بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

**پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی**

# مدلسازی انتقال حرارت و جرم در لباس بعنوان یک محیط متخلخل

**عماد پاسدار**

استاد راهنما

**دکتر مهدی معرفت**

دی ۱۳۸۹

بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای **عماد پاسدار** پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان مدلسازی انتقال حرارت و رطوبت در لباس به عنوان یك محیط متخلخل** در تاریخ ۱۳۸۹/۱۰/۲۸ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

| عضو هیات داوران | نام و نام خانوادگی | رتبه علمی | امضا |
|---|---|---|---|
| استاد راهنما | دکتر مهدی معرفت | دانشیار | |
| استاد ناظر | دکتر قاسم حیدری نژاد | استاد | |
| استاد ناظر | دکتر علی جعفریان دهکردی | استادیار | |
| استاد ناظر | دکتر محمد علی اخوان بهابادی | دانشیار | |
| مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی) | دکتر قاسم حیدری نژاد | استاد | |

**دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس**

**مقدمه:** با عنایت به سیاست‌های پژوهشی 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 هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

**ماده ۱**- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

**ماده ۲**- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

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

**ماده ۳**- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

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

**ماده ۵**- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی: عماد پاسدار

امضاء

۸۹/۱۲/۲۱

## آیین نامه چاپ پایان‌نامه (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 می‌شوند:

**ماده ۱**: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» 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 مهندسی مکانیک است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر مهدی معرفت از آن دفاع شده است.»

**ماده ۳**: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

**ماده ۴**: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

**ماده ۵**: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد 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 عماد پاسدار دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: عماد پاسدار

تاریخ و امضاء

۸۹/۱۲/۲۱

# تقدیم به

همسر مهربانم که با قلم محبت و فداکاری خویش خط به خط صفحات زندگی‌ام را با سخن عشق نوشت.

# تقدیر و تشکر:

سپاس و ستایش معبود یگانه را که پرتو الطاف بی شمارش در تمامی لحظات زندگیم ساطع و آشکار است؛ حمد و ثنا می‌گذارم او را که فکرت و اندیشه را در بستر روحم روان ساخت و بهره‌گیری از خوان گسترده‌ی دانش را روزیم گردانید.

امتنان و سپاس می‌گذارم تلاش‌ها، زحمت‌ها و راهنمایی‌های ظریف، ارزشمند و بی شائبه‌ی استاد فرزانه و گرانمایه‌ام، جناب آقای دکتر مهدی معرفت را که با همیت و جدیت مرا به دقت، اندیشه، درک و تعمق وا می‌داشتند. از راهنمایی‌های ظریف جناب آقای دکتر سید علیرضا ذوالفقاری که در تمامی مراحل انجام پایان نامه آموخته‌های ارزشمند وی رهگشا بود، تشکر و قدردانی مخصوص را می‌نمایم.

از تمامی دوستان عزیز که در این راه بنده را یاری نمودند آقایان مهندس امیر نیازمند، مهندس ابراهیم صلاحی پروین و مساعدت های فراوان شرکت تهران میراب کمال تشکر و سپاس گذاری را می‌نمایم.

از یکایک اعضای خانواده‌ام مخصوصا همسر مهربانم،که حضور آنها همواره برایم سبب آرامش است، صمیمانه تشکر کرده و دست مهربان آنها را به گرمی می‌فشارم.

**چکیده:**

هدف اصلی این پایان نامه مدلسازی انتقال حرارت و جرم در لباس می‌باشد، این مدلسازی کاربرد وسیعی در صنایع گوناگون از قبیل کاغذ، ساختمان و البسه دارد، اما یکی از مهمترین کاربردهای آن که در این پایان نامه نیز به آن پرداخته شده است، مسائل مربوط به آسایش حرارتی می‌باشد. از سوی دیگر مدلسازی اتلافات حرارت از طریق تبخیر عرق بدن و تعیین میزان تری لباس از جمله مسائلی است که در تعیین شرایط آسایش حرارتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. این در حالی است که در اکثر مدلهای حرارتی بدن فرض می‌شود تمامی تعرق صورت گرفته بر روی پوست بدن تبخیر شده و هیچیک نرخ تبخیر صورت گرفته در لباس را بررسی نمی‌نمایند.

