

## اثر شتابهای عرضی بر عملکرد خنک کاری یک لوله حرارتی استوانه ای با شیارهای مارپیچ (HGHP)

حسین شکوهمند

استاد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

منصور نیکخواه بهرامی

استاد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مازیار امین

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۰/۱۰/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۱۱/۳، تاریخ تصویب ۸۲/۱۱/۱۸)

### چکیده

یک لوله حرارتی با شیار مارپیچ از جنس مس و با سیال عامل اتانول که به موازات محور اصلی یک هواپیمای جنگی قرار دارد، برای خنک کاری مدارات بال آن، در هنگام دور زدن در هوا، در نظر گرفته شده است. این هواپیما در حین این حرکت، بطور همزمان، هم دارای حرکت دورانی<sup>۱</sup> حول محوری در فضا و هم دارای حرکت چرخشی<sup>۲</sup> حول محور اصلی خود خواهد بود. محدوده موئینگی، هم برای شیارها بصورت جداگانه، و هم برای کل لوله حرارتی، در حالت پایا، با استفاده از یک مدل ریاضی، محاسبه شده است. مشاهده میشود که حد موئینگی کاملاً به شتاب دورانی ( $a_r$ )، سرعت زاویه ای چرخش ( $\omega_2$ ) و زاویه بال هواپیما ( $\Gamma$ ) وابسته میباشد و همچنین در مورد شیارها، حد موئینگی بستگی به زاویه شروع آنها در کندانسور ( $\Phi_0$ ) هم دارد. یک محدوده 1g تا 10g برای  $a_r$  و یک بازه  $[0.2-2]\pi$  rad/sec برای  $\omega_2$  در نظر گرفته شده است. در ادامه مشاهده میشود که حد موئینگی کل لوله ( $Q_{tot,cap}$ ) با افزایش مقدار  $a_r$  ابتدا کاهش و سپس افزایش خواهد یافت. لیکن اثر  $\omega_2$  بر  $Q_{tot,cap}$ ، بصورت کاهش خواهد بود. بعلاوه در مقایسه با کارهای انجام شده قبلی، خواهیم دید که دوران خالص بدون چرخش، باعث تخمین بیش از حد عملکرد HGHP خواهد شد. اگر چه در این مقاله حرکت کلی بصورت پایا در نظر گرفته شده است، ولی در حین چرخش، اثرات زوایای مختلف بال بر عملکرد HGHP بررسی گردیده است. این اثر بصورت کاهش حد موئینگی به ازای زوایای بزرگتر بال خواهد بود.

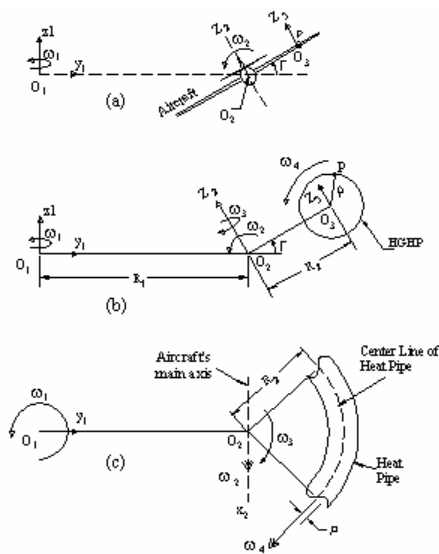
**واژه های کلیدی:** کنترل درجه حرارت، شتابهای عرضی، حرکات دورانی، خنک کاری مدارهای الکتریکی، لوله حرارتی استوانه ای، شیارهای مارپیچی

### مقدمه

گردند، استفاده از یک لوله حرارتی با شیارهای مارپیچ<sup>۳</sup>، بجای استفاده از لوله های حرارتی متداولیکه با شیارهای مستقیم هستند، توصیه میگردد (توماس، کلاوسینگ و یرکس، ۱۹۹۸). این شتابها ممکن است تا مقادیر بزرگی چون  $1g$  در هنگام مانور یا عملیات جنگی افزایش یابند. یک مدل ریاضی در سال ۱۹۹۸، توسط توماس، کلاوسینگ و یرکس، برای حالت پایا، به منظور بررسی حد موئینگی یک لوله حرارتی با شیارهای مارپیچ، از جنس مس و با سیال عامل اتانول ارائه گردید. در این بررسی مشخص شد که زمانیکه یک هواپیما در حال دور زدن میباشد، حد موئینگی HGHP، بصورت چشمگیری با افزایش شتاب دورانی ( $a_r$ ) افزایش خواهد یافت.

کنترل درجه حرارت یکی از مباحث بسیار مهم در تضمین عملکرد عادی مدارات الکترونیکی پیشرفته میباشد. به منظور در حد مطلوب نگهداشتن عملکرد این تجهیزات الکترونیکی، باید به نحوی حرارت تولید شده در آنها را خارج کرد. اهمیت دفع این حرارت در مواردی که این تجهیزات در هواپیماها یا فضا پیماها مورد استفاده قرار میگیرند، بیشتر است. در نظر گرفتن میدان شتاب بر عملکرد لوله های حرارتی ایکه در چنین شرائطی مورد استفاده قرار میگیرند و همچنین آگاهی از قابلیت لوله حرارتی برای منتقل کردن حرارت دریافتی از تجهیزات الکترونیکی، برای طراحان آنها بسیار ارزشمند است. چون این شتابها علاوه بر اینکه میتوانند بصورت خطی باشند، میتوانند عرضی ( بصورت شتابهای گریز از مرکز) هم اعمال

اصلی خودش اجتناب ناپذیر است. در این مقاله به بررسی ترکیب این دو حرکت خواهیم پرداخت. در شکل (۱) موقعیت هواپیما در هوا و در حین مانور ( چرخش همزمان با دوران ) در صفحه افق، نشان داده شده است. همچنین سرعتهای زاویه ای که در این وضعیت در سیستم وجود خواهد داشت، مشخص گردیده است. برای ایجاد یک شتاب یکنواخت وارده به کل HGHP و سهولت در محاسبات، فرض میکنیم که HGHP بصورت خمیده باشد (شکل ۱ (C)). بعلاوه، فرض میگردد که هواپیما با یک سرعت دوران ( $\omega_1$ ) ثابت در صفحه ای موازی زمین در حال چرخش است.



شکل ۱: موقعیت هواپیما در هوا: (a) تصویر از پشت هواپیما  
(b) موقعیت HGHP نسبت به هواپیما و مرکز دوران  
(c) تصویر از بالای هواپیما.

بنابر این اعمال یک شتاب گریز از مرکز ( $a_r$ ) نسبت به هواپیما غیر قابل اجتناب خواهد بود. چون ( $\omega_1$ ) نسبت به زمان تغییر نمیکند، هیچ شتاب مماسی ( $a_t$ ) نیز در مسیر حرکت آن وجود نخواهد داشت. علاوه بر این فرض میشود که هواپیما با سرعت زاویه ای ثابت ( $\omega_2$ ) حول محور خود بطور همزمان چرخش خواهد کرد. اگرچه سرعت زاویه ای در ابتدا و انتهای چرخش، تغییر خواهد کرد ولی به علت اینکه زمان شروع و پایان بسیار کوتاه میباشد، ( $\omega_2$ ) ثابت فرض میگردد. ذکر این نکته لازم است که چرخش هواپیما حول محور خودش، پس از رسیدن به یک زاویه معین به اتمام خواهد رسید و هواپیما در حین دوران، فقط در مدت زمان نسبتاً کوتاهی بطور هم

در بررسی کنونی، یک HGHP، مشابه موردیکه توسط افراد فوق الذکر مورد بررسی قرار گرفت، منتهی با طول گام بهینه شده (بهینه شده برای زمانیکه فرض میکنیم هواپیما فقط دوران دارد)، در نظر گرفته شده است. در این بررسی، خنک کاری برای تجهیزات الکترونیکی ای که نسبت به مرکز دوران دورتر هستند و برای حرکت در آوردن اهرم شهرها و فلپ های بال استفاده میگردند، در نظر گرفته شده است. نیاز به این بررسی از این جهت است که در حالت عادی، هیچ هواپیمایی نمیتواند بدون چرخش حول محور اصلی خود، پایداری لازم را در حین دور زدن داشته باشد. بنابراین بررسی اثرات ناشی از حرکت چرخشی و نیروهای ناشی از آن بر مایع درون شیارهای مستطیلی (HGHP)، حائز اهمیت خواهد بود. این شتاب چرخشی، همراه با شتاب دورانی هواپیما حول محوری در فضا و همچنین نیروی جاذبه زمین، مقادیر و برآیند جدیدی از نیروهای وارد شده بر مایع درون شیار را نتیجه میدهد. لذا، تحت این شتابهای عرضی، حد موئینگی متفاوتی نسبت به مقدار اولیه، قابل انتظار است. سر انجام یک مدل ریاضی که مستلزم استفاده از روش تکراری خواهد بود، ارائه میگردد.

