



## تأثیر پارامترهای فرایند بر عیب نازک‌شدگی در شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی شکل سیامک پوریان<sup>1</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>2\*</sup>، رسول صفدریان<sup>3</sup>، بهروز شیرانی بیدآبادی<sup>4</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان

4- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115، Moslemi@modares.ac.ir

### کلیدواژگان

شکل‌دهی غلتکی سرد  
شعاع گوشه غلتک  
زاویه شکل‌دهی

### چکیده

شکل‌دهی غلتکی سرد یک فرایند شکل‌دهی ورق فلزات است که از نظر ظاهری ساده ولی به دلیل پارامترهای زیادی که بر این فرایند تأثیر گذار هستند و اثر متقابلی که این پارامترها بر یکدیگر دارند با چالش‌هایی روبرو است. یکی از مهمترین عیوبی که روی کیفیت محصولات این فرایند تأثیر می‌گذارد، عیب نازکی شدگی می‌باشد. این عیب که عمدتاً در ناحیه خم ورق اتفاق می‌افتد تحت تأثیر پارامترهایی از فرایند می‌باشد. پارامترهایی از قبیل: زاویه شکل‌دهی، ضخامت ورق، قطر غلتک، شعاع گوشه غلتک و فاصله بین ایستگاه‌ها تأثیر زیادی در وقوع عیب پارگی دارند. در این مقاله به بررسی پارامترهای شعاع گوشه غلتک، زاویه شکل‌دهی و ضخامت ورق بر روی عیب نازک‌شدگی در این فرایند پرداخته شده است. برای انجام این تحقیق آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی غلتکی سرد انجام شده است و از شبیه‌سازی اجزای محدود نرم‌افزار آباکوس برای پیش‌بینی عیب نازک‌شدگی در ناحیه خم استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌های تجربی از ورق فولادی St52 استفاده شد. نتایج نشان داد که از سه پارامتر مورد بررسی در این مقاله شعاع گوشه غلتک 0/5 میلی‌متر با 41/7% و زاویه شکل‌دهی 60 درجه با 40/7% بیشترین تأثیر را بر عیب نازک‌شدگی دارند؛ از این رو برای کم کردن کرنش‌های عرضی در ناحیه خم بهتر است که زاویه شکل‌دهی کاهش یابد، بنابراین تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی باید افزایش یابد.

## The effect of process parameters on thinning defect in the cold roll forming process of channel section

Siamak Pouryan<sup>1</sup>, Hassan Moslemi Naeini<sup>1</sup>, Rasoul Safdarian<sup>2</sup>, Behrooz Shirani Bidabadi<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

\* P.O.B. 14115-1111, Tehran, Iran, Moslemi@modares.ac.ir

### Keywords

Cold roll forming  
Roller radius corner  
Forming angle

### Abstract

Cold roll forming is a sheet metal forming process that it looks simple, but the lot of parameters that influence this process and interaction of this parameters over each other's are challenges. One of the defects that affect the quality of the products in this process, is the thinning. This defect occurs mainly in bending zone is affected by the parameters of the process. Parameters such as forming angle, sheet thickness, roller diameter, roller corner radius and distance between stations have a major effect on the occurrence of fracture. In this paper, the roller corner radius, forming angle and sheet thickness have been investigated to the thinning defect in this process. Cold roll forming experiments for this study has been done and the Abaqus finite element simulation software used to predict the thinning in the bending zone. St52 steel sheet was used to experiments. The results showed that from three parameters investigated in this paper the radius of the corner of 5mm with 41.7% and forming angle of 600 whit 40.7% have the greatest effects on this defect. In fact for reduction of transverse strains in bending zone it is better that forming angle decrease so the number of forming stations increase.

### 1- مقدمه

با عبور از میان جفت غلتک‌های بالایی و پایینی در ایستگاه‌های متوالی به‌صورت تدریجی تبدیل به محصول نهایی خواهد شد [2,1]. یکی از محصولات تولیدی توسط این فرایند، مقاطع کانالی شکل متقارن هستند. یک مقطع کانالی شکل را می‌توان

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد<sup>1</sup> یک فرایند خم کاری است که ورق

<sup>1</sup> Cold roll forming

### Please cite this article using:

S. Pouryan, H. Moslemi Naeini, R. Safdarian, B. Shirani Bidabadi, The effect of process parameters on thinning defect in the cold roll forming process of channel section, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 11-18, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از عیوبی که در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد اتفاق می‌افتند می‌توان به عیب شمشیری شدن، کمانش، پیچش، چین‌خوردگی لبه، نازک‌شدگی و پارگی اشاره کرد که در این میان عیب نازک‌شدگی و پارگی چندان مورد بررسی قرار نگرفته و تنها در بعضی از پژوهش‌های محققان پیشین این عیب مشاهده شده است [4-9,6].

