

## (علمی-پژوهشی)

# بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند فرزکاری مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی با هدف کاهش زبری سطح

امروزه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن در مقایسه با فلزات، با توجه به برخورداری از نسبت استحکام به وزن بالا، کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف پیدا نموده است. ماشین‌کاری این مواد با توجه به ساختار غیر همگن آنها از پیچیدگی خاصی برخوردار است. با توجه به ضریب انبساط حرارتی متفاوت بین الیاف و رزین در کامپوزیت‌های پلیمری، فرزکاری این مواد یک عملیات پیچیده برای ایجاد قطعات نهایی می‌باشد. تحلیل و پیش‌بینی دقیق شرایط بهینه ماشین‌کاری با حداکثر راندمان، از اهداف این فرآیند محسوب می‌گردد. با گسترش تکنولوژی ماشین‌کاری CNC، کاهش زمان ماشین‌کاری از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از راه‌حل‌های کاهش زمان، تکنولوژی ماشین‌کاری با سرعت بالا می‌باشد. صفحه کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، که در بدنه سازه‌های هوافضایی و موشک‌ها کاربرد دارد، به روش لایه چینی دستی ساخته شده است. پارامترهای برش برای فرآیند فرزکاری صفحه کامپوزیتی از سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ تا ۷۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۱ تا ۳ میلی‌متر هر کدام در پنج سطح مختلف، در نظر گرفته شد. پس از طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ، ۲۰ نمونه مورد ماشین‌کاری قرار گرفت. در این فرآیند، فرزکاری با ابزاری از جنس الماس با پوشش تنگستن کاربرد و دارای دو لبه، انجام و سپس زبری سطوح اندازه‌گیری و نرخ برداشت ماده برای هر آزمایش ثبت شده و تحلیل‌های لازم انجام گرفت. سرعت اسپیندل بیشترین تأثیر را در زبری سطح داشت. نتیجه گیری نهایی بدین صورت بود که زبری سطح پایین تحت تأثیر پارامترهای برش در نتیجه سرعت اسپیندل بالا، نرخ پیشروی پایین و عمق برش کم به دست آمد. حالت بهینه با حداقل زبری ۱/۹ میکرومتر، با سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، عمق برشی ۱ میلی‌متر به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: فرزکاری، زبری سطح، کامپوزیت کربن/اپوکسی، سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش

## Optimization of Milling Process Parameters of Carbon/Epoxy Composite Material for Minimizing Surface Roughness

Today, Carbon fiber-reinforced polymer composites (CFRP) have extensive use in different fields such as aerospace, automotive, oil, gas, and defense industries compared to metals, due to the high ratio of strength to weight. Machining of these materials regard to their non-homogeneity structure is complicated. Due to the different thermal expansion coefficients between the fibers and resin polymer composite milling materials difficult to create one of the final parts. Achieve optimal machining conditions, with high efficiency, which need proper analysis and careful investigation. Minimizing the machining time became important Due to developments in CNC technology. One of the time minimizing methods is high-speed machining technology. In this study, composite plates made of carbon/epoxy to a thickness of 10 millimeters, which are often used in the body of Aerospace structures and missiles, have been manufactured by hand layup. The cutting parameters used during the milling operation of the CFRP panel ranged from 1000 rpm to 7000 rpm for the spindle speed, feed rate from 1000 mm/min to 3000 mm/min, and lastly 1.0 mm to 3.0 mm range for depth of cut. the combination of spindle speed, feed rate, and depth of cut are studied at five different levels. 20 runs of experiments are performed based on Response Surface Methodology (RSM). the milling process with two-flute tungsten carbide - coated diamond insert with a 20 mm diameter was performed. their surface quality after milling process is measured. So after roughness, material removal rate and required analysis were performed. Spindle speed has a greatest effect on surface roughness. In conclusion, the influence of the cutting parameters is higher spindle speed, lower feed rate, and lower depth of cut resulting in low surface roughness. The optimized cutting parameters were spindle speed, feed rate, and depth of cut of 7000 rpm, 1000 mm/min and 1 mm respectively with the surface roughness of 1.9 um.

**Keywords:** Milling, Surface Roughness, Carbon/epoxy Composite, Spindle Speed, Feed Rate, Depth of Cut

رضا انصاری<sup>۱\*</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>۱\*\*</sup>، محمدحسین علایی<sup>۱\*\*\*</sup>، محسن حیدری بنی<sup>۲\*\*\*\*</sup> و مجید اسکندری شهرکی<sup>۲\*\*\*\*</sup>

۱- مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، کدپستی: ۱۵۸۷۵۱۷۷۴

۲- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد، کدپستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، مشهد، ایران

\* دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

\*\* استاد (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

jafar.eskandarijam@gmail.com

\*\*\* استادیار

\*\*\*\* دانشجوی دکتری

R. Ansari<sup>1\*</sup>, J. Eskandari Jam<sup>1\*\*</sup>, M.H. Allae<sup>1\*\*\*</sup>, M. Heydari Beni<sup>1\*\*\*\*</sup>, and M. Eskandari Shahraki<sup>2\*\*\*\*</sup>

1- University Complex of Materials and Manufacturing Technology, Malek Ashtar University of Technology, Postal Code: 1477893855, Tehran, IRAN

2- Department of Aerospace Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Postal Code: 9177948974, Mashhad, IRAN

\* M.Sc. Holder

\*\* Professor (Corresponding Author):

Email:

jafar.eskandarijam@gmail.com

\*\*\* Assistant Professor

\*\*\*\* Ph.D. Student

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های ماشین‌کاری، فرزکاری می‌باشد. فرزکاری با استفاده از ابزار یک لبه یا چند لبه که حول محوری موازی یا عمود بر سطح قطعه کار دوران می‌کند. نرخ براده برداری بالا و امکان دسترسی به صافی سطح بسیار خوب، عوامل مهمی هستند که باید در این فرآیند توجه شوند. کامپوزیت‌های کربن اپوکسی با توجه به دارا بودن خواص مکانیکی بالا، کاربرد بیشتری در صنایع پیدا کرده‌اند. این دسته از کامپوزیت‌ها، در بدنه و بال سازه‌های هوافضایی کاربرد بسیاری دارند. معمولاً ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها، جهت سایننگ و مونتاژ که از مراحل مهم فرآیند ساخت و تولید قطعات محسوب می‌شود، استفاده می‌گردد. در صورتی که عملیات ماشین‌کاری به صورت اصولی اعمال نگردد، احتمال تخریب مواد، عدم کیفیت سطحی مناسب، جدایش الیاف از رزین و در برخی موارد شکست قطعه کار وجود خواهد داشت. زبری سطح از جمله پارامترهایی است که پس از ماشین‌کاری سطوح کامپوزیتی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نیز می‌تواند یکی از مراحل آماده‌سازی سطوح قبل از رنگ‌آمیزی باشد. در برخی موارد جهت اتصال کامپوزیت‌های عایق با کاور فلزی، نیاز به ایجاد زبری متوسط و گاهاً بالا جهت دستیابی به استحکام بالا، می‌باشد. کامپوزیت نوع کربن با توجه به شرایط عملیاتی سازه‌های هوایی یکی از بهترین انتخاب‌ها می‌باشد؛ زیرا دو پارامتر وزن کم و استحکام ویژه بالا را در سازه فراهم می‌کند.

ورما<sup>۱</sup> و همکاران [۱]، به بررسی تأثیر جهت الیاف در ماشین‌کاری کامپوزیت با الیاف شیشه تک جهته و زمینه پلیمری، پرداختند. پارامترهای نرخ فرسایش ابزار، نرخ پیشروی و سرعت برش، نرخ شکل‌گیری تراشه وابسته به سرعت برش، زاویه برش ابزار، شعاع نوک ابزار، نوع بافت الیاف و مواد استفاده‌شده در الیاف و ماتریس از عواملی هستند که در روند ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها تأثیر دارند. نیروهای برش و گشتاور بستگی به جهت الیاف و شرایط ماشین‌کاری دارد و هندسه ابزار تأثیر کمتری در نیروهای برشی دارد.

کاراتاس<sup>۲</sup> و همکاران [۲]، مقاله‌ای با عنوان مروری بر قابلیت ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن و مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه ارائه داده‌اند. الیاف تک جهته در یک جهت استحکام و سختی بیشتر دارد و الیاف دو جهته در هر دو جهت استحکام و سختی خواهد

داشت. الیاف صفر درجه نیروی محوری، الیاف  $\pm 45$  درجه، نیروی برشی و الیاف ۹۰ درجه نیروهای جانبی خواهد داشت. راج<sup>۳</sup> و همکاران [۳]، مقاله‌ای با عنوان آنالیز زبری سطح و تورق توسط روش تاگوچی در فرزکاری پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه به چاپ رساندند. آنها نشان دادند که، با افزایش سرعت برش، زبری سطح برای دو ابزار کاهش یافته و میزان تورق، افزایش و کاهش متناسب با جنس ابزارها داشته است. در ابزار کار باید تیتانیوم، مقدار بهینه سرعت برش ۷۲، عمق برش ۰/۵ و نرخ پیشروی ۶۰۰ و دقت ابعادی بهتر معادل ۹۵/۴ به دست آمد. در ابزار کار باید جامد، مقدار بهینه سرعت برش ۷۲، عمق برش ۲،۵ و نرخ پیشروی ۳۰۰ بوده است.

سو<sup>۴</sup> و همکاران [۴]، مقاله‌ای با عنوان عوامل مؤثر در یکپارچگی سطح در فرآیند شیارزنی قطعه کامپوزیتی CFRP، به چاپ رساندند. در مقاله آن‌ها به بررسی پارامترهای ماشین‌کاری، جنس ابزار و شرایط محیطی سرد و خشک پرداخته شده است. نتیجه اینکه، ابزار پوشش شده مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به ابزارهای بدون پوشش نشان داد. در برخی آزمون‌ها سوختن رزین در نرخ پیشروی کم و محیط خشک اتفاق افتاد. سرعت برش بالا و نرخ پیشروی پایین صافی سطح بهتری به ما خواهد داد. در زاویه ۹۰ و ۱۳۵ درجه شکست ماتریس و بیرون کشیدگی الیاف به واسطه سرعت برش بالا و نرم شدن رزین اتفاق افتاد. بهترین سطح، جایی اتفاق افتاد که الیاف موازی با جهت پیشروی و برش ابزار بوده، یعنی زاویه بین آنها صفر باشد.

رتناچ<sup>۵</sup> و همکاران [۵]، در مقاله‌ای با عنوان تأثیر پارامترهای فرآیند فرزکاری در یکپارچگی سطح پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف کربن CFRP، پرداختند. در این تحقیق سرعت برش، جهت الیاف و دمای قطعه کار بررسی شده است. با افزایش دما و سرعت برش، خمش الیاف بیشتر می‌شود و احتمال ترک و آسیب بیشتر می‌شود.

خایروشیماء<sup>۶</sup> و همکاران [۶]، در مقاله‌ای با عنوان تأثیر پارامترهای فرزکاری روی لمینت تقویت‌شده با الیاف کربن CFRP، پرداختند. در این تحقیق به فرسایش ابزار و زبری سطح با توجه پارامترهای سرعت برش، نرخ پیشروی، عمق برش پرداخته شده است. با افزایش سرعت برش و نرخ پیشروی، تورق افزایش می‌یابد، زیرا نیروی برش بیشتری در طول ماشین‌کاری وارد می‌شود. در سرعت برش بالاتر و

3. Raj

4. Soo

5. Rentsch

6. Khairusshima

1. Verma

2. Karatas

به‌خصوص در نرخ پیشروی بالا، سایش و فرسایش بیش از حد اتفاق می‌افتد. بیشتر CFRPها را می‌توان در نرخ پیشروی کم و سرعت کم فرزکاری کرد، زیرا عمر ابزار بیشتر است، ولی زبری سطح و دقت ابعادی نتایجی هستند که در سرعت برش بالا و نرخ پیشروی کم به دست می‌آیند. احتمال شکست CFRP در سرعت برش و نرخ پیشروی بالا، بیشتر است.

نارش<sup>۱</sup> و همکاران [۷]، آنالیز پارامتری فرزکاری، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه GFRP، با استفاده از روش تاگوچی را انجام دادند. زبری سطح و تورق، با افزایش در زاویه جهت الیاف و زاویه ماریچ و نرخ پیشروی افزایش یافته و با افزایش سرعت اسپیندل یا سرعت برش کاهش می‌یابد.

جنارتان<sup>۲</sup> و همکاران [۸]، در مقاله‌ای با عنوان بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری روی فرزکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه GFRP، از روش آنالیز عملکرد مطلوب با استفاده از روش تاگوچی به بررسی پارامترهای فرزکاری پرداختند. این مقاله بهینه‌سازی نتایج مقاله نارش و همکاران [۷] با استفاده از روش اشاره شده است. فرز انگشتی با زاویه ماریچ کوچک، موجب ایجاد بزرگ‌ترین نیروی ماشین‌کاری، کمترین زبری سطح و تورق می‌شود. زاویه جهت الیاف کمتر، زاویه ماریچ کمتر، سرعت اسپیندل متوسط و نرخ پیشروی کمتر، وضعیت ایده‌آل برای ماشین‌کاری صفحات کامپوزیتی GFRP می‌باشد.

وانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۹]، مقاله‌ای را تحت عنوان بررسی نیروی ماشین‌کاری و حرارت به وجود آمده در فرزکاری کامپوزیت با الیاف کربن، با استفاده از ابزار PCD، به چاپ رسانده‌اند. درجه حرارت و نیروی برشی از جمله عوامل مؤثر در کیفیت سطح کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف کربن می‌باشد که در این آزمایش، اندازه‌گیری دما با ترموکوپل صورت گرفته است. سرعت برش پایین با حداقل نرخ پیشروی و حداکثر عمق برش شعاعی، کیفیت سطح خوبی را ایجاد می‌نماید که به‌طور هم‌زمان نرخ براده برداری بالا در این حالت اجراء می‌گردد. هنگامی که درجه حرارت ماشین‌کاری بیش از دمای انتقال الیاف باشد، رزین به‌صورت محسوس تخریب می‌گردد به گونه‌ای که زمینه، اتصال خود را از الیاف از دست می‌دهد و در نتیجه کیفیت سطوح ماشین‌کاری به شدت کاهش می‌یابد.

ازمی<sup>۴</sup> [۱۰]، در مقاله‌ای تحت عنوان اندازه‌گیری فرسایش ابزار در ماشین‌کاری کامپوزیت با الیاف شیشه و مدل نمودن آن در مدل شبکه

عصبی مصنوعی، به بررسی فرسایش ابزار پرداخته است. در این بحث بیشتر به پارامترهای نیروی برش و پیشروی، پرداخته شده و مشاهده گردید که می‌توان از مدل به دست آمده، جهت بهینه نمودن پارامترهایی از جمله سرعت و نرخ پیشروی برای کاهش فرسایش ابزار استفاده نمود. در ضمن با افزایش زمان ماشین‌کاری و نیز افزایش نیروی برش و نیروی پیشروی، فرسایش ابزار زیاد خواهد شد.

شث<sup>۵</sup> و همکاران [۱۱]، در مقاله‌ای به پیش‌بینی آزمایش و بهینه‌سازی پارامترهای فرزکاری در ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن CFRP با استفاده از ابزار الماسه پلی کریستال PCD پرداختند. روش بهینه‌سازی، روش آنالیز ارتباطی خاکستری GRA و روش تاگوچی می‌باشد. فرسایش ابزار عامل مهمی بوده و باید کنترل شود تا زبری سطح بهتر و عمر ابزار بیشتری به دست آید. ابزارهای الماسه پلی کریستال برای ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پلیمری مناسب هستند. مقدار بهینه سرعت اسپیندل ۱۰۰۰، عمق برش ۰/۲ و نرخ پیشروی ۷۰ می‌باشد.

