







## Effect of Nanofluids on Internal Cooling of Milling Tools for Vehicle Part Machining

Mehrdad Honarmand<sup>1</sup>, Hadi Moshrefzadeh-Sani<sup>2</sup>, Alireza Hajian<sup>3</sup>,  
Mehdi Hajian<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Na.C, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

<sup>2,4</sup>Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>3</sup>Department of physics, N.a.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

---

### ARTICLE INFO

#### Article Type:

Original Research

**Received:** 21/10/2024

**Revised:** 09/07/2025

**Accepted:** 17/05/2026

#### Keyword:

Nanofluid, Internal cooling, Milling tool, COMSOL simulation, Heat transfer enhancement

#### Corresponding Author:

Mehrdad Honarmand

**Email:** [Dr.honarmand@iau.ac.ir](mailto:Dr.honarmand@iau.ac.ir)

---

### ABSTRACT

High-speed machining has emerged as a contemporary technique for manufacturing automotive parts. Accelerating the production process through milling with nano-fluid cooling via an inter-tool channel introduces a novel method to enhance both the durability and the quality of milling operations. This study examines the application of nano-fluids based on nano-diamonds, water-ethylene glycol, and water-propylene glycol in the intercooling systems of milling tools for automotive part production. Through COMSOL simulation, the results reveal that adding 5% nanofluid enhances the heat transfer coefficient by over 13%. Enhancing the concentration of nanofluid improves heat transfer efficiency, leading to a more rapid reduction in fluid temperature. Specifically, nanodiamond-based nano-fluids yield a 2% increase in the heat transfer coefficient, while ethylene glycol-based and water-propylene glycol-based nano-fluids achieve an 8% improvement. Among the tested options, propylene glycol-based fluids emerge as the optimal choice for tool cooling. By reducing the temperature in the machining zone significantly, these fluids effectively enhance the service life of cutting tools.

---

**EXTENDED ABSTRACT**

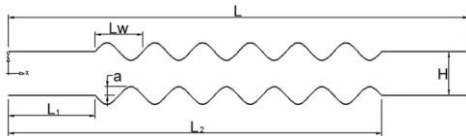

---

### Introduction

In general, cutting fluids have at least three main tasks, i.e. cooling, lubricating (reducing friction) and reducing the cutting resistance of the work piece. Previous researches focused on the number and shape of the cooling channels. In this article, the simulation of a milling tool for high volume production of car parts with a reciprocating channel of nanofluid coolant has been done. Three methods of dry cooling, emulsion and semi-dry cooling have been compared with each other supposing three main variables of milling, i.e. cutting speed, feed speed and depth of cut.

### Methodology

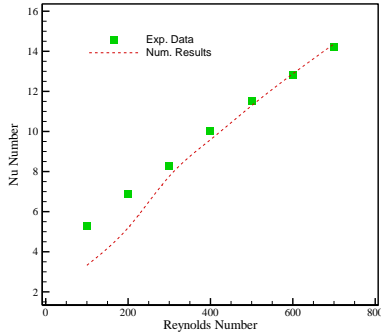
In this research, the problem is a two-dimensional channel according to Figure 1 and it consists of different parts such as the beginning and end parts (with a wall without waves and completely flat), the middle part (which is wavy with wavelengths according to Table 1) and the end part (which is flat). The initial geometry of the investigated channel is similar to the geometry used in reference [37].



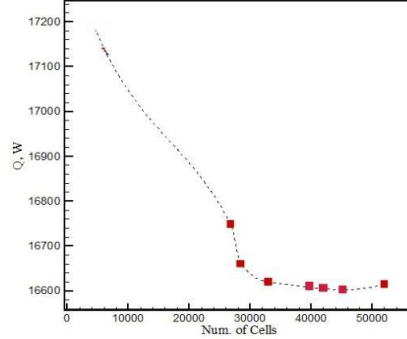
**Figure 1: Geometry investigated for validation of the solution method**

**Table 1: Geometrical parameters of the investigated channel**

Geometrical Parameter	Value (mm)
Channel Length	212
Channel Opening	20
Channel Entrance and Exit Length	40
Length from Channel Entrance to Exit of Wavy Zone	172
Wave Domain	5
Channel Wave Length	22



**Figure 2: Comparison of the results for validation**



**Figure 3: Independence results from the computing network**

In order to validate the numerical method used in this research, fluid flow with a Prandtl number of 6.93 in a wavy channel with  $\alpha = 0.3$  with a Reynolds number from 100 to 700 in a wavy channel with  $\alpha = 0.5$  is simulated and the results obtained with Laboratory data [37] have been compared. Figure 2 shows the comparison of the results, as it can be seen that the comparison of the average Nusselt number obtained from this simulation is in good agreement with the Nusselt number reported by reference [37]. In order to ensure the meshing, six meshes with the number of cells of 28,000, 33,000, 4,000, 42,000, 45,000 and 52,000 cells have been used. Results are given for average heat transfer denoted by  $Q$ . As shown in Figure 3, the results remain almost unchanged for cell numbers of 33,000 and above; Therefore, in order to reduce the cost of calculations, this grid (33000 cells) has been used during the simulation. It is added that checking the independence of results from the meshing has been done for Prandtl and Reynolds numbers of order 6.93 and 1600, as well as,  $\alpha$ ,  $\lambda$  and  $\theta$  equal to 0.3, 2.2 and  $\pi$ , respectively.

## Results and discussion

As can be seen in Figures 7-9, the use of nanofluid increases the viscosity and the heat transfer coefficient. As can be seen in Figure 10, due to the increase in viscosity, heat transfer coefficient and density of propylene glycol fluid, the best heat transfer rate is obtained, which can be used as a suitable working fluid. Comparing the speed distribution contours in Figure 11, it can be seen that with the increase in the percentage of nanoparticles due to the change in the physical properties of the flow, the flow speed has increased and as a result, the heat transfer rate has decreased. Figure 12 represents that when nanoparticles are applied, the temperature distribution is completely changed. Contrary to what was expected, when using this sample of nanofluids, the temperature decreased, so more time is needed for heat transfer Figure (13).

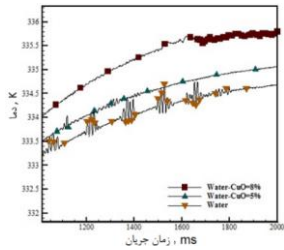


Figure 7 Comparison of temperature distribution for water and water/CuO working fluid

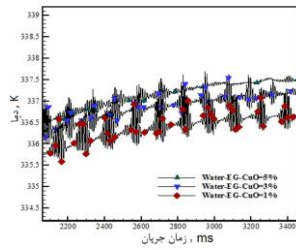


Figure 8 Comparison of temperature distribution for water and water/EG/CuO working fluid

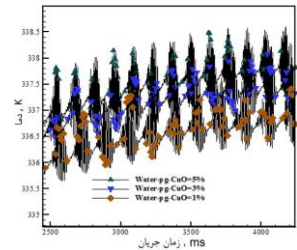


Figure 9 Comparison of temperature distribution for water and water/PG/CuO working fluid

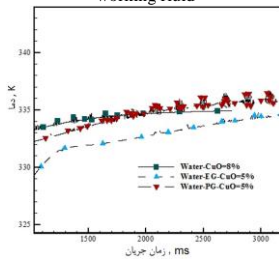


Figure 10 Comparison of temperature distribution for working fluid water/EG/CuO 5%, water/PG/CuO 5% and water/CuO 8%

