

اثر سرعت مته بر «نکروز حرارتی» در استخوان

(مطالعه حیوانی)

*احسان شکوری، **محمدحسین صادقی، *حمید سلیمانی مهر

«دانشگاه تربیت مدرس تهران»

خلاصه

پیش زمینه: روش بی حرکت‌سازی داخلی قطعات شکسته شده استخوان مبتنی بر دریل کردن موضع شکستگی و ثابت کردن آن به وسیله تجهیزاتی است که به استخوان پیچ می‌شوند. در حین فرآیند دریل کردن استخوان، این امکان وجود دارد که دما از محدوده مجاز ۴۷ درجه سانتی‌گراد فراتر رود و آسیب جبران‌ناپذیر نکروز حرارتی بر جای گذارد. این تحقیق به منظور یافتن مناسب‌ترین شرایط دریل کردن به لحاظ ایجاد حداقل آسیب گرمایی انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها: دو روش دریل کردن معمولی و دریل کردن با سرعت بالا بر روی استخوان ران گاو انجام شد و میزان ازدیاد دما در موضع دریل کردن و نیروی محوری ماشین‌کاری ثبت گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان دادند در تمامی حالات میزان گرمای تولید شده فراتر از حد مجاز بود و نکروز حرارتی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. از سوی دیگر، در محدوده‌های بالای سرعت چرخشی مته (در محدوده ۷۰۰۰-۶۰۰۰ rpm) کاهش شایان توجه نیروی محوری و به‌طور همزمان افزایش میزان تخلیه حرارت تولیدی به‌خارج به‌وسیله براده‌ها و در نهایت کاهش دمای موضع دریل کردن تا نزدیکی حد مجاز بود. اما با افزایش بیشتر سرعت چرخشی مته، به‌علت عدم تغییر مقدار نیروی محوری و نیز افزایش اصطکاک بدنه مته و براده‌ها با جدار سوراخ، میزان ازدیاد دما روند صعودی پیدا کرد.

نتیجه‌گیری: دریل کردن استخوان در محدوده سرعت‌های چرخشی ۷۰۰۰-۶۰۰۰ rpm، میزان ازدیاد دما و نکروز گرمایی را در مقایسه با دریل کردن معمولی کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: استخوان، نکروز، حرارت

دریافت مقاله: ۵ ماه قبل از چاپ؛ مراحل اصلاح و بازنگری: ۲ بار؛ پذیرش مقاله: ۱ ماه قبل از چاپ

Effect of Drill Speed in Thermal Necrosis of Bone

(An Animal Study)

*Ehsan Shakouri, **Mohammad Hosseyn Sadeghi, PhD; *Hamid Soleimanimehr

Abstract

Background: Internal immobilization of skeletal fractures is usually done by drilling of fracture site and screw fixation. During bone drilling, the temperature could increase above 47°C causing irreversible thermal necrosis. This study will try to determine the best drilling condition to minimize the chance of osteonecrosis.

Methods: Drilling tests were performed with two different drilling techniques -conventional and high speed- on the femur of bovine measuring the temperature and thrust force in drilling site.

Results: The results demonstrated that in conventional drilling, in all of the processing conditions, the value of generated heat was higher than allowable limit and occurrence of thermal necrosis was unavoidable. On the other hand, the increase of cutting speed of drill bit in high speed range (6000-7000 rpm) lead to considerable decrease of thrust force and increase of heat dissipation with chips, leading to reduction of local temperature raise in drilling site. But with more rotational speed of drill bit, the amount of temperature elevation was increased due to very little change in drilling force but increased friction between body of drill bit with the chips.

Conclusions: High speed bone drilling in 6000-7000 rpm, compared to conventional drilling, produces less heat and less thermal necrosis.

Keywords: Bone; Necrosis; Temperature; Heating

Received: 5 months before printing ; Accepted: 1 month before printing

*PhD Student, Mechanical Engineering-Manufacturing, Faculty of Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, IRAN.

**Mechanical Engineer- Manufacturing, Faculty of Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, IRAN.

Corresponding Author: Ehsan Shakouri

Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Jalaal-e Al-Ahmad ExpWay, Tehran, Iran, P.O.Box: 14115-143.

