



بررسی رفتار نیروی محوری و دما در فرایند کاری کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی با و بدون انحناء

آرمان طاهری^۱، مظاهر سلامت طلب^{۲*}، وحید طهماسبی^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* اراک، صندوق پستی: ۳۸۱۳۵۱۱۷۷، salamattalab@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۰ خرداد ۱۴۰۲

داوری اولیه: ۲۷ تیر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۷ مرداد ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی
سوراخ‌کاری چندلایه‌های کامپوزیتی
نیروی محوری
روش پاسخ سطح

چندلایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، سفتی بالا و عملکرد مناسب، کاربرد وسیعی در صنایع دارند. یکی از کاربردهای چندلایه‌های کامپوزیتی انتقال سیال به‌وسیله لوله‌های کامپوزیتی می‌باشد. در این مطالعه به دلیل استفاده روزافزون از لوله‌های کامپوزیتی به بررسی و مقایسه اثر پارامترهای اصلی سوراخ‌کاری مانند سرعت پیشروی، سرعت دورانی و قطر ابزار بر روی نیروی محوری و دما در سوراخ‌کاری چندلایه‌های کامپوزیتی با انحناء پرداخته شده و با نتایج چندلایه کامپوزیتی بدون انحناء مقایسه شده است. بدین منظور ابتدا چندلایه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که به‌طور کلی در تمامی قطرها و سرعت‌های پیشروی محوری در هر دو چندلایه کامپوزیتی با افزایش سرعت دورانی کاهش می‌یابد اما تأثیر این پارامتر بر روی دما وابسته به انحناء چندلایه کامپوزیتی می‌باشد. همچنین افزایش نرخ پیشروی در هر دو آزمایش باعث افزایش نیروی محوری و کاهش دما می‌شود و این موضوع به ترتیب به دلیل افزایش فشار ابزار بر روی چندلایه کامپوزیتی و کاهش زمان درگیری ابزار با چندلایه کامپوزیتی می‌باشد. در پایان به‌طور کلی نیروی محوری و دما در پارامترهای سوراخ‌کاری یکسان در چندلایه کامپوزیتی با انحناء کمتر از چندلایه کامپوزیتی بدون انحناء است.

Investigating the behavior of axial force and temperature in the drilling process of glass/epoxy composites with and without curvature

Arman Taheri, Mazaher Salamat-talab*, Vahid Tahmasbi

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* P.O.B. 381351177 Arak, Iran, salamattalab@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 10 June 2023
First Decision: 18 July 2023
Accepted: 18 August 2023

Keywords:

Glass/Epoxy Composites
Drilling of Laminated Composites
Thrust Force
Response Surface Method

Abstract

Fiber-reinforced composites are widely used in industries due to their high strength-to-weight ratio, high stiffness, and proper performance. One of the applications of composite laminates is fluid transmission by means of composite pipes. In this study, due to the increasing use of composite pipes, the effect of the main drilling parameters such as feed rate, rotational speed and tool diameter on the thrust force and temperature in the drilling of composite laminates with curvature was investigated and the results compared with one of composite laminates without curvature. To this end, glass fiber/epoxy composite laminates were manufactured by hand lay-up method. The experimental results show that, in general, in all diameters and feed rates, the thrust force in both composite laminates decrease with increasing rotational speed, but the effect of this parameter on temperature depends on the curvature of the composite laminates. Also, increasing the feed rate in both laminates increases the thrust force and decreases the temperature, and this is due to the increase of the pressure of the tool on the composite laminates and the reduction of the engagement time of the tool with the composite laminates, respectively. Finally, in general, the axial force and temperature in the same drilling parameters in the composite laminates with curvature is lower than that one without curvature.

۱- مقدمه

کشتی‌سازی، هوافضا و غیره همچنان در استفاده از چند لایه‌های کامپوزیتی محدودیت‌هایی وجود دارد. یکی از این موضوعات، ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها به‌ویژه سوراخ‌کاری، به‌منظور اتصال نهایی قطعات می‌باشد.

در سال‌های اخیر چند لایه‌های کامپوزیتی به دلیل خواص منحصربه‌فرد مانند وزن کم، استحکام و سفتی بالا، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱-۳]. علی‌رغم تقاضا و استفاده روزافزون از این مواد در حوزه‌های مختلف صنعتی مانند صنایع دفاعی و نظامی،

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Taheri, M. Salamat-talab, V. Tahmasbi, Investigating the behavior of axial force and temperature in the drilling process of glass/epoxy composites with and without curvature, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 12, pp. 19- 31, 2023 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.400730.1792>

هوچنگ و همکاران [۴] یک روش نوآورانه با استفاده از الکترومغناطیس و کلئید ارزان قیمت شک پذیر ترکیب شده با پودر آهن را برای تولید نیروی پشتیبان مغناطیسی در قسمت خروجی مته از چندلایه کامپوزیتی در سوراخ کاری لوله‌ی کامپوزیتی الیاف کربن و جلوگیری از تورق ارائه کرده‌اند. موارد بررسی شده شامل تورق، نرخ پیشروی، شدت جریان الکتریکی و نسبت حجمی پودر آهن که مربوط به نیروی پشتیبان می‌باشند، هستند. این روش نوآورانه کاهش ۶۰ الی ۸۰ درصدی تورق را به همراه داشته است. نتایج بررسی تجربی این محققان نشان می‌دهد افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش میزان تورق می‌شود. در ادامه، نگارندگان مقاله قبلی روشی دیگر با استفاده از نیروی داخلی در طول یخ زدن آب برای جلوگیری از تورق در سوراخ کاری لوله‌ی کامپوزیتی الیاف کربن ارائه کرده‌اند. نتایج این روش نشان می‌دهد با این نیروی پشتیبان تورق به طور متوسط ۴۰ درصد کاهش پیدا می‌کند [۵]. رابوو و همکاران [۶] به بررسی عملکرد سوراخ کاری سرعت بالا بر روی چند لایه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه و کاهش آسیب پرداختند. پارامترهای مورد بررسی در آزمایش تجربی سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و هندسه مختلف ابزار بوده که تأثیر این پارامترها بر روی تورق بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی ابزار، تورق کاهش می‌یابد که احتمالاً به دلیل نرم شدن ماتریس در نتیجه‌ی دمای بالا در سرعت دورانی بالا می‌باشد. همچنین در سرعت دورانی‌های کمتر، تورق با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌یابد اما در سرعت دورانی حداکثر که در این آزمایش ۴۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد، تورق تحت تأثیر سرعت پیشروی نمی‌باشد. نتایج هندسه مختلف ابزار هم نشان می‌دهد که هندسه ابزار بر روی نیروی عمودی تأثیر دارد؛ بنابراین یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر روی تورق می‌باشد. فیتو و همکاران [۷] به بررسی تأثیر انواع هندسه ابزار و پارامترهای برش مانند سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار بر روی تورق، نیروی عمودی و کیفیت سطح در سوراخ کاری کامپوزیت الیاف کربن تک جهته و الیاف بافته شده پرداختند. به‌طور کلی آنالیز واریانس نشان می‌دهد سرعت پیشروی پارامتر مؤثرتری بر روی نیروی عمودی و گشتاور می‌باشد در حالی که تأثیر سرعت دورانی در مقایسه با هندسه ابزار بسیار ناچیز است. همچنین الیاف کربن بافته شده در مقایسه با الیاف تک جهته کیفیت سطح بالاتری دارد. سهامی پور دهقان و حیدری [۸] به بررسی پارامترهای سوراخ کاری مانند سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی، قطر و هندسه مته بر روی نیروی عمودی و پارامترهای

