



مطالعه تجربی و آماری الیاف برش نخورده در سوراخکاری چندلایه‌های الیافی-فلزی CARALL و GLARE

رامین بیرانوند^۱، مهدی انصاری^{۱*}، البرز محبی^۲، محمد کشفی^۳

۱- گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۸ آبان ۱۴۰۴

پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

کلیدواژگان:

لایه‌چینی‌های الیافی-فلزی

سوراخ‌کاری کامپوزیت

الیاف برش نخورده

کیفیت سطح سوراخ

پارامترهای ماشین‌کاری

چند لایه‌های الیافی-فلزی (FML) از خانواده‌های GLARE و CARALL به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و عملکرد مکانیکی مطلوب در صنایع پیشرفته‌ای مانند خودروسازی و هوافضا به‌طور گسترده استفاده می‌شوند، اما سوراخ‌کاری آن‌ها همچنان چالشی اساسی در تضمین کیفیت سطح و یکپارچگی سازه‌ای است. در این پژوهش، تحلیل چند عاملی الیاف برش نخورده و کیفیت سطح سوراخ در نمونه‌های GLARE و CARALL تحت شرایط کنترل شده سوراخ‌کاری مورد بررسی مقایسه‌ای قرار گرفت. برای این منظور، آزمایش‌ها بر پایه طرح عاملی کامل با سه سطح برای سرعت دورانی ۱۰۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۵۰۰ دور در دقیقه، نرخ پیشروی ۸، ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر در دقیقه و قطر ابزار ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های CARALL به‌طور معناداری مقدار الیاف برش نخورده کمتر و کیفیت سطح بالاتری نسبت به GLARE ارائه می‌دهند که به سفتی بالاتر، چسبندگی قوی‌تر الیاف-ماتریس و پایداری حرارتی بهتر الیاف کربن نسبت داده می‌شود. در GLARE، حساسیت بیشتری نسبت به تغییر نرخ پیشروی و قطر ابزار مشاهده شد، به‌طوری‌که افزایش نرخ پیشروی منجر به تشدید الیاف برش نخورده و زبری سطح گردید. تحلیل نیرو-زمان نشان داد که افزایش سرعت دورانی به کاهش نیرو و بهبود کیفیت سطح در هر دو سیستم منجر می‌شود، هرچند اثر آن در GLARE بارزتر بود. همچنین اثر قطر ابزار الگوی غیرخطی نشان داد؛ قطرهای کوچک‌تر باعث کاهش الیاف برش نخورده شدند اما در قطرهای بزرگ‌تر نیروی محوری و آسیب لایه‌ای افزایش یافت. نتایج بیانگر برتری نسبی CARALL در مقاومت در برابر الیاف برش نخورده و دستیابی به کیفیت سطح مطلوب است.

Experimental and statistical study of uncut fibers in the drilling of GLARE and CARALL Fiber-Metal Laminates

Ramin Beyranvand¹, Mehdi Ansari^{1*}, Alborz Mohebi², Mohammad Kashfi³

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

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 30 October 2025

Accepted: 7 May 2026

Keywords:

Fiber-Metal Laminates

Composite Drilling

Uncut Fibers

Hole Surface Quality

Machining Parameters

Abstract

Fiber-metal laminates (FMLs) of the GLARE and CARALL families are widely utilized in advanced industries such as automotive and aerospace due to their high strength-to-weight ratio and favorable mechanical performance. However, drilling these hybrid laminates remains a fundamental challenge in ensuring hole-surface quality and structural integrity. In this study, a multifactorial analysis of uncut fibers and hole-surface quality in GLARE and CARALL laminates was conducted under controlled drilling conditions. For this purpose, a full factorial experimental design was employed with three spindle speeds (1000, 1600, and 2500 rpm), three feed rates (8, 16, and 25 mm/min), and three tool diameters (3, 5, and 7 mm). The results indicated that CARALL samples exhibited significantly lower amounts of uncut fibers and superior hole-surface quality compared to GLARE, which is attributed to the higher stiffness, stronger fiber-matrix interfacial bonding, and improved thermal stability of carbon fibers. GLARE showed greater sensitivity to changes in feed rate and tool diameter, where increasing the feed rate intensified the formation of uncut fibers and increased surface roughness. Force-time analysis revealed that increasing spindle speed reduced thrust force and improved hole-surface quality in both systems, although the effect was more pronounced in GLARE. The influence of tool diameter demonstrated a nonlinear trend: smaller diameters reduced the presence of uncut fibers, whereas larger diameters led to increased thrust force and interlaminar damage. Overall, the findings confirm the superior resistance of CARALL to uncut-fiber formation and its ability to maintain higher hole quality.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Beyranvand R, Ansari M, Mohebi A, Kashfi M. Experimental and statistical study of uncut fibers in the drilling of GLARE and CARALL Fiber-Metal Laminates. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Jan 21;12(11):1-17. doi: 10.22034/ijme.2026.555124.2145 [In Persian]

۱- مقدمه

چند لایه‌های الیافی-فلزی (FML) به دلیل ترکیب مناسب، استحکام ویژه، مقاومت در برابر ضربه و شکل‌پذیری، به‌طور گسترده در صنعت هوافضا، به ویژه در بخش‌های ساختاری هواپیماهایی مانند ایرباس A380، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ایجاد سوراخ در این مواد، که اغلب برای اتصال پرچ و مونتاژ سازه‌ها ضروری است، به دلیل ناهمگونی مواد، فرایندی پیچیده و حساس است و می‌تواند منجر به آسیب‌هایی مانند جدایش در فصل مشترک فلز و کامپوزیت، افت کیفیت سطح و کاهش مقاومت خستگی شود. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که پارامترهای برش و هندسه مته نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان آسیب ایجاد شده دارند. بررسی میکروسکوپی این آسیب‌ها و پیش‌بینی وقوع جدایش، بهینه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری FML را ممکن می‌سازد و به بهبود عملکرد ساختاری سازه‌های هوافضایی کمک می‌کند [۱، ۲]. لایه‌چینی‌های الیافی-فلز به‌واسطه‌ی نسبت استحکام به وزن مطلوب، میرایی مناسب، مقاومت در برابر خستگی و ضربه، و نیز پایداری محیطی، در پوسته‌های بدنه‌ی هواپیما، پانل‌های بدنه و سازه‌های خودرویی به‌طور گسترده به کار گرفته می‌شوند [۳]. خانواده‌های متداول FML شامل GLARE (شیشه-پوکسی-آلومینیوم) و CARALL (کربن-پوکسی-آلومینیوم) هستند که با لایه‌های آلایژ آلومینیوم و لایه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف بافته شده یا تک‌جهت ساخته می‌شوند [۴-۶]. هرچند تولید این سازه‌ها غالباً به‌صورت نزدیک به شکل نهایی انجام می‌شود، تقریباً تمامی کاربردهای صنعتی نیازمند فرایندهای پس از ساخت مانند سوراخ‌کاری برای نصب اتصال‌دهنده‌های مکانیکی یا ابزاربندی هستند [۷، ۸]. کیفیت سوراخ به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی یکپارچگی سازه‌ای در FMLها شناخته می‌شود؛ پارامترهایی مانند هم‌محوری، بیضوی شدن، زبری، پلیسه، جدایش لایه‌ای، الیاف بریده نشده، ناپیوستگی در فصل مشترک فلز-پلیمر و آسیب‌های حرارتی ماتریس می‌توانند مستقیماً بر عملکرد مکانیکی اتصال، از جمله استحکام باقیمانده، رفتار خستگی و قابلیت اطمینان مجموعه تأثیر بگذارند [۴-۶، ۹، ۱۰].

از منظر مکانیک ماشین‌کاری، سوراخ‌کاری FMLها یک مسئله چندفیزیکی و چندماده‌ای است؛ تغییرات ناگهانی مدول الاستیسیته، استحکام برشی و هدایت حرارتی بین لایه فلزی و ماتریس پلیمری لایه کامپوزیتی باعث ایجاد قله‌های نیرو، وارونگی جهت تنش برشی در سطح خروجی سوراخ (سمت ابزار) و تمرکز تنش در فصل مشترک می‌شود [۹-۱۱]. پیامدهای عملی این ناهمگنی‌ها شامل افزایش نیروی محوری، برداشت ناپایدار ماده در ماتریس پلیمری، برون‌کشی یا کشیدگی الیاف، ایجاد ترک‌های میان‌لایه‌ای و تشدید پلیسه در لایه آلومینیومی سطح خروجی سوراخ است [۱۰-۱۳]. همچنین، اندازه‌گیری‌های محلی دما در مرز آلومینیوم-الیاف شیشه نشان می‌دهد که پروفایل دمایی موضعی نقش تعیین‌کننده‌ای در گذار مکانیزم خرابی دارد؛ یعنی با تغییر سرعت دورانی و نرخ پیشروی می‌توان از برش پاکیزه به کنده‌شدن فاز پلیمری لایه کامپوزیتی و جدایش بین لایه‌ها منتقل شد، که این موضوع برای تعیین پنجره فرایندی کم‌آسیب اهمیت دارد [۶]. مقایسه روش‌های متداول سوراخ‌کاری با روش‌های جایگزین، مانند ماشینکاری مارپیچی^۱، نشان می‌دهد که با کاهش ضخامت براده و بهبود تخلیه، می‌توان نیروی محوری و دمای بیشینه فرایند را کاهش داده و در نتیجه کیفیت دیواره سوراخ و میزان جدایش بین لایه‌ها را بهبود بخشید [۵].

پژوهش‌های اخیر بر سه متغیر فرایندی کلیدی تمرکز کرده‌اند؛ سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار. در محدوده‌های عملی متعارف، افزایش سرعت دورانی معمولاً منجر به کاهش نیروی محوری و کاهش آسیب جدایش الیاف می‌شود که این اثر تا حدی ناشی از تغییرات اصطکاک و انتقال حرارت است؛ اما اگر سرعت موجب رسیدن دمای موضعی به آستانه نرم‌شدن فاز پلیمری لایه کامپوزیتی شود، آسیب‌های حرارتی تشدید خواهد شد [۵، ۹، ۱۱، ۱۲]. به‌علاوه، افزایش نرخ پیشروی معمولاً با افزایش نرخ برداشت ماده همراه است و به افزایش نیروی محوری و تشدید پدیده‌هایی مانند پارگی الیاف و افزایش زبری دیواره می‌انجامد؛ هرچند در برخی سیستم‌های بافته شده رفتار غیرخطی نیز گزارش شده است که ناشی از تغییر مکانیزم برش و کنده‌شدن بافت است [۱۱، ۱۳، ۱۴]. اثر قطر مته نیز دوگانه است: قطرهای کوچک نیروی متمرکز کوچک‌تری ایجاد می‌کنند و براده نازک‌تری تولید می‌شود، درحالی‌که افزایش قطر به دلیل افزایش سطح تماس و نرخ برداشت می‌تواند نیروی محوری و آسیب فصل مشترک را افزایش دهد [۳، ۱۳، ۱۵، ۱۶]. علاوه بر این سه پارامتر، هندسه مته، صفحه پشتیبان و استراتژی‌های خنک‌کاری به‌طور قابل‌توجهی روی جدایش الیاف و کیفیت سوراخ تأثیر می‌گذارند [۱۰، ۱۳، ۱۷].

