

تحلیل، بررسی و شبیه‌سازی بازگشت فنری در فرایند خمکاری غلتکی در تولید پوسته منحنی با شعاع متغیر

علیرضا داودی نیک^۱، سیروس ریزه‌وندی^۲، علی نگهبان برون^۳

۱ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، davoudinik@ssau.ac.ir

۲ کارشناس ارشد مهندسی مواد (شکل‌دهی فلزات)، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳ عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

چکیده

در این پژوهش میزان بازگشت فنری بعد از خمکاری سه‌غلتکه و اثر عوامل مختلف از جمله اصطکاک، موقعیت مکانی غلتک جانبی، سرعت چرخش غلتک و درصد کاهش ضخامت ورق در اثر نورد پیش از خمکاری بر نسبت بازگشت فنری ورق آلیاژی آلومینیم بررسی شده است. بدین‌منظور شبیه‌سازی مدل اجزای محدود و شکل‌دهی غلتکی توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. غلتک‌ها به‌صورت جسم صلب و ورق به‌صورت یک ماده کشسان - مومسان همسانگرد با خاصیت پلاستیک خطی مدلسازی شده و ضریب اصطکاک بین ورق و تمامی سطوح که با ورق در تماس‌اند برابر فرض شده است. به‌منظور صحت‌سنجی، مقایسه‌ای بین داده‌های شبیه‌سازی با نتایج تجربی انجام شده است. برای به‌دست آوردن معادله‌ای جهت پیش‌بینی دقیق مقادیر شعاع خمکاری پس از بازگشت فنری با استفاده از نرم‌افزار اس. پی. اس. به تحلیل رگرسیون مقادیر شعاع پس از بازگشت فنری که از شبیه‌سازی اجزای محدود به‌دست آمده‌اند، پرداخته شده است. سپس اثر عوامل مؤثر بر شعاع خم و میزان بازگشت فنری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با روش ارائه‌شده در این مقاله می‌توان پیش‌بینی دقیقی از اثر تغییرات پارامترهای خمکاری غلتکی بر نسبت بازگشت فنری داشت. در ادامه از این تکنیک برای تولید پوسته‌هایی با دو انحنای متفاوت استفاده شده است؛ زیرا خم‌هایی با انحنای متفاوت با جابه‌جایی موقعیت مکانی غلتک جانبی قابل تولید بوده و با دقت ابعادی بالاتری می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای خمکاری درون قالب یا شکل‌دهی کشایی ورق در تولید پوسته بال و بدنه هواپیما باشد.

واژگان کلیدی

خمکاری غلتکی، بازگشت فنری، پوسته منحنی، شعاع متغیر، رگرسیون خطی

۱. مقدمه

از جمله عوامل بسیار حساس و مؤثر بر دقت ابعادی قطعات نهایی در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی، پدیده فنریت و بازگشت فنری است [۱]. این پدیده بیانگر تغییر شکل ورق پس از باربرداری و رهاسدن ورق از نیروی پرس است. پدیده بازگشت فنر، دستیابی به دقت ابعادی بالا را ناممکن می‌سازد و سبب ایجاد مشکلات زیادی در مونتاژ قطعات تولیدی می‌شود [۲]. همچنین در صورت عدم تخمین صحیح آن، پوسته تحت شرایط پیش‌تینده مونتاژ شده و سبب بروز آسیب پیش از عمر تخمینی خواهد شد. بنابراین در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی پیش‌بینی میزان صحیح از بازگشت فنری برای تولید قطعات با دقت ابعادی بالا ضروری است.

بررسی‌های انجام‌شده در صنایع گوناگون، از جمله هوافضا و صنعت هواپیمایی، نشان می‌دهد که سالانه ضررهای هنگفتی به‌دلیل پیامدهای کیفی بازگشت فنری ایجاد می‌شود [۲]. با اتخاذ روش‌هایی در طراحی می‌توان این پدیده را جبران نمود و تحت کنترل درآورد. بنا بر نوع ساختار و خواص مکانیکی، میزان تغییر شکل حاصل از این پدیده برای آلیاژهای آلومینیومی و فولادی با استحکام بالا نسبت به سایر آلیاژها بیشتر است [۳]. با دستیابی به تکنیک صحیح شبیه‌سازی عددی فرایند خمکاری غلطکی، علاوه بر امکان بررسی کیفی و کمی پارامترهای مختلف مؤثر در فرایند و نیز تعیین مقادیر بهینه، از تحمیل هزینه‌های ناشی از طراحی نامناسب جلوگیری خواهد شد.

تحقیقاتی که تاکنون روی پدیده بازگشت فنری پوسته‌ها در فرایند خمکاری صورت گرفته است با استفاده از روش‌های تجربی و روش‌های تحلیلی بوده است. اما چون انجام روش‌های تجربی علاوه بر تحمیل هزینه، عمدتاً با سعی و خطا همراه است [۴] و روش‌های تحلیلی به‌خصوص در مواردی که شعاع شکل‌دهی پوسته متغیر است، با پیچیدگی محدودکننده مواجه می‌شود [۵-۸]. ارائه یک مدل نرم‌افزاری در قالب شبیه‌سازی عددی فرایند و بررسی میزان بازگشت فنری بعد از تغییر فرم خمکاری غلطکی برای شعاع متغیر یا ثابت، و نیز تأثیر نیروی لازم برای خمکاری غلطکی در میزان بازگشت فنری مبحثی است که با وجود ضرورت‌های ذکر شده تاکنون صورت نگرفته است [۹].

گاندی و همکاران یک مدل ریاضی را روی بار اعمالی به غلتک فوقانی در پیش‌خمش در فرایند خمکاری سه‌غلتکه

