

کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه در برآورد مقدار فاز آستنیت باقیمانده پر کربن در چدن‌های نشکن آستمپر شده

حمید پورآسیابی^{۱*}، حامد پورآسیابی^۲ و حسن ثقفیان^۳

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، گروه مهندسی متالورژی، اهر، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، باشگاه پژوهشگران جوان، اهر، ایران.

۳- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

*h-pourasiabi@iau-ahar.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۴/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۰۳)

چکیده

خواص ایده‌آلی از جمله نسبت استحکام به وزن بالا همراه با چقرمگی، انعطاف‌پذیری، استحکام خستگی، مقاومت سایشی و هدایت حرارتی بالا، قابلیت جذب ارتعاش عالی و حساسیت کم نسبت به اثر شیار در کنار هزینه تولید پایین باعث شده که چدن نشکن آستمپر شده (ADI) بعنوان یک ماده صنعتی مورد توجه مهندسين طراح و متالورژیست‌ها قرار بگیرد. آستنیت باقیمانده که در طول استحاله همدمای آستمپرینگ غنی از کربن می‌شود، عامل اصلی این خواص منحصر بفرد می‌باشد. با توجه به روش پیچیده و هزینه‌بر و با مقدار خطای بالای مرسوم برای تعیین میزان کسر حجمی آستنیت باقیمانده، هدف از این پژوهش ارائه یک مدل شبکه هوشمند عصبی مصنوعی برای برآورد این فاز با استفاده از بانک اطلاعاتی میسوطی که از داده‌های علمی منتشر شده در مجلات معتبر علمی تهیه شده، می‌باشد. به این منظور از یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP-ANN) با تعداد سلول‌های متغیر در لایه پنهان استفاده شد که در آن ورودی‌ها شامل درصد وزنی کربن، سیلیسیم، منگنز، مولیبدن، نیکل، مس، دما و زمان آستنیته کردن، دما و زمان آستمپرینگ و خروجی شبکه نیز مقدار آستنیت باقیمانده بعد از عملیات حرارتی آستمپرینگ می‌باشد. آزمون عملکرد شبکه بهینه شده نشان می‌دهد که شبکه سنتز شده با خطای بسیار کم می‌تواند این مقدار را تخمین بزند. از رابطه نهایی گزارش شده می‌توان به راحتی و با دقت بسیار بالا مقدار آستنیت باقیمانده را در ترکیب‌های شیمیایی و سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف این نوع چدن‌ها تعیین نمود.

واژه‌های کلیدی:

چدن نشکن آستمپر شده (ADI)، آستنیت باقیمانده، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، پرسپترون چند لایه (MLP).

۱- مقدمه

تلفیقی بهینه از هزینه تولید پایین، انعطاف‌پذیری و نسبت استحکام به وزن بالا، چقرمگی عالی، مقاومت به سایش و خستگی مطلوب، قابلیت ماشینکاری خوب، هدایت حرارتی بالا

چدن نشکن آستمپر شده (ADI)، یکی از آلیاژهای جدیدی است که می‌تواند طرح یک مهندس را در کاربردهای صنعتی با

طی استحاله همدم، غنی از کربن شده و پایدار می‌گردد. آستنیت باقیمانده، فاز پیوسته‌ای است که منجر به چقرمگی و انعطاف پذیری بالای این چدن‌ها می‌شود. از طرف دیگر اعمال تنشهای بالا، امکان استحاله آنرا به فاز سخت مارتنزیت با مکانیزم TRIP میسر می‌سازد و این امر باعث بهبود مقاومت سایشی این چدن‌ها به میزان چند ده برابر نسبت به چدن نشکن ریختگی می‌گردد [۷-۱]، لذا اندازه‌گیری و تعیین آن در آلیاژهایی از این دست، ضروری می‌باشد.

در این پژوهش از مدل‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی به منظور تعیین مقدار آستنیت باقیمانده به صورت تابعی از ترکیب شیمیایی (درصد وزنی کربن، درصد وزنی سیلیسیم، درصد وزنی منگنز، درصد وزنی نیکل، درصد وزنی مس و درصد وزنی مولیبدن) و پارامترهای عملیات حرارتی (دما و زمان آستنیت کردن و دما و زمان آستمپر کردن) استفاده شده و کوشش گردیده است که کارآمدترین مدل با کمترین خطا برای تخمین مقدار آستنیت باقیمانده معرفی گردد.

۲- اندازه‌گیری کسر حجمی آستنیت باقیمانده در چدن‌های نشکن آستمپر شده

میزان فاز آستنیت باقیمانده در ریزساختار پس از آستمپر چدن نشکن، متأثر از ترکیب شیمیایی چدن ریختگی (درصد کربن، سیلیسیم، منگنز، مولیبدن، مس، نیکل) و پارامترهای عملیات حرارتی (دما و زمان آستنیت کردن، دما و زمان آستمپر کردن) بوده و با تغییر این پارامترها، مقدار آستنیت باقیمانده تغییر خواهد کرد. با توجه به وابستگی خواص چدن‌های ADI به میزان این فاز در ریزساختار، اندازه‌گیری مقدار آن بسیار حائز اهمیت است ولی روش اندازه‌گیری مرسوم آن دشوار و بسیار حساس به نحوه آماده‌سازی نمونه‌هاست و از طرفی روشی پر هزینه و همراه با خطاهای دستگاهی و فردی بالاست. در این روش برای تعیین میزان آستنیت باقی‌مانده، نمونه‌های مورد نظر باید تا سمباده ۱۲۰۰ پرداخت شده و با اعمال نیروی کم به منظور کاهش اثرات کار مکانیکی با نمد و پودر آلومینا پولیش گردند. بعد از شستشو

و جذب ارتعاش عالی تکمیل نماید. در اوایل دهه ۵۰ میلادی، کاربرد چدن نشکن به سبب هزینه تولید پایین همراه با خواص مکانیکی مطلوب آن، بطور چشمگیری افزایش یافت. پس از آن، گسترش و توسعه چدن نشکن آستمپر شده در دهه ۷۰ میلادی افق جدیدی را در مسیر کاربرد چدن نشکن به ارمغان آورد؛ چرا که این نوع جدید از چدن‌ها را می‌توان همانند چدن نشکن معمولی ریخته‌گری نمود و سپس با انجام عملیات حرارتی موسوم به آستمپرینگ، خواص مکانیکی آن را در حد مطلوبی در قیاس با فولادهای فورج بهبود بخشید. آستمپر کردن شامل آستنیت کردن در دمای $950^{\circ}\text{C} - 850^{\circ}\text{C}$ کوئنچ و استحاله همدمای نمونه در منطقه بینایی در دمای $450^{\circ}\text{C} - 230^{\circ}\text{C}$ برای مدت زمان معینی می‌باشد. این فرآیند در چدن نشکن شامل دو مرحله زیر است:

مرحله اول استحاله: $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{\text{hc}}$

مرحله دوم استحاله: $\gamma_{\text{hc}} \rightarrow \alpha + \text{Carbide}$

استحاله آستمپر با جوانه‌زنی و رشد فریت در زمینه آستنیتی آغاز می‌شود. در پایان مرحله اول استحاله، ساختار حاوی فریت و آستنیت غنی از کربن (γ_{hc}) می‌باشد. در مرحله دوم آستنیت غنی از کربن به دو فاز پایدارتر فریت و کاربید تجزیه می‌شود. می‌توان گفت که آستنیت باقیمانده مهمترین فاز حاصل از آستمپر چدن‌هاست که کسر حجمی آن تعیین کننده خواص نهایی آلیاژ می‌باشد. آستنیت در این نوع چدن‌ها بر سه گونه می‌باشد؛

- آستنیت اولیه یا آستنیت واکنش نکرده که درصد کربن آن در حدود ۰/۸ الی ۱/۱ درصد می‌باشد.

