



نقش پارامترهای سوراخکاری در کنترل تورق و کیفیت سوراخکاری کامپوزیت‌های بلند الیاف نوین PLA-Glass ساخته شده به وسیله FDM

فاطمه فریدونی، مهدی انصاری*، محمد براهنی

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Anasari@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۴ آبان ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۸ اسفند ۱۴۰۳

چکیده

چاپ سه‌بعدی، دریچه‌ای نو به سوی تولیدات صنعتی گشوده و مرزهای فناوری ساخت را فراتر از روش‌های سنتی گسترش داده است. در میان روش‌های مختلف چاپ سه‌بعدی، فناوری مدل‌سازی با رسوب ذوبی (FDM) به دلیل هزینه پایین تجهیزات و مواد اولیه، سادگی کاربری و استحکام مناسب قطعات به دست آمده، توجه فراوانی را به خود جلب کرده است. پلیمرهای ترموپلاستیک، به ویژه به دلیل خواصی چون شکل‌پذیری مجدد، انجماد سریع، تجزیه‌پذیری و مقاومت بالا در برابر ضربه، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف یافته‌اند. مطالعات ماشین‌کاری این کامپوزیت‌های ترموپلاستیک به ویژه از آن جهت اهمیت دارند که به کارگیری آن‌ها در تولید افزایشی همچون FDM، ویژگی‌های منحصر به فردی را در برابر فرایندهای ماشین‌کاری پدید می‌آورد و نیازمند بررسی‌های دقیق است. این پژوهش به ارزیابی تأثیر پارامترهای کلیدی سوراخکاری نظیر سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار بر آسیب‌های حرارتی و دقت ابعادی سوراخ در کامپوزیت PLA با ۱۵ درصد الیاف شیشه می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش قطر مته از ۳ به ۸ میلی‌متر موجب افزایش نیرو و همچنین رشد آسیب حرارتی و خطای ابعادی می‌گردد، به طوری که حداکثر نیروی ثبت شده ۶٫۵ نیوتون، ارتفاع ناحیه ذوب ۵٫۱۸ میلی‌متر، و خطای ابعادی ۵ میلی‌متر در قطر ۸ میلی‌متر مشاهده شد. افزون بر این، کاهش نرخ پیشروی و افزایش سرعت دورانی ابزار موجب افزایش منطقه آسیب ذوب شدگی می‌شود، به گونه‌ای که در قطر ۸ میلی‌متر و سرعت دورانی ۱۶۰۰ درو دقیقه با نرخ پیشروی ۳۱٫۵ میلی‌متر بر دقیقه، بیشترین ناحیه ذوب به ارتفاع ۵٫۱۸ میلی‌متر مشاهده شد.

کلیدواژگان:

کامپوزیت الیاف شیشه

سوراخکاری

دقت ابعادی

تورق

پارامترهای ماشین‌کاری

The role of drilling parameters in controlling delamination and hole quality of novel long-fiber PLA-glass composites manufactured by FDM

Fatemeh Fereyduni, Mehdi Ansari*, Mohammad Baraheni

Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran

* Corresponding Author's Email: Anasari@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 14 November 2024

Accepted: 8 March 2025

Keywords:

Glass Fiber Composites

Drilling

Dimensional Accuracy

Delamination

Machining Parameters

Abstract

3D printing has opened new horizons in industrial production, expanding the boundaries of fabrication beyond conventional methods. Among various 3D printing techniques, Fused Deposition Modeling (FDM) has gained significant attention due to its low-cost equipment and materials, ease of use, and the structural integrity of printed components. Thermoplastic polymers, particularly due to their properties—such as re-moldability, rapid solidification, high biodegradability, and excellent impact resistance—hold a notable position across diverse industries. Studies on the machinability of these thermoplastic composites are particularly essential, as additive manufacturing processes like FDM present unique properties that demand precise evaluation when subject to machining parameters. This study assesses the influence of critical drilling parameters—tool rotation speed, feed rate, and tool diameter—on heat-induced damage and dimensional accuracy of drilled holes in PLA composite with 15% glass fiber. The findings indicate that increasing drill diameter from 3 to 8 mm escalates the required force, as well as thermal damage and dimensional inaccuracy; a peak drilling force of 6.5 N, melt zone height of 5.18 mm, and dimensional error of 0.5 mm were recorded at an 8 mm diameter. Furthermore, reducing feed rate and increasing rotational speed exacerbate the extent of thermal damage, with the largest melt area height of 5.18 mm observed at an 8 mm diameter, 1600 rpm, and 31.5 mm/min feed rate.

Please cite this article using:

Fereyduni F, Ansari M, Baraheni M. The role of drilling parameters in controlling delamination and hole quality of novel long-fiber PLA-glass composites manufactured by FDM. 2025 Mar 21;12(1):51-64. doi: 10.22034/ijme.2025.488847.2027 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های همیشگی در طراحی مواد، دستیابی به مجموعه‌ای گسترده از خواص فیزیکی و مکانیکی در یک ماده واحد است. این امر تاکنون دست‌نیافتنی باقی مانده است؛ زیرا در حالت معمول هیچ ماده‌ای نمی‌تواند تمامی ویژگی‌های مطلوب مانند استحکام بالا، مقاومت در برابر سایش و اشعه ماوراء بنفش، سبکی و پایداری در دماهای بالا را هم‌زمان فراهم کند. این ناتوانی موجب شده است تا طراحان به راه‌های جایگزینی برای ترکیب خصوصیات مختلف در یک ماده روی آورند و از این منظر، تولید کامپوزیت‌ها به عنوان یک رویکرد مؤثر و نوین مطرح شده است. کامپوزیت‌ها به‌عنوان گروهی از مواد پیشرفته شناخته می‌شوند که با ترکیب مواد ساده به دست می‌آیند و خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بهتری نسبت به اجزای تشکیل‌دهنده خود به ارمغان می‌آورند، چرا که اجزای تشکیل‌دهنده در این مواد به‌طور مستقل ویژگی‌های خود را حفظ کرده و در عین حال ساختاری بهینه ایجاد می‌کنند [۱].

پیشرفت فناوری موجب گسترش استفاده از کامپوزیت‌ها و فرایندهای نوین تولید در راستای دستیابی به مواد جدید شده است. ترکیب موادی مانند شیشه، کربن، گرافیت و رزین، تحول چشمگیری در حوزه مواد به وجود آورده است و استفاده از این کامپوزیت‌ها در اشکال و کاربردهای مختلف به سرعت رو به رشد است [۲]. این مواد به دلیل ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی منحصر به فرد، به تدریج جایگزین بخش عمده‌ای از فلزات و آلیاژهای فلزی شده‌اند. کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و شیشه، از پرکاربردترین انواع کامپوزیت‌ها هستند و در صنایع مختلفی مانند حمل‌ونقل، ساخت‌وساز، خودروسازی و پزشکی استفاده می‌شوند [۳]. [۴]. در مقایسه با مواد همگن، ماشینکاری کامپوزیت‌ها به دلیل ساختار لایه‌ای و ترکیب مواد متفاوت، پیچیده‌تر است [۵]. به طور کلی، ماشینکاری کامپوزیت‌ها یکی از مراحل نهایی در ساخت این مواد است و هرگونه نقص در این فرایند می‌تواند باعث مشکلات عملکردی و افزایش هزینه‌ها شود [۶].

تحقیقات بسیاری در رابطه با انتخاب پارامترهای بهینه ماشینکاری فلزات صورت گرفته، اما مطالعات کمتری در مورد کامپوزیت‌ها انجام شده است [۷، ۸]. فیزیک فرایند ماشینکاری کامپوزیت‌های پایه پلیمری نسبت به فلزات متفاوت است. عواملی مانند تفاوت در ماهیت ماتریس و الیاف، ناهمسانگردی، عدم انتقال حرارت مناسب، چسبندگی و نوع اتصال بین ماتریس و الیاف بر ماشینکاری تأثیر می‌گذارند. در حال حاضر، سوراخکاری با مته به دلیل اقتصادی بودن، اصلی‌ترین روش برای ایجاد سوراخ در این مواد است [۹]. به طور کلی، عیوب ناشی از ماشینکاری مواد کامپوزیتی شامل چهار دسته می‌شوند: تورق در لایه ورودی، تورق در لایه‌های خروجی، عیوب هندسی و آسیب‌های حرارتی. تورق به عنوان یک عیب مهم در فرایند سوراخکاری کامپوزیت‌ها شناخته می‌شود که در هر دو سطح ورودی و خروجی رخ می‌دهد و می‌تواند تا ۶۰٪ از موارد عدم تأیید مونتاژها را به خود اختصاص دهد [۱۰].

