



بهینه‌سازی سوراخکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی AA7075 با استفاده از روش سطح پاسخ

سپهر آئینه‌بندی^۱، مجید قریشی^{۲*}، امیررضا قاسمی جبل^۱، محمد مهدی مهرافشان^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: ghoreishi@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۰ خرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۴ آبان ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

کامپوزیت زمینه فلزی

سوراخکاری

زبری سطح

نیروی محوری

سایش ابزار

چکیده

کامپوزیت‌های زمینه ریخته‌گری آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی به دلیل خواص عالی مانند وزن سبک، استحکام بالا و افزایش سختی، به طور گسترده در هواپیما و در ساخت قطعات خودرو استفاده می‌شود. در این کار تحقیقاتی از کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با AA7075/BN استفاده شده است. پودر سرامیک نیتريد بور با درصد وزنی مختلف مانند (۰، ۴ و ۸) اضافه می‌شود. آزمایش‌های سوراخکاری بر روی کامپوزیت‌های ساخته شده از طریق دستگاه سوراخکاری عمودی CNC با استفاده از مته کاملاً کاربیدی و با تغییر پارامترهای فرآیند مانند سرعت اسپیندل، پیشروی و زاویه راس مته انجام می‌شود. پس از آن با تغییر زاویه ابزار برش (۱۱۸ درجه، ۱۰۸ درجه و ۹۸ درجه)، آزمایش سوراخکاری انجام می‌شود. دینامومتر ابزار فرز برای تشخیص نیروی محوری در حین سوراخکاری استفاده می‌شود. روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی پاسخ‌های خروجی نیروی محوری و اثرات زبری سطح از کامپوزیت‌های زمینه فلزی سوراخکاری شده استفاده می‌شود. تنظیم پارامترهای آزمایشی با فاکتورهای طراحی L27 Box-Behnken و با چهار فاکتور سه سطح انجام می‌شود. این بررسی نشان داده است که پیشروی و زاویه راس از عوامل تأثیرگذار اصلی بر نیروی محوری و زبری سطح هستند. زیرا دلیل این امر آن است که با افزایش پیشروی، براده بیشتری در هر دور برداشته می‌شود و بنابراین نیروی بیشتری برای شکستن و خروج این براده‌ها نیاز است. افزایش پیشروی نیز باعث افزایش زبری سطح شده و همچنین زاویه راس و افزایش زاویه راس مته بر کیفیت سطح نهایی تأثیر دارد.

Optimization of drilling of AA7075 metal matrix composites using response surface method

Sepehr Aeinehbandi¹, Majid Ghoreishi^{2*}, Amirreza Ghasemi Jabal¹, Mohammad Mahdi Mehrafshan¹

1- MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: ghoreishi@kntu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 9 June 2024

Accepted: 14 November 2024

Keywords:

Metal Base Composite

Drilling

Surface Roughness

Axial Force

Tool Wear

Abstract

Cast aluminum matrix composites reinforced with ceramic particles are widely used in aircraft and automotive parts due to their excellent properties such as light weight, high strength, and increased stiffness. In this research work, metal matrix composites reinforced with AA7075/BN have been used. Boron nitride ceramic powder is added with different weight percentages such as (0, 4 and 8). Drilling tests on the fabricated composites are performed through a CNC vertical drilling machine using a full carbide drill and by varying the process parameters such as spindle speed, feed, and drill tip angle. After that, by changing the angle of the cutting tool (118°, 108° and 98°), the drilling test is performed. Milling tool dynamometer is used to detect the axial force during drilling. The response surface method is used to optimize the axial force output responses and surface roughness effects of perforated metal matrix composites. The adjustment of experimental parameters is done with L27 Box-Behnken design factors and with four three-level factors. This study has shown that the advance and angle of the apex are the main influencing factors on the axial force and surface roughness. Because the reason for this is that by increasing the advance, more chips are removed in each round, and therefore more force is needed to break and remove these chips. Increasing the advance also increases the surface roughness, as well as the angle of the tip and increasing the angle of the tip of the drill on the quality. The final level has an effect.

Please cite this article using:

Aeinehbandi S, Ghoreishi M, Ghasemi Jabal A, Mehrafshan MM. Optimization of drilling of AA7075 metal matrix composites using response surface method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Dec 21;11(10):32-44. doi: 10.22034/ijme.2024.461244.1969 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم به دلیل خواص جذاب وزن سبک، سختی بالا و چگالی کم از نظر درک مکانیکی و مورفولوژیکی، تأثیر زیادی در بخش‌های مهندسی فعلی مانند خودرو، قطعات هوافضا و صنایع اندام مصنوعی پیدا کرده‌اند. هدف از کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دست آوردن موادی با مقاومت در برابر سایش، استحکام ویژه بالا و پایداری حرارتی خوب در کاربردهای دمای بالا است. در سناریوی اخیر، محققان بیشتر توجه خود را به ادغام ذره نیتريد بور (2.1 g/cm^3) در ماده زمینه معطوف کرده‌اند. که خواص متمایزی مانند چگالی کم، تقویت مواد، سختی بالا، مقاومت در برابر دمای بالا و پیوند بهتر بین زمینه را فراهم می‌کند [۱]. ذرات BN چنین ویژگی‌های خاصی را نشان می‌دهند که به طور گسترده در تجهیزات زرهی، قطعات موشک، تیغه‌های هلیکوپتر، اجزای هوافضا که در معرض قرار گرفتن در معرض محیط‌های کاری پویا و گرم هستند، قابل استفاده است. این خواص منجر به افزایش علاقه تحقیقاتی در مورد ذرات نیتريد بور (BN) و تغییر درصد وزنی برای تولید AMMCها شده است [۲، ۳].

سوراخکاری از فرایندهای مهم به حساب می‌آید که در عرصه‌های نظامی، صنعتی و پزشکی کاربرد دارد [۴، ۵]. همچنین انتخاب ابزار مناسب مهم‌ترین عامل برای ایجاد سوراخ با کیفیت سطح مطلوب است. نیروی محوری بالا، سایش ابزار، سرعت براده برداری و زبری سطح تأثیرگذارترین عوامل در طول فرایند سوراخکاری هستند.

به طور کلی، از روش اندازه‌گیری نوع تماس برای مشاهده نیروی محوری استفاده می‌شود. بسته به پارامترهای فرآیند ماشینکاری، روانکاری ضعیف منجر به تولید نیروی محوری بالا و زبری سطح (SR) می‌شود. پیش‌بینی پارامترهای ماشینکاری موثر برای اطمینان از ماشینکاری مناسب مواد کامپوزیت ضروری است. برای غلبه بر این مشکلات به طراحی تجربی و تکنیک‌های بهینه‌سازی نیاز دارد. یک رویکرد یکپارچه مدل ریاضی جدید و پارامترهای بهینه‌تر را ارائه می‌دهد. روش سطح پاسخ (RSM) [۶، ۷] برای یافتن پارامترهای ماشینکاری بهینه استفاده می‌شود. نتایج برای دستیابی به زبری سطح خوب (SR) و حداقل نیروی محوری در حین سوراخکاری کامپوزیت‌ها تجزیه و تحلیل می‌شوند [۸، ۹] از مطالعات ادبیات، مشاهده می‌شود که کار تحقیقاتی محدودی بر روی سوراخکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی AA7075/BN انجام شده است. این مقاله عمدتاً بر روی بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری به منظور استاندارد کردن پاسخ‌های خروجی زبری سطح و نیروی محوری با استفاده از روش سطح پاسخ متمرکز است. تعداد بسیار کمی از محققان در مورد بهینه‌سازی پاسخ‌های خروجی و پارامترهای فرآیند گزارش داده‌اند [۱۰-۱۴].

۲- مواد و روش‌ها

آلیاژ AA7075 (2.81 g/cm^3) به عنوان ماده زمینه استفاده شد. این شامل عنصر آلیاژی مانند روی (6.1%)، منیزیم (2.9%)، مس (2%) و آلومینیوم (91.4%) است که به تسریع تراکم بالاتر در نتیجه عملیات حرارتی کمک می‌کند. خواص مکانیکی و پیکربندی شیمیایی آلومینیوم ۷۰۷۵. ذره سرامیکی نیتريد بور با اندازه ذرات متوسط ≥ 10 میکرومتر به عنوان یک ماده تقویت کننده استفاده شده است که دارای مقاومت بسیار عالی در برابر شوک حرارتی با خود روانکاری است [۱۰]. ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی AA7075/BN با روش ریخته‌گری انجام شده است. کوره مقاومت الکتریکی برای ذوب آلیاژ پایه تا حالت مایع و حذف رطوبت و گازهای ناشناس از نیتريد بور قبل از افزودن به مذاب از قبل گرم می‌شود. برای ساخت کامپوزیت‌ها از فرآیند ریخته‌گری متعارف هم‌زده استفاده شد. عملکرد هم‌زدن برای ۱۰-۱۵ دقیقه از بازه زمانی منظم با سرعت ثابت ۳۰۰ دور در دقیقه ادامه یافت. برای از بین بردن ناخالصی‌ها از مذاب مایع از هگزافلوروزیرکونات پتاسیم کریستالی استفاده شد. مذاب مایع شده در قالب EN8 از قبل گرم شده ریخته شد. فرآیند پیش‌ماشینکاری روی تمام کامپوزیت‌های ساخته شده انجام شد تا به راحتی در معاونت مکانیکی محکم شوند.