بابو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۲]، تأثیر پارامترهای فرآیند روی قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه GFRP به وسیله فرز انگشتی را بررسی کردند. روش استفاده شده روش تاگوچی و روش آنالیز عملکرد مطلوب است. پارامترهای بررسی شده سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش و زاویه جهت الیاف، حجم الیاف، زاویه شیب ابزار، زاویه لقی ابزار در نظر گرفته شد. زاویه جهت الیاف مهم‌ترین عامل در فرزکاری لمینت‌های کامپوزیتی تک جهته است. وقتی پایه برش ابزار عمود به جهت الیاف یعنی ۹۰ درجه باشد، شکست الیاف اتفاق می‌افتد. نتایج نشان می‌دهد سطح تمام شده و میزان تورق بهتر زمانی اتفاق می‌افتد که پایه برش ابزار در طول جهت زاویه الیاف ۰ و ۴۵ درجه باشد. درصد حجمی الیاف نیز نقش مهمی دارد. فرزکاری لمینت با درصد حجمی الیاف ۶۰ درصد باعث افزایش زبری سطح و میزان تورق می‌شود. کیفیت سطح بهتر در درصد حجمی الیاف ۴۰ درصد اتفاق می‌افتد. افزایش درصد الیاف زبری سطح را افزایش می‌دهد. تورق نیز با افزایش درصد الیاف بیشتر می‌شود.

امینی و همکاران [۱۳]، مطالعه آماری تأثیر شرایط مختلف ماشین‌کاری بر میزان لایه‌لایه شدگی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن را ارائه داده‌اند. نتایج آنها نشان داد که افزایش مقدار سرعت پیشروی در فرآیند ماشین‌کاری موجب افت کیفیت سطحی سوراخ شده و مقدار لایه‌لایه شدگی را

1. Naresh
2. Jenarathan
3. Wang
4. Azmi

5. Sheth
6. Babu

**(علمی-پژوهشی)**

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری برای کاهش زمان ماشین‌کاری و کیفیت سطح مناسب بسیار اهمیت دارد. برای بررسی تأثیر پارامترها و نیز بهینه‌سازی آنها از روش‌های آماری مختلف از جمله روش سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک، آنالیز واریانس، شبکه عصبی مصنوعی، آنالیز رگرسیون، روش پاسخ سطح، روش تاگوچی، آنالیز عملکرد مطلوب، الگوریتم فازی خاکستری استفاده شده است. اگرچه این نوع از روش‌های مدل‌سازی، کاربرد رضایت بخشی در موارد گوناگون دارند، اما بهره‌گیری از آنها دارای محدودیت‌ها، فرض‌ها و کمبودهایی در هر فرآیند خاص می‌باشد.

**۲- روش تحقیق**

در این بخش روند ساخت نمونه، انتخاب پارامترهای فرزکاری و طراحی آزمایش پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار، انجام فرآیند فرزکاری با معرفی دستگاه و ابزارهای مورد استفاده آورده شده است. در نهایت ارزیابی نمونه‌های فرزکاری انجام شده و نتایج زبری سنجی و نرخ برداشت ماده ثبت شد.

**۲-۱- ساخت صفحه کامپوزیتی کربن/اپوکسی**

مراحل فرآیند ساخت صفحات کامپوزیتی بدین صورت است که ابتدا باید مواد سازنده کامپوزیت (الیاف و رزین) را انتخاب نمود، روش ساخت و لایه چینی کامپوزیت و در نهایت نوع پخت مواد کامپوزیتی در استحکام نهایی سازه اهمیت به سزایی دارد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**انتخاب الیاف کربن و رزین اپوکسی: در ساخت قطعه**

کامپوزیتی از الیاف کربن استفاده شده است. الیاف مورد استفاده پارچه کربنی دو جهته با وزن ۲۰۰ گرم بر مترمربع مطابق شکل ۱ است. رزین مورد استفاده در این تحقیق از نوع اپوکسی، ساخت شرکت هانتسمن با نام تجاری Iy5052 همراه با سخت‌کننده Aradur5052 بود که با نسبت وزنی ۱۰۰-۳۸ با هم ترکیب شده است. این رزین یکی از رزین‌های اپوکسی با کارایی بالاست که عمدتاً در ساخت قطعات با خواص مکانیکی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص ظاهری رزین به صورت مایع شفاف است که قبل از استفاده باید با سخت‌کننده به میزان مشخص ترکیب و برای مدت کوتاه چند دقیقه‌ای استفاده شود، در غیر این صورت مایع ساخته شده به حالت ژله‌ای تبدیل شده که دیگر قابل استفاده نیست. مشخصات الیاف، رزین و هاردنر مورد استفاده تحقیق حاضر در جدول ۱ درج شده است.

افزایش میدهد. پیش مته زدن قبل از سوراخ‌کاری نهایی باعث کاهش لایه‌لایه شدگی ورودی تا حداکثر ۲۵ درصد می‌شود.

اوزکان و همکاران [۱۴]، تأثیر پارامترهای برش بر سایش ابزار در طول ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان داد که ویژگی ساینده مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن منجر به سایش طرفین ابزار اینسرت بدون روکش می‌شود. نرخ براده برداری اینسرت با افزایش تعداد پاس، افزایش یافت.

رشید و همکاران [۱۵]، مقاله تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی زبری سطح در فرز کامپوزیت تقویت شده با الیاف جوت با استفاده از طراحی کامپوزیت مرکزی را ارائه کردند. در نتایج آنها مشخص شد که نرخ پیشروی ماشین‌کاری مهم‌ترین پارامتری است که بر روی نتایج زبری سطح تأثیر می‌گذارد. پارامترهای بهینه‌سازی آنها مشخص کرد که در سرعت اسپیندل ۴۲۹۳،۵۶ دور در دقیقه، نرخ پیشروی ۱۵۰ میلی‌متر در دقیقه و عمق برش ۱،۰ میلی‌متر بهترین نتایج زبری سطح حاصل می‌شود.

در تحقیق حاضر با توجه به شرایط عملکردی تصمیم گرفته شد که قطعه کامپوزیتی کربن/اپوکسی که در سازه‌های هوایی استفاده می‌شود مورد آزمایش قرار گیرد. این نوع کامپوزیت؛ استحکام سازه‌ای مطلوب را فراهم می‌کند که بسیار بیشتر از استحکام سازه‌ای آلیاژهای آلومینیوم و فلزات دیگر می‌باشد، میزان کاهش وزن قابل توجهی را نیز در قطعه ایجاد می‌کند. در این تحقیق، مواردی که می‌توان در راستای نوآوری این پژوهش بیان نمود، استفاده از سرعت‌های بالای فرزکاری جهت دستیابی به زبری سطح مناسب است. به‌طور کلی ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها تفاوت‌های اساسی نسبت به ماشین‌کاری مواد فلزی دارد و این امر ناشی از ناهمسانگردی آنها می‌باشد. از این رو با توجه به گسترده بودن دامنه کاربردی این مواد با انواع الیاف و زمینه‌های مختلف، پژوهش در این زمینه لازم پیشرفت این فرآیند می‌باشد.

در پروسه فرزکاری هر قطعه، از یک سو می‌بایستی شاخص‌های کیفیتی مانند صافی سطح فرزکاری شده، دقت و تلرانس‌های ابعادی و از سوی دیگر مینیمم هزینه، مینیمم زمان و یا ماکزیمم سود مورد توجه قرار گیرند. از این رو جهت برآورده کردن هم‌زمان هر یک از شرایط ذکر شده، نیازمند یک مدل تحلیلی و یا عددی مناسب و همچنین روشی کارآمد جهت جستجو و به دست آوردن ترکیب بهینه از پارامترهای ماشین‌کاری همچون سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش با توجه به محدودیت‌های ناشی از شاخص‌های کیفیتی و شرایط می‌باشیم.

(علمی-پژوهشی)

بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند فرزکاری مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی با هدف کاهش زبری سطح

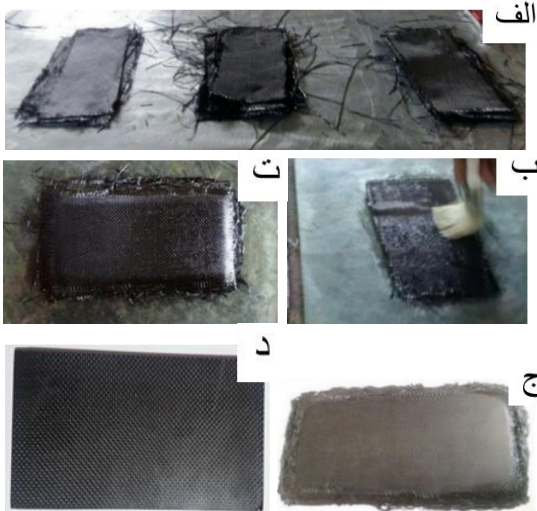
عملیات ماشین‌کاری بر روی قطعات انجام شد. پس از آن به کمک دستگاه فرز عملیات برش جهت دوربری بر روی قطعه شکل ۲ (ج) انجام شد. ابزار مورد استفاده فرز انگشتی با قطر ۱۱ میلی‌متر بوده و ماشین ابزار مورد استفاده فرز FP4 می‌باشد. در پرداخت لبه‌های قطعه، از روش فرزکاری موافق با سرعت اسپیندل ۸۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۴۰-۵۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده گردید. ابعاد نهایی قطعه ۲۰×۱۰ سانتی‌متر و ضخامت نهایی ورق حدود ۹۸ میلی‌متر حاصل شد. بعد از نهایی نمودن اندازه طولی و عرضی قطعه مطابق شکل ۲ (د)، با دستگاه فرز عملیات ماشین‌کاری مطابق طراحی آزمایش، انجام شده است.

**جدول (۱): مشخصات الیاف کربن و رزین اپوکسی.**

پارامتر	سازنده	مشخصه
رزین	Huntsman	LY5052 (100)
هاردنر	Huntsman	Aradur5052 (38)
الیاف	Interglas	Carbon Fabric 3K×3K-200 g
مشخصه الیاف		Woven 0/90
ضخامت	-	260 micron
استحکام کششی الیاف	-	230 GPa



شکل (۱): پارچه الیاف کربن مورد استفاده در آزمایش‌ها.



**شکل (۲):** فرآیند ساخت کامپوزیت، (الف) پارچه‌های برش خورده و آماده‌شده برای لایه‌چینی، (ب) فرآیند لایه‌چینی، (ت) قطعه آماده شده پس از لایه‌چینی، (ج) قطعه آماده شده پس از پخت و (د) قطعه نهایی آماده شده جهت انجام آزمایش‌ها.

**۲-۲- انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری**

انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری بر روی خروجی‌های آزمایش از اهمیت بالایی برخوردار است. به طوری که برای مثال اگر در انتخاب بازه یک پارامتر اشتباهی صورت گیرد می‌تواند به دستگاه، ابزار و همچنین سلامت سطح ماشین‌کاری شده صدمه وارد کرده در نتیجه راندمان و بهره‌وری سیستم را دچار مشکل کنند. به‌طور کلی عوامل تأثیرگذار بر زبری سطح و تخریب تورق در هنگام فرزکاری کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف را می‌توان به سه گروه دسته‌بندی کرد. این متغیرها در واقع پارامترهای ورودی فرآیند فرزکاری کامپوزیت‌ها محسوب می‌شوند که عبارت‌اند از:

- پارامترهای برشی شامل سرعت اسپیندل یا سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش،

**ساخت قطعه کامپوزیتی کربن/اپوکسی: قطعه از ۴۰**

لایه ساخته شده و نوع لایه‌چینی آن به صورت ۸ [۰،۹۰،۴۵،۹۰،۰] و متقارن بوده است. در دو لایه ابتدایی و انتهایی از الیاف دو جهته ۰ و ۹۰ درجه و در لایه مابین آنها از الیاف ۴۵ درجه مطابق شکل ۲ (الف) استفاده شد. علت استفاده از الیاف در زاویه ۴۵ درجه افزایش میزان استحکام قطعه کامپوزیتی در جهات مختلف است.

در پژوهش حاضر نوع قالب از نوع باز و نوع لایه چینی دستی انتخاب شده است. فرآیند حین ساخت قطعات در شکل ۲ نمایش داده شده است. نسبت الیاف به رزین در قطعات ۶۰ به ۴۰ است. پارچه‌ها پس از آغشته سازی با رزین و هاردنر از قبل ترکیب شده، لایه چینی شده است (شکل ۲ ب). لایه چینی در دمای حدود ۲۸ درجه انجام شد. شیشه‌ای برای چیدن پارچه‌ها روی آن تهیه، تمیز شد تا پس از پخت کامپوزیت، به راحتی از هم جدا شوند. قبل از لایه چینی پارچه‌ها روی شیشه، واکس جهت جدا شدن راحت قطعه کامپوزیتی اعمال شد.

پس از لایه چینی، شیشه دیگری آغشته به واکس روی قطعه کامپوزیتی قرار داده و یک وزنه روی مجموعه جهت خروج رزین‌های اضافی بین لایه‌ها و چسبندگی بهتر الیاف و رزین روی آن قرار گرفت. مجموعه به مدت یک روز در دمای محیط قرار داده شد. سپس مجموعه به مدت ۵ ساعت در کوره در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد پخت‌شد و ۱ ماه جهت کامل شدن فرآیند پخت در دمای محیط قرار گرفته که پس از آن

1. hl-603 mold Release Wax FRP
2. Curing

(علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

میلی متر است. در این پژوهش برای عمق برش با توجه به تحقیقات انجام شده، ۵ عمق برش ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ میلی متر انتخاب شد.

جهت ارزیابی قطعات و دستیابی به اهداف در هر آزمایش، نیاز به طراحی آزمایش مناسب است. بهترین ارزیابی وقتی به دست می آید که کلیه حالتها انجام شود که این موضوع نیازمند صرف هزینه و زمان می باشد. از اینرو نرم افزارهای مرتبط آماری برای کاهش آزمون و تحلیل های مناسب بکار گرفته می شوند. باید در نظر داشت قبل از هرگونه طراحی آزمایش تعداد و اندازه سطوح انتخابی، درست انتخاب شود تا دستیابی به نتایج با درصد اطمینان بالاتری کسب شود. سطوح انتخاب شده در این مطالعه با توجه به اینکه در پیشینه پژوهش معمولاً سرعت های پایین تری انتخاب شده بود، جهت افزایش راندمان و زمان ماشین کاری اعداد در محدوده بالاتری استخراج شد و سطوح هر پارامتر برای ارزیابی بهتر در پنج سطح سرعت اسپیندل، پنج سطح سرعت پیشروی و پنج سطح عمق برش مطابق جدول ۳ انتخاب شد.

جدول (۲): سرعت اسپیندل و سرعت برشی انتخاب شده.

Spindle Speed (rev/min)	Cutting Speed (m/min)
۱۰۰۰	۶۲/۸
۲۵۰۰	۱۵۷
۴۰۰۰	۲۵۱/۲
۵۵۰۰	۳۴۵/۴
۷۰۰۰	۴۳۹/۶

جدول (۳): پارامترها و سطوح انتخابی فرآیند فرزکاری.

سطوح	سرعت اسپیندل rev/min	سرعت پیشروی mm/min	عمق برش mm
۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱
۲	۲۵۰۰	۱۵۰۰	۱/۵
۳	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲
۴	۵۵۰۰	۲۵۰۰	۲/۵
۵	۷۰۰۰	۳۰۰۰	۳

۲-۳- طراحی آزمایش بر اساس پارامترهای انتخابی

با توجه به این مسئله که در روش طراحی سطح پاسخ، انتخاب ابتدا و انتهای بازه تغییرات، از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین، این فواصل به گونه ای انتخاب شدند که هم قابلیت تنظیم آن روی دستگاه وجود داشته باشد و هم با تغییر پارامترها در این محدوده ها، پاسخ هایی نزدیک به پاسخ های بهینه به دست آید که بتوان از آن طریق پاسخ بهینه را پیش بینی کرد. در این روش، با وارد نمودن ابتدا و انتهای بازه تغییرات به عنوان مقادیر کمترین و بیشترین سطح هر پارامتر در هنگام طراحی آزمایش و سطح متوسط به طور خودکار به عنوان میانگین سطح

- پارامترهای ابزار شامل هندسه (زاویه رأس، قطر، هندسه نوک، زاویه ماریج)، جنس و پوشش و
- پارامترهای مرتبط با قطعه کامپوزیتی شامل کسر حجمی الیاف بکار رفته در ورق کامپوزیتی، نوع لایه چینی و تعداد لایه ها، ضخامت ورق، جنس و قطر الیاف، نوع رزین، روش ساخت کامپوزیت.

