



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۴۲۲ تا ۴۳۵
Vol. 48, No. 4, Winter 2016, pp. 423-435



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک

AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
ASJR-ME

بررسی اثر تغییر منحنی خم در ناحیه انتقال بر عیب تابیدگی کف برای کانال‌های با سطح مقطع متغیر در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

رضا رضایی^۱، حسن مسلمی ناائینی^۲، روح‌الله عزیزی تفتی^۳، محمدمهدی کسائی^۴، بهنام عباس‌زاده^۴، مهران محمدی^۴

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۸ پذیرش: ۱۳۹۴/۹/۳۰)

چکیده

شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، فرایند جدیدی برای تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر است. در مقاله پیش‌رو، اثر تغییر منحنی خم در ناحیه انتقال بر عیب تابیدگی کف پروفیل‌ها مطالعه شده است. در این‌رو با توجه به نیروهای همدوسی در ناحیه انتقال، اثر پنج نوع منحنی مختلف سازگار با این شروط در ناحیه انتقال با معادلات دایره‌ای، چندجمله‌ای‌ها تا درجه پنج بر روی این عیب به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج اجزای محدود نشان داد که هر چه مقدار کرنش متوسط ایجادشده در لبه بال از کرنش مطلوب کمتر باشد عیب تابیدگی ناحیه کف افزایش خواهد یافت. کمترین مقدار عیب تابیدگی در محصول با منحنی خم چندجمله‌ای درجه چهار و بیشترین مقدار تابیدگی در محصول با منحنی خم دایره‌ای در ناحیه انتقال رخ داده است. برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، نمونه با منحنی خم دایره‌ای به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته و تاریخچه کرنش و عیب تابیدگی اندازه‌گیری شد. انطباق خوب نتایج آزمایش تجربی با شبیه‌سازی اجزای محدود درستی مدل اجزای محدود مورد استفاده را تأیید کرد.

کلمات کلیدی:

شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، پروفیل با سطح مقطع متغیر، تابیدگی ناحیه کف پروفیل، تغییر منحنی خم.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

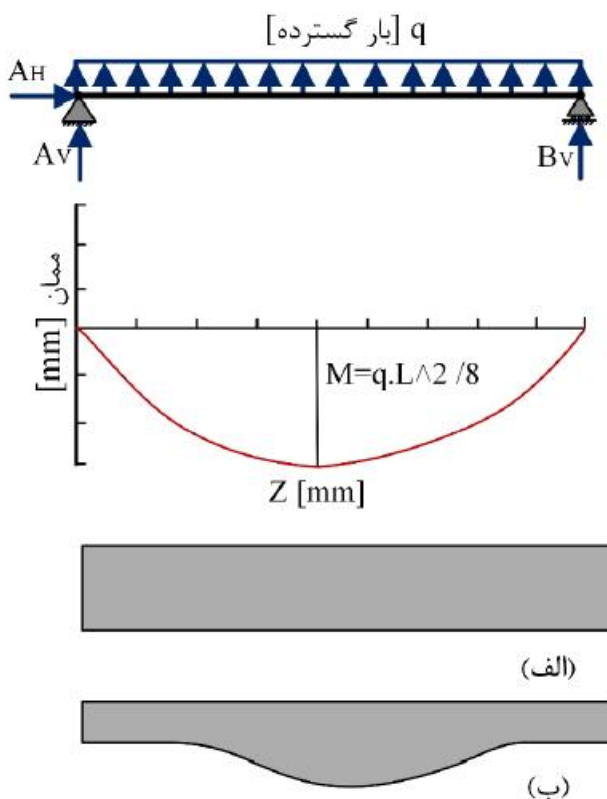
Rezaei, R., Moslemi Naeini, H., Azizi Tafti, R., Kasaei, M. M., Abbaszadeh, B., and Mohammadi, M., 2017. "An Investigation on Bend Curve in the Transition Zone on Web Warping of Channels with Variable Width in the Flexible Roll Forming Process". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(4), pp. 423-436.

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: moslemi@modares.ac.ir

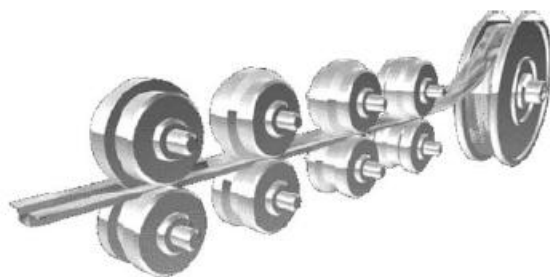


۱- مقدمه

انحراف هندسی بین ورق اولیه و ورق شکل داده شده در ناحیه انتقال رخ می‌دهد عیب تابیدگی ناحیه کف در ناحیه انتقال است. اگر کرنش‌ها در بال پروفیل به صورت مناسب ایجاد شود پروفیل مطابق شکل 5-الف سالم تولید خواهد شد و اگر کرنش‌ها در بال پروفیل به صورت مناسب ایجاد نشود، کف پروفیل مطابق شکل 5-ب دچار فرورفتگی و نوسازی می‌شود. بیشترین مقدار اختلاف بین برآمدگی و فرورفتگی را تابیدگی ناحیه کف گویند.



شکل ۱: بهینه‌سازی پروفیل



شکل ۲: فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد [۴]

گروچ و همکارانش [7] یک ایستگاه شکل‌دهی انعطاف‌پذیر را روی یک خط شکل‌دهی غلتکی سنتی سوار کردند. آن‌ها به صورت عددی و تجربی نشان دادند که برای به دست آوردن دقت و کیفیت مناسب، حرکت‌های خطی و دورانی غلتک‌های شکل‌دهی باید به گونه‌ای طراحی و کنترل شوند که غلتک‌ها همواره بر منحنی خم عمود باشند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر که توجه بسیاری از محققان صنایع مختلف به ویژه صنعت خودروسازی را به خود جلب کرده، حفظ منابع طبیعی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی است. یکی از راه‌های دستیابی به این اهداف، کاستن از وزن خودروها و به دنبال آن، کاهش مصرف سوخت و آلایندگی‌های محیطی است. تغییر در هندسه پروفیل‌های قطعات و بهینه‌سازی آن‌ها یکی از راه‌های مناسب برای کاهش وزن خودروها است. قطعات مهم مانند سپر و ستون کنار درب خودرو را می‌توان طوری طراحی کرد که نقاطی که نیرو و گشتاور خمشی بیشتری را تحمل می‌کنند دارای سطح مقطع بزرگتری نسبت به نقاط دیگر باشند. بنابراین پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر اهمیت می‌یابند. بر اساس بار و گشتاور وارده، سطح مقطع نشان داده شده در شکل 1-الف را به صورت شکل 1-ب می‌توان کاهش داد و بهینه کرد.

امروزه، فرایندهای پرس‌کاری، کشش عمیق، هیدروفرمینگ و شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر برای تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر به کل می‌روند که در این میان، فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به علت هزینه کم ساخت ابزار و قالب، تیراژ تولید بالا و هزینه کم تعمیر و نگهداری نسبت به فرایندهای دیگر مقرون به صرفه‌تر بوده و مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [3].

با توجه به استاندارد DIN8586، شکل‌دهی غلتکی یک فن‌آوری خم‌کاری با حرکت دورانی غلتک‌ها است که در آن نوار ورق فلزی از بین غلتک‌های چند ایستگاه متوالی عبور کرده و محصول‌هایی با سطح مقطع‌های مختلف تولید می‌شوند (شکل 2) [4]. از جمله محصولات این فرایند می‌توان به مصالح ساختمانی فلزی، اجزای ساختمان هواپیما، بدنه خودروها و لوله‌های نفت اشاره کرد [5]. برخلاف فرایند نورد که ضخامت را کاهش می‌دهد، در فرایند شکل‌دهی غلتکی ضخامت ورق ثابت می‌ماند [4].

یکی از محدودیت‌های شکل‌دهی غلتکی سرد این است که تنها محصول‌های با سطح مقطع ثابت در طول را می‌توان با این فرایند تولید کرد. در سال‌های اخیر، نسل جدیدی از این فرایند به نام شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به منظور تولید محصولات با مقاطع متغیر در طول توسعه داده شده است که در شکل 3 نمونه‌ای از یک دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به صورت طرح‌واره قابل مشاهده است. در این دستگاه علاوه بر اینکه غلتک‌ها حول محورشان (X) حرکت دورانی دارند، در راستای محور X حرکت خطی و حول محور Y حرکت دورانی نیز دارند. کنترل این حرکت‌ها با سیستم کنترل عددی صورت می‌گیرد. پروفیل‌هایی از خانواده پروفیل‌های نشان داده شده در شکل 4 که پروفیل‌های با عرض متغیر نامیده می‌شوند را می‌توان در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر تولید کرد. ناحیه‌ای که تغییر عرض در آن صورت می‌گیرد ناحیه انتقال نامیده می‌شود.

