



مروری بر فرزکاری با روش حداقل مقدار روانکاری با استفاده از روغن‌های گیاهی

مجتبی کلاهدوزان^{۱*}، مسعود شیری ورنامخواستی^{۱،۲}، ستار محمدی اسفرجانی^{۱،۲}

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات فناوری های نوین ساخت و تولید، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

kolahdoozan@pmc.iaun.ac.ir

چکیده:

در دهه‌های اخیر مطالعات فراوانی بر روی ابداع روش‌های جدید ماشین‌کاری که سازگار با محیط زیست باشد، انجام گرفته است. روش حداقل مقدار روانکاری یکی از این روش‌های جدید است. در این روش حجم بسیار کمی از روان کار با هوای فشرده ترکیب شده و مخلوط حاصل را به عنوان سیال روان کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش روغن‌ها باید از لحاظ وزنی سبکتر و از لحاظ گران روی پایین‌تر باشند تا پاشش پودری مناسب و یکنواختی را به دلیل ترکیب با هوای فشرده به محل ماشین‌کاری ارسال کنند. از این رو روغن‌های گیاهی با نقطه دود مناسب به دلیل ارزان و در دسترس بودن می‌توانند کارایی خوبی به دلیل سبک بودن و گران‌روی پایین نشان دهند. روغن‌های گیاهی می‌توانند روانکاری را به خوبی انجام دهند و از لحاظ زیست محیطی مناسب‌تر هستند ولی نسبت به سیال برشی از خنک‌کاری کمتری برخوردار هستند. با انتخاب صحیح ابزار برشی می‌توان این نقض را بر طرف کرد. در این مقاله برای اولین بار روش حداقل مقدار روانکاری با استفاده از روغن‌های گیاهی مرور می‌شود. مرور پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه نشان داد که در روش حداقل مقدار روانکاری مناسب‌ترین شرایط ماشین‌کاری روش نیمه خشک است. امید است که محتوا این تحقیق توسط صنعتگران و محققان به منظور کمک به حفظ محیط زیست مورد توجه قرار گیرد.

کلید واژگان: فرزکاری، روانکارهای صنعتی، روش حداقل مقدار روانکاری، روغن گیاهی، نانولوله کربنی

A review of milling with the minimum quantity lubrication using vegetable oils

Mojtaba Kolahdoozan^{1,2, †}, Masoud Shiri Varnamkhasti^{1,2}, Sattar Mohammadi Esfarjani^{1,2}

1- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Modern Manufacturing Technologies Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

†Corresponding Author Email: kolahdoozan@pmc.iaun.ac.ir

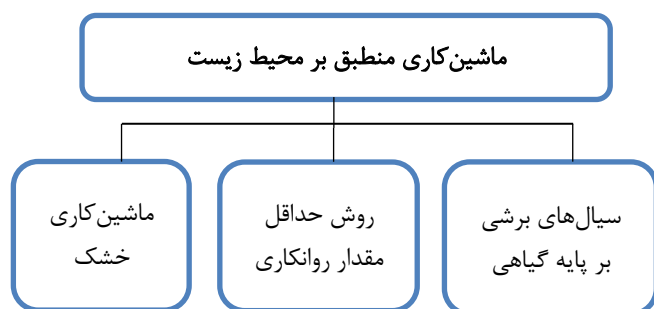
Abstract:

In recent decades, there has been a lot of research on the development of new, environmentally friendly machining techniques. The Minimum Quantity Lubrication (MQL) method is one of these new methods. In this method, a very small amount of lubricant is combined with compressed air. The resulting mixture is used as a lubricant fluid. In this method, the oils should be weighed less and low viscosity, in order to spray the powder properly and uniformly due to the combination of compressed air to the machining site. So, vegetable oils with a suitable smoke point, due to their low cost and availability, can show good performance because they have a little weight and low viscosity. Vegetable oils can perform lubrication well and are more environmentally friendly but have less cooling than the shear fluids. This violation can be overcome by correct selection of shear tools. In this paper, MQL method using vegetable oils is reviewed. A review of the researches carried out in this field showed that the MQL method is the most suitable machining condition in a semi-arid method. It is hoped that the content of this research to be considered by Industrialists and researchers in order to helping to maintain the environment.

Keywords: *Milling, Industrial Lubricants, Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method, Vegetable Oil, Carbon Nanotubes*

روش‌های جدید که در آنها سیال برشی با مقدار اندک به کار می‌رود مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت محققین روشی را ارائه کردند که در آن حجم بسیار کمی از روانکار با هوای فشرده ترکیب می‌شد و مخلوط حاصل را به عنوان سیال روان کننده در اندازه ذرات میکرونی مورد استفاده قرار دادند که این روش را روش حداقل مقدار روانکاری^۲ نامیدند.

