



Mathematical Modeling and Sensitivity Analysis of Effective Parameters on Temperature in Ultrasonic Assisted Drilling of Cortical Bone

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Pak A. ^{*1} PhD,
Yaghoti H. ² MSc,
Tahmasbi V. ² PhD

How to cite this article

Pak A, Yaghoti H, Tahmasbi V. Mathematical Modeling and Sensitivity Analysis of Effective Parameters on Temperature in Ultrasonic Assisted Drilling of Cortical Bone. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1321-1331.

¹Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²Mechanical Engineering Faculty, Arak University of Technology, Arak, Iran

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
Postal Code: 651754161
Phone: +98 (81) 38292630
Fax: +98 (81) 38292631
a.pak@basu.ac.ir

Article History

Received: June 22, 2019
Accepted: October 13, 2019
ePublished: May 09, 2020

ABSTRACT

The use of ultrasonic vibrations to reduce the temperature in bone drilling is one of the most important advanced processes that has attracted the attention of bone surgeons. Therefore, the study of temperature behavior in the ultrasonic-assisted drilling process and the prediction of temperature behavior have an important effect on improving the use of this method in orthopedic surgery. In this research, the influence of process parameters on change in the temperature was studied using response surface methodology and data analysis. Data analysis was carried out to find the effect of process factors such as rotational speed, feed speed, and ultrasonic vibrational amplitude and their interaction on the temperature. Moreover, using the statistical method of Sobol sensitivity, the effect, and sensitivity of each input factor on temperature were studied. The results show that the use of ultrasonic vibrations reduces the temperature, and rotational speed (%48), vibrational amplitude (%33) and feed speed (%19) had the greatest effect on temperature in ultrasonic-assisted bone drilling, respectively. As a result, the use of ultrasonic vibration can reduce the dependency of process temperature on the feed speed, and thus make it possible to perform surgery in a shorter time. The minimum temperature is 37°C at the rotational speed of 500rpm and the feed speed of 20mm/min and the vibration amplitude of 15µm.

Keywords Modeling; Temperature, Bone Drilling; Ultrasonic Vibration; Response Surface Methodology; Sobol Sensitivity Analysis

CITATION LINKS

[1] Cortical bone drilling and thermal ... [2] Mechanistic modeling of bone-drilling process with ... [3] Numerical evaluation of sequential bone drilling strategies based on thermal ... [4] Machining of bone and hard ... [5] Review of vibration-assisted ... [6] Ultrasonic assisted bone ... [7] S-46 experimental investigation of ultrasonic-assisted bone ... [8] Analysis of temperature in conventional and ultrasonically-assisted ... [9] Finite element modeling and analysis of ultrasonically-assisted drilling ... [10] Comparative study of conventional and ultrasonically-assisted bone ... [11] Experimental measurements of temperatures in ultrasonically ... [12] Experimental investigations of forces and torque in conventional and ... [13] Experimental investigations and finite element simulation of cutting heat in ... [14] Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic ... [15] An in vitro study of thermal necrosis in ultrasonic-assisted drilling of ... [16] Effect of rotatory-vibrational bone drilling in lowering thermal necrosis ... [17] Experimental investigation and statistical modeling of temperature rise in ... [18] Rotary ultrasonic drilling on bone: A novel technique to put an end to ... [19] Optimization of process parameters for drilled hole quality ... [20] Contribution, development and morphology of microcracking in cortical ... [21] Multi-performance optimization of bone drilling using Taguchi method ... [22] Experimental analysis of drilling process in cortical ... [23] Optimization of bone drilling using Taguchi methodology coupled ... [24] Optimization of multiple quality characteristics in bone drilling using grey ... [25] Drill wear monitoring in cortical bone ... [26] Temperatures measured in human cortical bone when ... [27] Parameters optimization of a nano-particle wet milling process ... [28] Modeling the thermomechanical effects on baking behavior of ... [29] An investigation on stability of laser hybrid arc ... [30] Modelling and optimization of Nd: YAG laser and tungsten ... [31] Design and Analysis of ... [32] Sensitivity estimates for nonlinear ... [33] Global sensitivity indices for nonlinear ... [34] Investigation, sensitivity analysis, and ... [35] Sensitivity analysis of temperature and force in robotic bone drilling ... [36] Fundamentals of metal machining and ... [37] Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine ... [38] Investigation, sensitivity analysis, and multi-objective optimization ... [39] Temperature in bone drilling process: Mathematical ...

مدل‌سازی ریاضی و تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر دمای فرآیند سوراخ‌کاری استخوان کورتیکال به کمک نوسان‌های فراصوتی

عباس پاک* PhD

دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

حامد یاقوتی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

وحید طهماسبی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

استفاده از نوسان‌های فراصوتی برای کاهش دما در سوراخ‌کاری استخوان یکی از مهم‌ترین فرآیندهای نوین است که مورد توجه محققین حوزه جراحی استخوان قرار گرفته است. لذا بررسی رفتار دما در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان به کمک نوسان‌های فراصوتی و پیش‌بینی رفتار دما نقش مهمی در بهبود استفاده از این روش در عمل‌های جراحی ارتوپدی دارد. در این پژوهش با استفاده از روش سطح پاسخ و تحلیل آماری اثر پارامترهای فرآیند روی تغییرات دما مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل آماری برای بررسی اثر هر یک از متغیرهای ورودی شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی ابزار، دامنه نوسان فراصوتی و برهم‌کنش آنها روی دما انجام شده است. همچنین با استفاده از روش آماری حساسیت سوبل مقدار تاثیر و حساسیت هر یک از متغیرهای ورودی روی دما مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از نوسان‌های فراصوتی باعث کاهش دما می‌شود و سرعت دورانی (۴۸٪)، دامنه نوسان (۳۳٪) و سرعت پیشروی (۱۹٪) به ترتیب بیشترین اثر را بر دمای فرآیند سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی داشته‌اند. استفاده از نوسان‌های فراصوتی می‌تواند باعث کاهش وابستگی دمای فرآیند به سرعت پیشروی شده و در نتیجه امکان انجام جراحی در زمان کوتاه‌تری را ممکن می‌سازد. کمینه مقدار دما (حدود ۳۷°C) در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و دامنه نوسان ۱۵ میکرومتر حاصل شده است.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی، دما، سوراخ‌کاری استخوان، نوسان‌های فراصوتی، روش پاسخ سطح، تحلیل حساسیت سوبل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱

* نویسنده مسئول: a.pak@basu.ac.ir

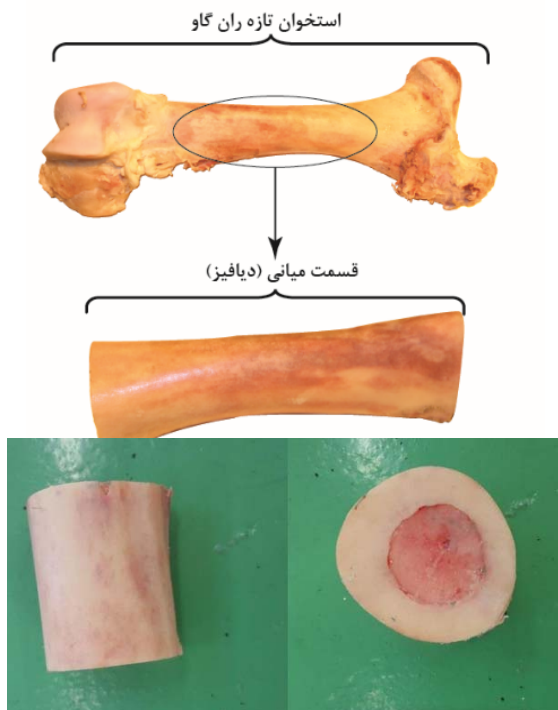
۱- مقدمه

فرآیند سوراخ‌کاری استخوان به جهت شرایط خاص ماده استخوان یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین فرآیندهای مکانیکی است که در اعمال جراحی ارتوپدی، درمان شکستگی‌ها، دندانپزشکی و نمونه‌برداری از استخوان درحوزه مهندسی پزشکی کاربرد فراوان دارد. در طول عمل سوراخ‌کاری به بافت استخوان نیرو وارد شده و دما در اثر اصطکاک بین مته و بافت استخوان، افزایش می‌یابد [1, 2]. مهم‌ترین عارضه‌ای که ممکن است در اثر بالا رفتن دمای فرآیند سوراخ‌کاری از محدوده مجاز (۴۷ درجه

