مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد ۱۳۹۹، دوره ۷، شماره ۳، ص‌ص. ۲۲- ۳۳

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی تحلیلی و تجربی تأثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر افزایش دما در سوراخ‌کاری استخوان کورتیکال

مسعود محمدی[۱]، محمد مراد شیخی[۲*]، محمد مقداد فلاح[۳]، احسان شکوری[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۷۸۸۱۵۸۱۱، m.sheikhi@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۸ خرداد ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۳ شهریور ۱۳۹۸

ارائه در سایت: خرداد ۱۳۹۹

کلیدواژگان:

سوراخ‌کاری استخوان

نکروز حرارتی

پارامترهای سوراخ‌کاری

مدل حرارتی

چکیده

سوراخ‌کاری استخوان، از بخش‌های ضروری در جراحی ارتوپدی است. اگر دمای این فرایند بیشتر از ۴۷°C شود، نکروز حرارتی اتفاق می‌افتد. در صورت وقوع نکروز حرارتی، تثبیت استخوان به خوبی انجام نمی‌گیرد. به همین دلیل تحقیقات فراوانی برای کاهش نکروز حرارتی صورت گرفته است. در این مطالعه، با استفاده از یک مدل تحلیلی، افزایش دمای استخوان در حین سوراخ‌کاری و در نرخ پیشروی و سرعت‌های دورانی مختلف بررسی شد. برای تأیید نتایج تحلیلی، افزایش دماهای به دست آمده در مقایسه‌ی با فرایند سوراخ‌کاری استخوان فمور گاو، ارزیابی شد. با مقایسه‌ی نتایج، مشخص شد که بین نتایج تحلیلی و تجربی تفاوت وجود دارد، که مربوط می‌شود به تخمین نادرست سهم حرارت تولید شده که به استخوان وارد می‌شود. بنابراین مقادیر صحیح این سهم حرارتی، پس از مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و عملی به دست آمد. در نهایت، این نتیجه حاصل شد که سهم حرارت به نرخ پیشروی و سرعت دورانی وابسته است و همچنین یک رابطه‌ی جدید برای آن ارائه شد. نتایج تجربی در بازه‌های بررسی شده نشان دادند که با افزایش نرخ پیشروی، دما کاهش می‌یابد و با افزایش سرعت دورانی، دما به صورت نوسانی تغییر می‌کند.

Analytical and experimental investigation of influence of rotational speed and feed on temperature elevation in cortical bone drilling

Masoud Mohamadi[1], Mohammadmorad Sheikhi[2*], Mohammad Meghdad Fallah[3], Ehsan Shakuri[4]

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

* P.O.B. 1678815811, Tehran, Iran, m.sheikhi@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 7 June 2019

Accepted 13 September 2019

Available June 2020

Keywords:

Bone Drilling

Thermal necrosis

Drilling Parameters

Analytical model

Abstract

Bone drilling process is one of the essential steps in orthopedic surgeries. If temperature of this process is more than 47 ° C, thermal necrosis occurs. In the event of the thermal necrosis, bone consolidation is not well done. For this reason, a lot of research has been done to reduce the thermal necrosis. In this study, by using an analytical model, bone temperature elevation during drilling was investigated at different feed rates and rotational speeds. To validate the analytical results, the bone temperature elevations were evaluated by comparison with bone drilling process using bovine femurs. With comparison the results, it was found that there are differences between analytical and experimental results that are related to incorrect estimation of the fraction of total heat generated that flows into the bone. Therefore, the correct values of this fraction were obtained after comparing analytical and experimental results. Finally, it was concluded that the fraction is dependent on the feed rate and rotational speed, and also a new equation was presented for it. Experimental results show that within the range of the investigated variables, increase in feed rate causes decrease in bone temperature and with the increase in rotational speed, the bone temperature changes are swinging.

۱- مقدمه

سوراخ‌کاری استخوان یکی از بخش‌های ضروری ثابت کردن استخوان در جراحی شکستگی و ارتوپدی می‌باشد. هیلاری و شعیب با سوراخ‌کاری روی استخوان ران گاو و انسان دریافتند که سرعت دورانی بهینه برای سوراخ‌کاری استخوان ۸۰۰-۱۴۰۰ mm/min و با مته به قطر ۳/۲mm می باشد [۱].

باچوس و همکاران [۲] دریافتند که با افزایش نیروی سوراخ‌کاری زمان و دمای سوراخکای کاهش یافته و در نتیجه نکروز حرارتی کاهش می یابد.

سرعت دورانی، نرخ تغذیه، هندسه‌ی مته مشخصات جنس

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Mohamadi, M.M. Sheikhi, M. Meghdad Fallah, E. Shakuri, Analytical and experimental investigation of influence of rotational speed and feed on temperature elevation in cortical bone drilling, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 22- 33, 2020 (in Persian)

استخوان در یک تحلیل پارامتریک تغییر می‌کنند تا تأثیر هر کدام روی افزایش دما و بنابراین روی تخریب حرارتی مشخص شود. مشخص شده است که سرعت دورانی، نرخ تغذیه و قطر مته بیشترین تأثیر را روی دمای ناشی از سوراخ‌کاری دارند در حالیکه زاویه‌ی مارپیچ مته، زاویه نوک و خواص حرارتی استخوان تقریباً تأثیر کمتری دارند[۳].

یودیلجاک و همکاران [۴] به بررسی امکان کاهش نیروی برشی و دما پرداختند. ایشان دریافتند که سرعت برشی تأثیر چندانی روی نیروی محوری ندارد، اما رابطه‌ی مستقیمی با دمای سوراخ‌کاری دارد. همچنین نرخ پیشروی، رابطه‌ی مستقیم با نیروی محوری و معکوس با دمای سوراخ‌کاری دارد. ایشان از مته مخصوص جراحی و دو فاز استفاده کردند.

یوان کان و همکاران [۵] دریافتند که مته با دمای ورودی کمتر می‌تواند به تقلیل افزایش دما در حین سوراخ‌کاری استخوان کمک نماید و رابطه‌ای بین دمای ورودی مته و دمای سوراخ‌کاری ارائه دادند.

آگوستین و همکاران [۶] تأثیر سرعت دورانی و قطر مته و خنک‌کاری را روی دمای سوراخ‌کاری استخوان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش قطر مته و سرعت دورانی باعث افزایش دما می‌شود و اینکه با افزایش نرخ پیشروی، افزایش دما کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین به این نکته اشاره کردند که با خنک‌کاری خارجی و تغییر عواملی دیگر می توان دما را زیر $47^{\circ}C$ نگه داشت.

لی و همکاران [۷] مدلی بر اساس سیستم جریان براده-مته متشکل از توزیع حرارتی محوری توزیع شده و تأثیر ظرفیت حرارتی توزیع شده در مقطع عرضی ارائه دادند که نتایج آن شامل موارد زیر است: ۱- بیشینه دما با افزایش جریان براده کاهش می‌یابد. ۲- توزیع دما به شدت تحت تأثیر دمای ورودی قرار دارد. ۳- خنک‌کاری مته، بیشینه دما را کاهش می‌دهد، حتی زمانی که نوک مته دور از منبع خنک‌کاری باشد.۴ - بیشینه دما با افزایش سرعت دورانی، کاهش نرخ پیشروی،کاهش قطر مته ، افزایش زاویه‌ی نوک مته و کاهش زاویه‌ی مارپیچ مته افزایش می‌یابد.

شکوری و همکاران [۸] با سوراخ‌کاری در شریط معمولی و سرعت بالا دریافتند که سوراخ‌کاری در شرایط معمولی باعث ایجاد نکروز حرارتی می‌شود و فقط در سوراخ‌کاری با سرعت بالا و در سرعت rpm ۶۰۰۰-۷۰۰۰ می‌توان دما را تا نزدیکی حد مجاز کاهش داد.

علم و همکاران [۹] به بررسی تأثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر دمای سوراخ‌کاری پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش سرعت دورانی و نرخ پیشروی دما افزایش می‌یابد اما با استفاده از خنک کاری می توان از سرعت‌های دورانی و پیشروی بالاتری که موجب نکروز حرارتی نشود، نیز استفاده کرد و در حضور ماده‌ی خنک‌کار سرعت دورانی ۲۵۰۰rpm را پیشنهاد دادند.

