



# Sensitivity Analysis of Orthopedic Drilling Process Parameters Using Titanium Nitride Nanocoated Tools



## ARTICLE INFO

### Authors

Taheri M.<sup>1\*</sup>,  
Mohammadi MJ.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

### \* Correspondence

Address: Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran  
[M-taheri@araku.ac.ir](mailto:M-taheri@araku.ac.ir)

### How to cite this article

Taheri M, Mohammadi MJ. Sensitivity Analysis of Orthopedic Drilling Process Parameters Using Titanium Nitride Nanocoated Tools. Proceedings of 3<sup>rd</sup> Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools. 2023;23(10):3-8.

## ABSTRACT

In orthopedics, the drilling process is one of the most important steps in the preparation of medical tools and implants. Improving the performance of medical tools and implants is of great importance, because these tools and implants are used in the repair of bone and joint injuries. One of the ways to improve the efficiency of these tools and implants is to use titanium nitride nano coatings on drilling tools. This article is presented with the aim of experimental analysis and optimization of axial force in the orthopedic drilling process using a tool coated with titanium nitride nano coating by physical deposition method. The purpose of this research is to improve the performance and efficiency of this process by optimizing various parameters such as tool rotation speed, cutting depth and titanium nitride coating. For this purpose, experimental tests were conducted using the response surface method. the sensitivity analysis was also performed. The results have shown that the rotational speed, as the most effective parameter, has a lesser effect (45% effect) on the axial force in the case without nanocoating, while it shows a greater effect (73% effect) in the case with nanocoating.

**Keywords** Drilling, Orthopedics, Tool Nanocoating, Machining, Sensitivity Analysis

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته  
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۳-۸



# آنالیز حساسیت پارامترهای فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی با استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم



## چکیده

در علم ارتوپدی، فرآیند سوراخ‌کاری یکی از مهم‌ترین مراحل در تهیه ابزارها و ایمپلانت‌های پزشکی است. بهبود عملکرد ابزارها و ایمپلانت‌های پزشکی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این ابزارها و ایمپلانت‌ها در ترمیم آسیب‌های استخوانی و مفصلی استفاده می‌شوند. یکی از روش‌های بهبود کارایی این ابزارها و ایمپلانت‌ها، استفاده از نانو پوشش‌های نیتريد تیتانیوم بر روی ابزارهای سوراخ‌کاری است. این مقاله با هدف تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی با استفاده از ابزار پوشش‌دهی شده با نانو پوشش نیتريد تیتانیوم به روش رسوب‌دهی فیزیکی ارائه می‌شود. هدف از این تحقیق، بهبود عملکرد و کارایی این فرآیند با بهینه‌سازی پارامترهای مختلف شامل سرعت چرخش ابزار، عمق برش و پوشش نیتريد تیتانیوم است. برای این منظور، با تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشات، آنالیز حساسیت نیز انجام گردیده است. نتایج نشان داده است که سرعت دورانی به‌عنوان اثرگذارترین پارامتر، در حالت بدون نانوپوشش، تأثیر کمتری (تأثیر ۴۵ درصد) بر نیروی محوری دارد، در حالی که در حالت با نانوپوشش، تأثیر بیشتری (تأثیر ۷۳ درصد) را نشان می‌دهد.

## مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

معین طاهری<sup>\*</sup>

محمد جواد محمدی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

\* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده فنی مهندسی،

دانشگاه اراک، اراک، ایران

[M-taheri@araku.ac.ir](mailto:M-taheri@araku.ac.ir)

**کلیدواژه‌ها** سوراخ‌کاری، ارتوپد، نانوپوشش ابزار، ماشین‌کاری، آنالیز حساسیت

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر توسعه فناوری‌های پوشش‌دهی به روش‌های نانومتری و کاربردهای آن‌ها در صنایع مختلف، به‌عنوان یکی از موضوعات مورد توجه قرار گرفته است<sup>[۱]</sup>. این فناوری‌ها امکان ایجاد پوشش‌های بسیار نازک با ویژگی‌های منحصربه‌فرد و قابلیت کنترل دقیق را فراهم خواهند ساخت<sup>[۲]</sup>.

