



لایه نشانی الیاف پیوسته شیشه بر روی سطح منحنی توسط دستگاه چاپگر سه بعدی بر اساس فن آوری لایه نشانی ذوبی

بهنام آخوندی^{۱*}، عرفان خسرویان^۲، وحید مدانلو^۱

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: b.akhoundi@sirjantech.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۵ آذر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۸ دی ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

چاپگر سه بعدی

فرآیند لایه نشانی ذوبی

الیاف پیوسته شیشه

سطوح منحنی

پلیمرهای گرماترم

کامپوزیت

چکیده

بهبود خواص مکانیکی قطعات چاپ شده توسط چاپگر سه بعدی بر اساس فن آوری لایه نشانی ذوبی، توسط الیاف پیوسته (کربن، شیشه و آرامید) مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. با توجه به ذات فرآیندهای ساخت افزایشی که قطعه را به صورت لایه لایه تولید می کنند، در اکثر تحقیقات صورت گرفته الیاف پیوسته در یک سطح صاف لایه نشانی می شوند. در مواردی هم که الیاف بر روی سطوح منحنی لایه نشانی می شوند از ربات هایی با درجات آزادی بالا استفاده شده است. در این پژوهش روشی برای لایه نشانی الیاف پیوسته شیشه بر روی سطح منحنی ارائه می گردد. این روش بر روی چاپگرهای ساده و ارزان قیمت پیاده سازی می شود. روش ارائه شده مبتنی بر اصلاح جی کد، ایجاد یک محور دورانی برای نازل، به کارگیری و استفاده از تکنیک های طراحی و ساخت به کمک رایانه است. در نهایت با اسکن سه بعدی قطعه چاپ شده و مقایسه آن با مدل سه بعدی میزان انحراف و تلورانس فرم سطحی تعیین می گردد. نتایج تجربی حاصل، حاکی از کارایی روش ارائه شده برای لایه نشانی الیاف پیوسته بر روی سطوح منحنی است. با سیستم ارائه شده الیاف پیوسته با روش آغشته سازی هم زمان بر روی یک سطح که متشکل از مسیرهایی با درجه انحنای مختلف است لایه نشانی می شوند. نتایج حاصل از مقایسه نمونه اسکن شده با نمونه چاپ شده نشان می دهد که حداکثر میزان انحراف حاصل شده ۰.۱ میلی متر است. این میزان خطا با توجه به ماهیت انقباض و اعوجاج مواد پلیمری گرماترم در فرآیندهای شکل دهی با توجه به استاندارد DIN 16901 قابل قبول است.

Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology

Behnam Akhoundi^{1*}, Erfan Khosravian², Vahid Modanloo¹

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: b.akhoundi@sirjantech.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 6 December 2023

Accepted: 8 January 2024

Keywords:

3D Printer

Fused Filament Fabrication

Continuous Glass Fibers

Curved Surfaces

Thermoplastic Polymers

Composite

Abstract

Improving the mechanical properties of the 3D printed parts by a 3D printer based on fused filament fabrication by continuous fibers (carbon, glass, and aramid) has been the focus of many researchers. Due to the nature of additive manufacturing processes that produce the parts layer by layer, in most of the research, continuous fibers are layered on a 2D surface. Robots with high degrees of freedom have been used in cases where fibers are placed on curved surfaces. In this research, a method for deposition of the continuous glass fibers on a curved surface is presented. This method is implemented on a simple and cheap 3D printer. The presented method is based on modifying the G-code, creating a rotating axis for the nozzle, and applying and using computer-aided design and manufacturing techniques. Finally, by 3D scanning of the printed sample and comparing it with the 3D model, the amount of deviation and tolerance of the surface form is determined. The obtained experimental results indicate the effectiveness of the presented method for the deposition of continuous fibers on curved surfaces. With the presented system, continuous fibers are deposited on a curved surface that consists of paths with different degrees of curvature, by simultaneous impregnation of fiber and polymer. Comparing the scanned sample with the printed sample shows that the maximum deviation is 0.1 mm. This error is acceptable due to the nature of shrinkage and distortion of thermoplastic polymer materials in forming processes according to the DIN 16901 standard.

Please cite this article using:

