

NGHIÊN CỨU ĐỘNG LỰC HỌC NGANG CỦA Ô TÔ CON BẰNG PHẦN MỀM MÔ PHỎNG SỐ

STUDY OF THE SIDELINE DYNAMICS OF PASSENGER CARS USING NUMERICAL SIMULATION SOFTWARE

Nguyễn Tiến Dũng, Lê Bảo Việt*, Chử Thanh Đức, Vi Quý Mùi
 Khoa Cơ khí Động lực, Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: viet.lebao@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Ổn định chuyển động của ô tô trong quá trình chuyển hướng có vai trò quan trọng đối với an toàn giao thông, đặc biệt ở vận tốc cao và khi thực hiện các thao tác đánh lái đột ngột. Nghiên cứu này khảo sát đặc tính động lực học ngang của ô tô con khi chuyển hướng thông qua phương pháp mô phỏng. Một mô hình động lực học ngang – quay thân xe nhiều bậc tự do được xây dựng, kết hợp với mô hình lớp phi tuyến Pacejka để mô tả tương tác lốp – mặt đường. Mô hình được triển khai để mô phỏng các kịch bản đánh lái điển hình, bao gồm chuyển làn đơn và chuyển làn kép. Ảnh hưởng của vận tốc xe và thao tác đánh lái đến các đại lượng động lực học ngang như vận tốc ngang, vận tốc quay thân xe, gia tốc ngang và quỹ đạo chuyển động được phân tích. Kết quả cho thấy khi vận tốc và mức độ đánh lái tăng, các đáp ứng động lực học ngang tăng mạnh, làm gia tăng góc trượt lốp và mở rộng quỹ đạo chuyển động; trong đó, kịch bản chuyển làn kép thể hiện xu hướng mất ổn định rõ rệt hơn. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá ổn định chuyển động và hỗ trợ phát triển các hệ thống hỗ trợ lái và điều khiển ổn định cho ô tô con.

Từ khóa: Động lực học ngang; Chuyển hướng; Mô hình lớp Pacejka.

ABSTRACT

Vehicle stability during cornering is a critical factor directly affecting traffic safety, particularly at high speeds and under abrupt steering maneuvers. This study investigates the lateral dynamic characteristics of a passenger car during cornering using a simulation-based approach. A multi-degree-of-freedom lateral–yaw dynamics model is developed and coupled with a nonlinear Pacejka tire model to describe tire–road interactions. The model is implemented to simulate representative steering scenarios, including single lane change and double lane change maneuvers. The effects of vehicle speed and steering inputs on key lateral dynamic responses – such as lateral velocity, yaw rate, lateral acceleration, and vehicle trajectory – are analyzed. The simulation results show that increases in vehicle speed and steering severity significantly amplify lateral dynamic responses, leading to larger tire slip angles and wider trajectories; notably, the double lane change maneuver exhibits a more pronounced tendency toward instability. These findings provide a scientific basis for evaluating vehicle handling stability and support the development of driver assistance and stability control systems for passenger cars.

Keywords: Lateral dynamics; Steering maneuver; Pacejka tire model.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

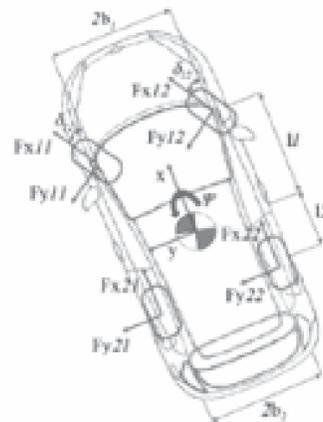
Trong quá trình chuyển động, đặc biệt ở vận tốc cao, ô tô thường phải thực hiện các thao tác chuyển hướng như chuyển làn, tránh chướng ngại vật hoặc quay vòng gấp, tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định chuyển động do trượt ngang, thiếu lái hoặc thừa lái, làm gia tăng nguy cơ tai nạn giao thông [1]-[3]. Chuyển hướng là một quá trình động lực học phức tạp, chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như vận tốc xe, đặc tính hệ thống lái, đặc tính lốp – mặt đường và thao tác điều khiển của người lái [4], [5]. Khi vận tốc tăng hoặc biên độ đánh lái lớn, các đại lượng động lực học ngang như vận tốc ngang, vận tốc quay thân xe và gia tốc ngang có thể tăng nhanh, dẫn đến sai lệch quỹ đạo chuyển động và suy giảm ổn định hướng của xe [6].

