



Investigating and analyzing parameters affecting the bone drilling process using the Taguchi method

Reza Saeidi Abueshaghi ^a, Farbod Setoudeh ^a, Vahid Tahmasbi ^{b*}, Mohammad Mohammadian ^a, Ghodratollah Taheri ^b

^a Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak University of Technology, Arak, 3818146763, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 3818146763, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: 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

 <https://10.61186/masm.4.1.139>

KEYWORDS

Machining,
Bone drilling,
Bone tissue,
Process optimization,
Taguchi algorithm.

ABSTRACT

The bone drilling process is a crucial and widely used technique in surgery and medical engineering. It is particularly prominent in orthopedic surgery, fracture treatment, bone sampling, and dentistry. The introduction of automatic surgical drills and numerically controlled surgical robots has revolutionized this process. However, a major concern during bone removal surgery is the potential increase in temperature, which can cause thermal necrosis in the bone tissue if it exceeds 47°C. Thermal necrosis can negatively affect bone fixation. To address this issue, extensive research has been conducted to reduce thermal necrosis. Unfortunately, researchers have not yet achieved satisfactory results in this field due to the lack of efficient optimization methods and the failure to consider all the parameters that affect the bone drilling process. Therefore, this paper proposes a solution to control temperature and axial force in order to optimize the parameters and improve the bone drilling process. The Taguchi method, known for its accuracy and efficiency, is used for optimization in this study. To evaluate the effectiveness of this method, experiments were conducted on cow femur bones. The results demonstrated that this method effectively improved the bone drilling process.

Extended Abstract

1. Introduction

Bone drilling is a crucial process in orthopedic surgery, serving various purposes such as fixing fractures or non-unions, correcting deformities or bad fusions, and lifting the bone. However, with advancements in technology and the increased complexity of surgical procedures, the incidence of medical errors has also risen. Orthopedic surgeries are particularly susceptible to medical errors that can lead to serious patient injuries. In many of these surgeries, precise drilling is necessary to internally or externally stabilize the broken bone. Unfortunately, there are instances where surgeons make mistakes during the bone piercing operation, resulting in excessive heat and thermal necrosis. Additionally, the application of large axial force by surgeons can lead to the development of bone cracks. To address this issue, researchers have focused on optimizing the parameters that impact the bone drilling process. This optimization aims to regulate temperature and axial force, thereby ensuring better control during bone piercing [1-9].

* Corresponding author. Tel.: +989104971398

E-mail address: tahmasbi@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.1.139>

Received: April 12, 2024; Received in revised form: June 03, 2024; Accepted: June 14, 2024

© Author



On the other hand, Table 1 demonstrates that the Taguchi method enables the optimization process to be completed in a shorter timeframe compared to other methods. This is due to the fewer number of steps involved in the Taguchi method as compared to other optimization approaches.

Table 1. Optimization steps using Taguchi method and other different optimization methods

Optimization steps using Taguchi method	Optimization steps using other optimization methods
Modeling experiments	Modeling experiments
Conducting experiments according to modeling and obtaining the results of the experiments	Conducting experiments according to modeling and obtaining the results of the experiments
The optimization of the input factors is done according to the modeling and the results obtained from the experiments	Calculation of the linear regression model based on the modeling and the results obtained from the experiments
	Optimizing input factors using optimization methods according to the linear regression model equation

2. Designing experiments

The behavior of temperature and force in the bone drilling process is being investigated. The following variables are considered as input parameters: rotational speed of the tool (rpm), advance rate (mm/min), drill diameter (mm), apex angle (degrees), helix angle (degrees), and flute. The response of the process includes the highest temperature reached in the bone tissue ($^{\circ}\text{C}$), vertical force, and the highest axial force (N) generated during drilling. In this study, fresh cow femurs (approximately 2.5 to 4 years old) were used for the experiments. The drilling process tests were performed using a separate high-speed motor from the Hertz brand. This motor had a power of 2.2 kilowatts and a maximum rotation speed of 18,000 rpm. Figure 1 shows a complete sample of the equipment used in the tests.



Figure 1. A complete example of the equipment used in the experiments

In addition, the bone drilling process followed the procedure depicted in Figure 2. To measure the temperature, shown in Figure 3, a temperature sensor was placed at a depth of 3 mm and a distance of 0.5 mm from the wall of the main hole in the bone tissue. The temperature value was then measured using this sensor.



Figure 2. Bone drilling process

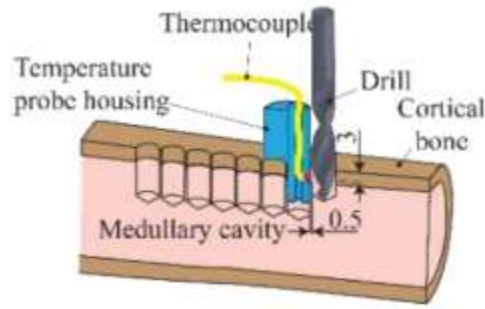


Figure 3. Location of the temperature sensor

3. Analysis of parameters affecting bone drilling temperature using Taguchi method

In order to optimize the parameters affecting the temperature of bone drilling, the input parameters in two levels have been considered as shown in Table 2. On the other hand, considering that the Taguchi optimization method can obtain the most optimal and best values for different factors at different levels and with any number of tests, therefore the results obtained in this research are reliable and accurate.

Table 2. Parameters affecting bone drilling temperature

Parameters	Level 1	Level 2
rotational speed (rpm)	500	1500
Drill diameter (mm)	2.5	4
vertical force (kg)	3.5	6
Axial force (N)	34.32	58.84
vertex angle (degrees)	80	100
Advance rate (mm/min)	10	30
Helix angle (degrees)	34.5	35.2
flute	2	3

On the other hand, in Taguchi's method, a loss function is used to calculate the changes between the results and the desired value, and this function has different modes according to the problem conditions. Also, for each output, we must calculate the total signal-to-noise S/N according to the following formula:

$$S/N = -10 \log_{10} T^2 \tag{1}$$

Finally, the overall data table, which includes the standard modeled tests, the results obtained for each test and the calculated ratio for each test, is shown in Table 3.

Table 3. General data table

	rotational speed (rpm)	Drill diameter (mm)	vertical force (kg)	Axial force (N)	vertex angle (degrees)	Advance rate (mm/min)	Helix angle (degrees)	flute	Temperature	S/N
EXP. 1	500	2.5	3.5	34.32	80	10	34.5	2	45.36	-33.13
EXP. 2	500	2.5	3.5	34.32	80	30	35.2	3	45.87	-33.22
EXP. 3	500	2.5	6	58.84	100	10	34.5	2	48.31	-33.68
EXP. 4	500	4	6	58.84	100	10	35.2	3	47.13	-33.46
EXP. 5	500	4	3.5	34.32	100	30	34.5	3	46.18	-33.38
EXP. 6	500	4	6	58.84	80	30	35.2	2	47.83	-33.59
EXP. 7	1500	2.5	6	58.84	80	10	35.2	3	45.91	-33.23
EXP. 8	1500	2.5	3.5	34.32	100	30	35.2	2	45.64	-33.18
EXP. 9	1500	2.5	6	58.84	100	30	34.5	3	48.29	-33.67
EXP. 10	1500	4	3.5	34.32	80	10	34.5	3	46.84	-33.41
EXP. 11	1500	4	6	58.84	80	30	34.5	2	48.17	-33.65
EXP. 12	1500	4	3.5	34.32	100	10	35.2	2	47.49	-33.53

The response table of the S/N ratio to determine the optimal values is given in Table 4.

Table 4. The S/N ratio to determine the optimal values

Levels	rotational speed (rpm)	Drill diameter (mm)	vertical force (kg)	Axial force (N)	vertex angle (degrees)	Advance rate (mm/min)	Helix angle (degrees)	flute
Level 1	*-33.39	*-33.35	*-33.29	*-33.29	*-33.37	*-33.40	-33.47	-33.46
Level 2	-33.44	-33.48	-33.54	-33.54	-33.46	-33.43	*-33.36	*-33.37

As can be seen in Table 4, the numbers marked with an asterisk (*) in Table 7 indicate the optimal levels, for example 33.39 is a larger number than 33.44, so the optimal level for the rotational speed is the same as the

numerical value of the level. 1 means 500, based on the information in Table 4, the optimal values for all input factors are given in Table 5.