معادلات حاکم بر این مدلسازی شامل معادله انرژی و دو معادله انتقال جرم در فازهای مایع و گاز می باشد که در ترم تغییر فاز و جذب رطوبت با یکدیگر کوپل می باشند. در این پایان نامه پس از ارائه تئوری مدل لباس و مدل حرارتی بدن (مدل گایج[۱])، روش حل عددی بیان شده است و پس از آن به اعتبار سنجی کد عددی در حالت های متفاوت پرداخته شده است. در فصول نتیجه‌گیری نتایج مربوط به تحلیل پارامترهای موثر بر نرخ تبخیر و تری لباس و نیز بررسی کمیت های آسایشی برای سه نوع لباس با کاربری متفاوت بیان شده است، نتایج حاکی از آن است که پارامترهای فیزیکی و ساختاری لباس نقش مهمی بر اتلافات تبخیری و تری لباس خواهد داشت. مثلا" با کاهش ضریب تخلخل لباس از ۰/۹ به ۰/۶، سهم اتلافات حرارت تبخیری حدود ۴۰٪ افزایش می‌یابد و نیز معیارهای آسایشی فرد ارتباط فراوانی با شرایط محیطی و نوع لباس مصرفی وی خواهد داشت. بعنوان مثال زمانی که فرد لباس اداری ضخیم می پوشد، در محدوده دمایی ۱۷ تا ۲۳ درجه سانتیگراد احساس حرارتی خنثی دارد، در حالیکه این احساس برای لباس اداری تابستانه بین دماهای ۲۱ تا ۲۵ درجه خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** انتقال حرارت و جرم، تبخیر و تری لباس، محیط متخلخل، آسایش حرارتی

---

۱. Gagge’s model

# فهرست مطالب

عنوان صفحه


**فهرست علائم و نشانه ها** ..... **د**

**فهرست جدول ها** ..... **ز**

**فهرست شکل ها** ..... **ح**

**فصل 1 - مقدمه** ..... 1

1-1- نوآوری و اهمیت انجام این تحقیق ..... 1

1-2- مروری بر کارهای انجام شده ..... 2

1-3- خلاصه ای بر مطالب این پایان نامه ..... 3

**فصل 2 – تئوری مدلسازی و معادلات حاکم** ..... 4

2-1- مقدمه ای بر مدلسازی لباس ..... 4

2-2- معادلات حاکم در مدلسازی لباس ..... 6

2-2-1- معادله انتقال حرارت (معادله انرژی متوسط گیری شده در بین فازها) ..... 6

2-2-1-1- ترم گذرا ..... 6

2-2-1-2- انتقال حرارت جابجایی در لباس ..... 6

2-2-1-3- انتقال حرارت هدایتی در لباس ..... 8

2-2-1-4- انتقال حرارت تشعشعی در لباس ..... 11

2-2-1-5- انتقال حرارت ناشی از ترم های تولید (تغییر فاز و جذب) ..... 12

2-2-2- معادله انتقال جرم ..... 14

2-2-2-1- معادله انتقال جرم در فاز گاز (رطوبت) ..... 14

2-2-2-1-1- انتقال رطوبت در اثر جابجایی ..... 14

2-2-2-1-2- انتقال رطوبت در اثر نفوذ ..... 15

2-2-2-1-3- ترم تولید و مصرف رطوبت ..... 15

2-2-2-2- معادله انتقال جرم در فاز مایع ..... 16

2-2-2-2-1- انتقال مایع در اثر جابجایی ..... 16

2-2-2-2-2- انتقال مایع در اثر نفوذ ..... 17

2-3- شرایط مرزی ..... 18

2-3-1- شرایط مرزی دما ..... 18

2-3-2- شرایط مرزی غلظت بخار ..... 19

2-3-3- شرایط مرزی مایع ..... 20

2-4- مدلسازی حرارتی بدن انسان ..... 21

2-4-1- مدل گایج ..... 21
2-5- ارتباط مدل بدن انسان و لباس ..... 23

**فصل 3 – گسسته سازی معادلات و الگوریتم حل عددی** ..... 25
3-1- مقدمه ..... 25
3-2- گسسته سازی معادلات حاکم ..... 26
3-2-1- گسسته سازی معادله انرژی ..... 26
3-2-2- گسسته سازی معادله غلظت بخار ..... 28
3-2-3- گسسته سازی معادله مایع ..... 29
3-3- الگوریتم محاسباتی انتقال حرارت و جرم در لباس ..... 30
3-3-1- الگوریتم حل معادلات به روش TDMA ..... 32

