



## DEVELOPING A PREDICTION MODEL FOR ON-STREET PARKING LOCATION CHOICE BEHAVIOR USING SUPPORT VECTOR MACHINE: A CASE STUDY IN HANOI

Le Van Che<sup>1,2</sup>, Dang Minh Tan<sup>1\*</sup>, Bui Xuan Cay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Hanoi Architectural University, No 129 Tran Phu Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 04/11/2025

Revised: 01/02/2026

Accepted: 04/02/2026

Published online: 15/02/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.2.2>

\* *Corresponding author*

Email: tandang@utc.edu.vn; Tel: +84983996556

**Abstract.** The acute lack of parking spaces in Hanoi capital, combined with rising urban traffic pressure, makes predicting drivers' parking location choices critically important. This study applies a Support Vector Machine (SVM) model to predict on-street parking location choice behavior in Hanoi. Input data were collected through questionnaire-based surveys administered directly to car drivers across different urban areas. The SVM model was evaluated using standard performance metrics. In addition, the study integrates model interpretation techniques, including SHapley Additive exPlanations (SHAP) and Partial Dependence Plots (PDP), to clarify the relative importance and directional effects of influencing factors. The results indicate that the SVM model achieves high classification and prediction performance. Parking location choice behavior is primarily influenced by pricing mechanisms, road hierarchy, sidewalk characteristics, and congestion risk, while demographic factors exhibit limited impact. The results of this study offer several valuable implications and provide a scientific basis for the planning, design, and operation of parking systems in Hanoi.

**Keywords:** Behavior, parking location choice, on-street parking, traffic congestion, SVM.

@ 2026 University of Transport and Communications



# PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN HÀNH VI LỰA CHỌN VỊ TRÍ ĐỖ XE TRÊN ĐƯỜNG ỨNG DỤNG MÔ HÌNH MÁY VECTOR HỖ TRỢ: NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH TẠI THÀNH PHỐ HÀ NỘI

Lê Văn Chè<sup>1,2</sup>, Đặng Minh Tân<sup>1\*</sup>, Bùi Xuân Cậy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội, Số 129 Trần Phú, Hà Nội, Việt Nam

## THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 04/11/2025

Ngày nhận bài sửa: 01/02/2026

Ngày chấp nhận đăng: 04/02/2026

Ngày xuất bản Online: 15/02/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.2.2>

\* Tác giả liên hệ

Email: tandang@utc.edu.vn; Tel: +84983996556

**Tóm tắt.** Với thực trạng thành phố Hà Nội đang thiếu hụt nghiêm trọng không gian đỗ xe và chịu áp lực giao thông ngày càng lớn, việc dự đoán hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe của người lái xe ô tô có ý nghĩa rất quan trọng. Nghiên cứu này ứng dụng mô hình máy vector hỗ trợ (SVM) nhằm dự đoán hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe trên đường tại Hà Nội. Dữ liệu để xây dựng mô hình được thu thập thông qua phỏng vấn trực tiếp người lái xe ô tô bằng bảng hỏi tại các khu vực khác nhau trong đô thị. Mô hình SVM được đánh giá thông qua các chỉ số đo lường hiệu suất. Bên cạnh đó, nghiên cứu đã kết hợp phân tích biểu đồ SHAP và biểu đồ phụ thuộc từng phần (PDP) để làm rõ vai trò và cơ chế tác động của biến đầu vào. Kết quả chỉ ra rằng mô hình SVM đạt được hiệu quả cao trong phân loại và dự đoán. Hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe chủ yếu chịu chi phối bởi phương thức thu phí, cấp hạng đường phố, đặc điểm hệ phố và nguy cơ ùn tắc giao thông, trong khi các yếu tố nhân khẩu học có ảnh hưởng hạn chế. Nghiên cứu đề xuất một số giải pháp và cơ sở khoa học trong quy hoạch, thiết kế và tổ chức hệ thống đỗ xe tại Hà Nội.

**Từ khóa:** Hành vi, lựa chọn vị trí đỗ xe, đỗ xe trên đường, ùn tắc giao thông, SVM.

@2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. MỞ ĐẦU

Giao thông tĩnh là một bộ phận quan trọng, góp phần bảo đảm sự vận hành hiệu quả của hệ thống giao thông đô thị. Một hệ thống đỗ xe được quy hoạch và thiết kế khoa học có thể giảm thiểu tình trạng tìm kiếm chỗ đỗ xe, từ đó giảm thời gian lưu thông và lượng khí thải phát

sinh. Tuy nhiên, thủ đô Hà Nội đang đối mặt với tình trạng thiếu hụt không gian đỗ xe, phân bố chưa hợp lý và hiệu quả sử dụng còn hạn chế, dẫn đến ùn tắc giao thông, gia tăng thời gian tìm kiếm chỗ đỗ từ đó phát sinh các hệ lụy tiêu cực về kinh tế, xã hội và môi trường đô thị (Hình 1). Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe của người sử dụng phương tiện trở nên đặc biệt cần thiết. Qua đó tạo cơ sở khoa học phục vụ việc xây dựng chính sách, quy hoạch không gian đỗ xe và tổ chức giao thông tĩnh trong đô thị.



Hình 1. Đỗ xe tràn lan chiếm dụng lòng đường, hè phố, trong phạm vi nút cản trở tầm nhìn (a) và đỗ xe tại khu vực điểm dừng xe buýt (b).

Hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe là một quá trình ra quyết định phức tạp. Quá trình này chịu tác động đồng thời từ nhiều yếu tố như đặc điểm cá nhân, mục đích chuyến đi, điều kiện hạ tầng kỹ thuật, tình trạng giao thông, chính sách thu phí và khả năng tiếp cận không gian đỗ xe... Việc phân tích và định lượng tác động của các yếu tố này đóng vai trò then chốt trong xây dựng mô hình dự đoán, tổ chức đỗ xe hiệu quả và phát triển hệ thống giao thông đô thị thông minh, bền vững.

Trong nhiều nghiên cứu trước đây, các mô hình lựa chọn rời rạc truyền thống như Logit đa thức (Multinomial Logit – MNL), Logit phân cấp (Nested Logit – NL) và Logit hỗn hợp (Mixed Logit – ML) đã được sử dụng để phân tích hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe (Bảng 1). Các mô hình này đã góp phần quan trọng trong việc nhận diện các yếu tố chi phối hành vi [1-4]. Tuy nhiên chúng vẫn tồn tại hạn chế bởi việc thường giả định hàm tiện ích tuyến tính, khiến các mô hình này gặp khó khăn trong việc mô phỏng các mối quan hệ phi tuyến phức tạp trong hành vi thực tế. Hơn nữa, chúng dựa trên các giả định phân phối nghiêm ngặt, như thuộc tính IIA trong mô hình MNL, và ngay cả mô hình ML cũng chỉ nắm bắt được sự không đồng nhất trong khuôn khổ phân phối được giả định trước. Những ràng buộc lý thuyết này dẫn đến khả năng dự đoán thường thấp hơn khi áp dụng vào các tập dữ liệu đa chiều và không đồng nhất.

Một số nghiên cứu điển hình cho thấy các yếu tố như chi phí đỗ xe, khoảng cách đi bộ, thời gian tìm kiếm, mức độ an ninh, tình trạng ùn tắc và mục đích chuyến đi có ảnh hưởng đáng kể đến hành vi lựa chọn bãi đỗ [5-7]. Trong khi đó, các nghiên cứu mới hơn đã mở rộng mô hình để tích hợp yếu tố tâm lý và nhận thức rủi ro của tài xế, song vẫn còn hạn chế trong khả năng xử lý dữ liệu thực nghiệm phức tạp [8, 9].

Thông qua việc tổng hợp các công trình nghiên cứu, có thể thấy rằng hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe chịu tác động từ nhiều yếu tố định lượng và định tính khác nhau, đặc biệt là phí đỗ xe, thời gian tìm kiếm, khoảng cách đi bộ và điều kiện hạ tầng khu vực đỗ xe (Bảng 1). Các nghiên cứu này đã góp phần quan trọng vào việc phân tích và dự đoán hành vi người lái xe. Tuy nhiên, chúng tồn tại hạn chế chung là giả định chiến lược lựa chọn đồng nhất, chưa thích ứng tốt với bối cảnh đa dạng, và ít tích hợp yếu tố tâm lý cùng chính sách thực tiễn. Đặc biệt, tại Hà Nội có hệ thống giao thông phức tạp và phân bố bãi đỗ xe không đồng đều, các yếu tố như cơ sở hạ

tầng đường phố, không gian tiếp cận, đặc điểm cá nhân và chuyển đi tác động đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe chưa được nghiên cứu sâu.

