



# Investigation of Parameters Affecting Deformation Length in Flexible Roll Forming Process

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Badparva H.<sup>1</sup>,  
Moslemi Naeini H.<sup>1\*</sup>,  
Kasaei M M.<sup>2</sup>,  
Dadgar Asl Y.<sup>3</sup>,  
Abbaszadeh B.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Badparva H, Moslemi Naeini H, Kasaei M M, Dadgar Asl Y, Abbaszadeh B. Investigation of Parameters Affecting Deformation Length in Flexible Roll Forming Process. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(01):47-56.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Tehran Branch, Faculty of Enghelab-e Eslami, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, IR Iran.  
P.O.Box: 14115-143  
moslemi@modares.ac.ir

### Article History

Received: May 08, 2021  
Accepted: August 10, 2021  
ePublished: November 17, 2022

## ABSTRACT

In this paper, the changes of deformation length and longitudinal strain in flexible roll forming are investigated using finite element simulations and experiments, and the relationship between them is determined. Flexible roll forming is a novel manufacturing process to produce variable cross-section profiles. One of the important parameters of this process is the distance between the starting point of the deformation before a forming station and the central cross-section of rolls at that station, which is called the deformation length. This parameter plays a key role in determining the distance between forming stations and the deformation behavior of the sheet. In the research work, the influence of roll diameter and mechanical properties of the sheet on the deformation length is also specified. The results showed that the maximum deformation length occurs when the stretching zone of the variable cross-section channel profile is formed because the additional tension is applied to the edge due to the concave geometry of the flange in this zone. The results also showed that the deformation length increases in all four of the stretching and compression zones and the slim and wide areas of the variable cross-section channel profile with the increase of roll diameter and yield stress, while it decreases in these zones with the increase of sheet thickness.

**Keywords** Flexible Roll Forming, Variable Cross-Section Profile, Deformation Length, Longitudinal Strain, Roll Diameter, Sheet Mechanical Properties

## CITATION LINKS

[1] Flexible roll forming. [2] Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming. [3] Analytical and Numerical Investigation of Deformation Length in Round Tube Roll Forming. [4] Roll forming handbook. [5] The prediction of deformation length in cold roll forming. [6] The prediction of roll load in cold roll-forming. [7] Longitudinal and shear strain development in cold roll forming. [8] Theoretical solution of linear hardening elastic-plastic deformation length for a roll formed channel. [9] Flange wrinkling in flexible roll forming process. [10] Investigation of the effect of roll diameter on product geometry in flexible roll forming process. [11] Investigation of web warping defect of profiles with variable cross-section in flexible roll forming process. [12] Effect of bend curve on web warping in flexible roll formed profiles. [13] An investigation on bend curve in the transition zone on web warping of channels with variable width in the flexible roll forming process. [14] Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD. [15] Spring-back of flexible roll forming bending process. [16] Characterization of the longitudinal bow during flexible roll forming of steel sheets. [17] Analysis of shape defects during flexible roll forming of steel/aluminum double-layered blanks. [18] Analytical, numerical and experimental investigation of wrinkling in flexible roll forming of variable cross-sectional channel profiles [19] On the prediction of wrinkling in flexible roll forming.

## بررسی پارامترهای اثرگذار بر طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

حسن بادپروا

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

حسن مسلمی نائینی\*

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

محمد مهدی کسائی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

یعقوب دادگراصل

دانشکده فنی انقلاب، دانشگاه فنی و حرفه ای استان تهران، تهران، ایران.

بهنام عباس‌زاده

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

### چکیده

در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج آزمایش‌های تجربی، تغییرات طول تغییرشکل و کرنش طولی در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار می‌گیرد و ارتباط بین آن‌ها مشخص می‌گردد. شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، یک فرایند ساخت نوین برای تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر است. یکی از پارامترهای مهم این فرایند، فاصله نقطه شروع تغییرشکل پیش از ایستگاه شکل‌دهی تا مقطع مرکزی غلتک‌ها در آن ایستگاه است که به آن طول تغییرشکل گفته می‌شود. این پارامتر در تعیین فاصله بین ایستگاه‌های شکل‌دهی و رفتار تغییرشکل ورق نقش اساسی دارد. همچنین اثر قطر غلتک و خواص مکانیکی ورق بر طول تغییرشکل مشخص می‌گردد. نتایج نشان داد بیشینه طول تغییرشکل به هنگام شکل‌دهی بخش کششی پروفیل کانالی با سطح مقطع متغیر روی می‌دهد که دلیل آن کشش مضاعفی است که به علت هندسه مقعر بال در این بخش به لبه آن اعمال می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش قطر غلتک و تنش تسلیم، طول تغییرشکل در هر چهار بخش باریک، کششی، فشاری و عریض پروفیل کانالی با سطح مقطع متغیر افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش ضخامت ورق، طول تغییرشکل در این بخش‌ها کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، پروفیل با سطح مقطع متغیر، طول تغییرشکل، کرنش طولی، قطر غلتک، خواص مکانیکی ورق

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸

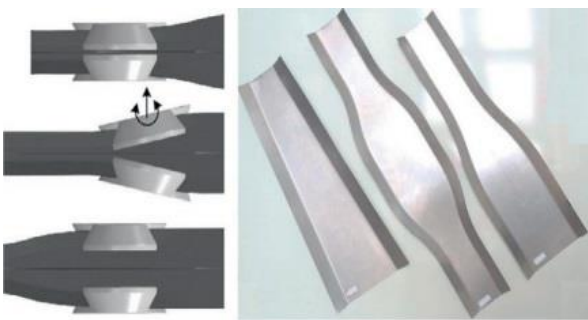
\*نویسنده مسئول: moslemi@modares.ac.ir

### ۱- مقدمه

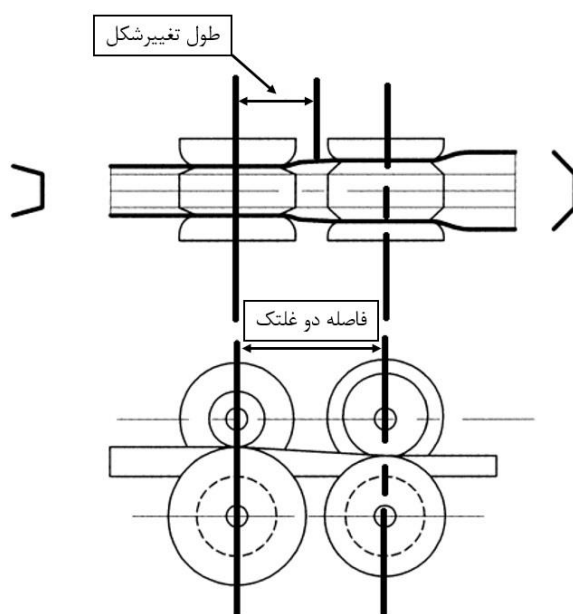
فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر روش نوینی برای تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر است. در این فرایند، نوار ورق با عبور از بین مجموعه‌ای از غلتک‌های دوار که برخلاف فرایند شکل‌دهی غلتکی متداول دارای حرکت زاویه‌ای و خطی نیز هستند، شکل می‌گیرد. حرکت‌های خطی و دورانی توسط سیستم کنترل عددی رایانه‌ای متناسب با تغییرات مقطع پروفیل کنترل می‌شود [1]. شکل ۱ نمونه‌هایی از پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر

تولید شده در دانشگاه تربیت مدرس و همچنین شماتیک حرکت غلتک‌ها در ناحیه تغییر سطح پروفیل (ناحیه انتقال) را نشان می‌دهد. با افزایش روز افزون قیمت سوخت و قوانین سخت‌گیرانه زیست محیطی، تلاش‌های زیادی جهت کاهش وزن خودروها به منظور کاهش مصرف سوخت انجام شده است. استفاده از پروفیل‌های بهینه‌شده بر مبنای بار وارده به آن‌ها یکی از روش‌های کاهش وزن خودرو است. این پروفیل‌ها را می‌توان با استفاده از فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر تولید کرد. به همین سبب این فرایند مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است و به سرعت در حال توسعه می‌باشد.

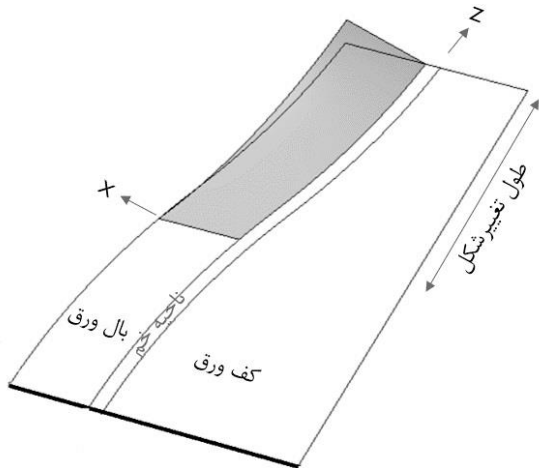
یکی از عوامل موثر در طراحی و زمانبندی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، طول تغییرشکل می‌باشد. طول تغییرشکل به فاصله بین نقطه شروع تغییرشکل پیش از ایستگاه شکل‌دهی تا مقطع مرکزی غلتک‌ها در ایستگاه گفته می‌شود (شکل ۲). طول تغییرشکل در تعیین فاصله بین ایستگاه‌ها و نیز رفتار تغییرشکل، نقش مهمی دارد [3].



شکل ۱ الف- نمونه‌ای از پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر تولیدشده در دانشگاه تربیت مدرس ب- شماتیک حرکت غلتک‌ها در ناحیه انتقال [2]



شکل ۲ ارتباط طول تغییرشکل و فاصله بین دو ایستگاه [4]



شکل ۳) شماتیک طول تغییرشکل در ناحیه انتقال در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

انعطاف‌پذیری را برای نمونه‌سازی پروفیل‌های با عرض متغیر طراحی و ساختند.

آن‌ها با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود به بررسی همزمان توزیع کرنش و تنش برای تحلیل مکانیک تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند و روشی را برای پیش‌بینی چین‌خوردگی در فضای کرنش موثر و سه محوری تنش ارائه کردند. عباس‌زاده و همکاران<sup>[10]</sup> اثر قطر غلتک بر روی هندسه پروفیل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار دادند. محمدی و همکاران<sup>[11]</sup> به بررسی اثر پارامترهای هندسی محصول بر تابیدگی کف در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش زاویه شکل‌دهی، طول بال ورق، تنش تسلیم و همچنین کاهش شعاع ناحیه انتقال، تابیدگی کف پروفیل افزایش می‌یابد. رضایی و همکاران<sup>[12,13]</sup> منحنی‌های مختلفی را برای خط خم در ناحیه انتقال پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر در نظر گرفتند و بهترین منحنی را برای کاهش عیب تابیدگی کف معرفی کردند. دادگر اصل و همکاران<sup>[14]</sup> به بررسی اثر زاویه شکل‌دهی و شعاع خم بر شکست نرم در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. ژانگ و همکاران<sup>[15]</sup> با شبیه‌سازی اجزای محدود به بررسی برگشت فنری در سه نوع پروفیل متفاوت در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند. یانگ یون وو و همکاران<sup>[16]</sup> عیب خم طولی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که غیریکنواختی عرضی کرنش طولی دلیل اصلی پدید آمدن این عیب است. یانگ یون وو و همکاران<sup>[17]</sup> 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. کسائی و همکاران<sup>[18]</sup> معیار جدیدی برای پیش‌بینی چین‌خوردگی بر مبنای منحنی حد چین‌خوردگی در فضای کرنش

اگر فاصله بین دو ایستگاه کمتر از طول تغییرشکل باشد، ورق به طور کامل تغییرشکل نمی‌یابد و عیوب شکل‌دهی ایجاد می‌شود. اگر فاصله بین دو ایستگاه خیلی بیشتر از طول تغییرشکل انتخاب شود، طول خط تولید زیاد می‌شود که باعث کاهش سرعت و راندمان تولید می‌گردد و همچنین عیوبی مانند برگشت فنری را در پی دارد. شناخت مکانیک تغییرشکل ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر می‌تواند کمک زیادی به تعیین طول تغییرشکل در این فرایند کند.

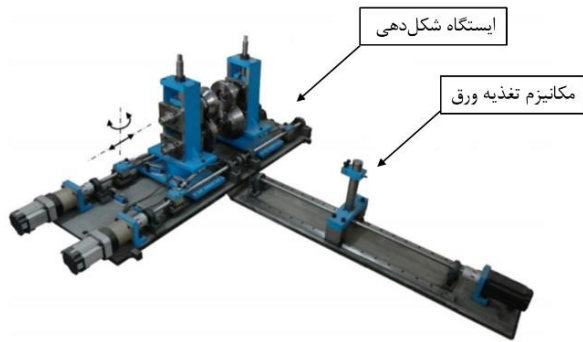
باتاچاریا و همکاران<sup>[5]</sup> با فرض رفتار صلب-مومسان کامل برای ماده ورق، معادله ۱ را برای تعیین طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی متداول بر اساس کمینه نمودن انرژی ارائه کردند.

