



## بررسی عددی و تجربی اثر گرمای موضعی روی کاهش عیب برگشت‌فتری در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

مهدی شمشیری<sup>۱</sup>، ولی‌اله پناهی‌زاده<sup>۱</sup>، یعقوب دادگراصل<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، ایران

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

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۵۷-۶۳۸۱۱، ydadgar@tvu.ac.ir

### چکیده

یکی از محدودیت‌های شکل‌دهی غلتکی سنتی ساخت قطعات با مقاطع ثابت است بنابراین فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به‌منظور تولید قطعات با سطح مقطع متغیر ایجاد شد. مهم‌ترین عیوب این فرایند شامل، تابیدگی کف، برگشت‌فتری، انحراف از موقعیت مطلوب لبه، چین‌خوردگی لبه و پارگی در گوشه‌ها می‌باشد. در این مقاله به بررسی عددی و تجربی اثر حرارت‌دهی به ورق در حین فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر روی عیب برگشت‌فتری پرداخته شده است. بدین منظور شبیه‌سازی اجزای محدود ترمومکانیکال فرایند در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی تهران به همراه سازوکار حرارت‌دهی موضعی الحاقی در پنج دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌منظور صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی انجام شد. برای اندازه‌گیری دمای ورق، از ترمومتر لیزری استفاده شد. برای جلوگیری از بازتاب نور لیزر و خطا در محاسبه دما، ورق به‌وسیله پوشش‌دهی کربن مات گردید. نتایج نشان داد که با افزایش دما برگشت‌فتری نسبت به شکل‌دهی در دمای محیط در هر دو جنس آلومینیوم کاهش یافت و با افزایش استحکام تسلیم، برگشت‌فتری افزایش یافت. با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط، برگشت‌فتری در ضخامت ۱ و ۱/۵ میلی‌متر، به ترتیب ۳۳/۵ و ۴۱/۲ درصد کاهش پیدا کرد؛ همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی تطابق خوبی را نشان داد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۱ اسفند ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۲۶ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۱ فروردین ۱۴۰۲

### کلیدواژگان:

برگشت‌فتری

شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر

گرمایش موضعی

## Numerical and experimental investigation of the effect of local heating on the reduction of the spring back defect in the flexible roll forming process

Mehdi Shamschiri<sup>1</sup>, Valiollah Panahizadeh<sup>1</sup>, Yaghoob DadgarAsl<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

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

\* P.O.B. 14357-63811 Tehran, Iran, ydadgar@tvu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 12 March 2023

First Decision: 17 March 2023

Accepted: 31 March 2023

### Keywords:

Spring back

Flexible roll forming

Local heating

### Abstract

One of the limitations of traditional roll forming is the production of parts with fixed cross-sections, so the flexible roll forming process was created to produce parts with variable cross-sections. The most important defects of this process, include warping, spring back, deviation from the desired position of the edge, wrinkling of the edge, and fracture in the corners. In this paper, the numerical and experimental investigation of the effect of heating the sheet during the flexible roll-forming process on the spring back defect was discussed. For this purpose, the simulation of the thermomechanical finite elements of the process was carried out in Abaqus software. Experimental tests were conducted using a flexible roller forming machine made in Shahid Rajaee University of Tehran along with additional local heating mechanisms in five temperatures 25, 100, 200, 300, and 400 to validate the simulation results. A laser thermometer was used to measure the sheet temperature. To prevent laser light reflection and error in temperature calculation, the sheet was matted by carbon coating. Results showed that with the increase in temperature, the spring back compared to forming at ambient temperature decreased in both types of aluminum, and with the increase of yield strength, the spring back increased. By increasing the temperature up to 400°C compared to the ambient temperature, the spring back in thickness 1mm and 1.5mm, decreased by 33.5 and 41.2%, respectively; also, the comparison of simulation and experimental results showed a good agreement.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Shamschiri, V. Panahizadeh, Y. DadgarAsl, 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, Vol. 9, No. 9, pp. 35-44, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/ijme.2023.389451.1759>

۱- مقدمه

در برگشت‌فتری، ضخامت ورق است که با افزایش آن برگشت‌فتری کاهش می‌یابد. [۷]. یکی دیگر از عواملی که در برگشت‌فتری تأثیرگذار است مدول یانگ و استحکام تسلیم فلز است. هرچه استحکام تسلیم فلزی بالاتر رود برگشت‌فتری فلز افزایش می‌یابد [۸]. با افزایش دما از ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برگشت‌فتری میله فلزی آلیاژ منیزیم کاهش می‌یابد. با افزایش دما تغییر مثبت در برگشت‌فتری ملاحظه شده است [۹]. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که با افزایش دما شکل‌پذیری مواد بهبود می‌یابد و برگشت‌فتری کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. این موضوع به زمان شکل‌دهی نیز بستگی دارد. اگر شکل‌دهی آهسته‌تر انجام شود و ورق در وضعیت شکل‌دهی باقی بماند برگشت‌فتری کمتر خواهد شد [۱۰]. پاناکسیموتو و ایامادا [۱۱-۱۲] اثر دما را بر برگشت‌فتری در فرایندهای خمکاری U شکل گرم ورق‌های فولادی و آلومینیومی بررسی کرده‌اند آن‌ها دریافته‌اند که افزایش دما سبب کاهش برگشت‌فتری می‌گردد. لارانژا و همکاران [۱۳] به بررسی رفع عیوب فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به‌واسطه یک فرایند گرمایی-مکانیکی پرداختند. برای این منظور از تجهیزات اضافی گرمایش موضعی در خط تولید کنار دستگاه شکل‌دهی غلتکی استفاده کردند. شکل ۲ تصویر دستگاه شکل‌دهی مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

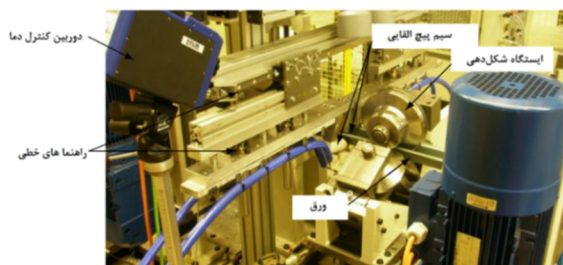


Fig. 2 Induction coil in flexible forming machine [13]

شکل ۲ سیم‌پیچ القایی در دستگاه شکل‌دهی انعطاف‌پذیر [۱۳]

ژانگ و همکاران [۱۴] به بررسی شکل‌دهی غلتکی همراه با اعمال گرمای موضعی پرداختند و برای این پژوهش از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی استفاده کردند. در شبیه‌سازی، به مسیر خم در ورق، گرمای موضعی اعمال شده است. دمای این ناحیه حدود ۲۰۰ درجه افزایش پیدا می‌کند. بعد از انجام این پژوهش به این نتیجه رسیدند که با اعمال گرما، کماتش در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر کاهش می‌یابد ولی تنش‌های حرارتی بیشتری در ورق گرم شده نسبت به ورق سرد ایجاد می‌شود.

در فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد ورق با عبور از بین مجموعه‌ای از غلتک‌ها، به خم‌های پیوسته و متوالی تبدیل می‌شود. امروزه، فرایند شکل‌دهی غلتکی سرد به‌طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شود. این فرایند نسبت به سایر فرایندهای مشابه، دارای سرعت بالایی بوده و مقرون‌به‌صرفه می‌باشد و از آن برای شکل‌دهی فولادهای نرم و سخت استفاده می‌شود [۱-۲]. با اینکه فرایند شکل‌دهی غلتکی کاربرد فراوانی در صنعت دارد؛ اما یک محدودیت اساسی این فرایند این است که با استفاده از آن فقط می‌توان پروفیل‌های با مقاطع ثابت را ایجاد کرد؛ اما صنعت به پروفیل‌ها و اشکالی با سطح مقطع عرضی متغیر هم نیاز دارد. با توجه به هزینه بالای کشش عمیق و فرایندهای مشابه برای تولید این پروفیل‌ها، شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مطرح گردید [۳-۴]. این فرایند از مزایای شکل‌دهی غلتکی سرد استفاده و بر محدودیت شکل‌دهی غلتکی سرد غلبه می‌کند. با این فرایند می‌توان به محصولی با سطح مقطع متغیر دست یافت [۵]. در بسیاری از موارد در صنایع خودروسازی، هوافضا، کشتی‌سازی و ساختمان‌سازی برای کاهش وزن و افزایش عملکرد از قطعات با مقاطع متغیر استفاده می‌کنند. در فرایند شکل‌دهی انعطاف‌پذیر، غلتک‌ها هم در راستای محور حرکت می‌کنند و هم حول محور عمودی حرکت چرخشی دارند تا خط خم موردنظر را روی پروفیل ایجاد کنند. شکل ۱ (الف و ب) شمایی از فرایند شکل‌دهی غلتکی با مقطع ثابت و انعطاف‌پذیر با مقطع متغیر را نشان می‌دهد [۶].

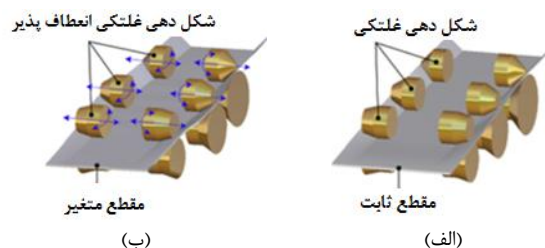


Fig. 1 Schematic of the roll forming process (a) fixed section; (b) Flexible with a variable section [6]

شکل ۱ شمایی از فرایند شکل‌دهی غلتکی (الف) مقطع ثابت؛ (ب) انعطاف‌پذیر با مقطع متغیر [۶]

یکی از عیوب محصول در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، عیب برگشت‌فتری می‌باشد. برگشت‌فتری به معنای بازیابی الاستیک قسمت تغییر شکل یافته شده است. برگشت‌فتری به دلیل برگشت تغییر شکل الاستیک از گشتاور خمش ورق‌های فلزی در طی تغییر شکل اتفاق می‌افتد که این عیب در ورق اجتناب‌ناپذیر است. یکی از پارامترهای تأثیرگذار

دادگراصل و همکاران [۱۷] به بررسی عددی و تجربی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداخته و عیب پارگی در گوشه‌ها را با استفاده از معیارهای شکست نرم مورد مطالعه قرار دادند. بادپروا و همکاران [۱۸] به بررسی پارامترهای اثرگذار بر طول تغییرشکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداخته‌اند. در یک مطالعه دیگر دادگراصل و همکاران [۱۹] با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر پرداختند.

با توجه به مطالعه‌های انجام شده، یک پژوهش کامل در زمینه برگشت‌فتری در دماهای مختلف در فرایندهای شکل‌دهی صورت نگرفته است. در این مقاله، به بررسی عددی و تجربی فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پرداخته شده است تا تأثیر دما بر روی برگشت‌فتری دو آلیاژ آلومینیوم مشخص گردد. علاوه بر اثر دما، به بررسی تأثیر ضخامت و جنس ورق با افزایش دما بر روی برگشت‌فتری پرداخته شده است.

## ۲- شبیه‌سازی اجزا محدود

به‌منظور بررسی عددی اثر حرارت‌دهی موضعی روی عیب برگشت‌فتری در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شد. برای ایجاد مدل از دو ایستگاه استفاده شده است که ایستگاه اول به‌منظور مهار و هدایت ورق و ایستگاه دیگر برای انجام عمل شکل‌دهی استفاده شده است. برای اعمال حرارت در حین شکل‌دهی از کوپل مکانیکی-گرمايي استفاده شده است. برای اعمال گرمای موضعی، ورق به ۲۰ قسمت مساوی تقسیم گردید و مرحله‌به‌مرحله قبل از اعمال شکل‌دهی گرم شده و به زیر غلتک وارد شد. به دلیل ماهیت شبه استاتیکی بودن فرایند برای شبیه‌سازی، از حل‌گر دینامیک صریح نرم‌افزار المان محدود آباکوس نسخه ۶/۱۴ استفاده گردیده است. پارامترهای تأثیرگذار فرایند شامل، ضخامت ورق، جنس ورق و دمای ورق روی عیب برگشت‌فتری مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات هندسی ورق در شکل ۵، نشان داده شده است. همچنین برای اعمال خواص مکانیکی ورق‌ها از داده‌های مرجع [۲۰] استفاده شده است که در جدول ۱ قابل مشاهده است.

