



## پیش بینی مقدار گشتاور مورد نیاز در فرایند شکل دهنده غلتکی سرد مقاطع کانالی شکل با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

یعقوب دادگر اصل<sup>۱</sup>، مهدی تاجداری<sup>۲</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>\*۳</sup>، بهنام داودی<sup>۴</sup>، روح الله عزیزی تفتی<sup>۵</sup>، ولی الله پناهی زاده<sup>۶</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد اراک، اراک

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۵- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

۶- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>\*</sup> تهران، صندوق پستی 14115-143، moslemi@modares.ac.ir

### چکیده

یکی از مسائل بسیار مهم در بررسی فرایند شکل دهنده غلتکی سرد فلزات، برآورد گشتاور مورد نیاز شکل دهنده می باشد. با دانستن عوامل تأثیرگذار روی گشتاور، می توان بهینه ترین خط تولید را طراحی نمود. از پارامترهای اساسی تأثیرگذار بر گشتاور مورد نیاز در شکل دهنده غلتکی سرد می توان به جنس، ضخامت ورق، زاویه شکل دهنده، شرایط روانکاری، سرعت دورانی غلتک و فاصله ایستگاهها اشاره نمود. هدف از این مطالعه پیش بینی مقدار گشتاور مورد نیاز شکل دهنده با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار روی گشتاور شامل، استحکام تسلیم، ضخامت و عرض ورق و زاویه شکل دهنده، با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی می باشد. بدین منظور فرایند شکل دهنده به صورت سه بعدی در نرم افزار اجزای محدود مارک مدل نشان داد. نتایج شبیه سازی ها نشان داد که با افزایش استحکام تسلیم، زاویه شکل دهنده و ضخامت، گشتاور وارد شده به غلتک ها زیاد می شود. همچنین افزایش عرض ورق با فرض ثابت بودن طول ناحیه کف، باعث کاهش گشتاور مورد نیاز برای شکل دهنده می شود. طی یک سری آزمایش های تجربی تأثیر ضخامت و عرض ورق مورد بررسی قرار گرفت که داده های حاصل، نتایج شبیه سازی های اجزای محدود را به خوبی تأیید نمود. شبکه عصبی پس انتشار خطابا یک لایه مخفی برای پیش بینی گشتاور موردنیاز شکل دهنده ایجاد شد، مقایسه بین نتایج شبیه سازی و شبکه عصبی نشان داد که شبکه آموخته داده شده می تواند مقدار گشتاور مورد نیاز شکل دهنده را بخوبی پیش بینی نماید.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۶ دی ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۴

ارائه در سایت: ۱۲ خرداد ۱۳۹۴

کلید واژگان:

شکل دهنده غلتکی سرد

گشتاور

شبکه های عصبی مصنوعی

شبیه سازی اجزای محدود

## Prediction of Required Torque in Cold Roll Forming Process of a Channel Section Using Artificial Neural Networks

Yaghoub Dadgar Asl<sup>1</sup>, Mehdi Tajdari<sup>2</sup>, Hasan Moslemi Naeini<sup>3\*</sup>, Behnam Davoodi<sup>4</sup>, Roohollah Azizi Tafti<sup>5</sup>, Valiollah Panahizadeh<sup>6</sup>

1-Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, I.R.Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, I.R.Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R.Iran.

4- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, I.R.Iran.

5- Department of Mechanical Engineering, University of Yazd, Yazd, I.R.Iran.

6- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, I.R.Iran.

\* P.O.B. 14115-143, Tehran, I.R.Iran, moslemi@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 December 2014

Accepted 17 May 2015

Available Online 02 June 2015

Keywords:

Cold roll forming

Torque

Artificial Neural Networks(ANN)

FEM

### ABSTRACT

One of the most important issues in the review of cold roll forming process of metals is estimation of required torque. The optimum production line can be designed by determining the effective parameters on torque. Some of these parameters are sheet material and thickness, bending angle, lubrication conditions, rolls rotational speed and distance of the stands. The aim of this study is to predict amount of required torque considering the factors influencing torque including thickness, yield strength, sheet width and forming angle using artificial neural network. So the forming process was 3D simulated in a finite element code. Simulation results showed that with increase of yield strength, thickness and forming angle, applied torque on rolls will increase. Also, the increase in sheet width -assuming constant web length- will decrease the torque needed for forming. The effects of thickness and sheet width were experimentally investigated which verified the results obtained by finite element analysis. A feed-forward back-propagation neural network was created. The comparison between the experimental results and ANN results showed that the trained network could adequately predict the required torque.

Please cite this article using:

Y. Dadgar Asl, M. Tajdari, H. Moslemi Naeini, B. Davoodi, R. Azizi Tafti, V. Panahizadeh, Prediction of Required Torque in Cold Roll Forming Process of a Channel Section Using Artificial Neural Networks, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 209-214, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مورد نیاز شکل دهی با در نظر گرفتن عوامل تاثیرگذار روی گشتاور شامل خصامت، استحکام تسلیم، عرض ورق و زاویه شکل دهی، شبکه عصبی سه لایه پس انتشار خطا (دارای یک لایه مخفی) با کاربرد نتایج شبیه سازی جهت پیش‌بینی گشتاور ایجاد شد. پارامترهای استحکام تسلیم، زاویه شکل دهی، ضخامت و عرض ورق، به عنوان ورودی های شبکه و گشتاور شکل دهی به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد. نرخ یادگیری ۰/۰۵ و پارامتر ممتنم ۰/۰۱۵ در نظر گرفته شد.

