



مطالعه تجربی نکروز حرارتی در فرایندهای سوراخ کاری معمولی و سرعت بالای استخوان

احسان شکوری^۱، محمدحسین صادقی^{۲*}، مهدی معرفت^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵ sadeghim@modares.ac.ir

چکیده- بی حرکت سازی داخلی قطعات شکسته شده استخوان، مبتنی بر سوراخ کاری موضع شکستگی و ثابت کردن آن به وسیله تجهیزاتی است که به استخوان پیچ می شوند. در حین سوراخ کاری، احتمال دارد دما از محدوده مجاز 47°C فراتر رفته، آسیب جبران ناپذیر نکروز حرارتی بر جای گذارد. در تحقیق حاضر، روش های سوراخ کاری استخوان بررسی شده اند تا شرایط مناسب به لحاظ ایجاد حداقل آسیب گرمایی تعیین شود. آزمون های سوراخ کاری با استفاده از دو روش معمولی و سرعت بالا بر روی استخوان ران گاو انجام پذیرفت و میزان ازدیاد دما در موضع سوراخ کاری، مدت زمان افزایش دما و نیروی محوری ماشین کاری ثبت گردید. نتایج نشان می دهند که در سوراخ کاری معمولی، در تمامی حالت ها میزان گرمای تولیدی فراتر از حد مجاز بوده و وقوع نکروز حرارتی اجتناب ناپذیر خواهد بود. از سوی دیگر، افزایش سرعت چرخشی مته تا 7000 rpm در سوراخ کاری سرعت بالا، موجب کاهش شایان توجه نیروی محوری و همچنین سبب افزایش میزان تخلیه حرارت به خارج به وسیله براده ها و در نتیجه کاهش میزان ازدیاد دمای موضع سوراخ کاری تا نزدیکی حد مجاز می شود. با افزایش بیشتر آن، به علت عدم تغییر مقدار نیرو و همچنین، به دلیل افزایش اصطکاک بدنه مته و براده ها با جدار سوراخ، میزان ازدیاد دما روند صعودی پیدا می کند.

کلیدواژگان: استخوان، نکروز حرارتی، سوراخ کاری معمولی، سوراخ کاری سرعت بالا، نیروی محوری ماشین کاری.

Experimental investigation of thermal necrosis in conventional and high speed drilling of bone

E. Shakouri¹, M.H. Sadeghi^{2*}, M. Maerefat³

1- PhD. Student, Mech. Eng, Faculty of Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Prof., Mech. Eng, Faculty of Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- Assoc. Prof., Mech. Eng, Faculty of Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

* P.O. B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

Abstract- Internal immobilization of fractured parts of bone depends on the drilling of fracture site and screw fixation of implanted devices to the bone. During drilling, the temperature may rise allowable temperature of 47°C and causes irreversible thermal necrosis. This study is concerned with methods of drilling to determine the best processing condition to minimize the osteonecrosis. Drilling tests were performed with two drilling techniques: conventional, and high speed drilling on the bovine femur and increase of temperature in drilling site, duration of temperature raise and thrust force were measured. The result for conventional drilling shows that in all processing conditions, the generated heat is over the allowable limit, which makes thermal necrosis inevitable. On other hand, it was found that increase of cutting speed of drill bit to 7000 rpm , leads to considerable decrease of thrust force and increase of heat dissipation with chips, simultaneously and leads to decrease of local temperature raise in drilling site. But with more increase of rotational speed of drill bit, because of not sensible change in drilling force and considerable increase of friction between chips, drill bit body and drilled hole, amount of temperature elevation is increased.

Keywords: Bone, Thermal Necrosis, Conventional Drilling, High Speed Drilling, Thrust Force.

۱- مقدمه

سوراخ‌کاری، یکی از مهمترین مراحل جراحی و ترمیم شکستگی استخوان به شمار می‌رود. در حین سوراخ‌کاری، جراح به منظور حصول اطمینان از نفوذ یکنواخت مته به استخوان، ملزم به اعمال فشار عمودی به ابزار سوراخ‌کاری می‌باشد. این مسأله، 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 می‌شود. بخشی از گرمای ایجاد شده در حین فرایند سوراخ‌کاری استخوان می‌تواند به وسیله جریان خون و مایعات میان بافتی پخش شده و همچنین بخشی از آن به وسیله براده‌ها به محیط خارج انتقال یابد. اما در عین حال، بخشی از حرارت از طریق انتقال حرارت رسانشی، به استخوان میزبان منتقل می‌شود. از طرفی استخوان، رسانای ضعیف گرما محسوب می‌شود، به طوری که ضریب هدایت حرارتی قشر خارجی استخوان تازه، در محدوده 0.38 تا $2/3 \text{ W/mK}$ گزارش شده است [۱]. این به آن مفهوم است که گرمای تولیدی در حین فرایند، توانایی آن را ندارد که به سرعت از استخوان به محیط اطراف پراکنده شود و در نتیجه موجب افزایش دمای موضعی در محل سوراخ می‌شود. ازدیاد دما در موضع سوراخ‌کاری، منجر به تغییر ماهیت آلکالین فسفاتاز استخوان می‌شود، که خود موجبات پدیده نكروز حرارتی و مرگ سلولی، و در نتیجه مردگی بافت استخوانی و افت استحکام مکانیکی موضع سوراخ‌کاری را فراهم می‌آورد [۲]. این مسأله در جراحی‌های ارتوپدی حائز اهمیت می‌باشد، چرا که در مراحل بعد، پیچ‌های خودکار درون این سوراخ‌ها جای خواهند گرفت تا پلاک، سیم و سایر تجهیزات مهار کننده شکستگی را نگه دارند. آسیب حرارتی وارده به استخوان در موضع شکستگی، منجر به ایجاد مشکلاتی در برهم کنش بین پیچ نگه‌دارنده و استخوان می‌شود و نهایتاً جوش خوردگی استخوان در جهت و زاویه مطلوب صورت نخواهد پذیرفت. بنابراین، به دلیل فوق می‌بایست جوانب احتیاط برای به حداقل رسانیدن میزان ازدیاد دما در موضع سوراخ‌کاری در نظر گرفته شود. شایان ذکر است که میزان عدم موفقیت کاشت پلاک در عمل‌های جراحی ساق پا بین $2/1$ تا $7/1\%$ گزارش شده است [۴،۳].

تأثیر حرارت بر بافت استخوان وابسته به دو عامل درجه

حرارت و مدت زمان مواجهه با آن دما می‌باشد. برخی از محققان، آستانه‌ای مشخص نموده‌اند که زیر آن حد، میزان تأثیر گرمایی قابل ملاحظه نیست، اما فراتر از آن حد، تخریب گرمایی سلول‌های استخوانی آغاز می‌شود. آزمون‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های استخوان نشان داده‌اند که به ازای هر یک درجه سلسیوس افزایش دما، مدت زمان قابل تحمل برای مواجهه با آن دما با نمای ۲ کاهش می‌یابد، بدین مفهوم که اگر مدت زمان قابل تحمل برای استخوان در دمای 47°C ، حدود یک دقیقه باشد، این زمان با افزایش دمای موضع سوراخ‌کاری به 48°C به ۳۰ ثانیه تقلیل می‌یابد. این رابطه نشان می‌دهد که زمان مواجهه، با افزایش دما به سرعت کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در دمای 53°C این بازه زمانی به کمتر از یک ثانیه تقلیل یافته و فراتر از آن دما، پدیده نكروز به صورت آنی روی می‌دهد [۷،۶،۵،۴،۳]. برای محاسبه آسیب حرارتی وارده به استخوان، از رابطه وابسته به دما-زمان آرینوس که توسط هنریکز ارائه شده است، استفاده می‌شود [۵]:

$$\Omega = \int_0^t A e^{-E_a / (R(T+273))} dt \quad (1)$$

که در این رابطه، Ω معرف آسیب حرارتی وارده به بافت استخوان در فاصله زمانی ۰ تا t ، A نماد فاکتور فرکانس [s^{-1}] E_a معرف انرژی اکتیواسیون [Jmol^{-1}] R ثابت جهانی گازها و T درجه حرارت در مقیاس سلسیوس می‌باشد. هنریکز با فرض آنکه مقادیر $E_a = 6/27 \times 10^5 \text{ Jmol}^{-1}$ و $A = 3/1 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$ باشد، آستانه وقوع پدیده نكروز در بافت استخوانی را رسیدن مقدار Ω به 0.53 تعیین کرده است.