فرایندهای ساخت افزایشی، امکان ایجاد قطعات با ویژگی‌های کنترل‌شده را برای محققان فراهم کرده است و به دلیل قابلیت تولید سریع قطعات پیچیده، تنوع هندسی بالا و کاهش هزینه‌ها، مزایای بسیاری دارند [۱۱]. این فرایندها به مهندسان اجازه می‌دهند قطعاتی با قابلیت‌های نوین برای کاربردهای مختلف ایجاد کنند. حوزه‌های جدیدی مانند ساختارهای هوشمند [۱۲، ۱۳]، محرک‌ها [۱۴]، حسگرها و ارگان‌های تراشه [۱۵] و کاربردهای بیوپزشکی [۱۶] با ظهور فرایندهای ساخت افزایشی پیشرفت کرده‌اند. امروزه، ساخت قطعاتی که بتوانند شرایط کاری پیچیده مانند کاربردهای درون بدنی را تحمل کنند، به لطف این فرایندها ساده‌تر شده است. به عنوان مثال، قطعاتی همچون صفحات تثبیت استخوان [۱۷] و کامپوزیت‌های دندان [۱۸-۲۰] که نیازمند ویژگی‌های زیستی و مکانیکی خاص هستند، به راحتی با چاپگرهای سه‌بعدی ساخته می‌شوند و خواص بخش‌های مختلف آن‌ها قابل مهندسی است.

چاپگرهای سه‌بعدی مبتنی بر فناوری FDM به دلیل هزینه کم، سهولت استفاده و امکان کاربرد الیاف پیوسته در ساخت کامپوزیت‌های الیاف بلند، به طور خاص مورد توجه پژوهشگران هستند [۱۷، ۲۱، ۲۲]. ماتریس‌های پلیمری زیست‌سازگار به دو دسته ترموپلاستیک و ترموست تقسیم می‌شوند. ماتریس‌های ترموپلاستیک به دلیل ویژگی‌هایی نظیر انجماد سریع، زیست‌سازگاری و مقاومت به خستگی بالا، به طور گسترده‌ای در ساخت کامپوزیت‌ها به کار می‌روند [۲۳-۲۵]. مشکلات اصلی سوراخکاری بیوکامپوزیت‌های ترموپلاستیک شامل تغییرات خواص مکانیکی ناشی از دما، ذوب شدن ماتریس، تورق، بیرون کشیدگی الیاف و خطای ابعادی سوراخ می‌باشد. تورق، که ناشی از عدم اتصال کامل بین الیاف و ماتریس است، مهم‌ترین عیب در ماشینکاری این مواد محسوب می‌شود و می‌تواند استحکام قطعه سوراخ‌کاری شده را به شدت کاهش دهد [۲۶-۲۸].

مطالعات نشان می‌دهند که کیفیت ماشینکاری کامپوزیت‌ها به پارامترهای سوراخکاری، هندسه و جنس ابزار بستگی دارد [۷، ۲۹-۳۳]. در سوراخکاری کامپوزیت‌های پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه، افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش نیروی محوری می‌شود، در حالی که با افزایش سرعت دورانی، این نیرو کاهش می‌یابد [۳۴]. همچنین، سوراخکاری کامپوزیت‌های پلی کربنات تقویت شده با الیاف شیشه نشان داده است که افزایش نرخ پیشروی و قطر مته، نیروی محوری را افزایش می‌دهد، در حالی که سرعت دورانی بیشتر، نیروی محوری را کاهش می‌دهد [۳۵]. محققان برای کاهش تورق در کامپوزیت‌های FRP نشان داده‌اند که افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی، نیروی عمودی را در چندلایه‌های گرم‌انرم تقویت شده با الیاف شیشه و کربن افزایش می‌دهد [۳۶]. همچنین، بهینه‌سازی پارامترهای سوراخکاری مانند سرعت دورانی و پیشروی با توجه به شاخص‌هایی نظیر نیروی عمودی، زبری سطح و تورق، از جمله موضوعات تحقیقاتی مهم است [۳۷].

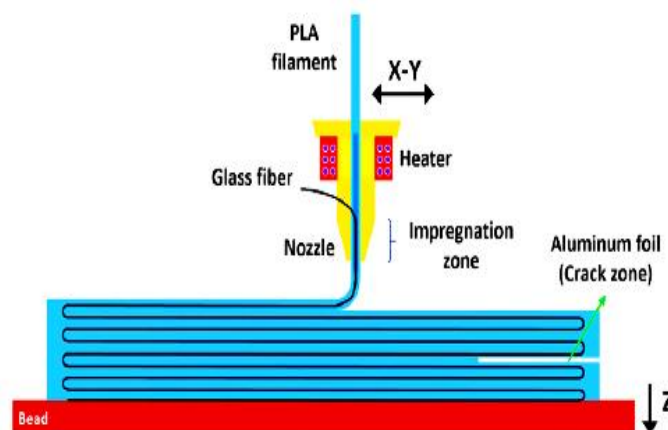
بر مبنای مطالب فوق، سوراخکاری کامپوزیت‌های ترموپلاستیک به‌ویژه برای تولید قطعات پزشکی مانند ایمپلنت‌های تثبیت استخوان از جنس بیوکامپوزیت ترموپلاستیک PLA-Glass ساخته شده به روش افزایشی، دارای اهمیت بسیاری است. علی‌رغم مطالعات انجام شده در این زمینه، تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر کامپوزیت‌های PLA-Glass تولید شده با چاپگر سه‌بعدی به طور دقیق بررسی نشده است. هدف این مقاله بررسی خصوصیات سوراخکاری بیوکامپوزیت PLA-Glass با استفاده از پارامترهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته می‌باشد.

۲- مواد، تجهیزات و طراحی آزمایش

۲-۱- ساخت کامپوزیت ترموپلاستیک

در این تحقیق، کامپوزیت مورد مطالعه، بیوکامپوزیت ترموپلاستیک PLA-Glass می‌باشد که جزئیات مواد و روش ساخت آن در مرجع [۳۸] ارائه شده است. در فرایند ساخت این قطعه، از فیلامنت ترموپلاستیک پلی لاکتیک اسید (PLA) با قطر ۱٫۷۵ میلی‌متر به عنوان ماتریس پلیمری و نخ الیاف شیشه نوع E با قطر ۰٫۲۲ میلی‌متر به عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است. این پلیمر ترموپلاستیک از طریق دستگاه چاپگر سه‌بعدی FDM اکستروژن شده و بر روی یک پلتفرم چاپ قرار می‌گیرد. فرایند ساخت قطعه به‌گونه‌ای است که کد چاپ بر اساس هندسه قطعه نوشته می‌شود و پس از چاپ هر لایه، پلتفرم به سمت پایین حرکت کرده و فرایند چاپ دوباره تکرار می‌شود تا در نهایت قطعه به صورت لایه به لایه ساخته شود. این روش به تولید قطعات با ویژگی‌های کنترل‌شده و ساختاری متناسب با نیازهای خاص کمک می‌کند.

شکل ۱ نمای شماتیک ساخت لایه‌ای کامپوزیت از طریق چاپگر سه‌بعدی را به تصویر می‌کشد. در این فرایند چاپ بیوکامپوزیت، از تکنیک آغشته کردن همزمان الیاف و پلیمرها استفاده می‌شود. دمای بالای پلیمر که به الیاف آمیخته می‌شود، باعث ایجاد اتصال بین لایه‌ها می‌گردد، که این امر موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی و پیوستگی لایه‌ها می‌شود [۳۸]. در این مطالعه از نمونه بیوکامپوزیت گرم‌انرم با درصد حجمی الیاف ۱۵٪ و ضخامت ۴ میلی‌متر و عرض ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۱ شماتیک ساخت لایه‌ای بیوکامپوزیت الیاف شیشه پلی لاکتیک اسید توسط چاپگر سه‌بعدی FDM [۳۸]

