

# مدلسازی جریان آرام نانوسیالات مختلف حول پره مستطیلی تخت با هدف بهینه سازی هندسی در یک چاه حرارتی

سید محمد جواد طاهری<sup>۱</sup>، علی حیدری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
 ۲- استادیار، مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
 ۳- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
 \* نویسنده مسئول: صندوق پستی ۱۷۹-۳۵۱۴۱، سمنان، ایران، آدرس ایمیل: [a.heydari@semnaniau.ac.ir](mailto:a.heydari@semnaniau.ac.ir)

## چکیده

در این مقاله، یک مدلسازی ریاضی با هدف بهینه سازی هندسی مقطع عرضی پره صفحه تخت انتها عایق با کاربرد در تعیین عرض بی بعد بهینه چاه حرارتی با استفاده از ۸ نوع مختلف نانوسیالات خنک کننده شامل نانوذرات آلومینا، سیلیکا، تیتانیوم دی اکسید، اکسید مس، طلا، مس، الماس و فروس اکسید با سیال پایه آب، انجام گرفته است. جریان برخورد کننده به پره آرام در نظر گرفته شده و تأثیر عدد رینولدز، کسر حجمی، قطر نانوذرات، سرعت متغیر و دمای متوسط جریان نانوسیالات بر بهینه سازی عرض بی بعد پره و عملکرد حرارتی آن بررسی شد. پره صفحه تخت عایق از جنس مس که دارای ضریب رسانش گرمایی بالایی می باشد در نظر گرفته شده است. نانوسیالات مختلف با کسرهای حجمی در محدوده ۰.۰۰۵ الی ۰.۱ درصد حجمی در قطرهای نانوذرات در رنج  $3 \times 10^{-8}$  تا  $1 \times 10^{-7}$  نانومتر برای پره با مقطع نازک مستطیلی تحلیل می شود. در این تحلیل با فرض اولیه زیاد بودن طول پره نسبت به عرض، حجم پره ثابت در نظر گرفته شده و پهنای پره بهینه سازی شده و سپس عملکرد حرارتی پره با این عرض بهینه بررسی می شود. نتایج تحلیل نشان داد که بیشترین عرض بی بعد بهینه پره برای نانوسیال طلا/ آب و کمترین مقدار مربوط به نانوسیال سیلیکا/ آب بدست می آید. همچنین با افزایش کسر حجمی، دمای میانگین ورودی و سرعت ورودی جریان، عرض بی بعد بهینه افزایش و با افزایش قطر نانوذرات کاهش می یابد.

## کلیدواژگان

بهینه سازی هندسی، پره صفحه تخت، نانوسیالات، اندازه نانوذرات، کسر حجمی

## Laminar flow modeling of different nano fluids around a flat plate fin for geometry optimization at the heat sink

Seyed Mohammad Javad Taheri<sup>1</sup>, Ali Heydari<sup>2\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
 2- Mechanical Engineering, Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
 \* P.O.B. 35141-179 Semnan, Iran, Email: [a.heydari@semnaniau.ac.ir](mailto:a.heydari@semnaniau.ac.ir)

## Abstract

This paper presents a mathematical model for geometry optimization of a rectangular cross-section flat plate fin with application in calculating optimized width of a heat sink for different Nano fluids (Aluminum oxide, Silicon dioxide, Titanium dioxide, Copper oxide, Gold, Copper, Diamond and Ferros oxide) with water as based fluid. Flow impinging on the fin is considered laminar. The effects of Reynolds number, volume fraction of nanoparticles, particle size, inlet velocity and different average temperature on the geometry optimization of the fin are investigated. A rectangular flat plate fin made from copper with higher thermal conductivity is used as the test case. Various Nano fluids with different volume fractions (0.005% to 0.1%) and different nanoparticle sizes ( $3 \times 10^{-8}$  to  $1 \times 10^{-7}$  nanometer) are analyzed. In this analysis, as a basic assumption, the length of the fin is taken larger than the width and the fin volume is considered constant. Then, width of the fin will be optimized. The results indicated that the highest and the lowest optimized width is related to Gold and silicon dioxide nano fluids respectively. Increase in volume fraction, inlet velocity and temperature and decrease in nano particle size leads to optimized width enhancement.

## Keywords

Geometry optimization, flat plate fin, nano fluids, nanoparticles size, volume fraction

به ذکر است که در سال های اخیر از پره ها برای بالا بردن راندمان تجهیزات حرارتی همچون مبدل ها به دلیل کاهش جرم و افزایش انتقال گرما استفاده شده است. لذا بهینه سازی پره ها یک موضوع مهم در جریان انتقال حرارت می باشد. برخی از کاربردهای سطوح گسترش یافته در انواع چاه های حرارتی<sup>۱</sup>، سرسپیندر موتور، تجهیزات مبدل های گرمایی مانند رادیاتور خودرو، میله های باریک بر روی کندانسور در پشت یخچال و سطح موج دار بدنه موتور در

## ۱- مقدمه

زمانی که مقدار گرمای مورد نیاز بواسطه ضریب انتقال حرارت و گرادیان دما در سطح ناکافی به نظر آید از پره ها<sup>۱</sup> استفاده می گردد. مساحت پایه سطح بخاطر نوع طراحی هدف، وابستگی اختلاف دما در فرایند و نوع شرایط اعمال فرایند دارای محدودیت می باشد. بنابراین بهترین گزینه جهت افزایش مساحت سطح استفاده از سطوح گسترش یافته یا همان پره ها می باشد. لازم

2. Heat sink

1. Fin

موازی در زمینه افزایش انتقال حرارت با تمرکز بر بهبود شکل فین‌های صفحه تخت و مدور مورد مطالعه قرار گرفتند.

در ارتباط با چاه حرارتی صفحه تخت فین گذاری شده، بسیاری از محققان [۱۰، ۱۱] با مطالعه انتقال حرارت و تمرکز بر بهبود شکل فین‌های صفحه تخت و مدور، دریافتند که افزایش آشفتنی جریان و بهبود عملکرد حرارتی در پره‌های صفحه تخت اتفاق خواهد افتاد.

وانگوایزس<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] عملکرد حرارتی و ویژگی‌های جریان را در چاه‌های حرارتی با ساختار پره‌های مدور (میل‌های) و مربعی با استفاده از ذرات پراکنده سیلیسیم‌دی‌اکسید درون آب دیونیزه شده در کسرهای حجمی ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۶٪ به صورت تجربی ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش تدریجی عدد ناسلت و غلظت حجمی ذرات ارتباط مستقیم دارد و همچنین بالا رفتن عملکرد انتقال حرارت به میزان ۴٪ الی ۱۴٪ در مقایسه با سیال پایه آب را بدست آوردند.

