

# PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ NĂNG LƯỢNG VÀ TÍNH BỀN VỮNG CỦA KẾT CẤU VỈA HÈ QUANG ĐIỆN TRONG HẠ TẦNG GIAO THÔNG ĐÔ THỊ: TRƯỜNG HỢP TUYẾN ĐT.353 - HẢI PHÒNG

## ENERGY PERFORMANCE AND SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF PHOTOVOLTAIC PAVEMENT STRUCTURES FOR URBAN TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE: A CASE STUDY OF ĐT.353, HAI PHONG

NGUYỄN PHAN ANH

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: phananh.ctt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.917>

### Tóm tắt

Bài báo đánh giá khả năng ứng dụng mô hình vỉa hè quang điện trên tuyến ĐT.353 - Hải Phòng thông qua phân tích các chỉ số năng lượng, môi trường và kinh tế theo khung phân tích vòng đời (LCA) và chi phí vòng đời (LCC). Với diện tích lắp đặt 2.000m<sup>2</sup>/km, hệ thống PV có thể tạo ra khoảng 254.800 kWh/năm/km, đáp ứng hơn 300% nhu cầu điện cho chiếu sáng và hệ thống giao thông thông minh (ITS), đồng thời tạo ra khoảng 191.874 kWh/năm/km điện dư thừa. Lượng phát thải CO<sub>2</sub> tránh được ước đạt ≈168 tCO<sub>2</sub>/năm/km, cho thấy lợi ích môi trường rõ rệt.

Phân tích vòng đời cho thấy thời gian hoàn vốn năng lượng (EPBT) khoảng 7 năm, phù hợp với các nghiên cứu quốc tế, trong khi thời gian hoàn vốn carbon (CPBT) chỉ khoảng 1,2 năm nhờ hệ số phát thải lưới điện Việt Nam còn cao. Về kinh tế, với chi phí đầu tư giả thiết 400USD/m<sup>2</sup>, thời gian hoàn vốn tài chính ước khoảng 92 năm, cho thấy mô hình hiện chưa khả thi về mặt thương mại. Tuy nhiên, kết quả khẳng định vỉa hè quang điện khả thi về mặt kỹ thuật và hiệu quả môi trường, đặc biệt khi xem xét triển khai thí điểm và lộ trình giảm chi phí trong tương lai.

**Từ khóa:** Vỉa hè quang điện, mặt đường phát điện, thu hồi năng lượng, hoàn vốn năng lượng, giao thông thông minh, giảm phát thải CO<sub>2</sub>.

### Abstract

This paper evaluates the application of photovoltaic (PV) sidewalks along the ĐT.353 corridor in Hai Phong City using Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC) frameworks. With an installed area of 2,000 m<sup>2</sup>

per kilometer, the PV system can generate approximately 254,800 kWh/year/km, supplying over 300% of the electricity demand for public lighting and intelligent transportation systems (ITS), while producing about 191,874 kWh/year/km of surplus electricity. The avoided CO<sub>2</sub> emissions are estimated at ≈168 tCO<sub>2</sub>/year/km, indicating significant environmental benefits.

Life-cycle analysis shows an Energy Payback Time (EPBT) of approximately 7 years, consistent with international studies, whereas the Carbon Payback Time (CPBT) is only about 1.2 years due to Vietnam's relatively high grid emission factor. From an economic perspective, assuming an investment cost of 400 USD/m<sup>2</sup>, the simple financial payback period is around 92 years, indicating limited commercial feasibility under current conditions. Nevertheless, the results confirm that PV sidewalks are technically feasible and environmentally effective, with strong potential for pilot implementation and future deployment as costs decrease and supportive policies are introduced.

**Keywords:** Photovoltaic pavement, Solar pavement, Energy harvesting, Energy payback time, intelligent transport, Carbon emissions.

### 1. Giới thiệu

Sự phát triển nhanh của hệ thống giao thông đô thị tại Việt Nam kéo theo nhu cầu ngày càng lớn về nguồn điện ổn định cho chiếu sáng đường phố, camera giám sát, cảm biến lưu lượng và các thiết bị giao thông thông minh (ITS). Trong bối cảnh đó, việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo phân tán vào hạ tầng

giao thông đang được xem là một hướng tiếp cận tiềm năng nhằm giảm phụ thuộc vào lưới điện và nâng cao tính tự chủ năng lượng của đô thị. Các đô thị ven biển như Hải Phòng có điều kiện bức xạ mặt trời tương đối thuận lợi, tạo tiền đề cho việc xem xét ứng dụng các hệ thống quang điện (photovoltaic - PV) trong không gian giao thông đô thị.

