Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal

http://masm.araku.ac.ir

ISSN: 2783-4220

Sensitivity analysis of effective parameters on bone drilling force by using E-fast method

Amin Sousanabadi farahani [a*], Omid Khalili [b], Ali Torabi [c]

[a] Department of Mechnical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 1684613114, Iran
[b] Department of Faculty Engineering, Tafresh University, Tafresh, 3951879611, Iran
[c] Department of Mechnical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 3848177584, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: 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.

https://10.52547/masm.3.1.83.

KEYWORDS

Drilling,
Machining force,
Biomedical Engineering,
Sensitivity analysis,
E-Fast.

ABSTRACT

Drilling is one of the most common methods during surgery on human bones with the aim of keeping broken bones together. Due to the complexity of the material under the machining process and the sensitivity of the process, it is one of the most important and widely used mechanical methods in the field of medical engineering. Cracking, breaking and serious damage to bone tissue is a problem that may arise with increased machining forces during orthopedic operations. In this article, a second-order linear regression equation was presented in order to predict the behavior of drilling forces in terms of feed speed, tool rotational speed, drill diameter and their effective interactions. Also, to check the influence of each parameter, E-fast sensitivity analysis method was used. According to the obtained results, the rotational speed of the drill is the most effective input parameter on bone drilling forces with 57% influence. After that, the feed rate with 23% and the cutting depth with 20% are the parameters affecting the force in the bone drilling process.

Extended Abstract

1. Introduction

Due to driving accidents, Sports injuries, old age and... Performing orthopedic surgeries, it is one of the main methods of treating bone diseases [1]. Purpose of bone fracture surgery is to hold the bones together so that the broken member regains its previous place. In surgery, mainly to put bones together it is necessary to perform the process of drilling and implantation [2]. During bone drilling studying and predicting the behavior of drill axial force it is very important during surgery. If the axial force is excessive, the drill may penetrate through the distal cortex and damage the surrounding soft environment or if the torque of the drill is more than the permissible limit, there is a tendency to jam the drill or even break it in the bone [3]. An increase in temperature causes thermal necrosis and the destruction of bone cells. Also, this increase in temperature will loosen the screws of the implant and damage the body [7]. Increasing the force applied to the bone tissue causes the creation of micro cracks around the hole and damage to the bone tissue this case also causes the failure of surgery and increases the duration of treatment and delays the complete recovery of the patient [9].

According to the results of the studies, researchers have not yet reached a comprehensive and accurate opinion about how the force behaves during bone drilling. Therefore, studying the factors affecting drilling forces is necessary and unavoidable.

* Corresponding author. Tel.: 08633400911
E-mail address: sousanabadi@arakut.ac.ir
DOI: https://10.52547/masm.3.1.83.
Received: May 16, 2023; Received in revised form: May 31, 2023; Accepted: June 15, 2023.
© Author

2. Modeling and experiment methods

In this research, taking into account the rotational speed of the tool, the progress rate and the diameter of the tool as input variables a total of 27 full factorial experiments have been conducted and it is modeled by the response surface method and using the central composite design. E-Fast sensitivity analysis method was used to express the influence of each factor. Sensitivity analysis investigates the uncertainty in the output of a model and it states how this uncertainty in the output is related to the uncertainty in the input

The regression equation governing bone drilling force is equation 1.

$$\text{Cutting Force N} = -149.2 - 0.04296*V - 0.138*f - 21.97*D + 0.000012*V*V + 3.684*D*D - 0.000106*V*f - 0.002633*V*D + 0.259*f*D \quad (1)$$

3. Sensitivity analysis of input parameters on drilling force

In this section according to the modeling done and matching it to the experimental data and considering the effective factors in the model, tried to explain the effect of rotational speed, feed rate and tool diameter on the axial force behavior.

3.1 The effect of the rotational speed of the tool on the drilling force

According to Figure 1, as the rotational speed of the tool increases, the drilling force decreases. The reason for this is that by increasing the rotational speed of the tool, the chip is more easily removed from the hole. Therefore, it prevents the chip from getting stuck in the hole and increases the friction between the hole wall and the drill bit. For this reason, the axial force of the drill decreases during bone drilling [23].

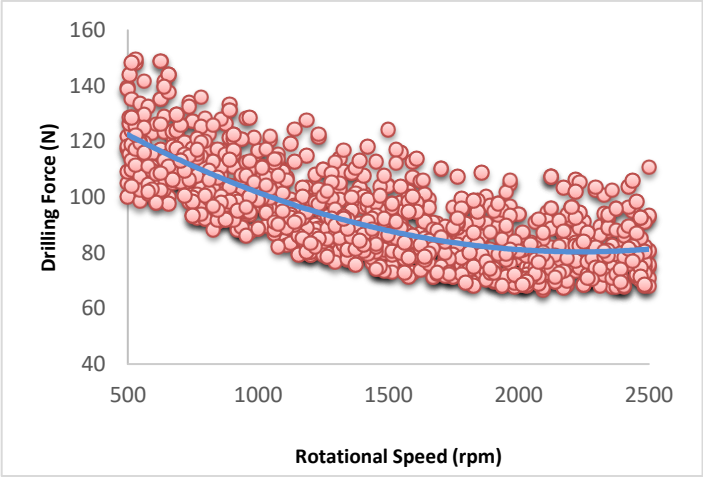


Figure 1. Effect of rotational speed on force

3.2 The effect of tool feed speed on the drilling force

With the increase in the feed rate due to the increase in the thickness of the deformed chip, The force on the bone increases. The lower the feed rate and penetration speed of the tool in the bone, the more chip will come out. Also, the thickness of the deformed chip is reduced and finally, the forces entering the bone are reduced. This is consistent with Figure 2.