یکی از عیوب مهمی که در پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر به دلیل

گزارش دادند که لبه بال در ناحیه انتقال تحت کشش و فشار قرار می‌گیرد و در صورت افزایش ارتفاع بال امکان کماتش و اعوجاج لبه بال بیشتر می‌شود.

برنر و همکارانش [10] مطالعات تجربی و عددی را به منظور لوک اثر ورق گیر بر روی تابیدگی ناحیه کف پروفیل از جنس فولاد ZStE340 انجام دادند و دریافتند که استفاده ورق گیر باعث کاهش تابیدگی ناحیه کف پروفیل می‌شود.

استفاده از ورق گیر نیز با معایی مانند ایجاد خمش بر روی ناحیه کف پروفیل و همچنین محدودیت فضا در قرارگیری ورق گیر در بین ایستگاه‌ها و افزایش طول خط شکل‌دهی همراه است [11].

از دیگر معایب استفاده از ورق گیر می‌توان به پیچیده بودن سازوکار آن اشاره کرد به طوری که تولیدکنندگان قطعات¹ را لو مقوون بصرفه بودن استفاده از آن دچار تردید کرده است [11].

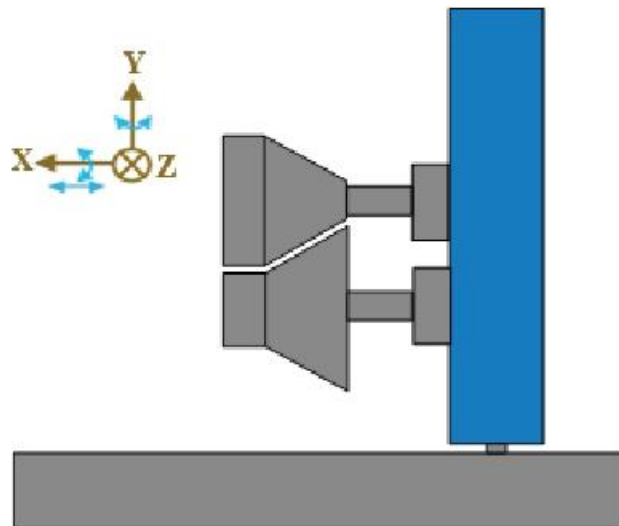
عباسزاده [1] با معرفی کمیتی به نام انحراف از موقعیت مطلوب لبه بال، روشی را برای طراحی پروفیل غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ارائه کرد. او با بررسی‌های عددی و تجربی دریافت که افزایش زاویه و قطر غلتک‌ها عیب انحراف از موقعیت مطلوب لبه بال را افزایش می‌دهد.

محمدی [2] بصورت عددی و تجربی به بررسی اثر لندله پهنای بال، زاویه شکل‌دهی، شعاع ناحیه انتقال و جنس ورق روی عیب تابیدگی کف محصول‌های عرض متغیر پرداخت. او به این نتیجه رسید که افزایش اندازه بال، افزایش زاویه شکل‌دهی، کاهش شعاع ناحیه انتقال و افزایش استحکام تسلیم عیب تابیدگی را افزایش می‌دهد.

کسایی و همکاران [12] به صورت عددی چین‌خوردگی لبه بال را بررسی کردند و دریافتند که زمانی که کرنش طولی فشاری از کرنش فشاری بحرانی برای کماتش بیشتر شود در لبه بال چین‌خوردگی رخ خواهد داد. آنها به صورت تحلیلی کرنش طولی فشاری مطلوب را محاسبه کردند.

پارک و همکارانش [13] به صورت عددی و تجربی عیب تابیدگی را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای کاهش این عیب فرایند جدیدی به نام شکل‌دهی مقاومتی افزایشی (ICF) را پیشنهاد دادند. آنها توزیع کرنش طولی در بال پروفیل را با ترکیب پارامترهای شکل‌دهی و پارامترهای ICF کنترل کردند. آنها فهمیدند که با افزایش کرنش طولی در قسمت‌های محدب و مقعر می‌توان عیب تابیدگی را کاهش داد.

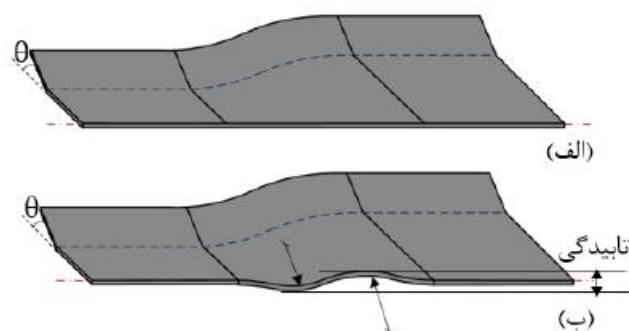
ژیا او و همکارانش [14] برای پیش‌بینی تابیدگی کف و کرنش طولی در پروفیل با سطح مقطع متغیر، مدلی تحلیلی ارائه کردند. آنها در این مدل، از جنس صرف‌نظر کرده و ارتباط بین تابیدگی کف و کرنش طولی را خطی فرض کردند به طوری که با زیاد شدن هر کدام دیگری کاهش می‌یافت. آنها همچنین نتایج تحلیل را با نتایج عددی اعتبارسنجی کردند.



شکل ۳: طرح‌واره دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر



شکل ۴: شکل ۴ پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر [۵]



شکل ۵: پروفیل (الف) بدون عیب و (ب) با عیب تابیدگی

لارانزا و همکارانش [8] به بررسی تجربی اثر گرمایش موضعی فولادهای استحکام بالا بر تابیدگی کف پروفیل با سطح مقطع متغیر پرداختند. آنها دمای بهینه را برای تولید پروفیل با کمترین میزان تابیدگی کف پیشنهاد دادند.

آنا و همکارانش [9] مطالعاتی را به صورت تجربی بر روی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر انجام دادند و دریافتند که میزان حرکت غلتک‌ها به نرخ تغذیه ورق در خط تولید بستگی دارد. آنها همچنین

1 Original Equipment Manufacturer (OEM)

$$x(0) = 0 \quad (1)$$

$$x'(0) = \left. \frac{dx}{dz} \right|_{z=0} = 0 \quad (2)$$

$$x(117.02) = 17.5 \quad (3)$$

$$x''(117.02) = \left. \frac{d^2x}{dz^2} \right|_{z=117.02} = 0 \quad (4)$$

$$x(234.04) = 35 \quad (5)$$

$$x'(234.04) = \left. \frac{dx}{dz} \right|_{z=234.04} = 0 \quad (6)$$

جدول ۱: مقدار کمیت‌های هندسی محصول

پارامترها	نظریات (mm)
طول قسمت باریک (L_s)	250
طول قسمت عریض (L_w)	250
طول ناحیه انتقال (L_t)	234/04
عرض کانال قسمت باریک ($2WS$)	70
عرض کانال در قسمت عریض ($2WW$)	140
نظریات بال (F)	30
ضخامت (t)	1

معادله پلسمتری منحنی خم دایره‌ای بصورت رابطه (7) است. با تغییر تقریب معادله قیمت نوسان تغییر می‌کند. معادله قیمت نوسان رابطه (8) به دست می‌آید. شش مجهول با استفاده از شرط‌های مرزی (1) تا (6) به صورت حل شش معادله و شش مجهول به دست می‌آیند.