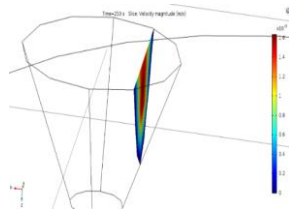


Figure 11(a) Velocity distribution contour Nanoparticles=0

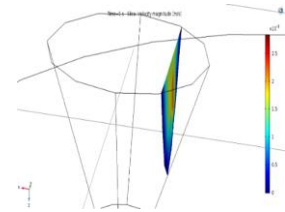


Figure 11(b) Velocity distribution contour Nanoparticles=0.1%

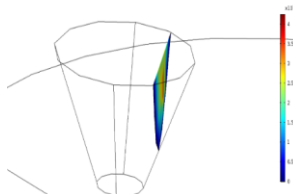


Figure 11(c) Velocity distribution contour Nanoparticles=0.3%

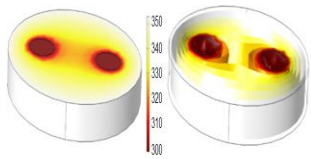


Figure 12(a) Temperature distribution contours Nanoparticles=0

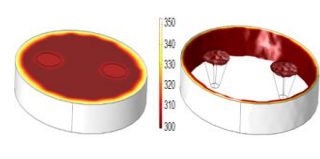


Figure 12(b) Temperature distribution contours Nanoparticles=0.1%

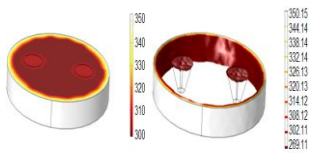


Figure 12(c) Temperature distribution contours nanoparticles=0.3%

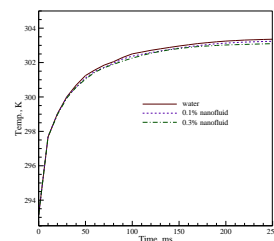


Figure 13 Temperature distribution for different times

### Conclusion

The use of water/ethylene glycol and water/propylene glycol nanofluids has a more noticeable effect on heat transfer. The use of 5% nanofluid increases the viscosity more than 3 times and the heat transfer coefficient increases more than 13%. Therefore, it can be stated that the use of nanofluid has caused more heat absorption in the wall, because in

addition to more opportunity for heat transfer due to increased viscosity, increasing the heat capacity of the working fluid with the increase of nanofluid will also help in this matter. With the increase in the percentage of nanofluid, due to the increase in the heat transfer coefficient, the temperature increases faster, which indicates the increase in the amount of heat transfer to the working fluid, with the increase in the percentage of nanofluid. This is also true for the working fluid based on propylene glycol because it increases the heat transfer time. With the increase in the percentage of nanofluid, the viscosity increases and the resistance factor against the flow causes its speed to decrease, and finally the opportunity for heat transfer will increase.



# کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت

بهار ۱۴۰۵، دوره ۲۳، شماره ۱، ۳۱-۰۰

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir>

doi : 10.48301/kssa.2026.481098.3013



## شبیه‌سازی تأثیر نانوسیالات بر انتقال حرارت داخلی ابزار فرزکاری برای ماشین کاری قطعات خودرو

مهرداد هنرمند<sup>۱</sup>، هادی مشرف زاده ثانی<sup>۲</sup>، علیرضا حاجیان<sup>۳</sup>، مهدی حاجیان<sup>۴</sup>

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

۲ و ۴- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۳- گروه فیزیک، کمیته ملی نجوم، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>دریافت مقاله:</b> ۱۴۰۳/۰۷/۳۰</p> <p><b>بازنگری مقاله:</b> ۱۴۰۴/۰۴/۱۸</p> <p><b>پذیرش مقاله:</b> ۱۴۰۵/۰۲/۲۷</p> <p><b>کلید واژگان:</b> نانوسیال، خنک کاری داخلی، ابزار فرزکاری، انتقال حرارت، شبیه سازی عددی، کامسول</p> <p><b>*نویسنده مسئول:</b> مهرداد هنرمند <b>پست الکترونیکی:</b> <a href="mailto:Dr.honarmand@iau.ac.ir">Dr.honarmand@iau.ac.ir</a></p>	<p>ماشین کاری با سرعت بالا به عنوان یک روش پیشرفته در تولید قطعات خودرو مطرح است. استفاده از خنک کاری داخلی با نانوسیالات در فرآیند فرزکاری با سرعت بالا، به عنوان روشی نوآورانه، می‌تواند منجر به بهبود کیفیت سطح ماشین کاری و افزایش عمر ابزار شود. در این پژوهش، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول، تأثیر استفاده از نانوسیالات بر پایه نانو الماس، آب/اتیلن گلیکول و آب/پروپیلن گلیکول در سیستم خنک کاری ابزارهای فرزکاری قطعات خودرو بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزودن ۵ درصد نانوسیال موجب افزایش بیش از ۱۳ درصدی ضریب انتقال حرارت می‌شود. با افزایش درصد نانوسیال، به دلیل ارتقاء ضریب انتقال حرارت، دمای سیال خنک‌کننده سریع‌تر بالا می‌رود. شبیه‌سازی‌ها مشخص کردند نانوسیالات بر پایه نانو الماس توانایی افزایش انتقال حرارت به میزان ۲ درصد را دارند، در حالی که استفاده از نانوسیالات آب/اتیلن گلیکول و آب/پروپیلن گلیکول میزان انتقال حرارت را حدود ۸ درصد افزایش می‌دهد. از میان گزینه‌های بررسی‌شده، سیال پایه پروپیلن گلیکول به عنوان مناسب‌ترین انتخاب برای خنک کاری ابزارهای برشی شناخته شد، زیرا با کاهش چشمگیر دمای منطقه ماشین کاری می‌تواند عمر ابزار را به طور قابل توجهی افزایش دهد.</p>

## مقدمه

در فرآیند فرزکاری، از یک ابزار برشی چرخان که دارای حرکت رفت و برگشتی می باشد استفاده می گردد. قطعه کار گیره بندی گردیده و توسط ابزار براده برداری می گردد. با این روش، می توان قطعاتی متنوع با سطوحی با درجات زبری مختلف و دقت ابعادی تا حدود ۰٫۱ میلی متر تولید کرد [۱]. هدف اصلی مهندسان ساخت و تولید، ارتقای کیفیت قطعات، کاهش زمان فرزکاری و کم کردن هزینه های تولید است. برای بهبود کیفیت سطح، باید عواملی نظیر زبری قطعات تولیدی مورد بررسی قرار گیرد. در عملیات ماشین کاری با دستگاه فرز، عواملی مانند سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش، جنس قطعه کار، نوع تیغچه فرز، پیچیدگی شکل قطعه، نیروی ماشین کاری و نوع سیال اعمالی تأثیرگذار هستند. هرگونه تغییر در این پارامترها می تواند بر کیفیت سطح قطعه و همچنین دمای فرزکاری اثر بگذارد [۲].

عملیات ماشین کاری همواره با تولید حرارت همراه است. یکی از روش های موثر برای کاهش این حرارت، استفاده از روانکارهای مناسب است. در حال حاضر، تنوع گسترده ای از روانکارها در این حوزه مورد استفاده قرار می گیرند. انتخاب صحیح روانکار به عوامل مختلفی از جمله نوع فرآیند ماشین کاری، نوع ابزار و پارامترهای مرتبط بستگی دارد [۳].

هدف اصلی در این فرآیند، تولید قطعه ای با دقت ابعادی بالا، صافی سطح مطلوب و شرایط اقتصادی مناسب است. به کارگیری روانکارهای مناسب می تواند مزایایی چون افزایش عمر ابزار برش، بهبود کیفیت سطح قطعه کار، کاهش نیروهای برشی و توان مصرفی به دلیل کاهش اصطکاک، کاهش تغییر شکل قطعه ناشی از حرارت، جلوگیری از تشکیل لبه انباشته، سهولت در جدا شدن براده ها و دفع مؤثر آن ها از ناحیه ابزار و سطح ماشین کاری را به همراه داشته باشد [۴].

