



Optimization of Drilling Parameters of Carbon Fiber Composites using RSM-Based Utility Function



ARTICLE INFO

Authors

Tahmasbi V^{1*},
Aeinehbandi S¹,
Ahadi R¹,

Arak university of technology, Arak, Iran

* Correspondence

Address: arak university of technology,
Arak, Iran
Tahmasbi@arakut.ac.ir

How to cite this article

Tahmasbi V, Aeinehbandi S, Ahadi R. Optimization of Drilling Parameters of Carbon Fiber Composites using RSM-Based Utility Function. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):237-243.

ABSTRACT

This paper deals with drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite filled with carbon nanotube (CNT) using response surface method (RSM) based utility function. In the drilling of CFRP composites with a hybrid metal base, the additional advance force and pleat height reduce the performance of the composite. Therefore, to improve the performance of the hybrid metal matrix composite, the advancing force and the pleat height of the composite are minimized. Hence, the advancing force and pleat height are the factors considered in the present research and are the main responses that are minimized using the RSM-based utility function. Four important input factors such as drilling speed, feed rate, CNT percentage and drill helix angle are considered to analyze the performance of the drilling process. The results showed that the advance rate is a very influential parameter that affects the advance force and pleat height in hybrid metal matrix composites. During the drilling operation, due to the mutual rubbing of the CNT abrasive particles, it causes extensive surface damage such as holes, cracks, and fibers coming out. The ANOVA results show that the experimental data are well correlated at the 95% confidence interval, and this technique can be very useful and reliable for predicting drilling parameters of CFRP metal matrix composites.

Keywords Carbon Fiber, Composit, Carbon Nanotube, ...

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۲۳۷-۲۴۳



بهینه سازی پارامترهای سوراخکاری کامپوزیت های فیبر کربنی با استفاده از تابع مطلوبیت مبتنی بر RSM



چکیده

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

وحید طهماسبی^۱
سپهر آئینه بندی^۱
رسول احدی^۱

^۱ دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* نویسنده مسئول

آدرس: دانشگاه صنعتی اراک، اراک
Tahmasbi@arakut.ac.ir

این مقاله به سوراخکاری کامپوزیت پلیمری تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) پر شده با نانولوله کربنی (CNT) با استفاده از تابع مطلوبیت مبتنی بر روش سطح پاسخ (RSM) می‌پردازد. در سوراخکاری کامپوزیت های CFRP زمینه فلزی هیبریدی، نیروی پیشروی اضافی و ارتفاع پلیسه باعث کاهش عملکرد کامپوزیت می شود. بنابراین، برای بهبود عملکرد کامپوزیت زمینه فلزی هیبریدی، نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه کامپوزیت به حداقل می رسد. از این رو، نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه عواملی هستند که در تحقیق حاضر در نظر گرفته می‌شوند و پاسخ‌های اصلی هستند که با استفاده از تابع مطلوبیت مبتنی بر RSM به حداقل می‌رسند. چهار عامل ورودی مهم مانند سرعت سوراخکاری، نرخ پیشروی، درصد CNT و زاویه ماریچ متنه برای تجزیه و تحلیل عملکرد فرآیند سوراخکاری در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که نرخ پیشروی پارامتر بسیار تأثیرگذاری است که بر نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه در کامپوزیت های زمینه فلزی هیبریدی تأثیر می‌گذارد. در حین عملیات سوراخکاری، به دلیل مالش متقابل ذرات ساینده CNT باعث آسیب های سطحی گسترده مانند سوراخ ها، ترک ها و بیرون آمدن الیاف می شود. نتایج ANOVA نشان می‌دهد که داده‌های تجربی در فاصله اطمینان ۹۵ درصد به خوبی همبستگی دارند و این تکنیک می‌تواند برای پیش‌بینی پارامترهای سوراخکاری کامپوزیت ماتریس فلزی CFRP بسیار مفید و قابل اعتماد باشد.

کلیدواژه‌ها کامپوزیت پلیمری، فیبر کربن، نانولوله کربنی و ...

۱- مقدمه

وزنی اضافه شدند. این مخلوط در دمای اتاق به مدت ۴۸ ساعت تحت شرایط آب بندی به هم زده شد تا محلول اپوکسی پر از CNT همگن ساخته شود. کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) به لایه های ۳۰۰ میلی متر در ۳۰۰ میلی متر با زاویه ۰، ۹۰، ۴۵ درجه تبدیل می شوند. وزنه هایی به تنظیمات اضافه می شود تا مقدار اضافی رزین و مخلوط سخت کننده حذف شود. صفحه کامپوزیت پر شده با نانولوله کربنی CNT همانطور که در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. کامپوزیت پلیمری تقویت شده با فیبر کربن پر شده با نانولوله کربنی

