



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.6.7.52-66>

***Corresponding author:**

Email address:

duc.doan@ut.edu.vn

Received: 25/05/2026

Received in Revised Form:

19/08/2026

Accepted: 21/08/2026

A study merging behavior on highways Trung Luong – My Thuan and Ho Chi Minh – Trung Luong based on microscopic vehicle trajectory data using modeling method

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

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

Abstract: This study collected trajectory data using drones on the Trung Luong - My Thuan and Ho Chi Minh City - Trung Luong expressways, yielding 2,370 trajectories that include 190 merging vehicles. The core novelty of this research lies in its in-depth analysis of merging behavior under free flow traffic conditions, where the on-ramp acts as an inactive bottleneck without causing congestion on the mainline. The results elucidate the relationships among lane-changing positions, speeds, and gap acceptance. Specifically, vehicle speeds gradually increase along the acceleration lane, while gap selection depends on the actual traffic volume. A PTV VISSIM simulation model was established using lane - based calibrated Wiedemann 99 parameters. The evaluation metric, with a GEH statistic of less than 5, confirms that the model accurately replicates real world microscopic merging behavior under free-flow conditions.

Keywords: Lane changing, merging behavior, gap acceptance, cooperative behavior, relaxation



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

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.7.52-66>

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

Ngày nộp bài: 25/05/2026
Ngày nộp bài sửa: 19/08/2026
Ngày chấp nhận: 21/08/2026

Nghiên cứu hành vi nhập làn trên cao tốc Trung Lương – Mỹ Thuận và Hồ Chí Minh – Trung Lương dựa trên quỹ đạo vi mô của phương tiện theo hướng mô hình hóa

Phạm Phùng Huy, Phan Thị Hoài Thương, Đoàn Hồng Đức*

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, số 2 đường Võ Oanh, phường Thạnh Mỹ Tây, thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Tóm tắt: Nghiên cứu thu thập dữ liệu quỹ đạo bằng drone trên hai tuyến cao tốc Trung Lương - Mỹ Thuận và Hồ Chí Minh - Trung Lương với 2370 quỹ đạo, gồm 190 xe nhập làn. Điểm mới cốt lõi của nghiên cứu là phân tích sâu hành vi nhập dòng trong điều kiện giao thông tự do, khi nhánh nhập là nút cổ chai nhưng không hoạt động và không gây ùn tắc dòng chính. Kết quả làm rõ mối liên hệ giữa vị trí chuyển làn, tốc độ và khoảng trống chấp nhận. Vận tốc tăng dần dọc làn tăng tốc, còn việc chọn khoảng trống phụ thuộc vào lưu lượng thực tế. Mô hình PTV VISSIM được thiết lập với tham số Wiedemann 99 hiệu chỉnh theo từng làn. Chỉ số đánh giá GEH nhỏ hơn 5 khẳng định mô hình đạt độ phù hợp cao với dữ liệu quan sát trong hành vi nhập dòng vi mô thực tế trong điều kiện giao thông tự do.

Từ khóa: Hành vi chuyển làn, hành vi nhập làn, khoảng trống chấp nhận, tương tác giữa phương tiện, hiện tượng giãn hồi

1. Giới thiệu

Năng lực của những mô hình mô phỏng giao thông vi mô trong việc phản ánh thực tiễn thời gian qua đã vẫn còn những hạn chế cần được làm rõ. Cho tới nay, tâm điểm nghiên cứu đa phần được tập trung vào thao tác lái xe theo trục dọc, đặc biệt là hành động bám sát xe trước. Thao tác lái xe theo hướng ngang, lấy ví dụ đổi làn, gần như chưa được chú trọng đầy đủ. Mới chỉ giai đoạn gần đây, ngày một có nhiều minh chứng chỉ ra ảnh hưởng của việc đổi làn lên tình hình giao thông cần được xem xét và hành động đổi làn có thể châm ngòi tình trạng sụt giảm khả năng lưu thông giữa hoàn cảnh dòng tự do cùng dòng kẹt xe.

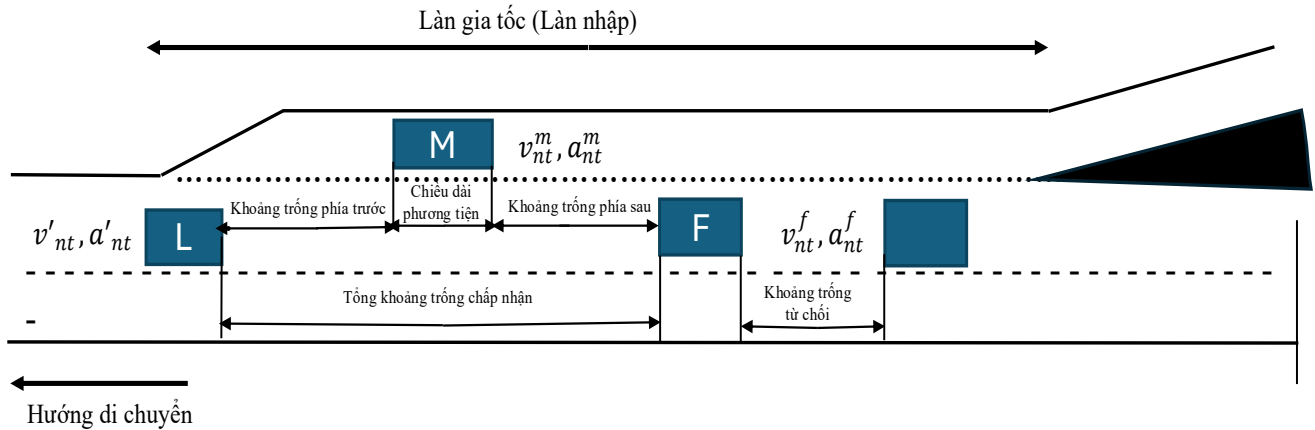
Thay đổi làn đường mang ý nghĩa là sự di chuyển của phương tiện trên đoạn đường đã làn

từ một làn qua làn tiếp giáp. Hành vi này được phân thành hai loại chính: đổi làn tự do và đổi làn bắt buộc. Trong đó, đổi làn tự do được thực hiện nhằm cải thiện điều kiện lưu thông của người điều khiển (ví dụ: vượt xe chậm), hoặc hỗ trợ dòng giao thông chung (ví dụ: nhường đường cho phương tiện từ nhánh nhập làn hoặc xe đang vượt). Ngược lại, đổi làn ép buộc là các thao tác chuyển làn mà người lái xe buộc phải tiến hành để duy trì lộ trình dự kiến (ví dụ: di chuyển về phía lối ra, chuyển làn do tiết diện mặt đường bị thu hẹp, hoặc nhập làn từ làn tăng tốc vào dòng chính). Hình 1 minh họa một ví dụ điển hình cho đổi làn bắt buộc; trong đó, vị trí bắt đầu của làn tăng tốc được xác định tại vạch sơn kẻ khối; đoạn chuyển tiếp xuất hiện khi làn tăng tốc hẹp dần và kết thúc tại điểm hội tụ của

vạch kẻ đường.

Hành động chuyển từ làn dẫn sang làn chính là đối tượng khảo sát trọng tâm của nghiên cứu này. Mục tiêu của nghiên cứu nhằm phân tích động thái nhập dòng tại điểm nối vào cao tốc thông qua

việc khai thác số liệu thực tiễn, từ đó đánh giá khả năng của các mô hình chấp nhận khoảng trống trong việc tái hiện chính xác hành vi này, đồng thời kiểm chứng một khung khái niệm được xây dựng trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu trước đây.



Hình 1. Mô tả các biến trong quá trình nhập xe

Mặc dù giữ vai trò quan trọng trên cao tốc, hành vi chuyển làn bắt buộc từ nhánh nhập vào tuyến chính vẫn còn nhiều hạn chế trong công tác mô hình hóa. Phần lớn các nghiên cứu trước đây thường tiếp cận hành vi chuyển làn dưới góc độ lý thuyết hoặc sử dụng dữ liệu vĩ mô, trong khi còn thiếu các đánh giá chuyên sâu ở cấp độ quỹ đạo vi mô của từng phương tiện. Đặc biệt, năng lực của các mô hình chấp nhận khoảng trống hiện nay trong việc tái hiện chính xác động thái nhập dòng dưới điều kiện giao thông thực tế, nơi có sự tương tác phức tạp giữa phương tiện trên nhánh nhập và phương tiện trên tuyến chính, vẫn là khoảng trống lớn chưa được kiểm chứng đầy đủ bằng dữ liệu thực nghiệm.

