



تحلیل تجربی و بهینه‌سازی نیروی محوری در فرایند سوراخ‌کاری ارتوپدی با استفاده از ابزار پوشش‌دهی شده با نانو پوشش نیتريد تیتانیوم به روش رسوب دهی فیزیکی

وحید طهماسبی^{۱*}، عباس پاک^۲، علی زین‌العابدین بیگی^۳، پیمان حسن پور^۴

۱- استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* اراک، صندوق پستی ۴۱۱۶۷-۳۸۱۸۱، Tahmasbi@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۸ خرداد ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۷ تیر ۱۴۰۱

پذیرش: ۹ مهر ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

ماشین‌کاری

سوراخ‌کاری پلی متیل متاکریلات

نیرو

روش سطح پاسخ

نانو پوشش پزشکی

چکیده

یکی از حساس‌ترین و پرکاربردترین فرآیندهای ماشین‌کاری در جراحی‌ها و مهندسی پزشکی، فرآیند سوراخ‌کاری استخوان می‌باشد. در این فرآیند سعی بر آن است تا نیروی محوری وارد بر بافت استخوان حین عمل جراحی کمینه شود. برای کاهش نیروی محوری روش‌های مختلفی از جمله استفاده از انجتم فرآیند در حالت سرعت بالا، خنک‌کاری با گاز، نوسانات فراصوتی، تغییر جنس و هندسه ابزار و همچنین استفاده از ابزارهای پوشش‌دار مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این مقاله بررسی اثر یک نوع نانو پوشش بر روی ابزار از جنس تیتانیوم نیتريد و بررسی اثر پارامترهای ورودی موثر بر روی رفتار نیرو در سوراخ‌کاری ارتوپدی با در نظر داشتن الزامات پزشکی می‌باشد. در این پژوهش ماده پلیمری پلی‌متیل‌متاکریلات که خواصی نزدیک به استخوان دارد انتخاب و با ایجاد نانو پوشش از جنس تیتانیوم نیتريد بر روی ابزار، اثر سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار بر روی نیروی فرایند سوراخ‌کاری با استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، مدل‌سازی و معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر مدل استخراج شده است. همچنین مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای ورودی به منظور دستیابی به بهترین و کمینه‌ترین مقدار نیروی ایجاد شده در حین سوراخ‌کاری ارتوپدی ارائه شده است. نتایج نشان داده است که ایجاد نانو پوشش تیتانیوم نیتريد باعث کاهش نیرو به مقدار ۴۰ درصد شده است. همچنین نیروی محوری با بیشترین مقدار سرعت برشی و کمترین مقدار سرعت پیشروی و در ابزارهای با قطر کمتر، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

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

Vahid Tahmasbi^{1*}, Abbas pak², Ali Zeinolabedin Beygi³, Peyman HassanPour¹

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

2- Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 38181-41167 Arak, Iran, Tahmasbi@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 June 2022

First Decision: 28 June 2022

Accepted: 1 Oktober 2022

Keywords:

Machining

Poly-methyl-meta-carylate drilling

Force

Response surface method

Medical nano coating

Abstract

One of the most significant and applicable machining processes in surgeries and medical engineering is the bone drilling process. In this process, it is intended to minimize the axial force on the bone tissue during surgery. To reduce force, different methods have been considered; including the use of a variety of lubricants, ultrasonic oscillations, material replacement, tool geometry, and also the use of coated tools. The purpose of this paper is to investigate the effect of a specific type of nano coating on steel tool, and to investigate the effect of effective input parameters on force behavior in orthopedic drilling with medical requirements in mind. In this study, the polymeric material of poly-methyl-meta-carylate (PMMA), which has similar properties to the bone, was selected; and by creating titanium nitride nano coating on the tool, the effect of tool rotational speed, feed rate, and the tool diameter on the drilling process force have been extracted using the design of experiment by the response surface method, modeling and second-order linear regression equation governing the model. The optimum values of each input parameter are also presented in order to achieve the minimum and the best amount of force created during orthopedic drilling. The results show that the creation of titanium nitride nano coating reduces the force by 40 percent. Also, the axial force with the maximum cutting speed, the minimum feed rate, and in the tools with smaller diameters has been significantly reduced.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.160059>

۱- مقدمه

استخوان از مهم‌ترین بخش اسکلت اغلب موجودات زنده می‌باشد. هنگامی که استخوان و بافت‌های آن دچار شکستگی و یا ترک می‌شود در جراحی‌های ارتوپدی سعی می‌شود که بافت‌های آسیب دیده در کنار هم قرار گیرند و با گذشت زمان بافت استخوان با عمل خود ترمیمی بهبود یابد. برای کنار هم قرار دادن اجزای شکسته شده یا آسیب دیده عمدتاً به سوراخ‌کاری استخوان به منظور استفاده از پلاتین نیاز است. طبق خواصی که پزشکان از استخوان ارائه داده‌اند هرگاه نیروی وارد به استخوان از یک حد بحرانی بیشتر شود، بافت استخوان به شدت آسیب خواهد دید و گاهی اوقات موجب شکست و ایجاد ترک و ریز ترک در دیواره استخوان خواهد شد [۱]. این موضوع به شدت در عمل جراحی مورد بحث است، چرا که در انجام عمل سوراخ‌کاری همواره یک نیروی محوری از طرف مته به بافت استخوان اعمال می‌شود و در خصوص بررسی و بهینه‌سازی، پارامترهای مختلفی مثل روش سوراخ‌کاری، پوشش روی ابزار، سرعت دورانی، نرخ پیشروی، قطر و هندسه ابزار در جراحی‌های ارتوپدی پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است و سعی بر این است تا بهترین شرایط ماشین‌کاری به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیروی محوری حاصل شود [۲-۴]. نتایج تحقیقات صورت گرفته درباره اثر سرعت برشی بر روی نیرو توسط محققین مختلف، با یکدیگر متفاوت گزارش شده است.

در پژوهشی که ریدوان زیتون و ویجایان [۵] بر روی قطعه آلومینیومی و یک قطعه کامپوزیتی داشتند، دریافتند که ایجاد نانو پوشش نیروی محوری در سوراخ‌کاری را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و بر خلاف تغییرات سرعت پیشروی، تغییرات سرعت دورانی اسپیندل تأثیر چندانی بر روی کاهش نیروی محوری ندارد. تاکور [۶] با مقایسه سوراخ‌کاری خشک، سوراخ‌کاری با حداقل مقدار روان کننده و سوراخ‌کاری با نانوپوشش تیتانیوم نیتراید به روش رسوب دهی فیزیکی دریافت که نانو پوشش تیتانیوم نیتراید نسبت به دیگر روش‌ها اثر بیشتری در کاهش نیرو دارد. اکبری و همکاران [۷] طی پژوهشی با مقایسه سوراخ‌کاری به روش مستقیم و روش آلتراسونیک بر روی یک ماده فلزی دریافتند که در روش آلتراسونیک به دلیل ارتعاش، سرعت تخلیه براده افزایش، اصطکاک کاهش و کیفیت سطح نیز افزایش می‌یابد. شکوری و همکاران [۸] با بررسی روش سوراخ‌کاری آلتراسونیک دریافتند که با ایجاد ارتعاش سرعت تخلیه براده افزایش و با ایجاد ریز ترک‌ها براده برداری راحت‌تر و در نتیجه اصطکاک نیز کمتر