## مدل ریاضی

یک مدل ریاضی، در سال ۱۹۹۸ توسط افراد فوق الذکر، در حالت پایا، به منظور بررسی حد موئینگی یک لوله حرارتی با شیارهای مارپیچ، از جنس مس و با سیال عامل اتانول ارائه گردید. در این بررسی مشخص شد که زمانیکه یک هواپیما در حال دور زدن میباشد، حد موئینگی HGHP بصورت چشمگیری با افزایش شتاب دورانی ( $a_r$ ) افزایش خواهد یافت.

در این بررسی، یک مدل ریاضی بر مبنای شبیه سازی تجربی ای که توسط توماس، کلاوسینگ و یرکس در سال ۱۹۹۸ انجام شده، ارائه گردیده است. در آن شبیه سازی، یک HGHP (مشابه جدول (۱))، منتهی با طول گام شیار  $p=1.3\text{in}$  بر روی میزی که با سرعت دورانی ثابت دوران میکرد، قرار داده شد. فاصله این HGHP تا مرکز میز بسیار کوچکتر از فاصله واقعی HGHP تا مرکز دوران هواپیما در فضا بود، ولی سرعت دوران میز طوری تنظیم میگردد که شتاب دورانی هواپیما در حین دور زدن، کاملاً برابر مقادیر واقعی شود. لیکن همانطور که قبلاً بیان گردید، در حین دور زدن هواپیما، چرخش هواپیما حول محور

### فرضیات

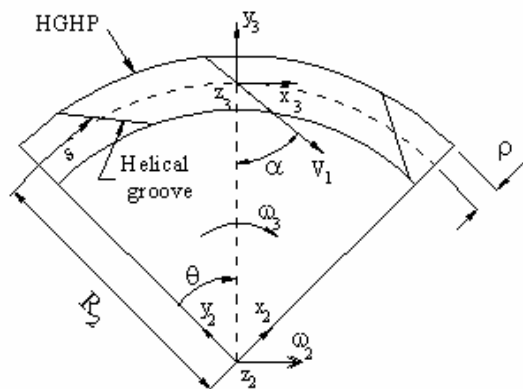
فرضیات زیرین در مورد مایع درون شیارهای مارپیچ توسط توماس، کلاوسینگ و یرکس، ۱۹۹۸، ارائه شده است:

۱. در کل طول لوله، شیارها بدون هیچ سر ریز و کاملاً پر از مایع میباشند.
۲. هیچ ارتباط و تداخلی بین مایع شیارهای مجاور وجود ندارد.
۳. بردار سرعت مایع در امتداد بردار  $x_4$  (مماس بر مسیر مارپیچ) میباشد.
۴. تقطیر و تبخیر بصورت یکنواخت در طول کندانسور و اواپراتور انجام میشود.
۵. سرعت مایع در داخل شیار میتواند برای شیارهای مختلف متفاوت باشد.

مطابق با فرضیات فوق، پروفیل سرعت در امتداد طول HGHP به صورت زیر بیان خواهد شد (سیلور اشتاین، ۱۹۹۲):

$$\vec{V}_l = \begin{cases} \left\{ \left( \frac{s}{L_c} \right) V_{l,max} \right\} \hat{e}_{x4} & 0 \leq s < L_c \\ \left\{ V_{l,max} \right\} \hat{e}_{x4} & L_c \leq s < L_c + L_a \\ \left\{ \left( \frac{L_l - s}{L_e} \right) V_{l,max} \right\} \hat{e}_{x4} & L_c + L_a \leq s < L_l \end{cases} \quad (1)$$

که:  $V_{l,max}$  سرعت مایع در قسمت آدیاباتیک میباشد. در شکل (۳)،  $V_l$  نشان داده شده است.

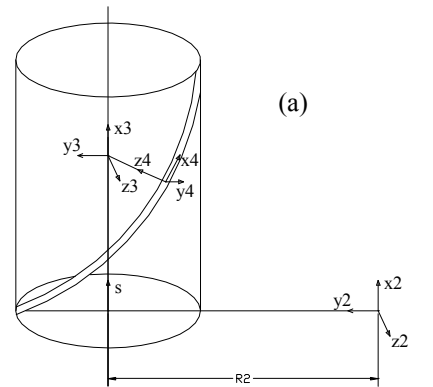


شکل ۳: هندسه یک شیار و موقعیت  $(x_2, y_2, z_2)$  و  $(x_4, y_4, z_4)$  با سرعتهای زاویه ای مربوطه.

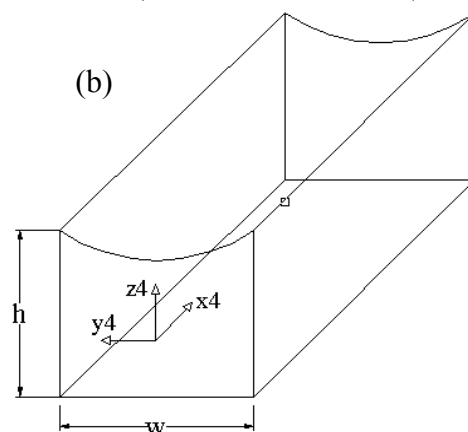
با این سرعت همانطور که قبلاً گفته شد میتوان  $\omega_3$  ای برای مایع نسبت به  $O_2$  و حول  $Z_2$  در نظر گرفت:

زمان چرخش هم خواهد داشت. چون مایع درون شیار در حین حرکت سیستم، نسبت به بدنه HGHP دارای اینرسی خواهد بود، سرعت زاویه ای  $(\omega_3)$  را میتوان بصورت سرعت زاویه ای مایع درون لوله، نسبت به  $(O_2)$  تعریف کرد. نیروی دیگری که به سیستم اعمال میگردد، نیروی جاذبه زمین میباشد که معمولاً نقش کمی در برابر شتابهای عرضی دیگر خواهد داشت. چارچوب اینرسی مرجع را که هواپیما حول آن دوران میکند، در نقطه  $(X_1, Y_1, Z_1)$  در نظر میگیریم. سیستم مختصاتی غیر اینرسی دیگری  $(X_2, Y_2, Z_2)$ ، در محل تقاطع محور اصلی هواپیما و محور بالهای آن قرار میدهیم (شکل ۱).

سیستم غیر اینرسی  $(X_3, Y_3, Z_3)$  هم، در روی محور لوله حرارتی قرار داده میشود که همگام با حرکت ذره مایع مورد بررسی، در درون شیار حرکت خواهد کرد (شکل ۲(a)). در نهایت دستگاه مختصات غیر اینرسی  $(X_4, Y_4, Z_4)$  در مرکز شیار در نقطه ای که دارای مقدار  $s$  یکسان با  $(X_3, Y_3, Z_3)$  است، منظور میشود (شکل ۲(b)). بردار  $x_4$  در امتداد مماس بر مسیر مارپیچ،  $Z_4$  بسمت مرکز لوله و  $y_4$  عمود بر  $x_4$  و  $Z_4$  میباشد.



(a)



شکل ۲: دستگاه مختصات هواپیما: (a) همراه با یک شیار (b) شیار مستطیلی HGHP.

