

تحلیل انتقال حرارت وابسته به زمان میکرولوله محتوی نانوسیال تحت شار حرارتی متغیر با زمان

محمد حسینی^{۱*}، میثم خالویی^۲، عباس زندی باغچه مریم^۳

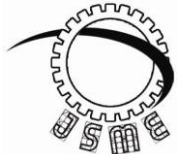
* نویسنده مسئول: hosseini@sirjantech.ac.ir

واژه‌های کلیدی	چکیده
میکرولوله نانوسیال انتقال حرارت شار حرارتی متغیر با زمان.	در این مقاله تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت وابسته به زمان میکرولوله محتوی نانوسیال در جریان آرام بررسی شده است. در این بررسی، انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال و سیال پایه و تحلیل گذرا برای شار حرارتی متغیر با زمان، به‌ازای گام زمانی 10^{-4} ثانیه بررسی شده است. مشاهده شد که با افزایش کسر حجمی نانوذره، قدرت پمپاژ نانوسیال و دمای حداکثر دیواره میکرولوله به ترتیب افزایش و کاهش پیدا می‌کند. حداکثر دما سیال پایه (آب) $305/6$ کلوین و برای نانوذره اکسید آلومینیوم AF با کسر حجمی سه درصد، دمای حداکثر $304/2$ کلوین می‌باشد. علاوه بر این نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال با وجود شار حرارتی پرریودیک دارای مزیت انتقال حرارتی است. از سویی دیگر نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای ذکر شده، تأثیر قابل توجهی در انتقال حرارت سیستم دارند. همچنین مشاهده گردید که با افزایش عدد رینولدز دمای حداکثر دیواره میکرولوله کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال، برای عدد رینولدز 180 ، 360 و 720 دمای حداکثر به ترتیب در $307/8$ کلوین، $304/6$ کلوین و $302/8$ کلوین رخ می‌دهد. علاوه بر این افزایش کسر حجمی نانوذره موجب کاهش در تغییرات دما می‌شود. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج روابط تئوریک موجود که در تطابق خوبی با نتایج تجربی بوده‌اند، مقایسه شده است.
تاریخ ارسال: ۹۵/۰۴/۲۶	
تاریخ بازنگری: ۹۵/۰۶/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۲	

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان، سیرجان، ایران

۳- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران



Journal of
Solid Mechanics
in Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Time Dependent Analysis of Micro-tube Conveying Nanofluids Under Time-Varying Heat Flux

Mohammad Hosseini^{1,*}, Meisam Khaloei², Abbas Zandi Baghche Maryam³

* Corresponding Author: hosseini@sirjantech.ac.ir

Abstract:

In this paper the numerical analysis of flow and time dependent heat transfer of micro-tube conveying nanofluid in laminar flow is investigated. In this study, convection heat transfer of nanofluid and base fluid and transient analysis for time-varying heat flux for time step of 10^{-4} second are elucidated. It is observed that the pumping power of nanofluid flowing and the maximum temperature of micro-tube wall, respectively, is increased and decreased with increases in the volume fraction of nanoparticle. The maximum temperature of base fluid (water) is $305.6K$ and the maximum temperature is $304.2K$ for alumina oxide nanoparticle AF with volume fraction 3%. In addition, the results show that using nanofluid has the advantage of heat transfer despite periodic heat flux. However, the results show that these parameters are vital in investigation of the heat transfer of system. Also, It is obvious that the maximum temperature of micro-tube wall decreases with increase in the Reynolds number. For example, for Reynolds numbers 180, 360 and 720, the maximum temperatures occur at $307.8K$, $304.6K$ and $302.8K$, respectively. In addition, it is indicated that the variation of temperature decreases when the volume fraction of nanoparticles increases. Also the results of numerical modeling are compared with those available in literature and good agreement is observed.

Key words:

Micro-tube
Nanofluid
Heat transfer
Time-varying heat flux.

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

2- M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

3- M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

۱- مقدمه

آب-آلومینا جاری در یک مجرا با دمای ثابت دیواره را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۴].

۵. مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در رژیم جریان آرام کاملاً توسعه یافته، در سال ۲۰۰۹، توسط هوانگ و همکارانش بررسی شد. آن‌ها افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات آب-اکسید آلومینیوم جاری در سرتاسر لوله دایره‌ای تحت شار حرارتی ثابت در رژیم جریان آرام کاملاً توسعه یافته را به صورت تجربی به دست آوردند. نتایج تجربی آن‌ها برای ضریب اصطکاک در تطابق بسیار خوبی با رابطه تحلیلی داری بود. همچنین آن‌ها نشان دادند که رابطه شاه در تطابق خوبی با نتایج تجربی آن‌ها است [۶]. میر معصومی و بهزادمهر در سال ۲۰۰۸، جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال آب-آلومینا را در ناحیه کاملاً توسعه یافته، به صورت عددی مطالعه کردند. تحلیل آن‌ها که شامل در نظر گرفتن مدل مخلوط دو فازی بود، این نتیجه را در برداشت که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با کاهش قطر متوسط نانوذرات، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۷]. مطالعه عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و آرام نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در یک مجرا، توسط ایزدی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ بررسی شد. ایشان همچنین نشان دادند که با افزایش کسر حجمی نانوذره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد [۸]. در سال ۲۰۰۹، اثر اندازه ذره بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در ناحیه کاملاً توسعه یافته، توسط آنوب و همکارانش بررسی شد. مطالعه تجربی ایشان این نتایج مهم را در برداشت که هر دو نانوسیال نسبت به سیال پایه، ویژگی‌های انتقال حرارتی بهتری دارند و همچنین در ناحیه در حال توسعه، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش بیشتری نسبت به ناحیه کاملاً توسعه یافته دارد [۹]. مروجی و همکارانش در سال ۲۰۱۱، مدل‌سازی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال در ناحیه توسعه یافته لوله را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. ایشان اثر اندازه