با این حال، استفاده از روانکار موجب هزینه های مختلف مانند راه اندازی سیستم های مکانیکی گردش روانکار، جمع آوری براده ها و تصفیه روانکار را به همراه دارد. ضروری است که این هزینه ها از طریق کاهش هزینه تولید و ارتقای کیفیت سطح جبران شوند. به طور کلی، سیال های برش وظایف اساسی همچون خنک کاری، کاهش اصطکاک و تسهیل در فرآیند برش قطعه کار را بر عهده دارند. انجام این وظایف باعث کاهش سایش ابزار و در نتیجه پایین آمدن هزینه ها و زمان فرآیند ماشین کاری می شود [۱].

## پیشینه پژوهش

ماسودا و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۳ اولین محققانی بودند که مفهوم نانوسیالات را به شکل امروزی آن استفاده کردند. نانوسیالات به سیالاتی اطلاق می شود که شامل ذرات بسیار ریز در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند و این ذرات در یک سیال پایه مانند آب یا اتیلن گلیکول به صورت پایدار توزیع شده اند. در سال های اخیر، نانوسیالات در بسیاری از زمینه های مهندسی نظیر سیستم های خورشیدی، خنک کاری قطعات الکترونیکی، کاربردهای پزشکی، پیل های سوختی، راکتورهای هسته ای و افزایش راندمان سیستم های حرارتی مورد توجه قرار گرفته اند. تحقیقات گسترده ای نیز پیرامون ویژگی های این سیالات تحت شرایط مختلف، به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. نتایج این تحقیقات اغلب نشان دهنده بهبود چشمگیر انتقال حرارت نانوسیالات در مقایسه با سیال پایه می باشد.

ژاون و لی [۶] در سال ۲۰۰۰، هدایت حرارتی نانوسیال های آب/اکسید مس و روغن/اکسید مس را در غلظت های حجمی بین ۱٫۴۲ تا ۱٫۸۷ درصد، از طریق آزمایش های تجربی و تحلیل های نظری بررسی کردند. یافته های آن ها حاکی از افزایش ۲٫۵ تا ۷٫۵ درصدی در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بود. نتایج مشابهی نیز

در زمینه بهبود هدایت حرارتی نانوسیالات توسط داس و همکاران [۷] و همچنین ژو و همکاران [۸] ارائه شده است.

در سال ۲۰۱۶، راوو و سریواستاوا با [۹] انجام آزمایش‌هایی بر روی مشخصات انتقال حرارت نانوسیالات رقیق در شرایط جریان طبیعی نتیجه گرفتند که میدان جابه‌جایی طبیعی به شدت به غلظت نانوسیالات وابسته است. علاوه بر این، در پتانسیل تحریک بالاتر، افزایش غلظت نانوذرات موجب بهبود اختلاط در لایه سیال شده و نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.

همچنین در همان سال، بوحلب و عباسی [۱۰] تحلیل عددی بر روی انتقال حرارت و جریان سیال در حالت جابه‌جایی طبیعی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات به سیال پایه سبب بهبود راندمان انتقال حرارت می‌شود. آن‌ها همچنین تأکید کردند که قطر ذرات جامد نقش کلیدی در راندمان انتقال حرارت دارد و تأثیر آن از غلظت نانوسیالات نیز مهم‌تر است.

در سال ۲۰۱۵، شرم و همکاران [۱۱] در مطالعه‌ای عددی به بررسی جابه‌جایی آزاد پایا در یک محفظه دوزنقه‌ای شکل و قائم‌الزاویه، پر شده با نانوسیال، پرداختند. آن‌ها از مدل ریاضیاتی بونگیورنو استفاده کرده و به نتایج مهمی دست یافتند. این بررسی نشان داد که تغییرات محسوس در جریان و میدان دما، در مقایسه با محفظه متخلخل مربعی که به‌طور جزئی گرم شده بود، مشاهده می‌شود. به‌طور ویژه، این نتایج محل کمینه انتقال حرارت در عرض محفظه را پیش‌بینی کردند، موضوعی که به‌طور مستقیم در مبحث عایق‌بندی حرارتی ساختمان‌ها اهمیت دارد.

در مطالعه دیگری که توسط همین گروه انجام گرفت [۱۲]، بررسی اولیه برای یک محیط سه‌بعدی توسعه یافت. نتایج جدید نشان داد که در شرایط اعداد رایلی و لوییس پایین و پارامتر ترموفورسیس بالا، توزیع نانوذرات به صورت ذاتی غیرهمگن است. این یافته‌ها تأکید کردند که استفاده از یک مدل غیرهمگن برای توصیف چنین سامانه‌هایی کارآمدتر خواهد بود.

همچنین در سال ۲۰۱۶، شرم و همکاران [۱۳] جابه‌جایی طبیعی گذرا را در یک محفظه با دیواره موج‌دار متخلخل، که با نانوسیال پر شده بود، مطالعه کردند. موضوع این تحقیق بررسی چگونگی پراکندگی حرارتی بود. نتایج آن‌ها شامل ارائه خطوط جریان، خطوط هم‌دما و توزیع عدد نوسلت متوسط در امتداد دیواره موج‌دار بود که نکات تازه‌ای در زمینه انتقال حرارت ارائه کرد.

خنک‌کاری غیرمستقیم در حال حاضر کاربرد گسترده‌ای در صنعت پیدا کرده است. در این روش، طی فرایند خنک‌کاری داخلی ابزار برش، مایع خنک‌کننده تحت فشار از طریق کانال‌های داخلی ابزار به داخل هدایت شده و گرما را از ناحیه کار دور می‌کند.

ناویس و همکاران [۱۴] اثر خنک‌کاری داخلی با فشار بالا را بر فولاد ضد زنگ AISI 316 مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که سطح جانبی برش نسبت به ماشین‌کاری خشک یا ماشین‌کاری با خنک‌کاری خارجی به‌شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد.

پنگ و همکاران [۱۵] روشی برای خنک‌کاری داخلی تحت فشار در سنگ‌زنی سوپراآلیاژ نیکل GH4169 ارائه داده و با هدف دستیابی به بازدهی حرارتی بالاتر، دمای سنگ‌زنی را کاهش دادند. همچنین، زبری سطح نسبت به روش‌های متداول خنک‌کاری بهبود یافت.

ژانگ و همکاران [۱۶] فرایند فرز‌کاری فولاد H13 با استفاده از خنک‌کاری داخلی را مطالعه کرده و از سه کانال خنک‌کننده بهره بردند. آن‌ها دریافتند که طراحی سیستم خنک‌کاری داخلی با یک کانال مستقیم دوپل، کنترل مؤثری بر سطح جانبی برش اعمال می‌کند.

حق پرست و همکاران [۱۷] در پژوهش خود به بررسی تأثیر استفاده از مبرد به‌عنوان سیال خنک‌کننده بر انحراف ابعادی و زبری سطح در فرآیند تراشکاری فولاد ۱۰۴۵ پرداختند و نتایج را با سیال آب-صابون مقایسه کردند. یافته‌ها نشان داد که به دلیل قدرت بالای سرمایش و کنترل بهتر دمای ناحیه برش، مبرد نسبت به سیال آب-صابون می‌تواند در فرآیند ماشین‌کاری سبب کاهش فرسایش ابزار شود و به‌عنوان یکی از سیال‌های خنک‌کننده مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

پناهی زاده و همکاران [۱۸] بهینه‌سازی پارامترهای سایش ابزار و زبری سطح در فرآیند ماشین‌کاری با استفاده از ابزارهای تحت عملیات تبرید را با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تراشکاری فولاد ضدزنگ AISI 304 با ابزارهای عملیات تبرید شده، در مقایسه با روش‌های تراشکاری خشک و معمولی، به بهبود کیفیت سطح قطعه کار و کاهش زبری آن منجر می‌شود.