Table 5. parameters affecting bone drilling temperature

Optimal amount	Parameter
500	rotational speed (rpm)
2.5	Drill diameter (mm)
3.5	vertical force (kg)
34.32	Axial force (N)
80	vertex angle (degrees)
10	Advance rate (mm/min)
35.2	Helix angle (degrees)
3	flute

4. The parameter affecting the growth of bone cracks

Based on the 12 experiments conducted in the previous section and the analysis of the results, it has been determined that the optimal value for the axial force is 34.32 N. In order to further investigate the effect of axial force as a significant parameter on bone crack growth, two bone drilling tests were carried out. These tests involved applying two forces: 34.32 N and 58.84 N. The other parameters were set to their optimal values, including a rotational speed of 500 rpm, a drill diameter of 2.5 mm, an apex angle of 80 degrees, an advance rate of 10 mm/min, a spiral angle of 35.2 degrees, and 3 flutes. As shown in Figure 4 and Figure 5, applying a force of 58.84 N resulted in an increase in roughness and the number of bone cracks. Therefore, based on these findings and the optimization results from the previous section, it can be concluded that the most optimal value for the axial force is 34.32 N.



Figure 4. Drilling with 34.32 N force

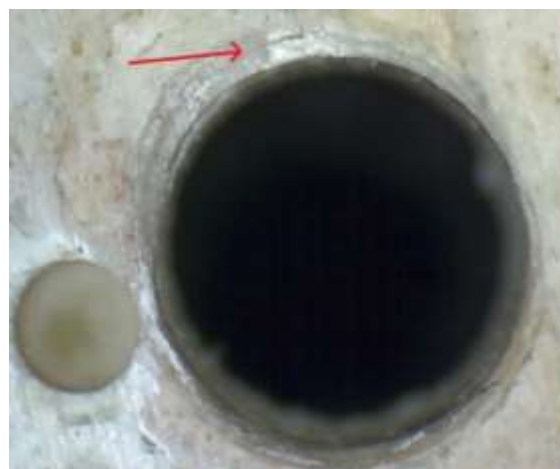


Figure 5. Drilling with 58.84 N force

5. Conclusion

Based on the results obtained and also the results of the researches and their analysis, as well as examining the parameters affecting the temperature of the bone drilling process and the parameters affecting the growth of bone cracks around the bone drilling site in orthopedic surgeries, it can be said that by optimizing all these parameters, the temperature of the drilling process can be It controlled the bone and the growth of bone cracks around the bone piercing site and greatly improved the bone piercing process and increased the accuracy of orthopedic surgeries.



بررسی و تحلیل پارامترهای مؤثر بر فرایند سوراخکاری استخوان مبتنی بر روش تاگوچی

رضا سعیدی ابواسحق^{الف}، فرید ستوده^ب، وحید طهماسبی^ج، محمد محمدیان^د، قدرت‌اله طاهری^ه

^{الف} دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، rezasa7de@gmail.com

^ب استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، f.setoudeh@arakut.ac.ir

^ج دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، tahmasbi@arakut.ac.ir

^د استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.mohammadiankebria@gmail.com

^ه دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، qtaheri1400@gmail.com

واژگان کلیدی	چکیده
ماشین کاری، سوراخکاری استخوان، بافت استخوان، بهینه‌سازی فرآیند، الگوریتم تاگوچی.	یکی از مهم‌ترین، حساس‌ترین و پرکاربردترین فرایندهای ماشین کاری در حوزه جراحی‌ها و مهندسی پزشکی، فرایند سوراخکاری استخوان می‌باشد. سوراخکاری استخوان کاربرد عمده‌ای در جراحی‌های ارتوپدی، درمان شکستگی‌ها و نمونه‌برداری‌های استخوانی و همچنین دندان پزشکی دارد. مهم‌ترین عارضه‌ای که ممکن است در عمل جراحی براده‌برداری از استخوان ایجاد شود، بالا رفتن دما از محدوده مجاز و ایجاد نکرور حرارتی در بافت استخوان می‌باشد. به‌طور کلی اگر دمای فرایند سوراخکاری استخوان بیشتر از ۴۷ °C شود، نکرور حرارتی اتفاق می‌افتد. در صورت وقوع نکرور حرارتی، تثبیت استخوان به خوبی انجام نمی‌گیرد. در سال‌های اخیر محققان به دلیل عدم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کارآمد و نیز عدم در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر بر فرایند سوراخکاری استخوان به نتایج قابل قبولی در این زمینه دست نیافتند. همچنین دستیابی به بهترین پارامترهای مؤثر جهت جلوگیری از بروز نکرور حرارتی نیز میسر نگردید. لذا در این مقاله، جهت جلوگیری از این موضوع، ضمن طراحی دقیق آزمایش‌ها، یک روش نسبتاً دقیق به عنوان راهکاری جهت کنترل دما و نیروی محوری به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرایند سوراخکاری استخوان و بهبود فرایند سوراخکاری استخوان ارائه شده است که در این مقاله، از روش بهینه‌سازی تاگوچی بدین منظور استفاده شده است و این روش در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی، در مدت زمان کوتاه‌تری فرایند بهینه‌سازی را با دقت بسیار بالایی انجام می‌دهد. همچنین به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده، نتایج حاصل از بهینه‌سازی صورت‌گرفته روی استخوان کورتیکال گاو آزمایش شده است. نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی صورت‌گرفته نشان می‌دهد که این روش در بهبود فرایند سوراخکاری استخوان کاملاً مؤثر بوده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵	

۱- مقدمه

سوراخکاری استخوان یکی از اصلی‌ترین فرایندها در جراحی ارتوپدی می‌باشد، که از این کار در راستای اهداف متعددی استفاده می‌شود. ثابت کردن استخوان جهت اصلاح شکستگی یا جوش نخوردگی‌ها، اصلاح دفورمیتی یا بدجوش خوردگی‌ها و

بلند کردن استخوان، اصلی‌ترین موارد استفاده از ثابت‌کننده‌های داخلی و خارجی می‌باشند، از طرفی با پیشرفت‌های تکنولوژی و پیچیده شدن عمل‌های جراحی و مداخلات گوناگون، بروز قصور خطاهای پزشکی نیز بیشتر شده است، از جمله عمل‌های جراحی که خطای پزشکی در آن‌ها سبب بروز آسیب‌های جدی به بیمار می‌شود، عمل‌های جراحی ارتوپدی می‌باشد، که در اکثر این عمل‌ها جهت ثابت‌سازی داخلی یا خارجی استخوان شکسته شده لازم است سوراخکاری با دقت بالایی صورت پذیرد، اما متأسفانه در برخی مواقع، خطای جراحان در حین عمل سوراخکاری استخوان سبب تولید حرارت بالا و نکرور حرارتی می‌شود، همچنین نیروی محوری وارد شده زیاد توسط جراحان هم سبب رشد ترک استخوان می‌گردد، لذا جهت جلوگیری از این موضوع، محققان بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فرایند سوراخکاری استخوان را راهکاری جهت کنترل دما و نیروی محوری در فرایند سوراخکاری استخوان می‌دانند. در گذشته محققان متعددی در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فرایند سوراخکاری استخوان فعالیت کرده‌اند؛ در این راستا، طهماسبی و همکاران یک مدل ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش‌بینی رفتار دمای فرایند در حین عمل سوراخکاری استخوان برحسب سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی و برهم‌کنش‌های مؤثر آن‌ها ارائه دادند. این مدل می‌تواند حداکثر سرعت عمل جراح را در محدوده مجاز دمایی مشخص کند. همچنین با طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرایند سوراخکاری استخوان برای نخستین بار به روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، مقدار بهینه‌ی سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی را ارائه کردند، که تغییرات سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی را در بازه‌های ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و ۴۰ تا ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفتند و با آزمایش بر روی استخوان ران گاو، کمترین مقدار دما را به ازای کمترین مقدار سرعت دورانی ابزار و کمترین مقدار نرخ پیشروی یعنی ۵۰۰ دور بر دقیقه و ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه به دست آوردند [۱].

