



## مدلسازی عملکرد حرارتی سیال در تبخیرکننده با میکروساختارهای کروی و میکروستون مخروطی

امین خلیلی<sup>۱</sup>، امیر میرزاقیطاقی<sup>۲</sup> و حمید صفاری<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

### چکیده

عملکرد حرارتی تجهیزات خنک‌کاری دوفاز غیرفعال مانند، لوله‌های حرارتی و محفظه‌های بخار، به طور عمده وابسته به هندسه و خواص میکروساختار تبخیرکننده و فتیله است. ویژگی‌های مطلوب ساختار تبخیرکننده شامل، فشار مویبینگی بالا با وجود مقاومت کم در برابر جریان به همراه سطح گسترده برای افزایش تبخیر لایه نازک سیال است که انتخاب مقیاس و تخلخل ساختار بر اساس مصالحه بین ویژگی‌های موردنظر فوق است. در مطالعه حاضر، شکل سطح آزاد سیال ساکن در میکروستون‌های مخروطی و میکروساختارهای کروی، توسط الگوریتم گرادینان کاهشی با نرم‌افزار Surface Evolver مدل شده است و فشار مویبینگی بی‌بعد، بر اساس انحنای سطح تعیین گردیده است. نفوذپذیری و ضریب انتقال حرارت با استفاده از نرم‌افزار فلونت به صورت تابعی از پارامتر هندسی بی‌بعد و زاویه تماس بین مایع و جامد، پیش‌بینی شده است. نتایج نشان داد، میکروستون مخروطی با توجه به سطح تماس گرمایی زیاد با زیرلایه، کاهش سطح مقطع در ارتفاع و افزایش نفوذپذیری، افزایش فیلم نازک به دلیل کشش مایع روی سطح مایل، عملکرد مطلوبی در فرآیند تبخیر نسبت به میکروساختار کروی نشان داد همچنین زاویه تماس بهینه و پارامتر هندسی بی‌بعد ارائه گردیده است که بهترین عملکرد ساختار در انتقال حرارت را نشان دادند.

**کلمات کلیدی:** فشار مویبینگی؛ میکروستون مخروطی و میکروساختار کروی؛ تبخیر؛ نفوذپذیری.

## Thermal Performance Modeling of Liquid in Evaporator with Spherical Microstructures and Conical Micropillars

A. Khalili<sup>1</sup>, A. M. Gheitaghy<sup>2</sup>, H. Saffari<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

The heat transfer performance of passive two-phase cooling devices such as heat pipes and vapor chambers is mainly depend on the topology and geometry of wick and evaporator microstructures. The desired characteristics of evaporator microstructures are high permeability, high wicking capability and large extended meniscus area that sustains thin-film evaporation which choices of scale and porosity lead to trade-offs between the desired characteristics. In the present study, the free-surface shapes of the static liquid meniscus in spherical microstructures and conical micropillar were modeled using gradient decent algorithm of Surface Evolver software and the non-dimensional capillary pressure was determined based on curvature of surface. Permeability and heat transfer coefficient were computed using Fluent software as functions of the nondimensional geometrical parameter and the contact angle between the liquid and solid. Based on these performance parameters, due to high heat contact surface, decrease of cross section, increase of permeability and increase of thin film liquid due to extention of liquid on inclined surface, conical microstructures provide more efficient and desirable geometry for wicking and thin-film evaporation. The solid-liquid contact angle and geometrical parameter that yield the best performance were also identified.

**Keywords:** Capillary Pressure; Conical Micropillar; Spherical Microstructure; Evaporation; Permeability.

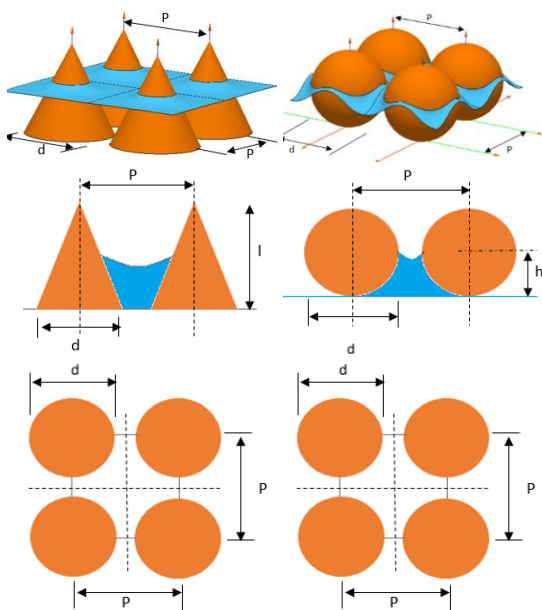
## ۱- مقدمه

مبحث خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی و نفوذ گرما به دلیل مواجهه با شارهای حرارتی بالا، با کوچکتر شدن این تجهیزات اهمیت روزافزونی یافته است. در این راستا، تجهیزات خنک‌کننده بر مبنای تغییر فاز سیال، مانند لوله‌های گرمایی و محفظه‌های بخار، به عنوان راهکاری برای انتقال گرمای زیاد از منبع حرارتی به سطح سرد در اختلاف دمای کم مورد توجه‌اند [۱-۲]. این تجهیزات، دارای نواحی مجزای تبخیرکننده و تقطیرکننده می‌باشند که به ترتیب برای ورود و خروج گرما در آن‌ها از ساختارهای متخلخل مویین استفاده می‌شود؛ همچنین از این ساختارهای مویین به نام فتیله، برای انتقال سیال عامل بین دو ناحیه استفاده می‌شود. این تجهیزات به دلیل کارکرد بر اساس گرمای نهان سیال، ظرفیت انتقال گرمای بالایی داشته، عملکرد مویینگی ساختار فتیله در نرخ انتقال گرما تاثیر زیادی دارد. مهمترین عامل در تعیین عملکرد این تجهیزات، مقاومت گرمایی تبخیرکننده است [۳-۴]. در شارهای حرارتی کمتر از  $100 \text{ W/cm}^2$  و در کاربردهای با ضخامت محدود، مقاومت تبخیری، بیشترین سهم را در مقاومت گرمایی کلی دارد که بهینه‌سازی ساختار تبخیرکننده، تاثیر قابل توجهی در افزایش انتقال حرارت دارد [۵]. مقاومت تبخیری متشکل از مقاومت حرارتی ماده (که بر اساس ضریب هدایت حرارتی تعیین می‌شود) و مقاومت منیسک<sup>۱</sup> مایع تبخیری (که بر اساس ضخامت فیلم مایع نزدیک خط تماس مایع-جامد تعیین می‌شود) است. با وجود اینکه مقاومت حرارتی ساختار در بخش تبخیرکننده، مقاومت غالب در بسیاری کاربردهای متداول است، اما مقاومت منیسک در موارد خیلی نازک (کمتر از ۲۰۰ میکرومتر) با ضریب هدایت گرمایی بالای ساختار (بیش از ۱۰۰ وات بر مترکلون) مهم است [۶]. علاوه بر این، بیشترین ظرفیت انتقال در لوله گرمایی توسط انتقال مایع در ساختار فتیله (محدودیت مویینگی) مشخص می‌شود؛ بنابراین عملکرد تجهیز با بهینه‌سازی ساختار فتیله می‌تواند بهبود یابد. علاوه بر این، معرفی ساختارهای جدید برای بهبود مشخصه‌های انتقالی سیال و عملکرد حرارتی برای طراحی خنک‌کننده‌های نسل آینده لازم است.

