

امکان‌سنجی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای کانوپی هواپیما از ورق پلی‌کربنات: تاثیر استراتژی مسیر و دوران ابزار بر دقت هندسی و شفافیت ظاهری

ابوذر بریمانی ورنندی^{۱*}، محمد کاظمی نصرآبادی^۲، بهرام عابدی روان^۳

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،

۲- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- دانشکده علوم پایه، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

کلمات کلیدی:

نمونه‌سازی سریع

کانوپی هواپیما

شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای

ورق پلی‌کربنات

استراتژی مسیر ابزار

خلاصه: کانوپی به عنوان محافظ شفاف کابین خلبان، یکی از قطعات پلی‌مری راهبردی در صنایع هوایی است. فرآیندهای شکل‌دهی سنتی در تولید تکی کانوپی‌های پلی‌مری شفاف، به‌علت مصرف بالای انرژی و هزینه‌های زیاد ماشین‌آلات، تجهیزات و ابزار مقرون به صرفه نیستند. ورق‌های پلی‌کربنات با ویژگی‌های مناسب مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و اپتیکی در ساخت جدیدترین کانوپی‌های یکپارچه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله نمونه‌سازی سریع هندسه‌ای مشابه کانوپی‌های یکپارچه هواپیما، به کمک فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های شفاف پلی‌کربنات در مقیاس آزمایشگاهی بررسی می‌شود. در آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای، تاثیر سرعت دورانی ابزار بر شفافیت ظاهری و تاثیر استراتژی مسیر ابزار بر دقت هندسی بررسی شد. سه استراتژی مسیر ابزار شامل استراتژی شطرنجی، مارپیچ از بیرون و استراتژی مارپیچ از داخل اعمال گردید. حرارت‌دهی پسا شکل‌دهی در دمای حدود 55°C به مدت 30 min ، با آزادسازی تنش‌های پسماند فرآیندی سبب کاهش 50% در برگشت فنری شد. استفاده از ابزار غیر دوار و همچنین پولیش سطحی مکانیکی - شیمیایی سبب بهبود قابل ملاحظه‌ای در پرداخت نهایی و شفافیت نمونه‌ها گردید. همچنین انحراف هندسی برای استراتژی شطرنجی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از 1 mm ایجاد شده که در محدوده مجاز پنجره فرآیندی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای قرار دارد.

۱- مقدمه

بدون وجود هیچ ستون و قاب عرضی ساخته می‌شود. کانوپی‌های یکپارچه به کمک فناوری قالب‌گیری تزریقی یکپارچه^۱ تولید می‌شوند. این فناوری هم‌اکنون تنها در اختیار ایالت متحده آمریکا بوده و به علت اهمیت بالای نظامی و استراتژیکی، جزئیات آن کاملاً محرمانه مانده است [۱-۳].

پوشش شفاف کابین هواپیماهای جنگی، آموزشی و یا تفریحی که خلبان را از عوامل جوی محافظت کرده کانوپی^۱ نام دارد. کانوپی‌ها که امروزه از پلی‌مرهای شفاف ساخته می‌شوند به عنوان یکی از قطعات کلیدی هواپیما نقش مهمی در تنش کل وارد بر سازه و همچنین تحمل بارهای ناشی از اثرات آیرودینامیکی و اختلاف فشار بین فضای داخلی و خارجی کابین را ایفا می‌کنند. یکی از معیارهای سنجش میزان پیشرفته‌بودن یک جنگنده نوع کانوپی مورد استفاده در آن است. در جنگنده‌های نسل چهارم نظیر اف-۲۲ و اف-۳۵، جهت افزایش توانایی دید خلبان، کانوپی به صورت یک قطعه یکپارچه و

ورق‌های پلی‌کربنات دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون شفافیت و مقاومت بالا در ضربه و همچنین استحکام عالی در برابر گرما و سرما هستند [۴، ۵]. استفاده از این ماده در ساخت کانوپی هواپیماها توانسته مشکلات موجود در دماهای بالا و برخورد با پرندگان برای سرعت‌های تا 2.5 ماخ را حل کند [۳]. مقاومت ضربه‌ای

1 Canopy

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: barimani.abozar@email.kntu.ac.ir

2 Integrated injection moulding



ترک عرضی را گزارش کردند. مارکز و همکاران [۱۹] امکان‌سنجی ساخت محصولات ورق‌پلی‌کربنات را توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای صحنه‌گذاری کردند. باگودانچ و همکاران [۲۰] محصولی از ورق پلی‌کربنات با هندسه‌ای ساده را توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بررسی و پارامترهای فرآیندی را از نقطه نظر مصرف انرژی الکتریکی و هزینه‌ها بهینه‌سازی کردند. ادواردز و همکاران [۲۱] پارامترهای فرآیندی بهینه جهت کاهش برگشت فنی ورق‌های پلی‌کربنات را در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای گزارش کردند. تاثیر شرایط تماسی و استراتژی مسیر ابزار بر کیفیت قطعات شکل‌گرفته از ورق‌های پلی‌کربنات، توسط دوران و همکاران [۲۲] در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بررسی و پارامترهای بهینه گزارش شد. فورمیسانو و همکاران [۲۳] شکل‌پذیری نمونه‌های پلی‌کربناتی شکل‌دهی شده توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که دیواره نمونه‌های هرمی شکل مستعد چروکیدگی ناشی از پیچش است. دوران و همکاران [۲۴] در پژوهش دیگر تاثیر قطر ابزار، ضخامت و هندسه نهایی را برای فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق‌های پلی‌کربنات به کمک تحلیل اجزای محدود مطالعه کردند. چشم‌پوشی از ناهمسانگردی ورق سبب عدم پیش‌بینی پیچش^۵ و چروکیدگی در نتایج عددی شد. قابل ذکر است که اغلب پژوهش‌های اشاره شده فرآیند شکل‌دهی تدریجی نمونه‌های پلی‌مری با هندسه‌های ساده (اغلب هرمی) و متقارن را بررسی کردند. درحالی‌که سنتنو و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۷ مطالعه‌ای مروری پیرامون روش‌های نوین برای ساخت کاشتنی‌های پلی‌مری توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی ارائه کردند. آن‌ها ساخت موفقیت‌آمیز بخشی از پروتز جمجمه را توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بر روی ورق‌های پلی‌کربنات گزارش کردند.

اغلب فرآیندهای تولیدی سنتی در تولید تکی کانوپی‌های پلی‌مری مقرون به صرفه نیستند. برای فرآیندهای شکل‌دهی تدریجی انعطاف‌پذیری بالایی در ساخت هندسه‌های پیچیده، زمان کم جهت ساخت محصول نهایی با توجه به عدم نیاز به طراحی و ساخت ابزار خاص، استفاده از تجهیزات ساده و بهره‌وری بالای اقتصادی در تولید غیر انبوه گزارش شده‌است. در این مقاله نمونه‌سازی سریع هندسه‌ای

ورق‌های پلی‌کربنات ۲۵۰ برابر شیشه با ضخامت یکسان است [۶]. کانوپی از جمله قطعاتی است که به دلیل قرارگرفتن در شرایط سخت جوی و عملیاتی و همچنین نیاز به خصوصیات اپتیکی ویژه در معرض استهلاک زیادی قرار می‌گیرد. بهره‌گیری از فرآیندهای شکل‌دهی سنتی پلی‌مرها همچون قالب‌گیری دمشی، فشاری، تزریقی، انتقالی و شکل‌دهی حرارتی و درخلا، به علت مصرف بالای انرژی و هزینه‌های زیاد ماشین آلات، تجهیزات و ابزار، در تیراژ کم مقرون به صرفه نیستند.

امروزه بهره‌گیری از روش‌های نمونه‌سازی سریع^۱ در حال گسترش می‌باشد. ضرورت آن نیز جهت اطمینان از انطباق دقیق قطعات برای تولید یک محصول جدید و دریافت بازخورد آن در کوتاه‌ترین زمان ممکن و همچنین افزایش بهره‌وری اقتصادی در تولید غیر انبوه است. این انتظارات اغلب با بکارگیری روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست [۷-۱۱]. یکی از روش‌های نمونه‌سازی سریع که در ساخت محصولات ورقی مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرآیند شکل‌دهی تدریجی است. فرآیندهای شکل‌دهی تدریجی نوین از ایده‌ی فنی لژاک ادوارد [۱۲] که در سال ۱۹۶۷ میلادی ثبت شد، نشأت گرفته‌است. این فرآیند به عنوان یکی از فناوری‌های شکل‌دهی انعطاف‌پذیر^۲ به ابزار و تجهیزات پیچیده‌ای نیاز ندارد [۱۳]. فرآیند شکل‌دهی تدریجی توانسته در نمونه‌سازی سریع هندسه‌های فلزی پیچیده، پتانسیل بالایی را از جنبه بهره‌وری اقتصادی در دهه‌های اخیر نشان دهد [۱۴]. [۱۵]. وحدتی و همکاران [۱۶] به کمک ارتعاش‌های آلتراسونیک در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای^۳ نیروهای شکل‌دهی، برگشت فنی و زبری سطحی را کاهش دادند. درحالی‌که بهره‌گیری از فرآیند شکل‌دهی تدریجی برای ورق‌های پلی‌مری برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ توسط فرانزن و همکاران [۱۷] گزارش شد. آن‌ها جهت نمونه‌سازی سریع از روش شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای استفاده کردند. در این روش نمونه‌های پلی‌مری توسط ابزار کنترل‌شده با ماشین فرز مجهز به کنترل عددی کامپیوتری^۴، به صورت تدریجی شکل‌دهی شدند. مارتینز و همکاران [۱۸] حد شکل‌دهی را برای پنج نوع ورق پلی‌مری از جمله ورق پلی‌کربنات استخراج کردند. آن‌ها وجود سه حالت شکست شامل ترک محیطی، چروکیدگی^۴ و