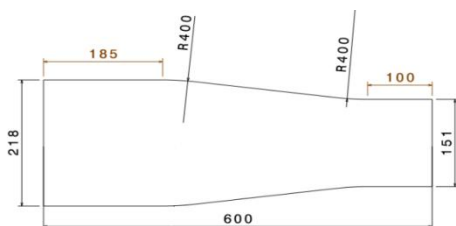


Fig. 5 Geometrical specification of sheet

شکل ۵ مشخصات هندسی ورق

ژانگ و همکاران [۱۵] به بررسی عددی عیب برگشت‌فتری در شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در دماهای مختلف پرداختند. دو نوع خمش در آلیاژ منیزیم انجام شد و توزیع کرنش و برگشت‌فتری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش دما میزان زاویه برگشت‌فتری کمتر می‌شود. شکل ۳ تصویری از غلتک‌ها در نرم‌افزار شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

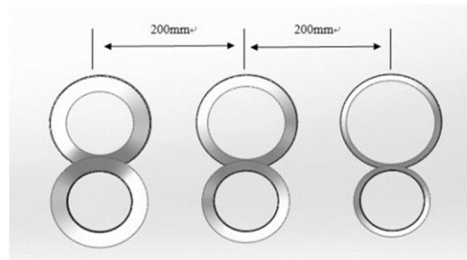


Fig. 3 Schematic of the rollers and their distance in the simulation software [15]

شکل ۳ شماتیک غلتک‌ها و فاصله آن‌ها در نرم‌افزار شبیه‌سازی [۱۵]

مایکل و همکاران [۱۶] به بررسی شکل‌دهی غلتکی فولاد استحکام بالا پرداختند. از آنجاکه در صنعت نیاز است ورق‌های کاهش پیدا کند، از فولادهایی با استحکام بالا استفاده می‌کنند. در این پژوهش برای شکل‌دهی بهتر فولاد استحکام بالا از حرارت استفاده شده است. نتایج نشان داد که با اعمال گرما، شکل‌دهی فولاد استحکام بالا راحت‌تر انجام می‌شود. آن‌ها برای گرم کردن ورق به‌صورت موضعی در محل خم، از غلتک‌های گرم استفاده کردند. در این پژوهش ساختار مکانیکی مواد بعد از گرمایش مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت سختی ورق‌ها آزمایش شد. در این مطالعه مشخص گردید ورق‌هایی که به آن گرما داده شده است، دچار ترک نمی‌شود. شکل ۴ تصویری از نمونه پارگی در ورق گرم نشده را نشان می‌دهد.

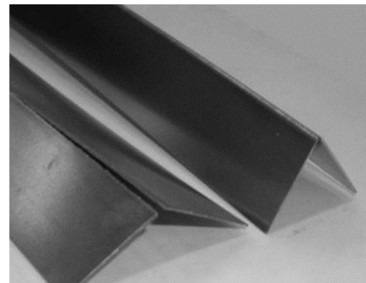


Fig. 4 Fracture defect in the bend zone [16]

شکل ۴ عیب پارگی در قسمت خم [۱۶]

با توجه به زاویه شکل‌دهی مورد نیاز توان گرمای اعمالی متغیر است و با توجه به تغییر شکل باید توان زیاد اعمال شود.

جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژها [۲۰]

**Table 1.** Mechanical properties of alloys [20]

دما (°C)					واحد	پارامتر	آلیاژ
۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۵			
۱۵۶/۹۴	۱۵۴/۶۱	۱۴۵/۷۶	۱۳۲/۷۴	۱۲۵/۲	$W/m - K$	هدایت حرارتی	Al 5083
۲۷/۶	۲۷/۶	۲۷/۶	۲۷/۶	۲۷/۶	$\mu m/m - ^\circ C$	ضریب انبساط	
۴۴	۹۰	۲۱۰	۲۴۰	۲۸۰	$MPa$	تنش تسلیم	
۴۶	۹۲	۲۳۰	۳۳۱	۳۴۵	$MPa$	استحکام تسلیم	
۱/۰۶۰	۱/۰۱۰	۰/۹۷۰	۰/۹۲۵	۰/۹۲۳	$J/gr - K$	گرمای ویژه	
۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	-	نسبت پواسون	
۱۸۰/۳۶	۱۹۱/۲۱	۱۸۰/۴۲	۱۷۵/۱	۱۷۰	$W/m - K$	هدایت حرارتی	Al 6061
۲۷/۹	۲۷/۹	۲۷/۹	۲۷/۹	۲۷/۹	$\mu m/m - ^\circ C$	ضریب انبساط	
۲۸	۹۸	۲۵۰	۲۹۵	۳۰۷	$MPa$	تنش تسلیم	
۳۵	۱۰۰	۲۵۱	۳۱۰	۳۲۵	$MPa$	استحکام تسلیم	
۱/۰۳۰	۰/۹۹۹	۰/۹۶۵	۰/۹۲۲	۰/۹۱۲	$J/gr - K$	گرمای ویژه	
۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	-	نسبت پواسون	

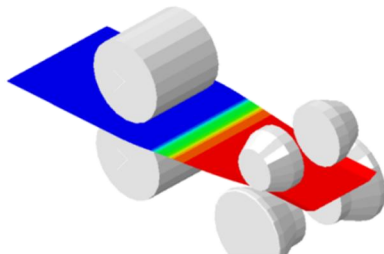


Fig. 8 Schematic of flexible roll forming process with the application of heat in the Abaqus software

شکل ۸ شمایی از فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر توأم با اعمال حرارت در نرم‌افزار آباکوس

### ۳- طراحی آزمایش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر عوامل تأثیرگذار فرایند شامل، ضخامت ورق، جنس ورق و درجه حرارت روی عیب برگشت‌فتری، طراحی آزمایش‌ها از نوع عاملی کامل انتخاب گردید. با این انتخاب، هم تأثیر پارامترها به تنهایی و هم تأثیر متقابل پارامترها بر روی هم در نظر گرفته شد. برای این طراحی از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. طراحی آزمایش بر اساس ۳ پارامتر جنس، ضخامت و دما صورت گرفته است که به‌ترتیب دارای ۲، ۲ و ۵ سطح می‌باشند. در جدول ۲ پارامترهای مؤثر و سطوح پارامترها آورده شده است.

