

استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل، مدلسازی و بهینه سازی آماری پارامترهای مؤثر در رفتار نیرو در فرآیند سوراخکاری استخوان

مجید قریشی

مجتبی ذوالفقاری

وحید طهماسبی*

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

یکی از مهمترین، حساس‌ترین و پرکاربردترین فرایندهای ماشینکاری در حوزه جراحی‌ها و مهندسی پزشکی، فرآیند سوراخکاری استخوان می‌باشد. سوراخکاری استخوان کاربرد عمده‌ای در جراحی‌های ارتوپدی، درمان شکستگی‌ها و نمونه برداری‌های استخوانی و همچنین دندان پزشکی دارد. استفاده از دریل‌های جراحی اتوماتیک و همچنین ربات‌های جراح کنترل عددی سبب ایجاد تحولی شگرف در بهبود این فرآیند شده است. در طول عمل سوراخکاری استخوان، اعمال نیروی بیش از حد به بافت استخوان سبب ایجاد شکست و ترک خوردگی و ایجاد آسیب جدی در بافت استخوان می‌گردد و همچنین این امکان وجود دارد که مته جراحی در داخل بافت استخوان دچار شکستگی گردد. در این مقاله با در نظر گرفتن سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار به عنوان مهمترین فاکتورهای ورودی فرآیند ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و روش سطح پاسخ، نیروی اعمالی به بافت استخوان مدل سازی و معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر مدل استخراج گردیده و از دقت آن اطمینان حاصل شده است. سپس با بهره گیری از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل که نسبت به سایر روش‌ها دارای مزیت استخراج مقدار کمی تأثیر پارامترهاست، به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی نیرو پرداخته شده و چگونگی تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی به دقت بررسی شده است و در انتها با بهینه‌سازی مدل حاکم بر فرآیند، مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای ورودی به منظور دستیابی به کمترین و بهترین مقدار نیروی ایجاد شده در حین سوراخکاری بافت استخوان ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده بدین صورت است که کمترین مقدار نیروی وارده بر بافت استخوان در قطرهای کمتر، نرخ‌های پیشروی پایین تر و حداکثر سرعت دوران ابزار حاصل می‌گردد. و از بین پارامترهای ورودی با در نظر گرفتن تغییرات همزمان تمامی پارامترها در بازه آزمایش‌ها، به ترتیب سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار بیشترین اثر را رفتار نیرو داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: ماشینکاری، سوراخکاری استخوان، نیرو، تحلیل حساسیت آماری، طراحی آزمایش‌ها، مهندسی پزشکی.

Sobol Sensitivity Analysis, Modeling and Optimization Effective Parameters of Force in Bone Drilling Processes

M.Ghoreishi

M.Zolfaghari

V.Tahmasbi

Faculty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

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

Abstract

Bone drilling process is indispensable in orthopedic surgeries and treating bone breakages. It is also very important in dentistry and bone sampling operations. Therefore, bone drilling is one of the most important, common and sensitive processes in biomedical engineering field. Orthopedic surgeries can be improved using robotic bone drilling systems and also mechatronic bone drilling process can be promoted using automatic drilling machines and surgery-assisting robots. Furthermore, imposing higher forces to bone might lead breaking or cracking and consequently serious damage in bone. In this paper a mathematical second order linear regression model is introduced to predict process force behavior during bone drilling process as a function of tool drilling speed, feed rate, tool diameter and effective interactions. Design of experiments using response surface methodology is followed. Then second linear governing equation is assigned to the model and its accuracy is evaluated. Later, Sobol Statistical sensitivity analysis is used to ascertain the effect of process input parameters on process force. Results show that among all effective input parameters tool rotational speed, feed rate and tool diameter have the highest influence on process force respectively. The behavior of each output parameters with variation in each input parameter is further investigated.

Keywords: machining, bone drilling, force, design of experiment, sensitivity analysis, Sobol method.

نماید. به وسیله عمل سوراخکاری استخوان می‌توان پیچ‌ها و ایمپلنت‌هایی را در داخل اعضای شکسته شده قرار داد تا بخش‌های آسیب دیده نسبت به یکدیگر ثابت گردند. در فرآیند سوراخکاری استخوان بررسی و پیش‌بینی رفتار دما و نیرو نقش بسزایی در موفقیت و بهبود بسیاری از عمل‌های جراحی ارتوپدی دارد. هم اکنون استفاده

۱- مقدمه

هدف از انجام عمل جراحی شکستگی استخوان کنار هم قرار دادن دقیق و ثابت نگه داشتن اجزای شکسته شده استخوان در کنار یکدیگر است تا عضو شکسته شده موقت قبل خود را به بهترین نحو بازبانی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: vtahmasbi@mail.kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۸

از ربات‌های اتوماتیک جراحی و بهره‌گیری از سیستم‌های رباتیک در اعمال جراحی و بهبود ابزار جراحی مورد توجه محققان و پژوهشگران این زمینه قرار گرفته‌است. استفاده از سیستم‌های کنترل عددی سبب می‌گردد که خطاهای تصادفی در حین عمل جراحی به کمترین مقدار خود برسد و از آسیب‌های ناخواسته به بافت استخوان جلوگیری گردد [۱]. عزیز و همکاران با ارائه یک الگوریتم، کنترل نیروی اعمالی حاصل از سوراخکاری را بهبود داده و دقت ابزار را در حین جراحی بالا بردند [۲]. لوردو و همکاران با استفاده از یک سیستم رباتیکی توانستند دقت ابزار سوراخکاری را هنگام لایه برداری و اعمال نیرو به بافت استخوان بهبود دهند [۳] و این موضوع در حال تحقیق و بررسی توسط دیگر محققان این زمینه بوده و به سرعت در حال پیشرفت می‌باشد [۴]. رفتار دما و نیرو در فرایند سوراخکاری استخوان از اهمیت بالایی برخوردار بوده و برای دستیابی به نتایج رضایت بخش در عمل جراحی می‌بایست به دقت مورد بررسی قرار گیرد [۵]. نیروی ایجاد شده در بافت استخوان با بالا رفتن دما و افزایش حرارت ایجاد شده در استخوان رابطه مستقیم دارد [۶]. افزایش دما سبب ایجاد عارضه نکروز حرارتی و مرگ سلولی در بافت استخوان می‌گردد [۷]. نکروز حرارتی سبب می‌گردد که پیچ‌های ایمپلنت شل شده و موجب ناموفق بودن عمل جراحی می‌گردد [۵]. افزایش نیروی اعمالی به بافت استخوان سبب ایجاد میکروتُرک‌ها 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 [۸]. همچنین اعمال نیروی بیش از حد ممکن است باعث شکسته شدن مته در داخل استخوان گردد [۹]. مهمترین پارامترهایی که بر رفتار دما و نیرو در سوراخکاری استخوان اثر دارند سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی، قطر و هندسه ابزار است. با وجود تحقیقات فراوان بر روی رفتار این دو پارامتر مهم، هم اکنون نتایج بررسی فاکتورهای فرایند سوراخکاری استخوان در بهبود رفتار دما و نیرو مورد اختلاف محققان این حوزه است [۱۰]. نتایج تحقیقات صورت گرفته در باره اثر سرعت برشی بر روی نیرو توسط محققین مختلف با یکدیگر متفاوت گزارش شده است. جاکوب و همکاران [۱۱] عالم و همکاران [۱۲] و بسیجا و همکاران [۱۳] بیان داشتند که افزایش سرعت دورانی ابزار موجب کاهش نیرو در فرایند سوراخکاری استخوان می‌گردد. اما لی و همکاران ابراز داشتند که افزایش سرعت برشی موجب افزایش نیرو در حین فرایند می‌گردد [۱۴]. شکوری و همکاران [۱۵، ۱۶] و همچنین پاندا و پاندی [۱۷] کمترین مقدار سرعت دورانی ابزار و کمترین مقدار پیشروی را به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو ارائه نمودند. یودیلجاک و همکاران دریافتند که سرعت دورانی ابزار نقش بسیار کمی در تغییرات نیروی محوری داشته و فاکتوری کم تأثیر است [۱۸]. همان گونه که ملاحظه می‌گردد محققین درباره رفتار نیرو در فرایند سوراخکاری استخوان دارای اختلاف نظر هستند. در این پژوهش برای نخستین بار طراحی آزمایش و مدل‌سازی آماری مناسب و تحلیل دقیق، بهینه‌سازی پارامترها با بهره‌گیری از یکی از دقیق‌ترین مدل‌های آماری در این حوزه صورت گرفته‌است. در این تحقیق مدلسازی نیروی فرایند سوراخکاری استخوان به روش سطح پاسخ، صحت آزمایش‌ها و تأثیر متغیرها و مدل آماری حاکم بر فرایند و همچنین بهینه‌سازی فرایند با در نظر گرفتن رفتار هر سه پارامتر ورودی مهم سرعت دورانی ابزار، نرخ

پیشروی و قطر ابزار و برهم کنش های موثر آنها به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین تاکنون از روش‌های آماری آنالیز حساسیت جهت بررسی دقیق و کمی میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر رفتار نیرو در فرایند سوراخکاری استخوان استفاده نشده است.

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 [۱۹]. این روش برای شناسایی پارامترهای مؤثر و غیرمؤثر در خروجی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های آنالیز حساسیت در دو نوع محلی و عمومی طبقه‌بندی می‌شوند [۲۰]. روش ای-فست توسط کوکیر و همکارانش [۲۱] ارائه شده و سالتلی و همکارانش [۲۲] این روش را بهبود داده‌اند.

در این مقاله با در گرفتن سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار به عنوان پارامترهای ورودی فرایند، نیروی محوری در فرایند سوراخکاری استخوان ضمن طراحی و انجام آزمایشات به روش سطح پاسخ مدلسازی و معادله رگرسیون آماری مرتبه دوم حاکم بر مدل استخراج و از دقت آن اطمینان حاصل شده است. سپس ضمن بررسی و مطالعه روش‌های مختلف آنالیز حساسیت، روش آنالیز حساسیت آماری سوبل مورد انتخاب قرار گرفته است و با استفاده از این روش به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر روی پاسخ خروجی نیروی محوری پرداخته شده است.

۲- بهره‌گیری از روش‌های ریاضی و آماری در تحلیل فرایند

۲-۱- روش طراحی آزمایش‌ها

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 آزمایش‌ها کمک شایانی به طراحی، مدل‌سازی و تحلیل و بهینه‌سازی دقیق این فرآیندها می‌نماید. در این زمینه یکی از بهترین روش‌های آماری، روش سطح پاسخ است [۲۳]. 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 [۲۴]. 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 [۲۵]. 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^۱ خطی مرتبه دوم ارائه نماید. شکل کلی معادله با توجه متغیرها و برهم‌کنش‌های مؤثر به صورت معادله (۱) می‌باشد [۲۶].

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

¹ Regression

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 رابطه (۳) به دست می‌آید:

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

معادلات و روابط روش سوبل در مرجع [۳۰] به طور کامل ارائه شده است.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- خصوصیات و شرایط آزمایش

در بررسی رفتار نیرو در فرایند سوراخکاری استخوان، پارامترهای سرعت دورانی ابزار (V)، نرخ پیشروی (f) و قطر ابزار (D) به عنوان متغیرهای ورودی فرایند در نظر گرفته شده است. همچنین بیشترین مقدار نیروی ایجاد شده در بافت استخوان در حین سوراخکاری به عنوان پاسخ فرایند (F)، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در انجام آزمایش‌ها از استخوان تازه گاو (سن حدود ۳ الی ۴ سال) استفاده شده است [۱]. از قسمت دیافیز ران گاو (بخش میانی) که طولی به اندازه ۹۰ میلیمتر دارد و ضخامت استخوان کورتیکال در این محدوده در حدود ۸-۱۰ میلیمتر است استفاده شده است. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استخوان ران گاو به استخوان‌های بلند انسان نزدیک است [۳۱، ۳۲]. از این رو بسیاری از محققین برای بررسی فرایند سوراخکاری استخوان از استخوان ران گاو استفاده نموده‌اند. [۱۲، ۱۷، ۳۱]. هیچ حیوانی به منظور و با هدف انجام این تحقیق قربانی نشده است. به منظور سهولت در انجام تحقیقات قسمت ابتدایی و انتهایی استخوان ران به وسیله اره جدا شده است. عمق سوراخکاری انجام شده در نمونه‌ها ۸ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

در انجام این تحقیق نباید مدت زمان زیادی از زنده بودن بافت استخوان گذشته باشد تا خواص مکانیکی و ترموفیزیکی و چگالی بافت 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 به شرایط عمل جراحی نخواهد داشت [۱۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵].

مته‌های استفاده شده در فرایند مته‌های استاندارد فولاد تند بر می‌باشد و به منظور حذف اثر سایش ابزار از مته‌های نو استفاده شده است. مته‌های به قطر ۴، ۵ و ۵ میلیمتر تهیه شده است. این مته‌های استاندارد دارای زاویه مارپیچ مته ۳۰ درجه، زاویه براده ۵۵ درجه و زاویه راس مته ۱۱۸ می‌باشد. از دریل سوراخکاری اتوماتیک تبریز جهت انجام فرایند سوراخکاری بهره گرفته شده است. برای اندازه‌گیری نیروی محوری از یک نیروسنج آزمایشگاهی بهره گرفته شده است. نمونه‌ای از نحوه پژوهش در فرایند سوراخکاری استخوان در حالت آزمایشگاهی در شکل ۱ ارائه شده است.

در این معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم، V به عنوان پاسخ خروجی بر حسب ورودی‌های آزمایش توصیف می‌گردد که در این معادله ثابت‌های β به عنوان ضرایب معادله رگرسیون، x_i فاکتور اصلی ورودی آزمایش، x_i^2 توان دوم فاکتورهای ورودی آزمایش و $x_i x_j$ اثر برهم کنش مرتبه دوم فاکتورهای ورودی آزمایش می‌باشد [۲۷]. مدل ارائه شده در صورت دقیق بودن می‌تواند رفتار خروجی را بر حسب پارامترهای ورودی در تمام بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نموده و نقاط بهینه را ارائه نماید [۲۸].

۲-۲- روش‌های تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت ابزاری مناسب جهت بررسی سیستم‌ها و تعیین میزان اثر متغیرهای ورودی بر روی پاسخ‌های خروجی سیستم‌ها در مسائل مهندسی می‌باشد. تحلیل حساسیت را می‌توان به چند بخش طبق‌بندی نمود که برحسب کاربرد که به نوع قطعی یا احتمالی است یا برحسب شکل مدل، به روش‌های گرافیکی، ریاضی و آماری طبقه‌بندی می‌شود.

روش ترسیمی: در این روش تحلیل حساسیت، حساسیت را در فرم‌هایی به‌صورت نمودار و جدول یا سطوح نمایش می‌دهند. از روش گرافیکی به طور کلی برای نشان دادن تغییرات پاسخ‌های خروجی تحت تأثیر متغیرهای ورودی‌ها استفاده می‌شود.

روش ریاضیاتی: در روش ریاضیاتی، حساسیت را از روی تغییرات پاسخ خروجی برحسب تغییرات فاکتورهای ورودی به دست می‌آورند. این روش‌ها شامل محاسباتی هستند که به بررسی پاسخ خروجی به ازای مقدار اندکی تغییر در ورودی می‌پردازند.

روش آماری: در این روش تحلیل حساسیت به‌صورت توزیع احتمالی به شبیه‌سازی متغیرهای ورودی سیستم می‌پردازد، سپس تأثیر 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 سوبل 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 [۲۹].

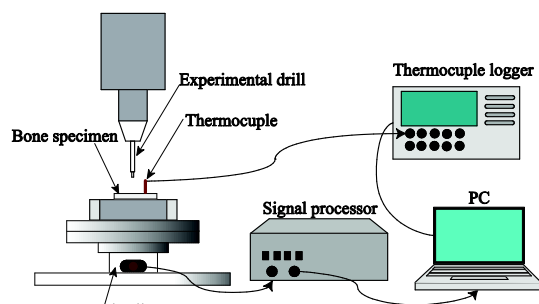
۲-۲-۱- روش تحلیل حساسیت سوبل

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 جمله تجزیه شده به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

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

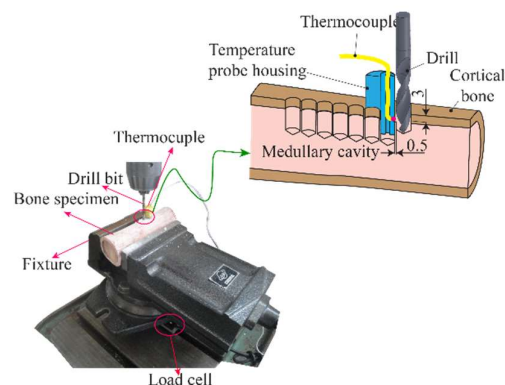
که در آن، V_i تأثیر مرتبه‌ی اول برای هر فاکتور ورودی $V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i$ و $x_i(V_i = V[E(Y|x_i)])$ تا

$V_{1, \dots, n}$ برهم‌کنش بین n فاکتور را نشان می‌دهند.



شکل ۱- فرآیند سوراخکاری استخوان در حالت آزمایشگاهی

نمونه ای از نحوه انجام آزمایشات در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- نحوه انجام آزمایش ها در فرآیند سوراخکاری استخوان

۳-۲- مدل سازی ریاضی و شیوه انجام آزمایش ها

در این پژوهش با درنظر داشتن سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار به عنوان متغیرهای ورودی تعداد ۳۳ آزمایش فول فاکتوریال صورت گرفته و به روش سطح پاسخ و با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) مدلسازی شده است. در جدول ۱ متغیرهای ورودی و بازه تغییرات آن با توجه به سه سطح کد شده آنها نمایش داده شده است.

جدول ۱ - مقادیر کد شده متغیرهای ورودی در سوراخکاری استخوان

ورودی های آزمایش	-۱	۰	۱
سرعت دوران ابزار V (rpm)	۵۰۰	۱۵۰۰	۲۵۰۰
نرخ پیشروی f (mm/min)	۱۰	۳۰	۵۰
قطر ابزار D (mm)	۲/۵	۴	۵

در جدول ۲ نیز مقادیر متغیرهای خروجی برای هر ۲۷ آزمایش آورده شده است. در انجام آزمایشها به منظور بالابردن دقت و صحت نتایج آزمایش، هر آزمایش سه بار تکرار شده است و میانگین بیشترین نیروی ایجاد شده به عنوان نیروی ایجاد شده در بافت برای هر آزمایش گزارش شده است. لازم به ذکر است که به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای پیش بینی نشده آزمایشات به صورت تصادفی انجام شده است [۲۴]

از نرم افزار مینیتب^۳ نسخه ۱۶، برای تحلیل و تفسیر نتایج و همچنین بدست آوردن ضرایب معادله ریاضی رگرسیون حاکم بر آزمایش استفاده شده است.

جدول ۲ - آزمایشهای صورت گرفته و مقادیر نیرو

شماره آزمایش	V (rpm)	f (mm/min)	D (mm)	نیرو (N)
۱	-۱	-۱	-۱	۹۸/۴
۲	۰	-۱	-۱	۷۰/۸
۳	۱	-۱	-۱	۶۶/۷
۴	-۱	-۱	۰	۱۰۳/۲
۵	۰	-۱	۰	۷۴/۸
۶	۱	-۱	۰	۶۸/۸
۷	-۱	-۱	۱	۱۱۹/۲
۸	۰	-۱	۱	۸۳/۲
۹	۱	-۱	۱	۷۵/۶
۱۰	-۱	۰	-۱	۱۱۳/۳
۱۱	۰	۰	-۱	۸۵/۵
۱۲	۱	۰	-۱	۷۹/۲
۱۳	-۱	۰	۰	۱۲۲/۴
۱۴	۰	۰	۰	۹۱/۲
۱۵	۱	۰	۰	۸۲/۰
۱۶	-۱	۰	۱	۱۳۹/۲
۱۷	۰	۰	۱	۱۰۰/۱
۱۸	۱	۰	۱	۸۹/۱
۱۹	-۱	۱	-۱	۱۱۶/۴
۲۰	۰	۱	-۱	۸۶/۸
۲۱	۱	۱	-۱	۷۶/۹
۲۲	-۱	۱	۰	۱۳۴/۸
۲۳	۰	۱	۰	۱۰۳/۳
۲۴	۱	۱	۰	۹۱/۸
۲۵	-۱	۱	۱	۱۶۴/۸
۲۶	۰	۱	۱	۱۲۴/۱
۲۷	۱	۱	۱	۱۱۲/۱

با استفاده از روش سطح پاسخ و آنالیز داده ها یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای هر پاسخ خروجی بر حسب متغیرهای ورودی با درنظر گرفتن دقت مدل منطبق شده که از داده های آزمایش و یا از نزدیک ترین نقاط به آنها در مدلسازی صورت گرفته عبور کرده حاصل گشته و تفسیر نتایج، تحلیل حساست آماری و همچنین بهینه سازی مورد نظر بر روی مدل انجام شده است.

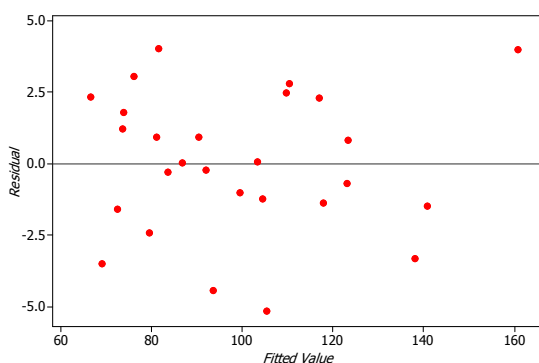
۴- تحلیل داده ها و تفسیر مدل سازی فرآیند

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل نیرو، نتایج حاصل از آنالیز واریانس^۴ در جدول ۳ آمده است. آنالیز واریانس میزان تاثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می نماید و در تحلیل و

^۳ Minitab
^۴ ANOVA

^۲ Coded Unit

سازی و نتایج حاصله را تعیین می‌نماید بحث تحلیل پراکندگی باقیمانده‌ها^۷ می‌باشد. مدلی که به داده‌های واقعی منطبق شده است می‌بایست 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 ۳ نشان می‌دهد که در این تحقیق هم مدل خوب منطبق شده و هم نظم خاصی در توزیع باقیمانده‌ها مشاهده نمی‌شود که این بسیار خوب است.



شکل ۳ - پراکندگی باقیمانده‌ها نسبت به مدل منطبق شده

۵- تحلیل حساسیت پارامترها و بررسی اثر متغیرهای ورودی در رفتار نیروی محوری در فرآیند سوراخکاری استخوان

در این بخش با توجه به مدلسازی صورت گرفته و انطباق آن بر داده‌های آزمایش‌ها و با در نظر گرفتن ترم‌های مؤثر در مدل، سعی بر آن است تا نقش سرعت دورانی، نرخ پیشروی و قطر ابزار در رفتار نیروی محوری تبیین گردد. بدین منظور ضمن بررسی میزان حساسیت هریک از پارامترهای ورودی در پاسخ سیستم، به بررسی و تحلیل منحنی کانتور پلات بر هم کنش مؤثر سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی که در شکل ۴ قابل مشاهده است، پرداخته خواهد شد. نمودارهای شکل ۴ رفتار نیروی را بر اساس متغیرهای ورودی فرآیند طبق مدلسازی صورت گرفته به روش سطح پاسخ ارائه می‌دهند و شکل های ۵، ۶ و ۷ پراکندگی نقاط پاسخ های نیرو با تغییرات همزمان پارامترهای ورودی را نشان می‌دهند. نقاط پراکنده موجود در این شکل‌ها با استفاده از نرم افزار سیملب^۸ و به روش سوبل استخراج شده‌اند. در روش سوبل بر خلاف روش‌های گرافیکی، که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می‌نمایند که برای توضیحات بیشتر می‌توان به مرجع [۳۰] مراجعه نمود.

مدلسازی آزمایش‌ها نقش به سزایی دارد. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر فاکتورهای ورودی و برهم کنش‌های آنها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید [۲۴].

جدول ۳ - تحلیل واریانس نیرو بر حسب ترم‌های مؤثر در سوراخکاری استخوان

ترم‌ها	درجه آزادی DF	جمع مربعات SS	میانگین مربعات MS	مقدار Fvalue	مقدار Pvalue
مدل	۹	۱۵۲۹۸/۷	۱۶۹۹/۸۵	۱۸۲/۲۶	۰/۰۰۰
V	۱	۷۶۲۹/۳	۷۶۲۳/۳۰	۷۹۵/۹۳	۰/۰۰۰
F	۱	۲۴۴۳/۲	۲۵۶۳/۲۹	۲۷۴/۸۴	۰/۰۰۰
D	۱	۳۵۱۷/۰	۳۲۸۴/۵۴	۳۵۲/۱۷	۰/۰۰۰
V ²	۱	۸۴۲/۲	۸۴۲/۲۰	۹۰/۳۰	۰/۰۰۰
F ²	۱	۱۷۷/۰	۱۷۷/۰۰	۱۸/۹۸	۰/۰۰۰
D ²	۱	۲۰/۶	۲۰/۶۵	۲/۲۱	۰/۱۵۵
V·F	۱	۱۲۴/۴	۱۲۴/۳۹	۱۲۴/۳۹	۰/۰۰۲
V·D	۱	۴۹/۴	۴۹/۳۶	۴۹/۳۶	۰/۰۳۴
F·D	۱	۴۹۵/۴	۴۹۵/۴۵	۴۹۵/۴۵	۰/۰۰۰

با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار Pvalue کمتر از ۰/۰۵ به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. مقدار خطای مجموع مربعات^۵ 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^۶ بدست آمد. با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع مربعات برای مدل مرتبه دوم خطی برابر ۴۳۵/۴۷۳، معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر نیروی فرآیند به صورت معادله ۴ است:

$$Force = 145.607 - 0.0432796V + 0.150566f - 21.6122D + 0.0000118476V^2 + 0.00464f^2 + 3645D^2 - 0.00010143V \times f - 0.00256V \times D + 0.255f \times D \quad (4)$$

با در نظر گرفتن مقادیر R-sq= 98.97% ، R-sq (pred)= 97.18% و R-sq (adj)= 98.43% و همچنین پراکندگی مناسب تحلیل باقیمانده‌ها با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت که مدلسازی صورت گرفته از دقت بسیار خوب و مناسبی برخوردار است. در مبحث طراحی آزمایش‌ها یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را تعیین می‌کند مقدار R-sq مدل می‌باشد. و مقدار آن با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است:

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

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 [۲۴]. یکی دیگر از مواردی که دقت مدل-

^۷ Residual fitted value

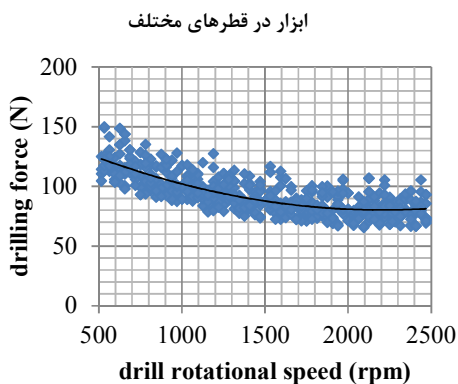
^۸ SimLab

^۵ PRESS

^۶ full quadratic

۵-۱- تحلیل اثر سرعت دورانی ابزار

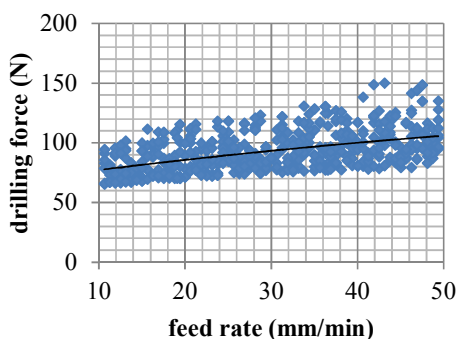
همانطور که در نمودارهای شکل ۴ و همچنین نمودار شکل ۵ ملاحظه می‌گردد با افزایش سرعت دورانی ابزار بیشینه نیروی ایجاد شده در بافت استخوان کاهش می‌یابد. افزایش سرعت دورانی نیز موجب خروج بهتر براده و جلوگیری از گیر کردن براده و در نتیجه کاهش اصطکاک بین جداره سوراخ و مته می‌گردد و به سبب آن نیروی محوری ایجاد شده در فرآیند کاهش می‌یابد [۳۶]. همچنین می‌توان دریافت که ماشینکاری سرعت بالا نیز اگر در عمل جراحی استخوان مورد استفاده قرار گیرد هم از جهت نیرو و هم از جهت دما به بهبود وضعیت فرآیند کمک می‌نماید. این امر توسط محققین در تحقیقات آزمایشگاهی هم‌اکنون در حال تحقیق و پژوهش است [۱۶].



شکل ۵ - تغییرات نیرو بر حسب سرعت دورانی ابزار

۵-۲- تحلیل اثر نرخ پیشروی

همانطور که در نمودارهای شکل ۴ و همچنین شکل ۶ ملاحظه می‌گردد هرچه نرخ پیشروی کمتر باشد نیروی ایجاد شده در استخوان کمتر است. می‌توان گفت کمترین نیروهای وارد به استخوان در سرعت‌های بالا و نرخ پیشروی کمتر ایجاد می‌گردد. با افزایش نرخ پیشروی و به سبب آن افزایش ضخامت براده تغییر شکل یافته، نیروی اعمالی به استخوان افزایش می‌یابد. هر چه مقدار پیشروی و سرعت نفوذ ابزار به درون استخوان کمتر باشد تغییر شکل براده و خروج آن با سهولت بیشتری اتفاق می‌افتد و ضخامت براده‌های تغییر شکل یافته کمتر می‌شود و در نتیجه نیروهای اعمالی به بافت استخوان کمتر می‌شود [۳۶، ۳۷]. این نکته به وضوح در نمودارهای شکل ۴ و نمودار مربوط به اثر فاکتور اصلی پیشروی شکل ۵ قابل مشاهده است.

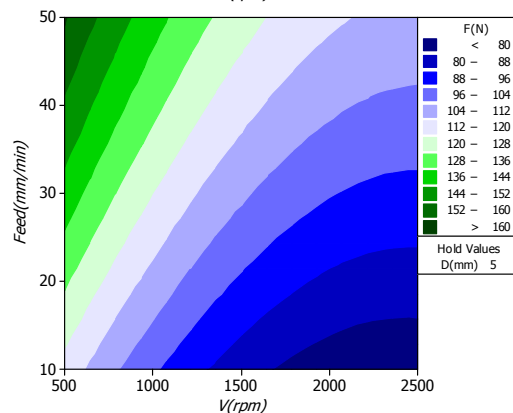
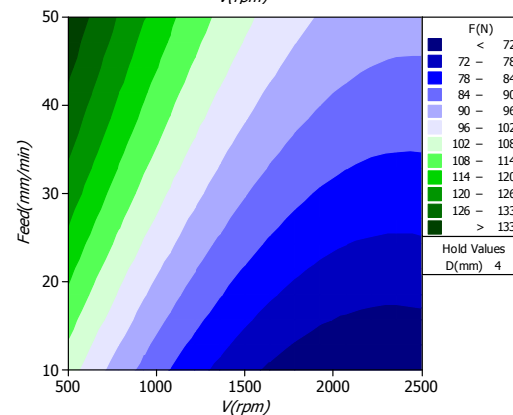
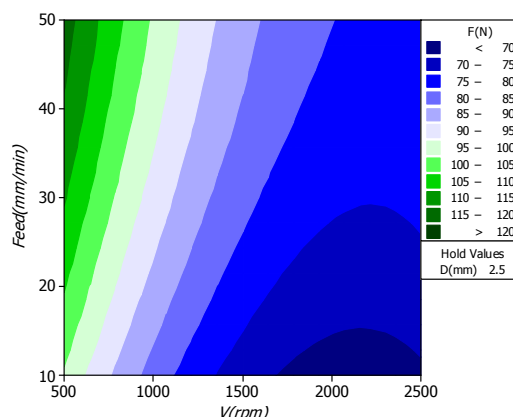


شکل ۶ - نمودار چگونگی رفتار فاکتور نرخ پیشروی ابزار

هرچه نیروی اعمالی به فرآیند بیشتر باشد امکان ایجاد شکست و آسیب به بافت استخوان افزایش می‌یابد. البته توجه به این نکته لازم است که در جراحی ارتوپدی سرعت عملکرد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و در هنگام استفاده از ربات‌های جراحی سرعت عملکرد به نرخ پیشروی ابزار وابسته است.

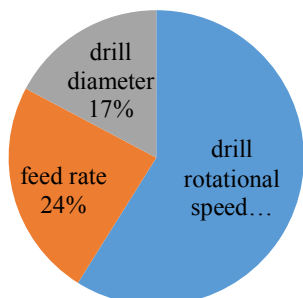
۵-۳- تحلیل اثر قطر ابزار

با افزایش قطر ابزار سطح تماس ابزار و بافت استخوان با نسبت مجذور قطر افزایش می‌یابد و نیروهای ایجاد شده با افزایش قطر ابزار



شکل ۴ - نمودارهای بر هم کنش مؤثر نرخ پیشروی و سرعت دورانی

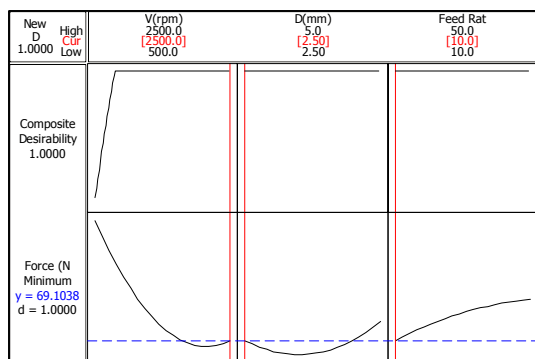
همزمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم اثر را به طور دقیق شناسایی نمود. البته در تحلیل اثر بر هم کنش رفتار پارامترها و تحلیل دقیق رفتارهای پیچیده روش سطح پاسخ تحلیلی کامل تر را ارائه می‌نماید.



شکل ۸- نمودار درصد تأثیر پارامترهای فرآیند در رفتار نیرو

۶- بهینه سازی نیروی محوری در فرآیند سوراخکاری استخوان

با توجه به بررسی هایی که در مورد تحلیل نیرو در فرآیند سوراخکاری استخوان مطرح گردید، در این بخش بهینه سازی فرآیند به منظور دستیابی به کمترین مقدار نیرو در سوراخکاری استخوان صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد کمینه مقدار نیرو در مدل منطبق شده بر آزمایش ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت^۹، بهینه سازی صورت گرفته بر روی مدل آزمایش‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. نتیجه بدست آمده از بهینه سازی و مقایسه نتیجه مدل‌سازی و آزمایش صحت سنجی در جدول ۴ ارائه شده است.

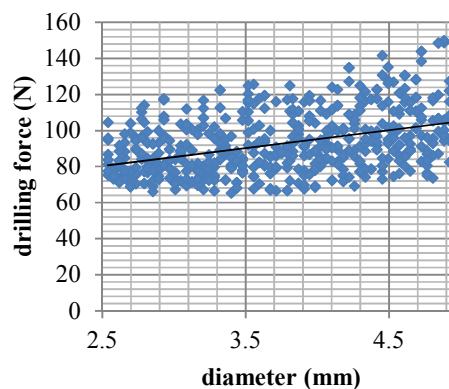


شکل ۶- بهینه سازی صورت گرفته به منظور دستیابی به کمینه نیرو

بهینه سازی	V (rpm)	f (mm/min)	D (mm)	Force (N)
مدلسازی	۲۵۰۰	۱۰	۲/۵	۶۹/۱
آزمایش	۲۵۰۰	۱۰	۲/۵	۶۶/۷

^۹ Desirability

افزایش می‌یابد. این مورد به وضوح در نمودارهای شکل ۴ و همچنین شکل ۷ به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. استفاده از ابزارهای با قطر زیاد در جراحی ارتوپدی نه تنها موجب بالا رفتن دما و نیرو در بافت استخوان می‌گردد بلکه موجب افزایش طول دوره درمان می‌گردد [۳۳]. استفاده از فرآیند میکروسوراخکاری و مته‌های با قطر کمتر در جراحی استخوان می‌تواند تأثیر بسزایی در پیشبرد این فرایند داشته باشد.



شکل ۷- نمودار چگونگی رفتار فاکتور قطر ابزار

۵-۴- جمع بندی آنالیز سوبل در بررسی حساسیت پارامترهای موثر در رفتار نیروی محوری در سوراخکاری استخوان

با توجه به نتایج موجود در شکل‌های ۵ الی ۷ و در تحلیل حساسیت نیرو در فرآیند استخوان و تحلیل آنالیز واریانس روش سطح پاسخ، مشخص می‌گردد که در بازه‌های در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی در این مقاله (شامل سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار) به طور کلی و با در نظر تغییرات هم زمان همه پارامترها در رفتار نیروی محوری ایجاد شده در فرآیند، به ترتیب سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار به ترتیب بیشترین اثر را داشته زیرا در بازه‌ی تغییرات مورد بررسی برای این ها شیب کلی تغییرات منحنی گرافیکی در این نمودارها نشان دهنده میزان تأثیر هر یک از پارامترهاست و البته همگی دارای اثر محسوس در رفتار فرآیند هستند.

شکل ۸ که نتایج آنالیز حساسیت پارامترها به روش سوبل را نشان می‌دهند نیز صحت نتایج به دست آمده تأیید می‌گردد. شکل ۸ نشان می‌دهد که در بین پارامتر ورودی، با توجه به درصدهای به دست آمده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل و با استفاده از نرم‌افزار سیملب که با الگوریتمی خاص پارامترهای ورودی را به طور همزمان تغییر داده و اثر آن را بر پارامتر خروجی بررسی می‌نماید [۳۰]، به طور کلی در بررسی حساسیت رفتار نیرو در فرآیند سوراخکاری استخوان سرعت دورانی ابزار دارای اثر ۵۹ درصدی و پس از آن نرخ پیشروی با ۲۴ درصد و قطر ابزار با ۱۷ درصد تأثیر گذار می‌باشند.

روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، 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 به طور

با در نظر داشتن جدول ۴ و خطای مدلسازی ۳/۶٪ ملاحظه می‌گردد که بهینه سازی صورت گرفته از دقت خوب برخوردار بوده است و قابل اطمینان است. و کمترین مقدار نیرو در محدوده آزمایش‌ها با استفاده از مته به قطر ۲/۵ میلیمتر و پیشروی ۱۰ میلیمتر بر دقیقه و سرعت دورانی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه حاصل می‌گردد که مقداری حدود ۶۹/۱ نیوتن است البته توجه به این نکته لازم است که در جراحی ارتوپدی سرعت عملکرد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و در هنگام استفاده از ربات‌های جراحی سرعت عملکرد به نرخ پیشروی ابزار وابسته است. با مراجعه به نمودارهای شکل ۴ این امکان وجود دارد که در قطرهای مختلف، سرعت دورانی و نرخ پیشروی را با در نظر داشتن نیروی مجاز جراحی در حالت مناسب تنظیم نمود.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضمن مدلسازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ در فرآیند سوراخکاری استخوان و در نظر گرفتن سرعت دورانی ابزار و نرخ پیشروی و قطر ابزار به عنوان متغیرهای ورودی و بیشینه نیروی محوری به عنوان متغیرهای خروجی، معادله ریاضی رگرسیون خطی مرتبه دوم برای نیرو بر حسب متغیرهای ورودی گردیده و دقت مدلسازی، و اهمیت و اثر هریک از ورودی‌ها بر روی رفتار نیرو مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل ریاضی ارائه شده قادر است با دقت بسیار مناسب نیروی محوری اعمالی به بافت استخوان را در بازه آزمایش‌ها پیش بینی نماید. با افزایش سرعت دورانی، کاهش نرخ پیشروی و کاهش قطر ابزار، نیروی وارد بر استخوان در حین ماشینکاری کاهش می‌یابد و با در نظر گرفتن معادله حاکم بر نیرو و تنظیم سرعت دوران ابزار بر روی ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و قطر ابزار ۲/۵ میلیمتر می‌توان به کمینه مقدار نیروی ۶۹/۱ نیوتن رسید.

در این مقاله برای بررسی و تحلیل حساسیت نتایج به دست آمده از روش آماری سوبل استفاده شد که روشی دقیق بوده ولی به زمان بالای اجرا نیاز دارد. در روش سوبل بر خلاف روش‌های گرافیکی، که در آن‌ها تمامی ورودی‌ها به جز یک ورودی ثابت است، با استفاده از الگوریتمی خاص تمامی پارامترها به طور همزمان تغییر می‌نمایند و در نتیجه اثرگذاری پارامترهای موثر در فرآیند به نحو دقیقتری بدست می‌آیند.

با مراجعه به نمودارهای شکل ۵ این امکان وجود دارد که در قطرهای مختلف، سرعت دورانی و نرخ پیشروی را با در نظر داشتن نیروی مجاز جراحی در حالت مناسب تنظیم نمود.

با در نظر تغییرات هم زمان همه پارامترها در رفتار نیروی محوری به ترتیب سرعت دورانی ابزار، نرخ پیشروی و قطر ابزار به ترتیب بیشترین اثر را داشته زیرا در بازه تغییرات مورد بررسی برای این‌ها شیب کلی تغییرات منحنی گرافیکی در این نمودارها نشان دهنده میزان تاثیر هریک از پارامترهاست و البته همگی دارای اثر محسوس در رفتار فرآیند هستند.

به طور کلی در بررسی حساسیت رفتار نیرو در فرآیند سوراخکاری استخوان سرعت دورانی ابزار دارای اثر ۵۹ درصدی و پس از آن نرخ پیشروی با ۲۴ درصد و قطر ابزار با ۱۷ درصد تاثیر گذار می باشند.

۸- مراجع

- [1] Wang W., Shi Y., Yang N., Yuan X., Experimental analysis of drilling process in cortical bone, Medical engineering & physics, Vol. 36, No. 2, pp. 261-266, 2014.
- [2] Aziz M., Ayub M., Jaafar R., Force control algorithm for detection of break-through bone drilling, in Proceeding of Procedia Engineering vol 41, pp.352 – 359, 2012.
- [3] Louredo M., Díaz I., Gil J. J., DRIBON: A mechatronic bone drilling tool, Mechatronics, Vol. 22, No. 8, pp. 1060-1066, 2012.
- [4] Díaz I., Gil J. J., Louredo M., Bone drilling methodology and tool based on position measurements, Computer methods and programs in biomedicine, Vol. 112, No. 2, pp. 284-292, 2013.
- [5] Sui J., Sugita N., Ishii K., Harada K., Mitsuishi M., Mechanistic modeling of bone-drilling process with experimental validation, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, No. 4, pp. 1018-1026, 2014.
- [6] 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, Vol. 9, pp. 1-80, 1971.
- [7] Augustin G., Zigman T., Davila S., Udilljak T., Staroveski T., Brezak D., Babic S., Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis, Clinical biomechanics, Vol. 27, No. 4, pp. 313-325, 2012.
- [8] Pandey R. K., Panda S. S., Optimization of multiple quality characteristics in bone drilling using grey relational analysis, journal of orthopaedics, 2014.
- [9] Abouzgia M. B., James D. F., Temperature rise during drilling through bone, The International journal of oral & maxillofacial implants, Vol. 12, No. 3, pp. 342-353, 1996.
- [10] Pandey R. K., Panda S., Optimization of bone drilling parameters using grey-based fuzzy algorithm, Measurement, Vol. 47, pp. 386-392, 2014.
- [11] Jacob C., Berry J., Pope M., Hoaglund F., A study of the bone machining process—drilling, Journal of Biomechanics, Vol. 9, No. 5, pp. 343-349, 1976.
- [12] Alam K., Mitrofanov A., Silberschmidt V. V., Experimental investigations of forces and torque in conventional and ultrasonically-assisted drilling of cortical bone, Medical engineering & physics, Vol. 33, No. 2, pp. 234-239, 2011.
- [13] Basiaga M., Paszenda Z., Szweczenko J., Kaczmarek M., Numerical and experimental analyses of drills used in osteosynthesis, Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol. 13, No. 4, pp. 29-36, 2011.
- [14] Lee J., Gozen B. A., Ozdoganlar O. B., Modeling and experimentation of bone drilling forces, Journal of biomechanics, Vol. 45, No. 6, pp. 1076-1083, 2012.
- [15] Shakouri E., Sadeghi M. H., Maerefat M., Shajari S., Experimental and analytical investigation of the thermal necrosis in high-speed drilling of bone, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, Vol. 10, No. 12, pp. 112-115, 2014.
- [16] Shakouri E., Sadeghi M.H., Maerefat M., Karafi M.R., Memarpour M., Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic assisted drilling of bone, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 194-200, 2014 .
- [17] Pandey R. K., Panda S., Multi-performance optimization of bone drilling using Taguchi method based on membership function, Measurement, Vol. 59, pp. 9-13, 2015.
- [18] Udiljak T., Ciglar D., Skorik S., Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis, Advance in Production Engineering & Management, Vol. 3, pp. 103-112, 2007.

- [19] Saltelli A. and sobol I. M., about the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output, Reliability Engineering & System Safety, vol. 50, pp. 225-239, 1995.
- [20] Saltelli A., Chan K. and Scott E., sensitivity analysis Wiley series in probability and statistics, Willey, New York,
- [21] Cukier R., Levine H. and Shuler K., Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems, Journal of computational physics, vol. 26, pp. 1-42, 1978.
- [22] Saltelli A., Tarantola S. and Chan K. S., A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output, Technometrics, vol. 41, pp. 39-56, 1999.
- [23] Ghoreishi M., Tahmasbi V., Optimization of material removal rate in dry electro-discharge machining process, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 113-121, 2014.
- [24] Montgomery D. C., Design and analysis of experiments: John Wiley & Sons, 2008.
- [25] Hou T.-H., Su C.-H., Liu W.-L., Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the Taguchi method, response surface method and genetic algorithm, Powder Technology, Vol. 173, No. 3, pp. 153-162, 2007.
- [26] Tahmasbi V., Ghoreishi M., Zolfaghari M., Temperature in Bone Drilling Process: Mathematical Modeling and Optimization of Effective Parameters, International Journal of Engineering, Vol. 29, No. 7, pp. 3845-3851, 2016.
- [27] Moradi M., et al., An investigation on stability of laser hybrid arc welding. Optics and Lasers in Engineering, 2013. 51(4): p. 481-487.
- [28] Moradi, M., M. Ghoreishi, and M. Torkamany, 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.
- [29] M.Sobol I., Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models, Math. Model. Comput. Exp, Vol. 14, pp. 407-414, 1993.
- [30] Korayem M. H., Rastegar Z. and Taheri M., Sensitivity analysis of contact mechanics models in manipulation of biological cell, Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 2, pp. 49-56, 2012.
- [31] Singh G., et al., 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: p. 355-365.
- [32] Vashishth D., Tanner K. and Bonfield W., Contribution, development and morphology of microcracking in cortical bone during crack propagation. Journal of Biomechanics, 2000. 33(9): p. 1169-1174.
- [33] Augustin G., Davila S., Mihoci K., Udiljak T., Vedrina D. S., Antabak A., Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited, Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, Vol. 128, No. 1, pp. 71-77, 2008.
- [34] Pandey R.K. and Panda S., Optimization of bone drilling using Taguchi methodology coupled with fuzzy based desirability function approach. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015. 26(6): p. 1121-1129.
- [35] Staroveski T., Brezak D., Udiljak T., Drill wear monitoring in cortical bone drilling, Medical engineering & physics, Vol. 37, No. 6, pp. 560-566, 2015.
- Knight W.A. and Boothroyd G., Fundamentals of metal machining and machine tools. Vol. 198. 2005: CRC Press.
- [36] Altintas Y., Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2012: Cambridge university press.