نافون<sup>۸</sup> و ناکارینتر<sup>۹</sup> [۱۳] به بررسی عملکرد گرمایی نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید/ آب از طریق جریان در چاه حرارتی کوچک با ساختار پره‌های مستطیلی پرداختند و دریافتند که عملکرد حرارتی پره با هندسه بهینه سازی شده به بیشینه مقدار خواهید رسید.

جونگ<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۱۴] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا/ آب را در یک میکروکانال مستطیلی در شرایط جریان آرام آزمایش کردند. آن‌ها مشاهده کردند که ضریب انتقال گرما برای کسر حجمی ۱.۸٪ بیش از ۳۲٪ در مقایسه با سیال پایه افزایش یافت.

خوشوقت و همکاران [۱۵] به صورت تجربی و پارامتری به بررسی چاه حرارتی با فین‌های نواری مقابل هم در حضور نانوسیال آلومینا پرداختند. در این کار آنها به بهینه سازی چیدمان فین‌ها پرداختند و نشان دادند قدرت سرمایش نانوسیال آلومینا از سیال پایه آن بیشتر است. ژیا و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی در چاه حرارتی با نانوسیالات آلومینا و اکسید تیتانیوم پرداختند. آنها نشان دادند که حرکت نانوذرات ناشی از حرارت منجر به قطع جریان آرام و افزایش انتقال حرارت می‌شود.

عباسی و جمشید اصلی [۱۷] انتقال حرارت جابجایی آرام نانوسیال‌ها در یک میکرو چاه حرارتی دو بعدی با صفحات موازی بدون و با در نظر گرفتن انتقال حرارت هم بسته به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که انتقال حرارت نسبت به آب خالص، با افزایش عدد رینولدز، غلظت نانوذرات، هدایت گرمایی چاه حرارتی و استفاده از نانوسیال آلومینا/ آب در مقایسه با تیتانیوم‌اکسید/ آب، افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالعات فوق مشخص می‌شود که در فین‌های صفحه تخت بکار رفته در چاه حرارتی تاکنون بهینه سازی هندسی برای ماکزیمم شدن نرخ انتقال حرارت برای نانوسیالات مختلف با نسبت‌های حجمی و قطر نانوذرات متفاوت بررسی نشده است. هدف اصلی این مقاله یافتن تأثیر نانوسیالات مختلف در طراحی هندسی بهینه فین برای تعیین عرض بی‌بعد بهینه چاه حرارتی و رسیدن به افزایش انتقال گرما تحت رژیم جریان آرام می‌باشد. در این تحقیق به صورت مدل‌سازی ریاضی با نوشتن رابطه انرژی در فین صفحه تخت و انتها عایق، مقدار نرخ انتقال حرارت محاسبه شده و ماکزیمم آن با توجه به پهنای بهینه فین بدست می‌آید. پره صفحه تخت در تماس با یک جریان غیر یکنواخت بوده به طوری که جریان لایه مرزی آرام

موتور سیکلت می‌باشد [۱]. چاه حرارتی وسیله‌ای است که حرارت را از طریق یک ساختار جامد، به محیط یک سیال، هم چون آب، و یا هوا انتقال می‌دهد. از جمله موارد موثر در بازده یک چاه حرارتی می‌توان به سرعت ورودی سیال، انتخاب جنس مواد سازنده و نوع پرداخت سطوح اشاره کرد. از دیگر مزایای چاه‌های حرارتی هزینه پایین و همچنین حفظ دمای عملکرد در یک سطح ایمن در مدتی طولانی برای عملکرد قابل اطمینان است. پره‌های مستطیلی دارای عملکرد بهتری نسبت به پره‌های مربعی شکل می‌باشد و مقدار جریان هوای عبوری از لبه‌های پشتی آن نسبتاً کمتر است. اگرچه مقدار افت فشار در پره‌های مستطیلی بالاست ولی دارای عملکرد بهتر در مقایسه با پره‌های مدور و استوانه‌ای می‌باشد. آلومینیوم یکی از رایج ترین و کاربردی‌ترین آلیاژهای مورد نظر در چاه‌های حرارتی بوده که به دنبال آن آلیاژ مس می‌باشد و از لحاظ قیمت، وزن و رسانایی گرمایی دارای مقادیر بالاتری نسبت به آلیاژ آلومینیوم است [۲].

نانوسیال<sup>۱</sup> به مخلوطی از ذرات نانوفلزی و یا غیرفلزی که در یک سیال پایه معلق شده باشند، اطلاق می‌گردد. به عنوان مثال، خون یک نانوسیال زیستی پیچیده است. ذرات معلق فوق ریز خواص انتقالی و عملکرد انتقال حرارت نانوسیال‌ها را تغییر می‌دهد، به طوریکه نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند [۳]. یکی از اساسی ترین اثرات مشاهده شده در نانوسیالات، رشد قابل توجه رسانش گرمایی بوده است. بدین صورت که این افزایش حتی در غلظت‌های پایین نانوسیال نیز مشاهده می‌شود. آثار مختلفی [۴، ۵] نشان می‌دهند که با حجم کم نانوذرات (۱ تا ۵ درصد حجمی) رسانایی حرارتی سوسپانسیون‌ها به میزان ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش در اصل به عواملی مانند اندازه ذرات، حجم ذرات در سوسپانسیون و ویژگی‌های حرارتی ذرات بستگی دارد. نانوسیال‌ها در مقایسه با سیالات متداول دارای مزیت‌های بسیار زیادی می‌باشند که می‌توان به کاربردهای فراوان آنها در مبدل‌های گرمایی اشاره داشت.

شیخ زاده و همکاران [۶] جابجایی طبیعی نانوسیال‌های مختلف داخل یک محفظه مربعی با منبع حرارتی مرکزی را بصورت عددی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذره افزایش می‌یابد.

پراکاش<sup>۲</sup> و جیانلس<sup>۳</sup> [۷] رسانش گرمایی نانوسیال آلومینا/ آب و اتیلن گلیکول را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که رسانش گرمایی به تغییرات دما، قطر نانوذره و غلظت نانوذره بستگی دارد. ژانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۸] انتقال گرمای نانوسیال آلومینا/ آب با کسرهای حجمی ۰.۲۵٪، ۰.۵۱٪ و ۰.۷۷٪ را در یک میکروکانال دایره‌ای به طور آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که عدد ناسلت آلومینا/ آب از عدد ناسلت آب خالص بیشتر است و این مقدار با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذره بیشتر می‌شود. بیشترین مقدار افزایش عدد ناسلت ۱۰.۶٪ و مربوط به نانوسیال با غلظت ۰.۷۷٪ بود.

