

原创研究型文章

评估生物气候战略在改善沙漠气候房屋热舒适度和降低能耗方面的有效性

Maamar Hamdani^{1,*}, Mohamed Kamal Cherier¹, Guermoui Mawloud¹, Sidi Mohammed El Amine Bekkouche¹,
Belaid Abdelfetah¹, Zaiani Mohamed¹, Rachid Djeflal¹, Saleh Al-Saadi^{2,3}, Ehsan Kamel⁴

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, or Applied Research Unit in Renewable Energies), Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, or Renewable Energy Development Center), 47133 Ghardaïa, Algeria

² Sustainable Energy Research Center (SERC), Sultan Qaboos University, 123 Alkhoud, Muscat, Oman

³ Department of Civil and Architectural Engineering, Sultan Qaboos University, 123 Alkhoud, Muscat, Oman

⁴ Department of Energy Management, New York Institute of Technology, New York 11568, United States

* 通讯作者: Maamar Hamdani, hamdanimaamar@gmail.com

引用格式

Hamdani M, Cherier MK, Mawloud G, et al. 评估生物气候战略在改善沙漠气候房屋热舒适度和降低能耗方面的有效性. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(3): 223.

<https://doi.org/10.18686/encest.v2i3.223>

Hamdani M, Cherier MK, Mawloud G, et al. Assessing the effectiveness of bioclimatic strategies in improving thermal comfort and reducing energy consumption in a house located in a desert climate (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(3): 223.

<https://doi.org/10.18686/encest.v2i3.223>

文章信息

收稿日期: 2024-05-13

录用日期: 2024-08-01

发表日期: 2024-08-19

版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由

Universe Scientific Publishing 出版。

本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is

available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/177>

摘要: 本文探讨了生物气候策略在提高沙漠气候住宅的热舒适度和降低能源消耗方面的有效性。研究评估了在一年时间内隔热、自然通风和相变材料 (Phase Change Materials, PCM) 的影响, 并分别对每种策略进行独立和组合评估。通过分析每月的能源消耗费用, 确定了这些策略的影响。结果表明, 能源成本大幅降低, 在过渡季节降低高达50%; 然而, 由于室内外环境之间存在显著的热相差, 完全消除加热和冷却系统并不可行。对热不适时间的进一步分析表明, 在特定季节增加隔热层厚度可以减轻峰值热强度并延迟其发生, 从而延长舒适期并减少不适时间。尽管有这些改进, 但在最热的月份仍然存在热困扰期, 这进一步表明了采取平衡的气候适应策略的必要性。总体而言, 尽管这些策略的实施无法完全消除对传统供暖和制冷系统的需求, 但它们在提高沙漠气候家庭的舒适度并降低能源的消耗方面展现出了有效性。

关键词: 生物气候策略; 热舒适度; 能源消耗; 沙漠气候; 隔热; 相变材料; 自然通风; 能源费用

1. 引言

在过去十年中, 阿尔及利亚的建筑行业已成为主要的能源消耗行业之一, 约占化石能源总消耗量的 40% [1,2]。根据阿尔及利亚能源部的国家能源平衡表提供的住宅建筑能源消耗年度统计数据, 阿尔及利亚住宅部门的能源消耗呈现出稳步增长的趋势, 其在 2010 年占比为 40%, 在 2013 年为 43%, 而在 2020 年上升至 46.7% [1]。此外, 阿尔及利亚特别容易受到极端高温的影响, 阿尔及利亚沙漠经历了创纪录的高温, 尤其是在南部地区, 如伊利济、瓦尔格拉、阿德拉尔和盖尔达耶, 该沙漠地区 2021 年 7 月的气温达到了 51 °C [1]。这种异常情况导致能源消耗大幅增加, 给经济带来了沉重的负担。此外, 在执行与节能相关的法规和决策方面也存在挑战 [2]。因此, 当前的政策重点是提高建筑能源性能和促进可再生能源的使用。

提高建筑行业能源效率的有效策略之一是优先考虑建筑围护结构的设计和施工。建筑围护结构 (包括墙壁、屋顶、窗户和门), 作为室内外环境之间的屏障, 在控制能量损失或增益方面发挥着关键作用 [3-5]。通过优化建筑围护结构的设计, 可以最大限度地减少通过传导、对流和辐射产生的不必要的热传递。这可以通过各种方式实现, 例如使用高质量的隔热材料、加入隔热层、密

封漏气处以及选择合适的窗户玻璃系统。

此外，建筑物的朝向和窗户的布局也会对能源效率有显著影响。在寒冷时期，利用自然光和太阳热增益可以减少对人工照明和供暖的需求。另一方面，在炎热时期，合理的遮阳和窗户设计可以最大限度地减少太阳热增益，并减少对机械制冷系统的依赖。

