

اثر شتابهای خطی بر ماکزیمم قابلیت انتقال حرارت در میکرو لوله های حرارتی با شیارهای مثلثی

حسین شکوهمند

استاد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

احمد کهربائیان

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

نصرالله تابنده

دانشیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

احمد جلیوند

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد تبدیل انرژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۱/۱۰/۲۹، تاریخ تصویب ۱۳۸۱/۲/۲۸)

چکیده

یکی از کاربردهای اصلی میکرو لوله های حرارتی، دفع گرمای ایجاد شده بوسیله قطعات الکترونیکی و کامپیوتری می باشد. قابلیت بالای میکرو لوله های حرارتی در دفع گرمای ایجاد شده در تجهیزات الکترونیکی و کامپیوتری که در یک حجم کوچک جا سازی شده اند، و همچنین قابلیت ایجاد توزیع یکنواخت دما در این تجهیزات، موجب استفاده روز افزون آنها در صنعت شده است. قطعات الکترونیکی که در هواپیماها و موشکها و ... جا سازی میگردند، و نیز سیستم میکرو لوله هایی که برای خنک کاری آنها تعبیه میشوند، تحت تاثیر شتابهای مختلفی قرار می گیرند. این شتابها بر عملکرد اینگونه لوله های حرارتی تاثیر بسزایی دارند. در لوله های حرارتی، فرایند برگشت مایع از کندانسور به اواپراتور اهمیت خاصی دارد و لازم است که هر عامل تاثیر گذار بر این فرایند مورد بررسی قرار گیرد. شتابهای خطی از عواملی هستند که بر روی برگشت مایع از تبخیر کننده به کندانسور تاثیر می گذارند و می توانند لوله حرارتی را دچار خشکی نمایند. میکرو لوله های حرارتی بجای مواد متخلخلی به نام فتیله، شیارهای موئینگی دارند که میتوانند مایع را از کندانسور به اواپراتور بر گردانند. مقطع این شیارها معمولاً به شکل مثلث است. با مطالعه یکی از این شیارهای مثلثی در یک میکرو لوله می توان نتایج حاصل از آنرا به هر نوع میکرو لوله ای تعمیم داد. در این مقاله با استخراج رابطه ای برای شتاب بحرانی، اثرات شتابهای خطی بر شعاع موئینگی مایع و حداکثر قابلیت انتقال حرارت میکرو شیار مطالعه شده و نتایج حاصله با حالت بدون شتاب مقایسه میشود. اثرات اندازه و جهت شتاب بر روی حداکثر حرارت انتقال یافته مورد بررسی قرار گرفته است. در مقاله حاضر اثرات اصطکاک در مرزهای مایع-بخار و مایع-جامد بر روی ماکزیمم قابلیت انتقال حرارت میکرو شیار نیز مد نظر قرار گرفته شده است.

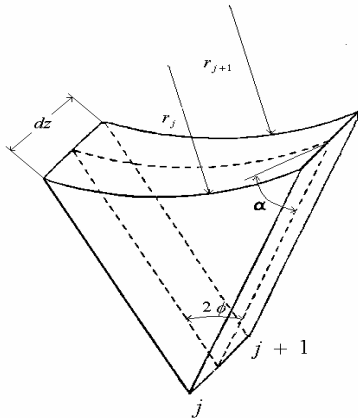
واژه های کلیدی: میکرولوله حرارتی، انتقال حرارت، تغییر فاز، شتاب خطی

مقدمه

پکیجهای الکترونیکی کوچک به کار می روند. میکرو لوله ها علاوه بر آنکه قابلیت انتقال مقدار زیادی گرما را دارند، باعث توزیع یکنواخت دما نیز می گردند، که این امر ناشی از جریان دو فازی سیال در داخل آنهاست.

میکرو لوله های حرارتی وسایل بسیار کوچکی هستند که در اثر تغییر فاز سیال درون آنها، انرژی حرارتی را انتقال می دهند. قطر هیدرولیکی میکرو لوله ها حدود ۱۰۰ میکرون می باشد و طول آنها معادل چند سانتیمتر است و اغلب برای دفع گرمای ایجاد شده در

گرفتن اثرات فشار بخار و فشار دینامیکی، یک میکرو لوله با مقطع مثلثی را در حالت پایدار مطالعه کرد. در مدل لانگتین، معادلات حاکم بر حرکت مایع و بخار در یک میکرو لوله حرارتی استخراج گردید. سپس معادلات بدست آمده که به هم وابسته می باشند، بصورت عددی حل شدند. در مدل لانگتین اثرات شتاب جاذبه نیز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل شده نسبت به نتایج پیترسون دقت بیشتری داشته و انطباق بهتری با نتایج آزمایشی دارد. در مدل یک بعدی دیگری که توسط پیترسون [۷] ارائه شد، اثرات جریان بخار بر حرکت مایع در داخل یک میکرو شیار مثلثی مطالعه گردید. در این مدل از روش عددی حجم محدود برای مطالعه ماکزیم قابلیت انتقال حرارت در یک میکرو شیار استفاده شد [۸]. حد موئینگی مبنای تحلیل در این مدل می باشد و اثرات شتاب جاذبه نیز منظور شده است. به علت در نظر گرفتن سرعت مایع در مرز مشترک مایع و بخار، نتایج حاصل از این مدل نسبت به مدل قبلی پیترسون انطباق بهتری با نتایج آزمایشی دارد.



شکل ۱: نحوه قرار گیری مایع در یک شیار مثلثی.

در لوله های حرارتی، فرایند برگشت مایع از کندانسور به تبخیر کننده اهمیت خاصی دارد و لازم است که هر عامل تاثیر گذار بر این فرایند، مانند شتاب جاذبه، شتاب خطی، نیروی گریز از مرکز و ... بدقت مورد بررسی قرار گیرد. در مقاله حاضر تاکید بر اثرات شتاب خطی می باشد. شتابهای جانب به مرکز نسبت به شتابهای محوری اثر بسیار کمتری بر روی قابلیت انتقال حرارت میکرو لوله دارند. این شتابها بر روی زاویه تماس مایع با دیواره لوله و نحوه شکل گیری مرز مشترک مایع - بخار تاثیر می گذارند، اما تاثیرات آنها نسبت به شتابهای طولی قابل توجه نیست [۱]. شتابهای محوری اثر زیادی بر ایجاد خشکی در میکرو لوله های حرارتی دارند. در شتابهای بالا، میکرو لوله دچار خشکی شده و پس از قطع شدن شتاب، سیال داخل آن مجدداً بخش خشک شده را تر می کند. پدیده تر شدگی مجدد موضوع تحقیق تعدادی از محققین بوده است [۱]. کاهش شار حرارتی اعمال شده به میکرو لوله در حین اعمال شتاب، یکی از

