



Quantitative and qualitative evaluation of passive cooling systems in traditional Iranian architecture: investigating thermal efficiency and sustainability¹

Safoura.Rouhi¹ *, Jamaledin Mahdinejad²

1.Researcher, Faculty of Architecture and Urban planning, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2.Professor of Architecture, Faculty of Architecture and Urban planning, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Received Date: 24 July 2024 Accepted Date: 22 November 2024

Abstract

Background and Aim: This research focuses on the examination of Vernacular Passive Cooling Systems (VPCSs) in traditional buildings situated in Iran's hot and dry climates. The study aims to evaluate the effectiveness of these systems in providing thermal comfort without the use of conventional cooling systems. To achieve this goal, the comfort temperature range is determined and compared with the internal temperatures of these buildings. This research involves a review and analysis of studies related to thermal comfort, comfort temperature prediction, and field studies concerning thermal comfort in naturally ventilated indoor spaces. Additionally, it examines validated models for predicting comfort temperature, highlighting their inherent strengths and weaknesses.

Methods and Material: This descriptive-analytical research involves collecting data through library studies and interviews with relevant experts and officials in the studied countries. Data analysis methods include comparative analysis of policies and strategies and case studies of successful countries. Ensuring the accuracy of internal temperature measurements and other climatic variables is crucial, along with the integration of interdisciplinary knowledge from architecture, environmental sciences, and engineering for a comprehensive analysis of passive cooling systems.

Results and Discussion: The results show that passive cooling systems in traditional buildings can provide adequate thermal comfort without conventional cooling systems. These systems utilize natural environmental features and sustainable design to reduce energy consumption and improve environmental sustainability. Optimizing passive cooling techniques can significantly contribute to sustainable development and the preservation of natural resources. A comparative study of active and passive cooling systems also offers a better understanding of the advantages and disadvantages of each.

Key words: Traditional architecture of Iran, native passive cooling systems, thermal comfort, hot and dry climate, comfort temperature.

¹This article is extracted from the post-doctoral thesis titled "Explaining the strategic principles of design based on the recognition of thermal comfort indicators of historical buildings in hot and dry climates (the sample studied in Isfahan province)" by the first author under the guidance of the second author, Faculty of Architecture and Urban Planning, Tarbiat Debir Shahid University Rajaei is from Tehran, Iran.

* **Corresponding Author: Email:** s.rouhi@yahoo.com

Cite this article: Rouhi, S., & Mahdinejad, J. (2024). Quantitative and qualitative evaluation of passive cooling systems in traditional Iranian architecture: investigating thermal efficiency and sustainability. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 5(3), 131-150.



شاپا: ۰۷۶۴-۲۷۸۳

دوره ۵، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۷، پاییز ۱۴۰۳

Journal Homepage <https://www.srds.ir/>
https://www.srds.ir/article_211145.html

ارزیابی کمی و کیفی سیستم‌های سرمایش غیرفعال در معماری سنتی ایران: بررسی کارایی حرارتی و پایداری^۱

صفورا روحی^{۱*}، جمال الدین مهدی نژاد^۲

۱. پژوهشگر پسادکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

۲. استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

چکیده

زمینه و هدف: پژوهش حاضر به بررسی سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی (VPCSS در بناهای سنتی اقلیم‌های گرم و خشک ایران می‌پردازد. این مطالعه تلاش می‌کند تا میزان کارآمدی این سیستم‌ها در فراهم کردن آسایش حرارتی بدون نیاز به استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده متعارف را ارزیابی کند. برای دستیابی به این هدف، دامنه دمای آسایش تعیین شده و با دماهای داخلی این بناها مقایسه می‌شود. این پژوهش به مرور و تحلیل مطالعات مرتبط با آسایش حرارتی، پیش‌بینی دمای آسایش و مطالعات میدانی مرتبط با آسایش حرارتی در فضاهای داخلی تهویه‌شده به‌طور طبیعی می‌پردازد. همچنین مدل‌های معتبر پیش‌بینی دمای آسایش را بررسی کرده و به نقاط قوت و ضعف ذاتی آن‌ها اشاره می‌کند.

روش بررسی: به صورت توصیفی-تحلیلی انجام می‌شود. جمع‌آوری داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با کارشناسان و مسئولین مربوطه در کشورهای مورد مطالعه انجام خواهد شد. روش تحلیل داده‌ها شامل تحلیل مقایسه‌ای سیاست‌ها و استراتژی‌ها و بررسی مطالعات موردی کشورهای موفق است. همچنین، اطمینان از دقت اندازه‌گیری دماهای داخلی و سایر متغیرهای اقلیمی و ادغام دانش میان‌رشته‌ای معماری، علوم محیطی و مهندسی برای تحلیل کامل سیستم‌های سرمایشی غیرفعال ضروری است.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که سیستم‌های سرمایش غیرفعال در ساختمان‌های سنتی قادر به فراهم کردن آسایش حرارتی مناسب بدون استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده متعارف هستند. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های طبیعی محیط و طراحی پایدار، به کاهش مصرف انرژی و بهبود پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کنند. همچنین، بهینه‌سازی تکنیک‌های سرمایش غیرفعال می‌تواند نقش مهمی در توسعه پایدار و حفظ منابع طبیعی داشته باشد. مطالعه تطبیقی سیستم‌های سرمایش فعال و غیرفعال نیز درک بهتری از مزایا و معایب هر یک ارائه می‌دهد.

کلید واژه‌ها: معماری سنتی ایران، سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی، آسایش حرارتی، اقلیم گرم و خشک، دمای آسایش.

^۱ این مقاله مستخرج از رساله پسادکتری تحت عنوان «تعیین اصول راهبردی طراحی مبتنی بر بازشناسی شاخص‌های آسایش حرارتی بناهای تاریخی اقلیم گرم و خشک (نمونه مورد مطالعه استان اصفهان)» نویسنده اول به راهنمایی نویسنده دوم دانشکده معماری و شهرسازی، در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران است.

* نویسنده مسئول: s.rouhi@yahoo.com

ارجاع به این مقاله: روحی، صفورا، مهدی نژاد، جمال الدین. (۱۴۰۳). ارزیابی کمی و کیفی سیستم‌های سرمایش غیرفعال در معماری سنتی ایران: بررسی کارایی حرارتی و پایداری. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۵(۳)، ۱۳۱-۱۵۰.

مقدمه و بیان مسأله

یکی از چالش‌های اصلی این پژوهش، جمع‌آوری داده‌های دقیق و به‌روز درباره عملکرد سیستم‌های سرمایش غیرفعال در ساختمان‌های سنتی است (بهرامی و صادقی، ۲۰۲۳). همچنین، اطمینان از دقت اندازه‌گیری دماهای داخلی و سایر متغیرهای اقلیمی امری حیاتی به شمار می‌آید (اسفندیاری، ۲۰۲۳). تنوع اقلیمی محلی نیز می‌تواند تأثیر زیادی بر عملکرد این سیستم‌ها داشته باشد (حفیظی و غفاری، ۲۰۲۳).

از سوی دیگر، ادغام دانش میان‌رشته‌ای معماری، علوم محیطی و مهندسی برای تحلیل کامل سیستم‌های سرمایشی غیرفعال ضروری است (جعفری و یوسفی، ۲۰۲۳). همچنین، احترام به میراث فرهنگی و حفظ آن در روش‌های پژوهش و توصیه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد (کمالی و نصر، ۲۰۲۳).

با توجه به موارد فوق، این پژوهش نگاهی جامع به مفهوم آسایش حرارتی در ساختمان‌ها دارد و دو رویکرد اصلی برای پیش‌بینی دمای آسایش را معرفی و تحلیل می‌کند. علاوه بر این، مدل‌های معتبرتر پیش‌بینی دمای آسایش، با توجه به زمینه این پژوهش، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند (محمدی و توکلی، ۲۰۲۳). هدف نهایی این پژوهش، تعیین بهترین روش برای محاسبه و پیش‌بینی دمای آسایش و محدوده‌های آن در ساختمان‌های سنتی مجهز به سیستم‌های سرمایش غیرفعال در اقلیم‌های گرم و خشک ایران است (نجفی و زارع، ۲۰۲۳). این امر کلیدی برای ارزیابی کارایی این سیستم‌ها و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد آنها خواهد بود (امیدوار و خدادادی، ۲۰۲۳). بهینه‌سازی تکنیک‌های سرمایش غیرفعال می‌تواند نقش مهمی در توسعه پایدار و حفظ منابع طبیعی داشته باشد (رحیمی و حسینی، ۲۰۲۳). مطالعه تطبیقی سیستم‌های سرمایش فعال و غیرفعال نیز می‌تواند درک بهتری از مزایا و معایب هر یک ارائه دهد (یزدانی و شریعتی، ۲۰۲۳).

مبانی نظری پژوهش

این پژوهش به بررسی سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی (VPCSS) در بناهای سنتی اقلیم‌های گرم و خشک ایران می‌پردازد. مبانی نظری این پژوهش شامل مفاهیم و تئوری‌های مرتبط با آسایش حرارتی، طراحی پایدار، و استفاده از سیستم‌های سرمایشی غیرفعال در معماری سنتی است. در ادامه، به برخی از مهم‌ترین مبانی نظری که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند، اشاره می‌شود:

۱. آسایش حرارتی

آسایش حرارتی به وضعیت ذهنی‌ای گفته می‌شود که در آن فرد از شرایط حرارتی محیط رضایت دارد. این رضایت ذهنی تحت تأثیر عوامل فیزیولوژیکی و روان‌شناختی است و از فردی به فرد دیگر متفاوت است (پیرسال، ۲۰۰۱). آسایش حرارتی در ساختمان‌ها به عنوان یک هدف کلیدی در طراحی محیط‌های داخلی به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک مطرح است (جعفری و یوسفی، ۲۰۲۳).

۲. سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی

سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی (VPCSS) به روش‌هایی اطلاق می‌شود که برای خنک کردن فضاها داخلی بدون نیاز به استفاده از انرژی‌های خارجی طراحی شده‌اند. این سیستم‌ها از ویژگی‌های طبیعی محیط بهره می‌برند و معمولاً در ساختمان‌های سنتی به کار گرفته می‌شوند (حفیظی و غفاری، ۲۰۲۳).

۳. طراحی پایدار

طراحی پایدار به فرآیند طراحی و ساخت سازه‌هایی اشاره دارد که کمترین تأثیر منفی را بر محیط زیست دارند. این نوع طراحی با استفاده از منابع طبیعی، کاهش مصرف انرژی، و بهره‌وری بالا در مصرف منابع همراه است (کمالی و نصر، ۲۰۲۳).

۴. تطبیق‌پذیری و استفاده مجدد از ساختمان‌های سنتی

استفاده مجدد تطبیقی به روش‌هایی اطلاق می‌شود که برای نگهداری و حفظ ساختمان‌های سنتی به کار گرفته می‌شوند. این رویکرد بر اساس اصول پایداری و حفظ میراث فرهنگی استوار است و به بهبود کارایی ساختمان‌های سنتی در برابر شرایط اقلیمی مختلف کمک می‌کند (نجفی و زارع، ۲۰۲۳).

۵. تحلیل و پیش‌بینی دمای آسایش

تحلیل دمای آسایش و پیش‌بینی آن یکی از مهم‌ترین مبانی نظری در این پژوهش است. استفاده از مدل‌های معتبر برای پیش‌بینی دمای آسایش و مقایسه آن با دماهای داخلی بناهای سنتی می‌تواند به ارزیابی کارایی سیستم‌های سرمایش غیرفعال کمک کند (محمدی و توکلی، ۲۰۲۳).

