

تحلیل عددی و تجربی شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای قطعات با هندسه پیچیده

مجتبی اسماعیلیان^۱، خلیل خلیلی^۲

۱ دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲ استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، kkhali@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۷

چکیده

در این پژوهش به کمک شبیه‌سازی و مقایسه نتایج آن با مشاهدات آزمایشگاهی به بررسی عددی و تجربی فرآیند شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای بر روی قطعات با فرم آزاد پرداخته شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، شبیه‌سازی شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای در معدود تحقیقاتی برای قطعات با فرم‌های مشخص نظیر نیم کره و هرم منتظم ناقص که مسیر ابزار به سادگی با توابع ریاضی قابل تعریف است، انجام شده است. این در حالی است که روش اتخاذ شده برای شبیه‌سازی شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای در این مقاله محدود به فرم خاصی نیست. در این مقاله شبیه‌سازی عددی برای لوله آگزوز یک نوع هلیکوپتر انجام شده و سپس با کمک آزمایش‌های تجربی صحت نتایج شبیه‌سازی تایید شده است. با مقایسه نمودار حد شکل دهی ورق مورد نظر و نمودارهای کرنش‌های اصلی و فرعی بدست آمده از شبیه‌سازی در حین فرآیند می‌توان از سلامت ورق و به طور کلی امکان انجام شکل دهی افزایشی دو نقطه‌ای بر روی قطعه مورد نظر اطمینان حاصل کرد.

واژگان کلیدی

شکل دهی افزایشی ورق فلزی، شبیه‌سازی اجزای محدود، فرم آزاد.

۱. مقدمه

مشخص که کل سطح قطعه را پوشش می‌دهد، انجام می‌پذیرند. طبق این تعریف، انواع مختلفی از فرآیند شکل دهی افزایشی وجود دارند از جمله: شکل دهی چرخشی^۲، شکل دهی برشی^۳، شکل دهی سیلانی^۴ و فرآیندهای شکل دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای^۵ و دو نقطه‌ای^۶. در فرآیند شکل دهی چرخشی به وسیله‌ی یک غلتک، ورق در حال چرخش بر روی مندرل چرخنده متقارن نشانده می‌شود و ورق دارای شکل متقارن محوری می‌شود. اساس فرآیندهای شکل دهی برشی و سیلانی نیز همانند شکل دهی

تولید قطعات از ورق‌های فلزی با استفاده از ساخت قالب و ابزار خاص، زمانی که در بخش تحقیق و توسعه و یا در صنایعی مانند صنایع هوایی که تیراژ تولید پایین است، مقرون به صرفه نیست و استفاده از فرآیند شکل دهی افزایشی یکی از بهترین پیشنهادها می‌باشد. فرآیند شکل دهی افزایشی ورق‌ها^۱ به طور کلی به گروهی از فرآیندهای شکل دهی اطلاق می‌شود که در آنها تغییر شکل‌ها به صورت محلی، پشت سر هم، افزایشی و در مسیری

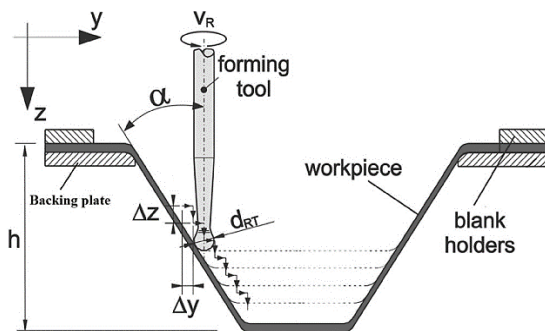
چرخشی است و تفاوت اصلی این سه روش در ضخامت قطعه‌ی شکل‌داده شده‌ی نهایی است.

به منظور شکل‌دهی قطعات با فرم‌های غیر از حالت متقارن محوری، برخی از روش‌های شکل‌دهی افزایشی از جمله فرآیندهای شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای به گونه‌ای توسعه داده شده‌اند که در آن‌ها حرکت ابزار توسط یک ماشین کنترل عددی^۷، هدایت می‌شود. در فرآیند مذکور یک ابزار سرگروی کوچک که با ورق خام دارای یک نقطه‌ی تماسی است بر روی یک مسیر مشخص توسط کاربر حرکت کرده (شکل ۱) و فرم نهایی قطعه را بر روی ورق ایجاد می‌کند [۲۰]. این فرآیند برای اولین بار به عنوان ثبت اختراع در سال ۱۹۶۷ توسط لیزاک معرفی شد [۳]. اما شکوفایی اصلی این روش در اواخر دهه‌ی ۷۰ و اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی و با ظهور ماشین‌های کنترل عددی رخ داد. در این دوران میسون و اپلتن [۴] برای اولین بار مفهوم شکل‌دهی افزایشی غیر متقارن را معرفی کردند و نشان دادند که شکل‌پذیری انعطاف‌پذیر ورق فلزی با حرکت ابزار سرگروی بر روی آن به وسیله‌ی دستگاه کنترل عددی امکان‌پذیر است.

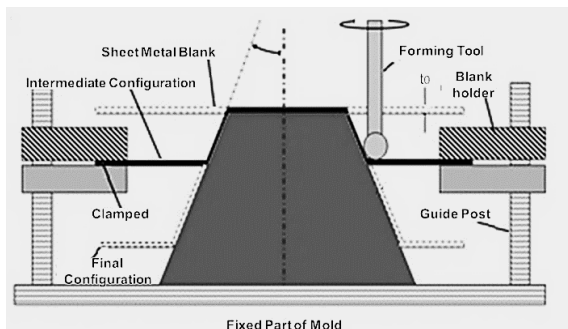
مزایای اصلی روش شکل‌دهی افزایشی نسبت به دیگر روش‌های شکل‌دهی فلزات عبارتند از: هزینه‌ی لازم به مراتب پایین‌تر برای انجام این فرآیند نسبت به روش‌های مرسوم شکل‌دهی [۵]، انعطاف‌پذیری بالا به دلیل امکان تغییر فرم قطعه‌ی نهایی با تغییر برنامه ماشین کنترل عددی [۶]، فرم‌پذیری بالاتر ورق نسبت به دیگر روش‌های مرسوم با توجه به اعمال نیرو به صورت نقطه‌ای، استفاده از این فرآیند به دلیل انعطاف‌پذیری و سادگی راه‌اندازی در نمونه‌سازی سریع^۸ و مواقعی که تولید انبوه مد نظر نیست، انتخاب ماشین مناسب با محدودیت کمتر به دلیل نیاز به نیروی پایین‌تر برای انجام این فرآیند نسبت به روش‌های مرسوم شکل‌دهی [۷]. نوع دیگری از این فرآیند، شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای می‌باشد. در این روش، یک سنبه ثابت در زیر ورق قرار داده شده و ابزار سرگروی ورق را به صورت افزایشی بر روی سنبه می‌نشانند و در نهایت ورق فرم سنبه زیرین را به خود می‌گیرد (شکل ۲) [۸]. تفاوت اصلی دیگر روش شکل‌دهی دو نقطه‌ای نسبت به حالت تک‌نقطه‌ای، فرم‌پذیری بیش‌تر می‌باشد.