مؤثر بر تورق، بر روی لوله‌ی کامپوزیتی الیاف شیشه پرداخته‌اند. در این بررسی تست‌ها اول در شرایط بدون نیروی پشتیبان انجام شده‌اند سپس پارامترهایی که دارای حداقل و حداکثر سطح تورق هستند انتخاب شده و با نیروی پشتیبان یخ، مجدد انجام شده‌اند. کوکلو و همکاران [۹] به بررسی تأثیر سوراخ کاری کامپوزیت الیاف کربن با خنک کاری به روش کرایونیک (نیترژن مایع) بر روی پارامترهایی مانند نیروی عمودی، تورق، سایش ابزار و زبری سطح و مقایسه آن با سوراخ کاری در شرایط معمولی و بدون خنک کاری پرداختند. نتایج بررسی تجربی این محققان نشان داده است که این روش خنک کاری با خود کاهش قابل توجه سایش ابزار و افزایش نیروی عمودی را به همراه دارد و در این شرایط سایش ابزار تقریباً ۳۰ درصد کاهش پیدا کرده و تورق ناشی از سوراخ کاری با شرایط خنک کاری کرایونیک مانند شرایط خشک در نوسان نمی‌باشد اما نیروی عمودی افزایش ۶۱ درصدی نسبت به حالت خشک داشته که این افزایش به دلیل افزایش مقاومت کامپوزیت الیاف کربن و سخت شدن آن در دمای بسیار پایین است. گیاسین و همکاران [۱۰] در آزمایشی دیگر به بررسی پارامترهای سوراخ کاری مانند سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی بر روی تورق، تغییر شکل در قسمت ورودی و خروجی مته در چندلایه کامپوزیتی و کیفیت سوراخ بر روی دو گرید مختلف از چندلایه‌های کامپوزیت-فلز گلاره^۱ پرداختند. دارائو و همکاران [۱۱] تأثیر پنج هندسه مختلف نوک مته و سه سرعت پیشروی را در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن بررسی کرده‌اند. در این تحقیق نیروی عمودی در طول سوراخ کاری و زبری سطح دیواره‌های سوراخ و تورق اندازه‌گیری شده است. نتایج مقایسه انواع هندسه مته نشان می‌دهد با افزایش نیروی عمودی میزان تورق و زبری سطح افزایش می‌یابد. ارترک و همکاران [۱۲] به بررسی تأثیر پارامترهای سوراخ کاری از قبیل روکش ابزار و هندسه نوک ابزار متفاوت، سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار بر روی نیروی عمودی، دمای سوراخ کاری و تورق قسمت ورودی و خروجی چندلایه کامپوزیتی پرداختند که این تست‌ها بر روی چندلایه کامپوزیتی الیاف شیشه انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش تجربی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی نیروی عمودی افزایش می‌یابد؛ اما افزایش سرعت پیشروی و دورانی تأثیر زیادی بر روی دمای نوک ابزار ندارند و به‌صورت کلی دمای ماده پارامتر تأثیرگذارتری بر روی تورق در قسمت خروجی در مقایسه با بقیه پارامترها است. ولایدهام و

^۱ GLARE

کربن، کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه و کامپوزیت تابعی^۳ پرداختند. این محققان نتایج تورق حاصل از سوراخ کاری FGC با کامپوزیت الیاف شیشه و کامپوزیت الیاف کربن از نظر نیروی عمودی، ضریب تورق، قطر و گرد بودن سوراخ مقایسه نموده‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که عملکرد سوراخ کاری FGCها به‌طور قابل توجهی پیچیده‌تر از کامپوزیت‌های الیاف شیشه و کربن می‌باشد به‌طوری‌که ضریب تورق در قسمت خروجی سوراخ در این مواد به‌طور مؤثری به مواد قرار گرفته و تراکم لایه‌های الیاف شیشه و کربن در قسمت بالایی و پایینی در چندلایه کامپوزیتی وابسته است؛ بنابراین پارامترهای برش پیشنهادی و هندسه مته برای به حداقل رساندن تورق در کامپوزیت‌های الیاف شیشه و کربن در سوراخ کاری FGCها طبق انتظارات عمل نمی‌کند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، بر اساس بهترین اطلاعات نگارندگان مقاله حاضر، بررسی تجربی جامع و مقایسه‌ای، در حوزه تعیین نیروی عمودی و دما در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی با و بدون انحنا صورت نگرفته است. از این‌رو در مطالعه حاضر، با ساخت چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا و تجهیزات مناسب آزمایشگاهی، نیروی عمودی و دما در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی یاد شده در پارامترهای مختلف سوراخ کاری بررسی و مقایسه شده است. همچنین با استفاده از روش‌های رگرسیون غیرخطی و سطح پاسخ به مدل سازی نیروی عمودی و دما بر حسب متغیرهای ورودی پرداخته شده و در نهایت بهینه‌سازی این دو خروجی انجام شده است.

۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- مواد و ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی

نمونه‌های کامپوزیتی با ۱۵ لایه به روش لایه‌چینی دستی در دو حالت با و بدون انحنا ساخته شده‌اند. در ساخت نمونه‌ها از الیاف شیشه بافته شده تهیه شده از شرکت AMP Composite استفاده شده است. رزین مورد استفاده در ساخت چندلایه کامپوزیتی EPL 1012 و سخت‌کننده آن RH 112 بوده است که به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۲ با یکدیگر ترکیب شده‌اند. فرایخت نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۷ روز صورت گرفته است و به‌منظور مشخصه سازی خواص مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی، از استاندارد ASTM D3039 برای کشش و ASTM

کریشنامورتی [۱۳] به کنترل نیروی عمودی و تورق با استفاده از هندسه نوک ابزار پرداختند. گیاسین و همکاران [۱۴] تأثیر پارامترهای ماشین کاری مانند سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار و سه روکش ابزار متفاوت را بر روی زبری سطح و تغییر شکل قسمت ورودی و خروجی ابزار بر روی چندلایه‌های کامپوزیت-فلز گلاره بررسی کرده‌اند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که روکش ابزار و سرعت دورانی تأثیر قابل توجهی بر روی زبری سطح داشته درحالی‌که روکش ابزار تأثیر بیشتری بر روی تغییر شکل در قسمت ورودی و خروجی چندلایه کامپوزیتی دارد. گنگ و همکاران [۱۵] به بررسی تورق در ماشین کاری کامپوزیت الیاف کربن به روش التراسونیک پرداختند. در این تحقیق روند تغییرات ضریب تورق، با سرعت پیشروی و برش به دست آمده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد سوراخ کاری به روش چرخشی (بیضوی)^۱ در مقایسه با روش سوراخ کاری مرکزی^۲ کاهش چشم‌گیر تورق در قسمت خروجی مته از چندلایه کامپوزیتی را به همراه دارد و به‌صورت کلی تورق در قسمت خروجی چندلایه کامپوزیتی با افزایش سرعت پیشروی افزایش پیدا می‌کند. ایزبلر و قاسمیه [۱۶] در آزمایش تجربی به بررسی عملیات سوراخ کاری بر روی کامپوزیت الیاف کربن با مته با روکش چندلایه و تأثیر پارامترهای سوراخ کاری مانند سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار بر روی نیروی عمودی، گشتاور، تورق و زبری سطح پرداختند. همچنین پیشرفت سایش ابزار در سطوح مختلف با استفاده از میکروسکوپ اندازه‌گیری شده است. مارکوتس و همکاران [۱۷] به بررسی اثر چهار نوع مته متفاوت از نظر هندسی و پارامترهای برش متفاوت بر روی نیروی عمودی و تورق در طول سوراخ کاری کامپوزیت الیاف کربن پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که می‌توان با انتخاب درست سرعت برش و سرعت پیشروی به کاهش نیروی عمودی و در نتیجه آن کاهش تورق دست یافت. سورنتینو و همکاران [۱۸] تأثیر پارامترهای برش در سوراخ کاری کامپوزیت‌های الیاف شیشه و کربن را بررسی کرده‌اند و پارامتر مهم اندازه‌گیری شده، نیروی عمودی سوراخ کاری، در چند مقدار متفاوت از سرعت برش و پیشروی می‌باشد. چندلایه‌های کامپوزیتی تست شده در هر دو جنس بدون انحنا هستند و مقدار تورق در دو حالت ورود و خروج مته در چندلایه کامپوزیتی بررسی شده است. کوکلو و همکاران [۱۹] به بررسی تجربی نتایج سوراخ کاری بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف

¹ Rotary Ultrasonic Elliptical Machining

² Core Drilling

³ Functionally Graded Composite (FGC)