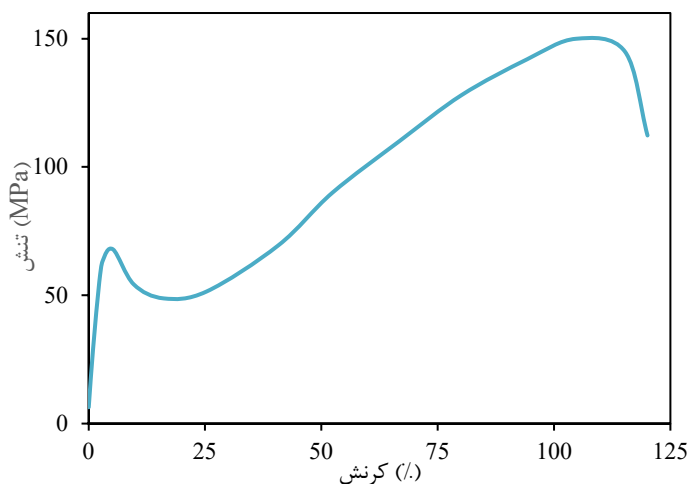
- 1 Rapid prototyping
- 2 Flexible forming
- 3 Computer numerical control (CNC)
- 4 Wrinkling

جدول ۱. خواص مکانیکی و فیزیکی ورق پلی کربنات [۲۵]

Table 1. Mechanical and physical properties of the polycarbonate sheet [24]

ازدیاد طول شکست (%)	استحکام تسلیم (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	دمای انتقال شیشه ^۱ (°C)	چگالی (kg/m ³)	ساختار	فرآیند تولید
۱۲۰	۶۰	۲٫۳	۱۴۵	۱٫۲	آمورف	اکستروژن

^۱ Glass transition temperature



شکل ۱. نمودار تنش- کرنش مهندسی ورق پلی کربنات [۲۵]

Fig. 1. Engineering stress-strain diagram of polycarbonate sheet [24]

۲-۱- مواد استفاده شده

برای انجام تمامی آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای از ورق‌های تجاری پلی کربنات آمریکایی برند لکسان^۱ با ضخامت معادل ۲٫۲۵ mm و ابعاد ۱۷۰ × ۱۷۰ mm استفاده شد. خواص گزارش شده در جدول ۱ و همچنین نمودار تنش- کرنش در شکل ۱ بر اساس اطلاعات تأمین کننده ورق ارائه شده است. در هر دو سمت ورق روکشی نایلونی قرار دارد. وجود این روکش علاوه بر تسهیل عملیات روانکاری، سطح محصول شکل‌دهی شده را تا حدود زیادی از ایجاد خط و خش محافظت می‌کند.

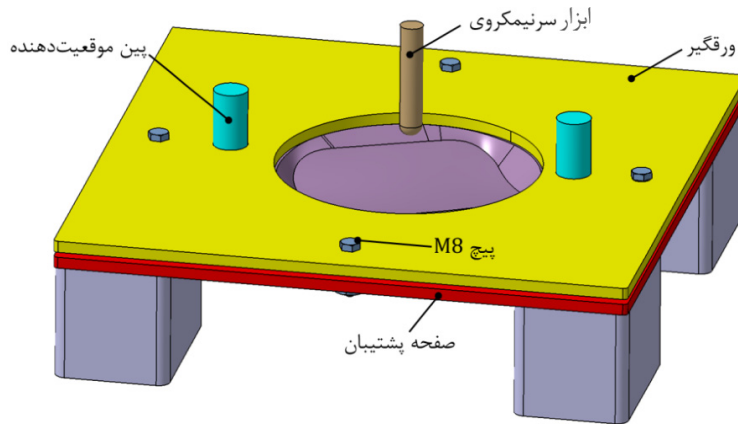
۲-۲- مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های تجربی از فیکسچری طبق مدل شکل ۲ استفاده شده است.

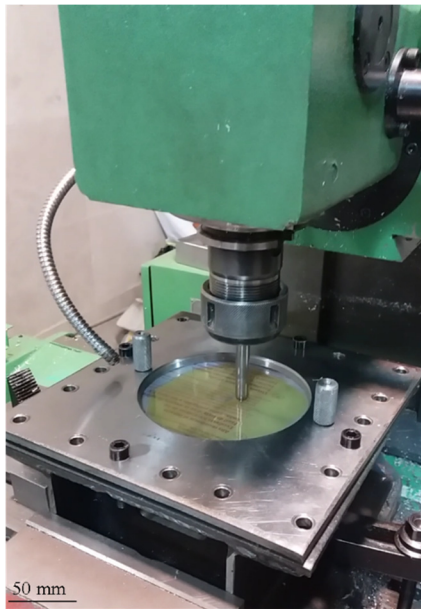
با توجه به اجزای معرفی شده، ورق بین ورقگیر و صفحه پشتیبان

نامتقارن و مشابه کانوپی هواپیما، به کمک شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق‌های پلی کربنات در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت بالای شفافیت کانوپی در وضوح دید خلبان راهکارهایی شامل استفاده از روغن روانکار مختص عملیات کشش، اعمال گام عمودی کوچک در مقایسه با تحقیقات پیشین، کاهش زبری با حذف سرعت دورانی و روشی جدید جهت پولیش سطحی مکانیکی- شیمیایی اعمال شد. هدف اصلی پژوهش امکان‌سنجی شکل‌دهی تدریجی کانوپی‌های شفاف یکپارچه نسل چهارم با ماهیت نمونه‌سازی سریع است. بدین منظور اثر متغیرهای سرعت دورانی ابزار و استراتژی مسیر ابزار به ترتیب بر خروجی‌های شفافیت ظاهری و دقت هندسی نمونه‌ها به کمک آزمایش‌های شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بررسی شد. همچنین تاثیر حرارت پسا شکل‌دهی نیز بر برگشت فنری مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- روش تحقیق



شکل ۲. مدل سه بعدی فیکسچر طراحی شده شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای
Fig. 2. 3D Model of the designed SPIF fixture



شکل ۳. انجام فرآیند شکل دهی تدریجی بر روی ماشین فرز
Fig. 3. Performing the SPIF process on a CNC milling machine

کانوپی‌های شفاف در نظر گرفته شد. از روغن گرید کندافرم ۳۴۴۲ ای^۱ نیز به عنوان روانکار استفاده شد. این گرید مختص عملیات شکل دهی و کشش است [۲۶]. پارامترهای فرآیندی مذکور با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش بر روی ورق‌های پلی‌مری، در نظر گرفته شد [۱۴، ۲۷]. مقدار پارامترهای ثابت در جدول ۲ ارائه شده است.

برای امکان‌سنجی قابلیت فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای در ساخت کانوپی هواپیما، با توجه به محدودیت منابع از هندسه

به کمک ۴ عدد پیچ و مهره ۸ گیره‌بندی شد. ورق پیش از شروع آزمایش، توسط دو عدد پین در دو سمت فیکسچر موقعیت دهی شد. وجود این دو عدد پین برای موقعیت دهی محصول بر روی فیکسچر حین بستن مجدد، بسیار مهم می‌باشد. ابزار از جنس فولاد سردکار اس پی کا^۱ (دین ۲۰۸۰) و سایر اجزای فیکسچر از فولاد اس تی ۵۲^۲ (دین ۱۰۵۵۳) ساخته شدند. آزمایش‌ها طبق شکل ۳ بر روی ماشین فرز مجهز به کنترل عددی کامپیوتری چهار محور ماشین‌سازی تبریز، مدل اف پی ۴ ای^۳ با کنترلر زیمنس ۸۰۲ انجام شد.

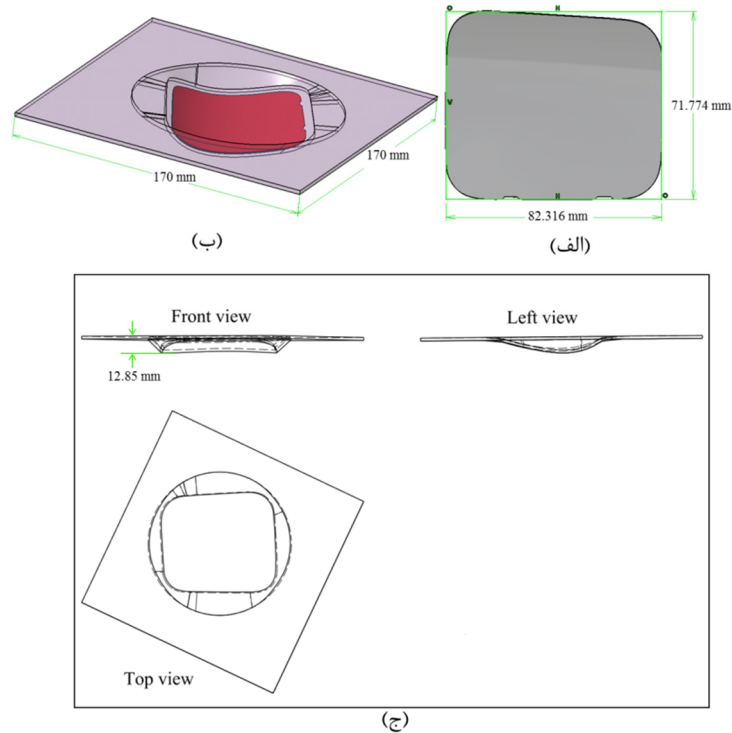
ابزار سرنیمکروی (انتها ثابت^۴) به قطر ۱۰ mm با توجه به کد مسیر ایجاد شده در نرم‌افزار پاورمیل^۵، به تدریج هندسه نهایی را شکل داد. آزمایش‌ها در دو حالت با و بدون سرعت دورانی انجام شد. جهت بررسی تاثیر سرعت دورانی بر کیفیت نهایی محصول، سرعت معادل ۱۰۰۰ rpm لحاظ شد. همچنین نرخ پیشروی معادل ۰.۲۵ mm فرز می‌گردید. گام حرکتی ابزار نیز در راستای عرضی و عمقی با توجه به اهمیت شفافیت ظاهری نهایی، ۰.۲۵ mm تنظیم شد. این مقدار کوچک‌ترین گام اعمالی گزارش شده در شکل دهی تدریجی ورق‌های پلی‌مری است. این تنظیم به دلیل اهمیت بالای پرداخت نهایی

