



Investigating the effectiveness of polymethyl methacrylate drilling parameters using coated tools

Moein Taheri ^{*a}, Amin Sousanabadi Farahani^a, Mohammadjavad Mohammadi^a

^a Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Taheri M, Sousanabadi Farahani A, Mohammadi M. Investigating the effectiveness of polymethyl methacrylate drilling parameters using coated tools. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024; 4(4): 563-578.

 <https://10.52547/masm.4.4.563>

KEYWORDS

Drilling,
Tool nanocoating,
Sensitivity analysis,
E-Fast.

ABSTRACT

Drilling is one of the most common surgical methods performed on human bones to stabilize fractured bones and hold them together. Due to the complexity of the machined material and the sensitivity of the process, it is considered one of the most significant mechanical techniques in biomedical engineering. Polymethyl methacrylate (PMMA), due to its mechanical properties similar to bone tissue, is regarded as a suitable alternative for bone in medical implants. However, increased drilling forces can damage bone tissue or implants, leading to severe and irreparable issues. Therefore, studying the factors influencing drilling forces in such materials is of utmost importance. In this study, the sensitivity analysis and optimization of axial force in the orthopedic drilling process using tools coated with a nanostructured titanium nitride (TiN) coating applied via physical vapor deposition (PVD) have been investigated. The primary objective of this research is to enhance the performance and efficiency of the process by optimizing parameters such as tool rotational speed, feed rate, tool diameter, and the use of the titanium nitride coating. Sensitivity analysis was also conducted by analyzing experimental data. The results indicate that using coated tools can significantly reduce drilling forces.

Extended Abstract

1. Introduction

In recent years, the development of coating technologies has garnered significant attention across various industries [1]. These technologies enable the creation of extremely thin coatings with unique properties and precise control capabilities [2]. Among the industries benefiting from this technology is machining, particularly drilling [3]. Drilling processes find applications in diverse fields, including medical procedures such as drilling bone and implants [4]. Given the critical need for precision in medical applications, optimizing the drilling process and enhancing the quality and accuracy of the produced holes is paramount [5]. A novel approach to improving drilling performance involves the utilization of nanostructured coatings on drilling tools [6]. Coating drilling tools with titanium nitride nanocoatings, via physical vapor deposition, is considered an advanced and reliable method for improving efficiency and reducing axial force in orthopedic drilling procedures [7].

As mentioned, the orthopedic industry demands high precision and quality in drilling processes for the creation of joints and the use of orthopedic components. To achieve better and more optimized results, nanometer-scale coating technologies can be employed [8]. Improving and optimizing the axial force in orthopedic drilling

* Corresponding author. Tel.: 09183616488

E-mail address: taheri@araku.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.4.563>

Received: October 01, 2024; Received in revised form: January 10, 2024; Accepted: March 03, 2025.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



processes using tools coated with nanocoatings can significantly enhance the performance and efficiency of this process, addressing the requirements of the orthopedic industry [9]. Research conducted by Marin and colleagues has shown that titanium alloys are among the most biocompatible and widely used alloys in metallic biomaterials [10]. Considering the significance of drilling processes in the orthopedic industry and the demand for high precision and quality, improving the efficiency of this process is of paramount importance. The use of titanium nitride coating as a significant factor in drilling and optimizing other parameters can significantly improve axial force and hole quality [11]. In the research of Nikouimanesh and colleagues [12], it is observed that titanium nitride coating, due to its unique properties such as high resistance to heat, oxidation, and wear, is used in many components to enhance corrosion, oxidation, and wear resistance.

Overall, numerous studies have been conducted in the field of orthopedic drilling with nanocoated tools, focusing on experimental analysis and optimization of axial force in orthopedic drilling processes. These studies provide information and results regarding the impact of various process parameters, such as tool rotational speed, depth of cut, titanium nitride coating, and other parameters, on axial force in orthopedic drilling with nanocoatings. This information can significantly improve the performance and efficiency of this process. Additionally, these studies can be used to optimize parameters and reduce unwanted side effects. Studies and research in the field of orthopedic drilling with nanocoated tools have also employed experimental design using response surface methodology, modeling, and second-order linear regression equations, as well as optimizing input parameters to achieve axial force, providing valuable information about orthopedic drilling using nanocoated tools. Some of the areas that have been investigated include the work of Wu and colleagues [13], who examined the impact of the type and properties of the nanocoating. In fact, they investigated the effect of a type of titanium nitride nanocoating on a titanium tool in orthopedic drilling and its impact on axial force. Similarly, Tahmasebi and colleagues [14] discussed the impact of input parameters. In this section, the impact of tool rotational speed, feed rate, and tool diameter on axial force in the orthopedic drilling process using tools coated with titanium nitride nanocoating was investigated. They focused on modeling and optimization, using these methods to determine the axial force behavior model and optimize input parameters with the aim of achieving optimal axial force and reducing side effects.

2. Materials

Due to its excellent properties and similarity to the mechanical properties of bone, polymethyl methacrylate (PMMA) was used as the material for this study. The similarity of this material to bone properties is shown in Table 1.

Table 1 Comparison of Mechanical Properties of Bone and Polymethyl Methacrylate [16]

Mechanical Properties	Bone	PMMA
Thermal conductivity (W/mK)	0.1-0.35	0.15-0.4
Specific heat (J/kg K)	1300	1400
Thermal diffusivity (m ² /s)	3×10^{-7}	1.1×10^{-7}
Density (kg/m ³)	1800	1400
Tensile strength (MPa)	115	1400
Shear modulus (GPa)	3.5	3

3. Experimental Procedure

Design of Experiments (DOE) was employed to reduce the number of experiments required to obtain a suitable response to a query. Response Surface Methodology (RSM) is a valuable tool due to its accuracy in modeling and experimental validation. In this study, RSM was used for experimental design. Instead of conducting random experiments, a set of experiments were conducted adhering to the drilling requirements to enable the analysis of the process for different response parameters individually or in combination. To study the force behavior during the drilling process of this material, the parameters of rotational speed, feed rate, and drill diameter were selected as input variables. In the experiments, a 10 mm thick polymethyl methacrylate (PMMA) polymer sheet was used. The drills used in the process were standard high-speed steel drills, and new drills were used to eliminate the effect of tool wear.

4. Data analysis

Based on the force analysis results and the experimental data obtained by Tahmasebi et al. [14], regression equations were derived for both cases with and without nanocoating (1 and 2).

- (1) $F(N) = -16.48 + 0.52f(\text{mm/min}) - 0.01493N(\text{rpm}) + 14.9D(\text{mm}) + 0.000007N(\text{rpm}) * N(\text{rpm}) - 0.00011f(\text{mm/min}) * N(\text{rpm}) - 0.004337N(\text{rpm}) * D(\text{mm})$
- (2) $F(N) = -42.56 + 0.5275f(\text{mm/min}) - 0.00548N(\text{rpm}) + 14.9D(\text{mm}) + 0.000007N(\text{rpm}) * N(\text{rpm}) - 0.00011f(\text{mm/min}) * N(\text{rpm}) - 0.004337N(\text{rpm}) * D(\text{mm})$

5. Sensitivity analysis of input parameters on drilling force

In this section, based on the performed modeling and its conformity with the experimental data, and considering the effective factors in the model, an attempt has been made to explain the role of rotational speed, feed rate, and tool diameter in the axial force behavior.

6. Effect of feed rate

According to the presented regression equations and the performed sensitivity analysis, specifically for the feed rate parameter, the obtained diagrams, respectively in the cases with nanocoating (Figure 1-a) and without nanocoating (Figure 1-b), show the trend of changes in the axial force. According to the observed results, with increasing feed rate, due to the increase in the thickness of the deformed chip, the applied force to the polycarbonate increases. The lower the feed rate and the penetration speed of the tool into the material, the easier it is for the chip to be removed from the drilling site. Also, with increasing feed rate, due to the increase in friction between the tool and the workpiece, the machining force will increase.

