



## تحلیل تجربی و عددی برگشت فنری در طراحی الگوی گل در فرایند شکل دهی مجدد لوله با مقطع مربعی

یاشار کیانی<sup>۱</sup>، یعقوب دادگر اصل<sup>۲\*</sup>، حسن مسلمی نائینی<sup>۳</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: ydadgar@tvu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۵ خرداد ۱۴۰۳

#### کلیدواژگان:

فرایند شکل دهی غلتکی سرد

شکل دهی مجدد

برگشت فنری

الگوی گل

### چکیده

در این مقاله اثر پارامترهای نوع الگوی گل (از نظر کاهشی، افزایشی و یا ثابت بودن)، میزان شکل دهی در هر ایستگاه، ضخامت، تعداد ایستگاه شکل دهی و نوع ماده‌ی اولیه بر برگشت فنری در فرایند شکل دهی مجدد لوله با مقطع مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. عامل بسیار تاثیرگذار در کنترل عیوب محصول از جمله برگشت فنری، طراحی الگوی گل مناسب است. در صورت عدم طراحی مناسب آن، محصول نهایی دچار برگشت فنری یا عیب جدایش می‌شود. پارامترهای تاثیرگذار بر پدیده برگشت فنری مورد بررسی قرار گرفته و الگوی گل مناسب انتخاب گردیده است. همچنین این الگوی گل با الگوهای گل خط پروفیل‌سازی شرکت سپنتا مقایسه و بهبود در میزان برگشت فنری مشاهده شد. نتایج نشان داد روش شکل دهی کاهشی نسبت به روش‌های دیگر، میزان برگشت فنری کمتری دارد. با کاهش ضخامت، احتمال پدید آمدن عیب جدایش افزایش پیدا می‌کند و با افزایش ضخامت به جهت کنترل برگشت فنری نیاز است که شکل دهی بیشتری به لوله تخصیص داده شود. همچنین در صورت کاهش ایستگاه که منجر به تخصیص دادن بیش از حد شکل دهی در هر ایستگاه می‌شود، احتمال پدیدار شدن عیب جدایش افزایش می‌یابد و در فولادهای دارای استحکام بالا، افزایش تعداد ایستگاه شکل دهی راه کاری مناسب در کنترل برگشت فنری می باشد.

## Experimental and numerical analysis of spring-back on flower pattern design in the reshaping process of square section pipe

Yashar Kiani<sup>1</sup>, Yaghoub Dadgar Asl<sup>2\*</sup>, Hassan Moslemi Naeini<sup>3</sup>

1- MSc Graduate, School of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

3- Professor, School of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: ydadgar@tvu.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 6 May 2024

Accepted: 25 May 2024

#### Keywords:

Cold Roll Forming Process

Reshaping

Spring-Back

Flower Pattern

### Abstract

In this paper, the effect of the parameters of flower pattern type (decreasing, increasing or constant), the amount of forming in each station, thickness, the number of forming stations and the type of raw material on the spring-back in the reshaping process of the square section pipe were investigated. A very effective factor in controlling product defects, including spring-back, is the design of the flower pattern. If it is not designed properly, the final product will suffer from spring-back or its separation defect. The effecting parameters on the spring-back phenomenon have been investigated and the appropriate flower pattern has been selected. Also, this flower pattern was compared with the flower patterns of Sepenta Company's profiling line and an improvement in the amount of spring-back was observed. The results showed that the reduction forming method has a lower amount of spring-back compared to other methods. As the thickness decreases, the probability of separation defects increases, and as the thickness increases, it is necessary to allocate more shaping to the pipe in order to control the spring-back. Also, if the number of stations is reduced, which leads to over-allocation of shaping in each station, the probability of separation defects will increase. In high strength steels, increasing the number of forming stations is a suitable solution to control spring-back.

### Please cite this article using:

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 January 21;10(11):61-76. doi: 10.22034/IJME.2024.455908.1952 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

امروزه از فرایندهای شکل‌دهی برای تولید بسیاری از محصولات فلزی [۱، ۲] و کامپوزیتی [۳، ۴] استفاده می‌شود. از بین فرایندهای شکل‌دهی، شکل‌دهی غلتکی سرد روشی برای ایجاد خم‌های پیوسته و متوالی در نوار فلزی است که این تغییر شکل‌ها به‌وسیله عبور دادن نوار فلزی از بین مجموعه غلتک‌های دوار ایجاد می‌شود. در این فرایند محصول نهایی، پروفیلی با سطح مقطع یکنواخت است. از عمده تفاوت‌های این روش با سایر روش‌ها می‌توان به سرعت عمل بالای آن و پیوستگی و یکنواختی تولید اشاره کرد که همین موضوع باعث کاهش عیوب محصول در مقایسه با روش‌های دیگر شکل‌دهی می‌باشد [۵، ۶]. از جمله عیوب متداول در این فرایند می‌توان به کمانی شدن [۷]، اعوجاج لبه پروفیل [۸]، برگشت فنری [۹] و پارگی [۱۰] اشاره کرد.

