



## بررسی عددی و شبیه‌سازی پارامترهای موثر بر عیوب مقطع U شکل پیش‌سوراخ شده بیضی تولید شده توسط فرآیند غلتکی سرد

سیاوش ستار<sup>1</sup>، سیامک مزدک<sup>2\*</sup>، ابراهیم شریفی<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش،

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\* تفرش، صندوق پستی 39518 - 79611، s.mazdak@tafreshu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 فروردین 1394

پذیرش: 31 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 03 تیر 1394

کلید واژگان:

شکل‌دهی غلتکی سرد

مقطع پیش‌سوراخ شده U شکل

روش اجزای محدود

روش پاسخ سطح

### چکیده

شکل دهی غلتکی سرد فرآیندی است که در آن ورق فلزی با عبور از یک سری غلتک دوار به مقطع مورد نظر در می‌آید. مقاطع دارای پیش-سوراخ در صنایع مختلف کاربرد فراوانی دارند. معضل اینگونه محصولات تغییر شکل در سوراخ پس از انجام شکل دهی می‌باشد، همچنین وجود عیوبی همچون موج لبه، کمانش، خمش، اعوجاج سوراخ و ... می‌باشد. به منظور بررسی و پیش‌بینی پارامترهای مهم در تغییر شکل سوراخ‌های بیضی در حین فرآیند غلتکی سرد مقطع U شکل، یک مدل سه بعدی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس 6.11.3 در نظر گرفته شده است. پارامترهایی از قبیل شعاع بزرگ و کوچک سوراخ، فاصله سوراخها، فاصله سوراخ از لبه فلنج، ضخامت و جنس ورق در نظر گرفته شده و با استفاده از روش طراحی آزمایش پاسخ سطح، یک مجموعه شبیه‌سازی بدست آمده است. در ادامه با در نظر گرفتن یک دسته پارامترهای خروجی از قبیل کمانش لبه، موج روی سوراخ، تغییر اندازه سوراخ، تغییر فاصله سوراخها از هم، تغییر فاصله سوراخ از لبه فلنج و اندازه‌گیری آنها جدول طراحی آزمایش تکمیل شده است. سپس با استفاده از روش آنوا صحت نتایج آماری بدست آمده است. با مقایسه با نتایج تجربی تحقیق دیگر [1] صحت مدل‌های شبیه‌سازی بررسی می‌شود و در نهایت تاثیر پارامترهای مهم هم به صورت آماری و هم به صورت توابعی ریاضی استخراج شده است.

## Numerical Analysis and Simulation of Effective Parameters on the Defects of Ellipsoidal Pre-notched U-channel Section Produced by Cold Roll-Forming Process

Siavash Sattar, Siamak Mazdak\*, Ebrahim Sharifi

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

\* P.O.B. 79611-39518 Tafresh, Iran, s.mazdak@tafreshu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 28 March 2015  
Accepted 21 May 2015  
Available Online 24 June 2015

#### Keywords:

Cold Roll Forming  
U-channel Pre-notched Section  
Finite Element Method  
Response Surface Method

### ABSTRACT

Cold roll-forming is a process by which a metal sheet will obtain its required section form by being passed through a series of rotating rollers. The pre-notched sections have frequent usage in different industries. The problem with these products is the deformation of the holes after completion of the forming process. Also, there are problems like edge waves, buckling, bending, distortion of the holes, etc. In order to analyze and predict the important parameters in deforming the ellipsoidal holes during the cold roll-forming of U-channel section, a three-dimensional model with finite element has been taken into account. The effective parameters of forming the U-channel section with pre-notches such as the minor and major hole diameter, hole spacing, the distance of holes from the flange edge, thickness and the material were intended. Furthermore, by usage of response surface methodology, the set of tests were designed. Afterward, a set of out-put parameters such as: edge buckling, the wave of the holes, the change of the hole spacing size, the change of the distance of the holes from the flange edge, and the change of the hole size were considered. The output parameters were measured and the chart of experiment design was completed. Then, by applying ANOVA, the accuracy of the statistical results was obtained. Also, by comparison of the results with experimental study, the accuracy of the simulated models was analyzed. Finally, the effect of the significant parameters has been extracted both in statistical form and mathematical functions.

### 1- مقدمه

تغییر شکل می‌دهد. این فرآیند شکل دهی به خاطر تغییر شکلی که در بین ایستگاه‌های شکل دهی علاوه بر تغییر شکل در حین درگیری با ابزار دارد، بسیار پیچیده است. محققین زیادی در این زمینه پژوهش‌های زیادی را

در فرآیند غلتکی سرد یک ورق فلزی در طی ایستگاه‌های شکل دهی مختلف بدون تغییر ضخامت از یک نوار تغییر شکل نیافته به پروفیل نهایی

Please cite this article using:

S. Sattar, S. Mazdak, E. Sharifi, Numerical Analysis and Simulation of Effective Parameters on the Defects of Ellipsoidal Pre-notched U-channel Section Produced by Cold Roll-Forming Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 125-133, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Sattar, S. Mazdak, E. Sharifi, Numerical Analysis and Simulation of Effective Parameters on the Defects of Ellipsoidal Pre-notched U-channel Section Produced by Cold Roll-Forming Process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 125-133, 2015 (In Persian)

انجام داده اند که در ادامه به برخی از آنها پرداخته شده است.

هیساکی واتاری [2,3] ویژگی های عیوب شکل در شکلهای غلتکی سرد محصولات پیش‌سوراخ شده در دو مقطع V شکل و L شکل همچنین پروفیل لوله ای را بررسی کرد. این تحقیق که یک کار تجربی بود با تعریف محدوده-ای برای ابعاد مقاطع و پیش‌سوراخ برای هر مقطع هم چنین با مقایسه آزمایش ها به این نتیجه رسید که اعوجاج لبه با طول فلنج بالا بزرگتر از محصولات با طول فلنج کمتر است. علاوه بر آن پهنای سوراخ اثری روی اعوجاج لبه برای محصولات برای پهنای سوراخ کوچک ندارند. ولی برای محصولاتی که طول فلنج بالا دارند هر چه پهنای سوراخ افزایش یابد احتمال ایجاد اعوجاج لبه بیشتر می‌شود. به علاوه هر چه فاصله از لبه افزایش یابد خم میل به کاهش دارد و کاهش فاصله سوراخها موجب رشد خم و پیچش در محصول می‌گردد

مدلهای ابتدایی فرآیند غلتکی سرد توسط بچری و چیانگ [4,5] طراحی شده بودند که مدل بچری بر پایه تغییر شکل طولی با حداقل ساختن کار پلاستیک برای مقطع L شکل بدست آمد که مدل بدست آمده پیش بینی کرد که طول تغییر شکل مستقل از مقاومت تسلیم می‌باشد. مدل چیانگ که بر پایه کرنش مهندسی در فلنج ارائه شد بر پایه حداقل کار پلاستیک ناشی از کشش و خمش پروفیل بود که نشان داد کرنش طولی در منطقه تغییر شکل یکنواخت است. این مدل‌های اولیه پیش‌بینی کردند که رفتار مستقل از ویژگی‌های ماده می‌باشد. در مقابل اینگورسون [6] فولاد نرم را با فولاد مقاوم بالا در یک آزمایش تجربی در مقطع V شکل مقایسه کرد که در هر دو تعداد ایستگاههای شکلهای برابر بود و در نهایت به این نتیجه رسید که فولاد مقاوم بالا تعداد ایستگاههای شکل دهی کمتری در قیاس با فولاد نرم احتیاج دارد. در تحقیقات لیندگرین [7] که از شبیه سازی المان محدود استفاده شد تاثیرات مقاومت تسلیم روی کرنش بیشینه و طول تغییر شکل ارزیابی شد که نتیجه حاکی از آن بود که کرنش در هنگام افزایش مقاومت تسلیم کاهش می‌یابد هم چنین طول تغییر شکل هنگام افزایش مقاومت تسلیم افزایش خواهد یافت. سلمانی تهرانی [8] از شبیه‌سازی المان محدود برای پیش بینی کمانش لبه به عنوان عامل محدودکننده در شکل دهی غلتکی سرد یک مقطع متقارن استفاده کرد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که در فرآیند نورد زاویه خم در ایستگاههای اول باید زیر حد مشخصی قرار گیرد در غیر اینصورت در ایستگاههای بعدی کمانش لبه ای ایجاد می‌گردد. هم‌چنین فرزین [9] محدودیت ناشی از کمانش را بررسی کرد و مدلی برای پیش‌بینی این پدیده ارائه داد.

ژی وو هان [10] با استفاده از تکنیک روش مدلسازی المان محدود فرآیند شکلهای غلتکی روش لاگرانژ به بررسی اثر پارامترهای شکلهای در مقطع L شکل پرداخت و نتایج حاکی از آن بود که افزایش نمو زاویه خم بین دو ایستگاه، ضخامت نوار و حد تسلیم ماده کرنش غشایی طولی ماکزیمم مقطع را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش پهنای لبه بیرونی، کرنش غشایی طولی ماکزیمم را کاهش می‌دهد و فاصله ایستگاه های غلطکی باید بزرگتر از طول تغییر شکل باشد.

در تاریخ مدلسازی این فرآیند، یک متد عددی عمومی معتبر برای مقطع عرضی دلخواه توسط برون [11] در سال 1996 ارائه شد. این مدل تحولی در مدلسازی فرآیند غلتکی سرد ایجاد کرد و همچنان به آن استناد می‌شود. این مدل به هدف دست یافتن به عملکردی بهبود یافته برای طراحی پروفیل رول بر اساس روش المان محدوداً لاستیک پلاستیک می‌باشد. مدل‌های پیشتر بر اساس تئوری کلاسیک کیرشهف طراحی شده بودند که به خاطر ساده سازی بیش از حد که در واقع از کرنش برشی به طور کل صرفنظر می‌شد

دچار اشکالاتی می‌گردید. در این طراحی با در نظر گرفتن درجه چرخشی مستقل آزاد این ایراد بر طرف شد.

بوی [1] با استفاده از شبیه‌سازی فرآیند توسط روش المان محدود به بررسی پدیده برگشت فنری در فرآیند پرداخته و نتایج حاکی از آن است که مقدار برگشت فنری حین فرآیند در ماده مقاومت بالا بیشتر از ماده نرم می‌باشد همچنین هر چه ماده ضخیم تر باشد برگشت فنری کمتر است و هر چه شعاع خم بزرگتر برگشت فنری افزایش می‌یابد.

