



## مطالعه تجربی تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح قطعه کار و نیروی ماشین کاری در فرایند تراش کاری فولاد AISI 4340

محمدرضا شبگرد<sup>۱\*</sup>، محمد جعفریان زنجناب<sup>۲</sup>، رضا آذرآفزا<sup>۳</sup>

۱- دانشیار مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات کردستان، سنندج

۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تبریز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، mtabrizu.ac.ir@mrshabgard

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۷ مرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۲ آبان ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۳ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

نانو سیال اکسید مس

سیال برشی

فولاد ابزار AISI 4340

زبری سطح

نیروی ماشین کاری

### چکیده

در این مقاله تأثیر نانوسیال اکسید مس با سیال پایه آب صابون (روغن حل شونده) بر روی نیروی ماشین کاری و زبری سطح قطعه کار در فرایند تراش کاری فولاد ابزار عملیات حرارتی شده (AISI 4340) مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل با حالت خشک و سیال برشی حل شونده مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد افزودن نانو ذرات اکسید مس به مقدار ۱٪ حجمی به روغن حل شونده موجب کاهش قابل ملاحظه مقدار زبری سطح قطعه کار و نیروی ماشین کاری نسبت به سیال برشی معمولی (حل شونده) و خشک می‌شود. بر اساس نتایج حاصل نانوسیال برشی اکسید مس زبری سطح و نیروی ماشین کاری را به ترتیب ۴۹٪ و ۲۴٪ نسبت به حالت خشک کاهش می‌دهد و در هنگام استفاده از نانوسیال مذکور در محدوده آزمایش‌های به عمل آمده کمترین زبری سطح در سرعت پیشروی ۰/۱ میلی‌متر بر دور و سرعت برشی ۲۵۰ متر بر دقیقه حاصل شد.

## Experimental study on the influence of CuO nanofluid on surface roughness and machining force in turning of AISI 4340 steel

Mohammad Reza Shabgard<sup>1\*</sup>, Mohammad Jafarian Zenjanab<sup>2</sup>, Reza Azarafza<sup>3</sup>

1- Assoc. Prof., Dept. of Mech. Eng., Uni. of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- MSc.student, Dept. of Mech. Eng., Azad Uni., Sanandaj, Iran.

3- Asst. Prof., Dept. of Mech. Eng., Malek Ashtar Uni., Tehran, Iran.

\*P.O.B. 5166616471 Tabriz, Iran, mrshabgard@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 18 August 2013

Accepted 24 October 2013

Available Online 12 April 2014

### Keywords:

CuO Nanofluid

Cutting Fluid

AISI 4340 Tool Steel

Surface Roughness

Machining Force

### ABSTRACT

This paper studies the effects of soluble cutting fluid-based CuO Nanofluid on machining force and surface roughness in turning of hardened AISI 4340 tool steel. These influences, Moreover, are compared with the outputs of similar tests through dry and soluble cutting fluid. The obtained results showed 1% volume fraction of CuO Nanoparticles added to soluble oil as cutting fluid was considerably reduced machining force and surface roughness in comparison to soluble cutting oil and dry. The investigations indicated that CuO Nanofluid reduced surface roughness and machining force by 49% and 24% respectively. Moreover, the results illustrated that the lowest surface roughness obtained in cutting speed 250 m/min, feed rate 0.1 mm/rev and cutting nanofluid.

### ۱- مقدمه

تراشکاری مورد سنجش قرار می‌گیرند [۱]. این مشخصه‌ها از عوامل زیادی مانند جنس و مشخصه‌های هندسی ابزار و مقدار پارامترهای ورودی ماشین کاری مانند سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق بار، نوع و فشار مایع روانکاری و... تأثیر می‌پذیرند. چون عوامل مذکور به واسطه ایجاد حرارت و اصطکاک در منطقه برش، از مقدار مطلوب و بهینه فاصله می‌گیرند، به همین منظور کاهش دما و اصطکاک در فصل مشترک ابزار- براده و ابزار- قطعه کار با استفاده از سیال‌های برشی مختلف (خنک‌کننده‌ها و روان‌کننده‌ها) یکی از

با توجه به اینکه فرایند تراشکاری یکی از پرکاربردترین و ضروری‌ترین عملیات در صنعت ساخت و تولید است، روش‌های دستیابی به کیفیت مطلوب در فرایند ساخت قطعات و کاهش هزینه‌های ماشین کاری یکی از زمینه‌های اساسی تحقیقات کاربردی در این راستا است. زبری سطح و مقدار نیروی ماشین کاری دو عامل مهم و حیاتی در عملیات تراشکاری هستند که در بسیاری از مواقع برای ارزیابی راندمان

### Please cite this article using:

M.R. Shabgard, M. Jafarian Zenjanab, R. Azarafza, Experimental study on the influence of CuO nanofluid on surface roughness and machining force in turning of AISI 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 27-33, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اهداف مهم تحقیقات اخیر است [۲-۴]. تا به حال تحقیقات گسترده‌ای جهت کاهش اصطکاک و حرارت ماشین کاری به منظور کاهش زبری و بهبود سلامت سطح قطعات ماشین کاری شده بر روی سیال‌های برشی مختلف انجام پذیرفته و سیال‌های برشی متنوعی مورد آزمایش و استفاده قرار گرفته‌اند [۵]، با وجود این از نانو سیال‌ها به عنوان سیال برشی در عملیات تراش کاری استفاده نشده است.