بردار شتاب نقطه  $P$  که ذره ای از مایع درون شیار مارپیچ است، بر حسب مرجع اینرسی  $(X_1, Y_1, Z_1)$  بصورت زیر بدست میاید (مریام، ۱۹۷۵):

$$\begin{aligned} \vec{A}_P = \vec{A}_{O4/O1} = \vec{A}_{O4/O2} + \vec{A}_{O2/O1} + 2\vec{\omega}_{O2/O1} \\ \times \vec{V}_{O4/O2} + \vec{\omega}_{O2/O1} \times (\vec{\omega}_{O2/O1} \times \vec{O}_2\vec{O}_4) \\ + \vec{\omega}_{O2/O1} \times \vec{O}_2\vec{O}_4 \end{aligned} \quad (7)$$

که:

$$\begin{aligned} \vec{A}_P = \vec{A}_{O4/O1} = \vec{A}_{O4/O2} + \vec{A}_{O2/O1} + 2\vec{\omega}_{O2/O1} \\ \times \vec{V}_{O4/O2} + \vec{\omega}_{O2/O1} \times (\vec{\omega}_{O2/O1} \times \vec{O}_2\vec{O}_4) \\ + \vec{\omega}_{O2/O1} \times \vec{O}_2\vec{O}_4 \end{aligned} \quad (8)$$

که در نظر میگیریم:

$$|R_1| = o_1o_2, \quad |R_2| = o_2o_3, \quad |\rho| = o_3o_4, \\ \vec{\omega}_1 = \vec{\omega}_{O2/O1}, \quad \vec{\omega}_4 = \vec{\omega}_{O4/O3}$$

چون  $O_3$  نسبت به  $O_3$  هم حول محور  $X_2$  و هم حول محور  $Z_2$  دوران میکند، خواهیم داشت:

$$\vec{\omega}_{O3/O2} = \vec{\omega}_3 + \vec{\omega}_2 \quad (9)$$

که:  $\vec{\omega}_3 \perp \vec{\omega}_2$

اگر فرض کنیم حرکت چرخشی  $(\omega_2)$  بصورت پایاست،  $(\omega_2 = cte)$ ، آنگاه خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \vec{A}_{O4/O2} = \left[ \frac{d(\vec{\omega}_3)}{dt} \times \vec{R}_2 + (\vec{\omega}_3 + \vec{\omega}_2) \times \frac{d\vec{R}_2}{dt} \right] \\ + \left[ \frac{d\vec{\omega}_4}{dt} \times \vec{\rho} + \vec{\omega}_4 \times \frac{d\vec{\rho}}{dt} \right] + 2(\vec{\omega}_3 + \vec{\omega}_2) \\ \times [\vec{\omega}_4 \times \vec{\rho}] + (\vec{\omega}_3 + \vec{\omega}_2) \times [(\vec{\omega}_3 + \vec{\omega}_2) \times \vec{\rho}] \\ + \frac{d\vec{\omega}_3}{dt} \times \vec{\rho} \end{aligned} \quad (10)$$

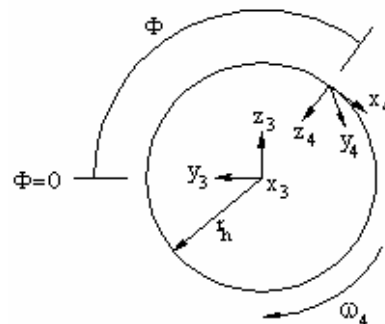
همچنین اگر فرض کنیم که هواپیما با سرعت زاویه ای ثابت حول محور  $Z_1$  در حال دوران است،  $(\dot{\omega}_1 = 0)$ ، میتوان بردار شتاب ذره  $P$  را بصورت زیرنوشت:

$$\vec{\omega}_3 = \left\{ -\frac{|\vec{V}_l| \sin \alpha}{R_2} \right\} \hat{e}_{z_2} \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{\omega}_3}{dt} = \begin{cases} \left\{ -\frac{V^2_{l,max} \sin \alpha}{2L_c R_2} \right\} \hat{e}_{z_2} & 0 \leq s < L_c \\ 0 & L_c \leq s < L_c + L_a \\ \left\{ \frac{V^2_{l,max} \sin \alpha}{2L_e R_2} \right\} \hat{e}_{z_2} & L_c + L_a \leq s < L_t \end{cases} \quad (3)$$

علاوه بر این، مایع درون شیارها، یک حرکت چرخشی حول محور HGHP خواهد داشت. سرعت زاویه ای ناشی از آن  $(\omega_4)$  بعلت تغییرات سرعت خطی مایع درون شیار (همانطور که در رابطه ۱ آمده است)، در طول لوله تغییر خواهد کرد. زاویه متناظر با هر  $s$  با  $\Phi$  (شکل ۴) در مقطع لوله بصورت زیر نشان داده میشود:

$$\phi = \phi_0 + \frac{2\pi s}{p} \quad (4)$$



شکل ۴: مقطع لوله حرارتی در کندانسور.

که  $\Phi_0$  زاویه شروع شیار مارپیچ در  $s=0$  میباشد. بنابراین سرعت زاویه ای و شتاب مایع درون آن در سیستم  $(X_3, Y_3, Z_3)$  برابر خواهد بود با:

$$\vec{\omega}_4 = \left\{ \frac{2\pi |\vec{V}_l| \sin \alpha}{p} \right\} \hat{e}_{x_3} \quad (5)$$

$$\frac{d\vec{\omega}_4}{dt} = \begin{cases} \left\{ \frac{\pi V^2_{l,max} \sin \alpha}{p L_c} \right\} \hat{e}_{x_3} & 0 \leq s < L_c \\ 0 & L_c \leq s < L_c + L_a \\ \left\{ -\frac{\pi V^2_{l,max} \sin \alpha}{p L_e} \right\} \hat{e}_{x_3} & L_c + L_a \leq s < L_t \end{cases} \quad (6)$$

و همچنین

$$\hat{I}_{(x1,y1,z1)} = \begin{bmatrix} \hat{e}_{x1} \\ \hat{e}_{y1} \\ \hat{e}_{z1} \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

و

$$\hat{I}_{(x2,y2,z2)} = \begin{bmatrix} \hat{e}_{x2} \\ \hat{e}_{y2} \\ \hat{e}_{z2} \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

و نهایتاً به ماتریس تبدیل زیر دست میابیم:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_{x2} \\ \hat{e}_{y2} \\ \hat{e}_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{e}_{x1} \\ \cos\Gamma \cdot \hat{e}_{y1} + \sin\Gamma \cdot \hat{e}_{z1} + R_1 \cos\Gamma \cdot \hat{e}_{y2} \\ -\sin\Gamma \cdot \hat{e}_{y1} + \cos\Gamma \cdot \hat{e}_{z1} - R_1 \sin\Gamma \cdot \hat{e}_{z2} \end{bmatrix} \quad (۱۹)$$

با استفاده از این تبدیل، میتوان بردارهای  $\bar{\omega}_1, \bar{R}_1$  را بر حسب دستگاه  $(X_2, Y_2, Z_2)$  نوشت:

$$\begin{aligned} \bar{R}_1 &= R_1 \cos\Gamma (1 - R_1 \cos\Gamma) \cdot \hat{e}_{y2} \\ &\quad - R_1 \sin\Gamma (1 + R_1 \sin\Gamma) \cdot \hat{e}_{z2} \end{aligned} \quad (۲۰)$$

و

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_1 &= \omega_1 \sin\Gamma (1 - R_1 \cos\Gamma) \cdot \hat{e}_{y2} \\ &\quad + \omega_1 \cos\Gamma (1 + R_1 \sin\Gamma) \cdot \hat{e}_{z2} \end{aligned} \quad (۲۱)$$

