



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.7.67-81>

***Corresponding author:**

Email address:

duc.doan@ut.edu.vn

Received: 25/05/2026

Received in Revised Form:

07/08/2026

Accepted: 21/08/2026

A modelling study of mixed traffic flow on national highway 1A in Ho Chi Minh City using a car-following approach

Pham Phung Huy, Phan Thi Hoai Thuong, Doan Hong Duc*

Ho Chi Minh City University of Transport, No.2 Vo Oanh Street, Thanh My Tay Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

Abstract: In this study, high-quality trajectory data were extracted from a 5-hour peak-period video on National Highway 1A (Phan Van Hon - Truong Chinh), with only the 11h30 – 12h30 time window meeting the required quality standards. Four vehicle categories were considered: cars, buses, light commercial vehicles (LCV), and heavy goods vehicles (HGV). Using lane - based time - space diagrams, the study identified leader - follower vehicle pairs and characteristic hysteresis loops. This lane-specific approach allows for a detailed representation of car - following behaviour under mixed traffic conditions. The Wiedemann 99 model was implemented, with parameters CC0 - CC9 calibrated from the observations. Simulation results of speed, density, and flow show that the calibrated model achieves high accuracy ($GEH < 3$), outperforming the default model ($GEH > 5$). The findings confirm that trajectory data are essential for simulating car-following behaviour and analysing microscopic traffic flow characteristics under mixed traffic conditions.

Keywords: Mixed traffic, Car – following models, Model calibration, Microsimulation, Perception thresholds.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.7.67-81>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
duc.doan@ut.edu.vn

Ngày nộp bài: 25/05/2026
Ngày nộp bài sửa: 07/08/2026
Ngày chấp nhận: 21/08/2026

Nghiên cứu đặc trưng dòng giao thông hỗn hợp trên Quốc lộ 1A, Thành phố Hồ Chí Minh theo hướng mô hình hóa tiếp cận xe theo xe

Phạm Phùng Huy, Phan Thị Hoài Thương, Đoàn Hồng Đức*
Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh, số 2 đường Võ Oanh, phường Thạnh Mỹ Tây, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Tóm tắt: Nghiên cứu trích xuất quỹ đạo phương tiện từ 5 giờ dữ liệu cao điểm trên đoạn tuyến Quốc lộ 1A (Phan Văn Hớn - Trường Chinh), chỉ duy nhất khung giờ 11h30 - 12h30 đáp ứng đủ yêu cầu chất lượng. Bốn nhóm phương tiện gồm ô tô, xe buýt, xe tải nhẹ (LCV) và xe tải nặng (HGV). Qua biểu đồ thời gian - khoảng cách theo làn, nghiên cứu xác định các cặp phương tiện dẫn - theo và vòng lặp độ trễ đặc trưng. Cách tiếp cận này mô tả chi tiết hành vi xe theo xe trong điều kiện giao thông hỗn hợp. Mô hình Wiedemann 99 được triển khai với các tham số CC0 - CC9 hiệu chỉnh từ quan trắc. Kết quả mô phỏng tốc độ, mật độ và lưu lượng cho thấy mô hình hiệu chỉnh đạt độ chính xác cao ($GEH < 3$), vượt trội so với mô hình mặc định ($GEH > 5$). Nghiên cứu khẳng định dữ liệu quỹ đạo là nền tảng quan trọng để mô phỏng hành vi xe theo xe và phân tích đặc trưng dòng giao thông vi mô trong điều kiện giao thông hỗn hợp.

Từ khóa: Giao thông hỗn hợp, Mô hình xe theo xe, Hiệu chỉnh mô hình, Mô phỏng vi mô, Ngưỡng cảm nhận.

1. Giới thiệu

Mô hình hóa giao thông là một trong những phương pháp mang tính ứng dụng nhằm đánh giá mức độ hoạt động của các thành phần giao thông trong nhiều bối cảnh khác nhau, qua đó dự báo hiệu quả của các cấu phần, đặc biệt là các đoạn đường. Trong lĩnh vực này, các nhà nghiên cứu đã thử nghiệm nhiều kỹ thuật mô hình hóa khác nhau, bao gồm xác định các chế độ dòng chảy vĩ mô, hiệu chỉnh các mô hình bám đuôi, và gần đây là sử dụng các mô hình mô phỏng. Trong đó, các công cụ mô phỏng giao thông đã nâng cao đáng kể độ chính xác của mô hình hóa dòng giao thông. Sự phát triển của năng lực tính toán càng làm tăng hiệu quả của mô phỏng vi mô. Tuy nhiên, điều này

cũng dẫn đến mức độ tùy chỉnh lớn trong mô phỏng, khi từng tham số hiện trường phải được đưa vào mô hình để đảm bảo kết quả chính xác, đồng thời làm tăng rủi ro phải tinh chỉnh phức tạp [1]. Đặc biệt trong mô phỏng vi mô, hành vi lái xe là yếu tố then chốt, quyết định mức độ phức tạp và khả năng ứng dụng thực tế của mô hình.

Việc xây dựng các mô hình có hành vi lái xe được hiệu chỉnh chính xác là một nhiệm vụ phức tạp. Đặc biệt trong điều kiện giao thông hỗn hợp, hành vi lái xe trở nên phức tạp hơn rất nhiều, khiến việc mô hình hóa gặp thách thức lớn. Trong số các tham số hành vi, hành vi xe theo xe của phương tiện đóng vai trò cốt lõi trong việc tái hiện hành vi lái xe thực tế. Hành vi này bao gồm: nhận thức của

người lái, hành vi xe theo xe, hành vi vượt, và các ngưỡng tránh va chạm trên từng đoạn đường dưới các kịch bản giao thông khác nhau. Chẳng hạn như môi trường không phân làn trong điều kiện giao thông hỗn hợp. Tuy nhiên, nghiên cứu về hành vi phương tiện trong môi trường hỗn hợp không phân làn hiện vẫn còn rất hạn chế, tạo ra khoảng trống lớn trong nghiên cứu. Ngoài ra, xét đến các thiết kế thí nghiệm phục vụ kiểm định chiến lược của hệ thống hỗ trợ lái xe, việc nghiên cứu hành vi lái xe trở nên đặc biệt quan trọng [2].

Mặc dù các mô hình xe theo xe như Wiedemann 99 đã được áp dụng rộng rãi trong dòng giao thông tự do nhưng khả năng tái hiện hành vi của phương tiện trong điều kiện dòng giao thông hỗn hợp vẫn chưa được kiểm chứng đầy đủ. Điều này tạo ra khoảng trống trong việc đánh giá mức độ phù hợp của mô hình, cũng như hiểu rõ cách các tham số mô hình phản ánh hành vi xe theo xe trong điều kiện môi trường giao thông như của Việt Nam nói chung và tuyến Quốc lộ 1A nói riêng. Từ khoảng trống đó, nghiên cứu đặt ra các câu hỏi:

- Mô hình “xe theo xe” Wiedemann 99 có mô phỏng chính xác hành vi phương tiện trong giao thông hỗn hợp Việt Nam hay không?

- Các quan hệ tốc độ - mật độ và lưu lượng - mật độ được mô hình tái hiện như thế nào trong điều kiện không phân làn?

- Thành phần dòng xe ảnh hưởng ra sao đến các tham số dòng giao thông khi mô phỏng bằng mô hình này?

Nghiên cứu này đóng góp quy trình hiệu chỉnh Wiedemann 99 cho giao thông hỗn hợp bằng dữ liệu quỹ đạo thực tế và các chỉ tiêu đặc trưng của dòng giao thông hỗn hợp trên tuyến đường nghiên cứu Quốc lộ 1A.

2. Phương pháp

2.1. Mô hình xe theo xe

Hành vi xe theo xe mô tả cách một phương tiện phía sau phản ứng với phương tiện dẫn đầu trong cùng một làn đường. Mô hình xe theo xe sớm nhất được đề xuất dưới dạng mô hình kích thích - phản ứng, dựa trên giả định rằng người lái xe phía sau nhận biết chính xác và phản ứng phù hợp với khoảng cách và chênh lệch tốc độ giữa xe sau và xe dẫn đầu [3, 4]. Các mô hình khoảng cách an toàn [5-7] giả định rằng xe phía sau sẽ duy trì một khoảng cách an toàn với xe phía trước và lựa chọn tốc độ sao cho có thể dừng lại an toàn để tránh va chạm đuôi xe. Bảng 1 tóm lược các biểu thức toán học của các mô hình xe theo xe [5, 6, 7, 13].

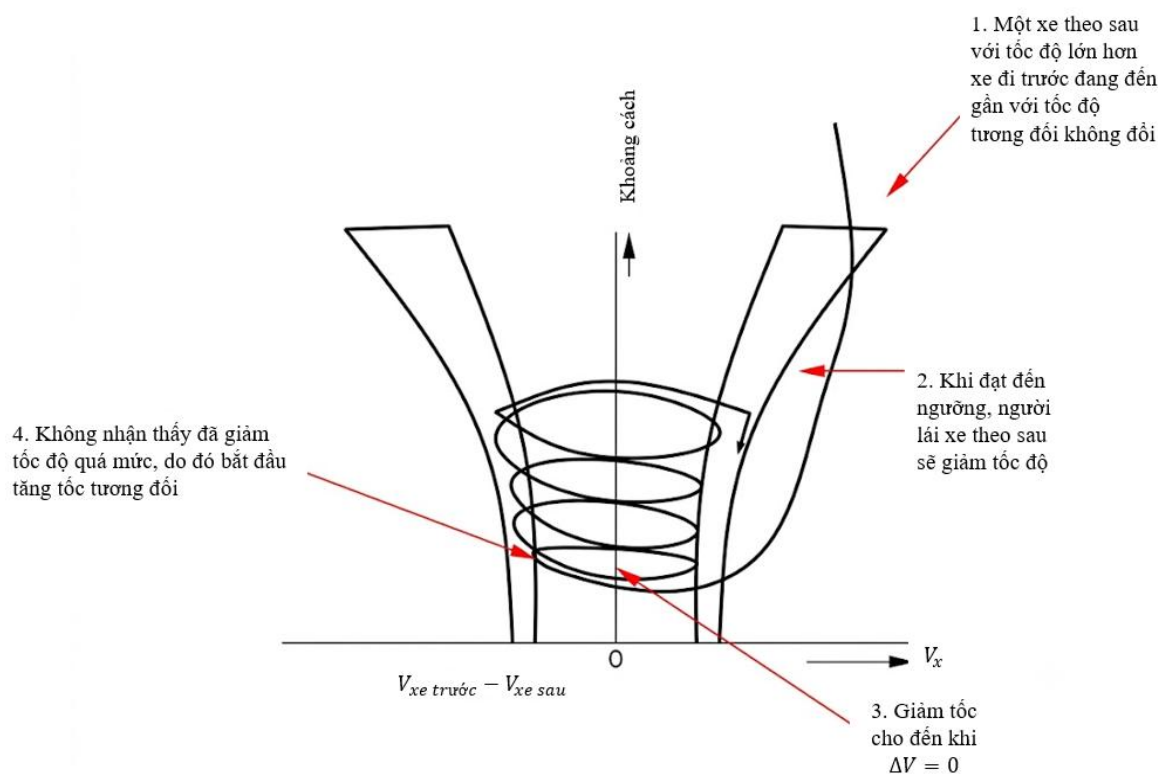
Bảng 1. Mô hình xe theo xe

Mô hình	Công thức toán học
Gipps [5]	$V_n(t+T) = \min \left\{ \frac{V_f(t) + 2.5 \max T \left(1 - \frac{V_f(t)}{V} \right) \sqrt{0.025 + \frac{V_f(t)}{V}}}{bT + b^2 T^2 - b \{ 2 x_l(t) - x_f(t) - s - v_f(t)T - v_l(t)^2/b \} ^{1/2}} \right\} \quad (1)$
IDM (Intelligent Driver Model - Mô hình người lái thông minh) [7]	$a_f = a_{\max} \left[1 - \left(\frac{V_f(t)}{V} \right)^\delta - \left(\frac{s_f^*}{x_l(t) - x_f(t)} \right)^2 \right]$ $s_f^*(v, \Delta V) = s_0^{(f)} + s_1^{(f)} \sqrt{\frac{V_f(t)}{V}} + T^\alpha V_f(t) + \frac{V_f(t) \Delta V}{\sqrt{a_{\max} b}} \quad (2)$
Krauss [6]	$V_{t+T}^f = \max [0, V_d - \epsilon a_n]$ $V_d = \min (V_f(t) + a_{\max} T, V_s, V_{\max}) \quad (3)$
Das và Asundi [13]	$V_s = V_l(t) + \frac{g_n(t) - V_l(t)T}{\frac{V_f(t) + V_l(t)}{2b} + T}$ $u = U_f \left(1 - (1-m) \frac{S_j}{S} - m \times \left(\frac{S_j}{S} \right)^n \right) \quad (4)$

Các mô hình ngưỡng cảm nhận của Leutzbach và R. Wiedemann (1986) [8] hướng đến việc mô tả hành vi lái xe thực tế hơn bằng cách cho phép khả năng nhận thức không hoàn hảo và phản ứng gián đoạn dựa trên các ngưỡng cảm nhận như góc nhìn, tốc độ, khoảng cách,... Trong các mô hình này, người lái có thể ở các trạng thái lái xe khác nhau như tự do, tiếp cận, xe theo xe, và phanh. Người lái chuyển trạng thái khi đạt đến một ngưỡng nhất định, có thể biểu diễn dưới dạng hàm của chênh lệch tốc độ, khoảng cách đầu xe,... Người lái xe luôn tồn tại một thứ được gọi là thời gian phản ứng. Trong hầu hết các mô phỏng, mô hình được đánh giá theo bước thời gian nhỏ, thường là 0.1 giây. Một mô hình tốt cho phép ta

thiết lập riêng thời gian phản ứng của người lái; khi đó chỉ các thông tin xảy ra sớm hơn thời gian phản ứng mới có thể ảnh hưởng đến gia tốc của xe theo sau được thể hiện qua Hình 1.

Một số mô hình lại sử dụng bước thời gian mô phỏng làm thời gian phản ứng. Trong trường hợp này, tốc độ hoặc gia tốc được tính ở mỗi bước thời gian và thông thường là 1 giây. Thông tin của bước trước sẽ được dùng ngay cho bước tiếp theo, và trong khoảng các bước không xét đến gia tốc. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng lên dòng giao thông đã được phân tích trong [7]. Tóm lại, thời gian phản ứng lớn dẫn đến dòng giao thông dễ mất ổn định, gây dao động hoặc hình thành sóng dừng.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý theo mô hình Wiedemann (1986)

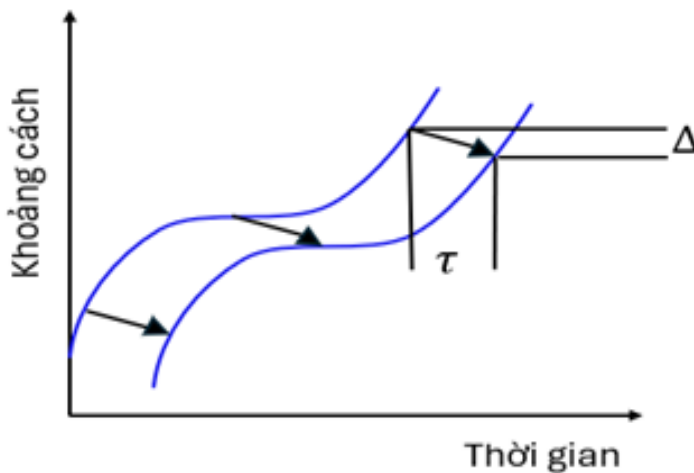
Trong các mô hình vận tốc tối ưu, người lái xe phía sau sẽ tăng tốc hoặc giảm tốc dựa trên chênh lệch giữa tốc độ hiện tại và tốc độ tối ưu có thể đạt được [9, 10] đã phát triển mô hình hành vi lái xe dựa trên logic mờ nhằm mô tả quyết định của xe phía sau dựa trên các luật suy luận mờ.