می‌شود. با به روی کار آمدن نانو پوشش‌ها، در شرایطی مشابه و یکسان تمامی آزمایش‌ها بر روی ابزارهای با نانو پوشش از جنس تیتانیوم نیتراید انجام شود و اثر آن بر روی خروجی‌های فرآیند مورد بررسی قرار گیرد [۹]. جاکوب و همکاران [۱۰]، عالم و همکاران [۱۱]، بسیجا و همکاران [۱۲] بیان داشتند که افزایش سرعت دورانی ابزار موجب کاهش نیرو در فرایند سوراخ‌کاری استخوان می‌شود؛ اما لی و همکاران [۱۳] ابزار داشتند که افزایش سرعت برشی موجب افزایش نیرو در حین فرایند سوراخ‌کاری استخوان می‌شود. آن‌ها در این مطالعه از مته‌ای به قطر ۲/۵ میلی‌متر استفاده نمودند. شکوری و همکاران [۸] و همچنین پاندا و پاندی [۱۴] کمترین مقدار سرعت دورانی ابزار و کمترین مقدار پیشروی را به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو ارائه کردند. یودیلجاک و همکاران [۱۵] دریافتند که سرعت دورانی ابزار نقش بسیار کمی در تغییرات نیروی محوری داشته و فاکتوری کم تأثیر است. طهماسبی و همکاران [۱۶] با بهره‌گیری از طراحی آزمایش‌ها و مدل‌سازی ریاضی فرآیند به روش پاسخ سطح ضمن انجام یک بهینه‌سازی چند هدفه بر روی رفتار دما و نیرو، بیان داشتند که افزایش سرعت دورانی، کاهش نرخ پیشروی و کاهش قطر ابزار موجب کاهش نیروی سوراخ‌کاری می‌شود؛ همچنین نرخ پیشروی بالا موجب افزایش چشمگیری در نیرو می‌شود و در تحقیق دیگر با در نظر گرفتن همزمان تغییرات همه پارامترها و استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل یافتند که سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار به ترتیب بیشترین اثر را داشته‌اند. در تحقیقی دیگر از پاندا، پاندی و کومار [۱۷] با بهره‌گیری از طراحی آزمایش به روش تاگوچی به دلیل تشابه خواص مکانیکی استخوان و ماده پلیمری پلی متیل متاکریلات عملیات سوراخ‌کاری را روی این ماده انجام دادند که قطر ابزار، نرخ پیشروی و سرعت دورانی اسپیندل به عنوان فاکتورهای ورودی فرآیند بودند و اثرات ترکیبی این پارامترها را بر روی کاهش دما و نیرو را بررسی کرده‌اند و دریافتند که به ترتیب قطر ابزار، سرعت دورانی و نرخ پیشروی بیشترین اثر را بر روی نیرو و دمای ماشین‌کاری دارد. سینق و همکاران [۱۸] توپوگرافی سطح استخوان را در دو روش سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری آلتراسونیک مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که سوراخ‌کاری آلتراسونیک کیفیت سطح بهتری نسبت به روش معمولی ارائه می‌دهد و همچنین زمان جراحی با استفاده از آلتراسونیک کوتاه‌تر می‌شود.

در این تحقیق با در نظر گرفتن پارامترهای مهم فرآیند سوراخ‌کاری ارتوپدی شامل سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و

و در برابر هوازدگی و شرایط محیطی (دما، فشار و رطوبت یا بخار آب) بسیار مقاوم می‌باشند. بازه ضریب شکست آن بین ۱/۴۹ تا ۱/۵۱ می‌باشد و قطعات ساخته شده از این ماده، دارای پایداری ابعادی خوب و استحکام مکانیکی بالا هستند.

بنابر تحقیقی که توسط پاندا پاندی [۱۷]، هینی [۲۲] و رامش و همکاران [۲۳] انجام شد، این خواص در مصارف پزشکی به دلیل تشابه با خواص مکانیکی استخوان نیز بسیار حائز اهمیت بوده است که در جدول ۱ آمده است. همچنین در محدوده رنگی بسیار متنوعی، به رنگ‌های شفاف در برابر عبور نور، نیم شفاف و مات یا کدر می‌باشند. هاتن و وور [۲۴] در پژوهشی که حدود ۱۲ ماه طول کشید از ماده دوفازی استخوان- پلی‌متیل‌متاکریلات استفاده کردند که شامل ذرات بسیار ریزی از استخوان و PMMA می‌باشد و با زیر نظر گرفتن حدود ۲۰ بیمار و چند خرگوش که تحت جراحی استخوان بودند، دریافتند در بیمارهایی که از این ماده دوفازی استفاده شده است میزان درد بعد از جراحی بسیار کاهش یافته است و بعد از عکس برداری‌ها در بازه‌های متوالی دریافتند که این ماده با استخوان سازگاری بسیار بالایی نیز دارد به طوری که سرعت رشد، ترمیم و بازیابی استخوان به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. همچنین لوکا و همکاران [۲۵] در پژوهشی از کامپوزیت استخوان و پلی‌متیل‌متاکریلات برای درمان پوکی استخوان استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این ماده دو فازی اثر مثبتی در روند درمان پوکی استخوان در طول دوره درمان خواهد داشت و این ماده با بافت استخوان بسیار سازگار بوده و در بافت‌های آن به راحتی نفوذ می‌کند. با توجه به آنکه استخوان انسان به راحتی قابل دسترس نیست و چگالی آن در قسمت‌های مختلف متفاوت است و همچنین سختی کار روی کورتیکال به جای خاطر هندسه و ضخامت آن، از پلی‌متیل‌متاکریلات به جای استخوان استفاده شد.

جدول ۱ مقایسه خواص مکانیکی استخوان و پلی‌متیل‌متاکریلات [۲۴]

Table 1 Comparison of mechanical properties of bone and polymethyl methacrylate [24]

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

قطر ابزار و در نظر گرفتن یک نانو پوشش پزشکی تیتانیوم نیتريد برای نخستین بار یک مدل ریاضی رگرسیون مرتبه دوم خطی با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ به منظور پیش بینی رفتار نیرو ارائه شده است و اثر هر یک از پارامترهای ورودی با در نظر داشتن اثر بر هم کنش بین فاکتورها به همراه بررسی دقیق اثر نانوپوشش مورد بررسی قرار گرفته و بهینه‌سازی لازم نیز در این خصوص صورت گرفته است.

