



## بررسی عیب تابیدگی کف پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر در فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

مهران محمدی<sup>۱</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>۲\*</sup>، محمد مهدی کسائی<sup>۳</sup>، مهدی سلمانی تهرانی<sup>۴</sup>، بهنام عباس‌زاده<sup>۵</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
  - ۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
  - ۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
  - ۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
  - ۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- \* صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵ تهران، moslemi@modares.ac.ir

### چکیده

شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، فرآیندی جدید و پیشرفته برای تولید پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر است. یکی از عیوب مهم این فرآیند، تابیدگی کف محصول تولید شده است که منجر به عدم دستیابی به تolerانس‌های ابعادی و هندسی مطلوب می‌شود. در این مقاله، چگونگی ایجاد تابیدگی کف با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که علت تابیدگی کف پروفیل، اعمال نشدن مقدار کافی کرنش طولی در لبه بال پروفیل در ناحیه انتقال می‌باشد. در ادامه نیز اثر پارامترهای هندسی محصول نظیر اندازه بال پروفیل، زاویه خم، شعاع ناحیه انتقال و ضخامت ورق بر میزان تابیدگی کف مشخص شد. با تحلیل واریانس نتایج، اندازه بال، زاویه خم به عنوان موثرترین عوامل بر روی تابیدگی پروفیلی با ضخامت مشخص شناخته شد و رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مقدار تابیدگی بر حسب پارامترهای هندسی محصول پیشنهاد شد. برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، کرنش طولی لبه ورق تغییرشکل یافته از شبیه‌سازی‌ها بدست آمد و با نتایج تجربی محققین دیگر مقایسه شد. انطباق آن‌ها، صحت مدل اجزای محدود را تأیید کرد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۳۰ مرداد ۱۳۹۲  
پذیرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۲  
ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳  
کلید واژگان:  
شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر  
پروفیل با سطح مقطع متغیر  
تابیدگی کف

## Investigation of web warping of profiles with changing cross section in flexible roll forming process

Mehran Mohammadi<sup>1</sup>, Hassan Moslemi Naeni<sup>2\*</sup>, Mohammad Mehdi Kasaei<sup>3</sup>, Mehdi Salmani Tehrani<sup>4</sup>, Behnam Abbas Zadeh<sup>5</sup>

- 1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
  - 2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
  - 3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
  - 4- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
  - 5- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
- \* P.O.B. 14115-143 Tehran, moslemi@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 21 August 2013  
Accepted 03 November 2013  
Available Online 13 July 2014

**Keywords:**  
Flexible Roll Forming  
Changing Cross Section Profile  
Web Warping

### ABSTRACT

Flexible roll forming is a modern process for producing profiles with changing cross section. One of the important defects in this process is the web warping of product that causes failure to obtain dimensional and geometrical tolerances. In this paper, mechanism of web warping occurrence was investigated by finite element simulation in ABAQUS/CAE software. Results of simulation indicated that inadequate longitudinal strain in the edge of profile's flange in transition zone is the reason of profile's web warping. Furthermore, the effect of geometric parameters of product such as flange length, bend angle, radius of transition zone and thickness on the web warping were determined. Analysis of variance showed flange length and bend angle are recognized as the most effective factors on warping of profiles with specific thickness. An equation for prediction of warping was proposed in terms of geometrical parameters of product. In order to verify the finite element model, the longitudinal strain of deformed strip edge was obtained from simulations and compared with the experimental results of other researchers. A good agreement between them confirmed the accuracy of the finite element model.

غلتک‌های دوار ایجاد می‌شود. محصول این فرآیند، شامل انواع پروفیل‌های باز و بسته می‌باشد [۱]. شمای از این فرآیند در شکل ۱ آمده است. از مزایای این فرآیند می‌توان به سرعت تولید بالا، پیوستگی در تولید، عدم

### ۱- مقدمه

شکل‌دهی غلتکی سرد روشی برای ایجاد خم‌های پیوسته و متوالی در نوار فلزی است. این تغییر شکل‌ها با عبور دادن نوار فلزی از بین مجموعه‌ای از

### Please cite this article using:

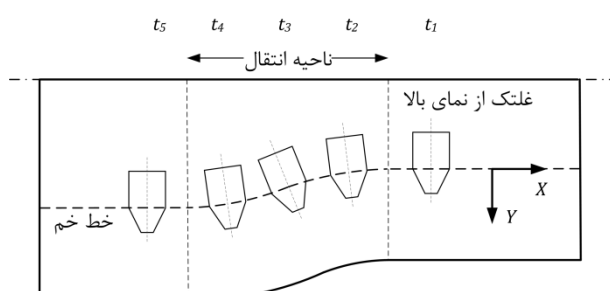
M. Mohammadi, H. Moslemi Naeni, M.M. Kasaei, M. Salmani Tehrani, B. Abbas Zadeh, Investigation of web warping of profiles with changing cross section in flexible roll forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 72-80, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۳ یک نمونه پروفیل کلاهی با سطح مقطع متغیر تولید شده در فرآیند

شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر [۴]



شکل ۴ موقعیت نسبی یک غلتک دوزنقه‌ای و ورق از نمای بالا در ۵ زمان مختلف

برای موقعیت‌دهی دقیق غلتک‌ها در فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از سیستم کنترل عددی رایانه‌ای<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. از این رو می‌توان تنها با تغییر در برنامه کنترلی دستگاه، نحوه موقعیت‌دهی غلتک‌ها را تغییر داده و در نتیجه محصولی جدید را با صرف کمترین هزینه و زمان ممکن تولید نمود. به همین دلیل به این فرآیند، شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر می‌گویند.

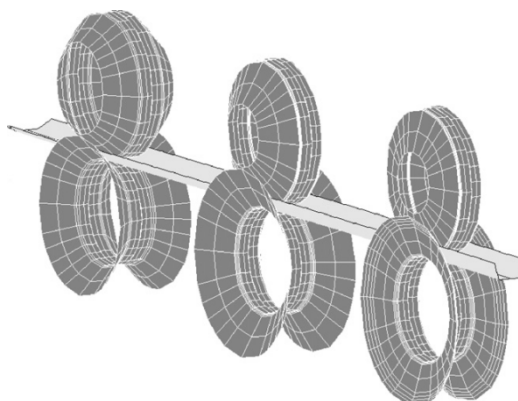
شکل ۵ شماتیکی از یک ایستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به همراه سازوکار تامین‌کننده حرکت غلتک‌ها را نشان می‌دهد.

اونا [۶] ضرورت استفاده از شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر را مورد بررسی قرار داد. او سیستمی برای حرکت‌های همزمان دورانی و خطی غلتک‌ها طراحی کرد و بر مبنای این طرح، خط شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیری در پنج ایستگاه ساخت، ابی و همکارانش [۷] با شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به- بررسی نحوه توزیع کرنش در این فرآیند پرداختند و مدل تحلیلی را برای پیش‌بینی کرنش لبه و طراحی پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر بر اساس عدم ایجاد عیب چروکیدگی در لبه بال ارائه دادند. گروچ و همکارانش [۸]، مدل تحلیلی ارائه شده توسط مرجع [۷] را با اضافه نمودن ضرایب تصحیح، بهبود بخشیدند. لارانژا و همکارانش [۹] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، اثر گرمایش موضعی بر روی تابیدگی کف پروفیل بررسی کردند. آن‌ها گرمایش ناحیه بال پروفیل را به‌عنوان بهترین موضع گرمایش پیشنهاد کردند. گرمایش ناحیه بال موجب کاهش تنش سیلان فلز و در نتیجه شکل‌دهی و اعمال کرنش راحت‌تر می‌شد که به موجب آن تابیدگی کاهش پیدا می‌کرد. لیندگرن [۱۰] با استفاده از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیری که هر ایستگاه آن شامل سه جفت غلتک استوانه‌ای تخت بود، موفق به تولید پروفیل‌های کلاهی با عرض متغیر شد. در هر ایستگاه یک جفت غلتک استوانه‌ای تخت با کف پروفیل تماس داشت و دو جفت غلتک استوانه‌ای تخت

محدودیت در تولید محصولاتی با طول زیاد و نیروی شکل‌دهی کم اشاره کرد [۱]. یکی از محدودیت‌های فرآیند شکل‌دهی غلتکی سنتی، عدم توانایی تولید پروفیل‌هایی با سطح مقطع متغیر در طول محصول می‌باشد. این در حالی است که بسیاری از پروفیل‌های مورد نیاز در صنعت خودروسازی، دارای سطح مقطع متغیر می‌باشند مانند ستون کنار درب خودرو و یا سپر خودرو که در حال حاضر با روش کشش عمیق تولید می‌شوند. شکل ۲، برخی از این قطعات بدنه خودرو که دارای سطح مقطع متغیر می‌باشند را نشان می‌دهد.