$$L = \sqrt{\frac{8a^3\theta}{3t}} \quad (1)$$

در این معادله  $L$  طول تغییرشکل،  $a$  طول بال پروفیل،  $\theta$  زاویه شکل‌دهی و  $t$  ضخامت ورق است. همان‌طور که مشخص است در این معادله اثر خواص مکانیکی بر طول تغییرشکل دیده نشده است. باتاچاریا و همکاران<sup>[6]</sup> همچنین رابطه‌ای برای محاسبه پیشینه کرنش طولی در فرایند شکل‌دهی غلتکی متداول برحسب ضخامت ورق، زاویه شکل‌دهی و طول بال پروفیل ارائه کردند. پانتون و همکاران<sup>[7]</sup> به توسعه روابطی برای کرنش طولی و کرنش برشی در شکل‌دهی غلتکی متداول پرداختند و دقت آن‌ها را از طریق مقایسه با نتایج آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار دادند. روح‌الله عزیزی تفتی و همکاران<sup>[8]</sup> با مدل کردن رفتار ورق به صورت کشسان-مومسان با سخت‌شوندگی خطی، رابطه‌ای برای طول تغییرشکل ارائه کردند و توانستند اثر خواص مکانیکی از جمله تنش تسلیم و مدول یانگ را بر طول تغییرشکل مشخص کنند. مهدی سلمانی تهرانی و همکاران<sup>[3]</sup> به بررسی تحلیلی و عددی طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی لوله پرداختند و اثر پارامترهای هندسی بر آن را مورد بررسی قرار دادند.

مطابق شکل ۳، به دلیل تغییرات سطح مقطع پروفیل، تعیین طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پیچیده‌تر از تعیین آن در فرایند شکل‌دهی غلتکی متداول است. تاکنون بیشتر پژوهش‌ها در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر متمرکز بر شناخت مکانیک تغییرشکل ورق و شناسایی دلایل ایجاد عیوب شکل‌دهی بوده‌است و پژوهشی در زمینه طول تغییرشکل در این فرایند انجام نشده‌است.

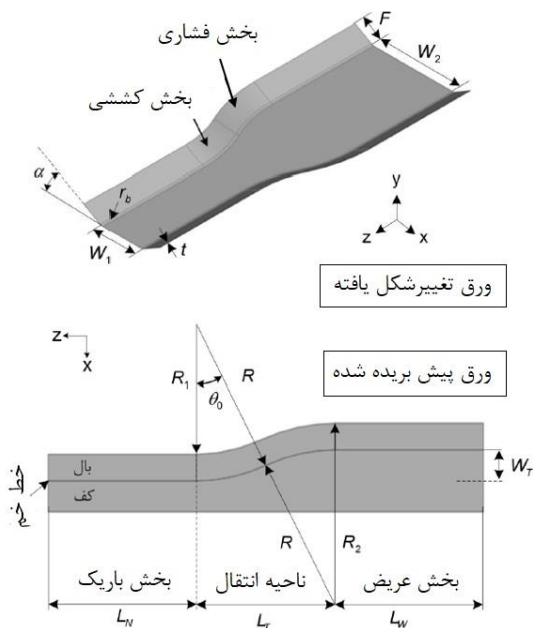
کسائی و همکاران<sup>[9]</sup> به بررسی کرنش طولی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند و روابطی را برای محاسبه کرنش ایده‌آل در ناحیه انتقال پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد تغییرشکل در ناحیه انتقال، ترکیبی از تغییرشکل در شکل‌دهی غلتکی متداول و فرایند فلنج‌کاری است. کسائی و همکاران<sup>[1,2]</sup> دستگاه شکل‌دهی غلتکی



شکل ۴) دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس [18]

غلتک‌ها می‌کشد. برنامه کنترلی این دستگاه با استفاده از نرم افزار لب ویوو (Lab View) نصب شده بر روی یک رایانه شخصی مجهز به کارت جمع‌آوری داده (Data acquisition board)، تدوین شده است [19].

در این مطالعه پروفیل هدف یک کانال متقارن با عرض متغیر است که دارای چهار بخش باریک، کششی، فشاری و عریض است. کمیت‌های هندسی پروفیل هدف و نیمی از ورق از پیش بریده‌شده برای تولید آن در شکل ۵ نشان داده شده است. در جدول ۳ اندازه کمیت‌های هندسی پروفیل آورده شده است.



شکل ۵) مشخصات هندسی ورق و پروفیل [19]

جدول ۳) مقادیر پارامترهای هندسی پروفیل در آزمایش‌های تجربی

اندازه	نماد	کمیت
۷۰ میلی‌متر	$W_1$	عرض کف بخش باریک
۳۵ میلی‌متر	$W_T$	عرض ناحیه انتقال
۳۰ میلی‌متر	$F$	طول بال
۱ میلی‌متر	$t$	ضخامت
۳۰ درجه	$\alpha$	زاویه شکل‌دهی
۴۰۰ میلی‌متر	$R$	شعاع خط خم

موثر و سه محوری تنش ارائه کردند و با تعریف آن در نرم افزار آباکوس به پیش‌بینی چین‌خوردگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند.

باتوجه به اهمیت طول تغییرشکل در طراحی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر و تفاوت‌های موجود در مکانیک تغییرشکل آن با شکل‌دهی غلتکی متداول، این پژوهش به بررسی طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج آزمایش‌های تجربی می‌پردازد. همچنین اثر قطر غلتک، ضخامت و تنش تسلیم ورق را بر طول تغییرشکل مشخص می‌کند.

## ۲-آزمون تجربی

### ۲-۱- خواص مکانیکی ورق

در این مقاله در آزمایش‌های تجربی از ورق فولادی St12 با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. برای تعیین دقیق خواص مکانیکی این ورق، آزمون کشش تک محوری با استاندارد ASTM E8 در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ نسبت به راستای نورد انجام گرفت. خواص ناهمسان‌گردی در جدول ۱ و خواص مکانیکی ورق در جدول ۲ آورده شده است. منحنی تنش-کرنش حقیقی در راستای نورد از رابطه لودوئیگ-هولومن مطابق معادله ۲ تقریب زده شد.

$$\sigma = 586.8 \varepsilon^{0.286} \text{MPa} \quad (2)$$

### ۲-۲- آزمایش‌های شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر بوسیله دستگاه ساخته‌شده در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد [19] (شکل ۴). این دستگاه دارای یک سازوکار سینماتیک موازی با دو محور است. حرکت خطی غیر برابر در امتداد این محورها، حرکت خطی و دورانی همزمان را برای دیسک مرکزی سازوکار که ایستگاه شکل‌دهی بر روی آن نصب شده است فراهم می‌کند. در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، حرکت غلتک‌ها باید کاملاً به صورت هماهنگ با حرکت ورق انجام‌گیرد. به دلیل تک ایستگاه بودن دستگاه، نیروی اصطکاک بین غلتک و ورق نمی‌تواند حرکت یکنواخت با سرعت ثابت را برای ورق تامین نماید. به همین دلیل دستگاه دارای یک سازوکار تغذیه ورق است که ورق را از فضای بین

