بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

بررسی جریان مایع در محیط متخلخل لوله حرارتی در شرایط دو بعدی، لایه‌ای و پایدار

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط :

ایمان شیرمحمدی

استادان راهنما :

دکتر حسن بصیرت تبریزی

دکتر بهمن خستو

دانشکده مهندسی مکانیک

۱۳۸۴

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :84/12/8

معاونت پژوهشی

فرم پروژه تحصیلات تکمیلی 7

فرم اطلاعات پایان‌نامه کارشناسی ارشد و دکترا

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : **ایمان شیرمحمدی** ■ **دانشجو آزاد** □ **بورسیه** □ **معادل**

شماره دانشجویی : 82126432 **دانشکده** : مکانیک **رشته تحصیلی** : مهندسی مکانیک

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : دکتر حسن بصیرت - دکتر بهمن خستو

عنوان به فارسی : بررسی جریان مایع در محیط متخلخل لوله گرمایی در شرایط دوبعدی، لایه ای و پایدار

عنوان به انگلیسی : Investigation of two dimensional laminar steady-state flow in porous media of heat pipe

نوع پروژه : ■ **کارشناسی ارشد** □ **دکترا** ■ **کاربردی** ■ **بنیادی** □ **توسعه‌ای** □ **نظری**

تاریخ شروع : 83/7/1 **تاریخ خاتمه** : 84/12/8 **تعداد واحد** : 6

سازمان تأمین کننده اعتبار : .معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

واژه‌های کلیدی به فارسی : لوله گرمایی، محیط متخلخل، حل عددی، حجم محدود، لایه ای، پایدار

واژه‌های کلیدی به انگلیسی : heat pipe, porous media, numerical analysis, finite volume, laminar, steady state

---

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه : -

استاد راهنما : -

دانشجو : -

امضا استاد راهنما : **تاریخ** :

نسخه 1) معاونت پژوهشی

نسخه 2) کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تصفیه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

بدینوسیله از زحمات اساتید بزرگوار، آقای دکتر بصیرت و آقای دکتر خستو برای ارائه راهنمایی‌های ارزنده در طول انجام این پایان‌نامه قدردانی می‌نمایم.

تقدیم به:

پدر بزرگوارم و مادر همیشه مهربانم

بدینوسیله اعلان می گردد که مطالب مندرج در این پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرکی توسط اینجانب و یا فرد دیگری ارائه نشده است.

ایمان شیرمحمدی

لوله گرمایی وسیله‌ای برای انتقال حرارت با ضریب هدایت گرمایی خیلی بالا می‌باشد که انرژی گرمایی را به وسیله تبخیر و میعان یک سیال عامل با افت دمای ناچیز منتقل می کند. هنگامی که گرما به اواپراتور می رسد سیال عامل تبخیر می شود و یک گرادیان فشار در لوله ایجاد می کند. این گرادیان فشار باعث می شود بخار در طول لوله حرکت کند تا به کندانسور برسد. در کندانسور بخار میعان شده، گرمای نهای تبخیر آن آزاد می‌شود. سپس سیال عامل توسط فشار مویینگی از درون فتیله به اواپراتور باز می‌گردد. فشار مویینگی درون فتیله بر اثر کشش سطحی سیال عامل و تغییرات انحناء سطوح تماس مایع و بخار در اواپراتور و کندانسور ایجاد می‌شود. عوامل مختلفی وجود دارند که در انتقال حرارت لوله گرمایی ایجاد محدودیت می کنند.

در این پایان نامه جریان مایع در محیط متخلخل لوله گرمایی مدلسازی و تحلیل شده است. فرض شده که جریان مایع به صورت دائمی، دو بعدی و لایه‌ای باشد و از نیروهای حجمی صرفنظر گردیده است، علاوه بر آن فتیله نیز ایزوتروپیک و همگن در نظر گرفته شده است.

