



## تحلیل عددی چگالش قطره‌های نانوسیال روی یک صفحه شیب‌دار

حمیدرضا طالبش بهرامی<sup>1</sup>، سعید زارعی<sup>2</sup>، حمید صفاری<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* صندوق پستی 16846-3114، saffari@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 آذر 1395

پذیرش: 12 بهمن 1395

ارائه در سایت: 11 اسفند 1395

کلید واژگان:

چگالش قطره‌ای

نانوسیال

انتقال حرارت

مدل‌سازی عددی

### چکیده

در این مقاله چگالش قطره‌های نانوسیال روی یک صفحه مسطح شیب‌دار بررسی شده است. برای این کار مقاومت حرارتی تک‌تک قطرات محاسبه شده و سپس انتقال حرارت کل با استفاده از روش توازن تعداد استخراج گردید. نانوسیال‌های مورد بررسی در این مطالعه آلومینا، اکسید تیتانیوم و نقره با سیال پایه آب می‌باشد. اثر تغییرات نوع نانوسیال، کسر حجمی نانوذره و شیب صفحه بر روی انتقال حرارت در این تحقیق بررسی شده است. خواص نانوسیال اعم از چگالی، قابلیت هدایت حرارتی، ویسکوزیته و گرمای نهان تبخیر از منابع و مقالات در دسترس استخراج و در معادلات وارد شدند. نتایج حاصل در شرایط مشابه، با برخی از داده‌های تجربی موجود اعتبار سنجی شده است. از تئوری ناسلت برای محاسبه مقدار انتقال حرارت در چگالش لایه‌ای استفاده شده و برای مقایسه با انتقال حرارت چگالش قطره‌ای بکار رفته است. با بررسی نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که ضریب انتقال حرارت در حالت صفحه عمودی بیشترین مقدار و با کاهش شیب صفحه از حالت قائم به دلیل کاهش سرعت زوده شدن قطره‌ها - کاهش می‌یابد. همچنین حضور ذرات نانو باعث افزایش انتقال حرارت در پدیده انتقال حرارت قطره‌ای می‌شود. ضریب انتقال حرارت در نانوسیالات مختلف، متفاوت و درعین‌حال در طول صفحه ثابت است. نتایج نشان می‌دهد برای سه نانوسیال ذکر شده، نانوسیال آب/ نقره دارای بیشترین انتقال حرارت نسبت به دو نانوسیال دیگر در شرایط یکسان می‌باشد و برای یک نانوسیال مشخص با افزایش کسر حجمی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

## A numerical analysis of dropwise condensation of nanofluid on an inclined flat plate

Hamid Reza Talesh Bahrami, Saeed Zareie<sup>1</sup>, Hamid Saffari<sup>2\*</sup>

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 16846-3114 Tehran, Iran, saffari@iust.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 01 December 2016  
Accepted 31 January 2017  
Available Online 01 March 2017

#### Keywords:

Dropwise condensation  
Nanofluid  
Heat transfer  
Numerical analysis

### ABSTRACT

In this paper nanofluids condensation heat transfer on an inclined flat plate is investigated. To do this, thermal resistances of single droplets are calculated and the total heat flux is evaluated using population balanced theory. The nanofluids include alumina, titanium dioxide and silver as nanoparticles and water as a base fluid. Effects of different surface inclinations, nanofluids types, and nanoparticles concentrations are investigated on the heat transfer. Nanofluids properties consisting of thermal conductivity, density, dynamic viscosity, and latent heat are extracted from literature and introduced into the equations. The results are compared with some experimental data in the same conditions. The Nusselt theory is used to compare the heat transfer rate of filmwise condensation with dropwise condensation. Inspecting the results shows that the heat transfer coefficient of a vertical plate is maximum, and falls with a decrease in inclination due to lower washing rate of small droplets by sliding droplets. The results also show that the heat transfer coefficients of various nanofluids are different but they are constant all over the surface. Moreover, addition of nanoparticles to the base fluid increases heat transfer rate. It can be seen that water-silver nanofluid has the maximum heat transfer rate among three previously mentioned nanofluids in the same conditions and the heat transfer rate increases with increase in volume fraction of nanoparticle for a specific nanofluid.

### 1- مقدمه

مختلف روی سطح چگالش می‌یابد. نوع فرایند چگالش به میزان تر شونده‌گی سطح و بالطبع به انرژی و کشش سطحی بین سطح و مایع چگالیده شده بستگی دارد. چگالش لایه‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که مایع چسبندگی زیادی به سطح داشته باشد درحالی‌که چگالش قطره‌ای زمانی به وقوع می‌پیوندد که مایع چگالیده تمایلی برای چسبیدن به سطح نداشته باشد. اشمیت و همکاران [1] در سال 1930 برای اولین بار ضریب انتقال

چگالش از رژیم‌های مهم انتقال حرارت است که در بسیاری از صنایع نظیر صنایع تولید نیرو و تبرید کاربرد گسترده‌ای دارد. فرایند چگالش روی سطح را می‌توان به دو دسته‌ی لایه‌ای و قطره‌ای تقسیم‌بندی کرد. در چگالش لایه - ای مایع چگالش یافته به‌صورت لایه‌ی پیوسته‌ای روی سطح ظاهر می‌شود. درحالی‌که در چگالش قطره‌ای، بخار به‌صورت قطرات مایع مجزا با ابعاد

Please cite this article using:

H. R. Talesh Bahrami, S. Zareie, H. Saffari, A numerical analysis of dropwise condensation of nanofluid on an inclined flat plate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 105-114, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است، لذا تبدیل سیال به نانوسیال از طریق افزودن نانو ذرات فلزی به سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایتی سیال پایه و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌گردد [11,10]. کبلینسکی و همکاران [12] در سال 2002 اثر اندازه نانوذرات را در ضریب هدایت حرارتی اندازه‌گیری کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش اندازه نانوذره ضریب هدایت حرارتی کاهش می‌یابد. تأثیر دما بر ضریب هدایتی نانوسیال نیز توسط دس و همکاران [13] در سال 2003 انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دمای نانوسیال ضریب هدایتی آن افزایش می‌یابد.

هرچند که شروع بحث بهبود فرایند انتقال حرارت در رژیم چگالش از طریق ایجاد چگالش قطره‌ای و تلاش برای بهبود فرایند انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال‌ها هم‌زمان بوده و به دهه 1930 باز می‌گردد، با این حال به‌کارگیری نانوسیالات برای بهبود فرایند چگالش از سال‌های اخیر آغاز شده است. عمده مطالعات موجود در رابطه با چگالش نانوسیالات معطوف به چگالش لایه‌ای می‌باشد. لیو و همکاران [14] در سال 2010 اثرات شیب لوله و فشار بر روی انتقال حرارت لوله حرارتی را با استفاده از نانوسیال اکسید مس بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شیب لوله تأثیر زیادی روی عملکرد لوله حرارتی دارد. هیومینیک و هیومینیک [15] فرایند انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آهن در یک ترموسیفون را بررسی کردند. اثرات شیب ترموسیفون، دما و غلظت نانو ذرات در این تحقیق بررسی و نتایج با حالت آب خالص مقایسه شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد افزایش غلظت نانوسیال باعث بهبود عملکرد ترموسیفون شده، مقاومت حرارتی ترموسیفون با افزایش شیب کاهش می‌یابد. آورانکو و همکاران [16] انتقال حرارت در چگالش لایه‌ای برای بخار ساکن حاوی نانوذرات روی سطح عمودی را با توسعه تئوری رینولدز و گنجاندن مشخصات نانوذرات در معادلات مدل کردند. انتقال حرارت در فرایند چگالش نانوسیالات در لوله‌های حرارتی توسط سینق و همکاران [17] در سال 2014 مطالعه شد. ایشان تغییرات نرخ و ضریب انتقال حرارت با تغییر اختلاف دمای بخار و سطح را روی لوله‌های حرارتی در حالت عمودی و افقی اندازه‌گیری کردند. یافته‌ها نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال اکسید مس برای حالت لوله‌ای عمودی 2.07 برابر حالت لوله افقی و ضریب انتقال حرارت در حالت عمودی 1.94 برابر حالت افقی است. اخوان بهابادی و همکاران [18] فرایند چگالش نانومبرد در یک لوله صیقلی افقی را به‌صورت تجربی مطالعه نمودند. در این تحقیق سه نوع سیال مختلف شامل مبرد R600a به‌طور خالص، مبرد با روان‌کننده (R600a/oil) و نانومبرد متشکل از مبرد با روان‌کننده و نانوذرات اکسید مس (R600a/oil/CuO) بررسی شد. روان‌کننده استفاده‌شده روغن پلی‌استر (POE) و نانومبرد استفاده‌شده دارای کسر جرمی 0.5%، 1% و 1.5% می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد وجود نانوذرات باعث افزایش قابل توجه انتقال حرارت می‌شود. بیشترین مقدار انتقال حرارت برای نانومبرد با کسر جرمی 1.5% و مقدار آن در مقایسه با مبرد خالص 83% بیشتر است. ترکیلمز اوغلو [19] در سال 2015 با استفاده از تئوری کلاسیک چگالش لایه‌ای نوسلت دو مدل مختلف تحلیلی را برای نانوسیالات ارائه کرد. او در این تحلیل از نانوذرات نقره، مس، اکسید مس، اکسید آلومینیم و اکسید تیتانیوم با سیال پایه آب استفاده کرد. نتایج وی نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضخامت لایه چگالش یافته کمتر شده و همچنین انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ضیائی راد و امانی [20] در سال 2015 مطالعه‌ای عددی برای انتقال حرارت چگالش نانوسیال روی صفحه مایل انجام دادند. در این تحلیل