۲-۲- طراحی تجربی

این آزمایش با ۲۹ اجرا بر اساس ماتریس طراحی RSM انجام شد. ماتریس طراحی بر اساس تعداد عوامل ورودی برنامه ریزی شده برای آزمایش های سوراخکاری انتخاب شد. پارامترهای ورودی و محدوده مربوط به آنها که در آزمایش انتخاب شده اند در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای ورودی و محدوده آنها

پارامترها	محدوده
(N) سرعت سوراخکاری	RPM ۵۰۰-۱۱۰۰
(f) نرخ پیشروی	۰/۰-۴/۸ (mm/min)
درصد نانولوله کربنی	۵-۳
زاویه مته	۱۲۰-۱۱۰

۳- روش آزمایشی

آزمایش سوراخکاری با استفاده از یک مرکز ماشینکاری CNC عمودی انجام شد. هر نمونه کامپوزیت پلیمری تقویت شده با فیبر کربن که قرار بود سوراخ شود به اندازه های ۱۰۰mm*۱۰۰mm بریده شد. مته کاربید جامد برای انجام هر اجرا درگیر در ماتریس طراحی استفاده شد. زاویه ماریچ ابزار مته کاربید به ترتیب 011۰، 011۵ و 01۲۰ با توجه به دنباله اجرای آزمایشی در ماتریس طراحی حفظ شد. دو پاسخ یعنی نیروی پیشروی در محور z و ارتفاع پلیسه به عنوان پاسخ در تحقیق حاضر در نظر گرفته شد. نمایش شماتیک فرآیند سوراخکاری در شکل ۲ و ماتریس طراحی و پاسخ مربوط به آنها به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است.

پلاستیک های تقویت شده با فیبر کربن (CFRPs) به دلیل خواص مکانیکی برجسته خود به طور گسترده در کاربردهای مهندسی مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند [۲۹]. بنابراین، تولید محصولات سبک وزن را امکان پذیر می کند و ساختار عمر سرویس آنها را افزایش می دهد. در دهه های گذشته مواد فلزی به طور گسترده ای با CFRP جایگزین شده اند. با توجه به رشد کاربردهای مهندسی با کامپوزیت ها، نیاز به یک مطالعه سیستماتیک برای ویژگی های ماشینکاری آنها پیش بینی شد. پارامترهای ماشینکاری کارآمد و اقتصادی مورد نیاز برای بدست آوردن پروفیل و ابعاد دلخواه کامپوزیت. با این حال، به خوبی شناخته شده است که بسیاری از عوامل موثر بر خواص مکانیکی CFRP در طول بارگذاری. به خصوص در طول فرآیندهای ساخت، عواملی مانند دما، فشار و زمان پردازش ممکن است منجر به ترک خوردگی، لایه شدن الیاف و شکستگی در کامپوزیت ها شود که بر خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده تأثیر می گذارد [۳]. از این رو کامپوزیت ها را می توان به طور قابل توجهی توسط رزین ها، افزودن نانو پرکننده و روش چیدمان الیاف و غیره اصلاح کرد. بنابراین، تیمارهای سطحی متعددی برای بهبود ویژگی های چسبندگی سطحی کامپوزیت های پلیمری از جمله روش الکتروشیمیایی، تصفیه پلاسما و روش پرتودهی و اکسیداسیون با انرژی بالا ایجاد شده است. [۴]. اگرچه نانو ذرات پراکنده همگن برای افزایش استحکام سطحی و سختی کامپوزیت اهمیت زیادی دارند. بنابراین، افزایش مقدار افزودن نانوذرات ممکن است منجر به پایان ضعیف سطح، و افزایش نیروی پیشروی شود که باعث سایش بیش از حد ابزار می شود، سوراخ ها و پلیسه های متعددی را نشان می دهد [5]. بنابراین، با انتخاب پارامترهای ماشینکاری مناسب می توان نیروی پیشروی را به حداقل رساند و پلیسه و گودال را در حین ماشینکاری کامپوزیت کاهش داد. بنابراین، با توجه به موارد فوق، یک مطالعه سیستماتیک دقیق با استفاده از تابع مطلوبیت مبتنی بر RSM انجام شد. مدل ریاضی با استفاده از RSM برای مدل سازی و تحلیل عملکرد در سوراخکاری کامپوزیت های زمینه فلزی هیبریدی توسعه داده شد.