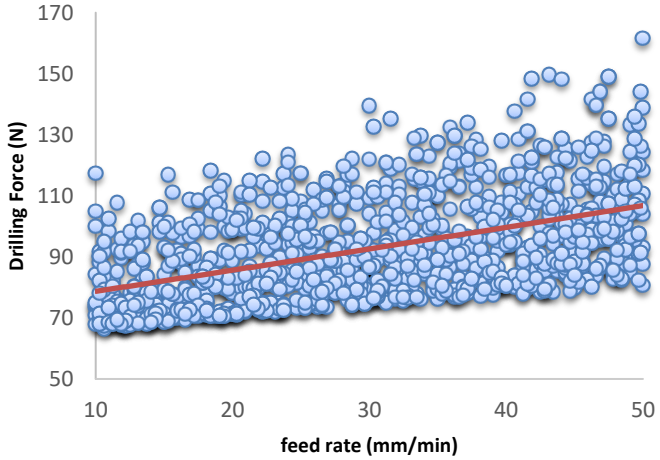


Figure 2. Effect of feed rate on force

3.3 Effect of tool diameter on drilling force

According to Figure 3, as the diameter of the drill bit increases, the drilling force increases with a slight slope. As the diameter of the tool increases, the contact surface between the tool and the bone increases with the ratio of the square of the diameter and as a result, the created forces increase.

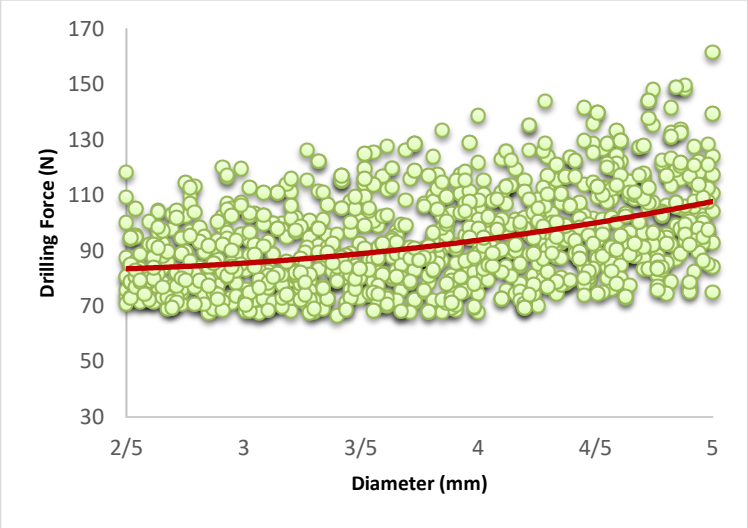


Figure 3. Effect of tool diameter on force

4. Summary of the sensitivity analysis using the fast method of effective parameters in bone drilling

In general, in examining the sensitivity of force behavior during bone drilling, the rotational speed of the drill is the most effective input parameter on bone drilling forces with 57% influence. In addition, the feed rate of 23% and the cutting depth of 20% are other effective parameters of the force in the bone drilling process.

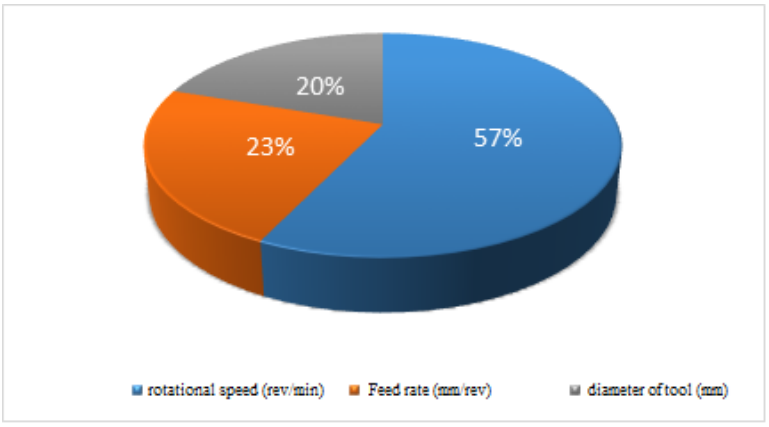


Figure 4. The effect of drilling parameters in E-fast method

5. conclusion

- By increasing the rotational speed of the drill, the drilling forces are reduced due to the ease of the chip exiting the hole.
- Due to the increase in the thickness of the deformed chip when the feed is increased, we will see an increase in the drilling forces.
- Drilling forces will increase with increasing drill diameter.
- The rotational speed of the drill is the most effective input parameter on bone drilling forces with 57% influence. In addition, the feed rate of 23% and the cutting depth of 20% are other effective parameters of the force in the bone drilling process.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند

شاپا: ۴۲۲۰-۲۷۸۳

مجله علمی مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند

آنالیز حساسیت عوامل تأثیرگذار بر نیروی سوراخ‌کاری استخوان به روش ای-فست

امین سوسن آبادی فراهانی[الف*]، علی ترابی[ب]، امید خلیلی[ج]

[الف] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران، sousanabadi@arakut.ac.ir

[ب] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، torabyali1991@gmail.com

[ج] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، omid.khalili1992@gmail.com

