

اثر تنش و انتقال جرم فصل مشترک مایع-بخار بر روی عملکرد ترموسیفونها

علی نوری^۱؛ پدرام حنفی زاده^۲

چکیده

در این مقاله اثر تنش برشی و انتقال جرم در فصل مشترک فیلم مایع و جریان بخار روی عملکرد یک ترموسیفون با استفاده از روش انتگرالی بررسی شده است. با حل معادلات حاکم در بخش چگالنده، توزیع سرعت و ضخامت فیلم مایع به دست می‌آید. سپس دبی جرم فیلم مایع و نرخ انتقال حرارت قابل محاسبه است. نتایج برای یک ترموسیفون با طول ۳۰/۵ cm و قطر داخلی ۲/۴۲ cm با سیال عامل متانل در دمای اشباع ۶۳ درجه سانتیگراد و دمای دیوار ۳۸ درجه سانتیگراد انجام گرفته است. نتایج تحلیلی ارائه شده با نتایج تجربی و عددی محققین قبلی مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی

لوله گرمایی، ترموسیفون، انتقال حرارت و جرم، تنش برشی

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

کنار جدار داخلی لوله برای برگشت جریان مایع از چگالنده به تبخیر کننده می‌باشد. در صورتیکه لوله گرمایی بدون فتیله باشد یعنی عمل برگشت مایع از چگالنده به تبخیر کننده توسط نیروی جاذبه صورت گیرد، لوله گرمایی را ترموسیفون می‌نامند. ترموسیفون شامل سه بخش تبخیر کننده، آدیاباتیک و چگالنده است. بخش تبخیر کننده شامل استخری از سیال

۱- مقدمه

لوله‌های گرمایی یکی از وسایل انتقال گرما و وسیله‌ای بسیار ساده و در عین حال با کارایی بسیار بالا است. لوله گرمایی شامل لوله ای حاوی سیال عامل و فتیله ای در،

^۱ استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف؛ Email: anouri@sharif.edu

^۲ عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات؛ Email: hanafizadeh@srbiau.ir

گوس- نیوتن محاسبه می‌گردند.

۲- معادلات حاکم

با فرض کوچک بودن ضخامت فیلم مایع نسبت به قطر ترموسیفون، می‌توان از اثرات انحنای دیوار صرف نظر نمود و معادلات را در دستگاه مختصات کارتزین نوشت. بنابراین معادله حرکت آرام فیلم مایع روی جدار داخلی لوله ترموسیفون در بخش چگالنده (شکل ۱)، با صرف نظر از جملات جابجایی بصورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 u_l}{\partial y^2} + \frac{g}{\mu_l} (\rho_l - \rho_v) = 0 \quad (1)$$

که در رابطه ۱، μ, ρ به ترتیب چگالی و ویسکوزیته دینامیکی، u سرعت و اندیسهای l, v به ترتیب نشان دهنده فازهای مایع و بخار می‌باشند. لازم به ذکر است که این معادله در بخشهای چگالنده و آدیاباتیک ($L_c + L_a$) اعتبار داشته و در بخش تبخیر کننده L_e اعتبار ندارد (شکل ۱).

شرط مرزی سرعت در دیواره بصورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$u_l(0) = 0 \quad (2)$$

شرط مرزی میدان سرعت فیلم مایع در محل فصل مشترک مایع-بخار را می‌توان به صورتهای الف و ب نوشت:

الف- تنش برشی فصل مشترک بدون اثر انتقال جرم [۷]:

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

علامت منفی هنگامی است که بخار و مایع هم جهت و علامت مثبت هنگامی است که بخار و مایع در خلاف جهت یکدیگر باشند. در این رابطه δ ضخامت فیلم مایع و f ضریب اصطکاک فانینگ (fanning) است و می‌توان آنرا با استفاده از فرمولهای (الف-۴) محاسبه نمود [۸].

$$f = \frac{16}{Re_v} \quad Re_v < 2000 \quad (الف-۴)$$

$$f = \frac{Re_v^{0.33}}{1525} \quad 2000 < Re_v < 4000 \quad (ب-۴)$$

$$f = \frac{0.079}{Re_v^{0.25}} \quad 4000 < Re_v < 3 \times 10^4 \quad (ج-۴)$$

$$f = \frac{0.046}{Re_v^{0.2}} \quad 3 \times 10^4 < Re_v < 10^6 \quad (د-۴)$$

که در این فرمولها، عدد رینولدز به صورت $Re_v = \bar{u}_v D / \nu_v$ تعریف شده است. \bar{u}_v سرعت متوسط بخار است و می‌توان آنرا از رابطه (۵) محاسبه نمود:

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 نیروی جاذبه به طرف پایین یعنی بخش تبخیر کننده حرکت می‌کند و باعث تداوم سیکل می‌شود (شکل ۱). ترموسیفونها دارای قابلیت انتقال حرارت بالا در اختلاف دماهای کوچک بین چگالنده و تبخیر کننده هستند. همچنین دارای بازده گرمایی و قابلیت اطمینان بالایی می‌باشند و به علت سادگی ساخت، دارای قیمت تمام شده پائین بوده، از اینرو کاربردهای گسترده‌ای در صنایع گرمایی دارند. از جمله این کاربردها می‌توان به خنک کردن موتورها، گرمایش ساختمانها، سرمایش اضطراری راکتورها و خنک کردن کیتهای الکترونیکی اشاره نمود [۱].

ناسلت (Nusselt) برای اولین بار مسئله چگالش را بر روی دیواره عمودی بدون در نظر گرفتن تنش برشی فصل مشترک بررسی نمود [۲]. ناسلت اثر اینرسی را ناچیز فرض نمود و از آن در معادله ممنت ممنت نظر کرد. معادله ممنت کامل توسط اسپارو و گرگ (Sparrow and Gregg) بررسی گردید [۳]. نتایج آنها برای عدد ناسلت متوسط وقتی عدد پرانتل کمتر از 0.3 و عدد ژاکوب بزرگتر از 0.1 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 همخوانی بهتری با نتایج تجربی داشت. سبان و فقری (Seban and Faghri) [۵] تحلیل را برای رژیمهای آرام و آشفته در داخل ترموسیفون بصورت عددی انجام دادند. اسپندل (Spendel) [۶] نیز مسئله چگالش در ترموسیفون را با حل عددی معادله ممنت بخار در حالت آرام و تلفیق آن با تحلیل فیلم مایع انجام داد.

در این مقاله اثرات تنش فصل مشترک و انتقال جرم بین دو فاز بصورت تحلیلی بررسی می‌گردد. برای این منظور جمله‌های غیر خطی بدست آمده در پروفیل سرعت، با استفاده از برازش منحنی به چند جمله‌ای‌های ساده تبدیل می‌شوند تا به راحتی قابل انتگرالگیری باشند. ضرایب این روابط نیز بصورت بهینه از طریق روش کمترین مجموع مربعات و روش تکرار

$$u_{l,\delta}^*(0) = 0 \quad (12)$$

$$-\frac{\partial u_l^*}{\partial y^*} \Big|_{\delta^*} = \frac{1}{2} f \rho^* \left(\bar{u}_v^* v^{*\frac{1}{3}} \pm u_{l,\delta}^* \right)^2 \quad (13)$$

که سرعت متوسط بخار بی بعد بصورت رابطه (۱۴) است:

$$\bar{u}_v^* v^{*\frac{1}{3}} = \frac{4D^* \int_0^{\delta^*} u_l^* dy^*}{\rho^* (D^* - 2\delta^*)^2} \quad (14)$$

$$-\frac{\partial u_l^*}{\partial y^*} \Big|_{\delta^*} = \frac{1}{2} f \rho^* \left(\bar{u}_v^* v^{*\frac{1}{3}} \right)^2 + \quad (15)$$

$$\frac{d \int_0^{\delta^*} u_l^* dy^*}{dx^*} \left(\bar{u}_v^* v^{*\frac{1}{3}} + u_{l,\delta}^* \right) \quad (16)$$

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

$$-\frac{\partial u_l^*}{\partial y^*} \Big|_{\delta^*} = \frac{1}{2} \left| \bar{u}_v^* v^{*\frac{1}{3}} + u_{l,\delta}^* \right| \frac{d \int_0^{\delta^*} u_l^* dy^*}{dx^* (1 - e^{\phi^*})} \quad (17)$$