حرارت بالایی را برای چگالش قطره‌ای، در مقایسه با چگالش لایه‌ای گزارش کردند و از آن پس مقوله چگالش قطره‌ای مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفت.

اگرچه ضریب انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای بسیار بالاتر از چگالش لایه‌ای است با این حال تاکنون به‌کارگیری چگالش قطره‌ای در صنعت چندان موفق نبوده است. دلیل آن نیز پیچیدگی کنترل‌پذیری و پایداری فرایند می‌باشد. فرایند چگالش قطره‌ای به پارامترهای مختلفی از جمله تراکم مکان‌های هسته‌زایی، میزان آب‌گریزی سطح، ضخامت لایه‌ی آب‌گریز کننده، جهت‌گیری و شیب سطح، اختلاف دمای میان بخار و سطح وابسته است که مدل‌سازی ریاضی فرایند را دشوار می‌نماید. همچنین مسائلی از قبیل چگونگی تشکیل قطره در مقیاس اتمی، پدیده سلسله مراتبی<sup>1</sup>، مکانیزم‌های رشد و ترکیب قطرات، هسته‌تیزیس زاویه تماس<sup>2</sup>، دینامیک خط تماس سه فاز<sup>3</sup>، ناپایداری و شسته شدن قطره‌ها در حین حرکت یک قطره هنوز کاملاً حل نشده‌اند [2].

یکی از اولین مدل‌سازی‌های مربوط به چگالش قطره‌ای توسط لی فور و رز [3] در سال 1966 انجام شد. ایشان محاسبات مربوط به انتقال حرارت برای یک قطره تنها را با توزیع اندازه قطرات ترکیب کردند. در این مدل‌سازی مقاومت هدایتی از میان قطره، انتقال جرم در سطح تماس مایع-بخار، مقاومت لایه‌ی آب‌گریز کننده و مقاومت انحنای قطره لحاظ شده است. تاناکا [4] در سال 1975 مفهوم دقیق تری برای محاسبه توزیع محلی اندازه ذرات ارائه داد. وی برای رشد قطرات دو مکانیزم چگالش مستقیم و ترکیب با قطرات همسایه را در نظر گرفت. وو و ما [5] توزیع اندازه قطرات کوچک را با فرض حالت پایا و با استفاده از مفهوم توازن<sup>4</sup> تعداد تعیین کردند. ابواورابی [6] مدل‌های ارائه‌شده چگالش قطره‌ای بر پایه توازن تعداد را با در نظر گرفتن تمام مقاومت‌های حرارتی ممکن به کار بست. وموری و کیم [7] در سال 2006 چگالش قطره‌ای را با استفاده از توازن تعداد برای قطرات نیم‌کروی که با چگالش مستقیم رشد می‌کنند، مدل کردند. در مدل مذکور زاویه تماس مقدار ثابت 90 درجه در نظر گرفته شد. تیانکینگ و همکاران [8] در سال 2007 به‌صورت تجربی نشان دادند که شروع چگالش روی سطح به‌صورت قطره‌ای است و نه به‌صورت لایه‌ای. نتایج آن‌ها نشان داد که مکانیزم تشکیل قطرات اولیه برای چگالش قطره‌ای مطابق با فرضیه «مکان‌های هسته‌زایی» است. به تبعیت از ایشان بیشتر مدل‌های تحلیلی اخیر با فرض تشکیل قطرات در مکان‌های هسته‌زایی، انتقال حرارت ناچیز در بین قطرات، انجام فرایند چگالش فقط در سطح آزاد قطرات و انتقال گرمای نهان از میان قطرات به سطح جامد توسعه یافته‌اند. کیم و کیم [9] در سال 2011 چگالش قطره‌ای را بر روی یک سطح ابر آب‌گریز<sup>5</sup> را به صورت عددی مدل‌سازی کردند. برای محاسبه انتقال حرارت کل، انتقال حرارت از یک قطره تنها، با تابع توزیع اندازه قطرات ترکیب شده‌است. تابع توزیع قطرات کوچک که از طریق چگالش مستقیم رشد می‌کنند با روش توازن تعداد و برای قطرات بزرگ‌تر از رابطه لی فور و رز [3] تعیین شده‌است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که انتقال حرارت هر قطره و تابع توزیع قطره بر روی سطح به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متأثر از زاویه تماس است.

از آنجا که ضریب هدایتی سیال از عوامل مهم در میزان انتقال حرارت

<sup>1</sup> Hierarchical phenomenon

<sup>2</sup> Contact angle hysteresis

<sup>3</sup> Dynamics of the three-phase contact line

<sup>4</sup> Population balance

<sup>5</sup> Superhydrophobic

- افت دمای مقاومت حرارتی به علت انحنای قطره از رابطه (1) محاسبه می‌شود [26]:

$$\Delta T_c = \frac{2T_{sat}\sigma}{rh_{fg}\rho} \quad (1)$$

در این رابطه  $T_{sat}$  دمای اشباع بخار آب،  $r$  شعاع قطره،  $\sigma$  کشش سطحی،  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر و  $\rho$  چگالی نانوسیال می‌باشد. رابطه (1) را می‌توان به صورت رابطه (2) بازنویسی کرد:

$$\Delta T_c = \frac{r_{min}}{r} \Delta T \quad (2)$$

که در این رابطه  $\Delta T$  اختلاف دمای سطح و بخار و  $r_{min}$  شعاع کوچک‌ترین قطره‌ای است که به صورت پایدار می‌تواند روی سطح تشکیل شود. شعاع کوچک‌ترین قطره پایدار از رابطه (3) محاسبه می‌شود [27]:

$$r_{min} = \frac{2T_{sat}\sigma}{h_{fg}\rho\Delta T} \quad (3)$$

- افت دما بین سطح مشترک بخار اشباع و مایع ( $\Delta T_i$ ) به علت مقاومت بین سطحی عبارت است از:

$$\Delta T_i = T_c - T_i = \frac{q_d}{h_i 2\pi r^2 (1 - \cos\theta)} \quad (4)$$

در این رابطه  $q_d$  نرخ انتقال حرارت از میان قطره و  $h_i$  ضریب انتقال حرارت بین سطحی چگالش<sup>۲</sup> می‌باشد.  $h_i$  را می‌توان از رابطه (5) محاسبه کرد [28]:

$$h_i = \frac{2\alpha}{2 - \alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi R_g T_{sat}}} \frac{h_{fg}^2}{v_g T_{sat}} \quad (5)$$

و  $R_g$  ثابت ویژه گاز و برای بخار آب برابر  $461.5 \text{ J/kgK}$  و  $v_g$  حجم مخصوص بخار اشباع می‌باشد. ضریب چگالش<sup>۳</sup>،  $\alpha$  نسبت مولکول‌های بخار به کل مولکول‌های محیط چگالش است. این نسبت عددی در محدوده 0 تا 1 است که در این تحقیق  $\alpha=0.95$  فرض می‌گردد.