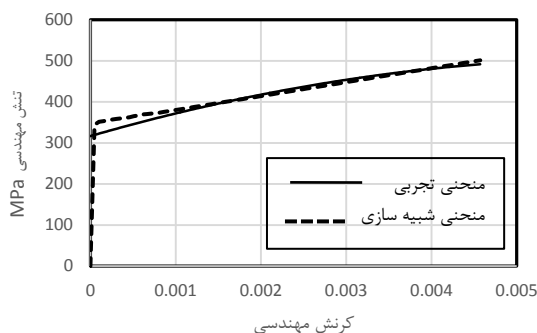
گسترش دادند که می‌تواند برای ارزیابی ظرفیت و تجزیه و تحلیل خمکاری غلتکی استفاده شود [۴، ۱۰-۱۱]. پس از بررسی اثر پارامترهای مختلف فرایند بر تغییر فرم، ژانگ یک مدل ریاضی را برای پیش‌فرم ارائه داد که منجر به بررسی تأثیر شعاع غلتک پایینی، انحنای نسبی و طول کمان بر بازگشت فنری و همچنین بررسی رابطه بین نسبت بازگشت فنری و زاویه بین خمکاری لبه‌ای شده است [۱۰]. همچنین با در نظر گرفتن حرکت نقطه تماس بین غلتک پایین و ورق، یک مدل عددی و تجربی برای تخمین موقعیت غلتک بالایی به‌صورت تابعی از شعاع دلخواه در خمکاری سه‌غلتکه لوله‌ها ارائه شده است [۴]. فو و همکاران یک مدل عددی برای خمکاری سه‌غلتکه ورق فلزی به‌وسیله شبیه‌سازی و آزمایش تجربی ارائه کردند. فنگ و همکاران با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی برای مطالعه دینامیک فرایند خمکاری غلتکی ورق که بر اساس روش المان محدود ارائه شده است، تحقیقات را در مورد خمکاری غلتکی تکمیل کرده‌اند [۱۲]. با اینحال تعداد کمی از محققان به‌طور مستقیم روی کیفیت خمکاری ورق‌های فلزی و دقت ابعادی آن تمرکز داشته‌اند. علاوه بر این، با توسعه سریع فناوری صنعتی، هم باید ظرفیت خمکاری دستگاه خمکاری بالاتر رود و هم نیاز است دقت ابعادی خم نیز بیشتر شود.

در این پژوهش سعی شده است با کنترل پارامترهای فرایند خمکاری سه‌غلتکه دقت ابعادی خم به‌دست آمده را افزایش داده و بازگشت فنری را به حداقل برسانیم تا خم مورد نظر با بیشترین دقت ابعادی تولید شود. در ادامه به بررسی امکان تولید خم‌های دارای شعاع متغیر و یا مقاطع دوکی‌شکل با استفاده از فرایند خمکاری غلتکی پرداخته خواهد شد.

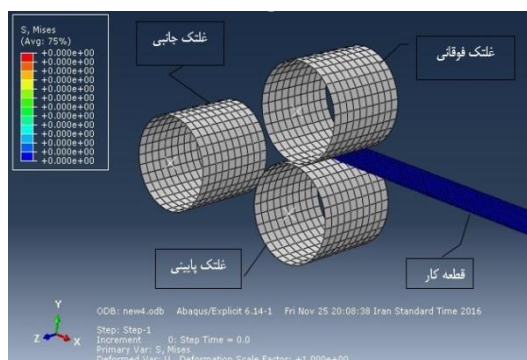
۲. مواد و روش تحقیق

اساس، محاسبه میزان بازگشت فنری بعد از خمکاری سه‌غلتکه و بررسی اثر عوامل مختلف از جمله اصطکاک، موقعیت مکانی غلتک جانبی و سرعت چرخش غلتک بر نسبت بازگشت فنری می‌باشد. به‌منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی فرایند، نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی در یکی از منابع مقایسه و صحت‌گذاری می‌شود. در این پژوهش از ورق آلومینیم (AI ۲۰۲۴)، که خواص مکانیکی و فیزیکی آن در جدول ۱ آمده است، به‌عنوان

پلاستیک خطی مدلسازی شده و ضریب اصطکاک بین ورق و تمامی سطوح که با ورق در تماس هستند برابر فرض شده‌اند [۵]. در این پژوهش برای انتخاب روش مناسب برای انجام شبیه‌سازی مطابق جدول ۲ چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. منحنی تنش - کرنش مهندسی ماده اولیه



شکل ۲. نمای مقابل مدل اجزای محدود دستگاه خمکاری سه‌غلتکه

جدول ۲. حالت‌های مختلف تحلیل مسئله

حالت	۱	۲	۳	۴
خمکاری غلتکی	Implicit	Implicit	Explicit	Explicit
بازگشت فنری	Explicit	Implicit	Explicit	Implicit

در شکل ۳ مقادیر R' (شعاع بعد از بازگشت فنری) که از آزمایش تجربی در حالتی که شعاع غلتک‌ها، ضخامت ورق و فاصله غلتک جانبی به ترتیب برابر با ۵، ۰/۲ و ۱۱ سانتی‌متر باشد، به دست آمده [۱۴] و با مقادیر حاصل از حالت‌های مختلف شبیه‌سازی اجزای محدود، که در جدول ۲ است، مقایسه شده است. از این داده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از حالت ۳ برای شبیه‌سازی هر دو فرایند بازگشت فنری و خمکاری سبب افزایش چشمگیر صحت پیش‌بینی R' می‌شود. استفاده از روش Explicit (حل صریح) برای شبیه‌سازی شکل‌دهی غلتکی علاوه بر اینکه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر صحت این پیش‌بینی‌ها

ماده اولیه استفاده می‌شود. ضخامت ورق اولیه ۳ میلی‌متر است که تحت عملیات نورد خمکاری در شرایط مختلف قرار می‌گیرد.

جدول ۱. خواص مکانیکی ماده اولیه

مقادیر	خواص ماده
۲/۷۱	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۶۸	مدول الاستیک (گیگاپاسکال)
۰/۳۳	ضریب پواسون
۳۴۴/۷۴	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۴۸۲	تنش کششی ماکزیمم (مگاپاسکال)
۰/۱۸	کرنش شکست

شکل ۱ منحنی تنش - کرنش مهندسی نمونه را مطابق استاندارد ASTM E8M برای ماده اولیه در حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماده اولیه‌ای که در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است، خاصیت الاستیک - پلاستیک خطی دارد. رابطه تنش متوسط با نرخ کرنش متوسط به صورت ۱ به نرم‌افزار معرفی شده است [۱۳].

$$\bar{\sigma} = c\dot{\epsilon}^M \rightarrow \bar{\sigma} = 238\dot{\epsilon}^{0.014} \quad (1)$$

به طوری که در آن $\bar{\sigma}$ تنش تسلیم متوسط برحسب مگاپاسکال و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش متوسط (s^{-1}) می‌باشد.

۲-۱. مدلسازی اجزای محدود

شبیه‌سازی مدل اجزای محدود و شکل‌دهی غلتکی توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، اجزای فرایند عبارت‌اند از: قطعه‌کار، غلتک بالایی، غلتک پایینی و غلتک جانبی؛ که دو غلتک بالا و پایین در راستای عمودی هم‌راستا و تمامی غلتک‌ها شعاع یکسانی دارند. در شبیه‌سازی غلتک‌ها با اینکه استفاده از حالت Analytical rigid هزینه زمانی کمتری دارد، اما چون دقت بیشتر در محاسبات مد نظر واقع شده است، غلتک‌ها به صورت Discret rigid و ورق آلومینیومی به صورت Deformable solid شبیه‌سازی شد. موقعیت غلتک جانبی در راستای ۳۰ درجه نسبت به خط افقی قابل تغییر است که سبب ایجاد خم‌هایی با انحنای متفاوت می‌شود.

۲-۲. تعریف نوع مسئله

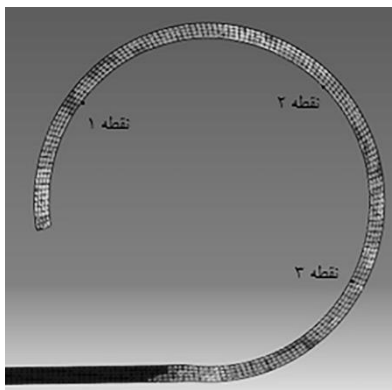
برای انجام این شبیه‌سازی غلتک‌ها به صورت جسم صلب و ورق به صورت یک ماده کشسان - مومسان همسانگرد با خاصیت

می‌گذارد، زمان و هزینه محاسبات را نیز به شدت کاهش می‌دهد. لذا بهترین حالت برای شبیه‌سازی شکل‌دهی غلتکی سه‌غلتکه، و نیز برای پیش‌بینی مقدار بازگشت فنری استفاده از حل Explicit است. جهت تعیین شعاع ورق مطابق با شکل ۴ پس از بازگشت فنری از ۳ نقطه روی قطعه کار استفاده کرده و شعاع دایره گذرنده بر این سه نقطه اندازه‌گیری می‌شود.

۳. نتایج و بحث

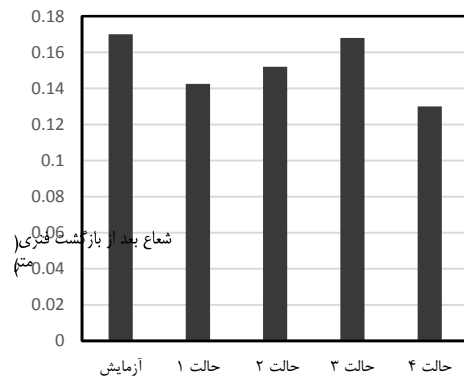
به‌منظور صحت‌سنجی، مقایسه‌ای بین داده‌های شبیه‌سازی با نتایج تجربی صورت گرفت [۱۴]. این مقایسه برای حالت‌هایی که فاصله بین غلتک فوقانی و غلتک جانبی مختلف بوده و ضخامت ورق برابر ۱، ۱/۵، ۲، و ۲/۵ میلی‌متر و نیز ضریب اصطکاک بین

سطوح تماس ثابت و برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده باشد، صورت گرفته است. شکل ۵ تغییرات شعاع خمکاری را بر حسب ضخامت ورق برای موقعیت غلتک جانبی در هر دو حالت شبیه‌سازی و نتایج تجربی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی به‌طور پیوسته با افزایش فاصله غلتک جانبی از غلتک بالایی شعاع خم افزایش می‌یابد. با محاسبه ماکزیمم مقدار خطای بین مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای ضخامت ملاحظه می‌شود که این مقادیر کمتر از ۵ درصد است. به‌طوری‌که برای ضخامت‌های ۱، ۱/۵، ۲، و ۲/۵ میلی‌متر به ترتیب ۲، ۲/۷، ۳/۶ و ۴/۵ درصد است که مقادیر قابل قبولی است و می‌توان نتیجه گرفت که این مدل شبیه‌سازی برای فرایند خمکاری غلتکی نتایج معتبری ارائه می‌دهد.



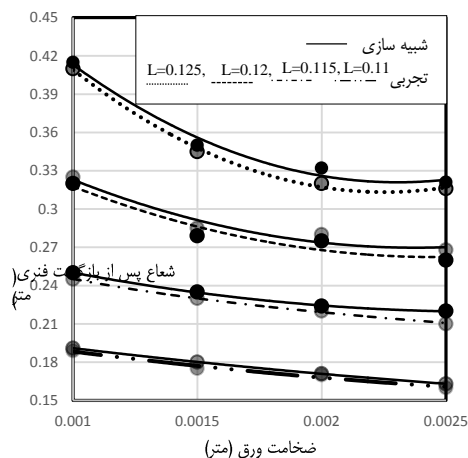
شکل ۴. نمایی شماتیک از

نقاط لازم برای اندازه‌گیری پارامتر R'



شکل ۳. مقادیر شعاع پس از بازگشت فنری در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی؛

شعاع غلتک‌ها، ضخامت ورق و فاصله غلتک جانبی ۵، ۰/۲ و ۱۱ سانتی‌متر است



شکل ۵. مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای ورق با ضخامت مختلف

۳-۱. شبیه‌سازی

داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول R شعاع خم پس از خمکاری برحسب متر، R'

شعاع پس از بازگشت فنری برحسب متر، L فاصله غلتک جانبی از مرکز غلتک بالایی برحسب متر، V سرعت چرخش غلتک‌ها

بوده به نرم‌افزار معرفی شده است و با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم ماده افزایش یافته و لذا ماده مستحکم‌تری وارد مرحله خمکاری می‌شود. شکل ۸ تغییرات نسبت بازگشت فنری با تغییرات سرعت چرخش غلتک‌ها برحسب رادیان بر ثانیه نمایش می‌دهد. با افزایش سرعت چرخش غلتک‌ها سرعت کرنش افزایش می‌یابد و لذا نسبت شعاع بعد از بازگشت فنری بر شعاع پیش از بازگشت افزایش می‌یابد که موجب کاهش دقت ابعادی نهایی می‌شود. به‌منظور بررسی اثر نورد، نمونه‌ها تحت شرایط یکسانی از سرعت چرخش غلتک‌ها، اصطکاک و فاصله غلتک جانبی از غلتک فوقانی، تحت مقادیر مختلف کاهش ضخامت در یک مرحله قرار گرفته‌اند (شکل ۹). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ابتدا با افزایش درصد کاهش ضخامت در اثر نورد نسبت بازگشت فنری افزایش پیدا می‌کند، با افزایش درصد کاهش ضخامت ورقی که وارد مرحله خمکاری می‌شود تنش تسلیم بالاتری خواهد داشت و لذا مقدار شعاع نمونه پس از بازگشت فنری بیشتر می‌شود که موجب افزایش نسبت شعاع می‌شود. این روند تا ۱۲/۵ درصد کاهش ضخامت ادامه دارد. در حالت‌هایی که کاهش ضخامت بیش از ۱۲/۵٪ شود، به علت افزایش تغییر فرم پلاستیک و غلبه انرژی پلاستیک به انرژی الاستیک نسبت بازگشت فنری کاهش می‌یابد. لذا مقدار شعاع تغییرات چندانی نداشته و مقدار نسبت شعاع بازگشت فنری به مقدار یک، نزدیک می‌شود.