بنابراین، می‌بایست با اتخاذ روش‌های مؤثر، میزان آسیب حرارتی وارده به استخوان در حین فرایند سوراخ‌کاری به حداقل برسد. محققان بسیاری درصدد به حداقل رسانیدن میزان تولید گرما در حین فرایند سوراخ‌کاری برآمده‌اند، اما هنوز هم توافق کاملی بر روی چگونگی کاهش مؤثر میزان ازدیاد دما صورت نپذیرفته است.

عوامل متعددی در حین فرایند سوراخ‌کاری استخوان بر روند ازدیاد دما تأثیرگذارند، از جمله کیفیت و خواص استخوان، هندسه مته، عمق سوراخ، میزان تیز بودن ابزار برشی، سرعت سوراخ‌کاری، فشار عمودی وارده به مته، اجرای سوراخ‌کاری به صورت تدریجی یا تک مرحله‌ای، انجام سوراخ‌کاری متناوب یا پیوسته، بکارگیری روش‌های خنک‌کاری داخلی یا خارجی، و

تأثیر خواص مکانیکی و کیفیت جنس مته انتخابی بر روی نحوه عملکرد آن [۶]. تحقیقات منتشر شده در زمینه سوراخ‌کاری استخوان، تأثیرات گوناگون پارامترهای فرایند سوراخ‌کاری را مورد بررسی قرار داده‌اند. هیلاری و شعیب اثرات هندسه مته و سرعت برشی را بر روی تغییرات دما مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱]. نتایج آنها نشان داده است که تغییر محسوسی در درجه حرارت تولیدی در ضمن سوراخ‌کاری با مته‌های دارای زوایای راس متفاوت مشاهده نشده است، ضمن آن که در حین استفاده از مته‌های استاندارد جراحی (با قطر ۳/۲ میلی‌متر)، به منظور حصول بهترین شرایط برش و نگهداری دماها در سطح قابل قبول، سرعت چرخشی بین ۸۰۰-۱۴۴۰ rpm را توصیه نموده‌اند. باچوس و همکاران، اثر مقدار نیروی محوری مته را بر روی دما و مدت زمان ماندگاری در آن دما، در فرایند سوراخ‌کاری قشر خارجی استخوان بررسی نموده‌اند [۲]. نتایج آنها، موید این مطلب است که با افزایش مقدار نیروی محوری اعمال شده، هر دو پارامتر حداکثر دما و مدت زمان ماندگاری در آن دما به نحو چشم‌گیری کاهش می‌یابند، که متعاقباً میزان گسترش نكروز گرمایی در محیط پیرامون سوراخ کاهش خواهد یافت. با وجود تأثیرات مثبت افزایش نیروی محوری، به دلیل احتمال گسترش ترک‌خوردگی استخوان و همچنین افزایش احتمال شکستگی مته در استخوان، در بکارگیری آن محدودیت وجود دارد. دیویدسون و جیمز، ضریب هدایت گرمایی استخوان گاو را مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که استخوان را به لحاظ خواص گرمایی می‌توان همسان‌گرد تصور کرد [۸].

در پژوهشی دیگر، دیویدسون و جیمز، مدلی ترمومکانیکی مبتنی بر تئوری ماشین‌کاری، جهت پیش‌بینی میزان ازدیاد دما و آسیب گرمایی وارده به استخوان در حین فرایند سوراخ‌کاری را ارائه نموده‌اند [۵]. اهمیت سایش مته در فرایند سوراخ‌کاری استخوان، از سوی آلان و همکاران مورد توجه قرار گرفته است و از آنجا که بکارگیری مته فرسوده، اعمال نیروهای برشی بیشتری را می‌طلبد، لذا موجب افزایش تولید حرارت اصطکاکی، افزایش میزان ازدیاد دما، و مدت زمان ماندگاری در آن دما می‌گردد. از این رو، آنها توصیه نموده‌اند که مته‌های جراحی برای یک دوره زمانی محدود، یا برای ایجاد تعداد مشخصی سوراخ مورد استفاده قرار گرفته و پس از آن با

مته‌های نو تعویض شوند [۶]. کارمانی، تأثیر پارامترهای سوراخ‌کاری و هندسه مته را بر میزان ازدیاد دما مورد بررسی مجدد قرار داده است [۹]. یودیلجاک و همکاران، افزایش دما در فرایند سوراخ‌کاری استخوان را در چندین نقطه پراکنده از محدوده سرعت‌های برشی اندازه‌گیری کرده‌اند و چنین نتیجه گرفته‌اند: الف) در فرایند سوراخ‌کاری معمولی، افزایش سرعت چرخشی منجر به افزایش درجه حرارت می‌شود، ب) در فرایند سوراخ‌کاری سرعت بالا، پس از گذار از بازه سرعت‌های معمولی و ورود به ناحیه سرعت بالا، افزایش بیشتر سرعت برشی تأثیر شایانی بر میزان ازدیاد دما ندارد، ج) سوراخ‌کاری سرعت بالا، میزان ازدیاد دمای نسبتاً کمتری نسبت به سوراخ‌کاری معمولی ایجاد می‌کند، ولی باز هم قادر نیست که مقدار دمای بیشینه را به زیر سطح مجاز آن تنزل دهد [۱۰]. آگوستین و همکاران در یک کار پژوهشی دریافته‌اند که افزایش قطر مته و افزایش سرعت چرخشی موجب افزایش دمای استخوان می‌شود، تغییرات مختلف زاویه راس مته تغییر محسوسی در میزان ازدیاد دما ایجاد نمی‌نماید، افزایش نرخ پیش‌روی، دمای بیشینه را کاسته، و بکارگیری خنک‌کاری خارجی، به میزان قابل ملاحظه‌ای از دمای بیشینه ایجاد شده می‌کاهد [۳].

در دیگر تحقیقات نیز اشاره شده است که بکارگیری سیال خنک‌کار، به‌طور قابل ملاحظه‌ای از ازدیاد دما در حین سوراخ‌کاری می‌کاهد، اما بر خلاف سایر فرایندهای ماشین‌کاری، در فرایند سوراخ‌کاری استخوان استفاده از سیال خنک‌کار مجاز نیست، چرا که کاربرد هرگونه خنک‌کار و روان‌کار، موجب افزایش احتمال بروز عفونت در موضع سوراخ‌کاری و به خطر افتادن سلامت بیمار می‌شود. به عنوان مثال، سم‌سز و همکاران، نشان داده‌اند در فرایند سوراخ‌کاری استخوان آرواره گاو، بخش عمده حرارت تولیدی در ناحیه سطحی متمرکز شده است تا در ناحیه عمق حفره ایجاد شده، و این حرارت به نحو مؤثری با بکارگیری مایع خنک‌کار از سیستم خارج می‌شود و دما از سطح مجاز فراتر نمی‌رود [۷]. علم و همکاران، برای نخستین بار ارتعاشات آلتراسونیک در جهت پیش‌روی مته را به فرایند سوراخ‌کاری استخوان افزودند و تأثیر آن را بر روی پارامتر زبری سطح مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، این ویژگی را دارد که سطح صاف‌تری را نسبت به

هدف پژوهش حاضر، شناسایی بهترین روش به لحاظ حداکثر کاهش میزان ازدیاد دما در حین فرایند سوراخ‌کاری استخوان در محیط آزمایشگاهی بوده و مشتمل بر بررسی دو مرحله‌ای سوراخ‌کاری استخوان می‌باشد. در مرحله نخست، مقادیر دمای موضع سوراخ‌کاری، بازه زمانی ماندگاری در دماهای بالا و نیروی محوری در سوراخ‌کاری معمولی مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند و در مرحله دوم، کاربرد ماشین‌کاری سرعت بالا و تأثیر آن بر پارامترهای فوق مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی این تحقیق نسبت به پژوهش‌های پیشین، آن است که محدوده گسترده‌ای از سرعت‌های برشی بالا را مد نظر قرار داده تا امکان مقایسه هرچه بهتر نتایج سوراخ‌کاری سرعت بالا با سوراخ‌کاری معمولی فراهم آید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موتور سرعت بالا

به منظور دستیابی به محدوده گسترده‌ای از سرعت‌های چرخشی، یک موتور سرعت بالای القایی مدل آرل با حداکثر سرعت دورانی ۱۸۰۰۰ دور در دقیقه مورد استفاده قرار گرفته است. این موتور به وسیله پایه بر روی میز دستگاه تراش CNC نصب شده تا مستقلاً حرکت چرخشی را انجام داده و حرکت پیش‌روی از جابجایی قطعه کار بسته شده بر روی سوپرت فراهم گردد. تغییرات سرعت چرخشی ابزار، به وسیله کامپیوتری که از طریق درایور سیستم به موتور متصل است، انجام پذیرفته است.

