ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. 2027;27(03):255-264.

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/mme.2026.123285.83101
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Experimental and Thermographic Analysis of Delamination in GFRP Composite Drilling Under Feed Rate Effects: A Comparative Study with Low-Velocity Impact

Sajjad Seifoori[1*], Ahmad Mahdian Parrany[2], Ali Akbar Majidi-Jirandehi[3], Esmail Shokouhi[2]

[1] Caspian Faculty of Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Rezvanshahr, Gilan, Iran
[2] Department of Mechanical Engineering, Vali–e–Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
[3] Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: September 02, 2026
Revised: September 29, 2026
Accepted: October 03, 2026
ePublished: October 29, 2026

ABSTRACT

Glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites are widely used in engineering applications due to their high strength-to-weight ratio and corrosion resistance. However, drilling at high feed rates induces transient, quasi-impact loading with severe stress concentrations, exacerbating delamination at hole entry and exit. This experimental study comprehensively investigates the effects of feed rate, spindle speed, drill geometry and diameter, pre-drilling, and cooling on the delamination factor of 2-mm-thick GFRP laminates. Infrared thermography was employed to capture localized surface temperature distributions, and drill-induced failure mechanisms were comparatively evaluated against low-velocity impact tests. The results revealed that increasing the feed rate substantially elevated the delamination factor due to abrupt dynamic thrust forces. Among all tools, the 10-mm step drill minimized delamination by progressively distributing axial loads, while pre-drilling mitigated initial penetration severity. Thermographic analysis showed that higher spindle speeds raised cutting temperatures, whereas cooling effectively suppressed matrix thermal softening, thereby reducing delamination. In low-velocity impact tests, the damaged areas for flat, hemispherical, and conical impactors were 0.20, 1.21, and 3.19 cm^2, respectively, confirming that sharp contact geometries induce severe localized damage analogous to high feed-rate drilling. Consequently, controlling feed rate, employing step drills, pre-drilling, and applying cooling are critical strategies to suppress delamination in GFRP composite drilling.

Keywords: GFRP Composite; Drilling; Feed Rate; Low-Velocity Impact; Thermography

How to cite this article
Seifoori S, Mahdian Parrany A, Majidi-Jirandehi A A, Shokouhi E, Experimental and Thermographic Analysis of Delamination in GFRP Composite Drilling Under Feed Rate Effects: A Comparative Study with Low-Velocity Impact. Modares Mechanical Engineering; 2027;27(03):255-264.

*Corresponding author's email: sajjad.seifoori@ut.ac.ir
*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-3831-924X

Copyright© 2027, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شاپا: ۶۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۲۶۴-۲۵۵:(۰۳)۲۷;۱۴۰۵

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2026.123285.83101

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی و ترموگرافی لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ‌کاری کامپوزیت (GFRP) تحت اثر نرخ پیشروی و مقایسه آن با آزمون ضربه کم‌سرعت

سجاد صیفوری[۱*]، احمد مهدیان پرانی[۲]، علی اکبر مجیدی جیرندهی[۳]، اسماعیل شکوهی[۲]

[۱] دانشکده فنی کاسپین، پردیس فنی، دانشگاه تهران، رضوانشهر، گیلان، ایران

[۲] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

[۳] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۸/۰۷

چکیده

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) به‌دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی عالی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مهندسی دارند. بااین‌حال، سوراخ‌کاری در نرخ‌های پیشروی بالا موجب اعمال بارگذاری گذرا و شبه‌ضربه‌ای همراه با تمرکز تنش شدید شده و لایه‌لایه‌شدگی را در ورودی و خروجی سوراخ تشدید می‌کند. در این پژوهش تجربی، تأثیر نرخ پیشروی، سرعت دوران، قطر و هندسه ابزار، پیش‌سوراخ‌کاری و خنک‌کاری بر ضریب لایه‌لایه‌شدگی لمینیت‌های (GFRP) با ضخامت ۲ میلی‌متر بررسی شد. توزیع دمای موضعی سطح با دوربین ترموگرافی ثبت و تحلیل گردید و سازوکار آسیب ناشی از مته با نتایج آزمون ضربه کم‌سرعت مقایسه شد. نتایج نشان داد افزایش نرخ پیشروی به‌دلیل بارگذاری دینامیکی محوری، ضریب لایه‌لایه‌شدگی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در میان ابزارها، مته پله‌ای ۱۰ میلی‌متری با توزیع تدریجی نیروی محوری کمترین آسیب را ایجاد کرد و پیش‌سوراخ‌کاری نیز شدت نفوذ اولیه ابزار را کاهش داد. تحلیل ترموگرافی نشان داد افزایش سرعت دوران موجب بالا رفتن دما شده، درحالی‌که خنک‌کاری با جلوگیری از نرم‌شدگی حرارتی ماتریس، لایه‌لایه‌شدگی را کاهش می‌دهد. در آزمون ضربه کم‌سرعت، مساحت آسیب برای پرتابه‌های تخت، کروی و مخروطی به‌ترتیب ۰٫۲۰، ۱٫۲۱ و ۳٫۱۹ سانتیمتر مربع به‌دست آمد که نشان‌دهنده شباهت آسیب ناشی از هندسه‌های نوک‌تیز با سوراخ‌کاری در نرخ‌های پیشروی بالاست. در نتیجه، کنترل نرخ پیشروی، به‌کارگیری مته پله‌ای، پیش‌سوراخ‌کاری و اعمال خنک‌کاری از راهکارهای کلیدی جهت مهار لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ‌کاری (GFRP) محسوب می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت با الیاف شیشه (GFRP) ؛ سوراخ‌کاری؛ نرخ پیشروی؛ ؛ ضربه کم‌سرعت؛ ترموگرافی.

نحوه ارجاع به این مقاله

صیفوری سجاد، مهدیان پرانی احمد، مجیدی جیرندهی علی اکبر، شکوهی اسماعیل، تحلیل تجربی و ترموگرافی لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ‌کاری کامپوزیت (GFRP) تحت اثر نرخ پیشروی و مقایسه آن با آزمون ضربه کم‌سرعت ، مهندسی مکانیک مدرس. ۲۶۴-۲۵۵:(۰۳)۲۷;۱۴۰۵.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sajjad.seifoori@ut.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۹۲۴-۳۸۳۱-۰۰۰۲-۰۰۰۰

Copyright© 2027, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

در ارزیابی رفتار ترومکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری، تکنیک‌های ترموگرافی فروسرخ بر اساس هدف آزمایش به دو دسته مجزا تقسیم می‌شوند:

۱) **ترموگرافی غیرفعال درحین فرایند (In-situ Passive Thermography):** جهت پایش مستقیم حرارت ناشی از براده‌برداری و اصطکاک مته در سوراخکاری و بررسی کارایی خنک‌کاری در جلوگیری از تضعیف ماتریس پلیمری.

۲) **ترموگرافی فعال ارتعاشی (Vibrothermography NDT):** به‌عنوان یک روش غیرمخرب پس از آزمون ضربه، که با اعمال تحریک اولتراسونیک و ایجاد حرارت اصطکاکی موضعی در سطوح تماس ترک‌ها (Rubbing Effect)، عیوب پنهان و مساحت دقیق لایه‌لایه‌شدگی ناشی از ضربه کم‌سرعت را آشکار می‌سازد.