$$(x(z) - a)^2 + (z - b)^2 = c^2 \quad (7)$$

$$(x(z) - d)^2 + (z - e)^2 = f^2 \quad (8)$$

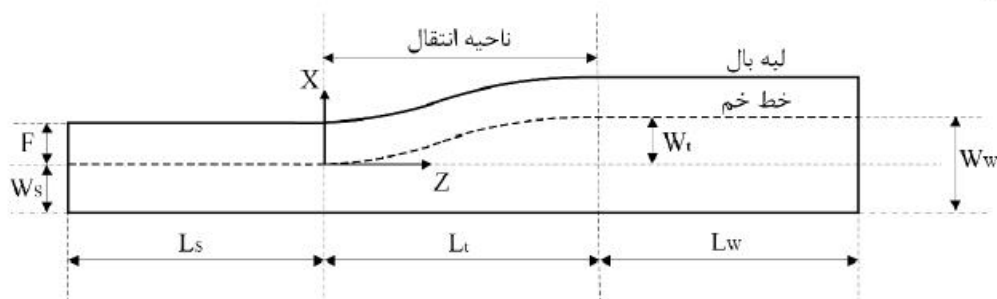
معادله پلسمتری منحنی خم با معادله چندجمله‌ای نوجه نو بصورت رابطه (9) است. این معادله با استفاده از شروط مرزی (1) تا (3) به دست می‌آید. با تغییر تقریب، معادله قسمت دوم تغییر می‌کند و معادله قسمت دوم

ژو و همکاران [15] به صورت تحلیلی و تجربی کرنش طولی را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که هنگامی که ارتفاع جانبی بال یا پهنای بال طی فرایند کاهش می‌یابد زاویه شکل‌دهی در ایستگاه آخر نیز باید کاهش یابد و هنگامی که ارتفاع جانبی بال یا پهنای بال طی فرایند افزایش می‌یابد زاویه شکل‌دهی در ایستگاه اول باید کاهش یابد. کسائی و همکاران [18] با شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمون تجربی روش جدیدی از مکانیک تغییر شکل را در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ارائه کردند و آزمونی برای پیش‌بینی چین‌خوردگی پیشنهاد دادند.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داد که تاکنون منحنی خم در ناحیه انتقال به صورت دو کمان دایره‌ای مماس بر هم در نظر گرفته شده و تأثیر تغییر شعاع قوس‌های دایره‌ای بر روی کاهش مقدار عیب تابیدگی کف نیز بررسی شده است. از طرفی برای کاهش عیب تابیدگی از روش‌های گرمایش و نصب ورق‌گیر نیز استفاده شده است که این موضوع باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود. در این پژوهش بدون پرداخت هزینه‌های اضافی و با طراحی بهتر، عیب تابیدگی کاهش داده شد. برای این کار بررسی تأثیر تغییر منحنی خم روی عیب تابیدگی کف محصول ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، برای طراحی هندسه ناحیه انتقال، چون لبه بال و لبسته به منحنی خم است، منحنی‌های خم مختلف سرگل با شرایط مرزی ناحیه انتقال محاسبه شدند و تأثیر آن‌ها بر روی عیب تابیدگی کف به دو صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت (شکل 6). نو این پژوهش همچنین روی بی‌بندیت آمد تا غلتک‌ها برای شکل‌دهی صحیح، تحت کنترل دقیق قرار گیرند که بتوانند هر مسیری از منحنی خم را به صورت دقیق طی کنند. البته این در صورتی ممکن می‌شود که معادله منحنی خم مشخص باشد.

۲- هندسه محصول مورد مطالعه

محصول هدف در این مقاله کانالی U شکل با عرض متغیر است که به دلیل تقارن طولی، نیمی از ورق اولیه از پیش بریده شده در شکل 6 نشان داده شده است. و جدول 1 اندازه‌های ورق اولیه داده شده است. با توجه به هندسه ناحیه انتقال، شش شرط مرزی شامل مختصات و شیب در نقاط ابتدا و انتها، مختصات و تغییر تقریب در نقطه عطف را می‌توان نو نظر گرفت (رابطه‌های (1) تا (6)) و معادلات سازگار با این شرایط را توسعه داد:



شکل ۶: مشخصات هندسی ورق از پیش بریده شده

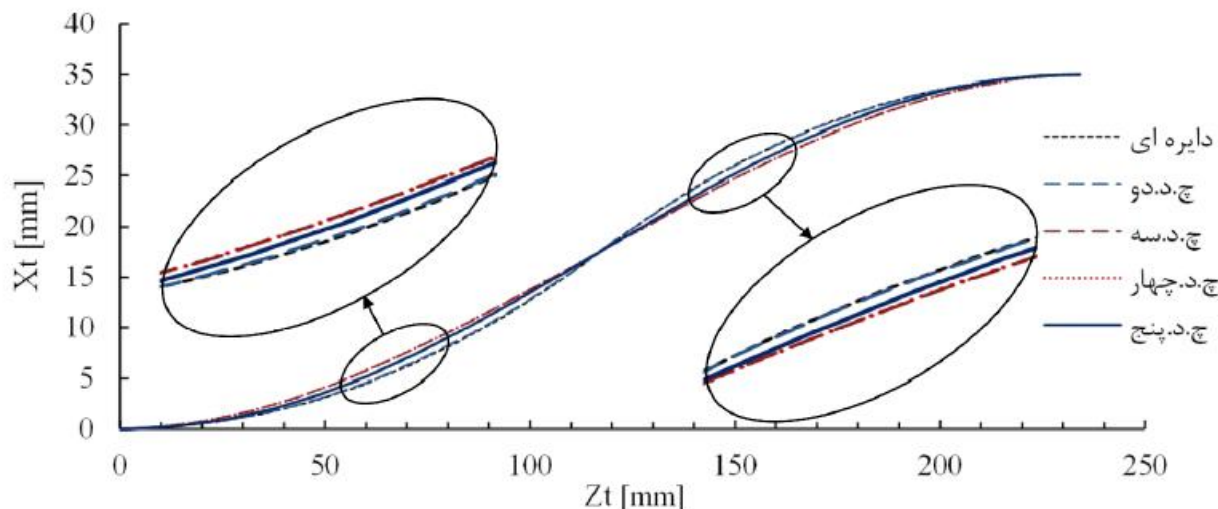
بیان می‌کند. با استفاده از شش شرط بالا ضرایب به دست می‌آیند:

$$x(z) = az^5 + bz^4 + cz^3 + dz^2 + ez + f \quad (13)$$

ضرایب معادلات پارامتری (7) تا (13) با استفاده از شوط‌های به دست آمده لوجنول 2 خاصه شده‌اند. منحنی‌های خم با توجه به معادلات فوق به صورت شکل 7 خواهند بود.

۳- آزمایش‌های تجربی

به منظور صحت سنجی شبیه‌سازی‌های اجزای محدود، آزمایش‌های تجربی روی نمونه با منحنی خم دایره‌ای انجام شد و کرنش‌ها در نزدیکی لبه بال مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. شکل 8 نمایی از ماشین شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیری را نشان می‌دهد که برای آزمون تجربی مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاه در آزمایشگاه شکل‌دهی فلزات دانشگاه تربیت مدرس در یک ایستگاه ساخته شد [2 و 1]



شکل ۷: منحنی‌های خم

جدول ۲: مقدار کمیت‌های هندسی محصول

منحنی‌های خم					ضرایب
چ.د.پنج	چ.د.چهار	چ.د.سه	چ.د.دو	دایره‌ای	
$8/87447 \times 10^{-11}$	$3/56426 \times 10^{-17}$	$-5/4604 \times 10^{-6}$	$1/27796 \times 10^{-3}$	400	a
$-5/19245 \times 10^{-8}$	$-5/4604 \times 10^{-6}$	$1/91694 \times 10^{-3}$	0	0	b
$4/26149 \times 10^{-6}$	$1/91694 \times 10^{-3}$	0	0	400	c
$1/34811 \times 10^{-3}$	0	0	$1/27796 \times 10^{-3}$	365	d
0	0	0	0/59819	234/04	e
0	0	0	-35	400	f

شکل 10 نمایی از تولید پروفیل کانالی U شکل با منحنی خم دایره‌ای را در حین شکل‌دهی ناحیه انتقال نشان می‌دهد. در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر برخلاف فرایند شکل‌دهی غلتکی سنتی، غلتک‌ها دارای موقعیت ثابت نیستند. بلکه متناسب با تغییر در سطح مقطع پروفیل، حرکت خطی و دورانی انجام می‌دهند (شکل 11). این حرکت خطی و دورانی باید به صورت هماهنگ با حرکت ورق انجام شود. بنابراین هر گونه تغییر در سرعت ورق، سبب ایجاد خطا در تغییر شکل پروفیل می‌شود. آنجایی که دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر طراحی و ساخته شده دارای یک ایستگاه شکل‌دهی است، نیروی اصطکاک بین غلتک و ورق نمی‌تواند یک حرکت یکنواخت با سرعت ثابت برای ورق ایجاد کند. زیرا در چنین شرایطی به علت کم بودن نیرو اصطکاک، احتمال سر خوردن غلتک بر روی ورق بسیار زیاد است. برای رفع این مشکل یک سازوکار ویژه برای تغذیه ورق طراحی شد این سازوکار دارای یک گیره است که سر ورق در آن بسته می‌شود و با حرکت آن ورق از فضای بین غلتک‌ها کشیده می‌شود. برای ایجاد حرکت خطی در این سازوکار از سروموتور و بال اسکرو استفاده شد. با توجه به توضیحات داده شده مشابه با آزمایش‌های تجربی، در شبیه‌سازی اجزای محدود دوران غلتک‌ها حول محورشان مقید شد و برای حرکت ورق با استفاده از یک شرط مرزی، سرعت ثابت 20 میلی‌متر بر ثانیه تعریف شد. شکل 12 کانال تولید شده با منحنی خم دایره‌ای را نشان می‌دهند.