از جمله صنایعی که از این فناوری‌ها بهره‌برداری می‌کنند، صنعت ارتوپدی است<sup>[۳]</sup>. فرآیند سوراخ‌کاری در صنایع مختلف، از جمله صنعت ارتوپدی، یکی از عملیات اساسی برای تهیه سوراخ‌های دقیق و کنترل‌شده در مواد مختلف می‌باشد<sup>[۴]</sup>. از آنجایی که در صنایع پزشکی دقت و دقت بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بهینه‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری و بهبود کیفیت و دقت سوراخ‌های تولید شده نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند<sup>[۵]</sup>. یکی از رویکردهای جدید در بهبود عملکرد فرآیند سوراخ‌کاری، استفاده از پوشش‌های نانوساختاری بر روی ابزارهای سوراخ‌کاری می‌باشد<sup>[۶]</sup>. پوشش‌دهی ابزار سوراخ‌کاری با نانوپوشش‌های نیتريد تیتانیوم، به روش رسوب‌دهی فیزیکی، به‌عنوان یک روش پیشرفته و قابل اعتماد در بهبود کارایی و کاهش نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی مطرح می‌باشد<sup>[۷]</sup>. همانطور که اشاره شد، در صنعت ارتوپدی، فرآیندهای سوراخ‌کاری 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<sup>[۸]</sup>. 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<sup>[۹]</sup>.

طی تحقیقات انجام شده توسط بدر و همکارانش<sup>[۱۰]</sup>، مشاهده شده است که آلیاژهای تیتانیومی جز زیست سازگارترین و پرمصرف‌ترین آلیاژها در میان بیو مواد فلزی در صنعت کاشتنی‌ها می‌باشد. همچنین این آلیاژ دارای مشکلاتی از قبیل رهایش یون‌های سمی مانند وانادیوم در محیط فیزیولوژیکی بدن در طولانی مدت است که سبب بروز مشکلات و بیماری‌هایی مثل آلزایمر و نوروپتی است در توصیفی دیگر، در مکان‌های تحت بار و سایش، مقاومت به خوردگی کمی از خود نشان داده و در نهایت موجب به وجود آمدن پدیده‌های نامطلوب در بدن می‌شود.

در این تحقیق، تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند سوراخ‌کاری مانند سرعت چرخش ابزار، عمق برش و پوشش نیتريد تیتانیوم بر نیروی محوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی این تحقیق،

بهینه‌سازی این پارامترها به منظور حصول از نیروی محوری بهینه و کاهش عوارض جانبی مورد نظر است<sup>[۱۱]</sup>. 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<sup>[۱۲]</sup>.

در تحقیقات نیکویی‌منش و همکارانش<sup>[۱۳]</sup>، مشاهده می‌شود پوشش نیتريد تیتانیوم به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی همچون مقاومت به حرارت و اکسیداسیون بالا و مقاومت زیاد به سایش، در بسیاری از قطعات به منظور تقویت مقاومت به خوردگی، اکسیداسیون و سایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین سایش باعث کاهش کارایی قطعات، افزایش تلفات انرژی، و همچنین نرخ تعویض قطعات می‌شود. به دلیل خواص و ویژگی‌های منحصربه‌فرد نیتريد تیتانیوم این ماده کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف یافته است. مثلاً در صنعت میکروالکترونیک، به‌عنوان سد الکتریکی استفاده می‌شود یا به سبب مقاومت بالا در برابر سایش در قطعات آن، بهره گرفته می‌شود. مطالعات انجام شده در زمینه سایش از یک جهت مربوط به متالورژی و نوع مکانیزم‌های فعال در ایجاد سایش و از جهت دیگر مربوط به شبیه‌سازی پدیده سایش با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود است.

به طور کلی در زمینه 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 به دست آمده است. این اطلاعات می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد و کارایی این فرآیند فراهم کند. همچنین، این تحقیقات می‌توانند به منظور بهینه‌سازی پارامترها و کاهش عوارض جانبی مورد نظر نیز به کار گرفته شوند.

مطالعات و تحقیقات در زمینه 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

نیروی محوری را به صورت رابطه‌ای مستقیم یا معکوس با پارامترهای ورودی مرتبط مدل می‌کنند، که شامل حالت‌های پوشش‌دهی شده با نانو پوشش و بدون پوشش می‌باشند. در آنالیز حساسیت نیز، تأثیر پارامترهای مختلف بر نیروی محوری در فرآیند سوراخکاری ارتوپدی با استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش‌ها 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 سوراخکاری ارتوپدی با نانوپوشش‌های پوشش‌دهی شده به دست خواهد آمد. بنابراین، معادلات رگرسیون برای مدلسازی 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 سوراخکاری ارتوپدی با ابزارهای پوشش‌دهی نانوپوشش‌ها در اختیار قرار دهند.