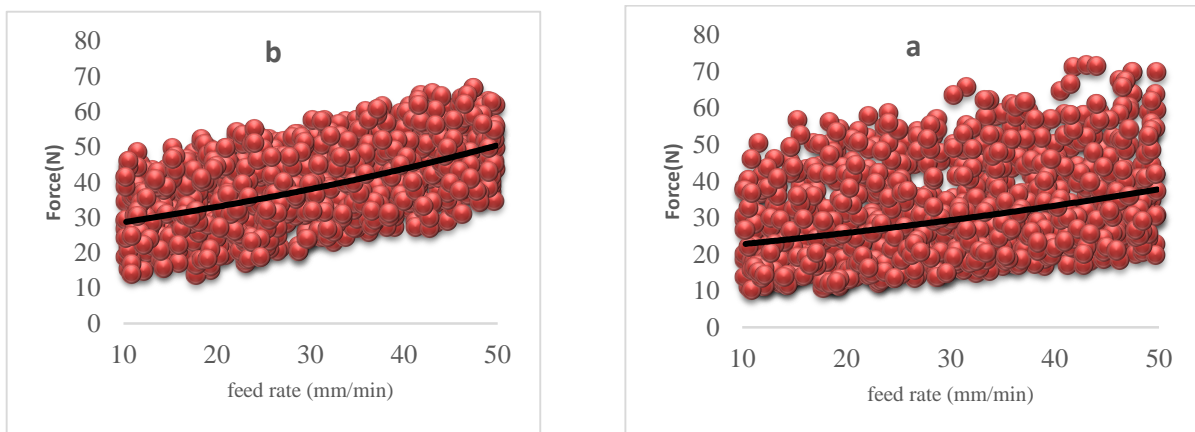


Figure 1 Study of the effect of the advance rate, a) with nanocoating b) without nanocoating

7. Effect of rotational speed

Rotational speed, as the second input of the regression equation, has been investigated in the sensitivity analysis of this research, the results of which are presented graphically in the cases with nanocoating (Figure 1-a) and without nanocoating (Figure 2-b). It is evident that the change in the tool rotation speed has a direct effect on the axial force. Increasing the tool rotation speed can lead to a decrease in the axial force. The reason for this is that with increasing rotational speed, the cutting speed will also increase accordingly. This increase in cutting speed leads to a decrease in the likelihood of built-up edge formation and also facilitates chip removal and reduces friction; therefore, in the drilling process of this material, adjusting the tool rotation speed can be used to control and optimize the axial force.

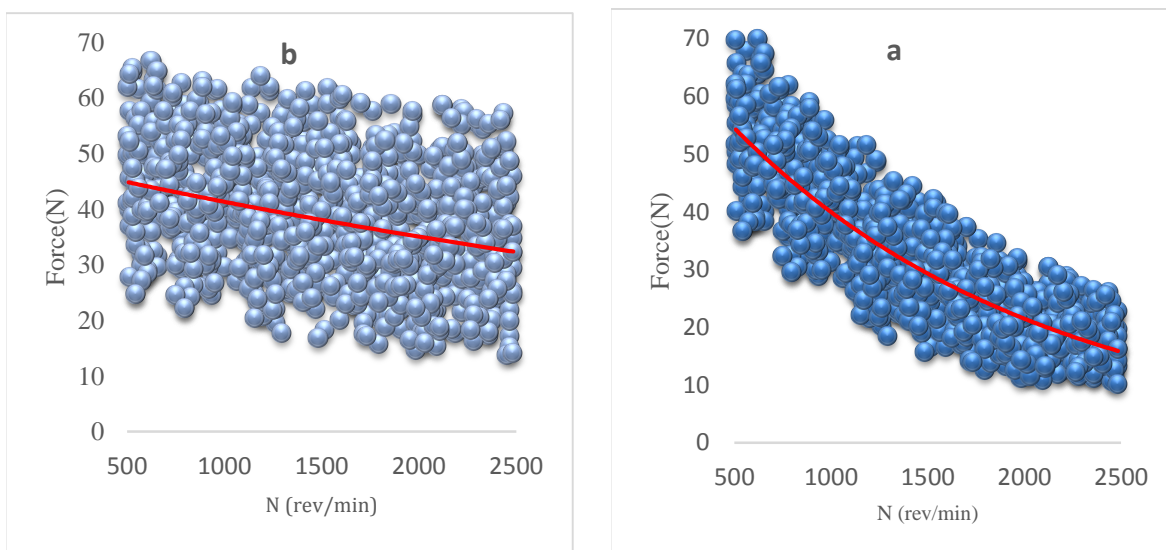


Figure 2 Investigating the effect of rotational speed, a) with nano coating b) without nano coating

8. Effect of tool diameter

Another input parameter of this equation is the tool diameter used. To investigate the effect of this parameter on the axial force, the results of the sensitivity analysis with nanocoating (Figure 3-a) and without nanocoating (Figure 3-b) are presented. With increasing tool diameter, the contact surface between the tool and the polymethyl methacrylate increases and therefore the axial force also increases [24].

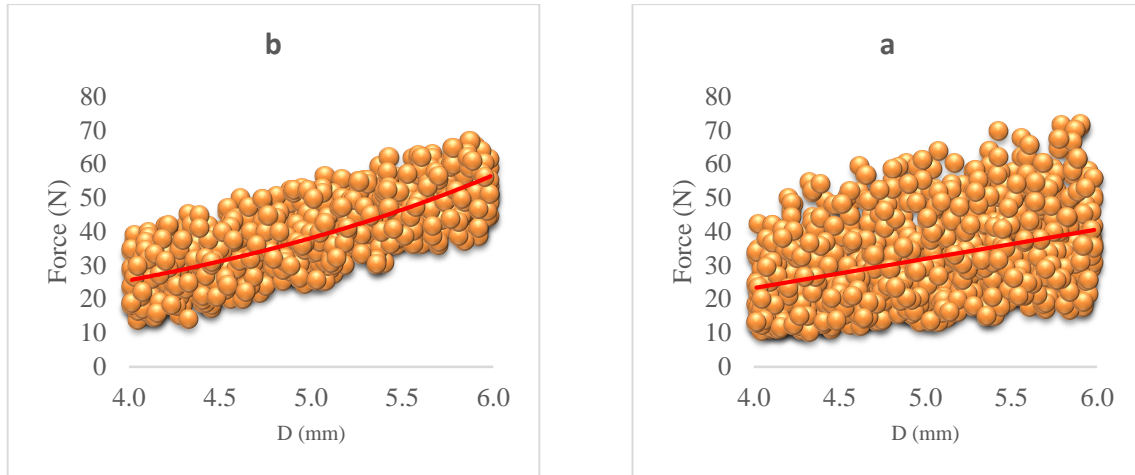


Figure 3 Investigating the effect of tool diameter, a) with nanocoating b) without nanocoating

9. Summary of sensitivity analysis of input parameters affecting drilling force using the E-Fast method

The importance of this comparison is that by accurately understanding the effect of each parameter on the axial force, it is possible to optimize the orthopedic drilling process and obtain the required axial force with minimal side effects and high accuracy. More importantly, the effect of nanocoatings is evident in this comparison. According to the diagrams presented below, the effect of each input is shown together, which has made it easy to compare them. Figure 4-a shows the effect of these parameters without nanocoating. In Figure 4-b, the same parameters show their effect along with the nanocoating. Based on the test results, the final effect of the presence and absence of nanocoating can be analyzed. Based on the mentioned percentages, the following results are obtained: Tool diameter: In the case without nanocoating, the tool diameter has a greater effect (32% effect) compared to the case where the nanocoating is used (16% effect). This result shows that the nanocoating is able to reduce the effect of tool diameter on the axial force. Rotational speed: In the case without nanocoating, the rotational speed has a lesser effect (45% effect) on the axial force, while in the case with nanocoating, it shows a greater effect (74% effect). This result shows that the nanocoating can increase the effect of rotational speed on the axial force and help improve the performance of the drilling process. Feed rate: In the case without nanocoating, the feed rate has a lesser effect (22% effect) on the axial force, while in the case with nanocoating, it shows a lesser effect (10% effect).

