اثر تنش و انتقال جرم فصل مشترک مايع-بخاربر روی عملکرد ترموسيفونها

علي نوري[i]؛ پدرام حنفي زاده[ii]

چکيده

در اين مقاله اثر تنش برشي و انتقال جرم در فصل مشترك فيلم مايع و جريان بخار روي عملكرد يك ترموسيفون با استفاده از روش انتگرالي بررسي شده است. با حل معادلات حاكم در بخش چگالنده، توزيع سرعت و ضخامت فيلم مايع به دست مي‌آيد. سپس دبي جرم فيلم مايع و نرخ انتقال حرارت قابل محاسبه است. نتايج براي يک ترموسيفون با طول ۳۰/۵ cm و قطر داخلي ۲/۴۲ cm با سيال عامل متانل در دماي اشباع ٦٣ درجة سانتيگراد و دماي ديوار ۳۸ درجة سانتيگراد انجام گرفته است. نتايج تحليلي ارايه شده با نتايج تجربی و عددی محققين قبلي مقايسه گرديده است.

كلمات كليدي

لولة گرمايي، ترموسيفون، انتقال حرارت و جرم، تنش برشي

The Effect of Shear Stress of Liquid-Vapor Interface with and without Mass Transfer on Thermal Performance of a Thermosyphon

A. Nouri, P. Hanafizadeh

ABSTRACT

This paper shows the effect of shear stress of liquid-vapor interface with and without mass transfer on thermal performance of a thermosyphon by the integral method. In this analysis, governing equation solved for laminar flow to find velocity profile, thickness of liquid film as well as heat transfer coefficient. In this study, a thermosyphon with 30.5cm length and 2.42cm inner diameter is analyzed. Methanol is used as a working fluid at saturated temperature of 63°C. Results show that the shear stress of liquid-vapor interface decreases the rate of heat transfer.

KEYWORDS

Heat Pipe, Thermosyphon, Heat Transfer, Shear Stress, Mass Transfer

۱- مقدمه

لوله‌هاي گرمايي يکی از وسايل انتقال گرما و وسيله‌ای بسيار ساده و در عين حال با كارايي حرارتي بسيار بالا است. لوله گرمايي شامل لوله ای حاوی سيال عامل و فتيله ای در، كنار جدار داخلی لوله برای برگشت جريان مايع از چگالنده به تبخير كننده مي‌باشد. در صورتيکه لوله گرمايي بدون فتيله باشد يعني عمل برگشت مايع از چگالنده به تبخير كننده توسط نيروي جاذبه صورت گيرد، لوله گرمايي را ترموسيفون مي‌نامند. ترموسيفون شامل سه بخش تبخير كننده، آدياباتيک و چگالنده است. بخش تبخير كننده شامل استخري از سيال

[i] استاد دانشكدة مهندسي مكانيك دانشگاه صنعتي شريف؛ Email:anouri@sharif.edu
[ii] عضو هيات علمي گروه مهندسي مكانيك دانشگاه آزاد اسلامي واحد علوم و تحقيقات؛ Email:hanafizadeh@srbiau.ir

عامل است که در آنجا به جذب گرما از محیط اطراف، مایع به بخار تبدیل می‌شود.بخار تولیدی به سمت بالا حرکت می‌کند و پس از عبور از بخش آدیاباتیک به بخش چگالنده می‌رود. در این بخش بخار با دفع گرما به محیط به مایع تبدیل می‌شود. سپس فیلم مایعی که بر اثر میعان بخار روی جدار داخلی لوله تشکیل شده، تحت اثر نیروي جاذبه به طرف پايين يعني بخش تبخیر کننده حرکت می‌کند و باعث تداوم سیکل می‌شود (شکل ۱). ترموسيفونها داراي قابليت انتقال حرارت بالا در اختلاف دماهاي كوچك بين چگالنده و تبخير كننده هستند. همچنين داراي بازده گرمايي و قابليت اطمينان بالايي مي‌باشند و به علت سادگي ساخت، داراي قيمت تمام شدة پائين بوده، از اينرو كاربردهاي گسترده اي در صنايع گرمايي دارند. از جمله اين كاربردها مي‌توان به خنك كردن موتورها، گرمايش ساختمانها، سرمايش اضطراري راكتورها و خنك كردن كيتهاي الكترونيكي اشاره نمود [۱].

