

## The Effects of Flower Pattern on Uniform Distribution of Force on Rollers in Cold Roll Reshaping\*

Hosain Arzandeh<sup>1</sup>, Hasan Moslemi Naeini<sup>2</sup>

Mahdi Tajdari<sup>3</sup>, Siamak Mazdak<sup>4</sup>, Manabo Kiuchi<sup>5</sup>

### 1. Introduction

Flower pattern is the most important factor for analyzing the reshaping of cold roll forming process. In this process, the mechanical properties of the final product depend on the flower pattern. Moreover, improper flower pattern and non-uniform hardening of the tube cause collapse defect.

In previous studies, the effect of flower pattern design on the applied force on rollers has not been reported. On the other hand, craftsmen need that the wear conditions of the rollers be uniform; therefore, it is necessary that the vertical force distribution on the rollers be uniform. In this study, the amount of height reduction for three different flower patterns, according to the experimental sample, uniform distribution method, and proportional distribution method, were investigated by finite element simulation. Moreover, to validate the simulation results, the power consumption and geometrical shape of the product obtained from the simulation with its experimental sample were compared and there is good agreement has been observed. Finally, for the three flower patterns, power consumption, geometric shape of the product, and the force on the rollers were compared with each other and based on the results, the appropriate flower pattern was selected.

### 2. Numerical simulation

Numerical simulation was performed on a 40 x 60 mm rectangular cross section with a thickness of 3 mm. The pipe is made of ST37 steel sheet. To determine the properties of the sheet, samples were prepared from the production line. The tube was modeled by solid element, and the whole simulation was carried out at one step with dynamic explicit properties.

### 3. Experimental test

To confirm the simulation results, an experimental test was performed and the results of the simulations were compared with experiments.

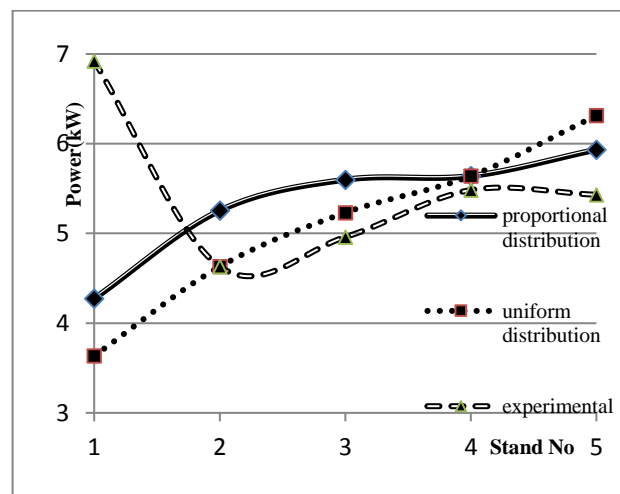
### 4. Results and discussion

Table 1 shows the amount of force applied to the rollers according to the simulation results of different flower patterns. It is observed that the values of the applied forces are highly dependent on the flower patterns. Moreover, the distribution of these forces in the experimental model is more uniform than other models.

Figure 1 shows the distribution of power consumption in stations according to different flower patterns. It is observed that the power consumption of the experimental method in the last stations is less than other methods, so the residual stress in the product in this method will be less than others. According to Figure 2, the experimental method was 17% and 31% more successful in forming the corners than the proportional and uniform distribution patterns, respectively.

**Table 1. The comparison of forces on rollers in proportional distribution, uniform, and experimental distribution**

Amount of force in simulating various types of flower patterns (kN)			Stand No.
experimental	uniform distribution	proportional distribution	
51	35	42	1
43.5	40	50	2
50	44	50	3
50	48	56	4
56.5	53.5	59.5	5
50.2	44.1	51.5	Avg.
-6.7 +6.3	-9.1 +9.4	-9.5 +8	min and max difference of Avg.
13%	21%	17%	Percentage Deviation from uniformity over Avg.



**Figure 1. The distribution of power consumption in stations according to different flower patterns**

Figure 2 shows also that increasing the non-uniformity of the force distribution increases the corner radius error.

\*Manuscript received, January, 10, 2020; Revised, April, 10, 2022, Accepted, May, 10, 2020.

1. PhD Candidate in Manufacturing Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

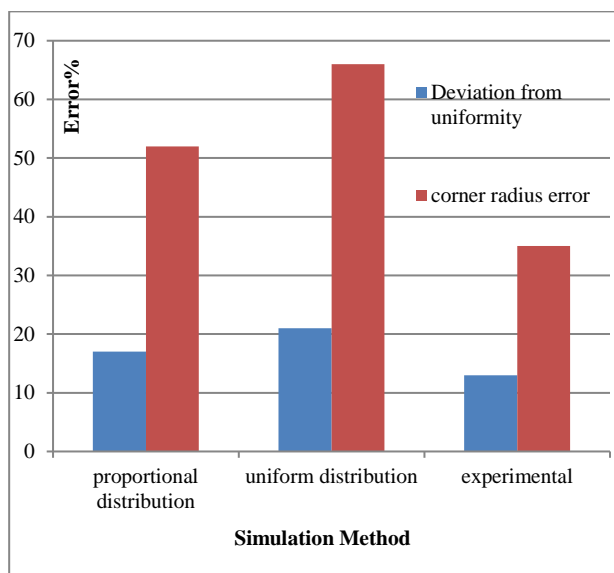
2. Corresponding Author: Professor of the Faculty of Mechanics Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Email: moslemi@modares.ac.ir

3. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Electronic, Mechanics and Computer Engineering, Ivanki University, Ivanki, Iran.

4. Assistant Professor, Faculty of Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

5. Manabo Kiuchi, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Bunkyo, Japan



**Figure 2. The effect of uniformity of force distribution on the reduction of corner radius error**

## 5. Conclusion

In this study, the effects of flower pattern design on the way distribution of the applied force to the rollers and their power consumption at different reshaping stations were investigated experimentally and numerically. To do this, three different flower patterns were evaluated using three-dimensional finite element simulations, and practical experiments were performed to ensure the accuracy of the simulations.

The simulation results showed that although the power consumption for reshaping in experimental flower pattern is 2.8% more than the proportional distribution method and 7.9% more than the uniform distribution method, respectively, this method is 17% and 31% more successful in forming the corner than the mentioned patterns, and the distribution of vertical force on its rollers is 4% and 8% more uniform, respectively.