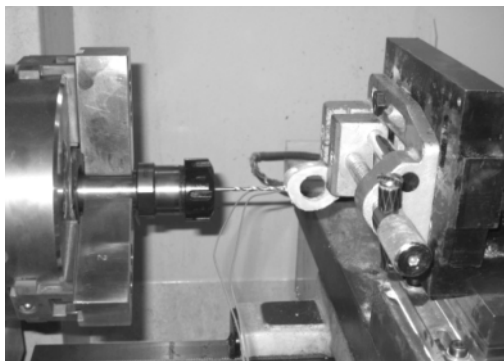
۲-۲- تجهیزات آزمایش

مجموعه آزمایش‌ها به منظور بررسی اثر سوراخ‌کاری به روش‌های معمولی و سرعت بالا بر روی گرمای تولیدی و نیروی ماشین‌کاری صورت پذیرفته است. تست‌ها بر روی دستگاه تراش CNC مدل (TME 40) ساخت ماشین‌سازی تبریز صورت پذیرفته و نیروهای ماشین‌کاری به کمک دینامومتر کیستلر مدل 9275BA اندازه‌گیری شده است. مته‌های مورد استفاده، مته استاندارد جراحی با قطر $3/2$ mm و از جنس فولاد ضد زنگ 316L می‌باشند. زوایای راس و ماریج آنها به ترتیب 90° و 20° بوده و بر اساس آنچه که در سایر مراجع قید شده، حداکثر برای ماشین‌کاری ۴۰ سوراخ مورد استفاده

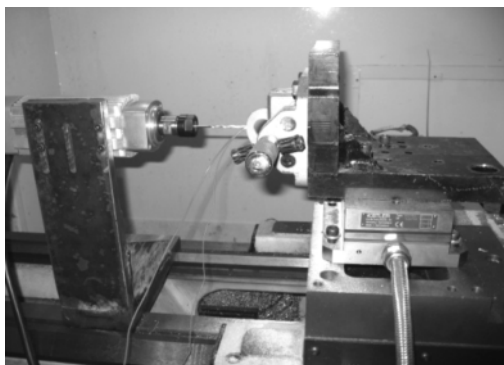
سوراخ‌کاری معمولی فراهم می‌آورد [۱۱]. آگوستین و همکاران، توزیع فضایی حرارت تولیدی در حین فرایند سوراخ‌کاری استخوان را با استفاده از ترموگرافی مادون قرمز مورد بررسی قرار دادند [۴]. نتایج آنها این واقعیت را آشکار می‌سازد که افزایش دما در استخوان ضمن برخورداری از شکل فضایی نامنتظم، دارای مقدار بیشینه در ناحیه قشر خارجی استخوان می‌باشد، یعنی جایی که از بیشترین میزان تراکم و دانسیته بهره می‌برد. در پژوهشی که توسط علم و همکاران صورت پذیرفته، نشان داده شده است که بکارگیری ارتعاشات آلتراسونیک در فرایند سوراخ‌کاری استخوان گاو، موجب کاهش نیروی محوری و گشتاور پیچشی در مقایسه با سوراخ‌کاری معمولی می‌شود [۱۲]. آگوستین و همکاران، در یک تحقیق مروری، سوراخ‌کاری استخوان و پدیده نكروز گرمایی را مورد بررسی مجدد قرار داده‌اند [۱۳]. کاراکا و همکاران، مطالعاتی را بر روی استخوان انسان انجام داده و مشاهده کرده‌اند که با افزایش سرعت چرخشی یا کاهش نرخ پیش‌روی و نیروی اعمالی، میزان ازدیاد دما افزایش می‌یابد [۱۴]. لی و همکاران در یک کار تحقیقاتی، یک مدل دمایی جدید برای سوراخ‌کاری استخوان [۱۵] و در پژوهشی دیگر، یک مدل مکانیستیک به منظور پیش‌بینی نیروی محوری و گشتاور پیچشی در فرایند سوراخ‌کاری استخوان [۱۶] ارائه نموده‌اند.

سوراخ‌کاری معمولی استخوان، نسبتاً نیروهای برشی بالایی را ایجاد می‌کند که طبیعتاً موجب افزایش دمای موضع سوراخ‌کاری می‌شود. روش‌های متعددی برای کاهش این نیروهای برشی و گرمای تولیدی وجود دارد. این روش‌ها شامل: بکارگیری سیال خنک‌کار در موضع سوراخ‌کاری، افزایش نرخ پیش‌روی به منظور کاهش زمان ماشین‌کاری، و همچنین انجام ماشین‌کاری سرعت بالا (فرا تر از ۳۰۰۰ rpm برای استخوان) می‌باشد. ماشین‌کاری سرعت بالا که در آن از سرعت‌های برشی فرا تر از محدوده‌های رایج ماشین‌کاری بهره گرفته می‌شود، یکی از جنبه‌های حائز اهمیت تکنولوژی‌های پیشرفته ساخت و تولید محسوب شده و موجبات افزایش نرخ تولید و کاهش هزینه‌های ماشین‌کاری را فراهم می‌آورد. تأثیر مثبت افزایش قابل ملاحظه سرعت برشی در ماشین‌کاری سرعت بالا، می‌تواند ناشی از دستیابی به نیروهای برشی کمتر و حجم براده‌برداری بالاتر و در نتیجه صرف انرژی کمتر باشد.

پس از کشتار، از بدن آن خارج شده، طی چند ساعت مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲ تجهیزات آزمایش‌های سوراخ کاری معمولی



شکل ۳ تجهیزات آزمایش‌های سوراخ کاری سرعت بالا

استخوان گاو از آن جهت انتخاب شده 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 mm برای آزمایش‌ها استفاده شده است (شکل ۴). ضخامت قشر بیرونی در این ناحیه حدود ۷-۸ mm می‌باشد. پیش از اجرای آزمون‌ها، پوشش غشایی روی محل سوراخ کاری از آن جدا شده است، چراکه وجود این غشا موجب ایجاد مشکلاتی در نحوه تخلیه براده‌ها و افزایش احتمال انسداد شیارهای مته می‌شود [۳]. سپس، نمونه‌هایی به پهنای حدود ۲۰ mm را با استفاده از دستگاه فرز برش داده تا هریک به صورت جداگانه برای سوراخ کاری و اندازه‌گیری درجه حرارت موضع سوراخ کاری، استفاده شوند (شکل ۵). تمامی آزمایش‌ها، در دمای اتاق و بدون بهره‌گیری از هرگونه خنک‌کار و روان‌کار انجام شده است.

قرار گرفته و سپس با مته جدید جایگزین شده‌اند [۶،۳]. در فرایند سوراخ کاری معمولی، مقادیر ۵۰، ۷۵۰، و ۱۰۰۰ rpm برای سرعت چرخشی و ۵۰، ۱۰۰، و ۱۵۰ mm/min برای نرخ پیش‌روی مته لحاظ شده است. در فرایند ماشین‌کاری سرعت بالا، ۱۶ مقدار برای سرعت چرخشی مته از ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ rpm با فواصل ۱۰۰۰ rpm و ۳ مقدار ۵۰، ۱۰۰، و ۱۵۰ mm/min برای نرخ پیش‌روی استفاده شده‌اند.

تغییرات دما در موضع سوراخ کاری، به وسیله ترموکوپل‌های تماسی سیمی از نوع k-type که با واسطه ترمومتر لوترون TM-925 به کامپیوتر متصل شده، اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. بازه قابل اندازه‌گیری دستگاه بین ۵۰- تا ۱۳۰۰ درجه سلسیوس و رزولوشن آن ۰/۱ درجه می‌باشد (شکل ۱). به منظور به حداقل رسانیدن 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 سوراخ کاری، بر اساس آنچه که در سایر تحقیقات رعایت شده، نصب آن در عمق ۳ mm و به فاصله ۰/۵ mm از جدار سوراخ بوده است [۱۰،۳].