برای غلبه بر این محدودیت و استفاده از مزایای بسیار فرآیند شکل‌دهی غلتکی سنتی، روش تولید جدیدی به نام شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> یا شکل‌دهی غلتکی سه‌بعدی<sup>۲</sup> ایجاد شد. نمونه‌ای از محصول تولید شده توسط فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در شکل ۳ نشان داده شده است.

یکی از تفاوت‌های مهم شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر با شکل‌دهی غلتکی سنتی، حرکت غلتک‌ها در حین فرآیند می‌باشد. شکل ۴ موقعیت یک غلتک دوزنقه‌ای نسبت به ورق را از نمای بالا در ۵ زمان مختلف نشان می‌دهد. در این شکل برای نمایش بهتر حرکت‌ها، غلتک دوزنقه‌ای به صورت نمادین و کوچک نشان داده شده است. باید توجه شود که موقعیت‌های نشان داده شده در شکل ۴ نسبی بوده و غلتک در راستای محور  $X$  حرکتی ندارد بلکه ورق در راستای محور  $X$  حرکت می‌کند و غلتک در راستای محور  $Y$  حرکت خطی داشته و حول محور  $Z$  (محور عمود بر صفحه) حرکت دورانی دارد. به این ترتیب در طول فرآیند به‌طور صحیح بر روی خط خم باقی می‌ماند [۵، ۶]. با مشاهده شکل ۵ می‌توان درک بهتری از نحوه حرکت غلتک‌ها در این فرآیند را به‌دست آورد.

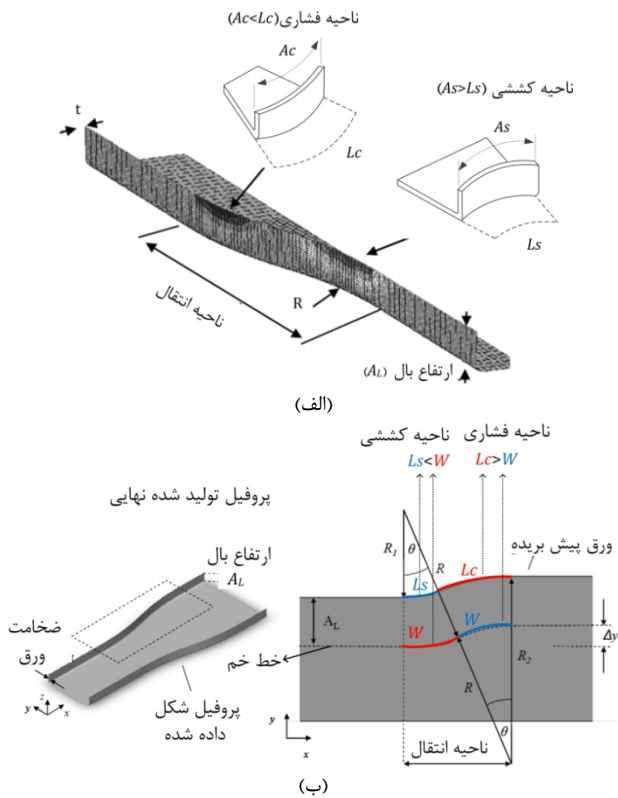


شکل ۱ شکل‌دهی غلتکی سرد پروفیل کانالی در سه ایستگاه [۲]

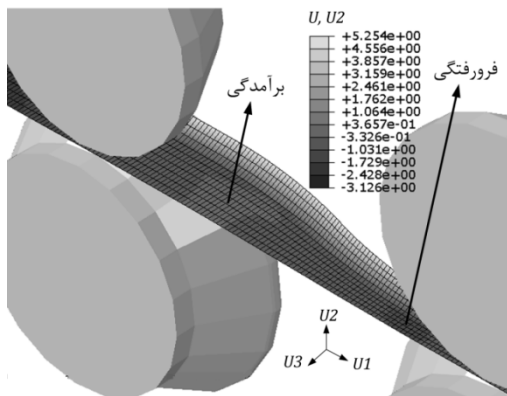


شکل ۲ برخی از قطعات خودرو که دارای سطح مقطع متغیر می‌باشند [۳]

1- Flexible roll forming  
2- 3D roll forming



شکل ۶ الف) نواحی فشاری و کششی لبه در پروفیل عریض شونده، ب) ورق پیش‌بریده شده [۸]



شکل ۷ نمایش تابیدگی پروفیل در یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده (واحدها به میلی‌متر است)

با توجه به شکل ۸ (ب)، در پروفیل‌های با سطح مقطع ثابت، اگر طول بال پروفیل شکل‌داده شده ( $L$ ) پس از زاویه شکل‌دهی مشخص، با طول متناظر آن بر روی کف پروفیل ( $W$ ) برابر باشد، آن‌گاه پروفیلی تخت و بدون تابیدگی تولید می‌شود. اما اگر طول لبه بال پروفیل از طول  $W$  بیشتر باشد، تابیدگی به سمت بالا (شکل ۸ الف)، و اگر طول لبه بال از طول  $W$  کمتر باشد، تابیدگی به سمت پایین ایجاد خواهد شد (شکل ۸ ج) [۱].

با استفاده از علت بیان شده برای ایجاد تابیدگی در پروفیل‌های با سطح مقطع ثابت، می‌توان علت فیزیکی ایجاد تابیدگی در پروفیل‌هایی با سطح مقطع متغیر را توجیه نمود. در پروفیل‌های با سطح مقطع متغیر، به دلیل هندسه خاص ورق پیش‌بریده شده اولیه، بین لبه ورق پیش‌بریده شده در هر یک از نواحی فشاری و کششی ( $L_s$  و  $L_c$ ) با خط خم ( $W$ )، اختلاف طول وجود دارد، شکل ۶ (ب).

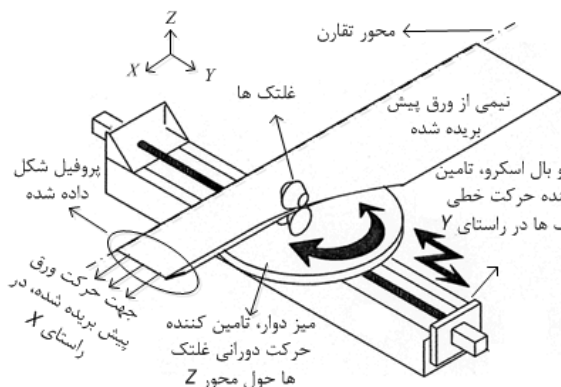
با قسمت چپ و راست کلاهی پروفیل تماس داشتند. با نزدیک شدن این دو جفت غلتک درگیر با بخش کلاهی به هم، زاویه شکل‌دهی پروفیل نسبت به ایستگاه قبلی افزایش پیدا کرده و به این ترتیب پروفیل کلاهی طی چند ایستگاه تا ۹۰ درجه شکل‌دهی می‌شد. او پروفیل‌های کلاهی با عرض متغیر تولید نمود و بیشترین عیوب را در پروفیل‌هایی با عرض متغیر نامتقارن مشاهده نمود. لارائزا و همکارانش [۱۱] با انجام آزمایش‌های تجربی اثر میزان گرمایش را بر روی تابیدگی کف پروفیل بررسی کردند. آن‌ها بهترین دمای گرمایش را با توجه به هندسه و جنس پروفیل تعیین کردند.

عیب تابیدگی کف، دقت هندسی پروفیل را کاهش می‌دهد و می‌تواند موجب معیوب شدن پروفیل شود. بنابراین طراحی محصولی که دارای حداقل تابیدگی کف باشد از اولویت‌های فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر محسوب می‌شود که این امر مستلزم شناخت اثر پارامترهای هندسی محصول بر تابیدگی کف می‌باشد که تاکنون در پژوهش‌های انجام شده مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به بررسی اثر اندازه بال، زاویه خم، شعاع انحنای ناحیه انتقال و ضخامت بر روی میزان تابیدگی کف پروفیل پرداخته شده است.