Bài báo thực hiện tổng quan về các nghiên cứu liên quan đến hành vi nhập làn, bao gồm tổng quan về các cách tiếp cận khác nhau trong mô hình hóa hành vi nhập làn. Các khía cạnh khác nhau của hành vi nhập làn được xác định và sẽ được phân tích bằng dữ liệu vi mô thực nghiệm trước khi tiến hành mô hình hóa.

Phần thứ nhất sẽ mô tả phương pháp thu thập dữ liệu và tập quỹ đạo phương tiện thu được.

Dựa trên kết quả tổng quan tài liệu, các khía cạnh then chốt trong mô hình hóa hành vi nhập làn được kiểm định trên bộ dữ liệu quỹ đạo và trình

bày trong phần thứ hai.

Phần ba mô phỏng hành vi nhập làn của các phương tiện.

Phần bốn đánh giá kết quả mô hình thu được và đưa ra kết luận và các khuyến nghị cho những nghiên cứu trong tương lai về mô hình hóa hành vi nhập làn.

2. Phương pháp

2.1. Các thành phần của mô hình chuyển làn

Thông thường, các mô hình chuyển làn được cấu thành từ ba bộ phận: mô hình quyết định, mô hình điều kiện và mô hình thao tác. Các quyết định chuyển làn phụ thuộc vào kế hoạch lộ trình, loại làn hiện tại và điều kiện giao thông trên làn đang di chuyển cũng như các làn kế bên. Mô hình điều kiện mô tả các điều kiện chấp nhận được đối với những loại chuyển làn khác nhau, trong khi mô hình thao tác mô tả tốc độ của phương tiện và thời gian thực hiện quá trình chuyển làn. Kesting và cộng sự cũng xác định ba bước trong mô hình hóa hành vi chuyển làn. Cấp chiến lược, trong đó người lái nắm được lộ trình của mình trong mạng lưới giao thông. Cấp chiến thuật, trong đó ý định chuyển làn được chuẩn bị và khởi phát thông qua các hành động điều chỉnh tốc độ, như tăng tốc hoặc giảm tốc của người lái. Đồng thời, người lái đánh giá khả năng thực hiện chuyển làn tại thời điểm hiện tại dựa trên

các tiêu chí về an toàn và tính phù hợp của thao tác. Trong mô hình quyết định của Wei và cộng sự [1] và cấp chiến lược của Kesting và cộng sự [2] với lý do chuyển làn đều được xác định rõ. Phần lớn các nhà nghiên cứu phân loại các lý do này thành hai nhóm chuyển làn bắt buộc và chuyển làn tùy ý. Wei và cộng sự đã bổ sung thêm một nhóm nữa, gọi là chuyển làn chủ động trước [1]. Đây là kiểu chuyển làn nhằm định vị phương tiện cho một thao tác sắp diễn ra ở phía trước xa hơn (nhưng không phải tại nút giao kế tiếp; những chuyển làn tại nút giao kế tiếp vẫn được xếp vào loại chuyển làn bắt buộc). Ở đây, nhóm tác giả tập trung vào phương tiện nhập làn và các phương tiện xung quanh. Tác giả không xem xét sự điều chỉnh lựa chọn làn của các xe trên làn chính, nghĩa là hành vi chuyển làn mang tính lịch sự. Hành vi nhập làn không thể được quan sát một cách chính xác thông qua các thiết bị đo được bố trí tại các vị trí cố định, chẳng hạn như cảm biến vòng từ. Do đó, các nghiên cứu thực nghiệm về hành vi nhập làn thường sử dụng các thiết bị đo quỹ đạo phương tiện để thu thập dữ liệu. Trong bối cảnh này, quỹ đạo được hiểu là tập hợp các vị trí (x, y) của phương tiện theo thời gian. Hiện nay, có hai phương pháp đo quỹ đạo phương tiện: (1) thu thập quỹ đạo của xe nhập làn bằng một phương tiện được gắn thiết bị định vị như GPS, hoặc (2) ghi nhận quỹ đạo từ bên ngoài xe bằng cách phân tích các đoạn video được ghi hình từ hệ thống camera quan sát.

2.2. Khung lý thuyết cho hành vi chuyển làn

Nhiều khung lý thuyết đã được phát triển để mô hình hóa quá trình chuyển làn. Phần lớn các khung này tối thiểu đều bao gồm mô hình quyết định (hoặc cấp chiến lược) và mô hình điều kiện (hoặc cấp chiến thuật). Một trong những khung lý thuyết đầu tiên được phát triển bởi [3], trong đó, tác giả xây dựng cấu trúc phân tích dẫn đến quyết định liệu người lái có thực hiện hành vi chuyển làn hay không. Những yếu tố quan trọng nhất và hệ quả của chúng bao gồm: khả năng chuyển làn xét trên phương diện vật lý và mức độ an toàn của thao tác, vị trí của các chương ngại vật cố định, sự

tồn tại của làn ưu tiên dành cho giao thông công cộng, hướng rẽ dự định của người lái, sự hiện diện của xe tải hạng nặng và điều kiện tốc độ giao thông. Mặc dù khung lý thuyết này tập trung vào mạng lưới đường đô thị nhiều làn, các nguyên lý chung của nó vẫn được áp dụng trong các khung mô hình nhập làn, điển hình như nghiên cứu của [4].

Trong nghiên cứu này, Choudhury trình bày một mô hình quyết định hoàn chỉnh cho người lái với kế hoạch tiềm ẩn, được hiểu là những kế hoạch hoặc chiến thuật điều khiển không thể quan sát trực tiếp, phản ánh mục tiêu và lựa chọn hành vi của người lái [5]. Chỉ các hành động phát sinh từ những kế hoạch tiềm ẩn này mới có thể được ghi nhận thông qua quan sát thực nghiệm. Choudhury phát triển các mô hình riêng biệt cho hành vi lựa chọn làn trên đường cao tốc, hành vi nhập làn tại các đoạn nối cao tốc, cũng như hành vi lựa chọn làn trên các tuyến đường đô thị, nơi việc chuyển làn của các phương tiện nhập dòng mang tính bắt buộc.

2.3. Tầm quan trọng của hành vi nhập làn

Hành vi nhập làn được xem là một trong những cơ chế chính dẫn đến hình thành nút thắt cổ chai trên đường cao tốc và đã được khẳng định trong nhiều nghiên cứu. Một số tác giả tập trung phân tích cách năng lực thông hành được phân chia giữa dòng chính và dòng nhánh tại khu vực nhập [6]. Các nghiên cứu khác chỉ ra hiện tượng nút thắt cổ chai, khi điểm nhập làn trở thành nút nghẽn hoạt động và tổng năng lực giảm so với điều kiện dòng tự do. Một hướng nghiên cứu riêng biệt cho thấy các thao tác chuyển làn tại vùng nhập có thể gây ra dao động tốc độ và góp phần hình thành sóng dừng và chạy [7]. Do các hàng chờ thường xuyên xuất hiện tại khu vực nhập, nhiều biện pháp quản lý như điều khiển tín hiệu nhập dòng tại nút giao đường dẫn vào cao tốc đã được áp dụng. Kết quả thực nghiệm, điển hình như Bhourri và cộng sự [8] cho thấy điều tiết dòng nhập giúp giảm đáng kể thời gian mất mát và cải thiện độ ổn định của dòng xe.

Kế hoạch tiềm ẩn của một phương tiện nhập

làn bao gồm ba giai đoạn được liên kết bằng một cây quyết định: (a) trạng thái bình thường, (b) trạng thái nhập làn mang tính nhường nhịn và (c) trạng thái nhập làn cưỡng bức. Một phương tiện bắt đầu ở trạng thái bình thường và có thể chuyển sang các trạng thái khác khi thỏa mãn những điều kiện nhất định. Mỗi trạng thái có các đặc trưng chấp nhận khoảng trống riêng. Trong trạng thái bình thường, các khoảng trống hiện có được xem xét và đánh giá xem có chấp nhận được hay không; một khoảng trống được coi là chấp nhận được nếu nó lớn hơn khoảng trống tới hạn. Các khoảng trống tới hạn được giả định tuân theo phân bố logarit chuẩn, trong đó giá trị trung bình của khoảng trống là hàm của các biến giải thích.

