

بررسی عملکرد ترموسیفون با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویر ذرات

Original Article

پدرام حنفی‌زاده* (استادیار)

محمد رضا مؤمنی‌فر (دانشجوی کارشناسی ارشد)
گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

مجید بستان‌خواه (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پلی‌تکنیک لوزان، سوئیس

محمدحسین سعیدی (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

ترموسیفون نوعی لوله‌ی گرمایی است که در آن برای بازگرداندن سیال عامل از سردکننده به تبخیرکننده از نیروی ثقلی استفاده می‌شود. بیشتر تحقیقات انجام شده پیرامون ترموسیفون در مورد مشخصات حرارتی آن بوده و کم‌تر به مشخصات هیدرولیکی آن توجه شده است. در این پژوهش، با استفاده از روش سرعت‌سنجی و کاربرد تصویر ذرات و مدل‌سازی عددی، ارتباط بین مشخصه‌های هیدرولیکی و حرارتی ترموسیفون با یکدیگر و بررسی اثرات متقابل آنها بر هم بررسی شده است. نتایج حاصله حاکی از آن است که این روش مشخصه‌های هیدرولیکی و حرارتی ترموسیفون را با دقت قابل قبولی تعیین می‌کند. در این پژوهش تأثیر زاویه‌ی قرارگیری ترموسیفون و حرارت ورودی به منبع گرم ترموسیفون مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج به دست آمده، ترموسیفون در حالت افقی بهترین وضعیت را دارد؛ در این حالت توزیع سرعت کاملاً منظم بوده و دارای بیشترین بازدهی است.

واژگان کلیدی: لوله حرارتی، ترموسیفون، روش سرعت‌سنجی با استفاده از ذرات (PIV)، پروفیل سرعت.

۱. مقدمه

ترموسیفون وسیله‌ی بسیار ساده و در عین حال با کارایی حرارتی بسیار بالا در انتقال حرارت است. ترموسیفون یک لوله‌ی گرمایی نازک و قائم با یک استخر سیال در کف آن است. بهترین روش توصیف برای ترموسیفون، مجزا کردن آن به سه بخش عمده است: ۱. گرما از قسمت تبخیرکننده^۱ که استخر مایع در آن بخش قرار دارد، وارد می‌شود و سیال عامل موجود در آن را به بخار تبدیل می‌کند. ۲. بخار به سمت بالا به حرکت درمی‌آید و با عبور از میان قسمت آدیاباتیک به طرف سردکننده^۲ جریان می‌یابد. در این بخش بخار میعان می‌شود و گرمای نهان خود را رها می‌کند. ۳. مایع شفاف تشکیل شده روی جداره‌ها، تحت اثر نیروی جاذبه به طرف پایین یعنی همان بخش تبخیرکننده برمی‌گردد و چرخه کامل می‌شود. در شکل ۱ ترموسیفون معمولی نمایش داده شده است.^[۱]

بررسی اثر تنش و انتقال جرم فصل مشترک مایع-بخار بر عملکرد ترموسیفون‌ها^[۲] نشان داد که در نظر گرفتن تنش برشی فصل مشترک و همچنین انتقال جرم بین فازها باعث افزایش ضخامت مایع شفاف و به دنبال آن کاهش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت می‌شود. در حقیقت، ترموسیفون وسیله‌ی است برای انتقال حرارت

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۴، اصلاحیه: ۱۳۹۳/۱/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۳/۳/۳۱

hanafizadeh@ut.ac.ir
m_nomenifar@ut.ac.ir
majid.bastankhah@epfl.ch
saman@sharif.ir

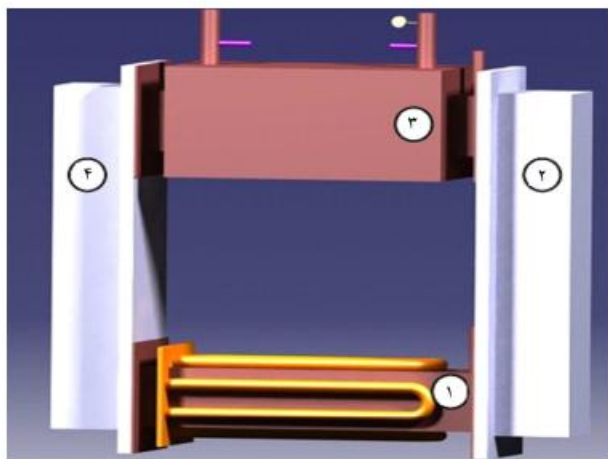
غیرفعال^۳ که در آن از نیروی جاذبه برای جریان یافتن مایع چگالیده به سمت بخش تبخیرکننده استفاده می‌شود.^[۴] نبود بخش متحرک در ترموسیفون، سازگاری برای طراحی در ابعاد مختلف و سیالات عامل متنوع، و هزینه‌های کم‌تر در مقایسه با دیگر وسایل انتقال حرارت، بخشی از مزایای این وسیله به شمار می‌آید. این مزایا، ترموسیفون را قابل اعتمادتر و به صرفه‌تر از دیگر وسایل انتقال حرارت می‌کند.^[۵] مزایای ذکر شده باعث ترویج استفاده از ترموسیفون در طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی — مثل شیمی، صنعت فرایند ریویولرهای ترموسیفونی^۴، آبگرمکن‌های خورشیدی، سیستم‌های زمین‌گرمایی، نیروگاه‌های هسته‌ای، سیستم‌های خنک‌کاری سریع در هسته‌های راکتور هسته‌ای، خنک‌کاری روتور ماشین الکتریکی، خنک‌کاری پره توربین و دیودها یا یک‌سوکننده‌های گرمایی و خنک‌کاری وسایل الکترونیکی — شده است.^[۶] ترموسیفون تک‌فاز، نوعی ترموسیفون حلقوی و شامل چهار قسمت است: یک منبع گرم در قسمت پایین، یک منبع سرد در قسمت بالا، و دو قسمت عمودی نصب شده بین ناحیه‌های منابع گرم و سرد برای انتقال مایع و بخار بین آنها. محققین زیادی ترموسیفون‌های حلقوی تک‌فاز و مشخصات آن‌ها را بررسی کرده‌اند. تشریح تأثیر پارامترهای بی‌بعد بر مشخصه‌های انتقال حرارت ترموسیفون مورب^[۷] بررسی اثر هندسه‌های مختلف کانال بر انتقال حرارت، رژیم جریان و

در پژوهش حاضر، یک ترموسیفون ابداعی متناسب با روش PIV طراحی و ساخته شده است. مقطع این ترموسیفون مستطیلی است و دو قسمت بالارونده و پایین آورنده آن، به منظور بررسی جریان در ترموسیفون از پلکسی گلاس^{۱۳} ساخته شده است. جزئیات ترموسیفون و ویژگی‌های آن در قسمت بعدی تشریح می‌شود.

۲. بستر آزمون آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در این پژوهش، با استفاده از سیستم ترموسیفون تک‌فاز (SPT)^{۱۴} صورت گرفته، که به منظور استفاده از روش PIV روی آن، طراحی و ابداع شده است (شکل ۲). ابعاد اصلی چرخه در جدول ۱ ارائه شده است. به‌طور کلی در ترموسیفون ساخته شده دو سیال (که می‌توانند از نظر جنس متفاوت باشند) استفاده می‌شود؛ سیال عامل اصلی (آب) که در مدار اصلی ترموسیفون جریان می‌یابد، و سیال خنک‌کننده که وظیفه‌اش گرم‌زدایی از سیال عامل است. این بستر از چهار کانال مستطیلی (چهار قسمت اصلی ترموسیفون تک‌فاز) تشکیل شده است: ۱. تبخیرکننده، ۲. بالارونده^{۱۵}، ۳. سردکننده، ۴. پایین‌آورنده^{۱۶}. آب گرمای تبخیرکننده را که از المنت‌های الکتریکی ناشی می‌شود، جذب می‌کند. توان الکتریکی از جریان ولتاژ آلمان‌ها محاسبه می‌شود.

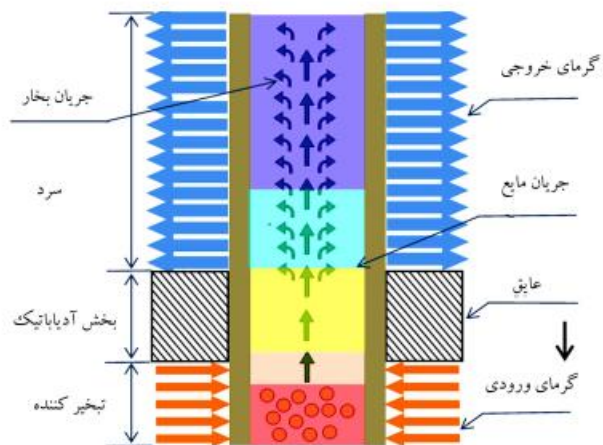
این قسمت (تبخیرکننده) برای بهبود انتقال حرارت، از ورقه‌های مسی ساخته شده است. المنت‌ها پیرامون کانال تبخیرکننده تعبیه، و برای کمینه‌کردن اتلاف حرارت به‌دقت آب‌بندی شده‌اند. شماتیک این قسمت در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تبخیر آب از چهار المنت الکتریکی ۵۰۰ وات استفاده شده است؛ بنابراین توان کل از صفر تا ۲۰۰۰ وات، به‌وسیله‌ی ترانسفورماتور خودکار تغییر می‌کند.



شکل ۲. شماتیک ترموسیفون تک‌فاز.

جدول ۱. ابعاد هندسی بستر آزمایشگاهی.

مشخصات هندسی مدل (اندازه‌ها برحسب cm)	
ارتفاع حلقه	۳۵
عرض حلقه	۳۰
قسمت داخلی حلقه	۵ × ۵
طول قسمت گرم	۲۵
طول قسمت سرد	۲۵

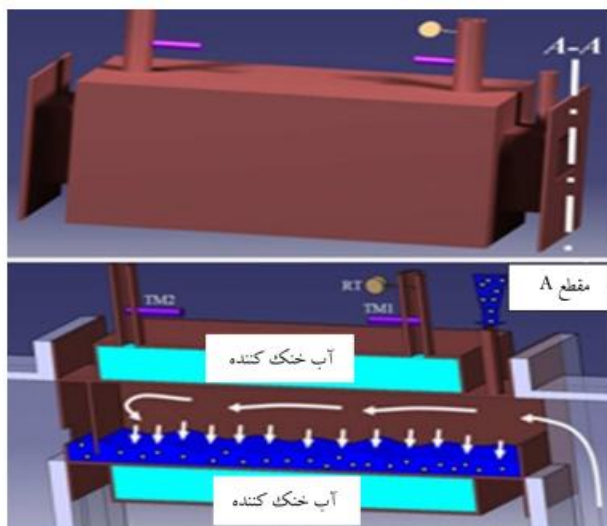


شکل ۱. شماتیک ترموسیفون معمولی (لوله‌ی گرمایی بدون فتیله).

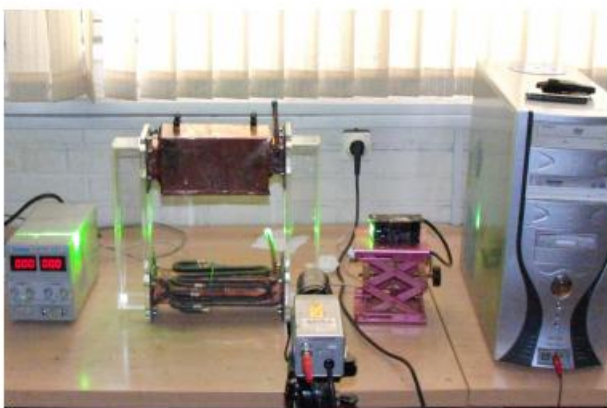
ناپایداری چرخه‌ی ترموسیفون^[۶] بررسی تجربی افزودن ناوذره‌های جامد به آب به‌عنوان سیال عامل^[۷]، بررسی ترموسیفون سقف منازل شیروانی با روش‌های عددی و با استفاده از روش PIV و مقایسه‌ی نتایج حاصله با نتایج تجربی^[۸] از جمله‌ی این بررسی‌ها بوده است. پس از مطالعه‌ی آزمایش‌های انجام گرفته^[۹] برای تعیین تأثیر اعداد بی‌بعد ویر (We)^۵، فرود (Fr)^۶، بوند (Bo)^۷ و کوتا‌نایدزه (Ku)^۸ مشخص شد که اعداد Bo و Fr هیچ رابطه‌ی با نسبت گرمای بیشینه به گرمای موقعیت قائم (Q_{max}/Q_{90}) ندارند.

محققین پارامترهای مختلفی مثل شیب چرخه و هدایت حرارتی دیواره‌ی لوله را به‌صورت تجربی، روی چرخه گردش آزاد تک‌فاز^۹ مطالعه کردند.^[۱۰] مثال‌هایی نیز از کاربرد روش‌های عددی اجزاء محدود در تحلیل پایداری چرخه‌های گردش آزاد تک‌فاز^[۱۱] گزارش شده است. همچنین با بررسی ترموسیفون در شیب‌های مختلف^[۱۲] مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت برای ترموسیفون حلقوی مستطیلی تک‌فاز را با استفاده از روش‌های LDV^{۱۰} و PIV گزارش کردند و به این نتیجه رسیدند که با تغییر زاویه‌ی ترموسیفون از ۳/۶ درجه ساعتگرد به ۴/۲ درجه‌ی پادساعتگرد تغییر چندانی در مقادیر سرعت اندازه‌گیری مشاهده نمی‌شود. محققین با مدل‌سازی عددی^[۱۳] عملکرد دائم یک لوله‌ی حرارت ترموسیفون دارای مخلوطی از دو خنک‌کننده‌ی R۱۱ و R۱۱۳ را به‌عنوان سیال عامل بررسی کردند. همچنین بررسی انتقال حرارت در لوله‌های گرمایی ضربه‌یی حلقوی و غیرحلقوی (PHPs)^{۱۱} نشان داد که انتقال حرارت عمدتاً مبتنی بر مبادله‌ی گرمای نهان است.^[۱۳]

روش سرعت‌سنجی با استفاده از ذرات (PIV)^{۱۲} یک روش لیزری برای آشکارسازی جریان است که در محاسبه و اندازه‌گیری‌های سرعت لحظه‌یی و ویژگی‌های مربوط به آن در سیالات کاربرد دارد. محققان در به‌کارگیری این روش برای ترموسیفون‌ها ممکن است با چندین چالش و سختی روبرو شوند. یکی از مشکلات نورشناختی در ترموسیفون، قابل رؤیت نبودن داخل ترموسیفون است. به‌دلیل انتقال گرمای زیاد و همچنین مشکلات آب‌بندی، ساخت ترموسیفون شفاف با مشکلاتی همراه است. بخار در چرخه‌ی ترموسیفون پسته‌ی آن قسمت را می‌پوشاند و مانع دیدن جریان می‌شود. بدین ترتیب وقتی آب در ناحیه‌ی گرم تبدیل به بخار می‌شود، ذرات دنبال‌کننده در آن ناحیه باقی می‌مانند و جریان بخار را دنبال نمی‌کنند زیرا چگالی ذره دنبال‌کننده بزرگ‌تر از فاز بخار است. علی‌رغم پژوهش‌های گسترده درخصوص ترموسیفون، بررسی‌ها برای کاربرد روش PIV روی آن‌ها اندک است.



شکل ۴. نمای شماتیک منبع سرد ترموسیفون تک فاز.

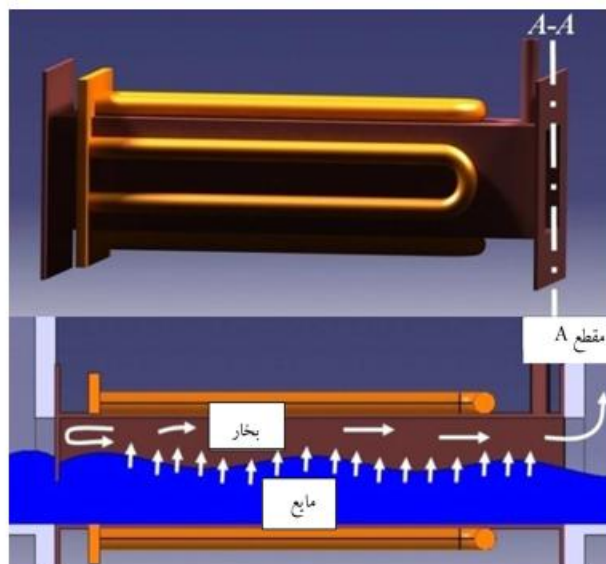


شکل ۵. بستر آزمایشگاهی.

شدند. بخار چگالیده می‌شود و به این استخر اضافه می‌شود. مایع چگالیده شده، از حفره مستطیلی عبور می‌کند و به قسمت پایین آورنده، راه می‌یابد. زائده عمودی که در انتهای سردکننده تعبیه شده است از ورود بخار به قسمت پایین آورنده، جلوگیری می‌کند. این مایع چگالیده شده، با مخلوطی از مایع و ذرات دنبال کننده، مخلوط می‌شود و با این روش، ذرات دنبال کننده را در خود نگه می‌دارد و بنابراین روش PIV، می‌تواند روی فیلم مایع، اعمال شود.

به منظور داشتن توانایی مشاهدات اپتیکی جریان و به کاربردن روش PIV، قسمت‌های بالارونده و پایین آورنده ترموسیفون، از شیشه‌های اکریلی شفاف، ساخته شده‌اند. در این آزمایش، از آب به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که حفره مستطیلی در انتهای کندانسور، جریان لایه‌یی^{۱۹} را تضمین می‌کند. یعنی جریان قطره‌یی^{۲۰} را به جریان لایه‌یی تبدیل می‌کند.

شماتیک سردکننده در شکل ۴، نشان داده شده است مایع چگالیده شده، به دلیل نیروی جاذبه، از دیواره پایین آورنده، به پایین هدایت می‌شود. پایین آورنده یک کانال مستطیلی با ورقه‌های پلکسی گلاس است که به شکل آدیاباتیک فرض می‌شود. ضخامت فیلم و همچنین پروفیل سرعت، می‌تواند از روش‌های پردازش تصویر^{۲۱} و PIV محاسبه شود. عکس‌ها توسط دوربین پرسرعت دیجیتال با قابلیت عکسبرداری^{۲۲} فریم بر ثانیه که در هر دو قسمت بالارونده و پایین آورنده تعبیه شده، گرفته شده است. تصویر بستر آزمایشگاهی در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۳. شماتیک تبخیرکننده‌ی ترموسیفون تک‌فاز.

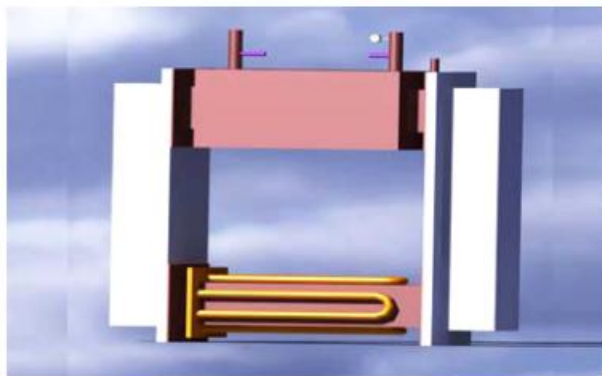
یکی از مهم‌ترین قسمت‌های ترموسیفون ساخته شده، قسمت عایق آن است که تمامی آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی روش PIV روی آن انجام می‌گیرد. در نتیجه این قسمت باید الزاماً شفاف باشد تا قابلیت عکس برداری امکان‌پذیر شود. به همین دلیل برای ساخت این قسمت از ورقه‌های پلکسی گلاس استفاده شده است. برای این که بخار تنها از قسمت بالارونده حرکت کند یک زائده عمودی به سمت پایین آورنده‌ی تبخیرکننده، به منظور جلوگیری از ورود بخار به بخش پایین آورنده اضافه شده است. اگر بخار از پایین آورنده عبور کند، ممکن است وجه داخلی شیشه‌ی پایین آورنده را بپوشاند که این می‌تواند در استفاده از روش PIV مشکلاتی ایجاد کند.

بخار از قسمت بالارونده، که به خوبی عایق شده است، بالا می‌رود. در حقیقت این قسمت، رابط بین بخش‌های تبخیرکننده و سردکننده ترموسیفون است و مشخصه‌های کیفی بخار، در این قسمت می‌تواند به وسیله‌ی روش اپتیکی^{۱۷} حاصل شود. قسمت سردکننده، یک مبدل حرارتی پوسته و لوله است، که از دو کانال مستطیلی هم مرکز، ساخته شده است. بخار از بخش داخلی عبور می‌کند و آب سرد در بخش خارجی، به گردش در می‌آید. دماهای ورودی و خروجی آب سرد به وسیله‌ی ترمومتر (TM)، اندازه‌گیری می‌شود. نرخ جریان حجمی آب، به وسیله‌ی شیرکنترلی^{۱۸}، تنظیم می‌شود و به وسیله‌ی یک روتامتر مدرج شده، اندازه‌گیری می‌شود. در این قسمت، بخار گرمای خود را به آب سرد می‌دهد و به سرعت، چگالیده می‌شود.

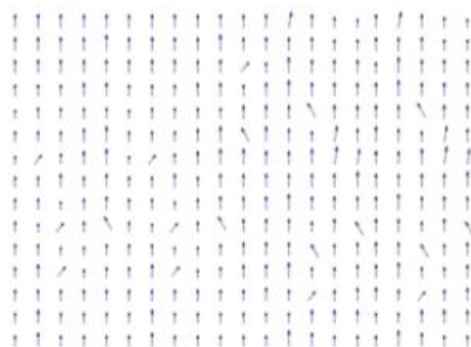
عموماً، به کاربردن روش PIV در جریان دوفازی تبخیرکننده و سردکننده، امکان مواجه شدن با دو مشکل بزرگ را ایجاد می‌کند. اولین مشکل، این است که بخار ممکن است روی سطح داخلی شیشه، چگالیده شود و میدان دید دوربین را مسدود کند. دومین مشکل، به دلیل چگالی بیشتر نسبت به آب، ذرات دنبال کننده که در PIV استفاده می‌شود، نمی‌توانند با بخار همراه شوند و در نتیجه بخار، هیچ ذرات دنبال کننده‌یی ندارد. در این پژوهش، چندین نوآوری، در طراحی بستر تحقیقاتی برای غلبه بر این مشکلات، اعمال شده است. اولین اصلاح به این شکل بود که ترموسیفون، برای جلوگیری از حضور همزمان مایع و بخار در مقطع آزمایش، به شکل حلقه‌یی ساخته شده است. دومین اصلاح، همانند تبخیرکننده، یک زائده عمودی به انتهای بخش سردکننده، به منظور جلوگیری از ورود بخار به قسمت پایین آورنده، اضافه شد. استخر آب و ذرات دنبال کننده در پایین بخش داخلی سردکننده، تعبیه

۳. نتایج

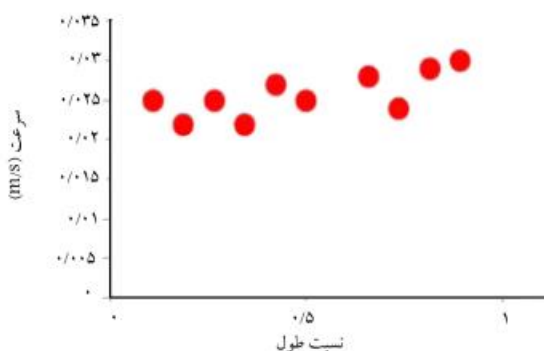
۳.۱. روش PIV



الف) نمای شماتیک ترموسیفون افقی؛



ب) توزیع سرعت در قسمت عایق ترموسیفون افقی؛



ج) توزیع سرعت در خط مرکزی قسمت عایق ترموسیفون.

شکل ۷. نتایج مربوط به ترموسیفون افقی.

می‌شود. بدین منظور با استفاده از روش PIV مقدار سرعت محوری در خط مرکزی ترموسیفون تعیین گشته است. سپس با انتگرال‌گیری در طول خط مرکزی، مقدار دبی جرمی جریان یافته در ترموسیفون محاسبه می‌شود.

در شکل ۱۰ تغییرات دبی جریان یافته در ترموسیفون را نسبت به شدت گرمای ورودی به ترموسیفون نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد به ازای مقادیر پایین گرمای ورودی، میزان سیال جریان یافته در ترموسیفون ناچیز است و ترموسیفون در شرایط کاری نمی‌باشد ($Q_{in} < 500 \text{ Watt}$) این ناحیه، ناحیه خارج از طراحی^{۲۳} نامگذاری شده است. با افزایش توان ورودی، میزان دبی جریان یافته در ترموسیفون افزایش می‌یابد. این ناحیه ($500 < Q_{in} < 1100 \text{ Watt}$) که تقریباً ترموسیفون در بهترین شرایط به سر می‌برد، ناحیه کاری^{۲۴} ترموسیفون گفته می‌شود. همچنین لازم به ذکر است با افزایش توان ورودی از این به بعد، دیگر تغییر محسوسی در شرایط کاری ترموسیفون دیده نمی‌شود و عملاً ترموسیفون به شرایط

آزمایش‌ها بر روی ترموسیفون در حالت‌های مختلف و به ازای سه زاویه قرارگیری مختلف ترموسیفون (افقی، ۴۵ درجه، عمود) انجام پذیرفته است. حال در ادامه به بررسی و بحث درباره نتایج می‌پردازیم.

ترموسیفون افقی، ترموسیفونی است که منبع گرم و سرد آن به صورت افقی قرار دارند و همچنین منبع گرم در پایین و منبع سرد در بالا قرار دارد. تعداد زیادی عکس از قسمت پایین آورنده ترموسیفون، برای مشخص کردن پروفیل سرعت فیلم پایین آورنده، گرفته شده است برای نمونه، چهار عکس در شکل ۶ نشان داده. پس از گرفتن عکس‌های مورد نیاز و ضبط آنها در رولابانه، این عکس‌ها توسط کد نوشته شده در نرم افزار متلب^{۲۲} مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

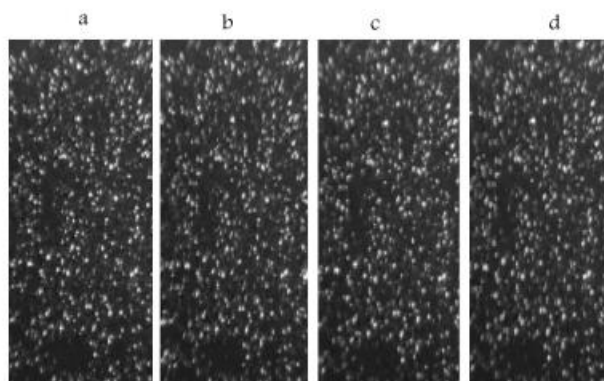
اندازه‌های مختلفی برای پنجره جستجو و بازیابی در نظر گرفته شد تا اندازه بهینه برای آنها انتخاب شود. همچنین تصحیح‌های نهایی به منظور بهبود حل مسئله انجام گردید، تا جواب‌های غیرمنطقی از دامنه حل حذف شوند. پس از انجام کلیه مراحل بالا، نتایج به صورت شکل ۷ در می‌آیند. مقادیر سرعت در قسمت سمت راست عایق ترموسیفون افقی به سمت بالا و دارای سرعت تقریبی ۲/۵ سانتیمتر بر ثانیه است. همچنین دمای آب گرم خروجی از ترموسیفون در این حالت توسط دماسنج برابر با ۲۵ درجه سانتیگراد گزارش شده است.

در ادامه نتایج مربوط به آزمایش‌های انجام شده بر روی ترموسیفون مایل در شکل ۸ و ترموسیفون عمود در شکل ۹ آورده می‌شود. سرعت میانگین روی خط مرکزی قسمت عایق راست ترموسیفون مایل، ۱/۲ سانتیمتر بر ثانیه است.

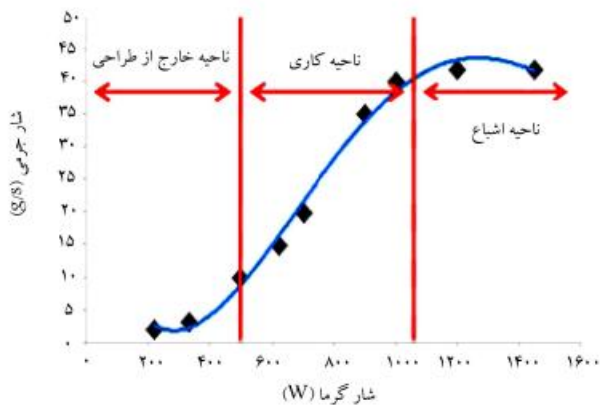
در ترموسیفون مایل، میدان جریان نسبت به ترموسیفون افقی نامنظم شده است. دمای خروجی آب خنک کننده نیز کاهش بازده ترموسیفون را در این حالت تایید می‌کند. در ترموسیفون مایل دماسنج، دمای خروجی آب خنک کننده را ۲۳ درجه گزارش نموده است. در ترموسیفون قائم، میدان جریان نسبت به ترموسیفون افقی نامنظم تر شده است و جریان به صورت رفت و برگشتی وجود دارد. دمای خروجی آب خنک کننده نیز این موضوع را تایید می‌کند. در ترموسیفون قائم دماسنج، دمای خروجی آب خنک کننده را ۲۰ درجه گزارش نموده است.

همانطور که از نتایج آزمایش‌های PIV مشخص است توزیع و مقادیر سرعت در ترموسیفون افقی بهتر از توزیع سرعت در ترموسیفون مایل و قائم است و دمای خروجی آب خنک کننده نیز مجدداً این موضوع را تایید می‌کند.

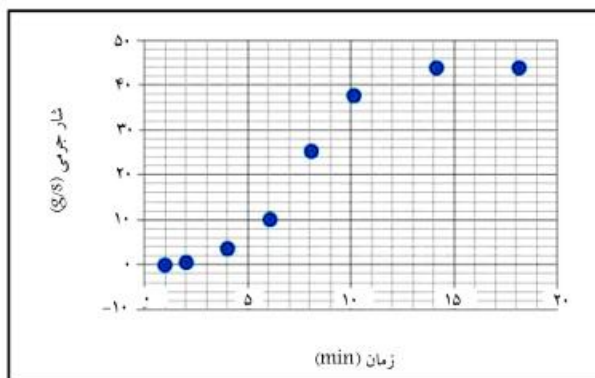
در این قسمت به بررسی اثر شدت حرارت ورودی بر کارکرد ترموسیفون پرداخته



شکل ۶. تصاویر متوالی فیلم مایع پایین آورنده.



شکل ۱۰. تغییرات دبی جرمی در ترموسیفون بر اساس شدت گرمای ورودی.

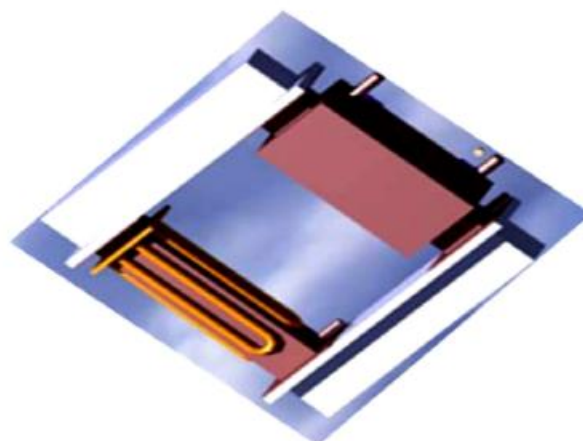


شکل ۱۱. تغییرات دبی جرمی ترموسیفون بر حسب زمان.

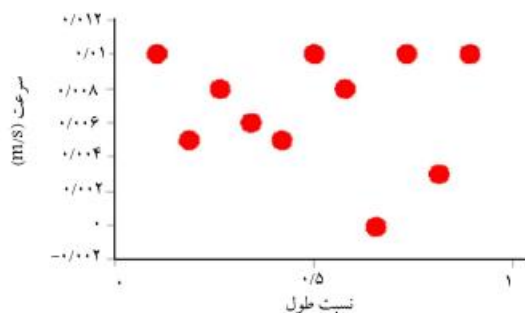
اشباع خود رسیده است. با افزایش بیش از حد توان، امکان وقوع پدیده جوشش بیشتر می‌شود و با استفاده از ترموستات نصب شده بر روی ترموسیفون دمای المنت‌ها کنترل می‌شود. این ناحیه ($Q > 1100 \text{ Watt}$)، ناحیه اشباع^{۲۵} تکفاز نامگذاری شده است. در این قسمت به بررسی رفتار دینامیکی ترموسیفون می‌پردازیم. در شکل ۱۱، تغییرات دبی جریان یافته در مدار اصلی ترموسیفون بر حسب زمان، نشان داده شده است. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، میزان دبی جریان یافته در ترموسیفون با گذشت زمان افزایش می‌یابد تا به تدریج به شرایط پایای خود نزدیک می‌شود. این نتایج به ازای ترموسیفون افقی رسم گردیده‌اند. با گذشت زمان در حدود ۱۰ دقیقه، ترموسیفون تقریباً به شرایط پایای خود می‌رسد.

۲.۳. مدل‌سازی عددی

کلیه مشخصات هندسه مدل شده مطابق با مشخصات نمونه واقعی است. در شکل ۱۲ شبکه دوبعدی به همراه شرایط مرزی آورده شده است. جهت مقایسه نتایج عددی با روش PIV، با توجه به اینکه اصولاً با استفاده از روش PIV میدان جریان معمولاً به صورت دوبعدی قابل حصول است و همچنین به علت حجم محاسباتی بالا در مدل‌های سه بعدی، نهایتاً مدل دوبعدی برای مدل‌سازی انتخاب شد. عدم وابستگی جواب به شبکه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل، توزیع سرعت در خط مرکزی قسمت عایق ترموسیفون به ازای سه مش درشت، متوسط و ریز رسم شده است. با توجه به اینکه جواب‌ها برای مش متوسط و ریز همخوانی خیلی خوبی با هم دارند در نتیجه از مش متوسط برای انجام محاسبات استفاده شد.

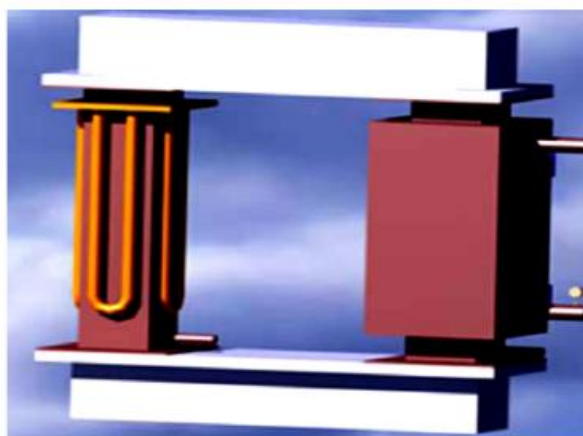


الف) نمای شماتیک ترموسیفون مایل؛

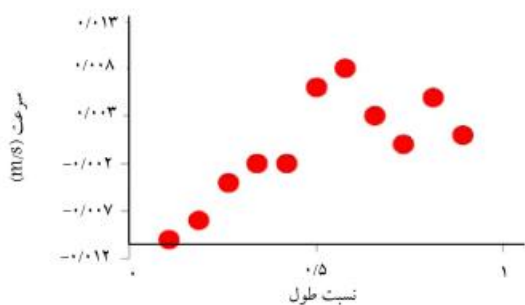


ب) توزیع سرعت در خط مرکزی قسمت عایق ترموسیفون.

شکل ۸. نتایج مربوط به ترموسیفون مایل.

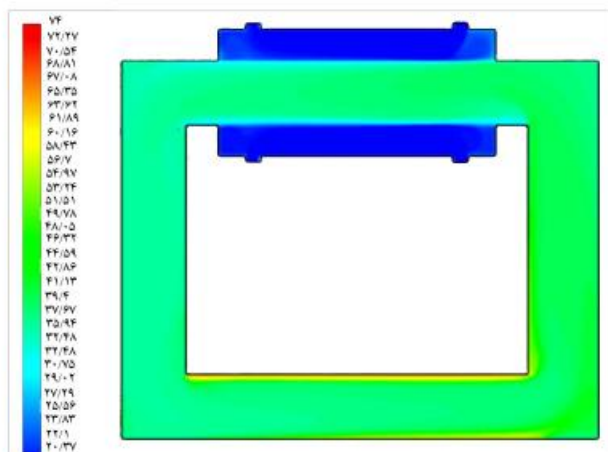


الف) نمای شماتیک ترموسیفون قائم؛

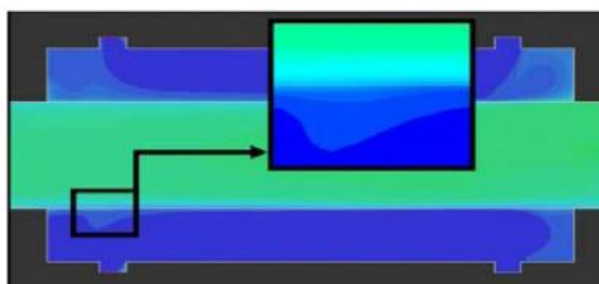


ب) توزیع سرعت در خط مرکزی قسمت عایق ترموسیفون.

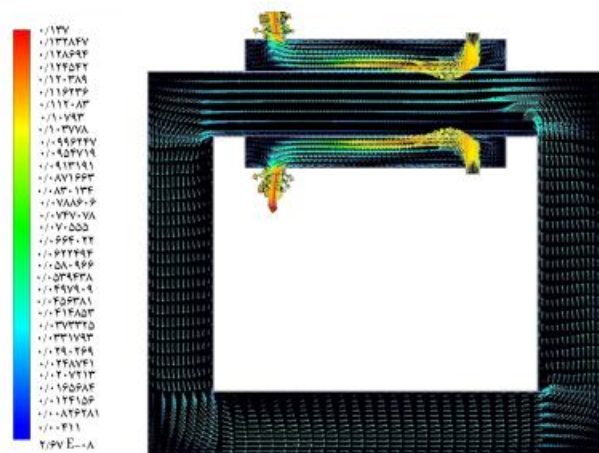
شکل ۹. نتایج مربوط به ترموسیفون قائم.



شکل ۱۴. کانتور دما در ترموسیفون افقی (برحسب درجه سانتیگراد).



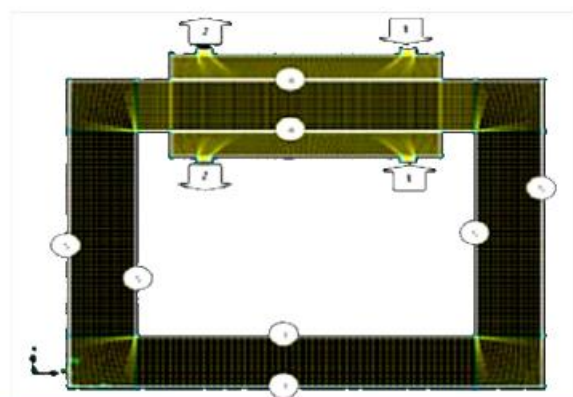
شکل ۱۵. لایه مرزی دمایی در نزدیکی دیواره بین ترموسیفون و محفظه خنک کننده.



شکل ۱۶. کانتور بردارهای سرعت در ترموسیفون افقی (رنگ‌بندی بر اساس اندازه سرعت m/s).

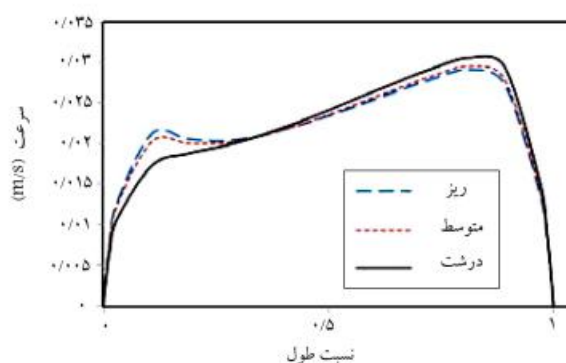
شود، دما در قسمت عمودی و عایق ترموسیفون در سمت راست بیشتر از دما در قسمت عمودی و عایق در سمت چپ است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که سیال پس از گرم شدن در منبع گرمایی از سمت راست به طرف منبع سرد حرکت می‌کند و پس از انتقال حرارت با آب خنک کننده از طریق لوله سمت چپ به منبع گرم باز می‌شود. در شکل ۱۶ بردارهای سرعت در تمامی دامنه حل رسم شده‌اند.

بردارهای سرعت در قسمت خنک کننده به خوبی نمایانگر این هستند که جریان آب سرد ورودی از قسمت سمت راست وارد محفظه خنک کننده می‌شوند و از



مقدار	نوع	شرط مرزی	ردیف
0.1 m/s	سرعت ورودی	ورودی	۱
$\cdot \text{Pag}$	فشار خروجی	خروجی	۲
1000 Watt	پاشار گرما	دیوار	۳
----	زوج	دیوار	۴
-----	آدیاباتیک	دیوار	۵

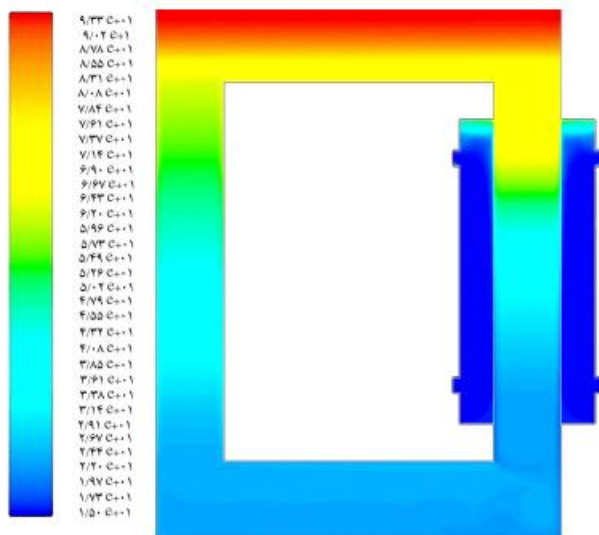
شکل ۱۷. شبکه دوبعدی ترموسیفون افقی و شرایط مرزی حاکم.



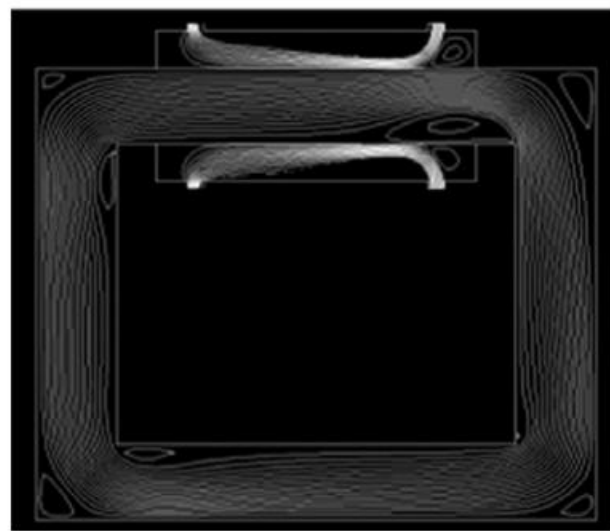
شکل ۱۸. توزیع سرعت در خط مرکزی قسمت عایق ترموسیفون افقی در شدت‌های مختلف.

در شکل ۱۴ توزیع دما در سرتاسر دامنه حل قابل مشاهده است. بر اساس آن دما در قسمت پایین ترموسیفون و در نزدیکی دیواره‌هایی که شار گرمایی از آنها وارد ترموسیفون می‌شود، زیاد است و به تدریج با افزایش ارتفاع از میزان دما کم می‌شود و کم‌ترین دما در مدار اصلی ترموسیفون در نزدیکی دیواره منبع سرد، در جایی که دقیقاً آب داخل ترموسیفون با آب خنک کننده به صورت غیرمستقیم تماس دارد، است.

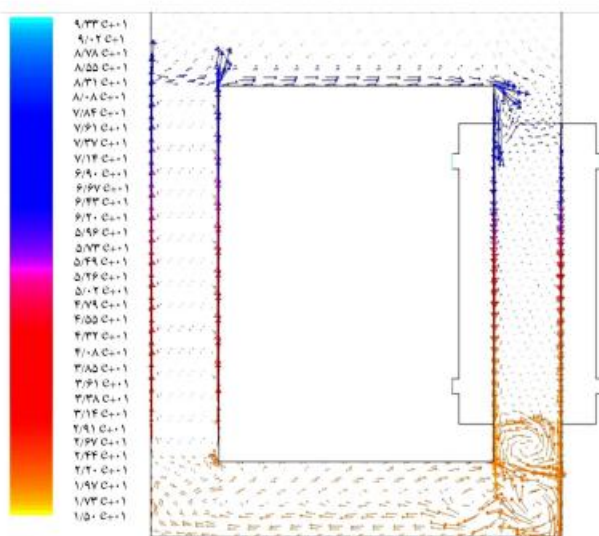
لایه مرزی دمایی^{۲۴} را که در محل تماس غیرمستقیم آب گردش کننده در ترموسیفون و آب خنک کننده تشکیل شده، در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. گرادینان‌های دما در این ناحیه بسیار شدید است. همچنین اگر به شکل ۱۴ دقت



شکل ۱۹. کانئور دما در ترموسیفون قائم.



شکل ۱۷. خطوط جریان در ترموسیفون افقی.

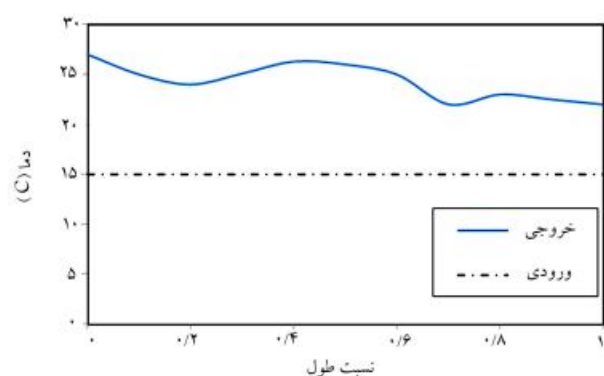


شکل ۲۰. کانئور بردارهای سرعت در ترموسیفون قائم ا رنگبندی بر اساس اندازه سرعت (m/s).

باشد، دمای آن نیز افزایش پیدا می‌کند و یا به عبارت بهتر، سیال پس از گرم شدن در منبع گرمایی به سمت بالای ترموسیفون حرکت کرده و در آن قسمت قرار می‌گیرد.

همانطور که در شکل ۲۰ قابل مشاهده است، سیال در قسمت گرم و در مجاورت دیواره‌ها با سرعت نسبتاً بالایی به سمت بالای ترموسیفون حرکت می‌کند.

در نتیجه توده‌یی از سیال گرم در بالای ترموسیفون قرار می‌گیرد و چون منبع سردی در قسمت بالای ترموسیفون در این حالت وجود ندارد، در نتیجه سیال فرصت از دست دادن حرارت خود را ندارد و همان جا متوقف می‌شود. به علت اینکه سیال در این قسمت دارای بیشینه دما در ترموسیفون و در نتیجه کمیته چگالی است، در نتیجه در همان بالای ترموسیفون باقی می‌ماند و به سمت منبع سرد حرکت نمی‌کند. همچنین بنا بر معادله پیوستگی از آنجا که سیال گرم در بالای ترموسیفون ساکن باقی می‌ماند در نتیجه به باقی سیال از جمله سیال چگال واقع شده در قسمت سرد نیز اجازه حرکت نمی‌دهد. در این شکل نیز سرعت در قسمت بالای ترموسیفون تقریباً برابر با صفر است. همچنین گردابه‌های تشکیل شده در



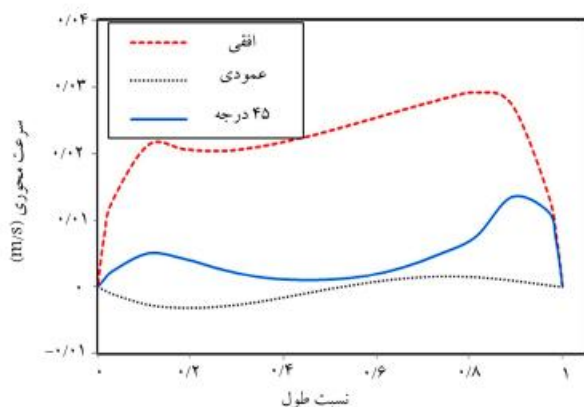
شکل ۱۸. اندازه دما در مقطع ورودی و خروجی آب خنک کننده ا بر حسب درجه سانتیگراد.

قسمت سمت چپ از این محفظه خارج می‌گردند.

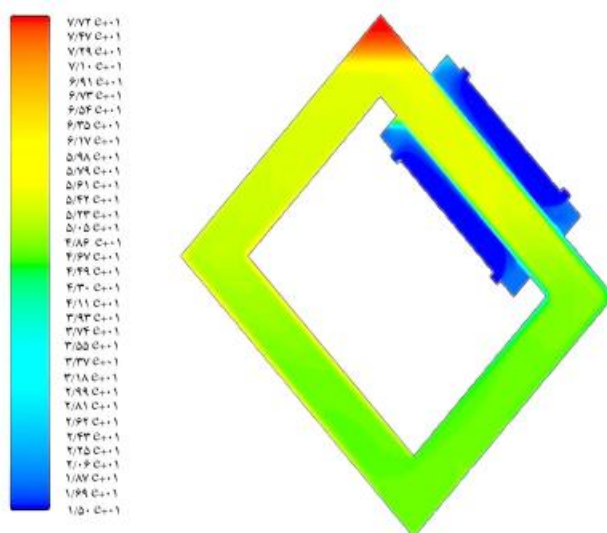
یکی دیگر از پارامترهایی را که می‌توان بر روی آن بحث نمود، خطوط جریان در ترموسیفون می‌باشند. در شکل ۱۷ خطوط جریان برای ترموسیفون رسم شده است. در شکل ۱۸ اختلاف دمای بین مقطع خروجی آب خنک کننده و مقطع ورودی آن قابل مشاهده است.

از آنجا که اساس کارکرد ترموسیفون بر نیروی جاذبه زمین استوار است در نتیجه نحوه قرارگیری ترموسیفون و تأثیر آن بر روی کارکرد ترموسیفون می‌تواند حائز اهمیت باشد. یکی از مواردی که تا به حال در پژوهش‌های صورت گرفته کم‌تر بررسی شده است، زاویه قرارگیری ترموسیفون است. زاویه قرارگیری ترموسیفون از آن جهت که باعث تغییر جهت اعمال نیروی جاذبه به ترموسیفون در قسمت‌های مختلف می‌شود، می‌تواند حائز اهمیت باشد. در این بخش سعی می‌شود که اثرات این تغییر زاویه بر روی مشخصه‌های هیدرولیکی و حرارتی ترموسیفون بررسی شود. بدین منظور ترموسیفون را در دو حالت مختلف جدید با زاویای ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق دوران داده و مجدداً آنها را به صورت عددی بررسی و تحلیل می‌نماییم.

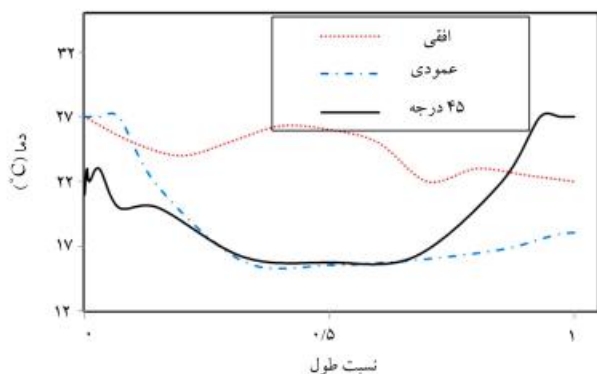
تأثیر قرارگیری ترموسیفون در زاویه ۹۰ درجه در شکل ۱۹، نشان داده شده است. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، مقدار دما در ترموسیفون با ارتفاع ارتباط مستقیم دارد و هر چه سیال در ارتفاع بالاتری در ترموسیفون



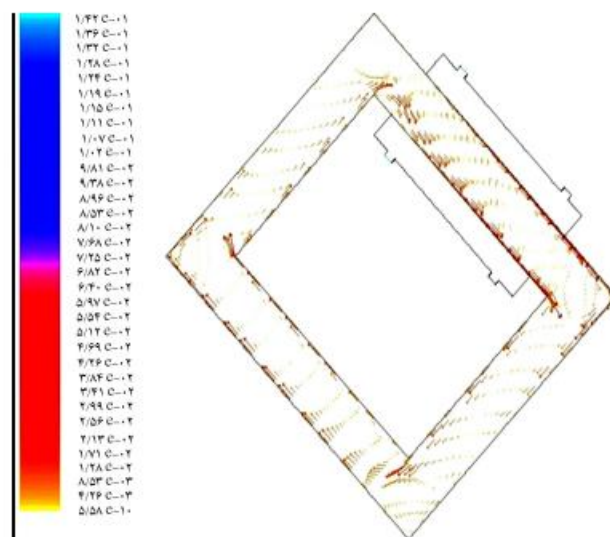
شکل ۲۳. توزیع سرعت محوری در خط مرکزی قسمت عایق ترموسیفون در زوایای مختلف.



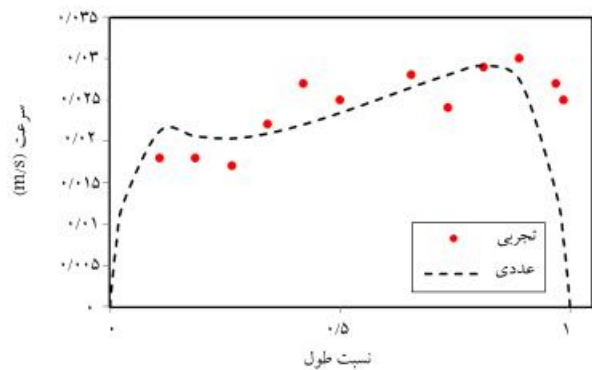
شکل ۲۱. کانطور دما در ترموسیفون ۴۵ درجه.



شکل ۲۴. توزیع دمای آب خنک کننده در مقطع خروجی در زوایای مختلف قرارگیری ترموسیفون.



شکل ۲۲. توزیع بردارهای سرعت در ترموسیفون ۴۵ درجه.



شکل ۲۵. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای خط مرکزی لوله عایق راست ترموسیفون افقی.

۳.۳. صحت‌سنجی نتایج عددی

به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته به وسیله PIV و همچنین نتایج به دست آمده از ثبت مقادیر دما در ورودی و خروجی آب خنک کننده در حین آزمایش استفاده می‌نماییم. در شکل ۲۵ مقادیر سرعت به دست آمده در خط مرکزی وسط لوله عایق سمت راست ترموسیفون در حالت افقی از دو روش عددی و PIV به نمایش درآمده است. شایان ذکر است که این نتایج هر دو در حالتی به دست آمده‌اند که ترموسیفون

پایین قسمت سرد ناشی از حرکات آشفته و رفت و برگشتی سیال در این ناحیه است.

توزیع دما در زاویه ۴۵ درجه در شکل ۲۱ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود، دما در بالاترین قسمت ترموسیفون بیشینه است و دمای سیال پس از عبور از قسمت سرد کاهش می‌یابد.

همچنین توزیع بردارهای سرعت در شکل ۲۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌کنیم، توزیع سرعت در ترموسیفون ۴۵ درجه از حالت افقی بدتر است اگرچه این وضعیت از ترموسیفون در حالت قائم بهتر است. شاید بتوان به صورت یک فرضیه کلی بیان نمود که هرچه منبع سرد به نقطه بالایی ترموسیفون نزدیکتر باشد، بازدهی آن بیشتر است. در شکل ۲۳ مقادیر سرعت در خط مرکزی قسمت عایق ترموسیفون به ازای زوایای قرارگیری ترموسیفون رسم گردیده است. همچنین قابل ذکر است که مقدار دمای خروجی آب خنک کننده در ترموسیفون ۴۵ درجه از ترموسیفون قائم تقریباً بیشتر و از ترموسیفون افقی کم‌تر است. در شکل ۲۴ این مقایسه انجام گرفته است.

زمان رسیدن به حالت پایا در شرایط آزمایشگاهی در حدود 10° دقیقه به دست آمد. در بررسی اثر زاویه قرارگیری ترموسیفون بر کارکرد آن، ترموسیفون افقی نتایج مناسب تری نسبت به حالت‌های مایل و قائم در بر داشت. همچنین توزیع سرعت در مدار اصلی ترموسیفون کاملاً منظم و یکنواخت بود. در این وضعیت مقدار ماکزیمم سرعت در قسمت عایق در حدود 3 سانتیمتر بر ثانیه بوده و همچنین دمای خروجی آب خنک کننده در حالت پایا به 25 درجه سانتیگراد می‌رسد. بدلیل اینکه در ترموسیفون مایل و قائم، قسمت عایق در بالاترین ارتفاع ترموسیفون قرار می‌گیرد در نتیجه سیالی که در منبع گرم، حرارت جذب کرده و به سمت بالا حرکت کرده است در این مکان انباشته شده و به صورت ساکن در می‌آید. همانطور که در نتایج عددی مشاهده شد، خطوط جریانی از این قسمت نمی‌گذرد و سیال تقریباً ساکن است. این نتیجه در مشاهدات به روش PIV نیز مشاهده شد. در این مشاهدات توزیع سرعت در ترموسیفون مایل و قائم به مراتب از ترموسیفون افقی نامنظم تر و بعضاً جریان رفت و برگشتی بود. همچنین دمای خروجی آب خنک کن در ترموسیفون مایل و قائم نسبت به افقی افت می‌کند که این خود مجدداً تأیید می‌کند که بازده در ترموسیفون مایل و قائم کاهش می‌یابد.

در وضعیت پایای خود مشغول به کار است. همانطور که در این شکل قابل مشاهده است نتایج عددی و تجربی به دست آمده همخوانی نسبتاً خوبی با هم دارند. همچنین دمای ورودی آب خنک کننده ترموسیفون در حالت آزمایشگاهی تقریباً برابر با 15 درجه و دمای خروجی آب خنک کننده تقریباً برابر با 25 درجه سانتیگراد اندازه‌گیری شد. در صورتیکه دمای متوسط خروجی آب خنک کننده با استفاده از روش‌های عددی برابر با مقدار $24/3$ درجه سانتیگراد به دست آمد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک ترموسیفون تک فاز، به منظور اعمال کردن روش PIV روی آن، طراحی و ساخته شد. از زمانی که ترموسیفون شروع به کار می‌کند، با گذشت زمان بتدریج سیال شروع به جریان یافتن می‌کند، این افزایش جریان ادامه پیدا می‌کند مادامی که جریان به حالت پایای خود برسد در این حالت دیگر تغییر محسوسی در مشخصات حرارتی و هیدرولیکی ترموسیفون رخ نمی‌دهد. برای ترموسیفون افقی

پانوشته‌ها

1. evaporator
2. condenser
3. passive
4. Thermosyphon Reboilers
5. Weber
6. Froude
7. Bond
8. Kutateladze
9. single phase natural circulation loop
10. Laser Doppler Vibrometer
11. pulsating heat pipes
12. Particle image velocimetry
13. Plexiglass
14. single phase Thermosyphon (SPT)
15. riser
16. down comer
17. Optical
18. control valve
19. filming flow
20. droplet flow
21. image processing
22. Matlab
23. off-design Region
24. operational situation
25. saturation region
26. thermal boundary layer

منابع (References)

1. Faghri, A., *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor and Francis (1995).
2. Hanafizadeh, P. and Nouri, A., "The effect of shear stress of liquid-vapor interface with and without Mass Transfer on thermal performance of a thermosyphon", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 41(2), pp. 55-62 (in Persian) (2010).
3. Bieliński, H. and Mikielewicz, J. "Natural circulation in single and two phase thermosyphon loop with conventional tubes and minichannels", *J. Heat Transfer - Mathematical Modeling Numerical Methods and Information Technology*, **19**, pp. 475-496 (2011).
4. Kandlikar, S.G. and Habsberg, S. "Review of literature and a preliminary experimental investigation instabilities in an R-11 thermosyphon loop with applications in microelectronic chip cooling", *ASME Heat Transfer Division HTD*, **115**, pp.7-13 (1989).
5. Payakaruk, T., Terdtoon, P. and Ritthidech, S. "Correlations to predict heat transfer characteristics of an Inclined closed two-phase thermosyphon at normal operating conditions", *J. Applied Thermal Engineering*, **20**(9), pp. 781-790 (2000).
6. Khodabandeh, R. and Furberg, R., Instability, heat transfer and flow regime in a two-phase flow thermosyphon loop at different diameter evaporator channel", *J. Applied Thermal Engineering*, **30**, pp. 1107-1114 (2010).
7. Humnic, G., Humnic, A., Morjan, I. and Dumitrache, F. "Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles", *J. Heat and Mass Transfer*, **54**, pp. 656-661 (2011).
8. Chami, N. and Zoughaib, A. "Modeling natural convection in a pitched thermosyphon system in building roofs and experimental validation using particle image

- velocimetry", *J. Energy and Buildings*, **42**, pp. 1267-1274 (2010).
9. Shiraishi, M., Terdtoon, P., Chailungkar, M., Ritthidej, S., "Effects of Bond numbers on internal flow patterns of an inclined, closed, two-phase thermosiphon at normal operating conditions", *Exp. Heat Transfer*, Vol. 10, pp. 233-251 (1997).
 10. Misale, M., Devia, F. and Garibaldi, P. "Some considerations on the interaction between the fluid and wall tube during experiments in a single-phase natural circulation loops", *Proceedings of the 3rd Iasme/Wseas Int. Conf. on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*, pp. 128-131 (2005).
 11. Ambrosini, W. and Ferreri, J.C. "Stability analysis of single-phase thermosiphon loops by finite difference numerical methods", *Nuclear Engineering and Design*, **201**(1), pp. 11-23 (2000).
 12. Kuhlman, J., Sivanagere, S., Gray, D. and Guffey, S.X. "LDV and PIV velocity results in a thermosiphon", *ASME_JSME Joint Fluids Engineering Conference* (2005).
 13. Shokohmand, H. and Hassani, A. "A numerical modeling of a variable conductance thermosiphon by use of a binary mixture", *IJE Transactions A: Basics*, **15**(4), pp. 373-382 (2002).
 14. Shafii, M.B. and Faghri, A. "Analysis of heat transfer in unlooped and looped pulsating heat pipes", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, **12**(5), pp. 585-609 (2002).