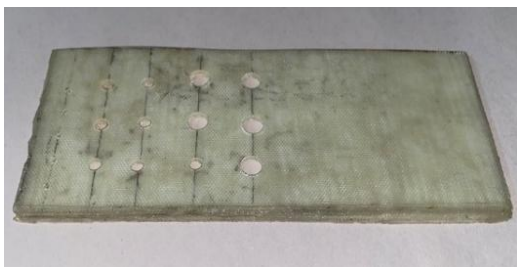


Fig. 2 Drilled plate Glass/Epoxy laminated composite

شکل ۲ چندلایه کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی بدون انحنا سوراخ کاری شده

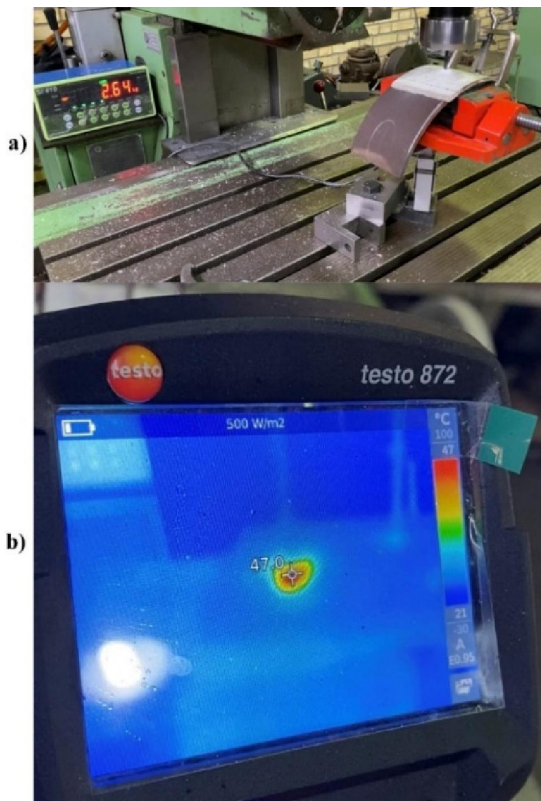


Fig. 3 a) Testo 872 thermal imager b) Dynamometer, milling machine and drilling equipment

شکل ۳ الف) دوربین حرارتی (Testo 872) ب) نیروسنج، دستگاه فرز و تجهیزات سوراخ کاری

۲-۳- روش سطح پاسخ

در تحلیل مسائل مهندسی که پاسخ مسئله تحت تأثیر متغیرهای ورودی است، استفاده از روش آماری به منظور مدل سازی، تحلیل و بهینه سازی فرایند، کمک شایانی می نماید. در این زمینه یکی از بهترین روش های آماری، روش سطح پاسخ می باشد [۲۰-۲۱]. محققین به منظور بهبود و اصلاح آزمایش و همین طور صرفه جویی در وقت و هزینه های بالای آزمایشات تجربی، تشخیص دقت و رفع عیوب آن، از روش طراحی آزمایش استفاده می نمایند. در این بین، روش سطح پاسخ به دلیل داشتن

D3518 برای برش داخل صفحه های استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین درصد حجمی چندلایه های کامپوزیتی ساخته شده ۴۳ درصد، ضخامت چندلایه های ۳/۱۲ میلی متر و شعاع انحنا ۱۱۰ میلی متر می باشد.

جدول ۱ خواص مکانیکی چندلایه های کامپوزیتی

Table 1 Mechanical properties of composite laminates

مقدار	خواص مکانیکی
19.5 GPa	مدول الاستیک طولی (E_1)
19.5 GPa	مدول الاستیک عرضی (E_2)
3.1 GPa	مدول برشی داخل صفحه ای (G_{12})
18 GPa	مدول خمشی (E_b)
0.29	ضریب پواسون (ν_{12})

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

مته های ابزار استفاده شده در این فرایند از سری مته های استاندارد فولاد تند بر انتخاب شده است و به منظور حذف اثر سایش ابزار از مته های نو به قطرهای ۲، ۵ و ۸ میلی متر استفاده شده است؛ همچنین از یک دستگاه ماشین فرز آزمایشگاهی دقیق جهت انجام فرایند سوراخ کاری بهره گرفته شده است. این مته های استاندارد دارای زاویه مارپیچ مته ۳۰ درجه، زاویه براده ۵۵ درجه و زاویه راس مته ۱۱۸ می باشند. برای اندازه گیری نیروی محوری از یک نیروسنج آزمایشگاهی با ظرفیت 10kgf بهره گرفته شده و دما با استفاده از دوربین حرارتی Testo 872 در حین فرایند سوراخ کاری به صورت آنلاین اندازه گیری شده و سپس در پایان هر آزمایش، با بازبینی فیلم گرفته شده از صفحه نمایش دوربین حرارتی، بیشینه دما گزارش شده است. چندلایه کامپوزیتی با انحنا سوراخ کاری شده در شکل ۱، چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا سوراخ کاری شده در شکل ۲ و همچنین تجهیزات آزمایشگاهی برای سوراخ کاری چندلایه های کامپوزیتی و اندازه گیری نیروی محوری و دما در شکل ۳ نشان داده شده اند.

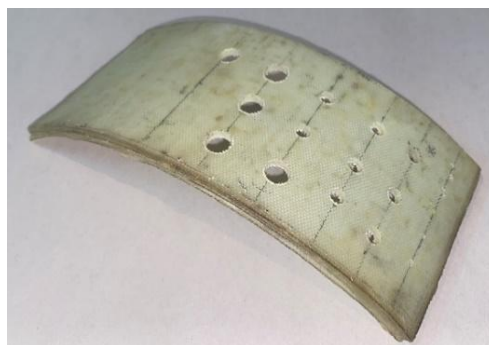


Fig. 1 Drilled curved Glass/Epoxy laminated composite

شکل ۱ چندلایه کامپوزیتی الیاف شیشه/اپوکسی با انحنا سوراخ کاری شده

به‌منظور تحلیل در نرم‌افزارهای مینی‌تب^۱ نسخه ۱۸ و دیزاین اکسپرت^۲ ۱۰ استفاده شده و خروجی‌ها و استخراج ضرایب معادلات و نمودارهای گرافیکی و برهم‌کنش پارامترها نیز در دومین نرم‌افزار یاد شده صورت گرفته است. باید این نکته را نیز یادآور شد که در روش سطح پاسخ، خروجی‌های مسئله یا به‌عبارت‌دیگر نیروی محوری و دما در فرایند سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با استفاده از یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم با توجه به پارامترهای ورودی مانند قطر، سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی تعریف می‌شوند.

جدول ۲ متغیرهای سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی

۲۵۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰	سرعت دورانی (rpm)
۵۰	۳۰	۱۰	سرعت پیشروی (mm/min)
۸	۵	۲	قطر مته (mm)

۳- مدل سازی ریاضی و تحلیل رفتار پارامترهای ورودی فرایند سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا

۳-۱- مدل سازی ریاضی رفتار نیروی محوری

پس از به دست آوردن نتایج تجربی نیروی محوری در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی، نتایج حاصل از تحلیل واریانس اصلاح شده چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. یکی از مسائلی که در تحلیل و مدل سازی آزمایش‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است بررسی تأثیر پارامترهای معادله رگرسیون با استفاده از تحلیل واریانس می‌باشد. در مبحث طراحی آزمایش‌ها، از جدول تحلیل واریانس میزان اثرگذاری پارامترهای ورودی و برهم‌کنش این پارامترها در خروجی مسئله می‌توان بهره برد. با توجه به این موضوع که در آزمایش‌های مهندسی مقدار قابلیت اطمینان ۹۵ درصد، مورد نظر می‌باشد، مقدار $P < 0.05$ کمتر از ۰/۰۵ به‌منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شوند و از اثر مقادیر بالای ۰/۰۵ صرف نظر 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؛ به‌طوری‌که هر میزان، مقدار خطای گفته شده در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد، مدل مربوطه دارای خطای

ویژگی‌هایی چون تبیین دقیق آزمایش، مدل سازی 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 محققین قرار گرفته است [۲۱-۲۲]؛ همچنین روش سطح پاسخ قادر است رابطه‌ای بین ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله حاکم نموده و آن را به‌صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه نماید. فرم کلی معادله با توجه به متغیرها و برهم‌کنش‌های مؤثر به‌صورت رابطه ۱ می‌باشد [۲۳-۲۴].