Bảng 1. Một số nghiên cứu điển hình về yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.

Tác giả	Cách tiếp cận nghiên cứu	Yếu tố chính ảnh hưởng
Austin [1]	Phân tích thực nghiệm	Chi phí đỗ xe, thời gian đi bộ.
Whitlock [10]	Lập trình tuyến tính	Tiện ích bãi đỗ.
Asakura và Kashiwadani [11]	Mô hình Logit đa thức (MNL)	Thông tin về chỗ đỗ xe.
Hunt và Teply [2]	Mô hình Logit phân cấp (NL)	Chi phí, khoảng cách, bề mặt bãi đỗ.
Chen và các cộng sự [3]	Mô hình nhiều thuộc tính mờ	Khoảng cách, trạng thái chỗ đỗ, tình trạng làn đường.
Guo và các cộng sự [8]	Mô hình năng lực bổ sung động	Thái độ tâm lý (lạc quan/bi quan).
Ottomanelli và các cộng sự [9]	Lý thuyết khả năng	Giá cả, khoảng cách, mức độ tắc nghẽn.
Antolín và các cộng sự [12]	Mô hình logit hỗn hợp (ML)	Đỗ xe miễn phí và trả phí.
Teknomo và Hokao [4]	Khảo sát hành vi, phân tích MNL	Phí, khoảng cách đi bộ, thời gian tìm kiếm, an ninh.
Waraich và Axhausen [7]	Mô hình hành vi	Giá cả tác động mạnh nhất.
Coppola [5]	Phân tích hành vi đỗ xe	Chi phí đỗ xe, thời gian tìm kiếm.
Khalik và các cộng sự [6]	Mô hình lựa chọn rời rạc (PARKAGENT)	Tỷ lệ lấp đầy, an ninh, giá cả, khoảng cách đi bộ.
Ni và Sun [13]	Phân tích hệ thống đặt chỗ đỗ (PRS)	Thời gian tìm kiếm, cải thiện hiệu suất.

Sự gia tăng về mức độ phức tạp và tính đa chiều của dữ liệu giao thông đã thúc đẩy việc ứng dụng các mô hình học máy trong dự đoán và phân tích hành vi người tham gia giao thông. Trong số đó, mô hình máy vector hỗ trợ (Support Vector Machine – SVM) được đánh giá cao nhờ khả năng xử lý hiệu quả dữ liệu có cấu trúc đa chiều và quan hệ phi tuyến, không đòi hỏi các giả định phân phối nghiêm ngặt như các mô hình lựa chọn rời rạc truyền thống, đồng thời cho khả năng phân loại mạnh mẽ và năng lực khái quát hóa tốt. SVM được Cortes và Vapnik đề xuất từ năm 1995 [14], và đã được nhiều nghiên cứu chứng minh có hiệu quả trong các bài toán liên quan đến hành vi giao thông, tiêu biểu như các nghiên cứu của Zhang và Xie [15], Sun và Park [16], cũng như Alex và các cộng sự [17].

Trong lĩnh vực dự đoán và quản lý đỗ xe thông minh, nhiều nghiên cứu thực nghiệm gần đây [18, 19, 20] cho thấy SVM được sử dụng phổ biến và mang lại hiệu suất ổn định, đặc biệt trong các bài toán có quan hệ phi tuyến và quy mô dữ liệu hạn chế. Các chiến lược mở rộng SVM cho phân loại nhiều lớp giúp mô hình giải quyết một cách hiệu quả các bài toán ra quyết định đa lựa chọn. Bên cạnh đó, các nghiên cứu của Gao và cộng sự [21], Sari và cộng sự [22] cho thấy SVM có khả năng thích ứng tốt với dữ liệu đa dạng về hạ tầng và điều kiện đô thị. Nhiều công trình khác cũng khẳng định tiềm năng của SVM trong phân loại hình thức đỗ xe, phát hiện bãi đỗ trống và dự đoán nhu cầu sử dụng [23, 24].

Nghiên cứu của Trương và cộng sự [25] tại Việt Nam có thể được coi là một nghiên cứu điển hình áp dụng SVM để phân tích hành vi đi lại tại Hà Nội, bao gồm lựa chọn phương thức và điểm đến. Kết quả cho thấy SVM phù hợp với dữ liệu giao thông đô thị Việt Nam, vốn có mức độ nhiễu cao và tính phi tuyến mạnh, qua đó củng cố cơ sở khoa học cho việc áp dụng SVM trong nghiên cứu này trong điều kiện Việt Nam.

Như vậy, trong bài báo này, nghiên cứu tiến hành khảo sát và phân tích các yếu tố tác động đến quyết định lựa chọn vị trí đỗ xe trên đường của người sử dụng phương tiện ô tô tại Hà Nội, đồng thời xây dựng mô hình dự đoán hành vi lựa chọn đỗ xe dựa trên phương pháp máy vector hỗ trợ (SVM). Trên cơ sở kết quả mô hình hóa và phân tích định lượng, nghiên cứu đề xuất các giải pháp nhằm nâng cao hiệu quả tổ chức và khai thác không gian đỗ xe trên đường. Kết quả nghiên cứu dự kiến cung cấp cơ sở khoa học và minh chứng thực nghiệm cho công tác quy hoạch, thiết kế và quản lý hệ thống đỗ xe tại Hà Nội, hướng tới phát triển đô thị hiện đại, thông minh và bền vững.

## 2. PHƯƠNG PHÁP VÀ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### 2.1. Phương pháp nghiên cứu và thu thập dữ liệu

Nghiên cứu này được thực hiện và triển khai qua nhiều giai đoạn, từ thu thập dữ liệu đến xây dựng và đánh giá mô hình SVM (Hình 3). Nghiên cứu áp dụng phương pháp điều tra xã hội học thông qua bảng hỏi để thu thập dữ liệu về hành vi, cũng như yếu tố ảnh hưởng đến lựa chọn vị trí đỗ xe. Nhân tố phụ thuộc là lựa chọn giữa ba phương án: (1) bãi đỗ xe ngoài đường; (2) đỗ xe trên đường có thu phí; (3) đỗ xe trên đường không thu phí. Nội dung bảng hỏi trong nghiên cứu này được xây dựng xoay quanh các nhóm yếu tố chính có khả năng ảnh hưởng đến quyết định lựa chọn vị trí đỗ xe của người sử dụng ô tô. Các nhóm này bao gồm (I) đặc điểm nhân khẩu, xã hội của người lái xe; (II) thông tin chuyến đi; (III) Đặc điểm tình huống và trải nghiệm đỗ xe; (IV) đặc điểm hạ tầng và tổ chức đỗ xe (Bảng 2). Câu hỏi được thiết kế dạng lựa chọn theo phương án định trước hoặc theo thang đo Likert với 05 mức nhằm đánh giá mức độ đồng ý hoặc cảm nhận của người trả lời đối với các yếu tố liên quan.

Bảng 2. Các yếu tố khảo sát ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.

TT	Nhóm yếu tố	Yếu tố tác động
I	Đặc điểm nhân khẩu, xã hội	Tuổi, giới tính, thu nhập
II	Thông tin chuyến đi	Mục đích chuyến đi, khoảng cách chuyến đi, mức độ sử dụng phương tiện
III	Đặc điểm tình huống và trải nghiệm đỗ xe	Nguy cơ ùn tắc, khu vực đô thị, khoảng cách đi bộ (từ nơi đỗ xe đến điểm đến), thời gian đỗ, thời gian tìm chỗ đỗ, mức độ quen thuộc bãi đỗ
IV	Đặc điểm hạ tầng và tổ chức đỗ xe	Phương thức thu phí, loại đường, đặc điểm hệ phố

Khảo sát được thực hiện bằng hình thức phỏng vấn trực tiếp người sử dụng ô tô tại hiện trường đỗ xe ở một số tuyến phố và bãi đỗ xe trong khu vực đô thị thành phố Hà Nội, có xét đến khác biệt không gian và thời gian, cũng như các khung giờ hoạt động để phản ánh đa dạng điều kiện khai thác đường phố. Để bảo đảm tính đại diện, khảo sát được thiết kế theo phân tầng không gian đô thị thuộc ba vùng: khu trung tâm bên trong vành đai 2 với mật độ hoạt động cao và kiểm soát đỗ xe chặt; vùng phát triển năng động từ vành đai 2 đến vành đai 3; và vùng cửa ngõ đang phát triển ngoài vành đai 3 (Hình 2).