۲-۱- روش تحقیق

بلوک مربعی $100 \times 100 \times 10$ میلی‌متر مکعبی برای آزمایش‌های سوراخکاری با پارامترهای مختلف ماشینکاری ورودی مانند سرعت اسپیندل ۱۵۰۰، ۱۷۵۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه و نرخ پیشروی در ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌متر بر دور، زاویه راس مته ۱۱۸، ۱۰۸ و ۹۸ درجه استفاده شد. برای انجام آزمایش از مته کاربرد جامد ۱۰ میلی‌متری استفاده شد. دینامومتر ابزار مته نوع تماسی در معاونت ثابت شد و مستقیماً با سیستم جمع‌آوری داده‌ها برای مشاهده نیروی محوری پیوسته همراه شد. مشخصات دینامومتر ابزار مته در ترانه‌ها

از هر سوراخ به طور جداگانه برای فرآیند مورفولوژی تراشه جمع آوری شدند. پرداخت سطح پاسخ خروجی اصلی برای انواع فرآیندهای ماشینکاری بود. از دستگاه تست زبری سطح Mitutoyo برای اندازه گیری سطح سوراخ شده با حرکت عرضی ۵ میلی متر به سمت انتهای سوراخ استفاده شد. تجهیزات تست میکروسختی ویکرز برای اندازه گیری سختی برای همه کامپوزیت‌های ساخته شده استفاده شد. نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM B557M-10 و میزان بار اعمال شده ۱ کیلوگرم با زمان بارگذاری ۵ ثانیه تنظیم شده است. مقدار متوسط سختی با انجام سه آزمایش برای هر نمونه به دست آمد.

۲-۲- طراحی و بهینه‌سازی تجربی

به منظور دستیابی به نیروی محوری بهتر و زبری سطح، سرعت براده برداری برای بهینه‌سازی پارامترهای ماشین کاری موثر درگیر است. جدول ۱ روش سطح پاسخ (RSM) یک تکنیک تحلیلی قوی است که اغلب برای پیدا کردن رابطه بین پارامترهای فرآیند ورودی با پاسخ‌های خروجی و برای پیش‌بینی پارامترهای فرآیند مؤثر بر نیروی محوری و زبری سطح استفاده می‌شود. نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی بر اساس نتایج پیش‌بینی ANOVA رسم شدند.

جدول ۱ پارامترها و سطوح فرآیند کار [۱۰]

پارامترهای ورودی	واحد	سه سطح		
		سطح-۱	سطح-۲	سطح-۳
تقویت کننده‌ها	%	AA7075	۴ BN	۸ BN
سرعت اسپیندل	RPM	۱۵۰۰	۱۷۵۰	۲۰۰۰
پیشروی	mm/rev	۰/۱	۰/۲	۰/۳
زاویه راس مته	°	۱۱۸°	۱۰۸°	۹۸°

به منظور کاهش هزینه های کاری کلی، L-27 با حداقل اجرای آزمایشی برای برآورده کردن هدف این طرح انجام شد. در این تحقیق از ۴ پارامتر ورودی و ۳ نقطه مرکزی در این طراحی استفاده شده است و پارامترهای فرآیند کار در جدول ۲ نشان داده شده است. نیروی محوری و زبری سطح از پارامترهای ورودی اصلی (سرعت اسپیندل، پیشروی، زاویه راس و تقویت کننده) می‌باشد. این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته و از یک طرح L-27 Box-Behnken برای پیش‌بینی برهمکنش‌های بین عوامل استفاده شده است [۱۵].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر پارامترهای فرآیند بر پاسخ های خروجی

فشار زیاد بر روی مواد قطعه کار در طول فرآیند سوراخکاری، سختی مواد و مواد ابزار برش نیز دلیل اصلی تولید نیروی محوری می‌شود. این به طور مستقیم بر کیفیت سطح سوراخ مته و ابزار برش تأثیر می‌گذارد. تغییر سرعت اسپیندل و پیشروی ممکن است منجر به کیفیت سطح در شرایط دینامیکی شود. برای دستیابی به نیروی محوری مطلوب و زبری سطح، انتخاب پارامترهای برش مناسب و ابزار برش غالب می‌شود. زاویه راس (۹۸ درجه) ابزار برش حداکثر نیروی محوری را در نرخ کرنش بالاتر ایجاد می‌کند. در مقایسه با مواد کامپوزیت خالص AA7075 و AA7075/4 wt% BN، نیروی محوری برای ماشین کاری بیش از ۸ درصد وزنی کامپوزیت‌های BN زیاد است. نیروی محوری با افزایش ذرات سرامیکی BN به داخل زمینه برای تمام شرایط برش کاهش یافت.

۳-۲- مدل سازی ریاضی برای نیروی رانش و زبری سطح

نیروی محوری و زبری سطح به صورت تجربی اندازه‌گیری شد و با روش سطح پاسخ در حین سوراخکاری کامپوزیت‌های AA7075/BN با استفاده از مته کاربرد جامد تحت شرایط ماشین‌کاری خشک پیش‌بینی شد. جدول ۲ نتایج نیروی محوری پیش‌بینی شده و زبری سطح را نشان می‌دهد. معادله رگرسیون برای نیروی محوری و زبری سطح در معادلات ۱ و ۲ توضیح داده شده است.

$$Trust\ force = +7.72 + 0.0378 \times A + 1.39 \times B + 0.1404 \times C + 0.4810 \times D + 0.0569 \times AB + 0.4298 \times AC - 0.5053 \times AD - 0.2831 \times BC - 0.1851 \times BD - 0.0558 \times CD - 0.1468A^2 - 0.0956 \times B^2 - 0.0994 \times C^2 + 0.1096 \times D^2 \quad (1)$$

$$Surface\ roughness = +1.16 + 0.1977 \times A + 0.1468 \times B + 0.0824 \times C + 0.1022 \times D + 0.2305 \times AB - 0.0690 \times AC + 0.1626 \times AD - 0.2813 \times BC - 0.0020 \times BD + 0.0663 \times CD + 0.1628 \times A^2 + 0.1879 \times B^2 + 0.2483 \times C^2 + 0.3798 \times D^2 \quad (2)$$

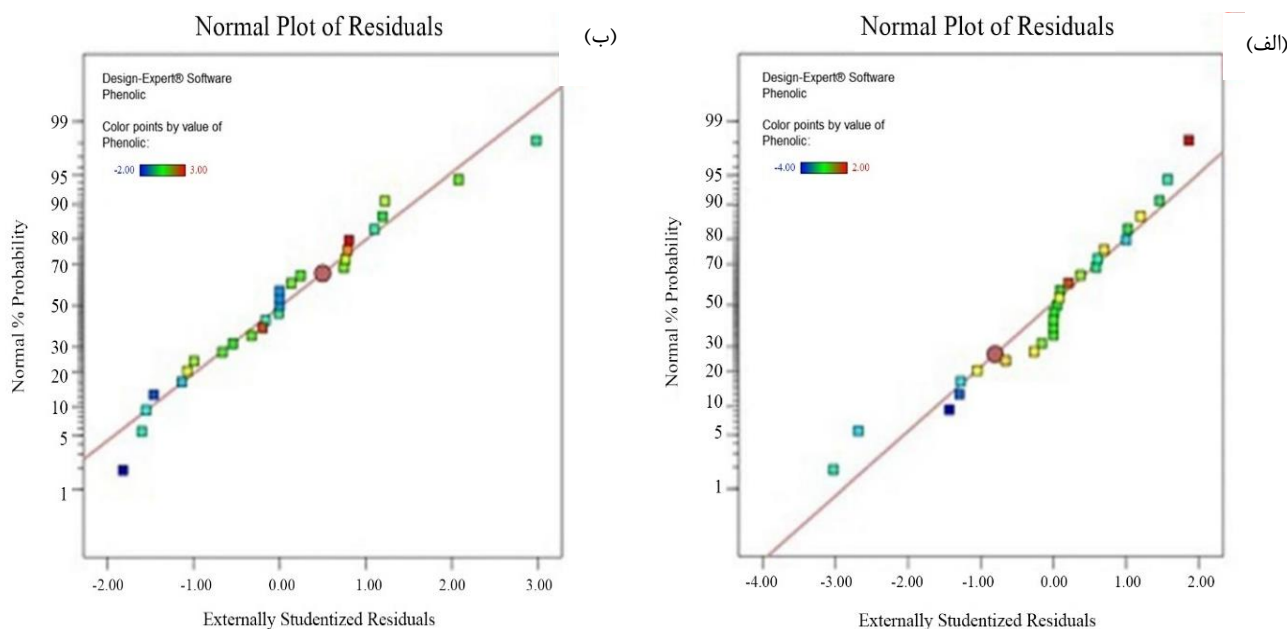
معادله بر حسب فاکتورهای کدگذاری شده می‌تواند برای پیش‌بینی پاسخ برای سطوح معین هر عامل استفاده شود. به طور پیش فرض، سطوح بالای فاکتورها به صورت +1 و سطوح پایین به صورت -1 کدگذاری می‌شوند. معادله کدگذاری شده برای شناسایی تأثیر نسبی عوامل با مقایسه ضرایب عامل مفید بود.