واژگان کلیدی

سوراخ‌کاری، نیروی ماشین‌کاری، مهندسی پزشکی، آنالیز حساسیت، ای فست.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵

چکیده

سوراخ‌کاری یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها در هنگام عمل جراحی بر روی استخوان انسان با هدف ثابت نگه‌داشتن استخوان‌های شکسته شده در کنار هم می‌باشد. به جهت پیچیدگی ماده تحت فرایند ماشین‌کاری و حساسیت فرایند، یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های مکانیکی در حوزه مهندسی پزشکی است. ایجاد ترک، شکست و آسیب جدی به بافت استخوان مشکلی است که ممکن است با افزایش نیروهای ماشین‌کاری در حین عمل‌های ارتوپدی به وجود آید. در این مقاله یک معادله خطی رگرسیون مرتبه دوم به‌منظور پیش‌بینی رفتار نیروهای سوراخ‌کاری برحسب سرعت پیشروی، سرعت دورانی ابزار، قطر مته و برهم‌کنش‌های مؤثر آن‌ها ارائه شد. همچنین برای بررسی میزان اثرگذاری هریک از پارامترها، از روش آنالیز حساسیت ای-فست استفاده گردید. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده سرعت دورانی مته با ۵۷ درصد تأثیر، اثرگذارترین پارامتر ورودی بر نیروهای سوراخ‌کاری استخوان است. پس‌ازآن نرخ پیشروی با ۲۳ درصد و عمق برش با ۲۰ درصد پارامترهای مؤثر بر نیرو در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان هستند.

۱- مقدمه

به علت سوانح رانندگی، آسیب‌های ورزشی، کهولت سن و... انجام جراحی‌های ارتوپدی[1] یکی از اصلی‌ترین روش‌های درمان بیماری‌های استخوانی است [۱]. هدف از انجام جراحی شکستگی استخوان، در کنار یکدیگر نگه‌داشتن استخوان‌ها است تا عضو شکسته شده موقعیت مکانی قبلی خود را به دست آورد. در عمل‌های جراحی عمدتاً برای کنار هم قرار دادن استخوان‌ها نیاز به انجام فرآیند سوراخ‌کاری و ایمپلنت گذاری است [۲]. در هنگام سوراخ‌کاری استخوان مطالعه و پیش‌بینی رفتار نیروی محوری دریل در حین جراحی بسیار با اهمیت می‌باشد. اگر نیروی محوری بیش‌ازحد باشد، ممکن است مته از طریق قشر دیستال فرو برود و به محیط نرم اطراف آن آسیب برساند و یا اگر گشتاور مته بیشتر از حد مجاز باشد، تمایل به گیر کردن مته و یا حتی شکستن در استخوان وجود دارد [۳]. بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل عددی می‌تواند تا حد قابل‌توجهی از وقوع اشتباهات در حین عمل جراحی و آسیب زدن به استخوان و بافت‌های پیرامونی جلوگیری نماید [۴]. لوردرو و همکاران توانستند با استفاده از یک سیستم رباتیکی روش اعمال نیرو به بافت استخوان را بهبود بخشند [۵]. رفتار دما و نیرو در هنگام ماشین‌کاری استخوان بسیار حائز اهمیت است و برای رسیدن به نتیجه بهینه باید مورد مطالعه دقیق قرار گیرد [۶]. افزایش دما باعث ایجاد نکروز

[1] Orthopedic surgery

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۸۶-۳۳۴۰۰۹۱۱

آدرس پست الکترونیک: sousanabadi@arakut.ac.ir

حرارتی و از بین رفتن سلول‌های استخوان می‌شود. همچنین این افزایش دما باعث شل شدن پیچ‌های ایمپلنت و آسیب رساندن به بدن خواهد شد [۷]. محققان موفق شدند با ارائه یک الگوریتم کنترل نیرو، دقت سوراخ‌کاری استخوان را افزایش دهند [۸]. افزایش نیروی اعمالی به بافت استخوان سبب ایجاد میکرو ترک‌ها در اطراف سوراخ و آسیب به بافت استخوان می‌گردد و این مورد نیز موجب شکست عمل جراحی و افزایش مدت زمان درمان و تأخیر در بهبودی کامل بیمار می‌گردد [۹]. همچنین اعمال نیروی بیش‌ازحد ممکن است باعث شکسته شدن مته در داخل استخوان شود. با توجه به ارتباط مستقیم بین اندازه نیروهای سوراخ‌کاری و حرارت ایجاد شده، هر مقدار که نیروهای فرآیند سوراخ‌کاری استخوان بالاتر باشد، گرمای تولیدی در موضع سوراخ‌کاری نیز بیشتر خواهد بود. تأثیر حرارت بر بافت استخوان وابسته به دو عامل درجه حرارت و مدت زمان مواجهه با آن دما می‌باشد [۱۰, ۱۱]. درصورتی‌که درجه حرارت در هنگام سوراخ‌کاری استخوان از حدی فراتر رود یا مدت زمان سوراخ‌کاری طولانی شود امکان آسیب رسیدن به بافت‌های زنده بدن بیشتر می‌گردد [۱۱]. محققان بیان داشتند که افزایش سرعت دورانی ابزار موجب کاهش نیرو در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان می‌گردد [۱۲-۱۵]، اما لی و همکاران ابراز داشتند که افزایش سرعت برشی موجب افزایش نیرو در حین فرایند می‌گردد [۱۶]. هانگ و همکاران کمترین مقدار سرعت دورانی و پیشروی مته را جهت دستیابی به کمترین میزان نیرو ارائه نمودند [۱۷]. یودیلجاک و همکاران دریافتند که سرعت دورانی ابزار نقش بسیار کمی در تغییرات نیروی محوری داشته و فاکتوری کم تأثیر است [۱۸].

