

سوراخکاری استخوان به کمک ارتعاشات التراسونیک

وحید خادمی^۱، جواد اکبری^۲، فرزاد فرهمند^۳
Vahid.Khademi@gmail.com

چکیده

سوراخکاری استخوان در جراحی‌های ارتوپدی برای ثابت‌سازی داخلی یا خارجی استخوان شکسته شده، عملی شناخته شده است. در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، ابزار علاوه بر حرکت چرخشی متداول خود، با فرکانس ۱۶ تا ۴۰ کیلوهرتز و دامنه ۱ تا ۳۰ میکرون در راستای محور دوران ارتعاش می‌کند. در این مقاله، سوراخکاری استخوان به کمک ارتعاشات التراسونیک با سوراخکاری به روش متداول، بررسی و مقایسه شده است. برای انجام آزمایشات، مجموعه تجهیزات لازم، طراحی و ساخته شده است. سپس مقادیر نیرو و حداکثر دمای ایجاد شده در استخوان، با نرخ پیشروی ۵۰، ۷۵ و ۱۲۵ میلی‌متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۵۰۰، ۷۱۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه در سوراخکاری به روش معمولی و سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک اندازه‌گیری شده است. با توجه به نتایج، ارتعاشات التراسونیک سبب کاهش نیروی سوراخکاری تا ۵۸ درصد می‌شود. همچنین در دوره‌های کم، بدست آمده از ارتعاشات التراسونیک، دمای ایجاد شده را کاهش می‌دهد.

کلید واژه :

سوراخکاری- ارتعاشات التراسونیک- استخوان- دمای ماشینکاری- نیروی ماشینکاری

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲ - دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، akbari@sharif.edu

۳ - استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، farahmand@sharif.edu

۱- مقدمه

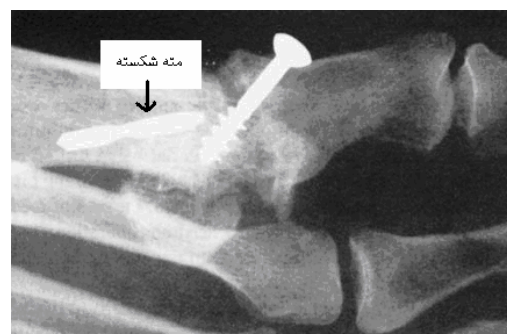
۱-۱- سوراخکاری استخوان

سوراخکاری در جراحی‌های ارتوپدی برای ثابت‌سازی داخلی یا خارجی استخوان شکسته، عملی شناخته شده است (شکل ۱). ثابت‌سازی استخوان شکسته، سبب کاهش زمان ترمیم می‌گردد. در هنگام سوراخکاری استخوان، دمای سلول‌های اطراف سوراخ افزایش می‌یابد. چنانچه که دمای سلول استخوانی انسان به بیش از 100°C افزایش یابد، یا در صورتی که به مدت بیش از یک دقیقه در دمای بیش از 55°C باشد، سلول دچار نکروز (مرگ سلولی) می‌شود [۱]. اگر سلول‌های اطراف سوراخ دچار نکروز شوند، چند روز بعد از عمل جراحی پیچ‌هایی که در زمان جراحی برای ثابت‌سازی استخوان بکار می‌روند، شل شده و وظیفه اصلی خود (ثابت‌سازی محل شکستگی) را نمی‌توانند به درستی انجام دهند.



شکل (۱): کاربرد سوراخکاری در ثابت‌سازی استخوان شکسته [۳]

علاوه بر مشکل نکروز دمایی استخوان، در بعضی موارد به دلیل اعمال نیروی زیاد سوراخکاری توسط جراح، احتمال شکست ابزار در داخل استخوان نیز وجود دارد (شکل ۲).