حال پارامترهایی را نیز که در دستگاه  $(X_4, Y_4, Z_4)$  هستند، بر حسب  $(X_2, Y_2, Z_2)$  می نویسیم. ابتدا با کمک تبدیل زیر، دستگاه  $(X_3, Y_3, Z_3)$  را با  $(X_2, Y_2, Z_2)$  مرتبط میسازیم:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_{x2} \\ \hat{e}_{y2} \\ \hat{e}_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_{x3} \\ \hat{e}_{y3} \\ \hat{e}_{z3} \end{bmatrix} \quad (۲۲)$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= r_h \cos\varphi \sin\theta \cdot \hat{e}_{x2} \\ &\quad + r_h \cos\varphi \cos\theta \cdot \hat{e}_{y2} + r_h \sin\varphi \cdot \hat{e}_{z2} \end{aligned} \quad (۲۳)$$

$$\begin{aligned} \bar{A}_p &= \bar{A}_{O4/O1} = \left[ \frac{d\bar{\omega}_3}{dt} \times \bar{R}_2 + (\bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_2) \times \frac{d\bar{R}_2}{dt} \right] \\ &\quad + \left[ \frac{d\bar{\omega}_4}{dt} \times \bar{\rho} + \bar{\omega}_4 \times \frac{d\bar{\rho}}{dt} \right] + 2(\bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_2) \\ &\quad \times [\bar{\omega}_4 \times \bar{\rho}] + (\bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_2) \times [(\bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_2) \times \bar{\rho}] \\ &\quad + \frac{d\bar{\omega}_3}{dt} \times \bar{\rho} + \bar{\omega}_1 \times \bar{R}_1 + \bar{\omega}_1 \times (\bar{\omega}_1 \times \bar{r}) + 2\bar{\omega}_1 \\ &\quad \times [\bar{\omega}_4 \times \bar{\rho} + (\bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_2) \times \bar{R}_2 + (\bar{\omega}_3 + \bar{\omega}_2) \times \bar{\rho}] \end{aligned} \quad (۱۱)$$

و بردار موقعیت  $\bar{\rho}, \bar{R}_2$ :

$$\bar{R}_2 = R_2 \sin\theta \cdot \hat{e}_{x2} + R_2 \cos\theta \cdot \hat{e}_{y2} \quad (۱۲)$$

$$\bar{\rho} = r_h \cos\varphi \cdot \hat{e}_{y3} + r_h \sin\varphi \cdot \hat{e}_{z3} \quad (۱۳)$$

### مطالعه شتاب سیال داخل شیار

در این مرحله هدف این است که شتاب نقطه  $P$  در داخل شیار، بر حسب  $(X_4, Y_4, Z_4)$  بیان گردد. بنابراین جملات مختلف شتاب، با استفاده از تعدادی انتقال مناسب، در چارچوب  $(X_4, Y_4, Z_4)$  نوشته خواهند شد. در ابتدا دنباله تبدیلی هستیم تا بتوان پارامترهایی که بر حسب دستگاه  $(X_2, Y_2, Z_2)$  بیان میشوند را بر حسب دستگاه  $(X_1, Y_1, Z_1)$  بیان نمود و سپس کلیه پارامترها را از دستگاه  $(X_2, Y_2, Z_2)$  بدستگاه  $(X_4, Y_4, Z_4)$  منتقل نمود. در مرحله اول نیاز است که دستگاه  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ، تحت یک انتقال و سپس یک دوران، بر روی دستگاه  $(X_2, Y_2, Z_2)$  کاملاً منطبق شود. این تبدیل را میتوان بصورت زیر نشان داد:

$$\hat{I}_{(x2,y2,z2)} = \hat{I}_{(x1,y1,z1)} \cdot T + \bar{d} \quad (۱۴)$$

که در آن  $\bar{d}$  و  $T$  بترتیب بردار انتقال و ماتریس دوران میباشند و بصورت زیر تعریف میشوند:

$$\bar{d} = R_1 \begin{bmatrix} 0 \\ \cos\Gamma \\ -\sin\Gamma \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

و

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Gamma & \sin\Gamma \\ 0 & -\sin\Gamma & \cos\Gamma \end{bmatrix} \quad (۱۶)$$

میتوان اندازه مؤلفه های شتاب را بر حسب

$$A_{x2} = B_2 \cdot r_h \cdot \sin \Phi + C_1 \cdot C_2 \cdot \rho_2 - C_2^2 \cdot \rho_1 - D_1 \cdot R_2 \cdot \cos \theta R_2 \cdot E^2 \cdot \sin \theta - 4\pi r_h \cdot |V_l| / p \cdot E \cdot C_1 \cdot \rho_3 - E \cdot (E \cdot \rho_1 + \omega_2 \cdot \rho_3) - D_1 \cdot \rho_2 - R_1 \cdot \omega_1 \cdot (1 - R_1 \cdot \cos \Gamma) \cdot (1 + R_1 \cdot \sin \Gamma) - (\omega_1 \cdot \sin \Gamma)^2 \cdot (1 - R_1 \cdot \cos \Gamma)^2 \cdot (R_2 \cdot \sin \theta + \rho_1) - (\omega_1 \cdot \cos \Gamma)^2 \cdot (1 + R_1 \cdot \sin \Gamma)^2 \cdot (R_2 \cdot \sin \theta + \rho_1) + \omega_1 \cdot \sin \Gamma \cdot (1 - R_1 \cdot \cos \Gamma) \cdot (C_1 \cdot \rho_2 - C_2 \cdot \rho_1 + \omega_2 \cdot \rho_2 \cdot \cos \theta + \omega_2 \cdot \rho_2) + \omega_1 \cdot \cos \Gamma \cdot (1 + R_1 \cdot \sin \Gamma) \cdot (C_1 \cdot \rho_3 + ER_2 \cdot \sin \theta + \omega_2 \cdot \rho_3)$$

(۳۳)

$$A_{y2} = -B_1 \cdot r_h \cdot \sin \Phi + C_1 \cdot C_2 \cdot \rho_1 - C_1^2 \cdot \rho_2 + D_1 \cdot R_2 \cdot \sin \theta R_2 \cdot (E^2 + \omega_2^2) \cdot \cos \theta - [E \cdot C_2 \cdot \rho_3 + 4\pi r_h \cdot |V_l| / p \cdot \omega_2 \cdot (C_1 \rho_2 - C_2 \cdot \rho_1)] - \rho_2 \cdot (E^2 + \omega_2^2) + D_1 \cdot \rho_1 + \omega_1^2 \cdot \cos \Gamma \cdot (1 + R_1 \cdot \sin \Gamma) \cdot [\rho_3 \cdot \sin \Gamma \cdot (1 - R_1 \cdot \cos \Gamma) - \cos \Gamma \cdot (R_2 \cdot \cos \theta + \rho_2) \cdot (1 + R_1 \cdot \sin \Gamma)] + \omega_1 \cdot \cos \Gamma \cdot (C_2 \cdot \rho_3 + ER_2 \cdot \cos \theta) \cdot (1 + R_1 \cdot \sin \Gamma)$$

(۳۴)

$$A_{z2} = B_1 \cdot \rho_2 - B_2 \cdot \rho_1 - C_1^2 \cdot \rho_3 - C_2^2 \cdot \rho_3 - R_2 \cdot \omega_2 \cdot E \cdot \sin \theta - \omega_2 \cdot C_1 \cdot \rho_3 \cdot 4\pi r_h \cdot |V_l| / p - \omega_2 \cdot (E \cdot \rho_1 + \omega_2 \rho_3) + \omega_1^2 \cdot \sin \Gamma \cdot (1 - R_1 \cdot \cos \Gamma) \cdot [\cos \Gamma \cdot (1 + R_1 \cdot \sin \Gamma) \cdot (R_2 \cdot \cos \theta + \rho_2) - \rho_3 \cdot \sin \Gamma \cdot (1 - R_1 \cdot \cos \Gamma)] - \omega_1 \cdot \sin \Gamma \cdot (1 - R_1 \cdot \cos \Gamma) \cdot (C_2 \cdot \rho_3 + ER_2 \cdot \cos \theta)$$

(۳۵)