سوریانو و همکاران [۱۰] به بررسی تأثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی و قطر مته روی دمای سوراخ‌کاری پرداختند و یک مدل ریاضی برای تخمین میزان حرارت ورودی به استخوان و تخمین دمای سوراخ‌کاری ارائه دادند.

معنی و همکاران [۱۱] یک مدل برای پیش بینی حرارت در سوراخ‌کاری استخوان ارائه دادند که مدل شامل یک حجم کنترل متشکل از استخوان و براده و مته می‌باشد و حجم کنترل به تعدادی سلول تقسیم بندی شده اند.

طهماسبی و همکاران [۱۲] بیان کردند که کمترین آسیب به استخوان حین عمل جراحی در سرعت دوران ابزار ۵۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه حاصل شده است.

فرناندز و همکاران [۱۳] یک مدل عددی سه بعدی برای شبیه سازی سوراخ‌کاری استخوان ارائه دادند و آزمایش عملی خود را نیز بر روی مواد بیومتریال شبیه استخوان انجام دادند، ۴ ماده کامپوزیتی با ظرفیت‌های حرارتی مختلف و دانسیته‌های مختلف. آن‌ها دریافتند که مواد با دانسیته و تخلخل کمتر، کمتر در معرض آسیب در فرایند سوراخ‌کاری قرار می‌گیرند.

فلدمن و همکاران [۱۴] مدلی بر اساس ارتباط توزیع دانسیته استخوان و حرارات تولید شده در سوراخ‌کاری استخوان فاسیال گوسفند برای جلوگیری از آسیب دیدن عصب صورتی ارائه دادند.

جمشیدی و همکاران [۱۵] با شبیه‌سازی سوراخ‌کاری در نرم افزار DEFORM-3D به این نتیجه رسیدند که مته با زاویه نوک ۷۰ درجه، کمترین حداکثر دما را حین سوراخ کاری ایجاد می‌کند. همچنین کمترین حداکثر دماها در سرعت چرخش مته، نرخ پیشروی مته و نیروی وارد بر مته به ترتیب برابر با ۱۲۰mm/min، ۲۰۰rpm و ۶۰N ایجاد می‌شود. استفاده از خنک کننده ماکزیمم دمای ایجاد شده را به مقدار تقریبی ۷ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد.

شکوری و همکاران [۱۶] با به کارگیری روش انتقال حرارت رسانشی معکوس نشان دادند که حرارت‌های تئوری و تجربی در شرایط مختلف فرایندی مختلف به یکدیگر نزدیک بوده و

مشخص شد که تئوری‌های ماشین‌کاری و واینر قادر به پیش بینی میزان حرارت ورودی به استخوان و تغییرات دما در موضع سوراخ است.

طهماسبی و همکاران [۱۷] با ارائه‌ی یک مدل تحلیلی-تجربی، اذعان داشتند که در نرخ پیشروی کمتر می‌توان به دمای کمتر دست یافت. ایشان نرخ پیشروی ۳۰mm/min و سرعت دورانی ۵۰۰rpm را با استفاده از مته‌ی ۲/۵mm پیشنهاد کردند.

شکوری و همکاران [۱۸] با سوراخ‌کاری استخوان تیبیا در جهات طولی و شعاعی و سرعت دورانی ۲۰۰۰rpm، دریافتند که دما در عمق ۸mm به میزان ۹٪ و در عمق ۸ تا ۵۰mm به میزان ۲۲/۵٪ افزایش پیدا می‌کند و تنها با استفاده از گاز CO2 می‌توان دما را زیر حد مجاز نگه داشت.

فرناندز و همکاران [۱۹] با حل یک مدل عددی و آزمایش تجربی به بررسی تنش‌های حرارتی- مکانیکی در حین سوراخ‌کاری پرداختند و دریافتند که سرعت دورانی کمتر و نرخ پیشروی بیشتر می‌تواند تنش و کرنش را در حین سوراخ‌کاری کاهش دهد.

اخبار و یوسف [۲۰] با شبیه‌سازی توسط نرم افزار DEFORM-3D و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی زاویه‌ی نوک مته‌ی ۱۱۰ تا ۱۴۰ درجه و زاویه‌ی مارپیچ ۵ تا ۳۰ درجه را پیشنهاد کردند.

اخبار و یوسف [۲۱] در تحقیق دیگری با استفاده از روش سطح پاسخ مته با زاویه‌ی نوک ۱۲۴/۹ درجه و زاویه‌ی مارپیچ ۳۰ را انتخاب کردند و سپس از طریق شبیه‌سازی، دمای ایجاد شده توسط این مته را به دست آوردند.

با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته که به صورت آزمایشگاهی انجام گرفته است نمی‌توان به نتیجه‌ی یکسانی جهت انتخاب مته رسید و در شبیه‌سازی های که توسط نرم افزار صورت گرفته است نیز نمی‌توان به رابطه‌ی مشخصی در تحلیل سوراخ‌کاری و قوانین حاکم بر آن دست یافت و هم اینکه مدل‌سازی‌های گذشته که بر مبنای روابط ریاضی صورت گرفته است، تقسیم حرارت در محل برش مبتنی بر روابط حاکم بر ماشین‌کاری فلزات، صورت گرفته و بررسی کاملی برای یافتن رابطه‌ای مختص ماشین‌کاری استخوان انجام نگرفته است، لازم دیده شد که یک مدل حرارتی بر مبنای ماشین‌کاری استخوان ارائه شود و پس از مقایسه با نتایج تجربی، بتواند علاوه بر اینکه به بررسی تحلیلی-تجربی دلیل برخی تفاوت‌های نتایج گذشته در سرعت‌های دورانی و نرخ‌های پیشروی مختلف بپردازد، یک رابطه‌ی جدید برای تقسیم حرارتی قابل استفاده در مدل‌سازی حرارتی سوراخ‌کاری استخوان ارائه نماید که در گذشته، مقایسه به این شکل و برای رسیدن به یک رابطه‌ی مختص استخوان انجام نشده است. در این روش ابتدا از طریق حل عددی مدل در نظر گرفته شده دما در شرایط مشخص به دست می‌آید، سپس به روش معکوس و با تغییر سهم حرارت ورودی نتایج شبیه-سازی به نتایج آزمایشگاهی انجام شده نزدیک می‌شود.این روش که به صورت معکوس انجام پذیرفته است تا به حال در مدل‌سازی‌ها استفاده نشده است. هر چند این نتیجه‌گیری بر اساس بازه‌های سرعت دورانی و نرخ پیشروی محدودی که بتواند حداکثر بازه‌ی مورد آزمایش در گذشته را در بر گیرد، انجام گرفته است و منجر به حصول فقط یک رابطه جدید اما کاربردی شده است، اما می‌تواند راه‌گشای تحقیقات بعدی برای ارائه روابط دقیق‌تر و کاملتر در سوراخ‌کاری استخوان باشد.

۲- محاسبهٔ تولید گرما در سوراخ‌کاری

از آن‌جایی که لبه‌های مته نیروی برشی به استخوان وارد می‌کنند [۲۲] و اینکه در برش متعامد جداسازی براده از طریق شکست انجام می‌پذیرد [۲۳] در این مطالعه از تئوری ماشین‌کاری فلزات برای محاسبه‌ی گرما در ماشین‌کاری فلزات به صورت متعامد استفاده شده است.

همچنین ماشین‌کاری از نوع متعامد می‌باشد. دلیل این فرض‌ها نتایج قابل قبول در تحقیقات گذشته می‌باشد [۳]. ماشین‌کاری متعامد در شکل ۱ نشان داده شده است.

اگر چه عمل برش در سوراخ‌کاری پیچیده تر از برشکاری متعامد می‌باشد، اما مکانیزم براده برداری یکسانی دارند و بنابراین تئوری ماشین‌کاری متعامد در این جا نیز قابل استفاده است. ناحیه‌ای که با برچسب A در شکل ۲ نشان داده شده است، ناحیه تغییر شکل اولیه نامیده می‌شود. انرژی برش مواد در این ناحیه به گرما تبدیل می‌شود. دو ناحیه تولید گرمای دیگر نیز وجود دارد. یکی از آن‌ها ناحیه ی ثانویه است که با نام B در شکل ۲ نشان داده شده است و از برش در امتداد سطح بیرونی ابزار ناشی می‌شود. گرمای تولید شده در این ناحیه بین براده و ابزار تقسیم می‌شود و با توجه به اینکه در این جا میزان گرمای ورودی به قطعه کار در نظر گرفته شده است، لذا این ناحیه در نظر نمی‌شود. ناحیه ثانویه دیگر که در شکل ۲ با نام C نشان داده شده است که حرارت در آن از اصطکاک بین ابزار و قطعه کار به وجود می‌آید. اصطکاک در اثر کندی ابزار افزایش می‌یابد و از آن‌جایی که در جراحی‌ها از ابزار تند استفاده

می‌گردد، در این جا نیز از این ناحیه صرف‌نظر شده است[۲].

