

بررسی اثر سرعت چرخشی مته بر عیوب سطحی استخوان در فرآیند سوراخکاری، به وسیله رنگ‌آمیزی هماتوکسیلین - اتوزین

(مطالعه حیوانی)

*دکتر احسان شکوری، **فاطمه زارع، ***دکتر احمد مجد، ****حسین حقیقی حسنعلی ده

«دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران شمال»

خلاصه

پیش‌زمینه: سوراخکاری در درمان شکستگی استخوان برای ثابت نگه‌داشتن قطعات شکسته با پیچ، سیم و یا پلاک انجام می‌پذیرد. مورفولوژی سطح حفرة سوراخ‌کاری شده و اجزای تثبیت‌کننده موضع شکستگی بر روی استحکام اتصال در فرآیند ثابت‌سازی اثرگذار است. در حین سوراخکاری ممکن است دما از 47°C بالاتر رود و آسیب جبران‌ناپذیر نکرود حرارتی برجای گذارد. زبری سطح می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از آسیب سلول استخوانی در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، اثر پارامتر سرعت چرخشی مته بر ایجاد عیوب سطحی استخوان، در انجام سوراخ‌کاری بررسی شد و اثر تخریبی حرارتی در سرعت‌های مختلف چرخش دریل (۷ سرعت) مطالعه شد. سوراخکاری بر روی استخوان ران گاو، در دو حالت با مایع خنک‌کننده و بدون خنک‌کننده انجام شد. در تمام آزمون‌ها، میزان دما اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها بعد از برش، با استفاده از روش رنگ‌آمیزی هماتوکسیلین - اتوزین برای مشاهده عیوب سطحی رنگ‌آمیزی شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که کمترین دمای حاصله، برای حالت با استفاده از خنک‌کننده مایع بود که دما از حد مجاز فراتر نرفت و حداقل عیوب سطحی و دما در شرایط آزمون بدون خنک‌کننده در سرعت چرخشی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بود که دمای 48.5°C به دست آمد.

نتیجه‌گیری: به‌کارگیری مایع خنک‌کننده در فرآیند سوراخکاری استخوان، ضمن جلوگیری از ازدیاد بیش از حد دما و وقوع پدیده نکرود حرارتی، موجب دستیابی به کمترین عیوب و بالاترین کیفیت سطح جدار سوراخ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: استخوان، سوراخکاری، سرعت چرخشی، عیوب سطحی، رنگ‌آمیزی هماتوکسیلین - اتوزین

دریافت مقاله: ۴ ماه قبل از چاپ؛ مراحل اصلاح و بازنگری: ۱ بار؛ پذیرش مقاله: ۲۰ روز قبل از چاپ

Investigation of Effect of Rotational Speed of Drill Bit on Surface Defects with H&E Stain in Bone Drilling (An Animal Study)

*Ehsan Shakouri, PhD; **Fatemeh Zareh, MSc; ***Ahmad Majd, PhD; ****Hossein Haghghi Hassanali Deh, MSc

Abstract

Background: Drilling of bone is used to fix the fractures with screws, wires or plates. The interaction between hole surface and fracture stabilization components is effective in the bonding strength of the stabilization process. During bone drilling, the temperature could increase above 47°C and cause irreversible thermal necrosis. The surface roughness can be considered as a sign of damage of the bone cells.

Methods: This study looks at the effect of rotational speed of drilling of bone on production of surface defects to determine the best processing condition for minimizing the osteonecrosis and surface defects. 7 different rotational speeds in drilling beef femur, were used in non-cooling and liquid cooling phases. In all tests the temperature was measured. After cutting samples, using hematoxylin-eosin staining were stained for detection of surface defects.

Results: The lowest heat production was with use of liquid cooling. The drill speed of 1500 rpm with liquid cooling showed the maximum temperature of 48.5°C without production of surface debris and degree as witnessed in stained bone see.

Conclusion: Cooling application in bone drilling process, avoids over, and thus less thermal necrosis, which gives the lowest number of surface defects and highest quality wall surface hole.