۲-۲- طراحی آزمایش و تجهیزات

در این پژوهش، به منظور بررسی آسیب‌های ایجاد شده در فرایند سوراخکاری کامپوزیت ترموپلاستیک، متغیرهای ماشینکاری انتخاب شده‌اند که بر اساس تجهیزات موجود و همچنین تحقیقات پیشین در زمینه مواد مشابه [۳۹] تعیین شده است. سه متغیر اصلی در این فرایند مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل قطر ابزار (d)، سرعت دورانی ابزار (v) و نرخ پیشروی (f) به عنوان فاکتورهای ورودی هستند. سوراخ‌ها با استفاده از دو سرعت دورانی مختلف، ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۳۱،۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و سه قطر مختلف ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر ایجاد شده‌اند. در طول فرایند ماشینکاری، از هیچ مایع خنک‌کننده‌ای استفاده نشده است. بازه تغییرات این متغیرها در فرایند سوراخکاری بیوکامپوزیت ترموپلاستیک PLA-Glass در جدول ۱ نشان داده شده است. پس از انجام فرایند سوراخکاری، دقت ابعادی سوراخ‌ها، ارتفاع ناحیه ذوب‌شده در محل ورود و خروج مته، همچنین جدایش الیاف و ماتریس، مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفتند. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از کولیس و دستگاه عکاسی برای مشاهده و ثبت جزئیات انجام شد. علاوه بر این، نیروهای ایجاد شده در حین سوراخکاری با استفاده از لودسل بر روی دستگاه فرز اندازه‌گیری گردیدند تا تأثیر متغیرهای مختلف بر روی نیروهای اعمالی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۱ متغیرهای فرایند سوراخکاری

سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر ابزار (mm)
۱۰۰۰-۱۶۰۰	۳۱/۵-۵۰	۳-۶-۸

در این تحقیق، برای انجام آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش تمام فاکتوریل استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در جدول ۲ ارائه شده است. در جدول ۲ تعداد ۱۴ آزمایش گزارش شده است، در حالی که تعداد آزمایش‌های اصلی ۱۲ مورد است. دو آزمایش اضافی به منظور اعتبارسنجی نتایج گنجانده شده‌اند. در این جدول، پارامترهای مختلف به شرح زیر بیان شده‌اند: t که نشان‌دهنده زمان ماشینکاری بر حسب ثانیه، H₁ و H₂ که به ترتیب بیشترین ارتفاع ناحیه ذوب در محل ورود و خروج مته به قطعه را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهند، و D که قطر سوراخ پس از فرایند ماشینکاری را بر حسب میلی‌متر نمایان می‌سازد. نتایج نشان‌دهنده این هستند که ذوب‌شدگی، مشابه با لایه لایه‌شدگی، در نواحی ورود و خروج قطعه‌کار در عملیات سوراخکاری اتفاق می‌افتد.

جدول ۲ آزمایش‌های اثر پارامترهای سوراخکاری بر آسیب کامپوزیت ترموپلاستیک

شماره	سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)	t (s)	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	D (mm)
۱	۱۰۰۰	۳۱/۵	۳	۸	۰	۰	۳
۲	۱۰۰۰	۵۰	۳	۵	۰	۰	۳
۳	۱۶۰۰	۵۰	۳	۴	۰	۱/۲۴	۳
۴	۱۶۰۰	۳۱/۵	۳	۶	۱/۲۲	۱/۱۵	۳
۵	۱۶۰۰	۳۱/۵	۶	۱۰	۳/۲۷	۱/۶۵	۵/۷
۶	۱۶۰۰	۵۰	۶	۵	۱/۸۴	۰/۸۷	۵/۷
۷	۱۰۰۰	۵۰	۶	۶	۰	۰/۸۸	۶
۸	۱۰۰۰	۳۱/۵	۶	۱۰	۰	۲/۲۷	۶
۹	۱۶۰۰	۳۱/۵	۸	۱۰	۵/۱۸	۱/۷۹	۷/۵
۱۰	۱۶۰۰	۵۰	۸	۳	۱/۷۹	۱/۲۸	۸
۱۱	۱۰۰۰	۳۱/۵	۸	۵	۰	۰/۳۳	۸
۱۲	۱۰۰۰	۵۰	۸	۳	۰	۰	۸/۲
۱۳	۸۰۰	۸	۶	۵۱	۰/۹۳	۲/۶۷	۵/۹
۱۴	۲۰۰۰	۸	۶	۴۱	۱/۴۴	۳/۵	۶

مقایسه آسیب‌های وارده به کامپوزیت در نواحی مختلف نشان می‌دهد که تعداد آسیب‌ها در قسمت خروجی مته به‌طور قابل توجهی بیشتر از ورودی است. تقریباً در تمامی پارامترهای آزمایش، آسیب در قطعه مشاهده شده است، اما شدت آسیب در ناحیه خروجی بیشتر است. این موضوع با چشم غیر مسلح نیز قابل تایید است. به همین دلیل، معیارهایی برای اندازه‌گیری بیشترین ارتفاع ناحیه ذوب در هر سوراخ، چه در ناحیه ورودی و چه در ناحیه خروجی، تعریف و اندازه‌گیری شده‌اند. در این راستا، شکل ۲ تصویری از قطعه سوراخ‌شده را در ناحیه ورودی و خروجی مته (روی قطعه و پشت قطعه) نشان می‌دهد. همچنین، در شکل ۳، دستگاه اندازه‌گیری بینایی مدل Arcs که برای تصویربرداری از قطعات استفاده شده است، به نمایش گذاشته شده است. ماشین مورد استفاده برای تست فرز ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز بوده و از یک فیکسچر پیچ دندانه مربعی کوچک برای مهار قطعه به بستر میز استفاده شده است.

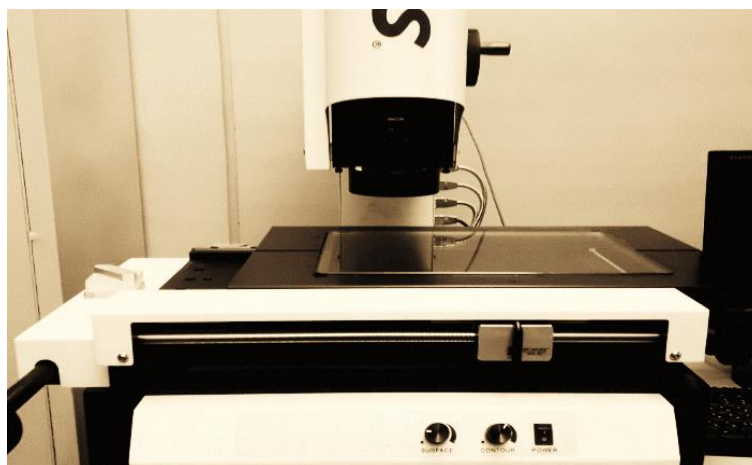


(الف)



(ب)

شکل ۲ تصاویر نواحی ورودی و خروجی مته در سوراخکاری بیوکامپوزیت PLA-Glass. (الف) ناحیه ورودی (ب) ناحیه خروجی



