

## ارائه الگوی گل مناسب برای شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کلاهی شکل

رسول صفدریان<sup>۱</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>۲\*</sup>، مهدی سلمانی تهرانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فنی مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ بهمن ۱۳۹۳  
بازنگری: ۱۴ مهر ۱۳۹۴  
پذیرش: ۱۴ مهر ۱۳۹۴  
ارائه آنلاین: ۱۱ آبان ۱۳۹۴

### کلمات کلیدی:

شکل‌دهی غلتکی سرد  
مقطع کلاهی شکل  
الگوی گل  
کمانش طولی (شمشیری شدن)  
کرنش طولی

**چکیده:** فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد فرایندی است که در آن ورق با عبور از بین مجموعه‌ای از غلتک‌های دوار به پروفیلی با سطح مقطع مشخص تبدیل می‌شود. مقطع کلاهی شکل یکی از محصولات این فرایند است که در صنایع مختلف به خصوص صنعت خودروسازی کاربرد دارد. در این تحقیق به ارائه الگوی گل مناسب برای شکل‌دهی مقطع کلاهی شکل پرداخته می‌شود. مناسب بودن الگوی گل در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد از معیوب شدن محصولات این فرایند جلوگیری می‌کند. در این تحقیق الگوی گل مناسب با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌شود. از کرنش طولی لبه محصول به‌عنوان معیاری برای سنجش کیفیت محصول استفاده می‌شود. برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها، تعدادی آزمایش تجربی برای ایستگاه اول شکل‌دهی انجام شد و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی‌ها مقایسه شد. در آزمایش‌های تجربی تحقیق حاضر تاثیر افزایش زاویه شکل‌دهی بر روی عیب شمشیری شدن یا همان کمانش طولی پروفیل بررسی شد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی ضمن نزدیکی به یکدیگر نشان می‌دهند که با افزایش زاویه شکل‌دهی عیب شمشیری شدن افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

شکل‌دهی غلتکی سرد به دلیل تاثیرگذاری پارامترهای فراوان در تولید یک محصول فرآیندی پیچیده است. به منظور بررسی این پارامترها و آشنایی با کارهای انجام‌شده در زمینه شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع باز، مروری بر تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه انجام شده است.

اونا [۱] در زمینه شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع ناودانی نامتقارن آزمایش‌های زیادی انجام داده و اثر عدم تقارن در بروز عیوبی نظیر پیچش، انحنای موج‌دار شدن مقاطع ناودانی نامتقارن را مورد بررسی قرار داد. فیوترال [۲] به بررسی شرایط موثر در فرایند شکل‌دهی غلتکی پرداخت. این شرایط شامل فاصله بین دو ایستگاه متوالی، بار وارده به غلتک‌ها، سرعت غلتک‌ها و هم‌محوری غلتک‌ها بود که با انجام ۵۰ آزمایش به بررسی اثر کرنش طولی بر کیفیت مقاطع ناودانی پرداخت. پنتون و همکاران [۳] برای تولید مقاطع کانال نامتقارن نشان دادند که شکل‌دهی در سه منطقه اتفاق می‌افتد. منطقه یک منطقه‌ای است که هیچ تغییر شکلی اتفاق نمی‌افتد، منطقه دوم، منطقه‌ای است که تغییر شکل اتفاق می‌افتد اما هیچ تماسی بین غلتک و ورق نیست و منطقه سوم، منطقه‌ای است که تغییر شکل اتفاق می‌افتد و بین غلتک و ورق تماس وجود دارد. علاوه بر این نشان دادند کرنش

طولی حداکثر در جایی اتفاق می‌افتد که غلتک‌ها در تماس با نوار هستند و نتیجه گرفتند که با افزایش قطر غلتک‌ها، کرنش طولی حداکثر کم می‌شود. آنها همچنین در تحقیقی دیگر [۴] کرنش‌های طولی، عرضی و برشی در مورد مقاطع کانال و کلاهی شکل متقارن را مورد بررسی قرار دادند. آنها با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که در تمام لایه‌های عرضی ورق کرنش‌های طولی، عرضی و برشی به وجود می‌آیند. علاوه بر این نشان دادند که در مقطع کانال بیشترین مقدار کرنش طولی در لبه اتفاق می‌افتد و همچنین با اندازه‌گیری کرنش در لبه داخلی و بیرونی مقطع کلاهی شکل نشان دادند که میزان کرنش طولی در لبه داخلی از لبه خارجی بیشتر است. باتاچاریا و همکاران [۵] بر روی مقاطع ناودانی و کلاهی شکل مطالعات و تحقیقات تجربی و تحلیلی زیادی انجام دادند. آنها با استفاده از روش حداقل کردن انرژی تغییر شکل برای شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کانال، رابطه‌ای تحلیلی برای طول تغییر شکل محاسبه کردند. باتاچاریا طول تغییر شکل را برابر با فاصله بین نقطه شروع تغییر شکل، پیش از ایستگاه، تا ایستگاه تعریف کرد. طول تغییر شکل در این رابطه به ضخامت، پهنای بال و زاویه خمش بستگی دارد و تابع پارامترهای مکانیکی ماده نیست. این پیش‌بینی با نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های تجربی آلومینیم و فولاد کم‌استحکام تایید شده‌است. اثر زاویه خمش و پهنای لبه بر طول تغییر شکل مورد بررسی قرار گرفت و