## ۲- عیب تابیدگی در کف پروفیل

در شکل ۶ الف) نمایی از پروفیل با سطح مقطع متغیر و در شکل ۶ ب) هندسه ورق پیش‌بریده شده مورد نیاز برای تولید این پروفیل نمایش داده شده است. در این‌گونه پروفیل‌ها، ناحیه‌ای که در آن عرض پروفیل تغییر می‌کند، ناحیه انتقال نامیده می‌شود (شکل ۶ الف). یکی از تفاوت‌های این فرآیند با شکل‌دهی غلتکی سنتی، نحوه خاص توزیع کرنش طولی لبه بال در ناحیه انتقال می‌باشد، به‌گونه‌ای که دو ناحیه فشاری و کششی در ناحیه انتقال شکل می‌گیرد [۸]. با توجه به شکل ۶ الف)، ناحیه انتقال پروفیل را می‌توان به دو بخش فشاری و کششی تقسیم نمود. ورق تغییر شکل نیافته در این شکل به صورت خط‌چین نمایش داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست، پس از شکل‌دهی به اندازه زاویه مشخص، لبه ورق در ناحیه فشاری کاهش طول داده و به طول ( $Ac$ ) می‌رسد. همچنین لبه ورق در ناحیه کششی دچار افزایش طول شده و به طول ( $As$ ) می‌رسد.

یکی از عیوب مهم که در قطعات تولید شده توسط این فرآیند وجود دارد، تابیدگی در کف پروفیل می‌باشد که باعث از بین رفتن تختی پروفیل می‌شود [۸-۱۲]. در شکل ۷ نتیجه یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده به همراه کانتور ارتفاع پروفیل آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کف پروفیل از حالت تخت خارج شده و در قسمتی دچار برآمدگی (تحدب) و در قسمتی دچار فرورفتگی (تقعر) گشته است.



شکل ۸ شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به همراه نحوه حرکت غلتک‌ها و ورق [۶]

فشاری ( $LC$ ) بایستی آنقدر کاهش یابد تا به طول مطلوب  $AC_{desirable}$  برسد و طول لبه ورق در ناحیه کششی ( $LS$ ) باید آنقدر افزایش طول بدهد تا به طول مطلوب  $AS_{desirable}$  برسد. این در حالی است که به دلیل ایده‌آل نبودن شکل‌دهی و مقاومت ماده در برابر تغییر شکل، طول لبه پروفیل شکل داده شده در نواحی فشاری ( $AC$ ) و کششی ( $AS$ ) به طول مطلوب مورد نظر نمی‌رسند و  $AC$  بیشتر از  $AC_{desirable}$  و  $AS$  کمتر از  $AS_{desirable}$  باقی می‌ماند. همین عامل باعث تابیدگی پروفیل به سمت بالا در ناحیه فشاری و تابیدگی به سمت پایین در ناحیه کششی می‌شود. این پدیده در شبیه‌سازی‌های انجام شده مورد بررسی قرار گرفت که در بخش نتیجه‌ها آورده شده است.

### ۳- نحوه انجام شبیه‌سازی‌های اجزای محدود

برای شبیه‌سازی‌های اجزای محدود از حل‌گر دینامیک صریح نسخه ۶/۱۰ نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> استفاده شد. شکل ۱۰ شمای کلی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

#### ۳-۱- مدل‌سازی

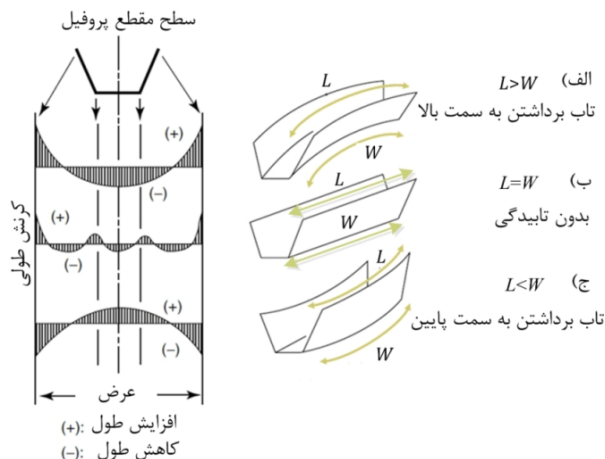
برای مدل‌سازی غلتک‌ها از مدل جسم صلب تحلیلی و برای مدل‌سازی ورق از مدل پوسته شکل‌پذیر استفاده شد. برای شبکه‌بندی ورق از المان پوسته‌ای چهار گره‌ای ( $S4R$ )، استفاده شد. اندازه شبکه پایدار بسته به هندسه قطعه بین  $2 \text{ (mm)} \times 2 \text{ (mm)}$  تا  $2 \text{ (mm)} \times 1/8 \text{ (mm)}$  انتخاب شد. هندسه ورق پیش‌بریده شده نیز با توجه به شکل ۶ (ب) در نظر گرفته شد. عرض کف در ناحیه باریک  $20 \text{ (mm)}$ ، عرض کف در ناحیه عریض  $60 \text{ (mm)}$ ، ضخامت ورق  $1 \text{ (mm)}$  و  $0/6 \text{ (mm)}$  و پارامترهای هندسی نظیر اندازه بال  $(A_L)$ ، شعاع ناحیه انتقال  $(R)$  در سه سطح در نظر گرفته شدند که در بخش طراحی آزمایش آمده است. پارامترهایی نظیر  $R_1$  و  $R_2$  و  $\theta$  که در شکل ۶ (ب) مشاهده می‌شوند، به اندازه بال و شعاع ناحیه انتقال وابسته هستند و با توجه به آن‌ها به دست می‌آیند.

مدل اجزای محدودی با یک ایستگاه شکل‌دهی ایجاد شد که یک جفت غلتک دوزنقه‌ای وظیفه شکل‌دهی ورق و یک جفت غلتک مشابه به جهت کنترل و هدایت سر ورق، پس از ایستگاه شکل‌دهی در نظر گرفته شد. همچنین یک جفت غلتک استوانه‌ای تخت قبل از ایستگاه شکل‌دهی قرار داده شد تا از حرکت‌های اضافی انتهای ورق پیش از ورود به ایستگاه شکل‌دهی جلوگیری کند. در این مدل فاصله بین ایستگاه‌ها  $200$  میلی‌متر در نظر گرفته شد.

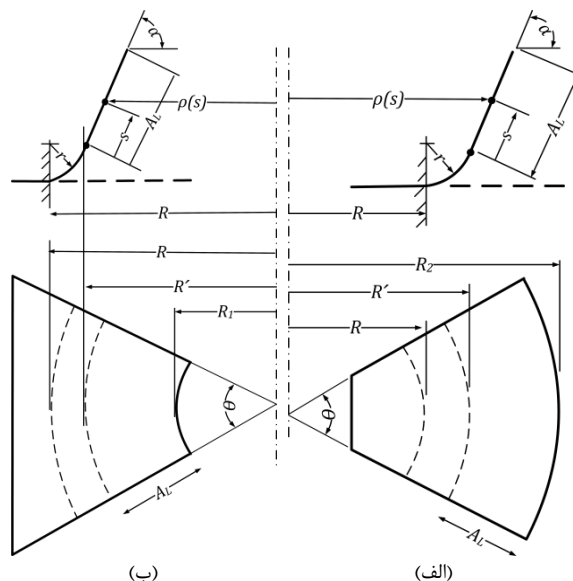
به جهت تقارن مدل، فقط نیمی از ورق و غلتک‌ها مدل شدند و برای برقراری شرط تقارن، بر روی صفحه تقارن ورق، حرکت در جهت عمود بر صفحه تقارن (جهت  $Z$ ) و دوران‌ها در صفحه تقارن (دوران حول محورهای  $X$  و  $Y$  در شکل ۱۰) مهار شدند. همچنین برای جلوگیری از نوسان انتهای ورق قبل از ورود به ایستگاه شکل‌دهی، حرکت انتهای ورق در جهت عمود بر ورق مهار شد. غلتک‌های ایستگاه شماره ۱ در حین شکل‌دهی ناحیه انتقال به‌طور همزمان در جهت  $Z$  حرکت کرده و حول محور  $Y$  دوران داده شدند. مطابق مرجع [۱۴]، بین غلتک‌ها و ورق اصطکاک در نظر نگرفته شد و با کشیدن سر ورق، ورق از بین غلتک‌ها حرکت کرده و شکل‌دهی انجام می‌گرفت.

