

استفاده از سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی برای پیش بینی خواص مکانیکی فولاد CK45 در نورد گرم

چکیده: فرآیند نورد یک فرآیند مهم تولید می باشد که می تواند علاوه بر عمل تولید بر روی خواص مکانیکی فولادها هم تأثیر بگذارد. هدف از این تحقیق، پیش بینی استحکام نهایی فولاد CK45 بر اساس پارامترهای فرآیند نورد گرم می باشد که به خاطر هزینه بالای عملیات نورد می تواند سبب کاهش هزینه ها و صرفه جویی در زمان تولید قطعات تولیدی شود. جهت انجام تحقیق، عملیات نورد گرم و سپس کوئنچ در دو محیط مختلف بر روی CK45 انجام شد. نمونه ها در دماهای مختلف نورد و در سرعت های غلطک متفاوت، تحت کرنش های یکسان قرار گرفته و سپس در دو محیط مختلف آب یخ و هوا تا دمای هوای اتاق به سرعت سرد شدند. پس از عملیات کوئنچ، نمودار تنش-کرنش و استحکام نهایی آنها با استفاده از یک دستگاه کشش بررسی شد. در مرحله بعد با استفاده از روش سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) مدلی برای پیش بینی استحکام نهایی فولادها بر اساس دو پارامتر دمای نورد و سرعت غلطک ها با استفاده از نرم افزار MATLAB ایجاد شد. سرعت غلطک و دمای نورد به عنوان ورودی و استحکام نهایی به عنوان خروجی به سیستم داده شد و پس از آموزش مدل نتایج بررسی گردید. مقایسه نتایج پیش بینی شده و اندازه گیری شده نشان داد که روش ANFIS می تواند نتایج را با دقت بالایی پیش بینی کند.

واژه های راهنما: نورد گرم، ANFIS، پارامترهای نورد، CK45

آیدین سلیمی اصل*
استادیار،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه پیام نور، تهران

اسماعیل صیدی
استادیار،
مهندسی مکانیزاسیون
دانشگاه پیام نور، تهران

مجتبی مروج
استادیار،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه پیام نور، تهران

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

Aydin Salimiasl*
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, University of
Peyame Noor, Tehran

Esmail Seidy
Assistant Professor,
Department of t of
Mechanization
Engineering, University of
Peyame Noor, Tehran

Mojtaba Moravej
Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, University of
Peyame Noor, Tehran

Using of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) for prediction the mechanical properties of CK45 hardness in hot rolling process

Abstract: Rolling is one of the most important manufacturing processes which can simultaneously effect on the mechanical properties of the steels. This is because of rolling effect on the grain size of the steel which in turn can change the mechanical properties. The aim of this research is to predict the ultimate strength of CK45 steel based on the rolling parameters which can decrease the operation costs and processing time of the rolling process. For conducting the research, the hot rolling operation and quenching in two different environments was carried out on CK45 steel. The samples were rolled under the same reduction percentage and in three temperatures and three rotational speeds of work-rolls. They were then quickly cooled down in room atmosphere and cold water and the ultimate strengths were measured by tensile testing machine. A prediction model was then designed using of an adaptive neuro fuzzy system based on the input parameters including rolling temperature and rotational speeds of the rollers in MATLAB program. The temperature and the rotational speeds were considered as the inputs and the measured ultimate strengths in two air and water environments were considered as the output of the ANFIS model. Comparing the measured and predicted results showed that the ANFIS model can predict the results with high accuracy.

Keywords: Hot rolling, ANFIS, Rolling parameters, CK45

۱- مقدمه

نیکان و همکارانش در پژوهش خود تأثیر پارامترهای مختلف نورد گرم را بر روی فولادهای دوفازی با و بدون عنصر نیویوم بررسی کرده‌اند. بر اساس این تحقیق دمای نورد و نرخ کرنش تأثیر محسوسی بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار دارند [۶]. ماندانا و همکارانش [۷] در تحقیقی که در آن تأثیر نورد گرم بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای با کربن کم و کربن بالا انجام دادند به این نتیجه رسیدند که نورد گرم یک روش عالی برای از بین بردن پیر سختی، لوله‌ای شدن و طولانی شدن نقطه تسلیم در این فولادها می‌شود. پیترو و همکارانش [۸] در تحقیقی تأثیر پارامترهای نورد گرم مثل نرخ کرنش و دمای نورد را بر روی فولاد St60Mn بررسی کرده‌اند. در این تحقیق استحکام کششی، استحکام تسلیم، سختی، مدول الاستیسیته، چقرمگی، خمش و درصد کاهش مساحت محصولات نورد اندازه‌گیری شدند. تحقیق نشان داد که پارامترهایی مثل نرخ کرنش و دمای نورد تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی این فولاد دارد.