در مطالعه دیگری، کریم زاده قویدل و همکاران [۱۹] به بررسی تأثیر خنک‌کننده‌های گازی بر خصوصیات سطح در فرزکاری پلی‌تترافلوئوراتیلن پرداختند. ماشین‌کاری با سرعت بالا (HSM)، به‌عنوان یک تکنیک ماشین‌کاری پیشرفته و مدرن، کاربرد گسترده‌ای در تولید قطعات پیچیده دارد و هدف آن تضمین بهره‌وری و کیفیت بالاست. این روش ابتدا برای ماشین‌کاری اجزا و تجهیزات هواپیماها و موشک‌های ساخته شده از آلومینیوم و آلیاژهای مرتبط توسعه یافت و سپس به صنایع دیگری مانند خودروسازی نیز راه یافت. سرعت ماشین‌کاری در این تکنیک بین ۱۰ تا ۱۵ برابر بیشتر از ماشین‌کاری معمولی است. ابزارهای برشی متداول به دلیل دمای بسیار بالای حاصل از این فرآیند نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، زیرا عمر مفید آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد. از این‌رو، توسعه ابزارهای برشی پیشرفته برای ماشین‌کاری با سرعت بالا، به‌منظور برآورده کردن نیازهای صنعتی و افزایش دوام ابزارها، امری اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود.

در این مقاله، شبیه‌سازی ابزار فرزکاری برای تولید انبوه قطعات خودروبی با استفاده از کانال‌های رفت و برگشتی و مواد خنک‌کننده مبتنی بر نانو سیالات انجام شده است. پژوهش‌های پیشین بیشتر بر بررسی تعداد و طراحی کانال‌های خنک‌کننده متمرکز بوده‌اند. این مطالعه تلاش کرده است تأثیر نوع سیال برشی، به‌ویژه انواع مختلف نانو سیالات، را به‌صورت جامع مورد تحلیل قرار دهد و به سوالات زیر پاسخ دهد:

۱- کدام نانو سیالات می‌تواند باعث بهبود شرایط خنک‌کاری در عملیات فرزکاری شود و بهترین نانو سیال در این زمینه کدام می‌تواند باشد.

۲- تأثیر غلظت نانو سیالات در بهبود انتقال حرارت هنگام ماشین‌کاری چگونه خواهد بود.

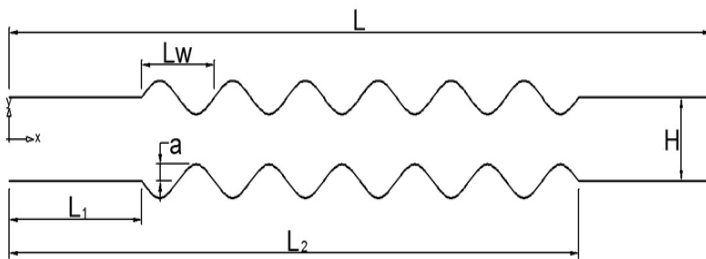
## روش‌شناسی

در سیالات معمولی، انتقال جرم و حرارت ذاتاً به یکدیگر مرتبط نیستند، اما در نانو سیالات، به دلیل جابجایی دوپخش، ارتباط و تعامل بین آن‌ها رخ می‌دهد. این موضوع به این دلیل است که چگالی مخلوط سیال وابسته به هر دو عامل دما و غلظت است. بنابراین، انتخاب مدل مناسب برای انتقال جرم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای شبیه‌سازی جریان در مسئله مورد بررسی، از سه مدل فیزیکی مختلف استفاده شده است.

برای شبیه‌سازی فرآیند انتقال و جابه‌جایی یون‌ها، از مدل انتقال گونه‌های رقیق‌شده در ماژول مهندسی شیمی بهره‌گیری شده و تحلیل جریان سیال نیز بر اساس مدل جریان در ماژول میکروفلوئیدیک انجام گرفته است. علاوه بر این، میدان الکتریکی داخل کانال‌ها با استفاده از مدل الکترواستاتیک موجود در ماژول AC/DC مورد بررسی قرار گرفته است. ماژول میکروفلوئیدیک قابلیت شبیه‌سازی جریان‌های پایدار و گذرا را در ابعاد دوبعدی و سه‌بعدی دارد. حضور یون‌های باردار و نیروهای اندروالسی ممکن است خوشه‌های نانوذرات را ایجاد

کرده و بر انتقال جرم و حرکت سیال اثر بگذارد. در این شرایط، مدل الکترواستاتیک ضروری است. برای شبکه بندی هندسی مسئله، از ابزار تولید شبکه داخلی نرم‌افزار COMSOL استفاده شد. پیش از آغاز شبه‌سازی، تنظیمات حل‌کننده انتخاب گردید. برای هر سه فیزیک اصلی شامل جریان سیال، الکترواستاتیک و انتقال جرم، از حل‌کننده ساکن استفاده شد. حضور نانوذرات با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر، انتقال حرارت و جرم جدیدی را ممکن می‌سازد که بر پیچیدگی رفتار نانوسیالات ویسکوالاستیک افزوده است. به همین دلیل، از یک سیستم حل غیرخطی برای مسئله استفاده شد.

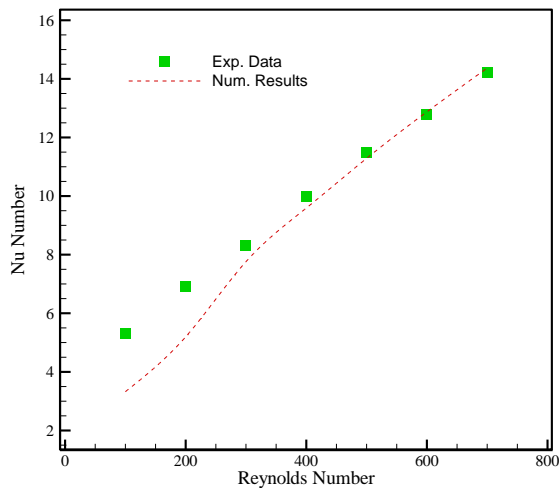
مرحله پایانی شامل تحلیل نتایج حاصل از شبه‌سازی عددی است که با استفاده از ابزارهای مختلف گرافیکی، رسم نمودارها و تدوین جدول انجام می‌شود. در این پژوهش، کانال مورد بررسی نمونه‌ای دوبعدی است که مطابق شکل (۱) تعریف شده است. این کانال شامل بخش‌های ابتدایی و انتهایی کاملاً تخت بدون موج، بخش میانی با ساختار موج‌دار دارای طول موج‌هایی مطابق با جدول (۱) و مجدداً بخش انتهایی تخت می‌باشد. هندسه اولیه کانال مشابه هندسه استفاده‌شده در مرجع [۲۰] طراحی شده است.



شکل ۱: هندسه مورد بررسی جهت اعتباربخشی روش حل

جدول ۱: پارامترهای هندسی کانال مورد بررسی

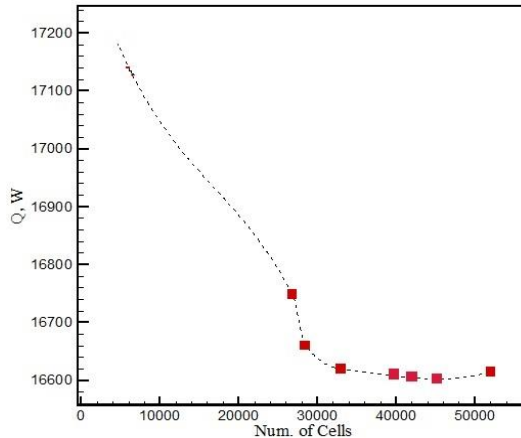
اندازه (میلی‌متر)	پارامتر هندسی
۲۱۲	طول کانال
۲۰	دهانه کانال
۴۰	طول ناحیه‌ی ورودی و خروجی کانال
۱۷۲	فاصله از ابتدای کانال تا انتهای ناحیه‌ی موج‌دار
۵	دامنه موج کانال
۲۲	طول موج کانال



شکل ۲: مقایسه نتایج تحقیق حاضر و مرجع [20] به منظور اعتبارسنجی نتایج

رأی اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده در این پژوهش، جریان سیال با عدد پرانتل  $6093$  در کانالی موج‌دار با مقدار  $\alpha$  برابر  $0,3$  و عدد رینولدز بین  $100$  تا  $700$  شبه‌سازی شده و نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [20] مقایسه شده است. شکل ۲ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت متوسط به دست آمده از شبه‌سازی تطابق مطلوبی با مقادیر گزارش شده در مرجع مذکور دارد.