سیالات متداولی که در زمینه انتقال حرارت استفاده می‌شوند، ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. ذرات جامد به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی‌شان با توزیع در سیال پایه، باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می‌گردند. سیستم‌های خنک کننده، یکی از مهمترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صناعی مانند میکروالکترونیک است. با پیشرفت فناوری در صناعی مانند میکروالکترونیک که در مقیاس‌های زیر صد نانومتر در آنها عملیات‌های سریع و حجیم با سرعت‌های بسیار بالا (چند گیگا هرتز) اتفاق می‌افتد، استفاده از تجهیزات با توان و بار گرمایی بالا اهمیت به‌سزایی پیدا می‌کند. بنابراین استفاده از سیستم‌های خنک کننده پیشرفته و بهینه، کاری اجتناب‌ناپذیر است. بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال گرمای موجود، در اکثر مواقع به وسیله افزایش سطح آن‌ها صورت می‌گیرد، که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه‌ها می‌شود. لذا برای غلبه بر این مشکل، به خنک‌کننده‌های جدید و مؤثر نیاز است. جهت بهبود خواص انتقال حرارت سیالات متداول، دانشمندان از تعلیق ذرات ریز با ابعاد میکرومتر و میلی‌متر در سیال استفاده کردند و برای سوسپانسیون حاصل نام میکروسیال را گذاشتند. این کار اولین بار توسط ماکسول [۱] در سال ۱۸۸۱ انجام شد. استفاده از این ذرات، مشکلاتی از قبیل رسوب‌دهی، خوردگی اجزا، افت فشار اضافی و رفتار غیر نیوتنی را به همراه داشت. با ظهور فناوری نانو، امکان ساخت ذراتی با ابعاد نانومتر فراهم شد که از پخش این ذرات بسیار ریز در سیال پایه، نانو سیال تهیه شد. واژه نانو سیال ابتدا توسط ژانگ و چوی [۲] پیشنهاد شد و از آن پس تحقیقات متعددی در رابطه با نانوسیال انجام گرفت. مشخصه‌های انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب-آلومینا جاری در لوله مسی، توسط ون و دینگ در سال ۲۰۰۴ بررسی شد و آن‌ها دریافتند که با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد [۳]. هریس و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ ضریب انتقال حرارت نانوسیال

بررسی شد. ایشان در تحقیق خود با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت به بررسی انتقال حرارت و افت فشار پرداختند. ایشان یافتند که به ازای کسر حجمی ۳ درصد از نانوذره، بیشترین افزایش در عدد ناسلت در صورت بکارگیری نانوسیال محتوی نانوذره اکسید آلومینیوم و کمترین آن در صورت بکارگیری نانوسیال محتوی نانوذره اکسیدتیتانیوم پدید می آید [۱۵]. بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در میکروکانال گرماگیر با استفاده از مدل های دینامیک سیالات محاسباتی تک فاز و چند فاز توسط قاله و همکارانش انجام شد. ایشان از مدل های تک فاز و دو فاز برای پیش بینی هیدرودینامیکی و حرارتی نانوسیالات درون میکروکانال گرماگیر استفاده کردند و یافتند که مدل دوفاز نسبت به تک فاز از دقت بیشتری برخوردار است [۱۶]. در سال ۲۰۱۶ مقایسه مدل های گوناگون برای بررسی انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم در درون لوله حرارتی توسط بهروپانا و همکارانش انجام شد. کسر حجمی در نظر گرفته شده توسط ایشان ۱٫۶ درصد و عدد رینولدز ۱۶۰۰ بود. ایشان یافتند که مدل تک فاز غیر نیوتنی در پیش بینی عدد ناسلت نسبت به مدل تک فاز نیوتنی دقیق تر است [۱۷]. با توجه به بررسی های صورت گرفته، عمده کارهای انجام گرفته در زمینه نانوسیالات مربوط به بررسی حالت پایا بوده و در مورد تحلیل وابسته به زمان کارهای بسیار اندکی یافت می شود. لذا در تحقیق کنونی تحلیل غیر دائم جریان و انتقال حرارت نانوسیالات تحت شار حرارتی متغیر با زمان به طور کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل سازی عددی

۲-۱- روابط خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

در این قسمت خواص ترموفیزیکی نانوسیالات شامل چگالی نانوسیالات، ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات، ویسکوزیته نانوسیالات و هدایت حرارتی نانوسیالات بررسی می شود، که به ترتیب از روابط زیر محاسبه می شوند [۱۸]:

$$\rho_{nf} = (1 - \Phi) \rho_{bf} + \Phi \rho_p \quad (1)$$

ذره روی ضریب انتقال حرارت جابه جایی را در محدوده عدد رینولدز ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ بررسی کردند. ایشان همچنین براساس نتایج مدل سازی، برای پیش بینی عدد ناسلت رابطه ای را ارائه کردند که در تطابق خوبی با نتایج تجربی قبلی بود [۱۰]. بزرگان و همکاران کاربرد نانوسیالات اتیلن گلیکول - اکسید آلومینیوم به عنوان سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دو لوله ای را بررسی کردند. محدوده کسر حجمی نانوذره مورد استفاده توسط ایشان ۰ تا ۷ درصد بود. ایشان در تحقیق خود، علاوه بر اثبات اثر بخشی استفاده از نانوسیال در مبدل حرارتی دو لوله ای، این موضوع را نیز بیان کردند که استفاده از نانوسیالات هزینه های پمپاژ را افزایش می دهد [۱۱]. تحلیل عددی جابه جایی اجباری آرام و گذرا نانوسیال در مجراهای دایره ای در سال ۲۰۱۲، توسط اوزان سرت و همکارانش انجام شد. ایشان در این مطالعه عددی که از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم استفاده کردند، انتقال حرارت و جریان آرام و گذرا غیر قابل تراکم را در یک مجرا دایره ای، تحت تغییر در دمای دیواره و شار حرارتی دیواره مورد بررسی قرار دادند. ایشان نشان دادند که نانوسیالات نسبت به سیالات پایه، افزایش بیشتری را در ضریب انتقال حرارت جابه جایی ایجاد می کنند [۱۲]. حقیقی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ کارایی خنک کاری نانوسیالات در لوله با قطر کوچک را مورد بررسی قرار دادند. ایشان افزایش انتقال حرارت در صورت بکارگیری نانوسیالات را مشاهده نمودند، ولی معتقد به افزایش افت فشار در صورت بکارگیری نانوسیالات نبودند [۱۳]. داور نژاد و همکارانش در سال ۲۰۱۴، در شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) خود که با استفاده از نرم افزار فلوئنت و گمیت انجام دادند، اثر اندازه نانوذره را بر روی انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال در ناحیه توسعه یافته، بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذره، ضریب انتقال حرارت جابه جایی افزایش می یابد [۱۴]. در سال ۲۰۱۴ پیش بینی عددی مشخصه های انتقال حرارت نانوسیالات در درون مینی کانال ها توسط ادیل و همکارانش در سال ۲۰۱۴