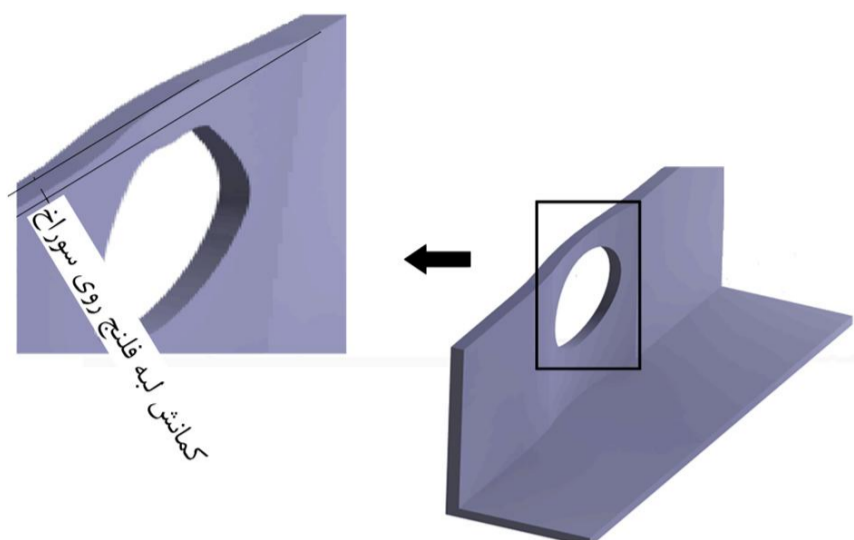
در ادامه تحقیقات پارالیکس [12] نشان می‌دهد کاهش کرنش لبه ای طولی موجب افزایش کیفیت محصول همچنین کاهش بقیه عیوب مثل موج لبه و پیچش می‌گردد. ویبنگا [13] با استفاده از تکنیک بهینه سازی روبااست در فرآیند شکلهای غلتکی سرد بدین مسئله پرداخت که چگونه عیوب محصول با بررسی واریانس ویژگی های ماده به حداقل می‌رسد. یک روش دیگر بهبود عملکرد فرآیند بر اساس متد پاسخ سطح می‌باشد [14] که در این مقاله هم از آن استفاده شده است. این روش که بر اساس توابع چند جمله ای تخمینی کار می‌کند یک متد بازگشتی برای بیان رابطه بین متغیرهای گوناگون و یک یا چند متغیر پاسخ می‌باشد. در این روش تاثیرات افزایشی زاویه شکلهای شعاع غلتک برگشت فنری و کرنش طولی غشایی بررسی می‌شود. به عبارت دیگر با تعریف تابع هدف مثلاً برگشت فنری و تعریف موقعیت-های قیدی مثل تعیین محدوده فاکتورهای طراحی و در نهایت محاسبات عددی می‌توان عیوب محصول را به حداقل رساند این روش سریع و بدون هزینه است. حسن مسلمی نائینی [15] با استفاده از داده های بدست آمده از شبیه-سازی های روش اجزاء محدود علل بوجود آمدن عیوب سطح در مقطع L شکل سوراخدار تولید شده توسط فرآیند غلتکی سرد را بررسی کرده و در دسته های مشخصی طبقه بندی کرد و میزان تاثیر هر کدام از این پارامترها بر روی میزان عیوب شرح داده شده‌اند.

شیرانی [16] با ارائه یک مدل المان محدود برای مقطع L شکل پیش-سوراخ دایره‌ای تولید شده به روش غلتکی سرد و طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح عوامل موثر بر عیوب و تاثیر هر کدام در حین فرآیند شکل دهی غلتکی سرد را مورد بررسی قرار داد سپس میزان تاثیر این عیوب به شیوه تجربی به دست آمد که رفتار این عیوب در آزمون‌های عملی و مدل طراحی شده مطابقت داشت.

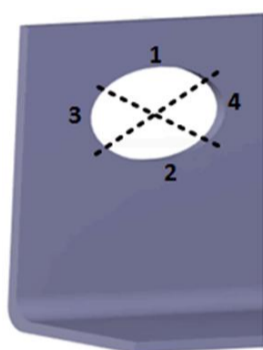
نویسندگان این مقاله به منظور بررسی و شبیه‌سازی پارامترهای موثر در تغییر شکل سوراخهای بیضی در حین فرآیند غلتکی سرد با استفاده از روش المان محدود، یک مقطع که در ناحیه فلنج دارای سوراخهای بیضی می‌باشد شبیه سازی کردند سپس برای فاکتورهای طراحی از قبیل فاصله و شعاع سوراخها، فاصله از لبه آنها، ضخامت و سختی ورق، محدوده‌ای که در واقع شدنی و ممکن باشد را در نظر گرفته و توسط روش پاسخ سطح و تعیین مقادیر موقعیت‌های قیدی فاکتورهای طراحی هندسی، آزمایش‌های مورد نیاز برای بررسی فرآیند را استخراج کردند. سپس با انجام 35 شبیه سازی استخراج شده و اندازه گیری توابع هدف مثل کمانش، موج لبه و تغییرات اندازه های هندسی محصول نسبت به اندازه های اسمی، صحت پاسخها با استفاده از تحلیل آنوا بررسی شده است و با استفاده از روش پاسخ سطح نتایج حاصل از 35 شبیه سازی بررسی شده است.

## 2- عیوب محصول مقطع L شکل پیش‌سوراخ شده و نحوه اندازه گیری آن

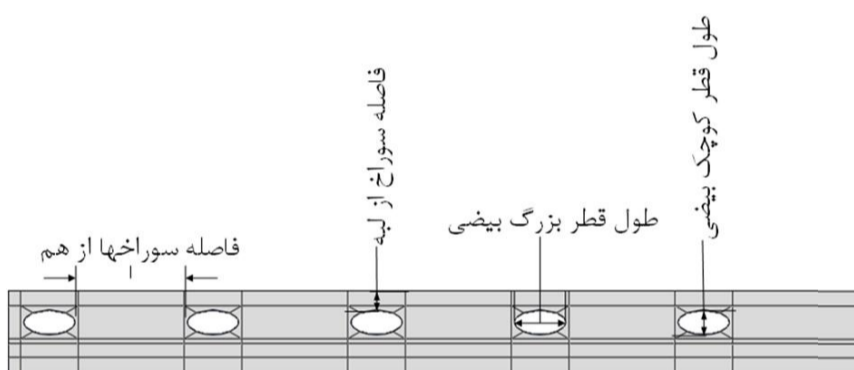
در محصول مقطع L شکل پیش‌سوراخ شده علاوه بر عیوب محصول بدون



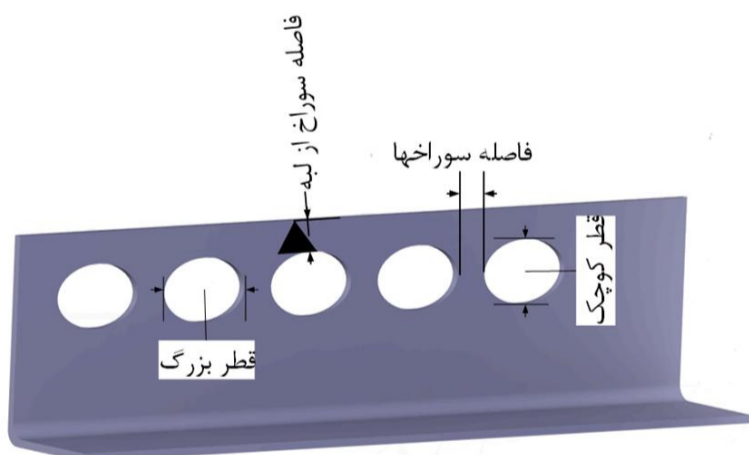
شکل 1 کمانش لبه فلنج و اعوجاج روی سوراخ بیضی



شکل 2 تقسیم سوراخ دایره‌ای به 4 قسمت برای بررسی اعوجاج لبه روی سوراخ



شکل 3 ورق مدل شده دارای سوراخ بیضی



شکل 4 فاصله از لبه و فاصله سوراخها و شعاع بزرگ و کوچک سوراخ در نیمی از مقطع متقارن L شکل با پیش‌سوراخ بیضی

در این آزمایش از فولاد نرم SA1020 برای ماده 1 استفاده شده که خصوصیات آن در جدول 2 آمده است. رفتار ماده در حالت الاستیک از قانون هوک و رفتار ماده در حالت پلاستیک از قانون کارسختی سوئیفت که در معادله 1 نشان داده شده پیروی می‌کند که برای ماده نرم ضریب کارسختی  $K=617/2$ ، کرنش پلاستیک  $\epsilon_p$ ، تنش حقیقی ماده  $\sigma_v$ ، کرنش جبرانی  $\epsilon_0=0/001292$  و توان کارسختی  $n=0/143$ ، بدست می‌آید [1].

برای ماده متوسط و سخت مقادیر تنش ماده نرم به ترتیب به مقدار 100 و 200 اضافه شده است. مدل ایجاد شده حاصل از شبیه‌سازی و میزان خم شدگی در هر ایستگاه در شکل 5 و 6 نشان داده شده است.

$$\sigma_v = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad (1)$$

سوراخ مثل کمانش لبه، خم، پیچش، موج لبه، وجود سوراخها نیز به عنوان عامل تمرکز تنش موجب وجود عیوبی بیشتر از پیش می‌شود و با توجه به کاربرد سوراخ موجب کاهش بهره‌وری محصول می‌شود. عمده عیوب بوجود آمده در محصولات L شکل تولیدی به روش غلتکی سرد به علت کرنش‌های غیر یکنواخت بوجود آمده در قسمت فلنج این مقاطع می‌باشد [7]. در این تحقیق عیوب به دو دسته تقسیم شده است: 1. عیوب کمانش و اعوجاج 2. عیوب تغییر شکل هندسی که در ادامه هر کدام به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

## 2-1- عیوب کمانش و اعوجاج

یکی از عیوب مهم مقطع L شکل تولید شده در فرآیند کمانش لبه فلنج محصول می‌باشد که همانطور که در شکل 1 برای سوراخ بیضی مشخص است برای اندازه‌گیری این عیب میزان کمانش لبه محصول نسبت به کناره‌ها که کمانش کمتری را متحمل می‌شوند اندازه گرفته شده است. در واقع ماکزیمم ارتفاع موج لبه بوجود آمده بالای سوراخ اندازه‌گیری می‌شود. این عیب بر اثر تفاوت در کرنش‌های طولی بوجود آمده در کف و لبه محصول بوجود می‌آید. کرنش طولی در لبه محصول زیاد و در کنار خط خم کم می‌باشد. بنابراین در لبه محصول کمانش مشاهده می‌شود [8].

لبه سوراخ در محصول نهایی دچار اعوجاج می‌شود. برای بررسی این عیب مطابق شکل 2 سوراخ بیضی را به 4 قسمت تقسیم کرده و به طور جداگانه برای هر قسمت ماکزیمم ارتفاع موج لبه اندازه‌گیری شده است و در نهایت میانگین موج روی کل قطاع سوراخ برای 4 قسمت تعیین شده سوراخ محاسبه می‌شود که این عیب نیز به علت کرنش غیر یکنواخت در فلنج محصول حاصل می‌شود.