شکل (۲): شکستن مته در داخل استخوان [۴]

هیلازی و شعیب [۳] و لاری و ماتيو [۱] دریافتند، افزایش سرعت دوران، حداکثر دمای سوراخکاری و مداومت دمای اطراف استخوان را کاهش می‌دهد. یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار بر افزایش دمای استخوان در سوراخکاری، هندسه ابزار است. هیلازی و شعیب [۳] نشان دادند که زاویه راس^۱ مته تاثیر محسوسی در افزایش دما ندارد. ناتالی و انگل [۴] با بررسی ۶ مته مختلف دریافتند، زاویه مارپیچ^۲ کم سبب کاهش حداکثر دما و مداومت آن می‌شود. همچنین یودیلجک و سیگلار [۵] با استفاده از مته دو مرحله‌ای افزایش دمای استخوان را به‌طور چشمگیری کاهش دادند. استفاده از مته‌های مستعمل سبب افزایش بیشتر دما و مداومت طولانی‌تر دمایی می‌شود. خنک‌کاری با آب محل سوراخکاری باعث کاهش میزان افزایش دمای استخوان می‌گردد [۱].

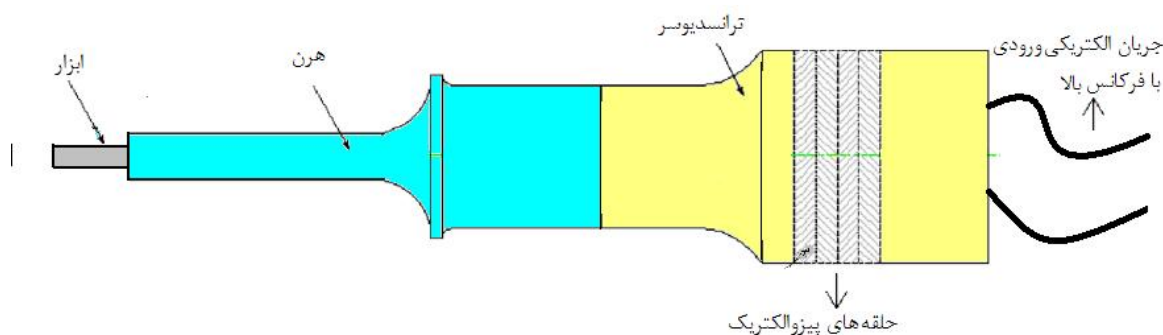
۱-۲- ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات التراسونیک^۳

در این روش، ابزار برشی علاوه بر حرکت معمول خود، تحت تأثیر ارتعاشات التراسونیک حرکتی رفت و برگشتی با دامنه چند میکرون و فرکانس بین ۱۶ تا ۳۰ کیلوهرتز دارد. این حرکت می‌تواند، در راستای حرکت اصلی ابزار و یا عمود بر آن باشد. این روش در اکثر ماشین‌کاری‌های متداول سبب بهبود فرایند تولید شده است. تاکنون اثرات موثر استفاده از این تکنیک در تراشکاری [۶]، سنگ زنی [۷] و سوراخکاری [۸ و ۱۰] مشاهده شده است. تجهیزات تولید ارتعاشات التراسونیک شامل ژنراتور، ترانسدیوسر و هرن است. ژنراتور جریان الکتریکی ورودی با فرکانس ۵۰ هرتز را تبدیل به جریانی با فرکانس ۱۶ تا ۴۰ کیلوهرتز می‌کند. سپس این جریان الکتریکی در ترانسدیوسر به امواج مکانیکی با فرکانس ۱۶ تا ۴۰ کیلوهرتز تبدیل می‌گردد. دامنه این ارتعاشات معمولاً کمتر از ۵۰ میکرون است. این ارتعاشات توسط هرن (انتقال دهنده) به ابزار منتقل می‌شود. در برخی موارد هرن علاوه بر انتقال ارتعاش، دامنه آن را نیز تقویت می‌کند. در شکل (۳) شماتیکی از مجموعه التراسونیک نشان داده شده است.

در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک^۴ ابزار علاوه بر حرکت دورانی در سوراخکاری معمول^۵، در جهت محور سوراخکاری، حرکتی رفت و برگشتی دارد. استفاده از این روش برای سوراخکاری خصوصاً سوراخ‌هایی با عمق زیاد، بسیار کارآمد است [۸].