سینگ‌ها و همکاران از تکنیک بهینه‌سازی تاگوچی برای به حداقل رساندن آسیب در حین سوراخکاری استخوان استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که آسیب در سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و مقادیر نرخ خوراک ۵۰ میلی‌متر به حداقل میرسد [۲].

سوسن‌آبادی و همکاران به منظور پیش‌بینی رفتار نیروی سوراخکاری برحسب سرعت پیشروی، سرعت دورانی ابزار، قطر مته و برهم‌کنش‌های مؤثر آن‌ها، یک معادله خطی رگرسیون مرتبه دوم ارائه کردند، همچنین آن‌ها به منظور بررسی میزان اثرگذاری هر یک از پارامترها بر روی نیروی سوراخکاری از روش آنالیز حساسیت ای‌فست استفاده کردند [۳].

صفری و همکاران یک مدل ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر رفتار دما در حین عمل سوراخکاری استخوان بر حسب زاویه راس و زاویه مارپیچ مته ارائه دادند. همچنین با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل، میزان تأثیر دقیق هر یک از پارامترهای ورودی زاویه راس و زاویه مارپیچ را بر خروجی دما به دقت بررسی کردند و با استفاده از روش بهینه‌سازی درینگر کمترین مقدار دمای ایجاد شده در بازه تغییر فاکتورهای ورودی فرایند را ارائه دادند که نتایج نشان داد کمترین دمای ایجاد شده در بافت استخوان تازه ران گاو در زاویه راس ۹۰ و زاویه مارپیچ ۲۷ درجه حاصل می‌گردد. همچنین با افزایش زاویه راس و کاهش زاویه مارپیچ دمای ایجاد شده در بافت استخوان در فرایند سوراخکاری افزایش می‌یابد. از طرفی تغییرات دما حساسیت بیشتری به تغییرات زاویه مارپیچ نسبت به زاویه راس مته دارد [۴].

پاک و همکاران، یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم، به منظور بهینه‌سازی نیروی محوری در فرایند سوراخکاری استخوان با استفاده از ابزار پوشش‌دهی شده با نانو پوشش نیتريد تیتانیوم ارائه دادند، که به منظور جلوگیری از شکست استخوان در جراحی‌های ارتوپدی باید نیروی محوری به‌طور دقیق کنترل شود. همچنین آن‌ها، بهینه‌ترین مقادیر را برای پارامترهای مؤثر بر نیروی محوری به‌روش بهینه‌سازی سطح پاسخ به دست آوردند، که نتایج در محدوده آزمایش‌ها نشان می‌دهد که کمترین نیروی وارد شده به استخوان ران گاو مربوط به نرخ پیشروی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دوران ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و قطر ابزار ۴ میلی‌متر می‌باشد [۵].

شکوری و همکاران یک مدل ریاضی مناسب، به منظور پیش‌بینی مقدار نیروی محوری بر حسب نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار به کمک ارتعاشات التراسونیک ارائه دادند. همچنین بهینه‌ترین مقادیر نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار را به دست آوردند، که نتایج در محدوده آزمایش‌ها نشان داد، کمترین نیروی محوری وارد شده به استخوان ران گاو با استفاده از ارتعاشات التراسونیک مربوط به نرخ پیشروی ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار ۱۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد [۶].

سوسن‌آبادی و همکاران، روشی را به منظور پیش‌بینی حداکثر دما و حداکثر نیروی محوری در فرایند سوراخکاری سرعت بالای استخوان ارائه دادند. همچنین با استفاده از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، بهینه‌ترین مقادیر نرخ پیشروی،

سرعت دورانی ابزار و قطر ابزار را به دست آوردند، که نتایج در محدوده آزمایش‌ها نشان می‌دهد، که کمترین دمای ایجاد شده در بافت استخوان ران گاو و کمترین نیروی محوری وارد شده به استخوان ران گاو مربوط به نرخ پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت دورانی ابزار ۱۱۷۷۸ دور بر دقیقه و قطر ابزار ۲ میلی‌متر می‌باشد [۷]. جمیل و همکاران، دو معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم به منظور پیش‌بینی دما و نیروی محوری در فرایند سوراخکاری استخوان با کمک ترکیب آب شور و هوا که خنک‌کننده، روان‌کننده و شوینده می‌باشد را ارائه دادند. همچنین با استفاده از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، بهینه‌ترین مقادیر نرخ پیشروی، سرعت دورانی ابزار، قطر ابزار و نرخ تزریق ترکیب آب شور و هوا در فرایند سوراخکاری استخوان را به دست آوردند، که نتایج در محدوده آزمایش‌ها نشان داد، کمترین دمای ایجاد شده در بافت استخوان ران گاو و کمترین نیروی محوری وارد شده به استخوان ران گاو مربوط به نرخ پیشروی ۴۵ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه، قطر ابزار ۴ میلی‌متر و نرخ تزریق آب شور و هوا ۲۵۰ میلی‌لیتر بر ساعت در فرایند سوراخکاری استخوان می‌باشد [۸]. گارگ و همکاران، روشی را جهت پیش‌بینی حداکثر دما و حداکثر نیروی محوری در فرایند سوراخکاری استخوان ارائه دادند، که روابط ارائه شده بر اساس روش ریشه میانگین مربعات به دست آمده‌اند. همچنین با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، بهینه‌ترین مقادیر نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار را به دست آوردند که نتایج در محدوده آزمایش‌ها نشان داد کمترین دمای ایجاد شده در بافت استخوان ران گاو و کمترین نیروی محوری وارد شده به استخوان ران گاو مربوط به نرخ پیشروی ۵۵ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار ۲۵۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد [۹]. تای و همکاران، با انجام آزمایش بر روی استخوان ران گاو و با تغییر فاکتورهای ورودی در بازه‌های مشخص، مته پیچشی با قطر ۲ میلی‌متر را به عنوان یک مته استاندارد جهت دستیابی به کمترین میزان دما معرفی کردند [۱۰]. تسیگادیکگی و همکاران، با انجام آزمایش بر روی استخوان تازه ران گاو و با تغییر فاکتورهای ورودی در بازه‌های مشخص، بهینه‌ترین مقادیر فاکتورهای ورودی یعنی قطر ابزار ۳/۲ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار ۲۰۰ دور بر دقیقه و نیز قطر ابزار ۳ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی ابزار ۱۰۰ دور بر دقیقه را جهت دستیابی به کمترین میزان دما ارائه دادند [۱۱]. میسیک و همکاران، با انجام آزمایش بر روی استخوان ران گاو و با تغییر فاکتورهای ورودی در بازه‌های مشخص به مقایسه سوراخکاری معمولی و سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک پرداختند و ملاحظه کردند که دما در سوراخکاری به کمک ارتعاشات با افزایش عمق به طور پیوسته کاهش یافته ولی در سوراخکاری معمولی با افزایش عمق تا ۵ میلی‌متر دما افزایش پیدا کرده است [۱۲].