۲- راه اندازی آزمایشی

۲-۱- مواد و روش ها

الیاف کربن از لایه تک لایه با قطر ۵-۱۰ میکرومتر با ضخامت ورق ۵ میلی متر برای انجام فرآیند سوراخکاری ساخته شد. ۶۰٪ رزین و ۴۰٪ هاردنر به نسبت لازم با هم مخلوط می شوند و زمان ژل اندازه گیری می شود. علاوه بر آن ۵ درصد از نانولوله های کربنی با اندازه های ۵۰ تا ۸۰ نانومتر به رزین اپوکسی مایع بر اساس کسر

زاویه مته (θ) مربوط می شود. سطح به صورت زیر نشان داده می شود.

$$f = f(N, f, \%CNT) \text{ نیروی پیشروی}$$

$$f = f(N, f, \%CNT) \text{ ارتفاع پلیسه}$$

مدل سطح پاسخ چند جمله ای مرتبه دوم که برای ارزیابی اثرات پارامتری پارامترهای فرآیند سوراخکاری استفاده می شود به شرح زیر است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

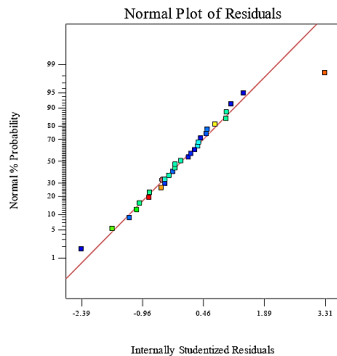
در جایی که β_0 میانگین پاسخ است، β_i ، β_{ii} و β_{ij} ضرایبی هستند که به اثرات عمده و اثر متقابل پارامترها بستگی دارند و ϵ خطای آماری است (۱۴). سطح پاسخ مرتبه دوم برای نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$\begin{aligned} \text{نیروی پیشروی} = & +42.61 + 33.98 * A + 11.08 * B + \\ & 4.66 * C + 2.82 * D + 11.60 * A * B + 6.70 * A * C + \\ & 2.72 * A * D + 0.30 * B * C + 0.59 * B * D + 9.68 * \\ & C * D + 11.63 * A^2 - 5.23 * B^2 - 8.42 * C^2 - 3.80 * \\ & D^2 \end{aligned}$$

ارتفاع پلیسه

$$\begin{aligned} & +0.28 + 0.13 * A - 1.667E - 003 * B - 0.029 * C \\ & + 0.064 * D - 0.033 * A * B - 0.018 \\ & * A * C - 0.050 * B * C - 2.500E \\ & - 003 * B * D + 9.250E - 003 * A^2 \\ & - 0.074 * B^2 - 0.066 * C^2 - 0.051 \\ & * D^2 \end{aligned}$$

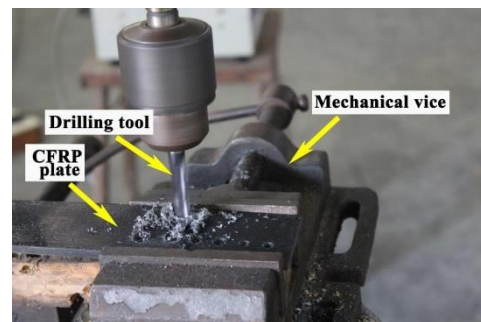
ANOVA برای تخمین معناداری مدل در سطح معنی داری ۹۵ درصد استفاده می شود. هدف اصلی از انجام آنالیز واریانس تخمین برهمکنش و اثرات قابل توجه بر نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه فرآیند سوراخکاری است. در ANOVA، کفایت مدل توسعه یافته با مقادیر R-Sq مطابقت داشت. در تحقیق حاضر، R-Sq برای نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه به ترتیب ۰/۹۹۷۴ و ۰/۹۹۵۳ به دست آمد. مقادیر بزرگ R-Sq مطلوب است. بنابراین، مقدار R-Sq موجود نشان دهنده همبستگی بالا بین مقادیر تجربی و پیش بینی شده است. همچنین مقادیر تجربی و پیش بینی شده فوق در شکل ۳ و شکل ۴ ترسیم شده اند. از این رو مدل ریاضی پیش بینی شده بسیار مفید است و نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه کامپوزیت CFRP پر شده با نانو ذرات CNT را در فرآیند سوراخکاری در محدوده فاکتورها پیش بینی می کند. مطالعه کرد.



