



Investigating the efficiency of indigenous passive cooling systems in traditional Iranian houses: Quantitative and qualitative analysis in hot and dry climates ¹

Safoura.Rouhi^{1*}, Jamaledin Mahdinejad²

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

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

Received Date: 23 September 2024 Accepted Date: 19 January 2025

Abstract

Background and Objective: Vernacular passive cooling systems play a crucial role in maintaining thermal comfort in traditional Iranian houses, especially in hot and dry climates. This study aims to assess the efficiency of these systems through quantitative and qualitative analysis to identify their strengths and weaknesses and propose improvements.

Methodology: This research was conducted as a case study in Iran's hot and dry regions. Data collected included field observations, interviews with residents, and previous studies. Quantitative and qualitative analytical methods were used to evaluate the thermal efficiency and other related aspects of passive cooling systems.

Findings and Conclusion: This study shows that vernacular passive cooling systems in traditional houses in hot and dry climates can provide thermal comfort but require improvements to compete with modern systems. The widespread use of evaporative coolers indicates that passive systems need to be more efficient. It is recommended that further research be conducted to optimize and enhance the performance of these systems to play a more effective role in providing thermal comfort and reducing energy consumption. 1. Thermal Comfort Temperature: The thermal comfort survey identified a neutral temperature of 28°C and a comfort range between 25°C and 30°C for residents of traditional courtyard houses in Iran's hot and dry climate. 2. Capability of Passive Systems: Traditional houses cannot maintain thermal comfort throughout a hot summer day unless in their basements. However, these buildings can significantly reduce spatial cooling needs through the use of vernacular passive cooling measures, minimizing reliance on conventional cooling systems. 3. Climate Responsiveness: Traditional buildings are highly responsive to the climate, capable of reducing peak electricity demand, compensating for mechanical coolers with free cooling, and maintaining adequate comfort conditions. 4. Spatial Diversity: The variety of spaces and temperature differences in traditional houses offer residents choices and adaptability, enabling them to select and acclimate to different environments based on their preferences.

Key words: Traditional architecture, passive cooling systems, thermal comfort, hot and dry climate, thermal comfort temperature, traditional houses, cooling systems.

¹This article is an extracted from the postdoctoral research entitled "Explanation of strategic design principles based on the recognition of thermal comfort indicators of historical monuments in hot and dry climates (case study of Isfahan province)" at Shahid Rajaee Teacher Training University, by the first author has been carried out.

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

Cite this article Rouhi, S. and Mahdinejad, J. D. (2025). Investigating the efficiency of indigenous passive cooling systems in traditional Iranian houses: Quantitative and qualitative analysis in hot and dry climates. Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS), 6(2), 1-22.



بررسی کارایی سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی در خانه‌های سنتی ایران: تحلیل کمی و کیفی در اقلیم‌های گرم و خشک^۱

صفورا روحی^۱، جمال الدین مهدی نژاد^۲

۱. پژوهشگر پسا دکتری 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: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

چکیده

زمینه و هدف: سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی نقش مهمی در حفظ راحتی حرارتی در خانه‌های سنتی ایران، به ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، ایفا می‌کنند. هدف این مطالعه بررسی کارایی این سیستم‌ها از طریق تحلیل کمی و کیفی است تا بتوان نقاط قوت و ضعف آنها را شناسایی و راهکارهایی برای بهبود آنها ارائه داد.

روش بررسی: این پژوهش به صورت تحلیل موردی در مناطق گرم و خشک ایران انجام شده است. داده‌های جمع‌آوری شده شامل مشاهدات میدانی، مصاحبه با ساکنین و مطالعات پیشین است. از روش‌های تحلیلی کمی و کیفی برای ارزیابی کارایی حرارتی و سایر جنبه‌های مرتبط با سیستم‌های سرمایش غیرفعال استفاده شده است.

یافته‌ها و نتیجه گیری: این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی در خانه‌های سنتی اقلیم گرم و خشک توانایی تأمین آسایش حرارتی را دارند، اما نیاز به بهبودهایی دارند تا بتوانند با سیستم‌های مدرن رقابت کنند. استفاده گسترده از کولرهای تبخیری نشان می‌دهد که سیستم‌های غیرفعال باید کارآمدتر شوند. پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی و بهبود کارایی این سیستم‌ها انجام شود تا بتوانند نقش مؤثرتری در تأمین آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی ایفا کنند. دمای آسایش: نظرسنجی آسایش حرارتی دمای خنثی ۲۸ درجه سانتی‌گراد و دامنه دمای آسایش بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد را برای ساکنان خانه‌های بومی حیاط مرکزی در اقلیم گرم و خشک ایران تعیین کرد. توانایی سیستم‌های غیرفعال: خانه‌های بومی نمی‌توانند دمای آسایش را در طول یک روز گرم تابستانی تأمین کنند، مگر در زیرزمین‌ها. اما این ساختمان‌ها می‌توانند نیاز به سرمایش فضایی را با استفاده از تدابیر خنک‌کننده غیرفعال به حدی کاهش دهند که نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده متعارف کمتر شود. پاسخگویی به اقلیم: ساختمان‌های سنتی به‌طور قابل توجهی به اقلیم پاسخگو هستند و می‌توانند به کاهش تقاضای برق اوج و جبران خنک‌کننده‌های مکانیکی کمک کنند. تنوع فضاها: تنوع فضاها در خانه‌های بومی امکان انتخاب و سازگاری بیشتر را برای ساکنان فراهم می‌کند.

کلید واژه‌ها: معماری سنتی، سیستم‌های سرمایش غیرفعال، آسایش حرارتی، اقلیم گرم و خشک، دمای آسایش، خانه‌های سنتی، سیستم خنک‌کننده.

^۱ این مقاله مستخرج از پژوهش پسادکتری تحت عنوان "تبیین اصول راهبردی طراحی مبتنی بر بازشناسی شاخص‌های آسایش حرارتی بناهای تاریخی اقلیم گرم و خشک (نمونه مورد مطالعه استان اصفهان) در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، نویسنده اول انجام شده است.

نویسنده مسئول: s.rouhi@yahoo.com

ارجاع به این مقاله: روحی، صفورا و مهدی نژاد، جمال الدین. (۱۴۰۴). بررسی کارایی سیستم‌های سرمایش غیرفعال بومی در خانه‌های سنتی ایران: تحلیل کمی و کیفی در اقلیم‌های گرم و خشک. فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۶(۲)، ۱-۲۲.

مقدمه و بیان مسأله

فرضیه‌ای رایج وجود دارد که خانه‌های سنتی ساخته شده از خاک در اقلیم‌های گرم، به‌ویژه در مرکز ایران، به‌عنوان ساختمان‌هایی پاسخگو به شرایط اقلیمی طراحی شده‌اند که در آن‌ها، حتی بدون استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده متعارف، آسایش حرارتی در دوره‌های گرم سال فراهم می‌شود (فروزان‌مهر، ۱۴۰۱). این فرضیه اغلب بر مبنای تحقیقات علمی دقیقی درباره عملکرد حرارتی تکنیک‌های خنک‌کننده غیرفعال که در معماری سنتی ایرانی به کار رفته، استوار نیست. بسیاری از مطالعات موجود در این زمینه بیشتر مبتنی بر شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و تحلیل‌های ریاضی نظری هستند تا بر اساس اندازه‌گیری‌های تجربی (فروزان‌مهر و ولینگا، ۱۴۰۰). به این دلیل، نیاز به بررسی دقیق‌تر درباره میزان آسایش حرارتی که این سیستم‌های سنتی امروزه فراهم می‌کنند و همچنین توانایی معماری سنتی در مقابله با دماهای بسیار بالای تابستان وجود دارد.

برای پر کردن این شکاف، در این پژوهش به توصیف دو نظرسنجی پرداخته می‌شود که به منظور ارزیابی امکان تأمین دماهای داخلی راحت در خانه‌های سنتی با حیاط مرکزی یزد، در طول پژوهش‌های گرم، انجام شده‌اند: یکی نظرسنجی آسایش حرارتی و دیگری نظرسنجی تغییرات دما. این پژوهش همچنین به توضیح روش‌های انجام نظرسنجی آسایش حرارتی می‌پردازد که با استفاده از آن، دمای آسایش و ناحیه دمای آسایش برای ساکنان خانه‌های سنتی در روزهای گرم تابستان در یزد تعیین شد. افزون بر این، به تنوع دماهای مشاهده شده در فضاها، مختلف خانه‌های سنتی در روزهای تابستانی پرداخته می‌شود. این مسئله از طریق اندازه‌گیری و ثبت تغییرات دما بررسی شده است. دماهای ثبت شده در ادامه با دمای آسایش (یا ناحیه آسایش) به دست آمده از نظرسنجی آسایش حرارتی مقایسه شدند تا مشخص شود آیا دماهای داخلی در محدوده آسایش قرار دارند یا خیر. این پژوهش نشان می‌دهد که خانه‌های سنتی خنک‌شده به صورت غیرفعال تا چه حد و برای چه مدت می‌توانند دماهای داخلی آسایش را برای ساکنان فراهم کنند (فروزان‌مهر، ۱۴۰۱).