۳-۳. تحلیل رگرسیون خطی شعاع خمکاری پس از بازگشت فنری

برای به‌دست آوردن معادله‌ای جهت پیش‌بینی مقادیر شعاع خمکاری پس از بازگشت فنری با استفاده از نرم‌افزار اس. پی. اس. اس. به تحلیل رگرسیونی مقادیر شعاع پس از بازگشت فنری (R') که از شبیه‌سازی اجزای محدود به‌دست آمده‌اند، پرداخته شده است. در این تحلیل متغیرهای اصطکاک، مقدار نورد پیش از خمکاری، سرعت چرخش غلتک‌ها و فاصله غلتک جانبی از غلتک فوقانی به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (مستقل) و شعاع پس از بازگشت فنری به‌عنوان متغیر ملاک (وابسته) در نظر گرفته شده است. جدول ۴ خلاصه مدل رگرسیون را ارائه می‌کند. این جدول شامل مقادیر همبستگی و ضریب تعیین می‌باشد. همبستگی یعنی تغییر در یک متغیر وابسته چقدر روی تغییر بر متغیر مستقل تأثیر می‌گذارد.

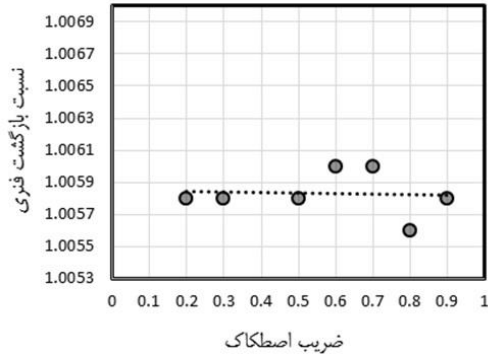
برحسب رادیان بر ثانیه، P درصد کاهش ضخامت در اثر نورد پیش از خمکاری و μ ضریب اصطکاک بین قطعه‌کار و غلتک‌هاست که با استفاده از روانکارهای متفاوت مقدار اصطکاک به‌عنوان یک متغیر بررسی شده است.

۲-۳. تأثیر پارامترهای مختلف بر نسبت بازگشت فنری

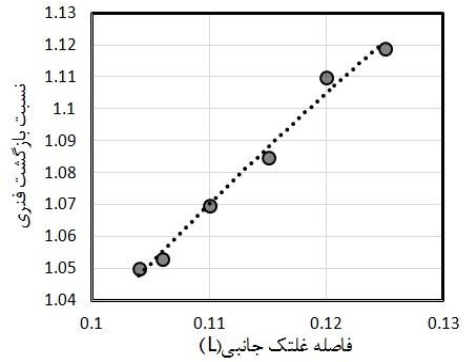
در این پژوهش اثر چهار عامل سرعت چرخش غلتک‌ها، اصطکاک، مقدار نورد پیش از خمکاری و فاصله غلتک جانبی از غلتک بالایی بر شعاع خم و میزان بازگشت فنری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به‌منظور اندازه‌گیری مقدار بازگشت فنری پارامتری تحت عنوان S را مطابق رابطه ۲، که عبارت است از نسبت شعاع بعد از بازگشت فنری R_f بر شعاع خم پیش از بازگشت R_i معرفی می‌کنیم.

$$S = \frac{R_f}{R_i} \quad (2)$$

در ادامه تأثیر موقعیت مکانی غلتک جانبی بر شعاع خم، قبل و پس از بازگشت فنری، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی فرایند، در شرایطی که سایر متغیرها ثابت باشند، بررسی شده است. همان‌گونه که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، با افزایش فاصله غلتک جانبی از غلتک بالایی شعاع خم افزایش می‌یابد؛ زیرا تغییر فرم پلاستیک کمتری روی ورق رخ داده و مقدار انرژی الاستیک بیشتر می‌شود، و در نتیجه میزان بازگشت فنری افزایش می‌یابد. لذا نسبت بازگشت فنری به‌طور پیوسته با افزایش فاصله غلتک جانبی از غلتک بالایی افزایش می‌یابد تا جایی که تماس غلتک جانبی و ورق قطع شود. تغییرات نسبت بازگشت فنری برحسب تغییر اصطکاک بین قطعه‌کار و غلتک‌ها در حالت‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص می‌شود، با افزایش ضریب اصطکاک تغییر محسوسی در نسبت بازگشت فنری مشاهده نمی‌شود. با افزایش ضریب اصطکاک، مقدار گیرش بین غلتک‌ها و قطعه‌کار افزایش می‌یابد. این امر بدین دلیل است که سطح تماس قطعه‌کار و غلتک‌ها زیاده‌تر و مؤلفه افقی نیروی ناشی از اصطکاک بسیار بزرگتر از مؤلفه افقی نیروی فشاری غلتک می‌شود و این کار تنها قدرت گیرش غلتک‌ها را زیاد کرده و بر نسبت بازگشت فنری تأثیر محسوسی نخواهد داشت. همان‌طور که در بخش مواد و روش آزمایش در رابطه با خواص مکانیکی ماده مورد استفاده در این پژوهش بحث شد، این ماده به‌صورت ماده‌ای که نسبت به سرعت کرنش وابسته



شکل ۷. تغییرات نسبت بازگشت فیزی با تغییرات ضریب اصطکاک



شکل ۶. نمودار تغییرات نسبت بازگشت فیزی با فاصله غلتک جانبی

جدول ۳. حالت‌های شبیه‌سازی فرایند خمکاری غلتکی

حالت	μ	L	V	P	R	R'
		(m)	(radian/s)		(m)	(m)
۱	۰/۳	۰/۱۰۴	۴	.	۰/۰۹۴۲	۰/۰۹۹
۲	۰/۳	۰/۱۱	۴	.	۰/۱۵۹۸	۰/۱۷۱
۳	۰/۳	۰/۱۰۶	۴	.	۰/۱۱۶۹	۰/۱۲۴
۴	۰/۳	۰/۱۱۵	۴	.	۰/۲۸۵۷	۰/۳۱۰
۵	۰/۳	۰/۱۲	۴	.	۰/۴۱۴۴	۰/۴۶۰
۶	۰/۳	۰/۱۲۵	۴	.	۰/۶۳۳۹	۰/۷۱۰
۷	۰/۶	۰/۱۱	۴	.	۰/۱۹۹۰	۰/۲۰۰
۸	۰/۸	۰/۱۱	۴	.	۰/۱۹۶۰	۰/۱۹۸
۹	۰/۲	۰/۱۱	۴	.	۰/۲۰۷۰	۰/۲۰۹
۱۰	۰/۹	۰/۱۱	۴	.	۰/۲۰۵۰	۰/۲۰۷
۱۱	۰/۹	۰/۱۱	۵	.	۰/۲۱۲۰	۰/۲۱۴
۱۲	۰/۳	۰/۱۱	۶	.	۰/۲۰۲۰	۰/۲۰۴
۱۳	۰/۹	۰/۱۱	۴	.	۰/۲۰۵۰	۰/۲۰۷
۱۴	۰/۵	۰/۱۱	۴	.	۰/۱۹۷۰	۰/۱۹۹
۱۵	۰/۷	۰/۱۱	۴	.	۰/۱۹۳۰	۰/۱۹۵
۱۶	۰/۶	۰/۱۱۵	۴	.	۰/۲۰۴۶	۰/۲۰۶
۱۷	۰/۱	۰/۱۱۵	۴	.	۰/۳۳۶۰	۰/۳۴۰
۱۸	۰/۲	۰/۱۱۵	۳	.	۰/۳۰۹۰	۰/۳۱۱
۱۹	۰/۶	۰/۱۱۵	۳	.	۰/۳۲۵۰	۰/۳۲۷
۲۰	۰/۶	۰/۱۱۵	۷	.	۰/۳۱۲۰	۰/۳۲۷
۲۱	۰/۶	۰/۱۱۵	۸	.	۰/۳۲۱۰	۰/۳۳۸
۲۲	۰/۶	۰/۱۱۵	۹	.	۰/۳۳۹۰	۰/۳۵۵
۲۳	۰/۶	۰/۱۱۵	۳	.	۰/۲۹۴۰	۰/۲۹۷
۲۴	۰/۶	۰/۱۱۵	۵	.	۰/۲۹۵۰	۰/۳۰۴
۲۵	۰/۶	۰/۱۱۵	۱۰	.	۰/۳۱۰۰	۰/۳۳۳
۲۶	۰/۳	۰/۱۰۸	۶	.	۰/۱۸۹۰	۰/۲۰۲
۲۷	۰/۴	۰/۱۱۲	۳	.	۰/۱۹۸۰	۰/۲۱۰
۲۸	۰/۵	۰/۱۱۴	۵	.	۰/۲۵۴۰	۰/۲۶۹
۲۹	۰/۶	۰/۱۰۸	۵	۵	۰/۰۸۱۰	۰/۰۸۸
۳۰	۰/۶	۰/۱۰۸	۵	۷/۵	۰/۰۸۵۰	۰/۰۹۶
۳۱	۰/۶	۰/۱۰۸	۵	۱۰	۰/۱۰۰۰	۰/۱۲۰
۳۲	۰/۶	۰/۱۰۸	۵	۱۲/۵	۰/۱۰۸۰	۰/۱۲۹
۳۳	۰/۶	۰/۱۰۸	۵	۱۵	۰/۰۹۰۰	۰/۱۰۰
۳۴	۰/۶	۰/۱۰۸	۵	۱۷/۵	۰/۰۸۰۰	۰/۰۸۳
۳۵	۰/۶	۰/۱۰۸	۵	۲۰	۰/۰۵۹۰	۰/۰۶۱

ضریب، مقدار ضریب تعیین را به‌منظور انعکاس بیشتر میزان نیکویی برازش مدل تصحیح می‌کند. برای تفسیر ضریب تعیین، معمولاً از این مقدار (تعدیل‌شده) استفاده می‌شود. چون در این ضریب، مقدار تعیین با درجات آزادی تعدیل شده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که آیا مدل رگرسیون می‌تواند به‌طور معنادار (و مناسبی) تغییرات متغیر وابسته را پیش‌بینی کند یا خیر. برای بررسی معناداری، مقادیر ستون آخر جدول ۵ (sig) ارزیابی می‌شود. این ستون معناداری آماری مدل رگرسیون را نشان می‌دهد به‌طوری‌که به ازای مقدار به‌دست آمده کمتر از ۰/۰۵ می‌توان نتیجه گرفت که مدل به‌کار رفته، پیش‌بینی‌کننده خوبی برای متغیر وابسته است [۱۵]. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان معناداری در این پژوهش کمتر از میزان ۰/۰۵ است. معنادار بودن آزمون تحلیل واریانس (مقدار F)، نشان می‌دهد که متغیرها به‌طور معناداری توانسته‌اند تغییرات متغیر وابسته را پیش‌بینی کنند. جدول ۶ اطلاعاتی را در مورد متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و نیز اطلاعات ضروری برای پیش‌بینی متغیر وابسته را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، مقدار ثابت (constant) و متغیرهای اصطکاک، سرعت چرخش، درصد کاهش ضخامت در اثر نورد و فاصله غلتک جانبی همگی در مدل، معنادار شده‌اند (ستون sig). پس از تعیین معنادار بودن مقدار ثابت و متغیرها، ستون Standardized Coefficients بیانگر ضریب رگرسیونی استاندارد شده یا مقدار β است که نشانگر میزان تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته است. جهت ایجاد معادله رگرسیونی از میزان ضریب رگرسیونی استاندارد نشده (B) استفاده می‌شود [۱۵]. معادله رگرسیونی جهت پیش‌بینی دقیق مقادیر متغیرهای وابسته مورد استفاده قرار می‌گیرد و معادله آن به‌صورت رابطه ۳ برای مقادیر مختلف شعاع پس از بازگشت فنری می‌باشد.

همبستگی را با ضریبی به نام ضریب همبستگی پیرسون r اندازه‌گیری می‌کنند که عددی بی‌بعد و بین صفر و یک است. هرچه مقدار همبستگی به یک نزدیکتر باشد، همبستگی بین دو متغیر بیشتر است. ضریب تعیین معلوم می‌کند که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته ناشی از تغییرات متغیر مستقل است. ضریب تعیین r^2 توان دوم ضریب همبستگی بوده و باز هم عددی بین صفر و یک است. مثلاً چنانچه ضریب تعیین عدد a به‌دست آید؛ یعنی می‌توان a درصد از تغییرات در متغیر وابسته را با تغییرات متغیر مستقل بیان کرد.

در این مسئله که مقادیر پارامترهای معرفی‌شده در جدول ۴ را دربر می‌گیرد، مقدار r برابر با ۰/۹۶۵۴ است، که این مقدار همبستگی ساده بین چند متغیر و به‌عبارتی شدت همبستگی بین چند متغیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از مقدار r نمایان است، بین مقدار شعاع پس از بازگشت فنری و متغیرهای اصطکاک، سرعت چرخش و فاصله غلتک جانبی میزان همبستگی در حد بالایی وجود دارد. مقدار r^2 نشان می‌دهد که چه مقدار از متغیر وابسته؛ یعنی شعاع پس از بازگشت فنری، می‌تواند توسط متغیرهای مستقل تبیین شود. در این مقاله متغیر وابسته شعاع پس از بازگشت فنری می‌تواند به میزان ۹۳/۱ درصد توسط تغییرات متغیرهای مستقل اصطکاک، سرعت چرخش غلتک‌ها و فاصله غلتک جانبی تبیین شود، که در واقع مقدار چشم‌گیری است. اشکال ضریب تعیین این است که میزان موفقیت مدل را بیش از اندازه برآورد می‌کند و کمتر تعداد متغیرهای مستقل و همین‌طور حجم نمونه را در نظر می‌گیرد. همچنین ضریب تعیین تعداد درجات آزادی را به‌حساب نمی‌آورد. از اینرو، برخی آمارشناسان ترجیح می‌دهند تا شاخص دیگری به نام ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adjusted r Square) را مورد استفاده قرار دهند [۱۵]. این

جدول ۴. خلاصه مدل رگرسیون خطی

Model	r	r ²	Adjusted r Square
۱	۰/۹۶۵۴	۰/۹۳۱۹	۰/۹۱۳۱

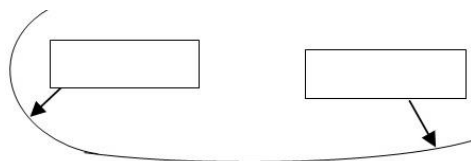
جدول ۵. مدل Anova و آزمون Fisher برای شعاع پس از بازگشت فنری

Model		Sum of Squares	Mean Square	F	Sig.
۱	Regression	۰/۲۹۸	۰/۰۷۵	۵۵/۳۲۲	۰/۰۰۰
	Residual	۰/۰۲۲۶	۰/۰۰۸		
	Total	۰/۵۲۵			

جدول ۶. ضرایب مدل رگرسیون خطی و آزمون t برای شعاع پس از بازگشت فنری

Model	parameter	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	β		
	(Constant)	-۱/۹۰۱	۰/۴۴۸	-	-۴/۲۴۶	۰/۰۰۰
	V(radian/s)	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۶	۴/۸۸۰	۰/۰۰۶
۱	L(m)	۱۸/۸۶۹	۳/۹۴۹	۰/۶۳۹	۴/۷۷۸	۰/۰۰۰
	μ	۰/۰۰۱	۰/۰۷۶	۰/۰۰۱	۱/۹۶۵	۰/۰۰۹
	P	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	-۲۱۰	-۱/۹۷۵	۰/۰۰۱

شرایط مختلف فرایند برای هر سه نمونه در جدول ۷ ذکر شده است. با توجه به این جدول مشخص می‌شود که تحلیل رگرسیون خطی شعاع نهایی ورق را با خطای متوسط کمتر از ۵ درصد ارائه می‌دهد. شکل‌های ۹ و ۱۰ مقدار جابه‌جایی غلتک جانبی را به ترتیب در دو راستای افقی و قائم برای نمونه ۲ نشان می‌دهد.



شکل ۸. شکل مدنظر برای یک خم با دو انحنا متفاوت

همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، این خم دارای دو انحنا متفاوت است که می‌تواند برای کاربردهای متفاوت از جمله بال و بدنه هواپیما مورد استفاده واقع شود. برای تولید این خم سعی شده است که با توجه به مطالبی که پیشتر به منظور کاهش بازگشت فنری و کنترل دقت ابعادی ارائه شد سرعت تغییر فرم و درصد کاهش ضخامت در اثر نورد تا حد ممکن به گونه‌ای باشد که بازگشت فنری کاهش یابد. لذا همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مقدار بازگشت فنری برای این نمونه از انحنا به حداقل رسیده و خم تولیدشده به شکل مد نظر بسیار نزدیک می‌باشد. از مقایسه دو شکل ۱۱ و ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که پس از بازگشت فنری، تغییرات ابعادی در نمونه مشاهده نمی‌شود و از سوی دیگر تنش‌های باقیمانده در نمونه پس از بازگشت فنری آزاد شده و مقدار ماکزیمم این تنش‌ها در نمونه از ۴۲۵ به ۳۴ مگاپاسکال بعد از بازگشت فنری کاهش پیدا کرده است. لذا نمونه مستعد تغییر فرم یا خوردگی تنشی پس از به‌کارگیری در تجهیزات نمی‌باشد.

$$R'=A(L)+B(\mu)+C(V)+D(P)+E \quad (3)$$

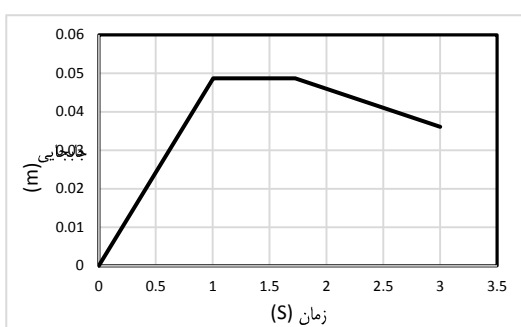
در این معادله L , μ , V , P و متغیرهای مستقل و R' متغیر وابسته است. ضرایب هر کدام از این متغیرها A , B , C , D می‌باشد و E مقدار ثابت این معادله بوده و به ترتیب برابر $۰/۰۰۵$ ، $۰/۰۰۱$ ، $۱۸/۸۶۹$ و $-۱/۹۰۱$ می‌باشد. مقدار t و مقدار Sig معنادار بودن آماری تأثیر متغیرهای پیش‌بین را نشان می‌دهند. مقدار t (چه مثبت و چه منفی) اگر بزرگتر از $۱/۹۶$ باشد و مقدار Sig اگر کوچکتر از $۰/۰۵$ باشد نشان می‌دهد که متغیر پیش‌بین بر متغیر ملاک تأثیر معنادار دارد.

۳-۴. تولید پوسته‌هایی با دو انحنا متفاوت

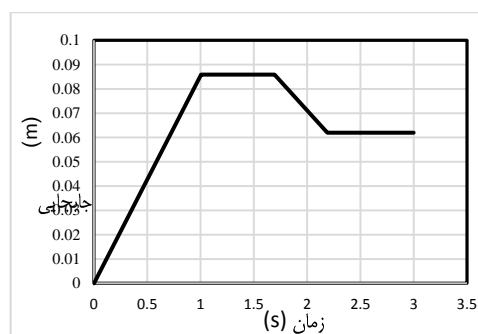
به‌منظور شکل‌دهی صفحات فلزی با انحنای غیریکنواخت از قالب‌هایی با شکل متنوع به‌طور عمده استفاده می‌شود. خمکاری سه‌غلته یک فرایند انعطاف‌پذیر است که به‌سادگی می‌تواند جایگزین مناسبی برای خمکاری درون قالب یا شکل‌دهی کشایی ورق، به‌منظور تولید انحنا متفاوت روی یک پوسته باشد؛ زیرا خم‌هایی با انحنا متفاوت با جابه‌جایی موقعیت مکانی غلتک جانبی قابل تولید است. به‌منظور ایجاد خم با شعاع متفاوت که در این پژوهش روی خم‌هایی با دو انحنا متفاوت مطابق شکل ۸ که به شکل یک نیم‌مقطع دوکی شکل است (مشابه پوسته بال هواپیما)، یک الگوی زمانی برای جابه‌جایی غلتک جانبی در نرم‌افزار تعریف شده است. مطابق این الگو، ابتدا غلتک جانبی برای ایجاد خم با انحنا بیشتر به غلتک فوقانی نزدیک شده و سپس از آن دور می‌شود. با دانستن اینکه شعاع خم مورد نظر چه مقدار باشد، می‌توان با استفاده از معادله رگرسیون خطی فاصله غلتک جانبی را تنظیم نمود. در این مبحث به بررسی سه نمونه پرداخته شده است که اندازه شعاع مدنظر پس از بازگشت فنری در

جدول ۷. شعاع نمونه‌هایی با دو انحنای متفاوت پس از بازگشت فتری

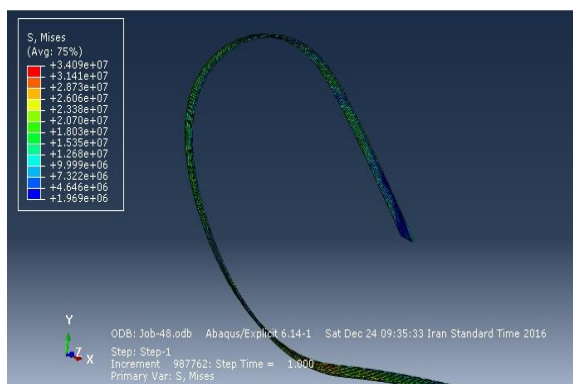
شماره نمونه			شرایط فرایند
۳	۲	۱	
$L=0/108$	$L=0/108$	$L=0/110$	
$P=15$	$P=10$	$P=5$	
$V=5$	$V=5$	$V=5$	
$\mu=0/6$	$\mu=0/6$	$\mu=0/6$	
0/100	0/112	0/137	R'_1
0/503	0/527	0/552	R'_2
0/097	0/110	0/126	R'_1
0/486	0/492	0/521	R'_2
۳	۲/۱	۸	خطای R'_1 (درصد)
۳/۳	۶	۵/۶	خطای R'_2 (درصد)



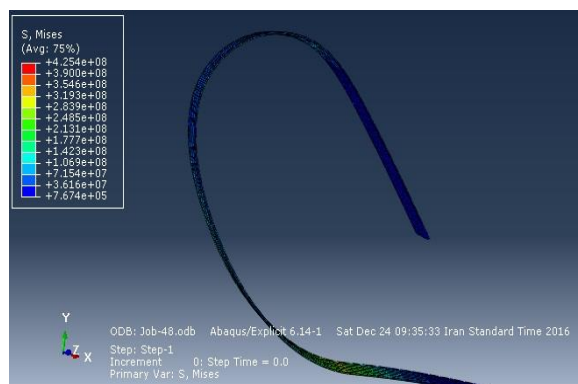
شکل ۱۰. الگوی جابه‌جایی غلتک جانبی در راستای قائم برحسب زمان



شکل ۹. الگوی جابه‌جایی غلتک جانبی در راستای افقی برحسب زمان



شکل ۱۲. پوسته با دو انحنای متفاوت پس از بازگشت فتری



شکل ۱۱. پوسته با دو انحنای متفاوت قبل از بازگشت فتری

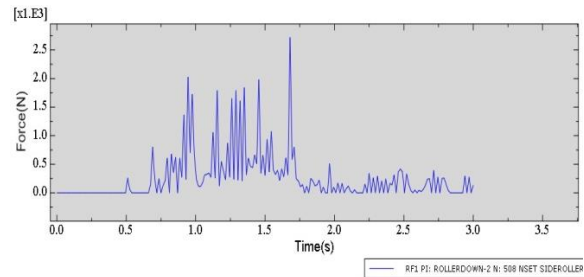
۲۷۱۹ نیوتن است که به مقدار ۱۵۱۲ نیوتن از ماکزیمم نیروی عمودی بیشتر است. علت این اختلاف، هندسه قطعه کار است که سبب اعمال نیروی افقی بیشتر به غلتک جانبی می‌شود. از سوی دیگر با افزایش زمان و کاهش فاصله بین غلتک جانبی و غلتک فوقانی نیرو افزایش یافته، سپس حول یک مقدار نوسان می‌کند و مجدداً با فاصله گرفتن غلتک جانبی این مقدار نیرو کاهش می‌یابد.

۳-۵. نیروی وارده به غلتک جانبی برای خمکاری با دو انحنای متفاوت

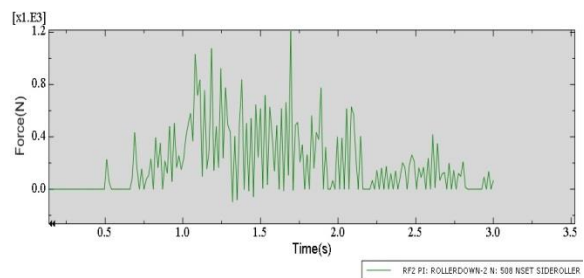
شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمودار تغییرات نیروی وارده به غلتک جانبی را برحسب زمان به ترتیب در دو راستای افقی و قائم برای تولید نمونه ۲ نمایش می‌دهند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ماکزیمم نیروی وارد بر غلتک جانبی در راستای افقی برابر با

استفاده از نرم‌افزار اس. اس. اس. به تحلیل رگرسیون مقادیر شعاع پس از بازگشت فنری که از شبیه‌سازی اجزای محدود به‌دست آمده‌اند پرداخته و معادله‌ای ارائه شد. در ادامه از این تکنیک برای تولید پوسته‌هایی با دو انحنای متفاوت استفاده شد؛ زیرا خم‌هایی با انحنای متفاوت با جابه‌جایی موقعیت مکانی غلتک جانبی قابل تولید بوده و با تسریع در روند تولید و کاهش عمده در هزینه ساخت قالب‌هایی با شعاع متفاوت می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای خمکاری درون قالب یا شکل‌دهی کشایی ورق، به‌منظور تولید انحنای متفاوت روی یک پوسته باشد. در این مقوله میزان جابه‌جایی غلتک جانبی و نیز تغییرات نیروی وارده به غلتک جانبی برحسب زمان در دو راستای افقی و قائم در تولید یک نمونه ارائه شد. از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱. به‌طور پیوسته افزایش فاصله غلتک جانبی از غلتک فوقانی سبب افزایش نسبت بازگشت فنری می‌شود که علت این امر کاهش تغییرشکل پلاستیک می‌باشد
۲. تغییرات نسبت بازگشت فنری با تغییر اصطکاک قابل چشم‌پوشی می‌باشد
۳. سرعت چرخش غلتک‌ها بر نسبت بازگشت فنری اثری مستقیم دارد؛ به‌عبارتی با افزایش سرعت چرخش غلتک‌ها نسبت بازگشت فنری افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به حساس بودن ماده به نرخ کرنش نسبت داد
۴. با افزایش درصد کاهش ضخامت در اثر نورد پیش از خمکاری غلتکی، ابتدا نسبت بازگشت فنری افزایش یافته و در ادامه به‌دلیل غلبه انرژی پلاستیک بر انرژی الاستیک مقدار آن کاهش می‌یابد
۵. با استفاده از تحلیل رگرسیون معادله‌ای جهت بازگشت فنری ارائه شد که با دقت بالایی می‌تواند انحنای نهایی ورق را بدون نیاز به شبیه‌سازی پیش‌بینی کند. با کمک این رابطه، شرایط لازم برای شکل‌دادن ورق با انحنا مشخص قابل تعیین است
۶. فرایند خمکاری سه‌غلتکه برای تولید خم‌هایی با شعاع متغیر برای کاربردهایی از جمله تولید پوسته بال و بدنه هواپیما قابل اجرا و مفید است؛ زیرا این فرایند انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و می‌توان به‌کمک آن به



شکل ۱۳. تغییرات نیروی افقی وارد بر غلتک جانبی برحسب زمان



شکل ۱۴. تغییرات نیروی قائم وارد بر غلتک جانبی برحسب زمان

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان بازگشت فنری بعد از خمکاری سه‌غلتکه و اثر عوامل مختلف از جمله اصطکاک، موقعیت مکانی غلتک جانبی و سرعت چرخش غلتک بر نسبت بازگشت فنری ورق آلومینیم (Al ۲۰۲۴) با ضخامت اولیه ۳ میلی‌متر بررسی شد. بدین‌منظور شبیه‌سازی مدل اجزای محدود و شکل‌دهی غلتکی توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. برای انجام این شبیه‌سازی غلتک‌ها به‌صورت جسم صلب و ورق به‌صورت یک ماده کشسان مومسان همسانگرد با خاصیت پلاستیک خطی مدل‌سازی شده و ضریب اصطکاک بین ورق و تمامی سطوح که با ورق در تماس هستند برابر فرض شدند. در شبیه‌سازی غلتک‌ها با وجود اینکه استفاده از حالت Analytical rigid هزینه زمانی کمتری دارد، اما چون دقت بیشتر در محاسبات مدنظر نبوده است، غلتک‌ها به‌صورت Deformable solid و ورق آلومینیمی به‌صورت Discret rigid شبیه‌سازی شدند. برای شبیه‌سازی شکل‌دهی غلتکی و پیش‌بینی مقدار بازگشت فنری از روش Explicit (حل صریح) استفاده شد. به‌منظور صحت‌سنجی، مقایسه‌ای بین داده‌های شبیه‌سازی با نتایج تجربی به‌دست آمد. سپس اثر چهار عامل سرعت چرخش غلتک‌ها، اصطکاک، مقدار نورد پیش از خمکاری و فاصله غلتک جانبی از غلتک بالایی بر شعاع خم و میزان بازگشت فنری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. برای به‌دست آوردن معادله‌ای جهت پیش‌بینی دقیق مقادیر شعاع خمکاری پس از بازگشت فنری با

بمعبارتی فرایند از نظر اقتصادی نیز بسیار مقرون به‌صرفه است.

دقت ابعادی بالاتری دست یافت. از سوی دیگر، نیازی به ساخت چندین قالب برای شعاع‌های متفاوت نیست.

۵. مآخذ

- [1] M. Chudasama, H. Raval, An approximate bending force prediction for 3-roller conical bending process, *International journal of material forming*, vol. 6, no. (2), 2013, p. 303-314.
- [2] M. Firat, Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part II- Deformation response modeling, *Materials & design*, vol. 28, no. 4, 2007, pp. 1304-1310.
- [3] W. Gan, R. Wagoner, Die design method for sheet springback, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, no. 7, 2004, pp. 1097-1113.
- [4] A. Gandhi, H. Gajjar, H. Raval, Mathematical modelling and finite element simulation of pre-bending stage of three-roller plate bending process, in ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing, American Society of Mechanical Engineers, 2008.
- [5] T. Yu, W. Johnson, Influence of axial force on the elastic-plastic bending and springback of a beam, *Journal of Mechanical Working Technology*, vol. 6, no. 1, 1982, pp. 5-21.
- [6] W. Johnson, T. Yu, On springback after the pure bending of beams and plates of elastic work-hardening materials-III, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 23, no. 11, 1981, pp. 687-695.
- [7] B. Chongthairungruang, et al., Experimental and numerical investigation of springback effect for advanced high strength dual phase steel, *Materials & Design*, vol. 39, 2012, pp. 318-328.
- [8] M. Hua, D. Sansome, K. Baines, Mathematical modeling of the internal bending moment at the top roll contact in multi-pass four-roll thin-plate bending, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 52, no. 2, 1995, pp. 425-459.
- [9] M. Chudasama, H. Raval, Bending force prediction for dynamic roll-bending during 3-roller conical bending process, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16, no. 2, 2014, pp. 284-295.
- [10] Z. Zhang, et al., A refined model of three-roller elastoplastic asymmetrical pre-bending of plate, *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 21, no. 3, 2014, pp. 328-334.
- [11] A. Gandhi, H. Raval, Analytical and empirical modeling of top roller position for three-roller cylindrical bending of plates and its experimental verification, *Journal of materials processing technology*, vol. 197, no. 1, 2008, pp. 268-278.
- [12] Z. Feng, H. Champlaud, Modeling and simulation of asymmetrical three-roll bending process, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, no. 9, 2011, pp. 1913-1917.
- [13] D. Ellis, mechanical properties of aluminum alloys at various temperatures, atomics international. div. of north american aviation Inc., Canoga Park, Calif, 1960.
- [14] H. Quan, H. Champlaud, Z. Feng, T. Dao, FE Study for Reducing Forming Forces and Flat End Areas of Cylindrical Shapes Obtained by the Roll-Bending Process, *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, vol. 4, 2014, pp. 467-475.
- [15] R. Karimi, Statistical Analysis Software Easy Guide of spss. 1394. p. 220.