عملکرد میکرو لوله های حرارتی بسیار شبیه لوله های حرارتی معمولی است، با این تفاوت که برای برگرداندن مایع از تبخیر کننده به کندانسور، بجای استفاده از یک فنیله متخلخل، از شیار های موئینگی استفاده میشود. برگشت مایع از اواپراتور به کندانسور به توان پمپاژ موئینگی بستگی دارد. حد بالای این توان پمپاژ موئینگی مستقیماً به شعاع موئینگی مینیمم وابسته است و در تعیین ظرفیت انتقال حرارت ماکزیم در لوله های حرارتی معمولی و میکرو لوله های حرارتی نقش مهمی دارد. این حد پمپاژ موئینگی هنگامی فرا می رسد که فشار پمپاژ موئینگی قادر نباشد بر مجموع افت فشارهایی که در مسیر جریان مایع و بخار وجود دارند، غلبه نماید. این حد را حد موئینگی در لوله های حرارتی گویند. رابطه (۱) نشان دهنده اهمیت شعاع موئینگی مایع در بخش تبخیر کننده، $r_{c,e}$ ، در تعیین فشار پمپاژ موئینگی (Δp) میباشد. کاهش شعاع موئینگی در تبخیر کننده باعث افزایش فشار پمپاژ موئینگی میشود. ولی کاهش این شعاع محدود به شرایط خاصی است که دانستن آن شرایط از اهمیت زیادی برخوردار است.

$$\Delta p = 2\sigma \left(\frac{1}{r_{c,e}} - \frac{1}{r_{c,c}} \right) \quad (1)$$

شکل (۱) نحوه قرار گیری مایع در یک شیار مثلثی به همراه پارامترهای مربوطه را نشان می دهد. در جریانهای موئینگی که دارای عدد باند بسیار کوچکی هستند، سطح مایع شعاع انحنا ($r_{c,l}$) تقریباً ثابتی خواهد داشت، که بستگی به شکل هندسی مجرای مایع و زاویه تماس مایع با دیواره (α) دارد [۸]. به علت کوچک بودن قطر هیدرولیکی این شیارها، نیروی موئینگی به حدی است که مایع چگالیده شده را از تبخیر کننده به کندانسور باز میگرداند. افت فشار هایی که نیروی پمپاژ موئینگی در شیار بایستی بر مجموع آنها غلبه نماید، عبارتند از: افت فشار ناشی از لزجت سیال، افت فشار ایجاد شده در اثر اصطکاک بین مرزهای مایع-بخار و مایع-جامد و افت فشار های ناشی از نیرو های حجمی. مانند لوله های حرارتی معمولی، در اغلب موارد حد موئینگی محدوده عملکرد میکرو لوله های حرارتی را مشخص می کند. برای مطالعه میکرو لوله های حرارتی مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است.

پیترسون [۴] با استفاده از یک مدل تحلیلی در حالت پایدار، یک میکرو لوله حرارتی با مقطع مربع شکل را مورد مطالعه قرار داد. مبنای تحلیل در این مدل، حد موئینگی در میکرو لوله های حرارتی می باشد. در مدل پیترسون، ابتدا فرض شده است که اثر شتاب جاذبه ناچیز باشد. سپس تاثیر شتاب جاذبه بر عملکرد میکرو لوله های حرارتی نشان داده شده است. در این مدل سرعت مرز مایع-بخار ناچیز فرض شده است. این فرض مقداری خطا در نتایج بوجود میآورد. فرض دیگر در این مدل، اینست که جریان بخار آرام و غیر قابل تراکم میباشد. نتایج حاصل از این مدل با نتایج تجربی انطباق نسبتاً خوبی دارند. لانگتین [۵] نیز با استفاده از یک مدل یک بعدی، و با در نظر

در رابطه (۵)، δ پهنای شیار می باشد (شکل b-۲). با
انتگرال گیری و مرتب کردن رابطه (۵) داریم:

$$\dot{V}(t) = \frac{\delta}{3a} \left[2aH - \frac{4\sigma}{\rho_l R_l} \right]^{3/2} \quad (6)$$

با توجه به اینکه در حالت پایدار حجم مایع در درون لوله حرارتی ثابت می باشد، رابطه زیر را می توان نوشت:

$$A_l H_l + A_v H_v = cte \quad (7)$$

با دیفرانسیل گیری از دو طرف رابطه (۷) و مرتب نمودن آن خواهیم داشت:

$$A_l dH_l = -A_v dH_v \quad (8)$$

از طرفی:

$$dH = dH_l - dH_v \quad \text{یا} \quad H = H_l - H_v \quad (9)$$

با ترکیب معادلات (۸) و (۹) داریم:

$$dH = \left(1 + \frac{A_l}{A_v}\right) dH_l \quad (10)$$

از طرفی:

$$dV(t) = -A_l dH_l = \dot{V}(t) dt \quad (11)$$

با ترکیب روابط (۱۰) و (۱۱) و جایگذاری در رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$\frac{-A_l A_v}{A_l + A_v} dH = \frac{\delta}{3a} \left[2aH - \frac{4\sigma}{\rho_l R_l} \right]^{3/2} dt \quad (12)$$

در $t=0$ داریم: $H=L$ ، با انتگرال گیری از رابطه (۱۲)، می توان رابطه ای برای طول ستون مایع در درون شیار بدست آورد:

$$H_l = L + \frac{A_v}{2a(A_l + A_v)} \left\{ \frac{\delta(A_l + A_v)}{3A_l A_v} t + \left[2aL - \frac{4\sigma}{\rho_l R_l} \right]^{-1/2} \right\}^{-2} - \frac{A_v}{2a(A_l + A_v)} \left[2aL - \frac{4\sigma}{\rho_l R_l} \right] \quad (13)$$

شرط اینکه در لوله در اثر شتاب محوری پدیده خشک شدگی اتفاق نیافتد آنست که $H_l = L$ باشد. بنابراین در حالت پایدار $(t \rightarrow \infty)$ ، طول ستون مایع H_l به شرطی با کل طول لوله