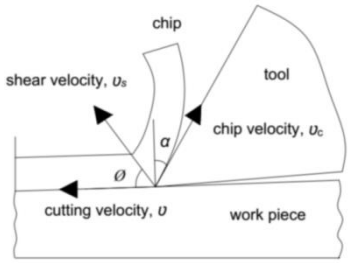

Fig. 1 Orthogonal cutting and material removal

شکل ۱ برش متعامد و براده برداری

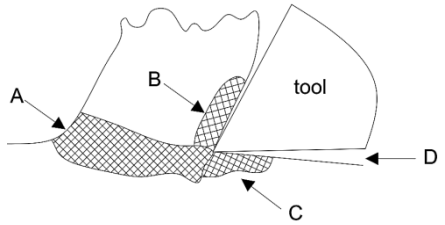

Fig. 2 Zones of heat generation in orthogonal cutting

شکل ۲ نواحی تولید گرما در برش متعامد

بنابراین حرارات تولید شده با رابطه (۱) تخمین زده می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = F_s . v_s \qquad (۱)$$

که Q حرارت تولید شده در فرایند برش می‌باشد، Fs نیروی برش در صفحه برش و v_s سرعت برشی می‌باشد که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$v_s = \frac{v}{\cos \emptyset} \qquad (۲)$$

برای محاسبه مقدار $\emptyset$ از رابطه‌ی ارنست- مرچنت (۳) بر مبنای اصل حداقل کار استفاده می‌شود:

$$2\emptyset + \beta - \alpha = 90 \qquad (۳)$$

که α زاویه براده ابزار بوده و β برابر ۰/۶۴۴ می‌باشد [۳]. زاویه‌ی براده در طول لبه مته تغییر می‌کند. به همین دلیل از رابطه‌ی (۴) برای محاسبه‌ی زاویه براده استفاده می‌شود:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{2r}{D}\tan(\theta) - \tan[\sin^{-1}(\frac{d0}{2r})\sin(p)]\cos(p)}{\sin(p)} \qquad (۴)$$

که D قطر مته، $d0$ قطر مرکز مته، θ زاویه ی مارپیچ و p نصف زاویه ی نوک مته می‌باشد.

سرعت برشی از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید:

$$v = {2\pi r N}/{60} \qquad (۵)$$

که N سرعت دورانی به rpm می‌باشد.

نیروی برش از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود:

$$F_{s=}\tau_s . A_s \qquad (۶)$$

که τ_s تنش برشی برای استخوان و A_s مساحت سطح برشی می‌باشد. از آن جایی که با توجه به جنس استخوان تنش برشی نهایی با تغییر نرخ برشی تغییر می‌کند، نرخ برش بایستی مشخص گردد. با فرض اینکه ماده‌ای که به وسیله‌ی ابزار از ناحیه تغییر شکل برداشته می‌شود، از مسیر هایپربولیک نشان داده شده در شکل ۳ و طبق رابطه‌ی (۷) عبور می‌کند:

$$y^2 \tan \alpha - xy = a \qquad (۷)$$

که x و y در مختصات کارتزین به مبدأ نوک مته هستند، به طوری که در شکل ۳ نشان داده شده است. ثابت a انحنای هذلولی را مشخص می‌کند و از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید.

$$a = \frac{{t_1}^2}{16C^2 \sin^4(\emptyset)[\tan(\alpha)\cot(\emptyset)]} \qquad (۸)$$

که t_1 ضخامت براده ی تغییر شکل نیافته است و در این جا عمق برش در هر دور می‌باشد. C ثابت ماده است که مقدار 6 برای آن در نظر گرفته می‌شود [۳]. هدف در این جا یافتن بیشینه نرخ برش $\dot{\gamma}$ می‌باشد (خط AB در شکل ۳) که در صفحه برش اتفاق می افتد و از رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود:

$$\dot{\gamma}_{AB} = \frac{v}{4\sqrt{a}\,(\sin \emptyset)^2\,[\tan \alpha + \cot \emptyset]^{3/2}} \qquad (۹)$$

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تنش برشی نهایی به نسبت مشخصی از نرخ کرنش رفتار می‌کند، به صورتی که در رابطه‌ی (۱۰) آورده شده است:

$$\tau_s \propto \dot{\gamma}^{0.06} \qquad (۱۰)$$

بر اساس مطالعات گذشته [۳] ثابت تناسب در این رابطه مقدار ۸۰ می‌باشد، یعنی:

$$\tau_s = 80\dot{\gamma}^{0.06} \qquad (۱۱)$$

مساحت صفحه برش از رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید:

$$A_s = \frac{t_1(D - d0)}{\cos(90° - p)\sin \emptyset} \qquad (۱۲)$$

عمق برش در هر دور نیز از رابطه‌ی (۱۳) به دست می‌آید:

$$t_1 = \frac{f/2}{N/60}\sin(p) \qquad (۱۳)$$

که f نرخ تغذیه می‌باشد.

گرمای تولید شده توسط عملیات برش به قطعه کار ، مته و براده منتقل می‌شود. تعیین مقداری از حرارت که به قطعه کار منتقل می‌شود بسیار مشکل است. بر اساس آزمایشاتی که در گذشته انجام گرفته ، این مقدار ۵۰٪ در نظر گرفته می‌شود [۳].

با ترکیب معادلات گذشته ، عبارت (۱۴) برای مقدار حرارت منتقل شده به قطعه کار به دست می‌آید:

$$\frac{\partial Q_w}{\partial t} = \eta \frac{\partial Q}{\partial t} = \eta A_s \tau_s v_s (j/s) \qquad (۱۴)$$

۳- مدل ریاضی توزیع دما

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، منطقه‌ی مورد نظر برای مدل‌سازی اطراف مته که حرارت بیشتری تولید می‌شود، در نظر گرفته شده است، بنابراین دامنه کار محاسباتی یک حلقه در اطراف سوراخ ایجاد شده توسط مته در نظر گرفته شده است.

در این مختصات استوانه ای، سطح داخلی دارای شعاع $r=R_i$ که توسط مته ایجاد شده است و این شعاع برابر شعاع مته در نظر گرفته شده است. شعاع خارجی برابر $R_o=R_i$ +15mm در نظر گرفته شده است، ضخامتی که بتوان مقدار دما در سطح خارجی آن را ۳۷°C در نظر گرفت [۳]. حرارت تولید شده در نوک مته به شکل یک منبع حرارتی استوانه ای روی محیط یک سطح داخلی مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود که این منبع حرارتی از نقطه ی z=0 به نقطه ی z=H حرکت می‌کند. قدرت این چشمه‌ی حرارتی به عواملی از قبیل سرعت دورانی مته، نرخ پیشروی و هندسه‌ی مته بستگی دارد. شرایط مرزی در z=0 و z=H عایق در نظر گرفته شده است. مقداری از حرارت از طریق سطح داخلی و مقداری نیز از طریق سطح خارجی به صورت جابجایی تلف می‌شود. بخشی از حرارت نیز از طریق مغز استخوان تلف می‌شود. محاسبه ی مقادیر این اتلاف حرارت بسیار مشکل است و به دلیل اینکه مقدار آن‌ها ناچیز است از آن‌ها چشم پوشی می‌شود [۳]. دما در مرز $r=R_o$ برابر ۳۷°C در نظر گرفته می‌شود. همچنین دما در زمان اولیه ۳۷°C در نظر گرفته می‌شود. البته در این جا دمای اولیه اهمیتی ندارد به دلیل اینکه در نتایج تجربی و تحلیلی فقط افزایش دما در نظر گرفته شده است. به دلیل تقارن شرایط مرزی و اولیه، بر اساس معادله‌ی انتقال حرارت فوریه، مختصات زاویه ای به عنوان یک متغیر در نظر گرفته نمی‌شود و مسأله برای یافتن دما در دو دامنه‌ی (r,z) نوشته می‌شود.