ون<sup>۵</sup> و دینگ<sup>۴</sup> [۹] جریان آرام نانوسیال آب/ اکسید آلومینیوم را در یک لوله مسی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم تا ۱.۶٪ به آب، عدد ناسلت آن را تا ۳۸٪ افزایش می‌دهد. بسیاری از پژوهش‌های تجربی برای جریان همسو و

1. Nano fluid
2. Prakash
3. Giannelis
4. Zhang
5. Wen
6. Ding

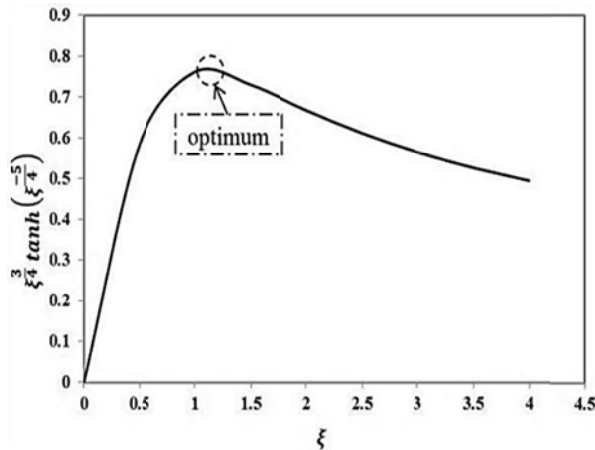
7. Wongwises  
8. Naphon  
9. Nakharintr  
10. Jung

می‌باشد. همانطور که در نمودار شکل ۱ مشخص گردیده، مقدار ماکزیمم تابع فوق در  $\xi_{optimum} = 1.071$  می‌باشد که این بدان معنی است:

$$\frac{b_{opt}}{t} = 1.071a \quad (7)$$

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مقدار ماکزیمم تابع  $\xi$  را به وضوح می‌توان مشاهده کرد. به بیان دیگر با جایگذاری دو پارامتر  $a$  و  $C$  رابطه گرما را می‌توان به صورت رابطه (۸) بازنویسی کرد:

$$\frac{b_{opt}}{t} = 1.071 \left( \frac{V}{t^3} \right)^{\frac{4}{5}} \times (C)^{\frac{2}{5}} \quad (8)$$



شکل ۱ مقدار ماکزیمم تابع  $\xi$

## ۲-۲- محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال

خواص ترموفیزیکی آب و هشت نانوذره مورد بررسی در قالب جدول (۱) آمده است. چگالی نانوسیال از رابطه معروف پک و چو<sup>۱</sup> به صورت رابطه (۹) به دست خواهد آمد [۱۹]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (9)$$

همانطور که بونگیورنو [۲۰] ذکر کرده است، با فرض این که سیال پایه با نانوذرات در تعامل گرمایی باشد، ظرفیت گرمایی نانوسیال به فرم زیر محاسبه می‌گردد.

$$(C_p)_{nf} = \frac{\rho_{bf}(C_p)_{bf}(1 - \phi) + \phi\rho_p(C_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (10)$$

دقت این معادلات که بر پایه ویژگی‌های نانوسیال می‌باشند، توسط خانافر و وفایی [۲۱]، پک و چو [۱۹] و ژوان و رتزل [۲۲] سنجیده شده است که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی آن‌ها این معادلات مناسب می‌باشند.

ویسکوزیته نانوسیال از طریق رابطه کرکیونه<sup>۴</sup> [۲۳] که برای کسرهای حجمی حداکثر ۱۰٪ و اندازه نانوذرات بزرگتر از ۲۵ نانومتر قابل استفاده بوده و به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{1 - 34.87 \left( \frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (11)$$

که در رابطه فوق،  $d_f$  قطر مولکول مایع پایه می‌باشد و از رابطه (۱۲) بدست خواهد آمد:

در راستای پهنای فین تشکیل شده است. انواع نانوسیالات با مشخصات ترموفیزیکی مختلف برای بهینه‌سازی عرض بی‌بعد پره مستطیل شکل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲- معادلات حاکم

جهت محاسبه انتقال حرارت جابجایی از سطوح جانبی پره با توجه به قانون سرمایه‌ی نیوتن نیاز به داشتن دمای پای پره  $T_b$  داریم. از طرف دیگر توزیع دمای سطح پره از معادله دیفرانسیل عمومی که با نوشتن معادله یک بعدی انرژی برای پره‌ها بدست می‌آید، محاسبه خواهد شد. لذا پس از ساده سازی معادلات، پروفیل دمایی برای حالتی که نوک پره عایق باشد طبق رابطه (۱) خواهد بود [۱۸]:

$$\theta(x) = \theta_b \frac{\text{Cosh}[m(L-x)]}{\text{Cosh}(mL)} \quad (1)$$

همچنین با اعمال شرایط مرزی معلوم در نوک پره، مقدار آهنگ انتقال گرمای کلی از دیواره با دمای معلوم  $T_b$  به پره از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$q_{fin} = M\theta_b \tanh(mL) \quad (2)$$

که در روابط (۱) و (۲) مقادیر  $M = \sqrt{hpKA_c}$  و  $m = \sqrt{\frac{hp}{KA_c}}$  می‌باشند.

## ۲-۱- تحلیل بهینه سازی پره

مقدار انتقال گرما (رابطه (۲)) را می‌توان به صورت رابطه (۳) بازنویسی کرد:

$$q_b = (T_b - T_{\infty})(hpKA_c)^{1/2} \tanh \left[ L \left( \frac{hp}{KA_c} \right)^{1/2} \right] \quad (3)$$

در رابطه (۳) مقدار  $A_c = b \times t$  و  $P = 2 \times b$  می‌باشد. فرض می‌شود حجم و ضخامت پره ثابت باقی بماند بنابراین مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در راستای عرض پره به صورت رابطه (۴) خواهد بود [۱۸]:

$$h_{nf} = \frac{k_{nf}}{b_{opt} \times t} 0.664 \times \left( \frac{V}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{U_{\infty} b}{v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن هندسه متقارن در پره، تحت قید حجم ثابت مقطع  $(V = b \times L \times t)$  و همچنین تغییرات کسر حجمی ذرات، دمای میانگین و قطر نانوذرات می‌توان با جایگذاری  $h_{nf}$  در معادله (۳)، رابطه گرما را به صورت ذیل بدست آورد:

$$\frac{q_b}{k_{fin} t (T_b - T_{\infty})} = \sqrt{1.328 \times Pr^{\frac{1}{3}} \frac{k_{nf}}{k_{fin}} Re_t^{\frac{1}{2}} \left( \frac{b}{t} \right)^{\frac{3}{2}}} \tanh \left\{ \frac{V}{t^3} \sqrt{1.328 \times Pr^{\frac{1}{3}} \frac{k_{nf}}{k_{fin}} \left[ Re_t^{\frac{1}{2}} \left( \frac{b}{t} \right)^{\frac{-5}{4}} \right]} \right\} \quad (5)$$