As a result, due to the uniformity of the vertical force in the experimental method, the friction and wear conditions of the rollers will be more uniform than other methods. Therefore, it can be concluded that in order to select a more suitable flower pattern, the use of uniform distribution of applied force along with the criterion of minimum energy consumption leads to more suitable conditions.

**تأثیر الگوی گل بر توزیع یک‌نواخت نیروی وارد بر غلتک‌ها در شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد\***

مقاله پژوهشی

حسین ارزنده<sup>(۱)</sup> حسن مسلمی نائینی<sup>(۲)</sup> مهدی تاجداری<sup>(۳)</sup> سیامک مزدک<sup>(۴)</sup> مانابو کیوچی<sup>(۵)</sup>

**چکیده** در این مقاله، اثر طراحی الگوی گل بر انرژی مصرفی و نیز چگونگی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها در ایستگاه‌های مختلف شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد به صورت تجربی و عددی بررسی گردیده است. به منظور مطالعه اثر متغیرها از شبیه‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی استفاده شده و برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌ها آزمایش عملی انجام شده است. از مقایسه ابعادی و نیز مقایسه توان مصرفی به عنوان ابزارهای صحت‌گذاری بر شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. ضمن معرفی شیوه‌های مختلف طراحی الگوی گل، نیروی اعمالی بر غلتک‌ها در سه طراحی مختلف الگوی گل بررسی شده است. مقادیر و نحوه تغییرات انرژی کرنشی، کار خارجی و انرژی داخلی طی زمان در هر روش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین چگونگی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها در هر روش تشریح شده است. علاوه بر معیار انرژی مصرفی کمینه، یک‌نواختی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها نیز به عنوان معیاری برای طراحی الگوی گل معرفی شده است و نشان داده شده که استفاده از معیار یک‌نواختی نیروی اعمالی به غلتک‌ها در کنار معیار انرژی مصرفی کمینه، موجب افزایش دقت ابعادی محصول می‌شود.

**واژه‌های کلیدی** شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد، الگوی گل، یک‌نواختی توزیع نیرو، انرژی مصرفی.

**مقدمه**

شده است. آن‌ها هم‌چنین روش رفت و برگشتی را توسعه دادند و قابلیت‌های این روش را در طراحی الگوی گل در شکل‌دهی مجدد غلتکی نشان دادند. یانگ مینگ [3] در سال ۲۰۰۸ با استفاده از قالب‌های ۷ شکلی به بررسی تأثیر پارامترهای اصطکاک، نسبت هندسی، جنس لوله‌ها و میزان کاهش ارتفاع بر روی نیروی شکل‌دهی و حالت‌های عیوب پیش‌آمده در تبدیل لوله‌های چهارگوش از لوله گرد اولیه پرداخت. وی نشان داد در شرایط اصطکاکی لغزنده با یک مقدار کاهش ارتفاع یکسان، با کاهش ضخامت احتمال ایجاد عیب جدایش کاهش می‌یابد. علی‌نژاد و همکاران [4] در سال ۲۰۰۹ با توسعه روش مرجع [2] یک روش تحلیل دوبعدی برای بررسی رفتار تغییر شکل کشسان-مومسان سطح مقطع لوله در طی فرایند شکل‌دهی لوله‌های گرد به مقاطع مربعی و مستطیلی ارائه کردند و توانستند شکل لوله فلزی تغییر شکل یافته در بین دو ایستگاه مجاور را به دست آورند. چن و یه [5] در سال ۲۰۱۱ تأثیر پارامترهای ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی و نسبت

در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد لوله گرد طی عبور از چند ایستگاه شکل‌دهی، به پروفیل غیر گرد تبدیل می‌شود. عامل اساسی لازم برای تجزیه و تحلیل فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد، الگوی گل است. الگوی گل شکلی است مصور که از کنار هم قرار دادن مقاطع حاصل از ایستگاه‌های شکل‌دهی بر مبنای یک محور مشترک ایجاد می‌گردد [1]. برای تجزیه و تحلیل فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد روش‌های تقریبی مختلف تجربی، نیمه تجربی و تحلیلی توسط محققان ارائه شده است. مسلمی نائینی و همکاران [2] در سال ۲۰۰۱ یک برنامه براساس روش تعادل نیروها و گشتاور در یک المان برای تحلیل دوبعدی تغییر شکل کشسان-مومسان لوله در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی لوله‌های گرد به لوله‌هایی با مقطع غیر گرد تدوین نمودند. با استفاده از این برنامه، شکل هندسی، توزیع نیروها و گشتاورهای خمشی وارد به لوله برای مقاطع مختلف بررسی

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۱۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری ساخت و تولید-دانشگاه تربیت مدرس-تهران

(۲) نویسنده مسئول: استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران،

(۳) استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی الکترونیک، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوانکی-ایوانکی

(۴) استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش

Email: moslemi@modares.ac.ir

شد، اما در این تحقیقات، اثر طراحی الگوی گل غلتک بر نیروی اعمالی به غلتک‌ها گزارش نشده است.

از سوی دیگر برای کاهش هزینه‌ها و کاهش توقف خط تولید، تلاش صنعتگران بر این است که طراحی الگوی گل غلتک‌ها به گونه‌ای باشد که همگی باهم به تعمیر و تراش کاری نیاز پیدا کنند. بنابراین باید شرایط سایش غلتک‌ها یک‌نواخت باشد و بدین جهت لازم است تا توزیع نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها یک‌نواخت باشد.

در این مقاله بر اساس سه الگوی گل منطبق بر نمونه عملی، توزیع یک‌نواخت و توزیع متناسب مقدار کاهش ارتفاع، شبیه سازی اجزای محدود الگوی گل انجام شده است. برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی توان مصرفی، شکل هندسی محصول حاصل از شبیه‌سازی با نمونه تجربی آن مقایسه و تطابق خوبی مشاهده شد. در نهایت توان مصرفی، شکل هندسی محصول و نیروی وارد بر غلتک‌ها بین سه الگوی گل مقایسه و الگوی گل مناسب انتخاب شد.