در تمام روابط ارائه‌شده،  $\theta$  زاویه ترشوندگی است. همان‌گونه که در شکل 2 نشان داده شده است روی سطح شیب‌دار، زاویه  $\theta$  در جلو و عقب قطره یکسان نیست. در این حالت زاویه پیشینه را زاویه پیشرو<sup>۴</sup> ( $\theta_a$ ) و زاویه کمینه را زاویه پسرو<sup>۵</sup> ( $\theta_r$ ) می‌نامند. روی سطح شیب‌دار زاویه  $\theta$  برابر میانگین زاویه پیشرو و پسرو می‌باشد [2].

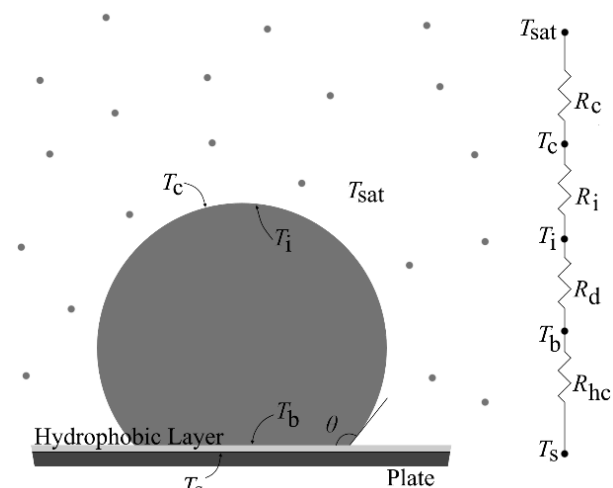


Fig. 1 Droplet state on plate and its thermal resistances

شکل 1 حالت قرارگیری قطره روی سطح و مقاومت‌های حرارتی مربوطه

<sup>2</sup> Interfacial heat transfer coefficient

<sup>3</sup> Condensation coefficient

<sup>4</sup> Advancing

<sup>5</sup> Receding

اثرات تغییر زاویه سطح، نوع نانوسیال، کسر حجمی نانوذرات و عدد زاكوب بر پروفیل سرعت، دما و عدد نوسلت بررسی شده است. ال مغاری و همکاران [21] در سال 2015 انتقال حرارت در چگالش لایه‌ای نانوسیال درون میکروکانال مربعی را به صورت عددی تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد اگر کسر حجمی نانوذرات مس 5% افزایش یابد ضریب انتقال حرارت 20% بهبود می‌یابد. مالوندی و همکاران [22] در سال 2016 اثر بزرگی و جهت میدان مغناطیسی را بر ضریب هدایتی نانوسیالات مغناطیسی ناهمسانگرد در فرایند چگالش لایه‌ای روی یک استوانه عمودی بررسی کردند. در این تحقیق توزیع نانوذرات داخل لایه‌ی چگالش یافته به صورت تحلیلی به دست آمده و نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه بین میدان مغناطیسی و گرادیان دما، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

افزودن نانوذره به یک سیال پایه، به‌غیراز تغییر ضریب هدایت حرارتی، خواص دیگری نظیر کشش سطحی، زاویه تماس و لزجت را نیز دست‌خوش تغییر می‌کند. این موارد موضوع تحقیق بسیاری از محققان در سال‌های اخیر است. به‌عنوان مثال ژو و همکاران [23] کشش سطحی نانوسیال آلومینیم را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که کشش سطحی به‌صورت خطی با دما کاهش و با افزایش کسر حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد. سبیلینسکی و کریگیر [24] زاویه تماس قطرات نانوسیالات آب-آلومینا، آب-دی‌اکسید تیتانیوم و آب-مس را بررسی کردند. جنس صفحات در این مطالعه شیشه، آلومینیم آنودایز شده<sup>۱</sup> و فولاد ضدزنگ با زبری‌های متفاوت است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد زاویه تماس قطره نانوسیال به زبری و جنس صفحه و نیز به غلظت و جنس نانوذره استفاده‌شده بستگی دارد. بوییان و همکاران [25] اثر غلظت و اندازه نانوذرات را روی کشش سطحی نانوسیال بررسی کرده‌اند. نانوذرات استفاده‌شده شامل  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  و سیال پایه آب مقطر است. یافته‌های آنان نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی نانوذرات کشش سطحی افزایش می‌یابد و نیز نانوذرات بزرگ‌تر کشش سطحی‌های بزرگ‌تری را از خود نمایش می‌دهند.

با توجه به منابع در دسترس نویسندگان، برخلاف چگالش لایه‌ای تاکنون هیچ مطالعه‌ای در ارتباط با به‌کارگیری نانوسیال در فرایند چگالش قطره‌ای انجام نشده است. لذا در این مقاله فرایند چگالش قطره‌ای نانو سیال بررسی شده است. هدف بررسی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله شیب صفحه، نوع و غلظت نانوذره بر فرایند چگالش قطره‌ای در مقایسه با چگالش لایه‌ای است. برای این کار معادلات مربوط به مقاومت حرارتی یک قطره استخراج و انتقال حرارت کل با در نظر گرفتن اثر نانو ذرات در خواص حرارتی، کشش سطحی، لزجت، چگالی و ضریب هدایت حرارتی به روش توازن تعداد برای کل صفحه استخراج شده است.

## 2- مدل سازی چگالش قطره‌ای

مدل‌سازی چگالش قطره‌ای با در نظر گرفتن مقاومت‌های حرارتی انجام می‌شود. حالت قرارگیری قطره روی سطح آب‌گریز و مقاومت‌های حرارتی مربوطه در شکل 1 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای انتقال حرارت، چهار مقاومت در نظر گرفته شده است: مقاومت ناشی از انحنای سطح قطره، مقاومت بین سطحی بخار اشباع و آب چگالش یافته، مقاومت هدایتی از میان قطره و مقاومت حرارتی لایه آب‌گریزکننده سطح. برای هر یک از مقاومت‌های فوق، افت دمای معادل به شرح زیر ارائه می‌گردد:

<sup>1</sup> Anodized

شدن قطره توسط رابطه (12) محاسبه می‌شود [32,31]:

$$r_{\max} = \left[ \frac{6(\cos\theta_r - \cos\theta_a)\sin\theta_e\sigma}{\pi(2 - 3\cos\theta_e + \cos^3\theta_e)\rho g \cos\theta} \right]^{1/2}$$

$$\theta_e = \cos^{-1}(0.5\cos\theta_a + 0.5\cos\theta_r) \quad (12)$$

در این رابطه زاویه  $\theta$  مطابق شکل 2 از حالت عمودی سنجیده می‌شود.

شعاع مؤثر  $r_e$ ، فاصله‌ای که تا آن قطرات با چگالش مستقیم و بعد از آن

به‌صورت ترکیب رشد می‌کنند، از رابطه (13) محاسبه می‌شود [9]:

$$r_e = (4N_s)^{-1/2} \quad (13)$$

که در آن  $N_s$  تعداد سایت‌های هسته‌زایی بر واحد سطح است. بر اساس منابع موجود نظیر میلیجکویک و همکاران [33] و کیم و کیم [9] در این مطالعه تعداد سایت‌های هسته‌زایی برابر  $10^{10}/\text{m}^2$  در نظر گرفته شده است.

برای استخراج انتقال حرارت کل چگالش قطره‌ای در واحد سطح، نرخ

انتقال حرارت از هر قطره را در چگالی تعداد قطرات ضرب کرده و از  $r_{\min}$  تا  $r_{\max}$  انتگرال گیری می‌شود:

$$q'' = \int_{r_{\min}}^{r_e} q_d(r)n(r)dr + \int_{r_e}^{r_{\max}} q_d(r)N(r)dr \quad (14)$$

### 3- نرخ انتقال حرارت در فرایند چگالش لایه‌ای

برای درک هرچه بهتر چگونگی رفتار چگالش قطره‌ای نتایج حاصل از آن برای نانوسیال نقره با نتایج چگالش لایه‌ای آن مقایسه شده است. برای مدل سازی چگالش لایه‌ای از روش تک فاز که توسط ترکیلمز اوغلو [19] استفاده شده بهره گرفته می‌شود. در این روش به‌جای خواص سیال در تئوری رینولدز از خواص نانوسیال استفاده می‌شود.

$$q'' = \bar{h}\Delta T = 0.943 \left[ \frac{\rho_{nf}^2 g h_{fg} k_{nf}^3}{\mu_{nf} x \Delta T} \right]^{1/4} \Delta T \quad (15)$$

در این رابطه  $\rho_{nf}$  چگالی نانوسیال،  $g$  شتاب گرانشی،  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر،  $k_{nf}$  ضریب هدایتی، لزجت نانوسیال،  $x$  طول صفحه و  $\Delta T$  اختلاف دمای سطح چگالش و بخار می‌باشد.