در عملیات ماشین‌کاری، تولید با بازدهی مطلوب و تولید قطعات با کیفیت بالا مورد نظر است. عملیات ماشین‌کاری در مرحله پرداخت (با تلفیق چندین مرحله عملیات به یک فرایند یکپارچه) می‌تواند قطعات با دقت بالاتر در عین کاهش قیمت مونتاژ و فیکسچرها را در پی داشته باشد. برای ارتقای بازدهی ماشین‌کاری و دقت آن بطور همزمان تاکنون تحقیقات زیادی بر روی فرآیند ماشین‌کاری با سرعت بالا صورت گرفته است [۱]. در فرآیندهای ماشین‌کاری یکی از پارامترهای اساسی، استفاده از سیال‌های برشی و روانکارها می‌باشد که می‌تواند باعث بهبود پارامترهای خروجی در ماشین‌کاری از قبیل کیفیت سطح، نیرو و گشتاور ماشین‌کاری و عمر ابزار شود که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های ماشین‌کاری می‌گردد. سیال‌های برشی و روانکارهای صنعتی با روانکاری و خنک‌کاری مناسب می‌توانند موجب کاهش و دفع موثر حرارت تولیدی از ناحیه ماشین‌کاری شوند که افزایش عمر ابزار را در پی خواهد داشت. با وجود مزایای ذکر شده در استفاده از سیال‌های برشی و روانکارهای صنعتی، امروزه استفاده از این سیالات به علت اثرات نامطلوب زیادی که بر روی سلامتی انسان و محیط زیست دارند مورد تردید قرار گرفته است. همچنین استفاده نادرست از آنها با توجه به اینکه در اغلب موارد بازیافت‌شان مشکل و هزینه‌بر است، مشکلات زیست محیطی و بیماری‌های پوستی و تنفسی ایجاد می‌کند [۲]. از این رو بهداشت جهانی تا سال ۲۰۲۰ استفاده از سیال‌های برشی و روانکارهای صنعتی پایه هیدروکربن را ممنوع کرده است زیرا استفاده از هر لیتر روغن‌های هیدروکربنی و سیال‌های برشی زمانی که با آب ترکیب می‌شوند تقریباً ۴۰ لیتر آب را در طبیعت نابود می‌کند. از این رو باید بهترین روش روانکاری و خنک‌کاری را هم از لحاظ زیست محیطی و هم از لحاظ هزینه‌ای انتخاب کرد [۲]. از لحاظ زیست محیطی، هزینه‌ای و کارایی مطابق شکل (۱) سیال‌های برشی بر پایه گیاهی، روش حداقل مقدار روانکاری و ماشین‌کاری خشک دارای اهمیت می‌باشند.



شکل (۱): ماشین‌کاری از لحاظ زیست محیطی [۲]

این روش برای اولین بار در دهه ۹۰ میلادی در ماشین‌کاری مورد استفاده قرار گرفت که کاهش مصرف سیال روان کننده، کاهش هزینه تولید، افزایش عمر ابزار و کاهش زمان مورد نیاز برای تمیزکاری ماشین ابزار را به همراه داشت [۳]. موضوع دیگر مطرح شده در شکل (۱) استفاده از روغن‌های گیاهی است که به عنوان سیال برشی با آب ترکیب می‌شوند. دلایلی که استفاده از این روش تا حد زیادی مانند عدم روانکاری مناسب، ایجاد شوک حرارتی به ابزار، به وجود آمدن میکروتورک در ابزار که منجر به کاهش عمر ابزار می‌شود، ترکیب سیال برشی با آب و از بین بردن آب، بخارات سمی ایجاد شده که در بعضی موارد آسم صنعتی در اثر استفاده گزارش شده است، گندیدگی سیال برشی بر اثر ماندن در محفظه دستگاه منسوخ شد [۳]. بنابراین استفاده از روش حداقل مقدار روانکاری که جز روش‌های نیمه خشک می‌باشد گسترش پیدا کرده و هر روز تحقیقات بر روی این روش ادامه دارد تا بهترین حالت برای این روش از لحاظ زیست محیطی، مصرف بهینه، روانکاری با ایجاد فیلم روغن مناسب و خنک‌کاری بهتر در ماشین‌کاری‌ها حاصل گردد. در روش حداقل مقدار روانکاری سعی بر این است تا از روغن‌های گیاهی به دلیل خواص همچون ظرفیت گرمایی مناسب، قیمت ارزان و در دسترس بودن، گران‌روی^۳ پایین برای شستشوی مناسب و معلق ماندن ذرات روغن برای استفاده بهتر در روش حداقل روانکاری، نقطه دود^۴ نسبتاً بالا، نداشتن خوردگی و مناسب از لحاظ زیست محیطی استفاده گردد [۳]. یکی از نقاط

در دهه‌های اخیر، ماشین‌کاری بدون استفاده از سیال برشی به دلیل نداشتن مشکلات ناشی از سیال روان کننده مورد توجه قرار گرفت (ماشین‌کاری خشک^۱) که با بهبود پوشش و جنس ابزارهای ماشین‌کاری همراه بود اما به دلیل این که از لحاظ اقتصادی هزینه‌های تولید را افزایش می‌داد مورد قبول قرار نگرفت. از طرفی روش‌های قدیمی (روش‌های تر) هم بسیار هزینه‌بر و آلوده‌کننده بودند. بنابراین تحقیقاتی بر روی ابداع

²- Minimum Quantity Lubrication (MQL)

³- Viscosity

⁴-Flash Point

¹-Dry Machining

۷۱۸^۵ در کارخانه میتسویشی ژاپن مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق سه نوع ابزار کاربردی متفاوت با دبی خروجی روغن ۷ میلی‌لیتر بر ساعت به روش حداقل مقدار روانکاری داخلی استفاده و برتری هر یک از ابزارها در حالت‌های متفاوت شرایط ماشین‌کاری به دست آورده شده است. آنها به این نتیجه دست یافته‌اند که استفاده از گاز آرگون به جای هوا در فرآیند خنک‌کاری روش حداقل مقدار روانکاری تأثیر بهتری نسبت به هوا بر روی عمر ابزار دارد [۷]. در سال ۲۰۰۷ توسط ده‌ار^۶ و همکارانش، پارامترهای موثر تراشکاری بر روی فولاد AISI 1040 توسط روش حداقل مقدار روانکاری و ماشین‌کاری با روش تر انجام و مقایسه شده است که عمر ابزار مناسب‌تری را در روش حداقل مقدار روانکاری به دست آورده شده است. آنها دریافتند که دما در روش ماشین‌کاری نزدیک خشک^۷ در مقایسه با روش مرطوب بین ۱۰٪-۵٪ کاهش و در نتیجه ماندگاری و پرداخت سطح دستگاه حدود ۲۰٪-۱۵٪ بهبود پیدا می‌کند. نکته جالب اینکه آنها دریافتند در هر دو روش خشک و مرطوب عمر دستگاه یکسان است [۸]. در سال ۲۰۱۱ توسط علی و همکارانش به بررسی تراشکاری فولاد با کربن متوسط با ابزار بدون پوشش کاربردی روش حداقل مقدار روانکاری پرداخته و با روش ماشینکاری خشک مقایسه شده است. در این تحقیق یک دبی مشخص ۱۵۰ میلی‌لیتر بر ساعت در نظر گرفته شده است که نسبت به ماشینکاری خشک، سایش نوک ابزار کمتر و دمای ناحیه ماشینکاری کمتر بود [۹]. روش حداقل مقدار روانکاری یکی از روش‌های نیمه خشک می‌باشد که سیال خنک‌کننده به صورت دوره‌ای عمل خنک‌کنندگی بین ابزار و قطعه‌کار را انجام می‌دهد. روانکاری در این روش توسط هوای فشرده با فشار معین به همراه روغن با دبی معین است که بر روی قطعه‌کار پاشش می‌شود. دستگاه، روغن را به صورت دوره‌ای به ابزار منتقل می‌کند که تا حد زیادی از شوک‌های حرارتی که به ابزار وارد می‌شود جلوگیری و عمر ابزار را افزایش می‌دهد. به طور کلی روش حداقل مقدار روانکاری یک روش با درجه خنک‌کنندگی متوسط به حساب می‌آید.