Hình 2. Người được phỏng vấn điền phiếu trả lời bảng hỏi (a) và phân vùng khu vực đô thị khảo sát (b) tại Thành phố Hà Nội.

Sau khi thu thập dữ liệu khảo sát, bộ dữ liệu được làm sạch, mã hóa và chuẩn hóa để phù hợp với yêu cầu của các thuật toán học máy. Tiếp đó, dữ liệu được chia thành hai tập: tập huấn luyện (80%) và tập kiểm tra (20%), sự phân chia này phù hợp với thông lệ phổ biến trong các nghiên cứu học máy nhằm cân bằng giữa khả năng học của mô hình và khả năng đánh giá tổng quát hóa. Kohavi [26] chỉ ra rằng việc phân chia dữ liệu với tỷ lệ 80:20 cho kiểm tra được sử dụng rộng rãi và cho kết quả đáng tin cậy trong các nghiên cứu thực nghiệm. Gần đây, Sivakumar và các cộng sự [27] cũng khẳng định rằng tỷ lệ 80:20 đạt được sự đánh đổi hợp lý giữa hiệu suất huấn luyện và độ chính xác kiểm tra, đặc biệt đối với các tập dữ liệu có quy mô không lớn. Tiếp theo, mô hình SVM được xây dựng với hàm hạt nhân cơ sở xuyên tâm (kernel Radial Basis Function - RBF), cho phép xử lý các mối quan hệ phi tuyến giữa các yếu tố tác động đến lựa chọn vị trí đỗ xe. Hàm kernel RBF được sử dụng rộng rãi trong SVM để mô hình hóa các ranh giới quyết định phi tuyến trong không gian đặc trưng [28]. Nhờ khả năng điều chỉnh linh hoạt các tham số, hàm hạt nhân cơ sở xuyên tâm giúp cải thiện độ chính xác của dự đoán, đặc biệt trong môi trường dữ liệu hành vi đô thị có tính phức tạp cao.

Hiệu quả dự đoán của mô hình được đánh giá thông qua các chỉ số như độ chính xác tổng thể (Accuracy), độ chính xác theo lớp (Precision), độ bao phủ theo lớp (Recall) và chỉ số F1 (F1-score) được thể hiện trong các công thức (1), (2), (3), và (4). Các chỉ số này được sử dụng theo khung phương pháp kinh điển trong lĩnh vực học máy, giúp đánh giá toàn diện hiệu quả của mô hình SVM, phản ánh cả độ chính xác tổng thể lẫn khả năng nhận diện từng nhóm hành vi đỗ xe. Định nghĩa và cách xác định các chỉ số này dựa trên nền tảng của Mitchell [29], cùng với tiếp cận đánh giá lỗi và hiệu suất mô hình [30]. Các chỉ số được vận dụng theo công thức nguyên thủy do Van Rijsbergen [31] phát triển và được trình bày lại có hệ thống theo Manning và các cộng sự [32]. Ngoài ra, việc lựa chọn các thước đo đánh giá trong nghiên cứu phân loại được tham chiếu theo khung phân tích toàn diện của Sokolova và Lapalme [33], đây là tài liệu chuẩn trong việc hệ thống hóa và so sánh hiệu suất các mô hình phân loại.

$$\text{Độ chính xác theo lớp (Precision)} \quad Precision_i = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \quad (1)$$

$$\text{Độ bao phủ theo lớp (Recall)} \quad Recall_i = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} \quad (2)$$

$$\text{Trung bình điều hòa giữa độ chính xác theo lớp và độ bao phủ theo lớp (F1-score)} \quad F1_i = 2 \times \frac{Precision_i \times Recall_i}{Precision_i + Recall_i} \quad (3)$$

$$\text{Độ chính xác tổng thể (Accuracy)} \quad Accuracy = \frac{\sum_{i=1}^k TP_i}{\sum_{i=1}^k (TP_i + FP_i + FN_i)} = 0,93 \quad (4)$$

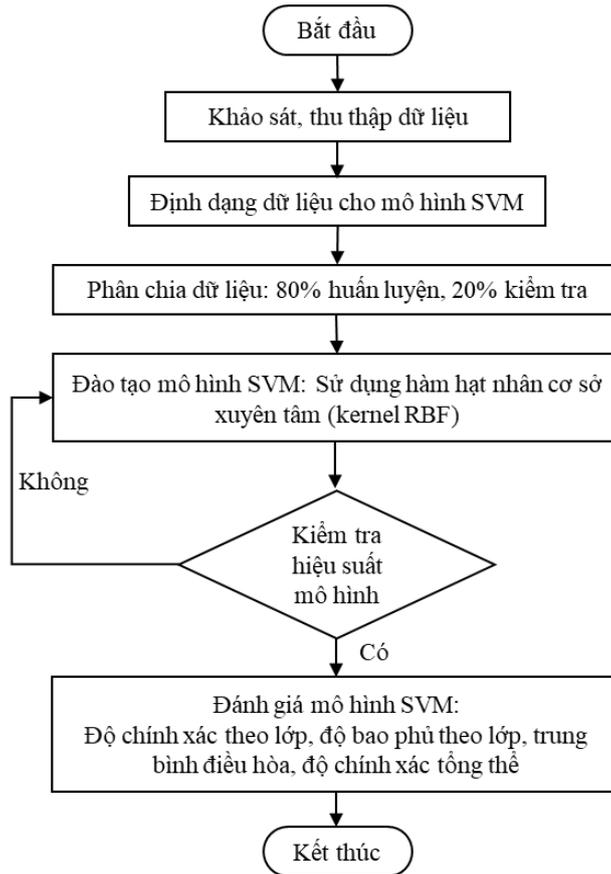
Trong đó:

$TP_i$ : số lượng trường hợp mô hình dự đoán đúng loại hành vi trong lớp  $i$ .

$FP_i$ : số lượng trường hợp mô hình dự đoán nhầm loại hành vi.

$FN_i$ : số lượng trường hợp mô hình không nhận diện được đúng loại hành vi thực tế.

$k$ : tổng số lớp hành vi được dự đoán (trong nghiên cứu này  $k = 3$ , gồm: Bãi đỗ xe ngoài đường, đỗ xe trên đường có thu phí, đỗ xe trên đường không thu phí).



Hình 3. Sơ đồ quy trình phát triển mô hình SVM trong dự đoán hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.

Sau khi đánh giá mô hình, nghiên cứu tiến hành kết hợp với các công cụ phân tích biểu đồ giá trị (SHapley Additive exPlanations – SHAP) và biểu đồ phụ thuộc từng phần (Partial Dependence Plot – PDP) nhằm nhận diện rõ tác động của các nhóm yếu tố như đặc điểm nhân khẩu, xã hội; thông tin chuyến đi; đặc điểm tình huống và trải nghiệm đỗ xe; hạ tầng bãi đỗ, điểm đỗ đến quyết định lựa chọn vị trí đỗ xe của tài xế. Trong nghiên cứu này, giá trị SHAP được sử dụng theo cách tiếp cận của Lundberg và Lee [34] để định lượng mức độ đóng góp của từng biến đầu vào vào dự đoán của mô hình. Biểu đồ PDP được xây dựng theo cách tiếp cận của Friedman [35] để mô tả mối quan hệ biên giữa từng yếu tố và xác suất lựa chọn bãi đỗ xe.