ساختارهای فتیله معمول در لوله‌های حرارتی شامل، شیار، توری فلزی و پودر کروی است. رنجان<sup>۲</sup> و همکارانش، مشخصه‌های تبخیری و مویینگی میکروساختارهای فوق را بررسی نموده و نتیجه گرفتند، ذرات کروی سینترشده بهترین مشخصه عملکردی را دارد [۶]. البته ساختارهای شیار و توری فلزی، هم به دلیل کاهش هزینه و سادگی مورد اقبال می‌باشند. در این‌گونه سیستم‌های خنک‌کاری، تبخیر لایه نازک<sup>۳</sup> (ضخامت لایه کمتر از ۱۰ میکرومتر) که در نزدیکی خط تماس جامد-مایع در حفره‌های فتیله رخ می‌هد، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال حرارت دارد. به همین دلیل، نحوه قرارگیری سیال داخل منافذ محیط متخلخل، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۷]. ساختارهایی که مساحت لایه نازک بیشتری ایجاد می‌نمایند، نرخ انتقال حرارت تبخیری بیشتری دارند. با وجود اینکه ساختار ذرات کروی دارای مشخصه‌های تبخیر لایه نازک و مویینگی مطلوبی است، اما رسانش حرارتی آن‌ها (حدود  $40 \text{ W/mK}$ )، کمتر از هندسه میکروستون‌ها است [۸]. فتیله‌های میکروستونی در تراشه‌های الکترونیکی [۹]، تجهیزات پزشکی [۱۰] و مدیریت حرارتی [۱۱]، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ساختارهای ستونی می‌تواند در میکروکانال‌ها به منظور افزایش سطح به حجم و افزایش جریان مویین به کار رود [۱۲]. زیالو<sup>۴</sup> و همکارانش، مدل نیمه‌تحلیلی با صحت‌سنجی آزمایشی برای نفوذ سیال بین میکروستون‌ها ارائه دادند [۱۳]. وی از نرم‌افزار SE<sup>۵</sup> [۱۴]، برای تعیین شکل سطح سیال در سلول واحد میکروستون استفاده کرد. شکل سطح را برای تعیین حجم سیال بین ساختار و مساحت لایه نازک در هندسه با قطر و گام مشخص ستون استفاده کرد. هونگ<sup>۶</sup>، مدلی نیمه‌تحلیلی با استفاده از این نرم‌افزار برای تعیین فشار مویینگی در میکروستون‌های مربعی و دایروی با چیدمان ایزوتروپیک ارائه کرد [۱۵]. بیون و کیم<sup>۷</sup>، عملکرد مویینگی در چند چیدمان غیرهمگن میکروپست‌های استوانه‌ای را مدل‌سازی و آزمایش کرد [۱۶].

<sup>2</sup> Ranjan<sup>3</sup> Thin film evaporation<sup>4</sup> Xiao<sup>5</sup> Surface Evolver<sup>6</sup> Hong & Byon<sup>7</sup> Bion & Kim<sup>1</sup> Menisque

نشان داده شده است. فتيله با میکروستون‌های مخروطی در چیدمان مربعی در نظر گرفته می‌شود که چیدمان معمول در ساخت میکروساختارها است.  $h$  ارتفاع اولیه مایع اشغال شده از پایین سطح است،  $r$  شعاع پایه مخروط (یا کره سینتر) و  $p$  فاصله بین مراکز دو میکروساختار مجاور است. در چیدمان مربعی، گام در هر دو جهت طولی و عرضی برابر است.  $p/r$  مقدار بی‌بعد گام است. ارتفاع مخروط برابر با قطر دایره قاعده (و قطر کره سینتری مورد مقایسه) در نظر گرفته شده است. شکل سطح مایع در منافذ فتيله لوله گرمایی بستگی به عوامل مختلف مانند، زاویه تماس بین سیال و جامد، هندسه ساختار، حجم شارژ سیال و شار حرارتی ورودی دارد. خاصیت تخلخل بصورت نسبت حجم خالی به حجم کل در سلول واحد (مجموع حجم خالی و حجم جامد) تعریف می‌شود. میکروستون مخروطی با میکروساختار کروی در مقادیر یکسان تخلخل و نفوذپذیری مقایسه می‌شوند.



شکل ۱- مشخصات هندسی میکروستون مخروطی و میکروساختار کروی در چیدمان مربعی با گام مشابه

## ۲-۲- پارامترهای عملکردی تبخیرکننده

پارامترهای حائز اهمیت در عملکرد بخش تبخیرکننده لوله-های حرارتی عبارتند از: فشار مویینگی، نفوذپذیری، ضریب هدایت حرارتی و نرخ تبخیر فیلم نازک از منیسک مایع که

دینگ<sup>۱</sup> و همکارانش، میکروستون‌های تیتانیومی ساختند و رفتار ترشوندگی آن‌ها را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند [۱۷]. روش‌های فوتولیتوگرافی پیشرفته، قادر به تولید ساختارهای میکروستونی است که می‌توانند مقاومت تبخیرکننده را کاهش داده، عملکرد تجهیز خنک‌کننده را بهبود بخشند. در مقایسه با ساختارهای سینتر و شیار، میکروستون‌ها دارای مزایای ذیل می‌باشند [۱۸]:

۱) فتيله میکروستونی، دارای رسانش حرارتی بیشتری در مقایسه با لایه ذرات کروی است؛ زیرا می‌توانند روی سطح رشد یابند یا با میکروماشینکاری روی زیرلایه ایجاد شوند. در شارهای حرارتی کم که مقاومت حرارتی تجهیز، عامل محدودکننده است، سطوح میکروستونی عملکرد بهتری دارند. ۲) ساختار میکروستونی، نفوذپذیری بیشتری دارد که منجر به افت فشار کمتر و توانایی انتقال گرمای بیشتر می‌شود.

مروری بر مطالعات گذشته نشان می‌دهد، با افزایش شار حرارتی تجهیزات، ساختارهای متداول جوابگوی نرخ انتقال گرمای مورد نیاز نبوده، تحقیقات روی میکروساختارهای با عملکرد بهتر صورت می‌پذیرد. میکروستون مخروطی که در این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت، نسل جدیدتری نسبت به ساختارهای میکروستونی است.

در مقاله حاضر، مقدار مویینگی، نفوذپذیری و ضریب انتقال حرارت پایه در میکروستون‌های مخروطی محاسبه می‌شوند که در مطالعات گذشته بطور خاص به آن پرداخته نشده است و عملکرد آن با میکروساختارهای کروی (کره‌های سینترشده) در زاویه تماس‌ها و گام‌های بی‌بعد مختلف (با تخلخل ثابت) مقایسه می‌شود. به‌منظور پیش‌بینی میکروساختار بهینه برای بکارگیری در تجهیزات خنک‌کاری دوفاز، پارامتر مؤثر عملکرد مویینگی به عنوان یک شاخصه جدید، محاسبه و مقایسه می‌شود.

