



مدلسازی آماری، بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت سوپل پارامترهای مؤثر بر رفتار نیروی عمودی در فرآیند میکروسوراخکاری کامپوزیت چندلایه شیشه/اپوکسی

مظاهر سلامت طلب^{۱*}، وحید طهماسبی^۱، مهدی صفری^۲، رضا غلامی^۲ و رضا قاسمی^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

چکیده

در تحقیق حاضر، چندلایه کامپوزیتی با الیاف شیشه نوع E از نوع بافته شده ساده به همراه رزین اپوکسی به عنوان زمینه با لایه‌چینی [0]₁₂ به روش لایه‌چینی دستی ساخته شده است. سپس با در نظر گرفتن مهمترین پارامترهای ورودی فرآیند میکروسوراخکاری شامل، سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار، مدلسازی ریاضی آماری به منظور بررسی دقیق رفتار پاسخ نیروی محوری بر حسب متغیرهای یاد شده صورت گرفته است. بدین منظور ضمن استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها به روش عاملی کامل و رویه پاسخ و انجام ۵۴ آزمایش و لحاظ نمودن تکرار آزمایش‌ها به منظور بالا بردن دقت مدلسازی، یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم استخراج شده است؛ همچنین با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت سوپل به بررسی تأثیر کمی دقیق میزان حساسیت رفتار نیرو بر حسب پارامترهای ورودی پرداخته شده است. نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهد که کمترین مقدار نیروی محوری در فرآیند میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی در کمترین نرخ پیشروی، حداکثر سرعت دورانی ابزار و مقدار قطرهای کوچک‌تر حاصل می‌شود؛ همچنین نتایج تحلیل حساسیت سوپل نشان می‌دهد که به ترتیب قطر (۵۷/۸ درصد)، سرعت دورانی (۲۴/۴ درصد) و سرعت پیشروی (۱۷/۸ درصد) در فرآیند میکروماشین‌کاری تأثیرگذار بوده است.

کلمات کلیدی: میکرو سوراخکاری؛ روش رویه پاسخ؛ تحلیل حساسیت سوپل؛ چندلایه‌های کامپوزیتی؛ بهینه‌سازی.

Statistical Modelling, Optimization and Sobol Sensitivity Analysis of Effective Parameters on Thrust Force Behavior in Micro-Drilling of Glass/Epoxy Laminated Composites

M. Salamat-talab^{1,*}, V. Tahmasebi¹, M. Safari², R. Ghasemi³, R. Gholami³

¹ Assist. Prof., Mech. Eng., Arak University of Technology, Arak, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Arak University of Technology, Arak, Iran.

³ MSc student, Mech. Eng., Arak University of Technology, Arak, Iran.

Abstract

In this study, E-glass/epoxy laminated composites with [0]₁₂ stacking sequence manufactured by hand lay-up method. Afterwards, by considering the most important input parameters of the micro-drilling process including tool rotational speed, feed rate and tool diameter, the statistical mathematical modeling is performed to accurately investigate the thrust force response behavior versus the mentioned variables. For this purpose, using full factorial experimental design and response surface methodology and performing 54 experimental tests and considering repeatability of experiments in order to improve modeling accuracy, a second-order linear regression equation has been obtained. Also, by using the Sobol sensitivity analysis method, the quantitative effect of force behavior sensitivity versus input parameters is investigated. The results of the statistical analysis show that the lowest feed rate, maximum tool rotational speed and smaller diameter lead to produce lowest thrust force of laminated composites. The Sobol sensitivity analysis shows that the diameter of the tool (57.8%), the feed rate (24.4%), and the rotational speed (17.8%) will have the greatest effect on thrust force in micro-drilling process, respectively.

Keywords: Micro-Drilling; Response Surface Methodology; Sobol Sensitivity Analysis; Laminated Composites; Optimization.

۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی به علت خواص مکانیکی و فیزیکی عالی، به تدریج جایگزین بسیاری از فلزات و آلیاژهای فلزی شده‌اند که در ساخت قطعات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معروفترین انواع کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنعت شامل، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و چندلایه‌های کامپوزیت-فلز هستند [۱-۳]. چندلایه‌های کامپوزیتی در بسیاری از صنایع مانند، صنایع دفاعی و نظامی، کشتی‌سازی، هوافضا و غیره کاربرد بسیار فراوانی دارند [۱، ۲ و ۴]. به طور معمول قطعات کامپوزیتی به شکل مورد نیاز نهایی آن ساخته می‌شوند، اما در بعضی از مواقع، مهندسان ناگزیر به استفاده از ماشینکاری و به ویژه عملیات سوراخکاری به منظور اتصال نهایی قطعات و حفظ یکپارچگی سازه ساخته شده هستند.

حیدری و همکاران [۵]، به بررسی اثر پارامترهای نرخ پیشروی، سرعت دورانی و زاویه رأس مته بر نیروی محوری و میزان آسیب ایجاد شده ناشی از تورق در محل سوراخکاری پرداختند. نتایج این محققان نشان می‌دهد که نرخ پیشروی و زاویه رأس مته دو عامل تأثیرگذار بر نیروی محوری هستند. حکیمی و امینی [۶]، به بررسی تورق و تأثیر پارامترهای مختلف فرزکاری مارپیچ کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این محققان نشان می‌دهد، کاهش میزان نرخ پیشروی و افزایش سرعت دورانی، موجب تولید سوراخ با دقت بالاتر و کاهش آسیب تورقی در ناحیه سوراخکاری می‌شود. جوشی و همکاران [۷]، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشینکاری بر نیروی عمودی، عامل آسیب تورقی و زبری سطح در چندلایه‌های کامپوزیتی پلیمری با الیاف کربن در شرایط محیطی خشک و برودتی پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این محققان نشان می‌دهد، افزایش نرخ پیشروی ابزار، موجب افزایش ضریب آسیب تورقی در دو حالت خشک و برودتی می‌شود و همچنین با افزایش سرعت برش، در شرایط خشک، مقدار آسیب تورقی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، افزایش قطر ناشی از سوراخکاری به همراه نیرو و گشتاور مورد نیاز بدین منظور روی چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف طبیعی و رزین پلی استر مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته

است [۸]. در این تحقیق، از یک مدل فازی به منظور مقایسه نتایج بدست آمده و کاهش آزمایشات لازم بهره برده شده است. سورنتینو و همکاران [۹]، میزان آسیب در لایه‌های ورودی و خروجی محل سوراخکاری در چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه و کربن در یک قطر خاص مانند ۱۰ میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند و رابطه‌ای بین میزان آسیب در محل سوراخکاری و بیشینه نیروی عمودی اعمالی توسط ابزار را بدست آوردند. این محققان نشان دادند که سرعت برشی بالا بیشترین آسیب را بر چندلایه کامپوزیتی وارد می‌نماید. تاناکا و همکاران [۱۰]، دو عملیات برشکاری سوراخ و سوراخکاری را با استفاده از جت آبی ساینده در چندلایه‌های کامپوزیتی کربنی با الیاف بافته شده ساده، انجام دادند؛ همچنین لازم به ذکر است که چندلایه‌های ساخته شده دارای زمینه پلیمری گرم‌ترم بوده است. نتایج این محققان بیانگر این است که برش‌کاری با جت آبی ساینده برای قطرهای کوچک امکان‌پذیر نبوده و از طرفی دیگر سوراخ ایجاد شده در کامپوزیت در هر دو عملیات یاد شده، مخروطی بوده به طوری که در بالا (بخش ورود) قطر بزرگتر و در پایین (بخش خروج) چندلایه کامپوزیتی، قطر کمتر تشکیل می‌شود؛ همچنین میزان فشار آب نازل، تأثیر زیادی بر آسیب در نواحی نزدیک به محل برش‌کاری یا سوراخکاری دارد. آناند و پاترا [۱۱]، به انجام آزمایشات و تحلیل با استفاده از روش روبه پاسخ (Response surface methodology) به بررسی کیفیت میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی پرداختند. در این تحقیق از یک قطر خاص ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج تحقیق نشانگر وجود اثرات اندازه (Size effect) در آسیب‌های تورقی ایجاد شده در چند لایه کامپوزیتی است. علاوه بر سوراخکاری کامپوزیت‌های در سرعت‌های پایین، در برخی از موارد به منظور بالابردن میزان تولید و ایجاد کیفیت سطوح بهتر، از سوراخکاری با سرعت‌های بالا استفاده می‌شود. بابو و همکاران [۱۲]، با سوراخکاری سرعت بالای چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با لایه‌چینی صلیبی (Cross ply) و معرفی متغیر آسیب جدید، به بررسی آسیب تورق در این نوع از عملیات سوراخکاری پرداختند. نتایج این محققان نشان می‌دهد که کمترین مقدار آسیب تورقی در حالت سرعت دورانی، ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه با سرعت پیشروی ۱ متر بر

سوراخکاری سرعت بالا طبقه‌بندی می‌گردند. نتایج این محققان، بیانگر این است که تورق در بخش خروجی چندلایه کامپوزیتی، اهمیت بیشتری نسبت به ناحیه ورودی ابزار در چندلایه کامپوزیتی دارد؛ همچنین افزایش سرعت دورانی ابزار در حدود ۴۰ هزار دور بر دقیقه به منظور عملیات میکروسوراخکاری به منظور کاهش عامل آسیب مناسب است. ارائه روابط تحلیلی به منظور پیش‌بینی نیروی عمودی ایجاد شده هنگام میکرو سوراخکاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی در تحقیقات دیگر، مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷-۱۹].