## 2.2. Kết quả và phân tích

Nghiên cứu đã thực hiện thu thập được 540 phiếu điều tra, thông qua việc khảo sát thực tế ở hiện trường (Hình 2). Toàn bộ phiếu khảo sát hợp lệ được nhập và số hóa trên máy tính, sau đó xây dựng và đánh giá qua mô hình SVM bằng ngôn ngữ lập trình Python. Kết quả tổng hợp được thể hiện trong các Hình 4, 5, 6 và Bảng 2. Hiệu quả phân loại của mô hình SVM trong quá trình dự đoán hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe của người lái xe được đánh giá thông qua các chỉ tiêu thống kê chính: Độ chính xác theo lớp (Precision), độ bao phủ theo lớp (Recall), trung bình điều hòa giữa độ chính xác theo lớp và độ bao phủ theo lớp (F1-score), độ chính xác tổng thể (Accuracy).

Độ chính xác trung bình của mô hình được tính bằng trung bình cộng của các giá trị giữa các lớp từ các công thức (1), (2), (3), và (4) tính toán được các giá trị này theo các công thức dưới đây:

+ Độ chính xác trung bình ( $Precision_{macro}$ ):

$$Precision_{macro} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 Precision_i = \frac{0,93+1,00+0,86}{3} = 0,93 \quad (5)$$

+ Độ bao phủ trung bình ( $Recall_{macro}$ ):

$$Recall_{macro} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 Recall_i = \frac{1,00+0,78+1,00}{3} = 0,93 \quad (6)$$

+ Trung bình điều hòa giữa độ chính xác theo lớp và độ bao phủ theo lớp trung bình:

$$F1_{macro} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 F1_i = \frac{0,96+0,88+0,93}{3} \approx 0,92 \quad (7)$$

Trong đó:

$Precision_i$  = tỷ lệ hành vi được dự đoán đúng trong tổng số hành vi mà mô hình dự đoán thuộc loại  $i$ .

$Recall_i$  = tỷ lệ hành vi thực tế thuộc loại  $i$  được mô hình nhận diện đúng.

$F1_i$  = Trung bình điều hòa giữa  $Precision_i$  và  $Recall_i$ , thể hiện sự cân bằng giữa hai chỉ tiêu.

$Accuracy$  = Độ chính xác tổng thể.

$Precision_{macro}$  = Độ chính xác trung bình.

$Recall_{macro}$  = Độ bao phủ trung bình.

$F1_{macro}$  = giá trị trung bình của  $F1_i$  trên tất cả các lớp hành vi.

Kết quả đánh giá cho thấy mô hình SVM đạt hiệu suất dự đoán cao, phản ánh khả năng phân loại chính xác và ổn định hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe (Bảng 3). Tổng thể, chỉ số F1-score nằm trong khoảng 0,88 đến 0,96, với giá trị trung bình đạt 0,92, minh chứng cho hiệu quả tổng hợp rất tốt giữa khả năng nhận diện và tính chính xác của mô hình. Ngoài ra, độ chính xác tổng thể trung bình là 0,93 tiếp tục củng cố độ tin cậy cao trong phân loại hành vi.

Bảng 3. Kết quả đánh giá mô hình SVM.

STT	Nhóm lựa chọn	Precision	Recall	F1-score
1	Đỗ xe ngoài đường	0,93	1,00	0,96
2	Đỗ xe trên đường có thu phí	1,00	0,78	0,88
3	Đỗ xe trên đường không thu phí	0,86	1,00	0,93
4	Giá trị trung bình	0,93	0,93	0,92
5	Độ chính xác tổng thể	0,93	0,93	0,93

Hình 4 trình bày mức độ ảnh hưởng trung bình của từng biến đầu vào đối với kết quả dự đoán của mô hình SVM, qua đó cho phép so sánh tầm quan trọng tương đối giữa các yếu tố. Kết quả phân tích từ mô hình SVM kết hợp với biểu đồ Hình 4 cho thấy rằng hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe của người lái xe ô tô tại Hà Nội chịu ảnh hưởng chủ yếu bởi các yếu tố hạ tầng và chính sách tổ chức đỗ xe. Cụ thể, các yếu tố có mức độ ảnh hưởng mạnh bao gồm: phương thức thu phí, loại đường, nguy cơ ùn tắc và đặc điểm hệ phố. Đây là nhóm yếu tố phản ánh trực tiếp tác động của cơ chế giá, đặc trưng hình học tuyến đường và điều kiện tiếp cận không gian đô thị đến quyết định lựa chọn vị trí đỗ xe của người lái.

Trong đó, phương thức thu phí được xác định là yếu tố có tác động mạnh nhất, thể hiện vai trò trung tâm của chính sách giá và cơ chế thanh toán trong điều tiết hành vi đỗ xe. Khi hệ thống thu phí được thiết kế minh bạch, hợp lý và linh hoạt theo thời gian, khu vực hoặc hình thức sử dụng, người lái xe có xu hướng chuyển từ các vị trí đỗ miễn phí sang các điểm đỗ có thu phí nhưng được quản lý hiệu quả và an toàn hơn. Kết quả này cho thấy chính sách thu phí không chỉ đóng vai trò công cụ tài chính mà còn là đòn bẩy hành vi, giúp giảm áp lực nhu cầu đỗ xe tự phát và tăng cường tính tuân thủ của người sử dụng.

Phân loại đường là yếu tố có ảnh hưởng lớn thứ hai, phản ánh mối quan hệ giữa đặc trưng hình học tuyến đường và khả năng tổ chức đỗ xe có kiểm soát. Các tuyến đường gom, đường nội bộ hoặc đường khu vực thường được người lái xe ưa chuộng hơn nhờ khả năng tiếp cận dễ

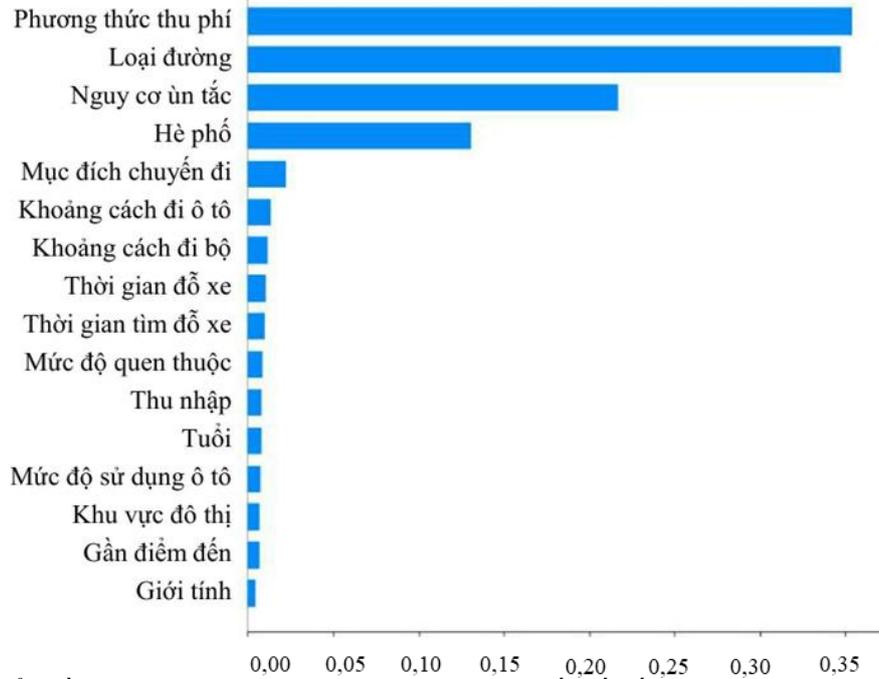
dàng, mật độ giao thông thấp và ít xung đột lưu thông. Ngược lại, các tuyến đường chính đô thị hoặc đường hẹp trong khu trung tâm thường bị hạn chế đỗ xe nhằm đảm bảo năng lực thông hành và an toàn giao thông. Điều này cho thấy loại hình đỗ xe trên đường đáp ứng tốt nhu cầu linh hoạt tại các khu vực chức năng nhỏ hơn, như khu dân cư hoặc khu thương mại quy mô vừa [36]. Bên cạnh đó, đặc điểm hệ phố thể hiện ảnh hưởng đáng kể trong mô hình, phản ánh tác động của yếu tố không gian, tính tiếp cận đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe. Những tuyến phố có hệ rộng có xu hướng tăng mức hấp dẫn của hình thức đỗ xe trên đường. Điều này cho thấy việc quy hoạch hệ phố và thiết kế mặt cắt ngang đường ảnh hưởng trực tiếp đến hành vi đỗ xe và hiệu quả sử dụng không gian đô thị [37]. Kết quả này cho thấy việc cải thiện thiết kế không gian đô thị, đặc biệt là mặt cắt ngang đường và hệ phố có thể góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng giao thông tĩnh. Nguy cơ ùn tắc cũng là yếu tố có mức độ chi phối cao, phản ánh tính nhạy cảm của hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe đối với điều kiện giao thông động. Khi nguy cơ ùn tắc gia tăng, người lái xe có xu hướng giảm lựa chọn đỗ xe trên đường và chuyển sang các phương án ít ảnh hưởng đến dòng xe như bãi đỗ công cộng hoặc khu vực ngoài đường. Kết quả này cũng có quan điểm rằng các yếu tố vận hành giao thông tức thời (ví dụ: mật độ xe, tốc độ lưu thông) có ảnh hưởng đáng kể đến việc hình thành hành vi đỗ xe ở khu vực đô thị mật độ cao.

