

پیش‌بینی گشتاور شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی غلتکی کانال متقارن برای ورق فولاد SS2333

سعید سپاهی‌بروجنی^۲
دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه بوعلی سینا همدان
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۳۱)

مهدی سلمانی‌تهرانی^۱
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

یکی از مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز برای راه‌اندازی یک خط شکل‌دهی غلتکی، گشتاور لازم برای انجام فرایند است. هدف از این مقاله، بررسی اثر پارامترهای هندسی پروفیل، بر گشتاور شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی غلتکی مقطع کانال متقارن است. پارامترهای بررسی شده شامل ضخامت ورق، زاویه شکل‌دهی، عرض بال و عرض کف پروفیل است. برای پیش‌بینی گشتاور شکل‌دهی از شبکه عصبی استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه عصبی، از شبیه‌سازی اجزای محدود به‌دست آمده‌اند. در ادامه رابطه‌ای ساده برای محاسبه گشتاور شکل‌دهی پیشنهاد شده است. اعتبار نتایج شبیه‌سازی‌ها، با مقایسه با نتایج آزمایش‌های تجربی موجود، نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده تأثیر محسوس ضخامت ورق، زاویه شکل‌دهی و عرض بال پروفیل بر گشتاور شکل‌دهی در این فرایند است. اما اثر عرض کف پروفیل ناچیز و بی‌اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی غلتکی سرد، مقطع کانال متقارن، گشتاور شکل‌دهی، شبیه‌سازی اجزای محدود، شبکه‌های عصبی

Prediction of Forming Torque in Roll-Forming of Symmetric Channel Section for SS2333 Steel Sheet

M. Salmani Tehrani
Department of Mechanical Engineering
Isfahan University of Technology Isfahan

S. Sepahi Boroujeni
Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department
Bu-Ali Sina University, Hamedan

(Received: 4/September/2012; Accepted: 20/April/2014)

ABSTRACT

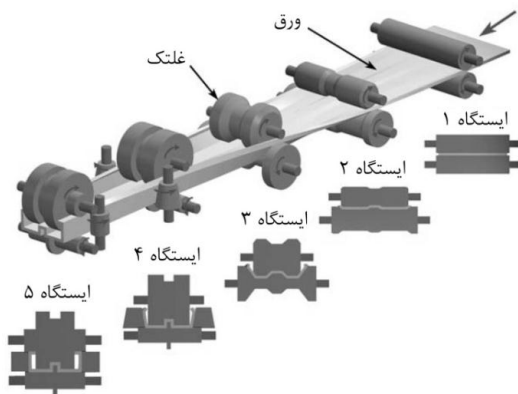
The forming torque is one of the most important information needed for starting-up a roll-forming line. In this paper the effect of profile geometric parameters on the forming torque is investigated, in roll-forming of symmetric channel section. The parameters which are to be studied include sheet thickness, fold angle, flange width and web width. To end this, the torque is predicted by a neural network algorithm. Finite element simulation has been utilized to train the neural network and the simulation results were validated, comparing with existing experimental results. Then an equation is proposed to determine forming torque. The results show that forming torque is considerably affected by sheet thickness, fold angle and flange width, while the effect of web width is negligible.

Keywords: Cold Roll-Forming, Symmetric Channel Section, Forming Torque, F.E. Simulation, Neural Network

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): tehrani@cc.iut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: saeid_sepahi@yahoo.com

همکارانش [۱۲] به بهینه‌سازی مقطع غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی به‌روش رویه‌ی پاسخ (RSM)^۴ پرداختند.



شکل (۱): نمایش طرح‌واره‌ی عملیات شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد.

آن‌ها حداکثر کرنش طولی ورق و میزان بازگشت فنری را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. سپس میزان شعاع غلتک و تغییر زاویه در هر ایستگاه را به‌گونه‌ای محاسبه کردند که توابع هدف انتخابی را بهینه کند.

روش محاسبه‌ی تغییرشکل غلتک‌ها و قفسه‌ها برای دست‌یابی به محصولاتی با تolerانس کوچک توسط پاسپیچ^۵ [۱۳] ارائه شد. او همچنین در پژوهش خود قطر بهینه‌ی غلتک‌ها را محاسبه و تأثیر واریانس نیروی شکل‌دهی را بر تغییرشکل قفسه‌ها بررسی نمود.

پنتون^۶ و همکارانش [۱۴] تغییرشکل‌های پایه‌ای و خواص مقطع در فرایند شکل‌دهی غلتکی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند از بین انواع تغییرشکل‌های ایجاد شده در این فرایند، تغییرشکل برشی بیشترین مقدار را دارد و بر این اساس نحوه‌ی تغییرشکل ورق به‌گونه‌ای است که این تغییرشکل برشی را کمینه کند.

سلمانی تهرانی [۱۵] نشان داد، استفاده از شبیه‌سازی عددی در تحلیل و پیش‌بینی عیوب و محاسبه‌ی حد شکل‌دهی متناظر با آن‌ها، می‌تواند اصول و مبنای طراحی در فرایند شکل‌دهی غلتکی کانال متقارن قرار گیرد. در این پژوهش، کمانش محلی لبه ورق، به‌عنوان عیبی رایج و محدودیتی در حد شکل‌دهی ورق در هر ایستگاه شکل‌دهی غلتکی، مورد بررسی قرار گرفت. او نشان داد حد کمانش ورق برای ابعاد هندسی متشابه، یکسان است و ضریب اصطکاک در حد کمانش ورق بی‌تأثیر است. او روشی بر اساس محاسبه‌ی حد شکل‌دهی

۱- مقدمه

در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، نوار ورق فلزی در دمای اتاق، با عبور از میان ایستگاه‌های مختلف، توسط غلتک‌های دوار تحت خمش قرار می‌گیرد تا در نهایت پروفیلی با مقطع دلخواه به‌دست آید. در این فرایند، نوار ورق در هر ایستگاه تغییرشکل کمی را تجربه کرده تا در نهایت بدون تغییر محسوس در ضخامت، به پروفیل با مقطع مورد نظر تبدیل شود. قسمت‌های اصلی هر ایستگاه شامل غلتک‌های بالا و پایین، موتور، مجموعه‌ی انتقال توان، یاتاقان‌ها، قفسه‌ی نگه‌دارنده، تجهیزات کنترلی و در صورت نیاز غلتک‌های جانبی است. حرکت ورق از میان غلتک‌ها به‌کمک نیروی اصطکاک میان ورق و سطح غلتک‌ها، ادامه پیدا می‌کند. شکل ۱ روند شکل‌دهی غلتکی را برای یک مقطع نمونه در پنج ایستگاه نشان می‌دهد.