این دامنه دو بعدی در شکل ۴ نشان داده شده است. معادله‌ی انتقال حرارت در نهایت به صورت روابط (۱۵) نوشته می‌شود:

$$K\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$
$$B.C: \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} = \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=H} = 0$$
$$T(R_0, z, t) = 37°\mathrm{C}$$
$$\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R_i} = q(z,t)$$
$$I.C.: T(r,z,0) = 37°\mathrm{C} \qquad (۱۵)$$

که T دما، K ضریب هدایت حرارتی، ρ چگالی، و c گرمای ویژه می‌باشد که مقادیر آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است [۳]. همچنین $q(z,t)$ نیز شار حرارتی در مرز $r=R_i$ می‌باشد. معادله شماره‌ی ۱۵ به صورت عددی و با استفاده از روش ضمنی و توسط نرم‌افزار متلب حل شده است.

تعداد تقسیمات در جهت r و z هر کدام ۱۲۰ عدد و در مجموع ۱۴۴۰۰ المان در نظر گرفته شده است. گام زمانی نیز ۰/۰۵s در نظر گرفته شده است.

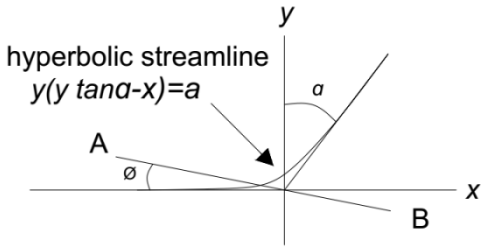

Fig. 3 Hyperbolic streamline through the primary deformation zone

شکل ۳ مسیر جریان هایپربولیک ناحیه‌ی اولیه‌ی تغییر شکل

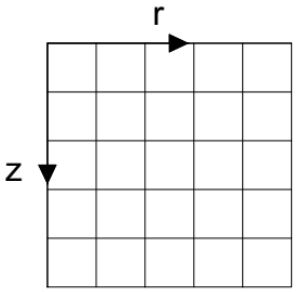

Fig. 4 Region of bone modelled in the numerical simulations

شکل ۴ ناحیه‌ی مدل شده‌ی استخوان در مدل تحلیلی

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی استخوان مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی

Table. 1 Mechanical properties of bone used in analytical model

مشخصه فیزیکی	مقدار
چگالی	2200 $^{kg}/_{m^3}$
هدایت حرارتی	0.56 $^{W}/_{mK}$
گرمای ویژه	1300 $^{J}/_{KgK}$

معادله برای حل به روش ضمنی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$T_{i,j}^{n}\left(-\frac{1}{\alpha \Delta t}\right) = T_{i-1,j}^{n+1}\left(\frac{1}{\Delta r^2}\right) + T_{i,j}^{n+1}\left(\frac{-2}{\Delta r^2} - \frac{2}{\Delta z^2} - \frac{1}{i\Delta r} - \frac{1}{\alpha \Delta t}\right)$$

$$+T_{i+1,j}^{n+1}\left(\frac{1}{\Delta r^2}+\frac{1}{\Delta r}\right)+T_{i,j-1}^{n+1}\left(\frac{1}{\Delta z^2}\right)+T_{i,j+1}^{n+1}\left(\frac{1}{\Delta z^2}\right)$$

$$B.C.\quad T(40,j)=37°\mathrm{C}$$
$$T(i,1)=T(i,2)$$
$$T(i,41)=T(i,40)$$
$$T(1,j)=T(2,j)+q(r,z)$$
$$I.C.\quad T^{n=0}(i,j)=37°\mathrm{C} \qquad (۱۶)$$

که T دما در نقطه‌ی مورد نظر، i و j شماره‌ی نقطه ها بر روی محور r و z، n شماره‌ی گام زمانی ، Δr طول المان‌ها در امتداد محور r، Δz طول المان‌ها در امتداد محور z، Δt فاصله‌ی زمانی و α ضریب نفوذ استخوان می‌باشند. شار حرارتی q که به وسیله ی مته ایجاد می‌شود و در شرایط مرزی $r=R_i$ قرار دارد، فقط در نقاطی دارای مقدار است که مته در آن زمان در آن نقاط قرار دارد و در بقیه‌ی نقاط صفر می‌باشد و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$q_j=\frac{\partial Q_w}{\partial t}\frac{\Delta r}{2\pi\Delta z R_i k} \qquad (۱۷)$$

۴- مواد و تجهیزات

برای عمل شبیه‌سازی از نرم‌افزار متلب نسخه 2014 در سیستمی با مشخصات زیر انجام شده است.

Intel (R) Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU RAM 8GB

برای انجام آزمایش‌های تجربی، از استخوان ران گاو که پس از کشتار، یک روز در یخچال نگهداری شده بود استفاده شده است. برای این کار قسمت میانی استخوان ران (۲۰cm) از دو سر آن جدا شد و سپس مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه برای انجام عمل سوراخ‌کاری، به دلیل نیاز به دقت بالا برای ایجاد سوراخ ترموکوپل با فاصله‌ی مشخص، و همچنین استفاده از سرعت‌های پیشروی مشخص، از دستگاه فرز CNC سه محوره مدل VMC ساخت صنایع ماشین ابزار سازی اصفهان، استفاده شد. نمایی از دستگاه در شکل ۵ نشان داده شده است. برای سوراخ‌کاری از مته‌های استاندارد جراحی با قطر ۳/۲ میلی‌متر و از جنس فولاد ضد زنگ 316L استفاده شد. زوایای راس و مارپیچ آنها به ترتیب ۹۰ و ۲۰ درجه بود و براساس آنچه که در سایر مراجع قید گردیده [۸]، حداکثر برای ماشین‌کاری ۴۰ سوراخ مورد استفاده قرار گرفته است. شکل مته در شکل ۶ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری دما در موضع سوراخ‌کاری، از ترموکوپل متصل به ترمومتر لوترون TM-925 که به کامپیوتر متصل شده است، استفاده شده است. بازه‌ی قابل اندازه‌گیری دستگاه بین ۱۰۰- تا ۱۳۰۰+ درجه سلسیوس، رزولوشن آن ۰/۱ درجه سانتی‌گراد و فواصل زمانی اندازه‌گیری ۱ ثانیه می‌باشد. این نوع ترمومتر در شکل ۷- الف نشان داده شده است. به وسیله ترموکوپل‌های تماسی سیمی از نوع K-Type که به ترمومتر متصل می‌شوند، دما به ترمومتر منتقل می‌شود. فاصله استاندارد برای استقرار ترموکوپل در موضع سوراخکاری، براساس آنچه که در سایر مراجع رعایت گردیده [۸]، نصب آن در عمق ۳ میلی‌متر و به فاصله ۰/۵ میلی‌متر از جدار سوراخ بوده است. محل سوراخ به وسیله خمیر رسانای گرما پوشانده شده است [۸]. ترموکوپل مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۷- ب نشان داده شده است. محل قرارگیری ترموکوپل در شکل ۸ نشان داده شده است.

Fig. 5 CNC machine used in experiments

شکل ۵ ماشین CNC استفاده شده در سوراخ‌کاری به صورت تجربی

Fig. 6 Surgerial drill used in drilling

شکل ۶ مته‌ی استفاده شده در سوراخ‌کاری

(ب) (الف)

Fig. 7 a-Thermometer b-Thermocouple

شکل ۷ الف- ترمومتر ب- ترموکوپل

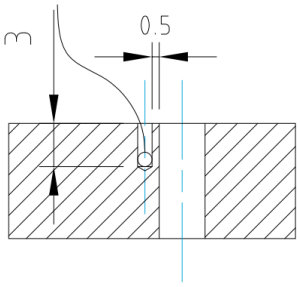

Fig. 8 Thermocouple place

شکل ۸ محل قرارگیری ترموکوپل

برای انتقال حرارت بهتر محل سوراخ به وسیله خمیر رسانای گرما پوشانده شده است. استخوان‌ها پس از برش‌کاری و رسیدن به اندازه‌ی مناسب جهت سوراخ‌کاری، داخل گیره قرار داده شدند.