پرداخته شده است. یک جریان متناوب، جریان الکتریکی است که در آن اندازه‌ی جریان به صورت چرخه‌ای تغییر می‌کند. برخلاف جریان مستقیم که در آن اندازه‌ی جریان مقدار ثابتی می‌ماند، جریان متناوب به وسیله‌ی ولتاژ متناوب ایجاد می‌شود. ولتاژ متناوب را می‌توان به صورت تابعی از زمان، توسط معادله‌ی (۸) تعریف کرد:

$$V(t) = V_{peak} \cdot \sin(\omega t) \quad (8)$$

در رابطه بالا V_{peak} بیانگر ولتاژ حداکثر بر حسب ولت، ω فرکانس زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه و t زمان بر حسب ثانیه است. رابطه بین ولتاژ و توان تحویل داده شده، به صورت رابطه (۹) است [۲۰]:

$$P(t) = \frac{V^2(t)}{R} \quad (9)$$

که $P(t)$ بیانگر توان لحظه‌ای و R بیانگر مقاومت الکتریکی معادل مدار می‌باشد. با جایگزینی رابطه (۸) در معادله (۹)، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$P(t) = C \sin^2(\omega t) \quad (10)$$

که در رابطه فوق $C = \frac{V_{peak}^2}{R}$ در نظر گرفته شده است. چنانچه راندمان دستگاه الکترونیکی η باشد، لذا قسمتی از توان الکتریکی که تبدیل به حرارت می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$q(t) = (1-\eta)P(t) = c_1 \sin^2(\omega t) \quad (11)$$

در رابطه فوق $c_1 = (1-\eta)C$ در نظر گرفته شده است. شار حرارتی ناشی از عبور جریان متناوب از دستگاه الکترونیکی، از رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۲۱]:

$$q''(t) = \frac{q(t)}{A} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) A برابر با سطحی است که برای دفع حرارت تولید شده، تعبیه شده است. با ترکیب روابط (۱۱) و (۱۲)، شار حرارتی ناشی از عبور جریان متناوب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q''(t) = c_2 \sin^2(\omega t) \quad (13)$$

که با توجه به ثابت بودن A ، $c_2 = \frac{c_1}{A}$ ضریبی ثابت می‌باشد.

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\Phi)\rho_{bf}C_{p,bf} + \Phi\rho_pC_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1+a\Phi) \quad (3)$$

$$K_{nf} = K_{bf} \left[\frac{K_p + 2K_{bf} - \frac{a}{1.25}\Phi(K_{bf} - K_p)}{K_p + 2K_{bf} + \frac{a}{2.5}\Phi(K_{bf} - K_p)} \right] \quad (4)$$

در روابط فوق ρ_p و ρ_{bf} ، ρ_{nf} به ترتیب بیانگر چگالی نانو سیال، چگالی سیال پایه و چگالی نانوذرات هستند و Φ کسر حجمی نانوذرات است. همچنین $C_{p,nf}$ ، $C_{p,bf}$ و $C_{p,p}$ به ترتیب بیانگر ظرفیت حرارتی مؤثر نانو سیال، ظرفیت حرارتی ویژه سیال پایه و ظرفیت حرارتی ویژه نانوذرات هستند. در رابطه (۳) μ_{bf} و μ_{nf} به ترتیب ویسکوزیته نانو سیال و ویسکوزیته سیال پایه هستند. همچنین a عدد ثابتی است که وابسته به خواص سطحی، شکل و اندازه نانوذرات است. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی چان و همکارانش [۱۹] مقدار a برای سه نانوذره اکسید آلومینیوم AK، AR و AF به ترتیب ۴/۹۴۰۷، ۳/۵۵۷۳ و ۱۵/۴۱۵۰ محاسبه شده است. همچنین در رابطه (۴) K_{bf} ، K_p و K_{nf} به ترتیب بیانگر هدایت حرارتی سیال پایه، هدایت حرارتی نانوذره و هدایت حرارتی نانو سیال می‌باشند. در جدول (۱) و جدول (۲) به ترتیب خواص سیالات پایه گوناگون و خواص فیزیکی نانوذرات اکسید آلومینیوم نشان داده شده است.

۲-۲- فرمولاسیون مساله

در حالت غیردائم، جریان و انتقال حرارت نانو سیالات، با معادله‌های پیوستگی، ممتنم و انرژی به ترتیب به شرح ذیل تشریح می‌شوند [۷]:

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V_m) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V_m V_m) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{nf} V_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla V_m) \quad (6)$$

$$\rho_{nf} c_{p,nf} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_m \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) + \mu_{nf} (\nabla^2 V_m) \quad (7)$$

با توجه به اینکه تحقیق حاضر مربوط به انتقال حرارت میکرو لوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان می‌باشد لذا در این قسمت به استخراج رابطه شار حرارتی که بدلیل عبور جریان متناوب از مدارات الکترونیکی ایجاد می‌شود

مرزی اعمال شده شامل شرط مرزی ورودی سرعت، شرط مرزی خروجی فشار و شرط مرزی دیواره بالایی می‌باشند. ضمن اینکه به دلیل وجود تقارن محوری در هندسه مفروض، به دلیل کاهش هزینه‌های محاسباتی، مرز محور به مرز پایین میکرولوله اختصاص می‌یابد، که بدین ترتیب تنها نیمی از مسئله در نرم افزار مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در شکل (۱) شماتیکی از هندسه دوبعدی میکرولوله به همراه شرایط مرزی نشان داده شده است. همچنین شکل (۲) شبکه ایجاد شده در نرم افزار گمبیت را نشان می‌دهد.