Akhoundi B, Khosravian E, Modanloo V. Deposition of continuous glass fibers on a curved surface by 3D printer based on fused filament fabrication technology. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 January 21;10(11):16-23. doi: 10.22034/IJME.2024.429126.1885 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت سریع و توجه صنایع گوناگون به فرآیندهای ساخت افزایشی [۱-۳]، تحقیقات وسیعی در این زمینه در حال انجام است [۴]. یکی از مهم‌ترین حوزه‌های این تحقیقات، تولید مواد مرکب با الیاف پیوسته (شیشه، کربن، کولار) و ماتریس ترموپلاستیک است [۵]. در این حوزه چاپگرهای سه‌بعدی نیز به بازار عرضه شده‌اند [۶]. لیو و همکاران [۷] از نگاشت پرکننده بر اساس تنش محرک برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت با الیاف با چگالی و مورفولوژی پرکننده قابل تنظیم استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که این رویکرد پر شدن پیشنهادی می‌تواند با ساختار بهینه شده توپولوژی برای بهینه سازی مسیر الیاف پرکننده و پیکربندی ساختاری ادغام شود. نتایج حاصل نشان داد که الگوی پیشنهادی مزایای قوی برای ایجاد الگوهای پرکننده تطبیقی با هندسه پیچیده را نشان می‌دهد. ژانگ و همکاران [۸] یک روش ساخت جدید برای ورقه‌های کامپوزیتی با الیاف پیوسته منحنی با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی ارائه کردند. لی و همکاران [۹] یک روش جدید برای چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن پیوسته ارائه دادند. ژو و همکاران [۱۰] تأثیر جهت‌گیری‌های الیاف پیوسته بر ویژگی‌های فرورفتگی شبه استاتیک (سختی) در کامپوزیت‌های تقویت‌شده هیبریدی با الیاف پیوسته کربن/الیاف کولار با چاپ سه‌بعدی را بررسی کردند. یان و همکاران [۱۱] موفق به چاپ سه‌بعدی حسگر کششی بر اساس ساختار آکوستیک تقویت‌شده با الیاف پیوسته شدند. ژیا و همکاران [۱۲] رفتارهای مکانیکی و جذب انرژی کامپوزیت‌های ترکیبی پلی لاکتیک اسید تقویت‌شده با الیاف کربن/کولار پیوسته و چاپ‌شده سه‌بعدی شده را بررسی کردند. پارکر و همکاران [۱۳] استحکام و تنوع آن در چاپ سه‌بعدی کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف پیوسته را مورد مطالعه قرار دادند.

چاپ سه‌بعدی بر روی سطوح منحنی و حذف کردن محدودیت چاپ سه‌بعدی از حالت لایه به لایه همواره مورد توجه محققین بوده است. در این راستا لیم و همکاران [۱۴] با استفاده از شبکه‌ای از میله‌های رزوه‌دار که آن را قالب غشایی تطبیق‌پذیر نامیدند، صفحات منحنی بتنی را با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی تولید کردند. مجموعه میله‌های رزوه‌دار با تغییر ارتفاع به‌عنوان ساختار پشتیبان عمل کرده و عمل چاپ سه‌بعدی بتن به‌صورت صفحات منحنی را امکان‌پذیر می‌کند. آن‌ها در نهایت بیان داشتند که این روش پیشنهادی پتانسیل زیادی را برای چاپ سه‌بعدی نماهای آزاد و منحنی در معماری نشان می‌دهد. در تحقیقی دیگر پارک و همکاران [۱۵] پدهای محافظت‌کننده در برابر سقوط را که دارای سطح منحنی هستند را با چاپ مش سه‌بعدی گسترش دادند. آن‌ها در ابتدا قسمت‌های مختلف بدن را اسکن سه‌بعدی کرده و بعد از آن مدل سه‌بعدی را به‌صورت تخت گسترش داده و به‌صورت مش سه‌بعدی با ساختار لانه زنبوری چاپ سه‌بعدی کردند. این مش بعد از چاپ سه‌بعدی به دلیل داشتن انعطاف به‌راحتی بر روی سطح منحنی بدن قرار می‌گیرد. تان و همکاران [۱۶] نیز از رویکرد چاپ مش سه‌بعدی تطبیق‌پذیر برای ساخت مستقیم سطوح سه‌بعدی منحنی ذاتی، بدون نیاز به قالب یا سازه پشتیبان بهره گرفتند. آن‌ها برای فرآیند چاپ آزاد سه‌بعدی از یک ماتریس پشتیبان از جنس میکروژل‌های آلژینات کلسیم استفاده کرده و مواد چاپی نیز از جوهر سیلیکون است. در این پژوهش مسیرهای چاپ آزاد، از جی کدهای سفارشی‌سازی شده که دقیقاً با مشخصات اسکن شده از سطح بدن انسان مطابقت دارد، تشکیل شده است. آن‌ها در نهایت بیان کردند که روش آن‌ها پتانسیل بالایی برای دستگاه‌های اپیدرمی یا روباتیک نرم دارد. ژانگ و همکاران [۱۷] از یک دستگاه چاپگر سه‌بعدی بر اساس فن‌آوری لایه نشانی ذوبی با پنج محور حرکتی، برای چاپ سه‌بعدی منحنی‌های فضایی استفاده و خواص مکانیکی محصولات چاپ‌شده با این روش را با محصولات چاپ شده به‌صورت لایه‌لایه مقایسه کردند. آن‌ها بیان داشتند که استحکام و مدول فشاری نمونه‌های تقویت شده با الیاف کتان پیوسته در مقایسه با روش چاپ لایه به لایه (روش برش مسطح) به ترتیب ۲۹٪ و ۵۲٪ افزایش یافته است. ژانگ و همکاران [۱۸] فرآیندی را برای ساخت قطعات یا سازه‌ها با چاپ در امتداد سطوح منحنی با استفاده از ربات‌های صنعتی شش درجه آزادی ارائه کردند. آن‌ها نرم‌افزاری برای تولید جی کد مسیر ساخت را توسعه دادند. آن‌ها بیان کردند که برخلاف طرح سنتی چاپ سه‌بعدی که به صورت لایه به لایه عمودی است، یک مسیر ساخت رباتیک را می‌توان در جهت سطوح منحنی یا جهات دیگر برای افزایش خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و حتی ویژگی‌های زیست‌پزشکی به کار گرفت. آن‌ها بیان کردند که به‌کارگیری ربات با شش درجه آزادی برای انجام و تأیید طرح چاپ در امتداد سطوح منحنی قدمی به سمت ساخت آزاد است. شانگ و همکاران [۱۹] عملکرد در راستای محور Z و رفتار شکست کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته چاپ‌شده سه‌بعدی با ساختار سینوسی را بررسی کردند. آن‌ها برای چاپ نمونه‌ها از یک ربات پرینت سه‌بعدی ۷ محوره استفاده کردند.

با بررسی پژوهش‌های پیشین، مشخص می‌گردد که کانون توجه مطالعات پیشین بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ شده است. علاوه بر این با توجه به ماهیت اصلی فرآیندهای ساخت افزایشی الیاف پیوسته در یک سطح دوبعدی و مسطح لایه نشانی می‌شوند [۲۰]. در مواردی هم که الیاف بر روی سطوح منحنی لایه نشانی می‌شوند از ربات‌هایی با درجات آزادی بالا استفاده شده است. در این پژوهش با ارائه یک الگوریتم مبتنی بر روش‌های مرسوم در فرآیندهای طراحی و ساخت به کمک رایانه و اصلاح جی‌کد و تغییر جزئی در دستگاه روشی برای لایه نشانی الیاف پیوسته و چاپ مواد مرکب توسط چاپگرهای سه‌بعدی بر اساس فن‌آوری لایه‌نشانی ذوبی ارائه می‌گردد. علاوه بر بررسی صحیح عمل لایه نشانی بر روی سطوح منحنی، قطعه چاپ‌شده اسکن سه‌بعدی شده و با مدل سه بعدی رایانه‌ای مقایسه می‌شود. این امر به منظور محاسبه دقت ابعادی و بررسی تلورانس فرم سطح منحنی است.

۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

در این پژوهش از یک چاپگر سه‌بعدی بر اساس فن‌آوری لایه نشانی ذوبی (کوانتوم ۲۰۲۰، ساخت ایران) با قابلیت چاپ قطعه با ابعاد $20 \times 20 \times 20$ استفاده می‌شود. از فیلامنت پلی لاکتیک اسید با قطر $1/75$ میلی‌متر (سیزان، ایران) برای چاپ نمونه پلیمری و آغشته‌سازی هم‌زمان الیاف پیوسته شیشه استفاده می‌شود. چگونگی آغشته‌سازی هم‌زمان پلیمر و الیاف در مرجع [۶] به‌طور کامل توضیح داده شده است. از الیاف پیوسته شیشه با جرم $0/1$ گرم به ازای یک متر با قطر $0/22$ میلی‌متر و استحکام کششی 935 مگاپاسکال و مدول کششی $56/67$ گیگاپاسکال استفاده می‌شود [۶]. نرم‌افزارهای تجاری (نرم‌افزارهای اسلایسینگ) برای ایجاد جی‌کد برای فرآیند لایه نشانی ذوبی تنها قابلیت ایجاد جی‌کد به صورت $2/5$ بعدی را دارند. بدین معنا که ابتدا یک لایه در صفحه XY لایه نشانی شده و پس از اتمام آن لایه، محور Z به میزان ارتفاع لایه تعیین شده حرکت کرده (حرکت نازل به سمت بالا و یا حرکت میز به سمت پایین) و لایه بعدی، روی لایه قبلی لایه نشانی می‌گردد. بنابراین از این نرم‌افزارها برای تولید جی‌کد به صورت حرکت هم‌زمان در سه محور نمی‌توان استفاده کرد. در این پژوهش ابتدا از نرم‌افزار سالدکم (فرآیند فرزکاری سه‌بعدی، استراتژی خطی، فرآیند پرداخت کاری) برای ایجاد جی‌کد استفاده می‌شود. این جی‌کد نیاز به یک پارامتر دیگر به نام پیشروی فیلامنت دارد [۲۰] که باید به برنامه اضافه شود. میزان پیشروی فیلامنت با توجه به رابطه ۱ که به دست آوردن این رابطه در مرجع [۶] و [۲۰] بیان شده است، محاسبه شده و به هر خط برنامه اضافه می‌شود.

$$E = (4whL/\pi D^2) \quad (1)$$

که در این رابطه E پیشروی فیلامنت برحسب میلی‌متر، w عرض روزن‌رانی برحسب میلی‌متر، h ارتفاع لایه برحسب میلی‌متر، L طول مسیر لایه نشانی شده برحسب میلی‌متر و D قطر فیلامنت برحسب میلی‌متر است. همچنین با توجه به میزان قطر الیاف، عرض روزن‌رانی و میزان درصد حجمی الیاف پارامتر ضریب روزن‌رانی نیز بر اساس رابطه ۲ [۶]، محاسبه و مقدار در آن در مقدار پیشروی فیلامنت ضرب گردد.

$$F = 1 - (\pi d_f / 4w) \quad (2)$$

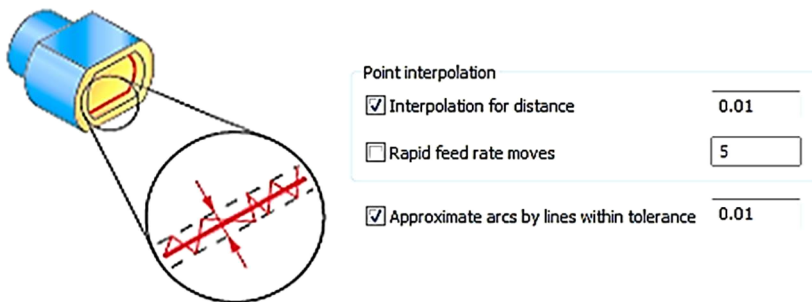
که در این رابطه F ضریب روزن‌رانی برحسب درصد و d_f قطر الیاف پیوسته برحسب میلی‌متر است.