Trong các yếu tố ảnh hưởng đến ổn định chuyển động ngang, tương tác lốp – mặt đường đóng vai trò quyết định thông qua khả năng tạo lực ngang phụ thuộc vào góc trượt và điều kiện bám [7]. Phương pháp mô phỏng dựa trên mô hình động lực học được sử dụng rộng rãi nhờ tính an toàn và khả năng khảo sát các trạng thái gần giới hạn ổn định; trong đó, mô hình lốp phi tuyến Pacejka được áp dụng phổ biến do mô tả tốt mối quan hệ giữa động lực học tác dụng lên lốp và góc trượt [8]. Trên cơ sở đó, bài báo này nghiên cứu đặc tính động lực học ngang của ô tô con khi chuyển hướng thông qua mô phỏng, sử dụng mô hình động lực học ngang – quay thân xe kết hợp với mô hình lốp Pacejka để phân tích các kịch bản chuyển làn đơn và chuyển làn kép, nhằm đánh giá ảnh hưởng của vận tốc và thao tác đánh lái đến ổn định chuyển động của ô tô con.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết lập hệ phương trình vi phân chuyển động của xe trong mặt phẳng đường

Áp dụng hệ phương trình Newton-Euler cho xe ô tô con chuyển động trong mặt phẳng song song với mặt đường, với khối lượng toàn xe bao gồm khối lượng được treo và các khối lượng không được treo. Xét mô hình động lực học ngang của xe với ba bậc tự do, bao gồm chuyển động tịnh tiến theo phương dọc, phương ngang và chuyển động quay quanh trục thẳng đứng đi qua trọng tâm xe. Mô hình lực tác dụng lên xe trong mặt phẳng chuyển động được thể hiện trên Hình 1. Từ các giả thiết trên, hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của xe trong mặt phẳng đường được thiết lập như sau:



Hình 1. Mô hình lực tác động lên xe trong mặt phẳng song song với mặt đường

$$M(\ddot{u} - v\dot{r}) = F_{x11}\cos\delta_{11} - F_{y11}\sin\delta_{11} + F_{x12}\cos\delta_{12} - F_{y12}\sin\delta_{12} + F_{x21} + F_{x22} - F_{wx} \quad (1)$$

$$M(\dot{v} - ur) = F_{x11}\sin\delta_{11} + F_{y11}\cos\delta_{11} + F_{x12}\sin\delta_{12} + F_{y12}\cos\delta_{12} + F_{y21} + F_{y22} + F_{wy} \quad (2)$$

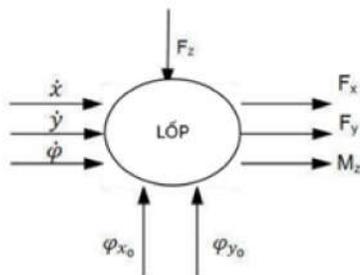
$$J_z\dot{r} = [(F_{x12}\cos\delta_{12} - F_{y12}\sin\delta_{12}) - (F_{x11}\cos\delta_{11} - F_{y11}\cos\delta_{11})]b_1 + (F_{x22} - F_{x21})b_2 + [(F_{x11}\sin\delta_{11} + F_{y11}\cos\delta_{11}) + (F_{x12}\sin\delta_{12} + F_{y12}\cos\delta_{12})]l_1 - (F_{y21} + F_{y22})l_2 + F_{wy}l_{wy} \quad (3)$$

Trong các phương trình (1)-(3), δ_{11} và δ_{12} là góc quay của bánh xe dẫn hướng bên trái và bên phải; F_{xij} , F_{yij} và F_{zij} lần lượt là các thành phần lực dọc, lực ngang và phản lực thẳng đứng của mặt đường tác dụng lên bánh xe thứ ij ($i = 1,2; j = 1,2$). Các lực khí động theo phương dọc và phương ngang được ký hiệu là F_{wx} và

F_{wy} . Các đại lượng u , v và r tương ứng là vận tốc dọc, vận tốc ngang và vận tốc quay thân xe quanh trục thẳng đứng; J_z là mômen quán tính của xe quanh trục z . Các tham số hình học b_1 , b_2 , l_1 , l_2 và l_{wy} biểu thị các khoảng cách đặc trưng của xe. Hệ phương trình (1)-(3) là cơ sở để xây dựng mô hình mô phỏng động lực học ngang của ô tô con khi chuyển hướng.