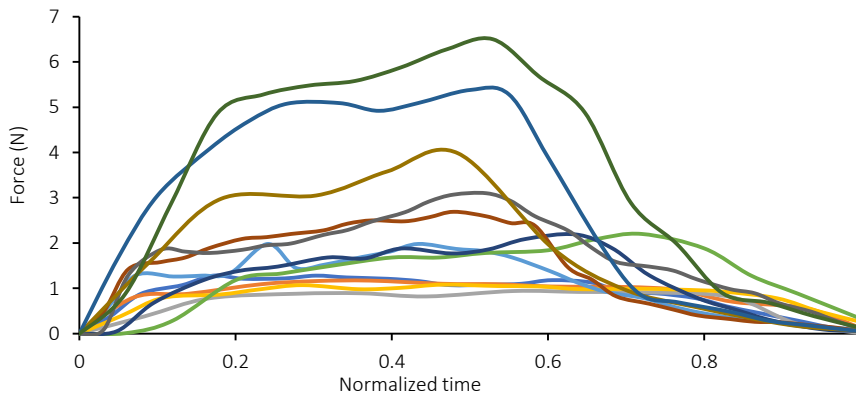
شکل ۳ دستگاه اندازه‌گیری بینایی

۳- نتایج و بحث

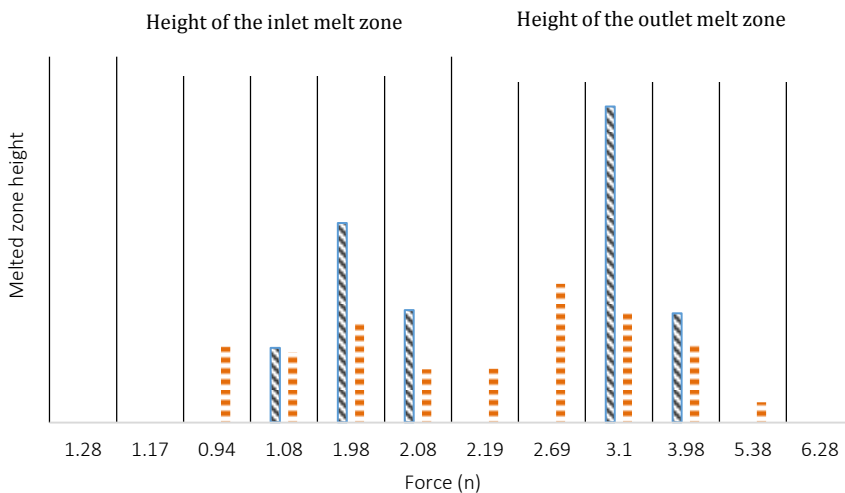
۳-۱- نیرو

نمودار شکل ۴ که نمودار نیرو-زمان برای تمام آزمایش‌ها می‌باشد، متغیر زمان را برای هر ۱۲ آزمایش اصلی نرمال کرده است. نیروهای اندازه‌گیری شده برای مقایسه بهتر، نسبت به بیشترین مقدار ثبت شده نرمال سازی شده‌اند تا اثر تفاوت‌های ابعادی و هندسی کاهش یابد. اعداد استفاده شده در نامگذاری هر F به ترتیب از چپ به راست نشان‌دهنده سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته هستند. براساس این نمودار، می‌توان نتیجه گرفت که نیرو، صرف‌نظر از مقدار سرعت دورانی و نرخ پیشروی، رابطه‌ای مستقیم با قطر دارد و با افزایش قطر، نیرو نیز افزایش می‌یابد. البته سرعت دورانی نیز بر نیروی سوراخکاری تاثیرگذار است و در سرعت‌های دورانی ۱۰۰۰ نسبت به ۱۶۰۰ در یک قطر ثابت، نیروی بیشتری ایجاد می‌شود.

بیشترین نیروی اعمالی در قطر ۸ میلی‌متر با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه مشاهده شد. در این پارامترها هیچ‌گونه آسیب ناحیه ذوب مشاهده نشد که این موضوع به دلیل درگیری بالای ابزار با قطعه کار با حجم بالا و همچنین مدت زمان طولانی‌تری است که ابزار در تماس با قطعه باقی می‌ماند. در مقابل، کمترین نیرو در قطر ۳ میلی‌متر، سرعت دورانی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه مشاهده شد که در این شرایط تنها در خروجی سوراخ ذوب‌شدگی به وجود آمده است. در این شرایط، درگیری ابزار با قطعه کار کمتر بوده و زمان کمتری برای سوراخکاری صرف شده است. شکل ۵ نمودار رابطه نیرو و ارتفاع آسیب ذوب‌شدگی را نشان می‌دهد که در آن مشاهده می‌شود در شرایطی که بیشترین نیرو اعمال شده، آسیب کمتری در ناحیه ذوب مشاهده می‌شود. با این حال، به‌طور کلی نمی‌توان رابطه دقیقی بین نیرو و آسیب ذوب‌شدگی تعریف کرد.



شکل ۴ نمودار نیرو-زمان (نرمالایز شده)

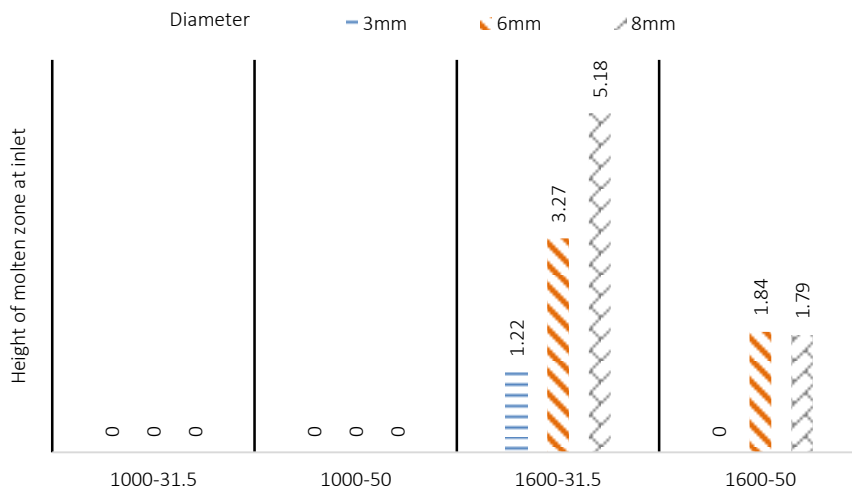


شکل ۵ تاثیر نیرو بر میزان ناحیه ذوب در ورودی و خروجی

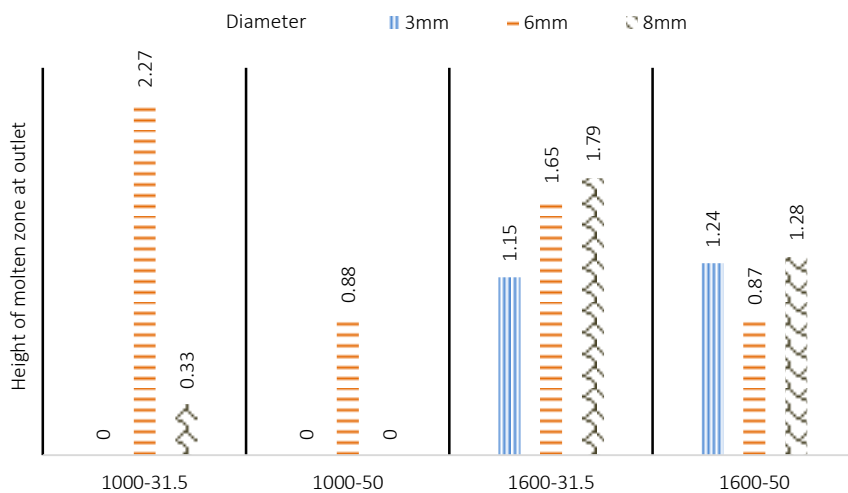
۳-۲- اثر قطر مته

در این بخش اثر قطر مته بر میزان ناحیه ذوب‌شدگی در ورودی و خروجی قطعه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از مته‌های با قطرهای ۳، ۶ و ۸ میلی‌متر، تأثیر تغییر قطر بر آسیب‌های ناشی از سوراخکاری در هر بخش به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نمودارهای شکل‌های ۶ و ۷، محور افقی تغییرات قطر مته را در نظر گرفته و برای هر یک از قطرهای مختلف، نرخ پیشروی (عدد سمت راست) و سرعت دورانی (عدد سمت چپ) ثابت نگه داشته شده‌اند تا تأثیر تنها قطر بررسی شود. با توجه به این نمودارها، مشاهده می‌شود که افزایش قطر مته در سرعت‌های دورانی بالاتر، باعث افزایش میزان آسیب در ورودی و خروجی قطعه می‌شود. این امر به دلیل افزایش سرعت برشی در قطرهای بزرگ‌تر و در نتیجه تولید حرارت بیشتر است. در حالی که در سرعت‌های دورانی ۱۰۰۰، افزایش قطر مته تأثیری بر میزان آسیب ورودی (یعنی ارتفاع ناحیه ذوب‌شده) ندارد، اما در خروجی، مته با قطر ۶ میلی‌متر نسبت به مته‌های ۳ و ۸ عملکرد بدتری داشته است و در تمام شرایط آزمایشی، آسیب در خروجی مشاهده شد. در حالی که برای قطرهای ۳ و ۸ میلی‌متر در سرعت دورانی ۱۰۰۰ و نرخ‌های پیشروی ۳۱،۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تقریباً هیچ آسیبی در خروجی ایجاد نشد.