Ngoài nhóm yếu tố chính, các yếu tố có mức ảnh hưởng trung bình như mục đích chuyến đi, cự ly giữa điểm xuất phát và điểm đến, khoảng cách đi bộ, thời gian đỗ và thời gian tìm chỗ đỗ cho thấy sự điều chỉnh hành vi mang tính bối cảnh. Người lái xe có xu hướng cân nhắc giữa chi phí, thời gian và sự tiện lợi: các chuyến đi ngắn hoặc khi thời gian tìm kiếm kéo dài thường làm tăng khả năng lựa chọn vị trí đỗ xe trên đường để tối ưu hóa thời gian di chuyển.

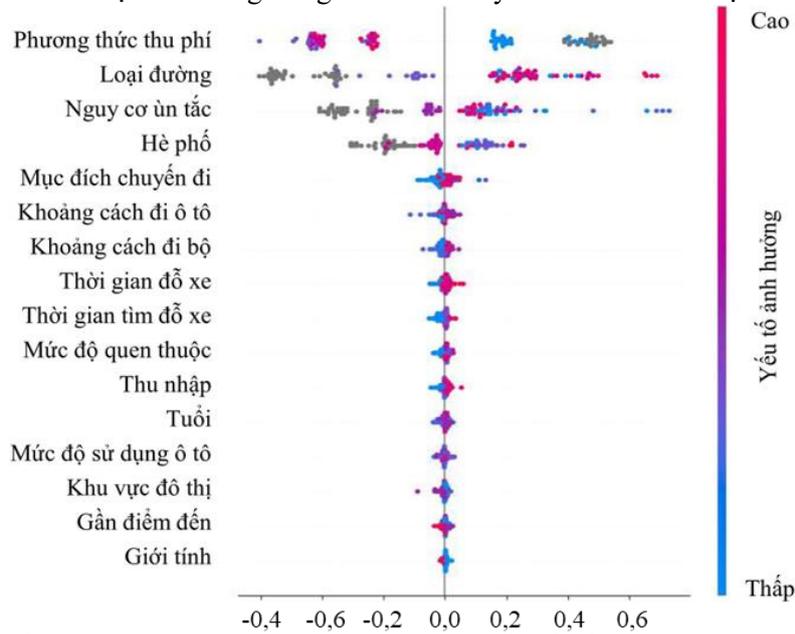
Ngược lại, nhóm yếu tố nhân khẩu học và đặc điểm cá nhân, bao gồm thu nhập, tuổi, giới tính, tần suất sử dụng phương tiện và mức độ quen thuộc thể hiện giá trị SHAP nhỏ, cho thấy tác động hạn chế đối với hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe. Điều này cũng củng cố nhận định rằng hành vi đỗ xe chịu chi phối chủ yếu bởi các yếu tố hạ tầng, không gian và chính sách quản lý, trong khi sự khác biệt về yếu tố cá nhân chỉ đóng vai trò điều chỉnh thứ yếu ở biên độ hành vi.

Biểu đồ Hình 5 giúp quan sát đồng thời hướng và cường độ tác động của từng yếu tố trong mô hình. Các giá trị dương biểu thị xu hướng làm tăng xác suất lựa chọn vị trí đỗ xe trên đường có thu phí hoặc được quản lý, trong khi giá trị âm phản ánh xu hướng ngược lại, tức giảm lựa chọn, thường gắn với bãi đỗ miễn phí hoặc khu vực cấm đỗ. Phân bố màu sắc (đỏ có giá trị cao, xanh có giá trị thấp) thể hiện rõ sự đa dạng của dữ liệu đầu vào và tương tác giữa các yếu tố.

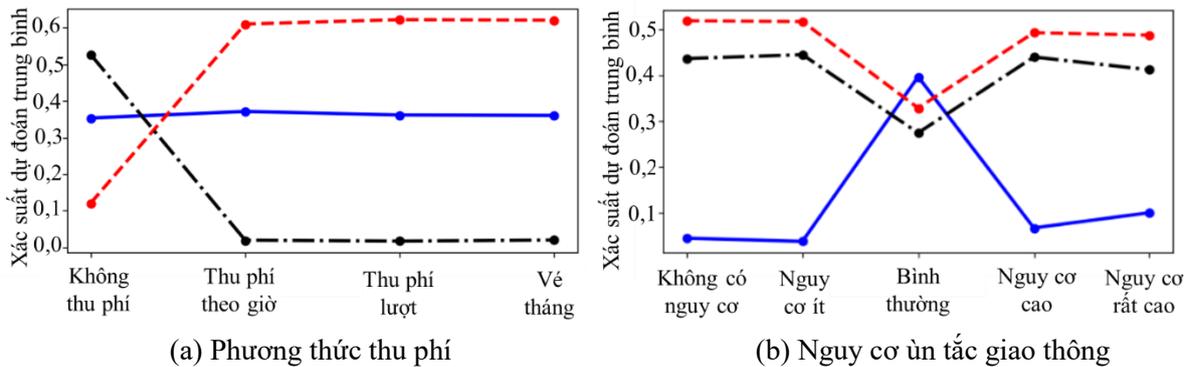
Bổ sung cho kết quả SHAP, phân tích biểu đồ phụ thuộc từng phần (PDP) giúp mô tả cơ chế tác động cận biên của từng yếu tố lên xác suất lựa chọn vị trí đỗ xe (Hình 6). Các đồ thị PDP cho thấy các yếu tố có tác động đáng kể nhất bao gồm: Phương thức thu phí, loại đường, khoảng cách đi bộ đến điểm đến, mục đích chuyến đi, và điều kiện hạ tầng đường phố (hệ phố và mức độ ùn tắc). Những kết quả này củng cố kết luận từ phân tích SHAP, cho thấy hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe tại Hà Nội được định hình bởi sự kết hợp phức tạp giữa yếu tố hạ tầng, không gian tiếp cận và chính sách đô thị, trong khi đặc điểm cá nhân chỉ đóng vai trò hỗ trợ. Nhìn chung, các phát hiện từ PDP củng cố kết quả SHAP: hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe được định hình chủ yếu bởi yếu tố hạ tầng và chính sách, trong khi đặc điểm cá nhân chỉ giữ vai trò phụ trợ. Những kết quả này phản ánh tính phức tạp của hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe, trong đó sự kết hợp giữa các yếu tố hạ tầng, không gian đô thị và đặc điểm cá nhân có vai trò quyết định đối với sự lựa chọn vị trí đỗ xe.