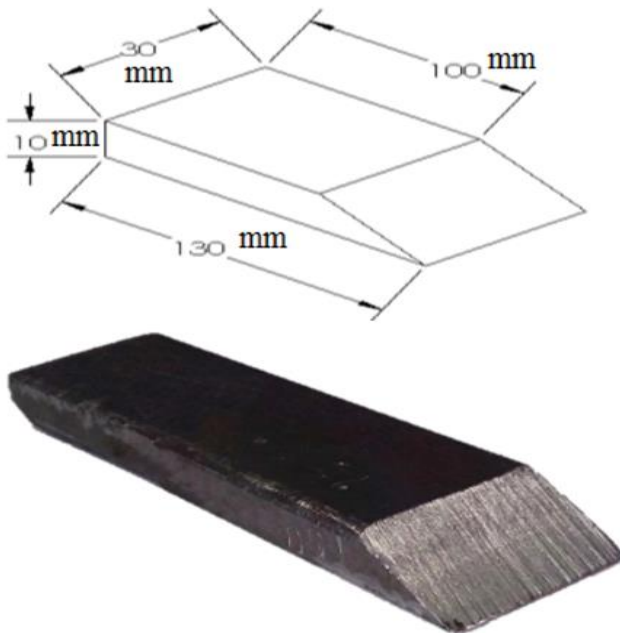
با توجه به زمان بر بودن و هزینه بر بودن فرایند نورد استفاده از ابزاری برای پیش‌بینی تأثیر پارامترهای نورد بر روی خواص مکانیکی در تعداد زیاد پارامترها از اهمیت خاصی برخوردار است. عبدالشکور محمد جایا همکاران در تحقیق خود روشی تازه برای پیش‌بینی سختی پوشش TiAlN با استفاده از سیستم نور-فازی تطبیقی انجام دادند [۹]. خلجی و همکاران از روش ANFIS برای پیش‌بینی سختی ۵ نمونه از فولاد استفاده کردند [۱۰]. Ly و همکاران از روش ANFIS برای پیش‌بینی استحکام کششی بتن استفاده کردند [۱۱]. زارع و همکاران از روش شبکه‌های عصبی و ANFIS برای پیش‌بینی استحکام تسلیم و استحکام نهایی پیش‌آلیاژ مولیبدن فشرده استفاده کردند [۱۲]. یدالهی و همکاران در تحقیقی دیگر روش ANFIS را برای پیش‌بینی استحکام فشاری یک کامپوزیت پلیمری به کار گرفته‌اند [۱۳]. کیان و همکاران در پژوهش خود از روش یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خواص مکانیکی چند فولاد پس از عملیات نورد استفاده کردند [۱۴]. نتایج نشان داد که درصد خطای پیش‌بینی بین ۲/۳۶ تا ۱۶/۲ درصد می‌باشد. مهدی سلیمانی و همکاران [۱۵] از روش شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی سختی قطعات تولیدی از جنس فولاد St37 در عملیات نورد پیچ استفاده کردند. نتایج پیش‌بینی قابل قبول اعلام شده است. هاوو و همکاران در پژوهش خود خواص مکانیکی یک فولاد با ترکیب شیمیایی مشخص را بعد از عملیات نورد پیش‌بینی کرده‌اند. در این تحقیق از شبکه‌های عصبی استفاده شده است و ورودی مدل هم شامل پارامترهای فرآیند و هم شامل ترکیب شیمیایی فولاد می‌باشد [۱۶].

یکی از مهمترین روش‌های تولید مواد فولادی فرآیند نورد می‌باشد که بیش از ۸۰٪ از فرآورده‌های فلزی در جهان با این روش تولید می‌شود [۱]. از میان انواع مختلف فرآیندهای نورد، نورد تخت از پرکاربردترین فرآیندها است، به طوری که در کشورهای صنعتی ۴۰ تا ۶۰ درصد محصولات حاصل از فرآیندهای مختلف نورد، به وسیله نورد تخت ایجاد می‌شود [۱، ۲].

فرآیند نورد ممکن است به صورت گرم یا سرد انجام پذیرد که برگزیدن روش به نوع، اندازه، ویژگی‌های ماده و شکل پایانی و انتظارات تولیدکنندگان از فرآورده بستگی دارد. در روش نورد گرم شکل‌دهی در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد انجام می‌پذیرد که از مزایای آن نسبت به روش سرد می‌توان به ایجاد تغییر شکل‌های بالا، توان و نیروی اعمالی کمتر، اخذ خواص همسانگرد در ریزساختار محصول نهایی و عدم وقوع پدیده کار سختی در محصول نهایی اشاره کرد [۲].

یکی دیگر از مزایای بسیار مهم عملیات نورد گرم بهبود خواص مکانیکی قطعه تولیدی به این روش است. برای ایجاد کیفیت مناسب فرآورده، پارامترهای مختلف مکانیکی، سطحی، دمایی و متالورژیکی می‌بایست تحت کنترل دقیق باشند. این کنترل‌ها برای فولادهای مختلف متفاوت بوده و برای هر کدام از آن‌ها برنامه کنترل جداگانه‌ای می‌بایست در نظر گرفته شود. از این رو می‌توان گفت که یکی از مؤثرترین روش‌ها برای ارتقاء خواص مکانیکی فولادها انجام کنترل‌های لازم حین نورد آن‌ها است. اگر بتوان پارامترهای حاکم در فرآیند نورد را که عبارت‌اند از: دمای تغییر شکل، میزان کرنش اعمالی و نرخ کرنش را به خوبی کنترل کرد؛ آنگاه محصول به دست آمده دارای خواص مکانیکی بهتری خواهد بود که این خواص نیز به نوبه خود متأثر از ریزساختار آن فلز است [۳]. بنابراین فرآیند نورد یک روش استحکام‌بخشی هم به حساب می‌آید که این استحکام‌بخشی از طریق مواردی همچون ریز کردن دانه‌ها اتفاق می‌افتد. در بین روش‌های ریز کردن دانه‌ها، فرآیندهای تغییر فرم پلاستیکی شدید و عملیات ترمومکانیکی توسعه پیدا کرده و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام گرفته است [۴] که هر دو در مقایسه با روش نورد جزو روش‌های گران‌قیمت و زمان‌بر محسوب می‌شوند. لذا انتخاب نورد گرم برای کنترل پارامترهای ذکر شده می‌تواند عملیاتی کم‌هزینه‌تر و با سرعت بیشتری ارائه دهد [۴، ۵]. تحقیقات زیادی در سراسر جهان در مورد تأثیر پارامترهای نورد بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار فولادها انجام شده است.