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moslemi@modares.ac.ir

نتایج تجربی نشان داد که با افزایش زاویه خم و همچنین افزایش پهناى بال به ازای زوایای خم مختلف، طول تغییر شکل افزایش می‌یابد. زاویه خم در واقع زاویه‌ای است که در هر ایستگاه ورق تحت آن زاویه دچار خم و تغییر شکل می‌شود. بال ورق در مقطع کانال فاصله بین لبه ورق تا ناحیه خم است. باتاچاریا و همکاران [۶] در تحقیقی دیگر با نصب کردن کرنش‌سنج در فاصله ۱/۵ میلیمتری از لبه و ۴۰۰ میلیمتر از ابتدای ورق کرنش طولی را اندازه‌گیری کرد و نشان داد که با افزایش زاویه خم میزان کرنش طولی افزایش می‌یابد و همچنین بیشترین مقدار آن قبل از ایستگاه اتفاق می‌افتد. آلتان و همکاران [۷] از یک برنامه شبیه‌سازی به کمک رایانه برای تحلیل فرایند شکل‌دهی غلتکی استفاده کردند. نتایج روش تحلیل در این کار با نتایج باتاچاریا مقایسه شده‌است و مشاهده شده که کرنش پسماند به‌دست‌آمده در روش تحلیل از مقدار تجربی باتاچاریا کمتر است و علت آن در نظر گرفتن رفتار سینوسی برای ماده بیان شده‌است. علاوه بر این مشاهده شده‌است که با افزایش زاویه خم از یک ایستگاه به ایستگاه بعدی کرنش عرضی زیاد می‌شود. حساسیت کرنش‌ها نسبت به تعداد ایستگاه‌ها بررسی شد و مشاهده شد هر چه تعداد ایستگاه‌ها زیاد می‌شود میزان کرنش کم می‌شود و بنابراین امکان رخ دادن عیوب نیز کمتر خواهد شد. با زیاد شدن فاصله ایستگاه‌ها و همچنین تعداد ایستگاه‌ها، کرنش طولی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. هان و همکاران [۸] با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی پارامترهای شکل‌دهی مقطع کانال با لبه بیرونی مانند افزایش زاویه خم، ضخامت ورق، حد تسلیم ماده، پهناى لبه بیرونی، پهناى کف مقطع و فاصله بین ایستگاه‌های شکل‌دهی بر روی بیشینه کرنش طولی پرداختند. نتایج تئوری با تجربی هماهنگی خوبی داشته‌اند و بیشینه کرنش طولی با افزایش زاویه خم، ضخامت ورق و افزایش حد تسلیم ماده زیاد می‌شود و با افزایش پهناى لبه بیرونی، پهناى کف و افزایش فاصله بین ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این بیشینه کرنش طولی کمی زودتر از رسیدن ورق به مرکز غلتک اتفاق می‌افتد و این به دلیل وجود لبه بیرونی است. لیندگرن [۹] با انجام یک شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار مارک برای مقطع کانال متقارن اثر استحکام ماده و زاویه خم را روی کرنش طولی و طول تغییر شکل بررسی کرد. مدل استفاده‌شده در این شبیه‌سازی‌ها از چهار ایستگاه تشکیل شده که دو ایستگاه اول برای تغذیه ایستگاه‌های بعدی در نظر گرفته شده بودند. مسلمی نایینی [۱۰] با استفاده از روابط پلاستیسیته به محاسبه تنش‌ها پرداخت و با استفاده از تابع شکل معرفی‌شده توسط کیوچی، انرژی مصرفی بین ایستگاه‌ها را کمینه کرده و در عین کوتاه کردن زمان محاسبات، نتایج قابل‌قبولی را نیز به دست آورده‌است. مسلمی نایینی در ادامه تحقیق خود یک سیستم طراحی به کمک رایانه بر اساس روش شبیه‌سازی مذکور به منظور طراحی پروفیل غلتک‌ها برای تولید لوله تدوین کرد. مدینه [۱۱] بر اساس روش نیمه تجربی - تحلیلی باتاچاریا، برنامه‌ای تدوین کرد که در قسمتی از آن طول تغییر شکل به‌دست می‌آید و مقادیر کرنش طولی بیشینه در لبه‌های بال مقطع در ایستگاه‌های مختلف شکل‌دهی برای مقاطع

کانال و کلاه‌شکل، تعیین می‌شود. تاجداری [۱۲] شکل‌دهی 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 باشینگر، تنش‌های عرضی، طولی و برشی را محاسبه نمود. وی برای محاسبه تنش‌ها در ناحیه پلاستیک روشی به نام لوی-میزز کنترل‌شده را پیشنهاد کرد که با استفاده از آن زمان تحلیل را به میزان قابل‌توجهی کاهش داد. عاصم پور و صفی‌خانی [۱۳] با در نظر گرفتن سه نوع رفتار ماده صلب-پلاستیک، الاستیک خطی-پلاستیک کامل و کار سختی‌نمایی، از روش حداقل کردن انرژی شکل‌دهی برای محاسبه طول تغییر شکل استفاده کردند. انرژی شکل‌دهی مجموع انرژی خم در راستای خم و کشش در بال ورق در نظر گرفته شده‌است. سلمانی تهرانی [۱۴] با استفاده از شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس به بررسی عیوب موجود در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد و یافتن یک حد شکل‌دهی پرداخت. لیندگرن [۱۵] نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها را بررسی و با یک سری آزمایش‌های تجربی، نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها و توان مصرفی را به‌دست 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. مقایسه مقادیر به‌دست آمده از مدل‌ها با نتایج آزمایش‌های تجربی، مطابقت خوبی را نشان داد. روسی و همکاران [۱۶] از نرم‌افزار اجزای محدود متافور<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد برای شکل‌دهی مقطع کانالی ساخته‌شده از جنس فولاد ضدزنگ و فولاد با استحکام بالا استفاده کردند. وینگا و همکاران [۱۷] از روش‌های بهینه‌سازی خبره برای تعیین پارامترهای بهینه فرایند در ایستگاه پایانی فرایند شکل‌دهی غلتکی استفاده کردند. در این آزمایش از فولاد با استحکام بسیار بالا برای شکل‌دهی غلتکی مقطع V شکل استفاده شد. نتایج عیوب برگشت فنی و شمشیری‌شدن را در محصول نشان داد. در تحقیقی که توسط صفدریان و همکاران [۱۸] انجام شد تأثیر تعدادی از پارامترهای فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد بر روی کرنش طولی لبه برای مقطع کانالی بررسی شد. پارامترهای بررسی شده شامل زاویه شکل‌دهی، ضخامت ورق، فاصله ایستگاه‌های شکل‌دهی و سرعت شکل‌دهی هستند. نتایج نشان داد که افزایش زاویه شکل‌دهی و کاهش ضخامت ورق سبب افزایش کرنش طولی لبه می‌شود. افزایش فاصله ایستگاه‌ها سبب کاهش کرنش طولی می‌شود و سرعت شکل‌دهی تأثیری بر کرنش طولی لبه ندارد.

از آنجاییکه ارائه الگوی گل مناسب برای شکل‌دهی غلتکی سرد محصولات این فرایند از اهمیت خاصی برخوردار است، در این تحقیق به ارائه الگوی گل مناسب برای شکل‌دهی مقطع کلاه‌شکل پرداخته می‌شود. مناسب‌بودن الگوی گل در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد از معیوب‌شدن محصولات این فرایند جلوگیری می‌کند. در این تحقیق الگوی گل مناسب با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌شود. از کرنش طولی لبه محصول به عنوان معیاری برای سنجش کیفیت محصول استفاده

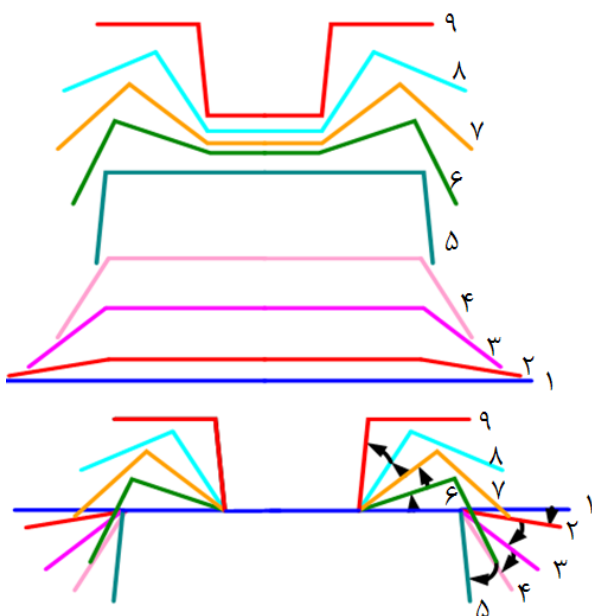
**جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌ها، غلتک‌ها و ابعاد مقطع برای تولید مقطع کلاهی شکل در الگوی گل الف**

**Table 1. Characteristic of stands, rolls and section dimensions of hat channel section (A)**

مقدار	پارامتر
۱۰	عرض کف مقطع (میلی‌متر)
۱۰	پهنای بال مقطع (میلی‌متر)
۱۰۳	قطر غلتک‌ها (میلی‌متر)
۱۴۶	فاصله ایستگاه‌ها (میلی‌متر)
۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۸۵	زاویه غلتک‌ها (درجه)
۶	تعداد ایستگاه

**۲-۲- الگوی گل مقطع کلاهی شکل ب**

براساس این الگوی گل ابتدا ورق به مقطع کانال و سپس مقطع کانال به مقطع کلاهی تبدیل می‌شود (شکل ۲). همانطور که در این الگوی گل مشاهده می‌شود از ایستگاه اول تا چهارم ورق تبدیل به مقطع کانال و از آن پس طی چهار ایستگاه دیگر مقطع کلاهی نهایتاً در ایستگاه هشتم شکل می‌گیرد. بر همین اساس یک شبیه‌سازی در نرم‌افزار با جزییات و ابعاد گفته‌شده در جدول ۲ طراحی شد که در ادامه توضیح داده خواهد شد.