Mặc dù khung mô hình này được đánh giá là tương đối toàn diện, một số hạn chế vẫn đã được chỉ ra. Thứ nhất, hiện tượng chuyển làn mang tính hợp tác chưa được đưa vào mô hình hóa, điều này có thể dẫn đến việc đánh giá thấp số lượng khoảng trống có khả năng được chấp nhận. Thứ hai, mô hình chưa phản ánh hành vi tăng tốc của phương tiện nhập làn nhằm tiếp cận khoảng trống đã lựa chọn, từ đó có thể làm giảm độ chính xác trong dự báo tốc độ và vị trí nhập làn. Thứ ba, tác động của hành vi chuyển làn đến trạng thái dòng giao thông chưa được xem xét trong mô hình. Đặc biệt, trong các tình huống nhập làn mang tính nhường nhịn hoặc cưỡng bức, những tác động này nhiều khả năng sẽ khác biệt đáng kể so với các hành vi chuyển động dọc tiêu chuẩn.

2.4. Khoảng trống chấp nhận

Hầu hết các lý thuyết hiện có về hành vi nhập làn đều mô hình hóa hành vi này dựa trên chấp nhận khoảng trống. Theo cách tiếp cận này, mỗi người lái xe có một khoảng trống tới hạn nhất định. Bất kỳ khoảng trống nào lớn hơn khoảng trống tới hạn đó sẽ được người lái chấp nhận. Hiện nay, các mô hình mô phỏng vi mô như Vissim và FOSIM [9]-[11] giả định rằng khoảng trống tới hạn sẽ giảm dần dọc theo làn nhập. Bằng cách này, sự gia tăng mức độ “thúc bách” phải thực hiện nhập làn được mô hình hóa. Những lý thuyết mới hơn về hành vi nhập làn đã phát triển sâu hơn cách tiếp cận chấp nhận

khoảng trống, bằng cách bổ sung hành vi hợp tác của các phương tiện trên làn chính hoặc xem xét các kịch bản khác nhau, trong đó mỗi kịch bản có một giá trị khoảng trống tới hạn khác nhau.

2.5. Hành vi nhường đường mang tính hợp tác

Wang và cộng sự kết hợp mô hình gia tốc và mô hình chấp nhận khoảng trống với một mô hình mô tả mức độ hợp tác của dòng giao thông trên làn chính. Hai hành vi hợp tác được xác định gồm: chuyển làn mang tính hợp tác, trong đó phương tiện trên làn chính chuyển sang làn kế bên tạo điều kiện cho xe nhập làn; và hành vi nhường đường lịch sự, trong đó phương tiện trên làn chính giảm tốc để mở rộng khoảng trống với xe phía trước. Mặc dù khung mô hình này được đánh giá là tương đối toàn diện, [12] cho rằng vẫn còn một số điểm cần được xem xét và đánh giá một cách phê phán.

Thứ nhất, việc sử dụng phân bố nhị thức và không xác định làn mục tiêu cho phương tiện chuyển làn mang tính hợp tác để mô hình hóa hành vi này là điều đáng nghi ngờ, bởi cách tiếp cận đó bỏ qua thực tế rằng việc thực hiện chuyển làn hợp tác phải khả thi về mặt điều kiện giao thông. Hành vi nhường đường lịch sự cũng được mô hình hóa bằng phân bố nhị thức, nhưng cách này có thể chấp nhận được hơn: về nguyên tắc, người lái luôn có thể dần dần thay đổi gia tốc; họ chỉ cần quyết định có thực hiện hay không. Thứ hai, mô hình này có thể dẫn đến thất bại trong quá trình nhập làn, với tỷ lệ được báo cáo nằm trong khoảng từ 5% đến 20%. Dựa trên kinh nghiệm thực tế, các tỷ lệ này được cho là tương đối cao. Thứ ba, các quy tắc bám xe thông thường được áp dụng khi quá trình chuyển làn hoàn tất, trong khi tính phù hợp của cách tiếp cận này đã bị đặt dấu hỏi trong một số nghiên cứu trước đây.

2.6. Hiệu ứng ngắn hạn sau thay đổi trạng thái

Laval và Daganzo đề xuất một mô hình trong đó tác động của việc chuyển làn đối với dòng giao thông được định lượng [13]. Đây là một mô hình lai, bao gồm một mô – đun sóng động học đa làn và một mô–đun tạo ra các hạt chuyển làn rời rạc (tức là các phương tiện thực hiện chuyển làn). Các hạt rời rạc này được xem như những chướng ngại

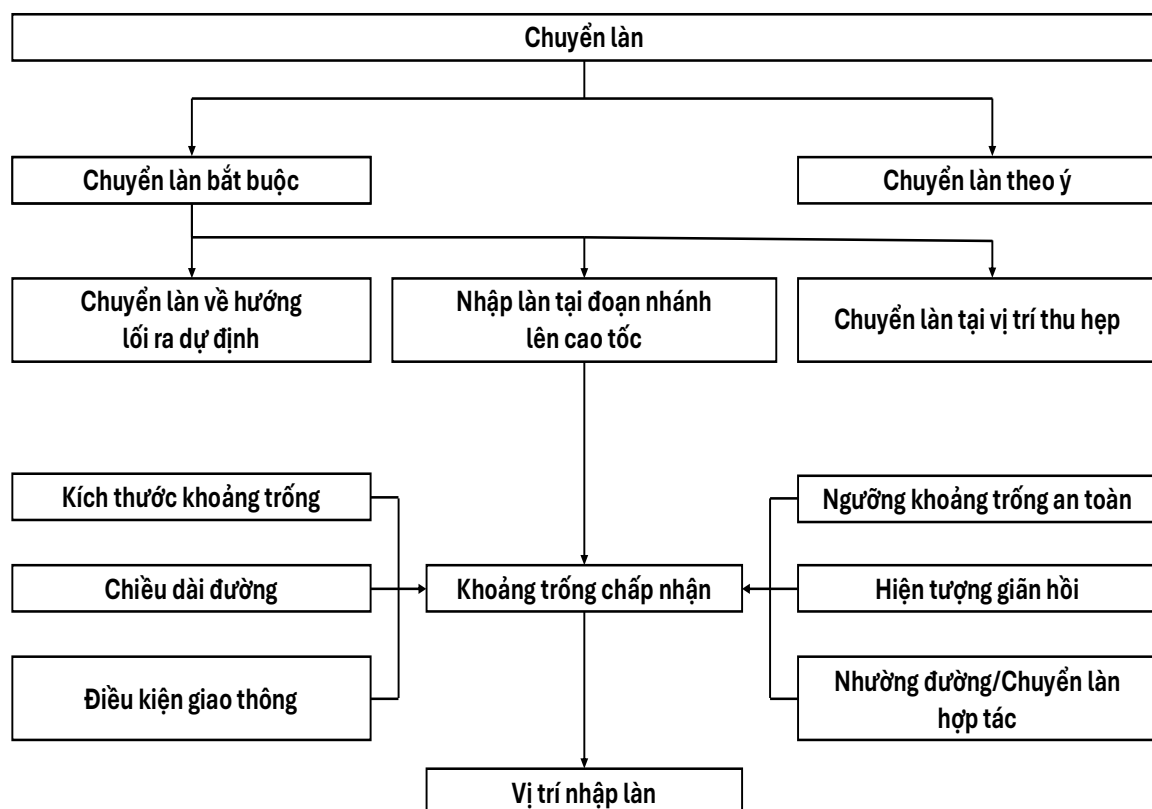
vật tạm thời, di chuyển với gia tốc bị giới hạn. Các bằng chứng kiểm định thực nghiệm cho thấy hành vi chuyển làn có thể kích hoạt dòng xả tại các nút thắt cổ chai trên đường cao tốc trong giai đoạn bắt đầu xuất hiện ùn tắc. Đồng thời, các tác giả cũng chỉ ra sự tồn tại của mối quan hệ giữa tốc độ di chuyển của nút thắt cổ chai động và năng lực thông hành tương ứng của khu vực này.

Trong các nghiên cứu tiếp theo về chủ đề này, Laval và Leclercq cho rằng tham số quan trọng nhất mô tả tác động của chuyển làn lên dòng giao thông là hiện tượng giãn hồi [14]. Giãn hồi được hiểu là việc người lái chấp nhận khoảng cách ngắn hơn ngay tại thời điểm chuyển làn được thực hiện, và sau đó dần quay trở lại giá trị bình thường sau một khoảng thời gian ngắn (khoảng 20 đến 30 giây). Hiện tượng giãn hồi lần đầu tiên được phát hiện thông qua thực nghiệm bởi Smith, người đã chỉ ra rằng các lái xe bị ảnh hưởng bởi một hành vi chuyển làn sẵn sàng chấp nhận khoảng cách theo sau ngắn hơn trong giai đoạn đầu sau khi chuyển làn [15]. Tuy nhiên, sau những bằng chứng thực nghiệm ban đầu này, hiện tượng giãn hồi hầu như

chưa nhận được nhiều sự quan tâm trong các nghiên cứu khoa học.

