بسم الله الرحمن الرحيم

٢٠٣٤٩٩٨ - ١٥٢٦٢٠

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

رساله دکترای مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

بهبود مدلهای استاندارد آسایش حرارتی با بکارگیری تحلیل فرکانسی پاسخ حرارتی بدن انسان

سید علیرضا ذوالفقاری

استاد راهنما:

دکتر مهدی معرفت

زمستان ۱۳۸۹

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه علوم و فناوری اطلاعات ایران
مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
IRANDOC

۱۵۶۶۲۰

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای علیرضا ذوالفقاری رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان تحلیل فرکانسی پاسخ حرارتی بدن انسان با هدف بهبود مدلهای استاندارد آسایش حرارتی** در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۱۱ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری 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 حسن سعیدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر ناصر فتورائی	دانشیار	فتورائی
استاد ناظر	دکتر کیومرث مظاهری	دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

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 پایان نامه/ 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 پایان نامه 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 ٤- 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 ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ 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 علیرضا ذوالفقاری دانشجوی رشته مهندسی مکانیک- تبدیل انرژي ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۵ مقطع دکتری دانشکده فنی و مهندسی 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»

سید علیرضا ذوالفقاری

تاریخ: ۱۳۸۹/۱۲/۱۵

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 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.

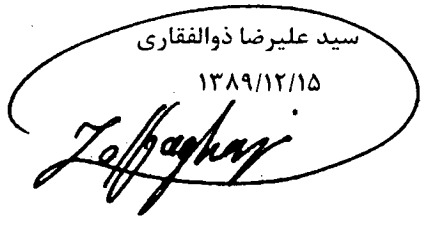
ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند 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 سید علیرضا ذوالفقاری دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

سید علیرضا ذوالفقاری

۱۳۸۹/۱۲/۱۵



با تمام عشق،

این ناچیزترین را تقدیم می‌کنم به ...

... تمامیِ مهربانی‌ها و دلواپسی‌های مادرم

... تمامیِ همراهی‌ها و دلسوزی‌های پدرم

... تمامیِ فداکاری‌ها و دلگرمی‌های همسرم

و نیز

دخترم، که مرا بعنوان پدری پاره‌وقت پذیرفت

تشکر و قدردانی

با تشکر فراوان از زحمات و راهنمایی‌های بی‌دریغ و ارزشمند استاد ارجمند جناب آقای دکتر معرفت که در این سالها از ایشان بسیار آموخته‌ام و هنوز بسیار درصدد آموختنم. همچنین بر خود لازم می‌دانم تا از مساعدتهای دوستانه‌ی جناب آقای دکتر امیر امیدوار و نیز جناب آقای دکتر کیان حق‌داد صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

هدف اصلی از انجام این تحقیق، ارائه‌ی راهکارهایی است که ضمن حفظ سادگی ساختار مدلهای استاندارد آسایش حرارتی، عملکرد این مدلها را در ارزیابی شرایط حرارتی بدن انسان بهبود بخشد. از سوی دیگر، همه‌ی مدلهای موجود برای پیش‌بینی احساس حرارتی افراد، بر مبنای معادلات موازنه‌ی انرژی برای بدن استوارند. این در حالی است که برقرار بودن موازنه‌ی انرژی برای بدن لزوماً به معنای احساس مطلوب حرارتی نیست و در حقیقت آنچه که احساس حرارتی افراد را تعیین می‌کند، پاسخ فرکانسی حسگرهای حرارتی پوست به محرکهای محیطی است؛ نه برقرار بودن موازنه‌ی انرژی برای بدن. با این توصیف، ساختار مدلهای مبتنی بر موازنه‌ی انرژی با فیزیک احساس حرارتی افراد همخوانی مناسبی ندارند. از همین رو است که این مدلها نمی‌توانند توصیف کننده خوبی برای تأثیر برخی پدیده‌ها از جمله عوامل ایجاد نارضایتی موضعی بر احساس حرارتی افراد باشند. بر این اساس، در پژوهش حاضر یک رویکرد جدید برای ارزیابی احساس حرارتی و میزان نارضایتی کلی افراد بر مبنای پاسخ فرکانسی حسگرهای پوست پیشنهاد شده است. برای این منظور، یک مدل زیست-گرمایی جدید بر پایه‌ی سیگنالهای حرارتی بدن و با در نظر گرفتن تأثیر سازوکارهای تنظیم حرارت توسعه یافته و با استفاده از آن، شاخصی جدید برای ارزیابی احساس حرارتی افراد بر اساس پاسخ حسگرهای پوست ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص جدید قادر است احساس حرارتی افراد را با دقت مناسبی تحت گستره‌ی وسیعی از شرایط فردی و محیطی پیش‌بینی نماید. از آنجایی که هدف نهایی همه‌ی مدلهای آسایش حرارتی، برآورد صحیح درصد رضایت و نارضایتی حرارتی افراد است، در این تحقیق نیز سعی شده تا با استفاده از شاخص احساس حرارتی جدید میزان نارضایتی حرارتی کلی افراد مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به اینکه میزان نارضایتی حرارتی افراد علاوه بر احساس حرارتی ایشان به عوامل ایجاد نارضایتی موضعی به ویژه کوران وابسته است، لذا باید اثرات متقابل این عوامل بر نارضایتی حرارتی در نظر گرفته شود. بر این اساس، در تحقیق حاضر یک شاخص جامع برای برآورد میزان نارضایتی حرارتی افراد معرفی شده است. شایان ذکر است که شاخص جدید، اولین شاخص جامع برای ارزیابی درصد نارضایتی حرارتی کلی افراد محسوب می‌شود که ضمن مبتنی بودن بر پاسخ فرکانسی حسگرهای پوست، اثرات متقابل عوامل سراسری و موضعی ایجاد نارضایتی حرارتی را بطور همزمان در نظر می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: آسایش حرارتی، مدلهای استاندارد، حسگرهای حرارتی پوست، کوران

