



## تأثیر الگوی گل بر نیروی وارد بر غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد

حسین ارزنده<sup>۱</sup>، مهدی تاجداری<sup>۲\*</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>۳</sup>، سیامک مزدک<sup>۴</sup>، رضا علی نژاد<sup>۵</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، جمهوری اسلامی ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، جمهوری اسلامی ایران

۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، جمهوری اسلامی ایران

۴- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، جمهوری اسلامی ایران

۵- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران، جمهوری اسلامی ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: mahdi.tajdari@eyc.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۰ مهر ۱۴۰۳

پذیرش: ۶ اسفند ۱۴۰۳

## کلیدواژگان:

شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد

طراحی الگوی گل

نیروی وارد بر غلتک‌ها

معیار طراحی

در این مقاله تأثیر طراحی الگوی گل بر نیروی وارد بر غلتک‌ها، در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی این موضوع، ابتدا برای مقطع مستطیلی ۴۰ در ۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر چند الگوی گل طبق روش‌های رایج طراحی شده است. سپس این الگوها به همراه الگوی گل صنعتی این مقطع در نرم‌افزار آباکوس به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها به کمک آزمایش عملی تأیید شده است. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده شد که مجموع کل نیروهای وارد بر غلتک‌ها در ایستگاه‌های مختلف تقریباً ثابت بوده و ارتباطی با شیوهی طراحی الگوی گل ندارد. بر این اساس پیشنهاد شده است تا برای طراحی الگوی گل مناسب، ابتدا توسط یکی از روش‌های رایج الگوی گل طراحی شده و طبق آن کل نیروی وارد بر غلتک‌ها استخراج گردد. سپس الگوی گل جدید به گونه‌ای طراحی شود که نیروی وارد بر غلتک‌ها، در کل ایستگاه‌ها، توزیعی یکنواخت داشته باشد. بدین منظور معیاری جدید برای طراحی الگوی گل ارائه شده و بر اساس این معیار رابطه‌ای نوین برای ارتباط بین نیروی وارد بر غلتک‌ها با مقدار کاهش در هر ایستگاه برای این مقطع استخراج گردیده است. طبق این رابطه، الگوی گل جدیدی طراحی شده و کارایی این رابطه و الگوی گل جدید، با یکنواختی بهتر توزیع نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که کمک این معیار می‌تواند یکنواختی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها را نسبت به شرایط صنعتی ۵٫۶٪ بهبود بخشد.

## The effect of the flower pattern on the applied force on the Rollers in the reshaping of cold roll forming process

Hosein Arzandeh<sup>1</sup>, Mehdi Tajdari<sup>2\*</sup>, Hassan Moslemi Naeini<sup>1,3</sup>, Siamak Mazdak<sup>4</sup>, Reza Alinejad<sup>5</sup>

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

2- Department of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, IR Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, IR Iran

4- Engineering Department, Arak University, Arak, IR Iran

5- Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Industries and Mines, Tehran, IR Iran

\* Corresponding Author's Email: mahdi.tajdari@eyc.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 11 October 2024

Accepted: 24 February 2025

## Keywords:

Reshaping of Cold Roll Forming

Flower Pattern Design

Force on the Rollers

Design Criterion

## Abstract

This paper investigates the effect of flower pattern design on the roll forces in reshaping cold roll forming. To examine this, several flower patterns were initially developed for a rectangular profile of 40x60 mm with a 3 mm thickness, following common design methods. Subsequently, these patterns, along with an industrial flower pattern for the same profile, were simulated in 3D using Abaqus software, with the accuracy of the simulations validated through experimental testing. The simulation results revealed that the total sum of forces exerted on the rolls remains relatively constant across various stations and is independent of the flower pattern method. Based on this finding, a design approach is proposed: initially, a flower pattern should be created using any common method, from which the total roll force is extracted. A new flower pattern should then be designed to achieve a more uniform distribution of the roll forces across all stations. For this purpose, a new criterion for flower pattern is introduced, and based on this criterion, a new relationship between the roll force and the reduction amount at each station for this profile is established. Following this relationship, a new flower pattern was developed, and the effectiveness of this approach and the new flower pattern was demonstrated through a better uniformity of the vertical roll force distribution. The results indicate that, using this criterion, the uniformity of the roll force distribution can be improved by 5.6% compared to industrial conditions.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Arzandeh H, Tajdari M, Moslemi Naeini H, Mazdak S, Alinejad R. The effect of the flower pattern on the applied force on the Rollers in the reshaping of cold roll forming process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Mar 21;12(1):40-50. doi: 10.22034/ijme.2025.482885.2016 [In Persian]

## ۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد از روش‌های پرکاربرد جهت تولید مقاطع فلزی است که به دو صورت سنتی [۱] و انعطاف‌پذیر [۲] برای تولید مقاطع فلزی استفاده می‌شود. این فرایند با به‌کارگیری مجموعه‌ای از غلتک‌های دوار، طی چندین مرحله و به‌طور تدریجی محصول مورد نظر را تولید می‌کند [۳-۵]. در شکل‌دهی مجدد، لوله گرد با عبور از یک دسته غلتک به لوله‌ای با مقطع غیر گرد تبدیل می‌شود [۶]. استفاده از محصولات تولیدی با این روش در بسیاری از صنایع از جمله اتومبیل‌سازی، صنعت راه و ساختمان و پتروشیمی‌ها کاربرد روزافزونی پیدا کرده است [۷]. طراحی الگوی گل از مسائل مهم این فرایند است. برای تجزیه و تحلیل این فرایند روش‌های تقریبی مختلف تجربی، نیمه‌تجربی و تحلیلی توسط محققین ارائه شده است. مسلمی نائینی و همکاران [۸] برای طراحی الگوی گل در روش شکل‌دهی مجدد، الگوریتم طراحی رفت و برگشتی<sup>۱</sup> را معرفی کردند. آن‌ها بر اساس این الگوریتم، با فرض کرنش صفحه‌ای و در نظر گرفتن تغییر شکل کشسان-مومسان، قابلیت این روش را در طراحی الگوی گل نشان دادند. رایالا و گوود [۹] تأثیر اندازه‌ی شعاع‌گوشه و میزان کاهش در هر مرحله را، بر خواص و کیفیت محصول نهایی موردبررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش شعاع‌گوشه، نیروی شکل‌دهی کاهش می‌یابد. ابری نیا و فرهمند [۱۰] تغییرات ضخامت و شعاع‌گوشه محصول را در مقاطع جدار ضخیم غیر فولادی بررسی کردند و نشان دادند که در این مقاطع، قطر لوله‌ی اولیه و میزان کاهش بیشترین اثر را بر مقدار شعاع‌گوشه دارد. چن و یه [۱۱] تأثیر پارامترهای ضریب اصطکاک و نسبت ضخامت به قطر لوله را بر روی رخ دادن عیب جدایش در فرایند شکل‌دهی مجدد مقاطع جدار نازک موردبحث قرار دادند و نشان دادند که در مقاطع جدار نازک، افزایش اصطکاک موجب کاهش عیب می‌شود. فرهمند و ابری نیا [۱۲] شکل‌دهی مجدد مقاطع چندضلعی جدار ضخیم را با استفاده از غلتک‌های تخت بررسی کردند و نشان دادند نتایج حاصل از تحلیل مقطع ۴ ضلعی، قابل‌تعمیم بر محصولات چندضلعی دیگر نیز هست. یانگ و همکاران [۱۳] برای یک مقطع بیضوی جدار نازک، مقادیر کاهش ارتفاع مناسب در هر ایستگاه را ارائه کردند. تاجیار [۱۴] تأثیر پارامترهای مقدار کاهش ارتفاع، نسبت ضخامت به قطر، جنس لوله‌ها، و شعاع‌غلتک را بر کیفیت ابعادی محصول تولیدی موردبررسی قرار داد و نشان داد برای یک نسبت ضخامت به قطر ثابت، با افزایش میزان کاهش، احتمال وقوع عیب جدایش افزایش می‌یابد. در بین متغیرهای ذکرشده، پارامتر "مقدار کاهش" اشاره به طراحی الگوی گل دارد. الگوی گل، شکلی مصور است که از کنار هم قرار دادن مقاطع منتج از هر ایستگاه بر مبنای یک محور مشترک، ایجاد می‌گردد [۱۵]. روش‌های مختلف طراحی الگوی گل در فرایند شکل‌دهی مجدد، در مرجع [۱۶] ارائه شده است. آکوپیان و همکاران [۱۷] برای سه وضعیت جدار نازک، جدار متوسط و جدار ضخیم (با نسبت ضخامت به قطر به ترتیب: کمتر از ۵٪، بین ۵٪ تا ۱۰٪ و بیش از ۱۰٪) به‌صورت تحلیلی نشان دادند که چگونگی توزیع و میزان تنش، به‌صورت مستقیم وابسته است به چگونگی توزیع کرنش. بایومی و همکاران [۱۸] نیروی وارد بر ابزار شکل‌دهنده را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها روابطی بر مبنای مشخصات ابعادی لوله اولیه و محصول نهایی به همراه مشخصات ماده خام، ارائه کردند. روابط آن‌ها نیروی کل شکل‌دهی را تخمین می‌زند. زینگ و همکاران [۷] به بررسی عوامل سایش پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در شکل‌دهی مجدد با ۴ غلتک تخت، اثر سرعت زاویه‌ای غلتک‌ها بر سایش محصول، بیش از اثر اصطکاک است. لی و همکاران [۱۹] نشان دادند که تغییرات پی‌درپی بارگذاری و باربرداری بین ایستگاه‌ها به همراه میزان نیروی کششی مختلف اعمالی به پروفیل بین ایستگاه‌ها یکی از عوامل موجب تغییرات ضخامت در محصول است. لی و همکاران [۲۰] با استفاده از پراش اشعه X توزیع تنش پسماند در راستای طولی و در امتداد ضخامت بر روی قطعات شکل‌دهی مجدد شده را، اندازه‌گیری کردند. یانگ و همکاران [۲۱] تنش پسماند در محصول را مطالعه نموده و چگونگی توزیع تنش باقی‌مانده در محصول را روشی برای بررسی کیفیت محصول معرفی نمودند. شائو و همکاران [۲۲] برای پیش‌بینی تنش پسماند در محصول با توجه به خواص فلز به‌ویژه مدول یانگ، استحکام تسلیم و شرایط سخت‌شوندگی آن، روابطی را ارائه کردند. لئو و همکاران [۲۳] اثر نسبت ضخامت به قطر لوله را بر تنش باقی‌مانده در جنس‌های با استحکام بالا مورد بررسی قرار دادند. ما و همکاران [۲۴] نشان دادند که متوسط تنش باقی‌مانده در مقاطع مستطیلی کم‌تر از مقاطع مربعی است. همچنین نشان دادند که تنش پسماند در ضلع‌های بلند مقاطع مستطیلی کم‌تر از ضلع‌های کوچک همان مقطع است. ژنگ و همکاران [۲۵] الگوی پیش‌بینی تنش تسلیم افزایش‌یافته در مقاطع شکل‌دهی مجدد شده‌ی مربعی و مستطیلی را توسعه دادند و مقدار تنش اعمالی به ورق در امتداد ضخامت را در نقاط مختلف مقطع پیش‌بینی کردند. آن‌ها نشان دادند که جهت دستیابی به این الگوها نیاز به تبیین تاریخچه کرنش