## 2-2- عیوب تغییر اندازه

ابعاد سوراخ به علت نیروی وارده به آن با مقدار اسمی متفاوت است که با توجه به شکل 3 اندازه آن برای سوراخ بیضی تعریف می‌شود. همچنین فاصله سوراخها نسبت به هم و فاصله سوراخها نسبت به لبه نیز با آنچه برای طراحی آزمایش تعریف شده متفاوت است که در ادامه به تفصیل درباره این تغییر اندازه‌ها صحبت خواهد شد و در شکل 4 نحوه اندازه‌گیری آن در محصول نهایی مشخص شده است که این عیوب نیز به علت کرنش غیر یکنواخت در فلنج محصول حاصل می‌شود.

## 3- مدل المان محدود

همه شبیه‌سازی‌های این تحقیق توسط نرم افزار المان محدود آباکوس 6.11.3 انجام شده است. یک مدل سه بعدی المان محدود ایجاد شده است. در این شبیه‌سازی‌ها 7 ایستگاه شکلدهی وجود دارد. غلتکها به صورت صلب و ورق با استفاده از المان پوسته‌ای نازک مدل شده‌اند. در جدول 1 پارامترهای مدل ایجاد شده نشان داده شده است. فرآیند در 7 مرحله تغییر شکل می‌یابد.

جدول 1 فاکتورهای طراحی فرآیند

مقدار	فاکتور طراحی
300mm	فاصله بین هر دو ایستگاه شکلدهی
120mm	قطر غلتکهای بالایی
60mm	قطر غلتکهای پایینی
60 × 137mm	ابعاد نوار
90, 85, 75, 60, 45, 30	تغییر شکل در هر ایستگاه بر حسب درجه

انرژی تغییر شکل بررسی شده است. در شکل 8 میزان تغییرات انرژی تغییر شکل مدل بر اساس تعداد المان در نظر گرفته برای ورق نشان داده شده است و مش مورد نظر برای مدلسازی بر این اساس انتخاب می‌شود به گونه‌ای که تغییرات تعداد المان تاثیری بر انرژی تغییر شکل نداشته باشد. همچنین ضریب اصطکاک برای تمام غلتکها 0/2 در نظر گرفته شده است.

### 3-2- شرایط مرزی

برای سرعت تحلیل بیشتر تنها نیمی از فرآیند به شکل متقارن مدل شده که به این منظور در خط تقارن نوار قید تقارن در نظر گرفته شده و غلتکها نیز با قیود (جابجایی/ دوران) و (سرعت زاویه ای/ سرعت) مقید شده‌اند، سرعت حرکت خطی برای اولین ایستگاه شکل دهی 5rpm برای غلتک بالایی و 10rpm برای غلتک پایینی در نظر گرفته شده و در هر مرحله شکل دهی 5% سرعت در هر ایستگاه افزایش می‌یابد.

### 3-3- شبیه‌سازی

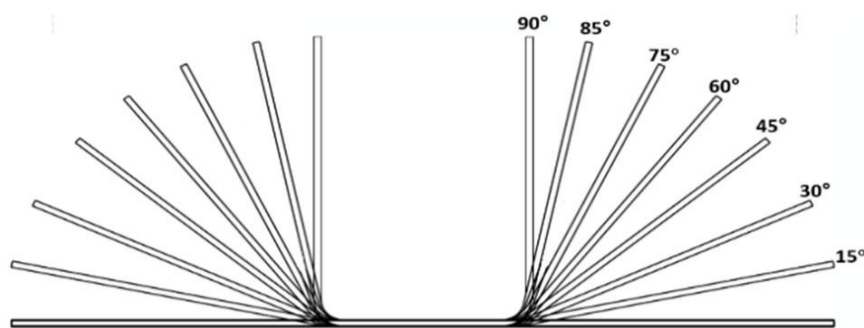
تحلیلها به صورت دینامیک ضمنی انجام شده است. تماس بین غلتکها و نوار از نوع تماس صفحه به صفحه انتخاب شده است. در این تحلیلها دو غلتک ابتدایی تنها نقش هدایت نوار را به عهده دارند و در مرحله اول در ایستگاه 1 شکل دهی، غلتک پایینی که در فاصله 20mm بعلاوه ضخامت نسبت به غلتک بالایی تعبیه شده و تا اندازه ضخامت به غلتک بالایی نزدیک می‌شود و موجب درگیری مناسب نوار و ابزار می‌گردد و سپس با سرعت اولیه غلتکهای ایستگاه شکل دهی 1 شروع به حرکت کرده و با زمان بندی مناسب قبل از رسیدن سر نوار به ایستگاه شکل دهی 2، غلتکهای آن شروع به چرخش می‌کنند و موجب درگیری مناسب نوار و غلتک می‌گردند. این روند تا ایستگاه آخر ادامه می‌یابد. در این تحلیلها انرژی جنبشی کمتر از 10 درصد انرژی داخلی بوده که صحت مدل شبه استاتیکی را تایید می‌کند. محصول نهایی حاصل از شبیه‌سازی در شکل 9 نشان داده شده است.

### 4- طراحی آزمایش

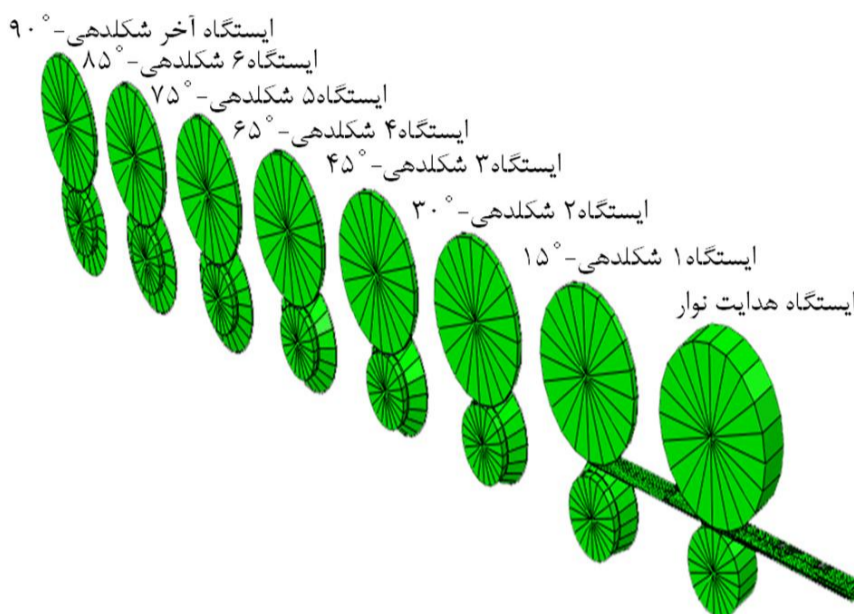
برای طراحی آزمایش از نرم‌افزار دیزاین‌اکسپرت 9 استفاده شده است. روش پاسخ سطح، روش بهینه برای طراحی آزمایش در نظر گرفته شده است. ابتدا پاسخهای سطحی که قرار است بر روی آنها تحلیل انجام شود را وارد کرده است. آزمایشهای پیشنهادی نرم‌افزار با فاکتورهای طراحی متفاوت استخراج شده است. کلیه آزمایشهای پیشنهادی را بر اساس فاکتورهای پیشنهادی در هر آزمایش مدل کرده و پاسخهای سطحی به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده برای هر آزمایش را اندازه گیری کرده و داده های آزمایش را کامل کرده تا نهایتاً نتایج تحلیل شوند و اثر تغییر فاکتورهای طراحی روی پاسخهای سطحی که عموماً عیوب شکل می‌باشند تعیین گردند.

### 4-1- پارامترهای ورودی

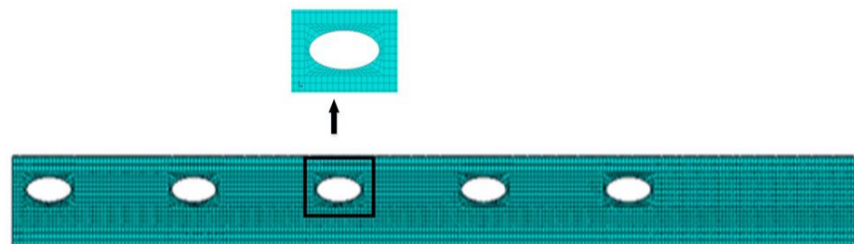
پارامترهای ورودی مقطع L شکل با سوراخ بیضی پس از انجام چند شبیه سازی عبارتند از: (1) شعاع بزرگ سوراخ بیضی (2) شعاع کوچک سوراخ بیضی (2) فاصله لبه دایره از لبه فلنج (3) فاصله سوراخها (4) ضخامت نوار (5) جنس ماده. محدوده این متغیرها در جدول 3 نشان داده شده است. برای محدوده جنس ماده همان فولاد نرم SAE10 به عنوان ماده پایه انتخاب می‌شود و دو ماده دیگر به طور فرضی با میزان تنش تسلیم هر کدام به اندازه 100MPa و 200MPa بیشتر از فولاد مذکور و همان کرنش پایه در نظر گرفته شده است.



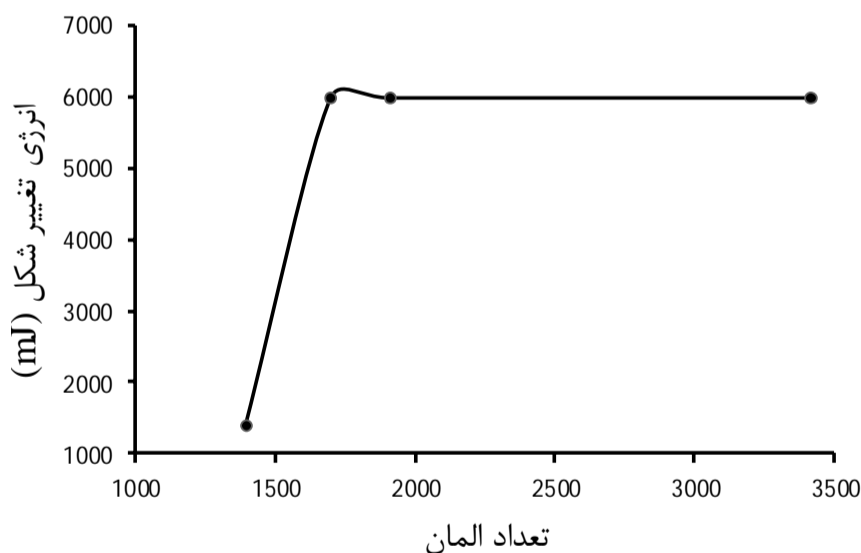
شکل 5 الگوی گل فرآیند شبیه‌سازی شده



شکل 6 مدل ایجاد شده در نرم افزار آباکوس



شکل 7 نوار مش بندی شده دارای سوراخ بیضی



شکل 8 بررسی عدم وابستگی مدل طراحی شده به مش بندی

جدول 2 خصوصیت ماده (فولاد نرم SA1020)

ویژگی	مقدار
مدول یانگ	$207 \times 10^{-3} \text{ GPa}$
ضریب پواسون	0.3
چگالی	$7.8 \times 10^{-9}$

### 3-1- صحت مش

ورق با استفاده از المان پوسته‌ای و غلتکها به صورت صلب مدل شده‌اند. المان S4R چهار گره‌ای برای ورق انتخاب شده است. ورق به منظور دقت بیشتر در نواحی سوراخها و خم پارتیشن بندی شده است (شکل 7). برای مدل بررسی شده عدم وابستگی به مش بندی با در نظر گرفتن

#### 4-2- پارامترهای خروجی

پارامترهای خروجی عبارتند از درصد اختلاف اندازه واقعی نسبت به اندازه واقعی شعاع افقی و عمودی سوراخ بیضی مقطع L شکل، کمانش لبه، درصد اختلاف نسبت به اندازه واقعی فاصله نسبت به لبه و فاصله سوراخها. برای دقت بیشتر تمامی پاسخها برای 3 سوراخ بیضی وسط فلنج اندازه‌گیری شده و مقدار میانگین به عنوان مقدار نهایی در نظر گرفته می‌شود.

