



اثر پارامترهای فرایند سوراخ کاری بر نیروی محوری در کامپوزیت فنل پر شده توسط الیاف کتان

وحید مهدی نژاد قزوینی^۱، مسعود رخس خورشید^{۲*}، محمدرضا مرکی^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۳- مربی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: rakhshkhorshid@birjandut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۰ تیر ۱۴۰۳

پذیرش: ۱ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

ماده مرکب

سوراخ کاری

نیروی محوری

مته مارپیچ

چکیده

در این مقاله، از روش سطح پاسخ جهت بررسی اثر پارامترهای فرآیند سوراخ کاری شامل سرعت برشی، سرعت پیشروی، زاویه رأس مته و زاویه آزاد مته بر نیروی محوری در کامپوزیت فنل تقویت شده توسط الیاف کتان استفاده شده است. این ماده مرکب پایه پلیمری در بازار به عنوان فیبر استخوانی نخ دار شناخته می شود و در صنایع مختلف از جمله صنایع الکترونیک و هوافضا استفاده می شود. بررسی اثر زاویه آزاد مته به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در فرآیند سوراخ کاری از نقاط قوت مقاله حاضر است. از آنالیز واریانس جهت بررسی میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بر نیروی محوری استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده معین شد سرعت برشی (سرعت دوران ابزار) و زاویه آزاد به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر نیروی محوری دارند. همچنین با توجه به معادله درجه دوم برازش شده برای بیان نیروی محوری به عنوان تابعی از پارامترهای فرایند مورد بررسی، کمینه نیروی محوری در شرایط زاویه رأس مته 106.4 درجه و زاویه آزاد 8.4 درجه بدست آمد.

The effect of drilling process parameters on thrust force in cotton phenolic composite

Vahid Mahdinezhad Qazvini¹, Masoud Rakhshkhorshid^{2*}, Mohammadreza Maraki³

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

3- Educator, Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

* Corresponding Author's Email: rakhshkhorshid@birjandut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 30 June 2024

Accepted: 22 August 2024

Keywords:

Composite Material

Drilling

Trust Force

Spiral Drill Bit

Abstract

In this study, the response surface method is used to investigate the effect of drilling process parameters including cutting speed, feed rate, drill bit point angle and drill bit relief angle on the thrust force of cotton phenol composite. This polymer-based composite material is used in various industries including electronics and aerospace industries. Investigating the effect of the drill bit relief angle as one of the effective parameters in the drilling process is one of the strength points of this research. Design of experiments was conducted using Box-Behnken method and the response surface method was used to express the trust force as a quadratic function of investigated process parameters. Variance analysis was used to check the influence of each parameter on the trust force. According to the obtained results, it was determined that cutting speed (i.e. tool revolution speed) and drill bit relief angle have the greatest and least effect on the trust force, respectively. Also, according to the quadratic equation fitted to express the trust force as a function of the investigated process parameters, the minimum trust force was obtained in the conditions of the drill bit point angle of 106.4 degrees and the drill bit relief angle of 8.4 degrees.

Please cite this article using:

Mahdinezhad Qazvini V, Rakhshkhorshid M, Maraki M. The effect of drilling process parameters on thrust force in cotton phenolic composite. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Oct 22;11(8):1-9. doi: 10.22034/ijme.2024.465446.1980 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

سوراخ کاری یکی از پرکاربردترین فرایندهای ماشین کاری در ساخت و تولید است. به عنوان مثال در ساخت بال یک هواپیمای مسافری بوئینگ بیش از یک میلیون سوراخ ایجاد می شود [۱]. گرچه، مته‌ها می‌توانند سوراخ‌هایی بادقت مناسب ایجاد کنند؛ ولی، در برخی صنایع که دقت و کیفیت سوراخ خیلی مهم است از مته به عنوان یک ابزار خشن تراشی قبل از فرایندهای نظیر برقوقاری، داخل تراشی و سنگ زنی استفاده می‌شود [۲]. تحقیقات جدید نشان داده است حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد زمان متوسط ماشین کاری قطعات گوناگون مربوط به سوراخ کاری است [۳] که نشان دهنده اهمیت این فرایند در فرایند تولید یک محصول است.