۳-۲- تأیید کار عددی انجام شده

در این قسمت به بررسی استقلال نتایج از شبکه ایجاد شده و همچنین تأیید نتایج عددی استخراج شده با مقایسه با پژوهش‌های دیگر در این زمینه پرداخته شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه ایجاد شده، شبکه مورد نظر در ۷ مرحله ریز شده است و شبکه‌ای که با ریزتر کردن آن تغییری در نتایج حاصل ایجاد نشده، به عنوان شبکه منتخب برای محاسبات در نظر گرفته شده است. در کلیه موارد انجام شده در این قسمت و قسمت‌های دیگر، مگر در مواردی که اشاره شده باشد، سیال مورد نظر آب مایع و سرعت ورودی سیال ۳ متر بر ثانیه و یکنواخت انتخاب شده است و دمای ورودی سیال به میکرولوله ۲۹۸٫۱۵ درجه کلوین و فشار خروجی سیال عامل از میکرولوله برابر ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است. همچنین شار حرارتی اعمال شده به دیواره‌های میکرولوله ۱۰۰۰۰۰ وات بر متر مربع است.

شکل (۳) استقلال نتایج از شبکه را برای ضریب اصطکاک داری نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، با افزایش تعداد نودهای شبکه از ۲۲۴۶۴ نود، تغییر بسیار کمی در نتایج ضریب اصطکاک در ناحیه کاملاً توسعه یافته مشاهده می‌شود، لذا شبکه منتخب شبکه‌ای متشکل از ۲۲۴۶۴ نود می‌باشد.

جدول (۱) خواص فیزیکی سیالات پایه

سیال	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	ظرفیت حرارتی ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	هدایت حرارتی ($\frac{W}{m \cdot K}$)	ویسکوزیته ($\frac{kg}{m \cdot s}$)
آب مایع	۹۹۸/۲	۴۱۸۲	۰/۶	۰/۰۰۱۰۰۳
اتیلن گلیکول	۱۱۱۱/۴	۲۴۱۵	۰/۲۵۲	۰/۰۱۵۷
روغن موتور	۸۸۹	۱۸۴۵	۰/۱۴۵	۱/۰۶

جدول (۲) خواص فیزیکی نانوذرات اکسید آلومینیوم [۱۱]

اکسید آلومینیوم	نانوذرات AK	نانوذرات AR	نانوذرات AF
شرکت سازنده	شرکت دگاسا	شرکت ان-ای
اندازه (nm)	۴۳	۲۷-۴۳	۷
شکل	کروی	کروی	میله‌ای
سطح	آب گریز	آب دوست	آب دوست
گرمای ویژه ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	۷۶۵	۷۶۵	۷۶۵
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	۳۹۷۰	۳۹۷۰	۳۹۷۰
هدایت حرارتی ($\frac{W}{m \cdot K}$)	۳۶	۳۶	۳۶

۳-۳- شبیه‌سازی عددی

۳-۱- تولید هندسه و شبکه

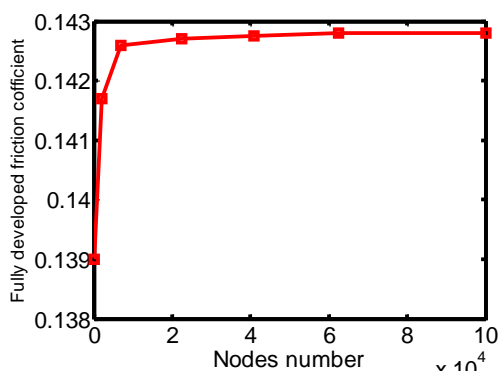
برای تولید هندسه میکرولوله به قطر ۱۵۰ میکرومتر و طول ۳۰ میلی‌متر که می‌تواند برای عملیات خنک کاری از تجهیزات ریز الکترونیکی مورد استفاده قرار بگیرد، از نرم افزار پیش پردازشگر گمبیت (Gambit) استفاده شده است. گمبیت یک نرم افزار یکپارچه جامع پیش پردازشگر برای تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی است. با توجه به تقارن محوری که در مسئله وجود دارد، هندسه دوبعدی در نظر گرفته شده است. پس از تولید هندسه، شبکه بندی میدان حل با استفاده از المان‌های چهار ضلعی و به صورت سازمان یافته انجام شده است. به دلیل اینکه گرادیان‌های شدید سرعت در دیواره میکرولوله رخ می‌دهند، لذا از یک شبکه غیر یکنواخت با ضریب غیر یکنواختی ۱/۱ جهت ریز کردن شبکه در نزدیکی دیواره استفاده شده است. شرایط

شرایط توسعه یافتگی حرارتی که در آن عدد ناسلت در حدود ۴/۳۶ است، برقرار می‌شود.

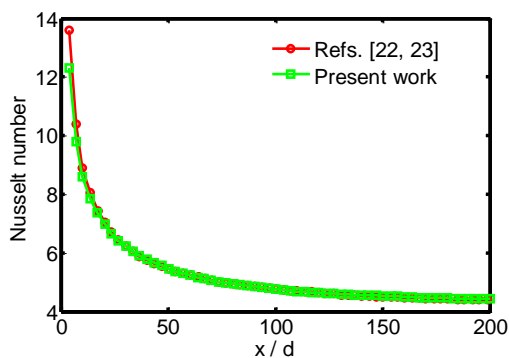
۴- نتایج عددی و بحث

۴-۱- تحلیل وابسته به زمان با شار حرارتی ثابت

در شکل (۵) نمودار سرعت حداکثر بر حسب زمان برای نانوسیال با نانوذرات اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، اختلاف زیادی بین نانوسیال و سیال پایه در رسیدن به حداکثر سرعت حالت پایا وجود ندارد. در این شکل نتایج نشان می‌دهد که سرعت حالت پایا نانوسیال با کسرهای حجمی مختلف تقریباً در سرعت ۵/۹۸ متر بر ثانیه رخ می‌دهد.

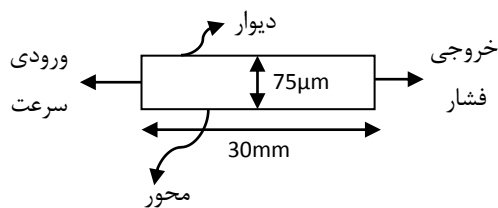


شکل (۳) بررسی استقلال نتایج ضریب اصطکاک از شبکه ایجاد شده

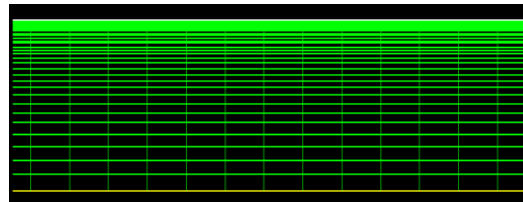


شکل (۴) مقایسه عدد ناسلت موضعی کار کنونی با مراجع [۲۳، ۲۲]

در شکل (۶) نمودار فشار حداکثر بر حسب زمان برای سیال پایه و نانوسیال با کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که نانوسیال نسبت به سیال پایه، زودتر به فشار حداکثر حالت پایا می‌رسد و با افزایش کسر حجمی نانوذره این روند سرعت



شکل (۱) شماتیک میکرولوله و شرایط مرزی در نظر گرفته شده



شکل (۲) شبکه ایجاد شده در نرم افزار گمیت

همچنین برای تأیید کار گذرا انجام شده به دلیل نبود مورد تجربی مشابه، از مقایسه عدد ناسلت موضعی حالت پایا با نتایج رابطه شاه و همکارانش [۲۳، ۲۲] که در تطابق خوبی با نتایج تجربی [۶] بوده است، استفاده شده است. رابطه (۱۴) معرف رابطه شاه و همکاران [۲۳، ۲۲] می‌باشد که از این رابطه جهت مقایسه نتایج استفاده شده است.

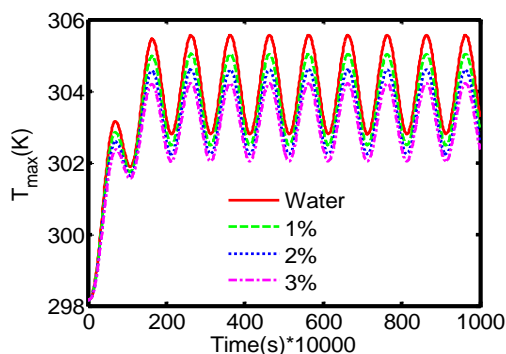
$$Nu_x = \quad (14)$$

$$\begin{cases} 1.302x_*^{-1/3} - 1 & x_* < 0.0005 \\ 1.302x_*^{-1/3} - 0.5 & 0.0005 < x_* < 0.0015 \\ 4.364 + 8.68(10^3 x_*)^{-0.506} \exp(-41x_*) & x_* > 0.001 \end{cases}$$

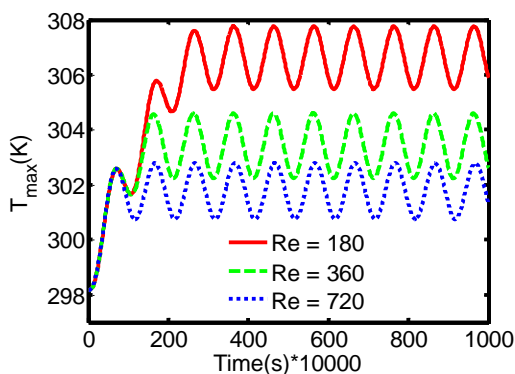
$$Nu_x = \frac{h(x)d}{k}, \quad x_* = \left[\frac{\frac{x}{d}}{Re_d \cdot Pr} \right] \quad (15)$$

در رابطه فوق، $Re_d T$ به ترتیب بیانگر اعداد بدون بعد پرانتل و رینولدز هستند. شکل (۴) مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی کار کنونی را با نتایج رابطه شاه و همکاران [۲۳، ۲۲] نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و نتایج رابطه شاه و همکاران [۲۳، ۲۲] با درصد اختلاف کمتر از ۱ درصد وجود دارد. در ورودی میکرولوله، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی حداکثر است. دلیل بیشینه بودن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در ورودی میکرولوله را می‌توان کوچک بودن لایه مرزی در این ناحیه دانست و به تدریج در طول میکرولوله که گرادیان دما بیشتر می‌شود، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند و

کمتری نسبت به حالت نوسانی و منظم ایجاد شده است. استفاده از نانوسیالات باعث کاهش اختلاف حد بالایی نوسانات دمایی با حد پایین این نوسانات می‌شود و با افزایش کسر حجمی نانوذره، این اختلاف کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشخص شد که حداکثر دما برای سیال پایه دمای ۳۰۵/۶ کلوین و برای کسر حجمی ۳ درصد ۳۰۴/۲ کلوین می‌باشد. به منظور بررسی اثر عدد رینولدز بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم A با کسر حجمی دو درصد استفاده شده است و نتایج در شکل (۸) بیان شده است. همان‌گونه که در شکل (۸) دیده می‌شود با افزایش عدد رینولدز دمای حداکثر دیواره میکرولوله کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر را می‌توان افزایش یافتن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش عدد رینولدز بیان کرد، به طوری که در عدد رینولدز ۱۸۰ دمای حداکثر ۳۰۷/۸ کلوین، در رینولدز ۳۶۰ دمای حداکثر ۳۰۴/۶ کلوین و در رینولدز ۷۲۰ دمای ۳۰۲/۸ کلوین می‌باشد.

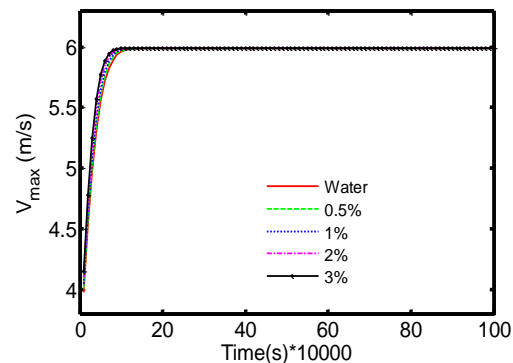


شکل (۷) بررسی اثر کسر حجمی نانوذره بر دمای حداکثر نسبت به زمان در صورت استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم AF با وجود شار حرارتی متغیر با زمان در دیواره میکرولوله

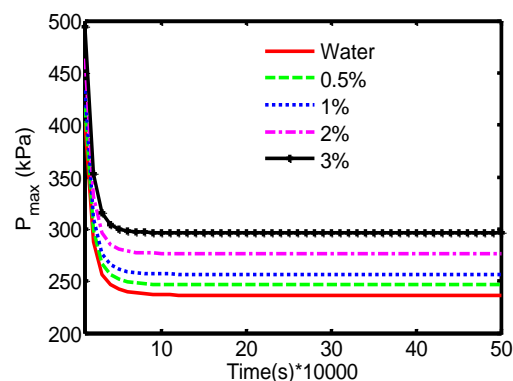


شکل (۸) بررسی اثر عدد رینولدز بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان

می‌بخشد، ولی همان‌گونه که در شکل (۶) مشخص است، فشار حداکثر در شرایط استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه، بیشتر است و در نتیجه به کارگیری نانوسیال باعث افزایش افت فشار اضافی در سیستم می‌شود. در این شکل نتایج برای سیال پایه با گذشت زمان تا فشار ۲۳۸ کیلوپاسکال روندی کاهشی و بعد از آن روندی ثابت را دارد، در صورتی که برای نانوسیال با کسر حجمی ۳ درصد این روند نزولی تا فشار حداکثر ۲۹۵ کیلوپاسکال ادامه دارد.