**Fig. 2. Flower pattern of hat channel section (flower pattern of B)**

شکل ۲: الگوی گل پروفیل مقطع کلاهی شکل (الگوی گل ب)

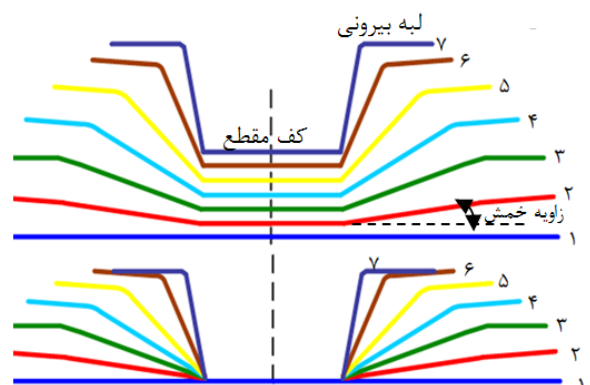
می‌شود. برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها، تعدادی آزمایش تجربی برای ایستگاه اول شکل‌دهی انجام شد و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی‌ها مقایسه شد. در آزمایش‌های تجربی با تغییر زاویه ایستگاه شکل‌دهی، عیب شمشیری شدن یا همان کمانش طولی پروفیل ظاهر شد که نتایج عددی نیز با نزدیکی خوبی وقوع این عیب را تایید کردند. میزان انحراف لبه ابتدایی پروفیل را که از ایستگاه شکل‌دهی عبور کرده است را نسبت به خط افق، کمانش طولی لبه یا همان عیب شمشیری شدن می‌گویند. بررسی عیب شمشیری شدن به صورت تجربی و عددی و عوامل موثر بر آن و همچنین ارائه الگوی گل مناسب برای تولید مقطع کلاهی شکل با فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، نوآوری تحقیق حاضر است. معیار مورد استفاده در ارائه الگوی گل مناسب کرنش طولی لبه محصول است که افزایش آن از حد مشخصی سبب رخ دادن عیب چین‌خوردگی و موج‌دار شدن لبه محصول می‌شود.

**۲- طراحی الگوی گل پروفیل مقطع کلاهی شکل**

اولین موضوعی که در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد باید به خوبی مورد توجه قرار گیرد طراحی الگوی گل مناسب برای یک پروفیل می‌باشد. طراحی الگوی گل مناسب می‌تواند بر روی تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی، سالم بودن محصول و هزینه‌های تولید تاثیر زیادی داشته باشد. الگوی گل روندی است که طی آن پروفیل موردنظر شکل می‌گیرد. در ادامه دو نوع الگوی گل برای ساخت مقطع کلاهی شکل ارائه می‌شود و پس از مقایسه، الگوی گل پروفیل مناسب برای مقطع کلاهی شکل ارائه خواهد شد. مقطع کلاهی شکل یکی از مقاطع پرکاربرد در صنایع مختلف به خصوص صنعت خودروسازی است که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**۲-۱- الگوی گل مقطع کلاهی شکل الف**

در این الگوی گل همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود شکل‌دهی خم بیرونی و داخلی به‌طور همزمان انجام می‌شود. جزییات مدل شبیه‌سازی این الگوی گل در جدول ۱ آمده است.



**Fig. 1. Flower pattern of hat channel section (flower pattern of A)**

شکل ۱: الگوی گل پروفیل مقطع کلاهی شکل (الگوی گل الف)

کرنش مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. رفتار ورق در نرم‌افزار الاستیک - پلاستیک در نظر گرفته شد. ضریب پوواسون  $\nu = 0.3$  و مدول یانگ  $E = 207$  گیگاپاسکال اعمال شد.

مدلی برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی طراحی شد. در مدل طراحی شده برای صحت‌سنجی فقط ایستگاه اول شکل‌دهی مقطع کانال شبیه‌سازی شده است. به منظور ساده‌سازی تحلیل و همچنین وجود تقارن، فقط نصف ورق و غلتک‌ها مدل شده است (شکل ۴). این مدل متشکل از دو ایستگاه است، ایستگاه صفر عمل شکل‌دهی انجام نمی‌دهد و فقط برای جلوگیری از ارتعاشات ورق استفاده شده است بنابراین غلتک‌های این ایستگاه استوانه‌ای هستند. مدل‌های طراحی شده برای شبیه‌سازی مقطع کلاهی شکل در بخش نتایج ارائه می‌شود. شکل ۵ نحوه مش‌بندی ورق برای شبیه‌سازی مقطع کلاهی شکل را نشان می‌دهد. از آنجاییکه مقطع کلاهی شکل متقارن است فقط نصف ورق مدلسازی شد بنابراین قید تقارن در وسط ورق قرار گرفت.

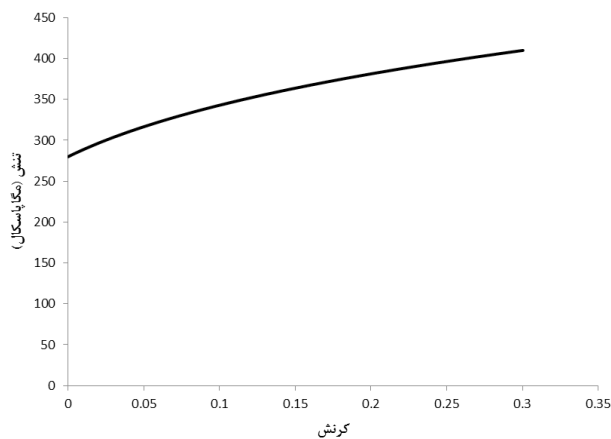


Fig. 3. Engineering stress-strain curve of St14 sample

شکل ۳: نمودار تنش - کرنش مهندسی برای نمونه مورد آزمایش St14

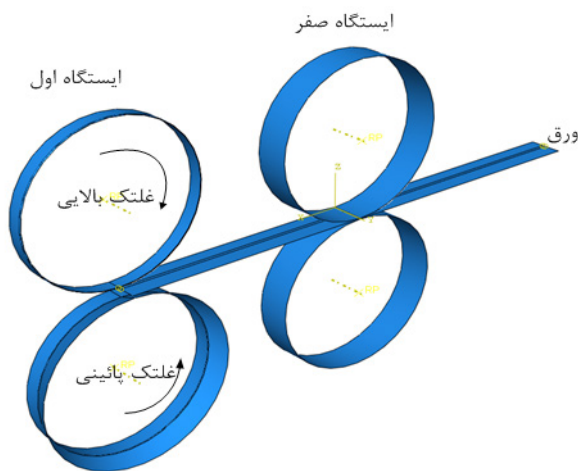


Fig. 4. First arrangement of model which used for simulation

شکل ۴: آرایش اولیه مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی

## جدول ۲: مشخصات ایستگاه‌ها، غلتک‌ها و ابعاد مقطع برای تولید مقطع کلاهی شکل در الگوی گل ب

Table 2. Characteristic of stands, rolls and section dimensions of hat channel section (B)

