



## تأثیر پارامترهای سوراخ‌کاری بر جدایش الیاف، کیفیت سطح و نیروی سوراخ‌کاری سطوح منحنی کامپوزیتی آلومینیوم/شیشه/پلی‌پروپیلن رامین بیرانوند<sup>۱</sup>، مهدی انصاری<sup>۱\*</sup>، حامد دیلمی عضدی<sup>۱</sup>، محمد میلاد جعفری<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: Ansari@arakut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

### مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۱ شهریور ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۷ آبان ۱۴۰۴

### کلیدواژگان:

سوراخ‌کاری

کامپوزیت فلز-پلیمر

جدایش الیاف

کیفیت سطح

ورق‌های لایه‌ای زمینه‌فلزی تقویت‌شده با الیاف (FMLs) به دلیل ترکیب خواص برتر فلز و کامپوزیت‌های پلیمری، به‌عنوان موادی نوظهور در صنایع هوافضا و خودروسازی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. با وجود مزایا، فرایند سوراخ‌کاری این سازه‌ها به‌ویژه در قطعات منحنی با چالش‌هایی همچون جدایش لایه‌ای، افت کیفیت سطح و افزایش نیروهای ماشین‌کاری همراه است. هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر سه پارامتر کلیدی سوراخ‌کاری شامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته بر جدایش الیاف، کیفیت سوراخ و نیروی سوراخ‌کاری در ورق‌های آلومینیوم/پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه منحنی شکل است. برای ساخت نمونه‌ها، لایه‌های آلومینیوم ۳۱۰۵ و پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه با روش پرس حرارتی و قالب اوهایو شکل‌دهی شدند. آزمایش‌ها با طراحی فاکتوریل کامل و در سطوح مختلف سرعت (۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه)، نرخ پیشروی (۸، ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه) و قطر مته (۳، ۵ و ۷ میلی‌متر) انجام گرفت. نتایج نشان داد بیشترین جدایش الیاف (۰/۲۴۳ میلی‌متر) در شرایط استفاده از مته ۳ میلی‌متری، سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه رخ داد؛ در حالی که کمترین جدایش (۰/۰۹۰ میلی‌متر) مربوط به مته ۷ میلی‌متری در همان شرایط بود. تحلیل کیفیت سطح نشان داد سرعت پایین و نرخ پیشروی کم، سوراخ‌هایی منظم‌تر با لبه‌های دقیق‌تر ایجاد می‌کنند. همچنین افزایش سرعت دورانی منجر به کاهش نیروی سوراخ‌کاری شد، در حالی که افزایش نرخ پیشروی اثر معکوس داشت. قطر مته تأثیری دوگانه بر نیرو داشت؛ به‌گونه‌ای که ابتدا نیرو افزایش و سپس به دلیل کاهش فشار واحد سطح، روندی کاهشی یافت. در مجموع، نتایج بیانگر اهمیت انتخاب بهینه پارامترهای سوراخ‌کاری برای بهبود کیفیت و کاهش آسیب در FMLهای منحنی است.

## Effect of drilling parameters on fiber delamination, surface quality, and drilling force in curved aluminum/Glass/Polypropylene composite

Ramin Beyranvand<sup>1</sup>, Mehdi Ansari<sup>1\*</sup>, Hamed Deilami Azodi<sup>1,2</sup>, Mohammad Milad Jafari<sup>1</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

### Article Information

### Original Research Paper

Received: 2 September 2025

Accepted: 18 November 2025

### Keywords:

Drilling

Fiber-Metal-Polymer

Composite

Fiber Delamination

Surface Quality

### Abstract

Fiber Metal Laminates (FMLs), which combine the superior properties of metallic and polymeric composite materials, have emerged as innovative materials widely utilized in aerospace and automotive industries. Despite their advantages, the drilling process of these structures, particularly in curved components, is associated with challenges such as delamination, deteriorated surface quality, and increased machining forces. The present study aims to investigate the influence of three critical drilling parameters-spindle speed, feed rate, and drill diameter-on fiber delamination, hole quality, and drilling force in curved aluminum/polypropylene sheets reinforced with glass fibers. For sample fabrication, layers of 3105 aluminum and glass fiber-reinforced polypropylene were shaped using a hot press technique and an Ohio-shaped mold. Experiments were conducted based on a full factorial design, with spindle speeds of 1000, 2000, and 2500 rpm, feed rates of 8, 16, and 25 mm/min, and drill diameters of 3, 5, and 7 mm. Results indicated that the maximum fiber delamination (0.243 mm) occurred under conditions using a 3 mm drill bit, 1000 rpm spindle speed, and 8 mm/min feed rate, whereas the minimum delamination (0.090 mm) was observed with a 7 mm drill bit under the same conditions. Surface quality analysis revealed that lower spindle speeds and feed rates produced more regular holes with sharper edges. Furthermore, an increase in spindle speed resulted in a reduction of drilling force, while an elevated feed rate exhibited an opposing effect. The drill diameter demonstrated a dual impact on force, initially increasing it and subsequently decreasing it due to reduced unit pressure. Collectively, the findings underscore the significance of optimizing drilling parameters to enhance quality and minimize damage in curved FMLs.

### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Beyranvand R, Ansari M, Deilami Azodi H, Jafari MM. Effect of drilling parameters on fiber delamination, surface quality, and drilling force in curved aluminum/Glass/Polypropylene composite. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Sep 23;12(7):81-95. doi: 10.22034/ijme.2025.543487.2126 [In Persian]

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، توسعه‌ی مواد چندلایه‌ی سبک با عملکرد بالا به یکی از محورهای اصلی پژوهش در صنایع هوافضا و خودروسازی تبدیل شده است [۱-۴]. ترکیب خواص فلزات و کامپوزیت‌ها در قالب مواد موسوم به ورق‌های لایه‌ای زمینه‌فلزی تقویت‌شده با الیاف<sup>۱</sup> مزایایی همچون استحکام ویژه‌ی بالا، مقاومت‌خستگی مناسب، پایداری حرارتی و مقاومت به خوردگی را فراهم کرده است [۲-۴]. این ویژگی‌ها موجب افزایش بهره‌وری سازه‌ها و کاهش جرم در کاربردهای مهندسی‌شده است [۱-۴]. در ساختار FML، لایه‌های فلزی معمولاً از آلیاژ آلومینیوم و لایه‌های پلیمری تقویت‌شده از جنس الیاف شیشه یا کربن تشکیل می‌شوند که با پیوند بین‌سطحی مناسب، انتقال تنش مؤثر بین لایه‌ها برقرار می‌گردد [۲، ۳]. چنین ساختاری مقاومت مطلوب در برابر شکست تدریجی، پایداری ابعادی و رفتار یکپارچه در بارگذاری‌های دینامیکی ایجاد می‌کند [۵].

در سال‌های اخیر جایگزینی سامانه‌های گرماسخت با گرمانرم‌ها در این نوع مواد به دلیل قابلیت بازیافت، شکل‌پذیری حرارتی و سرعت بالاتر فرایند شکل‌دهی مورد توجه قرار گرفته است [۶-۹]. استفاده از پلیمرهای گرمانرم به دلیل رفتار ویسکوالاستیک وابسته به دما علاوه بر بهبود چقرمگی شکست، امکان شکل‌دهی دقیق‌تر قطعات منحنی را فراهم می‌کند [۶-۸]. همچنین این مواد به دلیل قابلیت ذوب و تکرار فرایند، برای تولید انبوه در صنایع حمل‌ونقل مناسب‌تر هستند [۹]. ویژگی انعطاف‌پذیری در کنترل سفتی موضعی در ساختارهای گرمانرم نیز فرصت طراحی سازه‌هایی با پاسخ مکانیکی تنظیم‌پذیر را ایجاد کرده است [۹].

در تولید قطعات منحنی FML گرمانرم، یکی از چالش‌های کلیدی، دستیابی به انحنای دقیق و تکرارپذیر است. فرایندهای مدرن شکل‌دهی مانند شکل‌دهی حرارتی و هیدروفرمینگ امکان کنترل همزمان دما و فشار را ایجاد کرده‌اند تا انحنای پایدار و پیوند بین‌لایه‌ای مطلوب حاصل شود [۱، ۱۰]. این ویژگی‌ها زیرساخت اصلی برای تحقق هندسه‌های سه‌بعدی در قطعات سبک‌وزن را فراهم کرده‌اند که از منظر عملکرد آیرودینامیکی و استحکام اتصالی اهمیت بالایی دارند [۱۰]. با وجود موفقیت در حوزه‌ی تولید، چالش مهم بعدی مربوط به فرایندهای ماشین‌کاری و سوراخ‌کاری در این ساختارهای مرکب است. سوراخ‌کاری، فرایندی ضروری برای ایجاد اتصالات مکانیکی، عبور کابل‌ها و نصب اجزا در قطعات FML محسوب می‌شود [۶، ۱۱]. با این حال، وجود دو یا چند ماده با خواص کاملاً متفاوت مانند مدول، سختی، ضریب هدایت حرارتی و میزان کرنش مجاز موجب ایجاد تنش‌های ناهمگون در محل تماس ابزار با ماده می‌گردد [۷، ۸، ۱۲]. این ناهمگنی سبب افزایش دمای موضعی، تغییر رفتار برشی و بروز پدیده‌هایی مانند جدایش بین‌لایه‌ای و آسیب لبه‌ی سوراخ می‌شود [۱۳، ۱۴]. به همین دلیل، مطالعه‌ی دقیق رفتار برشی در سوراخ‌کاری این نوع مواد برای اطمینان از کیفیت سوراخ و دوام اتصال ضروری است [۶، ۱۱].