E-mail: ehsan.shakouri@modares.ac.ir

مقدمه

دریل کردن استخوان، یکی از مهم‌ترین مراحل بی‌حرکت‌سازی در تثبیت شکستگی استخوان می‌باشد. این فرآیند منجر به تولید حرارت در اثر عوامل تغییر شکل پلاستیک براده‌ها، وجود اصطکاک بین مته و استخوان و همچنین وجود اصطکاک بین براده‌ها و جدار سوراخ می‌گردد. بخشی از گرمای ایجاد شده می‌تواند به‌وسیله جریان خون و مایعات میان بافتی پراکنده شده و همچنین بخشی از آن به وسیله براده‌ها به محیط خارج انتقال یابد. به‌هرحال، بخشی از حرارت به استخوان می‌زبان منتقل می‌گردد. از طرفی استخوان رسانای ضعیف گرما محسوب می‌شود، به‌طوری‌که ضریب هدایت حرارتی قشر خارجی استخوان تازه، در محدوده $0.38-2.3 \text{ W/mK}$ گزارش شده است^(۱). این بدان معنی است که گرمای تولیدی در حین فرآیند، توانایی آن را ندارد که به سرعت از استخوان به محیط اطراف پراکنده گردد و در نتیجه موجب افزایش دمای موضعی در محل سوراخ می‌شود. ازدیاد دما منجر به تغییر ماهیت آلكالین فسفاتاز استخوان و پدیده نکروز حرارتی و مرگ سلولی، و در نتیجه مردگی بافت استخوانی و افت استحکام مکانیکی در محل سوراخ دریل می‌شود^(۲). آسیب حرارتی وارده به استخوان در موضع شکستگی منجر به ایجاد مشکلاتی در تعامل بین پیچ نگه‌دارنده و استخوان می‌گردد و نهایتاً جوش خوردگی استخوان به‌طور مطلوب صورت نمی‌گیرد^(۳،۴).

تأثیر حرارت بر بافت استخوان وابسته به دو عامل درجه حرارت و مدت زمان مواجهه با آن دما می‌باشد. برخی از محققین آستانه‌ای مشخص نموده‌اند که زیر آن حد، میزان تأثیر گرما قابل ملاحظه نیست، اما فراتر از آن حد، تخریب گرمایی سلول‌های استخوانی آغاز می‌گردد. آستانه تحمل دمای 47°C برای مدت یک دقیقه می‌باشد. این زمان با افزایش هر یک درجه دمای موضع دریل کردن به نصف تقلیل می‌یابد به گونه‌ای که در دمای 53°C این بازه زمانی به کمتر از یک ثانیه کاهش یافته و فراتر از آن دما، پدیده نکروز به‌صورت آنی روی می‌دهد^(۳-۷).

عوامل متعددی در دمای ایجاد شده در زمان دریل کردن استخوان مؤثر هستند. از جمله کیفیت و خواص استخوان، هندسه مته، عمق سوراخ، میزان تیز بودن ابزار برشی، سرعت

دریل کردن، فشار عمودی وارده به مته، اجرای دریل کردن به‌صورت تدریجی یا تک مرحله‌ای، انجام دریل کردن متناوب یا پیوسته، بکارگیری تکنیک‌های خنک‌کاری داخلی یا خارجی و تأثیر خواص مکانیکی و کیفیت جنس مته انتخابی بر روی نحوه عملکرد آن^(۸). «هیلاری»^۱ و «شعیب»^۲ اثرات هندسه مته و سرعت برشی را بر روی تغییرات دما مورد مطالعه قرار دادند^(۱). نتایج نشان داد که تغییر محسوسی در درجه حرارت تولیدی در حین دریل کردن با مته‌های دارای زوایای راس متفاوت مشاهده نگردیده است، ضمن آنکه در حین استفاده از مته‌های استاندارد جراحی (با قطر $3/2$ میلی‌متر)، به‌منظور حصول بهترین شرایط برش و نگهداری دما در سطح قابل قبول، سرعت چرخشی بین $800-1440 \text{ rpm}$ را توصیه نموده‌اند. «باچوس»^۳ و همکاران اثر مقدار نیروی محوری مته را بر روی دما و مدت زمان ماندگاری در آن دما، در قشر خارجی استخوان بررسی نمودند^(۲) و دریافتند که با افزایش مقدار نیروی محوری اعمال شده، هر دو پارامتر حداکثر دما و مدت‌زمان ماندگاری در آن دما به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد و متعاقباً میزان گسترش نکروز گرمایی در محیط پیرامون سوراخ کاهش خواهد یافت. علی‌رغم تأثیرات مثبت افزایش نیروی محوری، به‌دلیل احتمال گسترش ترک‌خوردگی استخوان و همچنین افزایش احتمال شکستگی مته در استخوان، در به‌کارگیری آن محدودیت وجود دارد. «آلان»^۴ و همکاران نشان دادند که مته فرسوده، اعمال نیروهای برشی بیشتری را می‌طلبد، لذا موجب افزایش تولید حرارت اصطکاکی، افزایش میزان ازدیاد دما و مدت‌زمان ماندگاری در آن دما می‌گردد. آنها توصیه نمودند که مته‌های جراحی برای یک دوره زمانی محدود یا برای ایجاد تعداد مشخصی سوراخ مورد استفاده قرار گیرند و پس از آن با مته‌های نو تعویض گردند^(۶). «کارمانی»^۵ تأثیر هندسه مته بر میزان ازدیاد دما را مجدداً بررسی نمود^(۹). «آگوستین»^۶ و همکاران دریافتند که افزایش قطر مته و افزایش سرعت چرخشی موجب افزایش دمای استخوان