ناسلت (Nusselt) براي اولين بار مسئله چگالش را بر روی دیوارة عمودی بدون در نظر گرفتن تنش برشی فصل مشترک بررسی نمود [۲]. ناسلت اثر اینرسی را ناچیز فرض نمود و از آن در معادلة ممنتم صرف نظر کرد. معادلة ممنتم کامل توسط اسپارو و گرگ (Sparrow and Gregg) بررسی گردید [۳]. نتایج آنها برای عدد ناسلت متوسط وقتی عدد پرانتل کمتر از ۰/۰۳ و عدد ژاکوب بزرگتر از ۰/۰۱ است، کمتر از مقدار محاسبه شده توسط ناسلت گردید. در تحلیل بعدی چن (Chen) [۴] اثر تنش برشی فصل مشترک مایع-بخار و اینرسی را در نظر گرفت. وی بخار را در خارج از فصل مشترک بصورت ثابت و در حالت اشباع فرض نمود. نتایج چن برای عدد ناسلت متوسط بویژه در اعداد پرانتل کوچک، کمتر از مقادیر اسپارو و گرگ گردید و همخواني بهتری با نتایج تجربی داشت. سبان و فقری (Seban and Faghri) [۵] تحلیل را برای رژیمهای آرام و آشفته در داخل ترموسیفون بصورت عددي انجام دادند. اسپندل (Spendel) [۶] نیز مسئله چگالش در ترموسیفون را با حل عددی معادلة ممنتم بخار در حالت آرام و تلفیق آن با تحلیل فیلم مایع انجام داد.

در این مقاله اثرات تنش فصل مشترك و انتقال جرم بين دو فاز بصورت تحليلي بررسي مي گردد. براي اين منظور جمله‌هاي غير خطي بدست آمده در پروفیل سرعت، با استفاده از برازش منحني به چند جمله‌اي‌هاي ساده تبدیل می‌شوند تا به راحتي قابل انتگرال‌گيري باشند. ضرایب این روابط نیز بصورت بهینه از طریق روش کمترین مجموع مربعات و روش تکرار گوس- نیوتن محاسبه مي‌گردند.

۲- معادلات حاکم

با فرض کوچك بودن ضخامت فيلم مايع نسبت به قطر ترموسيفون، مي‌توان از اثرات انحناي ديوار صرف نظر نمود و معادلات را در دستگاه مختصات کارتزین نوشت. بنابراين معادله حركت آرام فيلم مايع روي جدار داخلي لولة ترموسيفون در بخش چگالنده (شکل۱)، با صرف نظر از جملات جابجايی بصورت رابطه (۱) نوشته مي‌شود:

$$\frac{\partial^2 u_l}{\partial y^2}+\frac{g}{\mu_l}(\rho_l-\rho_v)=0 \qquad (۱)$$

كه در رابطه ۱، μ,ρ به ترتيب چگالي و ويسكوزيته ديناميكي، u سرعت و انديسهاي v,l به ترتيب نشان دهندة فازهاي مايع و بخار مي‌باشند. لازم به ذکر است که این معادله در بخشهاي چگالنده و آدیاباتیك (L_c+L_a) اعتبار داشته و در بخش تبخیر کننده L_e اعتبار ندارد (شکل ۱).

شرط مرزي سرعت در ديواره بصورت رابطه (۲) مي‌باشد:

$$u_l(0)=0 \qquad (۲)$$

شرط مرزی میدان سرعت فیلم مایع در محل فصل مشترك مايع-بخار را مي‌توان به صورتهاي الف و ب نوشت:

الف- تنش برشي فصل مشترك بدون اثر انتقال جرم [۷]:

$$-\mu_l\left.\frac{\partial u_l}{\partial y}\right|_{\delta}=\frac{1}{2}f\rho_v(\bar{u}_v\pm u_{l\delta})^2 \qquad (۳)$$

علامت منفي هنگامي‌است که بخار و مایع هم جهت و علامت مثبت هنگامي‌است که بخار و مایع در خلاف جهت یکدیگر باشند. در اين رابطه δ ضخامت فيلم مايع و f ضريب اصطكاك فانينگ (fanning) است و مي‌توان آنرا با استفاده از فرمولهاي (٤الف-د) محاسبه نمود [۸].

$$f=\frac{16}{\mathrm{Re}_v} \qquad \mathrm{Re}_v<2000 \qquad (\text{٤- الف})$$

$$f=\frac{\mathrm{Re}_v^{\ 0.33}}{1525} \qquad 2000<\mathrm{Re}_v<4000 \qquad (\text{٤- ب})$$

$$f=\frac{0.079}{\mathrm{Re}_v^{\ 0.25}} \qquad 4000<\mathrm{Re}_v<3\times10^4 \qquad (\text{٤- ج})$$

$$f=\frac{0.046}{\mathrm{Re}_v^{0.2}} \qquad 3\times10^4<\mathrm{Re}_v<10^6 \qquad (\text{٤- د})$$

که در این فرمولها، عدد رینولدز به صورت $\mathrm{Re}_v=\bar{u}_v D/\upsilon_v$ تعریف شده است. $\bar{u}_v$ سرعت متوسط بخار است و مي‌توان آنرا از رابطة (۵) محاسبه نمود:

$$\frac{\pi}{4}(D-2\delta)^2\rho_v\bar{u}_v = \int_0^{\delta}\pi D\rho_l u_l dy$$ (۵)

