

تخمین برگشت فنری در شکل‌دهی غلتکی سرد با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

حسن مسلمی نایینی^{۱*}؛ روح‌اله عزیزی تفتی^۲؛ مهدی تاجداری^۳

چکیده

شکل‌دهی غلتکی سرد یکی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی است که در آن ورق با عبور از بین یک سری غلتک‌های شکل‌دهی در ایستگاه‌های متوالی به طور پیوسته و ملایم خم شده و شکل نهایی را به خود می‌گیرد. با وجود سادگی ظاهری، به دلیل زیاد بودن کمیت‌های دخیل در فرآیند و اثر متقابل آنها، طراحی و کنترل فرآیند با چالش‌هایی درگیر است که پدیده برگشت فنری یکی از آنها است.

هدف اصلی در این مقاله، ارائه معیاری ساده برای برگشت فنری و بیان راه‌حلی برای دستیابی سریع به آن معیار است که شبکه عصبی مصنوعی به عنوان ابزاری قدرتمند برای نیل به این هدف انتخاب شد. شکل‌دهی غلتکی سرد برای مقطع کانالی شکل در ایستگاه اول، با نرم‌افزار مارکمنتات^۱ شبیه‌سازی شد و با استفاده از داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی، آموزش و امتحان شبکه عصبی انجام شد. مقایسه خروجی‌های شبکه عصبی با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود که در مجموعه داده‌های آموزشی موجود نیستند درستی عملکرد شبکه عصبی را به اثبات رساند.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی غلتکی سرد، برگشت فنری، شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبیه‌سازی اجزای محدود.

Using Artificial Neural Networks for Estimation of Springback in Cold Roll Forming

H. Moslemi Naieni; R. Azizi Tafti; M. Tajdari

ABSTRACT

Cold roll forming is a sheet metal forming process in which the bending occurs gradually in several forming steps from an undeformed strip to a finished profile. Although simple appearance, the process is influenced by several parameters that complicate the process design and control such as springback.

The main purpose in this article is to determine a simple criterion for the springback and to introduce a fast solution to obtain it and therefore artificial neural network was proposed for achieving this goal. Cold roll forming of a channel section in the first station was simulated by a commercial package named "Msc Marc Mentat". The data obtained from the finite element simulations were used as training and testing sets for neural networks. Perfect performance of neural network was proved when the neural network outputs were compared with the testing set that did not exist in the training set.

KEYWORDS: Cold roll forming, Springback, Artificial neural networks, Finite element simulation.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۳/۲۲

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۴/۶

^{۱*} نویسنده مسئول و استاد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس: moslemi@modares.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس: azizitafti@modares.ac.ir

^۳ دانشیار؛ مرکز مکانیک و فن‌آوری‌های ساخت؛ دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر: tajdari@yahoo.com

پایگاه داده چند کارخانه شکلدهی غلتکی سرد موجود بود یک شبکه عصبی ایجاد کردند. به عبارتی، آنها به جای انجام یک کار تحقیقاتی و تحلیلی، روشی طراحی تخمینی برای محصولات جدید بر اساس طراحی‌های قبلی ارائه کردند که بسیار وابسته به صحت داده‌های قبل است.

ابتدا در نرم‌افزار اجزای محدود مارکمنتات، یک مقطع کانالی شکل در ایستگاه اول شبیه‌سازی شد. برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی از داده‌های موجود در مقالات [۱۱] کمک گرفته شد و در ادامه با انجام یک فرآیند آماری، معیاری برای برگشت‌فتری ارائه گردید. سپس یک شبکه عصبی مصنوعی ایجاد و با داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی، آموزش داده شد. برای امتحان شبکه عصبی آموزش‌دیده، شبکه به یک سری از داده‌ها که در مرحله آموزش به آن ارائه نشده بود پاسخ‌هایی داد که با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها هم‌خوانی خوبی داشت.

۲- شیوه کار

در شکلدهی غلتکی سرد وقتی ورق در ایستگاه شکلدهی از تماس با غلتک‌ها خارج می‌شود به تدریج خاصیت برگشت‌فتری خود را نشان می‌دهد. با دور شدن از ایستگاه شکلدهی، مقدار برگشت‌فتری زیاد می‌شود که در بسیاری از موارد برای مقابله با آن از غلتک‌های هرزگرد استفاده می‌شود. اما در صورتی که طراحی غلتک‌های شکلدهی به گونه‌ای باشد که مقدار برگشت‌فتری در یک گستره قابل‌قبول محدود شود، نیازی به غلتک‌های هرزگرد نیست.

با تغییر زاویه غلتک پایینی، شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام گرفت. از روی داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با استفاده از یک سری روش‌های آماری ابداعی، یک محدوده تخمینی برای برگشت‌فتری به‌دست آمد. در پایان یک شبکه عصبی مصنوعی پایه شعاعی ایجاد گشت و با داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، آموزش یافت.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند

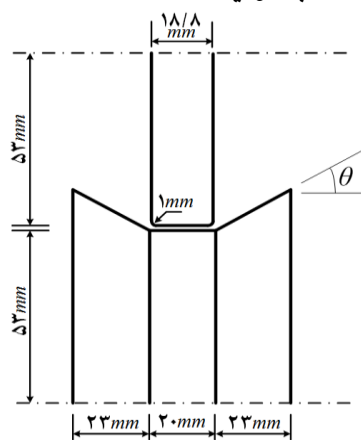
۳-۱- مدل‌سازی

بسیار و یک نمونه با زاویه‌های شکلدهی متفاوت در نرم‌افزار اجزای محدود مارکمنتات ایجاد و تحلیل شد. در شکل (۱) نمونه اجزای محدود برای زاویه شکلدهی 20° نشان داده شده است. این نمونه دارای سه ایستگاه است که غلتک‌های دو ایستگاه اول صاف بوده و فقط نقش نگهدارنده را دارند و خمی

