

# بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی لوله گرمایی ترموسیفون در شرایط

## عملکردی دما بالا

امیرحسین صدرالدینی<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی شیمی  
دانشگاه تربیت مدرس

سید محمد واعظی<sup>۲</sup>

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

محمد مزیدی شرف‌آبادی<sup>۱</sup>

پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی  
پژوهشگاه صنعت نفت

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶)

### چکیده

در قرن اخیر انرژی از اهمیت ویژه‌ای به دلیل کمبود منابع انرژی و همچنین میزان اتلاف زیاد آن برخوردار شده است. استفاده بهینه از انرژی و به حداقل رساندن میزان اتلاف آن به یکی از بزرگ‌ترین اهداف محققان تبدیل شده و زمینه ساخت و تولید وسایلی جهت رسیدن به این هدف را فراهم آورده است. در این پژوهش نحوه ساخت یک سامانه لوله گرمایی در دمای بالا با سیال عامل جیوه تشریح و در مورد شبیه‌سازی CFD لوله گرمایی ساخته شده بحث شده است. عوامل مؤثر در انتقال حرارت لوله گرمایی از جمله ضرایب انتقال حرارت داخلی تبخیرکننده و چگالنده و ضریب هدایت حرارتی به صورت تجربی و عددی بررسی و نتایج آن به صورت نمودار گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهند، لوله گرمایی در شار گرمایی ۲۷۸ وات دارای بازده ۰/۸۹ بوده و کمترین مقاومت گرمایی ( $R=1.3 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ) در مقابل انتقال حرارت را دارا می‌باشد که عملکرد بهتری نسبت به شارهای گرمایی ورودی کمتر دارد. لوله گرمایی ساخته شده در بازه دمایی نزدیک به شرایط طراحی، عملکرد قابل قبول تری ارائه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** لوله گرمایی، سیال عامل لوله گرمایی، لوله گرمایی دما بالا، عدد مریت

## Experimental Investigation and Numerical Simulation of Thermosyphon Heat Pipe under High Temperature Operation Conditions

M. Mazidi, SHaraf-abadi

Development and Optimization of Energy  
Technologies Division

Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

S. M. Vaezi

Malek Ashtar University of  
Technology

A. Sadreddini

School of Chemical Engineering  
Tarbiat Modares University

(Received: 04/June/2017 ; Accepted: 17/March/2018)

### ABSTRACT

In recent centuries energy has become of great importance due to the shortage of energy resources and energy losses. Efficient use of energy and minimizing energy waste has become one of the largest research purposes and achieving this goal has provided the field of production of the devices. In this research, the construction of a high-temperature heat pipe with mercury as the working fluid as well as CFD simulation of the heat pipe is investigated and the obtained results are presented. The factors affecting the heat transfer of the heat pipe, including the evaporator and condenser internal heat transfer coefficients and the thermal conductivity coefficient are empirically and numerically investigated and the results are reported as the diagram. The results show that the heat pipe in the heat flux of 278 watts has an efficiency of 0.89 and has the lowest thermal resistance ( $R=1.3 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ) against the heat transfer, which has a better performance than the lower input heat fluxes. The heat pipe built in temperature range close to the design conditions delivers more acceptable performance.

**Keywords:** Heat Pipe, Heat Pipe Working Fluid, High Temperature Heat Pipe, Merritt Number

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): mazidim@ripi.ir

۲- کارشناس ارشد: smvturboengine@gmail.com

۳- کارشناس ارشد: am\_sadreddini@yahoo.com

## ۱- مقدمه

لوله گرمایی یکی از وسایل انتقال گرماست که اخیراً به‌عنوان بهترین وسیله جهت انتقال حرارت شناخته می‌شود. لوله گرمایی با توجه به نوع سیال عامل در بازه دمایی ۴ تا ۲۶۰۰ کلوین کاربرد دارند. لوله‌های گرمایی دما بالا در دماهای بالای ۶۷۳ کلوین کاربرد دارند که در بخش‌های صنعتی قابل استفاده هستند. با توجه به بالا بودن رسانندگی گرمایی این وسیله کاربردهای بسیاری در زمینه‌های مختلف از جمله صنعتی و صنایع هوا فضایی دارد و مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱].

لوله گرمایی از سه ناحیه تبخیرکننده، آدیباتیک و چگالنده تشکیل شده است. این وسیله به‌صورت رژیم جریان دوفازی درون لوله عمل می‌کند که به عنوان وسیله تبخیر- چگالش برای انتقال حرارت شناخته می‌شود، بدین گونه که گرمای نهان تبخیر برای انتقال حرارت مقدار زیاد انرژی و اختلاف دما کوچک به‌کاربرده می‌شود. حرارت ورودی در قسمت تبخیرکننده توسط رسانش به سیال عامل منتقل و موجب تبخیر سیال می‌شود. بخار موجب افزایش فشار بخار در قسمت تبخیرکننده شده و به سمت قسمت چگالنده همراه با گرمای نهان تبخیر جریان می‌یابد. انرژی در قسمت چگالنده گرفته شده و بخار مقدار گرمای نهان را آزاد کرده و بر روی سطح چگالیده می‌شود. ساختار کلی لوله گرمایی دو نوع فتیله‌دار و بدون فتیله است. در لوله گرمایی فتیله‌دار بازگشت سیال عامل توسط فتیله انجام می‌شود و در نوع بدون فتیله که ترموسیفون نام دارد، توسط جاذبه صورت می‌گیرد [۱].

