکر

داده‌های بکار رفته در این پژوهش در قالب پروژه پژوهشی انجام شده برای مجتمع فولاد مبارکه بدست آمده که بدین وسیله از کلیه مدیران و پرسنل محترم واحدهای مربوطه از جمله نورد گرم، متالورژی و روش‌های تولید و همچنین، از مدیریت پژوهش و توسعه و واحد متالورژی و روش‌های تولید که در انجام این پژوهش مشارکت فعال داشتند، قدردانی و تشکر می‌گردد.

منابع

- 1- D. Ravi Kumar, "Formability analysis of extra-deep drawing steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130, pp. 31-41, 2002.
- 2- S. Yong Shin, B. Hwang, S. Lee, N. J. Kim, S. Ahn, "Correlation of microstructure and Charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 458, pp. 281-289, 2007.
- 3- B. Hwang, Y. Min Kim, S. Lee, N. J. Kim, S. Ahn, "Effective Grain Size And Charpy Impact Properties Of High-Toughness X70 Pipeline Steels", *Metallurgical And Materials Transactions A*, Vol. 36, pp. 2107-21014, 2007.
- 4- S. Mishra, "On the formability of sheet steels", *Material. Science*, Vol. 19, pp. 963-984, 1996.
- 5- A. Kumar Gupta, D. Ravi Kumar, "Formability of galvanized interstitial-free steel sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 225-237, 2006.
- 6- N.S. Reddy, J. Krishnaiah, S. Hong, J. Sang Lee, "Modeling medium carbon steels by using artificial neural networks", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 508, pp. 93-105, 2009.
- 7- Y. Sun, W. Zeng, Y. Han, "Determination of the influence of processing parameters on the mechanical properties of the Ti-6Al-4V alloy using an artificial neural network", *Computational Materials Science*, Vol. 60, pp. 239-244, 2012.
- 8- W. Tan, Z.Y. Liu, D. Wu, G.D. Wang, "Artificial Neural Network (ANN) Modeling for the Energy Absorption of Hot-Rolled Plates in Charpy Impact Tests",

ضربه فولاد API-X60 با ترکیب شیمیایی عنوان شده دارد به گونه ای که با افزایش کرنش اعمالی انرژی ضربه افزایش می‌یابد.

■ در فولاد API-X60 با ترکیب شیمیایی عنوان شده، دمای مناسب برای نورد نهایی، کلاف پیچی و دمای ورودی به نورد نهایی به ترتیب 560، 970 و 840 درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, Vol. 4, pp. 37-46. 2005.

9- M. A. Akoy, E. S. Kayali, H. Cimenoglu, "The influence of microstructural features and mechanical properties on the cold formability of ferritic steel sheets", *ISIJ International*, Vol. 44, pp. 422-428, 2004.

10- R. K. Ray, J. J. Jonas, R. E. Hook, "Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels", *International Materials Reviews*, Vol. 39, pp. 129-172, 1994.

11- Z. Tang, W. Stumpf, "The Effect of microstructure and processing variables on the yield to ultimate tensile strength ratio in a Nb-Ti and a Nb-Ti-Mo line pipe steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 490, pp. 391-402, 2008.

12- A. J. DeArdo, "Niobium in modern steels", *International Materials Reviews*, Vol. 48, No. 6 371, 2003.

13- M. Olasolo, P. Uranga, J.M. Rodriguez-babe, B. López, "Effect of austenite microstructure and cooling rate on transformation characteristics in a low carbon Nb-V microalloyed steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 2559-2569, 2010.

14- J. Sun, J.D. Boyd, "Effect of thermomechanical processing on anisotropy of cleavage fracture stress in microalloyed linepipe steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77, pp. 369-377, 2000.

15- B. Hwang, Y. Min Kim, S. Lee, N. J. Kim, S. Ahn, "Effect of Microstructure on the Yield Ratio and Low Temperature Toughness of Line pipe Steels", *ISIJ International*, Vol. 42, pp. 1571-1577, 2002.

16- V. V. Basabe, J. J. Jonas, "The Ferrite Transformation in Hot Deformed 0.036% Nb

Austenite at Temperatures above the Ae₃", ISIJ International, Vol. 50, pp. 1185–1192, 2010.

17- P. A. Manohaard, T. Chandra "Continuous cooling Micro alloyed steels transformation for behavior of high strength line pipe applications", ISIJ International, Vol. 38, pp. 766-774, 1996.

