

تأثیر نسبت پرشدن بر عملکرد و ضریب انتقال حرارت در تبخیرکننده و چگالنده ترموسیفون (لوله گرمایی بدون فتیله)

مسعود رحیمی* و حسن میرشاهی

دانشگاه رازی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات CFD

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۲/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۷/۷/۱۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۷/۱۰/۵

چکیده ترموسیفون، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد، جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های بهینه‌سازی مصرف و بازیافت انرژی یافته است. این مقاله، به بررسی تأثیر نسبت پرشدن، بر ضریب انتقال حرارت بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده و همچنین عملکرد کلی ترموسیفون می‌پردازد. بدین منظور یک نمونه آزمایشگاهی ترموسیفون، از جنس مس به قطر داخلی ۱۷/۵mm و قطر خارجی ۱۹mm و طول ۱m طراحی و ساخته شد. طول بخش‌های تبخیرکننده، بی‌دررو و چگالنده به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۴۰cm بود. آب یون‌زدایی، با نسبت‌های پرشدن ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۸ درون ترموسیفون تزریق شد. دمای نقاط مختلف ترموسیفون و دمای آب ورودی و خروجی چگالنده و همچنین فشار بخار در انتهای بالایی ترموسیفون ثبت شد. در نهایت بالاترین عملکرد ترموسیفون بین این سه حالت در نسبت پرشدن ۰/۵ مشاهده شد. به علاوه، حداکثر ضریب انتقال حرارت بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده نیز در این محدوده قرار داشت.

کلمات کلیدی بازیافت انرژی، ترموسیفون، نسبت پرشدن، عملکرد، ضریب انتقال حرارت.

The Effect of Fill Ratio on Performance and Heat Transfer Coefficient of Thermosyphon's Evaporator and Condenser

M. Rahimi* and H. Mirshahi

Group of Chemical Engineering, Department of Engineering, University of Razi

Abstract Thermosyphons has a special position in field of energy recovery and saving regarding to their unique performance. In the present research, the effect of the fill ratio on the heat transfer rate in the evaporator and condenser sections as well as the overall performance of the thermosyphon was studied. For this purpose, a one meter copper thermosyphon tube with an inside and outside diameters of 17.5 and 19 mm was fabricated. The length of the evaporator, adiabatic and condenser sections were 40, 20 and 40 cm respectively. The deionizer water with the fill ratio of 0.3, 0.5 and 0.8 were used as working fluid in experiments. The temperature was recorded at various points on the thermosyphon as well as at the inlet and outlet streams of the condenser. The maximum performance among three cases was observed at the 0.5 fill ratio. In addition, the maximum heat transfer rate in the condenser and evaporator was happened in this ratio.

Keywords Energy Recovery, Thermosyphon, Fill Ratio, Performance, Heat Transfer Coefficient.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: کرمانشاه، دانشگاه رازی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات CFD.
تلفن: ۰۸۳۱-۴۲۷۴۵۳۰، دورنگار: ۰۸۳۱-۴۲۷۴۵۳۰، پیام نگار: masoudrahimi@yahoo.com

۱- مقدمه

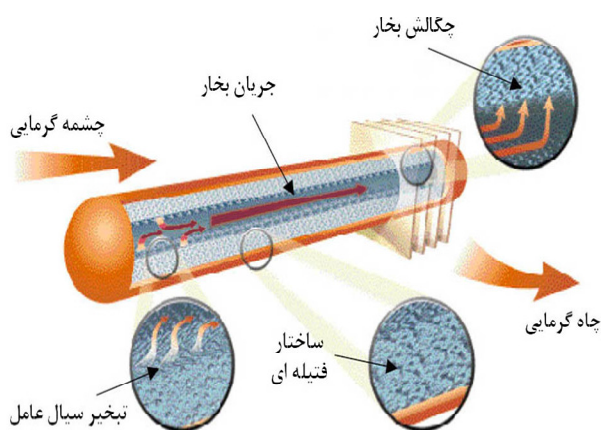
سادگی با مشاهده شکل ۱ دریافت می شود. گرما از راه یک چشمه گرمایی خارجی به بخش تبخیرکننده اعمال می شود و از میان دیواره لوله و سازه فتیله ای هدایت شده و سبب تبخیر سیال عامل می شود. اختلاف فشار ایجاد شده به دلیل تبخیر، موجب انتقال بخار، از میان بخش بی دررو به چگالنده می شود. در نهایت بخار، گرمای نهان تبخیر خود را به چاه گرمایی منتقل می کند و چگالیده می شود. فشار مویینگی ایجاد شده توسط سطوح هلالی فتیله، سیال چگالش یافته را به تبخیرکننده برمی گرداند. اجزای لوله گرمایی عبارت اند از ظرف آب بندی شده (شامل لوله و کلاهک های انتهایی)، سازه فتیله ای و مقداری سیال عامل (در تعادل با بخار خود تشکیل شده است) [۲].

ترموسیفون دوفازی بسته، یک لوله گرمایی بدون فتیله است (شکل ۲). عملکرد آن مشابه لوله گرمایی است، با این تفاوت که برای برگرداندن سیال چگالش یافته به تبخیرکننده، فقط از نیروی گرانش کمک می گیرد. از این رو، برای اینکه ترموسیفون عملکرد درستی داشته باشد، بخش چگالنده باید بالاتر از تبخیرکننده قرار گیرد. ترموسیفون ها، به دلیل بازده بالا،

نیاز روزافزون به انرژی و استفاده نادرست از منابع تجدیدناپذیر، موجب بحران انرژی شده است و از آنجا که کلید توسعه صنعت، انرژی است، مباحثی همچون بهینه سازی مصرف انرژی، بازیافت و استفاده از انرژی های نو و تجدیدپذیر اهمیت چشمگیری یافته است. در این میان، نحوه و کیفیت انتقال حرارت و عملکرد دستگاه های انتقال حرارت بسیار مهم است. در بین سیستم های انتقال حرارت گوناگون، لوله گرمایی یکی از مؤثرترین سیستم های شناخته شده تا امروز است. برتری آن نسبت به روش های متداول دیگر این است که با یک سطح مقطع کوچک و در فاصله مناسب، بدون نیاز به وارد کردن توان اضافی به سیستم، می توان مقادیر زیاد حرارت را با اختلاف دمای ناچیز منتقل کرد [۱].