۲- روش انجام آزمایش و خصوصیات آن

۲-۱- طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌بندی و تحلیل مسائلی که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، مفید است و هدف آن بهینه سازی این پاسخ است. در اکثر مسائل مربوط به روش سطح پاسخ، ارتباط بین پاسخ و متغیرهای مستقل نامعلوم است؛ پس اولین قدم در سطح پاسخ، یافتن تقریبی مناسب برای ارتباط واقعی موجود بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است [۱۹]، ۲۰]. معمولاً از چند جمله‌ای‌های مرتبه پایین در ناحیه‌ای از مقادیر متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. اگر پاسخ به خوبی توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل بندی شده باشد، آنگاه تابع تقریب کننده برای مدل مرتبه اول بصورت معادله (۱) و اگر در سیستم، خمیدگی وجود داشته باشد، آنگاه باید از چندجمله‌ای‌های مرتبه بالاتر، مانند مدل مرتبه دوم استفاده کرد [۲۱].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2$$

$$+ \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن x متغیرهای مستقل معادله، β و ε هم ضرایب ثابت معادله هستند.

۲-۲- ماده پلیمری پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA)

پلی‌متیل‌متاکریلات^۱ یکی از پلاستیک‌های مهندسی پرکاربرد در صنعت پلیمر می‌باشد. پلیمرهای اکریلیک (پلی‌متیل‌متاکریلات)، از خود خواص نوری و مقاوم بسیار خوبی را در برابر شرایط آب و هوایی گوناگون، نشان می‌دهند یعنی وقتی در معرض تماس با شرایط جوی قرار می‌گیرند، مقاومت بالایی دارند

¹ Poly methyl methacrylate

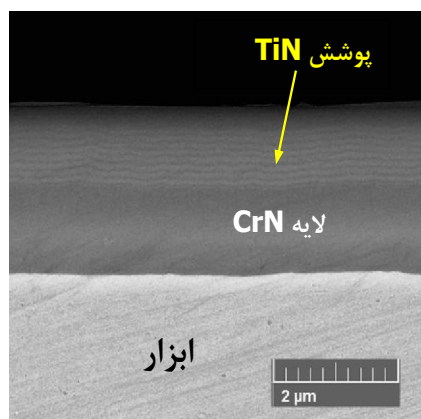


Fig. 1 SEM image of coated tool

شکل ۱ تصویر SEM از ابزار پوشش داده شده

۲-۴- مته‌ها

مته‌هایی که در این پژوهش استفاده قرار گرفت از جنس فولادهای تندبر حاوی کبالت بوده است که دو دسته حاوی نانوپوشش و بدون نانوپوشش بودند که نانو پوشش روی آن‌ها از جنس تیتانیوم نیتراید بوده است.

در بررسی رفتار نیرو در فرایند سوراخ‌کاری استخوان، پارامترهای سرعت دورانی ابزار (rev/min)، نرخ پیشروی (mm/min) و قطر ابزار (D(mm)) به عنوان متغیرهای ورودی فرایند در نظر گرفته شده است. همچنین بیشترین مقدار نیروی ایجاد شده در ماده پلیمری پلی متیل متاکریلات در حین سوراخ‌کاری به عنوان پاسخ فرایند، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در انجام آزمایش‌ها از یک ورق پلیمری پلی متیل متاکریلات با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. مته‌های استفاده شده در فرایند، مته‌های استاندارد فولاد تندبر می‌باشد و به منظور حذف اثر سایش ابزار از مته‌های نو استفاده شده است. مته‌های به قطر ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر تهیه شد. در جدول ۲ سطوح پارامترهای ورودی مشخص شده است. از دریل سوراخ‌کاری اتوماتیک تبریز جهت انجام فرایند سوراخ‌کاری بهره گرفته شده است که در شکل ۲ به صورت شماتیکی و در شکل ۳ به صورت واقعی فرایند سوراخ‌کاری مشخص شده است. برای اندازه‌گیری نیروی محوری از یک نیروسنج آزمایشگاهی بهره گرفته شد [۲۱].

جدول ۲ پارامترهای ورودی ماشین‌کاری در سه سطح

ورودی‌های آزمایش	-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

قابل توجه است که محققان در استفاده از پلی متیل متاکریلات دو هدف را مدنظر قرار دادند: ۱- از این ماده به دلیل شباهت‌های فیزیکی و مکانیکی به استخوان به عنوان ماده‌ای به جای استخوان استفاده کردند [۱۳، ۲۳، ۲۶]. ۲- از پلی متیل متاکریلات به عنوان ماده‌ای برای استفاده در مفصل‌ها و ایمپلنت‌ها استفاده شده است. مانند چارنلی و همکاران [۲۷] از پلی متیل متاکریلات در جراحی مفصل لگن استفاده کردند و یا کالیدینی [۲۸] که در دندان‌پزشکی و استفاده در ایمپلنت‌ها از این ماده استفاده کرد.

۲-۳- نانو پوشش‌ها

فرایند رسوب دهی فیزیکی بخار یکی از روش‌های لایه نشانی است که تحت خلاء بالا و در اکثر موارد در دمایی بین ۱۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. در این فرایند پوشش (فلزات مثل تیتانیوم، کروم، آلومینیوم) به وسیله گرما با بمباران با یون‌ها (کند و پاش) تبخیر می‌شوند، به صورت همزمان یک گاز واکنشی وارد محفظه شده و با فلزات تبخیر شده واکنش نشان داده و بر روی ابزارها و اجزا لایه نشانی می‌شود. این پوشش علاوه بر چسبندگی بالا به وسیله چرخش نگهدارنده قطعات و ابزارها داخل محفظه، پوشش یکنواختی را ایجاد می‌کند. در این روش می‌توان خواص پوشش مثل سختی، ساختار، چسبندگی، خواص شیمیایی، مقاومت دمایی را با دقت بالا کنترل کرد. دلیل استفاده از جنس تیتانیوم نیتراید در این تحقیق کاربردی بودن این نوع پوشش در مصارف پزشکی می‌باشد [۲۹].

لیو ویلی و همکاران [۳۰] در تحقیق خود با مقایسه چند نوع متفاوت از پوشش‌ها دریافتند که نانو پوشش تیتانیوم نیتراید اصطکاک را بیشتر از بقیه کاهش می‌دهد؛ لذا در این تحقیق پوشش نانو ساختار TIN با استفاده از روش رسوب گذاری فیزیکی از فاز بخار اعمال شد. برای این منظور نمونه‌ها ۱۵ دقیقه در محلول استون و الکل در حمام التراسونیک شستشو شدند، سپس نمونه‌ها در محفظه قرار داده شده و از فشار 5×10^{-5} tor برای لایه نشانی استفاده شد. پوشش دهی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و ولتاژ بایاس ۱۰۰ ولت به مدت یک ساعت انجام شد. برای افزایش چسبندگی پوشش TIN به زیر لایه، ضمن استفاده از بمباران یونی آرگون، از میان لایه CrN به ضخامت ۱۰۰۰ نانومتر استفاده گردید. در شکل ۱، تصویر SEM از ابزار پوشش داده نشان داده شده است.