Theo Knoop [11], mô hình xe theo xe của

Newell được hiểu như sau: Mô hình xe theo xe là mô hình mô tả hành vi chuyển động dọc của xe theo sau dựa vào trạng thái của xe phía trước. Được mô tả theo ba đại lượng: Vị trí $x(t)$; Vận tốc $v(t)$; và gia tốc $a(t)$.

Có nhiều dạng mô hình khác nhau và tất cả đều có những ưu và nhược điểm riêng. Tất cả điều

trên nhằm tái hiện lại hành vi lái xe thực tế và đặc biệt hành vi của con người là không nhất quán nên vì thế rất khó nắm bắt trong các mô hình. Xe theo sau s_j so với vị trí khoảng cách của xe phía trước tại một thời điểm sớm hơn τ , với việc quy định vị trí của xe theo sau x_{i+1} cũng như hàm của vị trí xe dẫn trước x_i .



Hình 2. Mô hình Newell mô tả việc tịnh tiến quỹ đạo xe dẫn đầu theo một vector xác định $\{\tau, s_j\}$

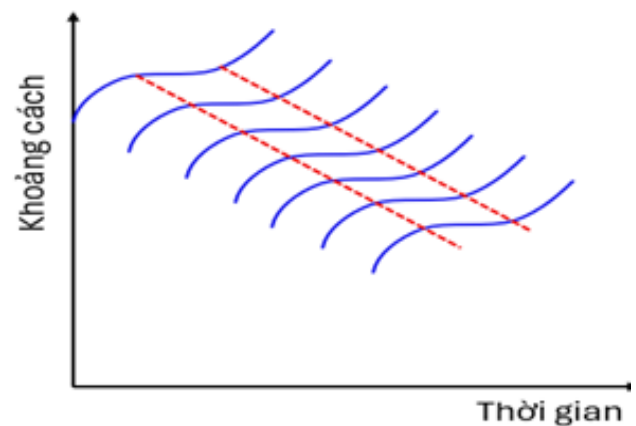
Để phân tích trong phạm vi rộng các điều kiện hình học tuyến đường và điều kiện giao thông, việc sử dụng các mô hình mô phỏng là cần thiết nhằm đảm bảo khả năng kiểm soát đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng. Vì mục đích này, nghiên cứu sử dụng mô hình mô phỏng giao thông vi mô cho điều kiện giao thông hỗn hợp do [12] phát triển đồng thời mở rộng bằng cách tích hợp nhiều mô hình xe theo xe khác nhau trong môi trường giao thông hỗn hợp. Khung mô phỏng giao thông vi mô bao gồm ba mô-đun chính:

- Sinh phương tiện
- Bố trí phương tiện
- Chuyển động phương tiện

Các phương tiện được sinh ra tại điểm đầu của đoạn đường mô phỏng dựa trên phân bố khoảng thời gian giữa các xe cho từng nhóm phương tiện khác nhau, xét đến mối quan hệ giữa xe dẫn đầu và xe theo xe [1]. Sau khi phương tiện được sinh ra, loại phương tiện sẽ được xác định dựa trên thành phần dòng giao thông. Tiếp theo,

$$x_{i+1}(t) = x_i(t - \tau) - s_j \quad (5)$$

Từ công thức trên có thể thấy mô hình giả định quỹ đạo của xe theo sau là phiên bản dịch chuyển theo thời gian và không gian của quỹ đạo xe dẫn đầu, được tịnh tiến theo một vector $\{\tau, s_j\}$ trong mặt phẳng x-t như Hình 2 và Hình 3 bên dưới.



Hình 3. Trung bình hóa hành vi xe theo xe của các tài xế với những tham số Newell khác nhau tạo ra một vận tốc sóng xung kích

phương tiện được gán tốc độ tự do tương ứng với loại phương tiện đó. Phương tiện sau đó được bố trí tại đầu đoạn đường thử nghiệm với một tốc độ là hàm của tốc độ dòng tự do của nhóm phương tiện, đặc tính tăng/giảm tốc của phương tiện, cũng như khoảng trống phía trước hiện có.

Trong điều kiện giao thông hỗn hợp, khi các phương tiện di chuyển trên mạng lưới giao thông đô thị có mức độ ùn tắc cao, chúng thường bám sát phương tiện phía trước và lựa chọn tốc độ xe theo xe cũng như khoảng cách xe theo xe dựa trên nguyên tắc tránh va chạm [5-7]. Các mô hình này hiện được sử dụng rộng rãi và có mức độ phổ biến cao trong các nghiên cứu trước. Do đó, các mô hình xe theo xe gồm P.G. Gipps (1981) [5]; IDM M. Treiber, A. Hennecke và D. Helbing. (2000) [7]; K. Das và J. Asundi (2012) [13] được lựa chọn để tích hợp trong mô phỏng vi mô. Các mô hình trên được hiệu chỉnh nhằm đảm bảo rằng kết quả mô phỏng có thể tái hiện hợp lý các điều kiện giao thông quan sát được ngoài thực địa. Mô phỏng được thực hiện

với các tham số đã xác định, sau đó so sánh đặc trưng dòng giao thông mô phỏng với quan trắc nhằm đánh giá mức độ phù hợp của mô hình.

2.2. Đoạn tuyến nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, đoạn đường có kiểm soát truy cập trên Quốc lộ 1A (Phan Văn Hớn - Trường Chinh) được chọn. Dữ liệu video được thu liên tục trong 5 giờ cao điểm để xây dựng đặc trưng dòng giao thông ở mức vi mô. Tuy nhiên, trong suốt quá trình ghi nhận dữ liệu cao điểm, 4 trong 5 khung giờ không đáp ứng được yêu cầu cho phân tích dòng giao thông hỗn hợp xe theo xe theo hướng tiếp cận. Cuối cùng, chỉ có duy nhất khung giờ 11h30 ÷ 12h30 đáp ứng đủ yêu cầu và các tiêu chí cho việc sử dụng trong nghiên cứu này. Vì vậy

10 phút dữ liệu quỹ đạo phương tiện từ khung giờ này được trích xuất.

Trong bối cảnh khu vực nghiên cứu, dòng giao thông xe máy được phân luồng di chuyển trên một không gian hoàn toàn riêng biệt. Để đảm bảo tính tập trung và loại trừ các biến số không tác động trực tiếp đến động học của dòng xe tại làn đường nghiên cứu, thành phần xe máy sẽ không được đưa vào mô hình phân tích của bài viết. Chính vì vậy, tại đoạn tuyến nghiên cứu, 4 nhóm phương tiện được ghi nhận, bao gồm: xe ô tô, xe buýt, xe tải nhẹ (LCV), xe tải nặng và xe container (HGV).