تاکنون پارامترهای مختلف فرآیند شکل‌دهی افزایشی در تحقیقات مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. برای نمونه در زمینه پارامترهای تأثیرگذار بر روی مقدار شکل‌پذیری در این

فرآیند، محققان مختلفی با استفاده از راهکارهای تئوری و شبیه‌سازی به بررسی اثر پارامترهای مختلف نظیر دما [۹-۱۱]، حداکثر زاویه دیواره [۱۲-۱۴]، گام عمودی ابزار [۱۵-۱۷]، اندازه ابزار [۱۶-۱۸] و مسیر حرکت ابزار [۱۹ و ۲۰] بر روی میزان شکل‌پذیری ورق پرداخته‌اند. برای مثال با افزایش دما، کاهش اندازه گام‌های عمودی و همچنین کاهش شعاع سر ابزار می‌تواند شکل‌پذیری ورق را در فرآیند مذکور افزایش داد. تعداد دیگری از تحقیقات بر روی بررسی مدهای شکست و پارگی ورق و پارامترهای موثر بر آن در فرآیند شکل‌دهی افزایشی متمرکز بوده‌اند و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، تئوریک و شبیه‌سازی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند.



شکل ۱. شماتیک فرآیند شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای [۷]



شکل ۲. شماتیک فرآیند شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای [۸]

امروزه با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود، شبیه‌سازی لازم را جهت پیش بینی رفتار فرآیند می‌توان انجام داد. مزیت شبیه‌سازی اجزای محدود صرفه جویی در وقت و هزینه می‌باشد. اولین تحلیل‌های عددی در فرآیند شکل‌دهی افزایشی مربوط به کیم و پارک می‌باشد که به تحلیل تجربی و تحلیل المان محدود اثر پارامترهای فرآیند از قبیل اندازه و نوع ابزار، نرخ پیشروی، اصطکاک در سطح تماس بین ابزار و ورق است که بر روی قابلیت شکل‌دهی ورق فلزی در شکل‌دهی

طبق دانش نویسندگان، بررسی پارامترهای دخیل در مورد نوع دونقطه‌ای چه از لحاظ تئوریک و چه از طریق شبیه‌سازی چندان که باید مورد توجه قرار نگرفته است [۲۸]. شبیه‌سازی عددی، شکل‌دهی افزایشی دونقطه‌ای تنها در چند مقاله‌ی محدود مورد بررسی قرار گرفته است [۲۹ و ۳۰]. نکته قابل توجه اینکه، در معدود مقالات ارائه شده با موضوع شبیه‌سازی عددی فرآیند دونقطه‌ای نیز، بر روی قطعات با فرم مشخص و متقارن نظیر نیم‌کره ناقص، مخروط ناقص و هرم متقارن ناقص انجام شده است و تحقیقی در مورد شبیه‌سازی شکل‌دهی افزایشی دونقطه‌ای برای قطعات با فرم آزاد انجام نشده است. علت این امر مشکلات اعمال مسیر حرکت ابزار در شبیه‌سازی برای قطعات با فرم آزاد است. در مورد قطعات با فرم مشخص و متقارن نظیر آنچه گفته شد مسیر حرکت ابزار با توابع ریاضی به راحتی قابل تعریف و پیاده‌سازی در شبیه‌سازی می‌باشد و این در حال است که قطعات صنعتی اکثراً دارای شکل‌هایی هستند که از یک معادله خاص پیروی نمی‌کنند.

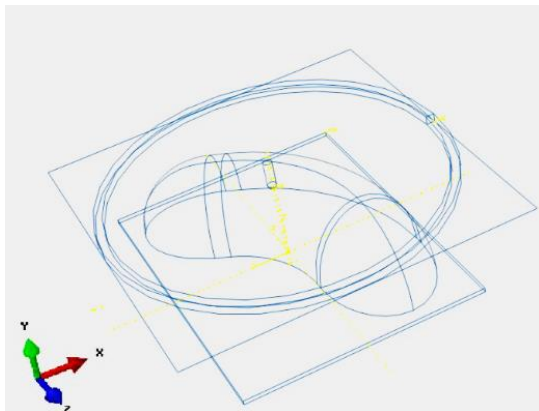
در این پژوهش هدف اصلی بیان روند مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی فرآیند شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای با روش اجزاء محدود بر روی قطعات با فرم آزاد می‌باشد. همانطوری که اشاره شد هزینه فرآیند دونقطه‌ای نسبت به حالت تک‌نقطه‌ای به دلیل هزینه‌ی ساخت سنبه‌ی زیرین بالاتر است. بنابراین پیش‌بینی پارگی ورق پیش از انجام فرآیند عملی و ساخت سنبه زیرین به منظور کاهش هزینه‌های سعی و خطا ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق با انجام شبیه‌سازی عددی به همراه تست‌های آزمایشگاهی به بررسی و مقایسه پارگی ورق با استفاده از دو روش پرداخته شده است. معیار پارگی ورق در شبیه‌سازی عددی این فرآیند بررسی کرنش‌های ایجاد شده در ورق و مقایسه آن با نمودار حدشکل‌دهی حاصل از تست‌های تجربی مربوط به این ورق می‌باشد. در صورتی که مقادیر کرنش در هر مرحله از فرآیند، از حد مجاز تغییر شکل عبور کرده باشد، می‌توان گفت پارگی ورق در این مرحله یا در این عمق شکل‌دهی صورت گرفته است. در این مقاله شبیه‌سازی عددی برای لوله آگزوز یک موتور هلیکوپتر که در شکل ۳ نمایش داده شده، انجام شده و سپس با کمک آزمایش‌های تجربی صحت نتایج شبیه‌سازی تایید شده است. برای ساخت این لوله آگزوز ابتدا به صورت دو نیم‌لوله ساخته شده و سپس با کمک جوشکاری به یکدیگر متصل می‌شوند.

افزایشی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که با افزایش نرخ پیشروی و کاهش اصطکاک قابلیت شکل‌دهی ورق بیشتر می‌شود [۲۱]. هیرت و همکارانش [۲۲] در تحقیق خود دو محدودیت اصلی فرآیند شکل‌دهی افزایشی، یعنی بیشینه زاویه دیواره قابل دستیابی و ایجاد انحراف هندسی را ارائه کردند. آن‌ها تعدادی استراتژی شکل‌دهی و مدل‌سازی المان محدود فرآیند را برای شکل‌دهی افزایشی ورق، به منظور غلبه بر محدودیت‌های فرآیند پیشنهاد دادند.

