

بررسی تجربی عامل‌های موثر بر عملکرد گرمایی ترموسیفون دو فاز بسته در شرایط جوشش گرمایی توسعه یافته و نوسانی در تبخیر کننده

حسن خدادی، محمدرضا سرمستی امامی*⁺

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

چکیده: هزینه‌های تأمین انرژی با افزایش پیوسته قیمت سوخت افزایش می‌یابد. ترموسیفون‌های دو فاز بسته از دستگاه‌های کارآمد برای انتقال گرما می‌باشند. در این پژوهش اثر متغیرهای مهم بر عملکرد یک ترموسیفون دو فاز بسته در شرایط جوشش توسعه یافته و نوسانی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های در یک ترموسیفون مسی به طول یک متر و قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر با سیال عامل آب مقطر انجام شد. آزمایش‌ها در نسبت پر شدن ۲۵٪ تا ۷۰٪، نسبت اندازه‌ها ۱۳، ۱۶/۵ و ۲۰، توان ورودی ۱۰۰ تا ۳۰۰ وات و زاویه شیب ۵ تا ۹۰ درجه انجام شد. برای به دست آوردن دید جامع نسبت به عامل‌های موثر بر عملکرد ترموسیفون یک رابطه بر اساس همه نتیجه‌های به دست آمده ارایه شد که هم خوانی خوبی با داده‌های سایر پژوهشگران در بازه‌ی این پژوهش داشت. بر اساس نتیجه‌های به دست آمده بهترین عملکرد گرمایی ترموسیفون در شیب ۶۰ درجه، توان ورودی ۲۰۰ وات، نسبت پر شدن ۵۰٪ و نسبت اندازه ۱۶/۵ به دست آمد. از آنجا که در طی بررسی اثر این عامل‌ها بر عملکرد ترموسیفون در برخی شرایط پدیده جوشش نوسانی رخ داد، الگوهای گوناگون جوشش نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی جوشش نوسانی از روش میزان نوسان دمای سیال خروجی از غلاف چگالنده استفاده شد. نتیجه‌ها نشان داد که در توان ورودی ۱۰۰ وات جوشش ترکیبی و در توان بالاتر از ۱۵۰ وات جوشش توسعه یافته در بخش تبخیرکننده رخ می‌دهد. همچنین رابطه تجربی دیگری برای بازه زمانی نوسان دمای خروجی بخش چگالنده ارایه شد که نشان می‌دهد دوره نوسان‌های دما ناشی از پدیده جوشش نوسانی با نسبت پر شدن و نسبت اندازه‌ها رابطه مستقیم و با شدت جریان سیال خنک کننده، زاویه شیب ترموسیفون و گرمای ورودی به بخش چگالنده رابطه عکس دارد.

واژه‌های کلیدی: ترموسیفون دو فاز بسته، بازده گرمایی، نسبت اندازه‌ها، نسبت پر شدن، جوشش توسعه یافته، جوشش نوسانی.

KEYWORDS: Two-phase closed thermosyphon, Thermal efficiency, Aspect ratio, Filing ratio, Developed boiling, Geyser boiling.

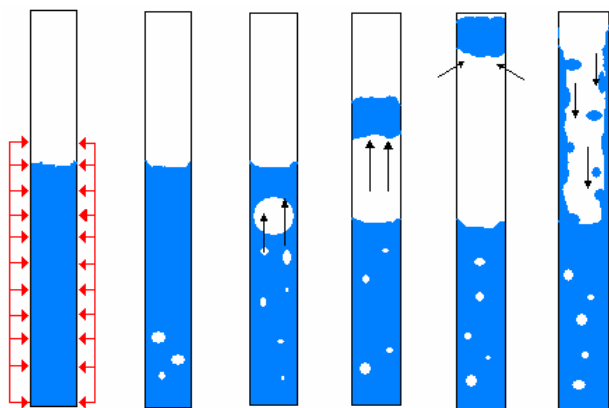
مقدمه

گرمایی است که به‌طور معمول به شکل استوانه دو سر بسته و در شرایط خلأ می‌باشد که از سه بخش تبخیرکننده، بی‌دررو (آدیاباتیک) و چگالنده تشکیل شده است. در این سامانه مقداری از یک سیال عامل مناسب وجود دارد که با جذب گرما در بخش تبخیرکننده بخار، و با از دست دادن

ترموسیفون‌های دو فاز بسته نمونه‌ای از لوله‌های گرمایی هستند که انتقال گرما در آن‌ها توسط فرآیند جوشش و چگالش صورت می‌گیرد طرح‌واره عملکرد یک ترموسیفون دو فاز بسته در شکل ۱ آورده شده است. به طور کلی ترموسیفون دو فاز بسته یک دستگاه

+E-mail: m_r_emami@mazust.ac.ir

* عهده دار مکاتبات



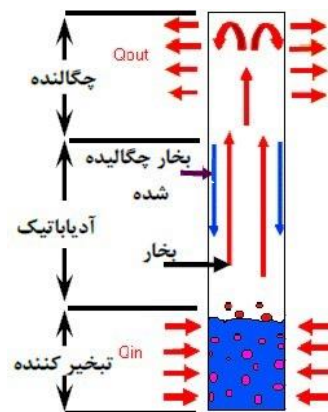
شکل ۲: مکانیسم جوشش نوسانی در ترموسیفون [۱]

در جوشش نوسانی در نقطه ای از تبخیرکننده یک حباب به اندازه قطر لوله رشد می‌کند و سپس مایع بالای سر خود را به چگالنده منتقل می‌کند. در این بازه زمانی به علت کاهش جریان بخار به سمت چگالنده، دمای آب خروجی از غلاف چگالنده کاهش می‌یابد. وقتی حباب مورد نظر و مایع بالای آن به چگالنده می‌رسند، حباب در تماس با سطح سرد متلاشی شده و مایع بالای آن به تبخیرکننده بر می‌گردد و بی‌درنگ افزایش دمای آب خروجی از غلاف چگالنده مشاهده می‌شود. با ترکیدن حباب و برگشت مایع بالای آن از چگالنده جوشش در تبخیرکننده به حالت پایدار بر می‌گردد. این وضعیت تا زمان شکل‌گیری حباب بعدی به طور پیوسته تکرار می‌شود.

اگر دوره نوسان‌های دما بیش‌تر از ۲۱۰ ثانیه باشد جوشش از نوع نوسانی (Geyser Boiling) و اگر کم‌تر از ۹۰ ثانیه باشد از نوع توسعه‌یافته (Developed Boiling) می‌باشد و در فاصله بین این دو از نوع ترکیبی (Mixture Boiling) است [۵].