هندسه مته نقش مهمی در بهبود قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پلیمری از چندین جنبه از جمله کاهش آسیب های 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.

تأثیر زاویه نوک مته بر نیروی محوری و گشتاور توسط بسیاری از محققان ارائه شده است. آنها گزارش دادند که گشتاور با افزایش زاویه نوک، کاهش می‌یابد. در مقابل، نیروی محوری با افزایش زاویه نوک به دلیل افزایش سطح برشی افزایش می‌یابد. کارنیک و همکاران [۱] از مته‌های مارپیچ کاربید سمنتد با زاویه نوک (۱۳۰ ، ۱۱۵ و ۸۵ درجه) در سوراخکاری کامپوزیت‌های پلیمری استفاده شده است. نتایج آنها نشان داد که حداقل لایه‌لایه شدگی با سرعت بالاتر و زاویه نوک پایین تر بدست آمد. آنها این نتایج را به اثر ترکیبی افزایش دما در سرعت برش بالا و نیروی محوری پایین تر برای زاویه نوک کوچک نسبت دادند.

چن [۲] اثر هندسه ابزار و پارامترهای سوراخکاری را بر تغییر نیروی برش در سوراخکاری مواد کامپوزیتی پلیمری (CFRP) بررسی کرد. وی دریافت که هرچه زاویه مارپیچ بزرگتر باشد، نیروی محوری و گشتاور آن نیز کوچکتر است. سهم لبه اسکنه به نیروی محوری برای مته مارپیچ اغلب تا ۴۰-۶۰ از کل نیروی محوری است.

برخی از انواع سوراخ‌های ویژه مانند مته اره، مته شمعدانی و مته هسته می‌توانند نیروی محوری را به جای تغلیظ آن در مرکز سوراخ همانند مته مارپیچ، توزیع کنند. در نتیجه این مته‌ها می‌توانند در سرعت پیشروی بالاتر (زمان ماشین‌کاری کمتر) با آسیب لایه‌لایه شدگی کمتری نسبت به مته مارپیچ عمل کنند.

لهسا و همکاران [۳] تأثیر متغیرهای برش بر نیروی محوری در سوراخکاری کامپوزیت‌های (GFRP) با مته‌های مختلف، یعنی براد و اسپور، چند وجهی و پله. آنها نشان دادند که در مقایسه با سایر سوراخ‌ها، سوراخ‌های براد و اسپور نیروی محوری بیشتری در سوراخکاری کامپوزیت‌های (GFRP) نشان می دهند. کمترین نیروی محوری برای مته‌های پله مشاهده می‌شود.

قابلیت‌های مته‌های مخصوص در مقایسه با مته مارپیچ این است که نرخ پیشروی بالاتری را بدون لایه‌لایه شدن با بار توزیع بهتر و نیروی محوری پایین‌تر فراهم کند. استفاده از لبه کوچک اسکنه جهت به حداقل رساندن لایه‌لایه شدگی ناشی از نیروی محوری پایین توصیه شده‌است [۴].

۲- پارامترهای مؤثر در فرآیند سوراخکاری مرسوم

سرعت برش (متر بر دقیقه) به سرعت خطی لبه بیرونی ابزار برش، یعنی سرعت مماسی ایجادشده بر سطح مته، اطلاق می‌شود. نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور) نیز میزان جابه‌جایی محوری مته در هر دور چرخش آن است. این دو پارامتر از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده کیفیت سوراخ‌های ایجادشده در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف (FRPC) به شمار می‌روند؛ با این تفاوت که نرخ پیشروی نقشی کلیدی‌تر دارد، زیرا نوع آسیب ایجادشده در حین سوراخکاری کامپوزیت‌های الیافی را مشخص می‌کند.

هنگام تماس مته با قطعه‌کار، نیرویی در راستای محوری به قطعه وارد می‌شود که نیروی محوری (Thrust Force) نامیده می‌شود. بزرگی این نیرو با حرکت رو به بالای براده‌ها که از طریق شیارهای مته از ناحیه برش خارج می‌شوند، افزایش می‌یابد. ضریب اصطکاک نیز به‌طور مستقیم بر کیفیت سوراخ اثرگذار است و همواره تلاش می‌شود در حد پایینی حفظ شود. از سوی دیگر، گشتاور ناشی از دوران مته، نیروی چرخشی تولیدشده توسط ابزار است که موجب خروج ماده بریده‌شده از ناحیه ماشین‌کاری از طریق شیارهای تعبیه‌شده روی مته می‌شود.

اندازه‌گیری لایه‌لایه‌شدگی

برای کمّی‌سازی میزان لایه‌لایه‌شدگی در فرایند سوراخکاری، روش‌های متعددی وجود دارد که از رایج‌ترین آن‌ها، محاسبه ضریب لایه‌لایه‌شدگی (Delamination Factor, DF) است. این ضریب به‌صورت نسبت حداکثر قطر ناحیه جدایش لایه‌ای به قطر اسمی سوراخ، مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود:

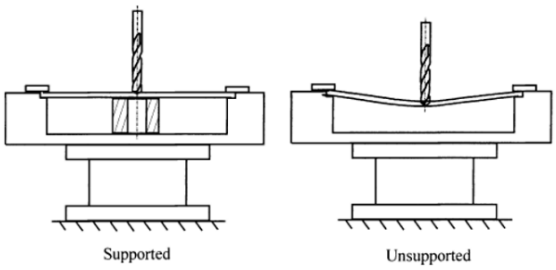
$$DF = \frac{D_{max}}{D_0} \qquad (۱)$$

که در آن D_{max} حداکثر قطر سوراخ ایجادشده بر اثر آسیب لایه‌لایه‌شدگی (میلی‌متر) و D_0 قطر اسمی یا مورد نیاز سوراخ (میلی‌متر) است. مقدار مطلوب این ضریب نزدیک به یک است، به این معنا که ناحیه آسیب‌دیده اطراف سوراخ حداقل باشد. هرچه ناحیه آسیب‌دیده بزرگ‌تر باشد، خواص عملکردی سوراخ ایجادشده افت می‌کند و اثربخشی آن در شرایط بهره‌برداری کاهش می‌یابد [۵]. یکی دیگر از نقص‌های عمده هنگام سوراخکاری کامپوزیت‌ها، بیرون زدگی الیاف است. در این نقص، به دلیل نیروهای مکانیکی

ایجاد شده هنگام سوراخکاری، پیوند بین ماتریس و لایه الیاف شکسته شده و الیاف از کامپوزیت جدا می‌شوند. مشاهده شده است که بیرون زدگی الیاف در پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن معمولاً زمانی مشاهده می‌شود که زاویه بین لمینت‌ها و جهت برش نزدیک به ۱۳۵ درجه باشد. بیرون زدگی الیاف می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های ناشی از خستگی و در نتیجه، شکست کامپوزیت‌ها شود. هنگام سوراخکاری کامپوزیتها، قطعه کار می‌تواند در ماتریس، الیاف و سطح مشترک الیاف-ماتریس آسیب ببیند. در ماتریس، ترک‌های ریز، از بین رفتن رزین، حفره‌های سطحی، خطای گردی و غیره می‌توانند رخ دهند. آسیب‌های وارده به الیاف می‌تواند شامل بیرون زدگی الیاف، شکستگی الیاف، کمانش الیاف، پلیسه و آسیب‌های حرارتی به الیاف باشد. در فصل مشترک الیاف-ماتریس، جدایش الیاف و لایه لایه شدن رخ می‌دهد. چسبندگی خوب بین الیاف و ماتریس می‌تواند تا حد زیادی از جدا شدن الیاف جلوگیری کند[۵].