شکل ۳. مقادیر تجربی در مقابل پیش بینی شده نیروی پیشروی

جدول ۲. ماتریس طراحی و پاسخ های مربوط به آنها

شماره آزمایش	اجرا (RUN)	سرعت چرخشی (N)	نرخ پیشروی (mm/min)	درصد CNT	زاویه مته (θ)	نیروی پیشروی (N)	ارتفاع پلیسه (mm)
۱	۱۰	۵۰۰	۴	۴	۱۱۵	۱۵/۷۵	۰/۰۲
۲	۹	۱۱۰۰	۴	۴	۱۱۵	۵۸/۵	۰/۳۶
۳	۲۵	۵۰۰	۸	۴	۱۱۵	۱۵/۲	۰/۰۹
۴	۲۴	۱۱۰۰	۸	۴	۱۱۵	۱۰۴/۲۳	۰/۱۳
۵	۱۱	۸۰۰	۶	۳	۱۱۰	۳۳/۱۷	۰/۱۲
۶	۱۸	۸۰۰	۶	۵	۱۱۰	۲۲/۱۴	۰/۰۶
۷	۸	۸۰۰	۶	۳	۱۲۰	۱۸/۱۶	۰/۲۶
۸	۴	۸۰۰	۶	۵	۱۲۰	۴۵/۸۵	۰/۱۲
۹	۱۷	۵۰۰	۶	۴	۱۱۰	۱۲/۳۶	۰/۰۲
۱۰	۱۹	۱۱۰۰	۶	۴	۱۱۰	۸۰/۱۴	۰/۲۹
۱۱	۷	۵۰۰	۶	۴	۱۲۰	۱۶/۸۶	۰/۱۴
۱۲	۵	۱۱۰۰	۶	۴	۱۲۰	۹۵/۵	۰/۴۱
۱۳	۲۱	۸۰۰	۴	۳	۱۱۵	۱۵/۴	۰/۱۲
۱۴	۱۴	۸۰۰	۸	۳	۱۱۵	۳۵/۶۸	۰/۲۱
۱۵	۲	۸۰۰	۴	۵	۱۱۵	۲۳/۱۸	۰/۱۶
۱۶	۲۶	۸۰۰	۸	۵	۱۱۵	۴۴/۶۸	۰/۰۵
۱۷	۱۲	۵۰۰	۶	۳	۱۱۵	۱۴/۳۳	۰/۰۸
۱۸	۲۰	۱۱۰۰	۶	۳	۱۱۵	۶۵/۶۷	۰/۳۸
۱۹	۳	۵۰۰	۶	۵	۱۱۵	۱۲/۱۷	۰/۰۶
۲۰	۲۲	۱۱۰۰	۶	۵	۱۱۵	۹۰/۳	۰/۲۹
۲۱	۲۹	۸۰۰	۴	۴	۱۱۰	۲۱/۱۷	۰/۰۹
۲۲	۲۷	۸۰۰	۸	۴	۱۱۰	۴۲/۹۴	۰/۰۹
۲۳	۶	۸۰۰	۴	۴	۱۲۰	۲۲/۶۳	۰/۲۲
۲۴	۱	۸۰۰	۸	۴	۱۲۰	۴۶/۷۵	۰/۲۱
۲۵	۱۵	۸۰۰	۶	۴	۱۱۵	۴۲/۴۸	۰/۲۶
۲۶	۱۶	۸۰۰	۶	۴	۱۱۵	۴۲/۱۸	۰/۲۷
۲۷	۱۳	۸۰۰	۶	۴	۱۱۵	۴۱/۶۳	۰/۲۹
۲۸	۲۳	۸۰۰	۶	۴	۱۱۵	۴۱/۸۴	۰/۲۸
۲۹	۲۸	۸۰۰	۶	۴	۱۱۵	۴۴/۹۴	۰/۲۸



شکل ۲. نمایش شماتیک فرآیند سوراخکاری

۴- مدلسازی پارامترهای فرآیند با استفاده از RSM

روش شناسی سطح پاسخ (RSM) یک تکنیک آماری است که برای مدل سازی، بهینه سازی و تحلیل مسائل استفاده می شود (۶-۱۰). همچنین برای ایجاد رابطه بین پارامترهای فرآیند سوراخکاری ورودی و پاسخ های مورد نیاز استفاده می شود. معمولاً هدف برآورد مقادیر پارامترهای فرآیند ورودی در فرآیند سوراخکاری است که در آن پاسخ ها بهینه می شوند. بهینه ممکن است حداقل یا حداکثر باشد به علاقه کاربر به آزمایش بستگی دارد. از این رو RSM به طور گسترده در بسیاری از حوزه های کاربردی به منظور بدست آوردن مقادیر بهینه در فرآیندهای مربوطه استفاده می شود (۱۱-۱۳). نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه کامپوزیت های CFRP به سرعت چرخشی (N)، نرخ پیشروی (f)، درصد CNT (% CNT) و

راه حل با مطلوبیت بالا ترجیح داده می شود. بنابراین، بهترین سه ترکیب از مقادیر مطلوبیت به دست آمده و پارامترهای فرآیند ورودی پیشنهادی متناظر با آنها در جدول ۴ ارائه شده است.