## ۲- توصیف مسئله

### ۲-۱- هندسه میکروساختار

میکروستون مخروطی و میکروساختار کروی که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد، در شکل ۱، از چند زاویه دید

<sup>۱</sup> Ding

می‌شود که ناحیه بین فیلم غیرتبخیری و منیسک حقیقی است. تحقیقات گذشته، بیش از ۸۰ درصد انتقال حرارت کلی را از ضخامت فیلم نازک ۱۰ میکرومتری دانسته‌اند. هر چه سطح فیلم نازک بیشتر باشد، نرخ تبخیر بیشتر می‌شود. سطح جامد در حالت مخروطی، بیشترین میزان سطح آزاد مایع را به دلیل شیب سطح دارد.

در مطالعات پیشین [۳]، میکروساختارهای مختلفی برای بررسی عملکرد تبخیر فیلم نازک در تخلخل و طول مشخصه ثابت بررسی و مقایسه شده‌اند. در مطالعه حاضر، عملکرد میکروستون مخروطی مورد بررسی قرار گرفته و با فرض تخلخل ثابت با میکروساختار کروی مقایسه می‌شود.

### ۳- روش مدل‌سازی محاسباتی

در این بخش، مدل عددی برای پیش‌بینی عملکرد میکروساختار با هندسه و شرایط مرزی مشخص ارائه می‌شود. مدل‌ها برای تخمین نفوذپذیری و موینگی توضیح داده شده، سپس مدل تبخیر لایه نازک ارائه می‌شود.

### ۳-۱- مدل نفوذپذیری

از آنجایی که روابط تحلیلی دقیقی برای نفوذپذیری سیال بین میکروستون‌ها در دسترس نیست، جریان مایع عبوری از ستون‌ها با استفاده از حلگر جریان حجم محدود فلوئنت محاسبه می‌شود. میکروستون مخروطی با جریان رینولدز ۰.۱ مدل می‌شوند. عدد رینولدز ۰.۱ بر اساس نوع سرعت جریان در مواجهه با ساختار فتیله انتخاب می‌شود. سرعت جریان در ساختار فتیله برای محفظه بخار به ضخامت تقریبی 3mm با ضخامت ساختار فتیله 0.2mm از مرتبه  $10^{-4}$  m/s است. بر اساس این سرعت جریان، مقدار رینولدز در حدود ۰.۱ است. (  $\mu = 0.001 \text{ kg/m}^2$  ،  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  ،  $Re = \rho u l / \mu$  ) ، سیال = آب ،  $u = 10^{-4}$  m/s ،  $L = 1$  mm به عنوان مقیاس طولی)

در شکل ۲، شرایط مرزی برای محاسبه نفوذپذیری میکروستون مخروطی در حجم مکعبی سلول واحد نشان داده شده است.

با توجه به تکرار شونده‌گی این ساختار، شرایط جریان پرودیک در مایع ورودی و مرزهای خروجی استفاده می‌شود.

در منافذ تشکیل می‌شود. در حرارت ورودی بالاتر از حدود  $100 \text{ W/cm}^2$  برای آب در فشار اتمسفر، جوشش می‌تواند در ساختار فتیله اتفاق بیفتد که به افزایش مقاومت گرمایی فتیله منجر می‌شود (البته در اینجا از جوشش صرف نظر شده است)؛ بنابراین مقایسه عملکرد میکروساختارها در تبخیر بر اساس پارامترهای موثر ذیل سنجیده می‌شود:

### ۲-۲-۱- فشار موینگی و نفوذپذیری

ساختار ایده‌آل باید فشار موینگی بالا در ناحیه تبخیرکننده فراهم نماید تا بازگشت مایع از کندانسور به ناحیه اواپراتور، حتی در حرارت ورودی بالا قطعی باشد. برای جلوگیری از خشکی در تبخیرکننده، فشار موینگی موجود در ناحیه تبخیر ( $\Delta p_c$ )، باید افت فشار جریان در فتیله ( $\Delta p_l$ ) و ناحیه بخار ( $\Delta p_v$ ) را جبران کند. این شرایط با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\Delta p_c \geq \Delta p_v + \Delta p_l \quad (1)$$

فشار موینگی موجود در لوله گرمایی، به وسیله شعاع منافذ در ناحیه اواپراتور تعیین می‌شود. با فرض اینکه منیسک، شعاع انحنا نامحدودی دارد، فشار موینگی از رابطه (۲) به دست می‌آید:

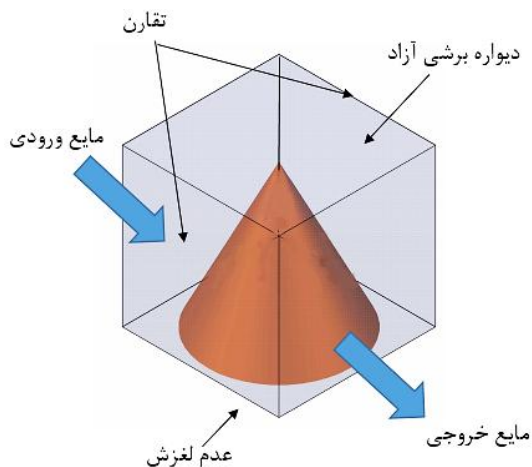
$$\Delta p_c = 2\sigma_{lv} / r_p \quad (2)$$

$\sigma_{lv}$  کشش سطح فصل مشترک بخار مایع و  $r_p$  شعاع منافذ است.  $r_p$  کوچکتر، فشار موینگی بالاتری می‌دهد؛ درحالی‌که نفوذپذیری فتیله با کاهش  $r_p$  کاهش می‌یابد و افت فشار جریان در فتیله افزایش می‌یابد. نفوذپذیری به عنوان معیاری از قابلیت نفوذ سیال در ساختار متخلخل تعریف می‌شود.

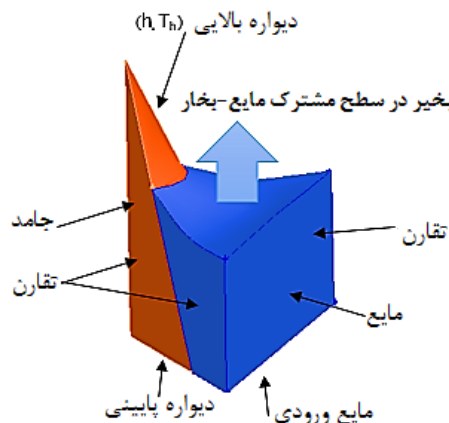
### ۲-۲-۲- هدایت حرارتی و تبخیر فیلم نازک

ناحیه فیلم نازک منیسک مایع، نزدیک خط تماس سه فاز بخار-مایع-جامد تشکیل می‌شود. نرخ انتقال حرارت تبخیری از منیسک، در شرایط بخار اشباع و مافوق گرم دیواره مشخص می‌شود. ناحیه خط تماس منیسک مایع شامل، ناحیه فیلم غیرنازکی است که نیروهای بین مولکولی مثل، نیروی واندروالس و فشار جدایش<sup>۱</sup> غالب هستند؛ همچنین ناحیه فیلم نازک منیسک مایع، به عنوان ناحیه گذار شناخته