مواد مرکب زمینه پلیمری از یک چسب پلیمری مانند رزین اپوکسی، رزین پلی‌استر، رزین فنولیک همراه با الیاف به عنوان عامل عنصر تقویت کننده تشکیل می‌شود. الیاف یا رشته در این گونه از ماده مرکب می‌تواند کربن، شیشه، کتان یا کولار باشد. مواد مرکب پلیمری با توجه به خواص مطلوبی که دارند در بسیاری از صنایع از جمله صنایع الکترونیک و هوافضا استفاده می‌شوند. کم کردن وزن سازه، مقاومت به خوردگی، مقاومت به خستگی، سهولت شیوهای ساخت و امکان ساخت شکل‌های خیلی پیچیده با روش‌های آسان از مهم‌ترین مزایای استفاده از مواد مرکب پایه پلیمری در صنایع مختلف است. سوراخ کاری یکی از روش‌های متداول ایجاد اتصال بین سازه‌های از جنس مواد تقویت شده با الیاف است [۴]. در مقاله انارقی و همکاران [۵] از طراحی آزمایش به روش تاگچی L59 برای بررسی سوراخ کاری کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت شده با الیاف آرامید با ابزاری از جنس کارباید تنگستن استفاده شده است. به کمک نتایج تحقیق کمترین نیروی محوری و گشتاوری جهت کاهش جدایش لایه‌ای مواد تعیین شده است. همچنین، بر اساس نتایج حاصل از تحقیق از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک جهت پیش‌بینی جدایش لایه‌ای استفاده شده است. از روش سطح پاسخ جهت بررسی اثر پارامترهای فرایند (سرعت دوران ابزار، سرعت پیشروی و زاویه رأس مته و قطر مته) بر نیروی محوری و گشتاور استفاده شده است. نتایج نشان داده است که زاویه رأس مته بیشترین تأثیر را بر نیروی محوری و گشتاوری دارد. علاوه بر این، استفاده از سرعت دوران بالا، نرخ پیشروی پایین و زاویه رأس مته ۱۱۸ درجه برای کاهش جدایش لایه‌ای در سوراخ کاری کامپوزیت لایه‌ای تقویت شده توسط الیاف آرامید پیشنهاد شده است. در مقاله پارامشواران و همکاران [۶] فرایند سوراخ کاری ماده کامپوزیت اپوکسی تقویت شده توسط الیاف کولار با هدف یافتن پارامترهای بهینه برای کاهش نیروهای محوری و گشتاوری بررسی شده است. حرارت ایجاد شده در ناحیه سوراخکاری در حین فرایند سوراخکاری توسط دوربین تصویربرداری حرارتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای انجام آزمایشات از مته‌های ماریپچ معمولی، مته هسته، مته مخروطی پله‌ای و مته چوب (شمعی) استفاده شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها معین شده است که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را بر نیروهای محوری و گشتاوری دارد و مته‌های هسته و چوب، در مقایسه با مته‌های دیگر، نیروی محوری کمتری ایجاد می‌کنند. همچنین در شرایط استفاده از مته‌های مخروطی پله‌ای و ماریپچ معمولی گرمای تولید شده در ناحیه سوراخ کاری در حین فرایند سوراخ کاری از دمای انتقال شیشه‌ای زمینه (رزین اپوکسی) بیشتر می‌شود و زمینه قادر به ارائه حمایت لازم از الیاف موجود در کامپوزیت نیست.

در مقاله سلامت طلب و دیگران [۷] پارامترهای مؤثر بر رفتار نیروی عمودی در فرایند میکروسوراخ کاری کامپوزیت چندلایه شیشه/اپوکسی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از روش طراحی آزمایش‌ها به روش عاملی کامل و روش آماری رویه پاسخ برای مدل سازی پاسخ نیروی محوری به متغیرهای سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار استفاده شده است. نتایج تحلیل آماری نشان داده است که نیروی محوری کمینه در فرایند میکروسوراخ کاری کامپوزیت چندلایه مورد مطالعه در نرخ پیشروی حداقل، سرعت دورانی حداکثر و قطرهای کوچک تر حاصل می‌شود. در مقاله ایسیک و همکاران [۸] اثر پارامترهای ماشین کاری بر مقدار آسیب در سوراخ کاری ماده مرکب تقویت شده با الیاف شیشه را با تحلیل واریانس مورد مطالعه قرار دادند و مشاهدات نشان داد که بالابردن سرعت برشی و کم کردن سرعت پیشروی سبب کاهش مقدار لایه لایه شدن در ورودی و خروجی مته می‌شود. در مقاله موهان و همکاران [۹] بوسیله روش‌های آماری تاگچی و سطح پاسخ و با در نظر گرفتن پارامتر ضخامت کامپوزیت دریافتند علاوه بر پارامترهای ماشین کاری ضخامت نمونه اثر مهم‌تری در لایه لایه شدن در زمان خروج مته دارند. لیسکو و همکاران [۱۰] نیز تاثیر پوشش دهی بر روی سطح مته را بر فرایند ساییدگی آن مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین مدلی برای ارتباط بین نیروی محوری با پارامترهای سوراخ کاری و سایش ابزار پیشنهاد دادند. در مطالعه انجام شده توسط ویچی سکار و همکاران [۱۱]، آزمایش‌های سوراخ کاری بر روی کامپوزیت‌های منیزیمی تقویت شده B4C با دو درصد حجمی تقویت کننده متفاوت (۵٪ و ۱۰٪) انجام و نتایج در شرایط مختلف برش مقایسه شد.