کوره به کار برده شده در این پژوهش یک کوره مقاومتی شرکت آذر فرنیس^۱ با مدل F11L و با دمای اسمی 1250°C می باشد (شکل (۲)).



شکل ۱ نمونه آماده شده برای عملیات



شکل ۲ کوره مورد استفاده برای آستینیت کردن نمونه

با توجه به اهداف پژوهش، از دستگاه نورد موجود در دانشگاه صنعتی سهند استفاده شده است. نمایی از دستگاه نورد در شکل (۳) آورده شده است. قطر هر غلتک ۳۴ سانتی متر بوده و سرعت حرکت دستگاه در سرعت های مختلف بین ۱۰ تا ۲۰ دور بر دقیقه قابل تنظیم است.

هدف از تحقیق حاضر پیش بینی استحکام نهایی فولاد CK45 بر اساس پارامترهای عملیات نورد می باشد. از آنجاییکه عملیات نورد جز فرآیندهای گران و زمان بر می باشد، پیش بینی نتایج حاصل از فرآیند قبل از انجام عملیات می تواند سبب کاهش هزینه و هدررفت زمان و افزایش بهره وری در کارگاه های نورد گردد. برای این منظور نورد گرم و سپس کوئنچ در دو محیط مختلف بر روی CK45 انجام شد. نمونه ها در دماهای مختلف نورد و در سرعت های غلطک متفاوت، تحت کرنش های یکسان قرار گرفته و سپس در دو محیط مختلف آب یخ و هوا تا دمای هوای اتاق به سرعت سرد شدند. پس از عملیات کوئنچ، نمودار تنش-کرنش و استحکام نهایی آن ها با استفاده از یک دستگاه کشش بررسی شد. در مرحله بعد با استفاده از روش سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) مدلی برای پیش بینی استحکام نهایی فولادها بر اساس دو پارامتر دمای نورد و سرعت غلطک ها با استفاده از نرم افزار MATLAB ایجاد شد. سرعت غلطک و دمای نورد به عنوان ورودی و استحکام نهایی به عنوان خروجی به سیستم داده شد و پس از آموزش مدل نتایج بررسی گردید. مقایسه نتایج پیش بینی شده و اندازه گیری شده نشان داد که روش ANFIS می تواند نتایج را با دقت بالایی پیش بینی کند.

۲- مواد و روش ها

در این تحقیق جهت انجام عملیات تغییر شکل گرم، فولاد ساده کربنی CK45 به عنوان ماده اصلی همراه با پودر آلومینای ۰/۳ و ۰/۰۵ میکرون، نمد و محلول نایتال ۰/۲٪ مورد استفاده قرار می گیرد. ترکیب شیمیایی فولاد CK45 مورد استفاده در پژوهش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد CK45

| Element | Fe | S | P | Si | Mn | C |
|---------|--------|-------|------|------|------|------|
| % wt | بالانس | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۱ | ۰/۲۵ | ۰/۶۵ | ۰/۴۵ |

نمونه مورد استفاده ابتدا توسط دستگاه برش پلاسما به شکل مکعب مستطیل در آمده و سپس توسط برش سیمی به شکل دوزنقه با زاویه راس ۳۰ درجه، طول ۱۰۰ میلی متر، عرض ۳۰ و ارتفاع ۱۰ میلی متر تهیه شد. نمای شماتیک و واقعی از نمونه و مراحل آن در شکل (۱) آورده شده است.

^۱ Azar Furnac

طبق استاندارد ASTM E8-M04 در جهت موازی با نورد (به صورت عرضی) تهیه شدند [۱۷، ۱۸]. طرحواره نمونه‌های کشش آماده شده و ابعاد دقیق آن‌ها به ترتیب در شکل (۵) و جدول (۲) ارائه شده است.

آزمون کشش در دمای محیط و با نرخ کرنش $2/7 \times 10^{-4}$ بر ثانیه و توسط دستگاه کشش SANTAM انجام شد. نرم‌افزار این دستگاه، مقادیر استحکام کششی و تسلیم، ازدیاد طول به همراه منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها را ارائه می‌دهد. داده‌های حاصل توسط نرم‌افزار تحلیلی اوریجین^۱ مورد تحلیل قرار گرفته و نمودارهای تنش-کرنش، بیشترین استحکام نمونه‌ها بدست می‌آید.