۳-۱ خواص مواد

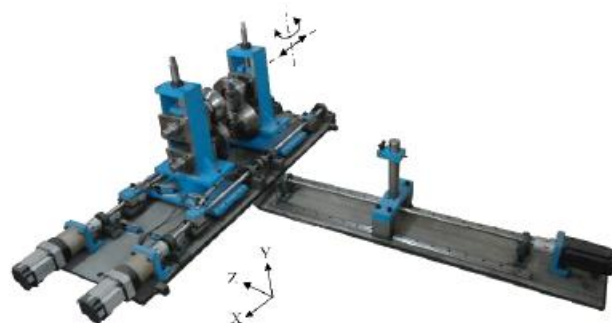
ورقه‌هایی که تحت بررسی قرار گرفتند از جنس فولاد St12 بودند. منحنی تنش حقیقی-کرنش خمیری حاصل از آزمون کشش در شکل 13 نشان داده شده است. فرض شده است که این فولاد همسانگرد و تحلیل‌ها ارتجاعی-خمیری هستند. ضریب پواسون 0/3 و نظر گرفته شد و مقدار مدول یانگ 197 گیگاپاسکال بدست آمد. منحنی کارسختی استحکام تسلیمی حدود 173 مگاپاسکال دارد.

۳-۲ اندازه‌گیری عیب تابیدگی کف در آزمون تجربی

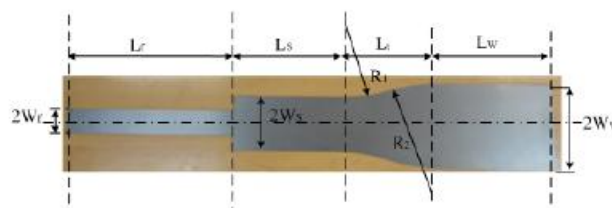
برای اندازه‌گیری عیب تابیدگی، مطابق شکل 14، مسیری بر روی خط مرکزی ناحیه کف در ناحیه انتقال ترسیم شد. با قرار دادن سنج‌هایی در زیر محصول، ارتفاع ابتدا و انتهای ناحیه انتقال به گونه‌ای تنظیم شد که عقربه ساعت اندازه‌گیری مقدار صفر را نشان می‌داد. با حرکت ساعت اندازه‌گیری در امتداد مسیر، مقدار انحنای طولی یا تابیدگی کف اندازه‌گیری شد.

۳-۳ اندازه‌گیری کرنش طولی لبه در آزمون تجربی

با نصب کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی در وسط قسمت‌های مقعر و محدب ناحیه انتقال محصول با منحنی خم دایره‌ای، تغییرات کرنش در حین شکل‌دهی اندازه‌گیری شد. در شکل 15-الف کرنش‌سنج‌های متصل



شکل ۸: دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر



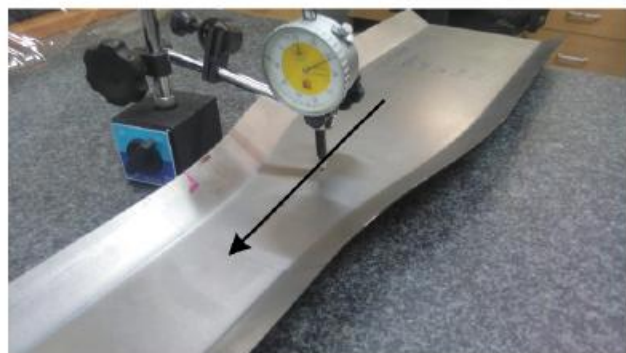
شکل ۹: کمیت‌های هندسی ورق از پیش بریده شده برای پروفیل‌های با منحنی‌های خم دایره‌ای

برای تولید کانال‌های با عرض متغیر در طول، غلتک‌ها در راستای محورشان حرکت خطی و حول محوری عمود بر محورشان حرکت دورانی دارند و توسط یک سیستم کنترلی هدایت می‌شوند. قطر غلتک به کار رفته 110mm و پهنای بال 35mm در نظر گرفته شده است. به دلیل نصب کرنش‌سنج، پهنای بال در غلتک بالا در یک سمت 25mm و نظر گرفته شده است تا به این صورت در حین شکل‌دهی، غلتک‌های بالا کرنش‌سنج را لهیده نکنند.

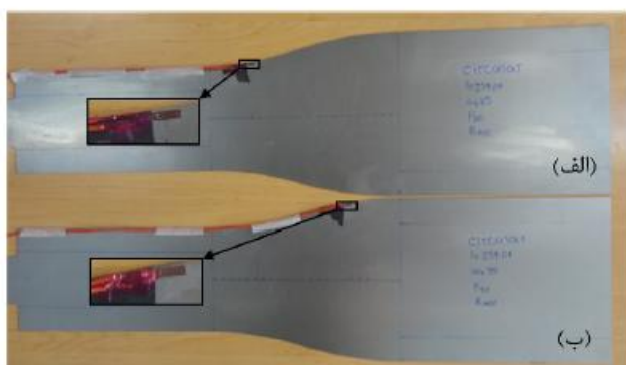
نمونه‌ای که در آزمون تجربی شکل داده شد ورقی به ضخامت 1mm بود که منحنی خم در آن دایره‌ای بود. برش ورق اولیه از پیش بریده شده، با برش لیزر CO₂ انجام شد. مشخصات هندسی این نمونه شکل 9 نشان داده شده است. لوجول 3 مقدار کمیت‌های هندسی درج شده است.

جدول ۳: مقدار کمیت‌های هندسی ورق از پیش بریده شده

پارامترها	اندازه‌ها (mm)
طول قسمت ثابت جلو (L_p)	400
طول قسمت باریک (L_s)	250
طول قسمت عریض (L_w)	250
عرض قسمت ثابت جلو ($2W_p$)	60
عرض قسمت باریک ($2W_s$)	70
عرض قسمت عریض ($2W_w$)	140
شعاع قوس قسمت مقعر (R_1)	370
شعاع قوس قسمت محدب (R_2)	430



شکل ۱۴: اندازه‌گیری عیب تابیدگی کف در پروفیل تولید شده

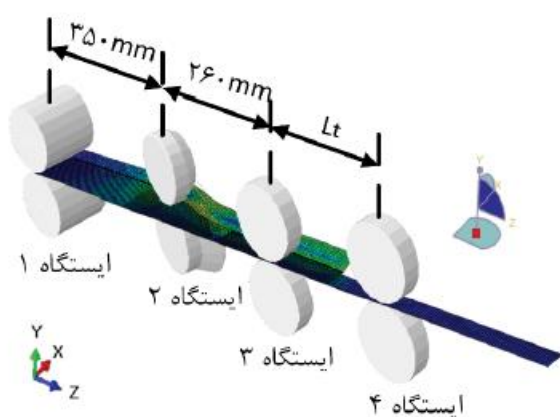


شکل ۱۵: کرنش‌سنج‌های متصل به ورق

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای شبیه‌سازی اجزای محدود از نرم‌افزار آباکوس¹ 6/13 استفاده شده و مسأله به صورت ضمنی حل شد تا حرکت ورق و غلتک‌ها با دقت بیشتری انجام شود و در نتایج هماهنگی حاصل شود [16].

شکل ۱۶ شمای کلی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. تنظیمات برای شکل‌دهی ورق با توجه به شرایط آزمایشگاهی بوده است. به دلیل تقارن مدل در راستای طولی، فقط نیمی از ورق مدل شد.