مرور پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که اکثر مطالعات تجربی بر سوراخ‌کاری صفحات تخت FML متمرکز بوده‌اند [۱۰، ۱۲، ۱۵-۱۸]. بررسی‌ها نشان داده‌اند که سرعت دورانی بالا موجب کاهش نیروی محوری اما افزایش دمای منطقه‌ی برش می‌شود، در حالی که افزایش نرخ پیشروی باعث تشدید نیروهای محوری و رشد جدایش در لایه‌های کامپوزیتی می‌گردد [۵، ۱۹-۲۱]. همچنین نوع ابزار و زاویه‌ی نوک متناهی بر توزیع تنش و میزان جدایش دارد، به طوری که استفاده از زاویه‌های کوچک‌تر معمولاً منجر به کاهش جدایش و بهبود زبری سطح خروجی می‌شود [۵، ۲۱، ۲۲]. مطالعات مرتبط با اثر جهت‌گیری الیاف نشان داده‌اند که تغییر زاویه‌ی فیبر نسبت به محور سوراخ موجب تغییر رفتار در مکانیزم شکست و ایجاد جدایش نامتقارن می‌گردد [۱۵]. سایر پژوهش‌ها نیز حاکی از آن‌اند که شرایط روانکاری مناسب مانند استفاده از MQL یا سوراخ‌کاری خشک نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل دما و جلوگیری از سوختگی ماتریس دارد [۱۲، ۲۳].

اگرچه شناخت مناسبی از مکانیزم‌های سوراخ‌کاری در صفحات تخت حاصل شده، اما نتایج این مطالعات به‌طور مستقیم قابل تعمیم به قطعات منحنی نیست [۲۴-۲۷]. در قطعات منحنی زاویه‌ی تماس ابزار در طول پیشروی تغییر می‌یابد و این تغییر باعث توزیع غیر یکنواخت تنش و اختلاف دما در ناحیه برش می‌شود [۲۵، ۲۶]. افزایش شعاع انحنا می‌تواند باعث افزایش نیروی محوری و ایجاد تمرکز تنش در لایه‌ی کامپوزیت شود که منجر به گسترش آسیب می‌شود [۲۵]. در مقابل، سطوح با انحنای کم معمولاً نیروی محوری کمتری ایجاد می‌کنند ولی به دلیل طول مسیر تماس بیشتر، دمای ابزار و سایش لبه افزایش می‌یابد [۲۴، ۲۷]. پژوهش‌های تجربی موجود عمدتاً مربوط به کامپوزیت‌های CFRP یا GFRP خمیده هستند و داده‌های اختصاصی برای FMLهای گرمانرم منحنی

<sup>۱</sup> Fiber Metal Laminates: FMLs

بسیار محدود است [۲۵، ۲۶]. از سوی دیگر، تأثیر پارامترهای فرایند بر ترکیب لایه‌های فلزی و پلیمری منحنی هنوز به صورت نظام‌مند بررسی نشده است [۱۱].

کمبود داده‌های تجربی و مدل‌های پیش‌بینی معتبر موجب شده پیش‌بینی دقیق نیرو، دما و میزان آسیب در سوراخ کاری سطوح منحنی دشوار باشد [۱۱]. پژوهش‌های اخیر نیز تأکید دارند که مدل‌های عددی موجود بر پایه‌ی داده‌های صفحات تخت توسعه یافته‌اند و رفتار وابسته به هندسه سطح را لحاظ نکرده‌اند [۱۱، ۱۶]. از منظر عملیاتی، این خلأ دانش منجر به عدم قطعیت در طراحی فرایند سوراخ کاری برای قطعات منحنی می‌شود و احتمال آسیب‌های غیرقابل کنترل در اتصالات حیاتی را افزایش می‌دهد [۱۰، ۱۶-۱۸]. داده‌های منتشرشده نشان می‌دهد که کوچک‌ترین جدایش در لایه‌های FML موجب تمرکز تنش در اطراف سوراخ و تسریع شکست خستگی در طول عمر بهره‌برداری می‌شود [۱۰، ۱۷، ۱۸]. این اثر به‌ویژه در ساختارهای هوافضایی با بارگذاری چرخه‌ای بالا می‌تواند پیامدهای ایمنی جدی ایجاد کند [۱۰، ۱۶-۱۸]. از این رو، دستیابی به روش‌های تجربی دقیق که اثر شکل هندسی سطح را بر روی رفتار سوراخ کاری نشان دهد، از جنبه‌ی علمی و صنعتی ضروری است [۲۴-۲۶].

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده می‌توان گفت هنوز هیچ پژوهش تجربی نظام‌مندی درباره‌ی سوراخ کاری FMLهای گرم‌انرم در شرایط سطح منحنی با شعاع انحنای کنترل‌شده منتشر نشده است [۱۱]. چنین اطلاعاتی برای تدوین دستورالعمل‌های طراحی، مدل‌سازی عددی و بهینه‌سازی فرایند سوراخ کاری در سازه‌های سبک وزن ضروری است [۵، ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۱، ۲۲]. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی جامع اثر سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته بر نیروی محوری، جدایش و کیفیت سطح در FMLهای منحنی آلومینیوم/الیاف شیشه/پلی‌پروپیلن است. در این تحقیق، نمونه‌ها با استفاده از قالب حرارتی مخصوص و سامانه‌ی کنترل دمای سه‌ناحیه‌ای ساخته شده‌اند تا شعاع انحنای دقیق و یکنواخت حاصل شود [۱، ۱۰]. این روش امکان تحلیل تکرارپذیر اثر هندسه سطح را بدون دخالت سایر متغیرهای ناخواسته فراهم کرده است.

ویژگی متمایز و نوآوری اصلی این پژوهش استفاده از انحنای دقیق و کنترل‌شده در راستای طول نمونه است که امکان ارزیابی تأثیر مستقیم هندسه سطح بر نیرو، جدایش و کیفیت سوراخ را به صورت کمی فراهم می‌نماید [۲۴-۲۶]. تولید این نمونه‌ها به کمک طراحی ویژه‌ی قالب و کنترل همزمان دما و فشار انجام شده تا از پایداری هندسی و یکپارچگی بین‌لایه‌ای اطمینان حاصل شود [۱، ۱۰]؛ در نتیجه، داده‌های حاصل نه تنها شکاف علمی موجود در زمینه سوراخ کاری FMLهای گرم‌انرم منحنی را پر می‌کند بلکه می‌تواند مبنایی برای توسعه‌ی مدل‌های تحلیلی و عددی پیشرفته‌تر برای طراحی فرایندهای ماشین کاری در این گروه از سازه‌ها فراهم سازد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، از ترکیب لایه‌های آلومینیوم و پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با پیش‌آغشته الیاف شیشه/پلی‌پروپیلن استفاده شد. لایه‌های فلزی از جنس آلومینیوم آلیاژی نوع ۳۱۰۵ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بودند. پیش‌آغشته مورد استفاده در این تحقیق مطابق پایان‌نامه مرجع [۲۸] بود. پیش از لایه‌چینی، سطح ورق‌های آلومینیوم توسط سنباده‌زنی مکانیکی به شماره ۱۰۰۰ زبر شد و شیارهای ریز موازی بر روی آن ایجاد گردید تا هم زبری سطح افزایش و هم احتمال لغزش لایه‌ها کاهش یابد. این عملیات سبب بهبود قفل‌شدگی مکانیکی و افزایش چسبندگی بین آلومینیوم و لایه‌های پلیمری شد. نمونه‌های نهایی از پنج لایه تشکیل شدند؛ دو لایه بیرونی آلومینیوم ۳۱۰۵ در طرفین و دو لایه پیش‌آغشته شیشه/پلی‌پروپیلن در میانه، با یک لایه مرکزی پلی‌پروپیلن خالص به‌عنوان لایه انتقالی. در این پیکربندی، جهت‌گیری الیاف شیشه در پیش‌آغشته‌ها در راستای ۰ درجه انتخاب شد تا بیشترین مقاومت در برابر نیروهای کششی و برشی حین سوراخ کاری ایجاد شود. برای تثبیت لایه‌ها، مجموعه‌ی لایه‌چینی‌شده در قالب قرار داده شد و تحت فشار حدود ۲ مگاپاسکال به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۱۰°C در آون قرار گرفت. این شرایط سبب نرم‌شدن ماتریس پلی‌پروپیلن، نفوذ آن به زبری سطح آلومینیوم و ایجاد چسبندگی مؤثر میان فلز و پلی‌پراگ گردید. انتخاب دمای ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل آن بود که بالاتر از دمای ذوب پلی‌پروپیلن است، اما همچنان از دمای تخریب حرارتی ماتریس فاصله ایمن دارد. برای ایجاد انحنا در ورق‌های کامپوزیتی از قالب شکل‌دهی نوع اوهايو<sup>۱</sup> استفاده شد. این قالب به‌طور گسترده برای ارزیابی قابلیت شکل‌دهی ورق‌ها در دانشگاه اباتی اوهايو توسعه‌یافته و شباهت زیادی به آزمون کشش صفحه‌ای دارد؛ به‌طوری‌که نمونه داخل قالب

<sup>۱</sup> Ohio Formability Test Die

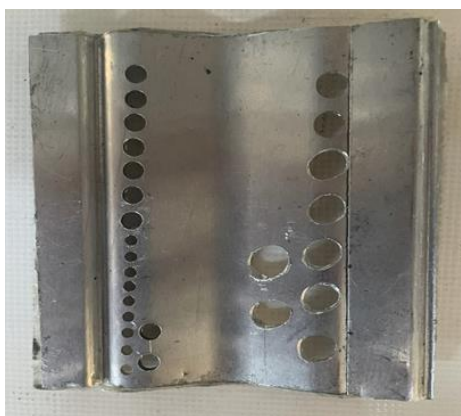
قرار گرفته و با حرکت تدریجی سنبه، تغییر شکل در شرایط کنترل شده اعمال می‌شود [۱۰]. به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی و جلوگیری از تردی ماتریس در حین شکل‌دهی، قالب مجهز به سیستم گرمایشی شد. این سیستم شامل سه المنت حرارتی با توان ۵۵۰ وات و یک ترموکوپل دیجیتال بود که امکان کنترل یکنواخت دما را فراهم می‌کرد.

