

بررسی تجربی و عددی بازگشت فنری در تغییر شکل

ماشین کاری سازه‌های نازک

احسان خاتمی^۳

دانشکده مکانیک و هوافضا

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

عباس وفائی صفت^۲

دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(تاریخ دریافت: ۱۹/۰۱/۹۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳/۰۶/۹۲)

حسن محققیان^۱

دانشکده مکانیک و هوافضا

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

چکیده

بازگشت فنری یکی از مهم‌ترین فاکتورها در شکل‌دهی قطعات محسوب می‌شود. مطالعات انجام شده در مورد پدیده بازگشت فنری نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند در میزان، شکل و فرم قطعات تولید شده بسیار مؤثر باشد. بنابراین، برای افزایش دقت ابعادی و کیفیت قطعات تولید شده لازم است عوامل مؤثر بر آن شناخته شوند. در مقاله حاضر ابتدا فرآیند نوین تغییر شکل ماشین کاری برای فرم‌دهی سازه‌های نازک، که ترکیبی از دو روش ساخت ماشین کاری سازه‌های نازک و تغییر شکل افزایشی در یک نقطه محلی به وسیله ماشین کنترل عددی سه‌محوره است معرفی می‌شود. سپس، نتایج تجربی و عددی برای دو نمونه جهت صحت‌سنجی با یکدیگر مقایسه می‌گردد. اثر پارامترهای مؤثر شکل‌دهی شامل قطر ابزار، زاویه قطعه‌کار، گام فرم‌دهی و مکان قرارگیری ابزار بر بازگشت فنری ارائه می‌گردد. برای دستیابی به بهترین نوع روش فرم‌دهی، گام فرم‌دهی و مکان قرارگیری ابزار بر اساس کم‌ترین بازگشت فنری مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که عمق گام تأثیر زیادی در بازگشت فنری دارد.

واژه‌های کلیدی: بازگشت فنری، فرم‌دهی، ماشین کاری، ماشین کنترل عددی

Numerical and Experimental Study of Springback in Machining Forming of Thin Structure

H. Mohagheghian

Department of Mechanical & Aerospace
Science and Research Branch
Islamic Azad University of Tehran

A. Vafaeesefat

Imam Hossain University

E. Khatami

Department of Mechanical & Aerospace
Science and Research Branch
Islamic Azad University of Tehran

(Received: 08 April, 2013; Accepted: 04 September, 2013)

ABSTRACT

Springback is one of the important factors in metal forming process. Study on springback shows that this phenomenon can have great impacts on shape and formation of the part. Therefore, to increase the accuracy and the quality of the produced part, the important factors have to be recognized. In this paper, machining forming for thin part which is a combination of machining and incremental forming is first introduced. Then numerical and experimental results are compared. The effects of forming parameters such as tool diameter, part angle, forming steps, and tool position on springback are presented. The results show that the step depth has a great affect on springback.

Keywords: Springback, Forming, Machining, CNC Machine

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: hassan_id1778@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): avafaee@ihu.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد: ehsan.khatamii@gmail.com

۱- مقدمه

پدیده بازگشت فنری، بیانگر تغییر شکل ورق پس از باربرداری در فرآیندهای ورق‌کاری کشش عمیق، خم‌کاری و غیره می‌باشد. این پدیده دستیابی به دقت ابعادی مورد نظر را ناممکن ساخته و باعث مشکلات پیش‌بینی نشده‌ای در مونتاژ قطعات می‌گردد. یک بررسی اقتصادی نشان می‌دهد که صنعت خودروسازی آمریکا چندین میلیون دلار به‌خاطر پیامدهای کیفی بازگشت فنری متضرر می‌شود [۱]. با اتخاذ روش‌هایی در طراحی می‌توان این پدیده را جبران نمود و تحت کنترل درآورد. میزان تغییر شکل حاصل از این پدیده برای آلیاژهای فولادی با استحکام بالا که امروزه در صنعت خودروسازی کاربرد زیادی دارند و نیز آلیاژهای آلومینیومی نسبت به سایر آلیاژها بیشتر است [۲]. تاکنون پیش‌بینی دقیق بازگشت فنری تنها برای شکل‌های ساده‌ای که شعاع انحناء ثابتی دارند در فرآیند خم‌کاری امکان پذیر شده است [۳].

در فرآیند تغییر شکل ماشینکاری^۱ برای ساخت قطعات یک‌پارچه از روش ساخت نوظهور در سازه‌های نازک استفاده می‌شود که شامل ماشینکاری سازه‌های نازک و فرم‌دهی افزایشی در یک نقطه^۲ (SPIF) است [۴-۶]. امتیازات فرآیند تغییر شکل ماشینکاری نسبت به روش‌های سنتی شامل انجام فرآیند بر روی یک ماشین در یک مرحله و توانایی تولید قطعات پیچیده که قبلاً با مونتاژ قطعات تولید می‌شدند و یا غیر قابل تولید می‌باشد. اکنون قطعات مذکور می‌توانند توسط روش تغییرشکل ماشینکاری به‌صورت قطعات یک‌پارچه تولید شوند [۷ و ۸]. به‌علاوه در تولید قطعات پیچیده به‌دلیل انجام فرآیند تغییر شکل ماشینکاری بر روی یک ماشین می‌توان از ماشین کنترل عددی سه‌محوره به‌جای ماشین کنترل عددی پنج‌محوره استفاده کرد.