سانتی‌گراد) اتفاق افتد، نکرور حرارتی یا مرگ سلولی در بافت استخوان است مرگ سلولی و در نتیجه از بین رفتن موضعی بافت استخوان باعث ضعیف شدن ساختار استخوان و شل شدن پیچ‌ها و ایمپلنت‌ها (Implant) در بافت استخوان می‌شود [3]. یکی از مهم‌ترین فرآیندهای نوین که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین حوزه جراحی‌های استخوان قرار گرفته است استفاده از نوسان‌های فراصوتی در حین سوراخ‌کاری استخوان است [4]. استفاده از نوسان‌های فراصوتی در فرآیندهای مختلف ماشین‌کاری از جمله سوراخ‌کاری استخوان باعث کاهش دما و نیرو شده است [5]. در نتیجه، بررسی رفتار دما در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان به کمک نوسان‌های فراصوتی و پیش‌بینی رفتار دما نقش بسزایی در موفقیت و بهبود استفاده از این روش در عمل‌های جراحی ارتوپدی دارد.

خادمی و همکاران با ساخت تجهیزات مورد نیاز به منظور اعمال فرآیند سوراخ‌کاری با استفاده از نوسان‌های فراصوتی به مطالعه تجربی رفتار دما و نیروی ایجاد شده در این فرآیند پرداختند و فرآیند سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی را با فرآیند سوراخ‌کاری متداول مقایسه و بیان نمودند که استفاده از نوسان‌های فراصوتی سبب کاهش نیروی سوراخ‌کاری تا ۵۸٪ می‌شود. همچنین در سرعت‌های دورانی پایین، دمای ایجاد شده کاهش یافته است [6, 7]. عالم و همکاران در مطالعه‌های متعدد به صورت تجربی و مدل‌سازی به بررسی جامع نوسان‌های فراصوتی در سوراخ‌کاری استخوان و مقایسه با سوراخ‌کاری معمولی پرداختند و بیان داشتند استفاده از نوسان‌های فراصوتی باعث کاهش نیروی و دمای فرآیند، بهبود زبری سطح و کاهش ترک می‌شود. مقدار تغییرات دما و نیرو بستگی به دامنه نوسان و فرکانس، سرعت دوران و مقدار سرعت پیشروی فرآیند سوراخ‌کاری استخوان دارد [8-12]. ونگ و همکاران [13] با بررسی تجربی فرآیند سوراخ‌کاری معمولی و فراصوتی نشان دادند که حرارت تولید شده در روش سوراخ‌کاری فراصوتی کاهش یافته همچنین با افزایش فرکانس در دامنه یکسان و افزایش دامنه در فرکانس یکسان حرارت تولید شده کمتر می‌شود همچنین نتایج مدل‌سازی اجزا محدود نشان می‌دهد که دامنه حرکت ابزار روی انتقال حرارت تاثیر می‌گذارد. شکوری و همکاران نیز نشان دادند که استفاده از نوسان‌های فراصوتی با فرکانس ۱۹/۷۵ کیلوهرتز و دامنه نوسان ۴۰ میکرومتر باعث کاهش قابل توجه دما شده و می‌تواند از ایجاد پدیده نکرور حرارتی جلوگیری نماید [14-16]. مطالعات کوپتا و همکاران نشان داد که دمای سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی در هنگام استفاده از ابزار با پوشش ذرات ساینده از جنس الماس و در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، با افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی افزایش یافته است. از طرفی در دامنه نوسان بین ۴ الی ۲۰ میکرون با افزایش دامنه نوسان به مقدار قابل ملاحظه‌ای دما کاهش پیدا کرده است [17]. [18]

با دمای ۲۵-درجه قرار داده و سپس دو ساعت قبل از استفاده در دمای محیط و در یک ظرف آب و مقداری نمک قرار داده شده است. عمق سوراخ‌کاری انجام شده در نمونه‌ها، ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱) استخوان تازه ران گاو و بخش میانی آن

۲-۲- تجهیزات لازم برای مطالعه فرآیند سوراخ‌کاری استخوان

در این فرآیند از سری مته‌های استاندارد فولاد تندبر با قطر ۵ میلی‌متر که بیشترین کاربرد را در عمل‌های جراحی ارتوپدی دارند استفاده شده است [1, 22-24]. این سری مته‌های استاندارد دارای زاویه مارپیچ مته ۳۰ درجه، زاویه براده ۵۵ درجه و زاویه رأس مته ۱۱۸ درجه هستند. اندازه‌گیری دقیق دما توسط چهار ترموکوپل کالیبره شده (دو عدد ترموکوپل مدل K و دو عدد ترموکوپل مدل T) ساخت شرکت ABB استفاده شده است. محل استقرار ترموکوپل بر اساس تحقیقات پیشین [25] در عمق ۳ میلی‌متری و فاصله ۵/۰ میلی‌متری از دیواره سوراخ ایجاد شده در بافت استخوان است.

مجموعه مافوق صوت مجهز به یک مبدل نوسان‌های مافوق صوت ۲۰ kHz با توان ۵۰۰ W، تقویت‌کننده نوسان‌ها و ابزارگیر است. ابزارگیر بر مبنای فرکانس طبیعی مجموعه مافوق صوت به مقدار ۲۰۶۰۰ کیلو هرتز با استفاده از تحلیل مودال در نرم‌افزار آباکوس برای شکل مود طولی مطابق شکل ۲ طراحی و ساخته شد. مجموعه ساخته شده بر روی دستگاه فرز CNC جهت انجام فرآیند سوراخ‌کاری نصب شده است. شکل ۳ دستگاه و تجهیزات استفاده شده در آزمون‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شرایط کامل آزمایش و مقادیر پارامترهای فرآیند در جدول ۲ آورده شده است.

با توجه به بررسی پژوهش‌های پیشین تاکنون مطالعه جامعی در زمینه مقدار اثرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی و نیز اثر تعاملی آنها و تعیین شرایط بهینه برای رسیدن به کمترین دما در سوراخ‌کاری استخوان به کمک نوسان‌های فراصوتی انجام نشده است. در این تحقیق جهت بررسی رفتار دما و پیش بینی رفتار آن در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان، با استفاده از روش سطح پاسخ و انجام آزمون‌های تجربی یک مدل ریاضی درونیابی خطی مرتبه دوم استخراج شده است. در این تحقیق دما به عنوان پاسخ خروجی و همچنین سرعت دورانی، نرخ پیشروی ابزار و دامنه نوسان‌های ابزار به عنوان فاکتورهای ورودی فرآیند سوراخ‌کاری در نظر گرفته شده است و اثر هر یک از فاکتورهای ورودی و همچنین برهم‌کنش آن‌ها بر روی رفتار دما بررسی شده است. همچنین با استفاده از روش آماری تحلیل حساسیت سوبل میزان تاثیر دقیق و حساسیت هر یک از فاکتورهای ورودی بر روی رفتار پاسخ فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- انتخاب استخوان و روش انجام آزمون

۲-۱- آماده‌سازی استخوان

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استخوان کورتیکال ران گاو به استخوان‌های بلند انسان نزدیک است [19, 20]. لذا بسیاری از محققین برای بررسی فرآیند سوراخ‌کاری استخوان کورتیکال، از استخوان ران گاو استفاده نموده‌اند [12, 19, 21, 22]. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استخوان تازه کورتیکال ران گاو و استخوان تازه کورتیکال ران انسان آورده شده است [19, 23].