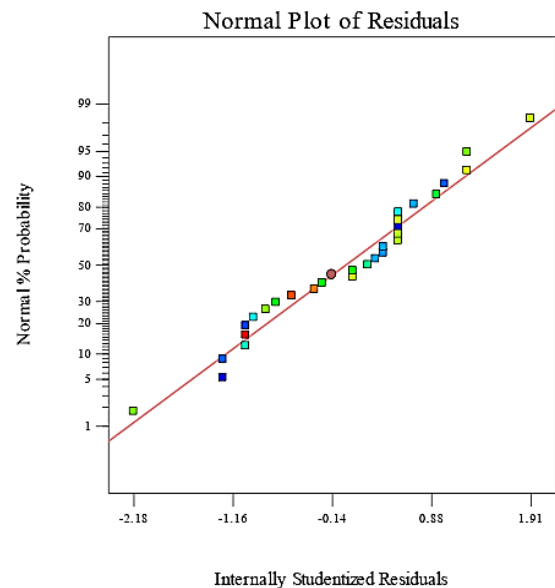
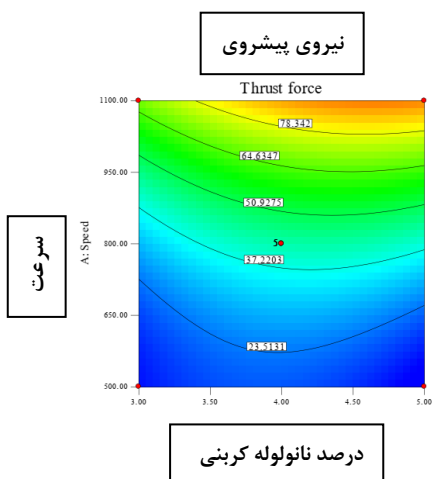
جدول ۴. مقادیر مطلوبیت

شماره	سرعت سوراخکاری (N)	نرخ پیشروی (f)	درصد CNT
۱	۵۱۱/۵۶	۴/۱۱	۴/۷۴
۲	۵۳۸/۴۴	۴/۵۷	۴/۹۹
۳	۵۵۱/۷۲	۸	۴/۵۵
۴	۵۰۲/۲۵	۴	۴/۹۸

زاویه مته (θ)	نیروی پیشروی (T)	ارتفاع پلیسه (h)	مطلوبیت
۱۱۲/۴۸	۷/۵۵۳۱۳	-۰/۰۰۸۶۷	۱ انتخاب شده
۱۱۱/۱	۷/۰۹۰۰۶	-۰/۰۳۰۸	۱
۱۱۲/۵۸	۱۱/۷۹۲۲	-۰/۰۱۱۶۹	۱
۱۱۶/۶۸	۷/۸۵۵۸۵	-۰/۰۱۹۷۲	۱

۶- نتیجه و بحث

نمودارهای کانتور برای سرعت سوراخکاری، نرخ پیشروی، درصد CNT و زاویه مته بر نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه در شکل ۵ ارائه شده است. افزایش نرخ پیشروی افزایش نیروی پیشروی فرآیند سوراخکاری و بالعکس. بنابراین، افزایش نیروی پیشروی، مواد را به اندازه پیشرفت ترک خوردگی پیوند سطحی بزرگتر خم می کند، که منجر به تشکیل سوراخهای بزرگتر می شود. افزایش درصد وزنی CNT باعث افزایش نیروی پیشروی می شود. وجود افزودن CNT در ماتریس فلزی کامپوزیت، استحکام کششی، سختی و مقاومت حرارتی کامپوزیت را افزایش می دهد (۱۵، ۱۶). این را می توان به افزایش شکنندگی کامپوزیت نسبت داد که باعث کاهش لبه ساخته شده در سوراخکاری کامپوزیت های هیبریدی می شود. افزایش زاویه ماریچج مته باعث افزایش نیروی پیشروی فرآیند سوراخکاری می شود در حالی که ارتفاع پلیسه کامپوزیت کاهش می یابد. همانطور که مته پیشروی می کند، یک نقطه محوری تشکیل می دهد و در نتیجه ارتفاع پلیسه کامپوزیت ماتریس فلزی را کاهش می دهد (۱۷).