پارامترهای خروجی (وابسته) فرآیند فرزکاری کامپوزیت های پایه پلیمری شامل زبری سطح، نیروی ماشین کاری، فاکتور تورق حاصل از فرآیند، فرسایش ابزار، میزان برداشت ماده می باشند که در این پژوهش از میان این متغیرها، مهم ترین آن ها که در مقالات مختلف نیز بررسی شده بود، سرعت اسپیندل یا سرعت برشی، نرخ پیشروی ابزار و عمق برش به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند. متغیرهای خروجی فرآیند نیز کیفیت سطح و میزان برداشت ماده در نظر گرفته شد. محدوده پارامترهای ماشین کاری با توجه به مشخصات ماشین، قطعه کار و ابزار انتخاب شدند.

سرعت اسپیندل یا سرعت برشی: در این پژوهش با

توجه به اینکه در تحقیقات صورت گرفته توسط دیگران هم سرعت های پایین و هم سرعت های بالا جهت انجام فرآیند فرزکاری انتخاب شده بود، با در نظر گرفتن کاهش زمان ماشین کاری و کیفیت سطح بالا، سرعت های بالا انتخاب شده است. ۵ سرعت اسپیندل با مقادیر ۱۰۰۰، ۲۵۰۰، ۴۰۰۰، ۵۵۰۰ و ۷۰۰۰ دور بر دقیقه، با توجه به ظرفیت دستگاه مورد استفاده انتخاب گردید. با توجه به قطر ابزار ۲۰ میلی متر انتخاب شده رابطه سرعت ها مطابق جدول ۲ است.

نرخ پیشروی: در این پژوهش برای پیشروی از  $V_f$  با واحد

میلی متر بر دقیقه استفاده شده است. برای سرعت پیشروی نیز با توجه به اینکه در بیشتر تحقیقات سرعت پیشروی پایین انتخاب شده بود، برای کاهش زمان ماشین کاری و انجام آزمایش در سرعت های بالای پیشروی، ۵ سرعت ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی متر بر دقیقه انتخاب شد.

عمق برش: در فرزکاری متداول، به فاصله بین سطح ماشین کاری

شده تا سطح ماشین کاری نشده در راستای محور ابزار عمق برش محوری می گویند. عمق برش محوری، از اهمیت کمتری نسبت به سرعت برشی و پیشروی برخوردار است. عمق برش محوری، نیروهای ماشین کاری را افزایش می دهد و سبب افزایش دمای ماشین کاری به علت درگیری و سطح تماس بیشتر بین ابزار و قطعه کار می شود. عمق برش محوری، با D نشان داده می شود و واحد آن

آزمایش، در سطوح تغییرات آن پارامتر مورد نظر قرار می‌گیرد و در آزمایش‌ها وارد می‌شود.

در این پژوهش، تمامی آزمایش‌ها با در نظر گرفتن روش RSM طراحی گردیده و در نهایت با کمک گزینه‌های ویژه موجود در این روش، مورد تحلیل آماری قرار گرفته‌اند. به منظور بررسی دقیق‌تر و بهتر بازه‌های انتخاب شده در طراحی آزمایش برای سه پارامتر سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش محوری، هر کدام در پنج سطح انتخاب گردید. طراحی آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری دیزاین اکسپرت<sup>۱</sup> و مینی‌تب<sup>۲</sup> انجام شده است. دلیل استفاده از دو نرم‌افزار مذکور، تحلیل کامل نتایج، مقایسه نتایج و گرفتن نمودارهای دوبعدی و سه‌بعدی مطلوب است.

**طراحی آزمایش:** با کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها انجام شد. ۲۰ حالت پیشنهاد این روش مطابق جدول ۴ ارائه شد.

جدول (۴): پارامترها و سطوح انتخابی فرآیند فرزکاری.

شماره آزمون	سرعت اسپیندل N (rev/min)	سرعت پیشروی V <sub>f</sub> (mm/min)	عمق برش D (mm)
۱	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲/۵
۲	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲
۳	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۱
۴	۷۰۰۰	۳۰۰۰	۲
۵	۷۰۰۰	۱۰۰۰	۱
۶	۵۵۰۰	۲۵۰۰	۲/۵
۷	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۲/۵
۸	۷۰۰۰	۳۰۰۰	۲
۹	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۳
۱۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰	۱/۵
۱۱	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲
۱۲	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱/۵
۱۳	۷۰۰۰	۱۵۰۰	۳
۱۴	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۱
۱۵	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۲/۵
۱۶	۴۰۰۰	۱۰۰۰	۱
۱۷	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲
۱۸	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۱
۱۹	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳
۲۰	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۲

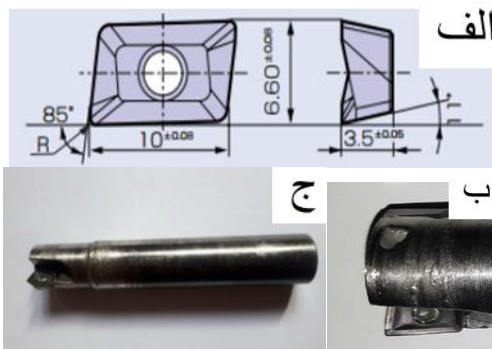
تعداد تکرار در طراحی آزمون‌ها، ۵ آزمون است. پس از آنکه جدول فوق توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت در روش سطح پاسخ ارائه شد، مطابق با سطوح انتخابی، عملیات فرزکاری قطعه انجام شد که پس از زبری سنجی روی سطوح، نتایج ثبت شد.

#### ۴-۲- انجام فرآیند فرزکاری

درمورد انجام فرآیند فرزکاری موضوعات ابزار برشی و نگهدارنده ابزار، ماشین‌ابزار و اجرای فرآیند فرزکاری قابل بحث است.

**ابزار برشی و نگهدارنده ابزار:** با توجه به پژوهش‌های پیشین و همچنین آزمایش‌های اولیه صورت گرفته، ابزار بکار گرفته شده، ابزار اینسرتی<sup>۳</sup> با پوشش تنگستن کارباید و شعاع نوک ۰/۴ میلی‌متر، ساخت شرکت ناچی فوجی کوشی<sup>۴</sup> ژاپن بود. پوشش این ابزار تنگستن کارباید (wc) باروکش AlTiN می‌باشد. این روکش علاوه بر افزایش سختی، باعث کاهش اصطکاک بین براده و ابزار می‌شود. تصویر و مشخصات هندسی ابزار در شکل ۳ آمده است.

با توجه به خواص کند کنندگی ابزار با تعداد لبه‌های برشی بیشتر، سبب بالا رفتن کیفیت سطح و عمر ابزار می‌شود، زیرا هر لبه سهم کمتری از ماشین‌کاری را به خود اختصاص می‌دهد. در این تحقیق با توجه به ابعاد قطعه و حجم ماشین‌کاری و همچنین بررسی شرایط سخت‌تر، ابزار دو لبه انتخاب گردید. جهت بسته شدن اینسرت و انجام فرآیند ماشین‌کاری، نیاز به نگهدارنده ابزار است. هولدر<sup>۵</sup> یا همان نگهدارنده ابزار در آزمایش‌ها، ساخت شرکت ماروکس<sup>۶</sup> بوده است که در شکل ۳ (ج) نمایش داده شده است.



شکل (۳): ابزار برشی و نگهدارنده ابزار، الف) مشخصات هندسی اینسرت مورد استفاده، ب) تصویر اینسرت مورد استفاده در آزمایش، ج) هولدر مورد استفاده در آزمایش.

3. Insert
4. Nachi-Fuji KO Shi Corp
5. Holder
6. Marox

1. Design Expert V11
2. Minitab19

(علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

۲-۵- ارزیابی نمونه پس از انجام فرآیند فرزکاری

برای بررسی میزان زبری در قطعات از زبری سنج استفاده شد. زبری سنج مورد استفاده در تحقیق حاضر با برند میتوتویو مدل SJ201، ساخت کشور ژاپن بود. دستگاه فوق قابلیت ثبت میانگین ارتفاع زبری یا همان Ra و حداکثر ارتفاع زبری یا همان Rz را داشت. از دستگاه استریو میکروسکوپ<sup>۲</sup> برای بررسی کیفیت سطح نمونه‌های فرزکاری شده و همچنین بررسی فرسایش لبه‌های اینسرت‌ها استفاده گردید. تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی هفت برابر توسط دستگاه تهیه شد.

**ثبت نتایج زبری سنجی:** زبری سطح نمونه‌های فرزکاری شده با استفاده از دستگاه زبری سنج مطابق شکل ۴ اندازه‌گیری شد. برای تعیین زبری سطح هر نمونه، زبری سنجی با پنج بار تکرار و در پنج ناحیه از شیار فرزکاری شده، انجام و میانگین به‌عنوان زبری سطح متوسط Ra مطابق جدول ۷ ارائه شد.

کیفیت سطح قطعات کامپوزیتی یکنواخت نبوده و هم به‌صورت کمی و هم کیفی مقایسه می‌شود و مقادیر زیادی اندازه‌گیری انجام شد تا نتیجه بهتری حاصل شود. در ضمن اعداد اندازه‌گیری شده با توجه به تحلیل آماری، کنترل چشمی و تصاویر میکروسکوپی بررسی و ثبت گردید. پس از زبری سنجی، نتایج در نرم‌افزارهای دیزاین اکسپرت و مینی تب تحلیل شد.



شکل (۴): انجام فرآیند زبری سنجی.

مشخصات ابزار برشی و نگهدارنده ابزار در جدول ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول (۵): مشخصات نگهدارنده ابزار.

ابزار	
شرکت سازنده	Marox
نوع	MR E90AP10-D20 AR0508
قطر ابزار (mm)	۲۰

جدول (۶): مشخصات ابزار برشی.

ابزار	
شرکت سازنده	Nachi- Fuji ko shi Corp
نوع	APMT 103504 PDERHN10
مشخصه	L 9326 XSZ330 APKT10
نوع مواد	تنگستن کارباید
شعاع نوک (mm)	۰/۴
ارتفاع (mm)	۶/۶ ± ۰/۰۸
عرض (mm)	۱۰ ± ۰/۰۸
ضخامت (mm)	۳/۵
زاویه گوه (درجه)	۸۵
زاویه آزاد یا لقی (درجه)	۱۱
پوشش	دارد

**ماشین ابزار:** آزمون‌های طرح‌ریزی شده روی دستگاه فرز CNC سه محوره کنترل هم‌زمان مدل VMC1050 با حداکثر دور اسپیندل 8000 RPM انجام شد.

**اجرای فرآیند فرزکاری:** تمامی آزمایش‌ها در حالت خشک انجام شد. برای یکسان بودن شرایط آزمایش برای همه حالت‌ها، بعد از هر آزمایش، لبه‌های ابزار بررسی و بازرسی شد تا پارامتر سایش بر صافی سطح تأثیر نگذارد. برای جلوگیری از ارتعاش قطعه و از بین بردن ارتعاش، حین اجرای فرآیند، قطعه کار توسط گیره و روبندهای مخصوص به‌طور کامل تثبیت گردید و سپس عملیات فرزکاری بر روی آن انجام گرفت. در هر آزمایش، داده‌های مربوط به سه پارامتر فرزکاری روی دستگاه تنظیم می‌شد. در ماشین‌کاری غیر سنتی معمولاً تنش مکانیکی زیادی به قطعه وارد نمی‌شود.

1. Mitutoyo  
2. Stereo Microscop

جدول (۸): ثبت نتایج مقدار برداشت ماده MRR.

شماره آزمون	سرعت اسپیندل N (rev/min)	سرعت پیشروی V <sub>f</sub> (mm/min)	عمق برش D (mm)	مقدار برداشت ماده MRR (cm <sup>3</sup> /min)
۱	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲/۵	۱۲۵
۲	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲	۸۰
۳	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۱	۶۰
۴	۷۰۰۰	۳۰۰۰	۲	۱۲۰
۵	۷۰۰۰	۱۰۰۰	۱	۲۰
۶	۵۵۰۰	۲۵۰۰	۲/۵	۱۲۵
۷	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۲/۵	۵۰
۸	۷۰۰۰	۳۰۰۰	۲	۱۲۰
۹	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۳	۱۸۰
۱۰	۵۵۰۰	۱۵۰۰	۱/۵	۴۵
۱۱	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲	۸۰
۱۲	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱/۵	۷۵
۱۳	۷۰۰۰	۱۵۰۰	۳	۹۰
۱۴	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۱	۶۰
۱۵	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۲/۵	۵۰
۱۶	۴۰۰۰	۱۰۰۰	۱	۲۰
۱۷	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲	۸۰
۱۸	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۱	۳۰
۱۹	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳	۱۲۰
۲۰	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۲	۱۲۰

جدول (۷): ثبت نتایج پنج مرحله زبری سنجی Ra.

شماره آزمون	زبری ۱ Ra (μm)	زبری ۲ Ra (μm)	زبری ۳ Ra (μm)	زبری ۴ Ra (μm)	زبری ۵ Ra (μm)	میانگین ارتفاع زبری Ra (μm)
۱	۲/۲۳	۲/۲۹	۲/۴۹	۲/۷۵	۲/۹۵	۲/۵۴
۲	۲/۱۵	۲/۱۷	۲/۲۱	۲/۲۳	۲/۶۳	۲/۲۸
۳	۱/۹	۲/۳۲	۲/۴۵	۲/۸۳	۲/۹۵	۲/۵۰
۴	۱/۷۴	۱/۹۱	۱/۹۴	۲/۳۶	۲/۳۹	۲/۰۷
۵	۱/۲۹	۱/۵۳	۱/۵۸	۱/۷۳	۲/۱۶	۱/۶۶
۶	۲/۱۸	۲/۳۹	۲/۵۴	۲/۶۵	۲/۹	۲/۵۳
۷	۲/۲۵	۲/۳۶	۲/۴۵	۲/۵۱	۳/۲۴	۲/۵۶
۸	۱/۴۸	۱/۵۷	۲	۲/۱۹	۲/۳۸	۱/۹۲
۹	۱/۹۸	۲/۰۱	۲/۳۸	۳	۳/۰۳	۲/۴۸
۱۰	۱/۹۵	۲/۱۸	۲/۲۷	۲/۷۸	۲/۹۲	۲/۴۲
۱۱	۱/۷۶	۲/۳۵	۲/۴	۲/۵۳	۲/۵۵	۲/۳۲
۱۲	۲/۲۲	۲/۵۱	۲/۵۴	۲/۵۹	۳/۳۱	۲/۶۳
۱۳	۱/۵۴	۱/۶۶	۲/۰۹	۲/۱۸	۲/۳۷	۱/۹۷
۱۴	۲/۳۴	۲/۴۷	۲/۵۴	۲/۶	۲/۷۹	۲/۵۵
۱۵	۲/۱۴	۲/۲۲	۲/۵۵	۲/۸۷	۲/۹	۲/۵۴
۱۶	۲/۰۱	۲/۱۵	۲/۲۳	۲/۲۷	۲/۴۲	۲/۲۲
۱۷	۲/۱۲	۲/۲۸	۲/۳۱	۲/۴۲	۲/۵۸	۲/۳۴
۱۸	۲/۴۵	۲/۵۱	۲/۵۲	۲/۹۶	۳/۵۷	۲/۸۰
۱۹	۲/۵۶	۲/۵۸	۲/۸۶	۲/۸۸	۳/۷۹	۲/۹۳
۲۰	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۱۹	۳/۳۱	۳/۴۵	۳/۲۰

## ۲-۶- بهینه‌سازی پارامترهای فرزکاری

به‌طور معمول بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری در دو مرحله صورت می‌گیرد: در مرحله اول مدل ریاضی فرآیند بهینه‌سازی، بر اساس معیارهای اقتصادی معین برای شرایط ماشین‌کاری و با توجه به محدودیت‌های حقیقی این فرآیند، فرموله می‌شود. در مرحله دوم روشی مناسب برای جستجوی جواب بهینه و یا جوابی در نزدیکی جواب بهینه، طراحی می‌شود. تاکنون بهینه‌سازی پارامترهای ماشین‌کاری بر اساس دو ایده بنیادی دنبال شده است: بهینه‌سازی در فرآیند ماشین‌کاری تک پاسه و دیگری بهینه‌سازی در فرآیند ماشین‌کاری چند پاسه. در فرآیند تک پاسه، تمام عمق خواسته شده قطعه کار جهت رسیدن به ابعاد مطلوب، فقط در یک بار عبور ابزار از سطح قطعه کار برداشته می‌شود که در تحقیق حاضر از این روش استفاده شد.