روش تحقیق

در این پژوهش که برای تعیین دمای آسایش و دامنه دماهای داخلی آسایش در خانه‌های سنتی خنک‌شده به صورت غیرفعال در یزد انجام شد (فروزان‌مهر، ۱۴۰۱)، یک نظرسنجی میدانی از وضعیت حرارتی ساکنان صورت گرفت. هدف این نظرسنجی جمع‌آوری داده‌هایی درباره محیط حرارتی و واکنش‌های همزمان ساکنان این خانه‌ها بود. از آنجا که افراد در حال انجام فعالیت‌های روزمره خود بودند، نظرسنجی میدانی روش مناسبی برای این منظور تشخیص داده شد.

نظرسنجی آسایش حرارتی

روش‌های نظرسنجی

در تابستان سال ۱۴۰۱، ۳۶۰ پرسشنامه به سه گروه نمونه در شهر یزد توزیع شد. نمونه اول شامل ساکنان محله سنتی فه‌ادان بود که در خانه‌های بومی زندگی می‌کردند و بنابراین، کاربران واقعی سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بودند. نمونه‌های دوم و سوم شامل ساکنان محله غیرسنتی سفایه بودند که به ترتیب در خانه‌های حیاطی غیرسنتی و بلوک‌های آپارتمانی زندگی می‌کردند. بنابراین، این دو نمونه، کاربران بالقوه سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی را تشکیل می‌دادند. برای بررسی دقیق‌تر یافته‌ها، پرسشنامه‌ها با مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته عمیق با زیرمجموعه‌ای از پاسخ‌دهندگان پرسشنامه و کارشناسان محلی دنبال شد.

جمع‌آوری داده‌های محیطی: داده‌های محیطی شامل دما، رطوبت نسبی و سرعت باد بود.

واکنش‌های حرارتی ساکنان: داده‌ها از طریق نظرسنجی و ثبت واکنش‌های حرارتی ساکنان در زمان‌های مختلف روز جمع‌آوری شد.

نمونه‌برداری توسط نویسندگان مقاله انجام شد و در طول دوره کار میدانی انجام شد. مشاهدات در طول دوره کار میدانی انجام شد و فعالیت‌ها، الگوهای فضایی، طراحی‌های معماری، و سطوح استفاده و نگهداری به صورت عکس‌ها، پلان‌ها، نقشه‌ها و یادداشت‌های کتبی مستند شد.

تعداد و بازه زمانی نظرسنجی

در این مطالعه، ۱۴۳ رأی حس حرارتی از حدود ۱۲۰ پاسخ‌دهنده متمایز گردآوری شد. این نظرسنجی از ۱۵ تا ۱۹ مرداد ۱۴۰۰، در اوج پژوهش گرم تابستان و در محله سنتی فهادان در شهر یزد انجام گرفت. ساعات نظرسنجی معمولاً از قبل از ساعت ۸:۰۰ صبح شروع و تا ساعت ۲۳:۰۰ شب ادامه داشت. تمامی شرکت‌کنندگان در سلامت کامل بودند و سن آن‌ها بین ۱۸ تا ۷۵ سال متغیر بود، با میانگین سنی ۳۵ سال.

ابزارهای اندازه‌گیری

- ترمو-هیگرومتر: دما و رطوبت نسبی با استفاده از داده‌بردارهای دیجیتال کوچک (ترمو-هیگرومتر مدل TH 103 از شرکت TempTec) اندازه‌گیری شد. این دستگاه‌ها قادر به اندازه‌گیری دما در دامنه $C^{\circ}10 - C^{\circ}50 +$ با دقت $C^{\circ}0.1$ بودند.
- آنومتر دستی: سرعت باد با استفاده از آنومتر دستی (مدل Kestrel 1000) اندازه‌گیری شد که توانایی ثبت سرعت باد در دامنه $m/s, 3$ تا $m/s, 40$ با دقت $\pm 3\%$ را داشت.

فرآیند نظرسنجی

ابزارهای اندازه‌گیری بین افراد حاضر منتقل شده و در نزدیکی و در ارتفاع (۲۰ cm تا ۳۰ cm) از افراد فاصله) قرار می‌گرفتند. در طول فرآیند، داده‌های محیطی در زمان تکمیل پرسشنامه‌های آسایش حرارتی توسط افراد جمع‌آوری شد. برخی از شرکت‌کنندگان تنها یک بار پاسخ دادند، در حالی که دیگران به‌طور مکرر شرکت کردند. این داده‌ها، همراه با زمان دقیق تکمیل پرسشنامه‌ها، ثبت شد.

پرسشنامه‌ها شامل دو بخش اصلی بودند:

۱. احساس حرارتی: بر اساس مقیاس هفت نقطه‌ای ASHRAE (از سرد تا گرم).
۲. ترجیح حرارتی: بر اساس مقیاس پنج نقطه‌ای (از بسیار گرم‌تر تا بسیار خنک‌تر).

معیارهای انتخاب ساختمان‌ها

داده‌های نظرسنجی آسایش حرارتی به همراه داده‌های سازمان خانه‌های سنتی یزد جمع‌آوری شد. مجموعه‌ای از معیارها برای انتخاب ساختمان‌های مورد بررسی تعیین و استفاده شد.

- ✓ موقعیت: ساختمان‌های انتخابی باید در محله سنتی یزد قرار داشته باشند.
- ✓ سن ساختمان: ساختمان‌های مورد بررسی باید در دهه ۱۳۰۰ یا قبل از آن ساخته شده باشند.
- ✓ مواد ساختمان: تمامی این ساختمان‌ها باید از خاک ساخته شده و متشکل از آجرهای گل خشک‌شده و/یا پخته شده باشند.
- ✓ وجود حیاط مرکزی: ساختمان‌های انتخابی باید دارای حیاط مرکزی باشند، با اتاق‌های زمستانی و تابستانی در دو طرف مقابل حیاط (شمال و جنوب).

✓ وجود زیرزمین: ساختمان‌ها باید دارای زیرزمین قابل دسترسی با پنجره‌ای رو به حیاط باشند تا داده‌بردارهای دما در آن نصب شوند.

✓ سالم بودن سیستم‌های خنک‌کننده سنتی: ساختمان‌ها نباید تغییری در سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال خود داشته باشند، نظیر افزودن درها یا پنجره‌های اضافی در فضاهای مورد مطالعه.

✓ ایمنی و وضعیت فیزیکی: خانه‌ها باید از نظر ساختاری سالم و به اندازه کافی ایمن برای انجام نظرسنجی باشند.

✓ دسترسی: دسترسی به ساختمان‌ها باید از طرف مالکان یا مسئولان محلی مجاز شده باشد.

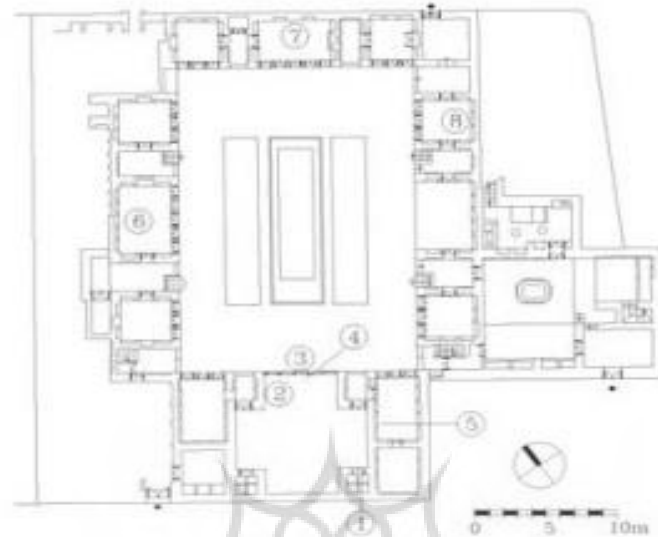
در ابتدا، بیش از ۳۰ ساختمان سنتی شناسایی شدند، اما پس از بررسی‌های بیشتر و تطبیق با معیارهای یادشده، هفت خانه به عنوان نماینده خانه‌های سنتی با حیاط مرکزی و سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال برای مطالعه انتخاب شدند. نظرسنجی در دو دوره زمانی مختلف، هر دو در پژوهش گرم، انجام شد؛ سه ساختمان از ۱۸ تا ۲۱ ژوئن ۱۴۰۰ و چهار ساختمان دیگر از ۵ تا ۹ اوت ۱۴۰۱ مورد بررسی قرار گرفتند. در این دوره‌ها، دماها در فضاهای مختلفی که با تهویه طبیعی و سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال خنک شده بودند، ثبت شدند و امکان مقایسه دماهای داخلی و دماهای آسایش فراهم آمد.