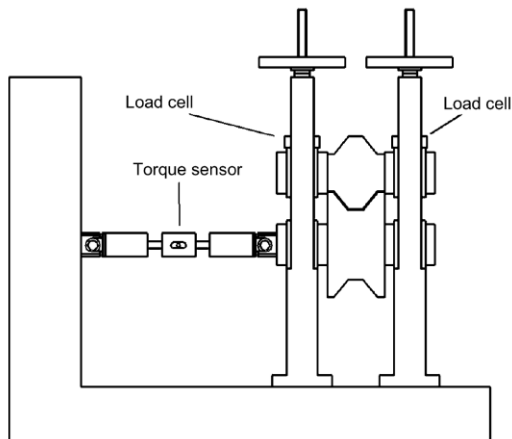
مقاطع تولید شده با روش شکل‌دهی غلتکی سرد دارای سطحی یکنواخت، و نسبت به نمونه‌های مشابه که با روش‌های دیگر، مانند اکستروژن تولید شده‌اند، سبک‌تر و مقاوم‌تر هستند. در حقیقت انجام عملیات کارسختی در دمای پایین بر روی نوار ورق سبب افزایش مقاومت این محصولات می‌شود. از دیگر مزایای این روش می‌توان به امکان رنگ‌پذیری محصول، پیش و پس از انجام فرایند اشاره کرد. از این فرایند برای تولید مقاطع پیچیده که در صنایع گوناگون مانند هواپیمایی، حمل‌ونقل، ساختمان و صنایع خاص کاربرد دارند نیز استفاده می‌شود.

امروزه در برخی مراکز صنعتی، طراحی فرایند شکل‌دهی، همچنان بر پایه‌ی روش آزمون و خطا استوار است که البته پرهزینه و زمان‌بر است [۱]. به‌کمک برنامه‌های کامپیوتری مهندسی (CAE)^۱، طراحی ماشین‌های شکل‌دهی، هرچه سریع‌تر و با دقت بیشتری انجام می‌شود. برخی از این برنامه‌ها، دارای امکان شبیه‌سازی بر اساس روش اجزای محدود، و استفاده از حل عددی هستند [۲]. پژوهش‌های گوناگونی برای شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر فرایند شکل‌دهی غلتکی به‌وسیله‌ی کامپیوتر، با استفاده از روش اجزای محدود و حل عددی انجام شده است [۱۱-۳]. تاکنون مطالعات تجربی و تحلیلی بسیاری با هدف بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرایند شکل‌دهی غلتکی از جمله کرنش طولی ورق در حین شکل‌پذیری، حد کمانش لبه ورق و بازگشت فنری^۲ انجام شده است. زنگ^۳ و

4-Response Surface Method
5- Pośpiech
6- Panton

1-Computer Aided Engineering
2-Spring Back
3- Zeng

ضخامت ورق و طول بال پروفیل به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را روی نیروی شکل‌دهی دارند.



شکل (۲): مکانیزم استفاده شده برای اندازه‌گیری نیرو و گشتاور شکل‌دهی در آزمایش‌های لینگرن [۲۰].

یکی از پژوهش‌های تجربی مفید منتشر شده در زمینه‌ی اندازه‌گیری نیرو و گشتاور شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی غلتکی، توسط لینگرن^۶ [۲۰] انجام شده است. او با انجام آزمایش‌هایی، گشتاور و نیروی شکل‌دهی را برای هفت ماده مختلف، با تنش تسلیم و ضخامت‌های متفاوت اندازه گرفت. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در این آزمایش حس‌گرهایی برای اندازه‌گیری نیرو و گشتاور شکل‌دهی در نظر گرفته شده‌اند. حس‌گرهای نیرو بین غلتک بالا و قفسه نگه‌دارنده، و حس‌گر گشتاور بین شافت انتقال‌دهنده توان و غلتک پایین قرار داده شده است. لینگرن همچنین در این پژوهش، رابطه‌ای برای محاسبه‌ی گشتاور شکل‌دهی، ارائه کرد. او در این رابطه، تنها اثر پارامترهای تنش تسلیم، زاویه‌ی شکل‌دهی و ضخامت ورق را در نظر گرفته و از اثر دیگر پارامترهای هندسی چشم‌پوشی کرده است.

در پژوهشی دیگر، داوودی و همکارانش [۲۱] به بررسی عددی و تجربی نیرو و گشتاور شکل‌دهی پرداخته، تأثیر تنش تسلیم ماده و همچنین ضخامت ورق، زاویه‌ی شکل‌دهی و عرض ورق را روی نیرو و گشتاور اعمالی بررسی کردند. آن‌ها در عمل با اندازه‌گیری جریان و ولتاژ موتور و تعیین توان مصرفی، گشتاور اعمالی توسط موتور را محاسبه نمودند. پژوهش آنها نشان داد با افزایش تنش تسلیم، زاویه‌ی شکل‌دهی و همچنین ضخامت و عرض ورق، نیروی شکل‌دهی افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی نیز برای گشتاور شکل‌دهی به دست آمد، با این تفاوت که با افزایش عرض ورق، گشتاور شکل‌دهی کاهش یافت.

کمانشی برای طراحی الگوی گل مقطع کانال متقارن، ارائه کرد. روش‌های پیشین برای طراحی الگوی گل، بیشتر بر مبنای مشاهدات تجربی محققین و به صورت نیمه تحلیلی-تجربی بوده است. او همچنین نشان داد در تولید مقطع لوله گرد، می‌توان با استفاده از طرح غلتک‌های چندپارچه، میزان شمشیری شدن پروفیل خروجی را کاهش داد. با استفاده از این راهکار می‌توان با حفظ میزان شکل‌دهی، از کمانش محلی لبه جلوگیری نمود. در پژوهشی دیگر سلمانی‌تهرانی و همکارانش [۱۶]، به بررسی پدیده‌ی کمانش در لبه ورق هنگام تولید مقطع لوله‌ی گرد پرداختند. آن‌ها نشان دادند اگر زاویه‌ی شکل‌دهی در ایستگاه اول از حد معینی تجاوز نماید، لبه‌ی ورق دچار کمانش خواهد شد.

لاراناگا^۱ و همکارانش در پژوهشی عددی و تجربی [۱۷] به اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی اجزای محدوده پیشنهادی خود پرداختند. آن‌ها در این تحقیق کرنش طولی، کرنش عرضی، زاویه، نیرو و گشتاور شکل‌دهی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش فاصله‌ی بین غلتک‌های بالا و پایین برابر ضخامت ورق در نظر گرفته شده که منجر به نتایجی منطبق با واقعیت شده است. والکر^۲ و پیک^۳ [۱۸] تقریبی از کرنش محوری در شکل‌دهی غلتکی، هنگام تولید لوله‌های ERW^۴ ارائه کردند. آن‌ها علت کمانش در لبه‌ی محصول را که در عملیات جوش‌کاری این لوله‌ها مشکل‌آفرین است، افزایش کرنش فشاری در لبه ورق دانستند و با مهار نکردن افتادگی جلوی ورق، این مشکل را کاهش دادند.