مطابق با نتایج حاصل از مطالعات انجام شده، پژوهشگران هنوز درباره‌ی چگونگی رفتار نیرو در هنگام سوراخ‌کاری استخوان به یک نظر جامع و دقیق نرسیده‌اند. لذا مطالعه عوامل مؤثر بر نیروهای سوراخ‌کاری امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این پژوهش با مطالعه بر روی پارامترهای اصلی سوراخ‌کاری یعنی سرعت دورانی مته، نرخ پیشروی و قطر ابزار برای بیان میزان تأثیرگذاری هریک از عوامل از روش آنالیز حساسیت ای فست[2] استفاده شد. آنالیز حساسیت عدم قطعیت در خروجی یک مدل را بررسی نموده و بیان می‌نماید که این عدم قطعیت در خروجی چگونه به عدم قطعیت در ورودی مرتبط می‌گردد. این روش برای شناسایی پارامترهای مؤثر و غیر مؤثر در خروجی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا طراحی آزمایش مدل مورد بررسی تشریح شده و سپس به تشریح روش آنالیز حساسیت ای فست و چگونگی انجام آنالیز حساسیت پرداخته می‌شود.

۲-۱- طراحی آزمایش‌ها

هدف استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها، شناسایی و تشخیص بهینه‌ترین سطوح برای پارامترهای ورودی تأثیرگذار بر فرآیند تولید یک محصول است تا میزان خطاها و هزینه‌ها کاهش‌یافته و کیفیت افزایش پیدا کند. روش سطح پاسخ[3]، به‌عنوان یکی از روش‌های طراحی آزمایش، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای ایجاد توابع ریاضی به‌منظور یافتن رابطه منطقی بین پارامترهای ورودی و خروجی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید مختلف به کار می‌رود [۱۹].

متغیرهای ورودی فرآیند سرعت برشی، پیشروی و قطر مته در نظر گرفته شده است. درنهایت تأثیر متغیرهای ورودی بر نیروی محوری مته مورد بررسی قرارگرفته است.

۲-۲- مواد و روش‌ها

در بررسی رفتار نیرو در فرایند سوراخ‌کاری استخوان، پارامترهای قطر ابزار، نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار متغیرهای ورودی فرآیند در نظر گرفته شده است. همچنین بیشترین مقدار نیروی ایجاد شده در بافت استخوان در حین سوراخ‌کاری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در انجام آزمایش‌ها از استخوان تازه ران گاو به طول حدوداً ۹۰ میلی‌متر استفاده شده است.

[2] E-Fast
[3] Response Surface Methodology

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استخوان گاو به استخوان‌های موجود در بدن انسان شبیه می‌باشد. پارامترهای سوراخ‌کاری از قبیل سرعت دورانی و قطر مته بر اساس مقالات موجود و بازه‌های کاری در حین عمل‌های ارتوپدی انتخاب شد [۲۰].

به دلیل افزایش دقت مطالعه، سعی بر آن شده است تا از زمان زنده‌بودن بافت استخوان مدت زمان زیادی نگذشته باشد تا شباهت بیشتری به فرآیند سوراخ‌کاری استخوان در حین عمل جراحی انسان داشته باشد.

۲-۳- مدل‌سازی و شیوه انجام آزمایش

در این پژوهش با در نظر داشتن سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار به‌عنوان متغیرهای ورودی تعداد ۳۳ آزمایش فول فاکتوریال صورت گرفته و به روش سطح پاسخ و با استفاده از طرح مرکب مرکزی مدل‌سازی شده است. در جدول ۱ نیز مقادیر متغیرهای خروجی برای هر ۲۷ آزمایش آورده شده است. در انجام آزمایش‌ها به‌منظور بالا بردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه بار تکرار شده است و میانگین بیشترین نیروی ایجاد شده به‌عنوان نیروی ایجاد شده در بافت برای هر آزمایش گزارش شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش‌بینی‌نشده آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شده است [۲۰].

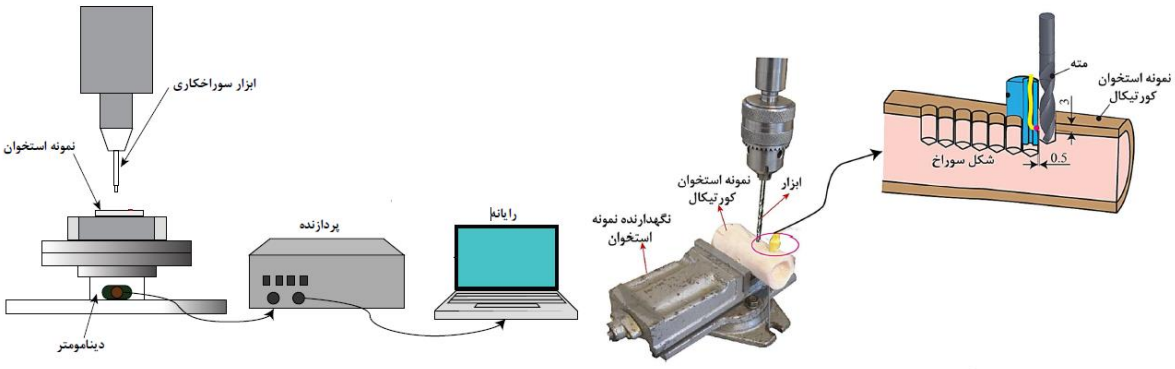
با استفاده از روش سطح پاسخ یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای پاسخ خروجی (نیروی سوراخ‌کاری) برحسب متغیرهای ورودی (پارامترهای ماشین‌کاری) ارائه شد.