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

$$\phi^* = \frac{\int_0^{\delta^*} u_l^* dy^*}{f \rho^* x^* \left| \bar{u}_v^* v^{*\frac{1}{3}} + u_{l,\delta}^* \right|} \quad (18)$$

$$Nu_x^* = \frac{1}{\delta^*} \quad (19)$$

۳- روش حل معادلات

۳-۱- بدون انتقال جرم

برای رژیم جریان آرام و بدون انتقال جرم، ابتدا با حل معادله (۱۱) به کمک شرایط مرزی (۱۲ و ۱۳) و جایگذاری سرعت متوسط بخار از معادله (۱۴) پروفیل سرعت برای فیلم مایع بصورت رابطه (۲۰) می‌گردد. برای سهولت در انتگرال-گیری معادله (۱۶)، ابتدا جمله سوم و چهارم طرف راست معادله (۲۰) با یک چند جمله ای درجه دو مطابق شکل (۲) تقریب زده شده و سپس انتگرال‌گیری شده است. با جایگذاری معادله اصلاح شده (۲۰) در معادله (۱۶) تغییرات ضخامت فیلم مایع مطابق معادله (۲۱) خواهد بود.

$$\frac{\pi}{4} (D - 2\delta)^2 \rho_v \bar{u}_v = \int_0^\delta \pi D \rho_l u_l dy \quad (5)$$

ب- تنش برشی فصل مشترک با اثر انتقال جرم [۹]

$$-\mu_l \frac{\partial u_l}{\partial y} \Big|_{\delta} = \frac{1}{2} f \rho_v \bar{u}_v^2 + \dot{m}'' (\bar{u}_v \pm u_{l,\delta}) \quad (6)$$

که \dot{m}'' برابر نرخ بخار مایع شده بر واحد سطح است و می‌توان آنرا از رابطه (۷) محاسبه نمود:

$$\dot{m}'' = \frac{d}{dx} \int_0^\delta \rho_l u_l dy \quad (7)$$

همچنین شرط مرزی در محل فصل مشترک مایع-بخار را می‌توان بصورت رابطه (۸) که توسط پن (Pan) [۱۰] پیشنهاد شده است بیان نمود:

$$\mu_l \frac{\partial u_l}{\partial y} \Big|_{\delta} = \frac{1}{2} f \rho_v (\bar{u}_v - u_{l,\delta})^2 \frac{\phi}{1 - e^\phi} \quad (8-الف)$$

$$\phi = \frac{\dot{m}''}{f \rho_v |\bar{u}_v - u_{l,\delta}|} \quad (8-ب)$$

با فرض خطی بودن دما در فیلم مایع معادله انرژی بر واحد سطح برابر است با:

$$K_l \frac{(T_{sat} - T_{wc})}{\delta} = h_{fg} \frac{d}{dx} \int_0^\delta \rho_l u_l dy \quad (9)$$

ضریب انتقال حرارت در هر نقطه را می‌توان از رابطه (۱۰) محاسبه نمود:

$$h_x = \frac{k_l}{\delta} \quad (10)$$

برای حل معادلات یادشده ابتدا معادلات بصورت بی بعد در آورده می‌شوند. تعریف اعداد بی بعد عبارتند از:

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

$$\rho^* = \frac{\rho_v}{\rho_l}, \quad v^* = \frac{v_v}{v_l}, \quad u_l^* = u_l / \left(v_l g \right)^{\frac{1}{3}}$$

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

شکل بدون بعد معادلات یاد شده به ترتیب بصورت روابط (۱۱-۱۹) می‌باشد:

$$\frac{\partial^2 u_l^*}{\partial y^{*2}} + (1 - \rho^*) = 0 \quad (11)$$

انتقال جرم بین دو فاز بصورت معادله (۲۳) خلاصه شده است:

$$u_l^* = -\frac{1}{2}y^{*2} + \left[\frac{-3\rho^* D^{*2} \text{Pr} - 6\text{Ja} D^* \delta^{*5} + 4f \text{Pr} \delta^{*5}}{12f \text{Pr} \delta^{*4}} \pm \frac{\left(9\rho^{*2} D^{*4} \text{Pr}^2 + 48f \rho^* D^* \text{Pr} \delta^{*5}\right)^{\frac{1}{2}}}{12f \text{Pr} \delta^{*4}} + \frac{\left(36\text{Ja}^2 D^{*2} \delta^{*2} + 36\text{Ja} \text{Pr} \rho^* D^* \delta^{*2}\right)^{\frac{1}{2}}}{12f \text{Pr} \delta^{*4}} \right] y^* \quad (22)$$

$$\frac{\text{Ja}^* x^*}{\text{Pr}} = \frac{h}{12f \text{Pr} \delta^{*}} + \frac{\left(2D^* \text{Ja} - 12c + a\delta^{*2}\right) \ln(\delta^*)}{24f \text{Pr}} - \frac{\rho^* D^{*2}}{4f \delta^*} \quad (23)$$