- آستنیت واکنش یافته نیمه پایدار که مقدار کربن آن در طول آستمپرینگ به ۱/۲ تا ۱/۶ درصد می‌رسد.

- آستنیت واکنش یافته پایدار یا آستنیت غنی از کربن با مقدار کربن ۱/۸ تا ۲/۲ درصد که در دمای محیط از نظر ترمودینامیکی پایدار بوده و از اینرو به آستنیت باقیمانده موسوم است. فاز آستنیت باقیمانده در ساختار پس از آستمپر چدن نشکن، دلیل اصلی خواص منحصر بفرد این نوع چدن‌هاست. این فاز در اثر پس زده شدن کربن از تیغه‌های فریت بینایی در حال رشد در

رابطه (۶) $V_\gamma = [(I_\gamma / R_\gamma)(I_\alpha / R_\alpha) + (I_\gamma / R_\gamma)]$ همانطور که ملاحظه می‌شود محاسبه میزان آستنیت باقیمانده بدین روش، پیچیده و همراه با خطایی در حدود ۵٪ می‌باشد؛ به این صورت که مقدار اندازه‌گیری شدهی مثلاً ۱۲٪ نشانگر این است که مقدار واقعی آستنیت باقیمانده در آن نمونه در گستره ۷٪ الی ۱۷٪ تغییر می‌کند ولی می‌توان با استفاده از سیستم‌های دینامیکی مدل آزاد بر پایه هوش مصنوعی، رابطه‌ای بر اساس شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه نمود که میزان کسر حجمی آستنیت باقیمانده در ساختار چدن نشکن آستمپر شده را بعنوان تابعی از ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی برآورد کند.

۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی

ایجاد یک سیستم هوش مصنوعی که توانایی یادگیری، خلاقیت و انعطاف‌پذیری انسان را داشته باشد، هدف اصلی تحقیقات در ارتباط با هوش مصنوعی می‌باشد. کوشش جهت تقلید این روند انسانی در گذشته همواره با فعالیت شدیدی روبرو بوده است که امروزه با مطالعات عمیق و جهت‌دار توسط دانشگاه‌ها، مؤسسات و مراکز تحقیقاتی جهان دنبال می‌شود. در طی این مدت، مدل‌های زیادی از سیستم بیولوژیکی هوش بدست آمده است که هدف هر یک از این مدل‌ها این بوده است که به گونه‌ای همانند مغز و سیستم عصبی انسان عمل نمایند. حرکت مستمري از تحقیقات صرفاً تنوری به سمت تحقیقات کاربردی، بویژه در پردازش اطلاعات برای مسائلی که برای آنها راه حلی وجود ندارد و یا براحتی قابل حل نیستند، صورت پذیرفته است. با توجه به این امر، علاقه روزافزونی در توسعه سیستم‌های دینامیکی هوشمند مدل آزاد که مبتنی بر داده‌های تجربی هستند، ایجاد شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ (ANN) که شبکه‌های عصبی شبیه‌سازی شده^۲ (SNN) و یا بطور معمول شبکه‌های عصبی^۳ (NN) نیز نامیده می‌شوند، جزء این دسته از سیستم‌های دینامیکی هستند که با پردازش داده‌های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کنند. به همین خاطر به این سیستم‌ها، هوشمند می‌گویند؛ چرا که بر اساس

با الکل و خشک کردن، نمونه‌ها باید تحت پراش اشعه X با دستگاه دیفرآکتومتر قرار بگیرند. محدوده مناسب تغییرات زاویه تفرق از ۴۰ تا ۱۰۰ درجه با سرعت ۰/۰۴°/SEC می‌باشد. برای افزایش دقت در محاسبات بایستی سه پیک (200)، (110) و (211) فریت با شبکه کریستالی BCC و سه پیک (111)، (200) و (220) آستنیت با شبکه کریستالی FCC در نظر گرفته شود. روش کار در تعیین میزان آستنیت باقیمانده مطابق با استاندارد ASTM E975-84 است که در آن شدت پیک مورد نظر طبق رابطه (۱) با کسر حجمی آن فاز متناسب می‌باشد؛

$$I^{hkl} = K R^{hkl} V / 2\mu \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن؛

$$K = \left(\frac{I_0 A \lambda^3}{32\pi r} \right) \left[\left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right)^2 \frac{e^4}{m^2} \right]$$

$$R = \left(\frac{1}{V^2} \right) \left[|F|^2 P \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{\sin^2\theta \cdot \cos\theta} \right) \right] (e^{-2M})$$

K ثابت بوده و به نوع ماده مورد آزمایش بستگی ندارد و در واقع وابسته به نوع تجهیزات و اشعه X می‌باشد. پارامتر R متناسب با شدت انتگرال تئوریک بوده و وابسته به فواصل بین صفحات (hkl)، زاویه براگ، ساختمان و ترکیب فاز مورد نظر می‌باشد.

شدت انتگرال صفحات (hkl) برای فاز فریت و آستنیت، توسط روابط (۳) و (۲) محاسبه می‌شود؛

$$I_\alpha^{hkl} = K R_\alpha^{hkl} V_\alpha / 2\mu \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$I_\gamma^{hkl} = K R_\gamma^{hkl} V_\gamma / 2\mu \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این روابط V_γ کسر حجمی آستنیت و V_α کسر حجمی فریت است. به این ترتیب برای هر زوج پیک آستنیت و فریت، رابطه (۴) برقرار است؛

$$I_\alpha^{hkl} / I_\gamma^{hkl} = (R_\alpha^{hkl} / R_\gamma^{hkl}) (V_\alpha / V_\gamma) \quad \text{رابطه (۴)}$$

رابطه فوق در شرایطی صادق است که دو فاز فریت و آستنیت تنها فازهای موجود در زمینه باشند. در این شرایط؛

$$V_\alpha + V_\gamma = 1 \quad \text{رابطه (۵)}$$

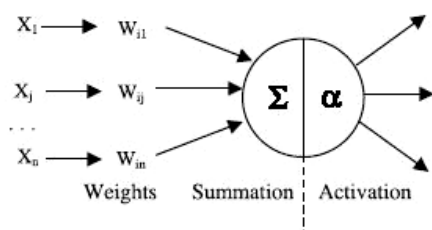
و لذا درصد حجمی فاز آستنیت (V_γ) از رابطه (۶) قابل محاسبه خواهد بود [۸]؛

آموزش شبکه وجود دارد که عبارتند از: آموزش کنترل پذیر و آموزش غیرقابل کنترل. مرسوم ترین الگوریتم آموزش، الگوریتم آموزشی پس انتشار خطا می باشد. شبکه عصبی به کمک الگوریتم پس انتشار خطا از طریق تغییر وزن لایه های میانی آموزش می بیند و این تغییرات به عنوان مفروضات شبکه ذخیره می گردند. برخی از روش های آماری نظیر ریشه میانگین مربعات خطا^۴ (RMS)، میانگین مربعات خطا^۵ (MSE) جهت بررسی صحت نتایج مورد استفاده قرار می گیرند. خطا در طول آموزش با این دو پارامتر مشخص می شود که به صورت روابط (۸) و (۹) محاسبه می گردند:

$$RMS = \left(\frac{1}{p} \sum_j |t_j - o_j|^2 \right)^{1/2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_j - o_j)^2 \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن t مقدار هدف، o مقدار خروجی و p به عنوان الگو می باشد. همچنین n بیانگر تعداد خروجی های شبکه عصبی می باشد. جهت افزایش دقت و یادگیری شبکه، مقادیر ورودی و خروجی به شبکه عصبی بین [۱۰-۱] نرمالیزه شدند.