ب- تنش برشي فصل مشترك با اثر انتقال جرم [۹]

$$-\mu_l\left.\frac{\partial u_l}{\partial y}\right|_{\delta} = \frac{1}{2}f\rho_v\bar{u}_v^2 + \dot{m}_v''\left(\bar{u}_v \pm u_{l,\delta}\right)$$ (٦)

که $\dot{m}_v''$ برابر نرخ بخار مايع شده بر واحد سطح است و مي‌توان آنرا از رابطة (۷) محاسبه نمود:

$$\dot{m}'' = \frac{d}{dx}\int_0^{\delta}\rho_l u_l dy$$ (۷)

همچنين شرط مرزي در محل فصل مشترك مايع-بخار را مي‌توان بصورت رابطة (۸) كه توسط پن (Pan) [۱۰] پيشنهاد شده است بيان نمود:

$$\mu_l\left.\frac{\partial u_l}{\partial y}\right|_{\delta} = \frac{1}{2}f\rho_v\left(\bar{u}_v - u_{l,\delta}\right)^2\frac{\phi}{1-e^{\phi}}$$ (۸- الف)

$$\phi = \frac{\dot{m}''}{f\rho_v\left|\bar{u}_v - u_{l,\delta}\right|}$$ (۸- ب)

با فرض خطی بودن دما در فيلم مايع معادله انرژی بر واحد سطح برابر است با:

$$K_l\frac{(T_{sat}-T_{wc})}{\delta} = h_{fg}\frac{d}{dx}\int_0^{\delta}\rho_l u_l dy$$ (۹)

ضريب انتقال حرارت در هر نقطه را مي‌توان از رابطة (۱۰) محاسبه نمود:

$$h_x = \frac{k_l}{\delta}$$ (۱۰)

برای حل معادلات يادشده ابتدا معادلات بصورت بی بعد در آورده مي‌شوند. تعريف اعداد بی بعد عبارتند از:

$$\psi^* = \psi\left(g/\nu_l^2\right)^{\frac{1}{3}}, \qquad where \quad \psi = [x, y, D, \delta]^T$$

$$\rho^* = \frac{\rho_v}{\rho_l}, \qquad \nu^* = \frac{\nu_v}{\nu_l}, \qquad u_l^* = u_l\Big/\left(\nu_l g\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Ja = \frac{c_p(T_{sat}-T_w)}{h_{fg}}, \qquad Nu_x^* = \frac{h_x}{k_l}\left(\frac{\nu_l^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$$

شكل بدون بعد معادلات ياد شده به ترتيب بصورت روابط (۱۱-۱۹) مي‌باشد:

$$\frac{\partial^2 u_l^*}{\partial y^{*2}} + (1-\rho^*) = 0$$ (۱۱)

$$u_l^*(0) = 0$$ (۱۲)

$$-\left.\frac{\partial u_l^*}{\partial y^*}\right|_{\delta^*} = \frac{1}{2}f\rho^*\left(\bar{u}_v^*\nu^{*\frac{1}{3}} \pm u_{l\delta}^*\right)^2$$ (۱۳)

که سرعت متوسط بخار بی بعد بصورت رابطه (١٤) است:

$$\bar{u}_v^*\nu^{*\frac{1}{3}} = \frac{4D^*\int_0^{\delta^*}u_l^*dy^*}{\rho^*\left(D^*-2\delta^*\right)^2}$$ (١٤)

$$-\left.\frac{\partial u_l^*}{\partial y^*}\right|_{\delta^*} = \frac{1}{2}f\rho^*\left(\bar{u}_v^*\nu^{*\frac{1}{3}}\right)^2 + \frac{d\int_0^{\delta^*}u_l^*dy^*}{dx^*}\left(\bar{u}_v^*\nu^{*\frac{1}{3}} + u_{l,\delta^*}^*\right)$$ (۱۵)

$$\frac{d}{dx^*}\int_0^{\delta^*}u_l^*dy^* = \frac{Ja}{\Pr}\frac{1}{\delta^*}$$ (١٦)

$$-\left.\frac{\partial u_l^*}{\partial y^*}\right|_{\delta^*} = \frac{1}{2}\left|\bar{u}_v^*\nu^{*\frac{1}{3}} + u_{l,\delta^*}^*\right|\frac{d\int_0^{\delta^*}u_l^*dy^*}{dx^*\left(1-e^{\phi^*}\right)}$$ (۱۷)

که در آن ϕ^* به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

$$\phi^* = \frac{\int_0^{\delta^*}u_l^*dy^*}{f\rho^*x^*\left|\bar{u}_v^*\nu^{*\frac{1}{3}} + u_{l,\delta^*}^*\right|}$$ (۱۸)

$$Nu_x^* = \frac{1}{\delta^*}$$ (۱۹)

۳- روش حل معادلات

۳-۱- بدون انتقال جرم

برای رژیم جریان آرام و بدون انتقال جرم، ابتدا با حل معادلة (۱۱) به کمک شرایط مرزی (۱۲ و ۱۳) و جایگذاری سرعت متوسط بخار از معادلة (١٤) پروفیل سرعت برای فیلم مایع بصورت رابطه (۲۰) میگردد. برای سهولت در انتگرال-گیری معادلة (١٦)، ابتدا جملة سوم و چهارم طرف راست معادلة (۲۰) با یک چند جمله ای درجة دو مطابق شکل (۲) تقریب زده شده و سپس انتگرال‌گیری شده است. با جایگذاری معادلة اصلاح شدة (۲۰) در معادلة (١٦) تغییرات ضخامت فیلم مایع مطابق معادلة (۲۱) خواهد بود.

$$u_l^* = -\frac{1}{2}y^{*2} + \left[\left(\frac{8f\,\delta^{*5} + 10f\,\rho^* D^* \delta^{*4} - 6\rho^* D^{*2} + 3f\,\rho^{*2} D^{*2} \delta^{*3}}{3\left(4f\,\delta^{*4} + 4f\,\rho^* D^* \delta^{*3} + f\,\rho^{*2} D^{*2} \delta^{*2}\right)}\right) + \frac{\left(48f\,\rho^* D^{*2} \delta^{*5} + 42f\,\rho^{*2} D^{*3} \delta^{*4}\right)^{\frac{1}{2}}}{3\left(4f\,\delta^{*4} + 4f\,\rho^* D^* \delta^{*3} + f\,\rho^{*2} D^{*2} \delta^{*2}\right)} + \frac{\left(9\rho^{*2} D^{*4} + 9f\,\rho^{*3} D^{*4} \delta^{*3}\right)^{\frac{1}{2}}}{3\left(4f\,\delta^{*4} + 4f\,\rho^* D^* \delta^{*3} + f\,\rho^{*2} D^{*2} \delta^{*2}\right)}\right] y^* \qquad (۲۰)$$

$$\frac{Ja}{\Pr}x^* = \frac{16h - 5af\,\rho^{*3} D^{*3} + 2b\,\rho^{*2} D^{*2}}{2304f\,\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)} - \frac{12c\,\rho^* D^* - 1152\rho^* D^{*2} + 12f\,\rho^{*5} D^{*5}}{2304f\,\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)} + \frac{af\,\rho^{*4} D^{*4} - 8h\,\rho^* D^* - 2fb\,\rho^{*3} D^{*3}}{2304f\,\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)^2} + \frac{4c\,\rho^{*2} D^{*2} + 576\rho^{*2} D^{*3}}{2304f\,\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)^2} + \frac{b\,\rho^* D^* \ln\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)}{576f} + \frac{3f\,\rho^{*4} D^{*4} \ln\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right) - c\ln\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)}{576f} \qquad (۲۱)$$

براى تعيين رابطة صريح ضخامت فيلم مايع بر حسب طـول ترمسيفون ابتدا معادلة فوق به ازاى مقاديرموجود در جدول (۱) مطابق شكل (۴) رسـم مـىگـردد. بـا جايگـذارى مقـادير δ^* از شكل در معادلة (۱۹)، تغييـرات عـدد ناسـلت در طـول چگالنـده مطابق شكل (۵) خواهد شد.

۳-۲- با انتقال جرم

بمنظور اعمال انتقال جرم در فصل مشترک دو فاز و تاثيرآن روى پروفيل سرعت مايع و به دنبال آن روى ضريب انتقال حرارت بخش چگالنده، دوباره معادلة (۱۱) با شرايط مرزى (۱۲ و ۱۵) حل مىگردند. خلاصة حل معادلة ديفرانسيل (۱۱) با فرض ناچيز بودن سرعت مايع در برابر سرعت بخار و همچنين فرض $\rho^* >> 1$ و باجايگذارى سرعت متوسط بخار از رابطة (۱۴) بصورت رابطه (۲۲) است. قبل از جايگذارى معادلة (۲۲) در معادلة (۱۷) براى تعيين ضخامت فيلم مايع، جملة سوم و چهارم طرف راست معادلة (۲۲) با یک چند جمله اى درجة سه مطابق شكل (۳) تقريب زده شده است. بعد از جايگذارى نتايج شكل (۳) در معادلة (۱۶) تغييرات ضخامت فيلم مايع با انتقال جرم بين دو فاز بصورت معادله (۲۳) خلاصه شده است:

$$u_l^* = -\frac{1}{2}y^{*2} + \left[\frac{-3\rho^* D^{*2}\Pr - 6JaD^*\delta^* + 4f\,\Pr\delta^{*5}}{12f\,\Pr\delta^{*4}} \pm \frac{\left(9\rho^{*2} D^{*4}\Pr^2 + 48f\,\rho^* D^{*2}\Pr\delta^{*5}\right)^{\frac{1}{2}}}{12f\,\Pr\delta^{*4}} + \frac{\left(36Ja^2 D^{*2}\delta^{*2} + 36Ja\Pr\rho^{*2} D^{*2}\delta^*\right)^{\frac{1}{2}}}{12f\,\Pr\delta^{*4}}\right] y^* \qquad (۲۲)$$

$$\frac{Ja}{\Pr}x^* = \frac{h}{12f\,\Pr\delta^*} + \frac{\left(2D^*Ja - 12c + a\delta^{*2}\right)\ln\left(\delta^*\right)}{24f\,\Pr} - \frac{\rho^* D^{*2}}{4f\,\delta^*} \qquad (۲۳)$$

براي تعيين رابطة صريح ضخامت فيلم مايع بر حسب طـول ترمسيفون، ابتدا معادلة (۲۳) به ازاى مقادير موجـود در جـدول (۱) مطابق شكل (۶) رسم مىگـردد. حـال بـا جايگـذارى مقـادير δ^* از شكل (۶) در معادلة (۱۹)، تغييرات عدد ناسـلت در طـول كندانسور مطابق شكل (۷) خواهد شد.

٤- نتايج و بحث

در تمام شكلها، متانل به عنوان سيال عامل در دمـاي اشـباع ۶۳ درجة سانتيگراد و در داخل ترموسيفوني بـه طـولcm ۳۰/۵ وقطر داخلـيcm ۲/۴۲ بكـار گرفتـه شـده اسـت. دمـاي ديـوارة ترموسيفون ۳۸ درجة سانتيگراد در نظر گرفته شده است. شكل (۸) مقايسه اي بين عدد ناسـلت بـراي حالتهـاي بـا انتقـال جـرم وبدون انتقال جرم در طول چگالنده با اعداد ناسلت بدست آمـده از تحليـل جريـان آرام ناسـلت و همچنـين تحليـل انجـام گرفتـه توسط سبان و فقري را نشان مىدهد . همان طور كـه در شـكل (۸) مشخص است مقدار عدد ناسلت در تحليل ناسلت از مقـادير عدد ناسـلت بدسـت آمـده از تحليـل سـبان و فقـرى و همچنـين تحليلهاى انجام گرفته در مقاله بزرگتر است اين امر را مى توان ناشى از در نظر نداشتن تنش برشى در تحليـل ناسـلت دانـست. همانطور كه انتظار مىرفت در نظـر گـرفتن تـنش برشـى باعـث افـزايش ضـخامت فـيلم مـايع و در نتيجـه كـاهش عـدد ناسـلت گرديده است. همچنين مقايسة عدد ناسلت در دو حالت با انتقـال جرم و بدون انتقال جرم نشان مىدهد كـه اثـر انتقـال جـرم در تنش فصل مشترک دو فاز، باعث افزايش ضخامت فـيلم مـايع و

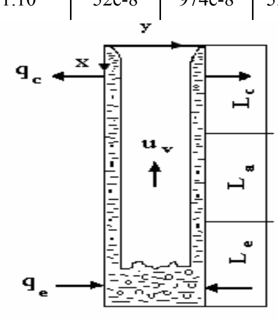
در نتيجه كاهش عدد ناسلت مـيگـردد. در شـكل (۹) مقايـسهاي بين عدد ناسلت در نقطة انتهايي چگالنده برحسب عدد ژاكوب، با عدد ناسلت بدست آمده از تحليلهاي ناسـلت و فقـري وهمچنـين بررسـی تجربـی هـو و تيـين(Ho and Tien) [۱۱و۱۲] در همـان نقطه، براي حالتهاي با انتقال جرم وبدون انتقال جرم نشان داده شده است. همانطور كه از اين شكل مشخص مـيشـود در نظـر گرفتن تنش فصل مشترك و همچنين اثـر انتقـال جـرم در تـنش فصل مشترك باعـث افـزايش ضـخامت فـيلم مـايع و در نتيجـه كاهش عدد ناسلت شده است.

۵- نتيجه گيری

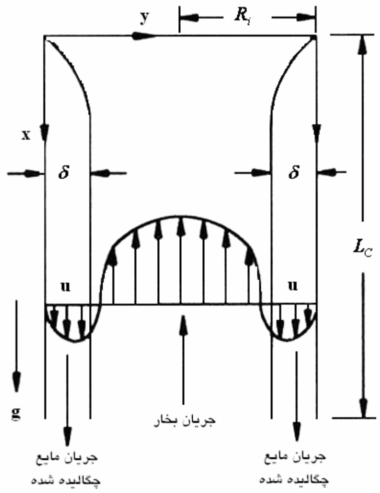
در اين تحقيق اثرات تنش برشي فصل مشترك مايع – بخار و همچنين انتقال جرم بين فازها در عملكرد حرارتي يك ترموسيفون قائم بصورت تحليلي مورد ارزيابي قرار گرفته است. براي اين منظور جملات غير خطي در پروفيل سرعت مايع با استفاده از روش برازش منحني با چند جمله ايهاي ساده جايگزين شده اند. ضرايب اين چند جمله ايها با استفاده از روش رگرسيون و روش تكرار گوس- نيوتن محاسبه گرديدند. نتايج مطابقت خوبي با نتايج تجربي هو و تين نشان ميدهد و اختلاف نتايج ناشي از خطاي تقريب جملات غير خطي پروفيل سرعت مايع، تقريب سرعت متوسط بخار بجاي سرعت موضعي و همچنين خطاي محاسباتي ميباشد. نتايج نشان ميدهند كه در نظر گرفتن تنش برشي فصل مشترك و همچنين انتقال جرم بين فازها باعث افزايش ضخامت فيلم مايع و به دنبال آن كاهش عدد ناسلت و ضريب انتقال حرارت مي گردد. در مجموع مي توان نتيجه گرفت كه در نظر نگرفتن اين دو عامل در تحليل حرارتي ترموسيفونها موجب بالاتر نشان دادن عملكرد حرارتي آنها نسبت به مقدار واقعي ميگردد.

جدول (۱): خواص و پارامترهای مورد استفاده در محاسبات

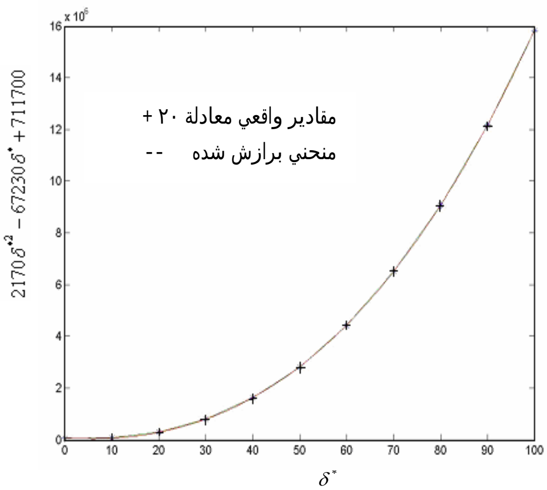
ρ_l (kg/m^3)	ρ_v (kg/m^3)	υ_l (m^2/s)	υ_v (m^2/s)	Pr	D (m)	h_{fg} (j/kg)
765	1.10	52e-8	974e-8	5.1	0.0242	1120



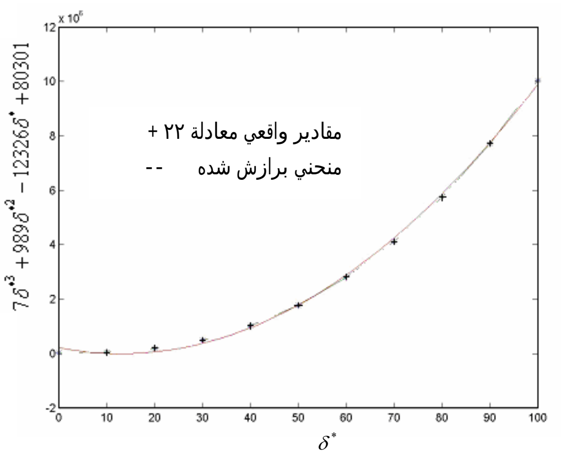
شكل (۱-الف): شماتيك ترموسيفون همراه با بخشهاي مختلف آن



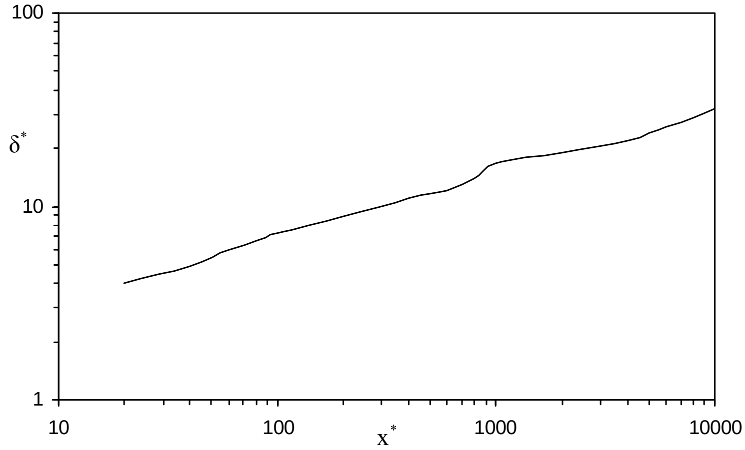
شكل (۱-ب): شماتيك پروفيل سرعت مايع و بخار در مقطعي از ترموسيفون قائم همراه با محورهاي مختصات