2.2. Xác định lực tương tác lốp – đường

Các lực tương tác giữa bánh xe và mặt đường theo phương dọc và phương ngang, ký hiệu lần lượt là F_{xij} và F_{yij} , là các đại lượng chưa xác định trong hệ phương trình động lực học của xe. Các lực này được xác định thông qua mô hình lốp nhằm phản ánh đặc tính tương tác lốp – mặt đường trong quá trình chuyển động. Hình 2 minh họa mô hình lốp với các đại lượng chuyển động tại vùng tiếp xúc và các phản lực tác dụng lên bánh xe, bao gồm lực dọc F_x , lực ngang F_y , lực thẳng đứng F_z và mômen quay M_z , được sử dụng làm đầu vào cho mô hình động lực học của xe.



Hình 2. Mô hình lốp

Trong nghiên cứu trên, nhóm tác giả đã sử dụng mô hình lốp Pacejka (Magic Formula) là mô hình được coi là có công thức mô tả tốt nhất mối quan hệ giữa lực F_x và độ trượt λ , khi không xét đến ảnh hưởng của góc đặt bánh xe, ta có công thức xác định:

$$F_x = D \cdot \sin \left[C \cdot \arctan \left\{ B \cdot \lambda - E \left(B \cdot \lambda + \arctan (B \cdot \lambda) \right) \right\} \right] \quad (4)$$

Đối với lực dọc F_x , mô hình lốp Pacejka mô tả quan hệ phi tuyến giữa lực kéo/phanh và hệ số trượt dọc λ theo Magic Formula khi bỏ qua ảnh hưởng của góc đặt bánh xe. Hệ số trượt λ được xác định từ v , ω và bán kính động lực học r , trong khi các tham số D , C , B và E phụ thuộc vào tải trọng thẳng đứng; các hệ số thực nghiệm được tham khảo từ các nghiên cứu đã công bố cho lốp có đặc tính tương tự.

Tương tự, lực ngang F_y của lốp được mô tả thông qua mối quan hệ phi tuyến giữa lực ngang và góc trượt α theo mô hình Pacejka như sau:

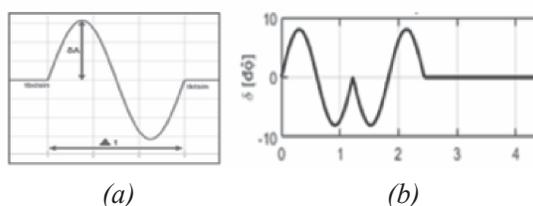
$$F_y(\alpha) = D_y \cdot \sin \left[C_y \cdot \arctan \left\{ B_y \alpha - E_y \left(B_y \alpha + \arctan (B_y \alpha) \right) \right\} \right] \quad (5)$$

Lực ngang F_y tại mỗi bánh xe được xác định bởi hàm Magic Formula với các tham số B_y , C_y , D_y và E_y . Trong mô phỏng, các giá trị tham số được lựa chọn là $B_y = 3,0$, $C_y = 1,2$, $D_y = 115000$ N và $E_y = -1,9$, phù hợp với đặc tính của lốp xe con thông dụng. Góc trượt của từng bánh xe được xác định từ vận tốc dọc, vận tốc ngang tại tâm bánh xe và góc đánh lái, qua đó phản ánh đúng sự phân bố lực ngang tại bốn bánh xe trong quá trình chuyển làn và quay vòng. Các lực F_{xij} và F_{yij} xác định từ mô hình lốp Pacejka được sử dụng làm đầu vào cho hệ phương trình động lực học, phục vụ mô phỏng và phân tích ổn định chuyển động ngang của ô tô con.

2.3. Quy luật đánh lái khi chuyển hướng

Trong quá trình chuyển hướng, người lái tác động lên hệ thống lái thông qua góc quay bánh xe dẫn hướng, từ đó quyết định quỹ đạo chuyển động và các đặc tính động lực học ngang của xe. Quy luật biến thiên của góc đánh lái theo thời gian ảnh hưởng trực tiếp đến mức độ kích thích các đáp ứng động lực học và ổn

định chuyển động của ô tô. Trong nghiên cứu này, nhằm thuận tiện cho việc phân tích và so sánh, quy luật đánh lái được xác định trước và sử dụng làm tín hiệu đầu vào cho mô hình mô phỏng; đồng thời, ảnh hưởng của độ đàn hồi hệ thống lái được bỏ qua và góc quay bánh xe dẫn hướng được xem là đại lượng điều khiển trực tiếp. Hai quy luật đánh lái điển hình được lựa chọn để đánh giá ổn định chuyển động, bao gồm chuyển làn đơn (Hình 3a) và chuyển làn kép (Hình 3b).