جدول ۱) مقایسه خصوصیات استخوان کورتیکال تازه گاو و استخوان کورتیکال تازه انسان [19, 23]

خواص	استخوان کورتیکال	
	انسان	گاو
استحکام کششی (MPa)	۱۳۰-۲۰۰	۱۴۰-۲۵۰
استحکام فشاری (MPa)	۴۰-۱۴۵	۴۵-۱۵۰
مدل یانگ (GPa)	۱۰-۱۷	۱۰-۲۲
مدل برشی (MPa)	۳	۳
چگالی (Kg/m ³)	۱۸۰۰-۲۰۰۰	۱۹۵۰-۲۱۰۰
ضریب پواسون	۰/۴	۰/۳۳
ضریب هدایت حرارتی ویژه (J/KgK)	۱۳۳۰	۱۳۰۰

در انجام آزمایش‌ها از استخوان ران تازه گاو (سن حدود ۳ الی ۴ سال) و از قسمت میانی (Diaphysis) آن که ضخامت استخوان این محدوده در حدود ۸-۱۰ میلی‌متر است استفاده شده است (شکل ۱). در این پژوهش استخوان تازه ران گاو از یک کشتارگاه محلی و بلافاصله پس از ذبح تهیه و استفاده شده است. در صورت عدم استفاده از استخوان تازه (زمانی در حدود ۳ الی ۴ ساعت) به منظور حفظ خواص آن، استخوان تازه در فریزر

رفع عیوب آنها است [26]. در این زمینه یکی از بهترین روش‌های آماری، روش سطح پاسخ است [21]. تبیین دقت آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر آزمایش، ارایه نمودارهای برهم‌کنش متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها از مزایای مهم روش سطح پاسخ است [27]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل‌سازی نموده و به صورت یک معادله ریاضی درونیابی (Regression) خطی مرتبه دوم ارایه نماید. فرم کلی معادله با توجه به متغیرها و برهم‌کنش‌های موثر به صورت معادله (۱) است [28].

(۱)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

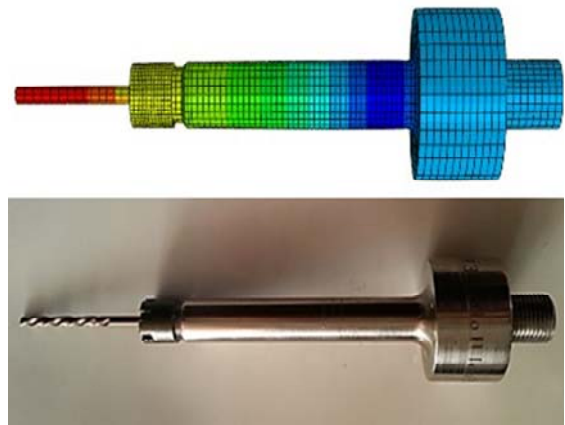
در این معادله درونیابی خطی مرتبه دوم، y به عنوان پاسخ خروجی برحسب ورودی‌های آزمایش توصیف می‌شود که در این معادله ثابت‌های β به عنوان ضرایب معادله درونیابی، x_i فاکتور اصلی ورودی آزمایش، x_i^2 توان دوم فاکتورهای ورودی آزمایش و $x_i x_j$ اثر برهم‌کنش مرتبه دوم فاکتورهای ورودی آزمایش است [29]. مدل ارایه شده در صورت دقیق بودن می‌تواند رفتار خروجی را برحسب پارامترهای ورودی در تمام بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نموده و نقاط بهینه را ارایه نماید [30].

در بررسی رفتار دما در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان، متغیرهای سرعت دورانی ابزار (N)، سرعت پیشروی (f) و دامنه نوسان ابزار (A) به عنوان فاکتورهای ورودی فرآیند در نظر گرفته شده است و بیشینه دما به عنوان پاسخ‌های خروجی فرآیند سوراخ‌کاری استخوان در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی و دامنه نوسان به عنوان متغیرهای ورودی تعداد ۱۷ آزمایش به روش سطح پاسخ طراحی و با استفاده از طرح مرکب مرکزی مدل‌سازی شده است. در جدول ۳ متغیرهای ورودی و بازه تغییرات آن با توجه به سه سطح کد شده آنها نمایش داده شده است.

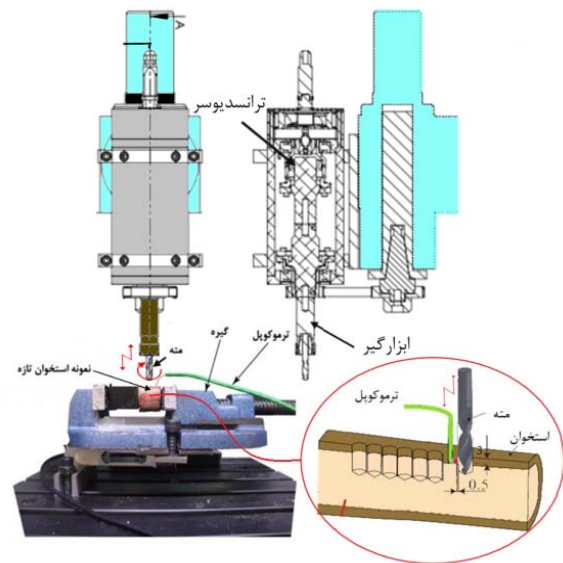
جدول ۳) مقادیر کد شده متغیرهای ورودی در سوراخ‌کاری استخوان

ورودی‌های آزمایش			
۱	۰	-۱	
سرعت دورانی ابزار (rpm)	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰
سرعت پیشروی (mm/min)	۴۰	۳۰	۲۰
دامنه حرکت (μm)	۱۵	۱۰	۵

در انجام آزمایش‌ها به منظور بالا بردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه بار تکرار شده است و میانگین بیشترین مقدار دما به عنوان پاسخ دما برای هر آزمایش گزارش شده است، لازم به ذکر است که به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش‌بینی نشده آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شده است [31]. در جدول ۴ نیز نتایج به دست آمده برای هر ۱۷ آزمایش آورده شده است.