Negishi و *Sawada* [۶] به صورت تجربی به این نتیجه رسیدند که جوشش نوسانی برای نسبت‌های پر شدن بیش‌تر از ۷۰٪ اتفاق می‌افتد. *Negishi* [۷، ۸] در بررسی‌های خود دریافت که دوره نوسان جوشش برای چگالنده بلندتر و گرمای ورودی پایین‌تر طولانی‌تر است. همچنین او دریافت که بیشینه انتقال گرما در زاویه 50° رخ می‌دهد.

Lin و همکاران [۹] جوشش نوسانی را در یک ترموسیفون دو فازی بسته حلقوی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نوسان‌های دما در گرمای ورودی بیش‌تر و نسبت پر شدن کم‌تر بی‌نظم‌تر می‌شود. *Kunkoro* و همکاران [۱۰] مکانیسم جوشش نوسانی در یک ترموسیفون به طول ۲۵۰۷ میلی‌متر را بررسی کردند



شکل ۱. طرح‌واره عملکرد ترموسیفون

گرما در بخش چگالنده به صورت مایع در آمده و به شکل یک لایه نازک از دیواره داخلی لوله به بخش تبخیرکننده باز می‌گردد و این چرخه به صورت پیوسته تکرار می‌شود.

ترموسیفون‌ها به دلیل رسانایی گرمایی بالا، هزینه پایین و ساختار ساده دارای کاربردهای بسیاری به ویژه در انواع تبادله‌گرهای گرمایی می‌باشند [۴-۱]. از این رو افزایش بازده گرمایی آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

ترموسیفون‌ها نیز مانند هر دستگاه انتقال گرمایی دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که می‌توانند عملکرد طبیعی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. این حدها شامل خشک شدن، جوشش، صوتی و طغیان است. از حد خشک شدن می‌توان با مقدار مناسب سیال عامل جلوگیری کرد. حد صوتی در گرمای ورودی بالا به بخش تبخیرکننده و حد طغیان نیز در مقدار بالای گرمای ورودی و نیز مقدار زیاد سیال عامل در بخش تبخیرکننده رخ می‌دهد. بنابراین تنها حدی که می‌تواند در شرایط متفاوت رفتار گوناگون را از خود نشان دهد حد جوشش است. برای نمونه در زمانی که مقدار گرمای ورودی کم و مقدار سیال عامل زیاد باشد پدیده جوشش نوسانی رخ می‌دهد. هر چند این پدیده عملکرد پایدار ترموسیفون را مختل نمی‌کند اما به دلیل ضرباتی که به سرپوش انتهایی لوله می‌زند باید از آن اجتناب نمود.

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است به‌طور معمول سه نوع الگوی جوشش در ترموسیفون‌ها با توجه به تغییر پارامترهای مؤثر در آن وجود دارد که شامل جوشش نوسانی، جوشش ترکیبی و جوشش توسعه‌یافته می‌باشد که شناسایی این الگوها به‌طور معمول با اندازه‌گیری دوره نوسان‌ها و شدت نوسان‌های جوشش انجام می‌گیرد. این نوسان‌ها را می‌توان از دو روش زمان نوسان دمای سطح لوله در تبخیرکننده و زمان نوسان دمای آب‌خنک کننده خروجی از چگالنده بررسی نمود.

تا ۱۴۰۰ سرعت حباب‌های بخار تا حدی افزایش می‌یابد که مانع برگشت فیلم مایع به تبخیرکننده و عملکرد ترموسیفون مختل می‌شود. در حال حاضر پژوهش‌هایی در زمینه پدیده جوشش و به ویژه جوشش نوسانی با استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و نیز ساخت ترموسیفون‌های شفاف انجام شده است [۱۷، ۱۸].

بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که عامل‌های گوناگونی بر وقوع پدیده جوشش به صورت توسعه یافته یا نوسانی اثر می‌گذارند که در هر پژوهش تنها اثر عامل‌های محدودی بر روی الگوهای جوشش و نیز دوره نوسان در جوشش نوسانی بررسی شده است. در نتیجه نویسندگان در تکمیل پژوهش‌های پیشین انجام شده [۱۱، ۱۲] اثر نسبت پر شدن، توان ورودی، زاویه شیب و نسبت اندازه‌ها (اثر طول تبخیرکننده در قطر ثابت) را در گستره‌های گوناگون بر این پدیده بررسی و بر اساس آزمایش‌های انجام شده رابطه‌هایی برای پیش بینی بازده گرمایی ترموسیفون و نیز الگوی جوشش و پیش بینی دوره نوسان در جوشش نوسانی ارائه می‌شود.

بخش تجربی

برای انجام آزمایش‌ها از یک لوله مسی به طول یک متر، قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر، طول بخش چگالنده ۴۰۰ میلی‌متر و قطر درونی غلاف چگالنده ۳۵ میلی‌متر استفاده شد. همچنین طول بخش تبخیرکننده و بی دررو ۶۰۰ میلی‌متر بود که در آزمایش‌های گوناگون طول تبخیرکننده ۲۶۰، ۳۳۰ و ۴۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. از هفت حسگر DS18B20 با دقت ± 0.1 که در ارتفاع ۴، ۱۴، ۲۴، ۳۴، ۵۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی سیال خنک کننده غلاف بخش چگالنده و دمای سطح ترموسیفون استفاده شد. میزان گرمای ورودی به گرمکن توسط دیمر (که وظیفه تنظیم آمپر در ولتاژ ثابت را دارد) و وات متر کنترل می‌شد. در این آزمایش از دیمر ۱۰۰۰ وات و وات متر PM-15 با توان اسمی ۳۷۵۰ وات استفاده شد.

داده‌ها از طریق یک تبدیل کننده داده به رایانه منتقل و ثبت شد. پس از انجام آزمایش مقدار بهینه برای جریان آب خنک کننده در غلاف چگالنده توسط رتامت تعیین شد. سرانجام آزمایش‌ها بر اساس متغیرهای جدول ۱ انجام شد. در شکل ۳ طرح‌واره کلی دستگاه آزمایش به همراه مکان حسگرها و طول بخش‌های اصلی ترموسیفون آورده شده است.

و به این نتیجه رسیدند که توزیع دما نقش مهمی در این پدیده بازی می‌کند که بستگی به هندسه سامانه هم دارد.