18- M. C. Zhao, K. Yang, F. R. Xiao, Y. Y. Shan, "Continuous cooling transformation of undeformed and deformed low carbon pipeline

steels", Materials Science and Engineering A, Vol. 355, pp. 126-136, 2003.

19- j. C. Muñoz, I. H. Jung, A.M. Elwazria, D. Baib, S. Y ue, "Influence of the chemical composition on transformation behavior of low carbon micro alloyed steels", Materials Science and Engineering A, Vol. 520, pp. 90–96, 2009.

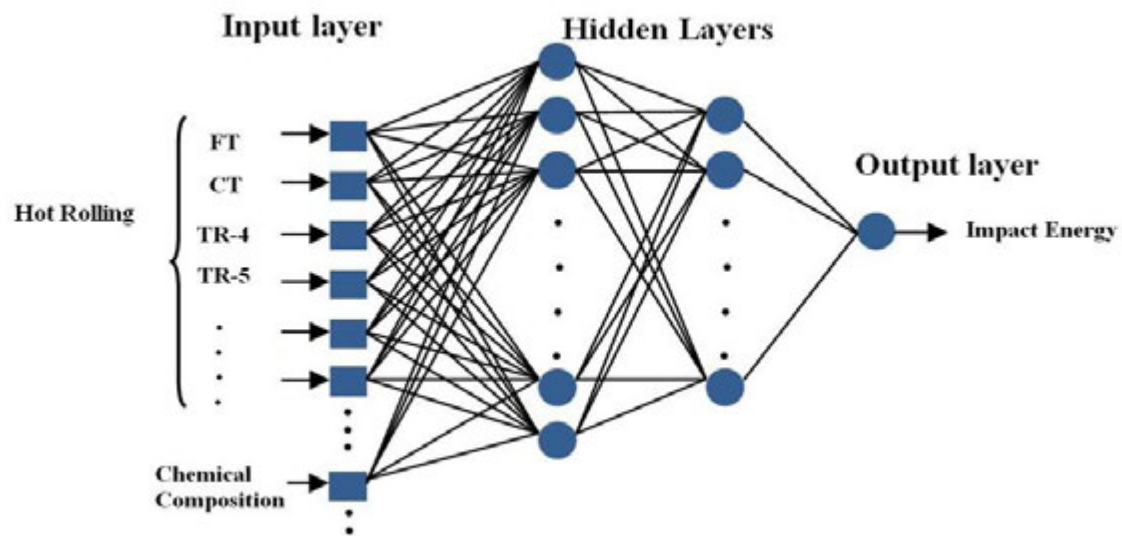
20- K. WU, Z. LI, A. M. GUO, L.Cheng, "Microstructure Evolution in a Low Carbon Nb–Ti MicroalloyedSteel", ISIJ International, Vol. 46, pp. 161–165, 2006.

پیوست‌ها

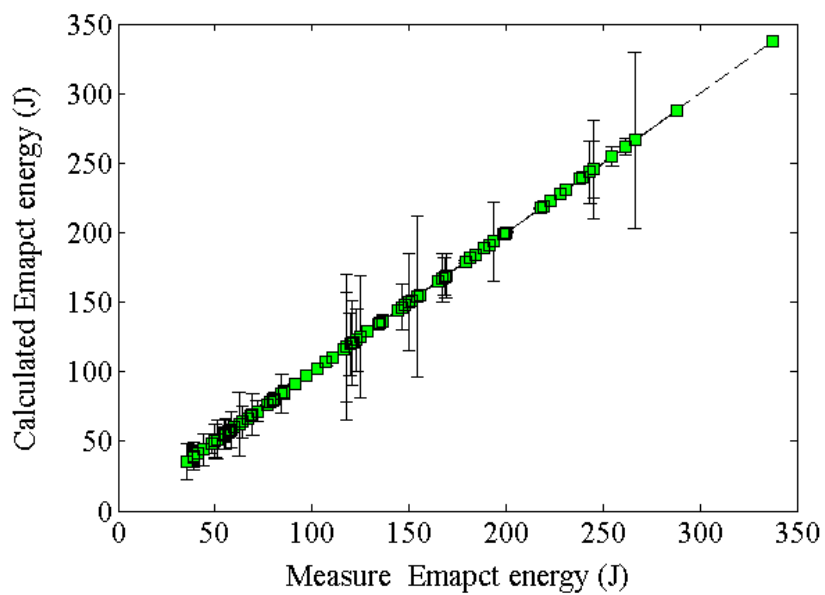
جدول 1- حدود تغییرات پارامترهای فرآیندی مورد بررسی