另外，在建筑物无人居住或入住率较低的时间段，例如夜间、周末或节假日，实施优化能源消耗的策略非常重要。这包括调整温度设定点、实施 HVAC 系统的回退或关闭模式，以及利用能源管理系统来监控和控制能源使用。

总体而言，优先考虑建筑围护结构设计并考虑减少使用时间，是提高建筑行业能源效率的有效策略。通过关注建筑围护结构的设计、隔热、朝向和控制，可以实现显著的节能效果，从而降低运营成本并打造更可持续的建筑环境 [6-9]。

为了降低建筑能耗，同时保持室内热舒适度，学者们广泛研究了主动和被动节能策略。[5-7]。主动技术经常遇到与低能效有关的障碍 [8]，因此被动节能技术受到越来越多的关注 [9]。被动策略的例子包括采用 Trombe 墙 [10,11]、轻质混凝土墙 [12]、隔热材料 [13]、反射材料 [11]、绿色屋顶 [10]和相变材料 (phase-change materials, PCM) [14,15]。PCM 对于储能尤为重要，尤其在炎热气候中，通过提供诸如自然冷却和增强热舒适度的优点，带来了极低的能源消耗。这对缓解全球变暖危机做出了重大贡献。实验和数值研究证实了被动技术在降低峰值负荷方面的有效性 [16-18]。为此，PCM 通常被集成到建筑外墙中。在最近的一项研究中，Zhou 和 Razaqpur [19]开发了一种新型动态 Trombe 墙，该墙结合了隔热材料和 PCM，以提高热效率。他们使用大型模型和计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 对比了这种墙与静态墙的热性能，结果显示节能效率提高了 25.3%，热效率提高了 79.8%。研究表明，所提墙体在 PCM 放热期间，调节空间内部温度更高，热性能更好。Anter 等 [20]在他们的研究中取得了重大发现，研究了集成了不同类型和厚度 PCM 的建筑墙体在埃及环境中的长期热性能。通过使用二维 CFD 模拟，他们评估了 PCM 的类型和位置。结果表明，添加 PCM 成功降低了室内热通量，使内墙温度符合目标范围。RT-35HC PCM 表现出卓越的热性能，尤其是当放置在距离内墙和外墙 1.5 cm 处时。Muzhanje 和 Hassan [21]的研究重点是优化各种封装几何形状的 PCM。他们通过热研究和建模，将各种 PCM 与不同的纳米颗粒融合在一起进行研究。他们强调在寒冷的地方进行自由加热，并专注于改善传热，尤其是对于结构而言。结果表明，矩形胶囊的熔化和凝固速度提高了 41% [22-24]。

使用 PCM 和热交换器的冷却系统有望在炎热气候下实现节能冷却和通风。该系统能在最小能耗下将送风温度降低 2 °C，改善室内空气质量并提高热舒适度。

本文研究了生物气候策略在提高沙漠气候住宅的热舒适度和降低能耗方面的有效性。研究评估了隔热、自然通风和 PCM 在一年内的表现，并对每种策略分别进行了独立和组合分析。

2. 方法论

本研究使用的建筑是来自 Google SketchUp 设计的一座功能性房屋，位于阿尔及利亚盖尔达耶的可再生能源应用研究中心（Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables，简称 URAER）。气候测量数据来自 URAER 大楼屋顶的辐射测量站。建筑几何图形以 IDF 格式从 Google SketchUp 导出，随后导入建模软件 TRNBUILD TRNSYS 18。气象数据通过 Type 109 模块整合到 Simulation Studio 软件中，初始模拟是在没有战略干预的情况下进行的，仅依赖于建筑组件（如墙壁、天花板和窗户）的固有属性。

在分析了初步结果后，战略解决方案被实施。首先引入了相变材料，然后集成了绝缘板，并根据既定的参考改进了通风系统。有关模拟过程的详细说明，请参阅模拟流程图中的图 1。

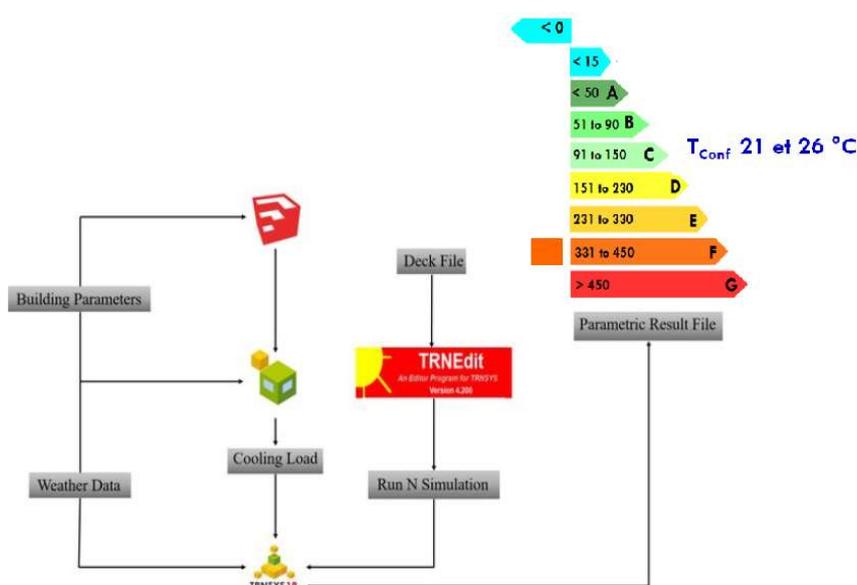


图1. 仿真流程图。

Figure 1. Simulation flowchart

为了评估生物气候策略在提高沙漠气候住宅的热舒适度和降低能源消耗方面的有效性，本研究进行了为期一年的全面评估。研究的策略包括隔热、自然通风和 PCM 的使用。每项策略都分别进行了独立和组合评估，以评估其单独和集体影响。

3. 气候条件对盖尔达耶热舒适度的影响

盖尔达耶位于北撒哈拉中心地带，具有典型的沙漠气候，特点是极端高温和低湿度。该地区年平均气温为 22.61 °C，冬季最低气温在 1 月份降至 5.5 °C，夏季最高气温在 7 月份达到 41.7 °C。相对湿度显著偏低，年平均为 38.33%，在气温最高的 7 月份降至 21.60%。盖尔达耶阳光充足，年平均太阳辐射超过 20 MJ/m²，日照时数超过 3000 h/年。高日照率加上极少的云量，使得该地区非常适合利用太阳能进行各种应用。如图 2 所示，已确定的分布与站点的平均云量

密切相关。

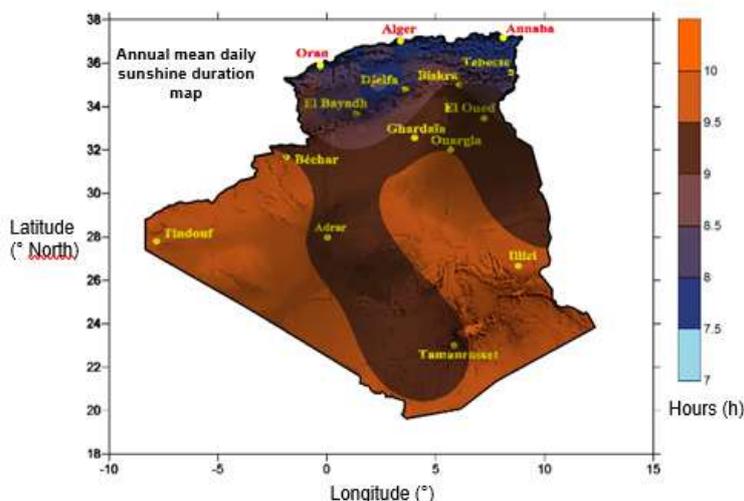


图2. 测量日照持续时间的年平均价值地图（1992–2002年） [2]。

Figure 2. Mapping of average annual values of measured insolation duration (1992–2002) [2].

在对盖尔达耶气候区的热舒适度进行生物气候分析后，我们发现，如图 3 所示，该环境在全年总时间（8760 h）中的约 1732 h，即在全年 19%的时间段内是相对舒适的。这种年度和月度热舒适度分析为我们提供了开发建筑项目所需的生物气候解决方案。换句话说，我们制定了一种适当的设计方法，将我们的建筑项目与其气候环境无缝集成，同时确保最佳的能源性能和舒适度。为此，我们提出了被动解决方案，包括隔热、自然通风和相变材料，以制定各个层面的建议。

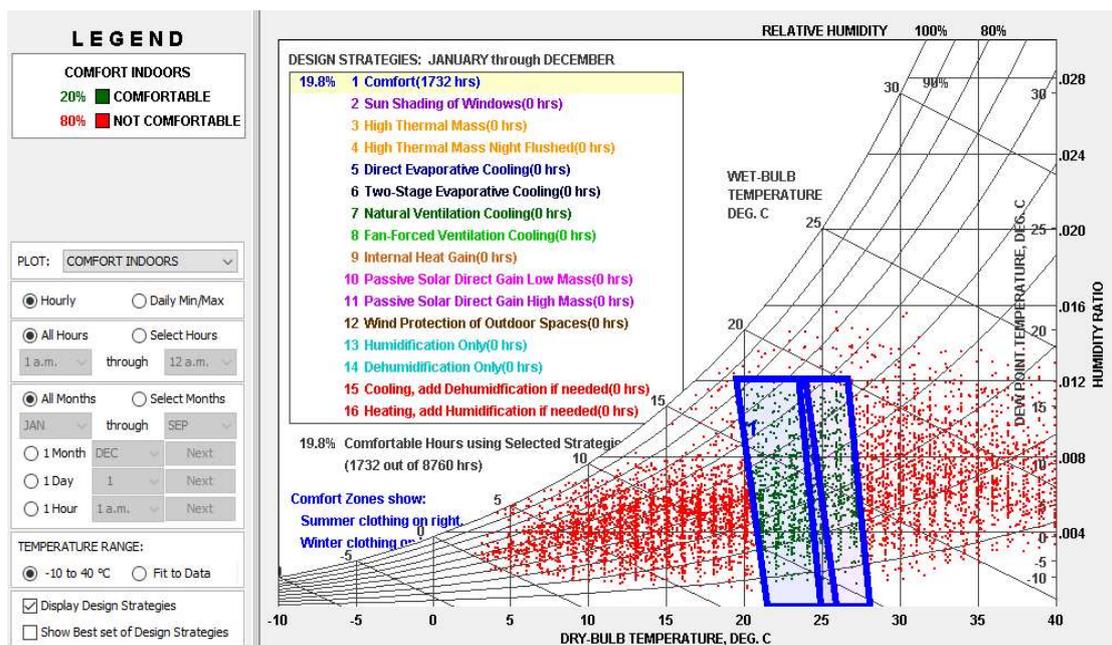


图 3. 盖尔达耶气候区热舒适度和设计策略的湿度图。

Figure 3. Psychrometric chart of thermal comfort and design strategies for climatic zone in Ghardaïa.

盖尔达耶一年中每个月的舒适和不舒适小时数。数据如图 4 所示。

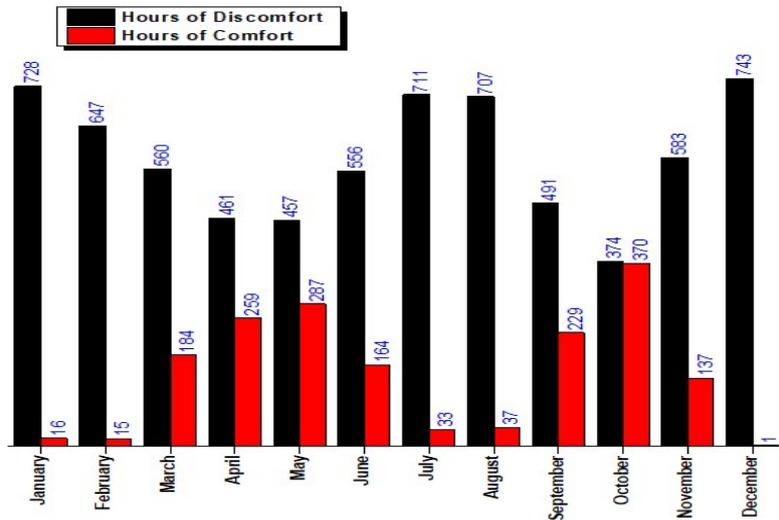


图 4. 舒适和不舒适小时数的直方图。

Figure 4. Histogram of hours of comfort and discomfort.

盖尔达耶最舒适的月份是 3 月、4 月、5 月、9 月和 10 月，月度舒适小时数从 229 h 到 370 h 不等。这些月份的舒适和不舒适时长分布相对均衡，这表明这是一个从夏季高温到冬季低温间的过渡期。夏季月份，尤其是 7 月和 8 月，舒适性最低，舒适时长短而不舒适时长长。在设计和建造该地区的建筑物时，必须考虑这些温度变化，以确保为居住者提供最佳的热舒适度。然而，值得注意的是，这些数据没有其他热舒适度影响因素，如湿度和风速等。

根据提供的数据，7 月份的总小时数（744 h）和不适小时数（711 h）最高，只有 33 h 被归类为舒适时间。这可能是由于夏季高温通常在这个时间段内出现。

1 月、2 月和 12 月的总时长均为 744 h，但不适程度不同。1 月不适程度最低，只有 16 个舒适小时，而 12 月不适程度最高，只有 1 个舒适小时。这表明 12 月在热舒适性方面最具挑战性。

4 月、5 月和 9 月的不适感程度也较高，每个月不适感时间超过 200 h。这可能是由于白天温度较高造成的。

3 月、6 月和 11 月的舒适小时数较多，表明这些月份的热舒适度相对宜人。

10 月和 11 月的舒适时间和不舒适时间分布相当均匀，表明这是夏季炎热和冬季寒冷的过渡时期。

4. 仅使用隔热材料进行被动能源优化

隔热材料在减少供暖和制冷需求方面起着至关重要的作用，它可以最大限度地减少冬季的热量损失，限制夏季的热量增加。通过优化建筑物的隔热性能，可以保持更稳定的室内温度，减少对传统供暖和制冷系统的依赖。

在本研究中，我们探索了单独使用隔热材料的有效性，未使用任何其他主

动加热或冷却系统，也没有采用其他被动策略。在第一种情况下，我们改变了所有室内表面（屋顶隔热层除外）的隔热厚度，从1 cm到10 cm不等，以评估隔热材料对直接受辐射影响的垂直暴露表面的重要性。在第二种情况下，我们仅对屋顶进行隔热，以比较结果并分析每个月的能耗 [13–15]。

采用隔热材料有助于降低空气温度，从而提高居住者的舒适度。在这种情况下，增加隔热材料可使舒适度提高7.3%，相当于增加642 h的舒适度。这意味着居住者能够在这些额外的时间内感受到热舒适感。

在这种情况下，居住者的舒适度达到了27.1%，这意味着在热舒适条件下度过的时间比例更高。这相当于2374 h的舒适度。

表1列出了不同绝缘情况与普通情况的能耗对比。

表1. 不同绝缘场景与普通情况的能耗比较。

Table 1. Energy consumption in different insulation scenarios compared with ordinary case.

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Ordinary case	Heating (kWh)	3570	2210	873	45.8	0	0	0	0	0	65.6	897	3100	10800
	Air conditioning (kWh)	0	0	0	0	10.6	903	2700	4350	3790	1900	244	0	13900
Insulation: 10cm Walls	Heating (kWh)	1700	947	205	0	0	0	0	0	0	0	155	1350	4350
	Air conditioning (kWh)	0	0	0	0	10.6	903	2700	4350	3790	1900	244	0	11400
Insulation: 10cm Walls + 10cm roof	Heating (kWh)	1640	1370	1040	305	0	0	0	0	0	1.89	374	1270	6000
	Air conditioning (kWh)	0	0	0	0	0	104	573	572	199	2.83	0	0	1450

研究结果强调了隔热和高质量材料的使用对改善建筑物热舒适度的重要性。通过结合这些被动策略，可以减少对供暖和制冷系统的依赖，同时为居住者提供舒适的室内环境：

- 关于供暖，我们观察到全年的能源消耗差异很大。最冷的月份（1月、2月和12月）的消耗最高，而最热的月份（5月至9月）的消耗为零。通过在建筑物外墙上添加10 cm厚的聚苯乙烯隔热层，所有月份的供暖消耗都显著减少，甚至4月至10月的月份也为零。增加隔热层可大幅减少一年中所有月份的供暖消耗，尤其是在5月至9月等较温和的月份。事实上，在这些月份，供暖消耗达到零，表明建筑物不需要供暖就能保持舒适的温度。隔热在过渡月份4月和10月也证明是有效的，因为供暖消耗显著减少，尽管没有完全消除。这表明隔热是降低供暖成本和提高建筑能源效率的有效解决方案。
- 关于制冷，夏季（6月至8月）的能耗较高，而其他月份的能耗为零。在外墙上增加10 cm的聚苯乙烯隔热层可显著减少最热月份的制冷消耗。例

如，7月份，能源消耗从 4350 kWh 下降到 3180 kWh。然而，在 4 月和 10 月，隔热带来了挑战，因为能耗略有增加，这表明在这些重叠的过渡时期，隔热可能不是一个有效的解决方案。在设计和实施节能措施时，考虑当地气候条件很重要，以确保这些措施适合特定的建筑情况。在外墙中设置 10 cm 的隔热层，可以显著提高能源效率，减少供暖和制冷成本。然而，在过渡时期，由于隔热效率会随着季节交替而降低，隔热效果可能不明显，甚至会带来挑战。这限制了隔热材料在这些重叠季节的实用性。比较这三种情况可以看出，与正常情况相比，在外墙和屋顶增加 10 cm 的隔热层，可以显著降低供暖和制冷的能耗。具体来说，当在外墙上使用 10 cm 的隔热层时，供暖的总能耗减少了一半以上，从 10800 kWh 减少到 4350 kWh，而制冷的总能耗减少了近 18%，从 13900 kWh 减少到 11400 kWh。与仅在外墙上增加隔热层相比，在外墙和屋顶同时增加隔热层的效果更好，特别是在制冷方面，总能耗减少了近 45%，而只在外墙上增加隔热层只减少了 18% 左右。总而言之，在外墙和屋顶上增加隔热层是减少供暖和制冷能耗的最佳选择，并且可显著节省长期能源费用（图 5）。

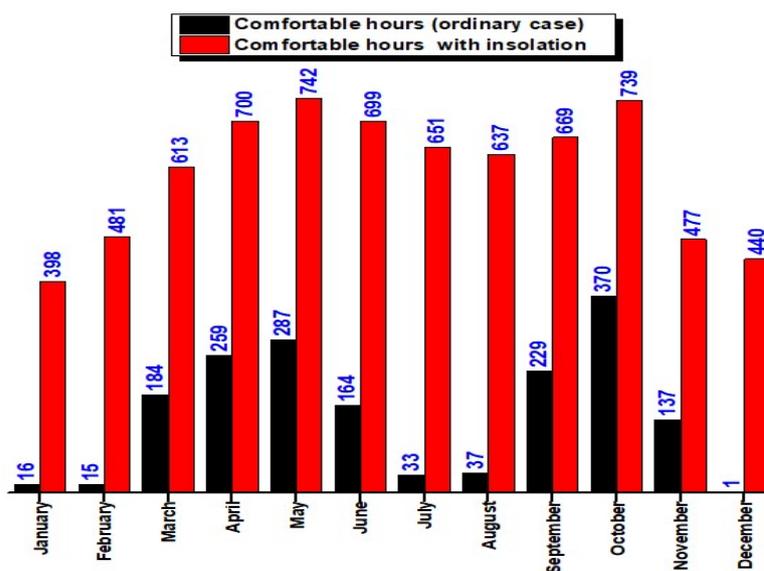


图5. 保温情况和普通情况的舒适时间直方图。

Figure 5. Histogram of comfort hours for thermal insulation case and ordinary case.

我们可以观察到，最冷的月份（即 1 月、2 月和 12 月）的热不适时间最长，即使增加了隔热措施也是如此。这表明仅靠隔热措施不足以在最冷的月份保持舒适的温度。另一方面，最热的月份（即 5 月、7 月和 8 月）的热不适时间最少。这表明隔热措施对减少夏季的过热有积极作用。

分析数据后，很明显，增加隔热层可以减少大多数月份的热不适时间。然而，在最冷的月份，即使有隔热层，仍然会有几个小时的热不适。因此，需要考虑其他策略来提高这些月份建筑物的热性能，例如使用高性能建筑材料（如相变材料）以及在中期和夏季进行自然通风。

5. 利用PCM进行被动能源优化

在本研究中，我们选择了 PCM 来削弱甚至消除围护结构热负荷的影响，如表 2 所示。PCM 也可以被动地永久性集成到天花板中。在这种情况下，我们将 PCM 放置在天花板的内层，其形式是轻质、便携式的板材，可在需要时拆卸和更换，这与 Hamdani 等 [2]的研究一致。其目的是确定在全年干旱气候的气候要求下，PCM 对不同居住区内部温度变化的影响，优先考虑室外温度与 PCM 熔点相近的日子。这项工作旨在充分利用 PCM 的保温和散热能力。

表 2. 采用 PCM 层加热和冷却的每月和每年能量需求 (kWh)。

Table 2. Monthly and annual energy needs for heating and cooling with PCM layer (kWh).

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
PCM layer	Heating (kWh)	2190	1302	412	39	0	0	0	0	0	162	420	1750	6275
	Air conditioning (kWh)	0	0	0	86	790	1830	2550	2230	950	40	0	0	8476

模拟基于建筑围护结构加固，通过在客厅内部天花板上使用可拆卸的 PCM 面板，并将其性能与没有 PCM 面板的同一房间进行比较。然后，我们使用 TRNSYS-18 和 Type 285 [2]对建筑物的热能和能源性能进行建模，分析了每月的节能效果和房间的平均室内空气温度。根据得到的结果，我们进行了特殊配置。

结果表明，3 月、4 月和 5 月的能耗百分比有所下降，当建筑物内未安装 PCM 时，最低能耗分别为 25.7 kWh、27.8 kWh 和 114 kWh。6 月的能耗开始上升，7 月能耗达到峰值 480.3 kWh，8 月份能耗继续上升至 312.2 kWh。在这种情况下，最合适的解决方案是在 6 月和 7 月安装上 Rt21 型的 PCM，但在 8 月份，使用更合适的 Rt26 型的 PCM 结果显示，使用 PCM 的建筑物相比于不使用 PCM 的建筑物，温度更低。

结果表明，对比有和没有 PCM 的建筑物，温度显著下降。因此，我们发现，在一年中的某些月份，必须移除 PCM，因为它会带来负面影响，即导致更高的能源需求。然后我们在 9 月、10 月、11 月、12 月和 1 月中投入使用 Rt21，因为与 Rt26 相比，它取得了更好结果。

6. 结论

隔热和 PCM 是提高沙漠气候住宅热舒适度和减少能源消耗的关键被动策略：

- 改变室内表面的隔热厚度并实施仅在屋顶上的隔热，可提高 7.3%的热舒适度，相当于增加了 642 h 的舒适时间。
- 在墙壁和屋顶上使用 10 cm 厚的隔热层，可使夏季高峰期减少高达 45%的制冷能源需求。
- 过渡季节的挑战凸显了综合生物气候策略的必要性。
- 在内部天花板上使用轻质 PCM 板可有效减轻热负荷，尤其是在 PCM 熔点附近。

- PCM 可减少较冷月份（尤其是 3 月、4 月和 5 月）的供暖需求，并缓和夏季的峰值制冷需求。
- 自适应策略（例如交替 PCM 类型，Rt21 和 Rt26）对于管理 PCM 功效至关重要。

总体而言，虽然隔热和 PCM 集成在优化干旱气候条件下的热性能和能源效率方面被证明是有效的，但持续监测和适应性管理必不可少。这种方法可确保在季节变化中持续受益，并且强调整体生物气候解决方案对于弹性和可持续居住环境的重要性。

作者贡献：方法学，EK 和 SAS；软件，BA；验证，SMEAB 和 RD；调查，ZM；数据整理，GM；写作—原稿准备，MH 和 MKC；监督，EK 和 SAS。所有作者均已阅读并同意手稿的出版版本。

利益冲突：作者声明没有潜在的利益冲突。

术语：

PCM：相变材料—在相变过程中吸收或释放热量的材料，用于各种应用中的热能存储。

Rt21 PCM 类型：熔点约为 21 °C 的相变材料，用于中温热能存储。

Rt26 PCM 类型：熔点约为 26 °C 的相变材料，适用于稍高温度的热能存储。

TRNSYS-18：瞬态系统仿真工具版本 18—用于模拟和分析热系统瞬态行为的软件。

TRNSYS 18 中 PCM 的 Type285：TRNSYS 18 中的特定组件模型，用于模拟系统内相变材料 PCM 的热行为。

参考文献

1. Algérie Presse Service. The construction sector, the largest consumer of energy in Algeria (France). Available online: <http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie> (accessed on 1 January 2021).
2. Hamdani M, Bekkouche SMEA, Al-Saadi S, et al. Judicious method of integrating phase change materials into a building envelope under Saharan climate. *International Journal of Energy Research*. 2021; 45(12): 18048-18065. doi: 10.1002/er.6951
3. Cherier MK, Hamdani M, Guermoui M, et al. Multi-hour ahead forecasting of building energy through a new integrated model. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2022; 41(5). doi: 10.1002/ep.13823
4. M.K. Cherier, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, S. Belaid, M. Hamdani, N. Benamrane, Energy efficiency and supplement interior comfort with passive solar heating in Saharan climate, *Advances in Building Energy Research*, 14(1), 2020, 94-114. <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1502682>.
5. Ayoub A, Maamar H, Yassine M, et al. Improvement of the thermal comfort of building roofs equipped with a phase change materials (PCM) layer under desert weather conditions. 2020 6th International Symposium on New and Renewable Energy (SIENR). Published online October 13, 2021. doi: 10.1109/sienr50924.2021.9631908
6. M. Hamdani, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, R. Belarbi, M.K. Cherier. Parametric simulations to evaluate the necessary thickness of the massive layer in the soil of building. 2019 IOP Conf. Ser : Earth Environ. Sci. 214 012121 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012121>
7. Hamdani M, Aggoune A, Marif Y, et al. Effect of a movable phase change materials (PCMs) layer on lowering energy usage in desert structures. In: Pong P (editor). *Renewable Energy Resources and Conservation. Green Energy and Technology*. Springer; 2024. doi: 10.1007/978-3-031-59005-4_21
8. Hebbal B, Marif Y, Hamdani M, et al. The geothermal potential of underground buildings in hot climates: Case of Southern Algeria. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021; 28: 101422. doi: 10.1016/j.csite.2021.101422
9. Hamdani M, Bekkouche S, Benouaz T, et al. A new modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate. *Thermal Science*. 2015; 19(suppl. 2): 591-601. doi: 10.2298/tsci131217026h

10. Álvarez S, Cabeza LF, Ruiz-Pardo A, et al. Building integration of PCM for natural cooling of buildings. *Applied Energy*. 2013; 109: 514-522. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.080
11. Osterman E, Butala V, Stritih U. PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*. 2015; 106: 125-133. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.012
12. Zhou G, Yang Y, Wang X, et al. Numerical analysis of effect of shape-stabilized phase change material plates in a building combined with night ventilation. *Applied Energy*. 2009; 86(1): 52-59. doi: 10.1016/j.apenergy.2008.03.020
13. Xiong Q, Alshehri HM, Monfaredi R, et al. Application of phase change material in improving Trombe wall efficiency: An up-to-date and comprehensive overview. *Energy and Buildings*. 2022; 258: 111824. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111824
14. Mathis D. Development of new high thermal inertia materials based on wood and bio-sourced phase change materials (France) [PhD thesis]. Laval University; 2019.
15. Delcroix B. Modeling of thermal mass energy storage in buildings with phase change materials [PhD thesis]. University of Montréal; 2015.
16. Aketouane Z, Malha M, Bruneau D, et al. Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks: The case of Moroccan buildings. *Building Simulation*. 2018; 11(6): 1109-1122. doi: 10.1007/s12273-018-0457-5
17. Jin X, Medina MA, Zhang X. Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 103: 1057-1063. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.056
18. Wang J, Long E, Qin W, et al. Ultrathin envelope thermal performance improvement of prefab house by integrating with phase change material. *Energy and Buildings*. 2013; 67: 210-216. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.029
19. Zhou S, Razaqpur AG. CFD modeling and experimental validation of the thermal performance of a novel dynamic PCM Trombe wall: Comparison with the companion static wall with and without PCM. *Applied Energy*. 2024; 353: 121985. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121985
20. Anter AG, Sultan AA, Hegazi AA, et al. Thermal performance and energy saving using phase change materials (PCM) integrated in building walls. *Journal of Energy Storage*. 2023; 67: 107568. doi: 10.1016/j.est.2023.107568
21. Muzhanje AT, Hassan H. Microcapsule geometry and nanomaterial enhancement of PCMs (sp07&sp11) for free heating applications. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 49: 103327. doi: 10.1016/j.csite.2023.103327
22. Kareem BE, Adham AM, Yaqob BN. Experimental analysis of air-multiple pcm heat exchanger in evaporative cooling systems for supply air temperature stabilization. *Journal of Building Engineering*. 2024; 82: 108269. doi: 10.1016/j.job.2023.108269
23. Kareem BE, Adham AM, Yaqob BN. Experimental and numerical investigation of a real-scale air to multiple PCM heat exchanger. *Journal of Building Engineering*. 2024; 89: 109323. doi: 10.1016/j.job.2024.109323
24. Kareem BE, Adham AM, Yaqob BN. Performance Enhancement of a Ventilation System in Hot and Dry Climate Using Air-PCM Heat Exchanger. *International Journal of Heat and Technology*. 2022; 40(3): 773-780. doi: 10.18280/ijht.400316

Article

Assessing the effectiveness of bioclimatic strategies in improving thermal comfort and reducing energy consumption in a house located in a desert climate

Maamar Hamdani^{1,*}, Mohamed Kamal Cherier¹, Guermoui Mawloud¹, Sidi Mohammed El Amine Bekkouche¹, Belaid Abdelfetah¹, Zaiani Mohamed¹, Rachid Djeflal¹, Saleh Al-Saadi^{2,3}, Ehsan Kamel⁴

¹Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, or Applied Research Unit in Renewable Energies), Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, or Renewable Energy Development Center), 47133 Ghardaïa, Algeria

²Sustainable Energy Research Center (SERC), Sultan Qaboos University, 123 Alkhoud, Muscat, Oman

³Department of Civil and Architectural Engineering, Sultan Qaboos University, 123 Alkhoud, Muscat, Oman

⁴Department of Energy Management, New York Institute of Technology, New York 11568, United States

* **Corresponding author:** Maamar Hamdani, hamdanimaamar@gmail.com

Abstract: This article examined the effectiveness of bioclimatic strategies to enhance thermal comfort and decrease energy consumption in a desert-climate residence. The study assessed the impact of thermal insulation, natural ventilation, and phase-change materials (PCMs) over a year, with each strategy evaluated both independently and in combination. Monthly energy bills were analyzed to determine the impact of these strategies. The results indicated substantial reductions in energy costs, with decreases of up to 50% during transitional seasons; however, the complete elimination of heating and cooling systems was not feasible due to significant thermal phase differences between indoor and outdoor environments. Further analysis of thermal discomfort hours revealed that increasing insulation thickness during specific seasons could mitigate peak heat intensity and delay its occurrence, thus extending periods of comfort and reducing discomfort hours. Despite these improvements, some periods of thermal distress persisted during the warmest months, underscoring the necessity for a balanced approach to climate adaptation strategies. Overall, the implementation of these strategies proved effective in improving comfort and reducing energy usage in desert-climate homes, although they do not fully negate the need for traditional heating and cooling systems.

Keywords: bioclimatic strategies; thermal comfort; energy consumption; desert climate; thermal insulation; phase-change materials; natural ventilation; energy bills