

تحلیل تجربی، آنالیز حساسیت و بهینه سازی تاثیر پارامترهای زاویه رأس و زاویه مارپیچ مته بر روی رفتار دمای فرایند سوراخکاری استخوان کورتیکال

مهدی صفری*
 وحید طهماسبی
 پیمان حسن پور
 مجتبی ذوالفقاری

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.safari@arakut.ac.ir
 استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، tahmasbi@arakut.ac.ir
 کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، p.hasanpour1376@gmail.com
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-zolfaghari@araku.ac.ir

چکیده

در این پژوهش با در نظر گرفتن زاویه مارپیچ و زاویه رأس مته به عنوان مهمترین فاکتورهای هندسی مته و با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش سطح پاسخ، رفتار دما و نکرور گرمایی در سوراخکاری استخوان بررسی شده است. بدین منظور ضمن انجام آزمایش‌های تجربی بر روی استخوان کورتیکال ران تازه گاو یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای رفتار دما استخراج گردیده و از دقت آن اطمینان حاصل شده است. با استفاده از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل، میزان تأثیر دقیق هر یک از پارامترهای ورودی زاویه رأس و زاویه مارپیچ بر خروجی دما به دقت بررسی شده است. همچنین با استفاده از روش بهینه سازی درینگر کمترین مقدار دمای ایجاد شده در بازه تغییر فاکتورهای ورودی فرآیند ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهند کمترین دمای ایجاد شده در بافت استخوان در زاویه رأس ۹۰ و زاویه مارپیچ ۲۷ درجه حاصل می‌گردد. همچنین با افزایش زاویه رأس و کاهش زاویه مارپیچ دمای ایجاد شده در بافت استخوان در فرآیند سوراخکاری افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات دما حساسیت بیشتری به تغییرات زاویه مارپیچ نسبت به زاویه رأس مته دارد. **واژه‌های کلیدی:** سوراخکاری استخوان، دما، نکرور گرمایی، روش سطح پاسخ، تحلیل حساسیت آماری، بهینه سازی.

Experimental investigation, sensitivity analysis and optimization on the effect of drill bit's point angle and helix angle on cortical bone drilling process temperature

M. Safari
 V. Tahmasbi
 P. Hassanpour
 M. Zolfaghari

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

Abstract

In this study, considering the point angle and helix angle as the most prominent geometrical parameters associated with the tool, using design of experiment based on Response Surface Method, evolution of process temperature and possibility of thermal necrosis were investigated. For this purpose, performing experimental tests on fresh bovine cortical bone, second order linear regression equation reflecting the process temperature was derived and validated. Using the Sobel sensitivity analysis, the exact influence of each point angle and helix angle on temperature was specified. Also, using durringer optimization method, the minimum process temperature, coincided with the optimum point angle and helix angles, was obtained. Results showed that minimal temperature could be obtained with vortex angle of 90 and helix angle of 27. Moreover, with higher point angles and lower helix angles drilling temperature in bone tissue increased. Finally, drilling temperature was more sensitive to the variation of helix angle rather than point angle.

Keywords: Bone drilling, Temperature, Thermal necrosis, Response surface methodology, Statistical sensitivity analysis, Optimization.

می‌شود و ایجاد نکرور گرمایی یا مرگ سلولی در بافت استخوان می‌باشد و استحکام محل سوراخکاری برای ایمپلنت گذاری کاهش می‌یابد [۱] و همچنین موجب طولانی شدن مرحله درمان شکستگی که در برخی موارد جبران ناپذیر خواهد بود، می‌گردد. این موضوع در جراحی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

عارضه نکرور گرمایی استخوان بر اثر بالا رفتن دما در آن ایجاد می‌گردد و در نتیجه‌ی آن خون‌رسانی به بافت استخوان با مشکل مواجه می‌شود. این امر باعث ایجاد مرگ سلولی و از بین رفتن موضعی بافت استخوان و ضعیف شدن ساختار آن می‌گردد [۲]. لندسکوگ در تحقیق خود در این زمینه دریافت که اگر در دمای ۵۵ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ ثانیه عمل سوراخکاری صورت گیرد موجب رخ دادن پدیده نکرور

۱- مقدمه

استخوان را می‌توان به عنوان یکی از مهمترین اعضای بدن انسان و سایر مهره داران بر شمرده. در جراحی‌های اورتوپدی هدف، کنار هم قرار دادن و ثابت نگه داشتن استخوان‌های آسیب دیده در کنار هم می‌باشد تا استخوان عمل خود ترمیمی را انجام دهد. در عمل جراحی استخوان عمدتاً برای کنار هم قرار دادن نیاز به انجام فرآیند سوراخکاری و ایمپلنت گذاری می‌باشد. طبق پژوهشی که محققین این حوزه از استخوان کورتیکال (استخوانه‌های فشرده و متراکم) ارائه داده‌اند، بالا رفتن دمای فرآیند سوراخکاری از محدوده مجاز (۴۷ درجه سلسیوس به مدت یک دقیقه) منجر به تغییر ماهیت آلكالین فسفاتاز استخوان

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.safari@arakut.ac.ir

گرمایی می‌شود [۳]. بالارفتن دما از مقدار ۴۷ تا ۵۰ درجه به مدت یک دقیقه بر روی بافت استخوان اثرگذار خواهد بود و اثرات دمایی در دمای زیر ۴۴ درجه سلسیوس به مدت یک دقیقه بر روی استخوان ناچیز است [۴].

یکی از مهمترین مواردی که در رفتار دما در این فرآیند نقش بسزایی دارد پارامترهای هندسه مته های به کار رفته در سوراخکاری استخوان است. ناراشیما در تحقیقی نشان داد که زاویه مارپیچ و زاویه رأس نسبت به دیگر زاویه‌ها در مته اثر بیشتری در تغییرات دما دارند [۵]. بجتول هنگام سوراخکاری استخوان اثر تغییرات زاویه رأس مته را بر روی دما مورد بررسی قرار داد و مقدار بهینه این زاویه را ۹۰ درجه اعلام نمود [۶] که بعدها این پیشنهاد نیز توسط جاکوب و همکارش نیز مورد تایید قرار گرفت [۷]. سینگ نیز مقدار زاویه رأس پیشنهادی جهت کمینه شدن دما در جراحی های ارتوپدی را بین ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه اعلام نمود [۸]. کالیدیندی با استفاده از سه مته با قطرهای ۲، ۳/۵ و ۴/۳ میلی‌متر و نرخ پیشروی ۰/۴۲ میلی‌متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه دریافت که با افزایش قطر مته، دما در محل سوراخکاری به صورت یک تابع نمایی افزایش پیدا می‌کند [۹]. آگوستین و همکارانش [۱۰] نیز با تحقیق بر روی استخوان خوک بیان داشتند با افزایش قطر سوراخ، سطح بین استخوان و مته افزایش می‌یابد و در اثر آن اصطکاک بین مته و استخوان دمای ایجاد شده بیشتر خواهد شد. هم‌چنین قطر بیشتر موجب کاهش مقاومت استخوان و هم‌چنین افزایش طول دوره درمان می‌شود. البته هافنر و همکارانش [۱۱] اثر قطر و طول مته را بر روی انحراف مته از محل دقیق جراحی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند استفاده از مته با قطر کم و طول بلند سبب ایجاد انحراف مته از محل دقیق جراحی می‌شود و دما نیز بالا می‌رود.