۵- نتایج مدل تحلیلی

ماتریس ضرایب و معادلات حاکم در نرم افزار متلب شبیه‌سازی و سپس نتایج مطابق شکل ۹، برای دورها و سرعت‌های پیشروی مختلف، دریافت شد. نتایج به دست آمده با استفاده از مدل تحلیلی در بازه‌ی مورد نظر به شرح زیر می‌باشد:

- از نرخ پیشروی کمتر و در سرعت برشی یکسان، دمای کمتری حاصل می شود.
- از سرعت دورانی کمتر، در نرخ پیشروی یکسان، دمای کمتری حاصل می شود.
- اختلاف افزایش دما در سرعت‌های پیشروی ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min در محاسبات تئوری، نسبت به نرخ پیشروی ۵۰ mm/min کمتر است.
- ترکیب نرخ پیشروی بیشتر مثل ۱۰۰mm/min و سرعت دورانی کمتر مثل ۵۰۰rpm می‌تواند نسبت به ترکیب یک نرخ پیشروی کمتر مثل ۵۰mm/min و سرعت دورانی بیشتر مثل ۱۰۰۰rpm، دمای کمتری را نتیجه دهد. به عبارتی درست است که با افزایش نرخ پیشروی، ضخامت براده‌ی تغییر شکل نیافته بیشتر شده و در نتیجه نیرو و حرارت تولید شده بیشتر می‌شود اما عاملی که در این جا باید در نظر گرفته شود، سرعت برشی است که رابطه‌ی مستقیم با سرعت دورانی دارد. با افزایش سرعت دورانی نیز، حرارت تولید شده افزایش می‌یابد و به این دلیل است که ترکیب نرخ پیشروی و سرعت دورانی اهمیت پیدا می‌کند.

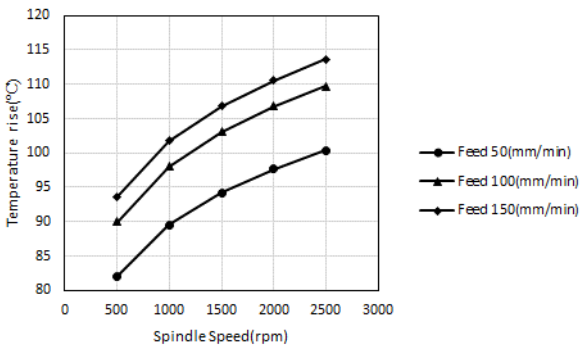

Fig. 9 Plot of rotational speed Vs drilling site temperature in simulation

شکل ۹ نمودار سرعت دورانی- دمای موضع سوراخ‌کاری در مدل تحلیلی

- تمام سرعت‌های پیشروی و دورانی استفاده شده در مدل تحلیلی موجب نکروز حرارتی می‌شوند و برای سوراخ‌کاری استخوان توصیه نمی‌شوند.

۶- نتایج تجربی

با انجام سوراخ‌کاری در سرعت‌های پیشروی و دورانی مختلف بر روی فمور گاو شکل ۱۰ بدست آمد. تمامی عملیات حالت‌های سوراخ‌کاری حداقل سه مرتبه تکرار گردید تا از تکرارپذیری نتایج و کسب خروجی‌های نزدیک به هم اطمینان مطلوب حاصل گردد. برای انجام عمل سوراخ‌کاری، انتخاب محل سوراخ‌کاری با دقت زیادی انجام گرفت تا سر خوردن مته روی استخوان، بر روی دمای به دست آمده تأثیر نگذارد. لازم به ذکر است، با توجه به تجربه کسب شده در آزمایش‌ها، هنگامی که مته سر می‌خورد دما ممکن است تا ۲۰ درجه تغییر کند. حتی اگر فاصله مناسب حفظ نشود و مته با ترموکوپل برخورد کند، ممکن است ایجاد خطای قابل ملاحظه نماید. به همین دلیل دقت درانجام عمل سوراخ‌کاری و حتی بررسی محل سوراخ‌ها پس از سوراخ‌کاری جهت اطمینان از فاصله‌ی صحیح ترموکوپل از جداره‌ی سوراخ، لازم و ضروری می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود از سرعت دورانی ۵۰۰rpm تا ۲۰۰۰ rpm افزایش دما مشاهده می‌شود که طهماسبی و همکاران [۱۲] نیز در سرعت‌های دورانی ۲۵۰۰rpm- ۱۵۰۰- ۵۰۰ به این نتیجه رسیدند که دما با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. به عبارتی اگر در شکل ۱۰ این سرعت‌ها در نظر گرفته شود این موضوع تأیید می‌شود هر چند در نرخ پیشروی ۵۰ mm/min دما در سرعت‌های ۵۰۰rpm و ۱۵۰۰rpm اختلاف چندانی ندارد اما به هر ترتیب سیر صعودی دما به چشم می‌خورد.

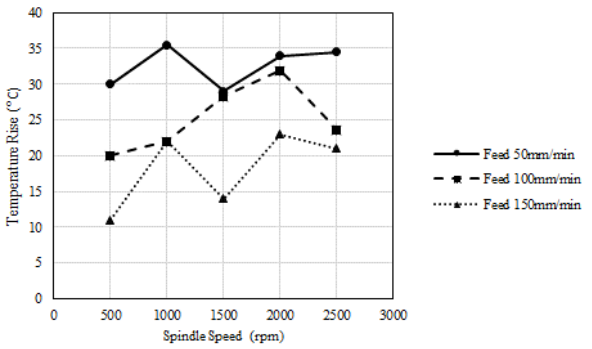

Fig. 10 Plot of rotational speed Vs drilling site temperature in experiments

شکل۱۰ نمودار سرعت دورانی- دمای موضع سوراخ‌کاری تجربی

نکته‌ی جالبی که در شکل ۱۰ به چشم می‌خورد این است که

در بازه‌ی سرعت دورانی در نظر گرفته شده در تمام نقاط افزایش دما مشاهده نمی‌شود و در سرعت ۱۵۰۰rpm کاهش دما اتفاق افتاده است. کاهش دما با افزایش سرعت دورانی در برخی تحقیق‌های گذشته مانند شکوری [۸] و سوریانو [۱۰] مشاهده می‌شود. دلیل این کاهش دما هدایت بهتر براده‌ها به خارج از سوراخ می‌باشد، اما با افزایش سرعت دورانی به دلیل تأثیر بیشتر اصطکاک بر سرعت خروج براده‌ها، دوباره افزایش دما اتفاق می‌افتد که این اتفاق در سرعت دورانی ۲۵۰۰rpm نیز دیده می‌شود.

این موضوع بیانگر این است که نمی‌توان به طور مطلق با افزایش سرعت دورانی مته، انتظار افزایش دما را داشت، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

شبیه همین اتفاق در مقاله ساها [۲۴] نشان داده شده است که با افزایش سرعت دورانی دما ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت و در نتیجه ایشان سرعت دورانی ۷۵۰rpm تا ۱۰۰۰rpm را برای سوراخ‌کاری پیشنهاد کرد. خادمی [۲۵] نیز در مقاله‌ی خود افزایش دما در نرخ پیشروی ۵۰۰rpm تا ۷۱۰rpm و سپس افزایش دما در بازه‌ی ۷۱۰rpm تا ۱۰۰۰rpm را گزارش کردند. در برخی از مقالات به چشم می‌خورد. با انجام آزمایش‌های عملی، نتایج زیر به دست آمد:

- فاصله‌ی دمایی سرعت‌های پیشروی ۵۰mm/min، ۱۰۰ و ۱۵۰ تقریباً یکسان می‌باشد اگر چه دمای ناشی از سرعت‌های پیشروی ۱۰۰ و ۱۵۰mm/min کمی به هم نزدیک‌تر هستند.
- تقریباً می توان گفت تا قبل از رسیدن به سرعت دورانی ۲۰۰۰rpm دما سیر صعودی دارد اما به محض رسیدن به سرعت دورانی ۲۰۰۰ رفتار ماده تغییر می‌کند. هر چند این موضوع در سرعت‌های پیشروی بالاتر، ملموس تر است.
- در نرخ پیشروی ۱۵۰mm/min و سرعت دورانی ۵۰۰rpm کمترین افزایش دما به مقدار ۱۰°C به دست آمد که می توان آن را برای جراحی استخوان پیشنهاد کرد.
- نرخ پیشروی ۵۰mm/min بیشترین افزایش دما را داشت.