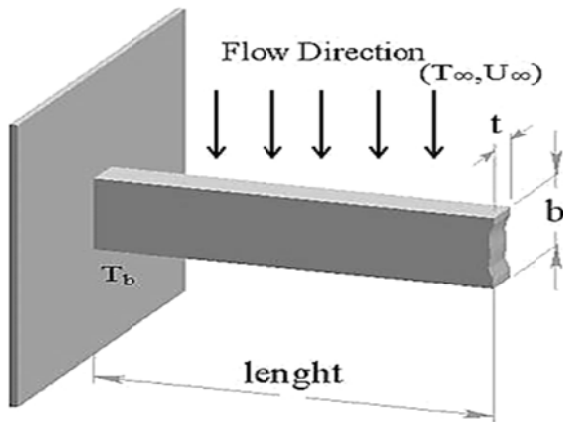
مطابق رابطه فوق  $Re_t = \frac{U_{\infty} \times t}{\nu}$  است. همچنین با فرضیات زیر می‌توان رابطه فوق را بصورت بی‌بعد و ساده تر طبق (رابطه (۶)) نوشت:

$$C = 1.328 \times Pr^{\frac{1}{3}} \frac{k_{nf}}{k_{fin}} \left[ Re_t^{\frac{1}{2}} \right] a^{5/4} = \frac{V}{t^3} (C^{1/2}) \frac{q_b}{Kt(T_b - T_{\infty})} = \left[ C^{\frac{1}{2}} \right] a^{\frac{3}{4}} \left( \frac{b}{at} \right)^{3/4} \tanh \left\{ \left( \frac{b}{at} \right)^{-5/4} \right\} \quad (6)$$

همانطور که پارامتر  $b$  بر روی تابع  $q_b$  تأثیرگذار خواهد بود، به روش مشابه تابع  $\xi$  نیز در رابطه  $\xi^{3/4} \tanh \left( \xi^{-5/4} \right)$  (که  $\xi = \frac{b}{at}$  است) مؤثر

1. Pak and Cho  
2. Xuan  
3. Roetzel  
4. Corcione

یک بعدی بودن مسئله از انتقال حرارت در سطوح نازک جانبی صرفنظر شده و این سطوح نیز عایق فرض شده‌اند. همچنین توزیع دمای پایه پره در راستای عرض پره یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲ مدل فیزیکی پره بررسی شده

در این تحقیق فرض می‌شود که دفع گرمای جابجایی از نوک پره بسیار ناچیز بوده و در این حالت نوک پره آدیباتیک می‌باشد. در ضمن جهت برقراری فرضیه یک بعدی بودن مسئله از انتقال حرارت در سطوح نازک جانبی صرفنظر شده و این سطوح نیز عایق فرض شده‌اند. همچنین توزیع دمای پایه پره در راستای عرض پره یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۲- متغیرهای تحقیق

همانطور که قبلاً نیز بیان شد در اینجا از ۸ نوع مختلف نانوسیالات خنک کننده شامل نانوذرات آلومینا، سیلیکا، دی‌اکسیدتیتانیوم، اکسید مس، طلا، مس، الماس و فروس‌اکسید با سیال پایه آب استفاده شده است. در مورد نانوسیالات مورد بررسی، لازم به ذکر می‌باشد که قطر نانوذرات در بازه  $3 \times 10^{-7}$  تا  $1 \times 10^{-7}$  نانومتر و میزان درصد کسرهای حجمی نانوذرات در محدوده مشخص  $0.05$  الی  $0.1$  درصد حجمی در نظر گرفته شده‌اند و اثر آنها نیز بر میزان عرض بی‌بعد بهینه پره و عملکرد حرارتی بررسی شده است. همچنین دمای متغیر سیال ورودی نیز در محدوده  $303.15$  تا  $398.15$  کلوین و سرعت جریان آرام ورودی  $0.3$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و اثر آنها نیز در عرض بی‌بعد بهینه پره بررسی شده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی سیال پایه و برخی از نانوذرات [۱۷]

| آب       | Cu   | CuO   | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | الماس | طلا   |
|----------|------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-------|-------|
| ۹۹۸.۲    | ۸۹۳۳ | ۶۵۰۰  | ۵۲۰۰                           | ۳۹۷۰                           | ۲۲۲۰             | ۴۱۵۷             | ۳۵۰۰  | ۱۹۳۰۰ |
| ۴۱۸۲     | ۳۸۵  | ۵۳۵.۶ | ۶۷۰                            | ۷۶۵                            | ۷۴۵              | ۷۱۰              | ۵۰۹   | ۱۲۹   |
| ۰.۶۵۵۲   | ۴۰۱  | ۲۰    | ۶                              | ۳۶                             | ۱.۳۸             | ۸.۴              | ۲۳۰۰  | ۳۱۷   |
| ۰.۰۰۰۴۴۷ | -    | -     | -                              | -                              | -                | -                | -     | -     |

### نتایج

متفاوت در دما و سرعت‌های ورودی متفاوت بر مبنای ضخامت ثابت پره پرداخته می‌شود. در شکل‌های شماره (۳ الی ۵)، اثر درصد حجمی انواع نانوسیالات بر عرض بی‌بعد بهینه پره با سرعت یکنواخت جریان نانوسیال

$$d_f = 0.1 \times \left( \frac{6M}{N\pi\rho_{bf}} \right)^{1/3} \quad (12)$$

با توجه به رابطه (۱۱) مقدار ویسکوزیته سیال پایه آب  $\mu_{bf}$  که تابعی از دما است از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\mu_{bf} = 2.414 \times 10^{-5} \times 10^{(247.8/T_{ave}-140)} \quad (13)$$

همانطور که در جدول (۲) قابل مشاهده است، مقادیر مربوط به ضرایب و توان‌های روابط جریان برای حالت‌های آرام و آشفتهدست آمده‌اند. بدین ترتیب می‌توان با جایگذاری ضرایب و توان‌ها در روابط به مقادیر دلخواه دسترسی پیدا کرد.

مقدار رسانش گرمایی بر اساس مدل ژوان و همکاران [۲۳] با ملاحظه حرکت براونی و تجمعی نانوذرات به صورت رابطه (۱۴) تعریف خواهد شد:

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_p + 2K_{bf} - 2\phi(K_{bf} - K_p)}{K_p + 2K_{bf} + \phi(K_{bf} - K_p)} + \frac{\phi\rho_p(C_p)_{bf}}{2K_{bf}} \sqrt{\frac{2K_B T_{ave}}{3\pi d_p \mu_{bf}}} \quad (14)$$

نمایر رابطه شماره (۱۱) مقدار رسانش گرمایی سیال پایه (آب) به صورت رابطه (۱۵) بدست می‌آید [۲۵]:

$$K_{bf} = 0.6067 \left[ -1.26523 + 3.704 \left( \frac{T_{ave}}{298.15} \right) - 1.43955 \left( \frac{T_{ave}}{298.15} \right)^2 \right] \quad (15)$$

### ۳- تعریف مسئله

در این مقاله یک پره تخت مستطیلی از جنس مس (برای داشتن ضریب پخش حرارتی بهتر جنس پره از مس در نظر گرفته شده است) با حجم  $7.2 \times 10^{-6}$  متر مکعب (با ابعاد اولیه  $3 \times 12 \times 20$  میلی‌متر) در نظر گرفته شده است. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شده بود ضخامت پره ثابت و برابر  $3$  میلی‌متر در نظر گرفته شده و با فرض ثابت بودن حجم کل پره، پهنا و طول پره مجدداً محاسبه می‌شوند. در شکل ۲ همانطور که ملاحظه می‌شود جریان آرام به سیال از محیط اطراف و از بالا به پره صفحه تخت مستطیلی وارد گردیده است.