نانوسیال یک دسته بسیار جدید از مایعات است که تعریف کلی آن ذرات جامد پراکنده در مقیاس نانو متر در مایع پایه است که اغلب برای افزایش انتقال حرارت در صنایعی که اصطکاک و درجه حرارت بالا اثرات مضر بر جای می‌گذارد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در ارتباط با خواص نانو سیالات مختلف و همچنین کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف به عمل آمده است، ورما و همکاران [۷]، خواص نانو سیال‌های حاوی نانو ذرات مولیبدن دی‌سولفاید را مورد مطالعه قرار دادند آن‌ها سه روغن مختلف شامل روغن پارافین، تری گلیسرید (روغن کانولا) و لسیتین<sup>۱</sup> را به عنوان سیال پایه انتخاب کرده و در بلبرینگ آزمایش کردند. بنا به گزارش ایشان نانوسیال مذکور موجب کاهش شدید ضریب اصطکاک و مقدار سایش می‌شود. ژو و وانگ [۸]، با مطالعه روی ویژگی‌های حرارتی نانو سیال‌های اکسید مس به این نتیجه رسیدند که با مخلوط کردن ۰/۴٪ حجمی نانو ذرات مذکور در آب، هدایت حرارتی آن ۱۷٪ افزایش می‌یابد. هوانگ و همکاران [۹]، تحقیقی در مورد افزایش هدایت حرارتی مایع‌های مختلف از طریق مخلوط کردن نانو ذرات اکسید مس انجام دادند. آن‌ها افزایش هدایت حرارتی را با افزودن نانو ذرات به قطر متوسط ۳۳ نانومتر در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول اندازه‌گیری کردند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد هدایت حرارتی سیال پایه به وسیله نانو ذرات مذکور به ترتیب ۵۰٪ و ۹۰٪ افزایش می‌یابد. هرناندز و همکاران [۱۰] در تحقیقی به بررسی ویژگی‌های ضد سایشی و ضد اصطکاک نانو سیال‌های اکسید مس، اکسید روی و دی اکسید زیرکونیوم پرداختند. سیال پایه نانوسیال پلی آلفا اولفین بوده و آزمایشات بر روی بلوک و حلقه‌ای با جنس‌های AISI 1045 و AISI D3 انجام گرفته است. در این پژوهش مشخص شد در بین سوسپانسیون‌های ۱٪ حجمی، بیشترین کاهش سایش و ضریب اصطکاک مربوط به نانوسیال اکسید مس بوده و مقادیر کاهش آن‌ها به ترتیب ۴۸٪ و ۱۹٪ نسبت به سیال پایه است.

آویلا و آبرام [۱۱]، در تحقیقی فولاد ابزار AISI 4340 را با استفاده از سه نوع سیال برشی (روغن امولوسیون بدون مواد معدنی، سیال برشی ۱۰۰٪/۱ مصنوعی و روغن امولوسیون معدنی) تراشکاری کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بهترین حالت برای حصول زبری سطح کمتر در سرعت برشی بالا، روغن امولوسیون بدون مواد معدنی است، اما برای کاهش زبری سطح در سرعت‌های برشی پایین باید از روغن امولوسیون معدنی استفاده کرد.

هدف این پژوهش مطالعه روی خاصیت خنک‌کاری و روان کاری نانوسیال اکسید مس و بررسی تأثیر آن به عنوان سیال برشی بر روی نیروهای ماشین کاری و زبری سطح قطعه کار در فرایند تراشکاری فولاد ابزار عملیات حرارتی شده AISI 4340 است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای تهیه نانوسیال برشی از روغن حل شونده (آب صابون) به عنوان سیال پایه و از نانوپودر اکسید مس به عنوان ذرات معلق در آن استفاده شد. درصد حجمی نانو ذرات ۱٪ بوده و اندازه متوسط آن‌ها ۵۰ نانومتر انتخاب شد. برای جلوگیری از رسوب نانو ذرات و توزیع همگن و یکپارچه آن یک سامانه و سیستم تأمین سیال برشی طراحی و ساخته شد. شکل ۱ سامانه تأمین نانوسیال و جزئیات آن را نشان می‌دهد و شکل ۲ محل قرار گرفتن

نازل سیال برشی نسبت به نوک ابزار را نشان می‌دهد. جنس قطعه کار فولاد ابزار AISI 4340 عملیات حرارتی شده به قطر ۵۰ میلی‌متر و طول ۳۸۰ میلی‌متر انتخاب شد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مذکور را نشان می‌دهد.

ابزار مورد استفاده در این تحقیق تیغچه لوزی شکل روکش‌دار با استاندارد (DNMG 150604-QM) و گرید 2025 بوده است. سایر مشخصات ابزار مذکور و نگهدارنده (هلدر) آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جهت انجام آزمایش‌ها از ماشین تراش لدول استراندز<sup>۲</sup> که مجهز به سیستم اندازه‌گیری نیروهای ماشین کاری است، استفاده شد و برای اندازه‌گیری زبری سطح قطعه کار، از دستگاه زبری سنج ماهر پرثومتر<sup>۳</sup> و برای بررسی کیفیت سطوح ماشین کاری شده، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی<sup>۴</sup> استفاده شد.

تعداد آزمایش‌های به عمل آمده ۲۷ عدد است که به صورت فول فاکتوریل طراحی شدند. مطابق جدول ۲ آزمایش‌ها در سه سرعت برشی مختلف ۱۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ متر بر دقیقه و سه نوع سرعت پیشروی ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ میلی‌متر بر دور و همچنین سه حالت محیطی (خشک، سیال برشی حل شونده، نانوسیال برشی اکسید مس) به عمل آمدند. در تمام آزمایش‌ها عمق برش ثابت و به مقدار ۰/۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. جدول ۲ سایر مشخصات و شرایط انجام آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی نمونه‌های فولاد ابزار AISI 4340

عناصر	کربن (C)	سیلیسیم (Si)	کرم (Cr)	منگنز (Mn)	مس (Cu)	نیکل (Ni)	مولیبدن فسفر (P)
درصد	۰/۳۵	۰/۲۸	۱/۶۱	۰/۶	۰/۱	۱/۶	۰/۲۵