<sup>1</sup> Disjoining Pressure



شکل ۲- شرایط مرزی سلول واحد مکعبی برای محاسبه نفوذپذیری در ساختار فتیله میکروستون مخروطی



شکل ۳- شرایط مرزی سلول واحد برای محاسبه نرخ تبخیر از منیسک سیال برای  $\theta = 5$  و  $\epsilon = 0.78$

در دیواره جامد معادله انرژی به صورت رابطه (۶) ساده می‌شود:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (۶)$$

مایع ورودی در دمای ثابت  $T_{inlet}$  با شرط مرزی فشار ثابت ورودی فرض شده است. شرط مرزی دمای ثابت نیز، در دیواره پایینی میکروستون بکار گرفته می‌شود. در حالت ساختار کروی، سطح ثابت به اندازه 0.1d فرض شده است. دمای این دیواره پایینی،  $T_{bot}$  است. در قسمت خشک میکروستون که در مجاورت بخار آب قرار دارد، شرط مرزی انتقال حرارت جابجایی طبیعی اعمال می‌شود. ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی  $(h_{nat})$  در رابطه (۷) صدق می‌نماید:

پس از حل جریان و تعیین پروفیل سرعت، مقدار نفوذپذیری از معادله دارسی [۱۹] ذیل بدست خواهد آمد.

$$\nabla p = -\frac{\mu \dot{m}}{k A \rho} \quad (۳)$$

که در آن  $A$  سطح مقطع عرضی جریان و  $\dot{m}$  نرخ جریان جرمی مایع است.

### ۳-۲- مدل موئینگی

فشار موئینگی تولیدی توسط فتیله، به انحنای متوسط منیسک مایع بین میکروساختارها و همچنین کشش سطحی مایع وابسته است. این مقدار از رابطه معروف یانگ-لاپلاس [۲۰]، محاسبه می‌شود:

$$\Delta p_c = \sigma_{lv} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = 2H\sigma_{lv} \quad (۴)$$

مقدار  $\Delta p_c$  فشار موئینگی و برابر با  $p_l - p_v$  است و  $r_1$  و  $r_2$  شعاع‌های متعامد انحنا در یک نقطه روی منیسک می‌باشند. عدد بی‌بعد فشار، از رابطه  $\Delta p_c = \Delta p_c L / \sigma_{lv}$  محاسبه می‌شود. طول مشخصه  $L$ ، به عنوان شعاع ذره/ستون در نظر گرفته می‌شود. انحنای متوسط منیسک مایع در یک روزنه تحت قیدهایی مثل حجم مایع و زاویه تماس با استفاده از برنامه مینیمم‌سازی انرژی سطح (SE) توصیف می‌شود [۱۴]. بر اساس انحنای سطح، فشار موئینگی بر اساس معادله فوق تعیین می‌شود. شکل منیسک به هندسه یعنی، قطر ستون/ذره و تخلخل فتیله، سطح مایع اشغال‌کننده روزنه‌های فتیله و زاویه تماس جامد-مایع بستگی دارد.

### ۳-۳- مدل تبخیر لایه نازک

ترکیب مقاومت ساختار فتیله و شکل سیال در منافذ به صورت عددی، با استفاده از روش منیسک تبخیری محاسبه می‌شود. در شکل ۳، دامنه محاسباتی و شرایط مرزی برای میکروستون مخروطی آورده شده است.

سیال آب با خواص ثابت در جریان پایا، تراکم‌ناپذیر و آرام فرض شده است [۶]. دامنه بخار در دمای معلوم اشباع فرض شده است و میدان جریان در دامنه بخار حل نمی‌شود. معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی در دامنه مایع در (۵) بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (۵-الف)$$

$$0 = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_1 \nabla \vec{V}) - \rho_1 \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \quad (۵-ب)$$

$$0 = -\rho_l \vec{V} \cdot \nabla (h_l) + \nabla \cdot (k_1 \nabla T) \quad (۵-ج)$$

اعمال جمله منبع جرمی در سلول‌های مایع مجاور فصل مشترک ایفای نقش می‌کند. این منبع جرمی از معادله (۱۴) بدست می‌آید. جایی که  $A_f$  سطح مشترک سلول و  $V_{cell}$  حجم سلول است.

$$S_m = -\dot{m}'' A_f / V_{cell} \quad (14)$$

انتقال حرارت تبخیری مرتبط با نرخ تبخیر معادله (۱۱)، به عنوان شرط انتقال حرارت موثر در فصل مشترک مایع-بخار با ضریب انتقال رابطه (۱۵) مدل می‌شود:

$$h_{evap} = \frac{\dot{m}'' h_{fg}}{(T_{lv} - T_v)} \quad (15)$$

مقادیر و روابط مرتبط با منبع جرمی و فشار بخار و دمای فصل مشترک با کد  $UDF$  در نرم افزار فلوئنت اعمال می‌شوند. برای میکروستون مخروطی و کره‌ها، از ترکیب مس-آب برای جامد و سیال استفاده می‌شود. در جدول زیر خواص ترموفیزیکی آب مورد استفاده در تحلیل ارائه شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب مورد استفاده در مدل‌سازی

واحد	مقدار	نماد	خاصیت ترموفیزیکی
Kg/kmol	۱۸/۰۱	$\bar{M}$	جرم مولی
Kg/m <sup>3</sup>	۹۹۸/۲	$\rho$	دانسیته
W/mK	۰/۶	$k$	ضریب رسانش
Kg/ms	۰/۰۰۱۰۳	$\mu$	ویسکوزیته
J/kgK	۴۱۸۱/۳	$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه
kJ/kg	۲۲۷۰*۱۰ <sup>۳</sup>	$h_{fg}$	آنتالپی مایع-بخار
N/m/k	-۱۵*۱۰ <sup>-۵</sup>	$do/dT$	تغییر کشش سطحی نسبت به دما

#### ۴- نتایج

نتایج بدست آمده برای میکروستون مخروطی در زیر ارائه گردیده و سرانجام با نتایج مربوط به پودرهای سینتر (کره) [۶] مقایسه می‌شود.

#### ۴-۱- تحلیل اندرکنش سیال با میکروستون مخروطی

در شکل ۴، شکل منیسک مایع برای  $p^*=2.2$  به عنوان گام بی بعد و زاویه تماس سیال و جامد ۵ درجه نشان داده شده است. با استفاده از محاسبه منیسک مایع، فشار مویینگی به عنوان تابعی از زاویه تماس جامد-مایع و تخلخل محاسبه می‌شود.

$$-k_{wall} \nabla T \cdot \vec{n} = h_{nat} (T_{wall} - T_v) \quad (7)$$

$(T_{wall} - T_v)$  دمای مافوق گرم نامیده می‌شود. مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی روی سطح کره و مخروط، از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$h_{nat} = k/d Nu \quad (8)$$

مقادیر رایلی و ناسلت بدین صورت روابط (۹-۱۰) بدست می‌آید [۲۱]:

$$Ra = (g\beta |T_{wall} - T_v| d^3 Pr) / \nu^2 \quad (9)$$

$$Nu = \left( 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{(1 + (0.559/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right)^2 \quad (10)$$

برای قطر ستون ۲۰۰ میکرومتر و دمای مافوق گرم ۲.۵ درجه، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی با جایگذاری مقادیر داده شده در روابط فوق  $38 \text{ W/m}^2\text{k}$  بدست می‌آید.