## 2- شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند

کلیه مراحل مدل‌سازی توسط حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس نسخه 6/10/1 انجام شد. با توجه به اینکه تغییر شکل غلتک‌ها در حین فرایند بسیار ناچیز است در شبیه‌سازی اجزای محدود غلتک‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شد. ورق نیز چون تغییر شکل پیدا می‌کند به صورت جسم تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شد [5]. در مدل طراحی شده برای شبیه‌سازی ایستگاه صفر نقشی در شکل‌دهی ورق ندارد و فقط برای جلوگیری از ارتعاش ورق استفاده شده است و بقیه ایستگاه‌ها شکل‌دهی ورق را انجام می‌دهند (شکل 1). برای اصطکاک بین غلتک‌ها و ورق از مدل کلمب با ضریب اصطکاک 0/2 استفاده شد [9,10].

از ورق فولادی st52 برای انجام شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های تجربی استفاده شد. برای وارد کردن خواص مکانیکی ورق st52 آزمون کشش تک‌محوری طبق استاندارد ASTM E8/E8M انجام شد. منحنی تنش-کرنش حقیقی مطابق شکل 2 به نرم‌افزار معرفی شد. با توجه به اینکه مقاطع کانالی شکل در راستای طولی خم می‌شوند در نتیجه بیشترین تغییر شکل در ناحیه خم اتفاق می‌افتد و ناحیه کف تقریباً تغییر شکل را تجربه نمی‌کند. بر این اساس اندازه المان‌ها در ناحیه خم کوچک‌تر در نظر گرفته شد [11,3]. برای شبکه‌بندی ورق از المان‌ها نوع S4R استفاده شد [12] (شکل 3).

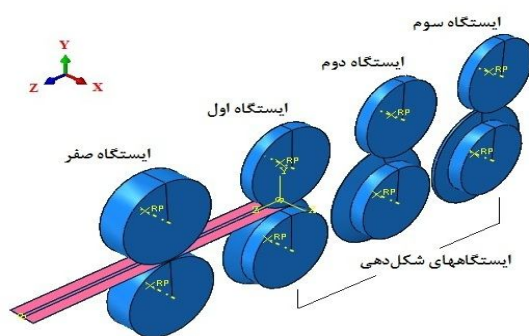


Fig. 1 A view of a model designed to simulation

شکل 1 نمایی از مدل طراحی شده برای شبیه‌سازی

به سه ناحیه کف<sup>1</sup>، بال<sup>2</sup> و خم<sup>3</sup> تقسیم کرد. در این فرایند حرکت حرکت ورق به سمت جلو توسط اصطکاک بین غلتک‌ها و ورق ایجاد می‌شود. تعداد مراحل شکل‌دهی به جنس و ضخامت ورق اولیه و پیچیدگی شکل پروفیل موردنظر بستگی دارد [3]. در شکل‌دهی غلتکی سرد برخلاف بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی فلزات، شکل‌دهی به صورت شدید و ناگهانی نیست زیرا تغییر شکل شدید می‌تواند سبب آسیب رساندن به غلتک‌ها و حتی بروز برخی عیوب هندسی در محصول نهایی می‌شود. از این رو کنترل آهنگ تغییر شکل در انجام موفقیت‌آمیز فرایند بسیار مهم است.

محققان زیادی در زمینه پارامترهای مؤثر در این فرایند تحقیق کرده‌اند که از این جمله پارالیکاس و همکاران [4] اثر سرعت خط تولید، فاصله بین ایستگاه‌ها، فاصله بین غلتک‌ها و قطر غلتک‌ها را روی کیفیت محصول U شکل بررسی کردند و توزیع کرنش‌های طولی و عرضی، کرنش‌های طولی لبه‌ای ارتجاعی و باقی‌مانده و دقت ابعادی محصول نهایی را به عنوان ملاک‌هایی برای ارزیابی کیفیت محصول نهایی در نظر گرفتند. فینگ و همکاران [5] به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود به بررسی توزیع تنش و کرنش در بخش‌های مختلف مقطع کانالی شکل در طی فرایند شکل‌دهی غلتکی پرداختند. نتایج نشان داد که تغییر شکل و کاهش ضخامت به‌طور عمده در گوشه انتهای وب متمرکز است و نحوه توزیع زاویه شکل‌دهی بین ایستگاه‌ها به کاهش مقدار تنش کمک می‌کند. زی و همکاران [6] به بررسی تأثیر پارامترهای شکل‌دهی در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در مقاطع کانالی شکل پرداختند. آن‌ها پارامترهای از قبیل زاویه خم و ضخامت ورق و تنش تسلیم ورق را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش زاویه خم بین دو ایستگاه، افزایش ضخامت ورق و افزایش تنش تسلیم باعث افزایش کرنش طولی لبه در مقطع کانالی شکل می‌شود. صفدریان و مسلمی نائینی [7] در تحقیقی به بررسی تأثیر پارامترهای شکل‌دهی غلتکی سرد بر روی کرنش‌های لبه پرداختند. در این تحقیق تأثیر زاویه شکل‌دهی بر روی عیب شمشیری شدن بررسی شد و مشاهده شد که با افزایش زاویه این عیب افزایش می‌یابد. دادگر اصل و همکاران [8] به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مقطع کانالی شکل پرداختند و پارگی را در زاویه 60 درجه مشاهده کردند.