شرایط شکل‌دهی	برای تبدیل ورق تخت به مقطع کانال متقارن	برای تبدیل کانال متقارن به مقطع کلاهی متقارن
تعداد ایستگاه	۴	۴
زاویه غلتک‌ها به ترتیب (درجه)	۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۵	۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۵
فاصله بین ایستگاه‌ها (میلی‌متر)	۱۴۶	۱۴۶
عرض کف مقطع (میلی‌متر)	۴۰	۲۰
پهنای بال مقطع (میلی‌متر)	۱۰	۱۰
قطر غلتک‌ها (میلی‌متر)	۱۰۳	۱۰۳

## ۳- بررسی عددی شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کلاهی با استفاده از روش اجزای محدود

بررسی عددی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کلاهی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. از حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد استفاده شد. دلیل انتخاب این حلگر کاهش زمان تحلیل فرایند است علاوه بر این جواب‌های این حلگر در زمینه شکل‌دهی فلزات با دقت خوبی به حلگر ضمنی نزدیک است. مدل اجزای محدود متشکل از یک ورق و تعدادی غلتک است که تعداد غلتک‌ها بستگی به تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی دارد. در هر ایستگاه دو غلتک وجود دارد که کار شکل‌دهی را انجام می‌دهند. تماس غلتک با ورق از نوع تماس سطح به سطح با اصطکاک در نظر گرفته شد. از آنجاییکه تغییر شکل غلتک‌ها در حین فرایند ناچیز است به صورت صلب مدل شدند. ورق به صورت یک جسم تغییر شکل‌پذیر با استفاده از المان پوسته دارای چهار نقطه انتگرال‌گیری و با ضخامتی برابر ضخامت ورق مدل شد. ضریب اصطکاک بین غلتک‌ها و ورق بر اساس مرجع [۹] برابر  $0.1$  در نظر گرفته شد. از آنجاییکه ورق مورد استفاده در آزمایش تجربی از جنس St14 انتخاب شده بود بر روی یک نمونه از آن آزمون کشش انجام شد تا خواص مکانیکی آن برای استفاده در شبیه‌سازی‌ها استخراج شود. آزمون کشش برای ورق St14 سه بار تکرار شد تا از درست انجام شدن آزمایش‌ها اطمینان حاصل شود. تنش کرنش ناشی از آزمون کشش تجربی به تنش کرنش حقیقی تبدیل شد تا در تحلیل استفاده شود. شکل ۳ بخش پلاستیک منحنی تنش



همه خصوصیات ورق و سایر پارامترها برای آزمایش‌های تجربی مشابه شبیه‌سازی اجزای محدود انتخاب شد تا بتوان مقایسه‌ای مناسب بین نتایج انجام داد.

یکی از بهترین راه‌های مقایسه محصول آزمایش‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار، مقایسه ابعادی نمونه‌ها می‌باشد. برای مقایسه کردن نمونه‌ها از نظر ابعادی نیاز به یک روش اندازه‌گیری با دقت بالا می‌باشد. بر این اساس برای اندازه‌گیری نمونه‌ها از روش اندازه‌گیری CMM استفاده شد. با این اندازه‌گیری علاوه بر کنترل ابعادی می‌توان عیوبی مانند شمشیری شدن را به دقت مورد بررسی قرار داد. میزان کمانش طولی پروفیل خروجی از ایستگاه به کمک دستگاه CMM اندازه‌گیری شد. یک نمونه از این پروفیل در شکل ۷ نشان داده شده است که در حال اندازه‌گیری میزان شمشیری شدن آن به وسیله دستگاه CMM است.

## ۵- بحث و نتایج

### ۵-۱- مقایسه نتایج مدل عددی با آزمایش‌های تجربی

نمونه‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که با افزایش زاویه، عیب شمشیری شدن در حال افزایش است. عیب شمشیری شدن اولین و بارزترین عیبی است که در محصولات خروجی این سری از آزمایش‌ها مشاهده شد. شکل ۸ نمونه‌های آزمایش شده با زوایای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است با افزایش زاویه غلتک‌های شکل‌دهی عیب کمانش طولی لبه افزایش می‌یابد.

عیب شمشیری شدن در نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با افزایش زاویه به وضوح قابل مشاهده است. شکل ۹ دو نمونه پروفیل شکل داده شده با زاویه ۱۵ و ۴۵ درجه در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. برای بررسی بهتر عیب شمشیری شدن نمودار میزان جابجایی عمودی پروفیل خروجی از ایستگاه شکل‌دهی برای آزمایش‌های تجربی و همچنین شبیه‌سازی نرم‌افزار با سه زاویه ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه مقایسه شد. در شکل ۱۰ نتایج تجربی و شبیه‌سازی مقایسه شده است. مقایسه میزان جابجایی انتهای پروفیل در راستای قائم ( $\Delta$ ) برای شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی همراه با درصد خطا برای زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در جدول ۴ ارائه شده است. درصد خطای این جدول نشان می‌دهد که نتایج مدل شبیه‌سازی نزدیکی خوبی با نتایج تجربی دارد و از مدل گفته شده می‌توان برای شبیه‌سازی مقطع کلاهی شکل استفاده نمود.

### ۵-۲- نتایج مدل‌های ارائه شده برای مقطع کلاهی شکل

برای مدل‌سازی مقطع کلاهی همانطور که قبلاً شرح داده شد بر اساس دو نوع الگوی گل ارائه شده، از دو مدل استفاده شد:  
الف) مدل شبیه‌سازی مقطع کلاهی شکل بر اساس الگوی گل الف  
در این مدل شکل‌دهی لبه بیرونی و داخلی مقطع کلاهی شکل به‌طور همزمان انجام می‌شود. الگوی گل آن در قسمت قبل همراه با تعداد مراحل

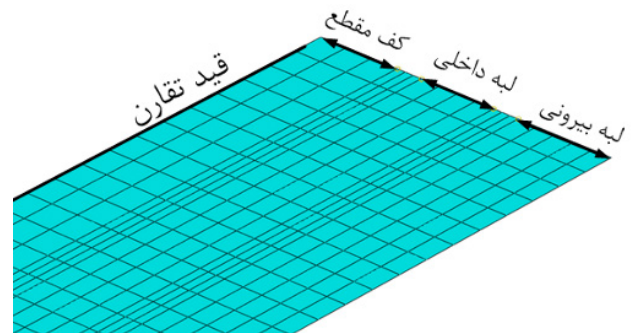


Fig. 5. Mesh density of sheet for hat channel section simulations

شکل ۵: نحوه مش‌بندی ورق در شبیه‌سازی‌های مقطع کلاهی شکل

## ۴- آزمایش‌های تجربی

به دلیل نبود امکان انجام آزمایش‌های تجربی برای تمام ایستگاه‌های شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کلاهی شکل، فقط ایستگاه اول آن (ایستگاه اول الگوی گل ب) مورد آزمایش تجربی قرار گرفت. هدف از انجام آزمایش تجربی صحت‌سنجی مدل عددی تک ایستگاهی و استفاده از آن مدل برای انجام شبیه‌سازی‌های مقطع کلاهی شکل است.

برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز این تحقیق فقط یکی از ایستگاه‌های شکل‌دهی یک دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد ساخت ایتالیا می‌باشد. مشخصات کامل‌تر این دستگاه در جدول ۳ آمده است. از ویژگی‌های بسیار خوب و انعطاف‌پذیری این دستگاه امکان تعویض غلتک‌های هر ایستگاه در کمتر از ۵ دقیقه می‌باشد. ایستگاه شکل‌دهی مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. برای بررسی اثر تغییر زاویه، ایستگاه‌های مختلف بر اساس زاویه شکل‌دهی تعویض شدند و نمونه‌هایی با زوایای مختلف ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه شکل داده شدند.

### جدول ۳: مشخصات دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 3. Characteristic of roll forming machine for experimental tests

پارامتر	مقدار
توان دستگاه (kW)	۱۳۵
بیشترین سرعت دستگاه (rpm)	۲۱۴۵
بیشترین فاصله شفت‌ها (میلی‌متر)	۲۷۰
قطر شفت‌ها (میلی‌متر)	۵۵
طول دستگاه (متر)	۲۱
تعداد ایستگاه	۳۲

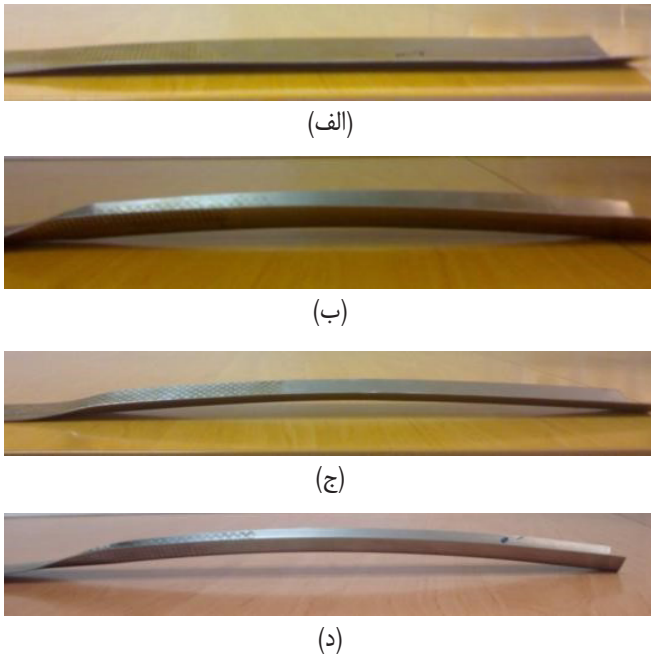


Fig. 8. Effect of roll forming angle on the bow defect of products for angles of (a) 15, (b) 30, (c) 45 and (d) 60 degree

شکل ۸: اثر افزایش زاویه شکل دهی بر روی شکل ظاهری محصول و مشاهده عیب شمشیری شدن برای زوایای: الف- ۱۵ درجه، ب- ۳۰ درجه، ج- ۴۵ درجه، د- ۶۰ درجه

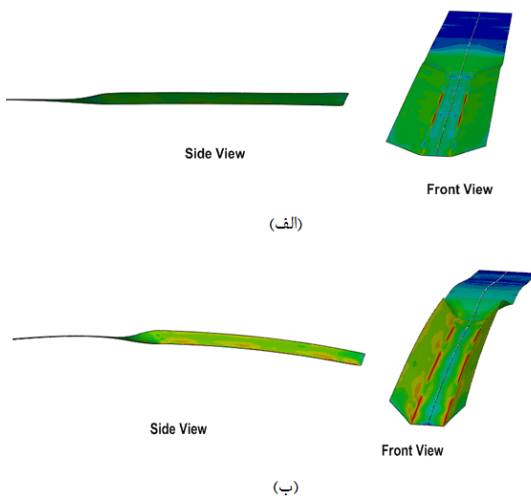


Fig. 9. Profiles which were formed by simulation with two angle of (a) 15, (b) 45

شکل ۹: پروفیل حاصل از شکل دهی در نرم افزار با دو زاویه، الف- ۱۵، ب- ۴۵ درجه

آمده است. نمونه در حال تحلیل از این مدل در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

نمودار تاریخچه کرنش طولی لبه این پروفیل در فاصله ۱/۳۵ میلی متر از لبه ورق استخراج شد. در اکثر مراجع کرنش طولی لبه به عنوان معیاری برای بررسی فرایند شکل دهی غلتکی سرد انتخاب می شود. از آنجائیکه کرنش های طولی لبه محصول به دلیل برخورد لبه پروفیل با غلتکها از دقت



Fig. 6. Experimental roll forming stand

شکل ۶: ایستگاه شکل دهی غلتکی سرد مورد استفاده برای انجام آزمایش ها

جدول ۴: مقایسه میزان شمشیری شدن برای نمونه های شبیه سازی  
Table 4. Comparison of bow defect for experimental and simulation samples

درصد خطا	$\Delta$ - آزمایش	$\Delta$ - تجربی (میلی متر)	زاویه شکل دهی (درجه)
۱۰/۱۲	-۰/۵۸۳	-۰/۵۲۴	۱۵
۱/۳	-۱۵/۷۹	-۱۵/۵۸	۳۰
۸/۰۸	-۲۱/۱۲	-۱۹/۵۴	۴۵



Fig. 7. Experimental sample measurement by CMM

شکل ۷: نمونه یک محصول اندازه گیری شده با دستگاه CMM

شکل دهی مورد نیاز ارائه شد. برای بررسی امکان پذیر بودن طراحی بر اساس این الگوی گل، فقط ایستگاه اول آن مدل سازی شد و تاریخچه کرنش طولی در لبه محصول مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات این مدل سازی در جدول ۵

این کرنش از مسیری در فاصله  $1/35$  میلیمتر خوانده شده که در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود قبل از ایستگاه شکل‌دهی، بیشینه کرنش مثبت است اما در هنگام عبور ورق از بین غلتک‌ها، ورق فشرده شده و این باعث منفی شدن کرنش می‌شود. تغییرات زیاد کرنش طولی در لبه سبب موج‌دار شدن لبه می‌شود و از طرفی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد پروفیل‌های باز مانند مقطع کلاهی لبه ورق همواره تحت کشش قرار دارد بنابراین این الگوی گل از آنجا که دارای کرنش منفی در لبه می‌باشد و نشان‌دهنده فشرده شدن لبه ورق می‌باشد برای مدلسازی مقطع کلاهی شکل مناسب نیست. شاید این میزان منفی شدن کرنش وقتی ضخامت ورق زیاد باشد سبب موج‌دار شدن لبه نشود ولی برای ضخامت‌های کم حتماً مشکل‌ساز خواهد شد. از طرفی برتری با الگوی گلی است که دارای روند مثبت و یکنواخت‌تری برای کرنش طولی لبه باشد.