فواید لوله‌های گرمایی علاوه بر روش‌های مرسوم دیگر انتقال حرارت مانند شبکه پره‌های گرمایی این است که لوله‌های گرمایی می‌توانند هدایت حرارت بالایی را در شرایط عملیاتی پایا داشته باشند. لوله گرمایی با سیال عامل فلز مایع می‌تواند هدایت حرارتی ده‌ها و یا هزار برابر بزرگ‌تر از بهترین هادی‌های جامد فلزی مانند مس و یا نقره داشته باشد. در لوله گرمایی انرژی با استفاده از تغییر فاز ماده و بدون نیرو خارجی منتقل می‌شود، همچنین میزان انرژی منتقل شده از طریق بخشی کوچک بسیار بیشتر از هدایت و همرفت می‌باشد. لوله‌های گرمایی می‌توانند بیش از یک طیف گسترده دما با انتخاب سیال عامل مناسب کار کنند [۲].

## فهرست علائم و اختصارات

$A$	مساحت سطح، $m^2$
$D$	قطر، $m$
$g$	شتاب گرانش، $m/s^2$
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2.K$
$h_{fg}$	گرمای نهان، $J/kg$
$k$	هدایت حرارتی، $W/m.K$
$L$	ارتفاع، $m$
$M$	عدد مریت، $W/m^2$
$P$	فشار، $Pa$
$Q$	نرخ انتقال حرارت، $W$
$R$	مقاومت، $m^2.K/W$
$S$	منبع
$T$	دما، $K$
$V$	حجم، $m^3$

## علائم یونانی

$\alpha$	کسر حجمی
$\eta$	بازده
$\mu$	گرانروی، $N.s/m^2$
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\sigma$	کشش سطحی، $N/m$

## زیرنویس

$a$	آدیباتیک
$c$	چگالنده
$E$	انرژی
$e$	تبخیرکننده
$f$	سیال
$i$	داخلی
$l$	مایع
$M$	جرم
$mix$	مخلوط
$o$	خارجی
$p$	استخر
$sat$	اشباع
$v$	بخار
$w$	دیواره

مطالعاتی که تاکنون بر روی لوله گرمایی انجام شده در اکثر موارد شامل ساخت و در برخی از موارد نیز شامل شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای مختلف بوده است. بیشتر مطالعات بر روی لوله‌های گرمایی با دمای پایین بوده که کاربرد صنعتی ندارند. در این پژوهش لوله گرمایی برای مصارف صنعتی در دمای بالا طراحی، ساخته و توسط نرم‌افزار ANSYS FLUENT شبیه‌سازی شده است.

## ۲- بررسی سیالات مناسب برای لوله گرمایی دما بالا

سیال عامل براساس محدوده دما عملیاتی مورد نظر انتخاب می‌شود. همچنین، شرایط دیگری نظیر سازگاری و قابلیت ترشوندگی با فتیل و دیواره، پایداری حرارتی، هدایت حرارتی بالا، نداشتن فشار بخار بالا یا کمتر از محدوده دما عملیاتی، گرمای نهان زیاد، گرانش کم مایع و بخار، کشش سطحی بالا و نقاط قابل قبول ریزش و انجماد را نیز باید در نظر گرفت. سیال‌های عامل مورد استفاده برای لوله گرمایی دما بالا در جدول ۱ آورده شده‌اند.

**جدول (۱):** نقطه ذوب و جوش سیال عامل‌های فلزی در فشار اتمسفر [۷].

سیال عامل	نقطه ذوب (K)	نقطه جوش (K)	محدوده استفاده (K)
سدیم	۳۷۱	۱۱۵۱	۸۷۳-۱۴۷۳
پتاسیم	۳۳۶/۴	۱۰۳۲	۷۷۳-۱۲۷۳
سزیم	۳۰۱/۶	۹۴۳	۷۲۳-۱۱۷۳
لیتیم	۴۵۳/۷	۱۶۱۵	۱۲۷۳-۲۰۷۳
جیوه	۲۳۴/۲	۶۳۰/۱	۵۲۳-۹۲۳
سولفور	۳۸۵/۹	۷۱۷/۸	۵۳۰-۹۴۷

تمامی خواص گفته شده را که سیال عامل باید دارا باشد، می‌توان به صورت پارامتری مانند عدد مریت،  $M$ ، مشخص کرد [۱]:

$$M = \frac{\rho_l \sigma_l h_{fg}}{\mu_l} \quad (1)$$

بنابراین، برای تعیین شرایط کارکرد لوله گرمایی، سیالی باید انتخاب کرد که در شرایط طرح، عدد مریت بالاتری داشته باشد. این عدد ویژگی‌های ذکر شده برای سیال عامل را داراست، اما خواص دیگر سیال عامل نیز باید مدنظر قرار گیرد.

در سال ۱۹۸۸ فایض موسی و حامد هاشم [۳] دو طرح برای بازیافت حرارت گازهای خروجی از توربین گازی توسط لوله‌های گرمایی ارائه دادند. نتایج به‌دست‌آمده از این طرح بازیابی گرمای حرارت گازهای خروجی بدین صورت نمایش داده شده که در طرح اول موجب صرفه‌جویی ۱۴/۹-۱/۲۲٪ در مصرف سوخت و رسیدن بازده کلی حرارتی نیروگاه بخار از ۲۹٪ به ۳۴٪ و همچنین در طرح دوم موجب صرفه‌جویی ۷/۳۵-۲/۳٪ در مصرف سوخت و همچنین افزایش ۳۲-۳۰/۳٪ بازده شده است.