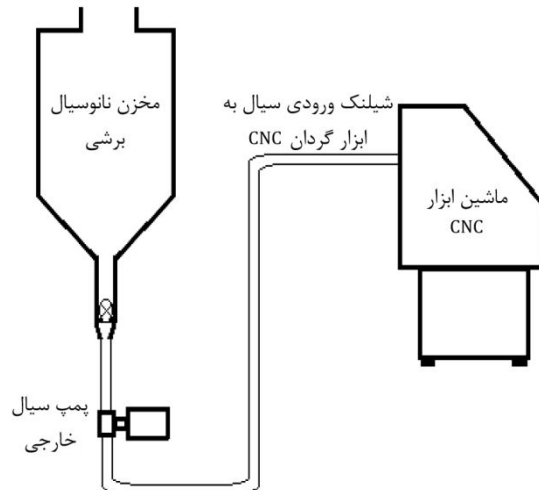
جدول ۲ شرایط برش و جزئیات کامل آزمایش‌های انجام یافته

مشخصات قطعه کار	
جنس	فولاد ابزار AISI 4340
اندازه	قطر ۵۰ میلی‌متر × طول ۳۸۰ میلی‌متر
سختی	۳ ± ۵۲ راکول سی
مشخصه‌های ورودی عملیات ماشین کاری	
سرعت برشی	۱۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ متر بر دقیقه (۳ حالت)
سرعت پیشروی	۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ میلی‌متر بر دور (۳ حالت)
عمق برش	۰/۶ میلی‌متر (یک حالت)
طول برش	۳۵۰ میلی‌متر
سیال برشی	خشک، سیال برشی حل شونده، نانوسیال برشی اکسید مس (۳ حالت)
دبی سیال برشی	۲۷ لیتر بر دقیقه
تعداد تکرار هر آزمایش	۴ بار
ماشین ابزار	
ماشین تراش CNC	لدول ال‌سی پی ۳۰ استراندز اس‌ام‌جی DNMG 150604-QM
ابزار برشی (تیغچه)	
نگهدارنده ابزار (هلدر)	PDJNL 2525M 15
زبری سنج	ماهر پرثومتر <sup>۳</sup>
نیروسنج	داخلی CNC (استریت پوینت <sup>۵</sup> )



2- Leadwell LCP 30P Strands SMG  
3- Mahr Perthometer M2  
4- SEM  
5- Straitpoint

1- Lecithin



شکل ۱ تصویر شماتیک و واقعی سامانه تأمین نانوسیال برشی در حین عملیات تراش کاری

فصل مشترک ابزار و براده نفوذ کرده و هنگامی که فاصله بین سطوح کاهش می‌یابد، فشار در فصل مشترک مذکور بالا می‌رود و نانو ذرات به علت فشار و دمای بالا سینتر<sup>۱</sup> شده و یک لایه متخلخل را تشکیل می‌دهند. این لایه قسمتی از نیروهای وارده را تحمل کرده و از تماس مستقیم سطوح جلوگیری می‌کند [۱۴]. بنابراین ضریب اصطکاک مابین سطوح درگیر (ابزار- براده و ابزار- قطعه کار) را کاهش داده و بدین صورت موجب کاهش نیروی اصطکاک و در نتیجه مطابق با رابطه (۱) باعث کاهش نیروی ماشین کاری می‌شود.

$$F_m = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_t^2} \quad (1)$$

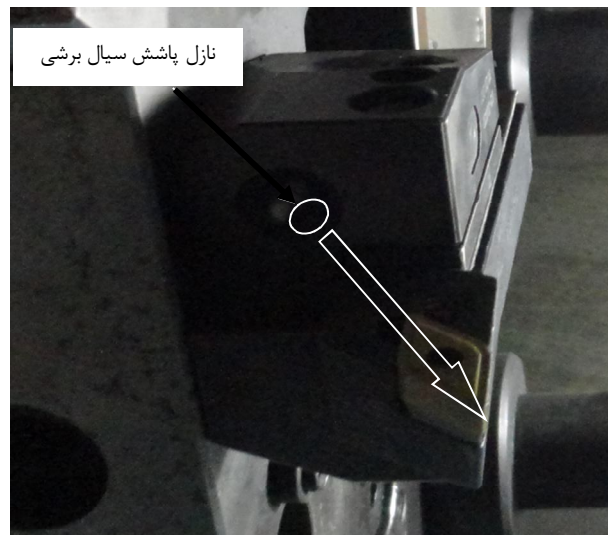
در این رابطه  $F_m$  نیروی ماشین کاری متوسط،  $F_c$  نیروی برشی<sup>۲</sup>،  $F_f$  نیروی اصطکاک<sup>۳</sup> و  $F_t$  نیروی شخم<sup>۴</sup> است.

از طرفی با توجه به هدایت حرارتی بسیار بالای نانوسیال اکسید مس، در هنگام استفاده از آن دمای منطقه برش کاهش یافته و باعث کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود و بدین طریق مانع بالا رفتن مقدار نیروی برشی ( $F_c$ ) به علت کندی لبه برشی ابزار شده و از افزایش نیروی ماشین کاری جلوگیری می‌کند [۱۵]. همچنین نتایج مذکور نشان می‌دهند سیال برشی معمولی (روغن حل شونده) تأثیر کمی در کاهش مقدار نیروی ماشین کاری دارد. این امر بیانگر کارایی پایین سیال برشی معمولی در میزان خنک‌کنندگی و مخصوصاً روان کاری است.

علاوه بر این همان طوری که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برشی در شرایط مختلف محیطی، نیروی ماشین کاری کاهش می‌یابد. علت این مسئله را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش سرعت برشی، زاویه صفحه برش بزرگتر شده و ضخامت براده کاهش می‌یابد [۱۶]. با کاهش ضخامت براده، مساحت صفحه برش کمتر شده و با توجه به ثابت بودن میانگین استحکام برشی در این صفحه، نیروی برشی ( $F_c$ ) کاهش می‌یابد و در نتیجه مطابق رابطه (۱) نیروی ماشین کاری کمتر می‌شود [۱۷].