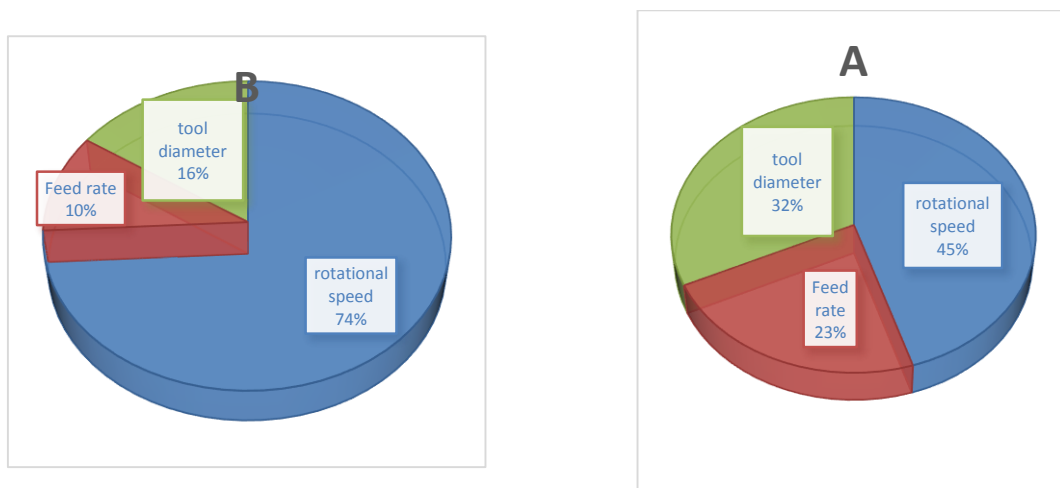


Figure 4 Diagram of the percentage effect of process parameters, a) without nanocoating b) with nanocoating

10. Conclusion

This paper presents an experimental analysis of the axial force in drilling polymethyl methacrylate using tools coated with titanium nitride nanocoating through physical vapor deposition. Regression equations were used to model the axial force, and sensitivity analysis was employed to investigate the impact of input parameters on the axial force.

Results

Experimental analysis revealed that the use of tools coated with titanium nitride nanocoating in the drilling process significantly improves the performance and efficiency of this process.

Tool Diameter: In the case without nanocoating, the tool diameter has a greater impact on the axial force (32% effect) compared to the case with nanocoating (16% effect). This result indicates that the nanocoating can reduce the effect of tool diameter on the axial force.

Rotational Speed: In the case without nanocoating, rotational speed has a lesser impact (45% effect) on the axial force, while in the case with nanocoating, it shows a greater impact (74% effect). This result indicates that the nanocoating can increase the effect of rotational speed on the axial force and improve the drilling process performance.

Feed Rate: In the case without nanocoating, the feed rate has a lesser impact (22% effect) on the axial force, while in the case with nanocoating, it shows a lesser impact (10% effect).



بررسی چگونگی اثرگذاری پارامترهای فرآیند سوراخ کاری پلی متیل متاکریلات با استفاده از ابزارهای پوشش داده شده

معین طاهری الف*، امین سوسنآبادی ب، محمدجواد محمدی ج

الف دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، ایران، m-taheri@araku.ac.ir

ب دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، a.sousanabadi.01@phd.araku.ac.ir

ج دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، mohamadjavadmohamadi79@gmail.com

واژگان کلیدی	چکیده
سوراخ کاری، نانوپوشش ابزار، آنالیز حساسیت، ای-فست.	سوراخ کاری یکی از رایج ترین روش های جراحی بر روی استخوان انسان است که به منظور تثبیت استخوان های شکسته در کنار یکدیگر استفاده می شود. این فرآیند، به دلیل پیچیدگی ماده تحت ماشین کاری و حساسیت آن، به عنوان یکی از مهم ترین روش های مکانیکی در مهندسی پزشکی شناخته می شود. پلی متیل متاکریلات، به دلیل داشتن خواص مکانیکی مشابه با بافت استخوان، گزینه ای مناسب برای جایگزینی استخوان در ایمپلنت های پزشکی محسوب می شود. افزایش نیروهای سوراخ کاری ممکن است به بافت استخوان یا ایمپلنت آسیب زده و مشکلات جدی و جبران ناپذیری ایجاد کند؛ بنابراین، بررسی عوامل مؤثر بر نیروهای سوراخ کاری این نوع مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، تحلیل حساسیت و بهینه سازی نیروی محوری در فرآیند سوراخ کاری ارتوپدی با استفاده از ابزارهایی که با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم (به روش رسوب دهی فیزیکی) پوشش داده شده اند، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش، ارتقای عملکرد و کارایی فرآیند از طریق بهینه سازی پارامترهایی همچون سرعت دوران ابزار، نرخ پیشروی، قطر ابزار، و استفاده از پوشش نیتريد تیتانیوم است. با تحلیل داده های آزمایش ها، آنالیز حساسیت نیز انجام شده است. نتایج نشان می دهند استفاده از ابزارهای پوشش داده شده می تواند منجر به کاهش نیروهای سوراخ کاری شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳	

۱- مقدمه

در سال های اخیر توسعه فناوری های پوشش دهی در صنایع مختلف، به عنوان یکی از موضوعات مورد توجه قرار گرفته است [۱]. این فناوری ها امکان ایجاد پوشش های بسیار نازک با ویژگی های منحصر به فرد و قابلیت کنترل دقیق را فراهم خواهند ساخت [۲]. از جمله صنایعی که از این تکنولوژی بهره برداری می کنند، صنعت ماشین کاری و علی الخصوص سوراخ کاری است [۳]. فرآیند سوراخ کاری در صنایع مختلف، از جمله در کاربردهای پزشکی مانند سوراخ کاری استخوان و ایمپلنت های مورد استفاده قرار می گیرد [۴]. از آنجایی که در صنایع پزشکی دقت بالا از اهمیت ویژه ای برخوردار است، بهینه سازی فرآیند سوراخ کاری و بهبود کیفیت و دقت سوراخ های تولید شده نیز از اهمیت بالایی برخوردار می باشند [۵]. یکی از رویکردهای جدید در بهبود عملکرد فرآیند سوراخ کاری، استفاده از پوشش های نانو ساختاری بر روی ابزارهای سوراخ کاری می باشد [۶]. پوشش دهی ابزار سوراخ کاری با نانوپوشش های نیتريد تیتانیوم، به روش رسوب دهی فیزیکی، به عنوان یک روش پیشرفته و قابل اعتماد در بهبود کارایی و کاهش نیروی محوری در فرآیند سوراخ کاری ارتوپدی مطرح می باشد [۷]. همان طور که اشاره شد، در صنعت ارتوپدی، فرآیندهای سوراخ کاری برای تهیه اتصالات و استفاده از اجزای ارتوپدی نیازمند دقت و کیفیت بالا هستند. برای دستیابی به نتایج بهتر و