## 2- شبیه سازی المان محدود

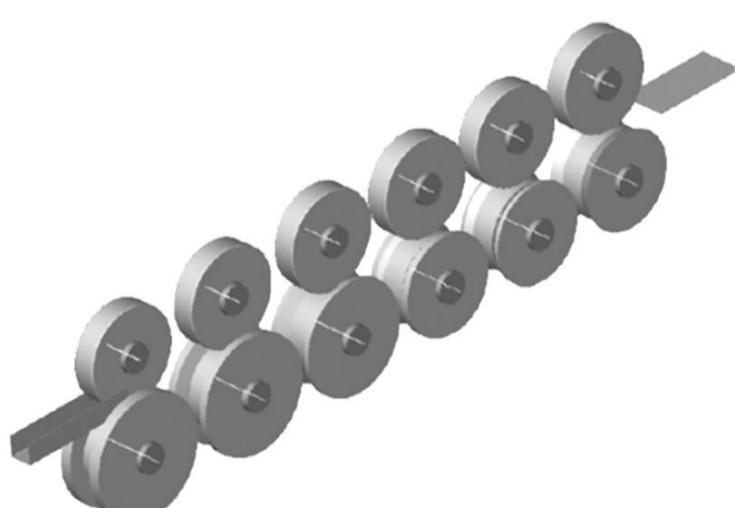
به دلیل تعدد پارامترهای موثر، طراحی آزمایشی بر مبنای معیار تاگوچی صورت گرفت. از آنجا که ماهیت طرح تاگوچی با محدودیت‌هایی از لحاظ تعداد فاکتورها وسطوح آن مواجه است، انتخاب طرحی مناسب با آزمایش، از حالات از پیش تعیین شده معیار تاگوچی، بر عهده طراح می‌باشد. نهایتاً طرحی شامل ۳۲ آزمایش برای ۴ فاکتور به صورت فاکتورهای بترتیب ۲، ۳، ۵ و ۴ سطحی انتخاب شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. بعد از اجرای شبیه سازی‌ها نتایج توسط نرم افزار مینیتب به روش آنالیز واریانس تحلیل شد و نتیجه شبیه سازی برای تمام سطوح فاکتورها تخمین زده شد. به منظور بررسی اثر استحکام تسلیم، زاویه خم، ضخامت و عرض ورق، روی گشتاور شکل دهی شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شد که در ادامه روند مدل‌سازی و انجام شبیه سازی‌ها بطور مفصل بیان شده است.

## 2-1- مدل‌سازی فرآیند

جدول ۱ زوایای خم، استحکام‌های تسلیم، ضخامت‌ها و عرض‌های ورق و استفاده شده در شبیه‌سازی‌های مختلف را نشان می‌دهد. مدل شامل چهار ایستگاه است که دو ایستگاه اول برای تغذیه ورق به ایستگاه‌های شکل دهی استفاده می‌شوند و دو ایستگاه بعد با زاویه‌های مساوی ورق را شکل می‌دهند. از آنجا که زاویه شکل دهی در ایستگاه بعدی روی گشتاور وارد بر غلتک‌ها در ایستگاه مورد نظر اثر می‌گذارد، به منظور رفع این تأثیر و نیز تعیین اثر واقعی زاویه شکل دهی هر ایستگاه بر روی گشتاور در آن ایستگاه، زاویه دو ایستگاه شکل دهی مساوی در نظر گرفته شد تا ایستگاه دوم عملاً تغییرشکلی روی ورق اعمال نکند.

جدول ۱ مشخصات استحکام‌های تسلیم، ضخامت‌ها و عرض‌های ورق و زوایای خم در شبیه‌سازی‌های مختلف

شبیه‌سازی‌های مختلف	پارامتر	سطوح
زاویه شکل دهی (درجه)	۱۰ و ۲۰	پارامتر
عرض ورق (میلی‌متر)	۷۰، ۵۵، ۴۰	
استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	۱۰۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۴۰۰	
ضخامت ورق (میلی‌متر)	۰/۰۷۵، ۰/۱۲۵، ۰/۲۵	



شکل ۱ شمایی از فرآیند شکل دهی غلتکی سرد [۱]

## 1- مقدمه

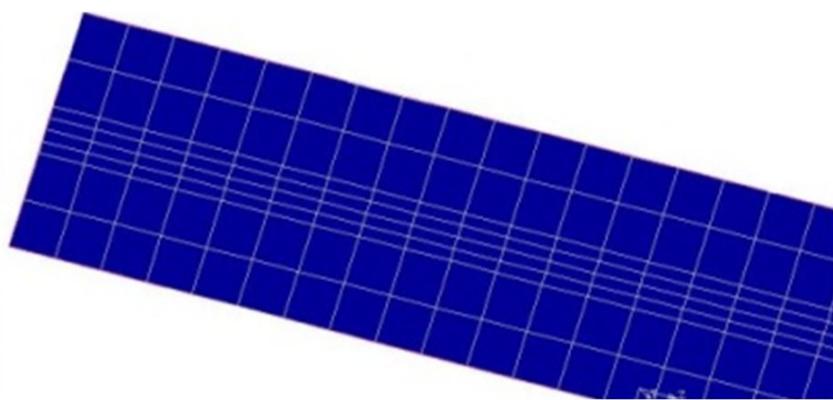
شکل دهی غلتکی سرد یکی از روش‌های رایج و پر بازده در صنعت شکل دهی ورقی فلزات می‌باشد. این فرآیند شامل چند مرحله شکل دهی فلز به صورت پیوسته و متوالی است که در هر مرحله با اعمال مقدار مشخصی شکل دهی، ورق به محصول نهایی نزدیک می‌شود. در شکل ۱ شمایی از فرآیند شکل دهی غلتکی سرد نشان داده شده است. یکی از مسائل بسیار مهم در بررسی فرآیندهای شکل دهی فلزات، برآورد گشتاور مورد نیاز در شکل دهی می‌باشد. از پارامترهای اساسی تاثیرگذار بر گشتاور در شکل دهی غلتکی سرد، می‌توان به هندسه غلتک، جنس و ضخامت ورق، زاویه شکل دهی در هر ایستگاه، شرایط روانکاری، سرعت دورانی غلتک و فاصله ایستگاهها اشاره نمود.