فهرست مطالب

	فهرست مطالب	(الف)
	فهرست علائم و نشانه‌ها	(ج)
	فهرست جدول‌ها	(ه)
	فهرست شکل‌ها	(و)
۱	**فصل اول: مقدمه و کلیات**	۱
	۱-۱. نگاهی اجمالی به مبحث آسایش حرارتی	۱
	۱-۲. مروری بر مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی	۳
	۱-۳. طرح مسئله و ضرورت انجام تحقیق	۵
	۱-۴. هدف از انجام تحقیق	۸
	۱-۵. سازماندهی مطالب	۹
۲	**فصل دوم: مروری بر مدلهای استاندارد آسایش حرارتی**	۱۱
	۲-۱. مقدمه	۱۱
	۲-۲. مدل فنگر	۱۱
	۲-۳. مدل گایج	۱۵
	۲-۴. عوامل نارضایتی حرارتی موضعی	۲۱
	۲-۴-۱. تابش نامتقارن	۲۱
	۲-۴-۲. گرادیان عمودی دما	۲۲
	۲-۴-۳. دمای کف	۲۲
	۲-۴-۴. کوران	۲۳
۳	**فصل سوم: اصلاح ساختار مدلهای استاندارد آسایش حرارتی**	۲۵
	۳-۱. مقدمه	۲۵
	۳-۲. ساختار مدل اصلاح شده‌ی جدید	۲۶

۳-۳. اعتبارسنجی مدل سه‌نقطه‌ای جدید ۳۱
۴ فصل چهارم: ضرورت اصلاح رویکرد مدلهای آسایش حرارتی ۳۶
۴-۱. مقدمه ۳۶
۴-۲. روابط تجربی نارضایتی ناشی از کوران ۳۷
۴-۳. رهیافتی برای اصلاح رویکرد مدلهای آسایش حرارتی ۴۱
۵ فصل پنجم: ارائه‌ی شاخصی جدید برای ارزیابی احساس حرارتی ۴۴
۵-۱. مقدمه ۴۴
۵-۲. مدل حسگرهای حرارتی پوست ۴۵
۵-۳. اصلاح ساختار مدل زیست-گرمایی بدن ۴۹
۵-۴. اعتبارسنجی مدل زیست-گرمایی جدید ۵۴
۵-۵. اشکالات باقی‌مانده ۶۲
۵-۶. ارائه‌ی یک شاخص پاسخ حرارتی جدید ۶۳
۵-۷. اعتبارسنجی شاخص پاسخ حرارتی جدید ۶۵
۶ فصل ششم: ارائه‌ی یک شاخص جامع برای ارزیابی نارضایتی حرارتی کلی ۷۵
۶-۱. مقدمه ۷۵
۶-۲. شبیه‌سازی جریان اغتشاشی ۷۷
۶-۳. اثر اغتشاشات جریان هوای وزشی بر شاخص استاندارد و شاخص جدید ۷۸
۶-۴. توسعه‌ی یک شاخص جدید برای پیش‌بینی نارضایتی حرارتی کلی افراد ۸۰
۶-۵. اعتبارسنجی شاخص نارضایتی حرارتی جدید ۸۲
۷ فصل هفتم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۰
۷-۱. خلاصه و جمع‌بندی ۹۰
۷-۲. جنبه‌های نوآوری تحقیق ۹۳
۷-۳. مقالات حاصل از تحقیق ۹۳
مراجع ۹۵
پیوست (الف). مثال نمونه از طراحی حرارتی محیط توسط شاخص جامع نارضایتی حرارتی(PD_{ov}) ۱۰۲
واژه‌نامه ۱۰۷