جدول ۲ سطوح پارامترهای مؤثر در آزمایش

**Table 2** Levels of effective parameters in the experiment

سطوح پارامترها	پارامترهای مؤثر
Al 6061 – Al 5083	جنس
۱/۵ ؛ ۱	ضخامت (mm)
۴۰۰ ؛ ۳۰۰ ؛ ۲۰۰ ؛ ۱۰۰ ؛ ۲۵	دما (°C)

به دلیل وجود تقارن محوری، برای کاهش زمان تحلیل در این فرایند نیمی از ورق شبیه‌سازی شده است. قبل از ورود ورق به ایستگاه شکل‌دهی هر یک از بخش‌های ۲۰ گانه مذکور، گرم شده و دمای آن بخش به دمای مورد نظر تغییر یافته است. در شکل ۶ تصویر نیمی از ورق بعد از بخش‌بندی نمایش داده شده است.

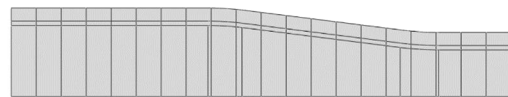


Fig. 6 Half of the sheet used in the simulation with 20 sections

شکل ۶ نیمی از ورق مورد استفاده در شبیه‌سازی با بخش‌های ۲۰ گانه

از آنجاکه شبیه‌سازی همراه با اعمال حرارت است، نوع شبکه‌بندی به‌صورت کوپل مکانیکی-حرارتی در نظر گرفته شد و المان پوسته مرتبه اول چهار گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته<sup>۱</sup> انتخاب گردید. برای افزایش دقت شبیه‌سازی در ناحیه خم تعداد المان‌ها افزایش داده شد تا نتایج دقیق‌تری به دست آید. در شکل ۷ نمایی از چیدمان ورق و غلتک‌ها نشان داده شده است. شکل ۸ نیز شمایی از فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر توأم با اعمال حرارت در نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

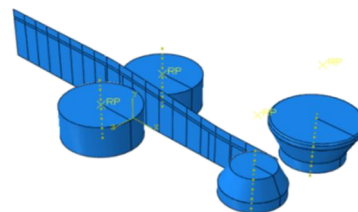


Fig. 7 A view of the arrangement of sheets and rollers in Abaqus software

شکل ۷ نمایی از چیدمان ورق و غلتک‌ها در نرم‌افزار آباکوس

<sup>۱</sup> S4R



#### ۴- آزمایش‌های تجربی

به‌منظور بررسی اثر دما روی عیب برگشت‌فتری، ورق باید تا رسیدن به دمای معین حرارت داده شود. برای سنجش دمای ورق از ترمومتر لیزری مطابق شکل ۹ استفاده شد. به علت اینکه ورق‌های مورد آزمایش از نوع آلومینیوم شفاف می‌باشد، ترمومتر لیزری قابلیت اندازه‌گیری ورق را به علت انعکاس نور ندارد؛ از همین رو سطح ورق مات گردید. برای مات کردن سطح ورق از پوشش کربن مشکی مات استفاده شد. با این روش انعکاس نور به حداقل می‌رسد و ترمومتر با دقت بالا دمای سطح را نمایش می‌دهد.



Fig. 9 Laser thermometer to calculate sheet temperature

شکل ۹ ترمومتر لیزری برای محاسبه دمای ورق

دستگاه شکل‌دهی غلتکی ساخته شده به‌صورت تک ایستگاهی می‌باشد. حرکت‌های لازم از طریق یک جفت الکتروموتور صورت می‌گیرد. به‌منظور هدایت دقیق ورق به داخل دستگاه از ریل‌های ساچمه‌ای و واگن استفاده شده است که عملکرد آن به این صورت است که پس از بسته شدن ورق بر روی ریل‌های ساچمه‌ای، ورق و ریل به سمت غلتک‌های شکل‌دهی حرکت کرده، غلتک‌های شکل‌دهی ورق را گرفته و با دوران با سرعت چرخشی مناسب فرایند شکل‌دهی صورت می‌پذیرد. در این مرحله باید مسیر خط خم ورق در دستگاه تعریف شود. بعد از وارد کردن مسیر حرکت غلتک‌ها، مشعل‌ها در ایستگاه قرار گرفته و اعمال گرما شروع می‌شود و دمای لحظه‌ای به‌وسیله ترمومتر اندازه‌گیری می‌گردد. برای جلوگیری از اتلاف گرما در دماهای بالاتر، خود غلتک‌ها و ورق نیز ابتدا پیش‌گرم می‌شوند. در شکل ۱۱ یک نمونه اندازه‌گیری دما برای ورق آلومینیومی نمایش داده شده است.



Fig. 11 Measuring sheet temperature with a laser thermometer

شکل ۱۱ اندازه‌گیری دمای ورق با دستگاه ترمومتر لیزری

به‌منظور محاسبه برگشت‌فتری ابتدا از سطح مقطع ورق با زاویه عمود، به‌وسیله دوربین ۶۴ مگاپیکسل عکس‌برداری انجام و سپس داخل نرم‌افزار گرافیکی زاویه خم محصول محاسبه شد. در شکل ۱۲ روش محاسبه زاویه خم توسط نرم‌افزار گرافیکی نشان داده شده است.

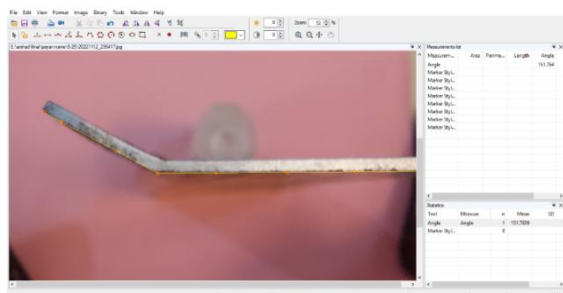


Fig. 12 The method of calculating the bending angle by graphic software

شکل ۱۲ روش محاسبه زاویه خم توسط نرم‌افزار گرافیکی

یکی از چالشی‌ترین مراحل، فرایند گرم کردن ورق و استفاده از ابزار مناسب گرم کردن ورق می‌باشد. برای این منظور از سر پیک شعله افکن همراه با گاز متان استفاده شد و با این دستگاه کم حجم و سبک می‌توان ورق را به دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رساند. در این مقاله برای انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر ساخته شده در دانشگاه شهید رجایی استفاده شده است. در شکل ۱۰ نمایی از دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به‌همراه سازوکار الحاقی حرارت‌دهی نشان داده شده است.