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

در رابطه ۱، y به‌عنوان پاسخ خروجی برحسب ورودی‌های آزمایش بیان می‌گردد که در این رابطه ثابت‌های β به‌عنوان 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 می‌باشد [۲۴-۲۵]. مدل ارائه شده در رابطه ۱، در صورت مناسب بودن می‌تواند رفتار خروجی مسئله را برحسب پارامترهای ورودی مسئله در تمام بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نموده و نقاط بهینه را به‌منظور تفسیر و تحلیل بهتر نتایج ارائه نماید [۲۶].

۲-۴- طراحی آزمایش

فاکتور کلیدی در توسعه‌ی یک مدل ریاضی به دست آوردن داده‌های تجربی کافی است تا بتوان در محیط کاری آزمایشگاه، نتایج را به‌درستی تحلیل کرد. سه فاکتور قابل کنترل و مستقل که در این فرایند انتخاب شدند عبارت‌اند از: سرعت دورانی (v)، نرخ پیشروی (f) و قطر ابزار (d). در جدول ۳ بازه تغییرات متغیرهای ورودی در فرایند سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است که هر متغیر دارای ۳ سطح می‌باشد؛ همچنین به‌منظور تحلیل نتایج آزمایش‌ها از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی بهره گرفته شده است. مطابق با طراحی آزمایش در نظر گرفته شده، ۱۷ آزمایش با ترکیب‌های مختلفی از قطر ابزار، سرعت دورانی و سرعت پیشروی انجام شده و نتایج تجربی نیروی محوری و دما به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ از سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا گزارش شده است. همچنین به‌منظور حذف خطاهای پیش‌بینی‌نشده، آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شده است. از هر دو نتایج تجربی نیروی محوری و دمای به‌دست‌آمده در این آزمایش

¹ Minitab² Design Expert³ P-value

جدول ۳ نتایج آزمایشات بررسی اثر پارامترهای سوراخ کاری بر نیروی محوری در چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا

Table 3 Thrust force experimental results of curved and Plate laminated composites

شماره آزمایش	قطر (mm)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	نیروی محوری در کامپوزیت با انحنا	نیروی محوری در کامپوزیت بدون انحنا
F(kgf)	F(kgf)	F(kgf)	F(kgf)	F(kgf)	F(kgf)
1	2	500	10	0.74	0.86
2	2	2500	10	0.4	0.43
3	2	500	50	1.38	1.62
4	2	2500	50	0.61	0.79
5	8	500	10	2.11	3.38
6	8	2500	10	1.2	1.33
7	8	500	50	4.03	5.98
8	8	2500	50	2.09	2.69
9	5	500	30	2.91	3.32
10	5	2500	30	1.31	1.63
11	5	1500	10	1.19	1.49
12	5	1500	50	2.02	2.62
13	2	1500	30	0.69	0.75
14	8	1500	30	2.29	3.48
15	5	1500	30	1.8	2.2
16	5	1500	30	1.69	2.12
17	5	1500	30	1.88	2.29

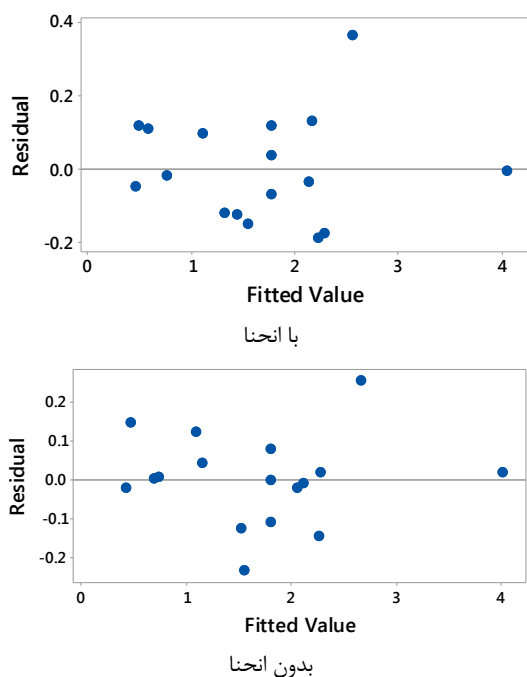


Fig. 4 Diagram of residual fitted values in association with fitted model to data points

شکل ۴ پراکندگی باقیمانده‌ها نیروی محوری نسبت به مدل منطبق شده برای چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا

پیش‌بینی کمتری است. در این آزمایش انجام شده کمترین عدد این مؤلفه برای مدل رگرسیون مرتبه دوم کامل^۱ به دست آمده است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع مربعات برای مدل مرتبه دوم خطی برابر ۰/۲۰۳۳۰۵ در چندلایه کامپوزیتی با انحنا و ۰/۱۹۵۱۳۹ در چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا، معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر رفتار نیروی محوری در فرایند سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا به ترتیب به صورت معادله‌های ۲ و ۳ می‌باشند.

$$F = -0.310 - 0.000604v + 0.01572f + 0.685d - 0.435d^2 - 0.000009v \times f - 0.000073v \times d + 0.00408f \times d \quad (2)$$

$$F = -0.430 + 0.000328v + 0.01684f + 0.4912d - 0.000010v \times f - 0.000170v \times d + 0.00592f \times d \quad (3)$$

در معادله‌های ۲ و ۳، 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 کیلوگرم نیرو (kgf) استخراج می‌گردد. با توجه به به دست آمدن مقادیر $R^2 = 97.51\%$ و $R^2 = 95.02\%$ برای مدل چندلایه کامپوزیتی با انحنا و مقادیر $R^2 = 98.73\%$ و $R^2 = 97.96\%$ برای مدل چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل ۴، می‌توان گفت که مدل سازی صورت گرفته از دقت بسیار مناسبی برخوردار می‌باشد. این نکته نیز می‌بایست لحاظ گردد که در مبحث طراحی آزمایش‌ها، مقدار بالای R^2 یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را تعیین می‌نماید. هر مقدار مؤلفه یاد شده به عدد ۱ و یا ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش‌بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیق‌تر خواهد بود [۲۸-۲۷]. علاوه بر مورد بالا، استفاده از بحث تحلیل پراکندگی باقیمانده‌ها^۲ باقیمانده‌ها^۲ نیز از دیگر مواردی است که دقت مدل سازی 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 ۴ می‌توان دریافت که مدل‌های رگرسیون به دست آمده از انطباق خوبی برخوردار می‌باشند.

¹ Full Quadratic
² Residual Fitted Value

81.10% برای مدل چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل ۵، می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت‌گرفته از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.

جدول ۶ نتایج آزمایشات بررسی اثر پارامترهای سوراخ کاری بر دما در چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا

Table 6 Temperature experimental results of curved and Plate laminated composites

شماره آزمایش	قطر (mm)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	دما در کامپوزیت با انحنا T(°C)	دما در کامپوزیت بدون انحنا T(°C)
1	2	500	10	28.5	33.5
2	2	2500	10	37	41.6
3	2	500	50	31	39
4	2	2500	50	38.3	39.3
5	8	500	10	48.5	56.6
6	8	2500	10	56.2	77.3
7	8	500	50	52.6	55.5
8	8	2500	50	48.8	70.7
9	5	500	30	44.8	48.9
10	5	2500	30	46.5	69.4
11	5	1500	10	57.5	66.4
12	5	1500	50	46	53
13	2	1500	30	30.5	38.6
14	8	1500	30	59.7	70.1
15	5	1500	30	49.7	55.4
16	5	1500	30	51.5	50.4
17	5	1500	30	53.7	49.9

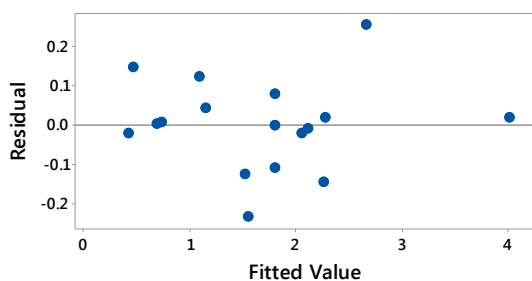


Fig. 5 Diagram of residual fitted values in association with fitted model to data points

شکل ۵ پراکندگی باقیمانده‌ها دما نسبت به مدل منطبق شده برای چندلایه کامپوزیتی با انحنا

جدول ۷ جدول اصلاح‌شده تحلیل واریانس دما بر حسب مؤلفه‌های مؤثر در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با انحنا

Table 7 Temperature ANOVA analysis results of curved laminated composite

ترم‌ها	درجه آزادی (DF)	جمع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	F- مقدار value	P- مقدار value
مدل	6	1479.1	246.51	38.95	0.000
v (rpm)	1	20.45	20.45	3.23	0.102
f (mm/min)	1	32.76	32.76	5.18	0.046
d (mm)	1	1067.1	1067.1	168.63	0.000
v ² (rpm) ²	1	100.59	100.59	15.90	0.003
d ² (mm) ²	1	52.49	52.49	8.30	0.016
v × f	1	49.01	49.01	7.74	0.019

جدول ۴ جدول اصلاح‌شده تحلیل واریانس نیروی محوری بر حسب مؤلفه‌های مؤثر در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با انحنا

Table 4 Thrust force ANOVA analysis results of curved laminated composite

ترم‌ها	درجه آزادی (DF)	جمع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	F- مقدار value	P- مقدار value
مدل	8	12.941	1.6177	39.14	0.000
v (rpm)	1	3.0914	3.0913	74.79	0.000
f (mm/min)	1	2.0160	2.0160	48.78	0.000
d (mm)	1	6.2410	6.2410	150.99	0.000
v ² (rpm) ²	1	0.1576	0.1576	3.81	0.087
d ² (mm) ²	1	0.4651	0.4651	11.25	0.010
v × f	1	0.2665	0.2665	6.45	0.035
v × d	1	0.3785	0.3785	9.16	0.016
f × d	1	0.4802	0.4802	11.62	0.009

جدول ۵ جدول اصلاح‌شده تحلیل واریانس نیروی محوری بر حسب مؤلفه‌های مؤثر در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بدون انحنا

Table 5 Thrust force ANOVA analysis results of plate laminated composite

ترم‌ها	درجه آزادی (DF)	جمع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	F- مقدار value	P- مقدار value
مدل	6	29.554	4.9258	129.36	0.000
v (rpm)	1	6.8724	6.8724	180.48	0.000
f (mm/min)	1	3.8564	3.8564	101.27	0.000
d (mm)	1	15.400	15.400	404.44	0.000
v × f	1	0.3362	0.3362	8.83	0.014
v × d	1	2.0808	2.0808	54.64	0.000
f × d	1	1.0082	1.0082	26.48	0.000

۲-۳- مدل‌سازی ریاضی رفتار دما

در این بخش پس از به دست آوردن نتایج تجربی دما در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی که در جدول ۶ آورده شده، نتایج حاصل از تحلیل واریانس اصلاح‌شده چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا به ترتیب در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع مربعات برای مدل مرتبه دوم خطی برابر ۲/۵۱۵۵۸ در چندلایه کامپوزیتی با انحنا و ۵/۷۴۳۰۳ در چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا، معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر رفتار دما در فرایند سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا به ترتیب به صورت معادله‌های ۴ و ۵ می‌باشند.

$$T = 4.86 + 0.02243v + 0.0951f + 8.07d - 0.000006v^2 - 0.463d^2 - 0.000124v \times f \quad (4)$$

$$T = 21.11 + 0.00648v + 4.607d \quad (5)$$

در معادله‌های ۴ و ۵، d بر حسب میلی‌متر، v بر حسب دور بر دقیقه و f بر حسب میلی‌متر بر دقیقه بوده که مقدار دما T بر حسب درجه سانتی‌گراد استخراج می‌گردد. با توجه به به‌دست آمدن مقادیر $R^2 = 95.90\%$ و $R^2(\text{adj}) = 93.44\%$ برای مدل چندلایه کامپوزیتی با انحنا و مقادیر $R^2 = 83.46\%$ و $R^2(\text{adj}) =$

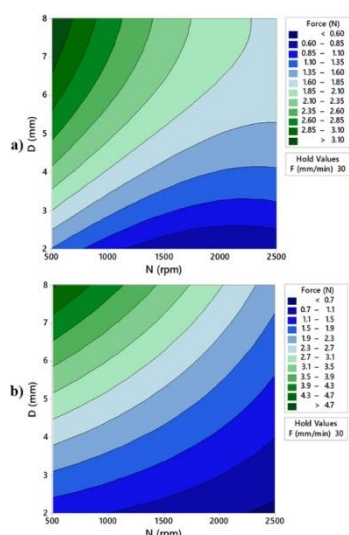


Fig. 7 Drill diameter and spindle speed interaction in constant feed rate of 30mm/min on thrust force in drilling of laminated composites a) curved b) plate

شکل ۷ نمودارهای برهم‌کنش قطر و سرعت دورانی ابزار بر نیروی محوری در سرعت پیشروی ثابت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی (الف) با انحنا (ب) بدون انحنا

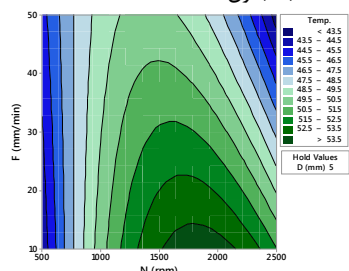


Fig. 8 Feed rate and spindle speed interaction in constant drill diameter of 5mm on temperature in drilling of curved laminated composite

شکل ۸ نمودار برهم‌کنش نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار بر دما در قطر ثابت ۵ میلی‌متر در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی با انحنا

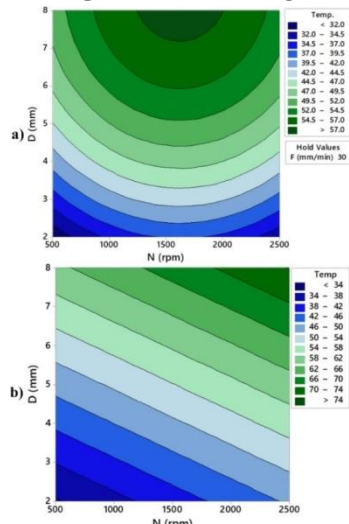


Fig. 9 Drill diameter and spindle speed interaction in constant feed rate of 30mm/min on temperature in drilling of laminated composites a) curved b) plate

شکل ۹ نمودارهای برهم‌کنش قطر و سرعت دورانی ابزار بر دما در سرعت پیشروی ثابت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی (الف) با انحنا (ب) بدون انحنا

جدول ۸ جدول اصلاح شده تحلیل واریانس دما بر حسب مؤلفه‌های مؤثر در

سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بدون انحنا

Table 8 Temperature ANOVA analysis results of plate laminated composite

P- value	F- value	میانگین مربعات (MS)	جمع مربعات (SS)	درجه آزادی (DF)	ترمها
0.000	32.32	1164.9	2329.8	2	مدل
0.003	12.73	419.90	419.90	1	v (rpm)
0.000	57.91	1909.9	1909.9	1	d (mm)

۳-۳- بررسی و مقایسه اثر متغیرهای ورودی بر مقدار نیروی محوری و دما در فرایند سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا

در این بخش به مقایسه و بررسی تأثیر پارامترهای ورودی عملیات سوراخ کاری مانند سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و قطر ابزار بر مقدار نیروی محوری و دما در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا پرداخته می‌شود. نمودارهای پاسخ نیروی محوری و دما به تغییر همزمان سرعت پیشروی و سرعت دورانی ابزار با قطر مته ثابت ۵ میلی‌متر و همچنین تغییر همزمان قطر و سرعت دورانی ابزار با نرخ پیشروی ثابت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه شده است.

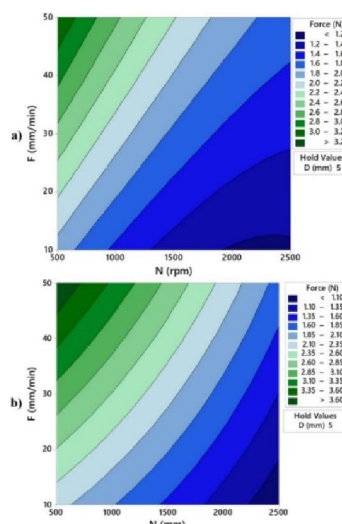


Fig. 6 Feed rate and spindle speed interaction in constant drill diameter of 5mm on thrust force in drilling of laminated composites a) curved b) plate

شکل ۶ نمودارهای برهم‌کنش نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار بر نیروی محوری در قطر مته ثابت ۵ میلی‌متر در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی (الف) با انحنا (ب) بدون انحنا

نمودارهای تحلیل شده نیروی محوری و دما به صورت کلی در شرایط سوراخ کاری یکسان در چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا بیشتر از با انحنا می‌باشند.

یکی از نکات مهم در این بحث ایجاد آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی به‌ویژه آسیب تورق و نرم شدن ماتریس می‌باشد که به ترتیب افزایش نیروی محوری و دما احتمال بروز این آسیب‌ها را بیشتر می‌کند.

۳-۵- تحلیل و مقایسه اثر سرعت پیشروی ابزار بر رفتار نیروی محوری و دما در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا

با توجه به نمودارهای شکل ۶ و قسمت دوم از نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نشان می‌دهند به‌طور کلی در تمام حالت‌ها با افزایش سرعت پیشروی نیروی محوری در هر دو چندلایه کامپوزیتی افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه نیروی محوری در هر دو چندلایه کامپوزیتی در حالتی ایجاد می‌شود که سرعت پیشروی زیاد بوده و از طرفی دیگر سرعت دورانی ابزار نیز کم باشد، در این حالت با توجه به اینکه ضخامت براده تغییر شکل یافته زیاد است و امکان خروج براده به راحتی از ناحیه سوراخ کاری وجود ندارد و همچنین به دلیل زیاد بودن نرخ پیشروی، فشار محوری ابزار بر روی چندلایه‌های کامپوزیتی زیاد است، بیشترین نیروی محوری به وجود می‌آید؛ اما در مورد دما با توجه به شکل ۸ و نمودارهای شکل‌های ۱۲ و ۱۳، می‌توان دریافت که با افزایش نرخ پیشروی دما ایجاد شده در سوراخ کاری هر دو چندلایه کامپوزیتی با و بدون انحنا کاهش می‌یابد و این کاهش دما به دلیل کاهش زمان درگیری ابزار با چندلایه‌های کامپوزیتی می‌باشد؛ همچنین بیشینه دما در هر دو چندلایه کامپوزیتی در کمترین نرخ پیشروی ایجاد می‌شود.

۳-۶- تحلیل و مقایسه اثر قطر ابزار بر رفتار نیروی محوری و دما در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا

با توجه به نمودارهای شکل‌های ۷ و ۹ و نمودارهای شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ می‌توان گفت که در تمامی حالات با افزایش قطر ابزار در عملیات سوراخ کاری هر دو چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا، میزان نیروی محوری و دما افزایش می‌یابد که دلیل اصلی افزایش این دو پارامتر خروجی، افزایش سطح تماس بین ابزار و دیواره داخلی سوراخ و همچنین

در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ به ترتیب اثر فاکتورهای اصلی سوراخ کاری (سرعت دورانی، سرعت پیشروی و قطر ابزار) بر نیرو محوری و دما در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا ارائه شده است. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که در برخی از آزمایش‌ها که نتایج برهم‌کنش پارامترهای ورودی دارای اهمیت باشند (همانند مطالعه حاضر)، بررسی و تحلیل‌ها باید بر اساس هر دو نمودارهای برهم‌کنش و نمودارهای فاکتورهای اصلی باشد و تحلیل نمودارهای فاکتورهای اصلی به‌تنهایی اهمیت کمتری دارند؛ بنابراین در این مطالعه، تحلیل‌ها و مقایسه‌ها با توجه به هر دو نمودار برهم‌کنش و نمودار فاکتورهای اصلی انجام و در بخش‌های بعد ارائه شده‌اند.

۳-۴- تحلیل و مقایسه اثر سرعت دورانی بر رفتار نیروی محوری و دما در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، همچنین قسمت اول شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به بررسی و مقایسه اثر سرعت دورانی ابزار بر مقدار نیروی محوری ایجاد شده در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا پرداخته می‌شود. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است در هر دو چندلایه کامپوزیتی در تمامی قطر‌ها و سرعت‌های پیشروی رفتار نیروی محوری با افزایش سرعت دورانی ابزار کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش سرعت دورانی موجب می‌گردد تا در حین سوراخ کاری براده به راحتی بتواند از ناحیه ماشین کاری خارج شده و اصطکاک بین لایه‌های چندلایه کامپوزیتی کمتر می‌شود. همچنین بیشینه نیروی محوری در هر دو چندلایه کامپوزیتی در کمینه سرعت دورانی و بیشینه سرعت پیشروی و قطر ابزار می‌باشد؛ اما در مورد دما با توجه به شکل ۸ و قسمت a از شکل ۹ کمینه دما در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی با انحنا در بیشینه و کمینه سرعت دورانی و همچنین بیشینه دما در سرعت دورانی بین ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰، کمینه نرخ پیشروی و بیشینه قطر ابزار به وجود می‌آید؛ اما در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا با توجه به قسمت b از شکل ۹ و قسمت اول از شکل ۱۳ به‌طور کلی با افزایش سرعت دورانی ابزار، دما افزایش می‌یابد و بیشینه دما در بیشینه سرعت دورانی و قطر ابزار رخ می‌دهد؛ بنابراین تأثیر پارامتر سرعت دورانی ابزار بر روی دما وابسته به انحنای چندلایه کامپوزیتی می‌باشد؛ همچنین با توجه به

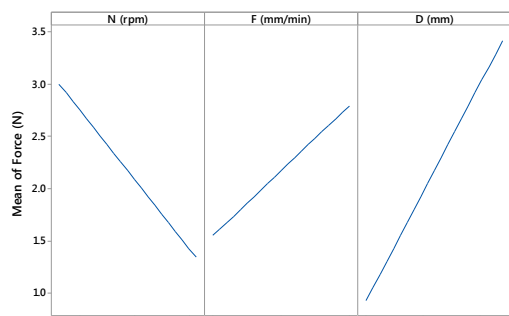


Fig. 11 Effect of drilling parameters (spindle speed, feed rate, drill diameter) on thrust force in drilling of Plate laminated composite

شکل ۱۱ نمودارهای اثر متغیرهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار بر نیروی عمودی در فرایند سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بدون انحنا

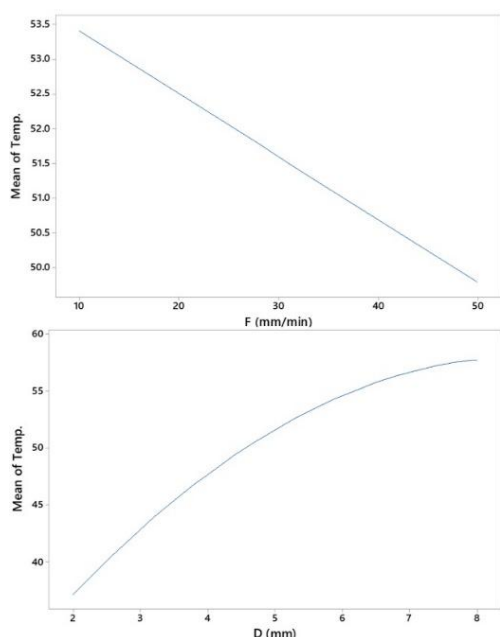


Fig. 12 Effect of drilling parameters (feed rate, drill diameter) on temperature in drilling of curved laminated composite

شکل ۱۲ نمودارهای اثر متغیرهای نرخ پیشروی و قطر ابزار بر دما در فرایند سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با انحنا

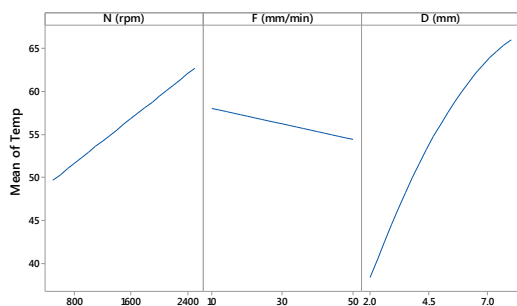


Fig. 13 Effect of drilling parameters (spindle speed, feed rate, drill diameter) on temperature in drilling of plate laminated composite

شکل ۱۳ نمودارهای اثر متغیرهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار بر دما در فرایند سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بدون انحنا

افزایش سطح مقطع براده می‌باشد. همچنین بیشینه نیروی محوری در هر دو چندلایه کامپوزیتی در کمترین سرعت دورانی و بیشترین میزان سرعت پیشروی با بزرگ‌ترین مته می‌باشد. با توجه به تحلیل تمامی پارامترهای اصلی سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا، نیروی عمودی و دما به صورت کلی در شرایط یکسان سوراخ کاری در چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا بیشتر از با انحنا می‌باشد که با توجه به نتایج به دست آمده و مشاهدات میدانی انجام شده، خروج براده در سوراخ کاری کامپوزیت با انحنا نسبت به حالت بدون انحنا با سهولت بیشتری صورت گرفته که این موضوع بر میزان نیرو و دمای بیشینه وارده تأثیرگذار بوده که منتج به دما و نیروی بالاتر در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا شده است.

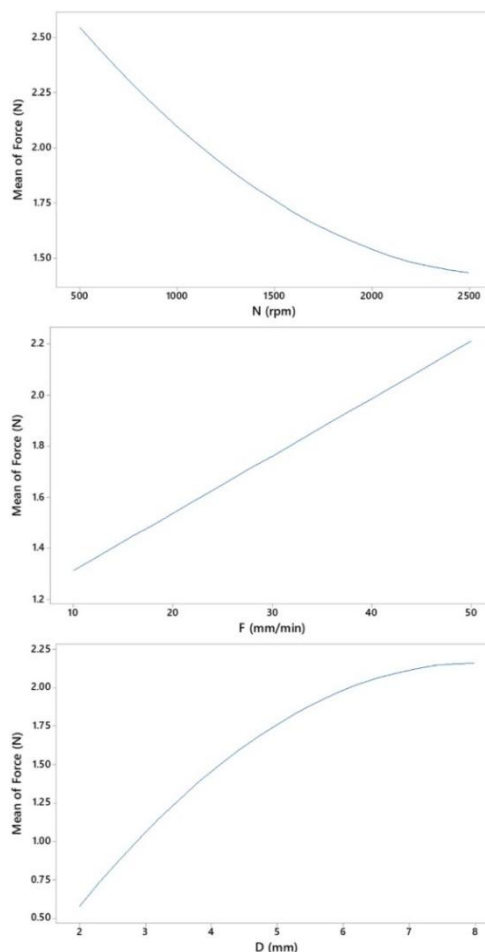


Fig. 10 Effect of drilling parameters (spindle speed, feed rate, drill diameter) on thrust force in drilling of curved laminated composite

شکل ۱۰ نمودارهای اثر متغیرهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار بر نیروی عمودی در فرایند سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با انحنا

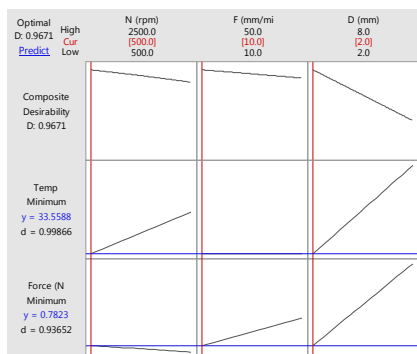


Fig. 15 Optimization of thrust force and temperature in drilling of plate laminated composite

شکل ۱۵ بهینه‌سازی صورت گرفته به‌منظور دستیابی به کمینه نیروی محوری و دما به‌طور هم‌زمان در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا

۴- نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر، بررسی و مقایسه اثر پارامترهای اصلی سوراخ کاری شامل نرخ پیشروی، سرعت دورانی و قطر ابزار بر روی نیروی محوری و دما در سوراخ کاری چندلایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با و بدون انحنا می‌باشد. مطابق با طراحی آزمایش در نظر گرفته شده، ۱۷ آزمایش با ترکیب‌های مختلفی از قطر ابزار، سرعت دورانی و سرعت پیشروی انجام شده و از نتایج تجربی نیروی محوری و دما به‌منظور تحلیل در نرم‌افزارهای مینی‌تب نسخه ۱۸ و دیزاین اکسپرت ۱۰ استفاده شده و خروجی‌ها و استخراج ضرایب معادلات و نمودارهای گرافیکی و برهم‌کنش پارامترها نیز در دومین نرم‌افزار یاد شده صورت گرفته است. همچنین با استفاده از سطح پاسخ و تحلیل واریانس، مدل‌سازی ریاضی هر دو مسئله انجام شده و تمامی پارامترهای ورودی توسط نمودارهای به‌دست‌آمده تحلیل، مقایسه و بهینه‌سازی شده‌اند. نتایج به‌صورت کلی نشان می‌دهند که:

- در تمامی قطرها و سرعت‌های پیشروی رفتار نیروی محوری در هر دو چندلایه کامپوزیتی با افزایش سرعت دورانی کاهش می‌یابد زیرا افزایش سرعت دورانی موجب می‌گردد تا در حین سوراخ کاری، براده به‌راحتی بتواند از ناحیه ماشین کاری خارج شده و این امر موجب کاهش اصطکاک بین لایه‌های کامپوزیت با ابزار می‌گردد که نتیجه‌ی آن کاهش نیروی محوری را به همراه دارد.
- تأثیر پارامتر سرعت دورانی ابزار بر روی دما وابسته به انحنای چندلایه کامپوزیتی می‌باشد.
- کمینه نیروی محوری در هر دو چندلایه کامپوزیتی در کمینه سرعت پیشروی و بیشینه سرعت دورانی ابزار رخ می‌دهد.

۳-۷- بهینه‌سازی نیروی محوری در سوراخ کاری چندلایه‌های

کامپوزیتی با و بدون انحنا

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در بخش‌های قبلی در زمینه اثر هر یک از پارامترهای ورودی عملیات سوراخ کاری بر مقدار نیروی محوری و دما در چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا و همچنین اهمیت کاهش نیروی محوری و دما در عملیات سوراخ کاری به دلیل بروز آسیب‌های احتمالی در چندلایه‌های کامپوزیتی به‌ویژه آسیب تورق و نرم شدن ماتریس، در این بخش به بهینه‌سازی هم‌زمان نیروی محوری و دما پرداخته می‌شود. بهینه‌سازی صورت گرفته با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب و با استفاده از مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها تجربی و در نظر گرفتن حد مطلوبیت صورت گرفته و در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب برای چندلایه‌های کامپوزیتی با و بدون انحنا نشان داده شده است. تحلیل سطح پاسخ مناطقی از ناحیه طراحی را نشان می‌دهد که احتمالاً فرایند، نتایج مطلوب را در آنجا خواهد داشت. در حالت‌های زیادی تابع مطلوبیت تابعی از بیشتر از یک پاسخ می‌باشد. برای لحاظ نمودن پاسخ‌ها به‌صورت هم‌زمان، ابتدا باید مدل مناسب رویه پاسخ را برای هر پاسخ ایجاد کرد و سپس سعی در ایجاد شرایط بهینه نمود تا پاسخ‌ها را بهینه کرده و یا در بازه مورد نظر مطلوب قرار داد. نتایج به‌دست‌آمده گویای این مطلب می‌باشد که با در نظر گرفتن قطر ۲ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، کمینه مقدار نیروی محوری و دما به‌طور هم‌زمان در فرایند سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با انحنا و با در نظر گرفتن قطر ۲ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه، کمینه مقدار نیروی محوری و دما به‌طور هم‌زمان در فرایند سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی بدون انحنا حاصل می‌گردد.

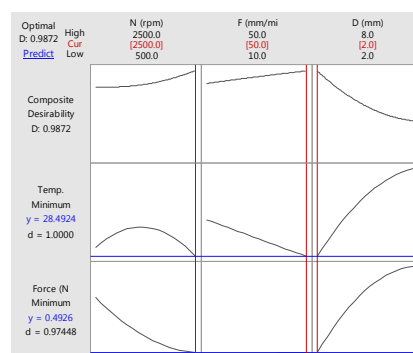


Fig. 14 Optimization of thrust force and temperature in drilling of curved laminated composite

شکل ۱۴ بهینه‌سازی صورت گرفته به‌منظور دستیابی به کمینه نیروی محوری و دما به‌طور هم‌زمان در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی با انحنا

- drilling composite tubes, *Composite Structures*, Vol. 139, pp. 36–41, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.043>
- [6] J. Campos Rubio, A. M. Abrao, P. E. Faria, A. E. Correia, J. P. Davim, Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 715–720, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.015>
- [7] N. Feito, J. Diaz-Álvarez, J. López-Puente, M. H. Miguelez, Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs, *Composite Structures*, Vol. 138, pp. 285–294, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.065>
- [8] M. Sahami poor deghghan, H. Heidary, Parametric study on drilling of GFRP composite pipe produced by filament winding process in different backup condition, *Composite Structures*, Vol. 234, pp. 111661, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111661>
- [9] U. Koklu, S. Morkavuk, U. Koklu, S. Morkavuk, Cryogenic Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Composite (cfRP), *Surface Review and Letters*, Vol. 26, No. 9, pp. 1950060, 2019.
<https://doi.org/10.1142/S0218625X19500604>
- [10] K. Giasin, S. Ayvar-Soberanis, An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA, *Composite Structures*, Vol. 159, pp. 745–760, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.015>
- [11] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, A. Aguiar Vieira, A. Torres Marques, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 7, pp. 1545–1550, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>
- [12] A. T. Erturk, F. Vatanserver, E. Yarar, E. A. Guven, T. Sinmazcelik, Effects of cutting temperature and process optimization in drilling of GFRP composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, No. 2, pp. 235–249, 2020.
<https://doi.org/10.1177/0021998320947143>
- [13] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, No. 1–3, pp. 204–209, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.146>
- [14] K. Giasin, G. Gorey, C. Byrne, J. Sinke, E. Brousseau, Effect of machining parameters and cutting tool coating on hole quality in dry drilling of fibre metal laminates, *Composite Structures*, Vol. 212, pp. 159–174, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.023>
- [15] D. Geng, Y. Liu, Z. Shao, M. Zhang, X. Jiang, D. Zhang, Delamination formation and suppression
- افزایش نرخ پیشروی در هر دو آزمایش باعث افزایش نیروی محوری و کاهش دما می‌شود که به ترتیب به دلیل افزایش فشار ابزار بر روی چندلایه‌های کامپوزیتی و کاهش زمان درگیری ابزار با چندلایه کامپوزیتی می‌باشد.
 - به‌طورکلی با افزایش قطر ابزار نیروی محوری و دما افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل افزایش سطح درگیری ابزار با دیواره داخلی سوراخ می‌باشد.
 - به‌طورکلی در شرایط یکسان سوراخ کاری، نیروی محوری و دمای ایجاد شده در چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا بیشتر از با انحنا می‌باشد.
 - بهینه‌سازی صورت گرفته بر روی پارامترهای ورودی در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با انحنا نشان می‌دهد قطر ۲ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و در سوراخ کاری چندلایه کامپوزیتی بدون انحنا و قطر ۲ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه کمترین مقدار هم‌زمان نیروی محوری و دما را حاصل می‌کنند.
- ۵- مراجع
- [1] M. Salamat-Talab, A. Akhavan-Safar, A. Zeinolabedin-Beygi, R. J. C. Carbas, L. F. M. da Silva, Effect of Through-the-Thickness Delamination Position on the R-Curve Behavior of Plain-Woven ENF Specimens, *Materials*, Vol. 16, No. 5, pp. 1811, 2023.
<https://doi.org/10.3390/ma16051811>
- [2] A. Akhavan-Safar, M. Salamat-Talab, F. Delzendehrooy, A. Zeinolabedin-Beygi, L. F. M. da Silva, Effects of natural date palm tree fibres on mode II fracture energy of E-glass/epoxy plain-woven laminated composites, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 44, No. 10, pp. 1–12, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s40430-022-03717-2>
- [3] A. Zeinolabedin-Beygi, M. Salamat-talab, A. Farrokhhabadi, H. Moslemi Naeini, Experimental Investigation of the Effect of natural Microfibers on the Mode I Fracture Toughness of Plain- Woven Laminated Composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 02, pp. 71–79, 2022. (in Persian)
- [4] H. Hocheng, C. C. Tsao, C. S. Liu, H. A. Chen, Reducing drilling-induced delamination in composite tube by magnetic colloid back-up, *CIRP Annals*, Vol. 63, No. 1, pp. 85–88, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.070>
- [5] H. Hocheng, C. C. Tsao, H. T. Chen, Utilizing internal icing force to reduce delamination in

- [22] M. Salamat-Talab, V. Tahmasbi, M. Safari, A. Zeinolabedin Beygi, Mathematical Modeling, Sobol Sensitivity Analysis and Optimization of Main Parameters in Drilling of E-glass/epoxy Laminated Composites, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 8, No. 11, pp. 43–53, 2022. (in Persian)
- [23] V. Tahmasbi, A. Pak, A. Zeinolabedin Beygi, P. HassanPour, 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*, Vol. 9, No. 5, pp. 49–59, 2022. (in Persian)
- [24] A. I. Khuri, J. A. Cornell, *Response surfaces designs and analyses*, 2nd edition, pp. 101-128, 1996.
- [25] M. Moradi, M. Ghoreishi, J. Frostevarg, A. F. H. Kaplan, An investigation on stability of laser hybrid arc welding, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, No. 4, pp. 481–487, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.10.016>
- [26] M. Moradi, M. Ghoreishi, M. J. Torkamany, Modelling and optimization of Nd:YAG laser and tungsten inert gas (TIG) hybrid welding of stainless steel, *Lasers in Engineering*, Vol. 27, No. 3–4, pp. 211–230, 2014.
- [27] R. K. Pandey, S. S. Panda, Optimization of multiple quality characteristics in bone drilling using grey relational analysis, *journal of orthopaedics*, Vol. 12, pp. 39–45, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jor.2014.06.003>
- [28] V. Tahmasbi, A. Zeinolabedin Beygi, H. Moslemi Naeni, 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*, Vol. 8, No. 8, pp. 12–23, 2021. (in Persian)
- during rotary ultrasonic elliptical machining of CFRP, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 183, pp. 107698, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107698>
- [16] O. Isbilir, E. Ghassemieh, Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 31, No. 10, pp. 717–727, 2012.
<https://doi.org/10.1177/0731684412444653>
- [17] A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães, J. F. Silva, J. M. R. S. Tavares, Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 14, pp. 2376–2382, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.025>
- [18] L. Sorrentino, S. Turchetta, C. Bellini, A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control, *Composite Structures*, Vol. 186, pp. 154–164, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.005>
- [19] U. Köklü, O. Demir, A. Avcı, A. Etyemez, Drilling performance of functionally graded composite: Comparison with glass and carbon/epoxy composites, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, No. 10, pp. 4703–4709, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s12206-017-0916-4>
- [20] V. Tahmasbi, A. Zeinolabedin-Beygi, S. H. Elahi, and M. R. A. Ashtiani, Statistical modeling, optimization and sensitivity analysis of dried turning of aluminum bronze alloy, *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, Vol. 47, No. 4, pp. 1–12, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s12046-022-01955-7>
- [21] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th edition, John Wiley and Sons, 2008.