پارامترها	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف استاندارد	مقدار مورد استفاده
ترکیب شیمیایی					
C, wt%	0/061	0/146	0/094	0/026	0/052
Si, wt%	0/2	0/6	0/180	0/0268	0/0090
Mn, wt%	0/85	1/8	1/21	0/0907	0/1800
Al, wt%	0/035	0/06	0/034	0/0024	0/0520
N, ppm	22	58	35/92		27
Ti+V+Nb+Cu, wt%	0/01	0/1	5/05		1/09
Ni+Cr+Mo, wt%	0/03	0/06	0/045		/05
Nb, wt%	0/001	0/05	0/016	0/01	0/022
نورد خشن (رفت و برگشتی)					
RT 4, °C	1000	1100	1076	227/56	1050
RT 6, °C	1036	1105	1085	97/65	1086
RSR 4, 1/S	9/71	35/3	16/9	8/8	13/56
RSR 5, 1/S	9/82	44/67	19/95	15/2	14
RSR 6, 1/S	14/32	35	15/5	14/3	12/2
RS 4	5/5	11/47	6/6	0/92	6/5
RS 5	8/9	11	10/48	5/09	10/6
RS 6	9/71	11/68	11/4	3/36	11/48
نورد نهایی (هفت قفسه‌ای)					
FSR 5	12/23	23/5	21/48	6/04	14/28
FSR 6	10/41	20/97	17/84	9	13/3
FSR 7	7/83	10/87	7/86	4/64	5/4
FS 5	1/04	22/9	16/15	8	12/13
FS 6	1/08	12/18	8/25	2/5	6/7
FS 7	1/9	15/13	9/96	6/06	5/6
FT ₁ , °C	935	1031	974	138/87	970
FT ₇ , °C	790	910	877/4	11/20	860
CT, °C	540	650	578/3	14/9	582

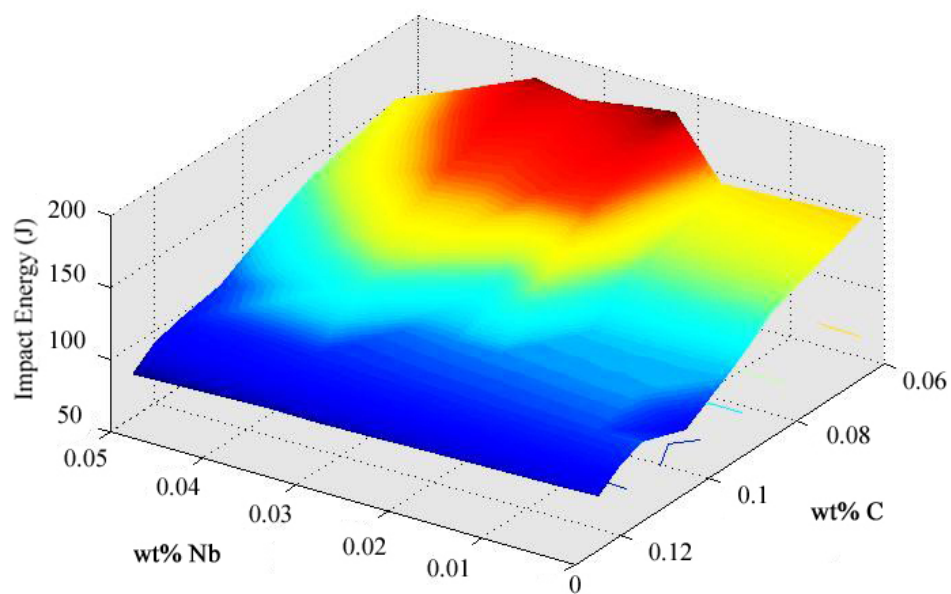
RT: Roughing Temperature, RSR: Roughing Strain Rate, RS: Roughing Strain, FSR: Finishing Strain Rate FS: Finishing Strain, FT: Finishing Temperature, CT: Coiling Temperature