این روش به عنوان جایگزینی برای خنک‌کاری معمولی و خنک‌کاری داخلی پر فشار به منظور کاهش مصرف روانکار با روانکاری مناسب توسعه داده شد [۴ و ۱۰]. شکل (۲) استفاده از روش حداقل مقدار روانکاری و غبار روغن ایجاد شده در اطراف ابزار را نشان می‌دهد [۱۱].

ضعف استفاده از روش حداقل مقدار روانکاری با روغن گیاهی، عدم خنک‌کاری در حد سیال‌های برشی می‌باشد که امروزه این نقص را با استفاده از افزودن ذرات و پودرها به روغن بر طرف می‌سازند. عملکرد فوق‌العاده بالای خنک‌کنندگی یکی از نیازهای مهم برای بسیاری از صنایع می‌باشد. با پیشرفت فناوری، ساختارهای نانویی مواد شکل گرفتند تا نانو پودرها با سوسپانسیون شدن در مایعات مانند آب، اتیلن گلیکول، گلیسرین و روغن برای اهداف خنک‌کنندگی مورد استفاده قرار گیرند. نانو پودرها به دلیل ریز بودن و تعداد ذره بیشتر که در مایع پخش می‌شود از اهمیت خاصی برخوردار هستند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سیالات نانو در مقایسه با سیالات پایه از انتقال حرارت بالاتری برخوردار هستند [۴]. بنابراین می‌توان برای تقویت روغن‌های گیاهی از لحاظ انتقال حرارت به آنها ذرات نانو را اضافه کرد. در ادامه این مقاله، ابتدا روش حداقل مقدار روانکاری معرفی می‌گردد. سپس تاریخچه و عملکرد روغن گیاهی مورد استفاده در روش حداقل مقدار روانکاری مرور می‌گردد.

۲- معرفی روش حداقل مقدار روانکاری

روانکاری با استفاده از روش حداقل مقدار روانکاری از سال ۲۰۰۳ با توجه به کارایی بالای آن و برطرف شدن نواقص مربوط به آن مورد بررسی جدی قرار گرفت. سیستم‌های روانکاری روش حداقل مقدار روانکاری انجام شده عموماً مربوط به بهینه‌سازی و انتخاب ابزارها و مایعات خنک‌کار مناسب برای این سیستم‌ها بوده و بهینه‌سازی این سیستم‌ها برای مصرف کمتر روغن، عمر بهتر ابزار، روش‌های جدید، ترکیب روش‌ها و همچنین افزایش کیفیت ماشینکاری همچنان ادامه دارد [۵]. در سال ۲۰۰۶ در یک پژوهش، شیارزنی با سرعت دوران بالای اسپیندل دستگاه تراش و مقایسه سه روش خنک‌کاری خشک و نیمه خشک (توسط روش حداقل مقدار روانکاری) و تر بر روی فولاد ۰/۴۵ درصد کربن را مورد بررسی قرار گرفته است تا کارایی و برتری روش حداقل مقدار روانکاری نسبت به دو روش دیگر اثبات شود. در بررسی آنها مشخص شده است خنک‌کاری با روش حداقل مقدار روانکاری موجب می‌گردد تا خوردگی ابزار نسبت به سایر روش‌ها کمتر باشد، بنابراین عمر ابزار بیشتر می‌باشد. همچنین آنها دریافتند که با افزایش فشار هوا تا حد معینی، خوردگی ابزار کمتر می‌شود [۶]. در سال ۲۰۰۷، شرایط ماشینکاری با سرعت دوران بالای اسپیندل دستگاه تراش توسط روش خنک‌کاری حداقل مقدار روانکاری در مرحله پرداخت توسط ابزارهای مختلف برشی بر روی قطعه‌کار اینکول

⁵-Inconel 718

⁶-N.R. Dhar

⁷- Near Dry Machining

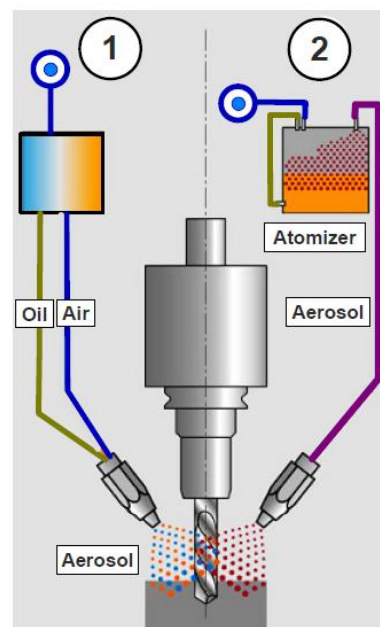
ترکیب شده و به موضع پاشیده می‌شود. این اندازه فاصله مناسب و توسط شرکت آکو-لوب^{۱۱} آلمان اولین سازنده تجاری این دستگاه مورد تایید می‌باشد [۱۲]. مزایا و معایب یک دستگاه روش حداقل مقدار روانکاری خارجی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل (۲): استفاده از روش حداقل مقدار روانکاری و غبار روغن ایجاد شده در اطراف ابزار [۱۱]