جدول ۳ طراحی آزمایش‌ها به روش پاسخ سطح و نیروهای به دست آمده

Table 3 Design of experiments by surface response method and forces obtained

شماره آزمایش	نرخ پیشروی میلی‌متر بر دقیقه	سرعت دورانی دور بر دقیقه	قطر ابزار میلی‌متر	پوشش‌دهی	نیرو	
					نیوتن	سانتی‌گراد
۱	۱۰	۵۰۰	۶	بله	۶۸	۳۷/۶۴
۲	۳۰	۱۵۰۰	۴	بله	۲۳/۷	۳۶/۷۵
۳	۳۰	۱۵۰۰	۵	خیر	۱۸/۶	۴۰/۱۵
۴	۵۰	۱۵۰۰	۵	خیر	۲۶/۷	۳۴/۱۰
۵	۵۰	۵۰۰	۴	خیر	۳۲/۵	۳۵/۱۰
۶	۵۰	۱۵۰۰	۵	بله	۳/۷۹	۲۷/۵۵
۷	۳۰	۲۵۰۰	۵	خیر	۱۳/۸	۴۱/۷۵
۸	۵۰	۲۵۰۰	۶	بله	۳۴	۳۱/۰۳
۹	۳۰	۱۵۰۰	۵	بله	۳۰/۸	۳۶/۰۱
۱۰	۱۰	۲۵۰۰	۶	خیر	۱۶/۴	۳۲/۱۳
۱۱	۳۰	۱۵۰۰	۵	خیر	۱۸/۸	۳۶/۸۵
۱۲	۵۰	۲۵۰۰	۴	بله	۱۸/۲	۳۱/۱۰
۱۳	۱۰	۵۰۰	۶	خیر	۳۵	۳۱/۳۰
۱۴	۵۰	۵۰۰	۶	خیر	۵۶	۲۹/۷۲
۱۵	۳۰	۵۰۰	۵	خیر	۳/۳۸	۳۶/۵۰
۱۶	۱۰	۵۰۰	۴	بله	۳۱/۵	۳۱/۳۰
۱۷	۱۰	۲۵۰۰	۶	بله	۱/۳۸	۴۷/۰۵
۱۸	۳۰	۵۰۰	۵	بله	۵۱	۳۲/۳۲
۱۹	۱۰	۲۵۰۰	۴	خیر	۸/۳	۴۶/۵۰
۲۰	۱۰	۵۰۰	۴	خیر	۱۴/۸	۳۱/۳۰
۲۱	۱۰	۱۵۰۰	۵	بله	۲۱/۸	۴۳/۵۰
۲۲	۳۰	۱۵۰۰	۶	خیر	۲۶/۲۸	۳۳/۸۵
۲۳	۱۰	۱۵۰۰	۵	خیر	۱۴/۹	۳۲/۶۰
۲۴	۳۰	۱۵۰۰	۵	خیر	۱۸/۵	۳۶/۸۵
۲۵	۳۰	۱۵۰۰	۵	بله	۳۰/۷	۳۶/۰۱
۲۶	۱۰	۲۵۰۰	۴	بله	۷/۶	۳۷/۴۰
۲۷	۵۰	۵۰۰	۴	بله	۵/۹۱	۲۸/۸۵
۲۸	۵۰	۲۵۰۰	۴	خیر	۱۳/۵	۳۴/۳۵
۲۹	۳۰	۱۵۰۰	۶	بله	۲۸/۵	۳۳/۰۵
۳۰	۳۰	۱۵۰۰	۵	بله	۲۹/۵	۳۶/۰۱
۳۱	۳۰	۲۵۰۰	۵	بله	۲۱/۵	۳۶/۳۰
۳۲	۳۰	۱۵۰۰	۴	خیر	۱۳/۵	۳۴/۵۰
۳۳	۵۰	۲۵۰۰	۶	خیر	۲۴/۲	۳۴/۱۵
۳۴	۵۰	۵۰۰	۶	بله	۸۵	۲۹/۸۵

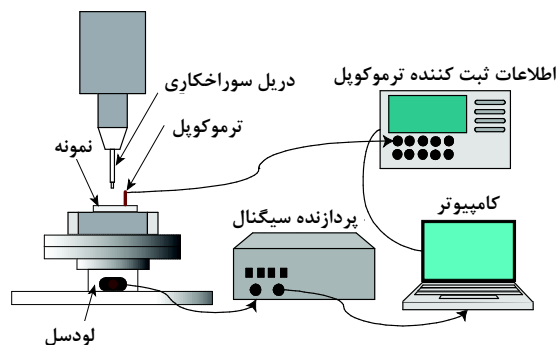


Fig. 2 Schematic of the drilling process by automatic machines

شکل ۲ شماتیکی از فرایند سوراخ‌کاری توسط دستگاه‌های اتوماتیک



Fig. 3 Equipment used in the test

شکل ۳ تجهیزات به کار رفته در آزمایش

شکل ۴ قطعه پلیمری مورد استفاده جهت انجام فرایند

سوراخ‌کاری را نشان می‌دهد.

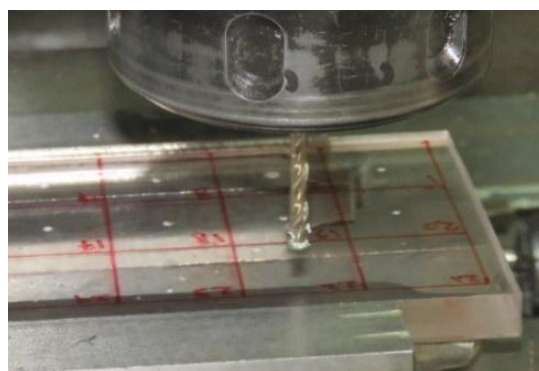


Fig. 4 Drilling of polymethyl methacrylate

شکل ۴ پلی متیل متاکریلات در حال سوراخ‌کاری

شکل ۵ لود سل مورد استفاده برای اندازه‌گیری نیروی محوری را نشان می‌دهد که مقدار ماکزیمم نیرو به صورت عددی از روی نمایشگر قرائت شده است.

در جدول ۳ طراحی آزمایش‌ها، مقادیر نیرو و بیشینه دمای فرایند سوراخ‌کاری برای هر آزمایش مشخص شده است.

با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. معادله‌های (۲) و (۳) معادلات رگرسیون به دست‌آمده در دو حالت به ترتیب، با نانوپوشش و بدون نانوپوشش را نشان می‌دهد.

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

$$F(N) = -42.56 + 0.5275f(\text{mm/min}) - 0.00548N(\text{rpm}) + 14.9D(\text{mm}) + 0.000007N(\text{rpm}) * N(\text{rpm}) - 0.00011f(\text{mm/min}) * N(\text{rpm}) - 0.004337N(\text{rpm}) * D(\text{mm}) \quad (3)$$

با در نظر گرفتن مقادیر $R\text{-sq}=96.77\%$ و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت گرفته از دقت بسیار خوب و مناسبی برخوردار است. در مبحث طراحی آزمایش‌ها به روش پاسخ سطح یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را مشخص می‌کند مقدار $R\text{-sq}$ مدل می‌باشد و مقدار آن با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_{Res}}{SS_T} \quad (4)$$

هرچه مقدار این مؤلفه به عدد ۱ یا ۱۰۰ درصد نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیق‌تر خواهد بود. تحلیل پراکندگی باقیمانده‌ها بر طبق معادله (۱) می‌باشد که دقت مدل‌سازی را نشان می‌دهد. مدل به دست آمده باید کمترین میزان فاصله با رگرسیون بدست آمده را داشته باشند. پارامتر $R\text{-sq}$ کم یا زیاد بودن این فاصله را مشخص می‌کند.

۴- بررسی متغیرهای ورودی در رفتار نیروی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری پلیمر پلی متیل متاکریلات

در این بخش با توجه به مدل‌سازی به دست آمده و مقایسه آن با داده‌های آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در مدل، سعی بر آن است تا اثر سرعت دورانی، نرخ پیشروی، قطر ابزار و نانو پوشش در رفتار نیروی محوری مشخص شود. نمودارهای شکل‌های ۶ تا ۱۲ رفتار نیرو را بر اساس متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدل‌سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ ارائه می‌دهند.

با استفاده از روش سطح پاسخ و آنالیز داده‌ها یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای هر پاسخ خروجی بر حسب متغیرهای ورودی با در نظر گرفتن دقت مدل منطبق شده که از داده‌های آزمایش و یا از نزدیک‌ترین نقاط به آن‌ها در مدل‌سازی صورت گرفته، عبور کرده حاصل گشته و بررسی داده‌های خروجی، انجام شده است.



Fig. 5 Load cell with display for force measurement

شکل ۵ لودسل به همراه نمایشگر برای اندازه گیری نیرو

۳- تحلیل، تفسیر و مدل‌سازی داده‌ها

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل نیرو، نتایج حاصل از آنالیز واریانس در جدول ۴ آمده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش به سزایی دارد. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر فاکتورهای ورودی و برهم‌کنش‌های آن‌ها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید [۲۱].

جدول ۴ تحلیل واریانس نیرو بر حسب ورودی‌های مؤثر در سوراخ‌کاری پلی متیل متاکریلات

Table 4 Analysis of variance of force in terms of effective parameters in polymethyl methacrylate drilling

ترم‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات میانگین مربعات		P-Value	F-Value
		SS	MS		
مدل	۱۳	۸۸۹۲/۴۲	۶۸۴/۰۳	۰	۴۶/۱۴
F	۱	۱۰۵۴/۸۲	۱۰۵۴/۸۲	۰	۷۱/۱۴
N	۱	۳۹۰۸/۹۱	۳۹۰۸/۹۱	۰	۲۶۳/۶۴
D	۱	۱۴۰۹/۹۱	۱۴۰۹/۹۱	۰	۹۵/۰۹
Coating	۱	۱۲۰۵/۸	۱۲۰۵/۸	۰	۸۱/۳۳
F×F	۱	۲۸/۵۲	۲۸/۵۲	۰/۱۸	۱/۹۲
N×N	۱	۱۹۹/۶۹	۱۹۹/۶۹	۰/۰۰۲	۱۳/۴۷
D×D	۱	۱/۰۲	۱/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۷
F×N	۱	۷۶/۸۹	۷۶/۸۹	۰/۰۳	۵/۱۹
F×D	۱	۶/۵	۶/۵	۰/۵۱	۰/۴۴
F×Coating	۱	۲۱/۶	۲۱/۶	۰/۲۴	۱/۴۶
N×D	۱	۳۰۰/۹۷	۳۰۰/۹۷	۰	۲۰/۳
N×Coating	۱	۴۴۵/۷۹	۴۴۵/۷۹	۰	۳۰/۰۷
D×Coating	۱	۲۰/۷۶	۲۰/۷۶	۰/۲۵۱	۱/۴

نیروی ماشین‌کاری توسط رابطه (۵) بیان می‌گردد که در آن F_f نیروی اصطکاک، F_m نیروی ماشین‌کاری، F_c نیروی برشی و F_t نیروی شخم است.

$$F_m = \sqrt{F_c^2 + F_t^2 + F_f^2} \quad (5)$$

۴-۲- بررسی اثر نرخ پیشروی

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود هرچه نرخ پیشروی کمتر باشد نیروی ایجاد شده در پلی متیل متاکریلات کمتر است. می‌توان گفت کمترین نیروهای وارد به پلی متیل متاکریلات در سرعت‌های بالا و نرخ پیشروی کمتر ایجاد می‌شود. با افزایش نرخ پیشروی و به سبب آن افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته، نیروی اعمالی به پلی متیل متاکریلات افزایش می‌یابد. هر چه مقدار پیشروی و سرعت نفوذ ابزار به درون این پلیمر کمتر باشد تغییر شکل براده و خروج آن با سهولت بیشتری اتفاق می‌افتد و ضخامت براده‌های تغییر شکل یافته کمتر می‌شود و در نتیجه نیروهای اعمالی کمتر می‌شود [۳۴]. هرچه نیروی اعمالی به فرآیند بیشتر باشد امکان ایجاد شکست و آسیب ماده پلیمری افزایش می‌یابد. با توجه به معادله (۶) مشخص می‌شود و که نیروی اصلی تراش با مقدار نرخ پیشروی رابطه مستقیم و از نوع خطی دارد که در آن C_f یک ضریب ثابت وابسته به نوع ماده می‌باشد.

$$F_t = C_f a_f \quad (6)$$

با افزایش سرعت پیشروی نیروی مماسی ماشین‌کاری افزایش یافته و همچنین با افزایش سرعت پیشروی، ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه کار نیز افزایش یافته و منجر به افزایش نیروی ماشین‌کاری می‌شود [۳۶].

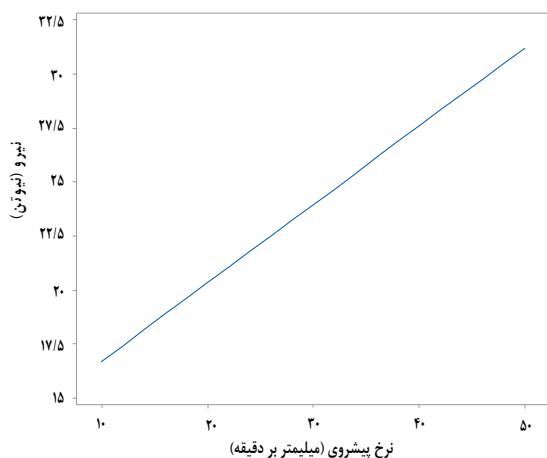


Fig. 8 Investigating the effect of feed rate on machining force

شکل ۸ بررسی اثر نرخ پیشروی بر روی نیروی ماشین‌کاری

۴-۱- بررسی اثر سرعت دورانی بر روی نیروی محوری

با افزایش سرعت دورانی ابزار بیشینه نیروی ایجاد شده در پلی متیل متاکریلات کاهش می‌یابد (شکل‌های ۶ و ۷). با افزایش سرعت دورانی، سرعت برشی نیز افزایش می‌یابد و سبب کاهش احتمال تشکیل براده با لبه انباشته می‌گردد؛ در نتیجه افزایش سرعت دورانی نیز موجب خروج بهتر براده و جلوگیری از گیر کردن براده و در نتیجه کاهش اصطکاک بین جداره سوراخ و مته می‌شود و به سبب آن نیروی محوری ایجاد شده در فرایند کاهش می‌یابد [۳۱]. با کاهش ضخامت براده، مساحت صفحه برش و حجم ناحیه تغییر شکل اولیه کاهش یافته و انرژی لازم برای براده برداری و نیروی برشی کمتر می‌شود و نیروی ماشین‌کاری و توان مصرفی کاهش می‌یابد [۳۲، ۳۳]؛ از این موارد نتیجه می‌شود که برای نیروی کمتر در انجام فرایند سوراخ‌کاری استخوان که خواصی مشابه با ماده پلیمری پلی متیل متاکریلات دارد می‌توان مقدار سرعت دورانی ابزار را بالا برد [۳۴].

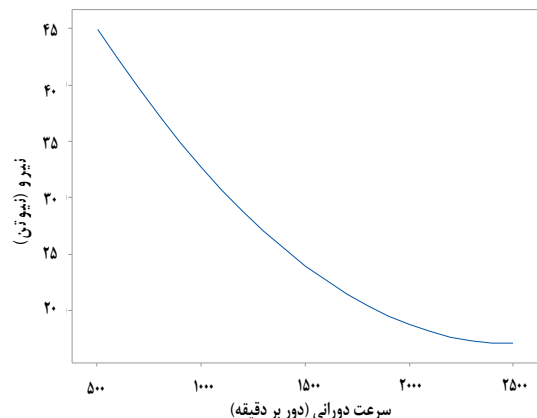


Fig. 6 Diagram of the main factor of tool rotational speed

شکل ۶ نمودار اثر فاکتور اصلی سرعت دورانی ابزار

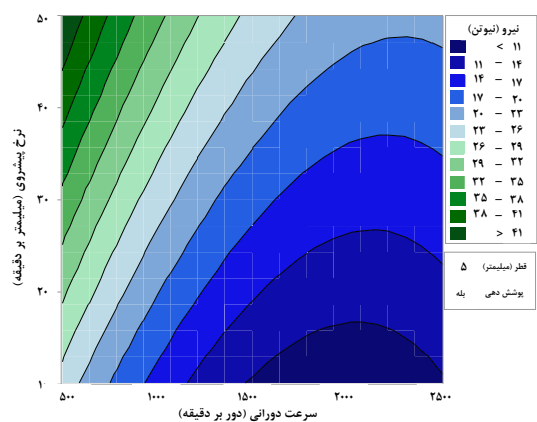


Fig. 7 Investigation of the simultaneous effects of rotational speed and feed rate on the machining axial force

شکل ۷ بررسی اثرات همزمان سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر روی نیروی محوری ماشین‌کاری

۳-۴- بررسی اثر قطر ابزار

با افزایش قطر ابزار سطح تماس ابزار و ماده پلى متیل متاکریلات با نسبت مجذور قطر افزایش می‌یابد و نیروهای ایجاد شده با افزایش قطر ابزار افزایش می‌یابد. این مورد به وضوح در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. استفاده از ابزارهای با قطر زیاد در جراحی ارتوپدی نه تنها موجب بالا رفتن حرارت و نیرو در بافت استخوان می‌شود بلکه موجب افزایش طول دوره درمان می‌شود. استفاده از فرآیند میکروسوراخ‌کاری و مته‌های با قطر کمتر در جراحی استخوان می‌تواند تأثیر بسزایی در پیشبرد این فرایند داشته باشد [۳۷].

کانتور شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش قطر ابزار و نرخ پیشروی باعث افزایش مقدار نیروی ماشین‌کاری می‌شود و میزان اثر گذاری همزمان قطر ابزار و نرخ پیشروی بر روی نیرو ماشین‌کاری طبق یک رابطه تقریباً خطی تغییر می‌کند.

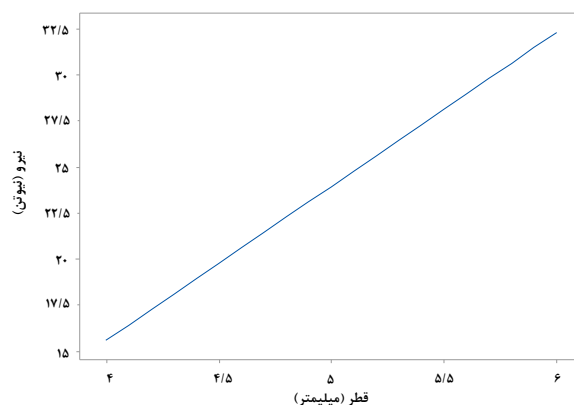


Fig. 9 Investigating the effect of tool diameter on machining force

شکل ۹ بررسی اثر قطر ابزار بر روی مقدار نیروی ماشین‌کاری

۴-۴- بررسی اثر نانو پوشش بر روی نیروی سوراخ‌کاری

یکی از ویژگی‌های قابل توجه نانو پوشش‌ها کاهش اصطکاک می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که نانو پوشش از جنس تیتانیوم نیتريد اثری بسیار مطلوب داشته و نیرو را در مقایسه با حالت بدون پوشش تا حدود ۴۰ درصد کاهش دهد. شکل ۱۲ بیانگر این است که با افزایش سرعت دورانی مقدار نیرو در حالت بدون پوشش و با پوشش بسیار به هم نزدیک می‌شوند به این دلیل که در سرعت‌های دورانی بالا ماده پلیمری زمان بسیار کوتاهی با سطوح جانبی مته در تماس است.

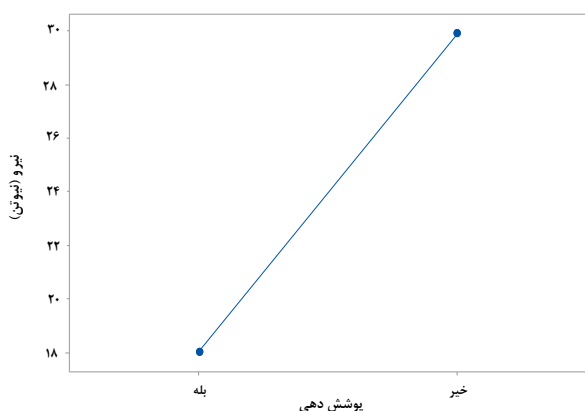


Fig. 11 Investigation of the effect of nano-coating on the axial force of drilling

شکل ۱۱ بررسی اثر نانو پوشش بر روی نیروی محوری سوراخ‌کاری

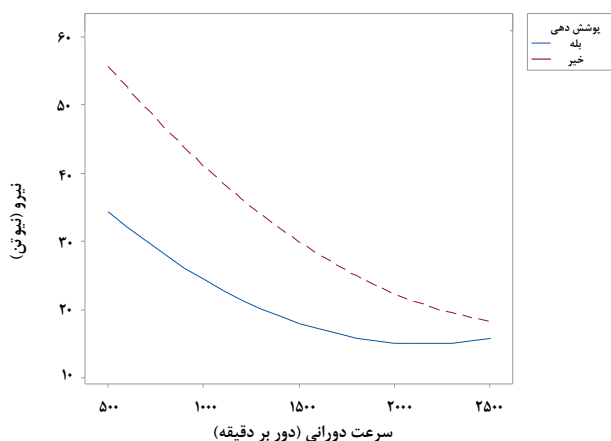


Fig. 12 Effect of nano-coating on the axial force of the drilling process with rotational speed changes

شکل ۱۲ اثر نانو پوشش بر روی نیروی محوری فرآیند سوراخ‌کاری با تغییرات سرعت دورانی

علاوه بر شکل‌های ۱۱ و ۱۲، شکل ۱۳ مقایسه‌ای از سیگنال‌های نیرو - زمان در شرایط یکسان ماشین‌کاری اما با ابزارهای با پوشش و بدون پوشش را نشان می‌دهد.

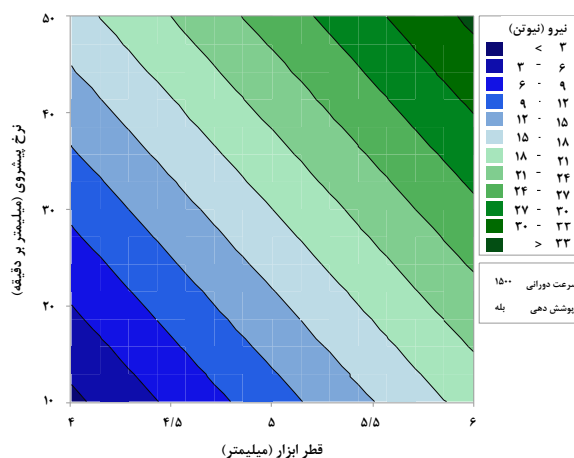


Fig.10 Diagram of force changes due to changes in feed rate and tool diameter despite nano-coating

شکل ۱۰ نمودار تغییرات نیرو بر اثر تغییرات نرخ پیشروی و قطر ابزار با وجود نانو پوشش

جدول ۵ ارائه شده است.

Table 5 Optimization and experimental validation

جدول ۵ بهینه‌سازی و صحت‌سنجی آزمایش

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

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضمن مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ در فرآیند سوراخ‌کاری پلی‌متیل متا کریلات و در نظر گرفتن سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی، قطر ابزار و نانو پوشش به عنوان متغیرهای ورودی و بیشینه نیروی محوری به عنوان متغیر خروجی، معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم برای نیرو بر حسب متغیرهای ورودی به دست آمد و دقت مدل‌سازی و اهمیت و اثر هر یک از ورودی‌ها بر روی رفتار نیرو بررسی شد. مدل ریاضی ارائه شده قادر است با دقت بسیار مناسب نیروی محوری اعمالی به ماده پلیمری را در بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نماید.

- با افزایش سرعت دورانی، سطوح تماسی مته زمان بسیار کوتاهی با بافت پلیمری درگیر خواهند بود و بدیهی است که اصطکاک و به دنبال آن مقدار نیروی محوری در سوراخ‌کاری کاهش می‌یابد.

- کاهش نرخ پیشروی به معنای کاهش مسافت طی شده در واحد زمان است که موجب می‌شود لبه‌های برنده ابزار در واحد زمان با حجم کمتری از ماده پلیمری درگیر شوند و جدایش ماده راحت‌تر صورت گیرد که نتیجه آن کاهش نیروی محوری در سوراخ‌کاری می‌باشد.

- با کاهش قطر ابزار نیروی وارد بر پلی‌متیل متا کریلات در حین ماشین‌کاری کاهش می‌یابد و با در نظر گرفتن معادله حاکم بر نیرو و سرعت دورانی ابزار ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و قطر ابزار ۴ میلی‌متر می‌توان به کمینه مقدار نیروی ۶/۷ نیوتن رسید.

- وجود نانو پوشش بر روی ابزار موجب کاهش اصطکاک و چسبندگی سطوح می‌شود و همین امر موجب شده است که نیروی محوری در مقایسه با حالت بدون نانو پوشش حدود ۵۰ درصد کاهش یابد.

شکل ۱۴ نیز رفتار دما در فرایند سوراخ‌کاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، ابزار پوشش‌دهی شده به دلیل کاهش اصطکاک و نیروهای ماشین‌کاری، بر روی رفتار دما اندکی اثر مثبت دارد و سبب کاهش آن می‌شود.

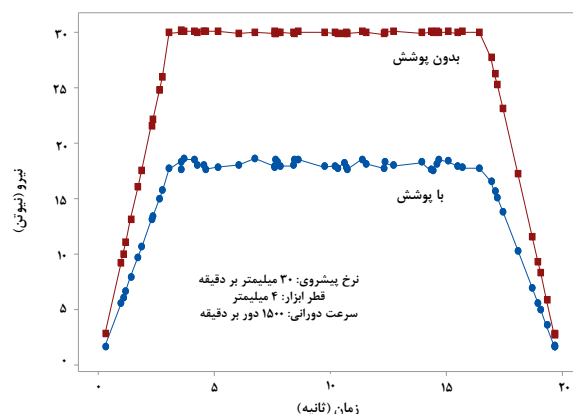


Fig. 13 Graph of the behavior of force - time related to the experiment of the central point in the states of without coated and with coated

شکل ۱۳ گراف رفتار نیرو-زمان مربوط به آزمایش نقطه مرکزی در حالت‌های بدون پوشش و با پوشش

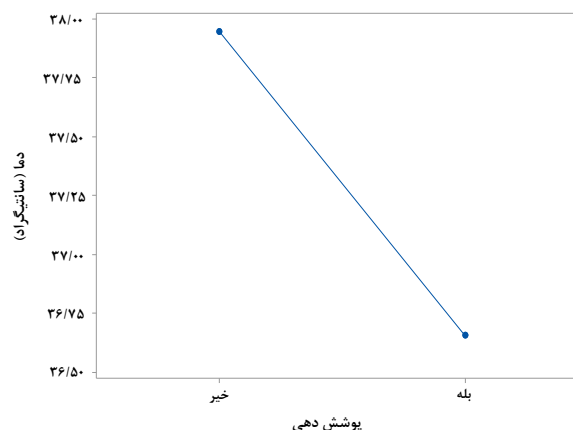


Fig. 14 Graph of the temperature behavior in drilling process in the states of without coated and with coated

شکل ۱۴ گراف رفتار دما در فرایند سوراخ‌کاری در حالت‌های بدون پوشش و با پوشش

۵- بهینه‌سازی محوری در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان

با توجه به بررسی‌هایی که در مورد تحلیل نیرو در فرآیند سوراخ‌کاری پلی‌متیل متا کریلات مطرح شد، در این بخش بهینه‌سازی فرآیند به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو در سوراخ‌کاری پلی‌متیل متا کریلات 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 بدست آمده از بهینه‌سازی و مقایسه نتیجه مدل‌سازی و آزمایش صحت‌سنجی در

۷- تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر حسن علم خواه که جهت پوشش‌دهی نانو ساختار ابزار همکاری نمودند، کمال قدردانی و تشکر بعمل می‌آید.