^۱ Helical Milling

در مطالعات تجربی امروزی، ارزیابی کیفیت سوراخ‌ها معمولاً با مجموعه‌ای از شاخص‌ها شامل زبری سطح، بیضی‌شدن، درصد جدایش یا طول الیاف برون‌کشیده، پلیسه، و تخریب فصل مشترک همراه با اندازه‌گیری نیروهای محوری و گاهی پایش دمای موضعی انجام شده است [۵]. در این میان، وجود الیاف برش‌خورده و بیرون‌کشیدگی الیاف نیز به‌عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت سطح سوراخ، به‌ویژه در ماشین‌کاری مواد چندلایه و کامپوزیتی، گزارش شده است [۱۸، ۱۹]. برای CARALL، گزارش‌ها نشان می‌دهند که روش‌هایی مانند ماشین‌کاری مارپیچی می‌تواند در شرایط معین نیروی محوری و دمای بیشینه را کاهش داده و در نتیجه دیواره صاف‌تر و آسیب خروجی کمتر باشد [۵]. در نمونه‌های GLARE، داده‌های اندازه‌گیری شده دما و نیرو همبستگی مستقیمی با شدت آسیب خروجی نشان داده‌اند که بر اهمیت کنترل حرارتی هنگام سوراخ‌کاری تأکید می‌کند [۶]. در مطالعات مربوط به GFRP-CFRP مستقل از فلز، تحلیل‌های آماری برای تعیین اثرات سرعت-پیشروی-قطر و یافتن نواحی عملیاتی کم‌خطر به‌طور گسترده به‌کار رفته‌اند [۹، ۱۱، ۱۳].

محققان داخلی نیز در چند سال اخیر به موضوع سوراخ‌کاری کامپوزیت و پارامترهای ماشین‌کاری پرداخته و نتایج کاربردی ارائه کرده است. پژوهش‌های منتشر شده در این حوزه نشان داده‌اند که بهینه‌سازی پارامترها و هندسه ابزار، و نیز بهره‌گیری از روش‌های نوین مانند سوراخ‌کاری فراصوتی، می‌تواند باعث کاهش زبری و کاهش جدایش نسبت به روش‌های متعارف شود [۱۷، ۲۰، ۲۱]. این مطالعات داخلی، هرچند اغلب بر کامپوزیت‌های پلیمری خالص متمرکز بوده‌اند، شواهد و نتایجی فراهم می‌کنند که برای تحلیل و تنظیم پنجره فرایندی سوراخ‌کاری در FMLها نیز مفید و قابل انتقال است [۲۰، ۲۱].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، نیاز به مطالعات مقایسه‌ای سیستماتیک میان انواع FMLها به‌ویژه مقایسه مستقیم GLARE و CARALL تحت شرایط مشابه سوراخ‌کاری همچنان محسوس است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از طراحی آزمایش عاملی کامل شامل سه سطح برای هر یک از پارامترهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته، و با کنترل دقیق مشخصات مواد و الیاف شامل الیاف شیشه و کربن به بررسی و مقایسه کیفیت سوراخ‌کاری و میزان جدایش بین الیاف و لایه آلومینیومی در دو نوع FML شامل شیشه-اپوکسی-آلومینیوم (GLARE) و کربن-اپوکسی-آلومینیوم (CARALL) می‌پردازد. ویژگی تمایز این مطالعه شامل گزارش هم‌زمان شواهد میکروسکوپی از جدایش بین الیاف و فلز و نقشه‌های نیرو-زمان در طول فرایند سوراخ‌کاری است که امکان تحلیل دقیق مکانیزم‌های خرابی و تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده می‌تواند به ارائه راهنمای عملیاتی پارامتری برای کاهش آسیب و بهبود کیفیت سوراخ‌ها در کاربردهای صنعتی کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

با توجه به خواص مکانیکی مطلوب و کاربرد گسترده آلومینیوم ۲۰۲۴ در صنایع، در این پژوهش از این سری آلومینیوم برای ساخت ورق‌های فلزی الیافی استفاده گردید. به همین منظور ورق‌های آلومینیوم با ابعاد ۸۰×۸۰ و با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر تهیه گردید. برای اطمینان از نوع آلیاژ آلومینیوم و انطباق آن با استاندارد ASTM B211، آزمایش تجزیه شیمیایی بر روی ورق آلومینیوم انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق نتایج، ترکیب شیمیایی آلیاژ با استاندارد مذکور سازگار بوده و تایید می‌کند که آلیاژ بکار رفته از نوع ۲۰۲۴ می‌باشد. آماده‌سازی سطح آلومینیوم مطابق استاندارد ASTM D2651 و به صورت فیزیکی-شیمیایی انجام شد؛ بدین ترتیب که سطح ابتدا با استون تمیزکاری، سپس با کاغذ سمباده شماره ۸۰ زبر شد و در نهایت شست و شوی نهایی انجام گرفت. لایه کامپوزیتی شامل شش لایه الیاف بافته شده بوده و ضخامت آن ۰/۷۲ میلی‌متر و ضخامت کل ساختار چندلایه حدود ۲/۳۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

جدول ۱ نتایج آنالیز آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده

عنصر	Cr	Ti	Zn	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Al
درصد	۰/۰۲	۰/۰۵۶	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۳۷	۰/۷	۱/۳۰	۴/۵۸	پایه

نمونه‌های ساخته‌شده دارای چیدمان متقارن با هسته کامپوزیتی بین دو ورق آلومینیومی هستند و مطابق با کدبندی FMLها به صورت GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8 تعریف می‌شوند. همچنین کسر حجمی الیاف در لایه کامپوزیتی و کسر حجمی فلز در هر دو نوع کامپوزیت محاسبه شد و مقدار آن به ترتیب حدود $5 \pm 5\%$ و $5 \pm 6\%$ درصد به‌دست آمد. این مقدار برای تمامی نمونه‌ها ثابت

نگه داشته شد تا امکان مقایسه‌ی مستقیم خواص مکانیکی فراهم گردد. برای ساخت لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف، از الیاف شیشه و کربن بافته شده به صورت رول، با ابعاد 3×1 متر و چگالی سطحی 200 گرم بر مترمربع استفاده گردید. این الیاف دارای پوشش سطحی سازگار با رزین اپوکسی بوده و اصلاح سطحی اضافی روی آن‌ها انجام نشده است. اطلاعات دقیق مربوط به سازنده، tow size و گروه‌های عاملی سطح الیاف توسط تأمین‌کننده ارائه نشده است؛ با این حال، با توجه به تجاری و استاندارد بودن الیاف، رفتار آن‌ها معادل الیاف متداول مورد استفاده در سامانه‌های اپوکسی در نظر گرفته شده است. برای ساخت ورق‌های فلزی-الیافی از رزین اپوکسی آرالدایت ۵۰۵۲ و آرادور ۵۰۵۲ شرکت هانتسمن استفاده گردید. این رزین از خانواده اپوکسی‌ها با کارایی بالا می‌باشد که عمدتاً در تولید قطعات هوایی با خواص مکانیکی بالا کاربرد دارد. در جدول ۲ خصوصیات رزین و سخت‌کننده نشان داده شده است. مطابق با پیشنهاد تولیدکننده، رزین اپوکسی و سخت‌کننده به ترتیب با نسبت حجمی 100 به 47 یکدیگر ترکیب شدند. تمامی نمونه‌ها به روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند. بدین صورت که در ابتدا رزین اپوکسی به سطح ورق آلومینیوم که بر اساس استاندارد ASTM D2651 آماده‌سازی سطح شده بود، آغشته گردید. سپس شش لایه الیاف روی لایه آلومینیومی قرار داده شد. در نهایت، سطح لایه فلزی دوم نیز توسط رزین اپوکسی، آغشته و بر روی آخرین لایه الیاف قرار داده شد. در پایان، نمونه ساخته شده بین دو صفحه تخت دستگاه سنتام مدل SPH-500B تحت شرایط پرس داغ قرار گرفت. در شکل ۱ تصویر نمونه ساخته شده و قرارگیری نمونه در دستگاه پرس نشان داده شده است. پیش از شروع ساخت، دقت سیستم‌های کنترل دما، فشار و زمان بر اساس گواهی‌های کالیبراسیون دوره‌ای آزمایشگاه کنترل کیفیت بررسی و تأیید شد. صحت سنسورهای دما و فشار با تجهیزات مرجع آزمایشگاه (کالیبراتور دما و گیج فشار مرجع) کنترل شده است. بازه خطای دما و فشار مطابق نتایج کالیبراسیون در محدوده قابل قبول استاندارد سازنده قرار داشته و انحراف معنی‌داری گزارش نشده است. یکنواختی دما و فشار صفحات نیز با آزمون‌های روتین آزمایشگاه تأیید شده است. این سطح از کنترل تضمین می‌کند که تمامی نمونه‌ها تحت شرایط فرایندی تکرارپذیر و یکسان ساخته شده‌اند. در ابتدا، نمونه تولید شده با آهنگ 1 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از دمای محیط تا 40 درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود تا با کاهش تدریجی گرانشی رزین اپوکسی، امکان نفوذ اولیه آن در الیاف فراهم گردد. سپس، به مدت یک ساعت دما در 40 درجه سانتی‌گراد ثابت می‌ماند تا با حفظ گرانشی پایین رزین، امکان نفوذ عمیق‌تر آن در ساختار الیاف فراهم گردد. در مرحله سوم، دما بار دیگر با همان آهنگ تا 60 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد تا جریان رزین در نمونه تولیدی بهینه شده و الیاف کاملاً با رزین اشباع شوند. سرانجام، در مرحله پایانی که 140 دقیقه دما در 60 درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته می‌شود، رزین اپوکسی به طور کامل پخت می‌گردد. شایان ذکر است که اعمال فشار یکنواخت حین فرایند گرم‌شدن در دستگاه پرس داغ، ضمن تضمین توزیع مناسب رزین در میان لایه‌ها، خلل و فرج و حباب‌های هوای محبوس در نمونه را به حداقل می‌رساند.

جدول ۲ خصوصیات رزین و سخت‌کننده در دمای 25 درجه سلسیوس

مقدار	خصوصیت	
۱/۱۷	چگالی (g/cm^3)	رزین
۱۰۰۰-۱۵۰۰	گرانروی (cps)	
۰/۹۴	چگالی (g/cm^3)	سخت‌کننده
۴۰-۶۰	گرانروی (cps)	



(ب)



(الف)

شکل ۱ الف) نمونه قالب‌گیری شده و ب) نمونه قرار داده شده در دستگاه پرس

۲-۱- روش تحقیق و طراحی آزمایش

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر سه عامل کلیدی در فرایند سوراخکاری شامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته بر الیاف برش خورده و کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده بود. برای این منظور، از دستگاه فرز برای سوراخکاری نمونه استفاده شد. سرعت دورانی و نرخ پیشروی دستگاه مطابق برنامه نگهداری دوره‌ای کنترل و با تجهیزات مرجع آزمایشگاه تطبیق داده شد. برای انجام آزمایش‌ها سرعت‌های دورانی ۱۰۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۵۰۰ دور در دقیقه، نرخ‌های پیشروی ۸، ۱۶ و ۲۵ میلی‌متر در دقیقه و مته‌های از جنس فولاد تندبر با قطرهای ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. در جدول ۳ پارامترهای ورودی سوراخکاری نشان داده شده است. در طول فرایند سوراخکاری، نیروی سوراخکاری با استفاده از نیروسنج مدل DACELL UU-100 Kg اندازه‌گیری شد که دارای گواهی کالیبراسیون معتبر داخلی بوده و صحت آن پیش از انجام آزمایش‌ها با وزنه‌های استاندارد کلاس M1 کنترل شده است. خطای اندازه‌گیری در محدوده گزارش شده سازنده قرار داشته است. تا تأثیر پارامترهای سوراخکاری بر نیروی سوراخکاری نیز مورد ارزیابی قرار بگیرد. تصویر نمونه در حین انجام سوراخکاری و اندازه‌گیری نیروی سوراخکاری با استفاده از نیروسنج در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از انجام سوراخکاری، عکس‌های دقیقی از سوراخ‌های ایجاد شده با استفاده از میکروسکوپ نوری NSIZE-200 ثبت گردید که کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده و الیاف برش خورده را به خوبی نشان می‌دهند. وضوح اندازه‌گیری و سیستم فوکوس دستگاه در ابتدای هر جلسه آزمون با اسلاید مرجع کالیبره کنترل شد. همچنین، برای طراحی آزمایش از روش طراحی آزمایش عاملی کامل استفاده شد. در این طرح آزمایشی، سه پارامتر ورودی شامل سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی ابزار و قطر مته مورد بررسی قرار گرفتند و هر یک از این عوامل در سه سطح مختلف مطالعه شدند، به طوری که در مجموع ۲۷ آزمایش برای نمونه GLARE 2/1-0.8 و ۲۷ آزمایش برای نمونه CARALL 2/1-0.8 انجام شد. در جدول ۴ طراحی آزمایش انجام شده نشان داده شده است. در این پژوهش برای بررسی تأثیر عوامل سوراخکاری بر نیروی سوراخکاری، نمودارهای مربوط به تأثیر عوامل ورودی شامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته بر نیروی سوراخکاری رسم شده‌اند.

جدول ۳ پارامترهای فرایند سوراخکاری

سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر ابزار (mm)
۱۰۰۰، ۱۶۰۰، ۲۵۰۰	۸، ۱۶، ۲۵	۳، ۵، ۷



شکل ۲ نمونه در حین انجام سوراخکاری و ثبت نیرو با استفاده از نیروسنج

جدول ۴ طراحی آزمایش انجام شده

شماره آزمایش	سرعت دورانی (mm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)
۱	۲۵۰۰	۱۶	۵
۲	۱۰۰۰	۸	۵
۳	۲۵۰۰	۱۶	۷
۴	۲۵۰۰	۲۵	۷
۵	۲۵۰۰	۸	۷
۶	۱۰۰۰	۱۶	۷
۷	۱۰۰۰	۲۵	۳
۸	۱۰۰۰	۸	۳
۹	۱۶۰۰	۱۶	۷
۱۰	۲۵۰۰	۸	۳
۱۱	۲۵۰۰	۲۵	۵
۱۲	۱۰۰۰	۱۶	۵
۱۳	۲۵۰۰	۱۶	۳
۱۴	۲۵۰۰	۸	۵
۱۵	۱۶۰۰	۲۵	۵
۱۶	۱۶۰۰	۲۵	۳
۱۷	۱۶۰۰	۸	۵
۱۸	۱۰۰۰	۲۵	۷
۱۹	۱۶۰۰	۸	۳
۲۰	۱۶۰۰	۱۶	۳
۲۱	۱۰۰۰	۲۵	۵
۲۲	۲۵۰۰	۲۵	۳
۲۳	۱۶۰۰	۸	۷
۲۴	۱۶۰۰	۱۶	۵
۲۵	۱۰۰۰	۸	۷
۲۶	۱۶۰۰	۲۵	۷
۲۷	۱۰۰	۱۶	۳

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الیاف برش نخورده و کیفیت سطح سوراخ‌ها

به منظور ارزیابی اثر پارامترهای فرایند بر الیاف برش نخورده، مقایسه‌ای بین شرایط حداقل و حداکثر سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته انجام شد. این نتایج در جدول ۵ برای نمونه GLARE 2/1-0.8 و در جدول ۶ برای نمونه CARALL 2/1-0.8 ارائه شده است. همچنین تصاویر مرتبط با کمترین و بیشترین جدایش در شکل‌های ۳ و ۴ و تصاویری از الیاف برش نخورده برای نمونه GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8 در شکل ۵ نمایش داده شده است. مطابق داده‌های جدول، میزان الیاف برش نخورده در نمونه GLARE 2/1-0.8 به‌طور متوسط حدود ۰/۲۵ mm تا ۰/۶۷ mm متغیر بوده است، در حالی‌که در نمونه CARALL 2/1-0.8 این مقدار در بازه ۰/۰۵ mm تا ۰/۴۰ mm قرار دارد. این اختلاف بیانگر آن است که نمونه‌های CARALL 2/1-0.8 به‌طور معناداری مقاومت بیشتری در برابر الیاف برش نخورده دارند. علت اصلی این رفتار را می‌توان به مدول بالاتر و استحکام کششی زیاد الیاف کربن، چسبندگی

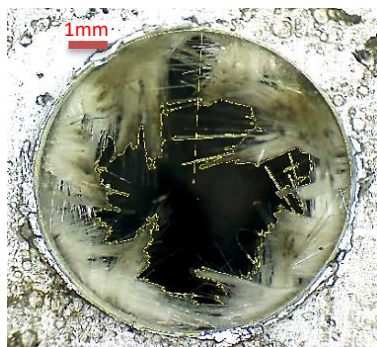
قوی‌تر الیاف-ماتریس و ساختار میکروسکوپی همگن‌تر نسبت داد. چنین ویژگی‌هایی موجب می‌شوند تا لایه‌ها در برابر تنش‌های محوری و برشی ناشی از فرایند سوراخکاری مقاومت بیشتری نشان دهند و در نتیجه میزان الیاف برش نخورده کاهش یابد. بررسی کیفی سطح سوراخ‌ها (شکل‌های ۶ و ۷) نشان داد که کیفیت سطح نیز رابطه نزدیکی با شرایط فرایند دارد. به طور مشخص، انتخاب سرعت دورانی پایین (۱۰۰۰ rpm)، نرخ پیشروی کم (۸ mm/min) و قطر کوچک مته (۳ mm) منجر به تولید سوراخ‌هایی با سطح صاف‌تر، جدایش حداقل و لبه‌های تمیزتر شد. در مقابل، در شرایطی با سرعت دورانی بالا (۲۵۰۰ rpm)، نرخ پیشروی زیاد (۲۵ mm/min) و قطر بزرگ مته (۷ mm) کیفیت سطح به‌طور قابل توجهی کاهش یافت و آثار الیاف برش نخورده و زبری لبه‌ها تشدید گردید. در مقایسه بین دو نوع نمونه، سوراخ‌های ایجادشده در نمونه CARALL 2/1-0.8 به طور واضح کیفیت سطح بهتری نسبت به نمونه GLARE 2/1-0.8 داشتند. این موضوع ناشی از پایداری حرارتی بالاتر الیاف کربن، کاهش تولید حرارت موضعی و مقاومت بالاتر در برابر ریزترک‌ها است. در نتیجه، ساختار CARALL 2/1-0.8 در برابر تغییرات حرارتی و مکانیکی فرایند پایداری بیشتری داشته و میزان الیاف برش نخورده در این نمونه کمتر است.

جدول ۵ میزان الیاف برش نخورده برای نمونه GLARE 2/1-0.8 در حالت کمترین و بیشترین سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر مته

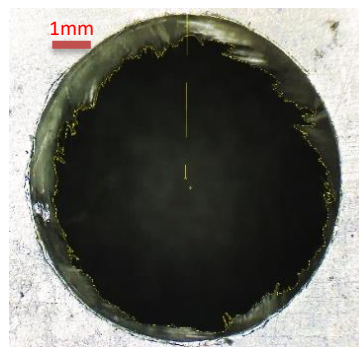
شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)	فاکتور الیاف برش نخورده
۱			۳	۰/۴۳۹
۲	۱۰۰۰	۸	۵	۰/۵۰۳
۳			۷	۰/۶۷۴
۴			۳	۰/۴۷۲
۵	۲۵۰۰	۲۵	۵	۰/۵۰۲
۶			۷	۰/۲۵۶

جدول ۶ میزان الیاف برش نخورده برای نمونه CARALL 2/1-0.8 در حالت کمترین و بیشترین سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر مته

شماره آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)	فاکتور الیاف برش نخورده
۱			۳	۰/۰۴۹
۲	۱۰۰۰	۸	۵	۰/۲۸۴
۳			۷	۰/۳۷۵
۴			۳	۰/۳۲۱
۵	۲۵۰۰	۲۵	۵	۰/۲۸۲
۶			۷	۰/۳۹۸

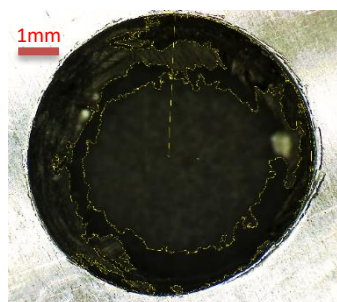


(ب)

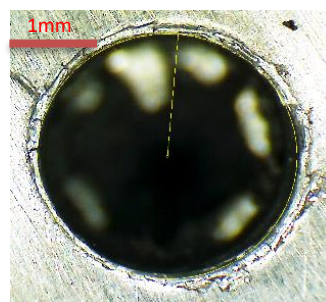


(الف)

شکل ۳ الیاف برش نخورده برای نمونه GLARE 2/1-0.8 (الف) کمترین مقدار الیاف برش نخورده (سرعت دورانی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲۵ میلی متر بر دقیقه و قطر ابزار ۷ میلی متر؛ ب) بیشترین مقدار الیاف برش نخورده (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۸ میلی متر بر دقیقه و قطر ابزار ۷ میلی متر)



(ب)

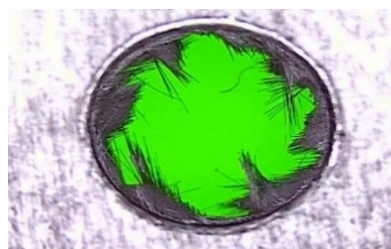


(الف)

شکل ۴ الیاف برش نخورده برای نمونه CARALL 2/1-0.8 (الف) کمترین مقدار الیاف برش نخورده (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۸ میلی متر بر دقیقه و قطر ابزار ۳ میلی متر؛ (ب) بیشترین مقدار الیاف برش نخورده (سرعت دورانی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲۵ میلی متر بر دقیقه و قطر ابزار ۷ میلی متر)

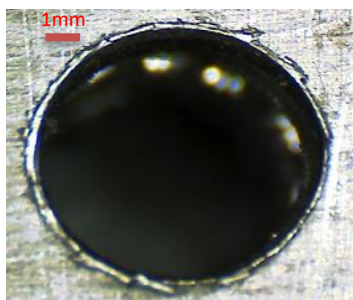


(ب)

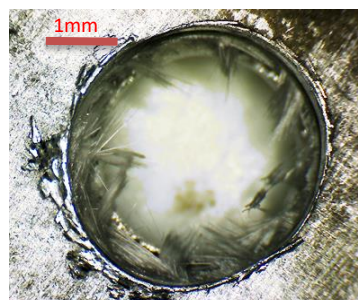


(الف)

شکل ۵ تصویر الیاف برش نخورده برای (الف) نمونه GLARE 2/1-0.8 و (ب) نمونه CARALL 2/1-0.8



(ب)

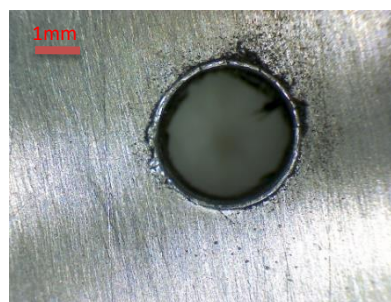


(الف)

شکل ۶ کیفیت سطح سوراخ ها برای نمونه GLARE 2/1-0.8 در سرعت های دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته متفاوت (الف) کمترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۸ میلی متر بر دقیقه و قطر مته ۳ میلی متر؛ (ب) بیشترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته (سرعت دورانی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲۵ میلی متر بر دقیقه و قطر مته ۷ میلی متر)



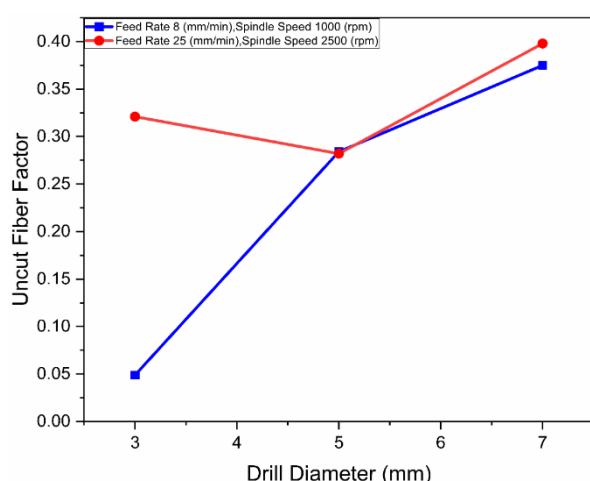
(ب)



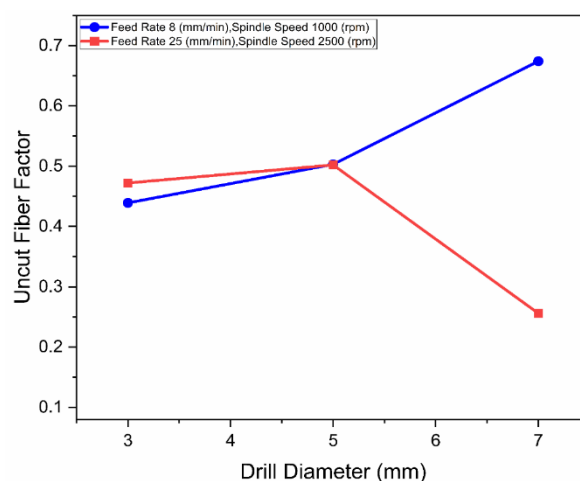
(الف)

شکل ۷ کیفیت سطح سوراخ ها برای نمونه CARALL 2/1-0.8 در سرعت های دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته متفاوت (الف) کمترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته (سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۸ میلی متر بر دقیقه و قطر مته ۳ میلی متر؛ (ب) بیشترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته (سرعت دورانی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲۵ میلی متر بر دقیقه و قطر مته ۷ میلی متر)

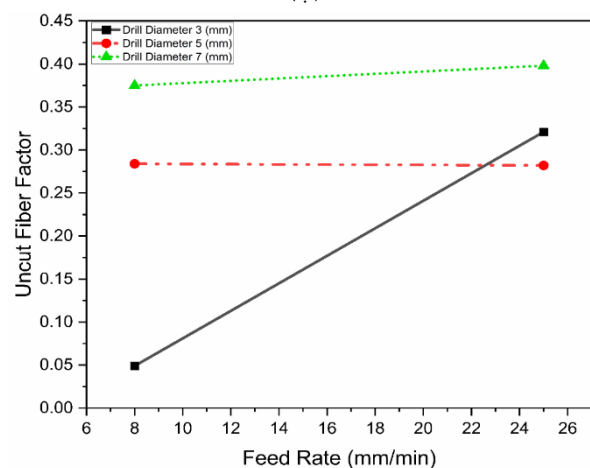
در شکل ۸ نمودارهای مربوط به میزان الیاف برش نخورده بر حسب پارامترهای مختلف سوراخ‌کاری ارائه شده است. همان‌طور که شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، افزایش قطر مته در نمونه GLARE 2/1-0.8 موجب افزایش مقدار الیاف برش نخورده از حدود ۰/۴۳۹ میلی‌متر در سرعت‌های پایین (۸ mm/min و ۱۰۰۰ rpm) شد، اما در سرعت‌های بالاتر (۲۵ mm/min و ۲۵۰۰ rpm) قطر ۷ میلی‌متر کاهش چشمگیری در میزان الیاف برش نخورده تا ۰/۲۵۶ میلی‌متر نشان داد که بیانگر نقش مثبت سرعت برشی در کاهش صدمات لایه GLARE 2/1-0.8 است. در شکل ۸-ب که مربوط به نمونه CARALL 2/1-0.8 است، افزایش سرعت در قطر ۳ میلی‌متر موجب جهش مقدار الیاف برش نخورده از ۰/۴۹ به ۰/۳۲۱ میلی‌متر شد، در حالی که در قطر ۵ میلی‌متر تغییر محسوسی مشاهده نگردید و در قطر ۷ میلی‌متر تنها افزایش خفیفی از ۰/۳۷۵ به ۰/۳۹۸ میلی‌متر رخ داد. شکل ۸-پ اثر سرعت پیشروی بر نمونه GLARE 2/1-0.8 را نشان می‌دهد که در آن افزایش سرعت پیشروی به‌ویژه در قطر ۷ میلی‌متر باعث کاهش میزان الیاف برش نخورده شد، در حالی که در شکل ۸-ت برای نمونه CARALL 2/1-0.8 افزایش سرعت پیشروی، خصوصاً در قطر ۳ میلی‌متر، باعث افزایش محسوس مقدار الیاف برش نخورده گردید. همچنین در شکل ۸-ث مشاهده می‌شود که افزایش سرعت دورانی در نمونه GLARE 2/1-0.8 همراه با سرعت پیشروی بالاتر به کاهش میزان الیاف برش نخورده و بهبود کیفیت سوراخ‌کاری انجامید، در حالی که در شکل ۸-ج برای نمونه CARALL 2/1-0.8 افزایش سرعت دورانی به‌ویژه در قطر کوچک‌تر موجب افزایش میزان الیاف برش نخورده شده و نشان‌دهنده حساسیت بیشتر الیاف کربن به تنش‌های حرارتی ناشی از سرعت برشی بالا است. این تفاوت رفتار به ساختار و خواص مکانیکی و حرارتی دو نوع الیاف بازمی‌گردد؛ به طوری که الیاف شیشه به دلیل چقرمگی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر ترک‌خوردگی در سرعت‌های بالا دچار کاهش میزان الیاف برش نخورده می‌شوند، در حالی که الیاف کربن به علت تردی بیشتر و هدایت حرارتی بالاتر در سرعت‌های زیاد مستعد افزایش تنش‌های حرارتی و گسترش مقدار الیاف برش نخورده هستند.



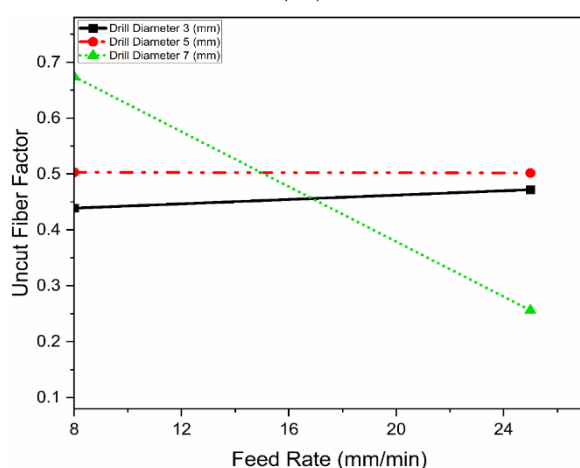
(ب)



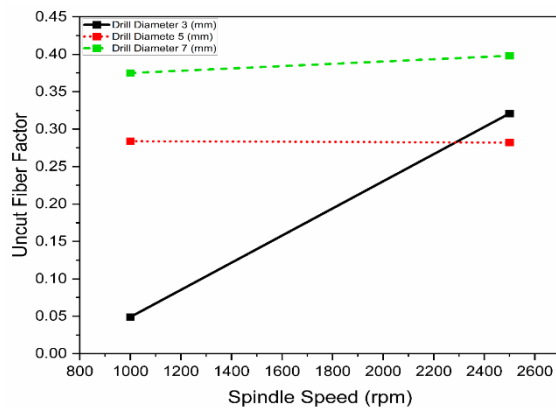
(الف)



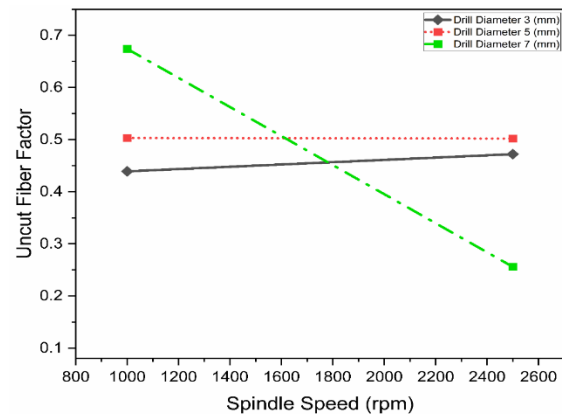
(ت)



(پ)



(ج)

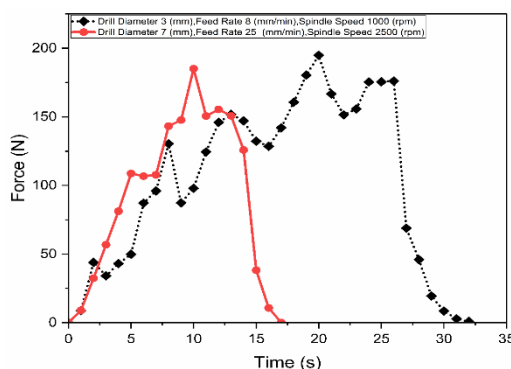


(ث)

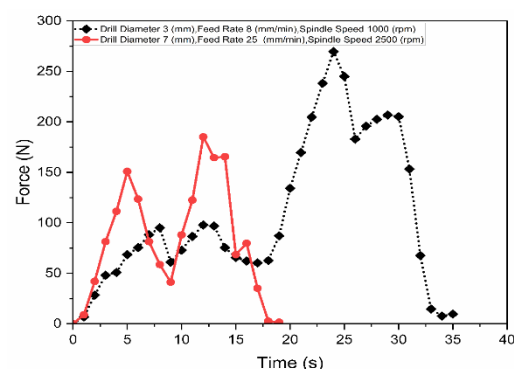
شکل ۸ تاثیر قطر مته بر الیاف برش نخورده در شرایط مختلف سوراخکاری برای الیاف (الف) نمونه GLARE 2/1-0.8 و (ب) نمونه CARALL 2/1-0.8، تاثیر افزایش سرعت پیشروی بر الیاف برش نخورده در قطر مته های مختلف برای (پ) نمونه GLARE 2/1-0.8 و (ت) نمونه CARALL 2/1-0.8 و تاثیر افزایش سرعت دورانی بر الیاف برش نخورده در قطر مته های مختلف برای (ث) نمونه GLARE 2/1-0.8 و (ج) نمونه CARALL 2/1-0.8

۳-۲- نیرو

نتایج بدست آمده میانگین نیرو در جدول ۷ نشان داده شده است، همچنین شکل ۹ تغییرات نیروی محوری بر حسب زمان را در فرایند سوراخکاری لایه‌چینی‌های GLARE 2/1-0.8 (الف) و CARALL 2/1-0.8 (ب) تحت شرایط حداقلی و حداکثری پارامترهای ماشین‌کاری نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۹-الف مشخص است، در حالت کمترین سرعت دورانی (1000 rpm)، نرخ پیشروی پایین (8 mm/min) و قطر مته کوچک (3 mm)، فرایند سوراخکاری زمان‌برتر بوده و افزایش تدریجی نیرو تا رسیدن به بیشینه مقدار خود مشاهده می‌شود. این روند به دلیل اصطکاک بیشتر میان ابزار و سطح تماس و نیز تجمع حرارتی در مقیاس موضعی رخ می‌دهد که سبب افزایش تدریجی مقاومت ماده در برابر نفوذ ابزار می‌گردد. در مقابل، در حالت بیشترین سرعت دورانی (2500 rpm)، نرخ پیشروی بالا (25 mm/min) و قطر مته بزرگ (7 mm)، زمان فرایند به طور قابل توجهی کوتاه‌تر شده و نیروهای وارد بر ابزار در مقایسه با حالت قبل کاهش یافته است. این رفتار نشان‌دهنده نقش مثبت سرعت دورانی بالا در کاهش نیروهای برشی و تسهیل فرایند خروج براده است، هرچند نرخ پیشروی و قطر بزرگ‌تر مته می‌تواند به افزایش ناگهانی نیروهای محوری در برخی مقاطع منجر شود. در نمونه‌های GLARE 2/1-0.8، تفاوت نیروی محوری میان شرایط حداقلی و حداکثری بسیار محسوس‌تر است، به طوری که افزایش سرعت دورانی اثر غالبی در کاهش نیروها ایفا کرده و فرایند را کارآتر ساخته است. با این حال، در نمونه‌های CARALL 2/1-0.8 روند متفاوتی مشاهده می‌شود. در شکل ۹-ب (شرایط حداقلی) نیروهای محوری به طور پیوسته در سطح بالاتری نسبت به نمونه GLARE 2/1-0.8 باقی می‌مانند و در شکل ۹-ب (شرایط حداکثری) اگرچه مقدار نیرو کاهش می‌یابد، اما اختلاف آن با حالت حداقلی بسیار کمتر از نمونه GLARE 2/1-0.8 است. این امر ناشی از سفتی بالاتر الیاف کربن، مدول الاستیسیته زیاد و رفتار شکننده‌تر آن‌هاست که موجب می‌شود حتی در شرایط بهینه ماشین‌کاری نیز نیروهای محوری به نسبت بالاتر باقی بمانند.



(ب)



(الف)

شکل ۹ نمودار های نیرو-زمان (الف) کمترین و بیشترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته برای نمونه GLARE 2/1-0.8 و (ب) کمترین و بیشترین سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته برای نمونه CARALL 2/1-0.8

جدول ۷ نتایج بدست آمده برای نیرو در نمونه GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8

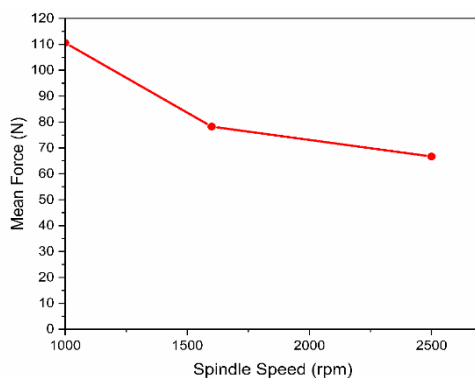
شماره آزمایش	سرعت دورانی (mm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)	میانگین نیروی سوراخکاری نمونه شیشه (N)	میانگین نیروی سوراخکاری نمونه کربن (N)
۱	۲۵۰۰	۱۶	۵	۴۶/۱۱	۶۴/۷۱۴
۲	۱۰۰۰	۸	۵	۷۷/۶۱۹	۶۹/۰۵۸
۳	۲۵۰۰	۱۶	۷	۵۸/۸۴۹	۷۰/۱۹۷
۴	۲۵۰۰	۲۵	۷	۸۰/۶۱	۸۹/۴۳۶
۵	۲۵۰۰	۸	۷	۶۳/۱۴۵	۳۸/۵۳
۶	۱۰۰۰	۱۶	۷	۱۲۵/۸۵۸	۱۵۱/۶۴
۷	۱۰۰۰	۲۵	۳	۹۶/۶۶۴	۹۶/۵۳۶
۸	۱۰۰۰	۸	۳	۱۰۵/۴۷	۱۰۱/۰۱۸
۹	۱۶۰۰	۱۶	۷	۸۷/۸۲۸	۹۷/۳۶
۱۰	۲۵۰۰	۸	۳	۶۶/۹۸۹	۷۰/۰۳۹
۱۱	۲۵۰۰	۲۵	۵	۵۳/۵۸۳	۶۲/۲۶۲
۱۲	۱۰۰۰	۱۶	۵	۸۴/۸۰۷	۸۴/۱۵
۱۳	۲۵۰۰	۱۶	۳	۵۴/۱۳۲	۷۸/۹۵۳
۱۴	۲۵۰۰	۸	۵	۵۲/۷۵۹	۵۹/۲۶۹
۱۵	۱۶۰۰	۲۵	۵	۶۷/۵۴۸	۸۰/۸۰۶
۱۶	۱۶۰۰	۲۵	۳	۸۰/۶۳	۷۰/۹۳۱
۱۷	۱۶۰۰	۸	۵	۵۹/۰۷۵	۶۰/۵۰۷
۱۸	۱۰۰۰	۲۵	۷	۱۱۱/۹۶۲	۱۶۵/۲۷۱
۱۹	۱۶۰۰	۸	۳	۱۰۶/۳۴۳	۷۳/۳۱۴
۲۰	۱۶۰۰	۱۶	۳	۸۱/۷۰۹	۷۲/۰۸۸
۲۱	۱۰۰۰	۲۵	۵	۷۷/۶۸۸	۱۰۸/۹۱۲
۲۲	۲۵۰۰	۲۵	۳	۵۹/۵۶۵	۶۶/۸۴۲
۲۳	۱۶۰۰	۸	۷	۱۰۷/۲۸۴	۴۷/۷۵۸
۲۴	۱۶۰۰	۱۶	۵	۵۸/۲۷۱	۹۷/۲۴۲
۲۵	۱۰۰۰	۸	۷	۱۰۰/۵۰۸	۹۹/۱۱۵
۲۶	۱۶۰۰	۲۵	۷	۹۰/۱۲۳	۱۰۴/۲۲۵
۲۷	۱۰۰	۱۶	۳	۹۶/۸۱۱	۱۱۹/۶۲۱

۳-۲-۱- اثر سرعت دورانی بر نیروی سوراخکاری

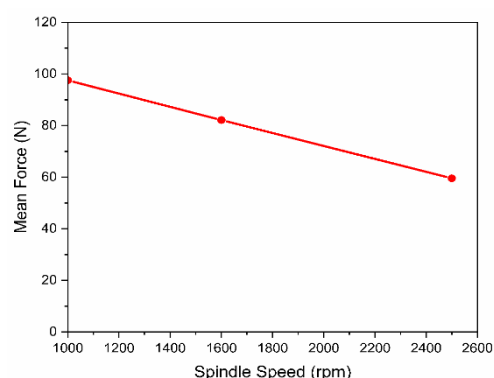
شکل ۱۰-الف و ب تغییرات نیروی سوراخکاری میانگین را بر حسب سرعت دورانی در نمونه‌های GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8 نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو نوع نمونه با افزایش سرعت دورانی از ۱۰۰۰ به ۲۵۰۰ rpm روندی کاهشی و نسبتاً خطی در نیروی محوری مشاهده می‌شود. این کاهش نیرو در سرعت‌های بالاتر به دلیل ترکیب چند عامل رخ می‌دهد: نخست، کاهش اصطکاک میان ابزار و سطح تماس که ناشی از کاهش زمان تماس در هر دور است؛ دوم، بهبود انتقال حرارت و کاهش تمرکز حرارتی در ناحیه برش که از نرم شدن موضعی ماتریس و سهولت در براده‌برداری حمایت می‌کند؛ و سوم، کاهش نیروی برشی مورد نیاز برای جدایش الیاف و ماتریس در اثر نرخ برش بالاتر.

در سرعت‌های پایین‌تر (۱۰۰۰ rpm)، زمان تماس طولانی‌تر ابزار با ماده و تجمع حرارتی ناکافی، منجر به افزایش مقاومت مکانیکی در ناحیه برش شده و نیروی سوراخکاری بالاتری تولید می‌شود. در مقابل، با افزایش سرعت دورانی به ۱۶۰۰ rpm و سپس ۲۵۰۰ rpm، کاهش پیوسته نیروی محوری مشاهده می‌شود که بیانگر نقش کلیدی سرعت بالا در بهبود بهره‌وری فرایند است.

نکته قابل توجه آن است که میزان کاهش نیرو در نمونه‌های GLARE 2/1-0.8 نسبت به نمونه‌های CARALL 2/1-0.8 محسوس‌تر است. این تفاوت به دلیل خواص مکانیکی متفاوت این دو نوع FML است؛ در نمونه‌های GLARE 2/1-0.8، مدول الاستیسیته پایین‌تر و چقرمگی ماتریس منجر به حساسیت بیشتر نسبت به تغییرات شرایط برشی می‌شود، در حالی که در نمونه‌های CARALL 2/1-0.8 سفتی بالاتر الیاف و مقاومت مکانیکی بیشتر باعث می‌شود تغییرات سرعت دورانی اثر محدودتری بر کاهش نیرو داشته باشد. به طور کمی، میانگین نیروی سوراخ‌کاری با افزایش سرعت دورانی از ۱۰۰۰ به ۲۵۰۰ rpm به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، هر دو سیستم کاهش نسبی مشابهی در نیروی محوری نشان می‌دهند، اگرچه مقادیر مطلق نیرو در هر حالت متفاوت است. این رفتار منعکس‌کننده ترکیبی از مکانیسم‌های فیزیکی شامل کاهش زمان تماس ابزار-قطعه در سرعت‌های بالاتر، بهبود انتقال حرارت موضعی و سهولت براده‌برداری که منجر به کاهش اصطکاک و نیاز برشی می‌شود است. اختلافات جزئی در مقادیر مطلق کاهش نیرو می‌تواند به تفاوت خواص الیاف، چسبندگی الیاف-ماتریس و پاسخ حرارتی ماتریس نسبت داده شود. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که افزایش سرعت دورانی یکی از مؤثرترین پارامترها در کاهش نیروی محوری است، هرچند کارایی آن به نوع لایه‌چینی بستگی دارد و در نمونه GLARE 2/1-0.8 نسبت به CARALL 2/1-0.8 اثر بارزتری از خود نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند در تعیین پنجره بهینه ماشین‌کاری برای جلوگیری از جدایش الیاف و بهبود کیفیت سطح سوراخ اهمیت راهبردی داشته باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۰ اثر سرعت دورانی بر نیروی سوراخکاری در (الف) نمونه GLARE 2/1-0.8؛ (ب) نمونه CARALL 2/1-0.8

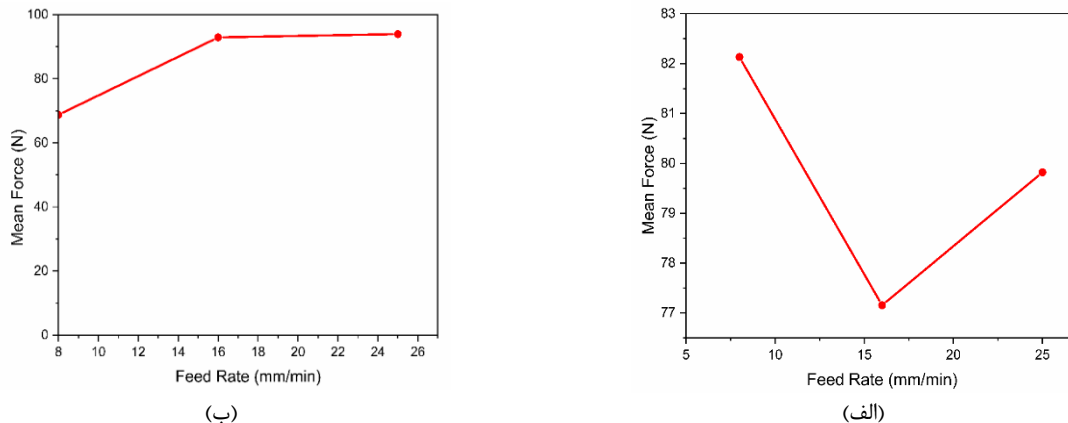
۳-۲-۲- اثر نرخ پیشروی بر نیروی سوراخ‌کاری

شکل ۱۱ میانگین نیروی محوری را به‌ازای سه سطح نرخ پیشروی برای نمونه GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8 نشان می‌دهد. برای GLARE 2/1-0.8 الگوی نیرو تقریباً صعودی است: افزایش نرخ پیشروی از ۸ mm/min به ۱۶ mm/min منجر به افزایش قابل توجه میانگین نیروی محوری از ۶۸/۹ N به ۹۳/۲ N شد که معادل افزایش حدود ۳۵/۳٪ است، و از ۱۶ mm/min به ۲۵ mm/min تنها تغییر جزئی (۰/۹۷٪) دیده می‌شود. این روند حاکی از آن است که در لایه‌چینی GLARE 2/1-0.8 افزایش نرخ پیشروی به سرعت موجب افزایش نرخ برداشت براده، افزایش تماس و اصطکاک جانبی و ورود به رژیم برش با نیاز برشی بالاتر می‌شود. به عبارت دیگر، در GLARE 2/1-0.8 افزایش پیشروی باعث می‌شود که برش بیش‌تر حالت شکست پراکنده و اصطکاک محور به خود گرفته و نیروی محوری به‌طور چشمگیری بالا رود؛ بنابراین برای کاهش نیروی محوری و احتمالاً کاهش جدایش، نرخ‌های پیشروی پایین‌تر یا تنظیم سایر پارامترها ترجیح داده می‌شوند. در مقابل، CARALL 2/1-0.8 یک پاسخ غیرخطی از نوع U شکل نشان می‌دهد: میانگین نیرو از ۸۲/۲ N در ۸ mm/min به ۷۷/۲ N در ۱۶ mm/min کاهش و سپس در ۲۵ mm/min تا ۷۹/۸ N افزایش جزئی دارد. این الگوی U شکل نشان‌دهنده وجود یک نقطه عملکردی میانی است که برآیند مکانیزم‌های برش-پلاوینگ و شرایط انتقال حرارت را بهینه کرده و مقاومت مؤثر در برابر نفوذ ابزار را کمینه می‌کند. برای CARALL 2/1-0.8، کاهش اولیه نیرو می‌تواند ناشی از گذار از رفتار پلاوینگ-چسبندگی در نرخ پایین به برش کارا تر در نرخ میانی باشد؛ اما افزایش نرخ پیشروی فراتر از این نقطه باعث افزایش بار بر ابزار و اصطکاک دیواره می‌گردد.

مقایسه تطبیقی دو ماده نشان می‌دهد که حساسیت نیروی محوری به نرخ پیشروی برای GLARE 2/1-0.8 بسیار بیشتر و به صورت مستقیم افزایشی است، در حالی که CARALL 2/1-0.8 نسبت به تغییر پیشروی واکنش پیچیده‌تری نشان می‌دهد و نقطه بهینه‌ای در محدوده میانی دارد. علت‌های محتمل این تفاوت عبارت‌اند از اختلاف در مدول و رفتار شکست الیاف (کربن سخت‌تر و شکننده‌تر؛ شیشه

دارای پاسخ ماتریکس-محورتر)، تفاوت در چسبندگی الیاف-ماتریس، و تفاوت در الگوهای تشکیل براده و اصطکاک سطحی در مرز فلز-پلیمر.

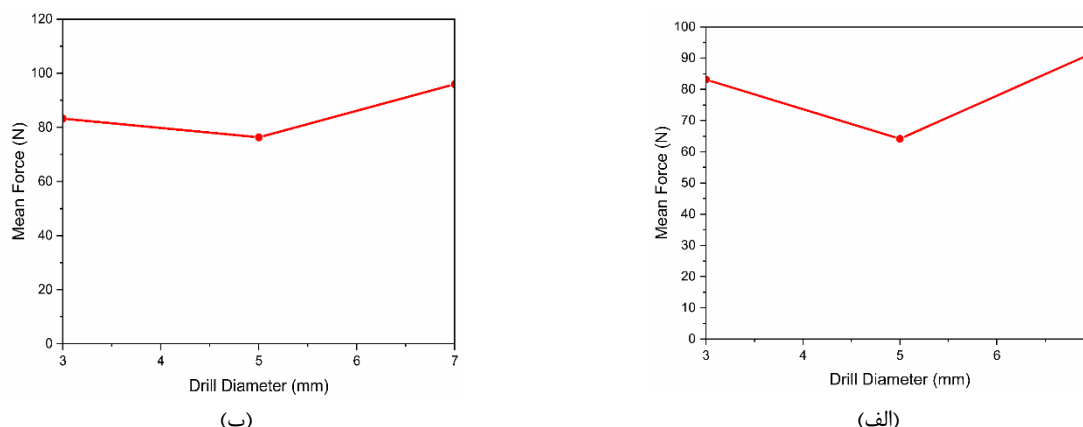
از منظر عملیاتی، نتایج نشان می‌دهند: (الف) برای GLARE 2/1-0.8 بهتر است نرخ پیشروی کم یا در صورت نیاز به افزایش سرعت تولید، دیگر پارامترها (افزایش rpm، استفاده از ابزار مناسب یا بهینه‌سازی خروجی پشتیبانی) هم‌زمان تنظیم شوند تا از افزایش شدید نیروی محوری جلوگیری شود؛ (ب) برای CARALL 2/1-0.8 انتخاب نرخ پیشروی میانی می‌تواند نیروی محوری را کمینه کند و به کاهش تنش‌های بین‌لایه‌ای و جدایش کمک نماید، اما افزایش بیش از آن احتمالاً بار ابزار و آسیب را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۱ اثر نرخ پیشروی بر نیروی سوراخکاری در (الف) نمونه GLARE 2/1-0.8؛ (ب) نمونه CARALL 2/1-0.8

۳-۲-۳- اثر قطر مته بر نیروی سوراخکاری

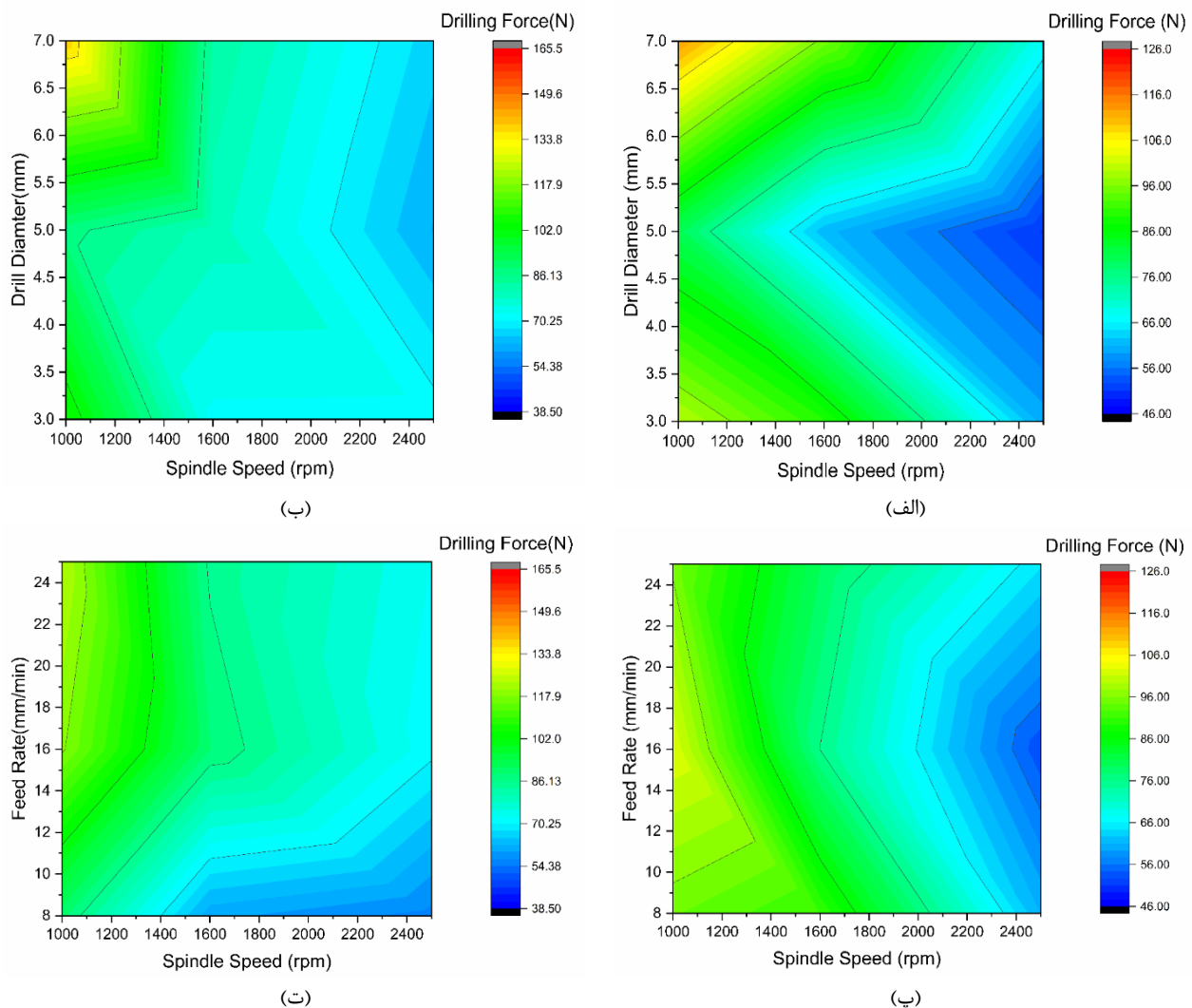
شکل ۱۲ تغییرات میانگین نیروی محوری را در سه قطر مته برای GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8 نشان می‌دهد. در هر دو نوع نمونه، رفتار نیرو الگوی غیرخطی U شکل دارد، به گونه‌ای که با افزایش قطر از ۳ mm به ۵ mm، نیرو کاهش یافته و سپس در قطر ۷ mm به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای نمونه GLARE 2/1-0.8، شکل ۱۲-الف، میانگین نیرو از حدود ۸۳/۲ N در قطر ۳ mm به ۷۶/۶ N در قطر ۵ mm کاهش یافته و سپس در قطر ۷ mm به حدود ۹۶/۲ N افزایش یافته است که نشان‌دهنده رشدی حدود ۲۵/۶٪ نسبت به قطر ۵ mm است. این روند بیانگر آن است که در قطرهای کوچک‌تر، کاهش بار برشی مؤثر بر واحد سطح و بهبود شرایط تخلیه براده موجب افت نیرو می‌شود؛ اما در قطر بزرگ‌تر، افزایش شدید سطح تماس ابزار-قطعه و حجم براده برداشت‌شده در هر دور منجر به افزایش قابل توجه بار محوری و نیروی سوراخکاری می‌گردد. برای نمونه CARALL، شکل ۱۲-ب، روند مشابهی مشاهده شد. نیروی محوری از حدود ۸۳/۵ N در قطر ۳ mm به ۶۴/۳ N در قطر ۵ mm کاهش یافته و سپس در قطر ۷ mm به حدود ۹۲/۱ N افزایش یافت که معادل ۴۳/۲٪ افزایش نسبت به قطر ۵ mm است. شدت تغییرات در CARALL نسبت به GLARE 2/1-0.8 چشمگیرتر است، که می‌تواند ناشی از سفتی بالاتر الیاف کربن، تفاوت در مدول الاستیک و چسبندگی قوی‌تر الیاف-ماتریس باشد. این ویژگی‌ها موجب می‌شوند که رفتار نیرو نسبت به تغییرات هندسی ابزار حساسیت بیشتری نشان دهد.



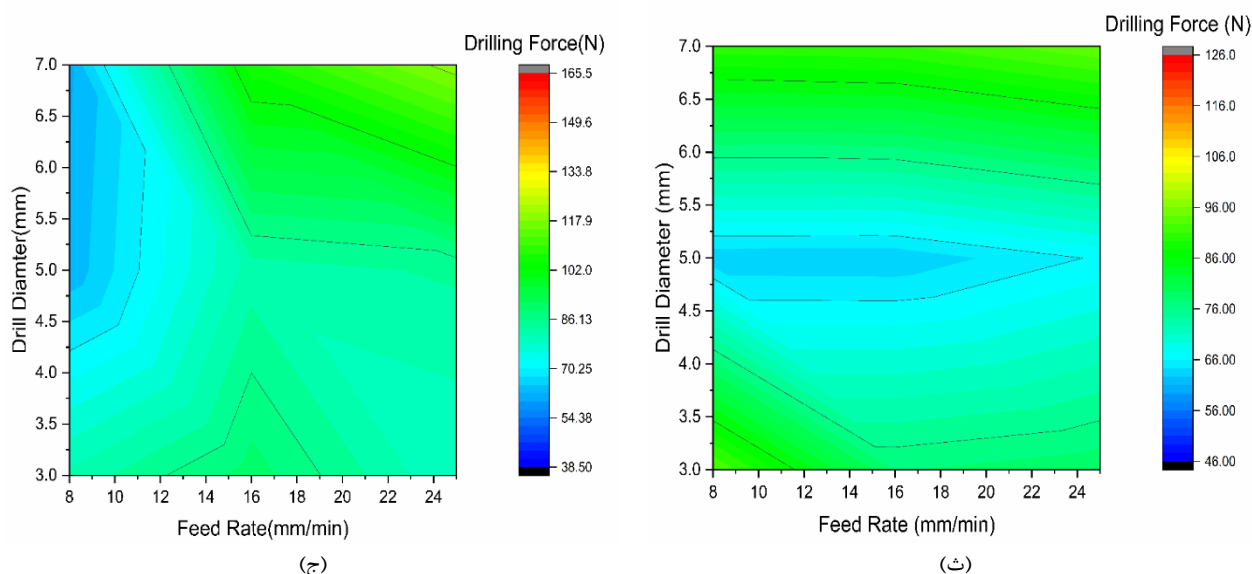
شکل ۱۲ اثر قطر مته بر نیروی سوراخکاری در (الف) نمونه GLARE 2/1-0.8؛ (ب) نمونه CARALL 2/1-0.8

۳-۲-۴- تأثیر همزمان پارامترهای سرعت دورانی، قطر مته و سرعت پیشروی بر نیروی سوراخکاری

در شکل ۱۳، نمودارهای دو بعدی تأثیر همزمان پارامترهای ورودی شامل سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته بر نیروی سوراخکاری برای نمونه‌های GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8 نشان داده شده است، برای رسم این نمودارها از نرم افزار اوريجین^۱ استفاده شده است. با توجه به شکل های ۱۳-الف و ب مشاهده می شود که با افزایش سرعت دورانی نیروی سوراخکاری کاهش می یابد. در سرعت های پایین و متوسط، افزایش قطر مته نیز باعث افزایش نیروی سوراخکاری می شود. اما در سرعت های بالا، قطر مته تأثیر چندانی ندارد و سرعت دورانی عامل تعیین کننده تری است. همانطور که در شکل های ۱۳-پ و ت می توان مشاهده کرد با افزایش سرعت دورانی، نیروی سوراخکاری کاهش می یابد. همچنین، در سرعت های پایین و متوسط، افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش نیروی سوراخکاری می شود. اما در سرعت های بالا، نرخ پیشروی تأثیر چندانی ندارد و سرعت دورانی عامل تعیین کننده تری است. با توجه به نمودار شکل ۱۳-ج مشاهده می شود که با افزایش نرخ پیشروی نیروی سوراخکاری افزایش می یابد. همچنین، با افزایش قطر مته، نیروی سوراخکاری نیز افزایش می یابد. در نرخ پیشروی پایین با افزایش قطر مته نیروی سوراخکاری کاهش می یابد اما با افزایش نرخ پیشروی و قطر مته نیروی سوراخکاری نیز افزایش پیدا می کند. همان طور که در شکل ۱۳-ث نیز مشاهده می شود با افزایش نرخ پیشروی و قطر مته نیروی سوراخکاری نیز بیشتر خواهد بود. این موضوع به دلیل افزایش سطح تماس بین مته و قطعه کار و همچنین افزایش حجم ماده در حال برداشت است.



¹ Origin



شکل ۱۳ نمودار دوبعدی تأثیر همزمان سرعت دورانی و قطر مته بر نیروی سوراخکاری برای الف) نمونه GLARE 2/1-0.8 و ب) نمونه CARALL 2/1-0.8، نمودار دوبعدی تأثیر همزمان سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر نیروی سوراخکاری برای پ) نمونه GLARE 2/1-0.8 و ت) نمونه CARALL 2/1-0.8 و نمودار دوبعدی تأثیر همزمان نرخ پیشروی و قطر مته بر نیروی سوراخکاری برای ث) نمونه GLARE 2/1-0.8 و ج) نمونه CARALL 2/1-0.8

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ورق‌های FML بر پایه آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ و رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و کربن تولید و رفتار سوراخکاری آن‌ها تحت شرایط مختلف فرایندی بررسی شد. طراحی آزمایش به صورت طرح عاملی کامل شامل سه سطح سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته انجام گرفت و نتایج حاصل از تحلیل الیاف برش نخورده، کیفیت سطح سوراخ و نیروهای برشی استخراج شد. به طور کلی، نتایج نشان دادند که سیستم CARALL 2/1-0.8 در مقایسه با GLARE 2/1-0.8 عملکرد بهتری در مقاومت در برابر میزان الیاف برش نخورده و دستیابی به کیفیت سطح مطلوب دارد. همچنین، انتخاب پنجره‌های عملیاتی شامل سرعت دورانی بالا همراه با نرخ پیشروی و قطر مته متوسط، می‌تواند شرایطی بهینه برای کاهش نیروهای فرایندی و آسیب‌های مکانیکی در سوراخکاری FMLها فراهم کند. یافته‌های اصلی به شرح زیر است:

۱) در مقایسه دو ساختار GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8، مقدار الیاف برش نخورده در CARALL 2/1-0.8 به طور قابل توجهی کمتر بود؛ این تفاوت نه تنها به سفتی و مدول بالاتر الیاف کربن مرتبط است، بلکه به دلیل چسبندگی قوی‌تر الیاف-ماتریس و پایداری حرارتی بالاتر باعث کاهش تمرکز تنش‌های برشی و جلوگیری از جداسازی موضعی در فصل مشترک فلز کامپوزیت می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که ساختار CARALL 2/1-0.8 در برابر مکانیسم‌های لغزش بین لایه‌ای و پارگی ماتریس مقاوم‌تر است و تغییرات فرایندی کمتر آن را دچار ناپایداری لایه‌ای می‌کند.

۲) بهترین کیفیت سطح سوراخ در شرایط فرایندی ملایم حاصل شد (سرعت دورانی پایین، نرخ پیشروی کم، قطر ابزار کوچک) و این رفتار تنها یک روند مشاهده‌ای نیست؛ بلکه از نظر مکانیکی ناشی از کاهش بار برشی واحد سطح، کاهش اصطکاک ابزار-قطعه و جلوگیری از تجمع حرارت در ماتریس پلیمری است. در CARALL 2/1-0.8 کیفیت سطح بالاتر به دلیل هدایت حرارتی بهتر الیاف کربن و کاهش چسبندگی حرارتی ماتریس تقویت می‌شود و اجازه می‌دهد سطح سوراخ بدون ریزترک و بدون پارگی الیاف تشکیل شود.

۳) روند کاهش نیرو با افزایش سرعت دورانی در هر دو سیستم کاملاً قابل توجیه است؛ زیرا با افزایش سرعت، زمان تماس ابزار-قطعه کاهش می‌یابد، اصطکاک کاهش پیدا می‌کند، نرخ برش مؤثر افزایش می‌یابد و ترکیب این عوامل باعث می‌شود نیروی برشی و مقاومت مؤثر لایه‌ها در برابر نفوذ کاهش پیدا کند. این اثر در GLARE 2/1-0.8 شدیدتر است، چون الیاف شیشه رفتار چقرمه‌تری داشته و به تغییر حرارتی-مکانیکی حساس‌ترند، در حالی که در CARALL 2/1-0.8 رفتار غالب‌تر ناشی از سفتی الیاف کربن است.

(۴) اثر نرخ پیشروی در دو ماده الگوی متفاوتی نشان داد: در CARALL 2/1-0.8 افزایش پیشروی به‌طور یکنواخت باعث افزایش نیرو شد، زیرا کاهش زمان برش و افزایش حجم براده مستقیماً سفتی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما در GLARE 2/1-0.8 رفتار غیرخطی مشاهده شد؛ دلیل آن این است که در پیشروی‌های پایین، حالت شیازنی سطحی و ساینده‌گی ماتریس نیرو را افزایش می‌دهد، ولی در پیشروی متوسط برش مؤثرتر الیاف شیشه رخ می‌دهد و نیرو کاهش می‌یابد؛ با افزایش بیشتر پیشروی مجدداً به علت افزایش بار لحظه‌ای و ناپایداری برش الیاف نیرو افزایش می‌یابد. این رفتار غیرخطی نشان می‌دهد که مکانیزم‌های برش در GLARE 2/1-0.8 وابسته به نرخ بارگذاری و حساس به گرادیان تنش هستند.

(۵) اثر قطر مته در هر دو سیستم الگوی غیرخطی داشت: افزایش قطر از ۳ به ۵ میلی‌متر باعث کاهش نیرو شد که ناشی از افزایش کارایی تخلیه براده و کاهش تمرکز تنش در مقطع کوچک ابزار است؛ اما قطر ۷ میلی‌متر به دلیل افزایش شدید سطح تماس، افزایش حجم براده و افزایش اصطکاک مماسی باعث افزایش محسوس نیرو شد. تفاوت شدت این تغییرات بین دو سیستم نیز ویژگی‌های حرارتی- مکانیکی الیاف شیشه و کربن را بازتاب می‌دهد.

(۶) تحلیل نمودارهای سطحی نشان داد که سرعت دورانی مهم‌ترین عامل کنترل نیرو است؛ زیرا در سرعت‌های بالا تأثیر نرخ پیشروی و قطر به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این رفتار بیانگر آن است که در رژیم‌های برشی با سرعت بالا، نقش اصطکاک غالب می‌شود و اثرات هندسی و بارگذاری ثانویه می‌گردند. در مقابل، در سرعت‌های پایین و متوسط تداخل اثرات هندسی ابزار (قطر) و بارگذاری حجمی (پیشروی) پررنگ‌تر است و ساختارهای GLARE 2/1-0.8 و CARALL 2/1-0.8 2/1-0.8 به‌طور متفاوت به آن واکنش نشان می‌دهند.

تقدیر و تشکر

محققان مقاله بر خود لازم می‌دانند از زحمات و همراهی‌های آقای مهندس حسن رفیعی‌نیا کارشناس مسئول دانشکده مهندسی مکانیک کمال تشکر را نمایند.

References

- [1] Giasin K, Ayvar-Soberanis S. Microstructural investigation of drilling induced damage in fibre metal laminates constituents. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017 Jun 1;97:166-78. doi: 10.1016/j.compositesa.2017.02.024
- [2] Marques F, Silva FG, Silva TE, Rosa PA, Marques AT, de Jesus AM. Delamination of Fibre Metal Laminates Due to Drilling: Experimental Study and Fracture Mechanics-Based Modelling. *Metals*. 2022 Jul 27;12(8):1262. doi: 10.3390/met12081262
- [3] Costa RD, Sales-Contini RC, Silva FJ, Sebbe N, Jesus AM. A critical review on fiber metal laminates (FML): from manufacturing to sustainable processing. *Metals*. 2023 Mar 23;13(4):638. doi: 10.3390/met13040638
- [4] Salem B, Mkaddem A, Habak M, Dobah Y, Elfarhani M, Jarraya A. Investigation of temperature at Al/glass fiber-reinforced polymer interfaces when drilling composites of different stacking arrangements. *Polymers*. 2024 Oct 6;16(19):2823. doi: 10.3390/polym16192823
- [5] Bolar G, Dinesh AA, Polishetty A, Shetty R, Hiremath A, Neelakantha VL. Performance analysis of helical milling and drilling operations while machining carbon fiber-reinforced aluminum laminates. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024 May 29;8(3):113. doi: 10.3390/jmmp8030113
- [6] Zhao M, Wang F, Fu R, Sun K, Du C, Cui J. Drilling study on CFRP/Al stack with different CFRP thickness using chip-breaking step drill bit. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Mar 24;90:300-9. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.050
- [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
- [8] 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
- [9] Gupta A, Vaishya R, Kumar R, Khan KL, Chhabra S, Verma AS, Bharadwaj A. Effect of drilling process parameters on delamination factor in drilling of pultruded glass fiber reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;64:1290-4. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.110

- [10] Seif A, Sadoun AM, Fathy A, Megahed AA. Evaluation of hole quality in drilling process of GF/Aluminum wire mesh reinforced epoxy composites. *Alexandria Engineering Journal*. 2024 May 1;94:257-73. doi: [10.1016/j.aej.2024.03.013](https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.013)
- [11] Ahn JH, Kim G, Min BK. Exit delamination at the material interface in drilling of CFRP/metal stack. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Jan 6;85:227-35. doi: [10.1016/j.jmapro.2022.11.058](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.11.058)
- [12] Martins A, Carvalho A, Bragança IM, Barbosa IC, Barbosa JI, Loja MA. A statistical assessment of drilling effects on glass fiber-reinforced polymeric composites. *Materials*. 2024 Nov 18;17(22):5631. doi: [10.3390/ma17225631](https://doi.org/10.3390/ma17225631)
- [13] Jackstadt A, Liebig WV, Weidenmann KA, Kärger L. On the influence of low-velocity impact damage on constrained-layer damping in hybrid CFRP-elastomer-metal laminates. *Materials & Design*. 2024 May 1;241:112882. doi: [10.1016/j.matdes.2024.112882](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112882)
- [14] Bolat Ç, Karakılınç U, Yalçın B, Öz Y, Yavaş Ç, Ergene B, Ercetin A, Akkoyun F. Effect of drilling parameters and tool geometry on the thrust force and surface roughness of aerospace grade laminate composites. *Micromachines*. 2023 Jul 15;14(7):1427. doi: [10.3390/mi14071427](https://doi.org/10.3390/mi14071427)
- [15] Zhang K, Yu C, Chen C. Measurement and analysis of residual stress of multilayer carbon fiber laminate based on incremental drilling method. *Polymer Testing*. 2024 Dec 1;141:108646.
- [16] Girot F, Dau F, Gutiérrez-Orrantia ME. New analytical model for delamination of CFRP during drilling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Feb 1;240:332-43. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.007)
- [17] 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]
- [18] Wang GD, Melly SK, Li N. Experimental studies on a two-step technique to reduce delamination damage during milling of large diameter holes in CFRP/Al stack. *Composite Structures*. 2018 Mar 15;188:330-9. doi: [10.1016/j.compstruct.2018.01.039](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.039)
- [19] Costa RD, Sales-Contini RC, Silva FJ, Sebbe N, Jesus AM. A critical review on fiber metal laminates (FML): from manufacturing to sustainable processing. *Metals*. 2023 Mar 23;13(4):638. doi: [10.3390/met13040638](https://doi.org/10.3390/met13040638)
- [20] Mahdinezhad Qazvini V, Rakhshkhorshid M, Maraki M. The effect of drilling process parameters on thrust force in cotton phenolic composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Oct 22;11(8):1-9. doi: [10.22034/ijme.2024.465446.1980](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.465446.1980) [In Persian]
- [21] Baraheni M, Jandaghi Shahi V. Enhancing dimensional accuracy of the produced holes in CFRP by ultrasonic vibration assistance. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 May 22;10(3):1-8. doi: [10.22034/IJME.2023.422082.1867](https://doi.org/10.22034/IJME.2023.422082.1867) [In Persian]