شکلدهی غلتکی سرد یکی از فرآیندهای شکلدهی ورق‌های فلزی با سرعت و بازده بالا است که می‌توان محصولات با طول نامحدود و سطح مقطع یکنواخت تولید نمود. با وجود پیشینه این صنعت، به دلیل اثر کمیت‌های متعدد در آن، هنوز روابط استاندارد و تثبیت‌شده برای آن ارائه نشده است و معمولاً طراحی بر اساس تجربه و سلیقه انجام می‌شود. یکی از این کمیت‌ها برگشت‌فتری است که بر روی دقت ابعادی محصول نهایی اثر مستقیم دارد. اما این که در این فرآیند، مقدار برگشت‌فتری چگونه، در کدام موقعیت مکانی و بر اساس کدام معیار اندازه گرفته شود، موضوعی است که اهمیت دارد و تاکنون به طور متمرکز بر روی آن تحقیقی انجام نگرفته است.

باتاچاریا و اسمیت [۱] با بررسی کرنش طولی در لبه یک مقطع کانالی شکل و انجام آزمایش‌هایی تجربی، اثر ایستگاه‌های اول و آخر شکلدهی را بیشتر اعلام کردند. مک‌کلر و هانهویی [۲] به کمک نرم‌افزار آباکوس، شکلدهی غلتکی سرد را شبیه‌سازی نموده و با چند آزمایش تجربی، صحت نتیجه‌های خود را بررسی کردند. هایسلیتز و همکارانش [۳] با نرم‌افزار تجاری اجزای محدود پام-استامپ، شکلدهی غلتکی سرد یک مقطع کانالی شکل را شبیه‌سازی و هندسه تغییرشکل‌یافته و توزیع کرنش‌ها را با داده‌های تجربی قبلی مقایسه نمودند. برویت و همکارانش [۴] به کمک روش اجزای محدود الاستیک-پلاستیک، تاریخچه کرنش در یک مقطع کانالی شکل در چهار ایستگاه را تحلیل و شکل غلتک‌ها را بهینه کردند. همچنین [۵] کد اجزای محدود پروفیل^۲ را ایجاد و مقاطعی مانند مقطع کانالی شکل را با آن شبیه‌سازی نمودند. هونگ و همکارانش [۶] یک برنامه شبیه‌سازی بر اساس مدل اجزای محدود صلب-خمیری سه‌بعدی ارائه دادند و بر اساس کمیت‌هایی از قبیل جنس و ضخامت ورق، قطر و سرعت غلتک‌ها و رفتار تغییرشکل ماده، طول تغییرشکل را تخمین زدند. لیندگرن [۷] با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود مارکمنتات، طول تغییرشکل و کرنش طولی در لبه مقطع کانالی شکل را بررسی و روابطی برای آنها ارائه نمود. همچنین [۸] با بررسی استحکام ورق اعلام کرد که با افزایش تنش تسلیم ورق، کرنش طولی در لبه افزایش و طول تغییرشکل کاهش می‌یابد. وی [۹] تأثیر استحکام ورق را روی نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها بررسی و با انجام یک سری آزمایش تجربی، نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها و توان مصرفی را به‌دست آورد. داووز و همکارش [۱۰] با استفاده از اطلاعات طراحی محصولات پیشین که در

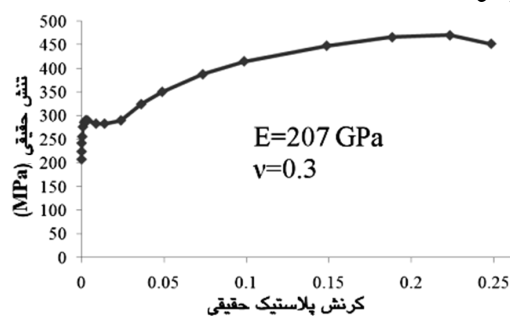
شعاع غلتک‌های صاف در ایستگاه‌های نگهدارنده و نیز شعاع غلتک بالایی و شعاع پایه غلتک پایینی در ایستگاه شکل‌دهی ۵۳ میلی‌متر منظور شده است. برای اینکه سرعت حرکت ورق برابر با ۰/۱ متر بر ثانیه باشد، سرعت دورانی غلتک‌ها در ایستگاه شکل‌دهی برابر با ۱/۸۸۷ رادیان بر ثانیه قرار داده شد. برای ایجاد کشش در ورق در بین ایستگاه‌ها، سرعت دورانی غلتک‌های ایستگاه‌های نگهدارنده به مقدار ۰/۵ درصد کاهش داده شد. در نمونه تماسی همه غلتک‌ها صلب هستند در حالی که ورق شکل‌پذیر است. برای ورق و تمامی غلتک‌ها ضریب اصطکاک ۰/۲ در نظر گرفته شد و قانون اصطکاک کولمب استفاده گردید. زاویه شکل‌دهی در غلتک پایینی از ۱۵° تا ۳۵° تغییر یافت و برای هر زاویه مقدار برگشت‌فتری محاسبه گردید.



شکل (۳): نمایی از غلتک‌های ایستگاه اول

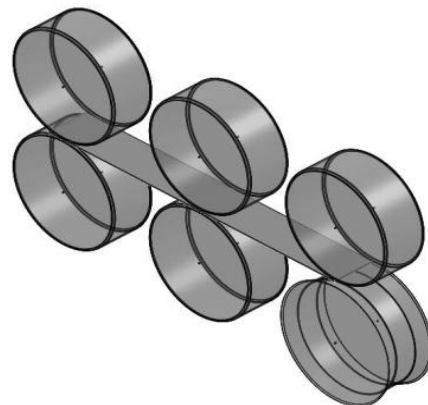
۳-۳- جنس ورق

جنس ورق در تحلیل‌های اجزای محدود، فولاد نرم 1020SAE انتخاب شده است که داده‌های مربوط به تنش اسمی- کرنش خمیری اسمی آن از مرجع [۱۱] استخراج شد. مقادیر تنش حقیقی - کرنش خمیری حقیقی از این مقادیر به‌دست آمد که در شکل (۴) نشان داده شده است. در تحلیل‌های انجام شده، ماده همسانگرد و ارتجاعی - خمیری فرض شده و از قانون کارسختی همسانگرد و معیار تسلیم فون میسنز استفاده شد.