شکل (۱): پردازش اطلاعات در یک سلول شبکه عصبی.

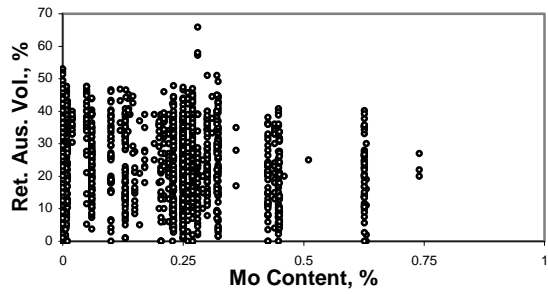
۴- روش انجام پژوهش

در این پژوهش از ۲۱۴۱ داده بصورت یازده تایی مرتب (۱۰) ورودی شامل مقدار کربن، سیلیسیم، منگنز، نیکل، مس، مولیبدن، دما و زمان آستنیته کردن و دما و زمان آستمبر کردن و یک خروجی؛ میزان آستنیته باقیمانده پس از عملیات حرارتی آستمبرینگ) که از پایان نامه ها و مقالات منتشر شده در مجلات

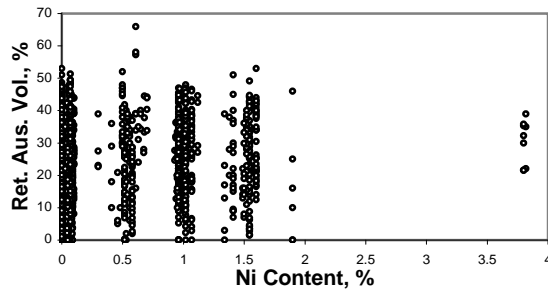
محاسبات روی داده های عددی، قوانین کلی را فرا می گیرند. این سیستم های مبتنی بر هوش محاسباتی سعی در مدل سازی ساختار نرو- سیناپتیکی مغز دارند. شبکه های هوشمند عصبی که به عنوان یک انفجار بزرگ در طی چند دهه اخیر مطرح شده اند، بطور موفقیت آمیزی در حل محدوده بسیار وسیعی از مسائل کاربرد گسترده ای یافته اند. در واقع هر جا که مسأله برآورد، پیشگویی، طبقه بندی و یا کنترل لازم بوده، شبکه های عصبی به نوعی در آنجا مطرح شده اند [۹-۱۲]. شبکه های عصبی مصنوعی در زمینه های مختلفی نظیر کنترل، بهینه سازی، تشخیص الگو، فشرده سازی و طبقه بندی اطلاعات، مهندسی، پزشکی، امور مالی و اقتصادی، زمین شناسی، فیزیک، پیش بینی آب و هوا، پردازش تصویر و صدا بکار برده می شوند. این شبکه ها جهت غلبه بر محدودیت های روش های مرسوم جهت حل مسائل پیچیده، آموزش دیده می شوند. اصلی ترین جزء شبکه عصبی سلول نام دارد. اساساً سلول های بیولوژیکی با دریافت ورودی ها از برخی منابع، آنها را از طرق مختلفی با یکدیگر ترکیب می نمایند و سپس با انجام عملیات غیرخطی بر روی نتایج، خروجی نهایی را ارائه می نمایند. شبکه های عصبی غالباً شامل یک لایه ورودی و یک یا چندین لایه میانی و یک لایه خروجی می باشند [۱۳]. هر ورودی در وزن مربوط به خودش ضرب می گردد. در ساده ترین حالت خروجی ها و بایاس ها با یکدیگر جمع و سپس از تابع فعال سازی جهت تولید خروجی ها عبور می نمایند. شکل (۱) پردازش اطلاعات را در یک سلول شبکه عصبی نشان می دهد. شبکه های دارای بایاس، رابطه بین ورودی ها و خروجی ها را راحتتر از شبکه های بدون بایاس بدست می آورند [۱۴]. در شکل (۱)، خروجی برای سلول i ام بصورت رابطه (۷) می باشد:

$$\alpha_i = f \left(\sum_{j=1}^n X_j W_{ij} \right) \quad \text{رابطه (۷)}$$

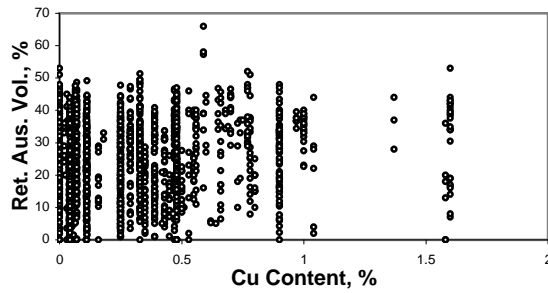
توابع فعال سازی به طور کلی از روابط جبری خطی و یا غیرخطی تشکیل شده اند. مهمترین مرحله در شبکه های عصبی، بخش آموزش شبکه می باشد. در حالت کلی دو روش مختلف برای



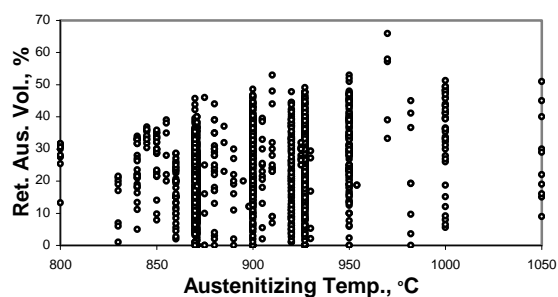
(د)



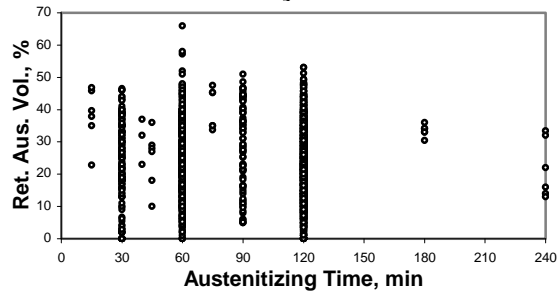
(ه)



(و)

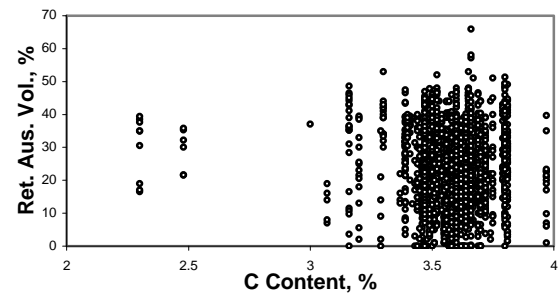


(ز)

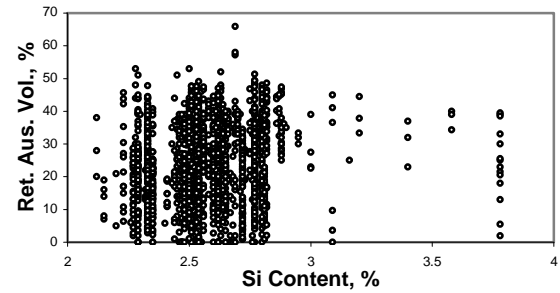


(ح)

