



بررسی اثر پدیده مارانگونی در چگالش تک قطره بر روی ساختارهای ونزل و کیسی

لقمان محمد پور^۱، احسان امینیان^۲ و حمید صفاری^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

یادداشت پژوهشی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹

چکیده

تغییر فاز بخار به مایع را چگالش می‌نامند که کاربردهای گسترده‌ای در صنعت دارد. چگالش قطره‌ای روی سطوح آبگریز و ابر آبگریز اتفاق می‌افتد. تحقیقات نشان داده‌اند که ایجاد ساختارهای میکرو-نانو ساختار روی سطوح، یکی از روش‌های آبگریز نمودن آن‌ها است. اختلاف دمای بخار و مایع می‌تواند منجر به ایجاد گرادیان دما و بالطبع همرفت مارانگونی شود. در این مقاله به شبیه سازی تک قطره روی سطوح با ساختارهای کیسی، ونزل در چهار حالت مختلف و سطح صاف پرداخته شده است و نرخ انتقال حرارت برای تک قطره چگالیده شده روی این سطوح و در دو حالت با و بدون مارانگونی در یک شبیه سازی عددی و با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، محاسبه گشته است. نتایج نشان داده‌اند، نرخ انتقال حرارت عبوری از قطره ساکن در حالتی که اثر مارانگونی احتساب گشته است، از حالتی که از آن صرف نظر شده است، بیشتر است. میزان انتقال حرارت عبوری از قطره در حالت بدون مارانگونی روی سطح با زبری کیسی از سطح صاف ۳۵٪ و سطح صاف نیز از سطح با زبری ونزل ۱۲۸٪ بیشتر است. در حالت با مارانگونی نحوه تغییر نرخ انتقال حرارت از این سطوح متأثر از زاویه تماس قطره روی سطح است.

کلمات کلیدی: چگالش قطره‌ای؛ انتقال حرارت؛ شبیه سازی عددی؛ ساختار ونزل؛ ساختار کیسی؛ زاویه تماس.

Investigating the effect of Marangoni phenomenon on single drop condensation on Wenzel and Cassie structures

L. Mohamadpour¹, E. Aminian², H. Saffari^{3,*}

¹ M.Sc. Student, Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

² Ph.D. Student, Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The change of the vapor to liquid phase, which is widely used in industry, is called condensation. Dropwise condensation (DWC) occurs on the hydrophobic and the super hydrophobic surfaces. Research has shown that the creation of micro-nanostructured structures on surfaces is one of the ways. The difference in temperature between the vapor and the liquid can lead to temperature gradient, which causes the convection Marangoni convection. This paper simulates a single drop on surfaces with Cassie and Wenzel structures in four different modes and a smooth surface, and the heat transfer rate for a single drop condensed on these surfaces is calculated in two modes with and without marangoni. The results show that the rate of heat transfer passing through the static drop in the case of the presence of marangoni is higher than the non-Marangoni mode. The rate of heat transfer from the droplet in the without-Marangoni state on the surface with the roughness of the cassie from the smooth surface is 350%, and the smooth surface is 128% higher than the surface with the roughness of the the Wenzel. In the case of Marangoni, the mode of change of heat transfer rate from these surfaces is affected by the contact angle of the drop on the surface.

Keywords: Dropwise Condensation; Heat Transfer; Computational Fluid Dynamic; Wenzel Structure; Cassie Structure; Contact Angle.

۱- مقدمه

چنانچه دمای یک سطح جامد به زیر دمای اشباع بخار مجاورش برسد، ممکن است که بخار روی سطح جامد چگالیده شود. چگالش در دو حالت لایه‌ای و قطره‌ای می‌تواند صورت بپذیرد. چگالش با انتقال جرم همراه است که در طی آن بخار به سمت فصل مشترک مایع-بخار رفته و به مایع تبدیل می‌شود. تبادل انرژی در چگالش در مرز جامد-بخار بوده و چون این فرآیند با حرکت سیال (مایع) همراه است، انتقال حرارت در آن از نوع جابجایی است. از جمله عواملی که روی فرآیند چگالش تأثیر می‌گذارند، می‌توان به گرمای نهان تبخیر، کشش سطحی بین سطح مشترک مایع-بخار و اختلاف چگالی بین مایع و بخار اشاره کرد. به دلیل آثار گرمای نهان تبخیر، آهنگ انتقال حرارت در فرآیند چگالش بسیار بیشتر از آهنگ انتقال حرارت در فرآیند جابجایی بدون تغییر فاز می‌باشد. جدا از پدیده‌های طبیعی، چگالش بخشی ضروری از تبدیل انرژی، برداشت آب از محیط اطراف، سیستم‌های تهویه مطبوع و سیستم‌های مدیریت حرارتی است؛ بنابراین بهبود در انتقال گرما و انتقال جرم در طول فرآیند تغییر فاز سودمند است [۱]؛ همچنین این پدیده در برخی از سیستم‌ها از جمله لوله‌های حرارتی، نیروگاه‌های حرارتی و نمک‌زدایی از آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزایش نرخ‌های انتقال حرارت به سیستم‌های ذکر شده این امکان را می‌دهد که بدون از دست دادن عملکردشان اندازه سیستم کاهش یابد یا همان اندازه باقی بمانند، در حالی که عملکردشان افزایش می‌یابد [۲].

در حالت کلی چگالش به دو دسته همگن و ناهمگن تقسیم می‌شود. چگالش همگن در فضای آزاد در غیاب هر ماده خارجی رخ می‌دهد. چگالش ناهمگن روی سطوح ایجاد شده و با توجه به نوع سطح چگالش، به دو دسته حجمی و سطحی تقسیم می‌شود. فرآیند چگالش بیشتر به صورت ناهمگن و سطحی اتفاق می‌افتد. چگالش روی سطوح ممکن است، به شکل قطره^۱ و یا لایه‌ای از مایع^۲ بسته به میزان ترشوندگی سطوح ظاهر شود. اگر دیواره جامد انرژی سطحی پایینی داشته باشد، بخار به صورت قطراتی ریز در سایت‌های

هسته زایی چگالش می‌یابد، اما اگر این دیواره از انرژی سطحی بالایی برخوردار باشد (که معمولاً سطوح فلزی به این صورت هستند)، بخار به صورت لایه‌ای از مایع روی سطح چگالش می‌یابد، مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که نرخ انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای در مقایسه با چگالش لایه‌ای به مراتب بیشتر است [۳-۵]؛ بنابراین، بسیاری از تلاش‌ها، هم از لحاظ عددی و هم از لحاظ تجربی، برای کشف مکانیزم اساسی و یا بهبود فرآیند انتقال حرارت چگالش قطره‌ای انجام شده‌اند.