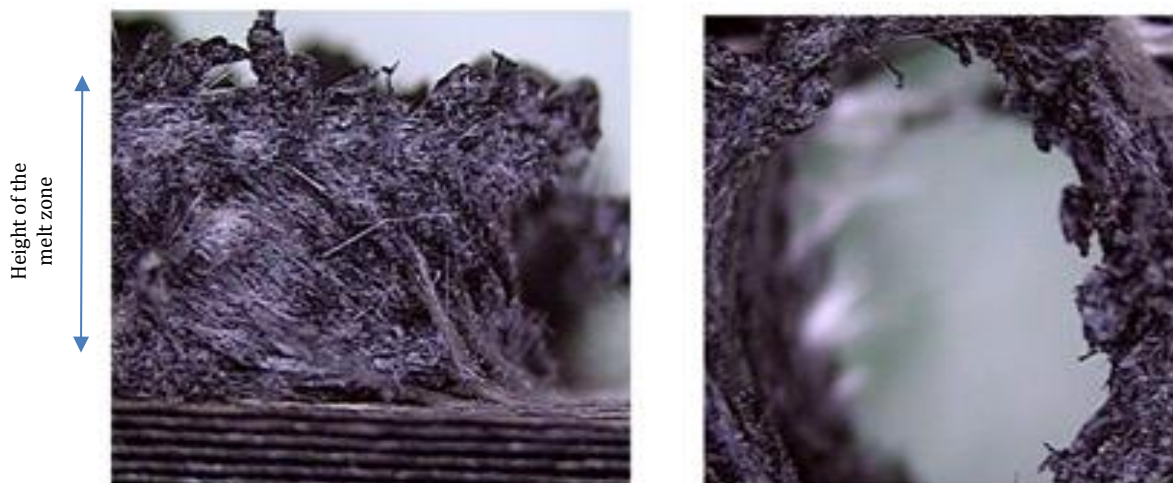
در مجموع، می‌توان گفت که برای سوراخکاری کامپوزیت‌های ترموپلاستیک PLA-Glass در محدوده پارامترهای ورودی مورد مطالعه در این تحقیق، بهترین انتخاب برای قطر مته، ۳ میلی‌متر است، چرا که هم دقت ابعادی بهتر و هم ناحیه ذوب‌شده در ورودی و خروجی در حداقل مقدار خود قرار دارند. بیشترین آسیب مشاهده‌شده در ورودی مته مربوط به قطر ۸ میلی‌متر، با سرعت دورانی ۱۶۰۰ و نرخ پیشروی ۳۱،۵ میلی‌متر بر دقیقه است، که در شکل ۸ به نمایش درآمده است.



شکل ۶ تأثیر قطر ابزار بر میزان ناحیه ذوب در ورودی



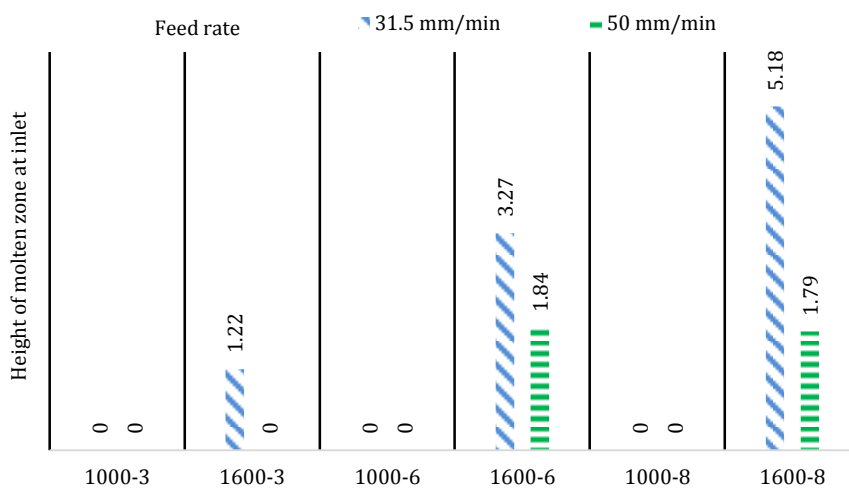
شکل ۷ تأثیر قطر ابزار بر مقدار ناحیه ذوب در خروجی



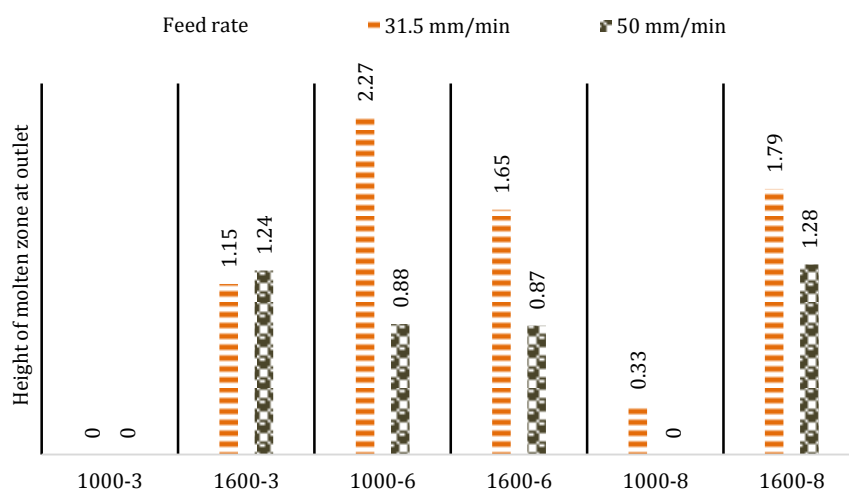
شکل ۸ آسیب در ورودی کامپوزیت ترموپلاستیک با قطر مته ۸ میلیمتر (سرعت دورانی ۱۶۰۰rpm و نرخ پیشروی ۸ میلیمتر بر دور)

۳-۳- اثر نرخ پیشروی

شکل‌های ۹ و ۱۰ تأثیر نرخ پیشروی بر میزان ذوب‌شدگی در ورودی و خروجی قطعه را نشان می‌دهند. در این آزمایش‌ها، از دو نرخ پیشروی ۳۱،۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است.



شکل ۹ تأثیر نرخ پیشروی ابزار بر ناحیه ذوب در ورودی



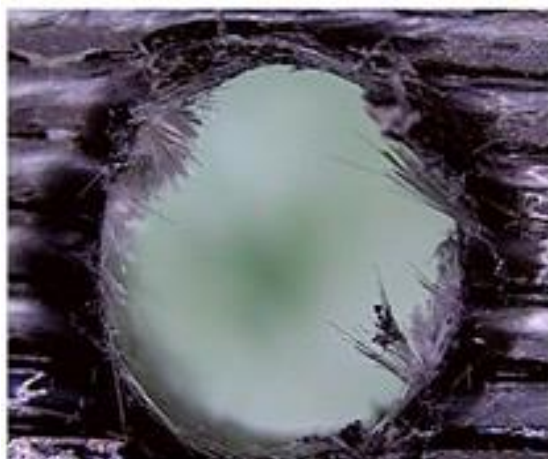
شکل ۱۰ تأثیر نرخ پیشروی ابزار بر ناحیه ذوب در خروجی

در هر نمودار، محور افقی نشان‌دهنده تاثیر نرخ‌های پیشروی مختلف در یک قطر ثابت (عدد سمت راست) و سرعت دورانی ثابت (عدد سمت چپ) است. برای تحلیل دقیق‌تر، نمودارهای ورودی و خروجی به طور جداگانه رسم شده‌اند.

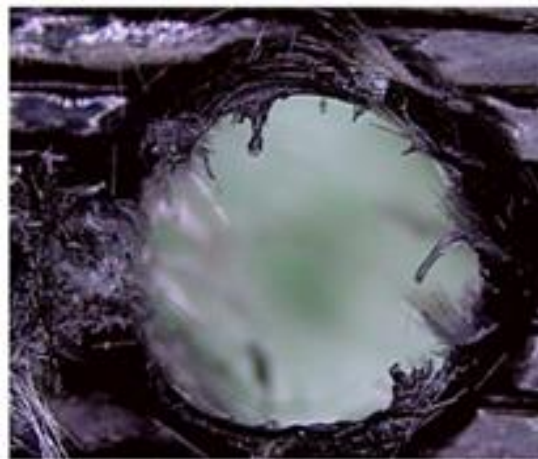
با توجه به این نمودارها، می‌توان مشاهده کرد که میزان آسیب ذوب‌شدگی به شدت به سرعت پیشروی ابزار در حین سوراخکاری وابسته است. به ویژه در شکل ۹، مشاهده می‌شود که در ورودی، با افزایش سرعت دورانی و قطر مته و کاهش نرخ پیشروی، ارتفاع ناحیه ذوب‌شدگی افزایش می‌یابد. علت این پدیده افزایش دمای ناحیه است که ناشی از افزایش سرعت برشی با قطر بیشتر و سرعت دورانی بالاتر است. همچنین، کاهش سرعت پیشروی موجب افزایش زمان درگیری ابزار با قطعه کار و در نتیجه افزایش ارتفاع ناحیه ذوب‌شدگی در ورودی می‌شود.

اما در شکل ۱۰، برای خروجی، مشاهده می‌شود که در نرخ پیشروی پایین، صرف‌نظر از سرعت دورانی و قطر مته، آسیب ذوب‌شدگی در قطعه به وضوح مشاهده می‌شود. برای کاهش این آسیب‌ها، مناسب‌ترین نرخ پیشروی در این تحقیق، نرخ پیشروی بالاتر (۵۰ میلی‌متر بر دقیقه) است. این نرخ پیشروی باعث کاهش زمان درگیری بین ابزار و قطعه کار شده و در نتیجه فرصت کمتری برای ایجاد ذوب‌شدگی فراهم می‌آید.