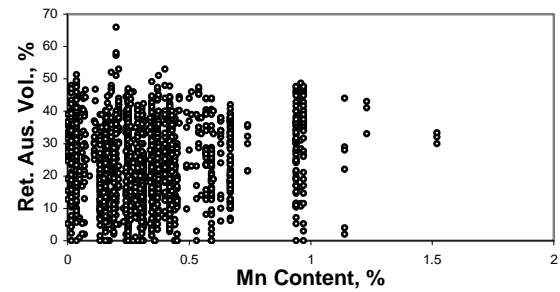
معتبر بین‌المللی [۱۵-۶۸ و ۳۰۲] جمع‌آوری گردیده‌اند، برای سنتز شبکه عصبی استفاده شد. نمودارهای پراکنش تابع خروجی (میزان آستنیت باقیمانده) بر حسب هر یک از متغیرهای ورودی در شکل (۲) نشان داده شده است. این نمودارها شکل و نحوه پراکندگی متغیر وابسته را بر حسب متغیرهای مستقل و نیز محدوده تغییرات متغیرهای ورودی و متغیر خروجی را بصورت گرافیکی نمایش می‌دهد. در جدول ۱ ملاحظات آماری از جمله مقدار کمینه، مقدار بیشینه، مقدار میانگین، مقدار میانه و میزان انحراف از معیار داده‌ها برای هر یک از متغیرهای ورودی و خروجی آورده شده است.



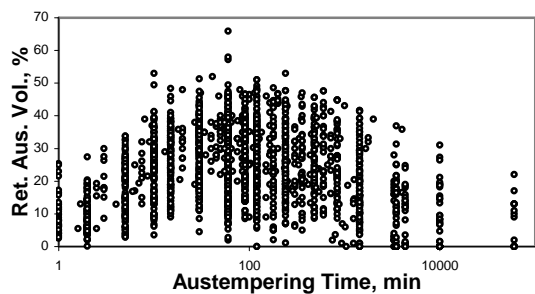
(الف)



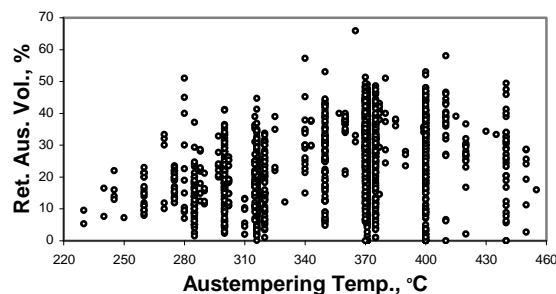
(ب)



(ج)



(ی)

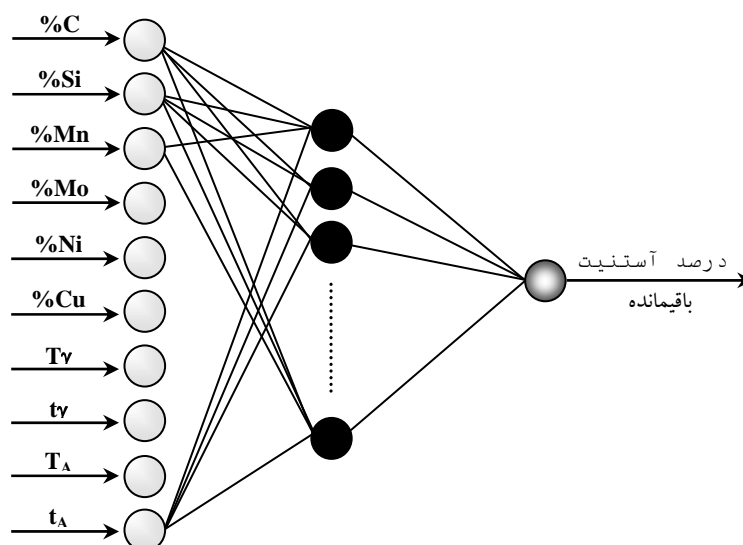


(ت)

شکل (۲): نمودار پراکنش متغیر خروجی (مقدار آستنیت باقیمانده) بر حسب؛ الف) مقدار کربن، ب) سیلیسیم، ج) منگنز، د) مولیبدن، ه) نیکل، و) مس، ز) دمای آستنیت کردن، ح) زمان آستنیت کردن، ت) دمای آستنیت کردن و ی) زمان آستنیت کردن.

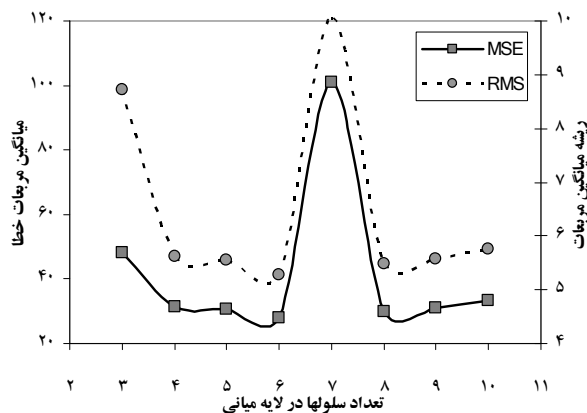
جدول (۱): ملاحظات آماری در مورد متغیرهای ورودی و تابع خروجی.

تعداد داده‌ها	مقدار انحراف از معیار	مقدار میانه	مقدار میانگین	مقدار بیشینه	مقدار کمینه	
۲۱۴۱	۰/۱۶۰۷	۳/۵۹	۳/۵۷۲۴	۳/۹۷	۲/۳	درصد کربن، %C
۲۱۴۱	۰/۲۰۶۰	۲/۵۴	۲/۵۷۴۳	۳/۷۸	۱/۵۷	درصد سیلیسیم، %Si
۲۱۴۱	۰/۲۲۳۶	۰/۲۸۹	۰/۳۲۹۷	۱/۵۲	۰	درصد منگنز، %Mn
۲۱۴۱	۰/۱۶۳۴	۰/۱۳	۰/۱۶۰۲	۰/۷۴	۰	درصد مولیبدن، %Mo
۲۱۴۱	۰/۵۴۰۶	۰/۰۶۴	۰/۳۴۵۸	۳/۸۲	۰	درصد نیکل، %Ni
۲۱۴۱	۰/۳۰۲۶	۰/۱۱۳	۰/۲۵۸۹	۱/۶	۰	درصد مس، %Cu
۲۱۴۱	۳۳/۸۰۷۱	۹۰۰	۹۰۱	۱۰۵۰	۸۰۰	دمای آستنیت، T_y (°C)
۲۱۴۱	۳۳/۰۶۴۲	۱۲۰	۹۸/۸۹	۲۴۰	۱۵	زمان آستنیت، t_y (min)
۲۱۴۱	۳۹/۹۸۵۹	۳۷۰	۳۵۰/۶	۴۵۵	۲۳۰	دمای آستنیت، T_A (°C)
۲۱۴۱	۵۳۲۵/۵۱	۸۵	۹۵۶/۳	۶۰۰۰۰	۰/۵	زمان آستنیت، t_A (min)
۲۱۴۱	۱۱/۶۰۶۶	۲۳/۵	۲۳/۷۲	۶۵/۹	۰	آستنیت باقیمانده، Ret. Aus.