## ۲-۱- روش تحقیق و طراحی آزمایش

هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثر سه پارامتر کلیدی فرایند سوراخ کاری یعنی سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر مته بر رفتار مکانیکی و کیفی سوراخ‌های ایجاد شده در کامپوزیت‌های لایه‌ای آلومینیوم/پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه است. اهمیت این متغیرها از آن جهت است که هر یک به شکل مستقیم بر مکانیسم برش، توزیع تنش‌های موضعی، تولید حرارت و در نهایت بر کیفیت سطح و میزان جدایش الیاف تأثیر گذارند.

برای اجرای آزمایش‌ها از یک دستگاه فرز یونیورسال مجهز به سیستم گیره دقیق استفاده شد تا ضمن تثبیت کامل نمونه‌ها، ارتعاشات احتمالی حین سوراخ کاری به حداقل برسد. ابزار سوراخ کاری در تمامی آزمایش‌ها از جنس فولاد ابزار تندبر (HSS) انتخاب گردید. دلیل انتخاب این ابزار آن است که ضمن داشتن مقاومت سایشی و حرارتی مناسب، قیمت مقرون به صرفه‌ای داشته و امکان مقایسه نتایج با سایر تحقیقات مشابه فراهم می‌گردد. سه سطح برای هر یک از پارامترهای ورودی انتخاب شدند. به این ترتیب، سرعت دورانی ابزار برابر با ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، نرخ‌های پیشروی برابر با ۸، ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه و قطر مته‌ها برابر با ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد. پارامترهای ورودی فرایند سوراخ کاری در جدول ۱ نشان داده شده است. این بازه‌ها به گونه‌ای انتخاب گردید که طیفی از شرایط مرسوم صنعتی تا شرایط نسبتاً بحرانی فرایند را پوشش دهند و امکان تحلیل جامع‌تری فراهم شود [۲۳]. در شکل ۱-الف دستگاه فرز یونیورسال و در شکل ۱-ب تصویر نمونه بعد از انجام سوراخ کاری نشان داده شده است.

به منظور ثبت داده‌های نیروی سوراخ کاری، از لودسل مدل DACELL UU 100 Kg با دقت بالا در زیر فیکسچر نمونه‌ها استفاده شد. اهمیت این اندازه‌گیری در آن است که تغییرات نیرو می‌تواند به‌طور مستقیم نشانگر تغییر در مکانیسم برش، افزایش اصطکاک یا بروز پدیده‌هایی مانند جدایش لایه‌ای باشد. پس از اتمام فرایند سوراخ کاری، برای تحلیل کیفی سوراخ‌ها و بررسی پدیده جدایش الیاف از میکروسکوپ نوری مدل NSIZE-200 استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی امکان مشاهده دقیق مرز بین لایه‌های آلومینیوم و پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه را فراهم کرد. این تصاویر به‌ویژه در تحلیل کیفیت سطح سوراخ، جدایش لایه‌ای و ناهمواری‌های ناشی از پارگی ماتریس اهمیت زیادی دارد. طراحی آزمایش‌ها بر پایه روش فاکتوریل کامل انجام گرفت. در این روش، تمامی ترکیبات ممکن میان سطوح سه‌گانه عوامل ورودی بررسی شدند. بدین ترتیب، سه عامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار هر کدام در سه سطح مجزا در نظر گرفته شدند که در مجموع منجر به انجام ۲۷ آزمایش مستقل گردید. در جدول ۲ آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. پاسخ‌های مورد بررسی شامل نیروی سوراخ کاری و شاخص‌های کیفیت سوراخ نظیر جدایش الیاف و یکنواختی سطح بودند. بدین ترتیب، می‌توان سهم هر یک از پارامترهای فرایند در بروز تغییرات کیفی و کمی را به صورت علمی و مبتنی بر داده ارزیابی نمود.



شکل ۱ الف) دستگاه فرز یونیورسال و ب) نمونه بعد از انجام سوراخ کاری

جدول ۱ پارامترهای فرایند سوراخ کاری

سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر ابزار (mm)
۲۵۰۰-۲۰۰۰-۱۰۰۰	۲۵-۱۶-۸	۷-۵-۳

جدول ۲ آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	قطر مته (mm)	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت دورانی (rpm)	ماکزیمم نیرو (N)
۱	۷	۱۶	۲۵۰۰	۴۰/۱۲۲۹
۲	۳	۸	۱۰۰۰	۳۵/۰۲۱۷
۳	۷	۸	۱۰۰۰	۲۸/۸۴۱۴
۴	۵	۱۶	۱۰۰۰	۶۳/۶۶۶۹
۵	۵	۸	۲۵۰۰	۳۹/۶۳۲۴
۶	۵	۲۵	۲۵۰۰	۵۸/۲۷۱۴
۷	۳	۸	۲۵۰۰	۳۳/۲۵۵۹
۸	۳	۲۵	۲۰۰۰	۳۶/۱۹۸۹
۹	۵	۱۶	۲۰۰۰	۵۳/۷۵۸۸
۱۰	۳	۱۶	۲۵۰۰	۲۸/۵۴۷۱
۱۱	۵	۲۵	۱۰۰۰	۴۷/۵۷۸۵
۱۲	۳	۸	۲۰۰۰	۲۵/۰۱۵۵
۱۳	۳	۱۶	۱۰۰۰	۳۳/۲۵۵۹
۱۴	۵	۸	۱۰۰۰	۳۷/۷۶۸۵
۱۵	۳	۲۵	۱۰۰۰	۴۶/۲۰۵۱
۱۶	۷	۱۶	۲۰۰۰	۳۵/۹۰۴۶
۱۷	۵	۸	۲۰۰۰	۳۷/۶۷۰۴
۱۸	۷	۸	۲۰۰۰	۲۹/۳۳۱۹
۱۹	۷	۲۵	۱۰۰۰	۶۰/۲۳۳۴
۲۰	۵	۱۶	۲۵۰۰	۴۷/۰۸۸
۲۱	۳	۲۵	۲۵۰۰	۳۶/۱۹۸۹
۲۲	۷	۸	۲۵۰۰	۲۴/۷۷۱۲
۲۳	۳	۱۶	۲۰۰۰	۳۴/۵۳۱۲
۲۴	۷	۱۶	۱۰۰۰	۲۷/۶۶۴۲
۲۵	۵	۲۵	۲۰۰۰	۵۶/۳۰۹۴
۲۶	۷	۲۵	۲۵۰۰	۲۸/۰۵۶۶
۲۷	۷	۲۵	۲۰۰۰	۳۹/۳۳۸۱

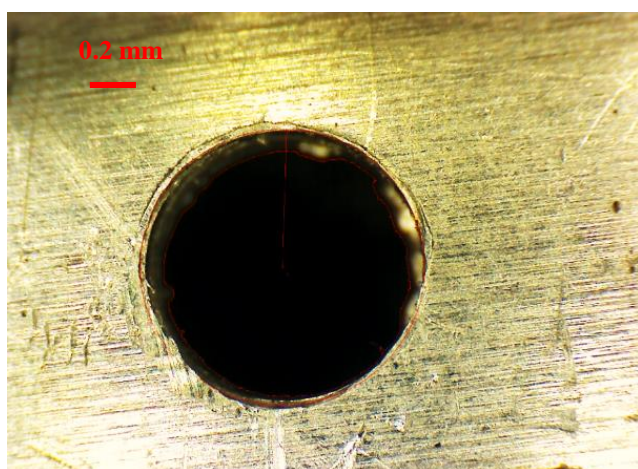
### ۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، برای تحلیل رفتار جدایش، داده‌های مربوط به بیشترین و کمترین میزان جدایش مورد بررسی قرار گرفتند. میزان جدایش الیاف با استفاده از نرم‌افزار دیجی‌مایزر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بیشترین جدایش الیاف برابر با ۰/۲۴۳ میلی‌متر در شرایط استفاده از مته با قطر ۳ میلی‌متر، سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ mm/min ثبت شد. در مقابل، کمترین جدایش معادل ۰/۰۹۰ میلی‌متر مربوط به سوراخ کاری با مته ۷ میلی‌متری، همان سرعت دورانی و نرخ پیشروی بود. داده‌های این بخش در جدول ۳ ارائه شده است.