Trong khoảng một thập kỷ gần đây, công nghệ mặt đường và vỉa hè quang điện đã được nghiên cứu và phát triển với nhiều cấu hình khác nhau, bao gồm tấm PV composite, mô-đun PV rỗng, lớp phủ polymer bán trong suốt và các mô hình PV thân thiện môi trường thế hệ mới. Các nghiên cứu quốc tế cho thấy, khi được bố trí tại các khu vực chịu tải trọng nhẹ như vỉa hè và đường đi bộ, các cấu hình này có thể đáp ứng đồng thời yêu cầu truyền lực, chống trượt, độ bền cơ học và hiệu suất quang điện ở mức chấp nhận được [1-5]. Một số nghiên cứu thực nghiệm tại châu Âu và châu Á ghi nhận sản lượng điện đạt khoảng 120-180 kWh/m<sup>2</sup>/năm, phù hợp cho các ứng dụng cấp điện phân tán như chiếu sáng, thiết bị ITS hoặc trạm sạc cho phương tiện điện cỡ nhỏ [2], [3].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về tích hợp PV vào hạ tầng giao thông còn tương đối hạn chế, đặc biệt trong bối cảnh khí hậu nóng ẩm, bức xạ cao và môi trường đô thị nhiều bụi bẩn. Hải Phòng là đô thị ven biển có tổng bức xạ trung bình năm khoảng 1.200-1.400 kWh/m<sup>2</sup>/năm, số giờ nắng vào khoảng 1.600 giờ/năm và tốc độ gió trung bình cao hơn so với nhiều đô thị nội địa, có thể góp phần cải thiện điều kiện tản nhiệt cho mô-đun PV. Tuyến ĐT.353 (Phạm Văn Đồng) có mặt cắt ngang rộng, nhu cầu chiếu sáng và triển khai ITS lớn, đồng thời vỉa hè tương đối thông thoáng, cho phép xem xét bố trí dải vỉa hè quang điện với bề rộng khoảng 2m dọc tuyến. Mặt cắt ngang điển hình của tuyến ĐT.353 được minh họa trong Hình 1.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này được định vị như một đánh giá định lượng sơ bộ về khả năng ứng dụng

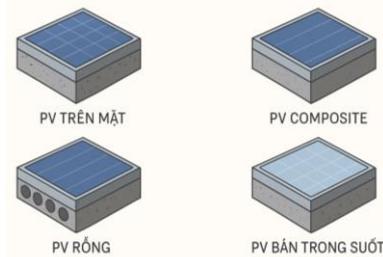
vỉa hè quang điện trong điều kiện đô thị ven biển Việt Nam, dựa trên các phân tích năng lượng, môi trường và kinh tế theo khung chuẩn hóa LCA/LCC (Phân tích vòng đời /Chi phí vòng đời). Kết quả nhằm cung cấp cơ sở khoa học ban đầu cho việc xem xét triển khai thí điểm, trong khi các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng chi tiết hơn sẽ cần được thực hiện trong các giai đoạn tiếp theo.

## 2. Tổng quan mặt đường quang điện

### 2.1. Sự hình thành và phát triển của công nghệ mặt đường quang điện

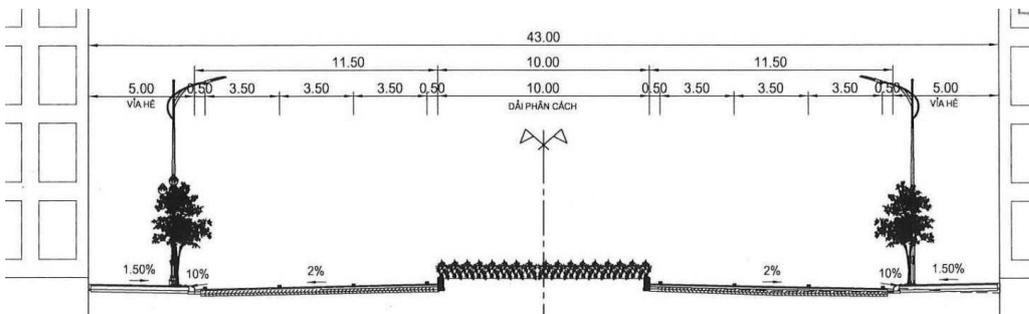
Trong hai thập kỷ gần đây, nghiên cứu về mặt đường quang điện phát triển mạnh như một giải pháp tận dụng diện tích mặt đường - vỉa hè để thu năng lượng mặt trời cho hạ tầng giao thông đô thị. Tổng quan tài liệu cho thấy mô-đun PV tích hợp mặt đường có thể trở thành một phần của hệ thống giao thông thông minh và hạ tầng tự chủ năng lượng trong bối cảnh năng lượng tái tạo ngày càng được chú trọng [4], [5].

Khác với PV mái nhà, PV mặt đường đòi hỏi thay đổi đáng kể về vật liệu và cấu trúc, từ lớp phủ polymer bán trong suốt đến lớp truyền lực composite, mô-đun PV rỗng hoặc tấm PV có khả năng chống trượt - chống mài mòn [1], [2], [3]. Các cấu hình đại diện đang nghiên cứu và ứng dụng được minh họa trong Hình 2.



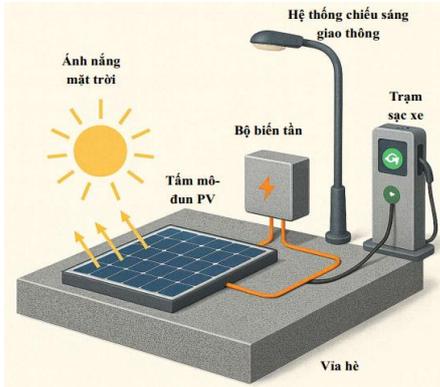
Hình 2. Các cấu hình mặt đường PV

Bên cạnh phát điện, nhiều nghiên cứu nhấn mạnh vai trò của mặt đường quang điện trong cung cấp năng



Hình 1. Mặt cắt ngang đường tỉnh 353 hiện trạng

lượng cho chiếu sáng, cảm biến, camera và trạm sạc phương tiện điện hạng nhẹ [1], [3]. Đây là mô hình hạ tầng tự chủ năng lượng phù hợp với định hướng “đô thị thông minh - xanh - ít phát thải”, thể hiện trong Hình 3.