خروجی نرم‌افزار برای حالت بهینه آزمایش: پس از تحلیل نتایج و بهینه‌سازی، آزمون ۱ برای حالت بهینه حداقل

ثبت نتایج نرخ برداشت ماده: برای بررسی بهتر و تخمین زمان ماشین‌کاری مقدار ماده برداشت شده<sup>۱</sup> که مطابق کاتالوگ سندویک<sup>۲</sup> با فرمول (۱) محاسبه می‌گردد، در جدول ۸ ثبت شد.

$$MRR = \frac{D \times a_e \times V_f}{1000} \quad (1)$$

که در آن D عمق برش، a<sub>e</sub> درگیری شعاعی ابزار برش با ماده برحسب میلی‌متر، V<sub>f</sub> سرعت پیشروی برحسب میلی‌متر بر دقیقه است. مقدار ماده برداشت شده نیز برحسب سانتی متر مکعب بر دقیقه به دست خواهد آمد.

1. Material Removal Rate
2. Sandvic

(علمی-پژوهشی)

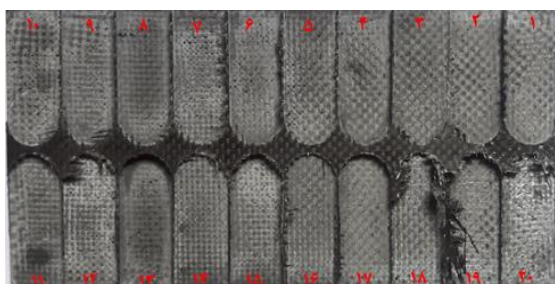
رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

۳- نتایج و بحث

همان‌گونه که اشاره شد، آزمایش‌ها در ۲۰ حالت انجام و پس از اندازه‌گیری زبری سطح و محاسبه نرخ برداشت ماده که در جدول ۱۱ درج شده، با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و مینی‌تب تحلیل و بررسی شد. قطعه نهایی بعد از فرآیند فرزکاری و ترتیب انجام آزمایش مطابق شکل ۶ می‌باشد.

جدول (۱۱): طراحی آزمایش‌ها همراه با مقادیر زبری سطح Ra و نرخ برداشت ماده MRR.

مقدار برداشت ماده MRR (cm <sup>3</sup> /min)	میانگین ارتفاع زبری Ra (μm)	عمق برش D (mm)	سرعت پیشروی Vf (mm/min)	سرعت اسپیندل N (rev/min)	شماره آزمون
۱۲۵	۲/۵۴	۲/۵	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱
۸۰	۲/۲۸	۲	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۲
۶۰	۲/۵۰	۱	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۳
۱۲۰	۲/۰۷	۲	۳۰۰۰	۷۰۰۰	۴
۲۰	۱/۶۶	۱	۱۰۰۰	۷۰۰۰	۵
۱۲۵	۲/۵۳	۲/۵	۲۵۰۰	۵۵۰۰	۶
۵۰	۲/۵۶	۲/۵	۱۰۰۰	۲۵۰۰	۷
۱۲۰	۱/۹۲	۲	۳۰۰۰	۷۰۰۰	۸
۱۸۰	۲/۴۸	۳	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۹
۴۵	۲/۴۲	۱/۵	۱۵۰۰	۵۵۰۰	۱۰
۸۰	۲/۳۲	۲	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۱۱
۷۵	۲/۶۳	۱/۵	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱۲
۹۰	۱/۹۷	۳	۱۵۰۰	۷۰۰۰	۱۳
۶۰	۲/۵۵	۱	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۱۴
۵۰	۲/۵۴	۲/۵	۱۰۰۰	۲۵۰۰	۱۵
۲۰	۲/۲۲	۱	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۱۶
۸۰	۲/۳۴	۲	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۱۷
۳۰	۲/۸۰	۱	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۱۸
۱۲۰	۲/۹۳	۳	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۹
۱۲۰	۳/۲۰	۲	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰



شکل (۶): قطعه نهایی و ترتیب انجام آزمایش.

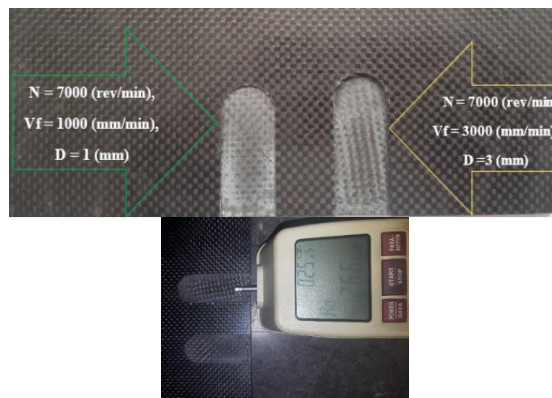
زبری و آزمون ۲ برای حالت بهینه حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت ماده مطابق جدول ۹ ارائه شد.

جدول (۹): آزمون‌های صحه‌گذاری نتایج برای حداقل زبری سطح Ra و حداکثر مقدار برداشت ماده MRR.

شماره آزمون	سرعت اسپیندل N	سرعت پیشروی Vf	عمق برش D
۱	۷۰۰۰	۱۰۰۰	۱
۲	۷۰۰۰	۳۰۰۰	۳

انجام آزمایش صحه‌گذاری حالت بهینه: جهت صحه‌گذاری موضوعات یاد شده، پس از فراهم نمودن شرایط فرزکاری، حالت بهینه برای یافتن حداقل زبری سطح و همچنین حالت بهینه برای دستیابی هم‌زمان به حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت ماده، مطابق جدول ۹ در دو آزمایش انجام شد. قطعه فرزکاری شده در شکل ۵ (الف) نمایش داده شده است.

زبری سنجی نمونه‌های فرزکاری شده در حالت بهینه: پس از فرزکاری، زبری سنجی مطابق شکل ۵ (ب)، در پنج مرحله انجام و نتایج در جدول ۱۰ ثبت شد.



شکل (۵): آزمایش صحه‌گذاری، الف) فرآیند فرزکاری انجام شده جهت صحه‌گذاری نتایج در سرعت ۷۰۰۰ دور بر دقیقه و ب) زبری سنجی نمونه‌ها در حالت بهینه.

جدول (۱۰): ثبت نتایج پنج مرحله زبری سنجی Ra برای حالت‌های بهینه.

شماره آزمون	زبری Ra (μm)	زبری Ra (μm)	زبری Ra (μm)	زبری Ra (μm)	زبری Ra (μm)
۱	۱/۶۴	۲/۱۱	۱/۹۵	۲/۳۶	۱/۵۲
۲	۲/۹۷	۲/۶۶	۲/۴۲	۱/۹۷	۲/۱۵

### ۳-۱- تحلیل آماری

آزمایش‌ها به صورت تجربی بر روی CFRP با فرآیند فرزندکاری انجام شده است. به طوری که خروجی‌ها با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۱</sup> و دیزاین اکسپرت<sup>۲</sup> مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. تحلیل نتایج و آنالیز باقیمانده‌ها نشان داد، داده‌ها پراکندگی مناسبی داشته و داده‌های آزمایش از صحت مناسبی برخوردار هستند. خروجی‌های اندازه‌گیری شده، شامل زبری سطح و مقدار ماده برداشت شده بودند که در ادامه هر کدام از این خروجی‌ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**تحلیل نتایج مربوط به زبری سطح:** در این تحلیل آماری سعی شده تا حد امکان داده‌ها و نتایج حاصل از آزمایش‌ها از لحاظ آماری بررسی و تحلیل شوند. برای بررسی میزان تأثیر هر فاکتور بر زبری سطح از آنالیز واریانس استفاده شده و نتایج تحلیل واریانس انجام شده به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت در جدول ۱۲ درج شده است.

جدول (۱۲): تحلیل واریانس مدل زبری سطح در روش سطح پاسخ.

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	اعتبار
مدل	۳	۲/۰۳	۳۲/۱۱	< /۰۰۰۱	
N	۱	۱/۸۸	۸۹/۱۷	< /۰۰۰۱	
V <sub>f</sub>	۱	۰/۱۶۳۷	۷/۷۵	۰/۰۱۳۳	
D	۱	۰/۰۱۱۱	۰/۵۲۳۹	۰/۴۷۹۶	
باقیمانده	۱۶	۰/۳۳۷۹			
عدم انطباق	۱۱	۰/۳۲۳۴	۱۰/۰۹	۰/۰۰۹۷	
خطای خالص	۵	۰/۰۱۴۶			
کل	۱۹	۲/۳۷			

مدل پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار، درجه یک بود، البته می‌توان درجات بالاتر را نیز برای تحلیل استفاده کرد، ولی خطای مدل بالا رفته و مدل‌های با توان بالاتر که توسط نرم‌افزار ارائه شد، معتبر نبودند. پس از تحلیل‌های انجام شده به کمک مدل رگرسیونی، معادله (۲) برای زبری سطح بر اساس مقادیر واقعی به دست آمد. (قابل استفاده با شماره سطوح هر پارامتر).

$$Ra = 2.73199 - 0.000157 \times N + 0.000121 \times V_f + 0.034336 \times D \quad (2)$$

مقدار F برای مدل برابر ۳۲/۱۱ است، P-value کمتر از

۰/۰۵ برای پارامترهای مدل نیز نشان‌دهنده معتبر بودن آن‌ها می‌باشد. پس از حذف پارامترهای بی‌معنی، با توجه به مقدار P، همان‌گونه که در جدول ۱۲ مشخص شده است و با توجه به مقدار F، سرعت اسپیندل به صورت مستقل دارای بیشترین تأثیر و سرعت پیشروی و عمق برشی به ترتیب تأثیر کمتری در زبری سطح دارند. نتایج فوق حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر پارامتر سرعت اسپیندل بوده و سرعت پیشروی و عمق برش معنی‌دار نبوده و تأثیر کمی در مدل دارند. در ضمن ترکیب هر کدام از پارامترها باهم تأثیر زیادی در نتایج نداشتند که از مدل به عنوان پارامترهای بی‌معنی حذف گردیدند.

همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار p-value برای سرعت پیشروی و عمق برش بالاست که بیانگر این مطلب است که اختلاف میانگین‌های زبری سطح برای سطوح مختلف پیشروی و عمق برش اندک است و در واقع تأثیرگذاری پیشروی و عمق برش نسبت به سرعت اسپیندل، بر زبری سطح چندان قابل توجه نمی‌باشد. دلیل این تأثیرگذاری کم نداشتن الگوی مشخصی در تغییر زبری نسبت به پیشروی است و با وجود این که در فرزندکاری پارامتر پیشروی بسیار حائز اهمیت و تأثیرگذار بر روی زبری سطح است، اما در اینجا تأثیر پیشروی بدان گونه نیست. از طرفی تأثیر پیشروی بر زبری سطح در فرزندکاری تا زمانی که ضخامت براده از شعاع لبه برش کمتر باشد، دارای روند یکسانی نیست و برحسب شرایط برش، باعث کاهش یا افزایش زبری سطح می‌شود.

مقدار ضریب همخوانی<sup>۳</sup> برای مدل به دست آمده برابر با ۸۵/۷۶ درصد به دست آمده است، به این معنی که مدل برازش شده تا ۸۵/۷۶ درصد از کل تغییرات زبری سطح را پوشش می‌دهد. از سوی دیگر بر اساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی‌دار بودن این فاکتور اثبات شده است.

نمودار شکل V (الف) احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها در Ra را نشان داده است. نمودار نشان می‌دهد که مانده‌ها چگونه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. حتی با وجود داده‌های طبیعی انتظار برخی پراکنش‌های متوسط وجود دارد. الگوهای منحنی شکل و مشخص تنها با یک نگاه قابل تشخیص می‌باشند. داده‌ها تقریباً بر روی خط مورب قرار گرفته و این بیانگر توزیع نرمال خطا است و نشان می‌دهد که مانده‌ها چگونه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند. این مطلب تأیید کننده کیفیت خوب مدل برازش شده است. نمودار V (ب) مقادیر پاسخ پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای کمک به تشخیص مقادیر یا گروهی از مقادیر که توسط مدل پیش بینی نشده است را نشان می‌دهد.

1. Minitab  
2. Design Expert

3. R-Squared

## (علمی-پژوهشی)

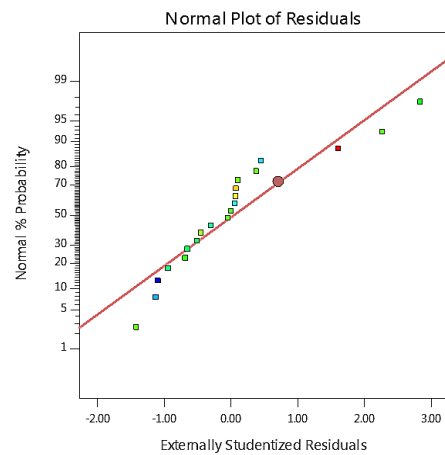
رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

مربعات مانده در مدل تبدیل شده ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد. هنگامی که نسبت حداکثر به حداقل مقدار پاسخ، بزرگتر از سه باشد توانایی بیشتری در بهبود مدل با استفاده از تابع توانی وجود خواهد داشت. همچنین در این نمودار محدوده اطمینان ۹۵٪ نیز نشان داده شده است. بهترین لاندا برای مدل ۰/۹۳ است و با توجه به ساده سازی مدل توان یک برای مدل انتخاب شده است.

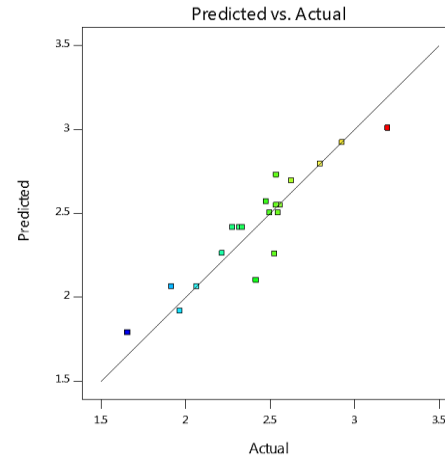
نمودار پرتشدگی یا انحراف از نقاط مرجع، مقایسه اثر همه پارامترها در یک نقطه خاص از فضای طراحی را امکان پذیر می‌کند. شیب یا انحنای تند یک پارامتر نشان می‌دهد که پاسخ، به این پارامتر حساس است. خط نسبتاً صاف، غیر حساس بودن پاسخ را به تغییر در آن عامل خاص نشان می‌دهد. در این نمودار اثر بر هم کنش‌ها قابل مشاهده نمی‌باشد. در نمودار پرتشدگی، اثر داده‌ها در نقطه مرکزی نمایش داده شده و می‌توان در حالت‌های مختلف خروجی را چک کرد. در نمودار شکل ۸ (ج) خط A مربوط به به‌سرعت اسپیندل، نشان دهنده حساس بودن این پارامتر نسبت به دو پارامتر سرعت پیشروی و عمق برش است.