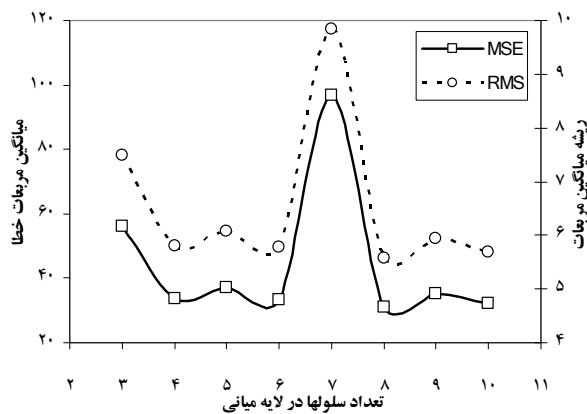


شکل (۳): شماتیک ساختار شبکه عصبی طراحی شده (پرسترون با یک لایه مخفی).

در این شکل‌ها خطای شبکه در مرحله آموزش و مرحله آزمون بر اساس میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا با تغییر در تعداد نرون‌ها در لایه میانی رسم شده و مشاهده می‌شود کمترین مقدار خطا هم در مرحله آموزش و هم در مرحله آزمون با انتخاب تعداد ۶ سلول در لایه میانی برای شبکه سنتز شده در این پژوهش قابل حصول است.



شکل (۴): تاثیر تعداد سلول‌های لایه مخفی بر خطای آموزش.



شکل (۵): تاثیر تعداد سلول‌های لایه مخفی بر خطای آزمون.

با توجه به نمودارهای فوق، شبکه عصبی با ۶ سلول در لایه مخفی برای برآورد میزان آستنیت باقیمانده در چدن‌های نشکن آستمپر شده انتخاب گردید. نمودار مقدار میانگین مربعات خطا در حین آموزش شبکه انتخابی در شکل (۶) نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود، آموزش تا همگرایی مطلوب شبکه ادامه پیدا کرده و معیار MSE به سمت صفر همگرا شده است.

در این پژوهش از یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه^۶ (MLP) با تعداد ۳ تا ۱۰ سلول در یک لایه پنهان^۷ استفاده شده است. شماتیک ساختار شبکه عصبی طراحی شده برای این پژوهش در شکل (۳) نشان داده شده است. توابع فعال‌سازی در لایه پنهان از توابع غیرخطی پیوسته و مشتق‌پذیر تانژانت سیگموئید و تابع خروجی خطی می‌باشد. تابع تانژانت سیگموئید به شکل رابطه (۱۰) تعریف می‌گردد:

$$\tan \text{sig}(n) = \frac{2}{1 + \exp(-2n)} - 1 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن $n = w_{ji} \times u_i + b_j$ می‌باشد.

از ۱۶۰۰ داده که به صورت تصادفی انتخاب شده بود، برای آموزش شبکه و از بقیه داده‌ها برای آزمودن میزان دقت شبکه استفاده شد. معیار مورد نظر برای حداقل‌سازی خطای خروجی شبکه عصبی، میانگین مربعات خطا (MSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMS) می‌باشد. همچنین جهت به دست آوردن وزن‌های بهینه شبکه، از الگوریتم لوبز-مارکوارت^۸ که از روش‌های بهینه‌سازی مرتبه دوم مبتنی بر مشتقات مرتبه دوم تابع خطا می‌باشد، استفاده شد. برای آموزش بهتر شبکه داده‌های ورودی و خروجی در بازه $[-1, +1]$ مطابق رابطه (۱۱) نرمالیزه گردید. در ادامه بعد از آزمون^۹ شبکه، داده‌ها با استفاده از رابطه (۱۲) دی‌نرمالیزه می‌شوند.

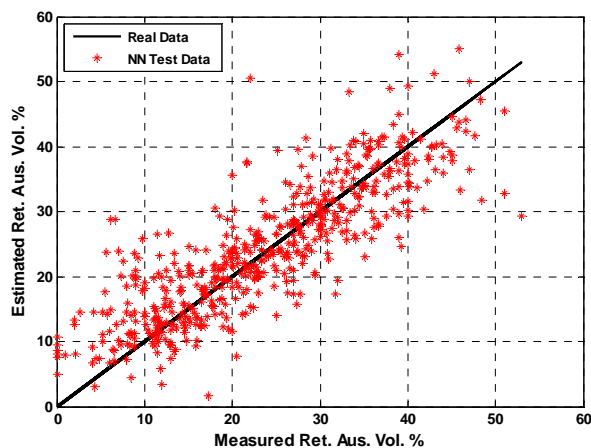
$$X_n = \left(\frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 2 \right) - 1 \quad [-1, +1] \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$Y = Y_{\min} + \frac{(1 + Y_n)(Y_{\max} - Y_{\min})}{2} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

برنامه کامپیوتری در محیط MATLAB 7.0 نوشته شد. کاهش مقدار میانگین مربعات خطا در حین آموزش شبکه بیانگر همگرایی شبکه می‌باشد.

۵- نتایج و سگالش

در شکل‌های ۴ و ۵ تاثیر تعداد سلول‌های موجود در لایه مخفی بر خطای آموزش و خطای آزمون شبکه نشان داده شده است.



شکل (۸): مقایسه داده‌های واقعی و خروجی شبکه برای داده‌های آزمون (نیمساز ربع اول و سوم).

روابط ریاضی بدست آمده از شبکه عصبی بصورت روابط (۱۳) تا (۱۹) قابل ارائه است. در این روابط از ضرایب مقادیر ورودی جهت استخراج تابع جمع سلول i ام (E_i) و تابع فعال‌سازی سلول i ام (F_i) استفاده شده است. این ضرایب بیانگر مقادیر وزنی تابع جمع هر سلول در لایه میانی شبکه سنتز شده می‌باشند. به عبارت دیگر، در این معادلات E_i ها از ضرب مقادیر ورودی نرمالیزه شده در وزنهای مربوطه‌شان حاصل می‌شوند و آخرین مقدار بیانگر بایاس i ام لایه میانی می‌باشد. این وزنهای واقع وزنه‌های بهینه شبکه هستند که پس از حدود ۷۰ بار تکرار فرآیند آموزش و همگرایی مطلوب و افت خطای شبکه به مقدار مورد نظر خطا (شکل (۶))، توسط شبکه محاسبه و ذخیره می‌گردند. جملات E_1 تا E_6 و F_1 تا F_6 نیز به ترتیب نشان‌دهنده توابع جمع و فعال‌سازی هر کدام از سلول‌ها در لایه پنهان می‌باشند.

$$E_1 = 0.6485\%C + 0.3311\%Si + 0.2733\%Mn + 0.1116\%Mo + 0.2674\%Ni - 0.0405\%Cu + 0.5892 T\gamma + 0.0360\text{Log } t\gamma - 0.3716 T_A - 1.2857\text{Log } t_A + 0.2146$$

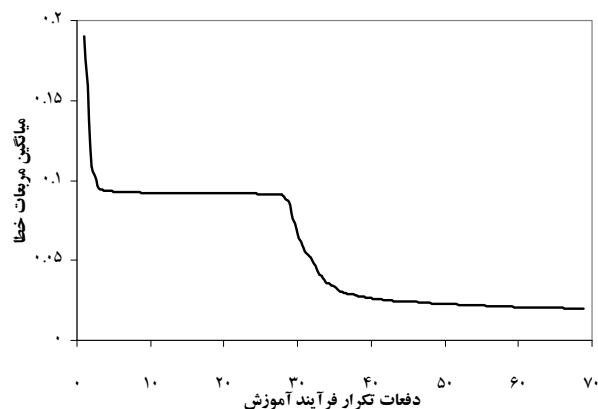
رابطه (۱۳)

$$E_2 = 0.0951\%C - 0.2085\%Si + 1.2656\%Mn + 0.4263\%Mo + 1.1487\%Ni + 1.1448\%Cu + 0.5439 T\gamma - 0.9037\text{Log } t\gamma + 0.9173 T_A - 0.1319\text{Log } t_A + 2.9724$$