معادله‌ی رگرسیون حاکم بر نیروی سوراخ‌کاری استخوان به‌صورت رابطه ۱ است.

$$\text{Cutting Force N} = -149.2 - 0.04296*V - 0.138*f - 21.97*D + 0.000012*V*V + 3.684*D*D - 0.000106*V*f - 0.002633*V*D + 0.259*f*D \quad (1)$$

جدول ۱ آزمایش‌های انجام شده و مقادیر نیروی اندازه‌گیری شده

شماره آزمایش	سرعت دوران (rpm)	پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)	نیرو (N)	شماره آزمایش	سرعت دوران (rpm)	پیشروی (mm/min)	قطر مته (mm)	نیرو (N)
۱	۵۰۰	۱۰	۲.۵	۹۸.۴	۱۵	۲۵۰۰	۳۰	۴	۸۲
۲	۱۵۰۰	۱۰	۲.۵	۷۰.۸	۱۶	۵۰۰	۳۰	۵	۱۳۹.۲
۳	۲۵۰۰	۱۰	۲.۵	۶۶.۷	۱۷	۱۵۰۰	۳۰	۵	۱۰۰.۱
۴	۵۰۰	۱۰	۴	۱۰۳.۲	۱۸	۲۵۰۰	۳۰	۵	۸۹.۱
۵	۱۵۰۰	۱۰	۴	۷۴.۸	۱۹	۵۰۰	۵۰	۲.۵	۱۱۶.۴
۶	۲۵۰۰	۱۰	۴	۶۸.۸	۲۰	۱۵۰۰	۵۰	۲.۵	۸۶.۸
۷	۵۰۰	۱۰	۵	۱۱۹.۲	۲۱	۲۵۰۰	۵۰	۲.۵	۷۶.۹
۸	۱۵۰۰	۱۰	۵	۸۳.۲	۲۲	۵۰۰	۵۰	۴	۱۳۴.۸
۹	۲۵۰۰	۱۰	۵	۷۵.۶	۲۳	۱۵۰۰	۵۰	۴	۱۰۳.۳
۱۰	۵۰۰	۳۰	۲.۵	۱۱۳.۳	۲۴	۲۵۰۰	۵۰	۴	۹۱.۸
۱۱	۱۵۰۰	۳۰	۲.۵	۸۵.۵	۲۵	۵۰۰	۵۰	۵	۱۶۴.۸
۱۲	۲۵۰۰	۳۰	۲.۵	۷۹.۲	۲۶	۱۵۰۰	۵۰	۵	۱۲۴.۱
۱۳	۵۰۰	۳۰	۴	۱۲۲.۴	۲۷	۲۵۰۰	۵۰	۵	۱۱۲.۱
۱۴	۱۵۰۰	۳۰	۴	۹۱.۲					



شکل ۱ روش انجام آزمایش سوراخ‌کاری استخوان

۲-۴- روش‌های تحلیل حساسیت ای فست

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

- تعریف ورودی و نوع توزیع هریک از ورودی‌ها
- تولید نمونه برای مقادیر ورودی
- محاسبه‌ی خروجی مدل برای هر یک از مجموعه نمونه‌های ورودی
- محاسبه‌ی تأثیر هر فاکتور ورودی در خروجی

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

روش ای فست یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد. کاربرد روش ای-فست در چند مرحله ارائه می‌شود. این روش همانند روش سوبل بر پایه‌ی واریانس است و مستقل از هرگونه فرض (خطی و یکنواخت) بین ورودی‌ها و خروجی(ها) می‌باشد. این روش برخلاف روش سوبل که برای به دست آوردن واریانس کلی و واریانس‌های جزئی از انتگرال‌های چندبعدی استفاده می‌کرد، با تعریف تابع انتقال، انتگرال‌های چندبعدی را به انتگرال‌های تک‌بعدی تبدیل کرده و موجب ساده‌سازی روند محاسبه شاخص‌های حساسیت می‌گردد. روش ای فست فضای n بعدی فاکتورهای ورودی (K^n) را با استفاده از منحنی جست‌وجو تعریف‌شده با مجموعه‌ای از معادلات پارامتریک، کاوش می‌کند [۲۱, ۲۲].

$$x_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} arcsin(sin(\omega_i s + \phi_i)) \quad (۲)$$

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

$$V(Y)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f^2(s)ds-\left[\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}f(s)ds\right]^2 \approx \sum_{j=-\infty}^{\infty}(A_j^2+B_j^2)-(A_0^2+B_0^2)\approx 2\sum_{j=1}^{N}(A_j^2+B_j^2) \quad (۳)$$

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

$$\mathrm{A_j}=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\mathrm{f(s)\cos(js)ds} \quad (۴)$$

$$\mathrm{B_j}=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\mathrm{f(s)\sin(js)ds} \quad (۵)$$

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

$$V_i=\sum_{p\in Z^0}(A_{p\omega_i}^2+B_{p\omega_i}^2)=2\sum_{p=1}^{\infty}(A_{p\omega_i}^2+B_{p\omega_i}^2) \quad (۶)$$