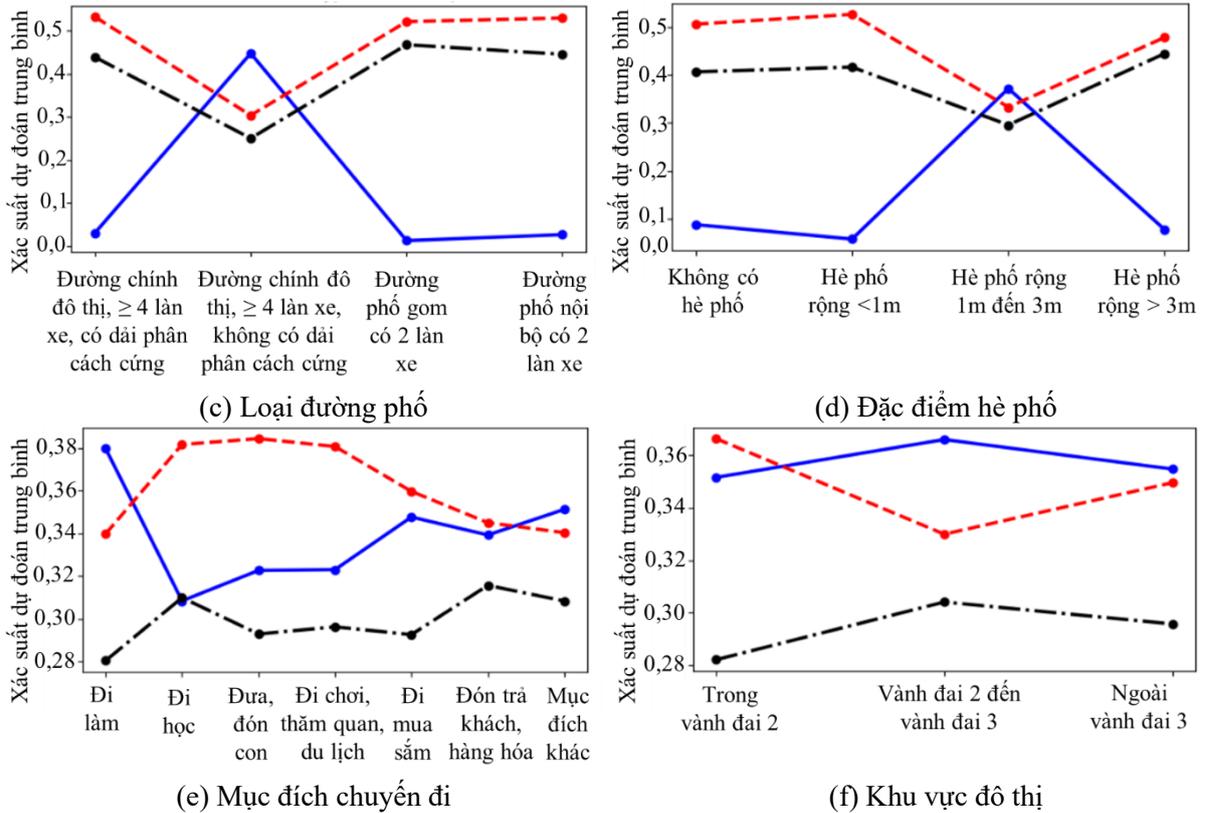


Hình 4. Biểu đồ mức độ ảnh hưởng trung bình của các yếu tố đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.



Hình 5. Biểu đồ hướng và mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.





Chú thích: — Đỗ xe ngoài đường - - - Đỗ xe trên đường có thu phí - . - Đỗ xe trên đường không thu phí

Hình 6. Biểu đồ ảnh hưởng của một số yếu tố đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.

### 3. THẢO LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP

Các kết quả nghiên cứu cho thấy rằng hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe trong đô thị không phải là quá trình hoàn toàn ngẫu nhiên mà cho thấy sự tương tác phức tạp giữa yếu tố hạ tầng, chính sách quản lý và đặc điểm cá nhân của người lái xe. Việc áp dụng mô hình SVM đã mang lại khả năng phân loại có hiệu quả cao. Điều này phản ánh rằng mô hình không chỉ hữu ích trong dự đoán mà còn có giá trị trong việc phát hiện những đặc điểm khó quan sát, từ đó cung cấp luận cứ khoa học cho quá trình đề xuất và lựa chọn giải pháp phù hợp. Bằng việc kết hợp với các công cụ giải thích như SHAP và PDP, nghiên cứu đã làm rõ hơn cơ chế tác động của từng yếu tố đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.

Kết quả phân tích chỉ ra rằng xu hướng gia tăng lựa chọn đỗ xe trên đường khi hệ phố đủ rộng và mức phí đỗ xe hợp lý, nhất quán với các phát hiện của Waraich và Axhausen [7], và Antolín và các cộng sự [12]. Ngược lại, tác động tiêu cực của tình trạng ùn tắc phù hợp với kết luận của Guo và các cộng sự [8], cho thấy người lái xe thường né tránh các tuyến đường có nguy cơ ùn tắc cao khi đưa ra quyết định đỗ xe. Sự tương đồng này góp phần kiểm chứng độ tin cậy của mô hình, và cho thấy vai trò then chốt của yếu tố hạ tầng và chính sách trong hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe tại các đô thị có mật độ giao thông cao như Hà Nội.

Bảng 4. Xu hướng tác động của các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe.

TT	Yếu tố tác động	Xu hướng tác động	Khuyến nghị
I	Đặc điểm nhân khẩu, xã hội		
1	Thu nhập	Thu nhập cao → sẵn sàng trả phí để tiết kiệm thời gian.	Cần chính sách giá công bằng, phân cấp theo khu vực hoặc nhóm người dùng.

2	Tuổi, giới tính	Ảnh hưởng nhỏ, chỉ điều chỉnh hành vi ở biên độ hẹp.	Yếu tố hạ tầng và chính sách mang tính quyết định hơn.
II Thông tin chuyến đi			
3	Mục đích chuyến đi	Đi học, đưa đón con → ưu đỗ có thu phí; đi làm → ưu tiên bãi công cộng.	Quản lý đỗ xe cần linh hoạt theo loại hình nhu cầu (học tập, dịch vụ, công vụ).
4	Khoảng cách xuất phát – điểm đỗ	Khoảng cách ngắn → tăng đỗ xe trên đường; khoảng cách xa → chọn bãi công cộng.	Bố trí bãi đỗ xe ngoài đường cho hành trình dài; kiểm soát đỗ xe cục bộ trong lõi đô thị.
5	Mức độ sử dụng phương tiện	Ảnh hưởng nhỏ, chỉ điều chỉnh hành vi ở biên độ hẹp.	Yếu tố hạ tầng và chính sách mang tính quyết định hơn.
III Đặc điểm tình huống và trải nghiệm đỗ xe			
6	Nguy cơ ùn tắc	Khi ùn tắc tăng, xu hướng đỗ ngoài đường giảm; người lái chọn bãi công cộng ổn định hơn.	Kết hợp quản lý đỗ xe với kiểm soát lưu lượng và thông tin giao thông thời gian thực.
7	Khu vực đô thị	Trong vành đai 2: ưu tiên đỗ có thu phí; ngoài vành đai 3: xu hướng cân bằng.	Chính sách tổ chức đỗ xe cần theo không gian đô thị.
8	Khoảng cách đi bộ (Từ nơi đỗ xe đến điểm đến)	Khoảng cách 200–300 m là giới hạn thuận tiện; vượt ngưỡng giảm lựa chọn đỗ có thu phí.	Thiết kế mạng lưới tiếp cận bộ hành $\leq 300$ m để tối ưu hiệu quả đỗ xe.
9	Thời gian đỗ	Thời gian ngắn → bãi công cộng; dài ( $\geq 4$ giờ) → tăng đỗ xe trên đường có thu phí.	Đề xuất định giá linh hoạt theo thời gian đỗ xe.
10	Thời gian tìm chỗ đỗ	Thời gian tìm kiếm dài → người lái sẵn sàng trả phí.	Hệ thống hướng dẫn tìm chỗ giúp giảm ùn tắc do tìm chỗ.
11	Mức độ quen thuộc bãi đỗ, gần điểm đến	Ảnh hưởng nhỏ, chỉ điều chỉnh hành vi ở biên độ hẹp.	Yếu tố hạ tầng và chính sách mang tính quyết định hơn.
IV Đặc điểm hạ tầng và tổ chức đỗ xe			
12	Phương thức thu phí	Có ảnh hưởng mạnh nhất; đỗ xe có thu phí tăng khi cơ chế giá minh bạch và hợp lý.	Chính sách giá là công cụ điều tiết hành vi hiệu quả, cần linh hoạt theo thời gian và khu vực.
13	Loại đường	Đường gom và nội bộ thuận lợi hơn cho đỗ xe có thu phí; đường chính bị hạn chế do ảnh hưởng lưu thông.	Tổ chức đỗ xe nên ưu tiên tại đường gom, nội bộ; hạn chế tại trục chính.
14	Đặc điểm hệ phố	Hệ rộng, bằng phẳng, tổ chức tốt → tăng xu hướng đỗ xe trên đường.	Cải thiện thiết kế hệ phố giúp nâng cao hiệu quả giao thông tĩnh và an toàn.