روش‌های جدید برای مدل‌سازی و مباحث اجزای محدود در تماس بین ابزار و ورق فلزی در فرآیندهای شکل‌دهی افزایشی با ابزار صلب بر مبنای تحلیل دینامیکی صریح توسعه پیدا کرده است. اما هنرودو همکارانش [۲۳] مقایسه بین این رویکرد جدید با رویکرد قدیمی بر مبنای تحلیل استاتیکی را انجام دادند. پس از آن نیز بررسی رفتار مدل‌سازی آلومینیوم در فرآیند شکل‌دهی افزایشی تک نقطه‌ای و تطابق دادن نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار آباکوس و نتایج آزمایشگاهی توسط دیکلتات و همکارانش به ثبت رسید [۲۴]. از جمله موارد مشکل ساز در انجام شبیه‌سازی این گونه فرآیندها در تحلیل دینامیکی، زمان گیر بودن انجام محاسبات می‌باشد. برای کاهش زمان تحلیل، هدوش از روش پالایش کردن مش بندی استفاده نمود که این روش بدون این‌که تاثیری در نتایج داشته باشد، زمان محاسباتی را کاهش داد [۲۵].

یاماچیتا و همکارانش [۱۹] کاربرد تکنیک‌های عددی را برای فرآیند شکل‌دهی افزایشی ورق‌های فلزی تحقیق کرده و از کد اجزای محدود صریح دینامیکی DYNA3D برای یک هرم با قاعده مربعی شکل استفاده کردند. ازوزی و لبال [۲۶] در یک تحقیق با استفاده از تحلیل المان محدود در ترکیب با روش سطح پاسخ^۱ و الگوریتم برنامه ریزی غیر خطی متوالی^۲، مسیر ابزار را بهینه‌سازی کرده و به منظور کاهش زمان ساخت و توزیع ضخامت یکنواخت یک قطعه نامتقارن، از بین مسیرهای مختلف ماریچ (از نظر تعداد دور و گام حرکت)، حالت بهینه مورد بررسی قرار دادند. هنرپیشه و همکارش [۲۷] یک مطالعه تجربی بر روی پارامترهای فرآیند شکل‌دهی افزایشی ورق‌های دولایه آلومینیوم - مس که به روش جوشکاری انفجاری تولید شده‌اند انجام داده‌اند. نکته‌ای که با مرور تحقیقات گذشته می‌توان دریافت این است که اکثر تحقیقات انجام شده بر روی جنبه‌های مختلف شکل‌دهی افزایشی بر روی نوع تک‌نقطه‌ای متمرکز بوده است.

صفحه‌ی فوقانی قالب متصل می‌شود. این قطعه، به شکل یک پوسته صلب، در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. قطر داخلی، قطر خارجی و ارتفاع رینگ به ترتیب ۳۸، ۴۰ و ۴ سانتی‌متر است. یکی دیگر از قطعات اصلی در فرآیند شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای سنبه زیرین است. شکل سنبه بر اساس تغییر فرم مورد نظر انتخاب می‌شود. این سنبه، به صورت یک جسم صلب سه‌بعدی مدل شده است. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار به منظور اعمال شرایط مرزی و مشاهده نتایج (نیروی شکل‌دهی وارد شده بر سنبه)، یک نقطه مرجع برای سنبه در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت شکل قطعه نهایی مورد نظر تنها قسمت میانی سنبه را شامل می‌شود که مانند یک نیم لوله دو سر باز است. ولی برای این که امکان انجام شکل‌دهی افزایشی وجود داشته باشد دوسر لوله به شکل یک ربع کره اضافه می‌گردد. اضافه کردن یک کفی به شکل مستطیل این امکان را فراهم می‌کند که در مازول اسمبلی دستگاه مختصات دقیقاً منطبق با دستگاه مختصات در نرم‌افزار طراحی گردد. ابزار فرم دهنده‌ی سر گروهی نیز به صورت یک قطعه صلب با شعاع سر ابزار ۱۰ میلی‌متر مدل شده است. نمای سیمی قطعات مونتاژ شده در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵. نمای سیمی قطعات مونتاژ شده

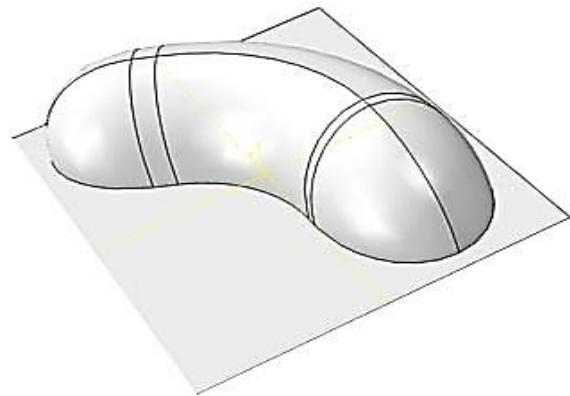
پس از این که قطعات به درستی تعریف شدند باید جنس ورق در نرم‌افزار معرفی گردد. به منظور انجام عملیات شکل‌دهی، از ورق آلومینیوم ۲۰۲۴ پیش از عملیات حرارتی استفاده شده است. چگالی آلومینیوم برابر با ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسون آن برابر با ۰/۳۳۴ در نظر گرفته شده است. همچنین، مدول یانگ ورق آلومینیومی برابر با ۷۰ گیگاپاسکال است. مقطعی با جنس آلومینیوم و ضخامت 1 mm تعریف می‌شود و به ورق



شکل ۳. لوله اگزوز یک موتور هلیکوپتر

۲. روند تحلیل و شبیه‌سازی

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی اجزاء محدود شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. ابتدا بر مبنای قطعه درخواستی، سنبه متناسب با آن در نرم‌افزار طراحی می‌گردد. در شکل ۴ مدل سنبه طراحی شده نمایش داده شده است. به منظور شبیه‌سازی این فرآیند، ابتدا با استفاده از ساده‌سازی‌های لازم، تجهیزات اصلی در حین فرآیند فرم‌دهی شامل ورق، رینگ و ورق گیر، سنبه، ابزار فرم‌دهنده مدل‌سازی می‌شوند.



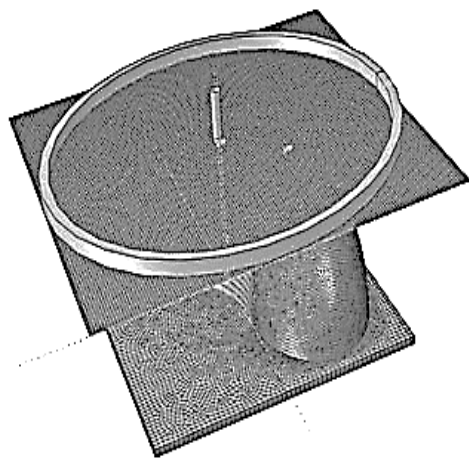
شکل ۴. مدل سنبه به صورت قطعه صلب سه‌بعدی

ورق فلزی، به عنوان یک جسم شکل‌پذیر، سه‌بعدی و پوسته مدل‌سازی می‌گردد. به دلیل استفاده از پوسته، سرعت تحلیل و محاسبات افزایش می‌یابد و از طرف دیگر به دلیل ضخامت اندک ورق این فرض قابل قبول است. لازم به ذکر است ضخامت ورق 1mm در نظر گرفته شده است. با توجه به ابعاد سنبه، اندازه ورق $40 \times 40 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شده است. در فرآیند شکل‌دهی افزایشی، ورق فلزی با استفاده از یک رینگ و تعدادی پیچ، به

می‌شود و با ضرب شدن در میزان 2-amplitude در هر لحظه (بین ثانیه ۱ تا ۱۱) میزان جابه‌جایی واقعی تعیین می‌گردد. به همین ترتیب برای راستای y و z شرایط مرزی تعریف می‌شود.

میزان جابه‌جایی رینگ در راستای ارتفاع به اندازه $0/9$ مقدار پایین رفتن ابزار تعریف شده است. دلیل آن است که در این روش لازم است شکل دهی توسط حرکت رو به پایین ابزار صورت گیرد در صورتی که رینگ بیش از میزان حرکت ابزار پایین رود موجب کشیده شدن ورق و شکل‌دهی روی سنبه می‌گردد.

در مرحله‌ی بعد می‌بندی مناسب بر روی قطعات ایجاد خواهد شد. در این قسمت مطابق شکل ۶ باید دو قطعه صفحه (که شکل‌پذیر تعریف شده است) و سنبه (که به صورت صلب گسسته^{۱۲} تعریف شده است) شبکه‌بندی گردد. چون در ماژول مونتاژ مش وابسته در نظر گرفته شده است، بنابراین هر قطعه جداگانه مش‌بندی می‌شود. برای انتخاب مش مطلوب برای حل این مساله با توجه به تحلیل‌های اولیه انجام شده و برطرف کردن اشکال‌های ایجاد شده حین حل و با توجه به همگرا شدن نتایج و این موضوع که در کمینه زمان حل، دقیق‌ترین جواب را ارائه دهد، اندازه المان برای ورق سه میلی‌متر و برای سنبه پنج میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. شبکه‌بندی کامل قطعات

در نهایت در ماژول job ، تعریف مناسب روش حل انجام می‌شود. پس از این که این حل انجام شود، مدل اولیه برای تحلیل نهایی آماده شده است. بنابراین از فولدر حل فایل ورودی را برداشته می‌شود و با اضافه کردن کدهای مربوط به دامنه، ست‌ها و گام‌های حل، فایل ورودی نهایی آماده می‌گردد. هر اجرا با استفاده از رایانه‌ای با پردازشگر مرکزی ۸ هسته‌ای، فرکانس

مورد نظر نسبت داده می‌شود. بدیهی است سایر قطعات (رینگ، ابزار و سنبه) از آنجا که به صورت صلب تعریف شده‌اند، نیاز به تعریف خواص ندارند.

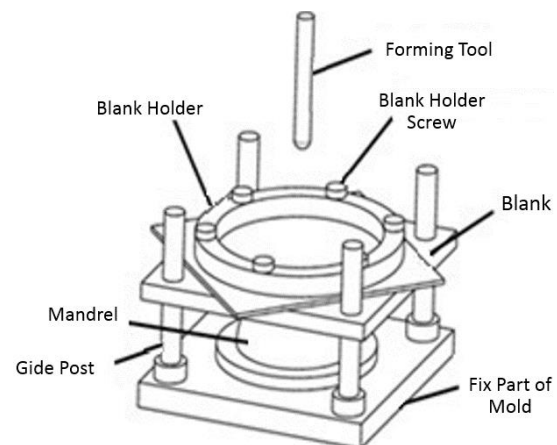
در ماژول گام کافی است دو مرحله با رویه دینامیک صریح تعریف گردد. گام اول در بازه زمانی ۱ ثانیه و گام دوم در بازه زمانی ۱۰ ثانیه تعریف می‌گردد. مساله دیگری که در این جا حائز اهمیت است بحث تعریف مقیاس‌دهی جرمی^{۱۱} است. بنابراین در ناحیه ورق در هرگام به اندازه ۱۰۶ افزایش جرم تعریف می‌شود. طبیعی است که برای تحلیلی دینامیکی در صورتی که جرم تغییر نماید، نتایج تحلیل نیز تغییر خواهند کرد. ولی در بعضی حالات کاربرد این تکنیک برای تعدادی المان کوچک که به واسطه اقتضای تحلیل با ابعاد کم تعریف شده‌اند، می‌تواند قابل قبول باشد، و با توجه به حجم بالای محاسبات در این تحلیل انجام این تکنیک به حل سریع‌تر مساله کمک می‌کند. به دلیل تغییر در چگالی اجسام و ذات مسئله، باید انتخاب مقدار مناسب برای مقیاس‌دهی جرمی با احتیاط صورت گیرد. به دلیل ذات شبه‌استاتیکی فرآیند شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای، لازم است پس از حل نسبت انرژی جنبشی به انرژی کرنشی از ۱۰٪ کوچک‌تر باشد. در این تحلیل عدد مذکور بر مبنای این که معیار فوق برقرار باشد انتخاب شده است. در ماژول بار، شرایط مرزی وارد بر قطعات تعیین می‌گردد. ابتدا نقطه مرجع سنبه که قبلاً تعریف شده است را به طور کامل مقید کرده و بدین ترتیب ۶ درجه آزادی سنبه گرفته می‌شود. چهار طرف ورق را انتخاب کرده و همه درجات آزادی آن، به جز راستای y محدود می‌شود. برای رینگ نیز شرایط مرزی مشابهی اعمال خواهد شد. در مرحله بعد شرایط مرزی گام ۱ تعریف می‌گردد. تمام شرایط مرزی تعریف‌شده تاکنون باید به گام ۱ توسعه یابند. سپس ابزار را به میزان یک میلی‌متر در راستای y پایین آورده، درحالی که سایر راستاهای ابزار مقدار جابه‌جایی برابر صفر خواهد بود. در این حالت زمانی که ابزار با سطح ورق تماس پیدا کند، گام یک به اتمام می‌رسد.

در گام دو، شرایط مرزی تعریف می‌شود. بنابراین میزان جابه‌جایی برابر یک وارد می‌شود و حرکت اصلی از طریق تعریف دامنه اعمال می‌شود. با توجه به شکل ۵ حرکت دورانی ابزار با سرعت ۳۰ دور بر دقیقه در راستای y (راستای ابزار) تعریف می‌شود. حرکت خطی در راستای x به اندازه یک واحد تعریف

۳/۲ GHz و حافظه موقت ۳۲ GB^{۱۳}، در حدود ۲۵ ساعت زمان می‌برد.

۳. روش انجام تست‌های تجربی

تجهیزات مورد نیاز و نحوه چیدمان آن‌ها جهت انجام فرآیند فرم‌دهی افزایشی دونقطه‌ای در شکل ۷ به صورت شماتیک نمایش داده شده است. با کمک این تجهیزات و با استفاده از یک دستگاه فرز کنترل عددی، می‌توان عملیات فرم‌دهی را انجام داد.



شکل ۷. نحوه مونتاژ تجهیزات در فرآیند فرم‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای

ماشین فرز بسته نمی‌شود، بلکه به کمک یک بوش در یک قطعه واسط بصورت فشاری جا زده می‌شود و سپس قطعه واسط در کله گی ماشین بسته می‌شود. با این روش در صورت اعمال نیروی بیش از حد از طرف ماشین به ابزار به دلیل تغییر شکل زیاد یا گیر کردن ابزار روی ورق، قسمت بالای ابزار بصورت هرزگرد در داخل این قطعه واسط می‌چرخد و از آسیب رساندن به سطح ورق تا حدود زیادی جلوگیری می‌شود.



شکل ۸. تجهیزات بکار رفته در فرآیند فرم‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای

در فرم‌دهی افزایشی دونقطه‌ای نقش سنبه، کمک در ایجاد یک هندسه‌ی سه‌بعدی برای هدایت ورق و نیز تکیه‌گاهی ثابت به منظور قراردادن ورق بر روی آن می‌باشد و در نهایت شکل سنبه‌ی مورد نظر بر روی ورق ایجاد خواهد شد. از آنجایی که نیروهای شکل‌دهی این روش نسبت به تکنیک‌های مرسوم در شکل‌دهی ورق بسیار پایین هستند، نیاز به ساخت سنبه با مواد با استحکام بالا نیست. جنس سنبه‌ها در این تحقیق با توجه به امکان ریخته‌گری بلوک خام و ماشین‌کاری مناسب از آلومینیوم ساخته شده است (شکل ۱۰).

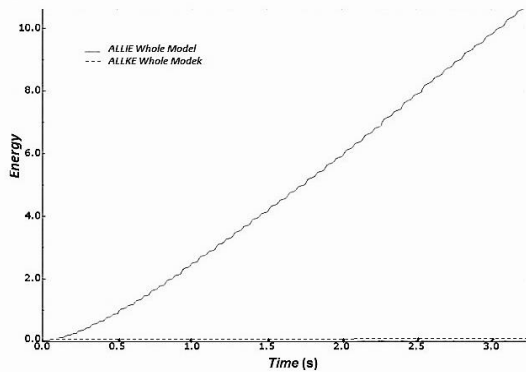


شکل ۹. الف) ابزار فرم‌دهی (ب) ابزار فرم‌دهی با قابلیت چرخش بصورت هرزگرد

این قالب دارای دو قسمت کاملاً مجزا و جداشدنی است. قسمت اول که میل‌های راهنما بر روی آن قرار گرفته و بر روی میز دستگاه فرز ثابت می‌شود، مکانی است به منظور قرارگیری و ثابت کردن سنبه در زیر ورق. در واقع سنبه پس از قرارگیری در بین میل راهنمای قالب (قسمت کفشک)، به کمک پیچ‌هایی بر روی آن بسته می‌شود. قسمت دوم قالب (متحرک) در داخل میل راهنماها قرار گرفته و در راستای عمودی، اجازه‌ی جابجایی خواهد داشت. این قسمت از قالب که محل استقرار ورق و ورق‌گیر و قفل شدن ورق در بین آن دو است، قابلیت خروج از میل‌های راهنما و جدا شدن از قسمت کفشک را دارا می‌باشد.

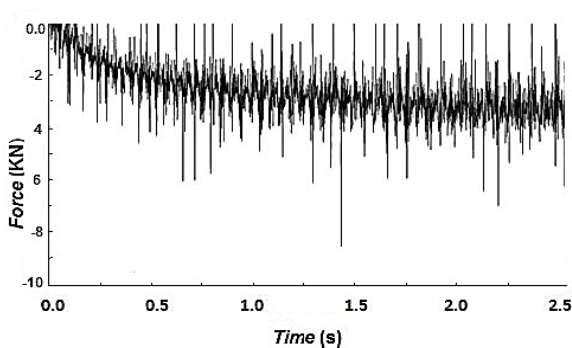
در شکل ۸ تجهیزات بکار رفته در فرآیند فرم‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای مرتبط با این تحقیق نمایش داده شده است. در این تحقیق از دو نوع ابزار سرکروی استفاده شده است. ابزار اول که در شکل ۹-الف نشان داده شده است، از اتصال یک میله فولادی با ساچمه سخت‌کاری شده به دست آمده و در ساخت ابزار نمایش داده شده در شکل ۹-ب از یک روش ابتکاری استفاده شده است. در این روش قسمت بالایی ابزار به صورت مستقیم در کلگی

نمود. در شکل ۱۱ نمودار انرژی جنبشی و انرژی درونی بر حسب زمان رسم شده است.



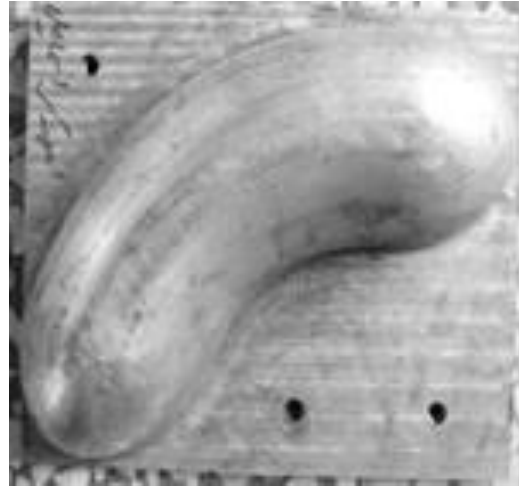
شکل ۱۱. مقایسه انرژی درونی و انرژی جنبشی بر حسب زمان

آگاهی از نیرو اعمال شده به ابزار در حین فرآیند شکل‌دهی افزایشی از اهمیت زیادی برخوردار است. نیروی اعمال شده به اسپیندل ماشین‌های کنترل عددی، دارای محدوده خاصی بوده و محاسبه نیروی اعمال شده به ابزار، معیار مناسبی به منظور انتخاب نوع ماشین کنترل عددی در اختیار کاربر قرار می‌دهد که در انتخاب جنس و اندازه‌ی ابزار، تاثیرگذار است. همچنین با اندازه‌گیری نیروی اعمال شده به ابزار، امکان ارائه تحلیل دقیق‌تر در مورد مکانیزم شکل‌پذیری ورق در این فرآیند فراهم می‌گردد. در شکل ۱۲ با صرف نظر از جهش‌ها و نوسانات مقدار بیشینه‌ای نیروهای شکل‌دهی در حدود ۳ kN است.



شکل ۱۲. نیروی وارد بر ابزار در راستای عمق در حین فرآیند شکل‌دهی

برای اطمینان از مجاز بودن نیروها در صفحه عمود بر عمق (در اینجا صفحه XZ)، نمودار نیروهای صفحه‌ای آن در شکل ۱۳ ترسیم شده است. با بررسی نمودار می‌توان دریافت این نیروها از مقدار ۱۰۰۰ N تجاوز نمی‌کنند. جهش‌های موجود در این نمودار



شکل ۱۰. سنبه بکار رفته در فرم‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای حاضر

پارامترهای مهم در شبیه‌سازی عددی و تست‌های تجربی در این تحقیق در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای مهم در شبیه‌سازی عددی و تست‌های تجربی

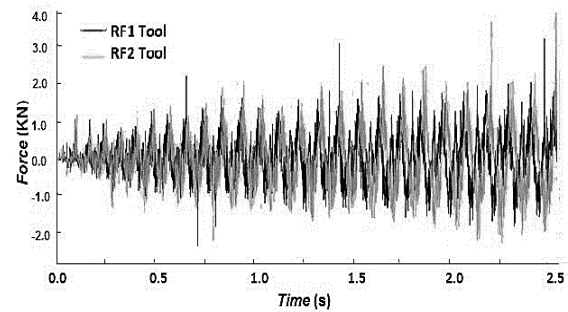
پارامتر	مقدار
ضریب اصطکاک بین ابزار و ورق	۰/۱
ابعاد اولیه ورق	۴۰۰ × ۴۰۰ mm
ضخامت ورق	۱ mm
جنس ورق	آلومینیوم ۲۰۲۴
سرعت چرخش ابزار	۳۰ Rad/s
گام عمودی ابزار	۱ mm
قطر ابزار	۱۰ mm

۴. نتایج

پس از آماده شدن فایل نهایی، در ماژول job، اجرای مناسب براساس فایل ورودی نهایی تعریف می‌گردد. در نهایت خروجی‌های زیر به دست می‌آید.

در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای، به دلیل پیچیدگی مسیر حرکت ابزار، تعداد گام‌های تعریف شده در نرم‌افزار بسیار زیاد است. این امر مدت زمان حل مسئله را افزایش می‌دهد. به منظور افزایش سرعت حل مسئله، می‌توان از مقیاس جرم استفاده نمود. یکی از روش‌های کسب اطمینان از عدم وابستگی نتایج به مقیاس جرم، بررسی مقادیر انرژی جنبشی و انرژی درونی سیستم می‌باشد. بر اساس استاندارد بیان شده در راهنمای نرم‌افزار، در صورتی که انرژی جنبشی ماده کمتر از ۵ درصد انرژی درونی سیستم باشد می‌توان از خطای ناچیز ایجاد شده صرف‌نظر

به دلیل ماهیت گسسته روش اجزاء محدود و روند حل دینامیکی صریح ایجاد می‌شود. همچنین از این نمودار می‌توان دریافت سرعت‌های بالای شکل‌دهی نیروهای ضربه‌ای بالایی را بر ابزار وارد می‌کنند. بنابراین لازم است چه در شکل‌دهی واقعی و چه تحلیل نرم‌افزاری، سرعت شکل‌دهی پایین‌ترین مقدار ممکن اختیار گردد.



شکل ۱۳. نیروهای وارد بر ابزار در صفحه عمود بر راستای ابزار

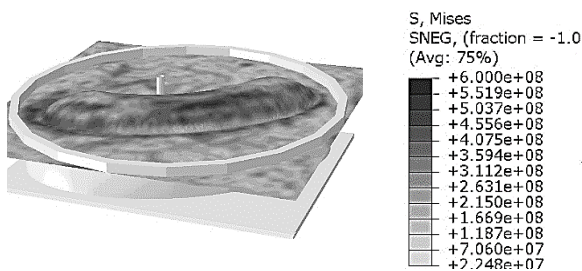
شکل ۱۴، تغییر شکل ایجاد شده در ورق هنگامی که ابزار به میزان ۳۰ mm در راستای عمق پایین رفته است، را نشان می‌دهد. در ادامه تحلیل‌ها و نتایج مربوط به این لحظه از فرآیند شکل‌دهی ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۵ تنش وون میز وارد بر ورق در محدوده مجاز قرار دارد. تنها نقطه‌ای که به تنش نهایی نزدیک شده است،

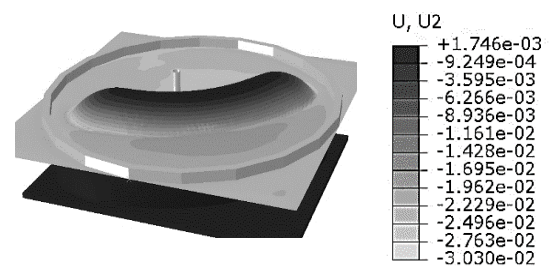
نقطه زیر ابزار است که در حال انجام عملیات شکل‌دهی می‌باشد. نکته‌ای که باید به آن توجه شود هموار بودن مدل سنبه است. این موضوع مانع از تمرکز تنش و پارگی نقاط دیگر می‌شود. در مورد مسئله‌ی پیش‌رو موضوعی که ممکن است باعث پارگی ورق گردد عمق زیاد شکل‌دهی و زاویه نزدیک به قائم دیواره سنبه است.

در ادامه نتایج تحلیل پس از وقوع پارگی در ورق بررسی شده است. در شکل ۱۶ تنش وون میز در لایه زیرین ورق در گام نهایی در زمان پاره شدن ورق، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است میزان تنش حتی در نواحی دور از ابزار به بیشینه مقدار خود یعنی ۶۰۰ MPa رسیده است که زمینه نازک شدگی و در نهایت پارگی ورق را فراهم می‌کند.

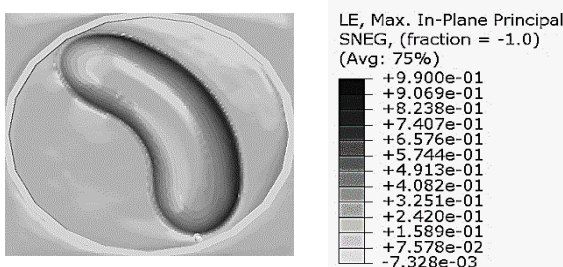
از آن‌جا که لایه بالایی ورق باید متحمل تنش‌ها و کرنش‌های بیشتری گردد، بنابراین باید بر آن کرنش‌های بیشتری اعمال شود تا به شکل سنبه درآید. در شکل ۱۷ کرنش‌های حقیقی وارد شده بر لایه بالایی ورق نشان داده شده است. فرآیند شکل‌دهی افزایشی، کرنش‌های ایجاد شده در راستای مماس بر سنبه (کرنش بیشینه) دارای مقادیر قابل توجهی می‌باشد. بنابراین، با محاسبه‌ی مقادیر مربوط به کرنش‌های اصلی در انتهای فرآیند و ارائه نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود، امکان بررسی ادعای بیان شده فراهم می‌گردد.



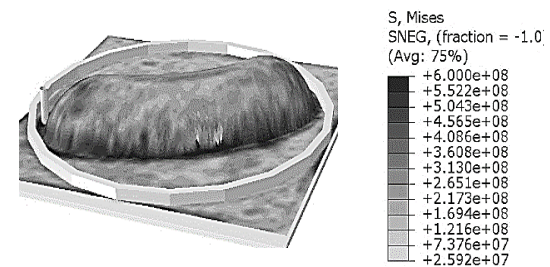
شکل ۱۵. تنش وون میز ایجاد شده در ورق در زمان جابجایی ابزار به مقدار ۳۰ میلی‌متر



شکل ۱۴. تغییر شکل ورق در زمان جابجایی ابزار به مقدار ۳۰ میلی‌متر

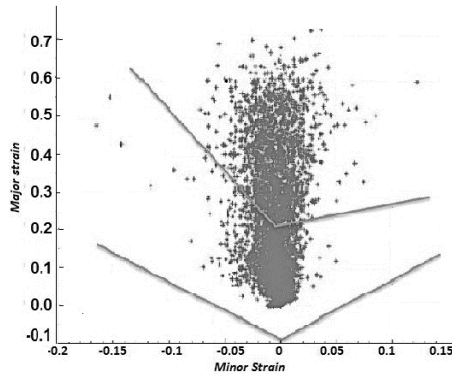


شکل ۱۷. کرنش حقیقی بر ورق در گام نهایی



شکل ۱۶. تنش وون میز ایجاد شده بر ورق در گام نهایی

هستند که بیان گر احتمال بالای پارگی ورق در این نقاط است. در حالی که مقادیر این کرنش‌ها در میزان عمق شکل‌دهی کمتر در محدوده بین دو خط قرار می‌گیرند.



شکل ۱۹. نمودار حد شکل‌دهی قطعه نیم‌لوله [۳۱]

در شکل ۲۰، نمونه واقعی پس از شکل‌دهی افزایشی و توقف عملیات به خاطر وقوع پارگی نشان داده شده است. این پارگی در عمق ۳۵ میلی‌متری رخ داده است.

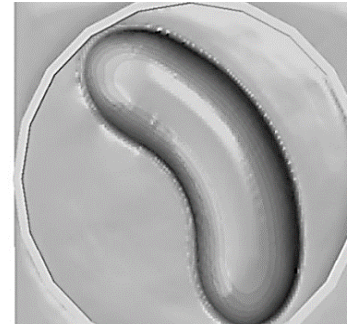
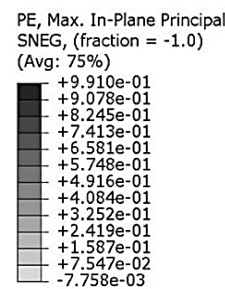
با مقایسه پارگی ایجاد شده در شکل ۲۰ حاصل تست تجربی و وجود تعداد قابل توجهی از نقاط کرنش‌های اصلی و فرعی بالاتر از نمودار حد شکل‌دهی ورق در شکل ۱۹ حاصل از شبیه‌سازی عددی در عمق ۳۵ mm، می‌توان تطابق نتایج تئوری و عملی را مشاهده کرد.

بنابراین باتوجه به نتایج تحلیل و نتایج آزمایش‌های تجربی، علاوه بر اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی صورت گرفته، نشان دهنده این موضوع است که فرم‌دهی این قطعه با عمق بیشتر، با استفاده از این روش و با تجهیزات موجود امکان‌پذیر نمی‌باشد.



شکل ۲۰. آزمایش تجربی شکل‌دهی افزایشی ورق و پارگی رخ داده در گوشه بالای سمت راست

بررسی مقادیر کرنش در فرآیند شکل‌دهی افزایشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شکل ۱۸ کانتور کرنش پلاستیک اصلی بیشینه در انتهای فرآیند نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، عمده مقادیر تغییر شکل در نواحی درونی و بیرونی سنبه اتفاق افتاده است. همان‌گونه که گفته شد دو پهلوی سنبه اضافه بوده و حتی اگر دچار ترک‌های سطحی گردد، مشکلی در تولید قطعه نهایی ایجاد نمی‌کند. بیشترین مقدار کرنش در قسمت درونی است که در همین ناحیه ترک‌خوردگی آغاز شده است.



شکل ۱۸. کانتور کرنش پلاستیک اصلی بیشینه بر روی ورق در گام نهایی

در نهایت با ترسیم نمودار حد شکل‌دهی می‌توان در خصوص پارگی یا سلامت فرآیند قضاوت کرد. به‌منظور تعیین معیار شکست در این فرآیند، از یک خط مستقیم با شیب منفی در نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی استفاده می‌شود. به این منظور، با اندازه‌گیری مقادیر کرنش‌های اصلی در سطح ورق، محدوده‌ی تقریبی این خط در انتهای فرآیند تعیین می‌گردد. با اندازه‌گیری حد نهایی کرنش در آزمایش‌های تجربی می‌توان محدوده‌ی ایمن در عملیات شکل‌دهی را تعریف نمود. در خصوص رسم خطوط سیاه برای تعیین محدوده شکل‌پذیری از مقاله جانبخش و همکارانش [۳۱] برای جنس آلومینیوم ۲۰۲۴ استفاده شده است. و مقادیر کرنش به دست آمده از تحلیل حاضر در شکل به صورت مجموعه نقاط نمایش داده شده است. در صورتی که نقاط محاسبه شده در نمودار محدوده‌ی فرم‌دهی (مربوط به مقادیر کرنش‌های اصلی و فرعی در سطح ورق)، پایین‌تر از خط فوق قرار گیرد آسیب جدی در ورق فلزی ایجاد نمی‌شود. لازم به ذکر است که نمودار حد شکل‌دهی نمایش داده شده در شکل ۱۹، با استفاده از کرنش‌های اصلی المان‌های ورق در عمق ۳۵ mm ترسیم شده است و همان‌طوری که مشخص است در تعداد قابل توجهی از نقاط کرنش‌های اصلی و فرعی بالاتر از نمودار حد شکل‌دهی ورق

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به کمک شبیه‌سازی و بررسی نتایج آن با مشاهدات آزمایشگاهی به بررسی عددی و تجربی فرآیند شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای بر روی قطعات با فرم آزاد پرداخته شد. شبیه‌سازی عددی این فرآیند این امکان را فراهم می‌سازد تا بدون نیاز به صرف هزینه‌های سنگین سعی و خطا، امکان‌پذیری تولید قطعات تکی با فرم‌های متنوع بررسی گردد.