Sultan và cộng sự mô tả một thí nghiệm trong đó một phương tiện được trang bị thiết bị đo đặc thực hiện hành vi chen vào một làn mới, và hành vi của phương tiện theo sau mới được quan sát [16]. Kết quả cho thấy các phương tiện theo sau cần từ 15 đến 25 giây để đạt tới khoảng cách theo sau tối đa.

Cohen đã đưa hiện tượng giãn hồi vào mô hình mô phỏng vi mô hiện có FRESIM [17]. Dựa trên một tập quỹ đạo nhỏ, ông kết luận rằng hiện tượng giãn hồi thực sự tồn tại, và thời gian của giai đoạn giãn hồi ít nhất là 15 đến 20 giây. Tuy nhiên, mô hình này vẫn cần được hiệu chỉnh bằng một bộ dữ liệu lớn hơn. Từ các nghiên cứu trên, vẫn chưa thể khẳng định chính xác tác động định lượng của hiện tượng giãn hồi đối với điều kiện giao thông. Tuy vậy, có cơ sở để tin rằng một tác động nhất định là có tồn tại. Một tác động có thể xảy ra là phản ứng quá mức của cả xe chuyển làn và xe theo sau mới, nếu hiện tượng giãn hồi không được xem xét trong mô hình.



Hình 2. Mô hình khái niệm về hành vi nhập làn đối với các chuyển làn bắt buộc

Laval và Leclercq [14] lập luận rằng trong mô hình của Cohen [17] cũng như trong các mô hình chuyển làn vi mô khác, bước thời gian mô phỏng là một phần của phương trình và do đó ảnh hưởng đến số lượng chuyển làn. Vì vậy, được đề xuất tiếp cận mô hình hóa gồm bốn phần [14]:

- Mô hình vĩ mô để ước tính số lượng chuyển làn;
- Mô hình nút thắt cổ chai di động vi mô, đại diện cho hành vi bám xe trong và ngay sau khi chuyển làn;
- Mô hình giãn hồi, giúp dần dần chuyển mô hình nút thắt cổ chai di động sang mô hình bám xe tiêu chuẩn;
- Mô hình bám xe dựa trên biểu đồ cơ bản tam giác.

Từ tổng quan tài liệu này có thể kết luận rằng đã có một lượng nghiên cứu đáng kể được thực hiện về chủ đề chuyển làn, đặc biệt là hành vi nhập làn. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn còn phân mảnh, chủ yếu tập trung vào một hoặc hai khía cạnh của quá trình chuyển làn. Hiện chưa có mô

hình nào kết hợp được đồng thời một cấu trúc ra quyết định tốt và các tác động của hành vi chuyển làn lên trạng thái dòng giao thông. Số lượng biến trong các lý thuyết đã được đề cập có khác nhau, nhưng tất cả đều sử dụng khái niệm chấp nhận khe hở để mô tả hành vi nhập làn. Trường hợp ngoại lệ duy nhất là lý thuyết do [14], nhưng lý thuyết này chưa hoàn toàn mang tính vi mô. Mặc dù hành vi nhường đường và chuyển làn hợp tác dường như có ảnh hưởng lớn đến hành vi chuyển làn, chỉ có Wang và cộng sự đưa những yếu tố này vào mô hình [12]. Cuối cùng, Smith đã giới thiệu nguyên lý “giãn hồi” [15], và tầm quan trọng của nguyên lý này gần đây đã được nhấn mạnh lại.

Bảng 1 và Hình 2 minh họa một mô hình khái niệm, bao gồm các yếu tố ảnh hưởng đến hành vi nhập làn, được xây dựng dựa trên các nghiên cứu trước đây. Các phân tích dữ liệu thực nghiệm đã tập trung vào các khía cạnh được chỉ ra trong mô hình khái niệm này, cụ thể là vị trí nhập làn và mối quan hệ của nó với điều kiện lái xe hiện hữu, khả năng chấp nhận khe hở, và hiện tượng “giãn hồi”.

Bảng 1. Mô hình và lý thuyết chuyển làn

Mô hình/Lý thuyết chuyển làn	Chấp nhận khe hở	Khe hở tới hạn cố định	Khe hở tới hạn dựa trên tốc độ tương đối	Khe hở thay đổi theo cấu hình đường	Chuyển làn hợp tác	Nhường đường	Hiện tượng giãn hồi	Chuyển làn bắt buộc	Chuyển làn tùy chọn	Mô phỏng vi mô hoàn chỉnh
Wei và cộng sự [1]	x	x						x	x	
Kesting và cộng sự [2]	x		x	x				x	x	x
VisSim [9]	x		x			x		x		x
FOSIM [10-11]	x		x	x				x	x	x
Choudhury [5]	x							x	x	x
Laval và Leclercq [14]				x			x	x	x	
Wang và cộng sự [12]	x			x	x	x		x		x

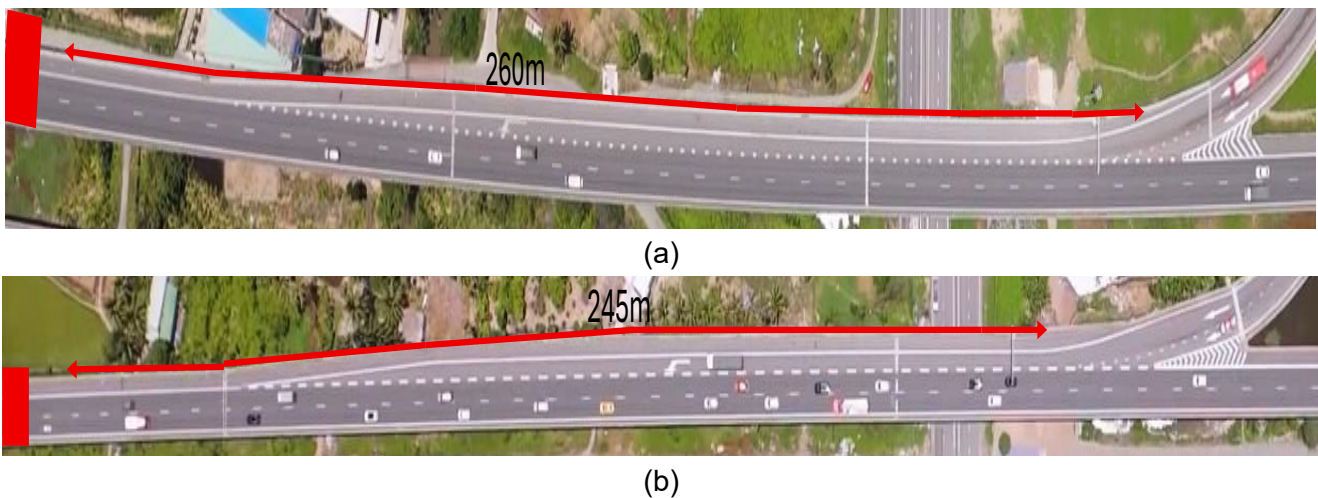
2.7. Nghiên cứu đoạn tuyến

Để nghiên cứu chi tiết hơn hành vi nhập làn và kiểm định mô hình khái niệm mô tả hành vi này, dữ liệu thực nghiệm ở cấp vi mô đã được thu thập, mô tả vị trí của từng phương tiện tại mỗi bước thời gian (tức là quỹ đạo của từng phương tiện riêng lẻ). Dữ liệu được thu thập bằng kỹ thuật quay bằng máy bay không người lái tương tự như phương pháp từ trực thăng do Hoogendoorn và cộng sự phát triển [7]. Kỹ thuật này sử dụng camera độ phân giải cao gắn tích hợp với drone để ghi video liên tục với tần suất 15 khung hình mỗi giây. Camera được điều khiển từ xa trong suốt quá trình bay. Chiều dài đoạn đường có thể được ghi lại phụ thuộc vào độ cao bay của drone, trong thực tế vào khoảng 260m. Các điều kiện hình học và giao thông bao gồm:

- Đoạn đường cao tốc có nhánh nhập;
- Lưu lượng tương đối ổn định trên nhánh nhập;
- Nhập làn trong điều kiện dòng tự do;
- Không có hiện tượng tắc nghẽn hoàn toàn

ở các nút thắt cổ chai phía hạ lưu.