- | | |
|---|-----------|
| 1 | SPK |
| 2 | DIN |
| 3 | St52 |
| 4 | FP4ME |
| 5 | Fixed end |
| 6 | Powermill |

جدول ۲. پارامترهای ثابت ورودی

Table 2. Constant input parameters

سرعت دورانی	گام حرکتی ابزار	نرخ پیشروی	قطر ابزار
۱۰۰۰ rpm	۰٫۲۵ mm	۲۰۰۰ mm/min	۱۰ mm



شکل ۴. (الف) نمای بالای پنجره با مقیاس ۱ به ۷، (ب) مدل توسعه یافته جهت انجام فرآیند شکل‌دهی تدریجی و (ج) نماهای مختلف

Fig. 4. a) Top view of the window with a scale of 1:7, (b) a model developed to perform SPIF process, and (c) various views

همچنین کنترل مناسب جریان مواد جهت ایجاد هندسه نامتقارن، از سه استراتژی شطرنجی^۱ و مارپیچ از بیرون^۲ و داخل^۳ طبق شکل ۵ استفاده شده‌است. این استراتژی‌ها در نرم‌افزار پاورمیل^۴ ایجاد شده سپس جهت اجرا به کنترلر ماشین فرز انتقال داده شده‌است. زمان شکل‌دهی تدریجی نمونه‌ها در هر یک از این سه استراتژی کمتر از ۳۰ min بود.

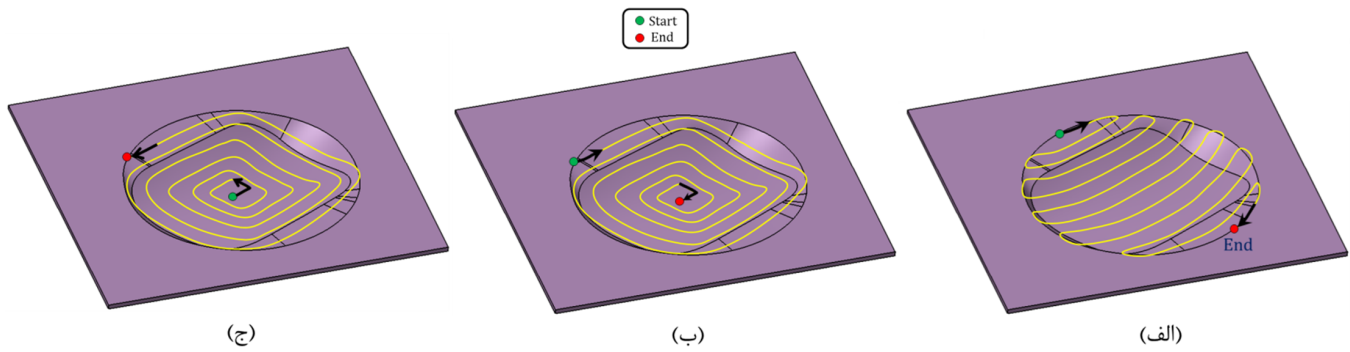
نمونه پلی‌کربنات پس از شکل‌دهی تدریجی دارای ناهمواری‌های سطحی ناشی از تماس ابزار با ورق است. این ناهمواری‌ها بر شفافیت ظاهری محصول تاثیرگذار هستند. پولیش سطحی قطعات پلی‌کربنات

پنجره کناری یک هواپیمای آموزشی موجود در ناوگان هوایی جمهوری اسلامی ایران استفاده شد. با توجه به محدودیت در ابعاد میز ماشین فرز و همچنین ابعاد فیکسچر، از مقیاس سطحی ۱ به ۷ استفاده شده‌است. مدل محصول که توسط اسکن سه‌بعدی ایجاد شده در شکل ۴ به صورت توسعه‌یافته نشان داده شده‌است.

طبق شکل ۴ مدل مقیاس‌دهی شده به کمک سطح‌سازی در نرم‌افزار کتیا بصورت محفظه‌ای درآمد تا بتوان توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی گیره‌بندی و شکل‌دهی شود. محفظه‌ای شدن مدل سبب ایجاد هندسه‌ای مشابه کانوپی‌های یکپارچه نسل چهارم شده که در حال حاضر در پیشرفته‌ترین جنگنده‌های ایالات متحده‌ی آمریکا به کار می‌روند [۳].

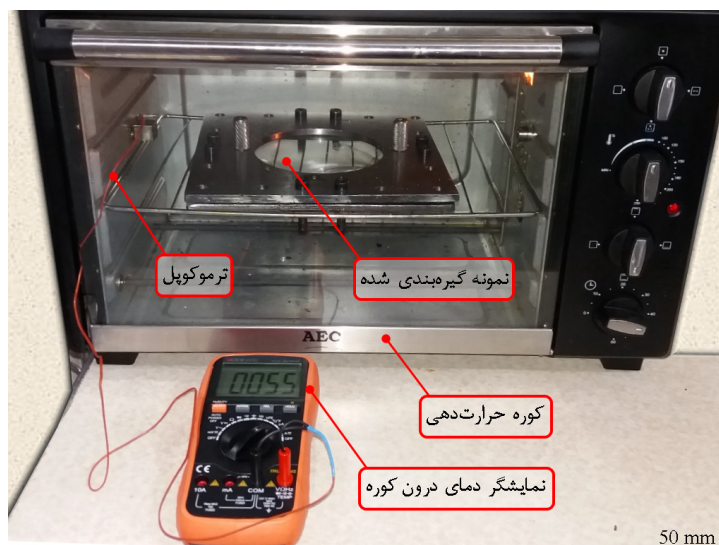
جهت بررسی تاثیر مسیر حرکت ابزار بر کیفیت هندسه نهایی و

1 Raster (Rst.)
 2 Spiral from outside (S_{out})
 3 Spiral from inside (S_{in})
 4 PowerMill



شکل ۵. استراتژی مسیر ابزار (الف) شطرنجی، (ب) مارپیچ از بیرون و (ج) مارپیچ از داخل

Fig. 5. a) Toolpath strategies: (a) Rst., (b) S_{out} , and (c) S_{in}



شکل ۶. تجهیزات جهت حرارت‌دهی پس‌فرآیندی

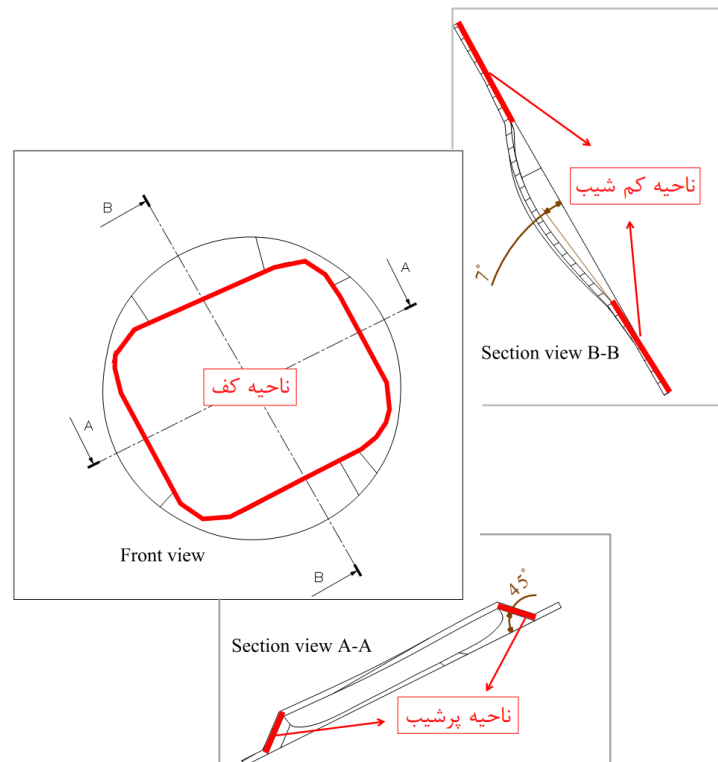
Fig. 6. Equipment for post-forming heating

بخار حاصل با سطوح نمونه‌های شکل داده‌شده تماس پیدا کرد. به محض تماس این گاز با محصول ویژگی‌های سطحی تغییر کرده و شفافیت افزایش می‌یابد [۲۸].