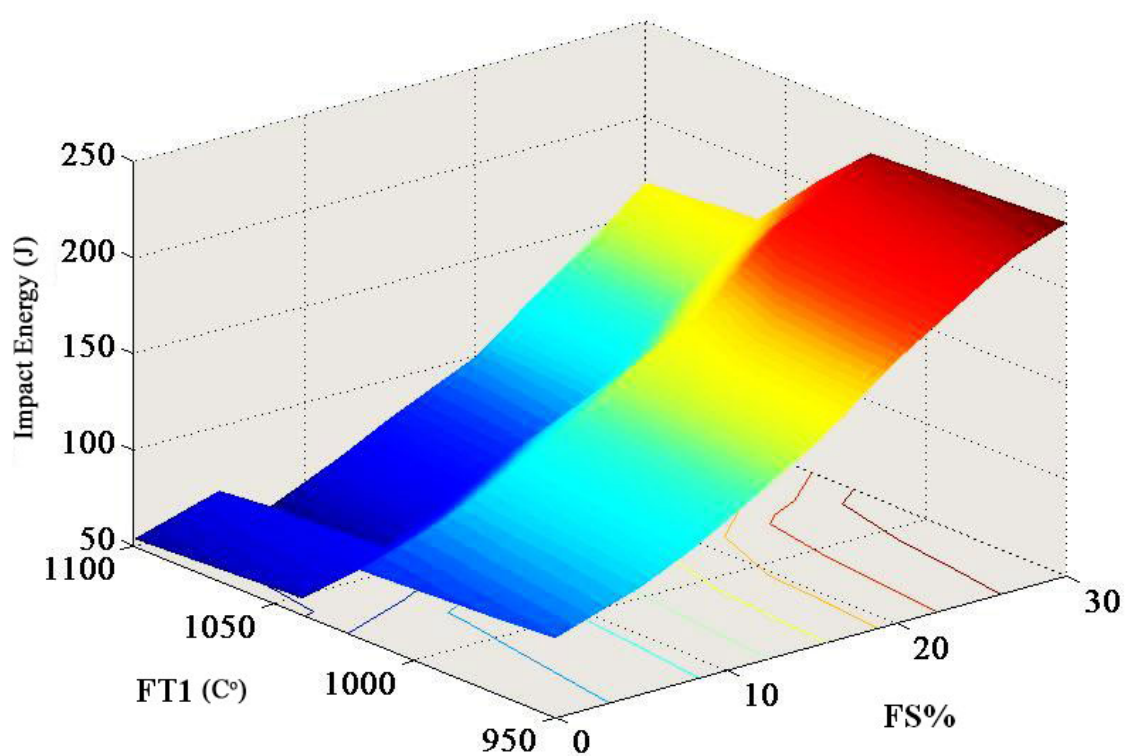
شکل 1- چگونگی فرار گیری لایه مخفی، داده‌های ورودی و خروجی



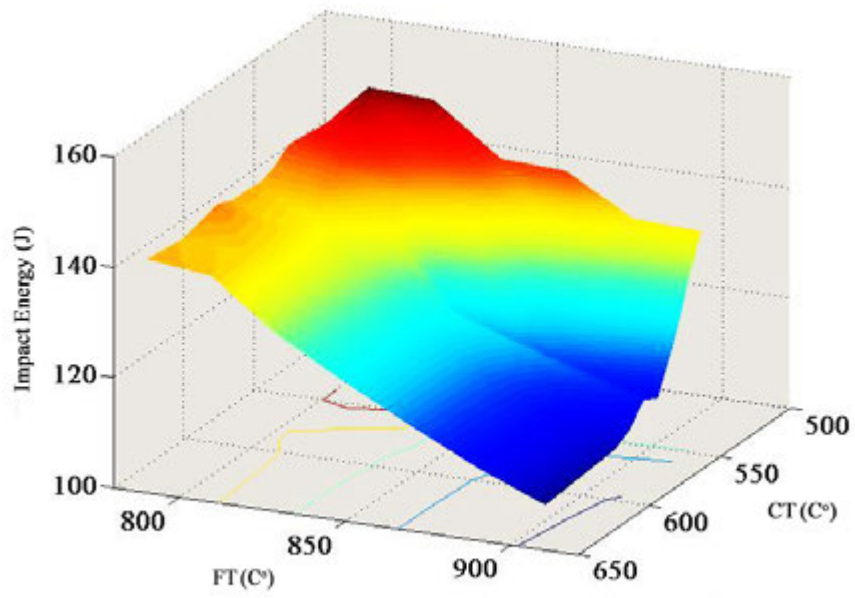
شکل 2- مقایسه بین داده‌های پیش بینی و محاسبه شده برای آزمون ضربه



شکل 3- تأثیر مقدار کربن و نیوبیم بر روی انرژی ضربه



شکل 4 - تأثیر دمای ورودی به نورد نهایی و آخرین کرنش در نورد نهایی بر روی انرژی ضربه



شکل 5 - تاثیر دمای پایانی نورد گرم و دمای کلاف پیچی بر انرژی ضربه