بسم الله الرحمن الرحيم

١١٥١٩٧

دانشگاه شهید باهنر کرمان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
گرایش تبدیل انرژی

مطالعه عددی دستگاه ذخیره انرژی گرمایی توسط مواد تغییر فاز دهنده در حالت گذرا

استاد راهنما:
دکتر مهرابیان

مؤلف:
غلام‌حسین باقری

اطلاعات مدارک علمی ایران
تهیه مدارک
۱۳۸۸/۴/۲۱

دی‌ماه ۱۳۸۷

۱۱۵۱۹۷

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه

به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : غلام حسین باقری

استاد راهنما : آقای دکتر مظفر علی مهرابیان

داور ۱ : آقای دکتر مهران عامری

داور ۲ : آقای دکتر سید حسین منصوری

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: آقای دکتر هاشمی پور

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه است

دانشگاه شهید باهنر
کرمان
اداره تحصیلات تکمیلی

تقدیم به

خانواده گرامی

و

همسر عزیزم

که در تمام مراحل مرا یاری کردند.

سپاس

بار الها سپاس ترا که به من قدرتی عطا فرمودی تا بتوانم درباره قطره‌ای از دریای بیکران علم، به مطالعه و پژوهش بپردازم و به یمن عنایت بی انتهایت تحقیق خود را به نگارش در آورده و با یاری تو با موفقیت به اتمام برسانم. از تو ممنونم که شرایط زندگی من را به گونه‌ای رقم زدی که توفیق تحصیل علم تا این مقطع را داشته باشم و امیدوارم مرا در ادامه زندگی در راه درست هدایت کنی تا حق آنچه را که از روی کرم به من بخشیدی به جا آورم.

برخود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های آقای دکتر مهرابیان که همیشه با صبر و حوصله فراوان اینجانب را یاری نمودند، کمال تشکر را داشته باشم.

چکیده

دستگاه ذخیره انرژی گرمایی توسط مواد تغییر فاز دهنده[1] به علت کاربردهای فراوان صنعتی در دو دهه اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته است. از جمله کاربردهای این دستگاه در سازه‌های فضایی، صنعت خودرو سازی و سیستم‌های تهویه مطبوع می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده دارای گرمای نهان بزرگی می‌باشند، بنابراین این اندیشه به ذهن ما خطور می‌کند که شاید بتوان با استفاده از این خاصیت و همچنین یک دستگاه با هندسه مناسب در زمانی که ماده تغییر فاز دهنده در تماس با سیال حامل قرار می گیرد انرژی را در یک بازه زمانی جذب کرده و در زمان نیاز، ماده تغییر فاز دهنده انرژی گرمایی را در یک بازه زمانی طولانی‌تر به سیال حامل بازگرداند.هدف این پایان‌نامه ایجاد یک برنامه کامپیوتری است که بتواند عملکرد دستگاه ذخیره انرژی را شبیه‌سازی کند. رفتار ماده تغییر فاز دهنده و انتقال حرارت گذرا به روش جابجایی اجباری و هدایت بطور همزمان برای سیال حامل با عدد پرانتل کوچک (فلز مایع) با حل عددی معادلات ناویر استوکس، انرژی و انتقال آنتالپی[2] مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. حل عددی دستگاه ذخیره انرژی گرمایی توسط روش حجم محدود ضمنی بر روی یک شبکه جابجاشده[3] انجام می‌گیرد. معادلات دیفرانسیل توسط طرح‌های بالادست[4]، قاعده توانی[5] و پیوندی[6] گسسته می‌شوند. برای حل میدان فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل[7] استفاده می‌شود. برنامه کامپیوتری به زبان فرترن[8] نوشته شده و قابلیت حل مسائل دو بعدی و سه بعدی در سیستم مختصاتی کارتزین و استوانه‌ای را دارد. جریان‌های لایه مرزی آرام به همراه انتقال حرارت هدایت، انتقال حرارت جابجایی واداشته، انتقال حرارت جابجایی آزاد، انتقال حرارت ترکیبی[9]، انتقال حرارت به همراه تغییر فاز و انتقال حرارت در مواد مرکب[10] در حالت پایا[11] و ناپایا[12] بر روی شبکه جابجاشده یکنواخت[13] و غیر یکنواخت[14] را می‌توان توسط برنامه تدوین شده در این پایان‌نامه حل نمود. نتایج بدست آمده از اعمال برنامه فوق در مورد عملکرد حرارتی دستگاه ذخیره انرژی گرمایی در حالت‌های مختلف توسط نرم‌افزار تک‌پلات[15] رسم شده‌اند. نتایج عددی، معیارها و ضوابط موثر را برای طراحی بهینه این دستگاه مشخص می‌کند. ابعاد بهینه دستگاه برای اهداف متفاوت منجمله ذخیره مقدار معینی انرژی گرمایی بدست می‌آید.

---

[1] Phase Change Material(PCM)
[2] Enthalpy Transforming Method
[3] Staggered
[4] Upwind
[5] Power law
[6] Hybrid
[7] SIMPLE
[8] Fortran
[9] Conjugate Heat Transfer
[10] Composite material
[11] Steady
[12] Unsteady
[13] Uniform
[14] Non-Uniform
[15] Tecplot

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده..... و

فهرست علائم واصطلاحات..... ی

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه..... ۱

۱-۲ مواد تغییر فاز دهنده..... ۲

۱-۳ تحقیقات گذشته..... ۴

۱-۴ هدف از مطالعه حاضر..... ۶

۱-۵ معرفی فصول..... ۷

فصل دوم: بیان موضوع تحقیق و معادلات حاکم

۲-۱ مقدمه..... ۸

۲-۲ تعریف مساله..... ۱۰

۲-۳ معادلات حاکم بر مساله..... ۱۱

۲-۴ فضای شبکه..... ۱۴

۲-۵ شرایط اولیه و مرزی..... ۱۵

فصل سوم: روش حل معادلات حاکم

۳-۱ مقدمه..... ۱۷

۳-۲ روش های پیشگویی..... ۱۸

۳-۳ انواع روش‌های عددی..... ۲۱

۳-۴ روش‌های انفصال ۲۳
۳-۵ انفصال معادلات حاکم ۲۶
۳-۶ طرح‌های انفصال ۲۷
۳-۷ انتخاب طرح انفصال ۲۹
۳-۸ مزایا و معایب انواع طرح‌های انفصال ۳۱
۳-۹ تولید شبکه ۳۲
۳-۱۰ محاسبه میدان جریان ۳۳
۳-۱۱ الگوریتم سیمپل ۳۵
۳-۱۲ معادلات حاکم برمختصات کارتزین ۳۸
۳-۱۳ جملات چشمه ۳۸
۳-۱۴ حل معادلات انفصال ۳۹
۳-۱۵ زیر تخفیف و فوق تخفیف ۴۰
۳-۱۶ شرایط مرزی برای معادله تصحیح فشار ۴۱
۳-۱۷ همگرایی ۴۱
۳-۱۸ فلوچارت برنامه ۴۳

فصل چهارم:اعتبارسنجی برنامه

۴-۱ مقدمه ۴۴
۴-۲ مساله حفره با سرپوش متحرک ۴۴
۴-۳ مساله حفره به همراه انتقال حرارت آزاد ۴۹
۴-۴ مساله جریان درون لوله با دیواره دماثابت ۵۵

۴-۵ مساله استفان ۶۱

۴-۶ انجماد روی سطح خارجی استوانه ۶۳

۴-۷ انجماد دوبعدی ۶۵

فصل پنجم: بررسی نتایج

۵-۱ مقدمه ۶۷

۵-۲ آزمون عدم وابستگی نتایج به تعداد نقاط شبکه ۶۸

۵-۳ حالت اول دستگاه ۶۹

۵-۴ حالت دوم دستگاه ۷۶

۵-۵ بهینه‌سازی هندسه دستگاه ۷۹

۵-۶ بررسی کلی حالات مختلف دستگاه ۸۱

۵-۷ مقایسه با نتایج دیگر مراجع ۸۲

۵-۸ نتیجه‌گیری ۸۳

۵-۹ پیشنهادات ۸۳

منابع و مراجع

چکیده انگلیسی

فهرست علائم

مساحت	A
گرمای ویژه	c
گرمای ویژه سیال حامل، ضریب اصطکاک بدون بعد	c_f
قطر داخلی لوله داخلی، جمله پخش، فاصله قطری	D
آنتالپی	E
آنتاپی بدون بعد	E^*
جمله جابجایی	F
شتاب جاذبه زمین	g
گرمای نهان، ارتفاع	H
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h
ضریب هدایت حرارتی	k
طول لوله، طول	L
جرم	m
عدد ناسلت	Nu
فشار	p
فشار بدون بعد	P
فشار نقطه مرجع	p_0
فشار حدسی	p^*
مقدار تصحیح فشار	p'
عدد پکلت	$Pe = \frac{F}{D}$
عدد پرانتل	$\mathrm{Pr} = \frac{\mu c}{k}$

کل انرژی گرمایی ذخیره شده	Q_t
کل انرژی نهان ذخیره شده	Q_l
چگالی انرژی گرمایی ذخیره شده	Q_m
متغیر بدون بعد تعریف شده در معادله (۵-۱۸)	Q_l^*
مختصه شعاعی	r
مختصه شعاعی بدون بعد، باقی‌مانده	R
عدد رایلی	$Ra = \frac{\rho^2 g\beta(T_H - T_C)H^3}{\mu^2}\Pr$
عدد رینولدز	$\mathrm{Re} = \frac{\rho U_0 D}{\mu}$
فاصله شعاعی بدون بعد سطح حائل از محور تقارن	$R_{\inf}$
شعاع داخلی لوله خارجی	r_o
گره جابجا شده در راستای r	r_v
شعاع خارجی لوله داخلی	r_{wi}
شعاع خارجی لوله خارجی	r_{wo}
جمله چشمه	S
مقدار متوسط S	$\overline{S}$
عدد استفان	$St = \frac{c_l(T_{in} - T_m)}{H}$
دما	T
زمان	t
دمای بدون بعد	T^*
دمای کیرشهف	T^0
دمای ذوب	T_m

سرعت ورودی لوله	U_0
سرعت در راستای x	u
سرعت بدون بعد در راستای X	U
سرعت حدسی	u^*
سرعت در راستای r یا y	v
سرعت بدون بعد در راستای R، حجم	V
سرعت حدسی	v^*
سرعت مرجع	v^{**}
مختصه طولی	x
مختصه طولی بدون بعد	X
گره جابجا شده در راستای x	xu
مختصه طولی در مختصات کارتزین	y

علائم یونانی

ضریب پخش حرارتی، مقدار زیرتخفیف و فوق تخفیف	α
ضریب انبساط حرارتی	β
متغیر عمومی	φ
ضریب پخش	Γ
متغیر تعریف شده در معادله (۲-۱۳)	Λ
متغیر تعریف شده در معادله (۲-۲۳)	$\Lambda^* = \Lambda \frac{c_l}{Hk_l}$
متغیر معرفی شده در معادله (۴-۲۳)	λ
متغیر تعریف شده در معادله (۲-۱۲)	Ω

متغیر تعریف شده در معادله (۲-۲۲)	$\Omega^* = \Omega \frac{c_l}{k_l}$
ویسکوزیته	μ
چگالی	ρ

زیرنویس‌ها

مقدار متوسط	av
دیواره سرد	C
گره شرقی	E
وجه شرقی	e
سیال حامل، مکان سطح حائل	f
کاملاً توسعه یافته	fd
دیواره گرم	H
شرایط اولیه	i
ورودی	in
اندیس‌های تانسوری جمع‌پذیر	I,J
اندیس تانسوری جمع‌پذیر بردار سرعت u در راستای x	i
اندیس تانسوری جمع‌پذیر بردار سرعت v در راستای r	j
فاز مایع ماده تغییر فاز دهنده	l
گره شمالی	N
وجه شمالی	n
گره همسایه	nb
مقدار در زمان t	o
گره مرکزی	P

ماده تغییر فاز دهنده	p
مقدار مطالعه حاضر	$Present$
مقدار مرجع	ref
گره شمالی	S
وجه شمالی، فاز جامد ماده تغییر فاز دهنده	s
نسبت خاصیت در فاز جامد به فاز مایع ماده تغییر فاز دهنده	sl
گره غربی	W
وجه غربی، دیواره	w

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

دستگاه ذخیره انرژی گرمایی یکی از مهمترین فناوری‌های جدید انرژی می‌باشد که در انواع کاربردهای حرارتی و برودتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری در بسیاری از کشورها به خصوص کانادا، ایالات متحده آمریکا و کشورهای اروپایی طرفداران بسیاری پیدا کرده است. از جمله کاربردهای مهم این دستگاه کاهش شدید مصرف انرژی الکتریکی به هنگام سرمایش در تابستان می‌باشد. استفاده از این دستگاه در سیستم‌های تهویه مطبوع در تابستان باعث انتقال مصرف انرژی الکتریکی از ساعات پرباری به ساعات کم-باری و همچنین صرفه‌جویی در مصرف برق می‌شود. به عنوان مثال نصب این دستگاه در کتابخانه عمومی شهر پاسادانای کالیفرنیا در سال ۱۹۹۲ میلادی سبب کاهش هزینه برق به اندازه ۲۵۰,۰۰۰ دلار در سال شده است، در هاوایی نیز نصب این دستگاه سبب کاهش ۵۰ درصدی در مصرف برق شده است[۱]. دستگاه ذخیره انرژی در استفاده از انرژی خورشیدی و در صنعت هوا- فضا کاربردهای بسیاری دارد. همه این مثال-ها شواهدی بر اهمیت فراوان این فناوری در صنعت امروز می‌باشد.

۱-۲ مواد تغییر فاز دهنده

ماده تغییر فاز دهنده، ماده‌ای است با گرمای نهان ذوب بسیار بالا که با ذوب و انجماد در یک دمای مشخص قابلیت ذخیره و آزاد سازی مقدار زیادی انرژی گرمایی را داراست. تنها حالت مرسوم تغییر فاز در مواد تغییر فاز دهنده بین فازهای جامد و مایع می‌باشد. مواد تغییر فاز دهنده مایع-گاز به خاطر اینکه به فضای بزرگ و یا فشار نگهداری زیادی در حالت گازی نیاز دارند مرسوم نمی‌باشند، هر چند که نسبت به ماده تغییر فاز دهنده مایع-جامد ظرفیت انتقال حرارت بیشتری نیز دارند. مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان به سه دسته بزرگ تقسیم کرد، ترکیبات آلی، مواد پایه نمکی، ترکیبات یوتکتیکی.

۱-۲-۱ ترکیبات آلی

نمونه‌های این گروه پارافین‌ها(C_nH_{2n+2}) و اسیدهای چرب($CH_3(CH_2)_{2n}COOH$) می‌باشد.

مزایا:

- در محدوده‌های دمایی زیادی برای کاربردهای مختلف وجود دارند،
- با مصالح موجود سازگارند،
- گرمای نهان زیادی دارند،
- قابل بازیابی می‌باشند.

معایب:

- در فاز جامد ضریب هدایت حرارتی کمی دارند،
- چگالی ذخیره گرمایی کمی دارند،
- قابل اشتعال می‌باشند،
- از لحاظ هزینه فقط پارافین‌ها مقرون به صرفه می‌باشد.

۱-۲-۲ مواد معدنی

نمونه این گروه هیدرات‌های نمک(M_nH_2O) می‌باشد.

مزایا:

- چگالی ذخیره گرمایی بالایی دارند،
- ارزان‌قیمت و در دسترس می‌باشند،
- یک دمای ذوب مشخص دارند،
- گرمای نهان زیادی دارند،
- غیر قابل اشتعال می‌باشند.

معایب:

- در حین تغییر فاز تغییرات چگالی زیادی دارند،

۱-۲-۳ مخلوط‌های یوتکتیک

نمونه این گروه $LiF-MgF_2$ می‌باشد.

مزایا:

- چگالی ذخیره گرمایی بالایی دارند،
- یک دمای ذوب مشخص دارند.

معایب:

- به علت جدید بودن مواد این گروه، اطلاعات ترموفیزیکی کمی در دسترس است.

در جدول ۱-۱ خواص ترموفیزیکی آب و مخلوط یوتکتیک $LiF-MgF_2$ را در شرایط اتمسفری مشاهده می‌کنید. دمای ذوب و گرمای نهان این مخلوط آن را مناسب طرح‌های تولید قدرت می‌کند.

جدول۱-۱: مقایسه خواص ترموفیزیکی آب و مخلوط یوتکتیک $LiF-MgF_2$

	مخلوط یوتکتیک LiF-MgF_2	آب
گرمای نهان ($J\ kg^{-1}$)	۵۵۰,۰۰۰	۳۳۳,۴۰۰
دمای ذوب (K)	۱۰۰۸	۲۷۳/۱۵
چگالی فاز مایع($kg\ m^{-3}$)	۲۳۰۰	۹۹۹/۹
چگالی فاز جامد($kg\ m^{-3}$)	۲۶۳۰	۹۱۶/۴
گرمای ویژه فاز مایع($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	۱۹۹۰	۴۲۲۶
گرمای ویژه فاز جامد($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)	۲۵۱۰	۲۰۴۰
ضریب هدایت حرارتی فاز مایع($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	۳/۵	۰/۵۶
ضریب هدایت حرارتی فاز جامد($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	۳/۵	۲/۲۵

۱-۲-۴ معیارهای انتخاب

خواص ترمودینامیکی که ماده تغییرفاز دهنده باید دارا باشد:

۱- دمای ذوب در محدوده دمای عملیاتی باشد،

۲- مقدار گرمای نهان در واحد حجم بالایی داشته باشد،

۳- گرمای ویژه، چگالی و ضریب هدایت حرارتی بالایی داشته باشد،

۴- تغییرات چگالی به هنگام تغییر فاز کمی داشته باشد.

۱-۲-۵ کاربردها

تاکنون مواد تغییر فاز دهنده کاربردهایی به شرح زیر داشته اند:

- ذخیره انرژی گرمایی در سازه‌های فضایی .
- ذخیره انرژی گرمایی درون ساختمان‌ها .
- تهویه مطبوع .
- ساختمان استارت موتورهای دیزل برای استارت سریع تر در هوای سرد .
- صرفه جویی در مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها به کمک مواد تغییر فاز دهنده در مقیاس نانو و اختلاط آنها با بتون .
- حمل و نقل مواد غذایی .
- در صنایع خودروسازی در قطعات موتور ، رادیاتور و اگزوز .
- تولید آب گرم در ساختمان‌ها .
- فین‌های قطعات الکترونیکی .
- حوضچه‌هایی که در آنها سرمایش و گرمایش انجام می‌شود .

۱-۳ تحقیقات گذشته

۱-۳-۱ تغییر فاز

انتقال حرارت به همراه تغییر فاز دارای اهمیت زیادی در کاربردهای صنعتی می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان از ریخته‌گری، جوشکاری و دستگاه‌های ذخیره انرژی گرمایی نام برد. با توجه به اینکه تعیین مکان سطح حائل بین فازهای جامد و مایع ماده بسیار مهم است و حل‌های تحلیلی برای حالات خاص و ساده شده وجود دارد، بنابراین حل‌های عددی و مطالعات آزمایشگاهی تنها وسیله برای بررسی مساله تغییر فاز می‌باشند.

روش‌های عددی که تاکنون ارائه شده‌اند را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم کرد. دسته اول به روش-های عددی قوی معروف هستند که تمرکز آنها بر روی روش‌های تفاضل محدود و المان محدود می‌باشد. این دسته از حل‌های عددی برای مسائل یک‌بعدی مناسب هستند که با برخی الگوهای پیچیده به مسائل دوبعدی تعمیم داده می‌شوند. نمونه‌ای از این گروه، حل مساله انتقال حرارت به همراه ذوب در یک دیواره قائم توسط اوکادا [۲] می‌باشد. آقای هو و همکارانش[۳] نیز مساله ذوب یخ در اطراف یک استوانه را مورد بررسی قرار دادند. دسته دوم به روش‌های عددی ضعیف معروف هستند. این روش‌ها برای حل نیازی به دانستن مکان سطح حائل هنگام حل ندارند، انعطاف‌پذیری بالایی دارند و به راحتی به مسائل چند بعدی تعمیم داده می‌شوند. در این گروه معادلات آنتالپی مورد توجه هستند. از جمله کارهایی که در این گروه

انجام شده است حل مساله هدایت به همراه تغییر فاز در مسائل چند بعدی به کمک معادله آنتالپی، توسط شامسوندر و اسپارو [۴] می‌باشد. همچنین کراولی [۵] حل عددی مساله استفان را به کمک روش آنتالپی انجام داد. وولر و کراس [۶] مساله ذوب و انجماد بر روی یک استوانه متقارن را بررسی کردند. سیائو و چانگ [۷] تغییر فاز با استفاده از روش المان محدود را حل کردند. کیونگ [۸] سعی کرد از چشمه و چاه در حل مسائل دوبعدی انتقال حرارت کمک بگیرد. وولر و کراس [۹] برای حل عددی مساله استفان یک روش دقیق ارائه دادند که در آن نیز از معادله آنتالپی استفاده می‌شد. در همه مقالات فوق از روش آنتالپی استفاده می‌شد که در آنها آنتالپی به عنوان یک متغیر وابسته به دما در معادله انرژی به همراه دما وجود داشت. در واقع وجود دو متغیر در یک معادله مساله را در حالتی که تغییرات دمایی در مرزها زیاد است و یا در حضور ترم‌های جابجایی، حل عددی را پیچیده و ناپایدار می‌کند. به عنوان مثال در الگوریتم‌های ضمنی تمامی جملات شامل دما در جمله چشمه و به عنوان یک ثابت در هر سعی و خطا وارد می‌شود که خود باعث ناپایداری است. برای حل مشکلات فوق تلاش‌هایی نیز انجام شد، به عنوان مثال وولر و پراکاش [۱۰] سعی کردند با تغییر در جمله چشمه در روش‌های مرسوم آنتالپی بر مشکل فوق غلبه کنند. کائو و فقری [۱۱-۱۲] با استفاده از روش انتقال دمای کیرشهف و معادلات آنتالپی پایه گذار روشی دقیق و استاندارد برای حل مسائل شامل ذوب و انجماد در حضور ترم‌های جابجایی و مسائل چند بعدی شدند. روش‌های ابداعی آنان روش انتقال آنتالپی و روش انتقال دما می‌باشد. معادله‌ای که در روش انتقال دما استفاده می‌شود فقط شامل دما و در روش انتقال آنتالپی فقط شامل آنتالپی است. هردو روش برای موادی که دمای ذوب آنها یک درجه ثابت و یا در یک بازه است، کاربرد دارند. در مطالعه حاضر از روش انتقال آنتالپی استفاده شده است.

۱-۳-۲ دستگاه ذخیره انرژی گرمایی توسط مواد تغییر فاز دهنده

همانطور که در قسمت قبل اشاره شد محققان بسیاری بر روی رفتار مواد تغییر فاز دهنده به صورت تحلیلی و عددی مطالعه کرده‌اند. حل‌های تحلیلی انگشت‌شماری در مورد هندسه‌های ساده، معروف به مسائل استفان وجود دارند که بیشتر جنبه تئوری دارند و در عمل نمی‌توانند مورد استفاده مسائلی مانند مطالعه حاضر قرار بگیرند. مسائل پیچیده‌ایی مانند دستگاه ذخیره انرژی گرمایی را به علت ترکیبی بودن انتقال حرارت در آن و ناپایا بودن، فقط توسط روش‌های عددی و یا مطالعات آزمایشگاهی می‌توان مورد بررسی قرار داد. در این مورد که بین روش‌های تجربی و عددی کدام روش موثرتر است در فصل سوم صحبت خواهد شد. در ادامه تاریخچه‌ایی از مسائل مرتبط با دستگاه ذخیره انرژی گرمایی توسط مواد تغییر فاز دهنده مرور می‌شود.

اسپرینگر [۱۳] مساله انجماد و ذوب یک استوانه محتوی ماده تغییر فاز دهنده را برای شرط مرزی دمای دیواره معلوم به صورت عددی حل کرد. سو و اسپارو [۱۴] یک حل تحلیلی برای مساله انجماد بر روی

سطح صاف بدست آوردند. حل عددی انجماد بر روی سطح خارجی یک لوله حاوی مبرد توسط همین محققان انجام گرفت[۱۵]. پاتانکار و اسپارو [۱۶] یک روش عددی برای حل مساله غیر دائم و دوبعدی ذوب و انجماد ارائه کردند که در آن مرزهای شبکه در طول زمان همراه با سطح حائل حرکت می‌کرد. شامسوندار [۱۷] یک حل تحلیلی برای مساله انجماد بر روی سطح خارجی یک لوله با شرط مرزی دمای متغیر در محور لوله بدست آوردند، که در آن از انرژی محسوس و هدایت محوری در ماده تغییر فاز دهنده صرف نظر شده بود. سولومون [۱۸] توسط روش تفاضل محدود به بررسی ذخیره انرژی گرمایی خورشید درون یک لوله حاوی ماده تغییر فاز دهنده پرداخت. استووال و آرمیلی [۱۹] چگونگی ذخیره انرژی در لوله‌ای حاوی ماده تغییر فاز دهنده که سطح خارجی آن در معرض سیال حامل قرار داشت مطالعه کردند.در هر دو مورد فوق مقدار انتقال حرارت ترکیبی با استفاده از روابط تجربی به دست آمد. کائو و فقری [۲۰] عملکرد دستگاه ذخیره انرژی گرمایی که مشابه دستگاه مورد بررسی در مطالعه حاضر می‌باشد را مورد مطالعه قرار دادند و در نهایت شرایط و ضوابط بهینه سازی دستگاه را بررسی کردند. آنها به استفاده از روابط تجربی برای تعیین میزان انتقال حرارت از سیال حامل اعتقاد نداشتند و استفاده از آنها را باعث خطا در طراحی دستگاه می‌دانستند. همچنین برای حل مساله تغییر فاز از روش انتقال دما استفاده کردند. سپس کُنتی و بِلچِی [۲۱] همین مساله را با استفاده از روابط تجربی در بدست آوردن ضریب انتقال حرارت سیال حامل و روش آنتالپی استاندارد در مساله تغییر فاز حل کردند، که استفاده از روابط تجربی حل را اندکی در مورد هندسه دستگاه محدود می‌کرد. ژانگ و فقری [۲۲] یک حل نیمه تحلیلی برای همین مساله در شرایطی که از هدایت محوری درون ماده تغییر فاز دهنده صرف نظر شده و حل یک بعدی برای آن در نظر گرفته شده بود، بدست آوردند. همچنین پروفیل سرعت از ابتدای لوله کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شده بود. اِرمیس و همکاران[۲۳] عملکرد این دستگاه را با روش انتقال دما و روابط تجربی در حالی که لوله داخلی بر روی سطح خارجی خود تعدادی فین داشت حل کردند و با نتایج آزمایشگاهی خودشان نیز مقایسه کردند.

۱-۴ هدف از پژوهش حاضر

در مطالعه حاضر عملکرد دستگاه بدون استفاده از روابط تجربی و با حل عددی بررسی شده است. طبق اطلاعات محقق این اولین مطالعه در مورد این دستگاه است که توسط روش انتقال آنتالپی انجام می‌گیرد. همچنین تاثیر ضخامت دیواره لوله خارجی و ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه واقعی برای فازهای مایع و جامد ماده تغییر فاز دهنده در راستای نزدیک کردن صورت مساله به حالت‌های واقعی در نظر گرفته شده است. در جدول ۱-۲، مقایسه‌ای بین مطالعه حاضر و کارهای انجام شده توسط دیگران انجام شده است. در مطالعه حاضر دو هدف عمده وجود دارد؛ هدف اول شبیه‌سازی کارکرد این دستگاه به کمک برنامه