فرایند سوراخ‌کاری تحت شرایط مختلف برش انجام و نیروی محوری و گشتاور با استفاده از دینامومتر و زبری سطح سوراخ و تشکیل براده نیز برای شرایط مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در تحقیق انجام شده توسط طاهری و بطحائی [۱۲]، نیروی محوری، گشتاور برشی و زبری سطح قطعات متالورژی پودر بازیابی از براده‌ها و تف‌جوشی شده با استفاده از طراحی آزمایش‌ها همگام با آنالیز حساسیت بررسی شده است. به‌منظور بهینه‌سازی این فرایند و بهره‌وری هرچه بیشتر بازیابی براده‌های چدن خاکستری با استفاده از روش آسیاب پاششی از تکنیک طراحی آزمایش‌ها همگام با آنالیز حساسیت استفاده شده است. طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ انجام و چهار عامل اصلی پودر چدن، فشار تراکم، دمای تف‌جوشی و زمان تف‌جوشی به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. اثر این متغیرها بر سه خروجی نیروی محوری، گشتاور سوراخ‌کاری و زبری سطح بررسی شده است. در تحقیق انجام شده توسط قسمتی کوچکی و دیگران [۱۳]، اثر متغیرهای مختلف جهت کاهش تورق ناشی از سوراخ‌کاری در چندلایه‌های کامپوزیتی بررسی شده است. سعی شده است تاثیر متغیرهای مختلف هندسه مته، سرعت پیشروی، سرعت برش، نیروی پیشروی، پیش‌مته‌زنی و نوع خنک‌کاری بر تورق بررسی شود. در تحقیق حاضر، از روش سطح پاسخ جهت بررسی اثر پارامترهای فرایند سوراخ‌کاری شامل سرعت برشی، سرعت پیشروی، زاویه رأس مته و زاویه آزاد مته بر نیروی محوری در کامپوزیت فنل تقویت‌شده توسط الیاف کتان استفاده می‌شود. از آنالیز واریانس جهت بررسی میزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترها بر نیروی محوری استفاده می‌شود. همچنین اثر متقابل این پارامترها بر نیروی محوری بررسی خواهد شد. بررسی اثر زاویه آزاد مته به‌عنوان یکی از پارامترهای موثر در فرایند سوراخ‌کاری را می‌توان از وجوه تمایز تحقیق حاضر با سایر مطالعات مشابه به حساب آورد. ماده استفاده شده در بازار به فیبر استخوانی نخ‌دار معروف می‌باشد. در ساخت این کامپوزیت پارچه کتان و رزین فنولیک به‌عنوان پایه استفاده می‌شود. این کامپوزیت با قابلیت فوق‌العاده ماشین‌کاری و خواص برجسته الکتریکی و شیمیایی توانسته است جایگاه ویژه‌ای را در صنعت به خود اختصاص دهد. ورقه‌های نازک فیبر نخ‌دار در صنایع الکترونیک و ضخامت‌های بالای آن در ساخت چرخ دنده، قرقره، پولی، بوش و واشر کاربرد دارد.

۲- مواد و آزمایش‌ها

در این تحقیق از روش سطح پاسخ (RSM) جهت بیان نیروی محوری به‌عنوان تابعی درجه دوم از پارامترهای فرایند سوراخ‌کاری شامل سرعت برشی، سرعت پیشروی، زاویه رأس مته و زاویه آزاد مته در کامپوزیت فنل تقویت‌شده توسط الیاف کتان استفاده می‌شود. از آنالیز واریانس جهت بررسی میزان تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بر نیروی محوری استفاده می‌شود. برای سوراخ‌کاری ماده مورد مطالعه، از مته گرانوکس ساخت چین از جنس فولاد تندبر HSS با ۵ درصد کبالت به قطر ۵ میلی‌متر دارای استاندارد ISO9002 استفاده شد. در این مقاله از ۹ مته که دارای سه زاویه رأس (۱۰۵، ۱۲۰، ۱۳۵) و سه زاویه آزاد (۸، ۱۰ و ۱۲) مختلف می‌باشد، استفاده شده است. برای به‌دست آوردن زاویه رأس و زاویه آزاد گوناگون بر روی رأس مته، مطابق شکل ۱ از دستگاه سنگ جونز-شیپ-من و فیکسچر ویژه آن استفاده شد.