جدول ۱) خواص ناهمسان‌گردی فولاد St12 با ضخامت ۱ میلی‌متر

ناهمسان‌گردی صفحه‌ای	ناهمسان‌گردی نرمال	ضرایب ناهمسان‌گردی
$(\Delta r)$	$\bar{r}$	(r)
۰/۲	۱/۳	۰ ۴۵ ۹۰
		۱/۳ ۱/۲ ۱/۵۵

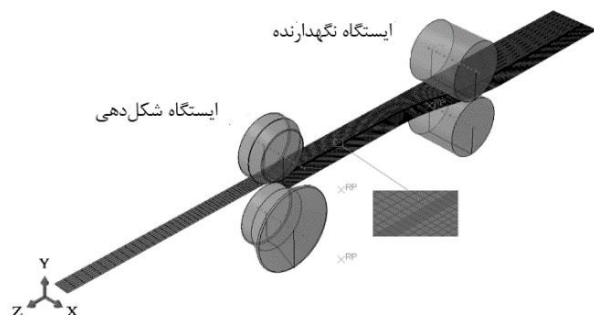
جدول ۲) خواص مکانیکی فولاد St12 با ضخامت ۱ میلی‌متر

ضریب کشسانی	استحکام تسلیم	استحکام کشش نهایی	افزایش طول قبل از شکست A (%)
E (GPa)	$\gamma$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	
۱۹۶/۵۳	۱۷۳/۲۷	۳۲۷/۶۸	۵۵/۲۶

آزمون کشش بدست آمده است، در نرم‌افزار تعریف شد. برای مدل‌سازی رفتار سخت‌شوندگی فلز، قانون کارسختی همسانگرد (Isotropic hardening rule) مورد استفاده قرار گرفت. معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل ۱۹۴۸ برای پیش‌بینی آغاز تغییرشکل مومسان بکار گرفته شد و ثوابت آن با استفاده ضرایب ناهمسان‌گردی به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی (جدول ۱) در نرم‌افزار تعریف شد.

به علت تغییرشکل ناچیز غلتک‌ها، آن‌ها به صورت صلب مدل شدند. در شکل ۷ نحوه قرارگیری ورق و غلتک‌ها و همچنین مش‌بندی ورق نشان‌دهنده شده‌است. به دلیل تقارن پروفیل مورد مطالعه، فقط نیمی از ورق و غلتک‌ها مدل شدند. وظیفه ایستگاه اول، نگهداری ورق است در حالی که 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. از لقی‌های موجود در سازوکارهای دستگاه و تغییرشکل الاستیک آنها تحت بار صرف نظر شد و بنابراین حرکت غلتک‌ها به صورت مطلوب در نرم‌افزار تعریف شد. تماس ورق با غلتک‌های ایستگاه‌های شکل‌دهی با مدل تماسی پنالتی و به کمک مدل اصطکاک کولمب و ضریب اصطکاک همسانگرد  $\mu=0.1$  [1,2,12,18] توصیف شد.

در این مقاله، دو رویکرد در شبیه‌سازی اجزای محدود دنبال شد. در رویکرد اول، مدل دقیقاً مطابق با آزمایش‌های تجربی بود. بنابراین جنس ورق فولاد St12 در نظر گرفته شد و خواص مکانیکی آن مطابق با نتایج آزمون کشش در نرم‌افزار آباکوس تعریف شد. از نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های این رویکرد جهت صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها و بررسی تغییرات طول تغییرشکل فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر استفاده شد. در رویکرد دوم برای بررسی اثر خواص مکانیکی و هندسه غلتک بر طول تغییرشکل، مقادیر مختلفی برای ضخامت ورق، تنش تسلیم و قطر غلتک در نظر گرفته شد. در رویکرد دوم هندسه پروفیل مشابه هندسه پروفیل در رویکرد اول است فقط به دلیل جلوگیری از چین‌خوردگی ورق بویژه در ضخامت‌های کم، طول بال ۱۰ میلی‌متر



شکل ۷) نمایی از موقعیت ورق و غلتک‌ها و همچنین نحوه مش‌بندی ورق در مدل اجزای محدود

به منظور برش ورق در اندازه‌های داده‌شده در جدول ۳، از برش لیزر استفاده شد. ورق برش داده شده در شکل ۶ (الف) نشان داده شده‌است. نوار باریک جلو ورق پیش بریده شده برای اتصال بخش اصلی ورق به گیره سازوکار تغذیه دستگاه است.

برای اندازه‌گیری کرنش از دستگاه اندازه‌گیری کرنش مدل TML DC-97 A، کرنش‌سنج مقاومتی TML FLA 5-11، پل وتسون و اسیلوسکوپ استفاده شد. کرنش اعمال شده در لبه بال پروفیل که باعث تغییر مقاومت در کرنش‌سنج می‌شود توسط پل وتسون به یک ولتاژ خروجی در محدوده میلی ولت تبدیل شد. این ولتاژ خروجی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری کرنش دریافت و توسط اسیلوسکوپ در رایانه نمایش داده شد. برای اینکه در ابتدا به ازای کرنش صفر، ولتاژ خروجی نیز صفر شود، بر روی پل وتسون کالیبراسیون انجام شد. در نهایت بر مبنای ولتاژ خروجی و با توجه به مشخصات کرنش‌سنج و پل وتسون، کرنش محاسبه شد.

در آزمایش‌های تجربی، کرنش‌سنج‌ها به فاصله ۲/۵ میلی‌متر از لبه در وسط بخش کششی و فشاری نصب شدند. به دلیل این‌که دستگاه اندازه‌گیری کرنش، فقط دارای یک کانال برای اتصال کرنش‌سنج بود، در هر آزمایش تنها یک کرنش‌سنج مورد استفاده قرار گرفت و برای اندازه‌گیری کرنش در بخش دیگر، آزمایش تکرار شد. برای اطمینان از دقت نتایج، اندازه‌گیری کرنش در هر بخش حداقل سه بار تکرار شد. به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به کرنش‌سنج در حین شکل‌دهی، غلتک بالایی در سمتی که کرنش‌سنج نصب می‌شود، ۱۰ میلی‌متر کوچک‌تر از بال پروفیل ساخته شده‌است. شکل ۶ (ب) پروفیل تولیدی با سطح مقطع متغیر را نشان می‌دهد.

### ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از حلگر استاتیک ضمنی نرم‌افزار آباکوس ۶/۱۴ استفاده شد. در این شبیه‌سازی، ورق به صورت کشسان-مومسان و با استفاده از المان پوسته چهارگره‌ای S4R مدل شد. منحنی تنش-کرنش در محدوده مومسان با استفاده از معادله ۲ که از



(الف)



(ب)

شکل ۶) الف- ورق پیش‌برش برای پروفیل هدف همراه با کرنش‌سنج نصب‌شده ب- پروفیل تولیدشده با سطح مقطع متغیر [13]

جدول ۴) مقادیر کمیت‌های هندسی پروفیل در رویکرد دوم

کمیت	نماد	اندازه
عرض کف بخش باریک	$W_1$	۷۰ میلی‌متر
عرض ناحیه انتقال	$W_T$	۳۵ میلی‌متر
طول بال	F	۲۰ میلی‌متر
زاویه شکل‌دهی	$\alpha$	۲۰ درجه
شعاع خط خم	R	۴۰۰ میلی‌متر

و زاویه شکل‌دهی ۱۰ درجه کمتر در نظر گرفته شد. اندازه کمیت‌های هندسی پروفیل در رویکرد دوم در جدول ۴ آورده شده است.

