



تأثیر نوع سیال برشی در روان کاری کمینه حین سنگ زنی در حضور ارتعاشات فراصوت

میرمجید مولائی^۱، محمد زارعی^۲، جواد اکبری^{۳*}، محمدرضا موحدی^۴

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۴- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، akbari@sharif.edu

چکیده

در پژوهش‌هایی که برای افزایش بازدهی فرآیند سنگ‌زنی انجام شده، اثبات شده است که استفاده از ارتعاشات فراصوت در حین فرآیند سنگ‌زنی و یا روان کاری کمینه کمک شایانی به بهبود کارایی و افزایش راندمان فرایند سنگ‌زنی می‌کند. ولی تاکنون پژوهش‌های کمی برای مطالعه حضور هم‌زمان این دو روش بر فرآیند سنگ‌زنی انجام شده است. بنابراین در این پژوهش به بررسی تأثیر تغییر سیال روان کاری کمینه بر نیروهای مماسی و عمودی سنگ‌زنی پاندولی فولاد ای‌آی‌اس‌آی ۵۲۱۰۰ سخت کاری شده در حضور ارتعاشات افقی فراصوت، به دلیل سهولت اندازه‌گیری نیروها و کارایی آن‌ها در تحلیل شرایط سنگ‌زنی، پرداخته شده است. نتایج بیان‌گر این هستند که حضور ارتعاشات افقی، باعث کاهش قابل ملاحظه‌ی نیروی مماسی و عمودی و افزایش نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی می‌شود. همچنین استفاده از روان کاری کمینه با سیال برشی آب تأثیر چندانی بر نیروهای سنگ‌زنی ندارد. ولی دیگر سیال‌های برشی مورد آزمایش، نیروها را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهند، که در این بین استفاده از روغن سویا بیش‌ترین کاهش را در نیروهای سنگ‌زنی به دنبال دارد. اما در حضور ارتعاشات فراصوت، همه‌ی سیال‌های برشی مورد بررسی، نیروها را نسبت به عدم حضور این ارتعاشات میزان بیش‌تری کاهش می‌دهند.

کلید واژگان: سنگ‌زنی، ارتعاشات فراصوت، سیال برشی، روان کاری کمینه

Cutting Fluid effect in Minimum Quantity Lubrication (MQL) of Ultrasonic – Assisted Grinding (UAG)

MirMajid Molaie, Mohammad Zarei, Javad Akbari*, MohammadReza Movahhedy

Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 11155-9567, Tehran, Iran, akbari@sharif.edu

ABSTRACT

In the previous researches on grinding, it was proven that the ultrasonic-assisted grinding and minimum quantity lubrication enhances the material removal and grinding efficiency. So far not many researches have studied the simultaneous use of these two methods. This research investigates the effect of the different lubricants in minimum quantity lubrication of reciprocatory grinding of AISI52100 hardened steel in the presence of horizontal ultrasonic vibrations on grinding forces and tangential to normal force ratio due to their measurement simplicity and convenience to analyze the grinding conditions. Results showed that the presence of the horizontal vibrations causes dramatic decrement of grinding forces and increment of force ratio. Also, using water and lubricant in minimum quantity lubrication won't cause significant change of grinding forces, while other fluids in this research (soluble oil, paraffin, and soybean oil) cause grinding force reduction among which soybean oil causes the most grinding force reduction. Applying the two methods simultaneously reduces the grinding forces moreover.

Keywords: Cutting fluid, Grinding, Minimum Quantity Lubrication (MQL), Ultrasonic Vibrations.

استفاده از سیال خنک‌کننده اجتناب‌ناپذیر است؛ ولی این سیالات که اکثراً پایه‌ی شیمیایی دارند، دارای مخاطرات زیست‌محیطی هستند و از طرف دیگر استفاده‌ی گسترده‌ی آن‌ها هزینه‌ی بالایی را در پی دارد. بنابراین استفاده از روش‌های جایگزین اهمیت ویژه‌ای می‌یابد.