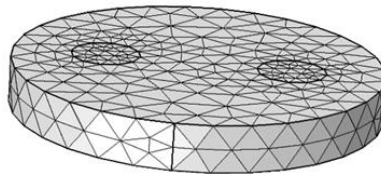
برای اطمینان از کفایت شبکه‌بندی، از شش گرید با تعداد سلول‌های  $28000$ ،  $33000$ ،  $40000$ ،  $42000$ ،  $45000$  و  $52000$  استفاده شده است. نتایج مربوط به انتقال حرارت متوسط که با  $Q$  نمایش داده شده، ارزیابی گردیده است. مطابق شکل ۳، از تعداد سلول‌های  $33000$  به بالا تغییرات قابل توجهی در نتایج مشاهده نشده است؛ بنابراین، جهت کاهش هزینه محاسبات از گرید  $33000$  سلولی در طول فرآیند شبه‌سازی بهره گرفته شده است. لازم به ذکر است که آزمون استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای اعداد پرانتل و رینولدز به ترتیب برابر با  $6,93$  و  $1600$ ، و همچنین مقادیر  $\alpha$ ،  $\lambda$  و  $\theta$  به ترتیب برابر با  $0,3$ ،  $0,2$  و  $\pi$  انجام شده است.



شکل ۳: نتایج استقلال از شبکه محاسباتی

### استفاده از نانوسیال در تیغه برش

این بخش به بررسی اثرات بهره‌گیری از نانوسیالات با هدف تحلیل توزیع دما و میزان انتقال حرارت در زمان کارکرد دستگاه می‌پردازد. برای این منظور، از هندسه معرفی شده در شکل ۴ استفاده شده است. در این هندسه، قطر بزرگ ۸ سانتی‌متر، قطر کانال‌ها ۲ سانتی‌متر و ضخامت ابزار ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز جریان ورودی ۵۰ فرض شده که نشان‌دهنده جریان آرام بوده و نیازی به استفاده از مدل آشفتگی نیست. همچنین ابزار با سرعت چرخش ۸۰ دور در دقیقه فعالیت دارد. نکته مهم در این بررسی، حفظ دمای ثابت ۳۵۰ کلوین برای لبه تیغه است که در طول محاسبات بدون تغییر باقی مانده است.



شکل ۴: شبکه بندی میدان محاسباتی

در این مقاله، نانوسیال با خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده است. جریان برای مقادیر عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ به صورت لایه‌ای و برای مقادیر بیش از ۴۰۰۰ به صورت آشفتنه فرض می‌شود. برای تهیه معادلات حاکم و حل مسئله، فرضیات مشخصی لحاظ شده‌اند؛ از جمله اینکه جریان پایا و تراکم‌ناپذیر است. همچنین خواص سیال مانند لزجت، ضریب هدایت گرمایی، و گرمای ویژه به صورت ثابت فرض شده‌اند. برای یک المان کوچک از سیال، سه معادله اصلی شامل معادلات پایستگی، انرژی، مومنتوم و پیوستگی نوشته شده و سپس با ساده‌سازی، معادلات نهایی حاکم بر جریان حاصل گردیده است.

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار کام‌سول انجام شده‌اند. تغییرات در نوع نانو سیال از طریق تغییر در خواص ترموفیزیکی آن اعمال شده است. نمودار موجود در شکل (۵) نشان‌دهنده میزان خطای محاسباتی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در انتهای هر مرحله محاسبات، خطای میدان دما حدود ۰،۰۰۱ و خطای میدان سرعت حدود ۰،۰۰۴ برآورد شده است که حاکی از دقت بالای محاسبات است. علاوه بر این، شکل (۶) نمودار مربوط به باقیمانده حل را نشان می‌دهد که مطابق مشاهده، حل در حوالی مقدار باقیمانده ۰،۰۰۲ به همگرایی رسیده است.

در این بخش از تحقیق، از شش نوع سیال عامل مختلف شامل آب، ترکیب آب و نانو سیال CuO، آب-اتیلن گلیکول، آب-اتیلن گلیکول با نانو سیال CuO، آب-پروپیلن گلیکول و آب-پروپیلن گلیکول همراه با نانو سیال CuO استفاده شده است. خواص این ترکیبات در جداول ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۲: مقایسه خواص ترموفیزیکی آب، آب/اتیلن گلیکول و آب/پروپیلن گلیکول با پایه آب (بر حسب در صد حجمی)

وزن مخصوص (SG)	ظرفیت حرارتی مخصوص (Cp)	دمای جوش (°C)	دمای انجماد (°C)	سیال
۱	۱	۱۰۰	۰	آب
۱/۰۹	۰/۷۶۸	۱۹۷	-۵۲/۸	اتیلن گلیکول (۶۰٪)
۱/۰۴۶	۰/۸۰۵	۱۰۷/۲	-۴۸	پروپیلن گلیکول (۶۰٪)

جدول ۳: خواص ترموفیزیکی نانو سیالات آب، آب/اتیلن گلیکول و آب/پروپیلن گلیکول با نانو ذرات اکسید مس با

غلظت‌های مختلف ( $D_{ave} = 50nm, T = 20^{\circ}C$ )

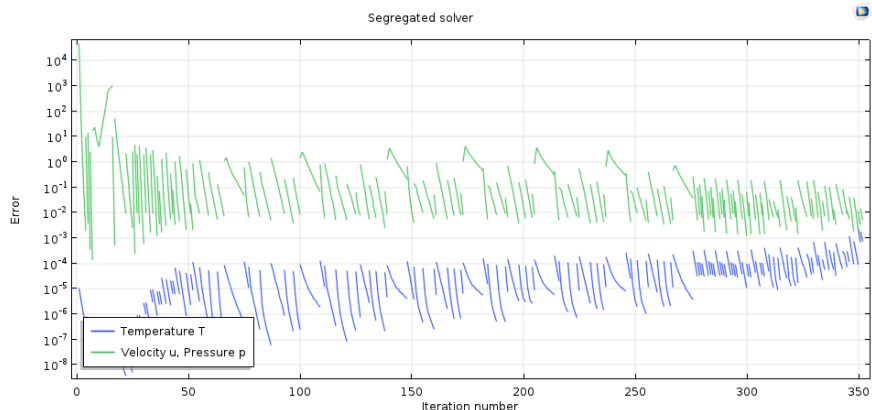
ویسکوزیته (kg/ms)	رسانایی گرمایی (W/mK)	ظریب گرمایی ویژه (J/kgK)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سیال
0.00096	0.602	4183.2	997.8	آب
0.00312	0.694	3993.3	1394.8	آب + 5% CuO
اتیلن گلیکول				
0.0052	0.39	3094	1066.2	EG/Water (60:40%)
0.00615	0.401	3066.9	1144.9	EG/Water+1% CuO
0.00683	0.413	3039.8	1223.5	EG/Water+2% CuO
0.00908	0.426	3012.7	1302.2	EG/Water+3% CuO
0.01138	0.438	2985.6	1380.9	EG/Water+4% CuO