ایده اولیه لوله گرمایی^۱ را از لوله پرکینز^۲ گرفته اند، که حاصل یک سری اختراع خانواده پرکینز از اواسط قرن نوزدهم تا قرن بیستم در بریتانیا بود. اساس انتقال حرارت در این دستگاه ها تغییر فاز بود. امروزه به این دسته از لوله های گرمایی که سیال چگالش یافته، فقط به واسطه نیروی گرانش به تبخیرکننده برمی گردد، ترموسیفون دوفازی بسته^۳ می گویند [۲]. گاگلر^۴، اولین لوله گرمایی را که از خاصیت مویینگی برای انتقال سیال چگالش یافته کمک می گرفت، در سال ۱۹۴۴ اختراع کرد. با این همه، تا سال ۱۹۶۴ که گروور^۵ و همکارانش [۴] نشان دادند که هدایت گرمایی لوله های گرمایی حتی می تواند چندین برابر بهترین هادی های فلزی باشد، رونق چندانی نداشت. اصطلاح لوله گرمایی را نیز نخستین بار وی به کار برد [۱].

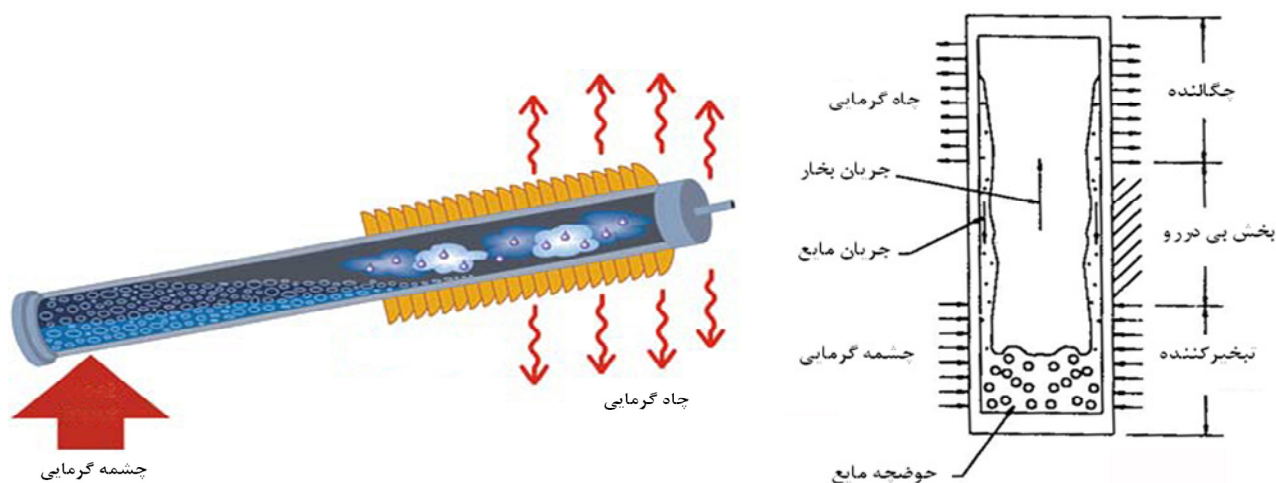
لوله گرمایی در یک چرخه دوفازی بسته عمل می کند و از گرمای نهان تبخیر برای انتقال حرارت با شیب دمای بسیار کوچک ($\frac{\Delta T}{\Delta x}$) استفاده می کند. نحوه عملکرد لوله گرمایی به



شکل ۱. طرح کلی لوله گرمایی.

1. Heat Pipe.
2. Perkins.
3. Two Phase Closed Thermosyphon.

4. Gaugler.
5. Groer.



شکل ۲. ترموسیفون دوفازی بسته.

عملکرد گرمایی چند نانوسیال برپایه آب و آب خالص یون زدایی شده (به منزله سیال عامل)، را با هم مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند که استفاده از نانوسیالها باوجود افزایش ترکندگی موجب افزایش مقاومت گرمایی و کاهش عملکرد ترموسیفون می‌شود. شار حرارتی بحرانی (CHF) ناشی از محدودیت طغیان ترموسیفون دوفازی بسته، برای مخلوطی از تری اتیلن گلیکول (TEG) و آب را، نانتافان^۶ و همکارانش، بررسی کردند [۱۲]. آنها پی بردند که استفاده از مخلوط آب و TEG (بسته به مقدار TEG) به گسترش محدوده شار حرارتی بحرانی منجر می‌شود. استفاده نسبت مناسبی از این مخلوط در یک مبدل حرارتی، موجب بالا رفتن عملکرد مبدل در دو حالت همسو و ناهمسو می‌شود. قابلیت کاربرد ترموسیفون‌های دو فازی بسته، در نقش ابزارهای انتقال حرارت بین محفظه احتراق و پخت در تنورها و کوره‌ها را سیلوا^۷ و منتلی^۸ [۶]، بررسی کردند. داده‌های تجربی نشان داد که ترموسیفون‌ها توزیع دمایی بسیار یکنواختی در محفظه پخت ایجاد می‌کنند، بی‌آنکه هیچ نقطه‌ای بیش از حد گرم شود آبرو^۹ و کول^{۱۰} [۷]، رفتار گرمایی یک ترموسیفون دوفازی بسته با شکل غیرمعمول را در

قابلیت اطمینان، هزینه اندک و طراحی و ساخت ساده کاربردهای بسیار فراوانی یافته‌اند. این کاربردها شامل حفاظت از یخچال‌های دائمی طبیعی، یخ‌زدایی از بزرگراه‌ها، خنک کردن پره توربین، مبدل‌های حرارتی [۲]، سیستم‌های تهویه مطبوع [۵]، صنایع غذایی [۶]، انرژی خورشیدی [۸،۷] و کنترل دمای راکتورها [۹] می‌باشد.

