



مطالعه طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

حسن بادپروا^۱، حسن مسلمی نائینی^{۲*}، محمد مهدی کسائی^۳، یعقوب دادگر اصل^۴ و بهنام عباس‌زاده^۱

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین

^۴ استادیار، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشکده فنی انقلاب، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

چکیده

فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، روشی نوین برای تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر است. در این فرایند، برای تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر، موقعیت غلتک‌ها در هر لحظه کنترل و متناسب با هندسه پروفیل حرکت داده می‌شوند. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی به بررسی طول تغییرشکل به عنوان یکی از پارامترهای مهم در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداخته می‌شود. بدین منظور، مدل اجزای محدود فرایند در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شد و سپس با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی برای کرنش طولی در بخش‌های فشاری و کششی پروفیل کانالی با سطح مقطع متغیر، صحت مدل مورد تأیید قرار گرفت. نتایج نشان داد که طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، نه تنها در بخش‌های مختلف پروفیل متفاوت است، بلکه در نواحی مختلف هر بخش نیز متفاوت است. بیشترین طول تغییرشکل در وسط بخش کششی پروفیل بدست آمد که نسبت به وسط بخش‌های باریک و عریض ۳۸٪ و نسبت به وسط بخش فشاری ۴۸٪ بیشتر است؛ همچنین مشخص شد که با افزایش زاویه شکل‌دهی و طول بال پروفیل، طول تغییرشکل در همه بخش‌های پروفیل با سطح مقطع متغیر افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر؛ طول تغییرشکل؛ پروفیل با سطح مقطع متغیر؛ کرنش طولی.

Study of Deformation Length in Flexible Roll Forming Process

H. Badparva¹, H. Moslemi Naeini^{2,*}, M.M. Kasaei³, Y. Dadgar Asl⁴, B. abbaszadeh¹

¹ M.S.c., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

² Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

³ Asset. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad Univ. of Qazvin, Qazvin, Iran

⁴ Asset. Prof., Dep. Mech. Eng., Enghelab-e Eslami Technical and vocational Univ., Tehran, Iran.

Abstract

Flexible roll forming process is a novel method for producing profiles with variable cross-section. In this process, the position of the rolls is controlled at any time and moved in accordance with the profile geometry to produce the profiles with variable cross-section. In the paper, the deformation length is investigated as one of the important parameters in the flexible roll forming using finite element simulations and experimental tests. For this purpose, a finite element model was created in Abaqus software, and then the accuracy of the model was confirmed by comparing the simulation results and experimental data for longitudinal strain in the compression and stretching zones of a channel profile with variable cross-section. The results showed that the deformation length in the flexible roll forming is changed not only in the different zones of the profile, but also in different areas of each zone. The highest deformation length was obtained at the middle of the stretching zone, which is 38% longer than that at the middle of the narrow and wide zones and 48% longer than that at the middle of the compression zone. It was also found that the deformation length increases in all the zones with the increase of the forming angle and flange length.

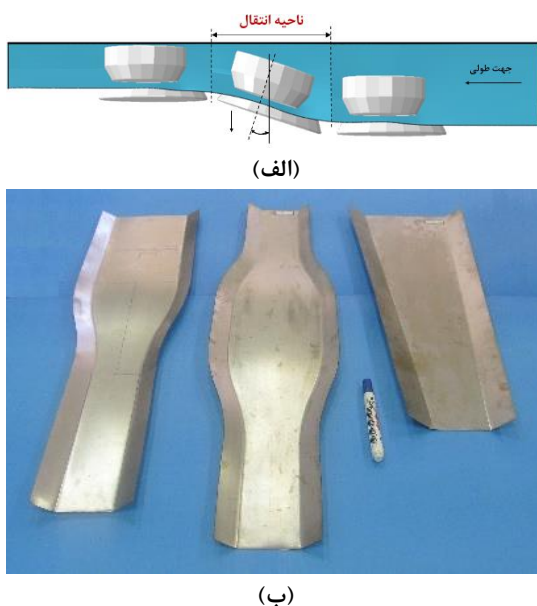
Keywords: Flexible Roll Forming; Deformation Length; Variable Cross-Section Profile; Longitudinal Strain.

۱- مقدمه

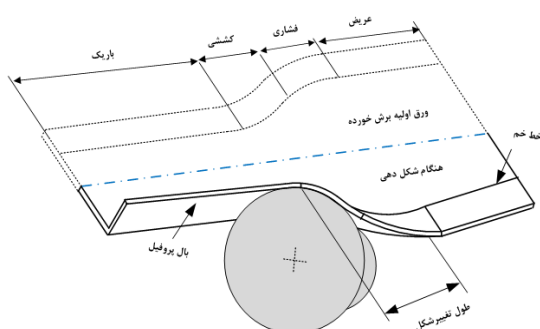
شکل‌دهی غلتکی سرد، روشی برای ایجاد خم‌های پیوسته و متوالی در نوار فلزی با شرط ثابت بودن ضخامت ورق است. در این فرایند نوار فلزی با عبور از بین مجموعه‌ای از غلتک‌های دوار به محصولات فلزی مانند لوله و پروفیل‌های با سطح مقطع ثابت تغییر شکل می‌یابد [۱]. یکی از محدودیت‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی سنتی، عدم توانایی تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر در طول محصول است. به همین دلیل فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر توسعه پیدا کرد که در آن نوار ورق با عبور از بین مجموعه‌ای از غلتک‌های دوار که دارای حرکت زاویه‌ای و حرکت خطی نیز هستند، به پروفیل مورد نظر تغییر شکل می‌یابد. حرکت‌های خطی و زاویه‌ای غلتک‌ها متناسب با هندسه پروفیل توسط سیستم کنترل عددی رایانه‌ای کنترل می‌شوند [۲]. شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در صنعت خودروسازی به علت قابلیت تولید پروفیل‌های بهینه شده بر مبنای بار و همچنین انعطاف‌پذیری بالای آن در تولید پروفیل‌های هم خانواده مورد توجه ویژه قرار گرفته است. شکل ۱ طرح‌واره حرکت غلتک‌ها در بخش تغییر سطح مقطع پروفیل که ناحیه انتقال نامیده می‌شود و همچنین نمونه‌هایی از پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر را نشان می‌دهد.

یکی از عوامل موثر در فرایند شکل‌دهی غلتکی، طول تغییر شکل است که در تعیین فاصله بین ایستگاهی نقش اساسی دارد. جهت داشتن یک طراحی و زمان‌بندی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مناسب، نیاز به دانستن طول تغییر شکل است و اینکه بیشترین مقدار طول تغییر شکل در کدام بخش رخ می‌دهد تا طراحی بر آن اساس انجام گیرد؛ همچنین طبق پژوهش‌هایی که صورت گرفته است، مهم‌ترین عاملی که در پیدایش عیوب شکل‌دهی نقش دارد، کرنش طولی است که با طول تغییر شکل مناسب می‌توان آن را کنترل نمود تا به یک محصول با کیفیت دست یافت. طول تغییر شکل به فاصله بین نقطه شروع تغییر شکل پیش از ایستگاه شکل‌دهی تا مقطع مرکزی غلتک‌ها در ایستگاه گفته می‌شود. در شکل ۲ طرح‌واره‌ای از طول تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر نشان داده شده است.