#### 5- تحلیل نتایج

##### 5-1- صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی اجزاء محدود نتایج بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی با نتایج علمی پژوهشهای بوی [1] مقایسه میگردد. در مدل بوی مقطع L شکل بدون سوراخ در طول یک خط با الگوی گل 0، 30، 60، 90 درجه مدل گردیده است. رفتار مکانیکی ورق با قانون کارسختی سوئیفت قابل توضیح است. این مدل توسط روش المان محدود با شرایط فیزیکی شرح داده شده شبیه‌سازی شده و در شکل 10 و 11 کرنش طولی در لبه کانال و جابجایی ورق در جهت طولی و ارتفاعی از ایستگاه 0 به 30 ارائه شده است که در آن نتایج حاصل از کار عملی بوی و شبیه‌سازی های المان محدود مقایسه شده است. میزان درصد خطا برای نقاطی درون شکل 10 نشان داده شده است.

##### 5-2- بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر عیوب کمانش و اعوجاج مقطع

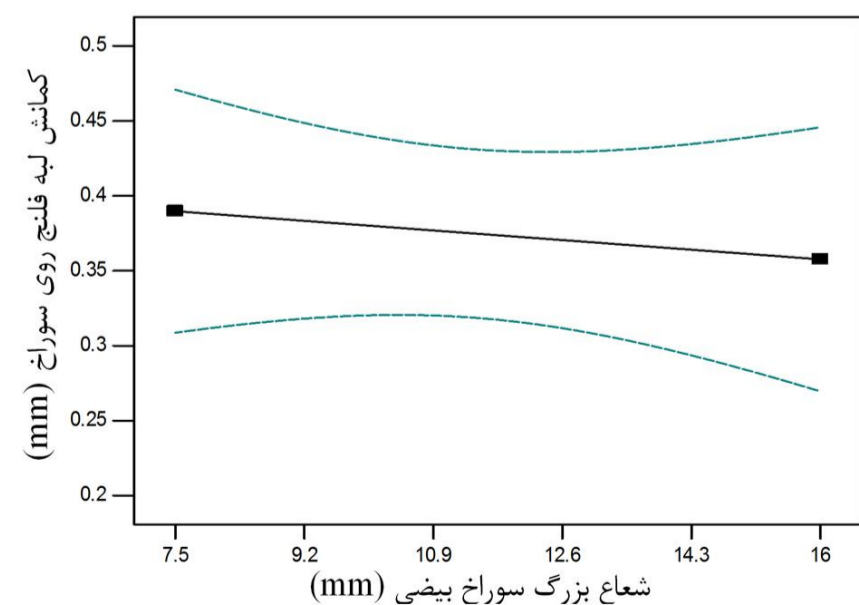
##### 5-2-1- L شکل پیش‌سوراخ شده بیضی

##### 5-2-1-1- کمانش لبه فلنج روی بیضی

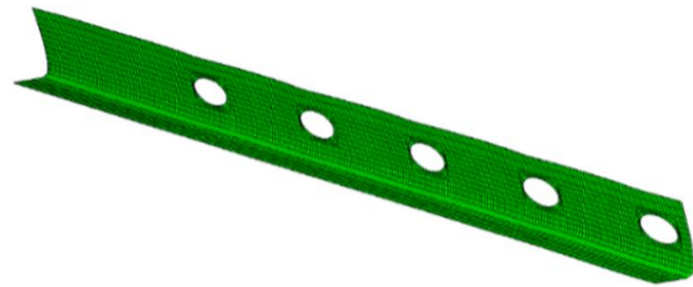
با افزایش طول شعاع کوچک سوراخ بیضی به علت کاهش سختی خمشی، کمانش افزایش می‌یابد (شکل 12). همچنین با افزایش طول شعاع بزرگ سوراخ بیضی کمانش کاهش می‌یابد (شکل 13). معادله شماره 2 که بر اساس روش پاسخ سطح به دست آمده مقدار کمانش روی لبه فلنج را بر اساس پارامترهای بیان شده پیش بینی می‌کند.

##### 5-2-2- میانگین موج لبه روی کل قطاع سوراخ

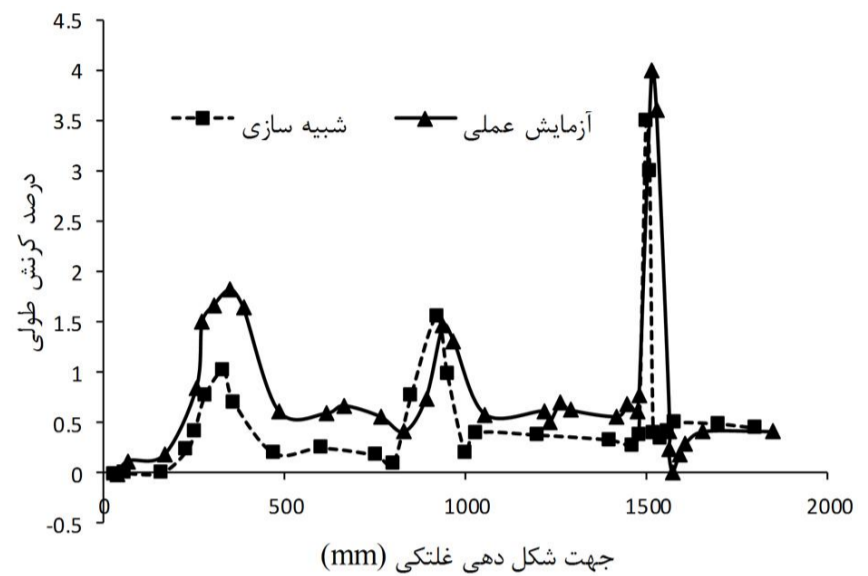
در این قسمت موج به طور کلی روی کل سوراخ بررسی شده است که نحوه اندازه‌گیری آن در بخش 2-1 بیان شده است. با افزایش طول شعاع بزرگ و کوچک سوراخ بیضی موج لبه حالت افزایشی دارد (شکل 14 و 15). علت آن را می‌شود با کاهش سختی خمشی همراه با افزایش شعاع سوراخ توجیه کرد.



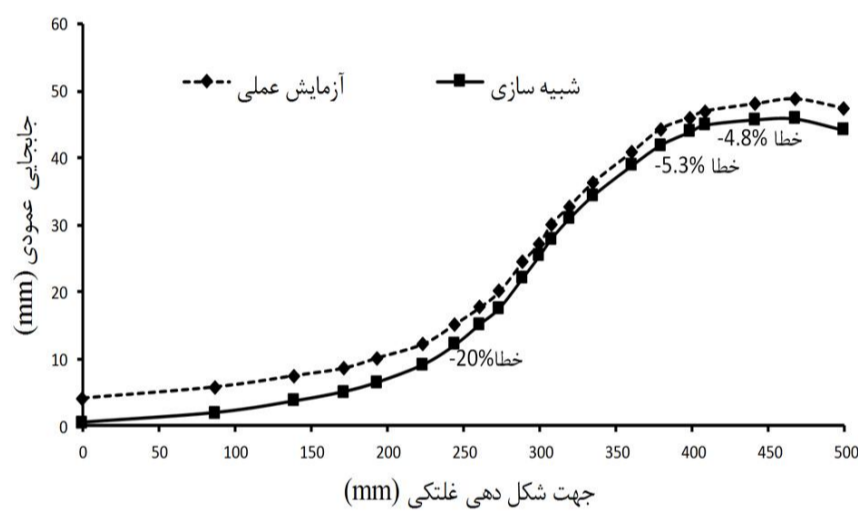
شکل 13 تغییرات کمانش لبه نسبت به طول شعاع بزرگ سوراخ بیضی



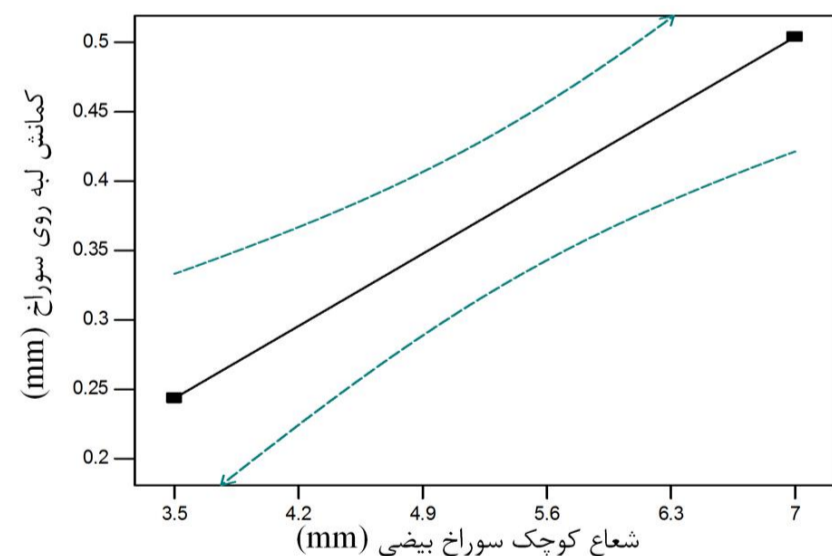
شکل 9 شکل نهایی حاصل از شبیه‌سازی مقطع L شکل دارای سوراخ بیضی



شکل 10 کرنش طولی لبه ورق [1]