### 3- شبیه‌سازی و نمایش داده‌ها

برای انجام آنالیز حساسیت، از روش‌های آماری و تحلیل رگرسیون استفاده شده است. در ابتدا، یک طرح آزمایشی به منظور جمع آوری داده‌های مورد نیاز برای آنالیز حساسیت انجام شده است. سپس، با استفاده از مدل‌های رگرسیون و نرم‌افزارهای آماری، ارتباط بین پارامترهای ورودی و نیروی محوری مورد نظر بررسی شده است. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که سرعت چرخش ابزار، عمق برش و پوشش نیتريد تیتانیوم به طور مستقل تأثیر قابل توجهی بر نیروی محوری در فرآیند سوراخکاری ارتوپدی دارند. با بهینه‌سازی این پارامترها، می‌توان نیروی محوری بهینه را حاصل کرده و عوارض جانبی را به حداقل رساند. این آنالیز حساسیت می‌تواند به جهت بهبود عملکرد و کارایی فرآیند سوراخکاری ارتوپدی و همچنین بهبود طراحی و بهینه‌سازی ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۳-۱- بررسی تأثیر نرخ پیشروی (f)

با توجه به معادلات رگرسیون ارائه شده و همچنین انجام آنالیز حساسیت، به طور تخصصی در موضوع پارامتر نرخ پیشروی (f)، نمودارهای به دست آمده به ترتیب در دو حالت با نانوپوشش (شکل ۱-الف) و بدون نانوپوشش (شکل ۱-ب)، روند تغییرات نیروی محوری را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج مشاهده شده، افزایش سرعت پیشروی منجر به افزایش نیروی محوری می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی، سرعت حرکت ابزار در روتور (rotor) افزایش می‌یابد و بنابراین نیروی محوری نیز افزایش می‌یابد.

گرفته‌اند، می‌توان به موضوعی که توسط وو و همکارانش<sup>[۱۴]</sup> 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<sup>[۱۵]</sup> 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 زمینه 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.

این تحقیقات، با استفاده از طراحی آزمایش‌های متناسب با الزامات پزشکی، مدل‌سازی ریاضی و تجزیه و تحلیل داده‌ها به نتیجه می‌رسند. آن‌ها می‌توانند در بهبود عملکرد و کارایی فرآیند سوراخکاری ارتوپدی با نانوپوشش مؤثر باشند.

### ۲- مدلسازی

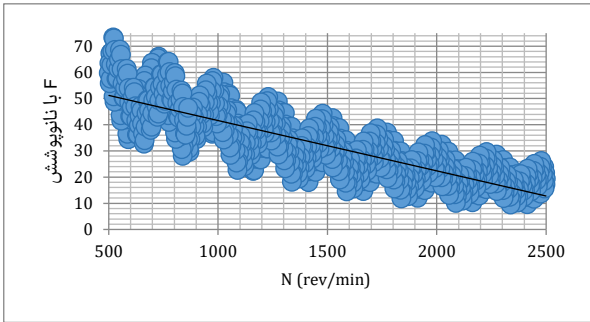
با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل نیرو و نتایج حاصل از آنالیز واریانس که توسط طهماسبی و همکارانش<sup>[۱۵]</sup> انجام شده است، آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش به‌سزایی دارد. آن‌ها در طراحی این آزمایش، در بررسی رفتار نیرو در این فرآیند، پارامترهای سرعت دورانی ابزار  $N(\text{rev}/\text{min})$ ، نرخ پیشروی  $f(\text{mm}/\text{min})$  و قطر ابزار  $D(\text{mm})$  در این فرآیند به عنوان ورودی در نظر گرفته‌اند. در ادامه معادلات رگرسیون به دست آمده در حالات مختلف با نانو پوشش (۱) و بدون نانو پوشش (۲) بدین صورت آورده‌اند.