از آنجایی که تغییر شکل از لبه ورق شروع می‌شود، برای تعیین طول تغییر شکل معمولاً کرنش طولی در لبه ورق مورد



شکل ۱- الف) طرح‌واره حرکت غلتک‌ها در بخش انتقال پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر و ب) نمونه‌هایی از پروفیل با سطح مقطع متغیر [۳]



شکل ۲- طرح‌واره‌ای از طول تغییر شکل در بخش کششی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

بررسی قرار می‌گیرد. باتاچاریا و همکاران [۴] به پیش بینی طول تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد پرداختند و رابطه‌ای را برای طول تغییر شکل بدون در نظر گرفتن خواص مکانیک ورق بر مبنای کمینه کردن انرژی تغییر شکل ارائه کردند. سلمانی تهرانی و همکاران [۵] به بررسی طول تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی لوله برای ورق فولادی SAE1020 پرداختند و اثر پارامترهای زاویه شکل‌دهی و عرض ورق بر آن را مشخص کردند. عزیزی تفتی و همکاران [۶] رابطه‌ای برای طول تغییر شکل با در نظر گرفتن رفتار

را برای تعیین حد چین خوردگی در فضای کرنش موثر و سه محوری تنش ارائه کردند و از آن برای پیش‌بینی چین‌خوردگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر استفاده کردند. عباس‌زاده و همکاران [۱۲] به بررسی تأثیر قطر غلتک بر روی هندسه محصول در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که قطر غلتک بر تابیدگی کف تأثیر چشم‌گیری نداشته ولی بر انحراف لبه بال ورق تأثیر زیادی دارد. رضایی و همکاران [۱۳] و [۱۴] به بررسی اثر منحنی خط خم بر تابیدگی کف در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. آن‌ها نشان دادند برای یک منحنی خط خم، هر چه کرنش ایجاد شده در لبه بال به حد مطلوب طراحی شده نزدیک‌تر باشد عیب تابیدگی تا حد امکان کاهش می‌یابد. دادگر اصل و همکاران [۱۵] به بررسی اثر زاویه شکل‌دهی و شعاع خم بر شکست در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در زاویه ۶۰ درجه شکست رخ می‌دهد. یون وو و همکاران [۱۶] عیب خم طولی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، با کاهش کرنش بیشینه طولی، عیب خم طولی نیز کاهش می‌یابد. یون وو و همکاران [۱۷]، به پیش‌بینی عیوب هندسی ورق‌های دو لایه در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. نتایج نشان داد که کرنش طولی نقش اصلی را در پدید آمدن عیوب هندسی دارد؛ همچنین نشان دادند که کاهش کرنش طولی باعث کاهش عیوب تابیدگی کف و کاهش چروکیدگی بال ورق می‌شود.

دادگر اصل و همکاران [۱۸] با استفاده از بهینه‌سازی و الگوریتم ژنتیک به بررسی پارامترهای موثر بر چین‌خوردگی در لبه بال و خم طولی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند.

پناهی‌زاده و همکاران [۱۹] به بررسی عیب برگشت فبری در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از معیارهای تسلیم ناهمسانگرد پرداختند. نتایج نشان داد، معیار بارلات نسبت به معیارهای هیل و فون میزز، پیش‌بینی دقیق‌تری از برگشت فبری در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر دارد.

کسائی و همکاران [۲۰] معیار جدیدی را بر مبنای منحنی حد چین‌خوردگی در فضای کرنش موثر و سه

کشان-مومسان با کارسختی خطی برای ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ارائه نمودند و نتایج رابطه خود را با نتایج رابطه طول تغییرشکل باتاچاریا مقایسه کردند. لیو و همکاران [۷] رابطه ریاضی جدیدی را برای بدست آوردن توزیع زاویه خم و کرنش طولی لبه ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ارائه کردند و اثر طول بال و قطر غلتک را بر آن‌ها مشخص کردند. آبراسنا و همکاران [۸] به بررسی اثر الگوی گل^۱ بر کرنش طولی و طول تغییرشکل در شکل‌دهی غلتکی سرد پرداختند. آن‌ها همچنین با در نظر گرفتن کرنش لایه میانی بر روی مسیری در لبه بال پروفیل، روابطی برای کرنش طولی و تأثیر طول تغییرشکل بر آن ارائه کردند. سون و همکاران [۹] به بررسی توسعه کرنش طولی در فرایند شکل‌دهی قالب زنجیری پرداختند. آن‌ها یک مدل تحلیلی جدید بر پایه شرایط مرزی هندسی ورق و ابزار شکل‌دهی ارائه کردند که از آن روابط کرنش طولی و بیشینه کرنش طولی استخراج گردید و با استفاده از ایجاد رابطه بین شعاع غلتک و ارتفاع تغییرشکل ورق به روابط طول تغییرشکل و طول تغییرشکل بیشینه در فرایند شکل‌دهی قالب زنجیری دست یافتند. شیان و همکاران [۱۰] به بررسی فرایند شکل‌دهی قالب زنجیری پرداختند. آن‌ها با استفاده از محاسبات تحلیلی منحنی زاویه خم در نقطه تماس ورق با ابزار پایینی شکل‌دهی، رابطه‌ای برای طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی قالب زنجیری ارائه کردند. آن‌ها همچنین به بررسی عیوبی مانند خم طولی در این فرایند پرداختند.

در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر تاکنون طول تغییرشکل مورد بررسی قرار نگرفته است و بیشتر پژوهش‌هایی که در این فرایند انجام شده است، متمرکز بر شناخت دلایل ایجاد عیوب شکل‌دهی بوده است. کسائی و همکاران [۲] و [۱۱] دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیری را برای نمونه‌سازی پروفیل‌های با عرض متغیر طراحی و ساختند. آن‌ها به بررسی چین‌خوردگی لبه در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند و نشان دادند که تغییرشکل در بخش انتقال ترکیبی از فلنج‌کاری و شکل‌دهی غلتکی سرد است. کسائی و همکاران [۳]، مکانیک تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را تحلیل کردند. آن‌ها آزمونی

^۱ Flower Pattern



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) نمونه‌های آماده شده برای آزمون کشش در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه و نمونه آزمایش شده St12 و ب) آزمون کشش انجام گرفته بر روی ورق های تهیه شده فولادی ST12

۲-۲- آزمایش‌های شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر

برای انجام آزمون تجربی از دستگاه شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد (شکل ۴) [۲۲]. در این دستگاه، حرکت خطی و دورانی برای ایستگاه شکل دهی توسط یک سازوکار سینماتیک موازی

محوری تنش برای پیش‌بینی چین خوردگی در شبیه‌سازی اجزای محدود فرایندهای شکل دهی ورقی ارائه کردند. آنها از این معیار برای پیش‌بینی چین خوردگی در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر استفاده کردند و نشان دادند که طول بال، تنش تسلیم و ضخامت ورق مهمترین پارامترهای اثرگذار بر چین خوردگی در این فرایند هستند.

اگر چه مطالعات متعددی بر روی طول تغییر شکل در فرایند شکل دهی غلتکی متداول انجام شده است، ولی با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان این مقاله، تاکنون پژوهشی بر روی طول تغییر شکل در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر انجام نشده است. در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر برخلاف شکل دهی غلتکی سنتی به دلیل تغییرات سطح مقطع پروفیل طول تغییر شکل برای تمام پروفیل ثابت باقی نمی‌ماند. به همین دلیل در این پژوهش با استفاده از تحلیل اجزای محدود به بررسی طول تغییر شکل در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر پرداخته می‌شود تا درک درستی از تغییرات آن در بخش‌های مختلف یک پروفیل با سطح مقطع متغیر بدست آید و اثر زاویه شکل-دهی و طول بال ورق بر آن مشخص گردد.