رابطه (۱۴)

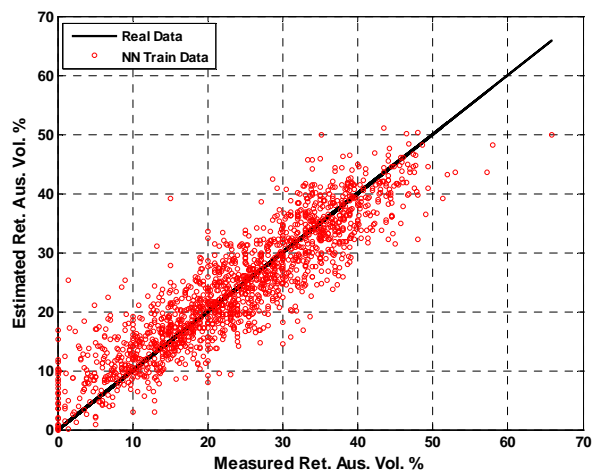
$$E_3 = 1.8637\%C + 0.1763\%Si - 0.2765\%Mn - 0.0144\%Mo + 0.2276\%Ni + 0.3176\%Cu +$$

رابطه



شکل (۶): منحنی خطای آموزش شبکه انتخابی (با ۶ سلول در لایه پنهان).

نتایج آموزش و آزمون شبکه سنتز شده در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. در این شکل‌ها با توجه به اینکه محور عمودی میزان آستنیت باقیمانده‌ی برآورد شده توسط شبکه و محور افقی میزان آستنیت باقیمانده واقعی می‌باشد، لذا برای داده‌های اندازه‌گیری شده، نقاط روی نیمساز ربع اول و سوم واقع می‌شوند و برای خروجی‌های شبکه، انحراف حول این خط وجود خواهد داشت. همانگونه که از این نمودارها برمی‌آید، خروجی‌های شبکه (هم برای آموزش و هم برای آزمون) حول نیمساز ربع اول تراکم یافته و انحراف ناچیزی از آن دارند و این حاکی از دقت بالای شبکه در برآورد داده‌ها و موید این مطلب است که با دقت مطلوبی می‌توان خروجی‌های شبکه را در عمل بکار بست.



شکل (۷): مقایسه داده‌های واقعی و خروجی شبکه برای داده‌های آموزش (نیمساز ربع اول و سوم).

۶- نتیجه گیری

خواص نهایی چدن‌های نشکن آستمپر شده به شدت متأثر از میزان کسر حجمی آستنیت باقیمانده در ساختار پس از عملیات حرارتی است و لذا تعیین مقدار این فاز ضروری می‌باشد. در این پژوهش برای ایجاد مدلی که بتواند بر اساس ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی چدن نشکن مورد نظر، مقدار این فاز را برآورد نماید از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی استفاده گردید. بانک داده‌ها از پایان‌نامه‌ها و مقالات منتشر شده در مجلات معتبر بین‌المللی تدوین گردید و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه بهینه با ۶ نرون در یک لایه مخفی با استفاده از ۱۶۰۰ داده بصورت یازده تایی مرتب، آموزش داده شد و ۵۴۱ داده دیگر برای آزمون شبکه مورد استفاده قرار گرفت. دقت شبکه در حین آموزش و آزمون با معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMS) و میانگین مربعات خطا (MSE)سنجیده شد. رابطه رگرسیون خطی توابع فشرده‌ساز که آنها هم توابع تانژانت سیگموئیدی از توابع جمع سلول‌های لایه مخفی هستند، مقدار نرمالیزه شده آستنیت باقیمانده را بدست می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که شبکه با دقت بسیار بالایی می‌تواند مقدار این فاز را برآورد کند و لذا از رابطه گزارش شده می‌توان براحتی و با خطای بسیار پایین برای برآورد آستنیت باقیمانده موجود در ریزساختار این نوع چدن‌ها و انجام برآوردی از خواص مکانیکی و متالورژیکی این آلیاژها بهره جست.

۷- منابع و مراجع

- [1] R.C. Voigt, "Austempered Ductile Iron Processing and Properties", Cast Metals, Vol.2, No.2, pp. 71-93, 1989.
- [2] R. Elliot, M. Bahmani, N. Varahraam, "Austempered Ductile Iron: A Competitive Alternative for Forged Induction-Hardened Steel Crankshafts", Cast Metals, Vol. 9, No. 5, pp. 249-257, 1997.
- [3] D.J. Moore, T.N. Rouns, K.B. Rundman, "Effects of Manganese on Structure and Properties of Austempered Ductile Iron: A processing window concept", AFS Transactions, No. 48, pp. 255-264, 1986.
- [4] K.B. Rundman, R.C. Klug, "An X-ray and Metallographic Study of an Austempered Ductile Cast Iron", AFS Transactions, No. 90, pp. 499-508, 1982.

$$E_4 = -0.0705\%C - 0.1023\%Si - 0.4396\%Mn - 0.1486\%Mo - 0.4381\%Ni - 0.0440\%Cu - 0.2134 T\gamma + 0.0414 \text{Log } t\gamma + 0.6947 T_A + 1.9288 \text{Log } t_A + 0.4271 \quad (15)$$

$$E_5 = -1.0131\%C - 0.3207\%Si - 0.2962\%Mn - 0.2247\%Mo - 0.2744\%Ni + 0.1133\%Cu - 0.3192 T\gamma + 0.0203 \text{Log } t\gamma + 1.9291 T_A + 2.1420 \text{Log } t_A - 0.0827 \quad (16)$$

$$E_6 = 0.4117\%C + 0.2586\%Si + 0.0360\%Mn + 0.0254\%Mo + 0.2414\%Ni - 0.0399\%Cu + 0.5696 T\gamma + 0.0989 \text{Log } t\gamma + 1.7078 T_A + 0.0976 \text{Log } t_A - 1.3373 \quad (17)$$

$$F_i = \frac{2}{1 + \exp(-2E_i)} - 1 \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (18)$$

$$F_i = \frac{2}{1 + \exp(-2E_i)} - 1 \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (19)$$

مقدار آستنیت باقیمانده در نمونه‌های آستمپر شده برحسب درصد کربن، درصد سیلیسیم، درصد منگنز، درصد مولیبدن، درصد نیکل، درصد مس، دمای آستنیت کردن، زمان آستنیت کردن، دمای آستمپر کردن و زمان آستمپر کردن بصورت رابطه (۲۰) داده شده است که در واقع یک تابع رگرسیون خطی از توابع فعال‌سازی سلول‌های لایه میانی (که آنها هم به نوبه خود از توابع جمع لایه ورودی بدست می‌آیند) به شمار می‌رود و به کمک آن مقدار آستنیت باقیمانده این نوع چدن‌ها برحسب پارامترهای ترکیب شیمیایی و سیکل عملیات حرارتی به راحتی قابل محاسبه است. باید خاطر نشان کرد که مقادیر ورودی مطابق رابطه (۱۱) باید در محدوده [+۱، -۱] نرمالیزه گردند و به تبع آن خروجی داده شده توسط رابطه (۲۰) نیز مقدار نرمالیزه شده در محدوده فوق می‌باشد که مطابق با رابطه (۱۲) باید به مقدار کسر حجمی آستنیت باقیمانده دی‌نرمالیزه شوند.