شکل ۳ دستگاه نورد مورد استفاده برای عملیات

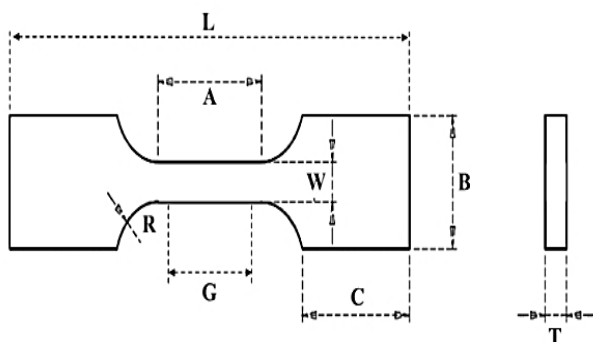
۲-۱- روش انجام آزمایش

پس از آماده کردن نمونه‌ها و برش پلاسمایی و سیمی آن‌ها، زوائد مربوط به برش پلاسمایی توسط سنگ‌زنی برقی زدوده شد تا نمونه به شکل منظم و به سطح مناسب برسد. سپس نمونه‌ها جهت عملیات آستنیته کردن به مدت ۱ ساعت درون کوره با دماهای مختلف قرار داده شدند. قبل از قرار دادن نمونه در کوره، ابتدا کوره با نرخ گرمایش آرام تا دمای ۶۵۰ درجه بالا برده شده و به مدت ۱ ساعت در این دما نگه‌داشته می‌شود. با رسیدن دمای کوره به ۶۵۰ درجه، نمونه به آرامی درون کوره قرار داده می‌شود. افزایش دمای کوره تا رسیدن به دمای مذکور با همان نرخ گرمایش انجام شده و با رسیدن به دمای موردنظر جهت توزیع یکنواخت دما در قطعه، کوره ۱ ساعت در این دما نگه‌داشته می‌شود، سپس نمونه جهت انجام فرآیند نورد از آن خارج شده و جهت جلوگیری از کاهش دمای نمونه، به سرعت تحت عملیات نورد قرار می‌گیرد. در مرحله نورد، نمونه توسط میله‌ی فولادی به آرامی به داخل غلتک هل داده می‌شود تا فرآیند نورد تنها یک پاس بر روی نمونه انجام گیرد. دستگاه نورد در این حالت با سرعت‌های مختلف و با فاصله ۳/۸ میلی-متری بین غلتک‌ها در حال چرخش است. در نتیجه با ورود نمونه به فاصله میان غلتک‌ها، عملیات نورد گرم در دماهای و سرعت‌های مختلف و با ۶۲٪ تغییر شکل پلاستیک انجام گرفته و نمونه از طرف دیگر خارج می‌شود. پس از خروج نمونه از دستگاه نورد، اجازه داده می‌شود تا نمونه در دو محیط هوا و آب یخ سرد شده و به دمای محیط برسد. در شکل (۴) نمونه در حال نورد نشان داده شده است.

برای تعیین خواص کششی نمونه‌ها از آزمون کشش استفاده گردید؛ به این ترتیب که ابتدا نمونه‌ها توسط وایرکات و



شکل ۴ نمونه در حال نورد



شکل ۵ نمونه کشش استاندارد

جدول ۲ ابعاد نمونه کشش طبق استاندارد ASTM E8-M04 (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

| L | A | G | W | T | C | B |
|-----|----|----|---|-----|----|----|
| ۱۰۰ | ۳۲ | ۲۵ | ۶ | ۲/۵ | ۳۰ | ۱۰ |

^۱ Origin

۳- سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی

لایه اول (گره‌های ورودی^۲): هر گره از این لایه، مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت تولید می‌کند.

$$O_j = \mu_{A_j}(x); \quad j = 1 \text{ و } 2 \dots$$

$$O_i = \mu_{B_i}(y); \quad i = 1 \text{ و } 2 \dots$$

که X و Y ورودی‌های غیرفازی به گره و A_i و B_i (کوچک، بزرگ و ...)، برچسب‌های زبانی هستند که به ترتیب با توابع عضویت مناسب μ_{A_i} و μ_{B_i} مشخص می‌شوند. O_j و O_i توابع خروجی را نشان می‌دهند.

لایه دوم (گره‌های قاعده^۳): در لایه دوم، عملگر "و" (AND) به کار برده می‌شود تا خروجی (قوه اشتعال^۴) که نمایانگر بخش مقدم آن قانون است، بدست می‌آید. قوه اشتعال به مقدار درجه‌ای که بخش مقدم یک قانون فازی برآورده شده، گفته می‌شود و به تابع خروجی آن قانون شکل می‌دهد. از این رو، خروجی‌های O_{2,i} این لایه، حاصل ضرب درجات مربوط به لایه اول هستند.

$$O_{2,ji} = w_i = \mu_{A_j}(x) \cdot \mu_{B_i}(y); \quad i = 1 \text{ و } 2 \dots$$

لایه سوم (گره‌های متوسط^۵): هدف اصلی در لایه سوم، تعیین نسبت هر قوه اشتعال^۴ آمین قانون به مجموع همه قوه اشتعال قوانین می‌باشد. در نتیجه \bar{w}_i به‌عنوان قوه اشتعال نرمال شده به دست می‌آید:

$$O_{3,ji} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}; \quad i = 1 \text{ و } 2 \dots$$

لایه چهارم (گره‌های نتیجه^۶): تابع گره چهارمین لایه توزیع آمین قانون را به کل خروجی محاسبه می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$O_{4,ji} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + z_i)$$

که \bar{w}_i خروجی آمین گره از لایه قبلی است. $\{p_i, q_i, r_i\}$ ضرایب این ترکیب خطی بوده، همچنین مجموعه پارامترهای بخش تالی مدل فازی تاکاگی-شوگنو نیز می‌باشند.

لایه پنجم (گره‌های خروجی^۷): این تک گره، خروجی کلی را با جمع کردن همه سیگنال‌های ورودی محاسبه می‌کند.

ANFIS قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه‌بندی دارد و همچنین دارای این مزیت است که اجازه استخراج قوانین فازی را از اطلاعات عددی یا دانش متخصص می‌دهد و به‌طور تطبیقی یک قاعده-بنیاد می‌سازد. علاوه بر این، می‌تواند تبدیل پیچیده هوش بشری به سیستم‌های فازی را تنظیم کند. مشکل اصلی مدل پیش‌بینی ANFIS، احتیاج نسبتاً زیاد به زمان برای آموزش ساختار و تعیین پارامترها می‌باشد.