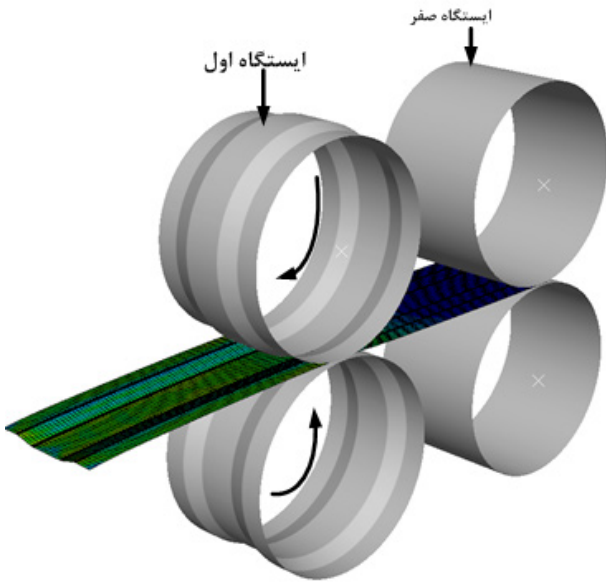


Fig. 11. Simulation of sample for one station of first model(A)

شکل ۱۱: نمونه در حال تحلیل برای یک ایستگاه مدل الف

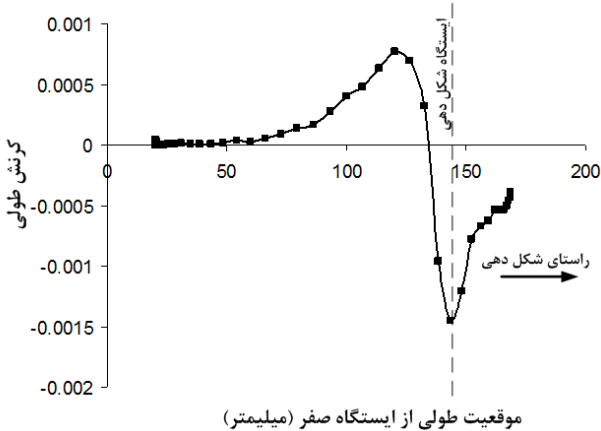
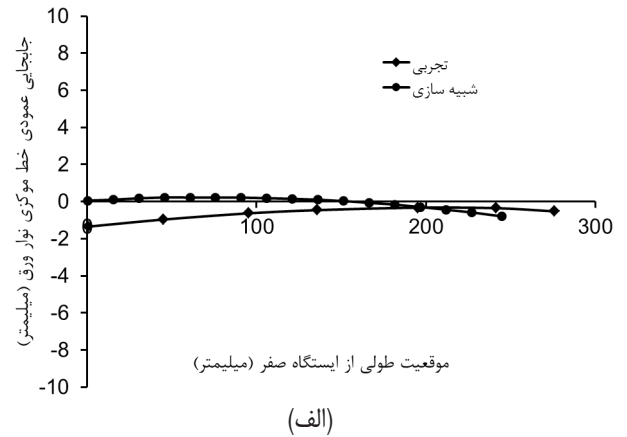
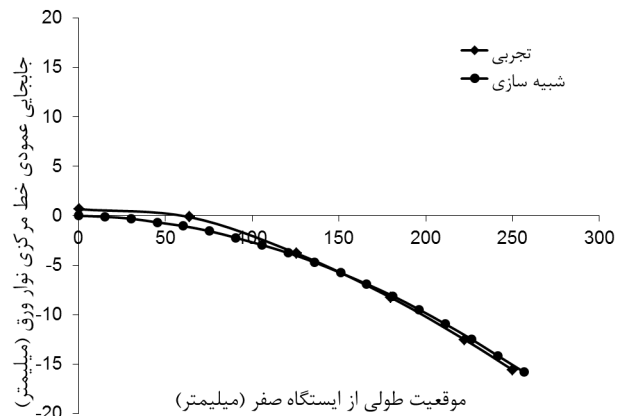


Fig. 12. History of edge longitudinal strain for the first station of first model(A)

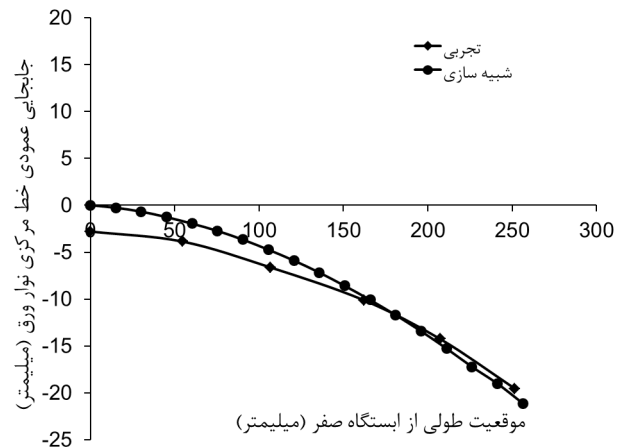
شکل ۱۲: تاریخچه کرنش طولی لبه برای اولین ایستگاه شکل‌دهی مدل الف



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 10. Effect of roll forming angle on the bow defect in the experiment and FEM for three angles of (a) 15 degree, (b) 30 degree and (c) 45 degree

شکل ۱۰: مقایسه اثر افزایش زاویه بر عیب شمشیری شدن در امتداد خط میانی نوار ورق، برای آزمایش تجربی و شبیه‌سازی نرم‌افزار با زوایای الف- ۱۵ درجه، ب- ۳۰ درجه، ج- ۴۵ درجه

کافی برخوردار نیست، این کرنش‌ها از لبه داخلی اولین المان لبه خوانده شده است که به دلیل اینکه طول المان  $1/35$  میلیمتر است بنابراین کرنش طولی لبه از گرهی در فاصله  $1/35$  میلیمتر از لبه محصول گرفته شده‌اند.

جدول ۵: شرایط کاری تحلیل انجام شده برای مدل الف

Table 5. Conditions of simulation of first hat channel model (model A)

مقدار	پارامتر
۱	تعداد مراحل شکل دهی
۱۵	زاویه خمش (درجه)
۳۰۰	طول ورق (میلی متر)
۰/۶	ضخامت ورق (میلی متر)
St14	جنس ورق
۱۰	پهنای لبه بیرونی (میلی متر)
۱۰	پهنای لبه داخلی (میلی متر)
۱۰	پهنای کف (میلی متر)
۱۴۶	فاصله بین ایستگاه‌های شکل دهی (میلی متر)
۲۵۰۰	سرعت شکل دهی (میلی متر بر ثانیه)

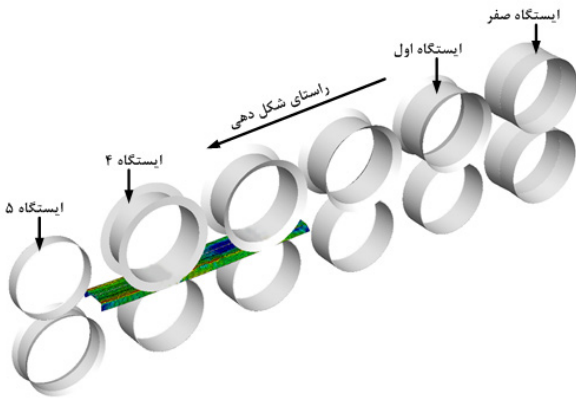


Fig. 13. Conversion of sheet to channel section in the ABAQUS simulation

شکل ۱۳: روند تبدیل ورق به مقطع کانال در شبیه سازی نرم افزار آباکوس

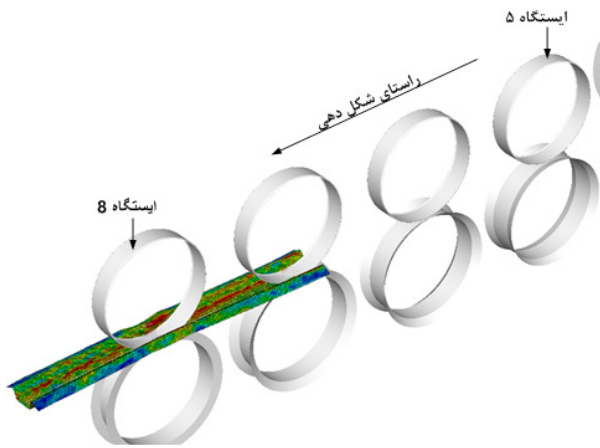


Fig. 14. Continue of simulation and conversion of channel section to hat channel section