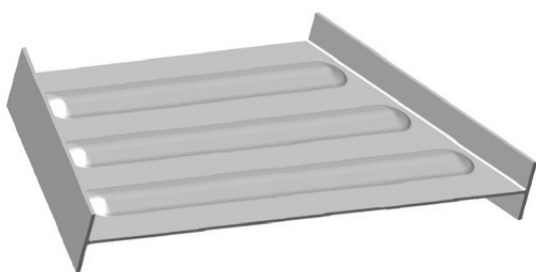
در مقاله حاضر ابتدا فرآیند نوین تغییر شکل ماشینکاری به‌روش هیبریدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس پارامترهای مؤثر در بازگشت فنری با استفاده از روش‌های تجربی و عددی انجام می‌گیرد. این پارامترها شامل مکان قرارگیری اولیه ابزار، گام فرم‌دهی و زاویه ورود ابزار می‌باشد، سپس نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه می‌شود. در نهایت مؤثرترین پارامترها براساس کمترین بازگشت فنری برای

دستیابی به بهترین روش شکل‌دهی از طریق شبیه‌سازی عددی انتخاب می‌شود.

۲- تغییر شکل ماشینکاری به‌روش هیبریدی

شکل‌دهی و خم‌کاری ورق‌های فلزی در روش سنتی عبارت است از مجموعه عملیاتی که در آن ورق‌های فلزی به‌دلیل تغییر شکل پلاستیک به فرم مطلوب شکل داده می‌شوند. در این فرآیندها با اعمال بارگذاری‌هایی از قبیل کشش، فشار، خمش، برش و یا ترکیبی از آنها می‌توان تغییر شکل‌های مورد نظر را در ورق‌های فلزی ایجاد نمود. به این ترتیب، با استفاده از عملیات شکل‌دهی ورق‌های فلزی قطعات پوسته‌ای شکل با کاربردهای گوناگون تولید می‌شوند. در این روش، ابتدا بلوک خام اولیه توسط ماشین فرز کنترل عددی سه‌محوره ماشینکاری شده و سپس به‌صورت تدریجی توسط ابزار سرکروی (بدون لبه برنده و نیم‌کره) فرم‌دهی می‌شود. با توجه به پدیده بازگشت فنری، ابزار سرکروی برای فرم‌دهی سازه باید در یک مسیر کنترل شده حرکت کند تا شکل مورد نظر بر روی سازه ایجاد شود.

شکل‌های ۱-۳ نمونه‌ای از قطعات ایجاد شده با این روش را نشان می‌دهند [۹]. شکل ۱ نوعی از سازه ایجاد شده بدون مونتاژ که با روش تغییر شکل ماشینکاری ساخته شده است را نشان می‌دهد. با این فرآیند نیازی به استفاده از روش‌های سنتی مونتاژ و جوشکاری نمی‌باشد و می‌توان در یک مرحله و با یک ماشین آن را کنترل نمود.



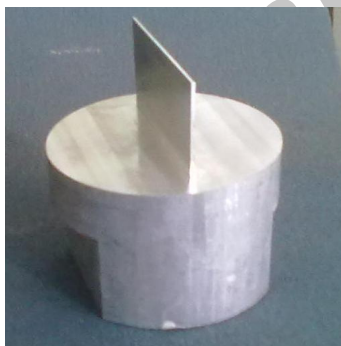
شکل (۱): سازه ایجاد شده بدون مونتاژ قطعات [۶].

شکل‌های ۲ و ۳ روش هیبریدی برای ساخت قطعات پروانه و بین‌های حرارتی ساخته شده را نشان می‌دهد [۱۰].

1- Machining Forming

2 - Single- Point Incremental Forming

صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی فرآیند با نرم‌افزار المان محدود را می‌توان با استفاده از نتایج مختصات مربوط به مسیر حرکت ابزار به‌دست می‌آید. در این روش، ابتدا مختصات مربوط به مسیر حرکت ابزار به‌دست می‌آید. سپس با در اختیار داشتن این نقاط، امکان شبیه‌سازی دقیق حرکت ابزار در محیط نرم‌افزار فراهم می‌گردد. بعد اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، عملیات ماشینکاری و فرم‌دهی قطعه انجام می‌گیرد. ابزار ساخته شده برای آزمایش تجربی یک ابزار سرکروی (جنس فولاد سنبه‌بر با سختی ۶۰ راکول C) و به شعاع ۵ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد [۱۱]. ساخت ابزار سرکروی توسط دستگاه ماشین ابزار ساز آلمانی^۱ انجام گرفته است. در این نوع خاص از عملیات تغییر شکل ماشینکاری، ابتدا مقطع سازه (بلوک آلومینیومی) از جنس AL7075 T6 رتبه هوا فضا با استفاده از ماشین فرز کنترل عددی سه‌محور توسط ابزار^۲ HSS به قطر ۵۰ میلی‌متر، سرعت دورانی ۷۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و میزان پیشروی ۵ میلی‌متر در راستای قائم خشن‌کاری شد. ماشینکاری نهایی تیغه برای ضخامت یک میلی‌متر با سرعت دورانی بالای (rpm) ۱۰۰۰، سرعت پیشروی ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و نرخ باربرداری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. این پارامترها براساس نتایج تجربی و محققان قبلی می‌باشد [۱۲-۱۴]. شکل ۴ ماشینکاری نهایی سازه نازک‌شده به ضخامت یک میلی‌متر را نشان می‌دهد.