برای تعیین رابطه صریح ضخامت فیلم مایع بر حسب طول ترمسیفون، ابتدا معادله (۲۳) به ازای مقادیر موجود در جدول (۱) مطابق شکل (۶) رسم می‌گردد. حال با جایگذاری مقادیر δ^* از شکل (۶) در معادله (۱۹)، تغییرات عدد ناسلت در طول کندانسور مطابق شکل (۷) خواهد شد.

۴- نتایج و بحث

در تمام شکلها، متانل به عنوان سیال عامل در دمای اشباع ۶۳ درجه سانتیگراد و در داخل ترموسیفونی به طول ۳۰/۵ cm قطر داخلی ۲/۴۲ cm بکار گرفته شده است. دمای دیواره ترموسیفون ۳۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. شکل (۸) مقایسه ای بین عدد ناسلت برای حالت‌های با انتقال جرم وبدون انتقال جرم در طول چگالنده با اعداد ناسلت بدست آمده از تحلیل جریان آرام ناسلت و همچنین تحلیل انجام گرفته توسط سبان و فقری را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۸) مشخص است مقدار عدد ناسلت در تحلیل ناسلت از مقادیر عدد ناسلت بدست آمده از تحلیل سبان و فقری و همچنین تحلیل‌های انجام گرفته در مقاله بزرگتر است این امر را می‌توان ناشی از در نظر نداشتن تنش برشی در تحلیل ناسلت دانست. همانطور که انتظار می‌رفت در نظر گرفتن تنش برشی باعث افزایش ضخامت فیلم مایع و در نتیجه کاهش عدد ناسلت گردیده است. همچنین مقایسه عدد ناسلت در دو حالت با انتقال جرم و بدون انتقال جرم نشان می‌دهد که اثر انتقال جرم در تنش فصل مشترک دو فاز، باعث افزایش ضخامت فیلم مایع و

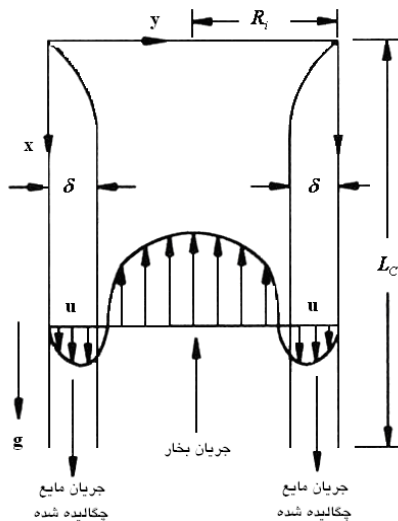
$$u_l^* = -\frac{1}{2}y^{*2} + \left[\frac{\left(8f \delta^{*5} + 10f \rho^* D^* \delta^{*4} - 6\rho^* D^{*2} + 3f \rho^{*2} D^{*2} \delta^{*3}\right)}{3\left(4f \delta^{*4} + 4f \rho^* D^* \delta^{*3} + f \rho^{*2} D^{*2} \delta^{*2}\right)} + \frac{\left(48f \rho^* D^{*2} \delta^{*5} + 42f \rho^{*2} D^{*3} \delta^{*4}\right)^{\frac{1}{2}}}{3\left(4f \delta^{*4} + 4f \rho^* D^* \delta^{*3} + f \rho^{*2} D^{*2} \delta^{*2}\right)} + \frac{\left(9\rho^{*2} D^{*4} + 9f \rho^{*3} D^{*4} \delta^{*3}\right)^{\frac{1}{2}}}{3\left(4f \delta^{*4} + 4f \rho^* D^* \delta^{*3} + f \rho^{*2} D^{*2} \delta^{*2}\right)} \right] y^* \quad (20)$$

$$\frac{\text{Ja}^* x^*}{\text{Pr}} = \frac{16h - 5af \rho^* D^{*3} + 2b \rho^{*2} D^{*2}}{2304f \left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)} - \frac{12c \rho^* D^* - 1152\rho^* D^{*2} + 12f \rho^{*5} D^{*5}}{2304f \left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)} + \frac{af \rho^{*4} D^{*4} - 8h \rho^* D^* - 2fb \rho^{*3} D^{*3}}{2304f \left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)^2} + \frac{4c \rho^{*2} D^{*2} + 576\rho^{*2} D^{*3}}{2304f \left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)^2} + \frac{b \rho^* D^* \ln\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)}{576f} + \frac{3f \rho^{*4} D^{*4} \ln\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right) - c \ln\left(2\delta^* + \rho^* D^*\right)}{576f} \quad (21)$$

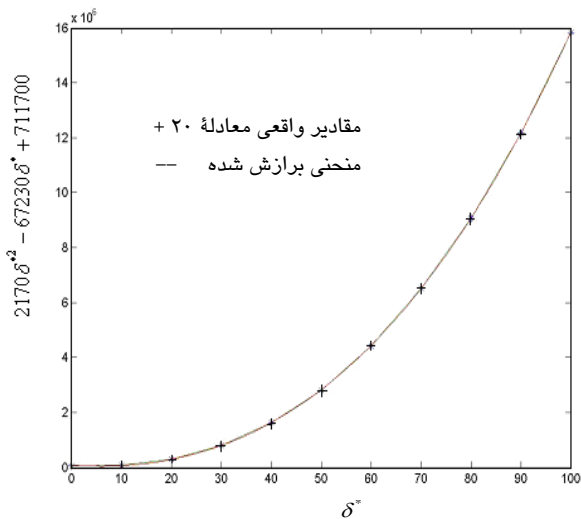
برای تعیین رابطه صریح ضخامت فیلم مایع بر حسب طول ترمسیفون ابتدا معادله فوق به ازای مقادیر موجود در جدول (۱) مطابق شکل (۴) رسم می‌گردد. با جایگذاری مقادیر δ^* از شکل در معادله (۱۹)، تغییرات عدد ناسلت در طول چگالنده مطابق شکل (۵) خواهد شد.

۳-۲- با انتقال جرم

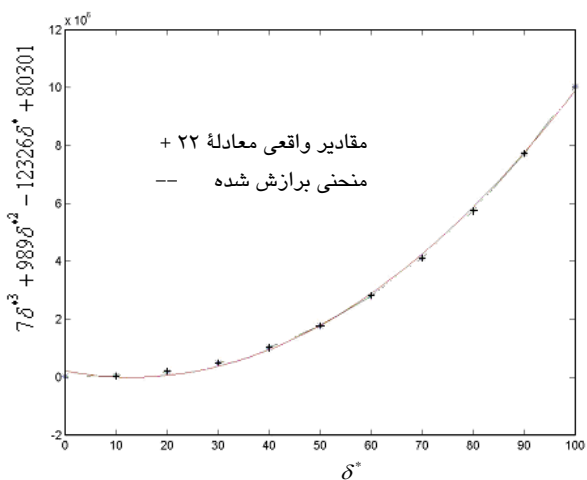
بمنظور اعمال انتقال جرم در فصل مشترک دو فاز و تاثیر آن روی پروفیل سرعت مایع و به دنبال آن روی ضریب انتقال حرارت بخش چگالنده، دوباره معادله (۱۱) با شرایط مرزی (۱۲ و ۱۵) حل می‌گردند. خلاصه حل معادله دیفرانسیل (۱۱) با فرض ناچیز بودن سرعت مایع در برابر سرعت بخار و همچنین فرض $\rho^* \ll 1$ و با جایگذاری سرعت متوسط بخار از رابطه (۱۴) بصورت رابطه (۲۲) است. قبل از جایگذاری معادله (۲۲) در معادله (۱۷) برای تعیین ضخامت فیلم مایع، جمله سوم و چهارم طرف راست معادله (۲۲) با یک چند جمله ای درجه سه مطابق شکل (۳) تقریب زده شده است. بعد از جایگذاری نتایج شکل (۳) در معادله (۱۶) تغییرات ضخامت فیلم مایع با



شکل (۱-ب): شماتیک پروفیل سرعت مایع و بخار در مقطعی از ترموسیفون قائم همراه با محورهای مختصات



شکل (۲): برازش جمله سوم سمت راست معادله (۲۰) بر حسب ضخامت بی بعد فیلم مایع



شکل (۳): برازش جمله سوم سمت راست معادله (۲۲) بر حسب ضخامت بی بعد فیلم مایع

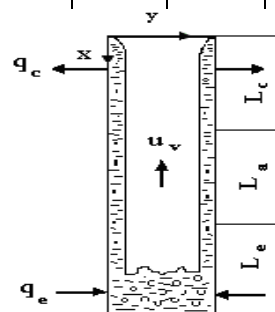
در نتیجه کاهش عدد ناسلت می‌گردد. در شکل (۹) مقایسه‌ای بین عدد ناسلت در نقطه انتهایی چکاننده برحسب عدد ژاکوب، با عدد ناسلت بدست آمده از تحلیلهای ناسلت و فقری و همچنین بررسی تجربی هو و تین (Ho and Tien) [۱۲ و ۱۱] در همان نقطه، برای حالت‌های با انتقال جرم وبدون انتقال جرم نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص می‌شود در نظر گرفتن تنش فصل مشترک و همچنین اثر انتقال جرم در تنش فصل مشترک باعث افزایش ضخامت فیلم مایع و در نتیجه کاهش عدد ناسلت شده است.

۵- نتیجه گیری

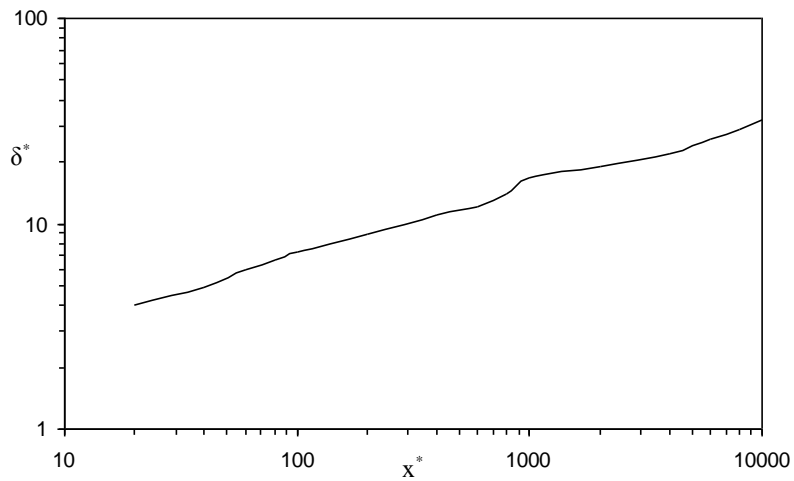
در این تحقیق اثرات تنش برشی فصل مشترک مایع - بخار و همچنین انتقال جرم بین فازها در عملکرد حرارتی یک ترموسیفون قائم بصورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور جملات غیر خطی در پروفیل سرعت مایع با استفاده از روش برازش منحنی با چند جمله ای‌های ساده جایگزین شده اند. ضرایب این چند جمله ای‌ها با استفاده از روش رگرسیون و روش تکرار گوس- نیوتن محاسبه گردیدند. نتایج مطابقت خوبی با نتایج تجربی هو و تین نشان می‌دهد و اختلاف نتایج ناشی از خطای تقریب جملات غیر خطی پروفیل سرعت مایع، تقریب سرعت متوسط بخار بجای سرعت موضعی و همچنین خطای محاسباتی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن تنش برشی فصل مشترک و همچنین انتقال جرم بین فازها باعث افزایش ضخامت فیلم مایع و به دنبال آن کاهش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت می‌گردد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در نظر نگرفتن این دو عامل در تحلیل حرارتی ترموسیفونها موجب بالاتر نشان دادن عملکرد حرارتی آنها نسبت به مقدار واقعی می‌گردد.

