



# Experimental Study on Effect of Machining Parameters in Slotting Polymers Reinforced by Carbon Fibers and MWCNT Nanoparticles



## ARTICLE INFO

### Authors

baraheni M<sup>1</sup>  
khoshdoni Farahani R<sup>2\*</sup>  
malekhoseini A<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Arak university of technology, sanati Arak, Iran

<sup>2\*</sup> Arak university of technology, sanati Arak, Iran

<sup>3</sup> Arak university of technology, sanati Arak, Iran

### \* Correspondence

Arak university of technology, sanati Arak, Iran  
Address: Rfarahani505@gmail.com

### How to cite this article

baraheni M, khoshdoni Farahani R, malekhoseini A. Experimental Study on Effect of Machining Parameters in Slotting Polymers Reinforced by Carbon Fibers and MWCNT Nanoparticles. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT), 2023;23(10):57-62.

## ABSTRACT

Composites reinforced with carbon fibers have various applications in different industries, due to their physical and mechanical properties. In this regard, multi-walled carbon nanotubes are used to strengthen the epoxy resin base, which is one of the emerging and important materials. Since machining is required to repair reinforced composite parts, in this research, the damages caused during the process should also be investigated and solutions should be provided. In this study, the delamination damage in the machining of composite parts of epoxy reinforced with carbon fibers and multi-walled carbon nanotubes has been discussed. In this regard, experiments have been conducted with a carbide end-mill at different cutting speeds and feed speeds. Then the delaminations created in these tests are studied. In the analysis of the results, by increasing the rotational speed from 500 to 2500, the amount of delamination increased by 25% and the force decreased by 87%. Also, solutions that include reducing the feed speed will have a significant effect on improving the final quality of the machined part.

**Keywords** Carbon Fiber - MWCNT- Spindel Speed - Feed Rate - Delamination.

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۵۷-۶۲



# بررسی تجربی تاثیر پارامترهای ماشینکاری در شیارزنی پلیمر تقویت شده با الیاف کربن و نانوذرات MWCNT



## چکیده

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف دارا می باشد که خواص فیزیکی و مکانیکی دلیل اهمیت آنها می باشد. در این راستا همچنین جهت استحکام بخشی به زمینه رزین اپوکسی از نانو لوله‌های چند جداره کربنی استفاده می شود که از جمله مواد نو ظهور و مهم می باشد. از آنجایی که برای اصلاح قطعات کامپوزیتی تقویت شده نیاز به ماشینکاری می باشد، در این تحقیق آسیب‌های ایجاد شده طی فرآیند نیز باید مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی جهت رفع آن ارائه میگردد. در این مطالعه، بر روی آسیب لایه لایه شدگی در ماشینکاری قطعات کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و نانو لوله‌های چند جداره کربنی پرداخته شده است. در این راستا آزمایش هایی با ابزار فرز انگشتی از جنس کاربیدی در سرعت دروانی و سرعت پیشرویهای مختلف انجام شده است، سپس لایه لایه شدگی هایی که در این آزمایشات ایجاد شده است مورد مطالعه قرار میگردد. در تحلیل نتایج با افزایش سرعت دورانی از ۵۰۰ به ۲۵۰۰ میزان لایه لایه شدگی ۲۵ درصد افزایش و نیرو ۸۷ درصد کاهش یافت. همچنین راهکارهایی که شامل کاهش سرعت پیشروی می باشد تاثیر بسزایی در بهبود کیفیت نهایی قطعه ماشینکاری شده خواهد داشت.

## مشخصات مقاله

### نویسنده‌ها

محمد براهنی<sup>۱</sup>  
رسول خوشدونی فراهانی<sup>۲\*</sup>  
علی ملک حسینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران  
<sup>۲</sup> دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران  
<sup>۳</sup> دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

### \* رسول خوشدونی فراهانی

آدرس: دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

Rfarahani505@gmail.com

**کلیدواژه‌ها:** الیاف کربن، MWCNT، سرعت دورانی، سرعت پیشروی، لایه لایه شدگی.

## ۱- مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌ها به دلیل اینکه دارای رنج وسیعی از ویژگی‌های مختلف هستند، در دنیای مدرن استفاده روزافزونی به خود گرفته است؛ به عنوان مثال با ترکیب کامپوزیت‌های چند جزئی، فیبرهای کربن، الیاف کربن و یا حتی اضافه کردن نانوذرات می‌توان رنج وسیعی از ویژگی‌ها را به کامپوزیت‌ها اضافه کرد. این افزایش ویژگی‌ها در کنار ویژگی‌هایی که در خواص کامپوزیت‌ها می‌باشد مانند استحکام بالا در عین حال داشتن نرخ وزنی پایین، مقاومت به سایش، مقاومت به خستگی و همچنین موادی سبک و مقاوم در برابر خوردگی می‌باشند استفاده از این کامپوزیت‌ها را در صنایعی مانند هوافضا، خودروسازی، ساخت بدنه هواپیما و ساخت مشتقات داخلی هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرند.<sup>(۱)</sup>