### 4- خواص نانوسیال

افزودن نانوذرات به سیال باعث تغییر مشخصات سیال پایه می‌گردد. مشخصات جدید به وجود آمده معمولاً بر پایه روابطی از ترکیب مشخصات

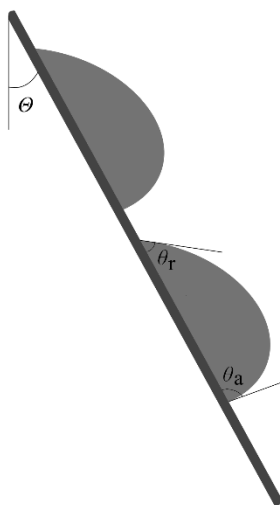


Fig. 2 Condensed droplets on an inclined surface

شکل 2 قطرات چگالش یافته روی یک سطح شیب‌دار

افت دما به دلیل مقاومت هدایتی در قطره می‌تواند به‌صورت رابطه (6) نوشته شود [29]:

$$T_i - T_b = \frac{q_d \theta}{4\pi r k_c \sin\theta} \quad (6)$$

در این رابطه  $T_i$  دمای سطح قطره،  $T_b$  دمای مایع پای قطره و  $k_c$  هدایت حرارتی مایع چگالش یافته می‌باشد.

افت دما به علت پوشش آب‌گریز با استفاده از رابطه (7) به دست می‌آید:

$$T_b - T_s = \frac{q_d \delta}{\pi r^2 k_{\text{coat}} \sin^2\theta} \quad (7)$$

در اینجا  $\delta$  ضخامت پوشش آب‌گریز و  $k_{\text{coat}}$  ضریب هدایت حرارتی پوشش است.

از برابر قرار دادن مجموع کلیه افت دماها با افت دمای کل، انتقال حرارت

عبوری از میان یک قطره به دست می‌آید:

$$q_d = \frac{\Delta T \pi r^2 (1 - \frac{r_{\min}}{r})}{\frac{1}{2h_i(1-\cos\theta)} + \frac{r\theta}{4k_c \sin\theta} + \frac{\delta}{k_{\text{coat}} \sin^2\theta}} \quad (8)$$

چگالش قطره‌ای در ابتدا در مکان‌های هسته‌زایی شروع می‌شود و قطرات تشکیل شده اولیه در اثر چگالش مستقیم رشد می‌کنند. وقتی قطرات به‌اندازه کافی بزرگ شدند به قطرات همسایه خود می‌پیوندند. ترکیب قطرات، مکانیزم حاکم فرایند بر رشد قطرات تا زمان سقوط و زدوده شدن آن‌ها می‌باشد. سطحی که در اثر سقوط قطرات عاری از قطره شده، دوباره در معرض بخار قرار می‌گیرد و هسته‌های اولیه دوباره می‌توانند روی آن شکل بگیرند [9].

بر اساس مدل کیم [9] تابع توزیع قطرات باید برای دو حالت در نظر گرفته شود: حالت اول برای قطرات کوچکی که با چگالش مستقیم رشد می‌کنند و حالت دوم قطرات بزرگتری که عمدتاً در اثر پیوند و ترکیب با سایر قطرات دیگر رشد می‌کنند. برای قطرات کوچکی که رشدشان با چگالش مستقیم است تابع توزیع تعداد با معادله (9) مشخص می‌شود:

$$n(r) = \frac{1}{3\pi r^3 r_{\max}} \left( \frac{r_e}{r_{\max}} \right)^{-2/3} \frac{r(r_e - r_{\min})}{r - r_{\min}} \frac{A_2 r + A_3}{A_2 r_e + A_3} \exp(B_1 + B_2) \quad (9)$$

که در آن:

$$A_1 = \frac{\Delta T}{2\rho h_{fg}}$$

$$A_2 = \frac{\theta(1 - \cos\theta)}{4k_c \sin\theta}$$

$$A_3 = \frac{1}{2h_i} + \frac{\delta(1 - \cos\theta)}{k_{\text{coat}}(\sin\theta)^2}$$

$$B_1 = \frac{A_2}{\tau A_1} \left[ \frac{r_e^2 - r^2}{2} + r_{\min}(r_e - r) - r_{\min}^2 \ln \left( \frac{r - r_{\min}}{r_e - r_{\min}} \right) \right]$$

$$B_2 = \frac{A_3}{\tau A_1} \left[ r_e - r_{\min} \ln \left( \frac{r - r_{\min}}{r_e - r_{\min}} \right) \right]$$

دوره زمانی زدوده شدن قطره از سطح  $\tau$  می‌تواند به‌صورت رابطه (10) نوشته شود:

$$\tau = \frac{3r_e^2 (A_2 r_e + A_3)^2}{A_1 (11A_2 r_e^2 - 14A_2 r_e r_{\min} + 8A_3 r_e - 11A_3 r_{\min})} \quad (10)$$

برای قطرات بزرگ‌تر که با هم پیوستن و ترکیب شدن رشد می‌کنند تابع توزیع  $N(r)$  توسط رز و گلیشمن [30] به‌صورت رابطه (11) ارائه شده است:

$$N(r) = \frac{1}{3r^2 r_{\max}} \left( \frac{r}{r_{\max}} \right)^{-2/3} \quad (11)$$

شعاع ماکزیمم مؤثر یا همان شعاع قطره در آستانه زدوده شدن  $r_{\max}$  با موازنه نیروهای کشش سطحی و گرانش محاسبه می‌شود. شعاع آستانه‌ای زدوده

تحقیقات نشان می‌دهد که رابطه فوق با مقدار  $\beta=2$  تطابق خوبی با نتایج تجربی تا غلظت 35% نانوسیال را دارا می‌باشد [39]. لازم به ذکر است که لزجت دینامیکی آب خالص (که در این تحقیق به عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار گرفته است) در دمای  $100^\circ\text{C}$  (دمای اشباع آب) برابر  $0.283\text{mNs/m}^2$  است [40].

از دیگر پارامترهای سیال که پس از افزودن نانوذرات به آن تغییر می‌کند، آنتالپی تبخیر است. مهرگان و مقیمان [41] رابطه (20) را برای آنتالپی تبخیر نانوسیالات ارائه داده‌اند:

$$(\rho h_{fg})_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f h_{fg,f} + \left(\frac{T_{b,f}}{T_{b,p}}\right)\varphi\rho_p h_{fg,p} \quad (20)$$

در این رابطه  $T_{b,p}$  و  $T_{b,f}$  به ترتیب نشان‌دهنده دمای نقطه جوش سیال و نانوذرات برحسب کلون بوده و  $h_{fg,p}$  و  $h_{fg,f}$  به آنتالپی تبخیر سیال و نانوذرات اشاره دارد. مقادیر این پارامترها در جدول 2 ارائه شده است.

لازم به ذکر است رابطه مهرگان و مقیمان اولین و تنها همبستگی موجود در رابطه با تقریب آنتالپی تبخیر نانوسیالات است که در سال 2014 ارائه شده است.

کشش سطحی سیال و زاویه تماس قطره با سطح از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در چگالش قطره‌ای است. در هر دو مورد نیز منابع بسیار محدودی در دسترس است که عمدتاً شامل آزمایش‌های تجربی است. از جمله مطالعه تجربی بوئیان و همکاران [25] در خصوص کشش سطحی نانوذرات آلومینا و دی‌اکسید تیتانیوم است. مطالعه انجام‌شده در محدوده دمایی 30 تا 50 درجه سلسیوس است و غلظت‌های 0.05 کسر حجمی و بالاتر را در برمی‌گیرد. کشش سطحی نانوسیال در غلظت‌های ارائه‌شده 0.01 تا 0.1 درصد حجمی مطالعه‌ی حاضر با خطی سازی داده‌های کسر حجمی 0.05 این مطالعه تخمین زده شد. بدین ترتیب کشش سطحی در دمای 100 درجه برای نانوسیال آلومینا مقدار  $62.4\text{ mN/m}$  و برای نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم مقدار  $62.6\text{ mN/m}$  تخمین زده می‌شود. مقدار کشش سطحی برای نانوسیال نقره نیز مقدار کشش سطحی آب خالص در دمای 100 درجه یعنی مقدار  $58.9\text{ mN/m}$  فرض شده است.