۲-۱- دسته‌بندی روش حداقل مقدار روانکاری

روش حداقل مقدار روانکاری را می‌توان مطابق شکل (۳) به دو روش داخلی^۸ و خارجی^۹ تقسیم بندی کرد [۱۱]. که به تفصیل در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل (۳): روش‌های حداقل مقدار روانکاری ۱- خارجی و ۲- داخلی [۱۱]

۲-۱-۱- روش حداقل مقدار روانکاری خارجی

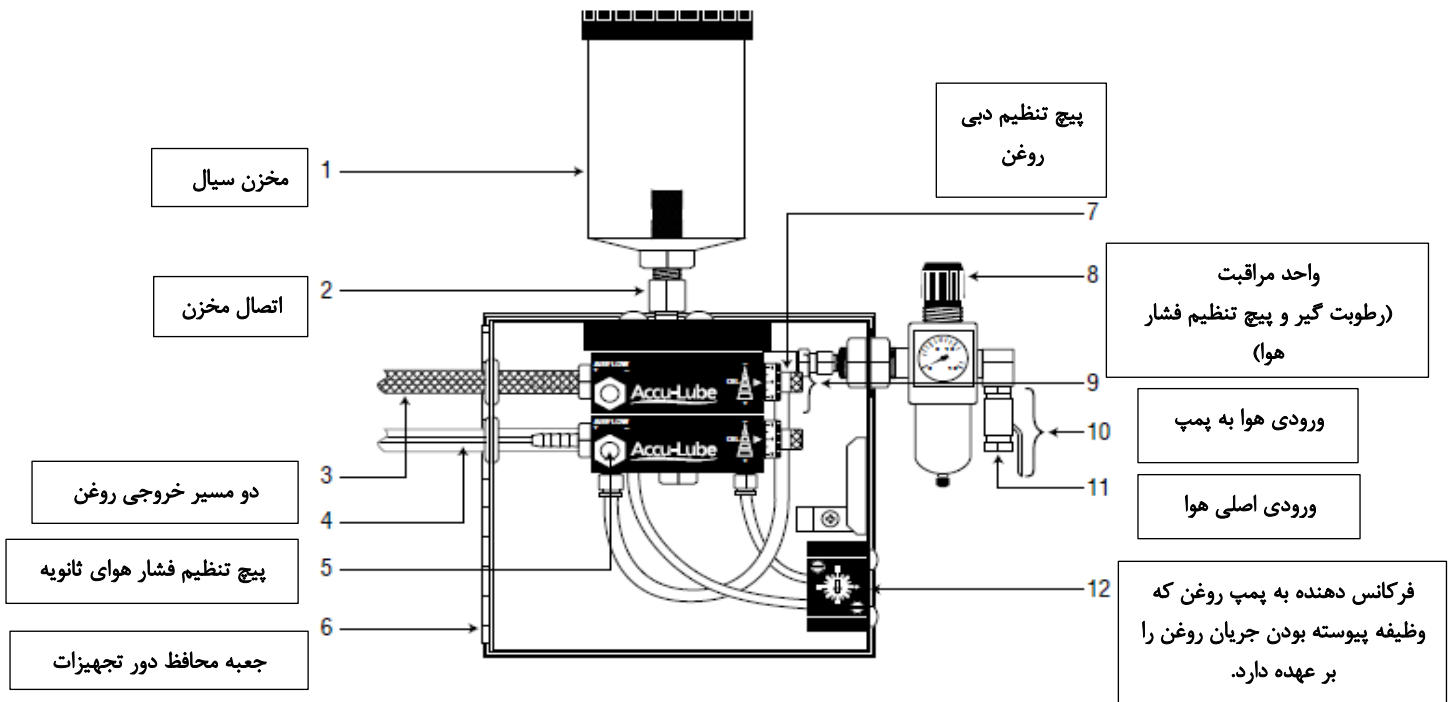
اولین دسته بندی، روش حداقل مقدار روانکاری خارجی می‌باشد که روغن در سر نازل توسط لوله موئین و میکروپمپ رها و با هوا ترکیب و از آنجا به صورت پاشش^{۱۰} خارج می‌گردد. یک دستگاه روش حداقل مقدار روانکاری خارجی در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۵) نازل و لوله موئین و محل قرار گیری آن نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است یک لوله موئین از وسط نازل رد شده که روغن را در حدود ۲۵ میلیمتری از سر نازل رها و در آنجا با هوا

⁸ -Internal MQL

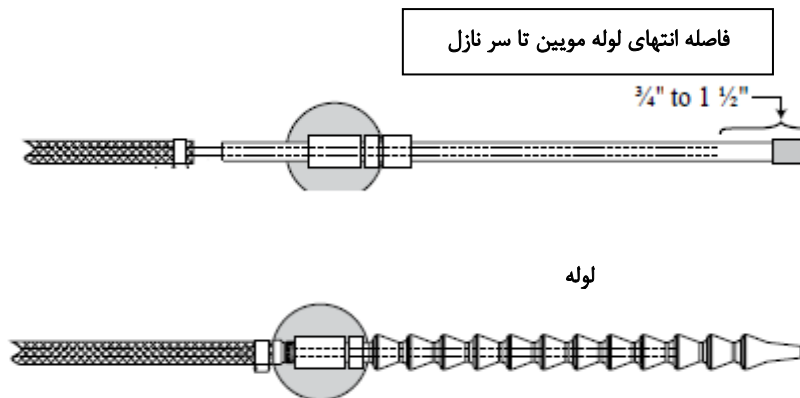
⁹ -External MQL

¹⁰ - Spray

¹¹ -Accu-Lube



شکل (۴): اجزای دستگاه روش حداقل مقدار روانکاری خارجی [۱۲]



شکل (۵): نازل دستگاه روش حداقل مقدار روانکاری [۱۲]