(L) برابر می شود که، مقدار شتاب از $a = \frac{2\sigma}{L\rho_l R_l}$ بیشتر

نشود. مقادیر شتاب محوری که برای محاسبه ماکزیمم حرارت منتقل

راههای موثر برای جلوگیری از خشکی میکرو لوله و سوزش آن می باشد. در حالتیکه شتاب اعمال شده به میکرو لوله کوچک باشد (عملاً در فضاییها و تاسیسات مشابه، شتاب خطی زیاد نیست) پدیده خشکی در آن ایجاد نمیشود. در اینحالت نیروهای موئینگی می توانند بر نیروهای اینرسی غلبه نمایند و با وجود اعمال شتاب به میکرو لوله حرارتی، سطح آن همواره تر باقی می ماند. با اینحال نیروهای اینرسی که توسط اینگونه شتابها بوجود آمده اند، بر شعاع موئینگی و در نتیجه بر نیروهای موئینگی اثر می گذارند. نتیجه نهایی اینکه شتابهای خطی بر قابلیت انتقال حرارت میکرو لوله تاثیر دارند. در مقاله حاضر ابتدا اثرات شتاب محوری بر رفتار مایع در داخل میکرو شیار، به روش تحلیلی بدست آمده و مقدار شتاب خطی بحرانی که بر اثر آن میکرو لوله در آستانه خشک شدگی قرار می گیرد، محاسبه گردیده است. سپس برای تعیین ماکزیمم حرارت انتقال یافته توسط میکرو شیار، از یک روش عددی حجم محدود یک بعدی استفاده شده است. در این روش اثرات نیروی برشی در مرز مایع-بخار نیز منظور گردیده است. به منظور کنترل روش عددی، نتایج برنامه در حالت شتاب خطی صفر استخراج و با نتایج تجربی مرجع [۹] که در حالت شتاب خطی صفر بدست آمده است، مقایسه گردیده که انطباق بسیار خوبی را نشان میدهد.

محاسبه شتاب خطی بحرانی

شکل (a-۲) مقطع طولی یک میکرو لوله حرارتی را نشان میدهد که تحت تاثیر شتاب خطی a قرار گرفته است. رابطه تعادل فشارها در یک شیار را می توان بصورت زیر بیان نمود:

$$\rho_l a (H - z) - \frac{2\sigma}{R} = \frac{1}{2} \rho_l v_z^2 \quad (2)$$

v_z سرعت محوری مایع است که آنرا میتوان بصورت زیر بدست آورد:

$$v_z = \left[2a(H - z) - \frac{4\sigma}{\rho_l R_l} \right]^{1/2} \quad (3)$$

چون نیروهای اینرسی و موئینگی در خلاف جهت یکدیگر اعمال میشوند، مایع در نقطه ای مانند H' ساکن میگردد ($v_z = 0$). از رابطه (۳) می توان H' را بدست آورد:

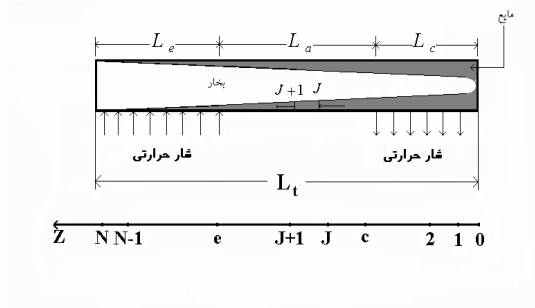
$$H' = H - \frac{2\sigma}{\rho_l a R_l} \quad (4)$$

دبی جرمی مایع را میتوان بصورت زیر بیان نمود:

$$\dot{V}(t) = \int_0^{H'} \delta v_z dz = \delta \int_0^{H'} \left[2a(H - z) - \frac{4\sigma}{\rho_l R_l} \right]^{3/2} dz \quad (5)$$

فشار ناشی از نیروهای حجمی است. نحوه محاسبه این افت فشارها در مرجع [۸] آمده است.

$$\sigma \left(\frac{1}{r_{c,l,j+1}} - \frac{1}{r_{c,l,j}} \right) \geq \rho_i g (z_{j+1} - z_j) \sin \psi + \rho_i a (z_{j+1} - z_j) + \frac{(f_{l,j} Re_{h,l,j}) \mu_{l,j} \cos^2(\alpha + \phi) (r_{c,l,j+1} + r_{c,l,j})^2}{C^3 \sin^2 \phi \rho_l (r_{c,l,j+1}^2 + r_{c,l,j}^2)^3} (z_{j+1} - z_j) \quad (14)$$



شکل ۳: نمای جانبی یک میکرو لوله .

در رابطه (۱۴)، a شتاب محوری اعمال شده به میکرو لوله می باشد. حجم کنترل J ام، در شکل (۱) نشان داده شده است. می باشد. معادله (۱۴) را میتوان بطور مستقل به قسمتهای اواپراتور، آدیاباتیک و کندانسور اعمال نمود. در هر یک از این قسمتها، دبی

جرمی، $m_{l,j}$ ، با یکدیگر متفاوت می باشد. برای هر قسمت به مقدار حرارت انتقال یافته توسط میکرو لوله حرارتی ارتباط پیدا می کند. عملاً با کاهش ضخامت متوسط فیلم مایع در داخل شیار یک میکرو لوله حرارتی، شار حرارتی انتقال یافته افزایش میابد. افزایش شار حرارتی در میکرو لوله های حرارتی تقریباً بصورت خطی می باشد. لذا در این مقاله شار ورودی به میکرو لوله بصورت خطی در نظر

گرفته شده است. نحوه بدست آوردن $m_{l,j}$ با فرض شار ورودی خطی به میکرو لوله، در مرجع [۸] آمده است.

حل معادله (۱۴) نیازمند دو شرط مرزی است. این شرایط مرزی عبارتند از: شعاع موئینگی در اولین حجم کنترل و شعاع موئینگی در آخرین حجم کنترل. در اولین حجم کنترل، شعاع موئینگی از روی ابعاد مقطع شیار بدست می آید. با نوشتن رابطه ای برای موازنه جرم برای آخرین حجم کنترل، شعاع موئینگی (شرط مرزی دوم) بدست میاید. رابطه مربوط به موازنه جرم برای آخرین حجم کنترل با این فرض بدست میاید که، مقدار مایع تبخیر شده در N امین حجم کنترل برابر با مقدار مایع وارد شده به آن است [۸].

اثرات نیروهای برشی در فصل مشترک مایع-بخار

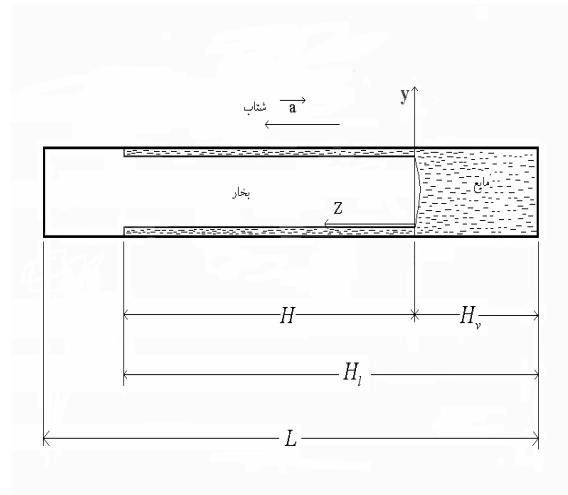
در میکرو لوله های حرارتی، جریان بخار اثر قابل

شده توسط میکرو لوله استفاده میشود، همواره کمتر از این مقدار بحرانی در نظر گرفته شده است.

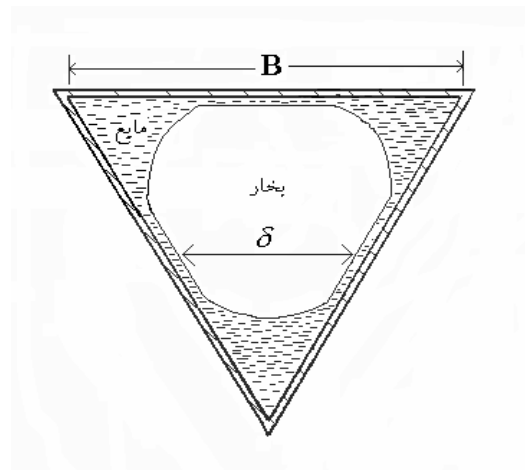
محاسبه ماكزيم حرارت منتقل شده در میکرو شيار

برای محاسبه ماكزيم حرارت مبادله شده توسط یک میکرو لوله به روش عددی، شیار لوله حرارتی را مطابق شکل (۳) به N حجم کنترل تقسیم می کنیم.

(a)



(b)



شکل ۴: یک میکرو لوله حرارتی با مقطع مثلثی که تحت اثر شتاب محوری a قرار دارد.

تعداد نیروها برای هر یک از حجم کنترل های فوق و از جمله حجم J ام به این صورت بیان می شود که: فشار موئینگی بزرگتر یا مساوی مجموع افت فشارهای مربوط به اصطکاک بین فاز مایع با دیواره لوله، افت فشار مربوط به تنش برشی در فصل مشترک مایع-بخار و افت

سیال و مشخصات هندسی میکرو لوله حرارتی، می توان با استفاده از معادله (۱۴)، شعاع موئینگی مایع را در دومین حجم کنترل بدست آورد. این روند را ادامه می دهیم تا به آخرین حجم کنترل برسیم. مقدار شعاع موئینگی مایع در آخرین حجم کنترل که از معادله (۱۴) بدست آمده است، با مقداری که بعنوان شرط مرزی تعریف کرده ایم تفاوت دارد. در این وضعیت، مقدار حرارت انتقال یافته توسط میکرو لوله را افزایش می دهیم و مجدداً از معادله (۱۴) و با استفاده از رویه بیان شده، شعاع موئینگی را در آخرین حجم کنترل بدست میاوریم. این روند را تا جایی ادامه می دهیم که شعاع موئینگی حاصل از حل معادله (۱۴) برای آخرین حجم کنترل با شرط مرزی در آخرین حجم کنترل مساوی شود. این مقدار گرمای انتقال یافته را بعنوان ماکزیم قابلیت انتقال حرارت میکرو لوله در نظر می گیریم. روند فوق را برای شتابهای محوری مختلف به کار می بریم تا اثر تغییرات شتاب محوری را بر قابلیت انتقال حرارت میکرو لوله حرارتی مشاهده کنیم.

بحث و نتیجه گیری

اغلب میکرو لوله های حرارتی که تا کنون ساخته شده اند، دارای سه یا چهار شیار مثلثی هستند. به همین دلیل برای اینکه بتوان نتایج حاصل از این مقاله را به هر نوع میکرو لوله ای تعمیم داد، تنها یک شیار موئینگی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مقایسه نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی، طول قسمت کندانسور میکرو لوله را بر اساس پیشنهاد مرجع [۸] صفر در نظر گرفته ایم. با توجه به این فرض، می توان از ضریب انتقال حرارت تقطیر صرفنظر نمود. زاویه تماس مایع با دیواره در طول شیار اندکی تغییر می کند، لیکن چون تغییرات این زاویه ناچیز است، مقدار آن ثابت فرض میشود [۸]. بر مبنای این شرایط، ماکزیم حرارت انتقال یافته توسط شیار مزبور به همراه اثرات شتابهای طولی بررسی شده است.

بررسی انجام شده توسط نگارندگان مقاله حاضر نشان داد که، مطالعه تجربی بر روی میکرو لوله هایی که شتابهای خطی به آنها اعمال شده باشد، فعلاً موجود نیست و آزمایشهای انجام شده عمدتاً مربوط به حالت شتاب صفر ($a=0$) می باشد، لذا برای مقایسه، برنامه کامپیوتری در حالت شتاب صفر اجرا و منحنی شکل (۴) بدست آمده است. بطوریکه ملاحظه میشود، در حالت شتاب صفر، مقدار Q با افزایش D_h ، ازدیاد پیدا می کند. همچنین در روی این شکل، نتایج تجربی مرجع [۹] برای $a=0$ استخراج شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. بطوریکه ملاحظه میشود، نتایج عددی و تجربی در حالت $a=0$ تا $D_h = 0.01$ به طرز مناسبی با منحنی حل عددی انطباق دارد و از آن به بعد تفاوت آشکار پیدا می کند.

توجهی روی جریان مایع دارد. معمولاً تاثیر سرعت نسبی فاز بخار بر فاز مایع به کمک یک ضریب اصطکاک f یا $f \cdot Re$ بیان میشود. لانگتین [۵]، این اثر را در حالت یک بعدی مطالعه کرده است. پیترسون [۷]، برای دقت بیشتر، جریان موئینگی در یک شیار را بصورت دو بعدی در نظر گرفته است. در مدل پیترسون، سرعت مایع همراه با اثرات جریان بخار با تعریف عدد بی بعد L_v بصورت زیر منظور شده است:

$$L_v = \frac{\overline{\Delta u}_{l,j}}{\overline{u}_{l,f,j}} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) داریم:

$$\overline{\Delta u}_{l,j} = \overline{u}_{l,f,j} - \overline{u}_{l,r_s,j} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، $\overline{u}_{l,f,j}$ سرعت متوسط سطح آزاد مایع بدون اثرات جریان بخار و $\overline{u}_{l,r_s,j}$ سرعت متوسط سطح آزاد مایع با اثرات جریان بخار می باشد [۷]. به این ترتیب پیترسون نشان داد که مقدار L_v به سرعت بخار و سرعت مایع و همچنین به جمله بی بعد $\frac{\rho_l u_l^{0.5}}{\rho_v u_v^{0.5}}$ بستگی دارد [۸]. در مقاله حاضر مقادیر $f \cdot Re$ از محاسبات پیترسون [۷] استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است.

اکنون با داشتن خواص سیال لوله حرارتی می توان معادله (۱۴) را برای تعیین ماکزیم قابلیت انتقال حرارت میکرو لوله حل نمود. در مقاله حاضر نتایج بدست آمده برای میکرو لوله ای است که با سیال متانول شارژ شده است (جدول ۱).

جدول ۱: خواص متانول .

چگالی	kg/m^3 (۷۵۱)
کشش سطحی	N/m (۰,۰۱۸۷۵)
لزجت	Ns/m^2 3.26×10^{-4}
گرمای نهان	KJ/kg (۱۱۰۱)

روند حل با یک حدس اولیه برای مقدار حرارت انتقال یافته توسط میکرو لوله آغاز می شود. با این حدس اولیه، دبی جرمی ورودی به اولین حجم کنترل، $m_{l,1}$ ، محاسبه می شود. با داشتن دبی جرمی، سرعت مایع در درون شیار با اثرات جریان بخار، بدست میاید. در نتیجه عبارت $f \cdot Re$ در معادله (۱۴) را می توان محاسبه نمود [۸]. با داشتن شتاب اعمال شده به میکرو لوله، خواص

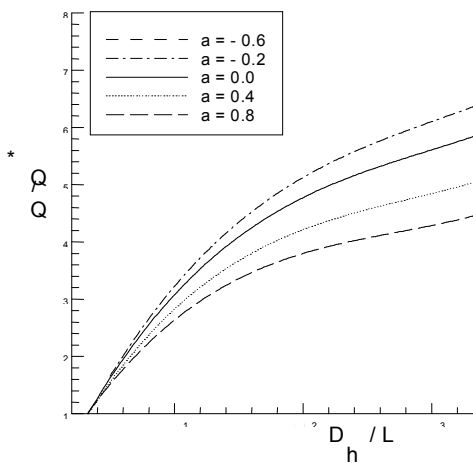
$$D_h = 0.002 \text{ m}, \beta = 60^\circ, \alpha = 0^\circ, L = 0.06 \text{ m}$$

$$(\psi = 14^\circ)$$

شکل (۶)، اثر شتاب خطی بر حرارت انتقال یافته توسط میکرو لوله را نشان می دهد. با افزایش مقدار شتاب، حرارت منتقل شده کاهش پیدا میکند. همچنین در یک شتاب معین، حرارت انتقال یافته با ازدیاد قطر هیدرولیکی افزایش میابد. دلیل کاهش حرارت منتقل شده در اثر شتابهای مثبت را میتوان به این صورت تعبیر نمود که: نیرو های اصطکاکی و نیرو های موئینگی هر دو با شعاع موئینگی ازدیاد پیدا می کنند. ولی نرخ ازدیاد نیرو های اصطکاکی بیشتر از نیرو های موئینگی است.

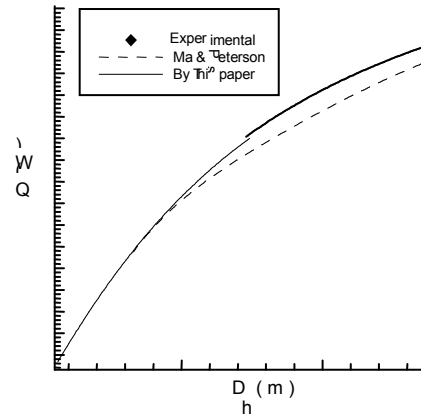
با غلبه نیرو های اصطکاکی، حرکت مایع در طول لوله کندتر صورت می گیرد. به این ترتیب سطح جداره لوله بیشتر با بخار در تماس قرار گرفته و از نرخ انتقال حرارت در شتابهای بزرگتر کاسته می شود.

همچنین در شکل (۶)، مشاهده می کنیم که با معکوس شدن جهت شتاب، بدلیل اینکه نیروی اینرسی با نیروی موئینگی همجهت میشود، گرمای منتقله بیشتر می گردد. بدین ترتیب در حالت شتاب معکوس، امکان تر شدگی جداره لوله بطور دائمی تضمین خواهد شد. و هر قدر شتاب بیشتر شود، سطح بیشتری از لوله با مایع در تماس قرار می گیرد (بر خلاف حالت شتاب موافق) و سطح تماس لوله با بخار کوچکتر و کوچکتر خواهد شد و در نتیجه مقدار کل گرمای انتقال یافته ازدیاد پیدا خواهد کرد. در شکل (۷)، Q^* حرارت انتقال یافته توسط میکرو لوله ای است که دارای قطر هیدرولیکی 0.002 متر (200 میکرون) می باشد



شکل ۶: اثر شتاب خطی بر حرارت منتقل شده

$$l (\psi = 14^\circ, \beta = 60^\circ, \alpha = 0^\circ)$$

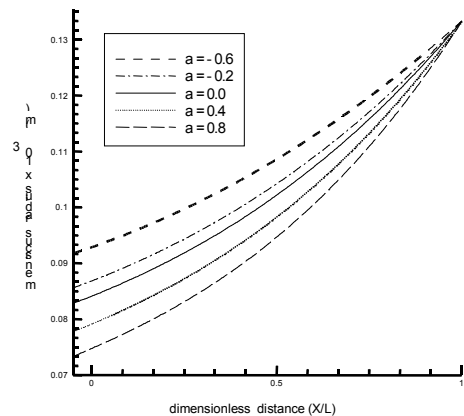


شکل ۴: مقایسه نتایج این مقاله با نتایج آزمایش

$$L = 0.05 \text{ m}, \alpha = 0^\circ, \beta = 60^\circ, \psi = 14^\circ$$

طبق رابطه (۱)، شعاع موئینگی بر مقدار نیروی موئینگی تاثیر بسزایی دارد و نیروی موئینگی نیز عامل اصلی برگشت مایع از کندانسور به اواپراتور می باشد. شتابهای محوری بر روی شعاع موئینگی مایع و در نتیجه بر نیروی موئینگی تاثیر می گذارند. شکل (۵) تغییرات شعاع موئینگی در اثر شتابهای محوری در طول لوله حرارتی را نشان می دهد. بطوریکه از این شکل مشاهده می شود، افزایش شتاب باعث کاهش شعاع موئینگی گشته است. چون نیروی موئینگی متناسب با عکس شعاع است، $\frac{Ns}{m^2}$ لذا می توان گفت افزایش شتاب در واقع باعث افزایش نیروی موئینگی می گردد. در همین شکل تاثیر شتاب خطی معکوس را مشاهده می کنیم. با معکوس شدن جهت شتاب، نیروی اینرسی با نیروی موئینگی هم جهت میشود. هر چقدر مقدار مطلق شتاب معکوس ازدیاد پیدا کند، شعاع موئینگی مایع زیاد خواهد شد و درست عکس حالتی که شتاب مثبت است اتفاق می افتد.

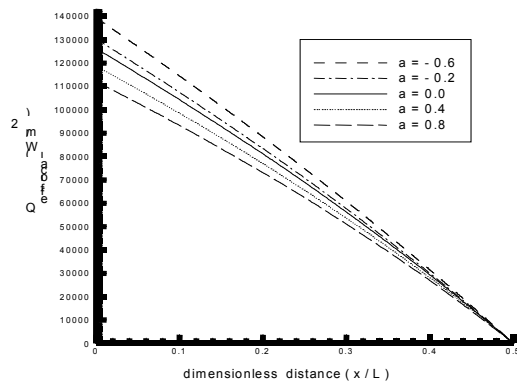
شکل ۵- اثر شتاب خطی بر شعاع موئینگی مایع



۷

در شکل (۹) تغییرات Q_{eff}^* در مورد یک میکرو لوله برای نسبت طول به قطرهای مختلف (تا ۴۰۰) ارائه شده است. بطوریکه دیده میشود در یک لوله معین، قابلیت انتقال حرارت مؤثر Q_{eff}^* به شدت به جهت شتاب و قدر مطلق آن بستگی دارد. با افزایش L/D ، Q_{eff}^* در تمام حالات کاهش میابد.

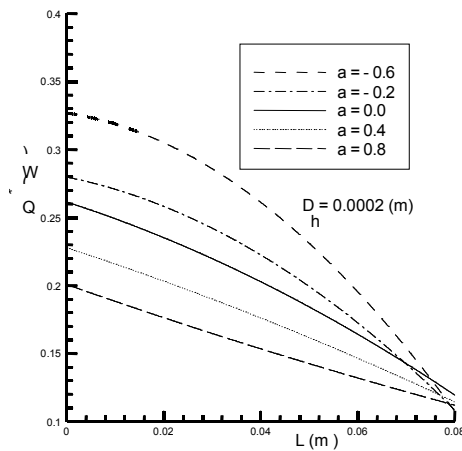
شکل (۱۰) نحوه تغییرات شار حرارتی مؤثر محلی ($Q_{eff, local}$) را بر حسب فاصله محوری بی بعد نشان میدهد. بطوریکه ملاحظه میشود، شار حرارتی در حالت شتاب صفر بصورت خطی تغییر می نماید. این نتیجه با تحقیقات انجام شده توسط پیترسون [۸،۹] مطابقت دارد. اما با افزایش شتاب، شار حرارتی کاهش میابد، در حالیکه توزیع شار تقریباً بصورت خطی باقی می ماند. شکل (۱۱) اثر شتابهای خطی بر روی حرارت انتقال یافته محلی (Q_{local}) را نشان می دهد



شکل ۹: اثر شتابهای خطی بر شار حرارتی مؤثر
 $(\psi = 14^\circ, D = 0.0002 \text{ m}, \phi = 60^\circ, \alpha = 0^\circ)$

شکل (۱۲) اثرات قطر هیدرولیکی میکرو لوله بر نحوه توزیع شار در قسمت اوپریاتور در حالت بدون شتاب را نشان می دهد. در این شکل مشاهده می کنیم که با بزرگتر شدن قطر هیدرولیکی میکرو لوله، توزیع شار حرارتی از حالت خطی خارج شده و تا حدی به شکل سهمی درآمد. به منظور بررسی اثرات انحراف شار حرارتی موضعی از حالت خطی، برنامه کامپیوتری در دو حالت شار حرارتی سهموی و شار حرارتی خطی اجرا گردیده است. نتایج در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همانطوریکه از این شکل مشاهده میشود، در نظر گرفتن توزیع شار در اوپریاتور بصورت سهمی اختلاف زیادی با حالت خطی ندارد و می توان با تقریب خوبی توزیع شار را برای تمام قطرهای هیدرولیکی بصورت سهمی در نظر گرفت.

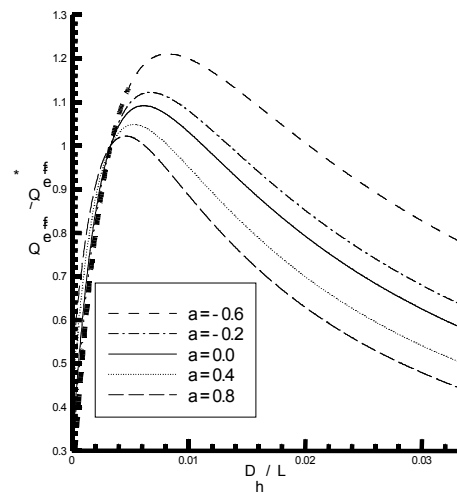
شکل (۸) تغییرات شار حرارتی بی بعد شده (انتقال حرارت بر واحد سطح مؤثر) را بر حسب نسبت بی بعد قطر به طول (D/L) میکرو لوله نشان می دهد. همانطوریکه ملاحظه میشود، برای یک شتاب محوری معین، شار حرارتی دارای یک مقدار ماکزیمم است. این مقدار ماکزیمم مربوط به میکرو لوله ای می باشد که دارای نسبت قطر به طول (D/L) معینی است. همچنین با ازدیاد شتاب نقطه ماکزیمم به سمت راست منتقل میشود و این بدین معناست که با افزایش اندازه شتاب مثبت، کارآمدترین میکرو لوله، میکرو لوله ای است که دارای نسبت قطر هیدرولیکی به طول (D/L) بیشتری باشد. با افزایش اندازه شتاب منفی، میکرو لوله هایی با نسبت (D/L) کمتر، مؤثر تر خواهند بود.

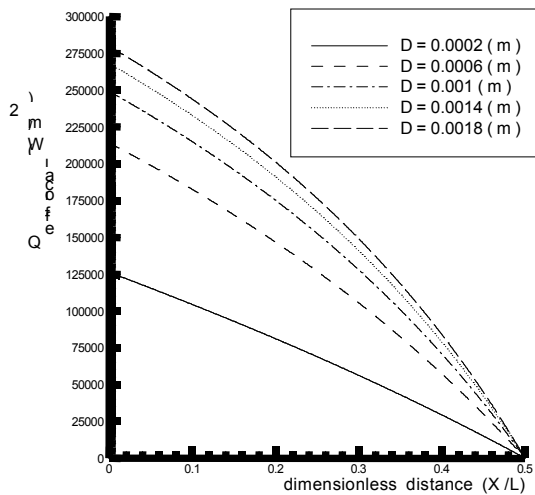


شکل ۷- تغییرات حرارت انتقال یافته بر حسب طول لوله حرارتی در شتابهای مختلف

$(\psi = 14^\circ, D_h = 0.0002 \text{ m}, \phi = 60^\circ, \alpha = 0^\circ)$

شکل ۸: اثر شتابهای خطی بر شار حرارتی مؤثر
 $(\psi = 14^\circ, \phi = 60^\circ, \alpha = 0^\circ)$

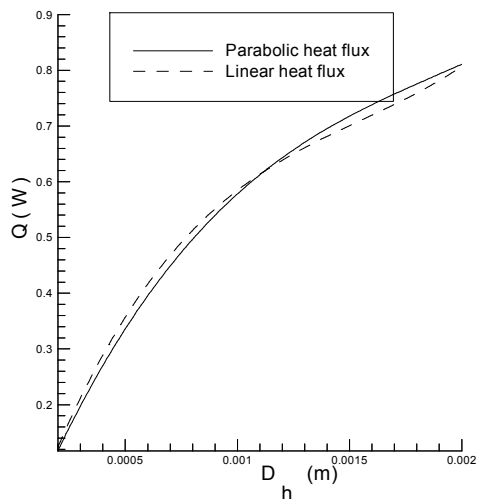




شکل ۱۲: اثرات قطر هیدرولیکی میکرو لوله بر نحوه توزیع

شار در قسمت اوپریاتور در حالت بدون شتاب

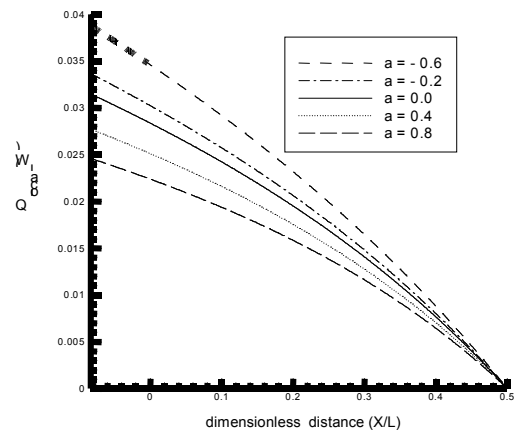
$$(\psi = 14^\circ, \alpha = 0^\circ, \phi = 60^\circ)$$



شکل ۱۳: اثرات نحوه توزیع شار بر روی حرارت انتقال یافته

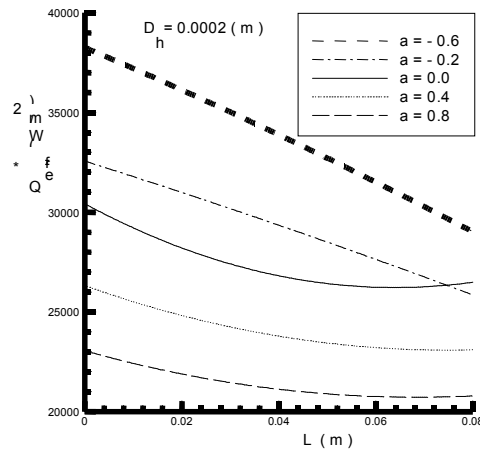
توسط یک میکرو لوله $(\psi = 14^\circ, \alpha = 0^\circ, \phi = 60^\circ)$.

در موارد عملی، مقدار حرارتی که یک جسم مولد گرما تولید می نماید معلوم است و ما در اثر شتابهای مختلف، مایلمیک میکرو لوله با اندازه مشخص برای دفع این گرما انتخاب نمائیم. شکل (۱۵) این امکان را فراهم میآورد که بتوانیم برای این منظور میکرو لوله مناسب را طراحی نمائیم. به این ترتیب که مقدار گرمایی که باید دفع شود روی محور افقی انتخاب می شود و برای حداکثر شتاب اعمال شده، نسبت قطر به طول میکرو لوله را محاسبه می کنیم.



شکل ۱۰: تغییرات شار حرارتی موثر محلی بر حسب فاصله بی

بعد $(\psi = 14^\circ, D_h = 0.0002 \text{ m}, \alpha = 0^\circ, \phi = 60^\circ)$.



شکل ۱۱: اثر شتابهای خطی بر روی حرارت انتقال یافته

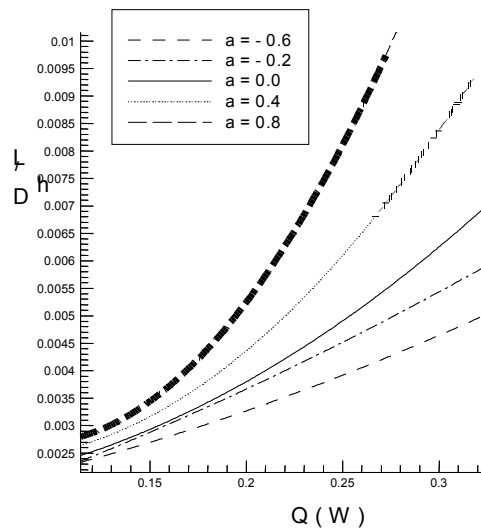
موضعی در قسمت اوپریاتور

$$(\psi = 14^\circ, D_h = 0.0002 \text{ m}, \alpha = 0^\circ, \phi = 60^\circ)$$

شکل (۱۴) اثرات قطر هیدرولیکی را بر روی حرارت انتقال یافته

محلی (Q_{local}) نشان می دهد. در این شکل مشاهده می کنیم که برای میکرو لوله هایی با قطر هیدرولیکی بزرگ، حرارت منتقل شده محلی بصورت سهمی شکل در طول اوپریاتور افزایش میابد. در حالیکه در قطر هیدرولیکی کوچکتر، این افزایش خطی می باشد.