Keywords: Bone, Drilling, Rotational Speed, Surface Defects, Hematoxylin and Eosin Stain

Received 3 months before printing; Accepted 70 days before printing

* Ph.D. Mechanical Eng-Manufacturing, Faculty of Engineering, Islamic Azad University-North Tehran Branch.

** M.Sc. Student, Biomechanical Eng, Faculty of Engineering, Islamic Azad University-North Tehran Branch.

*** Ph.D. Biology, Faculty of Biological Sciences, Islamic Azad University-North Tehran Branch.

**** M.Sc. Student, Mechanical Eng, Faculty of Engineering, Islamic Azad University-North Tehran Branch.

Corresponding Author: Ehsan Shakouri

Faculty of Engineering, Islamic Azad University-North Tehran Branch, Sadoughi Blvd, Hakimiyeh Wayout, Shahid Babaei Highway, Tehran, Iran,

P.O.Box: 19585/936.

E-mail: e_shakouri@iau-tnb.ac.ir

مقدمه

استخوان یک بافت همبند کلسیمی است که تشکیل دهنده بخش عمده‌ای از اسکلت بیشتر مهره‌داران است. یک استخوان زمانی دچار شکستگی می‌شود که اختلالی در پیوستگی آن به وجود آید^(۱). سوراخکاری، یکی از مهم‌ترین مراحل جراحی و ترمیم شکستگی استخوان به شمار می‌رود، در جراحی‌های ارتوپدی بعد از سوراخکاری، پیچ‌های خودکار درون این سوراخ‌ها جای خواهند گرفت تا پلاک، سیم و سایر تجهیزات مهارکننده شکستگی را نگه دارند^(۲-۶). نیروهای سوراخکاری استخوان، نقش بسیار مهمی در نتیجه عمل ارتوپدی ایفا می‌کنند، به این دلیل که مقدار بالای آنها تولید گرمای زیادی در ناحیه سوراخکاری می‌کند و باعث ایجاد ترک‌های ریز در استخوان و در نتیجه آسیب یا حتی مرگ سلول‌های استخوانی (نکروز استخوانی) در اطراف حفره می‌شود. مرگ سلول‌های استخوانی ممکن است باعث تأخیر در فرآیند بهبود استخوان یا کاهش پایداری و استحکام ثابت‌سازی شود^(۴).

زبری سطح، یک شاخص مهم در نتایج ماشینکاری است. اثر سطح در استحکام سطح رابط بین پیچ و استخوان و همچنین پاسخ سلولی برای رشد سالم استخوان ضروری است. مطالعات انجام شده در مورد زبری سطح، تا حدودی محدود هستند. در پژوهشی، «علم و همکاران»، به اندازه‌گیری زبری سطح در استخوان متراکم گاو به روش‌های سوراخکاری استخوان معمولی و سوراخکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک پرداختند^(۷). آنها دریافتند که سطح سوراخ ایجاد شده با روش سوراخکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، تا حدودی صاف‌تر از سوراخکاری معمولی است، همچنین زبری سطح کمتر در روش سوراخکاری ارتعاشی می‌تواند به براده‌برداری بهتر در محل سوراخکاری نسبت داده شود. «اندروهادی و همکاران»، اثر سرعت چرخشی مته و نرخ پیشروی در استخوان را بر زبری سطح در سوراخکاری استخوان بررسی کردند^(۸). نتایج آنها مؤید این مطلب بود که نرخ پیشروی اثر قابل توجهی بر زبری سطح داشت، در حالی که سرعت چرخشی مته اثر قابل توجهی نداشت. در پژوهشی دیگر، «اندروهادی و همکاران»،