جدول (۵): مزایا و معایب یک دستگاه روش حداقل مقدار روانکاری خارجی

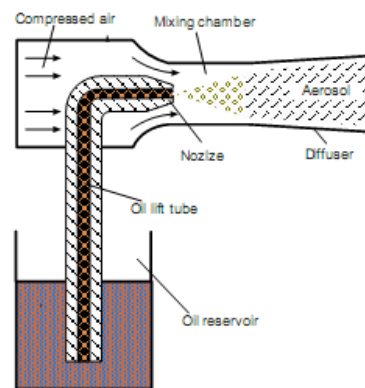
معایب	مزایا
<p>با مته^{۱۴} و ابزارهای سوراخ کردن^{۱۵} به خوبی کار نمی کند چون مخلوط هوا روغن نمی تواند به درون سوراخ نفوذ کند.</p> <p>برای نسبت عمق به قطر کمتر از ۳ ($L/D < 3$) استفاده می شود [۱۳].</p>	<p>۱- نصب کردن^{۱۲} ساده و ارزان دستگاه های موجود.</p> <p>۲- بالا بردن کارایی ابزار برش مورد استفاده.</p> <p>۳- استفاده، نگهداری و آموزش آسان توسط متصدی^{۱۳}.</p> <p>۴- جایجایی آسان تجهیزات از دستگاهی به دستگاه دیگر.</p> <p>۵- نعطاف نسبی به دلیل قابلیت تنظیم موقعیت نازل به راحتی توسط متصدی.</p> <p>۶- استانداردهای متنوع و طراحی های خاص نازل در روش حداقل مقدار روانکاری خارجی وجود دارد که متناسب با رایج ترین عملیات ماشینکاری و مدل های مختلف ابزار است.</p> <p>۶- فشار و دبی خروجی ترکیب روغن و هوا بیشتر از روش داخلی می باشد [۱۳].</p>

12- Assemble
13- Operator
14- Twist Drill
15- Boring

۲-۱-۲- روش حداقل مقدار روانکاری داخلی

در روش داخلی مخلوط هوا و روغن در داخل محفظه دستگاه ترکیب و از طریق ابزار مشابه روش روانکاری پرفشار تأمین می‌شود. این روش ترکیب از طریق تجزیه کردن^{۱۶} انجام می‌پذیرد. در تجزیه کردن از انرژی گاز فشرده معمولاً هوا برای پودر کردن روغن استفاده می‌شود. یک فرآیند تجزیه ساده در شکل (۶) نشان داده شده است [۱۱]. کاربراتور و بطری‌های پاشش چند نمونه از تجزیه کننده‌ها هستند. هوا از طریق محفظه اختلاط، روغن را به پاشش با ذرات میکرونی تبدیل می‌کند.

شکل (۶): مدل یک اتمیزر ساده [۱۱]



۲-۲- پارامترهای قابل تنظیم در روش حداقل مقدار

روانکاری

دبی خروجی روغن، فشار هوای تنظیمی و فاصله و زاویه پاشش از مهمترین پارامترهای هستند که در تنظیمات روش حداقل مقدار روانکاری تأثیر گذار بوده و قبل از ماشین کاری باید تنظیم شوند [۱۴-۱۶]. در سال ۲۰۰۸ توسط گایتند^{۱۷} و همکارانش، پارامترهای مؤثر تراشکاری بر روی برنج توسط روش خنک کاری حداقل مقدار روانکاری مورد بررسی قرار گرفت. آنها برای حداقل کردن نیروهای برشی و رسیدن به صافی سطح بهتر از روش خنک کاری حداقل مقدار روانکاری خارجی استفاده و به صافی سطح بهتری نسبت به حالت خنک کاری تر دست پیدا کردند. برای ماشینکاری برنج در حالت استفاده از روش خنک کاری حداقل مقدار روانکاری مقادیر سرعت برشی ۲۰۰ (mm/min)، سرعت پیشروی ۰/۰۵ (mm/rev) و سرعت پاشش روانکار (دبی خروجی) ۲۰۰ (ml/h) پیشنهاد شد که حالت‌های بهینه بوده است [۱۷]. در یک تحقیق در سال ۲۰۰۹، روش خنک کاری حداقل مقدار روانکاری بر روی قطعه کار اینکول ۷۱۸ به وسیله تراش در

مرحله پرداخت مورد بررسی قرار گرفته است. براساس تحقیق آنها کاهش فاصله میان خروجی نازل پاشش خنک کار تا نوک ابزار برش که از متد پوششی استفاده نموده، فشار و سرعت هوای فشرده را افزایش داده است، این امر باعث افزایش سرعت توزیع ذرات روغن به نوک ابزار برش شده است. از میان سه نمونه نازل، نمونه پوششی که برای پاشش شیب‌دار مورد استفاده قرار گرفته بیشترین میزان ارسال سرعت ذرات روغن را به نوک ابزار برش را دارا است. بررسی فاصله پرتاب ذرات روغن نشان داد که میزان فاصله‌ای که این ذرات در جریان هوا طی می‌کنند با مربع قطر آنها رابطه مستقیم دارد، در نتیجه ذرات بسیار کوچک روغن برای ماشینکاری به روش حداقل مقدار روانکاری مناسب‌تر نخواهد بود و در پایان ثابت شد که روانسازی سطح ابزار برش به وسیله روش پاشش شیب دار هم روانکاری و هم خنک‌کنندگی را به صورت چشم گیری افزایش داده است [۶].

دبی خروجی دستگاه روش حداقل مقدار روانکاری بر حسب میلی‌لیتر بر ساعت محاسبه و مهمترین پارامتر تنظیمی در روش حداقل مقدار روانکاری می‌باشد که مطابق شکل (۴) توسط پیچ تنظیم دبی به صورت دستی تنظیم می‌گردد. یکی دیگر از پارامترهای تأثیر گذار فشار هوای تنظیمی از طریق کمپرسور هوا است که بر حسب بار می‌باشد و در شکل (۴) توسط تنظیم کننده^{۱۸} فشار هوا تنظیم می‌گردد و در پودری شدن و اندازه ذرات مؤثر می‌باشد. فاصله و زاویه پاشش نازل نیز تأثیر گذار است که برای بدست آوردن مقدار مناسب آن و داشتن یک فیلم مناسب از روغن در محل ماشین کاری تعدادی آزمایش انجام می‌شود.