پس از انجام فرآیند شکل‌دهی تدریجی از حرارت‌دهی به منظور آزادسازی تنش‌های پسماند فرآیندی و همچنین بررسی تاثیر آن بر برگشت فتری استفاده شد [۲۱]. بدین منظور نمونه‌های خارج شده از فیکسچر، مجدد بین دو صفحه گیره‌بندی شده و سپس طبق شکل ۶ به مدت ۳۰ min در کوره‌ای با دمای حدود 55°C قرار گرفتند. یک نمایشگر دمای درون کوره را به کمک ترموکوپل نشان می‌دهد. پس اتمام زمان حرارت‌دهی کوره خاموش و نمونه در کوره خنک شد. قابل ذکر است که دمای ذکرشده با توجه به نتایج موفقیت

پس از تولید تزریقی یا فرآیند ترموفرمینگ (شکل‌دهی حرارتی) در مراجع گوناگون گزارش شده‌است [۳، ۲۸]. در پژوهش حاضر جهت برطرف کردن ناهمواری‌های سطحی محصول شکل‌دهی شده و همچنین بهبود شفافیت، از روش پولیش ترکیبی مکانیکی- شیمیایی استفاده شده‌است. روش مکانیکی شامل سنباده‌زنی بوده و روش شیمیایی بخش انتهایی عملیات پرداخت است. در روش مکانیکی به ترتیب از کاغذهای سنباده گریت^۱ پی ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ (استاندارد ایزو ۶۳۴۴) استفاده شد. جنس ذرات سنباده از کاربید سیلیسیم بوده و به‌عنوان روان‌کننده از آب استفاده شد. جهت انجام پولیش شیمیایی، حلال شیمیایی دی‌کلرومتان درون ظرفی حرارت داده شده، سپس

1 Grit



شکل ۷. نواحی مختلف اصطکاکی مبتنی بر عملکرد ابزار در حین شکل‌دهی
Fig. 7. Various friction zones in terms of the tool performance during forming

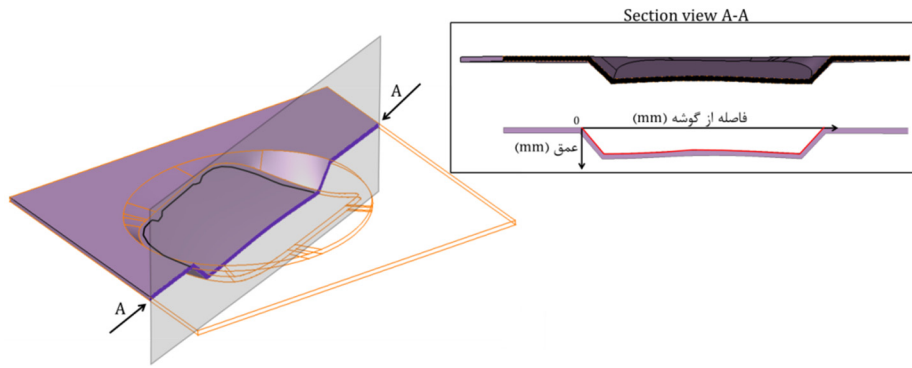
تعریف این نواحی به دلیل عملکرد متفاوت ابزار سرکروی در حین شکل‌دهی تدریجی است. در نواحی کم‌شیب و کف مشاهده گردید که به علت اصطکاک پایین و حرارت کم، ابزار روی ورق سر می‌خورد. اما در ناحیه پرشیب لغزش ابزار بر روی ورق سبب بالارفتن اصطکاک شد. جهت مقایسه شفافیت نمونه‌ها از روش بازرسی چشمی نتو و همکاران [۲۹] استفاده شده است. در این روش کیفیت و وضوح خطوط متعام پشت نمونه‌ها به کمک چشم غیرمسلح بطور نسبی مقایسه می‌شوند. جهت بررسی دقت هندسی محصول نهایی فاکتورهای بازیابی با گذشت زمان، توزیع ضخامت، پیچش، انحراف هندسی نمونه شکل‌دهی شده و برگشت فنری مهم هستند [۳۰]. سه مورد آخر که طبق نتایج حاصل در این پژوهش بحرانی مشاهده شده، ارزیابی می‌شوند. چشم‌پوشی از مورد اول به این دلیل است که اطلاعات زیادی راجع به بازیابی با گذشت زمان ورق‌های پلی‌مری شکل‌دهی تدریجی شده گزارش نشده و نیازمند بررسی و مطالعه جداگانه است. عدم لحاظ توزیع ضخامت نیز با توجه به عمق نه چندان زیاد محصول و عدم مشاهده نازک‌شدگی بحرانی در آزمایش‌ها، قابل توجیه است. پیش از شکل‌دهی بر روی ورق‌ها دو خط متعام عبوری از مرکز

آمیز ادوارد و همکاران اعمال شد [۲۱]. البته آن‌ها از دمنده هوای گرم استفاده کردند. در حالیکه استفاده از کوره شرایط دمایی پیوسته و یکنواختی را برای حرارت‌دهی نمونه ایجاد کرده و قابلیت کنترل بهتری را نیز دارد.

۳-۲- ارزیابی پسا‌فرآیندی

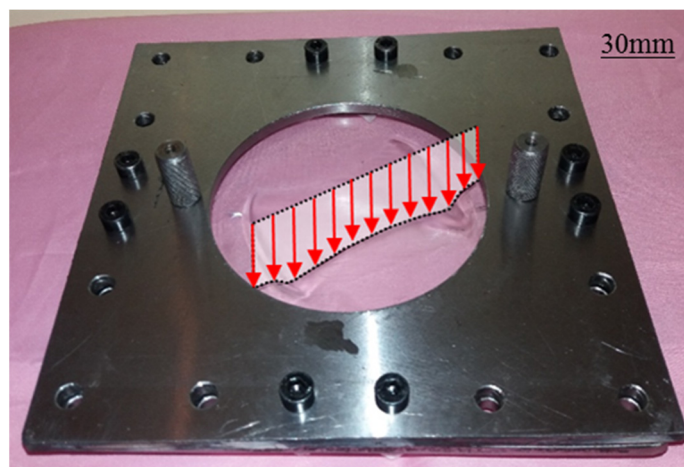
جهت بررسی اثر سرعت دورانی بر زبری نهایی در حالت با و بدون دوران ابزار، زبری سطحی در راستای عمود بر مسیر ابزار توسط دستگاه زبری‌سنج متحرک برند ماهر مارسرف پی‌اس ۱۰ اندازه‌گیری شد. با توجه به شرایط اصطکاکی متفاوت در فرآیند، پارامتر زبری میانگین^۲ در سه ناحیه پرشیب، کم‌شیب و کف محصول مطابق شکل ۷ اندازه‌گیری شد. پارامتر زبری میانگین رایج‌ترین سنجه برای کنترل کیفی و پرداخت نهایی معرفی شده که به عنوان معیاری کلی در زبری‌سنجی لحاظ می‌شود. این پارامتر میانگین حسابی برای مقادیر مطلق ارتفاع‌های پروفیل زبری است [۱۶].

1 Mahr MarSurf PS 10
 2 Roughness average (Ra)



شکل ۸. منحنی بحرانی در مدل اصلی جهت بررسی انحراف هندسی

Fig. 8. Critical curve in the main model to assess the geometric deviation



شکل ۹. نمایش عمق نقاط بر روی منحنی بحرانی یک نمونه گیره‌بندی شده

Fig. 9. Presentation of depth of points on the critical curve of a clamped sample

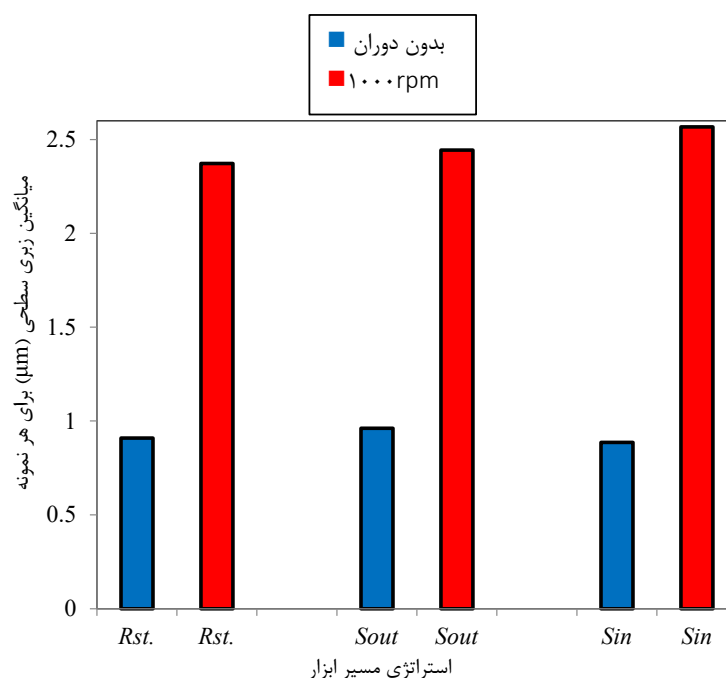
برای بررسی برگشت فنری، از نمونه‌های خارج شده از فیکسچر استفاده شده است. تغییر شکل سطح تخت نمونه‌ها معیاری جهت مقایسه کمی برگشت فنری لحاظ شد. با توجه به مهار و گیره‌بندی محصول اصلی بر روی هواپیما، اهمیت کاهش برگشت فنری در کاهش تنش‌های پسماند خواهد بود. برگشت فنری شدید سبب باقی ماندن تنش‌های پسماند برای پنجره اصلی نصب شده بر روی هواپیما می‌شود. لذا این قطعات پس از نصب تحت تنش قرار می‌گیرند. وجود این تنش‌ها علی‌رغم احتمال افزایش استحکام ذاتی، پنجره را مستعد به ایجاد اعوجاج و تغییر شکل ناشی از شوک‌های حرارتی (حاصل از تغییرات دمایی)، اختلاف فشار درون کابین و نیروی آیرودینامیکی پساً^۱ می‌کند. از مزایای بررسی جداگانه دو پارامتر انحراف هندسی و برگشت فنری در حالت‌های به ترتیب، گیره‌بندی شده و محصول

هندسی ورق رسم شد. میزان دوران این خطوط پس از شکل‌دهی نسبت به حالت پیش از شکل‌دهی، به عنوان معیاری جهت ارزیابی زاویه پیش‌لحاظ شد. جهت اندازه‌گیری انحراف هندسی، از نمونه‌های گیره‌بندی شده بر روی فیکسچر استفاده شد. دلیل این امر این است که محصول اصلی نصب شده بر روی هواپیما نیز از محیط بیرونی خود مهار و به نوعی توسط قاب پنجره گیره‌بندی می‌شود. میزان انحراف هندسی منحنی معین روی سطح درونی نمونه‌ها، نسبت به منحنی متناظر در مدل سه‌بعدی در استراتژی‌های مسیرهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. منحنی مورد بررسی نیز متعلق به مقطع بحرانی عبوری از عمیق‌ترین نقاط مدل محصول است که در شکل ۸ نشان داده شده است. جهت اندازه‌گیری انحراف منحنی بحرانی، عمق نقاط منحنی بحرانی طبق شکل ۹، با نمونه‌های افقی ۲ mm توسط عمق‌سنج اندازه‌گیری شد.