<sup>1</sup> Backward & Forward Method

طولی<sup>۱</sup> و افزایش ضخامت در طی فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی است. ظهراپی و همکاران [۲۶] برای مقطع تاخورد، نشان دادند با اصلاح الگوی گل می‌توان از بروز شکست در گوشه‌های تیز جلوگیری کرد. لی و همکاران [۱۹] توزیع ملایم تنش پسماند در محصول را به‌عنوان معیاری برای طراحی تعداد ایستگاه‌ها پیشنهاد دادند. آن‌ها نشان دادند که تجزیه و تحلیل تنش پسماند می‌تواند محل‌های بحرانی را مشخص کرده و با اصلاح الگوی گل می‌توان این تنش‌ها را از حالت بحرانی خارج کرد. لی و همکاران [۲۰] توزیع یکنواخت تنش پسماند را به‌عنوان معیاری برای طراحی الگوی گل پیشنهاد دادند. یائو و منگ [۲۷] ساینینگ لوله‌های فولادی جدار نازک با استحکام بالا را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش کرنش پلاستیک، تنش پسماند عرضی و طولی نیز افزایش می‌یابد. ایشان جهت طراحی الگوی گل مناسب فرمولی را ارائه کرده‌اند. پیشنهاد ایشان این بود که میزان کاهش محیط محصول در ایستگاه‌های متوالی یکسان در نظر گرفته شود. کیانی و همکاران [۲۸] ضمن معرفی متغیرهای مختلف تأثیرگذار بر طراحی الگوی گل، اثر آن‌ها را بر عیب برگشت فنی در فرایند شکل‌دهی مجدد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پیشنهاد دادند که برای افزایش کنترل برگشت فنی، به‌ویژه در محصولات با استحکام بالا، از تعداد ایستگاه بیشتری برای طراحی الگوی گل بهره‌گیری شود. ارزنده و همکاران [۲۹] اثر موقعیت مرکز لوله نسبت به غلتک‌ها را بر طراحی الگوی گل مقاطع پیچیده بررسی کرده و نشان دادند با انتخاب موقعیت مناسب می‌توان انرژی و نیروی وارد بر غلتک‌ها را کاهش داد.

همچنین در خصوص شیوه صحه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی، آکوپیان و همکاران [۱۷] برای صحه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی، علاوه بر ابعاد اصلی استفاده از ابعاد قطری پروفیل (گوشه تا گوشه برای سنجش میزان تعامد و توازی لبه‌ها) را نیز پیشنهاد کرده‌اند. فورمیسانو و همکاران [۳۰] استفاده از ضخامت محصول را در کنار ابعاد اصلی برای صحه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی پیشنهاد کرده‌اند. تسانگ و همکاران [۳۱] عوامل مؤثر بر صحه‌گذاری مدل‌های اجزای محدود در شکل‌دهی غلتکی سرد را بررسی کردند. آن‌ها پیشنهاد دادند که برای صحه‌گذاری، از ابعاد برداری سه‌بعدی از محصول در حال شکل‌گیری در ایستگاه‌های میانی و مقایسه‌ی آن با مدل شبیه‌سازی استفاده شود.

با توجه به مطالعات پیشین مشخص است که روش‌هایی برای طراحی الگوی گل بر مبنای هندسه مقطع و لوله اولیه ارائه شده است. روش بررسی تنش پسماند به‌عنوان معیاری برای بررسی کیفیت محصول معرفی شده است؛ همچنین توزیع ملایم تنش پسماند به‌عنوان معیاری برای طراحی الگوی گل پیشنهاد شده است اما نحوه دستیابی به الگوی گل مناسب از طریق بررسی تنش پسماند تبیین نشده است. از سویی دیگر روش رایج بررسی کیفیت طراحی‌ها، شبیه‌سازی است. جهت افزایش قابلیت اطمینان به شبیه‌سازی‌ها نیز روش‌هایی پیشنهاد شده است. اما تحقیقی که بتواند معیاری عملیاتی برای طراحی الگوی گل در این فرایند پیشنهاد داده و آن را پیاده‌سازی کند وجود نداشته است. لذا در این مقاله ابتدا سعی شده است تا به‌صورت موردی برای یک مقطع صنعتی این خلأ تحقیقاتی برطرف گردیده و ضمناً معیاری مناسب برای طراحی الگوی گل پیشنهاد گردد.

## ۲- شیوه‌ی انجام کار

### ۲-۱- انتخاب مقاطع مورد بررسی

به‌منظور بررسی کیفیت طراحی الگوی گل، مقطع مستطیلی ۴۰ در ۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر انتخاب شده است. دلیل این انتخاب این است که این مقطع، پروفیلی متوسط و مستطیلی است و انتظار می‌رود نتایج آن قابل توسعه به مقاطع مربعی و مستطیلی دیگر نیز باشد. بدین منظور الگوی گل صنعتی این پروفیل در یک شرکت تولیدی اخذ شده است. همچنین طبق روش‌های مندرج در مرجع [۱۶] نیز برای آن الگوی گل طراحی شده است؛ سپس همگی آن الگوها مورد شبیه‌سازی سه‌بعدی قرار گرفته‌اند.

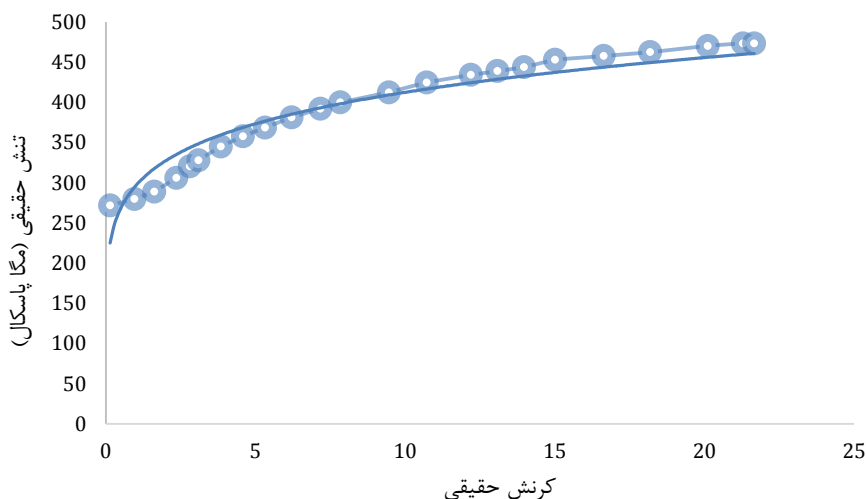
### ۲-۲- خواص مواد

جنس لوله‌ی مورد بررسی، فولاد St37 بود که مشخصات ماده خام به‌وسیله آزمایش کشش ورقه‌های اخذ شده از خط تولید، استخراج گردیده است. مشخصات مواد خام ورق صاف در جدول ۱ نشان داده شده است. ضمناً منحنی تنش-کرنش نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تصویر نقاط دایره‌ای منتج از آزمون کشش بوده و خط توپر منحنی برازش شده بر آن نقاط است.