نرخ تبخیر سطح مشترک بخار-مایع داخل روزنه فتنه برای مافوق گرم دیواره معلوم تحت شرایط بخار اشباع با استفاده از روابط ارائه شده توسط چارج<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود. در اینجا فصل مشترک ثابت با شرط مرزی جابجایی مدل می‌شود؛ در واقع ضریب انتقال حرارت تبخیری، با استفاده از بیان شار جرمی تبخیری بدست می‌آید [۲۲]:

$$\dot{m}'' = \frac{2\hat{\sigma}}{2-\hat{\sigma}} \left( \frac{\bar{M}}{2\pi R} \right)^{1/2} \left( \frac{P_{v,eq}(T_{lv})}{T_{lv}^{1/2}} - \frac{P_v}{T_v^{1/2}} \right) \quad (11)$$

در این معادله،  $\hat{\sigma}$  به عنوان ضریب همسان‌سازی است که مقدار ۱ را دارد. فشار بخار تعادلی می‌تواند به عنوان فشار بخار اشباع متناظر با دمای فصل مشترک تقریب زده شود که از معادله (۱۲-۱۳) بدست می‌آید:

$$p_{v,eq}(T_{lv}) = p_{sat}(T_{lv}) \quad (12)$$

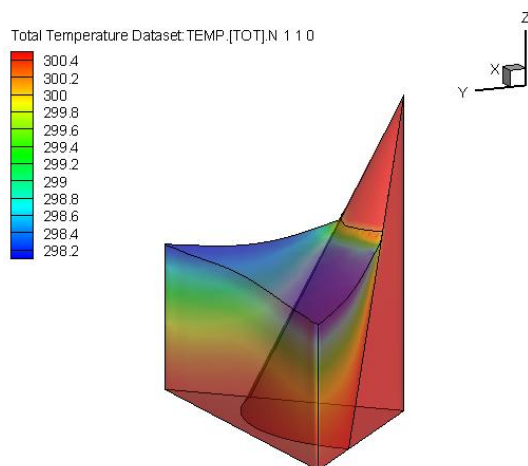
$$P_{sat}(T_{lv}) = P_{sat,ref} \exp\left( \frac{\bar{M}h_{fg}}{R} \left( \frac{1}{T_{sat,ref}} - \frac{1}{T_{lv}} \right) \right) \quad (13)$$

حل عددی با استفاده از روش حجم محدود بر پایه فشار<sup>۲</sup> در فلوئنت بدست می‌آید. از روش آپویند مرتبه دوم<sup>۳</sup> برای حل معادلات ممنوم و انرژی استفاده می‌شود. کوپلینگ سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل انجام می‌شود. انتقال جرم به دلیل تبخیر در فصل مشترک بخار-مایع با

<sup>1</sup> Schrage

<sup>2</sup> Pressure Based Finite Volume Scheme

<sup>3</sup> Second Order Upwind



شکل ۵- کانتور دمای سیال حین تبخیر حول میکروستون مخروطی

نتایج در شکل ۷ نشان می‌دهند، با شبکه ۶۰۰۰۰، ضریب انتقال حرارت پایه برابر با  $26690 \text{ W/m}^2$  و با  $110000$  شبکه،  $26890 \text{ W/m}^2$  می‌شود که در حدود ۰.۷٪ تغییر در نتایج با افزایش تعداد شبکه مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه حل معادلات جریان و حرارت تا حد زیادی مستقل از تعداد المان‌های مورد استفاده است و نفوذپذیری و میزان تبخیر با تغییر المان‌ها تا دو برابر به میزان ناچیزی تغییر می‌کند، تعداد ۶۰۰۰۰ شبکه در ادامه محاسبات در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۳- مقایسه میکروستون مخروطی با کروی

در فتیل‌های میکروستونی مخروطی، با توجه به هندسه خاصشان معمولاً تخلخل نمی‌تواند کم‌تر از ۷۲٪ باشد. ساختار فتیله ذرات کروی سینتر تجاری، دارای تخلخل ۵۰ تا ۷۰٪ است [۲] که بطور متوسط ۵۶٪ در نظر گرفته می‌شود و از تخلخل ۷۸٪ به عنوان حالت مشابه با مخروط برای مقایسه استفاده شده است. سطح اولیه سیال در تمام مقایسه‌ها برابر است و در نمودارهایی که مقایسه بر حسب گام است، زاویه تماس ۵ درجه در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۴- مقایسه میکروستون مخروطی با کروی

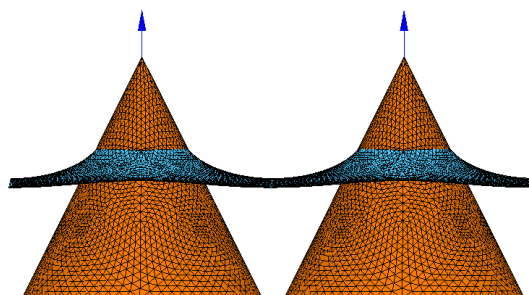
در فتیل‌های میکروستونی مخروطی، با توجه به هندسه خاصشان معمولاً تخلخل نمی‌تواند کم‌تر از ۷۲٪ باشد. ساختار

شود. نرخ تبخیر از منیسک نشان داده شده برای مافوق گرم دیواره معلوم ( $T_{wall} - T_v = 2.5$ ) و دمای بخار ۲۹۸ کلوین، به عنوان تابعی از تخلخل و زاویه تماس جامد-مایع با استفاده از مدل تبخیر فیلم نازک بدست می‌آید.

شکل ۵، میدان دمای حالت پایدار روی مرزهای دامنه مایع و جامد در طول تبخیر از منیسک ساکن در روزنه بین ستون‌های مخروطی سلول مربعی را نشان می‌دهد. نتایج برای  $h = r$  و  $\theta = 5^\circ$ ،  $p = 220 \mu\text{m}$ ،  $r = 100 \mu\text{m}$  از کانتور دما مشخص می‌شود که تبخیر در فصل مشترک مایع-بخار، مایع را خنک می‌کند؛ در حالی که مایع ورودی از پایین، دمایش بالاتر است. مایع بطور پیوسته به فصل مشترک تغذیه می‌شود تا تبخیر ادامه یابد و متوقف نشود. دمای فصل مشترک بخار-مایع در دمای بخار است، بجز در ناحیه خط ثابت فیلم نازک که بیشتر است؛ همچنین بیشترین میزان تبخیر کلی از فصل مشترک در ناحیه فیلم نازک اتفاق می‌افتد.