شکل (۵) سرعت گذرا نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم (AF)

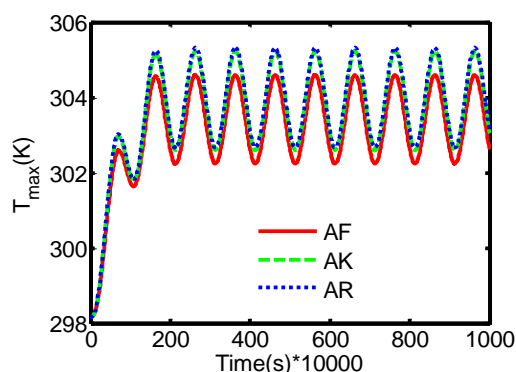


شکل (۶) فشار حداکثر نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم (AF) نسبت به زمان

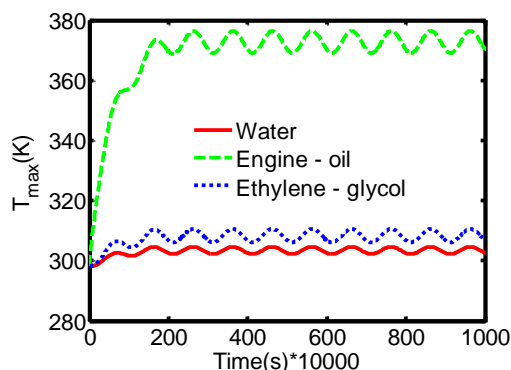
۴-۲- تحلیل وابسته به زمان با شار حرارتی متغیر

به منظور بررسی اثر شار حرارتی متغیر با زمان، از رابطه (۱۳) با ضریب $c_2 = 100000 \frac{W}{m^2}$ استفاده شده است. همچنین در این تحقیق فرکانس زاویه‌ای $\omega = 100\pi \left(\frac{rad}{s} \right)$ در نظر گرفته شده است. در شکل (۷) به بررسی اثر کسر حجمی بر دمای حداکثر با اعمال شار حرارتی متغیر با زمان پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل (۷) مشخص است، حالت گذرای ابتدایی دارای دمای

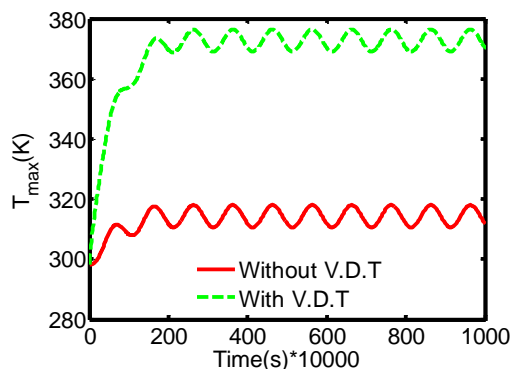
V.D.T مخفف ترم تلفات لزجت است. در این شکل مشاهده می‌شود که اختلاف دمای حداکثر در حالت با در نظر گرفتن اثر ترم تلفات لزجت نسبت به حالت بدون اثر ترم تلفات لزجت مقدار ۵۸/۶ کلوین را دارد، که مقدار قابل توجهی می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۱۱) دیده می‌شود در صورت اعمال ترم تلفات لزجت تغییر زیادی در دمای حداکثر دیواره میکرولوله پدید می‌آید، که این امر به دلیل ویسکوزیته بالای نانوسیال محتوی روغن موتور و باریک بودن هندسه میکرولوله در نظر گرفته شده است.



شکل (۹) بررسی اثر نوع نانوذره بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان



شکل (۱۰) بررسی اثر نوع سیال پایه بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان



شکل (۱۱) بررسی اثر ترم تلفات لزجت بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان

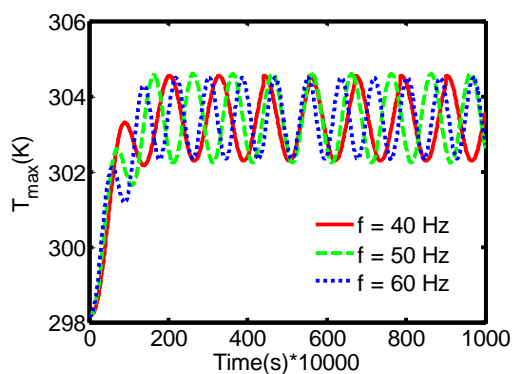
به‌منظور بررسی اثر نوع نانوذره بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله، از نانوسیال محتوی سیال پایه آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم AF، AR، و AK با کسر حجمی دو درصد استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود نانوسیالات محتوی نانوذره اکسید آلومینیوم AF دارای کمترین دمای حداکثر دیواره و نانوسیال محتوی نانوذره اکسید آلومینیوم AR بیشترین دمای حداکثر را داراست. دلیل این امر را می‌توان هدایت حرارتی بیشتر نانوسیال محتوی نانوذره اکسید آلومینیوم AF دانست که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش می‌دهد. مطابق با نتایج، دمای حداکثر برای اکسید آلومینیوم AR مقدار ۳۰۵/۳ کلوین، برای اکسید آلومینیوم AK مقدار ۳۰۴/۶ کلوین و برای اکسید آلومینیوم AF مقدار ۳۰۴/۶ کلوین را دارد.

به‌منظور بررسی اثر سیال پایه بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان از نانوسیالات محتوی نانوذره اکسید آلومینیوم AF با کسر حجمی دو درصد و سیالات پایه آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور استفاده شده است. در شکل (۱۰) به بررسی اثر نوع سیال پایه بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۰) دیده می‌شود در صورت استفاده از نانوسیال محتوی سیال پایه آب، کمترین دمای حداکثر دیواره میکرولوله و در صورت استفاده از سیال پایه روغن موتور بیشترین دمای حداکثر دیواره میکرولوله ایجاد می‌شود. دلیل این امر را می‌توان هدایت حرارتی بیشتر نانوسیال محتوی سیال پایه آب دانست که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش می‌دهد.