سنایاک و همکاران [۲] با استفاده از نرمافزار مارکمنات به تحلیل مقطع کانالی شکل متقارن پرداختند و به کمک این نرمافزار، مقاطع ساده را مدل‌سازی کردند. هونگ و همکارانش [۳] با ارائه یک برنامه شبیه‌سازی اجزای محدود صلب-خمیری سه‌بعدی و با درنظر گرفتن مشخصه‌های جنس و ضخامت ورق، قطر و سرعت غلتک‌ها و رفتار تغییرشکل ماده، طول تغییرشکل را تخمین زدند. مسلمی نائینی [۴] با ترکیب روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود، روش جدیدی در شبیه‌سازی عددی برای تحلیل دو بعدی تغییرشکل ارجاعی-خمیری لوله در فرآیند شکل دهی مجدد لوله‌های گرد به مقاطع غیرگرد ارائه کرد. تاجداری [۵] شکل دهی غلتکی سرد مقاطع باز متقارن را مورد بررسی قرار داد. او در تحقیق خود با در نظر گرفتن رفتار الاستیک-پلاستیک برای ورق و منظور کردن اثر باوشینگر، تنشهای عرضی، طولی و برشی را محاسبه نمود و با محاسبه توان و مینیمم کردن آن، پروفیل تغییرشکل ورق را بین ایستگاه‌ها، بدست آورد. فرزین و همکاران [۶] معیار جدیدی را به نام حد کرنش کمانشی<sup>۱</sup> مبتنی بر تحلیل اجزای محدود فرآیند شکل دهی غلتکی سرد معرفی کردند. لیندگرن [۷] تأثیر استحکام ورق بر روی طول تغییرشکل و کرنش طولی در لبه ورق را بررسی کرد و نتیجه گرفت که با افزایش استحکام تسلیم، طول تغییرشکل و کرنش طولی کاهش می‌یابد. وی همچنین [۸] نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها را بررسی و با یک سری آزمایش‌های تجربی، نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها و توان مصرفی را به دست آورد. او در این مطالعه، تأثیر استحکام تسلیم بر روی بار و گشتاور غلتک را بررسی و دو مدل برای بار و گشتاور ارائه کرد. در رابطه با کاربردهای شبکه عصبی مصنوعی در شکل دهی فلزات، گاناسکرا و همکارانش [۹] یک مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای فرآیند نورد سرد توسعه دادند. شبکه عصبی آنها پس انتشار بود که برای آموزش آن، یک مدل ریاضی غیرخطی بر اساس روش قاچی ایجاد کردند.

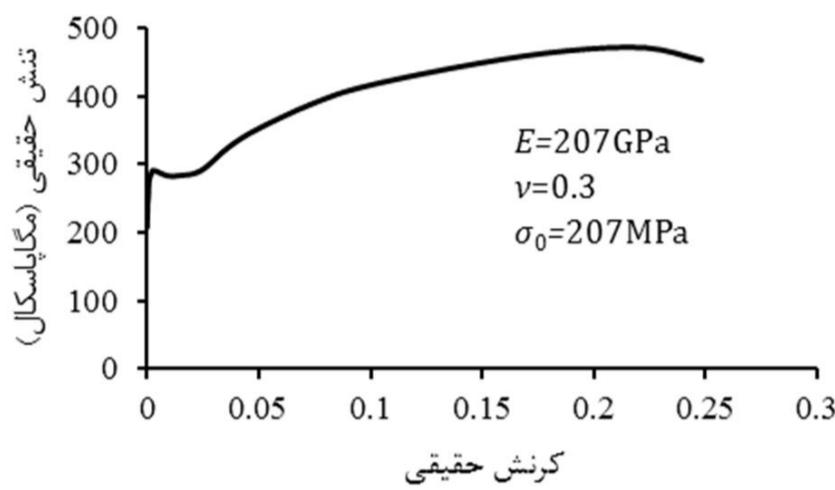
وانگ و همکارانش [۱۰] با استفاده از شبکه‌های عصبی روی تأثیر کمیت‌های هندسی بر روی چروکیدگی در شکل دهی ورقی فلزات بحث کردند و چروکیدگی را پیش‌بینی نمودند. شبکه‌ی مورد استفاده‌ی آنها پیش‌خور پس انتشار بود.

با توجه به این که در کارهای انجام شده، تأثیر پارامترهایی چون ضخامت و عرض ورق بر روی گشتاور شکل دهی بررسی نشده است، در این مقاله، با استفاده از نرمافزار مارکمنات، فرایند تولید مقطع کانالی بصورت سه بعدی شبیه‌سازی شد و تأثیر پارامترهای استحکام تسلیم، زاویه شکل دهی، ضخامت و عرض ورق بر روی گشتاور شکل دهی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در یک سری آزمایش‌های تجربی، صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها بررسی و مطابقت بسیار خوبی مشاهده شد. در این مطالعه به منظور پیش‌بینی مقدار گشتاور

1- Buckling limit of strain



شکل 4 نمایی از ورق شبکه‌بندی شده



شکل 5 منحنی تنش حقيقی-کرنش حقيقی

### 2-3- مشخصات شبکه‌بندی

با توجه به اینکه از یک سو مقدار تغییرشکل غلتکها ناچیز بوده و از سویی در این مطالعه بررسی تغییرشکل غلتکها مد نظر نبوده است بنابراین غلتکها صلب و ورق شکل‌پذیر در نظر گرفته شد. به دلیل شبیه‌سازی یک فرآیند شکل دهی ورقی، ورق از نوع المان پوسته تعریف شد. با توجه به خصوصیات المان پوسته‌ای ضخیم با شماره 75 در نرم‌افزار مارک‌منتات، این نوع المان برای شبکه‌بندی انتخاب شد. در ابتدا شبکه‌بندی با المان‌های درشت با اندازه  $10 \times 10$  شروع و پس از چند مرحله در نهایت، اندازه المان‌های  $4 \times 4$  انتخاب شد. نتایج حاصل از شبکه‌بندی با المان‌های ریزتر، از یک سو اختلاف چندانی با نتایج المان‌های مذکور نداشت و از سویی زمان محاسباتی آنها بسیار بیشتر بود. غلتکها به دلیل صلببودن نیازی به شبکه‌بندی نداشتند. از آنجا که در ناحیه خم تغییرشکل زیادی در ورق ایجاد می‌شود المان‌های این ناحیه در راستای عرضی به چهار المان تقسیم شدند. شکل 4 نمایی از ورق شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد.

### 2-4- مشخصات ماده

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، فرض شد که ماده در تمام جهات خواص همسانگرد از خود نشان دهد. برای تعیین دقیق مقدار گشتاور گشتاور ماده بر غلتکها، لازم بود تا حالات ارجاعی و خمیری و نیز رفتار کار سختی ماده در نظر گرفته شود که در این راستا قانون کار سختی همسانگرد مورد استفاده قرار گرفت. نرم‌افزار مارک‌منتات ناحیه الاستیک را با وارد کردن نسبت پواسون و مدول یانگ می‌شناسد. مقدار نسبت پواسون  $0/3$  و مدول یانگ 207 گیگا پاسکال در نظر گرفته شده است. برای معرفی ناحیه خمیری، منحنی تنش حقيقی-کرنش حقيقی مطابق شکل 5 به نرم‌افزار داده شد.