برخی شرایط برش بر زبری سطح استخوان ماشینکاری شده را بررسی کردند^(۹). نتایج آنها نشان داد که نرخ پیشروی، اثر قابل توجهی بر روی زبری سطح ندارد و عوامل مؤثر، نوع ابزار، سرعت برش و جهت برش هستند. «اندروهادی و همکاران»، در کار تحقیقاتی دیگری، تأثیر پارامترهای برش در سوراخکاری استخوان بر زبری سطح را بررسی کردند و مجموعه آزمون‌های سوراخکاری استخوان را با استفاده از استخوان ران گاو و بدون استفاده از خنک‌کننده انجام دادند. در این بررسی مشخص شد که با مته کاربرد پوشش داده شده، حداقل مقدار زبری سطح در تمامی حالت‌های ماشینکاری به دست آمده است^(۱۰). «ایزشاه و همکاران»، اثر پارامترهای سوراخکاری استخوان مانند سرعت چرخشی مته و نرخ پیشروی در استخوان را بر روی استخوان ران گاو، در بررسی زبری سطح به روش پاسخ سطح، مورد ارزیابی قرار دادند^(۱۱) و زبری سطح و نیروی برشی برای هر حالت آزمایش را اندازه‌گیری کردند. آنها نشان دادند که تعامل بین نرخ پیشروی و سرعت چرخشی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر زبری سطح و نیروی برشی است. با افزایش سرعت چرخشی مته، نیروی برش دریل افزایش قابل توجهی یافت و زبری سطح به تدریج تا یک سرعت خاص با توجه به افزایش اصطکاک بین دو سطح افزایش یافت. «سینگ و همکاران»، بهینه‌سازی پارامترهای سوراخکاری، شامل سرعت چرخشی، نرخ پیشروی و نوع ابزار در سه سطح به‌وسیله روش بهینه‌سازی تاگوچی را برای زبری سطح و نرخ خروج براده انجام دادند^(۱۲). با مرور پژوهش‌های مرتبط با زبری و عیوب سطحی استخوان در فرآیند سوراخکاری، ملاحظه می‌شود که نتیجه مستندی در مورد آشکارسازی عیوب سطحی در سرعت‌های مختلف چرخشی مته گزارش نشده است و این نکته، جنبه نوآوری تحقیق حاضر محسوب می‌شود. در این تحقیق سعی شده است تا به‌وسیله رنگ‌آمیزی استخوان‌های سوراخکاری شده با همتوکسیلین-اٹوزین جهت آشکارسازی بهتر عیوب سطح، تأثیر سرعت چرخشی مته و در نتیجه دمای ایجاد شده در موضع سوراخ، بر روی عیوب سطحی مورد مطالعه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایش

آزمون‌ها به منظور مطالعه عیوب سطحی ایجاد شده در استخوان در فرآیند سوراخکاری، با دستگاه دریل دستی بوش و مته استاندارد جراحی با قطر $3/2$ mm، از جنس فولاد ضدزنگ 316L انجام شده است. زوایای راس و مارپیچ آن به ترتیب 90° و 20° بوده و براساس توصیه دیگر مراجع، حداکثر برای سوراخکاری 40 سوراخ مورد استفاده قرار گرفته و سپس با مته نو جایگزین شده است^(۱۳). برای سوراخکاری، سرعت چرخشی مته متغیر و با مقادیر 1500 ، 1800 ، 1920 ، 2050 ، 2550 ، 2650 و 3200 دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که هر حالت آزمایش، چندین بار تکرار شده و برای مقادیر ازدیاد دما، میانگین حسابی در نظر گرفته شده است. تغییرات دما در موضع سوراخ به وسیله ترموکوپل تماسی سیمی از نوع K-type که به وسیله ترمومتر لوترون TM-925 به کامپیوتر متصل شده بود، اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. بازه قابل پایش دستگاه بین منهای 50 تا 1300 درجه سانتیگراد و میزان دقت آن تا $0/1$ درجه سانتیگراد بوده است. جهت به حداقل رسانیدن تلفات گرمایی و افزایش صحت اندازه‌گیری، محل تماس ترموکوپل و استخوان با خمیر رسانای گرما پوشانده شده است. فاصله استاندارد برای استقرار ترموکوپل در موضع سوراخکاری، براساس پیشینه تحقیق، نصب آن در عمق 3 mm و به فاصله $0/5$ mm از جدار سوراخ بوده است^(۱۴،۵). عکس‌برداری از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ لوپ بینوکولار نیکون مدل SMZ 800 با قابلیت نصب دوربین دیجیتال انجام گرفته و تصاویر توسط دوربین کائن Powershot SX60 HS با رزولوشن 16 مگاپیکسل تهیه شده است.