تاکنون مقادیر خاص و استاندارد برای هندسه مته در جراحی استخوان ارائه نشده است. در حال حاضر تحقیقات مختلفی برای ارائه بهترین هندسه مته جهت انجام سوراخکاری استخوان در حال انجام است. برخی از این تحقیقات برتری مته‌های استاندارد را که برای سوراخکاری فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرد برای جراحی‌های ارتوپدی از جهت خصوصیات مته بیان می‌کند به این دلیل که استخوان از مدل ماده‌ی جانسون-کوک پیروی می‌کند که این مدل ماده در مورد فلزات بیشترین کاربرد را دارد. پاندا و پاندى [۱۲] با تحقیق بر روی زاویه رأس و زاویه مارپیچ مته بیان داشتند در بین مته‌های استاندارد موجود (که قطر ۳/۵ میلی‌متر در بازه‌ی مورد نظر قرار داشت) دقت ابعادی سوراخ و دما در هنگام لایه برداری استخوان با زاویه رأس ۱۱۸ درجه و زاویه مارپیچ ۳۰ درجه بهتر می‌باشد. تویجتوف و همکاران [۱۳] نیز با در نظر داشتن انواع مته از جمله مته با قطر ۳/۵ میلی‌متر، اثر هندسه مته و نرخ پیشروی را بر روی دمای ایجاد شده در دو نوع استخوان کورتیکال و تراپیکولار مورد مطالعه قرار دادند و ضمن مهم دانستن اثرات نرخ پیشروی و هندسه مته بر روی دما و با توجه به اختلاف اثرات مثبت و منفی هر یک از این نوع مته ها که منظور فعالیت دیگری ساخته شده‌اند، بیان داشتند که در صورت یکسان بودن قطر ابزار، زاویه رأس و زاویه مارپیچ از بین سایر پارامترهای هندسه مته بیشترین اثر را در رفتار دما دارند و می‌بایست یک مقدار بهینه برای آنها لحاظ گردد و به انتخاب واحدی از بین این مته‌ها نرسیده-اند. سینگ و همکاران [۱۴] نیز با بررسی سه مدل هندسه مته متفاوت با

قطر ۴ میلی‌متر بر روی دقت ابعادی و زبری سطح سوراخ ایجاد شده در بافت استخوان، دریافتند که هندسه مته‌های استاندارد نسبت به دیگر هندسه‌ها مناسب‌تر هستند. فاشبرگر و همکاران [۱۵] در تحقیقی دریافتند که به دست آوردن هندسه‌ی بهینه‌ی مته بستگی به ماده‌ی مورد آزمایش دارد و با انجام سوراخکاری بر روی استخوان دریافتند که با ایجاد زوایای مارپیچ ۱۲ درجه و رأس ۷۰ درجه کم‌ترین میزان دما به وجود خواهد آمد. ناتالی و همکاران [۱۶] در تحقیق با انجام عمل سوراخکاری بر روی استخوان با استفاده از مته‌های استاندارد دریافتند که با ایجاد زاویه‌های رأس ۱۱۸ درجه و زاویه مارپیچ ۲۴ درجه کم‌ترین میزان دما محوری ایجاد خواهد شد. فانوورس و همکارانش [۱۷] نیز در عملی مشابه به این نتیجه رسیدند که مته‌ای با زوایای مارپیچ ۲۷ درجه و رأس ۱۳۰ درجه کم‌ترین مقدار دما را ایجاد خواهد کرد. گرین، ویگین و همکاران [۱۸] در پژوهشی زوایای رأس و مارپیچ متفاوتی را مورد بررسی قرار دادند که قطر ۳/۵ میلی‌متر نیز در بازه انتخابی‌شان قرار داشت و به این نتیجه رسیدند که زاویه رأس ۱۱۸ و زاویه مارپیچ ۲۸ درجه باعث به وجود آمدن کمترین مقدار دما خواهند شد. هولر [۱۹] در سال ۲۰۱۵ با بررسی استانداردهای جراحی، صنعتی و تمامی تحقیقات صورت گرفته بر روی هندسه ابزار جهت کمینه شدن دما دریافت که در تحقیقات قبل از ایشان نظرات بسیار متفاوت بوده است و با بررسی استانداردهای هندسه مته؛ بهترین قطر مته برای سوراخکاری استخوان ۳/۵ میلی‌متر، مقدار زاویه رأس ۱۰۵ درجه و زاویه مارپیچ ۲۷ درجه را پیشنهاد داده است این در حالی است که در برخی از مته‌های جراحی مقدار زاویه رأس را ۷۸ درجه و زاویه مارپیچ را ۱۴ درجه و استاندارد صنعتی نیز برای قطر ۳/۵ میلی‌متر مقدار زاویه رأس ۱۱۸ درجه و زاویه مارپیچ ۲۲ تا ۳۰ درجه در نظر گرفته است. در جدیدترین تحقیقات، طهماسبی و همکاران [۲۰] با بهره‌گیری از طراحی آزمایش‌ها به روش پاسخ سطح دریافتند که کاهش قطر ابزار موجب کاهش دما سوراخکاری می‌شود. اثر قطر مته در سوراخکاری استخوان و دمای ایجاد شده در آن توسط محققین متعددی مورد بررسی قرار گرفته است آن‌ها دریافتند که قطر مته سوراخکاری پارامتری تأثیرگذار در دما و نیروی ایجاد شده در سوراخکاری است.