### ۳-۲- تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های پیشروی مختلف

شکل‌های ۶، ۷ و ۸ مقادیر نیروی ماشین کاری را در سرعت‌های پیشروی



شکل ۲ محل قرار گرفتن نازل پاشش سیال برشی نسبت به نوک ابزار برشی

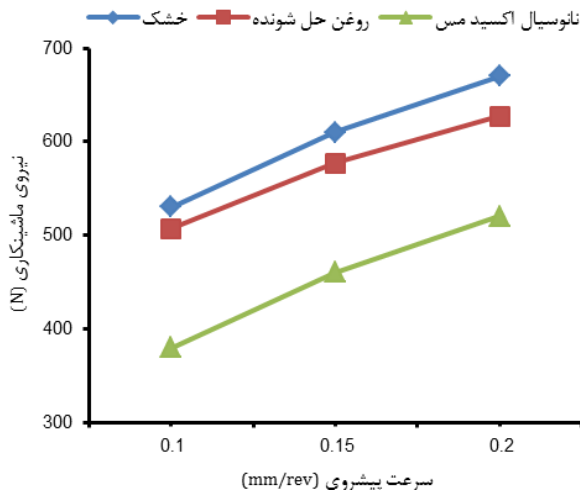
### ۳- نتایج و بحث

در بررسی‌های انجام‌شده تأثیر نانوسیال برشی اکسید مس با سیال پایه روغن حل شونده به عنوان سیال برشی بر روی نیروی ماشین کاری و زبری سطح تراشکاری شده فولاد ابزار AISI 4340 مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل با شرایط خشک و روغن حل شونده (سیال برشی معمولی) مقایسه شده و جهت استفاده آسان و سریع نتایج به دست آمده، برای نمایش آن‌ها از نمودارهای دو بعدی استفاده شده است.

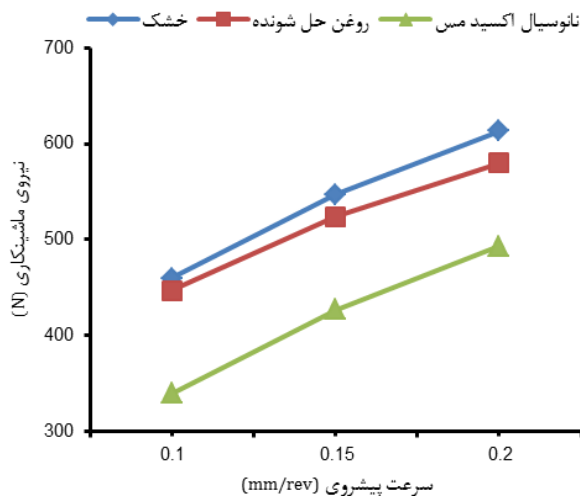
### ۳-۱- تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های برشی مختلف

شکل‌های ۳، ۴ و ۵ تأثیر نانو اکسید مس را بر روی نیروی ماشین کاری در مقایسه با حالت‌های خشک و سیال برشی معمولی (روغن حل شونده) در سرعت‌های برشی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در همه حالت‌ها مقدار میانگین نیروی ماشین کاری در هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس کمتر از حالت‌های دیگر است. علت این امر را می‌توان به انتقال حرارت بالا، خاصیت ضد اصطکاک و خاصیت ضد سایشی نانوسیال اکسید مس ربط داد [۱۰، ۱۲، ۱۳]. بطوریکه نانو ذرات اکسید مس از طریق سیال پایه به

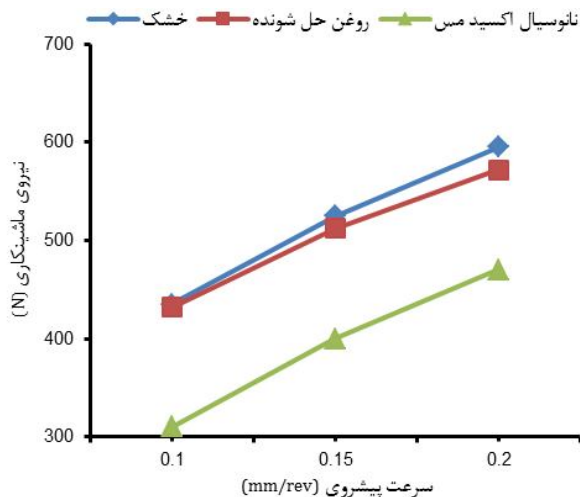
1- Sinter  
2- Cutting Force  
3- Friction Force  
4- Thrust Force



شکل ۶ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های پیشروی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6$  mm و  $V_c=100$  m/min)



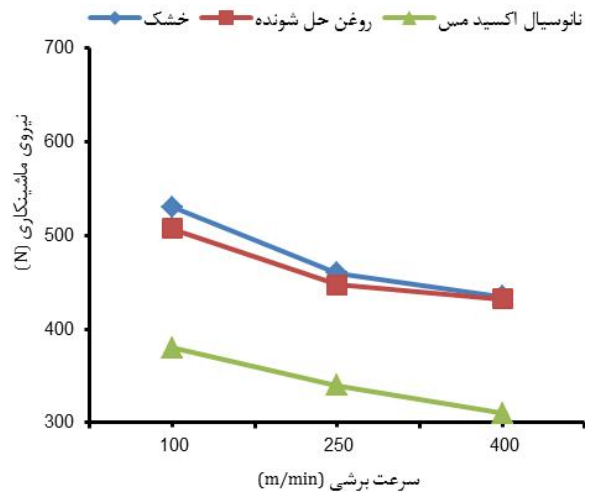
شکل ۷ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های پیشروی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6$  mm و  $V_c=250$  m/min)