Hình 3. Quy luật chuyển làn: a) Chuyển làn đơn, b) Chuyển làn kép

Phương trình (6) mô tả quy luật biến thiên của góc đánh lái $\delta(t)$ trong kịch bản chuyển làn đơn. Trong khoảng thời gian $0 \leq t < T_{steer}$, góc đánh lái được biểu diễn dưới dạng hàm sin với biên độ cực đại δ_A , phản ánh thao tác đánh lái sang một phía của người lái. Khi $t \geq T_{steer}$, góc đánh lái được đưa về giá trị bằng không, tương ứng với trạng thái trả lái và xe chuyển sang giai đoạn ổn định chuyển động. Dạng hàm này đảm bảo góc đánh lái biến thiên liên tục và trơn theo thời gian, phù hợp để mô phỏng các thao tác đánh lái thông thường trong điều kiện vận hành thực tế.

$$\delta(t) = \begin{cases} \delta_A \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{steer}}\right), & 0 \leq t < T_{steer} \\ 0, & t \geq T_{steer} \end{cases} \quad (6)$$

Phương trình (7) mô tả quy luật góc đánh lái trong kịch bản chuyển làn kép, trong đó góc đánh lái gồm hai pha liên tiếp có dấu ngược nhau. Pha thứ nhất ($0 \leq t < T_{steer}$) tương ứng với thao tác đánh lái ban đầu, trong khi pha

thứ hai ($T_{steer} \leq t < 2T_{steer}$) mô phỏng thao tác đánh lái đổi chiều để hoàn thành chuyển làn lần thứ hai. Sau thời điểm $t \geq 2T_{steer}$, góc đánh lái được đưa về giá trị bằng không. Quy luật này tạo ra kích thích mạnh hơn đối với chuyển động ngang và chuyển động quay thân xe, đồng thời vẫn đảm bảo tính liên tục của góc đánh lái tại các thời điểm chuyển pha, tránh xuất hiện xung kích không thực tế trong mô phỏng.

$$\delta(t) = \begin{cases} \delta_A \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{steer}}\right), & 0 \leq t < T_{steer} \\ \delta_A \sin\left(\frac{2\pi(t - T_{steer})}{T_{steer}}\right), & 0 \leq t < 2T_{steer} \\ 0, & t \geq 2T_{steer} \end{cases} \quad (7)$$

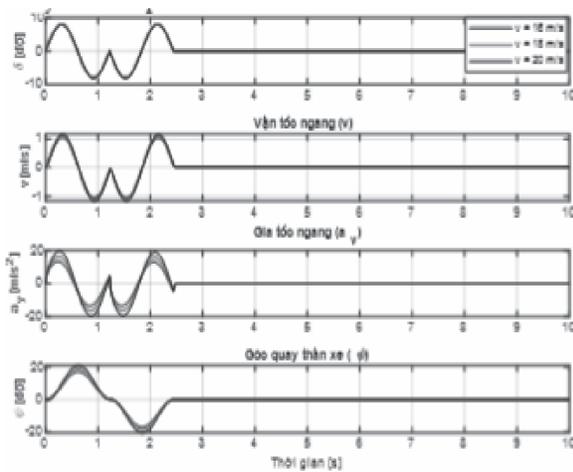
Trong các phương trình trên, $\delta(t)$ là góc đánh lái theo thời gian, δ_A là biên độ góc đánh lái cực đại và T_{steer} là thời gian thực hiện một pha đánh lái. Các tham số này được thay đổi trong các kịch bản khảo sát nhằm phân tích ảnh hưởng của thao tác đánh lái đến các đáp ứng động lực học ngang và ổn định chuyển động của ô tô con.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trên cơ sở mô hình động lực học ngang và các quy luật đánh lái đã thiết lập, quá trình mô phỏng được thực hiện cho hai kịch bản chuyển làn đơn (Single Lane Change – SLC) và chuyển làn kép (Double Lane Change – DLC). Các đại lượng động lực học được phân tích bao gồm vận tốc ngang v , vận tốc quay thân xe r , gia tốc ngang a_y và quỹ đạo chuyển động của xe.