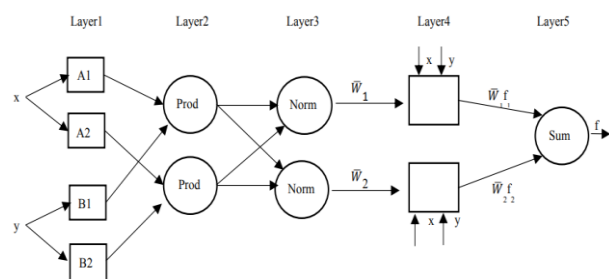
سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی توسط جانگ در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۹]. ANFIS یک نوع سیستم هوش مصنوعی بر پایه تاکاگی-شوگنو^۱ می‌باشد که برای حل سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌شود [۱۹]. در این سیستم یک مدل هیبرید بر اساس منطق فازی و شبکه‌های عصبی ایجاد می‌شود. بنابراین ANFIS، توانایی استنتاج و آموزش خود را دارد. قواعد فازی در ANFIS به‌صورت زیر شرح داده می‌شود. به منظور ساده‌سازی، فرض می‌شود که سیستم استنتاجی مورد نظر دو ورودی X و Y و یک خروجی Z دارد. برای یک مدل فازی تاکاگی-شوگنو درجه اول، می‌توان یک مجموعه قانون نمونه را با دو قانون اگر-آنگاه فازی به صورت زیر بیان کرد: قانون اول: اگر X برابر A₁ و Y برابر B₁ باشد.

$$\text{آنگاه } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$$

قانون دوم: اگر X برابر A₂ و Y برابر B₂ باشد.

$$\text{آنگاه } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$$

که P_i، q_i و r_i (i=1,2) پارامترهای خطی در بخش تالی مدل فازی تاکاگی-شوگنو درجه اول هستند. ساختار ANFIS شامل پنج لایه می‌شود [۲۲-۱۵]. شکل (۶) مدل عمومی برای دو ورودی را نشان می‌دهد.



شکل ۶ معماری مدل ANFIS

⁴ Firing strength

⁵ Consequent nodes

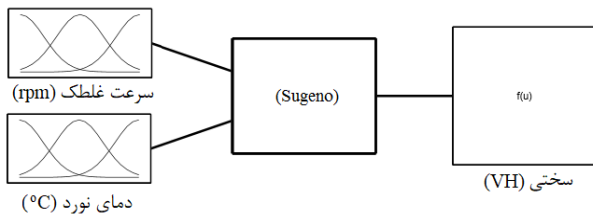
⁶ Average nodes

⁷ Output nodes

¹ Takagi-Sugeno

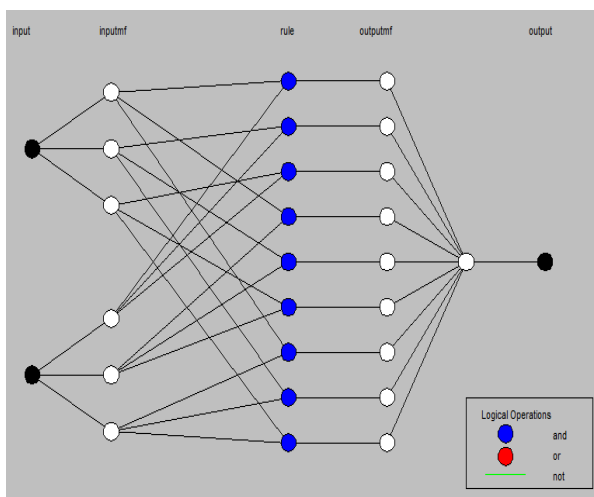
² Input nodes

³ Rule nodes



شکل ۴ ورودی و خروجی مدل ANFIS

برای فازی سازی پارامترها، سه مجموعه فازی بر اساس سه سطح از هر کدام از ورودی‌ها استفاده شد. از آنجاییکه تعداد آزمایش‌ها ۹ آزمایش می‌باشد؛ لذا در مجموع ۹ مجموعه فازی برای طراحی مدل تعریف گردید. بنابر این ۹ ق فازی پیش-بینی استحکام نهایی ایجاد شد. بعد از ایجاد مدل، آموزش عصبی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد. شکل (۵) ساختار مدل ANFIS را نشان می‌دهد.



شکل ۵ ساختار مدل ANFIS

همانطور که قبلاً هم ذکر شد، بعد از عملیات نورد، قطعه کار در دو محیط جداگانه شامل هوا و آب یخ سرد شد و سپس استحکام نهایی توسط دستگاه کشش محاسبه گردید. بنابراین برای هر محیط یک مدل ANFIS به صورت جداگانه ایجاد گردید. پس از ایجاد مدل، نتایج حاصل از مدل با نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها مقایسه گردید. جدول (۳) آزمایش‌ها و نتایج حاصل از آزمایش و تخمینی را نشان می‌دهد.

نتایج مدل به صورت سه بعدی هم بر اساس ورودی‌ها ایجاد شد. شکل (۶) نمودار سه بعدی رابطه بین دمای نورد، سرعت غلطک و استحکام نهایی را در محیط هوا نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود رابطه بین دمای نورد، سرعت غلطک و استحکام نهایی کاملاً غیرخطی می‌باشد و ارتباط همواره مستقیمی بین آنها دیده نمی‌شود.