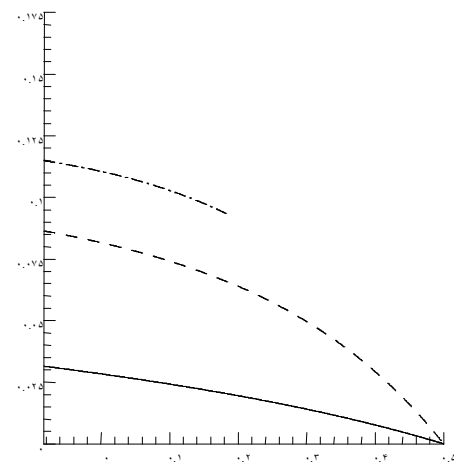
ارائه گردید. بدین ترتیب که ابتدا شتاب بحرانی که میکرو لوله را در آستانه خشکی قرار میدهد محاسبه میگردد، سپس با استفاده از روش حجم کنترل و در نظر گرفتن شتاب خطی، مشخصه های جریان در داخل میکرو لوله محاسبه میگردد. مدل مذکور که بر مبنای حد موئینگی استوار است، بصورت عددی حل میشود. نتایج محاسبه شده نشان میدهد که جهت و مقدار شتاب اعمال شده به میکرو لوله بر روی حد موئینگی و در نتیجه بر قابلیت انتقال حرارت میکرو لوله تاثیر بسزایی دارد. همچنین در این مدل نشان داده شده است که اعمال شتاب تاثیر محسوسی بر نحوه توزیع شار حرارتی ندارد. با اعمال شتاب در جهتی که پدیده خشکی را تسریع نماید، مشاهده مینماییم که میکرو لوله ای که قطر هیدرولیکی کمتری دارد، دارای راندمان بیشتری است و بر عکس. در شکل (۴) مشاهده میشود که با افزایش قطر هیدرولیکی میکرو لوله مقدار محاسبه شده از مقدار آزمایشی فاصله میگیرد که این امر به این دلیل رخ میدهد که با افزایش قطر هیدرولیکی فرض ثابت بودن شعاع موئینگی دیگر معتبر نیست. از روش تحلیلی که در اینجا ارائه گردیده میتوان برای طراحی بهینه میکرو لوله هایی که تحت اثر شتابهای خطی ثابت قرار دارند استفاده نمود.



شکل ۱۴: اثرات قطر هیدرولیکی میکرو لوله بر روی حرارت انتقال یافته موضعی در قسمت اواپراتور در حالت بدون شتاب
($\psi = 14^\circ, \phi = 60^\circ, \alpha = 0^\circ$)

فهرست علائم

- a : شتاب محوری (m / s^2)
- B : طول ضلع مقطع میکرو لوله, (m)
- C : ثابت هندسی, مرجع [۸]
- D : قطر (m)
- f : ضریب اصطکاک
- g : شتاب جاذبه (m / s^2)
- H : طول ستون مایع (m)
- h_{fg} : گرمای نهان تبخیر (KJ / Kg)
- L : طول (m)
- L_v : عدد بی بعد مایع-بخار
- \dot{m} : دبی جرمی (Kg / s)
- p : فشار (N / m^2)
- Q : حرارت منتقل شده (W)
- \dot{R} : شعاع موئینگی, (m)
- r : مختصه شعاعی, (m)
- Re : عدد رینولدز
- u : سرعت, (m/s)
- Z : مختصه طولی, (m)



شکل ۱۵: منحنی تغییرات قطر به طول میکرو لوله حرارتی بر حسب حرارت منتقل شده توسط میکرو لوله در شتابهای مختلف ($\psi = 14^\circ, \phi = 60^\circ, \alpha = 0^\circ$).
از نتایج این مقاله می توان در مورد نصب میکرو لوله ها در قطعات الکترونیکی بکار رفته در فضاپیماها و ... استفاده نمود.

نمادهای یونانی

- α : زاویه تماس مایع با دیواره, (درجه)
- θ : مختصه زاویه ای, (درجه)

بحث و نتیجه گیری

یک مدل تحلیلی به منظور پیش بینی اثر شتابهای خطی ثابت بر ماکزیمم قابلیت انتقال حرارت در میکرو لوله های حرارتی

زير نويسها

a : آدياباتيك
 C : موئينگي
 h : هيدروليكي
 j : شماره حجم كنترل
 l : مابع
 S : سطح
 ν : بخار

μ : لزجت, (Ns/m^2)
 ρ : چگالي, (kg/m^3)
 σ : كشن سطحى, (N/m)
 τ : تنش برشى, (N/m^2)
 ϕ : نصف زاويه شيار, (درجه)
 ψ : زاويه تمايل لوله, (درجه)
 δ : پهناى شيار, (m)

مراجع

- 1 - An Introduction to heat pipes, modeling, testing, and applications by. G.P. Peterson. Copyright C 1994 by John Wiley & Sons, Inc.
- 2 - Viscous fluid flow. by Frank M. White, Copyright C 1991, 1994 by McGraw-Hill, Inc.
- 3 - Ayyaswamy, P. S., Catton, I., and Edward, D. K. (1974). "Capillary flow in triangular grooves." *ASME Journal of Applied Mechanics*. Vol. 41, PP. 332-336.
- 4 - Babin, B. R., Peterson, G. P., and Wu, D. (1990). "Steady state modeling and testing of a micro heat pipe." *ASME Journal of heat transfer*, Vol. 112, PP. 595-601.
- 5 - Longtin, J. P., Badran, B., and Gerner, F. M. (1994). "A one dimensional model of a micro heat pipe during steady-state operation." *ASME Journal of heat transfer*, Vol. 116, PP. 709-715.
- 6 - Khrustalev, D. and Faghri, A. (1994). "Thermal analysis of a micro heat pipe." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, PP. 189-198.
- 7 - Ma, H. B., Peterson, G. P. and Lu, X. J. (1994). "The influence of vapor-liquid interactions on the liquid pressure drop in triangular micro grooves." *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 15, PP. 2211-2219.
- 8 - Peterson, G. P. and Ma, H. B. (1996). "Theoretical analysis of the maximum heat transport in triangular grooves-a study of idealized micro heat pipes." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, PP. 731-739.
- 9 - Ma, H. B. and Peterson, G. P. (1996). "Experimental investigation of the maximum heat transport in triangular grooves." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, PP. 740-746.
- 10 - Ha, J. M. and Peterson, G. P. (1996). "The interline heat transfer of evaporating thin films along a micro grooved Surface." *Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, PP. 747- 754.
- 11 - Ha, J. M. and Peterson, G. P. (1998). "The heat transport capacity of micro heat pipes." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 120, PP. 1064-1071.
- 12 - Ma, H. B. and Peterson, G. P. (1999). "Temperature response of heat transport in a micro heat Pipe." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, PP. 438-445.