تاکنون بررسی گشتاور شکل‌دهی، کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. چنانچه پیشتر عنوان شد، اهمیت این امر در راه‌اندازی خط شکل‌دهی، تحقیقات و بررسی بیشتری را طلب می‌کند. همچنین طراحی صحیح سایر اجزای یک ایستگاه شکل‌دهی، مانند یاتاقان‌ها و سیستم انتقال نیرو نیازمند پیش‌بینی درست توان مورد نیاز است. باتاچاریا و همکارانش^۵ [۱۹]، بر اساس برابر قرار دادن کار خارجی با انرژی انرژی تلف‌شده‌ی داخلی، رابطه‌ای تحلیلی-تجربی برای محاسبه نیروی شکل‌دهی ارائه کردند. نیروی شکل‌دهی نیروی فشردگی غلتک‌ها به ورق است. آن‌ها همچنین با بررسی تأثیرپذیری نیروی شکل‌دهی از خواص مادی و هندسه مقطع، نشان دادند

1- Larranaga
2- Walker
3- Pick
4- Electric Resistance Welded
5- Bhattacharyya

6- Lindgren

مختلف قابل پیش‌بینی است. در نهایت رابطه‌ای کاربردی برای محاسبه‌ی گشتاور برحسب پارامترهای هندسی مقطع پیشنهاد شده است. در بخش بعد به جزئیات مدل‌سازی اجزای محدود پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با استفاده از نسخه‌ی ۶/۱۰ نرم‌افزار ABAQUS انجام شده‌اند.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

در این بخش جزئیات مدل‌سازی اجزای محدود ارائه می‌شود. محاسبه‌ی گشتاور شکل‌دهی تنها در ایستگاه اول انجام شده است. بنابراین مدل شامل دو ایستگاه می‌شود. ایستگاه نگه‌دارنده یا تکیه‌گاه، که شامل دو غلتک استوانه‌ای است و ایستگاه اول، که در آن ورق اولین تغییرشکل خود را تجربه می‌کند. با توجه به استفاده از نتایج مرجع [۲۰] برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، مدل‌سازی اجزای محدود بر اساس مشخصات آزمایش‌های این مرجع انجام شده است.

۲-۱- هندسه‌ی مدل

با توجه به متقارن بودن مقطع مورد نظر، تنها نیمی از هندسه‌ی مدل شبیه‌سازی شده است (شکل ۳-الف)). در مدل‌سازی فرایند، غلتک‌ها به صورت صلب تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند. شعاع خم لایه‌ی میانی ورق در پروفیل نهایی برابر $r = 1/5t$ در نظر گرفته شده که r شعاع گوشه‌ی غلتک و t ضخامت ورق است. برای ایجاد این شعاع گوشه در ورق، شعاع گوشه در غلتک‌های بالا و پایین به ترتیب برابر $r_{Top} = t$ و $r_{Bottom} = 2t$ در نظر گرفته شده است. همچنین قطر غلتک‌های بالا و پایین برابر $2R_{Top} = 2R_{Bottom} = 150$ (mm) در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی میان غلتک‌های بالا و پایین پس از بسته شدن غلتک‌ها برابر ضخامت ورق است. نوار ورق پیش از شروع فرایند کاملاً تخت بوده، در نتیجه هندسه‌ی اولیه‌ی ورق به صورت یک صفحه‌ی مستطیلی مدل می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد، با توجه به تقارن مسأله، عرض مستطیل مدل برابر نصف عرض ورق است. بر اساس تجربه‌ی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده، طول نوار ورق در مدل، تقریباً دو برابر فاصله‌ی بین دو ایستگاه متوالی در نظر گرفته شده است (شکل ۳-الف)). با توجه به فاصله‌ی 145 (mm) بین ایستگاه‌ها، طول نوار ورق در مدل، اندکی بیش از دو برابر فاصله‌ی بین ایستگاه‌ها و برابر 300 (mm) منظور شده است. شکل ۳-ب) طرح‌واره‌ی مجموعه‌ی غلتک‌ها و ورق را نشان می‌دهد. در این شکل، t ضخامت ورق، θ زاویه‌ی شکل‌دهی، a عرض بال و b عرض کف پروفیل است.

تاکنون شبکه‌های عصبی مصنوعی نقش مؤثری در تحلیل پارامتری روش‌های شکل‌دهی، به‌خصوص در زمینه‌هایی که براساس آزمون و خطا عمل می‌شود، ایفا کرده‌اند. دانز^۱ و هارتلی^۲ [۲۲] در پژوهشی با جمع‌آوری طراحی‌های موفق که منجر به ساخت مقاطع به‌روش شکل‌دهی غلتکی شده است، و دسته‌بندی آن‌ها بر اساس تعداد خم‌ها، ضخامت و عرض ورق، یک شبکه‌ی عصبی با تابع شعاعی^۳ را، که در ذخیره‌ی بازیابی اطلاعات به‌خوبی عمل می‌کند، آموزش دادند. این شبکه با کنار هم قرار دادن طراحی‌های موفق برای مقاطع ساده، امکان طراحی مقاطع پیچیده که از چند مقطع ساده تشکیل شده‌اند را فراهم می‌کند. در پژوهشی دیگر گاناسکرا^۴ و همکارانش [۲۳] با استفاده از شبکه‌ی عصبی به پیش‌بینی نیروی شکل‌دهی در فرایند نورد مسطح^۵ بر اساس گستره‌ی قابل توجهی از پارامترهای فرایند پرداختند. یکی دیگر از کاربردهای شبکه‌ی عصبی در شکل‌دهی ورقی توسط وانگ^۶ و همکارانش [۲۴] انجام گرفته است. آنها میزان تأثیر برخی پارامترهای هندسی نظیر عمق ورق، گرادیان بردارهای انحنا و تاب منحنی ورق را بر روی احتمال پدید آمدن چین‌خوردگی روی ورق، طی فرایند کشش عمیق بررسی کردند. این پژوهش عمق کشش و گرادیان بردار تاب منحنی ورق را دو عامل تأثیرگذار در وقوع این پدیده معرفی می‌کنند. رفتار آلیاژ منیزیم در کشش در نرخ کرنش و دماهای مختلف توسط فورسلس^۷ و همکارانش [۲۵] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با آموزش یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی، رفتار تنش-کرنش آلیاژ منیزیم و میزان شکل‌پذیری این آلیاژ را پیش‌بینی کردند. این شبکه قادر به پیش‌بینی دقیق کرنش گلویی شدن است هر چند تنش تسلیم اولیه را با دقت کمتری پیش‌بینی می‌کند.

تاکنون رابطه‌ای کلی برای محاسبه گشتاور، که دربرگیرنده‌ی تمامی پارامترهای هندسی مقطع باشد ارائه نشده است. در این مقاله ابتدا فرایند شکل‌دهی شبیه‌سازی، و نتایج آن ارزیابی و اعتبارسنجی شده است. برای اعتبارسنجی، گشتاور شکل‌دهی به‌دست آمده از شبیه‌سازی، با نتایج آزمایش‌های مرجع [۲۰] مقایسه شده است. سپس اثر پارامترهای هندسی مقطع پروفیل بر میزان گشتاور شکل‌دهی بررسی، و با آموزش شبکه‌ی عصبی، گشتاور شکل‌دهی مورد نیاز برای هندسه‌های

- 1- Downes
- 2- Hartley
- 3- Radial Basis Functions Artificial Neural Network
- 4- Gunasekera
- 5- Flat Rolling
- 6- Gunasekera
- 7- Forcelllese

۲-۲- خواص مادی

در مدل‌سازی فرآیند، از ویژگی‌های مکانیکی ورق فولاد SS2333 استفاده شده است. این فولاد، یکی از مواد مورد بررسی در آزمایش‌های لینگرن [۲۰] است. خواص مکانیکی این فولاد که از مرجع [۲۶] برگرفته شده، در جدول ۲ آورده شده است. رفتار کرنش‌سختی فولاد SS2333 نیز با توجه به رابطه‌ی (۱) در نظر گرفته شده است [۲۶]. رفتار کرنش-سختی دیگر مواد استفاده شده در شبیه‌سازی که برای اعتبارسنجی نتایج از آنها استفاده شده، از همین مرجع استخراج شده است.

$$\sigma = 1339.8(\epsilon + 0.0023)^{0.346} \quad (1)$$

ورق به‌صورت همگن مدل شده و از پنج نقطه‌ی انتگرال‌گیری در راستای ضخامت آن و از انتگرال‌گیری به‌روش سیمپسون استفاده شده است.