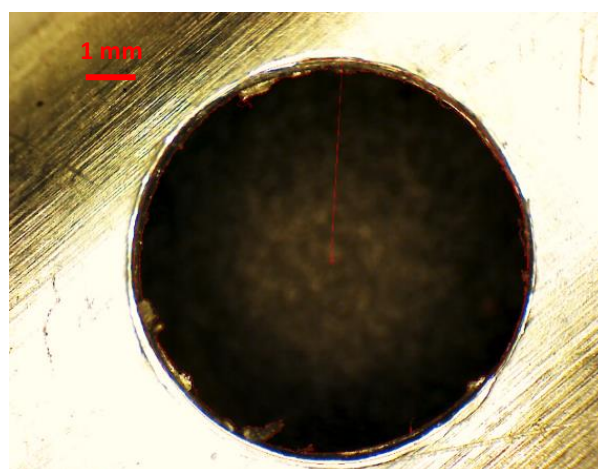
جدول ۳ میزان جدایش الیاف

شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)	الیاف جدا شده (mm)
۱	۱۰۰۰	۸	۳	۰/۲۴۳
۲	۲۵۰۰	۲۵	۳	۰/۲۱۴
۳	۱۰۰۰	۸	۵	۰/۲۱۲
۴	۲۵۰۰	۲۵	۵	۰/۱۷۰
۵	۱۰۰۰	۸	۷	۰/۰۹۰
۶	۲۵۰۰	۲۵	۷	۰/۲۳۴

همچنین در شکل ۲ تصاویر مربوط به اندازه‌گیری جدایش الیاف برای کمترین میزان جدایش (۲-الف) و بیشترین میزان جدایش (۲-ب) نشان داده شده است.



(ب)



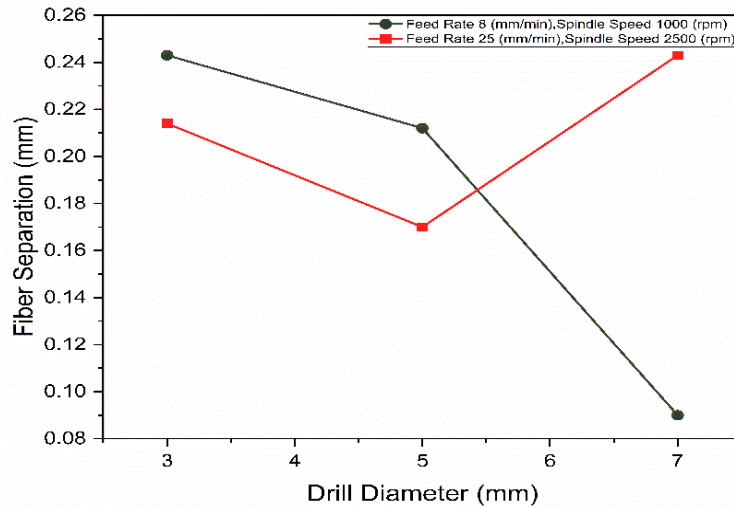
(الف)

شکل ۲ اندازه‌گیری جدایش الیاف (الف) کمترین میزان جدایش (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه و قطر مته ۷ میلی‌متر) و (ب) بیشترین میزان جدایش (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۸ میلی‌متر بر دقیقه و قطر مته ۳ میلی‌متر)

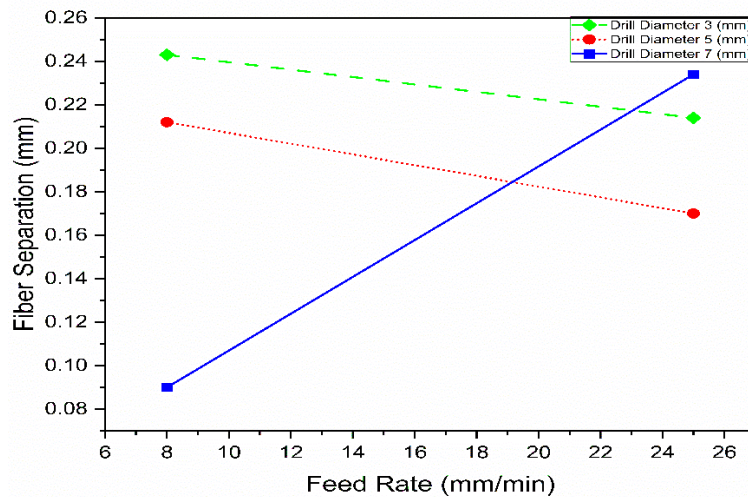
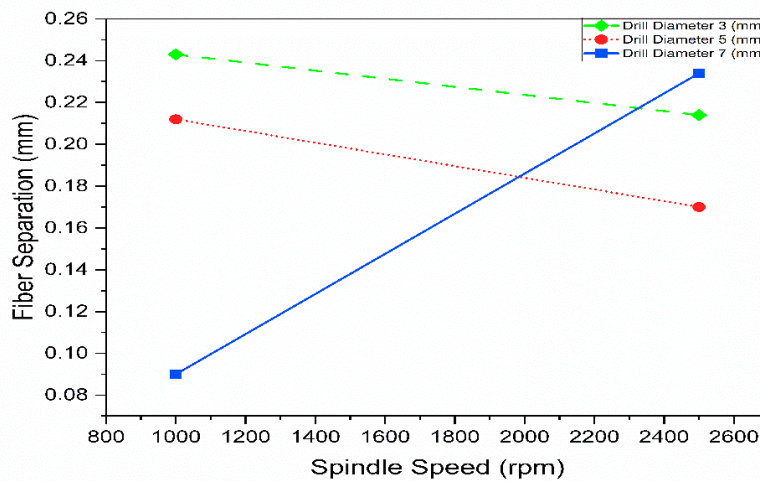
اختلاف قابل توجه اعداد نشان می‌دهد که افزایش قطر مته در شرایط یکسان، منجر به کاهش تنش متمرکز در مرز الیاف و فلز شده و از شدت جدایش می‌کاهد. علت این پدیده را می‌توان در افزایش سطح تماس و کاهش تمرکز بار محوری در حین نفوذ ابزار دانست (شکل ۳). نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد که افزایش قطر مته در سرعت‌های برشی و پیشروی پایین سبب کاهش میزان جدایش الیاف شده و در قطر ۷ میلی‌متر، جدایش به حداقل مقدار خود خواهد رسید. اما در سرعت‌های برشی و پیشروی‌های بالا، با افزایش قطر مجدداً شاهد افزایش جدایش الیاف خواهیم بود. در نتیجه علاوه بر قطر مته، ترکیب سرعت و نرخ پیشروی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری فرایند سوراخ‌کاری دارد.

از سوی دیگر، پارامتر سرعت دورانی و نرخ پیشروی نیز نقش دوگانه‌ای ایفا می‌کنند. در سرعت‌های پایین و نرخ‌های پیشروی کم، زمان تماس ابزار و قطعه افزایش یافته و فرصت بیشتری برای آزاد شدن تنش‌های برشی در مرز الیاف فراهم می‌شود، که این امر می‌تواند میزان جدایش را افزایش دهد. در مقابل، در سرعت‌های بالا و نرخ‌های پیشروی زیاد، اگرچه زمان تماس کاهش می‌یابد، اما افزایش اصطکاک و تولید حرارت، زمینه نرم‌شدگی ماتریس پلیمری و لغزش الیاف را فراهم می‌آورد. این موضوع در برخی آزمایش‌ها به افت کیفیت سطح سوراخ منجر شد. یافته‌های حاضر با نتایج پژوهش Karnik و همکاران [۱۸] در مورد سوراخ‌کاری CFRP هم‌راستا است. نمودارهای شکل ۴ نتایج تغییرات سرعت دورانی و پیشروی را در قطرهای مختلف مته بر روی جدایش الیاف نشان می‌دهند. مطابق شکل ۴، قطرهای کوچک‌تر در سرعت دورانی و پیشروی بالا عملکرد بهتری نشان دادند، اما برای قطر بزرگ‌مته، شرایط تهاجمی

منجر به بدترین کیفیت شد. این نتایج تأکید می‌کند که اثر سرعت و پیشروی مستقل از قطر نیست و تعامل سه‌گانه بین این پارامترها تعیین‌کننده کیفیت سوراخ است. چنین رفتاری نشان‌دهنده آن است که افزایش قطر مته تا یک حد معین کیفیت سطح را بهبود می‌دهد، اما در سرعت و پیشروی زیاد می‌تواند اثر معکوس داشته باشد.

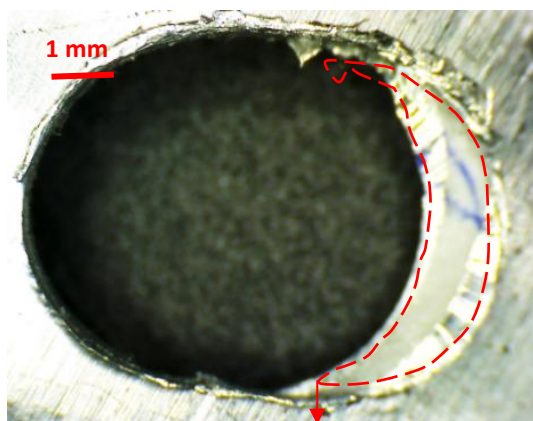


شکل ۳ تأثیر قطر مته بر جدایش الیاف در شرایط مختلف سوراخ کاری



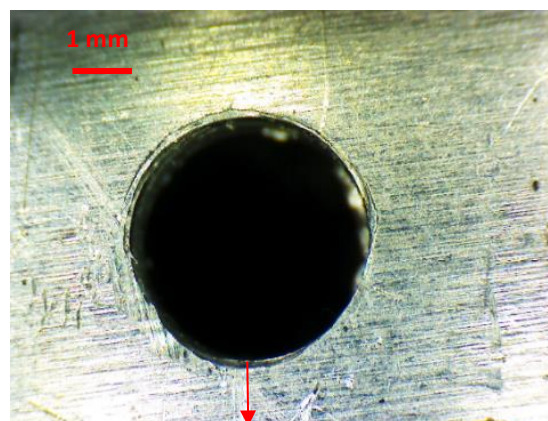
شکل ۴ تأثیر افزایش سرعت دورانی و سرعت پیشروی در قطرهای مختلف مته بر روی جدایش الیاف

بررسی کیفیت سطح سوراخ‌ها نشان داد که نمونه سوراخ‌کاری‌شده با شرایط ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، ۸ mm/min و قطر مته ۳ میلی‌متر دارای شکل هندسی منظم‌تر، لبه‌های صاف، جدایش و اعوجاج کمتر است (شکل ۵-الف)؛ در حالی که در شرایط ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، ۲۵ mm/min و قطر مته ۷ میلی‌متر سوراخ دچار بی‌نظمی محیطی و خروج از حالت دایروی شده است (شکل ۵-ب). علت اصلی این افت کیفیت را می‌توان در ترکیب سه عامل دانست؛ الف) افزایش حرارت و نرم‌شدگی ماتریس پلیمری، ب) افزایش بار محوری در نرخ پیشروی بالا و ج) اثر هندسی انحنای قطعه. به‌ویژه در نمونه‌های دارای انحنای زیاد، زاویه تماس مته با سطح تغییر کرده و موجب انحراف مسیر ابزار از خط برش ایده‌آل می‌شود. همچنین بررسی تصاویر میکروسکوپی نشان داد که در شرایط بهینه (سرعت دورانی پایین، نرخ پیشروی کم و قطر ابزار بزرگ‌تر)، سطح سوراخ دارای جدایش حداقلی و مرزهای نسبتاً یکنواخت است؛ اما در شرایط بحرانی، جدایش الیاف به صورت شکاف‌های شعاعی کوچک و ریزترک‌های بین‌لایه‌ای قابل مشاهده بود. این الگوهای شکست نشان می‌دهند که رفتار مرز مشترک الیاف و فلز نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی سوراخ دارد.



The lowest hole quality and circularity were observed at a spindle speed of 2500 rpm, a feed rate of 25 mm/min, and a drill diameter of 7 mm.

(ب)



The highest hole quality and circularity were achieved at a spindle speed of 1000 rpm, a feed rate of 8 mm/min, and a drill diameter of 3 mm.

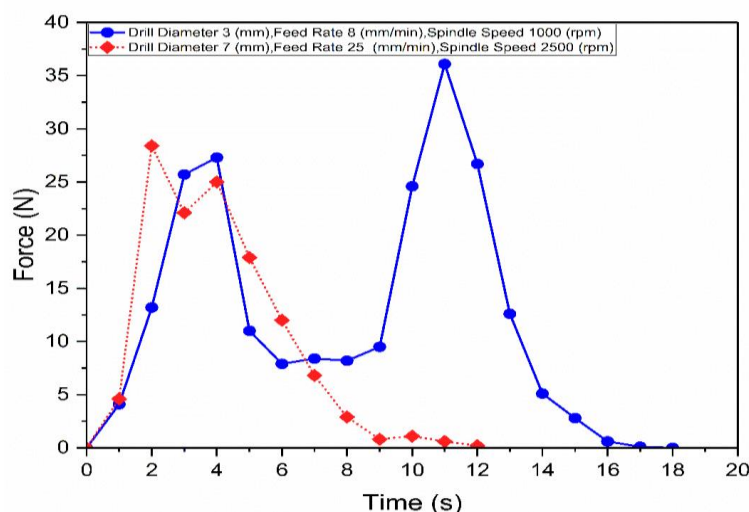
(الف)

شکل ۵ کیفیت سوراخ‌ها در سرعت‌های دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته متفاوت (الف) کمترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته و (ب) بیشترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته

مطابق شکل ۶ در حالت کمترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته، فرایند سوراخ‌کاری در مدت‌زمان طولانی‌تری در حدود ۱۸ ثانیه انجام شده است. این امر ناشی از ترکیب سرعت دورانی پایین و نرخ پیشروی کم است که باعث کندی فرایند نفوذ ابزار در ماده می‌شود. در طول عملیات، دو قله‌ی اصلی نیرو مشاهده می‌شود: قله اول مربوط به ورود ابزار به لایه‌ی سطحی آلومینیوم است که به دلیل سختی نسبی آلومینیوم در مقایسه با پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه، نیروی بالاتری را طلب می‌کند. پس از آن، نیرو کاهش یافته و در محدوده میانی تقریباً پایدار باقی می‌ماند که مربوط به عبور ابزار از لایه پلیمری است. قله دوم در نزدیکی زمان ۱۰ ثانیه رخ داده که ناشی از رسیدن ابزار به لایه دوم آلومینیوم و برش آن است. مقدار این قله به حدود ۳۵ نیوتن می‌رسد که بیانگر بیشترین مقاومت ماده در برابر نفوذ ابزار در این شرایط است.

در مقابل، نمودار شکل ۶ به ازای بیشترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته نشان می‌دهد که سوراخ‌کاری در مدت‌زمان بسیار کوتاه‌تری در حدود ۱۲ ثانیه تکمیل شده است. در این حالت، افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی موجب افزایش نرخ براده‌برداری و کاهش زمان تماس ابزار با ماده شده است. دو قله‌ی اصلی نیرو در این نمودار نیز قابل مشاهده هستند؛ قله اول در زمان حدود ۲ ثانیه با مقدار نزدیک به ۲۸ نیوتن که ناشی از نفوذ اولیه مته در لایه سطحی آلومینیوم است. قله دوم که در حدود ۴ ثانیه رخ داده و به مقدار ۲۵ نیوتن می‌رسد، مربوط به عبور ابزار از لایه دوم آلومینیوم است. اگرچه قله‌ها همچنان وجود دارند، اما مقادیر آن‌ها کمتر از حالت اول هستند و این مسئله بیانگر بهبود شرایط برش و کاهش مقاومت ماده در برابر ابزار در اثر ترکیب سرعت و قطر بالاتر است.

مقایسه دو حالت حدی در نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که قطر مته بزرگ‌تر و سرعت دورانی بالاتر باعث کاهش نیروی سوراخ‌کاری می‌شود، چراکه قطر بزرگ‌تر موجب توزیع بهتر تنش‌های برشی در مقطع و کاهش تمرکز نیرو بر الیاف می‌گردد. همچنین، افزایش سرعت دورانی منجر به ایجاد دمای موضعی بالاتر و نرم‌شدن نسبی ماتریس پلیمری می‌شود که در نتیجه مقاومت ماده در برابر نفوذ ابزار کاهش می‌یابد. هرچند در این پژوهش اندازه‌گیری مستقیم دما انجام نشده است، اما تغییرات مشاهده‌شده در نیروی سوراخ‌کاری و کیفیت سطح نشان‌دهنده‌ی بروز این پدیده است. با این حال، برای اطمینان بیشتر، در مطالعات آینده می‌توان از ابزارهایی مانند ترموکوپل یا تصویربرداری حرارتی جهت اندازه‌گیری و اعتبارسنجی کمی اثرات حرارتی استفاده کرد، که این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر نیز در نظر گرفته می‌شود. در مقابل، مته‌های با قطر کوچک‌تر در سرعت پایین به‌دلیل تماس طولانی‌تر با ماده، نیروهای بیشتری را به الیاف وارد کرده و موجب افزایش جدایش الیاف و نیروهای سوراخ‌کاری می‌شوند. نتایج این بخش بیان‌کننده این است که نیروهای سوراخ‌کاری در کامپوزیت‌های هیبریدی نه تنها به خواص لایه‌ها، بلکه به تعامل گرمایی-مکانیکی ناشی از شرایط فرایند نیز وابسته است. به‌طور خاص، نرخ پیشروی بالا هرچند زمان عملیات را کاهش می‌دهد، اما در صورتی که با قطر بزرگ‌تر و سرعت مناسب ترکیب نشود، می‌تواند موجب افزایش ناگهانی نیرو و ایجاد آسیب‌های سطحی شود.



شکل ۶ نمودارهای نیرو-زمان. نمودار آبی رنگ کمترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته. نمودار قرمز رنگ بیشترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته

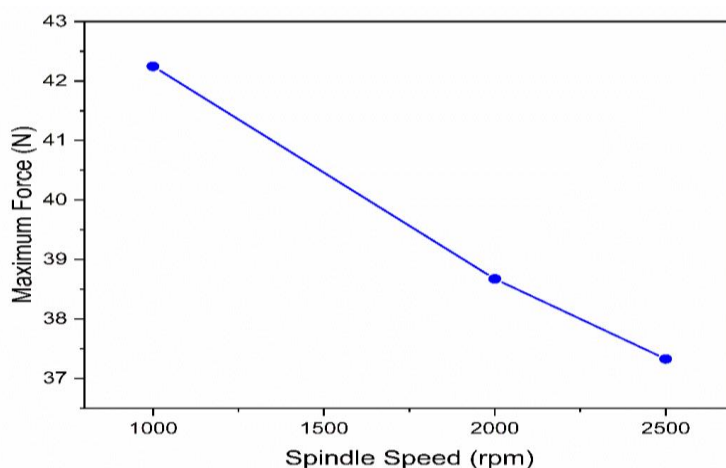
### ۳-۱- اثر سرعت دورانی بر نیروی سوراخ‌کاری

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، روند تغییرات نیروی سوراخ‌کاری نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی مته از ۱۰۰۰ به ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، میانگین نیروی سوراخ‌کاری از حدود ۴۲/۲ نیوتن به ۳۷/۳ نیوتن کاهش یافته است. این کاهش پیوسته و منظم حاکی از آن است که سرعت دورانی نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیسم براده‌برداری و پایداری فرایند دارد.

