



## پیش‌بینی نیرو و گشتاور در فرآیند نورد داغ ورق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و روش المان محدود

حمیدرضا رضایی آشتیانی\*

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

### چکیده

در این مطالعه، به بررسی اثرات پارامترهای مختلف فرآیند نورد داغ و پیش‌بینی نیرو و گشتاور نورد با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و المان محدود سه بعدی پرداخته شده است. برای این منظور، داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی برای آموزش و ارزیابی شبکه، وارد شبکه عصبی می‌شوند و پس از آموزش و ارزیابی، شبکه قادر خواهد بود که نیرو و گشتاور نورد را پیش‌بینی کند. نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی المان محدود برای اعتبار سنجی، با نتایج تجربی مقایسه شده است که نتایج به دست آمده، از تطابق خوبی برخوردار بوده است. به این ترتیب برای ایجاد مدل شبیه‌سازی المان محدود و مدل شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب، از دو نرم‌افزار آباکوس و متلب استفاده شده است. الگوریتم و تابع آموزش به‌کار رفته در این مدل به ترتیب، الگوریتم پس انتشار خطا و لونیگ-مارکورت بوده است. در اینجا پارامترهای مختلف و مهم فرآیند نورد داغ شامل، دمای اولیه ورق، ضریب انتقال حرارت بین ورق و غلتک‌های کاری، کاهش ضخامت ورق، ضخامت اولیه ورق و سرعت نورد، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از شبکه عصبی مصنوعی، حاکی از آن است که می‌توان با تغییر پارامترهای مختلف فرآیند نورد داغ، مقادیر نیرو و گشتاور را در کمترین زمان ممکن با دقت بالا پیش‌بینی کرد.

**کلمات کلیدی:** نورد داغ؛ نیروی نورد؛ گشتاور نورد؛ روش المان محدود؛ شبکه عصبی مصنوعی.

## Predication of Roll Force and Roll Torque in Hot Strip Rolling Process using Artificial Neural Networks and Finite Element Method

H. Rezaei Ashtiani

Assist. Prof., Faculty of Mech. Eng., Arak University of Technology, Arak, Iran

### Abstract

This paper introduces an artificial neural network (ANN) application to a hot strip mill to improve the model's prediction ability for rolling force and rolling torque, as a function of various process parameters. To obtain a data basis for training and validation of the neural network, numerous three dimensional finite element simulations were carried out for different sets of process variables. Experimental data were compared with the finite element predictions to verify the model accuracy. Thus the ABAQUS and MATLAB soft wares are used to simulate the finite element method and an artificial neural network, respectively. The back-propagation algorithm and Levenberg-Marquardt Training function were used in the artificial neural network. The input variables are selected to be, initial temperature of the strip, interface heat-transfer coefficient between strip and work roll, percentage of thickness reduction, initial thickness and rolling speed. The resulted ANN model is feasible for on-line control and rolling schedule optimization and can be easily and rapidly predicted the roll force and roll torque.

**Keywords:** Hot Rolling; Roll Force; Roll Torque; Finite Element Method; Artificial Neural Network.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۰۸۶۳۳۶۷۰۰۲۴؛ فکس: ۰۰۸۶۳۳۶۷۰۰۲۰

آدرس پست الکترونیک: [hr\\_rezaei@arakut.ac.ir](mailto:hr_rezaei@arakut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

امروزه، حفظ و نگهداری کیفیت و کمیت محصول در فرآیند ساخت، از توجه و اهمیت زیادی برخوردار بوده، این امر سبب افزایش رقابت در بازارهای جهانی می‌شود. در این میان صنعت نورد، توجه زیادی را به خود جلب کرده است؛ به گونه‌ای که این صنعت، یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تولید محصولات فلزی، بویژه ورق‌ها محسوب می‌شود. محصولات تولیدی از این صنعت در صنایع مختلفی همچون، صنعت هواپیماسازی، خودروسازی، لوله‌سازی، صنایع دریایی، مسکونی و ... استفاده می‌شود. فرآوری حرارتی-مکانیکی چنین محصولاتی اغلب شامل، مراحل از فرآیند نورد داغ است. شرایط کارداغ، غالباً به منظور افزایش کارپذیری فلز و کاهش انرژی لازم برای شکل دهی و گاهی اصلاح خواص میکروساختاری و مکانیکی محصولات ضروری است. با توجه به اینکه تعداد پارامترهای موثر و همچنین اثرات ترکیبی آن‌ها در فرایندهای حرارتی - مکانیکی همچون نورد داغ، زیاد و پیچیده است، بنابراین بررسی، کنترل و پیش‌بینی رفتار ماده هنگام انجام این فرایندها، کاری سخت با حساسیت‌ها و پیچیدگی‌های خاص خود است؛ بنابراین پیش‌بینی و کنترل نیرو و گشتاور در فرآیند نورد داغ آلومینیوم، دارای اهمیت زیادی است؛ بطوری‌که نیرو و گشتاور اعمالی می‌تواند ضخامت ماده نورد شده، پروفیل محصول نهایی و خواص مکانیکی و میکروساختاری ماده نهایی را تغییر داده، ضمن اینکه این دو پارامتر، تعیین‌کننده انرژی و هزینه مصرفی است. امروزه افزایش تقاضا در کیفیت تولیدات نورد، به تلاش‌های بیشتر برای بهبود و اصلاح سیستم‌های اتوماسیونی و کنترلی فرآیند نورد منتهی شده که این امر، زمینه پیش‌بینی دقیق نیرو و گشتاور تحت شرایط مختلف نورد را فراهم می‌کند. به این ترتیب، تعداد زیادی از محققان به بررسی و پیش‌بینی نیرو و گشتاور نورد در طی فرآیند نورد داغ پرداخته‌اند [۹-۱۱].

اروان [۱۱]، یکی از پیشگامان در تحلیل فرآیند نورد است. او تئوری جامعی را بر پایه بسط روش قاچی انجام داد و با معرفی تغییر شکل پلاستیک غیر همگن از ورق و تغییر شکل الاستیک غلتک‌ها، تئوری‌اش را کامل کرد. چند سال بعد سیمز [۱۲]، با اجتناب از انتگرال عددی در تئوری اروان، حالت‌های تحلیلی از توزیع فشار، نیروی نورد و گشتاور نورد

را انجام داد. فورد و الکساندر [۳]، مدل اروان را با استفاده از تکنیک تحلیل المان محدود اصلاح کرده، نتایج آن را با نتایج برای فلز غیر آهنی مقایسه کردند.

یکی از روش‌های پرکاربرد برای ارزیابی فرآیند نورد داغ، روش المان محدود است که می‌تواند فرآیند نورد داغ را تحت محدودیت‌های واقعی فرآیند و شرایط تغییر شکل مختلف مدل سازی نماید. فرمول‌بندی المان محدود فرآیند نورد داغ، ابتدا بوسیله وانگ و جاوون [۴] ارائه شد. آنها در آزمایشات خود تاثیر ضریب اصطکاک را روی نیروی نورد، فشار نورد و توزیع تنش مماسی بررسی کردند. شانگو و همکارانش [۵]، یک مدل سه‌بعدی از فرآیند نورد داغ ورق‌های تخت را مورد تحلیل قرار دادند. آنها با ترکیب مدل‌های المان محدود و المان مرزی، نیروی نورد، گشتاور نورد و فشار تماسی روی غلتک را برای هر دو حالت غلتک صلب و غلتک انعطاف‌پذیر پیش‌بینی کردند. واک و همکارانش [۶]، با استفاده از روش المان محدود صلب ویسکوپلاستیک و تصویر کلی از حالت تغییر شکل فرضی در شکافنورد، به پیش‌بینی نیروی نورد و توان کارکرد در مرحله نهایی نورد داغ ورق پرداختند. دان و شپارد [۷]، نورد داغ آلومینیوم ۳۰۰۳ را با استفاده از نرم افزار المان محدود فورج سه‌شبه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که جهت پیش‌بینی نیرو و گشتاور نورد، قانون اصطکاک ویسکوپلاستیک، کمی از قانون‌های اصطکاک ترسکا و کولمب بهتر است. وانگ و همکارانش [۸] برای افزایش دقت محاسبات نیروی نورد، تاثیرات تنش نرمال و تنش برشی را در جهت طولی، عرضی و نیز ارتفاع بررسی نمودند. ژانگ و سو [۹]، با ترکیب مدل مکانیکی- حرارتی سه‌بعدی و المان محدود الاستیک- پلاستیک، به بررسی تاثیر نیروی نورد روی شکل ورق و ابعاد نهایی آن پرداختند. گرچه روش المان محدود یکی از ابزارهای کارآمد و قوی جهت شبیه‌سازی مسائل مهندسی است، اما شبیه‌سازی المان محدود یک فرآیند زمان بر بوده، تعیین دقیق و درست جنبه‌های گوناگون شرایط تغییر شکل، مشکل است.