#### ۴-۲- صحت سنجی و استقلال نتایج از شبکه

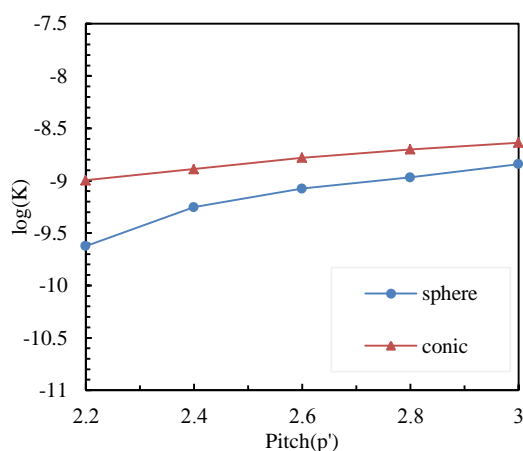
به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی دامنه محاسباتی، دو تقسیم‌بندی نشان داده شده در شکل ۶ با تعداد شبکه متفاوت برای مخروط در گام بی‌بعد ۲.۲ و زاویه تماس ۴۵ درجه، از لحاظ ضریب انتقال حرارت با یکدیگر مقایسه شدند. برای شبکه‌بندی دامنه حل، از سلول‌های محاسباتی کاملاً منتظم و سازمان یافته مثلثی استفاده شده است. تعداد نقاط شبکه براساس تحلیل‌های مختلفی که در موارد مشابه مورد استفاده قرار گرفته، تعیین گشته است.



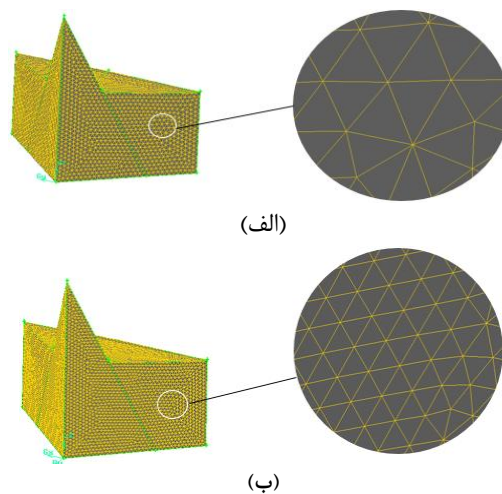
شکل ۶- شکل منیسک آب بین روزنه‌های ستون مخروطی برای  $r = 100 \mu\text{m}$  و  $\theta = 5^\circ$

بیشتر بودن اندک نفوذپذیری میکروستون مخروطی نسبت به میکروساختار کروی می‌توان نتیجه گرفت، میکروستون‌های مخروطی، افت فشار کمتری در برابر نرخ جرمی جریان ثابت نسبت به میکروساختارهای کروی ایجاد می‌نماید (رابطه (۳))، که این پدیده با توجه به سطح مقطع کمتر عبور در برابر جریان، قابل پیش‌بینی است.

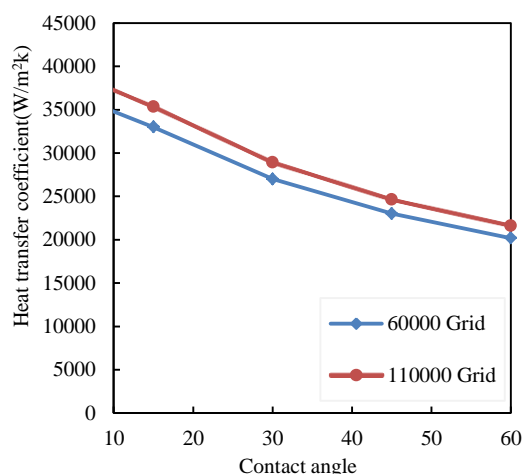
در شکل ۹، مقدار فشار مویبندی میکروستون مخروطی با تخلخل ۰.۷۸ (گام بی بعد ۲.۲) با ذرات کروی با تخلخل ۰.۵۶ و ۰.۷۸ که به ترتیب منجر به گام ۲۲۰ و ۳۰۸ میکرومتری در چیدمان مربعی با شعاع ۱۰۰ میکرومتر می‌شوند [۶]، در زاویه تماس‌های مختلف، مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فشار مویبندی برای هندسه میکروستون مخروطی بین زاویه تماس‌های ۰ تا ۶۰ درجه محاسبه شده است؛ زیرا بیشینه میزان مویبندی برای هندسه مخروطی همین محدوده است و برای زوایای بزرگتر از ۶۰ درجه فشارهای مویبندی مثبت تولید می‌شود که در بخش تخییر لوله گرمایی مناسب نمی‌باشد. بطور کلی با کاهش زاویه تماس که سطوح آبدوست‌تر می‌شوند، مقدار مویبندی با توجه به اینکه سطح سیال انحنا بیشتری دارد (رابطه (۴))، به مراتب بیشتر از زاویه تماس‌های بالاتر است. قدرمطلق فشار مویبندی در کره‌ها با ساختار فشرده‌تر (تخلخل کمتر)، بیشتر از مخروط و کره با تخلخل ۰.۷۸ است؛ همچنین در تخلخل ثابت، با توجه به اینکه انحنا مایع ایجاد شده در میکروستون مخروطی بیشتر از میکروساختار کروی است، فشار مویبندی ایجاد شده نیز بالاتر است (رابطه (۴)).



شکل ۸- نفوذپذیری کره و مخروط تابعی از گام بی‌بعد



شکل ۶- وابستگی به شبکه در میکروستون مخروطی با (الف) ۶۰۰۰۰ شبکه. (ب) ۱۱۰۰۰۰ شبکه



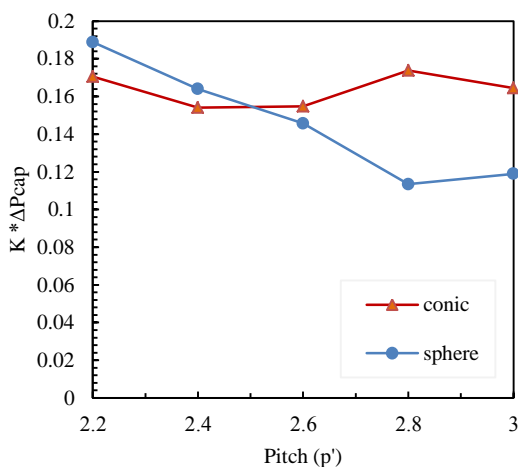
شکل ۷- استقلال از شبکه در میکروستون مخروطی

فتیله ذرات کروی سینتر تجاری، دارای تخلخل ۵۰ تا ۷۰٪ است [۲] که بطور متوسط ۰.۵۶٪ در نظر گرفته می‌شود و از تخلخل ۰.۷۸، به عنوان حالت مشابه با مخروط برای مقایسه استفاده شده است. سطح اولیه سیال در تمام مقایسه‌ها، برابر است و در نمودارهایی که مقایسه بر حسب گام است، زاویه تماس ۵ درجه در نظر گرفته شده است.