کارایی سنگ‌زنی به کمک ارتعاشات فراصوت^۱ طی پژوهش‌های متعددی اثبات شده است. به طوری که این روش با تغییر مکانیزم براده‌برداری و تبدیل آن از حالت برش-سایش به ضربه-برش-سایش نتایج قابل قبولی در کاهش نیروهای سنگ‌زنی ارائه داده است. در نتایج گزارش شده توسط بادوری و هم‌کاران [۲] که تأثیر ارتعاشات فراصوت بر سنگ‌زنی سوپرآلیاژهای پایه‌نیکل

۱- مقدمه

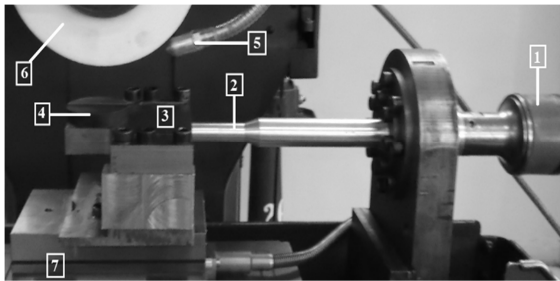
سنگ‌زنی روشی پرکاربرد می‌باشد، به‌طوری که اکثر قطعات صنعتی یا توسط این روش و یا توسط دستگاه‌هایی که دارای قطعات سنگ‌خورده هستند، ساخته می‌شوند. در این روش به دلیل زاویه‌ی براده‌ی منفی اکثر دانه‌های منفرد که به زوایای کم صفحه‌ی برش براده و کرنش بالا منجر می‌شود، عدم درگیری تمام ذرات ساینده، بزرگ‌تر بودن ابعاد ناحیه‌ی ساینده شده در دانه‌های فعال نسبت به ابعاد مشابه در قلم‌های تک‌لبه‌ای و نیز به دلیل اثر اندازه-اندازه‌ی براده‌ی بسیار کوچک-انرژی مورد نیاز برای برداشت حجم واحد ماده حدود ۱۰ برابر بیش‌تر از ماشین‌کاری مرسوم است [۱]. این انرژی مصرفی به‌صورت حرارت در منطقه‌ی سنگ‌زنی تخلیه می‌گردد، بنابراین

1. Ultrasonic-Assisted Grinding (UAG)

Please cite this article using:

M.M. Molaie, M. Zarei, J. Akbari, MohammadReza Movahhedy, Cutting Fluid effect in Minimum Quantity Lubrication (MQL) of Ultrasonic – Assisted Grinding (UAG), Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 301-305, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۱ سیستم مولد ارتعاشات فراصوت: ۱.مبدل ارتعاشات ۲. انتقال دهنده و تقویت کننده ارتعاشات ۳. سازه قابل انعطاف ۴. قطعه کار ۵. نازل روان کاری کمینه ۶. چرخ سنگ زنی ۷. نیروسنج

آلیاژ معمولی فولاد استفاده شده است. جزئیات بیش تر طراحی سیستم ارتعاشات فراصوت در [۱۱] دیده می شود.

۲-۲- شرایط ماشین کاری و تجهیزات اندازه گیری

آزمایش های سنگ زنی به صورت تخت و با استفاده از ماشین جونز شپمن^۸ مدل ۶۹۵۶۹ انجام شده است. پارامترهای سنگ زنی در جدول ۱ آورده شده اند. نیروهای سنگ زنی توسط نیروسنج سه مؤلفه ای کیستلر مدل بی ۹۲۵۷^۹ ثبت و توسط نرم افزار داینور^{۱۰} تحلیل شده اند. برای به دست آوردن شرایط مشابه برای همه ی آزمایش ها، چرخ سنگ زنی قبل از هر آزمایش درس^{۱۱} شد. شرایط درس در جدول ۱ آورده شده است. برای بهینه کردن کیفیت افشانه، دبی سیال روان کار، فشار هوا و پارامترهای نازل (قطر، زاویه با افق و فاصله تا منطقه ی سنگ زنی) آزمایش هایی از قبل انجام شد و بهترین مقادیر پارامترها برای انجام آزمایش های اصلی انتخاب شدند که در جدول ۱ آورده شده اند.