در سال ۲۰۰۷ آندره فیلیپ [۴] تحقیقاتی تجربی را بر روی لوله گرمایی ترموسیفون با سیال عامل جیوه انجام داد. دو نوع لوله گرمایی با سیال عامل جیوه ولی با طول متفاوت و مقدار سیال عامل مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده در آزمایش با افزایش حرارت ورودی، دمای عملیاتی و طول مؤثر افزایش پیدا می‌کند. نتیجه گزارش شده در این آزمایش نشان می‌دهد لوله گرمایی با سیال عامل بیشتر عملکرد بهتری نسبت به لوله گرمایی با سیال عامل کمتر نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۱۶ انگین گدیک [۵] عملکرد لوله گرمایی ترموسیفون را در شرایط عملیاتی مختلف بررسی کرد. در تحقیقی که صورت گرفت عملکرد لوله گرمایی با سیال‌های مختلف در مقادیر گرمای متفاوت و زوایای مختلف (نسبت به حالت عمودی) و دبی‌های آب‌خنک ورودی متفاوت بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده برای نمونه لوله گرمایی با سیال نشان می‌دهد که در حرارت‌های ورودی مختلف زاویه ۹۰ درجه لوله گرمایی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. نتایج گزارش شده برای سیال عامل‌های دیگر گزارش شده در این تحقیق نیز صحت عملکرد لوله گرمایی را در این زاویه گزارش می‌کند. در سال ۲۰۱۱ آنامالیا و رامالینگام [۶] بررسی‌های تجربی و آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی لوله گرمایی فتیل‌دار را با استفاده از ANSYS CFX انجام دادند. آن‌ها ناحیه داخل لوله گرمایی را به‌عنوان فاز بخار و ناحیه فتیل را فاز مایع در نظر گرفتند. دمای سطوح چگالنده و تبخیرکننده و همچنین دمای بخار داخل لوله گرمایی پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی را با نتایج تجربی به‌دست‌آمده مورد تحلیل و مقایسه قرار دادند. این مدل جریان داخل لوله گرمایی را در یک فاز بررسی می‌کند و شامل تبخیر و چگالش و فرآیند تغییر فاز نمی‌باشد.

### ۳- بررسی لوله گرمایی

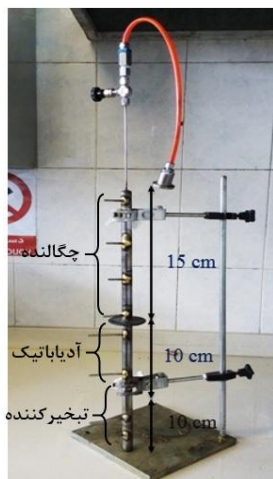
در این بخش جزئیات مطالعه لوله گرمایی به دو روش تجربی و عددی آورده شده است.

#### ۳-۱- مطالعه تجربی

لوله گرمایی ساخته شده برای شرایط دمایی بالا طراحی شده که سیال عامل آن فلز مایع جیوه بوده و جنس بدنه آن استیل ۳۱۶ انتخاب شده است. ابعاد و میزان سیال عامل مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. لوله گرمایی با استفاده از یک المنت W ۵۰۰ در قسمت تبخیرکننده تحت شارهای مختلف گرمایی قرار گرفته و توسط جریان آب با دما محیط در قسمت چگالنده خنک می‌شود که در شکل‌های ۱ و ۲ نمای کلی از آزمایش نمایش داده شده است. میزان گرما ورودی با استفاده از تنظیم‌کننده ولتاژ و جریان قابل محاسبه است و همچنین میزان گرما خروجی از لوله گرمایی نیز با استفاده از تغییر دمای آب ورودی و خروجی از چگالنده به دست می‌آید. میزان جریان آب نیز با استفاده از پمپ با جریان دبی ثابت تنظیم شده است.

#### جدول (۳): مشخصات لوله گرمایی.

پارامتر	مقدار
طول قسمت تبخیرکننده، $l_e$	۱۰ cm
طول قسمت آدیاباتیک، $l_a$	۱۰ cm
طول قسمت چگالنده، $l_c$	۱۵ cm
قطر داخلی، $D_i$	۱۴ mm
قطر خارجی، $D_o$	۱۶ mm
میزان سیال عامل، $V_f$	$16/9 \text{ mm}^3$



شکل (۱): نواحی سه‌گانه لوله گرمایی.

لوله گرمایی دما بالا برای دما بالای ۶۷۳ کلین استفاده می‌شود و بر این اساس، مقدار عدد مریت برای سیال‌های عامل مناسب برای این محدوده دمایی که در جدول ۱ آورده شده‌اند، به صورت جدول ۲ در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۲): مقادیر عدد مریت سیال‌های عامل فلزی در دما ۶۷۳ کلین.

سیال عامل	مقدار عدد مریت، $M$
سدیم	۲۱۹۳۶۸
پتاسیم	۷۳۹۶۳۹
سزیم	۲۱۹۵۹۲
لیتیم	۱۰۹۵۳۶۷
جیوه	۱۶۳۰۸۰
سولفور	۲۲۰۲/۰۶

با توجه به بالا بودن عدد مریت خواص فیزیکی و شیمیایی سیال عامل نیز باید مدنظر قرار گیرد تا بتوان سیال عامل مناسب را برای لوله گرمایی انتخاب کرد.

فلزات سدیم، پتاسیم، سزیم و لیتیم به دلیل بالا بودن خاصیت واکنش‌پذیری و همچنین خطرات حمل‌ونقلی و انفجاری و ... به جز در شرایط خاص استفاده نمی‌شوند [۴]. سیال عامل سولفور نیز به دلیل این که در بازه دمایی ۱۵۰ تا  $190^\circ\text{C}$  رفتار غیرعادی در ویسکوزیته از خود نشان می‌دهد، به کار گرفته نمی‌شود. این تغییر ویسکوزیته باعث انسداد مسیر و از کار افتادن لوله گرمایی می‌شود [۸].

سیال عامل جیوه به توجه به عدد مریت بالا، دمای ذوب، جوش و فشار بخار مناسب و همچنین قابلیت حمل و نقل آسان، سیال مناسبی برای محدوده دمایی  $450^\circ\text{C}$  است هرچند که نمی‌توان از خاصیت سمی آن صرف نظر کرد.

بدنه لوله گرمایی براساس شرایط سیال عامل و شرایط عملیاتی انتخاب می‌شود. جنس محفظه براساس خاصیت ترشوندگی، هدایت حرارتی، نسبت استحکام به وزن و سهولت ساخت و جوشکاری انتخاب می‌شود. در محدوده دمایی  $450^\circ\text{C}$  فلزات مس، آلومینیوم و استیل موجود هستند. با توجه به شرایط سیال عامل و تحمل دمایی و سهولت در ساخت و جوشکاری و مقاومت در برابر خوردگی فلز، استیل ۳۱۶ مناسب ساخت لوله گرمایی است [۹].