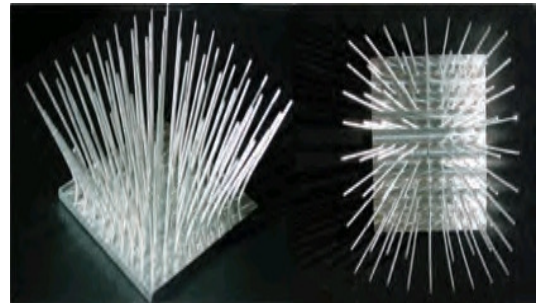


شکل (۴): ماشینکاری نهایی سازه نازک شده.

با تعویض ابزار سرکروی به‌صورت عمود بر سازه به‌جای ابزار فرز انگشتی حرکت تدریجی و برنامه‌ریزی شده ابزار در یک مسیر خاص، تغییر شکل مورد نظر بر روی سازه را انجام



شکل (۲): پروانه ساخته شده با روش تغییر شکل ماشینکاری [۱۰].



شکل (۳): پین‌های حرارتی [۱۰].

از مزیت‌های این روش ساخت قطعات به‌کمک ماشین‌های کنترل عددی سه‌محور به‌جای ماشین کنترل عددی پنج‌محور می‌باشد. این روش تغییر شکل ماشینکاری با هزینه کمتری قابل ساخت است.

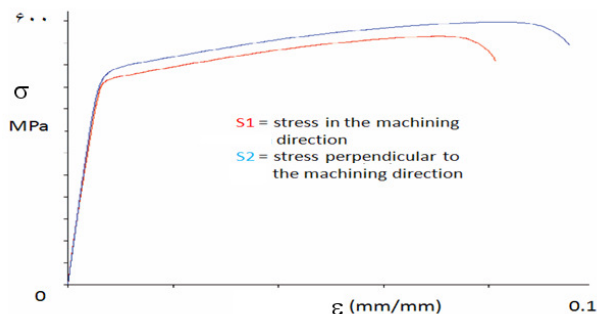
ماشینکاری سازه‌های نازک جزء فرآیندهای مهم در تغییر شکل ماشینکاری به‌حساب می‌آید. دشوارترین مراحل تغییر شکل ماشینکاری، تغییر شکل پره‌های نازک به‌دلیل منحرف شدن پره در حین عملیات می‌باشد. به‌همین دلیل برای اینکه فرآیند بر روی یک ماشین و در یک مرحله انجام شود، از ماشین فرز کنترل عددی سه‌محور به‌جای ماشین‌های سنتی استفاده می‌شود. به‌علاوه به‌دلیل نازک بودن پره، میزان بازگشت فنری در این فرآیند بسیار مهم می‌باشد. پدیده بازگشت فنری در این فرآیند به‌دلیل جدید بودن این روش فرم‌دهی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

۳- آزمایش تجربی

آزمایش تجربی تغییر شکل ماشینکاری از جهت‌های گوناگون حائز اهمیت می‌باشند. شکل‌دهی چند سازه به شکل خاص و انجام چندین آزمایش مناسب، اطمینان لازم به‌منظور موفقیت‌آمیز بودن فرآیند را تضمین می‌کند. به‌علاوه

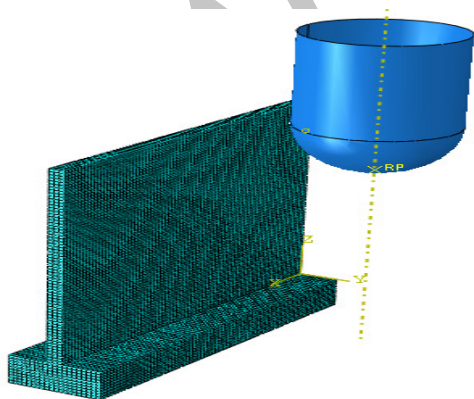
1- S₁₁ DECKEL

2 -High-Speed Steel



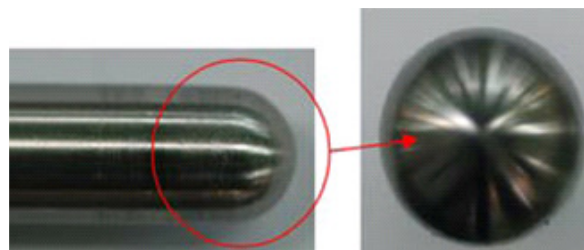
شکل (۶): نمودار تنش - کرنش آلومینیوم ۷۰۵۱ [۶].

مهم‌ترین چالش در شبیه‌سازی این فرآیند، مدل‌سازی حرکت ابزار در نرم‌افزار است. اهمیت این موضوع، زمانی افزایش می‌یابد که مسیر حرکت ابزار به صورت کاملاً دقیق در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی گردد. بنابراین تعریف چندین هزار نقطه در محیط نرم‌افزار (مربوط به مسیر ابزار) ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله، با استفاده از روشی نوین مسیر کنترل شده ابزار در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. حرکت کنترل ابزار به صورت کاملاً دقیق در نرم‌افزار ABAQUS براساس شکل نهایی سازه تعیین می‌شود. بدین منظور، با ترسیم مدل سه‌بعدی پره در نرم‌افزارهای CATIA می‌توان مسیر ابزار و مختصات نقاط مربوط به آن را براساس استراتژی ابداع شده استخراج نمود. مسیر ابزار از دو قسمت تشکیل می‌شود. در قسمت اول، ابزار تحت گام‌های کنترل شده ضمن حرکت به سمت پایین پره را خم می‌کند. در قسمت دوم ابزار با حرکت بر روی سطح نهایی قطعه‌کار، فرم نهایی قطعه را ایجاد می‌کند.



شکل (۷): شبکه‌بندی تجهیزات.