جدول ۱ شرایط سنگ زنی و پارامترهای روان کاری کمینه	
چرخ سنگ	نورتون ۵اس جی ۴۶-جی وی اس ۱۲۱۷۷×۱۵
سرعت برشی	۳۵ متر بر ثانیه
سرعت پیش روی	۵ متر بر ثانیه
عمق برش	۱۵ میکرومتر
سیال غوطه وری	آب صابون ۵ درصد حجمی
دبی سیال غوطه وری	۲/۵ لیتر بر دقیقه
دبی سیال برشی روان کاری کمینه	۳۰۰ میلی لیتر بر ساعت
فشار هوای سیستم روان کاری کمینه	۳ بار
زاویه ی نازل	۲۰ درجه نسبت به افق
جنس قطعه کار	فولاد ای آی اس آی ۵۲۱۰۰ ^{۱۲} سخت کاری شده
درس	با سختی ۵۵±۲ راکول سی
عمق درسینگ	الماس تک نقطه ای ۴۰ میکرومتر
سرعت درسینگ	۴۰ متر بر ثانیه

بررسی شده است، آمده است که افزودن ارتعاشات فراصوتی سبب ۲۳٪ کاهش نیروی عمودی و ۴۵٪ کاهش نیروی مماسی شده است. لیانگ و وانگ [۳] با طراحی و ساخت یک سیستم با قابلیت ارتعاش دو بعدی، گزارش نموده اند که ارتعاشات در راستای محور چرخ سنگ زنی تأثیر کمی بر نیروها داشته است. همچنین اکبری و همکاران در سنگ زنی سرامیک های مهندسی به کمک ارتعاشات فراصوت، کاهش چشم گیر مؤلفه های نیروی سنگ زنی را گزارش کرده اند [۴].

در روش های معمول روان کاری، به مقدار زیادی سیال روان کار برای روان کاری مؤثر در فرآیند سنگ زنی نیاز است. اما هزینه ی زیاد تهیه، نگهداری و دفن این سیالات برشی، در کنار قوانینی که به دلیل تأثیرات مخرب زیست محیطی این مواد، روز به روز سخت گیرانه تر می شوند، صنعت را به سمت استفاده ی هرچه کم تر از سیال های برشی سوق می دهد [۵]. استفاده از سنگ زنی خشک به دلیل تأثیرات نامطلوب آن بر محصول نهایی جایگزین مناسبی برای این منظور نیست [۶] در حالی که روان کاری کمینه^۱ جایگزین مناسبی برای خنک کاری مناسب در فرآیند ماشین کاری است [۷-۱۰]. در این روش مخلوط هوای فشرده و سیال برشی اصطلاحاً افشانه به ناحیه ی ابزار با قطعه کار پاشیده می شود. براساس مطالعات انجام شده، افزایش تأثیر روان کاری کمینه در فرآیندهایی با شرایط اصطکاکی بالا هم چون سنگ زنی، مستلزم استفاده از سیال برشی با خاصیت روان کاری بالا می باشد.

در این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده ی هم زمان از دو روش روان کاری کمینه حین فرآیند سنگ زنی و سنگ زنی در حضور ارتعاشات فراصوت، بر نیروهای مماسی و عمودی سنگ زنی و نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی، پرداخته می شود. با توجه به مؤثر بودن هر دو فرآیند و تفاوت مکانیزم آن ها در افزایش راندمان، انتظار می رود اعمال هم زمان آن ها باعث افزایش هرچه بیش تر راندمان فرآیند سنگ زنی شود.

در آزمایش ها از آب، روغن حل شونده در آب (آب صابون)، پارافین و روغن سویا به عنوان سیال روان کاری کمینه استفاده شده است. ارتعاشات نیز به صورت هم جهت با پیش رویش قطعه کار و به صورت افقی اعمال شده اند. نیروی مماسی، نیروی عمودی و نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی به عنوان پارامتر خروجی و معیار قضاوت عمل کرد فرآیند در نظر گرفته شده است.

۲- تجهیزات و روش آزمایش

۲-۱- سیستم ارتعاشات فراصوت

برای اعمال ارتعاشات با بسامد زیاد و دامنه ی کم به قطعه کار، تجهیزات^۲، مطابق شکل ۱ طراحی شد که مبدل ارتعاشات^۳ برای تولید ارتعاشات با بسامد مشخص، هورن^۴ برای انتقال ارتعاشات، تقویت کننده ی^۵ ارتعاشات و سازه ی قابل انعطاف برای نصب قطعه کار روی آن، را شامل می شود.