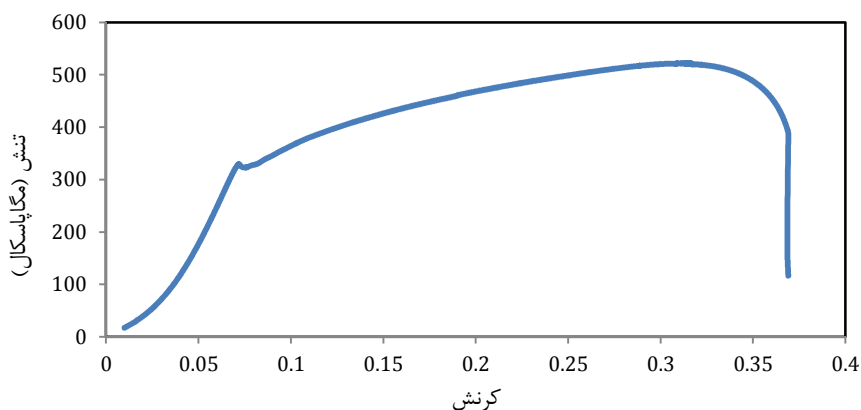
هوانگ [۱۱] با استفاده از قالب‌های V شکل به بررسی تأثیر پارامترهای اصطکاک، نسبت هندسی، جنس لوله‌ها و میزان کاهش ارتفاع بر روی نیروی شکل‌دهی و حالت‌های عیوب پیش‌آمده در تبدیل لوله‌های چهارگوش از لوله گرد اولیه پرداخت. وی نشان داد در شرایط اصطکاکی لغزنده با یک مقدار کاهش ارتفاع یکسان با کاهش ضخامت احتمال ایجاد عیب جدایش کاهش می‌یابد. مسلمی و همکاران [۱۲] یک روش طراحی غلتک در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله‌های ۵ ضلعی بدست آوردند که با استفاده از الگوریتم پیشرو و پسر و تعداد غلتک‌ها، مشخصات غلتک‌ها و آرایش متناسب آن‌ها در هر ایستگاه مشخص گردید. علی نژاد و همکاران [۱۳] در توسعه یک روش تحلیل دوبعدی جهت 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. لیو و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای تغییرات فرایند شکل‌دهی مجدد با استفاده صفحات تخت شکل دهنده را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این مطالعه بررسی زمان و علل وقوع عیب جدایش در فرایند شکل‌دهی مجدد می‌باشد لذا در نرم افزار اباکوس شرایط مورد بررسی و نتایج مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند. تاجیار [۱۵] اثر اصطکاک و کاهش ارتفاع بر ایجاد عیب جدایش را بررسی کرد و نشان داد که در لوله‌های جدارنازک، اصطکاک بر وقوع عیب جدایش اثرگذار است اما لوله‌های جدارضخیم، به اصطکاک حساس نمی‌باشند. مزدک و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر پروفیل غلتک بر عیب جدایش در فرایند شکل‌دهی مجدد با در نظر گرفتن کرنش سختی ترکیبی همراه با غیر خطی پرداختند. مشخص گردید افزایش معیار تسلیم مستقیماً بر روی عیب جدایش تأثیرگذار است. کانگ و همکاران [۱۷] به بررسی عددی و تحلیلی پارامترهای موثر در فرایند شکل‌دهی غلتکی فولاد مارتنزیت MS980 پرداختند. شبیه‌سازی شکل‌دهی مجدد از لوله گرد به سطح مقطع مربع با استفاده از نرم افزار اباکوس در ۴ ایستگاه انجام گرفت. با بررسی تنش پسماند، بیشترین فشار در مرکز گوشه‌های داخلی و بیشترین کشش در مرکز لبه‌های خارجی دیده شده است و تنش پسماند در خط جوش بیشتر از قسمت‌های کناری گزارش شده است. اوانادا و همکاران [۱۸] ویژگی‌های تغییر شکل لوله‌های فولادی گرد به لوله‌های مربعی را با استفاده از فرایند اکستروژن مطابق یک برنامه کاهش شدید مورد بررسی قرار دادند. همچنین با اندازه‌گیری‌های تجربی، نتایج محاسبه شده به‌وسیله روش اجزای محدود با فرض صلب - خمیری مورد بحث و صحت سنجی قرار گرفت. شائو و همکاران [۱۹] با توجه به اثر متغیرهای مختلف نظیر استحکام تسلیم، مدول یانگ و شرایط سخت‌شوندگی، روابطی برای توزیع تنش پسماند در فرایند شکل‌دهی غلتکی مجدد ارائه کردند. ژنگ و همکاران [۲۰] مقاطع مربعی و مستطیلی را بررسی کردند و نشان دادند که وقتی تعداد ایستگاه‌های الگوی گل زیاد باشد، وجود مدل عددی دقیق و کارآمد جهت تحلیل و بررسی فرایند ضروری می‌باشد. ارزنده و همکاران [۲۱] به بررسی عددی و تجربی اثر طراحی الگوی گل بر چگونگی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها و انرژی مصرفی آن‌ها در شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از معیار انرژی مصرفی کمینه در کنار معیار یکنواختی نیروی اعمالی به غلتک‌ها، دقت ابعاد محصول افزایش می‌یابد.

با توجه به اهمیت پدیده برگشت فنری در تولید محصول با دقت ابعادی مناسب در فرایندهای شکل‌دهی خصوصاً شکل‌دهی غلتکی، این پدیده بیشتر در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع باز بررسی شده است و در زمینه شکل‌دهی مجدد تا کنون پژوهشی انجام نشده است. ارائه روندی بر اساس مشخصه‌های محصول برای کمتر کردن و کنترل برگشت فنری از نوآوری‌های این مطالعه می‌باشد. از این رو در این مطالعه به شناخت تأثیر پارامترهای مهم مانند ضخامت قطعه، استحکام قطعه، تعداد ایستگاه، مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه بر روی مقدار برگشت فنری در فرایند شکل‌دهی مجدد پرداخته شده است. همچنین یک الگوی گل مناسب جهت کنترل پدیده برگشت فنری برای ساخت محصول نهایی با دقت ابعادی مناسب ارائه شده است.

## ۲- متدولوژی

### ۲-۱- آزمون‌های تجربی

در این مطالعه از ورقی با جنس فولاد St37 طبق استاندارد ISO 6892-1(2019)A23 جهت آزمون کشش استفاده شده است که نمودار تنش- کرنش بدست آمده در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱ نمودار تنش-کرنش مهندسی

آزمایش تجربی توسط دستگاه شکل‌دهی غلتکی با ۱۰ ایستگاه انجام گرفته است (شکل ۲). ماشین شکل‌دهی دارای ۲ غلتک (یک غلتک در بالا و یک غلتک در پایین) به صورت آفلاین در شرکت لوله و پروفیل سپنتا جهت شکل‌دهی پروفیل ۲۰/۵×۲۰/۵ موجود می‌باشد. فاصله غلتک‌ها از یکدیگر ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به این موضوع که هدف از این مطالعه بررسی روند برگشت فنری و تاثیر آن در محصول نهایی می‌باشد، پس از آن که ابتدای لوله به آخرین ایستگاه رسید، انرژی محرک غلتک‌ها قطع گردید تا غلتک‌های بالا آزاد گردد و لوله نیمه شکل گرفته از دستگاه خارج گردد. لذا نواحی زیر غلتک و مابین دو غلتک علامت‌گذاری گردید تا توسط ماشین اندازه‌گیری مختصاتی<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گیرد.



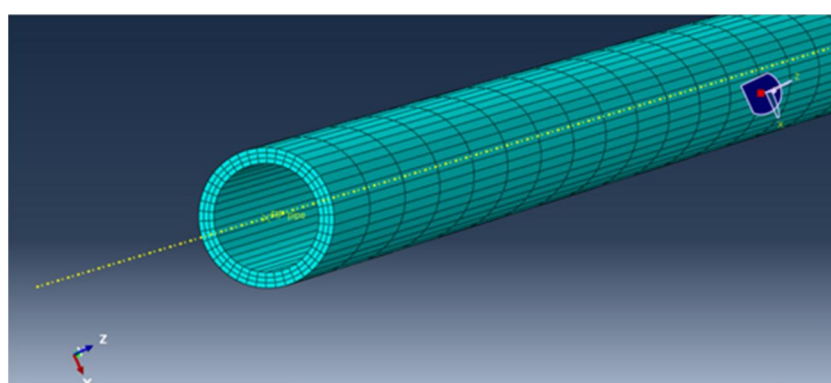
شکل ۲ ماشین شکل‌دهی غلتکی

### ۲-۲- شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد در نرم افزار المان محدود آباکوس و با استفاده از حلگر صریح انجام شده است. شبیه‌سازی پروفیل خط تولید سپنتا کاملاً مشابه شرایط موجود خط و کاملاً مشابه نقشه غلتک صورت پذیرفت و پارامترهای تاثیرگذار از شرایط خط تولید استخراج گردید. ورودی خط لوله گرد به قطر ۲۶/۷ میلی‌متر می‌باشد که در طی ۱۰ ایستگاه تبدیل به پروفیل ۲۰/۵×۲۰/۵ (مربع) خواهد شد (شکل ۳). طول لوله ۳۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده که مطابق شرایط واقعی خط می‌باشد و فاصله مرکز

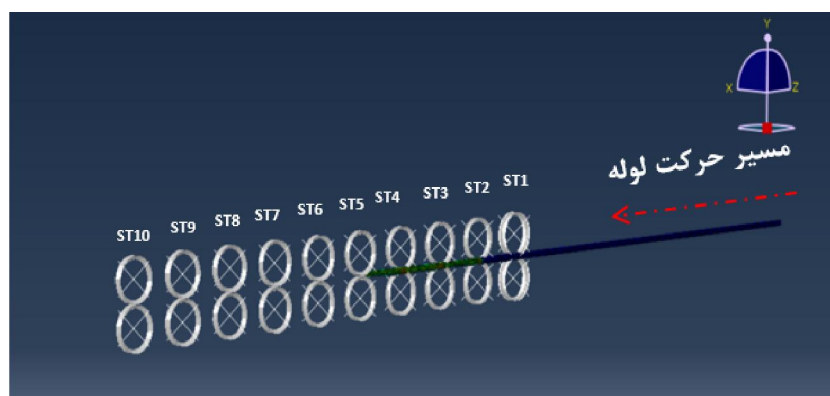
<sup>۱</sup> Coordinate Measuring Machine