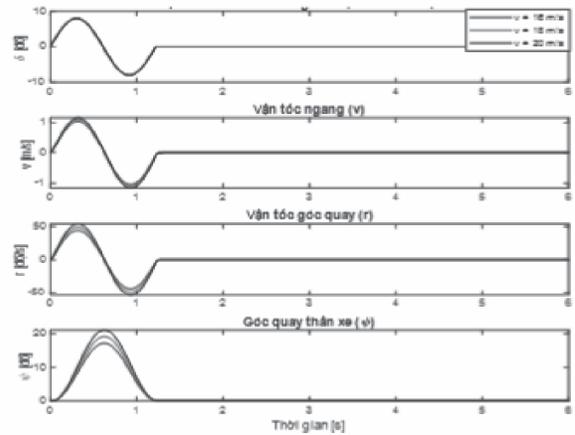
Hình 4 thể hiện ảnh hưởng của vận tốc xe đến các đáp ứng động lực học ngang trong kịch bản chuyển làn kép, bao gồm góc đánh lái, vận tốc ngang v , gia tốc ngang a_y và góc quay thân xe ψ . Kết quả cho thấy khi vận tốc xe tăng

từ 16 m/s lên 20 m/s, biên độ các đáp ứng động lực học ngang tăng rõ rệt. Cụ thể, vận tốc ngang và gia tốc ngang xuất hiện hai đỉnh liên tiếp tương ứng với hai pha đánh lái đổi chiều, trong đó biên độ đỉnh tăng theo vận tốc. Đồng thời, góc quay thân xe đạt giá trị lớn hơn và suy giảm chậm hơn ở vận tốc cao, phản ánh mức độ kích thích chuyển động quay thân xe mạnh và xu hướng giảm ổn định động lực học ngang của xe trong quá trình chuyển làn kép.



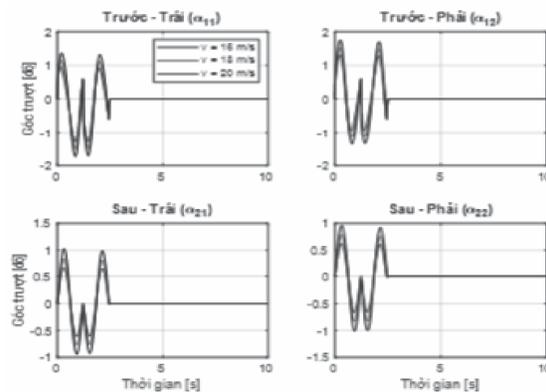
Hình 4. Ảnh hưởng của vận tốc đến góc đánh lái khi chuyển làn kép

Hình 5 thể hiện ảnh hưởng của vận tốc xe đến các đáp ứng động lực học ngang trong kịch bản chuyển làn đơn, bao gồm góc đánh lái, vận tốc ngang v , vận tốc quay thân xe r và góc quay thân xe ψ . Kết quả cho thấy khi vận tốc xe tăng, biên độ các đáp ứng động lực học ngang tăng theo, tuy nhiên mức tăng thấp hơn so với kịch bản chuyển làn kép. Các đại lượng vận tốc ngang và vận tốc quay thân xe chỉ xuất hiện một đỉnh chính tương ứng với pha đánh lái, sau đó nhanh chóng suy giảm về giá trị ổn định khi kết thúc thao tác. Góc quay thân xe đạt giá trị cực đại trong giai đoạn đánh lái và nhanh chóng trở về gần vị trí trung hòa, phản ánh khả năng phục hồi ổn định tốt hơn của xe trong kịch bản chuyển làn đơn, ngay cả khi vận tốc tăng.