$$\text{Vol. \% Ret. Aus.} = 2.4127F_1 + 0.2111 F_2 - 0.6091 F_3 + 1.3497 F_4 + 1.0624 F_5 - 1.2259 F_6 - 1.7619 \quad (20)$$

- [22] N. Darawish, R. Elliott, "Austempering of low manganese ductile irons part 1; processing window", *Mater. Sci. & Technol.*, Vol. 9, pp. 572-585, 1993.
- [23] J. Aranzabal, I. Gutierrez, J. Urcola, "Influence of heat treatment on microstructure of austempered ductile iron", *Mater Sci & Technol*, Vol. 10, pp. 728-737, 1994.
- [24] M.M. Shea and E.F. Ryntz, "Austempering Nodular Iron for Optimum Toughness", *AFS Trans.*, Vol. 125, pp. 683-688, 1986.
- [25] D.J. Moore, T.N. Rouns, K.B. Rundman, "Structure and mechanical properties of austempered ductile irons", *AFS Transactions*, Vol. 103, pp. 705-718, 1985.
- [26] T.N. Rouns, D.J. Moore, K.B. Rundman: "On the Structure and Properties of Austempered Ductile Cast Iron", *AFS Trans.*, Vol. 92, pp. 815-840, 1984.
- [27] D.J. Moore, T.N. Rouns, K.B. Rundman, "Effect of Manganese on Structure and Properties of Austempered Ductile Iron," *AFS Trans.*, Vol. 48, pp. 255-264, 1986.
- [28] D.J. Moore, T.N. Rouns, K.B. Rundman, "The Relationship Between Microstructure and Tensile Properties in ADI", *AFS Trans.*, Vol. 95, pp. 765-774, 1987.
- [29] T.N. Rouns, K.B. Rundman, "Constitution of Austempered Ductile Iron and Kinetics of Austempering", *AFS Transactions*, Vol. 116, pp. 851-874, 1987.
- [30] E. Dorazil, T. Podrabsky, J. Svejcar, "Micro-inhomogeneity of low alloy austempered ductile cast iron matrix", *AFS Trans*. Vol. 13, pp. 765-774, 1990.
- [31] M. Grech, J.M. Young, "Influence of austempering temperature on the characteristics of austempered ductile iron alloyed with Cu and Ni", *AFS Transactions*, Vol. 160, pp. 345-353, 1990.
- [32] G. Nadkarni, A.H. Behraves, R.D. Warda, K.G. Daris, M. Sahoo, "Low Carbon Equivalent Austempered Ductile Irons", *AFS Transactions*, No. 45, 1995, pp. 93-101.
- [33] S. Yazadani and R. Elliott, "Influence of Molybdenum on Austempering behaviour of Ductile Iron; Part 1 – Austempering Kinetics and Mechanical Properties of Ductile Iron Containing 0.13% Mo", *Material Science & Technology*, Vol. 15, pp. 531-540, 1999.
- [34] S. Yazadani and R. Elliott, "Influence of Molybdenum on Austempering behaviour of Ductile Iron; Part 2 – Influence of Austenitising Temperature on Austempering Kinetics, Mechanical Properties and Hardenability of Ductile Iron Containing 0.13% Mo", *Material Science & Technology*, Vol. 15, pp. 541-546, 1999.
- [35] S. Yazadani and R. Elliott, "Influence of Molybdenum on Austempering behaviour of Ductile Iron; Part 3 – Austempering Kinetics, Mechanical Properties and Hardenability of Ductile Iron Containing 0.25% Mo ", *Material Science & Technology*, Vol. 15, pp. 885-895, 1999.
- [36] S. Yazadani and R. Elliott, "Influence of Molybdenum on Austempering behaviour of Ductile Iron; Part 4 – Austempering Behaviour of Ductile Iron Containing
- [5] R.B. Gundlach, "Transformative in Austempering Nodular Iron", *Physical Metallurgy of Cast Iron proceeding*, pp. 399-404, 29-31 August 1984.
- [6] B.V. Kovacs, "A Simple Technique to Identify Various Phases in ADI", *Modern Castings*, pp. 34-35, June 1987.
- [7] B.V. Kovacs, "On the Terminology and Structure of ADI", *AFS Transactions*, No. 83, pp. 417-420, 1994.
- [8] "Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel With Near Random Crystallographic Orientation", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, pp. 753-758, 1990.
- [9] N.K. Kasabov, "Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering", *Massachusetts Institute of Technology*, Second Edition, 1998.
- [10] Howard Demuth, Mark Beale, "Neural Network Toolbox for Use with MATLAB", *The MathWorks, Inc.*, 2002.
- [11] L.P.J. Veelenturf, "Analysis and Applications of Artificial Neural Networks", *Prentice Hall International*, 1995.
- [12] B. Krose, Patrick Smagt, "An Introduction to Neural Networks", *University of Amsterdam*, 8th ed., 1996.
- [13] A. Pacheco-Vega, M. Sen, K.T. Yang, R.L. McClain, "Neural Network Analysis of a Fin-tube Refrigerating Heat Exchanger with Limited Experimental Data", *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, 2001.
- [14] A. Chaouai, S. Laugier, D. Richon, "Modeling of Thermodynamic Properties using Neural Networks; Application to Refrigerants", *Fluid Phase Equilibrium*, 2002.
- [15] S.E. Stenfors, J. Storesun, R. Sandstrom, "Influence of Heat Treatment and Composition on the Mechanical Properties and Machinability of Austempered Ductile Cast Iron", *2nd Int. conf. on Austempered Ductile Iron*, Ann Arbor, pp. 227-236, 1986.
- [16] K. B. Rundman, D. J. Moore, K. L. Hayrynen, W. J. Dubensky and T. N. Rouns, "The microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron", *J. of Heat Treating* Vol.5, No.2, pp. 79-95, 1988.
- [17] O. Yanagisawa, N. Varahaam, "Properties of austempered ductile iron in equipment designed for consecutive in-stream treatment gravity-die casting and direct austempering", *Cast Metals*, No. 3, pp. 129-139, 1990.
- [18] M. Grech, J.M. Young, "Effect of austenitising temperature on tensile properties of Cu-Ni austempered ductile iron", *Materials Science and Technology*, Vol. 6, pp. 415-421, May 1990.
- [19] Wu-Sheng Zhou, Qing-Dezhou, Shou-Kang Meng, "Abrasion Resistance of Austempered Ductile Iron", *Cast Metals*, Vol. 6, No. 2, pp. 69-75, 1993.
- [20] M. Nilli Ahmadabadi, "Effects of Successive-Stage Austempering on the Structure and Impact Strength of High Mn Ductile Iron", *Cast Metals*, Vol. 5, No. 2, pp. 62-72, 1992.
- [21] J.M. Prado, A. Pujol, J. Cullerell, and J. Tartera, "Dry Sliding Wear of Austempered Ductile Iron", *Materials Science and Technology*, Vol. 11, pp. 294-298, March 1995.

