نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۳، شماره ۶، شماره پیاپی ۱۵۹، بهمن و اسفند ۱۴۰۳، صفحه ۷۱-۵۸
ISSN: 1605-9719
DOI: https://doi.org/10.30506/mmep.2025.2034118.2182

مروری بر سوراخکاری کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی

هادی رزقی ملکی*
استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بناب، بناب

پویا پرونده
دانشجوی کارشناسی ارشد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تهران، تهران

محسن حامدی
استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تهران، تهران

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶

چکیده: در این مقاله، فرایند سوراخکاری سنتی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی و تأثیر عوامل مختلف بر کیفیت سوراخکاری این نوع مواد بررسی شده است. هدف از این تحقیق، شناسایی و معرفی پارامترهای کلیدی ماشین کاری از جمله سرعت دوران، سرعت برش، نرخ پیشروی و جنس ابزار به منظور بهبود کیفیت سوراخ های حاصل و کاهش پدیده‌های نامطلوب مانند لایه لایه شدن و افزایش زبری سطح است. با استفاده از روش های تجربی، تأثیر این عوامل بر کیفیت ماشین کاری مواد مورد آزمایش قرار گرفته و راهکارهایی برای بهینه سازی فرایند ماشین کاری ارائه شده است. نتایج حاصله نشان می دهند که با انتخاب پارامترهای مناسب و انتخاب دقیق ابزار، می توان به کاهش قابل توجه پدیده لایه لایه شدن و بهبود کیفیت سوراخکاری به روش سنتی دست یافت. این تحقیق دیدگاه های جدیدی را در زمینه بهبود فرایندهای سوراخکاری سنتی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی ارائه می دهد و مسیری برای صنعت در راستای بهینه سازی و افزایش کیفیت محصولات نهایی فراهم می آورد.

واژه‌های راهنما: کامپوزیت های الیاف طبیعی، سوراخکاری، لایه لایه شدن، زبری سطح، ابزار

A review on drilling of natural fiber- composites

Hadi Rezghi Maleki*
Assistant Professor,
Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab

Pooya Parvandeh
M.Sc. Student,
Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran

Mohsen Hamedi
Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran

Abstract: In this paper, the conventional drilling process of natural fiber composites (NFCs) and the effect of various factors on the drilling quality of these type of materials have been investigated. The aim of research is to identify and introduce key machining parameters, including rotational speed, cutting speed, feed rate, and tool material, to enhance the quality of the drilled holes and minimize undesirable phenomena such as delamination and increasing surface roughness. Using experimental methods, the effects of the factors on the machining quality of the materials were investigated, and solutions for optimizing the machining process were proposed. The results indicate that selecting appropriate parameters and precise tool selection can significantly reduce delamination and improve drilling quality. This study provides new insights into improving traditional drilling processes for natural fiber-reinforced composites and offers a pathway for the industry to optimize and enhance the quality of final products.

Keywords: Natural fiber composites, Drilling, Delamination, Surface roughness, Tool

*نویسنده مسئول، hrezghimaleki@ubonab.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پایه پلیمری از ترکیب مختلفی از فازهای مواد تشکیل یافته‌اند. در این ترکیبات حداقل یکی از اجزا زمینه پلیمری و دیگری تقویت کننده از جنس الیاف است. ترکیبات این مواد با یکدیگر خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی خاصی را به وجود می‌آورند که با استفاده از یک ماده منفرد به دست نمی‌آیند. هنگامی‌که الیاف تقویت‌کننده به ماتریس پلیمری افزوده می‌شود، خصوصیاتی چون سختی، استحکام کششی، مقاومت حرارتی، مقاومت شیمیایی، هدایت الکتریکی و مقاومت در برابر خوردگی افزایش می‌یابد. این تغییرات ناشی از تعاملات میان ماتریس و الیاف تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پایه پلیمری و رفتارهای برهمکنشی است [۱] و [۲]. کاربرد کامپوزیت‌های پایه پلیمری در صنعت هوافضا به خصوص در بدنه هواپیماها، به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این مواد به دلیل مزایای برجسته‌ای که نسبت به فلزات دارند، از جمله کاهش وزن، استحکام بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی، انعطاف‌پذیری بالا در طراحی و بهبود خواص حرارتی، به طور فزاینده‌ای جایگزین مواد فلزی سنتی شده‌اند [۳]. در صنعت هواپیماسازی مدرن، بهره‌گیری از کامپوزیت‌های پیشرفته برای ساخت بخش‌های اصلی هواپیماها، به ویژه در مدل‌های ایرباس A350 و بوئینگ ۷۸۷، به طور چشمگیری افزایش یافته است. این هواپیماها بیش از ۵۰ درصد وزنی و ۸۰ درصد حجمی خود را از مواد کامپوزیتی تشکیل داده‌اند که این نشان‌دهنده نقش به‌سزای این مواد در بهبود کارایی و کاهش مصرف سوخت است. به کارگیری کامپوزیت‌ها در ساختار بیرونی هواپیما نه تنها وزن کلی را کاهش می‌دهد بلکه مقاومت هواپیما در برابر عوامل محیطی و خستگی را بهبود می‌بخشد [۴]. تحقیقات نشان دادند که در ساخت یک بال برای ایرباس A380، حدود ۷۵۰،۰۰۰ سوراخ ایجاد می‌شود که این تعداد بیانگر پیچیدگی‌ها و نیاز به دقت فوق‌العاده بالا در فرایندهای ساخت و مونتاژ در صنعت هوافضا است [۵]. همچنین برای مونتاژ کامل یک هواپیمای معمولی، بین ۱/۵ تا ۳ میلیون سوراخ با کیفیت بالا جهت اتصالات مورد نیاز است که این نشان دهنده حجم عظیمی از کارهای دقیق و فنی است که باید با استانداردهای بسیار بالای صنعت هوافضا مطابقت داشته باشد. فرایند سوراخکاری برای این سوراخ‌ها باید با دقت بسیار زیادی انجام شود تا از بروز هرگونه خطا در اتصال قطعات جلوگیری شود چرا که خطاهایی حتی میلیمتری می‌تواند بر ایمنی پرواز تأثیر منفی بگذارد [۶]. کامپوزیت‌های الیاف طبیعی (NFCs) موادی هستند که حداقل یک بخش اساسی از منابع طبیعی را در خود جای داده‌اند. این کامپوزیت‌ها توسط الیاف طبیعی تقویت شده‌اند و توانمندی‌های مثبتی را برای جایگزینی پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف مصنوعی مانند پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) ارائه می‌دهند. کامپوزیت‌های الیاف طبیعی ارزان، سبک، سازگار با محیط زیست، غیر سمی، تجدیدپذیر، قابل بازیافت و زیست تخریب پذیر می‌باشند. با این حال، یکی از کاستی‌ها این مواد این است که خواص مکانیکی نسبتاً کمی دارند. یک روش برای افزایش عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف طبیعی برای گسترش کاربردهای آنها، هیبریداسیون است[۷]. با توجه به روند جهانی افزایش بازیافت و استفاده مجدد از منابع، الیاف طبیعی به عنوان یک جایگزین مناسب برای الیاف مصنوعی و سایر مواد غیرقابل تجزیه در صنایع مختلف مطرح شده‌اند. این الیاف، که از منابع تجدیدپذیر مانند گیاهان و درختان به دست می‌آیند، در پایان عمر مفید خود می‌توانند به طور کامل بازیافت شوند و بدین ترتیب از افزایش میزان دی‌اکسید کربن خالص در جو جلوگیری کنند [۸].

الیافی که از گیاهانی مانند کتان، کنف، جوت و پنبه به عنوان الیاف تقویت‌کننده بدست می‌آیند، الیاف طبیعی اقتصادی هستند و به آسانی در دسترس هستند و دارای چگالی کمی هستند که باعث افزایش استحکام و سختی ویژه آنها می‌شود [۹]. با وجود مزایای کامپوزیت‌های الیاف طبیعی، این مواد حساسیت بیشتری نسبت به عوامل محیطی دارند و نیاز به فرایندهای پیش‌پردازش دارند که ممکن است به تعداد و هزینه تولید اضافه کند [۱۰]. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی به دلیل ویژگی‌های پایدار و سبکی وزن خود، کاربردهای متنوعی در صنایع هواپیماسازی، خودروسازی و ساختمانی دارند. در هواپیماها، این مواد برای ساخت پانل‌های داخلی کابین به کار می‌روند که به بهبود تجربه مسافران و کاهش مصرف سوخت کمک می‌کند. در صنعت خودروسازی، استفاده از این کامپوزیت‌ها در قطعات داخلی و خارجی به تولید خودروهای سبک‌تر و کارآمدتر منجر شده و در ساختمان‌سازی، به دلیل مزایای عایق‌بندی و مقاومت بالا به عنوان جایگزینی برای کامپوزیت‌های سنتی رو به افزایش است [۱۱] و [۱۲].