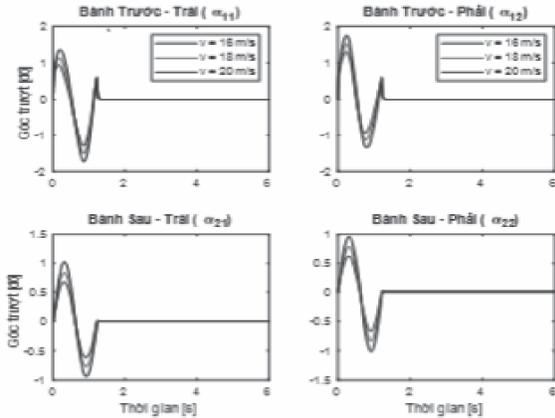
Hình 5. Ảnh hưởng của vận tốc đến góc đánh lái khi chuyển làn đơn

Hình 6 cho thấy khi vận tốc xe tăng, biên độ góc trượt của tất cả các bánh xe trong kịch bản chuyển làn kép đều tăng rõ rệt, phản ánh sự gia tăng lực ngang tác dụng lên lốp. Các bánh trước có góc trượt lớn hơn do chịu tác động trực tiếp của góc đánh lái và xuất hiện các đỉnh liên tiếp trong hai pha đánh lái đổi chiều. Góc trượt của các bánh sau có biên độ nhỏ hơn nhưng suy giảm chậm hơn ở vận tốc cao. Kết quả cho thấy khi vận tốc tăng, lớp xe làm việc gần giới hạn bám hơn, dẫn đến giảm dự trữ ổn định và gia tăng nguy cơ mất ổn định chuyển động ngang của ô tô con trong kịch bản chuyển làn kép.



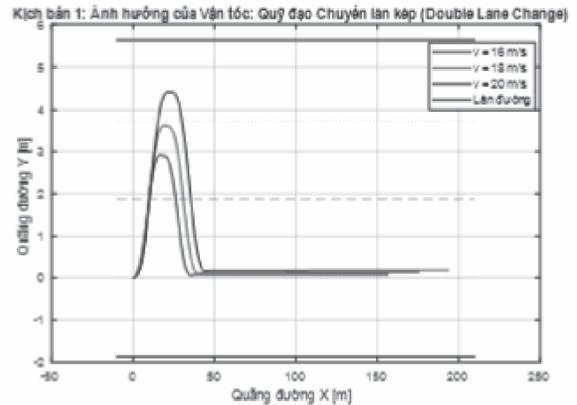
Hình 6. Ảnh hưởng của vận tốc đến góc trượt của các bánh xe khi chuyển làn kép

Hình 7 thể hiện ảnh hưởng của vận tốc xe đến góc trượt của các bánh xe trong kịch bản chuyển làn đơn. Kết quả cho thấy khi vận tốc tăng, biên độ góc trượt của các bánh xe tăng theo, trong đó các bánh trước có góc trượt lớn hơn do chịu tác động trực tiếp của góc đánh lái. Tuy nhiên, so với kịch bản chuyển làn kép, góc trượt trong chuyển làn đơn có biên độ nhỏ hơn và chỉ xuất hiện một đỉnh chính trong pha đánh lái, sau đó nhanh chóng suy giảm về giá trị ổn định. Điều này cho thấy lớp xe làm việc trong vùng bám an toàn hơn và xe duy trì được ổn định chuyển động tốt hơn khi chuyển làn đơn, ngay cả ở vận tốc cao.



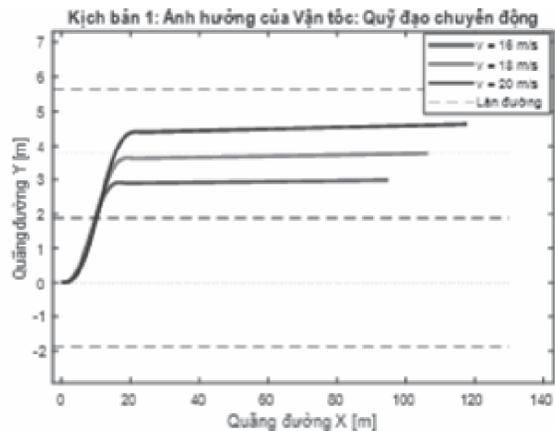
Hình 7. Ảnh hưởng của vận tốc đến góc trượt của các bánh xe khi chuyển làn đơn

Hình 8 thể hiện ảnh hưởng của vận tốc xe đến quỹ đạo chuyển động trong kịch bản chuyển làn kép. Kết quả cho thấy khi vận tốc xe tăng, độ lệch quỹ đạo theo phương ngang tăng rõ rệt, thể hiện qua biên độ dịch chuyển lớn hơn so với làn đường danh định. Ở vận tốc cao, quỹ đạo chuyển động mở rộng và đạt giá trị lệch cực đại lớn hơn, đồng thời thời gian để xe ổn định trở lại quỹ đạo mong muốn kéo dài hơn. Điều này phản ánh sự gia tăng mạnh của các đáp ứng động lực học ngang và xu hướng suy giảm ổn định chuyển động của xe trong kịch bản chuyển làn kép khi vận hành ở vận tốc cao.