شکل (۴): نمودار تنش حقیقی - کرنش خمیری حقیقی ورق

را روی ورق ایجاد نمی‌کنند. غلتک بالایی شکل‌دهی مشابه غلتک‌های صاف در ایستگاه‌های نگهدارنده است. اما غلتک پایینی زاویه‌دار بوده و عامل اصلی ایجاد خم بر روی ورق می‌باشد.



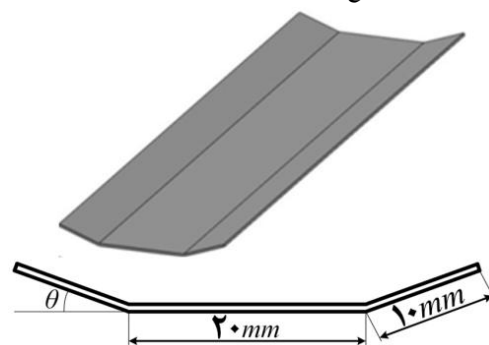
شکل (۱): نمونه اجزای محدود برای زاویه شکل‌دهی ۲۰°

تحلیل‌ها با یک ورق تخت شروع می‌شوند. غلتک پایینی در ایستگاه شکل‌دهی اول بالا می‌آید تا سطح پایه آن به سطح پایینی ورق مماس شود. غلتک‌ها شروع به دوران کرده و اصطکاک بین ورق و غلتک‌ها، ورق را به طرف جلو برده و ورق خم می‌شود.

۲-۳- ویژگی‌های هندسی

فاصله بین ایستگاه‌ها بر اساس مقدار موجود در مقاله [۲] ۱۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای اینکه در حین تحلیل، ورق حداقل با غلتک‌های سه ایستگاه در تماس باشد طول ورق ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است.

با توجه به اینکه مقطع کانالی شکل متقارن است فقط نیمی از آن به عرض ۲۰ میلی‌متر شبیه‌سازی شد. ضخامت ورق ۰/۶ میلی‌متر و نوع جزء پوسته^۱ انتخاب شد. در راستاهای طولی و عرضی به ترتیب ۱۵۰ و ۱۰ جزء چهار گرهی مربعی بر روی ورق ایجاد گردید. در شکل (۲) نمایی از محصول نهایی به همراه اندازه‌های مقطع آن نشان داده شده است.

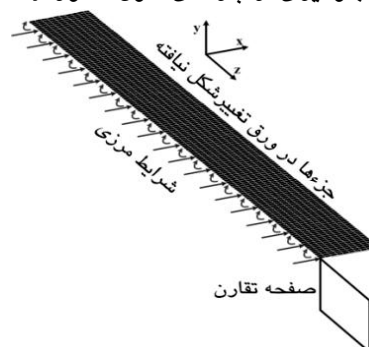


شکل (۲): نمایی از محصول نهایی و مقطع آن

۳-۴- شرایط مرزی

با توجه به تقارن محصول، یک صفحه تقارن در وسط مقطع کانالی شکل در نظر گرفته شد. از سه شرط مرزی در خط مرکزی ورق استفاده شد که عبارتند از:

- جلوگیری از حرکت در راستای x
- جلوگیری از چرخش حول محور z
- جلوگیری از چرخش حول محور y



شکل (۵): شرایط مرزی و صفحه تقارن

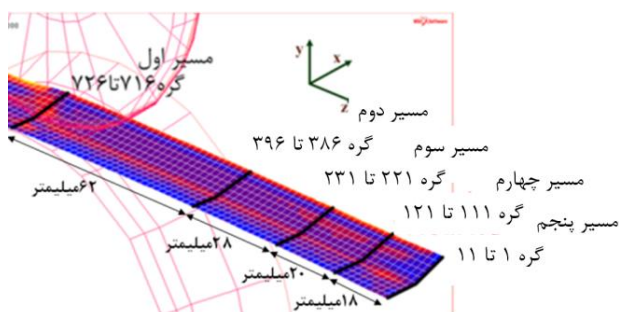
۴- نتایج و بحث

برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، کرنش طولی را در لبه ورق به‌دست آورده و مقادیر بیشینه و باقی‌مانده آن با داده‌های تجربی موجود در مرجع [۱۱] مقایسه شد. با توجه به جدول (۱) انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد.

جدول (۱): نتایج کرنش طولی در لبه ورق برای شبیه‌سازی‌های اجزای محدود و نتایج تجربی موجود در مرجع [۱۱]

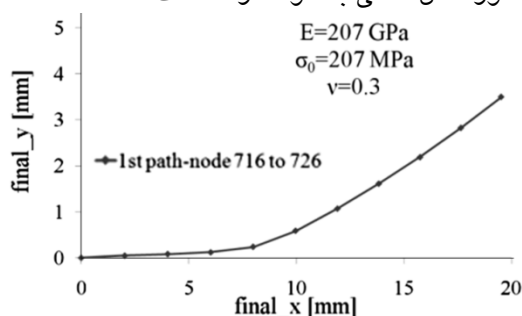
زاویه	شبیه‌سازی اجزای محدود		نتایج تجربی موجود	
	باقی‌مانده	بیشینه	باقی‌مانده	بیشینه
۲۰°	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۸

برای محاسبه برگشت‌فتری، مسیرهای در عرض ورق تعریف و مختصات گره‌ها در نموای مختلف در آن مسیرها تعیین گردید. یک قرارداد در این مقاله برای تعیین برگشت‌فتری مطرح شده است که داده‌ها زمانی از نرم‌افزار استخراج شوند که ورق ۱۲۵ میلی‌متر به جلو حرکت کرده باشد زیرا در این موقعیت برگشت‌فتری خود را به خوبی نشان داده و ورق مسافتی بیش از ۸۵ درصد فاصله بین دو ایستگاه را پیموده است. بدین منظور مسیرهای عرضی مختلفی مانند شکل (۶) در طول ورق تعیین شده و مختصات گره‌ها روی این مسیرها به‌دست می‌آید.