به‌منظور بررسی اثر ترم تلفات لزجت بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان از نانوسیال روغن موتور- اکسید آلومینیوم AF با کسر حجمی دو درصد استفاده شده است. در شکل (۱۱) بررسی اثر ترم تلفات لزجت بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان پرداخته شده است. در این شکل،

هرتز در زمان ۰/۱۶۴ ثانیه و در فرکانس ۶۰ هرتز در زمان ۰/۳۰۴ ثانیه دمای حداکثر رخ می‌دهد.

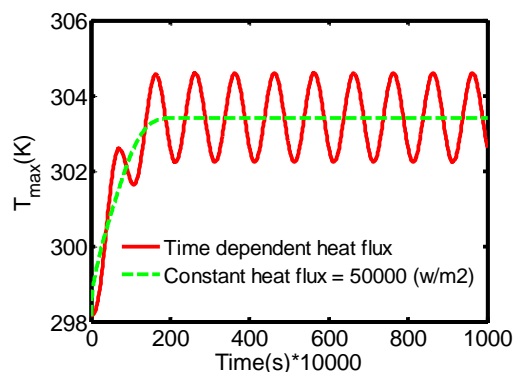
در شکل (۱۴) به بررسی اثر کسر حجمی نانوذره بر نرخ انتقال حرارت کل با وجود شار حرارتی متغیر با زمان در دیواره میکرولوله پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، افزایش کسر حجمی نانوذره تأثیر زیادی بر نرخ انتقال حرارت کل نانوسیال درون میکرولوله تحت شار حرارتی متغیر با زمان ندارد. علاوه بر این در زمان ۰/۰۴۶ ثانیه حداکثر نرخ انتقال حرارت کل برای کسر حجمی مختلف رخ می‌دهد که این مقدار برای سیال پایه (آب) مقدار ۱/۲۲۱ وات و برای کسر حجمی ۳ درصد مقدار ۱/۱۹۲ وات می‌باشد.



شکل (۱۳) بررسی اثر فرکانس بر دمای حداکثر نسبت به زمان در صورت استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم AF با وجود شار حرارتی متغیر با زمان در دیواره میکرولوله

در شکل (۱۵) به بررسی اثر نوع سیال پایه بر نرخ انتقال حرارت کل پرداخته شده است. نانوسیالات محتوی نانوذره اکسید آلومینیوم AF با کسر حجمی دو درصد و سیالات پایه آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، در ابتدا نوع سیال پایه بر نرخ انتقال حرارت کل نانوسیال گذار است، ولی با گذشت زمان تفاوتی بین سه نانوسیال محتوی سیالات پایه گوناگون دیده نمی‌شود. در این شکل حداکثر مقدار انتقال حرارت کل برای روغن موتور ۲/۶۵۲ وات، اتیلن گلیکول ۱/۲۴۵ وات و برای آب ۱/۲۰۱ وات است.

به منظور بررسی لزوم در نظر گرفتن شار حرارتی متغیر با زمان، به مقایسه دمای حداکثر دیواره میکرولوله در شرایط اعمال شار حرارتی متغیر با زمان و شرایط اعمال شار حرارتی میانگین ۵۰۰۰۰ وات بر متر مربع در شکل (۱۲) پرداخته شده است. در این نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم AF با کسر حجمی دو درصد در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، در نظر گرفتن شار حرارتی متغیر با زمان باعث برآورد دقیقتری از دمای میکرولوله می‌شود. همچنین با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که در حالت شار حرارتی ثابت در زمان ۰/۰۱۷۱ ثانیه دما به حالت پایای ۳۰۳/۴ کلوین می‌رسد، در صورتی که در حالت شار حرارتی وابسته به زمان دمای حداکثر ۳۰۴/۶ کلوین است.



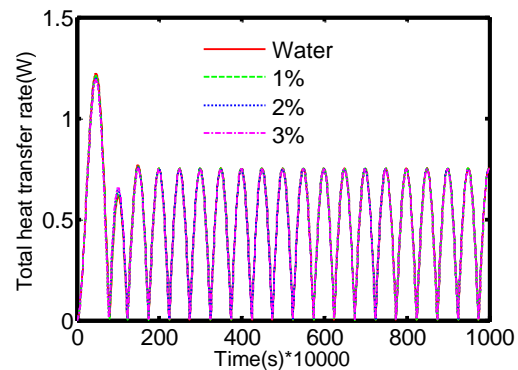
شکل (۱۲) مقایسه اثر در نظر گرفتن میانگین شار با شار حرارتی متغیر با زمان بر بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله

به منظور بررسی اثر فرکانس نوسانات شار حرارتی بر دمای حداکثر دیواره میکرولوله، نتایج در شکل (۱۳) بررسی شده است. در این شکل مقادیر فرکانس نوسانات ۴۰، ۵۰ و ۶۰ هرتز در نظر گرفته شده است. نانوسیال جاری در میکرولوله آب-اکسید آلومینیوم AF با کسر حجمی ۲ درصد است. همان‌گونه که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در ابتدا افزایش فرکانس، تغییرات محسوسی در دمای حداکثر ایجاد می‌کند ولی به تدریج با گذشت زمان، تغییرات حداکثر دما نسبت به تغییر فرکانس تغییر قابل توجهی ندارد، اگرچه زمان رسیدن به دمای حداکثر به ازای سه فرکانس متفاوت است، به طوری که در فرکانس ۴۰ هرتز در زمان ۰/۰۲۰۴ ثانیه به دمای حداکثر می‌رسد، همچنین در فرکانس ۵۰

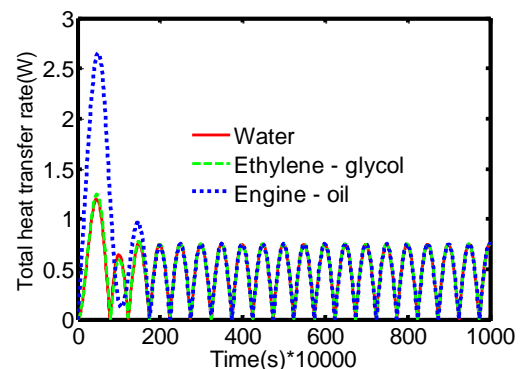
افزایش پیدا می‌کند. از میان پارامترهای فشار و سرعت، فشار زودتر به حالت پایا می‌رسد. دما به تدریج با افزایش زمان، به حالت منظم و پریودیک می‌رسد. با افزایش کسر حجمی نانوذره، دمای حداکثر دیواره میکرولوله کاهش پیدا می‌کند. دانستن رفتار حرارتی سیستم به شار حرارتی متغیر با زمان در دیواره میکرولوله که از عبور جریان متناوب از مدارات الکترونیکی ایجاد می‌شود، در طراحی مبدل‌های حرارتی کاربرد دارد و باعث کاهش هزینه‌های ساخت و طراحی بهینه می‌شود.