۲-۳- گام‌های حل

در روش متداول شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی، با چرخش غلتک‌ها، ورق به‌واسطه نیروی اصطکاک از میان آنها عبور کرده شکل مورد انتظار را به خود می‌گیرد. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این مقاله، «انرژی تلف‌شده در اثر اصطکاک» در کل مدل، نسبت به انرژی کل ناچیز است. بنابراین می‌توان با چشم‌پوشی از اصطکاک در کلیه‌ی تماس‌ها، شرایط مرزی مدل را به‌گونه‌ای تعریف کرد که طی آن، پس از بسته شدن غلتک پایین در ایستگاه اول، مجموعه چهار غلتک در مدل، از طول ورق عبور کنند. در این حالت ورق در موقعیت خود ثابت باقی می‌ماند.

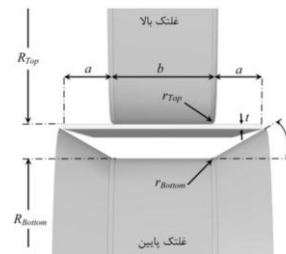
جدول (۲): خواص فولاد در مدل‌سازی [۲۰].

$\sigma_y = 301 \text{ (Mpa)}$	تنش تسلیم اولیه
$E = 176 \text{ (Gpa)}$	مدول یانگ
$\nu = 0.3$	نسبت پواسون
$\rho = 7800 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	چگالی

سه گام زمانی برای انجام فرآیند در نظر گرفته شده است. در اولین گام، غلتک پایین ایستگاه اول بسته شده و عملیات خمش روی ورق انجام می‌شود. در گام دوم تمامی غلتک‌ها در راستای طولی ورق از حالت سکون شروع به حرکت کرده تا به سرعت نهایی خود برسند. سپس در آخرین گام، غلتک‌ها با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهند تا فرآیند شکل‌دهی



(الف-۳)



(ب-۳)

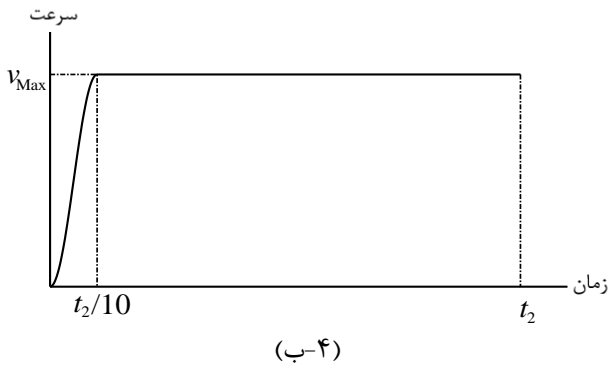
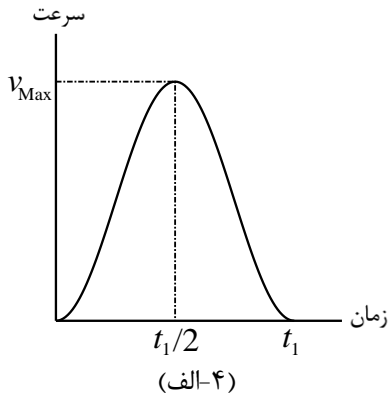
شکل (۳): نمایش مجموعه‌ی ورق و غلتک‌ها، الف) آرایش ابتدایی مجموعه در مدل اجزای محدود، ب) نمایش طرح‌واره‌ی مقطع ورق و غلتک‌ها و معرفی پارامترهای هندسی مورد بررسی، در شکل‌دهی غلتکی کانال متقارن.

جدول (۱): گستره تغییرات و مقدار پایه پارامترهای هندسی.

پارامتر هندسی	گستره‌ی تغییرات پارامترها	مقدار پایه
ضخامت ورق	$1 \text{ (mm)} \leq t \leq 2 \text{ (mm)}$	۱ (mm)
زاویه‌ی شکل‌دهی	$10^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$	30°
عرض بال پروفیل	$10 \text{ (mm)} \leq a \leq 15 \text{ (mm)}$	۱۰ (mm)
عرض کف پروفیل	$10 \text{ (mm)} \leq b \leq 60 \text{ (mm)}$	۲۰ (mm)

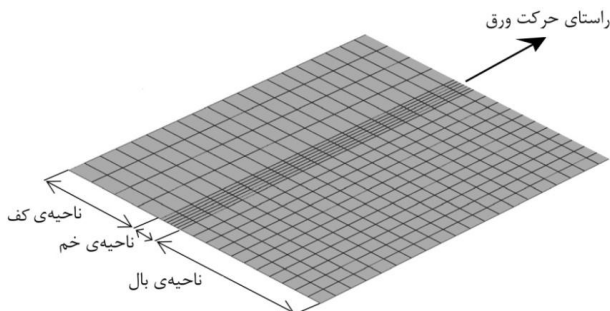
برای بررسی اثر پارامترهای هندسی بر گشتاور شکل‌دهی، شبیه‌سازی‌ها به‌ازای مقادیر مختلف پارامترهای هندسی تکرار شده‌اند. دامنه‌ی تغییر هر یک از این پارامترها و هم‌چنین مقادیر پایه‌ی هر یک از آنها، در جدول ۱ بیان شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، یک پارامتر در محدوده‌ی نشان داده شده در جدول ۱، تغییر کرده و پارامترهای دیگر در مقدار پایه‌ی خود ثابت می‌مانند.

آن‌چنان که در مرجع [۲۰] آمده است، در آزمایش‌های عملی برای عدم تأثیرگذاری ایستگاه‌های شکل‌دهی بعدی بر روی گشتاور شکل‌دهی در ایستگاه مورد بررسی، شکل‌دهی در سه ایستگاه $0^\circ - \theta^\circ - 0^\circ$ انجام شده است. به این معنی که پس از شکل‌دهی پروفیل ورق به‌اندازه‌ی θ° ، ورق دوباره وارد یک ایستگاه تکیه‌گاه (0°) می‌شود. اما در اینجا شبیه‌سازی‌ها تنها در دو ایستگاه ($0^\circ - \theta^\circ$) انجام شده است. دلیل این امر بی‌اثر بودن ایستگاه تکیه‌گاه دوم روی گشتاور شکل‌دهی است. برای نشان دادن این موضوع، گشتاور شکل‌دهی این دو حالت با هم مقایسه شده است که نتیجه‌ی آن در ادامه خواهد آمد.