۲- آزمون تجربی

۲-۱- خواص مکانیکی ورق

در این مقاله به منظور انجام آزمایش‌های تجربی از ورق فولادی St12 با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده گردید. آزمون کشش تک محوری با استاندارد ASTM E8 [۲۱] در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد جهت تعیین دقیق خواص مکانیکی این ورق، انجام گرفت (شکل ۳).

به دلیل نزدیک بودن نتایج استحکام تسلیم در سه جهت، میانگین استحکام تسلیم آن‌ها محاسبه شد و در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت. خواص ناهمسانگردی در جدول ۱ و خواص مکانیکی ورق در جدول ۲ آورده شده است.

از رابطه لودویک-هولومن مطابق رابطه ۱ می‌توان منحنی تنش- کرنش حقیقی را در راستای نورد تقریب زد.

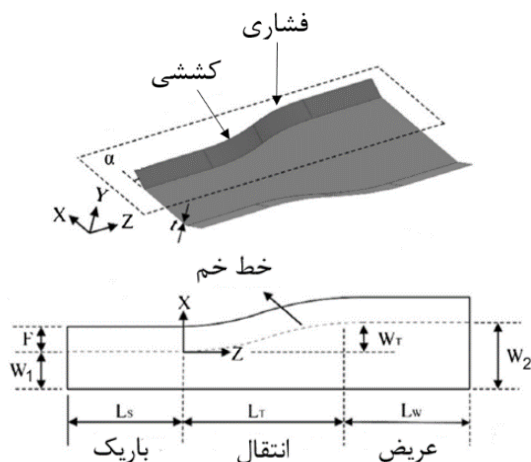
$$\sigma = 586.8 \varepsilon^{0.286} \text{ MPa} \quad (1)$$

جدول ۱- خواص ناهمسانگردی فولاد St12 با ضخامت ۱ میلی‌متر

ضرایب ناهمسانگردی (r)			ناهمسانگردی نرمال \bar{r}	ناهمسانگردی صفحه‌ای (Δr)
۰	۴۵	۹۰	۱/۳	۱/۲
۱/۳۲	۱/۲۳	۱/۵۵		

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد St12 با ضخامت ۱ میلی‌متر

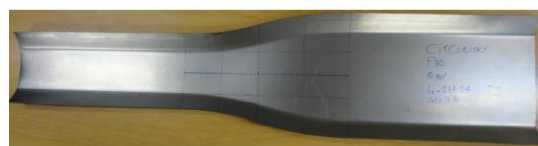
مدول یانگ E (GPa)	استحکام تسلیم Y (MPa)	استحکام کشش نهایی σ_u (MPa)	افزایش طول قبل از شکست A (%)
۱۹۶/۵۳	۱۷۳/۳۷	۳۲۷/۶۸	۵۵/۲۶



شکل ۵- مشخصات هندسی پروفیل و ورق پیش بریده شده [۱۳]

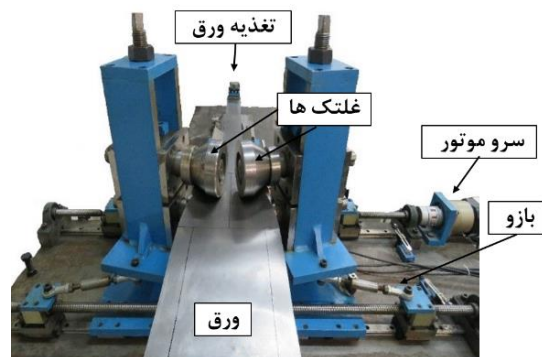


(الف)



(ب)

شکل ۶- (الف) ورق پیش برش برای پروفیل هدف همراه با کرنش سنج در لبه بخش کششی و (ب) پروفیل هدف تولید شده با مقطع متغیر [۱۳]



شکل ۴- دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

با دو محور ایجاد می‌شود؛ همچنین حرکت ورق توسط یک مکانیزم تغذیه تامین می‌شود که ورق را در طول خط شکل‌دهی می‌کشد. برنامه کنترلی دستگاه با استفاده از نرم افزار لب ویوو^۱ نوشته شده است که روی یک رایانه شخصی مجهز به کارت جمع‌آوری داده^۲ نصب شده است.

پروفیل هدف در این مطالعه یک کانال متقارن با عرض متغیر است که دارای چهار بخش باریک، کششی، فشاری و عریض است. شکل ۵ نشان‌دهنده مشخصات هندسی پروفیل و نیمی از ورق پیش بریده شده می‌باشد. اندازه کمیت‌های هندسی در جدول ۳ آورده شده است.

از دستگاه برش لیزر به منظور برش ورق در اندازه‌های داده‌شده در جدول ۳ استفاده شد. ورق پیش‌برش در شکل ۶-الف نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری کرنش از دستگاه اندازه‌گیری کرنش مدل TML DC- 97 A، کرنش‌سنج مقاومتی TML FLA 5-11،

^۱ Lab View

^۲ Data Acquisition Board

مقادیر خروجی ولتاژ کوچک هستند داده‌ها با ضریب ۲۰۰ بزرگنمایی شدند. برای اینکه در ابتدا به ازای کرنش صفر، ولتاژ خروجی نیز صفر شود، بر روی پل وتسون کالیبراسیون انجام شد و کرنش از رابطه ۲ محاسبه شد که توسط شرکت سازنده اعلام شده است.

$$\varepsilon = \frac{V_{out}}{V_{in}} * \frac{4}{GF} * \frac{1}{200} \quad (2)$$

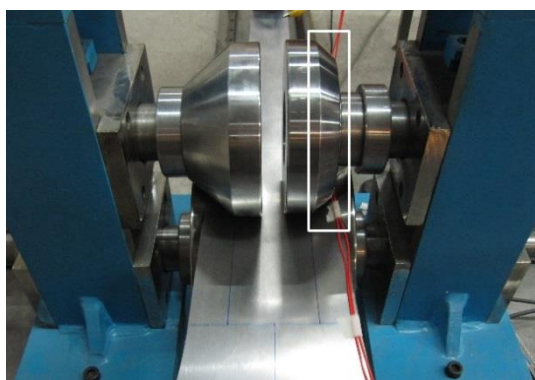
در این رابطه ε کرنش، V_{in} ولتاژ ورودی و برابر با 500mv ، GF گنج فاکتور برابر با $2/13$ ، عدد چهار به دلیل برابر بودن چهار مقاومت پل وتسون با هم و عدد 200 برای حذف تاثیر بزرگنمایی، ذکر شده است.

کرنش سنج‌ها به فاصله $2/5$ میلی‌متر از لبه و در وسط بخش کششی و فشاری نصب شدند (شکل ۶-الف). شکل ۶-ب پروفیل تولیدی با سطح مقطع متغیر را نشان می‌دهد. شکل ۸ غلتک‌های شکل‌دهی با بال کوتاه‌تر در سمت کرنش‌سنج را نشان می‌دهد.

غلتک بالایی در سمتی که کرنش‌سنج نصب می‌شود، 10 میلی‌متر کوچک‌تر از بال پروفیل ساخته شده است که دلیل آن جلوگیری از آسیب رسیدن به کرنش‌سنج در حین شکل‌دهی است.

۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی‌های اجزای محدود از حلگر استاتیک ضمنی^۱ نسخه ۶/۱۴ نرم افزار آباکوس استفاده شد. غلتک‌ها به دلیل



شکل ۸- غلتک‌های شکل‌دهی با بال کوتاه‌تر در سمت کرنش‌سنج [۲]

^۱ Implicit Static

پل وتسون و اسیلوسکوپ استفاده شد که در شکل ۷ آورده شده است.

با توجه به شکل ۷، به ترتیب از راست، اسیلوسکوپ، کرنش‌سنج مقاومتی TML FLA 5-11 و پل وتسون نشان داده شده است.

در این روش، کرنش اعمال شده در لبه بال ورق که باعث تغییر مقاومت در کرنش‌سنج می‌شود توسط پل وتسون به یک ولتاژ خروجی در محدوده میلی‌ولت تبدیل شد. این ولتاژ خروجی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کرنش دریافت و توسط اسیلوسکوپ در رایانه نمایش داده شد. به دلیل اینکه



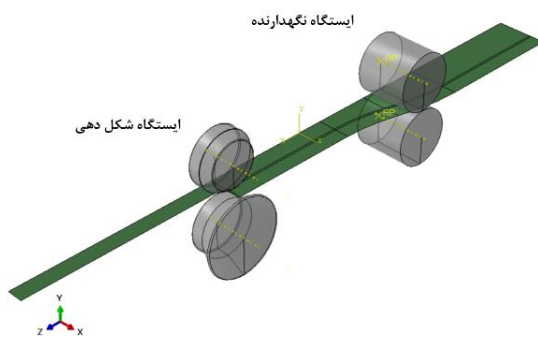
شکل ۷- تجهیزات مورد نیاز جهت اندازه‌گیری کرنش

جدول ۳- اندازه‌های مشخصات هندسی ورق

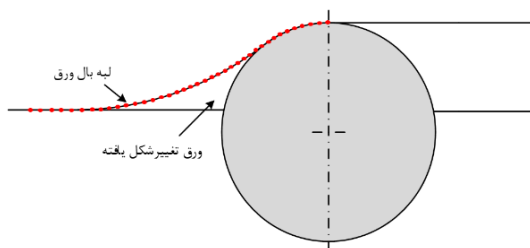
اندازه	پارامترها	کمیت
۷۰ میلی‌متر	عرض کف بخش باریک	W_1
۳۵ میلی‌متر	عرض بخش انتقال	W_T
۱۴۰ میلی‌متر	عرض کف بخش عریض	W_2
۲۳۴ میلی‌متر	طول ناحیه انتقال	L_T
۲۵۰ میلی‌متر	طول بخش باریک	L_S
۲۵۰ میلی‌متر	طول بخش عریض	L_W
۳۰ میلی‌متر	طول بال	F
۱ میلی‌متر	ضخامت	t
۳۰ درجه	زاویه شکل‌دهی	α

جدول ۴- مقادیر زاویه شکل‌دهی و طول بال پروفیل برای بررسی اثر این پارامترها بر طول تغییرشکل

اندازه	پارامترها	کمیت
۱۰-۲۰-۳۰ میلی‌متر	F	طول بال
۲۰-۳۰-۴۰ درجه	α	زاویه شکل‌دهی



شکل ۹- نمایی از موقعیت ورق و غلتک‌ها



شکل ۱۰- نحوه انتخاب مسیر در شبیه‌سازی اجزای محدود

جهت اندازه‌گیری کرنش بیشینه طولی در هر بخش در شبیه‌سازی اجزای محدود ابتدا نقطه وسط هر بخش تعیین شده و سپس تاریخچه کرنش طولی نسبت به زمان بر روی لبه بال ورق در آن نقطه استخراج می‌گردد. هنگامی که نقطه مدنظر به ایستگاه شکل‌دهی می‌رسد، کرنش بیشینه طولی قبل از ایستگاه رخ می‌دهد که با توجه به بالاترین کرنش طولی در نمودار، می‌توان آن را به عنوان کرنش بیشینه طولی معرفی نمود. نکته مهمی که در خصوص اندازه‌گیری کرنش طولی مطرح می‌شود، این است که در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، به دلیل اینکه ورق به صورت پوسته در نظر گرفته شده است، با تغییرشکل ورق راستاهای تعریف‌شده در ابتدای شبیه‌سازی تغییر نمی‌کنند؛ در نتیجه مشکلی در اندازه‌گیری کرنش طولی ایجاد نمی‌کنند.

تغییرشکل ناچیز صلب فرض شدند؛ در حالی که ورق به صورت کشسان-مومسان در نظر گرفته شد. از المان پوسته چهارگره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته S4R برای مدل‌سازی ورق استفاده شد. بر اساس نظریه ورق‌ها و پوسته‌ها، هندسه پوسته توسط لایه میانی آن توصیف می‌گردد. لایه میانی همان لایه وسط ضخامت است.

در شکل ۹ موقعیت ورق و غلتک‌ها نشان داده شده است. به دلیل تقارن پروفیل مورد مطالعه، فقط نیمی از پروفیل و غلتک‌ها در نرم افزار اجزای محدود مدل شدند. ایستگاه اول برای نگهداری ورق استفاده می‌شود. غلتک‌های ایستگاه دوم که دوزنقه‌ای هستند وظیفه شکل‌دهی را به عهده دارند. این غلتک‌ها علاوه بر حرکت دورانی حول محور X برای طی کردن منحنی‌های خم در راستای محور X حرکت خطی و حول محور Y حرکت دورانی دارند.

در این مقاله علاوه بر انجام شبیه‌سازی مطابق با آزمایش‌های تجربی، شبیه‌سازی‌هایی به منظور بررسی اثر زاویه شکل‌دهی و طول بال پروفیل بر طول تغییرشکل انجام شد. در این شبیه‌سازی‌ها زاویه شکل‌دهی و طول بال مطابق جدول ۴ تغییر داده شدند؛ همچنین کف پروفیل مقید شد تا از اثرگذاری تابیدگی کف پروفیل در ناحیه انتقال و خمش طولی بخش باریک بر طول تغییرشکل جلوگیری شود. اثر طول بال ورق در زاویه شکل‌دهی ۲۰ درجه و همچنین اثر زاویه شکل‌دهی در طول بال ۲۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با طی کردن مراحل زیر، طول تغییرشکل در شبیه‌سازی-های اجزای محدود بدست آمد؛

۱- در نظر گرفتن یک مسیر^۱ قبل از ایستگاه شکل‌دهی

(مطابق شکل ۱۰)

۲- بدست آوردن کرنش طولی بر روی آن مسیر

۳- اندازه‌گیری فاصله در راستای طول خط شکل‌دهی از

آخرین گره‌ای که قبل از ایستگاه مقدار کرنش آن

صفر است تا گره‌ای که زیر غلتک شکل‌دهی قرار

می‌گیرد.