هدف از این مقایسه، تعیین میزان تطابق دماهای داخلی با محدوده دماهای آسایش بود و همچنین مدت زمانی که این دماها ممکن بود از محدوده آسایش خارج شوند. برای ثبت دماهای داخلی در فضاهای مختلف خانه‌های مورد مطالعه، داده‌بردارهای دما از نوع *i-button* در مکان‌هایی نظیر زیرزمین‌ها، ایوان‌ها، حیاط‌ها و اتاق‌ها نصب شدند (شکل ۱، ۵). این داده‌بردارها قادر به ثبت دما در دامنه 40°C تا 85°C با دقت $\pm 1^{\circ}\text{C}$ در محدوده 30°C تا 70°C و $\pm 3^{\circ}\text{C}$ خارج از این محدوده بودند. پارامترهایی مانند محدوده‌های دمایی، زمان‌بندی خوانش‌ها و زمان شروع قبل از نصب داده‌بردارها تعریف شدند. داده‌بردارها به گونه‌ای تنظیم شدند که دما را در فواصل پنج دقیقه‌ای و برای مدت یک هفته ثبت کنند، تا اطمینان حاصل شود که تمام دوره نظرسنجی پوشش داده شده است. داده‌های ثبت شده از طریق داده‌بردارها در پایان هر روز دانلود شده و نمودارهای دما برای تحلیل بیشتر تولید شدند.

علاوه بر این، داده‌های اقلیمی ثبت شده توسط سازمان هواشناسی ایران (۱۴۰۰) نیز برای مقایسه با داده‌های داخلی اضافه شدند. دماهای داخلی ثبت شده با محدوده دماهای آسایش مقایسه شدند تا مشخص شود که آیا دماهای داخلی در محدوده آسایش قرار دارند یا از آن خارج هستند، و مدت زمانی که دماها ممکن است از این محدوده فراتر روند. این تحلیل نشان داد که تا چه حد این سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال برای فراهم‌سازی آسایش ساکنان مؤثر بودند و چه زمانی نیاز به پشتیبانی توسط روش‌های خنک‌کننده دیگر وجود داشت (شکل ۱). نقشه خانه محمودی و محل نصب داده‌بردارها را نشان می‌دهد، (شکل ۲) نمای حیاط این خانه را نمایش می‌دهد.

با استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده تبخیری. این امکان مقایسه بین دماهای مختلف داخلی و دماهای آسایش دماهای خارجی را فراهم کرد و به تعیین این موضوع کمک کرد که تا چه حد این خانه‌های سنتی می‌توانند دمای آسایش را برای ساکنان فراهم کنند. به منظور نظارت بر تغییرات دما در خانه‌های مورد مطالعه انتخاب شده، داده‌بردارهای دما از نوع *i-button* در فضاهای مختلفی مانند زیرزمین‌ها، ایوان‌ها، حیاط‌ها و اتاق‌ها نصب شدند. شکل ۱ محل داده‌بردارها را روی نقشه یکی از خانه‌های مورد مطالعه (خانه محمودی) نشان می‌دهد و شکل ۲. نمای حیاط این خانه را نمایش می‌دهد. این داده‌بردارها دما را در محدوده 40°C درجه سانتی گراد تا 85°C درجه سانتی گراد با افزایش 0.5°C درجه سانتی گراد اندازه‌گیری می‌کنند. دقت آن‌ها $\pm 1^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی گراد برای دماهای بین 30°C درجه سانتی گراد و 70°C درجه سانتی گراد و $\pm 3^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی گراد برای دماهای خارج از این محدوده است. پارامترهای مهمی که قبل از نصب نیاز به تعریف داشتند شامل محدوده‌های دما برای هر داده‌بردار، زمان بین خوانش‌ها و زمان شروع بودند. آن‌ها تنظیم شدند تا دماها را در فواصل پنج دقیقه‌ای به مدت یک هفته ثبت کنند (تا اطمینان حاصل شود که ثبت اطلاعات تا پایان دوره نظرسنجی ادامه یابد). دوره اندازه‌گیری نمی‌توانست تمدید

شود زیرا دسترسی به ساختمان‌ها محدود بود و محدودیت‌های زمانی اجازه ثبت طولانی‌تری را نمی‌داد. داده‌ها از داده‌بردارها به یک کامپیوتر قابل حمل در شب پس از آخرین روز ثبت داندلود شدند.



شکل ۱ نقشه خانه محمودی و محل داده بردارها



شکل ۲. نمایی از خانه محمودی، یزد

نمودارهایی از دماهای ثبت شده برای تحلیل بیشتر تولید شد. داده‌های اقلیمی که به‌طور خودکار - هر ۳۰ دقیقه - توسط سازمان هواشناسی ایران (۱۴۰۰) در شهر یزد ثبت شده بودند نیز به داده‌های جمع‌آوری شده اضافه شدند. دماهای داخلی ثبت شده در برابر محدودیت‌های منطقه آسایش شدند تا مشخص شود آیا درون یا بیرون منطقه آسایش‌قرار دارند و مدت زمانی که این دماها ممکن است از آستانه آسایش فراتر بروند. این تحلیل نشان داد که تا چه حد و به چه مدت این سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال باید با سایر روش‌های خنک‌کننده در این ساختمان‌ها پشتیبانی شوند تا آسایش فراهم شود. نتایج و تحلیل‌های این داده‌های جمع‌آوری شده به‌طور گسترده توسط فروزان‌مهر (۲۰۱۲) توضیح داده شده و در بخش‌های زیر بیان شده است.

تحلیل نظرسنجی آسایش حرارتی در یزد

در طول مطالعه کوتاه‌مدت آسایش حرارتی در تابستان ۱۴۰۰، دماهای داخلی ثبت شده از ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۳۷٫۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود و میانگین آن حدود ۲۹٫۹ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱). در همین دوره، دمای خارج از ۲۷٫۵ درجه سانتی‌گراد تا ۳۹ درجه سانتی‌گراد متغیر بود و میانگین آن ۳۳٫۳ درجه سانتی‌گراد بود. میانگین نرخ متابولیک حدود ۱٫۶ مت و میانگین ارزش لباس ۰٫۵۰ کلا بود. سطح فعالیت‌ها و ارزش‌های لباس از طریق مشاهده فعالیت‌ها و لباس‌های موضوعات تعیین شد.

جدول ۱. دماها و رطوبت ثبت شده در طول نظرسنجی آسایش حرارتی

انحراف استاندارد	میانگین	حداکثر	حداقل	متغیر
3.1	29.9	37.5	25	T داخلی (°C)
3.6	33.3	39	27	T خارجی (°C)
9.4	29	52	7	رطوبت (%)

(a) توزیع آرای حس (آرای آسایش) و آرای ترجیح

توزیع آرای حس حرارتی (یا آسایش) در جدول ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ تصویر کلی توزیع آرای حس حرارتی موضوعات در این نظرسنجی کوتاه‌مدت آسایش حرارتی را نشان می‌دهد. مقیاس حس حرارتی (ASHRAE استاندارد ASHRAE 55، ۲۰۰۴) (برای این نظرسنجی استفاده شد که از ۷ برای گرم تا ۱ برای سرد و ۴ برای خنثی متغیر بود. آرای حس از کمی سرد (۳) تا گرم (۷) متغیر بود. بالاترین رای مربوط به خنثی (۴) بود که ۵۵٫۹٪ از کل آرای را دریافت کرد. میانگین رای حس بر روی مقیاس ASHRAE (+1) تا ۷+ به جای ۳- تا ۳+ بود که به معنای حسی خنثی تا کمی گرم است. حدود ۸۱٪ از آرای موضوعات (۱۱۶ از مجموع ۱۴۳ رای) در یکی از سه دسته مرکزی بین کمی خنک و کمی گرم قرار داشتند (یعنی دامنه آسایش). زمانی که دامنه آرای حس در دامنه آسایش (۳ تا ۵) بود، دمای عملیاتی از ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۳۷٫۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. با توجه به دامنه دما، می‌توان مشاهده کرد که موضوعات در دامنه وسیعی از دماها راحت بودند. هیچ رای برای خنک (۲) و سرد (۱) وجود نداشت، در حالی که حدود ۱۹٪ از آرای به دسته‌های گرم (۶) و داغ (۷) تعلق داشت. این نشان می‌دهد که تنها اقلیتی از موضوعات (۱۹٪) در این نظرسنجی از نظر حرارتی ناراحت بودند. یک مقیاس پنج‌نقطه‌ای برای ترجیح حرارتی طراحی شد که از ۱ برای گرم‌تر تا ۵ برای خنک‌تر و ۳ برای بدون تغییر متغیر بود. توزیع آرای ترجیح حرارتی در جدول ۵٫۴ و جدول ۵٫۵ نشان داده شده است. درصدهای رای ترجیح در مقیاس پنج‌نقطه‌ای به ترتیب ۷٪ کمی گرم‌تر، ۳۹٫۲٪ بدون تغییر، ۴۴٫۱٪ کمی خنک‌تر و ۹٫۸٪ خنک‌تر بود. میانگین ترجیح ۳٫۵۷ بود که به این معنی است که اکثریت موضوعات ترجیح می‌دادند.