<sup>1</sup> Longitudinal Elongation

جدول ۱ مشخصات ماده خام St37

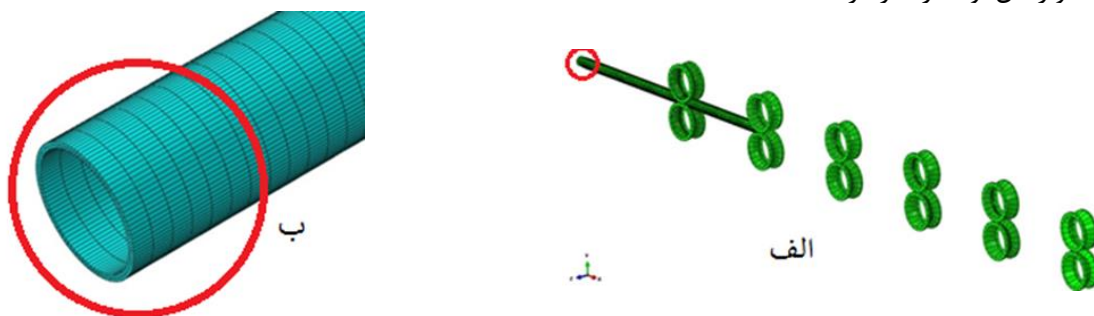
مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسن	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	ضریب K (MPa)	توان کرنش سختی (n)
۲۰۱	۰/۳	۲۷۸	۴۷۴	۲۹	۳۰۴	۰/۱۳۵



شکل ۱ منحنی تنش کرنش آزمون کشش مواد خام

### ۲-۳- شبیه‌سازی

در این مقاله شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از آباکوس ورژن ۲۰۲۰ انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها همگی به صورت سه‌بعدی و به صورت دینامیک صریح انجام شده‌اند. تمامی غلتک‌ها صلب تحلیلی و لوله از ماده شکل‌پذیر انتخاب شده‌اند. سطح مقطع لوله کاملاً دایره‌ای فرض شده و لوله در راستای طولی مستقیم و به صورت بدون درز در نظر گرفته شده است. برای کاهش زمان شبیه‌سازی طول لوله طوری انتخاب شده که در حین حرکت بین غلتک‌ها همیشه با دو غلتک درگیر باشد که با توجه به فاصله ۶۸ سانتی‌متری غلتک‌ها لوله به طول ۱٫۸ متر در نظر گرفته شده است. جهت ورود خواص مواد خام آزمایش کشش تک‌محوری بر روی ماده خام شرکت تولیدکننده انجام شده است. مشخصات ماده خام در بخش قبل ارائه شده است. جهت مش بندی لوله از المان C3D8R که از انواع المان سالیید ۸ نقطه‌ای است، استفاده شده است. تعداد المان در امتداد ضخامت دو عدد و در امتداد محیطی ۹۶ عدد در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌ها از نتایج آنالیز حساسیت به مش استخراج گشته است. با توجه به اینکه عامل مورد ارزیابی این مقاله نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها است، در آنالیز حساسیت به مش نیروی عمودی ایستگاه اول شکل‌دهی مورد تحلیل قرار گرفته است. مش از بزرگ به کوچک شروع به تغییر کرده و در نهایت بزرگ‌ترین مشی که خروجی شبیه‌سازی آن از لحاظ نیروی شکل‌دهی مناسب بوده، مورد قبول واقع شده است. در شکل ۲ نمایی از کل خط و نیز مش بندی لوله ارائه شده است. کل شبیه‌سازی در یک گام انجام شده است. مقدار قطر لوله اولیه، ابعاد و تعداد غلتک‌ها و فاصله بین ایستگاه‌ها منطبق بر شرایط خط تولید، رعایت گردیده است. تماس بین غلتک‌ها و لوله تماس سطح‌به‌سطح و با ضریب اصطکاک ۰٫۲ [۳۲] انتخاب شده است. نحوه اعمال حرکت به لوله نیز بر اثر غلتش غلتک‌ها و راندن لوله در نظر گرفته شده است.



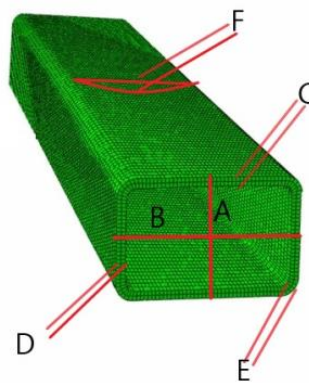
شکل ۲ نمایی از مدل‌سازی کامل فرایند (قبل از تحلیل) و (ب) نحوه مش بندی لوله

## ۲-۴- آزمایش عملی و صحنه‌گذاری بر شبیه‌سازی

در شکل ۳ نمایی از خط تولید مقطع مستطیلی  $60 \times 40$  با ضخامت ۳ میلی‌متر نشان داده شده است. مقایسه‌های هندسی و ابعادی مدل شبیه‌سازی و آزمایش عملی در جدول ۲ ذکر شده‌اند. همچنین موقعیت موارد نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲ مقایسه نتایج آزمایش عملی و شبیه‌سازی

مورد مورد سنجش	مقدار شبیه‌سازی	مقدار تجربی	درصد اختلاف (%)
ابعاد بیرونی (mm)	اندازه ۴۰ (A)	۴۰/۲۵	۰/۹۱
	اندازه ۶۰ (B)	۶۰/۲	۰/۲۲
ضخامت محصول (mm)	لبه (C,D)	(۳/۱۴, ۳/۱۲)	(۲/۵, ۱/۶)
	گوشه (E)	۳/۳۹	۳/۸۲
شعاع گوشه (R) (mm)		۴/۳۸	۲۳
مقدار تورفتگی (F) (mm)		۰/۲۵	۱۶
ابعاد هندسی	تعامد (درجه)	(۸۹/۵۴)-۰/۴۶	۰/۵۸
		(۸۹/۰۲)-۰/۹۸	