فرآیند تولید کامپوزیت‌های الیاف طبیعی را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: تولید اولیه و ثانویه. به‌طورکلی، کامپوزیت‌های الیاف طبیعی از طریق روش‌های مختلفی از جمله چینش دستی، قالب‌گیری با استفاده از کیسه‌های خلاء، قالب‌گیری با انتقال رزین و فرایند پالتروژن تولید می‌شوند. این فرایندها منجر به تولید یک محصول نهایی می‌شود. با این وجود،

این اشکال نیازمند برخی عملیات ثانویه مانند ماشین‌کاری، فرز یا سوراخکاری هستند تا الزامات مونتاژ قطعات را برآورده کنند؛ بنابراین، ماشین‌کاری به‌ویژه سوراخکاری، برای تسهیل فرایند مونتاژ قطعات ضروری است.

به‌طورکلی، فرآیند تولید کامپوزیت‌های الیافی در ابعاد بزرگ با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. یکی از این چالش‌ها، نیاز به فضای وسیع و سرمایه‌گذاری قابل‌توجه برای تولید این قطعات است. علاوه بر این، حجم بالای این اجزا محدودیت‌هایی را در حمل‌ونقل ایجاد می‌کند. بنابراین، قطعات کامپوزیتی معمولاً در ابعاد کوچک‌تر تولید شده و سپس برای ایجاد ساختارهای بزرگ‌تر با استفاده از پیچ، مهره یا پرچ به یکدیگر متصل می‌شوند [۱۳]. برای ایجاد اتصالات محکم در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، ضروری است که سوراخ‌هایی با دقت بالا و کیفیت مناسب ایجاد شوند؛ زیرا دقت در سوراخکاری مستقیماً بر استحکام و دوام اتصالات تأثیر می‌گذارد و از پایین آمدن کیفیت اجزاء مرتبط با این اتصالات جلوگیری می‌کند. این فرایند نیازمند استفاده از تکنیک‌ها و ابزارهای مخصوص است تا از هرگونه آسیب به الیاف و ماتریس پلیمری که می‌تواند به کاهش خواص مکانیکی و ساختاری ماده منجر شود، پرهیز شود [۱۴] و [۱۵].

ماشین‌کاری یک فرایند کاهشی است که برای حفظ شکل و ابعاد مورد نیاز قطعات نهایی، مواد ناخواسته را حذف می‌کند. به دلیل ترکیب ناهمگن کامپوزیت‌ها، ماشین‌کاری آن‌ها یک فرایند پیچیده می‌باشد [۱۶]. تحقیقات حاضر نشان داده است که ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی با مواد همگن مثل فولادها تفاوت‌های قابل توجهی دارد [۱۷] و [۱۸]. همچنین جنس و هندسه ابزار تأثیرات زیادی بر آسیب‌های ناشی از ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها دارند. به همین دلیل، توجه ویژه به بررسی عمیق روش‌های مونتاژ بیوکامپوزیت‌ها به منظور بهینه‌سازی تولید آنها، به ویژه در فرایند ماشین‌کاری، ضروری است [۱۸].

تولید محصولات با استفاده از کامپوزیت‌های پایه پلیمری در نقاط مونتاژ با مشکلاتی مواجه شده است [۱۹] و [۲۰]. این مشکلات شامل عدم دقت در ابعاد و کیفیت پایین داخل سوراخ است که می‌تواند به رد شدن محصولات منجر شود. در مقایسه با سوراخکاری مواد معمولی، سوراخکاری مواد مرکب پایه پلیمری با چالش‌های بیشتری همراه است. بنابراین، ممکن است الیاف در طول فرایند سوراخکاری شکسته، جدا شده یا لایه‌لایه شوند. با این حال، در صورت دستیابی به سوراخ‌هایی با کیفیت مناسب، استحکام کلی محصول دچار افت نمی‌شود [۲۱] و [۲۲].

کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف به دلیل ماهیت ناهمگن و ناهمسانگرد، موادی هستند که برش سختی دارند [۲۳]. فرایندهای ماشین‌کاری نامناسب، مشکلات و آسیب‌های خاصی به ساختار کامپوزیت‌ها وارد می‌کنند. این آسیب‌ها شامل لایه‌لایه شدن، سوراخ شدن، بیرون کشیده‌شدن الیاف، لکه‌دار شدن ماتریس و پارگی می‌شوند که همگی بر عملکرد نهایی محصول تأثیر منفی می‌گذارند [۲۴] و [۲۵]. لایه‌لایه شدن یکی از جدی‌ترین آسیب‌ها در کامپوزیت‌ها است؛ زیرا استحکام حاصل از قطعه کامپوزیتی را به طور مستقیم کاهش می‌دهد [۲۶].

سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی شامل روش‌های سنتی و غیرسنتی در پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با اینکه روش‌های غیرسنتی مانند سوراخ‌کاری لیزری [۲۷] و [۲۸] و واترجت [۲۹] و [۳۰] به دلیل کاهش سایش ابزار، حذف ارتعاشات و افزایش دقت جایگزین روش‌های سنتی محسوب می‌شوند، ولی روش‌های سنتی همچنان به دلیل اقتصادی بودن و دسترسی آسان، کاربرد گسترده‌ای در فرآیند ماشین‌کاری این مواد دارند.

سوراخ‌کاری سنتی بویژه با استفاده از مته‌های استاندارد و ابزارهای مخصوص، همچنان به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن و نیاز به تجهیزات متداول، انتخاب اصلی در تولید سوراخ‌ها در مواد کامپوزیتی است. بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند مانند سرعت پیشروی، نرخ برش، قطر سوراخ و هندسه مته از اهداف اصلی در پژوهش‌ها بوده که تأثیر مستقیم بر کاهش آسیب‌های ناشی از سوراخ‌کاری و بهبود کیفیت نهایی سوراخ دارد [۳۱] و [۳۲]. علاوه بر این، کاهش تخریب و جدایش الیاف از جمله اولویت‌های تحقیقاتی است که با بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند، می‌توان به کیفیت بهتر و سطحی بدون تخریب دست یافت [۳۳] و [۳۴].

از سوی دیگر، روش‌های غیرمرسوم مانند سوراخ‌کاری لیزری به دلیل نبود سایش ابزار و کاهش مشکلات ناشی از حرارت، گزینه‌های مناسبی برای سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها محسوب می‌شوند. این روش‌ها چالش‌هایی نظیر بهینه‌سازی توان لیزر و سرعت برش را دارند تا از بروز آسیب‌های حرارتی و ایجاد منطقه متاثر از حرارت (HAZ) جلوگیری کنند [۲۸] و [۳۵]. منطقه متاثر از حرارت در سوراخ‌کاری لیزری اهمیت بالایی دارد؛ زیرا در این ناحیه الیاف بدون محافظت رزین قرار می‌گیرند و به نقاط ضعیفی در برابر بارگذاری مکانیکی تبدیل می‌شوند[۳۶]. روش واترجت به عنوان روشی بدون ایجاد حرارت و منطقه متأثر از حرارت برای کامپوزیت‌ها مناسب است و قابلیت ماشین‌کاری دقیق و سریع را با کاهش تخریب سطحی و عدم جدایش الیاف فراهم می‌آورد [۲۹]. در روش سوراخ‌کاری التراسونیک، انرژی

الکتریکی به کمک یک مبدل به ارتعاشات مکانیکی تبدیل شده و سپس به ابزار تمرکزدهنده انرژی منتقل می‌شود که به کاهش نیروهای سوراخ‌کاری و بهبود کیفیت سطح سوراخ کمک می‌کند. این روش با کاهش چشمگیر نیروی قائم و جلوگیری از ایجاد تنش‌های باقیمانده، کیفیت سوراخ و سطح را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. با این حال، سوراخ‌کاری التراسونیک به دلیل نرخ پایین برداشت مواد و هزینه بالا، اقتصادی نیست و بیشتر برای تولید چندسوراخی مناسب است [۳۷] و [۳۸].

کامپوزیت‌های الیاف طبیعی به دلیل خواص منحصربه‌فردی مانند وزن سبک، استحکام بالا و سازگاری با محیط‌زیست، جایگزین مناسبی برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف مصنوعی هستند. در این مقاله مروری، سوراخکاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی به عنوان یکی از مراحل کلیدی ماشین‌کاری این مواد مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، فرآیند سوراخکاری این کامپوزیت‌ها با چالش‌هایی مانند لایه‌لایه شدن، زبری سطح و کاهش دقت ابعادی همراه است که می‌تواند بر کیفیت نهایی محصول تاثیر منفی بگذارد. در این پژوهش، پارامترهای کلیدی سوراخکاری از جمله سرعت دوران، سرعت برش، نرخ پیشروی و جنس ابزار با هدف بهبود کیفیت سوراخ‌ها بررسی شده‌اند. نتایج این بررسی می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای صنایع مختلف در جهت افزایش دقت و کیفیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها و کاهش هزینه‌های تولید به کار گرفته شوند.