**Hình 3. PV trong hệ thống ITS**

**2.2. Đặc tính nhiệt và các yếu tố khí hậu ảnh hưởng đến hiệu suất PV**

Hiệu suất mô-đun PV chịu ảnh hưởng lớn bởi nhiệt độ bề mặt, bức xạ, gió, độ ẩm và bụi. Do đặt nằm ngang, mô-đun PV thường nóng hơn PV mái và hiệu suất giảm 0,25-0,45%/°C [5]; tại khí hậu nhiệt đới, nhiệt độ mặt đường 55-65°C có thể làm giảm 10-20%

hiệu suất. Các giải pháp hạ nhiệt như lớp phủ mát giúp giảm 8-12°C và cải thiện hiệu suất, đồng thời giảm hiệu ứng đảo nhiệt [5], trong khi cấu trúc rỗng tăng trao đổi khí và giảm nhiệt độ mô-đun [2]. Bụi giao thông và dầu mỡ có thể làm giảm 5-12% sản lượng nếu không vệ sinh định kỳ [3], [4], nhưng lớp phủ polymer bán trong suốt thể mới cho thấy khả năng hạn chế bám bụi và duy trì truyền sáng ổn định [1], [3]. Điều kiện ven biển của Hải Phòng với gió lớn và bức xạ ổn định tạo môi trường thuận lợi cho vận hành mô-đun PV và thử nghiệm via hè quang điện.

**2.3. Vật liệu, cấu trúc lớp bề mặt và đặc tính cơ học của PV**

Các mô-đun PV tích hợp mặt đường cần hệ vật liệu nhiều lớp để chịu môi trường ngoài trời, bảo vệ tế bào quang điện và duy trì truyền sáng. Các lớp phủ polymer bán trong suốt, PMMA, polyurethane hoặc kính cường lực mỏng cho thấy khả năng truyền sáng cao, chống trượt và phù hợp cho khu vực giao thông nhẹ.

Cấu trúc đáng chú ý là mô-đun PV rỗng đặt trong bê tông tự lèn, giúp giảm tải lên mô-đun, tạo khoang đối lưu tản nhiệt và thuận lợi cho bố trí dây dẫn. Lớp phủ polymer bán trong suốt đồng thời tăng an toàn đi bộ nhờ độ bám dính tốt và độ truyền sáng 78-85%. Lớp truyền lực bên dưới có nhiệm vụ phân bố ứng suất,

**Bảng 1. So sánh các đặc tính vật liệu và cấu trúc mô-đun PV [1], [2],[ 3]**

STT	Loại mô-đun / nghiên cứu	Cấu trúc lớp trên (Top-layer)	Lớp truyền lực	Độ truyền sáng (%)	Hiệu suất / Sản lượng (kWh/m <sup>2</sup> /năm)	Ghi chú
1	PV polyurethane bán trong suốt	PU bán trong suốt, chống trượt	Lớp vật liệu composite nhựa	~85%	Chưa công bố kWh, nhưng hiệu suất duy trì ổn định nhờ giảm nhiệt	Phù hợp cho via hè, tải nhẹ/đi bộ
2	PV rỗng trong SCC	Kính/PMMA	Lớp vật liệu composite nhựa	75-82%	~150-180 kWh/m <sup>2</sup> /năm (mô phỏng)	Giảm nhiệt 5-7°C, tải nhẹ
3	PV đường bộ truyền thông	Kính cường lực	Tấm đệm EVA	88-90%	120-160 kWh/m <sup>2</sup> /năm	Giảm hiệu suất do ngang 0°, tải xe nhẹ
4	PV I - Mặt đường PV composite nhiều lớp	Polymer bán trong suốt	Lớp phân tán ứng suất	80-88%	130-170 kWh/m <sup>2</sup> /năm	Nhạy với nhiệt độ, tải nhẹ
5	PV II - Mặt đường PV thân thiện với môi trường	PMMA chống trượt	Lớp vật liệu composite nhựa	78-85%	154,40 kWh/m <sup>2</sup> /năm	Tải đi bộ/xe đạp

trong đó vật liệu composite hoặc polymer nhiệt rắn được xem là hiệu quả nhất.

Hầu hết nghiên cứu đều khuyến nghị lắp PV tại vỉa hè, lối đi bộ và dải phân cách nhằm tối ưu tuổi thọ và hiệu suất quang điện. Các đặc tính và cấu trúc mô-đun đại diện được tổng hợp trong Bảng 1.

#### 2.4. Hiệu suất năng lượng và mô hình tính toán cho PV vỉa hè/mặt đường

Mô hình hóa là công cụ thiết yếu để đánh giá hiệu suất mặt đường PV trong điều kiện thực tế. Các mô phỏng cho thấy cấu trúc rỗng giúp giảm 5-7°C nhiệt độ vận hành của mô-đun so với lắp trực tiếp trên bề mặt [2], đặc biệt quan trọng trong khí hậu nhiệt đới. Dù hiệu suất tuyệt đối thấp hơn PV mái do góc đặt 0°, sản lượng tổng thể vẫn đáng kể nhờ diện tích triển khai lớn và liên tục dọc vỉa hè [3], [4]. Bên cạnh đó, mô hình hóa cũng cần xem xét hiệu ứng phản xạ bề mặt, bởi lớp phủ mát có thể cải thiện chiếu sáng ban đêm nhưng đồng thời gây thay đổi phân bố ánh sáng, ảnh hưởng đến khả năng quan sát và an toàn giao thông.