جدول ۳. نتایج اندازه‌گیری زبری سطحی

Table 3. Measured results of the surface roughness

Ra (μm)						استراتژی
ناحیه پرشیب		ناحیه کم‌شیب		ناحیه کف		
بدون دوران	۱۰۰۰ rpm	بدون دوران	۱۰۰۰ rpm	بدون دوران	۱۰۰۰ rpm	
۱٫۲۸۶	۳٫۱۸۴	۰٫۷۹۱	۲٫۴۱۵	۱٫۵۱۸	۰٫۶۵۲	شطرنجی
۱٫۴۱۲	۳٫۶۰۱	۰٫۸۰۱	۲٫۳۱۵	۱٫۴۱۵	۰٫۶۷۱	مارپیچ از بیرون
۱٫۳۱۵	۳٫۰۹۹	۰٫۷۲۳	۲٫۷۵۱	۱٫۸۵۲	۰٫۶۲۰	مارپیچ از داخل



شکل ۱۰. میانگین زبری سطحی برای استراتژی‌های مختلف

Fig. 10. Average surface roughness for various strategies

مقایسه نسبی نمونه‌ها با یکدیگر بوده، لذا روش‌های بیان‌شده که در اغلب مقالات نیز گزارش شده [۱۴، ۲۲، ۳۱]، مناسب می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر سرعت دورانی ابزار بر شفافیت ظاهری محصول با توجه به تاثیر محسوس شرایط تماسی ابزار با ورق [۲۱، ۳۲]، اثر سرعت دورانی بر زبری و شفافیت ظاهری بررسی شده‌است. بدین منظور در حالت با و بدون دوران ابزار زبری سطحی مقایسه شد. زبری برای هر ناحیه در جدول ۳ و میانگین زبری برای هر نمونه در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. قابل اشاره است که مقادیر زبری

خارج‌شده از فیکسچر این است که هر خروجی به تنهایی بررسی شده و متاثر از دیگری نمی‌باشند. این رویه تا به حال گزارش نشده و با توجه به محصول محوربودن تحقیق، کمک شایانی به یافتن پارامترهای بهینه جهت شکل‌دهی دقیق‌ترین هندسه خواهد کرد.

شایان ذکر است که روش‌های اصولی‌تر جهت ارزیابی دقت هندسی استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات^۱، بهره‌گیری از فیکسچرهای کنترلی و یا اسکن سه‌بعدی نمونه شکل داده‌شده و مقایسه مدل آن با مدل اصلی است. این روش‌ها اغلب در صنعت استفاده می‌شوند و تا حدودی هزینه‌بر هستند. با توجه به اینکه هدف اصلی در این پژوهش

1 Coordinate measuring machine (CMM)



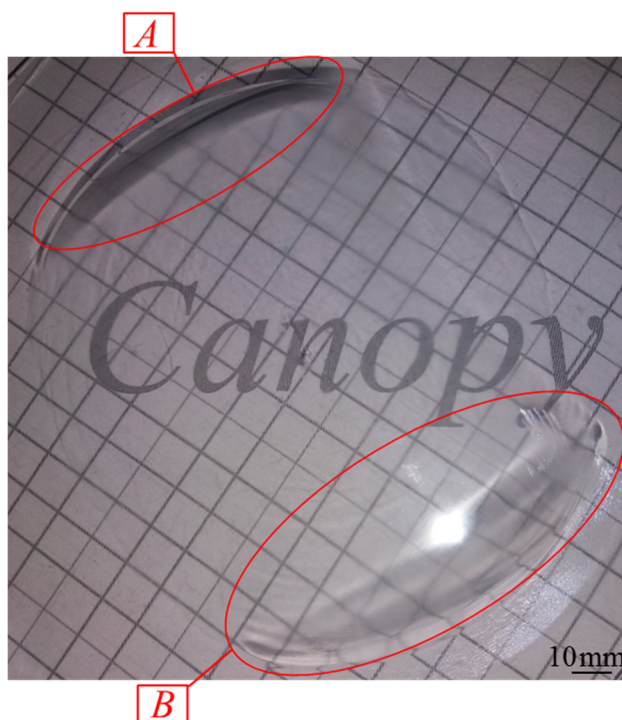
شکل ۱۱. مقایسه شفافیت محصول شکل‌دهی شده با استراتژی شطرنجی در حالت (الف) بدون دوران ابزار و (ب) سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm
Fig. 11. Comparison of the transparency of the sample formed with the raster strategy. (a) without rotating tool and (b) rotational velocity 1000 rpm

دوار شده‌است. دوران ابزار سبب اصطکاک سایشی و ایجاد حرارت شده و در نتیجه‌ی اغتشاش مواد، اعوجاج و اکسایش موضعی حادث می‌گردد. از تبعات آن کاهش شفافیت و کیفیت سطحی محصول نهایی بوده که در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌است.

طبق شکل ۱۱، در حالت بدون دوران خطوط شطرنجی با وضوح بیشتری با چشم غیرمسلح قابل رویت است. در سرعت دورانی معادل ۱۰۰۰ rpm، اصطکاک تماسی ناشی از دوران ابزار سبب افزایش اصطکاک شده طوری که شفافیت را به شدت تحت تاثیر قرار داده‌است. این کاهش شفافیت در تطابق با نتایج شکل ۱۰ است. قابل ذکر است که در حالت بدون دوران نیز اگرچه شفافیت ظاهری نسبت به حالت ابزار دوار بهبود یافته، اما همچنان در شرایط ایده‌آلی قرار نداشته و نیازمند تحقیقات بیشتری است. بدین منظور از پولیش مکانیکی- شیمیایی جهت بهبود کیفیت سطحی و شفافیت، پس از شکل‌دهی نهایی استفاده شده‌است (شکل ۱۲).

اساس این روش قراردادن سطح زبر پلاستیک در برابر جریان داغی از یک بخار محلول است. عملیات پیش‌سنباده‌زنی لازمه‌ی آماده‌سازی سطحی جهت تاثیرپذیری عملیات شیمیایی است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است، شفافیت ظاهری نمونه بهبود یافته بطوریکه خطوط متعام پشت نمونه، با وضوح بیشتری

گزارش شده، میانگین اندازه‌گیری شده از سه نمونه است. بر اساس نتایج جدول ۳، در تمامی موارد سطح زبرتری برای دیواره پرشیب ایجاد شده‌است. در کف و سطح کم‌شیب، تفاوت زبری قابل توجه نبوده و دلایل آن تماس نسبتاً عمود ابزار با این سطوح است. با آغاز حرکت تدریجی ابزار، در زمان یکسان عمق کمتری در سطح کم شیب نسبت به ناحیه پرشیب طی می‌شود. لذا برای قسمت کم‌شیب نیروهای بازدارنده کمتر شده و ابزار به راحتی بر روی ورق سر می‌خورد. درحالی‌که برای سطح پرشیب نیروهای بزرگتری در راستای عمقی وارد شده که لغزش ابزار را در پی خواهد داشت. در نتیجه اصطکاک بیشتری ایجاد شده و همراه با ایجاد حرارت خواهد بود. لذا زبری سطحی بیشتر در سطح پرشیب قابل پیش‌بینی می‌باشد. کاهش شرایط اصطکاکی برای ناحیه کف محصول نیز، زبری سطحی کمتری را نسبت به سایر سطوح در پی داشته است. طبق نتایج شکل ۱۰، با دوران ابزار زبری سطحی و در نتیجه کیفیت سطحی محصول برای هر سه استراتژی کاهش می‌یابد که در تطابق با نتایج پیشین است [۲۹، ۳۳، ۳۴]. همانطور که مشخص است نوع استراتژی مسیر تاثیر ناچیزی بر زبری سطح داشته و در هر سه استراتژی با حذف دوران، بهبود تقریباً یکسانی در میانگین زبری حاصل شده‌است. عدم دوران ابزار سبب بهبود ۶۲٪ پرداخت نهایی نسبت به حالت استفاده از ابزار



شکل ۱۲. انجام پولیش سطحی مکانیکی - شیمیایی بر روی نمونه شکل‌دهی شده با استراتژی شطرنجی بدون دوران ابزار

Fig. 12. Performing the mechanical-chemical surface polishing on a sample formed with a raster strategy without rotating tool

با انحنای زیاد حادث شده می‌تواند به دلیل اعوجاج‌های ایجاد شده، نقص‌های سطحی نمونه و یا ناشی از ویژگی‌های خود ورق پلی‌مری باشد. با توجه به مطالعات انجام شده بهره‌گیری از ابزارهای غیرفلزی و همچنین استفاده از فیلم واسط بین ابزار و محصول می‌تواند اعوجاج و نقص‌های سطحی را در قسمت‌های غیرتخت و انحنادار بهبود دهد [۱۴، ۲۷].

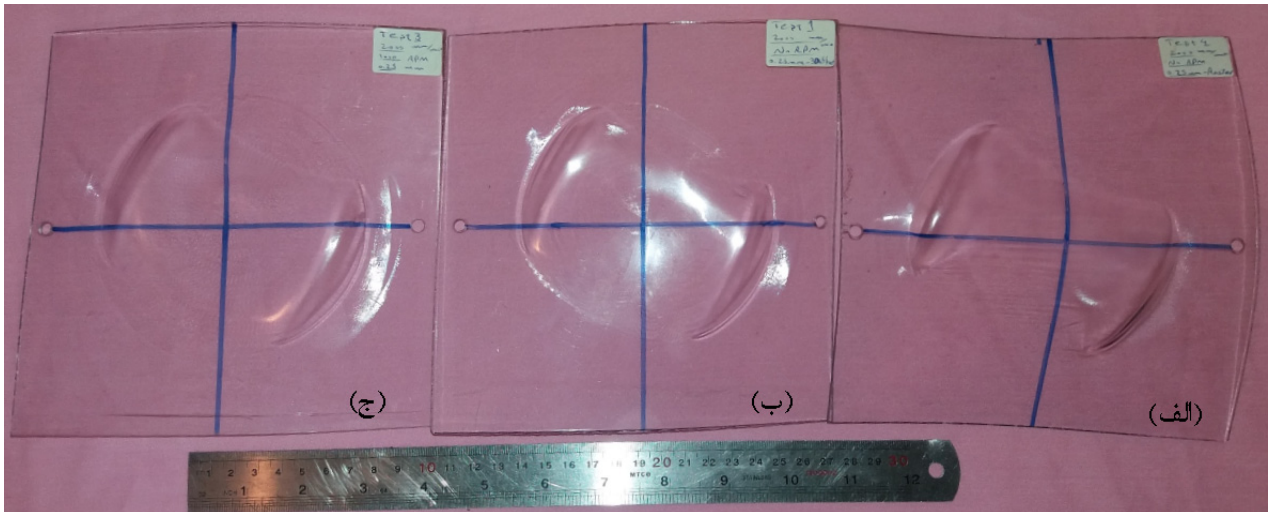
۳-۲- بررسی اثر استراتژی مسیر ابزار بر دقت هندسی

همانطور که در مقدمه اشاره شد، پدیده پیچش در فرآیند شکل‌دهی تدریجی، هندسه و شکل نهایی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این پدیده به دلیل نیروهای مماسی وارد شده توسط ابزار، چرخش کنترل نشده‌ی قطعه کار حول تکیه‌گاه صفحه پشتیبان ایجاد شده و منجر به برش درون صفحه‌ای^۴ در قطعه کار می‌شود. شدت این پدیده حتی تا مقدار ۲۴° هم گزارش شده است [۲۴]. جهت بررسی تاثیر استراتژی مسیر ابزار بر پدیده پیچش، سه نمونه طبق شکل ۱۳ شکل‌دهی شدند. قابل ذکر است که با توجه به نتایج قسمت قبل، برای

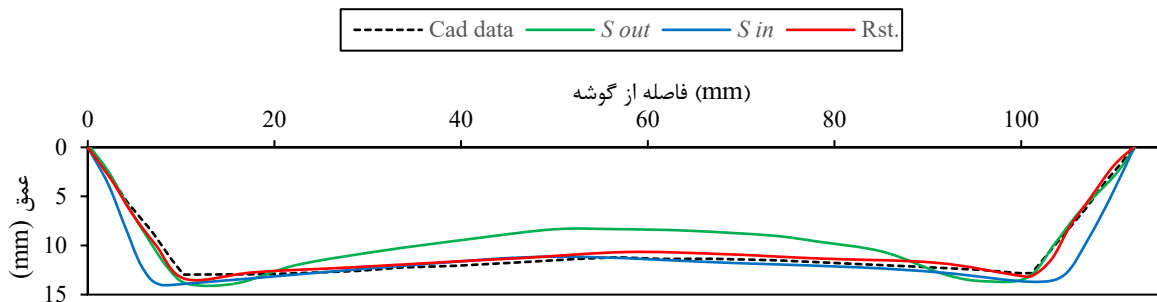
قابل رویت است. بهره‌گیری از فرآیند پولیش سطحی در ساخت کانوپی‌های شرکت‌های اروپایی و آمریکایی نیز تاکید شده است [۲۸]. سنجش ویژگی‌های اپتیکی کانوپی‌ها در شرکت‌های سازنده توسط آزمون‌های بسیار دقیقی انجام می‌شود. در این آزمون‌ها دو معیار عبورپذیری نور و انحراف نور طبق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی ۱۰۰۳^۱، از مهم‌ترین معیارهای اپتیکی ذکر شده‌اند. طبق این استاندارد به ترتیب از روش اسپکتروفوتومتر^۲ و هیزمتر^۳ جهت سنجش درصد عبورپذیری نور و درصد انحراف نور برای مواد پلاستیکی شفاف استفاده می‌شود. بررسی هر دو معیار در کنار هم نقش بسیار مهمی در وضوح دید خلبان دارد. در کانوپی از جنس پلی‌کربنات با درصد عبورپذیری نور بیش از ۹۰٪، اغلب طیف نور به‌خوبی از کانوپی عبور می‌کند. ولی اگر بخشی از این طیف به خاطر اعوجاج‌های درونی جسم از حالت مستقیم منحرف شود، آنگاه دیدن اجسام از میان این کانوپی علی‌رغم وجود شفافیت مقدور نخواهد بود. این نقص در نواحی A و B شکل ۱۲ نشان داده شده است. عدم وضوح که در قسمت‌هایی

- 1 ASTM D1003
- 2 Spectrophotometer
- 3 Haze meter

4 In-plane shear



شکل ۱۳. مقایسه اثر استراتژی مسیر ابزار بر پارامتر پیچش (الف) شطرنجی، (ب) ماریپچ از بیرون و (ج) ماریپچ از داخل
 Fig. 13. Comparison of the effect of toolpath strategy on twisting parameter: (a) Rst., (b) S_{out} , and (c) S_{in}



شکل ۱۴. مقایسه اثر استراتژی مسیر ابزار بر دقت هندسی منحنی بحرانی
 Fig. 14. Comparison of the effect of toolpath strategy on geometric accuracy for the critical curve

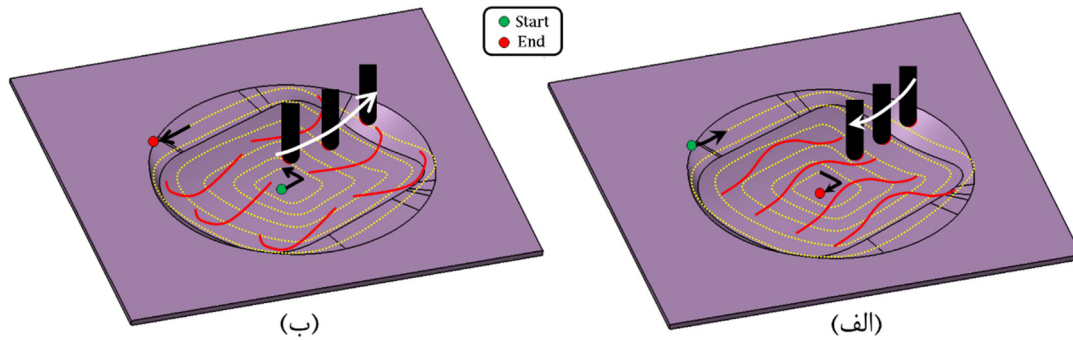
همچون کانوپی جنگنده‌های اف-۱۶، اف-۲۲ و اف-۳۵، جلوگیری از پدیده پیچش همراه با چالش خواهد بود.

جهت ارزیابی دقت هندسی منحنی بحرانی، طبق شکل ۱۴ مقطع هر منحنی در محور مختصات رسم شده‌است. برای هر نمونه میانگین عمق نقاط متناظر برای ۳ تکرار در هر منحنی رسم شده‌است. جریان مواد برای استراتژی‌های ماریپچ نیز در شکل ۱۵ با منحنی‌های قرمز نشان داده شده‌است.

در استراتژی ماریپچ بیرونی جریان مواد در جهت شعاعی و به سمت مرکز است. این جریان گردابی همانند یه موج به سمت مرکز حرکت کرده و سبب انباشت مواد در قسمت مرکزی نمونه می‌شود. طوری که انحراف بیشینه‌ای به مقدار ۳٫۷۸ mm ایجاد شده و عمق کمتری نسبت به منحنی مرجع شکل گرفته است. برای مسیر ابزار با استراتژی ماریپچ داخلی جریان گردابی مواد به سمت بیرون و در

تمامی آزمایش‌ها از حالت بدون سرعت دورانی استفاده شد. همانطور که نشان داده شده زاویه پیچش در هر سه استراتژی بسیار ناچیز بود. لذا پدیده چروکیدگی نیز در هیچ مورد مشاهده نشد. یکی از استراتژی‌هایی که جهت عدم پیچش محصول در فرآیندهای پیشین برای شکل‌دهی تدریجی تک و دونقطه‌ای پیشنهاد شده، متناوب کردن^۱ مسیر ابزار است. در استراتژی متناوب کاهش کیفیت سطحی نمونه به‌ویژه در محل تغییر جهت ابزار گزارش شده‌است [۳۵، ۳۶]. درحالی‌که مسیرهای اعمال‌شده در این مقاله، علاوه بر بهبود کیفیت سطحی، عدم پیچش محصول را نیز در پی داشته است. البته پژوهش‌های پیشین، پدیده پیچش را در شکل‌دهی تدریجی با استراتژی ماریپچ برای نمونه‌های عمیق نزدیک به حد شکل‌دهی گزارش کردند [۳۷، ۳۸]. لذا در صورت انتخاب محصولی عمیق‌تر

1 Alternating



شکل ۱۵. مقایسه اثر استراتژی مسیر ابزار بر جریان مواد (الف) ماریچ از بیرون و (ب) ماریچ از داخل
Fig. 15. Comparison of the effect of toolpath strategy on material flow: (a) S_{out} and (b) S_{in}

فرآیندهای بهبودیافته فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای، انجام فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای، بکارگیری فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای در چند پاس و بهره‌گیری از پشتیبان غیرصلب می‌تواند به دقت هندسی بیشتری بیانجامد. البته انجام فرآیند در چند پاس علاوه بر افزایش زمان فرآیندی می‌تواند سبب کاهش کیفیت سطحی محصول نهایی شود [۲۷، ۴۰].