### 2-5- روند انجام شبیه‌سازی

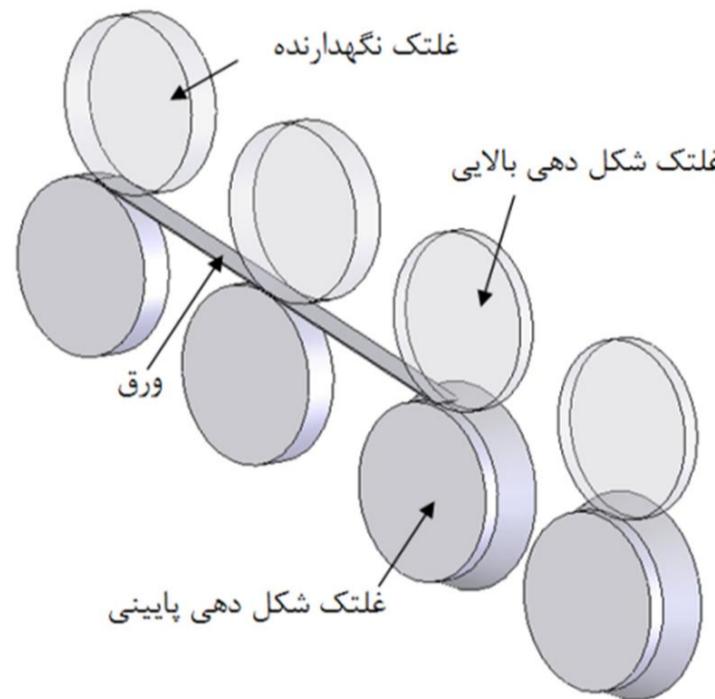
در شبیه‌سازی‌های انجام شده، تحلیل‌ها از نوع ارجاعی-خمیری در نظر گرفته شد. سرعت حرکت ورق در طول خط تولید روی  $0/6$  متر بر ثانیه تنظیم شد و برای ایجاد کشش در ورق در بین ایستگاه‌ها  $0/5$  درصد افزایش سرعت در ایستگاه‌های

غلتک‌ها در نرم‌افزار کتیا مدل، با پسوند (آی‌جی‌اس) ذخیره و به نرم‌افزار مارک‌منتات انتقال داده شدند. مقطع کانالی شکل مورد بحث در این مطالعه دارای یک صفحه تقارن می‌باشد که از خط مرکزی آن می‌گذرد بنابراین با توجه به تقارن مذکور، نیمی از آن مدل شد.

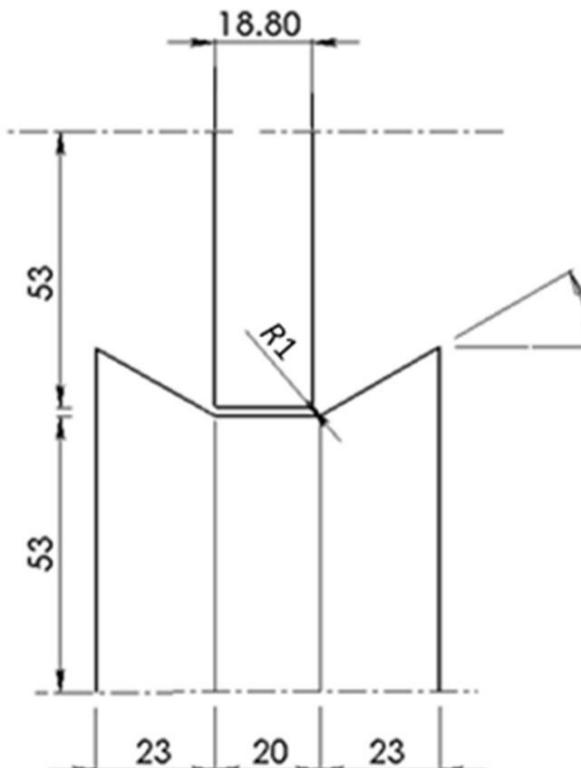
### 2-2- سوار کردن غلتک‌ها و ورق در خط تولید

از آنجا که فاصله بین ایستگاه‌ها 145 میلی‌متر در نظر گرفته شد، به منظور اینکه ورق باید در هر لحظه حداقل با دو ایستگاه شکل دهی درگیر باشد، ورقی به طول 300 میلی‌متر مدل شد. غلتک بالایی در ایستگاه‌های شکل دهی تخت است و غلتک پایینی در این ایستگاه‌ها دارای پروفیلی زاویه‌دار بوده و در واقع عامل اصلی ایجاد خم بر روی ورق است. فاصله بین غلتک‌ها به اندازه ضخامت ورق در نظر گرفته شد. در شکل 2 نحوه سوار کردن غلتک‌های نگهدارنده و غلتک‌های شکل دهی بر روی ورق در خط تولید، چهار ایستگاه از مدل ایجاد شده شامل دو تغذیه کننده و دو ایستگاه شکل دهی با زاویه‌های شکل دهی مساوی نشان داده شده است.

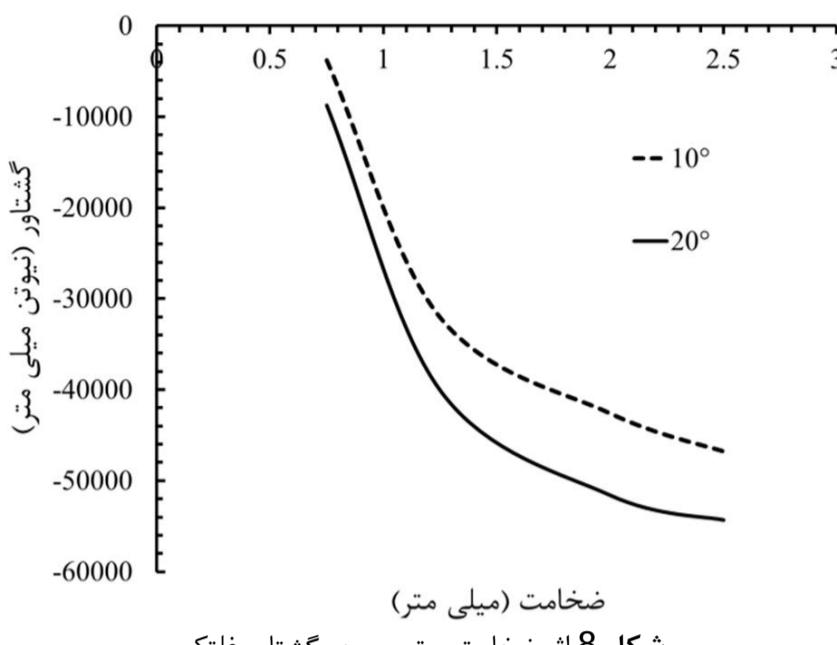
در شکل 3 شمایی از غلتک‌های شکل دهی بالا و پایین و اندازه‌های آنها نشان داده شده است.