می‌دهد. سرعت دورانی ابزار ۴۰ rpm و سرعت پیشروی ۲۰۰۰ mm/min انتخاب گردید. حرکت کنترل شده ابزار براساس زاویه ۲۵ درجه به ضخامت پره ۱ میلی‌متر، طول ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر تعیین شد. شکل ۵ ابزار سرکروی برای فرم‌دهی سازه را نشان می‌دهد.



شکل (۵): ابزار فرم‌دهنده.

جهت استخراج مسیر ابزار مدل سه‌بعدی سازه در نرم‌افزار Catia مدل‌سازی شد و با تغییر مسیر حرکت ابزار امکان استخراج مسیر دقیق ابزار مهیا گردید. سپس با ارسال مختصات نقاط به کنترلر دستگاه CNC حرکت ابزار بر روی سازه ایجاد شد.

۴- شبیه‌سازی عملیات شکل‌دهی سازه

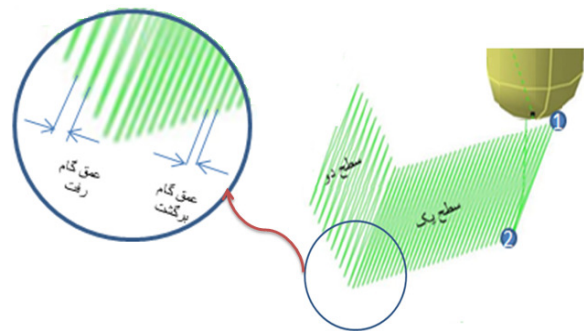
فرآیند فرم‌دهی سازه با روش تغییر شکل ماشینکاری و سپس بازگشت فنی حاصل از فرم‌دهی با روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. پایه بلوک فلزی به ابعاد (۶×۳×۲۵ mm) و پره نازک شده به ابعاد (۱×۲۰×۲۵ mm) می‌باشد. عملیات شکل‌دهی پره نازک شده و بلوک فلزی (شامل پره و پایه بلوک) به صورت سه‌بعدی قابل تغییر شکل و ابزار سرکروی با شعاع ۵ میلی‌متر به صورت صلب مدل‌سازی شدند. مشخصات مکانیکی ماده براساس آزمون کشش تک‌محوره به دست آمده است. در جدول ۱ خواص ماده و در شکل ۶، نمودار تنش - کرنش آلومینیوم (AL7051 T7451) نشان داده شده است. شکل ۷ شبکه‌بندی مدل سه‌بعدی ابزار و قطعه کار را در نرم‌افزار المان محدود برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی ماده.

نوع آلیاژ	σ_y (Mpa)	E (Gpa)	ν	ρ
AL7051 T7451	۴۶۹/۷	۷۰	۰/۳۳	۲۸۱۰

رفت و برگشت را نشان می‌دهد. میزان بازگشت فنری حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی برای دو نمونه در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی حاصل شده است. این نتایج صحت فرآیند شبیه‌سازی عددی را مورد تأیید قرار می‌دهد.

شکل ۸ مسیر دقیق حرکت ابزار بر روی سازه و گام فرم‌دهی مسیر رفت و برگشت را نشان داده است.



شکل (۸): مسیر دقیق حرکت ابزار بر روی سازه.

با انتقال نقاط مربوط به مسیر حرکت ابزار به مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS و حرکت ابزار بر روی سازه (متناسب با شکل سازه)، به تدریج فرم مورد نظر در سازه ایجاد می‌شود. ضریب اصطکاک بین ابزار و پره نازک شده $0/1$ [۱۵ و ۱۶] و برهم‌کنش بین دو سطح از نوع تماس صفحه به صفحه انتخاب شده است. پایه بلوک و همچنین پره با المان‌هایی با ابعاد بسیار کوچک ($0/3 \times 0/33 \times 0/33$ mm) تقسیم‌بندی شدند. در اغلب تحلیل‌های ارائه شده، به دلیل شکل یکنواخت ورق از نوع المان‌های سه‌بعدی مکعبی با ۸ گره در هر المان C3D8 استفاده گردید. المان‌ها با ابعاد بسیار کوچک ($0/3 \times 0/33 \times 0/33$ mm) تقسیم‌بندی شدند. جنس بلوک فلزی AL7051 T7451 در نظر گرفته شد. همچنین اندازه‌گیری تغییر مکان نهایی در روش عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS و در روش تجربی با استفاده از ماشین فرز اندازه‌گیری شد.

جهت صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، میزان بازگشت فنری در حالت تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه گردید. شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج تجربی تغییر فرم سازه با گام‌های متفاوت در مسیر



شکل (۹): تغییر فرم سازه بین گام‌های $0/08$ و $0/16$.

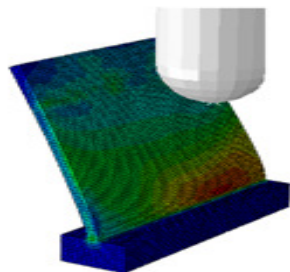
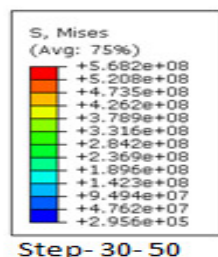


شکل (۱۰): تغییر فرم سازه بین گام‌های $0/09$ و $0/18$.

جدول (۲): درصد خطای نتایج تجربی و عددی.