1. Hillery
2. Shuaib
3. Bachus
4. Allan
5. Karmani
6. Augustin



شکل ۱. نمونه‌های برش خورده استخوان

به منظور دستیابی به محدوده گسترده‌ای از سرعت‌های چرخشی، موتور سرعت بالای القایی مدل آرل با حداکثر سرعت دورانی ۱۸۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. همچنین از مته‌های استاندارد جراحی با قطر ۳/۲ میلی‌متر و از جنس فولاد ضد زنگ 316L استفاده گردید. زوایای راس و ماریچ آنها به ترتیب ۹۰ و ۲۰ درجه بود و براساس آنچه که در سایر مراجع قید گردیده، حداکثر برای ماشین‌کاری ۴۰ سوراخ مورد استفاده قرار گرفت و سپس با مته جدید جایگزین شدند^(۳۶). در فرآیند «سوراخکاری معمولی»، مقادیر ۵۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ rpm برای سرعت چرخشی و ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min برای میزان پیشروی مته لحاظ گردید. در فرآیند «ماشین‌کاری سرعت بالا»، سرعت چرخشی مته ۱۸۰۰۰-۳۰۰۰ rpm با فواصل ۱۰۰۰ rpm و سه مقدار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min برای پیشروی استفاده شدند.

تغییرات دما در موضع سوراخکاری، به وسیله ترموکوپل‌های تماسی سیمی از نوع k-type بود که با واسطه ترمومتر لوترون TM-925 به کامپیوتر متصل، اندازه‌گیری و ثبت شدند. بازه قابل اندازه‌گیری دستگاه بین ۱۰۰- تا ۱۳۰۰+ درجه سلسیوس و رزولوشن آن ۰/۱ درجه می‌باشد. به منظور به حداقل رساندن تلفات گرمایی و افزایش صحت اندازه‌گیری، محل تماس ترموکوپل و استخوان با خمیر رسانای گرما پوشانیده شده است. فاصله استاندارد برای استقرار ترموکوپل در موضع سوراخکاری، براساس آنچه که در سایر مراجع رعایت گردیده، نصب آن در عمق ۳ میلی‌متر و به فاصله ۰/۵ میلی‌متر از جدار سوراخ بوده است^(۳۷). برای هر شرایط فرآیندی، حداقل دو سری آزمون انجام پذیرفت و مقدار دمای ثبت شده در هر حالت، برای مقایسه

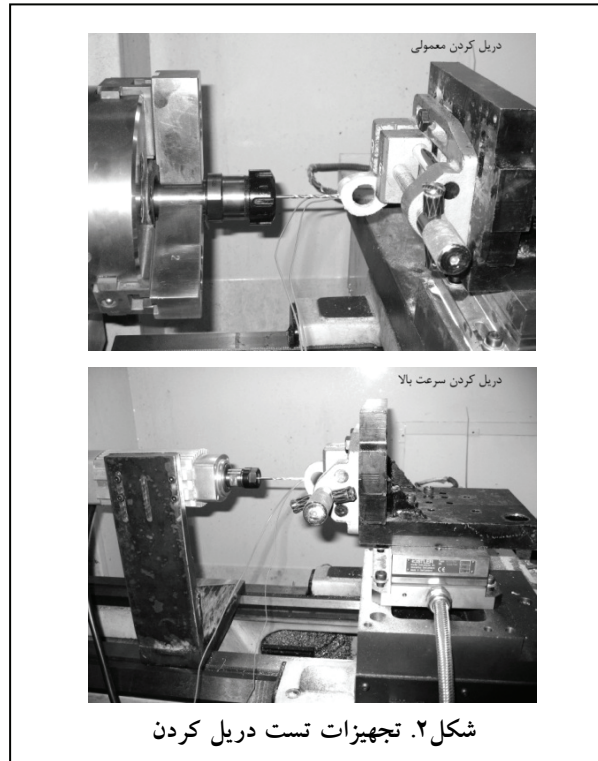
می‌گردد؛ تغییرات مختلف زاویه راس مته تغییر محسوسی در میزان ازدیاد دما ایجاد نمی‌نماید؛ افزایش میزان پیشروی، دمای بیشینه را کاسته، و بکارگیری خنک‌کاری خارجی، دمای بیشینه را به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌کاهد^(۳۷). «آگوستین» و همکاران توزیع فضایی حرارت تولیدی در حین فرآیند دریل کردن استخوان را با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز بررسی کردند^(۱۱). نتایج بررسی نشان داد که افزایش دما در استخوان ضمن برخورداری از شکل فضایی نامنتظم، دارای مقدار بیشینه در ناحیه قشر خارجی استخوان می‌باشد.

یافته‌های سایر تحقیقات نشان داد که سرعت چرخشی مته، مهم‌ترین عامل موثر بر ازدیاد دما در موضع دریل‌کردن می‌باشد. براساس آنچه که در مراجع قید گردیده است، سرعت چرخشی ۶۰-۷۰۰ rpm به جراحان توصیه گردیده تا میزان آسیب گرمایی وارده به حداقل برسد^(۳). هدف این پژوهش، دستیابی به شرایط مناسب برای ایجاد حداقل ازدیاد دما در حین دریل کردن سرعت بالا (فراتر از ۳۰۰۰ rpm برای استخوان^(۱۱)) در محیط آزمایشگاهی بود.

مواد و روش‌ها

برای این تحقیق، استخوان ران گاو که بلافاصله پس از کشتار از بدن آن خارج گردیده، طی چند ساعت مورد استفاده قرار گرفت. استخوان گاو از آن جهت انتخاب گردید که از میان حیوانات، استخوان‌های گاو، سگ و خوک بیشترین شباهت را از لحاظ خواص به استخوان انسان دارند. بخش میانی ناحیه دیافیز استخوان ران گاو با طول تقریبی ۷۵ میلی‌متر برای آزمایش‌ها استفاده شد. ضخامت قشر بیرونی در این ناحیه حدود ۷-۸ میلی‌متر می‌باشد. پیش از اجرای آزمون‌ها، پوشش غشایی روی محل دریل‌کردن از آن جدا گردید چرا که وجود این غشا موجب بروز مشکلاتی در نحوه تخلیه براده‌ها و افزایش احتمال انسداد شیارهای مته می‌گردد^(۳). سپس، نمونه‌هایی به پهنای حدود ۲۰ میلی‌متر برش داده تا هریک به صورت جداگانه جهت دریل‌کردن و اندازه‌گیری درجه حرارت موضع سوراخکاری مورد استفاده قرار گیرند (شکل ۱). تمامی آزمایش‌ها در دمای اتاق و بدون بهره‌گیری از هرگونه خنک‌کار و روان‌کار انجام پذیرفت.

دمای فرایندهای دریل کردن معمولی و سرعت بالای استخوان مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲).



شکل ۲. تجهیزات تست دریل کردن

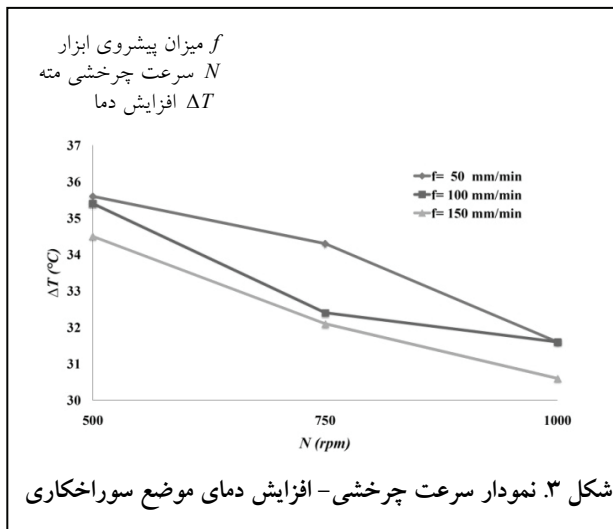
یافته‌ها

۱- دریل کردن معمولی:

نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای سوراخ در فرآیند دریل کردن معمولی، در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود:

- برای شرایط فرآیند انتخاب شده، با افزایش سرعت چرخشی مته از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ rpm، مقدار افزایش دمای موضع دریل کردن در هر سه مقدار پیشروی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min در حدود ۴-۳/۸°C کاهش یافت. این بدان معنی است که افزایش سرعت چرخشی مته تأثیر مثبت بر کاهش میزان افزایش دما دارد.
- هرچه میزان پیشروی بالاتر باشد، ازدیاد دما کمتر می‌شود. هرچند در «سوراخکاری معمولی»، مقدار تأثیرگذاری افزایش میزان پیشروی، به اندازه سرعت چرخشی نمی‌باشد و افزایش این پارامتر از ۵۰ تا ۱۵۰ mm/min برای سرعت‌های اعمال شده، منجر به کاهش میزان افزایش دما در حدود ۲/۲-۰/۲°C می‌گردد.