افزایش قطر مته منجر به افزایش سطح تماس سوراخ حفر شده می‌شود که متعاقباً منجر به افزایش نیروهای رانشی می‌شود. اگر تأثیر قطر ابزار بر لایه لایه شدن ارزیابی شود، می‌توان مشاهده کرد که ابزارهای مته با قطر کوچکتر، مستعد ایجاد ضریب لایه لایه شدن کمتری هستند. این شرایط ممکن است ناشی از کاهش سطح تماس بین ابزار و قطعه کار باشد. با بزرگتر و پهن‌تر شدن سطوح تماس، احتمال تماس ابزار/قطعه کار در سطوح ضعیف افزایش می‌یابد و اثرات فرورفتگی مبتنی بر تغییر شکل پلاستیک در مرکز هندسه سوراخکاری به نفع هر لایه نامطلوب تشدید می‌شود. سرعت اسپیندل ورودی دیگری است که مقادیر ضریب لایه لایه شدن محاسبه شده را تغییر می‌دهد و همچنین بر انرژی برش تأثیر می‌گذارد.

در فرایند سوراخکاری کامپوزیت‌ها، استفاده از تکیه‌گاه پشتی در زیر قطعه‌کار یکی از مؤثرترین و رایج‌ترین روش‌های کاهش لایه‌لایه‌شدگی است، زیرا با حمایت از لایه‌های پایینی لمینت، نیروی محوری بحرانی لازم برای شروع جدایش لایه‌ای را افزایش می‌دهد؛ نتایج مدل‌های پیشنهادی برای مته‌های اره‌ای و هسته‌ای با تکیه‌گاه نیز دامنه نیروی بحرانی بالاتری را نسبت به حالت بدون پشتیبان نشان می‌دهند که با تجربه واقعی صنعتی سازگار است. در سوراخکاری با تکیه‌گاه، نیروی محوری در ابتدای فرایند به‌سرعت افزایش می‌یابد و پس از نفوذ لبه برش، حول یک مقدار متوسط نوسان می‌کند تا با شروع لایه‌لایه‌شدگی به‌صورت پله‌ای کاهش یابد. در مقابل، در سوراخکاری بدون تکیه‌گاه، نیروی محوری ابتدا به‌آرامی پیش می‌رود و با کاهش ضخامت لمینت باقی‌مانده، قطعه‌کار به‌ناگهان به سمت نوک مته حرکت کرده و سرعت پیشروی واقعی به‌شدت افزایش می‌یابد که با یک پیک در نمودار گشتاور همراه است و مواد به‌صورت ناگهانی توسط لبه‌های برش بریده می‌شوند. نکته قابل‌توجه این است که اگرچه نیروی محوری در



شکل ۱ نمونه کامپوزیتی با پشتیبان و بدون پشتیبان در سوراخکاری

Fig. 1 Schematic representation of a composite workpiece during drilling with and without a backing support.

سوراخکاری بدون پشتیبان در مقایسه با حالت با پشتیبان کوچک‌تر است، اما میزان لایه‌لایه‌شدگی مطابق شکل (۱) بیشتر است؛ این تناقض نشان می‌دهد که در حالت بدون تکیه‌گاه، مکانیسم آسیب متفاوتی حاکم بوده و عواملی نظیر دینامیک قطعه‌کار و نحوه اعمال نیرو نیز باید مدنظر قرار گیرند[۶-۷].

رائو و همکاران [۸] تاثیر نرخ پیشروی (۰/۲، ۰/۴ و۰/۶ میلیمتر در دور) و سرعت دوران (۵۰۰ ، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه) با مته به قطر های (۵ ، ۱۰ و ۱۵ میلیمتر) بر روی پلیمرهای تقویت شده با الیاف آرامید ضخامت ۴ میلی متر و ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ میلیمتر بررسی کردند، مطالعه آنها نشان داد که کمترین مقدار ضریب لایه‌لایه شدن، برابر با ۱.۰۱۱، برای نرخ پیشروی ۰.۴ میلی‌متر بر دور، سرعت دوران ۱۰۰۰ دور در دقیقه و قطر مته ۱۵ میلی‌متر به دست می‌آید. همچنین مشاهده کردند که با کاهش سرعت دوران و قطر مته، روند افزایشی در ضریب لایه‌لایه شدن وجود دارد. اثر متقابل قابل‌توجهی بین نرخ پیشروی و قطر مته بر ضریب لایه‌لایه شدن مشاهده می‌شود.

خداپرست و همکاران [۹] جهت بررسی تاثیر هندسه مته، ۶ ابزار از جنس فولاد تندبر با قطرهای ۵، ۱۰ و ۱۵میلیمتر و زوایای راس 120و 140 درجه و سرعت دوران (۱۶۰۰،۸۰۰ و ۲۴۰۰) و سرعت پیشروی (۱۵۰ ،۳۰۰ و۴۵۰ میلیمتر بر دقیقه) بر روی کامپوزیت شیشه با ابعاد ۱۳۰ در ۲۹۰ با ضخامت ۱۰ میلیمتر و ابعاد نمونه‌های دومی ۲۰ در ۱۸و ضخامت ۵ میلیمتر بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی، مقدار لایه‌لایه شدگی، بعلت افزایش نیروی محوری و زمان کمتر جهت براده برداری، افزایش یافته است. سرعت ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ دور بر دقیقه مقدار لایه‌لایه شدگی افزایش یافته و پس از آن کم شده است. بنابراین بهتر است با افزایش سرعت پیشروی، سرعت دورانی را نیز افزایش داد. با افزایش زاویه راس مته از ۱۲۰به ۱۴۰ درجه، میزان لایه‌لایه شدگی کاهش یافته است. با افزایش ضخامت قطعه، لایه‌لایه شدگی نیز افزایش یافته است. زیرا با افزایش ضخامت تعداد لایه‌ها بیشتر شده و ابزار مدت زمان بیشتری با قطعه‌کار درگیر بوده و حرارت بیشتری بین ابزار و قطعه تولید شده که این امر منجر به افزایش تخریب و لایه‌لایه شدگی بیشتر در صفحه کامپوزیتی میگردد. با افزایش قطر ابزار لایه‌لایه شدگی کاهش می‌یابد. چون نیروی ابزار و

سطح تماس بین ابزار و قطعه‌کار، با افزایش قطر مته در حال افزایش هستند.

رزقی ملکی و همکاران [۱۰] مطالعات گذشته رو بررسی کرند و بررسی آنها نشان داد که استفاده بهینه از ابزارهای با جنس مناسب نه‌تنها به کنترل دمای برش کمک می‌کند، بلکه در کاهش سایش ابزار مؤثر واقع می‌شود. این تحقیق به وضوح بر اهمیت انتخاب مناسب ابزار و تنظیم دقیق پارامترهای ماشین‌کاری برای بهبود عملکرد و کاهش نقص‌ها در فرایندهای تولیدی که درگیر مواد کامپوزیتی هستند، تأکید می‌کند. بهینه سازی فرایندهای ماشین‌کاری با در نظر گرفتن خواص خاص مواد مورد استفاده 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.