## روش‌های معرفی شده طراحی الگوی گل در منابع

### پیشین

محققان مختلف روش‌های گوناگونی برای طراحی الگوی گل ارائه کرده‌اند. روش‌های مهم عبارتند از:

**الف) روش توزیع یک‌نواخت.** چگونگی محاسبه میزان کاهش در راستای ارتفاع و عرض لوله در هر ایستگاه طبق این روش در معادله (۱) نشان داده شده است. ابعاد کلی و مفاهیم پایه معادله مورد نظر نیز در شکل (۱) نشان داده شده است. در این روش، ارتفاع و عرض لوله در هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبلی به اندازه  $\theta$  کاهش می‌یابد. ابعاد لوله پس از شکل‌دهی مجدد  $d$ ، قطر لوله گرد اولیه  $D$  و تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز برای شکل‌دهی  $N$  فرض شده است [11].

هندسی را بر روی رخ دادن عیوب در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار دادند و روابطی برای پیش‌بینی احتمال وقوع عیب جدایش متناسب با نسبت هندسی ارائه کردند. رایالا و گوود [6] در سال ۲۰۱۶ تأثیر میزان کاهش ارتفاع در هر مرحله بر خواص و کیفیت محصول نهایی را مورد بررسی قرار دادند. اثر میزان کاهش ارتفاع بر تغییرات ضخامت دیواره، شعاع گوشه لوله و توان مصرفی را براساس شیوه توزیع یک‌نواخت به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند بر اساس این شیوه طراحی الگوی گل توان مصرفی ایستگاه به ایستگاه افزوده می‌شود. شائو و همکاران [7] در سال ۲۰۱۸ سعی کردند که با توجه به اثر متغیرهای مختلف فرایند نظیر خواص فلز مدول یانگ، استحکام تسلیم و شرایط سخت‌شوندگی آن، در فرایند شکل‌دهی غلتکی مجدد روابطی برای توزیع تنش پس‌ماند در محصول ارائه کنند. تاجیار [8] در سال ۲۰۱۹ تأثیر متغیرهای مقدار کاهش ارتفاع و اصطکاک بر ایجاد عیب جدایش را مورد بررسی قرار داد و نشان داد در شرایط لوله جدارنازک اصطکاک می‌تواند وقوع عیب جدایش را تحت تأثیر قرار دهد در حالی که لوله‌های جدارضخیم نسبت به اصطکاک حساس نیستند. ژنگ و همکاران [9] در سال ۲۰۲۰ به بررسی مقاطع مربعی و مستطیلی پرداختند و نشان دادند که وقتی الگوی گل دارای تعداد ایستگاه‌های زیاد باشد، یک مدل عددی کارآمد و دقیق برای تحلیل فرایند ضروری است. مزدک و همکاران [10] در سال ۲۰۲۱ با استفاده از روش تعادل المان و توسعه روش مرجع [2] روشی برای طراحی غلتک‌های مقاطع دارای تاخوردگی ارائه کردند. هم‌چنین مدلی عددی بر اساس این روش تهیه و ارائه نمودند و روشی اختصاصی برای طراحی غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی مجدد تدوین کردند و نشان دادند عامل ایجادکننده عیب جدایش، سخت شدن غیریک‌نواخت لوله است.

بررسی طراحی غلتک، چگونگی شکل‌گیری، مقدار کاهش ارتفاع و در نهایت طراحی الگوی گل موضوع مشترک تحقیقات فوق‌الذکر است. ملاحظه می‌شود که این تحقیقات اثر الگوی گل بر عیوب و خواص محصول را بررسی کرده‌اند. هم‌چنین روش‌هایی برای طراحی الگوی گل بر مبنای هندسه مقطع و لوله اولیه ارائه داده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد

گل، منطبق بر شیوه‌های طراحی ذکر شده و الگوی گل تجربی مورد استفاده در یکی از شرکت‌های تولیدکننده طراحی شده و همگی آن‌ها مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. در تمامی مدل‌ها منطبق بر شرایط خط تولید، یک ایستگاه اولیه به‌عنوان نگه‌دارنده و سپس ۵ عدد غلتک شکل‌دهنده با فاصله ۶۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. ابعاد غلتک‌ها نیز مشابه ابعاد خط تولید لحاظ شده‌است و تنها تفاوت غلتک‌ها در مدل‌های مختلف، در میزان کاهش ارتفاع مربوط به آن‌ها است. در جدول (۱) مقادیر کاهش ارتفاع در ایستگاه‌های مختلف طبق هر الگو بیان شده‌است. غلتک‌های صلب تحلیلی و لوله از ماده شکل‌پذیر انتخاب شده‌اند. ضخامت لوله اولیه ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. برای کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها، با در نظر گرفتن فاصله بین ایستگاه‌ها، طول لوله ۱۸۰۰ میلی‌متر و بدون درز در نظر گرفته شده‌است، به‌صورتی که محصول، در آن واحد حداقل در سه ایستگاه با غلتک‌ها در تماس باشد.

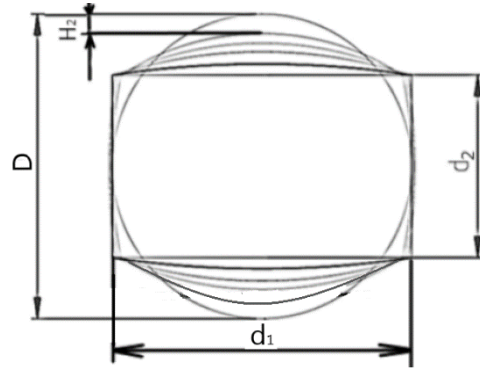
در جدول (۱) متغیرهای  $H_1$  و  $H_2$  به‌ترتیب به مقدار کاهش عرضی و ارتفاعی به‌ترتیب در بعد ۶۰ و ۴۰ محصول اشاره دارند. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود مقدار کاهش در راستای  $H_1$  در تمامی الگوها در ایستگاه اول مشابه است و در ایستگاه‌های بعدی نیز تفاوت آن‌ها ناچیز است، اما در مورد  $H_2$  این تفاوت‌ها قابل توجه و معنادار هستند و تفاوت عمده الگوهای مختلف در این بعد نمایان می‌شود.

جدول ۱ مقدار کاهش ارتفاع در ایستگاه‌های مختلف الگوی گل‌های طراحی شده

شماره ایستگاه					متغیر کاهش (mm)	نام روش
۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	$H_1$	توزیع
۴/۷۲	۴/۷۲	۴/۷۲	۴/۷۲	۴/۷۲	$H_2$	یکنواخت
۰/۷	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۴	$H_1$	توزیع
۳/۸۹	۴/۲۶	۴/۶۸	۵/۱۳	۵/۶۳	$H_2$	متناسب
.	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۷۶	$H_1$	الگوی گل
۳/۸	۴/۰۸	۳/۶۴	۳/۹	۸/۱۸	$H_2$	تجربی

### خصوصیات ماده خام

فلز مورد بررسی فولاد ST37 است و از ورق محصول در حال تولید نمونه گرفته شده‌است. مشخصات ماده خام به‌وسیله



شکل ۱ ابعاد کلی لوله با مقطع مستطیلی و لوله اولیه

$$H_1 = \frac{D - d_1}{N} \quad \& \quad H_2 = \frac{D - d_2}{N} \quad (1)$$

(ب) روش‌های توزیع کاهش. از آنجایی که بر اثر کارسختی تغییر شکل ورق دشوارتر می‌شود بر این اساس در این روش طراحی مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه از ایستگاه ابتدایی تا ایستگاه انتهایی رفته‌رفته کم‌تر در نظر گرفته می‌شود [11]. این شیوه به‌طور کلی منتخب صنعتگران بوده‌است اما مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه مبتنی بر دانش و سعی و خطا صورت می‌گیرد. در سال ۲۰۰۱ توسط ون و همکاران [12] شیوه‌ای به نام شیوه توزیع متناسب ارائه شده‌است. در این روش با داشتن تعداد ایستگاه و به کمک رابطه ارائه‌شده، میزان کاهش ارتفاع لوله در هر ایستگاه با جایگزین کردن متغیرهای طراحی در معادله (۲) به‌دست می‌آید. ارتفاع لوله در این روش در ایستگاه اول بیشترین کاهش را داراست و به‌تناسب در ایستگاه‌های بعدی اندازه آن کاهش می‌یابد. در این روش ارتفاع لوله پس از شکل‌دهی مجدد  $l$ ، قطر لوله گرد اولیه  $D$  و  $n$  شماره ایستگاه است و تعداد ایستگاه‌های موردنیاز برای شکل‌دهی  $N$  فرض می‌شود و معادله (۲) برای تخمین ارتفاع لوله و میزان کاهش ارتفاع در  $n$ مین ایستگاه معرفی می‌شود [12]:

$$l_0 = D, l_n = \frac{l_{n-1}}{K}, K = \left(\frac{D}{l}\right)^{\frac{1}{N}} \quad (2)$$

### شبیه‌سازی عددی فرایند

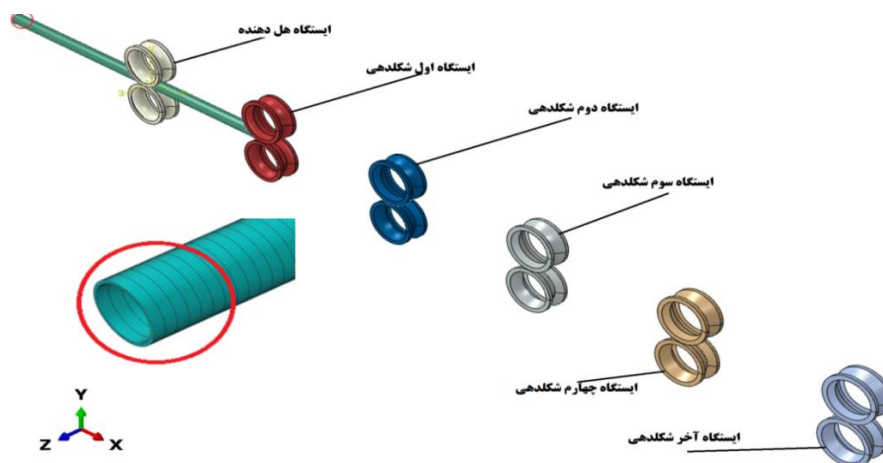
انتخاب مقطع مورد بررسی و مدل‌سازی. برای بررسی اثر الگوی گل بر نیروی شکل‌دهی، مقطع مستطیلی  $۶۰ \times ۴۰$  میلی‌متر با ضخامت ۳ میلی‌متر انتخاب شده‌است. برای آن سه الگوی

نشان داده شده‌است. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به اندازه‌مش‌بندی، شبیه‌سازی‌ها از تعداد المان کم به زیاد انجام شد. با ملاک قرار دادن نیروی وارد بر غلتک‌ها در ایستگاه اول شکل‌دهی، تعداد المان‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که نیروی ایستگاه اول کم‌تر از ۵ درصد تغییرات داشته باشد و در نهایت مدلی با تعداد المان ۳۲۶۴۰ عدد انتخاب شد. کل شبیه‌سازی در یک مرحله با خصوصیت دینامیک صریح انجام شده‌است. نحوه حرکت لوله نیز مشابه حالت واقعی بر اثر چرخش غلتک‌ها و راندن لوله در نظر گرفته شده‌است. سرعت دورانی غلتک‌ها منطبق بر سرعت خط تولید برابر با ۱۳/۵ rad/s در نظر گرفته شده‌است. تماس بین غلتک‌ها و لوله تماس سطح‌به‌سطح و با ضریب اصطکاک ۰/۲ انتخاب شده‌است [13].

### آزمایش عملی

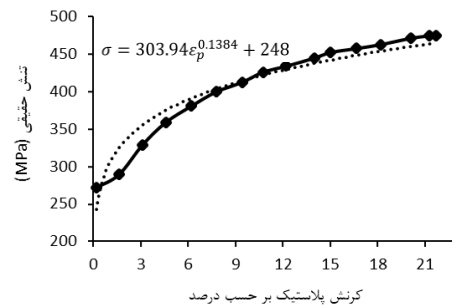
برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی‌ها، آزمایش عملی در یکی از خطوط تولید صورت گرفته‌است و نتایج شبیه‌سازی‌ها با آزمایش‌های تجربی مقایسه شده‌اند. شکل (۴) تصویری از محصول در حال تولید در آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. موارد بررسی شده عبارتند از:

- (۱) ابعاد بیرونی، (۲) ضخامت محصول در لبه‌ها و گوشه، (۳) شعاع گوشه، (۴) مقدار تورفتگی، (۵) ابعاد هندسی (تعامل لبه‌ها) و (۶) توان مصرفی برای شکل‌دهی. موقعیت موارد در شکل (۵) نشان داده شده‌است.
- نتایج این مقایسه‌ها در جدول (۳) ذکر شده‌اند.



شکل ۳ مدل ایجاد شده و المان‌بندی شده

آزمایش کشش استخراج گردیده و در شبیه‌سازی وارد شده‌است. از ورق اولیه (قبل از لوله شدن) سه عدد نمونه هم‌راستا (راستای نورد) تهیه و آزمایش کشش انجام شده و میانگین مقادیر آن‌ها گزارش شده‌است. در شکل (۲) نمودار تنش و کرنش به دست آمده از آزمایش کشش است. در جدول (۲) خصوصیات ماده خام ذکر شده‌است.



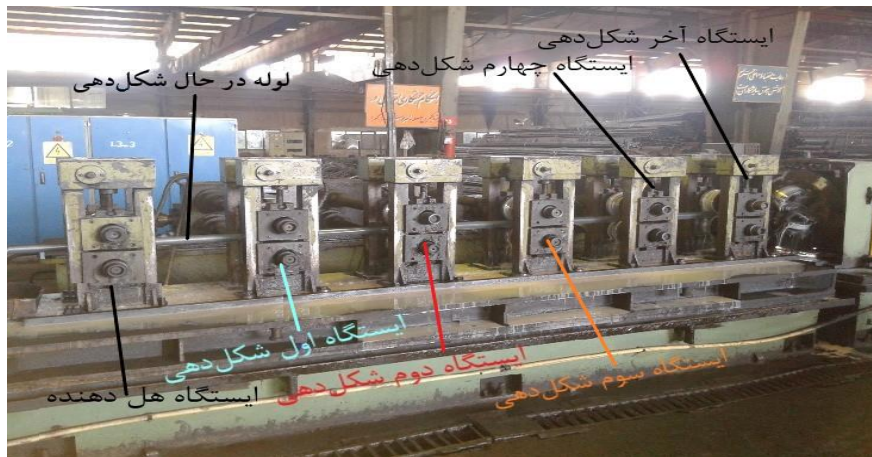
شکل ۲ منحنی تنش-کرنش پلاستیک حقیقی حاصل از آزمایش کشش

جدول ۲ خصوصیات فولاد St37

مدول یانگ GPa	ضریب پواسان	تنش تسلیم MPa	تنش نهایی MPa	کرنش بیشینه (%)	ضریب MPa K	n توان کرنش سختی
۲۰۱	۰/۳	۲۷۲	۴۷۴	۲۱/۵	۳۰۴	۰/۱۳۵

### مش‌بندی، شرایط مرزی و نحوه تعریف تماس

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد لوله به صورت توپر مدل شد و برای المان‌بندی از المان C3D8R که از انواع المان آجری ۸ نقطه‌ای با روش انتگرال کاهش یافته‌است، استفاده شد. غلتک‌ها به صورت صلب تحلیلی مدل شدند در شکل (۳) مدل مورد نظر

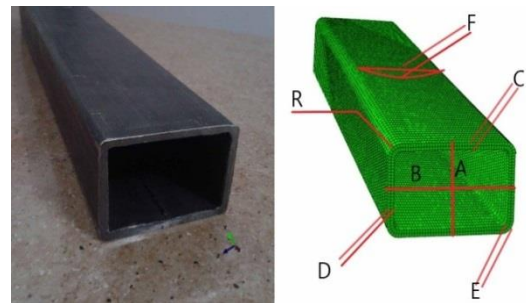


شکل ۴ لوله در حال شکل دهی

تمامی اندازه‌گیری‌ها برای اطمینان از صحت آن‌ها سه مرتبه تکرار شده‌اند و میانگین آن‌ها به‌عنوان اندازه موردنظر در نظر گرفته شده‌است.

ابعاد بیرونی و ضخامت با استفاده از کولیس معمولی با دقت  $0.02$  میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌اند. برای ضخامت محصول در گوشه‌ها، از  $4$  گوشه محصول نمونه برداری شده‌است. در مورد شعاع گوشه‌ها شعاع چهارگوشه محصول عملی به‌وسیله شعاع‌سنج با پلکان نیم میلی‌متر، اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها گزارش شده‌است. در شبیه‌سازی نیز برای اندازه‌گیری شعاع، از گره‌ها کماتی عبور داده شده و شعاع کمان به‌دست آمده‌است. در این مورد  $23\%$  اختلاف مشاهده شده‌است که دلیل آن می‌تواند خطای ناشی از فاصله پلکانی بین مقادیر شعاع‌سنج باشد. در مورد مقدار تورفتگی، در نمونه عملی مقدار تورفتگی با استفاده از کولیس عمق‌سنج با دقت  $0.02$  میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌است. برای پرهیز از اثرات ناشی از برش، موقعیت اندازه‌گیری  $50$  سانتی‌متر دورتر از مقطع برش‌خورده انتخاب شده‌است. در مورد مقدار تورفتگی  $16\%$  اختلاف مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری تعامد، ابتدا به‌کمک گونیای دقیق (گونیای مویی) و دسته فیلر استاندارد با فاصله پلکانی  $0.05$  میلی‌متر، حد فاصل لبه محصول تا وضعیت تعامد دقیق اندازه‌گیری شده‌است. علاوه بر مشخصات هندسی، مقدار توان مصرفی نیز برای صحنه‌گذاری شبیه‌سازی اندازه‌گیری شده‌است.

توان مصرفی برای شکل دهی مجدد. در خط تولید قبل از انجام شکل دهی انرژی به‌صورت‌های مختلفی مثل انرژی موردنیاز



شکل ۵ نمونه محصول عملی و شبیه‌سازی و عناوین موارد مورد مقایسه

جدول ۳ مقایسه نتایج آزمایش عملی و شبیه‌سازی

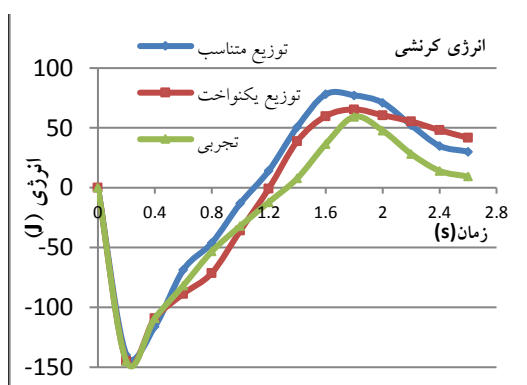
اختلاف (%)	مقدار تجربی	مقدار شبیه‌سازی	موارد مورد سنجش	
			ابعاد بیرونی (mm)	ضخامت محصول (mm)
0.91	40.25	39.88	اندازه 40 (A)	ابعاد بیرونی (mm)
0.22	60.2	60.07	اندازه 60 (B)	
1.6	3.12	3.07	لبه (C,D)	ضخامت محصول (mm)
2.5	3.14	3.06		
3.82	3.39	3.52	گوشه (E)	شعاع گوشه (R) (mm)
23.29	4.38	5.4		
16	0.25	0.29	مقدار تورفتگی (F) (mm)	ابعاد هندسی
0.58	-0.46 (89.54)	-0.98 (89.02)	تعامد (درجه)	
7.17	29.55	27.43	توان مصرفی برای شکل دهی (kw)	

## نتایج و بحث

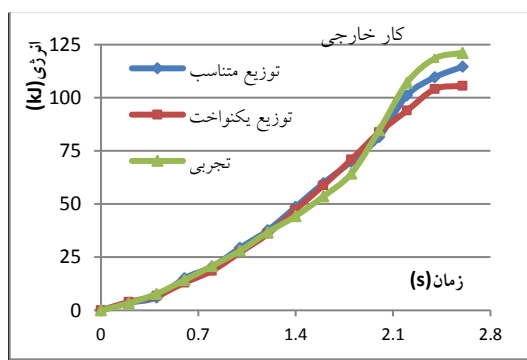
میزان کاهش ارتفاع در هر ایستگاه، طبق الگوی تولیدکننده صنعتی و هم طبق دو شیوه طراحی الگوی گل موردنظر در جدول (۱) آورده شده‌اند.

انرژی موردنیاز به صورت‌های مختلفی مانند انرژی داخلی، کار مومسانی، کار خارجی و انرژی کرنشی مصرف می‌گردد. بررسی برخی از این موارد در سه الگوی گل مختلف از شکل (۸) تا شکل (۱۰) صورت گرفته‌است. نکته قابل توجه در این شکل‌ها، مشابهت بسیار زیاد مقادیر انرژی و نحوه تغییرات آن طی زمان در هر مورد بین الگوهای مختلف است.

در جدول (۴) مقدار نیروی وارد بر غلتک‌ها در الگوهای گل حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که مقادیر نیروهای اعمالی به الگوی گل‌ها بسیار وابسته است. توزیع این نیروها در الگوی تجربی نسبت به الگوهای دیگر یک‌نواخت‌تر است.

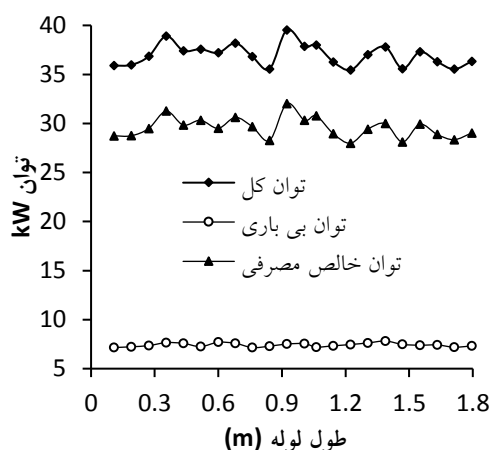


شکل ۸ انرژی کرنشی سه الگوی گل مختلف



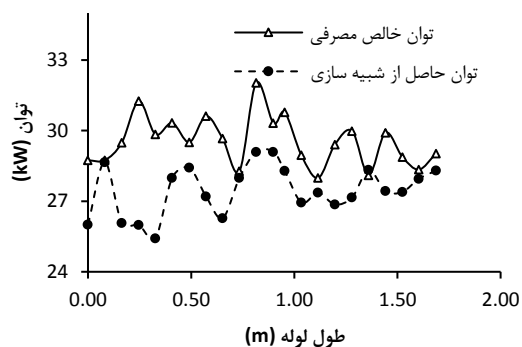
شکل ۹ کار خارجی سه الگوی گل مختلف

برای گردش غلتک‌ها و گیربکس‌ها، اصطکاک بین اجزای انتقال‌دهنده نیرو و انرژی لازم برای به حرکت درآوردن خود موتور، تلف می‌شود. برای حذف این اتلاف‌های انرژی، بعد از اندازه‌گیری توان در حین فرایند شکل‌دهی، توان مصرفی در هنگام بی‌باری نیز اندازه‌گیری شده و از توان مصرفی کل کم شده‌است. در شکل (۶) توان مصرفی کل، توان مصرفی در هنگام بی‌باری و توان خالص شکل‌دهی نمایش داده شده‌است.



شکل ۶ توان مصرفی کل، توان مصرفی در هنگام بی‌باری و توان خالص شکل‌دهی

برای اندازه‌گیری توان، مقدار جریان مصرفی با آمپرسنج اندازه‌گیری شد. در شکل (۷) توان خالص مصرفی خط موجود و توان شبیه‌سازی مقایسه شده‌است. در این مورد مقدار ۱/۷٪ اختلاف مشاهده شده‌است.



شکل ۷ مقایسه توان خالص مصرفی خط موجود و توان حاصل از شبیه‌سازی

در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده، کیفیت شبیه‌سازی مطلوب است و نتایج آن قابل اعتماد می‌باشد.



بیشتری برای شکل دهی استفاده کرده است. مشخصات ابعادی محصول نیز طبق سه الگوی گل غلتک، در جدول (۵) آورده شده است.

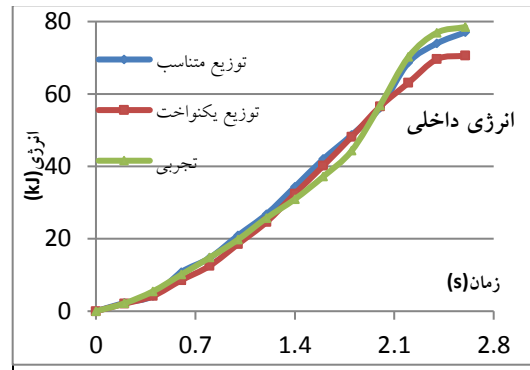
مطابق شکل (۱۱) مقدار خطا در شکل دهی گوشه در شبیه سازی روش تجربی ۳۵٪، در روش توزیع متناسب ۵۲٪ و در روش توزیع یک نواخت ۶۶٪ است لذا روش تجربی نسبت به الگوهای توزیع متناسب و یک نواخت به ترتیب ۱۷٪ و ۳۱٪ موفق تر بوده است. هم چنین در شکل (۱۱) نشان داده شده است که افزایش غیریک نواختی توزیع نیز موجب افزایش خطای شعاع گوشه می گردد.

جدول ۴ مقایسه نیروهای وارد بر غلتکها در وضعیت های توزیع

متناسب، توزیع یک نواخت و تجربی			شماره ایستگاه
مقدار نیرو در شبیه سازی انواع الگوهای گل غلتک (KN)			
تجربی	توزیع متناسب	توزیع یک نواخت	
۵۱	۴۲	۳۵	۱
۴۳/۵	۵۰	۴۰	۲
۵۰	۵۰	۴۴	۳
۵۰	۵۶	۴۸	۴
۵۶/۵	۵۹/۵	۵۳/۵	۵
۵۰/۲	۵۱/۵	۴۴/۱	میانگین
-۹/۵	-۹/۱	-۶/۷	اختلاف حداقل و حداکثر از میانگین
+۸	+۹/۴	+۶/۳	
۱۷٪	۲۱٪	۱۳٪	درصد اختلاف نسبت به میانگین

جدول ۵ مقادیر ابعادی حاصل از شبیه سازی سه الگوی گل مختلف

مقادیر ابعادی حاصل از شبیه سازی mm				
شبهه طراحی الگوی گل	در بعد ۶۰	در بعد ۴۰	شعاع گوشه	مقدار شعاع مورد انتظار
توزیع متناسب	۶۰/۱۲	۴۰/۱۴	۶/۰۷	۴
توزیع یک نواخت	۶۰/۱۵	۴۰/۲۱	۶/۶۴	۴



شکل ۱۰ انرژی داخلی سه الگوی گل مختلف

هم چنین در شکل (۱۲) توزیع توان مصرفی در ایستگاهها طبق الگوهای مختلف گل غلتک نشان داده شده است. ملاحظه می شود که در شرایط خط تولید تجربی ایستگاه اول بیشترین توان را مصرف کرده است ولی در الگوهای حاصل از شبیه سازی مقدار توان مصرفی ایستگاه به ایستگاه افزایش یافته و در ایستگاه آخر به نهایت خود رسیده است. البته در الگوی گل غلتک توزیع متناسب، شیب افزایش بین ایستگاهها ملایم تر است. از طرف دیگر با توجه به مقادیر نیروی وارد بر غلتکها (جدول ۴) می توان نتیجه گرفت این تفاوت نتایج بین الگوی گل روش تجربی و روش های عددی، یک مزیت قابل توجه در روش تجربی است، چرا که بدون اعمال نیروی عمودی مازاد بر غلتکهای ایستگاه اول موجب انجام کار مومسانی بیشتری نسبت به الگوهای دیگر شده است. توضیح این که مقادیر شعاع غلتکها، ضریب اصطکاک، مشخصات ابعادی لوله اولیه و خواص ماده خام در همه روشها یکی است؛ لذا انتظار می رود نیروی عمودی وارد بر غلتکها، مهم ترین عامل تعیین کننده تفاوت تلفات ناشی از اصطکاک در شیوه های مختلف باشد. هم چنین ملاحظه می شود که مقدار توان مصرفی روش تجربی در ایستگاه آخر کمترین مقدار بین روشها است. این امر از آن لحاظ اهمیت دارد که ایستگاه آخر، بیشترین سهم را در ویژگی های مکانیکی محصول تولیدی دارد و هر چه بار این ایستگاه کمتر باشد تنش پس ماند در قطعه کم تر می شود و محصولی با خواص مکانیکی مطلوب تر به دست می آید.

هم چنین شکل (۱۳) مقادیر کل توان مصرفی الگوهای گل غلتک مختلف را نشان می دهد. ملاحظه می شود که روش تجربی به مقدار ۲/۸٪ نسبت به الگوی گل غلتک توزیع متناسب و ۷/۹٪ نسبت به الگوی گل غلتک توزیع یک نواخت، انرژی

### نتیجه‌گیری

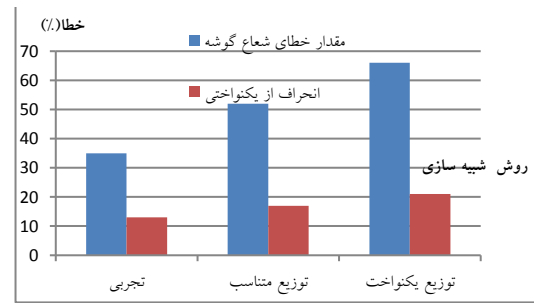
در این مقاله، اثر طراحی الگوی گل بر چگونگی توزیع نیروی اعمالی به غلتک‌ها و توان مصرفی آن‌ها در ایستگاه‌های مختلف شکل‌دهی غلتکی مجدد به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این بررسی‌ها سه الگوی گل مختلف به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار تجاری آباکوس به صورت سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌ها آزمایش عملی نیز صورت گرفته است.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است که در الگوی گل غلتک تجربی نسبت به الگوی توزیع متناسب ۲/۸٪ و نسبت به الگوی توزیع یک‌نواخت ۷/۹٪ توان مصرفی بیشتری برای شکل‌دهی مورد نیاز است. همچنین روش تجربی نسبت به الگوهای توزیع متناسب و یک‌نواخت به ترتیب ۱۷٪ و ۳۱٪ در شکل‌دهی گوشه موفق‌تر بوده است. همچنین نشان داده شد که در روش تجربی توزیع نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها نسبت به الگوی توزیع متناسب و توزیع یک‌نواخت به ترتیب ۴٪ و ۸٪ یک‌نواخت‌تر است. در نتیجه این یک‌نواختی نیروی عمودی شرایط اصطکاک و استهلاک غلتک‌ها در روش تجربی نسبت به دیگر روش‌ها یک‌نواخت‌تر خواهد بود؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که برای انتخاب الگوی گل مناسب‌تر، استفاده از توزیع یک‌نواخت نیروی اعمالی در کنار معیار انرژی مصرفی کمینه منجر به شرایط مناسب‌تری می‌شود.