جدول ۲ مدل طراحی آزمایش توسط RSM و نتایج تجربی انجام شده [۱۵]

تعداد اجرا	سرعت اسپیندل (RSM)	نرخ پیشروی (mm/min)	زاویه راس مته (°)	BN wt%	نیروی محوری (N)	زبری سطح (μm)
۱	۲۰۰۰	۰/۲	۱۱۸	۴	۷۳/۸۲۵۷	۳/۰۲۲
۲	۱۷۵۰	۰/۳	۱۱۸	۴	۷۴/۸۷۳۴	۲/۳۷۷
۳	۱۵۰۰	۰/۲	۹۸	۸	۷۶/۰۶۳۴	۲/۰۲۲
۴	۲۰۰۰	۰/۲	۹۸	۸	۵۶/۵۴۵۷	۴/۵۷۰
۵	۱۷۵۰	۰/۲	۷۸	۰	۵۰/۳۵۵۶	۳/۱۱۶
۶	۱۷۵۰	۰/۱	۷۸	۴	۳۷/۷۵۰۲	۰/۷۶۳
۷	۱۷۵۰	۰/۲	۹۸	۴	۵۹/۶۰۳۶	۱/۳۴۳
۸	۱۷۵۰	۰/۲	۷۸	۸	۶۵/۱۹۹۱	۲/۷۸۸
۹	۱۷۵۰	۰/۲	۱۱۸	۸	۶۴/۰۷۳۴	۳/۶۲۱
۱۰	۱۷۵۰	۰/۳	۹۸	۸	۸۶/۴۱۲۲	۴/۳۰۶
۱۱	۲۰۰۰	۰/۱	۹۸	۴	۳۰/۴۹۸۸	۲/۱۵۶
۱۲	۱۵۰۰	۰/۲	۷۸	۴	۴۵/۰۶۸۶	۲/۲۹۳
۱۳	۱۷۵۰	۰/۳	۹۸	۰	۷۴/۷۷۱۱	۳/۵۰۴
۱۴	۲۰۰۰	۰/۲	۷۸	۴	۵۴/۵۲۷۸	۳/۱۴۰
۱۵	۱۷۵۰	۰/۲	۹۸	۴	۵۹/۶۰۳۶	۱/۳۴۳
۱۶	۱۷۵۰	۰/۱	۱۱۸	۴	۵۱/۳۰۲۸	۲/۹۷۸
۱۷	۱۷۵۰	۰/۲	۹۸	۴	۵۹/۶۰۳۶	۱/۳۴۳
۱۸	۱۷۵۰	۰/۱	۹۸	۸	۳۹/۰۷۶۱	۳/۳۷۰
۱۹	۱۵۰۰	۰/۲	۱۱۸	۴	۳۸/۴۶۵۷	۳/۰۸۶
۲۰	۱۷۵۰	۰/۲	۱۱۸	۰	۵۲/۵۵۳	۳/۰۰۴
۲۱	۱۷۵۰	۰/۳	۷۸	۴	۷۶/۸۵۹۹	۳/۲۹۴
۲۲	۱۵۰۰	۰/۳	۹۸	۴	۹۰/۴۲۶۹	۱/۱۰۵
۲۳	۲۰۰۰	۰/۲	۹۸	۰	۵۶/۶۹۶۹	۲/۰۸۴
۲۴	۱۵۰۰	۰/۱	۹۸	۴	۴۵/۵۴۴۴	۱/۵۷۲
۲۵	۱۵۰۰	۰/۲	۹۸	۰	۴۵/۰۳۰۳	۱/۹۰۰
۲۶	۲۰۰۰	۰/۳	۹۸	۴	۷۲/۴۳۴۶	۴/۷۸۸
۲۷	۱۷۵۰	۰/۱	۹۸	۰	۲۳/۶۳۸۲	۲/۶۳۹

۳-۳- نمودارهای نرمال باقی مانده‌ها

نمودار احتمال نرمال برای باقیمانده‌های درونی دانشجویی برای نیروی محوری در شکل ۱ ارائه شده است. شکل الف احتمال کمترین نیروی محوری را در کامپوزیت‌های ساخته شده نشان می‌دهد. همه نقاط تقریباً به طور معمول در نزدیکی خط مستقیم توزیع شده‌اند، هیچ گونه ناهنجاری را نشان نمی‌دهد، و از این رو مدل موثر بود. شکل ب احتمال زبری سطح را نشان می‌دهد.

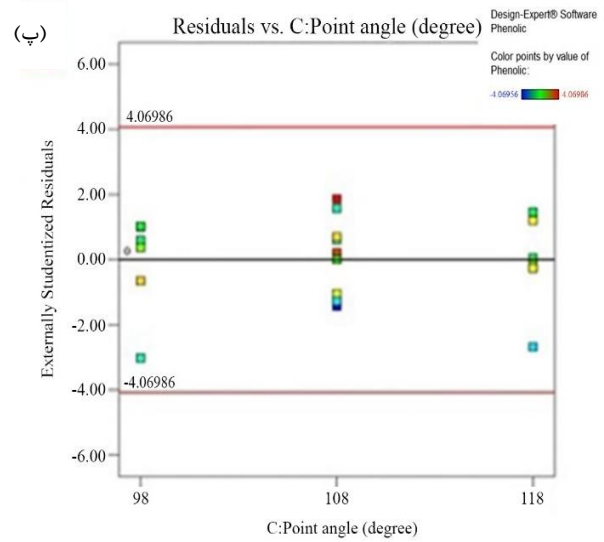
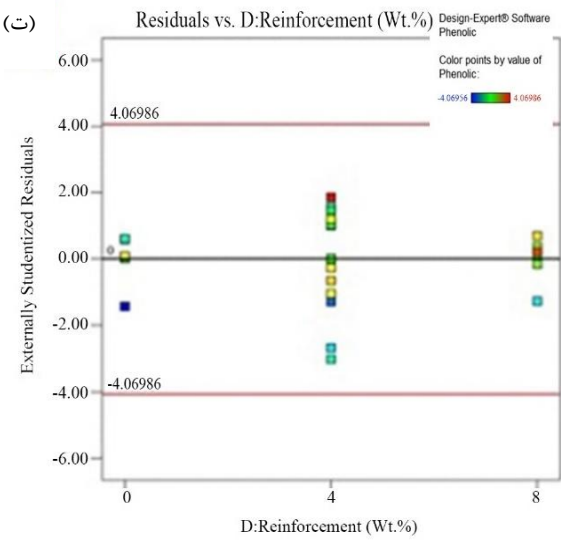
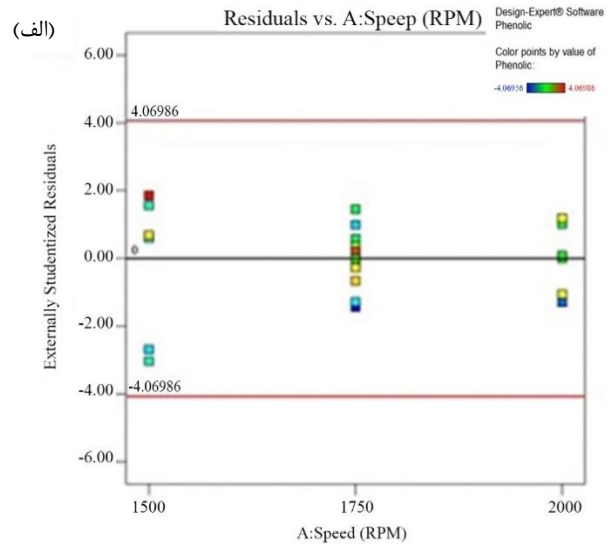
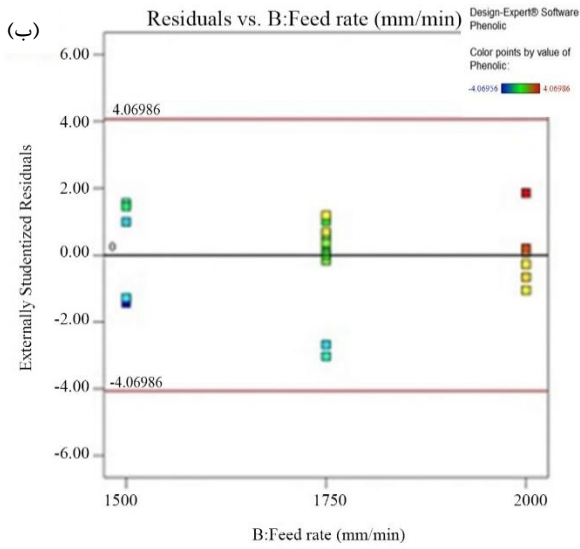