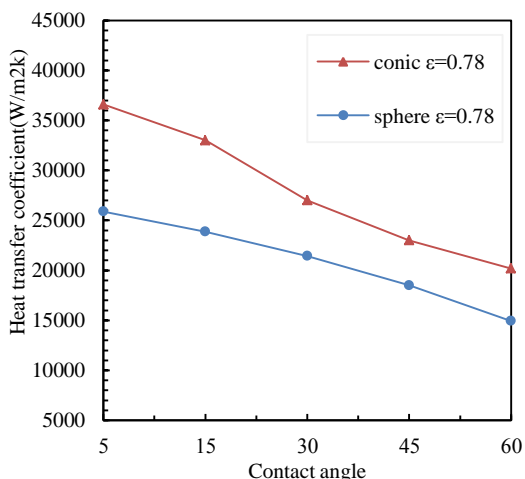
در شکل ۸، مقدار نفوذپذیری دو ساختار با تغییر گام بی بعد نشان داده شده است. مقدار نفوذپذیری برای ساختارها، حدود  $10^{-9} \text{ m}^2$  است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش گام (تخلخل)، مقدار نفوذپذیری افزایش می‌یابد. با توجه به



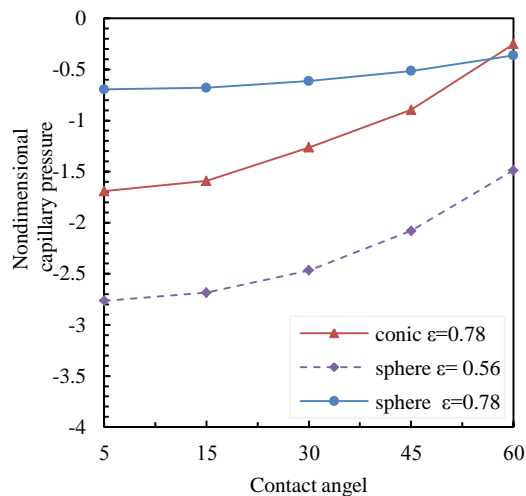
سینتری کمتر است، بنابراین ضریب انتقال حرارت میکروستون مخروطی نسبت به میکروساختار کروی در تخلخل ثابت، در تمامی زوایای تماس بیشتر است. عملکرد انتقال حرارتی دو میکروساختار با افزایش گام، به یکدیگر نزدیکتر می‌شود و تفاوت اصلی در تخلخل‌های کم است؛ به طوری که میکروساختار کروی با تخلخل ۵۸٪ (گام ۲.۲)، ضریب انتقال حرارت بیشتری نسبت به میکروستون مخروطی دارد.



شکل ۱۰- مقایسه نسبت نفوذپذیری به موئینگی در دو میکروستون مخروطی و میکروساختار کروی بر حسب گام بی بعد



شکل ۱۱- مقایسه بین ضریب انتقال حرارت برای مخروط و کره با تخلخل ۰.۷۸ برای زوایای تماس‌های مختلف

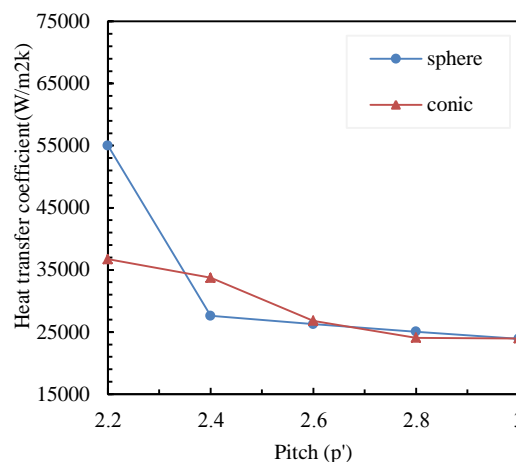


شکل ۹- مقایسه بین فشار موئینگی برای مخروط با تخلخل ۰.۷۸ و کره با تخلخل ۰.۷۸ و ۰.۵۶ بر حسب زاویه تماس

یکی از شاخصه‌های دسته‌بندی میکروساختارها، سرعت حرکت سیال در بین ساختارهاست که به فشار موئینگی و نفوذپذیری بستگی دارد. با توجه به توضیحات مربوط به شکل ۸ و شکل ۹ دیده شد که کوچکتر کردن منافذ موجود در میکروساختارها، منجر به افزایش موئینگی سطوح خواهد شد، ولی این امر کم شدن نفوذپذیری را در پی خواهد داشت. پارامتر مؤثر در عملکرد، نسبت نفوذپذیری به شعاع مؤثر روزنه‌ها (حاصلضرب نفوذپذیری در موئینگی) است که بایستی بهینه گردد. در شکل ۱۰، پارامتر مؤثر دو میکروساختار کروی و میکروستون مخروطی بر حسب گام مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد، از گام بی بعد ۲.۵ به بالاتر و تخلخل‌های کمتر عملکرد جریانی میکروستون مخروطی، بهتر از میکروساختار کروی است.

در شکل ۱۱، تغییرات ضریب انتقال حرارت پایه بر حسب زاویه تماس و در شکل ۱۲، بر حسب گام بی بعد برای مخروط و کره نشان داده شده است. نرخ خالص انتقال حرارت از سطح مبنای سلول واحد برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت پایه استفاده می‌شود. با افزایش زاویه تماس به دلیل کاهش مساحت سطح سیال بین میکروساختارها و در نتیجه کاهش مساحت لایه نازک سیال در نزدیکی دیواره جامد، نرخ تبخیر کمتر و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کمتری حاصل می‌شود. در میکروستون‌های مخروطی کاهش مساحت سطح سیال بین میکروستون‌ها نسبت به پودرهای

افت فشار و فشار مؤبیینگی میکروستون‌های مخروطی با توجه به شعاع مؤثر کوچکتر نسبت به میکروساختارهای کروی مطلوبتر است. هرچه زاویه تماس بین سیال و جامد کمتر باشد؛ یعنی سطوح آبدوست‌تر باشند، مویبیینگی بیشتر و مساحت میکرو لایه افزایش می‌یابد و در نتیجه نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود. حاصلضرب نفوذپذیری در مویبیینگی به عنوان پارامتر مؤثر برای میکروستون مخروطی در گام‌های طولی بزرگتر از ۲.۲، بیشتر از میکروساختار کروی است. همچنین هر چه فاصله ساختارها از هم کمتر باشند، با توجه به اینکه میزان لایه نازک سیال در نزدیکی دیواره جامد نسبت به سطح کلی بیشتر از حالتی است که فاصله بین ساختارها زیاد باشد، انتقال حرارت بیشتری حاصل می‌شود.



شکل ۱۲- مقایسه بین ضریب انتقال حرارت برای مخروط و کره در زاویه تماس ۵ درجه و گام‌های مختلف

#### ۵- نتیجه گیری

میکروساختارها و فتیله‌های موجود در ناحیه تبخیرکننده تجهیزات خنک کاری دوفاز، عملکرد گرمایی و بیشینه ظرفیت انتقال حرارت تجهیزات را مشخص می‌نمایند. در مطالعه حاضر، شکل سطح سیال در تماس با میکروستون‌های مخروطی و میکروساختارهای کروی با استفاده از نرم‌افزار SE برای پیش‌بینی فشار مویبیینگی مدل گردید و میزان نفوذپذیری و تبخیر از سطح با استفاده از نرم‌افزار فلونت در زوایای تماس و گام‌های مختلف تعیین گردید. همانطور که در کانتور دمای شکل ۵ مشاهده می‌شود، در نزدیکی خط تماس جامد-مایع-بخار که ناحیه فیلم نازک نامیده می‌شود، نرخ انتقال حرارت در مقایسه با طول کلی منیسک، مقدار قابل‌توجهی دارد. هرچه زاویه تماس جامد-مایع بیشتر می‌شود، درصد فیلم نازک (اندازه فیلم نازک به طول کل منیسک) کمتر شده، مقدار انتقال حرارت کمتر خواهد شد. بنابراین بهینه‌ترین مقدار زاویه تماس برای افزایش نرخ انتقال حرارت زاویه تماس‌های نزدیک به صفر هستند که سطوح آبدوست می‌شوند.