از روش‌هایی که می‌تواند روابط موجود بین پارامترهای فرآیندی و نتایج را پیش‌بینی کند، مدل شبکه عصبی مصنوعی است. این مدل در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده، در بسیاری از موارد، جهت پیش‌بینی رفتار فرآیندهای مختلف شکل دهی همچون نورد سرد، مورد

شبکه عصبی می‌شوند و پس از آموزش و آزمایش، شبکه می‌تواند نیرو و گشتاور نورد را پیش‌بینی کند؛ همچنین اعتبار سنجی مدل المان محدود نیز به کمک مقایسه نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی بررسی شده است که نتیجه به دست آمده قابل قبول بوده است.

## ۲- الگوی ریاضی

### ۲-۱- معادلات حرارتی

انتقال حرارت در فرآیند نورد داغ، نقش مهمی ایفا می‌کند، به نحوی که هم ورق و هم غلتک تحت تاثیر میدان‌های دمایی قرار می‌گیرند. معادله دیفرانسیلی جزئی سه بعدی حاکم بر توزیع دما در ورق در طی فرآیند نورد داغ ورق در معادله (۱) ارائه شده است [۱۹].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

همچنین با صرف‌نظر از هدایت حرارتی در راستای پهنا غلتک، معادله دیفرانسیلی جزئی حاکم بر توزیع دما در غلتک در معادله (۲)، آورده شده است [۱۹].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho_r c_r \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

که در این روابط پارامترهای  $\rho$ ،  $c$  و  $k$  به ترتیب، چگالی، گرمای ویژه و هدایت حرارتی برای ورق و غلتک می‌باشند. زیروندهای  $r$  و  $s$  به ترتیب، برای غلتک و ورق می‌باشند و  $x$  و  $y$  و  $z$  به ترتیب، فاصله در امتداد طول، ضخامت و عرض ورق است.  $\dot{q}$  شار حجمی گرمای تولید شده در اثر تغییر شکل بوده، با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید [۱۹].

$$\dot{q} = \eta \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \quad (3)$$

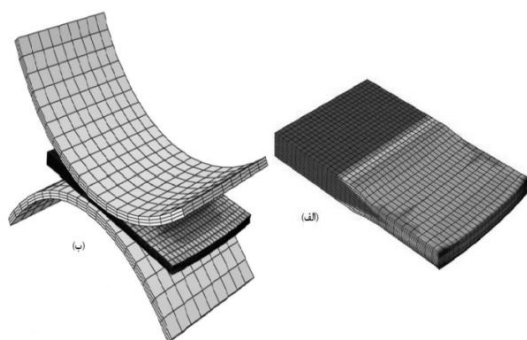
که در آن  $\eta$  بازده تبدیل انرژی تغییر شکل مکانیکی به گرما با مقدار ۰/۹۵ برای آلیاژهای آلومینیوم است و  $\bar{\sigma}$ ، تنش سیلان موثر و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش موثر است.

### ۲-۲- شرایط مرزی مکانیکی

شرط مرزی تماسی، بیانگر تماس مکانیکی بین ورق و غلتک‌های کاری است که در امتداد سطح مشترک ورق و غلتک‌های کاری اتفاق می‌افتد. همانگونه که در رابطه (۴) نشان داده شده است، اصطکاک بین دو سطح متناسب با تنش نرمال است [۲۰].

استفاده قرار گرفته است [۱۱-۱۰]. پورتمن و همکارانش [۱۲]، برای اولین بار یک طرح آموزش شبکه عصبی در سیستم کنترل ماشین نورد معرفی کردند. این طرح، ترکیبی از شبکه عصبی و مدل ریاضی مبتنی بر فیزیک کلاسیک بود. چان و همکارانش [۱۳]، توانایی و کارایی مدل شبکه عصبی را مطالعه کردند و با استفاده از الگوریتم آموزش پس‌انتشار، تنش سیلان، نیروی نورد و گشتاور نورد را هنگام نورد داغ آلیاژ آلومینیوم پیش‌بینی کردند. جن و کیم [۱۴]، الگوریتمی از شبکه‌های عصبی طراحی کردند. عملکرد این الگوریتم به نحوی بود که نیرو و گشتاور صحیح نورد را قبل از ورود ورق به غلتک‌های کاری به سرعت و به درستی محاسبه نماید و به سیستم نورد برای بهینه‌کردن فرآیند تولید ورق فرستاده شود. این الگوریتم، از کارایی خوبی برخوردار بود؛ به نحوی که می‌توانست قبل از رسیدن ورق به غلتک، مقادیر صحیح را پیش‌بینی کند. یانگ و همکارانش [۱۵]، روش مدل‌سازی شبکه عصبی را برای پیش‌بینی نیرو و گشتاور نورد ارائه کردند؛ همچنین آن‌ها یک سال بعد، مدل دیگری از شبکه عصبی را بر پایه داده‌های بدست آمده از مدل المان محدود برای پیش‌بینی نیروی نورد انجام دادند [۱۶]. بر اساس مشاهدات یانگ و همکارانش، پیش‌بینی نیروی نورد به طور کامل مخالف خطاهای ارائه شده بود. این خطاها به علت تعیین مقادیر ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت است. ستایشی و همکارانش [۱۷]، با استفاده از مدل شبکه عصبی و المان محدود دو بعدی، به پیش‌بینی نیروی پایانی نورد در فرآیند نورد داغ پرداختند. باقری پور و بیسادی [۱۸]، با استفاده از مدل شبکه عصبی به پیش‌بینی نیرو و گشتاور نورد در طی فرآیند نورد داغ ورق پرداختند. آنها برای این امر، یک مدل المان محدود سه‌بعدی را برای فراهم نمودن داده‌های ورودی برای آموزش شبکه به کار گرفتند.

در این مطالعه، سعی شده است تا با استفاده از روش‌های المان محدود سه بعدی و شبکه عصبی مصنوعی، نیرو و گشتاور فرآیند نورد داغ ورق آلومینیوم خالص، ارزیابی و پیش‌بینی شود. با عنایت به اینکه در این تحقیق اغلب پارامترهای مهم فرآیند نورد مورد بررسی دقیق قرار گرفته، بنابراین شبکه ارائه شده در مقایسه با تحقیقات قبلی منحصربرفرد است. برای این منظور، داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود برای آموزش و ارزیابی شبکه، وارد



شکل ۱- مدل المان محدود در حین نورد داغ، (الف) ورق و (ب) مدل کامل ورق و غلتک‌ها

با توجه به تقارن موجود و به منظور افزایش سرعت تحلیل، تنها یک چهارم از هندسه ورق در مدل‌سازی منظور گردیده است. در مورد غلتک‌ها نیز با توجه به تقارن هندسی، ۹۰ درجه از هندسه غلتک با ضخامت ۵ میلی‌متر مدل شده است. در این حالت، ورق و غلتک با قابلیت تغییر شکل در نظر گرفته شده‌اند. رفتار ورق به صورت ترموویسکوپلاستیک فرض شده، از آنجا که دامنه تغییرات دمایی، کرنش و نرخ کرنش در اثر انجام فرآیند زیاد است، لازم است تا رفتار پلاستیک ورق به عنوان تابعی از دما، کرنش و نرخ کرنش مشخص شود. این مهم توسط معادله سینوس هایپربولیک مشخص می‌شود که در رابطه (۸) آورده شده است که تنش سیلان را به عنوان تابعی از دما و نرخ کرنش برای آلومینیوم بیان می‌کند

$$\dot{\epsilon} = A(\sinh(\alpha\sigma_{ss}))^m \left( \frac{Q_{def}}{RT_{def}} \right) \quad (8)$$

ضرایب  $A$ ،  $\alpha$  و  $m$  در رابطه (۸)، ثابت مادی و به ترتیب ۱/۹۱ به توان ۷، ۰/۲۳ و ۴/۲۸ برای آلومینیوم خالص می‌باشند.  $\sigma_{ss}$  تنش سیلان در حالت پایا و  $Q_{def}$  انرژی فعال سازی تغییر شکل و برابر ۱۷۵/۳ کیلو ژول بر مول است. برای اعمال این معادله به نرم افزار، مقدار تنش سیلان برحسب کرنش در مقدار دمایی و نرخ کرنش متفاوت به صورت جداول درآورده شده است و وارد نرم افزار شده است؛ همچنین مقادیری از ثابت‌های الاستیک استفاده شده در آلومینیوم خالص، به عنوان تابعی از دما در جدول ۱ فهرست شده‌اند. خواص حرارتی - فیزیکی آلومینیوم خالص، در جدول ۲ ارائه شده است. چگالی ورق، ثابت و  $2710 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$  در نظر گرفته شده است. غلتک فولادی از ماده الاستیک با

$$\tau_{cr} = \mu P \quad (4)$$

که در آن  $\tau_{cr}$  تنش برشی بحرانی مورد نیاز جهت شروع لغزش،  $\mu$  ضریب اصطکاک بین ورق و غلتک‌های کاری و  $P$  فشار است؛ بنابراین حرارت تولیدی ناشی از اصطکاک از رابطه (۵) حاصل می‌شود [۲۰].

$$q_{fric} = \tau_{cr} A_c |uv_r - uv_c| \quad (5)$$

که در آن  $(uv_r - uv_c)$  سرعت خطی نسبی ورق و غلتک‌های کاری و  $A_c$  سطح تماس بین ورق و غلتک است.

### ۳-۲- شرایط مرزی حرارتی

از آنجا که گرمای از دست داده شده توسط ورق در ناحیه تماس به غلتک منتقل می‌شود، حل همزمان معادلات انتقال حرارت در ورق و غلتک ضروری است. شرایط مرزی ورق و غلتک در ناحیه تماس را می‌توان به ترتیب توسط روابط (۶) و (۷) بیان کرد [۱۹].

$$-k_r \frac{\partial T}{\partial n} = h_{con}(T - T_r) - q_{fric} \quad (6)$$

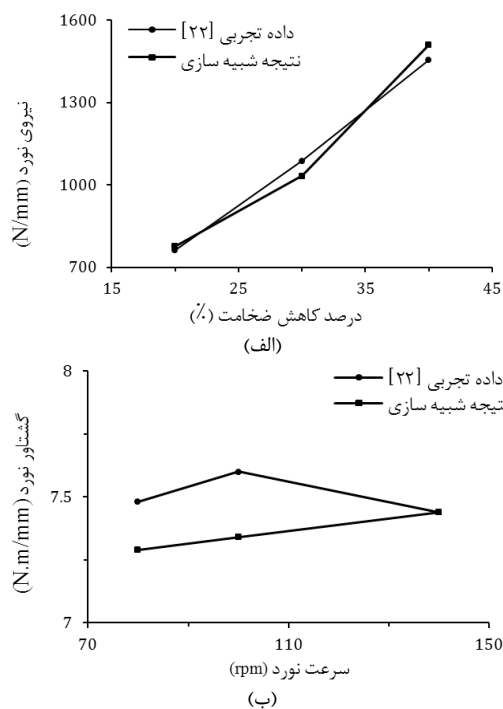
$$-k_s \frac{\partial T}{\partial n} = h_{con}(T_s - T)|_{(R=r)} - q_{fric} \quad (7)$$

در این روابط،  $h_{con}$  ضریب انتقال حرارت بین سطوح و  $T_r$  و  $T_s$  برترتیب، دمای سطح غلتک و ورق در ناحیه تماس می‌باشند. لازم به ذکر است که در ناحیه تماسی ورق و غلتک، بیشترین انتقال حرارت همرفتی بین سطوح ایجاد می‌شود و در واقع ضریب انتقال حرارت، مقدار انتقال حرارت بین سطوح را کنترل می‌کند.

### ۳- مدل المان محدود

در این مطالعه، از یک مدل المان محدود سه بعدی برای فرآیند نورد داغ آلومینیوم خالص در یک پاس و با استفاده از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. بدلیل ناهمگنی شرط مرزی در نواحی مرکزی و جانبی ورق، ناهمگنی توزیع دما از ابتدا تا انتهای عرض ورق تنها می‌تواند توسط مدل سه‌بعدی تعیین شود؛ درحالی‌که مدل دو بعدی اغلب برای حل معادله جابجایی حرارتی در غلتک‌های کاری که تحت شرایط نورد کرنش صفحه ای هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱، شمایی از مدل شبیه‌سازی فرآیند نورد داغ ورق در حالت ورق و مدل کلی شامل، ورق و غلتک‌ها را نشان می‌دهد.

مدل و داده‌های آزمایشگاهی برای نیروی نورد به ترتیب، ۵/۹ درصد و ۱/۶ درصد و برای گشتاور نورد به ترتیب، ۳/۴ درصد و نزدیک به صفر است که حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی است.



شکل ۲- مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی [۲۲] و نتایج شبیه‌سازی برای الف) نیرو و ب) گشتاور نورد

#### ۴- مدل شبکه عصبی

##### ۴-۱- شبکه‌های عصبی پس انتشار

تئوری شبکه‌های عصبی، برگرفته شده از ساختار مغز انسان است و اینکه چگونه مقادیر زیادی از اطلاعات را پردازش کند. شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل‌های انطباقی هستند که می‌توانند از داده‌ها آموزش ببینند و به داده‌هایی کلیت دهند که آموزش دیده‌اند. این شبکه‌ها بدین جهت مورد استفاده قرار می‌گیرند تا از داده‌های ورودی به داده‌های خروجی مسیرهای را تشکیل دهند و اینکه یک پدیده در عمل چگونه رفتار می‌کند، اطلاعات دهند. شبکه عصبی چند لایه، از سه لایه ورودی، مخفی و خروجی تشکیل شده است. لایه مخفی، می‌تواند یک و یا بیشتر از یک لایه داشته باشد. لایه ورودی، اولین لایه از شبکه‌های عصبی چند لایه است.

مدول یانگ (GPa) ۲۰۰ و چگالی  $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$  ۷۸۶۰ و ضریب هدایت حرارتی  $\left(\frac{\text{W}}{\text{m K}}\right)$  ۱۴ استفاده شده است [۲۱]. اختلاف زیاد مدول یانگ بین ورق و غلتک سبب شده که غلتک کاری به عنوان ماده‌ای صلب رفتار کند. نوع المان‌های انتخاب شده در این تحلیل، C3D8T است که به صورت المان‌های شش وجهی بوده، اثرات همزمان و ترکیبی جابجایی و حرارت در آن در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلومینیوم خالص

دما (°C)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
۳۰۰	۵۹/۴	۰/۳۵۶
۳۵۰	۵۷/۳	۰/۳۵۹
۴۰۰	۵۵/۱	۰/۳۶۲
۴۵۰	۵۲/۹	۰/۳۶۵
۵۰۰	۵۰/۷	۰/۳۶۸
۶۰۰	۴۶/۴	۰/۳۳۷

جدول ۲- خواص فیزیکی- حرارتی استفاده شده برای

##### آلومینیوم خالص

دما (°C)	گرمای ویژه (J/Kg.K)	هدایت حرارتی (W/m K)
۴۱	۹۰۰	۱۷۰
۲۸۰	۹۶۰	۱۹۰
۳۰۶	۹۸۰	۱۹۵
۴۱۰	۱۰۲۰	۲۰۰
۵۰۵	۱۱۳۰	۲۰۵

##### ۳-۱- اعتبار سنجی مدل المان محدود

به منظور اعتبار سنجی مدل المان محدود به کار گرفته شده، مقایسه‌ای بین نتایج پیش‌بینی شده نیرو و گشتاور نورد در شبیه‌سازی‌ها و نتایج آزمایشگاهی [۲۲] صورت گرفته است. برای این منظور، ضخامت، پهنا و طول ورق آلومینیوم خالص به ترتیب، ۶/۳۲، ۵۰ و ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قطر و ضخامت غلتک به ترتیب، ۲۵۰ و ۵ میلی‌متر قرار داده شده است.

در شکل ۲، به وضوح می‌توان دید که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی در کاهش ضخامت‌ها و سرعت‌های نورد مختلف، تطابق خوب و قابل قبولی خواهد داشت. بیشترین و کمترین خطای بدست آمده بین نتایج

سلول عصبی تا زمانی محاسبه خواهند شد که خروجی‌های نهایی حاصل شود. این مرحله پیش خورد نامیده می‌شود.

- مرحله دوم، در این مرحله خطای خروجی نهایی محاسبه شده، سپس با استفاده از این خطا، خطاهای خروجی‌های همه نورون‌ها را از جلو تا عقب حساب خواهد کرد که این مرحله، پس‌انتشار نامیده می‌شود.

- مرحله سوم، سرانجام در این مرحله، مطابق با نتایج مرحله دوم و استفاده از یک الگوریتم خاص، وزن‌ها و بایاس‌ها تغییر می‌کنند تا کمترین خطا بدست آید. هر اجرا بالا، یک سیکل نامیده می‌شود. سیکل‌ها تکرار می‌شوند تا یکی از شرایط توقف حاصل شود [۲۳].

#### ۴-۲- پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند

یکی از اهداف این تحقیق، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نیرو و گشتاور نورد ورق آلومینیوم خالص است. جهت انجام این امر، اثر یک سری پارامترهای ورودی همچون، دما و شعاع غلتک صرف‌نظر شده است. به این ترتیب پارامترهای ورودی عبارتند از: دمای اولیه ورق، ضریب انتقال حرارت بین ورق و غلتک، کاهش ضخامت ورق، ضخامت اولیه ورق و سرعت نورد. الگوی شبکه عصبی به کار گرفته شده در شکل ۳ ارائه شده است.

#### ۴-۳- نرمالیزه‌سازی داده‌های ورودی و هدف

معمولاً قبل از ورود داده‌های هدف و ورودی به شبکه عصبی پس‌انتشار، نیاز به یکپارچه سازی داده‌ها است. برای این منظور، از معادله (۱۱) استفاده می‌شود.

$$X_i = 0.1 + 0.8 \times \left( \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right) \quad (11)$$

که در آن  $X$ ، داده‌های اصلی،  $X_{\min}$  و  $X_{\max}$ ، بترتیب مقدار حداقل و حدکثر  $X$  و  $X_i$ ، داده‌های یکپارچه متناظر با  $X$  است.

#### ۴-۴- طراحی و آزمایش شبکه عصبی

برای ایجاد یک مدل شبکه عصبی کارآمد و قوی، به میزان قابل توجهی از داده‌ها برای آموزش نیاز است. نیرو و گشتاور نورد با توجه به آموزش داده‌ها برای مقادیر مختلف متغیرهای فرآیند توسط روش فاکتوریل کامل محاسبه شده که از

لایه‌های که بین لایه ورودی و خروجی قرار می‌گیرند را لایه‌های مخفی نامیده می‌شوند. لایه مخفی، داده‌های دریافت شده از لایه ورودی را پردازش کرده، پاسخ را به لایه خروجی ارسال می‌کند. لایه خروجی تمامی پاسخ‌ها را می‌پذیرد و بردار خروجی را تولید می‌کند [۲۳].

هر لایه، تعداد معینی از المان‌های پردازش شده (نورون‌ها) دارد که بوسیله لینک‌های ارتباطی با وزن‌های قابل تنظیم مرتبط می‌شوند. این وزن‌ها در طی آموزش فرآیند بواسطه الگوریتم پس‌انتشار در شبکه عصبی و با توجه به داده‌های ورودی- خروجی تشکیل می‌شوند. خروجی هر نورون، بوسیله ضرب ورودی‌هایش با بردار وزن، جمع نتایج و بکار بردن تابع فعال‌سازی محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$y = f \left[ \sum_{k=1}^n x_k w_k + b_k \right] \quad (9)$$

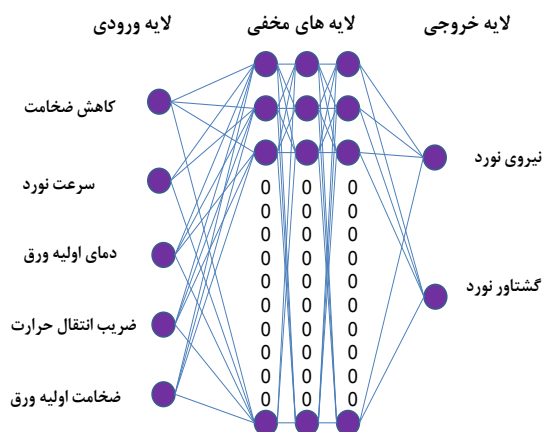
که در رابطه (۹)،  $n$  تعداد ورودی‌ها،  $b_k$  بایاس نورون،  $x_k$  مقدار ورودی بدست آمده از نورون لایه قبلی،  $w_k$  وزن متناظر از هر اتصال و  $f$  تابع فعال‌سازی بوده که برای محدود کردن دامنه خروجی از نورون استفاده می‌شود.

در طی آموزش،  $Q$ ، مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی داده شده به شبکه عصبی است. یک الگوریتم تکرار شونده، وزن‌ها را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که خروجی‌ها ( $o_k$ ) مطابق با الگوهای ورودی تا حد امکان به الگوهای خروجی ( $d_k$ ) مطلوب نزدیک شوند. با توجه به شبکه عصبی با  $K$  که تعداد کلی خروجی‌هاست، تابع میانگین مربع خطا (MSE) در رابطه (۱۰) کمینه خواهد شد [۱۸]:

$$MSE = \frac{1}{Q \times K} \times \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K K [d_k(q) - o_k(q)]^2 \quad (10)$$

الگوریتم پس‌انتشار در بیشتر موارد برای کمینه کردن تابع میانگین مربع خطا (MSE) مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ لذا با تنظیم کردن وزن‌های لینک‌های اتصال، می‌توان به کمینه کردن این تابع کمک کرد. یادگیری این روش شامل سه مرحله است:

- مرحله اول، داده‌های ورودی داخل شبکه می‌شوند. پس از آن بر اساس وزن‌ها و بایاس‌هایی که بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند، روی تابع هر نورون، خروجی‌های هر



شکل ۳- الگوی کلی از شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده

جدول ۳- معرفی مقادیر یک‌پارچه متغیرها بفرآیند

پایه ۳	پایه ۲	پایه ۱	پارامترها
۵۲۰	۴۶۰	۴۰۰	دمای اولیه ورق (درجه سانتی‌گراد)
۴۰	۳۰	۲۰	درصد کاهش ضخامت ورق (%)
۱۲۰	۸۰	۴۰	سرعت نورد (دور بر دقیقه)
۱۴/۳۲	۱۰/۳۲	۶/۳۲	ضخامت اولیه ورق (میلی‌متر)
۶۰	۴۰	۲۰	ضریب انتقال حرارت

جدول ۴- توابع و معماری شبکه عصبی

شبکه	الگوریتم پس‌انتشار
تابع آموزش	لونیبرگ-مارکورت
تابع یادگیری	تابع یادگیری شیب نزولی وزن
تابع مقدماتی	تابع مقدماتی شبکه لایه به لایه
تابع عملکرد	میانگین مربع خطا
تعداد پارامترهای ورودی	۵
تعداد پارامترهای خروجی	۲
تعداد لایه‌های مخفی	۳
تعداد نورون‌های لایه اول	۱۰
تعداد نورون‌های لایه دوم	۵
تعداد نورون‌های لایه سوم	۱

جدول ۵- تحلیل آماری از عملکرد شبکه عصبی پیشنهادی

گشتاور نورد		نیروی نورد		
تست	آموزش	تست	آموزش	
۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۶۰	۰/۰۰۸۷	ریشه میانگین مربع خطا
۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۴۱	خطای مطلق میانگین
۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۵۱	۰/۰۳۴۲۲	۰/۰۲۶۳	مجموع مربع خطا
۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۵۰	۰/۹۹۸۵	ضریب همبستگی
۰/۳۳	۰/۰۷۷۱	۰/۷۷	۰/۳۱	میانگین مطلق درصد خطا

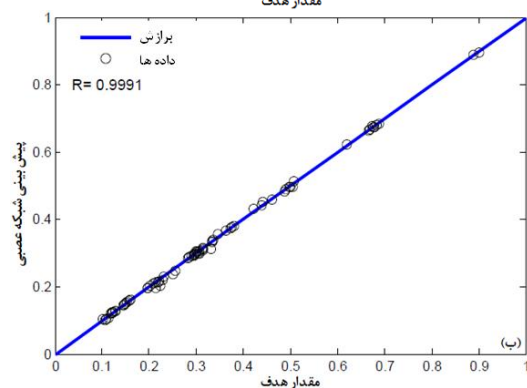
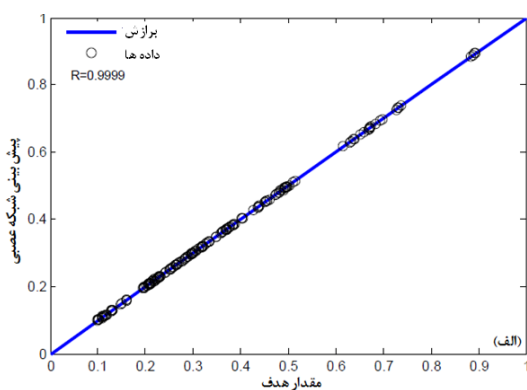
روش‌های آزمایشی است و بیشترین کاربرد را داراست. بدین ترتیب یا توجه به رابطه  $3n$  که در آن  $n$  تعداد متغیرهای ورودی است، تعداد کل نمونه‌های بدست آمده از روش المان محدود برای ورق آلومینیوم خالص، ۲۴۳ مورد است که ۱۷۰ نمونه تصادفی برای آموزش شبکه و ۷۳ نمونه تصادفی برای تست شبکه انتخاب شد. جدول ۳، متغیرهای فرآیند را نشان می‌دهد.

یکی از مهمترین کارهایی که باید در مطالعه شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام داد، بحث مربوط به معماری شبکه است که به تعداد لایه‌های مخفی و نورون‌های آن مربوط می‌شود. در این تحقیق، بهترین معماری شبکه با امتحان تعداد مختلفی از نورون‌ها و لایه‌های مخفی بدست می‌آید. انتخاب بهترین معماری شبکه بر اساس ضریب همبستگی (R) انجام می‌گیرد. به این ترتیب، تعداد نورون و لایه‌های مخفی را بایستی به گونه‌ای انتخاب کرد که بالاترین ضریب همبستگی حاصل شود و بر اساس همین تعداد نورون و لایه مخفی، معماری شبکه بنا می‌شود. در این تحقیق پس از سعی و خطای در تعداد نورون و لایه‌های مخفی شبکه عصبی مورد نظر، ۳ لایه مخفی انتخاب شد که در لایه اول، ۱۰ نورون، در لایه دوم ۵ نورون و در لایه آخر ۱ نورون انتخاب شدند. به این ترتیب، ضریب همبستگی برای مجموعه داده‌های آموزشی در نیرو و گشتاور به ترتیب، ۰/۹۹۸۵ و ۰/۹۹۹۹ و برای مجموعه داده‌های آزمایشی به ترتیب، ۰/۹۹۵۰، ۰/۹۹۹۵ حاصل می‌شود؛ همچنین معماری شبکه عصبی مصنوعی و توابع استفاده شده در جدول ۴ آمده است.

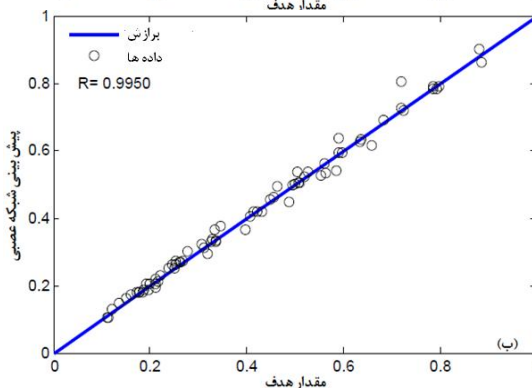
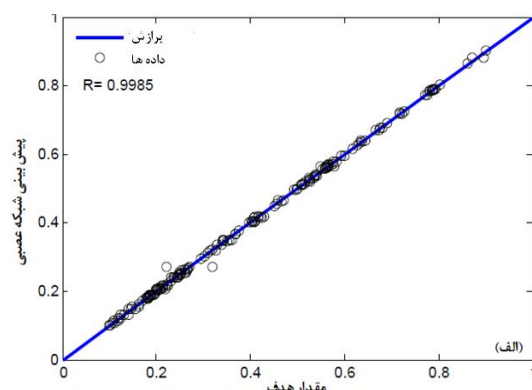
## ۵- بحث و نتایج

### ۵-۱- نتایج شبکه عصبی

نمودار ضریب همبستگی برای نیرو و گشتاور نورد در دو حالت آموزش و آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است؛ همچنین عملکرد کلی دو مجموعه نیرو و گشتاور نورد با روش‌هایی همچون، ریشه میانگین مربع خطا، مجموع مربع خطا، ضریب همبستگی (R)، میانگین مطلق درصد خطا و خطای مطلق میانگین، مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که از جدول ۵ مشخص است، ضریب همبستگی بالا و ریشه میانگین مربع خطای پایین برای دو مجموعه داده‌های آموزش و آزمایش برای نیرو و گشتاور نورد حاصل می‌شود.



شکل ۵- عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی گشتاور نورد (الف) داده‌های آموزشی و (ب) داده‌های آزمایشی



شکل ۴- عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی نیروی نورد، (الف) داده‌های آموزشی و (ب) داده‌های آزمایشی

#### ۵-۲-۱- تاثیر سرعت نورد

با افزایش سرعت نورد، زمان تماس بین ورق و غلتک کاهش می‌یابد که این امر سبب می‌شود تا انتقال حرارت کمتری از ورق به غلتک صورت گیرد و در نتیجه افت دمایی کمتری در ورق رخ می‌دهد. افت دمایی کمتر و در نتیجه دمای بالاتر ورق، سبب کاهش در نیروی نورد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، هر چه سرعت نورد افزایش یابد، نیروی نورد کاهش خواهد یافت.

#### ۵-۲-۲- تاثیر ضریب انتقال حرارت

زمانیکه ضریب انتقال حرارت بین ورق و غلتک افزایش می‌یابد، نرخ جریان گرمایی از ورق به غلتک افزایش یافته و به این ترتیب، دمای سطح ورق و نهایتاً ورق نیز کاهش می‌یابد. پس همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با افزایش ضریب انتقال، حرارت دمای ورق کاهش یافته، در نتیجه نیروی لازم جهت نورد داغ ورق افزایش خواهد یافت.

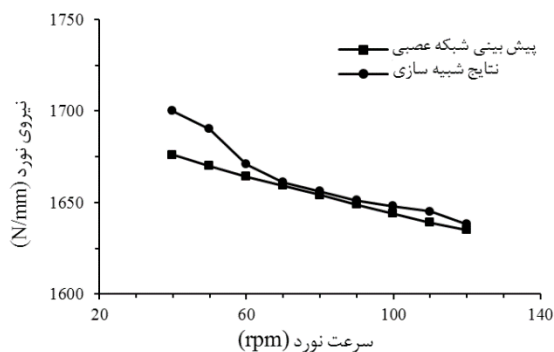
شکل ۶ و ۷ به ترتیب، مقایسه بین مقادیر نیرو و گشتاور پیش‌بینی شده از طریق شبکه عصبی و مجموعه داده‌های هدف را در حالت آزمایشی نشان می‌دهد؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شبکه عصبی قادر است، بصورت کاملاً درست و دقیق بین متغیرهای ورودی و خروجی تعمیم برقرار کند.

#### ۵-۲-۲- نیروی نورد

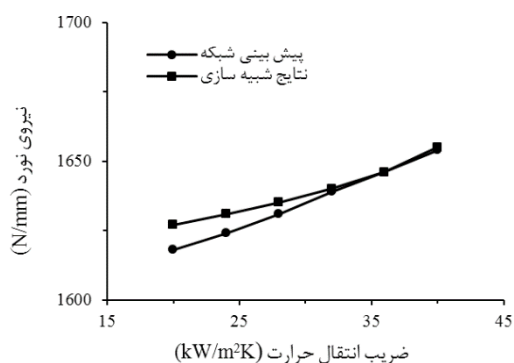
تمامی پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق جز در مواردی که مستقیماً آن پارامتر مورد بررسی قرار گرفته و یا به آن اشاره شده است، ثابت فرض می‌شود که در اینجا مقادیر اولیه و ثابت پارامترهای درصد کاهش ضخامت ورق، ضریب اصطکاک، ضریب انتقال حرارت، سرعت نورد، دمای اولیه ورق و ضخامت اولیه ورق به ترتیب ۴۰٪، ۰/۲۷، ۴۰ کیلو وات بر متر مربع در کلونین، ۸۰ دور بر دقیقه، ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۶/۳۲ میلی‌متر انتخاب شدند.



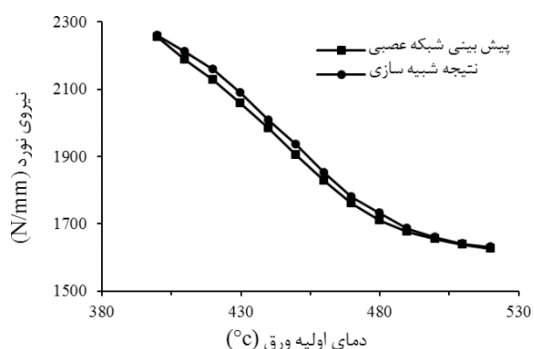
کاهش می‌یابد. شکل ۱۱، ارزیابی نیروی نورد بدست آمده از شبکه عصبی تحت اثر دو پارامتر دما و سرعت نورد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، تاثیر دما بر نیروی نورد، بیشتر از تاثیر سرعت غلتک در حین نورد است.



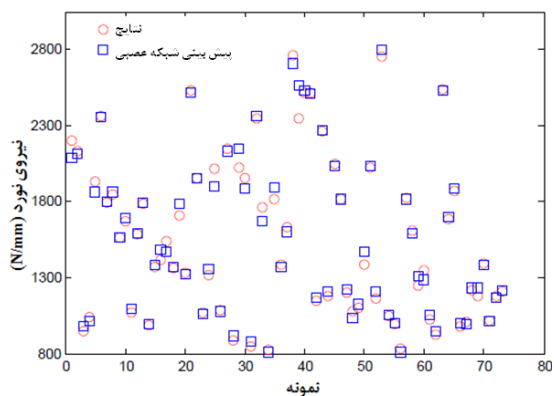
شکل ۸- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای نیروی نورد در سرعت‌های مختلف غلتک



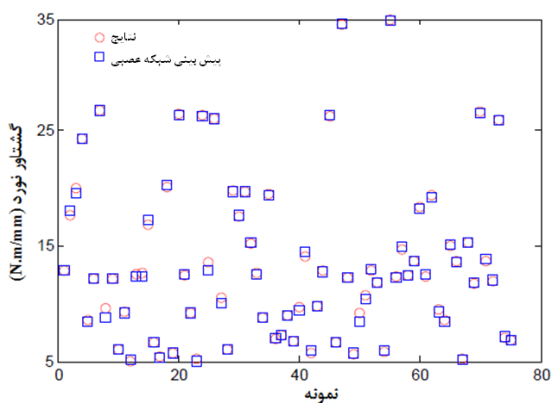
شکل ۹- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای نیروی نورد در ضرایب انتقال حرارت مختلف



شکل ۱۰- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای نیروی نورد در دماهای مختلف اولیه ورق



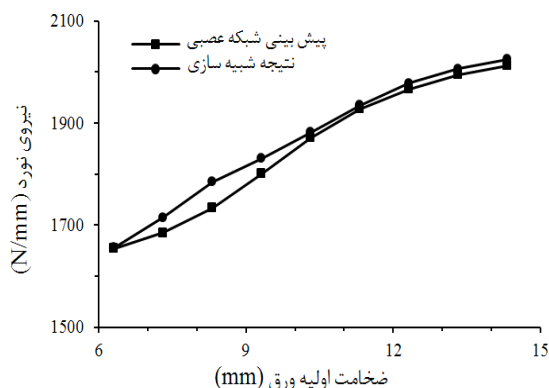
شکل ۶- ارزیابی دقت و صحت مدل شبکه عصبی پیشنهادی از طریق مقایسه بین نیروی نورد پیش بینی شده از شبکه عصبی و داده‌های هدف آزمایشی



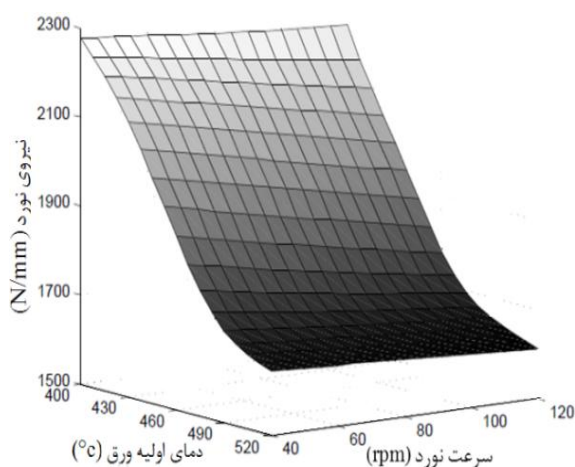
شکل ۷- ارزیابی دقت و صحت مدل شبکه عصبی پیشنهادی از طریق مقایسه بین گشتاور نورد پیش بینی شده از شبکه عصبی و داده‌های هدف آزمایشی

### ۵-۲-۳- تاثیر دمای اولیه ورق

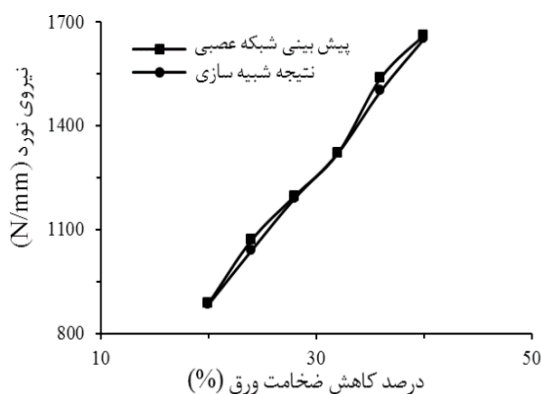
یکی از پارامترهای مهم در فرآیند نورد داغ ورق، دمای اولیه ورق است. اساساً استفاده از حرارت و دمای بالا جهت شکل‌دهی‌های داغ مانند نورد داغ بمنظور کاهش نیرو و انرژی لازم جهت شکل دهی فلز است؛ همچنین هرچه دمای اولیه ورق افزایش می‌یابد، تنش سیلان ماده نیز کاهش می‌یابد و کاهش در تنش سیلان، باعث کاهش نیروی نورد می‌شود. شکل ۱۰، پیش بینی نیروی نورد را به دو روش شبیه سازی عددی و شبکه عصبی با تغییر دمای اولیه ورق را نشان می‌دهد همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای اولیه ورق، نیروی لازم جهت انجام فرآیند نورد داغ ورق



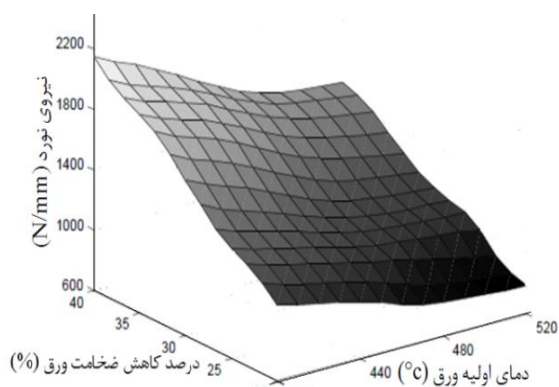
شکل ۱۲- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای نیروی نورد در ضخامت‌های مختلف اولیه ورق



شکل ۱۱- ارزیابی نیروی نورد در دما و سرعت‌های مختلف نورد در شبکه عصبی



شکل ۱۳- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای نیروی نورد در درصد کاهش ضخامت‌های مختلف ورق



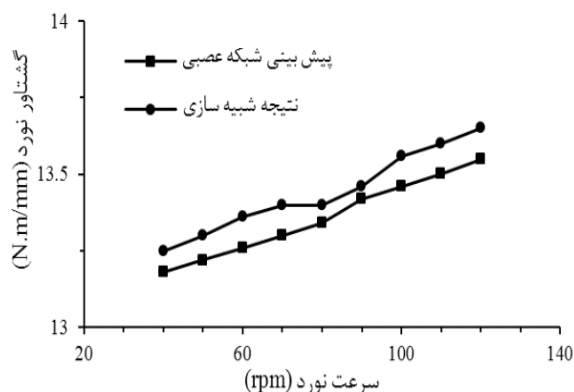
شکل ۱۴- ارزیابی نیروی نورد در دما و درصد کاهش ضخامت‌های مختلف ورق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

#### ۵-۲-۴- تأثیر ضخامت اولیه ورق

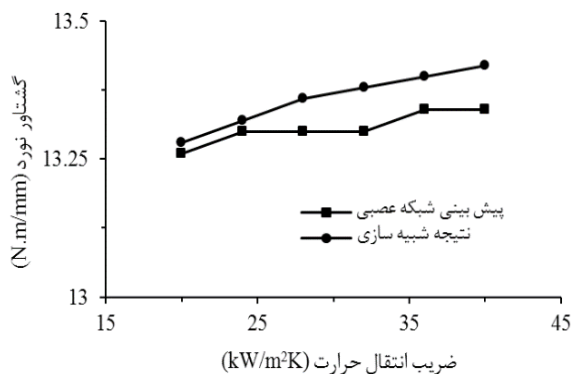
نتایج شبکه عصبی و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نیروی نورد با افزایش ضخامت اولیه ورق افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲، ارزیابی تأثیر ضخامت اولیه ورق بر نیروی نورد با دو روش شبیه‌سازی و شبکه عصبی آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش ضخامت اولیه ورق، حجم بیشتری از ورق دچار نورد شده که این امر افزایش در نیروی نورد را به دنبال خواهد داشت.

#### ۵-۲-۵- تأثیر درصد کاهش ضخامت ورق

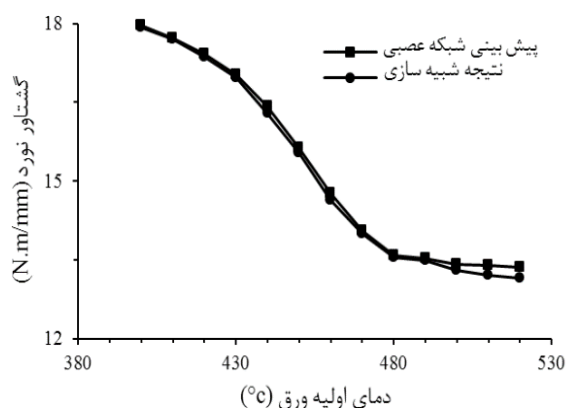
با افزایش درصد کاهش ضخامت ورق، از یک طرف درصد تغییر شکل و کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد و از طرف دیگر، تماس موثر بین ورق و غلتک افزایش یافته، این امر افزایش انتقال حرارت از ورق به غلتک و اتلاف حرارتی در ورق را به همراه خواهد داشت. به این ترتیب دمای ورق در حین فرآیند افت کرده، در نتیجه نیروی نورد افزایش می‌یابد. اثرات درصد کاهش ضخامت ورق بر نیروی مورد نیاز نورد، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۴، اثرات ترکیبی دمای ورق و کاهش ضخامت‌های مختلف ورق بر نیروی نورد ارزیابی شده از شبکه عصبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش دما و کاهش درصد کاهش ضخامت ورق، نیروی نورد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای گشتاور نورد در سرعت‌های مختلف نورد



شکل ۱۶- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای گشتاور نورد در ضرایب انتقال حرارت مختلف



شکل ۱۷- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای گشتاور نورد در دماهای اولیه مختلف در ورق

### ۳-۵- گشتاور نورد

#### ۱-۳-۵- تأثیر سرعت نورد

همانطور که نتایج پیش بینی گشتاور نورد در هر دو مورد شبکه عصبی و شبیه‌سازی در شکل ۱۵ نشان می‌دهد، با افزایش سرعت نورد، گشتاور نورد روند صعودی خواهد داشت. در واقع با توجه اینکه هر چه سرعت نورد افزایش یابد، محور دورانی موتور با سرعت بیشتری می‌چرخد، لذا با افزایش سرعت نورد، گشتاور نورد نیز افزایش کمی را تجربه خواهد کرد.

#### ۲-۳-۵- تأثیر ضریب انتقال حرارت

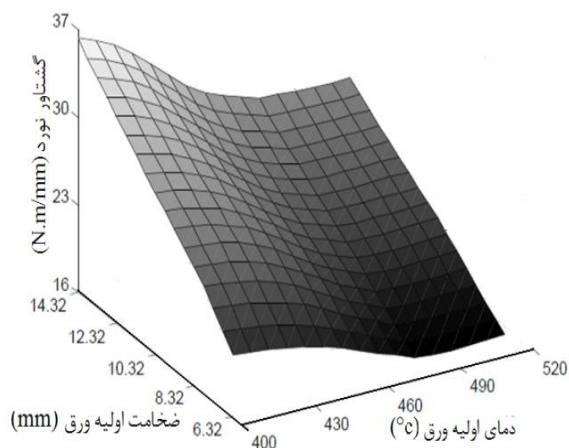
همانگونه که گفته شد، با افزایش ضریب انتقال حرارت بین ورق و غلتک، نرخ جریان گرمایی از ورق به غلتک افزایش یافته، به این ترتیب دمای سطح ورق نیز کاهش می‌یابد؛ لذا همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده، با افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه کاهش دمای ورق، گشتاور لازم جهت نورد داغ ورق افزایش خواهد یافت.

#### ۳-۳-۵- تأثیر دمای اولیه ورق

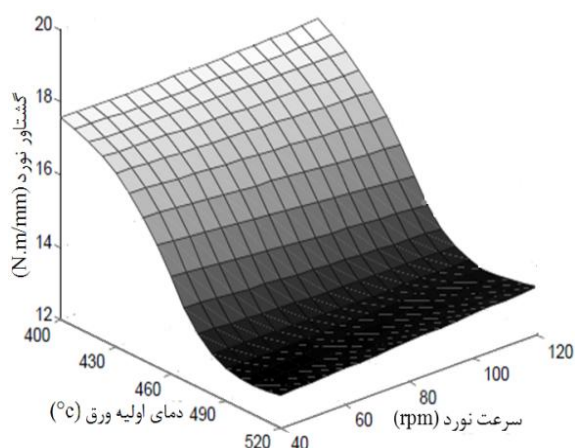
بررسی نتایج نشان می‌دهند که دما تاثیری یکسان بر نیرو و گشتاور نورد خواهد داشت؛ بطوریکه با افزایش دمای اولیه ورق، گشتاور نورد نیز کاهش می‌یابد (شکل ۱۷). ارزیابی گشتاور نورد با استفاده از شبکه عصبی در دماهای مختلف اولیه ورق و سرعت‌های مختلف غلتک در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، تاثیر دمای اولیه ورق بر گشتاور نورد، خیلی بیشتر از سرعت غلتک است.

#### ۴-۳-۵- تأثیر ضخامت اولیه ورق

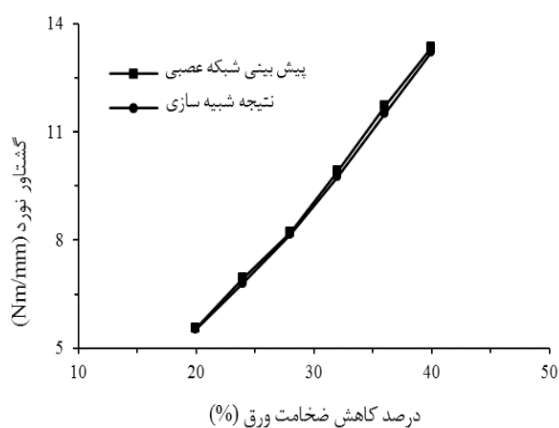
هر چه میزان ضخامت اولیه ورق افزایش یابد، نیرو و به دنبال آن گشتاور نورد نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۹ بیان می‌کند که با افزایش در ضخامت اولیه ورق نورد داغ شونده، گشتاور نورد نیز افزایش می‌یابد. شکل ۲۰، ارزیابی گشتاور نورد بدست آمده از شبکه عصبی را تحت اثر دماها و ضخامت‌های اولیه مختلف ورق را نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت اولیه ورق و کاهش دما، افزایش گشتاور نورد را به دنبال خواهد داشت.



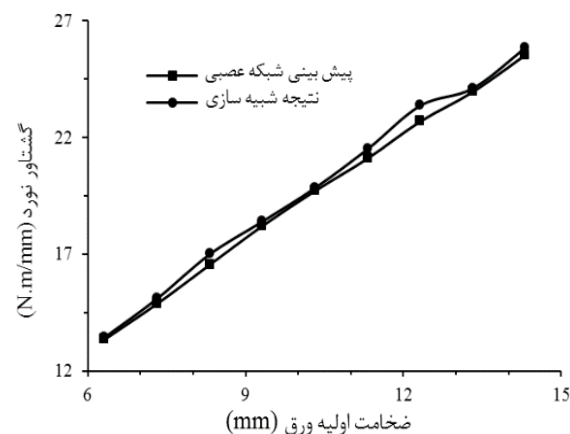
شکل ۲۰- ارزیابی گشتاور نورد در دما و ضخامت‌های مختلف ورق در شبکه عصبی



شکل ۱۸- پیش بینی گشتاور نورد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در دماهای مختلف ورق و سرعت‌های مختلف غلتک



شکل ۲۱- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای گشتاور نورد در درصد کاهش ضخامت‌های مختلف در ورق



شکل ۱۹- مقایسه نتایج شبکه عصبی با شبیه سازی برای گشتاور نورد در ضخامت‌های اولیه مختلف در ورق

### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، با استفاده از دو مدل المان محدود و شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی نیرو و گشتاور نورد در طی فرآیند مورد داغ ورق آلومینوم خالص پرداخته شد. برای این منظور، ابتدا از یک مدل المان محدود سه بعدی جهت شبیه‌سازی فرآیند نورد استفاده شد. از شبیه‌سازی‌های در حالات مختلف به منظور تهیه داده‌های اولیه برای آموزش و تست شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. الگوریتم پس انتشار خطا به همراه تابع آموزش لونیگ-مارکورت در شبکه عصبی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه بین

### ۵-۳-۵- تأثیر درصد کاهش ضخامت ورق

با افزایش درصد کاهش ضخامت ورق، تماس موثر بین ورق و غلتک افزایش می‌یابد و این امر باعث می‌شود تا انتقال حرارت و اتلاف حرارتی از ورق به غلتک افزایش یابد. به این ترتیب، دمای ورق هنگام فرآیند کاهش می‌یابد و که این امر همراه با افزایش کرنش پلاستیک تغییر شکل ورق، باعث افزایش نیروی نورد و به دنبال آن گشتاور نورد خواهد شد. در شکل ۲۱، مقایسه بین نتایج پیش‌بینی گشتاور نورد حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و شبیه‌سازی عددی با تغییر درصد کاهش ضخامت ورق نشان داده شده است.

- [9] Zhang J, Cui Z (2011) Continuous FEM simulation of multi-pass plate hot rolling suitable for plate shape analysis. *J Cent South Univ Technol* 18:16-22.
- [10] Dadgar Asl Y, Tajdari M, Moslemi Naeini H, Davoodi B, Azizi Tafti R, Panahizadeh V (2015) Prediction of Required Torque in Cold Roll Forming Process of Channel Section Using Artificial Neural Networks. *Modares Mech Eng* 15(7): 209-214. (In Persian)
- [11] Moharrami R, Soleymani MR (2015) Process parameters selection of cold rolling process for obtaining of certain residual stresses distribution on cylindrical aluminum. *Aero Mech J* 11(2):1-11. (In Persian)
- [12] Portmann NF, Lindhoff D, Sorgel G, Gramckow O (1995) Application of neural networks in rolling mill automation. *Iron Steel Eng* 72: 33-36.
- [13] Chun MS, Biglou J, Lenard JG, Kim JG (1999) Using neural networks to predict parameters in the hot working of aluminum alloys. *J Mat Proc Tech* 86: 245-251.
- [14] Jeon EC, Kim SK (2000) A study on the texturing of work roll for temper rolling. *J Korean Soc Mach Tool Eng* 9:7-16.
- [15] Yang YY, Linkens DA, Talamantes-Silva J, Howard IC (2003) Roll force and torque prediction using neural network and finite element modeling. *ISIJ Int* 43:1957-1966.
- [16] Yang YY, Linkens DA, Talamantes-Silva J (2004) Roll load prediction-data collection, analysis and neural network modeling. *J Mat Proc Tech* 152:304-315.
- [17] Shahani AR, Setayeshi S, Nodamaie SA, Asadi MA, Rezaie S (2009) Prediction of influence parameters on the hot rolling process using finite element method and neural network. *J Mat Proc Tech* 209: 1920-1935.
- [18] Bagheripoor M, Bisadi H (2013) Application of artificial neural networks for the prediction of roll force and roll torque in hot strip rolling process. *Appl Math Model* 37: 4593-4607.
- [19] Serajzadeh S, Karimi Taheri A, Nejati M, Izadi J, Fattahi M (2002) An investigation on strain in homogeneity in hot strip rolling process. *J Mater Process Technol* 128: 88-99.
- [20] Fletcher JD, Beynon JH (1996) Heat transfer in roll gap in hot strip rolling. *Ironmak Steel mak* 23: 52-57.
- [21] Rezaei Ashtiani HR, Bisadi H, Parsa MH (2011) In homogeneity of temperature distribution through thickness of the aluminum strip during hot rolling. *Proce Institu Mech Eng Part C: J Mech Eng Sci* 225: 2938-2952.
- پیش‌بینی‌های بدست آمده از مدل شبکه عصبی و مدل المان محدود، حاکی از تطابق بسیار خوب نتایج و در نتیجه دقت پیش‌بینی مناسب شبکه عصبی است. مدل شبکه عصبی به‌کار گرفته شده در این تحقیق قادر است که تاثیرات پارامترهای مختلف فرآیند نورد داغ شامل، دمای اولیه ورق، سرعت غلتک، ضریب انتقال حرارت بین ورق و غلتک، درصد کاهش ضخامت ورق و ضخامت اولیه ورق را بر نیرو و گشتاور نورد پیش‌بینی کند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ضریب انتقال حرارت بین ورق و غلتک، درصد کاهش ضخامت و ضخامت اولیه ورق نیرو و گشتاور نورد افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش دمای اولیه ورق نیرو و گشتاور نورد کاهش می‌یابد. برتری شبکه عصبی نسبت به شبیه‌سازی عددی، در پیش‌بینی در زمان بسیار کمتری است که از این مزیت می‌توان در کنترل لحظه‌ای این فرآیند بهره برد.

#### ۷- مراجع

- [1] Orowan E (1943) The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling. *Proce Institu Mech Eng* 150: 140-167.
- [2] Sims RB (1954) The calculation of roll force and torque in hot rolling mills. *Proce Institu Mech Eng* 168: 191-200.
- [3] Ford H, Alexander JM (1964) Simplified hot rolling calculations. *J Inst Metals* (92): 397-404.
- [4] Hwang SM, Joun M.S (1992) Analysis of hot-strip rolling by a penalty rigid-viscoplastic finite element method. *Int J Mech Sci* (34): 971-984.
- [5] Shangwu X, Rodrigues JMC, Martins PAF (1999) Three-dimensional simulation of flat rolling through a combined finite element-boundary element approach. *Finite Element Anal Des* (32): 221-233.
- [6] Kwak WJ, Kim YH, Park HD, Lee JH, Hwang SM (2000) FE-based on-line model for the prediction of roll force and roll power in hot strip rolling. *ISIJ Int* 40:1013-1018.
- [7] Duan X, Sheppard T (2002) Three dimensional thermal mechanical coupled simulation during hot rolling of aluminum alloy 3003. *Int J Mech Sci* 44: 2155-2172.
- [8] Wang X, Peng Y, Xu L, Liu H (2010) A 3-D differential method for solving rolling force of PC hot strip mill. *J Iron Steel Res* 17: 36-39.

[23] Deng J, Gu D, Li X, Yue ZQ (2005) Structural reliability analysis for implicit performance functions using artificial neural network, Struct Saf 27: 25-48.

[22] Hum B, Colquhoun HW, Lenard JG (1996) Measurements of friction during hot rolling of aluminum strips. J Mat Proc Tech 60: 331-338.