#### 2.5. Đánh giá vòng đời và chi phí vòng đời

LCA và LCC là cơ sở quan trọng để đánh giá tính bền vững của mặt đường quang điện. Một số nghiên cứu thực nghiệm cho thấy PV pavement có khả năng giảm phát thải CO<sub>2</sub> và hạ nhiệt độ bề mặt, góp phần giảm hiệu ứng đảo nhiệt đô thị [5]. Hiệu quả LCA phụ thuộc mạnh vào vật liệu lớp phủ trong suốt, quy trình thi công và chiến lược bảo trì [4].

Về kinh tế, chi phí đầu tư ban đầu của PV thường cao hơn mặt đường thông thường, nhưng trong vòng đời 20-25 năm, hệ thống giúp giảm đáng kể chi phí điện cho chiếu sáng và ITS. Một số cấu hình PV thể hệ mới có giá điện hòa vốn (LCOE) tiệm cận PV mái tại khu vực bức xạ cao [4], cho thấy tiềm năng ứng

dụng trong đô thị. Các chỉ số LCA-LCC được trình bày trong Bảng 2.

#### 2.6. Khoảng trống nghiên cứu và tính phù hợp với Việt Nam

Các nghiên cứu quốc tế về mặt đường quang điện chủ yếu thực hiện tại Mỹ, Trung Quốc và châu Âu, nhưng chưa đánh giá trong điều kiện nóng ẩm, bức xạ cao, mưa nhiều và giao thông hỗn hợp như ở Việt Nam. Những đặc trưng khí hậu này cùng với bụi đô thị và sự lão hóa lớp phủ polymer đặt ra yêu cầu điều chỉnh cấu trúc vật liệu và giải pháp tản nhiệt khi áp dụng PV cho vỉa hè.

Ngoài ra, chưa có nghiên cứu nào xem xét tích hợp PV cho các ứng dụng đô thị đặc thù của Việt Nam như chiếu sáng đường phố, trạm sạc xe máy điện và hệ thống ITS. Với điều kiện khí hậu ven biển, bức xạ ổn định và vỉa hè rộng, tuyến ĐT.353 (Hải Phòng) là vị trí phù hợp để thử nghiệm mô hình này và làm cơ sở nhân rộng trong các đô thị khác.

#### 2.6. Khoảng trống nghiên cứu trong bối cảnh Việt Nam

Mặc dù có nhiều kết quả nghiên cứu quốc tế, việc áp dụng vỉa hè quang điện trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa, độ ẩm cao và môi trường đô thị ven biển như Việt Nam vẫn còn thiếu các đánh giá định lượng cụ thể. Các yếu tố như bụi bản đô thị, che bóng từ cây xanh, tác động của môi trường biển và đặc điểm phụ tải giao thông địa phương có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất và tuổi thọ của hệ thống PV, nhưng chưa được xem xét đầy đủ trong các nghiên cứu trước. Do đó, các nghiên cứu trường hợp tại Việt Nam là cần thiết nhằm kiểm chứng khả năng ứng dụng và điều chỉnh các giả thiết thiết kế cho phù hợp với điều kiện thực tế trong nước.

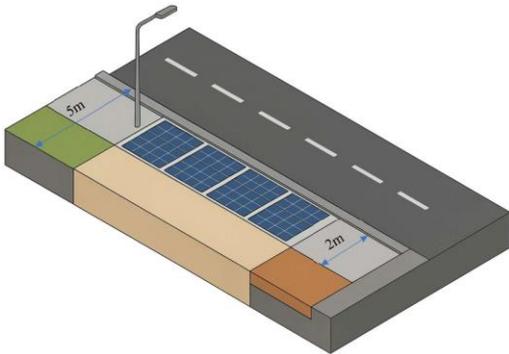
**Bảng 2. Tổng hợp các chỉ số LCA - LCC trong các nghiên cứu PV pavement [1], [4], [5]**

STT	Chỉ số	Giá trị điển hình	Ghi chú
1	EPBT - Thời gian hoàn vốn năng lượng	3-7 năm	PV tốn năng lượng sản xuất nhưng thu hồi nhanh trong vùng bức xạ cao
2	CPBT - Thời gian hoàn vốn Carbon)	4-6 năm	Thời gian để lượng CO <sub>2</sub> tránh phát thải bù lượng CO <sub>2</sub> sản xuất ban đầu
3	GWP - Giảm phát thải CO <sub>2</sub> trong vòng đời	1611,89 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /20 năm (PV II)	Giá trị từ thử nghiệm thực tế PV II
4	Tổng giảm CO <sub>2</sub> theo km đường (quy mô lớn)	2,15 × 10 <sup>7</sup> kg CO <sub>2</sub> /km	Khi áp dụng rộng rãi hệ thống Pv + mặt đường mát tích hợp
5	LCOE - Giá điện hoà vốn	0,45 USD/kWh (PV II)	Thấp hơn PV mái nghiêng (~1 USD/kWh)
6	Chi phí bảo trì (O&M)	Thấp	Chủ yếu làm sạch bề mặt, kiểm tra inverter
7	Tuổi thọ mô-đun	20-25 năm	Tương đương PV mái

### 3. Ứng dụng mô hình vỉa hè quang điện cho tuyến ĐT.353 và phân tích bền vững

#### 3.1. Điều kiện tuyến đường và cấu hình hệ thống vỉa hè quang điện

Trên cơ sở điều kiện hình học và khai thác, nghiên cứu đề xuất phương án bố trí vỉa hè quang điện dọc một bên tuyến, với bề rộng dải mô-đun sử dụng cho PV là 2,0m trên nền vỉa hè hiện hữu. Cấu trúc điển hình của hệ thống vỉa hè quang điện được xây dựng trên cơ sở các cấu hình “PV I” và “PV II” đã được công bố [7], [8]. Cấu trúc này phù hợp với các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng lớp composite gốc nhựa trung gian giúp phân bố đều ứng suất, giảm biến dạng cục bộ và bảo vệ mô-đun PV trước tác động cơ học, từ đó kéo dài tuổi thọ hệ thống [7], [4], [8]. Hình 4 minh họa sơ đồ cấu trúc và vị trí bố trí vỉa hè quang điện trên tuyến ĐT.353.