آسایش حرارتی

طبق تعریف دیکشنری نیو آکسفورد زبان انگلیسی، واژه "حرارتی" به معنای "مرتبط با گرما و دما" و "آسایش" به‌عنوان "وضعیت آسانی فیزیکی" تعریف شده است. (Pearsall, 2001) از ترکیب این دو مفهوم، اصطلاح "آسایش حرارتی" شکل می‌گیرد که توسط انجمن مهندسان حرارتی، برودتی و تهویه مطبوع آمریکا به‌عنوان "حالت ذهنی که رضایت از محیط حرارتی را نشان می‌دهد" توصیف شده است. این رضایت ذهنی، بر اساس عواملی همچون ویژگی‌های روان‌شناختی و فیزیولوژیکی افراد استوار بوده و از فردی به فرد دیگر متفاوت است.

بنابراین، تعیین وضعیتی که بتواند رضایت حرارتی همگانی را تامین کند، چالش‌برانگیز است (استاندارد ISO 7730، ۲۰۰۵) همچنین، از آنجایی که آسایش به‌عنوان یک حالت ذهنی پویا و وابسته به عوامل متعدد تعریف می‌شود، نمی‌توان به‌سادگی آن را توصیف کرد. تجربه آسایش حرارتی، اگرچه به شکل عینی قابل اندازه‌گیری است، اما اندازه‌گیری آن به دلیل تاثیرپذیری از پارامترهای متعددی نظیر دما، رطوبت، جریان هوا، کیفیت هوا، روشنایی، نویز، عادات فردی، نوع پوشش، سطح فعالیت، میزان کنترل افراد بر محیط، ترجیحات شخصی و عوامل فرهنگی، فرآیندی پیچیده است. (Sassi, 2006, p.100) الگی (Olgay) در تعریف خود از آسایش حرارتی عنوان می‌کند که «وضعیتی است که در آن فرد متوسط احساس عدم آسایش نمی‌کند. (Olgay, 1992, p.18)» او اشاره می‌کند که در چنین شرایطی، افراد توانسته‌اند نیاز به استفاده از انرژی برای تنظیم وضعیت حرارتی خود نسبت به محیط را به حداقل برسانند.

در عین حال، او تاکید می‌کند که احساس خنثی بودن حرارتی تحت تاثیر عواملی مانند پوشش افراد و نوع فعالیت‌های آنها قرار دارد. به‌طور مشابه، بنزینگر (Benzinger, 1979) و کول (Cole, 2003, p.68) نیز آسایش حرارتی را حالتی توصیف می‌کنند که در آن فرد نیازی به تغییر شرایط محیطی از طریق رفتار ندارد. این تعریف، رویکردی عینی‌تر نسبت به تعریف ASHRAE ارائه می‌دهد (Hensen, 1990)، اما دامنه و تاثیر این نیروهای محرک می‌تواند بین افراد مختلف متفاوت باشد.

گیونی (Givoni) آسایش حرارتی را به‌عنوان «دامنه شرایط اقلیمی که در داخل ساختمان‌ها راحت و قابل قبول در نظر گرفته می‌شود» یا «عدم وجود هر گونه احساس عدم آسایش حرارتی» تعریف کرده است. (Givoni, 1998, p.3) این دامنه به‌طور کلی به عنوان ناحیه آسایش (comfort zone) شناخته می‌شود. (Szokolay, 2008, p.20) به گفته نیکول (Nicol, 2004a, p.95)، آسایش حرارتی به معنای "شرایطی است که نه خیلی گرم و نه خیلی سرد باشد". از مجموع این تعاریف چنین استنباط می‌شود که آسایش حرارتی یک فضا، مستقیماً به شرایط اقلیمی و برداشت ساکنان آن از محیط بستگی دارد. برای تعیین ناحیه آسایش حرارتی در یک فضا، لازم است که هم معیارهای فیزیکی (از جمله عوامل محیطی، نوع پوشش و نرخ متابولیک) و هم معیارهای

ذهنی (احساس و برداشت ساکنان) به دقت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند. بنابراین، آسایش حرارتی یک فرد در یک فضا را می‌توان به‌عنوان ترکیبی از شرایط اقلیمی و عوامل محیطی تعریف کرد که در آن فرد احساس آسایش و رضایت حرارتی می‌کند.

معیارهای فیزیکی: عوامل محیطی، پوشش و نرخ متابولیک

احساس آسایش حرارتی به عوامل مختلفی وابسته است که هم ویژگی‌های محیطی و هم خصوصیات فردی مانند پوشش و فعالیت‌های روزانه را شامل می‌شود. از جمله عوامل محیطی موثر بر آسایش حرارتی می‌توان به دمای هوا، دمای تابشی، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا اشاره کرد. این عوامل به طور مستقیم بر نحوه تعامل بدن با محیط و حس حرارتی افراد تأثیر می‌گذارد (Goulding et al., 1992, p.112; Nicol, 2008). ترکیب مناسب این پارامترها می‌تواند به ایجاد شرایطی منجر شود که در آن فرد احساس رضایت حرارتی کرده و نیازی به تنظیم محیط از طریق رفتارهای جبرانی نداشته باشد.

دمای هوا

هر جسمی به‌طور مداوم گرما را از طریق جابجایی با هوا و از طریق تابش با سطوح اطراف خود مبادله می‌کند (Nicol, 2008). دمای هوا به عنوان یکی از عوامل کلیدی در آسایش حرارتی نقش برجسته‌ای دارد، زیرا میزان و نحوه اتلاف گرمای بدن انسان تا حد زیادی به دمای محیط وابسته است. (Goulding et al., 1992, p.113) اندازه‌گیری دمای هوا معمولاً با دماسنج خشک انجام می‌شود، اما برای به‌دست‌آوردن دقت بیشتر در اندازه‌گیری، لازم است تأثیر تبادل گرمای تابشی به حداقل برسد (Nicol, 2008). یکی از راهکارهای معمول برای کاهش اثر تابش، استفاده از سپر فلزی درخشان است که مؤلفه تابشی را مسدود کرده و امکان تماس مستقیم دماسنج با هوا را حفظ می‌کند. همچنین، می‌توان با کاهش اندازه حسگر به این هدف دست یافت؛ حسگرهای کوچکتر تبادل تابشی کمتری نسبت به جابجایی دارند. به عنوان مثال، ترموکوپل‌های بدون سپر، به دلیل اندازه کوچک‌شان، کمتر تحت تأثیر تابش دماهای پایین قرار می‌گیرند، البته باید از قرارگیری آنها در معرض تابش مستقیم نور خورشید جلوگیری کرد. (Nicol, 2008) در صورتی که دمای تابشی از دمای هوا متفاوت باشد، پروب دما به دمایی میانی بین این دو می‌رسد. اگرچه دمای هوا تنها یکی از پارامترهای مؤثر بر آسایش حرارتی است، اما مطالعات نشان می‌دهد که این پارامتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اغلب به عنوان عامل اصلی شکایات ساکنان در مورد شرایط حرارتی مطرح می‌شود (Hole and Attenburrow, 1966, p.40; Harris, 1991).

دمای تابشی

تابش به واسطه تبادلات حرارتی بین بدن انسان و سطوح اطراف، تأثیر قابل‌توجهی بر احساس آسایش حرارتی دارد. دمای تابشی که فرد احساس می‌کند، به میزان زیادی به دمای سطوح اطراف وابسته است. برای ارزیابی این تأثیر، از دمای تابشی میانگین (MRT) استفاده می‌شود. به‌عنوان دمای یک کره (Nicol, 2008) یا بدنی به شکل انسان (Fanger, 1970) در نقطه‌ای خاص تعریف می‌شود که هیچ تبادل خالصی از تابش با محیط اطراف ندارد. این پارامتر می‌تواند با استفاده از اسکنرهای مادون قرمز اندازه‌گیری شود یا به‌طور محاسباتی بر اساس دمای گلوب، دمای هوا و سرعت هوا به دست آید. (Goulding et al., 1992, p.113) دمای گلوب، دمای یک کره است که اغلب به رنگ سیاه یا خاکستری بوده و حدود ۴۰ میلی‌متر قطر دارد. این دما ترکیبی از دمای تابشی و دمای هوا است و معمولاً در حد واسط بین این دو قرار می‌گیرد. (Nicol, 2008) به دلیل کاربرد گسترده دمای گلوب در نظرسنجی‌های مربوط به آسایش حرارتی، این متغیر تقریباً به یک شاخص استاندارد تبدیل شده است. توصیه می‌شود که از دمای گلوب به‌عنوان معیاری برای ارزیابی تأثیر ترکیبی دمای هوا و تابش بر بدن انسان استفاده شود (Nicol, 2008). با این حال، Nicol و Humphreys (2010) پیشنهاد می‌کنند که برای تحلیل‌های دقیق‌تر در زمینه آسایش حرارتی، دمای عملی (Top) به‌عنوان شاخص بهتری عمل می‌کند. این شاخص به‌طور خاص برای محیط‌های داخلی تعریف شده و جزئیات آن در راهنمای CIBSE

(2006)) به این صورت آمده است: دمای عملی ترکیبی از تأثیر دمای هوا و دمای تابشی بر بدن انسان است که نقش مهمی در ارزیابی شرایط آسایش حرارتی ایفا می‌کند.

$$Tr (^\circ C) \cdot (A-1) + Tai \cdot A = Top$$

که در آن Tai دمای هوای داخلی (C°) و Tr دمای تابشی میانگین (C°) است، A نسبت $\frac{hc}{(hc+hr)}$ و $(A-1)$ نسبت $\frac{hr}{(hc+hr)}$ است؛
 hr و hc ضریب انتقال حرارت سطح بدن پوشیده شده به وسیله همرفت و تابش به ترتیب $(1-W.m^2-K)$ هستند.

در سرعت‌های هوای داخلی برابر یا کمتر از 0.2 متر بر ثانیه، همراه با دماهای معتدل، دمای عملی می‌تواند به عنوان میانگین دمای هوای اتاق و دمای تابشی میانگین در نظر گرفته شود (Goulding et al., 1992, p.114):

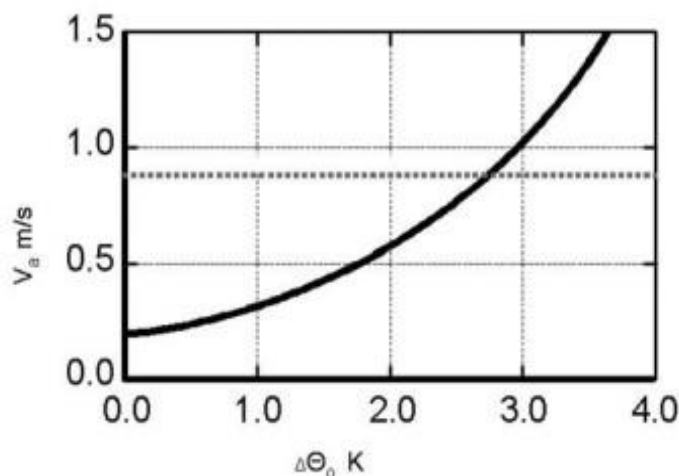
$$Tr \frac{1}{2} + Tai \frac{1}{2} = Top$$

دمای عملی (Top) به‌عنوان شاخصی مهم در ارزیابی شرایط حرارتی محیط، به دمای مرکز یک گلوب رنگ‌شده با قطر ۴۰ میلی‌متر نزدیک است (Humphreys, 1977). این شباهت باعث شده است که دمای گلوب به‌عنوان جایگزینی کاربردی در مواقعی که اندازه‌گیری دمای عملی مورد نیاز است، به کار رود. با توجه به ترکیب تأثیرات دمای هوا و دمای تابشی، دمای گلوب در بسیاری از مطالعات و نظرسنجی‌های مرتبط با آسایش حرارتی به عنوان معیاری استاندارد شناخته می‌شود. استفاده از این شاخص در ارزیابی‌های حرارتی، امکان تحلیل دقیق‌تری از شرایط محیطی را فراهم می‌آورد و به متخصصان کمک می‌کند تا بهینه‌ترین شرایط آسایش حرارتی را در فضاهای داخلی ایجاد کنند.