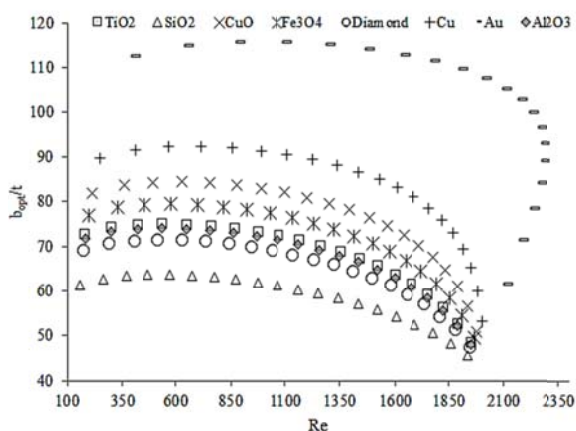
### ۳-۱- فرض یک بعدی بودن مسئله

در این تحقیق فرض می‌شود که دفع گرمای جابجایی از نوک پره بسیار ناچیز بوده و در این حالت نوک پره آدیباتیک می‌باشد. در ضمن جهت برقراری فرضیه

۰.۱ حجمی فقط نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید و آلومینا دارای عرض بی‌بعد بهینه شده پره مشابه بوده ولی نانوسیال الماس با کاهش تدریجی دارای مقادیر کمتری برای عرض بی‌بعد بهینه نسبت به دوتای دیگر بدست آمده است.

همچنین مشخص است که با افزایش کسر حجمی عرض بی‌بعد بهینه افزایش یافته ولی شیب افزایش آن برای نانوسیالات مختلف متفاوت است. بطوری که شیب افزایشی برای نانوسیال سیلیکا کمترین و نانوسیال طلا بیشترین بدست آمده است.

در شکل ۷ عرض بی‌بعد بهینه بر حسب رینولدز جریان بر اساس ضخامت اولیه پره در جریان آرام برای کسر حجمی‌های مختلف رسم شده است. در عدد رینولدز اثر چگالی و لزجت نانوسیال همزمان لحاظ شده است و معیار بهتری برای بررسی عرض بی‌بعد بهینه پره می‌باشد. عدد رینولدز می‌تواند با تغییر کسر حجمی به علت تغییر چگالی و لزجت تغییر کند. همانطور که مشخص است با افزایش کسر حجمی لزجت سینماتیک افزایش یافته و عدد رینولدز جریان بر مبنای ضخامت پره کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۷ مشخص می‌شود که با کاهش عدد رینولدز در اثر افزایش کسر حجمی عرض بی‌بعد بهینه پره افزایش می‌یابد. دلیل آن هم کاهش ظرفیت گرمایی نانوسیال با افزایش کسر حجمی و تمایل آن به انتقال سریعتر حرارت به پره است.



شکل ۷ مقایسه عرض بی‌بعد بهینه پره در انواع نانوسیالات بر مبنای عدد رینولدز به ازای کسرهای حجمی مختلف، سرعت جریان ورودی ۰.۳ متر بر ثانیه، قطر ۲۵ نانومتر و دمای ۳۳۵.۵ کلوین

همانگونه که مشاهده می‌شود اتفاق جالب برای نانوسیال طلا این است که در ابتدا با افزایش عدد رینولدز و سپس با کاهش آن مقادیر عرض بی‌بعد و بهینه پره افزایش یافته است ولی برای سایر نانوسیالات کاهش عدد رینولدز منجر به افزایش عرض بهینه گردیده است. اما این شیب کاهش در نانوسیالات مختلف متفاوت است بطوری که در نانوسیال طلا با شیب بسیار زیاد کاهش می‌یابد. سپس شیب کاهش برای نانوسیال مس از بقیه بیشتر بوده و در نهایت شیب کاهش عرض بی‌بعد بهینه سیلیکا با کاهش عدد رینولدز کمترین شیب را در میان نانوسیالات مختلف دارد.

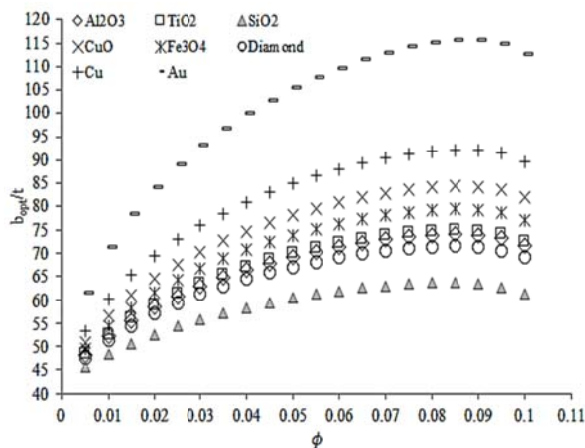
یکی دیگر از راه‌های تغییر عدد رینولدز جریان، تغییر سرعت ورودی جریان است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در جریان آرام برای انواع نانوسیالات عرض بی‌بعد بهینه پره بر حسب عدد رینولدز جریان در

۰.۲ متر بر ثانیه، دمای میانگین ۳۳۵.۵ کلوین و قطر نانوذره ۲۵ نانومتر بررسی شده است. با توجه به شکل ۳ نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، در کسر حجمی ۱٪ کمترین مقدار عرض بی‌بعد بهینه مربوط به نانوسیال دی-اکسیدسیلیسیم در حدود ۴۴.۶ و بیشترین آن مربوط به نانوسیال طلا در حدود ۶۵.۶ می‌باشد. در واقع می‌توان فهمید که کمترین عرض بی‌بعد بهینه مربوط به نانوذره‌ای است که بیشترین ضریب گرمای ویژه و کمترین چگالی را داشته باشد.

نکته قابل توجه دیگر آنست که مقادیر عرض بی‌بعد بهینه پره برای نانوذرات فلزی خالص (Cu و Au) در مقایسه با فلزات اکسیدی ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) بیشتر می‌باشد. در ضمن میزان عرض بی‌بعد بهینه برای نانوسیال‌های الماس،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  در یک محدوده بدست آمده است.