فهرست علائم و نشانه‌ها

A	مساحت، (m^2)
A_D	مساحت کل بدن، (m^2)
A_{fr}	کسر سطحی بخشهای مختلف بدن، (بی‌بعد)
C	ضریب تناسب
C_p	ظرفیت گرمایی، (J/kg°C)
CSIG	سیگنال سرمایی، (بی‌بعد)
EP	پارامتر مؤثر بر نارضایتی حرارتی کلی، (بی‌بعد)
Err	میزان خطا، (-)
f_{cl}	فاکتور لباس، (بی‌بعد)
h	ضریب انتقال حرارت، ($W/m^2°C$)
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر برای آب، (J/kg)
I_{cl}	مقاومت حرارتی لباس، (clo)
i_m	بازده‌ی کلی نفوذ بخار لباس، (بی‌بعد)
k	ضریب هدایت حرارتی، (W/m°C)
K_{eff}	رسانش حرارت مؤثر، ($W/m^2°C$)
k_{Tu}	انرژی جنبشی اغتشاشی، (m^2/s^2)
L	بار حرارتی کلی بدن، (W/m^2)
l_b	قد شخص، (m)
ℓ_b	طول مشخصه‌ی بدن، (m)
L_R	ضریب لویس، (°C/kPa)
$\hat{M}$	نرخ متابولیک، (met)
m_b	جرم بدن، (kg)
m_{fr}	کسر جرمی بخشهای مختلف بدن، (بی‌بعد)
$\dot{m}_{bl}$	دبی شارش جریان خون، ($kg/s.m^2$)
$\dot{m}_{rsw}$	نرخ تعرق تنظیمی، ($kg/s.m^2$)
N_{md}	عدد تصادفی در بازه‌ی ۱- تا ۱+، (بی‌بعد)
P	فشار جزئی بخار، (kPa)
PD	شاخص درصد نارضایتی حرارتی، (٪)
PMV	میانگین احساس حرارتی افراد، (بی‌بعد)
PPD	درصد نارضایتی افراد، (٪)
Q	تولید یا تبادل حرارت بر واحد سطح بدن، (W/m^2)
q	تولید یا تبادل حرارت بر واحد حجم بدن، (W/m^3)
R	مقاومت انتقال حرارت محسوس، ($m^2°C/W$)
R_e	مقاومت تبخیری، (m^2kPa/W)
r_{mt}	ضریب متابولیک باقیمانده، (بی‌بعد)
RH	رطوبت نسبی، (٪)
RS	شاخص پاسخ حرارتی بدن، (Hz)
T	دما، (°C)
t	زمان، (s)
$\overline{T}_{rd}$	دمای متوسط تابش، (°C)
TSENS	شاخص احساس حرارتی، (بی‌بعد)
TRESP	شاخص پاسخ حرارتی بدن، (بی‌بعد)
Tu	شدت اغتشاشات جریان هوا، (٪)
V	سرعت، (m/s)
$\overline{V}$	متوسط سرعت، (m/s)
V'_{rms}	شاخص سرعت اغتشاشی، (m/s)
$\forall_b$	حجم بدن، (m^3)
w	تری پوست، (بی‌بعد)
WSIG	سیگنال گرمایی، (بی‌بعد)
x	شاخصه‌ی طولی، (m)

علائم یونانی

α	کسر تجمع جرمی در ناحیه‌ی پوست، (بی‌بعد)
ε	ضریب صدور سطح لباس، (بی‌بعد)

η	بازده، (بی‌بعد)
κ_d	ثابت تناسب بخش دینامیکی، (K^{-1})
κ_s	ثابت تناسب بخش استاتیکی، ($K^{-1}s^{-1}$)
λ	نسبت سطح بخشهای لخت بدن، (بی‌بعد)
μ	نسبت جرم بخشهای لخت بدن، (بی‌بعد)
ϖ	نرخ ترشح خون در بافت، ($m^3/s\,m^3$)
ρ	چگالی، (kg/m^3)
σ	ثابت استفان-بولتزمن، (W/m^2K^4)

زیرنویسها

a	هوا
act	فعالیت بدنی
avg	میانگین
AR	مربوط به تابش نامتقارن
art	شریانی
b	مربوط به بدن
bl	مربوط به خون
br	لخت
cd	هدایتی
cl	مربوط به لباس
cr	مربوط به مرکز بدن
cR	حسگرهای سرمایی
cv	جابه‌جایی
DR	مربوط به کوران
ev	تبخیری
F	مربوط به کف اتاق
FT	مربوط به دمای کف اتاق
max	حداکثر
mech	مکانیکی
mt	مربوط به متابولیک
n	خنثی
o	عملکرد
ov	کلی
rd	تابشی
res	تنفسی
s	ذخیره حرارت
sat	مربوط به شرایط حرارتی اشباع
sen	مربوط به احساس حرارتی
shv	لرز
sk	مربوط به پوست
t	کلی
VD	مربوط به گرادیان عمودی دما
wk	کار خارجی
wR	حسگرهای گرمایی

بالانویسها

new	مرحله‌ی بعد
old	مرحله‌ی قبل

فهرست جدول‌ها

جدول (۲-۱). ضرایب معادله‌ی (۲-۴۵) برای شرایط حرارتی مختلف[۶]. ۲۲

جدول (۲-۲). محدوده‌ی دمای مجاز کف اتاق برای شرایط کف پای لخت[۴]. ۲۴

جدول (۳-۱). کسر سطحی و جرمی برای هر یک از بخشهای بدن در تقسیم‌بندی ۱۶ بخشی بدن[۳۰]. ۲۸

جدول (۳-۲). خلاصه‌ای از شرایط فردی و حرارتی حاکم بر چهار مورد از شرایط آزمایشگاهی جهت اعتبارسنجی مدل سه‌نقطه‌ای. ۳۴

جدول (۳-۳). مقایسه‌ی نتایج مدل سه‌نقطه‌ای جدید و مدل استاندارد گایج با داده‌های آزمایشگاهی [۷۴] و [۷۵]. ۳۵

جدول (۵-۱). مشخصات هندسی و خواص حرارتی لایه‌های مختلف پوست و بافت داخلی بدن [۹۰]. ۴۷

جدول (۵-۲). میزان خطای مدل زیست-گرمایی جدید و سایر مدلهای مقایسه‌ای نسبت به نتایج تجربی برای ۸ مورد مقایسه‌ای. ۶۲

جدول (۵-۳). مقایسه‌ی میان شاخص پاسخ حرارتی جدید (TRESP) با مقادیر تجربی[۷۴،۷۵]، شاخص استاندارد TRESP و شاخص تعریف شده توسط مدل سه‌نقطه‌ای ($TRESP_{۵۷}$) برای موارد مقایسه‌ای S1 تا S4. ۶۶

جدول (۵-۴). شرایط حرارتی موارد مقایسه‌ای S5 تا S26 به همراه مقایسه‌ی میان شاخص پاسخ حرارتی جدید (TRESP) با شاخص (PMV) و مقادیر تجربی [۱۰۵-۱۰۷]. ۶۷

جدول (۵-۵). مقایسه‌ی میزان خطای ناشی از شاخص پاسخ حرارتی جدید با شاخص‌های استاندارد PMV و TSENS برای ۲۶ مورد مقایسه‌ای پایا. ۶۸

جدول (۵-۶). خطای ناشی از شاخص پاسخ حرارتی جدید برای ۷ مورد مقایسه‌ای گذرا. ۷۳

جدول (۶-۱). مقایسه‌ی میزان خطای شاخص نارضایتی حرارتی جدید با خطای سایر روابط موجود برای پیش‌بینی میزان نارضایتی ناشی از پدیده‌ی کوران. ۸۷

فهرست شکل‌ها

شکل (۲-۱). نمودار درصد نارضایتی افراد (PPD) بر حسب احساس حرارتی ساکنین (PMV). ۱۵

شکل (۲-۲). شمایی از مدل دو لایه‌ای گایج و سازوکارهای انتقال حرارت حاکم بر آن. ۱۶

شکل (۳-۱). شمایی از مدل سه‌نقطه‌ای جدید و سازوکارهای انتقال حرارت حاکم بر آن. ۲۶

شکل (۳-۲). مقایسه‌ی دمای پوست حاصل از مدل جدید، مدل استاندارد گایج و مدل سطح بالای Salloum و همکاران[۳۷] با داده‌های آزمایشگاهی Kakitsuba [۷۲]. ۳۲

شکل (۳-۳). مقایسه‌ی نتایج حاصل برای دمای پوست با داده‌های آزمایشگاهی Ozaki و همکاران [۷۳]؛ (الف) نتایج مدل گایج، (ب) نتایج مدل سه‌نقطه‌ای جدید. ۳۳

شکل (۴-۱). شمایی کلی از روند پیش‌رو برای اصلاح رویکرد مدلهای آسایش حرارتی و تعریف شاخص جامع نارضایتی حرارتی افراد. ۴۲

شکل (۵-۱). شمایی از پوست و لایه‌های مختلف آن (مقیاس‌ها در شکل رعایت نشده است). ۴۷

شکل (۵-۲). شمای ترسیمی مدل زیست-گرمایی جدید. ۵۳

شکل (۵-۳). مقایسه‌ی نتایج مدل زیست-گرمایی جدید با نتایج تجربی Stolwijk و Hardy[۹۰]، نتایج مدل هزاران نقطه-ای دانشگاه برکلی[۲۲]، نتایج مدل Kaynakli و Kilic [۹۶] و همچنین مدل Pennes (مورد مقایسه‌ای اول). ۵۶