شکل ۱۶: نمایی از مدل اجزای محدود در حین شکل‌دهی

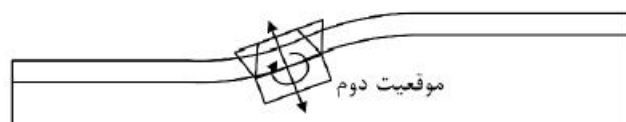
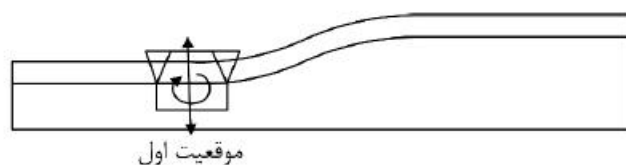
مدل اجزای محدودی با یک ایستگاه شکل‌دهی ایجاد شد که جفت غلتک‌های دوزنقه‌ای در ایستگاه دوم وظیفه شکل‌دهی ورق را داشتند و سه جفت غلتک در ایستگاه‌های اول، سوم و چهارم برای کنترل و هدایت

1 Abaqus

به ورق فلزی در وسط قسمت مقعر و در شکل ۱۵ نیز کرنش‌سنج‌های متصل به ورق قرئی نو وسط قسمت محدب نشان داده شده‌اند. فاصله این کرنش‌سنج‌ها از لبه ورق به اندازه 3mm بود.



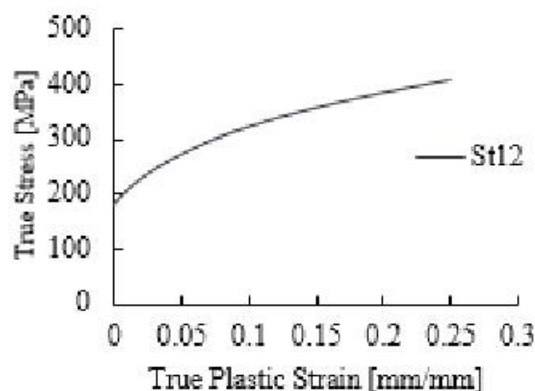
شکل ۱۰: نحوه انجام آزمون تجربی



شکل ۱۱: اصل عمود بودن



شکل ۱۲: پروفیل‌های تولید شده با منحنی‌های خم دایره‌ای

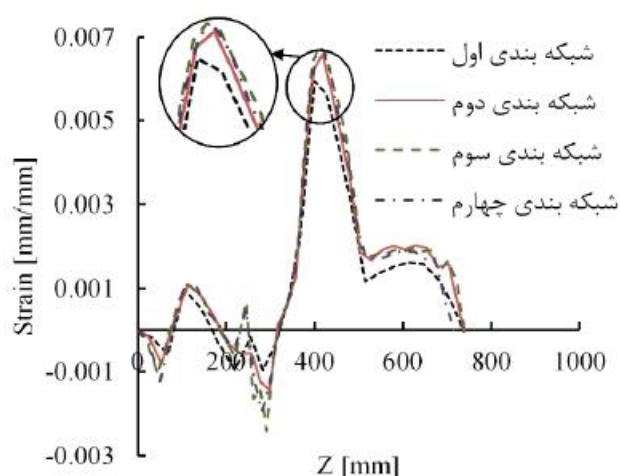


شکل ۱۳: منحنی تنش حقیقی کرنش خمیری

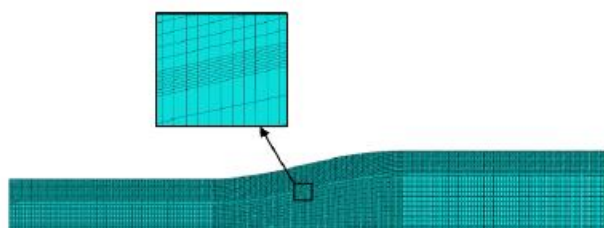
انتقال در کف پرفیل است که در آزمون تجربی با قرار دادن سنجه زیر پروفیل انجام شد (شکل 19). این ایستگاه‌ها در شکل‌دهی ورق نقشی نداشتند. ورق در شرایطی مشابه قرار گرفتن پروفیل روی سنجه‌ها در آزمون تجربی قرار گرفت. برای استخراج مقدار تابیدگی کف، مشابه با روش تجربی، مسیری روی خط تقارن در کف محصول تعریف شد و منحنی جابه‌جایی در راستای عمود بر ورق در ناحیه انتقال برای محصول با منحنی خم دایره‌ای مطابق شکل 20 به‌دست آمد. لختاف ارتفاع بیش‌ترین و کم‌ترین جابه‌جایی (قله و دره) معرف تابیدگی کف است.

۴ ۳ اندازه‌گیری کرنش لبه بال در شبیه‌سازی اجزای محدود

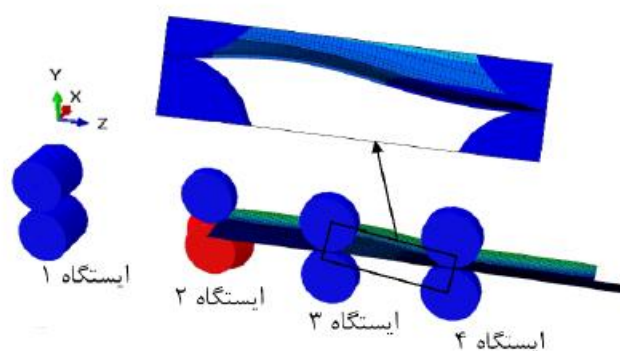
تاریخچه کرنش در نقطه وسط قسمت‌های مقعر و محدب و با فاصله 3mm لبه استخراج شد.



شکل 17: مطالعه شبکه برای کانال با منحنی خم دایره‌ای



شکل 18: نمایی از شبکه‌بندی ورق



شکل 19: موقعیت‌دهی طوری موقعیت‌دهی شد که ناحیه انتقال بین ایستگاه‌های 3 و 4 قرار گرفت. این کار برای هم‌ارتفاع کردن نقطه ابتدا و انتهای ناحیه

ورق در نظر گرفته شدند. غلتک‌های استوانه‌ای در حین شکل‌دهی در موقعیت خود ثابت هستند. ورق با سرعت ثابت کشیده می‌شود و نیازی به حرکت دورانی غلتک‌ها حول محور خودشان نیست. غلتک‌های ایستگاه دوم در حین شکل‌دهی ناحیه انتقال به‌طور هم‌زمان در جهت X برای حرکت طولی و حول محور Y دارای حرکت دورانی بودند.

در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر حرکت غلتک‌های شکل‌دهنده بر اساس اصل عمود بودن تعریف می‌شود. بر اساس آن، غلتک‌ها باید در هر لحظه بر منحنی خم عمود باشند [7]. در شکل 11 دیده می‌شود که غلتک‌ها در موقعیت‌های 1، 2 و 3 همواره بر منحنی خم عمود هستند.

به دلیل تقارن مدل در راستای طولی، فقط نیمی از ورق و غلتک‌ها مدل شدند و برای برقراری شرط تقارن، در امتداد خط میانی ورق، حرکت نو جهت عمود بر صفحه تقارن (جهت X) و دوران‌ها بر صفحه تقارن (دوران حول محورهای Y و Z در شکل 16) مهار شدند. با کشیده شدن لبه جلویی ورق با سرعت ثابت 20 mm/s به سمت جلو، ورق از بین غلتک‌ها حرکت کرده و تحت شکل‌دهی قرار می‌گرفت. این حرکت در آزمون تجربی با استفاده از دستگاه کشنده صورت گرفت. حرکت لبه جلویی ورق در راستای X و Y نیز مهار شد. در نرم‌افزار بین غلتک‌های بالایی و روی ورق و همچنین بین غلتک‌های پایینی و پشت ورق تماس تعریف شد.

۴ ۱ مدل‌سازی و مطالعه شبکه

غلتک‌ها از مدل جسم صلب تحلیلی و ورق از مدل پوسته شکل‌پذیر انتخاب شدند. به‌منظور شبکه‌بندی ورق، المان پوسته‌ای چهارگره‌ای S4R، مورد استفاده قرار گرفت.

شبیه‌سازی‌ها برای چهار اندازه مختلف برای المان‌ها در ورق نمونه با منحنی خم دایره‌ای انجام شد. کرنش در لبه بال محصول با منحنی خم دایره‌ای استخراج شد. نمودار توزیع کرنش به هم نزدیک شد که نشانه همگرایی نتایج بود. برای سرعت دادن به شبیه‌سازی و کمتر شدن زمان آن و با توجه به دقت مناسب در نتایج، آزمون دوم به عنوان اندازه مناسب انتخاب شد (شکل 17) [17].