شکل ۹ (الف) تأثیر هم‌زمان دو پارامتر سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی بر میزان زبری سطح در عمق برش ۲ میلی‌متر را نمایش می‌دهد. سرعت اسپیندل در حداکثر مقدار خود نتایج میانگین زبری سطح را بهبود می‌دهد. برای به حداقل رساندن زبری، افزایش سرعت اسپیندل و کاهش سرعت پیشروی به‌صورت هم‌زمان مؤثرترین حالت می‌باشد. این موضوع به علت کاهش نیروهای ماشین‌کاری می‌باشد.

افزایش سرعت اسپیندل (سرعت برشی) سبب کاهش نیروی محوری می‌شود و از طرفی افزایش سرعت پیشروی سبب افزایش این نیرو شده است. افزایش سرعت اسپیندل، دمای ماشین‌کاری را افزایش می‌دهد و این افزایش دما، سبب گرم شدن رزین اپوکسی و در نتیجه کاهش نیروی ماشین‌کاری می‌شود. علت این کاهش نیروی سریع‌تر با افزایش سرعت اسپیندل در فرآیند فرزکاری دمای بیشتر ماشین‌کاری می‌باشد که سبب گرم شدن رزین اپوکسی و در نتیجه کاهش نیرو با شیب بیشتری می‌شود. در شکل ۹ (ب) تأثیر هم‌زمان سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی بر زبری در حالت سه‌بعدی ترسیم شده است. مشاهده شد که کاهش یا افزایش عمق برش بر زبری سطح تأثیر چندانی ندارد. شکل ۹ (ج) تأثیر هم‌زمان سرعت پیشروی و عمق برش بر میزان زبری در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه نمایش داده شده است. سرعت پیشروی زیاد باعث افزایش زبری می‌گردد، زیرا سرعت پیشروی زیاد باعث افزایش هم‌زمان نیروهای ماشین‌کاری و عبور سریع نوک برنده ابزار از سطح می‌شود. کاهش عمق به همراه افزایش سرعت پیشروی، شرایط را بدتر خواهد نمود.



(الف)



(ب)

شکل (۷): (الف) نمودار احتمال نرمال و (ب) نمودار مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده برای زبری سطح Ra.

نمودار مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ زبری در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است. نمودار فوق باید دارای پراکندگی تصادفی، که نشان دهنده طیف ثابت مانده در سراسر نمودار می‌باشد. نمودار مانده استیودنتیته بیرونی یا خارجی مبین مقدار انحراف معیار مقدار واقعی از مقدار پیش‌بینی شده پس از حذف یک نقطه است. از آنجا که در این اندازه‌گیری‌ها از یک نقطه در محاسبه برآورد واریانس استفاده نمی‌شود، به این عمل باقی‌مانده استیودنتیته خارجی<sup>۱</sup> یا بیرونی گفته می‌شود. در نمودار برای شناسایی آسان‌تر نقاط غیرطبیعی، حدود کنترل به شکل دو خط آورده شده است.

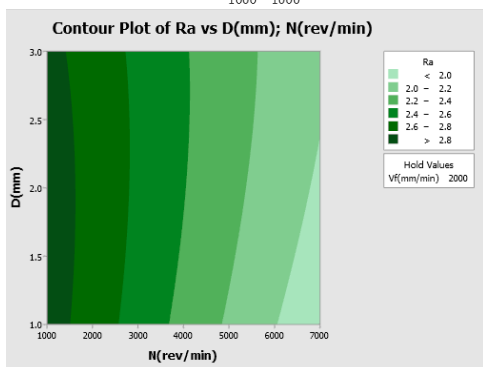
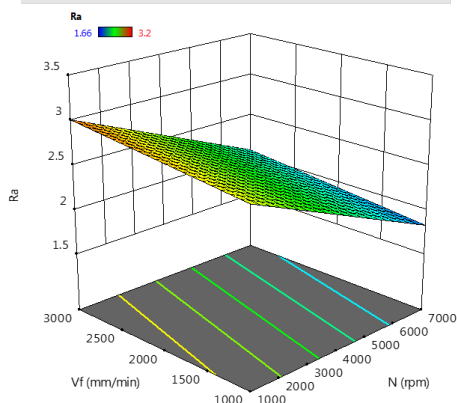
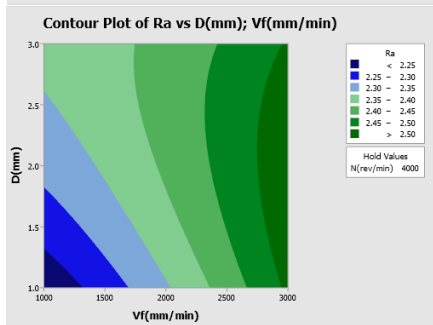
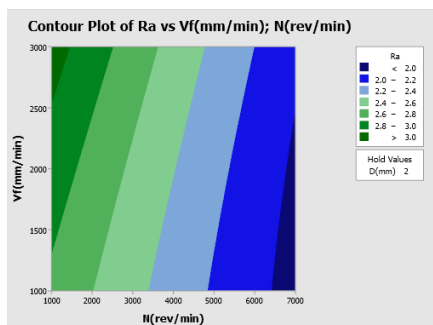
نمودار باکس کاکس<sup>۲</sup> که در شکل ۸ (ب) نشان داده شده، ابزاری برای کمک به تشخیص مناسب‌ترین تابع انتقال توانی به‌منظور اعمال بر پاسخ است. پایین‌ترین نقطه در نمودار باکس کاکس بهترین مقدار لاندا<sup>۳</sup> را که در آن حداقل مجموع

1. Studentized Residuals
2. Box-Cox
3. Lambda

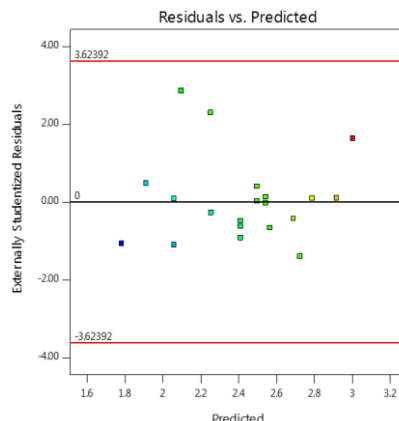
(علمی-پژوهشی)

بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند فرزکاری مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی با هدف کاهش زبری سطح

ب) تأثیر هم‌زمان سرعت اسپیندل و عمق برشی بر میزان زبری در سرعت پیشروی ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه در حالت سه‌بعدی نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در سرعت پیشروی پایین زبری سطح بهتری به دست آمده است.

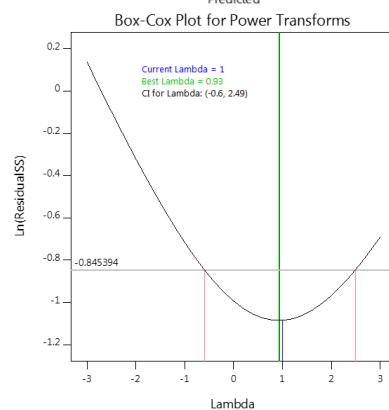


شکل ۹ (الف): نمودار تأثیر هم‌زمان سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی بر میزان زبری Ra در عمق ۲ میلی‌متر، ب) نمودار سه‌بعدی تأثیر هم‌زمان سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی بر زبری سطح Ra، ج) نمودار تأثیر سرعت پیشروی و عمق برشی بر میزان زبری Ra در سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، د) نمودار تأثیر سرعت اسپیندل و عمق برشی بر میزان زبری در سرعت پیشروی ۲۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه.



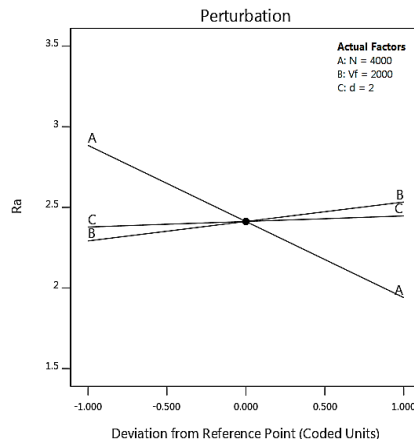
(الف)

(الف)



(ب)

(ب)



(ج)

(ج)

شکل ۸ (الف): نمودار مقادیر باقیمانده در مقابل مقادیر پیش‌بینی، ب) نمودار box-cox برای زبری سطح Ra و ج) نمودار پرتurbation برای مدل زبری سطح Ra.

در شکل ۹ (د) تأثیر هم‌زمان سرعت اسپیندل و عمق برشی بر زبری در سرعت پیشروی ۲۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه ترسیم شده است. حداکثر سرعت اسپیندل با کمترین عمق برشی نتایج خوبی رقم می‌زند ولی در حداکثر سرعت اسپیندل تأثیر عمق برشی بیشتر خواهد شد.

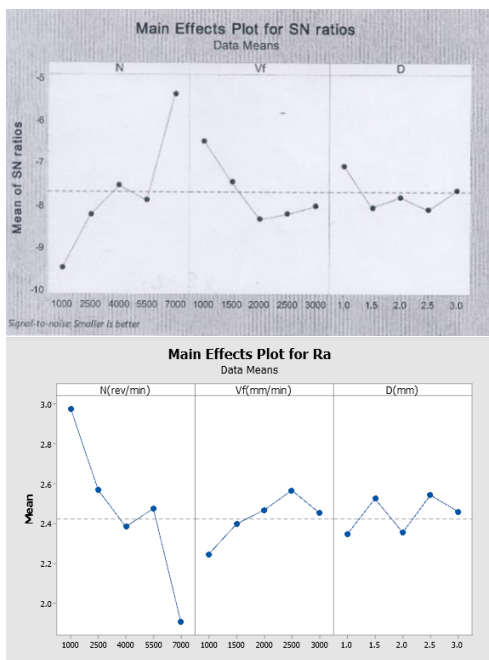
شکل ۱۰ (الف و ب) تأثیر هم‌زمان سرعت پیشروی و عمق برش بر میزان زبری در سرعت‌های ۱۰۰۰ و ۷۰۰۰ دور بر دقیقه در حالت سه‌بعدی نمایش داده شده است. با کاهش سرعت اسپیندل زبری سطح افزایش و با افزایش سرعت اسپیندل زبری سطح کاهش پیدا کرده است. شکل ۱۱ (الف و

(د)

(علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و نمودار پاسخ سطح و سیگنال به نویز، تأثیر هر پارامتر به صورت مجزا مشخص شده است. نمودار سیگنال به نویز در شکل ۱۲ (الف) نشان داده شده است. نتیجه کلی که می‌توان از نمودار سیگنال به نویز گرفته شود این است که سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برشی ۱ میلی‌متر بهترین شرایط برای دستیابی حداقل زبری را فراهم می‌کند. همان‌گونه که در نمودار شکل ۱۲ (ب) مشاهده می‌شود، سرعت اسپیندل دارای بیشترین تأثیر و سرعت پیشروی و عمق برشی از تأثیر کمتری در زبری سطح برخوردار می‌باشند. سرعت در سطح پنج خود بهترین نتیجه را رقم می‌زند. سرعت پیشروی در سطح یک، بهترین نتیجه را دارد. عمق برشی در سطح یک بهترین نتیجه و در سطح سه، نتیجه مشابه دارد.



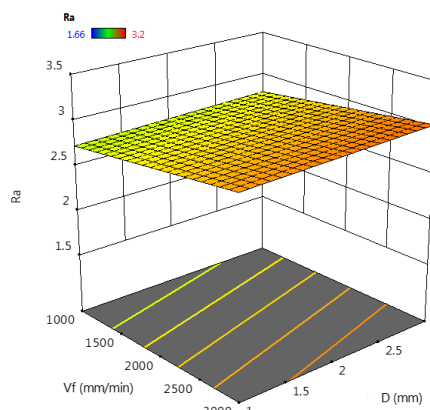
(الف)

(ب)

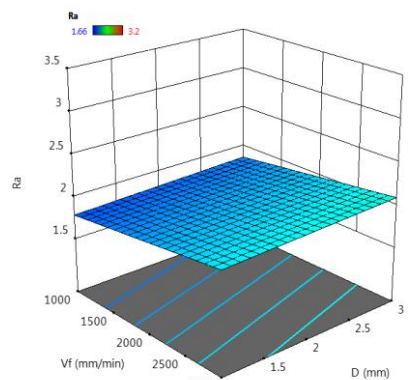
شکل ۱۲: (الف) نمودار سیگنال به نویز میزان زبری سطح Ra شکل و (ب) نمودار سطح پاسخ برای میزان زبری سطح Ra.

نمودار اصلاح شده ۱۳ (الف) نشان داد با افزایش سرعت اسپیندل زبری کاهش یافته و با افزایش سرعت پیشروی زبری افزایش و با افزایش عمق برشی نیز زبری افزایش می‌یابد که البته کمترین تأثیر را در حداقل زبری سبب می‌شود. تأثیر پارامترها بر روی یکدیگر بر میزان زبری مشخص شد. جهت درک بهتر، کلیه پارامترها و تأثیر هم‌زمان آن‌ها، در شکل ۱۳ (ب) نشان داده شده است.

I. S/N

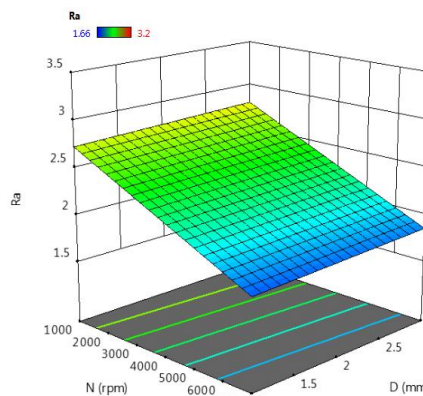


(الف)

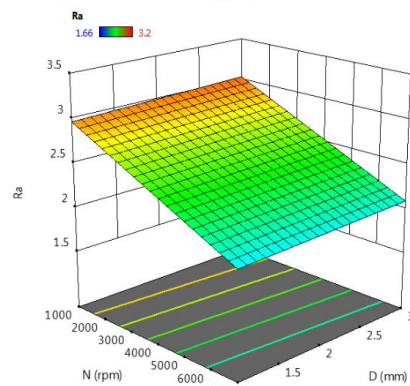


(ب)

شکل ۱۰: نمودار سه‌بعدی تأثیر سرعت پیشروی و عمق برش بر زبری در سرعت (الف) ۱۰۰۰ و (ب) ۷۰۰۰ دور بر دقیقه.

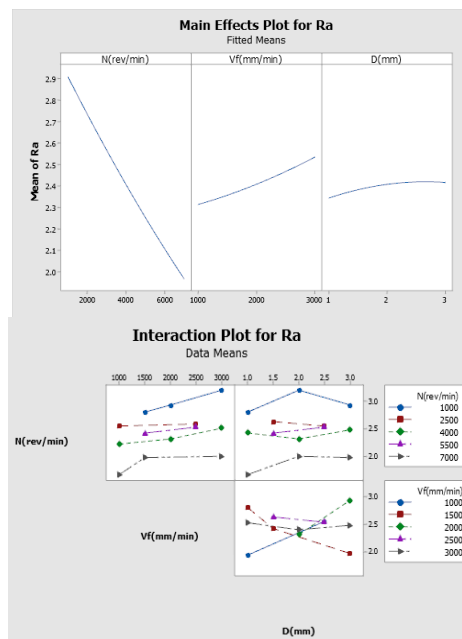


(الف)



(ب)

شکل ۱۱: نمودار سه‌بعدی تأثیر سرعت و عمق برش بر زبری در پیشروی (الف) ۱۰۰۰ و (ب) ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه.



(الف)

(ب)

شکل (۱۳): الف) نمودار سطح پاسخ اصلاح شده برای Ra و (ب) نمودار تأثیر هم‌زمان پارامترهای مختلف بر Ra.