شکل (۴): طرح‌واره‌ی الگوی دامنه‌ی هموار در اعمال سرعت، الف) نمودار سرعت بر حسب زمان برای گام اول و ب) نمودار سرعت بر حسب زمان، برای گام‌های دوم و سوم.

در شکل‌دهی غلتکی کانال متقارن، میزان و شدت تغییرشکل در عرض ورق یکنواخت نیست. بر همین اساس، عرض ورق در مدل اجزای محدود به سه بخش ناحیه‌ی خم، ناحیه‌ی بال و ناحیه‌ی کف تقسیم شده که به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین میزان تغییرشکل هستند. بدیهی است هرچه تغییرشکل در یک ناحیه بیشتر باشد، باید تراکم شبکه‌بندی نیز در آن ناحیه بیشتر باشد (شکل ۵). تعداد المان‌ها در ناحیه‌های خم، بال و کف به گونه‌ای در نظر گرفته شده که اندازه هر المان در این نواحی به ترتیب از $0.9(\text{mm})$ ، $0.4(\text{mm})$ و $2.5(\text{mm})$ بیشتر نشود. به طور متوسط از 3000 المان برای شبکه‌بندی نوار ورق در مدل، استفاده شده است.



شکل (۵): نمایش مدل شبکه‌بندی شده ورق و چگونگی تراکم المان‌ها در راستای عرض ورق.

را کامل کنند. در شبیه‌سازی‌ها از حل‌گر «دینامیک صریح»^۱ استفاده شده است.

۴-۲- تماس‌ها

تماس‌ها بین سطوح بیرونی هر کدام از غلتک‌ها و ورق تعریف شده است. قید تماس به روش پنالتی تعریف شده، و بین سطوح هیچ‌گونه لقی^۲ در نظر گرفته نشده است. آن‌چنان که پیش‌تر اشاره شد، تماس بین تمامی سطوح، بدون اصطکاک تعریف شده‌اند. به همین دلیل نحوه‌ی کنش سطوح بر یکدیگر به صورت عمودی^۳ در نظر گرفته شده است.

۵-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

در گام اول سرعت بسته شدن غلتک پایین ایستگاه اول، به آرامی و مطابق الگوی دامنه‌ی هموار، افزایش یافته تا به سرعت $3(\text{m/s})$ برسد. سپس سرعت آن به همین طریق کاهش می‌یابد تا در نهایت به صفر رسیده و خمش اولیه انجام شود. در گام بعدی غلتک‌ها در راستای طولی ورق شروع به حرکت کرده و سرعت آن‌ها به آرامی و با الگوی دامنه‌ی هموار، از صفر به $2.25(\text{m/s})$ می‌رسد. در گام نهایی، غلتک‌ها با همین سرعت راستای طولی ورق را طی می‌کنند. شرایط مرزی به گونه‌ای اعمال شده‌اند که در عمل، سرعت خطی ورق $2.25(\text{m/s})$ و سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها برابر $30(\text{rad/s})$ است. در شکل ۴، الگوی زمانی نمودار تغییر سرعت در هر گام نشان داده شده است.

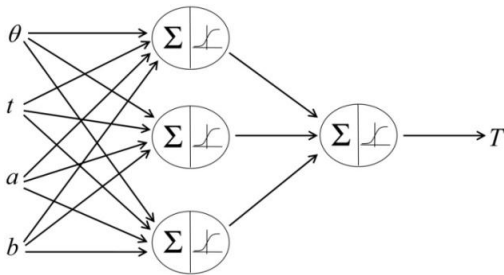
هم‌چنان که در ابتدای این بخش گفته شد، برای ایجاد امکان مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایش‌های عملی موجود، شرایط مرزی در شبیه‌سازی‌های قسمت اعتبارسنجی، مشابه شرایط آزمایش‌های مرجع [۲۰] در نظر گرفته شد. در این آزمایش‌ها سرعت دورانی غلتک‌ها برابر $2.156(\text{rad/s})$ بیان شده است. با توجه به شعاع غلتک‌ها، این سرعت دورانی غلتک‌ها معادل سرعت خطی $0.162(\text{m/s})$ برای ورق است.

۶-۲- المان انتخابی و شبکه‌بندی

بر اساس تجربه‌های به دست آمده در شبیه‌سازی‌ها، برای شبکه‌بندی ورق در مدل اجزای محدود، از المان «پوسته‌ی متداول»^۴ از نوع S4R استفاده شده است. در شبیه‌سازی فرایند، 300 المان به طور یکنواخت در راستای طول ورق در نظر گرفته شده است.

- 1- Dynamic Explicit
- 2- Clearance
- 3- Normal
- 4- Conventional Shell Element

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (۴)$$



شکل (۶): ساختار شبکه‌ی عصبی استفاده شده در این مقاله برای پیش‌بینی گشتاور.

۴- نتایج و بحث

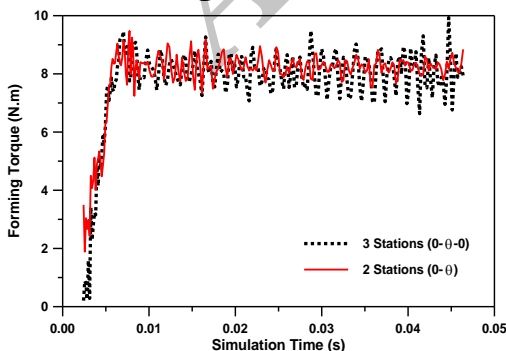
رابطه (۵)، رابطه پیشنهادی توسط لینگرن برای محاسبه گشتاور شکل‌دهی را نشان می‌دهد. در این رابطه، t ضخامت ورق، s تنش تسلیم ماده، k_2 و k_3 مقادیری ثابت، و $k_1(\theta)$ ثابتی تابع از زاویه شکل‌دهی است.

$$T = k_1(\theta) t^{k_2} s^{k_3} \quad (۵)$$

در حالتی که زاویه شکل‌دهی برابر 60° است، $k_1(\theta) = 0.138$ ، $k_2 = 2/1$ و $k_3 = 0.157$ است. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، در این رابطه نقش تمامی پارامترهای هندسی در نظر گرفته نشده و اطلاعاتی درباره نحوه‌ی محاسبه $k_1(\theta)$ برای دیگر زاویه‌های شکل‌دهی ارائه نشده است.

۴-۱- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود

در ارزیابی نتایج، ابتدا اثر در نظر گرفتن ایستگاه سوم، همانند آن‌چه در آزمایش‌های مرجع [۲۰] آمده است، بر گشتاور شکل‌دهی بررسی می‌شود. شکل ۷ گشتاور شکل‌دهی در دو حالت $0^\circ - \theta^\circ - 0^\circ$ و $0^\circ - \theta^\circ - \theta^\circ$ را نشان می‌دهد.



شکل (۷): مقایسه‌ی نمودار تغییرات گشتاور شکل‌دهی بر حسب زمان شبیه‌سازی، برای شکل‌دهی ورق در دو و سه ایستگاه، به‌ازای مقادیر هندسی پایه برای مقطع (جدول ۱).