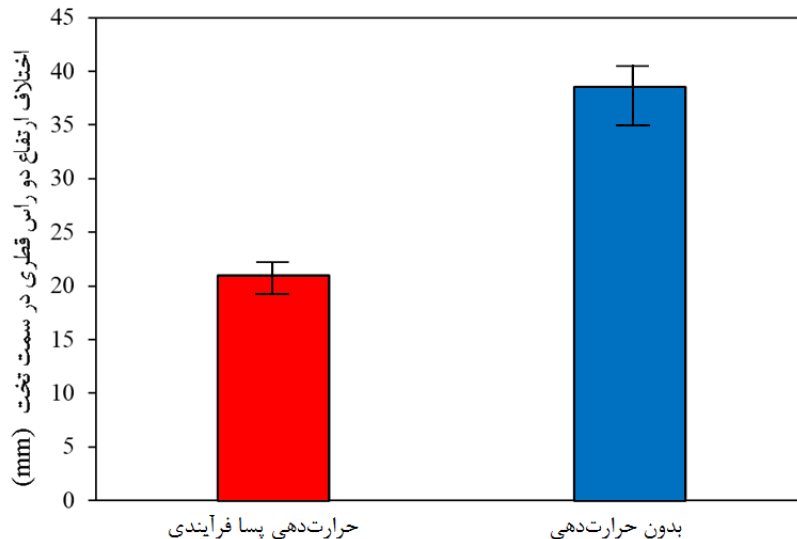
۳-۳- بررسی اثر حرارت‌دهی پسا شکل‌دهی بر برگشت فنری

پارامتر برگشت فنری در فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلی‌مری نقش بسیار کلیدی در دقت ابعادی و هندسی ایفا می‌کند. بدین دلیل که در فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق‌های پلی‌مری نسبت به ورق‌های فلزی، بسیار مستعدتر جهت اعوجاج و تابیده شدن هستند. مدول الاستیک کوچک، تنش تسلیم کم، ضخامت کم ورق‌ها و کرنش‌های بزرگ وارد شده سبب حادث شدن میزان برگشت فنری ورق‌های پلی‌مری می‌شود. در نتیجه اندیشیدن راه‌حلی جهت ارتقای این چالش ضروری است. با توجه به مطالعه پیشینه پژوهش، حرارت‌دهی پسا فرآیندی راه‌حل اجرایی مناسبی می‌تواند باشد [۲۱]. برای بررسی پارامتر برگشت فنری از نمونه‌های شکل‌دهی شده توسط استراتژی شطرنجی و در حالت بدون دوران استفاده شد. زیرا این استراتژی شفافیت و دقت هندسی بالاتری را نسبت به دو استراتژی ماریچ ایجاد کرد. با توجه به تخت بودن سمتی از نمونه که حین فرآیند گیره‌بندی شد، از بیشترین اختلاف ارتفاع دو راس یک قطر در سمت تخت برای مقایسه پارامتر برگشت فنری طبق شکل ۱۶ استفاده شد.

جهت افزایش قطر است. طوری که طبق منحنی شکل ۱۴ افزایش محیطی را در هر گام عمقی به همراه داشت. انحراف بیشینه در استراتژی ماریچ داخلی به مقدار 3.21 mm بوده که در راستای شعاعی حادث شد. همانطور که در پیشینه پژوهش ذکر گردید، اغلب مطالعات بر روی هندسه‌های ساده و متقارن انجام شد. در نتیجه مشکلات حاصل از ایجاد هندسه‌های نامتقارن به طور محسوس مشاهده و بررسی نشده‌است.

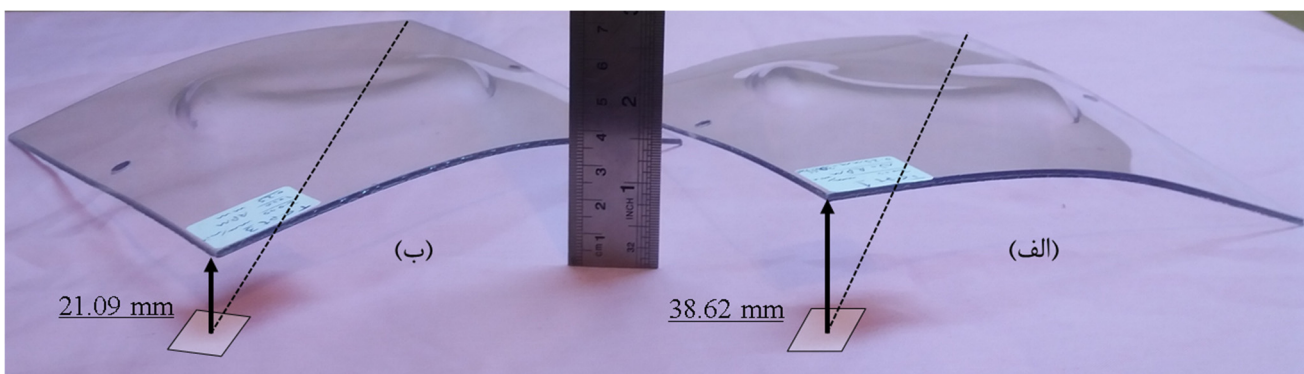
در استراتژی شطرنجی جریان مواد از یک سمت آغاز شده و به سمت دیگر جاروب می‌شود. در نتیجه عدم تقارن جریان سبب ایجاد جریان گردابی و انباشت مواد نمی‌شود. علی‌رغم ایجاد هندسه‌ای نامتقارن و نسبتاً پیچیده دقت هندسی مناسبی با اعمال استراتژی شطرنجی ایجاد شد. میزان انحراف برای استراتژی شطرنجی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از 1 mm بود. لذا در این استراتژی تolerانس $\pm 1 \text{ mm}$ قابل دستیابی بوده که در محدوده مجاز پنجره فرآیندی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای که پیشتر ارائه شده قرار دارد [۳۱، ۳۹]. با توجه به منابع بررسی شده این میزان دقت تقریباً در محدوده بالاترین مقادیر گزارش شده توسط فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای سنتی است. درحالی‌که برای ساخت کانوپی تolerانس‌های بسته‌تری مورد نیاز است. البته نمونه‌سازی سریع پنجره مورد بررسی در مقیاس اصلی، علی‌رغم نیاز به ماشین فرز با ابعاد میز بزرگ‌تر، به علت وجود انحنای بزرگ‌تر همراه با چالش‌های کمتری در شکل‌دهی تدریجی می‌باشد.

قابل ذکر است با توجه به عدم وجود قالب و پشتیبان در یک سمت نمونه‌ها، وجود این انحراف‌ها قابل انتظار می‌باشد. بهره‌گیری از



شکل ۱۶. مقایسه مقدار برگشت فنری برای نمونه‌های شکل‌دهی‌شده توسط استراتژی رسترنگی و در حالت بدون دوران ابزار

Fig. 16. Comparison of the spring back for the formed samples with raster strategy without rotating tool



شکل ۱۷. مقایسه ارتفاع دو رأس قطری متناظر در حالت (الف) بدون حرارت‌دهی و (ب) حرارت‌دهی پس‌فرآیندی

Fig. 17. Comparison of the height of the two vertices of corresponding diameters. (a) without heating and (b) applying post-forming heating

حرارت‌دهی جهت حفظ دقت ابعادی و هندسی است. زیرا با توجه به ضخامت کم نمونه‌ها، انجام عملیات حرارتی همراه با افزایش اعوجاج و تابیدگی در محصول می‌باشد. در شکل ۱۷ اختلاف ارتفاع دو رأس قطری متناظر مورد مقایسه قرار گرفته است.

بهینه‌سازی مقدار دما و زمان حرارت‌دهی پس‌فرآیندی می‌تواند کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان برگشت فنری به ارمغان آورد. قابل ذکر است که حرارت‌دهی در حین فرآیند نیز گزینه مناسبی می‌باشد که مطالعه آن در شکل‌دهی تدریجی پلی‌مرها گزارش نشده و نیازمند مطالعه و بررسی جداگانه می‌باشد. از مزایای آن می‌توان به حذف عملیات ثانویه حرارت‌دهی و در نتیجه کاهش زمان فرآیندی، بهبود

همانطور که نشان داده شده حرارت‌دهی پس‌فرآیندی مقدار برگشت فنری را تقریباً ۵۰٪ کاهش داده است. حرارت‌دهی به مدت زمان ۳۰ min در دمای حدود ۵۵ C° به نمونه اجازه‌ی آزادسازی تنش‌های پسماندی را می‌دهد که در حین شکل‌دهی تدریجی ایجاد شده است. این تنش‌های پسماند به دلیل کوچک بودن مدول الاستیک نسبت به ورق‌های فلزی بسیار بزرگتر خواهد بود. عمده‌ترین دلیل در بزرگ‌بودن مقدار برگشت فنری نسبت به ورق‌های فلزی، مقدار مدول الاستیک ورق‌های پلی‌کربنات است که تقریباً به ترتیب ۱۰۰ و ۳۵ برابر کوچکتر از مدول فولاد و آلومینیوم می‌باشد. یکی دیگر از موارد مهم در آزادسازی تنش‌های پسماند اهمیت گیره‌بندی در حین

شکل پذیری و کاهش نیروهای فرآیندی اشاره کرد.