شکل ۱ دستگاه سنگ جونز-شیپ-من و فیکسچر ویژه جهت تیزکاری مته‌های مورد نیاز با زوایای آزاد و رأس مته مطلوب

به‌طور کلی پارامترهای ورودی و سطح‌های مربوط به آن در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱ پارامترهای ورودی و سطح‌های انتخاب شده

سطوح	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	زاویه رأس مته (درجه)	زاویه آزاد (درجه)
۱	۷/۸۵	۵۰	۱۰۵	۸
۲	۱۵/۷	۷۵	۱۲۰	۱۰
۳	۲۳/۵۵	۱۰۰	۱۳۵	۱۲

لازم به ذکر است در مقاله حاضر با توجه به قطر مته سرعت‌های برشی نشان داده شده در جدول ۱ به ترتیب با سرعت‌های دوران ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بدست می‌آید. آزمایش‌ها بر روی یک ماشین کنترل عددی مدل بریچپورت با سیستم کنترل هایدن هاین انجام و اندازه‌گیری نیروی عمودی با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی مطابق شکل ۲ مجهز به چهار کرنش سنج انجام شد. تجهیز مورد نیاز به گونه‌ای فراهم شد که امکان عبور مته پس از سوراخکاری فراهم باشد.



شکل ۲ تجهیزات فراهم شده جهت اندازه‌گیری نیروی عمودی

از طراحی آزمایش باکس بنکن استفاده شد و آزمایش‌ها مطابق جدول ۲ انجام و حداکثر نیروی عمودی به دست آمده در هر یک از آزمایش‌ها یادداشت گردید. آزمایش‌ها دو بار انجام شد و همواره نتایج نشان‌دهنده تکرارپذیری و به دست آمدن نتایج یکسان در آزمایش‌ها انجام شده بود.

۳- نتایج و بحث

در این بخش از مقاله با توجه به نتایج به دست آمده و گزارش داده شده در جدول ۲، تحلیل آماری داده‌ها ارائه می‌گردد. در ادامه، معادله سطح پاسخ درجه دوم برای بیان نیروی عمودی به عنوان تابعی از پارامترهای مورد مطالعه و همچنین نمودارهای اثرات متقابل عوامل تأثیرگذار بر نیروی محوری به صورت رویه‌های سه‌بعدی ارائه می‌شود. همچنین، بر اساس نمودارهای ارائه شده اثر هر یک از عوامل ورودی (یعنی نرخ پیشروی، سرعت برشی، زاویه آزاد مته و زاویه رأس مته) در تقابل با یکدیگر بر خروجی مسئله (یعنی نیروی محوری در فرایند سوراخ‌کاری) بررسی خواهد شد.

جدول ۲ جدول طراحی آزمایش ها به روش باکس بنکن

شماره آزمایش	سرعت برشی (متر بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی متر بر دقیقه)	زاویه رأس مته (درجه)	زاویه آزاد (درجه)	نیروی محوری (نیوتن)
۱	۱۵/۷	۷۵	۱۲۰	۱۰	۶۴
۲	۷/۸۵	۵۰	۱۲۰	۱۰	۹۰
۳	۲۳/۵۵	۷۵	۱۲۰	۱۲	۶۳
۴	۱۵/۷	۷۵	۱۲۰	۱۰	۶۴
۵	۲۳/۵۵	۷۵	۱۳۵	۱۰	۵۵
۶	۱۵/۷	۷۵	۱۲۰	۱۰	۶۴
۷	۱۵/۷	۷۵	۱۲۰	۱۰	۶۲
۸	۱۵/۷	۱۰۰	۱۲۰	۱۲	۱۱۲
۹	۷/۸۵	۷۵	۱۲۰	۸	۱۱۵
۱۰	۱۵/۷	۷۵	۱۳۵	۱۲	۸۴
۱۱	۷/۸۵	۷۵	۱۲۰	۱۲	۱۴۳
۱۲	۲۳/۵۵	۵۰	۱۲۰	۱۰	۴۱
۱۳	۱۵/۷	۵۰	۱۲۰	۱۲	۷۱
۱۴	۲۳/۵۵	۷۵	۱۲۰	۸	۵۵
۱۵	۱۵/۷	۵۰	۱۲۰	۸	۵۵
۱۶	۲۳/۵۵	۱۰۰	۱۲۰	۱۰	۵۳
۱۷	۱۵/۷	۱۰۰	۱۰۵	۱۰	۵۱
۱۸	۷/۸۵	۷۵	۱۳۵	۱۰	۱۱۷
۱۹	۷/۸۵	۱۰۰	۱۲۰	۱۰	۱۲۷
۲۰	۱۵/۷	۱۰۰	۱۳۵	۱۰	۸۶
۲۱	۱۵/۷	۷۵	۱۳۵	۸	۵۵
۲۲	۱۵/۷	۵۰	۱۰۵	۱۰	۳۳/۵
۲۳	۱۵/۷	۵۰	۱۳۵	۱۰	۶۴
۲۴	۱۵/۷	۷۵	۱۰۵	۱۲	۴۱
۲۵	۷/۸۵	۷۵	۱۰۵	۱۰	۷۲
۲۶	۱۵/۷	۷۵	۱۲۰	۱۰	۶۴
۲۷	۲۳/۵۵	۷۵	۱۰۵	۱۰	۳۰
۲۸	۱۵/۷	۱۰۰	۱۲۰	۸	۸۸
۲۹	۱۵/۷	۷۵	۱۰۵	۸	۳۷