شکل ۲) ابزارگیر فولادی طراحی و ساخته شده



شکل ۳) دستگاه و تجهیزات استفاده شده در آزمون‌ها

جدول ۲) پارامترهای فرآیند سوراخ‌کاری استخوان به کمک نوسان‌های فراصوتی

پارامتر	مقدار
جنس ابزار	HSS
قطر ابزار (mm)	۵
فرکانس نوسان (Hz)	۲۰۶۰۰
دامنه نوسان (μm)	۵، ۱۰، ۱۵
سرعت دورانی ابزار (rpm)	۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰
سرعت پیشروی (mm/min)	۲۰، ۳۰، ۴۰

۳- روش طراحی آزمایش‌ها

در تحلیل مسائل مهندسی به‌ویژه در انجام آزمایش‌های تجربی و روش‌های شبیه‌سازی عددی که در آنها پاسخ مسئله تحت تاثیر متغیرهای مختلف ورودی است، بهره‌گیری از روش‌های آماری آزمایش‌ها کمک زیادی به طراحی، مدل‌سازی و تحلیل و بهینه‌سازی دقیق این مسائل می‌نماید. طراحی آزمایش‌ها یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای محققین در بهبود و اصلاح و صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و تشخیص دقت و

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i \leq j \leq n} V_{ij} + \dots + V_{1,\dots,n} \quad (2)$$

که در این رابطه، V_i تاثیر مرتبه اول برای هر فاکتور ورودی ($V_i = V[E(Y|x_i)]$) و V_{ij} و V_{ij} تا $V_{1,\dots,n}$ برهم‌کنش بین n فاکتور را نشان می‌دهند.

شاخص‌های حساسیت به صورت نسبت واریانس هر مرتبه به واریانس کلی به دست می‌آیند ($S_i = \frac{V_i}{V}$) شاخص حساسیت مرتبه اول، $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه دوم و ...). شاخص حساسیت کلی یا همان تاثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$S_{Ti} = S_i + \sum_{i < j} S_{ij} + \sum_{j \neq i, k \neq i, j < k} S_{ijk} + \dots \quad (3)$$

آنالیز حساسیت آماری سوپل توسط نرم‌افزار سیملب و با استفاده از الگوریتمی مربوط به روابط با تغییر همزمان پارامترهای و تعیین اثر آن‌ها بر پارامتر خروجی انجام شده است [30].

۵- مدل‌سازی رفتار پاسخ دما در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

مدل‌سازی ریاضی و بررسی دقیق اثر فاکتورهای ورودی و برهم‌کنش بین آنها و همچنین تحلیل و بهینه‌سازی پاسخ فرآیند سوراخ‌کاری استخوان نقش بسزایی در شناخت فرآیند ایفا می‌کند [34, 35]. لذا با توجه به نتایج آزمون‌های عملی و با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تیب نسخه ۱۸ و دی‌زاین اکسپرت (Design expert) نسخه ۱۰ جهت تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین استخراج معادله ریاضی درون‌یابی حاکم بر آزمایش استفاده شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵) نتایج آنالیز واریانس برای دمای فرآیند سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

ترم‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p
مدل	۹	۴۴/۲۲۵۱	۴/۹۱۳۹	۶۰/۳۵	۰/۰
N	۱	۲۸/۴۵۹۷	۲۸/۴۵۹۷	۳۴۹/۵۵	۰/۰
f	۱	۴/۰۷۰۴	۴/۰۷۰۴	۵۰/۰	۰/۰
A	۱	۹/۷۶۱۴	۹/۷۶۱۴	۱۱۹/۸۹	۰/۰
N.N	۱	۰/۱۷۹۸	۰/۱۷۹۸	۲/۲۱	۰/۱۸۱
f.f	۱	۰/۱۸۶۹	۰/۱۸۶۹	۲/۳۰	۰/۱۷۴
A.A	۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۹۸۲
N.f	۱	۰/۰۳۷۸	۰/۰۳۷۸	۰/۴۶	۰/۵۱۷
N.A	۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳۶	۰/۰۴	۰/۸۳۹
f.A	۱	۱/۰۲۹۶	۱/۰۲۹۶	۱۲/۶۵	۰/۰۰۹

با توجه به قابلیت اطمینان در آزمایش‌های مهندسی، مقدار P کمتر از ۰/۰۵ به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود [39]. با حذف مؤلفه‌های غیر موثر آنالیز واریانس اصلاح

جدول ۴) مقادیر اندازه‌گیری شده دما در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی استخوان کورتیکال

شماره آزمایش	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	دامنه نوسان (میکرومتر)	دما استخوان (سانتی‌گراد)
۱	۵۰۰	۲۰	۵	۳۹/۵
۲	۱۵۰۰	۲۰	۵	۴۳/۲۲
۳	۵۰۰	۴۰	۵	۴۰/۳۲
۴	۱۵۰۰	۴۰	۵	۴۳/۵۲
۵	۵۰۰	۲۰	۱۵	۳۷/۱۹
۶	۱۵۰۰	۲۰	۱۵	۴۰/۲
۷	۵۰۰	۴۰	۱۵	۳۸/۶۵
۸	۱۵۰۰	۴۰	۱۵	۴۲/۷۳
۹	۵۰۰	۳۰	۱۰	۳۹/۴۲
۱۰	۱۵۰۰	۳۰	۱۰	۴۲/۲۸
۱۱	۱۰۰۰	۲۰	۱۰	۴۰/۲۱
۱۲	۱۰۰۰	۴۰	۱۰	۴۱/۴۸
۱۳	۱۰۰۰	۳۰	۵	۴۲/۱۵
۱۴	۱۰۰۰	۳۰	۱۵	۴۰/۰۶
۱۵	۱۰۰۰	۳۰	۱۰	۴۱/۲
۱۶	۱۰۰۰	۳۰	۱۰	۴۱/۲
۱۷	۱۰۰۰	۳۰	۱۰	۴۱/۴

۴- تحلیل حساسیت آماری به روش سوپل

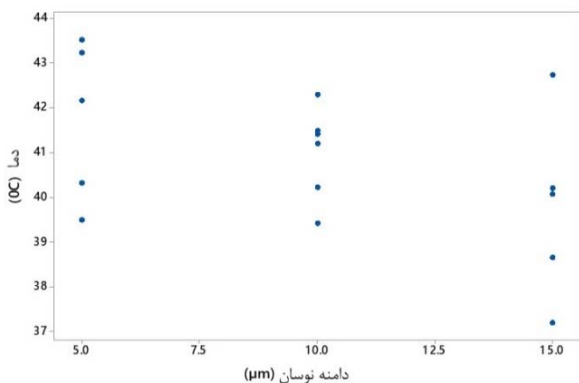
تحلیل حساسیت ابزار مناسب دیگری جهت بررسی و تعیین میزان اثر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها در مسائل مهندسی است. در روش آماری تحلیل حساسیت به صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی متغیرهای ورودی سیستم می‌پردازد، سپس تاثیر این فاکتورهای ورودی را بر پاسخ سیستم ارزیابی می‌کند. در این روش‌ها می‌توان اثر متقابل بین چندین فاکتور مختلف ورودی را بر روی پاسخ سیستم مشخص نمود. تحلیل حساسیت آماری سوپل یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه تحلیل واریانس است [32]. با استفاده از این روش آماری مقدار تاثیر دقیق و حساسیت هر یک از فاکتورهای ورودی بر روی رفتار پاسخ فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است. روش آماری آنالیز حساسیت سوپل، نسبت به آنالیز واریانس این مزیت را دارد که علاوه بر مشاهده تاثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی، می‌توان تاثیر کمی و دقیق این پارامترها را به طور همزمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تاثیرگذاری بالا و پارامترهای کم‌اثر را به طور دقیق شناسایی نمود. البته در تحلیل اثر بر هم کنش رفتار پارامترها و تحلیل دقیق رفتارهای پیچیده روش سطح پاسخ تحلیلی کامل‌تر را ارائه می‌نماید [2].