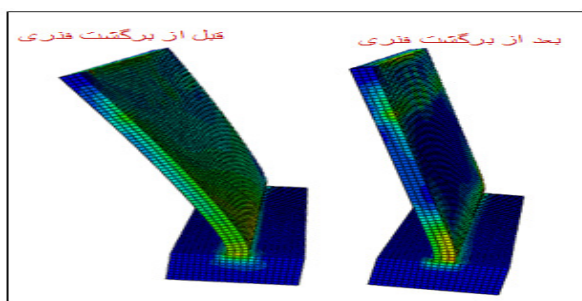
درصد خطا (درجه)	بازگشت فنری روش تجربی (درجه)	بازگشت فنری روش عددی (درجه)	زاویه طراحی (درجه)	گام فرم‌دهی		ردیف
				رفت (mm)	برگشت (mm)	
۱۱/۵۹	۶	۵/۳۰۴۶	۲۵	۰/۱۶	۰/۰۸	۱
۱۲/۴۶۱	۶/۵	۵/۶۹۰۰	۲۵	۰/۱۸	۰/۰۹	۲

ابزار و گام فرم‌دهی که مسیر ابزار را تشکیل می‌دهند متناسب با زاویه پره انتخاب گردید.



Step- 30- 50

شکل (۱۲): حل مسئله قبل از باربرداری.



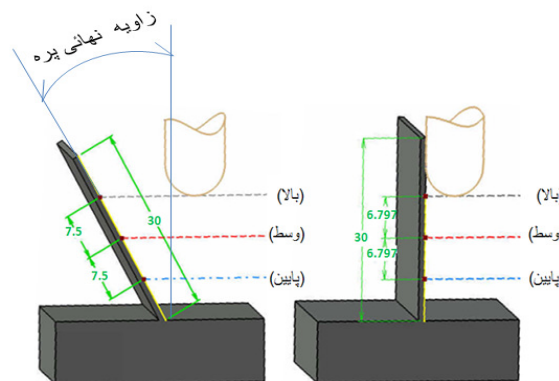
شکل (۱۳): بازگشت فنری قبل و بعد از تغییر شکل.

۵-۱- بازگشت فنری در زاویه ۱۵ درجه پره

در این قسمت میزان بازگشت فنری برای زاویه ۱۵ درجه پره مورد مطالعه قرار گرفته است. تمام موارد ارائه شده در بالا برای زاویه‌های ۲۵ و ۳۵ نیز صادق است. مقادیر بازگشت فنری، حاصل از چهار گام فرم‌دهی در سه مکان قرارگیری در شکل ۱۴ و جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از نمودار نشان می‌دهد که کم‌ترین مقدار بازگشت فنری در شکل ۱۴-الف در مکان قرارگیری بالا و گام فرم‌دهی برگشت ۰/۱ اتفاق افتاد و با کمتر شدن گام فرم‌دهی برگشت مقدار بازگشت فنری افزایش یافت. در شکل ۱۴-ب کم‌ترین مقدار بازگشت فنری در مکان قرارگیری وسط در گام برگشت ۰/۰۹ مشاهده شد. در این تحلیل نیز با کمتر شدن گام فرم‌دهی برگشت از بازگشت فنری نیز افزایش یافت. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مکان قرارگیری ابزار در پایین پره در تمام گام‌های فرم‌دهی به دلیل فاصله کم ابزار با انتهای پره نازک‌شده (پایه بلوک فلزی به‌عنوان تکیه‌گاه عمل کرده) نیروی فرم‌دهی بیشتر شده که این پدیده منجر به ایجاد شکم‌دهی در طول سازه می‌شود به‌همین دلیل از آوردن نتایج در جدول ۳ خوداری شد و شکل ۱۵ این موضوع را نشان می‌دهد.

۵- بررسی پارامترهای مؤثر در بازگشت فنری

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در بازگشت فنری، ۳۶ تحلیل متفاوت انجام شد. تحلیل‌های ارائه شده در نرم‌افزار به‌گونه‌ای تدوین شده‌اند که فاصله بین گام‌های فرم‌دهی در رفت و برگشت به ترتیب (۰/۸، ۰/۰۹، ۰/۱، ۰/۲) و (۰/۱۶، ۰/۱۸، ۰/۲، ۰/۴)، زوایای نهایی پره (۱۵، ۲۵، ۳۵) و مکان قرارگیری ابزار (بالا، وسط و پایین) مورد بررسی قرار گرفت. فاصله گام‌های فرم‌دهی در نرم‌افزار ABAQUS از نظر شکل‌دهی در دو مرحله متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله اول، فاصله بین گام‌های فرم‌دهی رفت و برگشت مساوی در نظر گرفته شدند. ولی در مرحله دوم، فاصله بین گام‌های فرم‌دهی رفت و برگشت انتخاب شد. بررسی‌های اولیه نشان داد که فاصله گام‌های فرم‌دهی رفت و برگشت مساوی به‌علت بازگشت فنری و شکم‌دهی بیشتر پره، برای شکل‌دهی سازه مناسب نمی‌باشند. یکی از پارامترهای مؤثر در میزان بازگشت فنری محل برخورد اولیه ابزار با پره می‌باشد. به این منظور سه مکان بالا، وسط و پایین بر روی پره در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ مکان قرارگیری اولیه ابزار به سه قسمت مساوی بالا، پایین و وسط و زاویه نهایی پره را به‌صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد.

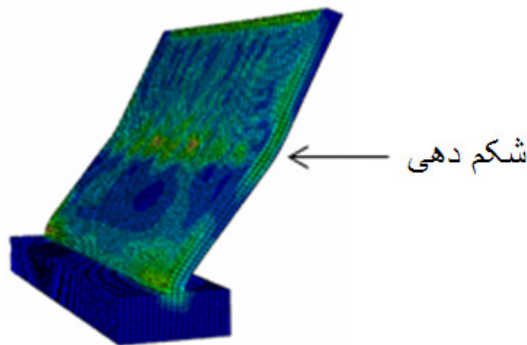


شکل (۱۱): مکان قرارگیری ابزار.