در جدول ۵ مشخصات هندسی غلتک و خواص مکانیکی ورق در رویکرد دوم آورده شده است. به هنگام بررسی هر پارامتر، سایر پارامترهای متغیر در سطح میانی در نظر گرفته شدند. همچنین در رویکرد دوم، کف پروفیل مقید شد تا از اثرگذاری تابیدگی کف پروفیل در ناحیه انتقال و خمش طولی بخش باریک بر طول تغییرشکل جلوگیری شود.

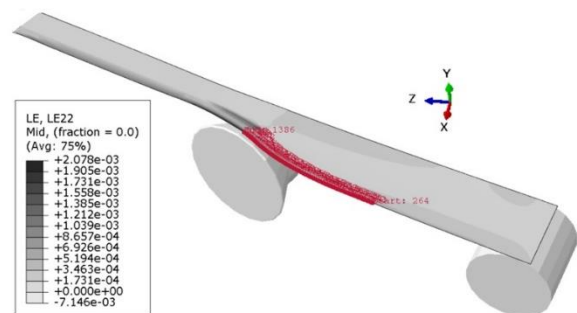
جهت اندازه‌گیری طول تغییرشکل به هنگام شکل‌دهی، وسط هر بخش مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری طول تغییرشکل در شبیه‌سازی اجزای محدود مراحل زیر به ترتیب انجام شد:

• در نظر گرفتن مسیری (Path) قبل از ایستگاه شکل‌دهی مطابق شکل ۸

• در نظر گرفتن کرنش طولی در لایه میانی بر روی آن مسیر  
• اندازه‌گیری فاصله گره‌ای که قبل از ایستگاه مقدار کرنش آن صفر می‌باشد تا گره‌ای که زیر ایستگاه شکل‌دهی قرار می‌گیرد.

جدول ۵) مشخصات هندسی غلتک و خواص مکانیکی ورق در رویکرد دوم

کمیت	پارامتر	اندازه
قطر غلتک	D	۱۵۰-۱۱۰-۷۰ میلی‌متر
ضخامت ورق	t	۱/۵-۱-۰/۵ میلی‌متر
ضریب پواسون	$\nu$	۰/۳
ضریب کشسانی	E	۲۰۰ گیگاپاسکال
تنش تسلیم	Y	۱۵۰-۴۰۰-۶۵۰ مگاپاسکال
توان کارسختی	n	۰/۲
ضریب استحکام	K	$E^n \gamma^{1-n}$



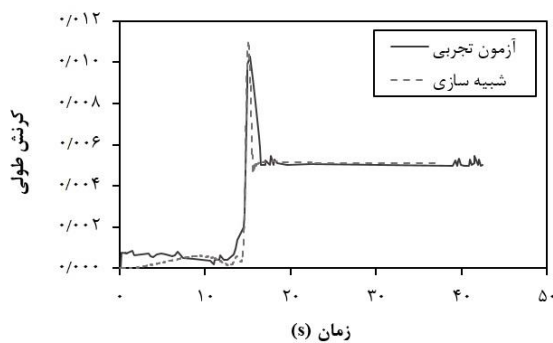
شکل ۸) نحوه انتخاب مسیر در شبیه‌سازی اجزای محدود برای بدست آوردن طول تغییرشکل

#### ۴- نتایج و بحث

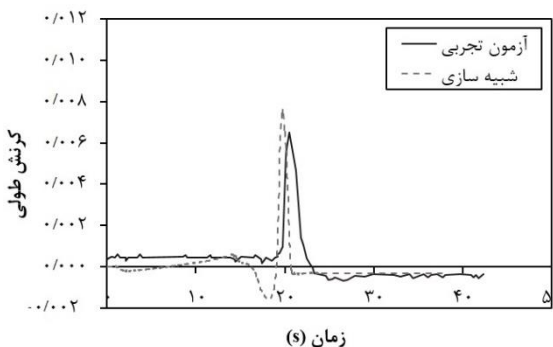
##### ۴-۱- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، کرنش طولی لبه اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود مورد مقایسه قرار گرفت. شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه تاریخچه کرنش طولی لبه ورق به ترتیب در وسط بخش‌های کششی و فشاری در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، با ورود ورق به ایستگاه شکل‌دهی، کرنش کششی زیادی در لبه ورق ایجاد می‌شود. اما پس از خروج 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. انطباق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی مشاهده می‌شود و فقط اختلاف کمی در پیک کرنش بویژه در بخش فشاری وجود دارد. این اختلاف می‌تواند به این دلیل باشد که حرکت غلتک‌ها در شبیه‌سازی‌ها ایده آل در نظر گرفته شده است در حالی که در آزمایش‌های تجربی ممکن است به دلیل لقی‌های اجزای مکانیکی ساز و کار نسبت به هم و یا تغییرشکل کشسان آن‌ها تحت بار، خطای بسیار کوچکی در حرکت غلتک‌ها ایجاد شود. بنابراین با توجه به اختلاف کم نتایج شبیه‌سازی و تجربی می‌توان به صحت نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود اطمینان کرد.



شکل ۹) مقایسه تاریخچه کرنش بدست‌آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی در بخش کششی



شکل ۱۰) مقایسه تاریخچه کرنش بدست‌آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش تجربی در بخش فشاری

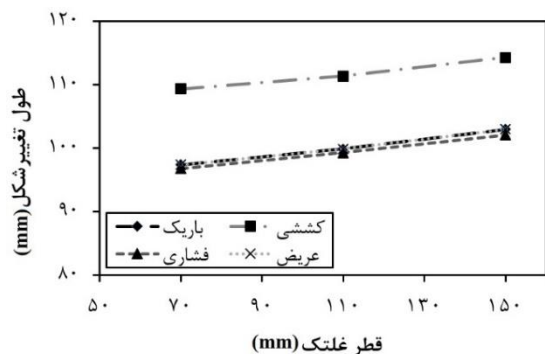
به هنگام تغییرشکل قبل از ایستگاه، همواره لبه بال ورق تحت کشش و خمش همزمان قرار می‌گیرد<sup>[19]</sup>. حال هرچه میزان این تغییرشکل افزایش یابد، طول تغییرشکل نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این که در بخش کششی، ورق تحت کشش مضاعف قرار می‌گیرد، کرنش در این بخش در مقایسه با سایر بخش‌ها بیشتر می‌باشد و همچنین بیشترین طول تغییرشکل در این بخش رخ می‌دهد. به دلیل هندسه مشابه بال در بخش عریض و باریک و در نتیجه تغییرشکل مشابه آن‌ها، طول تغییرشکل یکسانی در این دو بخش به دست آمد.