^۱ Path

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود

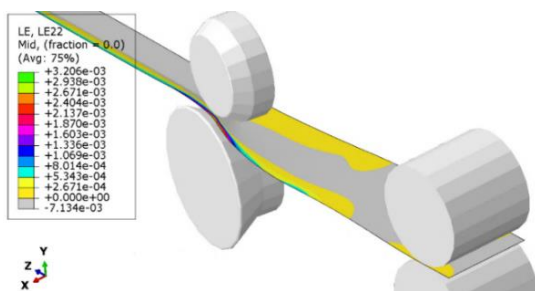
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه تاریخچه کرنش طولی لبه ورق به ترتیب در وسط بخش‌های کششی و فشاری را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، هنگامی که ورق وارد ایستگاه شکل‌دهی می‌شود، کرنش کششی زیادی در لبه ورق ایجاد می‌شود. با خروج ورق از ایستگاه، لبه ورق تحت فشار قرار می‌گیرد و با توجه به هندسه بال، کرنش‌های پسماند کششی و فشاری به ترتیب در بخش‌های کششی و فشاری باقی می‌ماند. همانطور که مشاهده می‌شود، اختلاف کمی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مخصوصاً در بخش فشاری وجود دارد که این اختلاف را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در شبیه‌سازی اجزای محدود حرکت غلتک‌ها ایده‌آل در نظر گرفته شده‌است؛ در حالی که در آزمایش‌های تجربی لقی‌های بین اجزای سازوکار دستگاه

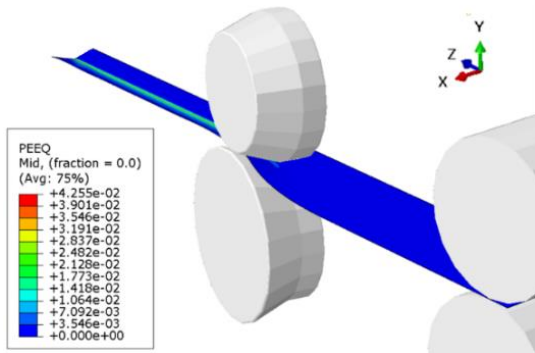
باعث خطای کمی در حرکت غلتک‌ها شود. با این‌حال اختلاف اندکی که وجود دارد، صحت تحلیل اجزای محدود را تأیید می‌کند.

شکل ۱۳ کانتور کرنش طولی و کرنش پلاستیک مؤثر پروفیل به هنگام شکل‌دهی بخش کششی را نشان می‌دهد. مطابق انتظار کرنش‌ها در فاصله مشخصی قبل از ایستگاه شروع به افزایش می‌کنند.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب تغییرات کرنش طولی بر روی لبه بال پروفیل به هنگام شکل‌دهی شروع هر بخش و وسط هر بخش را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه پروفیل دارای چهار بخش می‌باشد، دو اندازه‌گیری در هر بخش انجام گرفت. در مرحله اول زمانی که شروع هر بخش دقیقاً در ایستگاه شکل‌دهی (مقطع مرکزی غلتک‌های شکل‌دهی) قرار داشت، شبیه‌سازی در آنجا متوقف و سپس با اندازه‌گیری فاصله بین این نقطه تا موقعیتی که کرنش طولی روی مسیر صفر می‌شود، طول تغییر شکل محاسبه شد. در مرحله دوم طول تغییر شکل برای وسط هر بخش مطابق مرحله اول

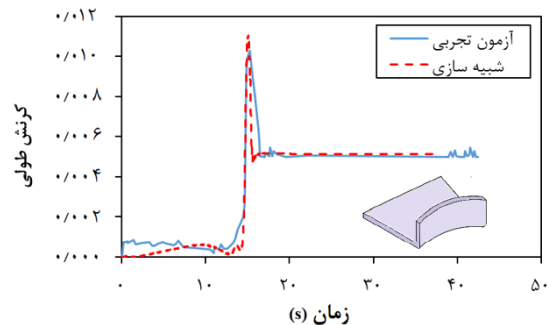


(الف)

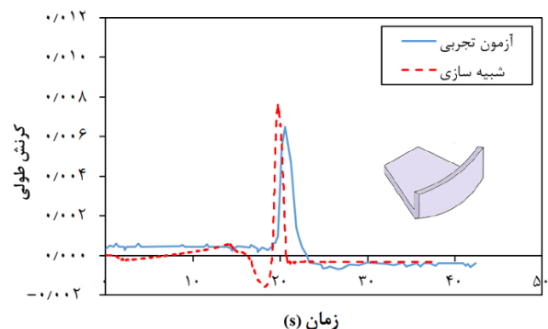


(ب)

شکل ۱۳- الف) کانتور کرنش طولی پروفیل به هنگام شکل‌دهی بخش کششی و ب) کانتور کرنش پلاستیک مؤثر پروفیل به هنگام شکل‌دهی بخش کششی



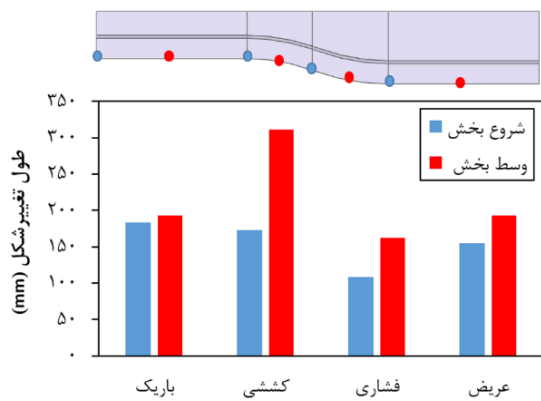
شکل ۱۱- مقایسه تاریخچه کرنش شبیه‌سازی و تجربی در بخش کششی



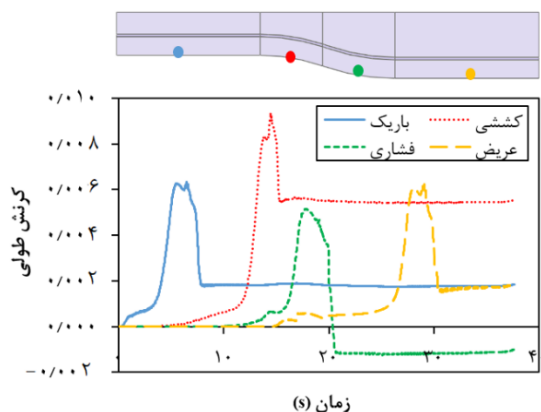
شکل ۱۲- مقایسه تاریخچه کرنش شبیه‌سازی و تجربی در بخش فشاری

تغییر شکل یکنواخت تر و پیوسته تر می‌شود. در بخش‌های کششی، فشاری و عریض نیز به دلیل اینکه در شروع این بخش‌ها اثرات کرنشی از بخش قبلی وجود دارد طول تغییر شکل در شروع کمتر از مرکز آن‌ها است. هرچه به وسط این بخش‌ها نزدیک تر می‌شویم، تغییر شکل یکنواخت تر و کامل‌تری در این بخش‌ها انجام می‌شود که افزایش طول تغییر شکل را در پی دارد.

مطابق شکل ۱۶، طول تغییر شکل در وسط بخش کششی بیشتر از دیگر بخش‌ها است به طوری که نسبت به وسط بخش‌های باریک و عریض ۳۸٪ و نسبت به وسط بخش فشاری ۴۸٪ اختلاف دارد. شکل ۱۷ تاریخچه کرنش طولی در وسط چهار بخش را نشان می‌دهد. کرنش طولی در بخش کششی بیشتر از دیگر بخش‌ها است. در هنگام تغییر شکل



شکل ۱۶- مقادیر طول تغییر شکل در بخش‌های مختلف محصول حاصل از شبیه‌سازی

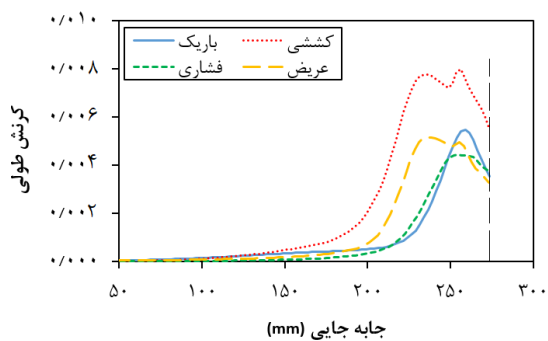


شکل ۱۷- مقایسه کرنش طولی در وسط بخش‌های مختلف پروفیل

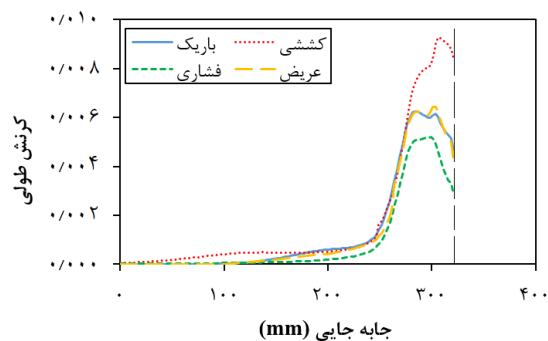
محاسبه شد. همانطور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود، بیشینه کرنش طولی قبل از ایستگاه رخ می‌دهد.