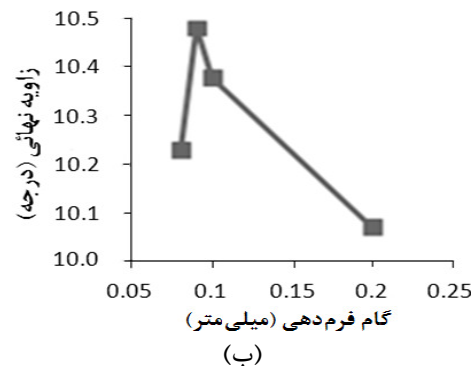
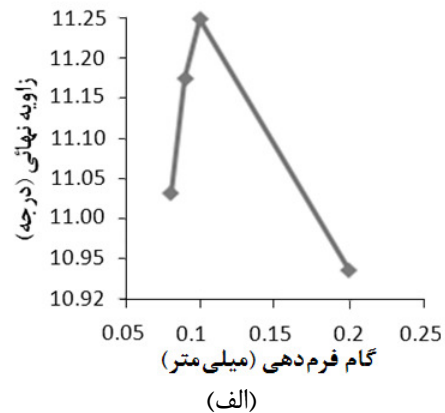
با توجه به شکل ۱۱ نوک ابزار سرکروی در ابتدا هر حرکت فرم‌دهی بر روی هر یک از مکان‌های قرارگیری اولیه ابزار (خط چین) مماس شده، و مرکز ابزار نسبت به محور تیغه پره در حالت عمود به اندازه شعاع ابزار فاصله دارد. در شبیه‌سازی عددی، پس از انجام بارگذاری و باربرداری مقدار بازگشت فنری محاسبه می‌گردد (شکل ۱۲ و ۱۳). شرایط تکیه‌گاهی، نوع تحلیل، مدل‌سازی، مونتاژ، ضخامت ورق و شبکه‌بندی برای تمام تحلیل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. پارامترهای مکان اولیه قرارگیری

جدول (۳): مقادیر بازگشت فنری در زاویه ۱۵ درجه.

ردیف	مکان اولیه قرارگیری ابزار	زاویه پره (درجه)	گام فرم دهی برگشت (میلی متر)	بازگشت فنری (درجه)
۱	بالا	۱۵	۰/۰۸	۳/۹۶۹۳
۲	بالا	۱۵	۰/۰۹	۳/۸۲۶۵
۳	بالا	۱۵	۰/۱	۳/۷۵۲۲
۴	بالا	۱۵	۰/۲	۴/۰۶۵۴
۵	وسط	۱۵	۰/۰۸	۴/۷۷۲۱
۶	وسط	۱۵	۰/۰۹	۴/۵۲۲
۷	وسط	۱۵	۰/۱	۴/۶۲۳۲
۸	وسط	۱۵	۰/۲	۴/۹۲۹۴
۹	پایین	۱۵	۰/۰۸	شکم گرفتگی
۱۰	پایین	۱۵	۰/۰۹	شکم گرفتگی
۱۱	پایین	۱۵	۰/۱	شکم گرفتگی
۱۲	پایین	۱۵	۰/۲	شکم گرفتگی



شکل (۱۵): شکم گرفتگی سازه در مکان قرارگیری پایین.



شکل (۱۴): تأثیر گام فرم دهی و مکان اولیه ابزار در زاویه ۱۵ درجه، الف) زاویه نهایی پره در گام‌های مختلف در مکان قرارگیری بالا و ب) زاویه نهایی پره در گام‌های مختلف در مکان قرارگیری وسط.

۵-۲- بازگشت فنری در زاویه ۲۵ درجه پره
 مقادیر اندازه‌گیری شده بازگشت فنری برای زاویه ۲۵ درجه پره، در جدول ۴ نشان داده شده است. مکان قرارگیری ابزار در پایین پره به دلیل فاصله کم ابزار با انتهای سازه نازک شده (مانند زاویه ۱۵ درجه) و منجر به ایجاد شکم‌دهی پره در طول سازه شد. شکل ۱۶ به بررسی مقادیر بازگشت فنری بر اساس جدول ۴ می‌پردازد. کم‌ترین مقدار بازگشت فنری برای شکل ۱۶-الف در گام فرم دهی برگشت ۰/۱ اتفاق افتاد و با کمتر شدن گام فرم دهی مقدار بازگشت فنری افزایش یافت. اثر زاویه نهایی مکان قرارگیری بالا در گام فرم دهی برگشت در شکل ۱۶-الف نشان داده شده است.

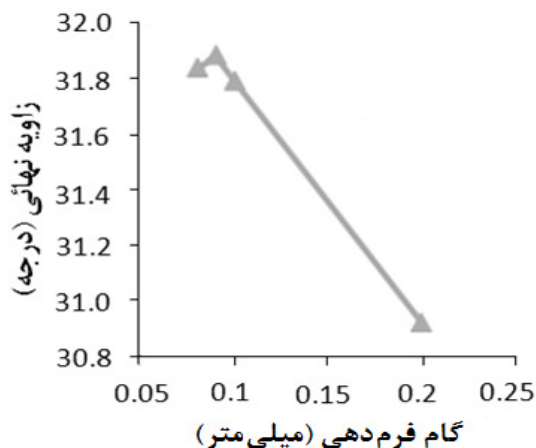
جدول (۴): مقادیر بازگشت فنری در زاویه ۲۵ درجه.