شکل ۱ خط نرمال باقی مانده‌ها برای نیروی محوری

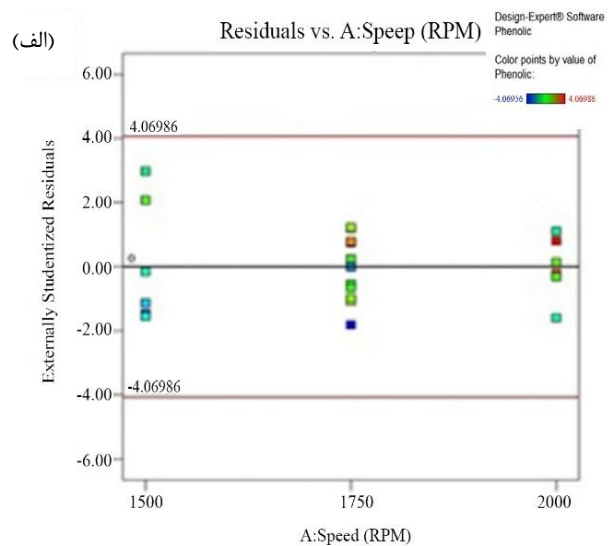
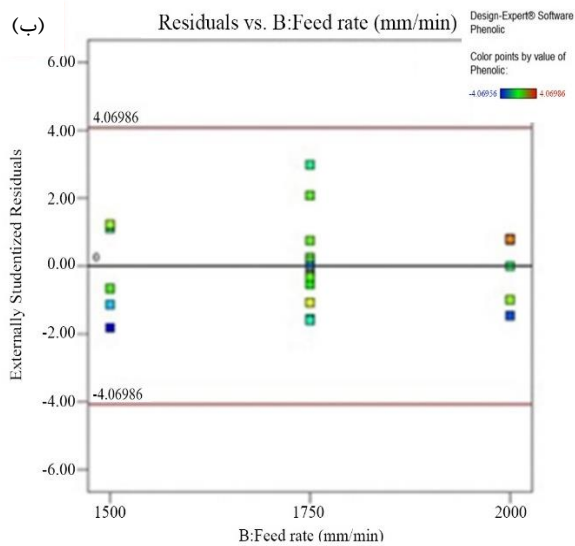
۳-۴- نمودارهای باقیمانده برای نیروی محوری و زبری سطح

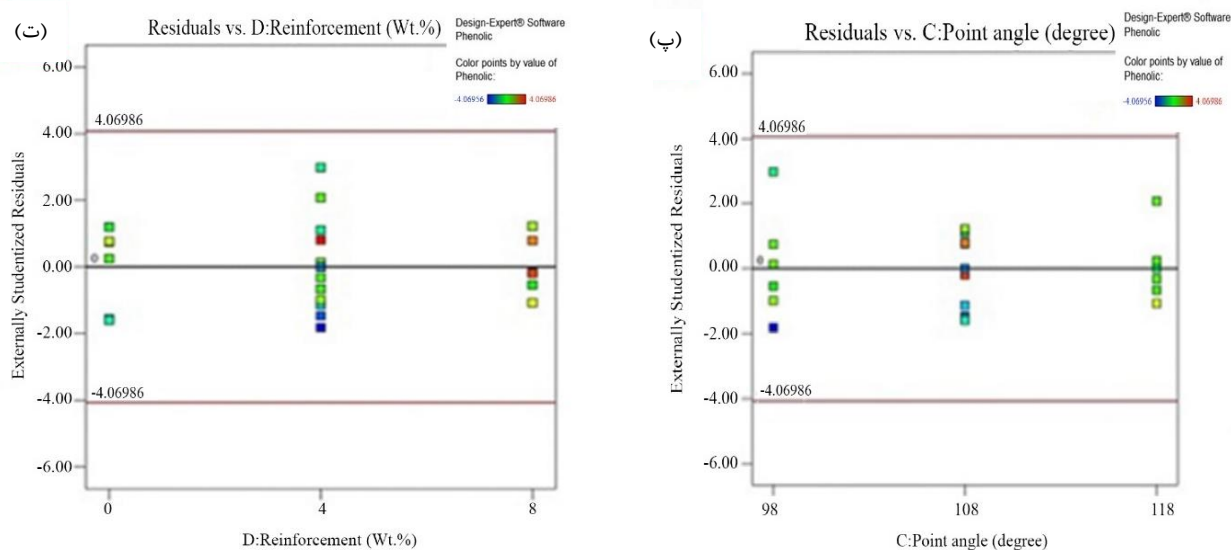
نمودار باقیمانده برای نیروی محوری در شکل ۲ نشان داده شده است که از نظر سرعت اسپیندل، پیشروی، زاویه راس مته و درصد وزنی تقویت کننده را نشان می‌دهد. از شکل ۳ الف، مشهود بود که نیروی محوری ایجاد شده با افزایش سرعت اسپیندل کاهش می‌یابد. حقیقت پشت سر این بود که در طول فرآیند سوراخکاری حداکثر سرعت اسپیندل نخ ریزی که تبدیل به نرم شدن مواد زمینه و کاهش نیروی محوری می‌شود. شکل ۳ ب نشان می‌دهد که افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش نیروی محوری می‌شود. افزایش سطح تماس و فشار اعمال شده بر ابزار باعث افزایش نیروی محوری در سوراخکاری می‌شود. شکل ۳ پ نشان می‌دهد که حداقل زاویه راس مته نشان دهنده کاهش نیروی محوری در سوراخکاری مواد کامپوزیتی است. کاهش زاویه راس مته باعث کاهش سطح تماس با قطعه کار می‌شود که نیروی محوری کم را القا می‌کند. شکل ۳ ت نشان می‌دهد که افزایش درصد وزنی تقویت کننده باعث کاهش نیروی محوری می‌شود. تغییر زاویه ابزار باعث کاهش نیروی برش می‌شود. در زاویه راس ۹۸ درجه، نوک مرزی در ناحیه کناری ابزار برش رخ می‌دهد. سپس زاویه راس تا ۱۰۸ درجه منجر به ناهمواری سطح ضعیف در سوراخ مته می‌شود و ابزار برش با نیروی محوری بالا مواجه می‌شود و باعث سایش می‌شود. نیروی محوری به دلیل افزایش شدید سختی مواد کاهش یافت. بنابراین، نتایج نشان داد که نیروی محوری را می‌توان با حداکثر سرعت اسپیندل، سرعت متوسط و شرایط زاویه راس ۹۸ درجه به حداقل رساند.

شکل ۴ نمودارهای باقیمانده برای زبری سطح را نشان می‌دهد. شکل ۴ ب و ت حداکثر تقویت را نشان می‌دهد و نرخ پیشروی بالا منجر به زبری سطح بالا می‌شود. زاویه تماس ابزار مستقیماً بر کیفیت سطح (Ra) تأثیر می‌گذارد. از این رو، ایجاد زاویه ابزار بهتر برای ماشینکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی ضروری است. تغییر هندسه ابزار ۹۸ درجه کیفیت سطح بهتری را ایجاد می‌کند که همچنین نیروی محوری را کاهش می‌دهد. وجود حداکثر درصد وزنی ذرات سخت سرامیکی در مواد کامپوزیت و همچنین سطح تماس ابزار برش و کامپوزیت‌ها زیاد بود. شکل ۴ الف و پ سرعت اسپیندل را نشان می‌دهد و زاویه راس مقدار زبری سطح پایینی را در حداکثر شرایط ایجاد می‌کند.