#### ۳-۴- اثر قطر غلتک (D) بر طول تغییرشکل

در شکل ۱۳ اثر قطر غلتک بر طول تغییرشکل به هنگام شکل‌دهی وسط هر چهار بخش پروفیل با سطح مقطع متغیر نشان داده شده است.

مطابق شکل ۱۳، با افزایش قطر غلتک از ۷۰ به ۱۵۰ میلی‌متر، طول تغییرشکل در بخش باریک، فشاری و عریض ۶٪ و در بخش کششی ۵٪ افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ تفاوت تماس ورق با غلتک با افزایش قطر را نشان می‌دهد. تغییرشکل ورق دارای دو بخش بارگذاری و باربرداری است که در بخش بارگذاری دو وضعیت تماسی و غیرتماسی وجود دارد. در وضعیت غیرتماسی، لبه ورق در حالی که در تماس با غلتک قرار ندارد همزمان تحت کشش و خمش قرار می‌گیرد با این تفاوت که در وضعیت تماسی، خمش طولی به صورت موضعی بر لبه بال ورق اعمال می‌گردد و سبب تغییر شکل‌های ناگهانی آن می‌شود<sup>[19]</sup>. بعد از اینکه ورق از فضای بین دو غلتک عبور کرد، باربرداری صورت می‌گیرد. در این بخش خمش معکوس در لبه بال اعمال می‌شود و در نتیجه از میزان کرنش‌های اعمال شده کاسته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با افزایش قطر غلتک به دلیل اینکه ورق زودتر با غلتک تماس پیدا می‌کند یا به عبارت دیگر سطح تماس غلتک و ورق افزایش می‌یابد (افزایش ناحیه تماسی در مرحله بارگذاری)، تغییرشکل زودتر در ورق آغاز می‌شود که افزایش طول تغییرشکل را سبب می‌شود.

شکل ۱۵ تغییرات کرنش طولی روی مسیری مطابق با شکل ۸ به

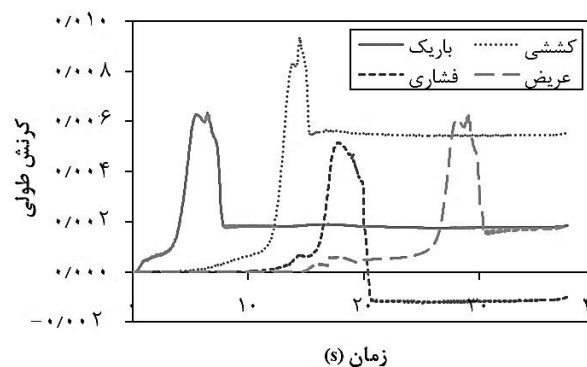


شکل ۱۳ اثر قطر غلتک بر طول تغییرشکل به هنگام شکل‌دهی وسط بخش‌های باریک، کششی، فشاری و عریض

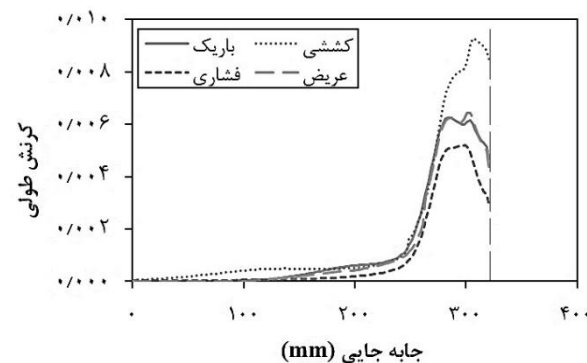
#### ۲-۴- تغییرات طول تغییرشکل در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

شکل ۱۱ تاریخچه کرنش طولی لبه ورق در وسط بخش باریک، کششی، فشاری و عریض را نشان می‌دهد. کرنش طولی بیشینه و کرنش پسماند در بخش کششی بیشترین و در بخش فشاری کمترین مقادیر را دارند. در حالی که کرنش در بخش باریک و عریض برابر است. اختلاف‌های موجود در مقادیر کرنش طولی، نتیجه تفاوت در هندسه بال پروفیل در این بخش‌ها است که در بخش کششی مقعر، در بخش فشاری محدب و در بخش‌های باریک و عریض به صورت تخت است. به علت هندسه بال، طول لبه بال در بخش کششی کمتر و در بخش فشاری بیشتر از طول خط خم در این بخش‌ها است به همین دلیل با تغییرشکل بال به ترتیب این دو ناحیه تحت کشش و فشار قرار می‌گیرند و کرنش‌های باقیمانده مثبت و منفی در آن‌ها ایجاد می‌شود.

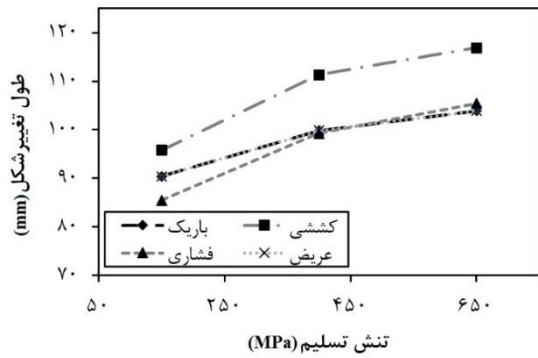
شکل ۱۲ تغییرات کرنش طولی بر روی مسیری در لبه ورق به هنگام شکل‌دهی وسط بخش‌های باریک، کششی، فشاری و عریض را نشان می‌دهد. مسیر مطابق با شکل ۸ تعریف شده است. بر مبنای این نتایج، طول تغییرشکل در بخش کششی ۳۱۱/۰۲ میلی‌متر، در بخش باریک و عریض ۱۹۲/۵۲ میلی‌متر و در بخش فشاری نیز ۱۶۱/۸۵ میلی‌متر به دست آمد.