آمده برابر با ۹۳/۱۹ درصد است، به این معنی که مدل برازش شده تا ۹۳/۱۹ درصد از کل تغییرات نرخ برداشت ماده را پوشش می‌دهد. از سوی دیگر بر اساس مقدار P برای فاکتور سرعت اسپیندل، معنی‌دار نبودن این فاکتور اثبات شد.

جدول (۱۳): تحلیل واریانس مدل نرخ برداشت ماده در روش سطح پاسخ.

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	اعتبار
مدل	۳	۳۱۶۶۲/۲۸	۷۳/۰۲	< ۰/۰۰۰۱	
N	۱	۳۲/۹۵	۰/۲۲۷۹	۰/۶۳۹۵	
Vf	۱	۱۴۷۸۸/۸۳	۱۰۲/۳۱	< ۰/۰۰۰۱	
D	۱	۱۴۹۱۴/۵۸	۱۰۳/۱۸	< ۰/۰۰۰۱	
باقیمانده	۱۶	۲۳۱۲/۷۲			
عدم انطباق	۱۱	۲۳۱۲/۷۲	۱۰/۰۹		
خطای خالص	۵	۰/۰۰۰۰			
کل	۱۹	۳۳۹۷۵/۰۰			

Significant

در نمودار شکل ۱۴ (الف) احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها در مدل MMR نشان داده شده که داده‌ها تقریباً بر روی خط مورب قرار گرفته است و این بیانگر توزیع نرمال خطا است. این مطلب تأییدکننده کیفیت خوب مدل برازش شده است. نمودار ۱۴ (ب) پاسخ پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای کمک به تشخیص مقادیر یا گروهی از مقادیر که توسط مدل پیش بینی نشده است را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده حداکثر نرخ برداشت ماده در شکل ۱۵ (الف) دارای پراکندگی تصادفی، که نشان دهنده طیف ثابت مانده در سراسر نمودار است، می‌باشد. در نمودار باکس‌کاکس مطابق شکل ۱۵ (ب) همان‌گونه که مشخص است بهترین لاندن برای مدل ۰/۲۸ می‌باشد و با توجه به ساده‌سازی مدل توان یک انتخاب شده است. در نمودار پرشیدگی، در شکل ۱۶ شیب تند پارامتر B و C نشان می‌دهد که پاسخ، به پارامترهای سرعت پیشروی و عمق برش حساس بوده و خط A مربوط به سرعت اسپیندل، نشان دهنده عدم حساس بودن این پارامتر است.

### تحلیل نتایج مربوط به نرخ برداشت ماده: در این

تحلیل آماری سعی شده تا حد امکان داده‌ها و نتایج حاصل از آزمایشات از لحاظ آماری بررسی و تجزیه و تحلیل شوند. برای بررسی میزان تأثیر هر فاکتور بر نرخ برداشت ماده<sup>۱</sup> از آنالیز واریانس استفاده شده است و نتایج حاصل از تحلیل واریانس در جدول ۱۳ آورده شده است. دستاورد دیگر این پژوهش استخراج معادله ریاضی با پارامترهای مختلف برای MRR است که مدل فوق این میزان را پیش‌بینی می‌کند (به ازای مقدار هر سطح). معادله (۳) برای نرخ برداشت ماده بر اساس مقادیر واقعی به صورت مجزا قابل محاسبه است.

$$MRR = -74.07966 + 0.000658 \times N + 0.036292 \times Vf + 39.86376 \times D \quad (3)$$

مقدار F برای مدل برابر ۷۳/۰۲ می‌باشد، که P-value کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده معتبر بودن مدل است. P-value کمتر از ۰/۰۵ برای پارامترهای مدل نیز نشان دهنده معتبر بودن آن‌ها می‌باشد. پس از حذف پارامترهای بی‌معنی، عمق برش و سرعت پیشروی به ترتیب دارای بیشترین تأثیر و سرعت اسپیندل در گام بعد تأثیر گذار می‌باشند. نتایج حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر پارامترهای اصلی از جمله سرعت پیشروی و عمق برش و تداخل آنها دارد ولی میزان تأثیر هر کدام متفاوت می‌باشد. مقدار ضریب همخوانی<sup>۲</sup> برای مدل نهایی به دست

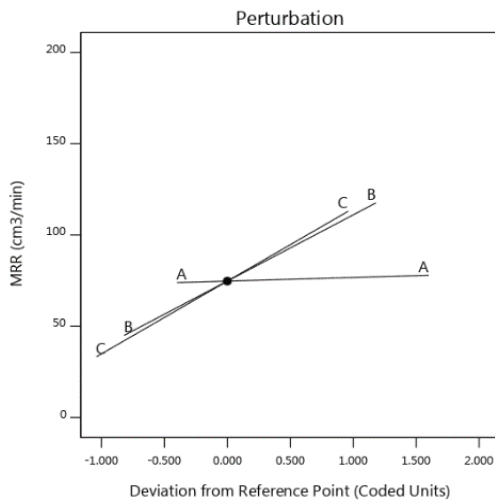
<sup>۱</sup> Material Removal Rate (MRR)

<sup>۲</sup> R-Squared

(علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

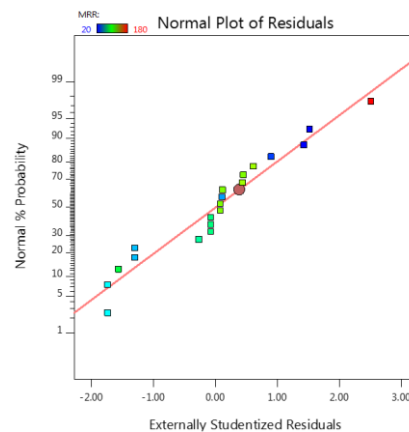
شکل (۱۵): الف) نمودار مقادیر باقیمانده و پیش بینی شده و ب) نمودار box-cox برای مدل نرخ برداشت ماده.



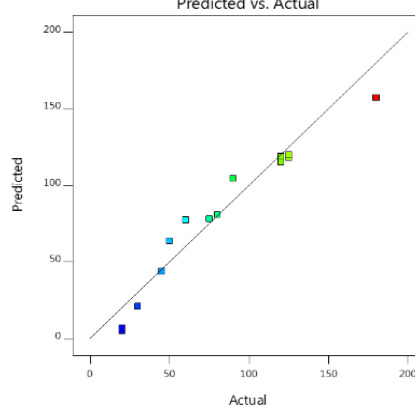
شکل (۱۶): نمودار پیش‌بینی برای مدل نرخ برداشت ماده.

شکل ۱۷ الف) تأثیر هم‌زمان دو پارامتر سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی بر نرخ برداشت ماده در عمق برش ۲ میلی‌متر را نمایش می‌دهد. سرعت اسپیندل تأثیری در نرخ برداشت ماده ندارد. برای به افزایش نرخ برداشت ماده، باید سرعت پیشروی را افزایش داد. در شکل ۱۷ ب) تأثیر هم‌زمان سرعت اسپیندل و عمق برشی بر نرخ برداشت ماده در سرعت پیشروی ۲۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه ترسیم شده است. با افزایش عمق برش نرخ برداشت ماده افزایش می‌یابد. تأثیر هم‌زمان سرعت پیشروی و عمق برش بر نرخ برداشت ماده در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه در شکل ۱۸ الف و ب) در حالت دوبعدی و سه‌بعدی نمایش داده است. افزایش سرعت پیشروی و عمق برش موجب افزایش نرخ برداشت ماده خواهد شد. نمودار شکل‌های ۱۹ الف و ب) نشان داد سرعت اسپیندل تأثیری در نرخ برداشت ماده نداشته و سرعت پیشروی و عمق برشی در نرخ برداشت ماده تأثیر مستقیم داشته و با افزایش آنها نرخ برداشت ماده افزایش خواهد داشت. سرعت پیشروی در سطح سه بهترین نتیجه را دارد.

بهینه‌سازی زبری سطح و نرخ برداشت ماده: حالت‌های بهینه آزمایش برای حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت ماده و همچنین حالت بهینه هم‌زمان دو خروجی مطابق جدول ۱۴ توسط نرم‌افزار ارائه شد.

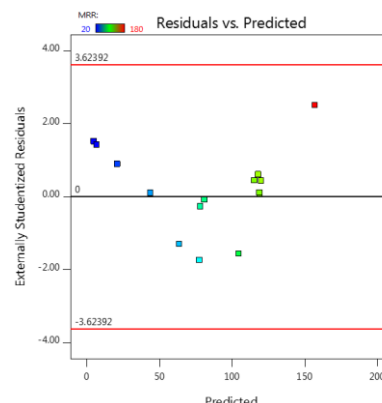


الف)

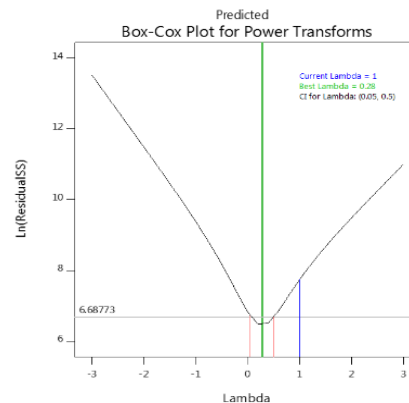


ب)

شکل (۱۴): الف) نمودار احتمال نرمال و ب) نمودار مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای نرخ برداشت ماده MRR.



الف)

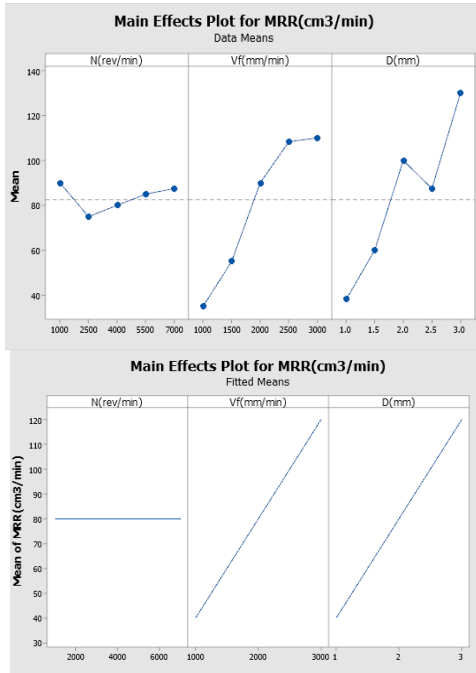


ب)

(علمی-پژوهشی)

بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند فرزکاری مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی با هدف کاهش زبری سطح

شکل (۱۸): الف) نمودار تأثیر سرعت پیشروی و عمق برش بر نرخ برداشت ماده در سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه و ب) نمودار سه‌بعدی تأثیر سرعت پیشروی و عمق برش بر نرخ برداشت ماده MRR.



(الف)

(ب)

شکل (۱۹): الف) نمودار سطح پاسخ برای نرخ برداشت ماده و ب) نمودار سطح پاسخ اصلاح شده برای نرخ برداشت ماده.

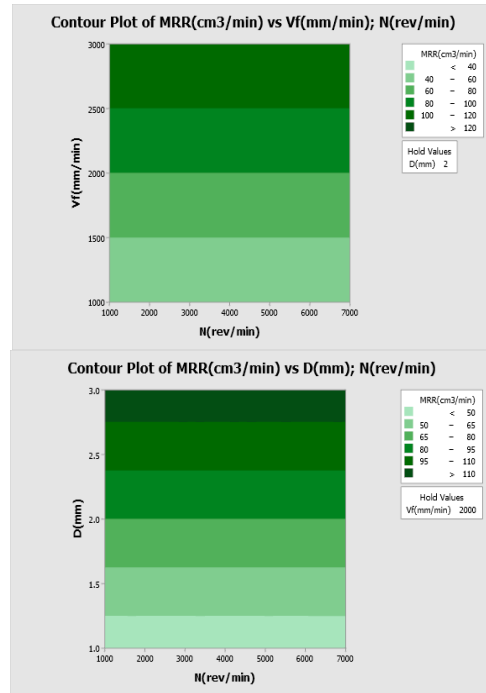
بهینه‌سازی زبری سطح و نرخ برداشت ماده: حالت‌های بهینه آزمایش برای حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت ماده و همچنین حالت بهینه هم‌زمان دو خروجی مطابق جدول ۱۴ توسط نرم‌افزار ارائه شد.

جدول (۱۴): حالت بهینه پارامترها برای آزمون ۱ حداقل زبری سطح، آزمون ۲ حداکثر نرخ برداشت ماده، آزمون ۳ حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت ماده.

مطلوبیت	مقدار برداشت ماده	میانگین زبری	عمق برش	سرعت پیشروی	سرعت اسپیندل	شماره آزمون
Desirability	MRR (cm <sup>3</sup> /min)	Ra (μm)	D (mm)	V <sub>f</sub> (mm/min)	N (rev/min)	
۰/۹۱۹	۲۰	۱/۷۸۵	۱	۱۰۰۰	۷۰۰۰	۱
۰/۸۶۹	۱۸۰	۲/۰۹۶	۳	۲۹۹۹/۹۹۵	۶۹۹۹/۸۳۰	۲
۰/۷۸۹	۱۸۰	۲/۰۹۶	۳	۲۹۹۹/۹۹۷	۶۹۹۹/۹۹۶	۳

نتایج آزمایش صحنه‌گذاری: جهت صحنه‌گذاری موضوعات یاد شده، پس از فراهم نمودن شرایط فرزکاری، حالت بهینه برای یافتن حداقل زبری سطح و همچنین حالت بهینه برای دستیابی هم‌زمان به حداقل زبری سطح و حداکثر

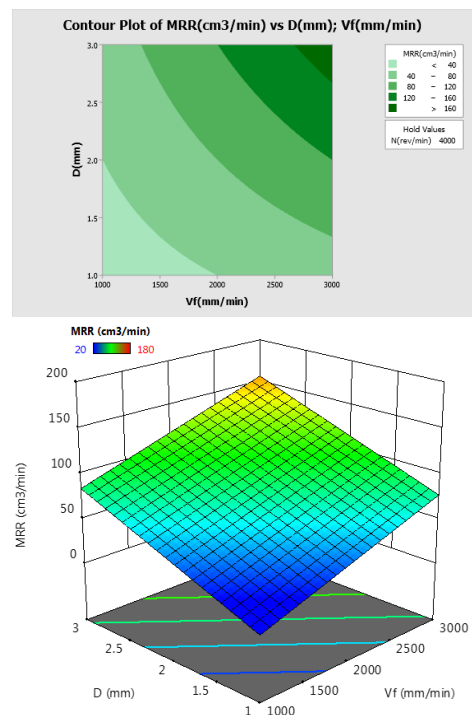
نتایج آزمایش صحنه‌گذاری: جهت صحنه‌گذاری موضوعات یاد شده، پس از فراهم نمودن شرایط فرزکاری، حالت بهینه برای یافتن حداقل زبری سطح و همچنین حالت بهینه برای دستیابی هم‌زمان به حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت ماده، مطابق جدول ۱۵ و شکل ۲۰ در دو آزمایش انجام شد.



(الف)

(ب)

شکل (۱۷): الف) نمودار تأثیر سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی بر نرخ برداشت ماده در عمق برش ۲ میلی‌متر، ب) نمودار تأثیر سرعت اسپیندل و عمق برش بر MRR در سرعت پیشروی ۲۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه.



(الف)

(ب)

(علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

و این نتیجه نیز تأییدکننده نتایج موجود و همچنین خروجی‌های قبل می‌باشد.

نرخ برداشت ماده، مطابق جدول ۱۵ و شکل ۲۰ در دو آزمایش انجام شد.

جدول (۱۵): آزمون‌های صحه‌گذاری نتایج برای حداقل زبری سطح Ra و حداکثر مقدار برداشت ماده MRR.