شکل ۲ نمودارهای باقیمانده برای نیروی محوری





شکل ۳ نمودارهای باقیمانده برای زبری سطح

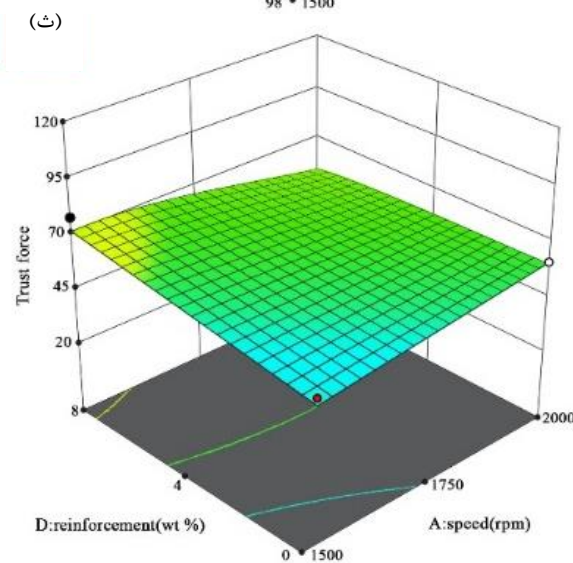
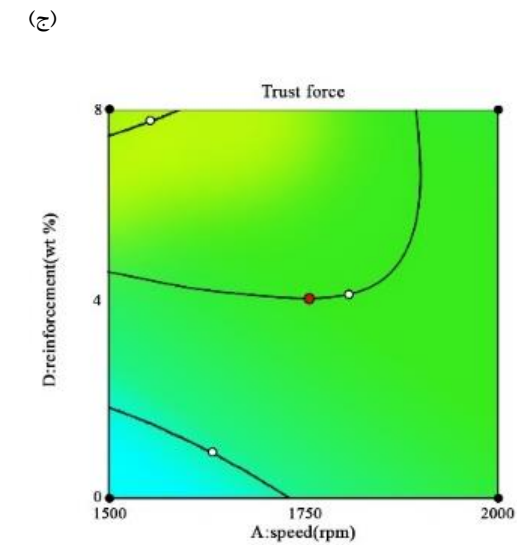
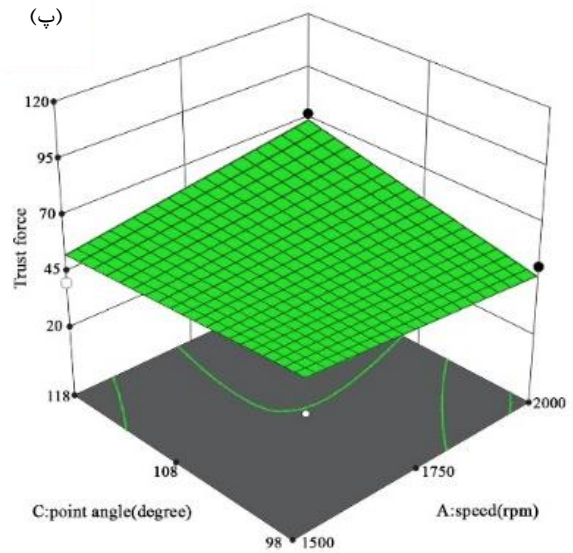
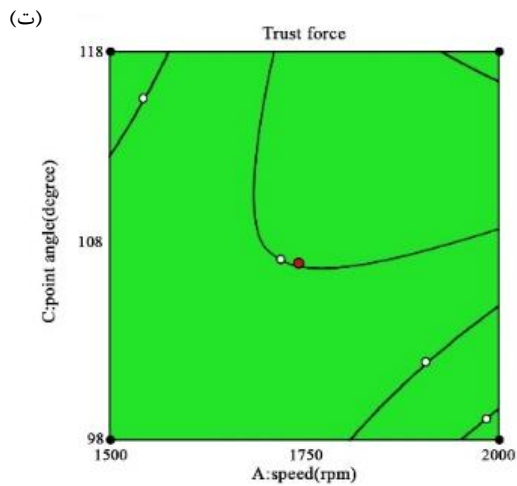
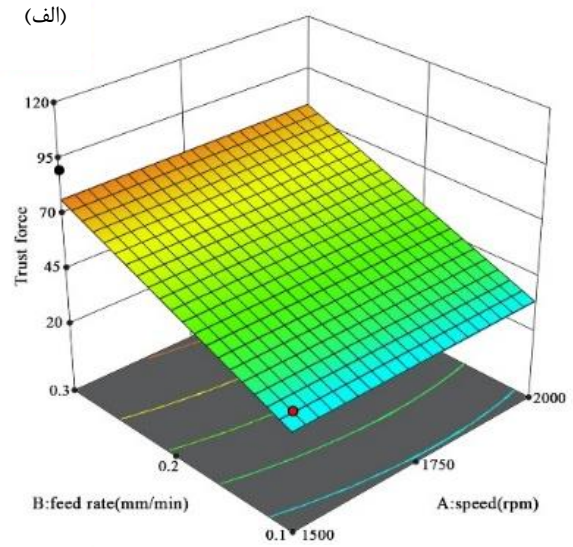
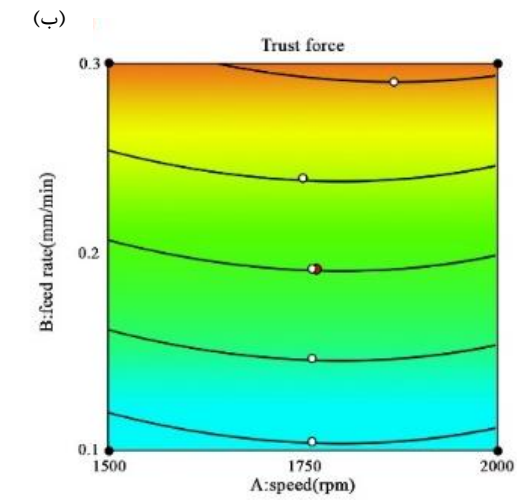
۳-۵- تأثیر پارامترهای فرآیند توسط نمودارهای سطحی

سرعت بالا، پیشروی کم و حداقل زاویه راس، نیروی محوری بهتر و پرداخت سطحی خوب کامپوزیت‌های هیبریدی را فراهم می‌کند. شکل ۴ اثر متقابل سه بعدی و دو بعدی پارامترهای ورودی بر نیروی محوری ایجاد شده در سوراخکاری مواد کامپوزیتی را نشان می‌دهد. نمودارهای سطحی به تجسم مقادیر سطح پاسخ و شرایط عملیاتی کمک می‌کند. شکل ۴ الف و ج اثر برهمکنش‌های نمودار سطح سه بعدی و دو بعدی پارامترهای ورودی مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۴ الف نمودار سطح سه بعدی اثر سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی را نشان می‌دهد. نشان داده است که نیروی محوری بالا در طول حداکثر نرخ پیشروی به دست آمده است. شکل ۴ ب نمودار شمارنده دو بعدی را نشان می‌دهد که با افزایش نیروی محوری با افزایش نرخ پیشروی ایجاد شد. شکل ۴ پ و ت اثر اندرکنش نمودار پاسخ سرعت اسپیندل و زاویه راس را نشان می‌دهد. شکل ۵ نمودار سطح سه بعدی را نشان می‌دهد که تأیید می‌کند که نیروی محوری با افزایش سرعت اسپیندل کاهش یافته است و زاویه راس را کاهش می‌دهد. شکل ۴ ت نشان می‌دهد که حداقل نیروی محوری در نقطه پایین زاویه به دست آمده است. شکل ۴ و ج اثر متقابل نمودار سطح پاسخ سه بعدی سرعت و درصد وزنی تقویت را نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که حداقل نیروی محوری در سرعت اسپیندل پایین تر به دست آمده است در حالی که بقیه مناطق نرمال هستند.