#### ۳-۲- خواص مواد

ورق از جنس SAE 1020 و همسان‌گرد در نظر گرفته شد و خواص مکانیکی آن نظیر نمودار تنش حقیقی- کرنش پلاستیک و مدول یانگ، از مرجع [۱۵] استخراج شد، (شکل ۱۱). برای تعریف رفتار کارسختی فلز نیز از قانون کارسختی همسان‌گرد استفاده شد.



شکل ۸ علت ایجاد تابیدگی در پروفیل با سطح مقطع ثابت [۱]



شکل ۹ الف) کاهش طول لبه در ناحیه فشاری ب) افزایش طول لبه در ناحیه کششی

پس از شکل‌دهی ورق به اندازه زاویه مشخص  $\alpha$ ، طول لبه ورق پیش‌بریده شده در ناحیه فشاری ( $LC$ ) کاهش و طول لبه ورق پیش‌بریده شده در ناحیه کششی ( $LS$ ) افزایش پیدا می‌کنند و به ترتیب به اندازه‌های  $AC$  و  $AS$  می‌رسند (شکل ۶ الف) [۸]. مقادیر مطلوب  $AC$  و  $AS$  که برای تولید پروفیلی بدون تابیدگی نیاز است را می‌توان با توجه به شکل ۹ و روابط هندسی موجود (۲) و (۴) به دست آورد. در این معادلات، شعاع انحنای قطاع شکل داده شده به فاصله  $s$  از ناحیه خم می‌باشد. بنابراین  $\rho(A_L)$  شعاع انحنای قطاع شکل داده شده در لبه بال می‌باشد.  $\alpha$  زاویه شکل‌دهی و پارامتر  $R$ ، شعاع ناحیه انتقال است. پارامترهای  $R_1$  و  $R_2$  نیز با توجه به هندسه ورق در شکل ۶ (ب) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۹، اختلاف بین پارامتر  $R$  و  $R'$  به اندازه عرض ناحیه خم می‌باشد.

در ناحیه فشاری با توجه به شکل ۹ الف):

$$\rho(s) = R + r \cdot \sin \alpha + s \cdot \cos \alpha \quad (1) \quad [13]$$

$$AC_{desirable} = \rho(A_L) \cdot \theta \quad (2) \quad [13]$$

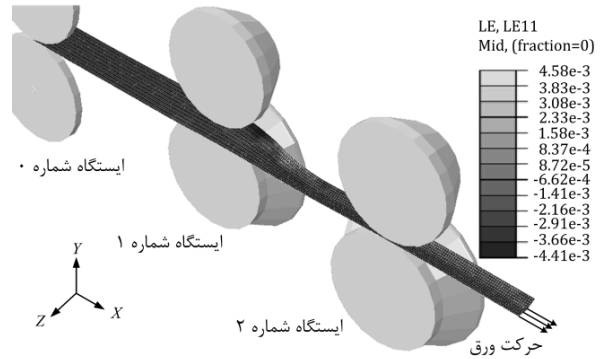
در ناحیه کششی با توجه به شکل ۹ ب):

$$\rho(s) = R - r \cdot \sin \alpha - s \cdot \cos \alpha \quad (3) \quad [13]$$

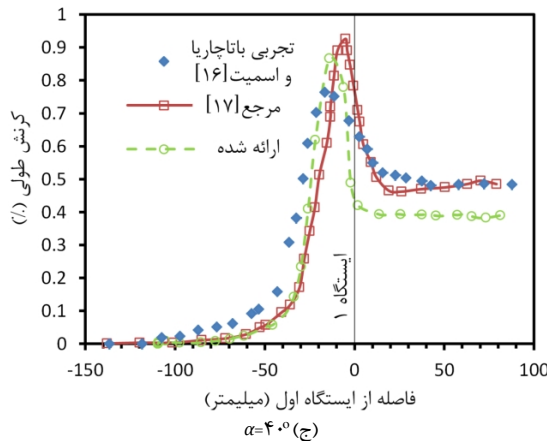
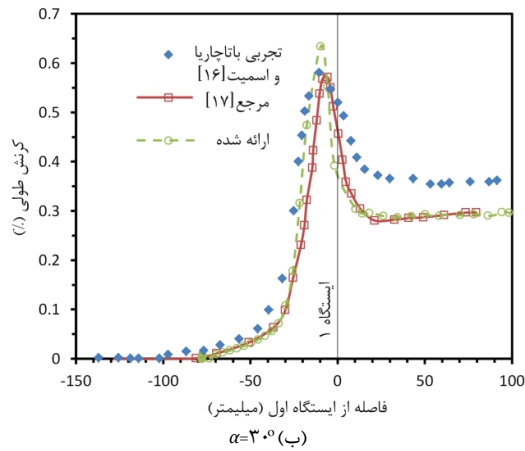
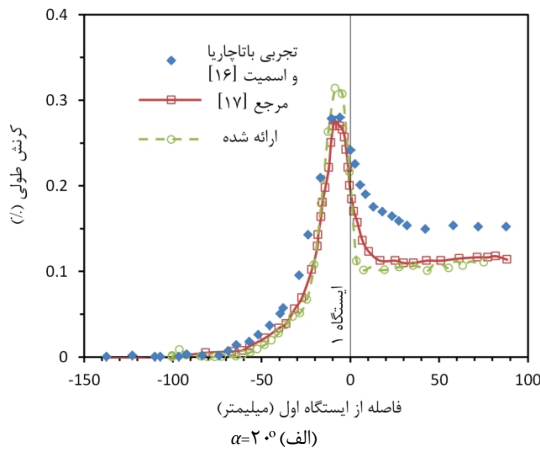
$$AS_{desirable} = \rho(A_L) \cdot \theta \quad (4) \quad [13]$$

برای تولید پروفیلی بدون تابیدگی، طول لبه ورق پیش‌بریده شده در ناحیه

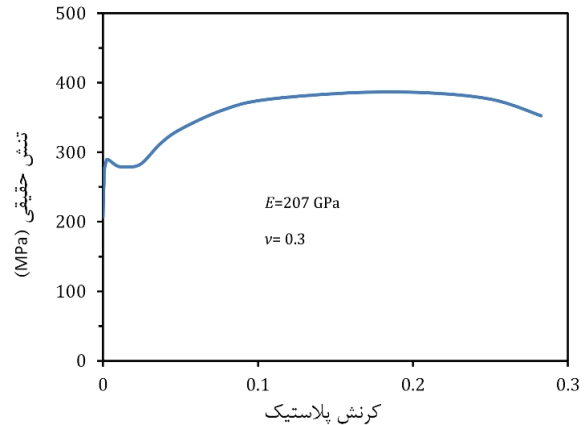
شکل ۱۰ قابل مشاهده است، پروفیل مورد نظر این پژوهش را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود؛ بخش اول پروفیلی باریک و با عرض ثابت و به طول (mm) ۲۰۰ است که توسط ناحیه‌ای موسوم به ناحیه انتقال به پروفیلی عریض‌تر متصل می‌شود. به منظور همسان‌سازی شبیه‌سازی با آزمایش باتاچاریا و اسمیت، هندسه بخش باریک پروفیل، مشابه هندسه پروفیل تولید شده توسط باتاچاریا و اسمیت در نظر گرفته شد و سپس نتایج کرنش طولی لبه در بخش باریک پروفیل با نتایج تجربی نامبرده مقایسه شد. در شکل ۱۲ نتایج شبیه‌سازی برای پروفیل مشابهی که در مرجع [۱۷] ارائه شده نیز آورده شده است. شبیه‌سازی‌های مرجع [۱۷] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده و برای اعمال تغییر شکل، سر ورق از بین غلتک‌های بدون اصطکاک کشیده شده است.



