بررسی انواع آسیبهای ایجادشده در عملیات سوراخکاری بر روی کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات گرافن

محمد براهنی[۱]، علی ملک حسینی[۲*]، محمدرضا نجیمی[۳]

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی اراک، mbaraheni@arakut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشگاه صنعتی اراک، alimmalek888@gmail.com

۳- دانشجوی کارشناسی، دانشگاه صنعتی اراک،mrn4495@gmail.com

*علی ملک حسینی

چکیده

کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف کربن کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف دارا می باشند که بعلت خواص فیزیکی و مکانیکی حائز اهمیت آنها می باشد. در این راستا همچنین جهت استحکام بخشی به زمینه رزین اپوکسی از نانوذرات گرافن استفاده می شود که از جمله ذرات نوظهور و مهم در مواد با تکنولوژی بالا می باشد. از آنجاییکه گاهاً برای اصلاح قطعات کامپوزتی تقویت شده، نیاز به ماشینکاری می باشد، آسیبهای ایجادشده طی فرآیند نیز باید مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی جهت ترمیم آنها در نظر گرفت. در این تحقیق به مطالعه بر روی انواع آسیبهای ایجادشده بر روی قطعات کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات گرافن پرداخته شده است. در این راستا آزمایشهایی با ابزار مته سوراخکاری از جنس فولاد تندبر و در سرعتهای دورانی و سرعتهای پیشروی مختلف انجام شده است. سپس انواع مشکلاتی که در این آزمایشات ایجاد گردیده است مورد مطالعه قرار گرفته است. انواع آسیبها عبارتند از لایه لایه شدگی ورودی (Peel-up)، لایه لایه شدگی در خروجی (Push down)، رزین و الیاف بریده نشده، ریش ریش شدن، جدایی زمینه از الیاف. در اکثر موارد فوق می توان با استفاده از ابزار مناسب با لبه های برنده بیشتر و همچنین ابزار نو آسیبها را به مقدار زیادی کاهش داد. همچنین با تنظیم سرعت دورانی و پیشروی ابزار ماشینکاری نیز میتوان کیفیت قطعه ایجادشده را بهبود داد. افزایش ضخامت قطعه کامپوزیتی نیز تاثیر بسزایی در افزایش استحکام قطعه کامپوزیتی و افزایش چسبندگی الیاف و زمینه اپوکسی دارد.

واژه های کلیدی: *کامپوزیت، الیاف کربن، نانوذرات گرافن - ماشینکاری - آسیب.*

۱- مقدمه

پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن در زمینه های مختلفی از جمله هوافضا، مهندسی خودرو، مهندسی سازه، کالاهای ورزشی و غیره استفاده می شود. علاوه بر این، به منظور بهبود خواص پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن، نانوذرات در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اینها ذرات با قطر ۱- ۱۰۰ نانومتر، مساحت سطح زیاد و رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا هستند. مشخصات ویژه نانوذرات طیف وسیعی از کاربردها را در کامپوزیت ها باز می‌کند.

نانومواد از مشتقات کربن، نانوذرات رایج در پلیمرها برای به دست آوردن خواص درخواستی در کامپوزیت ها هستند. اینها شامل نانولوله ها، گرافن، اکسید گرافن، نانومیله ها و غیره است که برای پرکردن و بهبود خواص مکانیکی در کامپوزیت ها استفاده می شوند. یکی از اعضای کلیدی خانواده کربن، گرافن است که اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط آنگره گیم (Angre Geim) و همکاران [۱] کشف شد. گرافن دارای خواص مکانیکی عالی است، مانند استحکام کششی بالا ۱۲۵ گیگا پاسکال، مدول الاستیک ۱,۱ تراپاسکال و هدایت حرارتی و الکتریکی بالا [۲].

کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات گرافن یکی از رایج‌ترین کامپوزیت‌ها بین صنایع و محققان است. به عنوان مثال، استفاده از کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات گرافن، کارایی هواپیما را با وزن کمتر افزایش می دهد و جایگزین مواد فولادی می شود. علاوه بر این، در بین ماتریس های مختلف مورد استفاده در کامپوزیت ها، رزین اپوکسی به دلیل مشخصات حرارتی، مکانیکی و شیمیایی بالاتر بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. با این وجود، اپوکسی به دلیل شکنندگی خود به ترک ها حساس است که کاربرد رزین اپوکسی را محدود می کند. در این راستا، همانطور که رحمان و همکاران گزارش کرده‌اند، نانوذرات گرافن می‌توانند رفتار ضربه‌ای رزین اپوکسی را افزایش دهند [۳]. این نیز آشکار است که سطح تماس بزرگتر بین نانوذرات و ماتریس تشکیل پیوند مناسبی را فراهم می کند و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ها را بهبود می بخشد [۴]. از سوی دیگر، به دلیل ترشوندگی و جذب کم بین الیاف کربن و رزین اپوکسی، از نانوذرات گرافن برای بهبود شرایط تماس بین سطحی در پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن استفاده می شود [۵].

در این کامپوزیت‌ها وجود گرافن سبب می‌گردد که رسانایی و استحکام مواد توده ای (سه بعدی) افزایش یابد. به علاوه در این کامپوزیت‌ها می‌توان از گرافنی استفاده نمود که با روش‌های ارزان تری تولید شده‌است. به عنوان مثال لایه برداری از گرافیت یکی از روش‌های ارزان تولید گرافن است. گفتنی است که بسیاری از مواد هنگامی که به شکل توده ای هستند، نسبت به شکل تک لایه ای (دوبعدی) خود رفتار متفاوتی نشان می‌دهند. منشأ این اختلاف رفتار، نیروهای ضعیفی است که تعداد زیادی تک لایه را در کنار هم نگه می‌دارند و یک توده از آن ماده را ایجاد می‌کنند. از آنجا که تولید مواد به شکل تک لایه و در ابعاد بزرگ با چالش‌هایی همراه است و تقریباً غیرممکن می‌باشد، استفاده از شکل توده ای ماده می‌تواند راه ساده ای برای بهره‌گیری از خواص منحصر به فرد تک لایه‌ها باشد.

امروزه محققان توانسته‌اند با افزودن مقدار کمی گرافن به فلزات، پلیمرها و سرامیک‌ها، موادی چقرمه و سبک تولید کنند. معمولاً کامپوزیت‌ها نسبت به مواد توده ای خالص از رسانایی الکتریکی بیشتری برخوردار هستند و در مقابل حرارت نیز بیشتر مقاومت می‌کنند. پیش از گرافن، اکثر پژوهش‌های روی نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری تهیه شده از نانولوله‌های کربن با هدف استفاده از خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی و مقاومت در برابر حرارت بی نظیر نانولوله‌های کربن متمرکز بود. با این وجود همچنان مشکلاتی در راستای تهیه نانولوله‌های کربنی وجود دارد که باید رفع شوند تا کاربرد آن‌ها ارتقا یابد. یکی از این مشکلات، قیمت بالای این مواد است؛ گرافن جایگزین مناسبی برای تولید آن نانوکامپوزیت‌ها است. افزون براین، ایجاد گروه‌های عاملی روی سطح گرافن، سطح ویژه زیاد گرافن و قدرت بالای چسبندگی بین سطح مشترک گرافن و ماده منتخب، خواص نهایی نانوکامپوزیت را ارتقا می‌دهد.

همانند نانو کامپوزیت‌های تهیه شده با سایر نانو افزایه‌ها، خواص مکانیکی به غلظت نحوه توزیع نانو افزایه و... بستگی دارد. اگرچه گرافن خالص بالاترین استحکام تئوری را دارد ولی وجود گروه‌های عاملی بر روی سطح اسید گرافن این مزیت را دارد که میزان پراکنش اکسید گرافن را در حلال‌های قطبی و آب افزایش می‌دهد. بهبود برهمکنش اکسید گرافن با پلیمر، پراکنش در سطح مولکولی را تسهیل می‌کند و برهمکنش بین سطحی را تقویت می‌کند که منجر به خواص مکانیکی بهتر می‌شود. خواص مکانیکی بالاتر کامپوزیت‌های گرافنی در مقایسه با نانو افزایه و ماتریس پلیمری به واسطه سطوح چین خورده گرافن است.

سوراخکاری کامپوزیت های تقویت شده با الیاف به دلیل ساختار ناهمگن و ناهمسانگرد [۶]، عملیات ماشینکاری را سخت‌تر می‌نماید. نیروی برشی ایجادشده در حین ماشینکاری کامپوزیت ها باعث آسیب های مختلفی در اطراف سوراخ می شود که از جمله آنها می توان به لایه لایه شدن، انقباض سوراخ، بیرون کشیدگی الیاف، الیاف برش نخورده، سطح ناهموار و خطاهای ابعادی اشاره کرد که از مشکلات اصلی در اتصال و مونتاژ کامپوزیت می باشد.

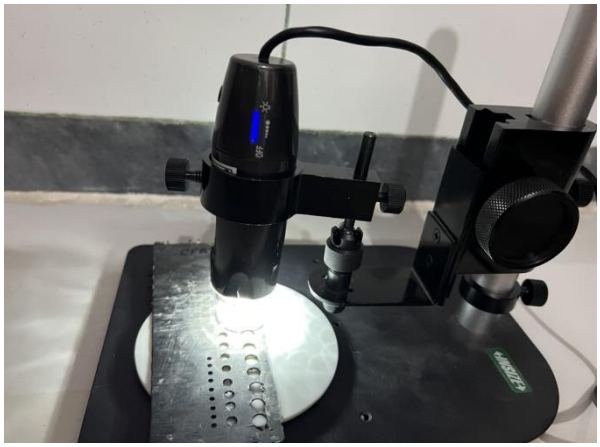
در این تحقیق، به مطالعه انواع آسیبهای ایجادشده حین ماشینکاری کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات گرافن پرداخته شده است.

۲- شرایط آزمایش

در این پژوهش، رزین اپوکسی ML605 و سفت‌کننده پلی‌آمین (HA-11) به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شدند. این رزین دارای خواص مکانیکی خوب و ویسکوزیته پایین می‌باشد که ماده را برای کاربردهای مختلف مناسب می‌کند. نمونه های ساخته شده شامل رزین اپوکسی ML 506، الیاف کربن یک طرفه T700 و نانوذرات گرافن است. نمونه ها به صورت صفحه ای به ابعاد ۲۵۰ × ۲۵۰ و ضخامت ۳ میلی متر می باشند. طبق مطالعات قبلی، مقدار نانوگرافن ۰,۲۵ درصد وزنی، درصد وزنی بهینه برای جلوگیری از تجمع است [۷]. خلوص ذرات نانو گرافن ۹۸,۵ درصد است و مساحت سطح آن ۴۰ متر مربع بر گرم است. ضخامت و اندازه جانبی نانوذرات به ترتیب کمتر از ۶۰ نانومتر و ۷ میکرومتر است. برای ساخت نمونه ها از الیاف کربن T700 با چگالی و استحکام کششی ۳۸۰۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ گرم بر متر مربع و ضخامت ۰,۲ میلی متر استفاده شد. رزین اپوکسی از نوع ML 506 با دانسیته، کشش و مدول برشی ۱,۱۱ گرم بر سانتی متر مکعب، ۲,۸۲ گیگا پاسکال و ۱۵,۳۴ گیگا پاسکال می باشد. قطعه کامپوزیتی از ۸ لایه ساخته شده است. الیاف به صورت یک‌جهته در لایه‌ها جایگذاری شده‌اند. چهار لایه ابتدایی به ترتیب با زوایای صفر و نود درجه قرار گرفته‌اند و چهار لایه بعدی نیز بصورت قرینه می‌باشند. ضخامت قطعه، ۱,۵ میلی‌متر می‌باشد. تصویر آماده سازی آزمایشات در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱. تصویر آماده سازی آزمایشات

جهت انجام آزمایشات از دستگاه فرز با کنترل عددی کامپیوتری (CNC) اونیورسال نوع FP4M ساخت ماشین‌سازی تبریز با دقت ۰,۰۰۱ میلی‌متر استفاده شد. همچنین جهت تصویربرداری از دستگاه اندازه‌گیری بینایی بکار گرفته شد. دستگاه‌های اندازه‌گیری بینایی از رده دستگاه‌های اندازه‌گیری الکترواپتیکی (برقی-نوری) محسوب می شوند و ابزاری بسیار کارآمد برای اندازه گیری دقیق و سریع قطعات هستند. تصویر دستگاه اندازه گیری بینایی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. دستگاه اندازه گیری بینایی

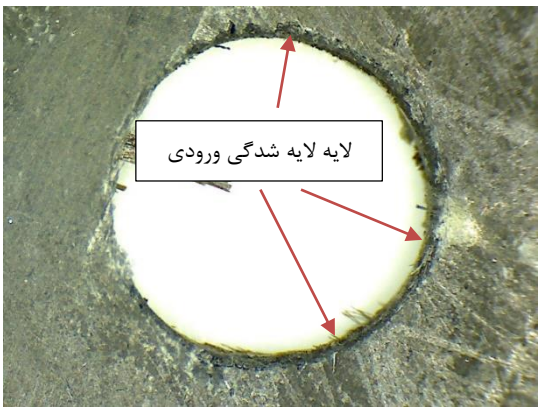
۳- نتایج و بحث

بر خلاف فلزات، کامپوزیتها از دو یا چند فاز با استحکام، سختی و هدایت حرارتی متفاوت ساخته می‌شوند. به علت ناهمسانگردی مواد استفاده‌شده در کامپوزیتها، اغلب مشکلات سوراخکاری از اینجا بوجود می‌آید. نیروی برشی در حین سوراخ کردن کامپوزیت باعث آسیب های مختلفی در اطراف سوراخ می شود که از جمله آنها می توان به لایه لایه شدن، انقباض سوراخ، بیرون کشیدن الیاف، الیاف برش نخورده، سطح ناصاف و خطاهای ابعادی اشاره کرد که از مشکلات اصلی در اتصال و مونتاژ ویژگی های کامپوزیت

می باشد. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، از بین مشکلات سوراخکاری، لایه-لایه‌شدگی مهمترین عامل در ایجاد مشکل در مجموعه‌های مونتاژی می-باشد. این پدیده در بارگذاریهای خستگی نیز قطعه را دچار مشکل می‌کند. لایه‌لایه‌شدگی در هنگام سوراخکاری رخ می‌دهد که در سوراخکاری با ابزار فولاد تندبر در شکل ۳ نشان داده شده است.

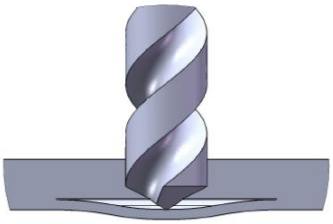
شکل ۳. آسیب لایه لایه شدگی در ورودی (Peel up)

سوراخکاری کامپوزیت های تقویت شده با الیاف به دلیل ساختار ناهمگن و ناهمسانگرد [۸]، که عملیات سوراخ کردن را پیچیده می کند، با فلزات متفاوت است. مشکل لایه لایه شدن در حاشیه سوراخ از بالا و پایین سوراخ اتفاق می افتد. آسیب لایه لایه شدن استحکام کامپوزیت را کاهش می دهد و هندسه ناحیه سوراخکاری را از بین می برد. گزارش شده است که تا ۶۰ درصد از قطعات کامپوزیت تقویت شده با الیاف که در طول مونتاژ نهایی رد شده اند به دلیل لایه لایه شدن ناشی از سوراخکاری می باشد [۹]. تصویر ایجادشده در رابطه با لایه لایه شدگی در هنگام ورود ابزار در شکل ۳نشان داده شده است.



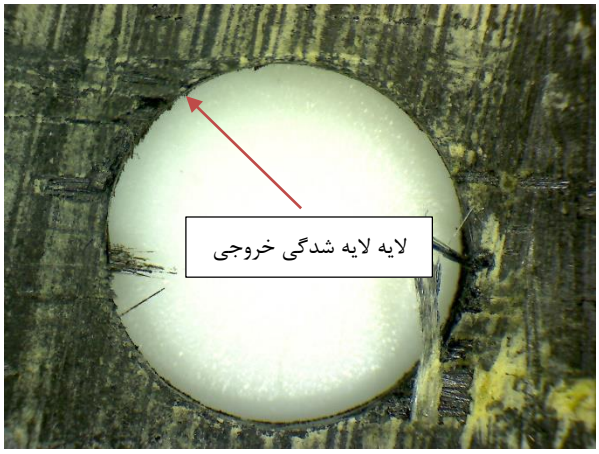
شکل ۴. تصویر آسیب لایه لایه شدگی در ورودی ابزار ماشینکاری

همچنین امکان ایجاد آسیب لایه لایه شدگی در خروجی ابزار نیز وجود دارد که در شکل ۵ مکانیزم ایجاد آسیب لایه لایه شدگی در خروجی ابزار نشان داده شده است.



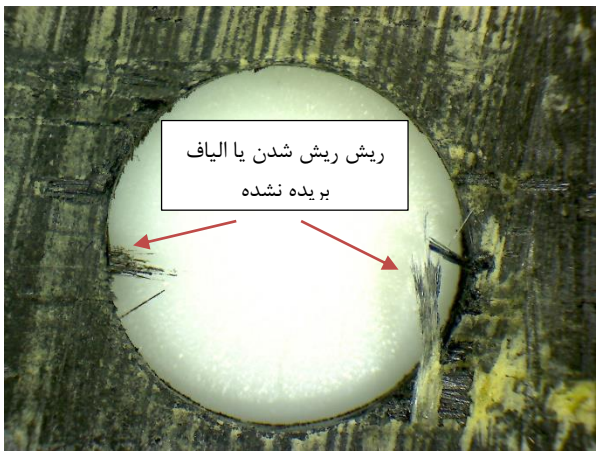
شکل ۵. مکانیزم ایجاد آسیب لایه لایه شدگی در خروجی ابزار (Push down) [۱۰]

ایراد لایه لایه شدگی در خروجی ابزار در شکل ۶ نشان داده شده است. این ایراد نیز بعلت نیروی بالا در پیشرویهای بالا ایجاد می گردد.



شکل ۶. آسیب لایه لایه شدگی در خروجی ابزار ماشینکاری

آسیب بعدی که در سوراخکاری کامپوزیتهای الیافدار رخ می دهد عبارتست از الیاف بریده نشده با ریش ریش شدن که در شکل ۷ نشان داده شده است. این آسیب بعلت نبود لبه برنده کافی بر روی ابزار ایجاد می گردد و بایستی از ابزارهای مناسب در این راستا استفاده شود.



شکل ۷. آسیب ریش ریش شدن یا الیاف بریده نشده

همچنین گاهی اتفاق می افتد که ریزن بصورت بریده نشده مانده و بیرون می زند که نمونه ای از آن در شکل ۸ نشان داده شده است. این مورد

بعلت دمای بالا حین سوراخکاری و ذوب شدن رزین و بیرون زدن آن می باشد. همچنین می تواند بعلت چسبندگی ضعیف بین رزین و الیاف باشد که ابزار ماشینکاری موجب جدایش این دو از همدیگر شود.

شکل ۸. رزین بریده نشده پس از ماشینکاری

جدایش الیاف از زمینه در حول سوراخ ایجادشده نیز از آسیبهای جدی در ماشینکاری کامپوزیتهای الیافدار می باشد که در ادامه با رشد ترک شکست موجب بزرگتر شدن آسیب شده و استحکام کامپوزیتها را بشدت کاهش دهد. برای بهبود این آسیب می توان ضخامت قطعه کامپوزیتی را افزایش داده و یا در فرآیند ماشینکاری اصلاحاتی انجام داد. جدایش زمینه از الیاف در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل ۹. جدایش الیاف از زمینه

۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر انواع آسیبهای ایجادشده در ماشین‌کاری نانوکامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و گرافن را نشان می‌دهد. لایه لایه شدن در ورودی و خروجی، ریش ریش شدن، جدایش الیاف از زمینه، الیاف بریه نشده و زمینه بریده نشده عنوان شاخص هایی از عملکرد عملیات ماشینکاری مورد بررسی قرار گرفت. برای هر کدام از آسیبهای ایجادشده راهکاری ارایه گردید که شامل موارد زیر می باشد:

- استفاده از ابزار مناسب برای کاهش نیروی ماشینکاری ودر نتیجه کاهش مقدار لایه لایه شدگی در ناحیه ورودی و خروجی ابزار
- استفاده از پارمترهای مناسب ماشینکاری شامل سرعت پیشروی پایین
- افزایش ضخامت کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف و نانوذرات جهت کاهش مقدار جدایش الیاف از زمینه پلیمری

۵- مراجع

۱. Young, R.J., et al., *The mechanics of graphene nanocomposites: a review.* Composites Science and Technology, 2012. **72**(12): p. 1459-1476.

۲. Kavimani, V. and K.S. Prakash, *Doping effect of SiC over graphene on dry sliding wear behaviour of Mg/SiC@ r-GO MMCs and its surface characterization.* Silicon, 2018. **10**(6): p. 2829-2843.

۳. Rahman, R. and A. Haque, *Molecular modeling of crosslinked graphene–epoxy nanocomposites for characterization of elastic constants and interfacial properties.* Composites Part B :Engineering, 2013. **54**: p. 353-364.

٤. Tabatabaeian, A., et al., *Residual stress in engineering materials: a review.* Advanced Engineering Materials, 2022. **24**(3): p. 2100786.

٥. Jiang, J., et al., *Influence of electrochemical oxidation of carbon fiber on the mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide/epoxy composites.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017. **95**: p. 248-256.

٦. Baraheni, M. and S. Amini, *Feasibility study of delamination in rotary ultrasonic-assisted drilling of glass fiber reinforced plastics.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2018. **37**(1): p. 3-12.

۷. Alexopoulos, N.D., et al., *Fracture related mechanical properties of low and high graphene reinforcement of epoxy nanocomposites.* Composites Science and Technology, 2017. **150**: p. 194-204.

۸. Baraheni, M., et al., *Parametric analysis of delamination in GFRP composite profiles by performing rotary ultrasonic drilling approach: experimental and statistical study.* Composites Part B: Engineering, 2019. **172** :p. 612-620.

۹. Stone, R. 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, 1996. **36**(9): p. 985-1003.

۱۰. Durão, L.M.P., et al., *Drilling damage in composite material.* Materials, 2014. **7**(5): p. 3802-3819.