منابع بسیار محدود درباره زاویه تماس قطرات نانوسیال با سطح مانع از به‌کارگیری یک همبستگی قابل‌قبول برای بررسی آن در این مطالعه شده است. لذا در این تحقیق از تغییر زاویه‌ی تماس یک قطره‌ی نانو سیال نسبت به حالت سیال پایه صرف‌نظر شده است. زاویه تماس مورد استفاده در این تحقیق برابر 96 درجه، زاویه پیشرو برابر 106 و پسرو برابر 76 درجه می‌باشد.

### 5- اعتبار سنجی

برای اطمینان از صحت و درستی مدل‌سازی انجام شده، این مدل با نتایج تجربی ویلمشورتس و رز [45] برای سیال خالص روی صفحه عمودی مقایسه شده و در شکل 3 ارائه شده است. در آزمایش تجربی ذکر شده دو لایه

سیال پایه و نانوذرات نوشته می‌شوند. در این بررسی آب به‌عنوان سیال پایه و آلومینا، اکسید تیتانیوم و نقره به‌عنوان نانوذرات استفاده شده‌اند. خواص ترموفیزیکی سیال پایه آب و نانوذرات استفاده‌شده در جدول 1 ارائه شده است. در این جدول  $\rho$  چگالی ماده و  $k$  ضریب هدایتی آن می‌باشد.

چگالی و ضریب هدایتی سیال پایه مهم‌ترین پارامترهایی هستند که پس از افزودن نانوذرات به سیال پایه تغییر می‌کنند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. در روابط ارائه‌شده  $\rho_{nf}$  اشاره به نانوسیال،  $f$  اشاره به سیال و  $p$  اشاره به نانوذرات دارد.

چگالی نانوسیال را می‌توان از رابطه (16) محاسبه نمود [35]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (16)$$

$$\varphi = \frac{V_p}{V_f + V_p}$$

$\varphi$  کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه است.

در این رابطه  $V_p$  حجم کل نانوذرات و  $V_f$  حجم سیال پایه می‌باشد.

روابط مختلفی برای محاسبه ضریب هدایتی نانوسیال ارائه شده است. یکی از روابطی به صورت گسترده‌ای در منابع و مقالات استفاده شده است، رابطه همیلتون و کراسر [36] می‌باشد. این رابطه برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی مخلوط جامد-مایع ارائه شده که از گسترش رابطه ماکسول [37] به دست آمده است.

مدل همیلتون و کراسر به صورت رابطه (17) ارائه می‌گردد:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_p)} \quad (17)$$

در این رابطه  $n$  به عنوان ضریب شکل ذره<sup>1</sup> و به صورت رابطه (18) تعریف می‌گردد:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (18)$$

$\psi$  نسبت کرویت نام دارد و عبارت است از نسبت مساحت سطح کره‌ای هم حجم با ذره به مساحت سطح ذره.

رابطه (17) برای ذرات کروی، مستقل از مقدار ضرایب هدایتی نانوذره و سیال پایه و اندازه نانوذرات برقرار بوده و  $n=3$  می‌باشد. نتایج تجربی این محققین نشان می‌دهد که این رابطه برای ذرات کروی تا غلظت 30% برقرار است [36]. همچنین ژانگ و همکاران [38] نشان داده‌اند که این رابطه برای تعیین ضریب هدایتی نانوسیال نتایج قابل‌قبولی بدست می‌دهد.

همان‌طور که اشاره شد نتایج چگالش قطره‌ای برای نانوسیال نقره با چگالش لایه‌ای همین نانو سیال مقایسه شده است. مدل‌سازی چگالش لایه‌ای با رابطه (15) انجام شده است. در این رابطه  $\mu_{nf}$  لزجت دینامیکی نانوسیال است که از همبستگی چنگ و لائو [39] تعیین می‌شود:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \exp\left[\frac{2.5}{\beta}\left(\frac{1}{(1-\varphi)^\beta} - 1\right)\right] \quad (19)$$

جدول 1 خواص ترموفیزیکی مواد [34]

ماده	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$k(\text{W/mK})$
آب	997.1	0.68
آلومینا	3970	40
اکسید تیتانیوم	4250	8.9538
نقره	10500	429

<sup>1</sup> Particle shape factor

<sup>2</sup> Sphericity

جدول 2 نقطه جوش و گرمای نهان تبخیر مواد

ماده	$T_b(^{\circ}\text{C})$	$H_{fg}(\text{kJ/kg})$
آب	100	2257
آلومینا [42]	2977	10780
اکسید تیتانیوم [43]	2972	9830
نقره [44]	2193	2330

## 6- نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد ضریب انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای در تمام طول صفحه مقدار ثابتی است و یا در واقع برخلاف چگالش لایه‌ای، ضریب انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای مستقل از طول صفحه می‌باشد؛ چراکه شرایط یک نقطه از صفحه‌ای که چگالش قطره‌ای روی آن انجام می‌شود مشابه نقاط دیگر است. مقادیر ضریب انتقال حرارت برای سه نانوسیال مختلف محاسبه و در جدول 3 ارائه شده است. کسر حجمی هر سه نوع نانوسیال برابر 0.05 و صفحه قائم است. اختلاف دما بین سطح و بخار اشباع برابر 20 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

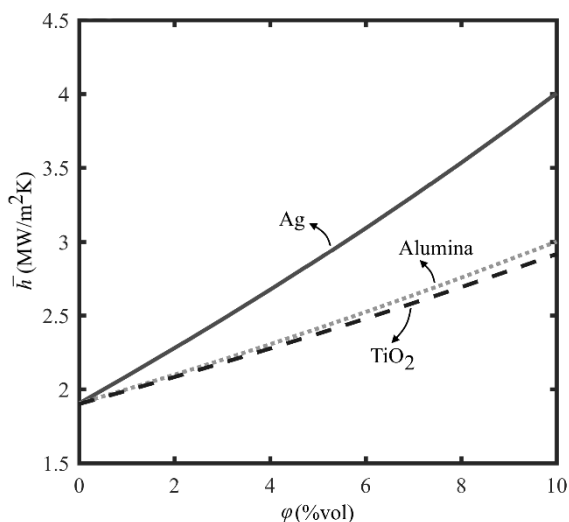
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ضریب انتقال حرارت نانوسیال نقره از نانوسیال آلومینا و دی‌اکسید تیتانیوم بیشتر است. با توجه به اینکه قابلیت هدایت حرارتی نانوذرات نقره به صورت قابل توجهی از دو مورد دیگر بیشتر است، بنابراین مقاومت هدایتی (رابطه 6) از میان هر قطره کاهش یافته و انتقال حرارت نیز به طور قابل توجهی بهبود پیدا می‌کند.

تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به غلظت هریک از نانوسیالات ذکرشده در شکل 4 نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نانو سیال نقره ضریب انتقال حرارت بالاتری نسبت به دو نانوسیال دیگر دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش غلظت، ضریب انتقال حرارت به صورت خطی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد ضریب هدایت حرارتی نانوذرات نقش اصلی را در تعیین مقدار ضریب انتقال حرارت نانوسیال ایفا می‌کند. به عبارت دیگر چون ضریب هدایتی نانوذرات نقره بیشتر از اکسید تیتانیوم و آلومینا است، نانوسیال آن نیز دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری است. با

جدول 3 ضریب انتقال حرارت برای سه نانو سیال مختلف با کسر حجمی 0.05 بر روی یک صفحه عمودی

**Table 3** Heat transfer coefficient for three different nanofluids with 0.05 volume fraction on a vertical plate

نانوسیال	نقره	آلومینا	دی‌اکسید تیتانیوم
ضریب انتقال حرارت (MW/m <sup>2</sup> K)	2.99	2.41	2.37



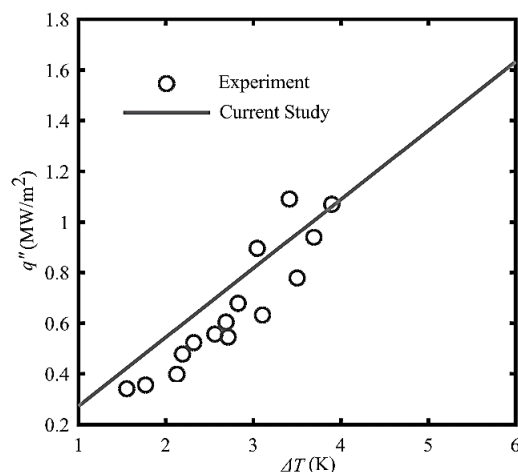
**Fig. 4** Heat transfer coefficient for three different nanofluids with respect to volume fraction

شکل 4 تغییرات ضریب انتقال حرارت برای سه نانو سیال مختلف نسبت به کسر حجمی

آب‌گریزکننده تفلون<sup>1</sup> و دی‌اکتادسیل دی‌سولفاید<sup>2</sup> به صورت جداگانه روی سطح مس قرار داده شده است. در این تحقیق تعدادی ترموکوپل داخل نمونه کار گذاشته شده و از برونیایی دمای این ترموکوپل‌ها، دمای سطح محاسبه شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد ضریب انتقال حرارت محاسبه‌شده برای تفلون و دی‌اکتادسیل دی‌سولفاید بسیار نزدیک به هم هستند.