۷- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

مقادیر تئوری به دست آمده که بر اساس سهم حرارت ورودی ۵۰٪ مشخص شده اند تفاوت زیادی با مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی دارند. البته نتایج تحقیقاتی گذشته نیز که با استفاده از نرم افزار آباکوس[۵] و آدامز [۹] نیز انجام شده است، این تفاوت را نشان می‌دهد. حتی نتایج عملی برخی از تحقیقات گذشته [۳] و [۱۳] نیز تفاوت‌های ملموسی با نتایج تجربی در این مطالعه داشت که موجب شد برخی از آزمایش‌ها در این تحقیق تا ۵ بار نیز تکرار شود. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که مقدار سهم ورودی ۵۰٪ (از کل حرارت ایجاد شده) که در تحقیق دیویدسون [۳] استفاده شده است برای سهم حرارت ورودی استخوان مقدار دقیقی نمی‌باشد و می بایست مقدار آن اصلاح شود. حتی مقادیر سهم حرارت ورودی استخوان در سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف نیز با هم متفاوت است. به نظر می رسد دلیل این موضوع به شرایط ماشین‌کاری و مشخصات فیزیکی استخوان مربوط می‌شود. به دلیل نامتجانس بودن استخوان، و در نتیجه تفاوت دانسیته و ضریب انتقال حرارت استخوان در نقاط مختلف شاهد رفتارهای ماشین‌کاری مختلف در سرعت‌های برشی متفاوت و در نتیجه دماهای مختلفی هستیم. اگر چه این موضوع در سرعت‌های برشی نزدیک به هم باعث پراکندگی در دماهای به دست آمده در این نقاط می‌شود اما در کل، با تنوع سرعت‌های برشی و ازدیاد نقاط، دما روند از سرعت ۵۰۰rpm تا ۲۰۰۰rpm (به جز سرعت ۱۵۰۰rpm که کاهش یافته است) دارای شیب صعودی است. به جز این مورد کاهش دما با افزایش نرخ پیشروی نیز موضوع مهم دیگری است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. بر اساس محاسبات تئوری و شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه با افزایش نرخ پیشروی، گرمای ایجاد شده و در نتیجه دمای به وجود آمده در سوراخ‌کاری باید افزایش یابد که در نتایج تجربی که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، خلاف این موضوع مشاهده می‌شود. علت این امر تغییر مقدار حرارت ورودی به استخوان با تغییر سرعت برشی می‌باشد که شکوری و همکاران [۸] نیز به آن اشاره کرده‌اند. مقادیر اصلاح شده‌ی سهم حرارت ورودی که پس از اصلاح معادلات در نرم افزار متلب به دست آمد در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که عدد ۰/۵ تقریب دقیقی برای تمام سرعت‌های پیشروی در ماشین‌کاری استخوان نمی‌باشد. با توجه به اینکه بازه‌ی سرعت دورانی که در این تحقیق آزمایش شد، زیر ۲۵۰۰ بوده است شاید بتوان گفت مقادیر موجود در جدول ۲ برای این بازه، تقریب خوبی حاصل می‌کند. پیش از این و در مطالعات گذشته مانند شکوری و همکاران [۱۶] تئوری واینر [۲۶] که برای فلزات ارائه شده است را برای تعیین سهم حرارتی استخوان مناسب دانستند؛ اما ایشان در همان مطالعه بر لزوم مطالعه‌ای که بتواند یک رابطه‌ی جدید مختص استخوان ارائه دهد تأکید کردند.

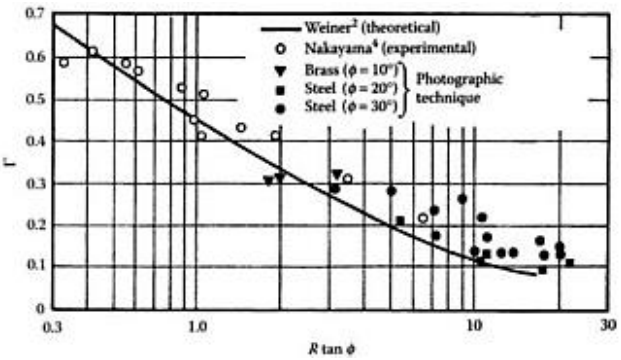

Fig. 11 Effect of *R*tanØ on share of shear zone heat beetwen chip & workpiece [26]

شکل ۱۱ اثر *R*tanØبر تقسیم گرمای منطقه برش بین براده و قطعه کار [۲۶]

جدول ۲ سهم حرارت ورودی‌های اصلاح شده

Table 2 Corrected fraction of heat entering the bone

سهم حرارت ورودی	*R*tanØ	سرعت دورانی rpm	نرخ پیشروی Mm/min
۰/۲	۷/۵۳	۵۰۰	۵۰
۰/۲۱	۷/۵۳	۱۰۰۰	۵۰
۰/۱۷	۷/۵۳	۱۵۰۰	۵۰
۰/۱۹	۷/۵۳	۲۰۰۰	۵۰
۰/۱۸	۷/۵۳	۲۵۰۰	۵۰
۰/۱۱	۱۵/۰۶	۵۰۰	۱۰۰
۰/۱۲	۱۵/۰۶	۱۰۰۰	۱۰۰
۰/۱۵	۱۵/۰۶	۱۵۰۰	۱۰۰
۰/۱۶	۱۵/۰۶	۲۰۰۰	۱۰۰
۰/۱۲	۱۵/۰۶	۲۵۰۰	۱۰۰
۰/۰۶	۲۲/۴	۵۰۰	۱۵۰
۰/۱۱	۲۲/۶	۱۰۰۰	۱۵۰
۰/۰۷	۲۲/۶	۱۵۰۰	۱۵۰
۰/۱۱	۲۲/۶	۲۰۰۰	۱۵۰
۰/۰۹	۲۲/۶	۲۵۰۰	۱۵۰

بر اساس تئوری واینر سهم حرارتی در نرخ پیشروی‌ها و سرعت‌های دورانی مختلف، مطابق شکل ۱۱ تغییر می‌کند. مشکلی که در این نمودار به چشم می‌خورد عدم تأثیر سرعت دورانی در نرخ پیشروی‌های یکسان است که در استخوان و با توجه به اعداد به دست آمده در این مطالعه مشخص می‌شود که نرخ پیشروی بر سهم حرارت ورودی به استخوان تأثیر گذار بوده و با تغییر سرعت دورانی، سهم حرارت ورودی نیز تغییر می‌کند. مقدار R در تئوری واینر از رابطه‌ی (۱۸) به دست می‌آید.

$$R = \frac{\rho v c t_1}{k} \qquad (۱۸)$$

که ρ چگالی، v سرعت برشی، c گرمای ویژه، t_1 ضخامت براده تغییر شکل نیافته، k هدایت حرارتی و Ø زاویه‌ی برش است.

با توجه به سهم حرارتی‌های به دست آمده در جدول ۲ می‌توان رابطه‌ی (۱۹) را برای سهم حرارتی در نرخ پیشروی و سرعت‌های دورانی، در بازه‌ی تعیین شده برای استخوان ارائه داد که تا پیش از این از این رابطه استفاده نشده است و می‌تواند در آینده به جای استفاده از تئوری واینر که برای ماشین‌کاری فلزات استفاده شده است، استفاده گردد.

$$\eta = 0.05 - 0.24\ \log(R\ \tan \emptyset) \qquad (۱۹)$$

۸- بحث

در مطالعه دیویدسون [۳] با توجه به اینکه از سهم حرارتی ۰/۵ استفاده شده، با افزایش نرخ پیشروی، افزایش دما مشاهده می‌شود که این موضوع به دلیل استفاده از مقادیر سهم حرارتی یکسان برای بازه های مختلف نرخ پیشروی و سرعت دورانی است و به همین دلیل نتایج منطبق با نتایج تجربی به دست نیامده است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، حرارت ورودی به استخوان، با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌یابد، با افزایش سرعت دورانی در نرخ پیشروی ثابت نیز دما افزایش می‌یابد. اختلاف افزایش دما در سرعت‌های پیشروی ۱۰۰ و ۱۵۰mm/min در محاسبات تئوری، نسبت به نرخ پیشروی ۵۰mm/min کمتر است. البته این موضوع به این دلیل است که زمان انجام سوراخ‌کاری در این دو نرخ به هم نزدیک‌تر است. به عبارت دیگر در نرخ پیشروی۵۰mm/min مته در زمان ۹/۶ ثانیه عمق سوراخ را طی می‌کند، اما در نرخ‌های پیشروی ۱۰۰ و ۱۵۰mm/min به ترتیب در زمان‌های ۴/۸ و ۳/۲ ثانیه عمق سوراخ را طی می‌کند. این روند می‌تواند تا عکس شدن روند افزایش دمای قطعه نیز ادامه پیدا کند به این معنی که اینقدر زمان ماشین‌کاری کاهش یابد تا دما روند نزولی به خود بگیرد. همچنین دیویدسون افزایش دما را تا نرخ پیشروی۱۲۰mm/min بیان کرده است و نشان داده که پس از این نرخ پیشروی دما سیر نزولی به خود می‌گیرد اما در نتایج تجربی که در این مطالعه و در شکل ۱۰ به دست آمد عکس این موضوع ثابت شد. البته تفاوت‌هایی که در نتایج تجربی این مطالعه و مطالعه دیویدسون وجود دارد ناشی از تخمین نادرست سهم حرارت ورودی به استخوان در مطالعه ایشان است. که در این مطالعه با مقایسه یا نتایج تجربی و بر اساس جدول ۲ می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت.

علم [۹] با شبیه‌سازی سوراخ‌کاری توسط نرم افزار آدامز در نرخ پیشروی ۱۰ تا ۵۰mm/min به افزایش دمای ۲۰°C

تا ۸۰°C در سرعت‌های دورانی ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ دست یافت. که تقریباً با افزایش دما در شبیه‌سازی این مطالعه با استفاده از سهم حرارت ورودی ۵۰٪ که در حدود ۸۲°C در همین نرخ پیشروی می‌باشد، تفاوت ۱۲ درجه‌ای دارد و دلیل آن را می توان تفاوت در روش حل و شرایط مرزی دانست. در نتایج علم باز هم خطای تئوری روند افزایش دما با افزایش نرخ پیشروی وجود دارد، اما با استفاده از سهم حرارتی به دست آمده در این مطالعه در مدل تحلیلی و در شکل ۹، نشان داده شد که با افزایش نرخ پیشروی دما کاهش می‌یابد. همچنین ایشان با ثابت نگه داشتن نرخ پیشروی، نشان داد که با افزایش سرعت دورانی، دما افزایش می‌یابد که شبیه‌سازی این مطالعه نیز همین موضوع را تأیید می‌کند.

یوان کان [۸] با شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس با دمای اولیه‌ی مته ۶۷°C و قطر مته‌ی ۴mm و زاویه‌ی نوک ۱۱۸ و زاویه‌ی مارپیچ ۳۰ درجه و سرعت دورانی ۹۰۰rpm به دمای ۵۵°C دست یافت. البته در عمق بیشتر دما به ۶۰°C نیز رسیده است که بیشترین دما در تحقیق ایشان است و این دما با دمای به دست آمده در بخش تجربی این مطالعه تفاوت ۳ درجه‌ای دارد اما در مطالعه ایشان بر روی سرعت‌هایی دورانی و نرخ‌های پیشروی مختلف بررسی صورت نگرفته است.

لی و همکاران [۷] با شبیه‌سازی سوراخ‌کاری در نرخ پیشروی۶۰mm/min به دمایی در حدود ۵۴°C تا ۶۱°C دست یافتند. تفاوت اصلی تحقیق ایشان با مطالعه حاضر در روش مدل‌سازی می‌باشد که مته و براده و استخوان را یک حجم کنترل در نظر گرفته‌اند. مسأله‌ای که در نتایج لی به چشم می خورد، این است که دما با افزایش نرخ پیشروی افزایش می‌یابد، اما در واقعیت و در آزمایش‌های تجربی خلاف این موضوع ثابت شده است. همچنین ایشان به کاهش دما با افزایش قطر مته اشاره کرده‌اند که در تحقیقات گذشته [۳] و این مطالعه خلاف این موضوع نتیجه‌گیری شده است.

طهماسبی و همکاران [۱۷] با مدل‌سازی و آزمایش در نرخ‌های پیشروی ۳۰ و ۴۰ و ۵۰mm/min و سرعت‌های چرخشی ۵۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ و مقایسه‌ی نتایج نرخ پیشروی ۳۰mm/min و سرعت دورانی ۵۰۰rpm را پیشنهاد کردند که دمای به دست آمده در این نرخ پیشروی با دمای به دست آمده در این مطالعه بسیار نزدیک است.

نکته‌ای که در تمام مدل‌سازی‌ها مشاهده می‌شود، این است که افزایش دما با افزایش سرعت دورانی اتفاق می‌افتد اما در نتایج مشاهده شده در مطالعه حاضر تغییر دما در سرعت‌های چرخشی مختلف مشاهده شد که لازم است به تفاوت این رفتار در آزمایش‌ها و مدل‌سازی پرداخته شود که این همان روش معکوس است و در این مطالعه نیز از آن استفاد شده است.

در تحقیقات تجربی، هیلاری و شعیب [۱] به دمای بالایی در سوراخ‌کاری رسیدند. البته ایشان از ترموکوپل در داخل مته استفاده کرده‌اند.

باچوس [۲] در مقاله‌ی خود، تأثیر مقدار نیرو و سرعت دورانی بر روی دما را بیان کرده است و تأثیر نرخ پیشروی را بررسی نکرده است. او در تحقیق خود به این نتیجه رسیده است که با افزایش نیرو در سواخکاری دما نیز افزایش می‌یابد و منظور از افزایش نیرو همان افزایش نرخ پیشروی است و این همان نتیجه‌ای است که در آزمایش‌های تجربی در این مطالعه به دست آمد. به دلیل اینکه در مطالعه ایشان رابطه‌ی نیرو و نرخ پیشروی بیان نشده است نمی‌توان مقادیر نیرو در مطالعه ایشان و نرخ پیشروی در این مطالعه را به صورت جزیی مقایسه نمود.

دلیل پایین بودن دمای حاصل از آزمایش‌های سوریانو و همکاران [۱۰]، اندازه‌گیری دما در فاصله‌ی ۲mm از سوراخ می‌باشد و با توجه به اینکه در این مطالعه دما از فاصله ۰/۵mm اندازه‌گیری شده است، این اختلاف دما طبیعی می باشد. همچنین ایشان این دما را با استفاده از دوربین مادون قرمز اندازه‌گیری کرده‌اند در حالی که در اکثر تحقیقات دما توسط توموکوپل اندازه‌گیری شده است و این موضوع نیز می‌تواند منشا تفاوت در نتایج باشد.

شکوری و همکاران [۸] نیز از موتور سرعت بالا استفاده کرده‌اند و نتایج ایشان در نرخ پیشروی ۵۰mm/min با نتایج این مطالعه منطبق است اما در سرعت‌های پیشروی بالاتر، تفاوت وجود دارد. شاید تفاوت نتایج این مطالعه و کار ایشان ناشی از تفاوت شرایط ماشین‌کاری و همچنین تفاوت خصوصیات استخوان‌های مورد استفاده باشد.

طهماسبی و همکاران [۱] در تحقیقات خود از نرخ پیشروی کمتر از ۶۰mm/min استفاده کرده‌اند و همچنین ایشان از مته ۶mm استفاده کردند و به دمای ۵۰°C دست یافتند که تقریباً با دمای تجربی به دست آمده در این مطالعه و در این نرخ پیشروی برابر است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نرخ پیشروی و سرعت دورانی که در این مطالعه انتخاب شده است، تمام بازه‌های سرعت دورانی و نرخ پیشروی مطالعات ذکر شده را در بر دارد که این موضوع سبب نتیجه‌گیری دقیق‌تری نسبت به رفتار ماشین‌کاری استخوان شد است به طوریکه در برخی سرعت‌های

دورانی که بر اساس روابط مدل‌سازی باید شاهد افزایش دما بود، عکس این اتفاق رخ می‌دهد که در روش معکوس در این مطالعه به علت آن پرداخته شد و نتایج به دست آمده نیز تا حدودی نتایج گذشته را تأیید می‌کند و تفاوت‌هایی که مشاهده می‌شود را می توان ناشی از نوع، جنس، قطر، زاویه‌ی نوک و زاویه‌ی مارپیچ مته‌ی مختلف، ضخامت‌های متفاوت استخوان، شرایط ماشین‌کاری مختلف و شرایط متفاوت استخوان‌های مختلف دانست.

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر نرخ پیشروی و سرعت دورانی روی حرارت ایجاد شده در استخوان در حین سوراخ‌کاری پرداخته شد و پس از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نتایج زیر حاصل شد.

- سهم حرارت ورودی به استخوان در سوراخ‌کاری که پیش از این و در تحقیق دیویدسون ۵۰٪ در نظر گرفته شده بود، نادرست بوده و در نرخ‌های مختلف پیشروی، مقادیر متفاوتی دارد.

- در نتایج تحقیقات گذشته که از شبیه‌سازی به دست آمده است، نشان داده شده که با افزایش نرخ پیشروی، دمای حاصل از سوراخ‌کاری در استخوان کاهش می‌یابد، اما در این مطالعه مشخص شد که با افزایش نرخ پیشروی، نه تنها دمای حاصل از سوراخ‌کاری افزایش نمی‌یابد، بلکه کاهش می‌یابد.

- سهم حرارت ورودی متاثر از نرخ پیشروی و سرعت دورانی است و می‌توان رابطه‌ی (۱۹) را برای آن ارائه کرد.

- با استفاده از سهم حرارت ورودی به دست آمده از شبیه‌سازی در این مطالعه، می‌توان دمای استخوان را در سوراخ‌کاری پیش بینی نمود.

۱۰- فهرست علایم

A_s مساحت صفحه برش
a انحنای خط جریان براده
C ثابت نرخ برش ماده
c ظرفیت گرمایی ویژه
D قطر مته
d_0 ضخامت جان مته
F_s نیروی برش
f نرخ پیشروی
H ضخامت استخوان
i,j شماره‌ی المان‌ها
k رسانش حرارتی
N سرعت دورانی مته
n شماره‌ی المان
p نصف زاویه رأس مته
q شار حرارتی
Q گرمای تولید شده ضمن سوراخ‌کاری
R_i, R_o شعاع داخلی و خارجی مدل تحلیلی
r فاصله از محور دوران
T درجه حرارت
t زمان
t_1 ضخامت براده تغییر شکل نیافته
v سرعت
v_s سرعت برشی
x,y مختصات کارتزین
z فاصله از سطح فوقانی استخوان

علایم یونانی

α زاویه براده
β زاویه اصطکاک
$\dot{\gamma}$ نرخ برش
$\dot{\gamma}_{AB}$ نرخ برش در صفحه برش
Δr اندازه المان‌ها در راستای محور r
Δz اندازه المان‌ها در راستای محور z
Δt گام زمانی
η درصد حرارت ورودی به استخوان
θ زاویه مارپیچ
ρ چگالی
τ_s تنش برشی نهایی
$\emptyset$ زاویه برش

۱۱- مراجع

[1] M. T. Hillery, I. Shuaib, Temperature effects in the drilling of human and bovine bone, *Materials Processing Technology*, Vol. 92, pp. 302-308, 1999.

[2] K. N. Bachus, M. R. Rondina, D. T. Hutchinson, The effects of drilling force on cortical temperatures and their duration: an in vitro study, *Med Engineering & Physics*, Vol. 22, No. 10, pp. 685-691, 2000.

[3] S. R. Davidson and D. F. James, "Drilling in bone: modeling heat generation and temperature distribution," *J Biomech Eng*, Vol. 125, No. 3, pp. 305-14, Jun 2003.

[4] T. Udiljak, D. Ciglar, S. Skoric, Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis, *Advances in*

Production Engineering & Management, Vol. 2, No. 3, pp. 103-112, 2007.

[5] Y.-K. Tu, L.-W. Chen, C.-C. Huang, Y.-C. Chen, H.-H. Tsai, L.-C. Lin, Finite element simulation of drill bit and bone thermal contact during drilling, *in 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Shanghai, China, 2008.

[6] G. Augustin, S. Davila, K. Mihoci, T. Udiljak, D. S. Vedrina, A. Antabak, Thermal osteonecrosis and bone drilling parameters revisited, *Arch Orthop Trauma Surg*, Vol. 128, No. 1, pp. 71-7, Jan, 2008.

[7] J. Lee, O. B. Ozdoganlar, Y. Rabin, An experimental investigation on thermal exposure during bone drilling, *Medical Engineering & Physics*, Vol. 34, No. 10, pp. 1510-1520, 2012.

[8] E. Shakouri, M. Sadeghi, M. Maerefat, Experimental Investigation of Thermal Necrosis in Conventional and High Speed Drilling of Bone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 105-17, 2013. (InPersian فارسی)

[9] K. Alam, M. Khan, V. V. Silberschmidt, 3D Finite-Element Modelling of Drilling Cortical Bone:Temperature Analysis, *Medical and Biological Engineering*, Vol. 34, pp. 6, 2013.

[10] J. Soriano, A. Garay, P. Aristimuño, L. M. Iriarte, J. A. Eguren, P. J. Arrazola, Effects of rotational speed, feed rate and tool type on temperatures and cutting forces when drilling bovine cortical bone, *Machining Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 611-636, 2013.

[11] N. Maani, K. Farhang, M. Hodaei, A Model for the Prediction of Thermal Response of Bone in Surgical Drilling, *Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 6, No. 4, pp. 17, 2014.

[12] V.Tahmasbi, M.Ghoreishi, M.Zolfaghari, Modeling and multi objective optimization of effective parameters in drilling cortical bone, *Modares Mechanical Engineering*, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 113-119, 2015 (in Persian فارسی)

[13] M. G. A. Fernandes, E. M. M. Fonseca, R. J. Natal, Thermal analysis during bone drilling using rigid polyurethane foams: numerical and experimental methodologies, *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 38, No. 7, pp. 1855-1863, 2016.

[14] Feldmann, J. Anso, B. Bell, T. Williamson, K. Gavaghan, N. Gerber, H. Rohrbach, S. Weber, P. Zysset, Temperature Prediction Model for Bone Drilling Based on Density Distribution and In Vivo Experiments for Minimally Invasive Robotic Cochlear Implantation, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 44, No. 5, pp. 1576–1586, 2016.

[15] A.P.Neisiani1, N.Jamshidi, M.Saraf Bidabad, N.Soltani, Thermal numerical assessment of jawbone drilling factor during implantology, *Journal of Dental Medicine-Tehran University of Medical Sciences*, Vol. 28, No. 4, pp. 266–273, 2016 (in Persian فارسی).

[16] E.Shakouri, M.Maerefat, Theoretical and Experimentl Investigation of Heat Generation in Bone Drilling: Determination of the Share of Heat Input to the Bone Using Machining Theory and Inverse Conduction Heat Transfer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 131-140, 2017 (in Persian فارسی)

[17] H. Heydari, N. Cheraghi Kazerooni, M. Zolfaghari, M. Ghoreishi, and V. Tahmasbi, Analytical and experimental study of effective parameters on process temperature during cortical bone drilling, *Proc Inst Mech Eng H*, Vol. 232, No. 9, pp. 871-883, 2018.

[18] S. Gholampour, E. Shakouri, and H. H. H. Deh, Effect of drilling direction and depth on thermal necrosis during tibia drilling: An in vitro study, *Technol Health Care*, Vol. 26, No. 4, pp. 687-697, 2018.

[19] M.G.Fernandes, E. M.Fonseca,R. N.Jorge, Thermo-mechanical stresses distribution on bone drilling: Numerical and experimental procedures, *Proc Inst Mech Eng H*, Vol. 233, No. 4, pp. 637-646, 2019.

[20] M.F.A. Akhbar, A.R.Yusoff, Drilling of bone: Effect of drill bit geometries on thermal osteonecrosis risk regions, *Proc Inst Mech Eng H*, Vol. 233, No. 2, pp. 207-218, 2019.

[21] M. F. A. Akhbar, A. R. Yusoff, Multi-objective optimization of surgical drill bit to minimize thermal damage in bone-drilling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 157, p. 113594, 2019.

[22] V. Klika, *Biomechanics in applications*. BoD–Books on Demand, 2011.

[23] C. Jacobs, M. Pope, J. Berry, and F. Hoaglund, A study of the bone machining process—orthogonal cutting, *Journal of Biomechanics*, Vol. 7, No. 2, pp. 131-136, 1974.

[24] S. Saha, S. Pal, and J. Albright, Surgical drilling: design and performance of an improved drill, Journal of biomechanical engineering, Vol. 104, No. 3, pp. 245-252, 1982.

[25] V. Khademi, J. Akbari, F. Farahmand, Ultrasonic Assisted Drilling of Bone, International *Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology (ADMT)*, Vol. 1, No. 4, pp. 69-74, 2008.

[26] G. Boothroyd, W. A. Knight, Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, pp. 109-129, *CRC Press Taylor & Francis*, 2005.