به طور کلی پارامترهای مؤثر بر دمای سوراخکاری استخوان، سرعت دورانی، قطر مته، نیروی عمودی، نیروی محوری، زاویه راس، نرخ پیشروی، زاویه مارپیچ و فلوت می‌باشند و پارامتر مؤثر بر رشد ترک استخوان در محل سوراخکاری استخوان نیز مقدار نیروی محوری وارده می‌باشد که جهت بهینه‌سازی این پارامترها در این پژوهش از روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی یک روش طراحی قدرتمند است که به صورت گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل مهندسی استفاده می‌شود. در این روش، پارامترهای اصلی را که فرض می‌شود در بهبود نتایج فرایند سوراخکاری استخوان مؤثر هستند، در ردیف‌های مختلف در یک آرایه متعامد طراحی شده، قرار می‌گیرند. سپس بر اساس جدول آرایه‌های متعامد طراحی شده، می‌بایست آزمایشات انجام شود و جهت بهینه‌سازی تمامی فاکتورهای مؤثر نیز در نرم‌افزار مینی‌تب با استفاده از Design Taguchi Analyze جدول آزمایشات و نتایج به دست آمده باید تحلیل و بهینه‌ترین مقادیر برای فاکتورهای مؤثر بدست آید. از طرفی با توجه به اینکه در بسیاری از تحقیقات قبلی در حوزه سوراخکاری استخوان، پارامترهایی نظیر سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر مته، رفتار خطی از خود نشان داده‌اند، لذا تغییرات این پارامترها در مدل تاگوچی با توجه به هزینه و تعداد کمتر انجام آزمایشات می‌تواند قابل قبول باشد و از خطای مدل در بازه نیز صرف‌نظر گردد. در جدول ۱، خلاصه مراحل بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی و سایر روش‌های بهینه‌سازی آورده شده است. همچنین بر خلاف پژوهش‌های صورت گرفته در گذشته که از روش‌های بهینه‌سازی دیگر استفاده می‌کردند، در این مقاله از روش بهینه‌سازی تاگوچی به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرایند سوراخکاری استخوان که همان پارامترهای مؤثر بر دمای سوراخکاری استخوان و پارامتر مؤثر بر رشد ترک استخوان در محل سوراخکاری استخوان در جراحی‌های ارتوپدی می‌باشند، استفاده شده است. به طور کلی مزایای استفاده از روش تاگوچی، کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها، امکان بررسی فاکتورهای گسسته، تعیین سهم فاکتورها، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه، تعیین سهم خطا، تعیین سهم اثرات متقابل در نظر گرفته شده، امکان به دست

آوردن همزمان شرایط بهینه برای چندین پاسخ، امکان بررسی فاکتورهایی با سطوح مختلف و بررسی تعداد فاکتورهای نامحدود می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت کنترل دما و تأثیر مستقیم چگونگی خارج شدن براده‌ها از درون شیارهای مارپیچ مته و نیز اصطکاک در لبه‌های برنده که از جمله موارد مهم تأثیرگذار بر روی افزایش دما می‌باشند، کنترل دما و اصطکاک در لبه‌های برنده و زاویه مارپیچ مته امکان‌پذیر می‌باشد. از طرفی با توجه به تأثیر مستقیم پارامترهایی نظیر سرعت دورانی و زاویه راس بر روی چگونگی خارج شدن براده‌ها از درون شیار مارپیچ و همچنین بر روی اصطکاک لبه‌ها، از این نظر با نگرش به تأثیر مستقیم تمامی پارامترهای مؤثر با یکدیگر، کنترل دمای فرایند مستلزم یافتن مقادیر بهینه برای پارامترهای مختلف بوده که بیشترین تأثیر و دقت را بر روی کنترل اصطکاک لبه‌های برنده و نیز نحوه خارج شدن براده از درون شیار مارپیچ داشته باشند. مثلاً ممکن است جهت دستیابی به دمای مطلوب، مقادیر بهینه یافته‌شده، حداکثر یا حداقل مقادیر ورودی در نظر گرفته شده برای هر پارامتر باشد. که در این پژوهش، نتایج به‌دست آمده، دقیق و با کیفیت مورد نظر هستند. همچنین با توجه به اینکه در پژوهش‌های قبلی پژوهشگرانی نظیر طهما سبی و همکاران [۱۳] از سایر روش‌ها مانند RSM و Full Factorial استفاده شده است و در پژوهش حاضر از روش تاگوچی، با نگرش به اینکه برتری روش تاگوچی نسبت به سایر روش‌ها، تعداد اندک انجام آزمایشات است، انجام شده است. در این تحقیق بررسی شده است که آیا کم کردن تعداد آزمایشات نسبت به سایر روش‌ها خطای محسوسی ایجاد می‌کند یا خیر؟ که خوشبختانه با توجه به نتایج بدست آمده، با استفاده از روش تاگوچی با مقدار هزینه کمتر به جواب‌های مطلوب دست یافته‌ایم. از طرفی مطابق جدول ۱، همان‌طور که قابل مشاهده است با استفاده از روش تاگوچی می‌توان در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی در مدت زمان کوتاه‌تری فرایند بهینه‌سازی را انجام داد، زیرا تعداد مراحل انجام فرایند بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی کمتر از سایر روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد.

جدول ۱ مراحل بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی و سایر روش‌های مختلف بهینه‌سازی ارائه‌شده در تحقیقات گذشته

مراحل بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی	مراحل بهینه‌سازی با استفاده از سایر روش‌های بهینه‌سازی
مدل‌سازی آزمایش‌ها	مدل‌سازی آزمایش‌ها
انجام آزمایش‌ها مطابق مدل‌سازی صورت گرفته و به‌دست آوردن نتایج آزمایش‌ها	انجام آزمایش‌ها مطابق مدل‌سازی صورت گرفته و به‌دست آوردن نتایج
بهینه‌سازی فاکتورهای ورودی مطابق با مدل‌سازی صورت گرفته و نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها	محاسبه معادله مدل رگرسیون خطی مطابق مدل‌سازی صورت گرفته و نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها
	بهینه‌سازی فاکتورهای ورودی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مطابق معادله مدل رگرسیون خطی

۲- طراحی آزمایش‌ها

در بررسی رفتار دما و نیرو در فرایند سوراخکاری استخوان، متغیرهای سرعت دورانی ابزار (rpm) - rpm، نرخ پیشروی (mm/min)، قطر مته (mm)، زاویه راس (درجه)، زاویه مارپیچ (درجه) و فلوت به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین بیشترین مقدار دمای ایجاد شده در بافت استخوان °C - (T)، نیروی عمودی و بیشترین مقدار نیروی محوری (N) به وجود آمده در حین سوراخکاری نیز به عنوان پاسخ فرایند در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در این پژوهش در انجام آزمایش‌ها از استخوان ران تازه گاو (سن حدود ۲/۵ الی ۴ سال) استفاده شده است. سپس از قسمت دیافیز ران گاو (بخش میانی) که طولی به اندازه حدود ۱۳۵ میلی‌متر داشته (شکل ۱) و ضخامت استخوان کورتیکال در این محدوده در حدود ۵-۸ میلی‌متر است، استفاده شده است. همچنین به‌منظور سهولت بیشتر در انجام آزمایش‌ها، قسمت‌های ابتدایی و انتهایی استخوان تازه ران به وسیله اره بریده شده است. در شکل ۲، نمایی از نمونه استخوان برش خورده از وسط که در انجام آزمایش‌ها به کار رفته است، قابل مشاهده می‌باشد. همچنین جهت انجام آزمایش‌های فرایند سوراخکاری از یک موتور سرعت بالای مجزا با برند hertz و توان ۲/۲ کیلووات با حداکثر سرعت دورانی ۱۸۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. در شکل ۳، نمونه کامل تجهیزاتی که در آزمایش‌ها استفاده شده است، قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۱ نمونه استخوان کامل ران گاو



شکل ۲ نمونه استخوان برش خورده

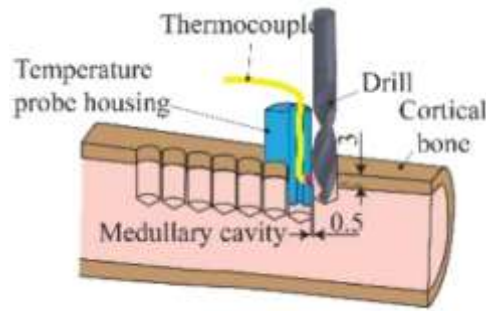


شکل ۳ نمونه کامل تجهیزات استفاده شده در آزمایشها



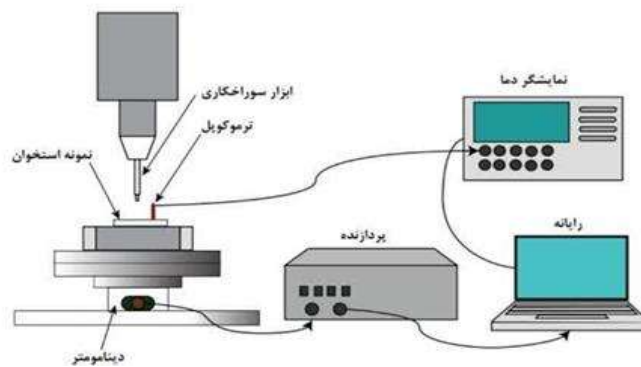
شکل ۴ فرایند سوراخکاری استخوان

از طرفی فرایند سوراخکاری استخوان مطابق شکل ۴، صورت پذیرفته است. همچنین جهت اندازه‌گیری مقدار دما مطابق شکل ۵، در عمق ۳ میلی‌متری و در فاصله ۰/۵ میلی‌متری از دیواره سوراخ اصلی ایجاد شده در بافت استخوان، رشته نشان دهنده دمای سنسور در سوراخ فرعی ایجاد شده قرار گرفته و مقدار دما توسط سنسور دما اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵ محل قرارگیری رشته نشان دهنده دما

در این مقاله برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل استفاده شده است. که در این پژوهش به منظور رعایت حداکثر دقت اندازه‌گیری، از یک ترموکوپل که با کمترین میزان خطا، دمای واقعی در حین فرایند را نمایش می‌دهد و متعلق به شرکت ABB می‌باشد، استفاده شده است. در شکل ۶، فرایند اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل نشان داده شده است.