با استفاده از نتایج بدست آمده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، طول تغییر شکل به هنگام آغاز شکل‌دهی هر بخش و همچنین وسط هر بخش بدست آمد که در شکل ۱۶ خلاصه شده است. نتایج نشان می‌دهد، طول تغییر شکل در شروع و وسط بخش باریک ۵٪، بخش کششی ۴۴٪، بخش فشاری ۳۳٪ و بخش عریض ۲۰٪ اختلاف دارند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر بر خلاف فرایند شکل‌دهی سنتی، طول تغییر شکل ثابت نبوده و در چهار بخش دارای مقادیر متفاوتی است.

در هر چهار بخش باریک، کششی، فشاری و عریض طول تغییر شکل در وسط بخش بیشتر از شروع بخش است. در بخش باریک دلیل این اختلاف می‌تواند ناپایداری تغییر شکل در شروع فرایند باشد؛ در حالی که در وسط این بخش،



شکل ۱۴- کرنش طولی بر روی مسیری در لبه بال به هنگام شکل‌دهی شروع بخش‌های مختلف پروفیل (خط‌چین: موقعیت مقطع وسطی غلتک‌ها)



شکل ۱۵- کرنش طولی بر روی مسیری در لبه بال به هنگام شکل‌دهی وسط بخش‌های مختلف پروفیل

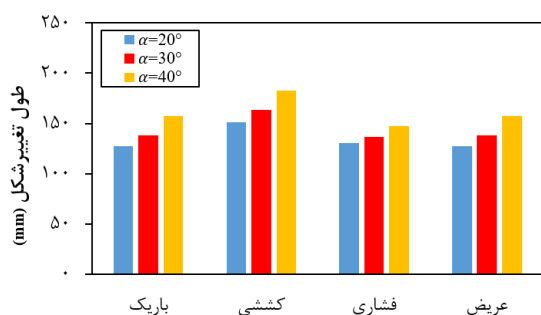
تغییر شکل کششی بیشتر، عاملی برای کشیده شدن بیشتر ورق و در نتیجه افزایش طول تغییر شکل است. در شکل ۱۹ اثر زاویه شکل دهی بر نحوه تماس ورق و غلتک نشان داده شده است. با افزایش زاویه شکل دهی، ارتفاع لبه بال پروفیل در ناحیه تماسی با غلتک بیشتر می شود که منجر به افزایش طول مسیر لبه قبل از ایستگاه و در نتیجه کشیده شدن بیشتر آن می شود؛ همچنین با افزایش زاویه شکل دهی، به علت افزایش قطر غلتک در ناحیه تماسی، تماس لبه بال با غلتک زودتر آغاز می شود. این تماس زودتر با غلتک می تواند سبب زودتر آغاز شدن تغییر شکل بال قبل از ایستگاه نیز شود.

شکل ۲۰ کرنش طولی لبه بال در بخش کششی پروفیل را در سه زاویه شکل دهی مختلف نشان می دهد. با افزایش زاویه شکل دهی، کرنش طولی در لبه بال پروفیل افزایش می یابد و همچنین تغییر شکل زودتر آغاز می شود. این نتایج، پیش بینی های انجام شده بر مبنای نحوه تماس ورق با غلتک را تأیید می کند.

۳-۴- اثر طول بال پروفیل (F) بر طول تغییر شکل

در شکل ۲۱ اثر طول بال پروفیل بر طول تغییر شکل در وسط هر چهار بخش پروفیل با سطح مقطع متغیر نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، با افزایش طول بال پروفیل، طول تغییر شکل در هر چهار بخش افزایش می یابد که میزان آن در بخش باریک ۲۸٪، بخش کششی ۴۸٪، بخش فشاری ۴۲٪ و بخش عریض ۲۸٪ است. با افزایش طول بال پروفیل مطابق شکل ۲۲، ارتفاع لبه بال در ناحیه تماسی افزایش می یابد. همچنین تماس بال با غلتک به علت



شکل ۱۸- اثر زاویه شکل دهی بر طول تغییر شکل

قبل از ایستگاه، همواره لبه بال پروفیل تحت کشش و خمش همزمان قرار می گیرد [۲۲]. حال هر چه میزان این تغییر شکل کششی افزایش یابد، طول تغییر شکل نیز افزایش می یابد. با توجه به این که در بخش کششی، ورق به علت هندسه مقعر بال تحت کشش مضاعف قرار می گیرد، بیشینه کرنش در این بخش در مقایسه با بخش های باریک و عریض ۳۲٪ و نسبت به بخش فشاری ۴۶٪ بیشتر می شود. به همین دلیل بیشترین طول تغییر شکل در بخش کششی رخ می دهد.

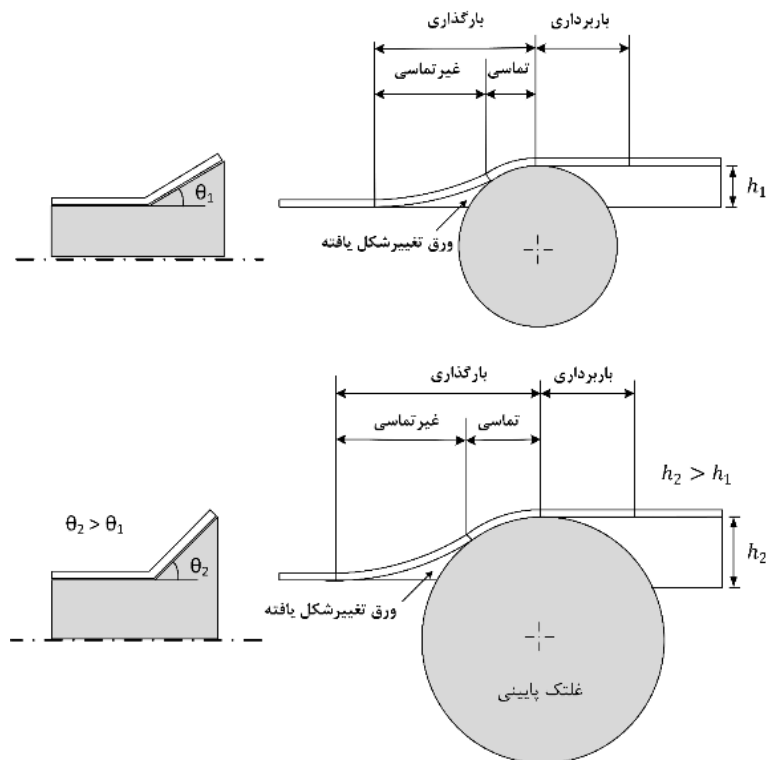
بیشینه کرنش طولی در بخش فشاری کم تر از دیگر بخش ها است زیرا در بخش فشاری به علت هندسه محدب، بال برعکس بخش کششی باید تحت فشار قرار گیرد تا به هندسه مطلوب دست پیدا کند. این عامل سبب کاهش مقدار کشش وارد شده قبل از ایستگاه و در نتیجه کاهش طول تغییر شکل می شود. علاوه بر این در شکل ۱۷ مشاهده می شود که کرنش طولی در وسط بخش های باریک و عریض با یکدیگر برابر است و به همین دلیل طول تغییر شکل نیز در وسط این دو بخش برابر است؛ اما در شروع بخش ها طول تغییر شکل در این دو بخش متفاوت است؛ زیرا در شروع بخش باریک، ورق تحت تاثیر تماس اولیه با غلتک قرار دارد؛ در حالی که تغییر شکل در شروع بخش عریض، تحت تاثیر فشاری قرار می گیرد که از بخش فشاری اعمال می شود.