Hình 4. Mô phỏng bố trí PV trên vỉa hè ĐT.353

#### 3.2. Tính toán tiềm năng năng lượng và khả năng cấp điện cho hạ tầng giao thông

##### 3.2.1. Giả thiết và phương pháp tính

Sản lượng điện trung bình năm của hệ thống vỉa hè quang điện trên 1km tuyến được tính theo công thức tiêu chuẩn áp dụng cho hệ thống PV nổi lưới [5], [6]:

$$E_{year} = A_{PV} \times G_{annual} \times \eta_{PV} \times (1 - L_{sys}) \quad (1)$$

Với  $E_{year}$  là sản lượng điện trung bình hàng năm (kWh/năm/km);

Trong nghiên cứu này, tổn thất hệ thống tổng hợp  $L_{sys}=30\%$  được sử dụng nhằm phản ánh các yếu tố bất lợi trong điều kiện vỉa hè đô thị, bao gồm: Suy giảm hiệu suất do nhiệt độ vận hành cao (10-15%), che bóng cục bộ từ cây xanh và công trình lân cận (5-10%), bám bụi và mài mòn bề mặt (5-8%), cùng với tổn thất điện và biến tần (3-5%). Cách tiếp cận này phù hợp với các nghiên cứu PV vỉa hè trong môi trường đô thị có che bóng không đồng đều, khi chưa triển khai mô phỏng hình học chi tiết.

Kết hợp với số liệu được đưa ra trong Bảng 3, ta có:

$$E_{year} = 2000 \times 1300 \times 14 \times (1 - 0,3) = 254.800 \text{ kWh/năm/km}$$

Như vậy, với cấu hình giả thiết, 1km vỉa hè quang điện trên tuyến ĐT.353 có thể tạo ra khoảng 255MWh điện mỗi năm.

##### 3.2.2. Nhu cầu điện cho chiếu sáng và hệ thống ITS

Để đánh giá khả năng tự cung cấp năng lượng cho hạ tầng giao thông, nghiên cứu xét tới ba nhóm phụ tải chính:

- Chiếu sáng đường bộ;
- Hệ thống giao thông thông minh (ITS: Camera, cảm biến, biển báo thay đổi nội dung);
- Trạm sạc cho xe đạp điện, xe máy điện.

Với giả thiết mỗi km tuyến có khoảng 40 cột đèn, mỗi cột sử dụng bộ đèn LED công suất 100W và thời gian chiếu sáng trung bình 11 giờ/đêm, điện năng tiêu thụ cho chiếu sáng là:

$$E_{light} = 40 \times 0,1 \times 11 \times 365 = 16.060 \text{ kWh/năm/km} \quad (2)$$

Hệ thống ITS giả thiết gồm 10 vị trí, mỗi vị trí tích hợp camera, cảm biến và biển báo điện tử với tổng công suất khoảng 260W. Khi vận hành liên tục 24 giờ/ngày, điện năng tiêu thụ là:

$$E_{ITS} = 2,6 \times 24 \times 365 = 22.776 \text{ kWh/năm/km} \quad (3)$$

Ngoài ra, nếu bố trí 2 trạm sạc cho xe máy điện mỗi km, với công suất mỗi trạm 3,3kW và thời gian hoạt động trung bình 10 giờ/ngày, điện năng dành cho sạc phương tiện là:

$$E_{charge} = 2 \times 3,3 \times 10 \times 365 = 24.090 \text{ kWh/năm/km} \quad (4)$$

Tổng nhu cầu phụ tải:

$$E_{load} = E_{light} + E_{ITS} + E_{charge} = 62.926 \text{ kWh/năm/km} \quad (5)$$

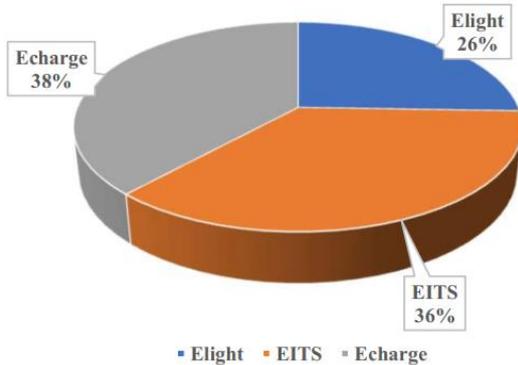
So sánh với sản lượng PV:

$$\frac{E_{load}}{E_{year}} = \frac{62.926}{254.800} \approx 24,7\% \quad (6)$$

Kết quả cho thấy, với cấu hình giả thiết, hệ thống vỉa hè quang điện trên 1km tuyến đủ khả năng tự cấp 100% điện cho chiếu sáng, ITS và trạm sạc, đồng thời còn dư khoảng 75% sản lượng để hoà lưới hoặc cấp cho các phụ tải đô thị khác. Sản lượng dư thừa:

$$E_{year} - E_{load} = 191.874 \text{ kWh/năm/km} \quad (7)$$

Biểu đồ cơ cấu tiêu thụ điện được thể hiện trong biểu đồ Hình 5.