Điều này có nghĩa là nhánh nhập được quan sát là một nút thắt cổ chai không có khả năng kích hoạt tình trạng ùn tắc trên làn chính. Dữ liệu đã được thu thập tại hai vị trí cao tốc khác nhau: trên tuyến cao tốc Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An) bao phủ 60 phút, và trên tuyến cao tốc Thành phố Hồ Chí Minh - Trung Lương, bao phủ 60 phút. Dữ liệu hình ảnh của bộ dữ liệu trên đã được xử lý thành 2370 quỹ đạo, bao gồm 190 phương tiện nhập làn. Quá trình trích xuất quỹ đạo và xác định lưu lượng được thực hiện thông qua phương pháp (quan sát trực quan) cụ thể, vị trí của từng phương tiện được xác định dựa trên lưới tọa độ tham chiếu được thiết lập cố định trên mặt đường. Với tần suất 15 khung hình mỗi giây, hành vi của từng phương tiện được ghi nhận chi tiết tại mỗi bước thời gian. Để đảm bảo độ tin cậy và hạn chế sai số do yếu tố con người, quá trình đếm và trích xuất dữ liệu được thực hiện lặp lại và kiểm chứng chéo bởi hai nghiên cứu viên, đảm bảo sự đồng nhất trong kết quả thu thập.



Hình 3. Địa điểm thu thập dữ liệu: (a): Tuyến Hồ Chí Minh - Trung Lương; (b): Tuyến Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An)

Tại thời điểm bắt đầu thu thập dữ liệu, làn chính có lưu lượng chưa cao nên chưa xảy ra ùn tắc. Lưu lượng giao thông trên nhánh nhập tương đối thấp so với dòng giao thông chính. Sau 10 phút, lưu lượng trên nhánh nhập xuất hiện và một số xe nhỏ, vừa và lớn cố gắng nhập vào làn chính. Đồng thời, lưu lượng trên làn chính cũng tăng nhẹ. Sau 30 phút, một sóng xung kích rất nhỏ hình thành ở

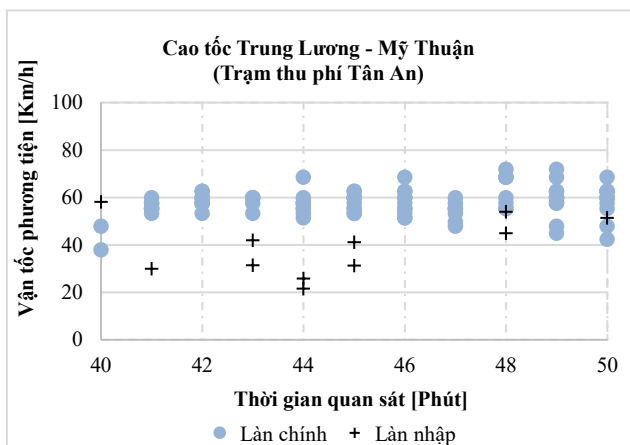
vị trí cách điểm kết thúc làn tăng tốc khoảng 170 m về phía hạ lưu, có thể do hiện tượng giãn hồi gây ra. Sóng xung kích này phát triển với chiều dài khoảng 2 đến 5 m và duy trì trạng thái ổn định, di chuyển ngược dòng với một vận tốc đặc trưng tại thời điểm sóng xung kích lan tới điểm kết thúc của làn tăng tốc, vì sóng xung kích quá nhỏ và không gây ảnh hưởng gì đến làn nhập cũng như làn chính

nên ta sẽ không xét đến. Sau 2 phút, khu vực phía hạ lưu của làn tăng tốc quay trở lại trạng thái dòng tự do. Hiện tượng dồn động này hoàn toàn không ảnh hưởng đến dòng giao thông tại vị trí thu thập dữ liệu trong suốt thời gian ghi nhận.

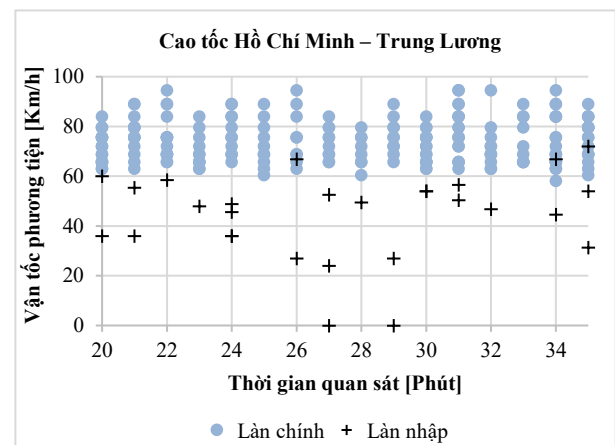
Bộ dữ liệu hai tuyến cao tốc bao gồm 60 phút dữ liệu. Điều kiện giao thông trong 40 phút đầu là dòng tự do, và trong 2 phút tiếp theo, điều kiện giao thông dần dần chuyển sang trạng thái hơi giãn hồi nhẹ rồi ngay lập tức quay lại trạng thái dòng tự do. Hình 3 thể hiện đoạn tuyến nghiên cứu.

Việc lựa chọn tập trung thu thập dữ liệu trong các khoảng thời gian mà lưu lượng nhập dòng đủ

lớn để cho phép nghiên cứu chính xác hành vi nhập dòng. Do đó, dữ liệu được phân tích và trình bày dưới đây liên tục theo thời gian, nhưng điều kiện giao thông lại khá đồng nhất trong suốt các giai đoạn quan sát. Tổng quan dữ liệu quỹ đạo đã thu thập được thể hiện trong Hình 4. Trong khi giao thông trên cả hai tuyến chính tại tuyến cao tốc Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An) và tuyến cao tốc thành phố Hồ Chí Minh - Trung Lương được quan sát đều ở trạng thái dòng giao thông tự do. Để có thể so sánh hai địa điểm, phần còn lại ta chỉ xem xét hành vi nhập dòng trong điều kiện tự do.



(a)



(b)

Hình 4. Điều kiện giao thông tại: (a) Trung Lương - Mỹ Thuận; (b) Hồ Chí Minh - Trung Lương

2.8. Phân tích dữ liệu thực nghiệm

Như đã chỉ ra trong mô hình khái niệm, ba khía cạnh của hành vi nhập làn được phân tích:

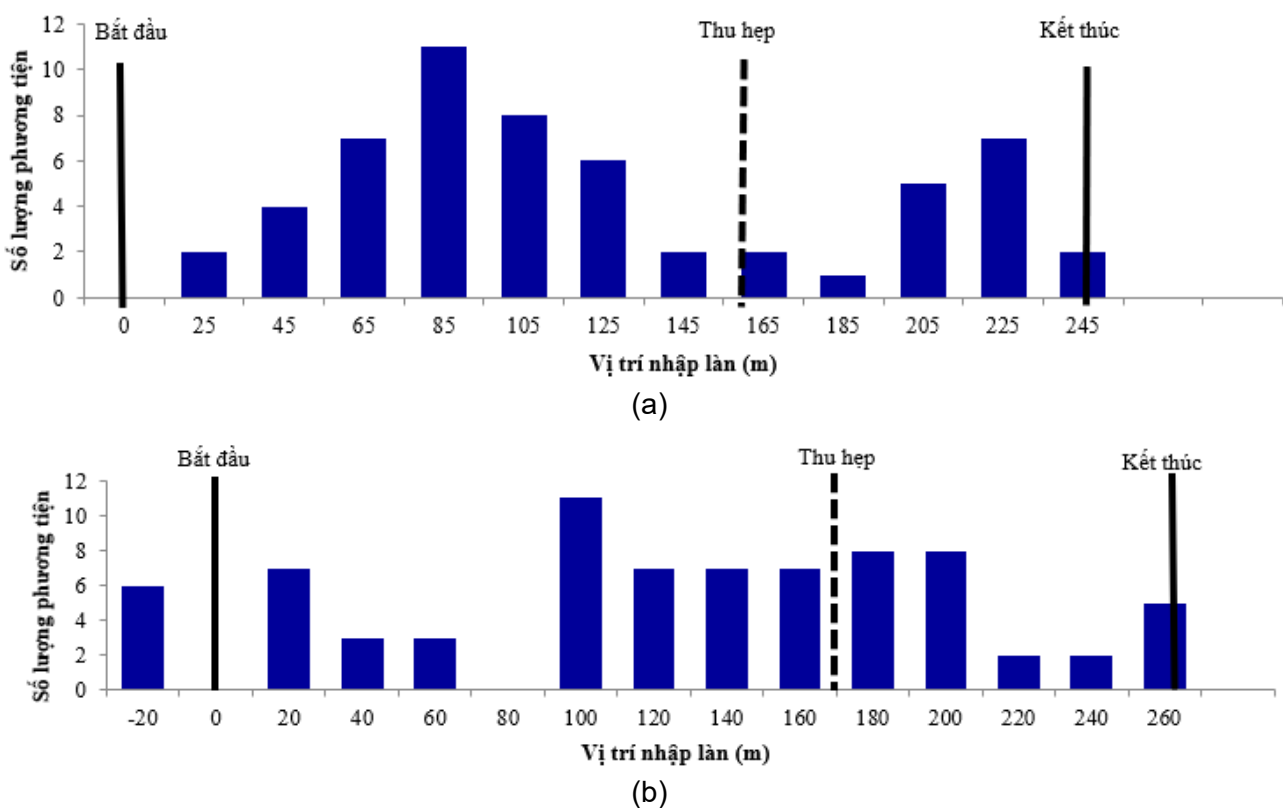
- Vị trí nhập làn;
- Các khoảng trống được chấp nhận và được nhường đường;
- Hiện tượng “giãn hồi”.