بنابراین، در این لایه فرایند غیرفازی سازی، نتایج هر قانون فازی را به خروجی غیرفازی تغییر شکل می‌دهد.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

این شبکه بر اساس یادگیری با نظارت، آموزش داده می‌شود. تعداد مجموعه‌های فازی از طریق تعداد گره‌ها در لایه اول تعیین می‌گردد. از طرف دیگر، تعداد ابعاد لایه چهارم، تعداد قواعد مورد استفاده را نشان می‌دهد که با پیچیدگی و انعطاف-پذیری مدل ارتباط مستقیم دارد.

ویژگی متمایزکننده ANFIS، فراهم کردن الگوریتم یادگیری پیوندی، روش شیب گرادیان و روش حداقل مربعات، به منظور اصلاح پارامترها می‌باشد. روش شیب گرادیان-ن به کار گرفته می‌شود تا پارامترهای غیرخطی مقدماتی (A_i, B_i) را تنظیم کند؛ در حالیکه روش حداقل مربعات به کار گرفته می‌شود تا پارامترهای خطی بخش تالی را تعیین کند. روند آموزش دو مرحله دارد: در مرحله اول، در حالیکه پارامترهای بخش مقدم (توابع عضویت) ثابت فرض می‌شوند، با استفاده از روش حداقل مربعات پارامترهای بخش تالی تعیین می‌شوند. سپس سیگنال‌های خطا پس انتشار می‌یابند. روش شیب گرادیان استفاده می‌شود تا پارامترهای مقدماتی از طریق حداقل کردن تابع هزینه درجه دوم کلی، اصلاح شود.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- ایجاد مدل استنتاجی فازی عصبی تطبیقی

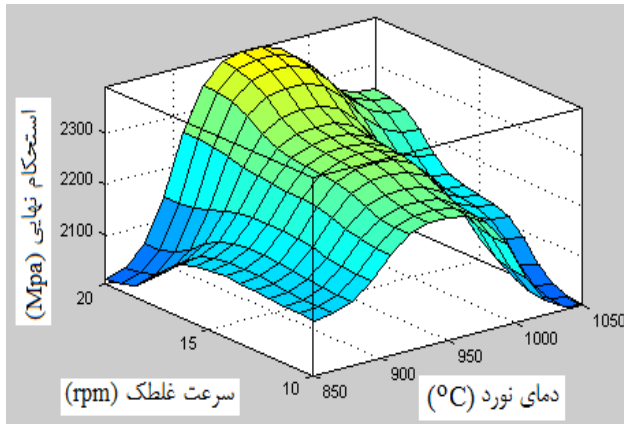
یک مدل استنتاجی فازی عصبی تطبیقی برای پیش‌بینی استحکام نهایی بر اساس سرعت‌های مختلف غلطک و دمای نورد از طریق نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد. برای فازی سازی ورودی‌ها از تابع عضویت گوسی استفاده شده است؛ چون این تابع نسبت به دیگر توابع نتیجه دقیق‌تری داد. تابع عضویت گوسی با یک مقدار مرکزی m و انحراف استاندارد $k > 0$ به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2k^2}}$$

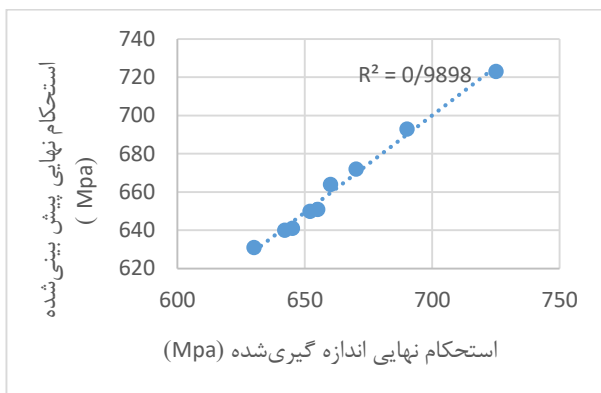
بعد از انتخاب تابع عضویت، مدل ANFIS بر اساس نتایج آزمایش‌ها و مجموعه‌های فازی ایجاد شد. در ساختار مدل، سرعت غلطک (V) و دمای نورد (T) به عنوان ورودی و استحکام نهایی (US) به عنوان خروجی مدل تعریف شدند. شکل (۴) ورودی و خروجی مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۳ طراحی آزمایش و نتایج بدست آمده از مدل

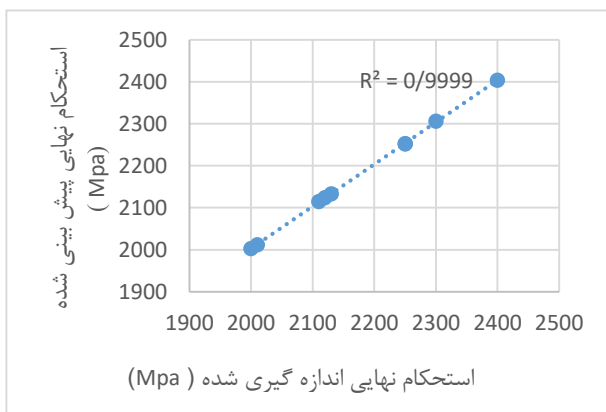
| ردیف | سرعت غلطک (rpm) | دمای نورد (T) | سختی اندازه گیری شده هوا - (VH) | سختی تخمین شده - هوا (VH) | سختی اندازه گیری شده آب - (VH) | سختی تخمین شده - آب (VH) |
|------|-----------------|---------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| ۱ | ۱۰ | ۸۵۰ | ۶۵۲ | ۶۵۰ | ۲۱۱۰ | ۲۱۱۵ |
| ۲ | ۱۰ | ۹۵۰ | ۶۴۵ | ۶۴۱ | ۲۲۵۰ | ۲۲۵۲ |
| ۳ | ۱۰ | ۱۰۵۰ | ۶۴۲ | ۶۴۰ | ۲۰۰۰ | ۲۰۰۳ |
| ۴ | ۱۵ | ۸۵۰ | ۶۶۰ | ۶۶۴ | ۲۱۲۰ | ۲۱۲۴ |
| ۵ | ۱۵ | ۹۵۰ | ۶۵۵ | ۶۵۱ | ۲۳۰۰ | ۲۳۰۶ |
| ۶ | ۱۵ | ۱۰۵۰ | ۶۷۰ | ۶۷۲ | ۲۱۳۰ | ۲۱۳۳ |
| ۷ | ۲۰ | ۸۵۰ | ۶۳۰ | ۶۳۱ | ۲۰۱۰ | ۲۰۱۲ |
| ۸ | ۲۰ | ۹۵۰ | ۶۹۰ | ۶۹۳ | ۲۴۰۰ | ۲۴۰۴ |
| ۹ | ۲۰ | ۱۰۵۰ | ۷۲۵ | ۶۲۳ | ۲۲۵۰ | ۲۲۵۳ |