**فصل 4 – اعتبار سنجی برنامه محاسباتی** ..... 33
4-1- مقدمه ..... 33
4-2- اعتبارسنجی کد عددی لباس ..... 34
4-3- اعتبار سنجی کد عددی لباس و مدل حرارتی بدن ..... 38

**فصل 5 – تحلیل پارامترهای موثر بر انتقال حرارت و جرم در لباس** ..... 42
5-1- مقدمه ..... 42
5-2- تعریف مساله ..... 43
5-3- اثر ضریب تخلخل ..... 44
5-3-1- تاثیر ضریب تخلخل بر اتلافات تبخیری درون لباس ..... 45
5-3-2- تاثیر ضریب تخلخل بر تری لباس و اتلافات تبخیری روی سطح لباس ..... 46
5-4- اثر نفوذپذیری فاز مایع (تعرق بدن) ..... 47
5-4-1- تاثیر نفوذپذیری مایع بر اتلافات تبخیری درون لباس ..... 47
5-4-2- تاثیر نفوذپذیری مایع بر تری لباس و اتلافات تبخیری روی سطح لباس ..... 48
5-5- اثر ضریب هدایتی حرارتی الیاف لباس ..... 49
5-5-1- تاثیر هدایت حرارتی بر اتلافات تبخیری درون لباس ..... 49
5-6- جمع بندی ..... 50

**فصل 6 – نتایج مدلسازی د رمسائل آسایش حرارتی** ..... 52
6-1- مقدمه ..... 52
6-2- بخش اول ..... 53
6-3- بخش دوم ..... 57
6-4- جمع بندی ..... 61

**مراجع**

**پیوست ها**

پیوست الف: محاسبه نرخ جذب رطوبت الیاف لباس

پیوست ب: روابط موجود در مدل گایج

## فهرست علائم و نشانه ها

| نشانه | شرح، یکا |
|---|---|
| $A_D$ | سطح بدن در حالت لخت، $m^2$ |
| $C$ | غلظت بخار آب در لابلای منافذ لباس، $kg\ m^{-3}$ |
| $C_f$ | غلظت بخار جذب شده در هر نقطه از لباس، $kg\ m^{-3}$ |
| $C_{p.b}$ | ظرفیت گرمایی بدن، $\mathrm{J}\ kg^{-1}\ K^{-1}$ |
| $C_{p.bl}$ | ظرفیت گرمایی خون، $\mathrm{J}\ kg^{-1}\ K^{-1}$ |
| $C_{res}$ | نرخ انتقال حرارت از بدن به محیط از طریق جابجایی در تنفس، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $C_{sk}$ | نرخ انتقال حرارت از پوست به محیط از طریق جابجایی، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $C_v$ | ظرفیت حرارتی حجمی موثر الیاف، $\mathrm{J}\ m^{-3}K^{-1}$ |
| $C_{vf}$ | ظرفیت حرارتی الیاف، $\mathrm{J}\ m^{-3}K^{-1}$ |
| $C_{v\mathrm{g}}$ | ظرفیت حرارتی فاز بخار، $\mathrm{J}\ m^{-3}K^{-1}$ |
| $C_{vw}$ | ظرفیت حرارتی فاز مایع، $\mathrm{J}\ m^{-3}K^{-1}$ |
| $\mathrm{CSIG_{cr}}$ | سیگنال سرد در مرکز بدن |
| $\mathrm{CSIG_{sk}}$ | سیگنال سرد در پوست |
| $C'_f$ | غلظت بخار جذب شده در هر نقطه درون الیاف، $kg\ m^{-3}$ |
| $D_f$ | ضریب نفوذ بخار درون الیاف، $m^2s^{-1}$ |
| $D_g$ | ضریب نفوذ بخار در لابلای منافذ لباس، $m^2s^{-1}$ |
| $D_L$ | ضریب نفوذ آب در الیاف، $m^2s^{-1}$ |
| $E$ | ضریب چگالش یا تبخیر الیاف، $m^{-1}$ |
| $E_{res}$ | نرخ انتقال حرارت از بدن به محیط از طریق تبخیر در تنفس، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $E_{rsw}$ | اتلافات حرارتی توسط تعرق، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $E_{sk}$ | نرخ انتقال حرارت از پوست به محیط از طریق تبخیر سطح پوست، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $F_L$ | نرخ تشعشعی که به سمت چپ حرکت می کند، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $F_R$ | نرخ تشعشعی که به سمت راست حرکت می کند، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $h_c$ | ضریب انتقال غلظت از طریق جابجایی برای هوای محیط، $m\ s^{-1}$ |
| $h_{fg}$ | گرمای نهان تبخیر آب، $\mathrm{J}\ kg^{-1}$ |
| $h_t$ | ضریب انتقال حرارت جابجایی برای هوای محیط، $\mathrm{W}m^{-2}K^{-1}$ |
| $K$ | هدایت حرارتی متوسط، $\mathrm{W}m^{-2}K^{-1}$ |
| $k_{eff}$ | ضریب هدایت حرارتی موثر الیاف، $\mathrm{W}m^{-1}K^{-1}$ |
| $k_f$ | ضریب هدایت حرارتی الیاف، $\mathrm{W}m^{-1}K^{-1}$ |
| $k_g$ | ضریب هدایت حرارتی فاز گاز، $\mathrm{W}m^{-1}K^{-1}$ |