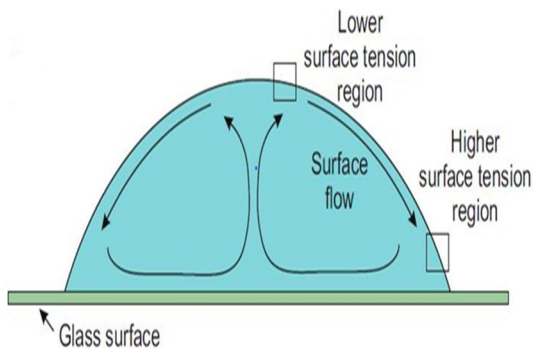
برای مثال وموری و کیم [۶]، به صورت تجربی و عددی چگالش قطره‌ای و لایه‌ای را روی یک سطح مسی صاف بررسی کرده‌اند. آن‌ها میزان انتقال حرارت چگالش قطره‌ای را ۳ برابر چگالش لایه‌ای گزارش کردند. مطالعات اخیر در زمینه چگالش قطره‌ای عموماً روی سطوح صاف با پوشش‌های آبگریز منعطف شده است. در این پژوهش‌ها به این نتیجه رسیده شده است که زاویه تماس قطره تأثیر به‌سزایی در نرخ انتقال حرارت دارد [۷ و ۸]. کیم و کیم [۹]، به صورت عددی نشان دادند که افزایش زاویه تماس از ۹۰ تا ۱۵۰ درجه، انتقال حرارت را تا ۴۰٪ افزایش می‌دهد، اگرچه مطالعات قبلی نشان داده‌اند که تولید زاویه تماس بزرگتر از ۱۲۰ روی سطوح صاف به صورت استفاده از روش‌های شیمیایی کار دشواری است [۱۰-۱۲]، در عوض تولید زاویه تماس بزرگتر از ۱۲۰ روی سطوح نانوساختار و میکرو ساختار به وسیله پوشش‌های آبگریز آسان است؛ بنابراین روش‌های زیادی برای تولید سطوح ابر آبگریز (زاویه تماس بزرگتر از ۱۵۰) به وسیله محققان ارائه شده است [۱۳-۱۵]. برای مثال کارهای عددی زیر در این راستا صورت گرفته است. میلکوویچ و همکاران [۱۶]، به صورت عددی مدل سازی و بهینه سازی چگالش قطره‌ای را روی سطوح میکرو-نانو ساختار انجام داده‌اند. آن‌ها از میکرو-نانوساختارهای به صورت استوانه‌ای با ابعاد و فاصله مرکز تا مرکز مشخص این کار را انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند، میکرو-نانوساختارها می‌توانند به وسیله پارامترهای هندسی تا ۱۹۰٪ انتقال حرارت را بهبود ببخشند. بهرامی و همکاران [۱۷]، به صورت عددی دو ساختار شبه هرمی و شبه مخروطی برای سطوح چگالش قطره‌ای مدل کردند. ساختارهای شبه هرمی و شبه مخروطی

¹ Dropwise Condensation

² Filmwise Condensation

حرارتی و لزجت دینامیکی قطره مایع می‌باشند که $\alpha = K/\rho C_p$ است.

جا به جایی سیال داخل قطره به عوامل مختلفی همچون، خواص سیال، هدایت حرارتی سطح جامد، دمای سطح و زاویه تماس قطره روی سطح بستگی دارد [۲۷]. جهت جا به جایی مارانگونی روی سطح تماس مایع-بخار از مناطق با گرادیان کشش سطحی کمتر (دمای بیشتر) به سمت مناطق با گرادیان کشش سطحی بیشتر (دمای کمتر) و داخل قطره به صورت یک جریان چرخشی از مناطق با دمای کمتر به سمت مناطق با دمای بیشتر است. در شکل ۱، جهت جریان چرخشی مارانگونی در قطره نمایش داده شده است [۲۷].



شکل ۱- نحوه ایجاد جریان مارانگونی و جهت آن در داخل قطره [۲۶]

برای شبیه سازی قطره روی سطح دو روش وجود دارد؛ روش تخمین دو دایره‌ای^۲ و نرم افزار SE^۳ [۲۸]. روش تخمین دو دایره‌ای معمولاً برای شبیه سازی قطره روی سطح صاف بکار گرفته می‌شود و نمی‌توان از آن برای شبیه سازی سطوح زبر بهره گرفت. در پژوهش پیش رو از نرم افزار SE استفاده شده است که از روش الگوریتم گرادیان کاهشی به شبیه سازی سطوح می‌پردازد. چن و همکاران [۲۹]، به شبیه سازی چند نوع زبری به وسیله نرم افزار SE و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی پرداختند و نحوه قرار گیری قطره روی زبری‌های به صورت مکعب و موازی با هم که دارای ساختار

نسبت به ساختارهای هرمی و مخروطی انتقال حرارت بیشتری را نشان دادند.

ایجاد ساختارهای میکرو نانو ساختار (زبری) باعث کاهش انرژی سطحی می‌شود. این زبری‌ها می‌توانند دو ساختار متفاوت داشته باشند [۲۱-۱۸]. اگر قطره مایع به داخل زبری نفوذ کند، حالت ونزل [۲۲] و اگر قطره روی زبری بایستد و به داخل آن نفوذ نکند حالت کیسی [۲۳] خواهد بود.

بهرامی و همکاران اثرات زبری سطح [۲۴]، چیدمان زبری و انرژی سطح را به صورت عددی برای ایجاد بهترین ساختار سطح به منظور افزایش انتقال حرارت چگالش قطره‌ای بررسی کردند. آن‌ها پس از بررسی به این نتیجه رسیدند که مزیت و معایب ساختار سطحی از جمله ارتفاع زبری می‌تواند منجر به افزایش یا کاهش انتقال حرارت در ساختارهای کیسی و ونزل شود.