بهینه‌تر، می‌توان از فناوری‌های پوشش‌دهی نانومتری استفاده کرد [۸]. بهبود و بهینه‌سازی نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی با استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش‌ها، می‌تواند عملکرد و کارایی این فرآیند را بهبود قابل توجهی بخشیده و نیازمندی‌های صنعت ارتوپدی را برطرف کند [۹]. طی تحقیقات انجام‌شده توسط مارین و همکارانش، مشاهده شده است که آلیاژهای تیتانیومی جز زیست‌سازگارترین و پرمصرف‌ترین آلیاژها در میان بیومواد فلزی می‌باشد [۱۰]. با توجه به اهمیت فرآیند سوراخ‌کاری در صنعت ارتوپدی و نیازمندی‌های دقت و کیفیت بالا، بهبود کارایی این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از پوشش نیتريد تیتانیوم به‌عنوان یک فاکتور تأثیرگذار در سوراخ‌کاری و اعمال بهینه‌سازی بر روی پارامترهای دیگر می‌تواند بهبود قابل توجهی در نیروی محوری و کیفیت سوراخ‌ها به همراه داشته باشد [۱۱]. در تحقیقات نیکویی‌منش و همکارانش [۱۲]، مشاهده می‌شود پوشش نیتريد تیتانیوم به دلیل داشتن خواص منحصربه‌فردی همچون مقاومت به حرارت و اکسیداسیون بالا و مقاومت زیاد به سایش، در بسیاری از قطعات به‌منظور تقویت مقاومت به خوردگی، اکسیداسیون و سایش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به‌طور کلی در زمینه‌ی سوراخ‌کاری ارتوپدی با ابزار نانوپوشش‌دهی شده، مطالعات و تحقیقات بسیاری انجام شده است که به تحلیل تجربی و بهینه‌سازی نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی توسط این ابزارها می‌پردازند. با استفاده از این تحقیقات، اطلاعات و نتایجی در مورد تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند سوراخ‌کاری، مانند سرعت چرخش ابزار، عمق برش، پوشش نیتريد تیتانیوم و سایر پارامترها بر نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی با نانوپوشش‌دهی شده به‌دست‌آمده است. این اطلاعات می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد و کارایی این فرآیند فراهم کند. همچنین، این تحقیقات می‌توانند به‌منظور بهینه‌سازی پارامترها و کاهش عوارض جانبی مورد نظر نیز به کار گرفته شوند. مطالعات و تحقیقات در زمینه‌ی سوراخ‌کاری ارتوپدی با ابزار نانوپوشش‌دهی شده همچنین با استفاده از طراحی آزمایش‌های تجربی با استفاده از روش‌های سطح پاسخ، مدل‌سازی و معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم و بهینه‌سازی پارامترهای ورودی جهت دستیابی به نیروی محوری به اطلاعات مفیدی در مورد سوراخ‌کاری ارتوپدی با استفاده از ابزار نانوپوشش‌دهی شده دست یافته‌اند. از جمله برخی از مواردی که مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌اند، می‌توان به موضوعی که توسط وو و همکارانش [۱۳] بررسی شده اشاره نمود که تأثیر نوع و خواص نانوپوشش چه می‌تواند باشد. در واقع به بررسی اثر یک نوع نانوپوشش بر روی ابزار از جنس تیتانیوم نیتريد در سوراخ‌کاری ارتوپدی و تأثیر آن بر نیروی محوری پرداخته می‌شود. در موردی مشابه، طهماسبی و همکارانش [۱۴] تأثیر پارامترهای ورودی را مورد بحث قرار داده‌اند. در این قسمت بررسی تأثیر سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار بر نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی با استفاده از ابزار پوشش‌دهی شده با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم انجام شده است. آن‌ها در زمینه‌ی مدل‌سازی و بهینه‌سازی، به استفاده از روش‌های آن جهت تعیین مدل رفتار نیروی محوری و بهینه‌سازی پارامترهای ورودی، با هدف دستیابی به نیروی محوری بهینه و کاهش عوارض جانبی پرداخته‌اند. ستوده و همکاران، در مطالعه دیگر به بررسی عوامل مؤثر بر بروز نکرور حرارتی در هنگام سوراخ‌کاری استخوان پرداختند، بر اساس نتایج گزارش شده می‌توان گفت با بهینه‌سازی تمامی این پارامترها می‌توان دمای فرآیند سوراخ‌کاری استخوان و رشد ترک‌های استخوانی در اطراف محل سوراخ‌کاری استخوان را کنترل نموده و تا حد بسیار زیادی فرآیند سوراخ‌کاری استخوان را بهبود بخشید [۱۵].

پلیمرهای اکریلیک یکی از مواد پر استفاده در صنعت می‌باشد. این مواد ویژگی‌های بسیار خوبی از نظر مقاومت در برابر شرایط آب و هوایی مختلف را دارا هستند، به‌طوری‌که وقتی که در تماس با شرایط مختلف قرار می‌گیرند، مقاومت مناسبی را از خود نشان می‌دهند و در برابر هوازدگی و شرایط محیطی (دما، فشار و رطوبت یا بخار آب) بسیار مقاوم هستند. مطابق با مطالعات مختلفی که توسط محققین انجام شده است، این خواص در کاربردهای پزشکی به سبب مشابهت با خواص مکانیکی استخوان نیز بسیار مهم و قابل استفاده می‌باشد. هاتن و وور [۱۶] در پژوهشی از ماده‌ی دوفازی استخوان - پلی متیل متاکریلات استفاده کردند که حاوی ذرات ریز از استخوان و $PMMA^1$ بود و با زیر نظر گرفتن چندین بیمار و خرگوش که تحت جراحی استخوان بودند، آن‌ها متوجه شدند در جراحی‌هایی که از این ماده استفاده شده است میزان درد بعد از انجام عمل بسیار کمتر شده است و بعد

¹ polymethyl methacrylate

از تصویربرداری‌ها در بازه‌های مختلف دریافتند که این ماده با استخوان سازگاری بسیار مناسبی نیز دارد به طوری که سرعت رشد، ترمیم و بازیابی استخوان به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. همچنین لوکا و همکاران [۱۷] در پژوهشی از کامپوزیت استخوان و پلی متیل متاکریلات برای درمان پوکی استخوان استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند این ماده با بافت استخوان بسیار سازگار بوده و در بافت‌های آن به راحتی نفوذ می‌کند. از مطالعه پژوهش‌های گذشته می‌توان این نتیجه را گرفت که محققان در نظر دارند از این ماده به دلیل نزدیکی خواص مکانیکی به استخوان به‌عنوان ماده‌ای به‌جای استخوان در ایمپلنت‌ها استفاده کنند.

با توجه به مطالعات صورت پذیرفته در این موضوع، میزان اثرگذاری هر یک از پارامترها بر روی نیروهای سوراخ‌کاری به‌صورت دقیق مشخص نشده است لذا در این مطالعه با استفاده از داده‌های حاصل از کار تجربی طهماسبی و همکاران [۱۴]، ضمن ارائه معادلات رگرسیون خطی مرتبه دوم و تحلیل آن‌ها، بهینه‌سازی آماری به‌منظور دستیابی به کمترین میزان نیرو با استفاده از الگوریتم درینگر ارائه شده است. همچنین در این مقاله به آنالیز حساسیت پارامترهای اصلی سوراخ‌کاری بر روی نیروی برشی با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای فست^۲ پرداخته شده است و میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار در دو حالت ابزار با پوشش و بدون پوشش در حین سوراخ‌کاری ماده پلیمری پلی متیل متاکریلات مشخص گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ماده پلیمری پلی متیل متاکریلات

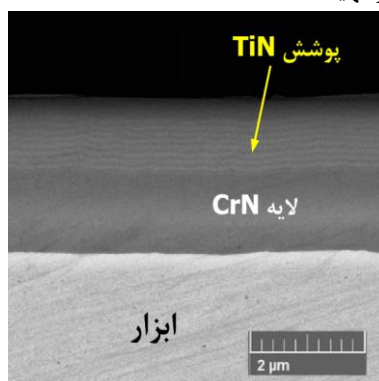
به دلیل ویژگی‌های بسیار خوب و مشابهت با خواص مکانیکی استخوان از پلی متیل متاکریلات به‌عنوان ماده مورد مطالعه استفاده شده است. میزان تشابه این ماده با خواص استخوان در جدول ۱ نمایش داده شده است