نتایج ارائه شده در شکل 3 که تغییرات شار انتقال حرارت نسبت به اختلاف دما را نشان می‌دهد، نتایج این محققان با استفاده از لایه آب‌گریزکننده تفلون است. برخلاف چگالش لایه‌ای، ضریب انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای در تمام طول صفحه مقدار ثابتی است و شیب خط شار انتقال حرارت برحسب اختلاف دمای صفحه و بخار مقدار ثابتی است. در چگالش لایه‌ای با افزایش اختلاف دمای میان سطح و بخار، نرخ تغییر فاز نیز افزایش یافته و بالطبع ضخامت لایه‌ی مایع چگالش یافته نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در چگالش لایه‌ای با افزایش اختلاف دما مقاومت حرارتی بین سطح و بخار نیز افزایش می‌یابد که تأثیر منفی بر روی انتقال حرارت می‌گذارد. به عبارتی افزایش اختلاف دما هم تأثیر مثبت (افزایش نیروی محرک<sup>3</sup>) و هم منفی (افزایش مقاومت حرارتی) بر روی چگالش لایه‌ای دارد.

در چگالش قطره‌ای افزایش اختلاف دمای میان سطح و بخار هیچ تأثیری بر روی جمعیت قطرات بزرگ (رابطه‌ی 11) و شعاع حداکثر قطرات (رابطه‌ی 12) ندارد هرچند که بر روی جمعیت قطرات کوچک (رابطه‌ی 9) تأثیر کمی دارد. همچنین نرخ انتقال حرارت از میان هر قطره (رابطه‌ی 8) به صورت مستقیم به اختلاف دما مرتبط است. بنابراین با افزایش اختلاف دما انتقال حرارت از میان هر قطره به صورت خطی افزایش یافته و بالطبع آن (با توجه به عدم تغییر جمعیت قطرات) انتقال حرارت کل نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. در نتیجه همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود با افزایش اختلاف دما بین صفحه و بخار آب انتقال حرارت به صورت خطی افزایش یافته‌است. این شکل نمایانگر تطابق خوبی بین نتایج مطالعه حاضر و نتایج ویلمشورتس و رز [45] است. لازم به ذکر است در ارتباط با چگالش قطره‌ای نانوسیال در منابع و مقالات در دسترس نویسندگان، مطالعه‌ای یافت نگردید.



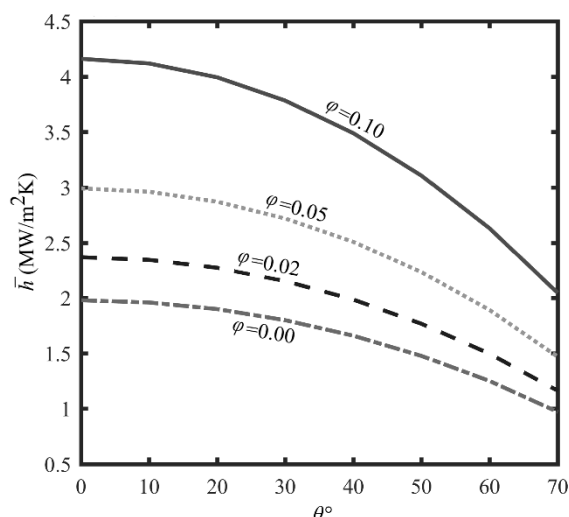
**Fig. 3** Comparison of the variation of heat flux with respect to temperature difference of the current study with Wilmshurst and Rose experimental results [45]

شکل 3 مقایسه تغییرات شار حرارتی نسبت به اختلاف دما در مطالعه حاضر با نتایج تجربی ویلمشورتس و رز [45]

<sup>1</sup> Ptfе

<sup>2</sup> Dioctadecyl disulphide

<sup>3</sup> Driving force



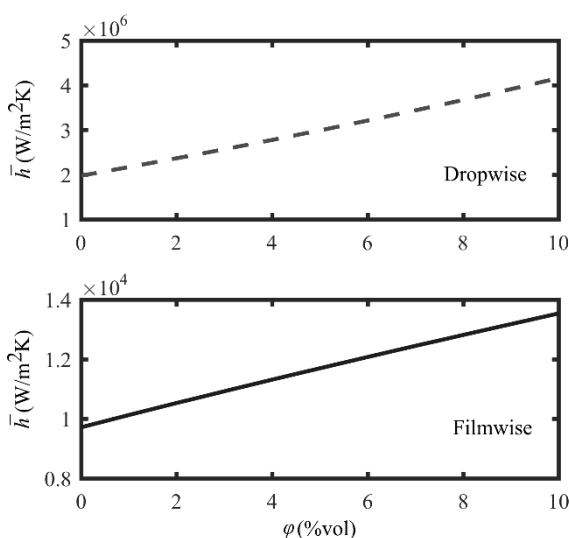
**Fig. 6** Variation of heat transfer coefficient for silver nanofluid in different concentrations with respect to surface inclination

شکل 6 تغییرات ضریب انتقال حرارت با زاویه سطح برای نانوسیال نقره در غلظت‌های مختلف نسبت به شیب سطح

ضریب هدایتی بسیار بالایی نسبت به سیال هستند داخل سیال پایه افزایش یابد باعث بهبود ضریب انتقال حرارت نانوسیال می‌گردد.

در شکل 7 مقادیر متوسط ضریب انتقال حرارت برای دو حالت چگالش لایه‌ای و قطره‌ای در غلظت‌های مختلف بر روی یک صفحه قائم مقایسه شده است. نانوسیال مورد بررسی نقره بوده و طول صفحه 10 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود این ضریب برای چگالش قطره‌ای بیش از 200 برابر چگالش لایه‌ای است. همچنین تغییرات ضریب انتقال حرارت برای هر دو حالت تقریباً به صورت خطی است.

در شکل 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط برای حالت‌های چگالش لایه‌ای و قطره‌ای برای صفحات قائم با طول‌های مختلف ارائه شده است. کسر حجمی سیال 0.05 و اختلاف دمای بین سطح و بخار 20 درجه در



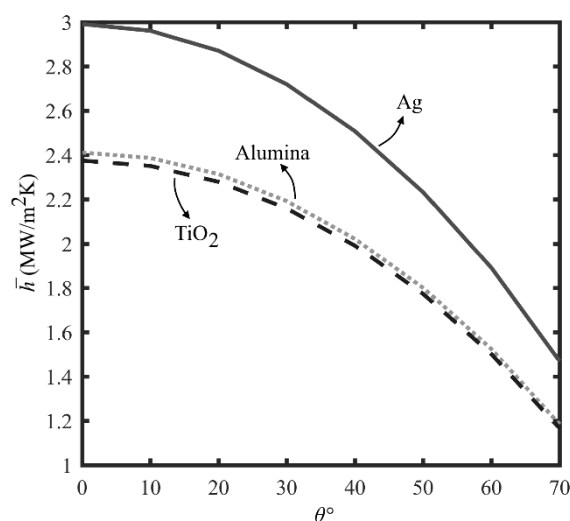
**Fig. 7** The variation of the average heat transfer coefficient with respect to volume fraction in dropwise and filmwise condensations for silver nanofluid on a plate with 10 cm in length

شکل 7 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با کسر حجمی در فرایندهای چگالش قطره‌ای و لایه‌ای برای نانوسیال نقره روی صفحه به طول 10 cm

افزایش درصد حجمی نانوذرات مقدار ماده دارای ضریب هدایتی بالا داخل سیال بیشتر می‌شود و این امر باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و بهبود فرایند انتقال حرارت می‌شود.