انرژی نهان بخار در حین چگالش قطره‌ای از قطره عبور کرده تا به سطح جامد سرد انتقال یابد [۲۵]. در یک قطره ساکن، اختلاف دمای بخار و مایع منجر به ایجاد گرادیان دما می‌شود. با توجه با اینکه کشش سطحی تابعی از دما است، این گرادیان دما سبب ایجاد گرادیان کشش سطحی می‌شود. گرادیان کشش سطحی به وجود آمده باعث ایجاد نیروهای برشی نابرابری می‌شود که این نیروها سبب ایجاد یک جریان به اسم جریان مارانگونی درون قطره می‌شوند. جریان مارانگونی می‌تواند به صورت مقاومتی (R_{ma}) در مسیر انتقال حرارت عمل بکند [۲۶]؛ همچنین چرخش به وجود آمده سیال درون قطره می‌تواند منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جا به جایی و طبعاً نرخ انتقال حرارت جا به جایی گردد؛ بنابراین پدیده مارانگونی را جا به جایی مارانگونی نیز می‌گویند. بزرگی همرفت مارانگونی^۱ را می‌توان از عدد بعد مارانگونی به دست آورد [۲۶]:

$$Ma = -\frac{d\sigma}{dT} \times \frac{\Delta T L}{\alpha \mu} \quad (1)$$

در رابطه فوق، $d\sigma/dT$ گرادیان کشش سطحی متاثر از دما، ΔT اختلاف دمای بین سطح جامد و بخار، L ارتفاع قطره، α و μ به ترتیب ضریب پخش شونده

² Two Circle Approximation

³ Surface Evolver

¹ Marangoni Convection

کیسی بودند را به وسیله نرم افزار مذکور شبیه سازی نموده و نتایج حاصل از آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده و توانستند، متد قابل قبولی را جهت شبیه سازی زبری‌های به صورت مکعب‌های موازی در این نرم افزار ارائه دهند. زبری‌های شبیه سازی شده هر دو حالت زبری کیسی و و نزل می‌باشند. نتایج حاصله از این دو زبری با نتایج سطح صاف نیز مقایسه گشته‌اند.

ابراهیم و المصری [۳۰]، به صورت آزمایشگاهی به بررسی چگالش قطره‌ای اکتان روی لایه‌ای آلومینومی و مهندسی سطح جامد جهت بهینه کردن آن برای وقوع چگالش قطره‌ای پرداختند. در پژوهشی که این محققان انجام دادند، به بررسی اثر زبری سینوسی ایجاد در چگالش قطره‌ای پرداختند و دریافته‌اند که این ساختار زبری به نسبت دیگر ساختارها می‌تواند تأثیر بسزایی در شکل‌گیری چگالش قطره‌ای داشته باشد. هونگ و همکاران [۳۱]، به بررسی حرکت قطره در داخل یک کانال زبر و مطالعه زوایای تماس آن در هنگام برخورد با زبری‌ها پرداختند. نحوه قرارگیری قطره بر روی سطح با ساختار زبری کیسی در این پژوهش بررسی گشته است. کنان و سیواکومار [۳۲]، نیز به مطالعه آزمایشگاهی اثر زبری‌های مختلف بر ساختار قطره بر روی سطح پرداختند و دریافته‌اند که ساختار زبری بر شکل‌نهایی قطره روی آن اثر می‌گذارد و در قطرات با حجم بالا هنگام قرارگیری روی زبری‌ها ممکن است، به قطرات ریزتری تقسیم شده و روی زبری پخش شوند.

باقل و سیکاروار [۲۵]، با لحاظ تمامی مقاومت‌های موجود در مسیر انتقال حرارت تک قطره در زیر یک سطح صاف جامد که با یک لایه آب‌گریز پوشیده شده بود، به بررسی نرخ انتقال حرارت عبوری از آن در زوایای تماس مختلف پرداختند.

در مطالعاتی که تا کنون صورت گرفته است، هیچ یک به بررسی شار حرارتی میانگین در هندسه‌های زبری‌های با ساختار کیسی و و نزل و مقایسه با سطح صاف نپرداخته‌اند. جزئیات مدلسازی انجام شده در این مطالعه بدین شرح است. در این پژوهش به شبیه سازی دو ساختار کیسی، زبری سینوسی با ساختار و نزل در چهار تراکم متفاوت و نیز یک سطح صاف در نرم افزار SE پرداخته شده است. قطره آب به حجم $4\mu\text{l}$ را روی هر یک از این سطوح زبر و صاف شبیه

سازی شده است. جهت المان بندی هندسه‌های استخراج شده از نرم‌افزار SE با استفاده از نرم افزار تجاری ICMCFD® و در راستای تبدیل دامنه حل به حجم کنترل‌های کوچک، مش زنی صورت گرفته است. حجم کنترل‌های ایجاد شده به صورت المان‌های چهار گوش^۱ و از روش بدون ساختار^۲ می‌باشند. این المان‌ها در نزدیکی سطوح تماس مایع با جامد و هوا به دلیل محاسبه دقیق‌تر دما و گرادیان سرعت در مرزها، کوچک‌تر مش زنی شده‌اند. معادلات ناویر-استوکس، انرژی و مومنتوم برای قطره مایع حل گشته‌اند. در سطح جامد شرط مرزی عدم لغزش ($u=v=w=0$) و در سطح تماس قطره و هوای اطراف شرط مرزی تنش مارانگونی لحاظ گشته است. روش المان حجم محدود (FVM) در حلگر فشار میناً استفاده شده است. نوآوری کار حاضر را می‌توان در ساختارهای شبیه سازی شده برای سطوح زبر و بررسی تأثیر زبری‌های و نیز میزان تراکم آنها بر نرخ انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای در احتساب و صرف نظر از تنش‌های مارانگونی دانست. چنانچه افزایش نرخ انتقال حرارت در چگالش قطره‌ای مدنظر باشد و یا نحوه تغییر نرخ انتقال حرارت روی سطوح زبر مورد توجه باشد، نتایج این کار می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

۲- شبیه سازی هندسه قطره روی سطح زبر

برای زبری با ساختار کیسی مکعب‌هایی کوچک و به طول و عرض و ارتفاع 0.1 میلی متر را با استفاده از زبان برنامه نویسی c و در نرم‌افزار SE شبیه سازی گشته‌اند. مبنای کار این نرم افزار بر اساس الگوریتم گرادیان کاهشی است [۳۳] و [۳۴]. تعداد این مکعب‌ها ۱۶ عدد است که هر یک به فاصله 0.1 میلی متر از هم قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ ساختار این نوع زبری را مشاهده می‌کنید.