شکل ۱۰ مدل اجزای محدود مورد استفاده در حین شکل‌دهی به همراه کانتور کرنش طولی حرکت ورق



شکل ۱۲ مقایسه کرنش طولی لبه محاسبه شده توسط شبیه‌سازی آباکوس با نتایج تجربی باتاچاریا و اسمیت [۱۶] و شبیه‌سازی مشابه در مرجع [۱۷]



شکل ۱۱ خواص فولاد SAE1020 [۱۵]

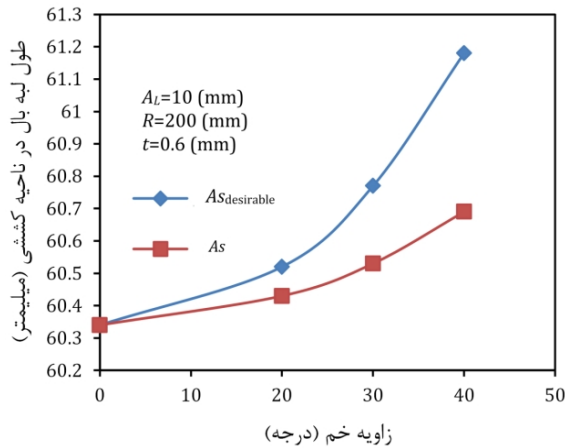
جدول ۱ سطوح پارامترهای بررسی شده برای ضخامت ۱ میلی‌متر			
سطح	پارامتر موثر		
۲۰ و ۱۵، ۱۰	اندازه بال، $A_t$ (mm)		
۵۰ و ۳۵۰، ۲۰۰	شعاع انحنای ناحیه انتقال، $R$ (mm)		
۴۰ و ۳۰، ۲۰	زاویه خم، $\alpha$ (deg)		
جدول ۲ هندسه پروفیل‌های شبیه‌سازی شده برای بررسی اثر ضخامت			
طول بال (mm)	شعاع ناحیه انتقال (mm)	زاویه خم (deg)	ضخامت (mm)
۱۰	۲۰۰	۴۰ و ۳۰، ۲۰	۰/۸، ۰/۶ و ۱

### ۳-۳- طراحی آزمایش

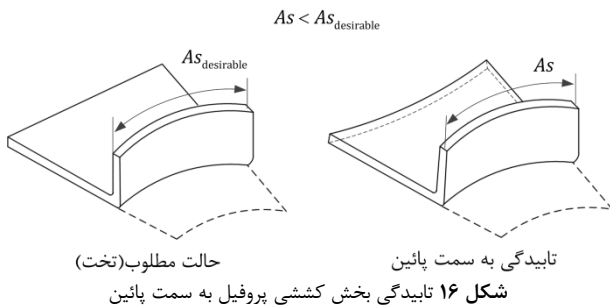
پارامترهای اندازه بال ( $A_t$ )، شعاع انحنای ناحیه انتقال ( $R$ ) و زاویه خم ( $\alpha$ ) در سه سطح انتخاب شدند. سطوح پارامترهای بررسی شده در جدول ۱ آمده است. ترکیب سطوح، ۲۷ حالت شبیه‌سازی را نتیجه داد که انجام گرفت. برای اجتناب از ایجاد عیب چروکیدگی لبه پروفیل‌هایی با ارتفاع بال زیاد در ضخامت‌های پایین، برای بررسی اثر ضخامت ( $t$ )، هندسه پروفیلی با مشخصات جدول ۲، با سه ضخامت مختلف شبیه‌سازی شد.

### ۴-۳- صحت‌سنجی شبیه‌سازی با نتایج تجربی

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، از نتایج تجربی باتاچاریا و اسمیت [۱۶] استفاده شد. باتاچاریا و اسمیت آزمایش‌های تجربی را به منظور بررسی اثر زاویه خم پروفیل بر روی کرنش طولی لبه انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها به صورت تک ایستگاه و با زوایای خم  $\alpha = 20^\circ, \alpha = 30^\circ, \alpha = 40^\circ, \alpha = 50^\circ$  انجام شد. پروفیل شکل داده شده دارای عرض اسمی کف (mm) ۲۰ و اندازه بال (mm) ۱۰ و ضخامت (mm) ۰/۶ بود. کرنش‌های طولی به وسیله کرنش‌سنج‌های الکتریکی به فاصله (mm) ۱/۵ از لبه پروفیل اندازه‌گیری شدند. همان‌گونه که در



شکل ۱۵ مقایسه طول لبه پروفیل شکل داده شده در ناحیه کششی و مقدار مطلوب آن



جدول ۳ مقایسه کرنش مطلوب لبه ( $\epsilon C_{desirable}$ ) و کرنش اعمال شده در ناحیه

فشاری ( $\epsilon C$ ) پروفیل‌هایی با مشخصات  $A_L=10\text{mm}$ ,  $R=200\text{mm}$  و  $t=0.6\text{mm}$

زاویه شکل‌دهی (درجه)	$\epsilon C_{desirable}(\%)$	$\epsilon C(\%)$
۲۰	-۰/۲۵	-۰/۰۲
۳۰	-۰/۶۲	-۰/۱۵
۴۰	-۱/۱۱	-۰/۲۷

جدول ۴ مقایسه کرنش مطلوب لبه ( $\epsilon S_{desirable}$ ) و کرنش اعمال شده در ناحیه

کششی ( $\epsilon S$ ) پروفیل‌هایی با مشخصات  $A_L=10\text{mm}$ ,  $R=200\text{mm}$  و  $t=0.6\text{mm}$

زاویه شکل‌دهی (درجه)	$\epsilon S_{desirable}(\%)$	$\epsilon S(\%)$
۲۰	۰/۳	۰/۱۵
۳۰	۰/۷۱	۰/۳۲
۴۰	۱/۳۹	۰/۵۸

با استفاده از معادلات (۵) تا (۸) می‌توان کرنش مطلوب لبه در نواحی فشاری و کششی ( $\epsilon C_{desirable}$  و  $\epsilon S_{desirable}$ ) و کرنش اعمال شده در نواحی فشاری و کششی ( $\epsilon C$  و  $\epsilon S$ ) را با در دست داشتن طول ثانویه و طول اولیه محاسبه کرد.

$$\epsilon C = \ln\left(\frac{Ac}{Lc}\right) \quad (5)$$

$$\epsilon C_{desirable} = \ln\left(\frac{Ac_{desirable}}{Lc}\right) \quad (6)$$

$$\epsilon S = \ln\left(\frac{As}{Ls}\right) \quad (7)$$

$$\epsilon S_{desirable} = \ln\left(\frac{As_{desirable}}{Ls}\right) \quad (8)$$

در جدول ۳ مقادیر کرنش مطلوب ( $\epsilon C_{desirable}$ ) و کرنش اعمال شده به لبه در ناحیه فشاری ( $\epsilon C$ ) برای پروفیل‌های نامبرده آورده شده است.

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که به دلیل ملایم بودن کرنش‌های اعمال شده در فرآیند شکل‌دهی غلتکی، کرنش‌های کافی به لبه بال در ناحیه فشاری اعمال نشده و در نتیجه طول لبه بال در ناحیه فشاری ( $Ac$ ) به طول مطلوب ( $Ac_{desirable}$ ) نخواهد رسید و اختلاف خواهد داشت.

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین شبیه‌سازی‌های ارائه شده و مراجع وجود دارد.

#### ۴- نتیجه‌ها و بحث

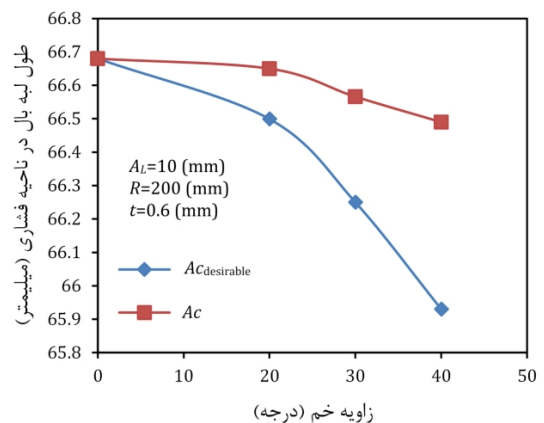
در این قسمت نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به منظور بررسی علت ایجاد تابیدگی و تعیین اثر پارامترهای هندسی محصول بر روی تابیدگی کف پروفیل ارائه می‌شود. در نهایت نیز رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مقدار تابیدگی برحسب برخی پارامترهای هندسی محصول، پیشنهاد می‌شود.