یک مدل جامع برای بررسی اثر نسبت پرشدن (نسبت حجم سیال عامل به حجم تبخیرکننده) بر عملکرد انتقال حرارت حالت پایدار یک ترموسیفون عمودی را ژیاو^{۱۰} و همکارانش عرضه کردند [۱۰]. آنها براساس توزیع لایه ریزان مایع و حوضچه مایع، سه نوع الگوی جریان و دو حالت گذرا در مدلشان مطرح کردند. مدل آنها سازگاری خوبی با داده‌های تجربی داشت. از طرف دیگر آنها دریافتند، که محدوده تقریبی نسبت پرشدن که بتواند ترموسیفون را در حالت پایدار و بهینه نگه دارد، به مرز بالایی EFR و مرز پایینی CFR بستگی دارد. EFR حالتی است که حوضچه مایع، کل تبخیرکننده را پر می‌کند و CFR حالتی است که ضخامت لایه مایع به حدی کاهش یابد که لایه مایع خشک شود. خنده کار^{۱۱} و همکارانش [۱۱]

6. Jiao.

7. Khandekar.

8. Nuntaphan.

9. Silva.

10. Mantelli.

11. Abrero.

12. Colle.

تبخیرکننده ترموسیفون پیچیده شد. یک رئوستا با توان نهایی ۲KW برای تأمین توان ورودی به کار رفت. توان اعمال شده به تبخیرکننده با یک آمپرسنج و یک ولتسنج اندازه گیری و کنترل شد. بدین منظور، آمپرسنج به صورت سری و ولتسنج به صورت موازی در مدار قرار گرفت (شکل ۳ الف). توان ورودی به تبخیرکننده از این رابطه محاسبه می شود:

$$Q_{in} = IV \quad \text{رابطه (۱)}$$

I و V به ترتیب شدت جریان ورودی به گرم کننده بر حسب آمپر و ولتاژ اعمال شده بر حسب وات است. برای ایجاد خلأ و تزریق سیال عامل از روش بسیار ساده و متداول در ایران استفاده شد. در این روش، پس از تزریق میزان مشخص سیال عامل (بر اساس نسبت پرشدن)، شیر تخلیه بسته می شود. با اعمال حرارت به بخش تبخیرکننده، سیال عامل شروع به تبخیر می کند و در نتیجه فشار درون ترموسیفون افزایش می یابد. در نهایت سیال عامل به جوش می آید و بخار حاصل، هوای موجود در ترموسیفون را به انتهای بالایی چگالنده می راند و بلوکه می کند. در این لحظه با باز کردن شیر تخلیه برای چند لحظه، قسمت عمده هوای موجود در ترموسیفون خارج می شود. باید توجه داشت که بلافاصله پس از مشاهده بخار در خروجی شیر تخلیه، شیر بسته شود. حرکت جبهه بخار به سمت بالا با افزایش ناگهانی دما در بخش های بالایی کاملاً مشاهده می شود.

برای هر سه نسبت پرشدن (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۸)، سه توان ورودی ۳۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰W به بخش تبخیرکننده اعمال شد و این آزمایش ها برای هر توان ورودی، در دو دبی حجمی ۷ و $14 \text{ cm}^3/\text{s}$ از آب خنک کننده تکرار شد. دمای نقاط مختلف ترموسیفون و همچنین دمای آب ورودی و خروجی چگالنده، پس از رسیدن به حالت پایدار اندازه گیری و ثبت شد.

دو حالت گذرا و پایدار به صورت تجربی بررسی کردند. چگالنده این ترموسیفون، که برای استفاده در آبگرمکن خورشیدی خانگی طراحی و ساخته شد، نیم دایره ای بود؛ درحالی که تبخیرکننده آن به صورت مستقیم بود. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که با افزایش دمای آب خنک کننده ورودی به چگالنده یا کاهش طول تبخیرکننده، مقاومت گرمایی کل کاهش می یابد. کمترین شیب (30°) و نسبت پرشدن ۶۰٪ بهترین نتایج را در برداشت ولی باید حد خشکی را نیز در نظر گرفت.

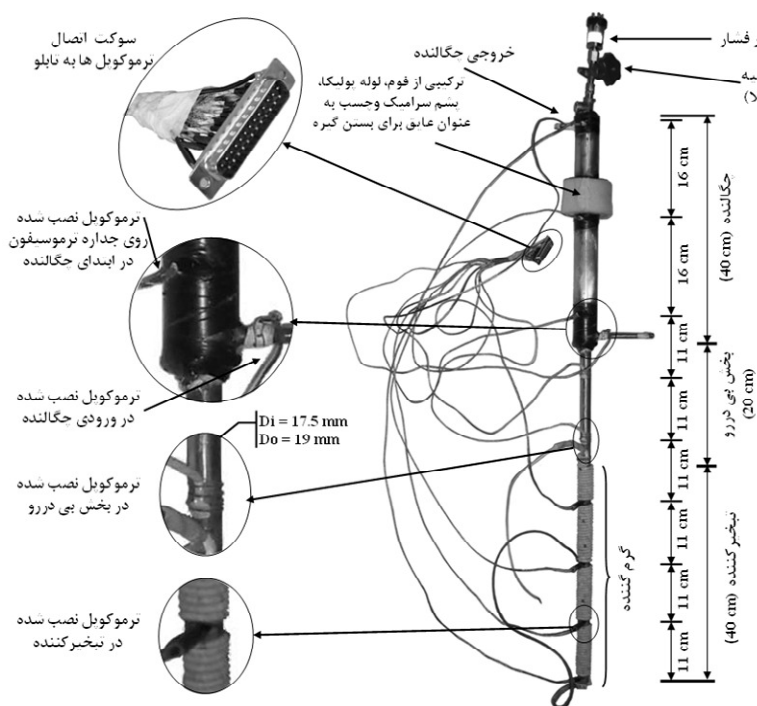
در این پژوهش اثر نسبت پرشدن بر روی عملکرد و ضریب انتقال حرارت تبخیرکننده و چگالنده یک ترموسیفون دوفازی بسته بررسی شده است.