Dựa trên kết quả của mô hình SVM và các phân tích định lượng thông qua các biểu đồ SHAP và PDP, nghiên cứu đã làm rõ mức độ ảnh hưởng cũng như chiều tác động của các nhóm yếu tố đến hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe. Trên cơ sở đó, các kết quả phân tích được tổng hợp và hệ thống hóa trong Bảng 4 nhằm khái quát các xu hướng tác động chính và chuyển hóa chúng thành các định hướng và khuyến nghị tương ứng.

Từ các khuyến nghị này, có thể rút ra một số định hướng quan trọng cho công tác quản lý, tổ chức đỗ xe. Thứ nhất, chính sách giá được xác định là công cụ trung tâm, trong đó việc áp dụng cơ chế thu phí minh bạch và linh hoạt (theo giờ, theo khu vực hoặc vé tháng) góp phần định hình rõ ràng hành vi của người sử dụng, hạn chế xu hướng đỗ xe tùy tiện. Thứ hai, quy hoạch không gian đỗ xe cần gắn với cấu trúc đường phố, ưu tiên bố trí chỗ đỗ trên các tuyến đường gom và đường nội bộ – nơi tác động tiêu cực đến lưu thông thấp hơn – đồng thời hạn chế tại các tuyến trục chính có nguy cơ ùn tắc cao. Thứ ba, việc cải thiện thiết kế hạ tầng đi bộ và hệ phố là cần thiết nhằm bảo đảm khả năng tiếp cận an toàn và thuận tiện từ vị trí đỗ xe đến điểm đến. Cuối cùng, sự kết hợp giữa tổ chức thời gian đỗ, cơ chế định giá và giám sát theo

thời gian thực tạo ra tính linh hoạt trong quản lý, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành của hệ thống đỗ xe đô thị và khả năng thích ứng với nhu cầu thay đổi của người dân.

Trên nền tảng các định hướng và khuyến nghị trong Bảng 4, nghiên cứu tiếp tục phát triển thành các nhóm giải pháp cụ thể cho Thành phố Hà Nội, được hệ thống hóa trong Bảng 5. Các giải pháp này được thiết kế phù hợp với đặc điểm không gian và điều kiện vận hành của từng khu vực đô thị, bao gồm cơ chế thu phí linh hoạt theo không gian và thời gian, tổ chức đỗ xe theo khu vực chức năng, cũng như ứng dụng công nghệ cảm biến và dữ liệu thời gian thực trong công tác quản lý. Cách tiếp cận này giúp kết nối chặt chẽ giữa kết quả phân tích định lượng, khuyến nghị chính sách và giải pháp triển khai, góp phần nâng cao hiệu quả tổ chức giao thông tĩnh và hướng tới phát triển hệ thống giao thông đô thị thông minh, bền vững.

Bảng 5. Đề xuất một số giải pháp thiết kế, tổ chức, khai thác đỗ xe trên đường tại Thành phố Hà Nội.

TT	Nhóm giải pháp	Giải pháp thiết kế	Giải pháp tổ chức, khai thác
1	Khuyến khích	Thiết kế không gian đỗ xe trên đường phù hợp với mật cắt và chức năng tuyến đường, ưu tiên các tuyến đường gom và đường nội bộ có hệ phố đủ điều kiện tiếp cận an toàn	Áp dụng cơ chế thu phí minh bạch và linh hoạt nhằm định hướng hành vi đỗ xe có kiểm soát, giảm hành vi đỗ xe tự phát
2	Hạn chế	Không bố trí hoặc hạn chế không gian đỗ xe trên các tuyến đường có chức năng giao thông chủ đạo hoặc nguy cơ ùn tắc cao	Tăng cường các biện pháp điều tiết giao thông tĩnh nhằm hạn chế đỗ xe trên đường tại khu vực nhạy cảm về ùn tắc và an toàn giao thông
3	Điều tiết có kiểm soát	Thiết kế tổ chức đỗ xe linh hoạt theo không gian và thời gian, phù hợp với đặc điểm sử dụng đất và nhu cầu đi lại theo khung giờ	Điều tiết thời gian và thời lượng đỗ xe thông qua quy định theo khung giờ, thời gian đỗ tối đa và mức phí tương ứng
4	Tổ chức tổng hợp	Tối ưu hóa bố trí đỗ xe trên đường tại các khu vực giáp ranh trung tâm, nơi tồn tại đồng thời nhu cầu cao và hạn chế không gian	Kết hợp đồng bộ các công cụ định hướng hành vi đỗ xe nhằm phù hợp với điều kiện hạ tầng và mật độ giao thông

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện khảo sát và thu thập dữ liệu về nhu cầu và hành vi đỗ xe nói chung, cũng như đỗ xe trên đường nói riêng tại Thành phố Hà Nội, dựa trên phương pháp phỏng vấn trực tiếp sử dụng bảng hỏi. Dữ liệu thu thập đã được xử lý, mã hóa và sử dụng để xây dựng mô hình SVM, sau đó, mô hình được diễn giải thông qua việc áp dụng các phương pháp như SHAP và PDP. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng mô hình SVM có hiệu quả cao trong việc dự đoán hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe trong bối cảnh đô thị phức tạp như Hà Nội. Với F1-score trung bình khoảng 0,92, mô hình thể hiện khả năng phân loại tốt so với các phương pháp truyền thống. Phân tích SHAP và PDP chỉ ra rằng hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe chủ yếu chịu ảnh hưởng của các yếu tố hạ tầng và chính sách như phương thức thu phí, loại đường, nguy cơ ùn tắc và điều kiện hệ phố, trong khi các đặc điểm cá nhân chỉ có tác động thứ yếu. Kết quả này củng cố nhận định rằng hành vi đỗ xe mang tính hệ thống và có thể điều chỉnh thông qua các công cụ quy hoạch, tổ chức giao thông và chính sách giá.

Về đóng góp khoa học, nghiên cứu này mở rộng cách tiếp cận phương pháp trong phân tích hành vi lựa chọn vị trí đỗ xe thông qua việc kết hợp mô hình SVM với các kỹ thuật giải thích mô hình như SHAP và PDP. Cách tiếp cận này không chỉ giúp cải thiện độ chính xác dự đoán mà còn tăng cường khả năng diễn giải và minh bạch của mô hình học máy trong bối cảnh nghiên cứu hành vi giao thông. Kết quả nghiên cứu cho thấy SVM là một phương pháp phù hợp và có tiềm năng ứng dụng trong phân tích hành vi đỗ xe, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc phát triển các hệ thống giao thông tĩnh thông minh và bền vững tại các đô thị lớn như Hà Nội.

Từ góc độ thực tiễn, nghiên cứu đã đưa ra một số giải pháp trong thiết kế và tổ chức đỗ xe tại thành phố Hà Nội, bao gồm đa dạng hóa và minh bạch hóa cơ chế thu phí, tổ chức đỗ xe tại các tuyến đường gom và đường nội bộ, cải thiện hạ tầng hè phố, cũng như gắn kết tổ chức đỗ xe với kiểm soát ùn tắc giao thông. Những giải pháp này góp phần nâng cao hiệu quả vận hành và thúc đẩy phát triển giao thông đô thị theo hướng bền vững.