بدنه لوله گرمایی به بیرون از عایق گرمایی انتقال می‌یابد که به‌صورت اتلاف در نظر گرفته می‌شود. بازده لوله گرمایی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} * 100 \quad (5)$$

### ۲-۳- شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه، از نرم‌افزار تجاری ANSYS FLUENT 17.2 و روش حجم سیال<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی یک لوله گرمایی ترموسیفون دوفازی بسته، استفاده شده است.

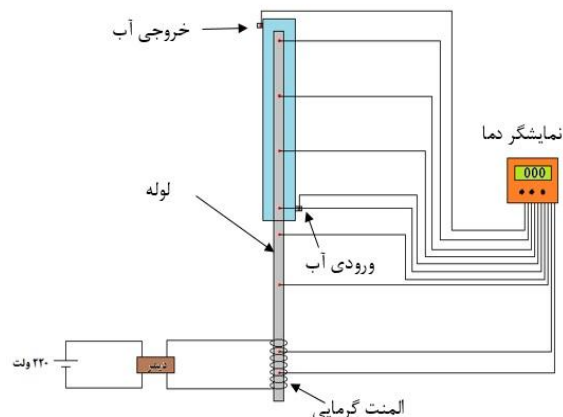
حل عددی براساس روش حجم محدود برای مسئله چندجریانی بسیار پیچیده‌تر از تک‌جریانی در یک فاز می‌باشد. دلیل این پیچیدگی ارتباط بین فازها، خواص ثابت و فیزیکی مانند چگالی و گرانشی متفاوت در سطح بین فازهای مختلف است که به محاسبات زیادی نیازمند است. برای حل این مشکل در روش حجم سیال برای تعیین حرکت در تمام فازها و تعریف حرکت سطح تماس بین فازها به‌طور غیرمستقیم از نتایج استفاده می‌شود [۱۱]. در این مقاله، لوله گرمایی ساخته شده، مدل‌سازی شده تا رفتار جوشش و چگالش و همچنین مشخصه‌های انتقال حرارتی آن بررسی گردد.

در این مطالعه عدد رینولدز داخل لوله به ازای توان حرارتی ۵۰۰ وات، ۱۸۵ به‌دست می‌آید. بنابراین، جریان در داخل لوله آرام فرض می‌شود.

### ۳-۲-۱- هندسه و مش‌بندی

هندسه دوبعدی برای مدل‌سازی جریان، انتقال حرارت و جرم در لوله گرمایی ترموسیفون در شکل ۳ ارائه شد. در این شکل هندسه استفاده‌شده و شبکه‌های ایجادشده نشان داده شده‌اند. این روش مرزبندی با استفاده از نرم‌افزار گمبیت<sup>۲</sup> انجام شده است. در این مطالعه از مش چهار وجهی ساختارمند استفاده شده است.

برای اطمینان از مستقل بودن شبیه‌سازی‌ها نسبت به شبکه محاسباتی، متوسط دمای بدنه در دیواره تبخیرکننده به‌عنوان پارامتر شاخص در ۵ شبکه مختلف محاسبه گردیده است که در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از بررسی



شکل (۲): نما کلی آزمایش لوله گرمایی.

حجم سیال عامل در سال ۱۹۷۵ توسط استرلت سو [۱۰] با این فرض که حجم سیال عامل برابر حجم لازم برای داشتن فیلم مایع باشد، با استفاده از روابط (۲-۴) به‌دست می‌آید که در این روابط،  $L_f$ ، ارتفاع سیال ریزان تبخیر کننده،  $L_p$ ، ارتفاع استخر مایع،  $L_e$ ، طول تبخیر کننده و  $V_f$ ، حجم سیال مورد نیاز است.

$$L_f = \left( \frac{3Q_e}{\pi D} \right)^{4/3} \left( \frac{\mu_l}{\rho_l^2 g h_{fg}} \right)^{1/3} \left( \frac{1}{4k(T_{w,f} - T_{sat})} \right) \quad (2)$$

$$L_p = L_e - \left( \frac{1}{4k} \right) \left( \frac{\mu_l}{\rho_l^2 g h_{fg}} \right)^{1/3} \left( \frac{3}{\pi D} \right)^{4/3} \times \left[ \frac{Q_e^{4/3}}{(T_{w,e} - T_{sat})} - \frac{Q_p^{4/3}}{(T_{w,e} - T_p)} \right] \quad (3)$$

$$V_f = \pi D \left( \frac{4k\mu_l}{\rho_l^2 g h_{fg}} \right)^{1/4} \times \left[ (T_{sat} - T_{w,c})^{1/4} \left( \frac{4}{5} L_c^{5/4} + L_a L_c^{1/4} \right) + \frac{4}{5} (T_{w,e} - T_{sat})^{1/4} (L_f^{5/4} - L_{f,p}^{5/4}) \right] \quad (4)$$

در این روابط، میزان سیال برای مقدار گرما ۵۰۰ W در نظر گرفته شد که این مقدار گرما برای دما ۴۵۰ °C در تبخیر کننده و ۳۰ °C در چگالنده فرض می‌شود. میزان سیال عامل بر اساس خواص جیوه در این شرایط محاسبه می‌شود.

لوله گرمایی ترموسیفون به‌صورت عمودی مورد آزمایش قرار گرفت. شارهای گرمایی از ۴۰ تا ۳۱۰ W به قسمت تبخیرکننده لوله گرمایی اعمال شده و در قسمت چگالنده با عبور جریان آب سرد با دبی متوسط ۸/۱۲۱ ml/s مقدار گرمای ورودی به لوله گرمایی دفع می‌شود. مقداری گرما از

1- Volume of Fluid (VOF)

2- GAMBIT

ورودی آب اعمال می‌شود. با استفاده از جداول بخار روابط چگالی، کشش سطحی، رسانایی و گرمای نهان تبخیر برای سیال عامل جیوه به صورت زیر استفاده می‌شوند [۱۲]:

$$\rho_l = -2.4 T + 13611.2 \quad (۶)$$

$$h_{fg} = -0.037 T + 313.99 \quad (۷)$$

$$k = 0.00912 T + 8.95 \quad (۸)$$

$$\sigma = -0.000231 T + 0.4767 \quad (۹)$$

### ۳-۲-۳- روش حل مسئله

معادلات ارائه شده توسط دشیر و همکارانش [۱۱] برای محاسبه شرایط اولیه جهت فرآیند تبخیر استفاده می‌شوند. روابط مورد استفاده برای انتقال جرم و انتقال انرژی جهت جوشش در دما مخلوط بیشتر از دما اشباع به صورت زیر ارائه شده‌اند:

رابطه فاز مایع:

$$S_M = -0.1 \alpha_l \rho_l \left( \frac{T_{mix} - T_{sat}}{T_{sat}} \right) \quad (۱۰)$$

رابطه فاز بخار:

$$S_M = 0.1 \alpha_l \rho_l \left( \frac{T_{mix} - T_{sat}}{T_{sat}} \right) \quad (۱۱)$$

رابطه انرژی:

$$S_E = -0.1 \alpha_l \rho_l \left( \frac{T_{mix} - T_{sat}}{T_{sat}} \right) h_{fg} \quad (۱۲)$$

معادلات انتقال جرم و انرژی نیز برای چگالش و در دما مخلوط کمتر از دما اشباع به صورت زیر ارائه شده‌اند:

رابطه فاز مایع:

$$S_M = 0.1 \alpha_v \rho_v \left( \frac{T_{sat} - T_{mix}}{T_{sat}} \right) \quad (۱۳)$$

رابطه فاز بخار:

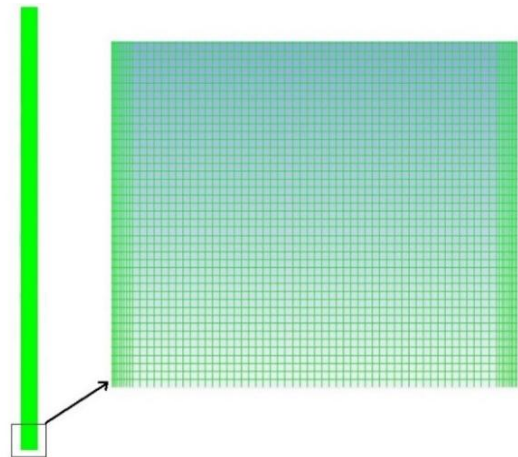
$$S_M = -0.1 \alpha_v \rho_v \left( \frac{T_{sat} - T_{mix}}{T_{sat}} \right) \quad (۱۴)$$

رابطه انرژی:

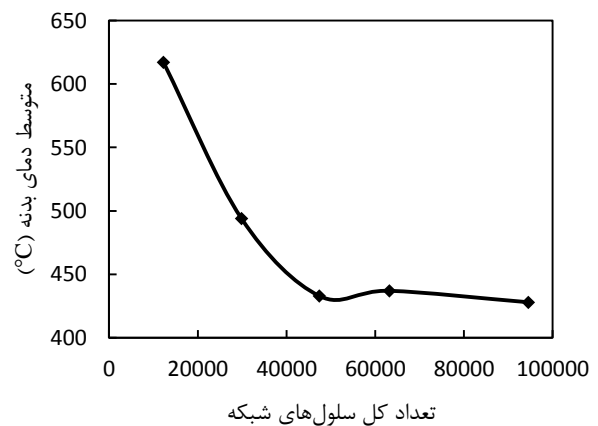
$$S_E = 0.1 \alpha_v \rho_v \left( \frac{T_{sat} - T_{mix}}{T_{sat}} \right) h_{fg} \quad (۱۵)$$

از الگوریتم SIMPLE جهت ارتباط فشار و سرعت و معادله مرتبه اول جهت تعیین اندازه حرکت و انرژی در مدل استفاده شده است. COMPRESSIVE و PRESTO به ترتیب برای کسر حجمی و رفتار فشار سامانه در شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند. در این شبیه‌سازی معیار همگرایی محاسبات عددی برای اجزای جرم و سرعت کمتر از  $0.0001$  در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی گذرا با گام زمان  $0.0005$  برای مدل رفتار دینامیک جریان دو فاز انجام شده است. برای مدل

مشخص گردید که شبکه با  $47390$  واحد مش جهت مدل‌سازی لوله گرمایی مناسب است.



شکل (۳): نمایش بخشی از مش محاسباتی.

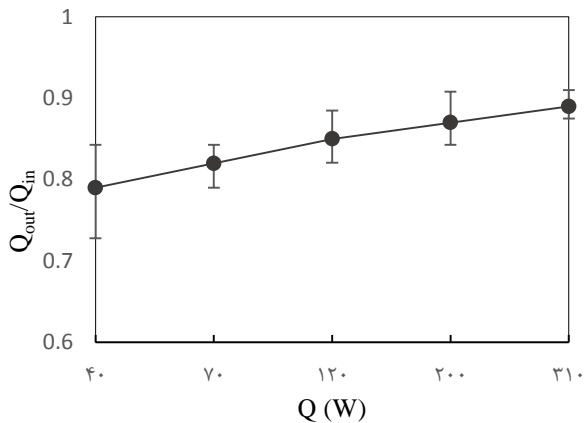


شکل (۴): استقلال نتایج از شبکه محاسباتی.

### ۳-۲-۳- شرایط مرزی و اولیه

در دیواره داخلی لوله گرمایی ترموسیفون از شرط مرزی بدون لغزش استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی حرارت و تبخیر، با توجه به ورودی برق و شار گرما در دیواره تبخیرکننده، شرط مرزی شار گرمایی ثابت برای این دیواره در نظر گرفته شده است. همچنین، شار گرمایی صفر در بخش دیواره آدیاباتیک به عنوان شرط مرزی تعریف شده است. دما محیط  $24^{\circ}\text{C}$ ، دما آب ورودی به طور متوسط  $26^{\circ}\text{C}$  و دبی آب ورودی به چگالنده  $8/121 \text{ ml/s}$  است. سیال داخل لوله در ابتدا در شرایط دمایی محیط است. با توجه به آزمایش تجربی مشخص است که قسمت چگالنده توسط آب خنک می‌شود و اختلاف دمای زیادی نسبت به سایر نقاط ندارد، بنابراین، در قسمت دیواره لوله گرمایی شرایط دما ثابت با دما

میزان بازده لوله گرمایی نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. میزان بازده لوله گرمایی قبل از رسیدن به محدودیت‌های لوله گرمایی با شیب ملایمی افزایش پیدا می‌کند و با رسیدن به محدودیت‌ها با روند نزولی کاهش می‌یابد که بازده لوله گرمایی مورد نظر قبل از رسیدن به محدودیت گزارش شده است.



شکل (۶): نسبت گرما خروجی به گرما ورودی لوله گرمایی.

#### ۲-۴- نتایج شبیه‌سازی

با استفاده از نتایج شبیه‌سازی دمای نقاط مورد نظر روی لوله گرمایی در شکل ۷ گزارش شده است. دماهای محاسبه شده از طریق نرم‌افزار به دماهای به‌دست آمده از طریق آزمایش لوله گرمایی نزدیک بوده و به ترتیب خطا ۹/۰۴ درصد در تبخیرکننده، ۱۰/۲۷ درصد در قسمت آدیاباتیک و ۱/۹ درصد در قسمت چگالنده گزارش شده است. این مقدار خطا در قسمت تبخیرکننده به دلیل فرآیند حباب‌زایی در جوشش و همچنین صرف‌نظر کردن از تشعشع و همچنین در قسمت آدیاباتیک به دلیل ایده‌آل نبودن عایق‌بندی قابل قبول است. پارامترهای عملیاتی لوله گرمایی همانند ضرایب انتقال حرارت داخلی و مقاومت لوله گرمایی نیز با توجه به دماهای محاسبه شده از طریق نرم‌افزار و آزمایش لوله گرمایی در ادامه گزارش شده‌اند.

در این مطالعه بخار جیوه به‌عنوان بخار فاز اولیه و جیوه مایع در فاز ثانویه به‌عنوان مایع تعریف شده است. جهت انجام محاسبات جرم و حرارت در طول فرآیند تبخیر و چگالش، دمای جوش  $369^{\circ}\text{C}$  و گرما نهان تبخیر  $300\text{ kJ/kg}$  در نظر گرفته شده است. با شروع شبیه‌سازی همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، استخر مایع در تبخیرکننده گرم می‌شود.

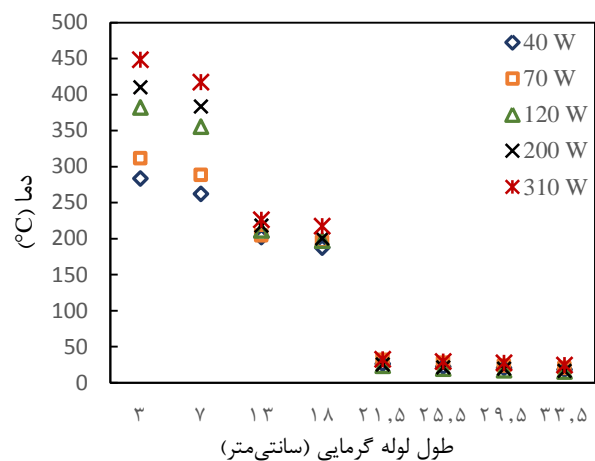
سیال حداکثر عدد کورانت مجاز نزدیک به ۲۵۰ است [۱۳]. برای یک گام زمان  $0.005$ ، تعداد کورانت کمتر از ۳ است و شبیه‌سازی بعد از ۶۰ ثانیه به‌حالت پایا می‌رسد. میزان گرما مبادله شده در حالت تجربی و همچنین ایجاد چرخه دائمی تغییر فاز، از معیارهای رسیدن به حالت پایا می‌باشند.

#### ۴- بحث و نتایج

در این بخش نتایج حاصل از مطالعه لوله گرمایی به دو روش تجربی و عددی آورده شده است.

##### ۴-۱- نتایج تجربی

میزان دما بدنه لوله گرمایی در نقاط مختلف از ناحیه سه‌گانه تبخیرکننده، چگالنده و آدیاباتیک اندازه‌گیری شده که در شکل ۵ آمده است. همان‌طور که قابل مشاهده است تأثیر افزایش شار ورودی بر دما قسمت تبخیرکننده نسبت به نواحی دیگر بیشتر بوده که موجب افزایش دما این ناحیه شده است که با عبور از بخش آدیاباتیک و چگالنده این دما کاهش می‌یابد. میزان دماهای اندازه‌گیری شده با حداکثر ۵ درصد خطا گزارش شده است.



شکل (۵): تغییرات دما بدنه در طول لوله گرمایی با توان ورودی مختلف.

