

مطالعه تجربی شکل دهی تدریجی چند نقطه‌یی قطعات مخروطی

صادق فرجی* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

یاسر رستمیان (دانشیار)

علی اصغر شمسی سربند (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

مهندسی مکانیک شریف (تابش ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۳۷-۴۴، (پژوهشی)

گسترش روش‌های نمونه‌سازی سریع در سال‌های اخیر بسیار چشمگیر بوده است. یکی از این روش‌ها، فرایند شکل‌دهی تدریجی است. در این پژوهش، فرایند شکل‌دهی تدریجی چند نقطه‌یی، توسط سه ماتریس استوانه‌یی با تک، دو و سه پله مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا، نرخ پیشروی و گام نفوذ ابزار برای شکل‌دهی نمونه‌های آلومینیومی در سه سطح بررسی شدند. در ادامه، تأثیر پارامترهای ورودی بر ارتفاع حدی نمونه‌های شکل گرفته، توزیع ضخامت، زبری سطحی و دقت هندسی نمونه‌های برش خورده طولی مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل، با بهره‌گیری از ماتریس‌های چند نقطه‌یی، علی‌رغم افزایش دقت هندسی نهایی، اصطکاک نسبت به ماتریس مخروطی یکپارچه تقلیل یافت. با به‌کارگیری ماتریس دو پله، با افزایش شکل‌پذیری ورق، قطعات عمیق‌تری شکل گرفت، به طوری که ارتفاع حدی میانگین را به میزان ۱۲٪ بهبود بخشید. از جنبه دقت هندسی نیز طرح ماتریس با سه پله، بالاترین دقت هندسی و کمترین انحراف را نسبت به مسیر برنامه‌ریزی شده ایجاد کرد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی تدریجی، ماتریس پشتیبان، انحراف هندسه، توزیع ضخامت، زبری سطحی.

۱. مقدمه

در دو دهه اخیر، فرایند شکل‌دهی تدریجی در حوزه نمونه‌سازی‌های صنعتی مورد توجه ویژه‌یی قرار گرفته است. این فرایند، با ماهیت نمونه‌سازی سریع در ساخت محصولات ورقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه استفاده از روش‌های نمونه‌سازی سریع^۱ در حال گسترش می‌باشد.^[۱] در دهه‌های اخیر، فرایند شکل‌دهی تدریجی توانسته در نمونه‌سازی سریع هندسه‌های فلزی پیچیده، ظرفیت بالایی را از جنبه بهره‌وری اقتصادی از خود نشان دهد.^[۱]

ضرورت توسعه این فرایند، به منظور حصول اطمینان از انطباق دقیق قطعات برای تولید محصولی جدید، دریافت بازخورد آن در کوتاه‌ترین زمان ممکن و همچنین افزایش بهره‌وری اقتصادی در تولید غیرانبوه است. این انتظارات اغلب با به‌کارگیری روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست. فرایندهای شکل‌دهی تدریجی نوین از ایده‌ی فنی لژاک ادوارد که در سال ۱۹۶۷ میلادی مطرح شد، نشأت گرفته است.^[۲] این فرایند به عنوان یکی از فناوری‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر^۲ به ابزار و تجهیزات

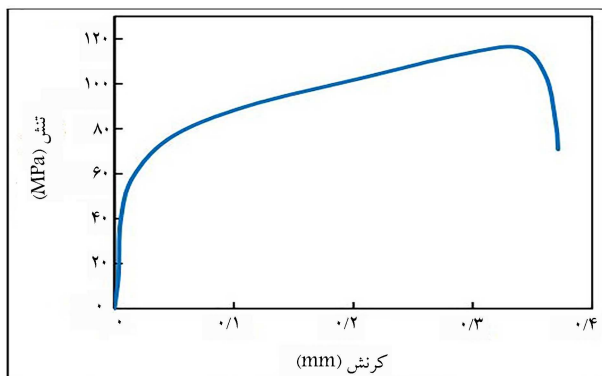
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۱۶، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۲۷.

استناد به این مقاله:

فرجی، صادق، رستمیان، یاسر، و شمسی سربند، علی اصغر، ۱۴۰۲. مطالعه تجربی شکل‌دهی تدریجی چند نقطه‌یی قطعات مخروطی. مهندسی مکانیک شریف، ۳۹(۲)،

صص. ۳۷-۴۴. DOI:10.24200/J40.2022.60611.1644



شکل ۱. نمودار تنش - کرنش ورق آلومینیوم ۱۰۵۰.



شکل ۲. مونتاژ ماتریس پشتیبان چند نقطه‌یی در حالت مونتاژی سه پله.



شکل ۳. نمونه برش خورده در راستای نورد جهت اندازه‌گیری توزیع ضخامت.

در آزمایش‌های انجام شده از ابزار استوانه‌یی سرکروی با قطری معادل 10 mm و از جنس فولاد سردکار استفاده شده است. این ابزارها با استفاده از دستگاه تراش معمولی به طول 15 سانتی‌متر ساخته شده و در برابر سایش مقاوم و استحکام مکانیکی بالایی دارند. همچنین از ماتریس‌های چند نقطه‌یی با هندسه استوانه‌یی تک، دو و سه پله به عنوان ماتریس‌های پشتیبان استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، جهت تسهیل فرایند ساخت، ماتریس‌ها به صورت مجزا طراحی و ساخته شده‌اند که با توجه به تعداد پله‌ها درهم مونتاژ شدند.

جهت مقایسه شکل‌پذیری نمونه‌ها از بیشینه ارتفاع شکل گرفته در هر حالت تحت عنوان پارامتر ارتفاع حدی استفاده شد. به منظور مقایسه دقت هندسی، انحراف هندسی مقطع نمونه‌های برش خورده در راستای نورد ورق نسبت به مسیر برنامه‌ریزی شده ابزار توسط دستگاه پروفیل‌سنج نوری Baty R۱۴ با دقت 1 mm / 0° اندازه‌گیری گردید. همچنین جهت بررسی توزیع ضخامت قطعات شکل گرفته، ضخامت نمونه‌ها طبق شکل ۳ در مسیری مشخص از مرکز بلنک تا وجه جانبی هرم، در جهت نورد و در نمونه‌های 1 mm اندازه‌گیری شدند. مقادیر زیری قطعات برش خورده نیز

کاهش شکل‌پذیری در دمای بالا مشهودتر می‌باشد. بریمانی و همکاران، نمونه‌سازی سریع هندسه‌یی مشابه کانوپی‌های یکپارچه هواپیما را به کمک فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های شفاف پلی‌کربنات در مقیاس آزمایشگاهی توسط روش شکل‌دهی تدریجی تک نقطه بررسی کردند. براساس نتایج حاصل، با آزادسازی تنش‌های پسماند فرایندی حین حرارت‌دهی پسا شکل‌دهی، برگشت فنری کاهش چشمگیری دارد. [۶] همچنین، انحراف هندسی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از 1 mm ایجاد شده که در محدوده مجاز پنجره فرایندی شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌یی قرار دارد. کومار و همکاران، تأثیر اصطکاک ابزار و زاویه مخروط بر زبری سطحی را در فرایند شکل‌دهی تدریجی مطالعه کردند. [۷] آن‌ها گزارش کردند که مقدار Ra با افزایش قطر ابزار کاهش یافته است. تززیسینسکی و همکاران، آخرین پیشرفت‌ها و چالش‌های شکست در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های آلومینیومی را مورد مطالعه قرار دادند. [۸] آن‌ها طی بررسی پژوهش‌های تجربی و عددی پیشین، مسیرهای ممکن و پیش‌رو در این فرایند را شناسایی کردند.