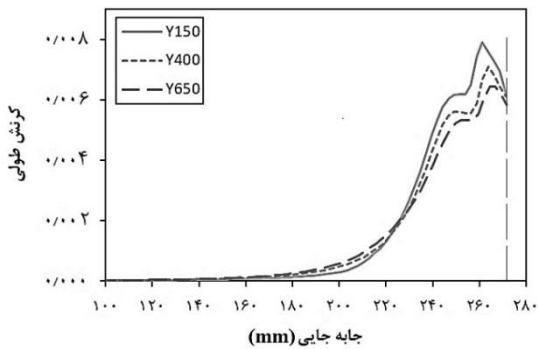
شکل ۱۱ مقایسه کرنش طولی در لایه میانی در وسط بخش‌های باریک، کششی، فشاری و عریض در شبیه‌سازی انجام شده مطابق با آزمایش تجربی



شکل ۱۲ تغییرات کرنش طولی بر روی مسیری در لبه ورق (مطابق شکل ۸) به هنگام شکل‌دهی وسط بخش‌های باریک، کششی، فشاری و عریض در شبیه‌سازی انجام شده مطابق با آزمایش تجربی (خط‌چین: موقعیت مقطع مرکزی غلتک‌ها)



شکل ۱۶) اثر تنش تسلیم بر طول تغییرشکل به هنگام شکل‌دهی وسط بخش‌های باریک، کششی، فشاری و عریض

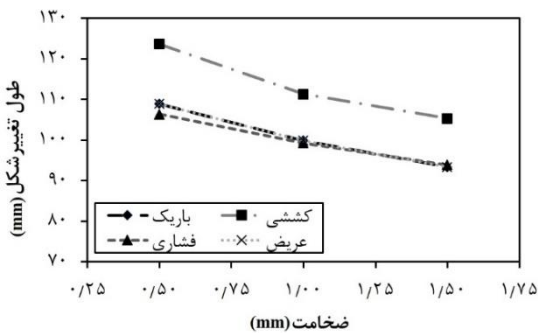


شکل ۱۷) اثر تنش تسلیم بر کرنش طولی بر روی مسیری در لبه ورق به هنگام شکل‌دهی وسط بخش کششی

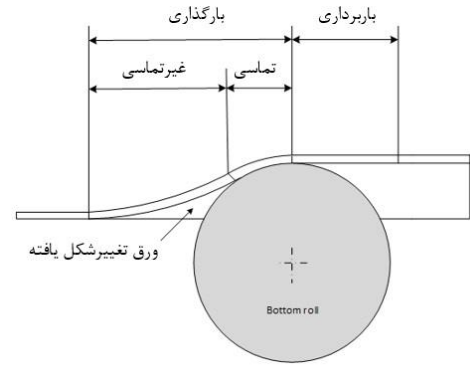
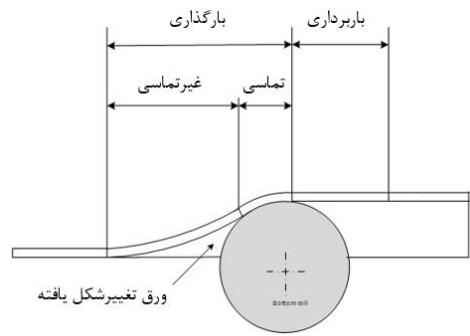
می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ناحیه تماسی به علت افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل با افزایش تنش تسلیم، میزان کرنش طولی در این ناحیه کاهش می‌یابد. در حالی که این افزایش مقاومت به تغییرشکل در ناحیه تماسی، سبب کشیده شدن بیشتر ورق در ناحیه غیرتماسی شده و در نتیجه سبب افزایش میزان کرنش در این ناحیه می‌شود. به همین دلیل است که طول تغییرشکل در هر چهار بخش پروفیل با افزایش تنش تسلیم بیشتر می‌شود.

#### ۴-۵- اثر ضخامت ورق (t) بر طول تغییرشکل

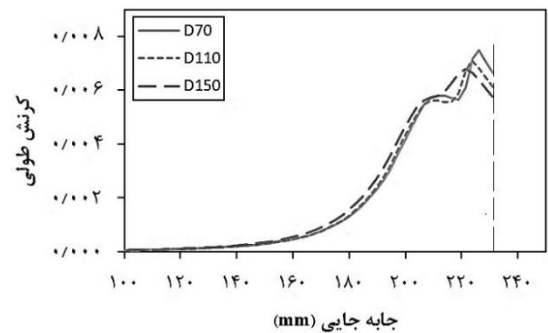
شکل ۱۸ اثر ضخامت ورق بر طول تغییرشکل وقتی که وسط بخش‌های مختلف پروفیل با سطح مقطع متغیر شکل‌دهی می‌شوند را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸) اثر ضخامت ورق بر طول تغییرشکل به هنگام شکل‌دهی وسط بخش‌های باریک، کششی، فشاری و عریض



شکل ۱۴) اثر قطر غلتک بر نحوه تماس ورق و غلتک



شکل ۱۵) اثر قطر غلتک بر کرنش طولی بر روی مسیری در لبه ورق به هنگام شکل‌دهی وسط بخش کششی

هنگام شکل‌دهی بخش کششی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش قطر غلتک بیشینه کرنش طولی زودتر رخ می‌دهد که این موضوع بیانگر تماس زودتر ورق با غلتک در قطرهای بزرگتر است. به‌هرحال با افزایش قطر غلتک، به دلیل افزایش شعاع تماس و توزیع کرنش در بخش بزرگتری از ورق، تغییرشکل یکنواخت‌تر شده و بیشینه کرنش طولی کاهش می‌یابد.

#### ۴-۴- اثر تنش تسلیم (Y) بر طول تغییرشکل

در شکل ۱۶ اثر تنش تسلیم ورق بر طول تغییرشکل به هنگام شکل‌دهی وسط چهار بخش باریک، کششی، فشاری و عریض نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، با افزایش تنش تسلیم در هر چهار بخش، طول تغییرشکل در بخش باریک ۱۳٪، در بخش کششی ۱۸٪، در بخش فشاری ۱۹٪ و در بخش عریض ۱۳٪ افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱۷ کرنش طولی در لبه بال ورق را در وسط بخش کششی به ازای سه تنش تسلیم متفاوت نشان



دلیل افزایش طول تغییرشکل با افزایش تنش تسلیم، افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل در ناحیه تماسی است که منجر به بیشتر شدن کشش در ناحیه غیرتماسی می‌شود.

۳- با افزایش ضخامت ورق از ۰/۵ میلی‌متر تا ۱/۵ میلی‌متر، طول تغییرشکل در بخش باریک ۱۴٪، در بخش کششی ۱۵٪، در بخش فشاری ۱۲٪ و در بخش عریض ۱۴٪ کاهش پیدا می‌کند. زیرا با افزایش ضخامت ورق، تغییرشکل در ناحیه تماسی افزایش می‌یابد در حالی که مقاومت در برابر تغییرشکل در ناحیه غیرتماسی افزایش می‌یابد که سبب می‌شود تغییرشکل در بال پروفیل دیرتر شروع شود.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تأییدیه اخلاقی:** نتایج علمی بیان شده حاصل فعالیت‌های پژوهشگران مقاله بوده و تاکنون در مجله دیگری چاپ نگردیده است؛ همچنین صحت نتایج بر عهده نویسندگان مقاله می‌باشد.

**تعارض منافع:** نویسندگان مقاله اعلام می‌دارند که مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافی با اشخاص و سازمان‌ها ندارد.

**سهم نویسندگان:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**منابع مالی:** تمامی هزینه‌ها توسط دانشگاه تربیت مدرس تأمین گردیده است.