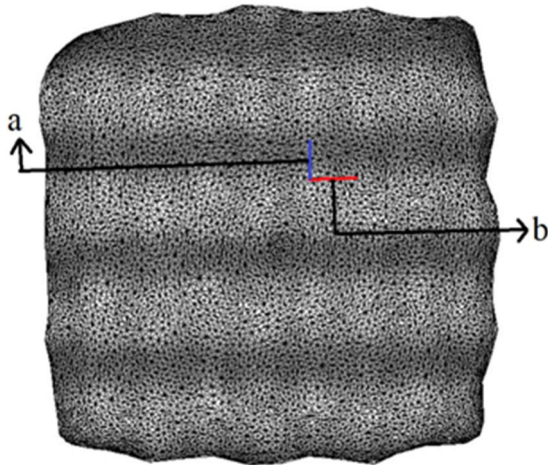
در ادامه قطره آب به حجم $4\mu\text{l}$ به مشخصات ترموفیزیکی مندرج در جدول ۲ را در زاویه تماس 160 درجه روی این زبری شبیه سازی گشته است. نتیجه حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است. در مرحله بعد یک زبری با

^۲ Tetrahedral

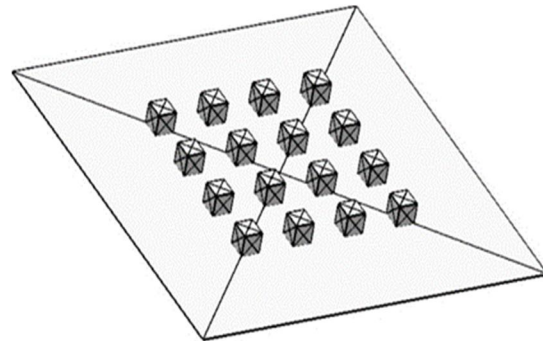
^۳ Unstructured

^۳ Finite Volume Method

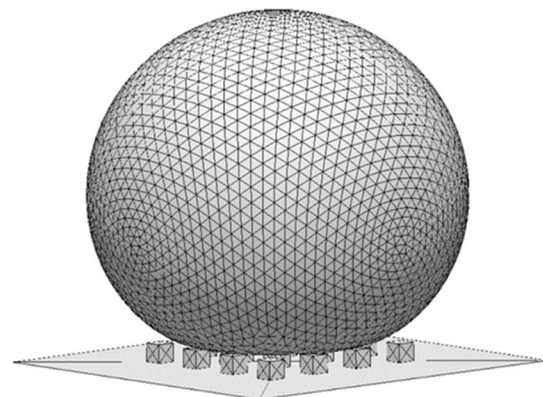
^۴ Pressure Based



شکل ۴- مؤلفه‌های طولی و عرضی روی زبری با ساختار ونزل



شکل ۲- زبری با ساختار کیسی



شکل ۳- نمای جانبی قطره روی زبری با ساختار کیسی

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی سیال آب [۱۰،۲۴]

آب	خواص
۴/۳۲	عدد پرانتل، (Pr)
۳۱۳	دمای اشباع، $T_{sat} (K)$
۳۰۳	دمای دیواره، $T_w (K)$
۹۹۲/۱	چگالی مایع، $\rho_l (Kg/m^3)$
۱/۲۲۵	چگالی بخار، $\rho_v (Kg/m^3)$
۲۴۰۶/۹	گرمای نهان تبخیر، $h_{lv} (kJ/Kg)$
۰/۰۷	کشش سطح، $\sigma (N/m)$
۰/۶۳۱	ضریب رسانش، $K (W/m.K)$
۱۸/۰۲	جرم مولکولی، $M (WKg/K mol)$
۰/۰۰۶۵۳	لزجت دینامیکی، $\mu (g/cm.s)$
۰/۰۴	ضریب چگالش، $\hat{\sigma}$
۴۱۷۹	گرمای ویژه، $C_p (J/Kg.K)$

نصف فاصله عرضی بین یک قله تا دره مجاورش را b و میزان عمق زبری به سمت داخل را a گرفته و پارامتر تراکم زبری (p) را نسبت a بر b در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی لایه آبگریز [۲۴]

ضریب رسانش، $K (W/m.K)$	گرمای ویژه، $C_p (J/Kg.K)$	چگالی، $\rho (Kg/m^3)$	نوع سطح
۰/۲	۳۱۰۰	۷۶۴/۶۴	زنجیره دراز هیدروکربنی

ساختار ونزل در نرم افزار SE شبیه سازی گشته است. ساختار این نوع زبری به صورت سینوسی است و یک قطره آب مایع با $T_{sat}=313 K$ ، زاویه تماس ۱۲۵، ۹۰ و ۱۶۰ درجه و حجم $4\mu l$ را روی یک لایه آبگریز زبری به ضخامت ۱۰ میکرومتر قرار گرفته است که مشخصات ترموفیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است. در نهایت نتایج به دست آمده را با نتایج حاصله از سطح صاف و سطح با زبری حالت کیسی مقایسه شده‌اند. در شکل ۴ مؤلفه‌های طولی و عرضی روی زبری با ساختار ونزل نمایش داده شده است. در شکل ۴

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

سیال مورد استفاده با خواص ثابت مندرج در جدول ۲ در جریانی تراکم ناپذیر و پایا در نظر گرفته شده است. اثرات اتلاف ویسکوزیته در مرز جامد-مایع ناچیز انگاشته شده است. معادلات ناویر استوکس حاکم بر مساله دامنه حل مایع پس از ساده سازی به صورت زیر در می آیند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} + g_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_i T}{\partial x_i} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (4)$$

دمای زیرین سطح زبر را T_W و دمای بخار اطرف را T_{sat} مطابق موارد موجود در جدول ۲ در نظر گرفته شده اند. دمای پوسته خارجی مایع را T_{cap} و ضریب انتقال حرارت جا به جایی قطره مایع را h_i که به ترتیب از روابط (۵) [۲۴] و (۶) [۳۲] بدست آمده اند را به عنوان شروط مرزی قطره مایع در برنامه فلونت^۱ اعمال گشته اند. نتایج با احتساب و نیز صرف نظر از تنش های مارانگونی (رابطه ۱) به دست آمده اند. در اینجا تنش نرمال برابر با فشار بخار فرض گشته است و تنش های برشی به وسیله معادله (۷) [۳۱] محاسبه گشته اند. تنش های برشی زمانی که جا به جایی مارانگونی ناچیز باشد، برابر با صفر می باشند. در معادله (۸) پارامتر تراکم زبری به صورت نسبت ارتفاع زبری به طول زبری تعریف شده است حل عددی با استفاده از روش حجم محدود (FVM) بر پایه فشار در فلونت به دست می آید. برای حل معادلات مومنوم و انرژی از روش مرتبه دوم بالا دست بهره گرفته شده است. کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل صورت پذیرفته است.

$$T_{cap} = T_{sat} \left[1 - \frac{2\sigma}{rh_v \rho} \right] \quad (5)$$

$$h_i = \left[\frac{2\hat{\sigma}}{2 - \hat{\sigma}} \right] \left(\frac{h_v^2 \Delta \rho}{T_{sat}} \right) \left(\frac{M}{2\pi RT_{sat}} \right)^{1/2} \left[1 - \frac{P_v}{\Delta \rho 2h_v} \right] \quad (6)$$

$$\tau_{ji} = \frac{d\sigma_j}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$p = \frac{a}{b} \quad (8)$$

در شکل ۵ شکل گیری قطره روی سطح صاف و زبری با تراکم های مختلف نمایش داده شده است. شرایط مرزی اعمالی بر هندسه بدین صورت است که دمای لایه آبریز $T=T_W$ در نظر گرفته شده و با لحاظ شرط مرزی جا به جایی ضریب انتقال حرارت را از رابطه (۶) محاسبه نموده و $h=h_i$ قرار داده شده است؛ همچنین دمای پوسته خارجی مایع نیز از طریق رابطه (۵) محاسبه گشته است. موارد مذکور در ارتباط با شرایط مرزی اعمالی بر هندسه، در شکل ۶ نمایش داده شده است.