Fig. 10 flexible roll forming device with additional heating function

شکل ۱۰ دستگاه شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر به‌همراه سازوکار الحاقی حرارت‌دهی

### ۵- بحث و نتایج

در جدول ۴ مقادیر برگشت‌فتری محاسبه شده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی برای ضخامت و دماهای مختلف آورده شده است.

جدول ۴ مقادیر برگشت‌فتری محاسبه شده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی برای ضخامت و دماهای مختلف

**Table 4** Spring-back values calculated from experimental and simulation for different thicknesses and temperatures

جنس ورق	دما (°C)	ضخامت (mm)	تجربی (درجه)	شبیه‌سازی (درجه)	خطا (%)
Al 6061	۲۵	۱	۱/۲۵۹	۱/۳۸۸	۹/۲
Al 6061	۱۰۰	۱	۱/۲۵۶	۱/۳۵۵	۷/۳
Al 6061	۲۰۰	۱	۱/۰۸۶	۱/۰۹۰	۰/۳۶
Al 6061	۳۰۰	۱	۰/۸۷۷	۰/۸۷۶	۰/۱۲
Al 6061	۴۰۰	۱	۰/۸۴۳	۰/۷۹۱	۶
Al 6061	۲۵	۱/۵	۱/۰۶۹	۱/۱۵۵	۷
Al 6061	۱۰۰	۱/۵	۰/۹۸۴	۱/۰۱۵	۳
Al 6061	۲۰۰	۱/۵	۰/۷۶۲	۰/۸۵۵	۱۰
Al 6061	۳۰۰	۱/۵	۰/۵۲۶	۰/۵۱۳	۱
Al 6061	۴۰۰	۱/۵	۰/۵۲۰	۰/۴۹۹	۴
Al 5083	۲۵	۱/۵	۰/۹۸۸	۱/۰۲۶	۳
Al 5083	۱۰۰	۱/۵	۰/۸۴۷	۰/۹۴۱	۹
Al 5083	۲۰۰	۱/۵	۰/۶۹۶	۰/۷۵۶	۸
Al 5083	۳۰۰	۱/۵	۰/۳۸۶	۰/۴۲۴	۸
Al 5083	۴۰۰	۱/۵	۰/۲۹۹	۰/۳۱۵	۵

مطابق شکل ۱۳، برای ضخامت ۱ میلی‌متر همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش دما کاهش برگشت‌فتری مشاهده شده است و نتایج مطابق پیش‌بینی می‌باشد. در دمای ۳۰۰ درجه بیشترین شیب در کاهش برگشت‌فتری مشاهده شده است که علت این موضوع، کاهش شدید استحکام تسلیم در دمای ۳۰۰ درجه می‌باشد. در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر در دمای ۴۰۰ درجه برگشت‌فتری بیشتر شد اما در ضخامت ۱ میلی‌متر با شیب بسیار کمی برگشت‌فتری باز هم کاهش است؛ این موضوع نشان می‌دهد که در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر احتمال خطای آزمایش وجود دارد.

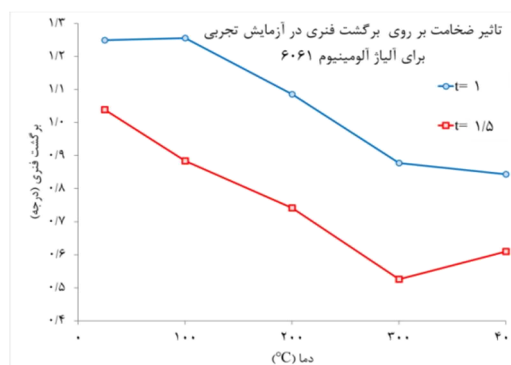
همچنین مطابق شکل ۱۳، برای منحنی مربوط به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر می‌توان گفت با افزایش دما برگشت‌فتری کاهش پیدا کرده است؛ این کاهش در دمای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه با شیب تقریباً ثابتی است اما در دمای ۳۰۰ درجه این شیب بیشتر شده و برگشت‌فتری بهبود می‌یابد. دلیل این تغییر رفتار را بدین‌صورت می‌توان توجیه کرد که برگشت‌فتری وابسته به استحکام تسلیم می‌باشد؛ با افزایش دما استحکام تسلیم فلز کاهش می‌یابد و در آلومینیوم ۶۰۶۱ در دمای ۳۰۰ درجه به یکباره کاهش شدیدتری اتفاق افتاده و به همین دلیل برگشت‌فتری کاهش یافته است اما در دمای ۴۰۰ درجه مقدار برگشت‌فتری افزایش پیدا کرده است. این مسئله را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که استحکام تسلیم فلز آلومینیوم در دمای ۴۰۰ درجه به نزدیکی ۲۵ مگا پاسکال می‌رسد و ورق آلومینیوم بسیار نرم می‌شود و ممکن است همین باعث رخداد خطا شده و دلیل افزایش برگشت‌فتری باشد.

موضوع دیگری که در نمودار شکل ۱۳ مورد توجه قرار می‌گیرد اختلاف نمودارهای مربوط به ضخامت‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر است. در ضخامت ۱ میلی‌متر در دماهای مختلف برگشت‌فتری بیشتر از ۱/۵ میلی‌متر است؛ علت این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان نمود که با افزایش ضخامت ورق کرنش‌های پلاستیک افزایش پیدا کرده و منطقه الاستیک نمونه‌ها کاهش می‌یابد به‌عبارت‌دیگر با افزایش ضخامت ورق، سطح تنش پسماند افزایش یافته و در نتیجه مقادیر کرنش‌های پلاستیک در نمونه‌ها بیشتر شده است که موجب کاهش برگشت‌فتری می‌شود؛ پس با تغییر ضخامت در منطقه الاستیک و پلاستیک، تغییر ایجاد شده و باعث تغییر برگشت‌فتری می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، رفتار نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف مشابه هم بوده و با افزایش دما کاهش برگشت‌فتری رخ داده است. نرم‌شدگی بیش‌ازحد ورق، عملیات شکل‌دهی را از کنترل خارج کرده است.

### ۵-۱- بررسی تأثیر ضخامت

#### ۵-۱-۱- نتایج تجربی

در شکل ۱۳ نمودار اثر دما روی برگشت‌فتری ورق از آلیاژ ۶۰۶۱ با ضخامت‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر در آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است.