شکل ۶ فرایند اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل

برای اندازه‌گیری نیروی محوری از یک دستگاه نیروسنج با ظرفیت ۱۰ kgf بهره گرفته شده است. در این مقاله از یک نیروسنج دقیق کالیبره‌شده، به‌منظور اندازه‌گیری نیروی محوری ایجاد شده در بافت استخوان استفاده شده است.

۳- تحلیل پارامترهای مؤثر بر دمای سوراخکاری استخوان با استفاده از روش تاگوچی

جهت بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر دمای سوراخکاری استخوان، پارامترهای ورودی در دو سطح به صورت جدول ۲، در نظر گرفته شده است. از طرفی با توجه به اینکه روش بهینه‌سازی تاگوچی می‌تواند در سطوح مختلف و با هر تعداد آزمایش بهینه‌ترین و بهترین مقادیر را برای فاکتورهای متفاوت به دست آورد، لذا نتایج حاصل شده در این پژوهش قابل اعتماد و دقیق می‌باشند.

جدول ۲ پارامترهای مؤثر بر دمای سوراخکاری استخوان

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲
سرعت دورانی (rpm)	۵۰۰	۱۵۰۰
قطر مته (mm)	۲/۵	۴
نیروی عمودی (kg)	۳/۵	۶
نیروی محوری (N)	۳۴/۳۲	۵۸/۸۴
زاویه راس (درجه)	۸۰	۱۰۰
نرخ پیشروی (mm/min)	۱۰	۳۰
زاویه مارپیچ (درجه)	۳۴/۵	۳۵/۲
فلوت	۲	۳

با توجه به اینکه هر فاکتور، دارای دو مقدار می‌باشد، تمامی فاکتورهای ورودی نیز بر این اساس دو سطحی می‌باشند (Level 2). از طرفی برای بهینه‌سازی به روش تاگوچی ابتدا بر اساس فرمول $L_m(P^n)$ (P نشان‌دهنده تعداد سطوح، m نشان‌دهنده تعداد آزمایشات و n تعداد فاکتورها می‌باشد)، باید از بین جداول آماده آرایه‌های متعامد تاگوچی، جدول آرایه‌های متعامد مناسب را انتخاب نمود و سپس براساس این جدول باید تعدادی آزمایش را برای انجام فرایند بهینه‌سازی به‌طور استاندارد مدل‌سازی کرد، بنابراین با توجه به دو سطحی بودن تمامی فاکتورهای ورودی (Level 2) می‌توان سه جدول $L_{12} - L_{16} - L_{32}$ را انتخاب نمود که با توجه به فرایند بهینه‌سازی کوتاه‌تر و تعداد آزمایشات کمتر جدول L_{12} را انتخاب می‌کنیم و سپس بر اساس مقادیر $n = 8, m = 12, P = 2$ و فرمول کلی $L_{12}(2^8)$ جدول آرایه‌های متعامد، به‌صورت جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳ جدول آرایه‌های متعامد انتخاب شده بر اساس فرمول $L_{12}(2^8)$

	H	G	F	E	D	C	B	A
۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱
۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱
۳	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۱
۴	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱
۵	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۱
۶	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱
۷	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲
۸	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲
۹	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲
۱۰	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲
۱۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲
۱۲	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۲

مطابق جدول ۳، تعداد ۱۲ آزمایش طراحی و در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴ جدول مدل‌سازی آزمایش‌ها

آزمایش	سرعت دورانی	قطر مته	نیروی عمودی	نیروی محوری	زاویه راس	نرخ پیشروی	زاویه ماریج	فلوت
۱	۵۰۰	۲/۵	۳/۵	۳۴/۳۲	۸۰	۱۰	۳۴/۵	۲
۲	۵۰۰	۲/۵	۳/۵	۳۲/۳۴	۸۰	۳۰	۲۵/۲	۳
۳	۵۰۰	۲/۵	۶	۵۸/۸۴	۱۰۰	۱۰	۳۴/۵	۲
۴	۵۰۰	۴	۶	۵۸/۸۴	۱۰۰	۱۰	۲۵/۲	۳
۵	۵۰۰	۴	۳/۵	۳۴/۳۲	۱۰۰	۳۰	۳۴/۵	۳
۶	۵۰۰	۴	۶	۵۸/۸۴	۸۰	۳۰	۲۵/۲	۲
۷	۱۵۰۰	۲/۵	۶	۸۴/۵۸	۸۰	۱۰	۲۵/۲	۳
۸	۱۵۰۰	۲/۵	۳/۵	۳۴/۳۲	۱۰۰	۳۰	۲۵/۲	۲
۹	۱۵۰۰	۲/۵	۶	۵۸/۸۴	۱۰۰	۳۰	۳۴/۵	۳
۱۰	۱۵۰۰	۴	۳/۵	۳۴/۳۲	۸۰	۱۰	۳۴/۵	۳
۱۱	۱۵۰۰	۴	۶	۵۸/۸۴	۸۰	۳۰	۳۴/۵	۲
۱۲	۱۵۰۰	۴	۳/۵	۳۴/۳۲	۱۰۰	۱۰	۲۵/۲	۲

پس از انجام هر یک از ۱۲ آزمایش بالا، به‌صورت جداگانه بر روی استخوان ران گاو مطابق شکل ۴، بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده دما برای هر آزمایش توسط ترموکوپل در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ بیشترین مقدار دمای اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
دما	۴۵/۳۶	۴۵/۸۷	۴۸/۳۱	۴۷/۱۳	۴۶/۱۸	۴۷/۸۳	۴۵/۹۱	۴۵/۶۴	۴۸/۲۹	۴۶/۸۴	۴۸/۱۷	۴۷/۴۹

از طرفی در روش تاگوچی از یک تابع زیان (Loss function) برای محاسبه تغییرات موجود بین نتایج و مقدار مورد نظر استفاده می‌شود و این تابع با توجه به شرایط مسئله دارای حالت‌های مختلف است. همچنین برای هر خروجی باید مقدار سیگنال به نویز کل S/N را مطابق با فرمول زیر محاسبه کنیم:

$$S/N = -10 \log_{10} T^2 \quad (1)$$

سپس با استفاده از رابطه ۱، نسبت S/N را برای تمامی نتایج به دست آمده به صورت زیر محاسبه می‌کنیم، که همان نتیجه به دست آمده برای هر آزمایش می‌باشد:

$S/N = -10 \log_{10}(47/49)^2 = -33/53$	نسبت S/N برای آزمایش ۱:
$S/N = -10 \log_{10}(45/87)^2 = -33/22$	نسبت S/N برای آزمایش ۲:
$S/N = -10 \log_{10}(48/31)^2 = -33/68$	نسبت S/N برای آزمایش ۳:
$S/N = -10 \log_{10}(47/13)^2 = -33/46$	نسبت S/N برای آزمایش ۴:
$S/N = -10 \log_{10}(46/18)^2 = -33/28$	نسبت S/N برای آزمایش ۵:
$S/N = -10 \log_{10}(47/83)^2 = -33/59$	نسبت S/N برای آزمایش ۶:
$S/N = -10 \log_{10}(45/91)^2 = -33/23$	نسبت S/N برای آزمایش ۷:
$S/N = -10 \log_{10}(45/64)^2 = -33/18$	نسبت S/N برای آزمایش ۸:
$S/N = -10 \log_{10}(48/29)^2 = -33/67$	نسبت S/N برای آزمایش ۹:
$S/N = -10 \log_{10}(46/84)^2 = -33/41$	نسبت S/N برای آزمایش ۱۰:
$S/N = -10 \log_{10}(48/17)^2 = -33/65$	نسبت S/N برای آزمایش ۱۱:
$S/N = -10 \log_{10}(47/49)^2 = -33/53$	نسبت S/N برای آزمایش ۱۲:

در نهایت جدول کلی داده‌ها، که شامل آزمایش‌های مدل‌سازی شده استاندارد، نتایج به دست آمده برای هر آزمایش و نسبت محاسبه شده برای هر یک از آزمایش‌ها می‌باشد، در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶ جدول کلی داده‌ها

S/N	دما	فلوت	زاویه مارپیچ	نرخ پیشروی	زاویه راس	نیروی محوری	نیروی عمودی	قطر متنه	سرعت دورانی
-۳۳/۱۳	۴۵/۳۶	۲	۳۴/۵	۱۰	۸۰	۳۴/۳۲	۳/۵	۲/۵	۵۰۰
-۳۳/۲۲	۴۵/۸۷	۳	۳۵/۲	۳۰	۸۰	۳۴/۳۲	۳/۵	۲/۵	۵۰۰
-۳۳/۶۸	۴۸/۳۱	۲	۳۴/۵	۱۰	۱۰۰	۵۸/۸۴	۶	۲/۵	۵۰۰
-۳۳/۴۶	۴۷/۱۳	۳	۳۵/۲	۱۰	۱۰۰	۵۸/۸۴	۶	۴	۵۰۰
-۳۳/۲۸	۴۶/۱۸	۳	۳۴/۵	۳۰	۱۰۰	۳۴/۳۲	۳/۵	۴	۵۰۰
-۳۳/۵۹	۴۷/۸۳	۲	۳۵/۲	۳۰	۸۰	۵۸/۸۴	۶	۴	۵۰۰
-۳۳/۲۳	۴۵/۹۱	۳	۳۵/۲	۱۰	۸۰	۵۸/۸۴	۶	۲/۵	۱۵۰۰
-۳۳/۱۸	۴۵/۶۴	۲	۳۵/۲	۳۰	۱۰۰	۳۴/۳۲	۳/۵	۲/۵	۱۵۰۰
-۳۳/۶۷	۴۸/۲۹	۳	۳۴/۵	۳۰	۱۰۰	۵۸/۸۴	۶	۲/۵	۱۵۰۰
-۳۳/۴۱	۴۶/۸۴	۳	۳۴/۵	۱۰	۸۰	۳۴/۳۲	۳/۵	۴	۱۵۰۰
-۳۳/۶۵	۴۸/۱۷	۲	۳۴/۵	۳۰	۸۰	۵۸/۸۴	۶	۴	۱۵۰۰
-۳۳/۵۳	۴۷/۴۹	۲	۳۵/۲	۱۰	۱۰	۳۴/۳۲	۳/۵	۴	۱۵۰۰

جهت بهینه سازی پارامترهای مؤثر بر دمای سوراخکاری استخوان، باید داده‌های به دست آمده مطابق با توضیحات زیر مد نظر قرار گیرد:

(۱) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود مقدار سرعت دورانی در آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ برابر با ۵۰۰ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب برابر با $۳۳/۱۳$ ، $۳۳/۲۲$ ، $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۴۶$ ، $۳۳/۲۸$ و $۳۳/۵۹$ است که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با $۳۳/۳۹$ (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار سرعت دورانی در آزمایش‌های ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ برابر با ۱۵۰۰ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب برابر با $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۱۸$ ، $۳۳/۶۷$ ، $۳۳/۴۱$ ، $۳۳/۶۵$ و $۳۳/۵۳$ است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N نیز برابر با $۳۳/۴۴$ (سطح ۲) می‌باشد.

(۲) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار قطر مته در آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ برابر با ۲/۵ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برابر با $۳۳/۱۳$ ، $۳۳/۲۲$ ، $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۱۸$ و $۳۳/۶۷$ است که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با $۳۳/۳۵$ (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار قطر مته در آزمایش‌های ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ برابر با ۴ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب برابر با $۳۳/۴۶$ ، $۳۳/۲۸$ ، $۳۳/۵۹$ ، $۳۳/۴۱$ ، $۳۳/۶۵$ و $۳۳/۵۳$ است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N نیز برابر با $۳۳/۴۸$ (سطح ۲) می‌باشد.

(۳) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار نیروی عمودی در آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ برابر با ۳/۵ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب برابر با $۳۳/۱۳$ ، $۳۳/۲۲$ ، $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۱۸$ ، $۳۳/۴۱$ و $۳۳/۵۳$ است که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با $۳۳/۲۹$ (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار نیروی عمودی در آزمایش‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ برابر با ۶ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برابر با $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۴۶$ ، $۳۳/۵۹$ ، $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۶۷$ و $۳۳/۶۵$ است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N نیز برابر با $۳۳/۵۴$ (سطح ۲) می‌باشد.

(۴) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار نیروی محوری در آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ برابر با ۳۴/۳۲ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب برابر با $۳۳/۱۳$ ، $۳۳/۲۲$ ، $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۱۸$ ، $۳۳/۴۱$ و $۳۳/۵۳$ است که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با $۳۳/۲۹$ (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار نیروی محوری در آزمایش‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ برابر با ۵۸/۸۴ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برابر با $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۴۶$ ، $۳۳/۵۹$ ، $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۶۷$ و $۳۳/۶۵$ است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N نیز برابر با $۳۳/۵۴$ (سطح ۲) می‌باشد.

(۵) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار زاویه راس در آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ برابر با ۸۰ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برابر با $۳۳/۱۳$ ، $۳۳/۲۲$ ، $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۱۸$ ، $۳۳/۴۱$ و $۳۳/۵۳$ است که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با $۳۳/۲۹$ (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار زاویه راس در آزمایش‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ برابر با ۱۰۰ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ به ترتیب برابر با $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۴۶$ ، $۳۳/۲۸$ ، $۳۳/۱۸$ ، $۳۳/۶۷$ و $۳۳/۵۳$ است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N نیز برابر با $۳۳/۴۶$ (سطح ۲) می‌باشد.

(۶) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار نرخ پیشروی در آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ برابر با ۱۰ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برابر با $۳۳/۱۳$ ، $۳۳/۶۸$ ، $۳۳/۴۶$ ، $۳۳/۲۳$ ، $۳۳/۴۱$ و $۳۳/۵۳$ است که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با $۳۳/۴۰$ (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار نرخ پیشروی در آزمایش‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ برابر با ۳۰ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ به ترتیب برابر با $۳۳/۲۲$ ، $۳۳/۲۸$ ، $۳۳/۵۹$ ، $۳۳/۱۸$ ، $۳۳/۶۷$ و $۳۳/۶۵$ است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N

نیز برابر با ۳۳/۴۳- (سطح ۲) می‌باشد.

(۷) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار زاویه مارپیچ در آزمایش‌های ۱، ۳، ۵، ۹، ۱۰ و ۱۱ برابر با ۳۴/۵ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۳، ۵، ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برابر با ۳۳/۱۳-، ۳۳/۶۸-، ۳۳/۲۸-، ۳۳/۶۷-، ۳۳/۴۱- و ۳۳/۶۵- است که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با ۳۳/۴۷- (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار زاویه مارپیچ در آزمایش‌های ۲، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۱۲ برابر با ۳۵/۲ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۲، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۱۲ به ترتیب برابر با ۳۳/۲۲-، ۳۳/۴۶-، ۳۳/۵۹-، ۳۳/۲۳-، ۳۳/۱۸- و ۳۳/۵۳- است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N نیز برابر با ۳۳/۳۶- (سطح ۲) می‌باشد.