حال بدنبال تبدیلی هستیم که بتواند ارتباط دهنده  $(x_2, y_2, z_2)$  با  $(x_4, y_4, z_4)$  باشد. در تبدیل زیر، مؤلفه های  $b_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) را طوری پیدا میکنیم که به هدف خود برسیم:

$$\begin{Bmatrix} \hat{e}_{x4} \\ \hat{e}_{y4} \\ \hat{e}_{z4} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b11 & b12 & b13 \\ b21 & b22 & b23 \\ b31 & b32 & b33 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{e}_{x2} \\ \hat{e}_{y2} \\ \hat{e}_{z2} \end{Bmatrix}$$

(۳۶)

بردار مکان ذره مایع درون شیار، نسبت به  $(x_2, y_2, z_2)$  بصورت زیر است:

$$\vec{r} = \vec{R}_2 + \vec{\rho} = \{(R_2 + r_h \cos \phi) \sin \theta\} \hat{e}_{x2} + \{(R_2 + r_h \cos \phi) \cos \theta\} \hat{e}_{y2} + \{r_h \sin \phi\} \hat{e}_{z2}$$

(۳۷)

اگر همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، شیارهای مارپیچ در جهت عقربه های ساعت چرخش کنند،

۹

$$\vec{\omega}_4 = \left\{ \frac{2\pi |\vec{V}_1|}{p} \sin \alpha \cos \theta \right\} \hat{e}_{x2} + \left\{ -\frac{2\pi |\vec{V}_1|}{p} \sin \alpha \sin \theta \right\} \hat{e}_{y2}$$

(۲۴)

و پس از مشتقگیری بر حسب زمان:

$$\frac{d\vec{\omega}_4}{dt} = \begin{cases} \left\{ \frac{B}{L_c} \cos \theta \right\} \hat{e}_{x2} + \left\{ -\frac{B}{L_c} \sin \theta \right\} \hat{e}_{y2} & 0 \leq s < L_c \\ 0 & L_c \leq s < L_c + L_a \\ \left\{ \frac{B}{L_e} \cos \theta \right\} \hat{e}_{x2} + \left\{ \frac{B}{L_e} \sin \theta \right\} \hat{e}_{y2} & L_c + L_a \leq s < L_t \end{cases}$$

(۲۵)

که:

$$B = \pi V_{lmax}^2 \sin \alpha / p$$

(۲۶)

با قرار دادن پارامترهای دخیل در شتاب ذره  $P$  در رابطه ۱۱ و تعریف پارامترهای کمکی زیر:

$$C_1 = 2\pi |V_l| \sin \alpha \cdot \cos \theta / p$$

(۲۷)

$$C_2 = -2\pi |V_l| \sin \alpha \cdot \sin \theta / p$$

(۲۸)

$$E = |V_l| \cdot \sin \alpha / R_2$$

(۲۹)

$$B_1 = \begin{cases} \frac{B \cdot \cos \theta}{L_c} & 0 \leq s < L_c \\ 0 & L_c \leq s < L_c + L_a \\ -\frac{B \cdot \cos \theta}{L_e} & L_c + L_a \leq s < L_t \end{cases}$$

(۳۰)

$$B_2 = \begin{cases} -\frac{B \cdot \sin \theta}{L_c} & 0 \leq s < L_c \\ 0 & L_c \leq s < L_c + L_a \\ \frac{B \cdot \sin \theta}{L_e} & L_c + L_a \leq s < L_t \end{cases}$$

(۳۱)

$$D_1 = \frac{d\vec{\omega}_3}{dt}$$

(۳۲)

$$b_{13} = (r_h \cos \phi) / |\bar{t}| \quad (۴۵)$$

$$b_{21} = \left\{ -r_h \cos \theta - \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \sin \phi \sin \theta \right\} / |\bar{t}| \quad (۴۶)$$

$$b_{22} = \left\{ r_h \sin \theta - \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \sin \phi \cos \theta \right\} / |\bar{t}| \quad (۴۷)$$

$$b_{23} = \left\{ \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \cos \phi \right\} / |\bar{t}| \quad (۴۸)$$

$$b_{31} = -\cos \phi \sin \theta \quad (۴۹)$$

$$b_{32} = -\cos \phi \cos \theta \quad (۵۰)$$

$$b_{33} = -\sin \phi \quad (۵۱)$$

### مطالعه حد موئینگی

لوله حرارتی زمانی بدرستی کار میکند که رابطه زیر برای افت فشار مربوط به حد موئینگی لوله حرارتی، صادق باشد (فقری، ۱۹۹۴ و جای، ۱۹۷۶):

$$\Delta P_{cap,max} \geq \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_{bf} \quad (۵۲)$$

و بیشینه مقدار فشار موئینگی:

$$\Delta P_{cap,max} = \frac{2\sigma}{r_c} \quad (۵۳)$$

شیار موئینگی در اینجا، برابر عرض شیار مستطیل میباشد  $r_c = W$

برای یک لوله حرارتی با مقطع دایروی که دارای گرمای ورود و خروج یکنواخت در طول اواپراتور و کندانسور میباشد، افت فشار در ناحیه بخار برابر خواهد بود با:

$$\Delta P_v = \frac{4\mu_v Q_{tot, cap}}{\pi \rho_v h_{fg} r_v^4} (L_e + 2L_a + L_c) \quad (۵۴)$$

نیروهای حجمی ای که بواسطه شتاب بیان شده در رابطه ۱۱، ایجاد شده، همراه با نیروی جاذبه، در امتداد مماس بر

علامت آخرین جمله، مثبت، و در غیر اینصورت منفی خواهد بود. با توجه به اینکه بردار یکه  $\hat{e}_{x4}$  مماس بر شیار ماریچ میباشد، بردار مماسی بصورت زیر میباشد:

$$\begin{aligned} \bar{t} = & \left\{ \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \cos \theta - r_h \sin \phi \sin \theta \right\} \hat{e}_{x2} \\ & + \left\{ - \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \sin \theta - r_h \sin \phi \cos \theta \right\} \\ & \hat{e}_{y2} + \{ r_h \cos \phi \} \hat{e}_{z2} \end{aligned} \quad (۳۸)$$

و اندازه آن:

$$|\bar{t}| = \sqrt{\left[ \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \right]^2 + r_h^2} \quad (۳۹)$$

جهت  $\hat{e}_{x4}$  از ذره مایع درون شیار، به سمت مرکز لوله (در  $S$  متناظر با ذره) میباشد.

$$\begin{aligned} \hat{e}_{z4} = -\frac{\bar{\rho}}{|\bar{\rho}|} = & \{ -\cos \phi \sin \theta \} \hat{e}_{x2} + \\ & \{ -\cos \phi \cos \theta \} \hat{e}_{y2} + \{ -\sin \phi \} \hat{e}_{z2} \end{aligned} \quad (۴۰)$$

همچنین بردار یکه  $\hat{e}_{x4}$ ، عمود بر  $\bar{t}$ ،  $\hat{e}_{y4}$ ، میباشد:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{z4} = \hat{e}_{z4} \times \bar{t} = & \left\{ -r_h \cos \theta - \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \sin \phi \sin \theta \right\} \hat{e}_{x2} \\ & + \left\{ r_h \sin \theta - \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \sin \phi \cos \theta \right\} \hat{e}_{y2} \\ & + \left\{ \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \cos \phi \right\} \hat{e}_{z2} \end{aligned} \quad (۴۱)$$

که بردار یکه  $\hat{e}_{x4}$  بصورت زیر است:

$$\hat{e}_{y4} = \bar{h} / |\bar{h}| = \bar{h} / |\bar{t}| \quad (۴۲)$$

مؤلفه های ماتریس انتقال در رابطه ۳۶ برابر خواهند بود با:

$$b_{11} = \left\{ \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \cos \theta - r_h \sin \phi \sin \theta \right\} / |\bar{t}| \quad (۴۳)$$

$$b_{12} = \left\{ - \left( \frac{p}{2\pi R_2} \right) (R_2 + r_h \cos \phi) \sin \theta - r_h \sin \phi \cos \theta \right\} / |\bar{t}| \quad (۴۴)$$

تکرار استفاده کرد. روند انجام این کار بصورت مراحل زیر است:

۱. یک مقدار اولیه برای کل ظرفیت حرارتی لوله در نظر میگیریم  $Q_{tot, cap} = Q_{ti}$ .