انتخاب ماشین کنترل عددی مناسب برای عملیات شکل‌دهی افزایشی با استفاده از نمودار نیروی وارد بر ابزار حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته و با بررسی تنش و کرنش وارد بر ورق و قالب درحین فرآیند نیز می‌توان کارایی فرآیند، نقاط بحرانی و بازگشت فنی قطعه را مشخص نمود. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان تاثیر پارامترهایی همچون ضخامت ورق، جنس ورق، شکل و قطر ابزار، گام عمودی ابزار و نوع مسیر

طی شده توسط ابزار را بر نتایج فرآیند بهینه نمود. درنهایت با گرفتن خروجی کرنش‌های اصلی و فرعی هر نقطه از ورق در هر مرحله از فرآیند می‌توان وضعیت شکل‌دهی و فاصله آن با پارگی در ورق یا وقوع پارگی را تعیین کرد.

روش اتخاذ شده برای شبیه‌سازی شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای در این مقاله محدود به فرم خاصی نیست و این استقلال از هندسه وجه تمایز اصلی این پژوهش است که امکان بررسی شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای بر روی دامنه گسترده‌ای از قطعات با فرم دلخواه را فراهم می‌کند. مشخصاً در مورد قطعات در نظر گرفته شده در این پژوهش مشخص شد که به دلیل عمق زیاد شکل‌دهی و همچنین شیب بالای دیواره، استفاده از شکل‌دهی افزایشی دو نقطه‌ای با مشکلات زیادی رو به رو بوده و امکان دستیابی به عمق بیش از ۳۵ میلی‌متر امکان‌پذیر نیست.

۶. مأخذ

- [1] A. Naganathan, L. Penter, *Sheet metal forming—processes and applications, Hot stamping*, pp. 133-142, ASM International, 2012.
- [2] M.-S. Shim, J.-J. Park, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1-3, pp. 654-658, 2001.
- [3] L. Edward, *Apparatus and process for incremental dieless forming*, US Patent No. 3342051, 1967.
- [4] B. Mason, E. Appleton, Sheet metal forming for small batches using sacrificial tooling, *Proceedings of the 3rd International Conference on Rotary Metalworking*, pp. 495-511, 1984.
- [5] F. Micari, G. Ambrogio, L. Filice, Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1-3, pp. 390-395, 2007.
- [6] L. Filice, G. Ambrogio, M. Gaudio, Optimised tool-path design to reduce thinning in incremental sheet forming process, *International journal of material forming*, Vol. 6, No. 1, pp. 173-178, 2013.
- [7] M. Tisza, General overview of sheet incremental forming, *Journal of achievements in materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 55, No. 1, pp. 113-120, 2012.
- [8] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, L. Mazzone, Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization, *Journal of materials processing technology*, Vol. 197, No. 1-3, pp. 59-67, 2008.
- [9] J. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert, H. De Baerdemaeker, Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 1, pp. 273-276, 2007.
- [10] G. Fan, L. Gao, G. Hussain, Z. Wu, Electric hot incremental forming: a novel technique, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 15, pp. 1688-1692, 2008.
- [11] Y. Ji, J. Park, Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature, *Journal of materials processing technology*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 354-358, 2008.
- [12] M. Ham, J. Jeswiet, Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 241-244, 2006.
- [13] F. C. Minutolo, M. Durante, A. Formisano, A. Langella, Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, No. 1-3, pp. 145-150, 2007.
- [14] A. Bhattacharya, K. Maneesh, N. V. Reddy, J. Cao, Formability and surface finish studies in single point incremental forming, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 133, No. 6, pp. 061020, 2011.
- [15] G. Ambrogio, L. Filice, L. Fratini, F. Micari, Process mechanics analysis in single point

- incremental forming, *AIP Conference Proceeding*, Vol. 712, pp. 922-927, 2004.
- [16] G. Hussain, L. Gao, Z. Zhang, Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 9-10, pp. 920-926, 2008.
- [17] D. Nguyen, J. Park, H. Lee, Y. Kim, Finite element method study of incremental sheet forming for complex shape and its improvement, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 6, pp. 913-924, 2010.
- [18] F. Han, J.-h. Mo, Numerical simulation and experimental investigation of incremental sheet forming process, *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 581-587, 2008.
- [19] M. Yamashita, M. Gotoh, S.-Y. Atsumi, Numerical simulation of incremental forming of sheet metal, *Journal of materials processing technology*, Vol. 199, No. 1-3, pp. 163-172, 2008.
- [20] L. R. Zhou, Study on mechanism of NC sheet metal incremental forming, *Advanced Materials Research*, Vol. 239-242, pp. 940-943, 2011.
- [21] Y. Kim, J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of materials processing technology*, Vol. 130, pp. 42-46, 2002.
- [22] G. Hirt, J. Ames, M. Bambach, R. Kopp, Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 53, No. 1, pp. 203-206, 2004.
- [23] C. Henrard, C. Bouffioux, L. Duchêne, J. R. Dufloy, A. M. Habraken, Validation of a new finite element for incremental forming simulation using a dynamic explicit approach, *Key Engineering Materials*, Vol. 344, pp. 495-502, 2007.
- [24] N. Decultot, V. Velay, L. Robert, G. Bernhart, E. Massoni, Behaviour modelling of aluminium alloy sheet for single point incremental forming, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, No. 1, pp. 1151-1154, 2008.
- [25] A. Hadoush, A. H. van den Boogaard, Time reduction in implicit single point incremental sheet forming simulation by refinement-derefinement, *International journal of material forming*, Vol. 1, No. 1, pp. 1167-1170, 2008.
- [26] M. Azaouzi, N. Lebaal, Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 24, pp. 49-58, 2012.
- [27] M. Honarpisheh, A. Gheysarian, An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, Vol. 7, No. 1, pp. 73-83, 2017.
- [28] W. Emmens, G. Sebastiani, A. H. van den Boogaard, The technology of incremental sheet forming - a brief review of the history, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 8, pp. 981-997, 2010.
- [29] R. Perez-Santiago, A. Fiorentino, R. Marzi, C. Rodriguez, Advances in simulation of two point incremental forming, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1353, pp. 183-188, 2011.
- [30] Q. C. Wang, H. H. Hu, J. H. Wu, J. Cao, Research on Forming Accuracy of Two Point Incremental Forming for Aluminum 1060, *Advanced Materials Research*, Vol. 936, pp. 1725-1729, 2014.
- [31] M. Janbakhsh, F. Djavanroodi, M. Riahi, A comparative study on determination of forming limit diagrams for industrial aluminium sheet alloys considering combined effect of strain path, anisotropy and yield locus, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47, No. 6, pp. 350-361, 2012.

بی نوشت

-
- 1 . Incremental Sheet Forming (ISF)
 - 2 . Spinning
 - 3 . Shear Forming
 - 4 . Flow Forming
 - 5 . Single-Point ISF (SPISF)
 - 6 . Two-Point ISF (TPISF)
 - 7 . Computer Numerical Controlled (CNC)
 - 8 . Rapid Prototyping
 - 9 . Response Surface Method (RSM)
 - 10 . Sequential Quadratic Programming (SQP) algorithm
 - 11 . Mass Scaling
 - 12 . Discrete rigid
 - 13 . RAM