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

$$ST_i=1-\frac{V_{-i}}{V} \quad (۷)$$

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

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

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

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

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

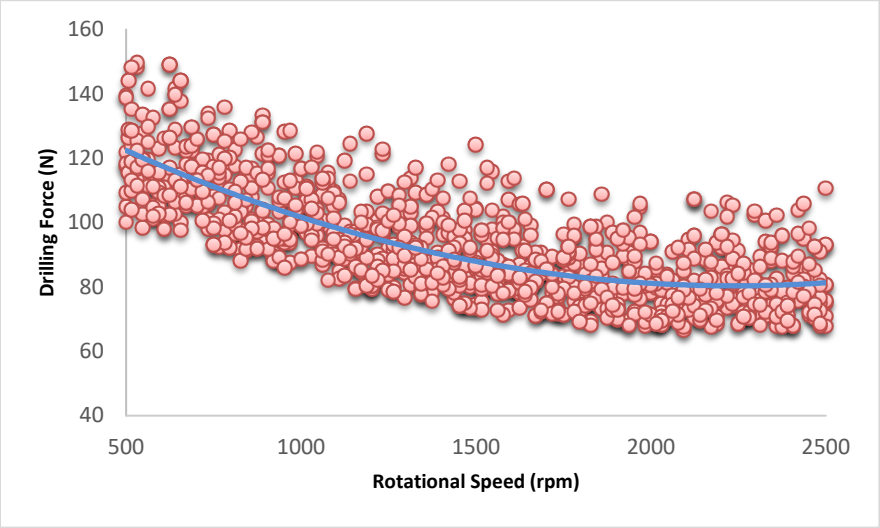
محاسبه اندیس‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی به‌وسیله تحلیل فوریه برای خروجی

۳- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی نیروی سوراخ‌کاری

در این بخش با توجه به مدل‌سازی انجام شده و تطابق آن بر داده‌های آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن فاکتورهای مؤثر در مدل، تلاش شده است تا نقش سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار در رفتار نیروی محوری تشریح گردد. برای انجام این منظور از روش آنالیز حساسیت ای- فست به کمک برنامه نویسی در نرم‌افزار متلب استفاده گردید.

۳-۱- تأثیر سرعت دورانی ابزار بر نیروی سوراخ‌کاری

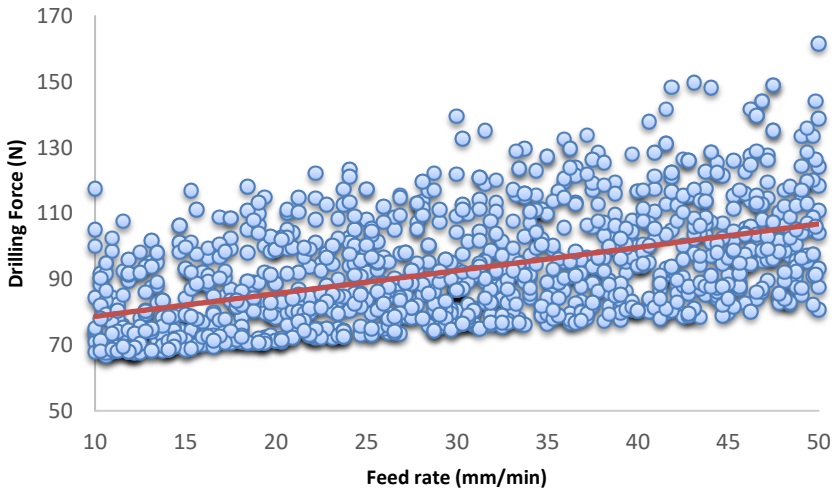
مطابق با شکل ۲ با افزایش سرعت دورانی ابزار، نیروی سوراخ‌کاری کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که با افزایش سرعت دورانی ابزار، براده راحت‌تر از سوراخ خارج می‌شود، لذا از گیر کردن براده در سوراخ و افزایش اصطکاک بین دیواره سوراخ و مته جلوگیری می‌شود. به همین علت نیروی محوری مته در هنگام سوراخ‌کاری استخوان کاهش می‌یابد [۲۳].



شکل ۲ رفتار نیروی سوراخ‌کاری برحسب تغییرات سرعت دورانی ابزار

۳-۲- تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر نیروی سوراخ‌کاری

با افزایش نرخ پیشروی به علت افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته، نیروی وارد بر استخوان افزایش پیدا می‌کند. هرچه نرخ پیشروی و سرعت نفوذ ابزار در استخوان کمتر باشد، خروج براده با سهولت بیشتر اتفاق خواهد افتاد. همچنین ضخامت براده تغییر شکل یافته کمتر شده و نهایتاً نیروهای وارده به استخوان کاهش می‌یابد. این مسئله با شکل ۳ به‌خوبی تطابق دارد. با افزایش نیروهای سوراخ‌کاری امکان شکسته شدن مته و یا آسیب به استخوان وجود دارد، لذا در حد امکان باید تلاش شود نیروهای سوراخ‌کاری در حین عمل جراحی از حد معینی تجاوز نکند.