نمونه‌های آزمایش

در این آزمایش‌ها، بخش میانی ناحیه دیافیز ران گاو به طول تقریبی 75 mm با ضخامت قشر بیرونی حدود $7-8$ mm که بلافاصله بعد از کشتار از بدن آن خارج شده است، مورد استفاده قرار گرفته است (به دلیل شباهت ساختاری زیاد و خواص مکانیکی نزدیکی به استخوان انسان). پیش از انجام آزمون،

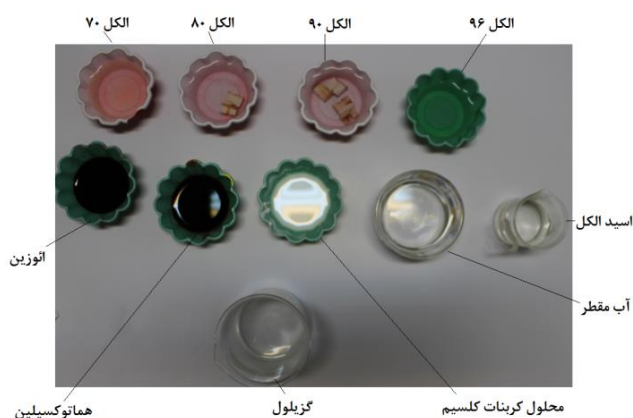
پوشش غشایی روی محل سوراخکاری از آن جدا شده است، چراکه وجود این غشا موجب ایجاد مشکلاتی در نحوه تخلیه براده‌ها و افزایش انسداد شیارهای مته می‌شود^(۵). سپس، نمونه‌هایی به پهنای حدود 20 mm را برش داده تا هر یک به صورت جداگانه برای سوراخکاری و اندازه‌گیری درجه حرارت موضع سوراخ، استفاده شوند (شکل ۱). تمامی آزمون‌ها در دمای اتاق و در دو حالت بدون خنک‌کننده و نیز با استفاده از خنک‌کننده مایع نرمال سالین انجام شده است. نمونه‌ها بعد از سوراخکاری، به منظور مشاهده سطح حفره از وسط سوراخ برش داده شدند. دمای اولیه مته و استخوان، عوامل حائز اهمیت نبود و اختلاف دمای اتاق تا دمای بدن انسان (37°C)، تغییری در خواص استخوان و حداکثر ازدیاد دمای ایجاد شده در حین فرآیند سوراخکاری ندارد^(۶).



شکل ۱. نمونه استخوان پس از برش

پروتکل رنگ‌آمیزی هماتوکسیلین-ائوزین

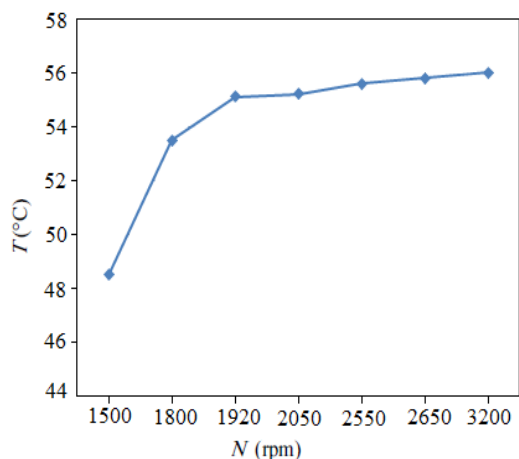
ترتیب رنگ‌آمیزی نمونه‌ها با هماتوکسیلین و ائوزین در جدول ۱ آورده شده است. هماتوکسیلین باعث می‌شود هسته آبی به نظر برسد و ائوزین باعث قرمز شدن سیتوپلاسم می‌شود. اسید الکل $0/1\%$ با استفاده از 1 ml هیدروکلریک اسید و 100 ml الکل 70 ساخته شده است. در شکل ۲-A، نمونه‌های قبل از رنگ‌آمیزی و در شکل ۲-B نمونه‌های رنگ شده، قابل مشاهده است. ترتیب فرآیند رنگ‌آمیزی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. ترتیب رنگ آمیزی هماتوکسیلین - اتوزین