| | |
|---|---|
| $k_{rw}$ | نفوذپذیری نسبی محیط متخلخل |
| $k_w$ | ضریب هدایت حرارتی فاز مایع، $\mathrm{W}m^{-1}K^{-1}$ |
| $k'$ | نفوذپذیری محیط متخلخل، $m^2$ |
| $M$ | نرخ متابولیک، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $m$ | جرم بدن، $kg$ |
| $M_{act}$ | نرخ متابولیک ناشی از فعالیت، $kg\ s^{-1}m^{-2}$ |
| $M_{Fiber}$ | جرم کلی الیاف لباس، $kg$ |
| $M_{shiv}$ | نرخ متابولیک بدن در اثر لرز، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $m_{water}$ | جرم آب در هر نقطه از لباس، $kg$ |
| $\dot{m}_{bl}$ | دبی جریان خون میان پوست و مرکز بدن، $kg\ s^{-1}m^{-2}$ |
| $\dot{m}_{rsw}$ | نرخ ترشح عرق از طریق ساز و کار تنظیم حرارت بدن، $kg\ s^{-1}m^{-2}$ |
| $P_a$ | فشار هوا، $kg\ s^{-2}m^{-1}$ |
| $P_c$ | فشار موئینگی آب لابلای الیاف، $kg\ s^{-2}m^{-1}$ |
| $P_{sat}$ | فشار اشباع بخار آب، $kg\ s^{-2}m^{-1}$ |
| $P_v$ | فشار بخار آب، $kg\ s^{-2}m^{-1}$ |
| $P_w$ | فشار آب، $kg\ s^{-2}m^{-1}$ |
| $Q_{cr.sk}$ | نرخ انتقال حرارت از هسته به پوست، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $R_c$ | مقاومت در برابر انتقال غلظت بخار، $m^{-1}s$ |
| $R_f$ | شعاع الیاف، $m$ |
| $R_{sk}$ | نرخ انتقال حرارت از پوست به محیط از طریق تشعشع، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $R_t$ | مقاومت در برابر انتقال حرارت، $\mathrm{W}^{-1}m^2K$ |
| $RH$ | رطوبت نسبی در هر نقطه از لباس |
| $\bar{R}$ | ثابت جهانی گازها، $\mathrm{J}\ kg^{-1}K^{-1}$ |
| $S_{cr}$ | ذخیره حرارت در مرکز بدن، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $S_{sk}$ | ذخیره حرارت در پوست، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $t$ | زمان، $s$ |
| $T$ | دما، $K$ |
| $T_g$ | دمای فاز گاز، $K$ |
| $T_l$ | دمای فاز مایع، $K$ |
| $T_s$ | دمای فاز جامد، $K$ |
| $T_b$ | دمای کل بدن، $C$ |
| $T_{b,n}$ | دمای کل بدن در حالت خنثی، $C$ |
| $T_{cr}$ | دمای مرکز بدن، $C$ |