۲-۷- محاسبه‌ی گشتاور با استفاده از نتایج شبیه‌سازی

اجزای محدود

بخش عمده‌ی گشتاور اعمال شده توسط موتور، به‌صورت انرژی تغییرشکل، صرف ایجاد خمش در قسمت خم، و کشش در ناحیه‌ی بال پروفیل می‌شود. برای محاسبه‌ی گشتاور شکل‌دهی، می‌توان از دو روش استفاده نمود. در روش اول، گشتاور به‌طور مستقیم از نتایج شبیه‌سازی استخراج می‌شود. در این حالت به‌دلیل نواسان شدید نمودار حاصل، لازم است متوسط آن به‌عنوان گشتاور متوسط شکل‌دهی در نظر گرفته شود.

در روش دوم، محاسبه‌ی مشتق کار خارجی در طول بازه‌ی زمانی شکل‌دهی، توان را به‌دست می‌دهد (رابطه‌ی (۲)). در رابطه‌ی (۲)، W کار خارجی در انجام فرآیند است. پس از محاسبه‌ی توان، با استفاده از رابطه‌ی توان

$$P = M \cdot \omega \quad (۲)$$

گشتاور شکل‌دهی محاسبه می‌شود. در این حالت نیز لازم است پس از مشتق‌گیری از نمودار کار خارجی، به‌دلیل نواسانات زیاد نمودار حاصل، متوسط آن به‌عنوان متوسط گشتاور شکل‌دهی لحاظ شود. طی بررسی‌های انجام شده در شبیه‌سازی فرآیند، دو روش بالا کاملاً با هم منطبق بوده و نتایج یکسانی به‌دست می‌دهند.

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (۳)$$

۳- پیش‌بینی گشتاور با استفاده از شبکه‌ی عصبی

یک شبکه‌ی عصبی مجموعه‌ای از برنامه‌ها و ساختارهای داده‌ای است که اساس کار آن از روی سیستم عصبی بدن انسان شبیه‌سازی شده است. هر شبکه‌ی عصبی توسط یک پایگاه داده‌ای آموزش داده می‌شود و پس از آن قادر به پیش‌بینی نتیجه برای ورودی‌های جدید خواهد بود.

شبکه‌های عصبی از تعدادی نورون تشکیل شده‌اند که در تعدادی لایه قرار گرفته‌اند. لایه‌ها به‌طور متوالی و نورون‌ها به‌صورت موازی با یکدیگر، عملیات پردازش را انجام می‌دهند. شبکه عصبی طراحی شده در این پروژه، از نوع «تغذیه-مستقیم» و شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان است. در لایه‌ی پنهان سه نورون قرار داده شده است. تابع فعال‌سازی همه‌ی نورون‌ها از نوع «لوژیستیک» است (رابطه‌ی (۴)). این شبکه چهار پارامتر هندسی را به‌عنوان ورودی دریافت، و میزان گشتاور مورد نیاز را برای تولید پروفیل مورد نظر، پیش‌بینی می‌کند (شکل ۶). برای آموزش و آزمون شبکه، به‌ترتیب از ۲۸ و ۴ سری داده استفاده شده است.

۴-۲- محاسبه‌ی گشتاور با استفاده از شبکه‌ی عصبی و رابطه‌ی تجربی

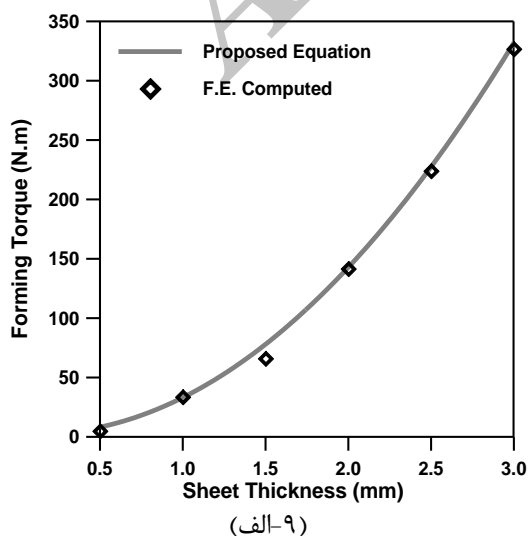
در نمودارهای شکل ۹-الف) تا ۹-د)، نمودارهای روند تغییر گشتاور شکل‌دهی با هر کدام از پارامترهای هندسی مقطع، نشان داده شده است. به طوری که در هر یک از نمودارهای شکل ۹، سایر پارامترها در مقادیر پایه‌ی خود ثابت نگه‌داشته شده‌اند. براساس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی انجام شده، رابطه (۶)، رابطه‌ی تجربی را برای محاسبه گشتاور شکل‌دهی پیشنهاد می‌دهد.

$$T = k(m)t^{2.088}\theta^{1.173}a^{0.2} \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶) t ضخامت ورق بر حسب (mm)، θ زاویه‌ی شکل‌دهی بر حسب درجه، a عرض بال پروفیل بر حسب (mm) و T گشتاور شکل‌دهی بر حسب (N.mm) است. ضریب $k(m)$ نیز ضریب ثابتی تابع خصوصیات مادی ورق است. برای فولاد SS2333 ضریب $k(m)$ برابر ۰/۳۹۱۴ است.

همان‌طور که از شکل ۹-د) مشاهده می‌شود، گشتاور شکل‌دهی مستقل از تغییرات عرض کف پروفیل است. بنابراین عرض کف در رابطه‌ی (۶) منظور نشده است. به علاوه، همان‌گونه که لینگر نشان داده است، گشتاور شکل‌دهی نسبت به پارامتر ضخامت، با توان ۲/۱ تغییر می‌کند [۲۰] و [۲۶]. در نتایج به دست آمده در این مقاله نیز همین نتیجه مشاهده می‌شود.

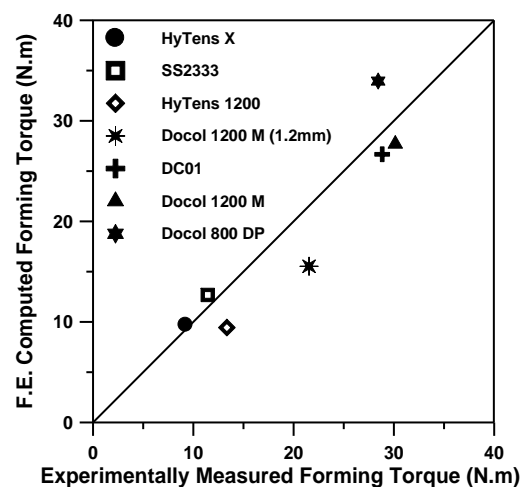
در جدول ۴، مقادیر گشتاور به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج به دست آمده از رابطه (۶) و همچنین گشتاور پیش‌بینی شده توسط شبکه‌ی عصبی، برای پنج حالت مختلف مقایسه شده است. نمودارهای شکل ۹ سازگاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و رابطه‌ی (۶) را نشان می‌دهد.



جدول (۳): گشتاور اندازه‌گیری شده در آزمایش برای ۷ نمونه [۲۰].