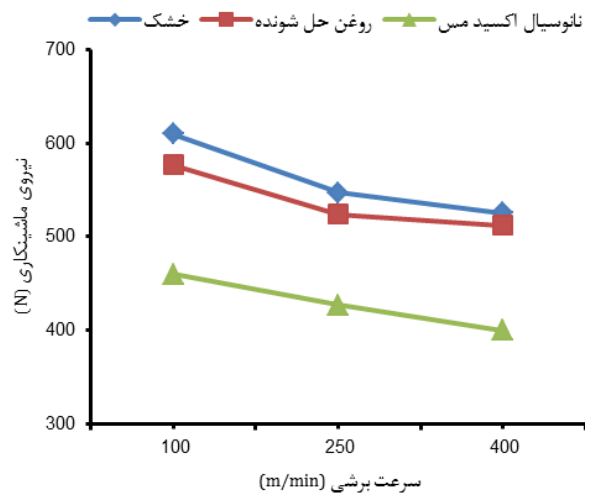
شکل ۸ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های پیشروی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6$  mm و  $V_c=400$  m/min)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار نیروی متوسط ماشین کاری در هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس به علت کمتر شدن اصطکاک در فصل مشترک ابزار- قطعه کار و ابزار- براده و همچنین کاهش دمای منطقه برش

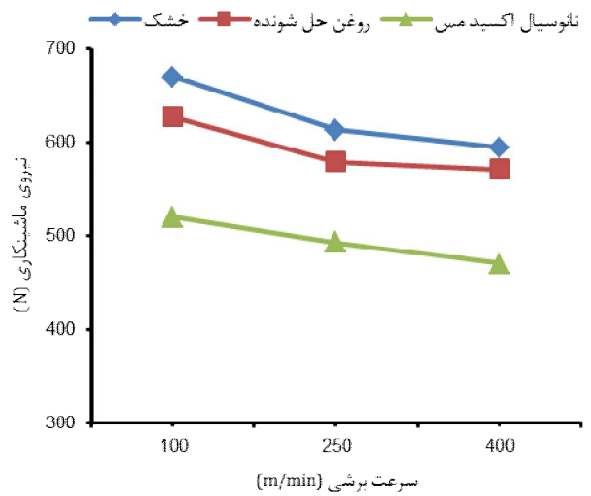
مختلف و سرعت‌های برشی ثابت برای سه حالت ماشین کاری بدون سیال برشی (خشک)، ماشین کاری با سیال برشی معمولی (روغن حل شونده) و ماشین کاری با نانوسیال برشی اکسید مس نشان می‌دهد.



شکل ۳ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های برشی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6$  mm و  $f=0.1$  mm/rev)

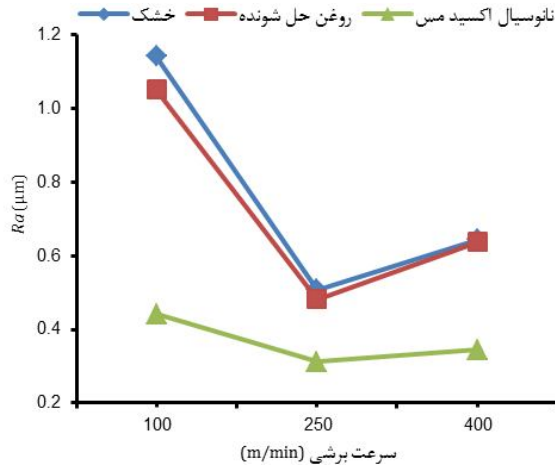


شکل ۴ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های برشی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6$  mm و  $f=0.15$  mm/rev)

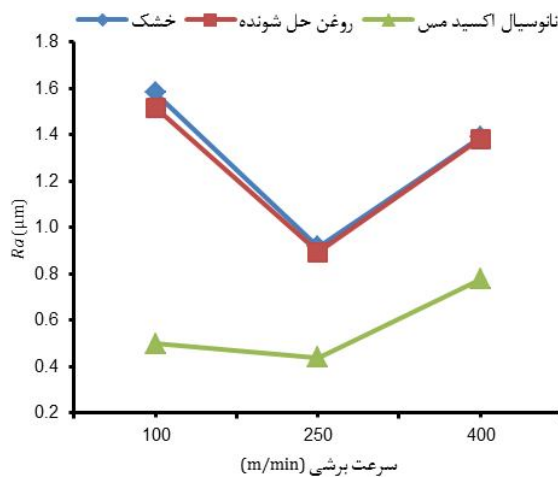


شکل ۵ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی نیروی ماشین کاری در سرعت‌های برشی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6$  mm و  $f=0.2$  mm/rev)

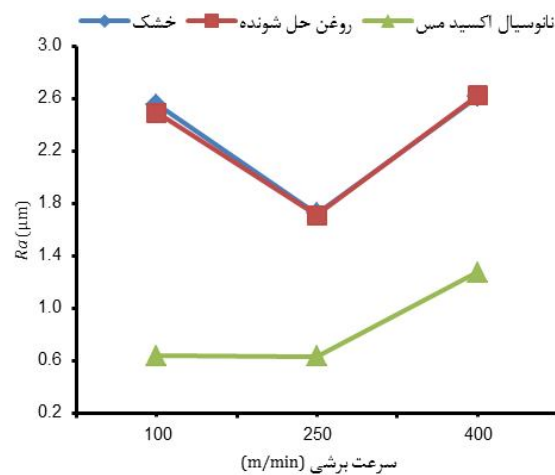
دوم (صعودی) حاکی از بروز اثرات منفی دمای بسیار زیاد و اصطکاک است. با افزایش دوباره سرعت برشی دمای منطقه برش بیش از اندازه افزایش می‌یابد. در این مرحله، دما و اصطکاک زیاد بین تیغچه و براده باعث به وجود آمدن پدیده‌های لبه انباشته، افزایش سایش ابزار و جریان نامناسب براده می‌شود، بدین طریق زبری سطح افزایش یافته و منحنی حالت صعودی به خود می‌گیرد [۱۸].