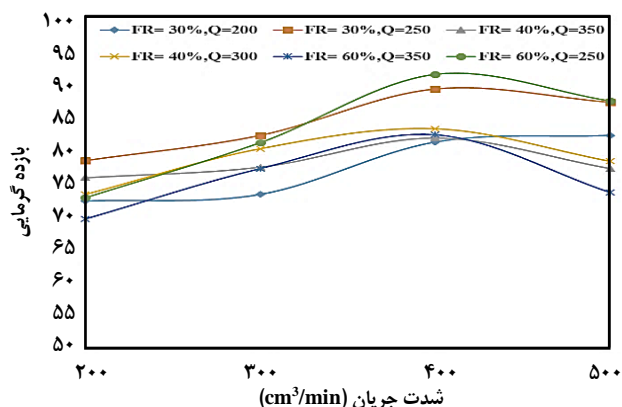
سرمستی /امامی و همکاران [۱۲، ۱۱] جوشش نوسانی را در یک ترموسیفون دو فازی بسته با در نظر گرفتن میزان سیال عامل آب و زاویه شیب به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که جوشش نوسانی در نسبت پر شدن بیش تر از ۳۰٪ رخ می‌دهد. همچنین دوره نوسان جوشش برای شیب‌های بیش تر نسبت به افق و نسبت پر شدن بزرگ‌تر، بیش تر است.

Khazaei و همکاران [۱۳] اثر عامل‌های موثر بر جوشش نوسانی را در ترموسیفونی با طول یک متر، قطر ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر و متانول مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در نسبت پر شدن کم تر از ۳۰٪ جوشش نوسانی از بین می‌رود و با افزایش قطر لوله، دوره جوشش نوسانی کاهش می‌یابد.

Tian و همکاران [۱۴] اثر پدیده‌های ناپایدار خشک شدن و جوشش نوسانی را در زمان راه اندازی ترموسیفون بررسی نمودند. آن‌ها بیان کردند که رابطه پیچیده‌ای بین گرمای ورودی در بخش تبخیرکننده و گرمای خروجی در بخش چگالنده با دو پدیده بالا وجود دارد، به گونه ای که با افزایش گرمای ورودی نوسانات دمایی به راحتی به انتهای لوله منتقل شده و اثرات فاجعه باری بر انتقال گرمای سامانه دارند.

Grab و همکاران [۱۵] از ترموسیفون فولادی با قطر داخلی ۳۲ و ۴۵ میلی‌متر و طول ۱۰ متر برای بررسی ویژگی‌های انتقال گرما استفاده نمودند. سیال عامل در نسبت پر شدن ۷۰٪ بود. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که اگر کمینه اختلاف دمای ۴۵ کلوین بین دو سر لوله وجود داشته باشد جوشش پایدار وجود دارد و برای لوله با قطر کوچک‌تر این مقدار ۵۰ کلوین است که در هر دو حالت نصف اختلاف دما برای شروع جوشش توسعه یافته (جوشش هسته‌ای) مصرف می‌شود. چون مخازن سوخت دارای اختلاف دمای ۶۰ درجه سلسیوس هستند استفاده از ترموسیفون می‌تواند برای کنترل مخازن سوخت راکتورهای هسته‌ای مناسب باشد.

Smith و همکاران [۱۶] دینامیک جوشش و چگالش را در یک ترموسیفون با طول ۰/۵ متر، قطر درونی ۸ میلی‌متر، طول تبخیرکننده ۰/۱ متر و طول چگالنده ۰/۲ متر مورد بررسی قرار دادند. سیال مورد استفاده آب و HFE7000 بودند. شار گرمای ورودی در بازه $400-1400 \text{ kW/m}^2$ متغیر بود. نتیجه‌ها نشان داد که در شار گرمایی پایین تنها برای آب جوشش نوسانی رخ می‌دهد. همچنین آن‌ها نشان دادند که برای آب با افزایش شار گرمایی ورودی



شکل ۴. تغییر بازده بر حسب شدت جریان در $A.R=16.5$

دقت اندازه‌گیری‌ها برای ترمومتر دیجیتالی (1 ± 0.1 °C) و ترموکوپل‌ها (1 ± 0.1 °C)، شدت جریان حجمی سیال خنک کننده 4 ± 0.1 ٪ و برای فشار بخار درون لوله 2 ± 0.1 ٪ است. برای جزئیات ساخت دستگاه به مراجع [۱۱-۱۲] مراجعه شود. میزان نداشتن قطعیت ایجاد شده خطاهای بالا بر اساس مرجع [۱۹] به تقریب برابر ۵٪ می‌باشد.

نتیجه‌ها و بحث

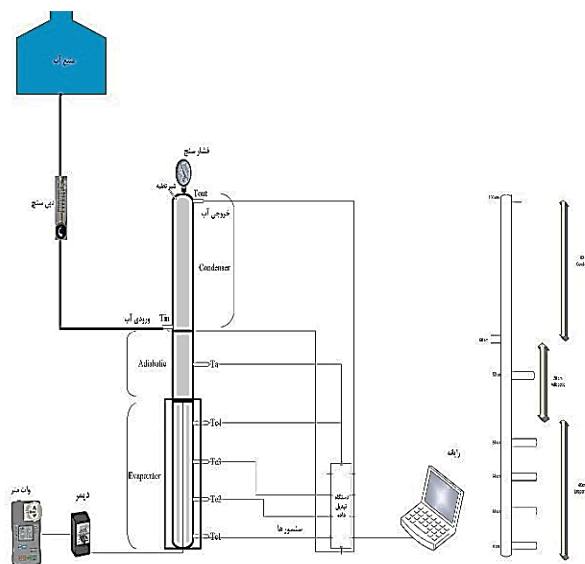
در این بخش اثر متغیرهای مهم از جمله نسبت پر شدن، زاویه شیب، شدت جریان آب خنک کننده، گرمای ورودی و نسبت اندازه‌ها بر روی عملکرد ترموسیفون تحت شرایط جوشش پایدار و نوسانی بررسی می‌شود. با بررسی حدهای عملیاتی ترموسیفون و نیز بررسی تغییرهای توزیع دمای بر روی سطح ترموسیفون از عملکرد طبیعی آن اطمینان به دست آمد [۱]. از آنجا که از روش بررسی یک عامل در هر زمان (One factor at a time) استفاده شد تعداد آزمایش‌ها با دو بار تکرار بسیار زیاد بود در بخش‌های زیر تنها برخی از نتیجه‌ها مهم ارائه شده و سایر نتیجه‌ها در قالب دو رابطه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