#### ۴-۱- بررسی علت تابیدگی

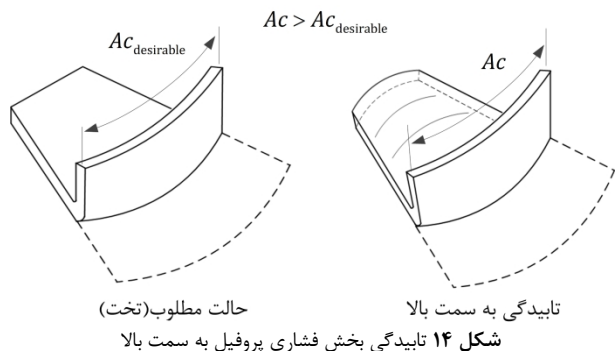
همان‌طور که پیش‌تر بیان شده علت ایجاد تابیدگی نرسیدن طول لبه پروفیل شکل داده شده در هر یک از نواحی فشاری و کششی ( $As$  و  $Ac$ ) به طول مطلوب ( $As_{desirable}$  و  $Ac_{desirable}$ ) محاسبه شده از روابط هندسی (۲) و (۴) می‌باشد. در این بخش این موضوع توسط چند نمونه از شبیه‌سازی‌های انجام شده به صورت کمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

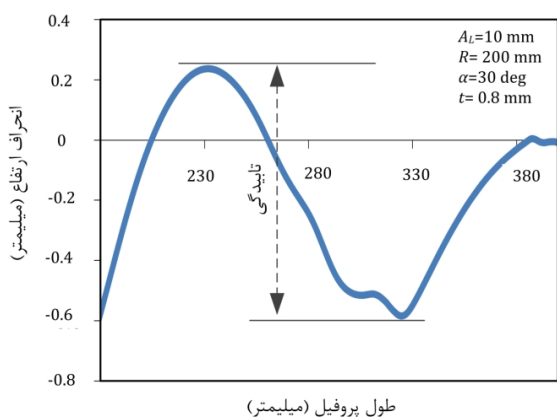
در شکل ۱۳ نمودار طول لبه بال پروفیل در ناحیه فشاری ( $Ac$ ) که از شبیه‌سازی‌ها استخراج شد و طول مطلوب ( $Ac_{desirable}$ ) محاسبه شده از معادله (۲) برای سه پروفیل به ضخامت  $0.6\text{ (mm)}$ ، شعاع ناحیه انتقال  $200\text{ (mm)}$  و اندازه بال  $10\text{ (mm)}$  و زاویه خم‌های  $20$  درجه،  $30$  درجه و  $40$  درجه آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، طول لبه پروفیل در ناحیه فشاری ( $Ac$ ) در تمام زوایای شکل‌دهی  $20$  درجه،  $30$  درجه و  $40$  درجه، بزرگتر از طول مطلوب  $Ac_{desirable}$  است. همین عامل باعث ایجاد قوس و تحذب پروفیل در ناحیه فشاری می‌شود. این پدیده در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

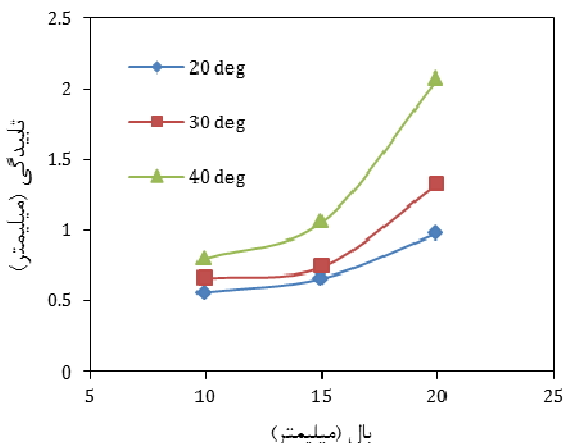


شکل ۱۳ مقایسه طول لبه پروفیل شکل داده شده در ناحیه فشاری ( $Ac$ ) با مقدار مطلوب آن ( $Ac_{desirable}$ )





شکل ۱۷ نمودار انحراف ارتفاع کف پروفیل برحسب طول پروفیل



شکل ۱۸ اثر طول بال پروفیل ( $A_L$ ) بر تابیدگی کف برای پروفیل‌هایی با شعاع ناحیه انتقال  $R=200$  (mm)

برای ناحیه فشاری:

$$Lc = (R + A_L) \cdot \theta \quad (9)$$

$$W = R \cdot \theta \quad (10)$$

$$\Rightarrow \frac{Lc}{W} = 1 - \frac{A_L}{R} \quad (11)$$

برای ناحیه کششی:

$$Ls = (R + A_L) \cdot \theta \quad (12)$$

$$W = R \cdot \theta \quad (13)$$

$$\Rightarrow \frac{Ls}{W} = 1 - \frac{A_L}{R} \quad (14)$$

با توجه به معادلات (۱۱) و (۱۴)، با افزایش طول بال،  $A_L$  نسبت  $Lc/W$  و  $Ls/W$  برای هر دو ناحیه فشاری و کششی، از عدد ۱ فاصله بیشتری خواهد گرفت، که طبق پیش‌بینی انجام شده پتانسیل ایجاد تابیدگی بیشتر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل ۱۸ نیز تایید کننده همین امر است.

#### ۲-۲-۴- بررسی اثر شعاع ناحیه انتقال ( $R$ )، بر تابیدگی کف

نمودار شکل ۱۹، میزان تابیدگی کف پروفیل با طول بال ثابت ۲۰ (mm) برحسب شعاع ناحیه انتقال مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع ناحیه انتقال، میزان تابیدگی کف پروفیل برای هر سه زاویه خم ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه، کاهش می‌یابد. این پدیده نیز با توجه به توضیحات داده شده در بخش ۲-۴-۱ قابل توجیه است. با توجه به معادلات (۱۱) و (۱۴)، برای یک طول بال  $A_L$  ثابت، هرچه شعاع ناحیه انتقال

با توجه به شکل ۱۳، مقدار  $AC_{desirable}$  با افزایش زاویه شکل‌دهی، کاهش می‌یابد. کمترین مقدار آن در زاویه شکل‌دهی ۹۰ درجه برابر  $W$  می‌باشد، (شکل ۶). در این حالت برای تولید پروفیل بدون تابیدگی، بایستی طول لبه پروفیل ( $AC$ ) با طول متناظر بر روی کف پروفیل ( $W$ )، برابر شود ( $AC=AC_{desirable}=W$ ). بنابراین هر چه اختلاف بین طول لبه ورق پیش‌بریده شده ( $LC$ ) و طول متناظر آن بر روی کف ( $W$ )، بیشتر باشد یا به عبارتی نسبت  $LC/W$  از عدد یک دورتر شود، برای شکل‌دهی صحیح پروفیل، به تغییر شکل بیشتر لبه نیاز است که پیش‌بینی می‌شود پتانسیل ایجاد تابیدگی افزایش یابد. این امر در بخش ۲-۴-۱ نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۱۵، نمودار طول لبه بال پروفیل شکل داده شده در ناحیه کششی ( $AS$ ) و طول مطلوب محاسبه شده از معادله (۴) برای سه پروفیل آورده شده است.

در نمودار شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که طول لبه پروفیل در ناحیه کششی ( $AS$ ) کوچک‌تر از طول مطلوب این ناحیه ( $AS_{desirable}$ ) می‌باشد. این عامل موجب تفرق پروفیل و تابیدگی به سمت پایین می‌شود. این پدیده در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.

در جدول ۴ مقادیر کرنش مطلوب ( $\epsilon S_{desirable}$ ) و کرنش اعمال شده به لبه در ناحیه کششی ( $\epsilon S$ ) برای پروفیل‌های نامبرده آورده شده است. در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود که کرنش‌های کافی به لبه بال در ناحیه کششی اعمال نشده و در نتیجه بین طول لبه ناحیه کششی و مقدار مطلوب آن اختلاف به وجود می‌آید.