یافته‌ها

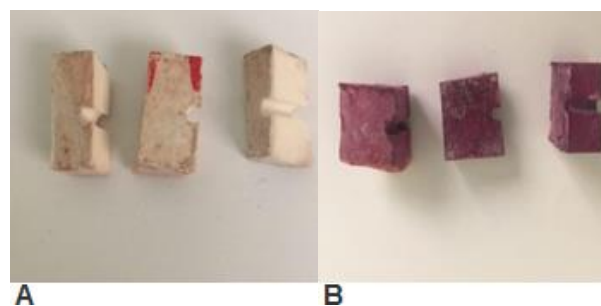
نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای سوراخ در سرعت‌های چرخشی مختلف، در شکل ۴ ارائه شده است. قابل ملاحظه است که با افزایش سرعت چرخشی، میزان دمای موضع سوراخکاری افزایش یافته است. در همه شرایط فرآیندی که بدون خنک‌کننده انجام گرفته است، دمای موضع سوراخکاری به بالای ۴۷°C رسیده و این به مفهوم وقوع نکرورز حرارتی است.



شکل ۴. نمودار سرعت چرخشی - دمای موضع سوراخکاری

تصویر حاصل از سوراخکاری با سرعت ۱۵۰۰ rpm در شکل ۵-A ارائه شده است. میزان دمای اندازه‌گیری شده در این حالت ۴۸/۵°C بود که بیانگر این است که نکرورز اتفاق افتاده است، ترک سطحی در این حالت ایجاد نشده است و مقدار زبری سطح اندک است.

نتایج حاصل از سوراخکاری با سرعت ۱۸۰۰ rpm در شکل ۵-B آورده شده است، در این حالت میزان ترک‌ها و همچنین



شکل ۲. نمونه‌های آزمایش:

A قبل از رنگ آمیزی و B بعد از رنگ آمیزی

جدول ۱: رنگ آمیزی بافت با هماتوکسیلین و اتوزین، به ترتیب

مرحله	معرف	زمان
۱	الکل ۷۰	۱-۲ دقیقه
۲	الکل ۸۰	۱-۲ دقیقه
۳	الکل ۹۰	۱-۲ دقیقه
۴	الکل ۹۶	۱-۲ دقیقه
۵	شستشو با آب مقطر	---
۶	هماتوکسیلین	۱۰-۱۵ دقیقه
۷	شستشو با آب مقطر	---
۸	اسید الکل	۳-۵ ثانیه
۹	محلول کربنات کلسیم	۳-۵ ثانیه
۱۰	اتوزین	۵-۱۰ ثانیه
۱۱	شستشو با آب مقطر	---
۱۲	الکل ۷۰	۳-۵ ثانیه
۱۳	الکل ۸۰	۳-۵ ثانیه
۱۴	الکل ۹۰	۳-۵ ثانیه
۱۵	الکل ۹۶	۳-۵ ثانیه
۱۶	گزیلول	۳-۵ دقیقه

زبری سطح، نسبت به سرعت اول افزایش یافته و میزان دما $53/5^{\circ}\text{C}$ بود. آزمایش بعدی با سرعت 1920 rpm انجام گرفت و نتایج آن در شکل ۵-C آورده شده است، میزان دما $55/1^{\circ}\text{C}$ محاسبه شد و میزان ترکها و همچنین زبری نسبت به دو حالت قبل افزایش قابل توجهی داشته است.



C

شکل ۵-C. عیوب سطحی: $60X$ ، $N=1920\text{ rpm}$



D

شکل ۵-D. عیوب سطحی: $60X$ ، $N=2050\text{ rpm}$

در شکل ۵-E، تصاویر حاصل از سوراخکاری با سرعت چرخشی 2550 rpm قابل مشاهده است، میزان دمای اندازه‌گیری شده در این حالت $55/6^{\circ}\text{C}$ بود، که نسبت به سرعت 2550 rpm به میزان $1/4$ درجه سلسیوس افزایش دما داشته است. در این تصاویر نیز میزان ترکها و زبری سطح افزایش یافته است.