با توجه به تحقیقات قبلی مشخص می‌شود که داده‌های پیشنهادی محققین باهم تفاوت قابل توجهی دارند و دلیل آن نیز عدم ارتباط صحیح بین فاکتورهای ورودی و اثر آن‌ها بر خروجی فرآیند بوده است. رفع این مشکل و دستیابی به مقادیر دقیق و بهینه هندسه مته و به کارگیری آن در سوراخکاری استخوان، نیازمند یک طراحی آزمایش و بررسی دقیق است که مقدار دقیق زاویه رأس مته، زاویه مارپیچ، زاویه براده و دیگر خصوصیات آن به منظور کمینه کردن دما محاسبه شود. البته می‌بایست در تهیه این مته‌ها از جنس‌ها و پوشش‌دهی‌هایی استفاده نمود که الزامات پزشکی فرآیند را در عمل جراحی پوشش دهد. همچنین تاکنون از روش‌های آماری آنالیز حساسیت جهت بررسی دقیق و کمی میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر رفتار دما در فرآیند سوراخکاری استخوان استفاده نشده است.

در این تحقیق با در نظر گرفتن پارامترهای مهم هندسی مته‌های جراحی شامل زاویه مارپیچ و زاویه رأس مته، یک مدل ریاضی رگرسیون مرتبه دوم خطی با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ به منظور پیش بینی

در این روش 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 می‌باشد، و واریانس خروجی مدل (V) به صورت مجموع واریانس‌های هر ترم تجزیه شده به صورت معادله (۲) می‌باشد:

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

که در آن، V_i تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی x_i ($V_i = V[E(Y|x_i)] - V_i - V_j$) و V_{ij} ($V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i - V_j - V_{ij}$) 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 مرتبه‌ی اول، $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}$ شاخص حساسیت مرتبه‌ی دوم و ...). شاخص حساسیت کلی یا همان تأثیر کلی هر پارامتر به صورت مجموع همه‌ی مرتبه‌های شاخص حساسیت برای آن پارامتر به صورت معادله (۳) به دست می‌آید [۲۵]:

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

۴- متد و روش‌ها

در بررسی رفتار دما در فرآیند سوراخکاری استخوان کورتیکال، پارامترهای زاویه رأس مته، و زاویه مارپیچ مته به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند در نظر گرفته شده است. همچنین بیشترین مقدار دمای ایجاد شده در بافت استخوان در حین سوراخکاری به عنوان پاسخ فرآیند، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در انجام آزمایش‌ها از استخوان تازه گاو (سن حدود ۳ الی ۴ سال) استفاده شده است (شکل ۱) ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استخوان کورتیکال ران گاو به استخوان‌های بلند انسان نزدیک است [۲۶]. به منظور سهولت در انجام تحقیقات قسمت ابتدایی و انتهایی استخوان ران به وسیله اره جدا شده است. عمق سوراخکاری انجام شده در نمونه‌ها ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. خواص استخوان با گذشت زمان تغییرات زیادی خواهد داشت. در انجام این تحقیق نباید مدت زمان زیادی از زنده بودن بافت استخوان گذشته باشد تا خواص مکانیکی و ترموفیزیکی و چگالی بافت تازه استخوان حفظ گردد و به بافت زنده مورد عمل جراحی شباهت داشته باشد. خواص ماده استخوان با گذشت زمان بسیار تغییر خواهد کرد و دیگر مشابهت لازم را با شرایط عمل جراحی نخواهد داشت. هیچ حیوانی به منظور و با هدف انجام این تحقیق قربانی نشده است. عمق سوراخکاری انجام شده در نمونه‌ها ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. [۲۷]. شکل ۲ شماتیک یک مته و مشخصات هندسی و ابعادی آن را نشان می‌دهد. از یک دستگاه ماشین فرز کنترل عددی (CNC) آزمایشگاهی دقیق جهت انجام فرآیند سوراخکاری بهره گرفته شده است. جهت اندازه‌گیری دما از ترموکوپل‌های نوع K مشابه اکثر پژوهش‌های قبلی که در این حوزه انجام شده بهره گرفته شده است [۲۶]. محل استقرار ترموکوپل به منظور اندازه‌گیری دما بر اساس بررسی‌هایی که در تحقیقات پیشین صورت گرفته است در عمق ۳ میلیمتری و فاصله ۰/۵ میلیمتری از دیواره سوراخ ایجاد شده در بافت استخوان می-

رفتار دما ارائه شده است و اثر هر یک از پارامترهای ورودی با در نظر داشتن اثر بر هم کنش بین فاکتورها مورد بررسی قرار گرفته و بهینه سازی لازم نیز در این خصوص صورت گرفته است. سپس ضمن بررسی و مطالعه روش‌های مختلف آنالیز حساسیت، روش آنالیز حساسیت آماری سوپل مورد انتخاب قرار گرفته است و با استفاده از این روش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر روی پاسخ خروجی دما پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی آماری و طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ

در تحلیل مسائل مهندسی به ویژه در انجام آزمایش‌های تجربی و روش‌های شبیه سازی عددی که در آن‌ها پاسخ مسئله تحت تأثیر متغیرهای مختلف ورودی است، بهره‌گیری از روش‌های آماری طراحی آزمایش‌ها کمک شایانی به طراحی، مدل‌سازی و تحلیل و بهینه سازی دقیق این فرآیندها می‌نماید. در این زمینه یکی از بهترین روش‌های آماری، روش سطح پاسخ است [۲۱]. طراحی آزمایش‌ها یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای محققین در بهبود و اصلاح و صرفه جویی در وقت و هزینه‌های آزمایش‌ها و تشخیص دقت و رفع عیوب آن‌ها می‌باشد [۲۲]. تبیین دقت آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر آزمایش، ارائه نمودارهای برهم‌کنش متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها از مزایای مهم روش سطح پاسخ است [۲۳]. همچنین این روش این قابلیت را دارد که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک آزمایش را مدل‌سازی نموده و به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم ارائه نماید. فرم کلی معادله با توجه متغیرها و برهم‌کنش‌های مؤثر به صورت معادله (۱) می‌باشد [۲۰].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

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

۳- روش تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت ابزاری مناسب جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین میزان اثر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها در مسائل مهندسی می‌باشد. 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 [۲۴].