در ادامه به دلیل اینکه طول تغییر شکل در وسط بخش ها بزرگتر از شروع بخش ها می باشد، اثر دو پارامتر زاویه شکل دهی و طول بال پروفیل در وسط بخش ها بررسی می شود.

۲-۴- اثر زاویه شکل دهی (α) بر طول تغییر شکل

در شکل ۱۸ اثر زاویه شکل دهی بر طول تغییر شکل در وسط هر چهار بخش پروفیل با سطح مقطع متغیر نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱۸ مشخص است، با افزایش زاویه شکل دهی طول تغییر شکل افزایش می یابد. میزان افزایش طول تغییر شکل در بخش باریک ۱۶٪، بخش کششی ۱۹٪، بخش فشاری ۱۲٪ و بخش عریض ۱۶٪ است. با افزایش زاویه شکل دهی، سهم کرنش کششی تک محوری در مقایسه با کرنش خمشی طولی در تغییر شکل افزایش می یابد.



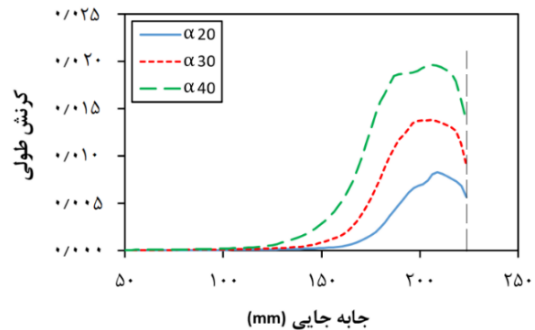
شکل ۱۹- اثر زاویه شکل دهی بر نحوه تماس ورق و غلتک

افزایش قطر غلتک زودتر آغاز می‌شود. به همین دلایل، کشش بیشتری قبل از ایستگاه به لبه بال اعمال می‌شود که افزایش طول تغییر شکل را نتیجه می‌دهد. مکانیزم اثرگذاری طول بال بر طول تغییر شکل مانند زاویه شکل دهی است، ولی بهرحال اثرگذاری طول بال بیشتر از زاویه شکل دهی است.

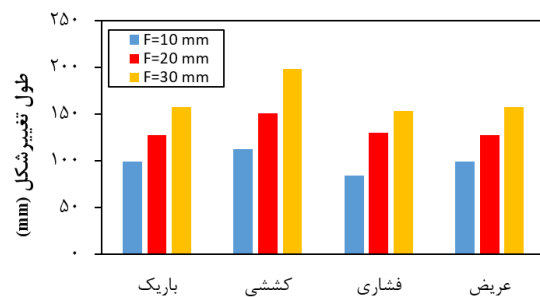
شکل ۲۳ کرنش طولی روی مسیری در لبه بال پروفیل به هنگام شکل دهی وسط بخش کششی را برای سه طول بال مختلف نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر این موضوع است که با افزایش طول بال پروفیل، تغییر شکل قبل از ایستگاه بیشتر و زودتر آغاز می‌شود که این امر سبب افزایش طول تغییر شکل می‌شود.

۵- نتیجه گیری

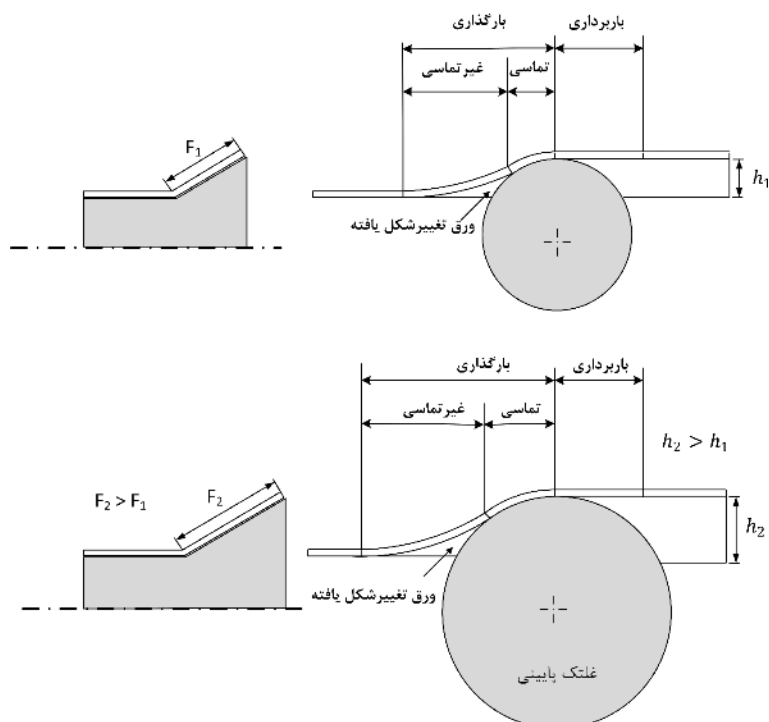
در این مقاله، طول تغییر شکل در پروفیل کانالی با عرض متغیر تولید شده با فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر، با استفاده از تحلیل اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد:



شکل ۲۰- کرنش طولی بر روی مسیری در لبه بال پروفیل در بخش کششی برای سه زاویه شکل دهی مختلف



شکل ۲۱- اثر طول بال پروفیل بر طول تغییر شکل

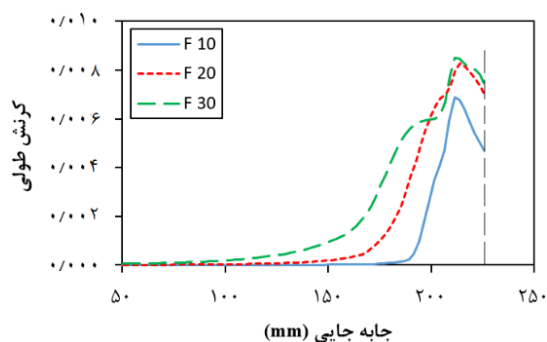


شکل ۲۲- اثر طول بال پروفیل بر نحوه تماس ورق و غلتک

عریض ۲۰٪ اختلاف طول تغییر شکل بین شروع و وسط مشاهده شد.