شماره آزمون	سرعت اسپیندل	سرعت پیشروی	عمق برش
N (rev/min)	V <sub>f</sub> (mm/min)	D (mm)	
۱	۷۰۰۰	۱۰۰۰	۱
۲	۷۰۰۰	۳۰۰۰	۳



(الف)

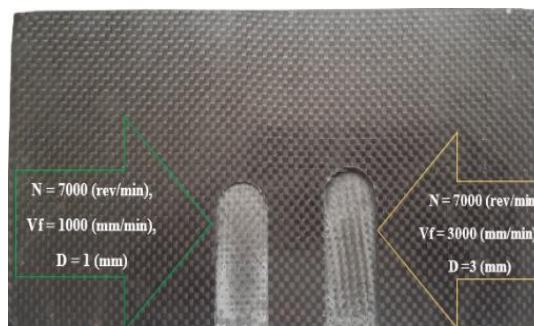


(ب)



(ج)

شکل (۲۱): (الف) آزمون‌های انجام شده برای آزمون‌های صحه‌گذاری ارائه شده توسط نرم‌افزار، (ب) تصویر مایکروسکوپی در سرعت ۷۰۰۰rpm، سرعت پیشروی ۱۰۰۰mm/min و عمق برش ۱mm (ج) تصویر مایکروسکوپی در سرعت ۷۰۰۰rpm، سرعت پیشروی ۳۰۰۰mm/min و عمق برش ۱mm.



شکل (۲۰): فرآیند فرزکاری انجام شده جهت صحه‌گذاری نتایج در سرعت ۷۰۰۰ دور بر دقیقه.

پس از انجام آزمایش و اندازه‌گیری زبری سطح نتیجه ۱/۹ میکرومتر برای، سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برشی ۱ میلی‌متر به دست آمد. برای آزمایش دوم که با، سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برشی ۳ میلی‌متر نتیجه زبری سطح ۲/۴ به دست آمد.

در ضمن نتایج این دو آزمون نیز نتایج حاصل از طراحی آزمایش را با خطای به ترتیب حدود ۶/۳ و ۱۳/۷ درصد و همچنین خروجی‌های مرحله قبل را تأیید کرده و نشان می‌دهد در سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ دور بر دقیقه زبری سطح کاهش یافته و با افزایش سرعت پیشروی از ۱۰۰۰ به ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش از ۱ به ۳ میلی‌متر، زبری سطح افزایش می‌یابد. ازلحاظ تئوری تمام موارد فوق قابل پیش‌بینی بوده است که خود به‌نوعی مهر تأیید بر کلیه مراحل می‌باشد. در ضمن با بررسی و کنترل کیفیت سطح به‌صورت چشمی و همچنین توسط استریو میکروسکوپ، شکل ۲۱ (الف، ب و ج) نشان می‌دهند که با افزایش سرعت پیشروی و عمق برش در سرعت ثابت، زبری سطح افزایش داشته است

**توپوگرافی سطح:** در پژوهش‌های صورت گرفته در فرآیند فرزکاری معمولی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن، همراه با ترک‌های بزرگ و یا کوچک در رزین همراه می‌باشند. در آزمایش‌های انجام شده با پارامترهای مختلف فرزکاری ممکن است ترک‌هایی در برخی نقاط مشاهده شود؛ همچنین زبری سطح پایین بیانگر بی‌عیب و نقص بودن قطعه نیست. بیرون‌زدگی الیاف و رزین و ترک‌های ریز عیب و نقص‌های موجود بر روی سطح فرزکاری شده است. در انتهای فرآیند معمولاً به علت افزایش دمای ماشین‌کاری قسمت‌هایی از رزین سوخته یا به‌صورت دوباره ریخته شده نمایان می‌شوند و رزین به‌صورت لکه‌دار می‌شود و در برخی از قسمت‌ها با توجه به ارتعاشات ماشین‌کاری و افزایش دما رزین سوخته و از بین می‌رود. افزایش سرعت برشی به دلیل تأثیر مستقیم بر روی

(علمی-پژوهشی)

بهبودسازی پارامترهای فرآیند فرزکاری مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی با هدف کاهش زبری سطح

N = 7000 (rev/min), Vf = 3000 (mm/min), D = 2 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۴ 2mm

شکل (۲۲): مقایسه تصاویر میکروسکوپی آزمایش‌های انجام شده در

سرعت ۷۰۰۰rpm

N = 5500 (rev/min), Vf = 1500 (mm/min), D = 1.5 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۱۰ 2mm

N = 5500 (rev/min), Vf = 2500 (mm/min), D = 2.5 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۶ 2mm

شکل (۲۳): مقایسه تصاویر میکروسکوپی آزمایش‌های انجام شده در

سرعت ۵۵۰۰rpm

N = 4000 (rev/min), Vf = 2000 (mm/min), D = 2 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۲ 2mm

N = 4000 (rev/min), Vf = 1000 (mm/min), D = 1 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۱۶ 2mm

N = 4000 (rev/min), Vf = 2000 (mm/min), D = 2 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۱۷ 2mm

دمای ماشین‌کاری و افزایش آن، آسیب بیشتری را به رزین می‌تواند وارد کند، که البته در آزمون‌های انجام شده به دلیل بالا بودن هم‌زمان سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی و عدم وجود فرصت برای افزایش دما آسیبی به قطعه وارد نشده است. در ادامه تصاویر میکروسکوپی سطوح فرزکاری شده در شرایط مختلف آزمایش نمایش داده شده است.

با توجه به تصاویر میکروسکوپی شکل ۲۲ کاملاً مشخص است که کیفیت سطح در سرعت اسپیندل بالا نسبت به سرعت‌های پایین‌تر بهتر بوده، چه از لحاظ میکروسکوپی و حتی چشمی در سرعت ۷۰۰۰ دور بر دقیقه کیفیت سطح بهتری حاصل شده است. با توجه به شکل‌های ۲۳-۲۷ با کاهش سرعت اسپیندل به ۴۰۰۰، ۵۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش زبری سطح مشهود است.

N = 7000 (rev/min), Vf = 1000 (mm/min), D = 1 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۵ 2mm

N = 7000 (rev/min), Vf = 1500 (mm/min), D = 3 (mm)



7.01 : 1 آزمایش شماره ۱۳ 2mm

N = 7000 (rev/min), Vf = 3000 (mm/min), D = 2 (mm)



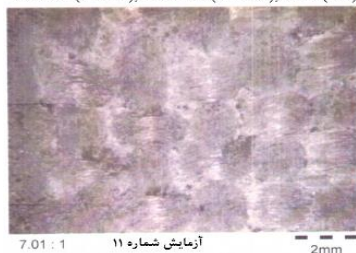
7.01 : 1 آزمایش شماره ۸ 2mm

(علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

معیار ورقه ورقه شدن نشان می‌دهد آسیب اطراف شیار بیشتر شده است و این آسیب در اثر افزایش نیرو، موجب پایین آمدن دقت شیار از نظر ابعادی خواهد شد. در نتیجه، دقت ابعادی و معیار ورقه ورقه شدن ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند. میزان ورقه ورقه شدن با کاهش نیرو، با توجه به معیار بی‌بعد  $F_d$  کاهش یافته است، همچنین با افزایش نیرو معیار ورقه ورقه شدن افزایش یافته است. افزایش سرعت برشی به دلیل کاهش نیرو در فرآیند فرزکاری سبب کاهش معیار ورقه ورقه شدن می‌شود و افزایش سرعت پیشروی به علت افزایش نیروی ماشین‌کاری باعث افزایش معیار ورقه ورقه شدن می‌شود. افزایش سرعت برشی، سبب بهبود معیار ورقه ورقه شدن شده است، زیرا با افزایش سرعت برشی نیروی ماشین‌کاری در یک نرخ پیشروی ثابت کاهش می‌یابد. این کاهش سبب بالا رفتن دقت ابعادی می‌شود. از طرفی معیار  $F_d$  با افزایش دقت ابعادی کاهش پیدا می‌کند.

$N = 4000 \text{ (rev/min)}, Vf = 2000 \text{ (mm/min)}, D = 2 \text{ (mm)}$



شکل (۲۴): مقایسه تصاویر میکروسکوپی در سرعت  $4000 \text{ rpm}$  و سرعت پیشروی  $1000 \text{ mm/min}$  و  $2000 \text{ mm/min}$ .

$N = 4000 \text{ (rev/min)}, Vf = 3000 \text{ (mm/min)}, D = 1 \text{ (mm)}$



$N = 4000 \text{ (rev/min)}, Vf = 3000 \text{ (mm/min)}, D = 1 \text{ (mm)}$



$N = 4000 \text{ (rev/min)}, Vf = 3000 \text{ (mm/min)}, D = 3 \text{ (mm)}$



شکل (۲۵): مقایسه تصاویر میکروسکوپی در سرعت  $4000 \text{ rpm}$  و سرعت پیشروی  $3000 \text{ mm/min}$ .

$N = 2500 \text{ (rev/min)}, Vf = 1000 \text{ (mm/min)}, D = 2.5 \text{ (mm)}$



$N = 2500 \text{ (rev/min)}, Vf = 1000 \text{ (mm/min)}, D = 2.5 \text{ (mm)}$



$N = 2500 \text{ (rev/min)}, Vf = 2500 \text{ (mm/min)}, D = 1.5 \text{ (mm)}$



**دقت ابعادی و معیار ورقه ورقه شدن:** دقت ابعادی با توجه به انطباقات میان قطعات مختلف از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. همان‌طور که مشخص است با افزایش سرعت برشی و کاهش سرعت پیشروی شیار فرزکاری شده دارای دقت ابعادی بهتر خواهد بود. همچنین در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن یکی از عوامل تعیین‌کننده دقت ابعادی، ورقه ورقه شدن است. با افزایش معیار ورقه ورقه شدن عرض شیار فرزکاری شده از ابعاد نامی دور می‌شود. افزایش

در آزمایش‌های انجام شده، بیشترین تورق در آزمایش‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ مطابق شکل ۲۸ به دلیل اعمال سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه با سرعت پیشروی‌های به ترتیب ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه اتفاق افتاد. البته این مورد به تجربه قابل پیش‌بینی بود، چرا که در انتخاب سرعت‌ها، معمولاً سرعت اسپیندل باید از سرعت پیشروی بالاتر باشد. این سرعت‌ها با توجه به طراحی آزمایش پیشنهاد شده، به دلیل کامل کردن داده‌ها حذف نشده و اجرا گردید. در ضمن در آزمایش‌های دیگر، نیز در برخی نقاط در دیواره و انتهای شیارها آسیب ورقه ورقه شدن مشاهده شد. لازم به ذکر است تolerانس‌های ابعادی و هندسی با توجه به ساختار کامپوزیت قابل اندازه‌گیری با ابزارهای رایج مانند کولیس و غیره نبوده و باید برای بررسی دقیق از تصاویر میکروسکوپی استفاده کرد. نتایج ارائه شده کیفی است. در ضمن با توجه به اینکه کامپوزیت پس از لایه چینی، تحت فشار و پخت کاهش ضخامت و جمع شوندگی دارد، ارزیابی اینکه در عمق‌های مختلف کدام لایه تحت ماشین‌کاری قرار گرفته دشوار بوده و در تحقیقات مختلف نیز بررسی نشده است. حجم براده تغییر شکل نیافته نیز با توجه به اینکه براده ایجاد شده به صورت پودر بود، قابل بررسی نبود.



شکل (۲۸): آسیب تورق در آزمایش‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰.

**فرسایش ابزار:** در فرآیند فرزکاری انجام شده از ابزار دو لبه استفاده گردید. دو اینسرت استفاده شده در هر مرحله از اجرای فرآیند بررسی چشمی گردید، تا اگر لبه‌های برنده دچار سایب شده و یا آسیب دیده باشند، نسبت به تعویض اینسرت‌ها اقدام گردد. در آزمایش مذکور لبه‌های برنده بدون

N = 2500 (rev/min), Vf = 2500 (mm/min), D = 2.5 (mm)



شکل (۲۶): مقایسه تصاویر میکروسکوپی در سرعت ۲۵۰۰rpm و سرعت پیشروی ۲۵۰۰mm/min و ۱۰۰۰.

N = 1000 (rev/min), Vf = 1500 (mm/min), D = 1 (mm)



N = 1000 (rev/min), Vf = 2000 (mm/min), D = 3 (mm)



N = 1000 (rev/min), Vf = 3000 (mm/min), D = 2 (mm)



شکل (۲۷): مقایسه تصاویر میکروسکوپی در سرعت ۱۰۰۰rpm.

(علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

آسیب و عیب بودند که این مورد با کنترل و مشاهده میکروسکوپی پس از انجام آزمایش صحه‌گذاری گردید.

**اثر جهت الیاف در زبری سطح:** زبری سطح در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن بسیار وابسته به جهت الیاف می‌باشد. در ماشین‌کاری CFRP مکانیزم جدا شدن الیاف به سه صورت توسط ابزار از روی قطعه کار با توجه به جهت‌گیری الیاف انجام می‌شود. هنگامی که جهت الیاف در راستای جهت برش واقع شده باشد عملیات برش به‌صورت فشرده‌سازی صورت می‌گیرد و هنگامی که با زاویه نسبت به جهت برش قرار گیرد مکانیزم برش، به‌صورت خم یا شکست می‌باشد. از آنجای که در ساخت قطعه CFRP از الیاف دو جهته در جهات مختلف استفاده شد به همین جهت روند خاصی در مورد زبری سطح در جهات اندازه‌گیری شده به دست نمی‌آید. این مطلب در اندازه‌گیری‌های انجام شده قابل مشاهده است. استفاده از الیاف تک جهته در ساخت قطعه CFRP روند دقیق‌تری را برای پیش‌بینی زبری سطح ایجاد می‌کند.

که این فاکتور اثر کمتری را بر زبری سطح دارد. سرعت پیشروی در سرعت‌های پایین برش، اثر بیشتری بر زبری می‌گذارد. این امر ناشی از تشکیل براده با لبه انباشته در سرعت‌های پایین برش است. در سرعت‌های بالا با حل شدن این مشکل، اثر پیشروی کمی کاهش می‌یابد. دلیل افزایش زبری سطح با افزایش پیشروی در برخی نقاط از سطح فرزکاری شده می‌تواند با حرارت تولید شده ارتباط داشته باشد. در پیشروی‌های بالا میزان حرارت تولید شده بالا بوده و در نتیجه دمای ناحیه فرزکاری بالا می‌رود. این امر باعث نرم‌تر شدن ماتریس شده و در نتیجه تیغ فرز راحت‌تر در قطعه کار فرو می‌رود و باعث پارگی الیاف شده و زبری سطح افزایش پیدا می‌کند. اثر عمق برش، اثر محسوسی نیست و این امر در مقالات مختلف نیز گزارش شده است.

در صورت استفاده از ماشین‌کاری سرعت بالا مقدار تنش، نیرو، ارتعاش و دما تقلیل پیدا می‌کند و در محدوده‌ای قرار می‌گیرد که قطعه ماشین‌کاری از لحاظ تیرانس، دقت ابعادی، کیفیت سطحی و تنش‌های به وجود آمده در حین ماشین‌کاری در محدوده قابل قبول باشد.

**اثر پارامترهای فرزکاری:** طبق تحقیقات انجام شده زبری سطح در کامپوزیت‌ها تحت تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری است. این تحقیقات نشان داده است که زبری سطح در فرزکاری وابسته به سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی و عمق برش می‌باشد و با افزایش پیشروی زبری سطح کمی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مشخص می‌کند سرعت برشی تأثیر خیلی زیادی نسبت به سرعت پیشروی و عمق برش بر روی زبری سطح دارد. به‌طورکلی با افزایش سرعت برشی، تغییر شکل براده و در نتیجه نیروی وارد بر ابزار کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت برشی نیروی اصطکاک روی سطح ابزار کاهش می‌یابد و این در صورتی می‌باشد که لبه انباشته به وجود نیاید. با افزایش سرعت برشی مساحت صفحه مساحت برش و یا حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش می‌یابد. لذا انرژی کمتری صرف برداشت براده می‌گردد و بازدهی فرز افزایش می‌یابد.