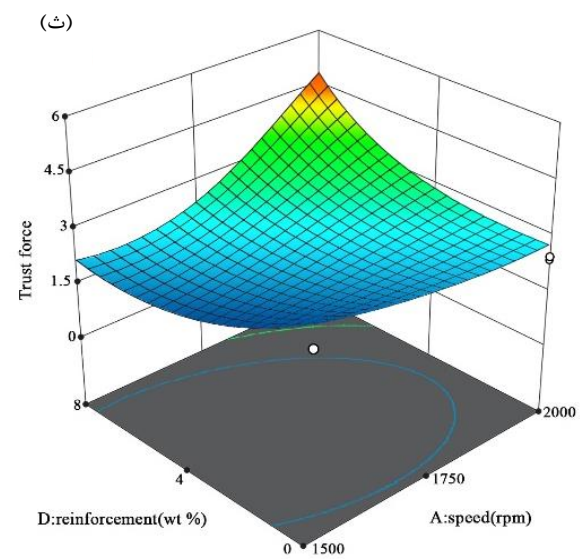
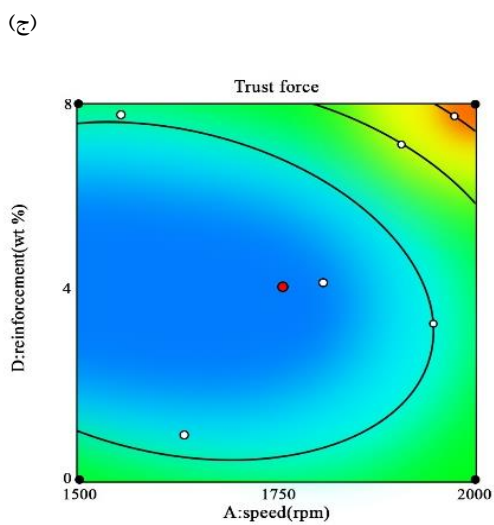
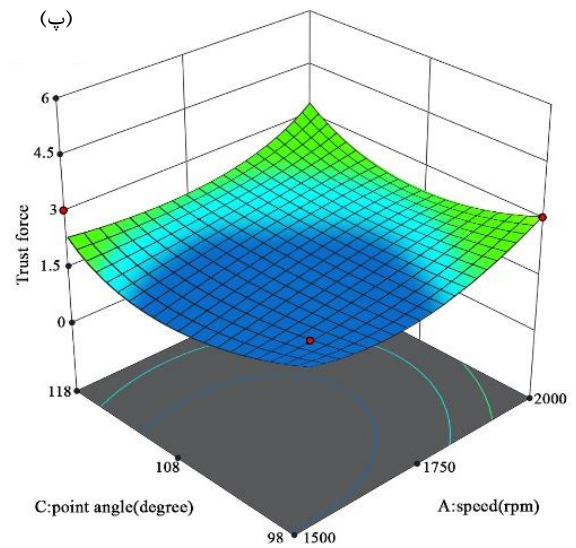
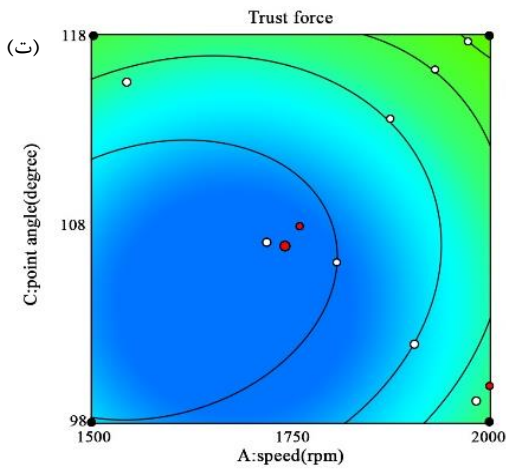
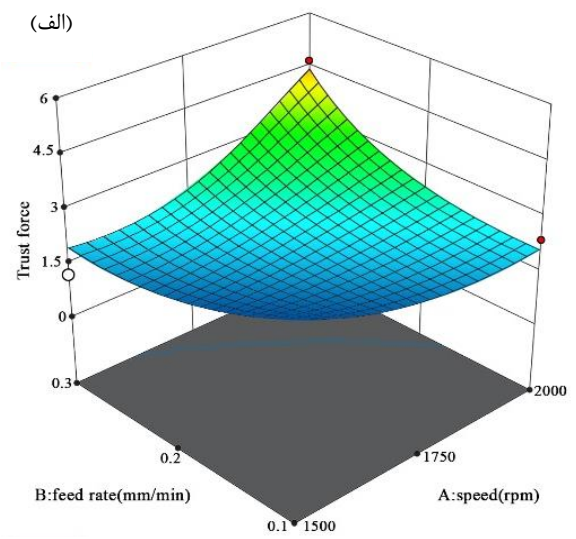
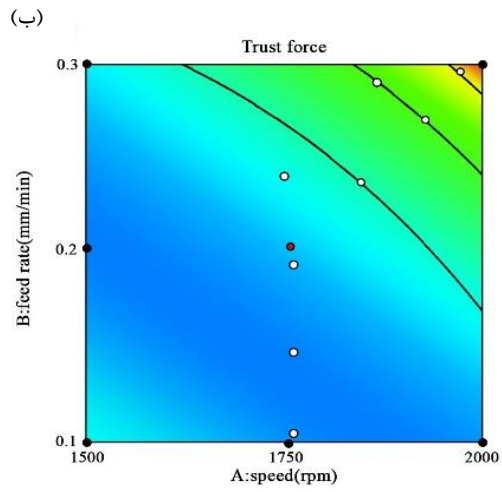
شکل ۵ الف، ج و ت نمودارهای سه بعدی زبری سطح را برای برهمکنش بین سرعت، پیشروی، زاویه راس و درصد وزنی محتوای تقویت کننده نشان می‌دهد. شکل ۵ ب، ت و ج نمودارهای سطح دو بعدی را نشان می‌دهد. زبری سطح به طور مستقیم با مربع نرخ پیشروی برای نقطه ثابت زاویه ابزار برش متناسب بود. افزایش سرعت با کاهش زاویه راس (۹۸-۱۱۸ درجه) همچنین سطح خوبی را ارائه می‌دهد. ابزار مته کاربرد برای دستیابی به سایش کمتر ابزار و عملکرد خوب استفاده شد. افزایش زبری سطح با نرخ پیشروی نشان می‌دهد که افزایش نرخ پیشروی نشان دهنده کرنش بیشتر براده‌ها است که باعث زبری سطح بالاتر می‌شود. علاوه بر این، تقویت در درصد وزنی به طور قابل توجهی نسبت داده شد.

۳-۶- اعتبار سنجی

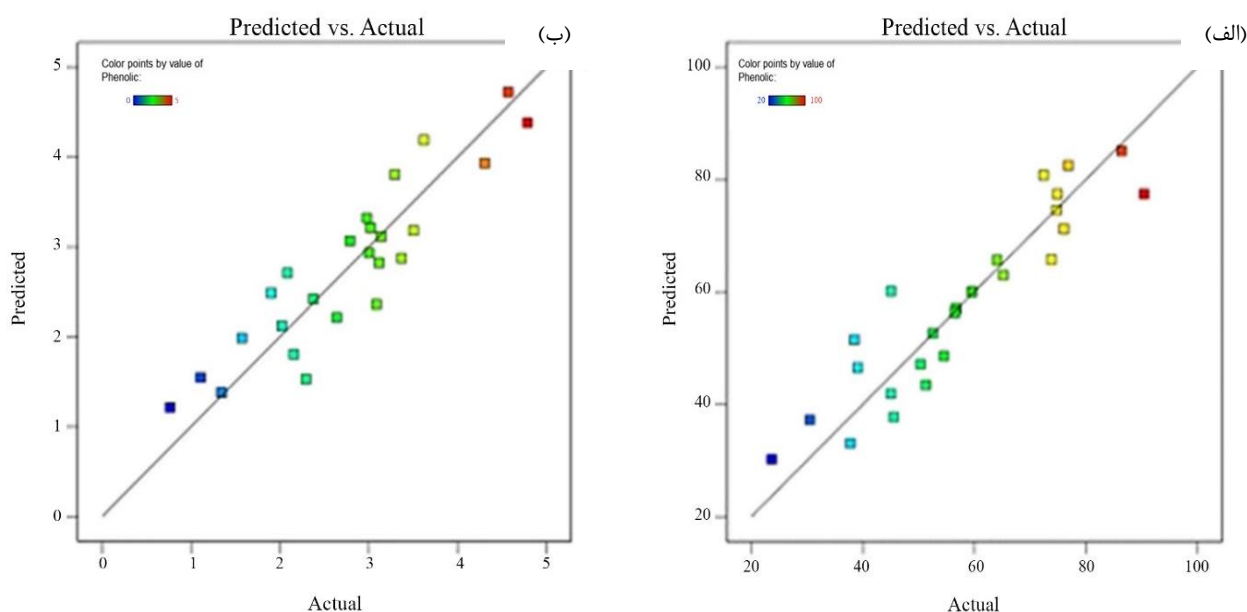
دقت مدل سطح پاسخ توسعه یافته با استفاده از آزمون‌های اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نیروی محوری و مقادیر زبری سطح در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج تایید نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده به دست آمده از مدل و مقادیر تجربی نزدیک به هم هستند که به صورت خط مستقیم نشان داده شد. مدل توسعه یافته از طریق RSM که برای پیش‌بینی نیروی محوری و زبری سطح در سوراخکاری کامپوزیت‌های زمینه فلزی برای هر ترکیبی از سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، زاویه راس مته و درصد وزنی ترکیب تقویت کننده در محدوده آزمایش استفاده شد.