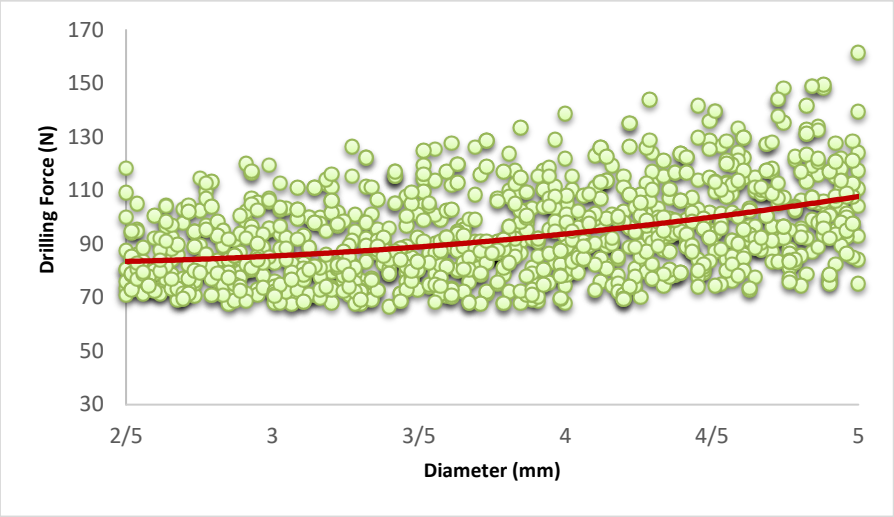


شکل ۳ رفتار نیروی سوراخ‌کاری برحسب تغییرات نرخ پیشروی

۳-۳- تأثیر قطر ابزار بر نیروی سوراخ‌کاری

همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است. با افزایش قطر مته نیروی سوراخ‌کاری با شیب ملایمی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش قطر ابزار سطح تماس بین ابزار و استخوان با نسبت مجذور قطر افزایش پیدا کرده و درنتیجه نیروهای ایجادشده افزایش می‌یابد. استفاده از مته‌های با قطر بیشتر نه‌تنها باعث ازدیاد نیروهای سوراخ‌کاری شده بلکه موجب افزایش طول دوره درمان نیز می‌گردد. لذا در صورت امکان تلاش بر آن است از فرآیندهایی همچون میکرو سوراخ‌کاری با قطر مته‌های بسیار کوچک‌تر در

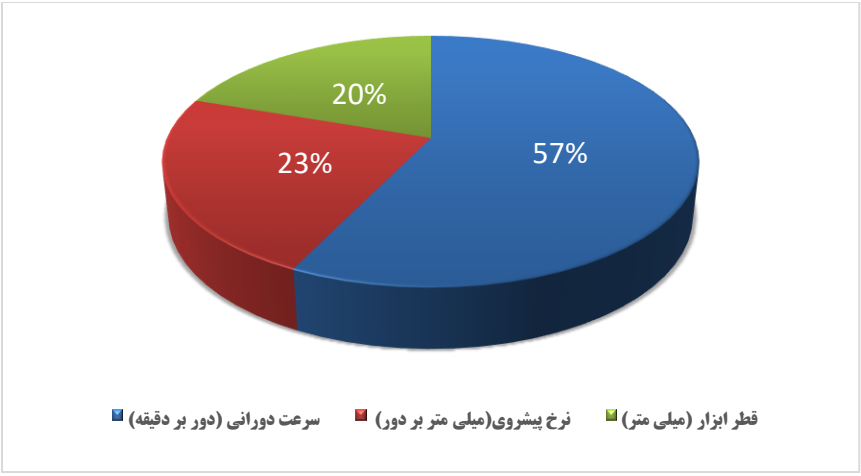
عمل‌های ارتوپدی استفاده گردد [۲۴].



شکل ۴ رفتار نیروی سوراخ‌کاری برحسب تغییرات قطر مته

۳-٤- جمع‌بندی آنالیز حساسیت به روش ای فست پارامترهای مؤثر در سوراخ‌کاری استخوان

مطابق با شکل ۵ که نتایج آنالیز حساسیت پارامترها به روش ای- فست را نشان می‌دهند، صحت نتایج به‌دست‌آمده تأیید می‌گردد. به‌طورکلی در بررسی حساسیت رفتار نیرو در حین سوراخ‌کاری استخوان، سرعت دورانی مته با ۵۷ درصد تأثیر، اثرگذارترین پارامتر ورودی بر نیروهای سوراخ‌کاری استخوان است. پس‌ازآن نرخ پیشروی با ۲۳ درصد و عمق برش با ۲۰ درصد پارامترهای مؤثر بر نیرو در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان هستند. روش آماری آنالیز حساسیت ای- فست، نسبت به آنالیز واریانس این برتری را دارد که علاوه بر مشاهده‌ی تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی، می‌توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به‌طور هم‌زمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم اثر را به‌طور دقیق شناسایی نمود. البته در تحلیل اثر برهم‌کنش رفتار پارامترها و تحلیل دقیق رفتارهای پیچیده روش سطح پاسخ تحلیلی کامل‌تر را ارائه می‌نماید.



شکل ۵ تأثیر پارامترهای سوراخ‌کاری برحسب در صد بر روی نیرو

٤- نتیجه‌گیری

امروزه دو ابزار قدرتمند آنالیز حساسیت و روش طراحی آزمایش‌ها باعث افزایش دقت و کاهش هزینه‌ها شده است. اگر در تمام زمینه‌های صنعتی و آزمایشگاهی برای انجام یک فرایند در ابتدا با روش طراحی آزمایش‌ها متغیرهای ورودی تعیین گردند، سپس با آنالیز حساسیت میزان اثرگذاری هر یک از متغیرهای ورودی به‌صورت کمی و کیفی بر روی فاکتورهای خروجی مشخص

شود، میزان بهره‌وری، دقت، صحت و همچنین کیفیت در فرایند افزایش می‌یابد. در این پژوهش میزان تأثیر هریک از پارامترهای سرعت دوران مته، نرخ پیشروی و قطر مته بر روی نیروهای سوراخ‌کاری به روش آنالیز حساسیت ای- فست موردبررسی قرار گرفت. اهم نتایج به‌دست‌آمده به شرح ذیل است.