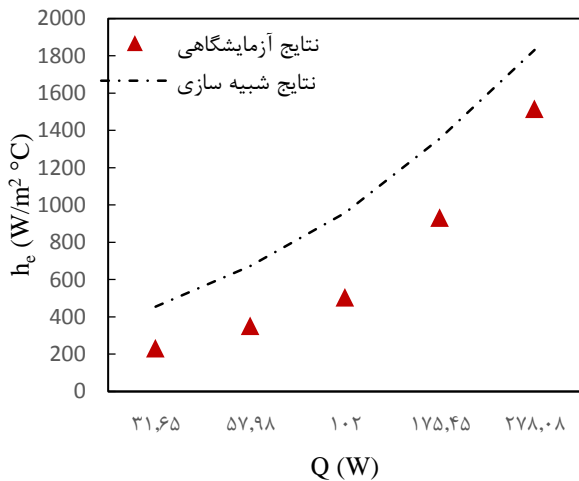
یک سری محدودیت‌های خاص وجود دارد که معطوف به کارکرد عملیاتی صحیح لوله گرمایی و توانایی عملی کردن مواردی می‌شود که از لوله گرمایی در محیط عملکرد مورد انتظار است. این محدودیت‌ها شامل محدودیت گرانشی، محدودیت صوتی، محدودیت مویینگی، محدودیت روند فرآیند و محدودیت جوشش می‌باشند [۱-۲].

$$h_e = \frac{Q}{A_e(T_e - T_{sat})} \quad (17)$$

ضریب انتقال حرارت داخلی چگالنده لوله گرمایی:

$$h_c = \frac{Q}{A_c(T_{sat} - T_c)} \quad (18)$$

با برابری روابط ۱۶ و ۱۷ مقدار دمای اشباع محاسبه شده و با استفاده از دما اشباع مقادیر ضرایب انتقال حرارت تجربی در تبخیرکننده و چگالنده محاسبه می‌شود. ضرایب انتقال حرارت داخلی لوله گرمایی با افزایش شار گرمایی می‌یابد که موجب بهبود عملکرد لوله گرمایی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی دارای اختلاف هستند، ولی در افزایش روند یکسانی را دنبال می‌کنند. این اختلاف ناشی از پارامترهای معادله تئوری در جوشش جیوه است.



شکل (۹): ضریب انتقال حرارت داخلی تبخیرکننده.

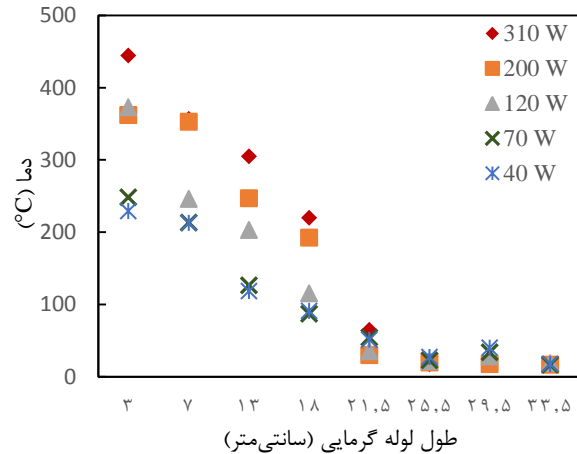
نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت داخلی چگالنده نیز در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. با افزایش شار حرارت نتایج شبیه‌سازی و تجربی از هم فاصله می‌گیرند ولی روند رو به افزایش، نشان از صحت شبیه‌سازی است و این اختلاف ناشی از محاسبات عددی نرم‌افزاری می‌باشد.

مقاومت کلی لوله گرمایی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

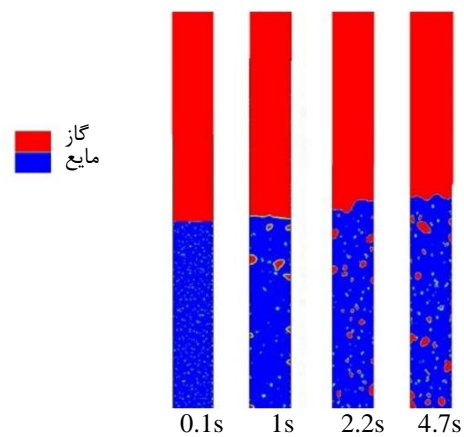
$$R = \frac{T_e - T_c}{Q_{in}} \quad (19)$$

نتایج مقاومت کلی انتقال حرارت لوله گرمایی توسط آزمایش تجربی لوله گرمایی و شبیه‌سازی آن در شکل ۱۱ آمده است. میزان مقاومت لوله گرمایی با افزایش شار گرمایی کاهش

هنگامی که دما سیال به دمای ۳۶۹ °C می‌رسد تبخیر شروع شده و تغییر فاز رخ می‌دهد. بخار اشباع به سمت چگالنده حرکت کرده و با سرد شدن بر روی دیواره تشکیل فیلم مایع می‌دهد.



شکل (۷): تغییرات دما بدنه در طول لوله گرمایی با توان ورودی مختلف توسط شبیه‌سازی.



شکل (۸): کسر حجمی مایع و بخار طی فرآیند جوشش در زمان‌های مختلف.

ضرایب انتقال حرارت در هادی‌های حرارت اهمیت ویژه‌ای دارند. ضرایب انتقال حرارت داخلی لوله گرمایی با استفاده از روابط تئوری و تجربی موجود اندازه‌گیری شده تا روند شار حرارتی انتقالی بررسی شود.