شکل ۱ تجهیزات اندازه‌گیری دما

برای هر شرایط فرایندی، حداقل دو سری آزمون انجام پذیرفته و مقدار دمای ثبت شده در هر حالت، برای مقایسه دمای فرایندهای سوراخ کاری معمولی و سرعت بالای استخوان مورد استفاده قرار گرفته است. شکل‌های ۲ و ۳، تصاویری از تجهیزات آزمایش‌های سوراخ کاری معمولی و سوراخ کاری سرعت بالا را نشان می‌دهند.

۲-۳- نمونه‌های آزمایشی

برای این مجموعه آزمایش‌ها، استخوان ران گاو که بلافاصله

- با افزایش سرعت چرخشی مته از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ rpm، میزان ازدیاد دمای موضع سوراخ‌کاری در هر سه نرخ پیش‌روی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min کاهش می‌یابد. این به آن مفهوم است که افزایش سرعت چرخشی مته، تأثیر مثبت بر کاهش میزان افزایش دما دارد. برای شرایط فرایندی انتخاب گردیده، افزایش سرعت چرخشی مته از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ rpm، منجر به کاهش مقدار افزایش دما در حدود $3/8-4^{\circ}\text{C}$ برای نرخ‌های پیش‌روی اعمال شده می‌شود.

- هرچه نرخ پیش‌روی بالاتر باشد، میزان ازدیاد دما کمتر خواهد بود. البته شایان ذکر است که در فرایند سوراخ‌کاری معمولی، میزان تأثیرگذاری افزایش نرخ پیش‌روی، به اندازه سرعت چرخشی نبوده و افزایش این پارامتر از ۵۰ تا ۱۵۰ mm/min، برای سرعت‌های اعمال شده، منجر به کاهش مقدار افزایش دما در حدود $2/2-2/4^{\circ}\text{C}$ می‌شود.

- می‌توان نتیجه گرفت که فرایند سوراخ‌کاری معمولی، در محدوده‌های سرعت چرخشی و نرخ‌های پیش‌روی توصیه شده برای سوراخ‌کاری استخوان، قادر به دستیابی درجه حرارت‌های پایین‌تر از مقدار مجاز نمی‌باشد. کمترین میزان ازدیاد دما (نسبت به دمای اولیه) در این فرایند $30/6^{\circ}\text{C}$ بوده که در سرعت ۱۰۰۰ rpm و پیش‌روی ۱۵۰ mm/min پدید می‌آید.

مدت زمان ماندگاری، در درجه حرارت‌های فراتر از حد مجاز، برای آزمون‌های انجام پذیرفته در سرعت‌های چرخشی و نرخ‌های پیش‌روی مختلف، در شکل ۷ نشان داده شده است.

- قابل ملاحظه است که با افزایش نرخ پیش‌روی، مدت زمان ماندگاری در دماهای بالا تقلیل می‌یابد.

- تغییر سرعت چرخشی، تأثیر چندانی محسوس بر کاهش این مدت زمان ندارد.

در شکل ۸، نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی محوری ماشین‌کاری، در فرایند سوراخ‌کاری معمولی استخوان گاو ارائه شده است. با توجه به شکل فوق، قابل ملاحظه است که:

- هرچه پیش‌روی بالاتر باشد، مقدار نیرو بیشتر است.

- با افزایش سرعت چرخشی مته از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ rpm، مقدار نیروی محوری برای هر سه نرخ پیش‌روی کاهش می‌یابد.

- در سرعت ۱۰۰۰ rpm، مقادیر نیروی هر سه نرخ پیش‌روی به یکدیگر نزدیک شده، شیب منحنی‌ها کاهش یافته و عملاً تأثیر افزایش سرعت بر کاهش نیرو، تقلیل می‌یابد.



شکل ۴ بخش دیافیز استخوان ران گاو



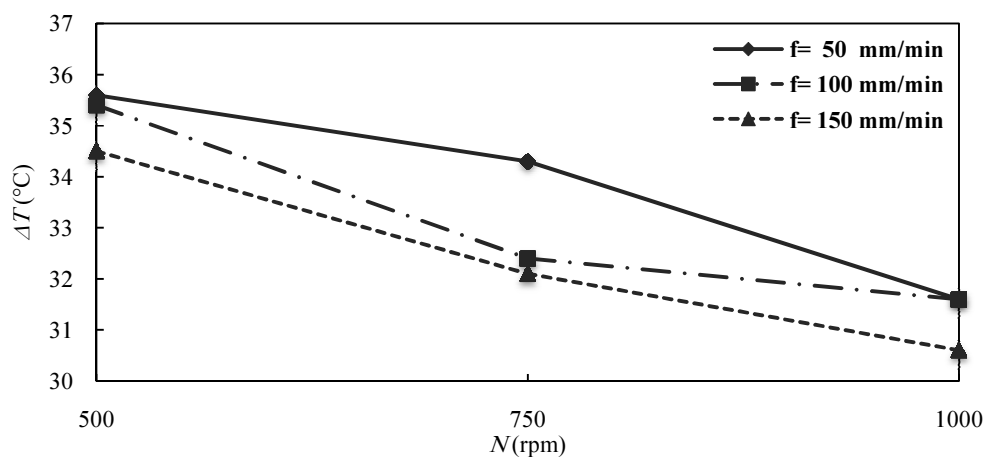
شکل ۵ نمونه‌های برش خورده استخوان

دمای اولیه مته و استخوان، عوامل حائز اهمیتی نبوده و اختلاف دمای اتاق تا دمای بدن انسان (37°C)، تغییری در خواص استخوان و حداکثر ازدیاد دمای ایجاد شده در حین فرایند سوراخ‌کاری ندارد [۴]. بنابراین صرفاً مقدار ازدیاد دمای ایجاد شده (ΔT)، مد نظر بوده و سپس با انتقال مبدا اندازه‌گیری به دمای بدن، می‌توان بیشینه دمای ایجاد شده را با سطوح مجاز دمایی (47°C) مقایسه کرد. قابل ذکر است که فاصله زمانی مناسب بین آزمایش‌ها رعایت شده تا درجه حرارت مته و استخوان، به دمای اتاق باز گردد.