برای اصلاح جی‌کد ایجادشده توسط نرم‌افزار سالدکم از نرم‌افزار اکسل استفاده می‌شود. فایل اکسل سپس با پسوند txt ذخیره شده و سپس با تغییر نام فایل این پسوند به پسوند gcode تبدیل می‌شود. نکته مهم در تولید جی‌کد این است که مسیرهای منحنی باید با خط تقریب زده شود و کل جی‌کد بر اساس کد G01 ایجاد شود (شکل ۱). برای لایه نشانی الیاف پیوسته ابتدا یک قطعه پلیمری دارای سطح منحنی چاپ و سپس کد اصلاح شده اجرا می‌شود. بدین ترتیب الیاف پیوسته روی قطعه دارای سطح منحنی لایه نشانی می‌گردد. سایر پارامترهای چاپ در جدول ۱ آمده است.

نکته مهم بعدی این است که در فرآیندهای پرداخت از ابزار سر کروی استفاده می‌شود. از آنجایی که سر ابزار کروی است و هدف براده برداری است، در هر زمان یک نقطه از ابزار بر قطعه مماس است. این بدان معناست که نیازی نیست که مرکز ابزار دقیقاً بر مختصات نقاط مسیر قرار گیرد. ولی در فرآیند لایه نشانی ذوبی مرکز نازل دقیقاً بر روی مختصات مسیر قرار می‌گیرد. بنابراین نیاز به یک اصلاح دیگر نیز است به طوری که مرکز نازل با دوران آن همواره عمود بر مسیر حرکت باشد (شکل ۲-الف). در غیر این صورت نازل با مسیر منحنی تداخل خواهد داشت (شکل ۲-ب). بنابراین لازم است زاویه مسیر در هر نقطه از مسیر تعیین و میزان زاویه آن توسط یک محور دورانی به نازل داده شود. زاویه مسیر با توجه به شکل ۲-ج از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد. این زاویه چون حول محور Y دوران

می‌کند در جی‌کد و در هر خط از برنامه بعد از حرف B برحسب درجه می‌آید. در این صورت لازم است تغییراتی در دستگاه چاپگر سه‌بعدی انجام شده و نازل به یک استپ موتور وصل گردد تا بتواند دوران لازم را انجام دهد. جزئیات مربوط به تغییرات دستگاه به دلیل عدم اتمام فرآیند ثبت اختراع آن در مقاله ذکر نمی‌گردد. در این صورت زاویه منفی به معنی دوران در جهت عقربه‌های ثابت و زاویه مثبت به معنای دوران در جهت مثلثاتی است.