شکل ۹ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های برشی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6 \text{ mm}$  و  $f=0.1 \text{ mm/rev}$ )



شکل ۱۰ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های برشی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6 \text{ mm}$  و  $f=0.15 \text{ mm/rev}$ )



شکل ۱۱ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های برشی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6 \text{ mm}$  و  $f=0.2 \text{ mm/rev}$ )

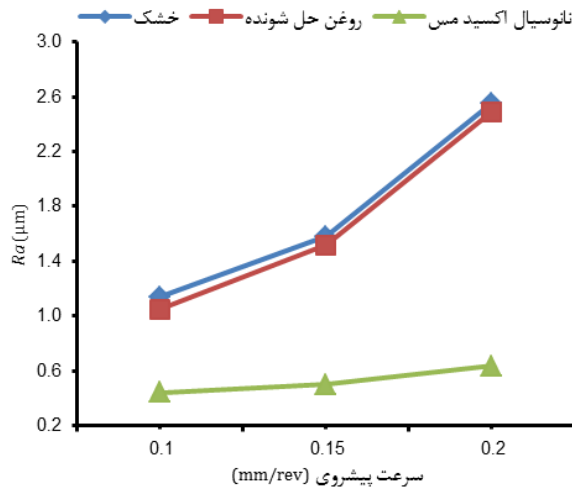
در مقایسه با سایر شرایط محیطی به طور چشمگیری کاهش یافته است. همچنین همان طور که ملاحظه می‌شود در شرایط محیطی مختلف با افزایش سرعت پیشروی، نیروی ماشین کاری با نرخ بالایی افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد دلیل این عامل افزایش سطح تماس بین ابزار و قطعه کار باشد که باعث افزایش نیروی اصطکاک شده و بدین طریق موجب افزایش نیروی ماشین کاری می‌شود [۱۶].

### ۳-۳- تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های برشی مختلف

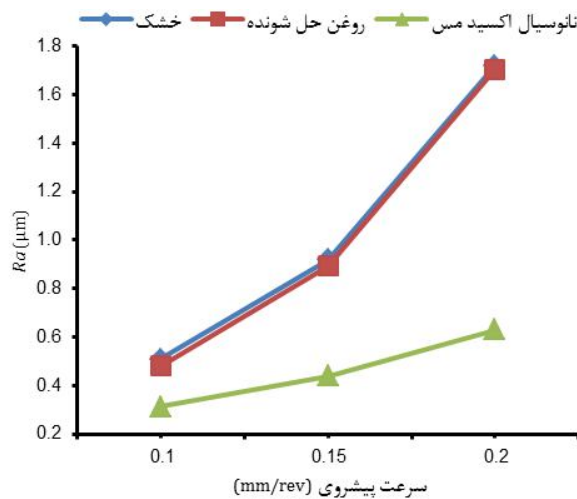
شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده را در سرعت‌های برشی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مذکور ملاحظه می‌شود که مقدار زبری سطح در نمونه‌هایی که با استفاده از نانوسیال اکسید مس ماشین کاری شده‌اند بسیار پایین‌تر از سیال برشی معمولی (روغن حل شونده) و همچنین ماشین کاری در حالت خشک است. علت این امر را می‌توان به واسطه هدایت حرارتی بالا و خاصیت ضد اصطکاک و ضد سایشی نانو سیال اکسید مس توجیه کرد [۱۳، ۱۲، ۱۰]. نانو ذرات مس موجود در سیال برشی باعث کاهش ضریب اصطکاک (با جلوگیری از تماس مستقیم سطوح) بین سطح تیغچه و براده شده بنابراین احتمال بروز پدیده لبه انباشته<sup>۱</sup> را که یکی از علل افزایش زبری سطح طبیعی است، کاهش می‌دهد [۱۸]. همچنین کاهش اصطکاک در فصل مشترک ابزار و براده باعث بهبود جریان براده شده و سبب کاهش ارتعاش قطعه کار و ابزار می‌گردد و در نتیجه زبری ناشی از عوامل مذکور (زبری سطح طبیعی) کاهش می‌یابد [۱۹]. دلیل دیگری که سبب کمتر شدن زبری سطح در هنگام ماشین کاری با نانوسیال اکسید مس می‌شود، کاهش دمای منطقه برش به علت ضریب انتقال حرارتی بالای نانوسیال مذکور است. بطوریکه کاهش حرارت منطقه مذکور باعث کاهش نرخ سایش ابزار می‌شود [۱۸]. کاهش نرخ سایش ابزار از افزایش زبری سطح ناشی از تغییر شعاع و هندسه لبه برشی (زبری سطح ایده‌آل) جلوگیری می‌کند و علاوه بر آن به واسطه کاهش نیروهای ماشین کاری مانع افزایش ارتعاشات در اجزای ماشین ابزار شده و در نتیجه زبری سطح طبیعی قطعه کار را کاهش می‌دهد [۲۰]. در مجموع می‌توان گفت، نانوسیال اکسید مس با کاهش حرارت و اصطکاک نسبت به حالت خشک و روغن حل شونده علاوه بر کاهش زبری سطح طبیعی، زبری سطح ایده‌آل را نیز کاهش می‌دهد و در نهایت باعث کاهش شدید زبری سطح متوسط ( $R_a$ ) قطعه کار می‌شود.

همانطوریکه شکل‌های مذکور نشان می‌دهند، روغن برشی حل شونده تأثیر بسیار ناچیزی در کاهش زبری سطح نسبت به حالت خشک داشته است. این پدیده عدم کارایی سیال برشی حل شونده را به عنوان سیال خنک‌کار و روان‌کار نسبت به نانوسیال برشی اکسید مس در فرایند ماشین کاری، نشان می‌دهد.