۴- استقلال از شبکه

در شکل ۷ استقلال از مش برای حالت ونزل در پارامتر تراکم زبری، $p=0.6$ و در زاویه تماس 160° درجه، برای سه شبکه مختلف انجام شده است. استقلال از مش برای دمای داخل قطره و در راستای بزرگترین ارتفاع قطره صورت پذیرفته است. همچنان که مشاهده می شود، تغییر میزان المان ها تأثیر قابل ملاحظه ای در روند مساله ندارد و می توان گفت که این مساله مستقل از تعداد المان ها است. در ادامه کار مساله مربوط به سطح زبر با انتخاب تعداد المان $240 \times k$ صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در شکل ۷ مایع، آب با عدد پرانتل $4/32$ است.

۵- اعتبار سنجی

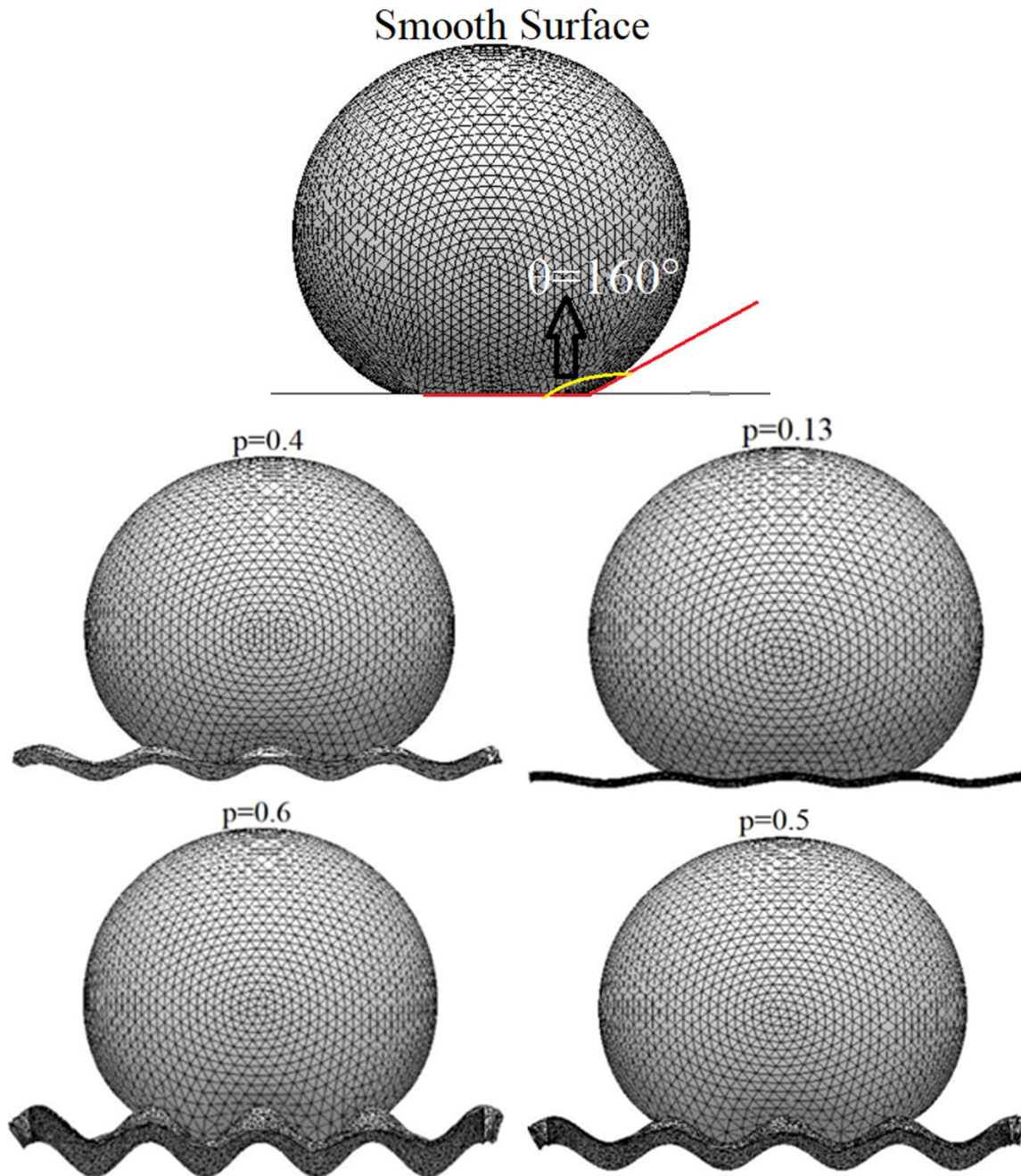
باقل و سیکاروار [۲۴] از روش تخمین دو دایره ای، قطره ای از جنس آب را با حجم $3/59 \mu l$ و مشخصات ترموفیزیکی مندرج در جدول ۱ و در زاویه تماس های 97° و 113° و 134° درجه را در زیر یک سطح جامد مسی به ضخامت 2 mm با پوشش آبریز هیدروکربنی به ضخامت $10 \mu m$ شبیه سازی نمودند. در پژوهش حاضر، تک قطره آب در شرایط مذکور به وسیله نرم افزار SE شبیه سازی گشته و شار حرارتی میانگین در فصل مشترک سطح جامد و مایع به منظور اعتبار سنجی

¹ Fluent

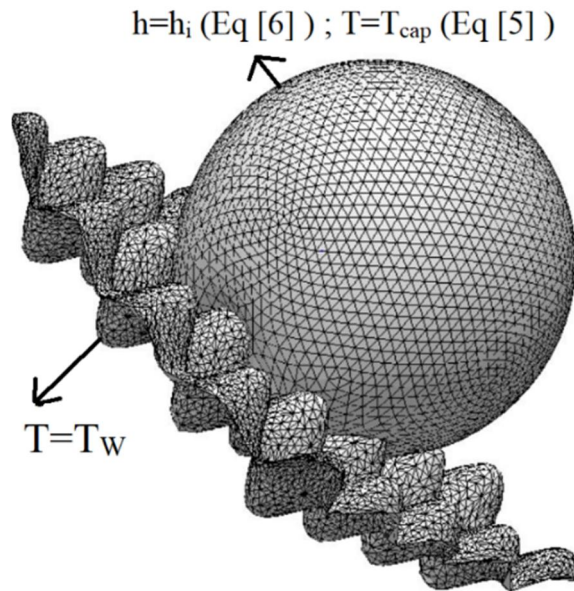
ناچیز ناشی از تفاوت روش‌های شبیه‌سازی قطره، تفاوت اندک در تعداد المان بندی حجم داخلی مایع و... دانست؛ بنابراین می‌توان بیان داشت که اعتبار سنجی صورت گرفته از دقت بالایی برخوردار است.