جدول ۱ مقایسه خواص مکانیکی استخوان و پلی متیل متاکریلات [۱۶]

خواص مکانیکی	استخوان	PMMA
رسانایی گرمایی (وات بر کلوین متر)	۰/۳۵-۰/۱	۰/۴-۰/۱۵
گرمای ویژه (ژول بر کلوین کیلوگرم)	۱۳۰۰	۱۴۰۰
انتشار حرارتی (مترمربع بر ثانیه)	۰/۰۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۰۱۱
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۸۰۰	۱۴۰۰
استحکام کششی (مگا پاسکال)	۱۱۵	۸۳
مدول برشی (گیگاپاسکال)	۳/۵	۳

۲-۲- ابزارها

در این مطالعه از دو دست مته از جنس فولادهای تندبر حاوی کبالت با پوشش تیتانیوم نیتراید و بدون پوشش مورد استفاده قرار گرفت. مته‌های به قطر ۵،۴ و ۶ میلی‌متر تهیه شده است.



شکل ۱ تصویر SEM ابزار پوشش داده شده [۱۴]

² E-Fast method

۳- روش انجام آزمایش

استفاده از طراحی آزمایش‌ها (DOE) می‌تواند برای کاهش تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای به دست آوردن پاسخ مناسب به یک پرسش، استفاده شود. روش سطح پاسخ (RSM) یک ابزار خوب به دلیل دقت در مدل‌سازی و اعتبارسنجی تجربی می‌باشد [۱۸]. در این مطالعه، از روش سطح پاسخ برای طراحی آزمایش‌ها استفاده گردید. به‌جای انجام آزمایش‌های تصادفی، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با رعایت الزامات سوراخ‌کاری انجام شد تا بتوان فرآیند را برای پارامترهای مختلف پاسخ به‌صورت جداگانه یا ترکیبی تجزیه و تحلیل کرد.

برای مطالعه رفتار نیرو در فرآیند سوراخ‌کاری این ماده، پارامترهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته به‌عنوان متغیرهای ورودی انتخاب شده است. در انجام آزمایش‌ها از یک ورق پلیمری پلی متیل متاکریلات با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده گردید. مته‌های استفاده شده در فرآیند، مته‌های استاندارد فولاد تندبر می‌باشد و به‌منظور حذف اثر ساییش ابزار از مته‌های نو استفاده شده است. در جدول ۲ سطوح پارامترهای ورودی مشخص شده است. برای اندازه‌گیری نیروی محوری از یک نیروسنج آزمایشگاهی بهره گرفته شده است.



شکل ۲ پلی متیل متاکریلات در حال سوراخ‌کاری [۱۴]

جدول ۲ پارامترهای ورودی ماشین‌کاری در سه سطح

پارامتر ورودی	۱-	۰	۱+
نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	۱۰	۳۰	۵۰
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۵۰۰	۱۵۰۰	۲۵۰۰
قطر ابزار (میلی‌متر)	۴	۵	۶

۳-۱- روش‌های تحلیل حساسیت ای فست

آنالیز حساسیت برای ساده کردن مدل و افزایش اعتمادپذیری به مدل و ارائه ارتباط بین اطلاعات ورودی و خروجی مدل استفاده می‌شود. همچنین پیش‌بینی می‌کند مدل چگونه پاسخی به متغیرهای ورودی و تغییرات آن‌ها می‌دهد و کالیبراسیونی برای داده‌ها می‌باشد. حوزه‌ای از روش‌های آنالیز حساسیت عمومی که بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است، روش‌های بر پایه‌ی واریانس می‌باشد. در این روش‌ها شاخص حساسیت به‌صورت سهم هر یک از پارامترهای ورودی در واریانس کلی خروجی مدل محاسبه می‌گردد. روش‌های آنالیز حساسیت عمومی در چهار مرحله انجام می‌گیرد:

تعریف ورودی و نوع توزیع هر یک از ورودی‌ها

تولید نمونه برای مقادیر ورودی

محاسبه‌ی خروجی مدل برای هر یک از مجموعه نمونه‌های ورودی

محاسبه‌ی تأثیر هر فاکتور ورودی در خروجی

روش‌های آنالیز حساسیت عمومی بر پایه‌ی واریانس می‌توانند برای محاسبه‌ی تأثیر مرتبه‌ی اول و تأثیر مرتبه‌ی دوم (که شامل برهم‌کنش بین پارامترهای دیگر می‌باشد) مورد استفاده قرار گیرند.

روش ای فست یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد. کاربرد روش ای-فست در چند مرحله ارائه می‌شود. این روش همانند روش سوبل بر پایه‌ی واریانس است و مستقل از هرگونه فرض (خطی و یکنواخت) بین ورودی‌ها و خروجی‌ها (ها) می‌باشد. این روش برخلاف روش سوبل^۳ که برای به دست آوردن واریانس کلی و واریانس‌های جزئی از انتگرال‌های چندبعدی استفاده می‌کرد، با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل کرده و موجب ساده‌سازی روند محاسبه شاخص‌های حساسیت می‌گردد. روش ای فست فضای n بعدی فاکتورهای ورودی (K^n) را با استفاده از منحنی جست‌وجو تعریف شده با مجموعه‌ای از معادلات پارامتریک، کاوش می‌کند [۱۹-۲۳].

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(\omega_i s + \phi_i)) \quad (2)$$

ω_i ($i = 1, 2, \dots, n$) فرکانس مربوط به فاکتور x_i و s متغیری است که در بازه‌ی $-\pi$ تا π تغییر می‌کند و ϕ_i نقطه شروع منحنی را مشخص می‌کند. واریانس خروجی مدل با استفاده از آنالیز فوریه تقریب زده می‌شود:

$$V(Y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(s) ds - \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) ds \right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty} (A_j^2 + B_j^2) - (A_0^2 + B_0^2) \approx 2 \sum_{j=1}^N (A_j^2 + B_j^2) \quad (3)$$

$f(s) = f(G_1(\sin(\omega_1 s)), G_2(\sin(\omega_2 s)), \dots, G_n(\sin(\omega_n s)))$ توابع انتقال، A_j و B_j ضرایب فوریه می‌باشند که در روابط ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos(js) ds \quad (4)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin(js) ds \quad (5)$$

با محاسبه ضرایب فوریه برای فرکانس پایه ω_i و هارمونیک‌های بالاتر آن $p\omega_i$ می‌توان واریانس جزئی مرتبه اول ورودی x_i را به دست آورد.

$$V_i = \sum_{p \in Z^0} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) = 2 \sum_{p=1}^{\infty} (A_{p\omega_i}^2 + B_{p\omega_i}^2) \quad (6)$$

همچنین برای محاسبه شاخص حساسیت اصلی مانند روش سوبل از نسبت واریانس جزئی مرتبه اول به واریانس کلی استفاده می‌کنیم. شاخص حساسیت کلی نیز از معادله‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$ST_i = 1 - \frac{V_{-i}}{V} \quad (7)$$

واریانس V_{-i} از تغییر همه پارامترها به‌جز تغییر پارامتر x_i به دست می‌آید.

مراحل آنالیز حساسیت به کار گرفته شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

انتخاب مجموعه‌ای از n فرکانس $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ ، n تعداد پارامترهای ورودی مدل می‌باشد.

نسبت دادن به‌دلخواه یک فرکانس از مجموعه فرکانس‌ها برای هر پارامتر ورودی.

معرفی منحنی جست‌وجو که فضای همه پارامترهای ورودی را کاوش می‌کند.

محاسبه اندیس‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی به‌وسیله تحلیل فوریه برای خروجی

۴- تحلیل، تفسیر و آنالیز حساسیت داده‌ها

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل نیرو و نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها توسط طهماسبی و همکارانش [۱۴] معادلات رگرسیون به شرح ذیل در حالات مختلف با نانو پوشش (۱) و بدون نانو پوشش (۲) به‌دست‌آمده است.

³ Sobol method

$$(۱) F(N) = -16.48 + 0.52f(mm/min) - 0.01493N(rpm) + 14.9D(mm) + 0.000007N(rpm) * N(rpm) - 0.00011f(mm/min) * N(rpm) - 0.004337N(rpm) * D(mm)$$

$$(۲) F(N) = -42.56 + 0.5275f(mm/min) - 0.00548N(rpm) + 14.9D(mm) + 0.000007N(rpm) * N(rpm) - 0.00011f(mm/min) * N(rpm) - 0.004337N(rpm) * D(mm)$$

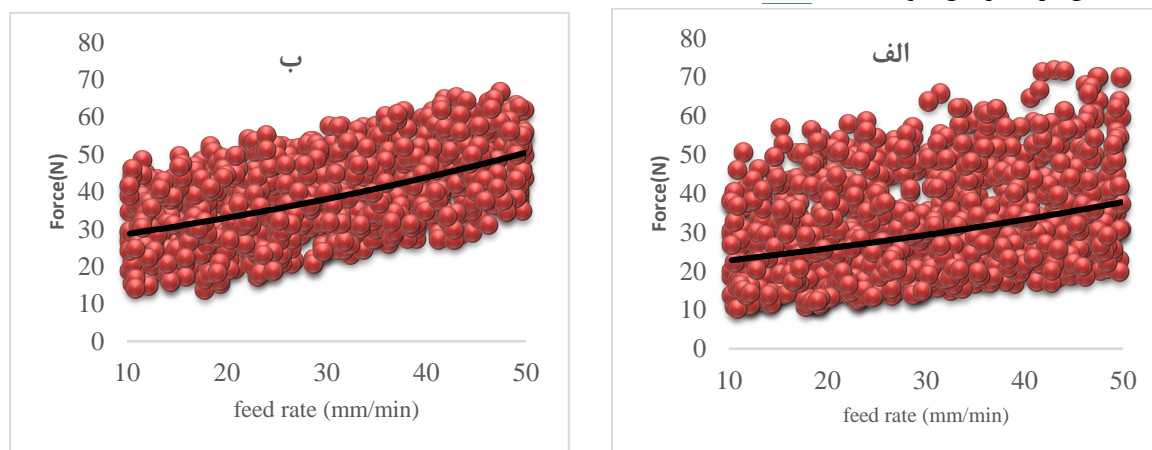
در این مقاله، معادلات رگرسیون و آنالیز حساسیت به صورت مرتبط با یکدیگر استفاده شده‌اند. معادلات رگرسیون، با استفاده از روش طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، برای مدل سازی و پیش بینی نیروی محوری در فرآیند سوراخ کاری استخراج شده‌اند. این معادلات، بر اساس پارامترهای ورودی ذکر شده، نیروی محوری را به صورت رابطه‌ای مستقیم یا معکوس با پارامترهای ورودی مرتبط مدل می‌کنند که شامل حالت‌های پوشش دهی شده با نانو پوشش و بدون پوشش می‌باشند. در آنالیز حساسیت نیز، تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی محوری در فرآیند سوراخ کاری با استفاده از ابزارهای پوشش دهی شده با نانو پوشش‌ها بررسی می‌شود. با تغییر مقادیر این پارامترها و ثبت نتایج، تأثیر هر یک از آن‌ها بر نیروی محوری مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. این آنالیز حساسیت این امکان می‌دهد تا پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر نیروی محوری دارند را شناسایی شده و درک بهتری از رابطه بین این پارامترها و نیروی محوری در فرآیند سوراخ کاری با نانو پوشش‌های پوشش دهی شده به دست خواهد آمد؛ بنابراین، معادلات رگرسیون برای مدل سازی نیروی محوری و آنالیز حساسیت برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر نیروی محوری، به صورت هم‌زمان در این مقاله استفاده شده‌اند تا ارتباط و رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی را بهبود بخشند و اطلاعات بیشتری درباره فرآیند سوراخ کاری با ابزارهای پوشش دهی نانو پوشش‌ها در اختیار قرار دهند.

۵- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی نیروی سوراخ کاری

در این بخش با توجه به مدل سازی انجام شده و تطابق آن بر داده‌های آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن فاکتورهای مؤثر در مدل، تلاش شده است تا نقش سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار در رفتار نیروی محوری تشریح گردد.

۵-۱- تأثیر نرخ پیشروی

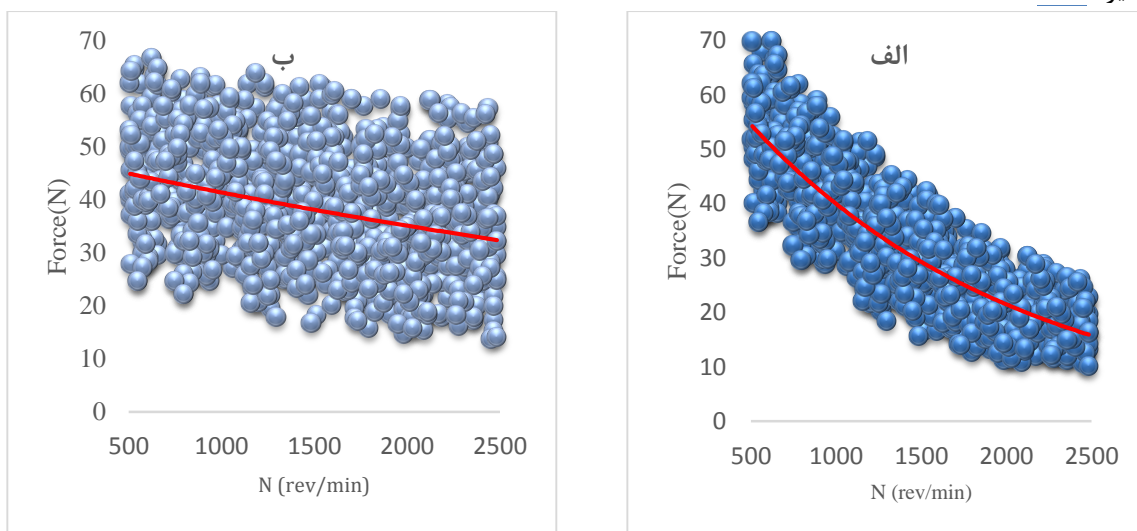
با توجه به معادلات رگرسیون ارائه شده و همچنین انجام آنالیز حساسیت، به طور تخصصی در موضوع پارامتر نرخ پیشروی، نمودارهای به دست آمده به ترتیب در دو حالت با نانو پوشش (شکل ۳-الف) و بدون نانو پوشش (شکل ۳-ب)، روند تغییرات نیروی محوری را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج مشاهده شده، با افزایش نرخ پیشروی به دلیل افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته نیرو اعمالی به پلی متیل کربنات افزایش می‌یابد. هرچه نرخ پیشروی و سرعت نفوذ ابزار در ماده کمتر باشد، براده راحت تر می‌تواند از محل سوراخ کاری خارج شود، همچنین با افزایش سرعت پیشروی به دلیل زیاد شدن اصطکاک بین ابزار و قطعه کار نیروی ماشین کاری افزایش خواهد یافت [۲۴].



شکل ۳ بررسی تأثیر نرخ پیشروی، (الف) با نانو پوشش (ب) بدون نانو پوشش

۵-۲- تأثیر سرعت دورانی

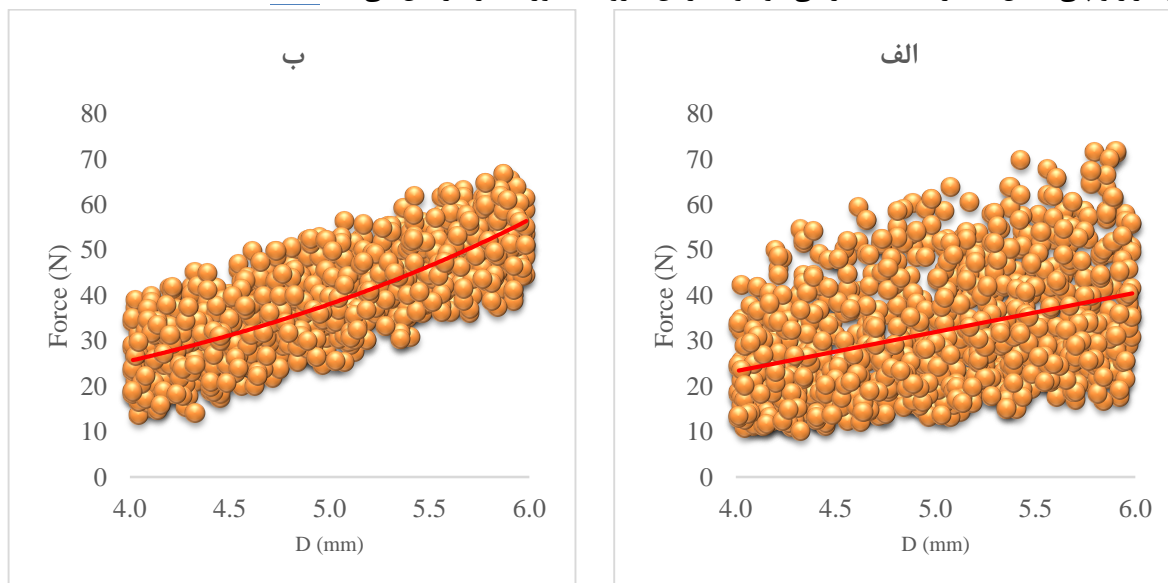
سرعت دورانی به‌عنوان دومین ورودی معادله رگرسیون در آنالیز حساسیت این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن به‌صورت نموداری در حالت‌های با نانوپوشش (شکل ۴-الف) و بدون نانوپوشش (شکل ۴-ب) آورده شده است. مشهود است تغییر در سرعت چرخش ابزار تأثیر مستقیم بر نیروی محوری دارد. افزایش سرعت چرخش ابزار می‌تواند منجر به کاهش نیروی محوری شود. علت این امر این است که با افزایش سرعت دورانی، سرعت برشی نیز به طبع آن افزایش پیدا خواهد کرد. این افزایش سرعت برشی منجر به کاهش احتمال ایجاد لبه انباشته و همچنین تسهیل در خروج براده و کاهش اصطکاک خواهد شد؛ بنابراین، در فرآیند سوراخ‌کاری این ماده، تنظیم سرعت دوران ابزار می‌تواند برای کنترل و بهینه‌سازی نیروی محوری مورد استفاده قرار گیرد [۲۵].



شکل ۴ بررسی تأثیر سرعت دورانی، الف) با نانوپوشش ب) بدون نانوپوشش

۵-۳- بررسی تأثیر قطر ابزار

دیگر پارامتر ورودی این معادله، قطر ابزار مورد استفاده می‌باشد. برای بررسی میزان تأثیر این پارامتر در نیروی محوری نتایج آنالیز حساسیت با نانوپوشش (شکل ۵-الف) و بدون نانوپوشش (شکل ۵-ب) آورده شده است. با افزایش قطر ابزار، سطح تماس بین ابزار و پلی متیل متاکریلات بیشتر می‌شود و بنابراین نیروی محوری نیز افزایش می‌یابد [۲۶].



شکل ۵ بررسی تأثیر قطر ابزار، الف) با نانوپوشش ب) بدون نانوپوشش

۶- جمع‌بندی آنالیز حساسیت به روش ای فست پارامترهای مؤثر بر نیروی سوراخ‌کاری

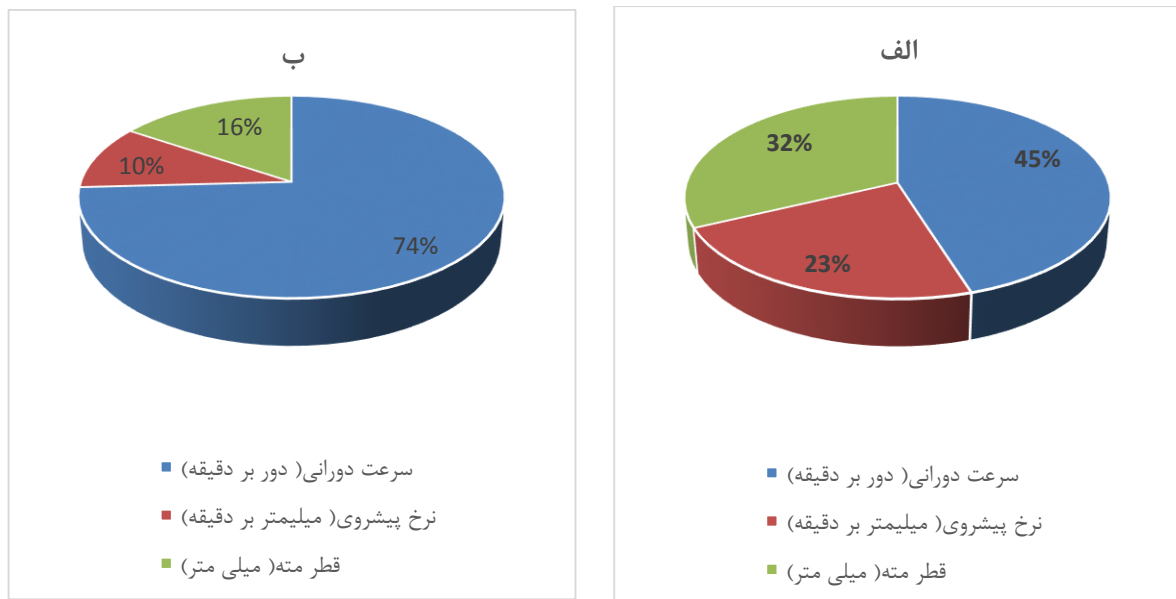
اهمیت این مقایسه در این است که با شناخت دقیق تأثیر هر پارامتر بر نیروی محوری، می‌توان بهینه‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی را انجام داد و نیروی محوری موردنیاز را با حداقل عوارض جانبی و با دقت بالا به دست آورد. مهم‌تر از هر چیز تأثیر نانوپوشش‌ها می‌باشد که در این مقایسه کاملاً مشهود است. با توجه به نمودارهایی که در ادامه آورده شده‌اند، اثر هرکدام از ورودی‌ها در کنار یکدیگر نشان داده شده که باعث شده مقایسه آن‌ها به سهولت انجام شود. در شکل (۶-الف) اثر این پارامترها بدون نانوپوشش آورده شده است. در نمودار شکل (۶-ب) همان پارامترها تأثیر خود را در کنار نانوپوشش نشان می‌دهند. با توجه به نتایج آزمایش، می‌توان تأثیر نهایی وجود و عدم وجود نانوپوشش را تحلیل کرد.