۲- پارامترهای تأثیرگذار در سوراخکاری

۲-۱- پارامترهای برشی

در فرایند سوراخکاری، کیفیت نهایی سوراخ‌های ایجاد شده به پارامترهای برشی وابسته است. این پارامترها شامل سرعت دوران، سرعت برش و نرخ پیشروی است که همگی در زمان شروع فرایند سوراخکاری قابل‌تنظیم و کنترل هستند. تنظیم این متغیرها اگر به بهینه‌ترین شکل ممکن انجام شود امکان تولید سوراخ‌هایی با دقت بالا و کیفیت مطلوب را فراهم می‌کند. در گذشته، تحقیقات گسترده‌ای برای درک بهتر و دقیق‌تر اثرات این پارامترها بر روی نتایج سوراخکاری انجام شده است و این تحقیقات نشان داده‌اند که تغییرات در این متغیرها می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر روی کیفیت نهایی داشته باشد[۳۹].

در مطالعه پارامترهای سوراخ‌کاری در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی، سرعت برش و نرخ پیشروی تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت نهایی کامپوزیت دارند. سرعت‌های برش بالا معمولاً به کاهش نیروی قائم کمک کرده و در نتیجه لایه‌لایه‌شدن را کاهش می‌دهد اما این تأثیر با توجه به نوع ماده و ابزار متفاوت است؛ برخی مطالعات نشان می‌دهند که سرعت برش بالا می‌تواند باعث افزایش لایه‌لایه‌شدن شود [۴۰]. به طور کلی نرخ پیشروی پایین برای کاهش لایه‌لایه‌شدن و حفظ یکپارچگی سطح توصیه می‌شود؛ زیرا نرخ پیشروی بالا با افزایش نیروهای قائم و خطر لایه‌لایه‌شدن همراه است. اگرچه سرعت برش بر دمای ایجاد شده تأثیر می‌گذارد و می‌تواند بر خواص حرارتی ماده اثر بگذارد، نرخ پیشروی تأثیر کمتری بر دما دارد اما به شدت بر لایه لایه شدن و نیروهای قائم در طی ماشین‌کاری تأثیرگذار است[۱۹].

سرعت دورانی به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی معرفی شده است. افزایش سرعت دوران باعث کاهش نیروی قائم می‌شود که به نوبه خود احتمال لایه‌لایه شدن در کامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهد [۴۱]. با این حال، تحقیقات نشان داده است که سرعت‌های بسیار بالا ممکن است به افزایش دمای برش منجر شوند و نتیجتاً سایش ابزار و خرابی سطحی را تشدید کنند [۴۲]. در این مطالعات، سرعت‌های اسپیندل بین ۵۰۰ تا ۲۸۰۰ دور بر دقیقه برای فرآیندهای سوراخ‌کاری معمولی پیشنهاد شده هرچند سرعت‌های بالاتر (۳۰۰۰ تا ۹۰۰۰ دور بر دقیقه) نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در آنها، سایش ابزار و دمای برش به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر بوده است [۴۳].

ناصر و همکاران [۴۱] به بررسی پارامترهای بحرانی در سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با کتان پرداختند. نتایج نشان داد که سوراخکاری با سرعت‌های دورانی بالا (بین ۳۰۰۰ تا ۹۰۰۰ دور در دقیقه) می‌تواند به چالش‌هایی مانند سایش بیش از حد ابزار و افزایش دمای برش و نهایتاً سوختن رزین منجر شود. این مسائل می‌توانند بر دوام ابزار و کیفیت سوراخ‌کاری تأثیر بگذارند.

۲-۲- جنس ابزار

جنس ابزار عامل مهمی است که بر دقت سوراخ‌های ایجاد شده تأثیر می‌گذارد. برای دستیابی به‌دقت موردنظر در سوراخ‌ها، ضروری است که جنس ابزار و هندسه آن به‌دقت انتخاب شود. بااین‌حال، بررسی‌ها و مطالعات کافی در زمینه انتخاب مواد ابزار مناسب برای سوراخکاری در مواد کامپوزیتی نظیر کامپوزیت‌های الیاف طبیعی به‌ندرت انجام شده است. در بیشتر موارد، از روش‌های تجربی برای این منظور استفاده می‌شود که نه‌تنها زمان‌بر است؛ بلکه هزینه‌های قابل‌توجهی را نیز در بر دارد. این

چالش می‌تواند با ترکیب مطالعات تجربی و تحلیل اجزای محدود برطرف شود تا درک عمیق‌تری از تأثیر مواد بر کارایی مته‌ها حاصل گردد. در مطالعات تجربی بیشتر از ابزارهای فولادی تند بر (HSS) و کاربید جامد به دلیل دسترسی آسان و کاربرد گسترده‌ای که در سوراخکاری انواع مواد دارند، استفاده شده است [۴۴]. ابزارهای تندبر به دلیل عدم سایش در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی گزینه مناسبی شناخته شده‌اند.

جنس ابزار با چالش سایش در فرآیند سوراخکاری همراه است که این سایش منجر به تخریب شرایط اولیه سوراخکاری از جمله هندسه می‌شود. این تغییرات می‌تواند به افزایش احتمالی نقص در ورودی و خروجی مته‌ها منجر شود [۴۵]. سایش ابزار در فرایند سوراخکاری می‌تواند به آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه شدن منجر شود که تأثیر اقتصادی زیادی دارد به ویژه در کامپوزیت‌ها که نیاز به دقت بالا دارند. این سایش محدودیت‌هایی را در تعداد سوراخ‌های قابل ایجاد با یک ابزار خاص قبل از نیاز به تعویض یا تعمیر آن ایجاد می‌کند که باعث افزایش هزینه‌ها و کاهش بهره‌وری تولید می‌شود. همچنین، سایش بیش از حد ابزار به کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده آسیب می‌زند [۴۶] و [۴۷].

۲-۳- هندسه ابزار

هندسه مته نقش مهمی در بهبود قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت-های الیاف طبیعی از چندین جنبه از جمله کاهش آسیب‌های ناشی از سوراخکاری و افزایش کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده ایفا می‌کند. هندسه ابزار به شکل، قطر و زاویه مته اشاره دارد. مته با هندسه‌های مختلف اثرات متفاوتی بر روی ایجاد نیروی محوری دارند. هرچه قطر مته کمتر باشد، نیروی محوری و گشتاور کمتری ایجاد می‌شود بنابراین لایه‌لایه شدگی کمتری در نزدیکی سوراخ‌های ایجاد شده رخ می‌دهد. در سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، از مته‌ها با هندسه‌های مختلف و مته‌ها با نقطه انحناء متفاوتی که از جنس‌های مختلفی مثل فولاد تند بر، کاربید جامد، کاربید سیلیسیم با پوشش، کاربید سیلیسیم بدون پوشش و الماس ساخته شده‌اند استفاده می‌شود [۴۸] و [۴۹].

۳- نحوه ارزیابی کیفیت سوراخکاری

۳-۱- ارزیابی لایه‌لایه شدن

لایه‌لایه‌شدن به عنوان یک پدیده خرابی، در میان لایه‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف در طول ماشین‌کاری رخ می‌دهد. این یکی از چالش‌های اساسی و متداول است که در حین ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد [۵۰] و [۵۱]. در این پدیده، لایه‌های کامپوزیت تحت تأثیر عملکرد مته و نتیجتاً نیروی محوری حاصله از یکدیگر جدا می‌شوند. لایه‌لایه‌شدن اغلب در آغاز و انتهای فرایند ماشین‌کاری مشاهده می‌شود [۵۲]. در میان عیوب مرتبط با ماشین‌کاری، لایه‌لایه شدن از مهمترین عیوب محسوب می‌شود [۵۳-۵۵]. لایه لایه‌شدن به عنوان یک نگرانی اساسی در حین ماشین‌کاری ورق‌های کامپوزیت شناخته شده و ممکن است منجر به کاهش قابل ملاحظه تمامیت ساختاری، کیفیت سطح و استحکام باربری سازه گردد [۵۶-۵۸]. ارزیابی لایه‌لایه شدن در کامپوزیت‌های الیاف طبیعی یک چالش نسبتاً دشوار محسوب می‌شود به‌ویژه در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف یه رنگ تیره که باعث مشکلات در بازرسی چشمی و روش پردازش تصویر می‌شوند.