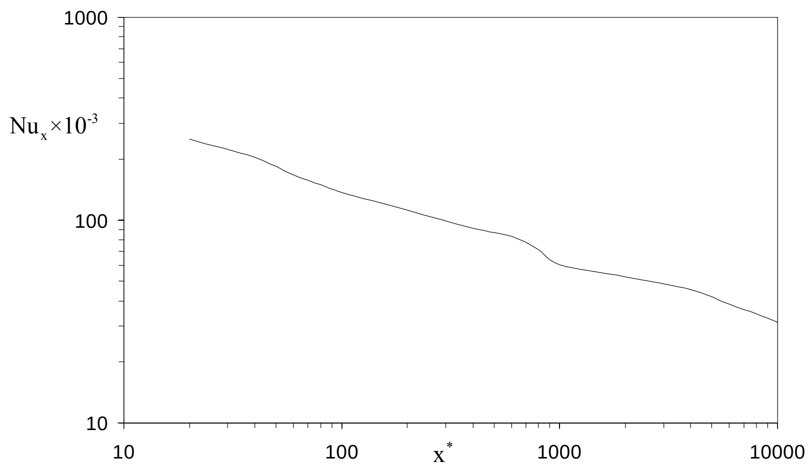
شكل(۲): برازش جملة سوم سمت راست معادلة (۲۰) بر حسب ضخامت بی بعد فيلم مايع



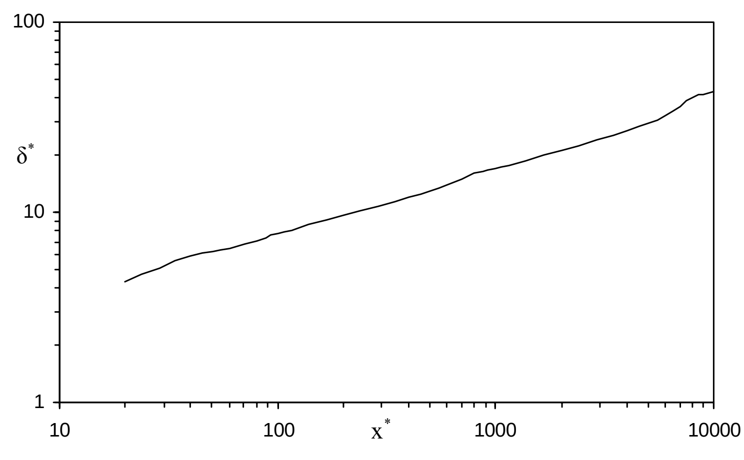
شكل(۳): برازش جملة سوم سمت راست معادلة (۲۲) بر حسب ضخامت بی بعد فيلم مايع



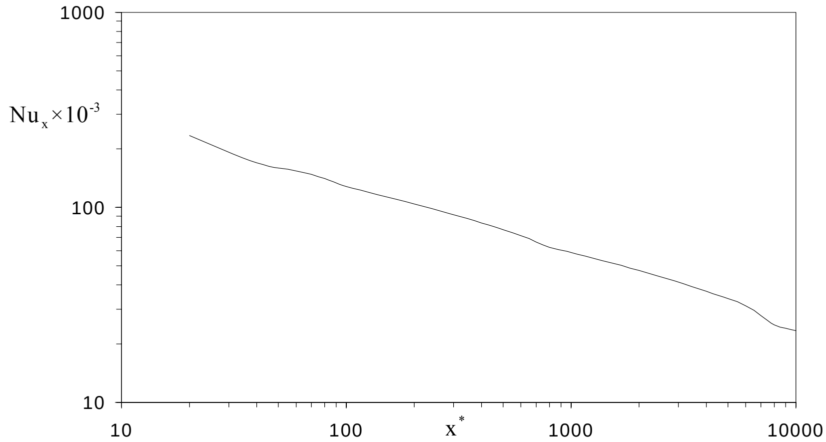
شکل (۴): ضخامت لایة مرزی در طول چگالنده (بدون انتقال جرم)



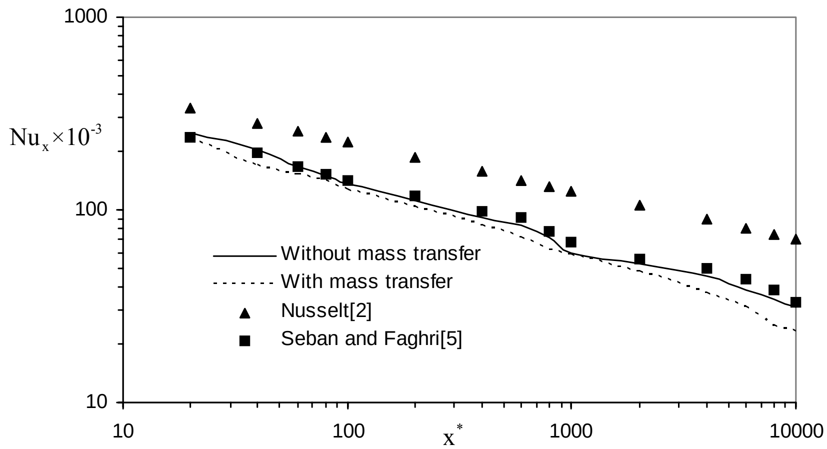
شکل (۵): عدد ناسلت در طول چگالنده (بدون انتقال جرم)