1- Point angle
2- Helix angle
3- Ultrasonic Assisted Machining
4- Ultrasonic Assisted Drilling (USD)
5- Conventional Drilling (CD)

آزمایشات باچوس و ماتيو [۲] و لاری و ماتيو [۱] نشان داد، افزایش نیرو باعث کاهش چشمگیر دمای حداکثر و مداومت آن می‌گردد.



شکل (۳): نمایی شماتیک از مجموعه ترانسدیوسر، هرن و ابزار

دقیق و محل تکیه‌گاه توسط نرم افزار ANSYS انجام شد. برای ایجاد حرکت دورانی از دستگاه تراش مدل TN40A ساخت کارخانه ماشین‌سازی تبریز استفاده شد. با توجه به محدوده دمایی کاری (۱۰- ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد)، از ترموکوپل سیمی k-type با قطر ۰/۸ میلیمتر استفاده شد. فاصله دیواره سوراخ تا ترموکوپل ۰/۷ میلیمتر در نظر گرفته شده بود. برای اندازه‌گیری دما از دستگاه Logoscrean ساخت شرکت JUMO استفاده شد. دینامومتر مورد استفاده در اندازه‌گیری نیرو از نوع پیزوالکتریکی، مدل 9255B ساخت شرکت KISTLER بود. نرخ نمونه برداری در آزمایشات ۱۰۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شد. مته‌های مورد استفاده، از نوع مته‌های پزشکی با قطر ۳/۲ میلیمتر و زاویه راس ۱۱۰ درجه بود. نمونه‌ها از قسمت جلو و میانی استخوان تازه فمور گاو تهیه شد. ابعاد نمونه‌ها ۲۰×۲۰×۴۰ میلیمتر انتخاب شد. حداقل ضخامت در نظر گرفته شده برای محل سوراخ کاری ۹ میلیمتر بود. نمونه‌هایی که ضخامتشان کمتر از این مقدار بود، از آزمایشات حذف شدند.



شکل (۴): قرار گرفتن نمونه در فیکسچر و محکم کردن پیچ

بررسی‌های انجام شده توسط چانگ و بون [۱۱] نشان داد، اندازه براده در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک بدلیل ایجاد ارتعاش پیوسته ابزار کوچکتر از سوراخکاری معمولی است. همچنین آزمایشات بابیسکی و استاشو [۱۲]، چانگ و بون [۱۱] و لیو و چن چانگ و بون [۱۰] نشان داد، نیروی سوراخکاری به مقدار قابل توجهی در روش جدید کاهش می‌یابد [۱۲].

یکی از دلایل کاهش نیروی محوری، کوچکتر شدن اندازه براده‌ها و در نتیجه جدایش سریعتر آنها از ابزار است. همچنین، بدلیل وجود ارتعاشات پیوسته ابزار در راستای سوراخ، چسبندگی ابزار به جداره‌های سوراخ کمتر شده و در نتیجه نیروی اصطکاک و نیروی تماس کاهش می‌یابد. [۸، ۹، ۱۱]. عمر ابزار در سوراخکاری به کمک التراسونیک نسبت به حالت معمولی به طور کاملاً محسوس افزایش می‌یابد. محققین افزایش عمر ابزار تا ۳ برابر را گزارش داده‌اند [۱۰]. اکبری و آذرهوشنگ [۹] گردی و استوانه‌ای بودن سوراخ را در دو روش با یکدیگر مقایسه کردند. در این روش به طور چشمگیری نتایج بهبود یافت. همچنین آنها نشان دادند برای بعضی مواد همچون سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ که امکان سوراخکاری به روش معمولی وجود ندارد، به کمک ارتعاشات التراسونیک می‌توان با کیفیت بالا سوراخکاری را انجام داد.