شکل 2 نحوه سوار کردن غلتک‌های نگهدارنده و غلتک‌های شکل دهی بر روی ورق در خط تولید



شکل 3 مشخصات غلتک‌های شکل دهی



با توجه به شکل 6، مشاهده می‌شود که با افزایش استحکام تسلیم، کرنش طولی کاهش یافته است. مقایسه شکل 6 (الف و ب) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شکل دهی، مقدار کرنش‌های طولی به شدت زیاد شده است که به دلیل افزایش مقدار شکل دهی با توجه به افزایش زاویه خم، این پدیده کاملاً قابل انتظار است. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج مرجع [11] برای زاویه شکل دهی 10 درجه، حداقل خطا  $7/5$  درصد و حداکثر خطا  $15/1$  درصد می‌باشد. همچنین با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج مرجع [11] برای زاویه شکل دهی 20 درجه، حداقل خطا  $6/9$  درصد و حداکثر خطا  $12/6$  درصد می‌باشد. به این ترتیب، با توجه به نزدیکی مقادیر حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های گزارش شده در [11] می‌توان به جوابهای شبیه‌سازی اجزای محدود اعتماد خوبی داشت.

### 3-2- اثر استحکام تسلیم بر روی گشتاور غلتک

در این بخش، اثر استحکام تسلیم روی گشتاور وارد بر غلتک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که شکل 7 به این موضوع اشاره دارد.

با توجه به شکل 7، افزایش استحکام تسلیم به افزایش گشتاور وارد بر غلتک پایینی منجر شده است. با توجه به نمودارها، در استحکام‌های تسلیم بیشتر از 600 مگاپاسکال، روند افزایش مذکور با شبیه ملایم‌تری دنبال شده است. دلیل منفی بودن مقدار گشتاورهای داده شده در نمودار، ناشی از جهت چرخش غلتک پایینی برای کشیدن ورق به سمت جلو است. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه شکل دهی، گشتاورها با افزایش نسبتاً کمی مواجه شده‌اند.

با توجه به مطالعه ذکر شده، افزایش استحکام تسلیم به افزایش گشتاور وارد بر غلتک‌ها می‌انجامد که در نتیجه باید ابزار تولیدی از قبیل جنس غلتک‌ها، محرك غلتک‌ها و یاتاقان‌ها را به گونه‌ای مناسب طراحی و انتخاب نمود.

### 3-3- اثر ضخامت ورق بر روی گشتاور غلتک

در شکل 8 تأثیر افزایش ضخامت محصول تولیدی روی گشتاور وارد بر غلتک‌ها نشان داده شده است.