ردیف	مکان اولیه قرارگیری ابزار	زاویه پره (درجه)	گام فرم دهی برگشت (میلی متر)	بازگشت فنری (درجه)
۱	بالا	۲۵	۰/۱۶	۵/۴۵۳۹
۲	بالا	۲۵	۰/۱۸	۵/۲۸۳۸
۳	بالا	۲۵	۰/۲	۵/۰۹۸۳
۴	بالا	۲۵	۰/۴	۵/۸۱۱
۵	وسط	۲۵	۰/۱۶	۴/۳۸۱
۶	وسط	۲۵	۰/۱۸	۳/۶۰۹
۷	وسط	۲۵	۰/۲	۳/۳۹۰۴
۸	وسط	۲۵	۰/۴	۳/۵۱۴۱

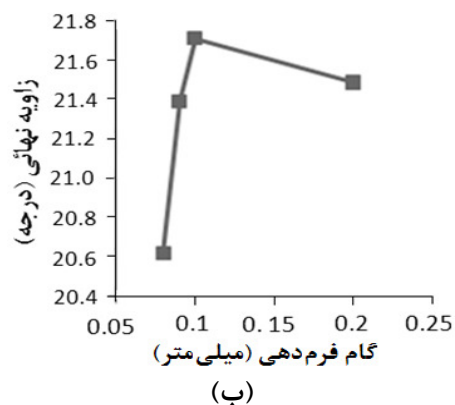
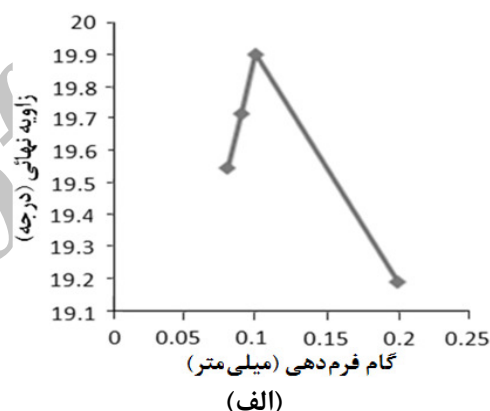
۰/۱ به دست آمد. در این تحلیل نیز با کمتر شدن گام فرم دهی، بازگشت فنری نیز افزایش یافت. شکل ۱۶- ب اثر این پارامترها را نشان می دهد.

۵-۳- بازگشت فنری در زاویه ۳۵ درجه پره

شکل ۱۷ مقادیر حاصل از زاویه نهایی پره در مکان قرارگیری بالا بعد بازگشت فنری را نشان می دهد. در این زاویه پره فقط با یک نمودار به علت شکم دهی پره در مکان قرارگیری وسط و پایین آورده شده است. با توجه به نمودار ارائه شده با کاهش گام فرم دهی میزان بازگشت فنری نیز کاهش می یابد. کم ترین میزان بازگشت فنری در گام فرم دهی ۰/۰۹ در برگشت بوده و با کاهش گام فرم دهی، میزان بازگشت فنری مجدداً افزایش یافت. جدول ۵ نتایج حاصل از بررسی مقادیر بازگشت فنری را برای زاویه ۳۵ درجه پره نشان می دهد.



شکل (۱۷): زاویه نهایی پره در مکان قرارگیری بالا.



شکل (۱۶): تأثیر گام فرم دهی در زاویه ۲۵ درجه، الف) زاویه نهایی پره در گام های مختلف در مکان قرارگیری بالا و ب) زاویه نهایی پره در گام های مختلف در مکان قرارگیری وسط.

کم ترین مقدار بازگشت فنری بر اساس نمودار شکل ۱۶- ب در مکان قرارگیری وسط مانند مکان قرارگیری بالا در گام فرم دهی

جدول (۵): مقادیر حاصل از بازگشت فنری در زاویه ۳۵.

ردیف	مکان قرارگیری ابزار	زاویه (درجه)	گام فرمدهی		بازگشت فنری (درجه)
			رفت (میلی متر)	برگشت (میلی متر)	
۱	بالا	۳۵	۰/۰۸	۰/۱۶	۳/۱۶۲۳
۲	بالا	۳۵	۰/۰۹	۰/۱۸	۳/۱۱۷۱
۳	بالا	۳۵	۰/۱	۰/۲	۳/۲۰۹۲
۴	بالا	۳۵	۰/۲	۰/۴	۴/۰۷۹

(بالا، وسط و پایین) بر پدیده بازگشت فنری با استفاده از یک فرآیند شکل‌دهی نوین به صورت تجربی و عددی پرداخته شد. براساس نتایج پارامترهای به دست آمده از شبیه‌سازی اجزاء محدود، امکان بررسی شکل‌پذیری سازه‌ها در عملیات شکل‌دهی تدریجی با پارامترهای مؤثر فراهم گردید. با توجه به نتایج ارائه شده، با کاهش فاصله بین گام‌های فرم‌دهی، میزان بازگشت فنری نیز کاهش می‌یابد. چنانچه گام‌های فرم‌دهی از حد معمول کمتر انتخاب شود این کاهش گام باعث تعداد حرکات بیشتر ابزار برای فرم‌دهی سازه می‌شود، در نتیجه در پره نازک شده کارسختی ایجاد شده که این کارسختی نیز منجر به شکم دهی پره می‌شود. همچنین، بهترین مکان قرارگیری در فرآیند تغییرشکل ماشینکاری برای کلیه زوایا، مکان بالا، به دلیل بازگشت فنری کمتر می‌باشد.