در تحلیل حساسیت سوپل برای مدل تعریف شده با تابع $Y=f(X)$ ، که Y خروجی مدل و $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ بردار پارامترهای ورودی است، و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه شده به صورت رابطه (۲) است [33]:

۶- بحث و بررسی نتایج

۶-۲۶ بررسی اثر متغیرهای ورودی در رفتار دما در فرآیند سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

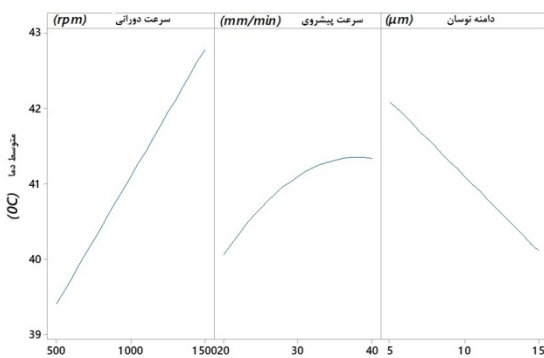
در این بخش با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته و انطباق آن بر داده‌های آزمایش‌ها به بررسی اثر پارامترهای موثر ورودی در مدل شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و دامنه نوسان ابزار بر رفتار دمای فرآیند سوراخ‌کاری استخوان پرداخته شده است. بدین‌منظور ضمن بررسی میزان حساسیت هریک از پارامترهای ورودی به بررسی و تحلیل برهم‌کنش موثر پارامترهای ورودی و نمودارهای اثر فاکتورهای اصلی (Main effects) آنها پرداخته شده است. نمودار ۲ به عنوان نمونه مقادیر اندازه‌گیری شده دما برای دامنه‌های نوسان مختلف نشان داده شده است.



نمودار ۲) نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری دما در دامنه‌های نوسان مختلف

۶-۲-۶ اثر سرعت دورانی بر دما

همان‌طور که از نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی دمای فرآیند با شیب زیادی افزایش پیدا کرده است. دلیل این افزایش را می‌توان افزایش نیروی اصطکاک و افزایش نرخ کرنش برشی به‌منظور جدایش براده از بافت استخوان بیان نمود که با افزایش استحکام ماده استخوان در برابر گسیختگی به علت سخت شونده‌گی در نرخ کرنش‌های پلاستیک بالاتر حرارت ایجاد شده در هنگام جدایش براده افزایش یافته است [17, 18].



نمودار ۳) اثر فاکتورهای اصلی ورودی بر روی رفتار دما در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

شده مطابق با نتایج جدول ۶ به‌دست آمده است. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر فاکتورهای ورودی و برهم‌کنش‌های آنها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید [31]. با توجه به مقدار F به‌دست آمده از جدول ۶ بیشترین متغیر موثر بر روی دمای فرآیند به ترتیب سرعت دورانی (N) و دامنه نوسان (A) و سپس سرعت پیشروی و اثر تعاملی آن با دامنه نوسان است [31].

جدول ۶) نتایج آنالیز واریانس اصلاح شده برای دمای فرآیند سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

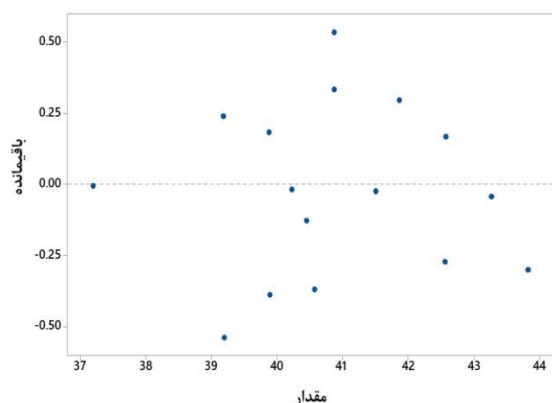
ترم‌ها	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار p
مدل	۴	۴۳/۳۲۱۲	۱۰/۸۳۰۳	۸۸/۱۸	۰/۰
N	۱	۲۸/۴۵۹۷	۲۸/۴۵۹۷	۲۳۱/۷۲	۰/۰
f	۱	۴/۰۷۰۴	۴/۰۷۰۴	۳۳/۱۴	۰/۰
A	۱	۹/۷۶۱۴	۹/۷۶۱۴	۷۹/۴۸	۰/۰
f.A	۱	۱/۰۲۹۶	۱/۰۲۹۶	۸/۳۸	۰/۰۱۳

$$R^2=0.9671, R^2_{adj}=0.9071, R^2_{pred}=0.9190$$

مقدار خطای مجموع مربعات مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله درونیابی حاکم بر مدل را مشخص نموده و در مبحث طراحی آزمایش‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. هرچه این مقدار در مدل‌های قابل انطباق بر داده‌ها کمتر باشد مدل مربوطه دارای خطای پیش‌بینی کمتری است و در این تحقیق کمترین عدد این مولفه برای مدل درونیابی مرتبه دوم کامل (Full Quadratic) به‌دست آمد. با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع مربعات برای مدل مرتبه دوم خطی، معادله درونیابی خطی مرتبه دوم حاکم بر دما فرآیند پس از اصلاح مدل و حذف مولفه‌های غیر موثر به صورت رابطه (۴) است:

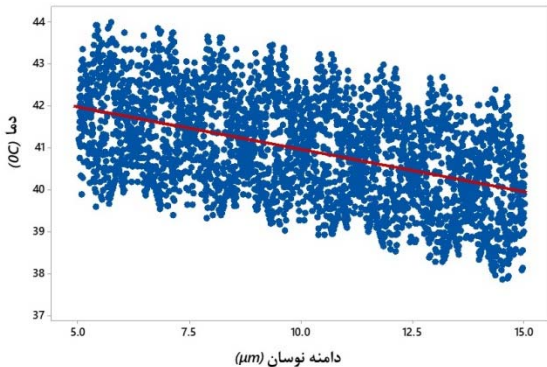
$$T(^{\circ}C) = 39.707 + 0.003374N - 0.0079f - 0.4128A + 0.00717f.A \quad (4)$$

با در نظر داشتن مقادیر حاصله، $R^2=0.9671$ برای مدل دما و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقی‌مانده‌ها با توجه به نمودار ۱ می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی صورت گرفته و اصلاح شده از دقت مناسبی برخوردار است [31].



نمودار ۱) پراکندگی باقی‌مانده‌ها نسبت به مدل منطبق شده

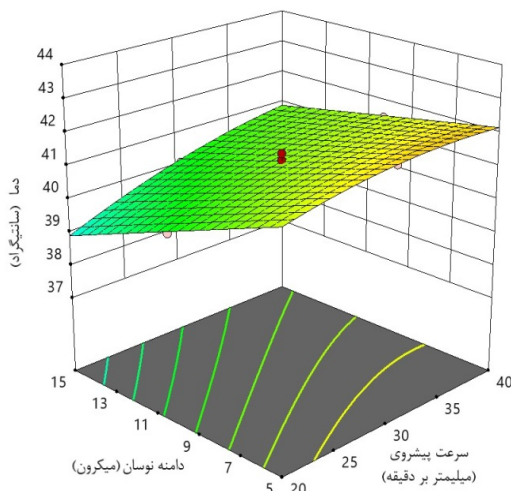
شده می‌شود همچنین باعث بهبود جریان هوای نزدیک مته و انتقال حرارت بیشتری منتقل می‌شود [17, 18].