- Temperature", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 29A, pp. 3005-3016, 1998.
- [51] I. Schmidt, A. Schuchert, "Unlubricated sliding wear of austempered ductile iron", Metallkunde, Vol. 78, pp. 871-875, 1987.
- [52] P. Shanmugam, P. Prasad, K. U. Rajendra and N. Venkataraman, "Effect of microstructure on the fatigue strength of an austempered ductile iron", J. of Material Science, Vol. 29, pp. 4933-4940, 1994.
- [53] A. Trudel and M. Gagné, "Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons", Canadian Metallurgy Quarterly, No. 36, pp. 289-298, 1997.
- [54] T.S. Shih, Z.C. Yang, "Effects of nickel and processing variables on the mechanical properties of austempered ductile irons", Int. J. of Cast Metals Res, Vol. 10, pp. 335-344, 1998.
- [55] P.P. Rao, S.K. Putatunda, "Comparative Study of Fracture Toughness of Austempered Ductile Iron with Upper and Lower Ausferrite Structures", Material Science and Technology, Vol. 14, pp. 1257-1265, 1998.
- [56] M. Bahmani, "Kinetics, Structure and Mechanical Properties of a Mn-Ni-Cu-Mo Alloyed Austempered Ductile Iron and its Application for Crankshafts", Ph.D. Thesis, University of Manchester, 1996.
- [57] J. Zimba, D.J. Simbi, E. Navara, "Austempered ductile iron: an alternative material for earth moving components", Cement & Concrete Composites, Vol. 25, pp. 643-649, 2003.
- [58] A. Nazarboland and R. Elliott, "The Relationship between Austempering Parameters, Microstructure and Mechanical Properties in a Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron", Cast Metals Res., Vol. 9, pp. 295-308, 1997.
- [59] J. Yang, S.K. Putatunda, "Effect of microstructure on abrasion wear behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process", Materials Science and Engineering A, Vol. 406, pp. 217-228, 2005.
- [60] L.C. Chang, I.C. Hsui, L.H. Chen, T.S. Lui, "Effects of heat treatment on the erosion behavior of austempered ductile irons", Wear, Vol. 260, pp. 783-793, 2006.
- [61] F.Y. Hung, L.H. Chen, T.S. Lui, "A study on the particle erosion of upper bainitic austempered ductile iron", Wear, Vol. 252, pp. 985-991, 2002.
- [62] O. Eric, L. Sidjanin, Z. Miskovic, S. Zec, M.T. Jovanovic, "Microstructure and toughness of CuNiMo austempered ductile iron", Materials Letters, Vol. 58, pp. 2707-2711, 2004.
- [63] Ulvi Seker, Hasan Hasirci, "Evaluation of machinability of austempered ductile irons in terms of cutting forces and surface quality", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 173, pp. 260-268, 2006.
- [64] J. Zimba, M. Samadani, D. Yu, T. Chandra, E. Navara, D.J. Simbi, "Un-lubricated sliding wear performance of unalloyed austempered ductile iron under high contact stresses", Material and Design, Vol. 25, pp. 431-438, 2004.
- 0.45% Mo ", Material Science & Technology, Vol. 15, pp. 896-902, 1999.
- [37] H. PourAsiabi, "Investigation on Replaceability of Carburized Forged Steel with Austempered Ductile Iron (ADI) in Wear Applications", M.Sc. Thesis, Iran University of Science & Technology (IUST), 2008, in Farsi.
- [38] H. Bayati, R. Elliott, G.W. Lorimer, "Influence of austenitizing temperature on austempering kinetics of high manganese alloyed ductile cast iron", Materials Science and Technology, Vol. 11, pp. 776-786, 1995.
- [39] R. Boschen, H. Vethers, P. Mayer and P. L. Ryder, "Investigations on the Stress Induced Martensite Formation in Austempered Ductile Cast Iron (ADI)", Practical Metallurgy, Vol. 25, pp. 524-531, 1988.
- [40] H. Bayati and R. Elliott, "Austempering process in high manganese alloyed ductile cast iron", Material Science & Technology, Vol. 11, pp. 118-129, 1995.
- [41] N. Darwish and R. Elliott, "Austempering of low manganese ductile irons Part 3; Variation of mechanical properties with heat treatment conditions", Material Science & Technology, Vol. 9, pp. 586-602, 1993.
- [42] M. Gagne, "Effect of Mn and Si on the quality of heavy section ADI castings", AFS Transactions, Vol. 95, pp. 523-532, 1987.
- [43] A.S. Hamid Ali, R. Elliott, "Influence of Austenitising Temperature on Austempering of a Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron, Part 1- Austempering Kinetics and the Processing Window", Materials Science and Technology, Vol. 12, pp. 1021-1031, 1996.
- [44] R. Kazerooni, A. Nazarboland and R. Elliott, "Use of Austenitising Temperature in Control of Austempering of An Mn-Mo-Cu Alloyed Ductile Iron", Material Science & Technology, Vol. 13, pp. 1007-1015, 1997.
- [45] T. Kobayashi, H. Yamamoto, "Development of high toughness in austempered type ductile cast iron and evaluation of its properties", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 19A, pp. 319-327, 1988.
- [46] C.K. Lin, Y.J. Wei, "High Cycle Fatigue of Austempered Ductile Iron in Various Sized Y-Blocks Castings", Material Transactions, Vol. 38, No.8, pp. 682-691, 1997.
- [47] A. Owahdi, J. Hedjazi, P. Davami, "Wear Behavior of 1.5Mn Austempered Ductile Iron", Material Science & Technology, Vol. 14, pp. 245-250, 1998.
- [48] S.K. Putatunda, K. Gadicherla, "Influence of austenitizing temperature on fracture toughness of a low manganese austempered ductile iron (ADI) with ferritic as cast structure", Materials Science and Engineering A, No. 268, pp. 15-31, 1999.
- [49] P.P. Rao, S.K. Putatunda, "Influence of microstructure on fracture toughness of austempered ductile cast iron", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 28A, pp. 1457-1470, 1997.
- [50] P. Prasad and S. K. Putatunda, "Dependence of Fracture Toughness of Austempered Ductile Iron on Austempering

۹- فهرست نمادهای بکار رفته در روابط

I_a^{hkl} ، شدت انتگرال در واحد طول خط پراش (J/s.m)

I_0 ، شدت اشعه تابش ($J/s.m^2$)

A، سطح مقطع اشعه تابشی (m^2)

λ ، طول موج اشعه تابشی (m)

r ، شعاع دایره دیفراکتومتر (m)

e، بار یک الکترون (C)

m، جرم یک الکترون (Kg)

V، حجم سلول واحد (m^3)

F، فاکتور ساختمانی

P، فاکتور تعدد

θ ، زاویه براگ

e^{-2M} ، فاکتور درجه حرارت

μ ، ضریب جذب خطی

- [65] M.J. Perez, M.M. Cisneros, H.F. Lopez, "Wear Resistance of Cu-Ni-Mo Austempered Ductile Iron", *Wear*, No. 26, pp. 879-885, 2006.
- [66] K.H. Nen, "ADI: Another Avenue of Ductile Iron Foundries", *Modern Casting*, Vol. 85, No. 8, pp. 35-37, 1995.
- [67] G. Francucci, J. Sikora, R. Dommarco, "Abrasion resistance of ductile iron austempered by the two-step process", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 63, pp. 34-39, 2007.
- [68] O. Eric, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Zec, "An austempering study of ductile iron alloyed with copper", *J. of Serb. Chem. Soc.* Vol. 70, No. 7, pp. 1015-1022, 2005.

۸- پی نوشت

1. Artificial Neural Network
2. Simulated Neural Network
3. Neural Network
4. Root Mean Square
5. Mean Square Error
6. Multi-Layer Perceptron
7. Hidden Layer
8. Levenberg-Marquardt Algorithm
9. Test