کار حاضر در شکل ۸ با نتایج مرجع [۲۴] مقایسه گردیده است.

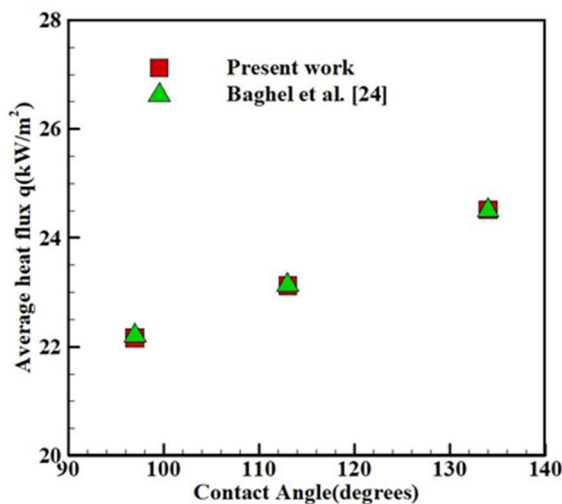
با توجه شکل ۸ بیشترین خطای موجود برای زاویه تماس ۹۷ درجه و کمتر از ۰/۲ درصد است که این خطای



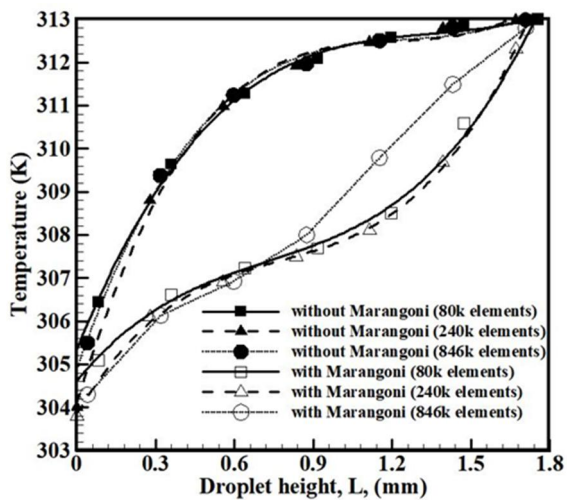
شکل ۵- نمای روبه روی قطره با زاویه تماس ۱۶۰ درجه و حجم ۴μl روی سطوح با پارامتر زبری مختلف



شکل ۶- شرایط مرزی اعمالی بر قطره روی سطح زبر



شکل ۸- اعتبار سنجی پژوهشی صورت گرفته



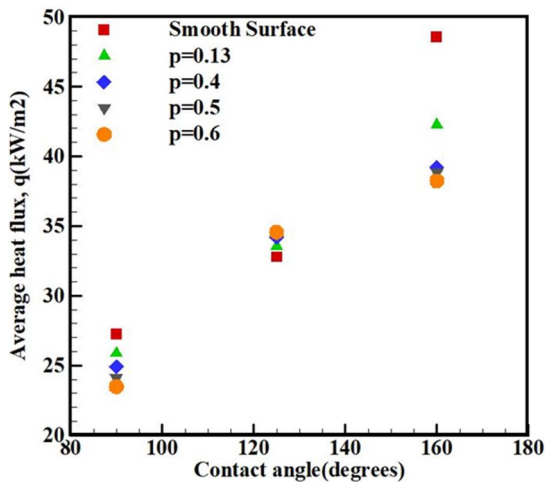
شکل ۷- نتایج حاصل از افزایش تعداد المان‌ها بر نرخ انتقال حرارت عبوری از سطح در هندسه سطح زبر

همانگونه که بیان گشت، برای زبری با ساختار ونزل چهار تراکم مختلف شبیه سازی شده است و در سه زاویه تماس ۹۰، ۱۲۵ و ۱۶۰ درجه، اثر افزایش پارامتر تراکم زبری بر نرخ انتقال حرارت عبوری از تک قطره آب مایع با عدد پرانتل ۴/۳۲ و دمای اشباع ۳۱۳ کلوین بررسی گشته است. همانگونه که از شکل ۹ پیداست، نرخ انتقال حرارت عبوری از تک قطره آب در حالت بدون احتساب تنش

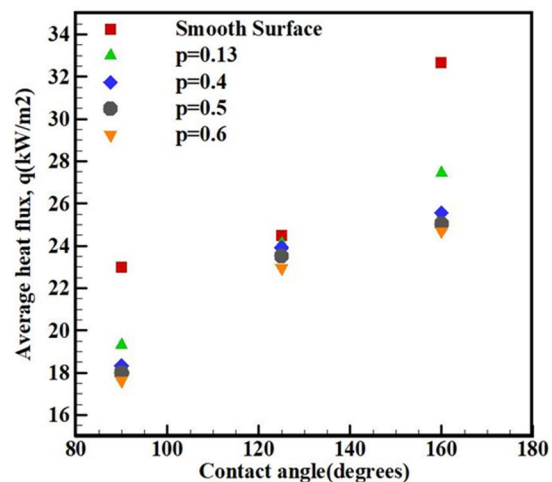
۶- نتایج

۶-۱- بررسی اثر گام زبری و عدد مارانگونی بر شار حرارتی در ساختارهای ونزل

پس از شبیه سازی‌های صورت گرفته برای هندسه قطره روی سطح زبر، به وسیله نرم افزار SE در این بخش به بررسی و تحلیل میزان تغییر نرخ انتقال حرارت عبوری از تک قطره آب در زبری‌های مختلف می‌پردازیم.



شکل ۱۰- مقایسه نرخ انتقال حرارت عبوری از تک قطره در سطح صاف با سطح با ساختار زبری و نزل در پارامتر تراکم متفاوت و با احتساب تنش مارانگونی



شکل ۹- مقایسه نرخ انتقال حرارت عبوری از تک قطره در سطح صاف با سطح با ساختار زبری و نزل در پارامتر تراکم متفاوت و با صرف نظر از تنش مارانگونی

۱۰ می‌توان پی برد که شار حرارتی میانگین زمانی که تنش مارانگونی احتساب گشته نسبت به حالتی بیشتر است که از این تنش صرف نظر گشته است.