Hình 5. Biểu đồ cơ cấu phụ tải

### 3.3. Đánh giá môi trường và vòng đời

#### 3.3.1. Giảm phát thải CO<sub>2</sub> do thay thế điện lưới

Lượng CO<sub>2</sub> tránh phát thải nhờ thay thế điện lưới bằng điện từ via hệ quang điện được xác định theo:

$$\Delta CO_2 = E_{year} \times EF_{grid} \quad (8)$$

Với  $EF_{grid}$  là hệ số phát thải lưới điện Việt Nam lấy bằng 0,6592 tCO<sub>2</sub>/MWh theo DCC/MONRE 2023; tức là khoảng 168 tấn CO<sub>2</sub>/năm cho mỗi km via hệ quang điện;

Trong vòng đời 20 năm, tổng lượng phát thải tránh được ước khoảng 3.359 tấn CO<sub>2</sub>/km, giả thiết sản lượng PV ổn định.

#### 3.3.2. Thời gian hoàn vốn năng lượng (EPBT)

Để tính EPBT, tổng năng lượng tích lũy ( $E_{emb}$ ) của hệ thống được xác định bằng cách cộng toàn bộ năng lượng tiêu thụ trong quá trình sản xuất mô-đun PV, chế tạo lớp phủ composite - polymer, sản xuất vật liệu kết cấu, vận chuyển và thi công lắp đặt. Trong nghiên cứu này, giá trị năng lượng hàm chứa được ước tính theo dải 800-1100 kWh/m<sup>2</sup>, tương ứng với các hệ PV mặt đường loại nhẹ, chỉ bao gồm năng lượng cho mô-đun PV và lớp polymer truyền sáng [5], [8]. Các giá trị này không bao gồm năng lượng cho kết cấu áo đường để tránh trùng lặp với chi phí xây dựng hạ tầng hiện hữu. Với mục đích minh họa, nghiên cứu giả thiết giá trị trung bình 900 kWh/m<sup>2</sup> cho toàn bộ cấu phần liên quan đến PV:

$$\begin{aligned} E_{emb} &= A_{PV} \times 900 = 2.000 \times 900 \\ &= 1.800.000 \text{ kWh/km} \end{aligned} \quad (9)$$

Thời gian hoàn vốn năng lượng được tính theo:

$$EPBT = \frac{E_{emb}}{E_{year}} = \frac{1.800.000}{254.800} \approx 7,1 \text{ năm} \quad (10)$$

Giá trị EPBT  $\approx 7,1$  năm nằm sát ngưỡng trên của dải 5-8 năm được báo cáo cho các hệ thống PV tích hợp hạ tầng trong các nghiên cứu quốc tế [5], [7], [8], phản ánh ảnh hưởng của điều kiện nhiệt đới và bố trí mô-đun nằm ngang.

#### 3.3.3. Thời gian hoàn vốn carbon (CPBT)

CPBT được hiểu là số năm cần thiết để lượng CO<sub>2</sub> tránh phát thải nhờ vận hành hệ thống PV bù lại lượng CO<sub>2</sub> phát thải trong giai đoạn chế tạo. Giả sử tổng phát thải CO<sub>2</sub> hàm chứa trong vật liệu và lắp đặt hệ thống via hệ quang điện là 200 tấn CO<sub>2</sub>/km (giá trị trung bình tham khảo từ các nghiên cứu LCA cho PV mặt đường [6], [8]), CPBT được xác định:

$$CPBT = \frac{CO_{2,emb}}{\Delta CO_2} \approx \frac{200}{168} \approx 1,2 \text{ năm} \quad (11)$$

Kết quả cho thấy, xét trên khía cạnh carbon, hệ thống via hệ quang điện có khả năng hoàn vốn phát thải trong khoảng 1,2 năm đầu vận hành; phần thời gian còn lại trong vòng đời sẽ đóng góp ròng vào mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính.

So với các nghiên cứu PV via hệ tại châu Âu và Bắc Mỹ, nơi CPBT thường nằm trong khoảng 4-7 năm, giá trị CPBT thấp tại Việt Nam phản ánh hiệu quả khử carbon vượt trội của PV trong bối cảnh lưới điện có cường độ phát thải cao, qua đó nhấn mạnh vai trò của công nghệ này trong các chiến lược giảm phát thải quốc gia.

### 3.4. Phân tích LCC và khả năng khả thi

#### 3.4.1. Giả thiết chi phí đầu tư, vận hành và giá điện

Phân tích chi phí vòng đời được thực hiện trên cơ sở các giả thiết điển hình, nhằm minh họa phương pháp và đánh giá xu hướng kinh tế của giải pháp via hệ quang điện cho 1km tuyến ĐT.353. Do chưa có số liệu đơn giá xây dựng cụ thể cho loại kết cấu này tại Việt Nam, các giá trị chi phí dưới đây được coi là giả thiết kỹ thuật, tham khảo từ dải chi phí của các mô-đun PV mặt đường chuyên dụng trong các nghiên cứu quốc tế.