EG/Water+5% CuO	1459.5	2958.6	0.451	0.014
EG/Water+6% CuO	1538.2	2931.5	0.464	0.01875
پروپیلن گلیکول				
PG/Water (60:40%)	1021.7	3161.9	0.3	0.00931
PG/Water+1% CuO	1100.8	3134.1	0.309	0.01066
PG/Water+2% CuO	1179.9	3106.3	0.318	0.01327
PG/Water+3% CuO	1259	3078.6	0.328	0.01693
PG/Water+4% CuO	1338.1	3050.8	0.313	0.02126
PG/Water+5% CuO	1417.2	3023	0.347	0.02711

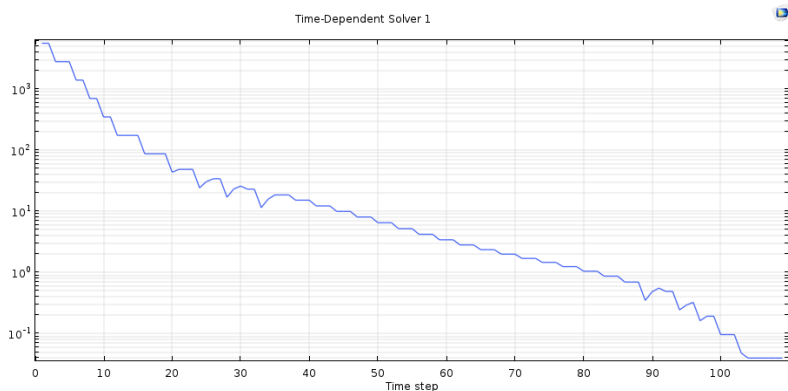
بر اساس تحلیل ابعادی مشخص شده که ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) به صورت تابعی از ویژگی‌هایی نظیر ضریب رسانش حرارتی نانو سیال (kf) و ضخامت لایه مرزی حرارتی قابل بیان است. بنابراین، بهبود نرخ انتقال حرارت را می‌توان به دو عامل کلیدی نسبت داد: اول، توانایی بالاتر انتقال حرارتی توسط نانو سیال و دوم، تغییرات در ضخامت لایه مرزی حرارتی.

هنگام بررسی مدت زمان لازم برای رسیدن به همگرایی پاسخ، مشخص شد که نانوسیال با پایه آب نسبت به نانو سیالات بر پایه آب/اتیلن گلیکول (EG) و آب/پروپیلن گلیکول (PG) سریع‌تر به حالت پایا می‌رسد. این تفاوت احتمالاً ناشی از مقادیر بالاتر ضریب نفوذ مؤثر و نسبت ظرفیت گرمایی حجمی در نانو سیالات با پایه آب در مقایسه با سایر ترکیبات است.

شکل (۷) توزیع دما در زمان‌های مختلف را برای سیال‌های عامل شامل آب، آب همراه با ۵ درصد نانوسیال CuO و ۸ درصد نانوسیال CuO نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش درصد نانوسیال، حرارت دیواره تیغه سریع‌تر به سیال عامل منتقل می‌شود. این امر را می‌توان به افزایش ویسکوزیته سیال عامل نسبت داد، که موجب کاهش سرعت جریان و در نتیجه افزایش زمان و فرصت برای انتقال حرارت می‌گردد.



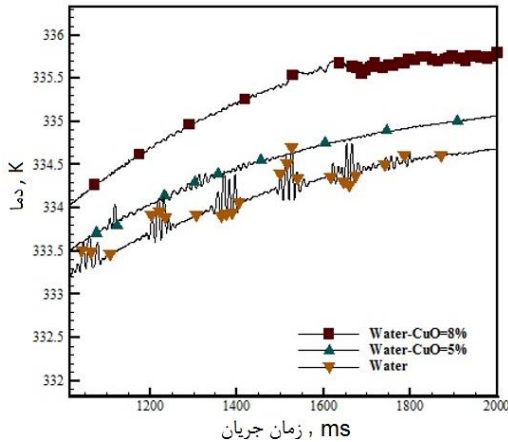
شکل ۵: میزان خطای محاسبات



شکل ۶: باقیمانده حل

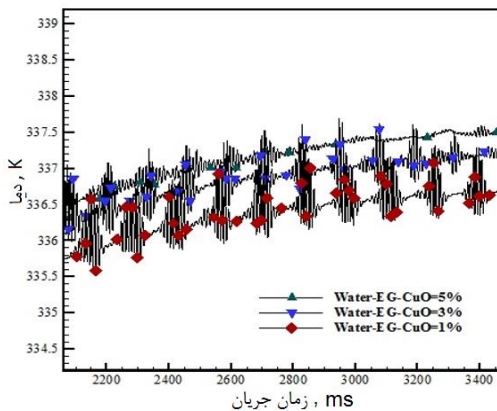
مطابق داده‌های جدول (۳)، استفاده از ۵ درصد نانو سیال باعث افزایش بیش از سه برابری ویسکوزیته و در عین حال افزایش ضریب انتقال حرارت به میزان بیش از ۱۳ درصد می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیال منجر به جذب حرارت بیشتر از دیواره می‌شود. این بهبود نه تنها به دلیل افزایش ویسکوزیته و زمان بیشتر برای انتقال حرارت رخ می‌دهد، بلکه افزایش ظرفیت گرمایی سیال عامل با افزودن نانوسیال نیز نقشی مؤثر در این فرآیند دارد.

شکل (۷) بیانگر توزیع دما در سیالات عامل مختلف، از جمله آب-اتیلن گلیکول حاوی نانو سیال‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد  $\text{CuO}$  در زمان‌های گوناگون است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد نانو سیال، به دلیل بالا رفتن ضریب انتقال حرارت، دما سریع‌تر افزایش یافته و این امر نشان‌دهنده بهبود انتقال حرارت در سیال عامل با افزایش درصد نانو سیال است. این پدیده برای سیال‌های مبتنی بر پروپیلن گلیکول نیز صادق است، زیرا افزایش درصد نانوسیال باعث کاهش زمان انتقال حرارت می‌شود.



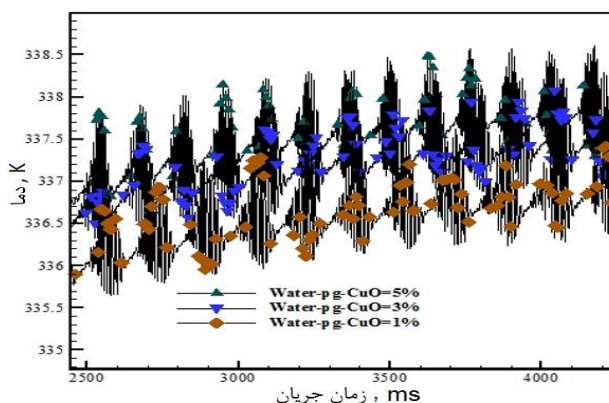
شکل ۷: مقایسه توزیع دما برای سیال عامل آب و آب/CuO

با مراجعه به جدول (۳)، مشاهده می‌شود که ضریب ویسکوزیته برای سیالات حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد نانوسیال به ترتیب برابر ۰،۰۰۶۱۵، ۰،۰۰۹۰۸ و ۰،۱۱۳۸ است. این افزایش لزجت با افزایش درصد نانوسیال بیانگر مقاومت بیشتر در برابر جریان است که منجر به کاهش سرعت سیال و ایجاد فرصت بیشتر برای انتقال حرارت می‌شود. از سوی دیگر، بر اساس همین جدول، ضریب انتقال حرارت با افزایش درصد نانوسیال برای مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد به ترتیب به اعداد ۰،۴۰۱، ۰،۴۲۶ و ۰،۴۵۱ می‌رسد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که انتقال حرارت جابجایی (Convective Heat Transfer) نیز با افزایش درصد نانوسیال بهبود یافته است.