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

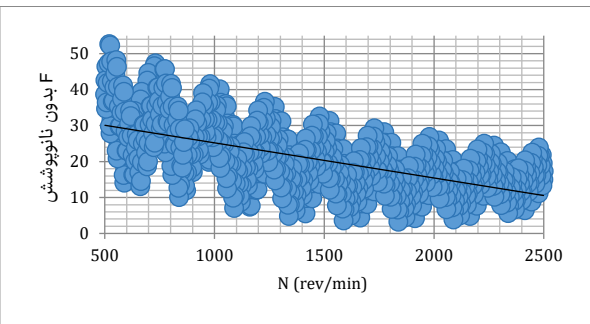
$$F(N) = -42.56 + 0.5275f(\text{mm}/\text{min}) - 0.00548N(\text{rpm}) + 14.9D(\text{mm}) + 0.000007N(\text{rpm}) * N(\text{rpm}) - 0.00011f(\text{mm}/\text{min}) * N(\text{rpm}) - 0.004337N(\text{rpm}) * D(\text{mm}) \quad (2)$$

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 مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروی محوری در فرآیند سوراخکاری ارتوپدی استخراج شده‌اند. این معادلات، بر اساس پارامترهای ورودی ذکر شده،

می‌یابد. این به این معنی است که با سرعت چرخش کمتر، ابزار به طور کندتر حرکت کرده و نیروی محوری بیشتری به بافت استخوان انتقال می‌دهد. بنابراین، در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی، تنظیم سرعت چرخش ابزار می‌تواند برای کنترل و بهینه‌سازی نیروی محوری مورد استفاده قرار گیرد. با تغییر سرعت چرخش، می‌توان میزان نیروی محوری را تنظیم کرده و با انتخاب مقدار مناسب، به دستیابی به نیروی محوری بهینه در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی کمک کرد.



الف) با نانوپوشش

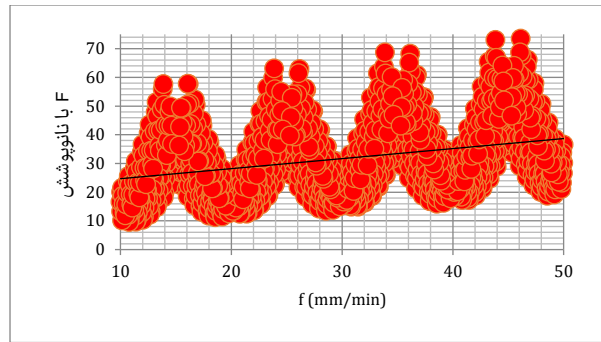


ب) بدون نانوپوشش

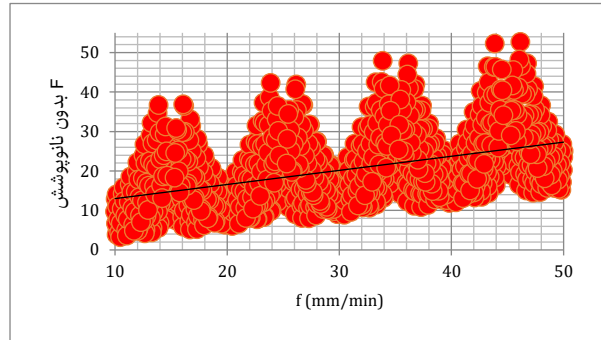
شکل 2) بررسی تأثیر سرعت دورانی، الف) بدون نانوپوشش ب) با نانوپوشش

### ۳-۳- بررسی تأثیر قطر ابزار (D)

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 ۳-الف) و بدون نانوپوشش (شکل ۳-ب) آورده شده است. با افزایش قطر ابزار، سطح تماس بین ابزار و بافت استخوان بیشتر می‌شود و بنابراین نیروی محوری نیز افزایش می‌یابد. در واقع به این معنی است که با استفاده از ابزار با قطر بزرگتر، مساحت تماس بین ابزار و بافت بیشتر شده و نیروی محوری بیشتری به بافت استخوان انتقال می‌یابد. در مقابل، با کاهش قطر ابزار، سطح تماس کاهش می‌یابد و بنابراین نیروی محوری نیز کاهش می‌یابد. به این معنی است که با استفاده از ابزار با قطر کوچکتر، مساحت تماس کمتری بین ابزار و بافت وجود دارد و نیروی محوری کمتری به بافت استخوان انتقال می‌یابد.