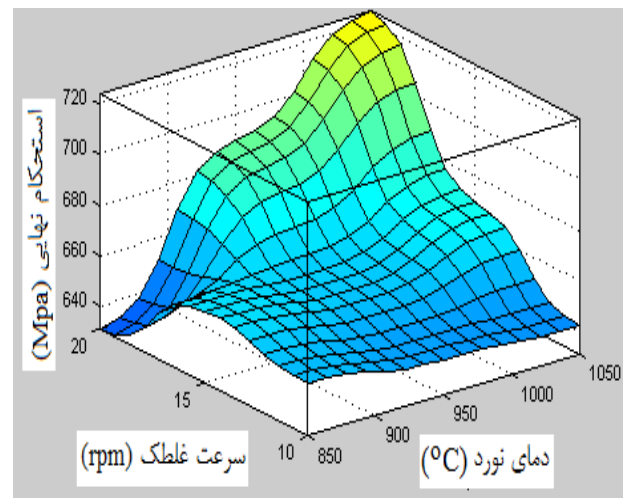
شکل ۷ تأثیر پارامترهای سرعت غلطک و دمای نورد بر روی استحکام نهایی فولاد پس از سرد کردن در آب یخ



شکل ۸ مقایسه نتایج حاصل از مدل استحکام نهایی با نتایج اندازه گیری شده پس از سرد کردن در آب



شکل ۹ مقایسه نتایج حاصل از مدل استحکام نهایی با نتایج اندازه گیری شده پس از سرد کردن در آب



شکل ۶ تأثیر پارامترهای سرعت غلطک و دمای نورد بر روی استحکام نهایی فولاد پس از سرد کردن در هوا

مقایسه نتایج اندازه گیری شده استحکام نهایی از طریق دستگاه کشش با مقدار تخمینی مدل ANFIS در شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب برای کوئنچ در محیط هوا و آب داده شده است. همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل بسیار نزدیک به میزان اندازه‌گیری شده است و در محیط هوا این میزان برابر ۰/۹۸ و در محیط آب یخ برابر

شکل (۷) نمودار سه بعدی روابط بین ورودی و خروجی‌ها را در محیط آب یخ نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در اینجا هم رابطه بین سرعت غلطک، دمای نورد و استحکام نهایی کاملاً غیر خطی می‌باشد؛ بدین معنی که نسبت این پارامترها در فواصلی کاهش و در فواصلی افزایش را نشان می‌دهد. از طرف دیگر در این نمودار استحکام نهایی فولاد به خاطر کوئنچ در آب نسبت به هوا به صورت محسوس بالا رفته است.

- [2] S.-F. Wang, Y. Peng, and Z.-J. Li, "Work-Hardening and Deformation Mechanism of Cold Rolled Low Carbon Steel," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 823–828, 2013.
- [3] X. Zhang, H. Wang, R. O. Scattergood, J. Narayan, and C. C. Koch, "Modulated oscillatory hardening and dynamic recrystallization in cryomilled nanocrystalline Zn", *Acta Materialia*, vol. 50, no. 16, pp. 3995-4004, 2002, [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00199-4).
- [4] R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino, and Y. Koizumi, "Effect of rolling reduction on ultrafine grained structure and mechanical properties of low-carbon steel thermomechanically processed from martensite starting structure," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 5, no. 1–2, pp. 153–162, 2004, doi: 10.1016/j.stam.2003.10.017.
- [5] R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino, and Y. Koizumi, "Effect of rolling reduction on ultrafine grained structure and mechanical properties of low-carbon steel thermomechanically processed from martensite starting structure," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 5, no. 1–2, pp. 153–162, 2004, doi: 10.1016/j.stam.2003.10.017.
- [6] H. Niakan, and A. Najafizadeh, "Effect of niobium and rolling parameters on the mechanical properties and microstructure of dual phase steels", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 21, pp. 5410-5414, doi: [https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.078.\(2010\)](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.078.(2010)).
- [7] M. Zebarjadi Sar, S. Barella, A. Gruttadauria, D. Mombelli, and C. Mapelli, "Impact of Warm Rolling Process Parameters on Crystallographic Textures, Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon Boron-Bearing Steels," *Metals*, vol. 8, no. 11, art. 927, 2018, [Online], Available: [http://www.mdpi.com/2075-4701/8/11/927.\(2018\)](http://www.mdpi.com/2075-4701/8/11/927.(2018)).
- [8] P. U. Nwachukwu and O. O. Oluwole, "Effects of rolling process parameters on the mechanical properties of hot-rolled St60Mn steel," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 6, pp. 134-146, 2017, doi: [https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006.\(2017\)](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006.(2017)).
- [9] A. S. Mohamad Jaya, A. S. H. Basari, S. Z. M. Hashim, H. Haron, R. Muhamad, and M. N. A. Rahman, "Application of ANFIS in Predicting of TiAlN Coatings Hardness," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 9, pp. 1647-1657, 2011.
- [10] G. Khalaj, A. Nazari, and A. K. Livary, "Application of ANFIS for modeling of microhardness of high strength low alloy (HSLA) steels in continuous cooling," *Materials Research*,