۲. بررسی را با شیاریکه در کندانسور دارای زاویه شروع صفر است ( $\Phi_0=0$ )، آغاز میکنیم. همچنین فرض میکنیم که حرارت منتقل شده توسط آن شیار برابر  $Q_{g, cap} = \Delta Q_{g, cap}$  باشد؛ که  $\Delta Q_{g, cap}$  گام افزایش مییابد.

۳. محاسبه سمت راست و چپ نامساوی ۶۰

۴. اگر نامساوی صدق کرد، مقدار  $Q_{g, cap}$  را باندازه  $\Delta Q_{g, cap}$  افزایش میدهیم و دو مرتبه برقرار بودن نامساوی را بررسی میکنیم. این عمل را تا هنگامی انجام میدهیم که نامساوی برقرار نباشد.

۵. مراحل ۲ تا ۴ را برای هر شیار تکرار میکنیم.

۶. گرمای منتقل شده توسط HGHP را برابر مجموع گرمای منتقل شده توسط کلیه شیارها، قرار میدهیم:

$$Q_{tot, cap} = \sum_{j=1}^{N_g} (Q_{g, cap})_j \quad (61)$$

۷. از مقدار  $Q_{tot, cap}$  بدست آمده در مرحله قبل، بعنوان مقدار ورودی مرحله ۱ استفاده میکنیم.

۸. مراحل ۱ تا ۷ را تا جایی ادامه میدهیم که  $Q_{g, cap}$  و  $Q_{tot, cap}$  همگرا شوند.

قابلیت برگرداندن مایع از کندانسور به اواپراتور از طریق شیارها، کاملاً وابسته به زاویه شروع هر شیار در کندانسور و همچنین طول گام ماریچ دارد. در سال ۱۹۹۸، توماس، کلاوسینگ و یرکس، نشان دادند که بهینه ترین مقدار برای نسبت طول گام ماریچ به طول لوله حرارتی ( $p/L_t$ ) برابر ۲ میباشد. یعنی کلیه شیارها باندازه  $\pi$  rad در طول لوله میچرخند. بعلاوه، اگرچه عمده شیارها، در انتقال حرارت از اواپراتور به کندانسور مشارکت میکنند، ولیکن مقادیر گرمای انتقال داده شده ممکن است تغییر کند و حتی بعضی شیارها ممکن است بکلی مانع بازگشت مایع گردند. در این بررسی وابستگی خواص مختلف اتانول مانند: لزجت و دانسیته در هر دو حالت مایع و بخار، مقدار گرمای تبخیر و کشش سطحی، با دما در نظر گرفته شده است و بکمک یک سابروتین در برنامه کامپیوتری تهیه شده، از

طول شیار، انتگرالگیری میشوند تا بتوان افت فشار ناشی از نیروهای حجمی را بدست آورد:

$$\Delta P_{bf} = -\rho_l \left( \int_0^{L_g} \hat{e}_{x4} \cdot (-\bar{A}_p + \{-g\} \hat{e}_{z2}) dx_4 \right) \quad (55)$$

$$L_g = \sqrt{\left( \frac{2\pi r_h}{p} \right)^2 + 1} \quad (56)$$

$$\Delta P_{bf} = -\rho_l \sqrt{\left( \frac{2\pi r_h}{p} \right)^2 + 1} \times \left[ \int_0^{L_g} \hat{e}_{x4} \cdot (-\bar{A}_p + \{-g\} \hat{e}_{z2}) ds \right] \quad (57)$$

و افت فشار برای مایع:

$$\Delta P_l = \int_0^{L_g} \frac{\mu_l \dot{m}_l}{\rho_l A_w K} dx_3 = \frac{\mu_l Q_{g, cap} (f_l Re_l) (L_e + 2L_a + L_c)}{4\rho_l r_l^2 h w h_{fg}} \times \sqrt{\left( \frac{2\pi r_h}{p} \right)^2 + 1} \quad (58)$$

و ضریب Drag درون شیار مستطیلی بصورت زیر توسط شاه و باتی ارائه گردیده است:

$$f_l Re_l = 24(1 - 1.3553\beta + 1.9467\beta^2 - 1.7012\beta^3 + 0.9564\beta^4 - 0.2537\beta^5) \quad (59)$$

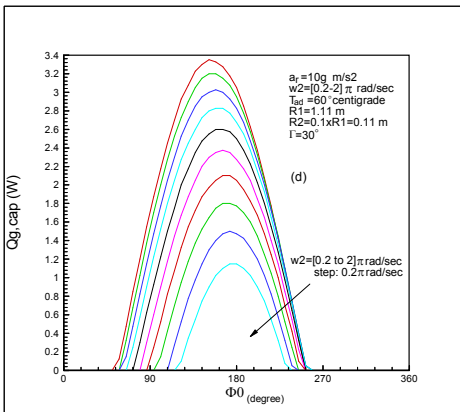
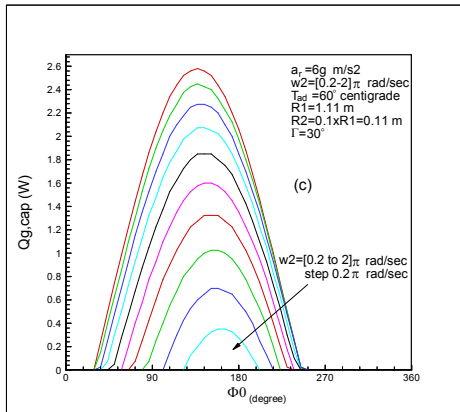
که  $0 \leq \beta \leq 1$  و  $\beta = w/h$

با استفاده از روابط ۵۲ تا ۵۸ خواهیم داشت:

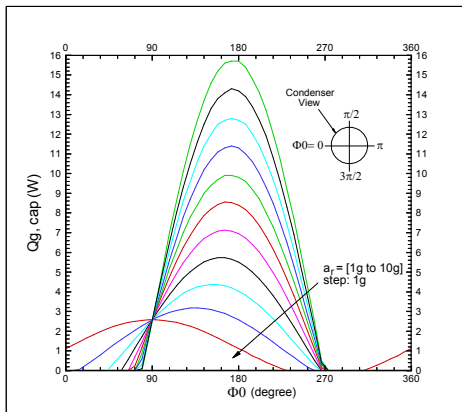
$$\frac{2\sigma}{w} \geq \frac{(L_e + 2L_a + L_c)}{h_{fg}} \times \left\{ \frac{4\mu Q_{tot, cap}}{\pi\rho_l r_l^4} + \frac{\mu_l Q_{g, cap} (f_l Re_l)}{4\rho_l r_l^2 h w} \sqrt{\left( \frac{2\pi r_h}{p} \right)^2 + 1} \right\} - \rho_l \sqrt{\left( \frac{2\pi r_h}{p} \right)^2 + 1} \left[ \int_0^{L_g} \hat{e}_{x4} \cdot (-\bar{A}_p + \{-g\} \hat{e}_{z2}) ds \right] \quad (60)$$

این نامساوی باید برای کلیه شیارها صادق باشد. چون ظرفیت انتقال حرارت هر لوله حرارتی و شیارهای آن از ابتدا مشخص نیستند، باید از مقادیر تخمینی اولیه و روش





شکل ۵:  $Q_{tot, cap}$  بازای زاویه شروع ماریچ برای هر شیار، در حالت ترکیب دوران با چرخش، در  $\Gamma=30^\circ$ ،  $T_{ad}=60^\circ C$ ،  $a_r=10g$  (d)  $a_r=6g$  (c)  $a_r=4g$  (b)  $a_r=1g$  (a)



شکل ۶:  $Q_{tot, cap}$  بازای زاویه شروع ماریچ برای هر شیار، در حالت دوران خالص در  $T_{ad}=60^\circ C$