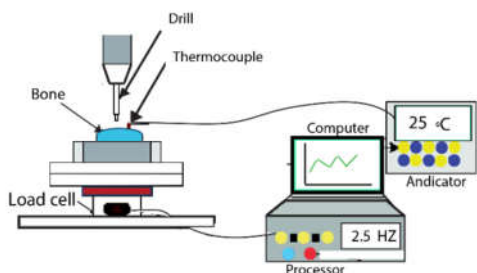
۱-۳- روش تحلیل حساسیت سوپل

تحلیل حساسیت آماری سوپل یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که برپایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد



شکل ۳ - مته‌های با قطر ۳/۵ میلی متر استفاده شده در آزمایش‌ها

نمونه‌ای از نحوه پژوهش در فرآیند سوراخکاری استخوان در حالت آزمایشگاهی در شکل ۴ ارائه شده است. برای اندازه‌گیری دمای سوراخکاری از ترموکوپل‌های با دقت بالا بهره گرفته شده است به شکلی که فاصله سطح جانبی ترموکوپل از سطح جانبی سوراخ ۰/۵ میلی‌متر باشد (شکل ۵) [۲۸]. سرعت دورانی دستگاه ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی نیز ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد.



شکل ۴ - طرح‌های از فرآیند سوراخکاری استخوان کورنیکال

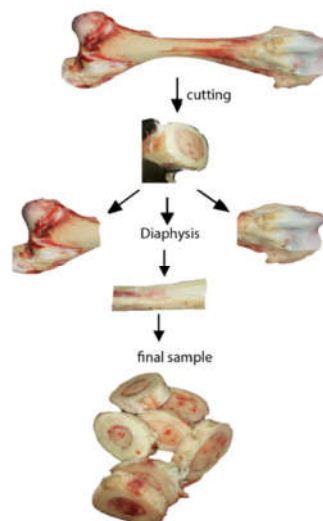
جدول ۱ - پارامترهای ورودی ماشینکاری در سه سطح

	حد پایین	حد وسط	حد بالا
زاویه مارپیچ	۱۴	۲۰.۵	۲۷
زاویه رأس	۹۰	۱۱۲/۵	۱۳۵

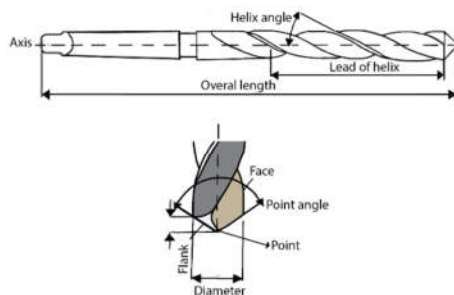
نمونه‌ای از نحوه انجام آزمایش‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

باشد [۲۰]. در این پژوهش به منظور رعایت حداکثر دقت اندازه‌گیری، ترموکوپل‌های کالیبره شده (ترموکوپل مدل K و ترموکوپل مدل T) با استفاده از بهترین مواد اولیه در شرکت صنعتی پارس جهد که مجهز به تجهیزات و سیستم‌های ساخت و آزمایشگاه کالیبراسیون انواع ترموکوپل می‌باشد طراحی و ساخته شده است. یکی از بهترین تجهیزات پردازنده دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل که با کمترین میزان خطا دمای واقعی در حین فرآیند را نمایش می‌دهد متعلق به شرکت سازنده آمریکایی ABB می‌باشد که در این تحقیق از این پردازنده‌ها استفاده شده است.

در حین انجام آزمایش‌ها به طور متناوب از کالیبراتورهای دمای ترموکوپل به منظور اطمینان از به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری بهره گرفته شده است. دقت اندازه‌گیری ترموکوپل‌ها ۰/۰۱ درجه سلسیوس می‌باشد. ابزارهای استفاده شده در فرآیند مته‌های استاندارد فولاد تند بر با قطر ۳.۵ میلی‌متر می‌باشد که به جهت تیز بودن تمامی زوایا به صورت نو خریداری شد (شکل ۳). این مته‌ها دارای سه نوع مارپیچ متفاوت ۱۴، ۲۰.۵ و ۲۷ درجه به صورت استاندارد می‌باشد (جدول ۱)؛ که زاویه‌های رأس آن‌ها توسط دستگاه مته تراش در زاویه‌های ۹۰، ۱۱۲/۵ و ۱۳۵ سنگ زنی شده اند و جهت صحت سنجی و اطمینان از کالیبره بودن دستگاه از گیج‌های زاویه‌سنج استفاده شد.



شکل ۱- استخوان کورنیکال تازه تکه شده از ران گاو



شکل ۲ - طرح‌های از ابعاد، زوایا و هندسه مته

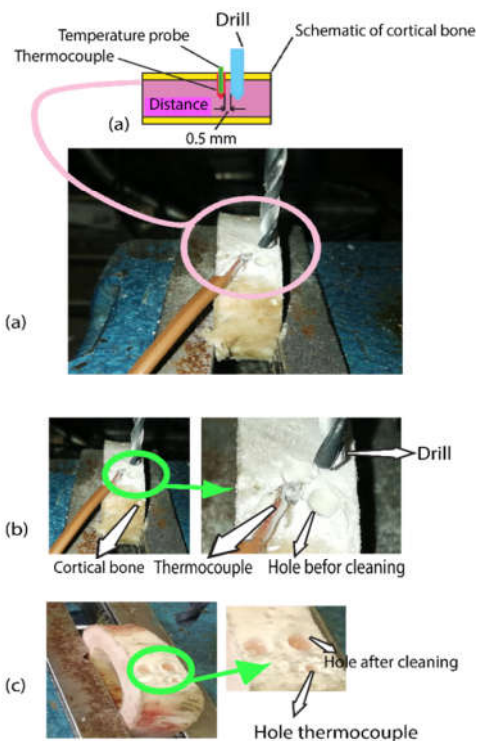
جدول ۲ - طراحی آزمایش ها به روش پاسخ سطح و دما های به دست

شماره آزمایش	آمده بر حسب درجه سلسیوس		
	زاویه مارپیچ	زاویه رأس	دما (درجه سلسیوس)
1	14	90	43.36
2	14	135	33.9
3	27	90	30.17
4	27	135	38.34
5	20.5	90	43.86
6	20.5	135	39.56
7	14	112.5	49.57
8	27	112.5	40.01
9	20.5	112.5	42.81
10	20.5	112.5	43.86
11	20.5	112.5	44.51

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

۵- تحلیل، تفسیر و مدل‌سازی داده‌ها

با توجه به نتایج بدست‌آمده از تحلیل دما، نتایج حاصل از آنالیز واریانس در جدول ۳ آمده‌است. آنالیز واریانس میزان تاثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش بسزایی دارد. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر فاکتورهای ورودی و برهم کنش‌های آن‌ها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید [۲۲].