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

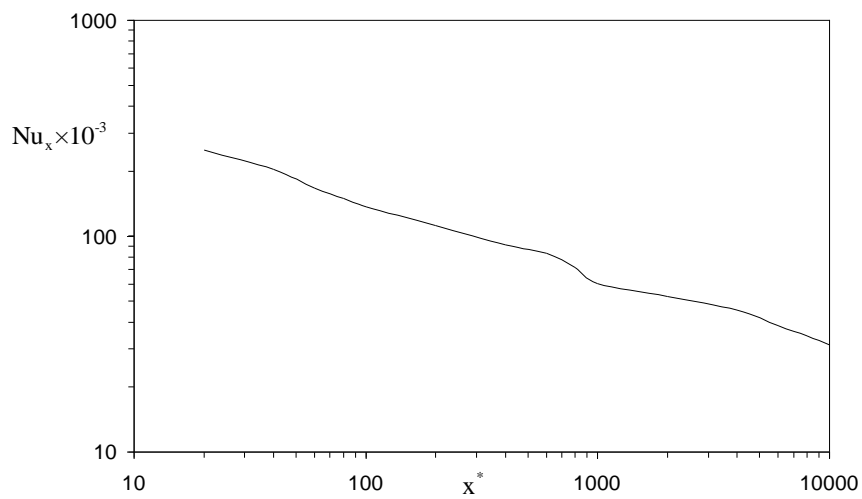
ρ_l (kg/m ³)	ρ_v (kg/m ³)	ν_l (m ² /s)	ν_v (m ² /s)	Pr	D (m)	h_{fg} (j/kg)
765	1.10	52e-8	974e-8	5.1	0.0242	1120



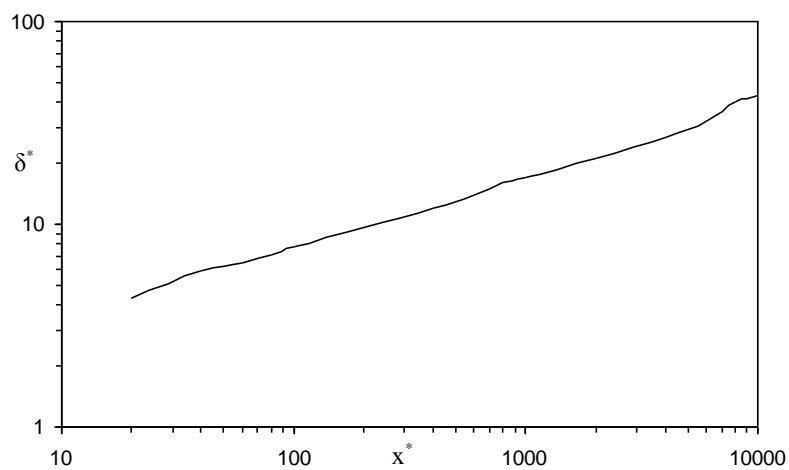
شکل (۱-الف): شماتیک ترموسیفون همراه با بخشهای مختلف آن



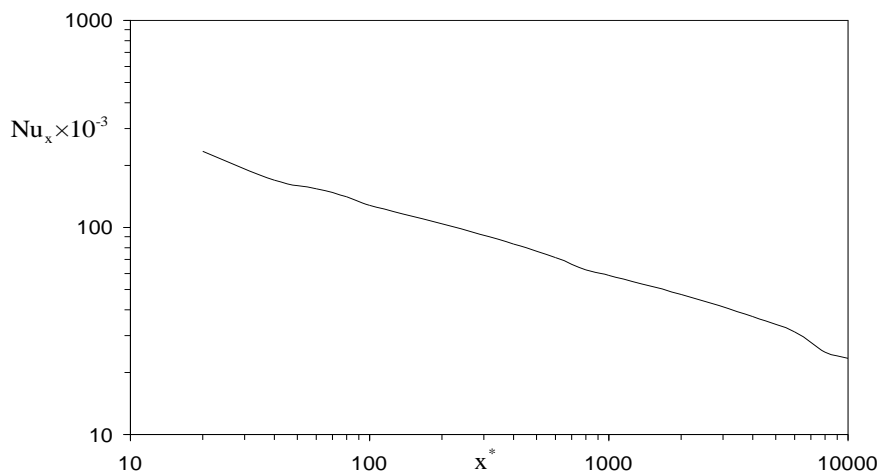
شکل (۴): ضخامت لایه مرزی در طول چکانده (بدون انتقال جرم)