Hình ảnh của đoạn nghiên cứu lựa chọn được thể hiện ở Hình 4.



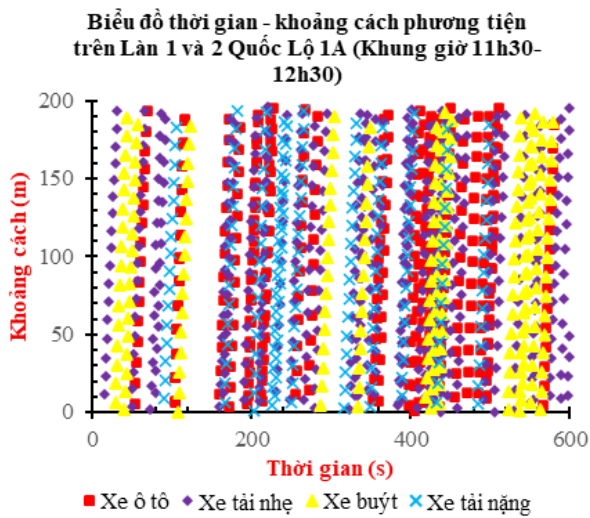
Hình 4. Đoạn tuyến nghiên cứu Quốc lộ 1A

Để xây dựng được biểu đồ thời gian - khoảng cách, 2 yếu tố chính cần xác định được là: khoảng cách (tức là vị trí dọc trên đường của phương tiện đó so với phương tiện khác mà phải cùng 1 loại phương tiện), và thời gian (là khoảng thời gian mà phương tiện đó xuất hiện trên làn và có sự tương tác với các phương tiện khác). Từ dữ liệu quỹ đạo, các biểu đồ thời gian - khoảng cách (biểu diễn

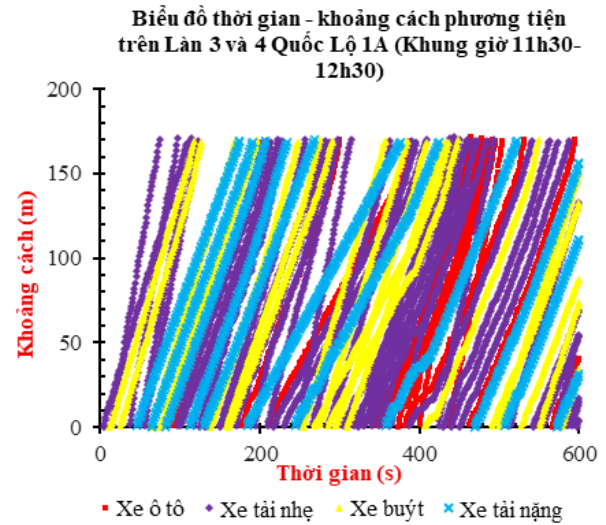
quãng đường dọc theo thời gian) đã xây dựng từ đoạn tuyến trên như thể hiện trong Hình 5. Điều đặc biệt khi quan sát được là khoảng cách và thời gian khung giờ được chọn xảy ra mức tương tác rất dày đặc trong làn 3 và 4 so với làn 1 và 2 chung khung giờ. Các khung giờ còn lại biểu đồ thời gian - khoảng cách được xây dựng dựa trên phương pháp tương tự được mô tả trong Hình 6. Đây là

bước đầu để xác định phương tiện có cặp dẫn - theo hay không? Và liệu chúng có thể diễn ra

những vòng lặp “độ trễ” đặc trưng của dòng giao thông xe theo xe theo hướng tiếp cận hay chưa?

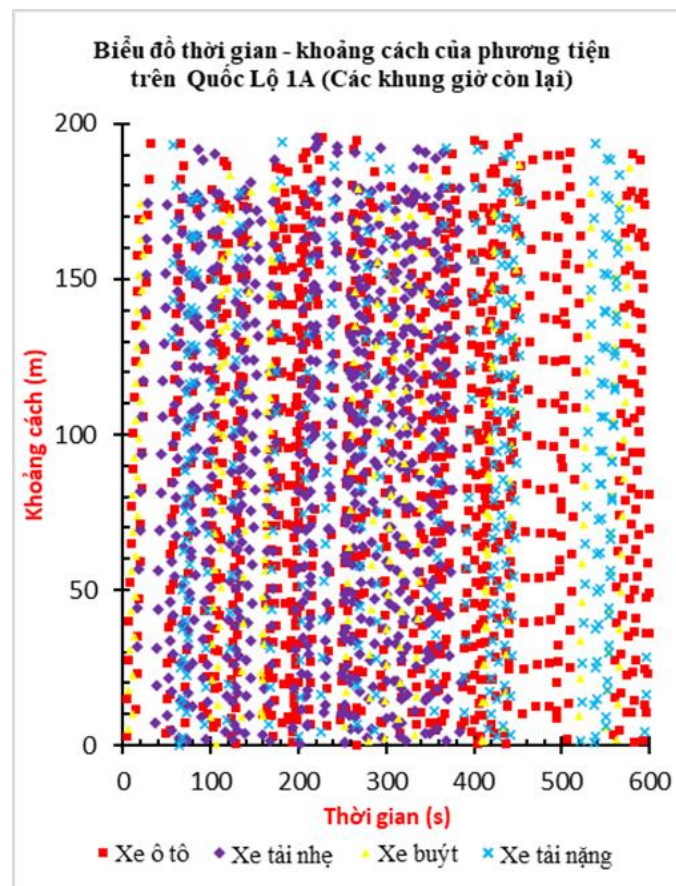


(a)



(b)

Hình 5. Biểu đồ thời gian - khoảng cách của các phương tiện trong khung giờ 11h30 – 12h30: (a) Làn 1 và 2 đoạn Quốc lộ 1A từ dữ liệu quỹ đạo xe; (b) Làn 3 và 4 đoạn Quốc lộ 1A từ dữ liệu quỹ đạo xe



Hình 6. Biểu đồ thời gian – khoảng cách của các phương tiện (Các khung giờ còn lại) tại đoạn Quốc lộ 1A từ dữ liệu quỹ đạo xe

Các thông tin đặc trưng của đoạn tuyến gồm: bề rộng làn xe, loại đường và chi tiết bộ dữ liệu sử

dụng được tổng hợp tại Bảng 2.

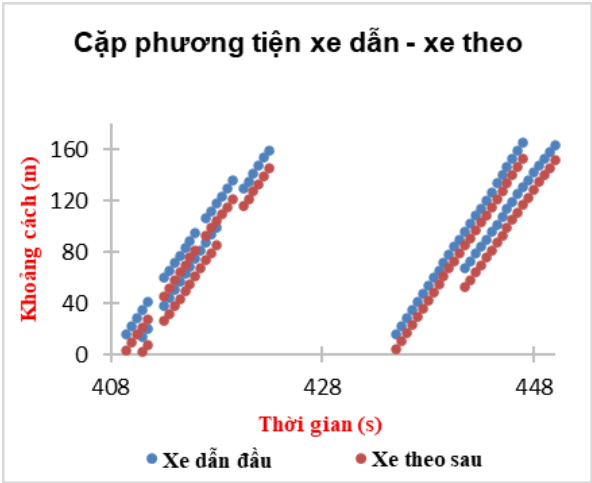
Việc xác định các cặp phương tiện dẫn - theo