علی‌رغم تأثیرات مثبت افزایش سرعت چرخشی و میزان پیشروی مته، در محدوده «سوراخکاری معمولی»، تمامی نتایج فراتر از حد مجاز بود و با میزان ازدیاد دمای مجاز فاصله قابل ملاحظه‌ای داشت. پس می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند «سوراخکاری معمولی» در محدوده سرعت‌های چرخشی و مقادیر پیشروی خود، قادر به دستیابی درجه حرارت‌های پایین‌تر از مقدار مجاز نمی‌باشد. کمترین میزان ازدیاد دما در این فرآیند ۳۰/۶°C است که در سرعت ۱۰۰۰ rpm و پیشروی mm/min ۱۵۰ پدید می‌آید و استفاده کلینیکی آن توصیه نمی‌شود.

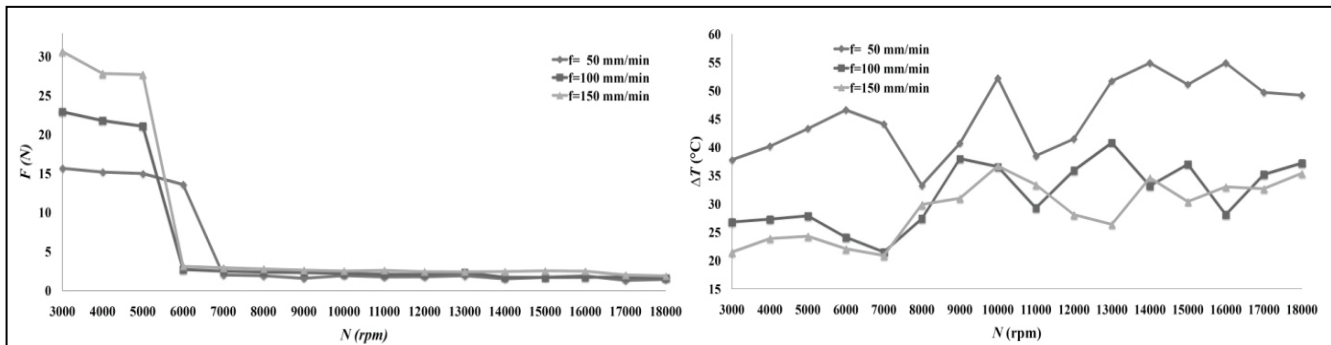


شکل ۳. نمودار سرعت چرخشی - افزایش دمای موضع سوراخکاری

۲- دریل کردن سرعت بالا

نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای موضع سوراخ در فرآیند دریل کردن سرعت بالا (بالاتر از ۳۰۰۰ rpm) در شکل ۴ ارائه شده است و نشان می‌دهد:

- هرچه میزان پیشروی بالاتر باشد، میزان ازدیاد دما کمتر خواهد بود. برخلاف نتایج دمای «سوراخکاری معمولی» که در آن میزان تأثیرگذاری پیشروی ناچیز بود، در این فرآیند اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین درجه حرارت‌های میزان پیشروی ۵۰ با ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min دیده شد. ضمن آنکه در بسیاری از سرعت‌های چرخشی، نتایج مقادیر ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min به یکدیگر نزدیک بود.
- با افزایش سرعت چرخشی از ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ rpm، در مجموع، نمودارهای ازدیاد دمای موضع دریل کردن روندی صعودی نشان دادند، تا جایی که در سرعت‌های چرخشی بالا، مقادیر دمای به‌دست آمده، از نتایج دریل کردن معمولی فراتر



شکل ۵. نمودار سرعت چرخشی- نیروی محوری سوراخکاری

شکل ۴. نمودار سرعت چرخشی- افزایش دمای موضع سوراخکاری

F نیروی محوری؛ f میزان پیشروی ابزار؛ N سرعت چرخشی مته؛ ΔT افزایش دما

صنعتی در جنس‌های متنوع مانند فولاد ضد زنگ، فولاد تندبر، الماس، تنگستن کارباید، تیتانیوم کارباید و نیتراید، ابزارهای پوشش‌دار و ابزارهای نیتراید بور مکعبی و ... و برحسب نوع کاربرد، در قطرها و با زوایای مختلف عرضه می‌شوند. اما در مورد مته‌های پزشکی، چندین نکته حائز اهمیت است: الف) به دلیل آنکه مته‌ها با خون و مایعات میان‌بافتی سروکار دارند، معمولاً از فولاد ضدزنگ ساخته می‌شوند، ب) با توجه به نتایج تحقیقات صورت گرفته، تغییر زوایای راس و ماریپیج، بر روی میزان ازدیاد دما در فرآیند سوراخکاری استخوان تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای نداشته و به این دلیل معمولاً این مته‌ها با زاویه راس بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه و زاویه ماریپیج بین ۲۰ تا ۳۰ درجه ساخته می‌شوند. این محدوده به دلیل فراهم نمودن امکان خروج راحت‌تر براده‌ها و پیشگیری از انسداد شیارهای مته انتخاب شده است.

براساس آنچه که در خصوص اجرای فرآیند دریل کردن سرعت بالا، بر روی نمونه‌های قطعه کارهای فلزی گزارش شده، انتظار می‌رود افزایش سرعت چرخشی و دستیابی به مقادیر بالای سرعت برشی، از یک سو منجر به کاهش نیروی ماشین‌کاری و از سوی دیگر منجر به افزایش سرعت تخلیه براده و افزایش سهم حرارت خروجی به‌وسیله براده‌ها و نهایتاً کاهش ازدیاد دما در موضع ماشین‌کاری گردد (در مورد دریل‌کردن فلزات، ۸۵٪ حرارت تولیدی، به‌وسیله براده‌ها به خارج محیط ماشین‌کاری حمل می‌گردد^(۹)). اما در مورد استخوان، به دلیل کم‌بودن مقدار ضریب هدایت حرارتی آن در مقایسه با فلزات،

اما یک نکته حائز اهمیت در نمودارهای فوق این است که برای مقادیر پیشروی ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min در سرعت چرخشی ۶۰۰۰ rpm، نمودارهای دما حالت نزولی به خود گرفت که در سرعت ۷۰۰۰ rpm به حداقل دمای نمودارهای مزبور رسید. همین شرایط برای پیشروی ۵۰ mm/min در سرعت ۷۰۰۰ rpm آغاز گردید و در سرعت ۸۰۰۰ rpm به حداقل دمای نرخ پیشروی فوق، در سرتاسر بازه سرعت‌های چرخشی منتهی شد. در شکل ۵ نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی محوری ارائه شده و نشان می‌دهد:

- در محدوده سرعت‌های ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ rpm، هرچه پیشروی بالاتر باشد، مقدار نیروی محوری بالاتر است. ضمن آنکه افزایش سرعت چرخشی، تأثیر شایانی بر روی نیرو ندارد.
- برای پیشروی ۵۰ mm/min در سرعت ۷۰۰۰ rpm و برای پیشروی‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min، در سرعت ۶۰۰۰ مقدار نیرو به‌طور ناگهانی افت می‌نماید. میزان افت نیرو برای پیشروی‌های فوق به ترتیب ۳/۸۵٪، ۲/۸۷٪ و ۸/۸۸٪ بود.
- پس از سرعت‌های ذکر شده، نمودار نیروی محوری برای هر سه مقدار پیشروی، به‌صورت خطی درآمد و تقریباً برهم منطبق بود و افزایش سرعت چرخشی، تغییری در مقدار نیروی محوری ایجاد نکرد.

بحث

در خصوص مته، چهار پارامتر اهمیت دارند: ۱) جنس مته، ۲) قطر مته، ۳) زاویه راس مته، و ۴) زاویه ماریپیج مته. مته‌های

صعودی به خود می‌گیرد. با در نظر گرفتن عوامل سه گانه تولید گرما (نیروی تشکیل براده، انباشتگی براده در شیار مته، و اصطکاک) و لحاظ نمودن روند ثابت ماندن نیرو و افزایش پیوسته سرعت تخلیه براده، می‌توان احتمال داد که با افزایش هرچه بیشتر سرعت چرخشی مته، اصطکاک (بین براده یا بدنه مته با جدار سوراخ) افزایش یافته و این عامل تولید حرارت، از سرعت چرخشی مشخصی به بعد، بر تأثیرات مثبت افت نیرو و کاهش انباشتگی براده غلبه نموده و منجر به افزایش بیشتر دما می‌گردد. از آنجا که افزایش اصطکاک با جدار سوراخ، هم موجب افزایش دما و هم موجب افت کیفیت سطح جدار و افزایش ارتفاع زبری سطح می‌گردد، با بررسی پارامتر زبری سطح سوراخ‌های ایجاد شده در فرآیند دریل کردن سرعت بالا، می‌توان تعیین نمود که افزایش سرعت چرخشی مته، چه تأثیری بر اصطکاک بین براده‌ها و بدنه مته، با جدار سوراخ دارد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی محوری در فرآیند دریل کردن سرعت بالای استخوان ران گاو با استفاده از مته با قطر $4/3 \text{ mm}$ گویای این واقعیت است که با افزایش سرعت برشی مته، میزان نیروی محوری فرآیند کاهش می‌یابد و هرچه میزان ازدیاد سرعت چرخشی مته بیشتر باشد، افت نیروی محوری بیشتر خواهد بود.

در سرعت‌های چرخشی بالا (از 13000 rpm به بعد)، به رغم ناچیز بودن میزان نیروی محوری، میزان تماس براده‌ها و بدنه مته با جدار سوراخ در نرخ پیشروی ثابت با ازدیاد سرعت چرخشی مته افزایش می‌یابد. این عامل منجر می‌گردد که تأثیر مثبت کاهش نیروی محوری مته از بین رفته و از نقطه بهینه به بعد، با افزایش سرعت چرخشی مته، ارتفاع زبری سوراخ افزایش یابد. در نهایت این اصطکاک، منجر به افزایش دما در موضع سوراخکاری، پس از عبور از نقطه بهینه می‌گردد.

به منظور مقایسه یافته‌ها با سایر تحقیقات، حداقل و حداکثر ازدیاد دمای ثبت شده در فرآیندهای دریل کردن معمولی و سرعت بالا همراه با نتایج دیگر محققین در جدول ۱ ارائه شده است. در تمامی موارد، دریل کردن معمولی منجر به افزایش قابل ملاحظه دما در محل سوراخ گردیده که وقوع پدیده نکروز را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. حداقل دمای ثبت شده در این فرآیند مربوط به تحقیق

نمی‌توان انتظار داشت که افزایش چشمگیر سرعت چرخشی و به تبع آن، افزایش سرعت تخلیه براده، سهم به‌سزایی در انتقال حرارت تولیدی به بیرون ایفا نماید. زیرا به‌واسطه پایین بودن ضریب هدایت حرارتی، گرمای تولیدی فرصت جذب شدن بوسیله براده‌ها را پیدا ننموده و در موضع ماشین‌کاری و درون مته باقی می‌ماند. همین عامل موجب گردیده که تاکنون توافقی در خصوص تأثیر مثبت بکارگیری سرعت‌های بالا در مورد دریل کردن استخوان در بین محققین وجود نداشته باشد.

پس تنها عواملی که در مورد فرآیند دریل کردن استخوان می‌توانند مفید واقع گردند، بهبود شرایط تشکیل براده، افزایش سرعت تخلیه و کاهش میزان انباشتگی براده‌ها در شیار مته می‌باشند. در مورد نتایج حاصل از دریل کردن سرعت بالای استخوان در این تحقیق (شکل ۴)، ملاحظه گردید که درجه حرارت‌های به‌دست آمده در موضع دریل کردن برای تمامی مقادیر پیشروی، با افزایش سرعت چرخشی روندی صعودی داشته و تنها یک نقطه منحصر به فرد برای هر مقدار پیشروی وجود دارد که در آن، دما به‌طور ناگهانی افت می‌کند. با بررسی یافته‌های حاصل از اندازه‌گیری نیرو، مشاهده می‌گردد که مقدار نیروی محوری، تا پیش از رسیدن به نقطه افت ناگهانی (6000 rpm برای پیشروی‌های 100 و 150 mm/min و 7000 rpm برای پیشروی 50 mm/min) روندی ثابت دارد و سپس به‌طور ناگهانی افت می‌نماید. وقوع این پدیده، براساس مشاهده براده‌های شکل گرفته در سرعت‌های فوق، قابل توجیه است. در سرعت‌های چرخشی پایین، براده‌های استخوانی به‌صورت رشته‌ای و مارپیچ تشکیل می‌گردند که موجب زیاد بودن مقدار نیروی ماشین‌کاری می‌گردد. اما در سرعت‌های چرخشی ذکر شده، براده‌ها به شکل ذرات ریز پودر مانند شکل گرفته، که به میزان شایان توجهی از نیروی مورد نیاز برای تشکیل آن می‌کاهد. همین افت ناگهانی نیرو و به همراه آن، افزایش توام سرعت تخلیه براده، موجب کاهش ناگهانی ازدیاد دما در سرعت‌های محدوده $6000-7000 \text{ rpm}$ برای پیشروی 100 و 150 mm/min و $7000-8000 \text{ rpm}$ برای پیشروی 50 mm/min می‌شود. اما پس از عبور از سرعت‌های فوق، مشاهده می‌گردد که علی‌رغم ثابت و ناچیز بودن مقدار نیرو، نمودار افزایش دما روندی

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر سرعت چرخشی، در فرآیند «سوراخ کاری سرعت بالا» بر پارامتر دمای موضع سوراخکاری، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل گردید:

- در فرآیند دریل کردن معمولی استخوان، به دلیل فاصله قابل ملاحظه حداقل از دیاد دما با آستانه دمایی نکروز، وقوع آن اجتناب ناپذیر بود و اجرای دریل کردن استخوان در این حالت، توصیه نمی‌گردد.

- در فرآیند دریل کردن سرعت بالای استخوان، در سرعت چرخشی معین (برای مته با قطر ۳/۲ میلی‌متر، در محدوده سرعت ۶۰۰۰-۷۰۰۰ rpm) به دلیل افت ناگهانی نیروی ماشین‌کاری (به‌طور متوسط ۸۷٪)، میزان از دیاد دما کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد که حداقل از دیاد دما در مجموعه فرآیندهای دریل کردن معمولی و سرعت بالا بوده و نقطه عملیاتی مناسبی برای انجام عمل جراحی، محسوب می‌گردد. پس به‌عنوان یک توصیه برای جراحان جهت انتخاب شرایط فرآیندی مناسب برای دریل کردن استخوان در عمل‌های جراحی ثابت‌کردن داخلی موضع شکستگی، به‌منظور حصول کمترین میزان از دیاد دما، انتخاب سرعت چرخشی ۶۰۰۰-۷۰۰۰ rpm توصیه می‌گردد.