Trước tiên, các định nghĩa để mô tả quá trình nhập làn được giới thiệu. Thời điểm nhập làn được định nghĩa là thời điểm mà đường tâm của xe nhập làn cắt qua các vạch phân chia. Vị trí theo trục x của xe nhập làn tại thời điểm này được định nghĩa là vị trí nhập làn. Một khoảng trống được định nghĩa là khoảng cách đầu tới đuôi giữa xe dẫn đầu (PL) và xe theo sau (PF) của xe nhập làn. Tại thời điểm nhập làn, có thể xác định ba khoảng trống: khoảng trống giữa PL và PF, khoảng trống giữa PL

và xe nhập làn, và khoảng trống giữa xe nhập làn và PF. Các lý thuyết chấp nhận khoảng trống sử dụng “khoảng trống thuần”, trong đó khoảng trống được đo từ cản sau của xe dẫn đầu đến cản trước của xe theo sau. Ba yếu tố của hành vi nhập làn: vị trí nhập làn, chấp nhận khoảng trống và hiện tượng hồi giãn đều có mối liên hệ chặt chẽ với hành vi xe theo xe. Các biến số nền tảng trong xe theo xe như khoảng cách, tốc độ tương đối và khả năng điều chỉnh gia tốc được sử dụng trực tiếp trong quá trình đánh giá khoảng trống và phản ứng của xe chính tuyến sau nhiều loạn. Do đó, phân tích hành vi nhập làn “không thể tách rời khỏi cơ chế tương tác dọc” và cùng với đó là tương tác ngang giữa các phương tiện trong dòng giao thông. Sai số trong quá trình đo đặc thủ công được kiểm soát thông qua việc hiệu chỉnh khoảng cách thực tế dựa trên

các vạch sơn kẻ đường tiêu chuẩn tại đoạn tuyến nghiên cứu, giúp sai số vị trí luôn nằm trong ngưỡng cho phép đối với các phân tích dòng giao thông vĩ mô. Tiêu chí nhận diện phương tiện nhập làn trong nghiên cứu này được xác định rõ: là những phương tiện di chuyển từ làn tăng tốc và thực hiện thao tác cắt qua vạch phân làn để hòa vào dòng chính. Những trường hợp phương tiện dừng khẩn cấp hoặc không thực hiện trọn vẹn quá trình hòa dòng sẽ được loại bỏ khỏi bộ dữ liệu quỹ đạo để đảm bảo tính đồng nhất của mẫu nghiên cứu. Từ dữ liệu quỹ đạo cho phép xác định vị trí

chính xác nơi các xe nhập dòng thực hiện chuyển làn. Phân bố các vị trí nhập dòng (Hình 5a và 5b) ở đoạn tuyến cao tốc Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An) cho thấy phần lớn diễn ra trong khoảng $x = 60 - 120$ m, với 66.67% diễn ra trước mốc 130 m, chủ yếu ở nửa đầu và gần giữa làn tăng tốc. Một đỉnh nhỏ khác xuất hiện tại đoạn làn thu hẹp. Mặt khác, tuyến cao tốc còn lại cho thấy phần lớn nhập làn ở vị trí $x = 100 - 200$ m, với 77.63% diễn ra trước mốc 210 m chiếm đại đa số giữa và gần cuối làn gia tốc. Và tương tự cũng có 2 đỉnh khá lớn xuất hiện tại làn thu hẹp.



Hình 5. Biểu đồ tần suất nhập làn: (a) Tuyến Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An); (b) Tuyến Hồ Chí Minh - Trung Lương

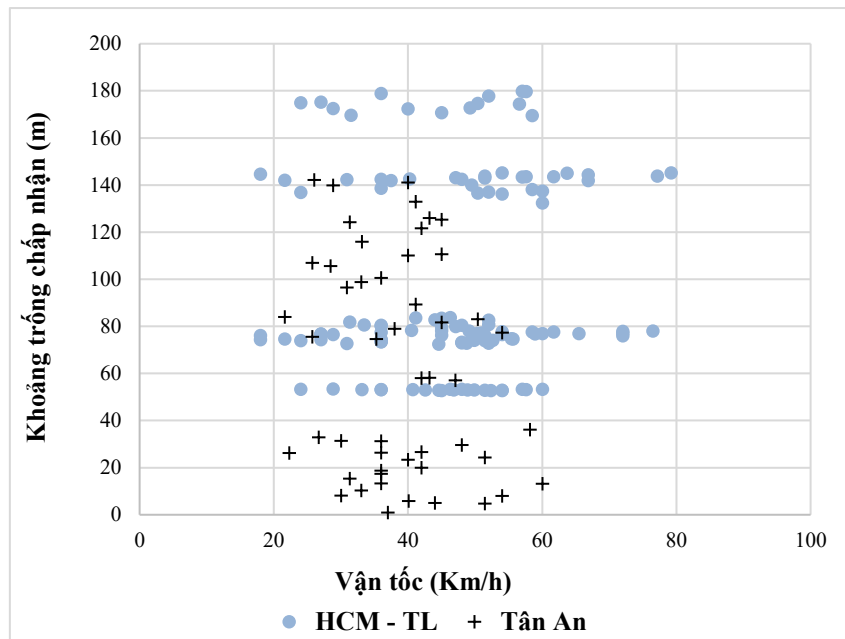
Phân tích cho thấy vận tốc khi xe nhập làn có mối liên hệ rõ ràng với kích thước khoảng trống mà tài xế chấp nhận. Tại đoạn tuyến cao tốc Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An), vận tốc nhập làn quan sát được nhỏ hơn so với đoạn tuyến cao tốc thành phố Hồ Chí Minh - Trung Lương do lưu lượng trên đường chính nhiều hơn, khiến xe trên nhánh nhập buộc phải chạy chậm. Khi vận tốc tăng, mức độ dao động của kích thước khoảng trống chấp nhận tại cao tốc Trung Lương - Mỹ

Thuận (trạm thu phí Tân An) không thay đổi, trong khi tại cao tốc thành phố Hồ Chí Minh - Trung Lương sự dao động này gần như ổn định, dù số lượng dữ liệu ở vùng vận tốc thấp ít hơn. Ở cả hai vị trí nghiên cứu đều nhận thấy xu hướng chung là tại vận tốc nhập làn thấp, khoảng trống chấp nhận khá ổn định; khi vận tốc tăng thì khoảng trống này có xu hướng không thay đổi theo vận tốc. So sánh trực tiếp cho thấy Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An) có khoảng trống chấp nhận ngắn