Nghiên cứu đã đạt được các mục tiêu đề ra, tuy nhiên vẫn còn một số hạn chế cần được xem xét. Dữ liệu khảo sát còn giới hạn về phạm vi thời gian và không gian, mặc dù nghiên cứu đã tiến hành phân vùng khảo sát nhưng chủ yếu phản ánh hành vi lựa chọn đỗ xe tại một số khu vực và trong khoảng thời gian khảo sát tương đối ngắn, do đó chưa thể đại diện đầy đủ cho đặc điểm giao thông tĩnh của toàn bộ đô thị Hà Nội. Đồng thời, nghiên cứu chưa xem xét, đánh giá được tác động của các yếu tố động như biến động nhu cầu đỗ xe, điều kiện giao thông hay chính sách quản lý theo thời gian, do dữ liệu được thu thập trong một giai đoạn nhất định. Những hạn chế này cho thấy nhu cầu mở rộng nghiên cứu dựa vào dữ liệu được thu thập trong chuỗi thời gian dài hơn, phạm vi khảo sát rộng hơn và các mô hình phân tích động.

Bên cạnh đó, các giải pháp khuyến nghị để cải thiện hiệu quả tổ chức đỗ xe tại Hà Nội mới dừng lại ở mức định hướng, chưa được triển khai và kiểm chứng trong điều kiện thực tiễn. Do đó, hiệu quả triển khai, áp dụng các giải pháp đã đề xuất cần được đánh giá sâu hơn thông qua các nghiên cứu thực nghiệm, thí điểm và phân tích chi phí – lợi ích trong bối cảnh cụ thể của từng khu vực đô thị.

Các nghiên cứu trong tương lai cần mở rộng phạm vi và quy mô dữ liệu, kết hợp dữ liệu thời gian thực, thực hiện so sánh đa mô hình và phát triển các phân tích theo chiều dọc (theo thời gian), để cải thiện tính nhất quán và khả năng áp dụng rộng rãi của kết quả nghiên cứu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T.W. Austin, Allocation of parking demand in a CBD, Highway Research Record, 444 (1973) 1-8.
- [2]. J.D. Hunt, S. Teply, A nested logit model of parking location choice, Transportation Research Part B: Methodological, 27 (1993) 253–265. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(93\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0191-2615(93)90035-9)
- [3]. M. Chen, C. Hu, T. Chang, The research on optimal parking space choice model in parking lots, 3rd International Conference on Computer Research and Development, 2 (2011) 93–97. <https://doi.org/10.1109/ICCRD.2011.5764091>
- [4]. K. Teknomo, K. Hokao, Parking behavior in central business district: A study case of Surabaya, Indonesia, EASTS Journal, 2 (1997) 551–570.
- [5]. P. Coppola, Transportation Planning: State of the Art, 1st Edition, Springer US, Boston, MA, 2002.
- [6]. Khaliq, P.J.H.J. Van Der Waerden, D. Janssens, A discrete choice approach to define individual parking choice behaviour for the ParkAgent model, 23rd International Conference on Urban Transport and the Environment, (2017) 493–502.
- [7]. R.A. Waraich, K.W. Axhausen, Agent-based parking choice model, Transportation Research Record, 2319 (2012) 39–46. <https://doi.org/10.3141/2319-05>
- [8]. L. Guo, S. Huang, J. Zhuang, A.W. Sadek, Modeling parking behavior under uncertainty: A static game theoretic versus a sequential neo-additive capacity modeling approach, Networks and Spatial Economics, 13 (2013) 327–350. <https://doi.org/10.1007/s11067-012-9183-1>
- [9]. M. Ottomanelli, M. Dell’Orco, D. Sassanelli, Modelling parking choice behaviour using Possibility Theory, Transportation Planning and Technology, 34 (2011) 647–667.
- [10]. E.M. Whitlock, Use of linear programming to evaluate alternative parking sites, Highway Research Record, 444 (1973).
- [11]. Y. Asakura, M. Kashiwadani, Effects of parking availability information on system performance: A simulation model approach, Proceedings of VNIS’94 - 1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference, (1994) 251–254. <https://doi.org/10.1109/VNIS.1994.396832>
- [12]. G. Antolín, A. Ibeas, B. Alonso, L. dell’Olio, Modelling parking behaviour considering users’ heterogeneities, Transport Policy, 67 (2018) 23–30.

- [13]. X.Y. Ni, D. Sun, Agent-based modelling and simulation to assess the impact of parking reservation system, *Journal of Advanced Transportation*, 2017 (2017) 2576094.
- [14]. C. Cortes, V. Vapnik, Support-vector networks, *Machine Learning*, 20 (1995) 273–297.
- [15]. Y. Zhang, Y. Xie, Travel mode choice modeling with support vector machines, *Transportation Research Record*, 2076 (2008) 141–150. <https://doi.org/10.3141/2076-16>
- [16]. B. Sun, B. B. Park, Route choice modeling with support vector machine, *Transportation Research Procedia*, 25 (2017) 1806-1814. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.151>
- [17]. A. P. Alex, M. A. Thomas, R. Raj, Modelling of activity–travel pattern with support vector machine, *European Transport*, 82 (2021) 1–20. <https://doi.org/10.48295/ET.2021.82.2>
- [18]. A. Dahiya, P. Mittal, Y. K. Sharma, U. K. Lilhore, S. Simaiya, E. Ghith, M. Tlija, Machine learning-based prediction of parking space availability in IoT-enabled smart parking management systems, *Journal of Advanced Transportation*, 2024 (2024). <https://doi.org/10.1155/2024/8474973>
- [19]. Z. Zhao, Y. Zhang, Y. Zhang, A comparative study of parking occupancy prediction methods considering parking type and parking scale, *Journal of Advanced Transportation*, 2020 (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/5624586>
- [20]. C. Ma, X. Huang, J. Li, A review of research on urban parking prediction, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 11 (2024) 700–720.
- [21]. S. Gao, M. Li, Y. Liang, J. Marks, Y. Kang, M. Li, Predicting the spatiotemporal legality of on-street parking using open data and machine learning, *Annals of GIS*, 25 (2019) 299–312.
- [22]. Y. Sari, H. Suhud, A. R. Baskara, R. A. Premunendar, I. F. Radam, Parking lots detection in static images using support vector machine based on genetic algorithm, *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14 (2021) 476–487. <https://doi.org/10.22266/ijies2021.1231.42>
- [23]. P. Sattayhatewa, R.L. Smith Jr., Development of parking choice models for special events, *Transportation Research Record*, 1858 (2003) 31–38. <https://doi.org/10.3141/1858-05>
- [24]. Y. Han, W. Huang, X. Wu, G. Yang, Parking location choice model in mixed residential and commercial land considering parking sharing policy, *COTA International Conference of Transportation Professionals*, (2017) 3543–3550. <https://doi.org/10.1061/9780784480915.370>
- [25]. T. M. T. Truong, H. B. Ly, D. Lee, B. T. Pham, S. Derrible, Analyzing travel behavior in Hanoi using support vector machine, *Transportation Planning and Technology*, 44 (8) (2021).
- [26]. R. Kohavi, A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection, *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 2 (1995) 1137-1143.
- [27]. M. Sivakumar, S. Parthasarathy, T. Padmapriya, Trade-off between training and testing ratio in machine learning for medical image processing, *PeerJ Computer Science*, 10 (2024).
- [28]. D. S. Broomhead, D. Lowe, Multivariable functional interpolation and adaptive networks, *Complex Systems*, 2 (1988) 321–355.
- [29]. T. M. Mitchell, *Machine Learning*, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [30]. T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, Springer, New York, 2001.
- [31]. C. J. Van Rijsbergen, *Information Retrieval*, 2nd ed., Butterworths, London, 1979.
- [32]. C. D. Manning, P. Raghavan, H. Schütze, *Introduction to Information Retrieval*, Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [33]. M. Sokolova, G. Lapalme, A systematic analysis of performance measures for classification tasks, *Information Processing & Management*, 45 (2009) 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2009.03.002>
- [34]. S. M. Lundberg, S.-I. Lee, A unified approach to interpreting model predictions, *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, (2017) 4765–4774.
- [35]. J. H. Friedman, Greedy function approximation: A gradient boosting machine, *The Annals of Statistics*, 29 (2001) 1189–1232. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
- [36]. S. B. Hassine, R. Mraïhi, A. Lachiheb, E. Kooli, Modelling parking type choice behavior, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11 (2022) 653–664.
- [37]. X. Li, Parking choice behavior of urban village residents considering parking risk: An integrated modeling approach, *Case Studies on Transport Policy*, 15 (2024).