Hình 8. Ảnh hưởng của vận tốc đến quỹ đạo chuyển động khi chuyển làn kép

Hình 9 thể hiện ảnh hưởng của vận tốc xe đến quỹ đạo chuyển động trong kịch bản chuyển làn đơn. Kết quả cho thấy khi vận tốc xe tăng, độ lệch quỹ đạo theo phương ngang tăng lên, thể hiện qua vị trí quỹ đạo ổn định đạt được cao hơn so với làn đường danh định. Tuy nhiên, quỹ đạo chuyển động trong chuyển làn đơn có dạng biến thiên tương đối trơn và xe nhanh chóng đạt trạng thái ổn định sau khi hoàn thành thao tác đánh lái. Điều này cho thấy mặc dù vận tốc tăng làm gia tăng mức độ lệch quỹ đạo, xe vẫn duy trì được khả năng ổn định tốt hơn trong kịch bản chuyển làn đơn so với các kịch bản đánh lái phức tạp hơn.



Hình 9. Ảnh hưởng của vận tốc đến quỹ đạo chuyển động khi chuyển làn đơn

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở mô hình động lực học ngang – quay thân xe kết hợp với mô hình lớp phi tuyến Pacejka, nghiên cứu đã phân tích ảnh hưởng của vận tốc xe đến các đáp ứng động lực học ngang của ô tô con trong quá trình chuyển hướng thông qua các kịch bản chuyển làn đơn và chuyển làn kép. Kết quả mô phỏng cho thấy khi vận tốc xe tăng, các đại lượng động lực học ngang như vận tốc ngang, gia tốc ngang, vận tốc quay thân xe, góc trượt lớp và độ lệch quỹ đạo đều tăng rõ rệt, phản ánh sự gia tăng lực ngang tác dụng lên lớp và sự suy giảm mức dự trữ ổn định của xe. Các bánh trước chịu ảnh hưởng lớn hơn do tác động trực tiếp của góc đánh lái, trong khi ở vận tốc cao, các bánh sau có xu hướng suy giảm đáp ứng chậm hơn, làm gia tăng nguy cơ mất ổn định. Đặc biệt, trong kịch bản chuyển làn kép, các đáp ứng động lực học ngang có biên độ lớn và diễn biến phức tạp hơn, lớp xe làm việc gần giới hạn bám và quỹ đạo chuyển động lệch nhiều so với làn đường danh định, cho thấy đây là kịch bản khắc nghiệt để đánh giá ổn định chuyển động. Các kết quả thu được khẳng định vai trò quan trọng của vận tốc và thao tác đánh lái đối với ổn định động lực học ngang của ô tô con, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá an toàn chuyển động và phát triển các hệ thống hỗ trợ lái, điều

kiển ổn định trong điều kiện vận hành ở vận tốc cao. ❖

Ngày nhận bài: **06/01/2026**

Ngày phản biện: **18/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Gillespie, Thomas, ed., “*Fundamentals of vehicle dynamics*”. SAE International, 2021.
- [2]. Rajamani, Rajesh, “*Vehicle dynamics and control*”. Boston, MA: Springer US, 2006.
- [3]. Milliken, William F., Douglas L. Milliken, and L. Daniel Metz, “*Race car vehicle dynamics*”. Vol. 400. Warrendale: SAE International, 1995.
- [4]. Guiggiani, Massimo, “*The science of vehicle dynamics*”. Pisa, Italy: Springer Netherlands 15 (2014): 32.
- [5]. Wong, Jo Yung, “*Theory of ground vehicles*”. John Wiley & Sons, 2022.
- [6]. Casanova, Daniele, Robin S. Sharp, and Pat Symonds, “*Minimum time manoeuvring: The significance of yaw inertia*”. *Vehicle system dynamics* 34.2 (2000): 77-115.
- [7]. Crolla, D. A., “*Vehicle dynamics – theory into practice*”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 210.2 (1996): 83-94.
- [8]. Pacejka, Hans, “*Tire and vehicle dynamics*”. Elsevier, 2005.