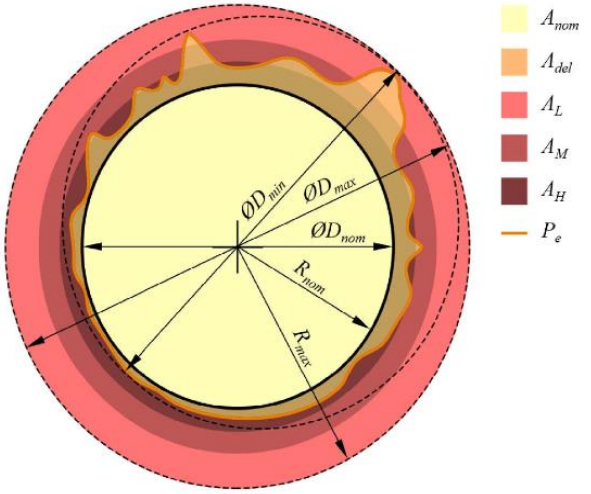
جدول ۱ فهرست پارامترهای مشخص کننده لایه‌لایه‌شدن ناشی از سوراخکاری در کامپوزیت‌های پایه پلیمری [۵۹]

نام	اندازه	رابطه	منبع
فاکتور لایه‌لایه‌شدن معمولی	۱	$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$	چن [۶۰]
ضریب لایه‌لایه‌شدن اصلاح شده	٪	$F'_d = \frac{(D_{max} - D_{nom})}{D_{nom}} \times 100$	گوگل و همکاران [۶۱]
ضریب لایه‌لایه شدن معکوس	۱	$F_{d,inv} = \frac{D_{nom}}{D_{max}}$	خانا و همکاران [۶۲]
حداقل ضریب لایه‌لایه شدن	۱	$F_{dmin} = \frac{D_{min}}{D_{nom}}$	خانا و همکاران [۶۲]
ضریب لایه‌لایه شدن دوبعدی	٪	$DF = \left(\frac{A_{del}}{A_{nom}}\right)\%$	چن [۶۰]
ضریب لایه‌لایه‌شدن تنظیم شده	۱	$F_{da} = F_d + \left(\frac{A_{del}}{A_{max} - A_{nom}}\right).(F_d^2 - F_d)$	داویم و همکاران [۶۳]
ضریب لایه‌لایه‌شدن معادل	۱	$F_{ed} = \frac{\sqrt{\frac{4.(A_{del} + A_{nom})}{\pi}}}{D_{nom}}$	تسائو و همکاران [۶۴]
اندازه لایه‌لایه‌شدن	۱	$R_d = R_{max} - R_{nom}$	خشابا [۶۵]

برای ارزیابی میزان آسیب لایه‌لایه شدن، از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود. در این میان، ضریب لایه‌لایه شدن به‌عنوان یک پارامتر اساسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است و در جدول (۱) خلاصه شده است لایه‌لایه شدن ناشی از سوراخکاری را می‌توان با چندین عامل ساده و پیچیده مشخص کرد.

دورائو و همکاران [۶۶] بیان کردند که کاهش لایه‌لایه شدن را می‌توان از طریق انتخاب شرایط ماشین‌کاری مناسب مانند نرخ پیشروی، سرعت برش، جنس ابزار و همچنین هندسه ابزار به دست آورد.

یالو و همکاران [۶۷] رفتار ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف جوت را تحت تأثیر پارامترهای مختلف برش و جنس مختلف مته‌ها بررسی کردند. جنس مختلف مته‌ها با تنظیمات یکسان در هندسه ماشین‌کاری، تفاوت معناداری در مقادیر نیروی محوری و ضریب لایه‌لایه شدن ایجاد کردند. از میان مته‌های استفاده شده، مته سهموی بهترین عملکرد برشی را با کمترین نیروهای ماشین‌کاری و بهترین کیفیت سوراخ‌ها نشان داد.



شکل ۱ نمودار شماتیک برای تفسیر ویژگی‌های هندسی اصلی مربوط به معیارهای لایه‌لایه‌شدن [۵۹] و [۶۸]

رزقی ملکی و همکاران [۶۹] سوراخکاری سنتی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف جوت را مطالعه کردند و در این کار به بررسی تأثیر نوع مته و نرخ پیشروی بر نیروی محوری و لایه‌لایه شدن پرداختند. نتایج نشان داد که مته مارپیچ از جنس فولاد تندبر نیروی محوری کمتری نسبت به مته‌های کورودریل ۸۵۴ و ۸۵۶ تولید می‌کند و تأثیر سرعت دورانی بر نیروی محوری ناچیز است. همچنین نتایج نشان داد که لایه‌لایه‌شدن در قسمت خروجی مته بیشتر از لایه‌لایه‌شدن در قسمت ورودی مته است و تفاوت در نوع مته تأثیر قابل توجهی بر اندازه لایه‌لایه شدن دارد. افزایش نرخ پیشروی باعث کاهش لایه‌لایه شدن در استفاده از مته پیچشی و کورودریل ۸۵۶ شد. زبری سطح اساساً توسط نوع مته تحت تأثیر قرار گرفته و دمای برشی کمتری برای مته‌های مارپیچ مشاهده شد. رزقی ملکی و همکاران در پژوهشی دیگر [۷۰] ارزیابی لایه‌لایه‌شدن حاصل از سوراخکاری در کامپوزیت‌های الیاف طبیعی توسط روش‌های مختلف غیر مخرب را بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش پردازش تصویر با استفاده از اسکنر می‌تواند به عنوان یک روش آسان، اقتصادی و کارآمد برای ارزیابی لایه لایه شدن استفاده شود.

بابو و همکاران [۱۴] ضریب لایه‌لایه شدن و مقادیر زبری سطح حاصل از سوراخ شدن کامپوزیت‌های الیاف طبیعی شامل چتایی، کنف، جوت و موز را با کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه مقایسه نمودند. نتایج تحقیقات نشان داد که در کامپوزیت تقویت شده با الیاف جوت، ضریب لایه‌لایه شدن و مقادیر زبری سطح بیشتر از سایر کامپوزیت‌ها می‌باشد. این مقادیر در کامپوزیت‌های طبیعی تقویت شده با الیاف کنف و موز نزدیک به کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه بود.

رزقی ملکی و همکاران [۷۱] سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کتان را بررسی کردند. مته مارپیچ استاندارد در مقایسه با ابزارهای کاربیدی ویژه، منجر به تولید نیروی محوری کمتر و آسیب کمتر سوراخ در کامپوزیت‌ها شد. بررسی‌ها نشان داد که هندسه ابزار به طور قابل ملاحظه‌ای بر نیروی محوری حین ماشین‌کاری و متعاقباً لایه‌لایه شدن تأثیر می‌گذارد. در مقابل، سایر پارامترها نظیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی تأثیر کمتری بر پارامترهای خروجی داشتند.

جنارتانان و جیاپاول [۷۲] دریافتند دقت ابعادی را می‌توان با کاهش زبری سطح و ضریب لایه‌لایه شدن بهبود بخشید و همچنین عملکرد کامپوزیت را بالا برد.

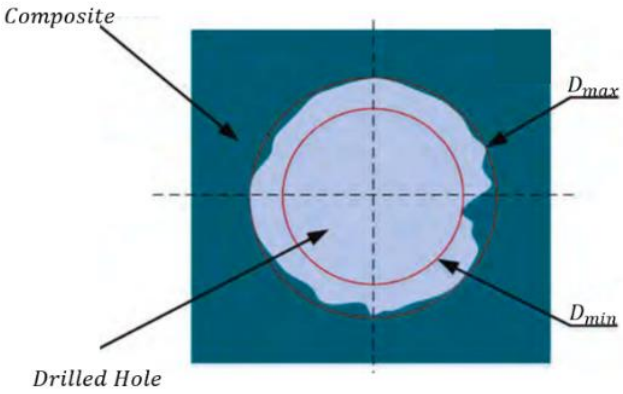
۳-۲- ارزیابی کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت سوراخکاری، میزان دایره‌ای بودن سوراخ است که به طور مستقیم به نوع ماشین‌کاری استفاده شده، نوع ماده مورد ماشین‌کاری و پارامترهای ورودی مختلف بستگی دارد. دایره‌ای بودن سوراخ‌ها می‌تواند در هر دو نقطه ورودی و خروجی سوراخ به‌صورت جداگانه ارزیابی و تعریف شود که نشان‌دهنده دقت و استانداردهای برش در فرایند ماشین‌کاری است. در

کامپوزیت‌های پایه پلیمری، حفظ دایره‌ای بودن سوراخ‌ها می‌تواند چالش‌برانگیز باشد؛ زیرا این مواد به دلیل ساختار ناهمگن خود به راحتی تحت تأثیر نیروهای برشی قرار می‌گیرند که این امر می‌تواند منجر به ناهمواری‌ها و نامنظمی‌هایی در سطح و اطراف سوراخ‌ها شود [۷۳]. شکل (۲) مشکلات مربوط به دایره‌ای نبودن سوراخ‌های ایجاد شده در کامپوزیت‌ها را به وضوح نمایش داده است که تأکیدی بر اهمیت انتخاب صحیح ابزار و تنظیمات دقیق ماشین‌کاری در جهت بهبود کیفیت نهایی محصول دارد. از نظر ریاضی، طبق معادله زیر دایروی بودن نسبت حداقل قطر به حداکثر قطر سوراخ تعریف شده است:

$$Circularity = \frac{D_{min}}{D_{\max}} \quad (۱)$$

که در آن $D_{\min}$ حداقل قطر و D_{max} حداکثر قطر سوراخ ایجاد شده است [۷۴].



شکل ۲ مشکل عدم دایره‌ای بودن سوراخ ایجاد شده[۷۴]

زیتون و همکاران [۷۵] از طریق آزمایش‌های عملی تأثیرات پارامترهای مختلف بر گشتاور، نیروی محوری و صافی سطح را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دادند که انتخاب صحیح پارامترهای برش می‌تواند به بهبود کیفیت سوراخ‌ها کمک کند. فرنس و همکاران [۷۶] تجزیه و تحلیل آماری تاثیر نرخ پیشروی، سرعت برش و سایش را در کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که پیشروی و سرعت تأثیر کمی بر کیفیت سوراخ دارند.

آددا و همکاران [۷۷] بر اساس نتایج سوراخکاری بر روی کامپوزیت پلی استر تقویت‌شده با الیاف جوت مشاهده کردند که لایه‌لایه شدن به پارامترهای مختلف برش بسیار حساس می‌باشند. ترکیب نرخ پیشروی کم و سرعت دوران بالا، موجب کاهش لایه‌لایه شدن می‌شود. همچنین استفاده از قطر مته کمتر و نرخ پیشروی کمتر نیز می‌تواند ضریب لایه‌لایه شدن را کاهش دهد. پالانیکومار و همکاران [۷۸] افزایش لایه‌لایه شدن را با افزایش نیروی محوری مشاهده کرده اند.

۳-۳- ارزیابی زبری سطح

این ویژگی میزان صافی یا زبری سوراخ‌های سطح مورد نیاز را اندازه می‌گیرد. زبری سطح را می توان با مشاهده بی‌نظمی سطح سوراخ‌های تولید شده ارزیابی کرد [۷۹]. مقدار بالای زبری سطح در سوراخ‌ها باعث خستگی و سایش بیش از حد در محل سوراخ می‌شود. نرخ پیشروی و سرعت دورانی تأثیر عمده‌ای بر زبری سطح سوراخ‌های تولید شده توسط عملیات ماشین‌کاری دارند [۸۰]. کیفیت پرداخت سطح داخلی سوراخ‌های ایجاد شده در فرایند سوراخکاری به طور چشمگیری بر عملکرد آن‌ها در سرویس‌دهی اثر می‌گذارد. یک سطح با کیفیت بالا، افزایش قابلیت اطمینان بعد از مونتاژ را ممکن می‌سازد. تلاش‌های فراوانی برای اصلاح پارامترهای سوراخکاری جهت رسیدن به نرخ زبری سطح مطلوب صورت گرفته است. زبری سطح بیش از حد یا نوسانات شدید در زبری می‌تواند به شکست ماده در برابر بارهای خستگی منجر شود که این امر نهایتاً باعث ایجاد ناسازگاری، افزایش اصطکاک و تولید حرارت در دیواره‌های سوراخ می‌شود [۸۱]. زبری سطح در سوراخکاری کامپوزیت‌ها تحت تأثیر عواملی چون سرعت دوران، نرخ پیشروی و جنس مته قرار دارد. با افزایش دور دوران و سرعت پیشروی، زبری سطح عموماً افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از نیروهای برشی بیشتر و تنش‌های ناگهانی ایجاد شده بر سطح کامپوزیت باشد که به پراکندگی و نامنظمی سطح منجر می‌شود [۸۲]. باجپای و سینگ [۸۳] مطالعاتی در زمینه ماشین‌کاری بر روی کامپوزیت‌های هیبریدی انجام دادند. آنها از انواع مته‌ها از جمله مته مارپیچ تندبر، مته مارپیچ چندساختی و انواع مته براد و خار استفاده کردند. در این آزمایشات از الیاف شیشه، سیسال و جوت به عنوان مواد تقویت‌کننده نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شد. مته‌های براد و خار آسیب کمتری در اطراف سوراخ ایجاد کردند و نیروی محوری کمتری نسبت به دیگر مته‌ها داشتند. از سوی دیگر، مته مارپیچ باعث لایه‌لایه‌شدن بیشتری در سطح چندلایه-های کامپوزیتی شد.

پالانیکومار [۸۰] در مطالعه سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه نرخ پیشروی را اصلی‌ترین پارامتر تأثیرگذار در این مطالعه بر زبری و ضریب لایه‌لایه شدن دانست. قطر مته تأثیر بیشتری بر ضریب لایه‌لایه شدن و تأثیر کمتری بر مقدار زبری سطح داشت. جان و همکاران [۸۴] اثر پارامترهای

ماشین‌کاری را در زبری سطح و لایه‌لایه شدن کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با کناف، جوت و پوسته برنج مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج، کمترین آسیب لایه‌لایه شدن و بهترین کیفیت سطح در الیاف کناف مشاهده شد. علاوه بر این، تفاوت در محتوای سیلیکون و سختی سه ماده به طور قابل توجهی بر کیفیت سطح تأثیر گذاشت.

چلیک و همکاران [۸۵] گزارش کردند که افزایش تعداد شیارهای ابزار در طول ماشین‌کاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی، می تواند منجر به کاهش قابل توجهی در نیروی برش، لایه‌لایه شدن و زبری سطح شود.

۴- جمع‌بندی اثر پارامترهای مختلف

۴-۱- پارامترهای ماشین‌کاری

در تحقیقات اخیر، مشخص شده است که تنظیم دقیق پارامترهای ماشین‌کاری، از جمله سرعت دوران، سرعت برش و نرخ پیشروی برای دستیابی به نتایج بهینه در فرایند سوراخکاری حیاتی است. استفاده از سرعت‌های بالای دوران می‌تواند به افزایش سایش ابزار و دمای برش منجر شود که این امر نه‌تنها عمر ابزار را کاهش می‌دهد؛ بلکه بر کیفیت سوراخ‌کاری نیز تأثیر می‌گذارد. بااین‌حال، مطالعات نشان داده‌اند که کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی مقاومت کمتری در برابر ساییدگی دارند و به طور مؤثرتری می‌توانند با این چالش‌ها مقابله کنند. برای بهبود عملکرد و کیفیت، پیشنهاد می‌شود که از مته‌های پوشش داده شده و سیستم‌های خنک‌کننده استفاده شود تا از این طریق دمای برش کنترل شده و نتایج بهتری حاصل گردد.

۴-۲- جنس ابزار

تحلیل‌ها نشان داد که جنس ابزار تأثیر قابل‌توجهی بر دقت سوراخ‌های ایجاد شده دارد. همچنین نتایج نشان دادند که اگرچه مته‌های مارپیچ با جنس فولاد تندبر از نظر هزینه مقرون‌به‌صرفه هستند اما نرخ سایش در آن‌ها سریع‌تر از ابزارهای کاربید جامد است که دوام بیشتری و هزینه بالاتری دارند. در برخی تحقیقات مته‌های مارپیچ با جنس فولاد تندبر به عنوان مناسب‌ترین ابزار برای سوراخکاری کامپوزیت‌های الیاف طبیعی معرفی شد. سایش ابزار به‌عنوان یک عامل کلیدی تأثیرگذار بر شرایط اولیه فرایند سوراخکاری شناخته شد. سایش بیش از حد منجر به انحراف از ابعاد و کیفیت سطح موردنظر سوراخ شده که افزایش احتمال نقص در بخش ورودی و خروجی سوراخ‌ها را به دنبال دارد. این تغییرات می‌توانند به کاهش کیفیت سوراخ‌ها و افزایش هزینه‌ها منجر شود که به کاهش بهره‌وری تولید نیز می‌انجامد.

۴-۳- هندسه ابزار

هندسه مته شامل شکل، قطر و زاویه نوک ابزار نقش حیاتی در بهبود ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف طبیعی دارد. استفاده از هندسه‌های مناسب مته کمک می‌کند تا آسیب‌های ناشی از فرایند سوراخکاری کاهش یابد و در نتیجه کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده بهبود یابد. نتایج نشان دادند که ابزارهای با قطر کمتر، نیروی محوری و گشتاور کمتری تولید می‌کنند که این امر به نوبه خود باعث کاهش لایه‌لایه‌شدن در اطراف سوراخ‌های ایجاد شده می‌شود. استفاده از هندسه‌های مخصوص و جنس مته مناسب می‌تواند به‌شدت در کاهش خطرات مرتبط با سایش ابزار و بهبود کلی فرایند سوراخکاری کمک کند.

۴-۴- لایه‌لایه شدن

در تحقیقات اخیر در زمینه ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، موضوع لایه‌لایه شدن به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی مطرح شده است. این پدیده بیشتر در ابتدا و انتهای فرایند ماشین‌کاری رخ داده و منجر به کاهش تمامیت ساختاری، کیفیت سطحی و استحکام باربری می‌گردد. تحقیقات نشان داده‌اند که این مشکل می‌تواند به‌وسیله انتخاب مناسب پارامترهای ماشین‌کاری مانند پیشروی و سرعت برش به طور قابل‌توجهی کاهش یابد.

از دیگر یافته‌های مهم در این زمینه، اثرات متفاوت جنس و شکل ابزارهای برشی در کاهش این پدیده است. مته‌های سهموی به دلیل طراحی خاص خود، نیروهای کمتری را در حین ماشین‌کاری ایجاد کرده و منجر به کیفیت بهتر سوراخ‌ها می‌شوند. در مقابل، استفاده از مته‌های پله‌ای نیز نتایج قابل‌توجهی در استحکام باقیمانده نسبت به مته‌های شمعدانی و مارپیچ به همراه داشته است. مقایسه میان کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی و الیاف شیشه نیز نکات جالب‌توجهی را آشکار ساخته است. کامپوزیت‌های الیاف طبیعی نرخ بالاتری از لایه‌لایه شدن و زبری سطح را نشان داده‌اند که این مسئله به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این نوع الیاف باز می‌گردد. این یافته‌ها به صنعتگران کامپوزیت این امکان را می‌دهند که با

انتخاب دقیق‌تر الیاف و تنظیم شرایط ماشین‌کاری، به بهبود عملکرد کامپوزیت و دقت ابعادی آن بپردازند.

۴-۵- کیفیت سوراخ‌های تولید شده

کیفیت سوراخ‌های تولید شده در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف یکی از معیارهای اصلی برای سنجش کارایی فرایند ماشین‌کاری است. دایره‌ای بودن سوراخ‌ها که به‌عنوان نسبت حداقل قطر به حداکثر قطر سوراخ تعریف می‌شود نشان‌دهندهٔ توانایی فرایند در تولید قطعات با دقت ابعادی بالا می‌باشد. تنظیم دقیق پارامترهای برش، مانند سرعت برش و نرخ پیشروی اساس بهبود این ویژگی است.

استفاده از انواع مته‌های مخصوص، مانند مته‌های براد و خار، کمک شایانی به کاهش آسیب‌دیدگی اطراف سوراخ‌ها و کاهش نیروی قائم می‌کند. این مته‌ها با کمترین تماس و فشار به ماده، سوراخ‌های دقیق‌تر و با دایره‌ای بودن بالاتر تولید می‌کنند.

۴-۶- زبری سطح

زبری سطح، به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در کیفیت ماشین‌کاری، تأثیر مستقیمی بر تولید سوراخ‌های دقیق و باکیفیت دارد. بی‌نظمی‌های روی سطح سوراخ‌ها که در اثر فرایند ماشین‌کاری ایجاد می‌شوند، می‌توانند نتیجه انتخاب مواد، نوع ابزار، پارامترهای برش و تکنیک‌های استفاده شده باشند. این ناهمواری‌ها ممکن است به شکست خستگی زودهنگام یا سایش بیش از حد در قطعات ماشین‌کاری شده منجر شوند که در نتیجه بر دوام و کارایی کلی محصول تأثیر می‌گذارند. در تحقیقات مشخص شده است که کامپوزیت‌های تقویت شده با کناف نسبت به کامپوزیت‌های دارای الیاف شیشه یا جوت، زبری سطح کمتر و کیفیت بالاتری را در سوراخ‌کاری نشان می‌دهند. این تفاوت ممکن است به دلیل سختی کمتر کناف و وجود سیلیکون در ساختار آن باشد که سبب کاهش اصطکاک و فرسایش در حین برش می‌شود. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و کنترل زبری سطح وجود دارد که هر کدام دقت و کاربردهای متفاوتی دارند. برخی از این روش‌ها شامل نمایه‌سازی زبری سطح در نقاط خاص هستند که امکان ارائه اطلاعات دقیق و موضعی را فراهم می‌کنند. دیگر روش‌ها، مانند مساحت ناهمواری سطح، به ارزیابی گسترده‌تر و سریع‌تر این ویژگی‌ها در سطح قطعه می‌پردازند. استفاده از قلم‌های مکانیکی برای ردیابی زبری خطی نیز یک روش مفید در برخی کاربردهای خاص است.

مطالعات اخیر نشان دادند که انتخاب دقیق نوع مته و تنظیم پارامترهای برش می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش زبری سطح و بهبود کیفیت سوراخ‌ها داشته باشد. مته‌های براد و خار به دلیل تولید نیروی محوری کمتر و آسیب کمتر به اطراف سوراخ، در کاهش زبری سطح مؤثر هستند. علاوه بر این، تحقیقات نشان دادند که افزایش تعداد فلوت‌ها در طول فرزکاری می‌تواند به کاهش نیروی برش و بهبود کلی زبری سطح کمک کند. این نکته تأکید می‌کند که انتخاب صحیح ابزار و پارامترهای ماشین‌کاری نه‌تنها بر کیفیت سطحی تأثیر می‌گذارد، بلکه به بهبود عملکرد کلی و استحکام قطعات نیز کمک می‌کند. نتیجتاً مهندسان و تکنسین‌ها باید به‌دقت نوع مته‌ها، شرایط برش و مواد استفاده شده را انتخاب کنند تا به بهترین نتایج دست یابند. این اطلاعات می‌تواند در صنعت ماشین‌کاری برای افزایش کارایی و کیفیت تولیدات، به‌ویژه در تولید قطعات دقیق و پیچیده که نیاز به استانداردهای کیفی بالا دارند، مفید واقع شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر عوامل مختلف بر فرایند ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی به‌دقت بررسی شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان دادند که با انتخاب دقیق متغیرهای کلیدی مانند سرعت دوران، نرخ پیشروی و انتخاب مته مناسب امکان کاهش آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه‌شدن و افزایش زبری سطح فراهم می‌شود. استفاده بهینه از ابزارهای با جنس مناسب نه‌تنها به کنترل دمای برش کمک می‌کند بلکه در کاهش سایش ابزار مؤثر واقع می‌شود که این عوامل به طور قابل‌ملاحظه‌ای کیفیت سوراخکاری را افزایش می‌دهند.

این تحقیق به‌وضوح بر اهمیت انتخاب مناسب ابزار و تنظیم دقیق پارامترهای ماشین‌کاری برای بهبود عملکرد و کاهش نقص‌ها در فرایندهای تولیدی که درگیر مواد کامپوزیتی هستند، تأکیدمی‌کند. بهینه‌سازی فرایندهای ماشین‌کاری با درنظرگرفتن خواص خاص مواد مورداستفاده می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر کاهش هزینه‌های تولید، افزایش دوام و استحکام محصولات نهایی داشته باشد. بر این اساس توصیه می‌شود که مطالعات بیشتری برای فهم عمیق‌تر تأثیرات جنس و هندسه ابزار بر روی انواع مختلف مواد کامپوزیتی انجام گیرد تا راهنمایی‌های دقیق‌تری برای کاربردهای صنعتی ارائه شود. این دستاوردها نه‌تنها به پیشبرد دانش فنی در زمینه ماشین‌کاری کمک می‌کنند بلکه می‌توانند به‌عنوان مرجعی برای توسعه فناوری‌های نوین در صنایع مرتبط استفاده شوند.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

D_{min}	قطر حداقل
D_{Max}	قطر حداکثر
D_{nom}	قطر اسمی
A_{del}	مساحت لایه‌لایه شده
A_{nom}	مساحت اسمی
F_d	فاکتور لایه‌لایه شدن معمولی
F'_d	ضریب لایه‌لایه شدن اصلاح شده
$F_{d,inv}$	ضریب لایه‌لایه شدن معکوس
F_{dmin}	ضریب حداقل لایه‌لایه شدن
DF	ضریب لایه‌لایه شدن معمولی
F_{da}	ضریب لایه‌لایه شدن تنظیم شده
F_{ed}	ضریب لایه‌لایه شدن معادل
R_d	اندازه لایه‌لایه شدن
R_{max}	شعاع حداکثر
R_{nom}	شعاع اسمی

۷- مراجع

[1] A. Pegoretti, "Recycling concepts for short-fiber-reinforced and particle-filled thermoplastic composites: A review," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 4, no. 2, pp. 93-104, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.03.004.

[2] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, Y. G. T. Girijappa, S. M. Rangappa, M. K. Gupta, and S. Siengchin, "Mechanical, electrical and thermal behaviour of additively manufactured thermoplastic composites for high performance applications," *Additive and subtractive manufacturing of composites*, pp. 167-199, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3184-9_7.

[3] M. Das, S. Sahu, and D. Parhi, "Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 955-960, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.005.

[4] D. Carrasco-Baltasar, S. García-Castillo, I. Ivañez, and C. Navarro, "Modelling of woven CFRP plates subjected to oblique high-velocity impact and membrane loads," *Composite Structures*, vol. 303, p. 116344, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116344.

[5] B. Mei and W. Zhu, "Accurate positioning of a drilling and riveting cell for aircraft assembly," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 69, p. 102112, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102112.

[6] M. Aamir, M. Tolouei-Rad, K. Giasin, and A. Nosrati, "Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: A review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 2289-2308, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-019-04348-z.

[7] H. Fernandes Medeiros de Queiroz, M. D. Banea, D. Kioshi Kawasaki Cavalcanti, and J. de Souza e Silva Neto, "The effect of multiscale hybridization on the mechanical properties of natural fiber-reinforced composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, no. 41, p. 51213, 2021, doi: https://doi.org/10.1002/app.51213.

[8] L. Calabrese, E. Piperopoulos, and V. Fiore, "Arundo donax fibers as green materials for oil spill recovery," *Biofibers and biopolymers for biocomposites: Synthesis, characterization and properties*, pp. 259-283, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40301-0_13.

[9] A. A. B. Omran *et al.*, "Micro-and nanocellulose in polymer composite materials: A review," *Polymers*, vol. 13, no. 2, p. 231, 2021, doi: https://doi.org/10.3390/polym13020231.

[10] A. Kadier *et al.*, "Use of industrial wastes as sustainable nutrient sources for bacterial cellulose (BC) production: Mechanism, advances, and future perspectives," *Polymers*, vol. 13, no. 19, p. 3365, 2021, doi: https://doi.org/10.3390/polym13193365.

[11] Y. Kim and J. Park, "A theory for the free vibration of a laminated composite rectangular plate with holes in aerospace applications," *Composite Structures*, vol. 251, p. 112571, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112571.

[12] J. Claramunt, H. Ventura, R. D. Toledo Filho, and M. Ardanuy, "Effect of nanocelluloses on the microstructure and mechanical performance of CAC cementitious matrices," *Cement and Concrete Research*, vol. 119, pp. 64-76, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.006.

[13] U. Khashaba, H. Sallam, A. Al-Shorbagy, and M. Seif, "Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures," *Composite Structures*, vol. 73, no. 3, pp. 310-317, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.02.004.

[14] G. D. Babu, K. S. Babu, and B. U. M. Gowd, "Effect of machining parameters on milled natural fiber-reinforced plastic composites," *J. Adv. Mech. Eng*, vol. 1, pp. 1-12, 2013, doi: https://doi:10.7726/jame.2013.1001.

[15] D. Che, I. Saxena, P. Han, P. Guo, and K. F. Ehmann, "Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, no. 3, p. 034001, 2014, doi: https://doi.org/10.1115/1.4026526.

[16] F. Chegdani and M. El Mansori, "New Multiscale Approach for Machining Analysis of Natural Fiber ReinforcedBio-Composites," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 1, 2018, doi: https://doi.org/10.1115/1.4041326.

[17] A. Khan, N. Kim, J. K. Shin, H. S. Kim, and B. D. Youn, "Damage assessment of smart composite structures via machine learning: a review," *JMST Advances*, vol. 1, pp. 107-124, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/s42791-019-0012-2.

[18] F. Ahmad, A. Manral, and P. K. Bajpai, "Machining of thermoplastic composites," *Processing of green composites*, pp. 107-123, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6019-0_8.

[19] K. Malik, F. Ahmad, and E. Gunister, "Drilling performance of natural fiber reinforced polymer composites: a review," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 12, pp. 4761-4779, 2022, doi: https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1870624.

[20] R. Stone and K. Krishnamurthy, "A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, no. 9, pp. 985-1003, 1996, doi: https://doi.org/10.1016/0890-6955(96)00013-2.

[21] M. Altin Karataş, A. R. Motorcu, and H. Gökkaya, "Study on delamination factor and surface roughness in abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composites with different fiber orientation angles," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, pp. 1-29, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s40430-020-02741-4.

[22] J. Xu, "Manufacturing of fibrous composites for engineering applications," vol. 6, no. 7, p. 187, 2022, doi: https://doi.org/10.3390/jcs6070187.

[23] G. Hegedus, T. Sarkadi, and T. Czigany, "Self-sensing composite: reinforcing fiberglass bundle for damage detection," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 131, p. 105804, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105804.

[24] K. K. Panchagnula, N. V. K. Jasti, and J. S. Panchagnula, "Prediction of drilling induced delamination and circularity deviation in GFRP nanocomposites using deep neural network," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 7118-7123, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.041.

[25] M. Monoranu, R. L. Mitchell, K. Kerrigan, J. P. A. Fairclough, and H. Ghadbeigi, "The effect of particle reinforcements on chip formation and machining induced damage of modified epoxy carbon fibre reinforced polymers (CFRPs)," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 154, p. 106793, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106793.

[26] D. Geng *et al.*, "Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review," *Composite Structures*, vol. 216, pp. 168-186, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099.

[27] A. Jain, B. Singh, and Y. Shrivastava, "Reducing the heat-affected zone during the laser beam drilling of basalt-glass hybrid composite," *Composites Part B: Engineering*, vol. 176, p. 107294, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107294.

[28] R. Tewari, M. K. Singh, S. Zafar, and S. Powar, "Parametric optimization of laser drilling of microwave-processed kenaf/HDPE composite," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 176-187, 2021, doi: https://doi.org/10.1177/0967391120905705.

[29] H. N. Dhakal, S. O. Ismail, S. O. Ojo, M. Paggi, and J. R. Smith, "Abrasive water jet drilling of advanced sustainable bio-fibre-reinforced polymer/hybrid composites: a comprehensive analysis of machining-induced damage responses," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, pp. 2833-2847, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-018-2670-x.

[30] S. Kalirasu, N. Rajini, S. Rajesh, J. W. Jappes, and K. Karuppasamy, "AWJM Performance of jute/polyester composite using MOORA and analytical models," *Materials and manufacturing processes*, vol. 32, no. 15, pp. 1730-1739, 2017, doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279314.

[31] N. Abilash and M. Sivapragash, "Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 28, no. 1, pp. 92-102, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004.

[32] A. KM and J. MP, "Optimization of process parameters on drilling of natural fibres reinforced in epoxy resin matrices using Taguchi–Grey relational analysis," *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, vol. 16, no. 5, pp. 937-949, 2020, doi: https://doi.org/10.1108/mmms-06-2019-0108.

[33] A. Athijayamani, M. Thiruchitrambalam, U. Natarajan, and B. Pazhanivel, "Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite," *Polymer composites*, vol. 31, no. 4, pp. 723-731, 2010, doi: https://doi.org/10.1002/pc.20853.

[34] K. Debnath, M. Sisodia, A. Kumar, and I. Singh, "Damage-free hole making in fiber-reinforced composites: an innovative tool design approach," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 10, pp. 1400-1408, 2016, doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1140191.

[35] A. Solati, M. Hamedi, and M. Safarabadi, "Combined GA-ANN approach for prediction of HAZ and bearing strength in laser drilling of GFRP composite," *Optics & Laser Technology*, vol. 113, pp. 104-115, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.016.

[36] A. Solati, M. Hamedi, and M. Safarabadi, "Comprehensive investigation of surface quality and mechanical properties in CO 2 laser drilling of GFRP composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 791-808, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-018-3164-6

[37] M. Kadivar, J. Akbari, R. Yousefi, A. Rahi, and M. G. Nick, "Investigating the effects of vibration method on ultrasonic-assisted drilling of Al/SiCp metal matrix composites," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 3, pp. 344-350, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.10.001.

[38] P. Mehbudi, V. Baghlani, J. Akbari, A. Bushroa, and N. Mardi, "Applying ultrasonic vibration to decrease drilling-induced delamination in GFRP laminates," *Procedia Cirp*, vol. 6, pp. 577-582, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.097.

[39] T. Rajmohan, R. Vinayagamoorthy, and K. Mohan, "Review on effect machining parameters on performance of natural fibre–reinforced composites (NFRCs)," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 32, no. 9, pp. 1282-1302, 2019, doi: https://doi.org/10.1177/0892705718796541.

[40] L. M. P. Durão, J. M. R. Tavares, V. H. C. De Albuquerque, J. F. S. Marques, and O. N. Andrade, "Drilling damage in composite material," *Materials*, vol. 7, no. 5, pp. 3802-3819, 2014.

[41] A. A. A. Nasir, A. I. Azmi, T. C. Lih, and M. S. A. Majid, "Critical thrust force and critical feed rate in drilling flax fibre composites: A comparative study of various thrust force models," *Composites Part B: Engineering*, vol. 165, pp. 222-232, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.134.

[42] V. Chaudhary and P. P. Gohil, "Investigations on drilling of bidirectional cotton polyester composite," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 7, pp. 960-968, 2016, doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444.

[43] A. A. Nasir, A. Azmi, and A. Khalil, "Measurement and optimisation of residual tensile strength and delamination damage of drilled flax fibre reinforced composites," *Measurement*, vol. 75, pp. 298-307, 2015, doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444.

[44] M. M. Nassar, R. Arunachalam, and K. I. Alzebdeh, "Machinability of natural fiber reinforced composites: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, pp. 2985-3004, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9010-9.

[45] P. Mayuet, A. Gallo, A. Portal, P. Arroyo, M. Alvarez, and M. Marcos, "Damaged area based study of the Break-IN and Break-OUT defects in the dry drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)," *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 743-751, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.249.

[46] M.-B. Lazar and P. Xirouchakis, "Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, no. 12, pp. 937-946, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.009.

[47] C. Tsao and H. Hocheng, "Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials," *International journal of mechanical sciences*, vol. 49, no. 8, pp. 983-988, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.01.001.

[48] A. Lotfi, H. Li, D. V. Dao, and G. Prusty, "Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 34, no. 2, pp. 238-284, 2021, doi: https://doi.org/10.1177/0892705719844546.

[49] S. Jayabal and U. Natarajan, "Optimization of thrust force, torque, and tool wear in drilling of coir fiber-reinforced composites using Nelder–Mead and genetic algorithm methods," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, pp. 371-381, 2010, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-010-2605-7.

[50] D. Liu, Y. Tang, and W. Cong, "A review of mechanical drilling for composite laminates," *Composite structures*, vol. 94, no. 4, pp. 1265-1279, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024.

[51] A. Caggiano, "Machining of fibre reinforced plastic composite materials," *Materials*, vol. 11, no. 3, p. 442, 2018, doi: https://doi.org/10.3390/ma11030442.

[52] T. Rajamurugan, K. Shanmugam, and K. Palanikumar, "Analysis of delamination in drilling glass fiber reinforced polyester composites," *Materials & Design*, vol. 45, pp. 80-87, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.047.

[53] A. Abrao, P. Faria, J. C. Rubio, P. Reis, and J. P. Davim, "Drilling of fiber reinforced plastics: A review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, no. 1-3, pp. 1-7, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146.

[54] J. C. Rubio, A. Abrao, P. Faria, A. E. Correia, and J. P. Davim, "Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 6, pp. 715-720, 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.015.

[55] M. Ganjiani, M. Safarabadi, N. Mehri-Khansari, and H. Oruji, "Effects of delamination in drilling glass/polyester composite," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 552-567, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s11709-021-0699-7.

[56] T. H. Nam, S. Ogihara, N. H. Tung, and S. Kobayashi, "Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 1648-1656, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.001.

[57] S. Karnik, V. Gaitonde, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. Abrão, and J. P. Davim, "Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model," *Materials & Design*, vol. 29, no. 9, pp. 1768-1776, 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.014.

[58] M. Safarabadi and M. Sardar, "Numerical study of GFRP joints bearing strength reduction due to drilling-induced delamination," *Journal of Composite Materials*, vol. 54, no. 16, pp. 2185-2194, 2020, doi: https://doi.org/10.1177/0021998319893075.

[59] T. Lukács, C. Pereszlai, and N. Geier, "Delamination measurement in glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite based on image differencing," *Composites Part B: Engineering*, vol. 248, p. 110381, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110381.

[60] W.-C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 8, pp. 1097-1108, 1997, doi: https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8.

[61] S. Gaugel *et al.*, "A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)," *Composite Structures*, vol. 155, pp. 173-183, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.08.004.

[62] N. Khanna, F. Pusavec, C. Agrawal, and G. M. Krolczyk, "Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility," *Measurement*, vol. 154, p. 107504, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107504.

[63] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. Abrao, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 1939-1945, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.009.

[64] C. Tsao, K. Kuo, and I. Hsu, "Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core–saw drill," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 617-622, 2012, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-011-3532-y.

[65] U. Khashaba, "Delamination in drilling GFR-thermoset composites," in *International conference on aerospace sciences and aviation technology*, 2003, vol. 10, no. 10th International Conference On Aerospace Sciences & Aviation Technology: The Military Technical College, pp. 461-481, doi: https://dx.doi.org/10.21608/asat.2013.24453.

[66] L. M. P. Durão *et al.*, "Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics," in *Materials Science Forum*, 2013, vol. 730: Trans Tech Publ, pp. 301-306, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301.

[67] T. B. Yallew, P. Kumar, and I. Singh, "A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 230, no. 4, pp. 888-898, 2016, doi: https://doi.org/10.1177/1464420715587750.

[68] N. Geier, D. I. Poór, C. Pereszlai, J. Bacs, and B. Z. Balázs, "Fúrásindukált delamináció kialakulása és mérőszámai szálerősített polimer (FRP)

kompozitokban= Formation and Measures of Drilling Induced Delamination in Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites," *Gradus*, vol. 8, no. 1, pp. 254-260, 2021, doi: https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.005.

[69] H. Rezghi Maleki, M. Hamedi, M. Kubouchi, and Y. Arao, "Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 3, pp. 283-295, 2019, doi: https://doi.org/10.1177/0021998318782376.

[70] H. R. Maleki, B. Abazadeh, Y. Arao, and M. Kubouchi, "Selection of an appropriate non-destructive testing method for evaluating drilling-induced delamination in natural fiber composites," *NDT & E International*, vol. 126, p. 102567, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102567.

[71] H. Rezghi Maleki, M. Hamedi, M. Kubouchi, and Y. Arao, "Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 34, no. 3, pp. 283-292, 2019, doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532584.

[72] M. Jenarthanan and R. Jeyapaul, "Machinability study of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites using design of experiment technique," *Pigment & Resin Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 35-44, 2014, doi: https://doi/10.1108/PRT-12-2012-0088.

[73] G. Kumar, S. M. Rangappa, S. Siengchin, and S. Zafar, "A review of recent advancements in drilling of fiber-reinforced polymer composites," *Composites Part C: Open Access*, vol. 9, p. 100312, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100312.

[74] A. Singh and A. K. Sharma, "On microwave drilling of metal-based materials at 2.45 GHz," *Applied Physics A*, vol. 126, no. 10, p. 822, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/s00339-020-03994-5.

[75] R. Zitoune, V. Krishnaraj, and F. Collombet, "Study of drilling of composite material and aluminium stack," *Composite structures*, vol. 92, no. 5, pp. 1246-1255, 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.010.

[76] R. Furness, C. Wu, and A. G. Ulsoy, "Statistical analysis of the effects of feed, speed, and wear on hole quality in drilling," 1996, doi: https://doi.org/10.1115/1.2831038.

[77] B. Adda, A. Belaadi, M. Boumaaza, and M. Bourchak, "Experimental investigation and optimization of delamination factors in the drilling of jute fiber–reinforced polymer biocomposites with multiple estimators," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, pp. 2885-2907, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s00170-021-07628-9.

[78] K. Palanikumar, B. Latha, V. Senthilkumar, and J. P. Davim, "Analysis on drilling of glass fiber–reinforced polymer (GFRP) composites using grey relational analysis," *Materials and manufacturing Processes*, vol. 27, no. 3, pp. 297-305, 2012, doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2011.577865.

[79] I. Cavusoglu, M. Durakbasa, and M. Cakir, "The effects of drilling operation on the surface roughness of modified GFRP composites," 2018, doi: https://10.12693/APhysPolA.134.339.

[80] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, and R. Karthikeyan, "Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites," *Materials & design*, vol. 27, no. 10, pp. 862-871, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.03.011.

[81] S. Margabandu and S. Subramaniam, "An experimental investigation of thrust force, delamination and surface roughness in drilling of jute/carbon hybrid composites," *World Journal of Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 661-674, 2020, doi: https://doi/10.1108/WJE-03-2020-0080.

[82] R. Vinayagamoorthy, I. Manoj, G. Narendra Kumar, I. Sai Chand, G. Sai Charan Kumar, and K. Suneel Kumar, "A central composite design based fuzzy logic for optimization of drilling parameters on natural fiber reinforced composite," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, pp. 2011-2020, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/s12206-018-0409-0.

[83] P. K. Bajpai and I. Singh, "Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 32, no. 20, pp. 1569-1576, 2013, doi: https://doi.org/10.1177/0731684413492866.

[84] R. John, R. Lin, K. Jayaraman, and D. Bhattacharyya, "Effects of machining parameters on surface quality of composites reinforced with natural fibers," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 36, no. 1, pp. 73-83, 2021, doi: https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1813896.

[85] Y. H. Çelik, E. Kilickap, and A. İ. Kilickap, "An experimental study on milling of natural fiber (jute)-reinforced polymer composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 22, pp. 3127-3137, 2019, doi: https://doi.org/10.1177/0021998319826373.