همچنین در شکل (۵) مشاهده میگردد که با افزایش مقدار  $a_r$  از  $1g$  تا  $10g$ ، عمدتاً، گرمای منتقل شده از طریق شیارها افزایش خواهد یافت؛ با اینحال تعداد شیارهایی که گرمائی انتقال نمیدهند، افزایش خواهد داشت. علاوه بر این نقطه Peak گرمای منتقل شده توسط شیارها بتدریج با افزایش  $a_r$  بسمت  $\Phi_0$  های بزرگتر

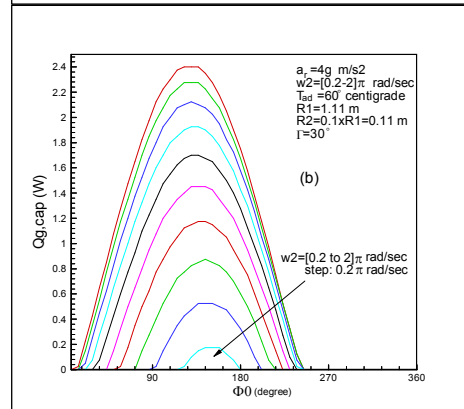
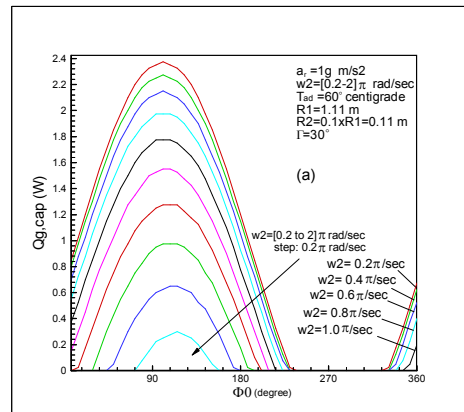
مقادیر جدول خواص اتانول، میانبایی بعمل می آید. در این بررسی از انتقال حرارت در دیواره لوله صرفنظر شده است. همانطور که در فرضیات گفته شد، هیچ ارتباط و تداخلی بین مایع درون شیارهای مجاور وجود ندارد؛ برای بررسی این فرضیه، به بررسی عدد Bond خواهیم پرداخت. این عدد نسبت نیروهای حجمی به کشش سطحی میباشد:

$$Bo = \frac{\rho_l r_l |\vec{A}_{res}|}{2\sigma / w} \quad (62)$$

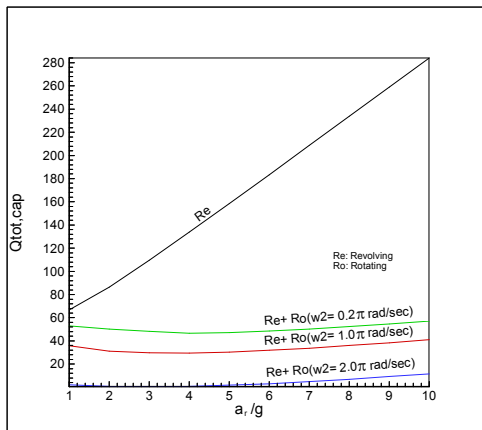
که  $\vec{A}_{res}$  برآیند بردار شتاب در جهت  $z_4$ ،  $y_4$  میباشد. چنانچه عدد Bond از یک کوچکتر باشد، فرضیه ما صحیح است.

## نتایج و بحث

شکل (۵) نشان دهنده حد موئینگی هر شیار، بازای زاویه شروع شیار در کندانسور میباشد. مشاهده میگردد که با افزایش شتاب دورانی از  $1g$  تا  $10g$ ، در  $\omega_2=0.2\pi \text{ rad/sec}$  بیشینه گرمای انتقالی توسط شیارها، از  $2.3W$  به  $3.3W$  افزایش خواهد یافت که دارای افزایشی برابر ۴۲٪ است. معهدا این مقدار در برابر حالتیکه دوران صرف داریم ناچیز میباشد (شکل ۶).



زاویه چرخش واقعی ای است که یک هواپیما در حین دور زدن به آن دست میابد؛ این زاویه گاه تا حدود  $90^\circ$  نیز میرسد. بر عکس در یک زاویه معین  $\Gamma$ ، مقادیر بزرگتر  $\omega_2$ ، مقادیر کمتری برای  $Q_{tot, cap}$  نتیجه میدهد.



شکل ۸: تغییرات  $Q_{tot, cap}$  با  $a_r$  در دو حالت دوران خالص و ترکیب دوران با چرخش، در  $T_{ad}=60^\circ C$  و  $\Gamma=10^\circ$ .

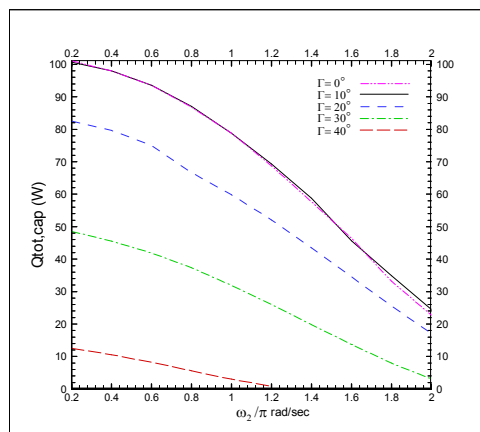
جدول ۱: مشخصات لوله حرارتی.

شیار مارپیچی	نوع سازه فنیله
اتانول	سیال عامل
0.4572m	طول کل لوله، $L_t$
0.1524m	طول ناحیه کندانسور، $L_c$
0.1016m	طول ناحیه آدیاباتیک، $L_a$
0.1524m	طول ناحیه اواپراتور، $L_e$
0.01588m	قطر خارجی لوله، $D_o$
0.000766m	ضخامت دیواره لوله، $t_w$
0.01346m	قطر مجرای بخار، $D_v$
1.1 lm	شعاع دوران، $R_1$
0.1 lm	شعاع چرخش، $R_2$
مس	جنس دیواره
0.9144m	طول گام، $p$
0.00044m	ارتفاع شیار، $h$
0.00047m	عرض شیار، $w$
50	تعداد شیارها

شکل (۸) مقادیر  $Q_{tot, cap}$  را بر حسب  $a_r$  هم در حالت دوران خالص و هم در دوران همراه با چرخش نشان میدهد. در یک شتاب معین  $a_r$ ، اگر  $\omega_2$  افزایش یابد،  $Q_{tot, cap}$  کاهش خواهد یافت. همچنین در  $\omega_2$  ثابت، در

پیش خواهد رفت. این نکته حائز اهمیت است که در کلیه مقادیر  $a_r$  که در محدوده 1g تا 10g هستند، تعدادی از شیارها که تقریباً در محدوده  $\Phi_0=[250^\circ, 330^\circ]$  قرار دارند، هرگز گرمائی را منتقل نمیکنند. از طرف دیگر، افزایش در سرعت زاویه ای چرخش از  $0.2\pi \text{ rad/sec}$  تا  $2\pi \text{ rad/sec}$  منجر به کاهش شدید در مقدار  $Q_{tot, cap}$  میگردد. در مقایسه شکل (۵) با شکل (۶) میتوان دریافت که یک تخمین دست بالا در مقدار گرمای بیشبند منتقل شده توسط شیارها، هنگامیکه بررسی، تنها در حالت دوران انجام میشود، وجود خواهد داشت. بطور مثال، در حالت دوران تنها، نسبت به حالت دوران+چرخش، در  $a_r=10g$ ،  $\omega_2=0.2\pi \text{ rad/sec}$  و در زاویه بال  $30^\circ$  خطائی معادل ۳۷۳٪ وجود خواهد داشت.

این نتایج این حقیقت را مشخص میکند که چرخش هواپیما سبب ایجاد مؤلفه ای در جهت  $x_4$  میشود که اثر مثبت دوران، در برگرداندن مایع به اواپراتور را تا حد زیادی کاهش میدهد. در یک سرعت زاویه ای چرخش معین  $\omega_2$ ، با افزایش زاویه بال، مقادیر کمتری برای  $Q_{tot, cap}$  بدست خواهند آمد (شکل ۷). علاوه بر این، در یک سرعت زاویه ای ثابت، نرخ کاهش  $Q_{tot, cap}$ ، با افزایش زاویه  $\Gamma$ ، افزایش میابد.