تعیین شدت جریان بهینه در بخش غلاف چگالنده

شدت جریان بهینه با توجه به طول، قطر داخلی ترموسیفون، بازه توان ورودی به تبخیرکننده و قطر غلاف چگالنده برای هر سامانه متفاوت از سامانه‌های دیگر می‌باشد؛ بنابراین لازم است پیش از بررسی چهار عامل اصلی، شدت جریان بهینه برای ترموسیفون مورد نظر مشخص شود. برای این منظور، آزمایش‌های بسیاری در نسبت پر شدن، نسبت اندازه و توان‌های ورودی گوناگونی انجام شد که نتیجه‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۱: متغیرهای استفاده شده در آزمایش‌ها

ردیف	متغیر	بازه
۱	نسبت پر شدن	$25\% \leq F.R \leq 70\%$
۲	نسبت اندازه	$A.R=13, 16.5, 20$
۳	زاویه شیب	$5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
۴	توان ورودی (W)	$100 \leq P \leq 300$



شکل ۳: طرح‌واره دستگاه آزمایش این پژوهش

برای عایق کاری دستگاه از عایق پشم شیشه با ضخامت ۵ سانتی‌متر با روکش آلومینیمی استفاده شد. گرمای ورودی در بخش تبخیرکننده توسط گرمکن از رابطه (۱) به دست می‌آید.

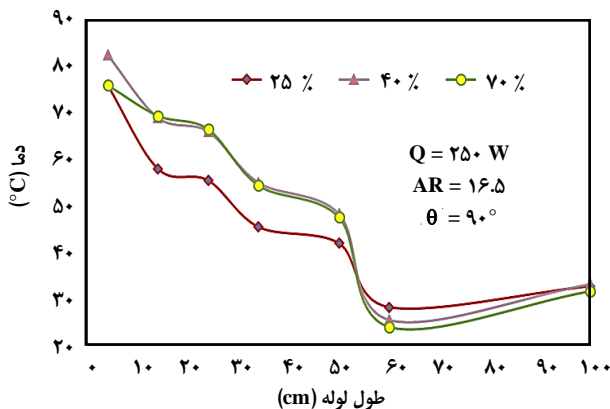
$$Q_{in} = P - Q_{loss} \quad (1)$$

که در آن P توان ورودی است که توسط وات متر ثبت می‌شود و Q_{loss} مجموع اتلاف‌های گرمایی از بخش تبخیرکننده به وسیله تابش و جابجایی آزاد می‌باشد. مقدار اتلاف توان ورودی در بازه ۱۰۰ تا ۳۰۰ وات بین ۲.۰۷٪ تا ۳.۷۳٪ متغیر است. گرمای منتقل شده از بخش چگالنده معادل با گرمای خارج شده توسط جریان آب‌خنک کننده در درون غلاف است و از رابطه (۲) به دست می‌آید.

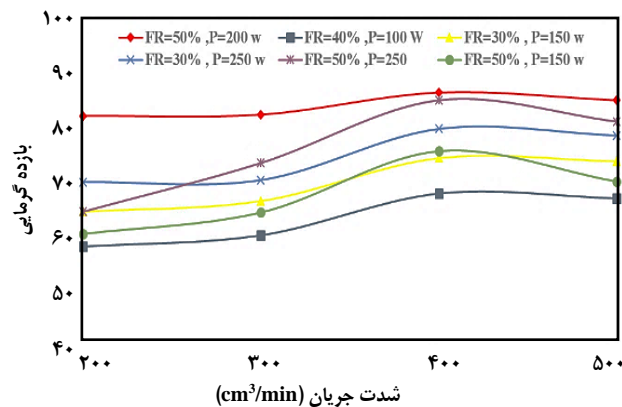
$$Q_{out} = \dot{m} C_{p,w} (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

اکنون بازده گرمایی ترموسیفون با رابطه (۳) بیان می‌شود.

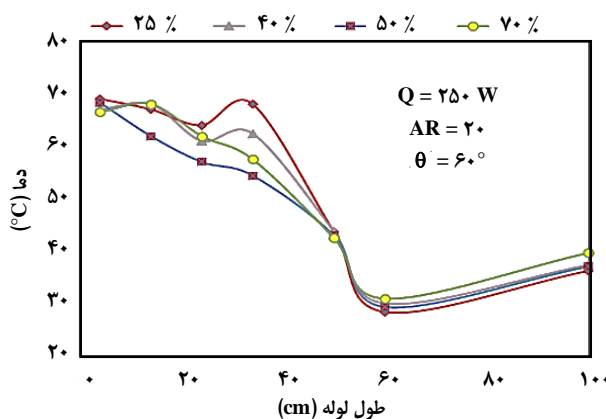
$$\eta = Q_{out} / Q_{in} \quad (3)$$



شکل ۶. تغییرهای دما در طول ترموسیفون در $Q=250\text{ W}$, $\theta=90^\circ$, $A.R=16.5$



شکل ۵. تغییر بازده بر حسب شدت جریان در $A.R=20$



شکل ۷. توزیع دما در ترموسیفون در $Q=250\text{ W}$, $\theta=60^\circ$, $A.R=20$

تبخیرکننده افزایش می‌یابد در نتیجه نرخ تبخیر افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش ارتفاع سیال موجب افزایش فشار هیدرواستاتیک شده و اثر منفی بر روی رشد حباب و فیلم مایع در بخش بالایی تبخیرکننده دارد.

شکل ۷ توزیع دما را بر حسب نسبت پر شدن ۲۵٪، ۴۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪، گرمای ورودی ۲۵۰ وات، و نسبت اندازه ۲۰ برای ترموسیفون با شیب ۶۰ درجه نسبت به افق نشان می‌دهد.

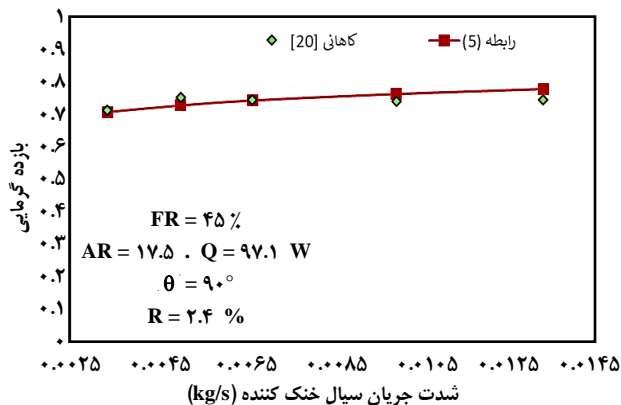
شکل ۷ نشان می‌دهد که با شیب‌دار کردن ترموسیفون در نسبت پر شدن ۲۵٪ متوسط اختلاف دما بین دو انتهای لوله بیش‌تر از دیگر نسبت‌ها می‌باشد. با شیب‌دار شدن ترموسیفون حوضچه مایع در سطح پایین تبخیرکننده گسترش یافته و در نتیجه سطح بالای آن دچار پدیده خشک شدن می‌شود. چون در این وضعیت فیلم مایع برگشتی از بخش بی در رو (آدیباتیک) نیز می‌تواند متوقف شود پدیده خشک شدن شدت یافته به گونه‌ای دمای این نقطه به 68°C می‌رسد.

شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که با افزایش شدت جریان حجمی سیال خنک کننده از $200\text{ (cm}^3/\text{min)}$ تا $400\text{ (cm}^3/\text{min)}$ ، افزایش دمای آب خروجی از غلاف چگالنده چشمگیر بوده و می‌تواند ظرفیت گرمایی ویژه را نیز افزایش دهد. در نتیجه بر اساس رابطه‌های (۲) و (۳) مقدار گرمای خروجی و بازده گرمایی افزایش می‌یابد. در شدت جریان بیش‌تر از $400\text{ cm}^3/\text{min}$ ، چون افزایش دمای آب خروجی ناچیز است در نتیجه ظرفیت گرمایی ویژه تغییر بسیار اندکی خواهد داشت. در نتیجه بازده به تقریب ثابت می‌ماند. به همین دلیل در همه آزمایش‌ها شدت جریان سیال خنک کننده $400\text{ cm}^3/\text{min}$ استفاده شد.

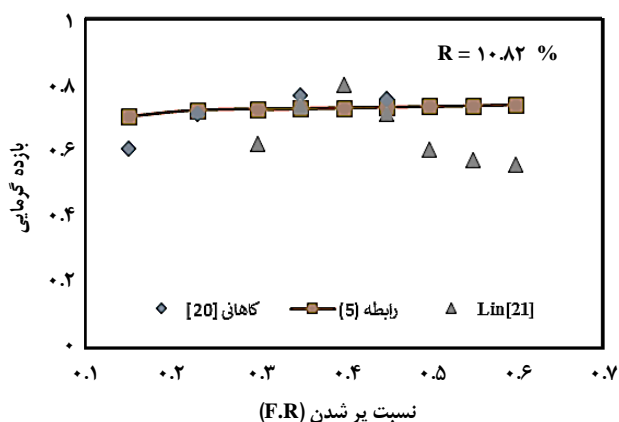
توزیع دمای روی سطح لوله

اختلاف دما بین بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده یک سامانه ترموسیفون دوفازی بسته، بیانگر عملکرد گرمایی آن می‌باشد. به بیان دیگر هر چه این اختلاف دما کم‌تر باشد به این معنی است که گرمای ورودی از بخش تبخیرکننده با مقاومت گرمایی کم‌تری بین دو انتهای لوله منتقل شده و بازده سامانه بالاتر خواهد بود. شکل ۶ توزیع دما را بر حسب نسبت پر شدن ۲۵٪، ۴۰٪ و ۷۰٪، گرمای ورودی ۲۵۰ وات و نسبت اندازه ۱۶/۵ برای ترموسیفون در حالت عمود نشان می‌دهد.

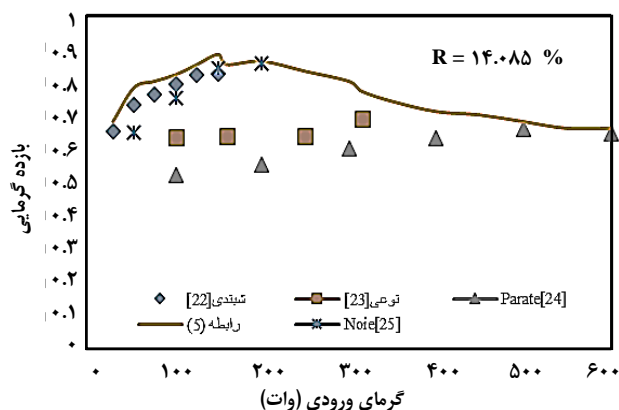
همان گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود در دو مکان کاهش چشمگیر دما رخ می‌دهد که یکی مربوط به انتهای بخش تبخیرکننده تا بخش بی‌دررو و دیگری مربوط به بخش بی‌دررو تا ابتدای بخش چگالنده می‌باشد. همچنین کم‌ترین اختلاف دما بین دو انتهای لوله در نسبت پر شدن ۲۵٪ به دست می‌آید در حالی که اختلاف معناداری بین دو نسبت پر شدن ۴۰٪ و ۷۰٪ دیگر وجود ندارد. با افزایش نسبت پر شدن سیال در ترموسیفون سطح تماس آن با دیواره



شکل ۸. مقایسه مرجع [۲۰] و رابطه (۵) در نسبت پر شدن ثابت



شکل ۹. مقایسه بازده گرمایی از دو مرجع [۲۰-۲۱] و رابطه (۵) در نسبت پر شدن ثابت



شکل ۱۰. مقایسه گرمایی بازده گرمایی به دست آمده از رابطه (۵) و مراجع [۲۲-۲۵]

مراجع [۲۴-۲۵] همخوانی بیش تری با رابطه (۵) این پژوهش، نسبت به پژوهش‌های [۲۲-۲۳] دارند که این موضوع می‌تواند به دلیل نزدیک بودن شرایط این پژوهش با دو پژوهش مورد نظر است.

در هر دو شکل ۶ و ۷ روند افزایش دما در بخش چگالنده دیده می‌شود. با توجه به اینکه ضخامت لایه مایع ایجاد شده در اثر چگالش بخار آب، با حرکت به سمت پایین چگالنده افزایش می‌یابد، موجب افزایش مقاومت گرمایی چگالنده می‌شود. به بیان دیگر، در قسمت بالایی چگالنده بخار آب به طور مستقیم با دیواره چگالنده در تماس است اما در قسمت‌های پایین چگالنده یک لایه مایع مانع تماس مستقیم بخار با دیواره می‌شود و انتقال گرما رسانایی از طریق لایه مایع در حال ریزش روی دیواره داخلی لوله دیواره صورت می‌گیرد.

بررسی اثر یکپارچه عامل‌های بر بازده

به علت تعداد بسیار زیاد آزمایش‌ها امکان ارائه همه نمودارها وجود ندارد. در نتیجه برای بررسی اثر یکپارچه عامل‌های گوناگون بر بازده گرمایی ترموسیفون رابطه (۴) به صورت زیر ارائه شد.

$$\eta = a(F.R)^b (\theta)^c (Q_{in})^d (m)^e (A.R)^f \quad (4)$$

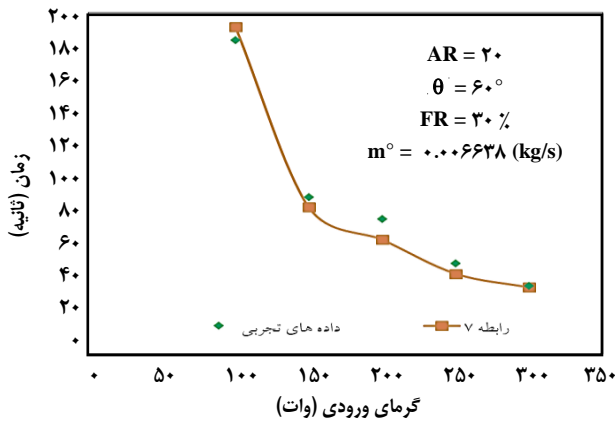
در رابطه (۴) پارامترهای $A.R$ ، $F.R$ و θ بدون بعد بوده ولی Q_{in} (W) و m (kg/s) دارای بعد هستند. با قرار دادن رابطه مورد نظر در نرم افزار دیتافیت (DataFit) و همچنین وارد کردن داده‌های آزمایش در نرم افزار، ثابت‌های رابطه (۵) مشخص می‌شود و رابطه نهایی (۶) به دست می‌آید:

$$\eta = 2.13256 \frac{F.R^{0.02089} Q_{in}^{0.00062} m^{0.06574}}{\theta^{0.10854} A.R^{0.077956}} \quad (5)$$

شکل‌های ۸ و ۹ مقایسه رابطه (۵) با نتیجه مراجع [۲۰-۲۳] را در دو حالت نسبت پر شدن ثابت درون بخش تبخیرکننده و شدت جریان ثابت سیال خنک کننده در غلاف چگالنده نشان می‌دهند.

همان گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، همخوانی خوبی بین نتیجه‌های آزمایش مرجع [۲۰] در نسبت پر شدن ۴۵٪، توان ورودی ۹۷.۱ وات، نسبت اندازه ۱۷/۵ و شیب ۹۰ درجه و شدت جریان سیال خنک کننده متغیر با نتیجه‌های به دست آمده از رابطه (۵) وجود دارد.

همچنین در شکل ۹ مقایسه بازده گرمایی از رابطه (۲) با دو مرجع [۲۰] و [۲۱] در نسبت پر شدن ثابت آورده شده است. همان گونه که شکل ۹ نشان می‌دهد مقدار بازده گرمایی در شرایط یاد شده با خطای ۱۰.۸۲٪ است. همچنین مقایسه بیش تری برای بازده گرمایی تجربی مراجع [۲۲-۲۵] با رابطه (۵) بر حسب توان ورودی به بخش تبخیرکننده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: مقایسه نتیجه‌های آزمایش و رابطه تجربی (۷) در توان‌های ورودی متفاوت و $A.R=20, \theta=60^\circ, F.R=30\%$

همچنین پیش‌بینی می‌شود که ارتباط بین متغیرهای مورد بررسی با دوره زمانی نوسان دمای خروجی از چگالنده با رابطه (۶) بیان شود:

$$\tau = a(F.R)^b (\theta)^c (Q_{in})^d (\dot{m})^e (A.R)^f \quad (6)$$

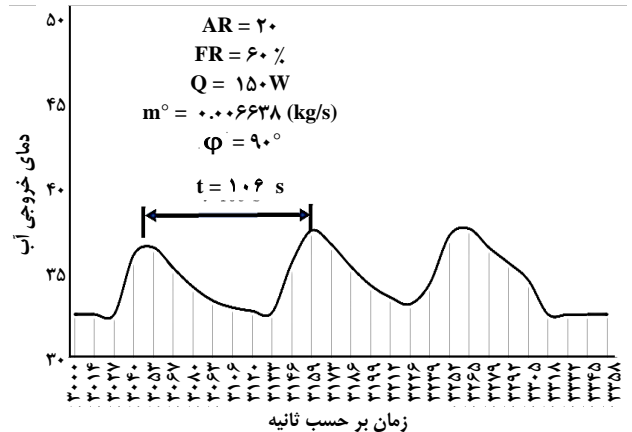
در این رابطه $A.R, F.R$ و θ بدون بعد ولی Q_{in} (W) در τ (s) و \dot{m} (Kg/s) هستند. دوباره برای به دست آوردن ثابت‌های رابطه (۶) از نرم افزار دیتافیت استفاده شد. بنابراین رابطه (۶) با قرار دادن ثابت‌ها به صورت رابطه (۷) اصلاح شد:

$$\tau = 0.107 \frac{F.R^{0.306} A.R^{0.804}}{\theta^{0.224} Q_{in}^{1.304} (\dot{m})^{2.438}} \quad (7)$$

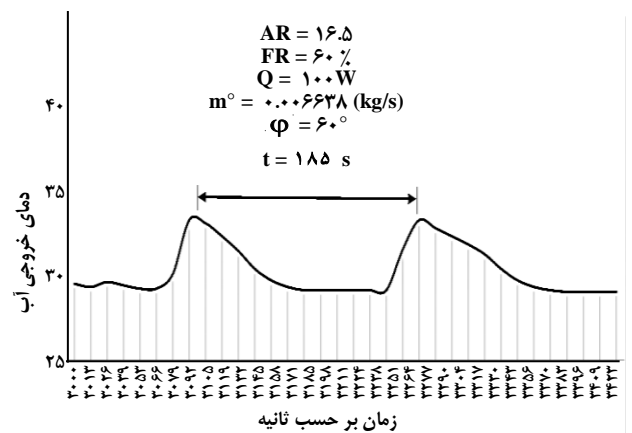
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نتیجه‌های تجربی با نتیجه‌های رابطه (۷) مقایسه شده است.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش گرمای ورودی دوره نوسان جوشش به دلیل افزایش سرعت صعود حباب‌ها به شدت کاهش می‌یابد. در واقع به الگوی جوشش توسعه یافته نزدیک می‌شویم.

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت پر شدن (در شرایط ثابت) دوره نوسان جوشش افزایش می‌یابد. برآورد خطای استاندارد که توسط نرم‌افزار دیتافیت محاسبه شد مقدار ۴/۵٪ می‌باشد.



شکل ۱۱: دوره نوسان دما در $A.R=20, F.R=60\%, Q=150 \text{ W}, \theta=90^\circ$



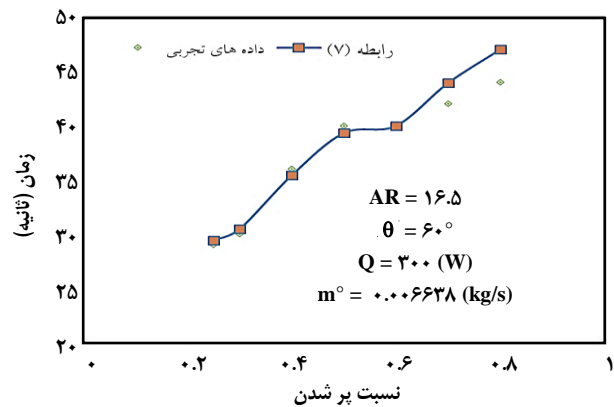
شکل ۱۲: دوره نوسان دما در $A.R=16.5, F.R=60\%, Q=100 \text{ W}, \theta=60^\circ$

بنابراین رابطه (۵) برای طراحی به عنوان حد بالا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی جوشش نوسانی

در این پژوهش از روش نوسان دمای آب خروجی از غلاف چگالنده برای بررسی جوشش نوسانی استفاده شده است. مقدار شدت جریان جرمی یاد شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ از ضرب شدت جریان حجمی در جرم ویژه آب (در دمای میانگین آب ورودی و خروجی از غلاف چگالنده) به دست آمده است. مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد که با کاهش گرمای ورودی، افزایش طول تبخیرکننده و کاهش شیب (از حالت عمود) سرعت صعود حباب شکل گرفته در بخش تبخیرکننده کاهش می‌یابد. در نتیجه زمان رسیدن این حباب و مایع بالای سر آن به انتهای بخش چگالنده افزایش می‌یابد. متلاشی شدن حباب در چگالنده موجب می‌شود دمای آب خروجی از غلاف چگالنده به تقریب ۵ درجه سلسیوس افزایش یابد.

- با افزایش توان ورودی دوره نوسان جوشش به شدت کاهش و با افزایش نسبت پر شدن (در شرایط یکسان) دوره نوسان جوشش افزایش می‌یابد. در گرماهای ورودی بالای ۱۵۰ وات جوشش از نوع توسعه یافته رخ می‌دهد حال آن که در گرمای ورودی ۱۰۰ وات به بخش تبخیرکننده جوشش از نوع ترکیبی رخ می‌دهد.
- دوره نوسانات دما با نسبت پر شدن و نسبت اندازه‌ها رابطه مستقیم و با سه عامل زاویه شیب، گرمای ورودی به بخش تبخیرکننده و شدت جریان آب‌خنک کننده در غلاف بخش چگالنده رابطه وارون دارد. از بین پنج متغیر ذکر شده، متغیر گرمای ورودی بیش‌ترین تأثیر در بین عامل‌های گوناگون دارا می‌باشد.



شکل ۱۴: مقایسه نتیجه‌های آزمایش و رابطه تجربی (۷) در نسبت پر شدن‌های متفاوت و $A.R=16.5, \theta=60^\circ, Q_{in}=300\text{ W}$

فهرست نمادها

نماد	بیانگر	شرح
A.R.	نسبت اندازه (بدون بعد)	نسبت طول بخش تبخیرکننده به قطر درونی لوله
F.R.	نسبت پر شدن (بدون بعد)	نسبت حجم سیال عامل موجود در لوله به حجم بخش تبخیرکننده
$C_{p,w}$	ظرفیت گرمایی ($J/kg \cdot ^\circ C$)	در میانگین دمای ورودی و خروجی آب در غلاف چگالنده محاسبه می‌شود.
\dot{m}	شدت جریان جرمی (kg/s)	شدت جریان سیال خنک جاری در غلاف بخش چگالنده
P	توان ورودی (W)	توان ورودی به بخش تبخیرکننده (حاصل ضرب جریان در ولتاژ)
Q_{in}	گرمای ورودی خالص جذب شده (W)	اختلاف توان ورودی و اتلاف‌های گرمایی از بخش تبخیرکننده
Q_{loss}	گرمای تلف شده (W)	مجموع اتلاف گرما از راه تابش و جابجایی با محیط می‌باشد.
T_{in}	دمای ورودی ($^\circ C$)	دمای ورودی آب به غلاف چگالنده
T_{out}	دمای خروجی ($^\circ C$)	دمای خروجی آب از غلاف چگالنده
θ	زاویه	شیب ترموسیفون نسبت به افق
τ	زمان (s)	دوره زمانی بین دو تغییر ناگهانی در دمای آب خروجی از چگالنده
η	بازده گرمایی	نسبت گرمای خروجی از چگالنده به گرمای ورودی به تبخیرکننده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۲۵

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عامل‌های گوناگون بر عملکرد گرمایی یک ترموسیفون دو فازی بسته تحت شرایط جوشش گرمایی پایدار و نوسانی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. لوله مورد آزمایش از جنس مس به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر، قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ثابت ۴۰۰ میلی‌متری چگالنده و طول متغیر از تبخیرکننده بود. عامل‌های مورد بررسی شامل نسبت پر شدن، زاویه شیب، شدت جریان آب‌خنک کننده، گرمای ورودی و نسبت اندازه (در قطر ثابت) بودند. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که:

- بررسی توزیع روی سطح بیرونی ترموسیفون نشان داد که با شیب‌دار کردن ترموسیفون و افزایش طول بخش تبخیرکننده نیاز به سیال عامل بیشتری برای دستیابی به عملکرد گرمایی بالاتر نسبت به حالت عمود می‌باشد.
- رابطه تجربی به دست آمده برای بازده گرمایی ترموسیفون در گستره‌های مورد آزمایش نشان داد که مقدار بازده گرمایی اثر مستقیم با نسبت پر شدن، گرمای ورودی و شدت جریان سیال خنک کننده و نسبت وارون با زاویه شیب و نسبت اندازه‌ها دارد.
- رابطه تجربی ارائه شده برای دوره زمانی نوسان دمای آب خروجی از چگالنده نشان می‌دهد که این مقدار با نسبت پر شدن و نسبت اندازه رابطه مستقیم و با زاویه شیب، گرمای ورودی و شدت جریان سیال خنک کننده به غلاف چگالنده رابطه وارون دارد.

مراجع

[1] Faghri A., "Heat Pipe Science and Technology", Global Digital Press, USA (2016).

- [2] Zare Aliabadi H., Atashy H., Noie S.H., Khoshnoodi M., Khorram M., Khoshvaght M., Experimental and Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer in a Gas-Liquid Thermosyphon Heat Exchanger in a Pilot Plant, *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **29** (2): 121-129 (2010).
- [3] Jafari D., Franco A., Filippeschi S. Di Marco P., Two-Phase Closed Thermosyphons: A Review of Studies and Solar Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **53**:575-593 (2016).
- [4] Ma C., Wu X., Gao S., Analysis and Applications of a Two-Phase Closed Thermosyphon for Improving the Fluid Temperature Distribution in Wellbores, *Applied Thermal Engineering*, **55**(1-2):1-6 (2013).
- [5] خزایی، ا.، حسینی، ر.، بهرامیان، ع.، "بررسی تجربی خصوصیات گرمایی، رژیم‌های جوشش و جوشش نوسانی در یک ترموسیفون دوفازی بسته"، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شماره‌ها، ۱۰-۸ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ۱۳۸۸.
- [6] Negishi K., Sawada T., Heat Transfer Performance of an Inclined Two-Phase Closed Thermosyphon, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26**(8):1207-1213 (1983).
- [7] Negishi K., "Unstable Phenomena in a Two-Phase Closed Thermosyphon", *Proc. Symp. on Mechanics for Space Flight*, August 22-24, Lake Placid, NY (1983).
- [8] Negishi K., "Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Closed Thermosyphons", *Proc. 5th IHPC*, 1984.
- [9] Lin T.F., Lin W.T., Tsay Y.L., Wu J.C., Experimental Investigation of Geyser Boiling in an Annular Two Phase Closed Thermosyphon, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **38**(2):295-307 (1995).
- [10] Kunkoro H., Rao Y.F., Fukuda K., An Experimental Study on the Mechanism of Geysering in a Closed Two Phase Thermosyphon, *Int. J. of Multiphase Flow*, **21**(6):1243-1252 (1995).
- [11] سرمستی امامی م. ر.، نوعی، س. ح.؛ خشنودی م.، نعمتی م.، "بررسی جوشش نوسانی در یک ترموسیفون دوفازی بسته"، دهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، ۲۴-۲۶ آبان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران (۱۳۸۴).
- [12] Sarmasti Emami M.R., Noie S.H., Khoshnoodi M., Hamed Mosavian M.T. , Kianifar A., Investigation of Geyser Boiling Phenomenon in a Two-Phase Closed Thermosyphon, *Heat Transf. Eng.*, **30**(5):408-415 (2009).
- [13] Khazaee I., Hosseini R. Noie S.H., Experimental Investigation of Effective Parameters and Correlation of Geyser Boiling in a Two-Phase Closed Thermosyphon, *Applied Thermal Eng.*, **30**:406-412 (2010).
- [14] Tian F.Z., Xin G.M., Wang X.Y. Cheng L., An Investigation of the Unstable Oscillation Phenomenas of Two-Phase Closed Thermosyphon, *Adv. Materials Research*, **668**: 608-611 (2013).
- [15] Grab C., Kulenovic R., Starflinger J., "Experimental Investigation on Long Two-Phase Closed Thermosiphons to be Applied in Spent Fuel Pools for Passive Heat Removal", *26th Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe*, September 11-14, Bled, Slovenia (2014).

- [16] Smith K., Kempers R., Robinson A., "Boiling and Condensation in Small Diameter Closed Two-Phase Thermosyphons", *9th Int. Conf. on Boiling and Condensation Heat Transfer*, April 26-30, Boulder, Colorado (2015).
- [17] Jouhara H., Fadhl B., C. Wrobel, L., Three-Dimensional CFD Simulation of Geyser Boiling in a Two-Phase Closed Thermosyphon, *Int. J. of Hydrogen Energy*, **41**(37):16463-16476 (2016).
- [18] Wang X., Wang Y., Chen H., Zhu Y., A Combined CFD/Visualization Investigation of Heat Transfer Behaviors During Geyser Boiling in Two-Phase Closed Thermosyphon, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **121**:703-714 (2018).
- [19] Holman J.D., "Experimental Methods for Engineers", 5th ed., Mc. Grow-Hill, New York, USA (1989).
- [20] کاهانی م، نوعی س.ح، زینالی هریس س، مقایسه عملکرد گرمایی یک ترموسیفون دوفازی بسته در اثر استفاده از نانو سیال‌های اکسید فلزی، نشریه جداسازی و پدیده‌های انتقال، **۲۱**(۱): ۴۳ تا ۵۸ (۱۳۸۹).
- [21] Lin M.C., Chun L.J., Lee W.S., Chen S.L., Thermal Performance of a Two-Phase Thermosyphon Energy Storage System, *Solar Energy*, **75**(4): 295-306 (2003).
- [22] شبندی م، زینالی هریس س، بنی آدم م، امیری ا، "بهبود عملکرد گرمایشی ترموسیفون بسته دوفازی (TPCT) بر اثر افزودن نانولوله کربنی به آب دیونیزه"، سومین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، ۳-۵ خرداد، تهران (۱۳۹۰).
- [23] نوعی س.م، نوعی س.ح، حریری دیبا ف، بررسی تجربی عملکرد نانو سیال اکسید مس - استون بر بازده گرمایی یک ترموسیفون دوفازی بسته، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۲**(۳): ۳۱ تا ۳۸ (۱۳۹۲).
- [24] Parate H. Farkade, S., Thermal Performance of a Two Phase Closed Thermosyphon Using Nanofluid, *Int. J. for Scientific Research & Development*, **2**(4):8-11 (2014).
- [25] Noie S.H., Zeinali Heris S., Kahani M., Nowee S.M., Heat Transfer Enhancement Using Al_2O_3 /Water Nanofluid in a Two-Phase Closed Thermosyphon, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, **30**:700-705 (2009).