مراجع:

- [1] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*: Clarendon press, Oxford, 1881.
- [2] S. P. Jang, S. U. Choi, Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, *Applied physics letters*, Vol. 84, No. 21, pp. 4316-4318, 2004.
- [3] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 47, No. 24, pp. 5181-5188, 2004.
- [4] S. Z. Heris, S. G. Etemad, M. N. Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 4, pp. 529-535, 2006.
- [5] S. Z. Heris, M. N. Esfahany, G. Etemad, Numerical investigation of nanofluid laminar convective heat transfer through a circular tube, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 52, No. 11, pp. 1043-1058, 2007.
- [6] K. S. Hwang, S. P. Jang, S. U. Choi, Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 52, No. 1, pp. 193-199, 2009.
- [7] S. Mirmasoumi, A. Behzadmehr, Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube, *International journal of heat and fluid flow*, Vol. 29, No. 2, pp. 557-566, 2008.



شکل (۱۴) بررسی اثر کسر حجمی نانوذره بر نرخ انتقال حرارت کل با وجود شار حرارتی متغیر با زمان در دیواره میکرولوله



شکل (۱۵) بررسی اثر نوع سیال پایه بر نرخ انتقال حرارت کل با وجود شار حرارتی متغیر با زمان در دیواره میکرولوله

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت، جریان و انتقال حرارت غیر پایا نانو سیالات شامل سیالات پایه آب، اتیلن گلیکول و روغن موتور و نانوذرات اکسید آلومینوم AF، AR و AK جاری در میکرولوله در شرایط مرزی شار حرارتی متغیر با زمان ناشی از عبور جریان متناوب از مدارات الکترونیکی، به صورت کامل تحلیل شده است. در مورد سرعت حالت گذرا، تفاوت چشمگیری بین نانو سیال و سیال پایه تشخیص داده نشد، ولی در مورد فشار، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین نانو سیال و سیال پایه در رسیدن به حالت پایا وجود دارد و نانو سیال با صرف زمان کمتری به فشار حداکثر حالت پایا می‌رسند، ولی فشار حداکثر نانو سیال نسبت به سیال پایه بیشتر است و این خود بیانگر نیاز به قدرت پمپاژ بیشتر برای راندن نانو سیال در طول میکرولوله است. با افزایش کسر حجمی نانوذره، قدرت مورد نیاز برای پمپاژ نانو سیال

- [17] I. Behroyan, S. M. Vanaki, P. Ganesan, R. Saidur, A comprehensive comparison of various CFD models for convective heat transfer of Al₂O₃ nanofluid inside a heated tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 27-37, 2016.
- [18] B. Ghasemi, S. Aminossadati, Natural convection heat transfer in an inclined enclosure filled with a water-CuO nanofluid, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 55, No. 8, pp. 807-823, 2009.
- [19] B.-H. Chun, H. U. Kang, S. H. Kim, Effect of alumina nanoparticles in the fluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 966-971, 2008.
- [20] T. L. Bergman, F. P. Incropera, *Introduction to heat transfer*: John Wiley & Sons, New York, 2011.
- [21] A. R. Hambley, N. Kumar, A. R. Kulkarni, *Electrical engineering: principles and applications*: Pearson Prentice Hall, New York, 2008.
- [22] R. K. Shah, A. L. London, *Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data*: Academic press, 2014.
- [23] R. K. Shah, M. Bhatti, *Laminar convective heat transfer in ducts, Handbook of single-phase convective heat transfer*, Vol. 3, 1987.
- [8] M. Izadi, A. Behzadmehr, D. Jalali-Vahida, Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus, *International journal of thermal sciences*, Vol. 48, No. 11, pp. 2119-2129, 2009.
- [9] K. Anoop, T. Sundararajan, S. K. Das, Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 52, No. 9, pp. 2189-2195, 2009.
- [10] M. K. Moraveji, M. Darabi, S. M. H. Haddad, R. Davarnejad, Modeling of convective heat transfer of a nanofluid in the developing region of tube flow with computational fluid dynamics, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 9, pp. 1291-1295, 2011.
- [۱۱] ن. بزرگان، پ. ف. بزرگان، بررسی کاربرد نانو سیالات اتیلن گلیکول-اکسید آلومینیوم به عنوان سیال خنک کننده در مبدل حرارتی دو لوله ای، مهندسی مکانیک مدرس، جلد ۱۱، شماره ۳، صفحه ۷۵-۸۴، ۱۳۹۰
- [12] İ. O. Sert, N. Sezer-Uzol, S. Kakaç, Numerical analysis of transient laminar forced convection of nanofluids in circular ducts, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 10, pp. 1405-1417, 2013.
- [13] E. B. Haghghi, M. Saleemi, N. Nikkam, Z. Anwar, I. Lumbreras, M. Behi, S. A. Mirmohammadi, H. Poth, R. Khodabandeh, M. S. Toprak, Cooling performance of nanofluids in a small diameter tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 49, pp. 114-122, 2013.
- [14] R. Davarnejad, S. Barati, M. Kooshki, CFD simulation of the effect of particle size on the nanofluids convective heat transfer in the developed region in a circular tube, *SpringerPlus*, Vol. 2, No. 1, pp. 192, 2013.
- [15] A. Adil, S. Gupta, P. Ghosh, Numerical prediction of heat transfer characteristics of nanofluids in a minichannel flow, *Journal of Energy*, Vol. 2014, No. 1, pp. 1-7, 2014.
- [16] Z. Y. Ghale, M. Haghshenasfard, M. N. Esfahany, Investigation of nanofluids heat transfer in a ribbed microchannel heat sink using single-phase and multiphase CFD models, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 122-129, 2015.