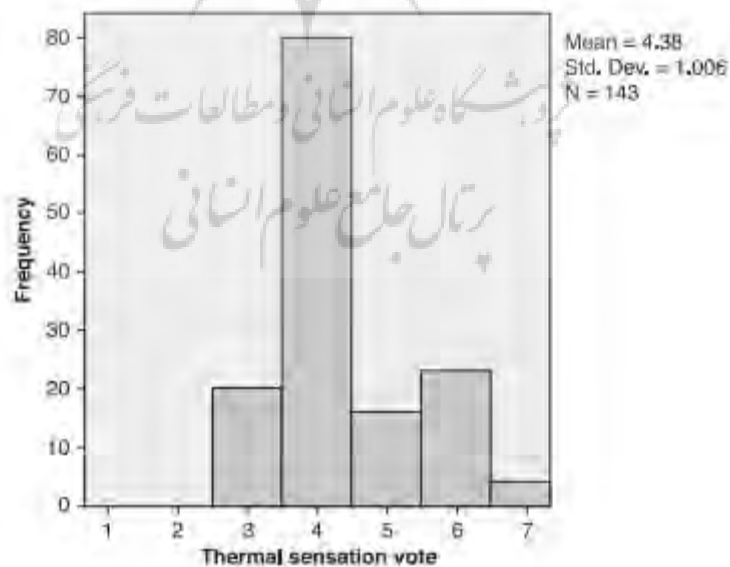
جدول ۲ میانگین و انحراف استاندارد آرای حس حرارتی

تعداد آراء	انحراف	استاندارد	حداقل	حداکثر	میانگین
۱۴۳	۳	۷	۴,۳۸	۱,۰۰۶	

حس حرارتی	فراوانی	درصد (%)
کمی خنک (۳)	۲۰	۱۴
خنثی (۴)	۸۰	۵۵,۹
کمی گرم (۵)	۱۶	۱۱,۲
گرم (۶)	۲۳	۱۶,۱
داغ (۷)	۴	۲,۸
کل	۱۴۳	۱۰۰

جدول ۳ توزیع آرای حس حرارتی

	Frequency	%
Slightly cool (3)	20	14
Neutral (4)	80	55.9
Slightly warm (5)	16	11.2
Warm (6)	23	16.1
Hot (7)	4	2.8
Total	143	100



شکل ۳ هیستوگرام آرای حس حرارتی

جدول ۴. آمار توصیفی آرای ترجیح حرارتی

تعداد آراء	انحراف	استاندارد	حداقل	حداکثر	میانگین
۱۴۳	۰,۷۶۵	۲	۱,۰۰۶	۵	۳,۵۷

تعداد آراء	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف استاندارد
143	2	5	3.57	0.765

یا

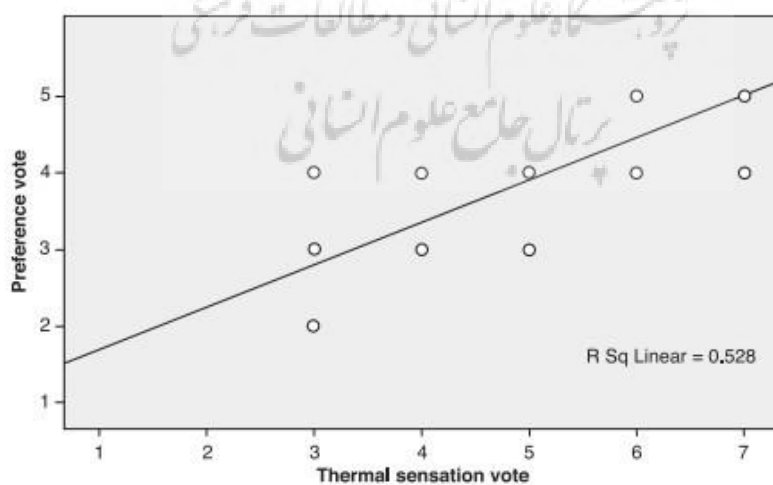
جدول ۵ شاخصه های آسایش حرارتی

Table 5.2 Mean and standard deviation of thermal sensation votes

	Number of votes	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
Thermal sensation votes (1-7, cold to hot)	143	3	7	4.38	1.006

Table 5.3 Distribution of thermal sensation votes

	Frequency	%
Slightly cool (3)	20	14
Neutral (4)	80	55.9
Slightly warm (5)	16	11.2
Warm (6)	23	16.1
Hot (7)	4	2.8
Total	143	100



شکل ۴: نمودار همبستگی بین آراء حس حرارتی و ترجیح حرارتی

دمای مورد ترجیح اکثر افراد این بود که وضعیت دما به همان شکل باقی بماند یا کمی خنک‌تر شود. انحراف استاندارد آراء ترجیح حرارتی ۰٫۷۶ بود، که نشان می‌دهد تفاوت‌هایی در ترجیح دمایی افراد وجود داشت، اما این تفاوت‌ها به‌طور کلی به سمت تمایل به حفظ دما یا کاهش اندک آن متمایل بودند.

(b) همبستگی میان آراء حس حرارتی و ترجیح حرارتی

شکل ۴. جدول‌های ۶ و ۷ ارتباط متقاطع و همبستگی بین آراء ترجیح حرارتی و حس حرارتی را نشان می‌دهند. این داده‌ها نشان می‌دهند که یک همبستگی مثبت قوی بین این دو متغیر وجود دارد. به این معنا که هرچه افراد حس حرارتی گرم‌تری را گزارش می‌کردند، به‌طور متناسب ترجیح می‌دادند محیط خنک‌تر باشد. این نتایج نشان می‌دهند که افراد، بر اساس احساسی که در لحظه داشتند، تمایل به تغییر دما به سمت خنکی بیشتر داشتند.

مجموع	خنک‌تر	کمی خنک‌تر	بدون تغییر	کمی گرم‌تر	رأی حس حرارتی
20	0	2	8	10	کمی خنک (Slightly cool)
80	0	34	46	0	خنثی (Neutral)
16	0	14	2	0	کمی گرم (Slightly warm)
23	12	11	0	0	گرم (Warm)
4	2	2	0	0	داغ (Hot)
143	14	63	56	10	مجموع (Total)

جدول ۶. متقاطع آراء حس حرارتی و ترجیح حرارتی

	Number of votes	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
Preference vote (1-5, warmer to cooler)	143	2	5	3.57	0.765

جدول ۷: همبستگی بین آراء حس حرارتی و آراء ترجیح حرارتی

Preference votes	Frequency	%
Slightly warmer (2)	10	7
No change (3)	56	39.2
Slightly cooler (4)	63	44.1
Cooler (5)	14	9.8
Total	143	100

همبستگی در سطح ۰٫۰۱ (دوطرفه) معنادار است.

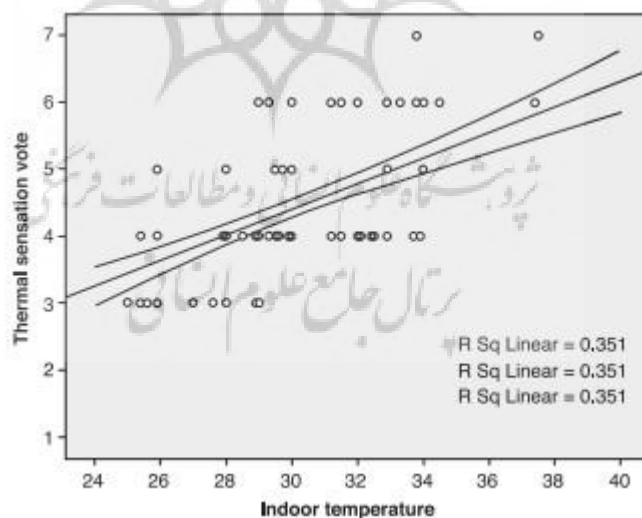
(c) ضریب همبستگی بین آراء حس حرارتی و دماهای داخلی

همبستگی‌های آراء حس حرارتی و ترجیح حرارتی با دمای داخلی در جدول ۸ و شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. همبستگی بین دمای عملیاتی داخلی و آراء حس حرارتی نسبتاً بالا (۰,۵۹) بود، به طوری که هرچه دما بالاتر می‌رفت، حس گرما نیز افزایش می‌یافت. چنین رابطه‌ای همچنین بین دمای هوای داخلی و آراء ترجیحی وجود داشت. همان‌طور که در شکل ۵,۶ نشان داده شده است، بیشتر افراد دماهای پایین‌تر را زمانی که دمای داخلی بالاتر بود، ترجیح می‌دادند. نتایج نشان می‌دهند که آراء ترجیحی کمی همبستگی کمتری با دمای عملیاتی (۰,۵۶) نسبت به آراء حس حرارتی (۰,۵۹) داشتند، که با نتایج نیکول و همکاران (۱۹۹۴) و حیدری (۲۰۰۰) هم‌خوانی دارد.

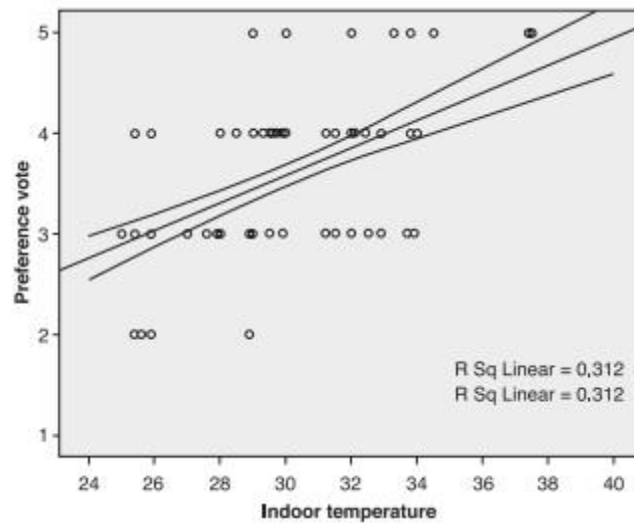
جدول ۸. همبستگی بین دمای عملیاتی و آراء آسایش و ترجیح

		Indoor temperature	Thermal sensation vote	Preference vote
Operative temperature	Pearson correlation	1	.592**	.558**
	Sig. (2-tailed)		0	0
	N	143	143	143
Thermal sensation vote	Pearson correlation	.592**	1	.727**
	Sig. (2-tailed)	0		0
	N	143	143	143
Preference vote	Pearson correlation	.558**	.727**	1
	Sig. (2-tailed)	0	0	
	N	143	143	143

همبستگی در سطح ۰,۰۱ (دوطرفه) معنادار است.



شکل ۲. نمودار پراکندگی و رابطه بین دمای داخلی و آراء حس حرارتی



شکل ۶. نمودار پراکندگی و رابطه بین دمای داخلی و آراء ترجیحی

(d) محاسبه دمای خنثی از تحلیل رگرسیون

یکی از روش‌های پیش‌بینی آسایش حرارتی ذهنی که نتیجه دمای معین یا ترکیبی از متغیرهای اقلیمی است، تحلیل رگرسیون است (نیکول و همکاران، ۱۹۹۴). در این تحقیق، یک تحلیل رگرسیون خطی ساده با استفاده از پاسخ‌ها به مقیاس هفت‌نقطه‌ای ASHRAE در مقابل دمای عملیاتی انجام شد تا قدرت رابطه بین آن‌ها تعیین شود. جدول ۲، ۹ نتایج تحلیل رگرسیون را نشان می‌دهد. همان‌طور که در اینجا نشان داده شده است، شیب آراء آسایش محدود ۰٫۱۹ °K/ است، در حالی که نیکول (۱۹۹۳) گزارش کرده است که ۰٫۲۵ °K/ معمول‌ترین شیب رگرسیون در نظرسنجی‌های میدانی است. با این حال، همفریس (۱۹۷۶) شیبی برابر با ۰٫۲۲ °K/ از بررسی مطالعات میدانی جهانی به‌دست آورد و حیدری (۲۰۰۰) شیب ۰٫۲۱ °K/ را در بناهای سنتی ایران در پژوهش‌های گرم گزارش کرد. این شیب‌ها کمتر از شیب ۰٫۳۳ °K/ گزارش شده توسط فنگر (۱۹۷۰) برای آزمایش‌های اتاق اقلیمی است. به گفته همفریس (۱۹۷۶)، مقادیر پایین‌تر شیب نشان‌دهنده وقوع سازگاری پاسخ‌دهندگان با محیط‌های حرارتی آن‌ها است. وین (۱۹۹۴) پیشنهاد می‌کند که در محیط‌های مختلف، شیب رگرسیون مربوط به حس حرارتی گزارش شده و دما به دلیل تفاوت در انتظارات آن محیط متفاوت خواهد بود و بنابراین دماهای خنثی مختلفی تولید خواهد شد.

از جدول ۲، ۹ همچنین می‌توان دید که عرض از مبدأ خط برابر با -۱٫۳۱۹ است که با شیب ۰٫۱۹، معادله زیر را به‌دست می‌دهد:

$$C V = 0.19 T_{in} - 1.319 \quad (1)$$

در این معادله C_V دمای محیط (داخلی) و T_{in} است. این معادله را می‌توان به‌صورت زیر نیز نوشت:

$$T_{in} = 0.19 (C V + 1.319) \quad (2)$$

اگر C_V خنثی باشد و بنابر این مقدار آن ۴ باشد، آنگاه T_{in} برابر با دمای خنثی T_n خواهد بود و بنابراین خواهیم داشت:

$$T_n = 0.19 (4 + 1.319) = 28^\circ C \quad (3)$$

جدول ۵،۹: رگرسیون بین دماهای داخلی و آراء حس حرارتی

Table 5.9 Regression between indoor temperatures and thermal sensation votes

	Un-standardised coefficients		Standardised coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-1.319	0.656		-2.01	0.046
Indoor temperature	0.191	0.022	0.592	8.729	0

Dependent variable: thermal sensation vote

متغیر وابسته: رأی حس حرارتی

با توجه به خطای استاندارد ممکن، دمای خنثی در طول این نظرسنجی ۲۸ درجه سلسیوس با ± 1 درجه بود. این مقدار با دماهای خنثی در سایر مطالعات میدانی در مناطق گرم قابل مقایسه است، به‌ویژه مطالعات وب (۱۹۵۹) که ۲۷،۲ درجه در سنگاپور، نیکول (۱۹۷۲؛ ۱۹۷۵) که ۳۲ درجه در هند و عراق، نیکول و همکاران (۱۹۹۴) که ۲۶،۷ تا ۲۹،۹ درجه در تابستان در پاکستان، مالیک (۱۹۹۶) که تقریباً ۲۸ درجه در بنگلادش، حیدری (۲۰۰۰) که ۲۷،۴ تا ۲۸،۴ درجه در تابستان در ایلام، ایران و حیدری (۲۰۰۶) که ۲۸،۴ درجه در یزد، ایران گزارش شده‌اند، مطابقت دارد. شرکت کنندگان (ساکنان ساختمان‌های انتخاب‌شده در محله سنتی یزد) آزاد بودند که هر جا بخواهند حرکت کنند یا بنشینند و می‌توانستند روی کف‌های خنک بنشینند؛ این شاید توضیح‌دهنده این است که چرا دمای خنثی آن‌ها به ۲۸ درجه رسید. خط رگرسیون حس حرارتی همه شرکت کنندگان در نمودار پراکندگی که در شکل ۵،۵ ارائه شده است، ضریب همبستگی بالایی برابر با ۰،۵۹۲ بین دمای عملیاتی و رأی‌های حس حرارتی نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تناسب خوب خط رگرسیون بین آن‌ها است.

(e) محاسبه دمای خنثی با استفاده از روش گریفیتس

برای برآورد دقیق دمای خنثی، نیاز به تنوع دما و حجم قابل توجهی از داده‌ها است (نیکول و همفریس، ۲۰۰۹). نمونه‌ای که در این نظرسنجی آسایش حرارتی استفاده شد، نمونه‌ای نسبتاً کوچک از رأی‌های آسایش در یک دوره کوتاه بود. بنابراین، به‌گفته همفریس و نیکول (۲۰۰۰)، برای بهبود دقت پیش‌بینی، از یک شیب رگرسیون فرضی برای رابطه بین رأی آسایش و دما استفاده شد. در نتیجه، همان‌طور که در پژوهش قبلی توضیح داده شد، معادله زیر به‌دست آمد:

$$T_n = T_g - 2 (C_V - 4)$$

که در آن T_g دمای گلوب، T_n دمای خنثی و C_V رأی آسایش است.

بر اساس این معادله، دمای خنثی برای هر پاسخ در این نظرسنجی آسایش حرارتی محاسبه شد. دماهای خنثی محاسبه‌شده بین ۲۳،۹ درجه تا ۳۳،۹ درجه متغیر بود و میانگین آن ۲۹،۱ درجه سلسیوس بود (جدول ۵،۱۰). همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای خنثی میانگین محاسبه‌شده از روش گریفیتس (یعنی ۲۹،۱ درجه) با دمای به‌دست‌آمده از تحلیل رگرسیون (یعنی ۲۸ درجه) متفاوت است. دلیل این تفاوت این است که تحلیل رگرسیون شامل برخی سازگاری‌ها می‌شود (یعنی در نظر می‌گیرد که شرکت کنندگان ممکن است لباس‌های کمتری پوشیده باشند یا فن در حال کار باشد).

این سازگاری‌ها باعث کاهش تغییر در رأی آسایش (برای یک تغییر معین در دما) و کاهش شیب خط رأی‌های آسایش می‌شود. از طرف دیگر، روش گریفیتس فرض می‌کند که هیچ سازگاری‌ای رخ نداده است.

Table 5.10 Calculated neutral temperatures based on Griffiths' method

	Number of votes	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
Neutral temperature	143	23.9	33.9	29.1	2.52

Table 5.11 Regression between neutral and indoor temperatures

	Un-standardised coefficients		Standardised coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	10.637	1.312		8.106	0
Indoor temperature	0.619	0.044	0.766	14.162	0

Dependent variable: neutral temperature

Table 5.12 Regression between neutral and outdoor temperatures

	Un-standardised coefficients		Standardised coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	20.137	1.826		11.028	0
Outdoor temperature	0.269	0.054	0.385	4.948	0

Dependent variable: neutral temperature

جدول ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ نتایج تحلیل رگرسیون انجام شده بین دمای خنثی و دمای داخلی را نشان می‌دهد.

متغیر وابسته: دمای خنثی

این تحلیل تلاش می‌کند پیش‌بینی کند که افراد در صورتی که هیچ‌گونه سازگاری نداشته باشند، در چه دمایی احساس آسایش می‌کنند. بنابراین، شیب رأی‌های آسایش بالاتر است و با در نظر گرفتن میانگین رأی آسایش ۴٫۳۸، منجر به دمای خنثی بالاتری می‌شود.

(f) ضریب همبستگی بین آسایش و دماهای داخلی/خارجی

همان‌طور که در اینجا مشاهده می‌شود، بین دمای خنثی و دمای داخلی همبستگی مثبت بالایی (+۰٫۷۶۶) وجود دارد. شیب خط بهترین تناسب ۰٫۶۱۹ است و نقطه قطع خط ۱۰٫۶۳۷ می‌باشد. این اعداد معادله‌ای برای تعیین رابطه بین دمای خنثی و دماهای داخلی (محیطی) ایجاد می‌کنند:

$$T_n = T_{in} + 10.6^{\circ}\text{C} \quad (25 \leq T_{in} \leq 37.5)$$

معادله‌ای که دمای خنثی را برای هر دمای داخلی مشخص در بازه 25°C تا 37.5°C محاسبه می‌کند. جدول ۵٫۱۲ نتایج تحلیل رگرسیون بین دمای خنثی و دمای خارجی را نشان می‌دهد. همبستگی بین دماهای خنثی و دماهای خارجی کم تا متوسط است (یعنی +۰٫۳۸۵). این موضوع می‌تواند به این دلیل توضیح داده شود که پاسخ‌دهندگان تحقیق، دماهای داخلی نسبتاً پایدار را تجربه می‌کردند.

جدول ۱۱ رگرسیون بین دماهای خنثی و دماهای داخلی

Sig.	t	ضرایب استاندارد	ضرایب غیر استاندارد
	بتا	خطای استاندارد	B
11.028	1.826	20.137	(ثابت)
0.385	0.054	0.269	دمای بیرونی

این جدول نتایج تحلیل رگرسیون بین دماهای خنثی و دماهای بیرونی را نشان می‌دهد که شامل ضرایب غیر استاندارد، ضرایب استاندارد، مقادیر t و سطوح معناداری (Sig.) است.

جدول ۱۲ رگرسیون بین دماهای خنثی و دماهای خارجی

محدوده دما (C°)	تفاوت یا دمای خنثی	تعداد آراء حس حرارتی	آراء ناراحتی	درصد ناراحتی
Tin < 28 ≥ 25	0 تا 3-	37	0	0%
Tin < 30 ≥ 28	2+ تا 0	44	3	6.8%
Tin < 32 ≥ 30	4+ تا 2+	17	6	35.3%
Tin < 34 ≥ 32	6+ تا 4+	33	10	30.3%
Tin < 36 ≥ 34	8+ تا 6+	8	4	50%
Tin < 37.5 ≥ 36	9.5+ تا 8+	4	4	100%

جدول ۱۲ تحلیل رگرسیون بین دماهای خنثی و دماهای بیرونی. دمای داخلی (در زیرزمین‌ها یا اتاق‌هایی با جرم حرارتی بالا) به جای دمای متغیر خارجی.

g) محدوده‌های دمایی آسایش

جدول ۱۳ محدوده‌های دما و تعداد آراء عدم آسایش حرارتی را نشان می‌دهد که در هر محدوده رخ داده است. این جدول نشان می‌دهد که وقتی دمای هوای داخلی بین ۲۵°C تا ۲۸°C بود، تمامی آراء در محدوده آسایش‌قرار داشتند و هیچ کس از دمای محیط ناراضی نبود. در محدوده دمایی ۲۸°C تا ۳۰°C، تنها ۶.۸٪ از آراء عدم آسایش از دمای داخلی را نشان دادند، به این معنا که بیش از ۹۳٪ از افراد در این دماها احساس آسایش می‌کردند. زمانی که دما ۲ تا ۶ درجه بالاتر از دمای خنثی افزایش یافت (یعنی در محدوده ۳۰°C تا ۳۴°C)، نسبت افرادی که از دما ناراضی بودند به ۳۵٪ رسید. درصد آراء عدم آسایش برای دماهای بین ۳۴°C و ۳۶°C به ۵۰٪ افزایش یافت، و وقتی دما از ۳۶°C تجاوز کرد، هیچ کس راحت نبود. به طور متوسط، بیش از ۸۵٪ از افراد زمانی که دما در محدوده ۲۸°C تا ۳۳°C بود احساس آسایش داشتند. این نسبت بالا است و نشان می‌دهد که حتی زمانی که دما پنج درجه بالاتر از دمای خنثی است، اکثریت افراد همچنان در منطقه آسایش‌خود قرار دارند. محدوده دمای راحت را می‌توان با دو تا سه درجه افزایش داد، در صورتی که افراد از پنکه‌های برقی استفاده کنند. این موضوع به این شکل تفسیر می‌شود که تعداد آراء عدم آسایش‌کاهش می‌یابد اگر پنکه‌های برقی به کار گرفته شوند. در این حالت، برای دماهای بین ۲۸°C تا ۳۳°C، نسبت افرادی که احساس آسایش می‌کنند ممکن است به بیش از ۹۰٪ برسد.

(h) خلاصه نتایج نظرسنجی آسایش حرارتی

جالب است که نتایج یک نظرسنجی همزمان (فروزان‌مهر، ۲۰۱۰) نشان داد که ۳۵٪ از پاسخ‌دهندگان علاوه بر سایر روش‌های موجود، از پنکه‌های برقی برای خنک کردن استفاده کرده‌اند.

(i) خلاصه نتایج نظرسنجی آسایش حرارتی

نتایج نظرسنجی (در کنار یک تحلیل رگرسیون ساده) نشان داد که دمای خنثی ۲۸°C بود، و محدوده قابل قبول بالای دمای آسایش برای افراد به شرح زیر است:

در محدوده دمای ۲۵°C تا ۲۸°C، تمامی افراد در محدوده آسایش قرار داشتند.

در محدوده دمای ۲۸°C تا ۳۰°C، تنها ۶٫۸٪ از افراد ناراضی بودند.

در محدوده دمای ۳۰°C تا ۳۴°C، ۳۵٪ از افراد احساس عدم آسایش کردند.

برای دماهای ۳۴°C تا ۳۶°C، ۵۰٪ از افراد ناراضی بودند.

در دماهای بیش از ۳۶°C، تمامی افراد عدم آسایش گزارش کردند.

این نتایج نشان می‌دهد که حتی در دماهای بالاتر از دمای خنثی (تا پنج درجه بالاتر)، بیش از ۸۵٪ از افراد همچنان در محدوده آسایش خود قرار دارند.

جدول ۱۳. دامنه‌های دما و وقوع آرای عدم آسایش

محدوده دما (°C)	تفاوت یا دمای خنثی	تعداد آراء حس حرارتی	آراء ناراضی	درصد ناراضی
$T_{in} < 28 \leq 25$	0 تا 3-	37	0	0%
$T_{in} < 30 \leq 28$	0 تا 2+	44	3	6.8%
$T_{in} < 32 \leq 30$	2+ تا 4+	17	6	35.3%
$T_{in} < 34 \leq 32$	4+ تا 6+	33	10	30.3%
$T_{in} < 36 \leq 34$	6+ تا 8+	8	4	50%
$T_{in} < 37.5 \leq 36$	8+ تا 9.5+	4	4	100%

متغیر وابسته: دمای خنثی

حد بالا ۳۳ درجه سانتی‌گراد بود (که در آن بیش از ۸۵ درصد افراد مورد بررسی رضایت داشتند). در زمان این نظرسنجی، اکثریت شرکت‌کنندگان ترجیح می‌دادند دما ثابت بماند یا کمی خنک‌تر شود. هرچه رای‌های حس گرما بیشتر بود، تمایل شرکت‌کنندگان به کاهش دما کمتر می‌شد. این یافته‌ها با الگوی نتایج بسیاری از نظرسنجی‌های قبلی مشابه است، از جمله (Woolard ، Nicol (1972) ، Sharma (1980) ، Ali (1986) ، Malick (1996) ، Nicol ، Malama (1997) و همکاران (۱۹۹۴) و Heidari (2000) ؛ (۲۰۰۶). این مطالعه با یافته‌های سایر مطالعات میدانی قبلی در مورد روابط بین دماهای داخلی و دماهای خنثی همخوانی داشت. دمای خنثی (Tn) به دمای داخلی (Tin) بر اساس معادله زیر وابسته بود:

$$T_n = 0.62T_{in} + 10.6^{\circ}\text{C} (25 \leq T_{in} \leq 37.5)$$

بررسی تغییرات دما

برای بررسی تغییرات دما در خانه‌های سنتی یزد، هفت خانه سنتی با حیاط مرکزی نماینده انتخاب شدند و ثبت دما در فضاها و مختلف آنها در طی یک دوره داغ معمولی انجام شد. جدول ۲، ۱۴ خلاصه‌ای از ثبت دما در یکی از این خانه‌های مورد مطالعه (خانه

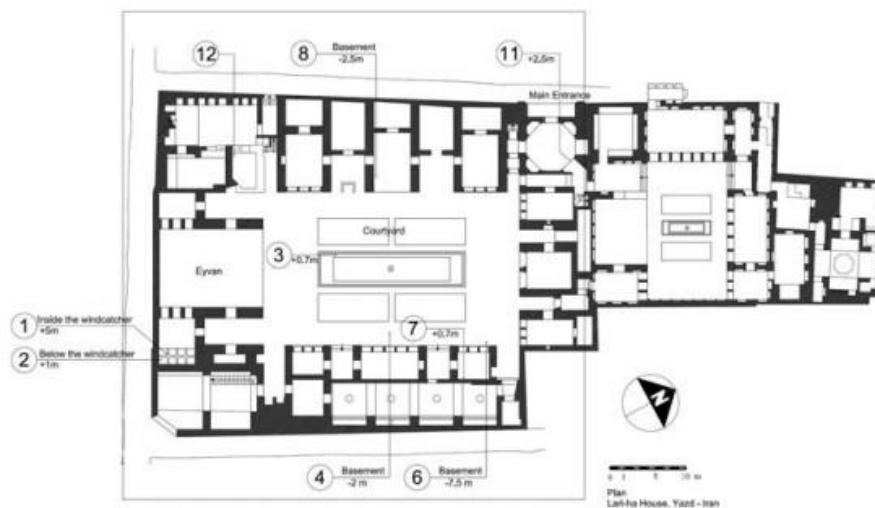
لاری‌ها) را ارائه می‌دهد. خانه لاری‌ها یک خانه سنتی یک طبقه با حیاط مرکزی و مصالح خشتی است که حدود ۱۳۵ سال پیش ساخته شده است (شکل ۷). اشکال ۸ و ۹ موقعیت ثبت‌کننده‌های داده را در یک نقشه و مقطع خانه نشان می‌دهند. یافته‌های بررسی تغییرات دما و آسایش حرارتی نشان داد که در تمامی خانه‌های مورد مطالعه انتخاب شده، هیچ یک از اتاق‌های طبقه همکف که به صورت غیرفعال خنک شده بودند (حتی آنهایی که به بادگیر مجهز بودند) نتوانستند دماهای داخلی راحت (یعنی بین ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه سانتی‌گراد) را برای ساکنان در تمام طول یک روز داغ تابستانی تأمین کنند. زیرزمین تنها فضایی بود که دما در محدوده (یا ممکن است زیر) محدوده آسایش قرار داشت. این موضوع به وضوح نشان می‌دهد که چرا زیرزمین‌ها و اتاق‌های زندگی زیرزمینی به عنوان فضاهای جایگزین زندگی توسط ساکنان به طور سنتی مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

جدول ۱۴. دامنه‌های دما در خانه لاری‌ها

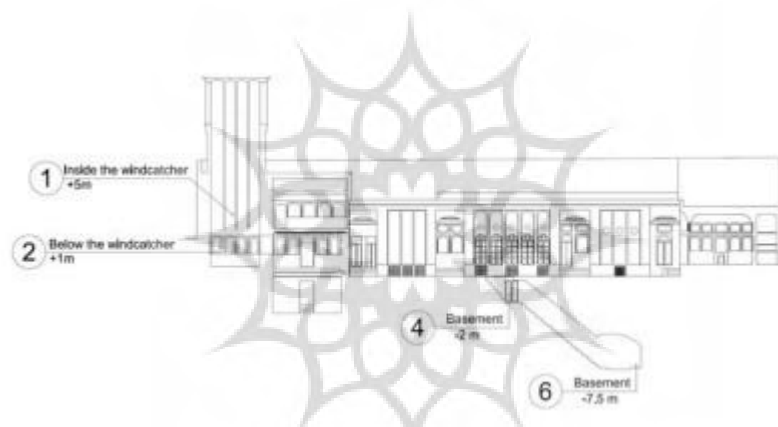
نوسان	حداقل	حداکثر	میانگین	دما	فضا
	15°C	28°C	43°C	35.5°C	فضای بیرونی
	9°C	30°C	39°C	34.9°C	اتاق تابستانی
	17°C	26.5°C	43.5°C	33.5°C	حیاط
	8.5°C	32°C	40.5°C	35.1°C	اتاق زمستانی
	0.5°C	23°C	23.5°C	23.5°C	زیرزمین



شکل ۷. نمایی از خانه لاری‌ها ۱



شکل ۸ پلان خانه لاری‌ها و محل قرارگیری دیتالاگرها



شکل ۹ مقطع خانه لاری‌ها و محل قرارگیری دیتالاگرها

دما در زیرزمین‌ها به طور قابل توجهی و به طور مداوم پایین‌تر از دمای متوسط بیرون بود، که نشان می‌دهد زیرزمین می‌تواند منبع دائمی خنک‌کنندگی و جایی برای پناه‌گیری از روزهای گرم تابستان باشد. در تقریباً تمام موارد، نوسانات دما در زیرزمین نسبت به سایر فضاهای خانه کوچک‌تر بود. این ممکن است به دلیل این باشد که زیرزمین‌ها به طور تعریف شده در سطح زیرزمین قرار دارند و با زمین در ارتباط هستند. نوسانات کم دما در زیرزمین‌ها ممکن است همچنین نتیجه عمق زیرزمین، اندازه‌های کوچک پنجره و موقعیت آن‌ها در خانه و سطح پایین تهویه در آن‌ها باشد.

در تقریباً تمام فضاهای طبقه همکف که اندازه‌گیری انجام شد، دماهای داخلی متوسط پایین‌تر از دمای متوسط بیرون بودند. این نشان می‌دهد که ساختمان‌های مورد بررسی دما را در اتاق‌های طبقه همکف با استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی کاهش داده‌اند، هرچند که این کاهش به اندازه‌ای نبود که آن را به ناحیه آسایش برساند. اتاق‌های تابستانی (اتاق‌های رو به شمال) دماهای متوسط کمی پایین‌تری نسبت به اتاق‌های زمستانی نشان دادند. اتاق‌های زمستانی در معرض آفتاب مستقیم برای بخش بزرگی از روزهای تابستان بودند و تمایل داشتند که دماهای بالاتری داشته باشند. این موضوع توجیه‌کننده این است که به‌طور سنتی و اقلیمی، تمایز بین اتاق‌های تابستانی

و زمستانی وجود داشته است، همان‌طور که توسط فون هاردنبرگ (۱۹۸۲)، فتحی و راف (۱۹۸۶)، راف (۱۹۸۸)، طاهری (۱۹۹۰)، خیربادی (۱۹۹۱)، ممرین (۱۹۹۸)، شوناور (۲۰۰۰)، بونین (۲۰۰۰)، ممرین و براون (۲۰۰۶) و نیکول (۲۰۰۸) اشاره شده است.

به‌طور کلی، نوسانات دما در داخل اتاق‌ها به‌طور قابل توجهی زیر نوسانات دما در خارج بود که نشان می‌دهد ساختار بزرگ خانه‌ها دماهای داخلی را تنظیم و پایدار می‌کند. هر جا که در یک فضا (به دلیل بسته بودن درها، پنجره‌ها و غیره) کمبود یا نبود تهویه وجود داشت، دما ثابت‌تر بود. دماهای اوج در اتاق‌های طبقه همکف پایین‌تر از دمای اوج بیرون بودند.

در کاهش بار سرمایش اوج، که می‌تواند در نهایت منجر به کاهش نیاز به برق اوج شود؛ این موضوع در مناطق گرم بسیار سودمند است زیرا می‌تواند به جلوگیری از کاهش یا محدودیت در مصرف برق کمک کند. با این حال، تأثیر کاهش دماهای اوج داخلی در تابستان بر نیاز برق اوج موضوعی است که نیاز به بررسی‌های دقیق‌تری دارد.

حیاط‌های خانه‌های مورد بررسی در این مطالعه عملکرد دمایی متفاوتی نشان دادند. نوسان دما در حیاط در موارد مختلف کمتر یا بیشتر از دمای بیرون بود. نسبت مساحت حیاط به ارتفاع اتاق‌های اطراف، جهت‌گیری حیاط، میزان پوشش گیاهی و حتی وجود بازشوهایی به زیرزمین به نظر می‌رسد که در دامنه دماهایی که یک حیاط فراهم می‌کند تأثیرگذار هستند. این می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیق بیشتر باشد. نظرسنجی نوسانات دما همچنین نشان داد که نوسان دما در ایوان کمتر از دمای بیرون بود، اما بیشتر از دمای داخلی بود. تنها دوره زمانی که دماها در حیاط و ایوان در ناحیه آسایش نزدیک به آن بودند، بین غروب و ساعات ابتدایی صبح بود. این موضوع توضیح می‌دهد که چرا حیاط و ایوان به‌طور سنتی به عنوان فضاهای زندگی، نشستن یا استراحت در عصر و اوایل صبح در دوران گرم استفاده می‌شدند. دمای ثبت شده بر روی بام‌ها از حدود نیمه شب (یا اوایل شب) تا اوایل صبح روز بعد در ناحیه آسایش‌قرار داشت، که توضیح می‌دهد چرا در گذشته، بام‌ها برای خوابیدن در شب‌های گرم تابستان مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

یافته‌های کلیدی

۱. دمای آسایش: نتایج نظرسنجی آسایش حرارتی دمای خنثی ۲۸ درجه سانتی‌گراد و دامنه دمای آسایش بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد را برای ساکنان خانه‌های بومی حیاط مرکزی در یزد تعیین کرد.
۲. توانایی سیستم‌های غیرفعال: خانه‌های بومی نمی‌توانند این دما را در طول یک روز گرم تابستانی تأمین کنند، مگر در زیرزمین‌های خود. با این حال، این ساختمان‌ها می‌توانند نیاز به سرمایش فضایی را با استفاده از تدابیر خنک‌کننده غیرفعال بومی به حدی کاهش دهند که نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده متعارف کمتر شود.
۳. پاسخگویی به اقلیم: نتایج نشان می‌دهد که این ساختمان‌ها به‌طور قابل توجهی پاسخگو به اقلیم هستند و می‌توانند به کاهش تقاضای برق اوج، جبران خنک‌کننده‌های مکانیکی با خنک‌کننده‌های رایگان و حفظ شرایط آسایش مناسب کمک کنند.
۴. تنوع فضاها: تنوع فضاها و تنوع دماها در خانه‌های بومی امکان انتخاب و سازگاری را برای ساکنان فراهم می‌کند. ساکنان می‌توانند محیط‌های مختلف را انتخاب کنند و به دما و فضایی که بیشتر دوست دارند، سازگار شوند.

اهمیت نتایج

این نتایج فرضیات بسیاری از پژوهشگران در این حوزه را تأیید می‌کند که خانه‌های بومی در اقلیم‌های گرم و خشک ایران به تأمین آسایش حرارتی کمک می‌کنند. با این حال، از آنجا که اقلیم یزد در تابستان بسیار گرم است، آسایش در خانه بدون استفاده از

خنک‌کننده‌های مکانیکی تنها با جابجایی در داخل خانه برای بهره‌برداری از مناسب‌ترین اقلیم‌های متنوع در زمان مناسب روز امکان‌پذیر است. این شامل استفاده از بام در شب، طبقه همکف در صبح و عصر و زیرزمین در زمان‌های گرم‌ترین روز می‌شود. مشکلات مربوط به جابجایی‌ها در سبک زندگی‌های امروزی به طور قابل توجهی منجر به استفاده از خنک‌کننده‌های الکترومکانیکی یا ترک این خانه‌ها شده است. این مشکلات در پژوهش‌های بعدی بیشتر بررسی و تحلیل خواهند شد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که یک خانه بومی با خنک‌کنندگی غیرفعال در یزد می‌تواند محیطی راحت فراهم کند، اما این کار تنها زمانی امکان‌پذیر است که استراتژی‌های مختلف به طور مشترک به کار گرفته شوند و ساکنان در زمان‌های مختلف روز از بخش‌های مختلف آن استفاده کنند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با وجود حضور سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی (VPCS) در ساختمان‌های سنتی یزد، این سیستم‌ها به طور معمول به عنوان وسیله خنک‌کننده جاری استفاده نمی‌شوند. متداول‌ترین روش خنک‌کننده برای مقابله با گرمای داخلی، کولرهای تبخیری الکترومکانیکی (کولرهای مردابی) بودند که حدود ۹۰٪ از پاسخ‌دهندگان از آنها استفاده می‌کردند. تحلیل نتایج نشان داد که پاسخ‌دهندگان سیستم‌های تهویه مطبوع را به سیستم‌های طبیعی و غیرفعال ترجیح می‌دهند.

این پژوهش همچنین نشان داد که خانه‌های سنتی یزد با استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی توانایی تأمین آسایش حرارتی را دارند. با این حال، استفاده گسترده از کولرهای تبخیری نشان می‌دهد که سیستم‌های غیرفعال بومی نیاز به بهبود دارند تا بتوانند با سیستم‌های مدرن رقابت کنند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری در مورد بهینه‌سازی و بهبود کارایی این سیستم‌ها انجام شود. کارایی سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی به توانایی و تمایل ساکنان برای تطبیق سبک زندگی خود با آن بستگی دارد. اگر چنین توانایی یا تمایلی وجود نداشته باشد، آسایش حرارتی حاصل نخواهد شد. بنابراین، برای درک اینکه تا چه اندازه خانه‌های بومی با خنک‌کنندگی غیرفعال در یزد امروز می‌توانند آسایش حرارتی را فراهم کنند، ضروری است که اطلاعات مربوط به عملکرد زیست‌محیطی سیستم‌های مختلف را با درک تصورات، نگرش‌ها و رفتارهای کنونی ساکنان در رابطه با آنها تکمیل کنیم.

۱. بهینه‌سازی سیستم‌های غیرفعال بومی: تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی و بهبود کارایی سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی با توجه به شرایط اقلیمی یزد انجام شود.

۲. مطالعه ترکیبی: بررسی ترکیب استفاده از سیستم‌های غیرفعال بومی و مدرن برای رسیدن به حداکثر آسایش حرارتی با حداقل مصرف انرژی.

۳. ارزیابی هزینه-فایده: مطالعه‌ای برای ارزیابی هزینه‌های اقتصادی و مزایای زیست‌محیطی استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی نسبت به سیستم‌های مدرن.

۴. تأثیر آموزش: بررسی تأثیر آموزش و آگاهی‌رسانی به ساکنان در مورد استفاده بهینه از سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی و تأثیر آن بر پذیرش و کارایی این سیستم‌ها.

۵. تحلیل تأثیرات سبک زندگی مدرن: تحلیل تأثیرات سبک زندگی مدرن بر استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال بومی و پیشنهاد راهکارهایی برای سازگاری بهتر این سیستم‌ها با نیازهای امروزی.

۶. مقایسه اقلیمی: مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج مشابه در مناطق دیگر با شرایط اقلیمی مشابه یا متفاوت برای فهم بهتر عملکرد سیستم‌های غیرفعال بومی در اقلیم‌های مختلف.

منابع

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

Bonine, M. (2000). Sustainable desert housing: From the dwelling to the desert community. Paper presented at regional symposium on Sustainable

Development of Desert Communities, Yazd, 16–18 May. Summertime thermal comfort in Yazd 139 Fanger, P. O. (1970). Conditions for thermal comfort: Introduction of a general comfort equation. In: Hardy, J. D. et al. (eds.) Physiological and behavioural temperature regulation. Springfield, IL: Charles C. Thomas.

Fardeheb, F. (1987). Examination and classification of passive solar cooling strategies in Middle Eastern vernacular architecture. *Passive Solar Journal* 4 (4), pp.377–417.

Fethi, I. and Roaf, S. (1986). The traditional house in Baghdad: Some socio-climatic considerations. In: Hyland, A. D. C. and Al-Shahi, A. (eds.) *The Arab house: Proceedings of the colloquium held in the University of Newcastle upon Tyne, 15–16 March 1984*. Newcastle: University of Newcastle upon Tyne, pp.41–49.

Foruzanmehr, A. (2006). Energy efficiency and sustainability in vernacular architecture of Iran: Traditional design, construction methods and passive strategies. Unpublished MSc dissertation, Oxford Brookes University.

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

Foruzanmehr, A. (2012). Summer-time thermal comfort in vernacular earth dwellings in Yazd, Iran. *International Journal of Sustainable Design* 2 (1), pp.46–63.

Foruzanmehr, A. and Vellinga, M. (2011). Vernacular architecture: Questions of comfort and practicability. *Building Research and Information* 39 (3), pp.274–285.

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 conference on Comfort and Energy Use in Buildings: Getting Them Right*, Windsor, UK, 27–30 April.

Available at: www.nceub.org.uk (accessed 5 June 2009).

Humphreys, M. A. (1976). Field studies of thermal comfort: Compared and applied. *Building Services Engineer* 44 (1), pp.5–27.

Humphreys, M. A. (2008). ‘Why did the piggy bark?’ Some effects of context and language on the interpretation of words used in scales of warmth and thermal preference. In: *Proceedings of conference on Air*

Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge, Network for Comfort and Energy Use in Buildings, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 27–29 July. Available at: www.nceub.org.uk (accessed 30 May 2017).

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. (2000). 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.

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.

Taghi, F. A. (1990). Ardakan: Housing on the edge of the desert. Unpublished PhD thesis, University of Glasgow.

Von Hardenberg, J. G. (1982). Consideration of houses adapted to local climate: A case study of Iranian houses in Yazd and Esfahan. *Energy and Buildings* 4 (2), pp.155–160.

Webb, C. G. (1959). An analysis of some observations of thermal comfort in an equatorial climate. *British Journal of Industrial Medicine* 16 (4), pp.297–310.

Woolard, D. (1980). Thermal habitability in the Solomon Islands. Unpublished PhD thesis, University of Queensland.

Wyon, D. P. (1994). Assessment of human thermal requirements in the thermal comfort region. In: *Proceedings of conference on Thermal Comfort: Past, Present and Future*, Building Research Establishment, Garston, 9–10 June 1993, pp.144–156. HIS BRE Press.