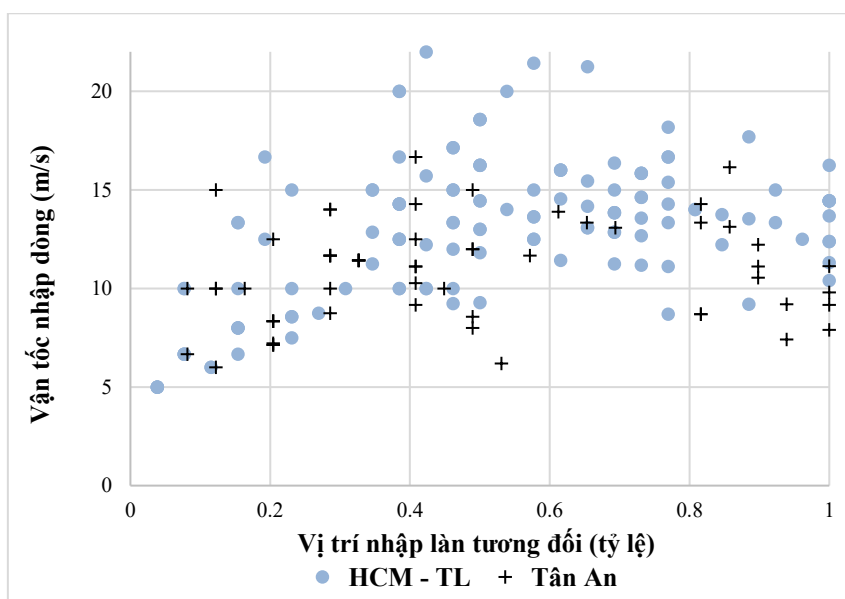
hơn Hồ Chí Minh - Trung Lương, nhưng ở những vận tốc cao hơn 40 km/h thì sự khác biệt dần hình thành. Kết quả cho thấy sự khác biệt về hành vi nhập làn giữa hai vị trí nghiên cứu có sự liên quan chặt chẽ đến lưu lượng và điều kiện giao thông tại thời điểm quan sát, qua đó ảnh hưởng đến quá trình lựa chọn khoảng trống chấp nhận, như được mô tả ở Hình 6.

Vị trí nhập làn tương đối (đại lượng phi thứ nguyên, từ 0 đến 1) được tính bằng tỷ lệ giữa khoảng cách từ điểm bắt đầu làn tăng tốc đến vị trí

xe nhập làn với tổng chiều dài làn tăng tốc. Mối quan hệ giữa tốc độ nhập làn và vị trí nhập làn cho thấy tốc độ nhập làn có sự biến thiên rất lớn. Cụ thể, tại đoạn đầu làn tăng tốc, vận tốc thấp hơn, khi các xe tiến đến giữa làn và cuối làn tăng tốc, phương tiện có xu hướng tăng gia tăng vận tốc trước khi nhập dòng. Kết quả này cho thấy mối liên hệ rõ ràng giữa vận tốc với vị trí nhập làn trong dòng giao thông tự do, trên cả tuyến Trung Lương - Mỹ Thuận (trạm thu phí Tân An) và tuyến Hồ Chí Minh - Trung Lương, như thể hiện trong Hình 7.



Hình 6. Mối quan hệ giữa vận tốc khi nhập làn và khoảng trống chấp nhận



Hình 7. Mối quan hệ giữa vận tốc khi nhập làn và vị trí nhập làn tương đối

2.9. Tham số mô phỏng nhập làn

Việc sử dụng PTV VISSIM cho phép tái hiện chi tiết hành vi nhập làn trong điều kiện giao thông thực, từ đó đánh giá sự tương tác vi mô giữa dòng chính và dòng nhánh. Thông qua hiệu chỉnh bộ tham số điều khiển (xe theo xe và hành vi chuyển làn), mô hình có thể phản ánh chính xác mức độ chấp nhận khoảng trống cơ chế tương tác giữa phương tiện nhập làn và dòng giao thông hiện chính. Tham số CC1 và hệ số giảm khoảng cách an toàn được lựa chọn là tham số hiệu chỉnh chính do có ảnh hưởng trực tiếp đến khoảng cách thời gian giữa các phương tiện và cơ chế chấp nhận khoảng trống khi nhập làn. Các tham số còn lại của mô hình Wiedemann 99 được giữ ở giá trị mặc định, do hạn chế về dữ liệu quỹ đạo không cho phép xác định chính xác các đặc trưng động học

như gia tốc, vận tốc tương đối và dao động khoảng cách. Việc giới hạn số lượng tham số hiệu chỉnh cũng nhằm đảm bảo tính ổn định và khả năng tổng quát hóa của mô hình, được thể hiện qua Bảng 2.

Hành vi bám theo được hiệu chỉnh theo hướng tiếp cận (theo làn xe), tức là gán bộ tham số Wiedemann 99 khác nhau cho từng làn đường. Làn nhánh (làn nhập) được thiết lập CC1 cao hơn nhằm phản ánh đặc tính giữ khoảng cách lớn khi chuẩn bị nhập dòng; trong khi các làn phía trong có CC1 giảm dần, phù hợp với xu hướng bám sát hơn của phương tiện trên dòng chính. Về mô hình hóa, điều quan trọng không phải vị trí nhập dòng cuối cùng mà là hành vi lái xe tạo ra vị trí đó, thường được thể hiện qua chấp nhận khoảng trống: khi người lái gặp một khoảng trống lớn hơn khoảng trống chấp nhận tối thiểu, họ sẽ chuyển làn.

Bảng 2. Tham số mô phỏng

Xe theo xe	Làn nhập	Làn 1	Làn 2
CC1 (Khoảng cách thời gian)	1.2s	1s	0.9s
Hệ số giảm khoảng cách an toàn	0.3	0.4	0.45

CC1 = Headway time

2.10. Đánh giá mô hình

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 3 và Hình 8. Giá trị GEH được tính theo công thức (1):

$$GEH = \sqrt{\frac{2(m-c)^2}{m+c}} \quad (1)$$

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

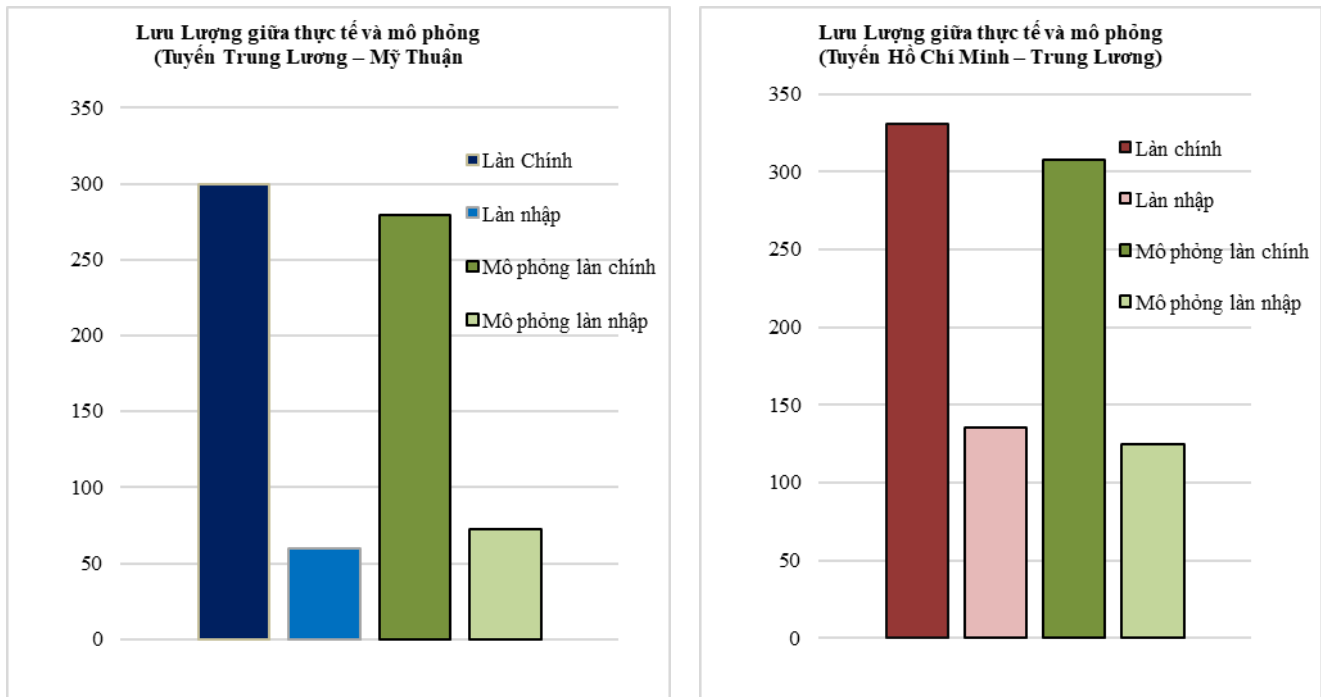
Wiedemann đã hiệu chỉnh với tham số ở Bảng 2 nhỏ hơn 5, thể hiện mức độ tốt giữa mô hình và dữ liệu thực tế quan sát được.