الف) با نانوپوشش



ب) بدون نانوپوشش

شکل 1) بررسی تأثیر نرخ پیشروی، الف) بدون نانوپوشش ب) با نانوپوشش

این موضوع می‌تواند منجر به سرعت برش بیشتر، دفعات تصادفی بیشتر بر روتور، و در نتیجه افزایش نیروی محوری شود. به عبارت دیگر، سرعت پیشروی می‌تواند به عنوان یک عامل تنظیم‌کننده برای کنترل نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی مورد استفاده قرار گیرد. با تغییر سرعت پیشروی، می‌توان مقدار نیروی محوری را به دلخواه تنظیم کرده و با انتخاب مقدار مناسب، نیروی محوری را به حداقل رساند.

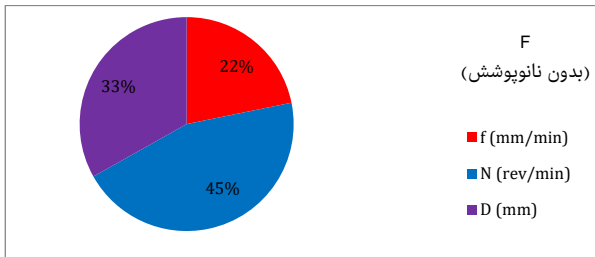
### ۳-۲- بررسی تأثیر سرعت دورانی (N)

سرعت دورانی به عنوان دومین ورودی معادله رگرسیون در آنالیز حساسیت این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن به صورت نموداری در حالت‌های با نانوپوشش (شکل ۲-الف) و بدون نانوپوشش (شکل ۲-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، در حالی که کاهش سرعت چرخش ابزار منجر به افزایش نیروی محوری می‌شود. با افزایش سرعت چرخش ابزار، سرعت برش در روتور افزایش می‌یابد و نیروی محوری کاهش می‌یابد. این به این معنی است که با سرعت چرخش بالاتر، ابزار به بالاترین نقطه سرعت رسیده و نیروی محوری کمتری به بافت استخوان انتقال می‌دهد. در مقابل، با کاهش سرعت چرخش ابزار، سرعت برش کاهش می‌یابد و نیروی محوری افزایش

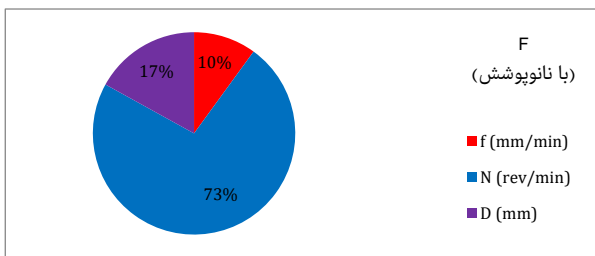
حالت با نانوپوشش، تأثیر بیشتری (تأثیر ۷۳ درصد) را نشان می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که نانوپوشش می‌تواند تأثیر سرعت دورانی را بر نیروی محوری افزایش دهد و به بهبود عملکرد فرآیند سوراخ‌کاری کمک کند.

نرخ پیشروی: در حالت بدون نانوپوشش، نرخ پیشروی تأثیر کمتری (تأثیر ۲۲ درصد) بر نیروی محوری دارد، در حالی که در حالت با نانوپوشش، تأثیر کمتری (تأثیر ۱۰ درصد) را نشان می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که نانوپوشش می‌تواند تأثیر نرخ پیشروی را بر نیروی محوری کاهش دهد و در بهبود کیفیت و دقت فرآیند سوراخ‌کاری مؤثر باشد.

با توجه به مقادیر درصدی ذکر شده، نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از نانوپوشش توانایی کاهش تأثیر قطر ابزار، افزایش تأثیر سرعت دورانی و کاهش تأثیر نرخ پیشروی را دارد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوپوشش می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد و کارایی فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی را ایجاد کند.



(الف)

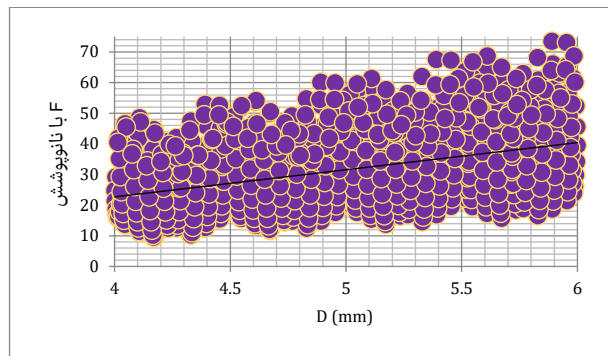


(ب)