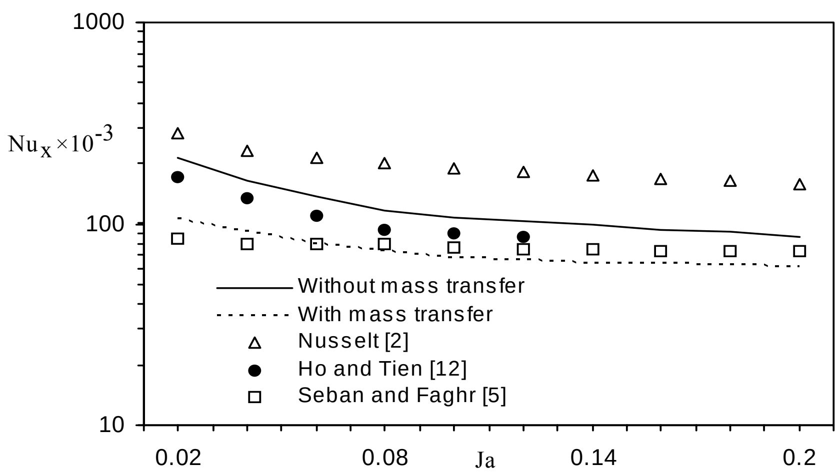
شکل (۶): ضخامت لایة مرزی در طول چگالنده(با انتقال جرم)



شکل (۷): عدد ناسلت در طول چگالنده (با انتقال جرم)



شکل (۸): مقایسه توزیع عدد ناسلت در طول چگالنده



شکل (۹): مقایسه توزیع عدد ناسلت بر حسب ژاکوب

۶- نمادها

C_p ظرفيت گرمايي ويژه

D قطر لوله

f ضريب اصطكاك فانينگ

g شتاب جاذبه

h ضريب جابجايي گرمايي

h_{fg} گرماي نهان تبخير

k ضريب هدايت گرمايي

$\dot{m}''$ نرخ جرم بخار مايع شده بر واحد سطح

T دما

u سرعت

حروف يوناني

δ ضخامت فيلم مايع

ρ چگالي

μ ويسكوزيته

اعداد بي بعد

Ja عدد ژاكوب

Nu عدد ناسلت

Pr عدد پرانتل

Re عدد رينولدز

زيرنويسها

l مايع

v بخار

sat اشباع

w ديواره

بالا نويسها

* بدون بعد

- متوسط

۷- مراجع

[۱] Lock, G.S.H.;*"The Tubular Thermo-syphon"*, Oxford Science Publications,1992.

[۲] Nusselt, W; *"Die Oberflachen kondensation der Wasserdampfes"*, Zeits chrift des vereines deutscher Ingenieure, Vol.60, PP.541-569, 1916.

[۳] Sparrow, E.M. and J.L.Gregg; *"A boundary–layer treatment of laminar-film condensation"*, J.Heat Transfer, Vol.81, pp.13-18, 1959.

[۴] Chen, M.M; "*An analytical study of laminar film condensation"*: Part 1-Flat plate,J.Heat Transfer, Vol.83,pp. 48-54, 1961.

[۵] Seban, R.A. and Faghri, A.; *Film Condensation in a Vertical Tube with a Closed Top*, Int. J.Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 6,pp.944-948, 1984.

[۶] Spendel, Th; *"Laminar Film Condensation Heat Transfer in Closed Two-Phase Thermosyphons*", proc.5th int.Heat Pipe Conf.,pp.208-213,Japan, 1984

[۷] Faghri, A; "*Heat Pipe Science and Technology*", Taylor&Francis, 1995.

[۸] Henstock, W.H and Hanratty, T.S; *"The Interfacial Drag and the Hight of the Wall Layer in Annular Flows"*, AIChE J., Vol. 22, p.990, 1976.

[۹] Prandtl, L; *"Essentials of Fluid Dynamics"*, Blackie & Son, London, p 117, 1969.

[۱۰] Pan, Y; *Condensation characterisics inside a vertical tube considering the presence of mass transfer, vapor velocity and interfacial shear*, *Int. J. Heat Mass Transfer* **44**, pp. 4475–4482, 2001.

[۱۱] Tien, C.L; Gerner, F.M. and Chen, S.L; "*General Film Condensation Correlations*", Experimental Heat transfer, Vol.1, PP.93-107, 1987.

[۱۲] Ho, W.K and Tien,C.L;, *"Reflux Condensation Characteristics of a Two-Phase Closed Thermosyphon"*, Proc. 4th In. Heat pipe Conf. London, 1981.