نتایج مقایسه ساختارها نشان می‌دهد در تخلخل ۰.۷۸، میکروستون مخروطی دارای فشار مویبیینگی، نفوذپذیری و نرخ انتقال حرارت بالاتری در مقایسه با میکروساختار کروی است؛ اما در مقایسه با تخلخل ۰.۵۶ میکروساختار کروی، مویبیینگی و انتقال حرارت کمتری دارد؛ بنابراین در کاربردهایی مانند، محفظه بخار نازک که افت فشار ناشی از جریان مهم است،

#### ۶- فهرست علائم

سطح	$A$
سطح زیر لایه در مدل تبخیر	$B$
دیواره جامد پایین	$Bot$
سلول واحد	$Cell$
ضریب گرمایی ویژه	$C_p$
قطر میکروستون و کره	$D$
تبخیر	$E$
تعادل	$Equ$
سطح المان سیال	$F$
ارتفاع سطح آزاد سیال از سطح پایین	$h$
ضریب انتقال حرارت پایه	$h_b$
ضریب انتقال حرارت تبخیری	$h_{evap}$
گرمای نهان تبخیر	$h_{fg}$
آنتالپی مایع	$h_l$
ضریب انتقال حرارت طبیعی	$h_{nat}$
ضریب هدایت گرمایی	$k$
نفوذپذیری	$K$
مایع	$l$
وزن مولکولی	$\bar{M}$
نرخ جریان جرمی	$\dot{m}''$
فصل مشرک بخار - مایع	$L_v$
ناسلت	$Nu$
گام	$P$

- [5] Altman DH, Wasniewski JR, North MT, Kim SS, Fisher TS (2011) Development of micro/nano engineered wick-based passive heat spreaders for thermal management of high power electronic devices. Proceedings of the ASME InterPACK Portland.
- [6] Ranjan R, Murthy JY, Garimella SV (2011) A microscale model for thin-film evaporation in capillary wick structures. Int J Heat Mass Tran 54 (1-3): 169-179.
- [7] Dhavaleswarapu HK, Migliaccio CP, Garimella SV, Murthy JY (2009) Experimental investigation of evaporation from low-contact-angle sessile droplets. Langmuir: 26(2): 880-888.
- [8] Nam Y, Sharratt S, Byon C, Kim SJ, Ju YS (2010) Fabrication and characterization of the capillary performance of superhydrophilic Cu micropost arrays. J Microelectromech S 19(3): 581-588.
- [9] Cui HH, Lim KM (2009) Pillar array microtraps with negative dielectrophoresis. Langmuir 25(6): 3336.
- [10] Nagrath S, Sequist LV, Maheswaran S, Bell DW, Irimia D, Ulkus L, Ryan P (2007) Isolation of rare circulating tumour cells in cancer patients by microchip technology. Nature 450(7173): 1235-1239.
- [11] Hilden JL, Trumble, KP (2003) Numerical analysis of capillarity in packed spheres: Planar hexagonal-packed spheres. J Colloid Interf Sci 267(2): 463-474.
- [12] Saha AA, Mitra SK, Tweedie M, Roy S, McLaughlin J (2009) Experimental and numerical investigation of capillary flow in SU8 and PDMS microchannels with integrated pillars. Microfluid Nanofluid 7: 451-465.
- [13] Xiao R, Enright R, Wang EN (2010) Prediction and optimization of liquid propagation in micropillar arrays. Langmuir 26(19): 15070-15075.
- [۱۴] صفاری ح، میرزاقیطاقی الف، رحیمی ع (۱۳۹۴) مدل‌سازی فشار مویینگی میکروسایالات در میکروساختارها با نرم افزار Surface Evolver. مجله علمی پژوهشی دینامیک سازه‌ها و شماره ۵، ۲۴۷-۲۵۵ (۳).
- [15] Hong DP, Byon C (2014) Analytic correlation for the capillary pressure of micro-square-pillar arrays. Int J Precis Eng Man 15(12): 2677-2680.
- [16] Byon Ch, Kim SJ (2014) Study on the capillary performance of micro-post wicks with non-homogeneous configurations. Int J Heat Mass Tran 68: 415-421.
- [17] Ding C, Meinhart CD, MacDonald NC (2010) Surface Modifications of bulk micromachined titanium pillar arrays – A wicking material for thin flat heat pipes. Proceedings of the ASME
- فشار هیدرودینامیکی  
گام بی بعد (نسبت گام به طول مشخصه)  
پرانتل  
نرخ انتقال حرارت  
عدد رایلی  
عدد رینولدز  
شعاع حفره  
اشباع  
منبع جرمی  
دما  
بخار  
حجم/سرعت  
دیواره جامد غیر تماس با مایع  
ضریب نفوذ گرمایی  
ضریب انبساط گرمایی  
ضخامت فیلم نازک  
ضخامت فیلم نازک بدون تبخیر  
فشار موئینگی  
تخلخل  
زاویه تماس بین جامد و مایع  
ویسکوزیته سینماتیکی  
ویسکوزیته دینامیکی  
چگالی مایع  
کشش سطحی بین فاز مایع و بخار  
ضریب انباشتگی
- $Pp$ ,  
 $P'$   
 $Pr$   
 $\dot{q}$   
 $Ra$   
 $Re$   
 $r_p$   
 $Sat$   
 $S_M$   
 $T$   
 $v$   
 $V$   
 $Wall$   
 $\alpha$   
 $\beta$   
 $\delta$   
 $\delta_0$   
 $\Delta p_c$   
 $\varepsilon$   
 $\theta$   
 $\mu$   
 $\nu$   
 $\rho$   
 $\sigma$   
 $\hat{\sigma}$
- ۷- مراجع**
- [1] Reay D, McGlen R, Kew P (2014) Heat pipes: Theory, design and applications. 6nd edn. Elsevier Ltd.
- [2] Faghri A (2012) Review and advances in heat pipe science and technology. J Heat Trans-T ASME 134(12): 123001.
- [3] Ranjan R, Murthy JY, Garimella SV (2009) Analysis of the wicking and thin-film evaporation characteristics of microstructures. J Heat Trans-T ASME 131(10): 101001.
- [4] Weibel JA, Garimella SV, North MT (2010) Characterization of evaporation and boiling from sintered powder wicks fed by capillary action. Int J Heat Mass Tran 53 (19-20): 4204-4215.

- [20] Finn R (1999) Capillary surface interfaces. Notices Amer Math Soc 46(7): 770-781.
- [21] Cengel YA (2003) Heat transfer a practical approach.
- [22] Schrage RW (1953) A theoretical study of interface mass transfer.
- Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference 415-419.
- [18] Iverson BD, Davis TW, Garimella SV, North MT, Kang SS (2007) Heat and mass transport in heat pipe wick structures. J Thermophys Heat Tr 21(2): 392-404.
- [19] Whitaker S (1986) Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law. Transport Porous Med 1(1): 3-25.