علاوه بر مطالعات صورت گرفته روی چندلایه‌های ساخته شده از الیاف کربن و شیشه، مطالعه روی ماشین‌کاری چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف کولار (Kevlar) نیز به دلیل ویژگی‌هایی چون چقرمگی بالا صورت گرفته است [۲۰-۲۲]؛ همچنین در بعضی از این تحقیقات، سعی شده است تا مدلی به منظور پیش‌بینی نیروی عمودی در این نوع از چندلایه‌ها صورت گیرد. ونگ و همکاران [۲۳]، سوراخکاری در شرایط محیطی با دماهای مختلف و اثر آن بر زبری سطح و تورق در لایه‌های خروجی چندلایه کامپوزیتی با الیاف کربنی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده حاکی از این است که بازه دمایی بهینه برای سوراخکاری بین دو دمای گذار شیشه‌ای (Glass transition temperature) و دمایی است که در آن رزین، تغییر شکل کاملاً ترد دارد. در تحقیق دیگر [۲۴]، تأثیر ابزارهای مختلف سوراخکاری بر میزان زبری سطح و تورق در چندلایه‌های با الیاف طبیعی کتان پرداخته شد. این محققان نشان دادند که اثر ابزار در مقایسه با سایر پارامترهای ورودی مانند سرعت دورانی و نرخ پیشروی از اهمیت بالایی برخوردار بوده، به طوری که اثر انتخاب مناسب ابزار بر میزان تورق لایه‌ها، ۶۷ درصد و بر زبری سطح ۷۴ درصد بوده است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، در سایر مراجع، میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس بهترین اطلاعات نگارندگان مقاله حاضر، مطالعه آزمایشگاهی در حوزه تعیین نیروی عمودی در میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی در قطره‌های مختلف، صورت نگرفته است. مطابق با بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، در یک مورد میکرو سوراخکاری

دقیقه و همچنین در حالت سرعت دورانی، ۱۶۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه با سرعت پیشروی ۳ متر بر دقیقه اتفاق می‌افتد. آگوا و مگاهد [۱۳]، به منظور کمینه‌سازی آسیب تورق در چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با انجام آزمایش‌های تجربی، مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی و بهینه‌سازی چند هدفه، به این نکته دست یافتند که سرعت دورانی بالای ابزار به همراه نرخ پیشروی پایین، موجب کمینه شدن تورق در بسیاری از موارد می‌شود. هریکاک و همکاران [۱۴]، با ارائه مدلی جدید به بررسی کیفیت سوراخکاری در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری پرداختند؛ همچنین آن‌ها روش ارائه شده را با انجام آزمون‌های مختلف سوراخکاری، اعتبارسنجی کردند. فاپال و همکاران [۱۵]، به مدل‌سازی المان محدود و مشخصه‌سازی نیروی عمودی بحرانی در عملیات سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی پرداختند. نتایج این محققان نشان می‌دهد که مقدار نیروی عمودی، وابستگی بسیار بالایی به نرخ پیشروی داشته، به طوری که با افزایش نرخ پیشروی از ۰/۱۵ به ۰/۴۵ میلی‌متر بر دور، مقدار نیروی عمودی بیش از ۹۴ درصد افزایش داشته است.

در بسیاری از قطعات مورد استفاده در صنایع مهم چون، دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان، فیلترها، نازل‌های تزریق سوخت، کانال‌های خنک کننده پره‌های توربین و غیره، استفاده از میکرو سوراخکاری اجتناب‌ناپذیر است. بسیاری از تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته است، متمرکز روی سوراخکار در ابعاد ماکرو در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده و تحقیقات کمتری در حوزه ویژگی‌ها و پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر سوراخکاری در ابعاد میکرو در چندلایه‌های کامپوزیتی بوده است. البته این نکته را نیز می‌بایست یادآور شده که میکروسوراخکاری در چندلایه‌های کامپوزیتی به دلیل قابل مقایسه بودن ابعاد ابزار با رشته‌های (Strands) الیاف و فواصل آن‌ها، مطالعه این پدیده را پیچیده‌تر می‌نماید. رحمت الله و شانموگان [۱۶]، با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی عملیات میکرو سوراخکاری مانند، نرخ پیشروی و سرعت دورانی به مطالعه رفتار تورق، خطای گرد بودن محل سوراخکاری، نیروی عمودی و گشتاور مورد نیاز در چندلایه کامپوزیتی کربن/اپوکسی پرداختند. قطر ابزار ۳۲۰ میکرومتر و سرعت دورانی ابزار در این تحقیق، بین ۲۰ تا ۴۰ هزار دور بر دقیقه بوده که در بحث عملیات سوراخکاری، به عنوان

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

مته‌های ابزار استفاده شده در این فرایند از سری مته‌های استاندارد فولاد تند بر انتخاب شده است و به منظور حذف اثر سایس ابزار از مته‌های نو به قطرهای ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ میلی‌متر استفاده شده است؛ همچنین، از یک دستگاه ماشین فرز کنترل عددی (CNC) آزمایشگاهی دقیق جهت انجام فرآیند سوراخ‌کاری بهره گرفته شده است. این مته‌های استاندارد دارای زاویه ماریچ مته ۳۲ درجه و زاویه راس مته ۱۱۸ هستند. برای اندازه‌گیری نیروی محوری از یک نیروسنج آزمایشگاهی با ظرفیت 10kgf بهره گرفته شده است. تجهیز آزمایشگاهی و مته‌های مورد استفاده برای میکروسوراخکاری چندلایه کامپوزیتی، در شکل ۲ نشان داده شده است.



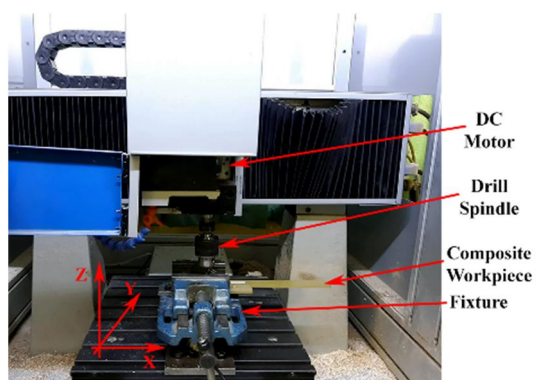
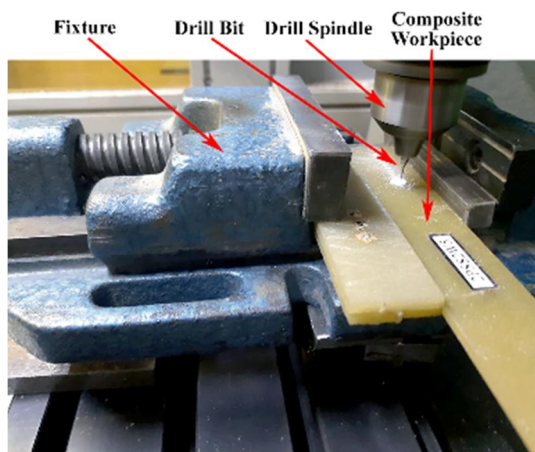
شکل ۱- تجهیز آزمایشگاهی تست کشش

چندلایه کامپوزیتی کربن/اپوکسی فقط در یک قطر خاص و با سرعت دورانی بالا مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]؛ در نتیجه در تحقیق حاضر، علاوه بر بررسی اثر پارامتر سرعت دورانی ابزار و همینطور نرخ پیشروی، رفتار نیرو در قطرهای مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفته است؛ همچنین در تحقیق حاضر، با استفاده از روش‌های رگرسیون مرتبه دوم خطی و سطح پاسخ به مدل‌سازی نیروی عمودی بر حسب متغیرهای ورودی پرداخته شده است. علاوه بر این، با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، میزان دقیق حساسیت فرآیند نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پایان، بهینه‌سازی نیروی عمودی و تعیین مقادیر پارامترهای ورودی به منظور کمینه‌سازی نیروی عمودی صورت گرفته است.

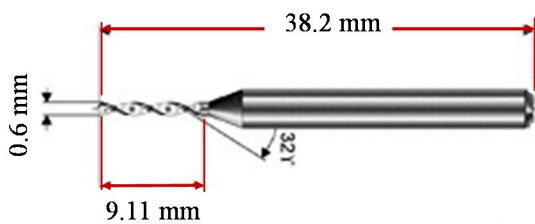
۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- مواد و ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی

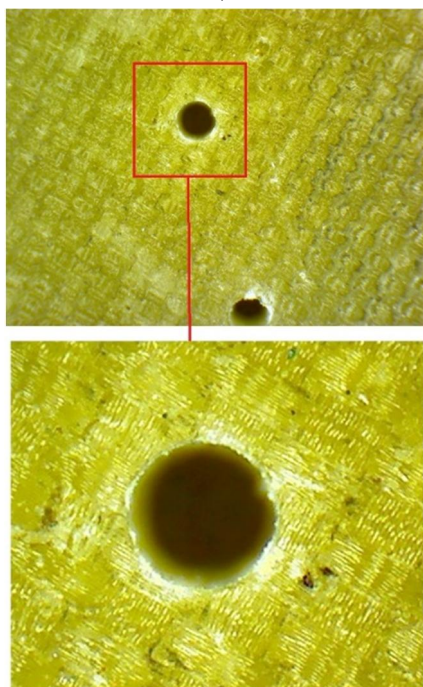
چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی از ۱۲ لایه الیاف شیشه بافته شده نوع E با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر متر مربع به همراه رزین اپوکسی LY-5052 به صورت لایه‌چینی دستی ساخته شده‌اند. سخت کننده مورد استفاده در تحقیق حاضر، HY-5052 بوده که با نسبت ترکیب ۱۰۰ به ۳۸ به لحاظ وزنی با رزین یاد شده، مخلوط شده است. فرایخت نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۷ روز صورت گرفته است. سپس چندلایه ساخته شده با استفاده از جت آبی با ابعاد ۲۵ میلی‌متر عرض و ۲۵۴ میلی‌متر طول، برش‌کاری شده‌اند. ضخامت چندلایه ساخته شده، ۲/۵ میلی‌متر است؛ همچنین لازم به ذکر است که مدول کششی و برشی چندلایه کامپوزیتی ساخته شده با انجام آزمایش مطابق با استانداردهای ASTM D3039 و ASTM D3518 به ترتیب ۱۶/۸ گیگاپاسکال و ۳/۱ گیگاپاسکال است؛ همچنین لازم به ذکر است که برای استخراج مدول کششی سه نمونه با ابعاد طول ۲۵۰ میلی‌متر، عرض ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و با لایه‌چینی 12[0] ساخته شده است. برای نمونه تحت برش نیز ابعاد تفاوتی نداشته و فقط از لایه چینی 3S[±45] استفاده شده است. تصویر تجهیز آزمایشگاهی تست کشش به همراه اکستنسیومتر در شکل ۱ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- الف) تجهیزات آزمایشگاهی، ب) مته‌های مورد استفاده در میکروسوراخکاری و ج) نمونه بعد از میکروسوراخکاری

۲-۳- روش رویه پاسخ

در تحلیل مسائل مهندسی که پاسخ مسئله تحت تأثیر متغیرهای ورودی است، استفاده از روش آماری به منظور مدل‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی فرآیند، کمک شایانی می‌نماید. در این زمینه یکی از بهترین روش‌های آماری، روش رویه پاسخ است [۲۵]. محققان به منظور بهبود و اصلاح آزمایش و هم‌منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های بالای آزمایشات تجربی، تشخیص دقت و رفع عیوب آن، از روش طراحی آزمایش استفاده می‌نمایند. در این بین، روش رویه پاسخ به دلیل داشتن ویژگی‌هایی چون تبیین دقیق آزمایش، مدل‌سازی ریاضی معادله حاکم بر مسئله، ارائه نمودارهای برهم‌کنش متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها، مورد استفاده بسیاری از محققان قرار گرفته است [۲۵]؛ همچنین روش رویه پاسخ قادر است، رابطه‌ای بین ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله حاکم نموده و آن را به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه نماید. فرم کلی معادله با توجه به متغیرها و برهم‌کنش‌های مؤثر به صورت رابطه (۱) است [۲۶].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

رابطه (۱)، y به عنوان پاسخ خروجی برحسب ورودی‌های آزمایش بیان می‌شود که در این رابطه ثابت‌های β به عنوان ضرایب معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم، x_i ضرایب اصلی ورودی آزمایش، x_i^2 توان دوم ضرایب ورودی آزمایش و $x_i x_j$ اثر برهم‌کنش مرتبه دوم ضرایب ورودی آزمایش است [۲۶]. مدل ارائه شده در رابطه بالا، در صورت مناسب بودن می‌تواند رفتار خروجی مسئله را برحسب پارامترهای ورودی مسئله در تمام بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نموده و نقاط بهینه را به منظور تفسیر و تحلیل بهتر نتایج ارائه نماید [۲۷].

۲-۴- تحلیل حساسیت سوبل

تحلیل حساسیت ابزاری مناسب جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین میزان اثر متغیرهای ورودی روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها در مسائل مهندسی است. آنالیز حساسیت عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی نموده و بیان می‌نماید که این عدم قطعیت در خروجی چگونه به عدم قطعیت در ورودی مرتبط می‌شود. در روش تحلیل حساسیت سوبل، برای مدل تعریف شده با تابع $Y=f(X)$ که Y خروجی مدل و $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردار پارامترهای ورودی است و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر عبارت تجزیه شده به صورت رابطه (۲) است:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1, \dots, n} \quad (2)$$

که در آن، V_i تأثیر مرتبه اول برای هر عامل ورودی ($V_i = V[E(Y|x_i)]$) و $(V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i - V_j)$ و V_{ij} تا $V_{1, \dots, n}$ برهم‌کنش بین n عامل را نشان می‌دهند. شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند ($S_i = \frac{V_i}{V}$) شاخص حساسیت مرتبه اول، $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه دوم و ...، شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید [۲۸].

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i \neq j} S_{ij} + \dots \quad (3)$$

۲-۵- طراحی آزمایش

عامل کلیدی در توسعه یک مدل ریاضی، بدست آوردن داده‌های تجربی کافی است تا بتوان در محیط کاری آزمایشگاه، نتایج را به درستی تحلیل کرد. در این تحقیق، چند لایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده ساده نوع E به منظور بررسی تغییرات نیرو با توجه به پارامترهای ورودی مهم فرآیند میکروسوراخکاری مورد آزمایش قرار گرفت. سه عامل قابل کنترل و مستقل که در این فرآیند انتخاب شدند عبارتند از: سرعت دورانی (v)، نرخ پیشروی (f) و قطر ابزار (d). در جدول ۱ بازه تغییرات متغیرهای ورودی در فرآیند میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است که هر متغیر دارای ۳ سطح است. طراحی آزمایش‌های این پژوهش به دلیل حساسیت بررسی فرآیند میکروسوراخکاری، با استفاده از روش طراحی عاملی کامل و با در نظر گرفتن دو بار تکرار به منظور افزایش دقت انجام آزمایش‌ها صورت گرفته است؛ همچنین به منظور

میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی و بر همکنش این پارامترها در خروجی مسئله می‌توان بهره برد. با توجه به اینکه در آزمایش‌های مهندسی مقدار قابلیت اطمینان ۹۵ درصد مورد نظر است، مقدار P (P-value) کمتر از ۰/۰۵ به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای با اهمیت در جدول واریانس، مقدار خطای مجموع مربعات مدل منطبق شده بر داده‌ها در تحلیل‌های آماری بوده که این پارامتر مقدار دقت معادله رگرسیون حاکم بر مسئله را مشخص می‌نماید. به طوریکه هرمیزان، مقدار خطای گفته شده در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد، مدل مربوطه دارای خطای پیش‌بینی کمتری است و در این تحقیق کمترین عدد این مولفه برای مدل رگرسیون مرتبه دوم کامل (Full quadratic) به دست آمده است. همانطور که در جدول آنالیز واریانس مشخص است و همچنین با توجه به مقدار مناسب R^2 و دقت انطباق معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم بر داده‌ها، مقدار خطای مانده بسیار ناچیز بوده و خطای عدم برازش نیز غیر مؤثر است. غیر مؤثر بودن خطای عدم برازش را می‌توان در مقدار P گزارش شده در جدول مشاهده نمود که بزرگتر از ۰/۰۵ است، مشاهده نمود [۲۷]. غیر مؤثر بودن خطای عدم برازش نشان می‌دهد، انطباق مدل بر داده‌های واقعی مناسب بوده و نقاط بهینه رویه پاسخ که ممکن است به صورت زینی، کمینه و یا بیشینه به وجود آید از دقت مناسبی برخوردار خواهد [۲۵]. با بررسی مقدار پایین خطای مانده، مؤثر بودن رگرسیون و غیر مؤثر بودن خطای عدم برازش می‌توان دریافت، مدل‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع مربعات برای مدل مرتبه دوم خطی برابر ۰/۴۰۷۲، معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر رفتار نیروی محوری در فرآیند میکروسوارخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی به صورت معادله (۴) است.

$$F_z = 1.117 - 4.295d + 0.01499f$$

$$-1.8 \times 10^{-5}v + 4.688d^2 - 1.3 \times 10^{-4}f^2$$

$$+0.0885d \times f - 3.17 \times 10^{-4}d \times v$$

$$-3 \times 10^{-6}f \times v \quad (4)$$

تحلیلی نتایج آزمایش‌ها از روش رویه پاسخ و طرح مرکب مرکزی بهره گرفته شده است. مطابق با طراحی آزمایش در نظر گرفته شده، ۵۴ آزمایش با ترکیب‌های مختلفی از قطر ابزار، سرعت دورانی و نرخ پیشروی انجام شده و نتایج تجربی نیروی محوری در جدول ۲ گزارش شده است؛ همچنین به منظور حذف خطاهای پیش‌بینی نشده، آزمایشات به صورت تصادفی انجام شده است. از نتایج ارائه شده در جدول ۲ به منظور تحلیل در نرم افزارهای مینی‌تب (Minitab) نسخه ۱۸ و دیزاین اکسپرت ۱۰ (Design Expert) استفاده شده و خروجی‌ها و استخراج ضرایب معادلات و نمودارهای گرافیکی و بر همکنش پارامترها نیز در دو نرم‌افزار یاد شده صورت گرفته است. باید این نکته را نیز یادآور شده که در روش رویه پاسخ، خروجی مسئله یا به عبارت دیگر، نیروی محوری در فرآیند میکروسوارخکاری با استفاده از یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم با توجه به پارامترهای ورودی مانند قطر، سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی تعریف می‌شود.

۳- مدل‌سازی ریاضی و تحلیل رفتار پارامترهای ورودی فرآیند میکروسوارخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی

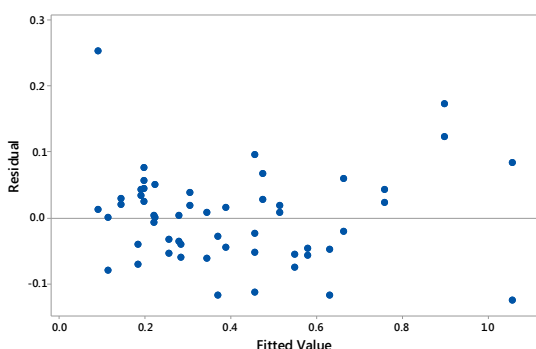
۳-۱- مدل‌سازی رفتار نیروی محوری

پس از استخراج نتایج بدست آمده از حداکثر مقدار نیروی محوری ایجاد شده در چندلایه‌های کامپوزیتی هنگام سوارخکاری، نتایج حاصل از تحلیل واریانس در جدول ۳ ارائه شده است. یکی از مسائلی که در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، بررسی تأثیر پارامترهای معادله رگرسیون با استفاده از تحلیل واریانس است. در مبحث طراحی آزمایش‌ها، از جدول تحلیل واریانس

جدول ۱- مقادیر کد شده متغیرهای ورودی بر اساس روش رویه پاسخ

ضرایب	-۱	۰	+۱
سرعت دورانی (rpm)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
سرعت پیشروی (mm/min)	۱۰	۳۰	۵۰
قطر (mm)	۰/۴	۰/۶	۰/۸

زیرا رگرسیون از بین داده‌ها و نزدیک آنها و در نظر داشتن همه آنها عبور می‌کند. ۲- این اختلاف باید کاملا تصادفی باشد و نظمی نداشته باشد و وجود نظم و یا انطباق کامل و غیره نشان دهنده مشکلاتی در داده برداری آزمایش‌هاست. ۳- نمودار آنالیز باقیمانده دقت و صحت مدلسازی را در کنار مقدار R^2 به تصویر کشیده و تک تک آزمایش‌ها مورد رصد دقیق قرار می‌دهد.



شکل ۳- پراکندگی باقیمانده‌ها نسبت به مدل منطبق شده

جدول ۲- انجام آزمایش‌های بررسی اثر پارامترهای

میکروسوراخکاری بر نیروی محوری

شماره آزمایش	قطر (mm)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	نیروی محوری، F (N)
۱	۰/۴	۱۰۰۰	۱۰	۰/۲۲
۲	۰/۴	۲۰۰۰	۱۰	۰/۱۷
۳	۰/۴	۳۰۰۰	۱۰	۰/۱۴
۴	۰/۴	۱۰۰۰	۳۰	۰/۴
۵	۰/۴	۲۰۰۰	۳۰	۰/۲۸
۶	۰/۴	۳۰۰۰	۳۰	۰/۲
۷	۰/۴	۱۰۰۰	۵۰	۰/۵
۸	۰/۴	۲۰۰۰	۵۰	۰/۳۲
۹	۰/۴	۳۰۰۰	۵۰	۰/۲۲
۱۰	۰/۶	۱۰۰۰	۱۰	۰/۲۲
۱۱	۰/۶	۲۰۰۰	۱۰	۰/۱۱

در رابطه (۴) d بر حسب میلی‌متر، v بر حسب دور بر دقیقه و f بر حسب میلی‌متر بر دقیقه بوده که مقدار نیروی محوری F بر حسب نیوتن استخراج می‌شود. با توجه به به‌دست آمدن مقادیر $R^2 = 92.17\%$ و $R^2(\text{adj}) = 90.57\%$ برای مدل بالا و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل ۳، می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت‌گرفته از دقت بسیار مناسبی برخوردار است. این نکته نیز می‌بایست لحاظ گردد که در مبحث طراحی آزمایش‌ها، مقدار بالای R^2 ، یکی از مواردی است که دقت مدل حاکم بر آزمایش را تعیین می‌نماید. هر مقدار مؤلفه یاد شده به عدد ۱ و یا ۱۰۰ درصد نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیقتر خواهد بود [۲۵]. علاوه بر مورد بالا، استفاده از بحث تحلیل پراکندگی باقیمانده‌ها (Residual fitted value) نیز از دیگر مواردی است که دقت مدل‌سازی انجام شده و نتایج گرفته شده را آشکار می‌سازد. مدلی که به داده‌های آزمایشگاهی منطبق شده، می‌بایست از بین مقادیر آزمایشگاهی عبور کرده و همچنین فاصله داده‌های آزمایشگاهی از مدل رگرسیون منطبق شده، کم و تصادفی باشد. کم بودن این مقدار را R^2 مشخص می‌نماید؛ در نتیجه با توجه به نمودار شکل ۳ می‌توان دریافت که مدل رگرسیون بدست آمده از انطباق خوبی برخوردار بوده و همچنین نظم خاصی در توزیع باقیمانده‌ها مشاهده نشده که از این نظر نیز مناسب است. همچنین در شکل ۳، محور افقی محور نمودار رگرسیون و محور عمودی باقی مانده بوده که نشان دهنده اختلاف بین مقدار واقعی و مقدار مدلسازی شده است. علاوه بر این در خصوص نمودارهای آنالیز باقیمانده می‌توان بیان داشت که در صورت انطباق کامل داده آزمایش واقعی با مقدار جایگذاری شده همین آزمایش در معادله رگرسیون، مقدار باقیمانده بین مقدار واقعی و مقدار حاصل از مدل سازی برابر با عدد صفر و در نتیجه این داده دقیقا روی محور افقی قرار می‌گیرد. در انجام آزمایش‌های واقعی، همواره مقدار اختلاف تصادفی بین مدل و داده واقعی وجود خواهد داشت و مقدار واقعی ممکن است کمی کمتر و یا بیشتر با مقدار مدل‌سازی اختلاف داشته باشد در این صورت توجه به چند نکته ضروری است. ۱- این اختلاف می‌بایست کم باشد و نشانه کم بودن این اختلافات خود را در مقدار R^2 نشان خواهد داد؛

۰/۳۴	۱۰	۳۰۰۰	۰/۶	۳۹	۰/۱	۱۰	۳۰۰۰	۰/۶	۱۲
۰/۴	۳۰	۱۰۰۰	۰/۶	۴۰	۰/۳۴	۳۰	۱۰۰۰	۰/۶	۱۳
۰/۲۲	۳۰	۲۰۰۰	۰/۶	۴۱	۰/۲۴	۳۰	۲۰۰۰	۰/۶	۱۴
۰/۲۲	۳۰	۳۰۰۰	۰/۶	۴۲	۰/۲۴	۳۰	۳۰۰۰	۰/۶	۱۵
۰/۵۲	۵۰	۱۰۰۰	۰/۶	۴۳	۰/۵۳	۵۰	۱۰۰۰	۰/۶	۱۶
۰/۲۸	۵۰	۲۰۰۰	۰/۶	۴۴	۰/۳۵	۵۰	۲۰۰۰	۰/۶	۱۷
۰/۲۵	۵۰	۳۰۰۰	۰/۶	۴۵	۰/۲۷	۵۰	۳۰۰۰	۰/۶	۱۸
۰/۵۸	۱۰	۱۰۰۰	۰/۸	۴۶	۰/۵۱	۱۰	۱۰۰۰	۰/۸	۱۹
۰/۴۳	۱۰	۲۰۰۰	۰/۸	۴۷	۰/۵۵	۱۰	۲۰۰۰	۰/۸	۲۰
۰/۲۵	۱۰	۳۰۰۰	۰/۸	۴۸	۰/۳۴	۱۰	۳۰۰۰	۰/۸	۲۱
۱/۰۷	۳۰	۱۰۰۰	۰/۸	۴۹	۱/۰۲	۳۰	۱۰۰۰	۰/۸	۲۲
۰/۷۲	۳۰	۲۰۰۰	۰/۸	۵۰	۰/۶۴	۳۰	۲۰۰۰	۰/۸	۲۳
۰/۵۲	۳۰	۳۰۰۰	۰/۸	۵۱	۰/۵۳	۳۰	۳۰۰۰	۰/۸	۲۴
۰/۹۳	۵۰	۱۰۰۰	۰/۸	۵۲	۱/۱۴	۵۰	۱۰۰۰	۰/۸	۲۵
۰/۸	۵۰	۲۰۰۰	۰/۸	۵۳	۰/۷۸	۵۰	۲۰۰۰	۰/۸	۲۶
۰/۴۹	۵۰	۳۰۰۰	۰/۸	۵۴	۰/۴۷	۵۰	۳۰۰۰	۰/۸	۲۷

۳-۲- بررسی اثر متغیرهای ورودی بر مقدار نیروی محوری در فرآیند میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی

در بخش حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی عملیات میکروسوراخکاری مانند سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و قطر ابزار بر مقدار نیروی محوری در حین سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی پرداخته می‌شود. روش مورد استفاده به منظور بررسی پارامترهای یاده شده، مدل‌سازی ریاضی صورت گرفته در بخش ۳-۱ که از پیش‌بینی مناسبی برخوردار بوده و منطبق بر داده‌های آزمایشگاهی بوده است. بدین منظور با استفاده از روش روبه پاسخ به مطالعه هر یک از متغیرهای اصلی و برهمکنش آن‌ها بر رفتار نیروی محوری ایجاد شده پرداخته شده و نمودارهای حاصله مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرند. استفاده از روش

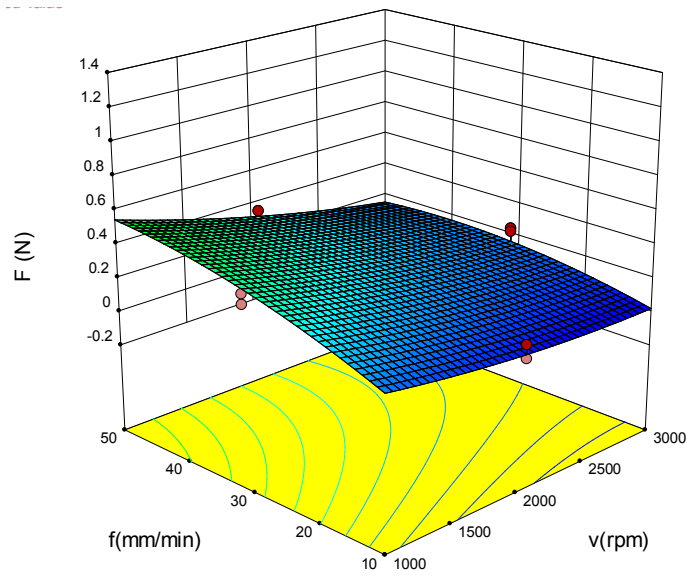
۰/۲۳	۱۰	۱۰۰۰	۰/۴	۲۸
۰/۱۶	۱۰	۲۰۰۰	۰/۴	۲۹
۰/۱۱	۱۰	۳۰۰۰	۰/۴	۳۰
۰/۳۴	۳۰	۱۰۰۰	۰/۴	۳۱
۰/۲۴	۳۰	۲۰۰۰	۰/۴	۳۲
۰/۲۲	۳۰	۳۰۰۰	۰/۴	۳۳
۰/۵۴	۵۰	۱۰۰۰	۰/۴	۳۴
۰/۳۴	۵۰	۲۰۰۰	۰/۴	۳۵
۰/۲۱	۵۰	۳۰۰۰	۰/۴	۳۶
۰/۲۷	۵۰	۱۰۰۰	۰/۶	۳۷
۰/۳	۱۰	۲۰۰۰	۰/۶	۳۸

جدول ۳- تحلیل واریانس نیروی محوری برحسب مؤلفه‌های مؤثر در میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیت

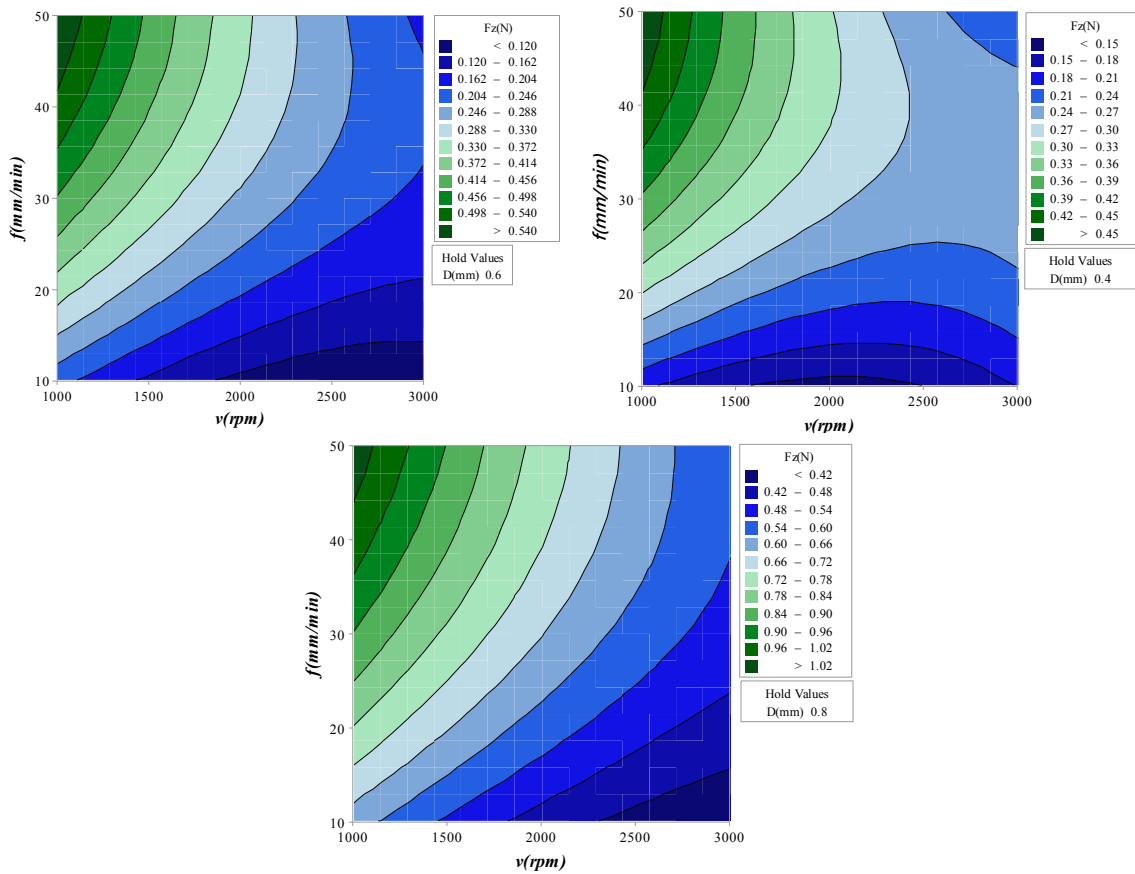
عبارت‌ها	جمع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F-value	مقدار P-value	سهم مشارکت (%)
مدل	۳/۱۱۸۲۴	۰/۳۴۶۴۷	۵۷/۵۵	۰/۰۰۰	۹۲/۱۷
v (rpm)	۰/۵۹۸۰۴	۰/۵۹۸۰۴	۹۹/۳۴	۰/۰۰۰	۱۷/۶۸
f (mm/min)	۰/۴۸۵۳۴	۰/۴۸۵۳۴	۸۰/۶۲	۰/۰۰۰	۱۴/۳۵
d (mm)	۱/۳۳۴۰۳	۱/۳۳۴۰۳	۲۲۱/۵۹	۰/۰۰۰	۳۹/۴۳
v^2 (rpm) ²	۰/۰۲۲۵۳	۰/۰۲۲۵۳	۳/۷۴	۰/۰۵۰۹	۰/۶۷
f^2 (mm/min) ²	۰/۰۳۶۶۳۰	۰/۰۳۶۶۳۰	۶/۰۳	۰/۰۱۸	۱/۰۷
d^2 (mm) ²	۰/۴۲۱۸۸	۰/۴۲۱۸۸	۷۰/۰۸	۰/۰۰۰	۱۲/۴۷
v (rpm) \times f (mm/min)	۰/۰۹۳۷۵	۰/۰۹۳۷۵	۱۵/۵۷	۰/۰۰۰	۲/۷۷
v (rpm) \times d (mm)	۰/۰۹۶۲۷	۰/۰۹۶۲۷	۱۵/۹۹	۰/۰۰۰	۲/۸۵
f (mm/min) \times d (mm)	۰/۰۳۰۱۰	۰/۰۳۰۱۰	۵/۰۰	۰/۰۳۰	۰/۸۹
خطا مانده	۰/۲۶۴۸۹	۰/۰۰۶۰۲	-	-	۷/۸۳
عدم برازش	۰/۰۸۳۲۰	۰/۰۰۳۰۸	۱/۴۷	۰/۲	۱/۳۷
خطای خالص	۰/۱۸۱۶۹	۰/۰۱۰۶۹	-	-	۶/۴۶

گرافیکی، که در آن، تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می‌نمایند که برای توضیحات بیشتر می‌توان به مرجع [۲۸] مراجعه نمود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که اگر در طراحی آزمایشات و نتایج ارائه شده، علاوه بر عامل‌های اصلی، برهمکنش پارامترهای ورودی دارای اهمیت باشد (به مانند آنچه در تحقیق حاضر صورت گرفته است)، به منظور بررسی و تفسیر نتایج، می‌بایست از نمودارهای برهمکنش استفاده نموده و اثر عامل‌های اصلی به تنهایی از اهمیت کمتری برخوردار بوده و در تحلیل نتایج در اولویت اول قرار ندارد و در صورت اختلاف رفتارها و مؤثر بودن هر دو پارامتر می‌بایست رفتار بر هم کنش را مورد نظر قرار داد [۲۵].

رویه پاسخ در تحقیقات سایر محققان جهت تحلیل مسائل مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷]. نمودار رویه پاسخ نیروی محوری به تغییر همزمان سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار در شکل ۴ قابل مشاهده است. در این شکل، بر اساس قطرهای مختلف، اثر تغییرات دو سرعت دورانی و پیشروی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵ اثر برهمکنش سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر قطرهای مختلف میکروسوراخکاری بر نیروی محوری، مورد بررسی قرار گرفته است؛ همچنین در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به ترتیب اثر عامل‌های اصلی قطر، سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر نیروی محوری مورد بررسی قرار گرفته است. نقاط ارائه شده در این شکل‌ها از نرم‌افزار سیملب ۱۰ و با استفاده از روش سوبل استخراج شده است. در روش سوبل بر خلاف روش‌های



شکل ۴- نمودار روبه پاسخ نیروی محوری بر اساس رفتار همزمان سرعت دورانی و سرعت پیشروی



شکل ۵- نمودارهای برهم کنش نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار در قطرهای مختلف بر نیروی محوری در فرآیند میکروسوراخکاری

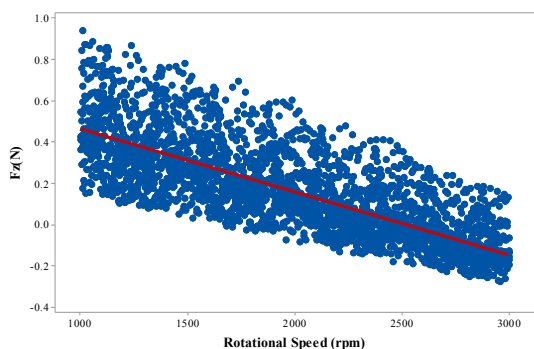
۳-۳- تحلیل اثر سرعت دورانی بر رفتار نیرو محوری

در این بخش، با توجه به نمودارهای برهمکنش بدست آمده در شکل ۵ و همینطور نمودار شکل ۶، به ارزیابی و تحلیل اثر سرعت دورانی ابزار بر مقدار نیروی محوری پرداخته می‌شود. همانطور که در این نمودارها مشخص است در تمامی قطرها رفتار نیروی محوری با افزایش سرعت دورانی کاهش می‌یابد، زیرا افزایش سرعت دورانی موجب می‌شود تا در حین سوراخکاری براده به سهولت بتواند از ناحیه ماشین‌کاری خروج نموده و به تبع آن موجب کاهش اصطکاک بین لایه‌های کامپوزیت با ابزار می‌شود؛ بنابراین مطابق با تحلیل بدست آمده در فرآیند میکروماشین‌کاری چندلایه‌های کامپوزیتی، افزایش سرعت دورانی ماشین‌کاری موجب بهبود فرآیند و کاهش مقدار نیروی محوری می‌شود. این نکته نیز باید در نظر گرفته شود که افزایش نیروی محوری می‌تواند موجب آسیب‌هایی در چندلایه کامپوزیتی گردد که از جمله این آسیب‌ها می‌توان به تورق یا جدایش لایه‌های کامپوزیت در ناحیه سوراخکاری در محل ورودی یا خروجی ابزار، اشاره نمود. افزایش دما با بالا رفتن سرعت دورانی موجب شکل‌گیری بهتر براده و نرم شوندگی و کاهش استحکام مکانیکی ماده در ناحیه‌های پلاستیک و در نتیجه کاهش نیروی محوری می‌گردد. البته در تحلیل دما بحث ارتباط رفتار دما و رفتار نیرو در ماشین‌کاری در برخی موارد پیچیده است، علی‌الخصوص در تحلیل اثر نرخ پیشروی، زیرا در پیشروی‌های پایین از طرفی ضخامت براده تغییر شکل نیافته و در نتیجه اصطکاک بین سطح براده و قطعه کار کم است و این امر موجب کاهش نیرو و کاهش اصطکاک و کاهش دما می‌شود و از طرفی به جهت مواجهه زیاد بین ابزار و قطعه کار و افزایش نرخ انتقال حرارت به جهت بالا رفتن زمان ماشین‌کاری دما در قطعه کار بالا می‌رود؛ همچنین در نرخ‌های پیشروی بالا به جهت ضخامت براده بالاتر و اصطکاک بالاتر از طرفی دما افزایش یافته، ولی به جهت زمان کوتاه فرآیند دما در قطعه زیاد بالا نمی‌رود. در این شرایط عمدتاً تحلیل رفتار دما و نیرو با استفاده از گراف‌های برهم‌کنش و شرایط آزمایش تحلیل می‌گردد و ممکن است در نرخ‌های پیشروی میانی که نسبت به شرایط پیشروی پایین‌تر مواجه کمتر است و نسبت به پیشروی بالاتر نیروی اصطکاک کمتر

است. بهترین حالت دما علی‌رغم کمینه نبودن نیروی محوری ممکن است، رخ دهد که گاهی این رفتار در قطرها و سرعت‌های مختلف متفاوت است که در این خصوص توضیحاتی در مرجع [۲۹] ارائه شده است.

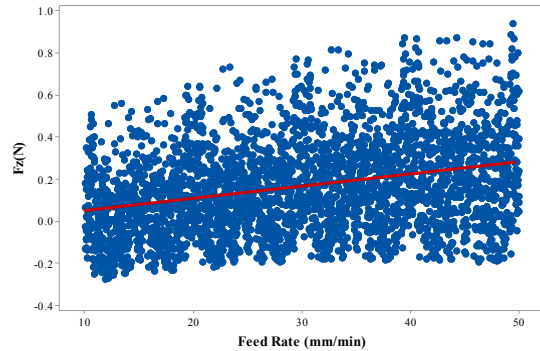
۳-۴- تحلیل اثر سرعت پیشروی ابزار بر رفتار نیرو محوری

با توجه به نمودار شکل ۵ که رفتار نیروی محوری را در قطره‌های مختلف و تغییرات سرعت پیشروی ابزار نشان می‌دهد و به علاوه نمودار شکل ۷ که با استفاده از روش سوبل بدست آمده، نشان می‌دهند، دو حالت بیشینه و کمینه نیروی محوری را می‌توان برای برهمکنش اثر نرخ پیشروی و سرعت دورانی در نظر گرفت. بیشینه نیروی محوری در حالتی خواهد بود که سرعت پیشروی زیاد بوده و از طرفی دیگر سرعت دورانی ابزار نیز کم بوده باشد که به طور مثال برای قطر ۰/۸ میلی‌متر این مقدار به بیش از ۱/۰۲ نیوتن می‌رسد. در این حالت با توجه به اینکه ضخامت براده تغییر شکل یافته زیاد بوده و امکان خروج براده به سهولت از ناحیه سوراخکاری وجود ندارد، مقدار نیروی محوری افزایش می‌یابد و این درحالی است که در سرعت‌های دورانی بالاتر و سرعت پیشروی پایین‌تر مقدار نیروی محوری کمینه مقدار خود را خواهد داشت که با مطالعه شکل ۵ می‌توان برای قطر ۰/۸ میلی‌متر به مقادیر کمتر از ۰/۴۲ نیوتن رسید؛ همچنین مطابق با شکل ۷، افزایش نرخ پیشروی به دلیل اینکه موجب افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته می‌شود، موجب افزایش نیروی محوری می‌شود.



شکل ۶- نمودار اثر متغیر سرعت دورانی ابزار بر نیروی محوری در فرآیند میکروسوراخکاری

سوراخکاری، مقدار نیروی محوری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر از نقطه نظر فیزیکی، با افزایش قطر ابزار، موجب افزایش سطح مقطع براده شده و همچنین مقدار تماس سطح ابزار با جداره سوراخ (لایه‌های کامپوزیت) بیشتر شده و این خود موجب افزایش نیروی محوری مورد نیاز جهت سوراخکاری و خروج براده می‌شود. در قطرهای پایین مانند ۰/۴ میلی‌متر نیرو تقریباً کمتر از ۰/۴۵ نیوتن بوده و از طرفی دیگر در قطرهای بالا مانند ۰/۸ میلی‌متر مقدار نیرو به بیش از ۱ نیوتن نیز می‌رسد.

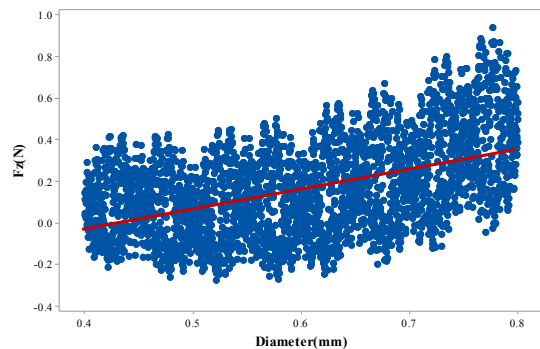


شکل ۷- نمودار اثر عامل نرخ پیشروی بر نیروی محوری در فرآیند میکروسوراخکاری

۳-۶- بهینه‌سازی نیروی محوری در میکروسوراخکاری

چندلایه کامپوزیتی و تحلیل حساسیت سوپل

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در بخش‌های ۳-۲ تا ۳-۵ در زمینه اثر هر یک از پارامترهای ورودی مسئله بر مقدار نیروی محوری و همینطور اهمیت کاهش نیروی محوری در عملیات ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها به دلیل احتمال ایجاد آسیب در بین لایه‌های کامپوزیت به‌ویژه آسیب تورق، در زیر بخش حاضر به بهینه‌سازی نیروی محوری پرداخته خواهد شد. بهینه‌سازی صورت گرفته با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و با استفاده از مدل منطبق شده بر آزمایشات تجربی و در نظر گرفتن حد مطلوبیت (Desirability) صورت گرفته و در شکل ۹ نشان داده شده است. جهت بهینه‌سازی نیرو از الگوریتم درینگر و سوویچ استفاده می‌شود. این روش از تابع مطلوبیت استفاده می‌نماید. در این روش هر پاسخ y_i به یک تابع مطلوبیت مجزا d_i تبدیل شده که این پارامتر بین ۰ تا ۱



شکل ۸- نمودار اثر پارامتر قطر بر نیروی محوری در فرآیند میکروسوراخکاری

۳-۵- تحلیل اثر قطر ابزار بر رفتار نیروی محوری

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در شکل ۵ و همینطور شکل ۸ می‌توان گفت که با افزایش قطر ابزار در عملیات

		Diameter, d (mm)	Feed Rate, f (mm/min)	Rotational Speed, v (rpm)
Optimal	High	0.8	50	3000
	Low	0.4	10	1000
		[0.5333]	[10]	[2515.15]

Force, F_z (N) Minimum $y=0.0672$			
---	--	--	--

شکل ۹- بهینه‌سازی صورت گرفته به منظور دستیابی به کمینه نیروی محوری در میکروسوراخکاری

عاملهای با تأثیرگذاری بالا و کم را شناسایی نمود. البته باید توجه داشت که در تحلیل اثر بر هم کنش رفتار پارامترها و تحلیل دقیق رفتارهای پیچیده روش رویه پاسخ تحلیلی کامل‌تری را ارائه می‌نماید. نتایج تحلیل حساسیت در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

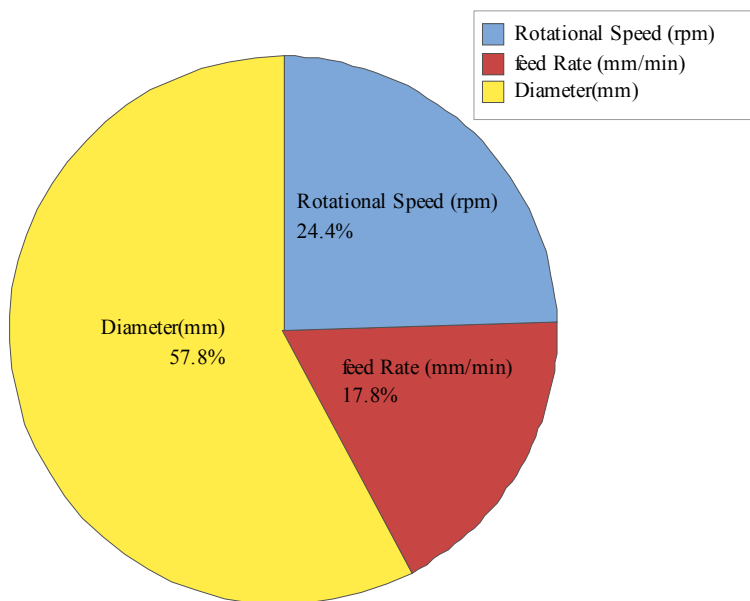
با توجه به تحلیل صورت گرفته، در فرآیند میکروسوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی ساخته شده از الیاف بافته شده ساده، قطر ابزار سوراخکاری داری اثر ۵۷/۸ درصدی و سپس سرعت پیشروی و سرعت دورانی به ترتیب دارای تأثیر ۱۷/۸ و ۲۴/۴ درصدی بوده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثرات پارامترهای ورودی مانند نرخ پیشروی، سرعت دورانی و قطر بر رفتار نیروی محوری در حین میکرو سوراخکاری چندلایه‌های شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده پرداخته شده است. بدین منظور با طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش عاملی کامل، آزمایش‌های تجربی لازم طراحی شده و تست میکرو سوراخکاری انجام شده است. تحلیل نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش رویه پاسخ صورت گرفته و همچنین با استفاده از مدل رگرسیون

تغییر می‌نماید ($0 \leq d_i \leq 1$). اگر پاسخ y_i یک مقدار هدف باشد آنگاه $d_i = 1$ بوده و همچنین اگر پاسخ خارج از بازه قابل قبول باشد، آنگاه $d_i = 0$ است. در پایان متغیرهای طراحی به‌گونه‌ای انتخاب می‌گردند که تابع مطلوبیت کلی را ماکزیمم نمایند $D = (d_1 d_2 \dots d_m)^{1/m}$. مطالب بیشتر در این موضوع در مرجع [25] ارائه شده است. نتایج بدست آمده گویای این مطلب است که با در نظر گرفتن قطر ۰/۵۳ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۲۵۱۵ دور بر دقیقه، کمینه مقدار نیروی محوری در فرآیند میکرو سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی حاصل می‌شود.

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در بخش‌های ۲-۳ تا ۳-۵، تمامی پارامترهای ورودی مانند سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار اثر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار نیروی محوری در فرآیند سوراخکاری داشته‌اند. حال در این بخش با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، مقدار کمی تأثیر هر یک از پارامترهای یاد شده بر نیروی محوری مشخص می‌شود. یکی از مزایای تحلیل حساسیت سوبل نسبت به تحلیل واریانس این است که علاوه بر مشاهده تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پاسخ سیستم، می‌توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به طور همزمان به دست آورده و



شکل ۱۰- نمودار درصد تأثیر پارامترهای ورودی بر متغیر آسیب

- [9] Sorrentino L, Turchetta S, Bellini C (2018) A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control. *Compos Struct* 186: 154-164.
- [10] Thongkaew K, Wang J, Li W (2019) An investigation of the hole machining processes on woven carbon-fiber reinforced polymers (CFRPs) using abrasive waterjets. *Mach Sci Technol* 23: 19-38.
- [11] Anand RS, Patra K (2018) Cutting force and hole quality analysis in micro-drilling of CFRP. *Mater Manuf Process* 33: 1369-1377.
- [12] Babu J, Paul Alex N, Abraham SP, et al (2018) Development of a comprehensive delamination assessment factor and its evaluation with high-speed drilling of composite laminates using a twist drill. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 232: 2109-2121.
- [13] Agwa MA, Megahed AA (2019) New nonlinear regression modeling and multi-objective optimization of cutting parameters in drilling of GFRE composites to minimize delamination. *Polym Test* 75: 192-204.
- [14] Hrechuk A, Bushlya V, Stáhl JE (2018) Hole-quality evaluation in drilling fiber-reinforced composites. *Compos Struct* 204: 378-387.
- [15] Phapale K, Ahire A, Singh R (2018) Experimental characterization and finite element modeling of critical thrust force in cfrp drilling. *Mach Sci Technol* 22: 249-270.
- [16] Rahamathullah I, Shunmugam MS (2013) Analyses of forces and hole quality in micro-drilling of carbon fabric laminate composites. *J Compos Mater* 47: 1129-1140.
- [17] Anand RS, Patra K, Steiner M (2014) Size effects in micro drilling of carbon fiber reinforced plastic composite. *Prod Eng* 8: 301-307.
- [18] Anand RS, Patra K (2017) Mechanistic cutting force modelling for micro-drilling of CFRP composite laminates. *CIRP J Manuf Sci Technol* 16: 55-63.
- [19] Rahamathullah I, Shunmugam MS (2014) Mechanistic approach for prediction of forces in micro-drilling of plain and glass-reinforced epoxy sheets. *Int J Adv Manuf Technol* 75: 1177-1187.
- [20] Anarghya A, Harshith DN, Rao N, et al (2018) Thrust and torque force analysis in the drilling of aramid fibre-reinforced composite laminates using RSM and MLPNN-GA. *Heliyon* 4: e00703.
- [21] Liu S, Yang T, Liu C, et al (2018) Investigation of hole quality during drilling of KFRP based on the interaction between collars and cutter. *Int J Adv Manuf Technol* 95: 4101-4116.
- [22] Díaz-Álvarez A, Rodríguez-Millán M, Díaz-Álvarez J, Miguélez MH (2018) Experimental

خطی مرتبه دوم رفتار نیروی محوری مدل‌سازی شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که افزایش قطر ابزار موجب افزایش سطح مقطع براده شده به تبع آن موجب افزایش نیروی محوری جهت سوراخکاری می‌گردد؛ همچنین افزایش سرعت دورانی به همراه کاهش نرخ پیشروی نیروی محوری را کاهش می‌دهد. علاوه بر این افزایش نرخ پیشروی به دلیل اینکه موجب افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته می‌گردد، موجب افزایش نیروی محوری می‌شود. در پایان، بهینه‌سازی پارامترهای ورودی با استفاده از الگوریتم درینگر نشان می‌دهد که کمینه نیروی محوری در سرعت دورانی ۲۵۱۵ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و قطر ابزار ۰/۵ میلیمتر حاصل می‌شود؛ همچنین تحلیل حساسیت سوپل‌گویای این مطلب است که به ترتیب قطر (۵۷/۸ درصد)، سرعت دورانی (۲۴/۴ درصد) و سرعت پیشروی (۱۷/۸ درصد) در پارامتری خروجی فرآیند سوراخکاری یا به عبارت دیگر نیروی محوری تأثیرگذار بوده‌اند.

۵- مراجع

- [1] Gay D, Hoa S V, Tsai SW (2003) *Composite Materials Design and Applications*. CRC Press
- [2] Jones RM (1998) *Mechanics of Composite Materials*, 2nd Edition. CRC Press
- [3] Asundi A, Choi AYN (1997) Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft. *J Mater Process Technol* 63: 384-394.
- [4] Soutis C (2005) Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Prog Aerosp Sci* 41: 143-151.
- [5] Heidary H, ZarifKarimi N, Ahmadi-Najafabadi M, Rahimi A (2013) Study of the Effect of Machining Parameters on Drilling of Composite Materials and Monitoring of Process by Acoustic Emission. *J Appl Comput Sci Mech* 24: 1-16. (In Persian)
- [6] Hakimi E, Amini S (2016) Study of Delamination in the Process Helical Milling of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite. *J Sci Technol Compos* 2: 51-58. (In Persian)
- [7] Joshi S, Rawat K, Balan ASS (2018) A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP. *J Mater Process Technol* 262: 521-531.
- [8] Vinayagamoorthy R, Manoj I V., Narendra Kumar G, et al (2018) A central composite design based fuzzy logic for optimization of drilling parameters on natural fiber reinforced composite. *J Mech Sci Technol* 32: 2011-2020.

- [27] Vahdati M, Moradi M (2019) Statistical Analysis of Parameters Affecting the Mechanical Properties of Surface Composite Al7075/Al2O3 Produced by Friction Stir Processing Using Response Surface Methodology. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9: 81-94. (In Persian)
- [28] Sobol IM (1993) Sensitivity estimates for nonlinear mathematical model. *Math Model Comput Exp* 1: 407-414
- [29] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M (2017) Investigation, sensitivity analysis, and multi-objective optimization of effective parameters on temperature and force in robotic drilling cortical bone. *Proc Inst Mech Eng Part H J Eng Med* 231: 1012-1024.
- analysis of drilling induced damage in aramid composites. *Compos Struct* 202: 1136-1144.
- [23] Wang H, Zhang X, Duan Y (2018) Effects of drilling area temperature on drilling of carbon fiber reinforced polymer composites due to temperature-dependent properties. *Int J Adv Manuf Technol* 96: 2943-2951.
- [24] Rezaghi Maleki H, Hamed M, Kubouchi M, Arao Y (2019) Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites. *Mater Manuf Process* 34: 283-292.
- [25] Montgomery DC (2008) Design and analysis of experiments, 8th edition. John Wiley & Sons, Inc.
- [26] A. I. Khuri, J. A. Cornell (2019) Response surfaces: Designs and analyses. 2nd edn. CRC Press