ضریب انتقال حرارت تئوری جوشش جیوه [۱۴]:

$$h_e = Q^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\rho_l h_{fg} k_l}{\sigma_l T} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{P_l}{P_c} \right)^{0.15} \quad (16)$$

ضریب انتقال حرارت داخلی تجربی تبخیرکننده لوله گرمایی:

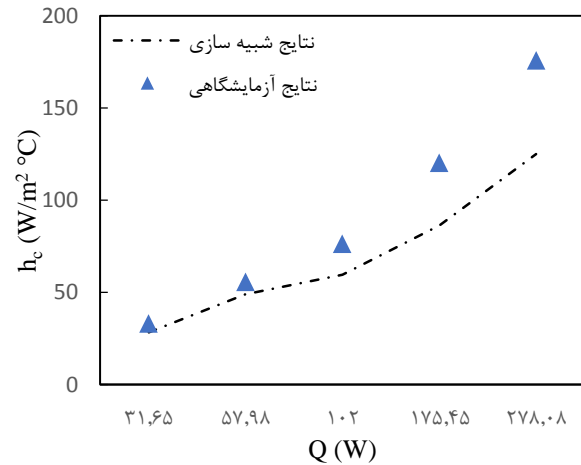


لوله گرمایی را با مقدار خطای قابل قبول مدل و سپس تحلیل کرد. عملکرد لوله گرمایی در شارهای گرمایی بالا، ۲۷۸ وات، بهتر است. در تبخیرکننده با ضریب حرارت جابجایی  $1830 \text{ W/m}^2\text{K}$  میزان مقاومت حرارتی لوله گرمایی برابر  $1/33 \text{ }^\circ\text{C/W}$  است که نشان‌دهنده توان بالا هادی بودن گرما لوله گرمایی است. به اندازه‌ای که شرایط موجود به شرایط طراحی لوله گرمایی نزدیک‌تر باشد، عملکرد لوله گرمایی نیز بهتر خواهد بود.

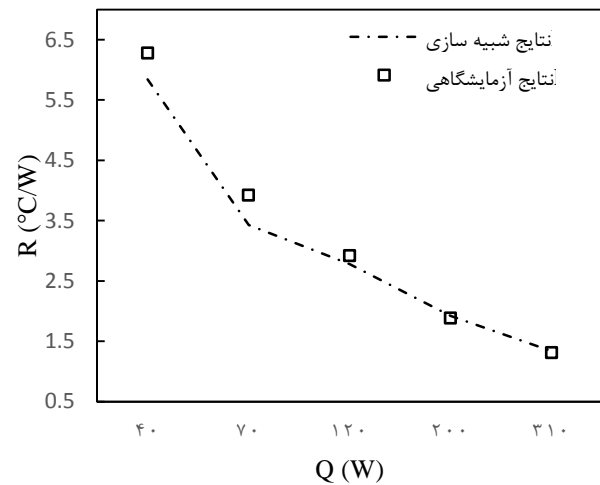
#### ۶- مراجع

1. Reay, D., and Kew, P. "Heat Pipes, Theory, Design and Applications", Fifth Edition, Elsevier, USA, 2006.
2. Faghri, A. "Heat Pipe Science and Technology", First Edition, Taylor & Francis, USA, 1995.
3. Mousa, F., and Hashem, H. "Gas Turbine Exhaust Gas Heat Recovery at South Baghdad (Iraq) Power Plant", Heat Recovery Syst. CHP, Vol. 9, No. 6, pp. 547-552, 1989.
4. Cunha, A.F.V., and Mantelli, M.B.H. "Analytical and Experimental Analysis of a High Temperature Mercury Thermosyphon", J. of Heat Transfer, Vol. 131, No. 9, pp. 11-17, 2009.
5. Gedik, E. "Experimental Investigation of the Thermal Performance of a Two-phase Closed Thermosyphon at Different Operating Conditions", Energy Build., Vol. 127, pp. 1096-1107, 2016.
6. Annamalai, A.S., and Ramalingam, V. "Experimental Investigation and Computational Fluid Dynamics Analysis of an Air Cooled Condenser Heat Pipe", Therm. Sci., Vol. 15, No. 3, pp. 759-772, 2011.
7. Faghri, A. "Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges", Front. Heat Pipes, Vol. 5, No.1, pp. 1-48, 2014.
8. Chaffey, G., Ralph, J.C., and Wade, C.D. "Development of a High Temperature Heat Pipe Heat Exchanger", Report EUR 9932 EN, pp. 51-65, 1985.
9. Anderson W.G., Hartenstine, J.R., Sarraf, D.B., and Tarau, C. "Intermediate Temperature Fluids for Heat Pipes and Loop Heat Pipes", Proc. 15<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Conf. (15<sup>th</sup> IHPC), Clemson, USA, 2010.
10. Strel'tsov, A.I. "Theoretical and Experimental Investigation of Optimum Filling for Heat Pipes", Heat Transfer: Soviet Res., Vol. 7, No. 1, pp. 23-27, 1975.
11. De Schepper S.C.K., Heynderickx G.J., and Marin G.B. "Modeling the Evaporation of a Hydrocarbon Feedstock in the Convection Section of a Steam

می‌یابد و مشخص است که با افزایش شار گرمایی نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. با کاهش مقاومت در برابر انتقال گرما میزان گرمای انتقالی بیشتر شده و موجب افزایش راندمان کلی می‌شود.



شکل (۱۰): ضریب انتقال حرارت داخلی چگالنده.



شکل (۱۱): تغییرات مقاومت کلی لوله گرمایی با افزایش شار گرمایی ورودی.

#### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی عددی برای لوله گرمایی نشان می‌دهد که نرم‌افزار تجاری ANSYS FLUENT با روش حجم سیال می‌تواند پدیده‌های پیچیده در داخل لوله گرمایی را به خوبی مدل‌سازی کند. دماهای حاصل از شبیه‌سازی با دماهای به‌دست‌آمده از آزمایش لوله گرمایی در شرایط یکسان و شارهای گرمایی متفاوت تطابق خوبی داشته و نشان‌دهنده این است که می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی عددی ابعاد مختلف

13. ANSYS FLUENT User Guide (Release 13.0). "Modeling Multiphase Flows", ANSYS, Inc., (chapter 26), pp. 1143-1144, 2010.
14. Carey, V.P. "Liquid Vapor Phase Change Phenomena: An Introduction to the Thermophysics of Vaporization and Condensation Processes in Heat Transfer Equipment", Second Edition, Taylor & Francis, London, 2007.
- Cracker", Comput. Chem. Eng., Vol. 33, No. 1, pp. 122-132, 2009.
12. Yaws, C.L. "Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamics, Environmental Transport, Safety and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals", McGraw-Hill, New York, 1999.