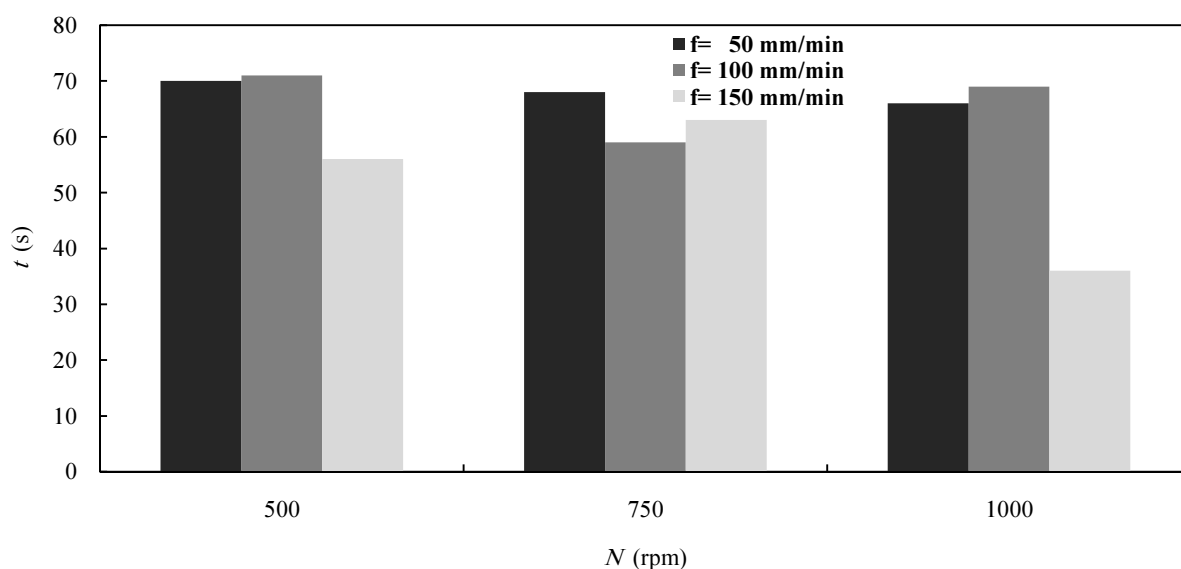
۳- یافته‌ها

۳-۱- سوراخ‌کاری معمولی

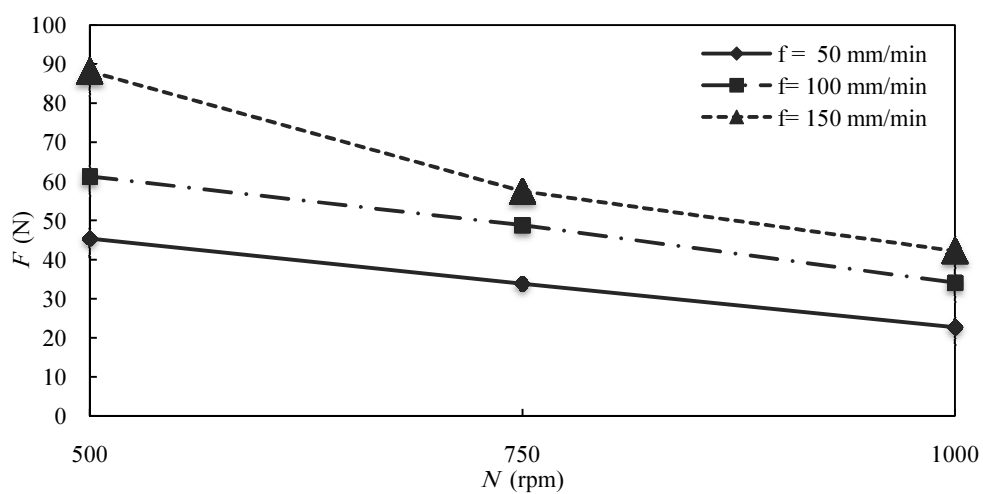
نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای سوراخ در فرایند سوراخ‌کاری معمولی، در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل فوق، قابل ملاحظه است که:



شکل ۶ نمودار سرعت چرخشی - افزایش دمای موضع سوراخ کاری (سوراخ کاری معمولی)



شکل ۷ نمودار سرعت چرخشی - مدت زمان ماندگاری در دمای فراتر از حد مجاز ۴۷°C (سوراخ کاری معمولی)



شکل ۸ نمودار سرعت چرخشی - نیروی محوری سوراخ کاری (سوراخ کاری معمولی)

۳-۲- سوراخ‌کاری سرعت بالا

در فرایند سوراخ‌کاری سرعت بالا، با توجه به آنچه که در مراجع در خصوص ماشین‌کاری استخوان قید شده است، محدوده سرعت چرخشی، فراتر از ۳۰۰۰ rpm انتخاب شده [۱۳] و به منظور فراهم آمدن شرایط مقایسه، آزمایش‌ها در همان نرخ‌های پیش‌روی سوراخ‌کاری معمولی انجام پذیرفته است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری دمای موضع سوراخ در فرایند سوراخ‌کاری سرعت بالا، در شکل ۹ ارائه شده است. با بررسی شکل فوق، قابل ملاحظه است که:

- هرچه نرخ پیش‌روی بالاتر باشد، میزان ازدیاد دما کمتر خواهد بود. برخلاف نتایج دمای سوراخ‌کاری معمولی که در آن میزان تأثیرگذاری نرخ پیش‌روی ناچیز بود، در این فرایند اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین درجه حرارت‌های نرخ پیش‌روی ۵۰ mm/min با ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min وجود دارد. ضمن آن که در بسیاری از سرعت‌های چرخشی، نتایج نرخ‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min به یکدیگر نزدیک می‌باشند.

- با افزایش سرعت چرخشی از ۳۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ rpm، در مجموع، نمودارهای ازدیاد دمای موضع سوراخ‌کاری روندی صعودی از خود نشان می‌دهند، تا جایی که در سرعت‌های چرخشی بالا، مقادیر دمای به‌دست آمده، از نتایج سوراخ‌کاری معمولی فراتر رفته و عملاً انجام سوراخ‌کاری در سرعت‌های بالا را بی‌تأثیر می‌کند. اما یک نکته حائز اهمیت در نمودارهای فوق وجود دارد و آن، این است که برای نرخ‌های پیش‌روی ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min در سرعت چرخشی ۶۰۰۰ rpm، نمودارهای دما حالت نزولی به خود گرفته که در سرعت ۷۰۰۰ rpm به حداقل دمای نمودارهای مزبور دست می‌یابد. همین شرایط برای پیش‌روی ۵۰ mm/min در سرعت ۷۰۰۰ rpm آغاز شده و در سرعت ۸۰۰۰ rpm، به دستیابی به حداقل دمای نرخ پیش‌روی فوق، در سرتاسر بازه سرعت‌های چرخشی منتهی می‌شود.

نتایج اندازه‌گیری مدت زمان ماندگاری در دماهای بیشتر از حد مجاز، در شکل ۱۰ ارائه شده است. نمودار فوق، گویای آن است که:

- با افزایش نرخ پیش‌روی، زمان ماندگاری در دماهای بالا کاهش می‌یابد.

- با افزایش سرعت چرخشی، بازه زمانی دماهای بالا در ابتدا روندی صعودی داشته، تا این که در سرعت‌های ۶۰۰۰ تا

۸۰۰۰ rpm به میزان قابل توجهی کاهش یافته و پس از آن مجدداً حالت صعودی به خود می‌گیرد.

در شکل ۱۱، نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی محوری ارائه گردیده است. قابل ملاحظه است که:

- 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.

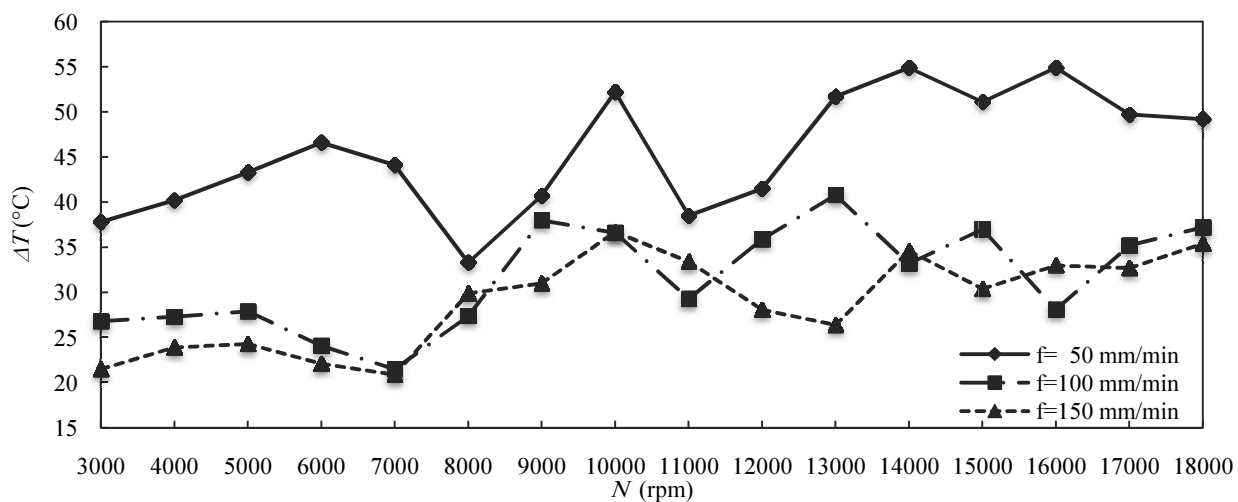
- برای پیش‌روی ۵۰ mm/min در سرعت ۷۰۰۰ rpm و برای پیش‌روی‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min، در سرعت ۶۰۰۰

مقدار نیرو به طور ناگهانی افت می‌کند. میزان افت نیرو برای پیش‌روی‌های فوق به ترتیب ۸۵/۳٪، ۸۷/۲٪ و ۸۸/۸٪ می‌باشد.