### تقدیر و تشکر

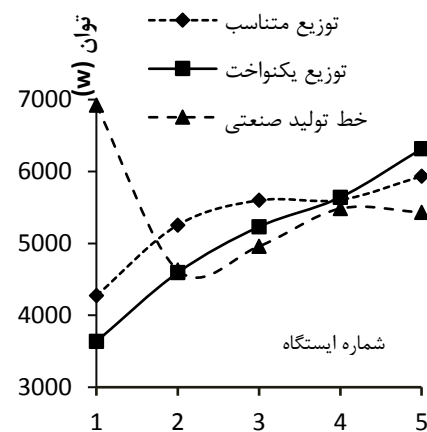
از شرکت لوله و پروفیل مهدی و به‌ویژه از جناب آقای مهندس ترابی بابت قبول زحمات انجام آزمایش‌ها و همکاری در اندازه‌گیری‌ها بسیار سپاس‌گزار می‌شود.

واژه نامه	
Reshaping of cold roll forming	شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد
Flower Pattern	الگوی گل
Uniform distribution of force	یک‌نواختی توزیع نیرو
Energy consumption	انرژی مصرفی

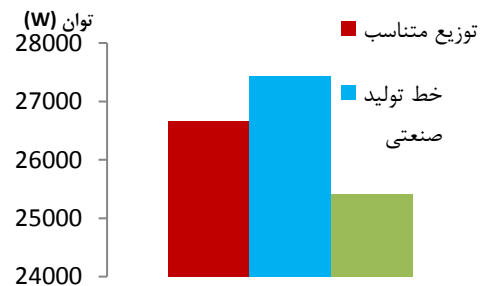


شکل ۱۱ اثر یک‌نواختی توزیع نیرو بر کاهش خطای شعاع گوشه

مطابق شکل (۸) انرژی کرنشی خط تولید تجربی نسبت به الگوهای دیگر کم‌تر است اما طبق شکل (۱۳) توان مصرفی این روش نسبت به بقیه روش‌ها بیشتر است. هر چند از لحاظ انرژی مصرفی، مقدار توان روش تجربی بیشتر است اما از نظر ابعادی در مورد شعاع گوشه نسبت به دو شیوه دیگر موفق‌تر بوده است و این تفاوت توان مصرفی نیز می‌تواند مربوط به توان مورد نیاز برای ایجاد شعاع گوشه باشد.



شکل ۱۲ توزیع توان مصرفی در ایستگاه‌ها طبق الگوی گل‌های مختلف



شکل ۱۳ توان کل مصرفی حاصل از شبیه‌سازی طبق الگوی گل‌های مختلف

## مراجع

1. Halmos, G.T., "Roll Forming Handbook", CRC Press, VOL. 1, Pp. 153 (2005)
2. Kiuchi, M., Naeini, H.M. and Shintani, K., "Computer Aided Design of Rolls for Reshaping Processes from Round Pipes to "Channel-Type" Pipes", *Journal of Materials Processing Technology*, VOL. 111, No.1, Pp. 193-197, (2001).
3. Huang, Y.M., "Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Squaring Circular Tube", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, VOL. 18 , NO 3: P. 665-673, (2008). , ..
4. Alinezhad, P., Sanati, A. and Momtahn, K.N. "Computer Aided Design of Reshaping Process of Circular Pipes into Square Pipes", *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*, VOL. 3, NO. 7, Pp. 468-472, (2009)
5. Chen, T.C. and Ye, J.M., "Finite-Element Analysis of the Double Lateral Compression of Clad Tube into a Symmetric Square-Tube", *Advanced Materials Research*, VOL 337: Pp. 332-335, (2011)
6. Rayala, P. and Goud, S.C., "Reshaping of Thick Tubes into Square Passes at Ends with FEM Simulation", *AIJREAS*, VOL. 1, NO. 4, P. 6, (2016).
7. Shao, C., Zhang, P. Zhu, Y. Zhang, Z. Tian, Y. and Zhang, Z., "Simultaneous Improvement of Strength and Plasticity: Additional Work-Hardening from Gradient Microstructure", *Acta Materialia*, VOL. 145, Pp. 413-428, (2018).
8. Tajyar, A., "Investigating the Effect of Different Parameters on the Occurrence of Collapse Defect in Re-Shape Rolling of Circular Pipe into a Square Tube", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, VOL. 6, NO. 4, Pp. 14-22, (2019).
9. Zheng, B., Shu, G., Wang, J., Gu, Y. and Jiang, Q., "Predictions of Material Properties in Cold-Rolled Austenitic Stainless Steel Tubular Sections", *Journal of Constructional Steel Research*, VOL. 164, Pp. 10582, (2020).
10. Mazdak, S., Naeni, H. M., Sheykholeslami, M. R., Kiuchi, M. and Validi, H., "The Effect of the Roller Profile Oncave-In Defect in Reshaping Processby Considering Nonlinear Combine Strain Hardening", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, VOL. 236. NO. 5, Pp. 1-13, (2022).
11. Kang, W., Zhao, Y., Yu, W., Wang, S., Ma, Y. and Yan, "Numerical Simulation and Parameters Analysis for Roll Forming of Martensitic Steel MS980", *Procedia Engineering*, VOL. 81, Pp. 251-256, (2014).
12. Wen, B., "Using Advanced Tooling Designs to Reshape Round Tube into Square and Rectangular Tubes", OH, USA: Roll-Kraft, Inc, (2001).
13. Tehrani, M.S., Hartley, P., Naeini, H.M., Khademizadeh, H., "Localised Edge Buckling in Cold Roll-Forming of Symmetric Channel Section", *Thin-Walled Structures*, VOL. 44, P. 13, (2006)