شکل (۵-۴). مقایسه‌ی نتایج مدل زیست-گرمایی جدید با نتایج تجربی Kakitsuba [۷۲]، مدلسازی Salloum و همکاران[۳۷] و نتایج مدل اصلاح شده‌ی سه‌نقطه‌ای (مورد مقایسه‌ای دوم). ۵۶

شکل (۵-۵). مقایسه‌ی نتایج مدل زیست-گرمایی جدید با نتایج تجربی Saltin و Hermansen [۹۷]، نتایج مدل Smith [۹۸] و مدل AUB [۳۷] (مورد مقایسه‌ای سوم). ۵۷

شکل (۵-۶). مقایسه‌ی نتایج مدل جدید با نتایج تجربی Stolwijk و Hardy [۹۵]، نتایج مدل AUB [۳۷] و مدل اصلاح شده‌ی AUB [۸۳] (مورد مقایسه‌ای چهارم). ۵۹

شکل (۵-۷). مقایسه‌ی نتایج مدل جدید با نتایج تجربی Raven و Horvath [۹۹]، نتایج مدل برکلی[۲۲]، مدل AUB [۳۷] و مدل اصلاح شده‌ی AUB [۸۳] (مورد مقایسه‌ای پنجم). ۵۹

شکل (۵-۸). مقایسه‌ی نتایج مدل جدید با نتایج تجربی Gordon و همکارانش[۱۰۰] و نتایج مدلسازی Ferreira و Yanagihara [۱۰۱] (مورد مقایسه‌ای ششم). ۶۰

شکل (۵-۹). مقایسه‌ی نتایج مدل جدید با نتایج تجربی Stolwijk و Hardy [۱۰۲] و نتایج مدلسازی Ferreira و Yanagihara [۱۰۱] (مورد مقایسه‌ای هفتم). ۶۱

شکل (۵-۱۰). مقایسه‌ی نتایج مدل جدید با نتایج تجربی Stolwijk و Hardy [۱۰۲] و نتایج مدلسازی Ferreira و Yanagihara [۱۰۱] (مورد مقایسه‌ای هشتم). ۶۱

شکل (۵-۱۱). رابطه‌ی میان شاخص احساس حرارتی اشری و دمای حسگرهای حرارتی پوست تحت شرایط فردی و محیطی مختلف. ۶۴

شکل (۵-۱۲). مقایسه‌ی دمای پوست و احساس حرارتی بدست آمده توسط مدل زیست-گرمایی جدید و شاخص پاسخ حرارتی TRESP با نتایج تجربی Arens و همکاران[۲۵] (مورد مقایسه‌ای T1). ۶۹

شکل (۵-۱۳). مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص پاسخ حرارتی جدید با نتایج تجربی Arens و همکاران [۲۵] (مورد مقایسه‌ای T2). ۷۰

شکل (۵-۱۴). مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص پاسخ حرارتی جدید با نتایج تجربی Goto و همکاران [۱۰۸] (مورد مقایسه‌ای T3). ۷۱

شکل (۵-۱۵). مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص TRESP با نتایج تجربی Goto و همکاران [۱۰۸] (مورد مقایسه‌ای T4). ۷۱

شکل (۵-۱۶). مقایسه‌ی میان نتایج شاخص جدید با نتایج تجربی Parsons [۱۰۹] و همچنین شاخص PMV (مورد مقایسه‌ای T5). ۷۲

شکل (۵-۱۷). مقایسه‌ی میان نتایج شاخص جدید با نتایج تجربی Parsons [۱۰۹] و شاخص PMV (مورد مقایسه‌ای T6). ۷۲

شکل (۵-۱۸). مقایسه‌ی میان نتایج شاخص جدید با نتایج تجربی Gagge و همکاران [۱۱۰] (مورد مقایسه‌ای T7). ۷۳

شکل (۶-۱). مقایسه‌ی میزان تأثیر اغتشاشات جریان بر شاخص استاندارد TSENS و شاخص جدید TRESP به ازای مقادیر مختلف دمای هوا. ۷۹

شکل (۶-۲). رابطه‌ی میان میزان نارضایتی ناشی از کوران با عامل $\overline{V}.\Delta TRESP$. ۸۱

شکل (۶-۳). مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص جدید با نتایج تجربی فنگر و همکارانش[۶۵] و همچنین نتایج حاصل از رابطه‌ی معروف فنگر برای پیش‌بینی میزان نارضایتی ناشی از کوران در شرایط حرارتی خنثی. ۸۴

شکل (۶-۴). مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص جدید با نتایج تجربی و همچنین رابطه‌ی Toftum و Nielsen [۷۸] برای پیش‌بینی میزان نارضایتی ناشی از کوران در شرایط حرارتی سرد. ۸۵

شکل (۶-۵). مقایسه‌ی نتایج حاصل از شاخص جدید با نتایج تجربی و همچنین رابطه‌ی توسعه یافته توسط Xia و همکارانش [۷۹] برای پیش‌بینی میزان نارضایتی ناشی از کوران در شرایط حرارتی گرم. ۸۶