غلتک‌ها از یکدیگر ۳۰۰ میلی‌متر باشد. ضخامت لوله ورودی ۳ میلی‌متر می‌باشد. نوع پروفیل در این شبیه‌سازی به صورت جسم تغییرشکل‌پذیر مدل شده است. لذا با توجه به اینکه ضخامت نسبت به ابعاد دیگر پروفیل خیلی کوچک است. در ابتدا از المان پوسته ای<sup>۱</sup> استفاده شد ولی پس از استخراج نتایج مشاهده گردید که در محاسبه‌ی میزان درصد برگشت فنری فاقد دقت می‌باشد و اصطلاحاً نقاط پس از استخراج به صورت زیگ‌زالی (مانند یک غشاء) نمایش داده می‌شوند که از نظر منطقی فاقد صحت می‌باشد لذا پس از بررسی مجدد علی‌رغم افزایش زمان شبیه‌سازی از المان توپر<sup>۲</sup> استفاده شد که پس از بررسی و استخراج نتایج دقت مد نظر مورد پذیرش قرار گرفت. با توجه به هدف این مطالعه که بررسی عیب برگشت فنری می‌باشد درجه اهمیت المان‌ها از بیشترین به ترتیب: المان در راستای محیطی- المان در راستای ضخامت- المان در راستای طول لوله می‌باشد و با توجه به حجم و زمان شبیه‌سازی المان در راستای محیطی ریزتر و در راستای طول درشت‌تر در نظر گرفته شده است که پس از بررسی میزان حساسیت مش بندی به نتایج مدنظر تعداد المان در راستای طولی و در راستای ضخامت و در راستای محیطی در نظر گرفته شد که در شکل ۳ شماتیک مش‌بندی لوله نشان داده شده است.



شکل ۳ شماتیک مش‌بندی لوله

در مدل‌سازی خط تولید شرکت لوله و پروفیل سپینتا از فولاد کربنی St37 استفاده شده است. همچنین این ماده همسانگرد و همگن در نظر گرفته شده است؛ اما با توجه به این که استحکام ماده جزء متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه است، از دو جنس St37 و X52 نیز استفاده شده است. اصطکاک به صورت سینماتیکی با ضریب اصطکاک ۰/۳ در نظر گرفته شده است. به جهت بررسی اثر پدیده برگشت فنری در طراحی الگوی گل ۴ پارامتر اصلی تاثیرگذار مطابق جدول ۱ مورد شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. در شکل ۴ شماتیک مونتاژ غلتک‌ها و لوله نمایش داده شده است.



شکل ۴ شماتیک مونتاژ غلتک‌ها و لوله

<sup>1</sup> Shell

<sup>2</sup> Solid

جدول ۱ آزمایش‌های انجام گرفته شده به تفکیک متغیرهای فرایند

توضیحات	نوع شکل دهی	جنس ماده اولیه	ضخامت لوله	تعداد ایستگاه	پارامترهای متغیر
					نام آزمایش
شکل‌دهی در هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل افزایشی می‌باشد	افزایشی	St37	۳	۵	روش افزایشی
شکل‌دهی در هر ایستگاه ثابت در نظر گرفته شده است.	ثابت مطابق مقاله	St37	۳	۵	روش ثابت
شکل‌دهی در هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل کاهش می‌باشد	کاهشی مطابق مقاله	St37	۳	۵	روش کاهشی M1
شکل‌دهی در هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل ۰/۱ کاهش داشته است	کاهشی ۰/۱	St37	۳	۵	روش کاهشی Y <sub>2</sub>
شکل‌دهی در هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل ۰/۲ کاهش داشته است	کاهشی ۰/۲	St37	۳	۵	روش کاهشی Y <sub>3</sub>
پارامتر متغیر در این شبیه‌سازی ضخامت لوله می‌باشد که به ۲/۵ تغییر پیدا کرده است	کاهشی ۰/۲	St37	۲/۵	۵	روش کاهشی Y <sub>4</sub>
پارامتر متغیر در این شبیه‌سازی ضخامت لوله می‌باشد که به ۳/۵ تغییر پیدا کرده است	کاهشی ۰/۲	St37	۳/۵	۵	روش کاهشی Y <sub>5</sub>
پارامتر متغیر در این شبیه‌سازی تعداد ایستگاه می‌باشد که به ۴ ایستگاه تغییر پیدا کرده است	کاهشی ۰/۲	St37	۳	۴	روش کاهشی Y <sub>6</sub>
پارامتر متغیر در این شبیه‌سازی تعداد ایستگاه می‌باشد که به ۶ ایستگاه تغییر پیدا کرده است و از آن جایی که شکل‌دهی کاهشی ۰/۲ در ۶ ایستگاه قابل اجرا نمی‌باشد، از روش ۰/۱۶ استفاده شد	کاهشی ۰/۱۶	St37	۳	۶	روش کاهشی Y <sub>7</sub>
پارامتر متغیر در این شبیه‌سازی جنس ماده اولیه لوله می‌باشد که از St37 به X52 تغییر پیدا کرد که ماده ای نسبتاً با استحکام بالا می‌باشد.	کاهشی ۰/۲	X52	۳	۵	روش کاهشی Y <sub>8</sub>
به جهت بدست آوردن نتایج بهتر یک ایستگاه به شرایط آزمایش اضافه گردید	کاهشی ۰/۱۶	X52	۳	۶	روش کاهشی Y <sub>9</sub>
به جهت مقایسه نتایج قبلی، مطابق مقاله مذکور ماده X52 مورد آزمایش قرار گرفت	کاهشی مطابق مقاله	X52	۳	۵	روش کاهشی Y <sub>10</sub>

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شد؛ سپس پارامترهای تاثیرگذار بر میزان برگشت فنری محصول نهایی مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۳-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی

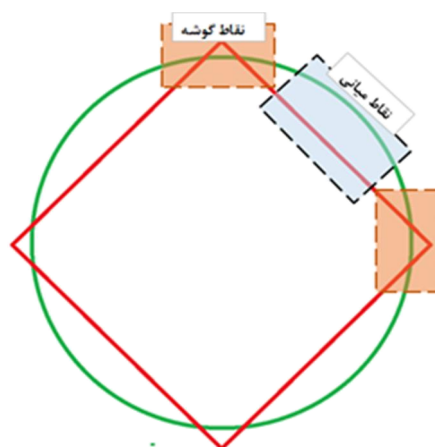
لوله‌ی گرد در فرایند شکل‌دهی مجدد در آزمایش تجربی پس از عبور از میان غلتک‌های شکل دهنده به محصول نهایی (پروفیل مربعی  $20/5 \times 20/5$ ) تبدیل شد که در نهایت میزان برگشت فنری پروفیل با اندازه‌گیری قطر بیرونی توسط CMM به دست آمد. در این مقاله با هدف بررسی برگشت فنری در هر ایستگاه شکل دهی و بررسی و تحلیل روابط موجود بین شرایط ایستگاه و برگشت فنری از روش خاصی استفاده شده است به اینصورت که پس از ورود لوله به خط شکل دهی و پس از طی کردن آخرین ایستگاه، موتور محرک سیستم خاموش شده و با باز کردن غلطک‌های بالایی لوله از مابین غلتک‌ها آزاد می‌شود و ابعاد مورد نظر توسط CMM اندازه‌گیری شد. خروجی CMM مختصات موقعیت‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد لذا به منظور بررسی میزان برگشت فنری در هر ایستگاه شکل‌دهی لازم بود که نقاط مذکور در یکی از نرم افزارهای مدل‌سازی، تبدیل به مدل گردد که در نهایت به روش‌های ذیل میزان برگشت فنری گزارش گردید. لازم به ذکر می‌باشد که در این مطالعه ایستگاه ۵ شکل‌دهی جهت صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی و آزمایش عملی انتخاب شده است؛ همچنین به جهت اطمینان از روش محاسبه‌ی برگشت فنری از دو روش کلی و مرسوم استفاده شده است.