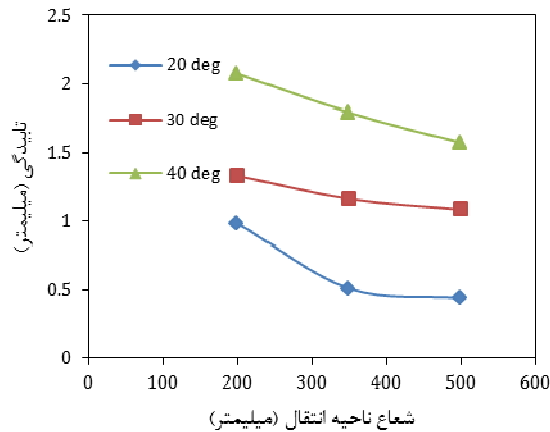
در ناحیه کششی نیز بیشترین مقدار  $AS_{desirable}$  در زاویه شکل‌دهی ۹۰ درجه است که برابر  $W$  می‌باشد (شکل ۶ الف)، که در صورت انجام شکل‌دهی ایده‌آل، بایستی طول لبه بال پروفیل شکل داده شده در ناحیه کششی ( $AS$ )، با طول متناظر بر روی کف پروفیل ( $W$ )، برابر شود ( $AS=AS_{desirable}=W$ ). در اینجا نیز با دورتر شدن نسبت  $LS/W$  از عدد ۱، برای شکل‌دهی صحیح پروفیل به تغییر طول بیشتر لبه نیاز است، بنابراین انتظار می‌رود پتانسیل ایجاد تابیدگی افزایش یابد. این امر در بخش ۲-۴-۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۲-۲-۴- بررسی اثر پارامترهای هندسی بر تابیدگی

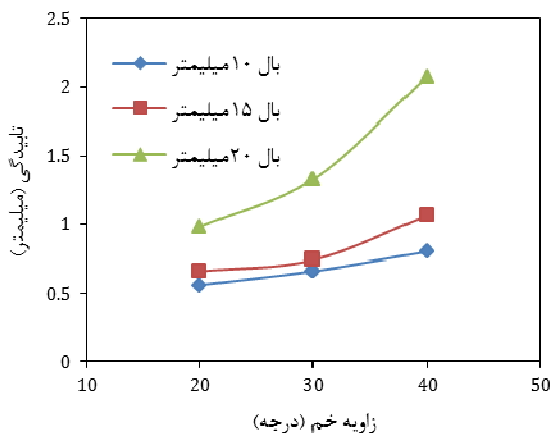
برای اندازه‌گیری مقدار تابیدگی کف، پس از خروج پروفیل از ایستگاه شکل‌دهی (شکل ۷)، مسیری بر روی کف پروفیل (بر روی صفحه تقارن پروفیل) تعریف شد و نمودار ارتفاع کف پروفیل برحسب طول قطعه رسم شد. سپس میزان اختلاف بین بیشینه و کمینه ارتفاع کف در ناحیه انتقال به‌عنوان مقدار تابیدگی کف پروفیل معرفی شد. شکل ۱۷ نمودار ارتفاع کف پروفیل در ناحیه انتقال را نشان می‌دهد.

#### ۲-۲-۴- بررسی اثر طول بال پروفیل ( $A_L$ )، بر تابیدگی کف

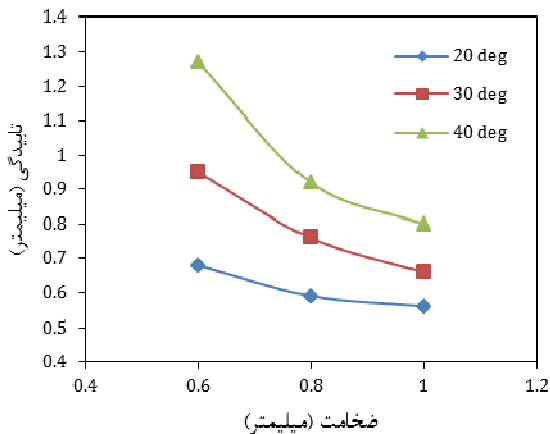
شکل ۱۸ نمودار تابیدگی کف پروفیل برحسب طول بال را برای سه زاویه خم مختلف و شعاع ناحیه انتقال ۲۰۰ میلیمتر نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این نمودار مشخص است، با افزایش اندازه بال پروفیل، تابیدگی برای هر سه زاویه خم ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد، هر چه نسبت  $Lc/W$  و  $Ls/W$  از عدد ۱ دورتر شود، آنگاه برای تولید پروفیل بدون تابیدگی، به تغییر طول بیشتری در لبه ورق در ناحیه انتقال نیاز است که انتظار می‌رود پتانسیل ایجاد تابیدگی افزایش یابد. با توجه به شکل ۶، نسبت  $Lc$  و  $Ls$  به  $W$  برای ناحیه فشاری و کششی به شرح زیر آورده شده است:



شکل ۱۹ اثر شعاع ناحیه انتقال (R)، بر تابیدگی کف پروفیل



شکل ۲۰ اثر زاویه خم (α) بر تابیدگی کف



شکل ۲۱ اثر ضخامت بر تابیدگی کف پروفیل

جدول ۵ مقادیر P حاصل از تحلیل واریانس مدل درجه دوم برای پروفیل به ضخامت ۱ میلی‌متر

عامل تاثیرگذار	P
R	۰/۰۰۰۹
α	<۰/۰۰۰۱
A <sub>L</sub>	<۰/۰۰۰۱
α × A <sub>L</sub>	<۰/۰۰۰۱
(A <sub>L</sub> ) <sup>2</sup>	۰/۰۰۹۹

با توجه به جدول ۵، عواملی همچون زاویه خم (α)، اندازه بال (A<sub>L</sub>) و حاصلضرب آن دو (α × A<sub>L</sub>) دارای مقادیر P کمتر از ۰/۰۰۰۱ می‌باشند که نشان می‌دهد این عوامل بیشترین سهم را در تعیین میزان تابیدگی دارا هستند.

(R)، بیشتر باشد، عبارت  $A_L/R$  به سمت صفر میل کرده و در نتیجه نسبت‌های  $Lc/W$  و  $Ls/W$  به عدد ۱ نزدیک‌تر شده و پتانسیل ایجاد تابیدگی کمتر می‌شود.

#### ۴-۲-۳- بررسی اثر زاویه خم (α) بر تابیدگی کف

در شکل ۲۰ نمودار تابیدگی کف پروفیل برحسب زاویه خم (α)، برای سه طول بال مختلف و شعاع ناحیه انتقال ثابت ۲۰۰ میلی‌متر آمده است. مشاهده می‌شود که هر چه زاویه خم پروفیل بیشتر شود، تابیدگی کف پروفیل برای هر سه طول بال افزایش می‌یابد. با توجه به معادله (۲) و (۴)، هر چه زاویه شکل‌دهی پروفیل (α) افزایش یابد، طول مطلوب لبه پروفیل در ناحیه فشاری ( $AC^{desirable}$ ) کاهش و طول مطلوب لبه در ناحیه کششی ( $AS^{desirable}$ ) افزایش پیدا می‌کند. از این رو لبه ورق در نواحی فشاری و کششی (Ls و Lc) نیاز به تغییر طول بیشتری دارند تا به مقادیر مطلوب ( $AS^{desirable}$  و  $AC^{desirable}$ ) برسند. به همین دلیل شکل‌دهی صحیح پروفیل دشوارتر شده و تابیدگی افزایش می‌یابد.

#### ۴-۲-۴- بررسی اثر ضخامت (t) بر تابیدگی کف

شکل ۲۱ نمودار تابیدگی کف پروفیل برحسب ضخامت ورق برای پروفیلی با اندازه بال ۱۰ میلی‌متر و شعاع ناحیه انتقال ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت ورق، تابیدگی کف پروفیل برای هر سه زاویه خم ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه کاهش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان با افزایش ممان اینرسی سطح مقطع پروفیل با افزایش ضخامت ورق بیان کرد. با توجه به معادله (۱۵)، هرچه ممان اینرسی سطح مقطع پروفیل (I) در ناحیه انتقال (با توجه به شکل ۸)، کاهش می‌یابد که همین امر موجب کاهش تابیدگی کف پروفیل می‌شود.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (15)$$

#### ۴-۳- تحلیل واریانس نتایج و ارائه رابطه‌ای جهت پیش‌بینی تابیدگی

مقادیر تابیدگی به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده برای پروفیل به ضخامت ۱ میلی‌متر (مطابق جدول ۱)، در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت مورد تحلیل واریانس قرار گرفت. مدل برازش به‌صورت تابع درجه دوم انتخاب شد. در جدول ۵ نتایج تحلیل واریانس مدل برازش شده مشاهده می‌شود.