là một trong những yếu tố then chốt khi phân tích hành vi xe theo xe trong điều kiện giao thông hỗn hợp. Ngược lại, trong giao thông thuần nhất việc nhận định cặp xe theo xe lại tương đối đơn giản hơn, do dòng xe di chuyển dựa trên cấu trúc làn đường rõ ràng. Tuy nhiên, trong điều kiện giao thông hỗn hợp, dòng xe thể hiện mức độ phức tạp cao vì không có quy tắc “giữ làn”, do vậy việc hiểu và mô tả được hành vi xe theo xe trong điều kiện như trường hợp Quốc lộ 1A càng trở nên khó khăn. Vì vậy, trong nghiên cứu này hành vi xe theo xe được khảo sát bằng cách sử dụng dữ liệu quỹ đạo phương tiện. Để thực hiện điều này, các biểu đồ thời gian - khoảng cách được xây dựng cho phương tiện trên từng làn giả định, với chiều rộng làn lấy 3.75 m. Dựa trên việc quan sát trực quan qua các biểu đồ với mức độ phóng đại phù hợp,

các phương tiện rơi vào trạng thái bám theo được xác định và lựa chọn như các cặp dẫn - theo giả định cùng làn ban đầu Hình 7, kết quả cho thấy rằng đồ thị xuất hiện các đoạn đứt là do chuỗi dữ liệu của phương tiện không được ghi nhận liên tục. Nguyên nhân có thể đến từ việc phương tiện tạm thời rời khỏi vùng quan sát, thay đổi làn hoặc thay đổi xe dẫn đầu làm gián đoạn quan hệ dẫn - theo. Hiện tượng này thường gặp cả trong dữ liệu thực tế lẫn dữ liệu mô phỏng và không ảnh hưởng đến quá trình xác định cặp xe nếu các đoạn hợp lệ vẫn được giữ nguyên để phân tích, bên cạnh đó là các chuỗi liên tục thể hiện mức độ xe theo xe liên tục trên cùng một làn, cùng một khoảng thời gian nhưng lại khác vị trí. Với cách tiếp cận này, có thể hiểu rằng các cặp dẫn - theo được lựa chọn dựa trên hành vi bám theo lý tưởng theo từng làn.

Bảng 2. Đặc điểm tuyến đường và chi tiết dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu

Đặc trưng	Thuộc tính của vị trí nghiên cứu
Đoạn nghiên cứu	Quốc lộ 1A
Loại đường	Đường trục chính đô thị
Chiều dài	134.82 m
Chiều rộng	15 m
Tốc độ giới hạn	60 km/h
Thời gian thu thập dữ liệu quỹ đạo xe	10 phút (chu kỳ 0.5 giây)
Số lượng xe quan sát	582 phương tiện



Hình 7. Xác định cặp phương tiện khả năng tạo quan hệ xe theo xe

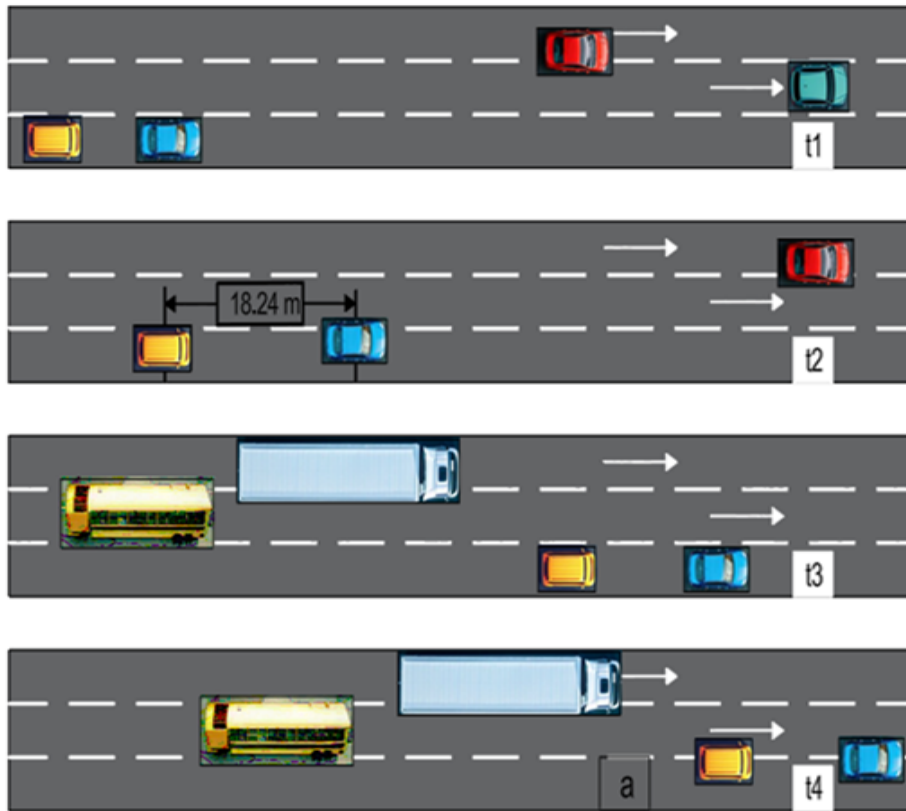
Quá trình xác định các cặp xe dẫn - theo thật sự được giải thích thông qua sơ đồ minh họa (ví dụ) trong Hình 8(a), nơi vị trí của các phương tiện trên đoạn đường tại bốn thời khác nhau được trực

quan hóa cho các xe đang xét (gồm xe màu xanh dương, xe màu cam). Xe ô tô đang bám theo màu xanh dương.

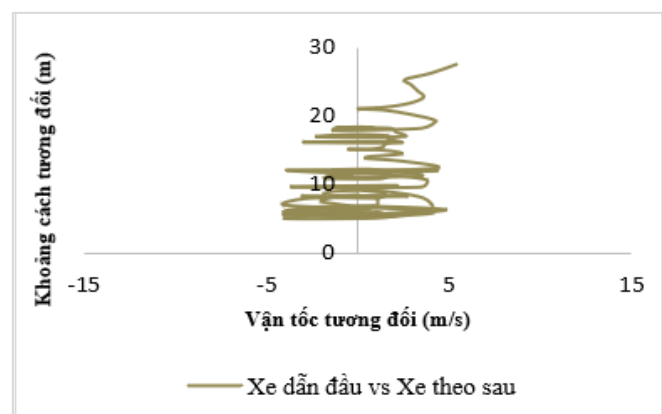
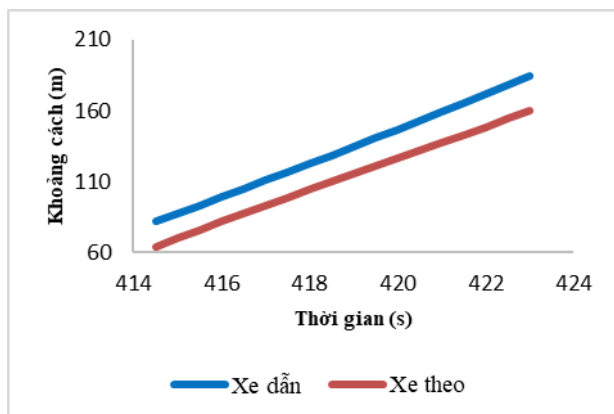
Dựa trên khung phương pháp, có thể giả

định rằng xe màu xanh dương và xe màu cam được xem như một cặp dẫn - theo giả định ban đầu. Để kiểm tra mức độ tương tác giữa 2 phương tiện này, các đồ thị quan hệ khoảng cách tương đối và tốc độ tương đối được xây dựng cho cặp phương tiện, như thể hiện trong Hình 8(b). Các đường dữ liệu được tô màu tương phản với màu phương tiện để thuận tiện theo dõi. Có thể nhận thấy rõ hiện tượng “độ trễ” (đặc trưng của tương

tác xe theo xe) xuất hiện giữa xe xanh và xe màu cam. Vì vậy, hai phương tiện này được xác định là cặp xe dẫn - theo thật sự. Phương pháp này được thực hiện cho toàn bộ phương tiện trên từng làn trong toàn bộ chiều rộng mặt đường của đoạn tuyến nghiên cứu. Kết quả xác định số lượng các cặp phương tiện xe theo xe theo hướng tiếp cận được tổng hợp trong Bảng 3. Từ đó, hành vi xe theo xe trên cả đoạn tuyến được mô tả đầy đủ.