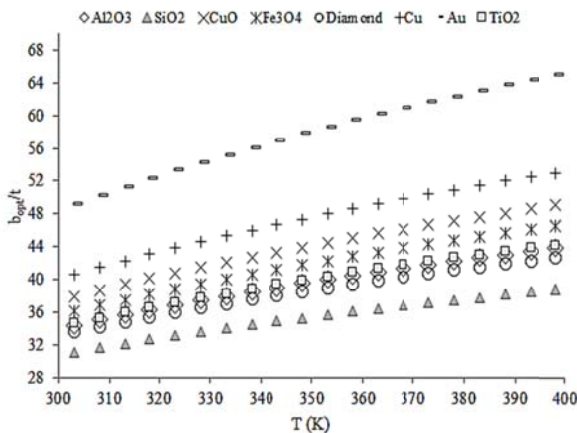
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت حجمی تا ۳/۳ عرض بی‌بعد بهینه برای کل نانوسیالات بررسی شده افزایش پیدا کرده است. نکته دیگر فاصله گرفتن عرض بی‌بعد بهینه نانوسیال الماس از نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم است. اما همچنان برای عرض بی‌بعد بهینه مربوط به نانوسیالات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم مقدار یکسانی بدست آمده است. در شکل ۵ می‌بینید، در کسر حجمی ۵٪ همان نتایج مشاهده شده در شکل ۳ و ۴ بدست می‌آید با این تفاوت که اختلاف عرض بی‌بعد بهینه محاسبه شده برای نانوسیال الماس نسبت به نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم با افزایش نسبت حجمی باز هم بیشتر می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که شیب افزایش عرض بی‌بعد بهینه با افزایش کسر حجمی در نانوسیالات مختلف متفاوت است. بطوری که با افزایش کسر حجمی از ۱٪ تا ۵٪ عرض بی‌بعد بهینه فین برای نانوسیال اکسید سیلیسیم ۱۵٪ و برای نانوسیال طلا ۳۰٪ افزایش می‌یابد. لذا لازم است سه نمودار فوق در یک نمودار (شکل ۶) نشان داده شوند.

در شکل ۶ عرض بی‌بعد بهینه پره از جنس مس خالص با مقطع مستطیلی در دمای ۳۳۵.۵ کلوین، قطر نانوذرات ۲۵ نانومتر و سرعت جریان ورودی ۰.۳ متر بر ثانیه در کسرهای حجمی مختلف نانوذرات در جریان آرام با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۶ اثر کسر حجمی بر عرض بی‌بعد بهینه انواع نانوسیالات برای قطر ۲۵ نانومتر، سرعت جریان ورودی ۰.۳ متر بر ثانیه و دمای ۳۳۵.۵ کلوین

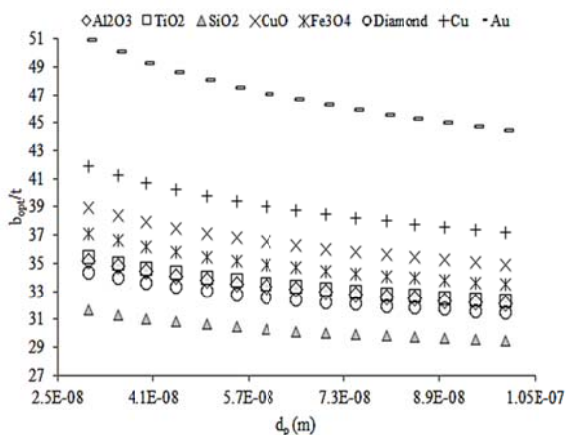
همانطور که قبلاً نیز گفته شد، عرض بی‌بعد بهینه شده پره در محدوده ۰.۰۰۵ الی ۰.۰۷۵ کسر حجمی برای سه نانوسیال آلومینا، الماس و تیتانیوم-دی‌اکسید دارای مقادیر مشابه با یکدیگر می‌باشند. اما در کسرهای ۰.۰۸ تا



شکل ۹ مقایسه عرض بی‌بعد بهینه پره در انواع نانوسیالات بر مبنای دمای متوسط در سرعت ثابت ۰.۳ متر بر ثانیه در کسر حجمی ۳٪ و قطر ۲۵ نانومتر

با توجه به روابط (۱۲) و (۱۳) افزایش دما باعث افزایش ضریب رسانش نانوسیال و کاهش لزجت سیال پایه شده که این امر مطابق رابطه (۸) باعث افزایش عرض بی‌بعد بهینه پره می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با تغییر دما نیز همچنان عرض بی‌بعد بهینه محاسبه شده برای نانوسیال آلومینا و اکسید-تیتانیوم یکسان بدست می‌آید.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌نمایید، مقادیر عرض بی‌بعد بهینه پره تحت دمای متوسط ۳۳۵.۵ کلوین و سرعت یکنواخت ۰.۳ متر بر ثانیه و کسر حجمی ۳٪ در قطرهای مختلف نانوذرات مقایسه و ارزیابی شده است.

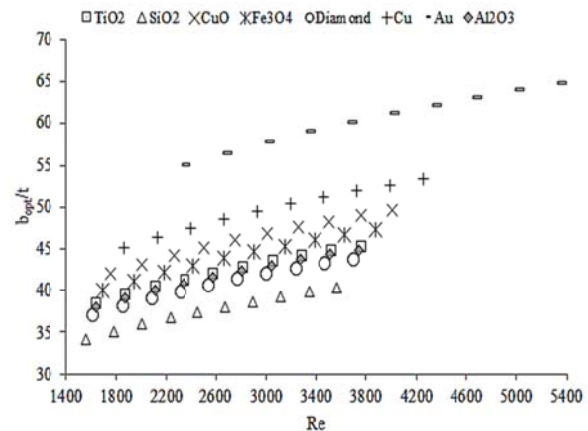


شکل ۱۰ اثر قطر نانوذرات مختلف بر عرض بی‌بعد بهینه پره در انواع نانوسیالات در کسر حجمی ۳٪، دمای متوسط ۳۳۵.۵ کلوین و سرعت ثابت (۰.۳ متر بر ثانیه)

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر نانوذرات عرض بی‌بعد بهینه پره برای نانوسیالات مختلف کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۱۱) و (۱۳) با افزایش قطر نانوذرات در نانوسیال لزجت و ضریب رسانش کاهش خواهند یافت. سپس با توجه به رابطه (۸) می‌توان دلیل کاهش عرض بی‌بعد بهینه پره با افزایش قطر نانوذره را فهمید. در ضمن شیب کاهش عرض بی‌بعد بهینه با افزایش قطر نانوذره برای نانوسیالات مختلف متفاوت است. بطوری که این شیب کاهشی برای نانوسیال طلا از همه بیشتر و برای نانوسیال سیلیکا از همه کمتر است.