سرعت هوا

سرعت هوا به‌طور قابل‌توجهی بر میزان حرارتی که از طریق همرفت از بدن انسان از دست می‌رود تأثیر می‌گذارد. حرکت هوا نه‌تنها باعث افزایش میزان حرارت از دست‌رفته از سطح پوست می‌شود، بلکه با نزدیک کردن هوای خشک به پوست و تسهیل فرآیند تبخیر، به افزایش این اتلاف حرارت کمک می‌کند. در شرایطی که دمای هوا کمتر از دمای پوست باشد، جریان هوا نیز به از دست رفتن حرارت از طریق همرفت منجر می‌شود. (Nicol, 1975 and 2008) در اقلیم‌های گرم و خشک، اثر حرکت هوا بر آسایش حرارتی افراد به‌ویژه قابل توجه است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تأثیر معرفی حرکت هوا می‌تواند معادل کاهش دما به میزان بیش از $3^\circ K$ باشد (Nicol, 2008).

این موضوع به‌ویژه در طراحی فضاهای داخلی و استراتژی‌های سرمایش غیرفعال اهمیت دارد، چرا که مدیریت صحیح جریان هوا می‌تواند به بهبود شرایط آسایش حرارتی و کاهش احساس عدم آسایش در شرایط گرم کمک کند (شکل ۴،۱). به‌خوبی نشان می‌دهد که چگونه سرعت هوا می‌تواند به جبران دماهای بالا کمک کند و به این ترتیب، اهمیت آن را در ایجاد محیط‌های راحت و پایدار بیشتر نمایان می‌سازد. دمای عملیاتی به عنوان یک شاخص کلیدی در ارزیابی آسایش حرارتی در محیط‌های داخلی، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. طبق استاندارد (ISO 7730 (2005)، نتایج نشان می‌دهند که در شرایطی که سرعت هوا در یک ساختمان 0.2 متر بر ثانیه یا کمتر باشد، تأثیری بر کاهش دمای عملیاتی مشاهده نمی‌شود. با این حال، زمانی که سرعت هوا به 0.3 متر بر ثانیه افزایش یابد، دمای عملیاتی تا 1.5 درجه کلوین کاهش می‌یابد.



شکل ۴،۱ سرعت هوای مورد نیاز برای جبران دمای عملی؛ خط چین افقی نشان‌دهنده سرعت هوایی است که در بالای آن ممکن است کاغذها جابجا شوند. منبع: استاندارد CEN EN15251.

حرکت هوا و حرارت تابشی به‌طور مستقل بر سطوح آسایش تأثیر می‌گذارند، بدون اینکه دمای هوا را تحت تأثیر قرار دهند. این موضوع همچنین شامل رطوبت نسبی است که به‌عنوان یک عامل مهم در ارزیابی شرایط حرارتی شناخته می‌شود و می‌تواند تأثیر مشابهی بر آسایش حرارتی افراد داشته باشد (Sassi, 2006, p. 101). توجه به این عوامل در طراحی فضاهای داخلی و بهینه‌سازی شرایط حرارتی اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی و افزایش رضایت ساکنان کمک کند.

رطوبت نسبی

رطوبت نسبی یکی از عوامل حیاتی است که تأثیر بسزایی بر نرخ تبخیر از سطح پوست دارد (La Roche, 2012). این پارامتر به‌صورت درصدی بیان می‌شود و نسبت مقدار رطوبت موجود در هوا به حداکثر رطوبتی است که در شرایط اشباع در همان دما و فشار می‌تواند وجود داشته باشد (Goulding et al., 1992, p. 113). به‌طور کلی، رطوبت نسبی بین ۳۰٪ تا ۶۰٪ به‌عنوان محدوده‌ای قابل قبول شناخته می‌شود و تأثیر محدودی بر آسایش حرارتی دارد (La Roche, 2012).

طبق بررسی‌های نیکول (۲۰۰۸)، در بسیاری از نظرسنجی‌های مربوط به آسایش حرارتی، نقش رطوبت نسبی در احساس آسایش افراد نسبتاً اندک است. رطوبت نسبی پایین‌تر اجازه می‌دهد تا عرق بیشتری تبخیر شود و به این ترتیب، پوست را خنک نگه‌دارد. در مقابل، رطوبت نسبی بالاتر (بیش از ۷۰٪) فرآیند تبخیر عرق را دشوارتر می‌کند و می‌تواند منجر به احساس عدم آسایش حرارتی شود. بنابراین، در طراحی فضاهای داخلی و استراتژی‌های مدیریتی برای آسایش حرارتی، توجه به میزان رطوبت نسبی اهمیت بسیاری دارد و می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی و تجربه ساکنان کمک کند.

لباس و نرخ متابولیسم

لباس به‌عنوان عایق حرارتی اطراف بدن عمل کرده و مقاومت حرارتی را در تبادل حرارت بین سطح پوست و محیط خارجی ایجاد می‌کند. این مقاومت حرارتی به واحدهای clo بیان می‌شود؛ به‌طوری که یک clo معادل ۰٫۱۵۵ متر مربع کلون بر وات است (Goulding et al., 1992, p. 112; La Roche, 2012). مقدار یک clo به‌گونه‌ای تعریف شده است که به یک فرد در حالت استراحت اجازه می‌دهد در یک محیط با دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد و با تهویه معمولی (حرکت هوا ۰٫۱ متر بر ثانیه) تعادل حرارتی خود را حفظ کند. نوع لباس پوشیده‌شده، تابعی از شرایط جوی و اجتماعی افراد بوده و به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در ایجاد شرایط

مطلوب در نظر گرفته می‌شود. به‌طور کلی، مقاومت حرارتی لباس‌های معمولی تابستانی حدود 0.5 clo و لباس‌های زمستانی داخلی 1.0 clo است. ثبت نوع لباس در نتایج نظرسنجی‌ها می‌تواند به‌ویژه زمانی که قصد مقایسه با سایر نظرسنجی‌ها یا تعمیم نتایج وجود دارد، مفید باشد. متابولیسم به مجموعه واکنش‌های شیمیایی گفته می‌شود که در بدن برای حفظ دمای داخلی بهینه معادل 36.7 درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد.

(Goulding et al., 1992, p. 112) تولید انرژی متابولیک وابسته به سطح فعالیت فرد است؛ به‌عنوان مثال، فعالیت‌های اداری تقریباً 1.2 met تولید می‌کنند. واحد met به‌عنوان معیار انرژی متابولیک معادل 58 وات بر متر مربع تعریف می‌شود و میانگین مساحت سطح بدن انسان حدود 1.8 متر مربع است. با وجود اینکه اندازه‌گیری نرخ متابولیسم در مطالعات میدانی ضروری نیست، توصیف فعالیت‌های انجام‌شده توسط افراد می‌تواند در مقایسه با پیش‌بینی‌های آسایش در سایر مطالعات ارزشمند باشد. استاندارد (ISO 7730 (2005) فهرستی از نرخ‌های متابولیک و توصیف‌های مربوط به لباس را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در این پژوهش ذکر شد، آسایش حرارتی یک فضا به‌طور مستقیم از ترکیب عوامل فیزیکی آن فضا و احساسات افراد حاضر در آن استنباط می‌شود. در بخش بعدی، روش‌هایی که برای مدیریت و پاسخ به احساسات ذهنی آسایش به‌کار گرفته شده‌اند، مورد بحث قرار خواهند گرفت.

پژوهش در زمینه آسایش حرارتی

از زمان آغاز مطالعات در زمینه آسایش حرارتی در اوایل قرن بیستم، دو رویکرد اصلی به‌عنوان مبنای پژوهش و تحلیل این حوزه توسعه یافته‌اند که بر اساس میزان کنترل بر شرایط محیطی و همچنین تأکید بر جنبه‌های ذهنی یا عینی طراحی شده‌اند (Humphreys و Nicol، ۲۰۰۸). (این دو رویکرد شامل مدل فیزیولوژیکی (مدل تعادل حرارتی) و رویکرد مطالعه میدانی (مدل سازگاری) می‌باشند.

مدل فیزیولوژیکی بر این اساس بنا شده است که انسان‌ها در واکنش به شرایط حرارتی، مشابه یکدیگر هستند و ناحیه آسایش حرارتی برای تمامی افراد یکسان در نظر گرفته می‌شود، بی‌آنکه به شرایط و سازگاری‌های فردی توجه شود. به‌عکس، مدل سازگاری تأکید می‌کند که در فضاهای کنترل‌شده توسط ساکنان، پاسخ حرارتی و ناحیه آسایش به‌طور مستقیم تحت تأثیر آب و هوای خارجی قرار دارد (La Roche، ۲۰۱۲). در هر دو رویکرد، سطح آسایش حرارتی غالباً به‌صورت درصدی از افراد که از شرایط جوی راضی هستند بیان می‌شود و معمولاً از طریق انجام نظرسنجی‌های پرسشنامه‌ای به‌دست می‌آید. این روش‌های تحلیل آسایش حرارتی در بخش‌های بعدی به‌طور دقیق‌تری بررسی خواهند شد و به خوانندگان کمک می‌کنند تا درک بهتری از عوامل مؤثر بر آسایش حرارتی در فضاهای مختلف به‌دست آورند.

مدل آسایش فیزیولوژیکی

مدل آسایش فیزیولوژیکی بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده در اتاق‌های جوی است که در آن‌ها سطوح محیطی، لباس و فعالیت می‌توانند تغییر یافته و به‌طور دقیق کنترل شوند. در این نوع مطالعات، اندازه‌گیری‌های جامعی از محیط و ساکنان آن در "وضعیت پایدار" انجام می‌شود و این داده‌ها به‌عنوان مبنایی برای توسعه استانداردهای فنی که شرایط آسایش حرارتی را تعریف می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Fanger، ۱۹۷۰؛ Nevins و Gagge، ۱۹۷۲).

هدف این مدل تعیین شاخص‌های آسایش با استفاده از یک متغیر فیزیکی به‌عنوان معیاری از ادراک پاسخ‌دهندگان و ارتباط آن با عدم وجود عدم آسایش است. مدل تعادل حرارتی، که به‌طور جامع اثرات عوامل جوی بر احساس حرارتی را مورد بررسی قرار می‌دهد، بهترین نمونه از کار فانگر (۱۹۷۲) به‌شمار می‌آید. روش او بر این فرض استوار است که شش عامل بر ادراک حرارتی تأثیر می‌گذارند: دمای هوا، دمای تابشی متوسط، رطوبت، سرعت هوا، سطح لباس و نرخ متابولیسم. این مدل شرایطی را تعریف می‌کند که در آن بیشتر افراد احتمالاً برای هر سطح فعالیت و لباسی مشخص راحت خواهند بود. با کنترل دقیق تمام شش عامل فوق، نتیجه‌گیری‌هایی حاصل می‌شود که به‌طور استاندارد، شرایط آسایش حرارتی را تعریف می‌کند.

جدول ۴،۱ مقیاس‌های آسایش ASHRAE و Bedford

ASHRAE	رأی آسایش	بدفورد گرم
داغ	+۳	خیلی گرم
گرم	+۲	آسایش گرم
کمی گرم	+۱	آسایش خنک
خنثی	۰	آسایش نه گرم و نه خنک
کمی سرد	-۱	خنک
سرد	-۲	خیلی خنک
سرد	-۳	خیلی خنک

منبع: اقتباس شده از (ASHRAE2004 و Bedford (1936).

اتاق‌های اقلیمی، فضایی هستند که در آن فانگر آزمایش‌های خود را بر روی شرکت‌کنندگان از دانمارک و ایالات متحده انجام داد. او اتاق را تنظیم کرد تا زمانی که شرکت‌کنندگان نتوانند تشخیص دهند که آیا تمایل به افزایش یا کاهش دما دارند. سپس او احساس آسایش شرکت‌کنندگان را با استفاده از مقیاس آسایش‌هفت‌نقطه‌ای ASHRAE ارزیابی کرد، که از سرد (-۳) تا گرم (+۳) متغیر بود و حالت خنثی در ۰ قرار داشت (به جدول ۴،۱ مراجعه کنید). فانگر آسایش را به‌عنوان شرایطی تعریف کرد که در آن رأی‌های آسایش حرارتی شرکت‌کنندگان بین «کمی سرد» (-۱) و «کمی گرم» (+۱) قرار می‌گیرد. شرایط واقعی اندازه‌گیری شده و شاخص آسایش درک شده ترکیب شدند تا میانگین رأی پیش‌بینی‌شده (PMV) تشکیل شود که نمایانگر پاسخ میانگین گروه بزرگی از شرکت‌کنندگان است. فانگر همچنین متوجه شد که همیشه برخی افراد از محیط‌های داخلی ناراضی هستند و رأی آن‌ها در خارج از سه نقطه مرکزی مقیاس ASHRAE قرار دارد (حتی در دماهای راحت محاسبه‌شده که اکثریت احساس آسایش می‌کردند). این مسئله مبنای درصد پیش‌بینی‌شده ناراضی (PPD) را تشکیل داد. فانگر پیشنهاد کرد که حتی در شرایط بهینه (هر زمان که PMV خنثی باشد) حداقل تعداد PPD برابر با ۵٪ است (فانگر، ۱۹۷۲).

داده‌های ذهنی که مدل فانگر بر اساس آن بنا شده، به‌طور انحصاری از مطالعات اتاق‌های اقلیمی به‌دست آمده و در شرایطی که به حالت پایدار رسیده است (نیکول، ۲۰۰۸). با این حال، معادله آسایش فانگر با تعدادی از مطالعات احساسات حرارتی افراد در خانه‌ها یا دفاترشان در تضاد است. این معادله به‌طور انحصاری بر تغییرات در شش متغیر اساسی تمرکز دارد و زمینه فرهنگی و توانایی افراد برای سازگاری با محیط حرارتی خود را نادیده می‌گیرد (دی دیر، ۱۹۹۴). همچنین، رفتار را به‌عنوان یک عامل مهم در آسایش در نظر نمی‌گیرد (فروزن‌مهر، ۲۰۱۰). مطالعات میدانی که بعداً در شرایط واقعی انجام شدند، مانند پژوهش تانابه (۱۹۸۸)، بررسی هامفری (۱۹۹۲)، پژوهش اولسند (۱۹۹۴) و بررسی هامفری و نیکول (۲۰۰۲)، معادله فانگر را تأیید نکرده‌اند (گیونی، ۱۹۹۸). آن‌ها نشان داده‌اند که میانگین مقادیر PMV با میانگین رأی آسایش متفاوت است. با این وجود، مزایای استفاده از اتاق‌های اقلیمی کاملاً مشهود است.

به‌گفته مک‌این‌تایر (۱۹۸۲)، مطالعات اتاق‌های اقلیمی برای سال‌ها در پژوهش‌های آسایش حرارتی مرکزی بوده‌اند. این مطالعات می‌توانند بسیار دقیق باشند و امکان آزمایش‌های کنترل‌شده را فراهم کنند (هامفری و نیکول، ۲۰۰۸). آن‌ها توانایی تولید شرایط محیطی مطلوب و کنترل متغیرهای ناخواسته را دارند که ممکن است در غیر این صورت بر نتایج تأثیر بگذارند. با اینکه این مطالعات در تولید شاخص‌های آسایش مفید هستند، اما برخی دام‌ها نیز با این نوع مطالعات همراه است که می‌توان آن‌ها را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

اتاق‌های اقلیمی دارای محیطی مصنوعی هستند و با شرایط واقعی متفاوتند؛ موضوعات نمی‌توانند به‌طور فعال برای فعالیت و لباس‌های خود مانند زندگی روزمره خود تنظیماتی انجام دهند. موضوعات داوطلبانی هستند که برای مدت کوتاهی در شرایط

آزمایشگاهی قرار می‌گیرند و بنابراین احتمالاً همان تنوع در پاسخ‌ها را در شرایط واقعی نشان نمی‌دهند (هانا، ۱۹۹۰، ص. ۱۱۱). این آزمایش‌ها نیاز به اتاق‌های اقلیمی پیچیده و فنی دارند که همیشه در برخی از کشورهای در حال توسعه در دسترس نیستند (هانا، ۱۹۹۰، ص. ۱۱۱)، به‌ویژه در زمینه‌های سنتی. با عدم توانایی در در نظر گرفتن عوامل اجتماعی و فرهنگی (نیکول، ۲۰۰۸)، مطالعات آزمایشگاهی به نظر می‌رسد که در تولید شاخص‌های آسایش دقیق ناکام هستند و بنابراین باید با مطالعات میدانی بررسی شوند (هامفری، ۱۹۷۶).

مطالعات میدانی (نظرسنجی‌های میدانی) و آسایش‌سازگار

در کنار مطالعات آزمایشگاهی ذکر شده، جریان مداومی از مطالعات میدانی آسایش حرارتی وجود دارد که هدف آن اندازه‌گیری آسایش حرارتی در دنیای واقعی است.

این مطالعات میدانی در تنظیم طبیعی زندگی روزمره (هامفری و نیکول، ۲۰۰۸، ص. ۱) انجام می‌شوند و نه در اتاق‌های آزمایشی. این مطالعات بیشتر به شرایط زندگی یا کاری معمولی مربوط می‌شوند. نه شرایط محیطی و نه انتخاب‌های لباس و فعالیت کنترل می‌شوند، جز توسط خود موضوعات. همچنین، محیط‌ها احتمالاً «کاملاً معمولی از موجودی ساختمان‌های معمولی» (هامفری و نیکول، ۲۰۰۸، ص. ۱) هستند. به‌گفته نیکول و هامفری (۲۰۰۲)، در نظرسنجی میدانی، محقق داده‌هایی درباره محیط حرارتی و پاسخ حرارتی همزمان موضوعات که در حال انجام زندگی روزمره خود هستند جمع‌آوری می‌کند. پاسخ حرارتی موضوعات معمولاً با پرسیدن رأی آسایش آن‌ها بر روی مقیاس توصیفی مانند مقیاس Bedford (یا ASHRAE جدول ۴،۱) اندازه‌گیری می‌شود. محقق با استفاده از روش‌های آماری داده‌ها را با استفاده از تنوع طبیعی شرایط حرارتی تجزیه و تحلیل می‌کند.

هدف این است که دما یا ترکیب متغیرهای حرارتی را که اکثر موضوعات آن را راحت یا خنثی در نظر می‌گیرند، پیدا کند (نیکول و هامفری، ۲۰۰۲). نتایج برای پیش‌بینی دماهای راحت یا شرایطی که در شرایط مشابه در جای دیگر قابل قبول خواهد بود، استفاده می‌شود. کار معروف اولیه Bedford (1936) نمونه‌ای از این رویکرد است. با این حال، این نوع مطالعه معایب و دام‌هایی دارد. به‌گفته هامفری و نیکول (۲۰۰۸، ص. ۱)، اندازه‌گیری‌های جامع از افراد یا محیط آن‌ها بسیار مزاحم خواهد بود. مطالعه میدانی از آزمایش‌های کنترل‌شده استفاده نمی‌کند؛ شرایط محیطی به‌طور ذاتی متغیر و دشوار برای اندازه‌گیری دقیق هستند و خطاها در داده‌های ورودی باید به‌عنوان تعصب سیستماتیک در ضریب رگرسیون محسوب شوند و خطای تصادفی پیش‌بینی را افزایش دهند (هامفری و نیکول، ۲۰۰۰). علاوه بر این، به‌دلیل اینکه نتایج یک نظرسنجی معمولاً به داده‌های نظرسنجی دیگر، حتی در شرایط مشابه، قابل تعمیم نیستند، دشوار است که از تحلیل‌های آماری تعمیم‌پذیری داشته باشیم (نیکول و هامفری، ۲۰۰۲).

مرور مطالعات میدانی

برخی از مطالعات میدانی در زیر مرور شده‌اند، ابتدا برای تعیین پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر آسایش حرارتی دارند و سپس برای مقایسه تغییرات دمای آسایش در مطالعات میدانی مختلف. نیکول (۱۹۷۲؛ ۱۹۷۵) داده‌هایی که توسط چارلز وب در بغداد (عراق) و روکی (هند) از ژوئن تا ژوئیه ۱۹۶۲ جمع‌آوری شده بودند را تجزیه و تحلیل کرد. این داده‌ها شامل دمای هوا، دمای گوی، رطوبت نسبی، سرعت هوا و احساسات شرکت‌کنندگان بر اساس مقیاس هفت‌نقطه‌ای بدفورد بودند. شرکت‌کنندگان در ساختمان‌های مدرن با دیوارهای بلوک سیمانی زندگی و کار می‌کردند. نیکول دریافت که دمای آسایش برای شرکت‌کنندگان عراقی و هندی حدود ۳۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. او همچنین متوجه شد که وقتی دما بالای ۳۶ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، عدم آسایش حرارتی تا ۲۰ درصد و هنگامی که دمای گوی بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد باشد تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که شرکت‌کنندگان به آب‌وهوای گرم عادت کرده بودند و در دماهایی که در مدل‌های توسعه‌یافته برای اقلیم‌های معتدل، بسیار گرم تلقی می‌شوند، احساس آسایش می‌کردند. با این حال، منطقه آسایش تعیین‌شده توسط این مطالعه ممکن است اکنون غیرقابل قبول باشد، زیرا این داده‌ها در سال ۱۹۶۲ جمع‌آوری شده‌اند و از آن زمان تغییرات بسیاری در نگرش‌ها، سبک‌های زندگی و انتظارات مردم رخ

داده است (هانا، ۱۹۹۰، ص. ۱۱۷). افزایش وابستگی به تجهیزات مکانیکی برای تغییر آب‌وهوای داخلی ساختمان‌ها در مناطق گرم و افزایش استانداردهای زندگی ممکن است باعث شود مردم مناطق آسایش‌پایین‌تر از ۳۲ درجه سانتی‌گراد را ترجیح دهند (هانا، ۱۹۹۰، ص. ۱۱۷). در این مطالعات، دماهای هوا و گوی به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای شناساشده توسط فانگر (۱۹۷۰) شناخته شدند. وولارد (۱۹۸۰) در سال ۱۹۷۶ یک مطالعه آسایش بر روی ساکنان خانه‌های با تهویه طبیعی در جزایر سلیمان از ژوئن تا اوت انجام داد. دماهای هوا و گوی، رطوبت نسبی و سرعت هوا اندازه‌گیری شدند. دمای خنثی محاسبه‌شده از تجزیه و تحلیل رگرسیون حدود ۲۷٫۵ درجه سانتی‌گراد بود و محدوده خنثی‌بودن ۴٫۵ درجه کلون داشت. وولارد دریافت که دمای هوا شاخص حرارتی مناسبی بود. او متوجه شد که نیازهای آسایش‌ساکنان جزایر سلیمان تفاوت زیادی با ساکنان سایر مناطق گرم و مرطوب نداشت. شارما و علی (۱۹۸۶) آسایش حرارتی افراد هندی را بررسی کردند تا شاخص تابستانی گرمسیری (جدولی که شامل محدوده‌های متغیرهای اقلیمی لازم برای آسایش است) را برای استفاده در محیط‌های داخلی و بیرونی ایجاد کنند. دمای مطلوب داخلی و خارجی که اکثر شرکت‌کنندگان در آن احساس آسایش داشتند ۲۷٫۵ درجه سانتی‌گراد بود. ماتریس همبستگی نشان داد که دمای هوا و گوی هر دو به‌شدت با احساس حرارتی همبستگی داشتند، در حالی که فشار بخار آب و سرعت هوا تأثیر معناداری بر احساس حرارتی نداشتند؛ این یافته‌ها با نتایج نیکول (۱۹۷۵) در این زمینه همخوانی داشت.

مالیک (۱۹۹۶) آسایش حرارتی افراد ساکن در خانه‌های شهری بنگلادش را بررسی کرد. نتایج مطالعه او نشان داد که دمای خنثی ۲۸ درجه سانتی‌گراد بود و شرکت‌کنندگان با دماهای بین ۲۴ درجه سانتی‌گراد تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بالا تا ۹۵ درصد با استفاده از روش‌های ساده‌ای مانند سطوح خنک و پنکه‌های سقفی احساس آسایش می‌کردند. مالاما (۱۹۹۷) مطالعه دیگری را در مورد آسایش حرارتی در زامبیا در طول پژوهش‌های گرم و خنک گزارش داد. نتایج نشان داد که دمای خنثی در پژوهش خنک ۲۵٫۲ درجه سانتی‌گراد و در پژوهش گرم ۲۶ درجه سانتی‌گراد بود. این یافته نشان داد که در پژوهش گرم، شرکت‌کنندگان از کنترل محیط (مانند بستن پنجره‌ها و درها) به‌عنوان روشی برای تنظیم محیط حرارتی خود استفاده می‌کردند. مالاما نشان داد که دمای گوی دقیق‌ترین پیش‌بینی‌کننده آسایش حرارتی بود، زیرا تأثیر بیشتری نسبت به سرعت هوا و رطوبت نسبی داشت.

اوسلند (۱۹۹۴) احساس حرارتی ساکنان خانه‌های جدید در بریتانیا را با استفاده از مقیاس آسایش‌نقطه‌ای ASHRAE بررسی کرد. اندازه‌گیری‌ها در این پژوهش نشان داد که میانگین دمای داخلی و خارجی به ترتیب در زمستان ۱۹٫۲ درجه سانتی‌گراد و ۱۲٫۱ درجه سانتی‌گراد و در تابستان ۲۱٫۷ درجه سانتی‌گراد و ۱۹٫۲ درجه سانتی‌گراد بود. دمای خنثی از تحلیل رگرسیون خطی برای زمستان ۱۷ درجه سانتی‌گراد و برای تابستان ۱۸٫۹ درجه سانتی‌گراد بود. به‌طور متوسط، پاسخ‌دهندگان خود را در زمستان گرم‌تر از تابستان ارزیابی کردند، حتی با وجود اینکه دمای اتاق در زمستان پایین‌تر بود. اوسلند معتقد بود که این احساسات حرارتی با دمای پایین‌تر خارجی و تفاوت بیشتر بین دماهای داخلی و خارجی در زمستان مرتبط بود. رابطه قوی بین دمای آسایش و دمای داخلی/خارجی در مطالعات بعدی بیشتر مشخص شده است. هامفری (۱۹۷۶) ۳۶ مطالعه میدانی را مرور کرد که با روش‌های مختلف و در شرایط محیطی متنوعی انجام شده بودند، از تابستان در عراق تا زمستان در سوئد. او از تحلیل رگرسیون استفاده کرد و معادله زیر را برای پیش‌بینی دمای خنثی از دمای متوسط داخلی ارائه کرد:

$$T_n = 2.56 + 0.831T \quad (1)$$

دمای خنثی (T_n) دمای هوایی است که در آن یک گروه بزرگ از افراد احساس گرما یا سرما نمی‌کنند و بدن تحت کمترین فشار حرارتی قرار دارد. هامفری در مطالعه‌ای دیگر (۱۹۷۸) نشان داد که دمای خنثی یا آسایش در ساختمان‌های دارای تهویه طبیعی به شدت با دماهای متوسط بیرونی مرتبط است و مطابق با این معادله تعیین می‌شود:

$$T_n = 11.9 + 0.534T_o \quad (2)$$

دمای خنثی (T_n) دمایی است که در آن افراد احساس گرما یا سرما نمی‌کنند و T_o دمای متوسط ماهانه بیرون است، یعنی $1/2$ (میانگین حداکثر ماهانه + میانگین حداقل ماهانه). آئولوسیئمز و دی دیر (۱۹۸۶) با استفاده از یک پایگاه داده بزرگ‌تر نیز رابطه‌ای بین دمای خنثی در ساختمان‌های بدون تهویه مطبوع و دمای متوسط بیرون یافتند. این رابطه برای دماهای بین 18°C و 28°C معتبر بود و در معادله زیر بیان شده است: (Auliciems and de Dear, 1986)

$$T_c = 17.6 + 0.31T_o \quad (3)$$

دمای آسایش (T_c) دمایی است که افراد در آن احساس آسایش می‌کنند و T_o دمای متوسط ماهانه بیرون است. نیکول و همکاران (۱۹۹۴) یک مطالعه طولی از آسایش حرارتی در پنج منطقه اقلیمی مختلف در پاکستان انجام دادند. پژوهش‌ات نشان داد که دماهای آسایش در تابستان از 26.7°C تا 29.9°C متغیر بود، در حالی که در زمستان این دما از 8.19°C تا 25.2°C تغییر می‌کرد. دمایی که افراد در ساختمان‌های بدون تهویه مطبوع در تابستان راحت می‌دانند از معادله زیر پیش‌بینی شده است:

$$T_c = 12.1 + 0.534 \quad (4)$$

دمای آسایش (T_c) دمایی است که افراد احساس آسایش می‌کنند و T_o دمای متوسط ماهانه بیرون است. نیکول و همکاران (۱۹۹۹) مطالعه‌ای دیگر درباره آسایش حرارتی در پاکستان انجام دادند. این مطالعه شامل یک بررسی طولی در تابستان (جولای ۱۹۹۳) و زمستان (ژانویه ۱۹۹۴)، و یک مطالعه عرضی با نظرسنجی‌های ماهانه طی یک سال کامل (آوریل ۱۹۹۵ تا جولای ۱۹۹۶) بود. دمایی که افراد در آن احساس آسایش می‌کنند بر اساس این معادلات پیش‌بینی شده است که از نظرسنجی‌های طولی و عرضی به دست آمده‌اند:

$$T_c = 11.7 + 0.55T_g \quad (5) \quad T_c = 18.0 + 0.33T_o \quad (6) \quad \text{طولی:}$$

$$T_c = 11.5 + 0.53T_g \quad (7) \quad \text{عرضی:}$$

که در آن T_c دمای آسایش، T_g دمای گوی و T_o دمای میانگین ماهانه فضای بیرونی است. همچنین پیشنهاد شد که دمای طراحی فضای داخلی برای ساختمان‌های تجاری در پاکستان باید بر اساس فرمول زیر تنظیم شود:

$$T_c = 18.5 + 0.36T_o \quad (8)$$

که در آن T_c دمای آسایش، T_g دمای گوی و T_o دمای میانگین ماهانه فضای بیرونی است. همچنین پیشنهاد شد که دمای طراحی فضای داخلی برای ساختمان‌های تجاری در پاکستان باید مطابق فرمول زیر تنظیم شود:

$$T_d = 18.5 + 0.36T_{olt} \quad (9)$$

که در آن T_d دمای داخلی طراحی شده (یا دمای نقطه تنظیم) و T_{olt} دمای میانگین ماهانه بیرونی است که از سوابق هواشناسی به دست آمده است. هیمفریس و نیکول (۲۰۰۰) نشان دادند که رابطه بین دمای آسایش T_c و دمای بیرونی T_o برای ساختمان‌های آزاد (بدون تهویه مطبوع) به طرز قابل توجهی پایدار است و داده‌های ارائه شده در دهه ۱۹۷۰ توسط هیمفریس (۱۹۷۸) و پایگاه داده ASHRAE 1998 (دهه دیر، ۱۹۹۸) را شامل می‌شود. معادله دمای آسایش تقریباً به صورت زیر است ($T_c = 13.5 + 0.54T_o$) که در این حالت T_o میانگین دمای بیرونی ماهانه است. در یک مطالعه جدید و مرتبط‌تر، حیدری (۲۰۰۰) به بررسی آسایش حرارتی در بناهای تهویه طبیعی در ایران، با تأکید ویژه بر ایلام، پرداخت. او نظرسنجی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را در پژوهش‌های گرم و سرد انجام داد. دمای خنثی برای پژوهش گرم در مطالعات بلندمدت 26.7°C و در مطالعات کوتاه‌مدت 28.4°C به دست آمد. نتایج نشان‌دهنده رابطه خوبی بین دمای خنثی و دماهای میانگین داخلی/بیرونی بود. دمای آسایش داخلی (T_c) که به میانگین دمای بیرونی (T_o) وابسته است، می‌توانست از معادله زیر به دست آید:

$$T_c = 17.3 + 0.36T_o \quad (10)$$

یافته‌های این مطالعه نشان داد که مردم ایلام می‌توانند در دماهای بالاتر از دماهای پیشنهادی استانداردهای بین‌المللی مانند ISO 7730 به آسایش دست یابند. حیدری (۲۰۰۶) به پژوهش دیگری در زمینه آسایش حرارتی اشاره می‌کند که از ۲۶ ژوئن تا ۱۴ ژوئیه ۲۰۰۲ در شهر یزد (اقلیم گرم و خشک ایران) انجام شد. در این پژوهش، بیش از ۴۲۰ نفر در ۳۲ خانه حیاط‌دار و ۳۹ واحد آپارتمانی (همه به‌طور طبیعی تهویه شده) به پرسش‌نامه‌های آسایش حرارتی پاسخ دادند. دمای خنثی در پژوهش گرم برای افراد داخل خانه 28.4°C بود که با دماهای خنثی به‌دست آمده از سایر مطالعات میدانی در ایران (حیدری، ۲۰۰۰) مقایسه‌پذیر است. گریفیتس (۱۹۹۰) و نیکول و راف (۱۹۹۶) نیز ارتباطات مشابهی بین دمای خنثی و دمای میانگین بیرونی پیدا کردند. به‌طور کلی، این معادلات زمانی معتبر هستند که دمای بیرونی بین 17°C و 30°C باشد (لا روش، ۲۰۱۲). دِ دیار و برگر (۱۹۹۸) رابطه بین آسایش حرارتی و دماهای داخلی و بیرونی را در پایگاه داده‌ای متشکل از ۲۱،۰۰۰ مشاهده از ۱۶۰ ساختمان در سراسر جهان بررسی کردند. آنها دریافتند که ساکنان ساختمان‌های با تهویه طبیعی نسبت به دماهای به‌طور قابل توجهی وسیع‌تری نسبت به ساکنان ساختمان‌های مجهز به گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع، تحمل دارند. آنها این موضوع را به ترکیبی از تنظیمات رفتاری و سازگاری‌های فیزیولوژیکی نسبت دادند.

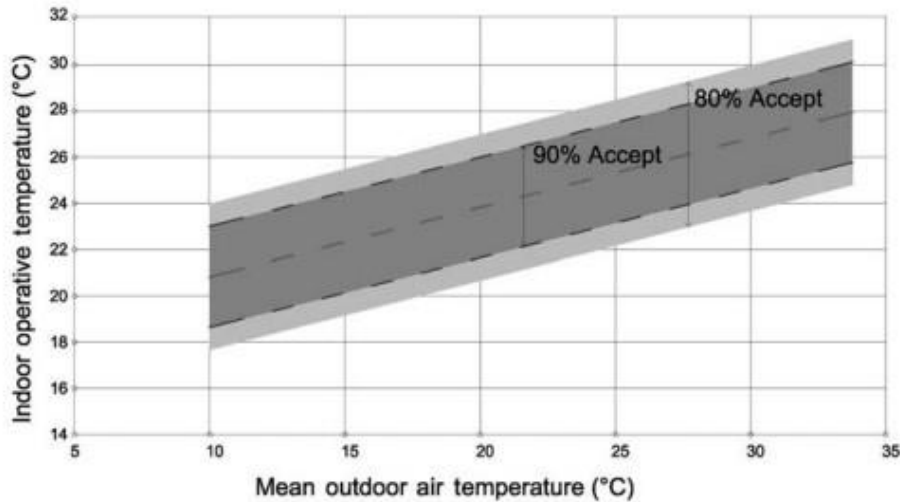
نتایج این پژوهش در بازنگری سال ۲۰۰۰ استاندارد آسایش (ASHRAE 55 (2004) گنجانده شد که شامل نموداری است که دماهای خنثی را در ساختمان‌های با تهویه طبیعی با دماهای بیرونی غالب مرتبط می‌سازد. معادله تطبیقی که زیرساخت استاندارد ASHRAE را تشکیل می‌دهد، به‌صورت زیر است:

$$T_{comf} = 17.8 + 0.31T_{om} \quad (11)$$

جایی T_{comf} که دمای آسایش و دمای میانگین T_{om} ماهانه هوای آزاد است. این معادله نشان می‌دهد که دمای مورد پسند در داخل یک ساختمان با تهویه طبیعی به‌طور تقریبی یک درجه به ازای هر سه درجه افزایش در دمای میانگین ماهانه هوای آزاد افزایش می‌یابد. این معادله فقط زمانی معتبر است که دمای میانگین ماهانه بیرونی بین 10°C و 33.5°C باشد و محدوده آسایش بین 2°C بالاتر و پایین‌تر از دمای خنثی قرار گیرد (شکل ۴،۲). اجرای مدل تطبیقی در استاندارد آسایش ASHRAE از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا این مدل می‌پذیرد که ساختمان‌های با تهویه طبیعی، که در آنها ساکنان کنترل بیشتری بر محیط حرارتی خود دارند، دارای محدوده آسایش وسیع‌تری هستند (لا روش، ۲۰۱۲). این امر به ترویج اجرای سیستم‌های خنک‌کنندگی غیرمستقیم در ساختمان‌ها کمک می‌کند و نقش کاربر را در کنترل محیط حرارتی برجسته می‌سازد.

$$T_{comf} = 18.8 + 0.33T_{rm} \quad (12)$$

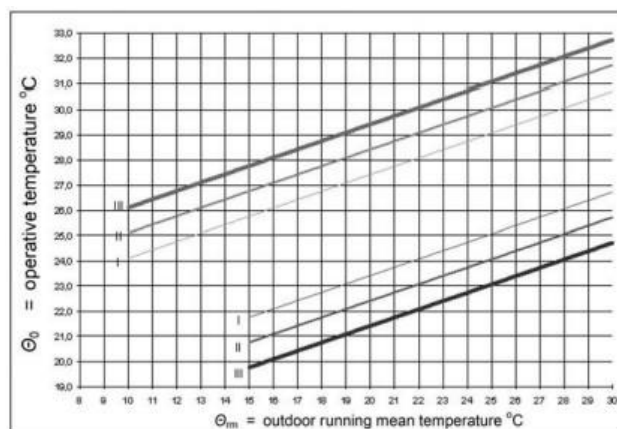
استاندارد اروپایی برای ساختمان‌های با تهویه طبیعی (EN15251) همچنین نسخه‌ای از روش تطبیقی توسعه یافته توسط نیکول و همفری (۲۰۱۰) را در بر می‌گیرد. تحلیل داده‌های SCATS (پروژه اتحادیه اروپا: کنترل‌های هوشمند و آسایش حرارتی) برای ساختمان‌های آزاد (نیکول و همفری، ۲۰۱۰) رابطه خطی بین دمای خنثی و دمای بیرونی را تأیید می‌کند و معادله زیر را تولید می‌کند:



شکل ۴،۲ دمای مورد پسند در داخل یک ساختمان با تهویه طبیعی را نشان می‌دهد.

که در آن T_{comf} دمای آسایش T_{om} میانگین متحرک دمای هوای روزانه است. رویکرد تطبیقی فرض می‌کند که دمای خنثی به تاریخچه حرارتی یک فرد مرتبط است و تجربیات اخیر تأثیر بیشتری دارند. این موضوع باعث می‌شود که وزن‌دهی نمایی به عنوان روشی مناسب برای در نظر گرفتن دماهای گذشته به کار رود. (Nicol and Humphreys, 2010) برای محاسبه مقدار برای هر روز، می‌توان از مقدار میانگین متحرک و میانگین دمای هوای روز قبل استفاده کرد.
 $(\text{respectively } Trm-1 \text{ and } Tod-1): Trm = (1-a) Tod-1 + a Trm-1$

جایی که یک دوره طولانی از روزها در دسترس نیست، استاندارد CEN EN15251 (2007) یک روش محاسبه تقریبی را با استفاده از دماهای میانگین برای هفت روز گذشته ارائه می‌دهد (با مقدار $a=0.8$):
 $Trm = (Tod-1 + 0.8Tod-2 + 0.6Tod-3 + 0.5Tod-4 + 0.4Tod-5 + 0.3Tod-6 + 0.2Tod-7)/3.8$
 شکل ۴،۳ مقادیر طراحی برای دمای عملیاتی داخلی ساختمان‌ها بدون سیستم‌های خنک‌کننده مکانیکی را به عنوان تابعی از میانگین متحرک وزنی نمایی دمای هوای خارج نشان می‌دهد. معادله‌ها و نمودارهای پیشنهادی برای این استاندارد مشابه، اما نه کاملاً یکسان با آنچه در استاندارد ASHRAE ارائه شده، هستند. طبق گفته لا روش (La Roche, 2012)، تفاوت‌های بین این دو معادله احتمالاً نتیجه چندین اختلاف در پژوهش‌های است که بر روی آن‌ها انجام شده است. پایگاه‌های داده مورد استفاده نیز متفاوت هستند.



شکل ۴،۳ دماهای عملیاتی داخلی طراحی شده برای ساختمان‌ها بدون خنک‌کننده‌های مکانیکی منبع: استاندارد CEN EN15251. دسته III نشان‌دهنده یک سطح قابل قبول و متوسط از انتظارات است و می‌تواند برای ساختمان‌های موجود استفاده شود.

به دلیل استاندارد ASHRAE 55-2004 بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در پایگاه داده جهانی ASHRAE توسط دی‌دیر و بریجر (۱۹۹۸) طراحی شده است، در حالی که استاندارد EN15251 به داده‌های پروژه SCATs اروپا که به‌تازگی انجام شده، اتکا دارد. همچنین، استاندارد ASHRAE فقط به ساختمان‌های دارای تهویه طبیعی مربوط می‌شود، در حالی که EN15251 برای تمامی ساختمان‌ها در حالت آزاد و بدون کنترل به کار می‌رود و از این رو شامل تعداد بیشتری از ساختمان‌ها می‌شود. معادله ASHRAE از دمای میانگین ماهانه هوای بیرون استفاده می‌کند، در حالی که EN15251 به میانگین متحرک دما توجه دارد. دماهایی که در آن آسایش تجربه می‌شود، به‌عنوان ناحیه آسایش (دمایی) تعریف می‌شود (کنیا، ۱۹۸۰، ص. ۲۷). پس از محاسبه دمای بهینه آسایش، می‌توان ناحیه آسایش را 2°K تا 3°K در هر طرف این دما به‌عنوان قابل قبول در نظر گرفت (نیکول، ۲۰۰۴ ب). در شرایط گرم، اگر ساکنان به فن‌هایی دسترسی داشته باشند، می‌توان 2°K دیگر به دمای آسایش پیش‌بینی شده اضافه کرد (نیکول، ۲۰۰۴ ب). جدول ۴،۲ داده‌های کلیدی از مطالعات و پژوهش‌های میدانی مرتبط با آسایش حرارتی را خلاصه می‌کند. مطالعات موجود در جدول ۴،۲ نشان می‌دهد که دماهای هوای داخلی و گلوب، مهم‌ترین شاخص‌ها در تعیین آسایش حرارتی به شمار می‌روند. به‌علاوه، دماهای آسایش (یا خنثی) که در پژوهش‌های میدانی مختلف به‌دست آمده، به‌طور قابل توجهی با یکدیگر متفاوت است و اغلب از دماهایی که در مطالعات آزمایشگاهی محاسبه شده‌اند، فاصله دارد. این پدیده‌ها نیاز به بازنگری در درک آسایش حرارتی را به‌عنوان بخشی از یک سیستم خودتنظیم نشان می‌دهد که در آن رفتار و فیزیولوژی افراد نیز نقش مهمی در تعریف آسایش ایفا می‌کند (نیکول، ۲۰۰۸).

مدل سازگاری

مطالعات میدانی آسایش حرارتی پایه‌های توسعه نظریه سازگاری را فراهم کرده است که تأثیر مهمی بر درک دمای آسایش (خنثی) دارد. در اوایل دهه ۱۹۷۰، نیکول و همفریس (۱۹۷۲) نظریه آسایش‌سازگاری را معرفی کردند. این نظریه بیان می‌کند که اگر ساکنان ساختمان اجازه داشته باشند تا به محیط خود سازگار شوند، چه از طریق تنظیم لباس، کنترل‌ها یا مکان، آنگاه می‌توانند شرایط محیطی خارج از آنچه که توسط نظریه‌های حالت پایدار و استانداردهای فعلی آسایش حرارتی توصیه شده است، تحمل کنند (مک‌کارتی و نیکول، ۲۰۰۲).

همفریس و نیکول در انتشار «آسایش حرارتی سازگاری در ساختمان‌ها» (۲۰۰۸) بیان می‌کنند که رویکرد سازگاری به آسایش حرارتی این را شناسایی می‌کند که مردم در برابر محیط حرارتی خود منفعل نیستند. برعکس، آن‌ها به‌طور فعال آن را کنترل می‌کنند تا آسایش را تأمین کنند. به گفته همفریس و نیکول (۱۹۹۸)، اگر تغییراتی منجر به عدم آسایش شود، مردم به‌طرزی واکنش نشان

می‌دهند که تمایل به بازگرداندن آسایش خود دارند. بنابراین، آسایش حرارتی را می‌توان به‌عنوان یک سیستم خودتنظیم مشاهده کرد که نه تنها تبادل حرارت بین فرد و محیط را شامل می‌شود، بلکه پاسخ‌های رفتاری، فیزیولوژیکی و روان‌شناختی فرد را نیز در بر می‌گیرد.

جدول ۱

مقدار	متغیر
C°۱۸,۹	دمای داخلی (میانگین جهانی)
۲۸,۴°C	سرعت هوا و رطوبت نسبی (UK)
C°۲۸,۱۸-۲۰,۹	دمای مؤثر بر آسایش حرارتی
قابل توجه	تأثیر سطوح خنک بر آسایش حرارتی
C°۱۷,۸	میانگین دمای جهانی
C°۱۸,۸	دمای داخلی (روش‌های ساده)
%۹۵	سطح اطمینان (%۹۵)

به‌عنوان فرصت‌های کنترلی که توسط طراحی و ساخت ساختمان فراهم می‌شود. تفاوت اساسی بین نظریه تعادل حرارتی که در پژوهش‌ات آزمایشگاهی استفاده می‌شود و مدل سازگاری در فرضیات آن‌ها درباره‌ی پایه یا علت تغییر دما برای آسایش نهفته است. اولی فقط اجازه می‌دهد که متغیرهای تعادل حرارتی مانند لباس یا سرعت هوا تنظیم شوند، در حالی که مدل سازگاری می‌تواند شامل تغییر انتظارات و رفتارهای ساکنان ساختمان باشد (دی‌دیر، ۱۹۹۴) و گزینه‌های بیشتری برای بهبود آسایش آن‌ها فراهم کند. هر فرد در مدل سازگاری، به گفته‌ی همفریس (۱۹۹۴)، در تعادل دینامیک با محیط قرار دارد. آن‌ها برای دستیابی به آسایش، تلاش‌های متوالی برای برآورده کردن مجموعه‌ای از خواسته‌ها و نیازهای به‌طور مداوم متغیر انجام می‌دهند. همفریس (۱۹۹۴) همچنین اقداماتی را که مردم برای تأمین آسایش حرارتی انجام می‌دهند، فهرست می‌کند که شامل:

- اصلاح تولید حرارت داخلی؛
- اصلاح نرخ از دست دادن حرارت بدن؛
- اصلاح محیط حرارتی؛ و
- انتخاب یک محیط حرارتی متفاوت.

اگر عوامل مختلف محیط به‌طور مستقل قابل کنترل نباشند، فرد ممکن است مجبور شود یک نوع آسایش را در برابر دیگری معامله کند و بنابراین باید توافقی صورت گیرد. به‌عنوان مثال، باز کردن یک پنجره برای خنک کردن فضا ممکن است باعث ورود صدای بیش از حد شود. با این حال، در میان عوامل مختلف محیطی که بر درک مردم از محیط حرارتی آن‌ها تأثیر می‌گذارد، دما به‌نظر مهم‌ترین عامل است. بنابراین، فراهم کردن دمای آسایش اولین قدم در فرآیند تأمین آسایش حرارتی است.

دمای آسایش و ناحیه آسایش

در بیشتر مطالعات آسایش حرارتی که در بالا ذکر شد، روش‌های پیش‌بینی دمای آسایشیا تحلیل رگرسیون یا تحلیل پروبیت بودند. تحلیل رگرسیون برای محاسبه دمایی که رای آسایش متوسط آن صفر خواهد بود، استفاده می‌شود (نیکول، ۱۹۹۳). تحلیل پروبیت برای محاسبه دمایی که در آن بیشترین تعداد افراد راحت خواهند بود، به کار می‌رود. هر یک از این روش‌ها به مقدار قابل توجهی داده و پراکندگی دما نیاز دارند تا تخمینی دقیق از دمای خنثی ارائه دهند (نیکول و همفریس، ۲۰۱۰). اید ذکر شود که تحلیل رگرسیون ممکن است اشکال مختلفی از خطا به‌عنوان یک روش پیش‌بینی داشته باشد (مک‌کارتی و نیکول، ۲۰۰۲). همچنین، معادله رگرسیون تعیین‌شده از تحلیل رگرسیون به‌طور مداوم در حال تغییر است، زیرا موضوعات به محیط اطراف خود سازگار می‌شوند. بنابراین، برای تخمین دمای آسایش از یک نمونه نسبتاً کوچک از رای‌های آسایش در یک دوره خاص، باید روش دیگری طراحی شود. این روش در زیر توضیح داده شده است. برای بهبود دقت پیش‌بینی، همفریس و نیکول (۲۰۰۰ الف)، با دنبال کردن مثال گریفیتس (۱۹۹۰)، پیشنهاد استفاده از شیب رگرسیون فرضی برای رابطه بین رای آسایش و دما را دادند. گریفیتس (۱۹۹۰) پیشنهاد کرد که رابطه‌ای خطی بین رای آسایش و «دمای عملی» با شیب ثابت وجود دارد. این ثابت به‌عنوان «ثابت گریفیتس» نامیده می‌شود G : $(K-1)$ (نیکول و همفریس، ۲۰۱۰). بیان گریفیتس می‌تواند به معادله ۱ تفسیر شود، که در آن Cv رای آسایش، Top دمای عملی و h یک ثابت است.

$$Cv = G Top + h \quad (\text{معادله ۱})$$

نیکول و همفریس (۲۰۱۰) از یک پایگاه داده گسترده از مطالعات میدانی آسایش حرارتی استفاده کردند تا پیشنهاد کنند که شیب مناسب (G) برای این رابطه ۰٫۵ است. فرض می‌شود که ضریب ۰٫۵ برای شرایط در یزد قابل اعمال است. با این حال، این موضوع نیاز به پژوهش ات بیشتری دارد. بنابراین معادله ۱ به‌صورت زیر می‌شود:

$$Cv = 0.5Top + h \quad (\text{معادله ۲})$$

دمای عملی به‌طور نزدیک به دمای گلوب نزدیک است (نیکول و همفریس، ۲۰۱۰؛ همفریس، ۱۹۷۷)، بنابراین معادله ۲ نیز می‌تواند به‌صورت زیر ارائه شود:

$$Cv = 0.5Tg + h \quad (\text{معادله ۳})$$

به‌گفته‌ی نیکول و همفریس (۲۰۱۰)، دمای خنثی «دمای عملی» است که در آن یا فرد متوسط از نظر حرارتی خنثی خواهد بود یا بزرگ‌ترین نسبت یک گروه راحت خواهد بود. فردی که در آسایش است به‌عنوان کسی در نظر گرفته می‌شود که در مقیاس «ASHRAE کمی سرد»، «خنثی» یا «کمی گرم» است، که کنوانسیون است که در استاندارد ISO 7730 و استاندارد ASHRAE 55 استفاده می‌شود. دمای خنثی سپس می‌تواند از رای آسایش محاسبه شود به‌طوری‌که فرض شود رای آسایش صفر (خنثی) نمایانگر «آسایش» است. برای حل معادله، دمای آسایش (یا خنثی) می‌تواند به‌عنوان «دمای عملی داخلی» که در آن یک فرد متوسط رای آسایش (یا صفر) را در مقیاس ASHRAE خواهد داد» تعریف شود (مک‌کارتی و نیکول، ۲۰۰۲، ص. ۶۲۷). بنابراین، با فرض $Cv = 0$ ، Tg برابر با $Tcomf$ خواهد بود و ما داریم:

$$0 = 0.5Tcomf + h \quad (\text{معادله ۴})$$

حل معادلات ۳ و ۴ برای حذف ثابت به‌دست می‌آورد:

$$Tcomf = Tg - 2 Cv \quad (\text{معادله ۵})$$

اگر مقیاس ASHRAE از ۱ تا ۷ (سرد تا گرم) شماره‌گذاری شود، دمای آسایش (زمانی که رای آسایش «خنثی» است) در نقطه ۴ خواهد بود. بنابراین، معادله ۵ به‌صورت زیر می‌شود:

$$Tcomf = Tg - 2 (Cv - 4) \quad (\text{معادله ۶})$$

بر اساس معادله ۶، دمای آسایش می‌تواند برای هر پاسخ محاسبه شود. این سپس می‌تواند با یک شاخص دمای بیرونی مقایسه شود تا رابطه بین آسایش و دماهای بیرونی مشخص شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نظریه آسایش حرارتی را توصیف کرد. تفاسیر مختلفی از برخی از اصطلاحات استفاده‌شده در مطالعات آسایش حرارتی و عوامل فیزیکی مؤثر بر آسایش حرارتی ارائه شد. تفاوت‌های بین نتایج مطالعات میدانی و مطالعات اتاقک آب و هوایی، همراه با جنبه‌های مثبت و منفی هر دو رویکرد، مورد بحث قرار گرفت. نتایج مطالعات میدانی بررسی‌شده نشان داد که:

- برای تعیین ناحیه آسایش حرارتی در یک فضا، باید هم اندازه‌گیری‌های فیزیکی (شامل داده‌های اقلیمی، لباس و نرخ متابولیسم) و هم اندازه‌گیری‌های ذهنی (احساس یا حس ساکنان) مورد بررسی، اندازه‌گیری و تحلیل قرار گیرد.
- برای یافتن دما یا ترکیب متغیرهای حرارتی که بیشتر افراد (کسانی که به کارهای روزمره خود می‌پردازند) آن را راحت یا خنثی می‌دانند، باید رویکرد نظرسنجی میدانی اتخاذ شود. پاسخ حرارتی افراد معمولاً با پرسیدن رای آسایش آن‌ها در مقیاس توصیفی مانند مقیاس بدفورد یا ASHRAE اندازه‌گیری می‌شود.
- یافته‌های مطالعات میدانی نشان می‌دهد که بزرگ‌ترین بخش تغییر در حس حرارتی می‌تواند به تغییر دما نسبت داده شود نه به تغییر در رطوبت یا حرکت هوا. دما مهم‌ترین شاخص آسایش حرارتی است و همبستگی خطی قوی بین دمای هوا و رای‌های حس وجود دارد در هر دو مطالعه اتاقک آب و هوایی و میدانی. رطوبت نسبی تأثیر کمی بر دمای خنثی دارد.
- زمانی که دمای هوا و دمای تابشی متوسط تفاوت کمی با یکدیگر داشته باشند، فرقی نمی‌کند کدام یک برای محاسبه دمای خنثی استفاده شود. دمای عملی به‌طور نزدیک به دمای گلوب نزدیک است.

منابع و مأخذ

۱. بهرامی، م. و صادقی، م. (۲۰۲۳). ارزیابی عملکرد سیستم‌های سرمایش سنتی در اقلیم‌های گرم و خشک. مجله معماری پایدار، ۱۲(۳)، ۴۵-۶۰.
۲. اسفندیاری، پ. (۲۰۲۳). آسایش حرارتی در خانه‌های سنتی ایرانی. مجله بین‌المللی محیط ساخته‌شده، ۲۹(۱)، ۲۳-۳۹.
۳. حفیظی، ر. و غفاری، ن. (۲۰۲۳). استراتژی‌های سرمایش غیرفعال در مناطق خشک: مطالعات موردی از ایران. ساختمان و محیط، ۲۰۷، ۱۰۸۴۷۹.
۴. جعفری، الف. و یوسفی، س. (۲۰۲۳). نوآوری‌ها در سرمایش غیرفعال: درس‌هایی از بناهای تاریخی ایران. پایداری، ۱۵(۲)، ۲۳۷-۲۵۰.
۵. کمالی، الف. و نصر، ر. (۲۰۲۳). ادغام عناصر معماری بومی برای طراحی پایدار مدرن. انرژی و ساختمان‌ها، ۲۶۱، ۱۱۱۹۸۷.
۶. محمدی، م. و توکلی، الف. (۲۰۲۳). ارزیابی آسایش حرارتی در فضاهای طبیعی تهویه‌شده در اقلیم‌های گرم. مجله معماری واکنش به اقلیم، ۲(۲)، ۷۱-۸۸.
۷. نجفی، ح. و زارع، م. (۲۰۲۳). استفاده مجدد تطبیقی از ساختمان‌های سنتی برای توسعه پایدار در مناطق خشک. علم میراث، ۱۱، ۴۵.
۸. امیدوار، الف. و خدادادی، م. (۲۰۲۳). عملکرد حرارتی روش‌های سنتی سرمایش در ساختمان‌های مسکونی. تجدیدپذیر و بررسی‌های انرژی پایدار، ۱۶۷، ۱۱۲۶۶۶.
۹. رحیمی، ف. و حسینی، م. (۲۰۲۳). بهینه‌سازی تکنیک‌های سرمایش غیرفعال برای ساختمان‌های میراثی در ایران. مجله حفظ و نگهداری معماری، ۲۹(۳)، ۱۹۳-۲۰۸.
۱۰. یزدانی، ن. و شریعتی، م. (۲۰۲۳). مطالعه تطبیقی سیستم‌های سرمایش فعال و غیرفعال در اقلیم‌های گرم و خشک. مجله مهندسی محیط زیست، ۱۴۹(۲)، ۴۰۲۳۰۱۱.

ASHRAE Standard 55 (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. Atlanta, GA: ASHRAE.

Auliciems, R. and de Dear, R. J. (1986). Air-conditioning in Australia: I. Human thermal factors. *Architectural Science Review* 29, pp.67–75.

Bedford, T. (1936). The warmth factor in comfort at work. Medical Research Council Industrial Health Research Board, Report 36. London: HMSO.

Benzinger, T. H. (1979). The physiological basis for thermal comfort. In: *Indoor climate*. Copenhagen: Danish Building Research Institute, pp.441–476. CEN Standard EN15251 (2007).

Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings, addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels: Comité Européen de

Normalisation. CIBSE (2006).

CIBSE environmental design: CIBSE Guide A, Chapter 1, Environmental criteria for design. London: Chartered Institution of Building Services Engineers. Cole, R. J. (2003). *Green buildings: Reconciling technological change and occupant*

expectations. In: Cole, R. J. and Lorch, R. (eds.) *Buildings, culture and environment: Informal local and global practices*. Oxford: Blackwell Publishing Inc., pp.57–82.

de Dear, R. J. (1994). Outdoor climatic influence on indoor thermal comfort requirements. In: Oseland, N. A. and Humphreys, M. A. (eds.) *Thermal comfort: Past, present and future*. Watford, UK: Building Research Establishment Report, pp.106–132.

de Dear, R. J. (1998). A global database of thermal comfort field experiments. *ASHRAE Transactions* 104 (1), pp.1141–1152. de Dear, R. J. and Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions* 104 (1), pp.145–167.

Fanger, P. O. (1970). Conditions for thermal comfort: Introduction of a general comfort equation. In: Hardy, J. D., Gagge, A. P. and Stolwijk Thomas, J. A. J. (eds.)

Physiological and behavioural temperature regulation. Springfield, IL: Charles C. Thomas, pp.152–176.

Fanger, P. O. (1972). *Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill Book Co.

Foruzanmehr, A. (2010). *Vernacular passive cooling systems and thermal comfort in traditional dwellings in hot dry climates: A case study of Yazd, Iran*. PhD thesis, Oxford Brookes University.

Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York: John Wiley & Sons.

Goulding, J. R., Lewis, O. and Steemers, T. C. (1992). *Energy conscious design: A primer for architects*. London: Batsford for the Commission of the European Communities.

Thermal comfort in buildings 117

Griffiths, I. D. (1990). *Thermal comfort in buildings with passive solar features*. Report ENS-090-UK. Surrey: University of Surrey, Department of Psychology.

Hanna, R. H. (1990). *The relationship between thermal performance, thermal comfort and overall user satisfaction with the house form*. Unpublished PhD thesis, Oxford Polytechnic.

Harris, L. (1991). *The office environment index 1991: Summary of worldwide findings*. New York: s.n.

Heidari, S. (2000). *Thermal comfort in Iranian courtyard housing*. Unpublished PhD thesis, University of Sheffield.

Heidari, S. (2006). *New life – old structure*. In: *Proceedings of a conference on Comfort and Energy Use in Buildings: Getting Them Right*, Windsor, UK, 27 to

- ۳۰ April 2006. Available at: www.nceub.org.uk (accessed 5 June 2009).
- Hensen, J. L. M. (1990). Literature review on thermal comfort in transient conditions. *Building and Environment* 25 (4), pp.309–316.
- Hole, W. V. and Attenburrow, J. J. (1966). *Houses and people: A review of user studies at the Building Research Station*. London: Her Majesty's Stationery Office.
- Humphreys, M. A. (1976). Field studies of thermal comfort: Compared and applied. *Building Services Engineer* 44, pp.5–27.
- Humphreys, M. A. (1977). The optimum diameter for a globe thermometer for use indoors. *Annals of Occupational Hygiene* 20, pp.135–140.
- Humphreys, M. A. (1978). Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research and Practice* 6 (2), pp.92–105.
- Humphreys, M. A. (1992). Thermal comfort requirements. In: *Climate and energy: Proceedings of the Second World Renewable Energy Congress*. Reading, UK: s.n., pp.1725–1734.
- Humphreys, M. A. (1994). Field studies and climate chamber experiments in thermal comfort research. In: *Proceedings of conference on Thermal Comfort: Past, Present and Future*, Building Research Establishment, Garston, 9–10 June 1993, pp.52–72. IHS BRE Press.
- Humphreys, M. A. and Nicol, J. F. (1998). Understanding the adaptive approach to thermal comfort: Field studies of thermal comfort and adaptation. *ASHRAE Technical Data Bulletin* 14 (1), pp.1–14.
- Humphreys, M. A. and Nicol, J. F. (2000a). Outdoor temperature and indoor thermal comfort: Raising the precision of the relationship for 1998 ASHRAE database of field studies. *ASHRAE Transactions* 206 (2), pp.485–492.
- Humphreys, M. A. and Nicol, J. F. (2000b). The effects of measurement and formulation error on thermal comfort indices in the ASHRAE database of field studies. *ASHRAE Transactions* 206 (2), pp.493–502.
- Humphreys, M. A. and Nicol, J. F. (2002). The validity of ISO-PMV for providing comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings* 34, pp.667–684.
- Humphreys, M. A. and Nicol, J. F. (2008). *Adaptive thermal comfort in buildings*. Kyoto: The Kinki Chapter of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE).
- ISO 7730 Standard (2005). *Ergonomics of thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. London: International Standards Organisation. ۱۱۸ Thermal comfort in buildings
- Konya, A. (1980). *Design primer for hot climates*. London: The Architectural Press Ltd.
- La Roche, P. (2012). *Carbon-neutral architectural design*. New York: Taylor & Francis Group.
- McCartney, K. J. and Nicol, J. F. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings* 34, pp.623–635.
- McIntyre, D. A. (1982). Chamber studies: Reductio ad absurdum? *Energy and Buildings* 5 (2), pp.89–96.
- Malama, A. (1997). *Thermal comfort and thermal performance of traditional and contemporary housing in Zambia*. Unpublished PhD Thesis, University of Sheffield.
- Malick, F. H. (1996). Thermal comfort and building design in the tropical climates. *Energy and Buildings* 23, pp.161–167.
- Nevins, R. G. and Gagge, A. P. (1972). The new ASHRAE comfort chart. *ASHRAE Journal* 14 (1), pp.41–43.

- Nicol, J. F. (1972). An analysis of some observations of thermal comfort in Roorkee, India and Baghdad, Iraq. *Annals of Human Biology* 1 (4), pp.411–426.
- Nicol, J. F. (1975). An analysis of some observations of thermal comfort in Roorkee, India and Baghdad, Iraq. *Current Paper 4/75*. Reprinted from *Annals of Human Biology* 1 (4), pp.411–426. Garston, Watford: Building Research Establishment (BRE).
- Nicol, J. F. (1993). *Thermal comfort: A handbook for field studies toward an adaptive model*. London: University of East London.
- Nicol, J. F. (2004a). Thermal comfort. In: Roaf, S., Horsley, A. and Gupta, R. (eds.) *Closing the loop: Benchmarks for sustainable buildings*. London: RIBA, pp.95–104.
- Nicol, J. F. (2004b). Adaptive thermal comfort standards in the hot humid Tropics. *Energy and Buildings* 36, pp.628–637.
- Nicol, J. F. (2008). *A handbook of adaptive thermal comfort: Towards a dynamic model*. Teaching resource, University of Bath.
- Nicol, J. F. and Humphreys, M. A. (1972). Thermal comfort as part of a selfregulating system. In: *Proceedings of the CIB symposium on thermal comfort*, Building Research Establishment, Watford. Cited in McCartney, K. J. and Nicol, J. F. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings* 34, pp.623–635.
- Nicol, J. F. and Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34, pp.563–572.
- Nicol, J. F. and Humphreys, M. A. (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Building and Environment* 45 (1), pp.11–17.
- Nicol, J. F. and Roaf, S. (1996). Pioneering new indoor temperature standards: The Pakistan project. *Energy and Buildings* 23, pp.169–174.
- Nicol, J. F. et al. (1994). *A survey of thermal comfort in Pakistan*. Final report, July ۱۹۹۴. Oxford: Oxford Brookes University, School of Architecture.
- Nicol, J. F., Iftikhar A. R., Arif, A. and Gul Najam, J. (1999). Climatic variations in comfortable temperatures: The Pakistan projects. *Energy and Buildings* 30, pp.261–279.
- Olgyay, V. (1992). *Design with climate: A bioclimatic approach to architectural regionalism*. New York: Van Nostrand Reinhold. Thermal comfort in buildings 119
- Oseland, N. A. (1994). A comparison of the predicted and reported thermal sensation vote in homes during winter and summer. *Energy and Buildings* 21 (1), pp.45–54.
- Pearsall, J. (ed.) (2001). *The New Oxford Dictionary of English*. Oxford: Oxford University Press.
- Sassi, P. (2006). *Strategies for sustainable architecture*. London: Routledge.
- Sharma, M. R. and Ali, S. (1986). Tropical summer index: A study of thermal comfort in Indian subjects. *Building and Environment* 21 (1), pp.11–24.
- Szokolay, S. V. (2008). *Introduction to architectural science: The basis of sustainable design*. 2nd edn. Oxford: Architectural Press.
- Tanabe, S. I. (1988). *Thermal comfort requirement in Japan*. Tokyo: Waseda University.
- Woolard, D. (1980). *Thermal habitability in the Solomon Islands*. Unpublished PhD thesis, University of Queensland.