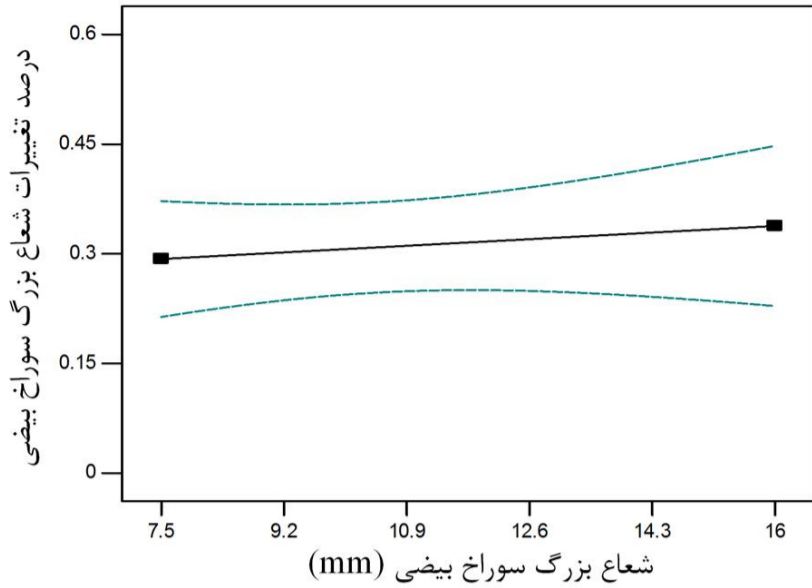
شکل 11 جابجایی لبه ورق [1]



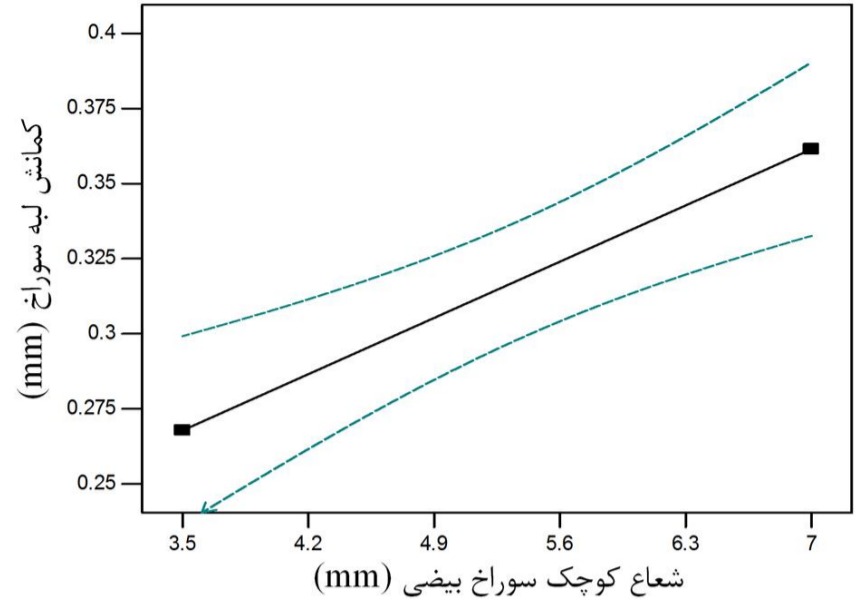
شکل 12 تغییرات کمانش لبه نسبت به طول شعاع کوچک سوراخ بیضی

جدول 3 محدوده قید فاکتورهای طراحی

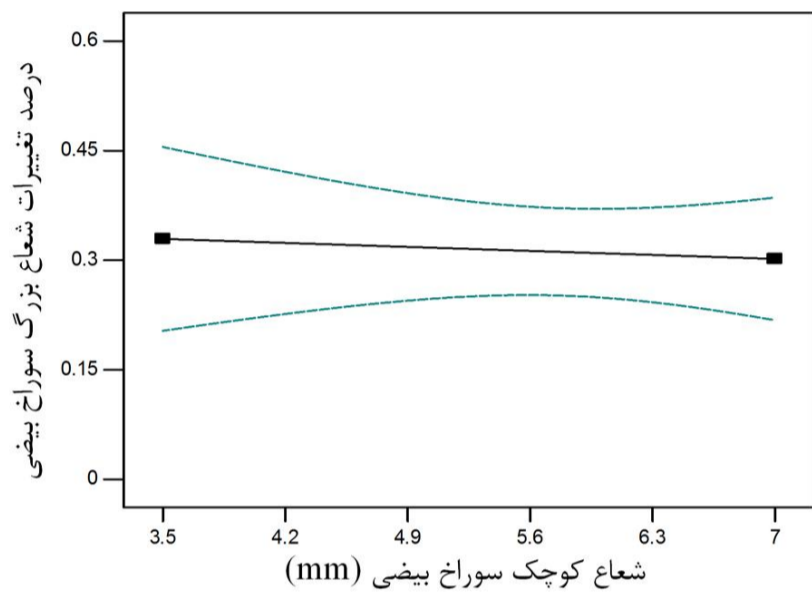
محدوده طراحی	فاکتور طراحی
3/5-7 mm	شعاع کوچک بیضی
7/5-16 mm	شعاع بزرگ بیضی
2-9/5mm	فاصله سوراخ از لبه فلنج
10-70 mm	فاصله سوراخها
1-4mm	ضخامت
ماده 1: نرم، 2: متوسط، 3: سخت	سختی



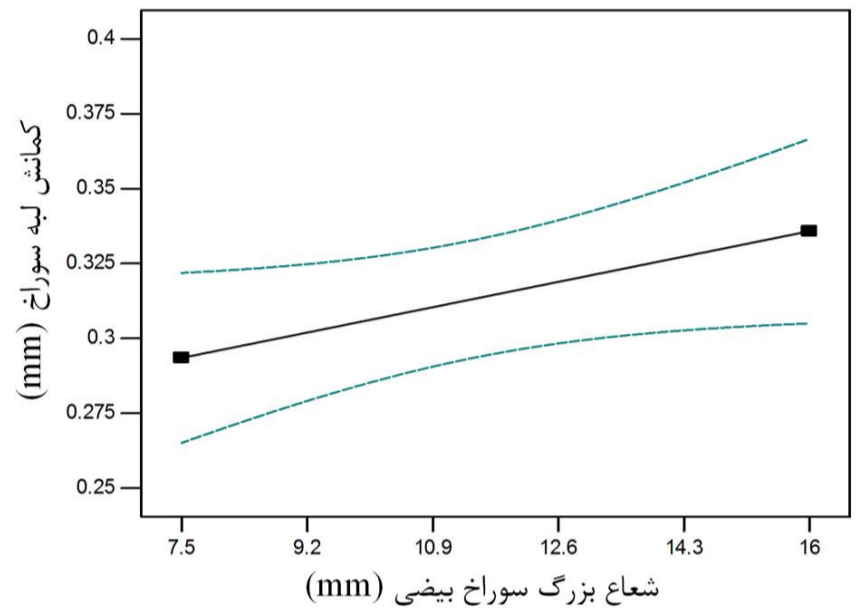
شکل 17 درصد تغییرات شعاع بزرگ سوراخ نسبت به طول شعاع بزرگ اسمی سوراخ



شکل 14 تغییرات میانگین موج روی کل سوراخ نسبت به شعاع کوچک سوراخ بیضی



شکل 18 درصد تغییرات شعاع بزرگ سوراخ بیضی نسبت به طول شعاع کوچک اسمی سوراخ



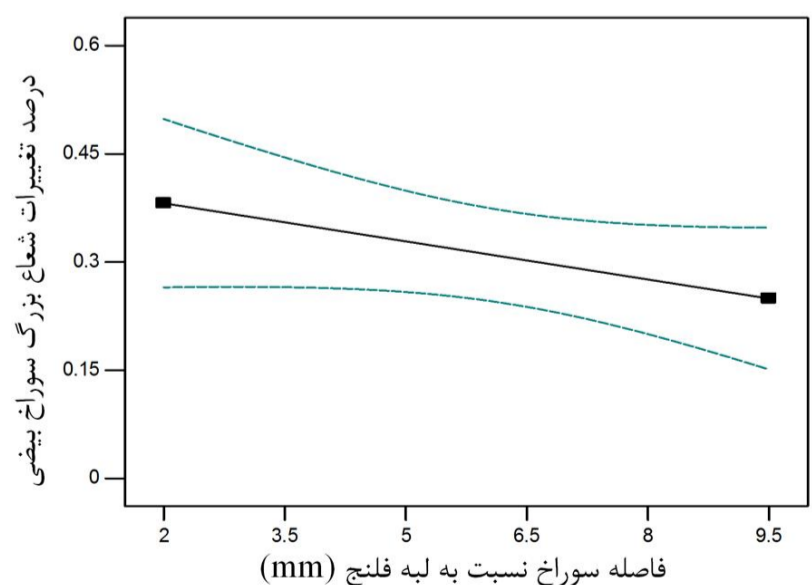
شکل 15 تغییرات میانگین موج روی کل سوراخ نسبت به شعاع بزرگ سوراخ بیضی

### 5-3-1- تغییرات شعاع بزرگ سوراخ بیضی

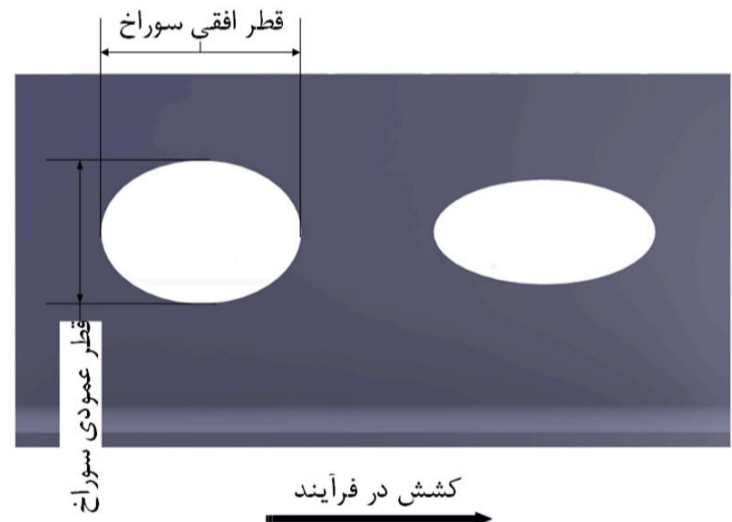
با بررسی اثر پارامترهای طراحی بر روی تغییرات اندازه شعاع بزرگ سوراخ نتیجه حاکی از آن است که با افزایش شعاع اسمی بزرگ سوراخ نرخ افزایش شعاع بزرگ سوراخ در حال افزایش است که علت آن کرنش ثابتی است که به پهنای سوراخ وارد می‌شود (شکل 17).

با افزایش طول شعاع کوچک سوراخ، میزان تغییر اندازه کاهش می‌یابد (شکل 18).

با افزایش فاصله سوراخ از لبه و فاصله سوراخها از هم نرخ افزایش شعاع بزرگ سوراخ به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد (شکل 19 و 20).



شکل 19 درصد تغییرات شعاع بزرگ سوراخ بیضی نسبت به فاصله سوراخ نسبت به لبه فلنج.

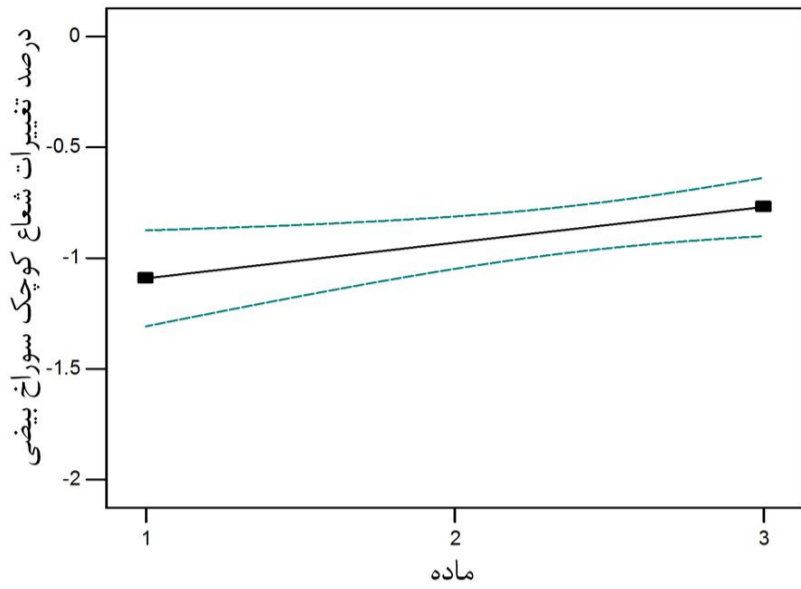


شکل 16 تغییر طول اضلاع سوراخ مربعی در حین فرآیند

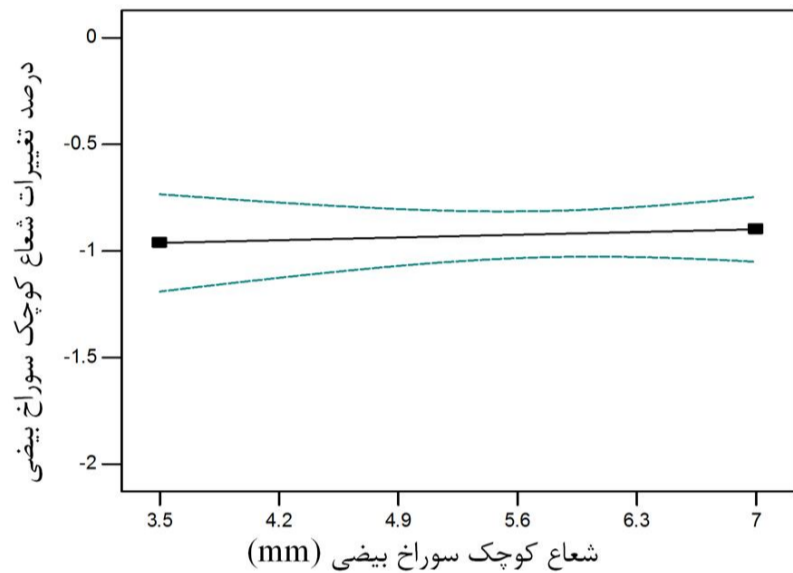
معادله شماره 3 که بر اساس روش پاسخ سطح به دست آمده مقدار میانگین موج لبه روی کل قطاع سوراخ را بر اساس پارامترهای بیان شده پیش بینی می‌کند.

### 5-3-3- بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر عیوب تغییر شکل مقطع L شکل پیش‌سوراخ شده بیضی

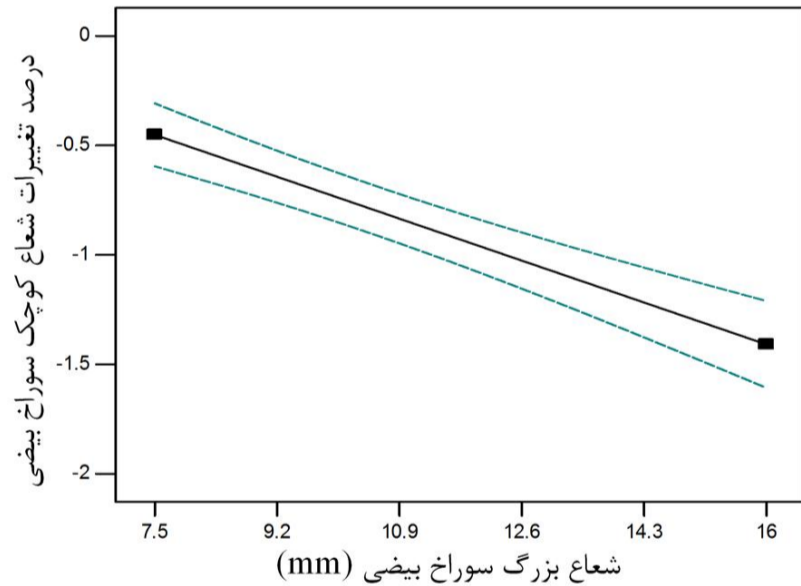
با بررسی نقطه به نقطه نمودارهای دریافتی برای شعاع بزرگ و کوچک بیضی، مشخص می‌شود که سوراخهای بیضی در محصول نهایی به بیضی تغییر شکل می‌یابد که میزان طول شعاع کوچک بیضی کمتر از میزان اسمی و میزان طول شعاع بزرگ بیضی بیشتر از میزان اسمی است (شکل 16). علت آن می‌تواند ناشی از افزایش سرعت تصاعدی هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبلی باشد و طبیعتاً موجب افزایش شعاع افقی سوراخ می‌گردد.



شکل 23 در صد تغییرات شعاع کوچک سوراخ بیضی نسبت به استحکام ماده



شکل 24 درصد تغییرات شعاع کوچک سوراخ نسبت به شعاع کوچک اسمی سوراخ



شکل 25 درصد تغییرات شعاع کوچک سوراخ نسبت به شعاع بزرگ اسمی سوراخ

همچنین با افزایش شعاع بزرگ، فاصله نسبت به لبه، فاصله سوراخها و ضخامت ورق نیز شعاع کوچک سوراخ به مقدار اسمی خود نزدیک تر می‌شود (شکل 25، 26، 27، 28).

معادله (5) که بر اساس روش پاسخ سطح به دست آمده میزان تغییرات شعاع کوچک را بر اساس پارامترهای بیان شده پیش بینی می‌کند.

### 5-3-3- درصد اختلاف فاصله سوراخ نسبت به لبه

اندازه فاصله سوراخها نسبت به لبه همواره کمتر از مقدار واقعی است در واقع به لبه نزدیک شده اند. در واقع می‌توان اینگونه توجیح کرد که در هنگام نورد سرعت خطی شکل دهی، هر چه به لبه محصول نزدیکتر شده، بیشتر شده و همین عامل باعث کشش بیشتر لبه محصول نسبت به نقاط پایین تر می‌گردد. در نتیجه این کشش مضاعف لبه، اندازه فاصله نسبت به لبه همواره

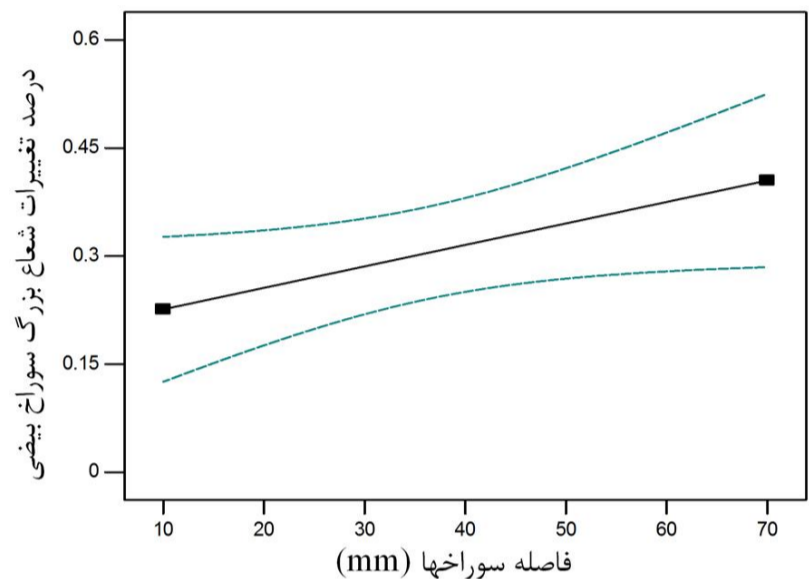
با افزایش ضخامت ورق نرخ افزایش شعاع افقی افزایش می‌یابد که علت آن کاهش برگشت فنری به علت افزایش ضخامت است (شکل 21).

با افزایش سختی ورق نرخ افزایش شعاع بزرگ کاهش می‌یابد که علت آن افزایش برگشت فنری به علت افزایش سختی ورق است (شکل 22).

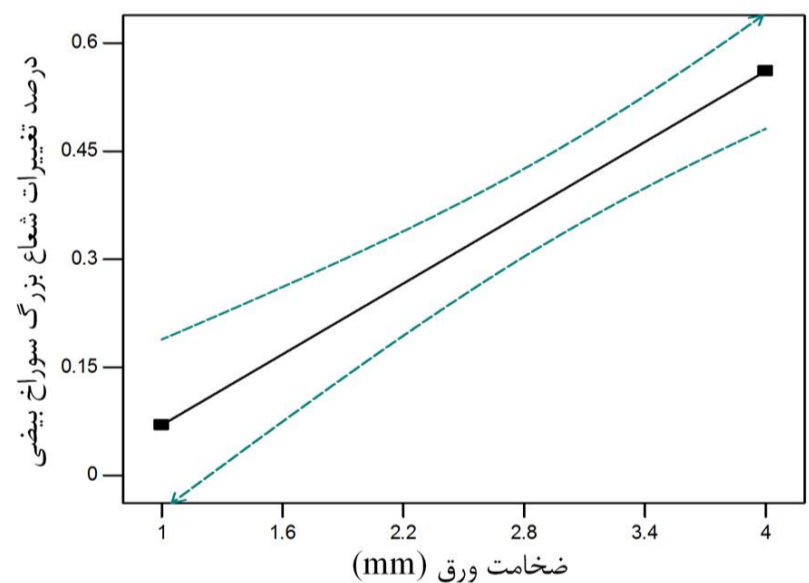
معادله (4) که بر اساس روش پاسخ سطح به دست آمده میزان تغییرات شعاع بزرگ را بر اساس پارامترهای بیان شده پیش بینی می‌کند.

### 5-3-2- تغییرات شعاع کوچک سوراخ بیضی

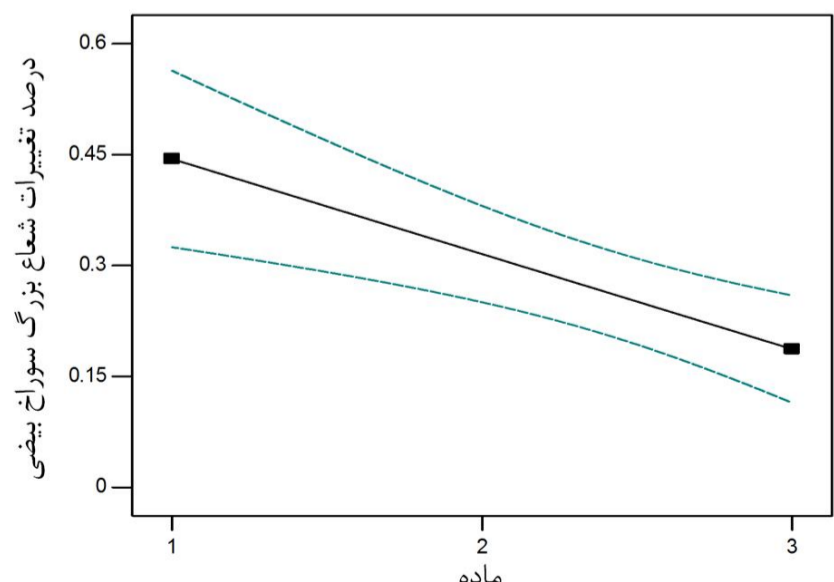
با بررسی اثر پارامترهای طراحی بر روی تغییرات اندازه شعاع کوچک سوراخ نتیجه حاکی از آن است که با افزایش طول شعاع کوچک اسمی سوراخ و افزایش سختی ماده طول شعاع کوچک سوراخ محصول نسبت به مقدار اسمی پیش‌سوراخ افزایش می‌یابد (شکل 23، 24).



شکل 20 درصد تغییرات شعاع بزرگ سوراخ بیضی نسبت به فاصله سوراخها



شکل 21 درصد تغییرات شعاع بزرگ سوراخ بیضی نسبت به ضخامت ورق



شکل 22 درصد تغییرات شعاع بزرگ سوراخ بیضی نسبت به ماده

مقدار کاهش نسبت به مقدار اسمی دارد.

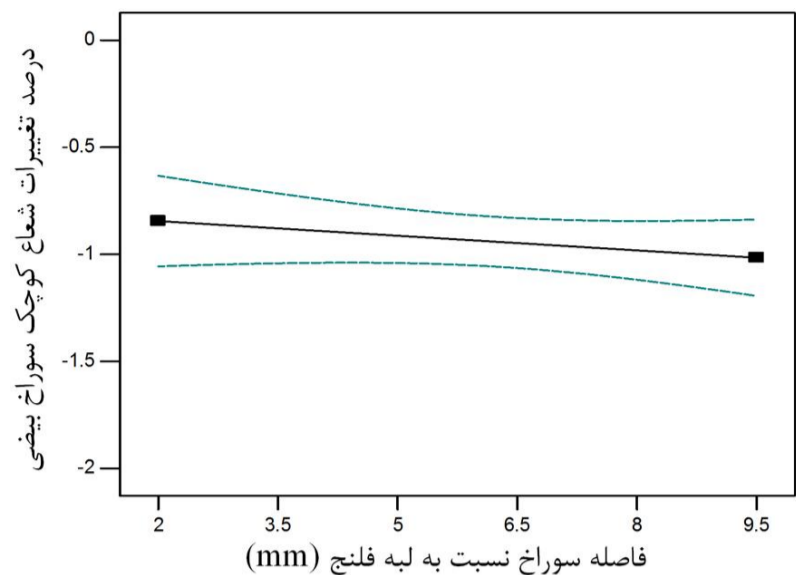
با افزایش شعاع کوچک سوراخ بیضی، فاصله سوراخها به اندازه اسمی خود نزدیکتر می‌شوند. همچنین با افزایش شعاع بزرگ سوراخ بیضی، سوراخها به لبه نزدیکتر می‌شوند (شکل 29، 30).

معادله (6) که بر اساس روش پاسخ سطح به دست آمده میزان اختلاف فاصله سوراخ نسبت به لبه را بر اساس پارامترهای بیان شده پیش‌بینی می‌کند.

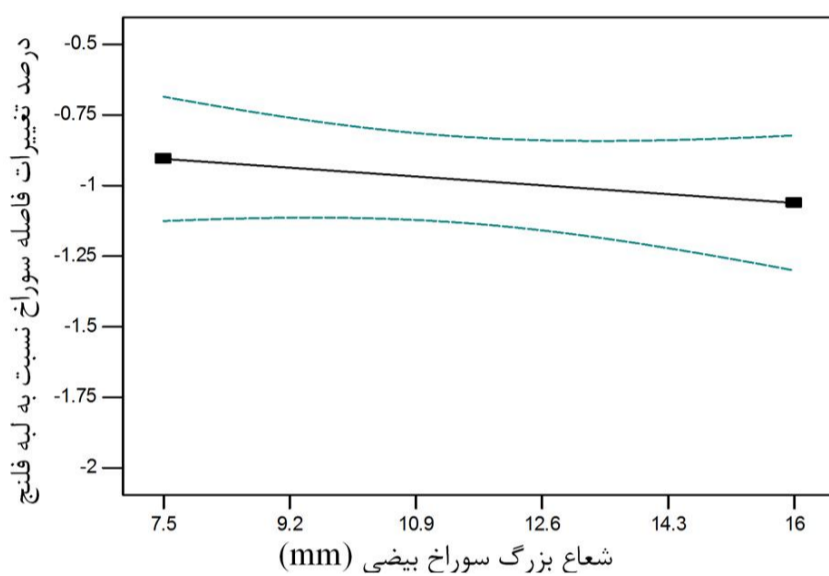
#### 5-3-4- اختلاف فاصله سوراخها نسبت به مقدار واقعی

فاصله سوراخها محصول بیشتر از مقدار واقعی می‌باشد که با توجه به افزایش تصاعدی سرعت هر ایستگاه به ایستگاه قبلی و کرنشی که به طول فاصله سوراخها وارد می‌شود این تغییر اندازه قابل توجیح است.

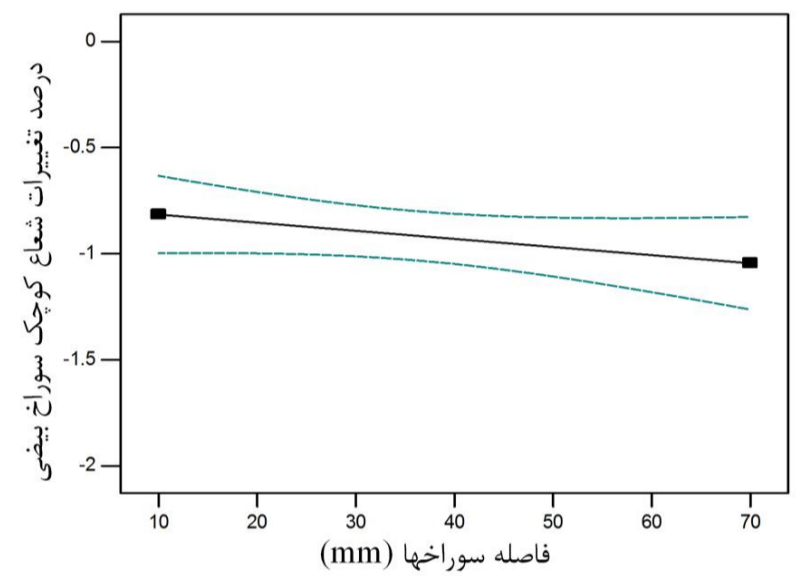
با افزایش شعاع کوچک، فاصله سوراخها به مقدار اسمی خود نزدیکتر می‌شوند (شکل 31). با افزایش شعاع بزرگ، سوراخها از هم دورتر می‌شوند (شکل 32).



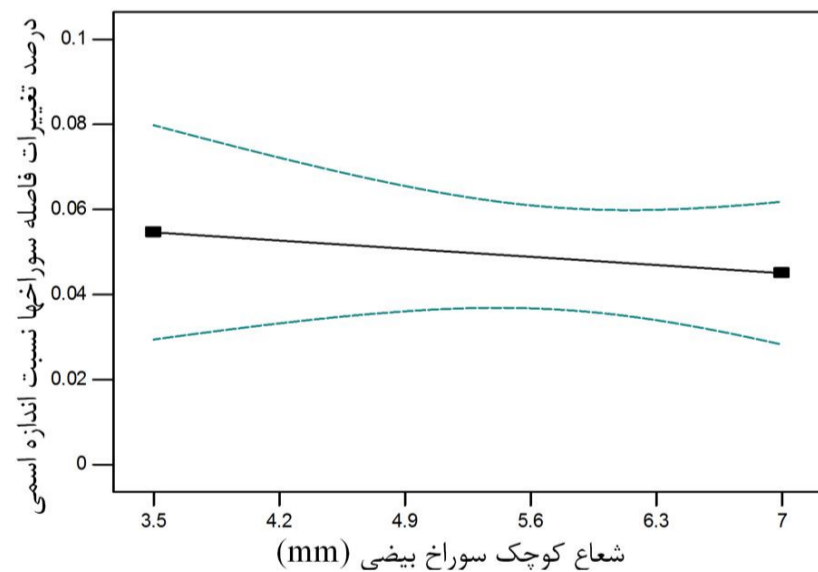
شکل 26 درصد تغییرات شعاع کوچک سوراخ نسبت به فاصله سوراخ نسبت به لبه



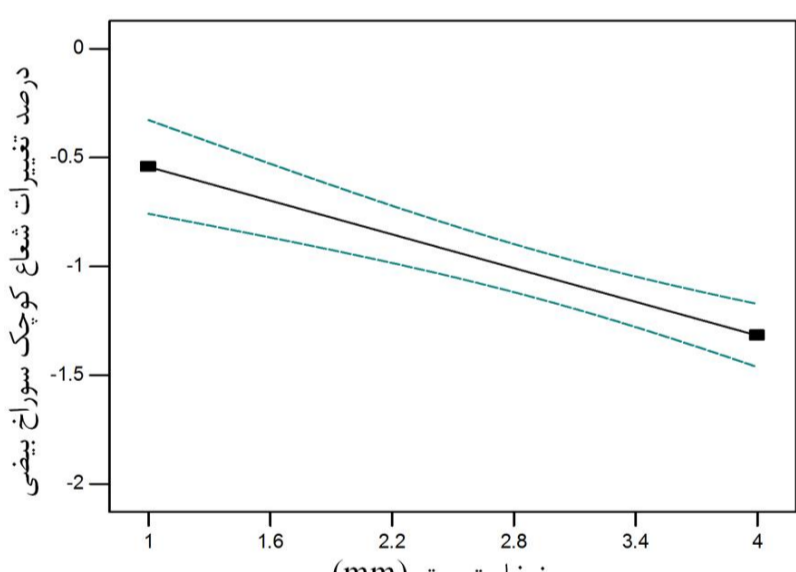
شکل 30 تاثیر شعاع بزرگ سوراخ مربعی روی فاصله سوراخها