۴- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش امکان‌سنجی نمونه‌سازی سریع کانوپی هوایما به کمک روش شکل‌دهی تدریجی است. بدین منظور هندسه‌ای مشابه کانوپی یکپارچه در ابعاد آزمایشگاهی، توسط ورق‌های تجاری پلی‌کربنات شکل‌دهی شد. آزمایش‌ها در حالت با و بدون ابزار دوار و اعمال سه استراتژی مسیر ابزار انجام شد. همچنین از حرارت‌دهی پسا شکل‌دهی جهت آزادسازی تنش‌های پسماند فرآیندی و بررسی اثر آن بر پارامتر برگشت فنری استفاده شد. یافته‌های مهم این مقاله بصورت زیر خلاصه شده‌است:

- ۱- عدم دوران ابزار با ارتقای ۶۲٪ پرداخت نهایی سبب افزایش کیفیت سطحی نسبت به حالت استفاده از ابزار دوار شد. استفاده از پولیش سطحی مکانیکی- شیمیایی بر روی نمونه‌های شکل‌دهی شده با ابزار غیر دوار، شفافیت ظاهری نمونه‌ها را بهبود داده بطوریکه خطوط متعامد پشت نمونه با وضوح بیشتری قابل رویت شد.
- ۲- نمونه‌های شکل‌دهی شده توسط هیچ یک از سه استراتژی شطرنجی، ماریچ از بیرون و از داخل، تحت تاثیر محسوس پدیده پیچش قرار نگرفتند. درحالی‌که در استراتژی شطرنجی، با کنترل مناسب جریان مواد انحراف هندسی کمتری برای منحنی بحرانی نسبت به سایر استراتژی‌ها ایجاد شد. میزان انحراف برای این استراتژی در دو راستای عمقی و شعاعی کمتر از ۱ mm بوده که در محدوده مجاز پنجره فرآیندی شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای قرار دارد.
- ۳- در حرارت‌دهی پسا فرآیندی به مدت ۳۰ min در دمای حدود ۵۵°C، با آزادسازی تنش‌های پسماند ایجادشده در حین شکل‌دهی تدریجی، مقدار برگشت فنری تقریباً ۵۰٪ بهبود یافت.
- ۴- با توجه به انتخاب هندسه‌ای نه چندان عمیق در مقایسه با هندسه‌های حدی، هیچ از سه حالت شکست رایج در شکل‌دهی تدریجی ورق‌های پلی‌مری شامل ترک محیطی، چروکیدگی و ترک عرضی در نمونه‌ها مشاهده نشده‌است.
- ۵- بهترین تنظیمات از نقطه نظر شفافیت ظاهری و دقت هندسی شامل اعمال ابزار غیر دوار، استفاده از پولیش مکانیکی- شیمیایی با لحاظ استراتژی شطرنجی و حرارت‌دهی پسا شکل‌دهی است.

۶- نتایج حاصل نوید بخش بکارگیری فرآیندهای شکل‌دهی تدریجی جهت نمونه‌سازی سریع کانوپی‌ها در آینده‌ای نزدیک است. البته این امر نیازمند بهره‌گیری از روش‌های نوین شکل‌دهی تدریجی بوده تا بتواند استانداردهای لازم را برآورده کند. مواردی همچون درصد عبورپذیری و اعوجاج نور و همچنین حفظ تolerانس‌های ابعادی و هندسی نیازمند مطالعات بیشتری است.

مراجع

- [1] B.S. Haisty, Lockheed Martin's Affordable Stealth, in: National Press Club, 2000.
- [2] B. Sweetman, f-22 raptor, Zenith Imprint, 1998.
- [3] X. Wang, S. Wei, B. Xu, Y. Chen, X. Yan, H. Xia, Transparent organic materials of aircraft cockpit canopies: research status and development trends, *Materials Research Innovations*, 19(sup10) (2015) S10-199-S110-206.
- [4] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K.Y. Benyounis, The effect of low power CO2 laser cutting process parameters on polycarbonate cut quality produced by injection molding, *Modares Mechanical Engineering*, 17(2) (2017) 93-100.
- [5] M.S.S.M. Meiabadi, A. Kazerooni, M. Moradi, M.J. Torkamany, Laser assisted joining of St12 to polycarbonate: Experimental study and numerical simulation, *Optik*, (2019) 164151.
- [6] M. Moradi, M.K. Moghadam, M. Shamsborhan, Z.M. Beiranvand, A. Rasouli, M. Vahdati, A. Bakhtiari, M. Bodaghi, Simulation, statistical modeling, and optimization of CO2 laser cutting process of polycarbonate sheets, *Optik*, (2020) 164932.
- [7] A. Barimani-Varandi, The non-isothermal hot deep drawing of AA5083 aluminum alloy, *Mechanics & Industry*, 21(1) (2020) 112.
- [8] A. Barimani-Varandi, A.J. Aghchai, Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength, *Mechanics & Industry*, 21(5) (2020) 529.
- [9] A. Barimani-Varandi, S.J. Hosseinipour, Numerical and experimental study on the effect of forming speed in

- Technology, 60(1-4) (2012) 75-86.
- [20] I. Bagudanch, M. Garcia-Romeu, M. Sabater, Incremental forming of polymers: process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 1013-1024.
- [21] W.L. Edwards, T.J. Grimm, I. Ragai, J.T. Roth, Optimum process parameters for springback reduction of single point incrementally formed polycarbonate, *Procedia Manufacturing*, 10 (2017) 329-338.
- [22] M. Durante, A. Formisano, F. Lambiase, Incremental forming of polycarbonate sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 253 (2018) 57-63.
- [23] A. Formisano, L. Boccarusso, L. Carrino, F. Lambiase, F.M.C. Minutolo, Single point incremental forming: Formability of PC sheets, in: *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2018, pp. 100006.
- [24] M. Durante, A. Formisano, F. Lambiase, Formability of polycarbonate sheets in single-point incremental forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5-8) (2019) 2049-2062.
- [25] <https://www.par-group.co.uk/>.
- [26] <https://www.condat-lubricants.com/>.
- [27] Y. Li, X. Chen, Z. Liu, J. Sun, F. Li, J. Li, G. Zhao, A review on the recent development of incremental sheet-forming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5-8) (2017) 2439-2462.
- [28] O. Cybulski, P. Garstecki, VAPOR POLISHING OF MICROMACHINED STRUCTURES, (2015).
- [29] B. Neto, M. De, R.d.C.M. Sales, K. Iha, J.A.F.F. Rocco, Reinforced Transparencies for Aerospace Application– Case Description, *Journal of Aerospace Technology and Management*, 8(1) (2016) 49-54.
- [30] V. Franzen, L. Kwiatkowski, J. Neves, P. Martins, A. Tekkaya, On the capability of single point incremental forming for manufacturing polymer sheet parts, in: *Int. Conf. Technol. Plast*, 2008, pp. 890-895.
- [31] V. Franzen, L. Kwiatkowski, P. Martins, A. Tekkaya, Single point incremental forming of PVC, *Journal of materials processing technology*, 209(1) (2009) 462-469.
- [32] J. Duflou, H. Vanhove, J. Verbert, J. Gu, I. Vasilakos, P. gradient warm deep drawing process, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 8(2) (2018) 51-66 (in Persain).
- [10] A. Barimani-Varandi, S. Jamal Hosseinipour, Investigation of process parameters in production of cylindrical parts by gradient warm deep drawing, *Modares Mechanical Engineering*, 14(10) (2015) 187-194 (in Persain).
- [11] A. Barimani-Varandi, A. Jalali Aghchai, Electroplastic Friction Stir Spot Welding for Joining of AA6061-T6 Aluminum to Galvanized DP590 Steel, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2020) (in Persain).
- [12] L. Edward, Apparatus and process for incremental dieless forming, in, *Google Patents*, 1967.
- [13] D.H. Nimbalkar, V. Nandedkar, Review of incremental forming of sheet metal components, *Int J Eng Res Appl*, 3(5) (2013) 39-51.
- [14] A.K. Behera, R.A. de Sousa, G. Ingarao, V. Oleksik, Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015, *Journal of Manufacturing Processes*, 27 (2017) 37-62.
- [15] M. Vahdati, R. Mahdavejad, S. Amini, M. Moradi, Statistical analysis and optimization of factors affecting the surface roughness in UVaSPIF process using response surface methodology, *Journal of Advanced Materials and Processing*, 3(1) (2015) 15-28.
- [16] M. Vahdati, R. Mahdavejad, S. Amini, Investigation of the ultrasonic vibration effect in incremental sheet metal forming process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(6) (2017) 971-982.
- [17] V. Franzen, L. Kwiatkowski, J. Neves, P. Martins, A. Tekkaya, On the capability of single point incremental forming for manufacturing polymer sheet parts, in: *ICTP2008, 9th International Conference on Theory of Plasticity*, 2008.
- [18] P. Martins, L. Kwiatkowski, V. Franzen, A. Tekkaya, M. Kleiner, Single point incremental forming of polymers, *CIRP annals*, 58(1) (2009) 229-232.
- [19] T.A. Marques, M.B. Silva, P. Martins, On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing*

- Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215(7) (2001) 959-966.
- [37] M. Ham, J. Jeswiet, Forming limit curves in single point incremental forming, CIRP annals, 56(1) (2007) 277-280.
- [38] S. Jadhav, Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine, Shaker, 2004.
- [39] J. Allwood, G. King, J. Duflou, A structured search for applications of the incremental sheet-forming process by product segmentation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 219(2) (2005) 239-244.
- [40] J. Li, T. Bai, Z. Zhou, Numerical simulation and experimental investigation of incremental sheet forming with an elastic support, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 74(9-12) (2014) 1649-1654.
- Eyckens, Twist revisited: Twist phenomena in single point incremental forming, CIRP annals, 59(1) (2010) 307-310.
- [33] I. Bagudanch, O. Martínez-Romero, A. Elías-Zúñiga, M.L. Garcia-Romeu, Identifying polymeric constitutive equations for incremental sheet forming modelling, Procedia Engineering, 81 (2014) 2292-2297.
- [34] A. Formisano, M. Durante, L. Boccarusso, A. Astarita, The influence of thermal oxidation and tool-sheet contact conditions on the formability and the surface quality of incrementally formed grade 1 titanium thin sheets, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93(9-12) (2017) 3723-3732.
- [35] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, CIRP annals, 54(2) (2005) 88-114.
- [36] S. Matsubara, A computer numerically controlled dieless incremental forming of a sheet metal, Proceedings of the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Barimani-Varandi, M. Kazemi Nasrabadi, B. Abedi Ravan, Feasibility study of single point incremental forming of aircraft canopy for polycarbonate sheet, *AmirKabir J. Mech. Eng.*, 53(Special Issue 4) (2021) 2751-2768.

DOI: [10.22060/mej.2021.18252.6784](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18252.6784)