نمودار ۶ اثر دامنه نوسان ابزار بر دمای در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

۴-۱-۶- اثر تعاملی ورودی‌های فرآیند بر دما

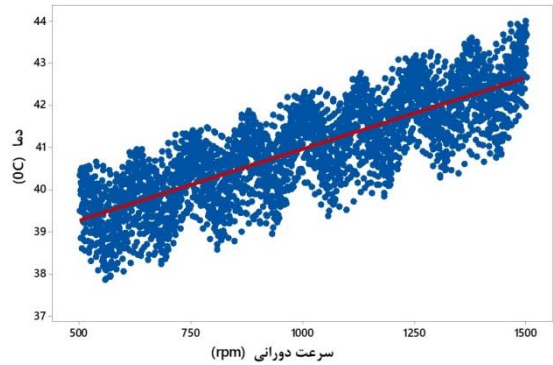
با توجه به رابطه ۱ و نتایج جدول تحلیل واریانس (جدول ۶) اثر تداخلی سرعت پیشروی و دامنه نوسان بر روی دما قابل توجه است. نمودار رویه پاسخ رفتار پاسخ دما برحسب دامنه نوسان و سرعت پیشروی در نمودار ۷ آورده شده است. همان طور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی دما افزایش و با افزایش دامنه نوسان دما کاهش می‌یابد به عبارتی برای کاهش دما در سرعت‌های پیشروی بالا باید دامنه نوسان بالاتر استفاده کرد. کمترین دما در دامنه نوسان ۱۵ میکرون و سرعت پیشروی ۲۰ متر بر دقیقه در حدود ۳۸ درجه است.



نمودار ۷ رویه پاسخ دما بر حسب سرعت پیشروی و دامنه نوسان در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

۲-۶- نتایج تحلیل سوبل در بررسی حساسیت پارامترهای موثر در رفتار دما

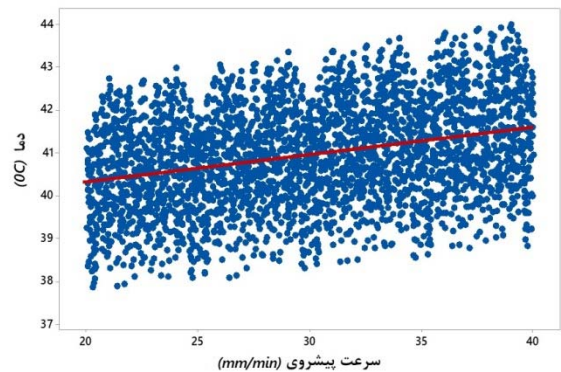
نمودار ۸ نشان می‌دهد که در بررسی حساسیت رفتار دما به روش سوبل، سرعت دورانی ابزار دارای اثر ۴۸٪ و پس از آن



نمودار ۴ اثر سرعت دورانی بر دما در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

۲-۱-۶- اثر سرعت پیشروی بر دما

در نمودارهای ۳ و ۵، اثر سرعت پیشروی بر روی تغییرات دما نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی ابتدا دما افزایش و سپس از شیب افزایش دما کاسته شده است. علت این پدیده آن است که در پیشروی‌های پایین، نیروی وارد بر استخوان و همچنین اصطکاک بین ابزار و استخوان و همچنین ضخامت براده تغییر شکل یافته کمتر است و همچنین خروج براده با سهولت صورت می‌گیرد که این امر موجب کاهش اصطکاک تماسی و کاهش حرارت ایجاد شده در استخوان می‌شود [36, 37]. اما در سرعت‌های پیشروی بالاتر زمان مواجهه ابزار با استخوان کم و در نتیجه نرخ انتقال حرارت از ابزار به استخوان کاهش یافته لذا میزان افزایش دما کاسته خواهد شد [36, 37].



نمودار ۵ اثر نرخ پیشروی بر دما در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

۳-۱-۶- اثر دامنه نوسان بر دما

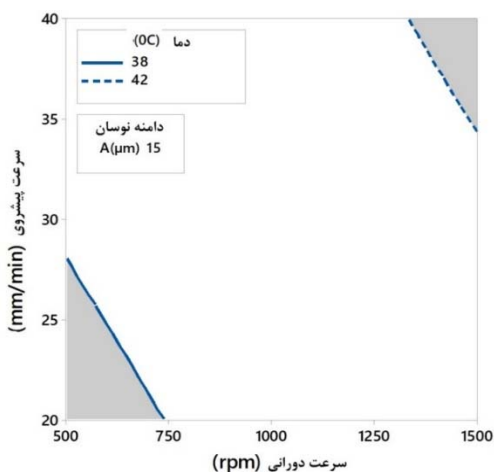
همان طور که در نمودارهای ۳ و ۶ نشان داده شده است با افزایش مقدار دامنه نوسان ابزار، دمای بافت استخوان کاهش یافته است. اعمال نوسان به ابزار باعث شده است که مکانیزم برخورد لبه برنده تغییر و زمان تماس ابزار و استخوان کمتر شده و در نتیجه انتقال حرارت مته به استخوان کاهش یابد. افزایش دامنه نوسان‌های باعث کاهش بیشتر اصطکاک و دمای تولید

که با خطای ۱۵٪، مدل سازی و بهینه سازی صورت گرفته از دقت مناسبی برخوردار بوده و نتایج به دست آمده از مدل منطبق شده بر نتایج آزمایش ها از قابلیت اطمینان قابل قبولی برخوردار است.

جدول ۷) مقایسه نتایج حاصل از بهینه سازی و نتایج آزمون های تجربی

بهینه سازی	نتایج	دما (°C)	A (μm)	F (mm/min)	N (rpm)
کمترین دما	مدل آزمایش	۳۷/۱۹۴۷ ۳۷/۱۹	۱۵	۲۰	۵۰۰
درصد خطا	-	۰/۱۵	-	-	-

در نمودار ۱۰ محدوده مجاز تنظیم سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی ابزار در مناسب ترین دامنه نوسان ابزار (۱۵ μm) با در نظر داشتن محدوده دمای کمتر از حد مجاز (۴۲ درجه سانتی گراد) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود با استفاده از این فرآیند پاسخ های فرآیند فاصله بسیار مناسبی با مرز محدوده های مجاز دما و نیرو در سوراخ کاری استخوان دارد. نمودار فوق نشان می دهد که جراح می تواند هر مقداری را برای نرخ پیشروی و سرعت دورانی ابزار با آسودگی خاطر تعیین نماید زیرا دما با مقدار مجاز ۴۷ درجه [38] فاصله دارد و حداکثر مقدار دما ایجاد شده حدود ۴۲ درجه است. در نتیجه با استفاده از ارتعاشات فراصوتی ابزار احتمال ایجاد پدیده نکرز حرارتی به حداقل رسیده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق نیز منطبق بر نتایج بیان شده توسط کوپتا و همکاران است که استفاده از نوسان ابزار را بهترین روش برای عدم ایجاد نکرز حرارتی در فرآیند استخوان عنوان نموده اند [18].

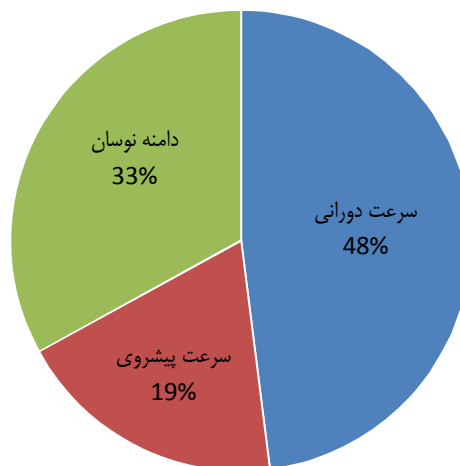


نمودار ۱۰) محدوده مجاز تنظیم سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی ابزار در مناسب ترین دامنه نوسان ابزار (۱۵ μm)

۴-۶- مقایسه فرآیند سوراخ کاری فراصوتی استخوان کورتیکال با سوراخ کاری در حالت معمولی

بررسی رفتار دما در سوراخ کاری معمولی استخوان کورتیکال توسط نویسندگان در مطالعات پیشین صورت پذیرفته است [34].