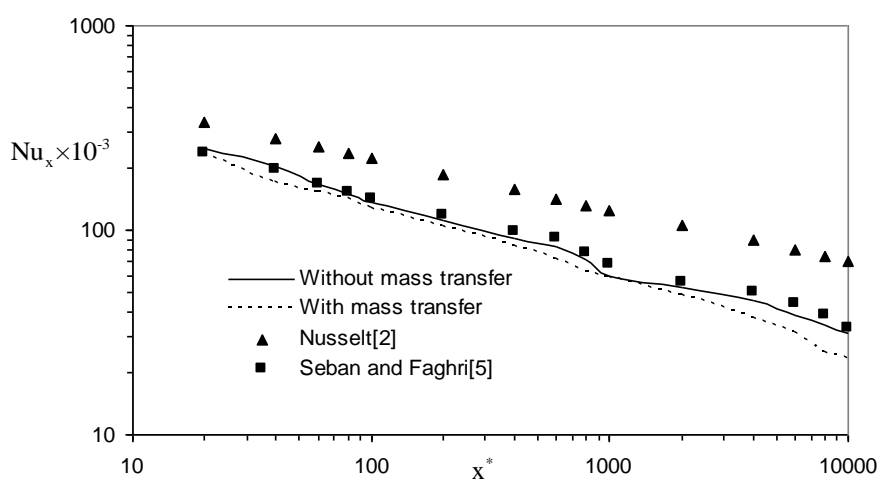
شکل (۵): عدد ناسلت در طول چکانده (بدون انتقال جرم)



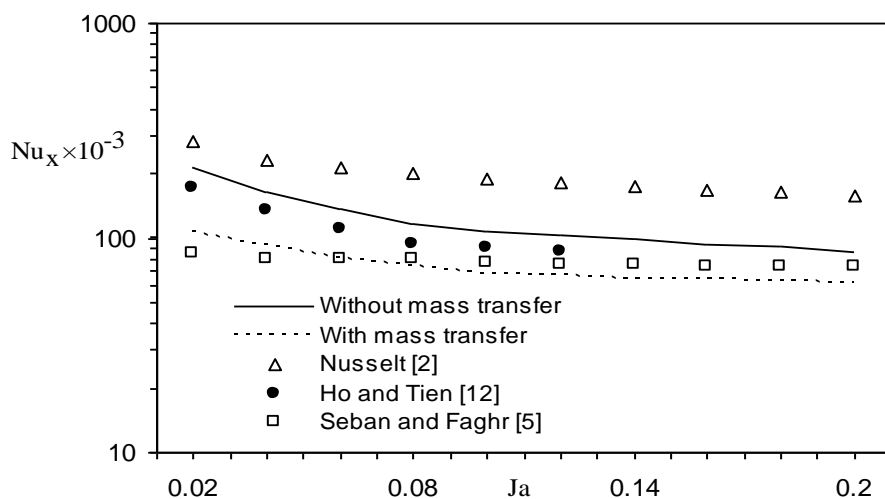
شکل (۶): ضخامت لایه مرزی در طول چکانده (با انتقال جرم)



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



۷- مراجع

۶- نمادها

- [۱] Lock, G.S.H.; "The Tubular Thermo-syphon", Oxford Science Publications, 1992.
- [۲] Nusselt, W; "Die Oberflachen kondensation der Wasserdampfes", Zeitschrift 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] Spindel, 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 characteristics 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.

- C_p ظرفیت گرمایی ویژه
- D قطر لوله
- f ضریب اصطکاک فانیگ
- g شتاب جاذبه
- h ضریب جابجایی گرمایی
- h_{fg} گرمای نهان تبخیر
- k ضریب هدایت گرمایی
- \dot{m}'' نرخ جرم بخار مایع شده بر واحد سطح
- T دما
- u سرعت
- حروف یونانی**
- δ ضخامت فیلم مایع
- ρ چگالی
- μ ویسکوزیته
- اعداد بی بعد**
- Ja عدد ژاکوب
- Nu عدد ناسلت
- Pr عدد پرانتل
- Re عدد رینولدز
- زیرنویسها**
- l مایع
- v بخار
- sat اشباع
- w دیواره
- بالا نویسها**
- * بدون بعد
- متوسط