از منظر مکانیکی، افزایش سرعت دورانی منجر به کاهش زمان تماس ابزار با ماده در هر نقطه می‌شود. در واقع، با سرعت بالاتر، نرخ براده‌برداری افزایش یافته و ماده سریع‌تر از ناحیه برش خارج می‌گردد. این موضوع نه تنها باعث کاهش نیروهای مقاوم در برابر پیشروی ابزار می‌شود، بلکه به پایداری بیشتر فرایند براده‌برداری نیز کمک می‌کند.

عامل مهم دیگر، افزایش دمای موضعی در منطقه برش است. حرارت موجب نرم‌تر شدن پلیمری و نیز کاهش سختی نسبی ماتریس در لایه‌های کامپوزیتی می‌شود. در مورد لایه‌های فلزی، گرمای بیشتر مقاومت تسلیم موضعی آلومینیوم را کاهش داده و تغییر شکل پلاستیک را تسهیل می‌کند. از جنبه دیگر، سرعت دورانی بالا بر نحوه تشکیل و جدایش تراشه‌ها نیز اثر می‌گذارد. در سرعت‌های پایین، تراشه‌ها معمولاً ناپیوسته و شکننده هستند که خود باعث افزایش نیروی نوسانی و حتی ایجاد پدیده‌هایی مانند لرزش و سایش ناهمگون ابزار می‌شود. اما در سرعت‌های بالاتر، تراشه‌ها پیوسته‌تر و نرم‌تر تشکیل می‌شوند و به‌راحتی از منطقه برش خارج می‌گردند. این پایداری در شکل‌گیری تراشه‌ها، منجر به کاهش بارگذاری متناوب روی ابزار و در نتیجه کاهش نیروی سوراخ‌کاری می‌شود.

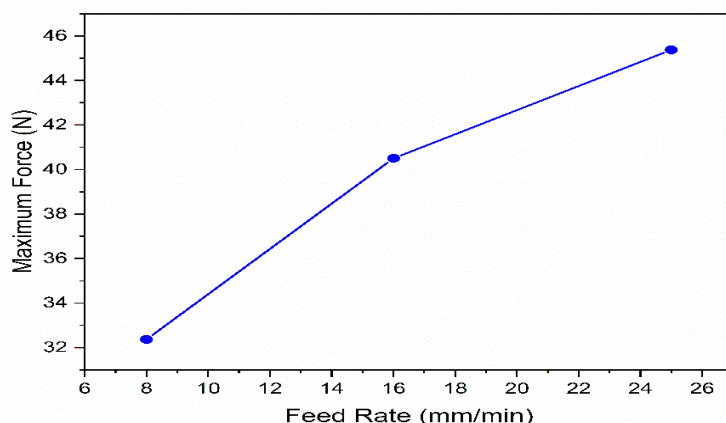
با این حال، باید توجه داشت که افزایش بیش از حد سرعت دورانی می تواند پیامدهای منفی نیز داشته باشد. افزایش حرارت بیش از حد ممکن است منجر به تخریب حرارتی لایه های پلیمری یا نرم شدن بیش از حد پلیمر گردد که می تواند کیفیت سطحی سوراخ و حتی میزان لایه لایه شدن را افزایش دهد. همچنین در سرعت های بسیار بالا، احتمال سایش شدیدتر لبه برشی و کاهش عمر ابزار نیز وجود دارد.



شکل ۷ اثر سرعت دورانی بر نیروی سوراخ کاری

### ۳-۲- اثر نرخ پیشروی بر نیروی سوراخ کاری

شکل ۸ تغییرات نیروی سوراخ کاری را در اثر افزایش نرخ پیشروی نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، روندی صعودی در مقدار نیروی سوراخ کاری با افزایش نرخ پیشروی وجود دارد؛ دلیل اصلی این رفتار آن است که افزایش نرخ پیشروی، مستقیماً به افزایش حجم ماده ای که در واحد زمان براده برداری می شود منجر می گردد. در این شرایط، ضخامت براده افزایش یافته و ابزار باید برای برش و جداسازی ماده، نیروی بیشتری اعمال کند. از منظر مکانیکی، افزایش ضخامت براده باعث بالا رفتن تنش های فشاری و برشی در ناحیه تماس ابزار و قطعه کار می شود و همین امر منجر به افزایش محسوس نیروی سوراخ کاری می گردد.



شکل ۸ اثر نرخ پیشروی بر نیروی سوراخ کاری

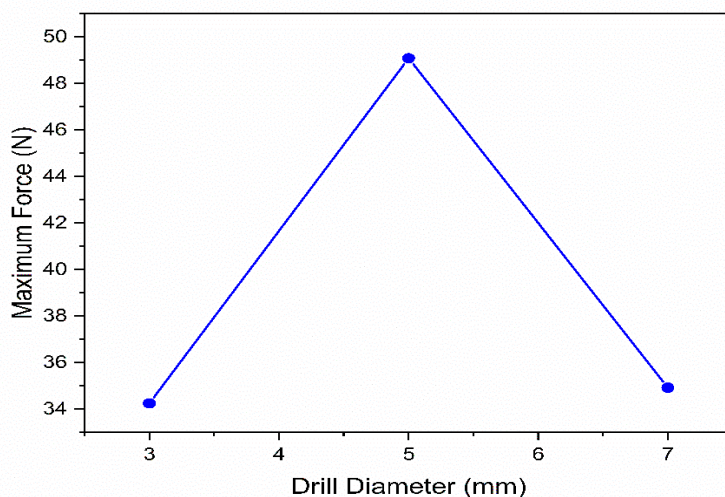
با این حال، نکته قابل توجه این است که رشد نیروی سوراخ کاری کاملاً خطی و متناسب با افزایش نرخ پیشروی نیست، بلکه شیب افزایش نیرو در نرخ های بالاتر کاهش می یابد. این موضوع را می توان به عوامل حرارتی و اصطکاکی مرتبط دانست. زمانی که نرخ پیشروی افزایش می یابد، اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و نیز انرژی ورودی به ناحیه برش بیشتر شده و دمای موضعی افزایش می یابد.

این دما موجب نرم‌شدگی پلاستیک ماده در ناحیه برش شده و مقاومت آن در برابر تغییر شکل کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، هرچند افزایش نرخ پیشروی در ابتدا سبب افزایش شدید نیروی سوراخ‌کاری می‌شود، اما با بالا رفتن دما، اثر نرم‌شدگی ماده تا حدی مانع از افزایش بیش از حد نیرو می‌شود. این رفتار غیرخطی نشان می‌دهد که در عملیات سوراخ‌کاری آلیاژهای فلزی، با افزایش نرخ پیشروی ابتدا نیروی برشی به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد، اما پس از عبور از یک حد آستانه، تأثیر حرارت تولیدی باعث کاهش آهنگ رشد نیرو می‌شود.

علاوه بر این، اثر نرخ پیشروی بر نحوه تشکیل تراشه نیز قابل توجه است. در نرخ‌های پایین، تراشه‌ها نازک‌تر بوده و به صورت پیوسته شکل می‌گیرند، اما با افزایش نرخ پیشروی، تراشه‌ها ضخیم‌تر و گاه به صورت ناپیوسته و خردشده ظاهر می‌شوند. این تغییر در مکانیسم تشکیل تراشه‌ها می‌تواند به نوسانات نیروی سوراخ‌کاری و افزایش بارگذاری متناوب بر ابزار منجر شود.

### ۳-۳- اثر قطر مته بر نیروی سوراخ‌کاری

شکل ۹ تغییرات نیروی سوراخ‌کاری را در اثر افزایش قطر مته نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر مته، نیروی سوراخ‌کاری ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، روندی کاهشی پیدا می‌کند. این رفتار را می‌توان ناشی از تغییرات در هندسه تماس، توزیع تنش، و شرایط مکانیکی فرایند براده‌برداری دانست. در مراحل ابتدایی افزایش قطر، سطح مقطع براده و ناحیه تماس ابزار با قطعه‌کار بزرگ‌تر می‌شود که موجب افزایش نیروی برشی مورد نیاز و در نتیجه، افزایش نیروی سوراخ‌کاری می‌گردد. با این حال، با بزرگ‌تر شدن بیشتر قطر مته، فشار مؤثر بر واحد سطح کاهش می‌یابد؛ زیرا نیروی اعمال‌شده بر سطح گسترده‌تری توزیع می‌شود. این کاهش فشار منجر به کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار شده و در نهایت نیروی سوراخ‌کاری را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، مته‌هایی با قطر بزرگ‌تر معمولاً از پایداری و سفتی بیشتری برخوردارند که موجب کاهش ارتعاشات و انحراف ابزار در حین عملیات می‌شود. این بهبود در شرایط مکانیکی فرایند، نقش مؤثری در کاهش نیروی سوراخ‌کاری در قطرهای بزرگ‌تر ایفا می‌کند.



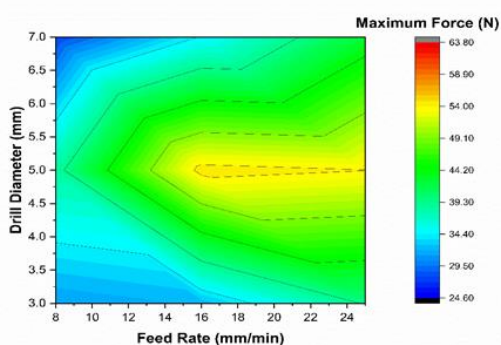
شکل ۹ اثر قطر مته بر نیروی سوراخ‌کاری

### ۳-۴- نمودارهای دوبعدی و سه‌بعدی تأثیر پارامترهای ورودی بر نیروی سوراخ‌کاری

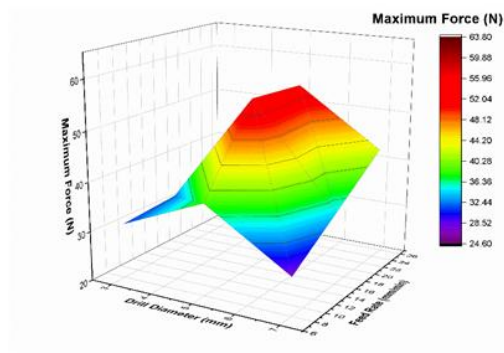
شکل ۱۰ تأثیر هم‌زمان پارامترهای ورودی شامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته بر نیروی سوراخ‌کاری را از طریق نمودارهای دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب که اثر ترکیبی افزایش نرخ پیشروی و قطر مته بررسی شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش این دو پارامتر، نیروی سوراخ‌کاری ابتدا افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از بالا رفتن نرخ براده‌برداری به دلیل نرخ پیشروی بیشتر و همچنین افزایش سطح تماس ابزار با قطعه‌کار در اثر بزرگ‌تر شدن قطر مته است که به افزایش نیروهای برشی و اصطکاکی منجر می‌شود. علاوه بر این، مته‌های بزرگ‌تر معمولاً از توان و گشتاور بیشتری برخوردارند که اجازه استفاده از

نرخ‌های پیشروی بالاتر را فراهم می‌سازد. با این حال، پس از عبور از یک محدوده بهینه، روند افزایشی متوقف شده و نیروی سوراخ‌کاری کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند ناشی از اثرات حرارتی و نرم‌شدن ماده در ناحیه برش، بهبود شرایط تخلیه براده و همچنین کاهش فشار مؤثر بر واحد سطح باشد که مجموعاً منجر به کاهش مقاومت مکانیکی در برابر نفوذ ابزار می‌شود.

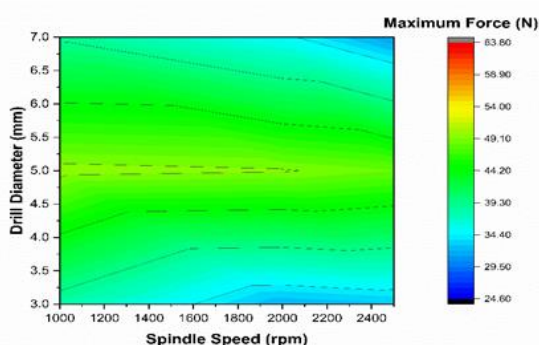
در شکل‌های ۱۰-ت و ۱۰-پ که اثر هم‌زمان سرعت دورانی و قطر مته بررسی شده است، و همچنین در شکل‌های ۱۰-ج و ۱۰-ث که اثر هم‌زمان سرعت دورانی و نرخ پیشروی مورد ارزیابی قرار گرفته است، الگوی مشابهی مشاهده می‌شود. در ابتدا، افزایش سرعت دورانی در کنار پارامتر دوم (قطر یا پیشروی) موجب افزایش نیروی سوراخ‌کاری می‌شود، چرا که با افزایش سرعت برش، نرخ تماس ابزار با ماده و نرخ تولید براده بالا می‌رود. اما پس از رسیدن به محدوده بحرانی، ادامه افزایش این پارامترها باعث بروز پدیده‌هایی نظیر تغییر در مکانیسم برش، افزایش دمای منطقه تماس، بروز ارتعاشات و ناپایداری ابزار، تغییر در زاویه تماس و همچنین تغییر الگوی جریان براده می‌شود که همگی می‌توانند به کاهش مؤثر نیروی سوراخ‌کاری منجر شوند.



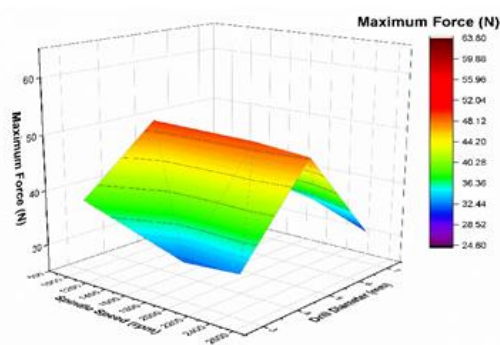
(ب)



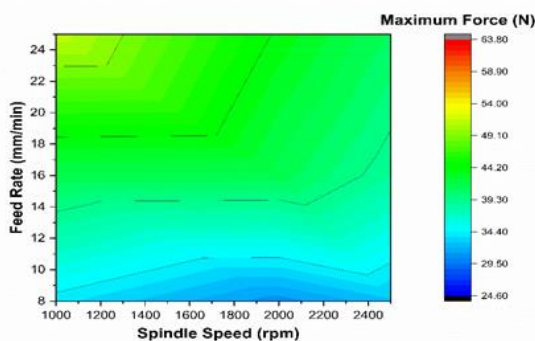
(الف)



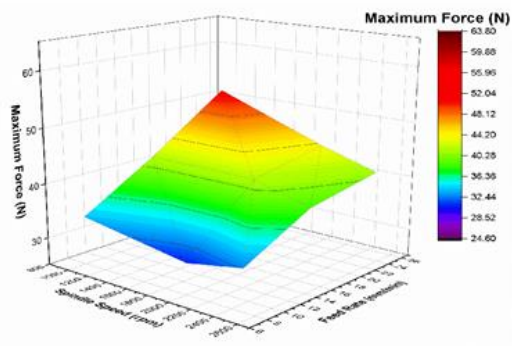
(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل ۱۰ الف) نمودار سه‌بعدی و ب) نمودار دوبعدی تأثیر هم‌زمان قطر مته و نرخ پیشروی بر نیروی سوراخ‌کاری، پ) نمودار سه‌بعدی و ت) نمودار دوبعدی تأثیر هم‌زمان سرعت دورانی و قطر مته بر نیروی سوراخ‌کاری، ث) نمودار سه‌بعدی و ج) نمودار دوبعدی تأثیر هم‌زمان نرخ پیشروی و سرعت دورانی بر نیروی سوراخ‌کاری

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، فرایند سوراخ کاری لایه‌های فلز/پلیمر/لیاف شیشه با هندسه‌ی منحنی مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار نیروی محوری، پایداری مکانیکی و کیفیت سطح حاصل از تغییرات پارامترهای فرایند تبیین شود. طراحی آزمایش‌ها بر مبنای طرح فاکتوریل کامل با سه سطح سرعت دورانی، سه نرخ پیشروی و سه قطر مته انجام شد تا امکان تحلیل اثرات متقابل بین پارامترها فراهم گردد. نتایج نشان داد که در سوراخ کاری سازه‌های لایه‌های منحنی، انحنا عامل کلیدی در تعیین نحوه‌ی توزیع نیروها، تمرکز تنش و بروز جدایش بین لایه‌ای است. شدت بارگذاری و جهت نیرو در این حالت تابعی از شعاع انحنا و زاویه تماس ابزار با سطح است؛ به طوری که افزایش انحنا در نرخ‌های پیشروی بالا باعث تشدید لغزش موضعی مته و افزایش انحراف مسیر براده می‌شود، در نتیجه احتمال کاهش کیفیت هندسی و جدایش سطحی بالا می‌رود. در مقابل، انتخاب محدوده‌های کنترل‌شده‌ی هندسه و پارامترهای سینماتیکی می‌تواند توزیع نیرو را متوازن ساخته و پایداری فرایند را بهبود دهد.

افزایش سرعت دورانی همراه با کاهش نرخ پیشروی موجب کاهش اصطکاک و کنترل حرارت موضعی شد، که اثر آن به صورت کاهش نیروی محوری و بهبود یکپارچگی لایه‌ها مشاهده گردید. این رفتار با مفهوم نرم‌شدگی ماتریس ترموپلاستیک در دماهای گذارسازگار است و نشان می‌دهد که کنترل حرارت در محدوده دمایی نیمه‌نرم، نقش مهمی در کاهش تنش‌های برشی و پیشگیری از جدایش دارد. از سوی دیگر، قطر مته تأثیر دوگانه‌ای بر رفتار مکانیکی فرایند دارد؛ قطر کوچک‌تر موجب تمرکز تنش و افزایش نیروی محوری، در حالی که قطرهای میانی تا بزرگ‌تر باعث توزیع یکنواخت‌تر نیرو و کاهش فشار واحد سطح می‌شوند. با این حال در شرایط سرعت و پیشروی بالا، قطر بزرگ‌تر دوباره با افزایش حرارت و افت پایداری به تشدید آسیب ساختاری منجر می‌شود.

تحلیل منحنی‌های نیرو-زمان آشکار کرد که عبور مته از لایه‌های فلزی و پلیمری دو قله مشخص نیرو ایجاد می‌کند که اولی مربوط به ورود به لایه فلزی و دومی به خروج از لایه پلیمری است. فاصله و دامنه این قله‌ها نشانگر یکنواختی نرخ براده‌برداری و پایداری فرایند است، به گونه‌ای که در محدوده سرعت ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۸ تا ۱۶ میلی‌متر بر دقیقه، کمینه مقدار نیروی محوری و بیشینه کیفیت سطح حاصل شد. چنین محدوده‌ای به عنوان شرایط بهینه سوراخ کاری برای FMLهای منحنی ترموپلاستیک قابل توصیه است.

رفتار مشاهده‌شده از دیدگاه فیزیکی به چهار مکانیسم اصلی وابسته است:

۱. افزایش سرعت دورانی سبب تولید حرارت موضعی و کاهش مقاومت برشی ماده.
۲. افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش ضخامت براده و اصطکاک سطحی.
۳. تغییر قطر مته موجب تغییر توزیع فشار و شدت تماس برشی.
۴. تغییر شعاع انحنا بر تمرکز تنش و زاویه ورود مته تأثیر مستقیم دارد.

این روابط نشان می‌دهد که بهینه‌سازی فرایند سوراخ کاری در سازه‌های منحنی باید بر اساس برهم‌کنش دینامیکی میان حرارت، فشار و هندسه سطح انجام گیرد، نه تنظیم منفرد پارامترها. از دیدگاه کاربردی، نتایج حاضر می‌تواند راهنمایی علمی برای تعیین شرایط کاری ماشین کاری سازه‌های لایه‌های منحنی فلز-پلیمر در مقیاس صنعتی باشد. تحقق این شرایط ضمن افزایش دوام سازه، موجب کاهش نرخ خرابی اتصالات پرچ یا پیچ در صنایع هوافضا و خودروسازی می‌شود.

به طور کلی، یافته‌های پژوهش حاضر علاوه بر ارائه درکی عمیق‌تر از رفتار مکانیکی و مکانیسم براده‌برداری در کامپوزیت‌های فلزی-پلیمری منحنی، مبنایی علمی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی فرایندهای ماشین کاری این مواد فراهم می‌کند. این داده‌ها به ویژه در طراحی ابزارهای خاص، کنترل هوشمند حرارتی-مکانیکی و تعیین استراتژی‌های تولید دقیق در سامانه‌های سبک‌وزن مهندسی کاربرد مستقیم دارند. با وجود اجرای دقیق آزمایش‌ها، عدم اندازه‌گیری مستقیم دمای لحظه‌ای و تحلیل سایش ابزار از محدودیت‌های پژوهش است. توصیه می‌شود در مطالعات آتی از ترموکوپل‌های تعبیه‌شده در ابزار و تصویربرداری مادون قرمز برای ثبت هم‌زمان رفتار حرارتی و دینامیکی استفاده شود تا مدل‌های شبیه‌سازی با شواهد تجربی تکمیل گردد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب مناسب سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار در تعامل با هندسه‌ی انحنا، کلید دستیابی به کیفیت سطح بالا و حداقل آسیب ساختاری در سوراخ کاری FMLهای منحنی است. این دستاورد می‌تواند مبنای بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی تولید قطعات دقیق در صنایع پیشرفته با نیاز به دوام مکانیکی و دقت ابعادی بالا باشد.

## References

- [1] Rabiee AH, Sherkatghanad E, Zeinolabedin Beygi A, Moslemi Naeini H, Lang L. Experimental investigation and modeling of fiber metal laminates hydroforming process by GWO optimized neuro-fuzzy network. *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*. 2023 Feb 1;12(2):193-209. doi: [10.22061/jcarme.2022.8268.2101](https://doi.org/10.22061/jcarme.2022.8268.2101)
- [2] Voogesang LB, Vlot A. Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. *Journal of materials processing technology*. 2000 Jun 1;103(1):1-5. doi: [10.1016/S0924-0136\(00\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00411-8)
- [3] Alderliesten RC. Fatigue & damage tolerance of hybrid materials & structures—some myths, facts & fairytales. In: *INCAF 2009, Bridging the Gap between Theory and Operational Practice: Proceedings of the 25th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue*, Rotterdam, The Netherlands, 27–29 May 2009 2009 (pp. 1245-1260). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: [10.1007/978-90-481-2746-7\\_70](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2746-7_70)
- [4] Asundi A, Choi AY. Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft. *Journal of Materials processing technology*. 1997 Jan 1;63(1-3):384-94. doi: [10.1016/S0924-0136\(96\)02652-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02652-0)
- [5] Yalçın B, Bolat Ç, Ergene B, Karakılınc U, Yavaş Ç, Öz Y, Ercetin A, Maraş S, Der O. Effect of drilling parameters and tool diameter on delamination and thrust force in the drilling of high-performance glass/epoxy composites for aerospace structures with a new design drill. *Polymers*. 2024 Oct 27;16(21):3011. doi: [10.3390/polym16213011](https://doi.org/10.3390/polym16213011)
- [6] Bonhin EP, David-Müzel S, de Sampaio Alves MC, Botelho EC, Ribeiro MV. A review of mechanical drilling on fiber metal laminates. *Journal of Composite Materials*. 2021 Mar;55(6):843-69. doi: [10.1177/0021998320957743](https://doi.org/10.1177/0021998320957743)
- [7] Rasti A, Zeinolabedin-Beygi A, Hassanpour H, Omiddodman AR. Study of surface roughness, texture, and microhardness in hard drilling of AISI D2: The critical role of cutting oil in minimum quantity lubrication. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2025 Sep;39(9):5397-403. doi: [10.1007/s12206-025-0841-x](https://doi.org/10.1007/s12206-025-0841-x)
- [8] 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;8(11):43-53. [In Persian]
- [9] 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)
- [10] Miles MP. Formability testing of sheet metals. In: *ASM handbook, volume 8: mechanical testing and evaluation*. ASM International; 2000. p. 201-10. doi: [10.31399/asm.hb.v08.a0003419](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v08.a0003419)
- [11] Doğan MA, Yazman Ş, Gemi L, Yildiz M, Yapici A. A review on drilling of FML stacks with conventional and unconventional processing methods under different conditions. *Composite Structures*. 2022 Oct 1;297:115913. doi: [10.1016/j.compstruct.2022.115913](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115913)
- [12] Rasti A, Omiddodman AR, Ustad M. Analysis of Geometric Dimensioning and Tolerancing in Sustainable Hard Drilling using Vegetable Oil-Based MQL. *Journal of Engineering Research*. 2025 Jun 2. doi: [10.1016/j.jer.2025.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jer.2025.05.012)
- [13] Ho-Cheng H, Dharan C. Delamination during drilling in composite laminates. 1990. doi: [10.1115/1.2899580](https://doi.org/10.1115/1.2899580)
- [14] Tsao CC, Hocheng H. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials. *International journal of machine tools and manufacture*. 2003 Sep 1;43(11):1087-92. doi: [10.1016/S0890-6955\(03\)00127-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00127-5)
- [15] Moradzadeh V, Danesh M, Arabgol F. Investigating the effect of fiber angle on the quality of the surface and delamination in the turning of epoxy composite reinforced with glass fiber. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Apr 21; 10(2):14-21. doi: [10.22034/IJME.2023.418064.1848](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.418064.1848) [In Persian]
- [16] Hocheng H, Tsao CC. The path towards delamination-free drilling of composite materials. *Journal of materials processing technology*. 2005 Aug 30;167(2-3):251-64. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2005.06.039](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.039)
- [17] Xu J, Mkaddem A, El Mansori M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. *Composite Structures*. 2016 Jan 1;135:316-38. doi: [10.1016/j.compstruct.2015.09.028](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028)
- [18] Karnik SR, Gaitonde VN, Rubio JC, Correia AE, Abrão AM, Davim JP. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. *Materials & Design*. 2008 Oct 1;29(9):1768-76. doi: [10.1016/j.matdes.2008.03.014](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.014)
- [19] Piquet R, Ferret B, Lachaud F, Swider P. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000 Oct 1;31(10):1107-15. doi: [10.1016/S1359-835X\(00\)00069-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00069-5)
- [20] Xu J, Huang X, Chen M, Paulo Davim J. Drilling characteristics of carbon/epoxy and carbon/polyimide composites. *Materials and Manufacturing Processes*. 2020 Nov 17;35(15):1732-40. doi: [10.1080/10426914.2020.1784935](https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1784935)

- [21] Baharlooey D. The effect of drill geometrical properties on delamination and diameter error of holes in a thin sheet of Kevlar/epoxy composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2018 Oct 23;5(2):9-17. [In Persian]
- [22] Ghesmati-Kucheki H, Zakeri M, AYAT EMR. Investigating the effect of different variables to reduce delamination due to drilling in composite laminates. 2021. [In Persian]
- [23] 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. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Mar 21;12(1):51-64. doi: [10.22034/ijme.2025.488847.2027](https://doi.org/10.22034/ijme.2025.488847.2027) [In Persian]
- [24] Geier N, Pereszlai C, Poór DI, Balázs BZ. Drilling of curved carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composite plates. *Procedia CIRP*. 2021 Jan 1;99:404-8. doi: [10.1016/j.procir.2021.03.057](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.057)
- [25] Morkavuk S, Köklü U, Aslantaş K. An experimental investigation on the influence of different surface curvatures in drilling machinability of carbon fiber reinforced plastic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022 Nov;236(22):10953-68. doi: [10.1177/09544062221110466](https://doi.org/10.1177/09544062221110466)
- [26] Li S, Zou S, Dai L, Zhou Y, Qiu X, Li C, Li P, Ko TJ. Damage mechanism of carbon fiber reinforced plastic pipe based on reverse and forward curvature drilling. *Composite Structures*. 2022 Jul 15;292:115700. doi: [10.1016/j.compstruct.2022.115700](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115700)
- [27] Arola D, McCain ML. Surface texture and the stress concentration factor for FRP components with holes. *Journal of Composite materials*. 2003 Aug;37(16):1439-60. doi: [10.1177/0021998303034462](https://doi.org/10.1177/0021998303034462)
- [28] Jafari MM. Study on formability of GLARE laminate [master's thesis]. Arak: Arak University of Technology; Faculty of Mechanical Engineering; 2021.