<sup>1</sup> Web  
<sup>2</sup> Flange  
<sup>3</sup> Bend

جدول 1 فاکتورهای مورد بررسی و سطوح آنها

فاکتور	سطوح	مقادیر
شعاع گوشه غلتک (mm)	3	0/5, 1, 1/5
زاویه شکل‌دهی (deg)	3	30, 45, 60
ضخامت ورق (mm)	2	2, 3

جدول 2 تعداد شبیه‌سازی‌ها

شماره آزمایش	شعاع گوشه غلتک (mm)	زاویه شکل‌دهی (deg)	ضخامت ورق (mm)
1	0/5	30	2
2	0/5	30	3
3	0/5	45	2
4	0/5	45	3
5	0/5	60	2
6	0/5	60	3
7	1	30	2
8	1	30	3
9	1	45	2
10	1	45	3
11	1	60	2
12	1	60	3
13	1/5	30	2
14	1/5	30	3
15	1/5	45	2
16	1/5	45	3
17	1/5	60	2
18	1/5	60	3

### 5- مشخصات هندسی نمونه‌ها

نمونه‌هایی که تحت آزمون تجربی قرار گرفتند ورق‌هایی به ضخامت 3 و 2 میلی‌متر بودند. این ورق‌ها در اندازه ابعادی 80×1000 میلی‌متر مورد برش قرار گرفتند که در شکل 4 قابل مشاهده است. برای برش ورق‌های مورد نیاز از گیوتین استفاده شد. ابعاد هندسی مقاطع کانالی شکل و غلتک‌ها در شکل 5 نشان داده شده است. طول بال مقاطع 20 میلی‌متر و اندازه کف 40 میلی‌متر می‌باشد و قطر غلتک‌ها 180 میلی‌متر است.

### 6- مشخصات دستگاه

دستگاه مذکور دارای هفت ایستگاه جهت شکل‌دهی بود که تنها از سه ایستگاه آن استفاده شد.

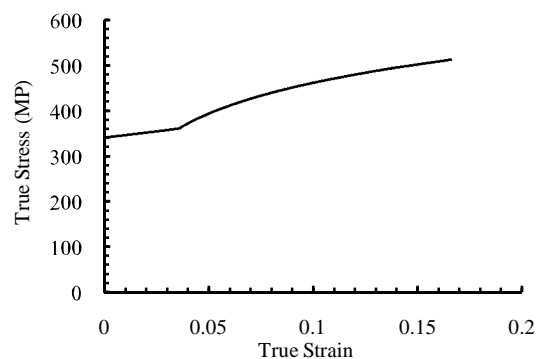


Fig. 2 Plastic true stress-strain curve

شکل 2 منحنی تنش-کرنش حقیقی خمیری

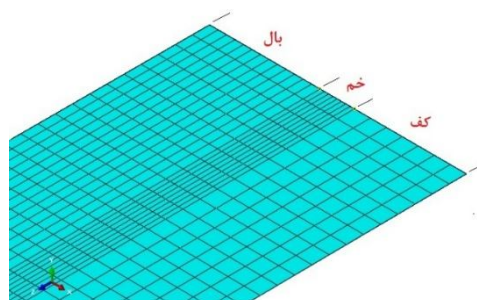


Fig. 3 Meshing

شکل 3 شبکه‌بندی ورق

### 3- طراحی آزمایش

برای آنکه بتوان آزمایش‌ها را به نحوی انجام داد که به بهترین نتایج دست یافت، باید پارامترهای مؤثر بر روی شکل‌دهی غلتکی سرد را شناخت. متغیرهای زیادی بر روی این فرایند تأثیرگذار هستند که از مهم‌ترین آنها می‌توان زاویه شکل‌دهی، شعاع گوشه غلتک و ضخامت و جنس ورق را نام برد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از طراحی کامل با 3 فاکتور استفاده شد که این فاکتورها با سطوح مورد نظر در جدول 1 ارائه شده است. شعاع گوشه غلتک دارای 3 سطح به ترتیب 0/5 و 1 و 1/5 میلی‌متر می‌باشد. زاویه شکل‌دهی دارای 3 سطح به ترتیب 30 و 45 و 60 درجه و ضخامت ورق دارای 2 سطح به ترتیب 2 و 3 میلی‌متر می‌باشد. به این ترتیب تعداد شبیه‌سازی‌ها شامل 18 آزمایش است که در جدول 2 نشان داده شده است.

### 4- آزمایش‌های تجربی

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد آزمایشگاه واقع در شرکت لوله و پروفیل پایا در شهرک صنعتی مورچه‌خورت اصفهان استفاده شد.

کرنشهای حقیقی کمینه و بیشینه با اندازه‌گیری قطر کوچک ( $b$ ) و قطر بزرگ ( $a$ ) بیضی‌ها و مقایسه آن با قطر اولیه ( $d_0$ ) با استفاده از روابط زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$\varepsilon_{\text{major}} = \ln(a/d_0), \varepsilon_{\text{minor}} = \ln(b/d_0) \quad (1)$$

پس از اندازه‌گیری قطر دایره‌ها در ناحیه خم و نزدیک به خم توسط شابلون (نوار شفاف درجه‌بندی شده با نام نوار میلر) کرنش‌های عرضی استخراج شد.

اگر کرنش طولی،  $\varepsilon_t$ ، کرنش در راستای ضخامت و  $\varepsilon_x$  کرنش عرضی در ناحیه خم باشد با توجه به اینکه در این فرایند حجم ثابت باقی می‌ماند بنابراین مجموع کرنش‌ها برابر با صفر خواهد بود و چون ورق نسبت به ضخامتش به اندازه کافی طویل است پس می‌توان کرنش طولی را برابر با صفر در نظر گرفت.

$$\varepsilon_z + \varepsilon_t + \varepsilon_x = 0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_t + \varepsilon_x = 0 \rightarrow \varepsilon_x = -\varepsilon_t \quad (4)$$

با توجه به روابط کرنش در راستای ضخامت فشاری بوده و از نظر مقداری برابر با کرنش عرضی می‌باشد.



Fig. 4 A sample of cut sheets

شکل 4 نمونه‌ای از ورق‌های برش خورده

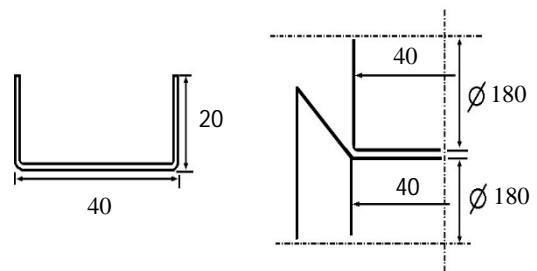


Fig. 5 Dimensions of roll and channel

شکل 5 ابعاد غلتک و کانال



Fig. 6 Cold roll forming machine used in experiments

شکل 6 دستگاه شکل‌دهی غلتکی سرد مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی



Fig. 7 Gridding of sheet test

شکل 7 گریدبندی ورق مورد آزمایش

این خط توسط یک موتور 45 کیلووات توان خود را دریافت می‌نماید. سپس به وسیله کوپلینگ حرکت دورانی به جعبه‌دنده مادر انتقال داده می‌شود. پس از این با کاهش سرعت دورانی و افزایش گشتاور با نسبت 1:20 این توان به وسیله کوپلینگ‌هایی به جعبه‌دنده هر ایستگاه منتقل می‌شود. هر ایستگاه یک جعبه‌دنده مخصوص به خود را داراست که با نسبت 1:20 دور وارده را کاهش می‌دهد و آن را از طریق گاردان به ایستگاه منتقل می‌نماید. جعبه‌دنده‌های کلیه ایستگاه‌ها به صورت موازی به وسیله کوپلینگ به یکدیگر متصل شده‌اند. حداکثر توان هر ایستگاه 7 کیلووات است. این دستگاه امکان تولید محصول کانالی شکل تا ضخامت 3/5 میلی‌متر را داراست (شکل 6).

## 7- اندازه‌گیری کرنش‌ها

به منظور اندازه‌گیری کرنش‌ها در ناحیه خم، ابتدا قبل از انجام آزمون‌های تجربی شکل‌دهی ورق‌ها توسط دستگاه حک الکتروشیمیایی گریدبندی شد که در شکل 7 نوع گرید بندی ورق نشان داده شده است. دایره‌هایی که در معرض تغییر شکل هستند پس از فرایند به شکل بیضی در می‌آیند. کرنش‌های اصلی در صفحه ورق بر اساس کرنش‌های حقیقی بیان شد.

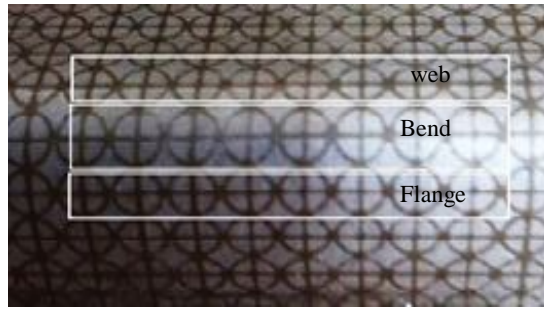


Fig. 8 Three parts of bend zone

شکل 8 سه بخش از ناحیه خم

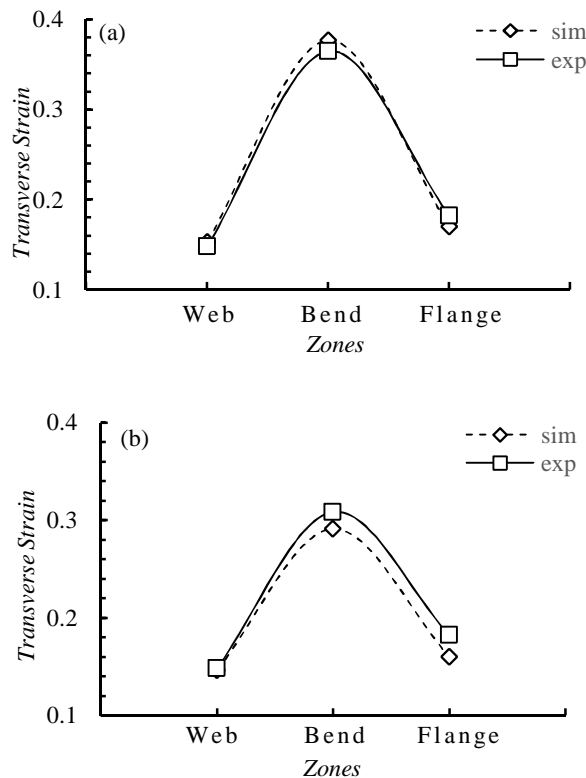


Fig. 9 Comparison of the transverse strain for thickness 3mm (a) 600 (b) 450

شکل 9 مقایسه کرنش‌های عرضی ورق 3 میلی‌متری (a) زاویه 60. (b) زاویه 45 درجه

جدول 3 اختلاف بین کرنش‌های عرضی در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی

Table 3 The difference between the experimental and simulation transverse strain

اختلاف %	کرنش‌های عرضی شبیه‌سازی	کرنش‌های عرضی تجربی	پروفیل
3/13	0/3764	0/3646	3mm و 60 درجه
5/27	0/2912	0/3074	3mm و 45 درجه
5/26	0/3551	0/3364	2mm و 60 درجه
4/07	0/2894	0/2776	2mm و 45 درجه

## 8- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، چهار نمونه از شبیه‌سازی‌ها تحت آزمون تجربی قرار گرفت. هر کدام از نمونه‌ها با سه بار تکرار انجام گرفت و نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمون‌های تجربی با هم مقایسه شدند. انتخاب این چهار نمونه بر اساس ضخامت و زاویه شکل‌دهی متفاوت انجام شد. ضخامت‌های 2 میلی‌متر و 3 میلی‌متر و زوایای شکل‌دهی 45 و 60 درجه انتخاب شد تا بتوان اثر تغییر پارامترها را بر نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی مقایسه کرد.

## 9- مقایسه کرنش‌های عرضی

به‌منظور اندازه‌گیری کرنش‌های عرضی، ناحیه خم به سه بخش شامل: بخش مرکزی ناحیه خم، کف و بال تقسیم شد که در شکل 8 قابل مشاهده است و کرنش‌ها برای هر سه قسمت محاسبه شد. در شکل 9 (a) مقایسه بین کرنش‌های عرضی شبیه‌سازی و آزمون تجربی برای پروفیل با ضخامت 3 میلی‌متر، زاویه شکل‌دهی 60 درجه و شعاع گوشه غلتک 1 میلی‌متر و در شکل 9 (b) مقایسه بین کرنش‌های عرضی شبیه‌سازی و آزمون تجربی برای پروفیل با ضخامت 3 میلی‌متر و زاویه شکل‌دهی و 45 درجه و شعاع گوشه غلتک 1 میلی‌متر نشان داده شده است. همچنین در شکل 10 (a) مقایسه بین کرنش‌های عرضی شبیه‌سازی و آزمون تجربی برای پروفیل با ضخامت 2 میلی‌متر و زاویه شکل‌دهی و 60 درجه و شعاع گوشه غلتک 1 میلی‌متر و در شکل 10 (b) مقایسه بین کرنش‌های عرضی شبیه‌سازی و آزمون تجربی برای پروفیل با ضخامت 2 میلی‌متر و زاویه شکل‌دهی و 45 درجه و شعاع گوشه غلتک 1 میلی‌متر نشان داده شده است.

اختلاف بین کرنش‌های عرضی در مرکز خم برای آزمون تجربی و شبیه‌سازی در جدول 3 نشان داده شده است. با توجه به این جدول بیشترین مقدار کرنش مربوط به پروفیل با ضخامت 3 میلی‌متر و زاویه شکل‌دهی 60 درجه و کمترین مقدار کرنش مربوط به پروفیل با ضخامت 2 میلی‌متر و زاویه شکل‌دهی 45 درجه است. با توجه به درصد اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی که در شکل قابل مشاهده است می‌توان گفت که نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی نزدیکی قابل قبولی دارند.

نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های در جدول 4 نشان داده شده است. در این جدول درصد کاهش ضخامت برای هر یک از شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است.



### 10- تحلیل واریانس نتایج

تحلیل واریانس مربوط به مدل استفاده شده در طراحی آزمایش حاضر در جدول 5 نشان داده شده است. مقدار F value مدل که برابر با 8/69 است، نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن مدل مورد استفاده است. شرط لازم دیگر معنی‌دار بودن مدل آن است که مقدار p-value کمتر از 0/05 باشد. این شرط نیز در مدل استفاده شده ارضا گردیده است. مقدار p-value مدل برابر با 0/002 است. در این جدول، DF درجه آزادی، Seq SS مجموع مربعات متوالی و Adj MS میانگین مربعات تنظیم یافته است [13].

### 11- تأثیر پارامترهای ورودی

در شکل 11 تأثیر شعاع گوشه غلتک بر درصد کاهش ضخامت نشان داده شده است. با توجه به این نمودار با کاهش شعاع گوشه غلتک، درصد کاهش ضخامت ورق افزایش می‌یابد به طوری که در شعاع 0/5 میلی‌متر بیشترین درصد کاهش ضخامت اتفاق می‌افتد. در واقع افزایش شعاع گوشه غلتک سبب کاهش انحنا در آن ناحیه شده و کاهش انحنا باعث می‌شود که در هنگام فرایند شکل‌دهی کرنش کمتری در ناحیه خم اعمال گشته و ورق در این ناحیه کمتر دچار کشش می‌شود. این امر سبب افت میزان کاهش ضخامت ورق می‌گردد.

جدول 5 تحلیل واریانس

Table 5 Analysis Variance

تحلیل واریانس				
P	F	Adj MS	Seq SS	DF
0/002	8/69	59/287	181/63	3
		6/969	97/571	14
			297/201	17

رگرسیون  
خطای باقی‌مانده  
کل

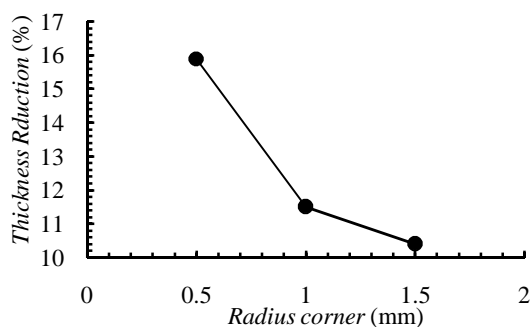


Fig. 11 The effect of roller radius corner on the percentage of thickness reduction

شکل 11 نمودار تأثیر شعاع گوشه غلتک بر درصد کاهش ضخامت

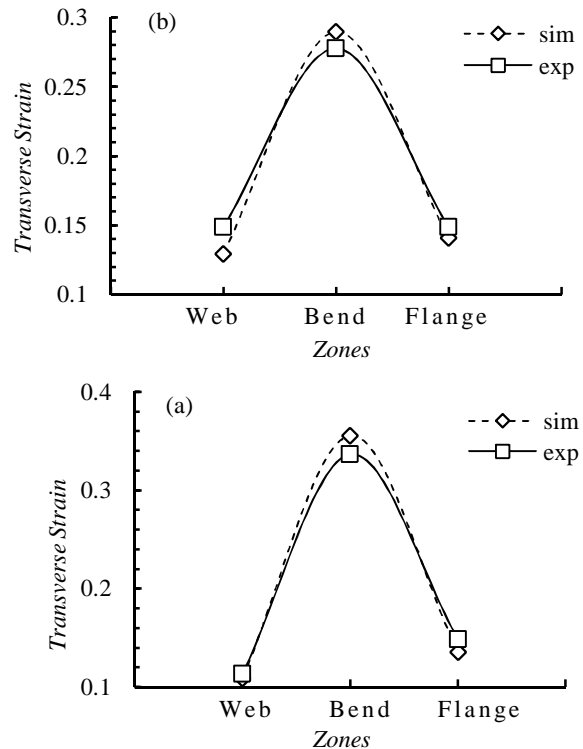


Fig. 10 Comparison of the transverse strain for thickness 2mm (a) 600 (b) 450

شکل 10 مقایسه کرنش‌های عرضی ورق 2 میلی‌متری (a) زاویه 60، (b) زاویه 45 درجه

جدول 4 درصد کاهش ضخامت در شبیه‌سازی‌ها

Table 4 Percent of reduction in simulation

شماره آزمایش	شعاع گوشه غلتک (mm)	زاویه شکل‌دهی (deg)	ضخامت ورق (mm)	کاهش ضخامت (%)
1	0/5	30	2	11/8
2	0/5	30	3	11/7
3	0/5	45	2	13
4	0/5	45	3	16
5	0/5	60	2	16
6	0/5	60	3	25/6
7	1	30	2	10/5
8	1	30	3	11/3
9	1	45	2	11
10	1	45	3	11/5
11	1	60	2	8/5
12	1	60	3	16/3
13	1/5	30	2	8/5
14	1/5	30	3	9/3
15	1/5	45	2	9/5
16	1/5	45	3	9/83
17	1/5	60	2	12/5
18	1/5	60	3	13

و می توان گفت که با افزایش زاویه شکل دهی و کاهش شعاع گوشه غلتک مقدار درصد کاهش ضخامت ورق افزایش می یابد به طوری که در زاویه شکل دهی 60 درجه و شعاع گوشه غلتک 0/5 میلی متر، بیشترین درصد کاهش ضخامت اتفاق می افتد. در شکل های 15 و 16 نیز به ترتیب دیاگرام سه بعدی تأثیر همزمان شعاع گوشه غلتک و ضخامت ورق و همچنین زاویه شکل دهی و ضخامت ورق نشان داده شده است.

## 12- نتیجه گیری

در طی فرایند شکل دهی غلتکی سرد، ورق در ناحیه خم دچار تغییر شکل شده و قسمت بیرونی کشیده و قسمت داخلی فشرده خواهد شد. از لحاظ تئوری محور خنثی در وسط سطح مقطع ورق باقی خواهد ماند.

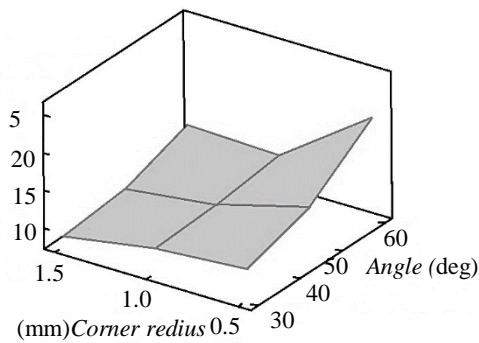


Fig. 14 Show dimensional effect of roller corner radius and forming angle on the percentage of reduction

شکل 14 نمایش سه بعدی تأثیر شعاع گوشه غلتک و زاویه شکل دهی بر روی درصد کاهش ضخامت

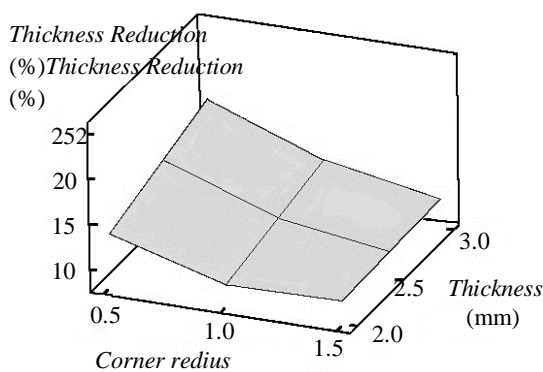


Fig. 15 Show dimensional effect of roller corner radius thickness on the percentage of reduction

شکل 15 نمایش سه بعدی تأثیر شعاع گوشه غلتک و ضخامت ورق بر روی درصد کاهش ضخامت

شکل 12 تأثیر زاویه شکل دهی را بر روی درصد کاهش ضخامت نشان می دهد. با توجه به شکل ارائه شده می توان گفت که با افزایش زاویه مقدار درصد کاهش ضخامت ورق به شدت افزایش می یابد. افزایش زاویه خم در ایستگاه شکل دهی باعث می شود که ورق در ناحیه خم بیشتر تحت کشش قرار گیرد. این امر باعث افزایش میزان نازک شدگی در ناحیه خم می شود.

در شکل 13 اثر ضخامت ورق بر روی درصد کاهش ضخامت نشان داده شده است همان طور که قابل مشاهده است با افزایش ضخامت ورق مقدار درصد کاهش ضخامت بیشتر می شود. با افزایش ضخامت ورق در واقع فاصله لایه های بیرونی ورق از تار خنثی بیشتر شده و این امر سبب افزایش کرنش خمشی در لایه های بیرونی می شود. افزایش کرنش خمشی همراه با کرنش کششی موجود در ورق سبب افزایش میزان نازک شدگی ورق (کاهش ضخامت بیشتر) می شود.

همچنین دیاگرام سه بعدی تأثیر همزمان در پارامتر شعاع گوشه غلتک و زاویه شکل دهی بر روی درصد کاهش ضخامت در شکل 14 نشان داده شده است. با توجه به این دیاگرام می توان محدوده پارامترها را برای دسترسی به درصد کاهش ضخامت دلخواه تنظیم کرد؛