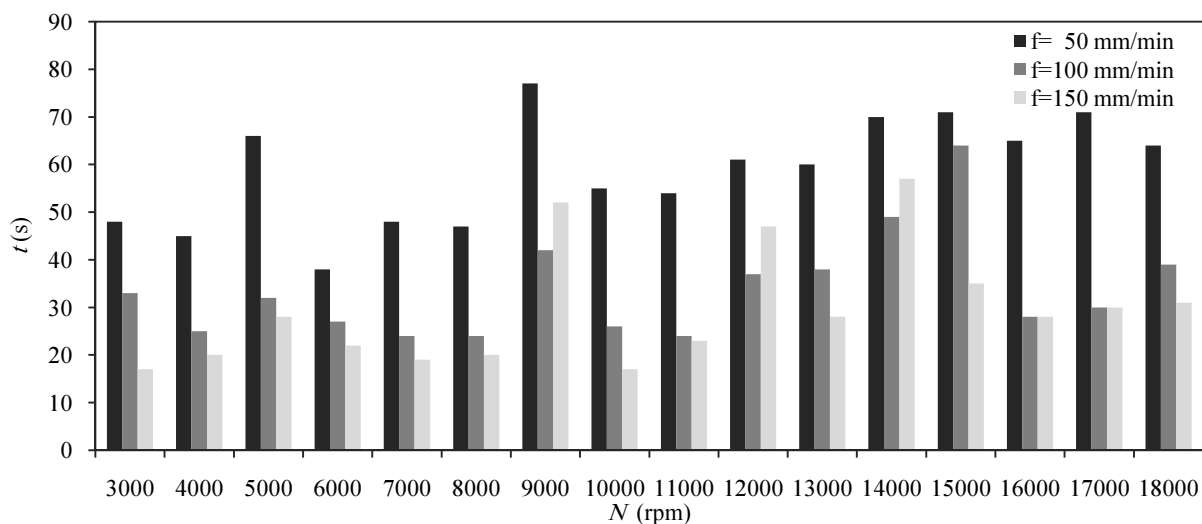
- پس از سرعت‌های ذکر شده، نمودار نیروی محوری برای هر سه نرخ پیش‌روی، به‌صورت خطی شده و تقریباً برهم منطبق بوده و افزایش سرعت چرخشی، تغییری در مقدار نیروی محوری ایجاد نمی‌کند.

۴- بحث

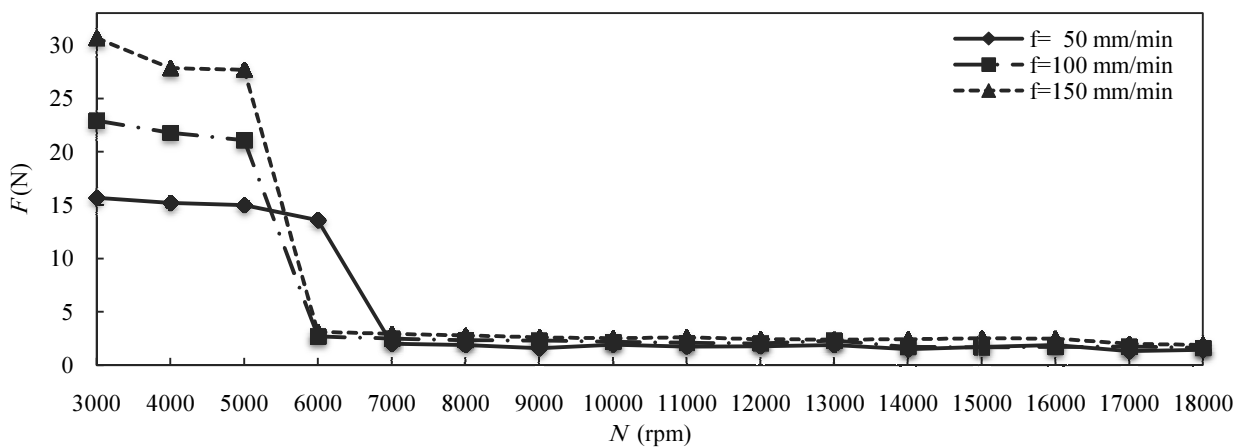
با توجه به نتایج به دست آمده در خصوص فرایند سوراخ‌کاری معمولی استخوان (شکل‌های ۶ تا ۸)، ملاحظه شد که افزایش سرعت چرخشی، منجر به کاهش ازدیاد دما در موضع سوراخ‌کاری می‌شود. به منظور بررسی این پدیده، می‌بایست عوامل مؤثر بر افزایش دما در حین فرایند را مورد مطالعه قرار داد. این عوامل عبارتند از: نیروی شکل‌گیری براده، انباشتگی براده و نیروی اصطکاک (براده یا بدنه مته با جدار سوراخ). در سرعت‌های چرخشی پایین، به دلیل زیاد بودن نیروی سوراخ‌کاری و سرعت کم خروج براده و وقوع پدیده انباشتگی براده، بیشترین ازدیاد دما روی می‌دهد. با افزایش سرعت، شرایط تشکیل براده بهبود یافته، بر سرعت خروج براده‌ها افزوده شده و انباشتگی ذرات داخل شیارهای مته کمتر می‌شود. در نتیجه نیروی سوراخ‌کاری کاهش یافته و از میزان حرارت تولیدی در سوراخ کاسته شده و درجه حرارت به میزان کمتری افزایش می‌یابد. اما به دلیل آن که فرایند سوراخ‌کاری معمولی، در کاهش مقدار نیرو و افزایش سرعت تخلیه براده محدودیت دارد، تا حد معینی می‌تواند از ازدیاد دما در موضع سوراخ‌کاری بکاهد که این میزان جهت پیشگیری از پدیده نكروز کافی نبوده و وقوع آن را اجتناب‌ناپذیر می‌کند.



شکل ۹ نمودار سرعت چرخشی- افزایش دمای موضع سوراخ کاری (سوراخ کاری سرعت بالا)



شکل ۱۰ نمودار سرعت چرخشی- مدت زمان ماندگاری در دمای فراتر از حد مجاز ۴۷°C (سوراخ کاری سرعت بالا)



شکل ۱۱ نمودار سرعت چرخشی- نیروی محوری سوراخ کاری (سوراخ کاری سرعت بالا)

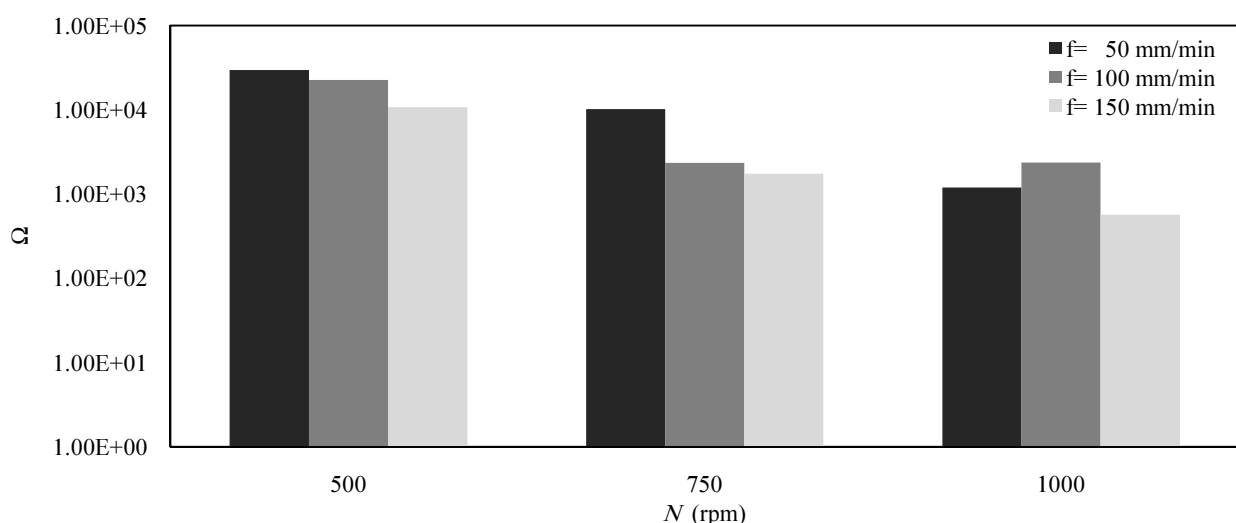
سرعت برشی، از یک سو منجر به کاهش نیروی ماشین کاری و از سوی دیگر منجر به افزایش سرعت تخلیه براده و افزایش سهم حرارت خروجی به وسیله براده‌ها و نهایتاً کاهش ازدیاد دما در موضع ماشین کاری شود (در مورد سوراخ کاری فلزات، ۸۵٪ حرارت تولیدی، به وسیله براده‌ها به خارج محیط ماشین کاری منتقل می‌شود [۹]). در مورد استخوان، به دلیل کم بودن مقدار ضریب هدایت حرارتی آن در مقایسه با فلزات، نمی‌توان انتظار داشت که افزایش چشمگیر سرعت چرخشی و به تبع آن، افزایش سرعت تخلیه براده، سهم بسزایی در انتقال حرارت تولیدی به بیرون داشته باشد. زیرا به واسطه پایین بودن ضریب هدایت حرارتی، گرمای تولیدی فرصت جذب شدن به وسیله براده‌ها را پیدا نکرده و در موضع ماشین کاری و درون مته باقی می‌ماند. همین عامل، موجب شده که تاکنون توافقی در خصوص تأثیر مثبت بکارگیری سرعت‌های بالا در مورد سوراخ کاری استخوان در بین محققان وجود نداشته باشد.

پس تنها عواملی که در مورد فرایند سوراخ کاری استخوان می‌توانند مفید واقع شوند، بهبود شرایط تشکیل براده، افزایش سرعت تخلیه و کاهش میزان انباشتگی براده‌ها در شیار مته می‌باشند. در مورد نتایج حاصله از سوراخ کاری سرعت بالای استخوان در تحقیق حاضر (شکل ۹)، ملاحظه شد که درجه حرارت‌های به دست آمده در موضع سوراخ کاری برای تمامی نرخ‌های پیش‌روی، با افزایش سرعت چرخشی روندی صعودی داشته و تنها یک نقطه منحصر به فرد برای هر نرخ پیش‌روی وجود دارد که در آن، دما بطور ناگهانی افت می‌کند.

نکته حائز اهمیت دیگری که می‌بایست مد نظر قرار گیرد آن است که افزایش نرخ پیش‌روی مته، دمای کمتری را در محل سوراخ ایجاد می‌نماید که بدان علت است که با افزایش سرعت پیش‌روی، زمان فرایند کاهش یافته و در نتیجه بازه زمانی تولید حرارت و ازدیاد دما مدت کوتاه‌تری به طول خواهد انجامید. تنها عامل محدودکننده در برابر بکارگیری نرخ پیش‌روی بالا در فرایند سوراخ کاری استخوان، وجود احتمال شکستگی مته در استخوان و همچنین گسترش ترک خوردگی در موضع شکستگی است.

نتایج محاسبه میزان آسیب حرارتی وارده به استخوان، در فرایند سوراخ کاری معمولی، در شکل ۱۲ ارائه شده است. با در نظر گرفتن نمودار فوق، می‌توان نتیجه‌گیری گری که آسیب حرارتی وارده، با افزایش سرعت چرخشی مته و همچنین افزایش نرخ پیش‌روی کاهش می‌یابد. با وجود کاهش قابل توجه عدد Ω در سرعت ۱۰۰۰ rpm و پیش‌روی mm/min ۱۵۰، باز هم مقدار آن تفاوت شایان توجهی با آستانه وقوع نکرور (۰/۵۳) داشته و بر این نکته تاکید دارد که در فرایند سوراخ کاری معمولی، حتی در بالاترین نرخ پیش‌روی و سرعت چرخشی هم میزان حرارت تولیدی در فرایند زیاد بوده و امکان پیش‌گیری از پدیده مرگ سلولی در اثر گرما، وجود ندارد.

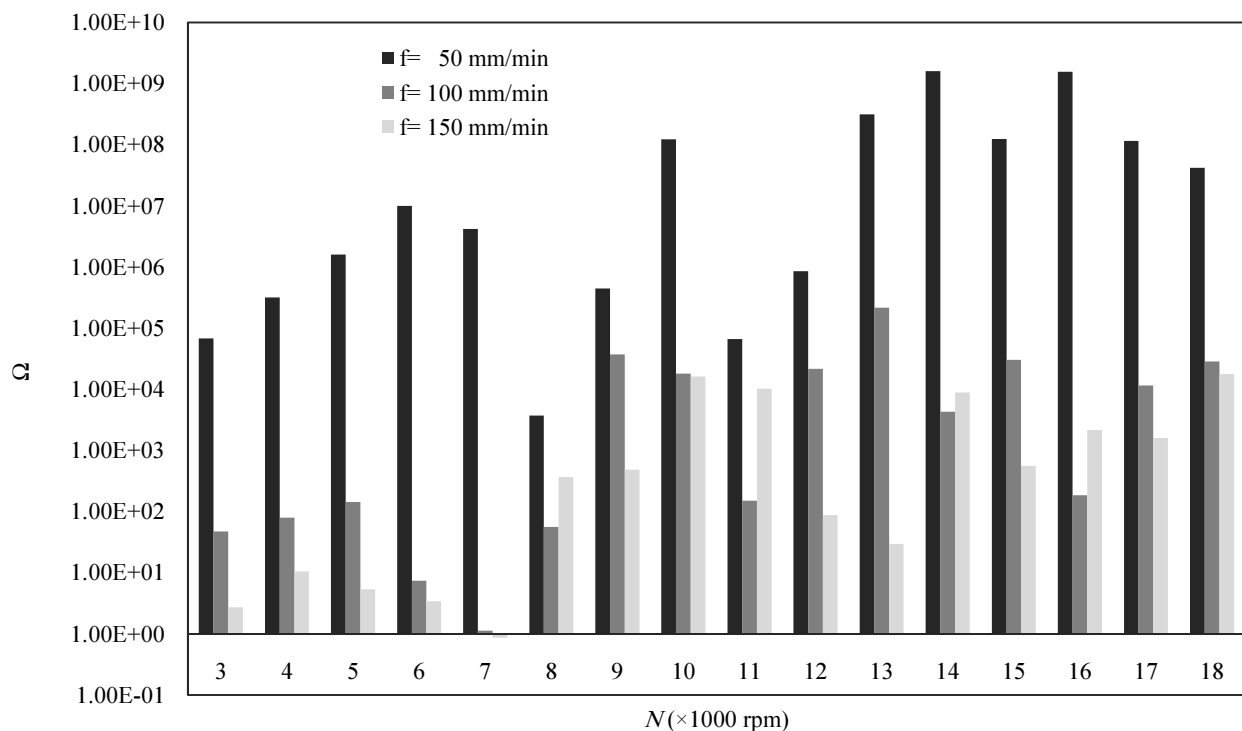
بر اساس آنچه که در خصوص اجرای فرایند سوراخ کاری سرعت بالا، بر روی نمونه‌های فلزی گزارش شده است، انتظار می‌رود که افزایش سرعت چرخشی و دستیابی به مقادیر بالای



شکل ۱۲ نمودار سرعت چرخشی-آسیب حرارتی (سوراخ کاری معمولی)

نمودن روند ثابت ماندن نیرو و افزایش پیوسته سرعت تخلیه براده، می توان 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 می شود. اما در خصوص آسیب گرمایی وارده به استخوان در فرایند سوراخ کاری سرعت بالا، با توجه به شکل ۱۳ می توان اظهار نمود که نمودار فوق، برای هر سه نرخ پیش روی، روندی افزایشی داشته و صرفاً در سرعت ۸۰۰۰ rpm برای نرخ پیش روی ۵۰ mm/min و ۷۰۰۰-۶۰۰۰ rpm برای پیش روی های ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min دارای افتی ناگهانی است که این ناحیه کاهش، منطبق بر محدوده افت نیروی محوری می باشد. میزان کاهش آسیب گرمایی Ω برای نرخ پیش روی ۵۰ mm/min، فاصله زیادی با حد مرزی ۰/۵۳ داشته و امکان پیش گیری از وقوع پدیده نکروز، با این نرخ پیش روی میسر نمی باشد. اما برای پیش روی های ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min، در سرعت چرخشی ۷۰۰۰ rpm، مقدار Ω به حد قابل قبولی رسیده که می تواند اطمینان خاطر را به لحاظ عدم وقوع پدیده نکروز، فراهم آورد.