در این مسأله از روش عددی حجم محدود و الگوریتم سیمپل استفاده شده است و برای حل معادلات جداسازی شده حاکم، الگوریتم ماتریس سه قطری به صورت خط به خط در جهت محوری و شعاعی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاصل با نتایج روش تحلیلی مقایسه شده و سپس اثر پارامترهای مختلف مانند توان حرارتی لوله گرمایی و محدودیت مویینگی، ضخامت فتیله، تخلخل فتیله و ضریب هدایت گرمایی مؤثر فتیله بررسی گردیده است.

فهرست مطالب

قدردانی ..... أ

اهدانامه ..... ب

اعلان منحصر بفرد بودن پایان نامه ..... ت

چکیده ..... ث

فهرست مطالب ..... ج

فهرست اشکال و جداول ..... د

فهرست علائم ..... س

فصل ۱ : مقدمه‌ای بر اصول لوله های گرمایی ۱

۱-۱- پیشگفتار ۲

۱-۲- معرفی لوله گرمایی ۳

۱-۲-۱- اصول کارکرد لوله گرمایی ۴

۱-۲-۲- انواع لوله‌های گرمایی ۱۰

۱-۲-۳- سیالهای عامل و محدوده دمایی ۱۱

۱-۲-۴- ساختار فتیله های مویین ۱۴

۱-۲-۵- عوامل محدود کننده انتقال حرارت در لوله گرمایی ۲۰

۱-۲-۶- راه اندازی لوله گرمایی ۲۵

۱-۲-۷- کاربردهای لوله گرمایی ۲۷

۳-۱- مطالعات قبلی در زمینه طراحی و مدلسازی لوله گرمایی ۳۰
فصل۲ : مدلسازی لوله گرمایی ۳۴
۲-۱- پیشگفتار ۳۵
۲-۲- معادلات حاکم بر جریان بخار در کانال بخار ۳۶
۲-۳- معادلات حاکم بر جریان مایع در محیط متخلخل ۳۷
۲-۴- شرایط مرزی ۳۹
فصل۳ : روش عددی و تجزیه معادلات ۴۲
۳-۱- پیشگفتار ۴۳
۳-۲- روش حجم محدود برای مسائل نفوذ- جابجایی ۴۵
۳-۳- محاسبه میدان جریان ۴۹
۳-۳-۱- شبکه جابجا شده ۵۱
۳-۳-۲- معادلات اندازه حرکت ۵۳
۳-۳-۳- تصحیح فشار و سرعت ۵۵
۳-۳-۴- معادله تصحیح فشار ۵۶
۳-۳-۵- الگوریتم سیمپل ۵۸
۳-۴- تجزیه معادلات و اعمال روش ***SIMPLE*** بر جریان مایع در فتیله ۵۹
۳-۴-۱- معادلات اندازه حرکت ۵۹
۳-۴-۲- معادله انرژی ۶۴
۳-۴-۳- تصحیح فشار وسرعت ۶۶
۳-۴-۴- معادله تصحیح فشار ۶۸
۳-۴-۵- اعمال روش سیمپل بر جریان مایع در فتیله ۶۹

فصل۴ : بررسی نتایج ۷۲

۴-۱- پیشگفتار ۷۳

۴-۲- ارزیابی مدل عددی به کار رفته ۷۳

۴-۲-۱- مقایسه با نرم افزار فلوئنت ۷۵

۴-۲-۲- مقایسه با جوابهای تحلیلی ۷۵

۴-۳- عدم وابستگی جوابها به ابعاد شبکه ۷۹

۴-۴- بررسی پارامترهای مختلف بر رفتار لوله گرمایی ۸۰

۴-۴-۱- توان حرارتی لوله گرمایی و حد مویینگی ۸۰

۴-۴-۲- ضخامت فتیله ۸۲

۴-۴-۳- تخلخل فتیله ۸۶

۴-۴-۴- ضریب هدایت حرارتی مؤثر فتیله ۸۷

فصل۵ : نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۱

۵-۱- نتیجه گیری ۹۲

۵-۲- پیشنهاد ادامه پروژه ۹۳

مراجع ۹۴

پیوست ۹۸

فهرست اشکال و جداول

شکل ۱-۱- شماتیکی از یک لوله گرمایی معمولی..... ۴

شکل ۱-۲- تغییرات محوری سطح مشترک بخار- مایع، و توزیع فشار مایع و بخار در لوله گرمایی با نرخ جریان بخار کم ۵