۳- ذرات نانو پودر به منظور اثر بخشی بر انتقال حرارت

بهتر روغن گیاهی

همان‌گونه که اشاره شد عملکرد فوق‌العاده بالای خنک‌کنندگی یکی از نیازهای مهم برای بسیاری از صنایع می‌باشد. با پیشرفت فناوری، ساختارهای نانویی مواد شکل گرفتند تا نانو پودرها با سوسپانسیون شدن در مایعات به وسیله آب، اتیلن گلیکول، گلیسرین و روغن برای اهداف خنک‌کنندگی مورد استفاده قرار گیرند. در سال ۲۰۱۱ در یک پژوهش رفتار نانو ذرات در روش حداقل مقدار روانکاری در فرآیند میکرو سوراخکاری مورد بررسی قرار گرفته است. براساس تحقیق آنها گشتاور ایجاد شده و نیروهای ماشینکاری با استفاده از روغن گیاهی و ذرات نانو تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و

¹⁶ -Atomizing

¹⁷ - V.N. Gaitonde

¹⁸ - Gauge

پودر را در مایع پخش کرد. تا گرانروی معینی با این دستگاه این کار را تا فرکانس ۴۰ کیلو هرتز می‌توان انجام داد. همچنین می‌توان با حمام فراصوت تا فرکانس بیش از ۴۰ کیلو هرتز ذرات نانو را در مایع پایه پخش کرد که در مورد گرانروی محدودیت کمتر از هورن فراصوت می‌باشد. در شکل (۸) نمایی از حمام اولتراسونیک نشان داده شده است.



شکل (۷): دستگاه فراصوت با هورن خارجی [۲۳]



شکل (۸): دستگاه حمام فراصوت [۲۳]

از نانو سیال به عنوان دفع حرارت از ناحیه ماشینکاری استفاده و مقدار حرارت طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$Q = hA\Delta T \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q مقدار حرارت، ΔT مقدار اختلاف دمایی، A مساحت ناحیه دفع حرارت و h ضریب هدایت گرمایی^{۲۲} می‌باشد که می‌توان با افزایش درصد حجمی ذرات نانو باعث افزایش مقدار h شد. براساس تحقیقات معمولاً با کاهش قطر ذرات نانو کارایی آنها در اثر بخشی به دفع حرارت بیشتر و بسته به شرایط تغییر می‌کند [۲۳]. تحقیقات پیشین نشان داده است که هنگامی که از نانو لوله برای انتقال نان سیال ها سبب می‌شود که به شدت انتقال حرارت افزایش یابد. به عنوان مثال می‌توان به تحقیقات تحقیقات هوپانگ و همکاران^{۲۳} اشاره کرد. تحقیقات آنها نشان داد که افزایش انتقال حرارت نانوسیال ها به واسطه انتقال حرارتی نانو ذرات و پایه فلزی به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، انتقال حرارتی نانوسیال های مبتنی بر آب با نانولوله کربنی چند ضلعی، نسبت به نانو ذرات دی اکسید سیلیسیم در همان فاز پایه، انتقال حرارت بیشتری دارند. در یک تحقیق دیگر توسط چو و همکاران^{۲۴}، افزایش

کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده افزایش یافته است [۱۸]. در همین سال در یک تحقیق دیگر، اثر نانوسیال اکسید آلومینیوم در روش حداقل مقدار روانکاری بر روی صافی سطح، سایش ابزار و دمای ماشینکاری در تراشکاری اینکونل ۶۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. در آن تحقیق سه روش خشک، روش حداقل مقدار روانکاری، روش حداقل مقدار روانکاری با ذرات نانو اکسید آلومینیوم^{۱۹} مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن تحقیق نشان داد که به ترتیب روش حداقل مقدار روانکاری با ذرات نانو اکسید آلومینیوم و روش خشک دارای بهترین عملکرد بود [۱۹]. در سال ۲۰۱۲ تحقیقی منتشر شد که براساس آن از نانو سیال برای خنک‌کاری در سنگ زنی استفاده شده است. آنها از نانو سیال MoS_2 در سیال برشی استفاده کرده‌اند که نسبت به حالت نیمه خشک و تر شرایط بهتری از لحاظ ماشینکاری ایجاد شد [۲۰]. در سال ۲۰۱۳ تحقیقی براساس روش تاگوچی بر روی صافی سطح در تراشکاری فولاد AISI 1050 مورد بررسی قرار گرفته است که بهترین حالت ماشینکاری در شرایط نیمه خشک و برای پاشش روغن ۱۲۰ میلی‌لیتر بر ساعت در عمق برش ۱/۲ میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دور و صافی سطح حدود ۰/۷۸ میکرومتر به دست آمد که بیش از پیش کارایی روش نیمه خشک را نشان می‌دهد [۲۱]. در سال ۲۰۱۵ در یک تحقیقی که بر روی صافی سطح در فرزکاری بر مبنای استفاده از نانو MoS_2 در روغن منتشر شده است که حالت خشک با دبی های مختلف روغن با پاشش توسط روش حداقل مقدار روانکاری با روغن معمولی و سپس روغن تقویت شده با ذرات نانو انجام شده بود که بهترین حالت مربوط به دبی ۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت به همراه نانو MoS_2 بوده است [۲۲].