بر اساس درصدهای ذکرشده، نتایج ذیل حاصل می‌شود:

قطر ابزار: در حالت بدون نانوپوشش، قطر ابزار باعث تأثیر بیشتری بر نیروی محوری است (تأثیر ۳۲ درصد) در مقایسه با حالتی که نانوپوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد (تأثیر ۱۶ درصد). این نتیجه نشان می‌دهد که نانوپوشش توانایی کاهش تأثیر قطر ابزار بر نیروی محوری را دارد.

سرعت دورانی: در حالت بدون نانوپوشش، سرعت دورانی تأثیر کمتری (تأثیر ۴۵ درصد) بر نیروی محوری دارد، درحالی‌که در حالت با نانوپوشش، تأثیر بیشتری (تأثیر ۷۴ درصد) را نشان می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که نانوپوشش می‌تواند تأثیر سرعت دورانی را بر نیروی محوری افزایش دهد و به بهبود عملکرد فرآیند سوراخ‌کاری کمک کند.

نرخ پیشروی: در حالت بدون نانوپوشش، نرخ پیشروی تأثیر کمتری (تأثیر ۲۲ درصد) بر نیروی محوری دارد، درحالی‌که در حالت با نانوپوشش، تأثیر کمتری (تأثیر ۱۰ درصد) را نشان می‌دهد.



شکل ۶ نمودار درصد تأثیر پارامترهای فرآیند، الف) بدون نانوپوشش ب) با نانوپوشش

۷- بهینه‌سازی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان

در این بخش بهینه‌سازی فرآیند به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو در سوراخ‌کاری پلی متیل متاکریلات صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد کمینه مقدار نیرو در مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت، بهینه‌سازی صورت گرفته بر روی مدل آزمایش‌ها انجام شده است. نتیجه به دست آمده از بهینه‌سازی و مقایسه نتیجه مدل‌سازی و آزمایش صحت سنجی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ بهینه‌سازی و صحت‌سنجی آزمایش

بهینه‌سازی	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	قطر ابزار (میلی‌متر)	نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	پوشش دهی	نیرو (نیوتن)
مدل‌سازی	۲۵۰۰	۱۰	۴	بله	۶/۷
آزمایش	۲۵۰۰	۱۰	۴	بله	۷/۶
خطا (میکرون)	-	-	-	-	٪۱۳/۴

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل تجربی نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ماده پلی متیل متاکریلات با استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم به روش رسوب‌دهی فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، معادلات رگرسیون برای مدل‌سازی نیروی محوری و آنالیز حساسیت برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر نیروی محوری استفاده شده است. نتایج تحلیل تجربی نشان داده است که استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم در فرآیند سوراخ‌کاری، منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد و کارایی این فرآیند می‌شود. همچنین میزان اثرگذاری هر یک از پارامترهای مورد مطالعه بر روی نیروی محوری سوراخ‌کاری مشخص شد. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود تأثیر پارامترهایی همچون هندسه ابزار، روش خنک‌کاری و ... بر روی فرآیند مورد مطالعه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری	درصد تأثیر بر نیروی محوری (با نانوپوشش)	درصد تأثیر بر نیروی محوری (بدون نانوپوشش)	پارامتر ورودی
در حالت بدون نانوپوشش، قطر ابزار باعث تأثیر بیشتری بر نیروی محوری است	٪۱۶	٪۳۲	قطر ابزار
نانوپوشش می‌تواند تأثیر سرعت دورانی را بر نیروی محوری افزایش دهد	٪۷۴	٪۴۵	سرعت دورانی
در حالت بدون نانوپوشش، نرخ پیشروی تأثیر کمتری بر نیروی محوری دارد	٪۱۰	٪۲۲	نرخ پیشروی

۹- مراجع

- [1] Krebs FC. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. *Solar energy materials and solar cells*. 2009;93:394-412.
- [2] Wang J, Zhu J, Zhang Y, Liu J, Van der Bruggen B. Nanoscale tailor-made membranes for precise and rapid molecular sieve separation. *Nanoscale*. 2017;9:2942-57.
- [3] Tahmasbi V, Sousanabadi Farahani A. Statistical Modeling and Optimization of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Hybrid Aluminum Matrix Composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2023;23:149-54.
- [4] Sousanabadi Farahani A, Khalili O, Torabi A. Sensitivity analysis of effective parameters on bone drilling force by using E-fast method. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2023;3:83-94.
- [5] Dubey AK, Yadava V. Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008;48:609-28.
- [6] Rodríguez-Barrero S, Fernández-Larrinoa J, Azkona I, López de Lacalle L, Polvorosa R. Enhanced performance of nanostructured coatings for drilling by droplet elimination. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016;31:593-602.
- [7] Gupta K, Laubscher RF. Sustainable machining of titanium alloys: a critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017;231:2543-60.

- [8] Mouche PA, Koyanagi T, Patel D, Katoh Y. Adhesion, structure, and mechanical properties of Cr HiPIMS and cathodic arc deposited coatings on SiC. *Surface and Coatings Technology*. 2021;410:126939.
- [9] Dabees S, Mirzaei S, Kaspar P, Holcman V, Sobola D. Characterization and evaluation of engineered coating techniques for different cutting tools. *Materials*. 2022;15:5633.
- [10] Marin E, Lanzutti A. Biomedical applications of titanium alloys: a comprehensive review. *Materials*. 2023;17:114.
- [11] Zhu W, Fu H, Li F, Ji X, Li Y, Bai F. Optimization of CFRP drilling process: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;123:1403-32.
- [12] Nikueimanesh A, Akbarzadeh S. Numerical and experimental investigation of wear in nanostructured tin coating on steel substrate. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20:149-55.
- [13] Wu J, Ling C, Ge A, Jiang W, Baghaei S, Kolooshani A. Investigating the performance of tricalcium phosphate bioceramic reinforced with titanium nanoparticles in friction stir welding for coating of orthopedic prostheses application. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;20:1685-98.
- [14] 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;9:49-59.
- [15] Saeidi Abueshaghi R, Setoudeh F, Tahmasbi V, Mohammadian M, Taheri G. Investigating and analyzing parameters affecting the bone drilling process using the Taguchi method. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024; 4(1): 139-157.
- [16] Hatten Jr H, Voor M. Bone healing using a bi-phasic ceramic bone substitute demonstrated in human vertebroplasty and with histology in a rabbit cancellous bone defect model. *Interventional Neuroradiology*. 2012;18:105-13.
- [17] Giorleo L. Poly (methyl methacrylate) Coating of Titanium Workpieces to Reduce Burrs in Micro-drilling. *Micromachines*. 2019;10:838.
- [18] Safarabadi A, Tahmasbi V, Sousanabadi Farahani A, Zolfaghari M. Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization of the effect of input parameters on material removal rate and workpiece surface roughness. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022;9:59-69.
- [19] Saltelli A, Bolado R. An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST). *Computational Statistics & Data Analysis*. 1998;26:445-60.
- [20] Ryan E, Wild O, Voulgarakis A, Lee L. Fast sensitivity analysis methods for computationally expensive models with multi-dimensional output. *Geoscientific Model Development*. 2018;11:3131-46.
- [21] 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;23:475-83.
- [22] Tahmasbi V, Baghi MH, Aeinehbandy S, Sousanabadi Farahani A. Sensitivity analysis and optimization of material removal rate and surface quality in aluminum matrix composite. *Modares Mechanical Engineering*. 2023;23:395-404.
- [23] Zeinalizad L, Habibnejad Korayem M. Sensitivity Analysis of contact frictional models of Biological Particles on Rough Surface in Liquid Environment by E-Fast Method. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(1):86-121.

- [24] Knight WA, Boothroyd G. Fundamentals of metal machining and machine tools: CRC Press, 2019.
- [25] Suresh R, Basavarajappa S, Gaitonde V, Samuel G. Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2012;33:75-86.
- [26] Augustin G, Davila S, Mihoci K, Udiljak T, Vedrina DS, Antabak A. Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*. 2008;128:71-7.