#### ۳-۱-۱- گزارش درصد برگشت فنری

پس از استخراج نتایج CMM ابر نقاط مذکور در نرم افزار کتیا مدل‌سازی گردید. به طور کلی نقاط بدست آمده از نظر نوع رفتار و حالت به رو صورت کلی می‌باشند (شکل ۵)، نقاطی که در گوشه‌ها قرار دارند دارای شکل‌دهی کمتری می‌باشند و نقاطی میانی که دارای شکل‌دهی و معرف میزان برگشت فنری هستند. لذا نقاط میانی از نقاط گوشه تفکیک گردید و همچنین به جهت قید تقارن و کاهش زمان محاسبات، برای نصف لوله انجام گرفته شده است. پس از مدل‌سازی نقاط میانی شعاعی متناسب با موقعیت نقاط در نرم افزار مدل‌سازی برازش شد و سپس شعاع برازش نسبت به شعاع نامی (شعاع نامی غلتک) مطابق رابطه ۱ مورد مقایسه قرار گرفت.

$$(1) \quad \left[ \frac{\text{شعاع غلتک} - \text{شعاع برازش بدست آمده}}{\text{شعاع غلتک}} \right] \times (100)$$

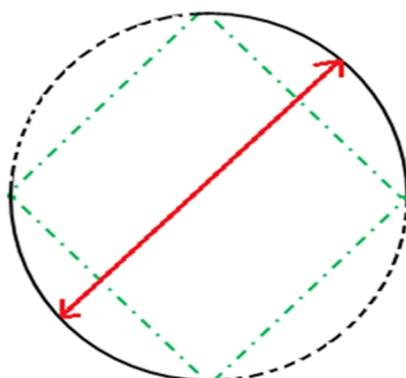
رابطه‌ی ۱ در صورتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که شعاع برازش بزرگتر از شعاع غلتک بدست آید که در این صورت به معنای پدیده برگشت فنری می‌باشد. لذا در غیر اینصورت بالعکس آن یعنی عیب جدایش رخ داده است.



شکل ۵ نقاط اندازه‌گیری شده

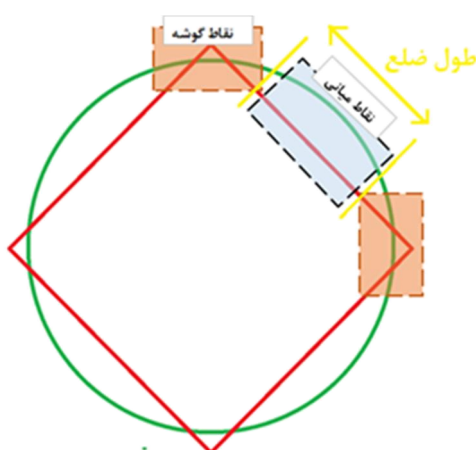
## ۳-۱-۲- گزارش بیشینه برگشت فنری

با توجه به اینکه بیشینه پدیده برگشت فنری در نقطه‌ی وسط از نقاط میانی اتفاق می‌افتد، لذا با اندازه‌گیری فاصله دو نقطه میانی از یک‌دیگر و مقایسه با میزان شکل‌دهی مورد انتظار، برگشت فنری گزارش داده می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶ بیشینه برگشت فنری (خط قرمز)

به جهت اطمینان از صحت‌سنجی نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی پارامتر دیگری علاوه بر دو پارامتر مذکور مورد سنجش قرار گرفت. پارامتر سوم طول ضلع (یکی از ابعاد پروفیل) می‌باشد (شکل ۷).



شکل ۷ پارامتر طول ضلع (خط زرد)

## ۳-۲- صحت‌سنجی نتایج عددی و تجربی

به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی، نتایج سه پارامتر اصلی و اساسی در این مطالعه (درصد برگشت فنری، بیشینه برگشت فنری و ضلع پروفیل) بدست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مطابق جدول ۲ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

جدول ۲ مقایسه نتایج عددی و تجربی

درصد خطا	نتایج شبیه‌سازی	نتایج تجربی اندازه‌گیری با (CMM)	-
۲/۰۴	۲۳/۵۸۱	۲۴/۱۳	بیشینه برگشت فنری (mm)
۴/۱۵	۴۲/۱۵	۴۰/۴۷	درصد برگشت فنری (%)
۲/۱۳	۱۲/۳۷	۱۲/۶۴	ضلع پروفیل (mm)

## ۳-۳- بررسی تأثیر پارامتر نوع شکل‌دهی بر پدیده برگشت فنری

در حالت شکل‌دهی یکسان (ثابت)، میزان شکل‌دهی تخصیص داده شده در هر ایستگاه یکسان می‌باشد و مجموع شکل‌دهی‌ها برابر با شکل‌دهی کلی می‌باشد. شکل‌دهی تا ایستگاه ۳ افزایشی گزارش شده است و از ایستگاه ۳ به بعد عیب جدایش مشاهده شده است که علت اصلی آن عدم طراحی مناسب الگوی گل می‌باشد که از ایستگاه ۳ به بعد شکل‌دهی بیش از حد در نظر گرفته شده است. دلیل افزایشی بودن روند برگشت فنری در ایستگاه‌های متوالی پدیده کار سختی می‌باشد. عیب جدایش روندی کاهشی طی می‌کند که علت آن رابطه معکوس پدیده برگشت فنری و عیب جدایش می‌باشد. جدول ۳ نتایج بدست آمده از این روش را نشان می‌دهد.

جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی روش ثابت

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	۰/۰۷۳	-	-	-	-	۲۳/۸	۰/۵۸	غلنک ۱
-	-	برگشت فنری	۹/۷۷	۰/۰۲۷	۳/۰۵	-	-	بین غلنک ۱ و ۲
-	۰/۱۱۹	-	-	-	-	۳۱/۰۶	۰/۵۸	غلنک ۲
-	-	برگشت فنری	۷/۸۵	۰/۰۳۶	۹/۷۶	-	-	بین غلنک ۲ و ۳
-	۰/۱۶۶	-	-	-	-	۴۵/۸۷	۰/۵۸	غلنک ۳
-	-	جدایش	۴/۹۶	-۰/۰۵	-	-	-	بین غلنک ۳ و ۴
-	۰/۲۱۸	-	-	-	-	۹۰/۸۶	۰/۵۸	غلنک ۴
-	-	جدایش	۳/۸	-۰/۰۳۹	-	-	-	بین غلنک ۴ و ۵
-	۰/۲۷۴	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۵۸	غلنک ۵
-	-	جدایش	۲/۸۴	-۰/۰۳	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	-	نهایی

در شکل‌دهی روش افزایشی، میزان شکل‌دهی تخصیص داده شده در هر ایستگاه به صورت افزایشی می‌باشد و مجموع شکل‌دهی‌ها برابر با شکل‌دهی کلی می‌باشد. بر خلاف روش ثابت شکل‌دهی در ایستگاه‌های اولیه کمتر در نظر گرفته شده و به مرور افزایش پیدا کرده است. مطابق روش ثابت به مرور پدیده برگشت فنری افزایش پیدا کرده و از ایستگاه ۴ به بعد عیب جدایش گزارش شده است. بر خلاف روش ثابت با گذشت زمان عیب جدایش روندی افزایشی داشته است که دلیل آن افزایش میزان شکل‌دهی در ایستگاه‌های پایانی می‌باشد که دلیل اصلی آن افزایش بیش از حد شکل‌دهی تخصیص داده شده می‌باشد. روند افزایشی روش صحیحی نمی‌باشد و علت آن تناقض و تضاد آن با پدیده کار سختی می‌باشد که منجر به پدید آمدن عیب جدایش در ایستگاه‌های انتهایی است که با گذشت هر ایستگاه این عیب حادتر هم می‌شود. جدول ۴ نتایج بدست آمده از این روش را نشان می‌دهد.

در شکل‌دهی روش کاهشی، میزان شکل‌دهی تخصیص داده شده در هر ایستگاه به صورت کاهشی می‌باشد و مجموع شکل‌دهی‌ها برابر با شکل‌دهی کلی می‌باشد. تا ایستگاه ۳ برگشت فنری مشاهده و روندی افزایشی گزارش شده است. از ایستگاه ۳ به بعد عیب جدایش مشاهده می‌شود اما روندی کاهشی طی می‌کند و علت آن رابطه معکوس پدیده برگشت فنری و عیب جدایش می‌باشد. لذا برخلاف تصور عموم عیب جدایش در شکل‌دهی مجدد به علت پدیده کار سختی قابل جبران می‌باشد. کرنش پلاستیک روند افزایشی طی می‌کند که با پدید آمدن عیب جدایش یک جهش افزایشی را تجربه کرده و با کاهش عیب جدایش روندی کاهشی را ادامه می‌دهد. جدول ۵ نتایج بدست آمده از این روش را نشان می‌دهد.



جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی روش افزایشی

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه	بیشینه برگشت فنری	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	پلاستیک		(mm)	(mm)		(mm)		
-	۰/۰۷۴	-	-	-	-	۲۳/۲۶	۰/۵۲	غلتنک ۱
+۰/۰۴۳	-	برگشت فنری	۸/۸۴	۰/۰۰۱۵	۱/۲۸	-	-	بین غلتنک ۱ و ۲
-	۰/۱۱۷	-	-	-	-	۲۹/۶۲	۰/۵۵	غلتنک ۲
+۰/۰۴۸	-	برگشت فنری	۷/۵۹۵	۰/۰۱۶	۷/۴۰	-	-	بین غلتنک ۲ و ۳
-	۰/۱۶۵	-	-	-	-	۴۲/۶۵	۰/۵۸	غلتنک ۳
+۰/۰۴۳	-	برگشت فنری	۶/۱۲	۰/۰۷۵	۱۴	-	-	بین غلتنک ۳ و ۴
-	۰/۲۰۸	-	-	-	-	۸۲/۴۰	۰/۶۱	غلتنک ۴
+۰/۰۴۷	-	جدایش	۴/۷	-۰/۰۲	-	-	-	بین غلتنک ۴ و ۵
-	۰/۲۵۵	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۶۴	غلتنک ۵
-	-	جدایش	۲/۸۴	-۰/۰۲۵	-	-	-	نهایی

جدول ۵ نتایج شبیه‌سازی روش کاهش‌ی

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه	بیشینه برگشت فنری	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	پلاستیک		(mm)	(mm)		(mm)		
-	۰/۰۹۷	-	-	-	-	۲۱/۵	۰/۶۴	غلتنک ۱
+۰/۰۵۹	-	برگشت فنری	۹/۵۸	۰/۰۲۹	۲/۹۰	-	-	بین غلتنک ۱ و ۲
-	۰/۱۵۸	-	-	-	-	۳۲/۶۶	۰/۶۱	غلتنک ۲
+۰/۰۶۱	-	برگشت فنری	۷/۳	۰/۰۳۵	۱۱/۲۰	-	-	بین غلتنک ۲ و ۳
-	۰/۲۱۷	-	-	-	-	۴۹/۶۳	۰/۵۸	غلتنک ۳
+۰/۰۵۰	-	جدایش	۵/۰۱۴	-۰/۰۳۵	-	-	-	بین غلتنک ۳ و ۴
-	۰/۲۶۶	-	-	-	-	۱۰۱/۲۸	۰/۵۵	غلتنک ۴
+۰/۰۳۹	-	جدایش	۳/۶۸	-۰/۰۱۳	-	-	-	بین غلتنک ۴ و ۵
-	۰/۳۰۶	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۵۲	غلتنک ۵
-	-	جدایش	۲/۸۹	-۰/۰۰۴	-	-	-	نهایی

در این مطالعه هدف حذف برگشت فنری نمی‌باشد؛ بلکه کنترل آن در جهت حذف عیب جدایش همراه با محصول با کمترین پدیده برگشت فنری می‌باشد. با توجه به بدست آمده، در آزمایش‌های بعدی روند کاهش برای نوع الگوی گل مناسب انتخاب شده است.

### ۳-۴- بررسی میزان شکل‌دهی تخصیص داده شده در روند شکل‌دهی کاهشی

در شکل‌دهی روش کاهشی ۰/۱، میزان شکل‌دهی تخصیص داده شده در هر ایستگاه به صورت کاهشی می‌باشد و ایستگاه بعدی ۰/۱ نسبت به ایستگاه قبلی کاهش در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج و بررسی‌های قبلی روندی شکل‌دهی کاهشی مورد پذیرش قرار گرفت. همچنین با توجه به این موضوع که میزان شکل‌دهی در هر ایستگاه تاثیرگذار در فرایند شکل و محصول نهایی خواهد بود، روند شکل‌دهی جدید با میزان کاهش ۰/۱ شکل در هر ایستگاه نسبت به ایستگاه قبل مورد طراحی قرار گرفت که نسبت به روش‌های قبلی میزان شکل‌دهی بیشتری در ایستگاه‌های اول تخصیص داده شده است که همین موضوع باعث پدید آمدن عیب جدایش از ایستگاه ۲ به بعد شده است. جدول ۶ نتایج بدست آمده از این روش را نشان می‌دهد.

جدول ۶ نتایج شبیه‌سازی روش کاهشی ۰/۱

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	۰/۰۰۹	-	-	-	-	۲۵/۲۴	۰/۷۲۵	غلطک ۱
-	-	برگشت فنری	۸/۶۱	۰/۰۱۸	۹/۸	-	-	بین غلتک ۱ و ۲
-	۰/۱۴۲	-	-	-	-	۳۵/۲۶	۰/۶۵۲	غلطک ۲
-	-	جدایش	۶/۷۳	-۰/۰۲۲	-	-	-	بین غلتک ۲ و ۳
-	۰/۱۸۷	-	-	-	-	۵۶/۲۱	۰/۵۸	غلطک ۳
-	-	جدایش	۶/۳۵	-۰/۰۲۷	-	-	-	بین غلتک ۳ و ۴
-	۰/۲۳۱	-	-	-	-	۱۲۰/۹۸	۰/۵۰۷	غلطک ۴
-	-	جدایش	۵/۹۵	-۰/۰۲۵	-	-	-	بین غلتک ۴ و ۵
-	۰/۲۶۹	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۴۳۵	غلطک ۵
-	-	جدایش	۲/۶۷	-۰/۰۰۶	-	-	-	نهایی

در شکل‌دهی روش کاهشی ۰/۲، میزان شکل‌دهی تخصیص داده شده در هر ایستگاه به صورت کاهشی می‌باشد و در ایستگاه بعدی ۰/۲ نسبت به ایستگاه قبلی کاهش در نظر گرفته شده است. با توجه به روش‌های شکل‌دهی قبلی که نتایج مطلوبی مشاهده نشد، در این روش جدید بر خلاف روش‌های قبلی، عیب جدایش مشاهده نگردید و روند برگشت فنری مطابق قبل افزایشی می‌باشد و روند افزایش، معقول و فاقد جهش بوده است. همچنین برگشت فنری محصول نهایی قابل قبول و در بازه‌ی استاندارد قرار دارد. جدول ۷ نتایج بدست آمده از این روش را نشان می‌دهد.

جدول ۷ نتایج شبیه‌سازی روش کاهش ۰/۲

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	۰/۱۰۶	-	-	-	-	۲۸/۱۳	۰/۹۶۶	غلنک ۱
-	+۰/۰۶۷	برگشت فنری	۶/۷۷	۰/۰۳	۸/۸۴	-	-	بین غلنک ۱ و ۲
-	۰/۱۷۳	-	-	-	-	۴۵/۸۲	۰/۷۷۳	غلنک ۲
-	+۰/۰۴۳	برگشت فنری	۵/۸	۰/۰۳۵	۱۰/۷	-	-	بین غلنک ۲ و ۳
-	۰/۲۱۶	-	-	-	-	۹۰/۶۱	۰/۵۷۹	غلنک ۳
-	+۰/۰۳۱	برگشت فنری	۵/۲	۰/۰۴۳	۱۳/۰۷	-	-	بین غلنک ۳ و ۴
-	۰/۲۴۷	-	-	-	-	۱۲۰/۹۸	۰/۳۸۶	غلنک ۴
-	+۰/۰۱۴	برگشت فنری	۴/۸۷	۰/۰۶	۱۷	-	-	بین غلنک ۴ و ۵
-	۰/۲۶۱	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۱۹۵	غلنک ۵
-	-	برگشت فنری	۵/۰۴۴	۰/۰۲۵	-	-	-	نهایی

باتوجه به نتایج بدست آمده، روند کاهش ۰/۱ و ۰/۲ مورد آزمایش قرار گرفت و به علت بیش از اندازه بودن شکل‌دهی در روش کاهش ۰/۱، عیب جدایش مشاهده گردید که نشان می‌دهد روش کاهش ۰/۱ الگوی گل مناسبی نمی‌باشد. همچنین الگوی گل کاهش ۰/۲ مطابق نتایج فاقد عیب جدایش گزارش شده است و روند برگشت فنری یکنواخت و قابل قبول می‌باشد؛ لذا روش کاهش ۰/۲ نتایج مناسب‌تری نسبت به روش کاهش مذکور در مطالعه مورد بررسی و روش کاهش ۰/۱ گزارش می‌دهد.

### ۳-۵- بررسی اثر ضخامت لوله بر پدیده برگشت فنری

در بخش قبلی، الگوی گل مناسب (کاهش ۰/۲) در ۵ ایستگاه برای ضخامت ۳ میلی‌متر ارائه شد. با هدف بررسی اثر ضخامت بر پدیده برگشت فنری دو آزمایش الگوی گل کاهش ۰/۲ با ضخامت ۳/۵ میلی‌متر و ۲/۵ میلی‌متر نیز طراحی گردید. نتایج آزمایش الگوی گل کاهش ۰/۲ برای ضخامت ۲/۵ میلی‌متر نشان داد که از ایستگاه ۱ عیب جدایش مشاهده و مطابق نتایج قبل عیب جدایش به مرور زمان روندی کاهش را طی کرده است. از طرفی الگوی گل ارائه شده مناسب نمی‌باشد و شکل‌دهی در هر ایستگاه بیش از حد تخصیص داده شده است و نیازمند بررسی و الگوی گل مجدد متناسب با شرایط ضخامت می‌باشد. جدول ۸ نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد.

با بررسی نتایج آزمایش الگوی گل کاهش ۰/۲ برای ضخامت ۳/۵ میلی‌متر، در همه ایستگاه‌ها برگشت فنری مشاهده شده است و روندی افزایشی دارد. نکته حائز اهمیت این است که با افزایش ضخامت، پروفیل کمتر دچار شکل‌دهی می‌شود. متعاقباً در مقایسه با ضخامت ۳ میلی‌متر میزان روند برگشت فنری در طول شکل‌دهی کمتر می‌باشد و محصول نهایی برگشت فنری بیشتری گزارش داده است که نشان از عدم تخصیص میزان شکل‌دهی مناسب در ایستگاه‌ها می‌باشد و نیاز دارد شکل‌دهی بیشتری تخصیص داده شود. جدول ۹ نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد.

جدول ۸ نتایج شبیه‌سازی روش کاهش ۰/۲ در ضخامت ۲/۵ میلی‌متر

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	۰/۰۹۷	-	-	-	-	۲۸/۱۳	۰/۹۶۶	غلتنک ۱
-	+۰/۰۳۹	جدایش	۶/۳۳	-۰/۰۷۹	-	-	-	بین غلتنک ۱ و ۲
-	۰/۱۳۶	-	-	-	-	۴۵/۸۲	۰/۷۷۳	غلتنک ۲
-	+۰/۰۲۷	جدایش	۵/۸۲	-۰/۰۳۰	-	-	-	بین غلتنک ۲ و ۳
-	۰/۱۶۳	-	-	-	-	۹۰/۶۱	۰/۵۷۹	غلتنک ۳
-	+۰/۰۲۰	جدایش	۴/۴۲۱	-۰/۰۱۵	-	-	-	بین غلتنک ۳ و ۴
-	۰/۱۸۴	-	-	-	-	۲۶۲/۲۱	۰/۳۸۶	غلتنک ۴
-	+۰/۰۰۷	جدایش	۴/۶۶	-۰/۰۰۵	-	-	-	بین غلتنک ۴ و ۵
-	۰/۱۹۰	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۱۹۵	غلتنک ۵
-	-	جدایش	۴/۹۷	-۰/۰۰۷	-	-	-	نهایی

جدول ۹ نتایج شبیه‌سازی روش کاهش ۰/۲ در ضخامت ۳/۵ میلی‌متر

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	۰/۱۱۶	-	-	-	-	۲۸/۱۳	۰/۹۶۶	غلتنک ۱
-	+۰/۰۶۳	برگشت فنری	۷/۴۸۸	۰/۰۰۱	۳/۳۶	-	-	بین غلتنک ۱ و ۲
-	۰/۱۷۹	-	-	-	-	۴۵/۸۲	۰/۷۷۳	غلتنک ۲
-	+۰/۰۵۰	برگشت فنری	۵/۸۸	۰/۰۲	۴/۲۲	-	-	بین غلتنک ۲ و ۳
-	۰/۲۲۹	-	-	-	-	۹۰/۶۱	۰/۵۷۹	غلتنک ۳
-	+۰/۰۴۵	برگشت فنری	۴/۴۷	۰/۰۲۷	۹/۲	-	-	بین غلتنک ۳ و ۴
-	۰/۲۷۰	-	-	-	-	۲۶۲/۲۱	۰/۳۸۶	غلتنک ۴
-	+۰/۰۱۹	برگشت فنری	۳/۶۵	۰/۰۶۱	۲۰/۲	-	-	بین غلتنک ۴ و ۵
-	۰/۲۸۹	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۱۹۵	غلتنک ۵
-	-	برگشت فنری	۶/۶۱	۰/۰۵	-	-	-	نهایی

## ۳-۶- بررسی اثر تعداد ایستگاه بر پدیده برگشت فنری

در این مطالعه دو آزمایش با شکل‌دهی در ۴ ایستگاه و ۶ ایستگاه مورد بررسی و با روش کاهشی ۰/۲ در ۵ ایستگاه مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل‌دهی ۴ ایستگاه مطابق انتظار به علت افزایش میزان شکل‌دهی تخصیص داده شده در هر ایستگاه و بیش از حد بودن آن در ۲ ایستگاه اول عیب جدایش مشاهده شد و باتوجه به نتایج قبل در این آزمایش نیز به مرور زمان عیب جدایش کاهش پیدا کرده است و همچنین در ایستگاه‌های بعدی پدیده برگشت فنری مشاهده شده و روند افزایشی را طی کرده است؛ لذا برخلاف شکل‌دهی مستقیم که هدف حذف پدیده برگشت فنری است، در اینجا هدف کنترل آن و ایزاری کمکی در جهت بهبود می باشد. در شکل‌دهی ۶ ایستگاه مطابق انتظار با توجه به این که شکل‌دهی کمتری در هر ایستگاه تخصیص داده شده است، در هر ۶ ایستگاه پدیده برگشت فنری مشاهده شد و روند برگشت فنری یکنواخت‌تر و دارای مقدار کمتری بوده است. جداول ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتایج حاصل از تخصیص میزان شکل‌دهی در ۴ و ۶ ایستگاه را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰ نتایج شبیه‌سازی روش کاهشی در ۴ ایستگاه

تغییرات کرنش پلاستیک	کرنش پلاستیک	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
-	۰/۱۰۷	-	-	-	-	۲۹/۸	۱/۰۳۵	غلتک ۱
+۰/۰۴۴	-	جدایش	۷/۲	-۰/۰۳۵	-	-	-	بین غلتک ۱ و ۲
-	۰/۱۵۱	-	-	-	-	۵۱/۱۸	۰/۸۲۸	غلتک ۲
+۰/۰۳۸	-	جدایش	۴/۸۵	-۰/۰۰۲	-	-	-	بین غلتک ۲ و ۳
-	۰/۱۹۰	-	-	-	-	۱۲۶/۴۸	۰/۶۲۱	غلتک ۳
+۰/۰۲۳	-	برگشت فنری	۳/۸۱	۰/۰۲۵	۱۹	-	-	بین غلتک ۳ و ۴
-	۰/۲۱۳	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۴۱۶	غلتک ۴
-	-	برگشت فنری	۵/۲۹	۰/۰۴۵	-	-	-	نهایی

جدول ۱۱ نتایج شبیه‌سازی روش کاهشی در ۶ ایستگاه

تغییرات کرنش پلاستیک	کرنش پلاستیک	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
-	۰/۰۹۶	-	-	-	-	۲۶/۱۲	۰/۸۰۵	غلتک ۱
+۰/۰۳۹	-	برگشت فنری	۷/۲۲	۰/۰۱۱	۱/۶۸	-	-	بین غلتک ۱ و ۲
-	۰/۱۳۵	-	-	-	-	۳۷/۷۶	۰/۶۷۶	غلتک ۲
+۰/۰۳۶	-	برگشت فنری	۵/۳	۰/۰۱۶	۲/۶۱	-	-	بین غلتک ۲ و ۳
-	۰/۱۷۱	-	-	-	-	۶۰/۸۲	۰/۵۴۷	غلتک ۳
+۰/۰۳۱	-	برگشت فنری	۴/۲۵	۰/۰۰۳	۷/۹۰	-	-	بین غلتک ۳ و ۴
-	۰/۲۰۲	-	-	-	-	۱۱۶/۷	۰/۴۱۸	غلتک ۴
+۰/۰۲۱	-	برگشت فنری	۳/۷۱	۰/۰۴۸	۱۴/۱	-	-	بین غلتک ۴ و ۵
-	۰/۲۲۳	-	-	-	-	۳۲۶/۳۳	۰/۲۸۹	غلتک ۵
+۰/۰۱۱	-	برگشت فنری	۳/۳۸	۰/۰۵۸	۱۷/۹	-	-	بین غلتک ۵ و ۶
-	۰/۲۳۵	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۱۶۱	غلتک ۶
-	-	برگشت فنری	۴/۶۹	۰/۰۱۵	-	-	-	نهایی

## ۳-۷- بررسی اثر جنس ماده بر پدیده برگشت فنری

در آزمایش های قبلی تماماً از جنس فولاد St37 استفاده شد؛ لذا جهت بررسی اثر پدیده برگشت فنری از جنس فولاد X52 که به نسبت ماده قبلی دارای استحکام بالاتری می باشد، در شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. پس از بررسی اثر الگوی کاهشی، در هر ۵ ایستگاه برگشت فنری گزارش شده است. روند برگشت فنری افزایشی می‌باشد اما خارج از استاندارد و حد پذیرش می‌باشد. در روش الگوی گل کاهشی ۰/۲ در ۵ ایستگاه برگشت فنری مشاهده شده است و برگشت فنری محصول نهایی در بازه استاندارد و حد پذیرش قرار دارد. با هدف بدست آوردن نتایج بهتر، الگوی گل کاهشی ۰/۱۶ در ۶ ایستگاه طراحی گردید که در هر ۶ ایستگاه برگشت فنری مشاهده شده است و محصول نهایی در بازه استاندارد و حد پذیرش قرار دارد و نتیجه آن از نظر میزان برگشت فنری نسبت به روش کاهشی ۰/۲ در ۵ ایستگاه بهبود یافته است. جدول ۱۲ نتایج روش کاهشی فولاد X52 در ۶ ایستگاه را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج حاصل از ۳ آزمایش مذکور، مشخص شد که افزایش استحکام ماده اولیه منجر به افزایش پدیده برگشت فنری می‌شود. لذا شکل‌دهی در هر ایستگاه سخت‌تر خواهد شد و همین موضوع منجر به افزایش پدیده برگشت فنری در ایستگاه های بعدی می‌شود.

جدول ۱۲ نتایج شبیه‌سازی روش کاهشی فولاد X52 در ۶ ایستگاه

تغییرات	کرنش	نتیجه	شعاع گوشه (mm)	بیشینه برگشت فنری (mm)	برگشت فنری (%)	شعاع غلتک (mm)	شکل‌دهی در نظر گرفته شده	ایستگاه
کرنش پلاستیک	۰/۰۹۶	-	-	-	-	۲۶/۱۲	۰/۸۰۵	غلتنک ۱
-	-	برگشت فنری	۷/۹۴	۰/۰۲	۸/۵۰	-	-	بین غلتنک ۱ و ۲
-	۰/۱۵۰	-	-	-	-	۳۷/۷۶	۰/۶۷۶	غلتنک ۲
-	-	برگشت فنری	۵/۶۳	۰/۰۲۷	۹/۹۰	-	-	بین غلتنک ۲ و ۳
-	۰/۱۹۰	-	-	-	-	۶۰/۸۲	۰/۵۴۷	غلتنک ۳
-	-	برگشت فنری	۴/۴	۰/۰۳۵	۱۲/۱۱	-	-	بین غلتنک ۳ و ۴
-	۰/۲۱۳	-	-	-	-	۱۱۶/۷	۰/۴۱۸	غلتنک ۴
-	-	برگشت فنری	۳/۷۳	۰/۰۴۸	۱۵	-	-	بین غلتنک ۴ و ۵
-	۰/۲۳۵	-	-	-	-	۳۲۶/۳۳	۰/۲۸۹	غلتنک ۵
-	-	برگشت فنری	۳/۴۷	۰/۰۶۵	۱۷	-	-	بین غلتنک ۵ و ۶
-	۰/۲۵۰	-	-	-	-	۲۰/۵ × ۲۰/۵	۰/۱۶۱	غلتنک ۶
-	-	برگشت فنری	۵/۱	۰/۰۴۵	-	-	-	نهایی

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پارامترهای تاثیرگذار بر پدیده برگشت فنری در طراحی الگوی گل در فرایند شکل‌دهی مجدد لوله با مقطع مربعی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته شده است که اهم نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- به علت کار سختی به وجود آمده در حین شکل دهی، روش شکل‌دهی کاهشی نسبت به روش‌های دیگر نتایج و میزان برگشت فنری و عیوب کمتری دارد.
- نتایج نشان می‌دهد که پدیده برگشت فنری با ضخامت رابط‌های مستقیم دارد و با کاهش ضخامت احتمال پدید آمدن عیب جدایش افزایش پیدا می‌کند و با افزایش ضخامت به جهت کنترل پدیده برگشت فنری نیاز است که شکل‌دهی بیشتری به

لوله تخصیص داده شود. همچنین مشخص شد که هر الگوی گلی مناسب لوله با هر ضخامتی نمی‌باشد و تنوع ضخامت محصولات، تنوع الگوهای گل مختلف را برای صنعت‌گران ملزم می‌نماید.

- نتایج نشان داد که در صورت کاهش ایستگاه که منجر به تخصیص دادن بیش از حد شکل‌دهی در هر ایستگاه شود، احتمال پدیدار شدن عیب جدایش را افزایش می‌دهد.
- در فولادهای دارای استحکام بالا، افزایش تعداد ایستگاه در کنترل پدیده برگشت فنری بسیار ثمر بخش می‌باشد.

## References

- [1] Dadgar Asl Y, Tajdari M, Moslemi Naeini H, Davoodi B, Azizi Tafti R, Panahizadeh Rahimloo V. Prediction of Required Torque in Cold Roll Forming Process of a Channel Sections Using Artificial Neural Networks. *Modares Mechanical Engineering*. 2015 June 2;15(7):209-14. [In Persian]
- [2] Dadgar Asl Y, Safdarian R, Moslemi Naeini H, Panahizadeh Rahimloo V. Experimental and Numerical Investigation of Affected Parameters On Torque and Power in Cold Roll Forming of a Channel Sections. *Sharif Journal of Mechanical Engineering*. 2016 December 2;32(2):91-7. [In Persian]
- [3] Safari M, Salamat-Talab M, Abdollahzade A, Akhavan-Safar A, da Silva L. Experimental investigation, statistical modeling and multi-objective optimization of creep age forming of fiber metal laminates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020 July 27;234(11):1389-98. doi: 10.1177/1464420720943
- [4] Rabiee AH, Sherkatghanad E, Zeinolabedin Beygi A, Moslemi Naeini H, Lang L. Experimental investigation and modeling of fiber metal laminates hydroforming process by GWO optimized neuro-fuzzy network. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*. 2023 February 5;12(2):193-209. doi: 10.22061/jcarme.2022.8268.2101
- [5] Shamshiri M, Panahizadeh V, Dadgar Asl Y. Numerical and experimental investigation of the effect of local heating on the reduction of the spring back defect in the flexible roll forming process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 November 10;9(9):35-44. doi: 10.22034/ijme.2023.389451.1759 [In Persian]
- [6] Hajiahmadi S, Moslemi Naeini H, 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 November 2;129(9):3965-78. doi: 10.1007/s00170-023-12516-5
- [7] Safdarian R, Moslemi Naeini H. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section. *Thin-Walled Structures*. 2015 July 4;92:130-6. doi: 10.1016/j.tws.2015.03.002
- [8] Dadgar Asl Y, Woo YY, Kim Y, Moon YH. Non-sorting multi-objective optimization of flexible roll forming using artificial neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 March 29;107:2875-88. doi: 10.1007/s00170-020-05209-w
- [9] 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 June 11;20(1):197-221. doi: 10.48301/KSSA.2023.374084.2358 [In Persian]
- [10] Dadgar Asl Y, Sheikhi MM, Pourkamali Anaraki A, Panahizadeh Rahimloo V, Hoseinpour M. Fracture analysis on flexible roll forming process of anisotropic Al6061 using ductile fracture criteria and FLD. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 December 12;91(5-8):1481-92. doi: 10.1007/s00170-016-9852-1
- [11] Huang YM. Elasto-plastic finite element analysis of squaring circular tube. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008 June 6;18(3):665-73. doi: 10.1016/S1003-6326(08)60116-8
- [12] Moslemi Naeini H, Kiuchi M, Kitawaki T, Kuromatsu R. Design method of rolls for reshaping processes of pipes with pentagonal cross-sections. *Journal of materials processing technology*. 2005 October 30;169(1):5-8. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.06.034
- [13] Alinezhad P, Sanati A, Momtahan KN. Computer Aided Design of Reshaping Process of Circular Pipes into Square Pipes. *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*. 2009 March 2;3(7):468-72.
- [14] Leu DK. The shaping of a circular tube into a symmetric square-tube by finite-element modeling. *Journal of materials processing technology*. 2006 September 14;178(1-3):287-96. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.011
- [15] 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 September 4;6(4):14-22,2019. [In Persian]

- [16] Mazdak S, Moslemi Naeni H, Sheykholeslami MR, Kiuchi M, Validi H. The effect of the roller profile on cave-in defect in reshaping process by considering nonlinear combine strain hardening. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2021 August 13;236(5):509-21. doi: [10.1177/09544054211036895](https://doi.org/10.1177/09544054211036895)
- [17] 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 June 7;81:251-6. doi: [10.1016/j.proeng.2014.09.159](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.159)
- [18] Onoda Y, Nagamachi T, Sugiyama T. Finite element simulation of deformation features of round welded steel pipes reshaped into square shape by extroll-forming. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity(Japan). 1995 March 1;36(490):149-54.
- [19] Shao C, Zhang P, Zhu Y, Zhang Z, Tian Y, Zhang Z. Simultaneous improvement of strength and plasticity: Additional work-hardening from gradient microstructure. Acta Materialia. 2018 February 15;145:413-28. doi: [10.1016/j.actamat.2017.12.028](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.028)
- [20] 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 January 5;164:105820. doi: [10.1016/j.jcsr.2019.105820](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105820)
- [21] 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 June 9;34(1):49-60. doi: [10.22067/jacsm.2022.74655.1090](https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.74655.1090) [In Persian]