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱. نگاهی اجمالی به مبحث آسایش حرارتی

هدف اصلی سیستم‌های تهویه مطبوع، ایجاد شرایطی مطلوب به منظور تأمین احساس آسایش حرارتی انسانها است. هر چند که برای آسایش حرارتی تعریفی یکتا وجود ندارد، ولی معمولاً برای بیان مفهوم آسایش حرارتی به تعریف ارائه شده در استاندارد ۵۵ دستورالعمل تأسیساتی اشری[۱][۱] استناد می‌شود. در این استاندارد آمده است: آسایش حرارتی حالتی ذهنی است که از شرایط حرارتی محیط ابراز رضایت می‌کند[۱]. همچنین، شرایط آسایش حرارتی هنگامی تأمین می‌گردد که دمای بدن در بازه‌ی محدودی واقع شود، رطوبت پوست کم باشد و تلاش فیزیولوژیکی بدن برای تنظیم حرارت به حداقل برسد. در چنین شرایطی است که افراد احساس حرارتی مطلوبی را تجربه می‌کنند و درصد نارضایتی حرارتی ایشان نسبت به محیط در محدوده‌ی مجاز قرار خواهد داشت.

اگر چه گزاره‌های فوق تعریف واضحی برای شرایط آسایش حرارتی ارائه نمی‌کند، ولی بیانگر این موضوع است که قضاوت درباره‌ی آسایش حرارتی، فرآیندی آگاهانه و دشوار است و مستلزم آگاهی از عوامل بسیاری

[۱] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers)

از جمله پارامترهای فیزیکی، فیزیولوژیکی، ذهنی و ... می‌باشد. بر این اساس، پیش‌بینی دقیق شرایط آسایش حرارتی به دلیل تعدد پارامترهای مؤثر بر آن بسیار دشوار است. از سوی دیگر، طراحی دقیق و هوشمندانه‌ی سیستم‌های تهویه مطبوع، مستلزم پیش‌بینی صحیح شرایط آسایش حرارتی می‌باشد. از این رو، محققان بسیاری سعی کرده‌اند تا شرایط آسایش حرارتی را مورد تحلیل و بررسی قرار دهند. با نگاهی به تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی تعیین شرایط آسایش حرارتی، می‌توان خط مشی اصلی این تحقیقات را در قالب سه رویکرد اصلی دسته‌بندی نمود: رویکرد پیمایش میدانی، رویکرد آزمایشگاهی و رویکرد تحلیلی[۲].

در رویکرد پیمایش میدانی از گروهی از افراد درخواست می‌شود که در ارزیابی شرایط آسایش حرارتی شرکت نمایند. این برآورد عموماً به نام رأی یا نظر افراد نسبت به محیط در نظر گرفته می‌شود. افراد بطور طبیعی به عوامل حرارتی محیط واکنش نشان می‌دهند و متغیرهای فیزیکی محیط مانند دما، سرعت هوا و ... بطور همزمان اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. سپس از طریق تحلیل رگرسیون آرای افراد به عنوان متغیر وابسته در مقابل متغیرهای مستقل محیطی، سعی می‌شود تعریف درستی از نحوه‌ی واکنش حرارتی افراد بدست آید. هدف اصلی در این رویکرد، یافتن واکنش‌های طبیعی افراد به عوامل حرارتی محیط است بدون این که دخالتی در شرایط متعارف زندگی آنها ایجاد شود[۲]. رویکرد دیگری که محققان برای ارزیابی شرایط حرارتی بدن از آن استفاده می‌کنند، رویکرد آزمایشگاهی است. این رویکرد معمولاً برای ارزیابی شرایط حرارتی بدن از جمله دمای پوست، دمای مرکز بدن، میزان رطوبت پوست و ... بکار می‌رود. در این روش پارامترهای حرارتی بدن در شرایط مختلف محیطی اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها می‌تواند بر روی آدمک‌های آزمایشگاهی و یا افراد انسانی صورت پذیرد. رویکردهای پیمایش میدانی و آزمایشگاهی مستلزم صرف هزینه‌های نسبتاً بالا برای انجام پیمایش‌ها و آزمایشات می‌باشند. ضمن این که نتایج حاصل از رویکردهای مذکور، تنها در گستره‌ی مورد پیمایش و یا در شرایط مشابه با شرایط آزمایشگاهی قابل استناد هستند. بنا به دلایلی که ذکر شد، رویکردهای پیمایش میدانی و آزمایشگاهی چندان مورد استقبال قرار نگرفتند و در مقابل، رویکرد تحلیلی توانست محبوبیت بیشتری در میان محققان و طراحان بیابد. در رویکرد تحلیلی سعی می‌شود تا از طریق معادلات حاکم برای بدن، شرایط آسایش حرارتی پیش‌بینی شود. رویکرد تحلیلی در نهایت به مدلی برای پیش‌بینی احساس حرارتی و درصد نارضایتی افراد نسبت به محیط منجر می‌گردد. شایان ذکر است که استفاده از مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی به لحاظ صرف زمان و هزینه نسبت

به سایر رویکردها مقرون به صرفه‌تر است. همچنین این مدلها به دلیل مبتنی بودن بر معادلات حاکم برای بدن، قابلیت تعمیم و استفاده در شرایط مختلف را دارند. همین امر موجب استقبال گسترده‌ی محققان و طراحان از مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی شده است.

۱-۲. مروری بر مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی

انرژی تولید شده از طریق متابولیک یا سوخت و ساز بدن باید بطور مداوم به صورت حرارت به محیط منتقل شود و یا کار انجام دهد، تا دمای بدن در شرایط طبیعی باقی بماند. همین اصل ساده، سالهاست که به عنوان مبنای مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. به بیان دیگر، بدن انسان را می‌توان به منزله‌ی یک موتور حرارتی فرض کرد که انرژی ورودی آن از طریق غذا تأمین می‌شود و باید بخشی از حرارت تولیدی را به صورت حرارت غیر قابل مصرف به محیط دفع نماید. در واقع قسمتی از حرارت تولید شده توسط بدن به کار مکانیکی لازم برای کنش اعضای بدن و فعالیت فرد تبدیل می‌شود و بخش دیگر آن از طریق اتلافات حرارت از پوست و اتلافات حرارت تنفسی به محیط دفع می‌گردد و باقیمانده‌ی آن در بدن ذخیره می‌شود. بر این اساس، همه‌ی مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی بر مبنای معادلات موازنه‌ی انرژی برای بدن استوار هستند. به طوری که این مدلها با تعیین دمای بخشهای مختلف بدن و برآورد میزان حرارت ذخیره شده در هر یک از این بخشها، شرایط حرارتی بدن و احساس حرارتی افراد را محاسبه و پیش‌بینی می‌کنند.

ایده‌ی بکارگیری مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی از دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی وجود داشته است[۳]. در ابتدا این مدلها به صورت معادله‌ی موازنه‌ی انرژی برای کل بدن و شرایط پایا ارائه شدند. اما با پیشرفت علم و تکنولوژی، امروزه مدلهای متعددی برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی در اندامها و لایه‌های مختلف بدن و در شرایط گذرا توسعه یافته است. در سال ۱۹۷۰، فنگر[۲] [۴] اولین مدل تحلیلی برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی را ارائه نمود. مدل فنگر یک مدل پایا و یک نقطه‌ای محسوب می‌شود و علیرغم زمان نسبتاً زیادی که از ارائه‌ی آن می‌گذرد، هنوز هم به عنوان پرکاربردترین مدل تحلیلی آسایش حرارتی مطرح است.

[2] Fanger

در سال ۱۹۸۶، گایج[3] و همکارانش[۵] یک مدل تحلیلی گذرا برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی ارائه نمودند. مدلهای فنگر و گایج علیرغم خطاهای ناشی از مدلسازی غیر دقیق، به یمن سادگی ساختار خود توانسته‌اند به استانداردهای آسایش حرارتی اشری[۱] و ایزو[۶] راه یابند. از این رو به مدلهای مذکور، مدلهای استاندارد آسایش حرارتی نیز اطلاق می‌شود. اگر چه سایر مدلهای آسایش حرارتی، هر یک در مقایسه با مدلهای استاندارد از مزایایی برخوردار هستند، اما غالباً پیچیدگی این مدلها موجب شده است تا کاربرد آنها تنها به جنبه‌های تحقیقاتی محدود شود. به همین دلیل، به این مدلهای پیشرفته و البته پیچیده، اصطلاحاً مدلهای تحقیقاتی گفته می‌شود. مدل ۴ لایه‌ای و ۶ بخشی (۲۵ نقطه‌ای) Stolwijk (۱۹۷۱)[۷]، مدل ۴ لایه‌ای و ۱۱ بخشی (۴۵ نقطه‌ای) Huckaba (۱۹۷۳) [۸، ۹]، مدل Morgan (۱۹۷۴)[۱۰]، مدل دو لایه‌ای KSU[4] (۱۹۷۷)[۱۱، ۱۲]، مدل ساده شده‌ی Sherman (۱۹۸۵)[۱۳]، مدل Doherty و Arens (۱۹۸۸)[۱۴]، مدل ۳ لایه‌ای و ۱۶ بخشی (۴۶ نقطه‌ای) Imre (۱۹۸۸) [۱۵]، مدل دو لایه‌ای Höppe (۱۹۹۳)[۱۶]، مدل تفاضل محدود Fiala (۱۹۹۹)[۱۷، ۱۸]، مدل ترکیبی Yigit (۱۹۹۹)[۱۹]، مدل دو لایه‌ای و فردی Havenith (۲۰۰۱)[۲۰]، مدل چهار لایه‌ای و ۱۵ بخشی (۶۱ نقطه‌ای) Kang (۲۰۰۱)[۲۱]، مدل ۵ لایه‌ای و هزاران نقطه‌ای دانشگاه برکلی[5] (۲۰۰۱)[۲۲-۲۹]، مدل ۴ لایه‌ای و ۱۶ بخشی (۶۵ نقطه‌ای) Tanabe (۲۰۰۲)[۳۰، ۳۱]، مدل دو لایه‌ای و ۱۶ بخشی (۲۰۰۳)[۳۲]، مدل ۵ لایه‌ای Fengzhi (۲۰۰۵)[۳۳]، مدل تفاضل محدود و فردی Van Marken (۲۰۰۴)[۳۴، ۳۵]، مدل تفاضل محدود و سه بعدی Xu (۲۰۰۶)[۳۶]، مدل تفاضل محدود و سه بعدی AUB[6] (۲۰۰۷)[۳۷، ۳۸]، مدل تطبیقی PMV (۲۰۰۹) [۳۹]، مدل تجمعی Hwang (۲۰۰۹)[۴۰] و رویکرد Orosa (۲۰۱۱)[۴۱] از جمله‌ی مدلهای تحقیقاتی هستند.

همانطور که مشاهده می‌شود، اگرچه مدلهای بسیار متنوعی در کنار مدلهای استاندارد آسایش حرارتی توسعه یافته‌اند، ولی هیچ یک از آنها نتوانسته‌اند تا جایگزین مدلهای استاندارد شوند. این امر به دلیل آن است که بالا رفتن دقت مدلهای آسایش حرارتی به قیمت پیچیده‌تر شدن آنها تمام شده است. در نتیجه،

---

[3] Gagge
[4] Kansas State University
[5] Berkeley University
[6] American University of Beirut

بکارگیری مدلهای دقیق اما پیچیده در استانداردهای آسایش حرارتی که به عنوان راهنمای طراحان و معماران مورد استفاده قرار می‌گیرد، توجیه چندانی ندارد.

۱-۳. طرح مسئله و ضرورت انجام تحقیق

همانطور که اشاره شد، همه‌ی مدلهای موجود برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی بر مبنای موازنه‌ی انرژی برای بدن استوارند. این در حالی است که درک حرارتی افراد از محیط، لزوماً به موازنه‌ی انرژی برای بدن ارتباط ندارد، بلکه احساس حرارتی افراد متأثر از پاسخ حسگرهای دمایی پوست و اعصاب پیرامونی بدن نسبت به شرایط حرارتی محیط است. با این توصیف، مدلهای مبتنی بر موازنه‌ی انرژی با فیزیک احساس حرارتی افراد همخوانی مناسبی ندارند. به همین دلیل است که این مدلها فقط می‌توانند اثرات عوامل مشارکت کننده در معادلات موازنه‌ی انرژی بدن را بر احساس حرارتی افراد مورد مدلسازی قرار دهند. به این عوامل که معادلات موازنه‌ی انرژی سراسر بدن را متأثر می‌کنند، اصطلاحاً عوامل سراسری ایجاد نارضایتی حرارتی گفته می‌شود که این عوامل شامل چهار عامل محیطی (دمای هوا، دمای متوسط تابش، سرعت متوسط جریان هوا و رطوبت نسبی) و سه عامل فردی (نرخ متابولیک، نرخ کار خارجی و میزان پوشش لباس) می‌باشد. در مقابل، عوامل دیگری وجود دارد که اگر چه سبب ایجاد نارضایتی حرارتی در افراد می‌گردد، ولی اثرات این عوامل در معادلات موازنه‌ی انرژی کلی بدن ظاهر نمی‌شود. به این عوامل اصطلاحاً عوامل ایجاد نارضایتی حرارتی موضعی گفته می‌شود. استاندارد آسایش حرارتی اشری[۱]، چهار عامل را به عنوان عوامل نارضایتی حرارتی موضعی معرفی می‌کند: کوران[۷] یا اغتشاشات جریان هوای وزشی، تابش نامتقارن[۸]، گرادیان عمودی دمای هوا[۹] و دمای کف. از آنجایی که مدلهای تحلیلی آسایش حرارتی قادر به مدلسازی تأثیر این عوامل بر میزان نارضایتی حرارتی افراد نیستند، لذا این مدلها به ناچار در کنار معادلات موازنه‌ی انرژی از تعدادی رابطه‌ی تجربی برای ارزیابی میزان نارضایتی حرارتی ناشی از عوامل موضعی استفاده می‌کنند.

---

[7] Draught
[8] Asymmetric Radiation
[9] Vertical Air Temperature Difference