- با افزایش سرعت دورانی مته به علت تسهیل در خروج براده از سوراخ نیروهای سوراخ‌کاری کاهش می‌یابد.
- به علت افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته در هنگام افزایش پیشروی، شاهد افزایش نیروهای سوراخ‌کاری خواهیم بود.
- نیروهای سوراخ‌کاری با افزایش قطر مته زیاد خواهند شد.
- سرعت دورانی مته با ۵۷ درصد تأثیر، اثرگذارترین پارامتر ورودی بر نیروهای سوراخ‌کاری استخوان است. پس‌ازآن نرخ پیشروی با ۲۳ درصد و عمق برش با ۲۰ درصد پارامترهای مؤثر بر نیرو در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان هستند.

۵- مراجع

[1] Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M. Part H: Journal of Engineering in Medicine. Investigation, sensitivity analysis, and multi-objective optimization of effective parameters on temperature and force in robotic drilling cortical bone. 2017;231:1012.

[2] Amewoui F, Le Coz G, Bonnet A-S, Moufki A. An analytical modeling with experimental validation of bone temperature rise in drilling process. Medical engineering & physics. 2020;84:151-60.

[3] Heydari H, Asadipoor N. Providing an analytical model and experimental study of the behavior of cortical bone drilling the thrust force. Modares Mechanical Engineering. 2017;17:175-84.

[4] Wang W, Shi Y, Yang N, Yuan X. Experimental analysis of drilling process in cortical bone. Medical engineering & physics .2014.

[5] Louredo M, Díaz I, Gil JJ. DRIBON: A mechatronic bone drilling tool. Mechatronics. 2012;22:1060-6.

[6] Sui J, Sugita N, Ishii K, Harada K, Mitsuishi M. Mechanistic modeling of bone-drilling process with experimental validation. Journal of materials processing technology. 2014;214:1018-26.

[7] Augustin G, Zigman T, Davila S, Udilljak T, Staroveski T, Brezak D, et al. Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis. Clinical biomechanics. 2012;27:313-25.

[8] Aziz MH, Ayub MA, Jaafar R .Real-time algorithm for detection of breakthrough bone drilling. Procedia Engineering. 2012;41:352-9.

[9] Sui J, Sugita N. Experimental study of thrust force and torque for drilling cortical bone. Annals of biomedical engineering. 2019;47:802-12.

[10] Shakouri E, Sadeghi MH, Maerefat M, Karafi M, Memarpour M. Experimental and Analytical Investigation of Thrust Force In Ultrasonic Assisted Drilling of Bone. Modares Mechanical Engineering. 2014;14:194-200.

[11] Agarwal R, Singh J, Gupta V. Prediction of temperature elevation in rotary ultrasonic bone drilling using machine learning models: An in-vitro experimental study. Medical engineering & physics. 2022;110:103869.

[12] Jacob C, Berry J, Pope M, Hoaglund F. A study of the bone machining process—drilling .Journal of Biomechanics. 1976;9:343-9.

[13] Alam K, Mitrofanov A, Silberschmidt VV. Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone. Medical engineering & physics. 2011;33:234-9.

[14] Basiaga M, Paszenda Z, Szewczenko J, Kaczmarek M. Numerical and experimental analyses of drills used in osteosynthesis. Acta of Bioengineering and Biomechanics. 2011;13:29-36.

[15] MacAvelia T, Salahi M, Olsen M, Crookshank M, Schemitsch EH, Ghasempoor A ,et al. Biomechanical measurements of surgical drilling force and torque in human versus artificial femurs. American Society of Mechanical Engineers; 2012.

[16] Liu S, Wu D, Zhao J, Yang T, Sun J, Gong K. Novel crescent drill design and mechanistic force modeling for thrust force reduction in bone drilling. Medical engineering & physics. 2022;103:103795.

[17] Huang T, Du M, Gu X, Cheng X. The Influence of Bit Edge Shape Parameters on Bone Drilling Force Based on Finite Element Analysis. Applied Sciences .2014.

[18] Udiljak T, Ciglar D, Skoric S. Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis. Advances in Production Engineering & Management. 2007;2:103-12.

[19] Ruiz Espejo M. Design of experiments for engineers and scientists. Taylor & Francis; 2006.

[20] M. Zolfaghari MG, V. Tahmasbi. An investigation and optimization of effective parameters on thrust force in drilling cortical bone process using response surface methodology. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2016;3:54-61.

[21] Saltelli A, Bolado R. An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST). Computational Statistics & Data Analysis. 1998;26:445-60.

[22] Ryan E, Wild O, Voulgarakis A, Lee L. Fast sensitivity analysis methods for computationally expensive models with multi-dimensional output. Geoscientific Model Development. 2018;11:3131-46.

[23] 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.

[24] Augustin G, Davila S, Mihoci K, Udiljak T, Vedrina DS, Antabak A. Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited. Archives of orthopaedic and trauma surgery. 2008;128:71-7.