**Fig. 13** Effect of temperature on spring-back of 6061 alloy sheet with thickness of 1 and 1.5 mm in experimental tests

شکل ۱۳ اثر دما روی برگشت‌فتری ورق از آلیاژ ۶۰۶۱ با ضخامت ۱ و ۱/۵ میلی‌متر در آزمایش‌های تجربی

۱-۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

در شکل ۱۴ نمودار تأثیر ضخامت‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر آلیاژ ۶۰۶۱ در شبیه‌سازی نمایش داده شده است.

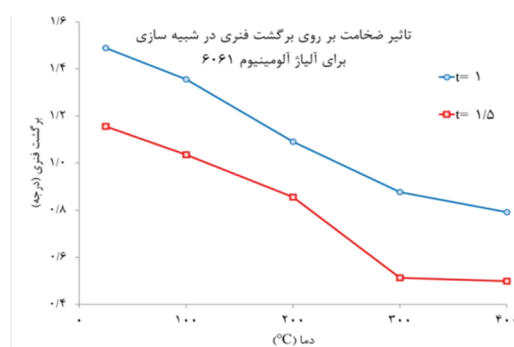


Fig. 14 Effect of thickness on spring-back in simulation of 6061 alloy  
شکل ۱۴ تأثیر ضخامت بر روی برگشت فنی در شبیه‌سازی آلیاژ ۶۰۶۱

همان‌گونه که در نمودار شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد مانند نمودار شکل ۱۳، برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ نیز برگشت فنی با افزایش دما کاهش یافته است. در این آلیاژ نیز برای برگشت فنی رفتار مشابه در مقابل دما مشاهده شده است. بر خلاف منحنی شکل ۱۳، در نمودار شکل ۱۵ با افزایش دما کاهش برگشت فنی به وضوح دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار تا دمای ۲۰۰ درجه با شیب مشخص رو به پایین حرکت کرده است. علت این مسئله را می‌توان به کاهش استحکام تسلیم فلز در دماهای پایین مرتبط دانست؛ زیرا با افزایش استحکام تسلیم، مدول الاستیک افزایش می‌یابد و ورق تمایل بیشتری به برگشت بعد از عبور از ناحیه فشار را دارد. زمانی که منحنی به دمای ۳۰۰ درجه رسیده است، شیب نمودار بیشتر شده و به زیر ۰/۴ درجه می‌رسد. در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بازهم کاهش برگشت فنی اتفاق افتاده است. برخلاف نمودار آلیاژ ۶۰۶۱ در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر برگشت فنی کاهش پیدا کرد.

همچنین مشاهده می‌شود که نمودار آلیاژ ۶۰۶۱ بالاتر از آلیاژ ۵۰۸۳ است و برگشت فنی در دماهای مختلف در آلیاژ ۶۰۶۱ بیشتر است. از آنجاکه استحکام تسلیم آلیاژ ۶۰۶۱ بیشتر از آلیاژ ۵۰۸۳ است، برگشت فنی در آلیاژ ۶۰۶۱ بسیار بیشتر از آلیاژ ۵۰۸۳ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، میزان برگشت فنی به شدت کاهش پیدا کرده است. استحکام تسلیم آلیاژ ۶۰۶۱ نسبت به آلیاژ ۵۰۸۳ در دماهای مختلف بیشتر است اما در دمای ۴۰۰ درجه استحکام تسلیم آلیاژ ۶۰۶۱ به حدود ۲۵ مگاپاسکال و در آلیاژ ۵۰۸۳ به ۵۰ مگاپاسکال می‌رسد. مشاهده شد که به علت کاهش بسیار زیاد استحکام تسلیم و نرم شدگی بیش‌ازحد آلیاژ ۶۰۶۱ برگشت فنی این آلیاژ بیشتر شده و شیب برگشت فنی در آلیاژ ۵۰۸۳ کاهش پیدا کرده است. با افزایش دما تنش سیلان مواد کاهش می‌یابد و شکل‌دهی بهتر انجام می‌شود.

۲-۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

در شکل ۱۶ نمودار برگشت فنی در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر برای آلیاژهای ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ در فرایند شبیه‌سازی نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود در عملیات شبیه‌سازی رفتار قابل پیش‌بینی مشاهده شده است. در ابتدا مهم‌ترین موضوع مشاهده شده، بالا بودن نمودار آلیاژ ۶۰۶۱ است که نشان‌دهنده برگشت فنی بیشتر این فلز است. برای توجیه این موضوع می‌توان به استحکام تسلیم و محدوده الاستیک فلز استناد کرد. استحکام تسلیم آلیاژ ۶۰۶۱ بالاتر از

با بررسی نمودار شکل ۱۴ مانند نمودار شکل ۱۳ اختلاف بین ضخامت ۱ و ۱/۵ کاملاً دیده می‌شود که در پاراگراف قبلی به صورت کامل بیان شد. برای هر دو ضخامت، با افزایش دما برگشت فنی کاهش پیدا کرده است اما این کاهش در دمای ۳۰۰ درجه به اوج خود می‌رسد ولی بازهم در دمای ۴۰۰ درجه رفتار ورق کمی تفاوت دارد و شیب نمودار از ۳۰۰ تا ۴۰۰ به شدت کاهش پیدا کرده و تغییر زیادی در برگشت فنی مشاهده نشده است. با توضیح‌های فوق و با توجه به نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی می‌توان بیان کرد که مناسب‌ترین دما، دمای ۳۰۰ درجه است که برگشت فنی به کمترین حالت خود رسیده است.

۲-۵- بررسی تأثیر جنس ورق

۱-۲-۵- نتایج تجربی

شکل ۱۵ نمودار مقایسه برگشت فنی آزمایش‌های تجربی را برای دو آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ و در ضخامت ورق ۱/۵ میلی‌متر، نشان می‌دهد.

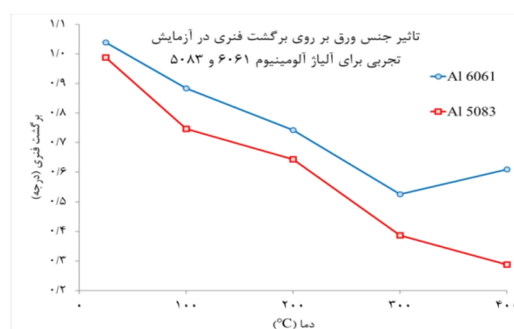


Fig. 15 Comparison of spring-back of experimental tests for two aluminum alloys in sheet thickness of 1.5 mm

شکل ۱۵ نمودار مقایسه برگشت فنی آزمایشات تجربی برای دو آلیاژ آلومینیوم در ضخامت ورق ۱/۵ میلی‌متر

برگشت‌فتری را نشان می‌دهند و بهترین نتیجه در این نمودار مشاهده می‌شود. نکته قابل‌تأمل دیگر کاهش چشمگیر شیب برگشت‌فتری در دمای ۴۰۰ درجه می‌باشد که می‌توان این موضوع را به نرم شدن بیش‌ازحد ورق نسبت داد.

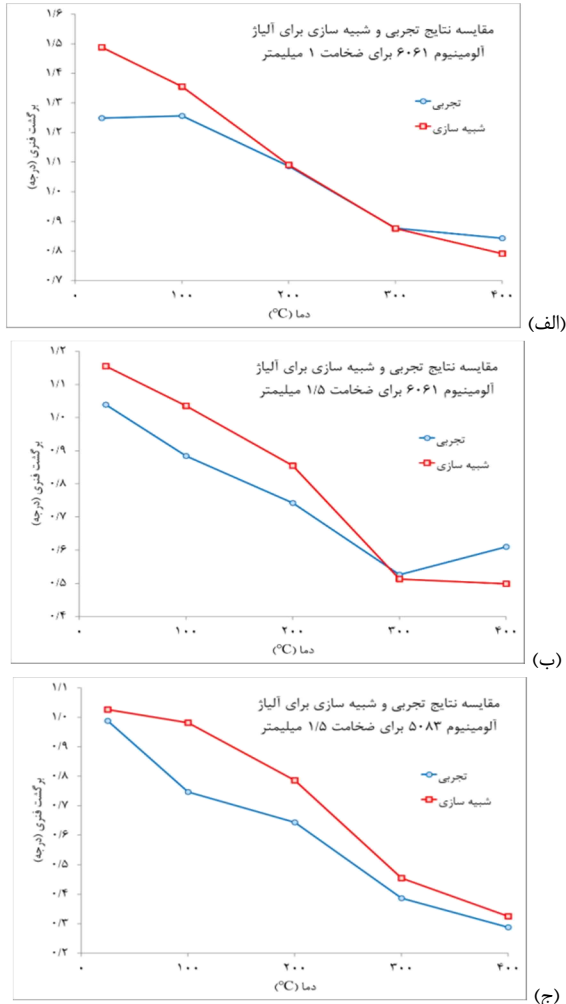


Fig. 17 Comparison of experimental and numerical results for a) 1 mm thickness of 6061 alloy b) 1.5 mm thickness of 6061 alloy c) 1.5 mm thickness of 5083 alloy

شکل ۱۷ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای الف) ضخامت ۱ میلی‌متر آلیاژ ۶۰۶۱ ب) ضخامت ۱/۵ میلی‌متر آلیاژ ۶۰۶۱ ج) ضخامت ۱/۵ میلی‌متر آلیاژ ۵۰۸۳

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر دما بر روی عیب برگشت‌فتری فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر در پنج دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی گردید. دماهای انتخابی در این مقاله بر مبنای دمای محیط تا قبل از دمای تبلور مجدد آلیاژ آلومینیوم انتخاب شده است. بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی، مطابقت خوبی بین نتایج را نشان دادند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

آلیاژ ۵۰۸۳ است و به همین علت برگشت‌فتری در آلیاژ ۶۰۶۱ بیشتر مشاهده شده است. با افزایش دما برگشت‌فتری کاهش می‌یابد. همان‌طور که دیده می‌شود در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه شیب نمودار افزایش می‌یابد و کاهش برگشت‌فتری در این دما چشم‌گیر است؛ علت این پدیده کاهش بسیار زیاد استحکام تسلیم فلز در دمای ۳۰۰ درجه است که باعث کاهش برگشت‌فتری می‌شود. در دمای ۴۰۰ درجه شیب نمودارها کاهشی می‌شود و دلیل این موضوع در بخش قبلی توضیح داده شده است. برای آلیاژ ۶۰۶۱ در دمای ۴۰۰ درجه شیب تقریباً صفر بوده و این به علت کاهش شدید استحکام تسلیم و نرم شدن زیاد ورق است.

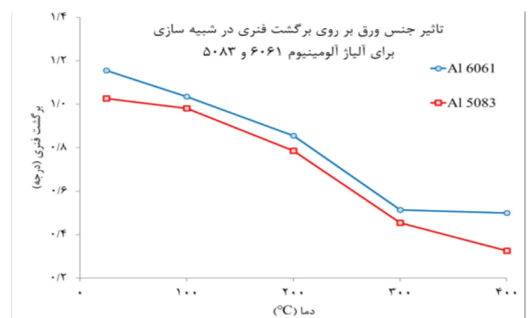


Fig. 16 Effect of sheet material on spring-back in simulation for aluminum alloy 5083 and 6061

شکل ۱۶ تأثیر جنس ورق بر روی برگشت‌فتری در شبیه‌سازی برای آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و ۶۰۶۱

### ۵-۳- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

در ادامه به مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. در شکل ۱۷ (الف-ج) مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی آلیاژ ۶۰۶۱ برای ضخامت‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر و همچنین آلیاژ ۵۰۸۳ برای ضخامت ۱/۵ میلی‌متر نشان داده شده است.

آنچه که در نمودارهای شکل ۱۷ مشترک هستند، روند نزولی همه منحنی‌ها در دماهای مختلف و تطابق خوب منحنی تجربی و شبیه‌سازی است که این موضوع نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. در شکل ۱۷-الف به جز دمای ۲۵ درجه که تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد، در دمای ۲۰۰ و ۳۰۰ درجه تقریباً نمودارها بر روی هم منطبق هستند. در شکل ۱۷-ب نیز به جز دمای ۴۰۰ درجه که در آزمایش تجربی برگشت‌فتری بیشتر شده است تطابق خوبی وجود دارد و در دمای ۳۰۰ درجه مقدار مقادیر برگشت‌فتری تجربی و شبیه‌سازی بر روی هم منطبق شده است. همچنین در شکل ۱۷-ج هر دو منحنی با شیب مشخص و بدون هیچ خطایی کاهش



- ۱- برگشت‌فتری در ضخامت ۱ میلی‌متر با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ۳۳/۵ درصد نسبت به دمای محیط کاهش پیدا کرد. در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر ۴۱/۲ درصد کاهش برگشت‌فتری نسبت به دمای محیط مشاهده گردید. می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دمای ورق، برگشت‌فتری در دو ضخامت کاهش پیدا کرد؛ علت این کاهش را می‌توان چنین توجیه کرد که با افزایش دما میزان استحکام تسلیم فلز کاهش می‌یابد و با کاهش استحکام تسلیم فلزات میزان برگشت‌فتری کاهش پیدا می‌کند.
- ۲- در ضخامت ۱ میلی‌متر و در دماهای مختلف، برگشت‌فتری بیشتر از ۱/۵ میلی‌متر است؛ به عبارتی نمودار برگشت‌فتری در پنج دما برای ضخامت ۱ میلی‌متر بالاتر از نمودار برگشت‌فتری در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر بوده است؛ علت این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان نمود که با افزایش ضخامت ورق کرنش‌های پلاستیک افزایش و منطقه الاستیک نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است که کاهش برگشت‌فتری را در پی دارد.
- ۳- برگشت‌فتری در فرایند شکل‌دهی غلتکی با گرمایش موضعی به استحکام ماده وابسته است. با افزایش استحکام ماده، برگشت‌فتری نیز افزایش می‌یابد. این خاصیت در دماهای مختلف نیز حاکم است.
- ۴- برای تمام نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ درجه شیب نمودار کاهش پیدا کرده است؛ علت این موضوع کاهش استحکام تسلیم ورق‌ها در دمای ۴۰۰ درجه و نرم شدن زیاد ورق در این دما است.
- ۵- به‌طور کلی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر فارغ از جنس و ضخامت ورق، با افزایش دما برگشت‌فتری کاهش پیدا کرد؛ به‌عبارت‌دیگر با اعمال گرمای موضعی عیب برگشت‌فتری بهبود پیدا کرد.
- ۷- مراجع**
- [1] D. Kim, M. Cha, Y.S. Kang, Development of the bus frame by flexible roll forming, *Procedia Engineering*, Vol. 183, pp. 11-16, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.004>
- [2] Y. Dadgar Asl, M. Tajdari, H. Moslemi Naeini, B. Davoodi, R. Azizi Tafti, V. Panahizadeh Rahimloo, Prediction of required torque in cold roll forming process of a channel sections using artificial neural networks, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 7, pp. 209-214, 2015. (in Persian)
- [3] B. Davoodi, H. Moslemi Naeini, Y. Dadgar Asl, R. Azizi T, M. M. Kasaei, V. Panahizadeh, Numerical and experimental investigation of roll forces and torques in cold roll forming of a channel section, *In: International Conference on Advances Materials and Processing Technologies*, pp. 581-586, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3552510>
- [4] V. Panahizadeh, Y. Dadgar Asl, F. Saeedi, S. Afshin, Numerical and experimental analysis of spring-back defect in flexible roll forming process using anisotropic yield criteria, *Journal of Mechanics of Structures and Fluids*, Vol. 11, No. 4, pp. 93-105, 2021. <https://doi.org/10.22044/JFSFM.2021.10554.3343> (in Persian)
- [5] J.C. Park, D.Y. Yang, M. Cha, D. Kim, J.B. Nam, Investigation of a new incremental counter forming in flexible roll forming to manufacture accurate profiles with variable cross-sections, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 86, pp. 68-80, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.07.001>
- [6] Y.Y. Woo, S.W. Han, I.Y. Oh, Y.H. Moon, Shape defects in the flexible roll forming of automotive parts, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 227-23, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0022-y>
- [7] V. Panahizadeh, Theoretical, numerical and experimental investigation of spring back and Prediction of fracture on cold roll forming of channel section. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran. 2014. (in Persian)
- [8] P. Groche, P. Beiter, M. Henkelmann, Prediction and inline compensation of spring back in roll forming of high and ultra-high strength steel, *Production Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 401-407, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0131-3>
- [9] X. Han, S. ZHANG, Z. Rong, D. LU, Spring back characteristics of AZ31 magnesium Alloy as-extruded profile in warm tension-rotation bending process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 416-421, 2012. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61740-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61740-3)
- [10] N. Zhani, M.- R Bagheri, A. Rahbar Ranji, Study on influence of the temperature and thickness of plate on springback phenomena in deep drawing forming of titanium blank, *Journal of marine engineering*, Vol. 7, No. 13, pp. 39-48, 2011. (in Persian)
- [11] S.H. Kim, M. Koc, Numerical investigations on spring back characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, No. 1-3, pp. 370-383, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.059>
- [12] J. Yanagimoto, K. Oyamada, Mechanism of springback free bending of high strength steel sheets under warm forming conditions, *Journal Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 256-262, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.099>
- [13] J. Larrañaga, I. Galdos, P. Groche, Geometric Accuracy improvement in flexible roll forming lines, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1315, No. 1, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3552505>
- [14] Y. Zhang, D. Kim, H. Guyen, D. Jung, A parametric study on cold roll forming with partial thermal. *International Conference on Sustainable Energy*, 2016.
- [15] Y. Zhang, D.W. Jung, Study of roll forming bending in different temperature, *International Journal of Materials Science and Applications*, Vol. 5, No. 3, pp

- Dadgar Asl, B. Abbaszadeh, Investigation of parameters affecting deformation length in flexible roll forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 47-56, 2021. (in Persian)
- [19] Y. Dadgar Asl, Y.Y. Woo, Y. Kim, Y.H. Moon, Non-sorting multi-objective optimization of flexible roll forming using artificial neural networks, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, No.6, pp. 2875–2888, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05209-w>
- [20] P. T. Summers, Y. Chen, C. M. Rippe, B. Allen, A. P. Mouritz, S. W. Case, B. Y. Lattimer, Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after fires, *Fire Science Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1-36, 2015. <https://doi.org/10.1186/s40038-015-0007-5>
- 129-135, 2016. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20160503.13>
- [16] M. Lindgren, U. Bexell, L. Wikström, Roll forming of partially heated cold rolled stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 7, pp 3117, 3124, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.041>
- [17] Y. Dadgar Asl, M.M. Sheikhi, A. Pourkamali Anaraki, V. Panahizadeh Rahimloo, M. Hosseinpour Gollo, Experimental and numerical analysis of fracture on flexible roll forming process of channel section in aluminum 6061-T6 sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp 329-338, 2016. (in Persian)
- [18] H. badparva, H. Moslemi Naeini, M.M. Kasaei, Y.