شکل ۱-۳- تغییرات محوری سطح مشترک بخار- مایع، و توزیع فشار مایع و بخار در لوله گرمایی با نرخ جریان بخار متوسط ۶

شکل ۱-۴- تغییرات محوری سطح مشترک بخار- مایع، و توزیع فشار مایع و بخار در لوله گرمایی با نرخ جریان بخار زیاد ۷

شکل ۱-۵- مدل مقاومت حرارتی یک لوله گرمایی ۸

شکل ۱-۶- سیکل ترمودینامیکی لوله گرمایی ۹

شکل ۱-۷- محدوده درجه حرارت کاری سیالهای عامل مختلف در مقیاس دمای لگاریتمی ۱۴

شکل ۱-۸- محدودیتهای انتقال حرارت ماکزیمم لوله گرمایی به صورت تابعی از دما..... ۲۰

شکل ۱-۹- توزیع فشار در یک لوله گرمایی ۲۱

شکل ۱-۱۰- تغییرات دمای محوری در زمان راه اندازی ۲۷

شکل ۱-۱۱- کاربرد لوله حرارتی در کامپیوتر نوت بوک..... ۲۸

شکل ۱-۱۲- چاه حرارتی خنک کننده پردازشگر کامپیوتر..... ۲۹

شکل ۱-۱۳- چاه حرارتی توان بالا به کمک لوله گرمایی..... ۳۰

شکل ۲-۱- لوله گرمایی به کار رفته در مدل عددی ۳۵

شکل۳-۱- حجم کنترل برای حالت دو بعدی ۴۵
شکل۳-۲- تابع $A(|P|)$ برای طرحهای مختلف ۴۹
شکل۳-۳- شبکه معمولی ۴۹
شکل۳-۴- میدان فشار با تغییرات تند ۵۰
شکل۳-۵- میدان سرعت مواج ۵۱
شکل۳-۶- مکانهای جابجا شده برای u و v ۵۲
شکل۳-۷- حجم کنترل u ۵۳
شکل۳-۸- حجم کنترل v ۵۴
شکل۳-۹- حجم کنترل برای معادله پیوستگی ۵۷
شکل۳-۱۰- حجم کنترل w ۶۰
شکل۳-۱۱- حجم کنترل v ۶۲
شکل۳-۱۲- حجم کنترل T ۶۵
شکل۳-۱۳- حجم کنترل p ۶۶
شکل۳-۱۴- الگوریتم *SIMPLE* ۷۱
شکل۴-۱- تغییرات سرعت ماکزیمم در طول لوله ۷۳
شکل۴-۲- کانتور اندازه سرعت و خطوط جریان به دست آمده از کد نوشته شده ۷۴
شکل۴-۳- کانتور اندازه سرعت و خطوط جریان به دست آمده از نرم افزار فلوئنت ۷۴
شکل۴-۴- تغییرات سرعت محوری ماکزیمم در طول لوله برای اعداد رینولدز مختلف ۷۶
شکل۴-۵- توزیع فشار مایع در طول لوله برای اعداد رینولدز مختلف ۷۶
شکل۴-۶- کانتور سرعت محوری و خطوط جریان برای $\mathrm{Re} = 10$ ۷۷
شکل۴-۷- خطوط سرعت محوری برای $\mathrm{Re} = 10$ ۷۷