#### منابع

- 1-Kasaei MM, Naeini HM, Abbaszadeh B, Silva MB, Martins PA. Flexible roll forming. In Materials Forming and Machining. Woodhead Publishing, 2015; (pp. 51-71).
- 2- Kasaei MM, Naeini HM, Liaghat GH, Silva CM, Silva MB, Martins PA. Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2015; 50(7):528-41.
- 3- Salmani Tehrani M, Bahrami M. Analytical and Numerical Investigation of Deformation Length in Round Tube Roll Forming. Journal of Assembly Mechanical Engineering Research. 2010; 3(2):25-35 (In Persian).
- 4- Halmos GT. Roll forming handbook. Published in 2006.
- 5- Bhattacharyya D, Smith PD, Yee CH, Collins IF. The prediction of deformation length in cold roll-forming. journal of mechanical working technology. 1984; 9(2):181-91.
- 6-Bhattacharyya D, Smith PD, Thadakamalla SK, Collins IF. The prediction of roll load in cold roll-forming. Journal of Mechanical Working Technology. 1987;14(3):363-379.
- 7- Panton SM, Duncan J, Zhu S. Longitudinal and shear strain development in cold roll forming. Journal of materials processing technology. 1996;60(1-4):219-224.
- 8- Azizi Tafti R, Moslemi Naeini H, Salmani Tehrani M, Kasaei MM. Theoretical solution of linear hardening elastic-plastic deformation length for a roll formed channel. Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics. 2013;24(1):19-32 (In persian).

همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت ورق، طول تغییرشکل در هر چهار بخش کاهش می‌یابد که میزان آن در بخش باریک ۱۴٪، در بخش کششی ۱۵٪، در بخش فشاری ۱۲٪ و در بخش عریض ۱۴٪ است. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت ورق، میزان کرنش طولی در لبه بال ورق در ناحیه تماسی افزایش می‌یابد زیرا ورق در این ناحیه، بیشتر تحت تغییرشکل خمشی قرار می‌گیرد که در این نوع تغییرشکل با افزایش ضخامت، کرنش افزایش می‌یابد. این در حالی است که به علت غالب بودن تغییرشکل کششی در ناحیه غیر تماسی، ورق با ضخامت بیشتر به علت مقاومت بیشتر در برابر تغییرشکل، دیرتر و کمتر دچار تغییرشکل می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

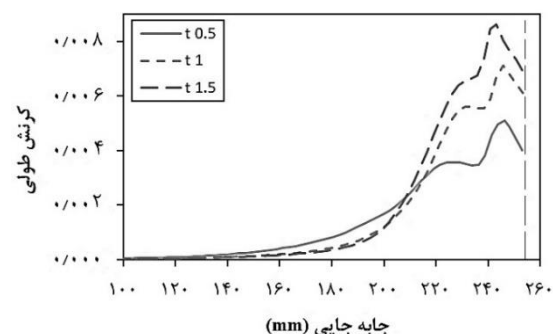
در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی، تغییرات کرنش طولی و طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد:

۱- به علت هندسه مقعر بال پروفیل در بخش کششی، بیشینه کرنش طولی و همچنین بیشینه کرنش طولی باقیمانده در بخش کششی روی می‌دهد و به همین دلیل طول تغییرشکل در این بخش از سایر بخش‌های پروفیل کانالی با سطح مقطع متغیر بیشتر است.

۲- به علت هندسه مشابه بال در بخش باریک و عریض، تغییرات کرنش طولی در لبه ورق در این دو بخش مشابه است و در نتیجه طول تغییرشکل در این دو بخش یکسان است.

۳- با افزایش قطر غلتک از ۷۰ میلی‌متر به ۱۵۰ میلی‌متر، طول تغییرشکل در بخش باریک، فشاری و عریض ۶٪ و در بخش کششی ۵٪ افزایش می‌یابد زیرا با افزایش قطر غلتک، ورق زودتر با غلتک تماس پیدا می‌کند و بنابراین تغییرشکل در بال پروفیل زودتر آغاز می‌شود.

۳- با افزایش تنش تسلیم از ۱۵۰ تا ۶۵۰ مگاپاسکال، طول تغییرشکل در بخش باریک ۱۳٪، در بخش کششی ۱۸٪، در بخش فشاری ۱۹٪ و در بخش عریض ۱۳٪ افزایش پیدا می‌کند.



**شکل ۱۹** اثر ضخامت ورق بر کرنش طولی بر روی مسیری در لبه ورق به هنگام شکل‌دهی وسط بخش کششی

- 9- Kasaei MM, Moslemi Naeini H, Abbaszadeh B, Mohammadi M, Ghodsi M, Kiuchi M, et al. Flange wrinkling in flexible roll forming process. *Procedia Engineering*. 2014; 81:245-250.
- 10- Abbaszadeh B, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Mohammadi M, Salmani Tehrani M. Investigation of the effect of roll diameter on product geometry in flexible roll forming process. *Iran International Annual Conference on Mechanical Engineering*. 2014(In Persian).
- 11-Mohammadi M, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Salmani Tehrani M, Abbaszadeh B. Investigation of web warping defect of profiles with variable cross-section in flexible roll forming process. *Journal of Modares Mechanical Engineering*. 2017;14(6):72-80 (In Persian).
- 12-Rezaei R, Moslemi Naeini H, Kasaei MM, Mohammadi M, Abbaszadeh B. Effect of bend curve on web warping in flexible roll formed profiles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;93(9):3625-3636.
- 13-Rezaei R, Moslemi Naeini H, Azizi Tafti R, Kasaei MM, Abbaszadeh B, Mohammadi M. An investigation on bend curve in the transition zone on web warping of channels with variable width in the flexible roll forming process. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2017;48(4):423-434 (In Persian).
- 14- Dadgar Asl Y, Sheikhi M, Pourkamali Anaraki A, PanahizadehV, Hoseinpour Gollo M. Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;91(5):1481-1492.
- 15- Zhang Y, Kim DH, Jung DW. Spring-back of flexible roll forming bending process. In *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015;103(1):12-29.
- 16- Woo YY, Han SW, Hwang TW, Park JY, Moon YH. Characterization of the longitudinal bow during flexible roll forming of steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018; 252:782-794.
- 17- Woo YY, Oh Y, Hwang TW, Moon YH. Analysis of shape defects during flexible roll forming of steel/aluminum double-layered blanks. *International Journal of Material Forming*. 2019;13(6): 861-872.
- 18- Kasaei MM. Analytical, numerical and experimental investigation of wrinkling in flexible roll forming of variable cross-sectional channel profiles. PhD diss. 2016 (In Persian).
- 19- Kasaei MM, Moslemi Naeini H, Abbaszadeh B, Roohi AH, Silva MB, Martins PAF. On the prediction of wrinkling in flexible roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;113(7):2257-2275.