شکل ۱۴: ادامه فرایند شبیه سازی و تبدیل مقطع کانال به مقطع کلاهی شکل

ب) مدل شبیه سازی مقطع کلاهی شکل اساس الگوی ب-۱ در این مدل ابتدا ورق در چهار ایستگاه اول به مقطع کانال تبدیل می شود و سپس مقطع کانال در چهار ایستگاه باقی مانده به مقطع کلاهی تبدیل می شود. جزییات کامل تر این شبیه سازی در جدول ۶ آمده است. شکل ۱۳ نمایی از مراحل شبیه سازی تبدیل ورق به مقطع کانال را نشان می دهد. پس از تبدیل شدن ورق به مقطع کانال در ادامه فرایند از ایستگاه پنجم به بعد با تغییر ناحیه خم، شکل گیری مقطع کلاهی شروع می شود و در ایستگاه هشتم خاتمه می یابد (شکل ۱۴). همانطور که قبلاً نیز بیان شد روند کرنش طولی در لبه ورق می تواند به عنوان معیاری از درست بودن فرایند شکل دهی غلتکی سرد باشد بنابراین تاریخچه کرنش برای گرهی در فاصله ۱/۳۵ میلی متر از لبه طولی ورق استخراج شد. نمودار کرنش طولی در لبه ورق در طول فرایند در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل خطوط خط چین نشان دهنده موقعیت ایستگاه شکل دهی غلتکی می باشد.

همانطور که در نمودار کرنش طولی مشاهده می شود از ابتدای فرایند تا زمان شکل گیری مقطع کانال، کرنش طولی لبه مثبت بوده و بیشترین مقدار کرنش در هر ایستگاه قبل از آن ایستگاه می باشد. این روند تا زمان شکل گیری مقطع کانال ادامه دارد ولی از ایستگاه پنجم به بعد کرنش طولی کاهش می یابد و حتی در بعضی نقاط در ایستگاه های آخر کرنش طولی منفی می شود. کرنش طولی لبه اگر از حد معینی بیشتر منفی شود می تواند سبب موج دار شدن و یا چین خوردن لبه پروفیل شود. دلیل این اتفاق در کم بودن فاصله ایستگاه چهارم و پنجم که تبدیل مقطع پروفیل در آنها اتفاق می افتد،

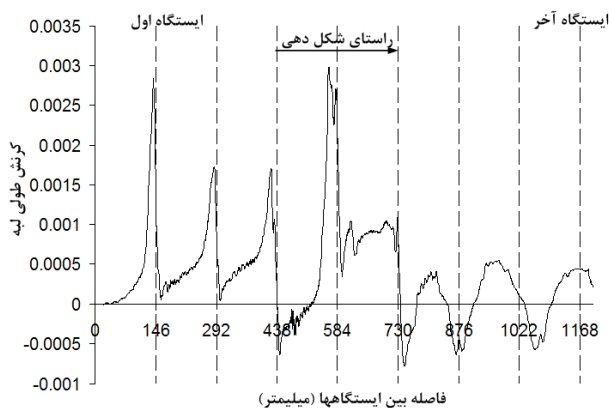


Fig. 15. History of longitudinal strain in the distance of 1.35 mm from sheet edge in the hat channel section simulation (Model B-1)

شکل ۱۵: تاریخچه کرنش طولی در فاصله ۱/۳۵mm از لبه ورق در شبیه سازی هشت ایستگاهی مقطع کلاهی شکل (مدل ب-۱)



می‌باشد. شکل ۱۶ تاریخچه کرنش طولی در فاصله ۱/۳۵ میلی‌متر از لبه طولی ورق را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را به‌صورت زیر می‌توان بیان کرد:

- روند کرنش طولی در این مدل بهتر از مدل قبل است و مشکل منفی شدن کرنش در این مدل برطرف شده است.
- میزان بیشینه کرنش در تمام ایستگاه‌ها در یک محدوده قابل قبول برای فرایند می‌باشد.
- میزان بیشینه کرنش تقریباً در تمام ایستگاه‌ها با اختلاف کمی به هم نزدیک است و این نشان‌دهنده این است که میزان کشش در تمام ایستگاه‌ها یکسان است. یکسان بودن کشش در تمام ایستگاه‌ها مبین آن است که میزان شکل‌دهی در تمام ایستگاه‌ها یکسان می‌باشد و این یکسان بودن برای یک فرایند مطلوب، ضروری است. قسمتی از محصول تولید شده با مدل ب-۲ در شکل ۱۷ نشان داده شده است. این محصول از کیفیت مطلوب برخوردار است و مشکلاتی مانند موج‌دار شدن لبه در این محصول وجود ندارد. مطلوب بودن کیفیت محصول از نظر ظاهری نشان‌دهنده مناسب بودن الگوی گل و شرایط شبیه‌سازی می‌باشد.

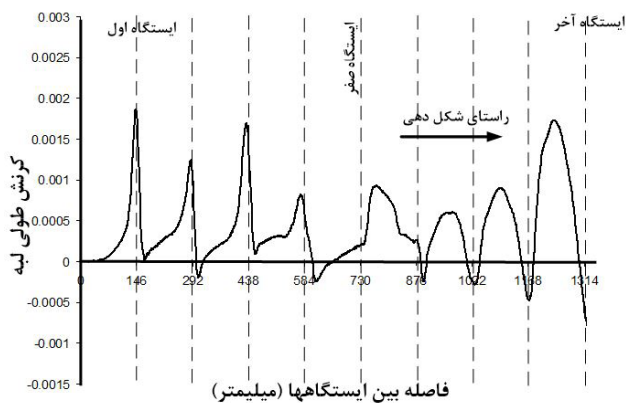


Fig. 16. History of longitudinal strain in the distance of 1.35 mm from sheet edge in the hat channel section simulation (Model B-2)

شکل ۱۶: تاریخچه کرنش طولی به فاصله ۳۵/۱ میلی‌متر از لبه ورق در تحلیل نه ایستگاهی با شرایط سرعت دادن به غلتک‌ها (مدل ب-۲)

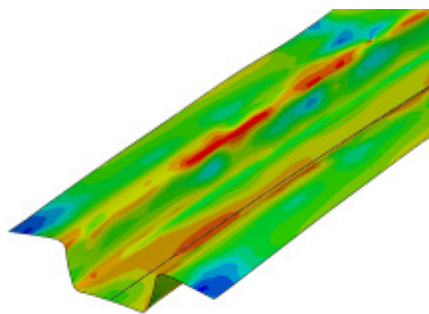


Fig. 17. View of final hat channel profile produced by B-2 model

شکل ۱۷: قسمتی از محصول نهایی پروفیل کلاهی شکل با مدل ب-۲

دیده شد. زیرا فاصله ایستگاه چهارم و پنجم برابر فاصله تمام ایستگاه‌ها است و این فاصله برای وقتی که مقطع از کانال به کلاهی تبدیل می‌شود، کم می‌باشد که خود سبب وارد شدن فشار به لبه ورق می‌شود. دلیل این فشار این است که در حالی که ورق در ایستگاه چهارم در حال خم شدن به پایین است در ایستگاه پنجم به سمت بالا خم می‌شود. این امر باعث منفی شدن کرنش طولی می‌شود. علاوه بر این حداکثر کرنش کششی در ایستگاه چهارم بسیار زیاد است و توزیع کرنش در تمام ایستگاه‌ها یکنواخت نیست. بنابراین یک ایستگاه صفر بین ایستگاه چهارم و پنجم اضافه شد (مدل ب-۲) که عمل شکل‌دهی انجام نمی‌دهد ولی سبب افزایش فاصله بین ایستگاه‌های چهارم و پنجم می‌شود و به این طریق مشکل فشرده شدن ورق در این ایستگاه برطرف می‌شود.