برای بررسی دقیق‌تر اثر نرخ پیشروی، آزمایش‌های ۱۳ و ۱۴ با قطر ۶ میلی‌متر، سرعت‌های دورانی ۸۰۰ و ۲۰۰۰ و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. همانطور که پیش‌بینی می‌شد، در نرخ پیشروی پایین، بیشترین میزان آسیب در خروجی مته مشاهده شد. این آسیب، با ارتفاع ذوب‌شدگی ۲٫۶۷ میلی‌متر در خروجی مته، به علت تماس طولانی‌مدت ابزار با قطعه کار و زمان درگیری بیشتر مشاهده گردید. این نتایج در شکل ۱۱ به وضوح نمایش داده شده‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱ خروجی ابزار از سوراخ در کامپوزیت ترموپلاستیک (قطر ۶ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه) (الف) سرعت دورانی ۸۰۰ rpm، (ب) سرعت دورانی ۲۰۰۰ rpm

۳-۴- اثر سرعت دورانی

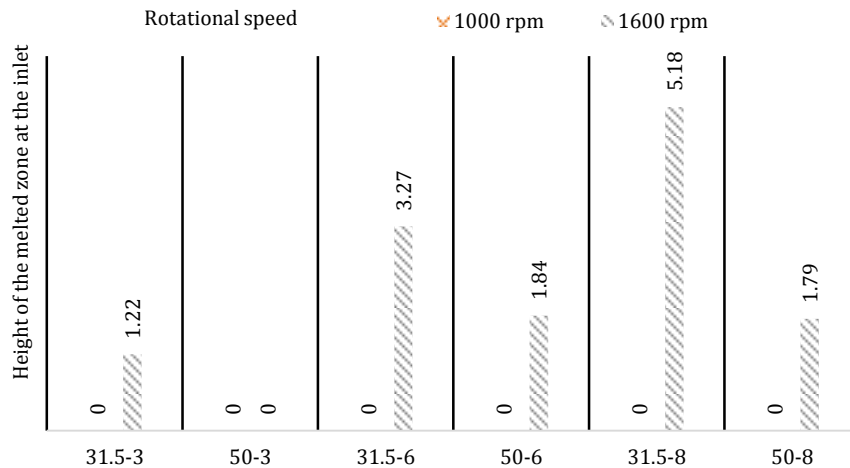
در این بخش، به بررسی تأثیر سرعت دورانی ابزار بر متغیر آسیب ناحیه ذوب در عملیات سوراخکاری کامپوزیت ترموپلاستیک پرداخته می‌شود. با توجه به نمودار شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت دورانی، متغیر آسیب ناحیه ذوب نیز افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تأثیر سرعت دورانی بر میزان ذوب‌شدگی در ورودی و خروجی قطعه را نشان می‌دهند. در این آزمایش‌ها از دو سرعت دورانی ۱۰۰۰ و ۱۶۰۰ استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در سرعت دورانی ۱۰۰۰ هیچ‌گونه ناحیه ذوبی در ورودی مته و روی قطعه وجود ندارد. در حالی که با افزایش سرعت دورانی به ۱۶۰۰، تقریباً در تمام قطرهای پیشروی ناحیه ذوب مشاهده می‌شود. این امر به دلیل تولید حرارت بیشتر در سرعت‌های دورانی بالاتر است.

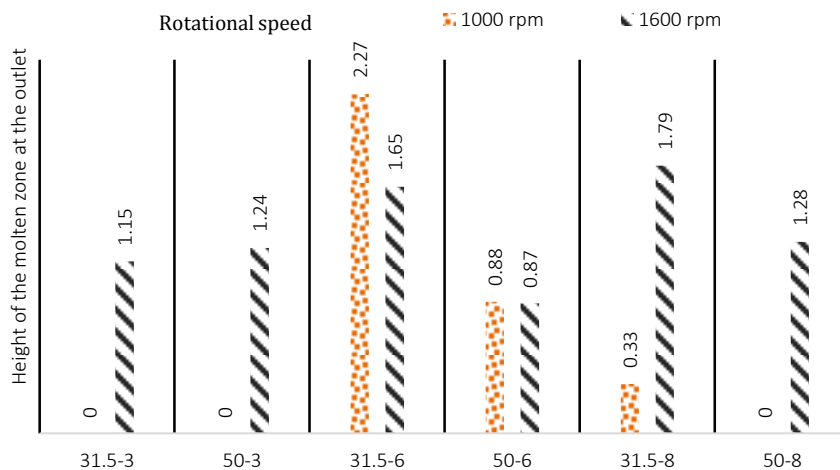
در شکل ۱۳، تأثیر سرعت دورانی بر خروجی مته نمایش داده شده است. در اینجا نیز مشاهده می‌شود که به جز قطر ۶ میلی‌متر، در سایر قطرهای، بیشترین آسیب در سرعت دورانی ۱۶۰۰ به علت حرارت بالاتر ایجاد شده است. بنابراین، به نظر می‌رسد که حد

مناسب برای سرعت دورانی در این آزمایش‌ها حدود ۱۰۰۰ دور بر دقیقه باشد، چرا که در این سرعت دورانی، میزان آسیب ذوب‌شدگی به حداقل می‌رسد.

نتایج نشان می‌دهند که افزایش سرعت دورانی باعث افزایش دما در ناحیه سوراخکاری می‌شود. از آنجا که کامپوزیت‌های ترموپلاستیک به طور طبیعی نرم می‌شوند، افزایش دما موجب افزایش میزان ذوب‌شدگی می‌شود. این پدیده در شکل ۱۴ برای قطرهای ۳ و ۶ میلی‌متر به وضوح مشاهده می‌شود، جایی که سطح سوراخ دارای کمترین آسیب ذوب‌شدگی است.



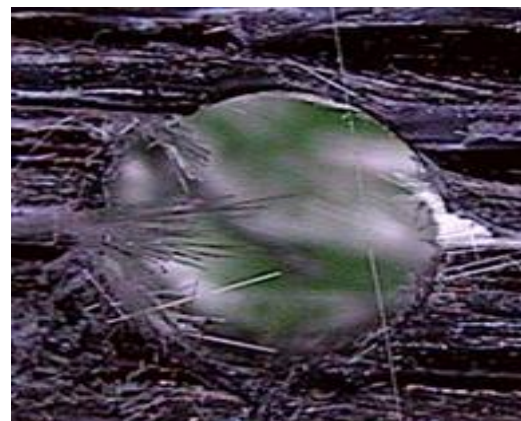
شکل ۱۲ تأثیر سرعت دورانی ابزار بر ناحیه ذوب در ورودی



شکل ۱۳ تأثیر سرعت دورانی ابزار بر ناحیه ذوب در خروجی



(ب)



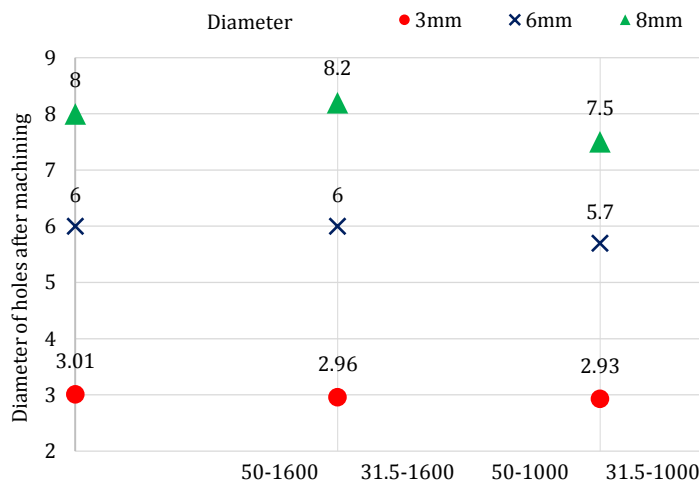
(الف)

شکل ۱۴ خروجی ابزار از سوراخ در کامپوزیت ترموپلاستیک با سرعت دورانی ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دور الف) قطر ۳ میلی‌متر، ب) قطر ۶ میلی‌متر

۳-۵- دقت ابعادی سوراخ

دقت ابعادی سوراخ‌ها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری بینایی و کولیس اندازه‌گیری شده و مقادیر به دست آمده در جدول ۲ آورده شده است. در شکل ۱۵، قطر سوراخ‌ها پس از ماشینکاری برای سه قطر مختلف ۳، ۶ و ۸ میلی‌متر در سرعت دورانی (عدد سمت راست) و نرخ پیشروی (عدد سمت چپ) یکسان مقایسه شده است. بر اساس نمودار موجود، مشاهده می‌شود که میزان خطا در قطرهای بالاتر بیشتر بوده و کمترین خطا در قطر ۳ میلی‌متر مشاهده شده است. علت این امر ممکن است به دلیل درگیری بیشتر ابزار با قطعه‌کار در ابزارهای با قطر بالاتر باشد که در بخش‌های قبلی نیز ذکر شد که افزایش قطر باعث افزایش ذوب‌شدگی می‌شود و در نتیجه خطای ابعادی افزایش می‌یابد.