شکل ۴. مقادیر تجربی در مقایسه با مقادیر پیش بینی شده ارتفاع پلیسه

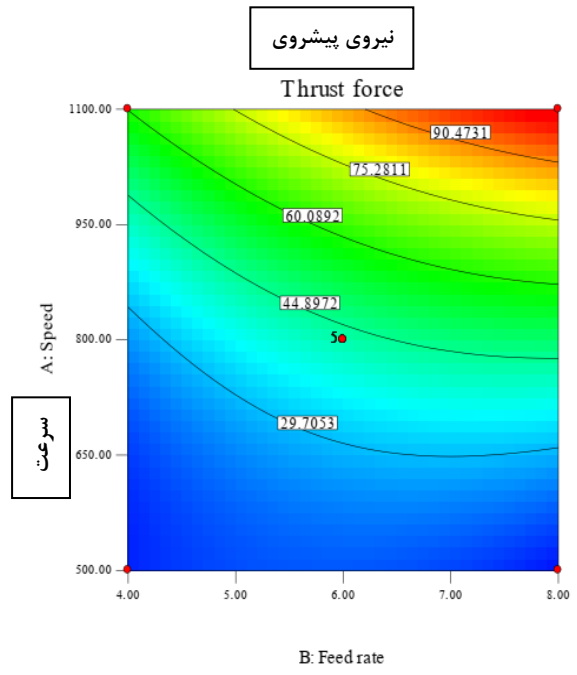
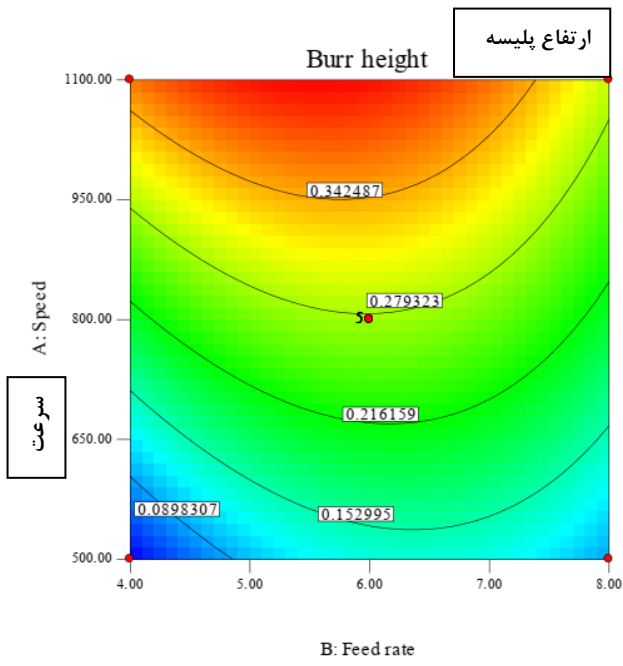
۵- بهینه سازی با استفاده از تابع مطلوبیت مبتنی بر RSM

Derringer و Suich (۱۹۸۰) یک تکنیک بهینه سازی چند پاسخی به نام تابع مطلوبیت را پیشنهاد کردند. تابع مطلوبیت کلی سیستم چند پاسخی را می توان با ترکیب تابع مطلوبیت فردی تخمین زد. تابع مطلوبیت را می توان به صورت $D = 1w_1$ نشان داد. $w_2 \dots w_n$ که در آن $0 < w_j < 1$ مقدار وزن داده شده برای اهمیت متغیر پاسخ z است و $\sum w_j = 1$ $n, j=1$. تنظیمات پارامتر با ترکیب حداکثر مطلوبیت کلی در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر، هدف به حداقل رساندن نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه در فرآیند سوراخکاری کامپوزیت CFRP است. تجزیه و تحلیل بهینه سازی با استفاده از نرم افزار Design Expert انجام شد. مجموعه اهداف و اهداف پارامترهای ورودی یعنی f, N, θ و θ و پاسخ در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. اهداف، اهداف پارامترهای ورودی فرآیند سوراخکاری

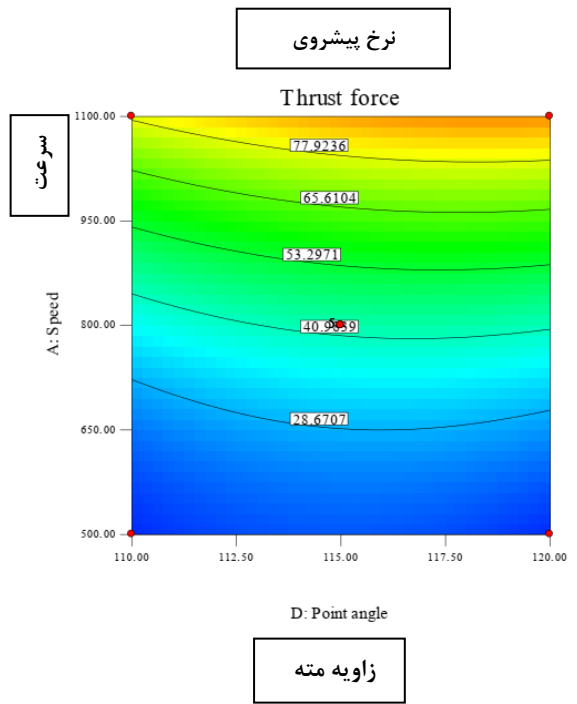
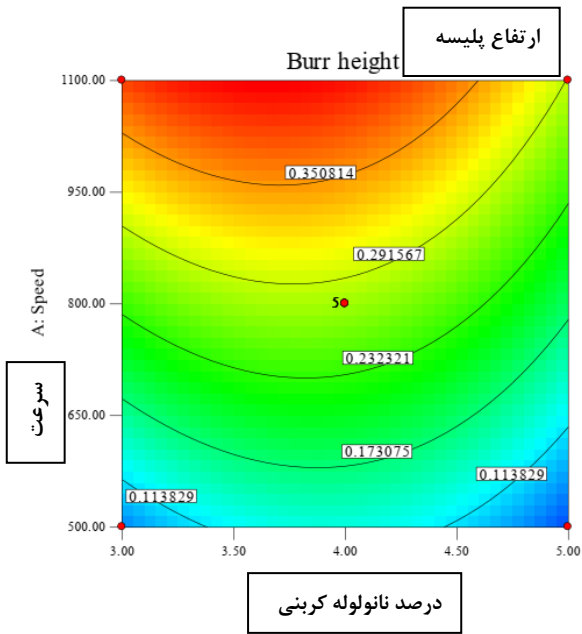
پارامترهای سوراخکاری	هدف	پایین ترین حد	بالا ترین حد
سرعت سوراخکاری (N)	در محدوده است	۵۰۰	۱۱۰۰
نرخ پیشروی (f)	در محدوده است	۴	۸
درصد CNT	در محدوده است	۳	۵
زاویه مته (θ)	در محدوده است	۱۱۰	۱۲۰
نیروی پیشروی (T)	به حداقل رساندن	۱۲/۱۷	۱۰۴/۳۳
ارتفاع پلیسه (h)	به حداقل رساندن	۰/۰۲	۰/۴۱

پایین ترین وزن	بیشترین وزن	نقوذ
۱	۱	۳
۱	۱	۳
۱	۱	۳
۱	۱	۳
۱	۱	۳
۱	۱	۳



نرخ پیشروی

نیروی پیشروی



درصد نانولوله کربنی

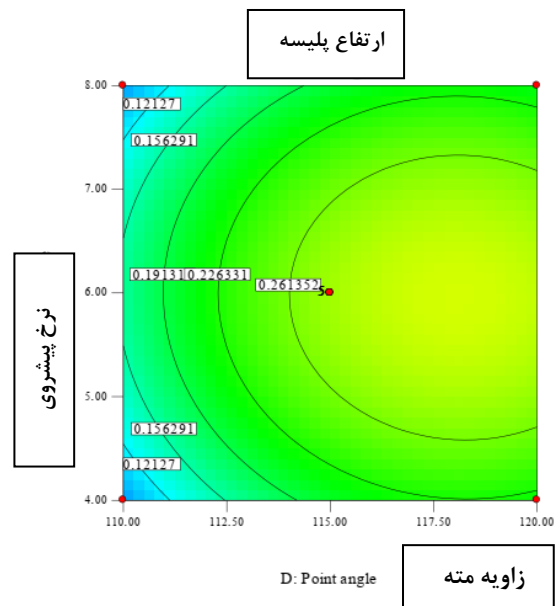
زاویه مته

بهینه‌سازی مبتنی بر مطلوبیت مبتنی بر مدل‌سازی سطح پاسخ برای به حداقل رساندن نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه در فرآیند سوراخکاری انجام شد. بر اساس آزمایش‌های انجام شده، می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

۱. مطلوبیت مبتنی بر روش سطح پاسخ در پیش بینی نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه کامپوزیت‌های ماتریس فلزی ترکیبی بسیار مفید است.
۲. نتیجه نشان می‌دهد که نرخ پیشروی پارامتر بسیار تأثیرگذاری است که بر نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه در کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی تأثیر می‌گذارد.
۳. تجزیه و تحلیل SEM سطح سوراخ سوراخکاری شده نشان دهنده نرخ پیشروی بالاتر و افزایش سرعت دوک سوراخکاری‌ها، ترک‌ها و بیرون آمدن فیبر است.
۴. نتیجه ANOVA نشان می‌دهد که داده‌های تجربی به خوبی با داده‌های پیش بینی شده در فاصله اطمینان ۹۵ درصد همبستگی دارند. از این رو، این تکنیک می‌تواند برای پیش بینی قابل اعتماد عملکردهای مختلف بسیار مفید باشد.