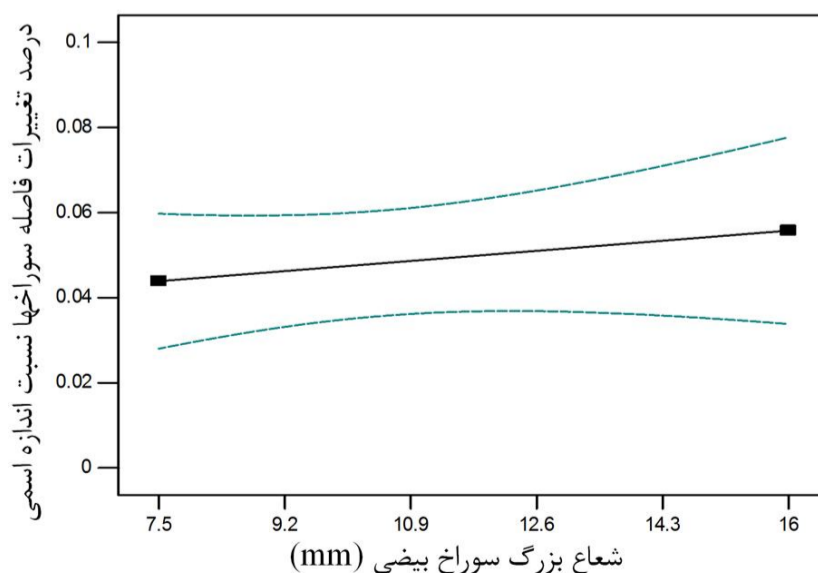
شکل 27 درصد تغییرات شعاع کوچک سوراخ بیضی نسبت به فاصله سوراخها



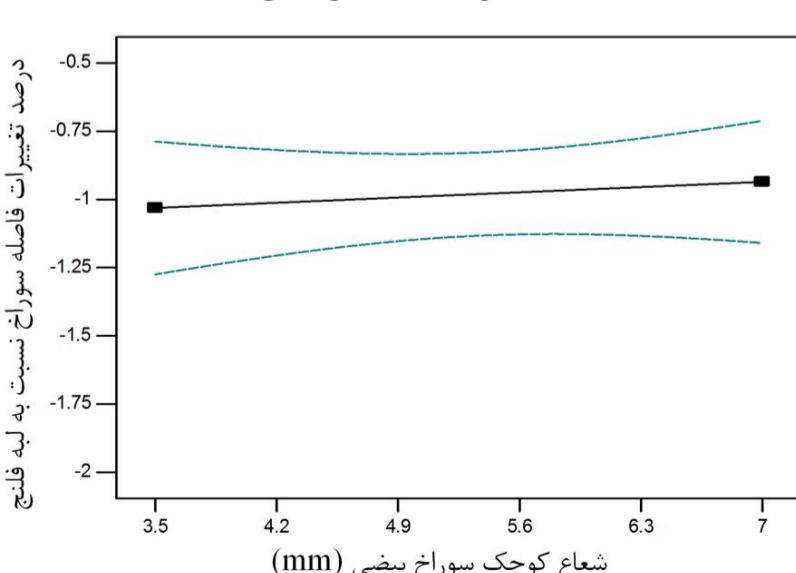
شکل 31 تاثیر شعاع بزرگ سوراخ مربعی روی فاصله سوراخها



شکل 28 درصد تغییرات شعاع کوچک سوراخ بیضی نسبت به ضخامت ورق



شکل 32 تاثیر شعاع بزرگ سوراخ مربعی روی فاصله سوراخها



شکل 29 تاثیر شعاع بزرگ سوراخ مربعی روی فاصله سوراخها



ضخامت ورق (mm)	$D$	معادله (7) بر اساس روش پاسخ سطح اختلاف فاصله سوراخها نسبت به مقدار واقعی را بر اساس پارامترهای بیان شده پیش بینی می‌کند.
نوع ماده	$E$	فرمولهای (2-7) توابع هدف برای یافتن پاسخ های سطح مقطع با سوراخ بیضی می‌باشند، که $H$ و $I$ و $B$ و $C$ و $D$ و $E$ و $R$ به ترتیب شعاع کوچک سوراخ، شعاع بزرگ سوراخ، فاصله سوراخ از لبه فلنج، فاصله سوراخها از هم، ضخامت ورق، نوع ماده و پارامتر عیب مورد نظر می‌باشد.
ضریب کارسختی (MPa)	$K$	$R_1 = -0.028 + 0.074H - 0.004I - 0.014B + 0.003C + 0.029D - 0.028E$ (2)
توان کارسختی	$n$	$R_2 = 0.307 + 0.027H + 0.005I - 0.021B - 0.0002C - 0.043D + 0.023$ (3)
پاسخ سطح میزان موج لبه فلنج	$R_1$	$R_3 = 0.152 - 0.007H + 0.008I - 0.021B + 0.003C + 0.158E - 0.143E$ (4)
پاسخ سطح میزان میانگین موج روی سوراخ	$R_2$	$R_4 = 0.917 + 0.019H - 0.111I - 0.021B - 0.003C + 0.259D + 0.139E$ (5)
پاسخ سطح درصد تغییرات شعاع افقی سوراخ	$R_3$	$R_5 = -1.054 + 0.027H - 0.018I + 0.103B - 0.008C - 0.233D + 0.238E$ (6)
پاسخ سطح درصد تغییرات شعاع عمودی سوراخ	$R_4$	$R_6 = -0.04 - 0.004H + 0.001I + 0.007B + 0.0007C + 0.023D - 0.015E$ (7)
پاسخ سطح درصد تغییرات اختلاف فاصله سوراخ از لبه فلنج	$R_5$	
پاسخ سطح درصد تغییرات اختلاف فاصله سوراخ از یکدیگر	$R_6$	
<b>علائم یونانی</b>		
کرنش جبرانی	$\epsilon_0$	
کرنش پلاستیک	$\epsilon_p$	
تنش حقیقی ماده (MPa)	$\sigma_p$	

### 6- جمع بندی نتایج

در این تحقیق تاثیر تغییرات فاکتورهای طراحی مقطع U شکل پیش سوراخ شده بیضی تولید شده توسط فرآیند غلتکی سرد بر عیوب هندسی آن بررسی شده است و نتایج زیر را می توان برای مقاطع پیش سوراخ شده بیضی استخراج نمود:

با افزایش 100% شعاع کوچک سوراخ بیضی کمانش لبه فلنج 111/33% افزایش می یابد. با افزایش 113/33% طول شعاع بزرگ سوراخ بیضی کمانش لبه فلنج 13/24% کاهش می یابد،

با افزایش 100% شعاع کوچک سوراخ میانگین موج روی کل قطاع سوراخ 35% افزایش می یابد و با افزایش 113/33% شعاع بزرگ سوراخ میانگین موج روی کل قطاع سوراخ 14/4% افزایش می یابد

سوراخهای بیضی در محصول نهایی به بیضی تغییر شکل می یابد که میزان طول شعاع کوچک بیضی کمتر از میزان اسمی و میزان طول شعاع بزرگ بیضی بیشتر از میزان اسمی است.

با افزایش طول شعاع بزرگ سوراخ، فاصله سوراخها و ضخامت طول شعاع بزرگ سوراخ افزایش می یابد. همچنین با افزایش شعاع کوچک، فاصله نسبت به لبه و مقامت ماده نیز شعاع بزرگ سوراخ به مقدار اسمی خود نزدیک تر می شوند.

با افزایش طول شعاع کوچک سوراخ و افزایش سختی ماده طول شعاع کوچک سوراخ افزایش می یابد. همچنین با افزایش شعاع بزرگ، فاصله نسبت به لبه، فاصله سوراخها و ضخامت ورق نیز شعاع کوچک سوراخ به مقدار اسمی خود نزدیک تر می شوند.

اندازه فاصله سوراخها نسبت به لبه همواره کمتر از مقدار واقعی است در واقع به لبه نزدیک شده اند. با افزایش شعاع بزرگ سوراخ بیضی، سوراخها به لبه نزدیکتر می شوند. همچنین با افزایش شعاع کوچک سوراخ بیضی، فاصله سوراخها به اندازه اسمی خود نزدیکتر می‌شوند.

فاصله سوراخها محصول بیشتر از مقدار واقعی می باشد. با افزایش شعاع بزرگ سوراخ، سوراخها از هم دورتر می شوند. با افزایش شعاع کوچک سوراخ بیضی فاصله سوراخها به مقدار واقعی خود نزدیکتر می شوند.

### 7- فهرست علائم

$B$	فاصله سوراخ از لبه فلنج (mm)
$C$	فاصله سوراخها از یکدیگر (mm)

### 8- مراجع

- [1] Q.V. Bui, J.V. Ponthot. Numerical simulation of cold roll forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 202, pp. 275-282, 2008.
- [2] H. Watari, H. Ona. Characteristic features of shape defects occurring in the cold roll forming of pre-notched products, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 80-81, pp. 225-231, 1998.
- [3] H. Watari, H. Ona. Cold roll-forming of small diameter pipes with pre-notches, *Journal of Materials processing technology*. Vol. 119, pp. 122-126, 2001.
- [4] D. Bhattacharyya, P.D. Smith, C.H. Yee, L.F. Collins. The prediction of deformation length in cold roll forming, *J. Mech. Work. Tech*. Vol. 9, pp. 181-191, 1984.
- [5] K.F. Chiang. *Cold roll forming*, ME Thesis, University of Auckland. 1984.
- [6] L. Ingvarsson. Förenklad teori för rullforming av elementär v-profil, jämförelse mellan normalt och höghastighet, VAMP 15- rullforming, 2001.
- [7] M. Lindgren. Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol 186, pp. 77-81, 2007.
- [8] M. Salmani Tehrani, P. Hartley, H. Moslemi Naeini, H. Khademizadeh. Localised edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section, *Thin-Walled Structures*. Vol. 44, pp. 184-196, 2006.
- [9] M. Farzin, M. Salmani Tehrani, E. Shameli. Determination of buckling limit of strain in cold roll forming by the finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 125-126, pp. 626-32, 2002.
- [10] Z.H. Han. The effects of forming parameters in the roll forming of a channel section with an outer edge, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 116, pp. 205-210, 2001.
- [11] M. Brunet, B. Lay, P. Pol, P. Computer aided design of roll forming of a channel section, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 60, pp. 209-214, 1996.
- [12] J. Paralikas, K. Salonitis, G. Chryssolouris. Optimization of roll forming process parameters – a semi-empirical approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 47 (9), pp. 1041-1052, 2010.
- [13] J.H. Wiebenga, M. Weiss, B. Rolfe, A.H. van den Boogaard. Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 213, pp. 978- 986, 2013.
- [14] G. Zeng, S.H. Li, Z.Q. Yu, X.M. Lai, X.M. Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method, *Materials and Design*. Vol. 30, pp. 1930-1938, 2009.
- [15] H. Moslemi Naeini, B. Bidabadi Shirani, S. Mazdak, R. Aziz Tafti., A. Nemati Faghir. Numerical analysis of effective parameters on the steel profiles in cold roll forming process of pre notch sheets. In the *20th annual international Iranian mechanical engineering conference*, Shiraz, Iran, 2012. (In Persian)
- [16] Shirani Bidabadi, B. *Numerical and experimental study of transforming the hole in cold roll forming process of pre-notch section*, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2013. (In Persian)