(a)



(b)

Hình 8. Biểu đồ mô tả nhận dạng các cặp phương tiện xe theo xe

Bảng 3. Số lượng cặp phương tiện xe theo xe theo hướng tiếp cận (Phân loại phương tiện)

Phương tiện	Làn 3,4 (11h30 -12h30)	Làn 1,2 (11h30 -12h30)	Các khung giờ còn lại
Xe ô tô	13	-	-
Xe buýt	19	-	-
Xe tải nhẹ	39	-	-
Xe tải nặng	12	-	-
Tổng cộng	83 cặp	-	-

2.3. Mô hình Wiedemann 99

Wiedemann 99, vốn giữ cấu trúc lập luận cơ bản của Wiedemann 74 nhưng sử dụng phương pháp tính toán các ngưỡng khác nhau. Mười tham số chính được hiệu chỉnh và giải thích như sau:

- CC0: khoảng cách dừng mong muốn giữa hai phương tiện, phản ánh mức độ an toàn tâm lý của người lái.

- CC1: khoảng cách thời gian giữa các xe mục tiêu, ảnh hưởng trực tiếp đến khoảng cách an toàn ABX.

- CC2: giới hạn dao động theo chiều dọc, quy định mức độ vượt quá khoảng cách an toàn trước khi người lái chủ động tiến sát.

- CC3: ngưỡng bắt đầu giảm tốc khi xe theo nhận thấy xe dẫn di chuyển chậm hơn.

- CC4 - CC5: vận tốc tương đối cực đại theo hai chiều âm và dương, biểu thị biên độ dao động vô thức trong quá trình đi theo.

- CC6 - CC7: mô tả tác động của khoảng cách đến tốc độ và gia tốc thực trong trạng thái dao động.

- CC8 - CC9: gia tốc mong muốn khi khởi hành và ở tốc độ hành trình cao (60 km/h), giới hạn bởi gia tốc tối đa của phương tiện.

Các ngưỡng hành vi đi theo được xác định dựa trên lý thuyết kết hợp dữ liệu độ trễ thực tế. Trong quá trình hiệu chỉnh, tham số CC0 được giữ nguyên theo giá trị mặc định của mô hình Wiedemann 74 và không thực hiện hiệu chỉnh. Do mô hình Wiedemann 74 đã quy định giá trị CC0 mặc định riêng cho từng loại phương tiện, các giá trị này được kế thừa khi chuyển sang mô hình

Wiedemann 99. Để thiết lập ngưỡng theo dõi SDX (CC2), nghiên cứu sử dụng phân phối tích lũy của khoảng cách tương đối để xác định giá trị hợp lý. Hai mức phần vị 50% và 25% được thử nghiệm, kết quả cho thấy phần vị 25% phù hợp nhất cho cả hai đoạn khảo sát. Đối với CC4 và CC5, thay vì dùng giá trị cực đại từ tất cả các vòng độ trễ, nghiên cứu chọn phần vị 50% để đại diện cho ngưỡng vận tốc tương đối. Sau khi cố định CC2 và CC5, CC3 được tính dựa trên độ dốc nổi từ gốc tọa độ đến giới hạn SDX tại CC5. Giá trị lớn hơn của các tham số này phản ánh người lái kém nhạy với sự thay đổi tốc độ của xe dẫn, dẫn đến dao động lớn hơn trong quá trình đi theo. Do chưa có dữ liệu thực nghiệm rõ ràng cho CC6, nghiên cứu áp dụng giá trị mặc định. CC7 được xác định là gia tốc trung bình trong quá trình đi theo dựa trên toàn bộ quan sát. Tương tự, CC8 và CC9 lần lượt biểu thị gia tốc tại trạng thái dừng và ở tốc độ 60 km/h do các vận tốc này không có trong bộ dữ liệu quỹ đạo, giá trị mặc định được dùng.

Mặc dù mô hình Wiedemann 99 cung cấp một bộ giá trị mặc định dùng chung cho tất cả các loại phương tiện, nghiên cứu nhận thấy hành vi theo xe của từng nhóm phương tiện (ô tô, xe buýt, xe tải nhẹ, xe tải nặng) có sự khác biệt đáng kể. Do đó, thay vì sử dụng một bộ tham số mặc định duy nhất, mỗi tham số được hiệu chỉnh riêng cho từng loại phương tiện dựa trên dữ liệu thực nghiệm. Các cột trong bảng tham số vì vậy không phải là “mặc định - hiệu chỉnh”, mà là “mặc định” và bốn bộ giá trị hiệu chỉnh tương ứng với bốn nhóm phương tiện. Điều này bảo đảm mô hình phản ánh

đúng hành vi thực tế thay vì áp dụng chung một giá trị cho toàn bộ loại phương tiện.

Nghiên cứu phân loại các tham số thành hai nhóm: (i) nhóm ước lượng trực tiếp từ dữ liệu thực nghiệm gồm CC1, CC2, CC3, CC4, CC5 và CC7 và (ii) nhóm giữ nguyên giá trị mặc định do không có dữ liệu quan sát phù hợp để ước lượng, gồm CC0, CC6, CC8 và CC9. Đồng thời, phân tích độ

nhạy ($\pm 10\%$) được thực hiện trên các tham số đã hiệu chỉnh nhằm đánh giá độ ổn định của mô hình, đảm bảo các thay đổi nhỏ không làm sai lệch đặc trưng hành vi theo xe.

Cuối cùng, do hạn chế về dữ liệu, nghiên cứu sử dụng cùng một bộ dữ liệu cho bước hiệu chỉnh. Tổng cộng, sáu tham số được hiệu chỉnh cho đoạn Quốc lộ 1A, kết quả được tổng hợp tại Bảng 4.

Bảng 4. Bộ tham số Wiedemann 99 sau hiệu chỉnh cho từng loại phương tiện

Bộ tham số	Giá trị mặc định	Xe ô tô	Xe buýt	Xe tải nặng	Xe tải nhẹ
CC0	1.5	1.1	1.8	1.8	1.1
CC1	0.9	0.14	0.51	0.27	0.29
CC2	4	5.46	8.26	11	9.83
CC3	-8	-3.79	-5.3	-5.29	-5.76
CC4	-0.35	-1.29	-1.35	-1.08	-1.29
CC5	0.35	1.44	1.56	2.08	1.71
CC6	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44
CC7	0.25	0.81	0.37	0.68	0.48
CC8	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
CC9	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

2.4. So sánh mô hình và thực tế

Đoạn đường nghiên cứu được mô hình hóa thành bốn làn có chiều dài 134.82 m và bề rộng 7.5 m. Lưu lượng phương tiện và thành phần dòng xe theo khoảng 10 phút được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình mô phỏng. Các lần chạy mô phỏng được thực hiện với năm giá trị ngẫu nhiên, đồng thời tích hợp các tham số đã được hiệu chỉnh của mô hình Wiedemann 99. Giá trị trung bình từ năm lần chạy được sử dụng cho phân tích. Kết quả mô phỏng về tốc độ, mật độ và lưu lượng theo khoảng 10 phút cho các loại phương tiện theo từng làn được so sánh với dữ liệu thực địa. Để đánh giá hiệu quả của quá trình hiệu chỉnh hành vi xe theo xe, mô hình tiếp tục được chạy lại với tham số mặc định của Wiedemann 99, và các kết quả đầu ra được so sánh với điều kiện thực tế. Kết quả cho thấy các mô hình sử dụng tham số Wiedemann đã hiệu chỉnh tái hiện điều kiện thực tế tốt hơn so với các mô hình sử dụng tham số mặc định.