شکل ۷: تغییرات  $Q_{tot, cap}$  با  $\omega_2$  در حالت ترکیب دوران با چرخش، در  $T_{ad}=60^\circ C$ .

بطوریکه مشاهده گردید، در حدود زاویه  $\Gamma=10^\circ$ ، منحنی های مربوطه تقریباً روی همدیگر منطبق میشوند. همچنین در شکل (۷)، در زاویه  $\Gamma=42^\circ$ ، HGHP کاملاً قابلیت انتقال حرارت خود را از دست میدهد، زیرا  $Q_{tot, cap}$  برابر صفر خواهد شد. با اینحال این زاویه معمولاً کوچکتر از

$L_g$ : طول شیار، m  
 $m$ : جرم، kg  
 $\dot{m}$ : دبی جرمی، kg/s  
 $N_g$ : تعداد شیارها،  
 $P$ : ذره ای از مایع درون شیار  
 $p$ : گام شیار، m  
 $P$ : فشار،  $N/m^2$   
 $Q$ : نرخ انتقال حرارت، W  
 $Q_{g,cap}$ : حد موئینگی هر شیار، W  
 $Q_{tot,cap}$ : حد موئینگی کل لوله حرارتی، W  
 $\bar{r}$ : بردار موقعیت از  $(x_2, y_2, z_2)$  تا شیار، m  
 $r_c$ : شعاع موئینگی، m  
 $r_h$ : شعاع ماریپیچ، m  
 $r_l$ : شعاع هیدرولیکی مایع،  $[2wh/(2h+w)]$ ، m  
 $r_v$ : شعاع بخار در لوله حرارتی، m  
 $\bar{R}_1$ : بردار موقعیت از  $(x_1, y_1, z_1)$  تا  $(x_2, y_2, z_2)$ ، m  
 $\bar{R}_2$ : بردار موقعیت از  $(x_2, y_2, z_2)$  تا  $(x_3, y_3, z_3)$ ، m  
 $S$ : پارامتر مشخص کننده طول مسیر ماریپیچ، m  
 $t_w$ : ضخامت دیواره لوله، m  
 $T_{ad}$ : درجه حرارت آدیاباتیک، K  
 $\bar{V}_l$ : بردار سرعت مایع، m/s  
 $\bar{V}_{l,max}$ : سرعت مایع در ناحیه آدیاباتیک، m/s  
 $[Q_{g,cap} / \rho_l w h h_{fg}]$   
 $w$ : پهنای شیار، m  
 $x_1, y_1, z_1$ : مولفه های اینرسی در مرکز دوران،  
 $x_2, y_2, z_2$ : مولفه های غیر اینرسی در محل تقاطع محور اصلی هواپیما و محور بال آن  
 $x_3, y_3, z_3$ : مولفه های غیر اینرسی در مرکز مسیر ماریپیچ،  
 $x_4, y_4, z_4$ : مولفه های غیر اینرسی در مرکز شیار،  
 $\alpha$ : زاویه ماریپیچ، rad،  $[\tan^{-1} / (p/2\pi r_h)]$   
 $w/h$ : نسبت ابعاد شیار،  
 $\Delta P$ : افت فشار،  $N/m^2$   
 $\varepsilon$ : پارامتر تخلخل،  $[whN_g/A_w]$   
 $\theta$ : زاویه بال نسبت به افق،  $\Gamma$  rad،  $[s/R_2]$ ، rad  
 $\mu$ : لزجت مطلق، kg/(m.s)  
 $\rho$ : بردار موقعیت از  $(x_3, y_3, z_3)$  تا مسیر ماریپیچ، m  
 $\sigma$ : کشش سطحی، N/m  
 $\Phi$ : پارامتر زاویه ماریپیچ از دید سطح مقطع، rad  
 $\Phi_0$ : زاویه شروع ماریپیچ، rad

بازه  $a_r=[1g, 3.7g]$  کاهش می دهد در مقدار  $Q_{tot,cap}$  دیده میشود؛ اما در مقادیر بیشتر از  $a_r=3.7g$   $Q_{tot,cap}$  رشد خواهد کرد. علاوه بر این، اختلاف بین مقادیر  $Q_{tot,cap}$  برای هنگامیکه دوران همراه با چرخش با  $\omega_2=0.2\pi$  rad/sec وجود دارد با هنگامیکه چرخش خالص وجود دارد، نشان میدهد که یک تخمین دست بالا از  $1g$  تا  $3.98g$  در  $1g$  دیده میشود. بنابراین در نظر گرفتن شتاب دورانی خالص بجای ترکیب دوران و چرخش، عملکرد مجازی مثبتی برای HGHP پیشبینی خواهد کرد.

در این بررسی مشاهده شد که عدد Bond در کلیه شیارها، کوچکتر از  $0.1$  میباشد که تصدیق بر صحت فرض اول مبنی بر عدم تداخل مایع درون شیارهای مجاور میباشد.

## تقدیر و تشکر

این پژوهش مستخرج از طرح شماره ۸۱۰۶۰۱۹/۱/۰۲ می باشد که با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است. بدینوسیله از کلیه مسئولین امر بویژه معاونت محترم پژوهشی دانشکده فنی صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

## فهرست علائم

### نمادها

$\bar{A}$ : بردار شتاب در هر نقطه از شیار،  $m/s^2$   
 $A_w$ : مساحت سطح مقطع فتیله،  $[\pi h(2r_v+h)]$ ،  $m^2$   
 $Bo$ : عدد باند  
 $C_p$ : گرمای ویژه در فشار ثابت، J/(kg-K)  
 $D_o$ : قطر خارجی لوله، m  
 $D_v$ : قطر مجرای بخار، m  
 $f_l Re_l$ : ضریب فشار  
 $g$ : ثابت جاذبه،  $[9.8\pm]$ ،  $m/s^2$   
 $h$ : ارتفاع شیار، m  
 $h_{fg}$ : گرمای نهان تبخیر، J/kg  
 $K$ : نفوذپذیری،  $[2\varepsilon r_1^2 / (f_l Re_l)]$ ،  $m^2$   
 $L_a$ : طول آدیاباتیک، m  
 $L_c$ : طول کندانسور، m  
 $L_e$ : طول اوپراتور، m

l : مایع	ω : سرعت زاویه ای، rad/s
max : ماکزیمم	
r : شعاعی	<b>زیر نویس</b>
res : برآیند	ad : آدیاباتیکی
t : مماسی	bf : نیروهای حجمی
tot : کل	c : کندانسور
v : بخار	cap : موئینگی
	e : اواپراتور
	g : جاذبه-شیار

## مراجع

- 1 - ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 1977.
- 2 - Faghri, A. (1994). *Heat pipe science and technology*. Taylor and Francis, Washington.
- 3 - Meriam, J. L. (1975). *Dynamics*, John Wiley & Sons.
- 4 - Peterson, G. P. (1994). *An introduction to heat pipes, modeling, testing, and application*. John Wiley & Sons, Inc.
- 5 - Richter, R. and Gottschlich, J. M. (1994) "Thermodynamics aspects of heat pipe operation" *AIAA J. Thermophysics Heat Transfer*, Vol. 8, No. 2, PP. 334-340.
- 6 - Silverstein, C. (1992). *Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange*, Taylor and Francis, Washington.
- 7 - Thomas, S. K., Klasing, K. S. and Yerkes, K. L. (1998). "The effects of transverse acceleration-induced body forces on the capillary limit of helically grooved heat pipes." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 120, 1998, pp. 441-451.
- 8 - White, M. (1994). *Viscous fluid flow*. McGraw-Hill, Inc.
- 9 - جلیلود، ا. "اثر شتابهای خطی بر ماکزیمم انتقال حرارت در میکرو لوله های حرارتی با شیارهای مثلثی." پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Yawing or Revolving
- 2 - Roiling or Rotating
- 3 - Helically Grooved Heat Pipe (HGHP)