۲- تجهیزات آزمایش

در این پژوهش برای تسهیل سوراخکاری از علاوه بر حرکت متداول ابزار، از ارتعاشات التراسونیک استفاده شد. ترانسدیوسر به کار رفته در مجموعه التراسونیک از نوع پیزوالکتریک بود که امواج الکتریکی تولید شده ژنراتور را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می‌کرد. جنس هرن (انتقال دهنده) از آلومینیوم ۷۰۷۵ انتخاب شد. هرن برای فرکانس کاری ۲۰ کیلوهرتز طراحی شد. آنالیز مودال و تعیین ابعاد

۴- نتایج و بحث

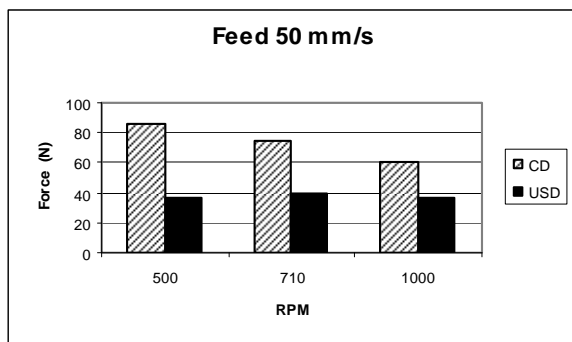
۴-۱- تاثیر سرعت دوران در نرخ پیشروی ۵۰mm/s در

نیروی سوراخکاری

در گروه اول آزمایشات، سوراخکاری در نرخ پیشروی ۵۰mm/s و در سرعت‌های دورانی ۵۰۰، ۷۱۰، ۱۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. جدول ۱ میانگین نیروها (Mean) و انحراف از معیار (SD) برای هر دسته از داده‌ها در سوراخکاری معمولی (CD) و سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک (USD)، را نشان می‌دهد. برای مقایسه بهتر، در شکل (۶) نمودار نتایج نشان داده شده است.

جدول (۱): میانگین و انحراف از معیار نیروی سوراخکاری در نرخ پیشروی ۵۰ (mm/s)

RPM	Force(N)			
	CD		USD	
	Mean(SD)	[Range]	Mean(SD)	[Range]
1000	60(0.58)	[60-61]	37 (0.58)	[36-37]
710	74 (0.45)	[74-75]	40 (2.12)	[39-42]
500	86 (0.58)	[85-86]	37 (1.5)	[35-38]



شکل (۶): مقایسه تاثیر سرعت دورانی در نرخ پیشروی ۵۰mm/s در نیروی سوراخکاری دو روش

در سوراخکاری منشا نیروهای مقاوم، نیروی براده برداری، نیروی فشاری بین ابزار و کف سوراخ، نیروی اصطکاک بین جداره سوراخ با ابزار و نیروی اصطکاک بین براده با ابزار است.

در سوراخکاری معمولی با افزایش سرعت دوران، نیروی سوراخکاری کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش سرعت دوران در نرخ پیشروی ثابت، ضخامت براده تشکیل نیافته کاهش می‌یابد. در نتیجه نیروی تشکیل براده، با افزایش سرعت دوران کم می‌شود. همچنین با افزایش سرعت دوران، سرعت خروج براده‌های استخوانی بیشتر و انباشتگی ذرات داخل شیارهای مته کمتر می‌گردد. در نتیجه نیروی فشاری لازم برای غلبه بر تخلیه براده کاهش می‌یابد.

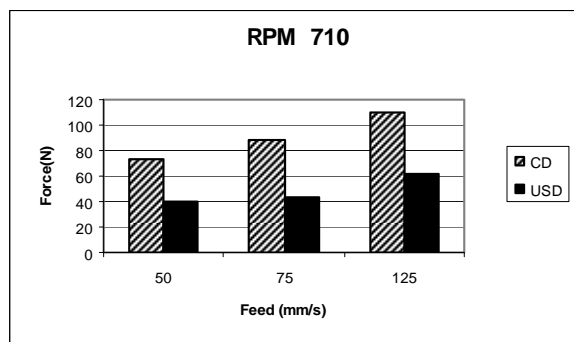


شکل (۵): نمایی از مجموعه تجهیزات آزمایش

۳- آزمایشات

بعد از ثابت شدن نمونه استخوانی در فیکسچر شکل (۴)، قطعه راهنما (جیگ) بر روی فیکسچر قرار می‌گرفت. سپس با استفاده از پین و چکش به آرامی محل دقیق مرکز سوراخکاری و محل قرار گرفتن ترموکوپل نشانه گذاری می‌شد. سپس قطعه راهنما از فیکسچر جدا می‌شد. و سوراخی به قطر ۰/۸ میلی‌متر و عمق ۴ میلی‌متر برای قرار گرفتن ترموکوپل در محل نشانه گذاری شده، ایجاد می‌شد. ترموکوپل در محل مورد نظر قرار می‌گرفت. در مرحله بعد، مجموعه رینگ بر روی فیکسچر محکم می‌شد. سپس دو انتهای سیم‌های ترموکوپل به دو پایانه رینگ متصل می‌گردید.