| | |
|---|---|
| $T_{sk}$ | دمای پوست، $C$ |
| $T_{cr,n}$ | دمای هسته بدن در حالت خنثی، $C$ |
| $T_{sk,n}$ | دمای پوست بدن در حالت خنثی، $C$ |
| TSENS | شاخص احساس حرارتی |
| $W$ | کار اعضای بدن، $\mathrm{W}\ m^{-2}$ |
| $\mathrm{WSIG_{cr}}$ | سیگنال گرم در مرکز بدن |
| $\mathrm{WSIG_{sk}}$ | سیگنال گرم در پوست |
| $\mathrm{WSIG_{b}}$ | سیگنال گرم در کل بدن |
| $U$ | سرعت حرکت توده ای بخار آب درون لباس، $m\ s^{-1}$ |
| $U_w$ | سرعت تخلیه حجمی آب درون لباس، $m\ s^{-1}$ |
| $V_f$ | حجم الیاف لباس، $m^3$ |
| $\alpha$ | کسر تجمعی جرمی در ناحیه پوست |
| $\beta$ | ضریب جذب تشعشع الیاف، $m^{-1}$ |
| $\Gamma$ | نرخ کلی جذب رطوبت در الیاف و تغییر فاز، $kg\ m^{-3}s^{-1}$ |
| $\Gamma_{ce}$ | نرخ تغییر فاز، $kg\ m^{-3}s^{-1}$ |
| $\Gamma_s$ | نرخ جذب رطوبت، $kg\ m^{-3}s^{-1}$ |
| $\varepsilon$ | ضریب تخلخل لباس |
| $\varepsilon'$ | ضریب تخلخل لباس در حالت خشک |
| $\lambda$ | حرارت نهان تغییر فاز یا جذب الیاف، $\mathrm{J}\ kg^{-1}$ |
| $\mu_{\mathrm{g}}$ | ویسکوزیته بخار آب، $kg\ m^{-1}s^{-1}$ |
| $\mu_w$ | ویسکوزیته آب، $kg\ m^{-1}s^{-1}$ |
| $\xi_1$ و $\xi_2$ | ضریب صدور مرزها |
| $\rho$ | چگالی الیاف، $kg\ m^{-3}$ |
| $\rho_w$ | چگالی آب، $kg\ m^{-3}$ |
| $\sigma$ | ثابت بولتزمان، $\mathrm{W}m^{-2}K^{-4}$ |
| $\sigma'$ | کشش سطحی الیاف، $kg\ s^{-1}$ |
| $\tau_c$ | ضریب پیچ و خم موثر الیاف |
| $\omega$ | درصد تجمع آب |
| $\omega_f$ | درصد تجمع آب درون الیاف |
| $\widetilde{\omega}$ | درصد تجمع آب در فضای خای لباس |

# فهرست جدول ها

عنوان صفحه

جدول 2-1- معادلات حاکم بر مدلسازی لباس ..... 24
جدول 4-1- مقادیر پارامترهای فیزیکی الیاف نایلون ..... 36
جدول 4-2- مقادیر پارامترهای فیزیکی الیاف پلی استر ..... 36
جدول 6-1- تعریف سه نوع لباس با کاربری های متفاوت ..... 52

# فهرست شکل ها

عنوان صفحه


شکل 2-1- شماتیکی از لباس ..... 5

شکل 2-2- فازهای موجود در محیط لباس ..... 9

شکل 2-3- شماتیکی از توزیع آب درون محیط لباس در نقطه $x$ ..... 11

شکل 2-4- شمایی از مدل دو لایه‌ای گایج و ساز و کارهای انتقال حرارت در آن ..... 21

شکل 3-1- نود های محاسباتی ..... 26

شکل 3-2- الگوریتم محاسباتی ..... 31

شکل 4-1- شماتیک لباس چند لایه ..... 34

شکل 4-2- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی بعد از گذشت زمان 8 ساعت ..... 37

شکل 4-3- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی بعد از گذشت زمان 24 ساعت ..... 37

شکل 4-4- مقایسه تغییرات دمای پوست با نتایج آزمایشگاهی ..... 39

شکل 4-5- مقایسه تغییرات دمای پوست با نتایج آزمایشگاهی ..... 39

شکل 4-6- مقایسه تغییرات دمای پوست با نتایج آزمایشگاهی مدل Li Fengzhi ..... 40

شکل 4-7- مقایسه تغییرات دمای سطح داخلی لباس با نتایج آزمایشگاهی مدل Li Fengzhi ..... 41