- Chi phí đầu tư ban đầu cho via hệ PV:

Do hiện chưa tồn tại đơn giá xây dựng chính thức cho kết cấu via hệ quang điện tại Việt Nam, nghiên cứu này sử dụng mức chi phí giả thiết nhằm minh họa phương pháp phân tích LCC và đánh giá xu hướng kinh tế, thay vì đưa ra kết luận đầu tư cụ thể. Giả thiết chi phí trung bình cho 1m<sup>2</sup> via hệ quang điện là

**Bảng 3. Các kịch bản khác nhau khi thay đổi chi phí đầu tư PV**

Chi phí đầu tư PV	Tổng CAPEX (tỷ VND/km)	Lợi ích ròng hàng năm (tỷ VND/km)	Thời gian hoàn vốn đơn giản (năm)
400 USD/m <sup>2</sup>	20,96	0,227	≈ 92
350 USD/m <sup>2</sup>	18,34	0,227	≈ 81
300 USD/m <sup>2</sup>	15,72	0,227	≈ 69
250 USD/m <sup>2</sup>	13,10	0,227	≈ 58
200 USD/m <sup>2</sup>	10,48	0,227	≈ 46

400USD/m<sup>2</sup> [5], [7], [8] (bao gồm mô-đun PV, lớp phủ composite, phụ kiện và lắp đặt). Chi phí đầu tư ban đầu và với tỷ giá giả thiết 1 USD = 26.200 VND, ta có:

$$C_0 = 400 \times 2.000 = 800.000 \text{ USD} \approx 20,96 \text{ tỉ VND} \quad (12)$$

- Chi phí vận hành - bảo trì (O&M):

Các nghiên cứu về PV mặt đường gợi ý chi phí O&M hàng năm thường vào khoảng 1-2% chi phí đầu tư [1], [4], [5]. Nghiên cứu này chọn giá trị trung bình 1,5%:

$$C_{O\&M} = 0,015 \times C_0 \approx 314,4 \text{ triệu VND/năm/km} \quad (13)$$

- Giá điện chiếu sáng công cộng:

Theo biểu giá điện hiện nay, nhóm “Chiếu sáng công cộng, đơn vị hành chính sự nghiệp, dưới 6kV” có giá điện khoảng 2.124VND/kWh. Do hệ thống via hệ PV chủ yếu cấp điện cho chiếu sáng, ITS và một phần phụ tải công cộng, nghiên cứu này lấy 2.124VND/kWh làm giá điện tham chiếu để tính giá trị điện năng tiết kiệm được.

- Sản lượng điện PV hằng năm:

Giá trị điện tương đương (tỉ VND/năm/km):

$$B_{energy} = \text{Giá điện} \times E_{year} = 254.800 \times 2.124 \approx 0,54 \quad (14)$$

Lợi ích ròng hàng năm (sau khi trừ chi phí O&M tỉ VND/năm/km):

$$B_{net} = B_{energy} - C_{O\&M} \approx 0,227 \text{ tỉ VND/năm/km} \quad (15)$$

### 3.4.2. Thời gian hoàn vốn tài chính

Với dòng tiền đơn giản chỉ xét giá trị điện năng tiết kiệm được và chi phí vận hành - bảo trì, thời gian hoàn vốn tài chính đơn giản được ước tính:

$$T_{PB} = \frac{C_0}{B_{net}} = \frac{20,960 \times 10^9}{226,795,200} \approx 92 \text{ năm} \quad (16)$$

Như vậy, với giả thiết chi phí 400USD/m<sup>2</sup>, tỷ giá khoảng 26.200VND/USD và giá điện chiếu sáng công cộng hiện hành, thời gian hoàn vốn tài chính thuần túy

của via hệ quang điện lên tới khoảng 92 năm, lớn hơn đáng kể so với vòng đời khai thác hợp lý của kết cấu (20-25 năm). Kết quả này cho thấy, trong điều kiện chi phí và cơ chế giá hiện tại, mô hình via hệ quang điện chưa đạt được tính khả thi về mặt kinh tế thương mại nếu chỉ xét lợi ích trực tiếp từ điện năng tiết kiệm.

Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng thời gian hoàn vốn tài chính phụ thuộc rất mạnh vào chi phí đầu tư ban đầu - tham số hiện còn biến động lớn do công nghệ via hệ quang điện đang ở giai đoạn thử nghiệm và chủ yếu dựa vào mô-đun chuyên dụng nhập khẩu. Khi xét đến các kịch bản giảm chi phí nhờ nội địa hóa vật liệu, tối ưu hóa thiết kế kết cấu, hoặc áp dụng các cơ chế khuyến khích năng lượng tái tạo (giá điện ưu đãi, tín chỉ carbon, dự án trình diễn công nghệ), thời gian hoàn vốn tài chính có thể được rút ngắn đáng kể. Phân tích kịch bản cho các mức chi phí đầu tư khác nhau cho thấy xu hướng cải thiện rõ rệt tính khả thi kinh tế của hệ thống via hệ quang điện trong trung và dài hạn (Bảng 3).

Bên cạnh đó, khi đánh giá ở góc độ tổng hợp, cần xem xét thêm các lợi ích gián tiếp khó lượng hóa bằng tiền như: nâng cao độ tin cậy cấp điện cho hệ thống ITS, giảm phụ thuộc vào lưới điện đô thị, cải thiện hình ảnh đô thị xanh - thông minh, và tiềm năng giảm hiệu ứng đảo nhiệt đô thị khi kết hợp với các giải pháp mặt đường mát. Do đó, kết quả phân tích LCC trong nghiên cứu này cho thấy mô hình via hệ quang điện khả thi về mặt kỹ thuật và môi trường, trong khi tính khả thi kinh tế phụ thuộc mạnh vào lộ trình giảm chi phí và chính sách hỗ trợ trong giai đoạn triển khai tiếp theo.