آزمایش های سنگ زنی بدون حضور ارتعاشات فراصوت و در حضور ارتعاشات فراصوت انجام شده اند. ارتعاشات فراصوت توسط یک سیگنال ساز و مبدل ارتعاشات مدل مسترسونیک ام اس جی ۲۰۰۰^۶ با فرکانس ۲۱/۹ کیلوهرتز از فرکانس برق شهری (۵۰ هرتز) تولید و به قطعه کار اعمال شدند. برای ساخت هورن و تقویت کننده، از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵^۷ و برای سازه ی قابل انعطاف از

1. Minimum Quantity Lubrication (MQL)
2. Setup
3. Transducer
4. Horn
5. Booster
6. Mastersonic MSG 2000
7. Al7075

8. Jones-Shipman
9. Kistler Type 9257
10. Dynoware
11. Dress
12. Norton 5SG46-JVS 177×15
13. AISI52100

۳- داده ها و بحث

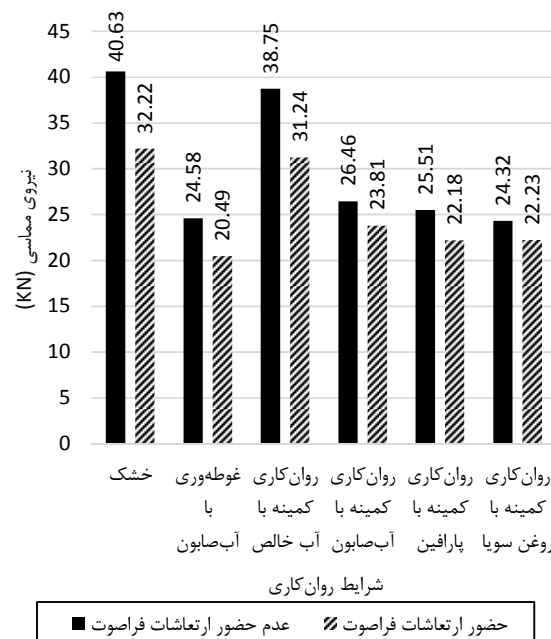
۳-۱- نیروهای مماسی و عمودی

در شکل های ۲ و ۳ نیروهای مماسی و عمودی سنگ زنی در شرایط مختلف روان کاری (غوطه وری و روان کاری کمینه با سیال های مختلف) بدون حضور ارتعاشات فراصوت و با حضور ارتعاشات فراصوت دیده می شود.

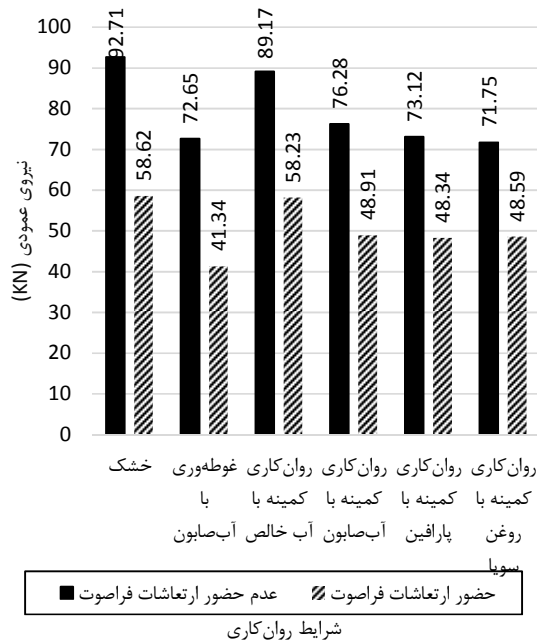
۳-۱-۱- سنگ زنی بدون حضور ارتعاشات فراصوت

همان گونه که در شکل ۲ و ۳ دیده می شود، در این حالت، نیروهای مماسی و عمودی سنگ زنی بدون روان کاری بیشترین مقدار خود را دارند. روان کاری کمینه با آب خالص نیز، تأثیر قابل توجهی بر نیروهای سنگ زنی ندارد. اما با تغییر سیال برشی در روان کاری کمینه از آب خالص به آب صابون، پارافین و یا روغن سویا، نیروهای سنگ زنی به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. حدی که بسیار نزدیک به روان کاری غوطه وری با آب صابون است. دلیل این موضوع این است که با افزایش لزجت سیال برشی، خواص روان کاری بهتری دیده می شود اما افزایش بیش از حد روان کاری (استفاده از روان کار با لزجت بسیار بالا) می تواند منجر به افزایش نیروهای سنگ زنی و کاهش بازدهی فرآیند شود [۱۲].