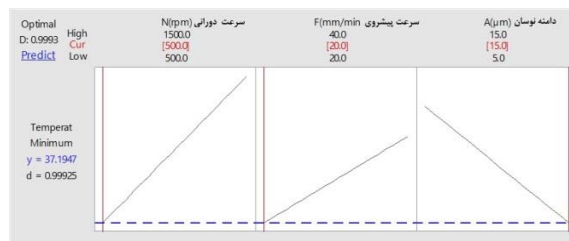
دامنه نوسان ابزار با ۳۳٪ و سرعت پیشروی با ۱۹٪ تاثیرگذار هستند. همان طور که ملاحظه می شود با استفاده از نوسان های فراصوتی در سوراخ کاری استخوان، فرآیند جراحی وابستگی کمتری به سرعت پیشروی ابزار به ویژه در هنگام استفاده از ربات در جراحی دارد. مدت زمان عمل جراحی به سرعت پیشروی ابزار بستگی مستقیم دارد به عبارتی هر چقدر سرعت پیشروی بالاتر انتخاب شود زمان جراحی کوتاه تر خواهد شد و لذا این کاهش وابستگی باعث خواهد شد که عمل جراحی در کوتاه ترین زمان ممکن انجام شود.



نمودار ۸) درصد تاثیر پارامترهای فرآیند بر رفتار دما در سوراخ کاری به کمک نوسان های فراصوتی

۳-۶- بهینه سازی فرآیند سوراخ کاری استخوان به کمک نوسان های فراصوتی

جهت بررسی صحت مدل ریاضی به دست آمده از روش آنالیز واریانس توسط روش پاسخ سطح و بررسی شرایط بهینه فرآیند سوراخ کاری به کمک نوسان های فراصوتی بهینه سازی آماری با استفاده از روش درینگر [3] و توسط نرم افزار مینی تب انجام شده است. نتایج بهینه سازی آماری برای کمترین مقدار دما در نمودار ۹ نشان داده شده است.



نمودار ۹) شرایط بهینه در سوراخ کاری استخوان به کمک نوسان های فراصوتی

کمترین مقدار دما در بیشترین دامنه نوسان (۱۵ میکرومتر) و کمترین سرعت پیشروی (۲۰ میلی متر بر دقیقه) و با سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه حاصل شده است. از مقایسه نتایج بهینه سازی و نتایج آزمایش مطابق با جدول ۷ مشاهده می شود

آمده است. خلاصه نتایج به‌دست آمده به صورت زیر است:
 - به ترتیب از پارامترهای مستقل ورودی در فرآیند سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی، سرعت دورانی، دامنه نوسان ابزار، سرعت پیشروی و اثر تعاملی سرعت پیشروی و دامنه نوسان بیشترین اثر را بر رفتار دمای فرآیند داشته‌اند. در بررسی حساسیت اثر این پارامترها در رفتار دما، سرعت دورانی ابزار دارای اثر ۴۸٪ و پس از آن دامنه نوسان ابزار با ۳۳٪ و نرخ پیشروی با ۱۹٪ تاثیر گذار بوده است.

- در فرآیند سوراخ‌کاری استخوان به کمک نوسان‌های فراصوتی با افزایش سرعت پیشروی دما افزایش و با افزایش دامنه نوسان دما کاهش یافته است. به عبارتی برای کاهش دما در سرعت‌های پیشروی بالا باید دامنه نوسان بالاتر استفاده کرد. در نتیجه استفاده از نوسان‌های فراصوتی می‌تواند باعث کاهش وابستگی دمای فرآیند به سرعت پیشروی ابزار شده و در نتیجه امکان انجام عمل جراحی در زمان کوتاه‌تری را به وجود آورد.
 - با توجه به محدوده دمای مجاز، با انتخاب دامنه نوسان مناسب جراح می‌تواند سایر پارامترهای فرآیند سوراخ‌کاری شامل سرعت پیشروی و سرعت دورانی را با محدودیت بسیار کمتری انتخاب نماید.

- با مقایسه دما در هر دو روش سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری با اعمال نوسان‌های فراصوتی مشاهده شد که در برخی نقاط استفاده از نوسان‌های فراصوتی دمای سوراخ‌کاری را تا ۳۵٪ کاهش می‌دهد. در نتیجه استفاده از نوسان‌های فراصوتی ابزار سبب کاهش دما و جلوگیری از پدیده نکرور حرارتی در جراحی‌های استخوانی می‌شود.

- در بررسی رفتار دمای فرآیند سوراخ‌کاری استخوان، مدل ریاضی درون‌یابی مرتبه دوم ارایه شده، قادر است مقدار دما برحسب متغیرهای ورودی فرآیند با دقت مناسبی در محدوده انجام آزمایش‌ها پیش‌بینی نماید. در محدوده این تحقیق با کاهش سرعت دورانی، کاهش نرخ پیشروی و افزایش دامنه نوسان ابزار دمای فرآیند کاهش می‌یابد و کمینه مقدار دما با مقدار حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد در حالت سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و دامنه نوسان ۱۵ میکرومتر حاصل شده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از همکاران محترم کارگاه ماشین‌ابزار دانشگاه صنعتی اراک تشکر و قدردانی می‌نمایند.

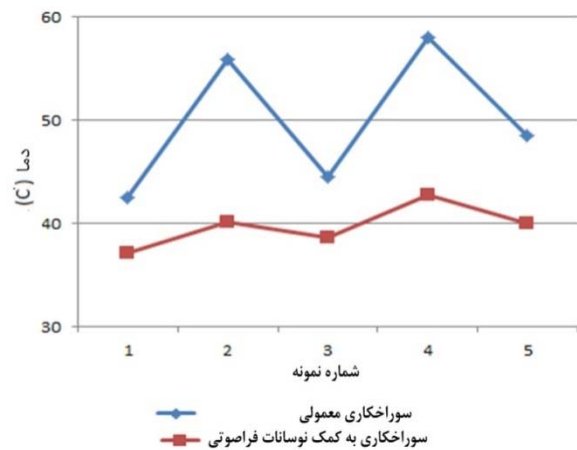
تاییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند که نتایج این مقاله در مجله دیگری چاپ نشده است.

تعارض منافع: همه نویسندگان منافع یکسانی از این مقاله دارند.

سهم نویسندگان: عباس پاک (نویسنده اول)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ حامد یاقوتی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ وحید طهماسبی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪).

منابع مالی: موردی بیان نشده است.

39). در این بخش با توجه به نتایج به‌دست آمده از این مطالعات، مقایسه بین فرآیند سوراخ‌کاری معمولی و با اعمال نوسان‌های فراصوتی انجام شده است. مشخصات نقاط مورد مقایسه و نمودار آنها در جدول ۸ و نمودار ۱۱ آورده شده است. با مقایسه نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که در برخی نقاط استفاده از نوسان‌های فراصوتی دمای سوراخ‌کاری را تا ۳۵٪ کاهش داده است.