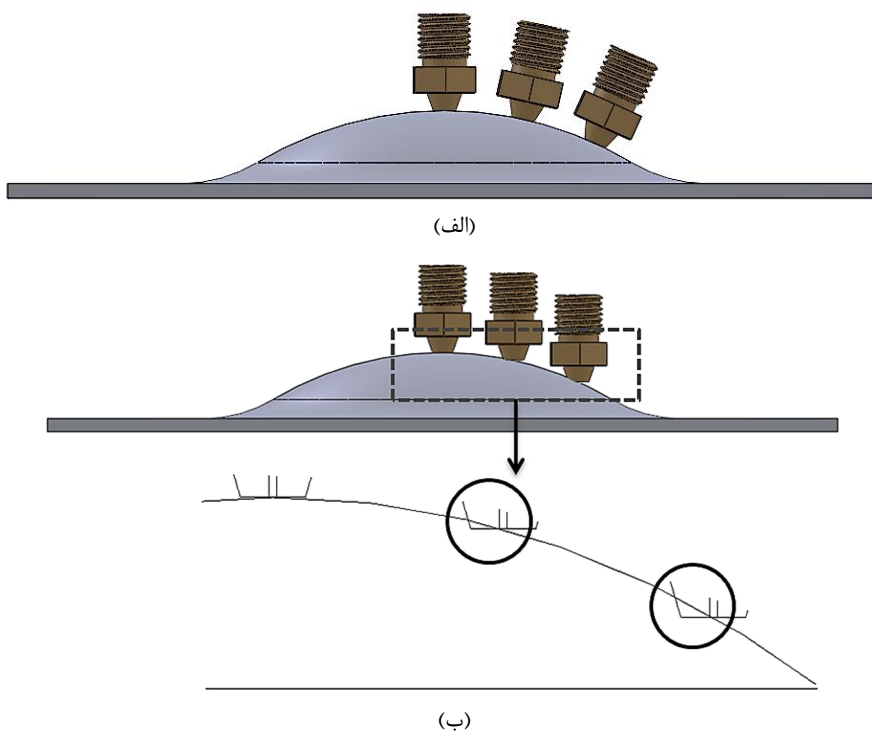
$$\theta = \tan^{-1}(z/x) \tag{3}$$

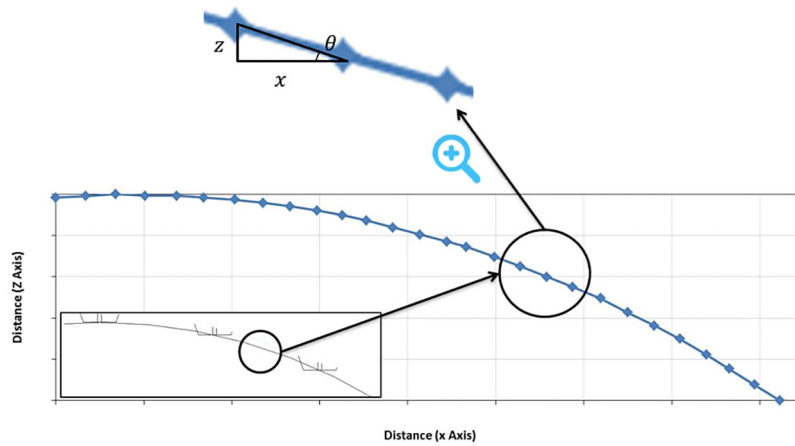


شکل ۱ مفهوم تقریب مسیرهای منحنی با خط و تعیین میزان دقت آن

جدول ۱ پارامترهای چاپ

مقدار	پارامتر
۲۱۰ درجه سانتی‌گراد	دمای نازل
۵۰ درجه سانتی‌گراد	دمای بستر
۰/۲۲ میلی‌متر	قطر الیاف
۰/۵ میلی‌متر	عرض روزن‌رانی
۰/۲۲ میلی‌متر	ارتفاع لایه‌ها
۰/۶۵ درصد	ضریب روزن‌رانی
۴۰ میلی‌متر بر ثانیه	سرعت چاپ قطعه پلیمری
۵ میلی‌متر بر ثانیه	سرعت چاپ الیاف پیوسته شیشه





(ج)

شکل ۲ الف) نازل عمود بر مسیر در هر نقطه است. ب) نازل ثابت و عمودی بوده و در امتداد مسیر لایه نشانی می کند و با افزایش مقدار زاویه، مقدار تداخل نازل با قطعه افزایش می یابد. ج) محاسبه زاویه مسیر در هر مسیر که با خط راست تقریب زده شده است.

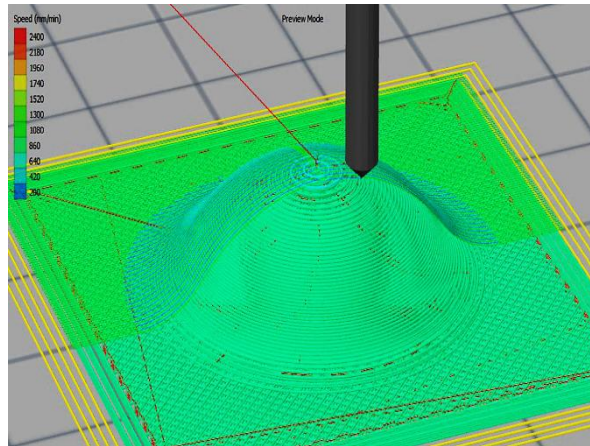
بعد از چاپ قطعه و لایه نشانی الیاف پیوسته بر روی سطوح منحنی آن، قطعه چاپ شده توسط اسکنر سه بعدی (EinScan SE) اسکن شده و فایل حاصل با قطعه اصلی به منظور محاسبه میزان انحراف و تلورانس ابعادی مقایسه می گردد. برای این مقایسه از نرم افزار جئومجیک دیزان ایکس استفاده می شود.

۳- نتایج و بحث

تصویری از کد ایجاد شده برای چاپ الیاف بر روی سطح منحنی در شکل ۳-الف آمده است. همان گونه که مشخص است زاویه دوران و مقدار پیشروی فیلامنت در کد برنامه اضافه شده است. به منظور بررسی صحت کد ایجاد شده این کد در نرم افزار سیمپلی فای تری دی شبیه سازی می گردد (شکل ۳-ب). لازم به ذکر است که این نرم افزار قابلیت شبیه سازی محور دورانی را ندارد. با روش ارائه شده می توان الیاف را بر روی هر سطحی توسط چاپگر سه بعدی نشانند. همان گونه که در شکل ۴-الف و ۴-ب آمده است ابتدا یک قطعه با سطح منحنی توسط چاپگر سه بعدی تولید شده است. سپس با اجرای کد اصلاح شده مطابق شکل ۴-ب لایه نشانی الیاف بر روی قطعه شروع می گردد. در شکل ۴-ج و ۴-د نیز محصول نهایی مشاهده می گردد. لازم به ذکر است که تمامی استراتژی های موجود برای ماشین کاری مانند مارپیچ و تحت زاویه را می توان برای چیدمان الیاف پیوسته به کار گرفت.

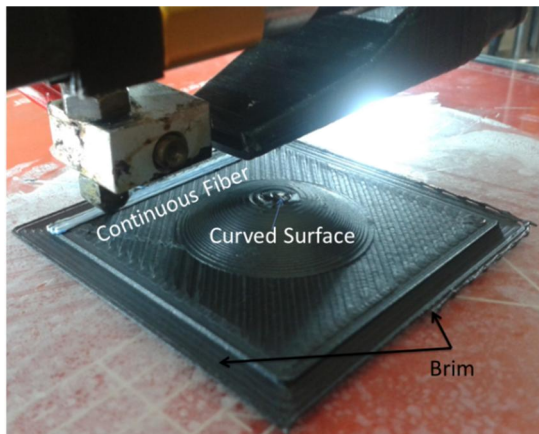
Curve-1.gcode - Notepad						
File	Edit	Format	View	Help		
B0	G0	X128.038	Y113.638	Z1	F1200	
B-0.742030639	G1	X105.534	Y113.638	Z1	E0.668959433	F800
B-1.884588913	G1	X104.067	Y113.638	Z1.019	E0.712571493	F100
B-1.639698577	G1	X103.368	Y113.638	Z1.042	E0.733361384	
B-2.37076433	G1	X102.32	Y113.638	Z1.072	E0.764527251	
B-2.010859343	G1	X101.692	Y113.638	Z1.098	E0.783211326	
B-1.640836634	G1	X100.923	Y113.638	Z1.125	E0.806084894	
B-1.311262399	G1	X100.155	Y113.638	Z1.147	E0.828924016	
B-1.162165475	G1	X99.456	Y113.638	Z1.163	E0.849708104	
B-0.521533654	G1	X98.618	Y113.638	Z1.18	E0.874623824	
B0	G1	X97.849	Y113.638	Z1.187	E0.897484254	
B0.596033422	G1	X97.081	Y113.638	Z1.187	E0.92031401	
B1.193489424	G1	X96.312	Y113.638	Z1.179	E0.94317473	
B1.340878729	G1	X95.544	Y113.638	Z1.163	E0.966009441	
B1.640836634	G1	X94.775	Y113.638	Z1.145	E0.988875185	
B2.010859343	G1	X94.007	Y113.638	Z1.123	E1.011714307	
B2.37076433	G1	X93.238	Y113.638	Z1.096	E1.034587875	
B1.639698577	G1	X92.61	Y113.638	Z1.07	E1.05327195	
B1.884588913	G1	X91.562	Y113.638	Z1.04	E1.084437817	
B0.697194114	G1	X90.863	Y113.638	Z1.017	E1.105227708	
B0	G1	X89.466	Y113.638	Z1	E1.146758348	

(الف)

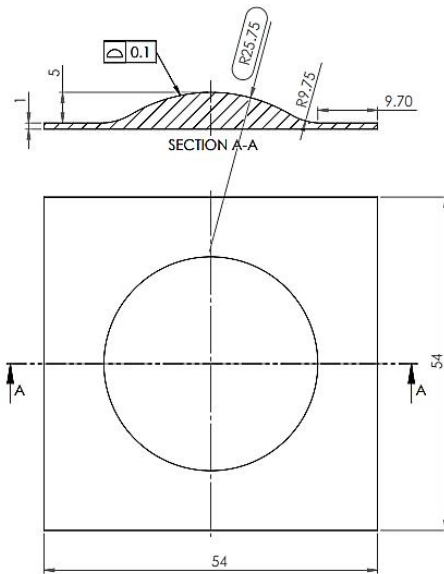


(ب)

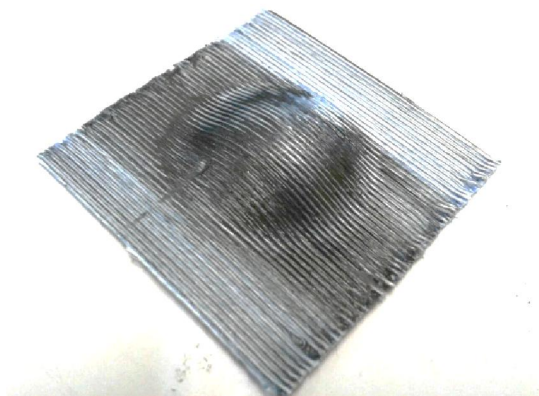
شکل ۳ الف) نمونه‌ای از جی‌کد اصلاح شده (عدد بعد از B زاویه برحسب رادیان، عدد بعد از X مختصات در راستای محور x برحسب میلی‌متر، عدد بعد از Y مختصات در راستای محور y برحسب میلی‌متر، عدد بعد از Z مختصات در راستای محور z برحسب میلی‌متر، عدد بعد از E میزان پیشروی فیلامنت برحسب میلی‌متر، عدد بعد از F پیشروی محورها برحسب میلی‌متر بر دقیقه، G0 حرکت سریع محورها و G1 به معنای حرکت محورها به همراه لایه نشانی است.) ب) شبیه‌سازی جی‌کد اصلاح شده بر روی نمونه چاپ شده



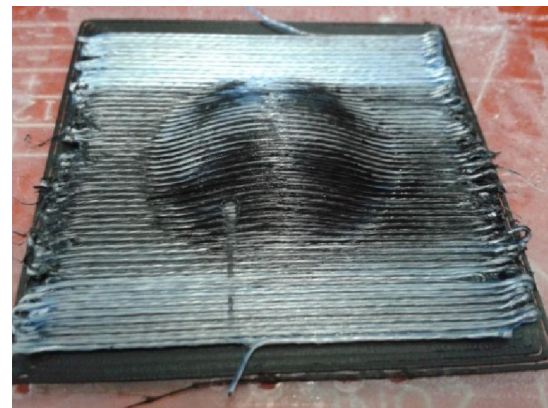
(ب)



(الف)



(د)

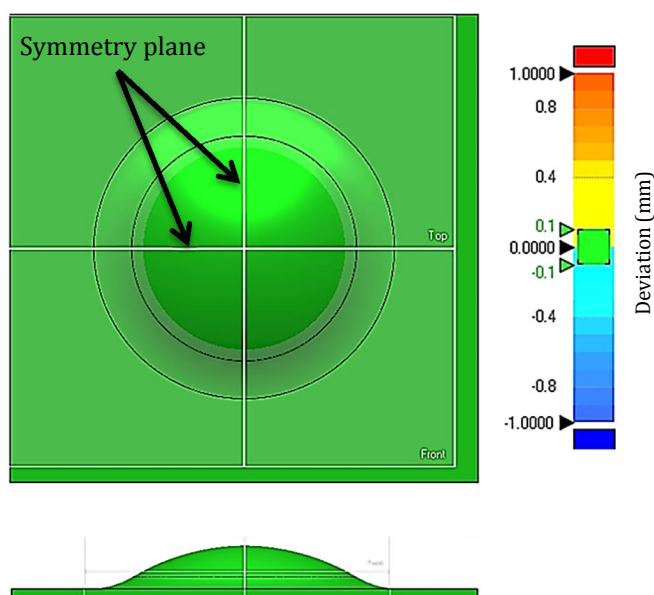


(ج)

شکل ۴ الف) نقشه فنی از مدل اولیه با سطوح منحنی ب) نشاندن الیاف بر روی سطح منحنی، ج) قطعه تولیدشده با سطح منحنی و شروع لایه نشانی الیاف بر روی قطعه، د) محصول نهایی

۴- بررسی تلورانس و انحراف

مواد پلیمری در هنگام سرد شدن منقبض شده و حجم آن‌ها کاهش می‌یابد که این امر در مواد پلیمری نیمه بلورهای شدیدتر است. سرد شدن غیریکنواخت نمونه پلیمری سبب ایجاد پدیده اعوجاج شده و این امر عملکرد قطعه را تحت تأثیر قرار داده و ممکن است حتی آن را بلااستفاده سازد. در فرآیند لایه نشانی ذوبی نیز فرآیند سرد شدن از رشته‌ای به رشته دیگر متفاوت بوده و لذا سرد شدن غیریکنواخت در نمونه‌های چاپ شده پدیده‌ای حتمی است. لذا برای مواد پلیمری تلورانس‌های ابعادی و هندسی را معمولاً خیلی بیشتر از مواد فلزی در نظر می‌گیرند. مرجع اصلی برای تلورانس‌گذاری قطعات پلیمری استاندارد DIN 16901 است. نتایج حاصل از اسکن سه‌بعدی و تعیین میزان انحراف در شکل ۵ آمده است. با مقایسه نمونه پرینت شده و مدل سه‌بعدی طراحی شده می‌توان دید که میزان انحراف در بازه ۰/۱ میلی‌متر بوده و این مقدار با توجه به استاندارد DIN 16901 که برای تلورانس‌های قطعات پلاستیکی است، قابل قبول است. همچنین سطح چاپ شده صاف، یکنواخت و دارای توزیع یکسان نسبت به محورهای تقارن است.



شکل ۵ میزان انحراف قطعه اسکن شده بعد از لایه نشانی الیاف پیوسته و مقایسه آن با مدل سه‌بعدی

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان لایه نشانی الیاف پیوسته بر روی سطوح منحنی مورد مطالعه قرار گرفت. با اصلاح جی‌کد گرفته شده از فرآیند فرزکاری و افزودن مقدار میزان پیشروی فیلامنت و ضریب روزن‌رانی به آن و نیز محاسبه زاویه لازم برای دوران نازل، جی‌کد لازم ایجاد شد. با اجرای جی‌کد اصلاح شده بر روی یک نمونه که دارای سطح منحنی با مسیریابی با درجه انحناهای مختلف است، الیاف پیوسته شیشه به‌طور صحیح بر روی سطح منحنی لایه نشانی شد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با ایجاد یک تغییر ساده در دستگاه و ایجاد یک سیستم برای اصلاح جی‌کدها می‌توان لایه نشانی الیاف پیوسته را بر روی سطوح منحنی به‌صورت صحیح انجام داد. از این الگوریتم می‌توان برای لایه نشانی بدون حضور الیاف پیوسته روی سطوح منحنی نیز استفاده کرد که مزایایی نظیر افزایش خواص مکانیکی را در پی دارد. در نهایت با اسکن سه‌بعدی قطعه چاپ شده و مقایسه آن با مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار جنئومجیک دیزاین ایکس، میزان انحراف ۰/۱ میلی‌متر حاصل گردید. این میزان از انحراف با توجه به ماهیت مواد پلیمری گرم‌انرم و وقوع پدیده‌های انقباض و اعوجاج در فرآیند سرد شدن و با توجه به استاندارد DIN 16901 قابل‌پذیرش است.

References

- [1] Abidaryan S, Akhoundi B, Hajami F. Additive manufacturing and investigation of shape memory properties of polylactic acid/thermoplastic polyurethane blend. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2023;55(2):201-22. doi: 10.1177/00952443221147028

- [2] Akhoundi B, Behraves AH. Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. *Experimental Mechanics*. 2019;59(6):883-97. doi: 10.1007/s11340-018-00467-y
- [3] Manouchehri AM, Golzar M, Masoudi A, Ghorbani H. Investigating and comparing the mechanical properties of ABS/GF continuous fiber composite and ABS polymer produced by fused deposition modeling method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022;9(9):26-34. doi: 10.22034/ijme.2023.375334.1722 [In Persian]
- [4] Nabipour M, Behraves AH, Akhoundi B. Effect of printing parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal composites Printed via FDM 3D printer. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(1):145-50. doi: 10.22034/IJME.2023.375334.1722
- [5] Akhoundi B, Behraves AH, Bagheri Saed A. Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2019;38(3):99-116. doi: 10.1177/0731684418807300
- [6] Akhoundi B, Behraves AH, Bagheri Saed A. An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: in-melt simultaneous impregnation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2020;234(1-2):243-59. doi: 10.1177/0954405419843780
- [7] Liu T, Yuan S, Wang Y, Xiong Y, Zhu J, Lu L, Tang Y. Stress-driven infill mapping for 3D-printed continuous fiber composite with tunable infill density and morphology. *Additive Manufacturing*. 2023;62:103374. doi: 10.1016/j.addma.2022.103374
- [8] Zhang Z, Xu J, Ma Y, Sun M, Chai H, Wu H, Jiang S. Design and analysis of multistable curvilinear-fiber laminates based on continuous fiber 3D printing of thermosetting resin matrix. *Composite Structures*. 2023;307:116616. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116616
- [9] Li S, Zhang H, Han Y, Lu Z, Miao K, Wang Z, Li D. Thermally assisted extrusion-based 3D printing of continuous carbon fiber-reinforced SiC composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023;172:107593. doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107593
- [10] Zhu W, Li S, Peng Y, Wang K, Ahzi S. Effect of continuous fiber orientations on quasi-static indentation properties in 3D printed hybrid continuous carbon/Kevlar fiber reinforced composites. *Polymers for Advanced Technologies*. 2023;34(5):1565-74. doi: 10.1002/pat.5991
- [11] Yan W, Tian X, Zhang D, Zhou Y, Wang Q. 3D Printing of Stretchable Strain Sensor Based on Continuous Fiber Reinforced Auxetic Structure. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. 2023;2(2):100073. doi: 10.1016/j.cjmeam.2023.100073
- [12] Zia AA, Tian X, Liu T, Zhou J, Ghouri MA, Yun J, Li W, Zhang M, Li D, Malakhov AV. Mechanical and energy absorption behaviors of 3D printed continuous carbon/Kevlar hybrid thread reinforced PLA composites. *Composite Structures*. 2023;303:116386. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116386
- [13] Parker M, Ezeokeke N, Matsuzaki R, Arola D. Strength and its variability in 3D printing of polymer composites with continuous fibers. *Materials & Design*. 2023;225:111505. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111505
- [14] Lim JH, Weng Y, Pham Q-C3 .D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork. *Construction and Building Materials*. 2020;232:117075. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117075
- [15] Park JH, Lee JR. Developing Fall-impact Protection Pad with 3D Mesh Curved Surface Structure using 3D Printing Technology. *Polymers*. 2019;11(11):1800. doi: 10.3390/polym11111800
- [16] Tan WS, Juhari MAB, Shi Q, Chen S, Campolo D, Song J. Development of a new additive manufacturing platform for direct freeform 3D printing of intrinsically curved flexible membranes. *Additive Manufacturing*. 2020;36:101563. doi: 10.1016/j.addma.2020.101563
- [17] Zhang H, Liu D, Huang T, Hu Q, Lammer H. 3D Printing Method of Spatial Curved Surface by Continuous Natural Fiber Reinforced Composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;782(2):022059. doi: 10.1088/1757-899X/782/2/022059
- [18] Zhang GQ, Mondesir W, Martinez C, Li X, Fuhlbrigge TA, Bheda H, editors. Robotic additive manufacturing along curved surface — A step towards free-form fabrication. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO); 2015 6-9 Dec. 2015. doi: 10.1109/ROBIO.2015.7418854
- [19] Shang J, Zhang W, Liu F, Wang S, Tian M, Ding X. Z-direction performance and failure behavior of 3D printed continuous fiber reinforced composites with sinusoidal structure. *Composites Science and Technology*. 2023;239:110069. doi: 10.1016/j.compscitech.2023.110069
- [20] Akhoundi B, Nabipour M, Hajami F, Band SS, Mosavi A. Calculating filament feed in the fused deposition modeling process to correctly print continuous fiber composites in curved paths. *Materials*. 2020;13(20):448. doi: 10.3390/ma13204480