قابل توجه است که روغن سویا به عنوان سیال برشی روان کاری کمینه استفاده می شود، نیروهای سنگ زنی کمتر از حالت روان کاری غوطه وری با آب صابون است. به تعبیری، روان کاری کمینه با روغن سویا در فرآیند سنگ زنی از نظر نیروهای سنگ زنی، نه تنها بهتر از روان کاری سنتی با آب صابون عمل می کند، بلکه از نظر مصرف سیال برشی، از آن نیز بسیار به صرفه تر است. یعنی کاهش هزینه روان کاری و افزایش عمر ابزار هم زمان حاصل می شوند که تضمین کننده بازگشت هزینه ی راه اندازی تجهیزات روان کاری کمینه در کوتاه مدت، حتی برای کارگاه های کوچک است.



شکل ۲ نیروی مماسی سنگ زنی در شرایط مختلف روان کاری، بدون حضور و با حضور ارتعاشات فراصوت



شکل ۳ نیروی عمودی سنگ زنی در شرایط مختلف روان کاری، بدون حضور و با حضور ارتعاشات فراصوت

۳-۲- سنگ زنی در حضور ارتعاشات فراصوت

با توجه به شکل های ۲ و ۳ دیده می شود که حضور ارتعاشات فراصوت به تنهایی باعث کاهش ۲۱ درصدی نیروی مماسی و کاهش ۳۷ درصدی نیروی عمودی می شود که حاکی از تأثیر به سزای این روش در کاهش نیروهای سنگ زنی است. تأثیر حضور ارتعاشات فراصوت افقی بیش تر در کاهش نیروی عمودی سنگ زنی مشهود است تا نیروی مماسی سنگ زنی [۱۳].

در حضور ارتعاشات فراصوت، برای کاهش نیروهای سنگ زنی، نوع روان کاری اهمیتی بیش تر از نوع روان کار دارد. بدین صورت که، در حالت عدم حضور ارتعاشات فراصوت، درصد کاهش نیروها تحت روان کاری کمینه با آب صابون (۳۵٪) برای نیروی مماسی و ۱۸٪ برای نیروی عمودی) اختلاف چندانی با غوطه وری با آب صابون (۴۰٪ برای نیروی مماسی و ۲۲٪ برای نیروی عمودی) ندارد، ولی در حضور ارتعاشات فراصوت، درصد کاهش نیروها تحت روان کاری کمینه با آب صابون (۲۶٪ برای نیروی مماسی و ۱۷٪ برای نیروی عمودی) نسبت به حالت غوطه وری با آب صابون (۳۷٪ برای نیروی مماسی و ۳۰٪ برای نیروی عمودی) اختلاف قابل توجه تری دارد.

به تعبیری، در حالت عدم حضور ارتعاشات فراصوت، غوطه وری نیروها را تنها ۵٪ بیش تر روان کاری کمینه کاهش می دهد ولی در حضور ارتعاشات فراصوت این عدد به ۱۲٪ می رسد. این در حالی است که در حضور ارتعاشات فراصوت اختلاف چشم گیری بین کاهش نیروهای ناشی از روان کاری کمینه با آب صابون، پارافین و روغن سویا، دیده نمی شود.

استفاده ی هم زمان از دو روش روان کاری کمینه و سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت با بهترین شرایط روان کاری (استفاده از پارافین به عنوان سیال برشی)، کاهش ۴۵ درصدی نیروی مماسی و کاهش ۴۸ درصدی نیروی عمودی سنگ زنی را به دنبال دارد. که عملاً باعث کاهش ۴۷ درصدی کل نیروی سنگ زنی می شود. به تعبیری، نیروهای سنگ زنی تقریباً به نصف کاهش می یابند. که حاکی از کارایی استفاده ی هم زمان از دو روش سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت و روان کاری کمینه است.

۳-۲-۱- عدم حضور ارتعاشات فراصوت

در این حالت، روان کاری کمینه با آب خالص تأثیر قابل توجهی بر نسبت نیروها ندارد، زیرا آب خالص در صنعت بیش تر به عنوان یک خنک کار شناخته می شود نه یک روان کار. روان کاری با آب صابون چه در حالت غوطه وری و چه در حالت روان کاری کمینه، نتایج مشابهی از نظر نسبت نیروها دارد. روان کاری کمینه با روغن های روان کار نیز، نتایج بسیار مشابهی را در بر دارد (کاهش نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی از ۰/۴۴ به حدود ۰/۳۴).