## 4. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh mô hình via hệ quang điện tại tuyến ĐT.353 - Hải Phòng khả thi về mặt kỹ thuật, với sản lượng điện trung bình khoảng 254.800kWh/năm/km, đáp ứng hơn 300% nhu cầu điện cho chiếu sáng, hệ thống giao thông thông minh (ITS) và trạm sạc phương tiện điện hạng nhẹ của tuyến, đồng thời tạo ra khoảng 191.874kWh/năm/km điện dư thừa có thể hòa lưới hoặc cấp cho các phụ tải đô thị khác. Lượng phát thải CO<sub>2</sub> tránh được ước đạt khoảng

168 tCO<sub>2</sub>/năm/km, cho thấy lợi ích môi trường rõ rệt của giải pháp.

Phân tích vòng đời cho thấy thời gian hoàn vốn năng lượng (EPBT) của hệ thống via hệ quang điện vào khoảng 7 năm, phù hợp với dải giá trị được báo cáo cho các hệ thống PV tích hợp hạ tầng giao thông trong các nghiên cứu quốc tế. Đáng chú ý, thời gian hoàn vốn carbon (CPBT) chỉ khoảng 1,2 năm, thấp hơn đáng kể so với mức 4-7 năm thường thấy trên thế giới. Kết quả này phản ánh đặc thù của bối cảnh Việt Nam, nơi hệ số phát thải lưới điện còn cao (0,6592 tCO<sub>2</sub>/MWh), khiến việc thay thế điện lưới bằng điện mặt trời mang lại hiệu quả giảm phát thải nhanh và rõ rệt hơn.

Về mặt kinh tế, với chi phí đầu tư giả thiết 400USD/m<sup>2</sup> (tương đương 20,96 tỷ VND/km) và mức giá điện chiếu sáng công cộng hiện hành, thời gian hoàn vốn tài chính đơn giản của hệ thống vào khoảng 92 năm, vượt xa vòng đời khai thác hợp lý của kết cấu. Kết quả này cho thấy, trong điều kiện chi phí và cơ chế giá hiện tại, via hệ quang điện chưa khả thi về mặt kinh tế thương mại nếu chỉ xét lợi ích trực tiếp từ điện năng tiết kiệm. Tuy nhiên, phân tích kịch bản cho thấy khi chi phí đầu tư được giảm nhờ nội địa hóa công nghệ, tối ưu hóa thiết kế hoặc áp dụng các cơ chế hỗ trợ năng lượng tái tạo, thời gian hoàn vốn tài chính có thể được rút ngắn đáng kể, cải thiện triển vọng triển khai trong trung và dài hạn.

Tổng hợp các kết quả, nghiên cứu khẳng định via hệ quang điện là giải pháp có tiềm năng cao về kỹ thuật và môi trường cho phát triển giao thông thông minh và giảm phát thải đô thị, đặc biệt tại các đô thị ven biển như Hải Phòng. Để triển khai ở quy mô thực tế, cần tiếp tục nghiên cứu tối ưu vật liệu, đánh giá độ bền lâu dài trong điều kiện khí hậu nhiệt đới - ven biển, đồng thời xây dựng lộ trình giảm chi phí và cơ chế chính sách phù hợp nhằm nâng cao tính khả thi kinh tế của giải pháp.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.101**.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Allahdadi, A. M. Almeshal, and N. A. Aldawsari, (2025), *Eco-friendly pathways: Exploring the potential of remote-controlled solar-technologies pathways*, Renewable Energy.
- [2] X. Zha, M. Qiu, H. Hu, J. Hu, R. Lv, and Q. Pan, (2022), *Simulation of structure and power generation for self-compacting concrete hollow*

*slab solar pavement with micro photovoltaic array*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol.53, p. 102798.

- [3] P. Greppi et al., (2021), *Novel semi-transparent polyurethane layer for solar pavement applications*, Solar Energy.
- [4] B. Zhou, J. Pei, D. M. Nasir, and J. Zhang, (2021), *A review on solar pavement and photovoltaic/thermal (PV/T) system*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol.93, p. 102753. doi: 10.1016/j.trd.2021.102753.
- [5] R. Lv, X. Zha, H. Hu, B. Lei, and C. Niu, (2025), *A review on the influencing factors of solar pavement power generation efficiency*, Applied Energy, Vol.379, p. 124897. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124897.
- [6] H. Li, N. Xie, X. Zhang, L. Sun, J. T. Harvey, and L. Wang, (2025), *Investigation on mixed reflection behavior of cool pavement coating and its impact on safety of road light environment*, Engineering. doi: 10.1016/j.eng.2025.06.014.
- [7] C. Efthymiou, M. Santamouris, D. Kolokotsa, and A. Koras, (2016), *Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation*, Solar Energy, Vol.130, pp.148-160.
- [8] C. Chu, S. Kim, and J. Park, (2019), *Development of walkable photovoltaic floor tiles and evaluation of their structural behavior*, Energy Conversion and Management, Vol.196, pp.771-782.
- [9] NASA POWER Project, (2024), *Solar radiation data for Northern Vietnam*. NASA Langley Research Center.

Ngày nhận bài:	23/11/2025
Ngày nhận bản sửa:	13/12/2025
Ngày duyệt đăng:	08/01/2026