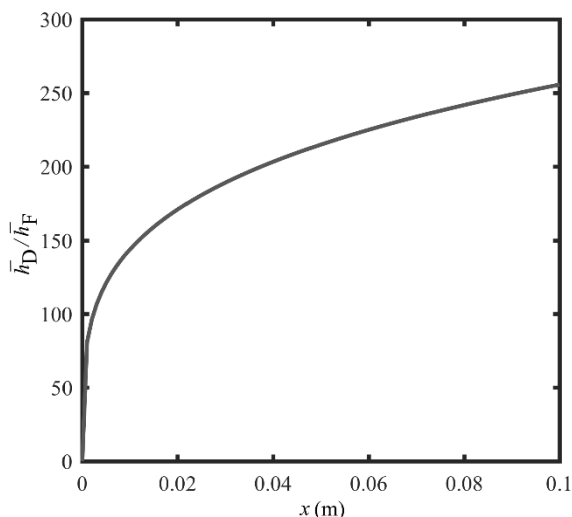
شکل 5 نشان‌دهنده تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به زاویه‌های مختلف سطح برای سه نانوسیال مختلف می‌باشد. در این بررسی نیز غلظت نانوسیالات برابر 0.05 و اختلاف دما 20 است. با توجه به شکل 5 مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت در حالت قائم (زاویه صفر درجه) بیشترین مقدار و رفته‌رفته با افزایش زاویه و نزدیک شدن صفحه به حالت افقی کاهش می‌یابد. در حالت قائم قطرات به راحتی می‌توانند از سطح زدوده شوند و این در حالی است که با نزدیک شدن صفحه به حالت افقی زدوده شدن قطرات به مراتب سخت‌تر می‌گردد. تغییرات ضریب انتقال حرارت برای نقره شدیدتر از دو نانوسیال دیگر است. نمودارهای شکل 5 و 6 تا حالت افقی سطح ادامه پیدا نکرده‌اند. چرا که هرچه صفحه به حالت افقی نزدیک‌تر شود مکانیزم حاکم بر زدوده شدن قطرات از سطح (گرائش) کم‌رنگ‌تر می‌شود. به عبارت بهتر اگر چگالش قطره‌ای بر روی یک صفحه تخت انجام شود، در ابتدای کار چگالش به صورت قطراتی مجزا پدیدار می‌شود. سپس با گذشت زمان قطرات به هم می‌پیوندند و قطرات بزرگ‌تر تشکیل می‌شود. سپس با گذشت زمان کافی به دلیل عدم مکانیزم مناسب برای زدودن قطرات از روی سطح افقی (نظیر گرائش) قطرات بزرگ‌تر به هم پیوسته و لایه‌ی مایع روی سطح پدید می‌آید. بنابراین حالت پایدار چگالش قطره‌ای بر روی یک سطح کاملاً افقی عملاً وجود نخواهد داشت. بنابراین نتایج تحلیل عددی چگالش قطره‌ای پایدار بر روی یک سطح افقی معتبر نخواهد بود. به همین خاطر زاویه‌ی 90 درجه در شکل‌های 5 و 6 ترسیم نشده‌اند.

تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به زاویه سطح برای نانوذره آلومینا در غلظت‌های مختلف در شکل 6 ارائه شده است. در این شکل ضریب انتقال حرارت برای غلظت‌های 0.00، 0.02، 0.05، 0.1 کسر حجمی ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در یک زاویه سطح مشخص همواره نانوسیال دارای غلظت بالاتر دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری نیز است. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد افزودن نانوذرات فلزی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت سیال پایه می‌گردد. هرچه مقدار نانوذرات فلزی که دارای



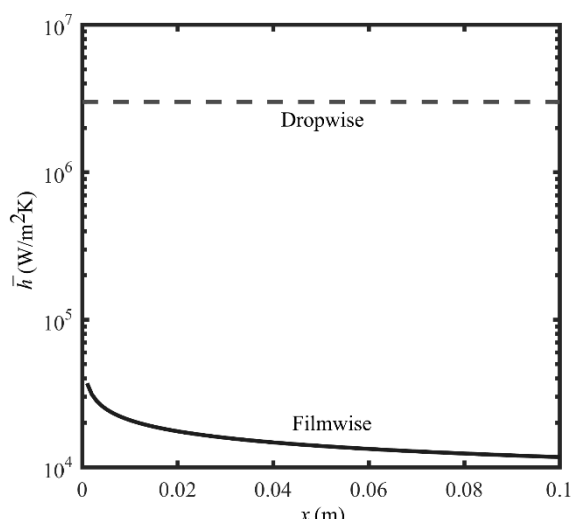
**Fig. 5** The variation of heat transfer coefficient for three nanofluids with respect to surface inclination

شکل 5 تغییرات ضریب انتقال حرارت با زاویه سطح برای سه نانوسیال مختلف



**Fig. 9** Average heat transfer coefficient in dropwise and filmwise condensations ratio for silver nanofluid

شکل 9 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با  $x$  در چگالش‌های قطره‌ای و لایه‌ای برای نانوسیال نقره



**Fig. 8** Average heat transfer coefficient with respect to  $x$  (length from top of the plate) in dropwise and filmwise condensations for silver/water nanofluid

شکل 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با  $x$  (طول صفحه از بالای صفحه رو به پایین) در چگالش‌های قطره‌ای و لایه‌ای بر روی یک صفحه قائم برای نانوسیال آب/نقره

- ضریب انتقال حرارت در فرایند چگالش قطره‌ای در طول صفحه ثابت است و برای نانوسیالات مختلف متفاوت می‌باشد.

- ضریب انتقال حرارت در فرایند چگالش قطره‌ای برای حالتی که صفحه در حالت عمودی است بیشترین مقدار است. هرچه که شیب صفحه از حالت عمود به حالت افقی نزدیک می‌شود ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

- ضریب انتقال حرارت چگالش قطره‌ای در این تحقیق حدود 200 برابر چگالش لایه‌ای است.

#### 8- فهرست علائم

$d$	قطر (m)
$h$	ارتفاع ستون (m)
$h_{fg}$	آنتالپی تبخیر (J/kgK)
$h_i$	ضریب انتقال حرارت بین سطحی ( $w/m^2K$ )
$k$	ضریب هدایتی (w/mK)
$N$	تابع توزیع ( $m^{-3}$ )
$N_s$	چگالی سایت‌های هسته‌زایی اولیه ( $m^{-2}$ )
$n$	ضریب شکل
$q_d$	انتقال حرارت از قطره (w)
$R_g$	ثابت ویژه گاز (J/kgK)
$r$	شعاع (m)
$r_e$	شعاع مؤثر (m)
$T$	دما (K)
$x$	طول (m)

#### علائم یونانی

$\sigma$	کشش سطحی (N/m)
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\theta$	زاویه ترشوندگی ( $^\circ$ )
$\Theta$	زاویه سطح ( $^\circ$ )
$\alpha$	ضریب چگالش
$\nu$	حجم مخصوص ( $m^3/kg$ )

نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد ضریب انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای مستقل از طول صفحه است اما در چگالش لایه‌ای با افزایش طول صفحه به دلیل رشد ضخامت لایه مایع در امتداد صفحه، کاهش می‌یابد. روی صفحه‌ای که چگالش قطره‌ای روی آن انجام می‌شود به‌طور پیوسته قطراتی که به شعاع ماکزیمم می‌رسند از روی آن می‌لغزند و سطح جدیدی برای تشکیل قطرات دیگر فراهم می‌شود و برخلاف چگالش لایه‌ای هیچ‌گاه لایه پیوسته‌ای از مایع روی سطح تشکیل نمی‌شود. این امر باعث می‌شود همواره در شرایط یکسان ضریب انتقال حرارت چگالش قطره‌ای چندین برابر چگالش لایه‌ای باشد.

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در شکل 8 نسبت‌های ضریب انتقال حرارت چگالش قطره‌ای به ضریب انتقال حرارت متوسط چگالش لایه‌ای به ازای طول‌های مختلف صفحه قائم تا 10 cm در شکل 9 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود این نسبت وابستگی شدیدی به طول صفحه دارد و با افزایش طول صفحه افزایش می‌یابد. این نسبت برای طول‌های کمتر در حدود صد و برای طول‌های بیشتر در حدود دویست است.