شکل ۸: مقایسه توزیع دما برای سیال عامل آب و آب/EG/CuO

علاوه بر موارد ذکر شده، با بررسی شکل (۹) مشاهده می‌شود که تغییرات دما در سیال عامل دارای نوساناتی است که نشان‌دهنده ماهیت دینامیکی و زمانمند بودن شبیه‌سازی محسوب می‌شود.

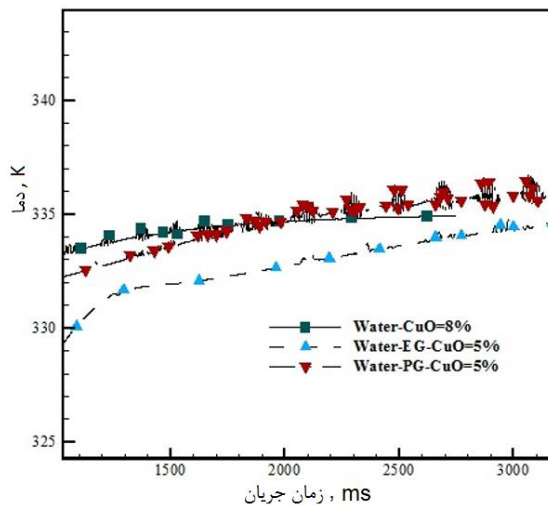


شکل ۹. مقایسه توزیع دما برای سیال عامل آب و آب/CuO/PG

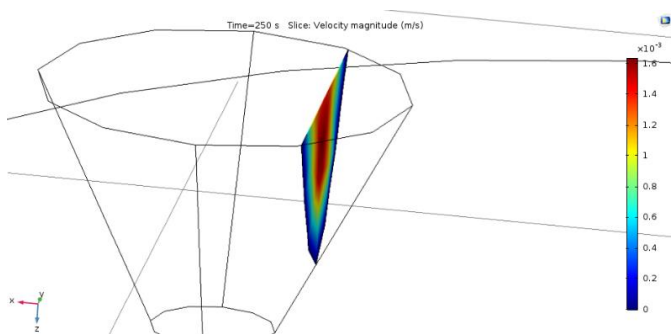
شکل (۹) توزیع دما را برای سیالات مبتنی بر PG با درصد‌های مختلف که در تصویر مشخص شده‌اند، نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، افزایش در صد نانوذرات به افزایش میزان انتقال حرارت منجر شده است.

همان‌طور که ذکر شد، با افزایش در صد نانو سیالات می‌توان بیشترین میزان انتقال حرارت را برای سیالات هم‌خانواده به دست آورد. در این بخش، سیالاتی که در مقایسه با سایر اعضای هم‌خانواده خود بالاترین انتقال حرارت را داشتند، بررسی و مقایسه شده‌اند. نتایج این مقایسه‌ها در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل افزایش ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت و چگالی، سیال عامل مبتنی بر پروپیلن گلیکول بهترین عملکرد را در انتقال حرارت نشان می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان یک سیال عامل مناسب در نظر گرفته شود.

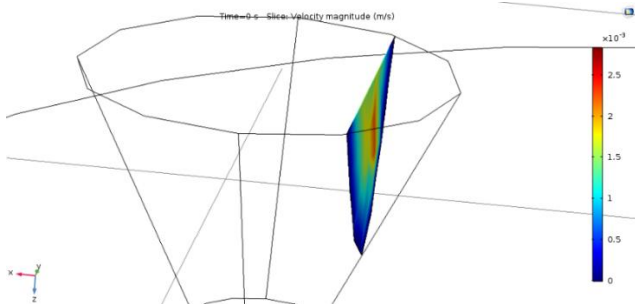
با مقایسه کانتورهای توزیع سرعت در شکل (۱۱) مشخص می‌شود که با افزایش در صد نانوذرات، به دلیل تغییر در خصوصیات فیزیکی جریان، سرعت آن افزایش یافته است. نتیجه این تغییر، کاهش نرخ انتقال حرارت بوده است. در ادامه، شکل (۱۲) کانتورهای توزیع دما را برای درصد‌های مختلف نانوذرات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزودن نانوذرات، توزیع دما به طور قابل توجهی تغییر کرده است. همچنین، با توجه به شکل (۱۳)، بر خلاف انتظار، استفاده از این نوع نانوسیالات باعث کاهش دما شده که در نتیجه آن زمان بیشتری برای انتقال حرارت مورد نیاز خواهد بود.



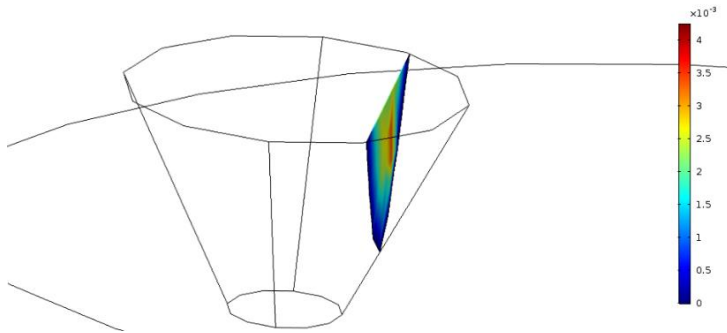
شکل ۱۰: مقایسه توزیع دما برای سیال عامل آب/CuO/EG ۵ درصد، آب/CuO/PG ۵ درصد و آب/CuO ۸ درصد