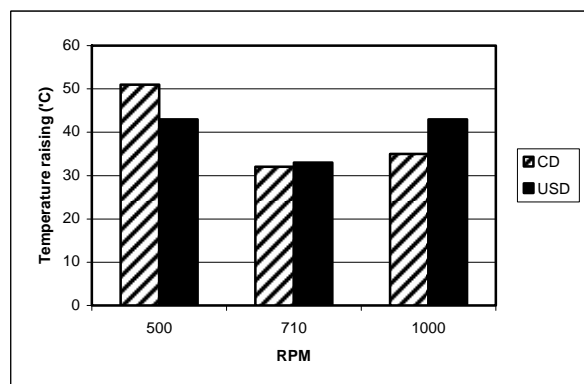
بعد از آن جاروبک‌ها بر روی رینگ قرار می‌گرفت. در نهایت بعد از اطمینان از درست بودن اتصالات و محل قرار گیری جاروبک‌ها، پایه جاروبک ثابت می‌شد. سرعت گردش اسپیندل و نرخ پیشروی مته تنظیم می‌شد. سپس مته تا فاصله ۵ میلی‌متر، به استخوان نزدیک شده بعد از کنترل موقعیت نوک مته و محل نشانه گذاری شده و اطمینان از عدم تماس سیم‌های ترموکوپل و مته و محکم بودن جاروبک‌ها، ماشین تراش روشن و شروع به گردش می‌کرد. بعد از رسیدن سرعت اسپیندل به حالت ثابت، کلید استارت دینامومتر برای ثبت نیرو فشرده می‌شد. دما نیز به وسیله دستگاه logoscrean ثبت می‌شد. جاروبک‌ها با رینگ ترموکوپل به مدت ۲ دقیقه بعد از اتمام سوراخکاری برای ثبت تغییرات دمای استخوان، تماس داشتند. برای تست‌هایی که در آنها سوراخکاری به کمک التراسونیک انجام می‌شد، قبل از روشن کردن دستگاه تراش، منبع مولد دستگاه التراسونیک روشن می‌شد. در شکل (۵) نمایی از کل مجموعه آزمایش نشان داده شده است. همه آزمایشات در دمای اتاق انجام شد.



شکل (۷): تاثیر نرخ پیشروی در سرعت دورانی ثابت ۷۱۰ RPM در نیروی سوراخکاری دو روش

جدول (۳): حداکثر دما در نرخ پیشروی ۵۰ mm/s و سرعت دورانی های مختلف

RPM	Temperature Raising (C)			
	CD		USD	
	Mean(SD)	[Range]	Mean(SD)	[Range]
1000	35(8.2)	[31-48]	43 (1.4)	[41-43]
710	31.7(3.8)	[25-34]	33 (.35)	[33-34]
500	51(8)	[46-60]	43(3.7)	[40-47]



شکل (۸): تغییرات دمای حداکثر در در نرخ پیشروی ۵۰ mm/s و سرعت دورانی های مختلف

۳-۴- حداکثر افزایش دما

دما در فاصله ۰/۷ میلیمتری از جداره سوراخ اندازه گیری شد. در جدول (۳) و شکل (۸)، تغییرات حداکثر دما را در هر دو روش سوراخکاری در نرخ پیشروی ۵۰ mm/s و سرعت های دورانی ۵۰۰، ۷۱۰، ۱۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان داده شده است. حداکثر تغییرات دما با افزایش سرعت دوران از ۵۰۰ به ۷۱۰ دور بر دقیقه کاهش داشت. ولی با افزایش سرعت دوران از ۷۱۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه حداکثر دما افزایش یافت.

عوامل افزایش دما در حین سوراخکاری عبارتند از: نیروی اصطکاک، نیروی ایجاد براده، انباشتگی براده ها و ارتعاشات التراسونیک.

در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، در سرعت های مختلف دوران، در مقدار نیرو تفاوت محسوسی مشاهده نشد. بدلیل ارتعاشات نوک ابزار، ریز ترک هایی در استخوان ایجاد می گردد. وجود ترک در استخوان سبب کاهش اندازه براده و در نتیجه کاهش نیروی براده برداری می گردد. همچنین در سوراخکاری به کمک التراسونیک با توجه به ایجاد ارتعاش پیوسته ابزار، نیروی اصطکاک بین براده و ابزار، همچنین اصطکاک بین براده و جداره های سوراخ استخوان کاهش می یابد. با توجه به لرزش پیوسته ابزار، ذرات بدون ایجاد انباشتگی از شیارها خارج می گردند. در محدوده سرعت های آزمایش شده در سوراخکاری التراسونیک، مقدار نیرو از سرعت دوران مستقل است. دلیل اصلی این رفتار، ایجاد ریز ترک در استخوان و تشکیل براده های هم اندازه در نرخ پیشروی ثابت است. نیروها در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک نسبت به سوراخکاری معمولی در سرعت های دورانی مختلف، از ۳۸ تا ۵۷ درصد کاهش داشته است.

۲-۴- تاثیر نرخ پیشروی در سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه

در نیروی سوراخکاری

سرعت دورانی دریل های مورد استفاده در جراحی های ارتوپدی، بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ دور بر دقیقه است. لذا برای بررسی تاثیر نرخ پیشروی، سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه انتخاب شد. با افزایش نرخ پیشروی، نیروی سوراخکاری در هر دو حالت افزایش یافت (شکل (۷) و جدول (۲)). با افزایش نرخ پیشروی، مقدار نفوذ در واحد دور افزایش می یابد. با افزایش مقدار نفوذ در واحد دور، ضخامت براده تشکیل نیافته افزایش می یابد. در نتیجه نیروی تشکیل براده با افزایش نرخ پیشروی افزایش می یابد. همچنین با افزایش نرخ پیشروی، مقدار انباشتگی براده ها در شیارهای مته و در نتیجه نیروی فشاری افزایش می یابد. عوامل فوق، سبب افزایش نیروی سوراخکاری با افزایش نرخ پیشروی ثابت می گردد. نیرو در سوراخکاری به کمک التراسونیک نسبت به سوراخکاری معمولی ۵۸ درصد کاهش یافت.

جدول (۲): میانگین و انحراف از معیار نیروی سوراخکاری در سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه

Feed(mm/s)	Force(N)			
	CD		USD	
	Mean(SD)	[Range]	Mean(SD)	[Range]
125	117(6)	[110-121]	61(2.5)	[59-63]
75	88(0.58)	[87-89]	44(0.58)	[43-44]
50	74(0.45)	[74-75]	40(2.12)	[39-42]

دقیقه کاهش یافت. ولی با افزایش سرعت دوران از ۷۱۰ به ۱۰۰۰ دور بر دقیقه حداکثر دما افزایش نشان می‌دهد. استفاده ارتعاشات التراسونیک در سوراخکاری استخوان و جایگزینی آن با روش متداول سوراخکاری می‌تواند، نویدبخش جراحی‌های با موفقیت بیشتر و عوارض کمتر باشد.