۳-۱- تحلیل آماری

رگرسیون مرتبه ۲ بر روی داده‌های آزمایش سوراخ کاری برای متغیر پاسخ نیروی محوری انجام شد. مقدار P-Value پارامترهای مهم پراکندگی داده‌ها را ارزیابی می‌کند. مقادیر P-Value کمتر از ۰/۰۵ بدست آمده برای هر یک از جملات مدل نشان می‌دهد که عوامل پراکندگی داده‌ای کمتر و در واقع رفتاری معنی‌دار در مدل ارائه شده دارد. با حذف عوامل دارای P-Value بالاتر از ۰/۰۵ عوامل C^2 ، D^2 ، A^2 ، B ، C ، D ، A به عنوان مقادیر معنی‌دار مدل تعیین شدند و جدول ۳ تحلیل واریانس اصلاح شده نهایی را نشان می‌دهد.

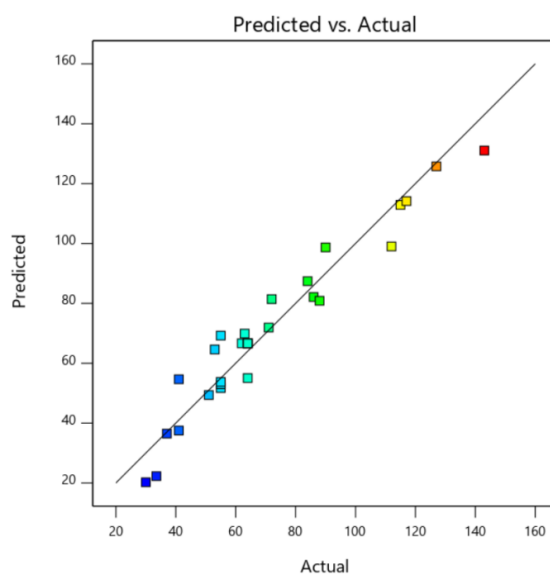
جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس نهایی برای مدل رگرسیون مرتبه دوم

منبع	مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	جمع مربعات
مدل	< 0.0001	42.90	3108.22	21757.55
سرعت برش-A	< 0.0001	154.92	11224.08	11224.08
سرعت پیشروی-B	< 0.0001	30.37	2200.52	2200.52
زاویه رأس-C	< 0.0001	44.41	3217.69	3217.69
زاویه آزاد-D	0.0013	13.67	990.08	990.08
A ²	0.0002	20.89	1513.30	1513.30
C ²	0.0002	19.36	1402.57	1402.57
D ²	0.0073	8.82	639.29	639.29

همچنین، مدل‌های ریاضی نیروی محوری به صورت معادله ۱ به دست آمد.

$$\begin{aligned} \text{Thrust Force} = & -709.63345 - 11.53842 \text{ Cutting Speed} + 0.541667 \text{ Feed Rated} \\ & + 16.49347 \text{ Point Angel} - 44.19989 \text{ Relief Angle} + 0.24339 \text{ Cutting Speed}^2 \\ & - 0.0641742 \text{ Point Angel}^2 + 2.43708 \text{ Relief Angle}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ضریب همبستگی R² برای مدل رگرسیون برابر ۹۳٪ به دست آمد که نشان دهنده برازش مناسب مدل رگرسیونی مطابق تحلیل انجام شده است. نمودار داده‌های واقعی در مقابل نمونه‌های پیش‌بینی شده در شکل ۳ برای شرایط آزمایش فرایند سوراخ کاری آورده شده است.