(۸) با توجه به جداول ۴ و ۶، همان‌طور که دیده می‌شود، مقدار فلوت در آزمایش‌های ۱، ۳، ۶، ۸، ۱۱ و ۱۲ برابر با ۲ (سطح ۱) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۱، ۳، ۶، ۸، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب برابر با ۳۳/۱۳-، ۳۳/۶۸-، ۳۳/۵۹-، ۳۳/۱۸-، ۳۳/۶۵- و ۳۳/۵۳- است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N برابر با ۳۳/۴۶- (سطح ۱) می‌باشد. همچنین مقدار فلوت در آزمایش‌های ۲، ۴، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۱ برابر با ۳ (سطح ۲) بوده و نسبت S/N برای آزمایش‌های ۲، ۴، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برابر با ۳۳/۲۲-، ۳۳/۴۶-، ۳۳/۲۳-، ۳۳/۶۷- و ۳۳/۴۱- است، که میانگین این مقادیر نسبت S/N نیز برابر با ۳۳/۳۷- (سطح ۲) می‌باشد.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده در خصوص میانگین مقدار نسبت S/N مربوط به هر یک از سطوح پارامترهای مختلف ورودی، جدول پاسخ نسبت S/N جهت تعیین مقادیر بهینه در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷ جدول پاسخ نسبت S/N جهت تعیین مقادیر بهینه

فلوت	زاویه مارپیچ	نرخ پیشروی	زاویه راس	نیروی محوری	نیروی عمودی	قطر مته	سرعت دورانی	سطوح
۳۳/۴۶	۳۳/۴۷	۳۳/۴۰*	۳۳/۳۷*	۳۳/۲۹*	۳۳/۲۹*	۳۳/۳۵*	۳۳/۳۹*	سطح ۱
۳۳/۳۷*	۳۳/۳۶*	۳۳/۴۳	۳۳/۴۶	۳۳/۵۴	۳۳/۵۴	۳۳/۴۸	۳۳/۴۴	سطح ۲

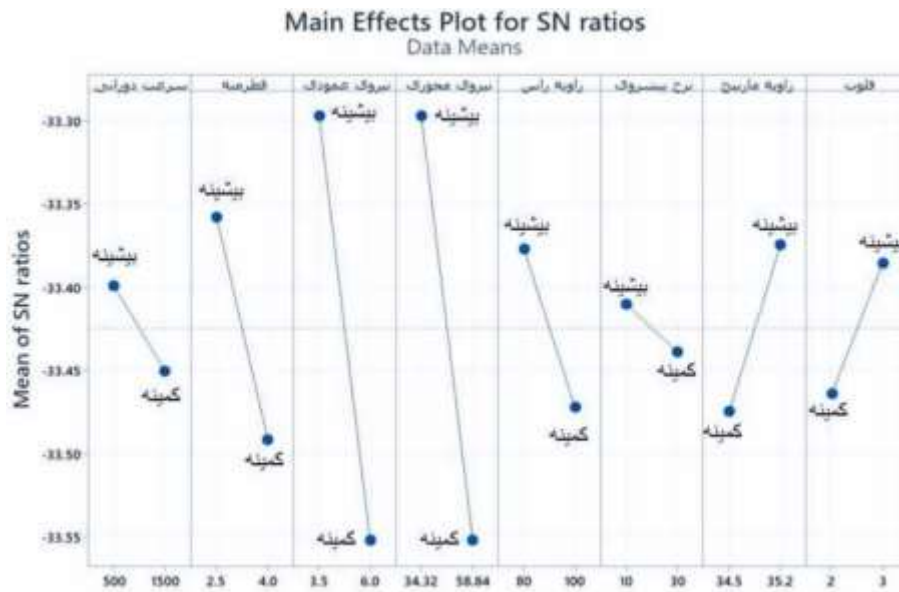
همان‌طور که در جدول ۷ قابل مشاهده می‌باشد، اعداد ستاره‌دار (*) مشخص شده در جدول ۷، سطوح بهینه را نشان می‌دهند، به‌عنوان مثال ۳۳/۳۹- یک عدد بزرگتر از ۳۳/۴۴- می‌باشد در نتیجه سطح بهینه برای سرعت دورانی همان مقدار عددی سطح ۱ یعنی ۵۰۰ می‌باشد، که بر اساس اطلاعات جدول ۷ مقادیر بهینه برای تمامی فاکتورهای ورودی در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸ پارامترهای مؤثر بر دمای سوراخکاری استخوان

پارامتر	مقدار بهینه
سرعت دورانی (rpm)	۵۰۰
قطر مته (mm)	۲/۵
نیروی عمودی (kg)	۳/۵
نیروی محوری (N)	۳۴/۳۲
زاویه راس (درجه)	۸۰
نرخ پیشروی (mm/min)	۱۰
زاویه مارپیچ (درجه)	۳۵/۲
فلوت	۳

برای اطمینان از بهینه‌سازی صورت‌گرفته، در نرم‌افزار مینی تب با استفاده از Analyze Taguchi Design جدول آزمایش‌ها

و نتایج به دست آمده را نیز تحلیل و بهینه ترین مقادیر، برای فاکتورهای مؤثر را به دست آوردیم، که مقادیر بهینه بر اساس تحلیل نرم افزار در تصویر ۷ قابل مشاهده می باشد.



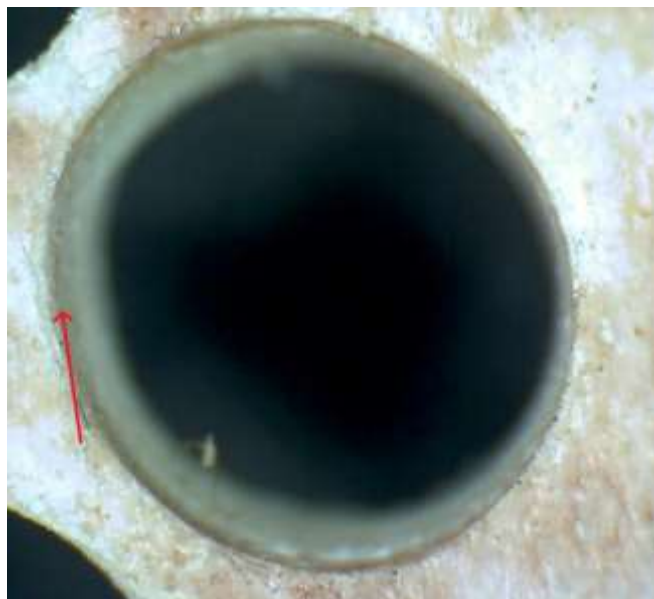
شکل ۷ مقادیر بهینه هر فاکتور

مطابق شکل ۷، بر اساس تحلیل نرم افزار، همان طور که قابل مشاهده است، سرعت دورانی ۵۰۰ rpm، بیشینه مقدار بهینگی و سرعت دورانی ۱۵۰۰ rpm، کمینه مقدار بهینگی فاکتور ورودی سرعت دورانی می باشد و با توجه به اینکه سرعت دورانی ۵۰۰ rpm بیشینه مقدار بهینگی بوده، بنابراین بهینه ترین مقدار سرعت دورانی، ۵۰۰ rpm می باشد. همچنین بیشینه مقادیر سایر فاکتورهای ورودی نیز همان بهینه ترین مقدار فاکتورهای ورودی می باشد که مقادیر بهینه تمامی فاکتورها در جدول ۸ آورده شده است.

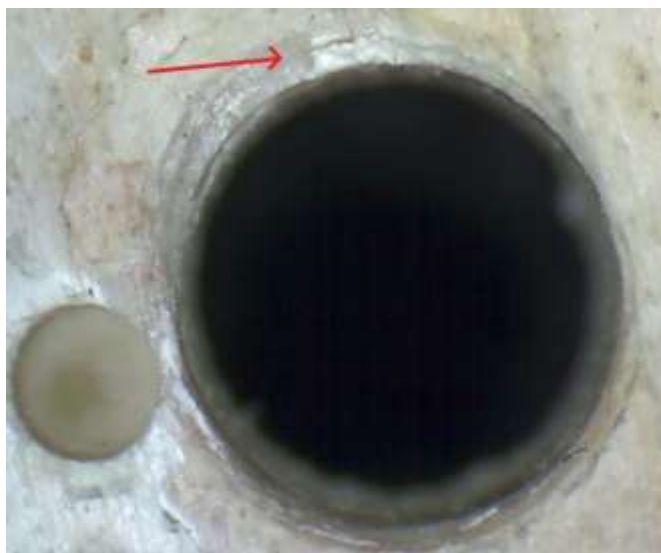
با مقایسه نتایج به دست آمده از بهینه سازی صورت گرفته و نتایج به دست آمده از بهینه سازی نرم افزاری می توان گفت فرایند بهینه سازی به درستی انجام شده است. همچنین با اندازه گیری دمای حاصل از آزمایش سوراخکاری استخوان بر اساس مقادیر بهینه به دست آمده برای هر فاکتور بر روی استخوان ران گاو که مقدار آن ۴۵/۷۶ درجه می باشد، می توان گفت بر اساس نتیجه به دست آمده از این آزمایش، بهینه سازی مقادیر هر فاکتور نیز به درستی صورت پذیرفته است.