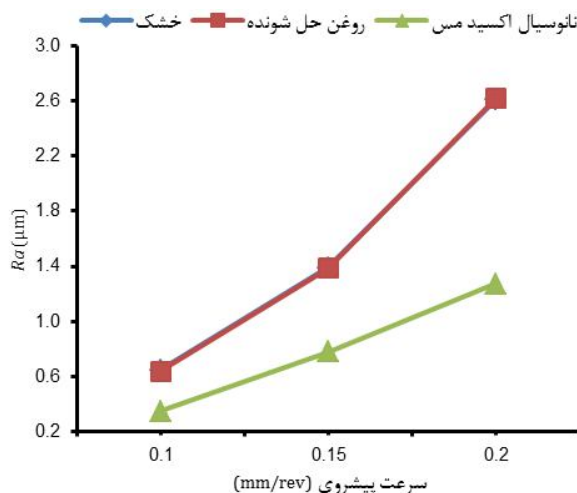
همچنین همان طور که از نتایج مذکور مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برشی، زبری سطح ماشین کاری شده ابتدا کاهش یافته سپس روند صعودی به خود می‌گیرد. رفتار منحنی‌ها در قسمت اول (نزولی) کاملاً طبیعی بوده و نشانگر نزدیک شدن زبری کلی سطح به زبری ایده‌آل (فقط ناشی از هندسه ابزار و پارامترهای ماشین کاری) با افزایش سرعت برشی است [۱۸]. علت این امر افزایش دما و از دست دادن سختی قطعه کار و نرم شدن آن بوده و در نتیجه شرایط برشی بهتر شده و زبری سطح کاهش می‌یابد [۱۶]. اما رفتار نمودارها در قسمت



شکل ۱۳ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های پیشروی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6 \text{ mm}$  و  $V_c=100 \text{ m/min}$ )



شکل ۱۴ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های پیشروی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6 \text{ mm}$  و  $V_c=250 \text{ m/min}$ )



شکل ۱۵ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های پیشروی و شرایط محیطی مختلف ( $\alpha_p=0.6 \text{ mm}$  و  $V_c=400 \text{ m/min}$ )

علت این امر را این گونه می‌توان توجیه کرد: چون در سرعت‌های پیشروی زیاد تنش‌های پسماند فشاری سطح قطعه کار به تنش‌های پسماند کششی تبدیل می‌شود [۲۱]، لذا در حین عملیات ماشین کاری از سختی سطح قطعه

علاوه بر آن با افزایش سرعت برشی امکان نفوذ سیال‌های برشی به حد فاصل و فصل مشترک ابزار-قطعه کار و ابزار-براده کاهش یافته و شرایط ماشین کاری به حالت خشک نزدیک می‌شود.

شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپی از سطوح ماشین کاری شده در دو حالت ماشین کاری با استفاده از نانوسیال اکسید مس (الف) و حالت ماشین کاری خشک (ب) را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود مقدار و عمق خراش‌ها و زبری قطعه کار در حالت خشک به علت انباشته شدن براده در لبه ابزار (لبه انباشته)، کند شدن لبه برشی ابزار و افزایش نیروهای ماشین کاری که موجب زیاد شدن ارتعاش در مجموعه و سیستم می‌شود، خیلی بیشتر از حالتی است که نانوسیال برشی مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳-۴- تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح ماشین کاری شده در سرعت‌های پیشروی مختلف

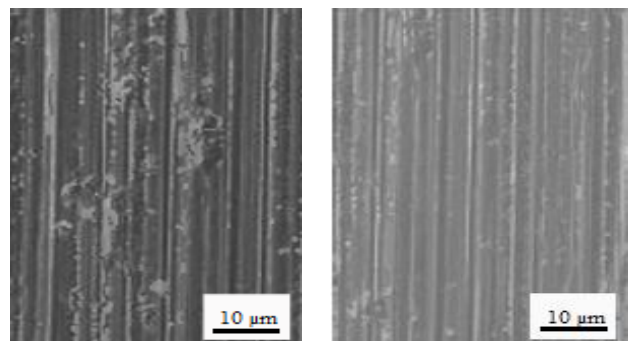
شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ تأثیر نانوسیال اکسید مس بر روی زبری سطح قطعه کار در سرعت‌های پیشروی و شرایط محیطی مختلف را نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود در هنگام استفاده از نانوسیال برشی اکسید مس افزایش سرعت پیشروی کمترین تأثیر را بر روی مقدار زبری سطح قطعه کار دارد به طوری که در سرعت‌های پیشروی زیاد زبری سطح قطعه کار با نانوسیال مذکور خیلی کمتر از حالت‌های خشک و روغن حل شونده است. بدیهی است این امر به واسطه کاهش شدید دما و ضریب اصطکاک در فصل مشترک ابزار-قطعه کار و ابزار-براده که موجب کاهش نیروی ماشین کاری شده و مانع بروز پدیده لبه انباشته، سایش ابزار و ارتعاشات سیستم می‌شود به راحتی توجیه می‌شود.

همچنین همان گونه که نتایج مذکور نشان می‌دهد در تمامی حالت‌ها با افزایش سرعت پیشروی ابزار، مقدار زبری سطح بیشتر می‌شود بدیهی است دلیل اصلی این عامل را می‌توان توسط رابطه (۲) به واسطه افزایش سرعت پیشروی توجیه کرد [۱۸].

$$R_t = \frac{0.0321 \times f^2}{V_c} \quad (2)$$

در این رابطه  $f$  سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دور)،  $r_{\text{شعاع}}$  شعاع نوک ابزار (میلی‌متر) و  $R_t$  زبری سطح ایده‌آل (میلی‌متر) است.

همچنین همانطوریکه شکل‌های مذکور نمایش می‌دهند رابطه (۲) در پیش‌بینی مقدار زبری سطح در حالت‌های مختلف (مخصوصاً در هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس) در سرعت‌های پیشروی بالا از کارایی لازم برخوردار نیست.



شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از سطوح ماشین کاری شده با استفاده از نانوسیال اکسید مس (الف) و حالت خشک (ب) ( $\alpha_p=0.6 \text{ mm}$ ،  $V_c=400 \text{ (m/min)}$ ) ( $f=0.2 \text{ (mm/rev)}$ )

- [6] S. U. S. Choi, D. A. Singer, H. P. Wang, *Development and application of non-Newtonian flows*, First ed., pp. 99–105, San Francisco: ASME, 1995.
- [7] A. Verma, W. Jiang, H. H. Abu Safe, W. D. Brown, A. P. Malshe, Tribological Behavior of Deagglomerated Active Inorganic Nanoparticles for Advanced Lubrication, *Tribology Transactions*, Vol. 51, No. 5, pp. 673-678, 2008.
- [8] L. Zhou, B. Wang, Experimental research on the thermophysical properties of nanoparticle suspensions using the quasi-steady state method, *Annual Proceeding Chinese Engineering Thermophysics*, pp. 889-892, 2002.
- [9] Y. Hwang, J. Lee, C. Lee, Y. Jung, S. Cheong, C. Lee, B. Ku, S. Jang, Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids, *Thermochemica Acta*, Vol. 455, No. 1, pp. 70-74, 2007.
- [10] A. Hernández Battez, R. González, J. L. Viesca, J. E. Fernández, J. M. Díaz Fernández, A. Machado, R. Chou, J. Riba, CuO, ZrO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants, *Wear*, Vol. 265, No. 3-4, pp. 422-428, 2008.
- [11] R. Avila, A. Abrao, The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, No. 1, pp. 21-26, 2001.
- [12] N. Karthikeyan, J. Philip, B. Raj, Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 109, No. 1, pp. 50-55, 2008.
- [13] A. Hernández Battez, J. L. Viesca, R. González, D. Blanco, E. Asedegbega, A. Osorio, Friction reduction properties of a CuO nanolubricant used as lubricant for a NiCrBSi coating, *Wear*, Vol. 268, No. 1-2, pp. 325-328, 2010.
- [14] A. Hernández Battez, R. González, D. Felgueroso, J. Fernández, M. del Rocío Fernández, M. Garcia, I. Penuelas, Wear prevention behaviour of nanoparticle suspension under extreme pressure conditions, *Wear*, Vol. 263, No. 7, pp. 1568-1574, 2007.
- [15] N. Dhar, S. Paul, A. Chattopadhyay, Role of cryogenic cooling on cutting temperature in turning steel, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 146-154, 2002.
- [16] R. Suresh, S. Basavarajappa, V. N. Gaitonde, G. L. Samuel, Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 33, pp. 75-86, 2012.
- [17] E.-G. Ng, D. Aspinwall, D. Brazil, J. Monaghan, Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 6, pp. 885-903, 1999.
- [18] G. Boothroyd, W. A. Knight, M. Dekker, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, pp. 180-174, Tehran: Markaze Nashre Daneshgahi, 1999. (In Persian)
- [19] T. Leppert, Effect of cooling and lubrication conditions on surface topography and turning process of C45 steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 2, pp. 120-126, 2011.
- [20] R. Pavel, I. Marinescu, M. Deis, J. Pillar, Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, No. 1-2, pp. 341-349, 2005.
- [21] T. Özel, T.-K. Hsu, E. Zeren, Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, No. 3-4, pp. 262-269, 2005.
- [22] Y. Guo, C. Liu, Mechanical properties of hardened AISI 52100 steel in hard machining processes, *Journal of manufacturing science and engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 1-9, 2002.

کار کاسته شده و این امر سبب می شود شرایط برشی بهتر شده (کاهش چسبندگی براده به ابزار، بهبود جریان براده، کاهش نیروهای ماشین کاری و ارتعاشات سیستم) و زبری سطح کاهش یابد [۲۲]. به طوری که در هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس به علت ضریب انتقال حرارت بالا، خاصیت ضد اصطکاکی و خاصیت ضد سایشی آن، تأثیر عامل مذکور افزایش یافته و در نتیجه زبری سطح ماشین کاری شده شدیداً کاهش می یابد [۱۳، ۱۲، ۱۰].

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از نانوسیال برشی اکسید مس در محدوده پارامترهای ماشین کاری مورد استفاده در این پژوهش، موجب بهبود شرایط ماشین کاری به شرح زیر می شود:

- نانوسیال اکسید مس در تمامی شرایط ماشین کاری موجب کاهش نیروهای ماشین کاری می شود و مقدار کاهش آن به طور میانگین نسبت به حالت ماشین کاری خشک ۲۴٪ و نسبت به ماشین کاری با روغن حل شونده ۲۰٪ است.

- استفاده از نانوسیال برشی اکسید مس در شرایط مختلف ماشین کاری فولاد ابزار AISI 4340 تأثیر زیادی روی کیفیت سطح قطعه کار دارد، به طوری که کاربرد آن مقدار زبری سطح را به طور میانگین به ترتیب ۴۹٪ و ۴۵٪ نسبت به حالت خشک و روغن حل شونده، کاهش داده است.

- در بین شرایط مختلف ماشین کاری کمترین نیروی ماشین کاری در سرعت پیشروی ۰/۱ میلی متر بر دور و سرعت برشی ۴۰۰ متر بر دقیقه در هنگام استفاده از نانوسیال برشی اکسید مس حاصل شد.

- در بین حالت های مختلف ماشین کاری کمترین زبری سطح در سرعت پیشروی ۰/۱ میلی متر بر دور و سرعت برشی ۲۵۰ متر بر دقیقه در هنگام استفاده از نانوسیال برشی اکسید مس به دست آمد.

#### ۵- مراجع

- [1] N. S. K. Reddy, P. V. Rao, Selection of an optimal parametric combination for achieving a better surface finish in dry milling using genetic algorithms, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 463-473, 2005.
- [2] P. Vamsi Krishna, R. R. Srikant, D. Nageswara Rao, Experimental investigation on the performance of nanoboric acid suspensions in SAE-40 and coconut oil during turning of AISI 1040 steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 10, pp. 911-916, 2010.
- [3] F. Klocke, H. Kratz, Advanced Tool Edge Geometry for High Precision Hard Turning, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 47-50, 2005.
- [4] Y. K. Chou, H. Song, Tool nose radius effects on finish hard turning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, No. 2, pp. 259-268, 2004.
- [5] Y. Yildiz, M. Nalbant, A review of cryogenic cooling in machining processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 9, pp. 947-964, 2008.