در تحلیل واریانس، هرچه مقدار P عامل مورد بررسی به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، تاثیرگذاری آن عامل بر خروجی بیشتر می‌باشد. در صورتی که مقدار P عامل مورد بررسی از ۰/۰۵ بیشتر باشد، تاثیرگذاری آن بر خروجی اندک بوده و می‌توان از آن عامل صرف‌نظر کرد [۱۸]. در مدل درجه دوم مورد نظر، مقادیر P برای عواملی همچون  $R^2$ ،  $\alpha^2$ ،  $\alpha \times R$  و  $R \times A_L$  از ۰/۰۵ بزرگتر به‌دست آمد که نشان‌دهنده تاثیر کم این عوامل بر تابیدگی بود. در نتیجه این عوامل از مدل برازش حذف شدند. مدل نهایی برازش شده به صورت معادله (۱۶) آورده شده است. معادله (۱۶) تابیدگی پروفیل به ضخامت ۱ میلی‌متر و جنس فولاد معمولی SAE1020 را برحسب پارامترهای هندسی نظیر اندازه بال (A<sub>L</sub>)، شعاع ناحیه انتقال (R) و زاویه خم (α) پیش‌بینی می‌کند. در این معادله واحد طول برحسب میلی‌متر و زاویه برحسب درجه می‌باشد.

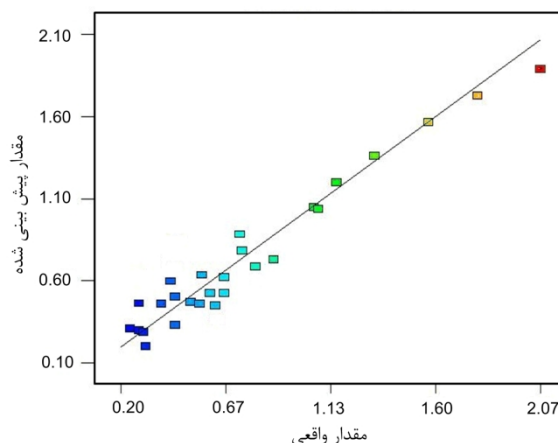
$$\begin{aligned} \text{Warpage} = & 3.4196 - 1.0814 \times 10^{-3} \times R - 0.0554 \times \alpha \\ & - 0.3374 \times A_L + 5.4333 \times 10^{-3} \times \alpha \times A_L \\ & + 8.2667 \times 10^{-3} \times (A_L)^2 \end{aligned} \quad (16)$$



خم ( $\alpha$ )، اندازه بال ( $A_L$ ) و حاصلضرب آن‌ها ( $\alpha \times A_L$ ) دارای بیشترین سهم در مقدار تابیدگی می‌باشند.

## ۶- مراجع

- [1] G. T. Halmos, *Roll Forming Handbook*, Published by Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] M. Lindgren, Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, pp.77-81, 2007.
- [3] M. Gutierrez, S. Berner, C. Hennigs, A. Sedelmaier, A. Agnello, J. Bahillo, Profile forming innovation, in *Proceeding of 50<sup>th</sup> Anniversary Conference of Tools and Technologies for the Processing of Ultra High Strength Steels*, Graz, Austria, May 31 2010.
- [4] R. Henning, A. Sedlmaier, A. Abee, Finite Element Analysis of 3D Profiles with Changing Cross Section, *10<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, Achen, Germany, September 2011.
- [5] P. Groche, M. Henkelman, P. Gotz, S. Berner, Cold rolled Profiles for Vehicle Construction, in *proceeding of 9<sup>th</sup> International Conference of Plasticity (ICTP)*, Gyeongju, Korea, 2008.
- [6] H. Ona, Study on development of intelligent roll forming machine, *Proceeding of 8<sup>th</sup> ICTP*, Verona, Italy, 2005.
- [7] Abee, S. Berner, A. Sedlmaier, Accuracy improvement of roll formed profile with variable cross section, *Proceeding of 9<sup>th</sup> International Conference of Plasticity (ICTP)*, Gyeongju, Korea, 2008.
- [8] P. Groche, A. Zettler, S. Berner, G. Schneider, Development and verification of one-step-model for the design of flexible roll formed parts, *International Journal of Material Forming*, Vol. 4, No. 4, pp. 371-377, 2011.
- [9] J. Larranaga, C. Galdos, R. Ortubay, G. Arrizabalaga, Flexible roll forming process reliability and optimisation method, *Proceeding of 9<sup>th</sup> International Conference of Plasticity (ICTP)*, Gyeongju, Korea, 2008.
- [10] M. Lindgren, 3D Roll-forming of Hat-profile with Variable Depth and Width, *1<sup>st</sup> International Congress on Roll Forming (RollFORM)*, Bilbao, Spain, 2009.
- [11] J. Larranaga, S. Berner, L. Galdos, P. Groche, Geometrical accuracy improvement in flexible roll forming lines, *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMTP)*, VOL. 1315, Paris, France, 2010.
- [12] S. Berner, M. Storbeck, P. Groche, A study on flexible roll formed products accuracy by means of fea and experimental tests, in *Proceeding of 14<sup>th</sup> International ESAFORM Conference on Material Forming AIP*, pp. 345-350, 2011.
- [13] Ch. Wang, G. Kinzel, T. Altan, Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operations in sheet-metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 53, No. 3, pp. 759-780, 1995.
- [14] F. Heislitz, H. Livatyali, M. A. Ahmetoglu, G. L. Kinzel, T. Altan, Simulation of roll forming process with 3-D FEM Code PAM-STAMP, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 59-67, 1996.
- [15] M. S. Tehrani, P. Hartley, H. Moslemi Naeini, H. Khademizadeh, Localized edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section, *Journal of Thin-Walled Structure*, Vol. 44, No. 2, pp. 184-196, 2006.
- [16] D. Bhattacharyya, P. Smith, C. H. Yee, I. F. Collins, The Prediction of Deformation Length in Cold Roll Forming, *Mechanical Working Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 181-191, 1984.
- [17] C. K. McClure, H. Li, Roll forming simulation using finite element analysis, *Manufacturing Review*, Vol. 8, No. 2, pp. 114-122, 1995.
- [18] Design Expert 7.00 Software, Help section



شکل ۲۲ مقایسه مقدار پیش‌بینی شده توسط معادله (۱۶) با مقدار واقعی آن

شکل ۲۲ نمودار مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله (۱۶) در برابر مقدار واقعی آن رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نزدیکی مقادیر به خط مرکزی نشان‌دهنده صحت مدل برازش شده می‌باشد.

معادله (۱۶) می‌تواند در طراحی پروفیل‌های با عرض متغیر مورد استفاده قرار گیرد. مثلاً برای طراحی پروفیلی با اندازه بال و زاویه شکل‌دهی مشخص، می‌توان شعاع ناحیه انتقال آن را طوری انتخاب کرد تا تابیدگی پروفیل از مقدار معینی بیشتر نشود. همچنین می‌توان برای محصولی با هندسه کاملاً مشخص، امکان و یا عدم امکان تولید آن در محدوده مجاز و معینی از تابیدگی، را مورد ارزیابی قرار داد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود عیب تابیدگی کف پروفیل در فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت و اثر پارامترهای هندسی نظیر اندازه بال، ضخامت، شعاع ناحیه انتقال و زاویه خم بر روی این عیب مشخص شد. در نهایت سهم عوامل تأثیرگذار بر تابیدگی برای پروفیل با ضخامت ۱ میلی‌متر معین و معادله‌ای جهت پیش‌بینی مقدار تابیدگی ارائه شد. بنابر نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت:

- علت ایجاد تابیدگی، اعمال نشدن مقدار کافی کرنش طولی در لبه بال پروفیل در ناحیه انتقال و در نتیجه خطای طول لبه بال پروفیل در هر یک از نواحی فشاری و کششی نسبت به طول مطلوب، می‌باشد.
- تابیدگی کف پروفیل با کاهش اندازه بال، کاهش می‌یابد.
- تابیدگی کف پروفیل با افزایش زاویه خم افزایش می‌یابد.
- تابیدگی کف پروفیل با افزایش شعاع ناحیه انتقال، کاهش می‌یابد.
- با افزایش ضخامت، تابیدگی کف پروفیل کاهش می‌یابد.
- رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقدار تابیدگی برحسب پارامترهای هندسی محصولی با ضخامت مشخص ارائه شد. در این رابطه عواملی همچون زاویه