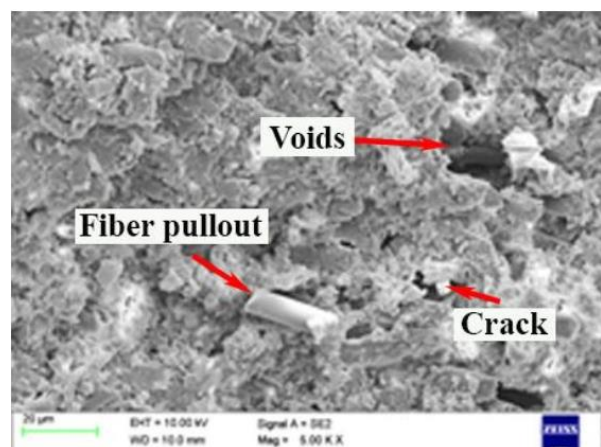
۸- مراجع

1. Xu B, Du Y, Wang P, Yan L, Sun B, Du B, Cheng Y, Hong C. Microstructure, surface emissivity and ablation resistance of multilayer coating for lightweight and porous carbon-bonded carbon fiber composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016 Nov 15;685:799-805.
2. Carvalho O, Buciumeanu M, Soares D, Silva FS, Miranda G. Evaluation of CNT dispersion methodology effect on mechanical properties of an ALSi composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015 Jun;24:2535-45.
3. Ma Y, Ueda M, Yokozeki T, Sugahara T, Yang Y, Hamada H. A comparative study of the mechanical properties and failure behavior of carbon fiber/epoxy and carbon fiber/polyamide 6 unidirectional composites. *Composite Structures*. 2017 Jan 15;160:89-99.
4. Jiang B, Zhang T, Zhao L, Huang Y. Interfacially reinforced carbon fiber composites by grafting modified methylsilicone resin. *Composites Science and Technology*. 2017 Mar 1;140:39-45.
5. Gopalakrishnan S, Murugan N. Prediction of tensile strength of friction stir welded aluminium matrix TiCp particulate reinforced composite. *Materials & Design*. 2011 Jan 1;32(1):462-7.
6. Rajakumar S, Balasubramanian V. Multi-response optimization of friction-stir-welded AA1100 aluminum alloy joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012 Jun;21:809-22.
7. Rajakumar S, Balasubramanian V. Diffusion bonding of titanium and AA 7075 aluminum alloy dissimilar joints—process modeling and optimization using desirability approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016 Sep;86:1095-112.
8. Vijayan D, Rao VS. Friction stir welding of age-hardenable aluminum alloys: a parametric approach using RSM based GRA coupled with PCA. *Journal of*



شکل ۶. نمودارهای کانتور برای ارتفاع برآمدگی

نرخ پیشروی کم نیروی پیشروی کمتری را تشویق می‌کند، بنابراین تغییر شکل پلاستیک ضعیف در کامپوزیت زمینه فلزی وجود دارد. به دلیل استحکام سطحی کم، ذرات CNT قبل از خم شدن مواد در طی تغییر شکل پلاستیک در فرآیند سوراخکاری لکه می‌شوند. افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش دما در سطح ابزار کار می‌شود بنابراین تغییر شکل پلاستیک را نرم می‌کند. بنابراین، ارتفاع پلیسه عمدتاً با افزایش سرعت دوک افزایش می‌یابد. از SEM برای تجزیه و تحلیل سطح ماشینکاری شده استفاده شد. در حین عملیات سوراخکاری، به دلیل مالش متقابل ذرات ساینده CNT باعث آسیب‌های سطحی گسترده مانند سوراخ‌ها، ترک‌ها و بیرون آمدن الیاف می‌شود (۱۸).



شکل ۷. تصویر SEM از سطح ماشینکاری شده

۷- نتیجه گیری

مدل‌های ریاضی برای تخمین نیروی پیشروی و ارتفاع پلیسه در سوراخکاری کامپوزیت‌های فیبر کربن هیبریدی توسعه داده شدند.

The Institution of Engineers (India): Series C. 2014 Apr;95:127-41.

9. Vijayan VS, Rao VS. Tensile properties improvement on friction stir welded age-hardenable aluminum alloys: an evolutionary approach using RSM based GA and SA. *Revista Tecnica De La Facultad De Ingenieria Universidad Del Zulia*. 2016:55-

10. Vijayan D, Seshagiri Rao V. Parametric optimization of friction stir welding process of age hardenable aluminum alloys- ANFIS modeling. *Journal of Central South University*. 2016 Aug;23:1847-57.

11. MM IW, Azmi AI, Lee CC, Mansor AF. Kerf taper and delamination damage minimization of FRP hybrid composites under abrasive water-jet machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Feb;94(5-8):1727-44.

12. Wang H, Qin X, Wu D, Song A. Optimization of cutting parameters in helical milling of carbon fiber reinforced polymer. *Transactions of Tianjin University*. 2018 Jan;24:91-100.

13. Vijayan D, Seshagiri VR. A parametric optimization of FSW process using RSM based grey relational analysis approach. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2014;8(2):328-7.

14. Palanikumar K, Muthukrishnan N, Hariprasad KS. Surface roughness parameters optimization in machining A356/SiC/20p metal matrix composites by PCD tool using response surface methodology and desirability function. *Machining Science and Technology*. 2008 Dec 16;12(4):529-45.

15. Palanikumar K, Karthikeyan R. Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of Al/SiC particulate composites. *Materials & design*. 2007 Jan 1;28(5):1584-91.

16. Rajmohan T, Palanikumar K. Modeling and analysis of performances in drilling hybrid metal matrix composites using D-optimal design. *The International journal of advanced Manufacturing technology*. 2013 Feb;64:1249-61.

17. Basavarajappa S, Chandramohan G, Davim JP, Prabu M, Mukund K, Ashwin M, PrasannaKumar M. Drilling of hybrid aluminium matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008 Feb;35:1244-50.

18. Vijayan D, Abhishek P, Kumar YM, Balaji P, kumar Reddy PS. Optimization of drilling parameters of carbon fiber composites using RSM based desirability function. *InIOP conference series: materials science and engineering 2018 Jul 1 (Vol. 390, No. 1, p. 012076)*. IOP Publishing.