شکل 5-1- شماتیک لباس مورد بررسی ..... 44

شکل 5-2- تغییرات شار حرارتی تبخیری درون لباس نسبت به زمان با تغییرات ضریب تخلخل ..... 45

شکل 5-3- تغییرات رطوبت نسبی درون لباس نسبت به ضریب تخلخل ..... 46

شکل 5-4- تغییرات تجمع آب درون لباس نسبت به ضریب تخلخل ..... 47

شکل 5-5- تغییرات تجمع آب درون لباس نسبت به نفوذپذیری مایع ..... 48

شکل 5-6- تغییرات دبی مایع روی سطح خارجی لباس نسبت به زمان برای نفوذپذیری‌های متفاوت ..... 49

شکل 5-7- تغییرات اتلافات تبخیری درون لباس نسبت به زمان برای الیاف با ضرایب هدایت حرارتی متفاوت ..... 50

شکل 6-1- تغییرات دمای مرکز بدن در حالت پایدار پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت ..... 53

شکل 6-2- تغییرات دمای پوست در حالت پایدار پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت ..... 54

شکل 6-3- تغییرات نرخ تعرق در حالت پایدار پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت ..... 55

شکل 6-4- تغییرات نرخ انتقال حرارت از لباس به محیط در حالت پایدار پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت ..... 56
شکل 6-5- تغییرات احساس حرارتی فرد در حالت پایدار پس از قرار گرفتن در محیط با دماهای متفاوت ..... 57
شکل 6-6- تغییرات نرخ تعرق پوست نسبت به زمان برای سه لباس ..... 58
شکل 6-7- تغییرات نرخ انتقال حرارت از لباس به محیط نسبت به زمان برای سه لباس ..... 59
شکل 6-8- تغییرات دمای مرکز بدن نسبت به زمان برای سه لباس ..... 60
شکل 6-9- تغییرات دمای پوست نسبت به زمان برای سه لباس ..... 60
شکل 6-10- تغییرات احساس حرارتی فرد نسبت به زمان برای سه لباس ..... 61

# فصل اول

# مقدمه

## 1-1- نوآوری و اهمیت انجام این تحقیق

مدلسازی انتقال جرم و حرارت[1] از لباس، به دلیل کاربردهای گستردهٔ آن در زمینهٔ آسایش حرارتی[2]، صنایع نساجی و صنایع تولید البسهٔ خاص از جمله لباسهای ضد حریق، البسهٔ ورزشی، نظامی و ... از اهمیت بسزایی برخوردار است. از سوی دیگر، ساختار فیزیکی لباس ایجاب می‌کند که مدلسازی آن بصورت یک محیط متخلخل[3] صورت گیرد. این در حالی است که مدلسازی انتقال جرم و حرارت از لباس به عنوان یک محیط متخلخل از سابقهٔ زیادی برخوردار نیست.

همانطور که گفته شد، یکی از کاربردهای مدلسازی لباس در زمینهٔ مسائل مربوط به آسایش حرارتی است. از سوی دیگر، مدلسازی اتلافات حرارت از طریق تبخیر عرق بدن و تعیین میزان تری لباس از جمله مسائلی است که در تعیین شرایط آسایش حرارتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. این در حالی است که تحقیقات انجام شده به این موضوع پرداخته نشده است. جنبه نوآوری این تحقیق را بدین صورت می‌توان ذکر نمود که در اکثر مدل‌های حرارتی بدن فرض بر این است که کلیه تعرق صورت گرفته بر

1. Heat and Mass transfer
2. Thermal Comfort
3. Porous Media

روی بدن تبخیر می‌شود و در حقیقت بیشینه اتلافات حرارتی تبخیری در این مدل ها در نظر گرفته می‌شود و هیچ یک از این مدل ها نرخ تبخیر صورت گرفته درون لباس بواسطه جذب تعرق و تاثیرات تعرق جذب شده درون لباس بر روی انتقال حرارت هدایتی و دیگر مکانیزم‌های انتقال حرارت را در نظر نمی‌گیرند. در تحقیق حاضر، نتایج در دو فصل پنجم و ششم بیان شده است در فصل پنجم اثرات پارامترهای اصلی لباس از جمله ضریب تخلخل، ضریب نفوذپذیری فاز مایع و ضریب هدایت حرارتی بر اتلافات حرارت تبخیری و میزان تری لباس مورد بررسی قرار گرفته است و در فصل ششم به جنبه کاربردی مدلسازی یعنی مسائل آسایش حرارتی پرداخته شده است.

## 2-1- مروری بر کارهای انجام شده

در سال 2000، جی فن[1] مدلی را برای انتقال حرارت و رطوبت بهمراه چگالش و جذب در لباس چند لایه بعنوان یک محیط متخلخل ارائه نمود. مدل او متشکل از دو معادله انرژی و معادله انتقال فاز گاز (رطوبت) می‌شد وی برای اولین بار اثر تجمع آب درون الیاف را بر روی ضریب هدایت بررسی نمود و همچنین انتقال حرارت تشعشعی را بعلت بالا بودن اختلاف دمای دو مرز لباس وارد معادله انرژی نمود. او توانست نتایج خود را برای توزیع دما، غلظت بخار و تجمع آب در لباس با جنس و شرایط مرزی گوناگون بدست آورد و با یکدیگر مقایسه کند [3]. او در ادامه کارهای خود در سال 2003 با کمک همکارانش مدل کاملتری را برای انتقال حرارت و رطوبت بصورت کوپل شده بهمراه تغییر فاز[2] ارائه نمود [4]. در این مدل معادله انتقال فاز مایع با مکانیزم‌های نفوذ و تغییر فاز به معادلات دیگر افزوده شد. در مدل جدید وی، حالتی تحت عنوان حالت مافوق اشباع[3] برای رطوبت نسبی معرفی گردید که آغاز چگالش منوط به رسیدن به آن حالت می‌باشد، نیز به کمک رابطه دارسی حرکت توده‌ای رطوبت درون لباس را توسط گرادیان فشار بدست آورد [4].

1. J. Fan
2. Phase Change
3. Super Saturation

فن مطالعات خود را در این زمینه گسترش داد و در سال 2007 روش حجم محدود را برای حل عددی مدل خود ارائه نمود و توانست تاثیر موقعیت مکانی و ابعاد لایه‌های مختلف را بر تجمع رطوبت و عملکرد عایق بودن لباس از نظر حرارتی در لباس‌های چند لایه بررسی نماید [5]. در سال 2007، هانگ[1] و همکارانش ترم جابجایی فاز مایع را به معادله انتقال جرم مایع اضافه نمودند که در این ترم سرعت حجمی مایع توسط اثرات موئینگی محاسبه می‌گردد، آنها حل تحلیلی جهت حل معادلات ارائه نمودند و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند [1].

## 1-3- خلاصه ای بر مطالب این پایان نامه

این پایان نامه در شش فصل تهیه شده است، طبق روال در فصل نخست مقدمه لحاظ گردیده که در آن بطور مختصر به تاریخچه‌ای در مورد کارهای انجام شده در این زمینه و اهمیت انجام این تحقیق و جنبه نوآوری آن اشاره شده است. در فصل دوم تئوری مدلسازی از قبیل معادلات حاکم، روابط کمکی مورد نیاز، شرایط مرزی حاکم بر مساله و مدل حرارتی بدن ذکر گردیده است، در این فصل سعی شده تمامی جزئیات مربوط به معادلات بیان شده تا خواننده در درک نحوه استخراج روابط دچار ابهام نشود.

در فصل سوم روش حل عددی به همراه چگونگی گسسته سازی معادلات و الگوریتم حل عددی توضیح داده شده است تا بتوانیم در فصل چهارم اعتبار سنجی برنامه محاسباتی را انجام دهیم. اعتبار سنجی در دو حالت، یکبار برای کارکرد صحیح کد عددی لباس به تنهایی و بار دیگر برای مدل حرارتی بدن و لباس در کنار یکدیگر انجام شده است.

در دو فصل پنجم و ششم نتایج ارائه شده است، در فصل پنجم تحلیل اثرات پارامتر های موثر بر نرخ تبخیر در لباس و تری لباس انجام شده است و در فصل ششم جنبه کاربردی مدلسازی در نظر گرفته شده و پارامترهای مهم آسایشی از قبیل دمای پوست و مرکز بدن، نرخ تعرق و احساس حرارتی انسان برای سه نوع لباس در شرایط محیطی مختلف محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده اند.

1. H. Huang