Trên cơ sở đó, quá trình kiểm định được thực

hiện đối với các đại lượng tốc độ, mật độ và lưu lượng theo thời gian khoảng 10 phút cho các loại phương tiện, như thể hiện trong Hình 9 và Hình 10. Trong đó, tốc độ quan trắc thực tế được so sánh với kết quả từ mô hình Wiedemann đã hiệu chỉnh và mô hình Wiedemann mặc định theo khoảng 10 phút cho các nhóm phương tiện quy đổi sang Passenger Car Unit (PCU).

Sai số GEH được sử dụng để đánh giá mức độ phù hợp giữa lưu lượng mô phỏng và lưu lượng quan trắc cho từng loại phương tiện, và kết quả được trình bày trong Bảng 5 và Hình 11. Giá trị GEH được tính theo công thức:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(m-c)^2}{m+c}} \quad (6)$$

trong đó:

m là lưu lượng mô phỏng

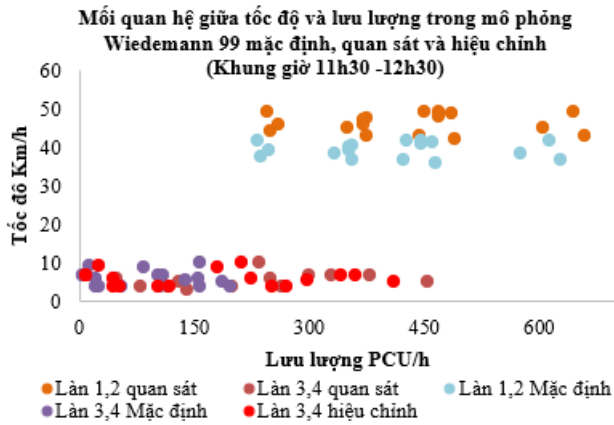
c là lưu lượng quan sát thực tế (veh/h).

Kết quả cho thấy giá trị GEH của mô hình Wiedemann đã hiệu chỉnh nhỏ hơn 3, thể hiện mức độ phù hợp tốt giữa mô hình và dữ liệu thực tế.

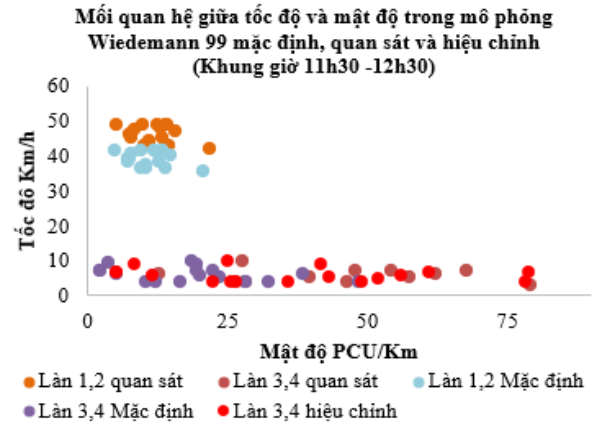
Ngược lại, mô hình sử dụng tham số Wiedemann mặc định xuất hiện một trường hợp có GEH > 5, phản ánh sự sai lệch lớn.

Theo tiêu chuẩn đánh giá, mô hình được

xem là đạt yêu cầu khi ít nhất 85% số điểm có GEH bé hơn 5. Dựa trên tiêu chí này, mô hình với tham số đã hiệu chỉnh thể hiện độ chính xác cao hơn rõ rệt so với mô hình mặc định.

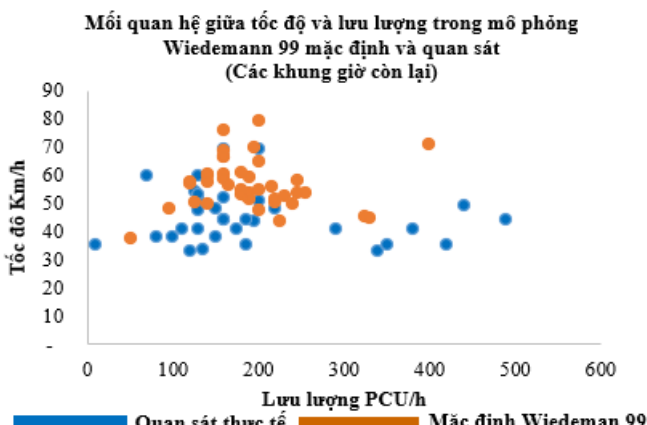


(a)

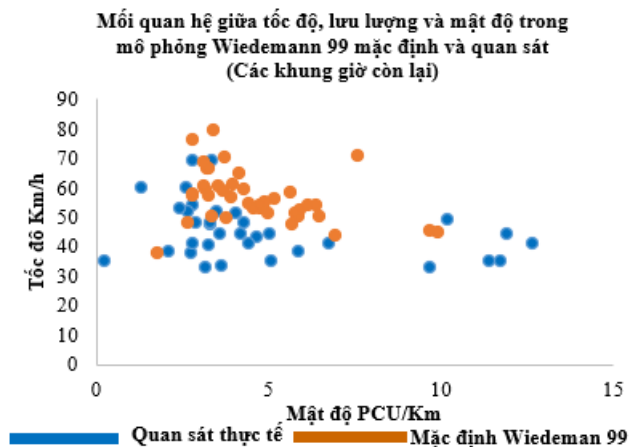


(b)

Hình 9. So sánh mô hình Wiedemann 99 đã hiệu chỉnh, mặc định và dữ liệu thực tế (Khung giờ 11h30 – 12h30): (a) Mối quan hệ giữa tốc độ và lưu lượng; (b) Mối quan hệ giữa tốc độ và mật độ

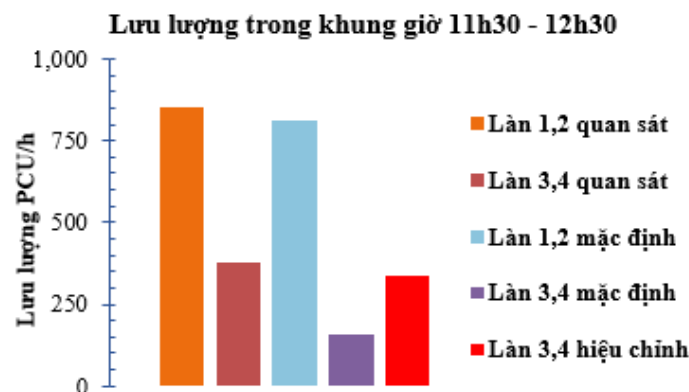


(a)



(b)

Hình 10. So sánh mô hình Wiedemann 99 đã hiệu chỉnh, mặc định và dữ liệu thực tế (Các khung giờ còn lại): (a) Mối quan hệ giữa tốc độ và lưu lượng; (b) Mối quan hệ giữa tốc độ và mật độ



Hình 11. Lưu lượng trong khung giờ 11h30 – 12h30 giữa quan sát, mặc định và hiệu chỉnh

Bảng 5. So sánh kết quả mô phỏng từ mô hình Wiedemann 99 mặc định và hiệu chỉnh với dữ liệu gốc