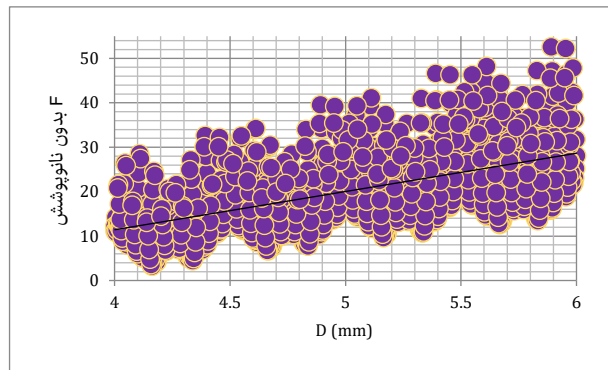
شکل ۴) مقایسه کمی اثر پارامترها، الف) بدون نانوپوشش ب) با نانوپوشش

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل تجربی و بهینه‌سازی نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی 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



الف) با نانوپوشش



ب) بدون نانوپوشش

شکل ۳) بررسی تأثیر قطر ابزار، الف) بدون نانوپوشش ب) با نانوپوشش

### ۴- مقایسه کمی اثر پارامترها

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 مورد نیاز را با حداقل عوارض جانبی و با دقت بالا به دست آورد. مهم تر 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 (۴-الف) اثر این پارامترها بدون نانوپوشش آورده شده است. در نمودار شکل (۴-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 درصدی ذکر شده، به نتایج ذیل حاصل می‌شود:

قطر ابزار: در حالت بدون نانوپوشش، قطر ابزار باعث تأثیر بیشتری بر نیروی محوری است (تأثیر ۳۳ درصد) در مقایسه با حالتی که نانوپوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد (تأثیر ۱۷ 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، در حالی که در

Coating Techniques for Different Cutting Tools. *Materials*. 2022; 15(16):5633.

10. Badr A. Creation of titanium oxynitride ceramic coating on metals for use in medicine. *Journal of Iran's ceramic*. 2020; 16(1):34-45 (in persian).

11. Lakshminarayanan AK, Balasubramanian V. Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2008; 18(3):548-554.

12. 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(5-6):1403-1432.

13. Nikueimanesh A, Akbarzadeh S. Numerical and Experimental Investigation of Wear in Nanostructured Tin Coating on Steel Substrate. *Modares Mechanical Engineering*. 2020; 20(1):149-155. (in persian).

14. 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; 20:1685-1698.

15. 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(5):49-59. (in persian).

سوراخ‌کاری ارتوپدی، منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد و کارایی این فرآیند می‌شود. نانوپوشش‌ها باعث کاهش نیروی محوری تماس با بافت استخوان شده و همچنین تأثیر مثبتی بر روی سرعت برشی دارند.

آنالیز حساسیت نیز نشان می‌دهد که پارامترهای ورودی از قبیل سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار، تأثیر قابل توجهی بر نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی دارند. این نتایج امکان بهینه‌سازی پارامترهای ورودی را برای حصول از نیروی محوری بهینه و کاهش عوارض جانبی مورد نظر فراهم می‌کند.

بنابراین، این مقاله نشان داده است که استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم در فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی می‌تواند بهبود چشمگیری در کیفیت و عملکرد این فرآیند ایجاد کند. همچنین، آنالیز حساسیت این امکان را می‌دهد تا پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر نیروی محوری دارند، شناسایی شوند و بر اساس آن‌ها تنظیمات بهینه‌تری برای فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی با استفاده از ابزارهای پوشش‌دهی شده با نانوپوشش نیتريد تیتانیوم ارائه شود.

#### 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(4):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(9):2942-2957.
3. Javaid M, Haleem A. Impact of industry 4.0 to create advancements in orthopaedics. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 2020; 11:S491-S499.
4. Jakopec M, y Baena FR, Harris SJ, Gomes P, Cobb J, Davies BL. The hands-on orthopaedic robot "Acrobot": Early clinical trials of total knee replacement surgery. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2003; 19(5):902-911.
5. Dubey AK, Yadava V. Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008; 48(6):609-628.
6. Rodríguez-Barrero S, Fernández-Larrinoa J, Azkona I, López de Lacalle LN, Polvorosa R. Enhanced performance of nanostructured coatings for drilling by droplet elimination. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016; 31(5):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(14):2543-2560.
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