۲- نحوه انجام آزمایش

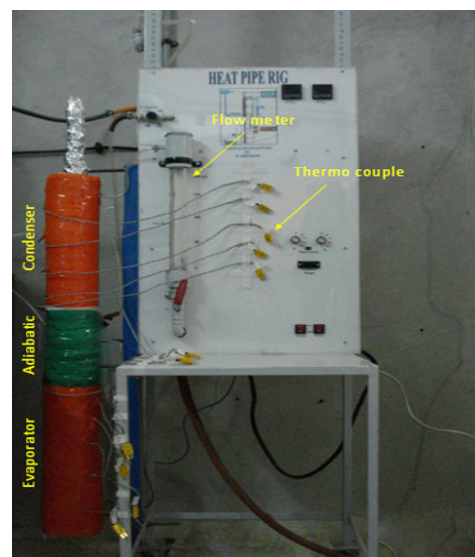
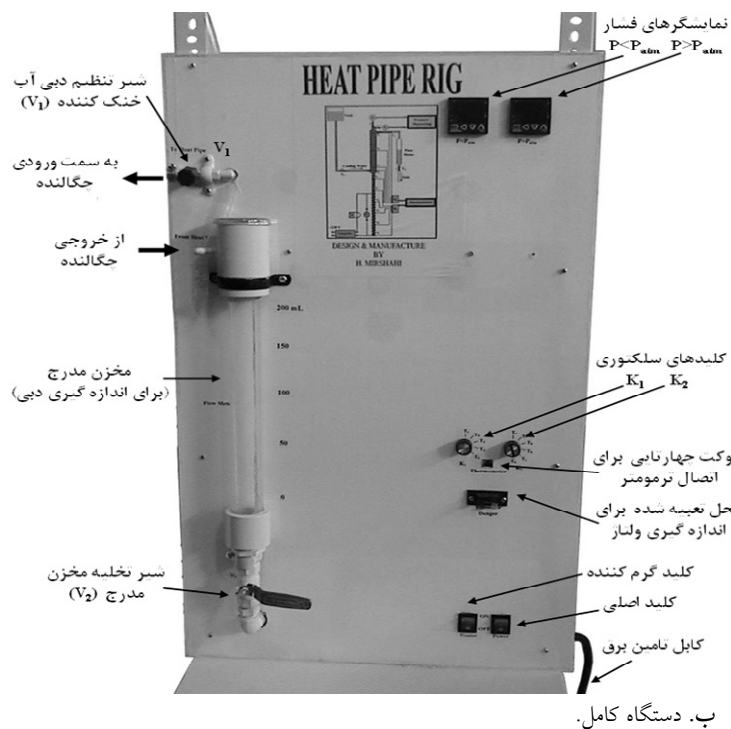
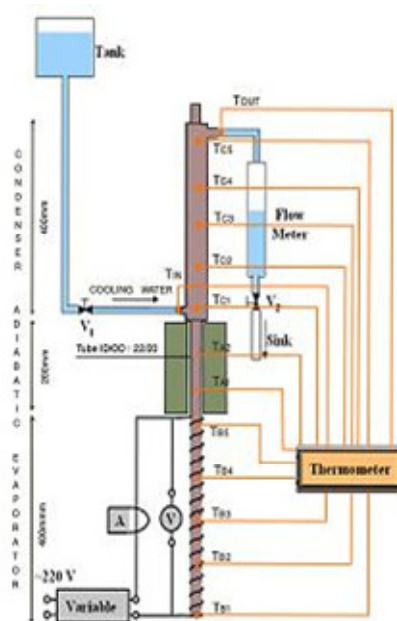
یک دستگاه ویژه برای انجام آزمایش ها طراحی و ساخته شد. طرح کلی به همراه تصویری از دستگاه و ترموسیفون ساخته شده در شکل ۳ آمده است.

ترموسیفونی از جنس مس، به طول ۱ m و قطر داخلی $17/5 \text{ mm}$ و قطر خارجی ۱۹ mm ساخته شد. یک لوله مسی به قطر ۴cm و طول ۴۰cm با تشکیل یک مبدل دولوله ای، نقش چگالنده ترموسیفون را بازی می کند. طول بخش های تبخیرکننده، بی دررو و چگالنده به ترتیب ۴۰، ۲۰ و ۴۰cm است. دمای ۹ نقطه از جداره ترموسیفون و همچنین دمای آب ورودی و خروجی چگالنده اندازه گیری و ثبت شد.

تمام ترموکوپل ها از نوع K انتخاب شدند. یک حسگر فشار نیز برای اندازه گیری و ثبت فشار بخار در انتهای بالایی ترموسیفون نصب شد. برای اعمال حرارت به تبخیرکننده، از یک گرم کننده الکتریکی استفاده شد که به طور یکنواخت دور



الف. ترموسیفون.

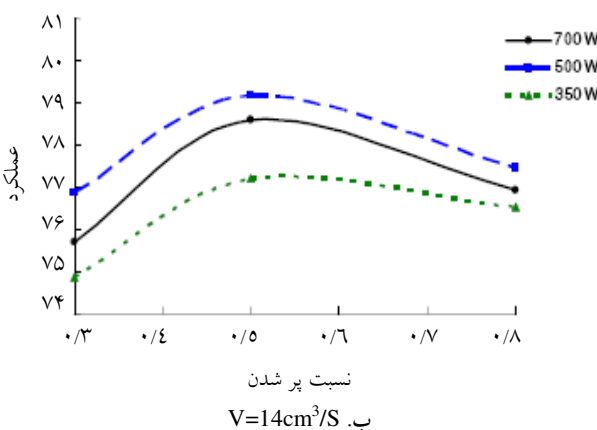
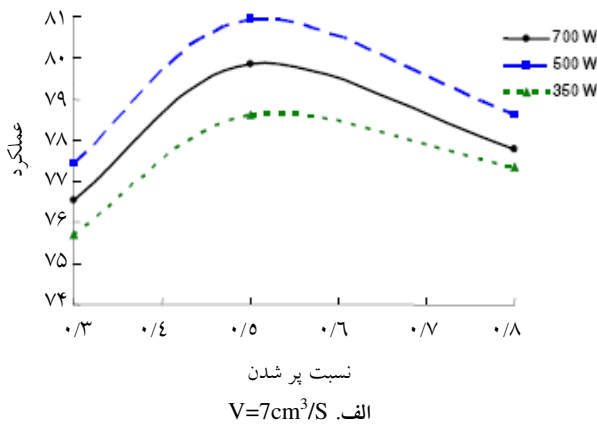


ب. دستگاه کامل.

شکل ۳. طرح کلی و تصویر واقعی از دستگاه ساخته شده ترموسیفون.

نسبت پرشدن ابتدا عملکرد ترموسیفون افزایش، و سپس کاهش می یابد (شکل ۴).

باتوجه به شکل ۴ مشاهده می شود که مقدار بهینه ای از نسبت پرشدن برای به دست آوردن بیشترین عملکرد وجود دارد. در نسبت های پرشدن پایین به دلیل خشکی موضعی تبخیرکننده و بالارفتن مقاومت گرمایی ترموسیفون، عملکرد کاهش می یابد. پدیده خشکی وقتی رخ می دهد که لایه ریزان مایع قبل از رسیدن به انتهای تبخیرکننده ناپدید شود. در نسبت های پرشدن بسیار کم، این پدیده حتی به ترموسیفون آسیب می زند.



شکل ۴. عملکرد ترموسیفون برحسب نسبت پرشدن در توان های ورودی مختلف.

برای محاسبه بار حرارتی چگالنده (توان خروجی) و عملکرد (کارایی) ترموسیفون از این روابط استفاده می شود:

$$Q_{out} = \rho \dot{V}_c (T_{out} - T_{in}) * 10^{-6} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} * 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

از روابط ۴ و ۵ برای محاسبه ضریب انتقال حرارت تبخیرکننده و چگالنده استفاده می شود:

$$h_e = \frac{Q_{in}}{A_e (T_e - T_v)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$h_c = \frac{Q_{out}}{A_c (T_v - T_c)} \quad \text{رابطه (۵)}$$

T_e و T_c به ترتیب دمای متوسط بخش های تبخیرکننده و چگالنده و T_v دمای بخار است، که برابر با دمای متوسط بخش بی دررو فرض شده است [۲]. بنابراین باتوجه به شکل ۳ داریم:

$$T_e = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$T_c = \frac{T_7 + T_8 + T_9}{3} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$T_v = \frac{T_5 + T_6}{2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

۳- نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش ها مشاهده شد که برای تمامی حالت های شار حرارتی و دبی حجمی یکسان، با افزایش

نتایج نشان داد که افزایش توان اعمال شده به ترموسیفون نیز عملکرد را می‌افزاید. با این همه، افزایش بیش‌ازحد، کاهش عملکرد ترموسیفون را در پی دارد (شکل ۴). به عبارت دیگر، توان ورودی به تبخیرکننده مقدار بهینه‌ای برای رسیدن به بیشترین عملکرد دارد. این مقدار بهینه برای کار حاضر ۵۰۰W است. به دلیل نحوه خلأ ترموسیفون، همواره مقدار کمی هوا در ترموسیفون باقی می‌ماند. با توجه به اینکه، هوا در این محدوده دمایی، یک گاز چگالش‌ناپذیر است، با اشغال فضای بالای چگالنده، مانع تماس مستقیم بخار با جداره داخلی چگالنده می‌شود. افزایش توان ورودی موجب افزایش دمای تبخیرکننده را می‌افزاید و در نتیجه بر فشار بخار افزوده می‌شود. با افزایش فشار، هوای اضافی به انتهای چگالنده رانده و بلوکه می‌شود. بدین ترتیب سطح تماس مؤثر چگالنده و در نتیجه عملکرد ترموسیفون افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر توان ورودی، چگالش بخار از نقطه بالاتری شروع می‌شود و با حرکت به سمت پایین ضخامت لایه مایع افزایش می‌یابد. افزایش ضخامت لایه، مانع تماس مستقیم بخار با جداره چگالنده می‌شود که افزایش مقاومت گرمایی چگالنده را در پی دارد و در نهایت عملکرد را می‌کاهد. با آب‌گریز کردن جداره داخلی چگالنده می‌توان بر این مشکل غلبه کرد. البته افزایش بیش‌ازحد توان ورودی نیز موجب بروز پدیده‌های نامطلوبی همچون عبور از حد جوشش و طغیان می‌شود.

از مقایسه شکل ۴ الف با شکل ۴ ب مشاهده می‌شود که با سرد شدن ترموسیفون یعنی افزایش دبی آب خنک کننده، عملکرد ترموسیفون کاهش می‌یابد. افزایش دبی آب جداره چگالنده را سرد می‌کند و در نتیجه دمای کل ترموسیفون کم می‌شود. کاهش دمای تبخیرکننده، با کاهش فشار بخار همراه است و در نهایت کاهش فشار منجر به گسترش فضای اشغال شده توسط هوای اضافی و کاهش سطح تماس مؤثر جداره چگالنده با بخار می‌شود و در نهایت عملکرد ترموسیفون را کم

این پدیده با افزایش بیش‌ازحد در بخش تبخیرکننده مشاهده می‌شود.

با افزایش نسبت پرشدن، نقاط خشک با لایه‌ای از سیال عامل پوشیده می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به نحوه ایجاد خلأ در ترموسیفون، همواره مقداری هوای اضافی درون ترموسیفون باقی می‌ماند. از این رو، افزایش نسبت پرشدن موجب افزایش حجم بخار و در نتیجه افزایش فشار بخار می‌شود. افزایش فشار باعث رانده شدن هوای اضافی به انتهای چگالنده می‌شود در نتیجه سطح تماس مؤثر بخار با جداره چگالنده افزایش می‌یابد که در نهایت افزایش عملکرد ترموسیفون را در پی دارد. با این همه، افزایش بیش‌ازحد نسبت پرشدن، به علت فشار هیدرواستاتیکی بالاتر، پدیده تجمع حباب‌ها بر روی جداره داخلی ترموسیفون و در مراحل بعدی حد طغیان و خشکی را به دنبال دارد که عملکرد ترموسیفون را می‌کاهد. حتی در مواردی به ترموسیفون نیز آسیب می‌زند. تجمع حباب‌ها مانع تماس مستقیم سیال عامل با جداره تبخیرکننده شود. در این حالت، حباب‌ها مقاومت گرمایی تبخیرکننده را می‌افزایند که کاهش عملکرد ترموسیفون را در پی خواهد داشت. این پدیده با بالا رفتن دمای تبخیرکننده قابل تشخیص است. در نسبت‌های پرشدن بالا، توده بخار بالارونده با فشار بخار بالا، جلوی برگشت مایع به تبخیرکننده را می‌گیرد و بخش‌های بالایی تبخیرکننده خشک می‌شوند. از طرف دیگر به دلیل مسدود شدن مسیر بخار با مایع برگشتی، بخار تازه به چگالنده نمی‌رسد و دمای آن کاهش می‌یابد. با گذشت زمان و سنگین شدن مایع بلوکه شده، مایع سقوط می‌کند و نقاط خشک را می‌پوشاند. این فرآیند به طور متناوب تکرار می‌شود. حد طغیان معمولاً با نوسان‌های شدید دما در طول ترموسیفون و لرزش و سروصدا همراه است. البته در این تحقیق، هیچ یک از این حدها به صورت مطلق رخ نداد و فقط در مواردی به این محدودیت‌ها نزدیک شد.

ورودی، h_e افزایش می‌یابد. با این همه، افزایش h_e متناسب با افزایش توان ورودی نیست. در شکل ۵ الف مشاهده می‌شود که با افزایش توان ورودی به میزان 150 W (از 350 به 700 W)، h_e به طور متوسط برای سه نسبت پرشدن، در حدود $240\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ افزایش یافته است.

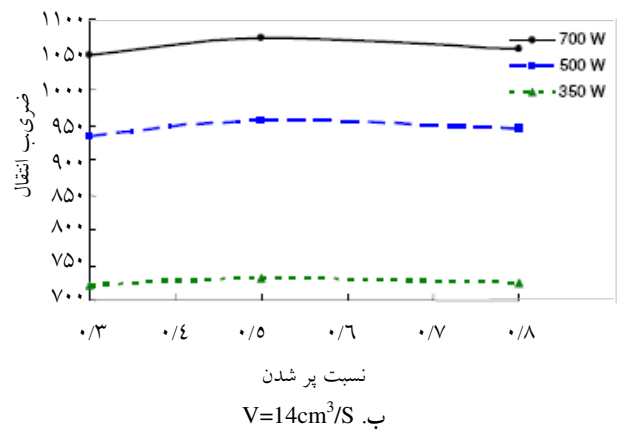
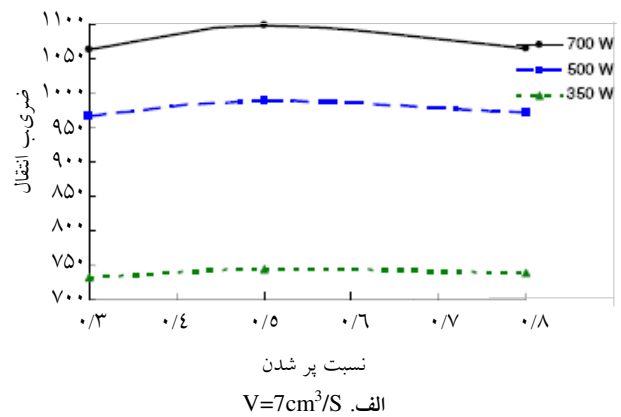
درحالی که در مرحله بعد، با افزایش توان ورودی به میزان 200 W (از 500 به 700 W)، h_e به طور متوسط برای سه نسبت پرشدن، در حدود $100\text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ افزایش یافته است. با توجه به رابطه ۴، h_e رابطه مستقیم با توان ورودی (Q_{in}) و رابطه معکوس با اختلاف دمای متوسط بین بخش‌های تبخیرکننده و بی‌دررو (T_e-T_v) و سطح جانبی تبخیرکننده دارد. با توجه به ثابت بودن سطح جانبی تبخیرکننده، مقدار h_e ، Q_{in} و (T_e-T_v) می‌عامل تعیین کننده است. در توان ورودی 700 W ، به دلیل نزدیک شدن به پدیده‌های نامطلوب نظیر حد جوشش، دمای نقاطی از تبخیرکننده افزایش می‌یابد. این درحالی است که دمای بخش بی‌دررو افزایش بسیار کمی دارد. در نتیجه اختلاف دمای متوسط بین بخش‌های تبخیرکننده و بی‌دررو افزایش می‌یابد. با این همه، میزان افزایش Q_{in} در مقایسه با افزایش (T_e-T_v) بیشتر است و در نتیجه مقدار h_e در 700 W بیشتر از 500 W است. با افزایش بیشتر توان ورودی، (T_e-T_v) افزایش چشمگیری خواهد داشت که به کاهش h_e منجر خواهد شد.

با اینکه h_e در توان ورودی 700 W بیشترین مقدار را دارد، همانطور که گفته شد، حالت بهینه مربوط به توان ورودی 500 W است، که بالاترین عملکرد و کمترین اختلاف دمای کل (اختلاف دمای متوسط بین بخش‌های تبخیرکننده و چگالنده (T_v-T_e)) را دارد.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود، که نسبت پرشدن، تأثیر بسیار محسوسی بر h_e ندارد. با این حال، بیشترین مقدار h_e مربوط به نسبت پرشدن $0/5$ می‌باشد. افزایش اولیه نسبت

می‌کند. باید توجه داشت که کاهش بیش از حد دبی آب خنک کننده، ممکن است به تشکیل حباب یا جوشش آب خنک کننده در پوسته چگالنده و مسدود شدن خروجی چگالنده منجر شود، که خطرات زیادی در پی خواهد داشت.

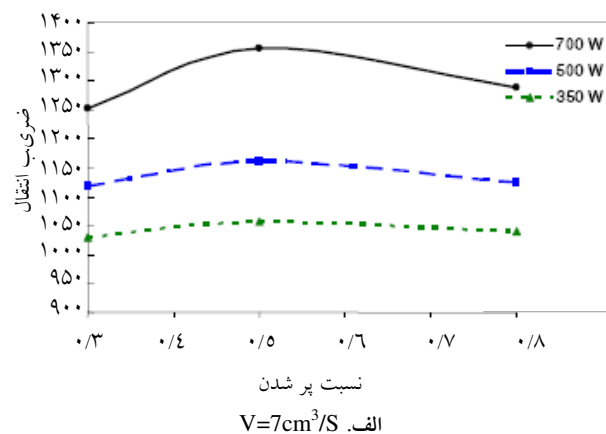
تغییرات ضریب انتقال حرارت تجربی تبخیرکننده (h_e) برحسب نسبت پرشدن برای توان‌های ورودی مختلف در شکل ۵ آمده است. نتایج نشان می‌دهد، که با افزایش توان



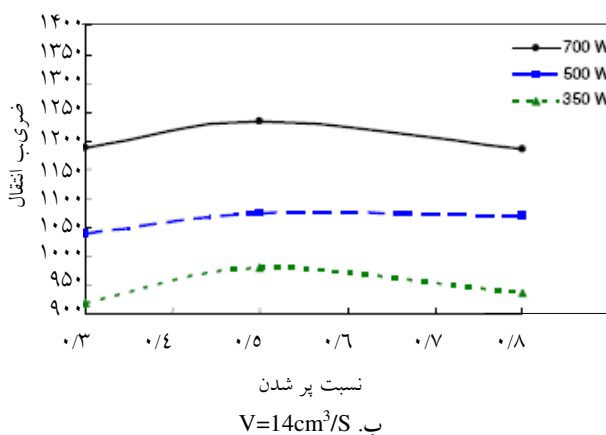
شکل ۵. ضریب انتقال حرارت تجربی تبخیرکننده برحسب نسبت پرشدن برای توان‌های ورودی مختلف.

۴_ نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که عملکرد ترموسیفون یک مقدار بهینه برای نسبت پرشدن، دارد. این مقدار برای ترموسیفون مطالعه شده و در محدوده مقادیر مطالعه شده ۰/۵ است. در این نسبت پرشدن کمترین اختلاف دمای کل (اختلاف دمای متوسط بین بخش های تبخیرکننده و چگالنده) مشاهده شد که حاکی از انتقال حرارت با راندمان بالاتر است. از طرف دیگر، در نسبت پرشدن ۰/۵، ضریب انتقال حرارت تجربی



الف. $V=7\text{cm}^3/\text{S}$



ب. $V=14\text{cm}^3/\text{S}$

شکل ۶. ضریب انتقال حرارت تجربی چگالنده برحسب نسبت پرشدن برای توان های ورودی مختلف.

پرشدن موجب پوشیده شدن نقاط خشک تبخیرکننده و کاهش دمای آن و در نتیجه کاهش اختلاف دمای متوسط بین بخش های تبخیرکننده و بی دررو می شود، که باتوجه به رابطه ۴ به دلیل ثابت بودن سطح جانبی تبخیرکننده و توان ورودی به افزایش h_e منجر می شود. با افزایش بیش از حد نسبت پرشدن، ترموسیفون به سمت پدیده های نامطلوب هدایت می شود و به افزایش دمای تبخیرکننده و در نتیجه کاهش h_e منجر می شود. همچنین افزایش دبی آب خنک کننده h_e را می کاهد. دلیل این امر نیز افزایش $(T_e - T_v)$ است که باتوجه به ثابت بودن عوامل دیگر، ناشی از کاهش شدید دما در بخش بی دررو نسبت به کاهش دما در تبخیرکننده است.

تغییرات ضریب انتقال حرارت تجربی چگالنده (h_c) برحسب نسبت پرشدن در توان های ورودی مختلف برای دو دبی آب خنک کننده در شکل ۶ آمده است. در اینجا نیز رفتار مشابهی وجود دارد با این تفاوت که تأثیر نسبت پرشدن بر h_c محسوس تر از تأثیر آن بر h_e (شکل ۵) است و مقدار بهینه آن در نسبت پرشدن ۰/۵ مشهودتر است. افزایش نسبت پرشدن به معنی افزایش حجم بخار و در نتیجه کاهش حجم هواست. افزایش سطح تماس مؤثر دمای متوسط چگالنده را می افزاید و در نتیجه اختلاف دمای متوسط بین بخش های بی دررو و چگالنده $(T_v - T_c)$ را می کاهد، که باتوجه به رابطه ۵ و ثابت بودن عوامل دیگر افزایش h_c را در پی دارد.

همان طور که قبلاً اشاره شد، این پدیده ها با افزایش دما در بخش های تبخیرکننده و بی دررو همراه است و از طرفی با اختلال در رسیدن بخار به چگالنده، دمای چگالنده را می کاهد. این تغییرات دمایی موجب افزایش $(T_v - T_c)$ و در نتیجه h_c می شود. مشابه شکل ۵ در اینجا نیز افزایش توان ورودی موجب کاهش h_c می شود. افزایش دبی آب خنک کننده نیز به دلیل اینکه دمای چگالنده را بسیار می کاهد، کاهش ضریب انتقال حرارت را در پی دارد.

h_c : ضریب انتقال حرارت تجربی چگالنده $(W/m^2 \cdot ^\circ C)$: دمای متوسط بخش بی دررو $(^\circ C)$.

h_e : ضریب انتقال حرارت تجربی تبخیرکننده $(W/m^2 \cdot ^\circ C)$: ولتاژ اعمال شده به گرم کننده (V) .

I : شدت جریان ورودی به گرم کننده (I) : دبی حجمی آب خنک کننده (cm^3/s) .

Q_{in} : توان اعمال شده به گرم کننده (W) : عملکرد (کارایی) ترموسیفون.

Q_{out} : توان جذب شده توسط چگالنده (W) : چگالی آب (kg/m^3) .

T_c : دمای متوسط چگالنده $(^\circ C)$.

مراجع

- Peterson, G.P., An Introduction To Heat Pipes, Modeling, Testing and Applications, John Wiley and Sons Inc., ISBN: 978-0-471-30512-5 (1994) 1.
- Faghri, A., Heat Pipe Science and Technology, Taylor and Francis, ISBN: 156-0-32383-3 (1995) 341.
- Gauglar, R.S., Heat Transfer Device, US Patent 2350348 (1942).
- Grover, G.M., Evaporation-Condensation Heat Transfer Device, US Patent 3229759 (1963).
- Wu, X.P., Johnson, P. and Akbarzadeh, A., "Application of Heat Pipe Heat Exchangers to Humidity Control In Air-Conditioning Systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17 No. 6 (1997) 561-568.
- Silva, A.K. And Mantelli, M.B.H., "Thermal Applicability of Two-Phase Thermosyphons in Cooking Chambers: Experimental and Theoretical Analysis", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24 No. 5 (2004) 717-733.
- Abreu, S.L. and Colle, S., "An Experimental Study of Two-Phase Closed Thermosyphons for Compact Solar Domestic Hot-Water Systems", *Solar Energy*, Vol. 76, No. 1-3 (2004) 141-145.
- Kalogirou, S.A., "Solar Thermal Collectors and Applications", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30 No. 3 (2004) 231-295.
- Nayak A.K., Lathouwers, D., Van Der Hagen, T.H.J.J., Schrauwen, F., Molenaar, P. and Rogers, A., "A Numerical Study of Boiling Flow Instability of A Reactor Thermosyphon System", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26 No. 5-6 (2006) 644-653.

تبخیرکننده و چگالنده در بیشترین مقدار است. این مقدار بهینه برای h_c مشهودتر از h_e است.

با سرد شدن ترموسیفون (افزایش دبی آب خنک کننده یا کاهش توان ورودی)، عملکرد ترموسیفون کاهش می یابد. البته باید توجه داشت که افزایش بیش از حد توان ورودی به دلیل بروز حدهای جوشش، طغیان و خشکی عملکرد ترموسیفون را کم می کند. کاهش بیش از حد دبی آب خنک کننده نیز با اختلال در حرکت آب درون پوسته چگالنده می تواند مشکلاتی در عملکرد ترموسیفون ایجاد کند.

نهایتاً، بررسی ها نشان می دهد که در محدوده توان ورودی مورد آزمایش، افزایش توان ورودی با افزایش ضریب انتقال حرارت تجربی تبخیرکننده و چگالنده همراه است. با این همه، مناسب ترین توان ورودی $500W$ است که در آن بیشترین عملکرد و کمترین اختلاف دمای کل به دست آمد.

تشکر و قدرانی

بدین وسیله نویسندگان این مقاله از شرکت ملی گاز استان کرمانشاه که این تحقیق را مورد حمایت مالی و معنوی خویش قرار دادند کمال تشکر و قدردانی را به عمل می آورند.

علائم اختصاری

A_c : سطح جانبی چگالنده (m^2) : دمای متوسط تبخیرکننده $(^\circ C)$.

A_e : سطح جانبی تبخیرکننده (m^2) : دمای آب ورودی به چگالنده $(^\circ C)$.

C_p : ظرفیت گرمایی ویژه آب $(J/kg \cdot ^\circ C)$: دمای آب خروجی از چگالنده $(^\circ C)$.

- Nanofluids”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47 No. 6 (2008) 659-667.
12. Nuntaphan, A., Tiansuwan, J. and Kiatsiriroat, T., “Enhancement of Heat Transport in Thermosyphon Air Preheater at High Temperature with Binary Working Fluid: A Case Study of TEG–Water”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22 No. 3 (2002) 251-265.
 10. Jiao, B., Qiu, L.M., Zhang, X.B. and Zhang, Y., “Investigation on The Effect of Filling Ratio on the Steady-State Heat Transfer Performance of a Vertical Two-Phase Closed Thermosyphon”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28 No. 11-12 (2008) 1417-1426.
 11. Khandekar, S., Joshi, Y.M. and Mehta, B., “Thermal Performance of Closed Two-Phase Thermosyphon Using