از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف معمولاً به نحوی استفاده می‌شود که نیاز به ماشینکاری ثانویه یا ماشینکاری خشن نداشته باشند، و این امکان از طریق نحوه تولید کامپوزیت‌ها و پلیمرهای تقویت شده با فیبرکربن که بسیار شبیه به محصول نهایی تولید می‌شوند که ماشینکاری دوباره را به حداقل می‌رساند، اما برای مونتاژ و همچنین رساندن کامپوزیت‌ها به تolerانس‌های ابعادی و کیفیت سطح مورد نیاز، نیاز به ماشینکاری کامپوزیت هاست؛ اما این نیاز به دلیل ماهیت خورنده و ساختار ناهمسانگرد که به دلیل چند جزئی بودن کامپوزیت‌ها می‌باشد و باعث شده است کامپوزیت‌ها به طور طبیعی موادی ناهمگن باشند فرآیند ماشینکاری آنها بسیار دشوارتر از فلزات که ساختاری ایزوتروپیک و همگن دارند باشد.<sup>(۲)</sup>

به دلیل خواصی که ذکر شد و همچنین تفاوت میان ماشینکاری فلزات و آلیاژ فلزات با پلیمرهای تقویت شده با فیبر کربن به این صورت است که در ماشینکاری پلیمرهای تقویت شده با فیبر کربن فقط رفتاری شکننده در مواجهه با نیروها از خود به جای می‌گذارد. این رفتار شکننده باعث می‌شود ایرادات مختلفی مانند بیرون کشیده شدن فیبر، فیبرهای شکسته شده و همچنین یکی از ایراداتی که به راحتی در ماشینکاری ایجاد می‌شود، لایه لایه شدگی را به وجود بیاورد به همین دلیل یکی از چالش برانگیزترین کارها در صنعت ماشینکاری کامپوزیت‌ها می‌باشد.<sup>(۳)</sup>

این ایرادات را می‌توان از زوایای مختلف مورد بررسی قرار داد دلایل مختلفی برای ایجاد هر کدام از مشکلات سطحی وجود دارد از این دلایل میتوان به نیروهای برش، پارامترهای دخیل در برش، هندسه ابزار نام برد.

وقتی از تفاوت ویژگی‌های کامپوزیت‌های مختلف بحث می‌شود به دلیل چند جزئی بودن کامپوزیت‌ها می‌باشد همین چند جزئی بودن کامپوزیت‌ها باعث می‌شود رنج وسیعی از خواص را داشته باشند؛ به عنوان مثال با اضافه کردن نانوذرات گرافن به عنوان رزین یا هر نانوذراتی که از مشتقات کربن ساخته شده است مانند نانو

لوله‌های چند جداره کربنی یا نانو میله‌های چند جداره کربنی باعث افزایش استحکام برشی و خمشی و افزایش مقاومت به سایش، افزایش هدایت الکتریکی، افزایش ضریب هدایت حرارتی در کامپوزیت‌ها می‌شوند به طور کلی امروزه با اضافه کردن نانوذرات در کامپوزیت‌ها رنج وسیعی از استحکام‌ها را می‌توان برای این مواد به وجود آورد.<sup>(۴)</sup>

گرافن یک تک لایه دو بعدی از اتم‌های کربن است، که به صورت هانی کمپ مرتب شده اند، که از بلوک خام گرافیت بدست می‌آیند. گونه‌های مختلفی از متریکال‌ها بر حسب گرافن وجود دارند؛ مانند گرافن‌های چند لایه و همچنین نانولوله‌های تک دیواره کربنی یا نانو لوله‌های چند جداره کربنی.