شکل۴-۸- کانتور سرعت محوری برای Re = 5 ..... ۷۸
شکل۴-۹- خطوط سرعت محوری برای Re = 5 ..... ۷۸
شکل۴-۱۰- کانتور سرعت محوری و خطوط جریان برای Re = 2 ..... ۷۸
شکل۴-۱۱- خطوط سرعت محوری برای Re = 2 ..... ۷۹
شکل۴-۱۲- بررسی عدم وابستگی جوابها به شبکه بندی..... ۷۹
شکل۴-۱۳- توزیع فشار مایع در طول لوله برای توانهای حرارتی مختلف..... ۸۱
شکل۴-۱۴- تغییرات سرعت محوری ماکزیمم در طول لوله برای توانهای حرارتی مختلف ۸۱
شکل۴-۱۵- توزیع دما در طول لوله در سطح مشترک فتیله- دیواره برای توانهای حرارتی مختلف .. ۸۲
شکل۴-۱۶- توزیع فشار مایع در طول لوله برای ضخامتهای مختلف فتیله ۸۳
شکل۴-۱۷- تغییرات سرعت محوری ماکزیمم در طول لوله برای ضخامتهای مختلف فتیله..... ۸۳
شکل۴-۱۸- کانتور سرعت محوری برای فتیله با ضخامت 0.75mm ۸۴
شکل۴-۱۹- کانتور سرعت محوری و خطوط جریان برای فتیله با ضخامت 1.5mm..... ۸۴
شکل۴-۲۰- خطوط سرعت محوری برای فتیله با ضخامت 1.5mm ۸۴
شکل۴-۲۱- کانتور سرعت محوری و خطوط جریان برای فتیله با ضخامت 3mm ۸۵
شکل۴-۲۲- کانتور سرعت محوری برای فتیله با ضخامت 4.5mm ۸۵
شکل۴-۲۳- خطوط سرعت محوری برای فتیله با ضخامت 4.5mm ۸۵
شکل۴-۲۴- توزیع فشار مایع در طول لوله برای تخلخل های مختلف فتیله ۸۶
شکل۴-۲۵- تغییرات سرعت محوری ماکزیمم در طول لوله برای تخلخلهای مختلف فتیله ۸۶
شکل۴-۲۶- توزیع دما در طول لوله در سطح مشترک فتیله- دیواره برای تخلخلهای مختلف فتیله . ۸۷
شکل۴-۲۷- توزیع دما در طول لوله با مدل رایلی برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر ۸۸
شکل۴-۲۸- توزیع دما در طول لوله با مدل سری برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر ۸۹

شکل۴-۲۹- توزیع دما در طول لوله با مدل موازی برای ضریب هدایت حرارتی مؤثر ۸۹
شکل۴-۳۰- توزیع دما در طول لوله در مرکز فتیله به إزای ضرایب هدایت حرارتی مؤثر مختلف ۹۰
جدول۱-۱- سیالهای عامل و محدودهٔ دمایی ۱۲
جدول۱-۲- سازگاری فلزات با سیالهای عامل برای لوله های حرارتی ۱۳
جدول۱-۳- ساختار انواع فتیله های همگن ۱۶
جدول۱-۴- ساختار انواع فتیله های مرکب ۱۹
جدول۳-۱- تابع $A(|P|)$ برای طرحهای مختلف ۴۸
جدول۴-۱- مشخصات لوله گرمایی که برای ارزیابی مدل ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفته است... ۷۵

فهرست علائم

حروف لاتین

c	سرعت محلی صوت
c_p	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت
Da	عدد دارسی
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر
K	نفوذپذیری
k	ضریب هدایت حرارتی
L	طول
Ma	عدد ماخ بخار
p	فشار
p_c	فشار مویینگی
P	عدد پکله
Pr	عدد پرانتل
$\dot{q}$	گرما
r	مختصات شعاعی
R	شعاع، ثابت گاز
Re	عدد رینولدز

T	دما
v	سرعت شعاعی
w	سرعت محوری
z	مختصات محوری
t	زمان

حروف یونانی

a	ضریب رهایی
r	چگالی
e	تخلخل
m	ویسکوزیته دینامیکی
n	ویسکوزیته سینماتیکی
s	کشش سطحی
j	متغیر عمومی

زیر نویسها

a	آدیاباتیک
c	کندانسور
e	اواپراتور
eff	مؤثر
int	سطح مشترک

l	مایع
v	بخار
w	دیوار

فصل۱ : مقدمه‌ای بر اصول لوله‌های گرمایی

۱-۱- پیشگفتار

امروزه توسعه سریع تکنولوژی در زمینه الکترونیک منجر به ساخت مدارات فشرده در اندازه های کوچک شده است. کامپیوترهایی با سرعت بالا که قابلیت پردازش اطلاعات بیشتر در زمان کوتاهتر را دارند، تولید شده اند. این امر باعث افزایش مقدار حرارت تولید شده در حجم کوچکتری گردیده است. عملکرد بهینه مدارات فشرده الکترونیکی از جمله پردازشگر مرکزی کامپیوتر[1]بسیار حساس به دمای کارکرد آنهاست و افزایش دما باعث کوتاه شدن عمر، اختلال در کارکرد و خرابی آنها می گردد. چون روشهای معمول خنک کردن این مدارات فشرده، همانند استفاده از چاههای حرارتی ساخته شده از سطوح گسترش یافته آلومینیومی دارای راندمان پایین است و باعث اشغال فضای زیاد و افزایش وزن سیستم می گردد، لزوم استفاده از طرحهای نوین در این زمینه احساس می گردد.

یکی از روشهایی که در این زمینه پیشنهاد شده است، استفاده از لوله گرمایی[2] برای خنک کردن تجهیزات الکترونیکی است. لوله های گرمایی قابلیت انتقال مقدار زیادی گرما در یک سطح مقطع کوچک را دارند، به طوری که ضریب انتقال حرارت هدایت معادل آنها به علت استفاده از مکانیزم انتقال حرارت دو فازی تا چند صد برابر هادی ترین فلزات موجود می رسد. علاوه براین، با استفاده از فن هایی با سرعتهای پایین تر می توان به عملکرد خنک کردن مطلوب رسید که این امر باعث کاهش صدای سیستم می گردد.

محققین و شرکتهای زیادی در طراحی و ساخت مبدلها و چاههای حرارتی با استفاده از لوله گرمایی به فعالیت پرداخته اند و به پیشرفتهای چشمگیری در این زمینه دست یافته اند. از نیمه دوم ۱۹۶۰ لوله های گرمایی به صورت تجاری موجود بودند، اما در چند سال گذشته، صنایع الکترونیک به

[1] CPU
[2] Heat pipe

آن به عنوان یک ابزار مورد اطمینان، با قابلیت بالا و قیمت مناسب روی آورده اند. به طور مثال امروزه اکثر کامپیوترهای کوچک از لوله های گرمایی برای خنک کردن پردازشگر استفاده می کنند.

در بعضی از این طرحها، گرمای تولید شده در پروسسور توسط لوله گرمایی به یک لوله گرمایی دیگر که به لولای متصل کننده صفحه نمایش متصل است، هدایت می شود. سپس برای پخش گرما به محیط از پشت صفحه نمایش کامپیوتر استفاده می گردد.

در همگی این طرحها، لوله گرمایی به عنوان جزء اصلی، اهمیت قابل توجهی دارد و سایر ملحقات مثل سطوح گسترش یافته، فن و ... در درجه دوم اهمیت قرار گرفته اند.

۱-۲- معرفی لوله گرمایی

لوله گرمایی وسیله ای است برای انتقال حرارت، با ضریب هدایت گرمایی خیلی بالا، که انرژی گرمایی را با افت دمای ناچیز منتقل می کند. از انواع مختلف سیستم های انتقال دهنده حرارت، لوله گرمایی یکی از کاراترین سیستم های شناخته شده امروزی می باشد. مزیت یک لوله گرمایی بر سایر روش های متداول، مقدار گرمای زیادی است که می تواند از یک سطح مقطع کوچک در یک فاصله زیاد بدون هیچگونه توان ورودی به سیستم منتقل گردد. علاوه بر این، طراحی وساخت نسبتاً ساده آن، افت درجه حرارت کم در طول لوله، قابلیت کنترل و انتقال گرما با نرخ بالا در درجه حرارت‌های مختلف از مشخصات منحصر به فرد لوله گرمایی می باشد.