**مقایسه نتایج با دیگر پژوهش‌ها:** بررسی سایر پژوهش‌ها در زمینه‌ی فرزکاری کامپوزیت کربن/ اپوکسی و سایر کامپوزیت‌های زمینه پلیمری نشان می‌دهد که غالباً تمرکز بر روی صافی سطح بوده و بیشتر سه پارامتر سرعت، نرخ پیشروی و عمق براده برداری ارزیابی شده است. در مقایسه نتایج با تحقیقات گذشته موارد ذیل قابل ذکر است:

در این پژوهش سرعت اسپیندل  $7000 \text{ rev/min}$ ، پیشروی  $1000 \text{ mm/min}$  و عمق برشی  $1 \text{ mm}$  بهترین شرایط را برای دستیابی به کیفیت سطح بالا ایجاد می‌کند. تائوچن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶]، سرعت اسپیندل  $5300 \text{ rev/min}$ ، خایروشیما<sup>۲</sup> و همکاران [۱۷]، سرعت حدود  $\text{rev/min}$ ،  $7700$ ، بایراکتار<sup>۳</sup> و همکاران [۱۸]، برای یکی از ابزارهای تحت آزمایش سرعت  $5800 \text{ rev/min}$ ، جنارتان<sup>۴</sup> و همکاران [۸]، سرعت  $6000 \text{ rev/min}$ ، چین<sup>۵</sup> و همکاران [۱۹]، سرعت  $9350 \text{ rev/min}$  را برای نمونه‌های تحت آزمایش بر اساس جنس قطعه و ابزار انتخابی و همچنین شرایط

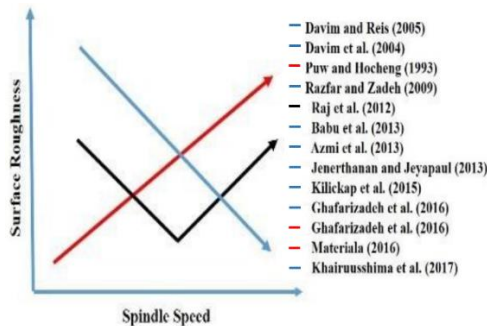
همان‌طور که انتظار می‌رفت افزایش سرعت برشی باعث کاهش زبری می‌گردد که این امر می‌تواند به خاطر کاهش براده با لبه انباشته در سرعت‌های بالا باشد. سرعت برش در سرعت پیشروی بالا و عمق‌های بالا، اثر بیشتری بر زبری می‌گذارد. افزایش سرعت پیشروی اثر معکوس دارد و افزایش آن، باعث افزایش زبری می‌شود. مشخص است

1. Tao Chen  
2. Khairusshima  
3. Senol Bayraktar  
4. Jenarathanan  
5. Chibane

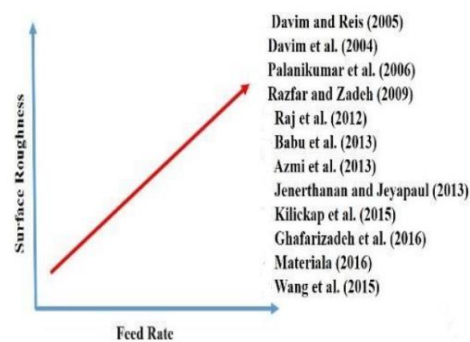
## (علمی-پژوهشی)

بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند فرزکاری مواد کامپوزیتی کربن/اپوکسی با هدف کاهش زبری سطح

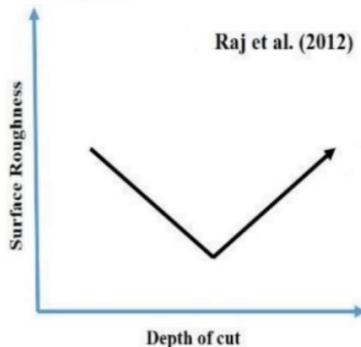
سایر محققین می‌باشد، تأیید کننده این مطلب است. در نمودار شکل ۳۰ (ج) با افزایش عمق برش، مقدار زبری سطح ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است، دلیل این است که با افزایش نرخ پیشروی یا عمق برش، مقدار زیادی گرما تولید شده باعث فرسایش ابزار و همچنین افزایش نیروی برش شده و ضخامت براده تغییر می‌کند و باعث افزایش زبری سطح می‌شود. البته در صورت عدم تولید حرارت این افزایش زبری به صورت خطی خواهد بود. در ضمن در تحقیقات پیشین معمولاً از سرعت پیشروی کمتر از ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده بود، که در پژوهش انجام شده سرعت‌های پیشروی بالای ۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.



الف



ب

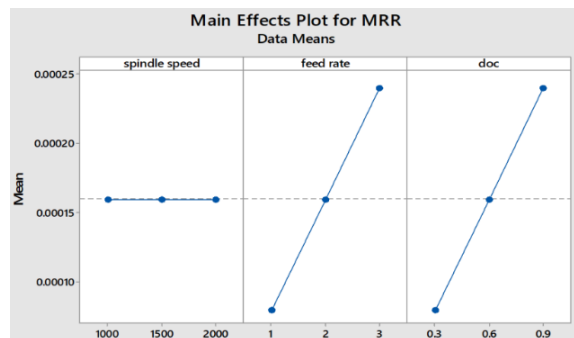


ج

شکل (۲۹): الف) نمودار رابطه سرعت اسپیندل با زبری سطح در فرآیند فرزکاری کامپوزیت‌ها [۲۲]، ب) نمودار رابطه نرخ پیشروی با زبری سطح در فرآیند فرزکاری کامپوزیت‌ها [۲۲] و ج) نمودار رابطه عمق برش با زبری سطح در فرآیند فرزکاری کامپوزیت‌ها [۲۲].

فرزکاری مختلف به‌عنوان بهترین سرعت به دست آوردند. با توجه به اینکه شرایط تحقیق انجام شده متفاوت با موارد اشاره شده می‌باشد و قابل مقایسه مستقیم نیست، حالت بهینه سرعت اسپیندل نزدیک و منطبق با شرایط دیگر محققین بوده و تأیید کننده نتایج حاصل است.

سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ rev/min، سرعت پیشروی ۳۰۰۰ mm/min و عمق برشی ۳ mm بهترین شرایط را برای دستیابی به کیفیت سطح بالا با حداکثر نرخ برداشت ماده ایجاد می‌کند، که در مقاله پاتل<sup>۱</sup> و همکاران [۲۰]، روند انجام فرآیند مطابق شکل ۲۹ که افزایش سرعت پیشروی و عمق برش موجب افزایش نرخ برداشت ماده شده و سرعت اسپیندل تأثیری در نرخ برداشت ماده نداشت، با نتایج حاصل از این پژوهش کاملاً مطابقت داشته و در حداکثر سرعت پیشروی و حداکثر عمق برش به حالت بهینه دست یافته‌اند.



شکل (۲۹): نمودار نرخ برداشت ماده برحسب پارامترهای فرزکاری [۲۰].

در این تحقیق افزایش پارامتر سرعت اسپیندل باعث کاهش زبری سطح و افزایش سرعت پیشروی و عمق برش موجب افزایش زبری سطح شد. سرعت اسپیندل بیشترین تأثیر و پارامترهای سرعت پیشروی و عمق برش تأثیر کمتری نسبت به سرعت اسپیندل در زبری سطح داشتند که با نتایج نارش<sup>۲</sup> و همکاران [۷]، جنارتانو همکاران [۸]، تائوچن و همکاران [۱۶] و همچنین خایروشیما و همکاران [۲۱]، مطابقت داشتند که البته در تحلیل‌های آنها درصد تأثیر پارامتر نرخ پیشروی بیشتر محاسبه گردید. در ضمن نمودار شکل ۳۰ ارائه شده توسط چادهری<sup>۳</sup> و همکاران [۲۲]، که جمع‌بندی تحقیقات

1. Patel
2. Naresh
3. Chaudhary

## (علمی-پژوهشی)

رضا انصاری، جعفر اسکندری جم، محمدحسین علایی، محسن حیدری بنی و مجید اسکندری شهرکی

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند فرزکاری با سرعت بالا، به عنوان روشی نوین روی صفحه کامپوزیتی کربن/اپوکسی با ضخامت ده میلی‌متر که با لایه چینی دستی ساخته شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. اثر پارامترهای برشی شامل سرعت اسپیندل، سرعت پیشروی و عمق برش بر روی کیفیت سطح مورد بررسی قرار گرفته و هر کدام از پارامترهای مذکور در پنج سطح تعریف شدند. به این منظور با استفاده از روش سطح پاسخ، طراحی آزمون‌ها با روش سطح پاسخ به منظور انجام تحقیقات تجربی انجام و پس از اجرای فرآیند فرزکاری با ابزار اینسرتی انتخاب شده، زبری سطح در هر مرحله اندازه‌گیری شد. به صورت کلی، نتایج حاصل برای این نوع الیاف و رزین با مشخصات فنی ذکر شده به شرح ذیل است:

۱- سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ rev/min، سرعت پیشروی ۱۰۰۰ mm/min و عمق برشی ۱ mm بهترین شرایط را برای دستیابی به حداقل زبری ایجاد می‌کند.

۲- سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ rev/min، سرعت پیشروی ۳۰۰۰ mm/min و عمق برشی ۳ mm بهترین شرایط را برای دستیابی به حداکثر نرخ برداشت ماده ایجاد می‌کند.

۳- سرعت اسپیندل ۷۰۰۰ rev/min، سرعت پیشروی ۳۰۰۰ mm/min و عمق برشی ۳ mm بهترین شرایط را برای دستیابی به حداقل زبری سطح و حداکثر نرخ برداشت ماده ایجاد می‌کند.

۴- افزایش پارامتر سرعت اسپیندل باعث کاهش زبری سطح و افزایش سرعت پیشروی و عمق برش موجب افزایش زبری سطح می‌شود. سرعت اسپیندل بیشترین تأثیر را در زبری سطح

دارد، و پارامترهای سرعت پیشروی و عمق برش تأثیر کمتری نسبت به سرعت اسپیندل در زبری سطح دارند.

۵- افزایش سرعت پیشروی و عمق برش موجب افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود. سرعت اسپیندل تأثیری در نرخ برداشت ماده ندارد.

۶- سرعت برشی بالا نتایج بهتری را سبب می‌شود و این موضوع احتمالاً به علت کاهش نیروهای ماشین‌کاری است. سرعت پیشروی کم به علت برش مناسب از سطح قطعه کار نتایج بهتری را نشان داد.

۷- تهیه دو مدل ریاضی می‌تواند پیش‌بینی مناسبی برای میزان Ra و MRR داشته باشد.

۸- در این تحقیق تجربی مشخص شد که کمترین تخریب تورق با سرعت‌های پیشروی خیلی کم همانند ۱۰۰۰ mm/min، اتفاق می‌افتد. استفاده از سرعت‌های پیشروی بالا مانند ۳۰۰۰ mm/min، تخریب تورق به مراتب بالاتری را نسبت به سایر نرخ‌های پیشروی حاصل می‌شود.

۹- کاهش نیروی ماشین‌کاری به دلیل افزایش سرعت برشی و کاهش میزان پیشروی، میزان ورقه ورقه شدن را کاهش می‌دهد و سبب افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های کلی ماشین‌کاری می‌شود. فرآیند فرزکاری با سرعت بالا به طور قابل ملاحظه‌ای این ویژگی‌ها را در عملیات ماشین‌کاری ثابت کرد.

۱۰- روش طراحی آزمایش سطح پاسخ به خوبی تأثیر هر یک از پارامترهای ماشین‌کاری بر روی خروجی آزمایش را نشان داد.

۱۱- کیفیت سطح قطعه تولیدی در فرآیند فرزکاری با سرعت بالا نتایج قابل قبولی ارائه داد و این فرآیند می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرزکاری با سرعت‌های پایین باشد.

## ۵- مراجع

- [1] R. K. Verma, S. Datta, and P. K. Pal, "Machining of unidirectional glass fibre reinforced polymers (ud-gfrp) composites," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 4, p. 49, 2015.
- [2] M. A. Karataş and H. Gökkaya, "A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials," *Defence Technology*, vol. 14, pp. 318-326, 2018.
- [3] P. P. Raj and A. E. Perumal, "Taguchi analysis of surface roughness and delamination associated with various cemented carbide K10 end mills in milling of GFRP," *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 3, pp. 58-64, 2010.
- [4] M. El-Hofy, S. Soo, D. Aspinwall, W. Sim, D. Pearson, and P. Harden, "Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP," *Procedia Engineering*, vol. 19, pp. 94-99, 2011.
- [5] O. Pecat, R. Rentsch, and E. Brinksmeier, "Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP," *Procedia Cirp*, vol. 1, pp. 466-470, 2012.
- [6] M. Khairusshima, C. C. Hassan, A. Jaharah, and A. Amin, "The effect of milling parameters on laminated carbon fibre reinforced plastic (CFRP)," *Jurnal Teknologi*, vol. 59, 2012.
- [7] N. Naresh, K. Rajasekhar, and P. V. Reddy, "Parametric analysis of GFRP composites in CNC milling machine using Taguchi method," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 6, pp. 102-111, 2013.
- [8] M. Jenarthanan and R. Jeyapaul, "Optimisation of machining parameters on milling of GFRP composites by desirability function analysis using Taguchi method," *International journal of Engineering, science and Technology*, vol. 5, pp. 22-36, 2013.
- [9] H. Wang, J. Sun, J. Li, L. Lu, and N. Li, "Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, pp. 1517-1525, 2016.
- [10] A. Azmi, "Monitoring of tool wear using measured machining forces and neuro-fuzzy modelling approaches during machining of GFRP composites," *Advances in Engineering Software*, vol. 82, pp. 53-64, 2015.
- [11] V. Sheth, A. Mehta and A. Gharal, "Experimental Investigation and Optimization of Milling Parameters in the Machining of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Material using PCD Tool," *International Journal of Science Technology and Engineering*, 2(4): ISSN (online): 2349-784X, 2015.
- [12] J. Babu and J. Philip, "Experimental studies on effect of process parameters on delamination in drilling GFRP composites using Taguchi method," *Procedia materials science*, vol. 6, pp. 1131-1142, 2014.
- [13] S. Amini, M. Baraheni, M. Moeini Afzal, "Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites," *Journal of science and technology of composites*, vol. 5, No. 1, pp. 41-50, 2018 (In persian).
- [14] D. Ozkan, M. S. Gok, H. Gokkaya, and A. C. Karaoglanli, "The effects of cutting parameters on tool wear during the milling of CFRP composites," *Materials Science*, vol. 25, pp. 42-46, 2019.
- [15] M. A. N. Rashid, Z. M. Zain, M. N. Khairusshima, W. I. Noor, M. Mullah, and S. A. Khan, "Analysis and modelling of surface roughness in milling of JFRP composite using central composite design," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, p. 012013.
- [16] G. Liu, H. Chen, Z. Huang, F. Gao, and T. Chen, "Surface quality of staggered PCD end mill in milling of carbon fiber reinforced plastics," *Applied Sciences*, vol. 7, p. 199, 2017.
- [17] M. N. Khairusshima and I. Sharifah, "Study on tool wear during milling CFRP under dry and chilled air machining," *Procedia engineering*, vol. 184, pp. 506-517, 2017.
- [18] R. K. P. MATERIALA, "Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon-fiber-reinforced polymer composite material," *Materiali in tehnologije*, vol. 50, pp. 591-600, 2016.
- [19] H. Chibane, A. Morandeau, R. Serra, A. Bouchou, and R. Leroy, "Optimal milling conditions for carbon/epoxy composite material using damage and vibration analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, pp. 1111-1121, 2013.
- [20] S. Ghalme, A. Mankar, and Y. Bhalerao, "Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method," *SpringerPlus*, vol. 5, pp. 1-9, 2016.
- [21] M. N. Khairusshima, A. N. Aqella, and I. Sharifah, "Optimization of milling carbon fibre reinforced plastic using RSM," *Procedia engineering*, vol. 184, pp. 518-528, 2017.
- [22] P. Patel, V. Chaudhary, K. Patel, and P. Gohil, "Milling of polymer matrix composites: a review," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13, pp. 7455-7465, 2018.