۶- مراجع

- [1] L. S. Matthews and C. Hirsch, "Temperatures Measured in Human Cortical Bone when Drilling," The Journal of Bone and Joint Surgery, Vol. 54, pp. 297, 1972.
- [2] K. N. Bachus, M. T. Rondina, and D. T. Hutchinson, "The effects of drilling force on cortical temperatures and their duration: an in vitro study," Medical Engineering and Physics, Vol. 22, pp. 685-691, 2000.
- [3] M. T. Hillery and I. Shuaib, "Temperature effects in the drilling of human and bovine bone," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92, pp. 302-308, 1999.
- [4] C. Natali, P. Ingle, and J. Dowell, "Orthopaedic bone drills-can they be improved?," Journal of bone and joint surgery - British Volume -, Vol. 78, pp. 357-362, 1996.
- [5] T. Udiljak, D. Ciglar, and S. Skoric, "Investigation into bone drilling and thermal bone necrosis" Advance in Production Engineering & Management, Vol. 3, pp. 103-112, 2007.
- [6] D. E. Brehl and T. A. Dow, "Review of vibration-assisted machining," Precision Engineering, vol. 32, pp. 153-172, 2008.
- [7] T. Tawakoli, B. Azarhoushang, "Influence of Ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 38, pp. 1585-1595, 2008.
- [8] R. Neugebauer and A. Stoll, "Ultrasonic application in drilling," Journal of Materials Processing Tech., Vol. 149, pp. 633-639, 2004.
- [9] B. Azarhoushang and J. Akbari, "Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, pp. 1027-1033, 2007.
- [10] Y. S. Liao, Y. C. Chen, and H. M. Lin, "Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy," International Journal of Machine Tools and Manuf.
- [11] S. S. F. Chang and G. M. Bone, "Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance," Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 21, pp. 442-450, 2005.
- [12] V.I. Babitsky, V.K. Astashev, A. Meadows, "Vibration excitation and energy transfer during ultrasonically assisted drilling," Journal of Sound and Vibration.

در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه، بدلیل نیروی زیاد سوراخکاری و سرعت کم خروج براده‌ها، انباشتگی براده‌ها، بیشترین افزایش در حداکثر دما رخ داده است. با افزایش سرعت دوران به ۷۰۰ دور بر دقیقه، سرعت خروج براده‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه مقدار حداکثر دما کاهش یافته است. در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، عامل افزایش نیروی اصطکاک بیش از افزایش سرعت خروج براده‌ها تاثیرگذار بوده است. در نتیجه مقدار حداکثر دما نسبت به حالت قبل افزایش یافته است.

در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، در سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه، میزان دما نسبت به سوراخکاری معمولی کاهش نشان می‌دهد. عامل مهم تولید حرارت در سوراخکاری معمولی، خروج آرام و پیوسته براده است. ولی در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، مکانیزم خروج براده تغییر نموده و براده با سرعت از محل سوراخ تخلیه می‌شوند. در نتیجه مقدار حداکثر افزایش دما، کاهشی نسبی به همراه دارد. در سرعت دورانی ۷۱۰ دور بر دقیقه، تغییر بین حداکثر افزایش دما محسوس نبود. ولی در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در سوراخکاری التراسونیک، حداکثر دمای ایجاد شده نسبت به روش متداول افزایش یافت. زیرا در این حالت، اثر حرارت تولید شده توسط ارتعاشات التراسونیک بیش از اثرات عوامل کاهش دما بوده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از دینامومتر، نیروی سوراخکاری در پیشروی‌ها و سرعت‌های دورانی مختلف اندازه‌گیری و ثبت شد. با توجه به نتایج بدست آمده، در سوراخکاری معمولی در نرخ پیشروی ثابت با افزایش سرعت دوران، مقدار نیروی سوراخکاری کاهش می‌یابد که با نتایج هیلاری و شعیب [۳] تطابق دارد. در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، در نرخ پیشروی ثابت با افزایش سرعت دورانی، نیروی سوراخکاری نسبتاً ثابت و بدون تغییر است. در سوراخکاری به کمک ارتعاشات التراسونیک، نیرو نسبت به روش متداول تا ۵۸ درصد کاهش داشت. با افزایش نرخ پیشروی در سرعت دورانی ثابت، مقدار نیروی سوراخکاری در هر دو روش، افزایش می‌یابد. در این حالت نیز، سوراخکاری استخوان به کمک ارتعاشات التراسونیک نیرو نسبت به روش متداول کاهش چشمگیری داشت. با اندازه‌گیری دما در فاصله ۰/۷ میلیمتری از محل سوراخکاری، تاثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی در حداکثر افزایش دما بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، در نرخ پیشروی ۵۰ mm/s، حداکثر افزایش دما با افزایش سرعت دوران از ۵۰۰ به ۷۱۰ دور بر