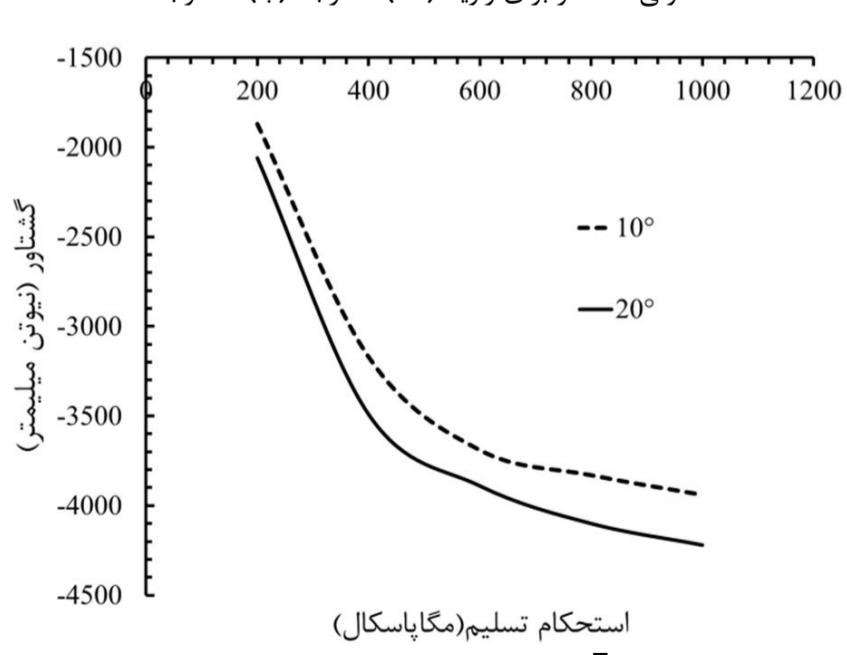
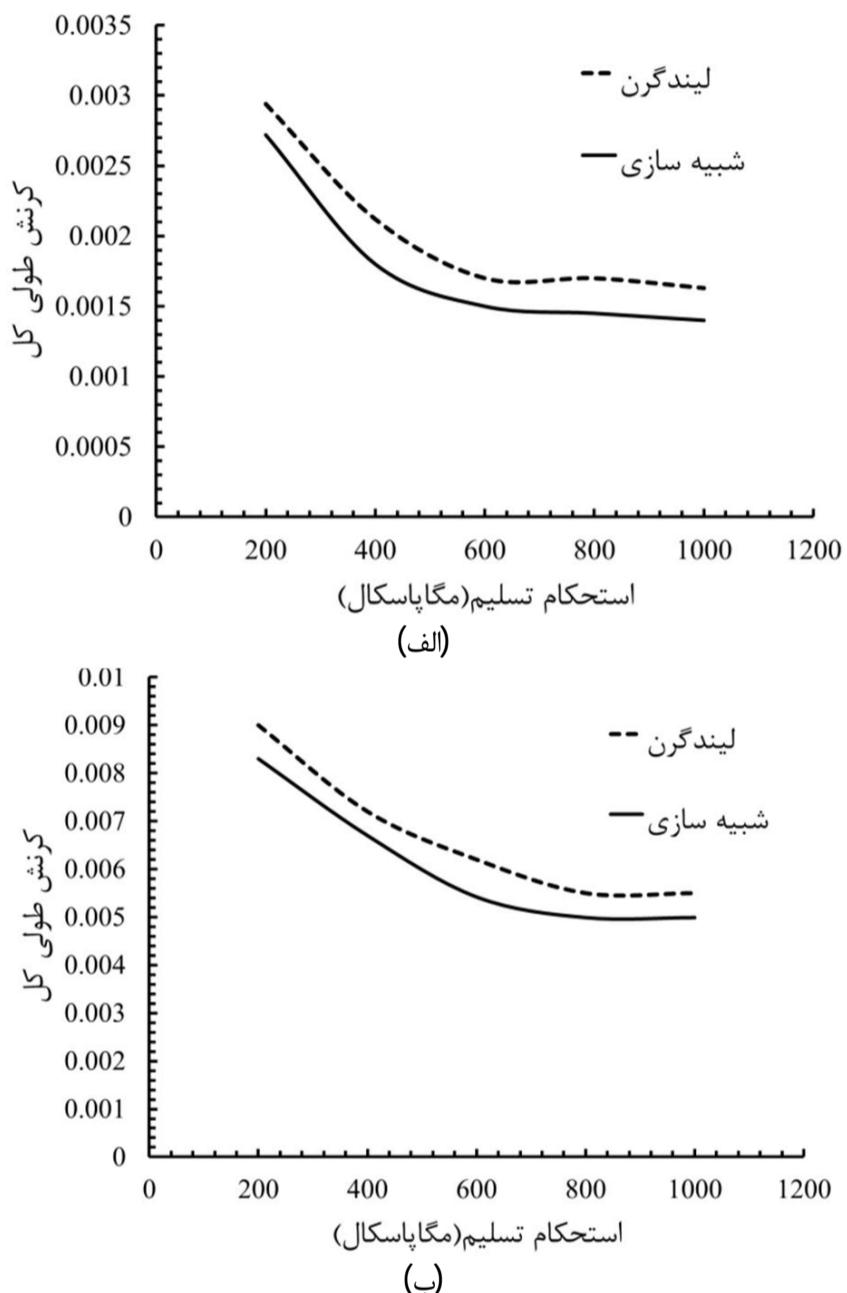
با توجه به شکل 8 می‌توان گفت که افزایش ضخامت ورق باعث زیاد شدن گشتاور وارد بر غلتک‌ها می‌شود. نکته‌ی قابل توجه آن است که افزایش زاویه شکل دهی به مقدار قابل توجهی، گشتاور را در ضخامت‌های مختلف افزایش داده است. به عبارتی با افزایش ضخامت ورق، گشتاور لازم برای شکل دهی در زاویه‌های شکل دهی بالاتر با سرعت زیادی رشد کرده است.

بعد اعمال شد. ضریب اصطکاک 0/1 و از قانون اصطکاک کولمب استفاده شد.

## 3- نتایج و بحث

### 3-1- بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی

یکی از کمیت‌های بسیار مهم در فرآیند شکل دهی غلتکی سرد، کرنش پوسته ای طولی حداکثر است که در لبه ورق اتفاق می‌افتد. برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی، با داده‌های گزارش شده در [11] انجام شد که در شکل 6 (الف و ب) نشان داده شده است.



جدول 2 مشخصات ضخامت‌ها و عرض‌های ورق در آزمایش‌های تجربی

	شماره نمونه	عرض ورق (میلیمتر)	ضخامت ورق (میلیمتر)
1/25	40	1	
2	40	2	
1/25	70	3	
2	70	4	

جدول 3 شدت جریان و توان در آزمایش‌های تجربی

	شماره نمونه	شدت جریان مؤثر (آمپر)	توان تجربی (وات)
479/1	1/3	1	
626/6	1/7	2	
405/4	1/1	3	
516	1/4	4	

جدول 4 توان در شبیه‌سازی اجزای محدود و درصد اختلاف نسبی آن با توان تجربی

	شماره نمونه	توان شکل دهی در آزمایش تجربی	درصد اختلاف نسبی با شبیه‌سازی (وات)
5/3	453/47	1	
6/8	584/11	2	
9/5	366/76	3	
3/9	495/81	4	

#### 4- کار تجربی

برای انجام آزمایش‌های تجربی، از یک دستگاه آزمایشگاهی استفاده شد که در یک ایستگاه، ورق را به اندازه 20 درجه شکل می‌داد. شکل 10 نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد.

در شکل 11 نمایی از محصول تولید شده نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر عرض و ضخامت ورق بر روی گشتاور شکل دهی، آزمایش‌هایی بر اساس عرض‌ها و ضخامت‌های ارائه شده در جدول 2 انجام شد.

در آزمایش‌های عملی، مقدار شدت جریان عبوری از موتور سه‌فاز محرک غلتک‌ها به کمک یک مولتی‌متر ثبات اندازه‌گیری شد و شدت جریان مؤثر از روی آن محاسبه شد. توان مصرفی از رابطه (1) به دست آمد که در آن  $P$  توان مصرفی،  $\bar{V}$  ولتاژ سه‌فاز متوسط،  $I_{\text{eff}}$  شدت جریان مؤثر،  $\eta$  بازده موتور و  $\cos(\varphi)$  از مشخصات موتور محرک (مربوط به اختلاف فاز) است:

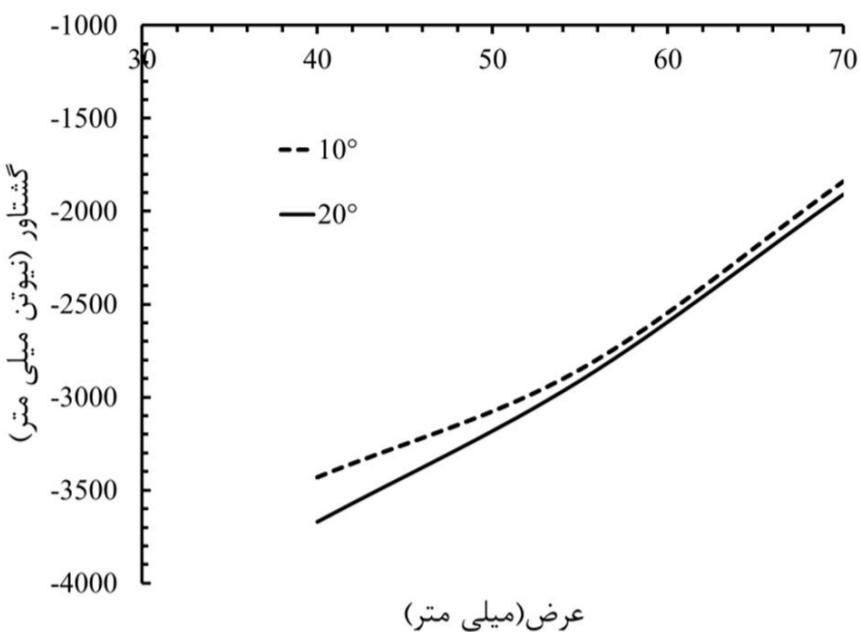
$$P = \sqrt{3}\bar{V} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos(\varphi) \cdot \eta \quad (1)$$

بازده موتور با توجه به شرایط کاری آن 80% و ولتاژ متوسط 380 ولت در نظر گرفته شد. در جدول 3 شدت جریان‌های مؤثر اندازه‌گیری شده به همراه توان مصرفی متناظر با آنها آورده شده است.

برای محاسبه توان شکل دهی در نرمافزار اجزای محدود مارک‌منتات می‌توان گشتاور شکل دهی را از نرمافزار استخراج و با داشتن سرعت دورانی غلتک‌ها، توان شکل دهی را با استفاده از رابطه (2) به دست آورد:

$$P = T \cdot \omega \quad (2)$$

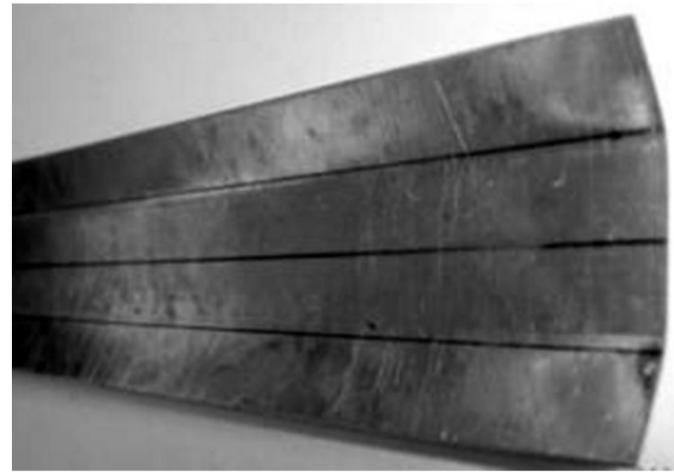
که در رابطه بالا  $T$  گشتاور و  $\omega$  سرعت دورانی غلتک‌ها است. برای نمونه‌های 1 تا 4، توان شکل دهی در شبیه‌سازی محاسبه شد که جدول 4 مقدارهای آنها و نیز درصد اختلاف نسبی آنها با توان‌های آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که درصد اختلاف بسیار کم می‌باشد که این مقدار اختلاف نیز به دلیل استهلاک مکانیکی دستگاه آزمایشگاهی و عوامل بیرونی مانند نوسان جریان برق منطقی به نظر می‌رسد. به این ترتیب مشاهده می‌شود که نتایج کار تجربی، نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها را به خوبی تأیید می‌کند.



شکل 9 اثر عرض ورق بر روی گشتاور غلتک



شکل 10 نمایی از دستگاه آزمایشگاهی



شکل 11 نمایی از یک ورق شکل داده شده

#### 3- اثر عرض ورق بر روی گشتاور غلتک

در شکل 9 چگونگی تغییرات گشتاور وارد بر غلتک پایین بر اساس تغییرات عرض ورق نشان داده شده است.

در شکل 9 مشاهده می‌شود که افزایش عرض ورق باعث شده است تا گشتاور وارد بر غلتک پایین کاهش یابد. این امر را می‌توان به این صورت توجیه نمود که با زیاد شدن عرض ورق، طول تماس بین غلتک و ورق زیادتر می‌شود. از آنجا که نیروی محرک در امر رانش ورق در طول خط تولید، نیروی اصطکاک مابین ورق و غلتک است با افزایش طول تماس، مقدار این نیرو زیاد شده و ورق راحت‌تر به درون فاصله بین غلتک‌ها کشیده می‌شود. در عین حال از شکل بالا پیداست که تغییرات زاویه شکل دهی تأثیر قابل توجهی روی گشتاور وارد و بر غلتک‌ها ندارد.

بهتر خواهد بود. با توجه به اینکه هدف این مقاله پیش‌بینی گشتاور است بنابراین تعداد واحدهای لایه خروجی را 1 واحد در نظر می‌گیریم. شبکه عصبی طراحی شده در متلب، در شکل 12 نشان داده شده است.

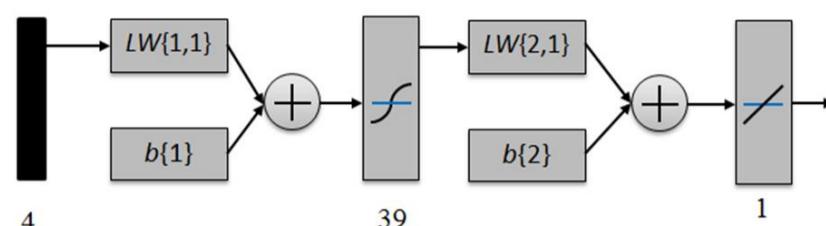
جدول 5 مقایسه بین نتایج شبیه سازی و شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

## 6- نتیجه‌گیری

از مسائل بسیار مهم در طراحی و بهینه‌سازی فرآیند شکل دهی غلتکی سرد، تخمین گشتاور مورد نیاز شکل دهی می‌باشد. از پارامترهای اساسی تأثیرگذار بر گشتاور شکل دهی، می‌توان به جنس، ضخامت و عرض ورق و زاویه شکل دهی اشاره نمود. نتایج بدست آمده از شبیه سازی ها نشان داد که با افزایش استحکام تسلیم، زاویه شکل دهی، ضخامت ورق و کاهش عرض ورق، گشتاور مورد نیاز شکل دهی افزایش می‌یابد. به این ترتیب، مهندسین طراح و تولید می‌توانند با در نظر گرفتن تأثیر هر کدام از کمیت‌های مذکور نوع و توان موتورهای محرك را با توجه به گشتاور مورد نیاز برای شکل دهی و کمیت‌های مؤثر بر آن مشخص سازند و نسبت به بهینه‌سازی مصرف انرژی اقدام کنند. شبکه عصبی پس انتشار خطای برای پیش‌بینی گشتاور موردنیاز شکل دهی ایجاد شد، مقایسه بین نتایج شبیه سازی و شبکه عصبی نشان داد که شبکه آموزش داده شده می‌تواند مقدار گشتاور مورد نیاز شکل دهی را بخوبی پیش‌بینی نماید.

## 7- مراجع

- [1] P.Groche, G.von Breitenbach, M.Jöckel, A.Zettler, New tooling concepts for future roll forming applications. *4th International conference on industrial tools (ITIC) 2003*, 121-126.
- [2] J.Senanayake, .., "The application of computation and experimental to metal deformation in cold roll forming", *J. Material processing Technology*, Vol.45, pp.155-163, 1994
- [3] S.Hong; S.Lee; N.Kim; "A parametric study on forming length in roll forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 774-778, 2001.
- [4] Moslemi Naeini, H., "Study on Design Method of Rolls for Reshaping of Non-Circular Pipes", Ph.D. thesis, University of Tokyo, Japan (In Japanese), 2000.
- [5] M.Tajdari,; "Analysis of Cold roll forming Process for Production of Symmetrical Open Sections", PhD Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, 1377. (In Persian)
- [6] Farzin, M., Salmani Tehrani, M. and Shameli, E., "Determination of Buckling Limit of Strain in Cold Roll Forming by the Finite Element Analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125-126, pp. 626-632, 2002.
- [7] M.Lindgren,; "Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, pp. 77-81, 2007.
- [8] M.Lindgren, "Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 44-47, 2007.
- [9] J. S.Gunasekera, , Z.Jia, , J. C.Malas, , L.Rabelo, "Development of a neural network for a cold rolling process", Vol. 11, pp. 597-603, June, 1998
- [10] J. Wu. X. Wang, P. F Thomson, A. Flitman, "A neural network approach to investigating the geometrical influence on wrinkling in sheet metal forming", *J. materials processing technology*, Vol. 105, pp. 215-220, 2000.
- [11] M.Lindgren,; "An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a roll formed U-channel developed by FE-analyses", *steel research int.* 78, No. 1, 2007.
- [12] R. A. Jacobs, *Neural Networks*, 1(4), 295(1988).
- [13] Matlab User Manual, Version (R2012a), The Math Work Inc., 2012.



شکل 12 شبکه عصبی طراحی شده در متلب

جدول 5 نتایج شبیه سازی و پیش‌بینی شبکه عصبی

ردیف	ضخامت عرض ورق	زاویه شکل دهی	شبکه عصبی	استحکام	شبیه سازی	تسهیم	
-9221	-9228	10	800	70	0/75	1	
-9474	-9487	20	800	70	0/75	2	
-24405	-24300	10	200	40	2	3	
-23805	-23910	20	200	40	2	4	

5- طراحی شبکه پس انتشار خطای و تخمین گشتاور مورد نیاز شکل دهی شبکه عصبی یک سیستم عملیاتی موازی است که نرون انسان را شبیه سازی می‌کند. هر نرون همیشه اطلاعات را از نرونهای لایه قبلی دریافت و بعد از محاسبه آنرا به نرونهای لایه بعدی توزیع می‌کند. به دلیل این ویژگی، شبکه عصبی نیازمند هیچگونه فرضی بین ورودی و خروجی نیست [12]. در بین مدل‌های بسیار زیاد شبکه عصبی، شبکه عصبی پس انتشار خطای شناخته شده بوده و بطور وسیعی در عیب یابی و پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله از نرم افزار متلب [13] جهت طراحی شبکه عصبی استفاده شده است. برای تسريع همگرایی شبکه، بطور همزمان از ممنتوم و نرخ یادگیری متغير استفاده شده است. هنگام ساخت شبکه پارامترهای زیادی باید تنظیم گردد. در این مقاله پارامترهای نرخ یادگیری اولیه برابر 0/001 و تعداد لایه های مخفی برابر 1 در نظر گرفته شدند.

از بین 32 مجموعه داده، 28 مجموعه به عنوان داده‌های آموزشی و 4 مجموعه به عنوان داده‌های آزمایشی انتخاب شدند. تاثیر تعداد نرون‌های لایه مخفی،تابع تبدیل لایه مخفی، نسبت کاهش و افزایش نرخ آموزش و ممنتوم بر کیفیت آموزش شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. فرآیند آموزش وقتی متوقف می‌شود که یکی از دو معیار همگرایی حاصل شود، که این دو به صورت زیر هستند:

- 1- میانگین مجموع مربعات خطای، که کوچکتر از 0/001 باشد.
- 2- تعداد تکرار، که به 50000 برسد.

کیفیت آموزش توسط میانگین مجموع مربعات خطای تعیین می‌شود، که صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (T_{ij} - P_{ij})^2 \quad (3)$$

پارامترهای در نظر گرفته شده برای پیش‌بینی گشتاور عبارتند از: استحکام تسلیم، ضخامت و عرض ورق و زاویه شکل دهی. بنابراین تعداد الگوهای ورودی، 4 واحد در نظر گرفته می‌شود. می‌توان با روش سعی و خطای و تعداد الگوی آموزشی مشخص، تعداد نرون‌های لایه مخفی را بدست آورد. برای انجام این کار شبکه ای از نوع پس انتشار خطای در محیط مطلب نوشته شد. شبکه با تعداد مختلفی از نرون‌های لایه مخفی (از 3 واحد تا 40 واحد) و با 28 الگوی آموزشی، آموزش داده شد. با توجه به نتایج بدست آمده در این قسمت اگر تعداد واحدهای لایه مخفی 39 در نظر گرفته شود کیفیت آموزش