۳- به علت کشش مضاعف اعمالی ناشی از هندسه مقعر بال در ناحیه کششی، بیشینه کرنش طولی در این بخش در مقایسه با بخش های باریک و عریض ۳۲٪ و در مقایسه با بخش فشاری ۴۶٪ بیشتر بدست آمد. به همین دلیل بیشترین طول تغییر شکل در بخش کششی رخ داد که نسبت به بخش های باریک و عریض ۳۸٪ و در مقایسه با بخش فشاری ۴۸٪ تفاوت داشت. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که ارتباط مستقیمی بین بیشینه کرنش طولی در هر بخش و طول تغییر شکل در آن بخش وجود دارد.

۴- با افزایش زاویه شکل دهی از ۲۰ درجه به ۴۰ درجه، طول تغییر شکل در بخش باریک ۱۶٪، بخش کششی ۱۹٪، بخش فشاری ۱۲٪ و بخش عریض ۱۶٪ افزایش یافت. دلیل این افزایش، افزایش کشش در بال پروفیل به دلیل افزایش ارتفاع لبه



شکل ۲۳- کرنش طولی بر روی مسیری در لبه بال پروفیل در بخش کششی برای سه طول بال مختلف

- ۱- طول تغییر شکل در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر برخلاف شکل دهی غلتکی سنتی ثابت نیست؛ زیرا تغییر در سطح مقطع پروفیل به هنگام شکل دهی، رفتار تغییر شکل متفاوتی را در هر بخش از پروفیل ایجاد می کند.
- ۲- به دلیل تغییر شکل متفاوت در شروع هر بخش و وسط آن بخش، در بخش باریک ۵٪، در بخش کششی ۴۴٪ در بخش فشاری ۳۳٪ و در بخش

- [9] Sun Y, Li Y, Daniel W, Meehan P, Liu Z (2017) Longitudinal Strain development in Chain-die forming AHSS products: Analytical modelling, finite element analysis and experimental verification. *J Mater Process Technol* 243: 322-334.
- [10] Qiana Z, Suna Y, Lib Y, Wanga CH, Meehana P, Daniela W, Dinga SH (2020) Investigation of the design process for the Chain-die forming technology based on the developed multi-Stand numerical model. *J Mater Process Technol* 277: 116484.
- [11] Kasaei MM, Moslemi Naeini H, Abbaszadeh B, Mohammadi M, Ghodsi M, Kiuchi M, et al (2014) Flange wrinkling in flexible roll forming process. *Procedia Eng* 81: 245-250.
- [۱۲] عباسزاده ب، مسلمی نائینی ح، کسائی م، محمدی م (۱۳۹۳) بررسی تأثیر قطر غلتک بر روی هندسه محصول در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر. بیست و دومین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران.
- [13] Rezaei R, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Mohammadi M, Abbaszadeh B (2017) Effect of bend curve on web warping in flexible roll formed profiles. *Int J Adv Manuf Technol* 93(9): 3625-3636.
- [۱۴] رضایی ر، مسلمی نائینی ح، عزیزی تفتی ر، کسائی م، عباسزاده ب، محمدی م (۱۳۹۴) بررسی اثر تغییر منحنی خم در ناحیه انتقال بر عیب تابیدگی کف برای کانال های با سطح مقطع متغیر در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر. نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک ۴۳۴-۴۲۳: ۴۸(۴).
- [15] Dadgar Asl Y, Sheikhi M, Pourkamali Anaraki A, Panahizadeh V, Hoseinpour Gollo M (2017) Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD. *Int J Adv Manuf Technol* 91(5): 1481-1492.
- [16] Woo YY, Han SW, Hwang TW, Park JY, Moon YH (2018) Characterization of the longitudinal bow during flexible roll forming of Steel sheets. *J Mater Process Technol* 252: 782-794.
- [17] Woo YY, Oh Y, Hwang TW, Hoon YM (2020) Analysis of shape defects during flexible roll forming of steel/aluminum double-layered blanks. *Int J Mater Form* 13(6): 861-872.
- [18] Dadgar Asl Y, Woo YY, Kim Y, Moon YH (2020) Non-sorting multi-objective optimization of flexible roll forming using artificial neural networks. *Int J Adv Manuf Technol* 107: 2875-2888.
- بال پروفیل در ناحیه تماس و همچنین تماس زودتر لبه با غلتک است.
- ۵- با افزایش طول بال پروفیل، طول تغییرشکل در بخش باریک ۲۸٪، بخش کششی ۴۸٪، بخش فشاری ۴۲٪ و بخش عریض ۲۸٪ افزایش یافت. مکانیزم اثرگذاری طول بال بر طول تغییرشکل مشابه با زاویه شکل دهی است.
- ### ۶- مراجع
- [۱] غفاری تراب ترکی ر، مسلمی نائینی ح، کسائی م، طالبی قادیکلایی ح (۱۳۹۹) مطالعه عددی و تجربی برش گیوتینی یک پروفیل پیچیده تولید شده به روش شکل دهی غلتکی. نشریه علمی مکانیک سازه ها و شاره ها ۱۵-۱۰: ۱۰(۳).
- [2] Kasaei MM, Moslemi Naeini H, Abbaszadeh B, Silva MB, Martins PAF (2015) Flexible roll forming. In: Davim JP (ed) *Materials Forming and Machining*. Woodhead Publishing 51-71.
- [3] Kasaei MM, Moslemi Naeini H, Liaghat GH, Silva CMA, Silva MB, Martins PAF (2015) Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming. *J Strain Anal Eng Des* 50(7): 528-541.
- [4] Bhattacharyya D, Smith PD, Yee CH, Collins IF (1984) The prediction of deformation length in cold roll forming. *J Mech Work Technol* 9(2): 181-191.
- [۵] سلمانی تهرانی م، بهرامی م (۱۳۸۸) بررسی تحلیلی و عددی طول تغییر شکل در شکل دهی غلتکی لوله ای گرد. مجله علمی - پژوهشی مهندسی مکانیک مجلسی ۳۵-۲۵: ۳(۲).
- [۶] عزیزی تفتی ر، مسلمی نائینی ح، سلمانی تهرانی م، کسائی م (۱۳۹۱) حل نظری طول تغییر شکل ارتجاعی - خمیری با کارسختی خطی در شکل دهی غلتکی یک مقطع کانالی. نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ۳۲-۱۹: ۲۴(۱).
- [7] Liu CH, Zhou WL, Fu Xu, Chen Gu (2015) A new mathematical model for determining the longitudinal Strain in cold roll forming process. *Int J Adv Manuf Technol* 79(5): 1055-1061.
- [8] Abeyrathna B, Rolfe B, Hodgson P, Weiss M (2015) An extension of the flower pattern diagram for roll forming. *Int J Adv Manuf Technol* 83(9): 1683-1695.

- prediction of wrinkling in flexible roll forming. Int J Adv Manuf Technol 113(7): 2257-2275.
- [21] <https://www.astm.org/Standards/E8>.
- [۲۲] کسائی م م (۱۳۹۴) بررسی عددی چین خوردگی پروفیل کانالی با سطح مقطع متغیر در شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.
- [۱۹] پناهی زاده و، دادگر اصل ی، سعیدی ف، افشین س (۱۴۰۰) تحلیل عددی و تجربی عیب برگشت فنری در فرایند شکل دهی غلتکی انعطاف پذیر با استفاده از معیارهای تسلیم ناهمسان گرد. نشریه علمی مکانیک سازه ها و شاره ها ۱۰۵-۹۳: ۱۱(۴).
- [20] Kasaei MM, Moslemi Naeini H, Abbaszadeh B, Roohi AH, Silva MB, Martins PAF (2021) On the