با بررسی نتایج حاصل از اندازه گیری نیرو، مشاهده می شود که مقدار نیروی محوری، تا پیش از رسیدن به نقطه افت ناگهانی (۶۰۰۰ rpm برای پیش روی های ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min) روندی ثابت داشته و سپس به طور ناگهانی افت می کند. وقوع این پدیده، بر اساس مشاهده براده های شکل گرفته در سرعت های فوق، قابل توجیه است. در سرعت های چرخشی پایین، براده های استخوانی به صورت رشته ای و مارپیچ تشکیل می شوند که موجب زیاد بودن مقدار نیروی ماشین کاری می شود. اما در سرعت های چرخشی ذکر شده، براده ها به شکل ذرات ریز پودر مانند شکل گرفته، که به میزان شایان توجهی از نیروی مورد نیاز برای تشکیل آن می کاهد. همین افت ناگهانی نیرو و به همراه آن، افزایش توأم سرعت تخلیه براده، موجب کاهش ناگهانی ازدیاد دما در سرعت های محدوده ۷۰۰۰-۶۰۰۰ rpm برای پیش روی ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min و ۸۰۰۰ rpm-۷۰۰۰ برای پیش روی ۵۰ mm/min می شود. اما پس از عبور از سرعت های فوق، مشاهده می شود که با وجود ثابت و ناچیز بودن مقدار نیرو، نمودار افزایش دما روندی صعودی به خود می گیرد. با در نظر گرفتن عوامل سه گانه تولید گرما (نیروی تشکیل براده، انباشتگی براده در شیار مته، و اصطکاک) و لحاظ



شکل ۱۳ نمودار سرعت چرخشی-آسیب حرارتی (سوراخ کاری سرعت بالا)

- به عنوان یک توصیه برای جراحان برای انتخاب شرایط فرایندی مناسب برای سوراخ کاری استخوان در عمل‌های جراحی ثابت کردن داخلی موضع شکستگی، به منظور حصول کمترین میزان ازدیاد دما و کاهش احتمال وقوع پدیده نکرور، انتخاب سرعت چرخشی ۷۰۰۰ rpm در نرخ‌های پیش‌روی ۱۵۰-۱۰۰ mm/min پیشنهاد می‌شود.

۶- فهرست علائم

A	فاکتور فرکانس آرینوس
Ea	انرژی اکتیواسیون آرینوس
F	نیروی محوری
f	نرخ پیش‌روی ابزار
N	سرعت چرخشی مته
R	ثابت جهانی گازها
T	درجه حرارت
ΔT	افزایش دما
t	زمان
Ω	آسیب حرارتی آرینوس

۷- مراجع

- [1] Hillery M.T., Shuaib I., "Temperature Effects in the Drilling of Human and Bovine Bone", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, 1999, pp. 302-308.
- [2] Bachus K.N., Mateehew T.R., Hutchinson, D.T., "The Effects of Drilling Force on Cortical Temperature and Their Duration: an in Vitro study", *Medical Engineering & Physics*, Vol. 22, 2000, pp. 685-691.
- [3] Augustin G., Davila S., Mihoci K., Udiljak T., Vedrina D.S., Antabak A., "Thermal Osteonecrosis and Bone Drilling Parameters Revisited", *Arch Orthop Trauma Surg*, Vol. 128, 2008, pp. 71-77.
- [4] Augustin G., Davila S., Udiljak T., Vedrina D.S., Bagatin D., "Determination of Spatial Distribution of Increase in Bone Temperature During Drilling by Infrared Thermography: Preliminary Report", *Arch Orthop Trauma Surg*, Vol. 129, 2009, pp. 703-709.
- [5] Davidson S.R.H., James D.F., "Drilling in Bone: Modeling Heat Generation and Temperature Distribution", *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 125, 2003, pp. 305-314.
- [6] Allan W., Williams E.D., Kerawala C.J., "Effects of Repeated Drill Use on Temperature of Bone

این مسأله ناشی از پایین بودن میزان ازدیاد دما و مدت زمان ماندگاری، برای شرایط فرایندی فوق می‌باشد. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پیش‌روی ۱۵۰-۱۰۰ mm/min و با سرعت چرخشی ۷۰۰۰ rpm، شرایط فرایندی بهینه به منظور دستیابی به حداقل تولید و جذب حرارت، در فرایند سوراخ کاری سرعت بالای استخوان می‌باشد. در ادامه، با افزایش سرعت چرخشی، برای تمامی مقادیر نرخ‌های پیش‌روی، بر میزان آسیب حرارتی ایجاد گردیده افزوده شده و حتی مقدار آن از نتایج سوراخ کاری معمولی هم بحرانی‌تر می‌شود. بدان مفهوم که افزایش بیشتر سرعت چرخشی، شرایط را بدتر نموده و منجر به افزایش مقدار Ω می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر سرعت چرخشی، در فرایندهای سوراخ کاری معمولی (سرعت پایین) و سوراخ کاری سرعت بالا بر پارامترهای نیروی محوری و دمای موضع سوراخ، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل به دست آمد:

- در فرایند سوراخ کاری معمولی استخوان، با وجود کاهش میزان ازدیاد دما با افزایش سرعت چرخشی مته (به واسطه کاهش نیرو)، به دلیل فاصله قابل ملاحظه بین حداقل میزان ازدیاد دما و محدوده مجاز افزایش دما، امکان پیش‌گیری از وقوع پدیده نکرور وجود ندارد.

- در فرایند سوراخ کاری سرعت بالای استخوان، در سرعت چرخشی معینی (برای مته با قطر ۳/۲ mm و با نرخ پیش‌روی بین ۱۵۰-۱۰۰ mm/min، در محدوده سرعت ۷۰۰۰ rpm) به دلیل افت ناگهانی نیروی ماشین کاری (بطور متوسط ۸۷٪)، میزان ازدیاد دما کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد که حداقل ازدیاد دما در مجموعه فرایندهای سوراخ کاری معمولی و سرعت بالا بوده و نقطه عملیاتی مناسبی برای انجام عمل جراحی، محسوب می‌شود.

- با عبور از نقطه بهینه و افزایش بیشتر سرعت چرخشی مته، با وجود ثابت ماندن مقدار نیروی محوری و افزایش پیوسته سرعت خروج براده، به دلیل افزایش اصطکاک، بر میزان ازدیاد دمای موضع سوراخ کاری افزوده می‌شود که مقدار آن در سرعت‌های خیلی بالا، حتی می‌تواند از دمای فرایند سوراخ کاری معمولی نیز فراتر رود.

- [12] Alam k., Mitrofanov A.V., Silberschmidt V.V., "Experimental investigations of Forces and Torque in Conventional and Ultrasonically-Assisted Drilling of Cortical Bone", *Medical Engineering & Physics*, Vol. 33, 2011, pp. 234-239.
- [13] Augustin G., Zigman T., Davila S., Udiljak T., Staroveski T., Brezak D., Babic S., "Cortical Bone Drilling and Thermal Osteonecrosis", *Clinical Biomechanics*, Vol. 27, 2012, pp. 313-325.
- [14] Karaca F., Aksakal B., Kom M., "Influence of Orthopaedic Drilling Parameters on Temperature and Histopathology of Bovine Tibia: An in Vitro Study", *Medical Engineering & Physics*, Vol. 33, 2011, pp. 1221-1227.
- [15] Lee J., Rabin Y., Ozdoganlar O.B., "A New Thermal Model for Bone Drilling with Applications to Orthopaedic Surgery", *Medical Engineering & Physics*, Vol. 33, 2011, pp. 1234-1244.
- [16] Lee J., Gozen B.A., Ozdoganlar O.B., "Modeling and Experimentation of Bone Drilling Forces", *Journal of Biomechanics*, Vol. 45, 2012, pp. 1076-1083.
- During Preparation for Osteosynthesis Self-Tapping Screws", *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, Vol. 43, 2005, pp. 314-319.
- [7] Cem Sener B., Dergin G., Gursay B., Kelesoglu E., Slih I., "Effects of Irrigation on Heat Control in Vitro at Different Drilling Depths", *Clin. Oral Impl. Res*, Vol. 20, 2009, pp. 294-298.
- [8] Davidson S.R.H., James D.F., "Measurement of Thermal Conductivity of Bovine Cortical Bone", *Medical Engineering & Physics*, Vol. 22, 2000, pp. 741-747.
- [9] Karmani S., "the Thermal Properties of Bone and the Effects of Surgical Intervention", *Current Orthopadics*, Vol. 20, 2006, pp. 52-58.
- [10] Udiljak T., Ciglar D., Skoric S., "Investigation into Bone Drilling and Thermal Bone Necrosis", *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 2, 2007, pp. 103-112.
- [11] Alam k., Mitrofanov A.V., Silberschmidt V.V., "Measurements of Surface Roughness in Conventional and Ultrasonically Assisted Bone Drilling", *American Journal of Biomedical Sciences*, Vol. 1, 2009, pp. 312-320.