۳-۱- پارامتر مؤثر بر رشد ترک استخوان

با توجه به اینکه در ۱۲ آزمایش صورت گرفته در بخش قبل و تحلیل نتایج، بهینه ترین مقدار نیروی محوری ۳۴/۳۲N می باشد. لذا با توجه به این موضوع و نیز تاثیر گذاری نیروی محوری به عنوان یک پارامتر مؤثر بر رشد ترک استخوان، دو آزمایش سوراخکاری استخوان با اعمال دو نیروی ۳۴/۳۲N و ۵۸/۸۴N و همچنین بر اساس مقادیر بهینه به دست آمده برای هر پارامتر یعنی سرعت دورانی ۵۰۰ rpm، قطرته ۲/۵mm، زاویه راس ۸۰ درجه، نرخ پیشروی ۱۰ mm/min، زاویه مارپیج ۳۵/۲ درجه و فلوت ۳ انجام شد که مطابق شکل ۸ و شکل ۹ می توان گفت با اعمال نیروی ۵۸/۸۴N میزان زبری و ترک های استخوان به میزان قابل توجهی افزایش یافته است، لذا بر اساس این موضوع و بر اساس نتایج به دست آمده از بهینه سازی بخش قبل می توان نتیجه گرفت که بهینه ترین مقدار نیروی محوری همان ۳۴/۳۲N می باشد.



شکل ۸ سوراخکاری با اعمال نیروی ۳۴/۳۲N



شکل ۹ سوراخکاری با اعمال نیروی ۵۸/۸۴N

۴- نتیجه‌گیری

براساس نتایج به‌دست آمده و همچنین نتایج پژوهش‌های صورت گرفته و تحلیل آن‌ها و نیز بررسی پارامترهای مؤثر بر دمای فرایند سوراخکاری استخوان و پارامتر مؤثر بر رشد ترک‌های استخوانی در اطراف محل سوراخکاری استخوان در جراحی‌های ارتوپدی، می‌توان گفت با بهینه‌سازی تمامی این پارامترها می‌توان دمای فرایند سوراخکاری استخوان و رشد ترک‌های استخوانی در اطراف محل سوراخکاری استخوان را کنترل نموده و تا حد بسیار زیادی فرایند سوراخکاری استخوان را بهبود بخشید و سبب افزایش دقت عمل‌های جراحی ارتوپدی شد. همچنین براساس تحلیل نرم‌افزار و با انجام فرایند بهینه‌سازی، مقادیر بهینه برای هر یک از پارامترها به‌صورت زیر می‌باشد:

سرعت دورانی ۵۰۰rpm، قطر مته ۲/۵mm، نیروی عمودی ۳/۵kg، نیروی محوری ۳۴/۳۲N، زاویه راس ۸۰ درجه، نرخ پیشروی ۱۰mm/min، زاویه مارپیچ ۳۵/۲ درجه و فلوت ۳، که با اندازه‌گیری دمای حاصل از آزمایش سوراخکاری استخوان

صورت گرفته بر اساس این مقادیر بهینه بر روی استخوان ران گاو که مقدار آن ۴۵/۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، می‌توان از نتایج به دست آمده در جهت جلوگیری از بروز نکرروز حرارتی در عمل‌های جراحی ارتوپدی استفاده نمود. همچنین با توجه دو آزمایش سوراخکاری صورت گرفته با اعمال دو نیروی ۳۴/۳۲N و ۵۸/۸۴N همانطور که در شکل ۸ و شکل ۹ قابل مشاهده است در آزمایشی که با اعمال نیروی ۵۸/۸۴N صورت گرفته است، برخلاف آزمایش صورت گرفته با اعمال نیروی ۳۴/۳۲N، میزان زبری و ترک‌های استخوان به میزان قابل توجهی افزایش یافته است؛ لذا بر اساس این موضوع و بر اساس نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌ترین مقدار نیروی محوری همان ۳۴/۳۲N می‌باشد.

Authorship Contribution Statement

Reza Saeidi Abu-es-haghi

Biography: Ms.c student in Electrical Engineering at Arak University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak, Iran

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Farbod Setoudeh



Biography: Assistant Professor in the Department of Electrical Engineering at Arak University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak, Iran

Contribution Statement: Conceptualization, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

Dr. Vahid Tahmasbi



Biography: Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering at Arak University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak, Iran

Contribution Statement: Conceptualization, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, review & editing, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

Dr. Mohammad Mohammadian

Biography: Assistant Professor in the Department of Electrical Engineering at Arak University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak, Iran

Contribution Statement: Resources, Supervision, Project administration, Investigation

Ghodratollah Taheri

Biography: Ms.c student in Mechanical Engineering at Arak University of Technology, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Arak, Iran

Contribution Statement: Conceptualization, Validation, Resources

۵- مراجع

- [1] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M. Investigation, sensitivity analysis, and multi-objective optimization of effective parameters on temperature and force in robotic drilling cortical bone. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2017;231:1012-24.
- [2] Singh G, Jain V, Gupta D. Multi-objective performance investigation of orthopaedic bone drilling using Taguchi membership function. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2017;231:1133-9.
- [3] Sousanabadi Farahani A, Khalili O, Torabi A. Sensitivity analysis of effective parameters on bone drilling force by using E-fast method. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(1):83-94.
- [4] Safari M, Tahmasbi V, Hassanpour P, Zolfaghari M. Experimental investigation, sensitivity analysis and optimization on the effect of drill bit's point angle and helix angle on cortical bone drilling process temperature *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*. 2022; 52(1):11-19.
- [5] 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.
- [6] Shakouri E, Sadeghi M H, Maerefat M, Karafi M, Memarpour M. Experimental and Analytical Investigation of Thrust Force In Ultrasonic Assisted Drilling of Bone. *Modares Mechanical Engineering* 2014; 14 (6) :194-200.
- [7] Sarparast M, Ghoreishi M, Jahangirpoor T, Tahmasbi V. Modelling and optimisation of temperature and force behaviour in high-speed bone drilling. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 2019;33:1616-25.
- [8] Jamil M, Khan AM, Hegab H, Mia M, Gupta MK. Modeling, multi-objective optimization and cost estimation of bone drilling under micro-cooling spray technique: an integrated analysis. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2020;14:435-50.
- [9] Garg A, Shankhwar K, Jiang D, Vijayaraghavan V, Panda BN, Panda SS. An evolutionary framework in modelling of multi-output characteristics of the bone drilling process. *Neural Computing and Applications*. 2018;29:1233-41.
- [10] Tai BL, Palmisano AC, Belmont B, Irwin TA, Holmes J, Shih AJ. Numerical evaluation of sequential bone drilling strategies based on thermal damage. *Medical Engineering & Physics*. 2015;37:855-61.
- [11] Tsiagadigui JG, Ndiwe B, Yamben M-AN, Fotio N, Belinga FE, Njeugna E. The effects of multiple drilling of a bone with the same drill bit: thermal and force analysis. *Heliyon*. 2022;8.
- [12] Mistic T, Markovic A, Todorovic A, Colic S, Miodrag S, Milicic B. An in vitro study of temperature changes in type 4 bone during implant placement: bone condensing versus bone drilling. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*. 2011;112:28-33.
- [13] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M. Investigation, sensitivity analysis, and multi-objective optimization of effective parameters on temperature and force in robotic drilling cortical bone. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 2017;231(11): 1012-1024.