۲-۶- مقایسه زبری در ساختارهای سطح کیسی، و نزل و صاف

یک زبری دیگر با ساختار کیسی را در نرم افزار SE شبیه سازی نموده تا نرخ انتقال حرارت عبوری از قطره در این نوع زبری را نیز بررسی بکنیم. ساختار زبری شبیه سازی شده را در شکل ۲ می‌توانید مشاهده کنید. سطح تماس قطره با زبری‌ها در این ساختار (شکل ۲) فقط مختص به چهار مورد از مکعب‌های موجود می‌شود؛ یعنی از ۱۶ مکعب موجود تنها ۴ مورد آنها با مایع در تماس هستند. به علت همین کم بودن سطح مشترک مایع با جامد، انتظار نرخ انتقال حرارت بالایی را به نسبت دیگر هندسه‌ها داریم. مقایسه نتایج حاصله را در جدول ۳ مشاهده می‌کنید.

۳-۶- خلاصه و نتیجه گیری

در پژوهش پیش رو، به بررسی اثر جریان مارانگونی در یک تک قطره آب ساکن روی سطوح صاف و زبر با ساختارهای کیسی و نزل پرداخته شده است. سطوح زبر با ساختار و نزل در چهار پارامتر تراکم زبری مختلف شبیه سازی شده‌اند.

مارانگونی، در سطح صاف بیشتر از سطوح دارای زبری است. با دقت در شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش پارامتر تراکم (متراکم کردن زبری‌ها) در حالت بدون احتساب تنش مارانگونی منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت عبوری از تک قطره می‌شود. لازم به ذکر است که افزایش زاویه تماس قطره با سطح نیز منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود.

برای حالت با احتساب تنش مارانگونی که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، نیز روند نتایج بجز در زاویه ۱۲۵ درجه مانند روند نتایج در حالت بدون مارانگونی می‌باشند. با توجه به رابطه ۱ می‌توان گفت که در یک عدد مارانگونی مشخص، مقدار گرادیان تنش سطح برای قطره با L کمتر، بیشتر است. قطره روی سطح زبر با تراکم بیشتر دارای ارتفاع کمتری به نسبت حالت‌های دیگر است؛ در نتیجه گرادیان تنش سطح و بالطبع گرادیان دما در سطح تماس قطره با بخار اطراف بیشتر است و همین مساله باعث شده است که نرخ انتقال حرارت عبوری در زاویه تماس ۱۲۵ درجه برای قطره روی سطح زبر با تراکم بالاتر، بیشتر از مقدار مشابه آن برای قطره روی سطوح زبر با تراکم کمتر است. همانگونه که پیشتر نیز ذکر شد، جریان به وجود آمده ناشی از همرفت مارانگونی می‌تواند منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جا به جایی گردد. به همین دلیل و با مقایسه شکل‌های ۹ و

جدول ۳- مقایسه نرخ انتقال حرارت عبوری از تک قطره در دو ساختار کیسی و ونزل با سطح صاف (اعداد بر حسب kW/m^2 و زاویه تماس قطره با سطح ۱۶۰ درجه)

کیسی	ونزل، $p=0/6$	ونزل، $p=0/5$	ونزل، $p=0/4$	ونزل، $p=0/13$	سطح صاف	نوع زبری
۱۱۲/۲۷۱	۲۴/۶۸	۲۵/۰۵	۲۵/۵۶	۲۷/۴۳	۳۲/۶۵	بدون مارانگونی
۱۱۸/۵۲۱	۳۸/۲۴	۳۸/۸۴	۳۹/۲۱	۴۲/۲۴	۴۸/۵۴	با مارانگونی

دما (K)	T	نحوه تغییر شار حرارتی میانگین عبوری از قطرات برای سطوح زبر و صاف در زوایای تماس متفاوت و در دو حالت احتساب و صرف نظر از جریان مارانگونی مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت:
وزن مولکولی بخار (kg/mol)	M	
ارتفاع قطره (m)	L	
هدایت حرارتی (W/m.K)	K	۱- شار حرارتی در فصل مشترک قطره آب و سطح مستقل از ساختار زبری (ونزل، کیسی) با فرض اثر جریان مارانگونی بیشتر است.
شار حرارتی میانگین (W/m^2)	q	
فشار بخار (Pa)	P_v	۲- شار حرارتی در ساختار کیسی برای تک قطره آب بدون جریان مارانگونی نسبت به سطح صاف ۳۵٪ بیشتر است، دلیل آن به دلیل تحرک بیشتر قطره روی ساختار کیسی و سطح تماس کمتری است که به دلیل عدم نفوذ در زبری ایجاد می‌کند.
ثابت جهانی گازها (J/mol.K)	\bar{R}	
مقاومت ماراگونی	R_{ma}	
گرمای ویژه ($J/Kg.K$)	C_p	
مختصات کارترین	x,y,z	
سرعت سیال در راستای محور x (m/s)	u	۳- شار حرارتی در ساختار ونزل با افزایش ارتفاع زبری به دلیل افزایش سطح تماس و نفوذ قطره به داخل زبری کاهش می‌یابد.
سرعت سیال در راستای محور y (m/s)	v	
سرعت سیال در راستای محور z (m/s)	w	۴- شار حرارتی در سطح صاف برای تک قطره آب بدون جریان مارانگونی نسبت به ساختار ونزل ۱۲۸٪ بیشتر است.
مؤلفه‌های تراکم زبری (m)	a,b	
پخش شونده‌گی حرارتی (m^2/s)	α	
دمای مادون سرد (K)	ΔT	۷- علایم، نشانه‌ها و ارقام
چگالی (kg/m^3)	ρ	گرادیان کشش سطحی (N/m-K)
زاویه تماس (degrees)	θ	بردار گرادیان دما در سطح چگالش (K/m)
ویسکوزیته دینامیکی (kg/m.s)	μ	شتاب گرانشی (m/s^2)
تنش برشی (N/m^2)	τ	ضریب انتقال حرارت جا به جایی (W/m^2K)
کشش سطحی (N/m)	σ	گرمای نهان تبخیر (J/kg)
ضریب چگالش	$\hat{\sigma}$	حجم قطره (μl)

controlled anodizing processes. *Appl Surf Sci* 435: 1322-1328.

[14] Talesh Bahrami HR, Ahmadi B, Saffari H (2017) Optimal condition for fabricating superhydrophobic copper surfaces with controlled oxidation and modification processes. *Mater Lett* 189: 62-65.