با توجه به شدت شکل‌دهی در نواحی مختلف و با مطالعه شبکه، اندازه شبکه در ناحیه انتقال 3mm × 3mm و 3mm × 0/8mm، نو قسمت باریک کانال 5mm × 3mm و 5mm × 0/8mm، نو قسمت عریض کانال 6mm × 3mm و 6mm × 0/8mm و نو قسمت ثابت جلوی ورق متغیر در نظر گرفته شده است (شکل 18).

۴ ۲ محاسبه عیب تابیدگی کف در شبیه‌سازی اجزای محدود

برای محاسبه عیب تابیدگی کف، ورق شبیه‌سازی شده بعد از انجام کامل شکل‌دهی طوری موقعیت‌دهی شد که ناحیه انتقال بین ایستگاه‌های 3 و 4 قرار گرفت. این کار برای هم‌ارتفاع کردن نقطه ابتدا و انتهای ناحیه

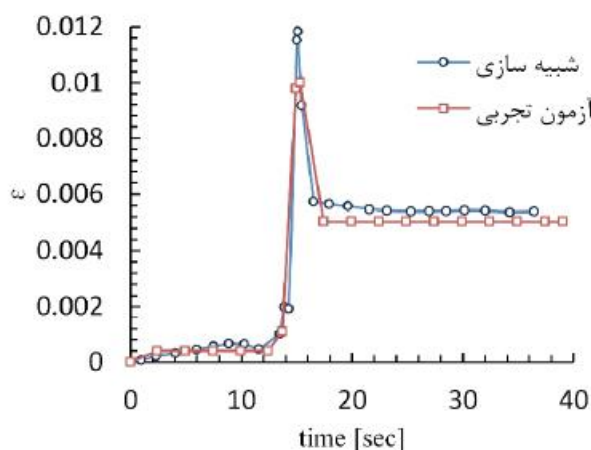
بنابراین به قسمت‌های مقعر و محدب به ترتیب قسمت‌های کششی و فشاری نیز گفته می‌شود.

۲۵ کرنش لبه بال در حالت مطلوب

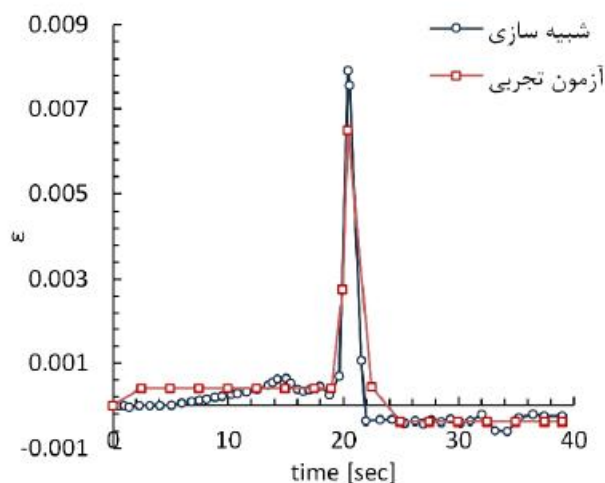
حالت مطلوب محصول، شکل ایده‌آلی است که مستقل از جنس ورق و روش تولید و مرحله طراحی است. شکل 23 طراحی برای پروفیلی خم شده به انداز 30 درجه را نشان می‌دهد. در این حالت لبه نسبت به صفحه $x-z$ دارای ارتفاع یکسانی در جهت Y است. بنابراین برای تجسم بهتر لبه بال مطابق شکل 24 توصیفه $x-z$ تصویر شده است. کرنش لبه بال در حالت مطلوب و قسمت‌های مقعر و محدب از رابطه‌های (14) و (15) به دست می‌آید. در این رابطه‌ها ϵ_{Sd} و L_{Sd} و ϵ_{Cd} و L_{Cd} به ترتیب طول اولیه لبه بال، طول لبه بال در حالت مطلوب و کرنش در حالت مطلوب در قسمت مقعر و رابطه‌ها ϵ_{Ct} و L_{Ct} و ϵ_{C0} و L_{C0} به ترتیب طول اولیه لبه بال، طول لبه بال در حالت مطلوب و کرنش در حالت مطلوب در قسمت محدب هستند.

$$\epsilon_{Sd} = \ln\left(\frac{L_{Sd}}{L_{S0}}\right) \quad (14)$$

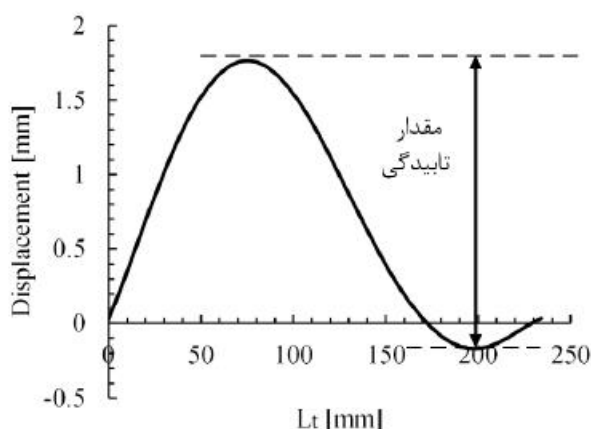
$$\epsilon_{Cd} = \ln\left(\frac{L_{Cd}}{L_{C0}}\right) \quad (15)$$



شکل ۲۱: تاریخچه کرنش در وسط قسمت مقعر محصول با منحنی خم دایره‌ای



شکل ۲۲: تاریخچه کرنش در وسط قسمت محدب محصول با منحنی خم دایره‌ای



شکل ۲۰: منحنی جابه‌جایی کف در ناحیه انتقال برای محصول با منحنی خم دایره‌ای

۵- نتایج و بحث

۱۵ صحت سنجی شبیه‌سازی اجزای محدود

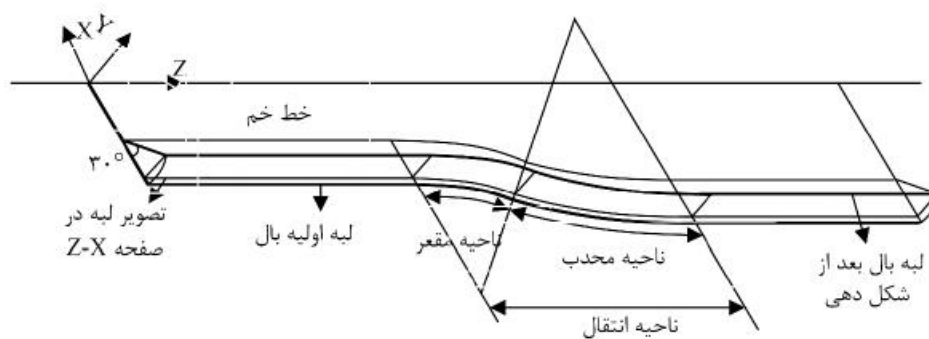
به منظور ارزیابی صحت مدل اجزای محدود، نتایج اجزای محدود و آزمون‌های تجربی در مورد مقدار عیب تابیدگی کف و نیز تاریخچه کرنش طولی در وسط قسمت‌های مقعر و محدب نمونه با منحنی خم دایره‌ای مقایسه شدند.

۱۱۵ مقایسه تابیدگی کف تجربی و اجزای محدود

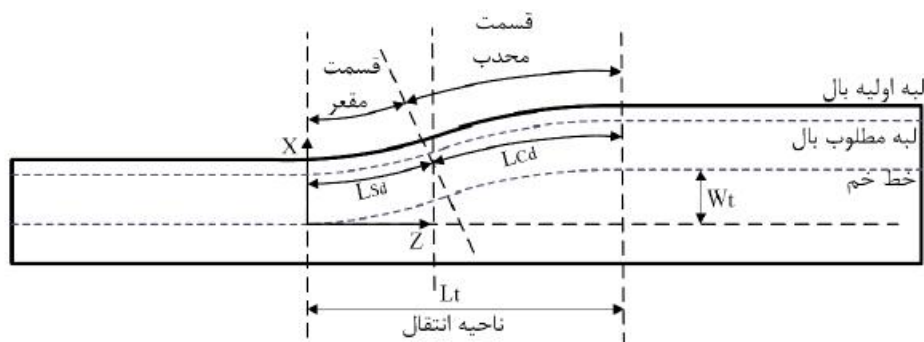
مقادیر تابیدگی کف پروفیل به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمون‌های تجربی برای محصول‌های با منحنی خم دایره‌ای به دست آمد. در آزمون تجربی مقدار تابیدگی 2/09 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در شبیه‌سازی اجزای محدود مقدار عیب تابیدگی به اندازه 1/93 میلی‌متر از نرم‌افزار استخراج شد. نتیجه استخراج شده در شبیه‌سازی اجزای محدود 7/66% نسبت به آزمون تجربی اختلاف داشت. این اختلاف ناشی از خطای عددی در انجام محاسبات اجزای محدود، یکسان نبودن شرایط عددی و تجربی و خطای اندازه‌گیری تجربی است.

۲۱۵ مقایسه کرنش‌های طولی تجربی و اجزای محدود

کرنش‌های طولی در وسط قسمت‌های مقعر و محدب ناحیه انتقال پروفیل با منحنی خم دایره‌ای از شبیه‌سازی اجزای محدود استخراج و در آزمون تجربی نیز اندازه‌گیری شدند که به ترتیب در شکل‌های 21 و 22 نشان داده شده است. در ابتدا منحنی‌ها، کشش اندکی را نشان می‌دهند. با ورود محل اندازه‌گیری کرنش به ایستگاه شکل‌دهی، در ورق کرنش کششی زیادی ایجاد می‌شود که با توجه به مرجع [18] در اثر کشیدن ورق توسط غلتک‌ها در اثر طول تغییر شکل، در لایه بالایی ضخامت ورق که کرنش سنج به آن متصل است، کشش روی می‌دهد. پس از عبور این محل از ایستگاه شکل‌دهی در قسمت مقعر تنش پسماند کششی (شکل 21) و در قسمت محدب تنش پسماند فشاری (شکل 22) باقی می‌ماند.



شکل ۲۳: ورق از بیش بریده شده و محصول نهایی در حالت طراحی



شکل ۲۴: تصویر لبه بال در صفحه X-Z

مقایسه استفاده شده است.

نو جدول‌های 4 و 5 طول مطلوب لبه ورق، طول لبه بعد از

شبیه‌سازی و درصد اختلاف به‌ترتیب برای قسمت‌های مقعر و محدب در پروفیل با منحنی‌های خم دایره‌ای و چندجمله‌های درجه‌های دو، سه، چهار و پنج ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود هم در قسمت مقعر و هم در قسمت محدب در پروفیل با منحنی‌های خم دایره‌ای بیشترین نوسد اختلاف وجود دارد.

بعد از آن درصد اختلاف در پروفیل با منحنی‌های خم چندجمله‌ای درجه دو، پنج، سه و چهار در جای بعدی قرار دارند. این اختلاف بیانگر اختلاف بین کرنش‌های مطلوب و کرنش‌های ایجاد شده بعد شکل‌دهی است.

$$\%E = \left| \frac{l_{sd} - l_s}{l_{sd}} \right| \times 100 \quad (18)$$

$$\%E = \left| \frac{l_{cd} - l_c}{l_{cd}} \right| \times 100 \quad (19)$$

%E: درصد اختلاف بین طول شبیه‌سازی و مطلوب

۵ ۵ علت ایجاد عیب تابیدگی

شکل 25 کرنش متوسط لبه بال در حالت مطلوب و کرنش به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود در پروفیل با منحنی خم دایره‌ای را نشان می‌دهد. در شکل 20 نیز منحنی جابه‌جایی ناحیه کف پروفیل

۳ ۵ کرنش لبه بال بعد از شبیه‌سازی اجزای محدود

به‌منظور یافتن کرنش متوسط در شبیه‌سازی اجزای محدود، مسیری روی لبه بال تعریف شد و با استخراج مختصات گره‌های این مسیر از نرم‌افزار، طول لبه در قسمت‌های مقعر و محدب در ناحیه انتقال به‌دست آمد. کرنش لبه بال در حالت شبیه‌سازی از رابطه (16) و (17) به‌دست می‌آید. در این رابطه‌ها ϵ_s و L_s و ϵ_c و L_c به ترتیب طول اولیه لبه بال، طول لبه بال و کرنش متوسط ایجاد شده بعد از شبیه‌سازی اجزای محدود در قسمت مقعر و ϵ_c و L_c و ϵ_s و L_s به ترتیب طول اولیه لبه بال، طول لبه بال و کرنش متوسط ایجاد شده بعد از شبیه‌سازی اجزای محدود در قسمت محدب هستند. همچنین کرنش در راستای طول لبه بال نیز با تعریف مسیر لبه بال، از نرم‌افزار استخراج شد.

$$\epsilon_s = \ln\left(\frac{l_s}{l_{s0}}\right) \quad (16)$$

$$\epsilon_c = \ln\left(\frac{l_c}{l_{c0}}\right) \quad (17)$$

۴ ۵ مقایسه طول مطلوب لبه ورق و طول لبه ورق بعد شبیه‌سازی اجزای محدود

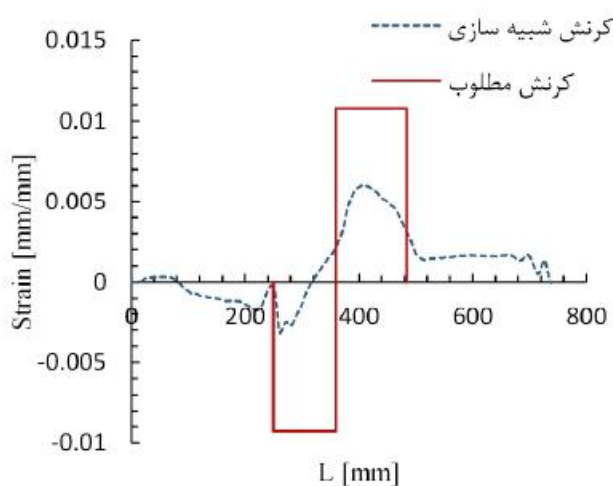
اختلاف طول لبه بال در حالت مطلوب و شبیه‌سازی اجزای محدود در قسمت‌های مقعر و محدب به‌ترتیب از رابطه (18) و (19) به‌دست می‌آید. درصد اختلاف طول مانند کرنش بی‌بعد و به‌عنوان معیاری برای

جدول ۴: مقایسه طول‌های مطلوب و شکل داده شده در ناحیه مقعر

%E	طول (mm)		منحنی‌های خم
	شبه‌سازی	مطلوب	
0/52	110/46	111/04	دایره‌ای
0/49	110/64	111/18	چ‌دبو
0/29	112/51	112/84	چ‌دبسه
0/28	112/53	112/84	چ‌دجهل
0/32	112/14	112/5	چ‌دببج

جدول ۵: مقایسه طول‌های مطلوب و شکل داده شده در ناحیه محدب

%E	طول (mm)		منحنی‌های خم
	شبه‌سازی	مطلوب	
0/88	127/59	126/48	دایره‌ای
0/86	127/39	126/3	چ‌دبو
0/72	125/21	124/31	چ‌دبسه
0/7	125/18	124/31	چ‌دجهل
0/78	125/76	124/79	چ‌دببج



شکل ۲۵: مقایسه کرنش مطلوب و شبه‌سازی برای پروفیل یا منحنی خم دایره‌ای

استخراج شده از شبه‌سازی‌های اجزای محدود با خطای قابل‌قبولی قابل‌اعتماد هستند.

پنج نوع منحنی خم سازگار با شرط‌های مرزی هندسی در ناحیه انتقال مورد بررسی قرار گرفتند که اثر این منحنی‌ها بر عیب تابیدگی کف

نورسنای Y نشان داده شده بود. با توجه به شکل‌های 25 و 20 و جنول‌های 4 و 5 می‌توان نتیجه گرفت که اگر کرنش در لبه بال به اندازه مطلوب ایجاد نشود عیب تابیدگی رخ می‌دهد. به عبارتی، به دلیل مقاومت ناحیه بال در برابر تغییر شکل، طول لبه به اندازه مطلوب نمی‌رسد و مقدار انرژی در مقطع ذخیره می‌شود. بنابراین ناحیه کف که مقاومت کمتری در برابر خمش دارد، از طریق آزاد کردن انرژی، دچار تغییر شکل نامطلوب در کف می‌شود. به عبارتی دیگر، عدم شکل‌دهی کامل ناحیه بال به تابیدگی کف می‌انجامد.