همچنین، در سرعت دورانی بالاتر و نرخ پیشروی پایین، تعداد خطاها بیشتر بوده است. بیشترین میزان خطا، معادل ۰٫۵ میلی‌متر، در سرعت دورانی ۱۶۰۰، نرخ پیشروی ۳۱٫۵ و قطر ۸ میلی‌متر مشاهده شده است. کمترین میزان خطای قطری، معادل ۰٫۰۱ میلی‌متر، در سرعت دورانی ۱۰۰۰، نرخ پیشروی ۳۱٫۵ و قطر ۳ میلی‌متر ثبت شده است. افزایش سرعت دورانی منجر به افزایش حرارت و در نتیجه افزایش ذوب‌شدگی می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش خطای ابعادی می‌گردد. همچنین، در نرخ پیشروی پایین، به دلیل زمان درگیری بیشتر ابزار با قطعه‌کار، آسیب ذوب‌شدگی در این ناحیه افزایش یافته و به دلیل نرم بودن ماده زمینه (PLA)، دقت ابعادی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد.



شکل ۱۵ بررسی دقت ابعادی سوراخ‌ها پس از ماشینکاری در سه قطر ۳، ۶ و ۸

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش که به بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری در فرایند سوراخکاری بر کامپوزیت ترموپلاستیک PLA با ۱۵ درصد الیاف شیشه پرداخته است، نشان‌دهنده تأثیرات معنادار پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های سوراخ‌ها از جمله دقت ابعادی و میزان آسیب ذوب‌شدگی است. نتایج اصلی حاصل از آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- با افزودن ۱۵ درصد الیاف شیشه به PLA، مقاومت حرارتی و مکانیکی پلیمر افزایش یافته است که در نتیجه این موضوع باعث تغییر در ویژگی‌های فرایند سوراخکاری از جمله دقت ابعادی و آسیب‌های ناشی از ذوب‌شدگی شده است.
- با افزایش قطر مته، نیروی مورد نیاز برای سوراخکاری افزایش یافت. این موضوع با توجه به افزایش سطح تماس مته با قطعه کار و در نتیجه افزایش اصطکاک و حرارت تولیدی در این نواحی قابل توجیه است.
- در سرعت‌های دورانی ۱۰۰۰، با ثابت بودن قطر مته، نیروی بیشتری در مقایسه با سرعت‌های بالاتر مشاهده شد. این نتیجه بیانگر تأثیر سرعت‌های پایین‌تر در افزایش دما و درگیری ابزار با قطعه کار است که به طور غیرمستقیم بر نیروی سوراخکاری اثر می‌گذارد.
- در بین قطرهای مته ۳، ۶ و ۸ میلی‌متر، قطر ۳ میلی‌متر بهترین دقت ابعادی را در این مطالعه به دست آورد و کمترین آسیب ذوب‌شدگی را در ورودی و خروجی سوراخ‌ها ایجاد کرد.

- از میان سه قطر مختلف مته، قطر ۶ میلی‌متر بیشترین میزان آسیب ذوب‌شدگی را در ورودی و خروجی سوراخ‌ها نشان داد که ناشی از ترکیب سرعت دورانی و نرخ پیشروی خاص در این شرایط بود. در این قطر، سرعت برشی بالا موجب افزایش دما شده، اما مکانیسم‌های اتلاف حرارت به اندازه کافی مؤثر نبوده‌اند. همچنین، نرخ براده‌برداری در ناحیه سوراخ‌کاری افزایش یافته که منجر به تجمع حرارت و نرم‌شدگی یا ذوب موضعی ماده، به‌ویژه در ورودی و خروجی سوراخ شده است. در مقایسه، مته‌های با قطر کمتر تولید حرارت کمتری دارند و مته‌های بزرگ‌تر ظرفیت انتقال حرارت بهتری دارند، در حالی که مته ۶ میلی‌متری در شرایطی قرار گرفته که بیشترین آسیب ناشی از ذوب‌شدگی را تجربه کرده است.
- کاهش نرخ پیشروی از ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه به ۳۱٫۵ میلی‌متر بر دقیقه باعث افزایش ارتفاع ناحیه ذوب‌شدگی در ورودی و خروجی سوراخ‌ها شد. این اثر به‌ویژه در خروجی سوراخ‌ها با شدت بیشتری مشاهده گردید، که نشان‌دهنده تأثیر زمان درگیری بیشتر ابزار با قطعه‌کار است.
- افزایش سرعت دورانی باعث افزایش ناحیه آسیب در ورودی و خروجی سوراخ‌ها شد. این امر به‌ویژه در سرعت‌های بالاتر (۱۶۰۰ دور بر دقیقه) مشهود بوده که به علت تولید حرارت بالاتر و نرم شدن بیشتر ماده زمینه ترموپلاستیک PLA-Glass 15% در اثر افزایش دما بود.
- در سرعت دورانی ۱۰۰۰، صرف‌نظر از قطر مته و نرخ پیشروی، هیچ‌گونه ناحیه آسیبی در ورودی سوراخ‌ها مشاهده نشد. این نتیجه به کاهش تولید حرارت در این سرعت دورانی و عدم ذوب شدن ماده در ناحیه ورودی اشاره دارد.
- تحلیل برهم‌کنش پارامترها نشان داد که ترکیب سرعت برشی و نرخ پیشروی تأثیر قابل‌توجهی بر میزان آسیب حرارتی دارد. افزایش سرعت برشی در نرخ‌های پیشروی بالا منجر به افزایش حرارت تجمعی و در نتیجه تشدید آسیب ذوب‌شدگی شد، در حالی که در نرخ‌های پیشروی پایین‌تر، احتمال چسبندگی ماده به ابزار افزایش یافت. با این حال، برای دستیابی به نقطه بهینه و تعیین دقیق‌ترین شرایطی که حداقل آسیب را به همراه داشته باشد، نیاز به بررسی پارامترهای بیشتر و انجام آزمایش‌های تکمیلی وجود دارد تا تعاملات پیچیده این متغیرها بهتر درک شود.

۵- پیشنهادهای پژوهش‌های آتی

پیشنهادات برای ادامه کارهای آتی و بهینه‌سازی سوراخکاری به شرح زیر است.

- بررسی تأثیر هندسه مته‌ها و مواد مختلف بر تورق‌های ورودی و خروجی. از آنجا که هندسه ابزار نقش مهمی در شدت تورق‌ها دارد، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده انواع مختلف مته‌ها (با هندسه‌های مختلف نوک، زاویه برش و فرم) و مواد مختلف برای مقایسه و بهینه‌سازی بیشتر استفاده شوند. این کار می‌تواند به شناسایی شرایط بهینه در انتخاب ابزار برای کاهش تورق در ورودی و خروجی سوراخ‌ها کمک کند.
- تأثیر پارامترهای عملیاتی همچون سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر آسیب‌های حرارتی و تورق. با توجه به اینکه نتایج نشان دادند سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر میزان آسیب‌های حرارتی و تورق تأثیر دارند، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات بعدی، محدوده‌های مختلف این پارامترها (شامل سرعت‌های بالاتر و پایین‌تر) آزمایش شده و اثرات آن‌ها بر کیفیت سوراخ‌ها و میزان تورق در ورودی و خروجی به‌دقت بررسی شود. به‌ویژه تأثیر پارامترهایی چون سرعت دورانی بالا و نرخ پیشروی پایین می‌تواند در بهبود کیفیت سطح و کاهش آسیب‌های حرارتی مؤثر باشد.

References

- [1] Davim JP, Reis P, António CC. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*. 2004 Feb;64(2):289-97. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00253-7
- [2] Khoran M, Ghabezi P, Frahani M, Besharati MK. Investigation of drilling composite sandwich structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015 Feb;76:1927-36. doi: 10.1007/s00170-014-6427-x
- [3] Akhavan-Safar A, Salamat-Talab M, Delzendehrooy F, Zeinolabedin-Beygi A, da Silva LF. Effects of natural date palm tree fibres on mode II fracture energy of E-glass/epoxy plain-woven laminated composites.

- Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022 Oct;44(10):457. doi: [10.1007/s40430-022-03717-2](https://doi.org/10.1007/s40430-022-03717-2)
- [4] Salamat-Talab M, Akhavan-Safar A, Zeinolabedin-Beygi A, Carbas RJ, da Silva LF. Effect of through-the-thickness delamination position on the R-curve behavior of plain-woven ENF specimens. *Materials*. 2023 Feb 22;16(5):1811. doi: [10.3390/ma16051811](https://doi.org/10.3390/ma16051811)
- [5] Abrao AM, Faria PE, Rubio JC, Reis P, Davim JP. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007 May 7;186(1-3):1-7. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146)
- [6] El-Sonbaty I, Khashaba UA, Machaly T. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Composite structures*. 2004 Feb 1;63(3-4):329-38. doi: [10.1016/S0263-8223\(03\)00181-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00181-8)
- [7] Abdollahi H, Mahdavinejad R, Ghambari M, Moradi M. Investigation of green properties of iron/jet-milled grey cast iron compacts by response surface method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2014 Apr;228(4):493-503. doi: [10.1177/0954405413502023](https://doi.org/10.1177/0954405413502023)
- [8] Moradi M, Golchin E. Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017 Mar;14(3):464-84. doi: [10.1590/1679-78253247](https://doi.org/10.1590/1679-78253247)
- [9] Salamat-Talab M, Tahmasbi V, Safari M, Zeinolabedin Beygi A. Mathematical modeling, sobol sensitivity analysis and optimization of main parameters in drilling of E-glass/epoxy laminated composites. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Feb 19;8(11):43-53. [In Persian]
- [10] Lachaud F, Piquet R, Collombet F, Surcin L. Drilling of composite structures. *Composite structures*. 2001 May 1;52(3-4):511-6. doi: [10.1016/S0263-8223\(01\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00040-X)
- [11] Kumar MB, Sathiyi P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures*. 2021 Feb 1;159:107228. doi: [10.1016/j.tws.2020.107228](https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228)
- [12] Falahati M, Ahmadvand P, Safaee S, Chang YC, Lyu Z, Chen R, Li L, Lin Y. Smart polymers and nanocomposites for 3D and 4D printing. *Materials today*. 2020 Nov 1;40:215-45. doi: [10.1016/j.mattod.2020.06.001](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.06.001)
- [13] Roudbarian N, Baniasadi M, Ansari M, Baghani M. An experimental investigation on structural design of shape memory polymers. *Smart Materials and Structures*. 2019 Aug 12;28(9):095017. doi: [10.1088/1361-665X/ab3246](https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab3246)
- [14] Manns M, Morales J, Frohn P. Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators. *Procedia Cirp*. 2018 Jan 1;72:328-33. doi: [10.1016/j.procir.2018.03.186](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.186)
- [15] Clarke GA, Hartse BX, Niaraki Asli AE, Taghavimehr M, Hashemi N, Abbasi Shirsavar M, Montazami R, Alimoradi N, Nasirian V, Ouedraogo LJ, Hashemi NN. Advancement of sensor integrated organ-on-chip devices. *Sensors*. 2021 Feb 15;21(4):1367. doi: [10.3390/s21041367](https://doi.org/10.3390/s21041367)
- [16] Negrini NC, Celikkin N, Tarsini P, Farè S, Święszkowski W. Three-dimensional printing of chemically crosslinked gelatin hydrogels for adipose tissue engineering. *Biofabrication*. 2020 Jan 16;12(2):025001. doi: [10.1088/1758-5090/ab56f9](https://doi.org/10.1088/1758-5090/ab56f9)
- [17] Kabiri A, Liaghat G, Alavi F, Saidpour H, Hedayati SK, Ansari M, Chizari M. Glass fiber/polypropylene composites with potential of bone fracture fixation plates: manufacturing process and mechanical characterization. *Journal of Composite Materials*. 2020 Dec;54(30):4903-19. doi: [10.1177/0021998320940367](https://doi.org/10.1177/0021998320940367)
- [18] Tiu J, Belli R, Lohbauer U. Rising R-curves in particulate/fiber-reinforced resin composite layered systems. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020 Mar 1;103:103537. doi: [10.1016/j.jmbbm.2019.103537](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103537)
- [19] Lassila L, Säilynoja E, Prinssi R, Vallittu PK, Garoushi S. Fracture behavior of Bi-structure fiber-reinforced composite restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020 Jan 1;101:103444. doi: [10.1016/j.jmbbm.2019.103444](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103444)
- [20] Tiu J, Belli R, Lohbauer U. R-curve behavior of a short-fiber reinforced resin composite after water storage. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020 Apr 1;104:103674. doi: [10.1016/j.jmbbm.2020.103674](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103674)
- [21] Hedayati SK, Behraves AH, Hasannia S, Saed AB, Akhoundi B. 3D printed PCL scaffold reinforced with continuous biodegradable fiber yarn: A study on mechanical and cell viability properties. *Polymer Testing*. 2020 Mar 1;83:106347. doi: [10.1016/j.polymertesting.2020.106347](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106347)
- [22] Caminero MA, Chacón JM, García-Moreno I, Reverte JM. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*. 2018 Jul 1;68:415-23. doi: [10.1016/j.polymertesting.2018.04.038](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.038)
- [23] Biron M. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2018.
- [24] Mallick PK. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2010.

- [25] Biron M. *Material Selection for Thermoplastic Parts: Practical and Advanced Information*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2016.
- [26] Penumakala PK, Santo J, Thomas A. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2020 Nov 15;201:108336. doi: [10.1016/j.compositesb.2020.108336](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108336)
- [27] Parlevliet PP, Bersee HE, Beukers A. Residual stresses in thermoplastic composites—A study of the literature—Part II: Experimental techniques. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007 Mar 1;38(3):651-65. doi: [10.1016/j.compositesa.2006.07.002](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.07.002)
- [28] Fleischer J, Teti R, Lanza G, Mativenga P, Möhring HC, Caggiano A. Composite materials parts manufacturing. *CIRP Annals*. 2018 Jan 1;67(2):603-26. doi: [10.1016/j.cirp.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.005)
- [29] Chen WC. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1997 Aug 1;37(8):1097-108. doi: [10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8)
- [30] Hocheng H, Tsao CC. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of materials processing technology*. 2003 Sep 22;140(1-3):335-9. doi: [10.1016/S0924-0136\(03\)00749-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00749-0)
- [31] Ghesmati-Kucheki H, Zakeri M, Ayatollahi MR. Investigating the effect of different variables to reduce delamination due to drilling in composite laminates. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Aug 23;8(6):15-20. [In Persian]
- [32] Lazar MB, Xirouchakis P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011 Dec 1;51(12):937-46. doi: [10.1016/j.ijmactools.2011.08.009](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.08.009)
- [33] Abrao AM, Rubio JC, Faria PE, Davim JP. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials & Design*. 2008 Jan 1;29(2):508-13. doi: [10.1016/j.matdes.2007.01.016](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.016)
- [34] Mudhukrishnan M, Hariharan P, Palanikumar K. Measurement and analysis of thrust force and delamination in drilling glass fiber reinforced polypropylene composites using different drills. *Measurement*. 2020 Jan 1;149:106973. doi: [10.1016/j.measurement.2019.106973](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106973)
- [35] Srinivasan T, Palanikumar K, Rajagopal K. Influence of thrust force in drilling of glass fiber reinforced polycarbonate (GFR/PC) thermoplastic matrix composites using box-behnken design. *Procedia Materials Science*. 2014 Jan 1;5:2152-8. doi: [10.1016/j.mspro.2014.07.419](https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.419)
- [36] Sorrentino L, Turchetta S, Bellini C. A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control. *Composite Structures*. 2018 Feb 15;186:154-64. doi: [10.1016/j.compstruct.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.005)
- [37] Palanikumar K. Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites. *Measurement*. 2011 Dec 1;44(10):2138-48. doi: [10.1016/j.measurement.2011.07.023](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.023)
- [38] Gazor MS, Ansari M, Hedayati SK, Ansari M. Bone fixation implants with in-situ controllable stiffness: Modifying the R-curve behavior by 3D printing. *Journal of Composite Materials*. 2022 Jun;56(15):2337-50. doi: [10.1177/00219983221092843](https://doi.org/10.1177/00219983221092843)
- [39] Amini S, Baraheni M, Moeini Afzal M. Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018;5(1):41-50. [In Persian]
- [40] Hocheng H, editor. *Machining Technology for Composite Materials: Principles and Practice*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2011.
- [41] Sheikh-Ahmad JY. *Machining of polymer composites*. New York: Springer; 2009.
- [42] Wang H, Sun J, Li J, Li W. Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014 Sep;74:257-66. doi: [10.1007/s00170-014-5973-6](https://doi.org/10.1007/s00170-014-5973-6)