- با عبور از نقطه بهینه و افزایش بیشتر سرعت چرخشی مته، به دلیل افزایش اصطکاک، بر میزان از دیاد دمای موضع دریل کردن افزوده می‌گردد که مقدار آن در سرعت‌های خیلی بالا، حتی می‌تواند از دمای فرآیند دریل کردن معمولی نیز فراتر رود و احتمال وقوع نکروز را تشدید نماید.

جدول ۱. مقایسه از دیاد دمای موضع دریل کردن با سایر تحقیقات

نام محقق	فرآیند	نمونه	از دیاد دما (°C)	سرعت مته (rpm)
«هیلازی» و «شعیب» ^(۱)	معمولی	گاو	۱۱۷-۱۰۲	۲۰۰۰-۴۰۰۰
«باچوس» و همکاران ^(۲)	معمولی	گاو	۶۸-۳۵	۸۲۰
«آگوستین» و همکاران ^(۳)	معمولی	خوک	۴۰/۸-۳۱/۶	۱۸۲۰-۱۸۸
«شکوری» و همکاران	معمولی	گاو	۳۵/۶-۳۰/۶	۱۰۰۰-۵۰۰
همکاران	سرعت بالا	گاو	۵۴/۹-۲۰/۹	۱۸۰۰۰-۳۰۰۰

«آگوستین» و همکاران و همچنین تحقیق حاضر بود که حدود ۳۰°C می‌باشد. با فرض دمای بدن ۳۷°C و با احتساب دمای ۴۷°C برای آستانه دمایی وقوع نکروز، قابل ملاحظه است که میزان مجاز از دیاد دما حدود ۱۰°C خواهد بود که حداقل افزایش دمای ۳۰°C، فاصله شایان توجهی با مقدار فوق دارد. با در نظر گرفتن محدوده دمایی به دست آمده برای دریل کردن سرعت بالا، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که حداقل میزان افزایش دمای ثبت شده برای این فرآیند (۲۰/۹°C)، پایین‌ترین دمای به دست آمده در مجموعه تحقیقات است که فاصله نسبتاً نزدیکی با آستانه دمایی وقوع نکروز دارد و میزان آن را به حداقل می‌رساند. ضمن آنکه در صورت اجرای آزمون‌ها بر روی استخوان انسان، به دلیل برخورداری از تراکم کمتر مواد معدنی و استحکام مکانیکی پایین‌تر نسبت به استخوان گاو، قطعاً دمای به دست آمده، فاصله کمتری با آستانه وقوع نکروز خواهد داشت و شرایط مطلوب‌تر خواهد بود.

References

- Hillery MT, Shuaib I. Temperature effects in the drilling of human and bovine bone. *J Materials Process Tech.* 1999;92-93:302-8.
- Bachus KN, Mateehew TR, Hutchinson DT. The effects of drilling force on cortical temperature and their duration: an in vitro study. *Med Engineering & Physics.* 2000;22:685-91.
- 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(1):71-7.
- 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(5):703-9. doi: 10.1007/s00402-008-0630-x.
- Davidson SR, James DF. Drilling in bone: modeling heat generation and temperature distribution. *J Biomech Eng.* 2003 Jun;125(3):305-14.
- Allan W, Williams ED, Kerawala CJ. Effects of repeated drill use on temperature of bone during preparation for osteosynthesis self-tapping screws. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2005;43(4):314-9.
- Sener BC, Dergin G, Gursoy B, Kelesoglu E, Slih I. Effects of irrigation temperature on heat control in vitro at

different drilling depths. *Clin Oral Implants Res.* 2009;20(3):294-8. doi: 10.1111/j.1600-0501.2008.01643.x.

8. Alam K, Mitrofanov AV, Silberschmidt VV. Measurement of surface roughness in conventional and ultrasonically assisted bone drilling. *Am J Biomed Science.* 2009;1:312-20.

9. Karmani S. The thermal properties of bone and the effects of surgical intervention. *Current Orthop.* 2006;20:52-8.

10. Udiljak T, Ciglar D, Mihoci K, Škorić S. Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis, *Advance Product Engineer Manag.* 2007;;2:103-12.

11. Augustin G, Zigman T, Davila S, Udiljak T, Staroveski T, Brezak D, Babic S. Cortical bone drilling and thermal osteonecrosis. *Clin Biomech* (Bristol, Avon). 2012;27(4):313-25. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2011.10.010.