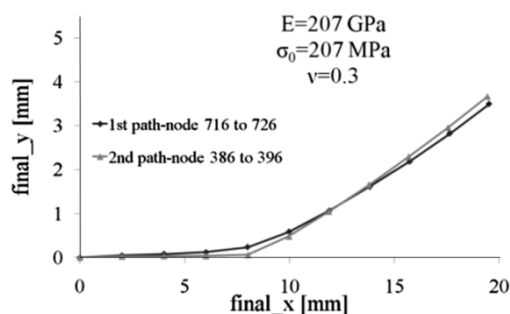
شکل (۶): مسیرهای انتخاب‌شده برای محاسبه برگشت‌فتری

در ادامه شرح مختصری از شیوه ابداعی برای محاسبه برگشت‌فتری آورده شده که از بین زاویه‌های ۱۵° تا ۳۵°، زاویه ۲۰° انتخاب گردیده است. در مسیر اول، گره ۷۱۶ تا ۷۲۶، مقادیر dx و dy که به ترتیب جابه‌جایی گره در راستای x و y هستند، از نرم‌افزار استخراج شد. برای به‌دست آوردن مختصات جدید گره‌ها، مقدار جابه‌جایی با مختصات اولیه گره جمع شد. برای مسیر ذکر شده، مقادیر مختصات گره‌ها محاسبه گردید و روی نمودار شکل (۷) نمایش داده شده است. از آنجا که این مسیر سه میلی‌متر قبل از ایستگاه شکل‌دهی است ورق هنوز شکل کاملی به خود نگرفته است.



شکل (۷): مختصات گره‌های روی مسیر اول

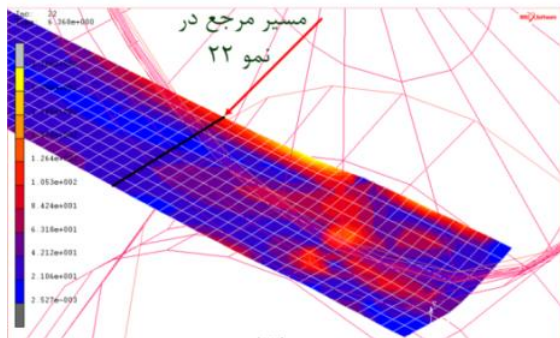
در شکل (۸) علاوه بر مسیر اول، مختصات مسیر دوم نیز از گره ۳۸۶ تا ۳۹۶ رسم شده است. این مسیر ۵۹ میلی‌متر از ایستگاه شکل‌دهی فاصله گرفته و در این فاصله شکل منحنی تقریباً ثابت باقی‌مانده است. مشاهده می‌شود که در قسمت جان مقطع، زاویه صفر بوده و زاویه‌ی بال مقطع با افق بسیار به زاویه شکل‌دهی ۲۰° نزدیک است.



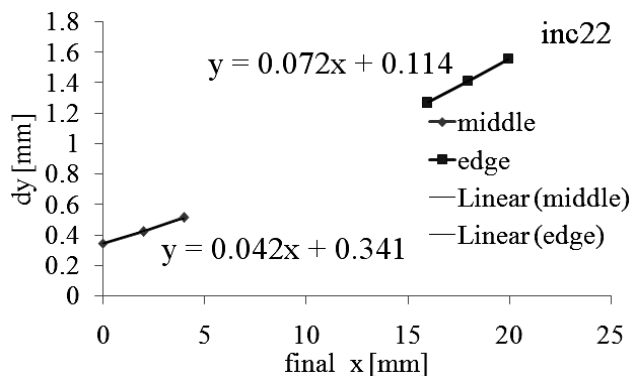
شکل (۸): مختصات گره‌های روی مسیرهای اول و دوم



سه گره در لبه و برای محاسبه اندازه زاویه میانی، مختصات سه گره در مرکز جان مقطع رسم و بهترین خطی که از هر دسته گره برازش می‌کند، ترسیم شد. از روی شیب هر خط برازش‌شده، مقدار زاویه در آن ناحیه به‌دست آمد. شکل‌های (۱۲) تا (۱۷) در سه نمو ۲۲، ۴۲ و ۹۸ این عملیات را به همراه موقعیت مسیر مرجع نشان می‌دهند.

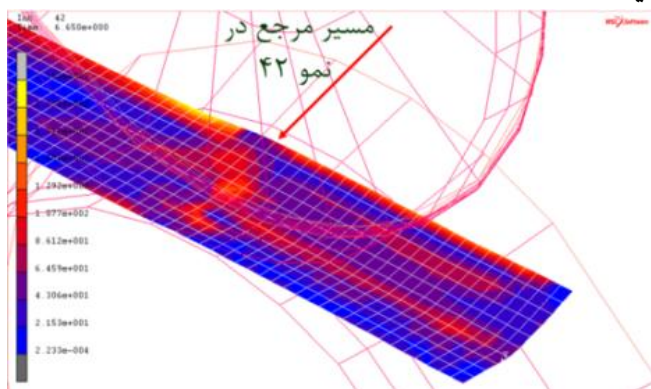


شکل (۱۲): موقعیت مسیر مرجع در نمو ۲۲



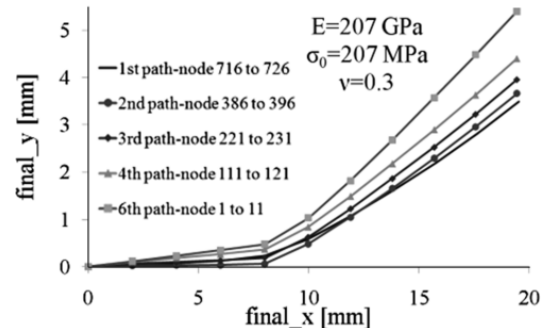
شکل (۱۳): شیب در جان و لبه مقطع در نمو ۲۲

در شکل‌های فوق روی محور عمودی به جای مختصات y از نگاهی از آن یعنی جابه‌جایی در راستای y یا dy استفاده شده که تأثیری در شیب و زاویه ندارد. در نمو ۲۲، هنوز مسیر مرجع به ایستگاه شکل‌دهی نرسیده است. مشاهده می‌شود که دو شیب مورد نظر به هم نزدیک بوده و مقدار شیب در لبه زیاد نیست.



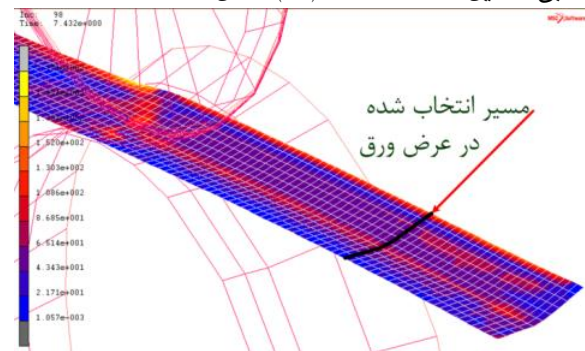
شکل (۱۴): موقعیت مسیر مرجع در نمو ۴۲

در شکل (۹) تمام مسیرها در کنار یکدیگر آورده شده‌اند. در صورتی که منحنی مسیر دوم، منحنی هدف باشد مشاهده می‌شود که با دور شدن از ایستگاه شکل‌دهی، منحنی‌های بعدی از آن دور شده و در زاویه‌های جان و لبه مقطع با افق، تغییراتی ایجاد می‌شود.



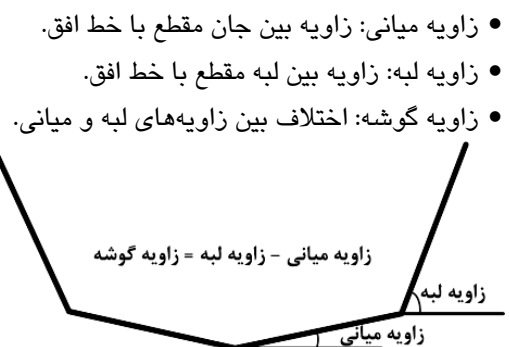
شکل (۹): مختصات گره‌های روی مسیرهای اول تا پنجم

برای اینکه برگشت‌فنی در ورق در نمو‌های مختلف با دقت بیشتری محاسبه شود، مسیری مورد نیاز است که تنش‌ها در آن مقطع از ورق به حالت پایدار رسیده باشند. مسیر مرجع انتخابی در این مقاله در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



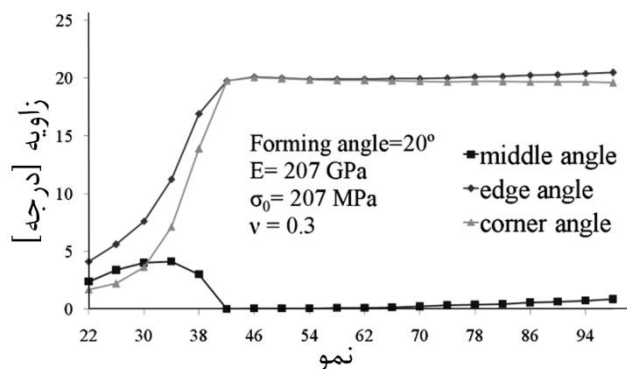
شکل (۱۰): مسیر مرجع انتخاب شده برای محاسبه برگشت‌فنی

برای بررسی دقیق‌تر سطح مقطع ورق در هر نمو، سه زاویه تعریف شده است که از روی آنها میزان برگشت‌فنی مورد بحث قرار گرفته است. شکل (۱۱) به صورت اغراق‌آمیز این سه زاویه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): زاویه‌های تعریف شده برای محاسبه برگشت‌فنی در هر نمو برای به‌دست آوردن مقدار زاویه لبه، مختصات

مختلف نشان می‌دهد که پس از خروج ورق از ایستگاه شکل‌دهی، میزان تغییرات زاویه گوشه بسیار کم می‌شود به طوری که می‌توان زاویه گوشه را ثابت در نظر گرفت. این در حالی است که تغییرات زاویه‌های میانی و لبه ادامه می‌یابد. آنجا که این حالت در تمام زاویه‌های شکل‌دهی مشاهده می‌شود، پس می‌توان آنرا معیاری برای برگشت‌فتری در نظر گرفت.

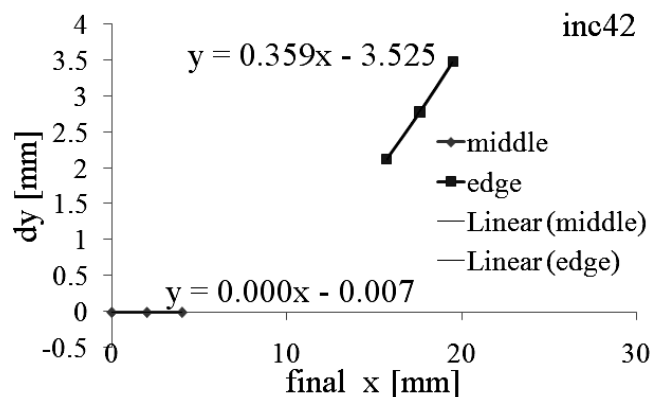


شکل (۱۸): نموهای زاویه میانی، لبه و گوشه در زاویه شکل‌دهی ۲۰°

با توجه به ثابت ماندن زاویه گوشه پس از خروج از ایستگاه شکل‌دهی و حرکت در فاصله‌ای مشخص و نیز به دلیل مهم‌تر بودن برگشت‌فتری در نمو‌های آخر از هر تحلیل که ورق به اندازه کافی از ایستگاه خارج شده است، آن دسته از نمو‌های انتهایی که انحراف معیار زاویه گوشه در آنها از مقدار قراردادی ۰/۰۰۲ کوچک‌تر بودند در نظر گرفته شد که جدول (۲) نمو‌های مذکور را از تحلیل زاویه شکل‌دهی ۲۰° نشان می‌دهد. در نمودار شکل (۱۹)، داده‌های جدول (۲) به همراه خطوط برازش‌شده و روابط آنها آورده شده است. مشاهده می‌شود که زاویه‌های میانی و لبه با شیبی بزرگ‌تر، صرف‌نظر از علامت، در حال تغییر هستند در حالی که زاویه گوشه تغییرات بسیار کمتری دارد.

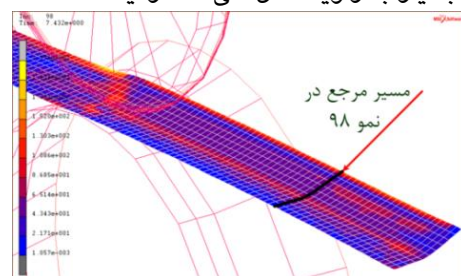
جدول (۲): نمو‌های انتخابی با توجه به انحراف معیار ۰/۰۰۲

نمو	زاویه میانی	زاویه لبه	زاویه گوشه
۷۰	۰/۲۳	۱۹/۹۵	۱۹/۷۲
۷۴	۰/۳۴	۲۰/۰۰	۱۹/۶۶
۷۸	۰/۴۰	۲۰/۱۰	۱۹/۷۰
۸۲	۰/۴۶	۲۰/۱۵	۱۹/۶۹
۸۶	۰/۵۷	۲۰/۲۵	۱۹/۶۸
۹۰	۰/۶۳	۲۰/۳۰	۱۹/۶۷
۹۴	۰/۷۴	۲۰/۴۰	۱۹/۶۶
۹۸	۰/۸۶	۲۰/۴۶	۱۹/۶۰
میانگین	۰/۵۲۸۷۵	۲۰/۲۰۱۲۵	۱۹/۶۷۲۵
انحراف از معیار	۰/۰۴۴۶۴۱۰۷۱	۰/۰۳۳۵۸۳۹۲۹	۰/۰۰۱۲۷۸۵۷۱

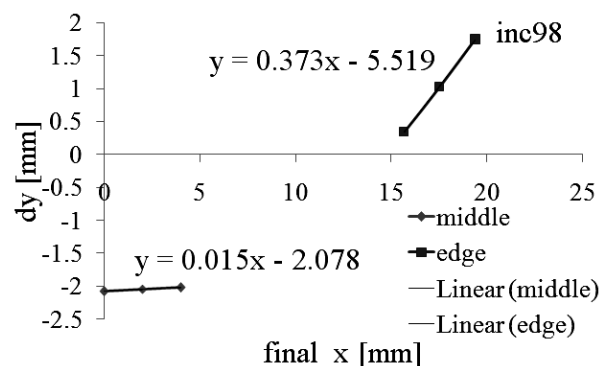


شکل (۱۵): شیب در جان و لبه مقطع در نمو ۴۲

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) که نمو ۴۲ را نشان می‌دهند، مسیر مرجع دقیقاً در زیر غلتک‌ها و در حال شکل‌دهی است. مشاهده می‌شود که شیب جان مقطع یا زاویه میانی صفر است و در زاویه لبه بسیار به زاویه شکل‌دهی ۲۰° نزدیک است.



شکل (۱۶): موقعیت مسیر مرجع در نمو ۹۸



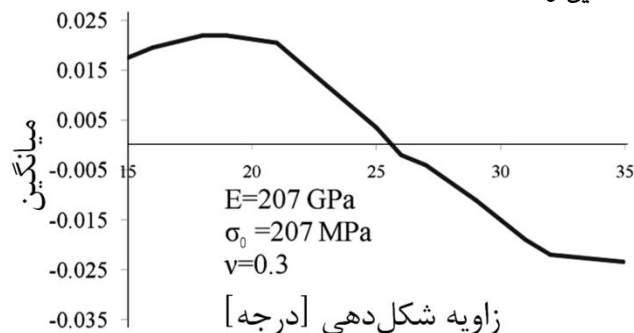
شکل (۱۷): شیب در جان و لبه مقطع در نمو ۹۸

نمو ۹۸ در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) موقعیتی را نشان می‌دهد که مسیر مرجع به اندازه ۱۲۵ میلی‌متر از ایستگاه شکل‌دهی فاصله گرفته است. مشاهده می‌شود که هر دو زاویه با مقادیر هدف در شکل (۱۵) فرق دارند. زاویه‌های میانی و لبه به ترتیب در حدود ۰/۸۶° و ۰/۷° بیشتر و زاویه گوشه به اندازه ۰/۱۶° کم شده است. با دور شدن از ایستگاه شکل‌دهی، زاویه گوشه کاهش یافته یا به عبارتی خم باز می‌شود.

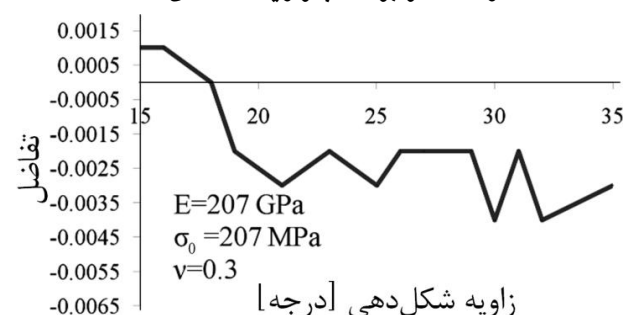
در هر تحلیل نمو‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و مانند شکل (۱۸) زاویه‌های میانی، لبه و گوشه در هر نمو به‌دست آمده است. بررسی نمودارها در زاویه‌های شکل‌دهی



مقدار برگشت‌فتری در زاویه‌های شکل‌دهی مختلف اظهارنظر کرد. اما برای دستیابی به معیاری ساده‌تر، از دو منحنی موجود در شکل (۲۰)، دو مقدار میانگین و تفاضل، مانند شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به دست می‌آید. هر چه این دو مقدار به صفر نزدیک‌تر باشند زاویه شکل‌دهی موردنظر برگشت‌فتری کمتری خواهد داشت. بنابراین با داشتن مقادیر میانگین و تفاضل شیب تغییرات زاویه‌های لبه و میانی، می‌توان مقدار برگشت‌فتری را تخمین زد.



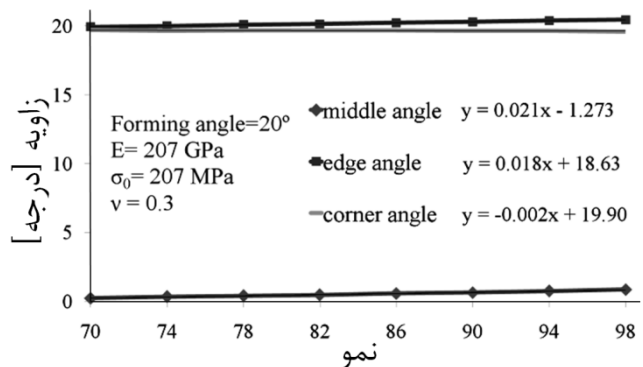
شکل (۲۱): منحنی میانگین شیب تغییرات زاویه‌های میانی و لبه در نمونه‌های آخر بر حسب زاویه شکل‌دهی هدف



شکل (۲۲): منحنی تفاضل شیب تغییرات زاویه‌های میانی و لبه در نمونه‌های آخر بر حسب زاویه شکل‌دهی هدف

در ادامه، یک شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شد که ورودی آن زاویه شکل‌دهی دلخواه بین 15° تا 35° و خروجی آن معیارهای معادل برگشت‌فتری بود. شبکه عصبی از نوع پایه شعاعی انتخاب شده که به سرعت آموزش دید و به داده‌های امتحانی بسیار دقیق پاسخ داد. مجموعه داده‌های آموزشی شامل ۲۱ داده برای زاویه‌های 15° تا 35° بود که دو نمونه از آنها به صورت تصادفی به عنوان داده‌های امتحانی برای آزمایش شبکه کنار گذاشته شد و بقیه به عنوان داده‌های آموزشی به شبکه ارائه شدند.

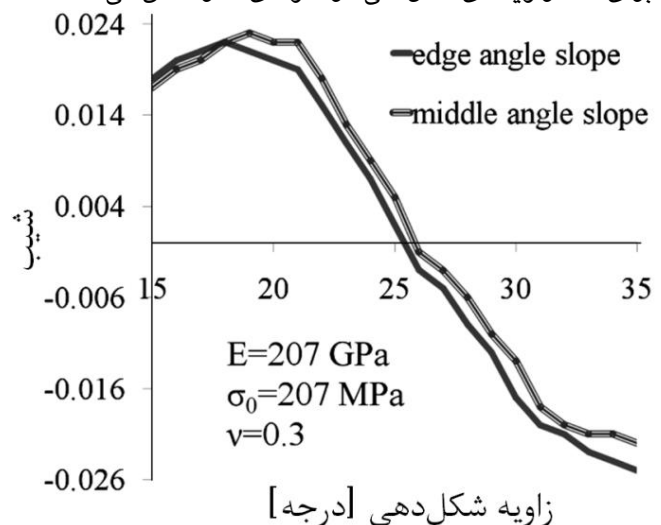
در شکل (۲۳) داده‌های آموزشی و داده‌های امتحانی برای معیار میانگین به همراه پاسخ شبکه نشان داده شده است.



شکل (۱۹): نمونه‌های انتخابی با توجه به انحراف معیار ۰/۰۰۲

شیب مثبت تغییرات زاویه‌های لبه و میانی به این معناست که هر دو زاویه در حال افزایش هستند، ولی منفی بودن شیب زاویه گوشه یعنی زاویه میانی با سرعتی بیشتر از زاویه لبه در حال افزایش است. در همه تحلیل‌ها کاهش ناچیز زاویه گوشه دیده شد که البته مقدار کاهش برای زاویه‌های مختلف، متفاوت است.

نمودار شکل (۲۰) شیب تغییرات زاویه‌های میانی و لبه را برای همه زاویه‌های شکل‌دهی در نمونه‌های آخر نشان می‌دهد.



شکل (۲۰): شیب تغییرات زاویه‌های لبه و میانی بر حسب زاویه شکل‌دهی

همانطور که دیده می‌شود شیب تغییرات زاویه‌های میانی و لبه از زاویه شکل‌دهی 15° تا 19° زیاد شده و در ادامه کاهش می‌یابد و در حدود زاویه شکل‌دهی 26° هر دو شیب تغییر علامت داده و منفی می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که در زاویه شکل‌دهی 26° ، کمترین برگشت‌فتری و یا به عبارتی کمترین تغییر در زاویه‌های لبه، میانی و گوشه وجود خواهد داشت که البته نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، این موضوع را به خوبی تأیید می‌کنند.

با توجه به نمودار شکل (۲۰) به خوبی می‌توان در مورد

میانگین مربعات خطا محاسبه شد که باز هم در محدوده قابل قبولی بودند. این مقادیر در جدول (۴) نمایش داده شده‌اند.

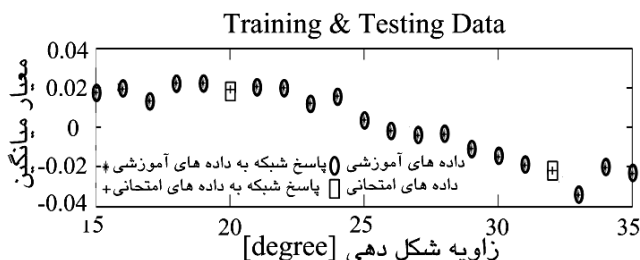
جدول (۴): میانگین مربعات خطا برای معیار تفاضل

معیار تفاضل	داده‌های آموزشی	داده‌های امتحانی
میانگین مربعات خطا	۹/۳۸۶۱e-۰۳۵	۱/۵۸۲۵e-۰۰۶

به کمک شبکه عصبی آموزش‌دیده و با وارد کردن هر زاویه دلخواه در فاصله 15° تا 35° ، شبکه عصبی به سرعت به آن پاسخ داده و دو مقدار میانگین و تفاضل را به عنوان معیارهایی برای برگشت‌فیزی در خروجی خواهد داد.

۵- نتیجه‌گیری

۲۱ مجموعه داده از شبیه‌سازی اجزای محدود به‌دست آمد که دو مورد از آنها به تصادف برای امتحان شبکه کنار گذاشته شد و بقیه به صورت مجموعه آموزشی به شبکه عصبی ارائه گردید. پس از پایان مرحله آموزش شبکه عصبی، داده‌های مجموعه امتحانی به شبکه وارد شد که شبکه آموزش‌دیده به خوبی به آنها پاسخ داد. به این ترتیب می‌توان با وارد کردن هر زاویه دلخواه بین 15° تا 35° به شبکه عصبی موجود، به سرعت مقدار برگشت‌فیزی را در آن زاویه به‌دست آورد و لذا نیاز به مدل‌کردن فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد در یک نرم‌افزار اجزای محدود و انجام شبیه‌سازی‌های طولانی‌مدت از بین می‌رود. با استفاده از معیار برگشت‌فیزی فوق می‌توان گفت که زاویه بهینه برای ایستگاه شکل‌دهی اول، با ابعاد و جنس ورق مذکور، 26° می‌باشد که کمترین مقدار برگشت‌فیزی را به دنبال دارد.



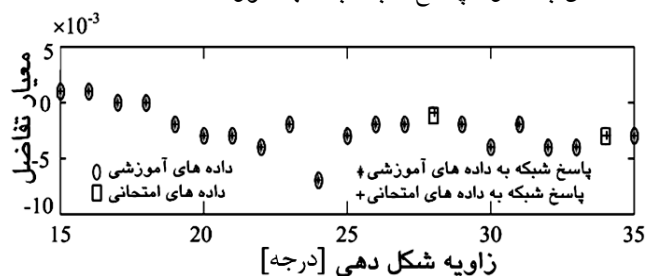
شکل (۲۳): داده‌های آموزشی و امتحانی از مجموعه داده‌های آموزشی معیار میانگین

دیده می‌شود که شبکه به داده‌های امتحانی مانند داده‌های آموزشی به خوبی پاسخ داده است و میانگین مربعات خطا برای هر دو دسته داده‌های آموزشی و امتحانی محاسبه شده که در محدوده قابل قبولی قرار گرفتند (جدول (۳)).

جدول (۳): میانگین مربعات خطا برای معیار میانگین

معیار میانگین	داده‌های آموزشی	داده‌های امتحانی
میانگین مربعات خطا	۱/۱۸۴۹e-۰۳۴	۲/۹۰۶۶e-۰۰۶

در شکل (۲۴) داده‌های آموزشی و امتحانی برای معیار تفاضل به همراه پاسخ شبکه به آنها، آورده شده است.



شکل (۲۴): داده‌های آموزشی و امتحانی از مجموعه داده‌های آموزشی معیار تفاضل

در این شکل مشاهده می‌شود که شبکه به داده‌های مربوط به معیار تفاضل به خوبی پاسخ داده است. برای این داده‌ها نیز

۶- مراجع

- [۱] Bhattacharyya, D.; Smith, P. D.; "The development of longitudinal strain in cold roll forming and its influence on product straightness", Journal of Advanced technology of plasticity, Vol. 1, 1984.
- [۲] McClure, C. K.; Hanhui, L.; "Roll forming simulation using finite element analysis", Armstrong world industries, P.O.Box 3511, Lancaster, PA 17604, 1995.
- [۳] Heislitz, F.; Livatyali, H.; Ahmetoglu, M. A.; Kinzel, G. L.; Altan, T.; "Simulation of roll forming process with the 3D FEM code PAM-STAMP", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 59, pp. 59-67, 1996.
- [۴] Brunet, M.; Lay, B.; Pol, P.; "Computer aided design of roll Forming of channel sections", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 60, pp. 209-214, 1996.
- [۵] Brunet, M.; Mguil, S.; Pol, P.; "Modelling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80-81, pp. 213-219, 1998.
- [۶] Hong, S.; Lee, S.; Kim, N.; "A parametric study on forming length in roll forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 774-778, 2001.
- [۷] Lindgren, M.; "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.
- [۸] Lindgren, M.; "Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 186, pp. 77-81, 2007.
- [۹] Lindgren, M.; "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.
- [۱۰] Downes, A.; Hartley, P.; "Using an artificial neural network to assist roll design in cold roll-forming processes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 319-322, 2006.



Tehrani, M. S.; Hartley, P.; Naeini, H. M.; [۱۱]
Khademizadeh, H.; "Localised edge buckling in cold
roll-forming of symmetric channel section", Journal of
Thin-Walled Structures, Vol. 44, pp. 184–196, 2006.

۷- زیرنویس ها

[\] Marc-Mentat

[\] Profil

[\] element

^ε shell

[°] variance