۸- مراجع

1. Gan, W., and Wagoner, R.H. "Die Design Method for Sheet Springback", Int. J. Mech. Sci., Vol. 46, No.7, PP. 1097-1113, 2004.
2. Papeleux, L. and Ponthot, J-P., "Finite Element Simulation of Springback in Sheet Metal Forming", J. Material Proc. Tech., Vol. 125, No.9, PP.785-791, 2002.
3. Narasimhan, N. and Lovell, M. "Predicting Springback in Sheet Metal Forming: an Explicit to Implicit Sequential Solution Procedure", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 33, No.1, PP. 29-42, 1999.
4. Jeswiet, J. and Szekeres, A. "Forces in Single Point Incremental Forming", Transactions of North American Manufacturing Research Institute, Vol. 33, pp. 339-404, 2005.
5. Jeswiet, J. and Young, D. "Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Forming", Transactions of the North American Manufacturing Research Institute, Vol. XXXIII, pp. 391-397, 2005.

۶- دست‌یابی به کم‌ترین بازگشت فنری براساس پارامترهای مؤثر

مکان قرارگیری ابزار در زوایای مختلف به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بازگشت فنری شناخته شد. بعد از شناسایی، این پارامتر مهم در سه مکان بالا، وسط و پایین مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که از نتایج نمودارها مشاهده می‌شود در اکثر مکان‌های قرارگیری اولیه ابزار با کاهش گام فرم‌دهی برگشت از ۰/۲ تا ۰/۰۹ میزان بازگشت فنری کاهش پیدا کرد. ولی کاهش گام فرم‌دهی برگشت از ۰/۰۹ تا ۰/۰۸ باعث افزایش بازگشت فنری شد. همچنین، کمترین میزان بازگشت فنری در تمام مکان‌های قرارگیری اولیه ابزار در گام فرم‌دهی برگشت ۰/۱ تا ۰/۰۹ برحسب تحلیل‌های شبیه‌سازی عددی به دست آمدند. بنابراین، با توجه به نمودارهای ارائه شده، برای کاهش میزان بازگشت فنری در زوایای کم از گام فرم‌دهی نزدیک به ۰/۱ تا ۰/۰۹ و برای زوایای بیشتر سازه از گام فرم‌دهی نزدیک به ۰/۱ پیشنهاد می‌شود. مکان قرارگیری ابزار در پایین پره، به دلیل فاصله کم ابزار تا انتهای سازه در تمام موارد منجر به شکم‌دهی پره می‌شود. بنابراین، مکان قرارگیری پایین، مکان مناسبی برای فرم‌دهی سازه نمی‌باشد. همچنین پدیده شکم‌دهی سازه در مکان قرارگیری ابزار در وسط پره در زاویه زیاد ۳۵ نیز رخ می‌دهد که علت آن زاویه زیاد پره می‌باشد. در نهایت این موضوع بدین نتیجه منجر شد که برای فرم‌دهی زوایای بیشتر باید مکان ابتدایی قرارگیری ابزار در نقطه بالاتر قرار گیرد.

۷- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی اثر پارامترهایی نظیر فاصله بین گام‌های فرم‌دهی در رفت و برگشت و مکان قرارگیری ابزار

12. Tlustý, J., Smith, S., and Winfough, R.G. "Techniques for the Use of Long Slender End Mills in High-Speed Milling", Annals of the CIRP, Vol. 45, No.1, pp. 393-396, 1996.
13. Smith, S., Winfough, R.G., and Halley, J. "The Effect of Tool Length on Stable Metal Removal Rate in High Speed Milling", Annals of the CIRP, Vol. 47, No.1, pp. 307-310, 1998.
14. Smith, S. and Dvorak, D. "Tool Path Strategies for High Speed Milling Aluminum Workpieces with Thin Webs", Mechatronics J. Vol. 8, No.4, pp. 291-300, 1998.
15. Minutolo, F.C., Durante, M., Formisano, A., and Langella, A. "Evaluation of the Maximum Slope Angle of Simple Geometries Carried out by Incremental Forming Process", J. Materials Proc. Tech., Vol. 194, No. 1-3, pp. 145-150, 2007.
16. Pohlak, M., Majak, J., and Kuttner, R. "Manufacturability and Limitation in Incremental Sheet Forming", Proc. Estonian Acad., Vol.13, No. 2, pp. 129-139, 2007.
6. Smith, S., Woody, B., Ziegert, J., and Huang, Y. "Deformation and Machining A New Hybrid Process", Annals of the CIRP, Vol. 56, No.1, pp. 281-284, 2007.
7. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Doflou, J., and Allwood, J. "Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal", Annals of the CIRP, Vol. 54, No.2, pp. 88-114, 2005.
8. Nakagawa, T. "Recent Developments in Auto Body Panel Forming Technology", Annals of the CIRP, Vol. 42, No.2, pp. 313-317, 1993.
9. Halley, J. et Al. "The Impact of High Speed Machining of Aluminum on the Design and Configuration of Aerospace Components", Proc. of the 1999 ASME Design Eng. Technical Conf., pp. 1-5, 1999.
10. Smith S., "Deformation Machining Combines Two Techniques', <http://support.blueswarf.com/customer/portal/articles/75844-deformation-machining-combines-two-techniques>
11. Kim, Y.H. and Park, J.J. "Effect of Process Parameters on Formability in Incremental Forming of Sheet Metal", J.Materials Proc. Tech., Vol. 130-131, pp. 42-46, 2002.

Archive of SID