۸- مراجع

- [1] K. Alam, Experimental and numerical investigation of cracking behavior of cortical bone in cutting, *Technology and Health Care*, Vol. 22, No. 5, pp. 741-750, 2014.
- [2] V. Tahmasbi, M. Ghoreishi, and M. Zolfaghari, Modeling and multi objective optimization of effective parameters in drilling cortical bone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 113-119, 2015. (in Persian)
- [3] T. L. Ginta and B. Ari-Wahjoedi, Cutting Force and Temperature Variation in Bone Drilling-A Review, in *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 845: Trans Tech Publ, pp. 934-938.
- [4] J. Lee, C. L. Chavez, and J. Park, Parameters affecting mechanical and thermal responses in bone drilling: A review, *Journal of Biomechanics*, Vol. 71, pp. 4-21, 2018.
- [5] R. Zitoune, V. Krishnaraj, B. S. Almabouacif, F. Collombet, M. Sima, and A. Jolin, Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 3, pp. 1480-1488, 2012.
- [6] A. Thakur and S. Gangopadhyay, Dry machining of nickel-based super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool, *Journal of cleaner production*, Vol. 129, pp. 256-268, 2016.
- [7] B. Azarhoushang and J. Akbari, Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 7-8, pp. 1027-1033, 2007.
- [8] E. Shakouri, M. H. Sadeghi, M. Maerefat, M. R. Karafi, and M. Memarpour, Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic assisted drilling of bone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 194-200, 2014. (in Persian)
- [9] A. P. Ilyuschenko, E. E. Feldshtein, Y. O. Lisovskaya, L. V. Markova, M. A. Andreyev, and A. Lewandowski, On the properties of PVD coating based on nanodiamond and molybdenum disulfide nanolayers and its efficiency when drilling of aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 270, pp. 190-196, 2015.
- [10] C. Jacob, J. Berry, M. Pope, and F. Hoaglund, A study of the bone machining process—drilling, *Journal of Biomechanics*, Vol. 9, No. 5, pp. 343-349, 1976.
- [11] K. Alam, M. Ghodsi, A. Al-Shabibi, and V. Silberschmidt, Experimental study on the effect of point angle on force and temperature in ultrasonically assisted bone drilling, *Journal of Medical and Biological Engineering*, Vol. 38, No. 2, pp. 236-243, 2018.
- [12] M. Basiaga, Z. Paszenda, J. Szewczenko, and M. Kaczmarek, Numerical and experimental analyses of drills used in osteosynthesis, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 13, No. 4, pp. 29-36, 2011.
- [13] J. Lee, O. B. Ozdoganlar, and Y. Rabin, An experimental investigation on thermal exposure during bone drilling, *Medical Engineering & Physics*, Vol. 34, No. 10, pp. 1510-1520, 2012.
- [14] R. K. Pandey and S. S. Panda, Optimization of bone drilling using Taguchi methodology coupled with fuzzy based desirability function approach, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 26, No. 6, pp. 1121-1129, 2015.
- [15] T. Udiljak, D. Ciglar, and S. Skoric, Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis, *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 2, No. 3, pp. 103-112, 2007.
- [16] M. Zolfaghari, Temperature in bone drilling process: Mathematical modeling and Optimization of effective parameters, *International Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 7, pp. 946-953, 2016.
- [17] R. K. Pandey and S. S. Panda, Modelling and optimization of temperature in orthopaedic drilling: An in vitro study, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 16, No. 1, 2014.
- [18] G. Singh, V. Jain, and D. Gupta, Comparative study for surface topography of bone drilling using conventional drilling and loose abrasive machining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 229, No. 3, pp. 225-231, 2015.
- [19] V. Tahmasbi, A. Zeinolabedin Beygi, and 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)
- [20] M. Salamat-Talab, V. Tahmasbi, M. Safari, and 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)
- [21] D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments. John Wiley & sons, 2017.
- [22] P. F. Heini, T. Franz, C. Fankhauser, B. Gasser, and R. Ganz, Femoroplasty-augmentation of mechanical properties in the osteoporotic proximal femur: a biomechanical investigation of PMMA reinforcement in cadaver bones, *Clinical biomechanics*, Vol. 19, No. 5, pp. 506-512, 2004.
- [23] R. Kuppuswamy and B. Christie-Taylor, Influence of surgical drill geometry on drilling performance of cortical and trabecular bone, in *Advances in Forming, Machining and Automation: Springer*, 2019, pp. 119-131.
- [24] H. Hatten Jr and M. Voor, Bone healing using a bi-

- establishing the optimum cutting speed, *Journal of materials processing technology*, Vol. 62, No. 1-3, pp. 175-179, 1996.
- [32] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. Gaitonde, and G. Samuel, Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 33, pp. 75-86, 2012.
- [33] E.-G. Ng, D. Aspinwall, D. Brazil, and J. Monaghan, Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 6, pp. 885-903, 1999.
- [34] W. A. Knight and G. Boothroyd, Fundamentals of metal machining and machine tools. CRC Press, 2005.
- [35] Y. Altintas and A. Ber, Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 54, No. 5, pp. B84-B84, 2001.
- [36] M. R. Shabgard, M. Jafarian Zanjaban, and R. Azarafza, Experimental study on the influence of CuO nanofluid on surface roughness and machining force in turning of AISI 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 27-33, 2014. (in Persian فارسی)
- [37] G. Augustin, S. Davila, K. Mihoci, T. Udiljak, D. S. Vedrina, and A. Antabak, Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited, *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, Vol. 128, No. 1, pp. 71-77, 2008.
- phasic ceramic bone substitute demonstrated in human vertebroplasty and with histology in a rabbit cancellous bone defect model, *Interventional Neuroradiology*, Vol. 18, No. 1, pp. 105-113, 2012.
- [25] L. Giorleo, Poly (methyl methacrylate) Coating of Titanium Workpieces to Reduce Burrs in Micro-drilling, *Micromachines*, Vol. 10, No. 12, p. 838, 2019.
- [26] R. kumar Pandey and S. Panda, Predicting temperature in orthopaedic drilling using back propagation neural network, *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 676-682, 2013.
- [27] J. Charnley, Anchorage of the femoral head prosthesis to the shaft of the femur, *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, Vol. 42, No. 1, pp. 28-30, 1960.
- [28] V. Kalidindi, Optimization of drill design and coolant systems during dental implant surgery, 2004.
- [29] W. Cui, G. Qin, J. Duan, and H. Wang, A graded nano-TiN coating on biomedical Ti alloy: Low friction coefficient, good bonding and biocompatibility, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 71, pp. 520-528, 2017.
- [30] W. Y. Liew, J. L. L. Jie, L. Y. Yan, J. Dayou, C. Sipaut, and M. F. B. Madlan, Frictional and wear behaviour of AlCrN, TiN, TiAlN single-layer coatings, and TiAlN/AlCrN, AlN/TiN nanomultilayer coatings in dry sliding, *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 512-517, 2013.
- [31] V. Astakhov and M. Osman, Correlations amongst process parameters in metal cutting and their use for