نتایج حاصل از سوراخکاری دو حالت آخر، سرعت‌های چرخشی 2650 و 3200 rpm به ترتیب در شکل ۵-F و ۵-G ارائه شده است. میزان دمای محاسبه شده برای موضع سوراخکاری به ترتیب $55/8$ و 56 درجه سلسیوس به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۵-G قابل مشاهده است در سوراخ با سرعت چرخشی 3200 rpm ، میزان زبری و ترکها به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.



A

شکل ۵-A. عیوب سطحی: $60X$ ، $N=1500\text{ rpm}$



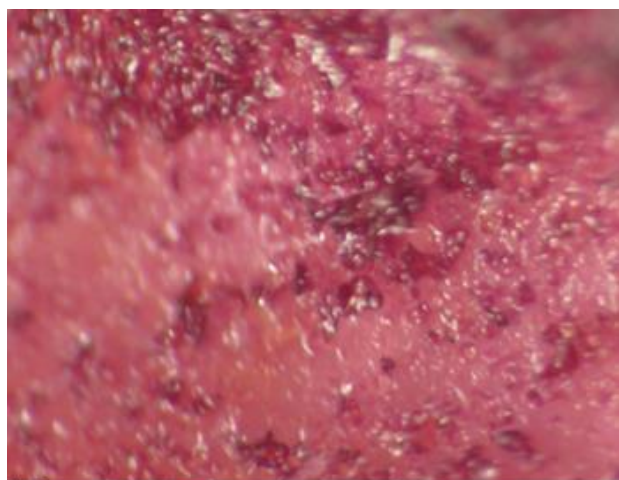
B

شکل ۵-B. عیوب سطحی: $60X$ ، $N=1800\text{ rpm}$

در شکل ۵-D، تصویر حاصل از سوراخکاری با سرعت چرخشی 2050 rpm دیده می‌شود، در این شرایط فرآیندی میزان دمای محاسبه شده با افزایش $0/1$ درجه‌ای نسبت به سوراخکاری با سرعت 1920 rpm ، $55/2^{\circ}\text{C}$ به دست آمد و میزان زبری سطح افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به سرعت‌های قبلی داشته است.



شکل ۶- A. عیوب سطحی: $60X$, $N=1500$ rpm, با خنک کننده

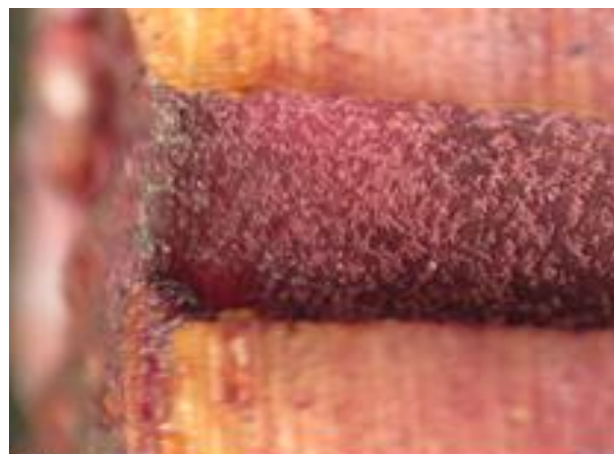


شکل ۶- B. عیوب سطحی: $60X$, $N=2650$ rpm, با خنک کننده

در شرایطی که از خنک کننده نرمال سالین استفاده شد، دما از سطح مجاز افزایش پیدا نکرد. شکل ۶- A سوراخکاری با سرعت چرخشی 1500 rpm و شکل ۶- B سوراخکاری با سرعت چرخشی 2650 rpm و با استفاده از خنک کننده مایع را نشان می دهد.

بحث

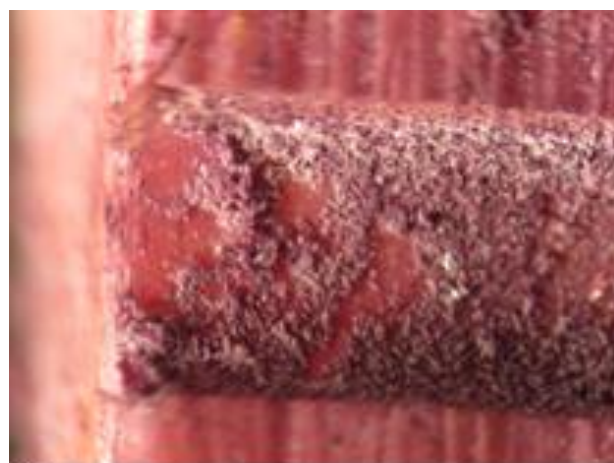
در پژوهش حاضر، در ۷ حالت سرعت چرخشی، سوراخکاری استخوان انجام گرفت و دما اندازه گیری شد. زبری و عیوب سطحی با استفاده از میکروسکوپ بینوکولار مشاهده شد.



شکل ۵- E. عیوب سطحی: $60X$, $N=2550$ rpm



شکل ۵- F. عیوب سطحی: $60X$, $N=2650$ rpm



شکل ۵- G. عیوب سطحی: $60X$, $N=3200$ rpm

در سرعت چرخشی ۱۵۰۰ rpm بود که دما $48/5^{\circ}\text{C}$ به دست آمد و میزان عیوب سطحی در مقایسه با سایر آزمون‌ها کمترین بود.

• در شرایطی به کارگیری مایع خنک‌کننده، میزان ترک‌ها و عیوب سطح حفره، نسبت به حالت بدون استفاده از خنک‌کننده کاهش قابل ملاحظه‌ای داشت. در این شرایط دما از حد مجاز فراتر نرفت.

• به‌عنوان یک توصیه برای جراحان برای انتخاب شرایط فرآیندی مناسب برای سوراخکاری استخوان در درمان موضع شکستگی به روش ثابت‌سازی داخلی، سرعت چرخشی ۱۵۰۰ rpm و استفاده از خنک‌کننده برای جلوگیری از ازدیاد دما و در نتیجه کاهش ترک‌ها و عیوب سطحی پیشنهاد می‌شود.

فهرست علائم

N = سرعت چرخشی ابزار (rpm)

T = دما ($^{\circ}\text{C}$)

باتوجه به نتایج به‌دست آمده، ملاحظه شد که سرعت چرخشی با عیوب سطحی نسبت مستقیم دارد. با افزایش سرعت چرخشی مته، میزان زبری سطح و همچنین ترک‌های ریز در سطح ماشینکاری شده افزایش می‌یابد که این ترک‌ها باعث کاهش پایداری و استحکام استخوان در سطح ماشین‌کاری شده می‌شود. این عدم استحکام منجر به تضعیف فرآیند ثابت‌سازی و در نتیجه، تأخیر در فرآیند بهبود شکستگی استخوان، یا جوش خوردگی در جهت یا زاویه نامطلوب می‌شود.

با افزایش سرعت چرخشی مته، به دلیل عدم خروج صحیح براده‌ها از محل سوراخ و اختلال در روند تخلیه براده‌ها و در نتیجه افزایش اصطکاک در سطح، دما نیز افزایش یافته است. این افزایش دما منجر به تغییر ماهیت آلکالین فسفاتاز استخوان و در نتیجه منجر به مرگ سلولی در آن ناحیه می‌شود. بهترین حالت، دارای کمترین عیوب سطحی، در سرعت ۱۵۰۰ rpm به دست آمد که در این حالت ترکی مشاهده نشد.