شکل ۳ نمایی از خط تولید مقطع  $60 \times 40$ 

شکل ۴ نمونه محصول عملی و شبیه‌سازی و عناوین موارد مورد مقایسه

مشاهده می‌شود که بازه خطاها ناچیز است. لذا مدل مناسب تشخیص داده شده است. جهت افزایش اطمینان از کارایی مدل، از توان مصرفی نیز برای صحت‌گذاری بر شبیه‌سازی بهره گرفته شده است. این مقدار در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ مقادیر توان مصرفی در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایش عملی

مورد موردسنجش	مقدار شبیه‌سازی	مقدار تجربی	درصد خطا
توان مصرفی جهت شکل‌دهی (kW)	۲۷/۴۶	۲۹/۴۵	۶/۷

برای استخراج انرژی خالص شکل‌دهی (حذف انرژی‌های تلف‌شده) از انرژی مصرفی موتور، به این ترتیب اقدام شده است:

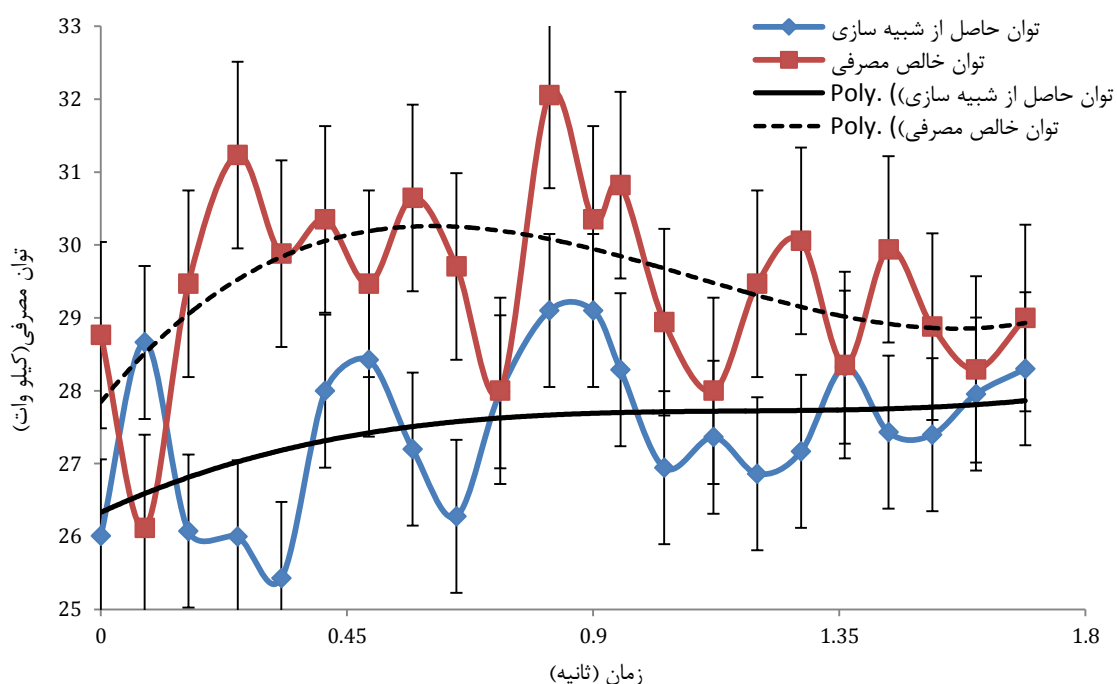
الف: انرژی مصرفی موتور در حالت بی‌باری (صرفاً مصرف شونده برای حرکت دادن اجزا) اندازه‌گیری شده است.

ب: انرژی کل (انرژی لازم برای به حرکت درآوردن اجزا به همراه انرژی شکل‌دهی محصول) اندازه‌گیری شده است.

ج: سپس با کم کردن انرژی بی‌باری از انرژی کل، انرژی خالص شکل‌دهی استخراج شده است. انرژی موتور با کمک رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است.

$$P = \sqrt{3} V.I. \cos \phi / \eta \quad (1)$$

در این رابطه،  $V, I, \cos \phi, \eta$  به ترتیب عبارتند از: بازده، ضریب توان، شدت جریان و ولتاژ موتور. همچنین در شکل ۵ توان خالص مصرفی خط موجود و توان حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود.



شکل ۵ مقایسه توان خالص مصرفی خط موجود و توان حاصل از شبیه‌سازی

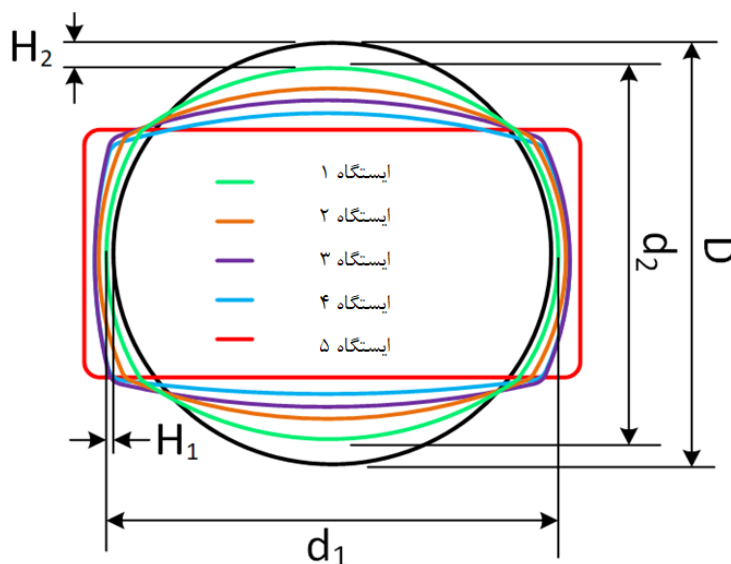
در این مورد حدود ۷٪ خطا مشاهده شده است. علت وجود این اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی نیز می‌تواند ناشی از:

- ۱- در نظر گرفتن عدم شکل‌دهی در ایستگاه اول (که صرفاً نگاه‌دارنده فرض شده اما در خط عملاً مقداری بیضوی بودن و دو پهنی لوله ورودی را اصلاح می‌کند)
- ۲- صرف نظر کردن از تغییر خواص ماده در مرحله تبدیل شدن از ورق به لوله (در شبیه‌سازی ویژگی‌های ورق قبل از لوله شدن وارد شده است).

در مجموع با توجه به نتایج حاصله می‌توان به نتیجه شبیه‌سازی‌ها اعتماد نمود.

## ۳- نتایج و بحث

در شکل ۶ پارامترهای اصلی موردنیاز برای ترسیم مقطع مستطیلی ارائه شده‌اند. جهت بررسی تأثیر الگوی گل بر نیروی وارد بر غلتک‌ها، طبق معادلات ارائه شده در مرجع [۱۶] و اندازه‌گیری قطر لوله طبق مشاهدات تجربی، الگوی گل مقطع  $40 \times 60$  برای روش‌های مختلف به شرح جدول ۴ طراحی و شبیه‌سازی سه‌بعدی شده‌اند. همچنین مشخصات الگوی گل تجربی نیز از خط تولید اخذ و شبیه‌سازی شده است. مقادیر کاهش آن نیز در جدول ۴ ذکر گردیده است.



شکل ۶ معرفی پارامترهای اصلی در الگوی گل مقاطع مربعی و مستطیلی

جدول ۴ مقادیر کاهش در الگوی گل‌های مختلف

شماره ایستگاه					مقدار کاهش (mm)	نام روش
۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	$H_1$	توزیع یکنواخت
۴/۸	۴/۸	۴/۸	۴/۸	۴/۸	$H_2$	
۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۸	۰/۸۱	۰/۸۲	$H_1$	توزیع متناسب
۳/۹۴	۴/۳۳	۴/۷۶	۵/۲۳	۵/۷۴	$H_2$	
.	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	۰/۸۵	$H_1$	الگوی گل تجربی
۳/۶	۴/۱	۳/۷	۴/۲	۸/۴	$H_2$	

در جدول ۵ نیروی وارد بر غلتک‌های شکل‌دهی در ایستگاه‌های مختلف به ازای هر الگوی گل ارائه شده است. همچنین در این جدول میانگین نیروها و اختلاف حداقل و حداکثر از میانگین و درصد متوسط این اختلاف‌ها از میانگین نیز ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که الگوی گل تجربی از توزیع نیروی یکنواخت‌تری نسبت به دیگر الگوها برخوردار است.

هرچند طبق جدول ۴ مقادیر کاهش الگوی گل‌ها کاملاً از یکدیگر متمایزند اما با توجه به نتایج جدول ۵ مشاهده می‌شود که متوسط نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها، بین ۵۲٫۲ تا ۵۵٫۶ کیلو نیوتن است. لذا چنین نتیجه گرفته شده است که نیروی اعمالی به غلتک‌ها در تک‌تک ایستگاه‌ها با مقدار کاهش ارتفاع در آن ایستگاه متناسب است، اما به دلیل ثابت بودن مقدار کل کاهش ارتفاع، جمع کل نیروی اعمالی به غلتک‌ها (با تیرانس  $\pm 4\%$ ) ثابت است.

در این مقاله از این ویژگی برای طراحی الگوی گل مناسب بهره گرفته شده و جهت بررسی دقیق‌تر رابطه بین نیرو و مقدار کاهش، با توجه به جدول ۴ و جدول ۵ و به کمک تحلیل رگرسیون درجه ۳ رابطه ۲ به دست آمده است.

$$\begin{cases} F = 7.1 \times H & n = 1 \\ F = 0.016 \times H^2 - 0.71 \times H + 10.5 \times H + 1 & n > 1 \end{cases} \quad (2)$$

در این رابطه H معرف مقدار کاهش و F معرف مقدار نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها بر حسب کیلو نیوتن هستند.

جدول ۵ نیروی وارد بر غلتک‌ها طبق الگوی گل‌های مختلف

مقدار نیرو در شبیه‌سازی انواع الگوهای گل غلتک (kN)			شماره ایستگاه
تجربی	توزیع یکنواخت	توزیع متناسب	
۵۸	۳۷	۴۸	۱
۴۶	۴۴	۵۴	۲
۵۶	۵۲	۵۴	۳
۵۶	۶۰	۵۸	۴
۵۹	۶۸	۶۴	۵
۵۵	۵۲/۲	۵۵/۶	میانگین
-۹	-۱۵/۲	-۷/۶	اختلاف حداقل و حداکثر از میانگین
۴	۱۵/۸	۸/۴	
۱۲	۳۰	۱۴	درصد اختلاف نسبت به میانگین %

طبق نتیجه جدول ۵، میانگین نیروی سه الگوی گل یعنی ۵۴٫۶ کیلو نیوتن به‌عنوان مقدار نیروی متوسط، هدف‌گذاری شده و به کمک رابطه ۲، مقادیر کاهش مناسب استخراج گردیده‌اند؛ سپس بر اساس این مقادیر پیشنهادی، الگوی گل جدیدی طراحی و شبیه‌سازی شده است. مقادیر کاهش این الگوی گل در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

جدول ۶ مقادیر کاهش در الگوی گل پیشنهادی

شماره ایستگاه					مقدار کاهش (mm)
۵	۴	۳	۲	۱	
۰/۳	۰/۵	۰/۸	۱/۱	۱/۳	H <sub>1</sub>
۱/۵	۳/۲	۴/۹	۶/۸	۷/۷	H <sub>2</sub>

نتایج نیروی اعمالی به غلتک‌ها طبق این الگوی گل نیز در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

جدول ۷ نیروی اعمالی به غلتک‌ها در الگوی گل پیشنهادی

مقدار نیرو غلتک (kN)	شماره ایستگاه
۵۴/۱	۱
۵۷/۸	۲
۵۹/۲	۳
۵۴/۶	۴
۵۲/۱	۵
۵۵/۹۲	میانگین
-۳/۹۲	اختلاف حداقل و حداکثر از میانگین
۳/۲۸	
۶/۴	درصد اختلاف نسبت به میانگین %

با مقایسه‌ی جدول ۵ و جدول ۷ مشاهده می‌شود که طبق الگوی گل پیشنهادی میانگین نیرو نسبت به الگوهای پیشین افزایش یافته اما توزیع آن بسیار یکنواخت‌تر شده است. بدین ترتیب که نسبت به الگوی گل تجربی (بهترین الگو در جدول ۵ با ۰.۱۲٪ پراکندگی) ۰.۵۶٪ بهبود در توزیع نیروی عمودی حاصل شده است. لازم به ذکر است که مشخصات ابعادی محصول این الگوی گل جدید مشابه الگوی گل‌های قبلی است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این شیوه‌ی پیشنهادی برای طراحی الگوی گل از کارایی لازم برخوردار است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یکی از عوامل مهم مؤثر بر طول عمر غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی مجدد، یعنی نیروی عمودی وارد بر آن‌ها، مورد تحقیق قرار گرفته است. مطالعات پیشین نشان داده است مهم‌ترین عامل این فرایند الگوی گل است، لذا در این مقاله اثر الگوی گل بر نیروی عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت قابلیت تعمیم نتایج این تحقیق، یک مقطع پرکاربرد صنعتی با ابعاد متوسط (۳×۶۰×۴۰) برای آزمایش‌های عملی و نیز سنجش اثر الگوی گل انتخاب شده است. علاوه بر الگوی گل صنعتی، دو الگوی دیگر نیز طبق روش‌های ذکر شده در منابع پیشین برای این مقطع طراحی شده و همگی شبیه‌سازی سه‌بعدی شده‌اند. برای اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، علاوه بر استفاده از مشخصات ابعادی، از توان مصرفی هم برای صحت‌گذاری بهره‌گیری شده است. مطابق نتایج شبیه‌سازی سه الگوی گل، مشخص شده است که مجموع کل نیروهای وارد بر غلتک‌ها مستقل از الگوی گل است. لذا به کمک تحلیل رگرسیون، بین میزان نیروی وارد بر غلتک‌ها با میزان کاهش ارتفاع در ایستگاه‌های مختلف رابطه‌ای استخراج شده است. سپس به کمک این رابطه الگوی گل جدیدی طراحی شده که توزیع نیروی یکنواخت‌تری را موجب شود. سپس بر اساس نتایج شبیه‌سازی کارایی این رابطه و الگوی گل جدید نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها با الگوی گل جدید ۰.۵۶٪ نسبت به الگوی گل تجربی یکنواختی بیشتری دارد.

#### ۵- محدودیتهای این تحقیق و پیشنهاد ادامه کار

در این مقاله از مقطع مستطیلی ۴۰×۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر برای بررسی موارد تحقیق بهره‌گیری شده است. دلیل این انتخاب این بوده که بتوان نتایج بدست آمده را بر مقاطع مربعی و مستطیلی دیگر تعمیم داد. با این حال این تحقیق با محدودیت‌های زیر روبرو بوده است:

- ۱- یکی از مهمترین موارد مؤثر بر نیروی شکل‌دهی جنس پروفیل است. این مقاله صرفاً به بررسی نتایج متناسب با فولاد St37 پرداخته است. مناسب است در تحقیق‌های دیگری چگونگی اثر تغییر جنس بر نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته و متناسب با آن جنس‌ها، الگوهای جدیدی پیشنهاد گردد.
- ۲- ضخامت پروفیل یکی دیگر از موارد بسیار تاثیرگذار بر نیروی شکل‌دهی است. نتایج این تحقیق به ضخامت ۳ میلی‌متر محدود گشته است. پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی ضمن بررسی چگونگی اثر ضخامت محصول بر نیروی شکل‌دهی، روابطی برای محاسبه‌ی میزان کاهش ارتفاع در هر ایستگاه متناسب با میزان ضخامت نیز ارائه گردد.

#### ۶- تقدیر و تشکر

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

#### References

- [1] Hajiahmadi S, Moslemi Naeini H, Talebi-Ghadikolaee H, Safdarian R, Zeinolabedin-Beygi A. A study on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process. Karafan Quarterly Scientific Journal. 2023 Jun 11;20(1):197-221. doi: 10.48301/kssa.2023.374084.2358 [In Persian]
- [2] Golmakani H, Dadgar Asl Y, Seyedkashi SM. Numerical and Experimental Analysis of Bowing Defect in the Flexible Roll Forming Process of Copper-Aluminum Double Layer Sheets. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2024 Jan 21;13(6):75-87. doi: 10.22044/jsfm.2024.13483.3775 [In Persian]