طبق مطالعات مروری، اغلب فرایندهای شکل‌دهی دونقطه‌یی قطعات مخروطی به کمک ماتریس پشتیبان استوانه‌یی و مخروطی انجام شده است. در ماتریس استوانه‌یی یکپارچه به علت چرخش کنترل نشده قطعه کار حول محور مخروط، انحراف از هندسه نهایی گزارش شده است. در ماتریس مخروطی، به این علت که ورق از دو سمت به طور پیوسته با ابزارهای صلب در تماس است، حد شکل‌پذیری ورق کاهش می‌یابد. در این مرجع، فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌یی قطعات مخروطی توسط ماتریس‌های استوانه‌یی دو و سه پله بررسی شده است. هدف اصلی مقاله حاضر، بهبود فرایند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌یی با مقید کردن بیشتر سطوح داخلی، کاهش احتمال چرخش کنترل نشده قطعه کار حول محور مخروط و کاهش اصطکاک تماسی به کمک ماتریس چند نقطه است. جهت بررسی فرایندی پارامترهای ورودی گام عمودی و نرخ پیشروی برای طرح ماتریس‌های ذکر شده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

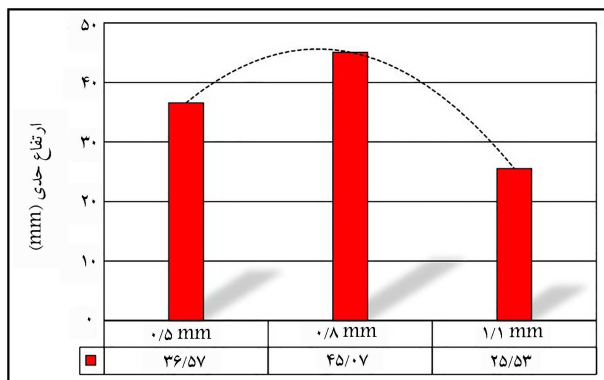
۲. مواد و روش‌ها

تمامی آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌یی با استفاده از ورق‌های آلومینیومی سری ۱۰۵۰ با درصد خلوص حداقل ۹۹٪ انجام شده است. این گرید برای مصارف با نیاز به استحکام متوسط و مقاومت به خوردگی بالا، همچون ظروف غذایی و بازتابنده لامپ‌ها، بسیار رایج است. از دیگر کاربردهای آن می‌توان به اشکال پیچیده نماهای معماری ساخته شده از آلومینیوم که اغلب تیراژی کم و هندسه شخصی‌سازی شده است، اشاره کرد. برخی از این نماها، از اجزای متقارن محور با مخروط‌های کم عمق شکل می‌گیرند. رفتار مکانیکی ورق مورد استفاده با نمودار تنش - کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش تک‌محوری طبق استاندارد ASTM-A۳۷۰ در شکل ۱، نشان داده شده است.

غیر قابل عملیات حرارتی بودن از ویژگی‌های آلیاژهای سری ۱۰۵۰ است. این گرید دارای مقاومت خوبی در برابر خوردگی بوده و رسانای مناسبی برای جریان الکتریسیته است. استحکام مکانیکی آن متوسط بوده اما قابلیت ماشینکاری و شکل‌پذیری بسیار بالایی دارد. در آزمایش‌ها از ورق‌های برش خورده 250×250 میلی‌متر با ضخامت 0.5 mm استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی ماشین فرز چهار محور ماشین‌سازی تبریز مجهز به کنترل عددی CNC مدل FP۴ME با کنترلر زیمنس ۸۰۲ انجام شده است.

برازش شده توسط معادله درجه دو، ابتدا ارتفاع حدی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در سرعت پیشروی 700 mm/min ارتفاع حدی میانگین سه نوع ماتریس اعمالی، نسبت به سرعت 400 mm/min ، 138% افزایش یافت. با افزایش سرعت به 1000 mm/min ، ارتفاع حدی میانگین نسبت به سرعت 400 mm/min ، 74% افزایش ولی نسبت به 700 mm/min ، 27% کاهش داشت.

افزایش نرخ پیشروی ابزار معادل، با بزرگ شدن نرخ کرنش وارد شده است. نرخ کرنش نیز معادل سرعت تغییرات کرنش است و ارتباط مستقیمی با سرعت خطی ابزار دارد. در منابع مختلف، حساسیت به نرخ کرنش برای آلیاژهای آلومینیوم در دمای محیط نامحسوس گزارش شده است.^[۹-۱۱] درحالی‌که طبق شکل ۵، افزایش سرعت سبب بهبود شکل‌دهی تدریجی شده و ارتفاع‌های بزرگ‌تری شکل گرفته است. اگرچه این تغییرات در بیشینه سرعت اعمالی با شدت کمتری افزایش یافته است. افزایش سرعت خطی با ایجاد حرارت موضعی بیشتر منجر به بهبود شکل‌پذیری شده است. بهبود شکل‌پذیری نیز با قابلیت تحمل کرنش‌های شکست بزرگتر همراه شده و باعث افزایش ارتفاع‌های حدی شده است. اگرچه کاهش 27% ارتفاع حدی میانگین در نرخ پیشروی بیشینه نسبت به سرعت 700 mm/min را باید با پدیده دیگری توجیه کرد. در سرعت 1000 mm/min ، افزایش حرارت موضعی باعث بزرگ شدن نمای حساسیت به نرخ کرنش شد. با افزایش ضریب حساسیت به نرخ کرنش، کرنش‌های بزرگ‌تری ایجاد شده که موجب کاهش تأثیر مثبت حرارت موضعی بر قابلیت شکل‌دهی می‌شود.^[۹-۱۱] در نتیجه، اگرچه در سرعت 1000 mm/min همچنان افزایش ارتفاع حدی میانگین نسبت به سرعت 400 mm/min مشاهده می‌شود، اما اثر منفی حساسیت به نرخ کرنش سبب افزایش چشمگیر قابلیت شکل‌دهی تدریجی نمی‌گردد. در دمای محیط، تغییرات سرعت طبق معادله بنیادی بکوفن ($\sigma = C \dot{\epsilon}^n$) تأثیر چندانی بر حساسیت به نرخ کرنش (m) و در نتیجه بر تنش سیلان (σ) نمی‌گذارد. درحالی‌که با افزایش سرعت و ایجاد حرارت موضعی، نمای کارسختی (n) و همچنین σ کاهش می‌یابد. بنابراین، تنش سیلان کاهش یافته و جریان مواد بهبود خواهد یافت. لازم به ذکر است که در برخی موارد، با افزایش چشمگیر سرعت و دما، m نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد، به ویژه زمانی که دمای موضعی ایجاد شده به 400°C دمای ذوب برسد. آنگاه، افزایش m بر کاهش n غلبه کرده و سبب افزایش تنش سیلان می‌شود.^[۹-۱۱] به منظور ارزیابی گام حرکتی ابزار، ارتفاع نمونه‌ها در سرعت 700 mm/min که طبق شکل ۵، بزرگ‌ترین ارتفاع‌های حدی ایجاد شده است، با میانگینی از آزمایش‌های انجام شده در سه نوع ماتریس اندازه‌گیری شدند. در شکل ۶ ارتفاع حدی مخروط‌های شکل گرفته در سه سطح گام حرکتی مقایسه شده است.



شکل ۶. مقایسه تغییرات ارتفاع حدی برای گام‌های مختلف.

توسط دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح با پارامتر Ra به صورت دستی سنجیده شده و زبری سطحی در جهت عمود بر هر نقطه مورد بررسی، توسط پراب دستگاه MahrSurf PS1 اندازه‌گیری شده است (شکل ۴).

برای بررسی دقیق تأثیر پارامترهای اصلی و تعاملی بر یکدیگر، باید از روش طراحی آزمایش‌ها و تحلیل واریانس استفاده کرد. با توجه به تعداد آزمایش‌های زیاد مورد نیاز و کمبود بودجه در دسترس، در این پژوهش از روش سنتی استفاده شده است. طبق روش سنتی، اغلب برای بررسی هر پارامتر، سایر پارامترها را ثابت در نظر می‌گیرند. در نتیجه، برای انتخاب مقادیر ثابت هر پارامتر، آن مقداری را باید برگزید که شرایط بهتری را ایجاد کرده است. باید توجه داشت که نمی‌توان به مقدار انتخابی اعتماد کرد و باید همچون اغلب پروژه‌های بزرگ دانشگاهی و صنعتی، از روش‌های DOE استفاده نمود. در این پژوهش، با استناد به منابع^[۷-۸] و انجام تست‌های اولیه از سه سرعت 400 ، 700 و 1000 mm/min با گام‌های 0.5 ، 0.8 ، و 1 mm با سه طرح ماتریس استوانه‌ای یک، دو و سه پله استفاده گردید.

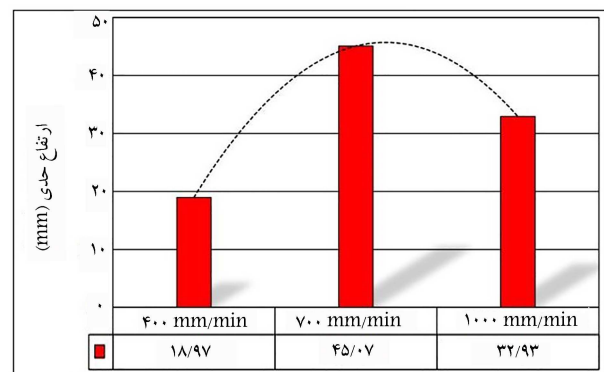
۳. نتایج و بحث

۳.۱. تأثیر پارامترهای فرایندی بر ارتفاع حدی

در ادامه، شکل ۵ ارتفاع نمونه‌ها را در گام حرکتی 0.8 mm و در سرعت‌های مختلف، نشان می‌دهد. مقدار عددی هر نمودار نیز بر روی محور افقی و زیر سرعت مربوطه ذکر شده است. ارتفاع حدی در هر سرعت، با میانگینی از آزمایش‌های انجام شده در سه نوع ماتریس لحاظ شد. به عنوان مثال، مقدار ارتفاع گزارش شده در سرعتی معادل 400 mm/min متعلق به میانگینی از آزمایش‌های انجام شده با گام 0.8 mm در سه طرح ماتریس استوانه‌ای یکپارچه، استوانه‌ای دو پله و سه پله شده است. قابل ذکر است که نمونه‌های مخروطی تا ارتفاع بیشینه، معادل 56 mm شکل‌دهی شدند. به محض وقوع پارگی، عملیات متوقف و ارتفاع گزارش شد. طبق خط روند



شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری زبری سطحی.



شکل ۵. مقایسه تغییرات ارتفاع حدی برای سرعت‌های پیشروی مختلف.



شکل ۸. مقایسه تغییرات ارتفاع حدی برای طرح ماتریس‌های مختلف.

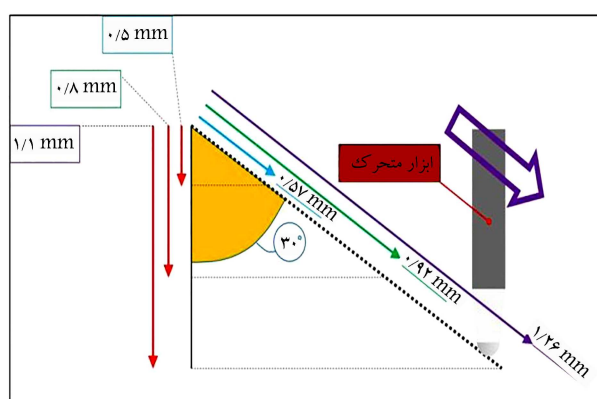
ارتفاع‌های حدی بزرگ‌تری می‌گردد. به عبارت دیگر، در یک مرحله از انجام فرایند می‌توان قطعات عمیق‌تری را شکل داد که سبب کاهش تعداد عملیات فرایندی لازم، برای شکل‌دهی قطعات عمیق و پیچیده می‌شود.

در استفاده از ماتریس استوانه‌ای یکپارچه، ورق به‌جز در وجه تخت بالایی، در سطوح جانبی آزاد و بدون پشتیبان است. تا زمانی که ورق از سمت ماتریس آزاد باشد، همانند فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه، احتمال انحراف هندسی ورق از مدل اصلی و ایجاد پیچش و چروکیدگی افزایش می‌یابد. پدیده پیچش در فرایند شکل‌دهی تدریجی، هندسه و شکل نهایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پدیده، به دلیل نیروهای مماسی وارد شده توسط ابزار، چرخش کنترل نشده‌ی قطعه کار حول تکیه‌گاه ورق‌گیر ایجاد شده و منجر به برش درون صفحه‌ی^۴ در قطعه‌کار می‌شود. [۱۲، ۱۱] برش درون صفحه‌ی امکان‌دستیابی به قطعات عمیق را کاهش داده و سبب وقوع نازک‌شدگی و شکست زودهنگام می‌گردد. با بهره‌گیری از ماتریس دو پله‌ی امکان پیچش و چروکیدگی کاهش یافته و به افزایش ۱۲٪ ارتفاع حدی میانگین منجر شده است. اما کاهش ۳۴٪ ارتفاع حدی میانگین در حالت سه پله نسبت به استوانه یکپارچه، حاکی از تنزل قابلیت شکل‌دهی محصول نهایی است. این کاهش می‌تواند به علت تأثیر معکوس عوامل دیگری همچون افزایش سطح تماس ماتریس با ورق، افزایش نرخ اصطکاک و نیروهای بزرگ ایجاد شده در سطوحی از ورق که از دو سمت با اجسامی صلب در تماس‌اند، ایجاد شده باشد.