در شرایط استفاده از خنک‌کننده، همان‌طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، هیچ‌گونه ترک خوردگی در سرعت ۱۵۰۰ rpm و نیز در سرعت ۲۶۵۰ rpm ایجاد نشد. از مقایسه حالت‌های خشک و تر می‌توان نتیجه گرفت که در حالت تر (به کارگیری خنک‌کننده مایع در حین سوراخکاری)، عیوب سطحی بسیار کاهش یافته است. این بهبود شرایط سوراخکاری، به دلیل کاهش اصطکاک میان مته و جدار سوراخ و اصطکاک میان براده و جدار سوراخ و تسریع روند انتقال حرارت از محل سوراخکاری است. بنابراین به کارگیری خنک‌کننده مایع، تأثیر عمده‌ای بر کاهش میزان ازدیاد دما و بهبود کیفیت سطح سوراخ در فرآیند سوراخکاری استخوان دارد.

نتیجه‌گیری

• با افزایش سرعت چرخشی در نرخ پیشروی ثابت، میزان دمای حفره افزایش می‌یابد، که در نتیجه آن و به دلیل آسیب حرارتی وارده، زبری سطح و ترک‌های ریز ایجاد شده در سطح سوراخکاری، افزایش می‌یابد.

• در حالت بدون خنک‌کننده، دمای سطح حفره از حد مجاز فراتر رفت و در نتیجه نکرودز حرارتی اتفاق افتاد. بهترین حالت،

References

1. **Pandey RK, Panda SS.** Drilling of bone: A comprehensive review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma.* 2013;4:(1):15-30.
2. **Shakouri E, Sadeghi MH, Soleimanimehr H.** Effect of Drill Speed in Thermal Necrosis of Bone. *Iranian Journal of Orthopaedic Surgery.* 2013;11(1):32-39 (in Persian).
3. **Shakouri E, Sadeghi MH, Karafi MR, Farzin M.** Effect of Rotatory-Vibrational Bone Drilling in Lowering Thermal Necrosis. *Iranian Journal of Orthopaedic Surgery.* 2014;12(2):53-59 (in Persian).
4. **Pandey RK, Panda SS.** Optimization of multiple quality characteristics in bone drilling using grey relational analysis. *Journal of Orthopaedics,* 2015;12(1):39-45.
5. **Augustin G, Davila S, Mihoci K, Udiljak T, Vedrına DS, Antabak A.** Thermal Osteonecrosis and Bone Drilling Parameters Revisited. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2008;128:71-77.
6. **Augustin G, Davila S, Udiljak T, Vedrına DS, Bagatin D.** Determination of Spatial Distribution of Increase in Bone Temperature During Drilling by Infrared Thermography: Preliminary Report. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2009;129:703-709.
7. **Alam k, Mitrofanov AV, Silberschmidt, VV.** Measurements of Surface Roughness in Conventional and Ultrasonically Assisted Bone Drilling. *American Journal of Biomedical Sciences.* 2009;1:312-320.
8. **Ndaruhadi PYMW, Sharif S, Kurniawan D.** Effect of Different Cutting Speed and Feed Rate on Surface Roughness in Femur Bone Drilling. *2nd International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference.* 2015;2:208-211.
9. **Ndaruhadi PYMW, Sharif S, Noordin MY, Kurniawan D.** Effect of cutting parameters on surface roughness in turning of bone. *Advanced Materials Research.* 2014;845:708-712.
10. **Ndaruhadi PYMW, Sharif S, Kurniawan D.** Experiment investigation of hole accuracy and surface roughness in femur bone drilling using different parameters. *Advanced Materials Research.* 2014;845:720-723.
11. **Izamshah R, Noorazizi MS, Kasim MS, Che Haron CH.** Influence of Orthopaedic Drilling Parameters on Surface Roughness and Cutting Force of Bone Drilling Process. *6th International Conference on Electronics, Mechanics, Culture and Medicine.* 2015;752-758.
12. **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.
13. **Allan W, Williams ED, Kerawala CJ.** Effects of Repeated Drill Use on Temperature of Bone During Preparation for Osteosynthesis Self-Tapping Screws. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery.* 2005; 43:314-319.
14. **Udiljak T, Ciglar D, Skoric S.** Investigation into Bone Drilling and Thermal Bone Necrosis. *Advances in Production Engineering & Management.* 2007;2:103-112.