ماده مورد آزمایش	گشتاور شکل‌دهی (N.m)
HyTens X	۹/۲
SS2333	۱۳/۳
HyTens 1200	۱۱/۴
Docol 1200 M	۳۰/۱
Docol 800 DP	۲۸/۴
DC01	۲۸/۸
Docol 1200 M (1.22 mm)	۳۰/۱

همان‌طور که از این شکل پیداست، گشتاور شکل‌دهی در این دو حالت بر هم منطبق بوده و استفاده از ایستگاه تکیه‌گاه دوم تأثیری روی گشتاور شکل‌دهی ندارد. ایستگاه‌های تکیه‌گاه در عمل به صورت غلتک‌های هرزگرد عمل کرده و تنها وظیفه‌ی حفظ موقعیت و هدایت ورق در طول خط شکل‌دهی را بر عهده دارند. بنابراین با توجه به عدم دخالت این ایستگاه‌ها در شکل‌دهی ورق، گشتاورهای به دست آمده در دو حالت، برابر است. در جدول ۳، گشتاور اندازه‌گیری شده در آزمایش لینگر برای هفت نمونه‌ی مورد بررسی آورده شده است [۲۰]. شکل ۸، نمودار مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی و عمودی به ترتیب نشان‌دهنده نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی است. اگر نتیجه تجربی با نتیجه شبیه‌سازی برای یک آزمایش دقیقاً مطابقت داشته باشند، نقطه مربوط به آن، روی خط ممتد قرار خواهد گرفت. در واقع شیب این خط برابر واحد است. آن‌گونه که از این نمودار برمی‌آید، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مطابقت دارند.



شکل (۸): مقایسه‌ی نتایج گشتاور اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی [۲۰] با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی.

جدول (۴): مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای

محدود، رابطه‌ی پیشنهادی (۶) و شبکه‌ی عصبی.

خطای رابطه‌ی (۶) (%)	خطای شبکه‌ی عصبی (%)	گشتاور محاسبه شده (N.m)			عرض بال (mm)	زاویه‌ی شکل‌دهی (درجه)	ضخامت ورق (mm)
		رابطه‌ی (۶)	شبکه‌ی عصبی	شبیه‌سازی اجزای محدود			
۰/۰۱	۰/۳۰	۳۶/۳۴	۳۶/۴۵	۳۶/۳۴	۱۵	۳۰	۱
-۰/۳۱	-۲/۱۴	۳۳/۵۱	۳۲/۹۰	۳۳/۶۲	۱۰	۳۰	۱
۱/۳۴	۵/۷۰	۲۲۷/۰۶	۲۳۶/۸۴	۲۲۴/۰۵	۱۰	۳۰	۲/۵
-۱/۱۶	-۲/۱۱	۲۷/۰۶	۲۶/۸۰	۲۷/۳۸	۱۰	۲۵	۱
۱۱/۶۵	۲۴/۶۶	۹/۲۳	۱۰/۳۱	۸/۲۷	۱۰	۱۰	۱

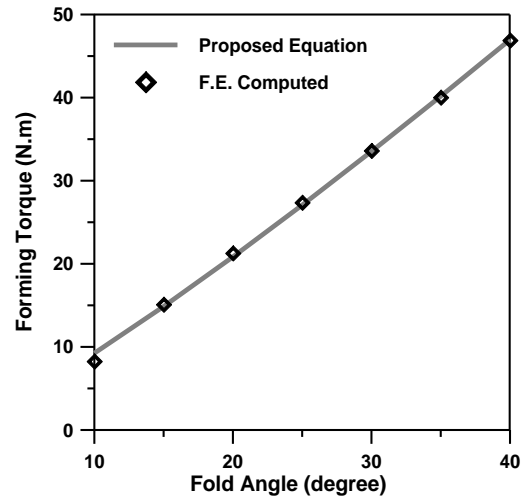
در انتها لازم به یادآوری است که هر شبکه‌ی عصبی تنها در محدوده‌ی آموزش خود قادر به پیش‌بینی نتیجه خواهد بود. به‌عبارت دیگر هر چه ورودی‌ها از این محدوده بیش‌تر فاصله بگیرند، خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد. بنابراین به‌منظور یافتن گشتاور برای ورودی‌هایی خارج از محدوده آموزش، لازم است شبکه با پایگاه داده‌ای جدیدی آموزش ببیند تا خطای پیش‌بینی به حداقل برسد.

۵- نتیجه‌گیری

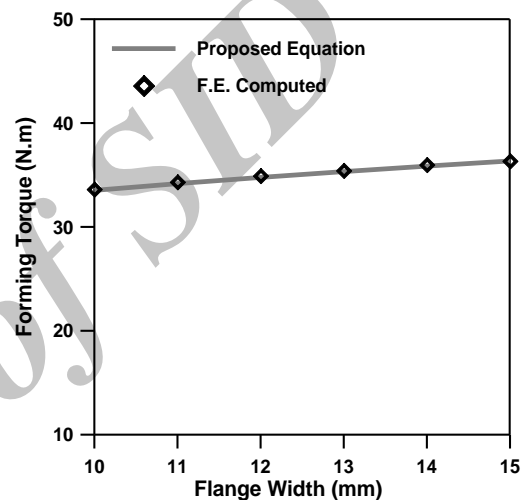
در این مقاله چگونگی اثرپذیری گشتاور شکل‌دهی از پارامترهای هندسی مقطع در شکل‌دهی مقطع کانال متقارن، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، بررسی شده است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی اجزای محدود، نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی موجود در منابع پیشین، مقایسه و اعتبار نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده شد. پس از آن با استفاده از بخشی از نتایج شبیه‌سازی‌ها، یک شبکه‌ی عصبی آموزش دیده و برای پیش‌بینی گشتاور شکل‌دهی به‌کار گرفته شد.

سپس رابطه‌ای برای محاسبه گشتاور شکل‌دهی در هر ایستگاه پیشنهاد شد. روش شبیه‌سازی ارائه شده در این مقاله که به نتایجی نزدیک با نتایج تجربی انجامید، روشی قابل قبول برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی کانال متقارن و تخمین زدن گشتاور شکل‌دهی است. نتایج به‌دست آمده از این مقاله را می‌توان در موارد زیر برشمرد:

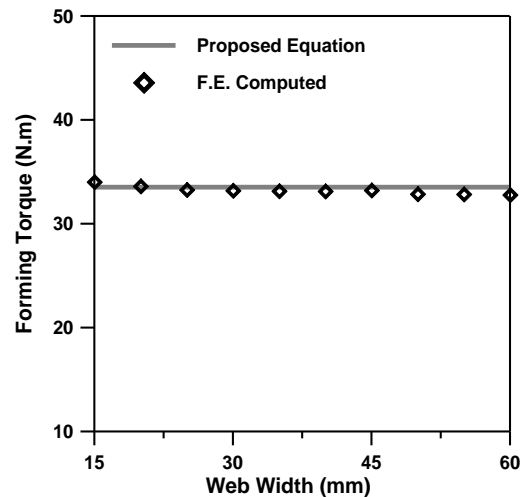
۱. شبکه‌ی عصبی و رابطه‌ی پیشنهاد شده برای پیش‌بینی گشتاور، نتایجی نزدیک با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی ارائه می‌دهد و می‌توان از آن‌ها برای محاسبه گشتاور بهره جست. البته همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شد، در بیشتر حالت‌ها رابطه‌ی (۶) نتایج نزدیک‌تری با واقعیت به‌دست می‌دهد،



(۹-ب)



(۹-ج)



(۹-د)

شکل (۹): نمودار تغییر گشتاور بر حسب پارامترهای هندسی مقطع پروفیل به‌دست آمده از شبیه‌سازی و رابطه‌ی (۶)، (الف) گشتاور بر حسب ضخامت ورق، (ب) گشتاور بر حسب زاویه‌ی شکل‌دهی، (ج) گشتاور بر حسب عرض بال و (د) گشتاور بر حسب عرض کف.

- Altan, T. "Computed Aided Simulation of Cold Roll Forming-a Computer Program for Simple Section Profiles", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 41-48, 1996.
11. Brunet, M. and Ronel, S. "Finite Element Analysis of Roll-Forming of Thin Sheet Metal", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 45, No. 4, pp. 255-265, 1994.
 12. Zeng, G., Li, S.H., Yu, Z.Q. and Lai, X.M. "Optimization Design of Roll Profiles for Cold Roll Forming Based on Response Surface Method", *J. Materials & Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 1930-1938, 2009.
 13. Pośpiech, J. "Calculation Method for Deformations of Stand and Rolls to Obtain Products with Small Dimension of Tolerances", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 1, pp. 417-422, 2005.
 14. Pantan, S.M., Zhu, S.D. and Duncan, J.L. "Fundamental Deformation Types and Sectional Properties in Roll Forming", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 26, No. 8, pp. 725-735, 1994.
 15. Salmani Tehrani, M. "Analysis and Prediction of Defects in Cold Roll-Forming of Basic Sections, Using Finite Element Simulation", Ph.D. Thesis, Isfahan University of Technology, I.R. Iran, 2006. (In Persian)
 16. Salmani Tehrani, M., Moslemi Naeini, H., Hartley, P. and Khademizadeh, H. "Localized Edge Buckling in Cold Roll-Forming of Circular Tube Section", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1, pp. 617-620, 2006.
 17. Larranaga, J., Galdos, L., Uncilla, L. and Etxaleku, A. "Development and Validation of A Numerical Model for Sheet Metal Roll Forming", *Int. J. Mater Forming*, Vol. 3, No. 1, pp. 151-154, 2010.
 18. Walker, T.R. and Pick, R.J. "Approximation of the Axial Strains Developed During the Roll Forming of ERW Pipes", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-44, 1990.
 19. Bhattacharyya, D., Smith, P.D., Thadakamalla, S.K. and Collins, I.F. "The Prediction of Roll Load in Cold Roll Forming", *J. Mech. Work. Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 363-379, 1987.
 20. Lindgren, M. "Experimental Investigations of the Roll Load and Roll Torque When High Strength Steel is Roll Formed", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1, pp.44-47, 2007.
 21. Davoodi, B., Moslemi Naeini, H., Dadgar Asl, Y., Azizi Tafti, R. and Kasaei, M.M. "Numerical and Experimental Investigation of Roll Forces and Torques in Cold Roll Forming of a Channel Section", *Proceeding of International Conference on Advances in Material and Processing Technologies*, Paris, France, 2010.
 22. Downes, A. and Hartley, P. "Using an Artificial Neural Network to Assist Roll Design in Cold Roll-Forming Processes", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 177, No. 1, pp. 319-322, 2006.
 23. Gunasekera, J.S., Zhengjie Jia, Malas, J.C. and Rabelo, L. "Development of a Neural Network Model for a Cold Rolling Process", *J. Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 11, No. 2. با افزایش زاویه‌ی شکل‌دهی و ضخامت ورق، گشتاور شکل‌دهی نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که پیشتر بیان شد، در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد، تغییر شکل‌های اساسی عبارتند از کشش در قسمت بال پروفیل و خمش در ناحیه‌ی خم. بنابراین با افزایش زاویه‌ی شکل‌دهی و ضخامت ورق، گشتاور لازم برای انجام این تغییر شکل‌ها افزایش یافته و در مجموع باعث افزایش گشتاور مصرفی می‌شود و
 ۳. بین گشتاور شکل‌دهی و عرض بال پروفیل رابطه‌ای مستقیم وجود دارد. هنگامی که عرض بال افزایش می‌یابد، مسیر طی شده توسط لبه ورق هنگام شکل‌پذیری و در نتیجه کرنش طولی آن افزایش می‌یابد. افزایش کرنش در ورق، باعث افزایش گشتاور مصرفی خواهد شد. همان‌گونه که از ابتدا نیز قابل پیش‌بینی بود، گشتاور شکل‌دهی تقریباً مستقل از عرض کف پروفیل است. زیرا در این ناحیه هیچ‌گونه تغییر شکلی به نوار ورق اعمال نمی‌شود.
- ### ۶- مراجع
1. Hellborg, S. "Finite Element Simulation of Roll Forming", M.S. Thesis, University of Linköping, Sweden, 2007.
 2. Profil, Rollform Design Software, UBECO, www.ubeco.com.
 3. McClure, C.K. and Li, H. "Roll Forming Simulation Using Finite Element Analysis", *Manufacturing Review*, Vol. 8, pp. 114-122, 1995.
 4. Heislitz, F., Livatyali, H., Ahmetoglu, M.A., Kinzel, G.L. and Altan, T. "Simulation of roll-Forming Process with the 3D FEM Code PAM-STAMP", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 59-67, 1996.
 5. Lindgren, M. "Modelling and Simulation of the Roll Forming Process", Licentiate Thesis, University of Luleå, Sweden, 2005.
 6. Brunet, M., Mguil, S. and Pol, P. "Modeling of a Roll Forming Process with a Combined 2D and 3D FEM code", *J. Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, No.1, pp.213-219, 1998.
 7. Lindgren, M. "Finite Element Model of Roll Forming of a U-Channel Profile", *Proceeding of International Conference on Technology of Plasticity*, Verona, Italy, 2005.
 8. Tajdari, M. and Farzin, M. "Simulation of Cold Roll Forming of Channel Section", *Proceeding of the First WMC International Symposium on Manufacturing Systems*, Auckland, New Zealand, pp. 311-317, 1997.
 9. Brunet, M. "A Finite Element Method for Unilateral Contact and Friction Problem Involving Finite Strain and large Displacement", *J. Theor. Appl. Mech.*, Vol. 7, No. 1, pp. 209-220, 1988.
 10. Duggal, N., Ahmetoglu, M.A., Kinzel, G.L. and

- 1, pp. 597-603, 1998.
24. Wang, J., Wu, X., Thomson, P.F. and Flitman, A. "a Neural Networks Approach to Investigating the Geometrical Influence on Wrinkling in Sheet Metal Forming", J. Materials Processing Technology, Vol. 105, No. 1, pp. 215-220, 2000.
25. Forcellese, A., Gabrielli, F. and Simoncini, M. "Prediction of Flow Curves and Forming Limit Curves of Mg Alloy Thin Sheets Using ANN-Based Models", J. Computational Materials Science, Vol. 50, No. 1, pp. 3184-3197, 2011.
26. Lindgren, M. "Experimental and Computational Investigation of the Roll Forming Process", Ph.D. Thesis, University of Luleå, Sweden, 2009.

Archive of SID