الف- بدون نانو ذره

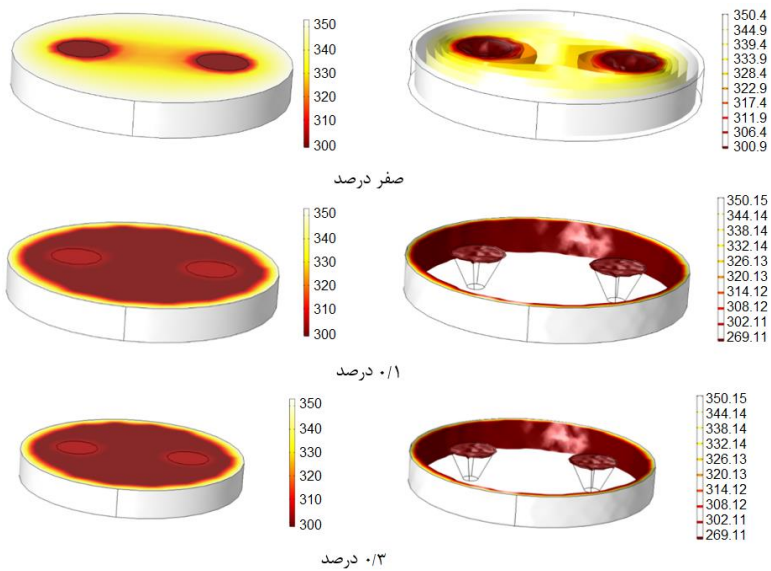


ب- ۰٫۱ درصد نانو ذره

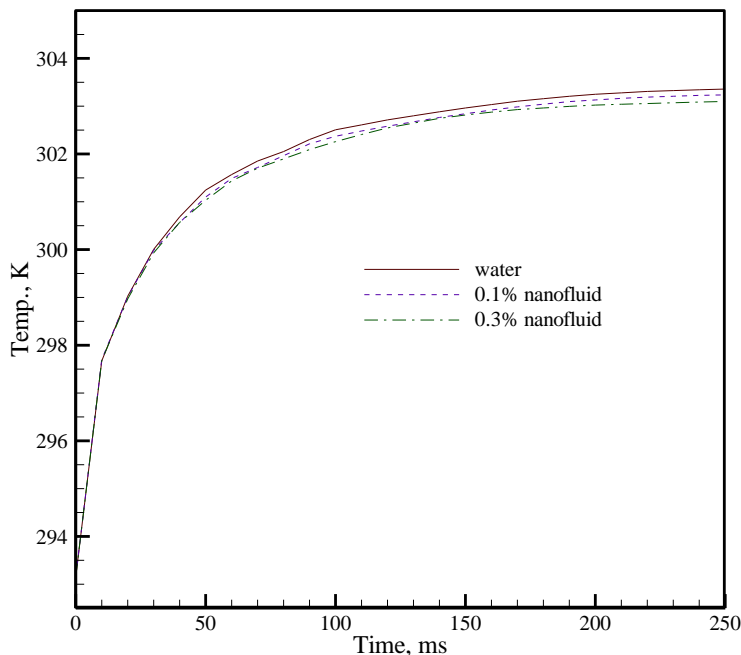


ج-۳، ۰٫۳ درصد نانوذره

شکل ۱۱: کانتور توزیع سرعت برای درصد‌های مختلف نانوذرات



شکل ۱۲: کانتورهای توزیع دما



شکل ۱۳: توزیع دما برای زمان‌های مختلف

## نتیجه‌گیری

این تحقیق به تحلیل جریان نانوسیال و عملکرد انتقال حرارت داخلی تیغه برش تک کاناله با بکارگیری شبه‌سازی در نرم‌افزار کامسول پرداخت. در مدل‌سازی، ابزار برشی با ابعاد قطر ۸ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر لحاظ شده است. شرایط جریان ورودی با عدد رینولدز ۵۰ طراحی گردید که خصوصیات جریان آرام را نشان داده و نیاز به استفاده از مدل آشفتگی را حذف می‌کند. همچنین در این شبه‌سازی، سرعت چرخش ابزار معادل ۸۰ دور در دقیقه تنظیم شده است.

نانوسیالات مبتنی بر نانوالماس تأثیر چشمگیری بر بهبود انتقال حرارت از خود نشان دادند، با این حال، بررسی‌ها حاکی از کارایی بیشتر نانوسیالات ترکیبی مانند آب/اتیلن گلیکول و آب/پروپیلن گلیکول هستند که در افزایش بهره‌وری انتقال حرارت عملکرد بهتری داشته‌اند.

اضافه نمودن ۵٪ نانوسیال به سیال پایه موجب افزایش بیش از سه برابر لزجت آن شده و در عین حال ضریب انتقال حرارت را حدود ۱۳ درصد ارتقاء داد. چنین تغییری حاکی از موثرتر شدن فرایند جذب حرارت توسط دیواره‌ها بوده که عوامل مؤثر در بهبود آن شامل افزایش زمان تماس حرارتی ناشی از افزایش لزجت و همچنین ظرفیت گرمایی بالاتر سیالات هستند.

افزایش غلظت نانوسیال، به طور روشنی در بهبود ضریب انتقال حرارت و سرعت جذب حرارت توسط سیال نقش آفرینی می‌کند. این تغییر رفتار در سیالات مبتنی بر پروپیلن گلیکول نیز مشاهده گردید. با افزایش در صد نانوسیال، لزجت سیال بالا می‌رود و در نتیجه جریان کندتر شده و زمان بیشتری برای تبادل حرارت فراهم می‌آید. چنین شرایطی در نرخ انتقال حرارت بیشتر نمود یافته و به‌ویژه در سیالات بر پایه پروپیلن گلیکول،

قابلیت اثربخشی ارتقاء فرایند انتقال حرارت را مطرح می‌سازد. از تطبیق این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که این رده از نانوسیالات گزینه‌ای موثر برای بهبود عملکرد ماشین‌کاری محسوب می‌شوند.

## References

- [1] Chan, T. C., Li, J. D., Farooq, U., & Ullah, A. (2024). Improving machining accuracy of complex precision turning-milling machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(1), 211-227. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13088-8>
- [2] Mohanraj, T., Kirubakaran, E. S., Naren, M. L., & Suganithi Dharshan, P. (2024). Review of advances in tool condition monitoring techniques in the milling process. *Measurement Science and Technology*, 35(9), 092002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/AD519B>
- [3] Chan, T. C., Li, J. D., Farooq, U., & Ullah, A. (2024). Improving machining accuracy of complex precision turning-milling machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(1), 211-227. <https://doi.org/10.1007/S00170-024-13088-8/METRICS>
- [4] Maurya, S. K., Campatelli, G., & Veracini, M. (2024). Experimental characterization of energy consumption in 5-axis milling machine and developing optimization strategy. *Procedia CIRP*, 122, 1024-1029. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2024.01.138>
- [5] Lee, S., Choi, S. S., Li, S. A., & Eastman, J. A. (1999). Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. <https://doi.org/10.1115/1.2825978>
- [6] Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of heat and fluid flow*, 21(1), 58-64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- [7] Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., & Roetzel, W. (2003). Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of heat transfer*, 125(4), 567-574. <https://doi.org/10.1115/1.1571080>
- [8] Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., & Wu, Q. (2002). Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of applied physics*, 91(7), 4568-4572. <https://doi.org/10.1063/1.1454184>
- [9] Rao, S. S., & Srivastava, A. (2016). Interferometric study of natural convection in a differentially-heated cavity with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water based dilute nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 1128-1142. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.074>

- [10] Bouhaleb, M., & Abbassi, H. (2016). Numerical investigation of heat transfer by CuO–water nanofluid in rectangular enclosures. *Heat Transfer Engineering*, 37(1), 13-23. <https://doi.org/10.1080/01457632.2015.1025003>
- [11] Sheremet, M. A., Groşan, T., & Pop, I. (2015). Steady-state free convection in right-angle porous trapezoidal cavity filled by a nanofluid: Buongiorno’s mathematical model. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 53, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2015.06.003>
- [12] Sheremet, M. A., Pop, I., & Rahman, M. M. (2015). Three-dimensional natural convection in a porous enclosure filled with a nanofluid using Buongiorno’s mathematical model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 396-405. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.066>
- [13] Sheremet, M. A., Pop, I., & Bachok, N. (2016). Effect of thermal dispersion on transient natural convection in a wavy-walled porous cavity filled with a nanofluid: Tiwari and Das’ nanofluid model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 1053-1060. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.071>
- [14] Naves, V. T. G., Da Silva, M. B., & Da Silva, F. J. (2013). Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. *Wear*, 302(1-2), 1201-1208. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.016>
- [15] Peng, R., Huang, X., Tang, X., Chen, R., & Hu, Y. (2018). Performance of a pressurized internal-cooling slotted grinding wheel system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5), 2239-2254. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1014-6>
- [16] Zhang, C., Zhang, S., Yan, X., & Zhang, Q. (2016). Effects of internal cooling channel structures on cutting forces and tool life in side milling of H13 steel under cryogenic minimum quantity lubrication condition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5), 975-984. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7644-7>
- [17] Haghparast, M. J., Motahari, A., & Khalaj, G. (2023). The Effect of Applying R410a Refrigerant as a Cooling Fluid on Dimensional Deviation and Surface Roughness in Turning 1045 Steel Compared to Soap-water Fluid. *Karafan Journal*, 20(3), 193-219. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_172817.html](https://karafan.tvu.ac.ir/article_172817.html) (in Persian)
- [18] Panahizadeh, V., Abootorabi, M. M., & Saliminia, A. (2022). Optimization of Tool Wear and Surface Roughness in Machining with Cryogenic Treated Tool Using Genetic Algorithm. *Karafan Journal*, 19(1), 565-581. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_140680.html](https://karafan.tvu.ac.ir/article_140680.html) (in Persian)

- [19] Karimzad Ghavidel, A., & Kiani, G. (2021). Experimental Study of the Gaseous Coolants Influence in the Milling of Polytetrafluoroethylene on the Surface Characteristics. *Karafan Journal*, 18(3), 343-367. [https://karafan.tvu.ac.ir/article\\_130311.html](https://karafan.tvu.ac.ir/article_130311.html) (in Persian)
- [20] Wang, C. C., & Chen, C. K. (2002). Forced convection in a wavy-wall channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(12), 2587-2595. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00335-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00335-0)