#### ۴-۲- ضریب انتقال گرمای جابجایی

سرعت‌های مختلف ۰.۳۵، ۰.۸ متر بر ثانیه و دمای متوسط ۳۲۳.۱۵ کلوین در کسر حجمی ۳٪ و قطر ۲۵ نانومتر مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت شکل ۷ و ۸ در این است که شکل ۷ اثر کسر حجمی‌های مختلف بر عرض بی‌بعد بهینه در قالب عدد رینولدز بررسی شده است، در حالی که در شکل ۸ اثر سرعت‌های مختلف جریان ورودی در قالب عدد رینولدز جریان آورده شده است.



شکل ۸ مقایسه عرض بی‌بعد بهینه پره در انواع نانوسیالات بر حسب عدد رینولدز در سرعت‌های ۰.۳۵، ۰.۸ متر بر ثانیه در دمای متوسط ۳۲۳.۱۵ کلوین، کسر حجمی ۳٪ و قطر ۲۵ نانومتر

با توجه به شکل ۸ با افزایش عدد رینولدز در اثر افزایش سرعت ورودی جریان عرض بی‌بعد بهینه پره افزایش می‌یابد و شیب افزایش آن تقریباً در تمام نانوسیالات مشابه همدیگر است. دلیل افزایش عرض بی‌بعد بهینه پره با افزایش عدد رینولدز در اثر افزایش سرعت، کاهش زمان تماس جریان با سطح پره است که باعث کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود. بنابراین با افزایش سطح تماس این کاهش نرخ انتقال حرارت باید جبران گردد. همچنین در این نمودار نیز مشخص است که رفتار نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم با تغییر سرعت نیز همچنان مشابه یکدیگر است، که دلیل آن هم نزدیک بودن ظرفیت گرمایی و چگالی آنهاست.

در شکل ۹ اثر دماهای مختلف جریان نانوسیال بر خورد کننده به پره بر عرض بی‌بعد بهینه آن در محدوده دمایی ۳۰۳.۱۵ الی ۳۹۸.۱۵ کلوین بررسی شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش دمای جریان ورودی عرض بی‌بعد بهینه شده پره افزایش می‌یابد و شیب افزایش آن برای نانوسیالات مختلف تقریباً مشابه است.

افزایش کسر حجمی نانوسیالات مختلف با دمای ورودی، قطر نانوذره و سرعت ورودی ثابت منجر به افزایش عرض بی‌بعد بهینه پره می‌شود. اما در مقابل باعث بهبود انتقال حرارت و افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان عبوری از روی پره می‌شود.

افزایش عدد رینولدز جریان در اثر کاهش کسر حجمی در سرعت ورودی ثابت باعث کاهش عرض بی‌بعد بهینه پره شده حال آنکه افزایش عدد رینولدز در اثر افزایش سرعت ورودی جریان در کسر حجمی ثابت باعث افزایش عرض بی‌بعد بهینه پره می‌شود.

کمترین عرض بی‌بعد بهینه و ضریب انتقال حرارت جابجایی بی‌بعد در کسر حجمی‌های مختلف مربوط به نانوسیال سیلیکا بوده و بیشترین عرض بی‌بعد بهینه و ضریب انتقال حرارت جابجایی مربوط به نانوسیال طلا می‌باشد.

برای عملکرد نانوسیال در یک چاه حرارتی و طراحی عرض بهینه چاه حرارتی پیشنهاد می‌شود. نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۳۵ تهیه شده و بر اساس آن ضخامت بهینه پره‌های چاه حرارتی طراحی شوند تا کمترین ماده در تهیه چاه حرارتی مصرف شده در عین حال که انتقال حرارت بیشینه باشد.

#### ۶- فهرست علائم

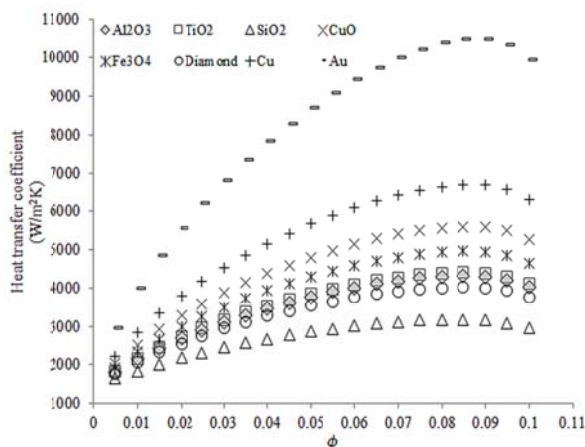
|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| b                         | عرض پره (m)               |
| $C_p$                     | ظرفیت گرمایی ویژه         |
| $d_p$                     | قطر نانوذره               |
| $d_f$                     | قطر مولکولی سیال          |
| h                         | ضریب انتقال گرمای جابجایی |
| K                         | رسانش گرمایی              |
| $K_B$                     | ثابت بولتزمن              |
| L                         | طول پره (متر)             |
| M                         | وزن مولکولی               |
| N                         | عدد آووگادرو              |
| Nu                        | عدد ناسلت جریان           |
| Pr                        | عدد پرانتل                |
| $q_f$                     | آهنگ انتقال گرما در پره   |
| Re                        | عدد رینولدز               |
| T                         | دما (K)                   |
| t                         | ضخامت پره (متر)           |
| $U_\infty$                | سرعت ( $ms^{-1}$ )        |
| $\frac{\theta}{\theta_b}$ | توزیع دما                 |
| $\theta_b$                | دمای پای پره              |

#### علائم یونانی

|          |                                    |
|----------|------------------------------------|
| $\alpha$ | ضریب پخش گرمایی                    |
| $\mu$    | لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ ) |
| $\xi$    | طول موثر پره                       |
| $\rho$   | چگالی ( $kgm^{-3}$ )               |
| $\phi$   | کسر حجمی                           |

#### زیرنویس‌ها

همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، مقادیر ضریب انتقال حرارت



شکل ۱۱ مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی برای انواع نانوسیال‌ها با کسر حجمی‌های مختلف در سرعت ثابت جریان ۰/۳ متر بر ثانیه، قطر نانوذره 25 نانومتر و دمای متوسط 335.5 کلوین

جابجایی برای انواع نانوسیال‌ها در کسرهای حجمی مختلف (۰/۰۰۵ الی ۰/۱ درصد) بیان گردیده است. به سادگی قابل مشاهده است که ضریب انتقال حرارت جابجایی برای نانوسیال‌های تیتانیوم‌دی‌اکسید، الماس و آلومینا بر پایه سیال خالص آب در کسر حجمی‌های مختلف دارای مقادیر مشابهی هستند.