نانو پودرها به دلیل ریز بودن و تعداد ذره بیشتر که در مایع پخش می‌شود از اهمیت خاصی برخوردار هستند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سیالات نانو در مقایسه با سیالات پایه انتقال حرارت بالاتری دارند. دو روش اساسی برای به دست آوردن سیالات نانو وجود دارد [۲۳]:

- ۱- تبخیر مستقیم و بخار ناشی از مواد در سیال پایه که برای نانو سیالات پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- ۲- پخش ذرات نانو که به وسیله روش‌های مختلف به دست آمده در مایع پایه، با روش‌هایی مانند موج اولتراسونیک در روش دوم که به وسیله موج فراصوت^{۲۰} انجام می‌پذیرد مطابق شکل (۷) می‌توان از طریق هورن فراصوت^{۲۱} در روغن،

21- Ultrasonic horn

22- Thermal Conductivity

23- Hwang et al

24- Choi et al

19- MQL+Nano- Al_2O_3

20- Ultrasonic

Fe	132	Water
	311	Ethylene glycol
Alxcuy		Water
		Ethylene glycol
Agxcuy		oil
Agxaly		Water
		Ethylene glycol
Carbon Nanotubes	3290	Water
	7780	Water
	17100	Antifreeze
	14300	Oil
Carbon Nanotubes	21	Water
	111	Oil
	3	Toluene
Graphite Diamond	1020	Oil
	3500	Ethylene glycol

^a k1, thermal conductivity of liquid; k2, thermal conductivity of solid

۴- نانو لوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی که از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه ای توخالی ساخته شده است در سال ۱۹۹۱ توسط سامیو ایجیما^{۳۰} از شرکت NEC ژاپن معرفی شد. خواص ویژه و منحصر بفرد آن از جمله مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف و همچنین طبیعت کربنی بودن نانو لوله ها (به خاطر این که کربن ماده ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده) جهت انجام فرآیندها (که نسبت به فلزات برای تولید ارزاتر می‌باشد) باعث شده که در دهه گذشته شاهد تحقیقات مهمی در کارایی و پرباری روش‌های رشد نانو لوله ها باشیم. کارهای نظری و عملی زیادی نیز بر روی ساختار اتمی و ساختارهای الکترونی نانو لوله متمرکز شده است که نمونه‌ای از ساختار نانو لوله کربن دو جداره در شکل (۹) مشاهده می‌شود [۲۴]. نانو لوله‌های کربنی به دو دسته تک جداره و چند جداره تقسیم می‌شوند. نانو لوله‌های کربنی تک جداره فقط از کربن و یک ساختار ساده (ورقه ای از شش ضلعی های منظم) تشکیل شده‌اند و دارای هزینه تولید بالاتری نسبت به چند جداره می‌باشند. نانو لوله‌های کربنی توسط سه روش تخلیه قوس، تابش لیزر و رسوب شیمیایی فاز بخار تولید می‌شوند. در جاهایی که بحث استحکام مواد مطرح باشد از تک جداره و در جاهایی که انتقال حرارت و خواص الکتریکی و قیمت پایین‌تر مورد نظر باشد از نانو لوله‌های کربنی چند

۱۵۰ درصدی انتقال حرارتی روغن پلی الفیل آلفا^{۲۵} با اضافه کردن نانو لوله های کربنی چند ضلعی^{۲۶} در ۱٪ حجم کسر گزارش شده است [۲۳]. از میان ذرات نانو، نانو لوله‌های کربنی^{۲۷} مطابق جدول (۲) دارای انتقال حرارت بیشتری نسبت به سایر ذرات می‌باشد. ترکیب آن‌ها در مشتقات نفتی و آنتی فریزها از بقیه مایعات از قبیل آب بیشتر است. کارایی مناسب- تر آن را از لحاظ انتقال حرارت نسبت به بقیه نانو پودرها را می‌توان مشاهده کرد. در "جدول ۲" ضرایب هدایت گرمایی نانو پودرهای مختلف در سیالات پایه نشان داده شده است. نانو سیال ها می‌توانند برای سرد کردن موتور اتومبیل و تجهیزات جوشکاری و خنک کردن گرمای وسایلی مثل لوله‌های ماکرو ویوها و دیوهای لیزر با قدرت بالا مورد استفاده قرار گیرند. در حفاری‌های عمیق و سوراخکاری‌ها نیز می‌توانند دما را تا حد قابل توجهی کاهش دهند و در کل در ماشینکاری‌ها دما را کاهش داده و باعث بهبود و کاهش هزینه‌های ماشین کاری گردند [۲۳].

جدول (۲): ضرایب هدایت گرمایی نانو پودرها در مایعات [۲۳]

سیال	نرخ انتقال حرارت جامد به سیال ^{۲۸} (k ₂ /k ₁) ^a	نانو ذرات ^{۲۹}
Water	66	Al ₂ O ₃
Ethylene glycol	156	
Glycerol	140	
Oil	342	
Water	127	CuO
Ethylene glycol	300	
Water	14	TiO ₂
Ethylene glycol	33	
Water	11.5	Fe ₃ O ₄
Water		ZrO ₂
Ethylene glycol		WO ₃
Water	48	ZnO
Ethylene glycol	113	
Water	2.2	SiO ₂
Ethylene glycol	5.2	
Water	655	Cu
Ethylene glycol	1550	
Water+ Ethylene glycol		
Water	697	Ag
Water	518	Au
Ethanol	1830	
Toluene	2370	

²⁵ - Poly(α -olefin) oil

²⁶ - Multiwalled carbon nanotubes (MWCNT)

²⁷ - Carbon nanotubes

²⁸ - Thermal conductivity ratio of solid to liquids

²⁹ - Nanoparticle

³⁰ - Sumio Iijima

Cui, X., Zhao, J., Jia, C., Zhou, Y., "Surface roughness and chip formation in high-speed face milling AISI H13 steel", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, pp.1-13, 2011.

2. Davim, J. P., (ed.), "Green Manufacturing Processes and Systems", Materials Forming, Machining and Tribology, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-33792-52.

3. Dixit, U. S., Sarma, D.K., Paulo Davim, J., "Environmentally Friendly Machining", *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-2308-92.

4. Mma, Kh., Nr, D., "Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI-1060 steel", *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol. 7, No. 11, pp. 1790-1799, 2006.

5. Hayashi, K., Inasaki, I., Wakabayashi, T., Suda, S., Suzuki, S., Yokota, H., Aoyama, T., Nakamura, M., "A controlled atmosphere cutting apparatus for understanding tribological behavior of lubricants in near-dry machining", *Advances in abrasive technology*, Vol. 6, pp. 9-14, 2003.

6. Obikawa, T., "High-speed grooving with applying MQL", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1854-1861, 2006.

7. Kamata, Y., "High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools", *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 192-193, pp. 281-286, 2007.

8. Ranjan Dhar, N., "Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel", *G.U. Journal of Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 23-32, 2007.