نمودار ۱۱) مقایسه دما در سوراخ‌کاری معمولی و سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی

جدول ۸) مشخصات نقاط تصادفی مقایسه شده در هر دو روش

شماره نقطه	سرعت دوران (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	دما در سوراخ‌کاری معمولی (°C)	دما در سوراخ‌کاری به کمک نوسان‌های فراصوتی (°C)
۱	۵۰۰	۲۰	۴۲/۵۵	۳۷/۱۹
۲	۱۵۰۰	۲۰	۵۵/۸۵	۴۰/۲
۳	۵۰۰	۴۰	۴۴/۵۱	۳۸/۶۵
۴	۱۵۰۰	۴۰	۵۸/۰۱	۴۲/۷۳
۵	۱۰۰۰	۳۰	۴۸/۵۲	۴۰/۰۶

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک طراحی آزمایش مناسب، مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ بر روی فرآیند سوراخ‌کاری استخوان به کمک نوسان‌های فراصوتی با درنظر گرفتن سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی و دامنه نوسان به‌عنوان متغیرهای ورودی و دما به‌عنوان متغیر خروجی، صورت پذیرفته است. با توجه به استخراج معادله ریاضی درون‌یابی خطی مرتبه دوم رفتار هر یک از متغیرها در پاسخ فرآیند مورد بررسی قرار گرفته و میزان دقیق حساسیت هریک از پارامترهای ورودی بر روی رفتار دما با استفاده از روش تحلیل حساسیت سوپل تعیین شده است. با انجام بهینه‌سازی فرآیند شرایط مناسب برای تولید کمترین دما در کمترین زمان جراحی به‌دست

- ultrasonic bone drilling. *Medical Engineering & Physics*. 2016;38(11):1330-1338.
- 18- Gupta V, Pandey PM, Gupta RK, Mridha AR. Rotary ultrasonic drilling on bone: A novel technique to put an end to thermal injury to bone, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: *Journal of Engineering in Medicine*, 2017;231(3):189-196.
 - 19- Singh G, Jain V, Gupta D, Ghai A. Optimization of process parameters for drilled hole quality characteristics during cortical bone drilling using Taguchi method. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016;62:355-365.
 - 20- Vashishth D, Tanner K, Bonfield W. Contribution, development and morphology of microcracking in cortical bone during crack propagation. *Journal of Biomechanics*. 2000;33(9):1169-1174.
 - 21- Pandey RK, Panda SS. Multi-performance optimization of bone drilling using Taguchi method based on membership function. *Measurement*. 2015;59:9-13.
 - 22- Wang W, Shi Y, Yang N, Yuan X. Experimental analysis of drilling process in cortical bone. *Medical Engineering & Physics*. 2014;36(2):261-266.
 - 23- Pandey RK, Panda SS. Optimization of bone drilling using Taguchi methodology coupled with fuzzy based desirability function approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2015;26(6):1121-1129.
 - 24- Pandey RK, Panda SS. Optimization of multiple quality characteristics in bone drilling using grey relational analysis. *Journal of Orthopaedics*. 2015;12(1):39-45.
 - 25- Staroveski T, Brezak D, Udiljak T. Drill wear monitoring in cortical bone drilling. *Medical Engineering & Physics*. 2015;37(6):560-566.
 - 26- Matthews LS, Hirsch C. Temperatures measured in human cortical bone when drilling. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 1972;54(2):297-308.
 - 27- Hou TH, Su CH, Liu WL. Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the Taguchi method, response surface method and genetic algorithm. *Powder Technology*. 2007;173(3):153-162.
 - 28- Nekahi A, Dehghani K. Modeling the thermomechanical effects on baking behavior of low carbon steels using response surface methodology. *Materials & Design*. 2010;31(8):3845-3851.
 - 29- Moradi M, Ghoreishi M, Frostevarg J, Kaplan AF. An investigation on stability of laser hybrid arc welding. *Optics and Lasers in Engineering*. 2013;51(4):481-487.
 - 30- Moradi M, Ghoreishi M, Torkamany M. Modelling and optimization of Nd: YAG laser and tungsten inert gas (TIG) hybrid welding of stainless steel. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*. 2014;27(3):211-230.
 - 31- Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*. 8th edition. New Jersey: John Wiley & Sons; 2012.
 - 32- Sobol IM. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *MMCE*. 1993;1(4):407-414.
 - 33- Sobol IM. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2001;55(1-3):271-280.
 - 34- 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:
 - 1- Augustin G, Zigman T, Davila S, Udiljak T, Staroveski T, Brezak D, Babic S. Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis. *Clinical biomechanics*. 2012;27(4):313-325.
 - 2- 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(4):1018-1026.
 - 3- 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(9):855-861.
 - 4- Dahotre NB, Joshi S. *Machining of bone and hard tissues*. New York City: Springer; 2016.
 - 5- Brehl DE, Dow TA. Review of vibration-assisted machining. *Precision Engineering*. 2008;32(3):153-172.
 - 6- Khademi V. *Ultrasonic assisted bone drilling [Dissertation]*. Tehran: Sharif University of Technology; 2008. [Persian]
 - 7- Khademi V, Akbari J, Farahmand F, Masoumi E. S-46 experimental investigation of ultrasonic-assisted bone drilling. *Journal of Biomechanics*. 2010;43(1):S47-S48.
 - 8- Alam K, Silberschmidt VV. Analysis of temperature in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone with infrared thermography. *Technology and Health Care*. 2014;22(2):243-252.
 - 9- Alam K, Khan M, Silberschmidt V. Finite element modeling and analysis of ultrasonically-assisted drilling of bone. Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation. California: ACM Digital Library; 2018. pp. 216-220.
 - 10- Alam K, Ahmed N, Silberschmidt VV. Comparative study of conventional and ultrasonically-assisted bone drilling. *Technology Health Care*. 2014;22(2):253-262.
 - 11- Alam K, Hassan E, Bahadur I. Experimental measurements of temperatures in ultrasonically assisted drilling of cortical bone. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 2015;29(4):753-757.
 - 12- Alam K, Mitrofanov AV, Silberschmidt VV. Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone. *Medical Engineering & Physics*. 2013;33(2):234-239.
 - 13- Wang Y, Cao M, Zhao X, Zhu G, McClean C, Zhao Y, et al. Experimental investigations and finite element simulation of cutting heat in vibrational and conventional drilling of cortical bone. *Medical Engineering & Physics*. 2014;36(11):1408-1415.
 - 14- Shakouri E, Sadeghi MH, Maerefat M, Karafi MR, Memarpour M. Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic assisted drilling of bone. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(6):194-200. [Persian]
 - 15- Shakouri E, Sadeghi MH, Karafi MR, Maerefat M, Farzin M. An in vitro study of thermal necrosis in ultrasonic-assisted drilling of bone. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: *Journal of Engineering in Medicine*. 2015;229(2):137-149.
 - 16- Shakouri E, Sadeghi MH, Karafi M, Farzin M. Effect of rotatory-vibrational bone drilling in lowering thermal necrosis (an animal study). *Iranian Journal of Orthopaedic Surgery*. 2014;12(2):53-59. [Persian]
 - 17- Gupta V, Pandey PM. Experimental investigation and statistical modeling of temperature rise in rotary

design. Cambridge: Cambridge University Press; 2012.

38- 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. Part H: Journal of Engineering in Medicine. 2017;231(11):1012-1024.

39- Zolfaghari M, Ghoreishi M, Tahmasbi V. Temperature in bone drilling process: Mathematical modeling and Optimization of effective parameters. International Journal of Engineering-Transactions. 2016;29(7):946-953.

Journal of Engineering in Medicine. 2017;231(11):1012-1024.

35- Tahmasbi V, Ghoreishi M, Zolfaghari M. Sensitivity analysis of temperature and force in robotic bone drilling process using Sobol statistical method. Biotechnology & Biotechnological Equipment. 2018;32(1):130-141.

36- Knight WA, Boothroyd G. Fundamentals of metal machining and machine tools. 3rd edition. Florida: CRC Press; 2005.

37- Altintas Y. Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC