

Ứng dụng viễn thám và mô phỏng năng lượng trong phân tích hiệu quả nhiệt của mái nhà xanh

Nguyễn Trường Ngân^{1,2}

¹ Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM (HCMUT)

² Đại học Quốc Gia TP.HCM (UN-HCM)

TỪ KHOÁ

Mái nhà xanh
Viễn thám
Mô phỏng năng lượng
Hiệu quả nhiệt
Đô thị bền vững

TÓM TẮT

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng, việc phát triển các giải pháp xanh nhằm giảm thiểu hiệu ứng đảo nhiệt đô thị là hết sức cấp thiết. Mái nhà xanh nổi lên như một giải pháp bền vững, vừa cải thiện vi khí hậu, vừa nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng cho công trình. Nghiên cứu này ứng dụng kết hợp dữ liệu viễn thám và mô phỏng năng lượng để đánh giá hiệu quả nhiệt của mái nhà xanh tại khu vực trung tâm Thành phố Hồ Chí Minh. Ảnh vệ tinh được xử lý nhằm xác định và phân loại mái nhà xanh; đồng thời mô hình mô phỏng năng lượng được thiết lập để phân tích tác động đến nhiệt độ bề mặt và nhu cầu làm mát. Kết quả cho thấy mái nhà xanh giúp giảm nhiệt độ bề mặt trung bình từ 0,45°C đến 1,05°C và tiết kiệm từ 0,55 đến 1,66 kWh/m²/năm, tùy loại mái và mật độ phủ xanh. Kết quả nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc quy hoạch, thiết kế và phát triển các giải pháp mái nhà xanh trong đô thị Việt Nam.

KEYWORDS

Green roof
Remote sensing
Energy simulation
Thermal performance
Sustainable urban development

ABSTRACT

In the context of rapid urbanization and increasing climate change, developing green solutions to mitigate the urban heat island effect has become urgent. Green roofs have emerged as a sustainable approach that improves microclimate conditions and enhances building energy performance. This study applies a combined approach of remote sensing and energy simulation to evaluate the thermal performance of green roofs in the central area of Ho Chi Minh City. Satellite imagery was processed to identify and classify green roofs, while an energy simulation model was established to analyze their impact on surface temperature and cooling demand. The results indicate that green roofs can reduce average surface temperature by 0.45 – 1.05 °C and save 0.55 – 1.66 kWh/m²/year of cooling energy, depending on roof type and vegetation density. The findings provide both scientific evidence and practical implications for the planning, design, and implementation of green roof solutions in Vietnamese urban areas.

1. Giới thiệu

Mái nhà xanh” (green roof) là hệ thống mái được phủ bằng lớp thảm thực vật nhằm tăng khả năng cách nhiệt, hấp thụ nước mưa và cải thiện vi khí hậu đô thị. Các mái nhà xanh được xem như một dạng mảng xanh trên cao, đóng vai trò bổ sung quan trọng cho không gian xanh mặt đất trong đô thị có mật độ xây dựng cao. Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chứng minh khả năng giảm nhiệt độ bề mặt và tiêu thụ năng lượng làm mát của mái nhà xanh, đặc biệt tại các khu vực có khí hậu nhiệt đới và cận nhiệt đới.

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và quá trình đô thị hóa nhanh chóng, các đô thị lớn ở khu vực nhiệt đới, đặc biệt như Thành phố Hồ Chí Minh (TP.HCM), đang đối mặt với hiện tượng đảo nhiệt đô thị (Urban Heat Island - UHI), làm gia tăng nhiệt độ bề mặt và mức tiêu thụ năng lượng trong các công trình xây dựng [1,2]. Một trong những giải pháp quan trọng nhằm giảm thiểu UHI là tăng cường diện tích

xanh, trong đó mái nhà xanh được xem là giải pháp có tiềm năng cao nhờ khả năng cải thiện vi khí hậu, giảm nhiệt bề mặt và tiết kiệm năng lượng cho các tòa nhà [3,4].

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chứng minh hiệu quả của mái nhà xanh trong việc giảm nhiệt độ bề mặt và cải thiện chất lượng vi khí hậu. Ví dụ, tác giả Santamouris đã tổng hợp bằng chứng thực nghiệm về hiệu quả làm mát của mái nhà xanh ở nhiều điều kiện khí hậu khác nhau [5]; Li & Babcock [6] nhấn mạnh khả năng giảm nhiệt độ mái và tiết kiệm năng lượng; Susca và cộng sự cho thấy mái nhà xanh có thể làm giảm nhiệt độ bề mặt đến 2–5 °C ở khu vực đô thị dày đặc [7]. Ở khu vực Đông Nam Á, mái nhà xanh tại Singapore đã được chứng minh giúp cải thiện hiệu quả năng lượng và giảm chi phí vận hành hệ thống điều hòa [8].

Tại Việt Nam, một số nghiên cứu bước đầu đã tiếp cận vấn đề này, song chủ yếu dừng lại ở mô hình thí nghiệm quy mô nhỏ hoặc các nghiên cứu đánh giá định tính [9,10]. Các nghiên cứu sử dụng viễn

*Liên hệ tác giả: ntngan@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 06/10/2025, sửa xong ngày 20/10/2025, chấp nhận đăng ngày 21/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2025.1124>

thăm để đánh giá hiệu quả nhiệt của mái nhà xanh trên quy mô toàn đô thị vẫn còn rất hạn chế.

Ba hạn chế chính của các công trình trước là: (i) chưa khai thác dữ liệu viễn thám độ phân giải phù hợp (như Landsat, Sentinel) để đánh giá sự khác biệt nhiệt độ bề mặt giữa mái nhà xanh và không xanh, (ii) thiếu nghiên cứu dài hạn theo mùa, đặc biệt trong bối cảnh khí hậu nhiệt đới gió mùa như TP.HCM, nơi sự khác biệt nhiệt độ giữa mùa khô và mùa mưa rất rõ rệt, và (iii) ít nghiên cứu kết hợp phân tích nhiệt - năng lượng, nhằm lượng hóa hiệu quả tiết kiệm điện năng từ mái nhà xanh.

Xuất phát từ những khoảng trống trên, nghiên cứu này kế thừa kết quả phân loại mái nhà xanh/không xanh bằng viễn thám và học máy trong khu vực trung tâm TP.HCM [11], đồng thời sử dụng ảnh Landsat 9 để tính toán nhiệt độ bề mặt đất (LST) trong các tháng mùa khô (2024–2025). Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung giải quyết 3 vấn đề: (i) phân tích sự khác biệt nhiệt độ giữa mái nhà xanh và không xanh; (ii) đánh giá biến động nhiệt theo thời gian mùa khô, và (iii) lượng hóa hiệu quả nhiệt và năng lượng của mái nhà xanh.

Các kết quả từ nghiên cứu đóng góp về mặt lý thuyết: cung cấp bằng chứng định lượng về hiệu quả giảm nhiệt của mái nhà xanh trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa, về mặt ứng dụng: làm cơ sở khoa học cho quy hoạch, thiết kế và khuyến nghị chính sách thúc đẩy phát triển mái nhà xanh tại các đô thị lớn ở Việt Nam.

2. Dữ liệu và phương pháp

2.1. Khu vực nghiên cứu

Quận 1 (toàn bộ diện tích của 4 phường hiện tại: Tân Định, Sài Gòn, Bến Thành và Cầu Ông Lãnh) nằm ở vị trí trung tâm của TP.HCM, là khu vực có mật độ xây dựng cao nhất và tập trung nhiều hoạt động kinh tế, thương mại – dịch vụ, hành chính và văn hóa của thành phố. Với diện tích khoảng 7,7 km² nhưng dân số thường trú và lượng người làm việc, di chuyển hằng ngày rất lớn, Quận 1 được xem là khu vực điển hình của môi trường đô thị nhiệt đới điển hình, nơi các hiệu ứng đảo nhiệt đô thị diễn ra rõ rệt. Một đặc điểm nổi bật của Quận 1 là mật độ cao tầng dày đặc, đặc biệt là các tòa nhà văn phòng, trung tâm thương mại, khách sạn và cơ sở hạ tầng đô thị. Theo số liệu quy hoạch và khảo sát, tỷ lệ diện tích bề mặt mái bê tông và vật liệu hấp thụ nhiệt ở Quận 1 chiếm phần lớn, trong khi diện tích mảng xanh đô thị còn hạn chế. Điều này khiến nhu cầu sử dụng năng lượng cho làm mát tại các công trình luôn ở mức cao, góp phần gia tăng phát thải khí nhà kính và áp lực lên hệ thống điện của thành phố.

TP.HCM là đô thị nhiệt đới gió mùa điển hình, với nhiệt độ trung bình năm cao (27–28 °C), nắng nóng kéo dài trong mùa khô (tháng 12–5). Trong bối cảnh này, Quận 1 trở thành khu vực nghiên cứu đại diện lý tưởng cho việc đánh giá hiệu quả tiết kiệm năng lượng của mái nhà xanh. Một số lý do chính gồm: (i) Tính điển hình về hình thái đô thị: Quận 1 có mật độ xây dựng và hệ số sử dụng đất cao, phản ánh rõ nét đặc trưng của khu trung tâm đô thị nhiệt đới, (ii) Áp lực nhiệt và năng lượng: Nhu cầu điều hòa không khí tại các tòa nhà cao tầng luôn lớn, tạo cơ hội để đánh giá mức tiết kiệm năng lượng từ giải pháp mái nhà

xanh, và (iii) Khả năng nhân rộng kết quả: Giải pháp nghiên cứu tại Quận 1 có thể cung cấp bằng chứng khoa học, làm cơ sở tham chiếu và áp dụng cho các khu vực trung tâm khác của TP.HCM và các đô thị nhiệt đới tương đồng.

2.2. Dữ liệu và công cụ sử dụng

Dữ liệu mái nhà: Kế thừa dữ liệu số (định dạng shapefile) của kết quả phân loại mái nhà xanh và không xanh bằng phương pháp viễn thám kết hợp học máy. Toàn bộ khu vực nghiên cứu (Quận 1, TP.HCM) ghi nhận 1.129 mái nhà xanh và 10.419 mái nhà không xanh [11]. Sau khi gán giá trị LST cho các tháng mùa khô năm 2025 và loại bỏ các mái nhà có giá trị LST = nodata, số lượng mẫu còn lại là 1.660 mái nhà (trong đó có 208 mái nhà xanh và 1.452 mái nhà không xanh).

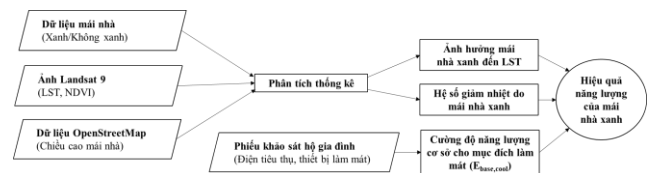
Dữ liệu viễn thám: Ảnh Landsat 9 được sử dụng để tính toán chỉ số LST và NDVI cho các tháng mùa khô (từ 12/2024 đến 5/2025). Sau khi lọc ảnh với tỷ lệ mây phủ <10 %, có 4 ảnh đảm bảo chất lượng được lựa chọn, tương ứng các ngày 19/01/2025, 04/02/2025, 24/03/2025 và 09/04/2025. Các tháng 12/2024 và 5/2025 không có ảnh đạt yêu cầu chất lượng.

Dữ liệu bản đồ: Lớp OSM_buildings được sử dụng để lấy trường dữ liệu độ cao công trình. Dữ liệu này được cập nhật đến 02/03/2025.

Dữ liệu khảo sát gia đình: Thực hiện khảo sát 20 hộ gia đình tại Quận 1 bằng biểu mẫu Google Form. Khảo sát thu thập hai nhóm thông tin chính: (i) lượng điện tiêu thụ hàng tháng (kWh) trong các tháng 1, 2, 3, 4/2025; (ii) đặc điểm và tần suất sử dụng thiết bị làm mát, bao gồm số lượng, công suất và thời gian sử dụng trung bình/ngày của các thiết bị như máy lạnh, quạt điện, quạt trần và quạt hơi nước.

Công cụ xử lý và phân tích: Nghiên cứu sử dụng các phần mềm mã nguồn mở, bao gồm: QGIS (xử lý ảnh viễn thám và biên tập bản đồ), JASP (phân tích thống kê mô tả, kiểm định giả thuyết, hồi quy).

2.3. Phương pháp nghiên cứu



Hình 1. Quy trình thực hiện nghiên cứu.

2.3.1. Tính toán nhiệt độ bề mặt (LST) từ các ảnh Landsat-9

Nhiệt bề mặt (LST) được tính toán cho từng thời điểm có ảnh được chọn, sử dụng kênh hồng ngoại TIRS-1 (band 10), kênh NIR (band 5) và kênh Red (band 4) qua các công thức dưới đây [12]:

$$LST = \frac{BT}{\left\{1 + \left(\frac{\lambda_{SBT}}{hc}\right) \ln(\epsilon)\right\}} \quad (1)$$

Trong đó:

LST: nhiệt độ bề mặt đất (°K), sau khi tính được chuyển về °C để phân tích thống kê.

BT: nhiệt độ sáng tại kênh TIRS-1 (°K)

λ : bước sóng trung bình của kênh TIRS-1 ($\approx 10,895 \mu\text{m}$)

δ : hằng số Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

h : hằng số Planck ($6,625 \times 10^{-34} \text{ Js}$)

c : vận tốc của ánh sáng trong chân không ($2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$)

ϵ : hệ số phát xạ bề mặt. $\epsilon = 0.004 * P_V + 0,986$.

ρ_{NIR} ; ρ_{Red} : phản xạ phổ bề mặt tại các kênh tương ứng sau khi đã hiệu chỉnh khí quyển.

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (2)$$

Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) được tính theo công thức (3):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (3)$$

2.3.2. Thống kê mô tả và kiểm định so sánh (green vs non-green)

Dữ liệu LST được gán các giá trị min, max, trung bình, trung vị, sai số chuẩn của các pixel trong phạm vi từng polygon thuộc hai nhóm mái nhà xanh và không xanh. Tiếp theo, dữ liệu này sẽ được đưa vào phần mềm JASP để tiến hành thống kê mô tả và kiểm định. Một số kỹ thuật kiểm định được dùng: Kiểm tra phương sai đồng nhất (Levene's test), kiểm tra phân phối chuẩn trong mỗi nhóm (Shapiro-Wilk test), kiểm định so sánh (Welch t-test, Mann-Whitney U test).

2.3.3. Phân tích đa biến (kiểm soát nhân tố)

Xây dựng mô hình hồi quy tuyến tính đa biến với mục đích kiểm định tác động của các đặc tính mái nhà đến LST. Mô hình được sử dụng trong nghiên cứu gồm 4 biến độc lập: Biến nhị phân loại mái nhà (green), chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI), độ cao mái nhà (height) và diện tích mái nhà (area). Các hệ số β_j (với $j = 1..4$) biểu thị mức thay đổi trung bình của LST khi từng biến tăng 1 đơn vị, giữ các biến khác không đổi. Mô hình hồi quy tổng quát như sau:

$$LST_i = \beta_0 + \beta_1 Green_i + \beta_2 NDVI_i + \beta_3 Height_i + \beta_4 Area_i + \epsilon_i \quad (4)$$

Trong mô hình này, ϵ_i là sai số ngẫu nhiên (residual term), giả định phân phối chuẩn với kỳ vọng bằng 0 và phương sai không đổi.

2.3.4. Phân tích biến động theo thời gian (chuỗi tháng mùa khô)

Để đánh giá sự biến động LST của các mái nhà xanh so với mái nhà không xanh trong các tháng mùa khô (tháng 1–4/2025), nghiên cứu áp dụng phân tích phương sai lặp lại (Repeated Measures ANOVA – RM-ANOVA). Mô hình RM-ANOVA được thiết lập với “Tháng” là yếu tố đo lặp lại (repeated factor) gồm bốn mức (Tháng 1, 2, 3 và 4), và “Loại mái” là yếu tố giữa nhóm (between-group factor) gồm hai mức (Green, Non-green).

Phương pháp này cho phép kiểm định đồng thời hai yếu tố: (i) hiệu ứng giữa các nhóm (Between-subjects effect) – sự khác biệt về LST giữa hai loại mái (mái xanh và mái không xanh); và (ii) hiệu ứng trong nhóm (Within-subjects effect) – sự thay đổi LST theo thời gian (giữa các tháng).

2.3.5. Ước tính hiệu quả năng lượng

Hiệu quả giảm nhiệt (ΔLST) của các mái xanh được tính riêng cho từng tháng dựa trên chênh lệch giữa nhiệt độ bề mặt của từng mái xanh và giá trị trung bình của nhóm mái không xanh trong cùng khu vực.

$$\Delta LST_{i,m} = LST_{i,m} - \overline{LST}_{non-green,m} \quad (5)$$

Trong đó:

m : tháng khảo sát, bao gồm 4 tháng mùa khô (1-4/2025)

$\Delta LST_{i,m}$: hiệu quả giảm nhiệt vào tháng m của mái nhà xanh thứ i (°C).

$\overline{LST}_{non-green,m}$: LST trung bình của các mái không xanh trong tháng m (°C).

Giá trị âm của ΔLST biểu thị mức giảm nhiệt của mái xanh so với nền nhiệt khu vực, được sử dụng để ước tính hiệu quả tiết kiệm năng lượng tương ứng. ΔLST trung bình các tháng mùa khô sẽ được dùng để tính toán hiệu quả năng lượng của mái nhà xanh tại các bước tiếp theo.

Tỷ lệ phần trăm năng lượng làm mát tiết kiệm được của mái nhà xanh được xác định dựa vào hệ số quy đổi k theo công thức (6).

$$\Delta T_{savings,i} = k \times \Delta LST_i \quad (6)$$

Trong đó:

$\Delta T_{savings,i}$: tỷ lệ nhu cầu làm mát tiết kiệm được của mái nhà i (%).

ΔLST_i : chênh lệch LST trung bình các tháng mùa khô giữa mái nhà xanh i và mái không xanh (°C),

k : hệ số quy đổi (%/°C) thể hiện mức giảm nhu cầu làm mát tương ứng với mỗi 1 °C giảm nhiệt độ mái.

Do giá trị k phụ thuộc mạnh vào đặc điểm khí hậu, cấu trúc công trình và hiệu suất hệ thống điều hòa không khí (HVAC), nghiên cứu áp dụng ba kịch bản đại diện cho khoảng biến thiên được ghi nhận trong các tài liệu quốc tế [5,13,14]:

- (1) Kịch bản A (bảo thủ): $k = 2,0 \text{ \%/}^\circ\text{C}$
- (2) Kịch bản B (trung bình): $k = 3,5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$
- (3) Kịch bản C (lạc quan): $k = 6,0 \text{ \%/}^\circ\text{C}$

Khoảng giá trị này phản ánh điều kiện thực tế của vùng khí hậu nóng ẩm, trong đó hiệu quả giảm nhiệt của mái xanh bị giới hạn bởi độ ẩm không khí cao và bức xạ mặt trời mạnh - tương tự điều kiện khí hậu tại Thành phố Hồ Chí Minh.

Lượng điện năng làm mát tiết kiệm được do mái nhà xanh giảm nhiệt sẽ được xác định dựa vào công thức (7):

$$E_{savings} = Area \times E_{base,cool} \times \Delta T_{savings} \quad (7)$$

Trong đó:

$E_{savings}$: năng lượng tiết kiệm do hiệu quả giảm nhiệt ((kWh/năm), được tính cho từng mái nhà xanh và tổng hợp cho cả khu vực nghiên cứu.

Area: diện tích (mái nhà/khu vực nghiên cứu) (m^2)

$E_{base,cool}$: cường độ năng lượng cơ sở cho mục đích làm mát ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{năm}$), được xác định bằng cách khảo sát nông hộ tiêu thụ điện theo công thức (8).

$$E_{base,cool} = E_{base,total} \times \overline{f_{cool}} \quad (8)$$

Trong đó:

$\overline{f_{cool}}$: tỷ lệ năng lượng điện dùng cho làm mát (cooling share)

trung bình (trên tập mẫu khảo sát) (%)

$E_{\text{base,total}}$: cường độ sử dụng năng lượng trung bình của TP.HCM ($\text{kWh/m}^2/\text{năm}$).

Trong nghiên cứu này, $E_{\text{base,total}} = 60 \text{ kWh/m}^2/\text{năm}$ theo báo cáo của UNEP năm 2018 cho nhà ở đô thị tại Việt Nam [15].

3. Kết quả và thảo luận

3.1. LST của các tháng mùa khô năm 2025

Mùa khô tại TP.HCM gồm 6 tháng (từ tháng 12 năm trước đến tháng 5 năm sau). Tuy nhiên, do đặc điểm khí tượng, các tháng chuyển mùa thường rất nhiều mây và dữ liệu viễn thám quang học sẽ rất khó đảm bảo chất lượng cho các phân tích. Nghiên cứu này tính toán chỉ số LST và NDVI của các tháng 1-4 theo các công thức (1), (2) và (3), kết quả thu được như hình 2.

3.2. Phân tích chênh lệch nhiệt độ giữa mái nhà xanh và không xanh

3.2.1. Thống kê mô tả

Dữ liệu đưa vào phân tích gồm 1.660 mái nhà, trong đó có 208 mái nhà xanh (12,53 %) và 1.452 mái nhà không xanh (87,47 %). Kết quả thống kê mô tả cho thấy các mái nhà xanh (Green = 1) có giá trị trung bình NDVI (0,287) cao hơn đáng kể so với nhóm không xanh (0,168), phản ánh sự hiện diện rõ ràng của thảm thực vật. Nhiệt độ bề mặt trung bình (LST) của nhóm mái nhà xanh ($47,23^\circ\text{C}$) thấp hơn nhóm không xanh ($48,29^\circ\text{C}$), cho thấy hiệu quả làm mát nhất định. Chiều cao trung bình của hai nhóm tương đương nhau, nhưng phân tán khá lớn do đặc trưng đa dạng về loại công trình. Diện tích mái nhà xanh trung bình cũng lớn hơn so với nhóm không xanh. Hệ số lệch (Skewness) dương ở các biến NDVI, chiều cao và diện tích cho thấy phân bố lệch phải, tức là phần lớn các giá trị tập trung ở mức thấp đến trung bình.

3.2.2. Kiểm định so sánh giữa mái xanh và mái không xanh

Kết quả kiểm định Levene cho thấy phương sai giữa hai nhóm không có sự khác biệt đáng kể ($F = 2,091$, $p = 0,148$), do đó có thể giả định phương sai bằng nhau. Kiểm định t độc lập theo Welch cho thấy sự khác biệt trung bình giữa hai nhóm có ý nghĩa thống kê ($t = 8,912$, $p < 0,001$). Kết quả này được củng cố bởi kiểm định phi tham số Mann-Whitney U ($U = 210.929,500$, $p < 0,001$), khẳng định sự khác biệt có ý nghĩa giữa hai nhóm được so sánh (Bảng 2).

3.2.3. Kết quả mô hình hồi quy

Một mô hình hồi quy tuyến tính đa biến được xây dựng nhằm kiểm định ảnh hưởng của đặc tính mái nhà đến LST. Kết quả cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê ($F(4;1655) = 41,534$; $p < 0,001$) với R^2 hiệu chỉnh = 0,089, tức các biến độc lập giải thích khoảng 8,9 % biến thiên của LST - một mức chấp nhận được trong bối cảnh đô thị phức

tạp. Các nghiên cứu tiếp theo cần đưa thêm nhiều yếu tố ảnh hưởng vào để tăng mức ý nghĩa thống kê cho mô hình này.

Trong các biến dự báo, NDVI thể hiện tác động mạnh nhất ($\beta = -0,163$; $p < 0,001$), khẳng định vai trò làm mát của thảm thực vật. Mái xanh (Green roof) cũng có ảnh hưởng âm có ý nghĩa ($B = -0,523$; $p < 0,001$), cho thấy sau khi kiểm soát các yếu tố khác, mái xanh có nhiệt độ trung bình thấp hơn mái không xanh khoảng $0,52^\circ\text{C}$. Ngoài ra, diện tích mái ($\beta = -0,124$; $p < 0,001$) và chiều cao công trình ($\beta = -0,077$; $p = 0,001$) đều có tác động âm nhẹ, phản ánh xu hướng các mái lớn hoặc cao thường mát hơn.

Nhìn chung, mô hình cho thấy các yếu tố xanh – đặc biệt là NDVI và loại mái – có vai trò quan trọng trong việc giảm nhiệt độ bề mặt, qua đó góp phần hạn chế hiệu ứng đảo nhiệt đô thị.

3.3. Đánh giá biến động nhiệt theo các tháng mùa khô

Kết quả thống kê mô tả cho thấy, giá trị LST trung bình tại nhóm mái nhà xanh luôn thấp hơn đáng kể so với nhóm không xanh trong tất cả các tháng mùa khô (Bảng 4, Hình 3).

Phân tích ANOVA lặp lại (RM-ANOVA) được tiến hành để đánh giá ảnh hưởng của loại mái (green vs. non-green) đến nhiệt độ bề mặt (LST) trong các tháng (tháng 1-4/2025). Kết quả ANOVA lặp lại (Bảng 5) thể hiện LST tăng dần từ tháng 1 đến tháng 4 ($F(2,03; 3371,13) = 22.299,94$; $p < 0,001$). Mái xanh luôn có nhiệt độ thấp hơn mái không xanh ($F(1;1658) = 95,94$; $p < 0,001$). Đáng chú ý, hiệu quả giảm nhiệt của mái xanh thay đổi theo thời gian ($F(2,03; 3371,13) = 6,77$; $p = 0,001$), với chênh lệch trung bình nhỏ nhất vào tháng 2 ($\Delta\text{LST} = 0,45^\circ\text{C}$) và lớn nhất vào tháng 4 ($\Delta\text{LST} = 1,05^\circ\text{C}$).

3.4. Hiệu quả nhiệt và năng lượng của mái nhà xanh

3.4.1. Kết quả khảo sát hộ gia đình tiêu thụ điện

Kết quả khảo sát 20 hộ gia đình tại Quận 1, TP.HCM cho thấy: về loại hình nhà ở, tỷ lệ hộ sống trong nhà liền kề và căn hộ chung cư là ngang nhau (đều chiếm 35 %), phần còn lại là các loại hình khác. Về quy mô hộ, nhóm có 4 thành viên chiếm tỷ lệ cao nhất (45 %), tiếp đến là nhóm 2 thành viên (25 %), và có 2 hộ gồm 5 thành viên (10 %).

Xét về thiết bị tiêu thụ điện, 20 % số hộ không sử dụng máy lạnh, trong khi 30 % sử dụng ba máy lạnh. 50 % số hộ sử dụng hai quạt bàn/quạt đứng, đáng chú ý có 20 % hộ sử dụng đến 6 quạt trong nhà. Quạt trần chỉ được sử dụng ở 35 % số hộ, và không có hộ nào sử dụng quạt phun sương hay quạt hơi nước.

Trung bình, lượng điện tiêu thụ trong 4 tháng mùa khô năm 2025 của các hộ khảo sát là 1.318 kWh/hộ , trong đó $586,5 \text{ kWh/hộ}$ dùng cho mục đích làm mát. Tỷ lệ điện năng sử dụng cho làm mát trung bình, ký hiệu là $\overline{f_{\text{cool}}}$, đạt 44,4 %.

Dựa trên cường độ sử dụng năng lượng trung bình của TP.HCM ($E_{\text{base,total}} = 60 \text{ kWh/m}^2/\text{năm}$ [15]), theo công thức (8), cường độ năng lượng cơ sở cho mục đích làm mát ($E_{\text{base,cool}}$) cho khu vực nghiên cứu tại quận 1 TP.HCM tính được là $27,4 \text{ kWh/m}^2/\text{năm}$. Giá trị này được

sử dụng làm tham số nền để tính toán hiệu quả tiết kiệm năng lượng của mái nhà xanh.

3.4.2. Kết quả đánh giá hiệu quả tiết kiệm năng lượng của mái nhà xanh

Áp dụng công thức (7), năng lượng tiết kiệm hàng năm do hiệu quả giảm nhiệt của mái nhà xanh (E_{saving} , kWh/năm) được tính cho từng mái nhà và tổng hợp cho toàn bộ khu vực nghiên cứu theo ba kịch bản giả định:

- (1) Kịch bản A (bảo thủ): hiệu quả giảm nhiệt thấp;
- (2) Kịch bản B (trung bình): hiệu quả giảm nhiệt theo giá trị quan sát thực nghiệm;
- (3) Kịch bản C (lạc quan): hiệu quả giảm nhiệt cao nhất trong giới hạn tin cậy.

Kết quả (Bảng 6) cho thấy, với 208 mái nhà xanh hiện hữu, tổng năng lượng tiết kiệm hàng năm tại Quận 1 ước đạt 56.971 kWh (kịch

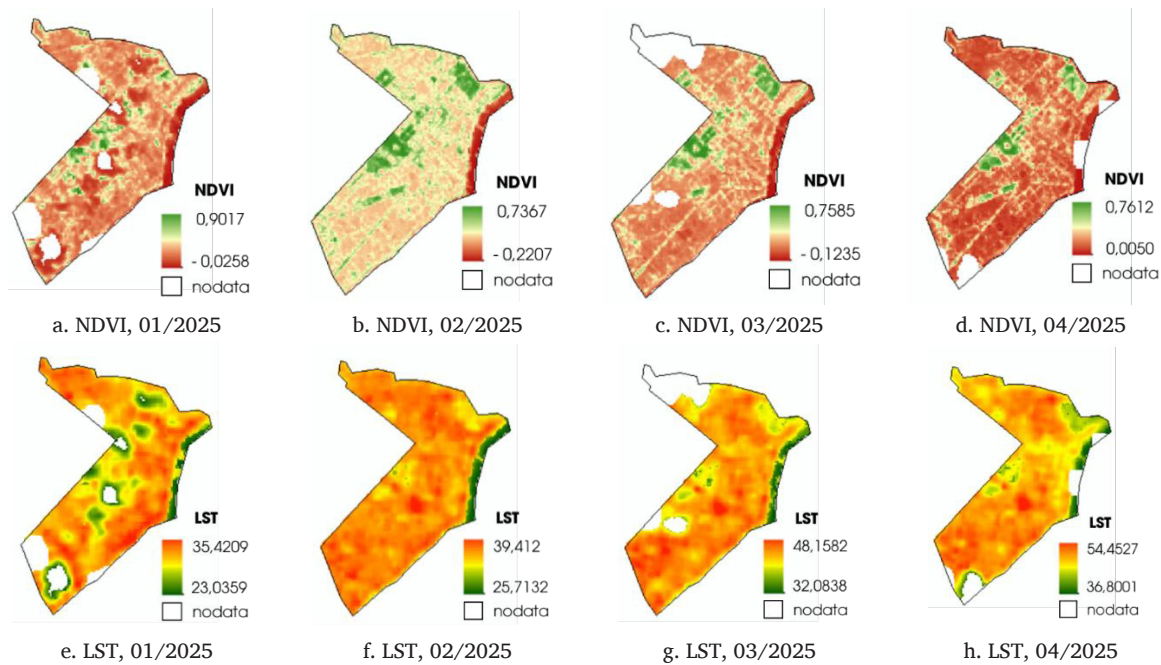
bản A) đến 170.914 kWh (kịch bản C). Trung bình, mỗi mét vuông mái nhà xanh đóng góp mức tiết kiệm điện năng khoảng 0,55 – 1,66 kWh/năm.

Những kết quả này chứng tỏ mái nhà xanh không chỉ có tác dụng giảm nhiệt bề mặt mà còn góp phần tiết kiệm năng lượng tiêu thụ trong đô thị, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới nóng ẩm như TP.HCM.

3.4.3. Bản đồ hiệu tiết kiệm năng lượng của mái nhà xanh

Dữ liệu cường độ tiết kiệm năng lượng trung bình (E_{saving} , kWh/m²/năm) của từng mái nhà xanh theo 3 kịch bản sẽ được biểu diễn thành các bản đồ (hình 4).

Kết quả cho thấy khu vực phía đông bắc Quận 1 hiện nay tập trung các mái nhà xanh đem lại hiệu quả tiết kiệm năng lượng tốt nhất. Theo kịch bản lạc quan, hàng năm các mái nhà xanh này có thể tiết kiệm được tối đa lên đến 6,0 kWh trên mỗi m² được bố trí.



Hình 2. Kết quả tính toán LST và NDVI các tháng mùa khô năm 2025.

Bảng 1. Thống kê mô tả các biến theo nhóm mái nhà.

Biến	Nhóm	n	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Min	Max	Skewness
LST (°C)	Green = 0	1.452	48,288	1,674	38,642	52,034	-1,712
	Green = 1	208	47,233	1,585	42,648	50,867	-0,361
NDVI	Green = 0	1.452	0,168	0,049	0,056	0,424	1,097
	Green = 1	208	0,287	0,072	0,117	0,563	0,541
Height (m)	Green = 0	1.452	12,437	24,899	5,000	419,000	7,008
	Green = 1	208	13,393	23,706	5,000	191,750	3,990
Area (m ²)	Green = 0	1.452	439,830	468,491	5,390	5.421,710	3,177
	Green = 1	208	493,915	439,268	33,680	2.212,100	1,641

Ghi chú: NDVI = chỉ số thực vật; Height = chiều cao mái; Area = diện tích mái.

Bảng 2. Kết quả kiểm định so sánh LST giữa hai nhóm mái nhà.

Kiểm định	Thống kê	p-value
Levene (equal variance)	2.091	0,148
t-test Welch	8.912	< 0,001
Mann–Whitney U	210.929,500	< 0,001

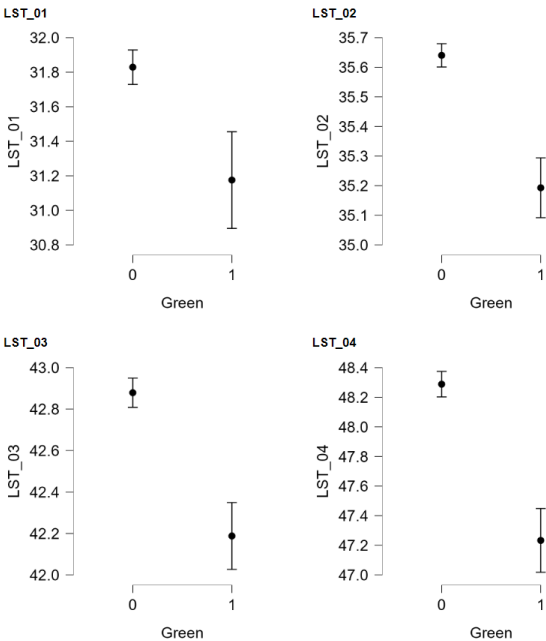
Bảng 3. Kết quả hồi quy tuyến tính.

Biến độc lập	B (Unstd.)	SE	β (Std.)	t	p
(Hằng số)	49,260	0,136	-	361,524	<0,001
Area (m ²)	$-4,52 \times 10^{-4}$	$9,03 \times 10^{-5}$	-0,124	-5,005	<0,001
Height (m)	-0,005	0,002	-0,077	-3,194	0,001
NDVI	-4,212	0,775	-0,163	-5,433	<0,001
Green (1 = Yes)	-0,523	0,151	-	-3,459	<0,001

Model summary: $R = 0,302$; $R^2 = 0,091$; Adjusted $R^2 = 0,089$; $RMSE = 1,622$; $F(4;1655) = 41,534$; $p < 0,001$

Bảng 4. Kết quả thống kê mô tả LST các tháng mùa khô năm 2025.

Tháng	Nhóm	n	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Min	Max	Skewness
01/2025	Green = 0	1.452	31,829	1,940	23,600	35,389	-1,212
	Green = 1	208	31,176	2,059	26,365	34,532	-0,638
02/2025	Green = 0	1.452	35,640	0,764	33,016	37,808	-0,235
	Green = 1	208	35,193	0,743	32,866	36,496	-0,511
03/2025	Green = 0	1.452	42,879	1,373	37,073	46,354	-0,838
	Green = 1	208	42,188	1,185	37,672	44,946	-0,579
04/2025	Green = 0	1.452	48,288	1,674	38,642	52,034	-1,712
	Green = 1	208	47,233	1,585	42,648	50,867	-0,361



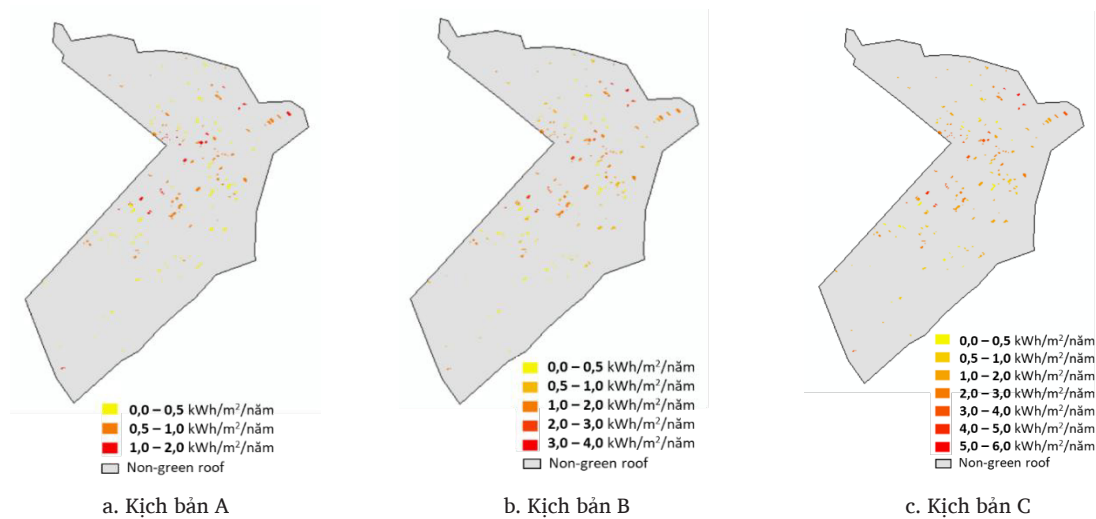
Hình 3. So sánh LST trung bình giữa mái nhà xanh và không xanh trong các tháng mùa khô (2024–2025), với thanh sai số thể hiện khoảng tin cậy 95 %.

Bảng 5. LST trung bình của mái xanh và mái không xanh các tháng (đơn vị °C).

Tháng	Mái nhà xanh (M ± SD)	Mái nhà không xanh (M ± SD)	Chênh lệch (Δ LST, °C)
01/2025	31,176 ± 2,059	31,829 ± 1,940	0,653
02/2025	35,193 ± 0,743	35,640 ± 0,764	0,447
03/2025	42,188 ± 1,185	42,879 ± 1,373	0,691
04/2025	47,233 ± 1,585	48,288 ± 1,674	1,055

Bảng 6. Năng lượng tiết kiệm hàng năm (E_{saving} , kWh/năm) của mái nhà xanh.

Kịch bản	n	Trung bình	Độ lệch chuẩn	Min	Max	Skewness
Bảo thủ (A)	208	273,9	25,13	0	2.173,4	2,398
Trung bình (B)	208	479,3	43,98	0	3.803,5	2,398
Lạc quan (C)	208	821,7	75,39	0	6.520,2	2,398



Hình 4. Cường độ tiết kiệm năng lượng của các mái nhà xanh theo 3 kịch bản.

3.5. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu đã khẳng định vai trò quan trọng của mái nhà xanh trong việc giảm nhiệt độ bề mặt và tiết kiệm năng lượng trong điều kiện đô thị nhiệt đới điển hình như TP. Hồ Chí Minh. Mức chênh lệch nhiệt độ giữa mái xanh và mái không xanh dao động từ 0,45 °C đến 1,05 °C, phù hợp với kết quả của nhiều nghiên cứu quốc tế. Chẳng hạn, Santamouris ghi nhận mái xanh tại Athens có thể giảm 0,8–2,5 °C so với mái thông thường [5]; tương tự, mức giảm trung bình 0,5–1,8 °C được báo cáo tại Hồng Kông [16]. Kết quả này cho thấy các mái xanh tại khu vực trung tâm TP.HCM, mặc dù diện tích phủ xanh còn hạn chế, vẫn có khả năng điều hòa vi khí hậu đáng kể, góp phần giảm cường độ của UHI.

Về hiệu quả năng lượng, lượng điện tiết kiệm ước tính trong khoảng 0,55–1,66 kWh/m²/năm, tương đương tổng cộng 56.971–170.914 kWh/năm cho toàn bộ các mái xanh hiện có ở Quận 1. Giá trị này tuy nhỏ khi tính cho từng hộ, song ở quy mô đô thị lại có ý nghĩa lớn, góp phần giảm tải điện mùa khô – thời kỳ tiêu thụ năng lượng cao nhất trong năm. So sánh với kết quả tại Singapore [17], mức tiết kiệm

ở Quận 1 thấp hơn do khác biệt về cấu trúc mái, độ dày lớp phủ và điều kiện khí hậu – song vẫn nằm trong giới hạn biến động hợp lý của khu vực Đông Nam Á.

Mô hình hồi quy đa biến trong nghiên cứu cho thấy các yếu tố NDVI, loại mái (green/non-green) và chiều cao công trình là những biến ảnh hưởng đáng kể đến LST. Trong đó, NDVI thể hiện tác động mạnh nhất ($\beta = -0,163$, $p < 0,001$), cho thấy mức độ phủ xanh có quan hệ tuyến tính nghịch với nhiệt độ bề mặt. Kết quả này tương đồng với phát hiện của Li và cộng sự [18], người đã chứng minh rằng mỗi 0,1 tăng trong NDVI có thể giúp giảm trung bình 0,6 °C trong vùng đô thị. Biến “mái xanh” cũng có tác động âm rõ rệt ($B = -0,523$, $p < 0,001$), củng cố lập luận rằng việc phủ xanh mái nhà có hiệu quả làm mát độc lập, ngay cả khi đã kiểm soát các yếu tố khác như chiều cao hay diện tích mái.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế. Thứ nhất, dữ liệu ảnh Landsat 9 có độ phân giải 30 m nên chưa thể phản ánh chính xác các mái nhà nhỏ hoặc xen kẽ cây xanh. Thứ hai, dữ liệu chiều cao công trình còn thiếu đối với nhóm nhà thấp tầng, khiến biến “height” chỉ phản ánh tương đối. Thứ ba, nghiên cứu mới chỉ xem xét tác động bề mặt, chưa xét đến các yếu tố vật liệu, hướng mái, độ nghiêng hay bóng

đồ – những yếu tố có thể ảnh hưởng đến nhiệt độ thực tế của mái.

Dù vậy, kết quả vẫn cho thấy xu hướng rõ ràng: mái nhà xanh giúp giảm nhiệt độ bề mặt và tiết kiệm năng lượng tiêu thụ cho làm mát. Điều này củng cố các bằng chứng thực nghiệm về hiệu quả môi trường của mái xanh trong giảm tải năng lượng, cải thiện vi khí hậu và tăng khả năng chống chịu với biến đổi khí hậu đô thị [19,20].

Trong tương lai, hướng nghiên cứu có thể tập trung vào (i) tích hợp dữ liệu viễn thám độ phân giải cao hơn (như PlanetScope, UAV hoặc ảnh drone), (ii) phân tích vật liệu và độ dày lớp phủ của mái xanh, và (iii) mô phỏng năng lượng công trình bằng các phần mềm như ENVI-met hoặc EnergyPlus để đánh giá chi tiết khả năng giảm tải điện và lượng CO₂ tương ứng. Ngoài ra, kết quả có thể được sử dụng để xây dựng bản đồ tiềm năng xanh hóa mái nhà – một công cụ hỗ trợ ra quyết định hữu ích cho quy hoạch đô thị bền vững tại TP.HCM.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã tích hợp dữ liệu viễn thám, GIS và mô phỏng năng lượng để đánh giá hiệu quả nhiệt và năng lượng của mái nhà xanh trong điều kiện đô thị đặc trưng của Quận 1, TP.HCM. Kết quả phân tích từ ảnh Landsat 9 cho thấy mái nhà xanh có nhiệt độ bề mặt trung bình thấp hơn mái nhà không xanh từ 0,45 °C đến 1,05 °C trong các tháng mùa khô, với mức chênh lệch lớn nhất ghi nhận vào tháng 4. Mô hình hồi quy đa biến khẳng định các yếu tố NDVI, loại mái và chiều cao công trình có ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ bề mặt, trong đó NDVI thể hiện vai trò chi phối nhất.

Từ kết quả khảo sát hộ gia đình, cường độ năng lượng cơ sở cho mục đích làm mát tại khu vực nghiên cứu được xác định là 27,4 kWh/m²/năm. Dựa trên các kịch bản mô phỏng năng lượng, tổng năng lượng tiết kiệm do mái nhà xanh mang lại ước đạt từ 56.971 kWh đến 170.914 kWh/năm, tương đương 0,55 – 1,66 kWh/m²/năm. Kết quả này chứng minh rằng mái nhà xanh không chỉ đóng góp vào việc giảm hiệu ứng đảo nhiệt đô thị mà còn mang lại lợi ích tiết kiệm năng lượng đáng kể ở quy mô công trình và khu vực.

Nghiên cứu cũng nhấn mạnh tiềm năng mở rộng mô hình mái nhà xanh tại các khu vực nội đô TP.HCM, đặc biệt trong bối cảnh nhu cầu giảm tiêu thụ năng lượng và thích ứng với biến đổi khí hậu ngày càng cấp thiết. Trong tương lai, việc tích hợp dữ liệu viễn thám độ phân giải cao hơn (như WorldView, PlanetScope) và thông tin vật liệu mái nhà sẽ giúp cải thiện độ chính xác của mô hình, đồng thời hỗ trợ hoạch định chính sách phát triển “đô thị xanh – năng lượng thấp” một cách hiệu quả và khả thi hơn.

Tài liệu tham khảo

[1]. T. R. Oke, “The energetic basis of the urban heat island,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, no. 455, pp. 1-24, 1982.
[2]. A. M. Rizwan, L. Y. C. Dennis, and C. Liu, “A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 120-128, 2008.

[3]. K. L. Getter and D. B. Rowe, “The role of extensive green roofs in sustainable development,” *HortScience*, vol. 41, no. 5, pp. 1276-1285, 2006.
[4]. U. Berardi, A. GhaffarianHoseini, and A. GhaffarianHoseini, “State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs,” *Applied Energy*, vol. 115, pp. 411-428, 2014.
[5]. M. Santamouris, “Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments,” *Solar Energy*, vol. 103, pp. 682-703, 2014.
[6]. W. C. Li and R. W. Babcock Jr., “Green roof hydrologic performance and modeling: A review,” *Water Science & Technology*, vol. 69, no. 4, pp. 727-738, 2014.
[7]. T. Susca, S. R. Gaffin, and G. R. Dell’Osso, “Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs,” *Environmental Pollution*, vol. 159, no. 8–9, pp. 2119-2126, 2011.
[8]. N. H. Wong, D. K. S. Cheong, H. Yan, J. Soh, C. L. Ong, and A. Sia, “The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore,” *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 4, pp. 353-364, 2003.
[9]. Lê Việt Nhân và cộng sự, “Vấn đề thiếu cây xanh ở Thành Phố Hồ Chí Minh: góc nhìn từ quản lý đô thị và ý thức xã hội,” *Tạp chí KH&CN Trường DHXD Miền Tây*, vol. 10, no.9, pp. 55-63, 2024.
[10]. Trần Quang Dũng và cộng sự, “Sự phát triển của thị trường công nghệ nhà xanh tại Việt Nam: Phân tích điểm mạnh, điểm yếu, cơ hội và thách thức,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, vol. 13, no. 2V, pp. 86-95, 2019.
[11]. Nguyễn Trường Ngân, “Xanh hóa đô thị: ứng dụng viễn thám và học máy đánh giá hiện trạng mái nhà xanh tại Quận 1, Thành phố Hồ Chí Minh,” *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, vol. 15, no.3, pp.53-59, 2024.
[12]. USGS, “Landsat 8 Surface Temperature Science Product (LST). U.S. Geological Survey”, Reston, VA., 2019. Available at: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-surface-temperature>.
[13]. H. Mahmoud, M. El-Sayed, and K. El-Hady, “Evaluating the thermal performance of green roofs in arid environments,” *Energy and Buildings*, vol. 154, pp. 221-233, 2017.
[14]. E. Jamei, C. Rajagopalan, and M. Seyedmahmoudian, “Role of green roofs in improving building energy performance: Climate and design considerations,” *Buildings*, vol. 13, no. 4, 2023, Art. no. 913.
[15]. United Nations Environment Programme (UNEP), *District Energy in Cities: Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Nairobi: UNEP, 2018.
[16]. L. L. H. Peng and C. Y. Jim, “Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal comfort,” *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 14, no. 1, pp. 28-40, 2015.
[17]. H. T. Nguyen, Y. He, Q. B. Pham, and P. L. Vo, “Evaluation of urban green roof energy efficiency in tropical cities,” *Energy and Buildings*, vol. 254, p. 111589, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111589.
[18]. H. Li, Z. Wang, C. Wang, and Y. Guo, “Quantifying the cooling effect of green roofs on urban heat islands,” *Urban Climate*, vol. 38, p. 100911, 2021.
[19]. D. J. Sailor, “A green roof model for building energy simulation: Implementation, calibration, and validation,” *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 8, pp. 1466–1478, 2008.
[20]. P. Bevilacqua, D. Mazzeo, and N. Arcuri, “Green roofs in building energy performance: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 924–939, 2017.