۰/۹۹ بدست آمده که دقت مدل را برای تخمین نتایج تایید می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر عملیات نورد گرم بر روی خواص مکانیکی یکی از پرکاربردترین فولادها یعنی فولاد CK45 مورد بررسی قرار گرفته و استحکام نهایی فولاد نورد شده توسط مدل ANFIS پیش‌بینی شده است. تحقیقاتی در این باب برای فولادهای دیگر انجام شده است و در این تحقیق هم برای فولاد CK45 انجام گردید. همچنین در این تحقیق روش ANFIS برای پیش‌بینی خواص مکانیکی استفاده گردیده است که بر اساس بررسی نویسندگان مقاله، هیچ پژوهشی قبلاً با این روش گزارش نشده است. با توجه به اینکه حجم آزمایش‌ها به خاطر هزینه بالا در عملیات نورد معمولاً پایین هست؛ لذا در مقایسه با پژوهش‌هایی که قبلاً برای موارد مشابه به روش‌های دیگر انجام شده است، روش فوق بخاطر استفاده از مزایای هر دو مدل فازی و عصبی نتایج را با دقت بالایی پیش‌بینی کرده است. برای بررسی تأثیر پارامترها، عملیات نورد گرم بر روی این فولاد بر اساس پارامترهای دمای نورد و سرعت غلطک‌ها انجام گرفت. نمونه‌ها در دماهای مختلف نورد و در سرعت‌های غلطک متفاوت، تحت کرنش‌های یکسان قرار گرفته و سپس در دو محیط مختلف آب یخ و هوا تا دمای هوای اتاق به سرعت سرد شدند. پس از عملیات کوپنچ، استحکام نهایی نمونه‌ها برای هر کدام از محیط‌ها به صورت جداگانه با استفاده از دستگاه کشش اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد با استفاده از روش سیستم استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) مدلی برای پیش‌بینی استحکام نهایی فولادها بر اساس دو پارامتر دمای نورد و سرعت غلطک‌ها و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد. سرعت غلطک و دمای نورد به عنوان ورودی و استحکام نهایی به عنوان خروجی به سیستم داده شد و پس از آموزش مدل نتایج بررسی گردید. نتایج بدست آمده از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد و R^2 مربوط به هر دو محیط بدست آمد. نتایج نشان داد که مدل ANFIS می‌تواند با دقت بالا و قابل قبولی نتایج استحکام نهایی را تخمین بزند.

۶- مراجع

- [1] S. Ray, "Introduction to Rolling Process," in *Principles and Applications of Metal Rolling*, Cambridge University Press, pp. 1–29, 2016, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139879293.002>.

vol. 16, no. 4, pp. 721-730, 2013, doi: 10.1590/S1516-14392013005000052.

- [11] H.-B. Ly, B. T. Pham, D. V. Dao, and V. M. Le, "Improvement of ANFIS Model for Prediction of Compressive Strength of Manufactured Sand Concrete," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, art. 3841, 2019, doi: 10.3390/app9183841.
- [12] M. Zare and J. Vahdati Khaki, "Prediction of mechanical properties of a warm compacted molybdenum prealloy using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy models," *Materials & Design*, vol. 38, pp. 26–31, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.01.042.
- [13] M. M. Yadollahi, A. Benli, and R. Demirboga, "Application of adaptive neuro-fuzzy technique and regression models to predict the compressive strength of geopolymer composites," *Neural Computing and Applications*, vol. 28, no. 6, pp. 1453–1461, 2016, doi: 10.1007/s00521-015-2159-6.
- [14] Q. Xie, M. Suvarna, J. Li, X. Zhu, J. Cai, and X. Wang, "Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning," *Materials & Design*, vol. 197, art. 109201, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109201.
- [15] M. Soleymani, M. Khoshnevisan, and B. Davoodi, "Prediction of micro-hardness in thread rolling of St37 by convolutional neural networks and transfer learning," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 123, no. 9–10, pp. 3261–3274, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10355-4.
- [16] Xu, H., Xu, Z., and Zhang, K., "Mechanical Properties Prediction for Hot Roll Steel Using Convolutional Neural Network," in *Bio-inspired Computing: Theories and Applications*, Singapore, L. Pan, J. Liang, and B. Qu, Eds., 2020// 2020: Springer Singapore, pp. 565-575.
- [17] Japanese Standards Association, "Method of tensile test for metallic materials," 2004.
- [18] G. Di Bella, F. Favaloro, and C. Borsellino, "Effect of Process Parameters on Friction Stir Welded Joints between Dissimilar Aluminum Alloys: A Review," *Metals*, vol. 13, no. 7, art. 1176, 2023, doi: 10.3390/met13071176.
- [19] K. Mohammadi, S. Shamshirband, D. Petković, P. L. Yee, and Z. Mansor, "Using ANFIS for selection of more relevant parameters to predict dew point temperature", *Applied Thermal Engineering*, vol. 96, pp. 311-319, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.081>.(2016).