#### 7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه چگالش قطره‌ای نانوسیالات مختلف روی یک صفحه شیب‌دار دارای پوشش آب‌گریز بررسی شد. ابتدا مقاومت‌های حرارتی از میان یک قطره استخراج شده و سپس با استفاده از مدل توازن تعداد انتقال حرارت کل محاسبه گردید. در این مطالعه نانوسیالات مختلف شامل آلومینا، اکسید تیتانیوم و نقره با سیال پایه آب مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شیب‌های مختلف صفحه و غلظت‌های متفاوت نانو سیال‌ها ارائه گردید. از تئوری نوسلت برای محاسبه مقدار انتقال حرارت در چگالش لایه‌ای استفاده و انتقال حرارت چگالش قطره‌ای و چگالش لایه‌ای مقایسه شد.

به‌طور خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

- حضور نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت در فرایند چگالش قطره‌ای شده است و برای غلظت‌های بالاتر این افزایش پررنگ‌تر است.



- [14] Z.-H. Liu, Y.-Y. Li, R. Bao, Thermal performance of inclined grooved heat pipes using nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 9, pp. 1680-1687, 2010.
- [15] G. Huminic, A. Huminic, Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphons using nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 3, pp. 550-557, 2011.
- [16] A. A. Avramenko, I. V. Shevchuk, A. I. Tyrinov, D. G. Blinov, Heat transfer at film condensation of stationary vapor with nanoparticles near a vertical plate, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, No. 1, pp. 391-398, 2014.
- [17] P. Singh, S. Venkatachalapathy, G. Kumaresan, Heat Transfer Studies on Condensation Using Heat Pipes, *Proceedings of Applied Mechanics and Materials*, Switzerland: Trans Tech Publication Inc., Vol. 592, pp. 1617-1621, 2014.
- [18] M. A. Akhavan-Behabadi, M. K. Sadoughi, M. Darzi, M. Fakoor-Pakdaman, Experimental study on heat transfer characteristics of R600a/POE/CuO nano-refrigerant flow condensation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 66, pp. 46-52, 2015.
- [19] M. Turkyilmazoglu, Analytical solutions of single and multi-phase models for the condensation of nanofluid film flow and heat transfer, *European Journal of Mechanics*, Vol. 53, pp. 272-277, 2015.
- [20] M. Ziaei-Rad, F. Amani, Numerical study of heat transfer in film condensation on an inclined plate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 239-248, 2015. (in persian)
- [21] H. El Mghari, H. Louahia-Gualous, E. Lepinasse, Numerical Study of Nanofluid Condensation Heat Transfer in a Square Microchannel, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 68, No. 11, pp. 1242-1265, 2015.
- [22] A. Malvandi, S. Heysiattalab, D. D. Ganji, Effects of magnetic field strength and direction on anisotropic thermal conductivity of ferrofluids (magnetic nanofluids) at filmwise condensation on a vertical cylinder, *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, No. 4, pp. 1539-1546, 2016.
- [23] D. S. Zhu, S. Y. Wu, N. Wang, Surface tension and viscosity of aluminum oxide nanofluids, *proceeding of the 6th international symposium on multiphase flow, heat mass transfer and energy conversion*, New York: American Institute of Physics Publishing, Vol. 1207, pp. 460-464, 2010.
- [24] J. T. Cieśliński, K. A. Krygier, Sessile droplet contact angle of water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, water-TiO<sub>2</sub> and water-Cu nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 59, pp. 258-263, 2014.
- [25] M. H. U. Bhuiyan, R. Saidur, R. M. Mostafizur, I. M. Mahbubul, M. A. Amalina, Experimental investigation on surface tension of metal oxide-water nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 65, pp. 82-88, 2015.
- [26] V. P. Carey, *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment*, Second Edition, pp. 52-78, New York: CRC Press, 2007.
- [27] A. Ranodolph, *Theory of Particulate Processes: Analysis and Techniques of Continuous Crystallization*, Second Edition, pp. 109-128, New York: Academic Press, 2013.
- [28] I. Tanasawa, Advances in condensation heat transfer, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 21, pp. 55-139, 1991.
- [29] S. Lee, A dropwise condensation model using a nano-scale, pin structured surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 60, pp. 664-671, 2013.
- [30] J. W. Rose, L. R. Glicksman, Dropwise condensation—the distribution of drop sizes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 16, No. 2, pp. 411-425, 1973.
- [31] H.-Y. Kim, H. J. Lee, B. H. Kang, Sliding of liquid drops down an inclined solid surface, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 247, No. 2, pp. 372-380, 2002.
- [32] P. Dimitrakopoulos, J. J. L. Higdon, On the gravitational displacement of three-dimensional fluid droplets from inclined solid surfaces, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 395, pp. 181-209, 1999.
- [33] N. Miljkovic, R. Enright, E. N. Wang, Modeling and optimization of superhydrophobic condensation, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 135, No. 11, p. 111004, 2013.
- [34] E. Abu-Nada, Z. Masoud, A. Hijazi, Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 5, pp. 657-665, 2008.

$\mu$	لزجت دینامیکی (Ns/m <sup>2</sup> )
$\delta$	ضخامت لایه آب‌گریز (m)
$\tau$	دوره زمانی زوده شدن قطره (s)
$\varphi$	کسر حجمی (% vol)
$\psi$	نسبت کروی

## زیرنویس‌ها

اشباع	sat
بین سطحی	i
قطره	d
گاز	g
سیال چگالش یافته	c
پوشش آب‌گریز	coat
پیشرو	a
پسرو	r
نانوذره	p
نانو سیال	nf
سیال	f

## 9- مراجع

- [1] E. Schmidt, W. Schurig, W. Sellschopp, Condensation of water vapour in film-and drop form, *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 74, pp. 544-544, 1930.
- [2] S. Khandekar, K. Muralidhar, *Dropwise condensation on inclined textured surfaces*, pp. 4-10, New York: Springer, 2014.
- [3] E. J. LeFevre, J. W. Rose, A theory of heat transfer by dropwise condensation, *Proceedings of 3rd International Heat Transfer Conference*, New York: American Institute of Chemical Engineers, Vol. 2, pp. 362-375, 1966.
- [4] H. Tanaka, A theoretical study of dropwise condensation, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 97, No. 1, pp. 72-78, 1975.
- [5] H. W. Wen, R. M. Jer, On the heat transfer in dropwise condensation, *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 12, No. 3, pp. 225-231, 1976.
- [6] M. Abu-Orabi, Modeling of heat transfer in dropwise condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 1, pp. 81-87, 1998.
- [7] S. Vemuri, K. J. Kim, An experimental and theoretical study on the concept of dropwise condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 3, pp. 649-657, 2006.
- [8] L. Tianqing, M. Chunfeng, S. Xiangyu, X. Songbai, Mechanism study on formation of initial condensate droplets, *The American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 53, No. 4, pp. 1050-1055, 2007.
- [9] S. Kim, K. J. Kim, Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 133, No. 8, pp. 081501-081507, 2011.
- [10] S. U. S. Chol, J. A. Estman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Proceedings of International mechanical engineering congress and exhibition*, Washington, DC: Fluids Engineering Division of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 231, pp. 99-106, 1995.
- [11] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles), *Netsu Bussei*, Vol. 7, No. 4, pp. 227-233, 1993.
- [12] P. Koblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, J. A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 4, pp. 855-863, 2002.
- [13] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, No. 4, pp. 567-574, 2003.

- McGraw-Hill, 2003.
- [41] M. Mehregan, M. Moghiman, Propose a correlation to approximate nanofluids' enthalpy of vaporization—a numerical study, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 2, No. 1, pp. 73–6, 2014.
- [42] R. J. Lewis, *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*, 11th Edition, p. 136, New Jersey: Wiley & Sons, 2004.
- [43] R. Serway, J. Faughn, C. Vuille, *College Physics*, 8th Edition, p. 360, California: Cengage Learning, 2010.
- [44] R. C. Weast, *Handbook of Chemistry and Physics*, 69th Edition, p. B-140, New York: CRC Press, 1988.
- [45] R. Wilmshurst, J. W. Rose, Dropwise condensation-further heat-transfer measurements, *Proceedings of the Fourth International Heat Transfer Conference*, New York: American Institute of Chemical Engineers, Vol. 4, Paper Cs1-4, 1970.
- [35] 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.
- [36] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two component systems, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962
- [37] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Second Edition, pp. 435, Oxford: Clarendon Press, Oxford, 1881.
- [38] X. Zhang, H. Gu, M. Fujii, Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, No. 6, pp. 593-599, 2007.
- [39] N. Cheng, A. Law, Exponential formula for computing effective viscosity, *Powder Technology*, Vol. 129, No. 1-3, pp. 156–160 2003.
- [40] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 5th edition, pp. 771, Boston: