



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

# **مدل سازی انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تشنش در عایق چندلایه در یک سیستم حفاظت حرارتی**

آرش اسماعیلی

استاد راهنما

دکتر مهدی معرفت

شهریور ۱۳۹۰





بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای آرش اسماعیلی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان مدل سازی انتقال حرارت ترکیبی هدایت- تشعشع در عایق چند لایه در یک سیستم حفاظت حرارتی در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۲۹ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی جعفریان	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا انصاری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر عزیز عظیمی	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمدرضا انصاری	دانشیار	

## آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب، سید علی حسینی، دانشجوی رشته مهندسی مخابرات، ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۸، مقطع دانشجوی ارشد، دانشکده مهندسی مخابرات، متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضاء: سید علی حسینی

تاریخ: ۱۳۹۰/۰۶/۲۹

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهری دانیل است که در سال

۱۳۸۸ در دانشکده صی رمهری دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار

خانم/جناب آقای دکتر مهری عرفت، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر

و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأديه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق

دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب اسرائیلی دانشجوی رشته مهری دانیل مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: اسرائیلی

تاریخ و امضا: Esmaeil

۹۰، ۶، ۲۹



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی

# مدل سازی انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تشنش در عایق چندلایه در یک سیستم حفاظت حرارتی

آرش اسماعیلی

استاد راهنما

دکتر مهدی معرفت

شهریور ۱۳۹۰

تقریب

بہ ریدر و بہ ماور

## چکیده

در این تحقیق مدل‌سازی انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تابش در عایق چندلایه در یک سیستم حفاظت حرارتی انجام شده است. معادلات حاکم بر مسئله انتگرالی-دیفرانسیلی هستند و حل دقیق ندارند. به همین دلیل برای این شبیه‌سازی از حل عددی به همراه حل‌های تقریبی استفاده شده است. معادلات حاکم اصلی شامل معادله‌ی انرژی و معادلات دوشار می‌باشند، که به ترتیب با استفاده از روش‌های حجم محدود و اختلاف گسسته‌سازی شده‌اند. حل عددی ابتدا با حل اوزیسیک و سپس در دو مرحله‌ی پایا و گذرا با داده‌های منتشرشده‌ی تجربی صحت‌سنجی شده است. با استفاده از حل پایا، شار حرارتی و رسانش حرارتی معادل به دست آمده است. با استفاده از حل بی‌بعد توزیع دمایی بی‌بعد در حالت پایا در طول نمونه به دست آمده است، همچنین نسبت شارهای بی‌بعد تابشی و هدایتی در طول نمونه به دست آمده است. در مجاورت مرز گرم شار تابشی غالب است، بنابراین پیشنهاد شده است، بازتاباننده‌ها نزدیک به مرز گرم قرار گیرند. برای اختلاف دماهای پایین، مد غالب هدایت است، بنابراین تعداد بازتاباننده‌ها در عایق چندان بر رسانش معادل تاثیرگذار نیست. در حل گذرا تغییرات دمایی سازه‌ی داخلی یک فضاییمما نسبت به زمان در طول فرآیند بازگشت به جو شبیه‌سازی و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. مجموعاً در هر سه مرحله‌ی صحت‌سنجی نتایج حل عددی تطبیق قابل قبولی با داده‌های منتشرشده در مراجع دارند. در آخر نیز با استفاده از نتایج به دست آمده، تحلیل پارامتریک برای عایق چندلایه انجام شده است. اثر پارامترهایی چون ضخامت عایق، بازتاباننده‌ها و جاگذاری آن‌ها و نوع پوشششان بررسی شده است. با توجه به رفتار شار تابشی در طول عایق، پیشنهاد شده است که برای کاهش هزینه، فقط برای فویل‌های نزدیک به مرز گرم از پوشش طلا استفاده شود. همچنین مشخص شده است چگالی عایق یک مقدار بهینه دارد و این مقدار بهینه با ثابت بودن شرایط مرزی و مواد به کار رفته در عایق ثابت می‌ماند.

**واژگان کلیدی:** عایق چندلایه، رسانش حرارتی، سیستم حفاظت حرارتی، انتقال حرارت ترکیبی



# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فهرست علائم و نشانه ها.....
۳.....	فهرست جدول ها.....
۴.....	فهرست شکل ها.....
۶.....	<b>فصل ۱ - مقدمه</b> .....
۶.....	۱-۱- پیشینه.....
۷.....	۲-۱- تحقیقات پیشین و ضرورت انجام تحقیق حاضر.....
۱۱.....	<b>فصل ۲ - تحلیل تئوری انتقال حرارت در عایق چندلایه</b> .....
۱۱.....	۱-۲- مفاهیم کلی انتقال حرارت در عایق های چندلایه.....
۱۳.....	۲-۲- معادلات حاکم بر انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تابش.....
۱۶.....	۱-۲-۲- حل های تقریبی برای انتقال حرارت تابشی.....
۲۰.....	۲-۲-۲- هدایت.....
۲۵.....	۳-۲-۲- جابجایی.....
۲۹.....	۳-۲- شبیه سازی مدل انتقال حرارت در یک سیستم حفاظت حرارتی.....
۳۲.....	۴-۲- شرح نمونه ها.....
۳۶.....	<b>فصل ۳ - حل عددی</b> .....
۳۶.....	۱-۳- مقدمه ای بر روش حجم محدود.....
۳۸.....	۲-۳- خلاصه ای از روش حجم محدود برای انتقال حرارت یک بعدی گذرا.....
۴۰.....	۱-۲-۳- روش صریح.....
۴۱.....	۲-۲-۳- روش ضمنی.....
۴۱.....	۳-۲-۳- روش کرنک-نیکلسون.....
۴۱.....	۳-۳- حل عددی انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تابش.....
۴۱.....	۱-۳-۳- معادلات حاکم و گسسته سازی.....
۴۶.....	۲-۳-۳- صحت سنجی.....
۴۹.....	۴-۳- استقلال از شبکه.....
۵۰.....	<b>فصل ۴ - نتایج حل پایا</b> .....
۵۰.....	۱-۴- تعیین پارامترهای حل پایا.....
۵۲.....	۲-۴- نتایج و نمودارها.....
۵۸.....	۱-۲-۴- نمودارهای بی بعد.....

فصل ۵ - نتایج حل گذرا ..... ۶۲

- ۱-۵- شبیه‌سازی انتقال حرارت گذرا..... ۶۲
- ۲-۵- دستگاه آزمون گذرا..... ۶۵
- ۳-۵- شرایط آزمون گذرا..... ۶۵
- ۴-۵- شرایط حل عددی..... ۶۸
- ۵-۵- شرح نمونه مورد مطالعه در آزمون گذرا..... ۶۹
- ۶-۵- نتایج حل عددی..... ۶۹

فصل ۶ - بهینه‌سازی طراحی عایق چندلایه ..... ۷۲

- ۱-۶- جاگذاری بازتابنده‌ها..... ۷۳
- ۲-۶- پوشش بازتابنده‌ها..... ۷۵
- ۳-۶- ضخامت عایق..... ۷۷
- ۴-۶- بازتابنده‌ها..... ۷۸
- ۵-۶- نوع گاز..... ۷۹
- ۶-۶- چگالی لایه..... ۸۰

فصل ۷ - نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۸۴

- ۱-۷- نتیجه‌گیری تحقیق حاضر..... ۸۴
- ۲-۷- پیشنهادات برای تحقیق‌های مرتبط آینده..... ۸۶

مراجع ..... ۸۸

## فهرست علائم و نشانه ها

یکای	شرح	علائم
$W.sr^{-1}$	شدت تابش	I
$m^2.kg^{-1}$	ضریب خاموشی ویژه	e
m	طول مشخصه	L
$kJ.(kg.K)^{-1}$	ضریب گرمای ویژه	C
K	دما	T
sec	زمان	t
$W.m^{-2}$	شار حرارتی	$q''$
m	مکان	x
$W.(m.K)^{-1}$	رسانش حرارتی	k
$W.sr^{-1}$	تابع تابش تابیده	G
$W.m^{-2}$	رادایوسیتی	B
	انتگرال نمایی تابش	E
$W.sr^{-1}$	انرژی تابشی جسم سیاه	$e_b$
	عدد پرنتل	Pr
	عدد نادسن	Kn
$J.K^{-1}$	ثابت بولتزمن	$K_B$
m	قطر برخورد گاز	$d_g$
	نسبت کسر جامد	f
m	قطر الیاف	$D_f$
m	طول مشخصه	$L_c$
	ضریب سازگاری ابعادی	H
	درصد چیدمان موازی	A
	ضریب مربوط به جهت الیاف	z
$W.(m^2.K)^{-1}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی	h
	نسبت هدایت به تابش	$N_r$

		علائم یونانی
$m^{-1}$	ضریب خاموشی	$\beta$
$m^{-1}$	ضریب جذب	$\kappa$
$m^{-1}$	ضریب پراکندگی	$\gamma$
$kg.m^{-3}$	چگالی	$\rho$
	آلبیدوی پراکندگی	$\omega$
	ضخامت نوری	$\tau$
$m$	طول پیمایش آزاد فوتون	$\lambda_P$
$W.(m^2.K^4)^{-1}$	ثابت استفان - بولتزمن	$\sigma$
	ضریب نشر	$\varepsilon$
	ضریب تطابق دمایی	$\alpha$
	نسبت گرمای ویژه ی گاز	$\gamma$
	دمای بی بعد	$\theta$
		زیرنویس
	مقدار در مبداء	0
	مربوط به تابش	r
	مقدار در مرز گرم	1
	مقدار در مرز سرد	2
	موثر محلی	e-l
	مربوط به جسم سیاه	b
	مربوط به گاز	g
	مربوط به جامد	s
	مقدار آدیاباتیک	aw
	اندیس مکانی	j
		بالانویس
	مقدار در شرایط مرجع	0
	اندیس زمانی	n
	مقدار بی بعد	*

## فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- مشخصات نمونه‌های عایق چندلایه	۳۳
جدول ۱-۳- مقادیر مختلف $I_T$ به ازای مقادیر مختلف $\theta$	۳۹
جدول ۲-۳- ضرایب رابطه‌ی ۳-۱۰ برای معادله‌ی انرژی	۴۰
جدول ۳-۳- مقایسه شار حرارتی بی‌بعد حل عددی با استفاده از تقریب دوشار با نتایج منتشر شده‌ی اوزیسیک	۴۷
جدول ۱-۴- مقایسه میزان خطای حل عددی نسبت به داده‌های تجربی برای ترکیب‌های مختلف ضریب تطابق دمایی و ضریب نشر	۵۱
جدول ۲-۴- متوسط خطای داده‌های عددی نسبت به داده‌های تجربی و انحراف از معیار برای نمونه‌های ML1 تا ML4	۵۴
جدول ۳-۴- رسانش حرارتی معادل عایق‌های ML1 تا ML4 بر حسب (W/m.K) برای دو اختلاف دما در فشار 0.001 torr	۵۷
جدول ۴-۴- رسانش حرارتی معادل عایق‌های ML1 تا ML4 بر حسب (W/m.K) برای دو اختلاف دما در فشار 0.1 torr	۵۷
جدول ۵-۴- رسانش حرارتی معادل عایق‌های ML1 تا ML4 بر حسب (W/m.K) برای دو اختلاف دما در فشار 100 torr	۵۷
جدول ۱-۶- رسانش حرارتی معادل عایق‌های ML2 و ML6 بر حسب (W/m.K) برای دو اختلاف دما در فشار 0.1 torr	۷۴
جدول ۲-۶- رسانش حرارتی معادل عایق‌های ML7 و ML6 بر حسب (W/m.K) برای دو اختلاف دما در فشار 0.1 torr	۷۶
جدول ۳-۶- چگالی لایه عایق‌های ML1 تا ML4	۸۰

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۱- نمونه‌ی یک عایق چندلایه به کار رفته در صنایع هوافضا.....
۲۶	شکل ۱-۲- کانتورهای سرعت در یک عایق چند لایه، (a) مختصات افقی، (b) مختصات عمودی.....
۲۷	شکل ۲-۲- تغییرات شار حرارتی و دما نسبت زمان در یک عایق چندلایه.....
۲۸	شکل ۳-۲- تغییرات رسانش حرارتی معادل نسبت به دما در دو جهت مختلف گرمایش و دو فشار مختلف برای ضخامت عایق 26.6 mm.....
۲۸	شکل ۴-۲- تغییرات رسانش حرارتی معادل نسبت به دما در دو جهت مختلف گرمایش و دو فشار مختلف برای ضخامت عایق 39.9 mm.....
۳۰	شکل ۵-۲- شکل شماتیک مدل انتقال حرارت پایا برای عایق.....
۳۱	شکل ۶-۲- شکل شماتیک مدل انتقال حرارت گذرا برای عایق.....
۳۳	شکل ۷-۲- شماتیک عایق‌های ML1 تا ML4.....
۳۴	شکل ۸-۲- مشخصات روی هم‌گذاری اجزای ML1.....
۳۴	شکل ۹-۲- مشخصات روی هم‌گذاری اجزای ML2.....
۳۴	شکل ۱۰-۲- شکل مشخصات روی هم‌گذاری اجزای ML3.....
۳۵	شکل ۱۱-۲- مشخصات روی هم‌گذاری اجزای ML4.....
۳۵	شکل ۱۲-۲- مشخصات روی هم‌گذاری اجزای ML5.....
۳۷	شکل ۱-۳- نمونه‌ی یک حجم کنترل متداول.....
۴۸	شکل ۲-۳- نمودار شار حرارتی بی‌بعد بر حسب آلبیدوی پراکندگی برای نتایج منتشرشده‌ی اوزیسیک و حل عددی با تقریب دوشار.....
۴۹	شکل ۳-۳- نمودار دمای بی‌بعد بر حسب مکان بی‌بعد برای سه حالت شبکه.....
۵۲	شکل ۱-۴- رسانش معادل بر حسب اختلاف دمای دو مرز عایق برای نمونه‌ی ML1.....
۵۳	شکل ۲-۴- رسانش معادل بر حسب اختلاف دمای دو مرز عایق برای نمونه‌ی ML2.....
۵۳	شکل ۳-۴- رسانش معادل بر حسب اختلاف دمای دو مرز عایق برای نمونه‌ی ML3.....
۵۴	شکل ۴-۴- رسانش معادل بر حسب اختلاف دمای دو مرز عایق برای نمونه‌ی ML4.....
۵۵	شکل ۵-۴- رسانش معادل عایق‌های ML1 تا ML4 در فشار 0.001 torr.....
۵۵	شکل ۶-۴- رسانش معادل عایق‌های ML1 تا ML4 در فشار 0.1 torr.....

- شکل ۴-۷- رسانش معادل عایق‌های ML1 تا ML4 در فشار 100 torr ..... ۵۶
- شکل ۴-۸- رسانش معادل عایق‌های ML1 تا ML4 نسبت به فشار در اختلاف دمای  $\Delta T=1000K$  ..... ۵۸
- شکل ۴-۹- تغییرات دمای بی‌بعد در طول بی‌بعد عایق ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۰- تغییرات سهم هر یک از شارهای تابشی و هدایتی از شار کل در طول بی‌بعد عایق ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۱- تغییرات نسبت شار هدایتی به شار تابشی در طول بی‌بعد عایق ..... ۶۱
- شکل ۵-۱- پروفیل نمونه فشار برای سیستم حفاظت حرارتی در طول فرآیند بازگشت به جو زمین ..... ۶۴
- شکل ۵-۲- شکل شماتیک دستگاه آزمون گذرا ..... ۶۵
- شکل ۵-۳- مقایسه فشار در حالت واقعی در اتاق تست و فشار مطلوب نمونه برای سامانه‌ی بازگشت‌پذیر ..... ۶۶
- شکل ۵-۴- مقایسه دما در حالت واقعی در اتاق تست و فشار مطلوب نمونه برای سامانه‌ی بازگشت‌پذیر ..... ۶۶
- شکل ۵-۵- اختلاف دمای میانگین بین ناحیه‌ی میانی و نواحی خارجی صفحه‌ی اینکانل ..... ۶۷
- شکل ۵-۶- تغییرات دمای صفحه‌ی خنک‌شونده با آب ..... ۶۸
- شکل ۵-۷- دمای صفحه‌ی آلومینیومی برای مقادیر تجربی و حل عددی در طول فرآیند بازگشت به جو ..... ۷۰
- شکل ۵-۸- اختلاف مقادیر تجربی و حل عددی برای دمای صفحه‌ی آلومینیومی در طول فرآیند بازگشت به جو ..... ۷۰
- شکل ۵-۹- خطای حل عددی نسبت به نتایج منتشر شده‌ی تجربی ..... ۷۱
- شکل ۶-۱- شماتیک عایق‌های ML2 و ML6 ..... ۷۴
- شکل ۶-۲- رسانش معادل عایق‌های ML2 و ML6 در فشار 0.1 torr ..... ۷۵
- شکل ۶-۳- شماتیک عایق‌های ML6 و ML7 ..... ۷۶
- شکل ۶-۴- رسانش معادل عایق‌های ML6 و ML7 در فشار 0.1 torr ..... ۷۶
- شکل ۶-۵- رسانش حرارتی معادل برای دو عایق F1 و F2 در فشار 0.001 torr ..... ۷۸
- شکل ۶-۶- رسانش حرارتی معادل عایق‌های چندلایه‌ی ML1 و ML2 و عایق‌های الیافی F1 و F2 در فشار 0.001 torr ..... ۷۹
- شکل ۶-۷- تغییرات رسانش حرارتی معادل نسبت به تغییرات فشار برای گازهای مختلف ..... ۸۰
- شکل ۶-۸- تغییرات سهم مدهای مختلف انتقال حرارت نسبت به تغییرات چگالی لایه در یک عایق چندلایه ..... ۸۱
- شکل ۶-۹- تغییرات رسانش حرارتی معادل بر حسب چگالی لایه ..... ۸۲
- شکل ۶-۱۰- تغییرات رسانش حرارتی معادل و شار حرارتی کل نسبت به تغییرات چگالی لایه ..... ۸۳

# فصل ۱ - مقدمه

---

## ۱-۱- پیشینه

عایق حرارتی موضوع جذاب و مهمی برای مهندسين و محققين در جهت توسعه فناوری‌های مرتبط با انتقال حرارت محسوب می‌شود. در طول دهه‌های اخیر، علم انتقال حرارت و استفاده از عایق‌های حرارتی از کاربرد در دماهای بسیار پایین تا کاربردهای دما بالا، در صنایع هوافضا، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است.

عایق‌های چندلایه اولین بار در صنایع کرایجنیک<sup>۱</sup> بکار رفته است [۱]. این عایق‌ها در مخازن ذخیره گازها و مایعات در دماهای بسیار پایین استفاده شد. در مخازن کرایجنیک از یک دیواره‌ی دو جداره استفاده می‌کنند، و بین آنرا خلاء می‌کنند. این کار باعث کاهش جابجایی و هدایت گاز می‌شود. برای کاهش انتقال حرارت تابشی، از بازتابنده‌ها<sup>۲</sup> که قابلیت انعکاس بالایی دارند استفاده می‌شود. بین این بازتابنده‌ها فاصله‌اندازهای<sup>۳</sup> پلیمری و یا سرامیکی قرار داده می‌شود. در شکل ۱-۱ نمونه‌ی یک عایق چندلایه به کار رفته در صنایع هوافضا را مشاهده می‌کنید.

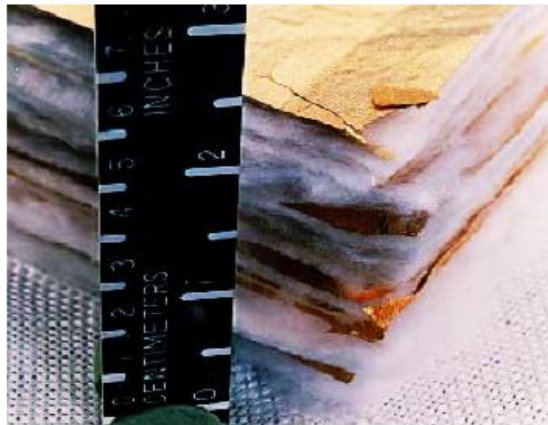
---

<sup>1</sup> Cryogenics

<sup>2</sup> Reflective Screens

<sup>3</sup> Spacer





شکل ۱-۱- نمونه‌ی یک عایق چندلایه به کار رفته در صنایع هوافضا [۲]

برای کاربردهای دما بالا، طراحی عایق‌های چندلایه متفاوت خواهد بود. در سامانه‌های بازگشت‌پذیر به زمین از سیستم‌های حفاظت حرارتی استفاده می‌شود. سیستم‌های حفاظت حرارتی، یک فن‌آوری کلیدی برای دستیابی به فضا با هزینه‌ی کمتر است. از زمان پیدایش نخستین ماشین‌های پرنده، نوع بشر در پی پروازی امن‌تر، سریع‌تر و به نقاط دورتر و بالاتر است. یکی از چالش‌های مهم مهندسی که در پروازهای فضایی سرعت بالا وجود دارد، گرمایش آئرو دینامیک است. ماشین‌هایی پرنده‌ای که با سرعت‌های بالا در جو زمین حرکت می‌کنند، به دلیل اصطکاک سطحشان با هوا به شدت گرم می‌شوند و باید تمهیداتی اندیشیده شود تا آسیب نبینند.

## ۲-۱- تحقیقات پیشین و ضرورت انجام تحقیق حاضر

تحلیل انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تابش، کاربردهای مهندسی بی‌شماری دارد. نمونه‌ی این کاربردها در تجهیزات تبدیل انرژی دما بالا، مواد نیمه‌شفاف<sup>۱</sup>، مواد متخلخل و عایق‌های الیافی و چندلایه وجود دارد. برخی کارهای تئوری و تجربی برای مدل‌سازی و تعیین انتقال حرارت در عایق‌های چندلایه صورت پذیرفته است. کانینگتون<sup>۲</sup> رسانش موثر هفت نوع عایق چندلایه را تا دمای ۴۲۷ درجه سانتی‌گراد و

<sup>1</sup> Semi-transparent

<sup>2</sup> Cunnington

در خلاء ( $5 \times 10^{-5}$  mm of Hg) محاسبه کرده است [۴]. مدل سازی تئوری در محاسبه یادشده با استفاده از تقریب ضخامت نوری کم<sup>۱</sup> برای تبادل انرژی تشعشعی انجام، و نتایج با داده های تجربی مقایسه شده است. دویت<sup>۲</sup> و همکارانش تحقیق تجربی پیشین را با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد و در فشار  $1 \times 10^{-3}$  میلی متر جیوه در سال ۱۹۶۸ ادامه دادند و یک فرمولاسیون ریاضی برای مسئله ارائه کردند. آنها از اثر هدایت گاز صرف نظر کردند و برای مدل سازی تشعشعی از تقریب ضخامت نوری زیاد استفاده کردند [۵]. مطالعه ی کاربردی عایق های چندلایه دمابالا، در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ توسط محققین آلمانی دنبال شد. آنها امکان استفاده از عایق های چندلایه را در سیستم های حفاظت حرارتی فلزی برای نقل مکان های فضایی با سرعت مافوق صوت، بررسی کرده اند. همچنین اثر هدایت جامد را نادیده گرفته اند و برای مدل سازی تشعشع از تقریب ضخامت نوری زیاد و تقریب دیفیوژن اصلاح شده<sup>۳</sup> استفاده کرده اند [۶]. برآوردی از اندازه گیری انتقال حرارت برای عایق های چندلایه دمایی که در فضاپیماها و ماهواره ها از آنها استفاده می شود، انجام شده است [۷]. کلر<sup>۴</sup> سهم مدهای مختلف انتقال حرارت و نقش چگالی لایه را بر آنها بررسی و از تقریب ضخامت نوری زیاد برای شبیه سازی تابش استفاده کرده است [۸]. تحلیل پارامتریک عایق چندلایه برای مخازن نگهداری گاز مایع انجام شده است. در این تحلیل شار حرارتی برای جنس های مختلف بازتاباننده و فاصله انداز اندازه گیری شده است [۹]. دریاییگی<sup>۵</sup> در یک سری آزمایشات تجربی رسانش معادل حرارتی برای عایق های چندلایه را اندازه گرفته است و در مواردی خاص نیز حل عددی را انجام و با نتایج تجربی مقایسه کرده است. او برای مدل سازی هدایت از تقریب ساده ی موازی استفاده کرده است [۲]. همچنین در تحقیق دیگری مسئله ی انتقال حرارت ترکیبی را برای عایق های الیافی با استفاده از تقریب دوشار انجام داده است [۱۰]. تحقیق دیگری نیز مشابه تحقیق پیشین برای عایق های الیافی، ولی با آلبیدوی پراکندگی<sup>۶</sup> ثابت انجام شده است [۱۱].

تحقیقی در مورد عایق های چندلایه مورد کاربرد در پیل سوختی انجام شده است، در این تحقیق از فرضیه ضخامت نوری زیاد استفاده، و نتایج نظری با نتایج تجربی مقایسه شده است [۱].

<sup>1</sup> Optically Thin Approximation

<sup>2</sup> Dewit

<sup>3</sup> Modified Diffusion Approximation

<sup>4</sup> Keller

<sup>5</sup> Daryabeigi

<sup>6</sup> Albedo of scattering

اثرات تغییر فشار و دما بر رسانش حرارتی معادل در عایق‌های الیافی بررسی شده است. در این تحقیق از تقریب ضخامت نوری زیاد برای تابش، و حل موازی برای هدایت استفاده شده است [۱۲]. در سال ۲۰۰۹ دو تحقیق با استفاده تحلیل معکوس<sup>۱</sup> انجام شده است. مطالعه‌ی اول برای عایق الیافی و با شرط پراکندگی غیرایزوتروپیک، [۱۳] و مطالعه‌ی دوم برای عایق چندلایه با بازتاباننده‌های مختلف انجام شده است [۱۴].

هم‌چنین تحقیقاتی برای تحلیل گذرای انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تابش انجام شده است. تن<sup>۲</sup> و لالمند<sup>۳</sup> [۱۵] توزیع دمای گذرا را برای یک صفحه‌ی شیشه‌ای برای شرایط مرزی مختلف به دست آورده‌اند. گرمایش گذرای یک ماده‌ی جاذب، تاباننده و پراکنده‌کننده با شرایط مرزی مختلف با صفحات سیاه متفاوت توسط یوئن<sup>۴</sup> و خاتمی<sup>۵</sup> انجام شده است [۱۶]. آن‌ها از روش اختلاف محدود نیمه‌صریح<sup>۶</sup> برای حل عددی استفاده کرده‌اند. برای حل معادله‌ی گذرای انرژی، سای<sup>۷</sup> و لین<sup>۸</sup> از روش کرنک-نیکلسون استفاده کرده‌اند. مسئله‌ی سرمایه‌ی گذرا در مختصات استوانه‌ای توسط بائک<sup>۹</sup> و همکارانش تحلیل شده است [۱۷]. آن‌ها از روش اختلاف محدود برای حل معادله انرژی استفاده کرده‌اند. هان<sup>۱۰</sup> و همکارانش انتقال حرارت گذرا را در یک لایه‌ی پودر سرامیک اندازه گرفته‌اند [۱۸].

با توجه به پیشینه‌ای که ذکر شد اغلب مطالعاتی که بر روی عایق‌های چندلایه انجام شده‌است، تجربی بوده است. در مطالعات نظری نیز معمولاً از تقریب‌هایی مانند ضخامت نوری زیاد و یا کم استفاده شده است. ایراد مهمی که به این تقریب‌ها وارد است، اینست که اولاً محدود به ضخامت نوری خاصی هستند [۱۹]. در صورتی که طراحی بهینه برای عایق‌های چندلایه (همان‌طور که در این تحقیق به آن می‌پردازیم)، مستلزم به‌کارگیری ضخامت‌های متفاوت برای لایه‌ها است. در چنین شرایطی ممکن است تقریب‌های ضخامت نوری زیاد و کم هم‌زمان برای بعضی لایه‌های یک عایق معتبر باشند یا نباشند.

<sup>1</sup> Inverse analysis

<sup>2</sup> Tan

<sup>3</sup> Lallemand

<sup>4</sup> Yuen

<sup>5</sup> Khatami

<sup>6</sup> Semi-explicit

<sup>7</sup> Tsai

<sup>8</sup> Lin

<sup>9</sup> Baek

<sup>10</sup> Hahn

نقطه‌ی ضعف دوم این تقریب‌ها اینست که در معادلات آن‌ها، خصوصیات تابشی دیواره‌های جامد<sup>۱</sup> جایی ندارند [۱۹]. این امر ممکن است برای عایق‌های الیافی که فقط دو مرز سرد و گرم دارند چندان مهم نباشد. اما برای عایق‌های چندلایه که از بازتاباننده‌ها نیز استفاده می‌کنند، استفاده از این تقریب‌ها به هیچ عنوان توصیه نمی‌شود.

در تحقیق حاضر از تقریب دوشار برای شبیه‌سازی تابش استفاده شده است که برای تمام محدوده‌های ضخامت نوری معتبر است و خصوصیات تابشی دیواره‌های جامد در آن لحاظ می‌شود. هم‌چنین از خواص موادی و تابشی وابسته به دما استفاده شده است. بسیاری از مطالعاتی که تاکنون انجام شدند از خواص ثابت استفاده کردند.

از اهداف پیش‌رو در انجام تحقیق حاضر مطالعه‌ی پارامتریک و طراحی بهینه عایق است، کاری در مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است. در راستای این موضوع پیشنهادهایی از قبیل متغیر بودن فاصله‌گذاری بازتاباننده‌ها یا خصوصیات تابشی آن‌ها که در طراحی‌های معمول عایق چندلایه کمتر دیده می‌شود، ارائه شده است.

---

<sup>1</sup> Solid walls