شکل ۵- نحوه ی انجام آزمایشات در فرآیند سوراخکاری استخوان و نمونه بعد از آزمایش

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی در جدول ۲ آمده است.

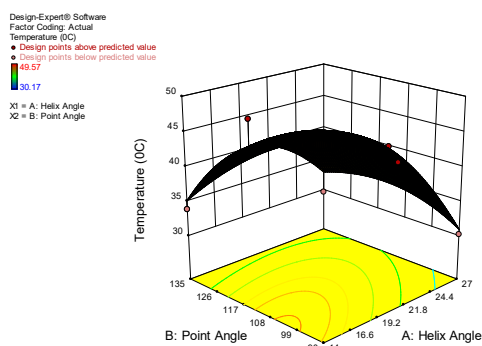
جدول ۳ - تحلیل واریانس دما بر حسب ورودی‌های مؤثر در سوراخکاری استخوان

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	248.498	86.08%	248.498	49.6997	6.18	0.034
Linear	2	61.084	21.16%	61.084	30.542	3.8	0.099
helix angle	1	55.876	19.35%	55.876	55.876	6.95	0.046
point angle	1	5.208	1.80%	5.208	5.208	0.65	0.457
Square	2	109.71	38.00%	109.71	54.8551	6.82	0.037
(H.A)*(H.A)	1	37.236	12.90%	13.039	13.0389	1.62	0.259
(P.A)*(P.A)	1	72.475	25.10%	72.475	72.4747	9.01	0.03
2-Way Interaction	1	77.704	26.92%	77.704	77.7042	9.66	0.027
(H.A)*(P.A)	1	77.704	26.92%	77.704	77.7042	9.66	0.027
Error	5	40.199	13.92%	40.199	8.0399		
Lack-of-Fit	3	38.728	13.41%	38.728	12.9093	17.54	0.054
Pure Error	2	1.472	0.51%	1.472	0.7358		
Total	10	288.698	100.00%				

R-sq= 86.08 %

۵-۱- بررسی متغیرهای ورودی در رفتار دما در فرآیند سوراخکاری استخوان

در این بخش با توجه به مدل‌سازی به دست آمده و مقایسه آن با داده‌های آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در مدل، سعی بر آن است تا اثر زاویه مارپیچ و زاویه ی رأس در رفتار دما تبیین گردد. نمودارهای شکل ۷ الی ۱۲ رفتار دما را بر اساس متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدل‌سازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ ارائه می‌دهند [۲۵]. شکل ۷ رویه رگرسیون مرتبه دوم خطی حاصل از مدل‌سازی رفتار دما بر حسب پارامترهای ورودی است. نقاط اکسترمم و منحنی و نقاط مرزی می‌بایست به دقت در این رویه بررسی گردند. همانطور که در شکل مشخص است برهم کنش زوایای راس و مارپیچ مته نشان دهنده یک نقطه بیشینه در مدل‌سازی است.



شکل ۷ - نمودار سه بعدی دمای فرآیند بر حسب زوایای رأس و مارپیچ به عنوان متغیرهای ورودی

۵-۱-۱- بررسی اثر زاویه‌ی مارپیچ بر روی دمای سوراخکاری

با توجه به "شکل‌های ۸"، "۱۰" و "۱۱" با افزایش زاویه مارپیچ ابزار دما روندی کاهشی را طی می‌کند. افزایش زاویه مارپیچ تا حدود ۲۷ درجه نیز موجب خروج بهتر براده و جلوگیری از گیر کردن براده و در نتیجه کاهش تقریبی اصطکاک بین جداره سوراخ و مته می‌گردد و به سبب آن دما کاهش می‌یابد. از این موارد نتیجه می‌شود که برای دمای کمتر در انجام فرآیند سوراخکاری استخوان زاویه مارپیچ باید نزدیک به ۲۷ درجه داشته باشد [۳۰].

۵-۱-۲- بررسی اثر زاویه‌ی رأس بر روی دمای سوراخکاری

همان‌طور که در نمودارهای "شکل ۹"، "۱۰" و "۱۲" مشاهده می‌شود هرچه زاویه راس بیشتر باشد نفوذ مته به قطعه کار راحت‌تر است و به دنبال آن دمای ایجاد شده هنگام سوراخکاری کمتر است. و برعکس اگر زاویه راس افزایش یابد به دلیل این نفوذ سخت‌تر، دما در ماده نیز افزایش می‌یابد [۳۰]. شکل ۱۰ نیز نشان می‌دهد جهت به دست آمدن کمترین

با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار P کمتر از ۰/۰۵ به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود [۲۲]. مقدار خطای مجموع مربعات مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون 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 مؤلفه برای مدل رگرسیون مرتبه دوم کامل بدست آمد [۲۲]. معادله (۴) معادله رگرسیون حاکم بر مسئله را نشان می‌دهد:

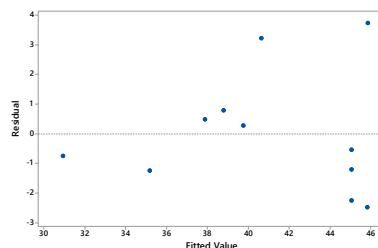
$$\begin{aligned} Temp(^{\circ}C) = & -27.4 - 1.66(HA) + 1.718(PA) \\ & - 0.0537(HA)^2 \\ & - 0.01057(PA)^2 \\ & + 0.03014(HA \\ & * PA) \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن پارامتر H.A زاویه مارپیچ و P.A زاویه راس مته بر حسب درجه می‌باشد.

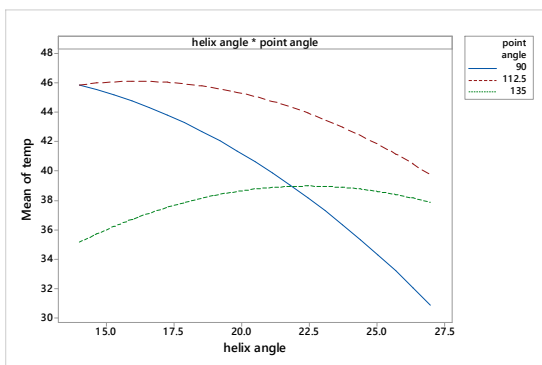
با در نظر گرفتن مقادیر $R-sq = 86.08\%$ و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت گرفته از دقت خوب و مناسبی برخوردار است. در مبحث طراحی آزمایش‌ها به روش پاسخ سطح یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را مشخص می‌کند مقدار $R-sq$ مدل می‌باشد. و مقدار آن با استفاده از معادله (۵) قابل محاسبه است [۲۹]:

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_{Res}}{SS_T} \quad (5)$$

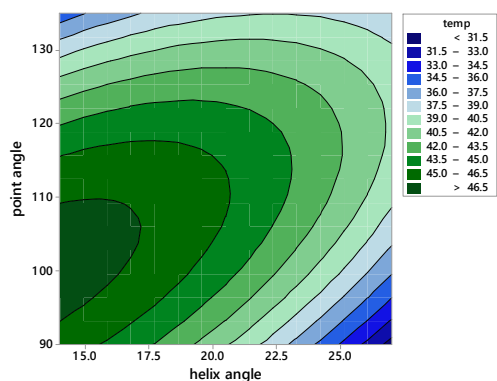
هرچه مقدار این مؤلفه به عدد ۱ و یا ۱۰۰ درصد نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش‌بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیق‌تر خواهد بود. یکی دیگر از مواردی که دقت مدل‌سازی و نتایج حاصله را تعیین می‌کند، بحث تحلیل پراکندگی باقیمانده‌ها بر طبق معادله‌ی ۵ می‌باشد. مدلی که به داده‌های واقعی منطبق شده‌است باید از نزدیک مقادیر واقعی عبور کرده باشد و در عین حال فاصله داده‌های واقعی از مدل رگرسیون منطبق شده کم و تصادفی باشد. کم بودن این مقدار را $R-sq$ مشخص می‌کند و پراکندگی تصادفی آن را نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که در این تحقیق هم مدل خوب منطبق شده و هم نظم خاصی در توزیع باقیمانده‌ها مشاهده نمی‌شود که این نشان دهنده‌ی نتیجه‌ی مطلوب می‌باشد.



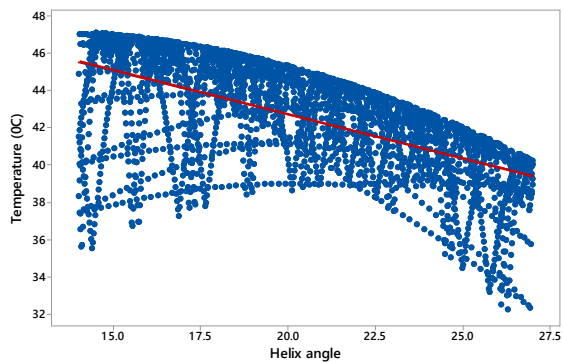
شکل ۶ - پراکندگی باقیمانده‌ها در آزمایش با مدل‌سازی صورت گرفته



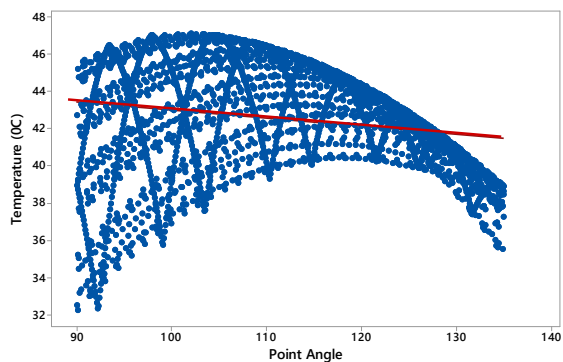
شکل ۹ - اثرات متقابل زوایای رأس و مارپیچ بر دمای فرآیند



شکل ۱۰ - نمودار دو بعدی دمای فرآیند بر حسب زوایای رأس و مارپیچ به عنوان متغیرهای ورودی

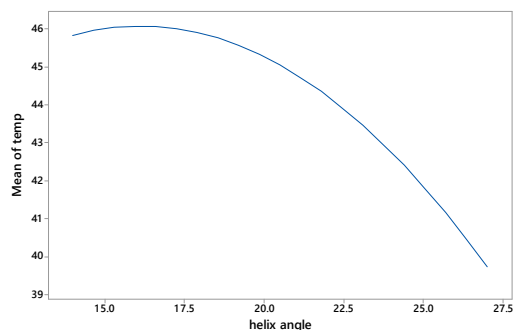


شکل ۱۱ - آنالیز حساسیت دمای فرآیند با تغییر زاویه مارپیچ ابزار



شکل ۱۲ - آنالیز حساسیت دمای فرآیند با تغییر زاویه رأس ابزار

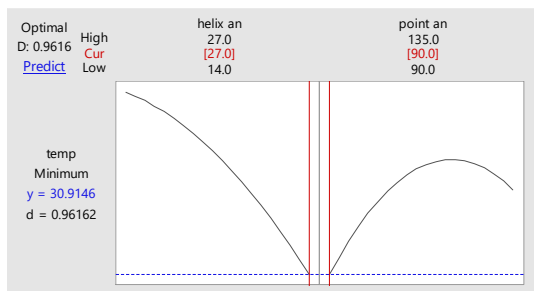
مقدار دما باید مقدار زاویه ی مارپیچ در حالت بهینه ی خود (حدود ۲۷ درجه) و مقدار زاویه ی رأس نیز در حالت کمترین مقدار خود (۹۰ درجه) باشد. با توجه به شکل ۹ هرگاه زاویه رأس به سمت ۹۰ تغییر کند و زاویه مارپیچ نیز به ۲۷ درجه برسد بهترین و ایده آل ترین حالت رخ خواهد داد به این دلیل که هر دو پارامتر ورودی فرآیند اثرگذاری مثبت دارند. و هرچه زاویه رأس مته بزرگتر شود نرخ تغییرات دما کاهش می یابد، با افزایش زاویه مارپیچ دما با نرخ بیشتری کاهش پیدا می کند. با توجه به شکل های شکل ۷ و ۱۰ که دسترسی همزمان به تمامی پارامترهای ورودی و خروجی امکان پذیر است، به راحتی مشخص می شود که کمترین مقدار دما برای سوراخکاری استخوان در زاویه ی رأس- های پایین (۹۰ درجه) و زاویه مارپیچ تقریبی ۲۷ درجه اتفاق می افتد.



شکل ۸ - اثر زاویه مارپیچ ابزار بر دمای فرآیند

۲-۵- آنالیز سوبل در بررسی حساسیت پارامترهای موثر در رفتار دما در سوراخکاری استخوان

با توجه به شکل های ۱۱ و ۱۲ در تحلیل حساسیت دما در فرآیند سوراخکاری استخوان و تحلیل آنالیز واریانس روش سطح پاسخ، مشخص می گردد که در بازه های در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی در این مقاله (شامل زاویه مارپیچ و زاویه ی رأس مته) به طور کلی و با در نظر گرفتن تغییرات هم زمان همه پارامترها در رفتار دمای ایجاد شده در فرآیند، زاویه مارپیچ اثر بیشتری نسبت به زاویه رأس مته در دما ایجاد شده در فرآیند سوراخ کاری دارد (شکل ۱۳). زیرا در بازه ی تغییرات مورد بررسی برای این ها شیب کلی تغییرات منحنی گرافیکی در این نمودارها نشان دهنده میزان تاثیر هر یک از پارامترهاست و البته همگی دارای اثر محسوس در رفتار فرآیند هستند (شکل ۱۱ و ۱۲).



شکل ۱۴ - بهینه سازی پارامترهای ورودی به منظور دستیابی به حداقل دمای فرآیند (به دست آمده توسط نرم افزار Minitab)

۶- نتیجه گیری

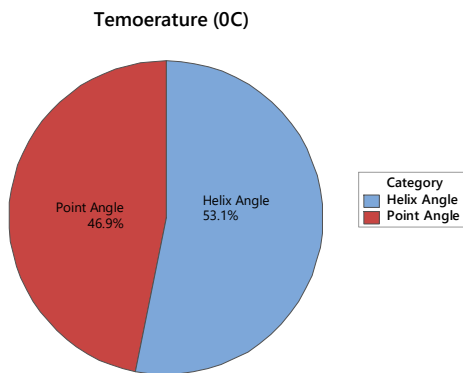
در این تحقیق ضمن مدل سازی و بهینه سازی به روش سطح پاسخ در فرآیند سوراخکاری استخوان و در نظر گرفتن زاویه های رأس و ماریچ مته به عنوان متغیرهای ورودی و بیشینه دما به عنوان متغیرهای خروجی، معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم برای دما بر حسب ورودی های فرآیند به دست آمد و دقت مدل سازی بر طبق نتایج حاصل از جدول ۴، و اهمیت و اثر هر یک از ورودی ها بر روی رفتار دما مورد بررسی قرار گرفته است.

- مدل ریاضی به دست آمده قادر است با دقت بالا دمای ایجاد شده در سوراخکاری استخوان را در بازه آزمایش ها پیش بینی نماید.

- با افزایش زاویه رأس مته سطوح تماسی نوک مته افزایش یافته و درگیری بیشتری با بافت های استخوان خواهند داشت که موجب افزایش نیروی اصطکاک می شوند و از آنجایی که رأس مته در عمیق ترین بخش سوراخ در حین عمل سوراخکاری قرار دارد نرخ انتقال حرارت آن نسبت به دیگر بخش های آن پایین تر می باشد و به دنبال آن گرمای تولیدی و در نهایت دما افزایش می یابد.

- از لحاظ نظری با افزایش زاویه ماریچ ابزار مقدار دما روند نزولی را طی می کند. افزایش زاویه ماریچ موجب خروج بهتر براده و جلوگیری از گیر کردن براده می شود و تراکم براده ها در شیارهای مته نیز کاهش می یابد، همچنین جریان هوا راحت تر با قسمتی از مته که درگیر سوراخکاری می باشد، صورت می گیرد و انتقال گرما راحت تر صورت می گیرد و در نتیجه دمای ایجاد شده در فرآیند کاهش می یابد. افزایش زاویه ماریچ تا حدود ۲۷ درجه (در بازه ی آزمایش) نیز موجب خروج بهتر براده و جلوگیری از گیر کردن براده و در نتیجه کاهش تقریبی اصطکاک بین جداره سوراخ و مته می گردد و به سبب آن دما کاهش می یابد.

- هرگاه زاویه رأس از ۱۳۵ به سمت ۹۰ درجه تغییر کند و زاویه ماریچ نیز از ۱۴ به ۲۷ درجه برسد بهترین و ایده آل ترین حالت رخ خواهد داد به این دلیل که هر دو پارامتر ورودی فرآیند اثرگذاری مثبت دارند و نرخ



شکل ۱۳ - اثر زوایای ماریچ و رأس بر دمای فرآیند به دست آمده از آنالیز حساسیت سوپل

۳-۵- بهینه سازی دما در فرآیند سوراخکاری استخوان

با توجه به بررسی هایی که در مورد تحلیل دما در فرآیند سوراخکاری استخوان مطرح گردید، در این بخش بهینه سازی فرآیند به منظور دستیابی به کمترین مقدار دما در سوراخکاری صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد کمینه مقدار دما در مدل منطبق شده بر آزمایش ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت، بهینه سازی صورت گرفته بر روی مدل آزمایش ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. نتیجه بدست آمده از بهینه سازی و مقایسه نتیجه مدلسازی و آزمایش صحت سنجی در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر بهینه ی دما حاصل از آزمایش ها پاندا [۱۲]، فارنورس [۱۷]، فاشبرگر [۱۵]، گرین [۱۸] و ناتالی [۱۶] انجام دادند در جدول ۵ آمده است که در ردیف آخر آن مقدار بهینه سازی حاصل از این تحقیق نیز محاسبه شده است و نتایج موجود نشان می دهد که زاویه های رأس ۹۰ و زاویه ماریچ ۲۷ درجه کمترین مقدار دما را به وجود می آورد.

جدول ۴ - ترکیب بهینه بین آزمایش های تجربی و مدل برآورده شده

بهینه سازی	زاویه ماریچ	زاویه رأس	دما
مدلسازی	۲۷	۹۰	30.2
آزمایش	۲۷	۹۰	30.17
درصد خطا	-	-	0.1%

جدول ۵ - دما در حالت های بهینه بین تحقیقات قبلی و تحقیق حاضر

مرجع	زاویه ماریچ	زاویه رأس	دما
ناتالی [۱۶]	۲۴	۱۱۸	41.8
فاشبرگر [۱۵]	۱۲	۷۰	45.8
فارنورس [۱۷]	۲۷	۱۳۰	38.1
گرین [۱۸]	۲۸	۱۱۸	38.2
پاندا [۱۲]	۳۰	۱۱۸	35.8
مته استاندارد جراحی [۱۹]	۱۴	۹۰	45.1
مته استاندارد صنعتی [۱۹]	۲۶	۱۱۸	40.2
هولر [۱۹]	۲۷	۱۰۵	37.1
تحقیق حاضر	۲۷	۹۰	30.2

- [17] Farnworth G. H. and Burton J. A., Optimization of drill geometry for orthopaedic surgery. In *Proceedings of the Fifteenth International Machine Tool Design and Research Conference*, Palgrave, London, 1975.
- [18] Green S. A. and Dahl M., *Intramedullary Limb Lengthening*, Springer Nature, New York, 2017.
- [19] Höller C., *Technical and Economic Analysis of the Process of Surgical Bone Drilling and Improvement Potentials*, MSc. Thesis, Graz University of Technology, 2015.
- [20] Tahmasbi V., Ghoreishi M. and Zolfaghari M., Modeling and multi objective optimization of effective parameters in drilling cortical bone. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 113-119, 2015.
- [21] Haddadi E., Moradi M., Ghavidel Ay. K., Ghavidel A. K. and Meiabadi S., Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO2 laser cutting of polystyrene. *Optik*, Vol. 184, pp. 103-114, 2019.
- [22] Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments: Second Edition*. John Wiley & Sons, New York, 2008.
- [23] Moradi M., Meiabadi S. and Kaplan A., 3D printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling; experimental characterization and production optimization. *Metals and Materials International*, Vol. 25, No. 5, pp. 1312-1325, 2019.
- [24] Sobol I. M., Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical modelling and computational experiments*, Vol. 1, No. 4, pp. 407-414, 1993.
- [25] Korayem M. H., Rastegar Z. and Taheri M., Sensitivity analysis of nano-contact mechanics models in manipulation of biological cell. *Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 2, No. 3, pp. 49-56, 2012.
- [26] Wang W., Shi Y., Yang N. and Yuan X., Experimental analysis of drilling process in cortical bone. *Medical engineering & physics*, Vol. 36, No. 2, pp. 261-266, 2014.
- [27] Alam K., Ghodsi M., Al-Shabib A. and Silberschmidt V., Experimental study on the effect of point angle on force and temperature in ultrasonically assisted bone drilling. *Journal of Medical and Biological Engineering*, Vol. 38, No. 2, pp. 236-243, 2018.
- [28] Staroveski T., Brezak D. and Udiljak T., Drill wear monitoring in cortical bone drilling. *Medical engineering & physics*, Vol. 37, No. 6, pp. 560-566, 2015.
- [29] Tahmasbi V., Ghoreishi M. and Zolfaghari M., Sobol Sensitivity Analysis, Modeling and Optimization Effective Parameters of Force in Bone Drilling Processes. *Journal of Mechanical Engineering (University of Tabriz)*, Vol. 48, No. 2, pp. 229-237, 2018.
- [30] Knight W. A. and Boothroyd G., *Fundamentals of metal machining and machine tools*. CRC Press, Florida, 2005.
- [31] Altintas Y., *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge University press, Cambridge, 2012.

کاهش دما به بیشترین مقدار ممکن خود می‌رسد. و هرچه زاویه رأس مته بزرگتر شود نرخ تغییرات دما کاهش می‌یابد، با افزایش زاویه ماریچج دما با نرخ بیشتری کاهش پیدا می‌کند.

۷- مراجع

- [1] Bachus K. N., Rondina M. T. and Hutchinson D. T., The effects of drilling force on cortical temperatures and their duration: an in vitro study. *Medical engineering & physics*, Vol. 22, No. 10, pp. 685-691, 2000.
- [2] Bronner F., Farach-Carson M. C. and Rubin J., *Bone resorption*. Springer Science & Business Media, London, 2006.
- [3] Lundskog J., Heat and bone tissue. An experimental investigation of the thermal properties of bone and threshold levels for thermal injury. *Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery and Hand Surgery*, Vol. 9, pp. 72-74, 1972.
- [4] Eriksson A. R. and Albrektsson T., Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: a vital-microscopic study in the rabbit. *Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 50, No. 1, pp. 101-107, 1983.
- [5] Narasimha K., Osman M. O. M., Chandrashekhara S and Frazao J., An investigation into the influence of helix angle on the torque-thrust coupling effect in twist drills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 2, pp. 91-105, 1987.
- [6] Bechtol C., Ferguson A. and Laing P. J., Metals and engineering in bone and joint surgery. *California Medicine*, Vol. 91, No. 5, pp. 303-304, 1959.
- [7] Jacob C. H., Berry J. T., Pope M. H. and Hoaglund F. T., A study of the bone machining process—drilling. *Journal of Biomechanics*, Vol. 9, No. 5, pp. 343-349, 1976.
- [8] Singh G., Jain V., Gupta D. and Sharma A., Parametric effect of vibrational drilling on osteonecrosis and comparative histopathology study with conventional drilling of cortical bone. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 232, No. 10, pp. 975-986, 2018.
- [9] Kalidindi V., *OPTIMIZ OPTIMIZATION OF DRILL DESIGN AND COOL TION OF DRILL DESIGN AND COOLANT SYSTEMS DURING DEN DURING DENTAL IMPL AL IMPLANT SURGER T SURGERY*, MSc. Thesis, University of Kentucky, 2004.
- [10] Augustin G., Zigman T., Davila S., Udiljak T., Staroveski T., Brezak D. and Babic S., Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis. *Clinical biomechanics*, Vol. 27, No. 4, pp. 313-325, 2012.
- [11] Hüfner T., Geerling J., Oldag G., Richter M., Kfuri Jr M., Pohlemann T. and Krettek C., Accuracy study of computer-assisted drilling: the effect of bone density, drill bit characteristics, and use of a mechanical guide. *Journal of orthopaedic trauma*, Vol. 19, No. 5, pp. 317-322, 2005.
- [12] Pandey R. K. and Panda S. S., Evaluation of delamination in drilling of bone. *Medical engineering & physics*, Vol. 37, No. 7, pp. 657-664, 2015.
- [13] Tuijthof G. J. M., Frühwirth C. and Kment C., Influence of tool geometry on drilling performance of cortical and trabecular bone. *Medical engineering & physics*, Vol. 35, No. 8, pp. 1165-1172, 2013.
- [14] Singh G., Jain V., Gupta D. and 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*, Vol. 62, pp. 355-365, 2016.
- [15] Fuchsberger A., Damaging temperature during the machining of bone. *Unfallchirurgie*, Vol. 14, No. 4, pp. 173-183, 1988.
- [16] Natali C., Ingle P. and Dowell J., Orthopaedic bone drills—can they be improved? Temperature changes near the drilling face. *The Journal of bone and joint surgery*, Vol. 78, No. 3, pp. 357-362, 1996.