نانو لوله‌های تک جداره معمولاً از چینش استوانه گونه ورق‌های گرافن درست می‌شوند. در حالی که نانولوله‌های چند جداره کربنی به وسیله اتصال چند لایه از ورق‌های گرافنی تشکیل میشوند. استفاده از نانومتريال‌ها به علت خواص چشم گیری که به خاطر استفاده از نانولوله‌های چند جداره کربنی و نانولوله‌های کربنی و نانو گرافن‌ها در افزایش خواص مکانیکی مواد دارد باعث افزایش استفاده از نانو کامپوزیت‌های پلیمری شده اند. ترکیب خواص فیزیکی و همچنین قابلیت گسترش خواص در ناحیه ی پلاستیکی باعث به وجود آمدن یک نوع جدیدی از نانو کامپوزیت‌های پلیمری شده است. نانولوله‌های کربنی و گرافن‌ها در پلیمرهای نانو کامپوزیتی باعث بهبود خواص مکانیکی حرارتی و نوری و همچنین بهبود ضریب هدایت الکتریکی را منجر می‌شود.<sup>(۵)</sup>

کانگاراچ و همکاران<sup>(۶)</sup> با انجام یک تست کشش بر روی پلی اتیلن‌هایی با چگالی بالا که تقویت شده با نانولوله‌های تک جداره کربنی بودند نتیجه گرفت که کسر حجمی نانو لوله‌ها به صورت خطی باعث افزایش مدول یانگ می‌شود.

رفیعی<sup>(۷)</sup> یافت که پرکننده (فیلر)های گرافنی توانایی این را دارند که به صورت موثر از رشد ترک در رزین کامپوزیت‌ها جلوگیری کند که این ویژگی در فرآیند تغییر شکل پلیمرها از نرخ وزنی بدنه ورقه‌های گرافن بسیار تأثیر می‌گیرد.

اضافه کردن نانوذرات به قطعه کار از طرفی باعث افزایش استحکام می‌شود که یکی از ویژگی‌های مثبت کامپوزیت‌هاست، اما به این نکته توجه داشته باشیم که این افزایش استحکام باعث افزایش مشکلات سطحی و افزایش چالش‌ها در هنگام ماشینکاری این مواد و متریکال‌ها می‌شود و یکی از مهم ترین این چالش‌ها بالا رفتن دمای سطح کامپوزیت‌ها در هنگام استفاده از نانوذرات در رزین کامپوزیت‌ها می‌شود.

اولین صنعتی که با استفاده از نانوذرات بسیار پیشرفت کرد صنایع خودروسازی بود، که بخاطر استفاده از این مواد و متریکال به پیشرفت‌های اقتصادی بسیاری دست یافتند در سال‌های اخیر همواره یکی از مهمترین چالش‌های صنعت خودرو در جهان کاهش قیمت بوده است و به تبعیت از آن، سبک سازی یکی

موضوع باعث چالش برانگیز شدن فرآیند ماشینکاری بین متریل-ها شده است. در این راستا اکثر محققان پیشنهاد میکنند که با استفاده از روش‌ها و متدهای جدید اقدام به ماشینکاری این متریل‌ها شود؛ روش‌هایی مانند استفاده از ابزارات مخصوص و یا مانند سورتید<sup>(۱)</sup> که در مطالعات آزمایش خود بر روی فرزکاری صفحات کامپوزیتی اقدام به آنالیز پارامترهای درگیر در برش کرد و رابطه این پارامترها را با صافی سطح سنجید وی مشاهده کرد که با افزایش سرعت پیشروی و عمق برش مقدار نیروی برش افزایش می‌یابد که موجب کاهش صافی سطح و افزایش مشکلات سطحی می‌شود.

ایرادات را میتوان از زوایه‌های مختلف مورد بررسی قرار داد دلایل مختلفی برای ایجاد هر کدام از مشکلات سطحی وجود دارد از این دلایل میتوان به نیروهای برش، پارامترهای دخیل در برش، هندسه ابزار نام برد.

اولین زاویه ای که به بررسی مشکلات سطحی کامپوزیت‌ها در حین عملیات فرزکاری بررسی می‌کنیم، نیروی برشی می‌باشد، نیروی برشی برای به دست آوردن حالت برش و همچنین پیشبینی حالت برش یکی از موثرترین راه‌ها می‌باشد، نیرویی که بین ابزار و قطعه کار به وجود می‌آید باعث ایجاد ارتعاشی در قطعه کار می‌شود این ارتعاش نتیجه ای جز افزودن مشکلات سطحی ندارد به همین دلیل نیروی فرآیند فرزکاری در ماشینکاری کامپوزیت‌ها باید به صورت پیوسته کنترل شود.

وجهی دیگر بررسی مشکلات سطحی کامپوزیت‌ها در فرآیند فرزکاری پارامترهای درگیر در فرآیند ماشینکاری می‌باشند پارامترهایی مانند سرعت دورانی، سرعت پیشروی، عمق برش، قطر ابزار، هندسه ابزار (مانند تعداد لبه‌های برشی زاویه هلیکس) می‌باشد. برای بررسی پارامترهای ماشینکاری باید به این نکته توجه داشت که این پارامترها بر کامپوزیتی که به عنوان قطعه کار مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیار وابسته‌اند. در بعضی از کامپوزیت‌ها مانند کامپوزیتی که کلاک و سنار<sup>(۲)</sup> بر روی آن تحقیق کردند به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت برشی و کاهش سرعت پیشروی اثرات بهتری را در صافی سطح و کاهش مشکلات سطحی می‌گذارد اما ال هوفی<sup>(۳)</sup> به این نتیجه رسید که، در کامپوزیت وی کاهش سرعت برشی و افزایش سرعت پیشروی بهترین شرایط برای فرز کاری و همچنین کاهش مشکلات سطحی می‌باشد به همین دلیل متوجه می‌شویم که پارامترهای برشی تاثیر زیادی از نوع قطعه کار و ابزار و نحوه برش می‌گیرد اما به طور کلی بهینه سازی پارامترهای برش برای کامپوزیت‌ها یکی از بهترین راه‌ها قبل از اقدام به طراحی و همچنین ماشینکاری کامپوزیت‌ها می‌باشد و استفاده از این بهینه سازی‌ها نیز با روش‌های آماری مختلف بررسی می‌شود که در ادامه به آن می‌پردازیم.

هدف از این مطالعه تحقیق و بررسی تاثیر پارامترهای برشی مختلف بر روی فرآیند فرزکاری مانند سرعت پیشروی سرعت

از اهداف کلیدی در این صنعت محسوب می‌شود. کامپوزیت‌ها به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، سفتی و جذب انرژی ضربه، از پتانسیل بالایی برای کاربرد در خودرو برخوردار هستند. تاکنون با استفاده از مواد کامپوزیتی کاهش ۳۵ درصدی وزن خودرو میسر شده است.

خانواده نانوذرات کربن مانند لوله‌های کربنی نانو میله‌ها و اکسید گرافن به صورت گسترده به عنوان پرکننده در پلیمرها مورد استفاده قرارگرفت که باعث شد حتی با درصد وزنی بسیار کم ویژگی‌های سطحی مواد را بسیار بهبود ببخشد.

الیاف کربن از لحاظ ساختمانی متشکل از کربن‌های گرافیتی هستند و از نظر شیمیایی شامل ۹۹/۹٪ کربن خالص است. این ساختمان از لایه‌های موازی تشکیل شده است که در آنها اتم‌های کربن به صورت شش وجهی‌های منظم قرار گرفته‌اند.

به این لایه‌ها صفحات بنیادی گفته شده و فواصل این لایه‌ها بزرگ‌تر از فاصله بین اتم‌های مجاور در هر لایه است. هدایت الکتریکی و حرارتی بالای گرافیت در جهت لایه‌ها به علت تحرك الکترون‌های  $\pi$  در بین لایه‌ها است.<sup>(۴)</sup> این صفحات به وسیله نیروهای ضعیف واندروالسی در کنار هم قرار گرفته‌اند در حالی که پیوند محکم کووالانسی بین اتم‌های کربن موجود در هر لایه وجود دارد. لذا الیاف کربن از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی رفتاری ناهمسان از خود نشان می‌دهد لذا جهت دهی صفحات بنیادی در جهت محور طولی الیاف باعث تولید الیافی با مدول بالا می‌شود که با توجه به چگالی کم این مواد در نهایت الیافی با مدول ویژه بسیار بالا حاصل می‌گردد.

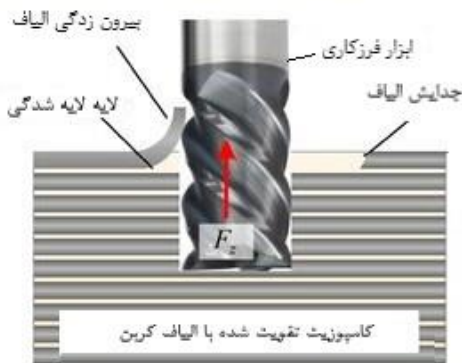
مقاله‌های علمی زیادی در راستای اضافه کردن گرافن‌ها و اکسید گرافن و نانولوله‌های چند جداره کربنی و دیگر نانوذره‌ها به رزین اپوکسی کامپوزیت‌ها به چاپ رسیده است. این امر نیازمند توجه ویژه در جهت بهبود و ارزیابی خواص چندگانه‌ی محصول نهایی بسیار ضروری است. مطالعات نشان داده است که مشخصه افزایش خواص مکانیکی به شدت تحت تاثیر میزان گستردگی و کسر حجمی نانوذرات می‌باشد و از سوی دیگر به علت خواص ناهمسانگرد و آن‌ایزوتروپیک به دست آوردن صافی سطح بهتر(منطقه آسیب دیده کمتر) و به طور کلی فرآیند ماشینکاری کارآمدتر نیازمند توجهی زیاد در امر اضافه کردن خواص مکانیکی است. ماشینکاری نانوکامپوزیت‌های تقویب شده با نانوذرات کربن از فاز اولیه گذشته است؛ بدین معنی که مطالعات و تحقیقات در سطح دانشگاهی و آکادمیک بر روی موضوع اضافه کردن کسر حجمی معقول در رزین کامپوزیت‌ها در راستای کاهش خواص مکانیکی و همچنین داشتن نیروی برشی کمتر برای داشتن صافی سطح بهتر و مشکلات ابعادی کمتر شده است.<sup>(۵)</sup>

با توجه به خواص نانوکامپوزیت‌ها و الزام حضور این نانومتریال‌ها در صنعت به علت ویژگی‌هایی که ذکر شد ضروری است اما همین

این دستگاه دارای طول محور X به میزان ۸۰۰ میلی متر و دو محور دیگر آن با طول ۴۰۰ میلی متر می باشد .



شکل (۱) ستاپ آزمایشگاهی



شکل (۲) نحوه برش صفحه کامپوزیتی

در هنگام عملیات فرزکاری کامپوزیت‌ها انواع مختلفی از آسیب‌ها به کامپوزیت وارد می‌شود که در شکل ۲ چند مورد از این آسیب‌ها آورده شده است.

با استفاده از دستگاه vmm عکس قطعه کار بعد از عملیات فرزکاری گرفته شد.

پروفایل پروژکتور شامل قسمت اندازه‌گیری - میکرومتر محور افقی ( میکرومتر محور عمودی اندازه‌گیری زاویه از ۰ تا ۳۶۰ درجه) می‌باشد؛ که برای اندازه‌گیری خط‌کش، اندازه‌گیری گام، زاویه پیچ و مهره و اندازه‌گیری ابعادی که نتوان با میکرومتر و کولیس اندازه‌گیری کرد استفاده می‌شود دقت اندازه‌گیری ابعاد 0.001mm و دقت اندازه‌گیری زاویه 0.01 درجه می‌باشد.

با استفاده از فرمول زیر که برای محاسبه مقدار لایه لایه شدگی است و نرم افزار دیجی مایزر اقدام به تحلیل عکس‌های گرفته شده توسط دستگاه vmm کردیم.

$$F_d = \frac{W_{max}}{W_{real}}$$

در این فرمول منظور از  $w_{max}$  ، قسمتی از کامپوزیت بعد از عملیات فرزکاری است که بیشترین مقدار آسیب عرضی به قطعه کار وارد شده است و مقدار آن از مقدار  $w_{real}$  که برابر با قطر فرز انگشتی است بیشتر است. به منظور محاسبه مقدار مناسبی برای  $F_d$  چند محل مختلف در یک آزمایش را انتخاب کرده و مقادیر

دورانی و همچنین تعداد لایه‌های برشی ابزار بر روی پارامترهای خروجی مانند لایه لایه شدگی و نیروی برشی می‌باشد. فرآیند شباهتی نمونه کامپوزیتی به وسیله دستگاه فرز و ابزار انگشتی با لایه ی برشی مستقیم از جنس کارباید انجام شده است.

## ۲- تجهیزات آزمایش

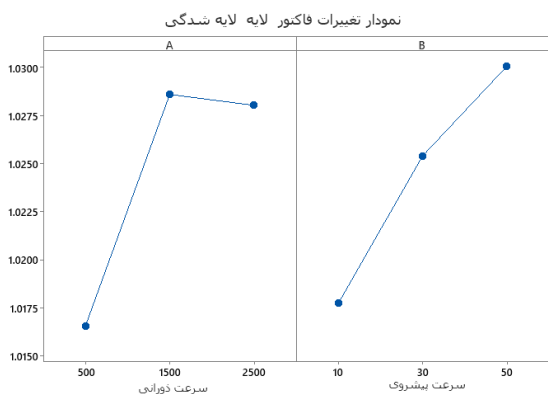
نمونه استفاده شده در این آزمایش شامل رزین اپوکسی ML506 به همراه سفت کننده پلی امین (HA-11) به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شده‌اند. این رزین دارای ویسکوزیته پایین و خواص مکانیکی خوبی می‌باشد؛ نمونه‌های ساخته شده شامل رزین اپوکسی ML-506 الیاف کربن یک طرفه T700 و نانولوله‌های چند جداره کربنی (MWCNT) می‌باشد. نمونه‌ها به صورت صفحه ای به ابعاد ۲۵۰\*۲۵۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد. خلوص نانوذرات ۹۵ درصد و قطر خارجی و داخلی به ترتیب ۳۰ و ۲۰ نانومتر و هدایت الکتریکی آن ۱۰۰ سیمن بر سانتی متر و چگالی آن ۲/۱ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. رزین اپوکسی استفاده شده با دانسیته، کشش و مدول برشی ۱/۱۱ گرم بر سانتی متر مکعب ، ۲/۸۲ گیگا پاسکال و ۱۵/۳۴ گیگا پاسکال می‌باشد. قطعه کامپوزیتی از ۸ لایه ساخته شده است الیاف به صورت یک جهته در لایه‌ها جایگذاری شده‌اند؛ ۴ لایه ابتدایی، به ترتیب با زوایای ۰ و ۹۰ درجه قرار گرفته‌اند و ۴ لایه بعدی نیز به صورت قرینه می‌باشند. عکس آماده سازی آزمایشات در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این آزمایش سعی داریم رابطه بین پارامترهای ورودی و تاثیر آنها بر روی پارامترهای خروجی مانند نیرو و لایه لایه شدگی را بررسی کنیم.

نیرو با استفاده از دستگاه نیروسنج شرکت SEWHA اندازه‌گیری شده است. این نیروسنج با نگه دارنده خود به میز ماشین فرز دستی و وصل کردن سیم‌های سیگنال به نیروسنج و همچنین با صفر کردن دستگاه نیروسنج کوچکترین نیروهای وارد شده به قطعه کار نیز بروی صفحه نمایش این دستگاه نشان داده می‌شود این نیرو سنج توانایی محاسبه نیرو از ۱ تا ۲۰۰ تن را دارا می‌باشد و همچنین دارای درجه حفاظتی IP67 یعنی مقاومت در برابر آب را دارا می‌باشد و کاربرد این دستگاه بیشتر برای اعمال نیروهای کششی و فشاری می‌باشد و ولتاژ پیشنهادی برای کار این دستگاه نیز ۱۰ ولت پیشنهاد شده است . فرز دستی استفاده شده در این آزمایش ساخت شرکت ماشین سازی تبریز به مدل FP4M استفاده شده‌است.

دستگاه فرز دستی توانایی اعمال سرعت‌های برشی ۵۰۰ ، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه را دارا می‌باشد که یک سطح آزمایش ما را برطرف می‌کند سرعت پیشروی این دستگاه به صورت خودکار و بین مقادیر ۱۰، ۳۰ و ۵۰ قابل انتخاب می‌باشد که تمام نیازهای ما را در جهت انجام این آزمایش برطرف می‌کند .

مهمترین مشکل سطحی در فرآیند ماشینکاری کامپوزیت‌ها لایه لایه شدگی می‌باشد. لایه لایه شدگی ایجاد شده در کامپوزیت در هنگام استفاده از پارامترهای برشی مختلف مانند سرعت دورانی و پیشروی در شکل ۳ آمده است در شکل تعدادی لایه لایه شدگی مختلف فیبرهای بریده نشده و زمینه بریده نشده مشخص است. همچنین برای بررسی عددی لایه لایه شدگی علاوه بر دسته بندی لایه لایه شدگی اقدام به تحلیل عددی لایه لایه شدگی با استفاده از فاکتور لایه لایه شدگی و آنالیز متغییرها در نرم افزار مینی تب اقدام شده است.



نمودار ۲) تغییرات فاکتور لایه لایه شدگی

در تحلیل نتایج نمودار ۱ مقدار لایه لایه شدگی کاملا مشخص است که با افزایش مقدار سرعت پیشروی مقدار لایه لایه شدگی افزایش پیدا کرده است که به علت افزایش مقدار نیروی ماشینکاری است همچنین در سرعت دورانی بالاتر مقدار انرژی مکانیکی بیشتری تولید می‌شود که این امر باعث افزایش میزان حرارت تولید شده در طی فرآیند ماشینکاری می‌شود و با نرم شدن باعث افزایش مقدار لایه لایه شدگی می‌شود علاوه بر این ارکان و همکاران (۱۴) توضیح می‌دهد که لایه لایه شدگی با افزایش مقدار تغییر شکل پلاستیک افزایش پیدا می‌کند به همین جهت در هنگام استفاده از سرعت های دورانی، بالاتر مقدار بالاتری را برای ضریب لایه لایه شدگی به ثبت می‌رساند همچنین وی پیشنهاد می‌کند که علاوه بر استفاده از سرعت‌های دورانی پایینتر، از ابزاری با لبه های برشی بیشتر استفاده کنید؛ زیرا تاثیر بسزایی بر روی بهبود ضریب لایه لایه شدگی دارد.

در هنگام ماشینکاری نیرو پارامتر مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک و همچنین برش مواد می‌باشد. نیرو از پارامترهای مشخصی تاثیر می‌گیرد این نیرو به شدت تحت تاثیر ترکیب مواد، سختی، ریزساختار، هندسه، نوع ابزار برش مورد استفاده، پارامترهای ماشینکاری و میزان حرارت تولید شده می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده از آزمایشات مقدار نیروی وارد شده به قطعه کار با استفاده از نیرو سنج ثبت شده است.

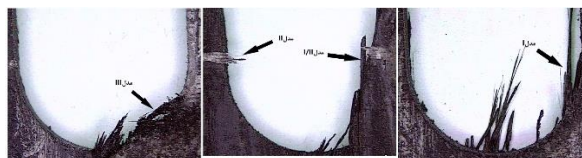
$w_{real}$  و  $w_{max}$  را در فرمول بالا جایگذاری کردیم و مقدار میانگینی برای مقدار لایه لایه شدگی به دست آورده ایم. همچنین تعداد آزمایشات صورت گرفته و سطح بندی آزمایشات در جدول ۱ آورده شده است.

آزمایش	blk	سرعت دورانی	سرعت پیشروی
۱	۱	-1	-1
۲	۱	1	-1
۳	۱	-1	1
۴	۱	1	1
۵	۱	-1	0
۶	۱	1	0
۷	۱	0	-1
۸	۱	0	1
۹	۱	0	0

جدول ۱) سطح بندی آزمایشات

### ۳- نتایج و تحلیل

کیفیت فرآیند ماشینکاری در هنگام برش کامپوزیت‌ها به صورت چشم گیری از پارامترهای برش و هندسه ابزار تاثیر می‌گیرد. در هنگام فرآیند فرز کاری با ابزار انگشتی لایه لایه شدگی از مهمترین مشکلات ایجاد شده در سطح کامپوزیت می‌باشد. در همین راستا و برای بررسی پارامترهای درگیر در برش اقدام به طراحی و انجام ۱۸ تست برای سنجش و ارزیابی فاکتورهایی مانند سرعت دورانی سرعت پیشروی و نیروی ایجاد شده در هنگام عملیات ماشینکاری انجام شده است. در هنگام عملیات فرزکاری بر روی صفحات کامپوزیتی مدل های مختلفی از لایه لایه شدگی نمایان می‌شود که می‌تواند به صورت‌های مختلف دسته بندی شود. رامالا (۱۳) ۴ نوع لایه لایه شدگی را که در هنگام فرآیند فرزکاری به وجود آمده بودند در ۴ نوع دسته بندی توصیف کرد. این ۴ نوع لایه لایه شدگی را به نام های نوع I، نوع II، نوع I/II و نوع III نام گذاری کرد نوع اول لایه لایه شدگی زمانی اتفاق می‌افتد که فیبرهای سطحی در راستای لبه ی ماشینکاری شکسته یا جدا می‌شوند. نوع دوم لایه لایه شدگی فیبرهای بریده نشده‌ای هستند که از لبه ی ماشینکاری عقب‌تر می‌باشند. همانگونه که از نام گذاری نوع سوم لایه لایه شدگی مشخص است نوع سوم ترکیبی از نوع اول و دوم می‌باشد. نوع چهارم دسته ای از فیبرها یا زمینه‌هایی هستند که عمود بر راستای ماشینکاری نیروی کافی برش برای آنها فراهم نشده است و به صورت بیرون زدگی‌هایی از لبه ی برش مشخص هستند.

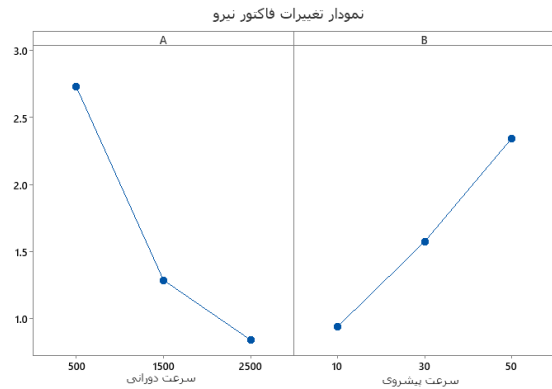


شکل ۳) انواع لایه لایه شدگی (الف) (ب) (ج)

شکل ۳) انواع لایه لایه شدگی

## مراجع

- Kiliçkap E, Yardimeden A, Çelik YH. Investigation of experimental study of end milling of CFRP composite. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2015;22(1):89-95.
- Xu Z, Wang Y. Study on milling force and surface quality during slot milling of plain-woven CFRP with PCD tools. *Materials*. 2022;15(11):3862.
- Li H, Qin X, Huang T, Liu X, Sun D, Jin Y. Machining quality and cutting force signal analysis in UD-CFRP milling under different fiber orientation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;98:2377-87.
- Mohan VB, Lau K-t, Hui D, Bhattacharyya D. Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations. *Composites Part B: Engineering*. 2018;142:200-20.
- Kumar MN, Mahmoodi M, TabkhPaz M, Park S, Jin X. Characterization and micro end milling of graphene nano platelet and carbon nanotube filled nanocomposites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;249:96-107.
- Kanagaraj S, Varanda FR, Zhil'tsova TV, Oliveira MS, Simões JA. Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*. 2007;67(15-16):3071-7.
- Rafiee MA, Rafiee J, Srivastava I, Wang Z, Song H, Yu ZZ, et al. Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *small*. 2010;6(2):179-83.
- Wang X-Y, Narita A, Müllen K. Precision synthesis versus bulk-scale fabrication of graphenes. *Nature Reviews Chemistry*. 2017;2(1):0100.
- Adak NC, Chhetri S, Sabarad S, Roy H, Murmu NC, Samanta P, et al. Direct observation of micro delamination in graphene oxide incorporated carbon fiber/epoxy composite via in-situ tensile test. *Composites Science and Technology*. 2019;177:57-65.
- Sorrentino L, Turchetta S, editors. Milling of carbon fiber-reinforced plastics: analysis of cutting forces and surface roughness. *18th International Conference of Composite Materials*; 2011.
- Çolak O, Sunar T. Cutting forces and 3D surface analysis of CFRP milling with PCD cutting tools. *Procedia Cirp*. 2016;45:75-8.
- El-Hofy M, Soo S, Aspinwall D, Sim W, Pearson D, Harden P. Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. *Procedia Engineering*. 2011;19:94-9.
- Colligan K, Ramulu M. Delamination in surface plies of graphite/epoxy caused by the edge trimming process. *Processing and Manufacturing of composite materials*. 1991;112:113-25.



نمودار ۲) تغییرات فاکتور نیرو

طبق نتایج نمودار ۲ میتوان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت پیشروی نیروی برش به صورت چشم گیری افزایش پیدا کرده است به طور کلی استفاده از سرعت های پیشروی پایینتر، باعث کاهش نیرو در راستای برش مقدار مشخصی از ماده در زمان بیشتر باعث کاهش نیروی برش می شود و همچنین به علت حرارت ایجاد شده در هنگام استفاده از سرعت های دورانی بالاتر مقدار نیروی برش با کاهش همراه شده است.

## ۳-۱- نتیجه گیری

در این مقاله با انجام آزمایش های تجربی و در راستای تحقیق بر روی تاثیر پارامترهای مختلف مانند سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر روی قطعه کار کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن و زمینه دارای نانولوله های چند جداره کربنی و در راستای بهینه سازی این پارامترها برای کاهش نیرو و لایه لایه شدگی آزمایشات انجام گرفت خلاصه نتایج این پژوهش به شرح زیر است.

- آسیب های ناشی از ماشینکاری تاثیر بسیار زیادی از پارامترهای برش و هندسه ابزار می گیرد.

- با افزایش سرعت پیشروی مقدار لایه لایه شدگی نیز افزایش پیدا می کند.

- با افزایش سرعت دورانی مقدار نیرو کاهش می یابد که به دلیل افزایش انرژی مکانیکی و تبدیل این انرژی به حرارت می باشد اما افزایش حرارت قطعه کار باعث افزایش میزان لایه لایه شدگی می شود.

- نیروی برش با سرعت پیشروی رابطه مستقیم و با سرعت دورانی رابطه عکس دارد.

- پیشنهاد می شود که برای داشتن بهترین کیفیت ماشینکاری از ابزاری با لبه های برشی بیشتر و سرعت پیشروی کمتر استفاده شود اما برای سرعت دورانی دستگاه نیز در هنگام برش اگر به دنبال کاهش نیرو هستید از سرعت دورانی بالا و اگر به دنبال کیفیت بهتر هستید از سرعت دورانی پایین تر استفاده کنید.