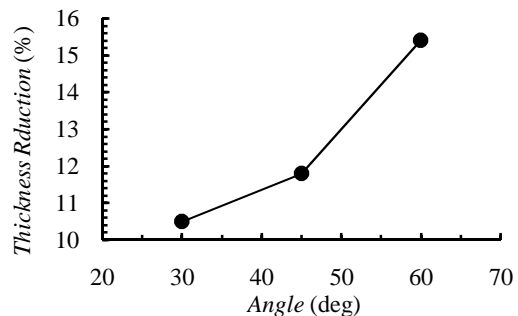


Fig. 12 The effect of forming angle on the percentage of reduction

شکل 12 نمودار تأثیر زاویه شکل دهی را بر روی درصد کاهش ضخامت

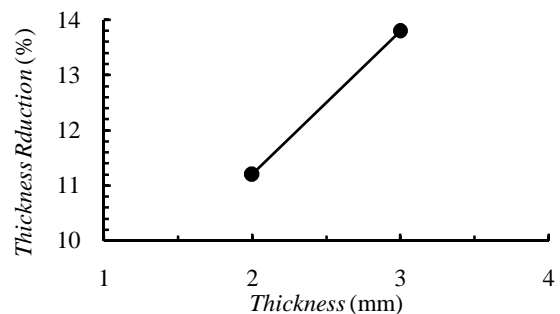


Fig. 13 The effect of sheet thickness on the percentage of reduction

شکل 13 نمودار تأثیر ضخامت ورق را بر روی درصد کاهش ضخامت

## 13- مراجع

- [1] J. Paralikas, K. Salonitis, G. Chryssolouris, Optimization of roll forming process parameters a semi-empirical approach, *Journal of Int J Adv Manuf Tech*, No. 47, pp. 1041-1052, 2010.
- [2] M. Lindgren, Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 186, pp. 77-81, 2007.
- [3] J. Paralikas, K. Salonitis, G. Chryssolouris, Investigation of the effects of roll forming pass design on main redundant deformations on profiles from AHSS, *Journal of Int J Adv Manuf Tech*, No. 56, pp. 475-491, 2011.
- [4] J. Paralikas, K. Salonitis, G. Chryssolouri, Investigation of the effects of main roll-forming process parameters on quality for a V-section profile from AHSS, *Journal of Int J Adv Manuf Tech*, No. 44, pp. 223-237, 2009.
- [5] G.Feng, H. zhang, P. zhang, Numerical Simulation for the Roll Forming Process of a Channel Steel, *Journal of Advanced Materials Research*, No. 821-822, pp. 1376-1380, 2013.
- [6] H. Zhi-wu, L. Cai, L. Wei-Ping, R. Lu-Quan, The effects of forming parameters in the roll-forming of a channel section with an outer edge, *Journal of Material Processing Tecchnology*, No. 116, pp. 205-210, 2001.
- [7] R. Safdarian, H. Moslemi Naeni, The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section, *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 92, 2015, pp. 130-136.
- [8] Y. Dadgar Asl, M. M. Sheikhi, A. Pourkamali Anaraki, V. Panahizadeh Rahimloo, M. Hosseinpour Gollo, Experimental and Numerical Analysis of Fracture on Flexible Roll Forming Process of Channel Section in Aluminum 6061-T6 Sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol, 99 .No. 9, pp 1-11, 2016 (in Persian فارسی)
- [9] Q. V. Bui and J. P. Ponthot, Numerical simulation of cold roll-forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 202(1-3), pp. 275-282, 2008.
- [10] S. Hong, S. Lee, N. Kim, A parametric study on forming length in roll forming, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 113, pp. 774-778, 2001.
- [11] Z. Wei, Y. Yu, W. Hai Bo, G. Jin Feng, Finite Element Analysis and Fracture Forecast of U Channel Flexible Roll Forming, *Journal of Advanced Materials Research*, No. 683 , pp. 604-607, 2013.
- [12] W. Peng, Q. Li, Y. Yan, FEM analysis on 600MPa TIRP steel variable section roll forming with protrusion and hole, *Journal of Advanced Materials Research*, Nos. 457-458, pp. 299-303, 2012.
- [13] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, John Wily & Sons, Inc, 6th edition, 2005.
- [14] G.T. Halmos, Roll forming handbook, CRC Press, 2006.

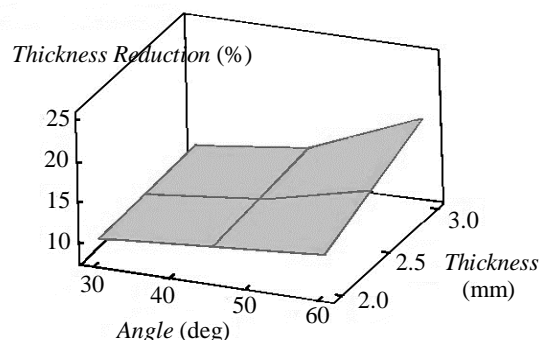


Fig. 16 Show dimensional effect of forming angle and thickness on the percentage of reduction

شکل 16 نمایش سه‌بعدی تأثیر زاویه شکل‌دهی و ضخامت ورق بر روی درصد کاهش ضخامت

در عمل به دلایل مختلف، فشار در قسمت داخلی کمتر و در قسمت بیرونی کشش بیشتر خواهد بود به همین دلیل در ناحیه خم ورق نازک‌تر خواهد شد [14].

در مقاله حاضر به بررسی پارامترهای مؤثر بر روی شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی شکل پرداخته شد. می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

- از بین سه شعاع 0/5، 1 و 1/5 میلی‌متر بررسی شده برای پارامتر شعاع گوشه غلتک، شعاع 0/5 میلی‌متر با 41/7% بیشترین تأثیر و شعاع 1/5 میلی‌متر با 27/7% کمترین تأثیر را بر روی نازک‌شدگی در ناحیه خم داشت. در واقع افزایش شعاع گوشه غلتک سبب کاهش انحنای در آن ناحیه شده و کاهش انحنای باعث می‌شود که در هنگام فرایند شکل‌دهی کرنش کمتری در ناحیه خم اعمال گشته و ورق کمتر دچار کشش شود. این امر سبب افت میزان کاهش ضخامت ورق می‌گردد.

- برای زاویه شکل‌دهی مقدار زاویه 60 درجه با 40/7% بیشترین و زاویه 30 درجه با 27/9% کمترین تأثیر را بر روی نازک‌شدگی داشت. دلیل این امر این است که افزایش زاویه شکل‌دهی باعث افزایش کرنش عرضی شده و این امر باعث افزایش انرژی کرنشی می‌شود که ممکن است این انرژی به حدی برسد که با آزادسازی آن ورق دچار پارگی شود.

- برای کم کردن کرنش‌های عرضی در ناحیه خم و جلوگیری از کاهش ضخامت بهتر است که زاویه شکل‌دهی کاهش یابد و به این منظور باید تعداد ایستگاه‌های شکل‌دهی ورق افزایش یابد.

- از آنجا که شعاع گوشه غلتک بیشترین تأثیر را بر روی کرنش‌های عرضی و نازک‌شدگی در ناحیه خم دارد پس می‌تواند معیاری مناسب برای جلوگیری از نازک‌شدگی باشد.