۳-۲-۲- حضور ارتعاشات فراصوت

حضور ارتعاشات فراصوت به تنهایی باعث افزایش نسبت نیروها می شود که از نظر ضریب اصطکاک نامطلوب است و می تواند به دلیل تولید حرارت زیاد، بر کیفیت سطح سنگ خورده تأثیر نامطلوب داشته باشد. اما کاهش زیاد نیروی عمودی، به دلیل افزایش تعداد دانه های فعال است که نیروی لازم برای دستیابی به عمق براده ای مشخص را کاهش می دهد و این موضوع می تواند با کاهش انرژی کل مصرف شده به افزایش کیفیت سطح سنگ خورده منجر شود [۱۵]. در این حالت برای کاهش ضریب اصطکاک، می توان از روان کاری استفاده کرد که بهترین نتیجه را روغن های روان کار (پارافین و روغن سویا) دارند. به گونه ای که روان کاری کمینه با روغن های روان کار، می تواند افزایش نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی (اصطکاک) در اثر حضور ارتعاشات فراصوت، را جبران کند.

۴- خلاصه ی نتایج

در سنگ زنی سنتی^۱، روان کاری تأثیر به سزایی در کاهش نیروی مماسی و نیروی عمودی دارد. در این حالت روان کاری کمینه با روغن سویا با کاهش ضریب اصطکاک، باعث کاهش نیروهای سنگ زنی می شود. به گونه ای که از نظر مقدار کاهش نیروها و ضریب اصطکاک قابل رقابت با روان کاری سنتی با روغن حل شونده در آب است، در حالی که از نظر هزینه ها بسیار به صرفه تر است.

سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت در مقایسه با سنگ زنی سنتی، نیروهای بسیار کمتری را دارد که از نظر عمر ابزار، گرمای تولید شده و تأثیرات سوء حرارتی بر سطح سنگ خورده بسیار مناسب است ولی ایجاد اصطکاک بیش تری بین دانه های سنگ و سطح قطعه کار می نماید.

استفاده از روان کاری کمینه حین سنگ زنی در حضور ارتعاشات فراصوت، باعث کاهش هر چه بیش تر نیروهای سنگ زنی می شود و حتا با انتخاب سیال برشی مناسب، می توان افزایش اصطکاک ناشی از حضور ارتعاشات فراصوت را جبران کرد.

بدین ترتیب استفاده ی هم زمان از دو روش سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت و روان کاری کمینه باعث کاهش مؤثر نیروهای سنگ زنی، افزایش قابل توجه بازدهی فرآیند سنگ زنی و کاهش هزینه های تولید می شود.

۵- فهرست علائم

μ	ضریب اصطکاک
F_t	نیروی مماسی سنگ زنی (N)
F_n	نیروی عمودی سنگ زنی (N)
u	انرژی مخصوص سنگ زنی (J/m ³)
P	توان سنگ زنی (J/s)

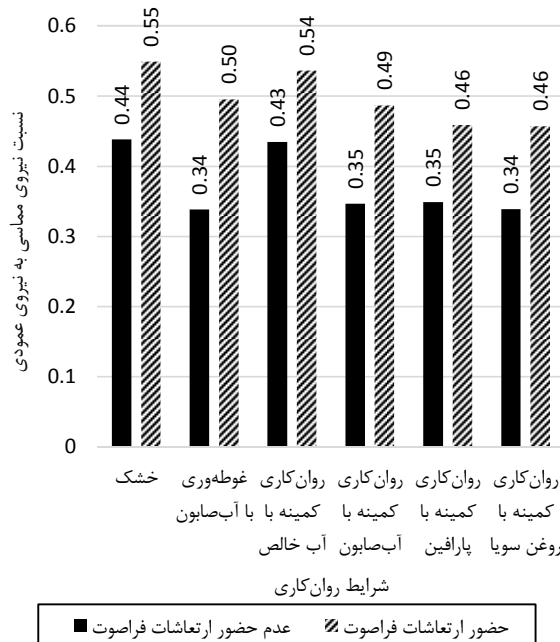
اگر بخواهیم سهم هر یک از دو روش فوق را به صورت جداگانه در کاهش نیروهای سنگ زنی بررسی کنیم، متوجه خواهیم شد که در مورد کاهش نیروی مماسی، سهم حضور ارتعاشات فراصوت (۰/۲۱) و روان کاری کمینه (۰/۲۴) تقریباً برابر است اما در مورد کاهش نیروی عمودی، سهم حضور ارتعاشات فراصوت (۰/۳۷) بیش از سه برابر سهم روان کاری کمینه (۰/۱۱) است. که با این حقیقت که حضور ارتعاشات فراصوت از خود تأثیر بیش تری در کاهش نیروی عمودی نشان می دهد تا نیروی مماسی، هم خوانی کامل دارد. دلیل آن که سهم حضور ارتعاشات فراصوت در کاهش نیروی عمودی بسیار بیش تر از سهم آن در کاهش نیروی مماسی است، را باید در نسبت نیروها جستجو کرد.