Trường hợp	Quan sát thực tế	Mặc định	GEH (Mặc định)	Hiệu chỉnh	GEH (Hiệu chỉnh)	Đánh giá
Làn 1,2 (Khung giờ 11h30 ÷ 12h30)	853	810	1.5	-	-	Tốt
Làn 3,4 (Khung giờ 11h30 ÷ 12h30)	377	158	13.4 (Chưa đạt)	339	2	Sau khi hiệu chỉnh (Đạt)
Các khung giờ còn lại	754	764	0.36	-	-	Tốt

2.5. Kết quả phân tích và mô phỏng hành vi lái xe

Dựa trên khung phương pháp đã xây dựng, hành vi xe theo xe của phương tiện trong điều kiện giao thông hỗn hợp đã được nhận diện và tái hiện bằng mô hình Wiedemann. Trong quá trình nghiên cứu, một số phát hiện quan trọng được rút ra như sau:

Có thể nhận định rằng dữ liệu quỹ đạo phương tiện là nguồn thông tin cực kỳ giá trị để nghiên cứu tương tác vi mô giữa các phương tiện trong môi trường giao thông hỗn hợp. Dữ liệu này cũng rất quan trọng trong việc mô phỏng hành vi lái xe bám sát điều kiện thực tế cũng như đánh giá đặc trưng giao thông ở cấp độ vi mô (như hành vi lái xe, phân tích an toàn,...). Tuy nhiên, hiện nay chỉ có rất ít bộ dữ liệu quỹ đạo được công bố rộng rãi, ngoài bộ dữ liệu VISSIM, trong nghiên cứu hành vi lái xe trên đường.

Kết quả cho thấy mô hình hành vi xe theo xe đã hiệu chỉnh thể hiện mức độ tương thích cao với dữ liệu thực tế trong khung giờ 11h30 - 12h30 ở làn 3 và 4 được phản ánh qua giá trị GEH thấp ($GEH = 2$). Ngược lại, mô hình Wiedemann 99 mặc định cho thấy sai lệch đáng kể với dữ liệu hiện trường với ($GEH = 13.4$), đánh giá không cao năng lực thông hành (chênh lệch 219 PCU). Điều này chứng minh mô hình đã hiệu chỉnh mô phỏng tốt hơn đáng kể các đặc trưng dòng giao thông trên đoạn tuyến Quốc lộ 1A.

Quan sát cho thấy rằng ngay cả trong điều

kiện giao thông hỗn hợp, vẫn xảy ra hành vi xe theo xe theo hướng tiếp cận trong khung giờ được lựa chọn nghiên cứu. Dựa trên các đồ thị quan hệ khoảng cách tương đối - vận tốc tương đối giữa các cặp dẫn - theo, các đồ thị “độ trễ” đã được xây dựng cho mọi phương tiện trong khung giờ 11h30 - 12h30 ở làn 3 và 4. Bên cạnh đó làn 1, 2 và các khung giờ còn lại vẫn liên tục xảy ra hành vi xe theo xe nhưng trong trạng thái lái xe tự do. Việc quan sát đúng các đồ thị này và hiện tượng “độ trễ” đóng vai trò then chốt trong việc xác định xe dẫn - xe theo thực sự.

3. Kết luận

Nghiên cứu này đã chỉ ra rằng dữ liệu quỹ đạo phương tiện thu thập trên đoạn Quốc lộ 1A trong khung giờ 11h30 - 12h30 cung cấp thông tin được đánh giá phù hợp cho mục đích để phân tích hành vi xe theo xe trong điều kiện giao thông hỗn hợp trên đoạn tuyến nghiên cứu. Qua việc xây dựng các biểu đồ thời gian - khoảng cách và đồ thị “độ trễ”, hành vi xe dẫn - xe theo của các phương tiện trên làn 3 và 4 đã được xác định rõ ràng, đồng thời mô hình Wiedemann 99 sau khi hiệu chỉnh tái hiện chính xác các đặc trưng dòng giao thông quan sát được, với giá trị GEH thấp ($GEH = 2$), phản ánh mức độ phù hợp cao giữa mô phỏng và dữ liệu thực tế. Ngược lại, việc sử dụng tham số mặc định của mô hình cho thấy sai lệch đáng kể ($GEH = 13.4$), chứng tỏ hiệu chỉnh mô hình là cần thiết để mô phỏng đúng hành vi xe theo xe trong môi trường giao thông hỗn hợp. Kết quả nghiên cứu

cũng cho thấy ngay cả khi dòng xe phức tạp và hỗn hợp, vẫn xuất hiện hành vi xe theo xe theo hướng tiếp cận, trong khi các làn khác và các khung giờ còn lại vẫn duy trì trạng thái lái xe tự do. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc quan sát hiện tượng “độ trễ” trong việc xác định các cặp xe dẫn - xe theo thực sự và cung cấp cơ sở vững chắc cho các phân tích vi mô về hành vi lái xe và hiệu quả thông hành trên tuyến đường nghiên cứu.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, các tác giả đã không sử dụng công cụ AI để tạo ra nội dung cho bài báo.

Tài liệu tham khảo

- [1]. V. Kanagaraj, G. Asaithambi, K.K. Srinivasan, R. Sivanandan. (2011). Vehicle classwise analysis of time gaps and headways under heterogeneous traffic. In *Proceedings of the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA. <https://trid.trb.org/View/1093491> (truy cập ngày 06/09/2026)
- [2]. N. Raju, S. Arkatkar, G. Joshi. (2021). Modeling following behavior of vehicles using trajectory data under mixed traffic conditions: an Indian viewpoint. *Transportation Letters*, 13(9), 649–663. <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1751440>
- [3]. R.E. Chandler, R. Herman, E.W. Montroll. (1958). Traffic dynamics: Studies in car following. *Operations Research*, 6(2), 165–184. <https://doi.org/10.1287/opre.6.2.165>
- [4]. D.C. Gazis, R. Herman, R.W. Rothery. (1961). Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations Research*, 9(4), 545–567. <https://doi.org/10.1287/opre.9.4.545>
- [5]. P.G. Gipps. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105–111. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0)
- [6]. S. Krauss. (1997). Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. *Ph.D. Dissertation*. University of Cologne, Cologne, Germany. <https://eclipse.dev/sumo/documents/KraussDis s.pdf> (truy cập ngày 06/09/2026)
- [7]. M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62(2), 1805–1824. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805>
- [8]. W. Leutzbach, R. Wiedemann. (1986). Development and applications of traffic simulation models at the Karlsruhe Institut für Verkehrswesen. *Traffic Engineering and Control*, 27(5), 270–278. <http://worldcat.org/issn/00410683> (truy cập ngày 06/09/2026)
- [9]. M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama. (1995). Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, 51(2), 1035–1042. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.1035>
- [10]. P. Chakroborty, S. Kikuchi. (1999). Evaluation of the General Motors based car-following models and a proposed fuzzy inference model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 7(4), 209–235. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(99\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(99)00020-0)
- [11]. V.L. Knoop. (2021). Traffic Flow Theory: An introduction with exercises. *TU Delft OPEN Publishing*, Delft, The Netherlands. <https://doi.org/10.5074/t.2021.002>
- [12]. G. Asaithambi, V. Kanagaraj, K.K. Srinivasan, R. Sivanandan. (2012). Characteristics of mixed traffic on urban arterials with significant motorized two-wheeler volumes: Role of composition, intra-class variability, and lack of lane discipline. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2317(1), 51–59. <https://doi.org/10.3141/2317-07>

- [13]. K. Das, J. Asundi. (2012). A simple explicit model approximating the relationship between speed and density of vehicular traffic on urban roads. *International Journal of Critical Infrastructures*, 8(2/3), 195-204. <https://doi.org/10.1504/IJCIS.2012.049039>