جدول ۶: مشخصات مدل استفاده شده برای شبیه‌سازی هشت ایستگاه (مدل ب-۱)

Table 6. Characteristic of eight station model (model B-1)

تنظیمات	برای تبدیل ورق تخت به مقطع کانال متقارن	برای تبدیل کانال متقارن به مقطع کلاهی متقارن
تعداد ایستگاه	۴	۴
زاویه غلتک‌ها به ترتیب (درجه)	۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۵	۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۵
فاصله بین ایستگاه‌ها (میلی‌متر)	۱۴۶	۱۴۶
عرض کف مقطع (میلی‌متر)	۲۰	۴۰
پهنای بال مقطع (میلی‌متر)	۱۰	۱۰
جنس ورق	St14	St14
طول ورق (میلی‌متر)	۳۰۰	۳۰۰
سرعت شکل‌دهی (میلی‌متر بر ثانیه)	۲۵۰۰	۲۵۰۰

ج) مدل شبیه‌سازی مقطع کلاهی شکل با نه ایستگاه (مدل ب-۲) که شرایط مدلسازی این مدل کاملاً مشابه مدل قبل است با این تفاوت که یک ایستگاه صفر بین ایستگاه‌های شکل‌دهی مقطع کانال و مقطع کلاهی اضافه شده است. جزییات کامل این مدل مشابه آنچه در جدول ۶ آمده است

## ۶- نتیجه گیری

در بخش آزمایش‌های تجربی تاثیر تغییر زاویه شکل‌دهی بر روی عیب شمشیری شدن مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش زاویه، عیب شمشیری شدن افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نیز تأیید کننده این نتیجه هستند. علاوه بر این نتایج شبیه‌سازی نزدیکی خوبی با نتایج تجربی دارند. از مدل تأیید شده به وسیله آزمایش‌های تجربی برای انتخاب الگوی گل مناسب برای مقطع کلاهی شکل استفاده شد.

در این تحقیق الگوی گل مناسب برای شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کلاهی شکل مورد بررسی قرار گرفت. دو الگوی گل برای این مقطع ارائه شد:

- نتایج تحقیق نشان می‌دهند که در الگوی گلی که همزمان خم داخلی و بیرونی مقطع کلاهی با هم زده می‌شود (الگوی گل الف) کرنش طولی لبه، منفی می‌شود و سبب موج دار شدن لبه محصول می‌شود.

- در الگوی گل دوم (الگوی گل ب) ابتدا ورق در چهار ایستگاه به کانال تبدیل می‌شود و سپس در چهار ایستگاه بعدی به مقطع کلاهی تبدیل می‌شود. تغییرات کرنش طولی در لبه محصول روند مناسب‌تری نسبت به الگوی گل قبلی دارد و کرنش طولی لبه زیاد منفی نمی‌شود اما همچنان تغییرات آن در تمام ایستگاه‌ها یکنواخت نیست. علاوه بر این در ایستگاه پنجم که مقطع کانال به کلاهی تبدیل می‌شود کرنش طولی لبه منفی می‌شود که می‌تواند سبب چین خوردگی محصول شود. بر این اساس با قرار دادن یک ایستگاه صفر (بدون شکل‌دهی) بین ایستگاه چهارم و پنجم تغییرات کرنش یکنواخت‌تر شده و کمتر وارد محدوده کرنش منفی می‌شود. بنابراین این الگوی گل بعنوان الگوی گل مناسب برای شکل‌دهی غلتکی سرد مقطع کلاهی ارائه می‌شود.

## منابع

- of *Materials Processing Technology*, 60(1) (1996) 219-224.
- [5] D. Bhattacharyya, P.D. Smith, C.H. Yee, I.F. Collins, The prediction of deformation length in cold roll-forming, *Journal of Mechanical Working Technology*, 9(2) (1984) 181-191.
- [6] D. Bhattacharyya, T.C. Maltby, T.A. Martin, S.M. Pantan, Prediction of Strain Development while Roll Forming Fundamentals Sections, *Advanced Technology of Plasticity*, 2 (1990) 871-876.
- [7] N. Duggal, M.A. Ahmetoglu, G.L. Kinzel, T. Altan, Computer aided simulation of cold roll forming — a computer program for simple section profiles, *Journal of Materials Processing Technology*, 59(1) (1996) 41-48.
- [8] Z.-W. Han, C. Liu, W.-P. Lu, L.-Q. Ren, The effects of forming parameters in the roll-forming of a channel section with an outer edge, *Journal of Materials Processing Technology*, 116(2) (2001) 205-210.
- [9] M. Lindgren, Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1) (2007) 77-81.
- [10] H. Moslemi Naeini, *Rolls design of pipe cold roll forming by computer*, Tarbiat Modares University, (1372).
- [11] S.A.R. Madineh, *Rolls design of non-circular profiles by computer in the cold roll forming*, Esfahan University of Technology, (1372).
- [12] M. Tajdari, *Cold roll forming analysis for symmetric open section*, Esfahan university of Technology, (1378).
- [13] A. Asempour, A.R. safikhani, Roll forming investigation of sheet and prediction of deformation length, in: *11th conference of Mechanical Engineering*, University of Ferdosi Mashhad, (1382).
- [14] M. Salmani Tehrani, *Defect analysis and prediction in the cold roll forming of symmetric section by FEM simulation*, Esfahan university of Technology, (1385).
- [15] M. Lindgren, Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed, *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1) (2007) 44-47.
- [16] B. Rossi, H. Degée, R. Boman, Numerical simulation of the roll forming of thin-walled sections and evaluation of corner strength enhancement, *Finite*
- [1] H. Ona, T. Jimma, N. Fukaya, Experiments on the Forming of Straight Asymmetrical Channels - Research on the High Accuracy Cold Roll Forming Process of Channels Type Cross Section, *Journal of The Japan Society for Technology of Plasticity*, 22 (1981) 1244-1251.
- [2] J. Fewtrell, *An Experimental Analysis of Operating Conditions in Cold Roll Forming*, University of Aston in Birmingham, (1990).
- [3] S.M. Pantan, S.D. Zhu, J.L. Duncan, Geometric Constraints on the Forming Path in Roll Forming Channel Sections, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 206(2) (1992) 113-118.
- [4] S.M. Pantan, J.L. Duncan, S.D. Zhu, Longitudinal and shear strain development in cold roll forming, *Journal*

978-986.

*Elements in Analysis and Design*, 72 (2013) 13-20.

[18] R. Safdarian, H. Moslemi Naeini, The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section, *Thin-Walled Structures*, 92 (2015) 130-136.

[17] J.H. Wiebenga, M. Weiss, B. Rolfe, A.H. van den Boogaard, Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6) (2013)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Safdarian, H. Moslemi Naeini, M. Salmani Tehrani, Appropriate Flower Pattern for Cold Roll Forming of Hat Channel Section, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(4) (2018) 773-784.  
DOI: 10.22060/mej.2017.10280.4820