شکل ۴ الف) نمودار سه بعدی و ب) نمودار دوبعدی اندرکنش برای نیروی محوری سرعت در مقابل پیشروی، پ) نمودار سه بعدی و ت) نمودار دوبعدی سرعت در مقابل زاویه راس، ث) نمودار سه بعدی و ج) نمودار دوبعدی سرعت در مقابل تقویت کننده‌ها



شکل ۵ الف) نمودار سه بعدی و ب) نمودار دوبعدی اندرکنش برای زبری سطح سرعت در مقابل پیشروی، پ) نمودار سه بعدی و ت) نمودار دوبعدی سرعت در مقابل زاویه راس، ث) نمودار سه بعدی و ج) نمودار دوبعدی سرعت در مقابل تقویت کننده‌ها



شکل ۶ الف) نیروی محوری واقعی در مقابل پیش‌بینی شده ب) زبری سطح

در آزمایش‌های انجام شده برای نیروی محوری، مقدار پیش‌بینی شده یکی از نقاط نمودار برابر با ۵۱ و مقدار واقعی برابر ۵۳ می‌باشد. که میزان اختلاف تقریباً ۳/۹ درصد می‌باشد. در آزمایش زبری سطح، مقدار پیش‌بینی شده یکی از نقاط برابر با ۲/۴ و مقدار واقعی ۲/۳ است که میزان اختلاف ۴/۲ درصد می‌باشد.

۳-۷- تحلیل واریانس (ANOVA)

نتیجه ANOVA برای نیروی محوری در جدول ۳، مقدار P را کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که اصطلاحات مدل معنی دار هستند. در این مورد B، D یک اصطلاح مدل قابل توجه هستند. مقدار بالاتر از ۰/۱ ممکن است به عنوان مدل‌هایی در نظر گرفته شود که ضروری نیستند. اگر عبارات مدل اهمیت زیادی نداشته باشد (بدون احتساب موارد مورد نیاز برای پشتیبانی از سلسله مراتب)، کاهش مدل ممکن است مدل را تا حدی بهبود بخشد.

نتیجه ANOVA برای نیروی رانش در جدول ۴ نشان داده شده است. مقدار P کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که شرایط مدل قابل توجه است. در این مورد A، B، AB، BC، B2، C2، D2 مقدار بیشتر از ۰/۱ نشان می‌دهد که عبارت مدل معنی دار نبوده است. مقدار مدل F 4.58 نشان می‌دهد که فقط ۰/۰۶۰ احتمال مقدار F به دلیل نویز وجود داشت.

۳-۸- بهینه‌سازی

نمودار کانتورهای روی هم برای تعیین نتایج پارامترهای بهینه پیش‌بینی‌شده نیروی محوری و زبری سطح استفاده شده است. سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی به عنوان عامل مشترک در نظر گرفته شد و به تصویر کشیده شد. شکل ۷ الف و ب نتایج بهینه پاسخ‌های خروجی را نشان می‌دهد.

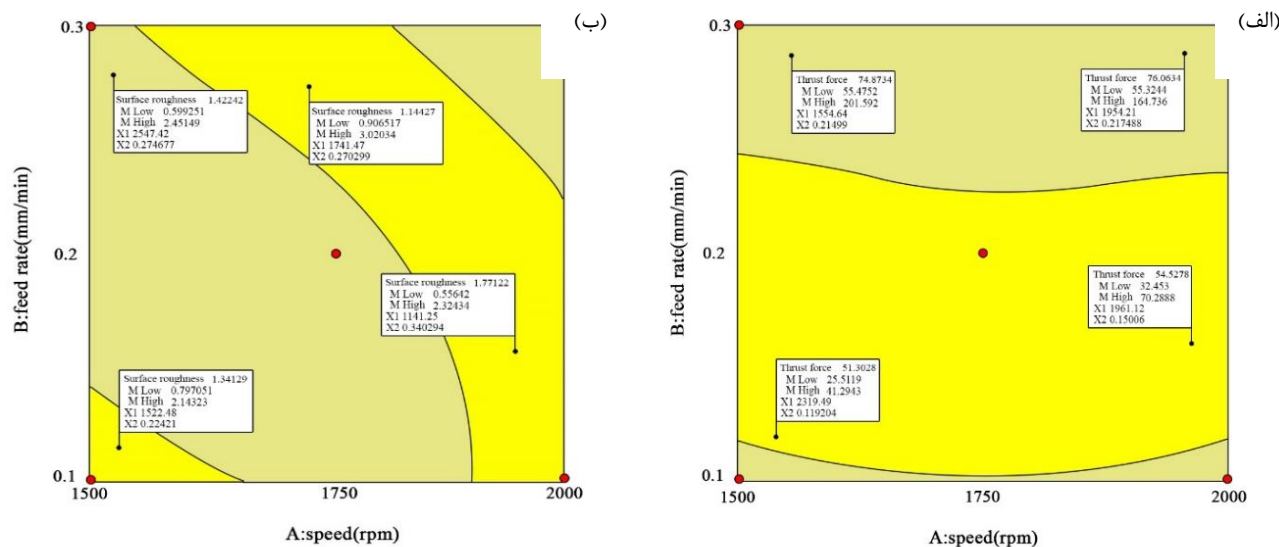
از نمودارها مشاهده شد که کمترین نقطه نیروی محوری در حداقل سرعت اسپیندل ۱۷۵۰ دور در دقیقه و سرعت متوسط پیشروی ۰/۲ میلی متر در دقیقه امکان پذیر است. در سطح بهینه، افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش نیروی محوری می‌شود. تاثیر نرخ پیشروی در مقایسه با سرعت اسپیندل بسیار بهتر است.

جدول ۳ ANOVA برای نیروی محوری

ملاحظات	P value	F value	MS	DoF	SS	منبع
قابل ملاحظه	۰/۰۰۶۲	۴/۵۴	۲/۰۵	۱۴	۲۸/۶۴	مدل
	۰/۸۴۸۵	۰/۰۳۸۱	۰/۰۱۷۲	۱	۰/۰۱۷۲	سرعت-A
قابل ملاحظه	<۰/۰۰۰۱	۵۱/۴۹	۲۳/۲۲	۱	۲۳/۲۲	نرخ پیشروی B
	۰/۴۸۲۹	۰/۵۲۴۲	۰/۲۳۶۴	۱	۰/۲۳۶۴	زاویه سر مته C
قابل ملاحظه	۰/۰۲۸۹	۶/۱۶	۲/۷۸	۱	۲/۷۸	تقویت کننده D
	۰/۸۶۸۲	۰/۰۲۸۷	۰/۰۱۳۰	۱	۰/۰۱۳۰	AB
	۰/۲۲۴۷	۱/۶۴	۰/۷۳۸۹	۱	۰/۷۳۸۹	AC
	۰/۱۵۸۲	۲/۲۶	۱/۰۲	۱	۱/۰۲	AD
	۰/۴۱۵۶	۰/۷۱۱۰	۰/۳۲۰۶	۱	۰/۳۲۰۶	BC
	۰/۵۹۱۶	۰/۳۰۳۹	۰/۱۳۷۰	۱	۰/۱۳۷۰	BD
	۰/۸۷۰۸	۰/۰۲۷۶	۰/۰۱۲۵	۱	۰/۰۱۲۵	CD
	۰/۶۲۲۹	۰/۲۵۴۷	۰/۱۱۴۹	۱	۰/۱۱۴۹	A ²
	۰/۷۴۸۰	۰/۱۰۸۱	۰/۰۴۸۷	۱	۰/۰۴۸۷	B ²
	۰/۷۳۸۳	۰/۱۱۶۹	۰/۰۵۲۷	۱	۰/۰۵۲۷	C ²
	۰/۷۱۲۸	۰/۱۴۲۰	۰/۰۶۴۱	۱	۰/۰۶۴۱	D ²
			۰/۴۵۱۰	۱۲	۵/۴۱	باقیمانده
			۰/۴۵۱۲	۱۰	۵/۴۱	عدم برازش
			۰/۰۰۰۰	۲	۰/۰۰۰۰	خطای محض
				۲۶	۳۴/۰۵	در مجموع

جدول ۴ ANOVA برای نیروی رانش

ملاحظات	P value	F value	MS	DoF	SS	منبع
قابل ملاحظه	۰/۰۰۶۰	۴/۵۸	۰/۱۷۶۴	۱۴	۲/۴۷	مدل
قابل ملاحظه	۰/۰۰۴۵	۱۲/۱۷	۰/۴۶۹۰	۱	۰/۴۶۹۰	سرعت-A
قابل ملاحظه	۰/۰۲۳۷	۶/۷۱	۰/۲۵۸۴	۱	۰/۲۵۸۴	نرخ پیشروی-B
	۰/۱۷۱۴	۲/۱۲	۰/۰۸۱۵	۱	۰/۰۸۱۵	زاویه سر مته-C
	۰/۰۹۶۵	۳/۲۵	۰/۱۲۵۳	۱	۰/۱۲۵۳	تقویت کننده-D
قابل ملاحظه	۰/۰۳۶۸	۵/۵۲	۰/۲۱۲۶	۱	۰/۲۱۲۶	AB
	۰/۴۹۵۴	۰/۴۹۴۴	۰/۰۱۹۱	۱	۰/۰۱۹۱	AC
	۰/۱۲۳۴	۲/۷۵	۰/۱۰۵۸	۱	۰/۱۰۵۸	AD
قابل ملاحظه	۰/۰۱۴۲	۸/۲۱	۰/۳۱۶۵	۱	۰/۳۱۶۵	BC
	۰/۹۸۴۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	BD
	۰/۵۱۲۲	۰/۴۵۶۲	۰/۰۱۷۶	۱	۰/۰۱۷۶	CD
	۰/۰۷۹۶	۳/۶۷	۰/۱۴۱۴	۱	۰/۱۴۱۴	A ²
قابل ملاحظه	۰/۰۴۷۳	۴/۸۸	۰/۱۸۸۲	۱	۰/۱۸۸۲	B ²
قابل ملاحظه	۰/۰۱۲۸	۸/۵۳	۰/۳۲۸۹	۱	۰/۳۲۸۹	C ²
قابل ملاحظه	۰/۰۰۰۸	۱۹/۹۶	۰/۷۶۹۳	۱	۰/۷۶۹۳	D ²
			۰/۰۳۸۵	۱۲	۰/۴۶۲۴	باقیمانده
			۰/۰۴۶۲	۱۰	۰/۴۶۲۴	عدم برازش
			۰/۰۰۰۰	۲	۰/۰۰۰۰	خطای محض
				۲۶	۲/۹۳	در مجموع



شکل ۷ الف) نیروی محوری واقعی در مقابل پیش‌بینی شده، ب) زبری سطح

۴- نتیجه گیری

یک کامپوزیت زمینه فلزی AA7075/BN یا موفقیت یا استفاده از روش ریخته گری به هم زدن معمولی ساخته شد. در این کار تحقیقاتی خصوصیات ریزساختاری، خواص مکانیکی، نیروی محوری و زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. یافته های کلیدی در زیر آورده شده است.

- سختی اندازه گیری شده با افزایش درصد وزنی مواد تقویت کننده به مواد زمینه افزایش یافت.
- از نتایج مشاهده شده، نیروی محوری و زبری سطح با افزایش نرخ پیشروی و درصد وزنی تقویت کننده (BN) به طور قابل توجهی افزایش یافت.
- از نمودار های سطحی به این نکته پی می‌بریم که با ترکیب سرعت کم (1500RPM) و نرخ پیشروی زیاد (0.3) و با حداقل زاویه سر مته (98) و همچنین با ترکیب سرعت زیاد و نرخ پیشروی کم، نیروی محوری و زبری سطح افزایش پیدا می‌کند، بنابراین مدل نیروی محوری و زبری سطح با خطای کمتر را نشان می‌دهد.

References

- [1] Kumaran ST, Uthayakumar M, Slota A, Aravindan S, Zajac J. Machining behavior of AA6351-SiC-B4C hybrid composites fabricated by stir casting method. Particulate Science and Technology. 2016 Sep 2;34(5):586-92. doi: 10.1080/02726351.2015.1093050
- [2] Kumar VV, Raja K, Chandrasekaran K, Ramkumar T. Microstructural characterization and mechanical properties of Al7075/BN metal matrix composites prepared by conventional casting method. Materials Research Express. 2019 Mar 6;6(6):066506. doi: 10.1088/2053-1591/ab07e2
- [3] Li Y, Ge B, Wu Z, Xiao G, Shi Z, Jin Z. Effects of h-BN on mechanical properties of reaction bonded β -SiAlON/h-BN composites. Journal of Alloys and Compounds. 2017 May 5;703:180-7. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.01.205
- [4] Tahmasbi V, Pak A, Zeinolabedin Beygi A, HassanPour P. Experimental Analysis and Optimization of Thrust Force in the Orthopedic Drilling Process Using the Tool Coated with Titanium Nitride Nano Coating by the Physical Vapor Deposition Method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 Jul 23;9(5):49-59. doi: 10.22034/ijme.2022.160059 [In Persian]
- [5] Salamat-Talab M, Tahmasbi V, Safari M, Zeinolabedin Beygi A. Mathematical modeling, sobol sensitivity analysis and optimization of main parameters in drilling of E-glass/epoxy laminated composites. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022 Feb 19;8(11):43-53. [In Persian]
- [6] Tahmasbi V, Zeinolabedin Beygi A, Moslemi Naeini H. Experimental study and sobol sensitivity analysis in optimizing the effective parameters of dry turning process of aluminum alloy 6061-T6. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Oct 23;8(8):12-23. [In Persian]

- [7] Tahmasbi V, Zeinolabedin-Beygi A, Elahi SH, Ashtiani MA. Statistical modeling, optimization and sensitivity analysis of dried turning of aluminum bronze alloy. *Sādhanā*. 2022 Nov 9;47(4):232. doi: [10.1007/s12046-022-01955-7](https://doi.org/10.1007/s12046-022-01955-7) [In Persian]
- [8] Sarparast M, Ghoreishi M, Jahangirpoor T, Tahmasbi V. Experimental and finite element investigation of high-speed bone drilling: evaluation of force and temperature. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020 Jun;42:1-9. doi: [10.1007/s40430-020-02436-w](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02436-w)
- [9] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M. Sensitivity analysis of temperature and force in robotic bone drilling process using Sobol statistical method. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 2018 Jan 2;32(1):130-41. doi: [10.1080/13102818.2017.1403863](https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1403863)
- [10] Gopalakannan S, Senthilvelan T, Kani K. Modeling and optimization of EDM of Al 7075/10wt% Al2O3 metal matrix composites by response surface method. *Advanced Materials Research*. 2012 Apr 10;488:856-60. doi: [10.4028/www.scientific.net/amr.488-489.856](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.488-489.856)
- [11] Ramkumar T, Narayanasamy P, Selvakumar M, Balasundar P. Effect of B4C reinforcement on the dry sliding wear behaviour of Ti-6Al-4V/B4C sintered composites using response surface methodology. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018;63. doi: [10.24425/123791](https://doi.org/10.24425/123791)
- [12] Vijayan D, Abhishek P, Kumar YM, Balaji P, kumar Reddy PS. Optimization of drilling parameters of carbon fiber composites using RSM based desirability function. In IOP conference series: materials science and engineering 2018 Jul 1 (Vol. 390, No. 1, p. 012076). IOP Publishing. doi: [10.1088/1757-899X/390/1/012076](https://doi.org/10.1088/1757-899X/390/1/012076)
- [13] Tahmasbi V, Aeinehbandi S, Ahadi R. Optimization of Drilling Parameters of Carbon Fiber Composites using RSM-Based Utility Function. *Modares Mechanical Engineering*. 2023 Oct 10;23(10):237-43. doi: [10.22034/mme.23.10.23](https://doi.org/10.22034/mme.23.10.23) [In Persian]
- [14] Tahmasbi V, Aeinehbandy S, Baghi MH, Sousanabadi Farahani A. Sensitivity analysis modeling and optimization of cutting Forces and stool wear in milling of aluminum matrix composite. *Modares Mechanical Engineering*. 2023 Aug 10;23(8):475-83. [In Persian]
- [15] Raja K, Chandra Sekar VS, Vignesh Kumar V, Ramkumar T, Ganeshan P. Microstructure characterization and performance evaluation on AA7075 metal matrix composites using RSM technique. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020 Nov;45:9481-95. doi: [10.1007/s13369-020-04752-8](https://doi.org/10.1007/s13369-020-04752-8)