همانطور که از شکل ۱۱ مشخص است، بیشترین ضریب انتقال حرارت جابجایی مربوط به نانوسیال طلا با کسر حجمی ۰/۱ و کمترین آنها مربوط به نانوسیال سیلیسیم‌دی‌اکسید در کسر حجمی ۰/۰۰۵ درصد حجمی می‌باشد. همچنین با افزایش کسر حجمی و به تبع آن افزایش لزجت سینماتیکی و ضریب پخش حرارتی مقادیر عدد رینولدز و عدد پرانتل کاهش می‌یابند. اما از آنجا که ضریب رسانش به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، ضریب انتقال حرارت جابجایی و مقدار بی‌بعد آن نیز افزایش خواهد یافت.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله با هدف بهینه سازی هندسی مقطع عرضی پره و با استفاده از نانوسیالات آلومینا، اکسیدمس، فروس‌اکسید، طلا، مس، سیلیسیم‌دی‌اکسید، تیتانیوم‌دی‌اکسید و الماس بر پایه سیال خالص آب با استفاده از فین صفحه تخت انتها عایق به صورت تحلیل ریاضیاتی، تغییرات خواص ترموفیزیکی انواع نانوذرات مورد بررسی عددی قرار گرفتند. در این مقاله اثر مقدار کسر حجمی ذرات و همچنین اثر اندازه نانوذرات، سرعت جریان و دمای کارکرد نانوسیالات برای بهینه سازی شرایط هندسی مقطع پره به طور جامع تحلیل گردید. مهمترین نتایج بدست آمده به صورت خلاصه به شرح ذیل می‌باشد.

- با افزایش قطر نانوذرات در کسر حجمی ثابت عرض بی‌بعد بهینه پره برای انواع نانوسیالات کاهش می‌یابد. شیب کاهش عرض بی‌بعد بهینه برای نانوسیالات مختلف متفاوت بود بطوری که نانوذره سیلیکا کمترین و نانوسیال طلا بیشترین کاهش را در مقایسه با دیگر نانوذرات داشت.
- افزایش دمای متوسط جریان ورودی با کسر حجمی، قطر نانوذره و سرعت ورودی ثابت باعث افزایش عرض بی‌بعد بهینه پره شده که شیب افزایشی آن برای نانوسیالات مختلف تقریباً یکسان است.

- [23] M. Corcione, Empirical Correlation Equations For Predicting The Effective Thermal Conductivity And Dynamic Viscosity of Nanofluids, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 1, pp. 789-793, 2011.
- [24] Y. Xuan, Q. Li, W. Hu, Aggregation Structure And Thermal Conductivity of Nanofluids, *AIChE Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 1038-1043, 2003.
- [25] C. A. Nieto de Castro, S. F. Y. Li, A. Nagashima, R. D. Trengove, W. A. Wakeham, Standard reference data for the thermal conductivity of liquids, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 15, No. 3, pp. 1073-1086, 1986.

متوسط Ave  
سیال پایه bf  
نانوسیال nf  
ذره P

#### ۷- مراجع

- [1] B. Yazicioglu, H. Yuncu, Optimum Fin Spacing Of Rectangular Fins On A Vertical Base In Free Convection Heat Transfer, *Journal Of Heat And Mass Transfer*, Vol. 44, No.1, pp. 11-21, 2007.
- [2] J. R. Culham, Y. S. Muzychka, Optimization Of Plate Fin Heat Sinks Using Entropy, *IEEE Transactions On Components And Packing Technologies*, Vol. 24, No. 2, pp. 159-165, 2001.
- [3] A. K. Singh, Thermal Conductivity Of Nanofluids, *Defence Science Journal* Vol. 58, No. 5, pp. 600-607, 2008.
- [4] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, J. A. Eastman, Measuring Thermal Conductivity of Fluid Containing Oxide Nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 121, No. 2 pp. 280-289, 1999.
- [5] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alternation of Thermal Conductivity And Viscosity of Liquid By Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  And  $TiO_2$  Ultra-Fine Particles), *Netsu Bussei (Japan)*, Vol. 7, No. 4, pp. 233-277, 1993.
- [6] G. A. Sheikhzadeh, H. Ehteram, A. Aghaei, Numerical study of natural convection in nanofluid filled enclosure with central heat source and presenting correlations for Nusselt number, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 62-74, 2014. (in Persian)
- [7] M. Prakash, E. Giannelis, Mechanism of heat transport in nanofluids, *Journal of Computer-aided Materials Design*, Vol. 14, No. 1, pp. 109-117, 2007.
- [8] H. Zhang, S. Shao, H. Xu, C. Tian, Heat Transfer And Flow Features Of  $Al_2O_3$ -Water Nanofluids Flowing Through Circular Microchannel Experimental Results And Correlations, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 61, No. 2, pp. 86-92, 2013.
- [9] 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.
- [10] H. Y. Li, S. M. Chao, Measurement of Performance of Plate-Fin Heat Sinks With Cross Flow Cooling, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2949-2955, 2009.
- [11] H. Y. Li, C. L. Chen, S. M. Chao, G. F. Liang, Enhancing Heat Transfer In a Plate fin Heat Sink Using Delta Winglet Vortex Generators, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, pp. 666-677, 2013. [1] A. Farshidianfar, M. Shafipour, M. Sabbagh Sabzevar, Analysis of Nonlinear Vibrations of Impact Dampers in Boats, *Journal of Vibration and Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 7-14, 2011. (In Persian)
- [12] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, A comparison of the heat transfer performance and pressure drop of nanofluid-cooled heat sinks with different miniature pin fin configurations, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 69, pp. 111-118, 2015.
- [13] P. Naphon, L. Nakharintr, Heat transfer of nanofluids in the mini-rectangular fin heat sinks, *International. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 25-31, 2013.
- [14] J. Y. Jung, H. S. Oh, H. Y. Kwak, Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 1, pp. 466-472, 2009.
- [15] M. Khoshvaght-Aliabadi, O. Sartipzadeh, S. Pazdar, M. Sahamiyan, Experimental and parametric studies on a miniature heat sink with offset-strip pins and  $Al_2O_3$ /water nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, In Press, Corrected Proof, Available online 11 October 2016.
- [16] G. D. Xia, R. Liu, J. Wang, M. Du, The characteristics of convective heat transfer in microchannel heat sinks using  $Al_2O_3$  and  $TiO_2$  nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 76, pp. 256-264, 2016.
- [17] D. Jamshideasli, A. Abbasi, Two-phase numerical simulation of flow and heat transfer of nanofluids in a microchannel heat sink using homogeneous mixture model, *journal of solid and fluid mechanic*, Vol. 3, No. 2, pp. 51-63, 2013. (in Persian)
- [18] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th edn, pp. 143-164.
- [19] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *experimental heat transfer*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.
- [20] J. Buongiorno, Convective Transport In Nanofluids, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, pp. 240-250, 2006.
- [21] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 4410-4428, 2011.
- [22] Y. Xuan, W. Roetzel, Conception for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat And Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701-3707, 2000.