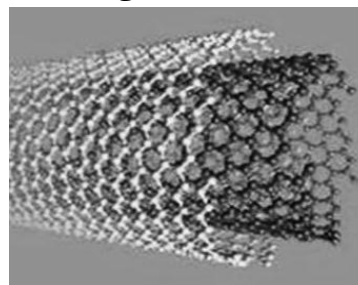
9. Ali, S.M., "The Effect of MQL on Cutting Performance in Turning Medium Carbon", *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 63, pp. 185-196, 2011.

10. Saberi, A., Rahimi, A.R., Parsa, H., Ashrafi, M., Rabiei, F., "Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube", *Journal of Cleaner Production*, in press, 2016.

11. Astakhov, V.P., "Ecological Machining: Near-dry Machining", *Springer*, London, 2008. DOI: :10.1007/978-1-84800-213-5_7.

جداره^{۳۱} استفاده می‌شود. همچنین روش‌های موجود برای تولید نانو لوله‌های تک جداره بازدهی کافی را ندارد و خالص کردن آن‌ها مشکل و در نهایت ممکن است به ساختار آن‌ها صدمه بزند [۲۵]. ویژگی‌های نانو لوله‌های کربنی عبارتند از [۲۵]:

- ۱- اندازه بسیار کوچک (قطر کوچکتر از ۰/۴ نانو متر)،
- ۲- حالت رسانا و نیمه رسانایی،
- ۳- قدرت رسانایی گرمایی خیلی بالا،
- ۴- بروز خواص الکتریکی منحصر بفرد،
- ۵- گسیل و جذب نور،
- ۶- مدول یانگ بالا،
- ۷- چگالی سطحی بسیار بالا،
- ۸- داشتن خاصیت ابر رسانایی.



شکل ۹: نانو لوله کربن دو جداره [۲۴]

۵- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند ماشینکاری با روش حداقل مقدار روانکاری با استفاده از روغن‌های گیاهی مرور شد. در این روش حجم بسیار کمی از روان کار با هوای فشرده ترکیب شده و مخلوط حاصل را به عنوان سیال روان کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش حداقل مقدار روانکاری مناسب‌ترین شرایط ماشین کاری روش نیمه خشک است. با استفاده از پخش ذرات نانو در روغن‌های گیاهی به وسیله فراصوت با بالا بردن ضریب انتقال حرارت در روغن‌های گیاهی می‌توان به برتری مناسبی نسبت به سیال برشی رسید، زیرا هم به روانکاری و هم به انتقال حرارت مناسب دسترسی پیدا می‌شود. در این راستا به کارگیری و ترکیب روش حداقل مقدار روان کاری، استفاده از روغن گیاهی سازگار با محیط زیست با نقطه دود مناسب و استفاده از ذرات نانو کربن چند جداره به دلیل انتقال حرارت بالا در روغن و داشتن خاصیت روان کنندگی مناسب زمینه بکارگیری روش‌های مناسب ماشینکاری و سازگار با محیط زیست را ایجاد کرده است.

۷- مراجع:

1. Cui, X., Zhao, J., Jia, C., Zhou, Y.,

^{۳۱} MWCNTs (Multi Walled Carbon Nanotubes)

- Behavioral Sciences, Vol. 195, pp. 2742 – 274.7, 2015.
23. Saidur, R., Leong, K.Y., Mohammad, H.A., “A review on applications and challenges of nanofluids”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 1646–1668, 2011.
24. Foroghi, M., “Introduction to the General Concepts of Nanotechnology”, First Edition, Islamic Azad University, Najaf Abad Publications, 2009 (in Persian فارسی)
25. Homeland, C., “Nanotechnology - Basic Science and New Technology”, First Edition, Publishing Designer Publishing, 2007 (in Persian فارسی)
26. Vatankhah, G., “Nanotechnology - Basic Science and New Technology”, First Edition, Nashr Tarah Publishing, 2007 (in Persian فارسی)
27. Razfar, M., “Machining Ability”, Second Edition, Amir Kabir University of Technology Publishing, 2001 (in Persian فارسی)
28. Mahdavi Nejad, R., “New Methods of Production”, First Edition, Tehran University Press, 2004 (in Persian فارسی)
12. Accu-Lube Manufacturing GmbH website: www.Accu-lube.com
13. Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wakabayashi, T., “Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 53, No. 2, pp. 511-537, 2004.
14. Kouam, J., Songmene, V., Balazinski, M., Hendrick, P., “Effects of minimum quantity lubricating (MQL) conditions on machining of 7075-T6 aluminum alloy”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 79, pp. 1325–1334, 2015.
15. Rahmati, B., Sarhan, A.A.D., Sayuti, M., “Morphology of surface generated by end milling AL6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS₂) nanolubrication in end milling”, Journal of Cleaner Production, Vol. 66, pp. 685-691, 2014.
16. Emami, M., Sadeghi, M.H., Diao Sarhan, A.A., Hasani, F., “Investigating the Minimum Quantity Lubrication in grinding of Al₂O₃ engineering ceramic”, Journal of Cleaner Production, Vol. 66, pp. 632-643, 2014.
17. Ranjan Dhar, N., “Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel”, G.U. Journal of Science, Vol. 20, No. 2, pp. 23-32, 2007.
18. SooNam, J., Lee, P.H., Lee, S.W., “Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 51, pp. 649–652, 2011.
19. Vasu, V., Pradeep Kumar Reddy, G., “Effect of minimum quantity lubrication with Al₂O₃ nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining Inconel 600 alloy”, Journal of Nanoengineering and Nanosystems, Vol. 225, pp. 3-16, 2011.
20. Kalita, P., Malshe, A.P., Arun Kumar, S., Yoganath, V.G., Gurumurthy, T., “Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants”, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 14, pp. 160–166, 2012.
21. Sarıkaya, M., Güllü, A., “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, 2013.
22. Uysala, A., Demirena, F., Altana, E., “Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Stainless Steel by Using Nano Mos₂ Reinforced Vegetable Cutting Fluid”, Procedia - Social and