۲.۳. تأثیر پارامترهای فرایندی بر زبری سطحی

با توجه به اینکه برای تمامی نمونه‌های شکل گرفته در تنظیمات گوناگون، تماسی بین ابزار و سطح تخت وجه بالای صورت نگرفته است، این ناحیه تحت کمترین تغییر شکل و سایش قرار گرفته است. ابزار متحرک در ابتدای درگیری، محیط دایره بالایی را شکل داده و همزمان در حین حرکت با نفوذ عمودی گام به گام، به‌طور تدریجی مخروطی ناقص را شکل می‌دهد. وجه بالایی مخروط ناقص در شکل ۹ نشان داده شده است.

طبق شکل ۹، سطح قاعده بالا که به علت تغییرات فرایندی نامحسوس آینه‌یی مانده، قابل مشاهده است. سایش و زبری سطحی در تصویر ارائه شده، برای وجوه جانبی نسبت به سطح آینه‌ی قاعده بالایی، گواهی آشکار بر توضیحات ارائه شده است. با توجه به وقوع سایش نامحسوس در قاعده بالایی، از سطوح جانبی مخروط برای سنجش میزان زبری استفاده شد. میانگینی از چهار زبری اندازه‌گیری شده تصادفی به‌عنوان معیار زبری سطحی برای هر نمونه گزارش شد. در شکل ۱۰،

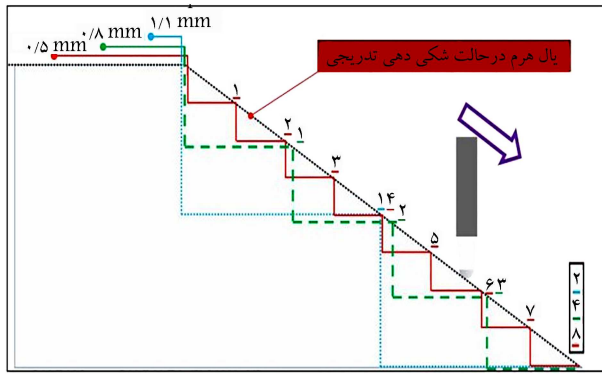


شکل ۷. مسافت طی شده بر روی سطح جانبی مخروط در طی یک گام با مقادیر مختلف.

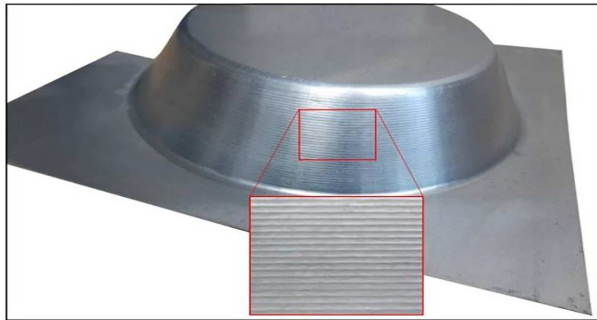
طبق شکل ۶ مشخص می‌شود که در بیشینه گام اعمالی، مخروط نهایی ارتفاع حدی کمتری را به خود اختصاص داده است. با افزایش گام به اندازه ۱/۱ mm ارتفاع حدی میانگین نسبت به گام‌های ۰/۵ mm و ۰/۸ mm به ترتیب ۳۰٪ و ۴۳٪ کاهش یافت. برای بررسی علت تأثیر گام بر ارتفاع حدی باید به ارتفاع عمودی نمو‌های شکل‌دهی رجوع کرد. در شکل ۷ مسافت طی شده برای سه گام اعمالی ۰/۵، ۰/۸ و ۱/۱ mm مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، میزان حرکت ابزار طبق مقدار هر گام می‌تواند سبب طی شدن مسافت‌های گوناگونی در هر تغییر گام شود. در واقع، افزایش گام معادل با افزایش عمق بار در باربرداری که سبب افزایش نیرو و کرنش‌های وارده خواهد شد، برابر می‌شود.

طبق شکل ۷، افزایش مقدار گام که در کنار ضلع عمودی مثلث برای ۳ مقدار مختلف و با پیکان به سمت پایین نشان داده شده، سبب بزرگ شدن مسافت حرکتی ابزار بر روی سطح مخروط در حین اعمال گام می‌گردد. در هر گام، ابزار بر روی وتر طبق شکل ۷ حرکت می‌کند. در واقع مجموع وترها در تمام گام‌ها برابر با اندازه طول یال مخروط نهایی است. سطح جانبی مخروط طبق ذات این فرایند در نمو‌های کوچک و تدریجی شکل‌دهی می‌گردد. با توجه به اینکه این مسافت بر روی یال و با زاویه‌ی نسبت به افق طی می‌گردد، افزایش آن برای گام‌های بزرگ‌تر، سبب وارد شدن کرنش‌های بزرگ‌تری می‌شود. مسافت طی شده بر روی یال با تغییر مقدار گام از ۰/۵ mm به ۰/۸ mm، ۶۱٪ و با تغییر از ۰/۵ mm به ۱/۱ mm، بیش از دو برابر افزایش می‌یابد. این افزایش مسافت، با ایجاد اصطکاک بزرگ‌تری همراه خواهد. در نتیجه کرنش‌های بزرگ‌تری نیز ایجاد شده و سبب کاهش قابلیت شکل‌دهی برای گام ۱/۱ mm می‌گردد. در نتیجه کاهش ارتفاع حدی مخروط‌ها برای گام بیشینه با توجه به کرنش‌های بزرگ وارد شده قابل انتظار است. باید توجه داشت، ارتفاع حدی گام ۰/۸ mm نسبت به ۰/۵ mm نه تنها کاهش نیافته، بلکه ۲۳٪ افزایش یافت. شاید به توان علت این افزایش را ناشی از تأثیر تداخلی پارامترها و یا افزایش کارسختی و استحکام ورق دانست. برای بررسی اثر نوع ماتریس‌های ارائه شده بر ارتفاع حدی، میانگین ارتفاع‌های شکل‌دهی شده در ۹ آزمایشی که متعلق به هر ماتریس بودند، در شکل ۸ رسم شده است.

برای هر ماتریس، ارتفاع‌های شکل گرفته در ۹ آزمایشی که در سه سطح متغیر برای گام و نرخ پیشروی شکل گرفته‌اند، با میانگین ارائه شدند. طبق شکل ۸، بهبود ۱۲٪ ارتفاع حدی میانگین با بهره‌گیری از ماتریس چند نقطه‌ی دو پله است. این امر موکد ارتقای قابلیت شکل‌دهی تدریجی به کمک استفاده از ماتریس استوانه‌ای دو پله خواهد بود. در واقع، اعمال ماتریس دو پله سبب افزایش احتمال دستیابی به



شکل ۱۲. مقایسه تعداد گام‌های طی شده بر روی پال مخروط در حال شکل‌دهی تدریجی.



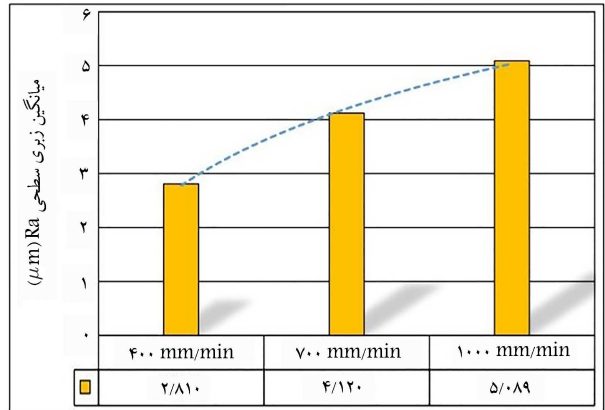
شکل ۱۳. کیفیت سطح نمونه‌های شکل گرفته با گام $1/16 \text{ mm}$ در سرعت 700 mm/min با ماتریس دو پله.

قابل ذکر است که برای انجام آزمایش‌ها از سطح میانی نرخ پیشروی با مقدار 700 mm/min و ماتریس دو پله استفاده شده است. مطابق با انتظار، با افزایش گام نفوذ ابزار، ارتفاع میکرونی برای برجستگی‌های سطحی که سنجی برای بیان زبری سطحی است، افزایش یافت. با افزایش گام از $0/5 \text{ mm}$ به $0/8 \text{ mm}$ ، میزان زبری 24% و همچنین با افزایش از گام $0/8 \text{ mm}$ به $1/16 \text{ mm}$ حدود 53% افزایش میزان زبری حاصل شد. افزایش میزان زبری معادل کاهش کیفیت سطحی محصول نهایی خواهد بود. به نحوی که، به علت سایش ابزار و اصطکاک شدید، پرداخت نهایی کیفیت پایینی خواهد داشت. جهت بررسی علت افزایش زبری برای گام‌های بزرگ‌تر، می‌توان به شکل ۱۲ توجه کرد.

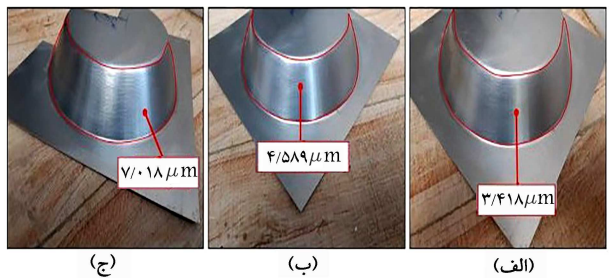
طبق شکل ۱۲، افزایش گام باعث می‌شود که ابزار طی نمونه‌های بزرگ‌تری بر روی پال، شروع به شکل‌دهی قاعده بعدی کند. برای پال مشخص شده در شکل در حین شکل‌دهی تدریجی توسط گام‌های $0/5$ ، $0/8$ و $1/16 \text{ mm}$ ، به ترتیب ۸، ۴ و ۲ تغییر گام مورد نیاز بوده که به ترتیب بر روی پال مخروط، نقاط تماس برای گام‌های مختلف شماره‌گذاری شده‌است. افزایش تعداد گام به معنای کاهش کیفیت سطح نهایی است. در واقع می‌توان تأثیر افزایش گام ابزار بر کیفیت محصول شکل‌دهی شده توسط فرایند TPIF را به افزایش بار براده‌برداری در فرایند ماشینکاری تعمیم داد. با افزایش مقدار گام ابزار پس از اتمام شکل‌دهی قاعده اول، به منظور اعمال گام بعدی و شکل‌دهی قاعده دوم که در داخل مخروط واقع شده است، در مسافت دورتری از نقطه آغاز، به روی پال و وجوه جانبی باز می‌گردد. بنابراین، تا شکل‌دهی آخرین قاعده، ابزار همواره با نمونه‌های بزرگ‌تری بر روی پال می‌نشیند. بزرگ‌تر شدن انقطاع مسافتی در برگشت ابزار بر روی ورق، سبب افزایش زبری و تنزل کیفیت پرداخت نهایی شده‌است. براساس شکل ۱۳، حتی با چشم غیر مسلح نیز تنزل



شکل ۹. مقایسه وجه تخت مخروط شکل‌دهی شده.



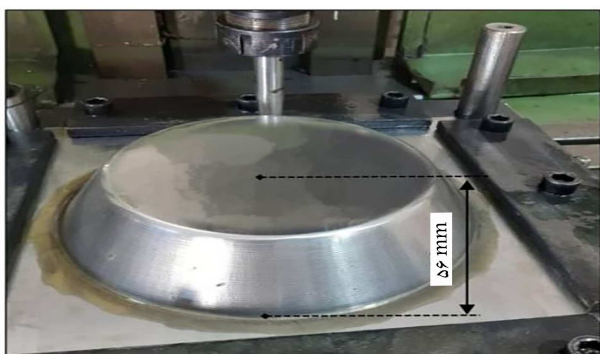
شکل ۱۰. مقایسه مقدار زبری سطحی برای سرعت‌های پیشروی مختلف.



شکل ۱۱. کیفیت سطحی نهایی با زبری میانگین برای گام: الف) $0/5$ ، ب) $0/8$ و ج) $1/16 \mu\text{m}$.

زبری‌سنجی برای پارامتر سرعت در گام ثابت $0/8 \text{ mm}$ بررسی شده است. زبری در هر سرعت، با میانگینی از آزمایش‌های انجام شده در سه نوع ماتریس لحاظ گردید.

طبق شکل ۱۰، ارتفاع ناهمواری‌های سطحی با افزایش نرخ پیشروی بزرگ‌تر شده است. با افزایش پیشروی، تماس فیزیکی ابزار و ورق بیشتر می‌شود. در نتیجه اصطکاک و نیروهای شکل‌دهی نیز حادث شده که ماحصل آن افزایش ارتفاع ابزار و بدتر شدن کیفیت ظاهری و پرداخت نهایی سطح است. به منظور مقایسه ناهمواری نسبتاً خشن با حالت سایش بسیار کم، می‌توان نتایج ارائه شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ را با یکدیگر مقایسه کرد. نرخ پیشروی برای مقادیر حدی کمیته، به صفر میل کرده که در واقع متناظر با عدم تماس ابزار و ورق است. شرایطی که در سطح قاعده بالایی ایجاد شده است، معادل سرعت پیشروی صفر بوده که توانسته بالاترین پرداخت نهایی را نتیجه دهد. در ادامه، تأثیر گام بر پارامتر Ra برای نمونه‌های شکل‌دهی شده در سه گام طبق شکل ۱۱ بررسی شده است.



شکل ۱۵. نمونه‌ی شکل‌دهی شده در گام 0.5 mm با نرخ پیشروی 1000 mm/min توسط ماتریس تک پله.

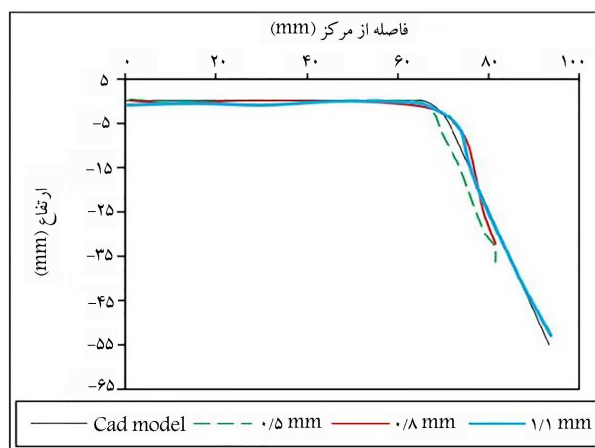
ابزار، ارتباط آن به پدیده برگشت فزنی بوده است. نجف‌آبادی و همکاران، با دو برابر کردن گام عمودی ابزار، کاهش 25% برگشت فزنی را گزارش کردند.^[۱۴] این بحث به شرایط این مقاله نیز قابل تعمیم می‌باشد. کاهش برگشت فزنی معادل خواهد بود با کمتر شدن انحراف هندسه نهایی نسبت به هندسه برنامه‌ریزی شده، به نحوی که محصول نهایی با دقت هندسی بالاتری شکل‌دهی می‌شود.

جهت بررسی تأثیر سرعت پیشروی بر دقت هندسی نیز آزمایش‌هایی در گام 0.8 mm طی سه سرعت 400 ، 700 و 1000 mm/min توسط ماتریس دو پله انجام شد. طبق نتایج، تغییرات نرخ پیشروی تأثیر محسوسی بر دقت هندسی نداشته و تقریباً برای هر سه سرعت، انحراف یکسانی تا ارتفاع کشش کمترین نمونه ایجاد شده است. درحالی‌که پیش‌تر نتایج متفاوتی به‌ویژه برای مشاهدات شکل‌دهی تدریجی تک نقطه گزارش شده است.^[۱۵] از علل تأثیر نامحسوس تغییرات نرخ پیشروی بر دقت هندسی نمونه‌های شکل‌دهی شده می‌توان به بهره‌گیری از ماتریس دو پله اشاره کرد که به‌خوبی توانسته با مقید کردن سطوح داخلی نمونه، از چرخش کنترل نشده قطعه کار حول محور مخروط جلوگیری کرده و از برش درون صفحه‌یی قطعه‌کار ممانعت کند.^[۱۷]

از نکات حائز اهمیت می‌توان به حادث نشدن تابیدگی و چروکیدگی در تمامی نمونه‌ها اشاره کرد. درحالی‌که پدیده تابیدگی هندسه نهایی در فرایند شکل‌دهی به ویژه بدون ماتریس پشتیبان، برای عمق‌های زیاد نزدیک به حد پارگی، بسیار رایج گزارش شده است.^[۱۸] در شکل ۱۵، نمونه شکل‌دهی شده توسط ماتریس دو پله نشان داده شده که تا عمق بیشینه 56 mm بدون ظهور چروک و تابیدگی شکل‌دهی شده است. از مزایای بهره‌گیری از ماتریس پشتیبان می‌توان به کاهش احتمال تابیدگی اشاره کرد که با کم کردن انحراف هندسی، سبب افزایش دقت هندسی محصول نهایی خواهد شد.

در ادامه به بررسی طرح ماتریس‌های ارائه شده بر دقت هندسی پرداخته شده است. بدین منظور، طبق شکل ۱۶، دقت هندسی پروفایل نهایی برای سه طرح ماتریس با هم مقایسه شده است. قابل ذکر است که طبق نتایج شکل‌های ۵ و ۷، مقادیر پارامترهای گام پیشروی و سرعت در شکل ۱۶ طوری انتخاب شدند که منجر به ایجاد عمیق‌ترین قطعات گردند. همچنین با توجه به انحراف ناچیز وجه تخت نمونه‌ها، فقط کانتور متعلق به سطوح جانبی اندازه‌گیری و ترسیم شدند.

همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده، در ماتریس دو پله، علی‌رغم حادث شدن شرایط شکل‌دهی و حصول قطعه‌ی عمیق‌تر، انحراف کانتور برش خورده نسبت به ماتریس تک پله کاهش یافته است. در ماتریس سه پله نیز این انحراف کاهش بیشتری یافته و دقت هندسی بالاتری ایجاد شده است. افزایش تعداد پله‌های ماتریس،



شکل ۱۴. مقایسه دقت هندسی مقطع برش خورده برای گام‌های مختلف.

کیفیت سطحی و پرداخت نهایی با افزایش گام برای نمونه شکل‌دهی شده توسط فرایند شکل‌دهی تدریجی دو نقطه قابل مشاهده است.

بر اساس شکل ۱۳، زبری شکل گرفته از نمای نزدیک نشان داده شده است. جهت بررسی تأثیر نوع ماتریس بر کیفیت سطحی نمونه‌های شکل‌دهی شده، زبری نمونه‌های شکل گرفته در سطح میانی پارامتر سرعت و گام معادل 700 mm/min و 0.8 mm ، در سه طرح ماتریس با استوانه یکپارچه، دو پله و سه پله اندازه‌گیری شدند. طبق مشاهدات، تغییر محسوسی در زبری نمونه‌های شکل گرفته در سه ماتریس ایجاد نشده است. بنابراین، طرح ماتریس‌های ارائه شده بر خروجی زبری نهایی سطحی تقریباً بی‌تأثیر هستند.

۳.۳. تأثیر پارامترهای فرایندی بر دقت هندسی

در شکل ۱۴، انحراف هندسی برای نمونه‌های برش خورده در راستای نورد ورق، برای گام‌های مختلف حرکتی مورد مقایسه قرار گرفته است. جهت مقایسه نتایج از ماتریس با استوانه دو پله با نرخ پیشروی 700 mm/min استفاده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، عمق نمونه‌های شکل گرفته متفاوت است. در گام 1.1 mm ارتفاع حدی بزرگ‌تری ایجاد شده است. با این وجود پروفیل برش خورده برای ارتفاع حدی هر یک از نمونه‌های شکل گرفته رسم شده است. با توجه به نتایج شکل ۱۴، افزایش گام حرکتی ابزار سبب کاهش انحراف پروفایل برش خورده نسبت به مقدار مدلی شده است که مسیر حرکتی ابزار بر مبنای آن برنامه‌ریزی شد. بهبود دقت هندسی حتی با افزایش عمق و حادث شدن شرایط شکل‌دهی، به‌طور محسوسی بهبود پیدا کرده است. در گام‌های کوچک با توجه به مقدار نفوذ کم، نیروی کمتری در راستای نفوذ به وجوه جانبی وارد می‌شود. با بزرگ‌تر شدن گام، مقدار نیرو به هنگام نفوذ افزایش یافته به نحوی و سبب کاهش انحراف ورق در بین ابزار و ماتریس می‌گردد.

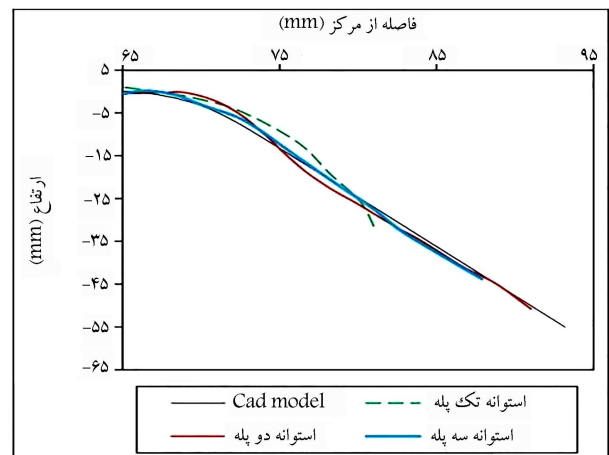
با افزایش عمق نفوذ، ابزار در طول بزرگ‌تری در راستای یال (30°) به مواد پیرامون نفوذ می‌کند. در نتیجه، کرنش موضعی بزرگ‌تری در هر اعمال گام به قاعده بعدی وارد می‌شود. بنابراین، نیروهای شکل‌دهی نیز افزایش یافته که از اثرات آن می‌توان به جلوگیری از انحراف ورق اشاره کرد. درحالی‌که برای نیروهای کم، به ویژه برای سطوح جانبی که ورق از سمت ماتریس آزاد است، تمایل به فرار از مسیر برنامه افزایش می‌یابد. این نتایج بیشتر نیز توجه سینگ و گووال همچنین گزارش شده است.^[۱۳] یکی دیگر از بحث‌های ارائه شده در توجیه رابطه مستقیم بین دقت هندسی و گام

حل می‌کند. برای مواردی که صرفاً ایجاد نمونه فیزیکی اولیه با دقت و هزینه کم مدنظر است، می‌توان از استوانه یکپارچه بهره برد. در نتیجه با توجه به اولویت در شکل‌دهی ورق، اینکه ارتفاع کشش، دقت هندسی و یا کیفیت سطحی نهایی در اولویت بالاتری قرار داشته باشد و یا اینکه سادگی و صرفه‌جویی در هزینه ساخت در اولویت بالاتری قرار داشته باشد، می‌توان یکی از طرح ماتریس‌های استوانه‌یی یکپارچه، دو پله، سه پله و مخروطی را برگزید.

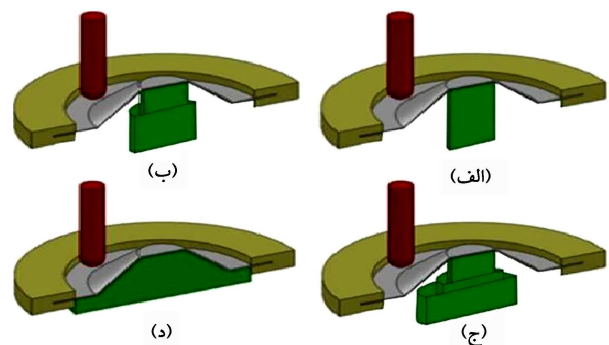
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مجموعه‌ای برای انجام شکل‌دهی تدریجی دو نقطه‌یی بر روی ورق‌های آلایزای آلومینیوم ۱۰۵۰ طراحی و ساخته شده است. آزمایش‌هایی در گام و نرخ پیشروی‌های متغیر در سه طرح ماتریس چند نقطه‌یی انجام شده که پارامترهای فرایندی مناسب با توجه به خروجی‌های توزیع ضخامت، زبری سطحی و دقت هندسی گزارش شده است. نتایج مهم حاصل از این پژوهش، به صورت زیر خلاصه شده است:

۱. با افزایش سرعت پیشروی، ارتفاع حدی میانگین سه نوع ماتریس اعمالی نسبت به سرعت 400 mm/min افزایش یافت. افزایش سرعت خطی با ایجاد حرارت موضعی بیشتر، به بهبود شکل‌پذیری و افزایش ارتفاع‌های حدی منجر شد.
۲. با افزایش گام به اندازه $1/1 \text{ mm}$ ، ارتفاع حدی میانگین کاهش یافت. در واقع افزایش گام با افزایش عمق بار در باربرداری که سبب افزایش نیرو و کرنش‌های وارده خواهد شد معادل خواهد بود.
۳. ارتفاع حدی میانگین با بهره‌گیری از ماتریس چند نقطه‌یی دو پله، 12% بهبود یافت. در واقع، اعمال ماتریس دو پله سبب افزایش احتمال دستیابی به ارتفاع‌های حدی بزرگ‌تری شد. در نتیجه، بهره‌گیری از این ماتریس سبب کاهش تعداد عملیات فرایندی لازم، برای شکل‌دهی قطعات عمیق و پیچیده شد.
۴. با افزایش گام نفوذ ابزار، ارتفاع میکرونی برای برجستگی‌های سطحی که سنجه‌یی برای بیان زبری سطحی است، افزایش یافت. لازم به ذکر است که افزایش میزان زبری ناشی از سایش ابزار و اصطکاک شدید که موجب پرداخت نهایی و کیفیت محصول پایین می‌شود معادل با کاهش کیفیت سطحی محصول نهایی است.
۵. طبق مشاهدات، تغییر محسوسی در زبری نمونه‌های شکل گرفته در سه نوع ماتریس ارائه شده ایجاد نشده است. لذا طرح ماتریس‌های ارائه شده بر خروجی زبری نهایی سطحی تقریباً بی تأثیر هستند.
۶. افزایش گام حرکتی ابزار سبب کاهش انحراف پروفایل برش خورده نسبت به مقدار مدل شد. دقت هندسی حتی با افزایش عمق و حادث شدن شرایط شکل‌دهی، به‌طور محسوسی بهبود پیدا کرده است. تغییرات نرخ پیشروی تأثیر محسوسی بر دقت هندسی پروفیل برش خورده نداشته و تقریباً برای هر سه سرعت، انحراف یکسانی تا ارتفاع کشش کمترین نمونه ایجاد شده است.
۷. طبق نتایج ارائه شده، در ماتریس دو پله و با افزایش شکل‌پذیری ورق، قطعات عمیق‌تری شکل گرفت. درحالی‌که طرح ماتریس با سه پله دقت هندسی بالاتر، انحراف کمتر و کاهش مشکلات اصطکاک دوطرفه را نتیجه داد. در نتیجه، با توجه به اهداف مدنظر در در شکل‌دهی ورق، می‌توان یکی از طرح ماتریس‌های پیشنهادی را استفاده کرد.



شکل ۱۶. نمونه مقایسه دقت هندسی مقطع برش خورده برای طرح ماتریس‌های مختلف.



شکل ۱۷. طرح ماتریس فرایند TPIF با (الف) استوانه تک پله، (ب) ماتریس دو پله، (ج) ماتریس سه پله و (د) مخروط یکپارچه.

با افزودن قيود خطی پشتیبان در سمت ماتریس، سبب کاهش احتمال انحراف ابزار و ورق در حین شکل‌دهی می‌گردد. در واقع ابزار تمایل کمتری به ارتعاش و انحراف داشته و لذا ورق را نیز طبق برنامه شکل‌دهی می‌کند.

۴.۳. مقایسه طرح‌های ارائه شده در ماتریس

طبق نتایج گزارش شده، طرح ماتریس‌های ارائه شده ویژگی‌هایی مختلفی خواهند داشت. از مزایای ماتریس استوانه یکپارچه (تک پله) می‌توان به سادگی آن اشاره کرد. این سادگی سبب کاهش هزینه ساخت آن می‌گردد. اجرا و ساخت با افزایش تعداد پله‌ها، هزینه بیشتری را به همراه خواهد داشت. در شکل ۱۷، طرح‌واره سه ماتریس ارائه شده است. طبق نتایج حاصل ماتریس دو پله توانست با افزایش شکل‌پذیری ورق، قطعات عمیق‌تری را شکل دهد. بر اساس نتایج و از جنبه دقت هندسی، طرح ماتریس با سه پله بالاترین دقت هندسی و کمترین انحراف را نسبت به مسیر برنامه‌ریزی شده ایجاد کرد.

با بهره‌گیری از ماتریس‌های چند نقطه‌یی، علی‌رغم افزایش دقت هندسی ورق، اصطکاک نیز نسبت به ماتریس مخروطی یکپارچه تقلیل می‌یابد. از معایب ماتریس مخروطی یکپارچه، بوجود آمدن سطوح تماس دوطرفه خواهد بود. با توجه به اینکه ورق از دو سمت به‌طور پیوسته با ابزارهای صلب در تماس می‌باشد، این امر سبب افزایش اصطکاک و کرنش‌های وارده می‌گردد. درحالی‌که ماتریس استوانه‌یی سه پله، علاوه بر کاهش انحراف هندسی محصول نهایی، چالش اصطکاک دوطرفه را

پانوشتها

1. Rapid Prototyping
2. Flexible Forming
3. Reflector
4. In-Plane Shear

منابع (References)

1. Behera, A.K., de Sousa, R.A. Ingarao, G. and Oleksik, V., 2017. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, pp.37-62. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.014>.
2. Edward, L., 1967. Apparatus and process for incremental dieless forming. Google Patents.
3. Nimbalkar, D.H. and Nandedkar, V., 2013. Review of incremental forming of sheet metal components. *Int J Eng Res Appl*, 3, pp.39-51.
4. Mirnia, M.J. and Mollaei Dariani, B., 2015/1393. An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet. *Modares Mechanical Engineering*, 14, pp.262-270 [In Persian]. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1393.14.14.2.7>.
5. Roohi, H., Deilami Azodi, H. and Safari, M., 2019. Investigation on Forming Limit of Aluminum Sheet in Warm Incremental Forming Process. *Modares Mechanical Engineering*, 19, pp.259-268. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1397.19.2.16.8>.
6. Barimani-Varandi, A., Nasrabadi, M.K., Ravan, B.A. and Javadi, M., 2021. Rapid prototyping of aircraft canopy based on the incremental forming process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43, pp.1-15. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-021-02811-1>.
7. Kumar, A., Singh, V., Nayak, S., Kumar, A., Tyagi, A. and Sharma, A., 2022. Impact of process variables on surface roughness in negative incremental forming process. *Materials Today: Proceedings*, 50, pp.930-934. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.324>.
8. Trzepiecinski, T., Najm, S.M., Oleksik, V., Vasilca, D., Paniti, I. and Szpunar, M., 2022. Recent developments and future challenges in incremental sheet forming of aluminium and aluminium alloy sheets. *Metals*, 12(1), 124. <https://doi.org/10.3390/met12010124>.
9. Naka, T., Torikai, G., Hino, R. and Yoshida, F., 2001. The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 113, pp.648-653. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00650-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00650-1).
10. Chu, X., Leotoing, L., Guines, D. and Ragneau, E., 2014. Temperature and strain rate influence on AA5086 forming limit curves: Experimental results and discussion on the validity of the MK model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 78, pp.27-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.11.002>.
11. Chen, D.Y., Xu, Y., Zhang, S.H., Ma, Y., Abd El-Aty, A., Banabic, D., Pokrovsky, A.I. and Bakinovskaya, A.A., 2019. A novel method to evaluate the high strain rate formability of sheet metals under impact hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 116553. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116553>.
12. Durante, M., Formisano, A. and Lambiase, F., 2019. Formability of polycarbonate sheets in single-point incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, pp.2049-2062.
13. Singh, R.P. and Goyal, G., 2014. FEA analysis to study the influence of various forming parameters on springback occurs in single point incremental forming. (*IJERA*) ISSN: 2248-9622 *National Conference on Advances in Engineering and Technology*, pp.33-37.
14. Mohammadi Najafabadi, H., Ataee, A.A. and Shariffar, M., 2014. Numerical and Experimental Investigation of Incremental Sheet Metal Forming Parameters and Multi-objective Optimization Using Neural-genetic Algorithm. *Modares Mechanical Engineering*, 14, pp.167-174. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1393.14.2.23.4>.
15. Duffou, J.R., Habraken, A.M., Cao, J., Malhotra, R., Bambach, M., Adams, D., Vanhove, H., Mohammadi, A. and Jeswiet, J., 2018. Single point incremental forming: State-of-the-art and prospects. *International Journal of Material Forming*, 11, pp.743-773.
16. Li, Y., Chen, X., Liu, Z., Sun, J., Li, F., Li, J. and Zhao, G., 2017. A review on the recent development of incremental sheet-forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, pp.2439-2462.
17. Nourmohammadi, A.A. Elyasi, M. and Mirnia, M.J., 2019. Flexibility improvement in two-point incremental forming by implementing multi-point die. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, pp.2933-2952. DOI:10.1007/s00170-019-03307-y.
18. Ham, M. and Jeswiet, J., 2007. Forming limit curves in single point incremental forming, *CIRP Annals*, 56, pp.277-280. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.064>.
19. Jadhav, S. 2004. Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine, Shaker.