[15] Talesh Bahrami HR., Ahmadi B, Saffari H (2017) Preparing superhydrophobic copper surfaces with rose petal or lotus leaf property using a simple etching approach. *Mater Res Express* 4(5): 055014.

[16] Miljkovic N, Enright R, Wang EN (2013) Modeling and optimization of superhydrophobic condensation. *J Heat Transfer* 135(11): 111004.

[17] Zarei S, Talesh Bahrami HR, Saffari H (2018) Effects of geometry and dimension of micro/nano-structures on the heat transfer in dropwise condensation: A theoretical study. *Appl Therm Eng* 137: 440-450.

[18] Chen L, Lian S, Yan R, Cheng Y, Huai X, Chen, S (2009) N-octadecanethiol self-assembled monolayer coating with microscopic roughness for dropwise condensation of steam. *J Therm Sci* 18(2): 160-165.

[19] Baojin Q, Li Z, Hong X, Yan, S (2011) Experimental study on condensation heat transfer of steam on vertical titanium plates with different surface energies. *Exp Therm Fluid Sci* 35(1): 211-218.

[20] Ucar IO, Erbil HY (2012) Dropwise condensation rate of water breath figures on polymer surfaces having similar surface free energies. *Appl Surf Sci* 259: 515-523.

[21] Feng J, Qin Z, Yao S (2012) factors affecting the spontaneous motion of condensate drops on superhydrophobic copper surfaces. *Langmuir* 28(14): 6067-6075.

[22] Wenzel RN (1936) Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind Eng Chem* 28(8): 988-994.

[23] Cassie ABD, Baxter S (1944) Wettability of porous surfaces. *Trans Faraday Soc* 40(0): 546-551.

[24] Talesh Bahrami HR, Zarei S, Saffari H (2019) The effect of droplet morphology on the heat transfer performance of micro-/nanostructured surfaces in dropwise condensation. *J Therm Anal Calorim* 138: 2979-2988.

[25] Baghel V, Sikarwar BS, Muralidhar K (2019) Modeling of heat transfer through a liquid droplet. *Heat Mass Transfer* 55(5): 1371-1385.

[26] Phadnis A, Rykaczewski K (2017) The effect of marangoni convection on heat transfer during dropwise condensation on hydrophobic and omniphobic surfaces. *Int J Heat Mass Transf* 115: 148-158.

[27] Pradhan A, Krishnamurthy PK (2018) Visualization of motion inside droplets. In: Pradhan

اعداد بدون بعد

عدد مارانگونی $(-d\sigma/dT.\Delta TL)/\alpha\mu$ Ma

پارامتر تراکم زبری a/b p

۸- مراجع

[1] Khandekar S, Muralidhar K (2014) Dropwise condensation on inclined textured surfaces. *Springer Briefs Appl Sci Technol*, New York.

[2] Chung BJ, Kim MC, Ahmadinejad M (2008) Film-wise and drop-wise condensation of steam on short inclined plates. *J Mech Sci Technol* 22(1): 127-133.

[3] Bonner R, (2020) Direct simulations of Biphilic-surface condensation: optimized size effects. *Front Heat Mass Transf* 14.

[4] Schmidt E, Schurig, W, Sellschopp W, (1930) Versuche uber die kondensation von wasserdampf in film- und tropfenform. 1: 53-63.

[5] Sikarwar BS, Khandekar S, Muralidhar K (2013) Effect of drop shape on heat transfer during dropwise condensation underneath inclined surfaces. *Interfacial Phenom Heat Transf* 38(6): 1135-1171.

[6] Vemuri S, Kim KJ (2006) An Experimental and Theoretical Study on the Concept of Dropwise Condensation. *Int J Heat Mass Transf* 49(3): 649-657.

[7] Neumann AW, Abdelmessih AH, Hameed A (1978) The role of contact angles and contact angle hysteresis in dropwise condensation heat transfer. *Int J Heat Mass Transf* 21(7): 947-953.

[8] Abdelmessih AH, Neumann AW, Yang SW (1975) The effect of surface characteristics on dropwise condensation. *lett heat mass trans* 2(4): 285-291.

[9] Kim S, Kim KJ (2011) Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces. *J Heat Transfer* 133(8): 081502-081502-8.

[10] He B, Patankar N A, Lee J (2003) Multiple equilibrium droplet shapes and design criterion for rough hydrophobic surfaces. *Langmuir* 19(12): 4999-5003.

[11] Lafuma A, Quéré D (2003) Superhydrophobic States. *Nature Mater* 2(7): 457-460.

[12] Lee, SM, Jung ID, Ko JS (2008) The effect of the surface wettability of nanoprotusions formed on network-type microstructures. *J Micromech Microeng* 18(12): 125007.

[13] Saffari H, Sohrabi B, Noori, MR, Talesh Bahrami, HRT (2018) Optimal condition for fabricating superhydrophobic aluminum surfaces with

- [32] Van P. Carey (2007) Liquid vapor phase change phenomena an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment. CRC Press.
- [۳۳] صفاری ح، میرزاقیطاقی الف، رحیمی ع (۲۰۱۵) مدل سازی فشار موینگی میکروسیالات در میکروساختارها با نرم افزار Surface Evolver. مجله مکانیک سازه ها و شماره ها ۲۴۷-۲۵۵ (۳): ۵.
- [۳۴] خلیلی الف، میرزاقیطاقی الف، صفاری ح (۲۰۱۶) مدلسازی عملکرد حرارتی سیال در تبخیرکننده با میکروساختارهای کروی و میکروستون مخروطی. مجله مکانیک سازه ها و شماره ها. ۲۰۴-۱۹۳ (۴): ۶.
- A., Krishnamurthy P. (Eds) Selected Topics in Photonics. IITK Directions, Springer, Singapore.
- [28] Brakke K (1992) The Surface Evolver. Exp Math 1(2): 141-165.
- [28] Chen Y, He B, Lee J, Patankar NA (2005) Anisotropy in the wetting of rough surfaces. J Colloid Interface Sci 281(2): 458-464.
- [29] Ibrahim J, Masri MA, Veillas C, Celle F, Cioulachtjian S, Verrier I, Lefèvre F, Parriaux O, Jourlin Y (2017) Condensation phenomenon detection through surface plasmon resonance. Opt Express OE 25(20): 24189-24198.
- [30] Huang JJ, Shu C, Chew YT (2009) Lattice boltzmann study of droplet motion inside a grooved channel. Phys Fluids 21: 022103.
- [31] Kannan R, Sivakumar D (2008) Drop impact process on a hydrophobic grooved surface. Colloid Surface A 317(1-3): 694-704.