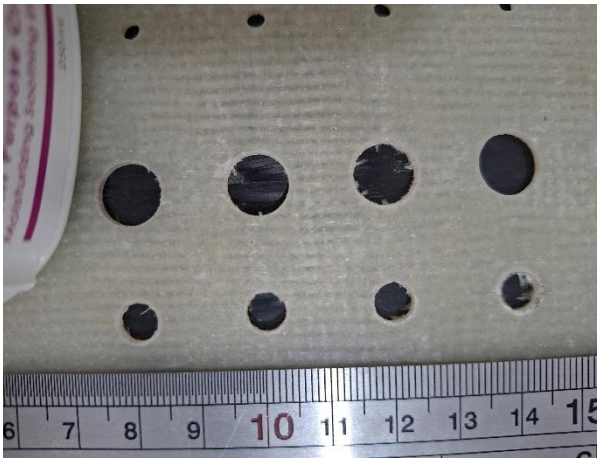
۳- روش تجربی

کامپوزیتهای با الیاف شیشه (GFRP) استفاده شده در این پژوهش به روش لایه چینی دستی ۸ لایه با چیدمان ۰ و ۹۰ آماده شده و سپس تحت فشار قرار گرفته و در نهایت در ضخامت ۲ میلیمتر در اندازه‌ی۳۰۰*۳۰۰ میلیمتر مطابق شکل (۲) ساخته شده است. دو سری تست تجربی انجام شده است شامل تست سوراخکاری و تست ضربه کم سرعت [۱۱] با دستگاه سقوط وزنه و برای هر تست از دوربین مطابق شکل (۳) در این مرحله از پژوهش برای مشاهده ناحیه خسارت استفاده شده است. تست‌های ضربه انجام‌شده در این پژوهش با استفاده از سه ضربه‌زننده به شکل‌های کروی، سرتخت و سرمخروطی با چگالی ۷۸۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب انجام شده است. وزن تمامی ضربه‌زننده‌ها یکسان و برابر ۶۸۰ گرم می‌باشد. در این پژوهش، تست ضربه بر روی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی برای هر سه پرتابه مورد نظر از ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌متر انجام شده است. همچنین سرعت ضربه‌زننده در هنگام برخورد با کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی ۴٫۴۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی دارای شش لایه و ضخامت آن‌ها تقریباً با هم یکسان و برابر با 1.5 ± 0.1 میلی‌متر می‌باشد. در مرحله اول خیز کامپوزیت‌های منحنی‌شکل در برابر بار ضربه‌ای ناشی از هر سه پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط مرزی صفحات کامپوزیتی منحنی‌شکل برای تمامی تست‌های ضربه به‌صورت چهار طرف گیردار اعمال شده است. برای این منظور از یک گیره‌بندی مخصوص استفاده شده است. خواص مکانیکی کاپوزیتهای ساخته شده همانند مراجع [۱۲-۱۳] می باشد. برای این منظور از دوربین E60 استفاده می‌شود. به‌منظور افزایش قابلیت تکرارپذیری اندازه‌گیری‌های ترموگرافی، دوربین E60 پیش از آزمون کالیبره شد و تصویربرداری در شرایط ثابت محیطی و با تنظیمات یکسان برای همه نمونه‌ها انجام گرفت. فاصله و زاویه دوربین نسبت به سطح نمونه، ناحیه تصویربرداری و تنظیمات ثبت تصاویر در تمام آزمون‌ها ثابت نگه داشته شد. تحلیل دما و مساحت آسیب نیز با استفاده از یک روش یکسان برای همه تصاویر انجام گرفت. روش‌های تصویربرداری حرارتی در این تحقیق با دو کارکرد کاملاً تفکیک‌شده به کار گرفته شدند:

پایش دمای سوراخکاری: توزیع دمای گذرا در ناحیه براده‌برداری حین ماشین‌کاری، با استفاده از دوربین فروسرخ کالیبره‌شده در دو حالت خشک و با سیال خنک‌کننده جهت ارزیابی اثر پارامترهای برشی (دور و پیشروی) ثبت گردید.

مشخصه‌یابی خسارت ضربه با ترموگرافی ارتعاشی: به‌منظور اندازه‌گیری دقیق مساحت لایه‌لایه‌شدگی و آسیب‌های زیرسطحی پس از تست ضربه کم‌سرعت [۱۴-۱۵]، نمونه‌ها تحت تحریک ارتعاشی اولتراسونیک با فرکانس 15 kHz، توان تنظیمی ۲۰ درصد و زمان اعمال ۳۰ تا ۸۰ ثانیه قرار گرفتند. پدیده اتلاف انرژی موضعی در فصول مشترک آسیب‌دیده، امکان استخراج نقشه حرارتی مساحت خسارت را برای انواع پرتابه‌ها فراهم ساخت.

در انجام تست ترموگرافی ارتعاشی برای اینکه نتایج بهتری به‌دست آید، بایستی نمونه مورد تست را در یک نگهدارنده مناسب قرار داد تا ارتعاش ناشی از دستگاه به‌طور کامل به قطعه نمونه اعمال شود. برای این منظور نگهدارنده‌هایی که برای انجام تست ضربه تولید شده بود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تست ترموگرافی ارتعاشی یک منبع تحریک خارجی وجود دارد. نمونه مورد تست با اعمال یک موج مافوق صوت توسط منبع تحریک مورد ارتعاش قرار می‌گیرد. ارتعاش به‌وجودآمده در نمونه باعث افزایش دمای قطعه می‌شود. توزیع حرارت جسم توسط دوربین ترموگرافی سنجیده می‌شود و در نتیجه عیوب و خسارات به‌وجودآمده در کامپوزیت‌های منحنی‌شکل دیده می‌شود.



شکل ۲ سوراخکاری نمونه کامپوزیتی شیشه با پشتیبان و با سرعتهای نفوذ مختلف

Fig. 2 Drilling of a GFRP composite specimen with a backing support at different feed rates.



شکل ۳ چیدمان آزمایش ضربه و ترموگرافی ارتعاشی جهت ارزیابی آسیب

Fig. 3 Experimental setup of impact test and vibrothermography for damage evaluation.

۴- تحلیل رفتار حرارتی لمینیت (GFRP) در فرآیند سوراخکاری

به‌منظور بررسی اثر قطر مته و شرایط خنک‌کاری بر رفتار حرارتی لمینیت (GFRP) در فرآیند سوراخکاری، آزمایش‌ها در سرعت پیشروی ثابت برابر با ٤٠٠ میلیمتر بر دقیقه و برای دو قطر مته ٦/٥ و ١٠ میلیمتر انجام شدند. در هر دو حالت، سرعت‌های اسپیندل برابر با ٨٠٠، ٢٠٠٠ و ٣٠٠٠ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. برای مقایسه بهتر داده‌ها، سرعت دوران اسپیندل به فرکانس دورانی، مطابق رابطه (٢) تبدیل شد:

$$f = \frac{N}{60} \qquad (۲)$$

بنابراین، فرکانس‌های متناظر با سرعت‌های ٨٠٠، ٢٠٠٠ و ٣٠٠٠ دور بر دقیقه به‌ترتیب برابر با ١٣/٣٣، ٣٣/٣٣ و ٥٠ هرتز هستند.

برای توصیف وابستگی دمای ایجادشده در حین سوراخکاری به فرکانس دورانی، رابطه توانی (٣) به داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد:

$$T = C + \alpha f^{n} \qquad (۳)$$

که در آن T دمای اندازه‌گیری‌شده بر حسب درجه سلسیوس، C ثابت مدل، α ضریب وابسته به شرایط فرآیند و n توان فرکانس دورانی است.

شکل (٤) مربوط به مته ٦/٥ میلیمتر نشان می‌دهد که افزایش فرکانس دورانی موجب افزایش دمای سوراخکاری در هر دو شرایط با و بدون خنک‌کاری می‌شود. با این حال، دما در شرایط بدون خنک‌کاری در تمام سرعت‌های بررسی‌شده به‌طور محسوسی بیشتر از شرایط خنک‌کاری است. در سرعت ٨٠٠ دور بر دقیقه، دما در شرایط بدون خنک‌کاری ٨٧ درجه سلسیوس و در شرایط خنک‌کاری ٦٠ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. با افزایش سرعت اسپیندل به ٣٠٠٠ دور بر دقیقه، این مقادیر به‌ترتیب به ٩٨ و ٧٥ درجه سلسیوس رسیدند.

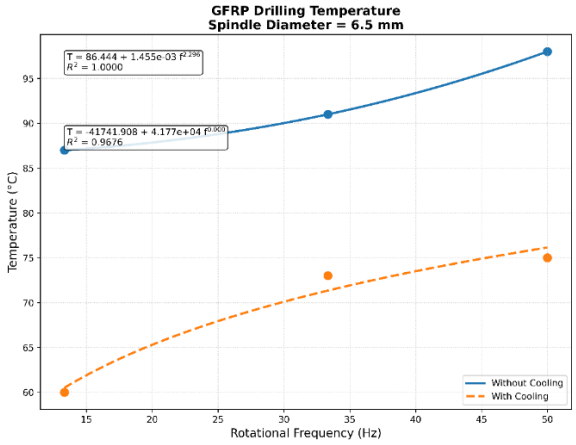
برای شرایط بدون خنک‌کاری، مدل برازش‌شده به‌صورت رابطه (٤) به دست آمد:

$$T = 86.444 + 1.455e-3f^{2.296} \qquad (۴)$$

ضریب تعیین این رابطه برابر با $R^2 = 1.0$ به دست آمد. برای شرایط خنک‌کاری نیز رابطه برازش‌شده، مطابق رابطه (٥) است:

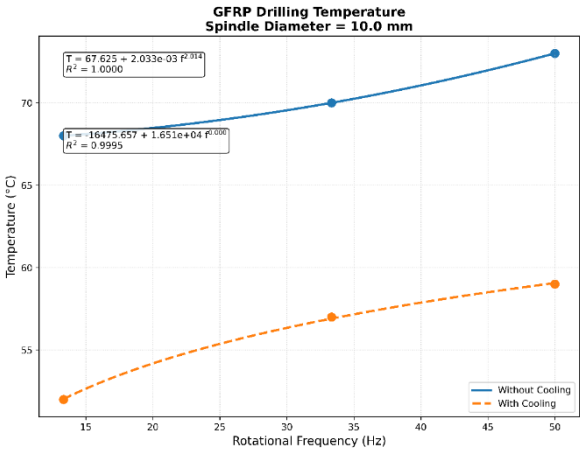
$$T = -41.741e3 + 4.177e4f^{0.00} \qquad (۵)$$

که برای آن ضریب تعیین $R^2 = 0.9676$ حاصل شد. مقایسه دو منحنی نشان می‌دهد که استفاده از سیال خنک‌کننده باعث کاهش قابل‌توجه دمای فرآیند می‌شود. این کاهش دما را می‌توان به افزایش انتقال حرارت از ناحیه برش و کاهش تجمع حرارت در ناحیه تماس مته و قطعه نسبت داد.



شکل ۴ تغییرات دمای سوراخکاری لمینیت (GFRP) بر حسب فرکانس دورانی اسپیندل برای مته با قطر ٦/٥ میلیمتر در دو شرایط با و بدون خنک‌کاری

Fig. 4 Variation of GFRP laminate drilling temperature with spindle rotational frequency for a 6.5 mm diameter drill bit, under dry and cooled conditions.



شکل ۵ تغییرات دمای سوراخکاری لمینیت (GFRP) بر حسب فرکانس دورانی اسپیندل برای مته با قطر ۱۰ میلیمتر در دو شرایط با و بدون خنک‌کاری

Fig. 5 Variation of GFRP laminate drilling temperature with spindle rotational frequency for a 10 mm diameter drill bit, under dry and cooled conditions.

مطابق شکل (۵)، نتایج حاصل از مته ۱۰ میلیمتر نیز روند مشابهی را نشان می‌دهند. در شرایط بدون خنک‌کاری، دمای اندازه‌گیری‌شده از ۶۸ درجه سلسیوس در سرعت ۸۰۰ دور بر دقیقه، به ۷۳ درجه سلسیوس در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافت. در شرایط خنک‌کاری، دمای متناظر از ۵۲ به ۵۹ درجه سلسیوس افزایش پیدا کرد. برای شرایط بدون خنک‌کاری، رابطه تجربی به صورت زیر به دست آمد:

$$T = 67.625 + 2.033e-3f^{2.014} \quad (۶)$$

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، ضریب تعیین این مدل برابر با $R^2 = 1.0$ است. برای شرایط خنک‌کاری، رابطه برازش‌شده عبارت است از:

$$T = -16.475e3 + 1.651e4f^{0.00} \quad (۷)$$

و ضریب تعیین آن برابر با $R^2 = 0.9995$ به دست آمد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که افزایش سرعت دوران اسپیندل موجب افزایش دمای سوراخکاری می‌شود، در حالی که استفاده از خنک‌کاری به کاهش محسوس دما در کل محدوده سرعت مورد بررسی منجر می‌شود. همچنین، اختلاف دمای بین دو شرایط خنک‌کاری در مته ۶/۵ میلیمتر بیشتر از مته ۱۰ میلیمتر مشاهده شد. این موضوع نشان می‌دهد که اثر خنک‌کاری می‌تواند به هندسه ابزار و نحوه تولید و انتقال حرارت در منطقه سوراخکاری وابسته باشد. با وجود برازش مناسب روابط فوق، باید توجه داشت که برای هر شرایط آزمایش تنها سه نقطه تجربی در دسترس است. بنابراین، مقادیر C، α و n به‌دست‌آمده باید به‌عنوان ضرایب تجربی محدوده آزمایش حاضر در نظر گرفته شوند و برای تعمیم مدل به بازه‌های وسیع‌تر سرعت اسپیندل، انجام آزمایش‌های بیشتر توصیه می‌شود.

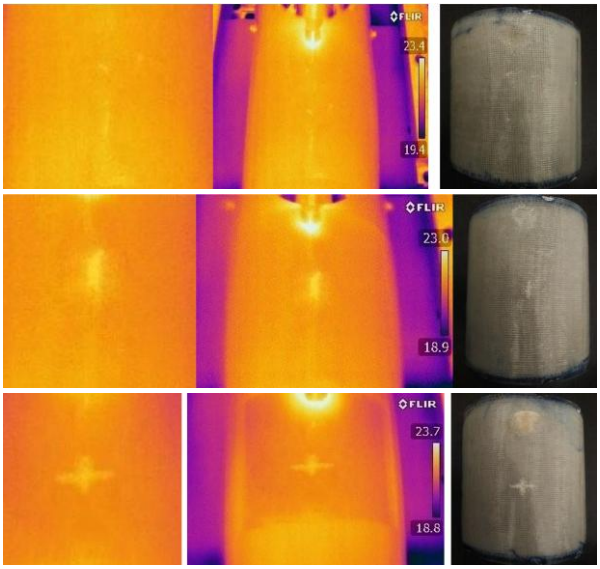
۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تست‌های مختلف ترموگرافی ارتعاشی نشان دادند که برای شرایط کامپوزیت‌های موجود در این پژوهش، یکی از این شرایط شامل ضخامت تقریباً یکنواخت در کل پنل کامپوزیتی می‌باشد. بهترین فرکانس تحریک، ۱۵ کیلوهرتز و مناسب‌ترین توان نیز ۲۰ درصد است.

البته زمان اعمال فرکانس کمی متغیر و بین ۳۰ ثانیه تا ۸۰ ثانیه در نظر گرفته شده است که این میزان تفاوت نیز به دلیل تفاوت جزئی در ضخامت کامپوزیت‌ها و شرایط دمایی اولیه قطعه می‌باشد. تصاویر شکل‌های (۶) نتایج حاصل از ترموگرافی ارتعاشی را برای این کامپوزیت‌ها نشان می‌دهند.

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود ناحیه برخورد ضربه‌زننده‌های کروی و سر مخروطی با کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی منجر به ایجاد خساراتی در قطعه شده است. همچنین مقدار خسارت در اثر برخورد ضربه‌زننده‌های سر مخروطی بیشتر از ضربه‌زننده‌های کروی می‌باشد. دلیل این موضوع نیز کم بودن سطح تماس ضربه‌زننده سر مخروطی نسبت به ضربه‌زننده کروی در طول ضربه می‌باشد که

این امر باعث تمرکز تنش و ایجاد خسارت بیشتر در نقطه برخورد می‌باشد. این درحالیست که ضربه‌زننده‌های سر تخت تنها در حد ایجاد خراش باعث ایجاد خسارت در کامپوزیت‌ها شده‌اند. جدول (۱) نتایج حاصل از مساحت خسارت در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی را نشان می‌دهد.



شکل ۶ تصاویر ترموگرافی ارتعاشی ضربه‌زننده‌های تخت، کروی و مخروطی (به ترتیب از بالا به پایین)، تحت فرکانس تحریک ۱۵ کیلوهرتز و توان ۲۰ درصد.

Fig. 6 Vibrothermography images of flat, spherical, and conical impactors (from top to bottom), obtained at an excitation frequency of 15 kHz and a power level of 20%.

جدول ۱ مقدار خسارت ایجاد شده برای ضربه زننده مختلف

Table 1 Induced damage values for different impactor types.

Item	Impactor Type	Experimental Damage Area (Vibrothermography) [cm^2]
1	Flat	0.2
2	Hemispherical	1.21
3	Conical	3.19

بررسی نواحی آسیب نشان می‌دهد که آغاز خسارت در سمت مخالف سطح برخورد رخ داده و در راستای ضخامت به سمت سطح ضربه رشد می‌کند. همچنین، شعاع انحنای نوک ضربه‌زننده نقش تعیین‌کننده‌ای در وسعت ناحیه آسیب دارد؛ به‌طوری‌که ضربه‌زننده‌های تیزتر مساحت خسارت بیشتری ایجاد می‌کنند، در حالی که ضربه‌زننده‌های پهن‌تر منجر به کاهش مساحت آسیب می‌شوند (بررسی این رفتار در ضخامت‌های بالاتر می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد). علاوه بر این، ارزیابی حجم خسارت مستلزم در نظر گرفتن پارامترهای سه‌بعدی از جمله عمق نفوذ ضربه‌زننده است که در این مطالعه به آن پرداخته نشده است. توالی زمانیِ تصاویر حرارتیِ ثبت‌شده در حین سوراخ‌کاریِ ورق‌چندلایه (لایه‌ای) کامپوزیتی بدون خنک کننده و به کمک خنک‌کننده، با استفاده از مته‌ی ٦/٥ میلی‌متری، در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل (۷) نشان داده شده است.

نتایج ترموگرافی درحین سوراخ‌کاری نشان داد که اعمال خنک‌کاری مستقیماً با تثبیت دما و جلوگیری از رسیدن حرارت موضعی به محدوده انتقال شیشه‌ای (T_g) ماتریس، از تضعیف برشی بین‌لایه‌ای جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، تصاویر حاصل از آزمون غیرمخرب ترموگرافی ارتعاشی بر روی نمونه‌های پس از تست ضربه کم‌سرعت، میزان خسارت را متناسب با تمرکز تنش هندسه پرتابه نشان داد؛ به‌طوری‌که مساحت آسیب استخراج‌شده برای پرتابه‌های تخت، کروی و مخروطی اندازه‌گیری شد. مقایسه این دو سازوکار نشان می‌دهد لایه‌لایه‌شدگی حاصل از نفوذ مته در نرخ‌های پیشروی بالا، از دیدگاه تمرکز تنش موضعی با الگوی خسارت ثبت‌شده در ترموگرافی ارتعاشی نمونه‌های ضربه‌خورده همخوانی مکانیکی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

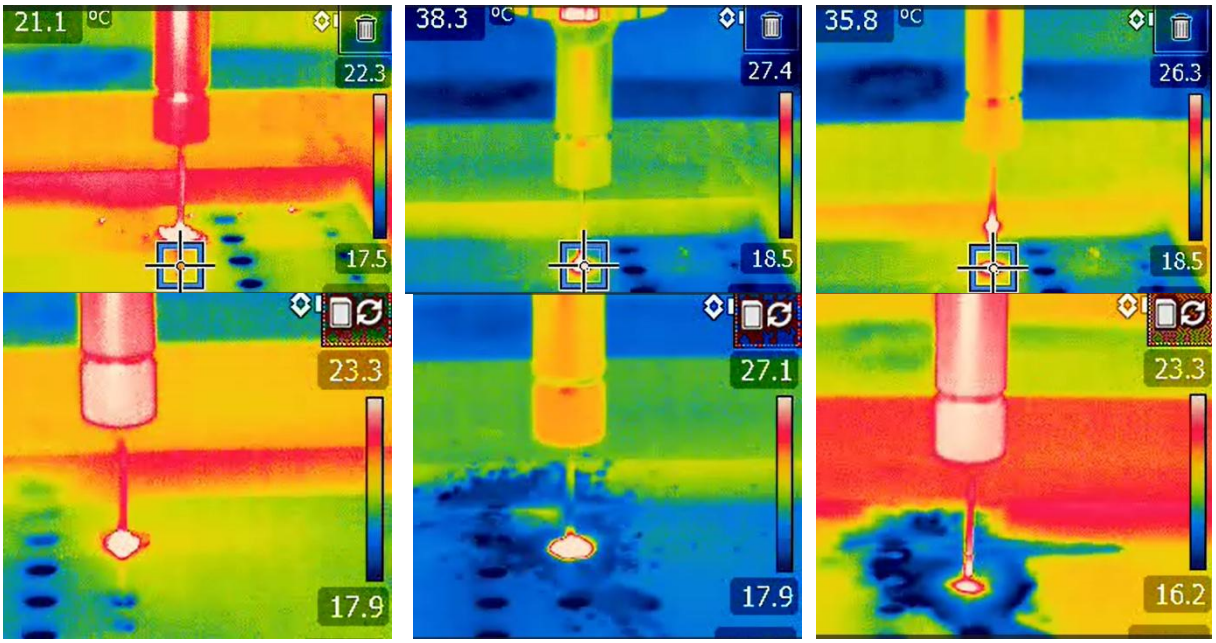
در این پژوهش، اثر نرخ پیشروی بر لایه‌لایه‌شدگی لمینیت‌های (GFRP) در فرایند سوراخ‌کاری بررسی شد و سازوکار آسیب ناشی از نفوذ مته با آسیب ایجادشده در آزمون ضربه کم‌سرعت مقایسه گردید. نتایج نشان داد که افزایش نرخ پیشروی، موجب افزایش نیروی محوری و شدت بارگذاری واردشده به لایه‌های کامپوزیت می‌شود. در نتیجه، احتمال عبور نیروی محوری از مقدار بحرانی لازم برای آغاز لایه‌لایه‌شدگی افزایش یافته و ضریب لایه‌لایه‌شدگی نیز بیشتر می‌شود.

اگرچه سوراخ‌کاری و ضربه کم‌سرعت از نظر هندسه تماس، شرایط مرزی و نحوه اعمال بار کاملاً یکسان نیستند، در هر دو فرایند، بار در مدت‌زمانی کوتاه و در ناحیه‌ای محدود از کامپوزیت اعمال می‌شود. بر این اساس، نفوذ مته، به‌ویژه در نرخ‌های پیشروی بالا و هنگام ورود یا خروج از لمینیت، می‌تواند به‌عنوان نوعی بارگذاری موضعی، گذرا و شبه‌ضربه‌ای در نظر گرفته شود. در این شرایط، افزایش سریع نیروی محوری و تمرکز تنش در ناحیه تماس مته با قطعه‌کار، شرایط مناسبی برای آغاز ترک‌های بین‌لایه‌ای و گسترش لایه‌لایه‌شدگی ایجاد می‌کند.

مقایسه الگوهای آسیب نشان داد که لایه‌لایه‌شدگی ایجادشده در نرخ‌های پیشروی بالا، از نظر نحوه گسترش ترک و جدایش بین‌لایه‌ای، شباهت قابل‌توجهی با آسیب ناشی از ضربه کم‌سرعت دارد. در هر دو حالت، آسیب در ناحیه‌ای تحت تمرکز تنش آغاز شده و سپس در راستای ضخامت و بین لایه‌های لمینیت گسترش می‌یابد. بنابراین، آزمون ضربه کم‌سرعت می‌تواند برای تفسیر رفتار آسیب‌پذیری کامپوزیت GFRP در برابر بارگذاری‌های گذرا و موضعی ناشی از سوراخ‌کاری مفید باشد. بااین‌حال، این شباهت باید به‌صورت کیفی و بر اساس سازوکار آسیب تفسیر شود و نباید به‌عنوان معادل‌بودن کامل دو فرایند در نظر گرفته شود.

بررسی هندسه ابزار نشان داد که مته پله‌ای با قطر ۱۰ میلی‌متر، در شرایط مقایسه‌شده، ، کمترین میزان لایه‌لایه‌شدگی را ایجاد کرد. این عملکرد را می‌توان به توزیع تدریجی‌تر بار، کاهش تمرکز نیروی محوری و کاهش شدت نفوذ اولیه مته نسبت داد. همچنین، پیش‌سوراخ‌کاری با کاهش نیروی تماس و شدت نفوذ اولیه مته، موجب کاهش ضریب لایه‌لایه‌شدگی شد.

نتایج ترموگرافی نشان داد که افزایش سرعت دوران اسپیندل موجب افزایش دمای ناحیه سوراخ‌کاری می‌شود، درحالی‌که استفاده از خنک‌کاری در کل محدوده سرعت مورد بررسی به کاهش محسوس دما و ضریب لایه‌لایه‌شدگی منجر می‌گردد. همچنین، اختلاف دمای ناشی از اعمال خنک‌کاری در مته با قطر ۶.۵ میلی‌متر بیشتر از مته ۱۰ میلی‌متر ثبت شد که بیانگر وابستگی مستقیم کارایی خنک‌کاری به هندسه ابزار، ابعاد ناحیه براده‌برداری و سازوکار تولید و انتقال حرارت است. این یافته‌ها تایید می‌کنند که آسیب در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های GFRP علاوه بر مؤلفه‌های مکانیکی، به شرایط حرارتی تماس نیز وابسته بوده و افزایش دما می‌تواند با تضعیف موضعی ماتریس پلیمری و تغییر اصطکاک، جدایش بین‌لایه‌ای را تشدید کند. علاوه بر این، اگرچه روابط تجربی ارائه‌شده برازش مناسبی با داده‌ها نشان دادند، اما ضرایب به‌دست‌آمده(C ، α و n) باید به‌عنوان مقادیر تجربی محدود به شرایط حاضر تلقی شوند و جهت تعمیم دقیق‌تر مدل به بازه‌های وسیع‌تر سرعت اسپیندل، گسترش آزمایش‌ها پیشنهاد می‌شود.



شکل ۷ توالی زمانی تصاویر حرارتی ثبت‌شده در حین سوراخکاری ورق‌چندلایه (لایه‌ای) کامپوزیتی بدون خنک کننده (ردیف بالا) و به کمک خنک‌کننده (ردیف پایین)، با استفاده از مته‌ی ۶/۵ میلی‌متری، در سرعت دوک ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه.

Fig.7 Temporal sequence of thermal images recorded during the drilling of the composite laminate under dry (top row) and coolant-assisted (bottom row) conditions, using a 6.5 mm drill at a spindle speed of 3000 rpm and a feed rate of 400 mm/min.

در آزمون ضربه کم‌سرعت، شکل ضربه‌زننده تأثیر مستقیمی بر وسعت و شدت ناحیه آسیب داشت. ضربه‌زننده مخروطی، به‌دلیل سطح تماس کوچک‌تر و تمرکز تنش بیشتر، بیشترین میزان آسیب را ایجاد کرد؛ درحالی‌که ضربه‌زننده تخت تنها موجب ایجاد خراش محدود در سطح کامپوزیت شد. این نتیجه با نقش تمرکز تنش در ناحیه تماس مته و افزایش لایه‌لایه‌شدگی در نرخ‌های پیشروی بالا همخوانی دارد. در مجموع، افزایش نرخ پیشروی، فرایند سوراخکاری را از یک فرایند برش پیوسته به فرایندی با مؤلفه بارگذاری گذرا و شبه‌ضربه‌ای(شباهت کیفی در سازوکار آسیب) نزدیک می‌کند. این مؤلفه، به‌ویژه هنگام نفوذ اولیه و خروج مته از لمینیت، می‌تواند موجب افزایش تمرکز تنش، آغاز ترک‌های بین‌لایه‌ای و گسترش لایه‌لایه‌شدگی شود. ازاین‌رو، کنترل نرخ پیشروی، استفاده از مته پله‌ای، به‌کارگیری پیش‌سوراخکاری، اعمال خنک‌کاری و استفاده از تکیه‌گاه پشتی مناسب، از مهم‌ترین راهکارهای کاهش آسیب و بهبود کیفیت سوراخکاری کامپوزیت‌های (GFRP) به شمار می‌روند. لمینیت شیشه/اپوکسی ساخته‌شده به روش لایه‌چینی دستی، با ۸ لایه، آرایش ۹۰/۰ و ضخامت ۲ میلی‌مترمی باشد بنابراین نتایج به سایر سامانه‌های الیاف، رزین، ضخامت یا لایه‌چینی قابل تعمیم مستقیم نبوده و احتیاج به صحه سنجی تجربی دارد.

در محدوده شرایط آزمایش حاضر و برای لمینیت شیشه/اپوکسی ۸ لایه با آرایش ۹۰/۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر، افزایش سرعت اسپیندل با افزایش دمای اندازه‌گیری‌شده همراه بود و خنک‌کاری دما را کاهش داد. در میان ابزارهای بررسی‌شده، کمترین لایه‌لایه‌شدگی مشاهده‌شده به مته پله‌ای ۱۰ میلی‌متری مربوط بود؛ این نتیجه به ابزارها و شرایط ضربه زننده‌های تخت، کروی و آزمون ضربه، مساحت آسیب برای ضربه‌زننده‌های تخت، کروی و مخروطی به‌ترتیب ۰/۲۰، ۱/۲۱ و ۳/۱۹ سانتی‌متر مربع بود. مقایسه سوراخکاری و ضربه در این مطالعه کیفی است و صرفاً به شباهت موضعی برخی سازوکارهای آسیب اشاره دارد. محدودیت‌های پژوهش شامل بررسی یک نوع لمینیت و نبود گزارش کمّی از پراکندگی نتایج است؛ بنابراین تعمیم نتایج به سایر مواد و آرایش‌های لایه‌ای نیازمند آزمایش‌های تکمیلی است.

بیانیه هوش مصنوعی: نویسندگان اعلام می‌دارند که در نگارش، تحلیل داده‌ها و تدوین این مقاله از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی زاینده یا فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده نشده است.

حامی مالی: این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سوی سازمان‌ها یا نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

نقش نویسندگان:

(سجاد صیفوری): ایده‌پردازی، طراحی آزمایش‌ها، انجام آزمون‌های تجربی، تحلیل داده‌ها و نگارش پیش‌نویس اصلی مقاله.

(احمد مهدیان پرنیان): نظارت علمی، بازبینی روش‌شناسی، اعتبارسنجی داده‌ها و ویرایش نهایی مقاله.

(علی مجیدی جیرندهی): انجام آزمون‌های تجربی، اعتبارسنجی داده‌های ترموگرافی.

(اسماعیل شکوهی): تحلیل حرارتی و ترموگرافی، بازنویسی بخش‌هایی از متن.
(تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.)

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع، وابستگی مالی یا منافع رقابتی مرتبط با این پژوهش وجود ندارد

منابع

[1] S. R. Karnik, V. N. Gaitonde, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrão, and J. P. Davim, "Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model," Mater. Des., vol. 29, no. 9, pp. 1768–1776, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2008.03.014.

[2] W.-C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, Aug. 1997, doi: 10.1016/S0890-6955(96)00095-8.

[3] B. Latha, V. S. Senthilkumar, and K. Palanikumar, "Influence of drill geometry on thrust force in drilling GFRP composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 30, no. 6, pp. 463–472, Mar. 2011, doi: 10.1177/0731684411398520.

[4] O. Isbilir and E. Ghassemieh, "Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites," *Compos. Struct.*, vol. 105, pp. 126–133, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.04.026.

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

[6] A. Ünüvar and O. Öztürk, "Machinability analysis of delamination and thrust force in drilling of pure and added GFRP composites," J. Compos. Mater., vol. 57, no. 1, pp. 3–21, Jan. 2023, doi: 10.1177/00219983221139423.

[7] R. K. Thakur and K. K. Singh, "Evaluation of drilling characteristics to explore the effect of graphene nanoplatelets on glass fiber reinforced polymer composite," *Measurement*, vol. 219, p. 113233, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113233.

[8] V. Durga Prasada Rao, S. R. S. Mahaboob Ali, S. M. Z. Ali, and B. S. Santhoshi, "Analysis of delamination during drilling process of aramid fibre reinforced polymers," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2765, no. 1, Art. no. 012016, 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2765/1/012016.

[9] M. J. Khodaparast, R. Azarafza, and A. Vafaiesifat, "Experimental investigation and optimization of the effective parameters in the drilling process of glass fiber–epoxy composite parts," Composite Science and Technology, vol. 8, no. 1, pp. 1411–1420, 2021. [Online]. Available: https://sid.ir/paper/1034487/fa

[10] H. Razqimaleki, P. Parvandeh, and M. Hamedi, "A review of drilling of natural fiber-reinforced composites," Journal of Mechanical Engineering, vol. 33, no. 6, pp. 58–71, 2025, doi: 10.30506/mmep.2025.2034118.2182.

[11] S. Seifoori, A. Alibiglo, G. Liaghat, and M. Pol, "Explicit finite element modeling of impact loading on nanobeam to compare with Euler–Bernoulli and Timoshenko theory," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 13, pp. 259–268, 2015. Dor :20.1001.1.10275940.1393.14.13.4.7.

[12] S. Seifoori, A. M. Parrany, and S. Mirzarahmani, "Impact damage detection in CFRP and GFRP curved composite laminates subjected to low-velocity impacts," *Compos. Struct.*, vol. 261, p. 113278, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113278.

[13] S. Seifoori, R. Izadi, and A. R. Yazdinezhad, "Impact damage detection for small- and large-mass impacts on CFRP and GFRP composite laminates with different striker geometries using experimental, analytical and FE methods," *Acta Mech.*, vol. 230, no. 12, pp. 4417–4433, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00707-019-02509-0.

[14] B. Arachchige and H. Ghasemnejad, "Post impact analysis of damaged variable-stiffness curved composite plates," *Compos. Struct.*, vol. 166, pp. 12–21, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.01.018.

[15] S. Seifoori and M. Hosseini, "Analytical and numerical study of composite plates under impact loading at low velocity with different strikers," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, pp. 53–60, 2018. dor: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.25.4.

[16] S. Seifoori, G. H. Liaghat, and M. Foladi, "Low velocity impact on Timoshenko nanobeam using a nonlocal elasticity theory," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 8, pp. 151–160, 2013. dor: 20.1001.1.10275940.1392.13.8.6.2.