- [3] Hajiahmadi S, Moslemi Naeini H, Talebi-Ghadikolaee H, Safdarian R, Zeinolabedin-Beygi A. Insights into spring-back prediction: a comparative analysis of constitutive models for perforated U-shaped roll-formed steel profiles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024 Sep;134(3):1915-33. doi: [10.1007/s00170-024-14211-5](https://doi.org/10.1007/s00170-024-14211-5)
- [4] Zeinolabedin-Beygi A, Naeini HM, Talebi-Ghadikolaee H, Rabiee AH, Hajiahmadi S. Predictive modeling of spring-back in pre-punched sheet roll forming using machine learning. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2024 Oct;59(7):463-74. doi: [10.1177/03093247241263685](https://doi.org/10.1177/03093247241263685)
- [5] Hajiahmadi S, Naeini HM, Talebi-Ghadikolaee H, Safdarian R, Zeinolabedin-Beygi A. Effect of anisotropy on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process: an experimental and numerical investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 Dec;129(9):3965-78. doi: [10.1007/s00170-023-12516-5](https://doi.org/10.1007/s00170-023-12516-5)
- [6] Kang W, Zhao Y, Yu W, Wang S, Ma Y, Yan P. Numerical simulation and parameters analysis for roll forming of martensitic steel MS980. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;81:251-6. doi: [10.1016/j.proeng.2014.09.159](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.159)
- [7] Xing M, Liu J, Wang Y, Wang Z, Fu Y, Du F. Prediction and Optimization of Wear Depth on Rectangular Tube Surface in Roll Forming. *Metals*. 2022 Dec 26;13(1):68. doi: [10.3390/met13010068](https://doi.org/10.3390/met13010068)
- [8] Kiuchi M, Naeini HM, Shintani K. Computer aided design of rolls for reshaping processes from round pipes to "channel-type" pipes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001 Apr 25;111(1-3):193-7. doi: [10.1016/S0924-0136\(01\)00511-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00511-8)
- [9] Rayala P, Goud SC. Reshaping of Thick Tubes into Square Passes at Ends with FEM Simulation. *ANVESHANA'S International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*. 2016;1(4):43-49.
- [10] Abrinia K, Farahmand HR. An upper bound analysis for the reshaping of thick tubes with experimental verification. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008 Feb 1;50(2):342-58. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2007.06.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.06.007)
- [11] Chen TC, Ye JM. Finite-element analysis of the double lateral compression of clad tube into a Symmetric Square-Tube. *Advanced Materials Research*. 2011 Oct 20;337:332-5. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.337.332](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.337.332)
- [12] Farahmand HR, Abrinia K. An upper bound analysis for reshaping thick tubes to polygonal cross-section tubes through multistage roll forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015 Sep 1;100:90-8. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2015.06.012](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.06.012)
- [13] Yang X, Li S, Zhao Y. The Computer-Aided Design of Pass for the High Extremely Thin Wall Elliptical Welded Pipe. In 2009 Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling 2009 Nov 30 (Vol. 3, pp. 164-166). IEEE. doi: [10.1109/KAM.2009.272](https://doi.org/10.1109/KAM.2009.272)
- [14] 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*. 2019 Sep 23;6(4):14-22. [In Persian]
- [15] Halmos GT. *Roll forming handbook*. Crc Press; 2005 Nov 29.
- [16] Arzandeh H, Moslemi Naeini H, Tajdari M, Mazdak S, Kiuchi M. Effect of Flower Pattern on Uniform Distribution of Force on Rollers in Reshaping of Cold Roll Forming. *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*. 2022 May 22;34(1):49-60. doi: [10.22067/jacsm.2022.74655.1090](https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.74655.1090) [In Persian]
- [17] Akopyan KE, Kolobov AV, Rodichev DA, Seleznev MS, Trusov VS, Fedotov ES, Yusupov VS. Mathematical simulation of the forming of a round welded steel tube into a square profile in four-roll passes. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012 May;2012(5):375-9. doi: [10.1134/S0036029512050023](https://doi.org/10.1134/S0036029512050023)
- [18] Bayoumi LS, Attia AS. Determination of the forming tool load in plastic shaping of a round tube into a square tubular section. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009 Feb 19;209(4):1835-42. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2008.04.047](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.047)
- [19] Lee J, Kim D, Quagliato L, Kang S, Kim N. Change of the yield stress in roll formed ERW pipes considering the Bauschinger effect. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Jun 1;244:304-13. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.01.022](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.022)
- [20] Li SH, Zeng G, Ma YF, Guo YJ, Lai XM. Residual stresses in roll-formed square hollow sections. *Thin-walled structures*. 2009 May 1;47(5):505-13. doi: [10.1016/j.tws.2008.10.015](https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.015)
- [21] Yang X, Choi C, Sever NK, Altan T. Prediction of springback in air-bending of Advanced High Strength steel (DP780) considering Young' s modulus variation and with a piecewise hardening function. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016 Jan 1;105:266-72. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2015.11.028](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.11.028)
- [22] Shao CW, Zhang P, Zhu YK, Zhang ZJ, Tian YZ, Zhang ZF. Simultaneous improvement of strength and plasticity: Additional work-hardening from gradient microstructure. *Acta Materialia*. 2018 Feb 15;145:413-28. doi: [10.1016/j.actamat.2017.12.028](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.028)
- [23] Liu XL, Cao JG, Chai XT, He ZL, Liu J, Zhao RG. Experimental and numerical prediction of the local thickness reduction defect of complex cross-sectional steel in cold roll forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Mar;95:1837-48. doi: [10/1007.s00170-017-1279-9](https://doi.org/10/1007.s00170-017-1279-9)

- [24] Ma JL, Chan TM, Young B. Material properties and residual stresses of cold-formed high strength steel hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015 Jun 1;109:152-65. doi: [10.1016/j.jcsr.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.02.006)
- [25] Zheng B, Shu G, Wang J, Gu Y, Jiang Q. Predictions of material properties in cold-rolled austenitic stainless steel tubular sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020 Jan 1;164:105820. doi: [10.1016/j.jcsr.2019.105820](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105820)
- [26] Zohrabi M, Mazdak S, Talebi-Ghadikolaee H. Selection of Appropriate Ductile Fracture Criterion to Predict Failure of Folded Cross Section Profiles in Reshaping Process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Oct 23;8(8):24-37. [In Persian]
- [27] Yao Y, Quach WM. Numerical Study on Residual Stresses and Plastic Strains in Cold-Formed High-Strength Steel Circular Hollow Sections. *Materials*. 2023 Sep 21;16(18):6337. doi: [10.3390/ma16186337](https://doi.org/10.3390/ma16186337)
- [28] Kiani Y, Dadgar Asl Y, Moslemi Naeini H. Experimental and numerical analysis of spring-back on flower pattern design in the reshaping process of square section pipe. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jan 21;10(11):61-76. doi: [10.22034/IJME.2024.455908.1952](https://doi.org/10.22034/IJME.2024.455908.1952)
- [29] Arzandeh H, Moslemi Naeini H, Tajdari M, Mazdak S, Kiuchi M. Influence of the position of the center of the pipe relative to the rollers in the design of flower pattern in reshaping of cold roll forming. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Dec 21;11(10):1-0. doi: [10.22034/ijme.2024.456656.1956](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.456656.1956) [In Persian]
- [30] Formisano A, Capece Minutolo F, Caraviello A, Carrino L, Durante M, Langella A. Validation of a FEM model for the simulation of the cold roll forming process. *Key Engineering Materials*. 2015 Aug 10;651:219-24.
- [31] Tsang KS, Ion W, Blackwell P, English M. Validation of a finite element model of the cold roll forming process on the basis of 3D geometric accuracy. *Procedia Engineering*. 2017 Jan 1;207:1278-83. doi: [10.1016/j.proeng.2017.10.883](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.883)
- [32] Salmani Tehrani M, Khodabande Shahraki R, Validi H. Analysis of roll wear in reshaping using finite element simulation. *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*. 2009 Jun 22;2(1):1-9. [In Persian]