۶۵ مقایسه عیب تابیدگی ناحیه کف در پروفیل‌ها با منحنی‌های خم مختلف

مقادیر تابیدگی کف محصول برای پروفیل‌ها با منحنی‌های خم مختلف به صورت نمودار میله‌ای شکل 26 نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود در بین پروفیل‌های بررسی شده، پروفیل با منحنی خم دایره‌ای دارای بیشترین مقدار تابیدگی کف پروفیل و پروفیل با منحنی خم چندجمله‌ای درجه چهار دارای کمترین مقدار تابیدگی کف بوده‌است. با بررسی جنول‌های 4 و 5 و شکل 26 مشاهده می‌شود که بین کرنش‌های ایجاد شده در لبه بال پروفیل و عیب تابیدگی ارتباط معناداری وجود دارد. طرفی با توجه به مرجع [4] مقاومت در برابر کشش و فشار در لبه بال نسبت به کف پروفیل بیشتر است بنابراین تغییر شکل در لبه بال ناکافی صورت می‌گیرد و انرژی آزاد نشده در بال پروفیل در کف آن آزاد می‌شود و کف دچار تغییر شکل یا اعجاج یا عیب تابیدگی می‌شود.

جنول‌های 4 و 5 و شکل 26 نشان دادند که هر چه اختلاف طول مطلوب لبه بال با طول لبه بال پس از شکل‌دهی بیشتر باشد، عیب تابیدگی نیز افزایش می‌یابد. اختلاف بین کرنش‌ها در اثر اختلاف بین طول لبه اولیه بال و طول لبه بال پس از شکل‌دهی و طول مطلوب لبه بال برای منحنی‌های مختلف خم صورت می‌گیرد. به عبارتی دیگر شکل‌دهی در بال پروفیل‌هایی که طول خم بزرگتر و به تبع آن ماده بیشتری دارند به دلیل مقاومت ماده مشکل‌تر انجام می‌شود. همچنین می‌توان گفت که هر چه تغییر شکل سخت‌تر انجام شود و انرژی تغییر شکل در بال آزاد نشود، کف پروفیل تغییر شکل را می‌پذیرد. در این صورت انرژی بیشتری در کف آزاد شده و کف دچار اعوجاج بیشتری می‌شود و در نتیجه مقدار عیب تابیدگی نیز افزایش می‌یابد.

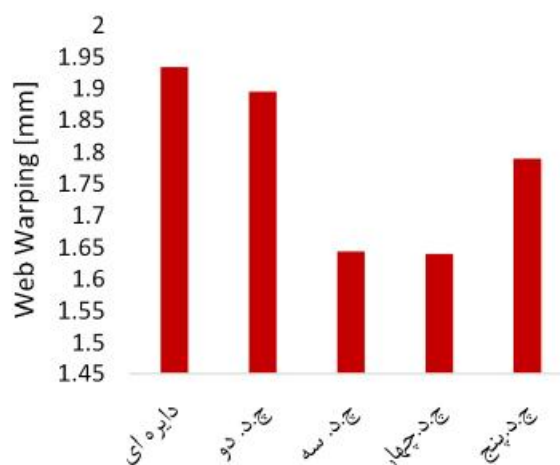
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر تغییر منحنی خم در ناحیه انتقال بر عیب تابیدگی کف محصول U شکل با عرض متغیر در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به دو صورت عددی و تجربی بررسی شده است.

برای صحت‌سنجی شبه‌سازی‌های اجزای محدود، در نمونه با منحنی خم دایره‌ای، به صورت هدفمند مقدار عیب تابیدگی و کرنش ایجاد شده در لبه بال تحت مقایسه قرار گرفتند. مقایسه نشان داد که مقدارهای

Forming, 371-377.

- [5] Ona, H., Shou, I., Hoshi, K., 2012. "On strain distributions in the formation of flexible channel section development of flexible cold roll forming machine", *Advance Materials Research*, 137-140.
- [6] Henninger, F., Friedrich, K., 2004. "Production of textile reinforced thermoplastic profiles by roll forming", *Composites: applied science and manufacturing*, 573-583.
- [7] Groche, P., Von Breitenbach, G., Jockel, M., Zettler, A., 2003. "New tooling concepts for future roll forming application", In: Proc. ICIT.
- [8] Larranaga, J., Berner, S., Galdos, L., Groche, P., 2010. "Geometrical accuracy improvement in flexible roll forming lines", in AIP Conference Proceedings.
- [9] Ona, H., 2005. "Study on development of intelligent roll forming machine", in Proceedings of the 8th international conference on technology of plasticity ICTP.
- [10] Berner, S., Storbeck, M., Groche, P., 2011. "A study on flexible roll formed products accuracy by means of FEA and experimental tests", in AIP Conference Proceedings.
- [11] Henning, R., Sedlmaier, A., Abee, A., 2011. "Finite element analysis of 3D-profiles with Changing Cross Sections", in International Conference on Technology of Plasticity (ICTP), Germany.
- [12] Kasaei, MM., Moslemi Naeini, H., Abbaszadeh, B., Mohammadi, M., Ghodsi, M., Kiuchi, M., Zolghadr, R., Liaghat, Gh., Azizi Tafti, R., Salmani Tehrani, M., 2014. "Flange wrinkling in flexible roll forming process", *Procedia Engineering*, 245-250.
- [13] Park, J.Ch., Yang, D.Y., Cha, M.H., Kim, D.G., Namb, J.B., 2014. "Investigation of a new incremental counter forming in flexible roll forming to manufacture accurate profiles with variable cross-sections", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 68-80.
- [14] Jiao, J., Rolfe, B., Mendiguren, J., Weiss, M., 2015. "An analytical approach to predict web-warping and longitudinal strain in flexible roll formed sections of variable width", *International Journal of Mechanical Sciences*, 228-238.
- [15] Joo, B.D., Han, S.W., Shin, S. G. R., Moon, Y. H., 2015. "Flexible roll forming process design for variable cross-section profile", *International Journal of Automotive Technology*, 83-88.
- [16] Daniel, W.J.T., Meehan, P.A., 2007. "Implicit



شکل ۲۶: مقایسه عیب تابیدگی

بصورت خاصه عیلتدل:

1. اختلاف اندازه طول لبه بال با اندازه مطلوب خود نشان‌دهنده آن است که کرنش‌ها برای کشش و فشار در ناحیه انتقال، برای شکل‌دهی صحیح، به صورت مناسب ایجاد نمی‌شوند و انرژی تغییر شکل آزاد نشده در بال پروفیل در کف آن آزاد شده و باعث اعوجاج یا تابیدگی در کف پروفیل می‌شود.
2. هر چه طول لبه بال بعد شکل‌دهی به حد مطلوب طراحی شده نزدیکتر باشد عیب تابیدگی تا حد امکان کاهش می‌یابد.
3. در پروفیل با منحنی خم با معادله دایره‌ای (بیشترین انحنا در بین منحنی‌های نامبرده) عیب تابیدگی کف نیز بیشترین است.
4. در پروفیل با منحنی خم چندجمله‌ای درجه سه و چهار (کمترین انحنا در بین منحنی‌های نامبرده) عیب تابیدگی کف پروفیل تا 15% نسبت به پروفیل با منحنی خم دایره‌ای در این آزمایش‌ها کاهش می‌یابد.

۷- مراجع

- [1] Abbaszadeh, B., 2013, "Roll profiles design for channel section with changing cross section in flexible roll forming", MSc thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, (in Persian).
- [2] Mohammadi, M., 2013, "Numerical and investigation of web warping of channel profile with changing cross section in Flexible Roll Forming Process", MSc thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, (in Persian).
- [3] Joo, B.D., Kim, S.Y., Kim, D.K., Sohn, S.M., Moon, Y.H., 2012. "Roll forming characteristics of a nonsymmetrical part made from high strength steel", Proc. 14th Int. Conf. Metal Forming.
- [4] Groche, P., Zettler, A., Berner, S., 2011. "Development of a one-step-model for the design of flexible roll formed parts", *International Journal of Material*

[18] Kasaei, MM., Moslemi Naeini, H., Liaghat, GH., Silva, CMA., Silva, MB., Martins, PAF., 2015. "Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*.

finite element study of non-steady effects in cold roll forming", 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM, Australia.

[17] Ozturk, F., 2002. "Analysis of forming limits using ductile fracture criteria", PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York