Ngược lại, nếu mô hình có chỉ số GEH lớn hơn 5, điều này 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 nhỏ hơn 5. Dựa trên tiêu chí này, mô hình xây dựng với bộ tham số ở Bảng 2 cho thấy mức độ tương đồng đáng kể với dữ liệu quan sát, phản ánh rất sát đối với hành vi nhập làn thực tế, như Bảng 3 và Hình 8 bên dưới đây.

Bảng 3. Đánh giá sai số giữa GEH mô phỏng và thực tế

Trường hợp	Quan sát thực tế (Làn chính)	Quan sát thực tế (Làn nhập)	Mô phỏng (Làn chính)	Mô phỏng (Làn nhập)	GEH	Đánh giá
Trung Lương - Mỹ Thuận	300	60	279	72	0.477	Tốt
Hồ Chí Minh - Trung Lương	331	135	308	125	1.556	Tốt

GEH = Geoffrey E. Havers, chỉ số GEH (GEH Statistic)



Hình 8. So sánh lưu lượng của các tuyến với mô phỏng

2.11. Mô phỏng làn nhập

Nghiên cứu được thực hiện dựa trên dữ liệu quỹ đạo thu thập từ hai đoạn tuyến, trong đó các thông số khoảng trống chấp nhận, tốc độ và vị trí chuyển làn được trích xuất và phân tích thống kê. Mô hình vi mô được xây dựng trong PTV VISSIM với bộ tham số Wiedemann 99 đã hiệu chỉnh từ dữ liệu thực tế. Quy trình mô phỏng gồm:

- Tái tạo hình học đoạn đường và dòng giao thông.
- Hiệu chỉnh các tham số theo xe và chuyển làn.
- So sánh hành vi mô phỏng với hành vi quan sát.

Kết quả được tổng hợp để đánh giá mức độ phù hợp và xác định các sai lệch của mô hình trong tái hiện hành vi nhập làn.

3. Kết luận

Nghiên cứu này đã triển khai phương pháp tiếp cận dựa trên dữ liệu quỹ đạo vi mô nhằm phân tích chi tiết hành vi nhập làn trên các tuyến cao tốc trong điều kiện giao thông tự do. Thông qua việc thu thập dữ liệu thực nghiệm bằng thiết bị bay không người lái (drone), vị trí và quỹ đạo di chuyển của từng phương tiện được mô tả với độ chính xác cao, cho phép trích xuất và phân tích các thông số

quan trọng như khoảng trống chấp nhận, vận tốc và vị trí chuyển làn. Kết quả nghiên cứu cho thấy hành vi nhập làn chịu ảnh hưởng trực tiếp từ điều kiện lưu lượng và vị trí trên làn tăng tốc. Các phương tiện nhập làn chủ yếu chọn khoảng trống ở nửa đầu và trung đoạn làn tăng tốc, với mức độ ổn định của khoảng trống chấp nhận phụ thuộc vào vận tốc xe và lưu lượng trên làn chính. Phân tích so sánh giữa hai tuyến cao tốc Trung Lương - Mỹ Thuận và TP.HCM - Trung Lương cho thấy sự khác biệt về khoảng trống chấp nhận chủ yếu bắt nguồn từ điều kiện giao thông thực tế, thay vì từ sự khác biệt trong văn hóa lái xe.

Việc áp dụng PTV VISSIM với bộ tham số Wiedemann 99 đã hiệu chỉnh cho phép mô phỏng chính xác hành vi nhập làn, phản ánh tương tác vi mô giữa dòng chính và dòng nhánh. Đặc biệt, mô hình hiệu chỉnh cho thấy sai số GEH thấp hơn 3, thể hiện mức độ phù hợp cao với dữ liệu thực tế. Phương pháp hiệu chỉnh theo làn (lane-based) giúp mô phỏng tái hiện rõ ràng cơ chế chấp nhận khoảng trống và hành vi bám theo xe trong các điều kiện giao thông phức tạp. Như vậy, nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở dữ liệu thực nghiệm giá trị cho việc phân tích hành vi nhập làn, mà còn chứng minh khả năng mô hình hóa vi mô trong

VISSIM để tái hiện chính xác các tương tác giữa các phương tiện trong giao thông tự do. Những kết quả này mở ra hướng tiếp cận khả thi cho việc thiết lập, hiệu chỉnh và đánh giá các mô hình mô phỏng giao thông vi mô trong điều kiện thực tế tại Việt Nam, góp phần nâng cao độ tin cậy của các mô hình dự báo và quản lý giao thông. Ngoài ra, do nghiên cứu sử dụng phiên bản PTV VISSIM Student, thời lượng mô phỏng bị giới hạn trong 10 phút. Vì vậy, kịch bản mô phỏng đã được thiết kế và tối ưu hóa nhằm bảo đảm thu thập đủ dữ liệu trong khoảng thời gian cho phép, đồng thời vẫn duy trì tính đại diện và độ tin cậy của kết quả 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] H. Wei, E. Meyer, J. Lee, C. Feng. (2000). Characterizing and modeling observed lane-changing behavior: Lane-vehicle-based microscopic simulation on urban street network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1710(1), 104–113. <https://doi.org/10.3141/1710-12>
- [2] A. Kesting, M. Treiber, D. Helbing. (2007). General lane-changing model MOBIL for car-following models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999(1), 86–94. <https://doi.org/10.3141/1999-10>
- [3] C.F. Daganzo. (2006). In traffic flow, cellular automata = kinematic waves. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(5), 396–403. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.05.004>
- [4] S. Oh, H. Yeo. (2012). Microscopic analysis on the causal factors of capacity drop in highway merging sections. In *Proceedings of the 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA. <https://trid.trb.org/View/1129178>
- [5] C.F. Choudhury. (2007). Modeling driving decisions with latent plans. Ph.D. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, USA. <https://dspace.mit.edu/entities/publication/de2424dc-2ed5-4731-95cd-735460d03f28> (Truy cập ngày 08/09/2026)
- [6] H. Bar-Gera, S. Ahn. (2010). Empirical macroscopic evaluation of freeway merge-ratios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4), 457–470. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.09.002>
- [7] S.P. Hoogendoorn, H.J. van Zuylen, M. Schreuder, B.G.H. Gorte, M.G. Vosselman. (2003). Traffic data collection from aerial imagery. In *Proceedings of the 10th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, IFAC Proceedings Volumes*, 36(14), 89–94. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)32401-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)32401-1)
- [8] N. Bhouri, H. Haj-Salem, J. Kauppila. (2013). Isolated versus coordinated ramp metering: Field evaluation results of travel time reliability and traffic impact. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 28, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.11.001>
- [9] PTV Vision. (2007). VISSIM 5.0 User Manual. PTV Vision. Karlsruhe, Germany. <https://www.ptvgroup.com> (Truy cập ngày 08/09/2026)
- [10] T. Dijkstra, P. Knoppers. (2004). FOSIM 5.0 User Manual. Delft University of Technology. Delft, Netherlands. <https://www.fosim.nl> (Truy cập ngày 08/09/2026)
- [11] T. Dijkstra, P. Knoppers. (2006). FOSIM 5.1 Program Description. Delft University of Technology. Delft, Netherlands. <https://www.fosim.nl/documenten/fosim5.1manual.pdf> (truy cập ngày 08/09/2026)
- [12] J. Wang, R. Liu, F. Montgomery. (2005). A simulation model for motorway merging behavior. In *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, New York, NY, USA, pp. 281–301. <https://doi.org/10.1016/B978-008044680->

6/50017-9

- [13] J.A. Laval, C.F. Daganzo. (2006). Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(3), 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.04.003>
- [14] J.A. Laval, L. Leclercq. (2008). Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6), 511–522. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.10.004>
- [15] S.A. Smith. (1985). Freeway data collection for studying vehicle interaction. FHWA Technical Report FHWA/RD-85/108. U.S. Department of Transportation. https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/752/dot_752_DS1.pdf (truy cập ngày 08/09/2026)
- [16] B. Sultan, M. Brackstone, B. Waterson, E.R. Boer. (2002). Modeling the dynamic cut-in situation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1803(1), 45–51. <https://doi.org/10.3141/1803-07>
- [17] S.L. Cohen. (2004). Application of relaxation procedure for lane changing in microscopic simulation models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1883(1), 50–58. <https://doi.org/10.3141/1883-06>