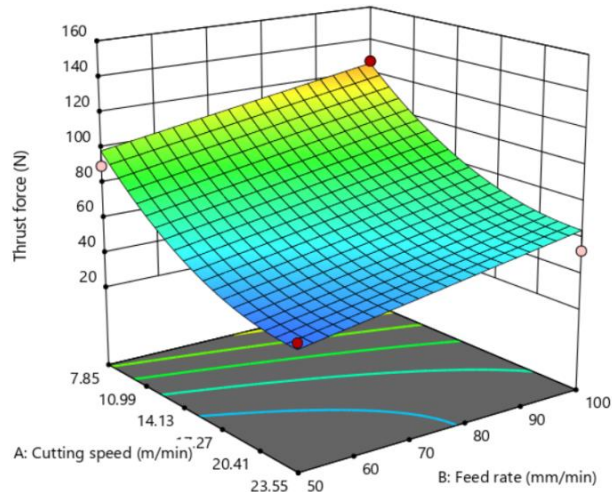


شکل ۳ نمودار داده‌های واقعی در مقابل داده‌های پیش‌بینی شده

۳-۲- اثر متقابل پارامترهای مورد بررسی فرایند سوراخ کاری در روبه پاسخ

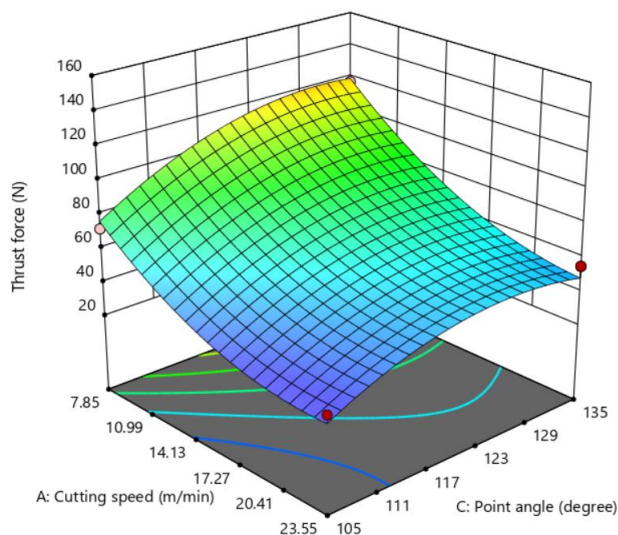
نمودارهای اثرات متقابل عوامل تأثیرگذار بر نیروی محوری به صورت روبه‌های سه‌بعدی در این بخش ارائه می‌شود. بر اساس این نمودارها می‌توان فهمید که هر کدام از عوامل ورودی (یعنی نرخ پیشروی، سرعت برشی، زاویه آزاد مته و زاویه رأس مته) نسبت به یکدیگر چه تأثیری بر خروجی مسئله (یعنی نیروی محوری در فرایند سوراخ کاری) داشته‌اند. در گزارش این نمودارها، در هر مورد هنگامی که برهم‌کنش دو عامل مورد بررسی قرار می‌گیرند، دیگر عوامل دارای مقدار ثابتی (برابر با مقدار میانگین آن‌ها) هستند. در شکل ۴ اثرات متقابل نرخ پیشروی و سرعت برشی (سرعت دورانی ابزار) بر نیروی محوری نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود به‌طور کلی با افزایش سرعت پیشروی نیروی محوری افزایش می‌یابد؛ گرچه در سرعت‌های برشی بالاتر روند افزایش نیروی محوری با افزایش سرعت پیشروی کمتر است. به‌عبارت‌دیگر افزایش سرعت دورانی ابزار از اثر افزایشی سرعت پیشروی

بر نیروی محوری می‌کاهد. نتایج مشابهی در مراجع [۱۴ و ۱۵] نیز گزارش شده است و کاهش نیروی محوری با افزایش سرعت دورانی در سرعت پیشروی ثابت به امکان خروج سریع‌تر براده نسبت داده شده است. همچنین کاهش اثر افزایشی سرعت پیشروی با افزایش سرعت دورانی نیز به امکان خروج سریع‌تر براده در سرعت‌های برشی بالاتر نسبت داده شده است.



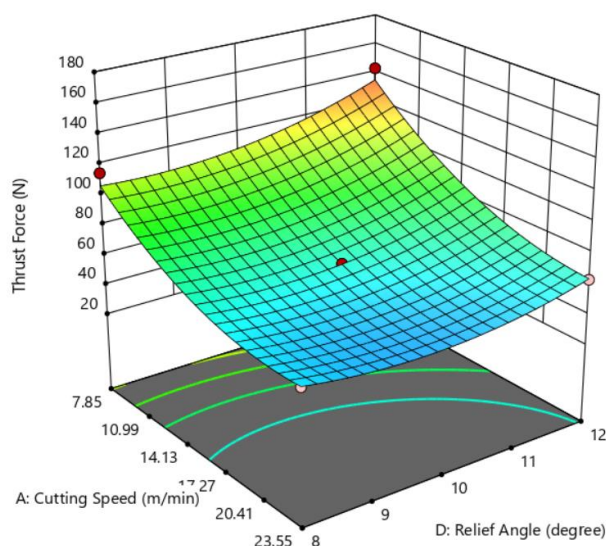
شکل ۴ نمودار اثرات متقابل نرخ پیشروی و سرعت برشی بر نیروی محوری

در شکل ۵ اثرات متقابل زاویه رأس مته و سرعت برشی بر نیروی محوری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طور کلی با افزایش سرعت برشی نیروی محوری کاهش می‌یابد. همچنین به‌طور کلی افزایش زاویه رأس مته باعث افزایش نیروی محوری می‌شود. کاهش نیروی محوری با افزایش سرعت برشی و کاهش زاویه رأس مته در سایر تحقیقات مشابه [۷] گزارش شده است.



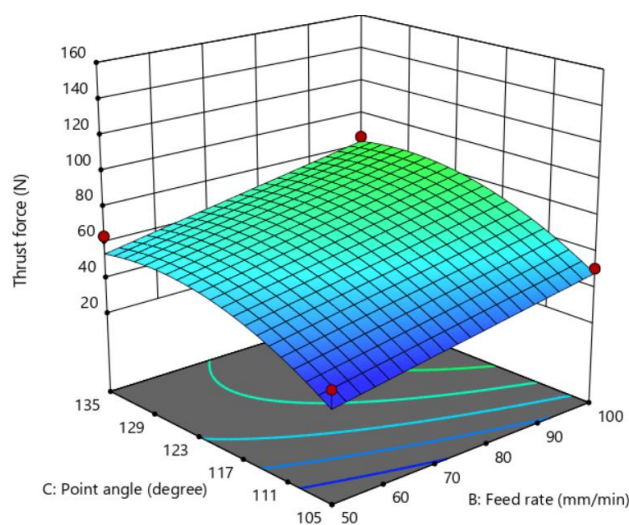
شکل ۵ نمودار اثرات متقابل زاویه رأس مته و سرعت برشی بر نیروی محوری

در شکل ۶ اثرات متقابل سرعت برشی و زاویه آزاد بر نیروی محوری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طور کلی با افزایش سرعت برشی نیروی محوری کاهش می‌یابد. همچنین به نظر می‌رسد در سرعت‌های پیشروی بالا زاویه آزاد اثری بر نیروی محوری ندارد. در سرعت‌های پیشروی پایین افزایش نیروی محوری با افزایش زاویه آزاد قابل مشاهده است. مطابق نتایج حاصل از تحلیل واریانس زاویه آزاد کمترین تأثیر را بر نیروی محوری دارد.



شکل ۶ نمودار اثرات متقابل سرعت برشی و زاویه آزاد بر نیروی محوری

در شکل ۷ اثرات متقابل سرعت پیشروی و زاویه رأس مته بر نیروی محوری نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود به طور کلی با افزایش سرعت پیشروی نیروی محوری افزایش می یابد. همچنین اثر افزایشی زاویه رأس مته بر نیروی محوری قابل مشاهده است.



شکل ۷ نمودار اثرات متقابل سرعت پیشروی و زاویه رأس مته بر نیروی محوری

۳-۳- شرایط بهینه سوراخ کاری

با توجه به معادله درجه دوم برازش شده در این مقاله (به روش سطح پاسخ) شرایط بهینه سوراخ کاری که همان شرایط حداقل نیروی محوری است به کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت به دست آمد. شرایط بهینه در سرعت برشی ۲۲/۵۷ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۵۱/۵۵ میلی متر بر دقیقه، زاویه رأس مته ۱۰۶/۴ درجه و زاویه آزاد مته ۸/۴ درجه بدست آمد که در این شرایط نیروی محوری برابر با ۲۹/۸۱۰ نیوتن بدست می آید. در نهایت با توجه به مقادیر بهینه بدست آمده توسط نرم افزار، آزمون سوراخ کاری در سه نوبت به منظور بررسی صحت بهینه سازی، انجام گردید و نیروی محوری متوسط ۳۰/۸۳ نیوتن بدست آمد که نشان دهنده خطای ناچیز ۳/۳ درصدی است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به طور تجربی تأثیر نرخ پیشروی، سرعت برشی (سرعت دورانی ابزار)، زاویه رأس و زاویه آزاد مته بر نیروی محوری حاصل از سوراخ کاری کامپوزیت فنل پر شده توسط الیاف کتان به روش سطح پاسخ مطالعه شد. نتایج کلی زیر به دست آمد:

- رابطه تجربی بین نیروی محوری و عوامل سوراخ کاری توسط روش سطح پاسخ استخراج گردید.
- نتایج نشان داد که عوامل مورد مطالعه بر نیروی محوری مؤثرند و سرعت برشی، زاویه رأس مته، سرعت پیشروی و زاویه آزاد مته به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نیروی محوری دارند.
- نمودارهای اثرات متقابل نشان داد که افزایش سرعت پیشروی، زاویه آزاد مته، زاویه رأس مته و همچنین کاهش سرعت برشی سبب افزایش نیروی محوری می گردد.
- شرایط بهینه در سرعت برشی ۲۲/۵۷ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۵۱/۵۵ میلی متر بر دقیقه، زاویه رأس مته ۱۰۶/۴ درجه و زاویه آزاد مته ۸/۴ درجه بدست آمد.

References

- [1] Bayly PV, Metzler SA, Schaut AJ, Young KA. Theory of torsional chatter in twist drills: model, stability analysis and composition to test. *J. Manuf. Sci. Eng.*. 2001 Nov 1;123(4):552-61. doi: 10.1115/1.1381399
- [2] Shaw MC, Cookson JO. *Metal cutting principles*. New York: Oxford university press; 2005.
- [3] Wang J, Zhang Q. A study of high-performance plane rake faced twist drills.: Part I: Geometrical analysis and experimental investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008 Sep 1;48(11):1276-85. doi: 10.1016/j.ijmactools.2008.03.005
- [4] Qin X, Wang B, Wang G, Li H, Jiang Y, Zhang X. Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the artificial neural network model. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014 Feb;28:713-9. doi: 10.1007/s12206-013-1135-2
- [5] Anarghya A, Harshith DN, Rao N, Nayak NS, Gurumurthy BM, Abhishek VN, Patil IG. Thrust and torque force analysis in the drilling of aramid fibre-reinforced composite laminates using RSM and MLPNN-GA. *Heliyon*. 2018 Jul 1;4(7). doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00703
- [6] Parameshwaran R, Rajasekar R, Ragavendra VH, Praveenraj N. Effect of thrust force, torque, and induced temperature on Kevlar reinforced composites during drilling process. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;45:522-8. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.162
- [7] Salamat-talab M, Tahmasbi V, Safari M, Gholami R, Ghasemi R. Statistical modelling, optimization and Sobol sensitivity analysis of effective parameters on thrust force behavior in micro-drilling of glass/epoxy laminated composites. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2020 Dec 21;10(4):225-40. doi: 10.22044/jsfm.2020.9231.3089 [In Persian]
- [8] Işık B, Ekici E. Experimental investigations of damage analysis in drilling of woven glass fiber-reinforced plastic composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010 Aug;49:861-9. doi: 10.1007/s00170-009-2440-x
- [9] Mohan NS, Kulkarni SM, Ramachandra A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007 May 7;186(1-3):265-71. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.043
- [10] Iliescu DM, Gehin D, Gutierrez ME, Girot F. Modeling and tool wear in drilling of CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010 Feb 1;50(2):204-13. doi: 10.1016/j.ijmactools.2009.10.004
- [11] Sekar KV, Gobivel K, Selvan CP, Ashwinkumaran S, Adithya DB, Chandrapraban U, Ragavendar BH. Effects of process parameters on drilling of Magnesium-reinforced with B4C composite. *Materials Today: Proceedings*. 2024 Mar 8. doi: 10.1016/j.matpr.2024.03.008
- [12] Taheri M, Bathaee SH. Investigating machining factors of recovery powder metallurgy parts, from filings and sintered by Design of experiments in conjunction with sensitivity analysis. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Sep 22;7(7):24-37. [In Persian]
- [13] Ghesmati-Kucheki H, Zakeri M, Ayatollahi MR. Investigating the effect of different variables to reduce delamination due to drilling in composite laminates. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Aug 23;8(6):15-20. [In Persian]
- [14] Giasin K, Ayvar-Soberanis S, Hodzic A. An experimental study on drilling of unidirectional GLARE fibre metal laminates. *Composite Structures*. 2015 Dec 1;133:794-808. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.007
- [15] Boughdiri I, Giasin K, Mabrouki T, Zitoune R. Effect of cutting parameters on thrust force, torque, hole quality and dust generation during drilling of GLARE 2B laminates. *Composite Structures*. 2021 Apr 1;261:113562. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113562