۳-۲-۳- نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی

در شکل ۴ نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی سنگ زنی در شرایط مختلف روان کاری بدون حضور ارتعاشات فراصوت و با حضور ارتعاشات فراصوت دیده می شود.

نسبت نیروها پارامتری است که معیاری از وضعیت سایشی و ضریب اصطکاک است و برای فرآیند سنگ زنی معمولاً از ۰/۲ تا ۰/۷ تغییر می کند [۱۴]:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$



شکل ۴ نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی در شرایط مختلف روان کاری، بدون حضور و با حضور ارتعاشات فراصوت

از طرفی می دانیم که رابطه ی (۲) عنوان یک رابطه ی متداول برای محاسبه ی انرژی مخصوص سنگ زنی مطرح است:

$$u = \frac{P}{Q_m} = \frac{V_s F_t}{v_w w d} \quad (2)$$

بدین ترتیب با مقایسه ی روابط (۱) و (۲) متوجه می شویم که با افزایش نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی، می توان انتظار داشت که به دلیل افزایش ضریب اصطکاک، انرژی مخصوص سنگ زنی نیز افزایش یافته که باعث کاهش بازدهی فرآیند سنگ زنی می شود [۱۴].

Q_m حجم براده‌ی برداشته شده در واحد زمان (m^3/s)

V_s سرعت محیطی چرخ سنگ (m/s)

v_w سرعت پیشروی قطعه کار (m/s)

w عرض ناحیه‌ی سنگ زنی (m)

d عمق برش (m)

۶- مراجع

- [1] M.P. Grover, *Fundamentals of modern manufacturing materials, processes, and systems*, Fourth Edition, pp. 604-621, New York: John Wiley, 2010.
- [2] D. Bhaduri, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, D. Novovic, P. Harden, S. Bohr, D. Martin, A study on Ultrasonic Assisted Creep Feed Grinding of Nickel Based Superalloys, *Procedia CIRP*, Vol. 1, pp. 376-381, 2012.
- [3] Z. Liang, X. Wang, Y. Wu, L. Xie, Z. Liu, W. Zhao, An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of monocrystal sapphire, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212 (4), pp. 868-876, 2012.
- [4] J. Akbari, H. Borzui, M.H. Mamduhi, Using Ultrasonic Vibration for Increasing the Performance of Grinding Process of Fine Ceramics, *The XVIIth Processing and Fabrication of Advanced Materials International Symposium (PFAM17)*, Delhi, India, 2008.
- [5] S.A. Lawal, I.A. Choudhury, Y. Nukman, A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 41, pp. 210-221, 2013.
- [6] E. Uhlmann, C. Sammler, Influence of coolant conditions in ultrasonic assisted grinding of high performance ceramics, *Production Engineering*, Vol. 4 (6), pp. 581-587, 2010.
- [7] M. Hadad, B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 54, pp. 332-343, 2013.
- [8] D. Fratila, C. Caizar, Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19 (6-7), pp. 640-645, 2011.
- [9] T. Tawakoli, M. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19 (17-18), pp. 2088-2099, 2011.
- [10] M. Sarikaya, A. Güllü, Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 65, pp. 604-616, 2014.
- [11] M. Ghahramani Nik, M.R. Movahhedy, J. Akbari, Ultrasonic-assisted grinding of Ti6Al4V alloy, *Procedia CIRP*, Vol. 1, pp. 353-358, 2012.
- [12] E. Brinksmeier, C. Heinzel, M. Wittmann, Friction, cooling and lubrication in grinding, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 48 (2), pp. 581-598, 1999.
- [13] T. Tawakoli, B. Azarhoushang, Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48 (14), pp. 1585-1591, 2008.
- [14] P. Kalita, A.P. Malshe, S. A. Kumar, V.G. Yoganath, T. Gurumurthy, Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14(2), pp. 160-166, 2012.
- [15] A. Modgil, *Effects of high speed machining on surface topography of titanium Alloy (Ti-2Al-2V)*, M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, University of Florida, 2003.