



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.6.5.136-147>

*Corresponding author:

Email address:

tiendatck75@ut.edu.vn

Received: 25/05/2026

Received in Revised Form:
07/08/2026

Accepted: 12/08/2026

Investigation of pressure wave characteristics induced by high-speed train entry into a tunnel using CFD

Hoang Van Chuan, Nguyen Thanh Sa, Nguyen Hong Thang, Le Van Vang, Tran Tien Dat*

Artificial Intelligence in Transportation Group (AIT), Ho Chi Minh City University of Transport, No. 2 Vo Oanh Street, Thanh My Tay Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

Abstract: This study employs Computational Fluid Dynamics (CFD) to simulate the process of a high-speed train entering a tunnel at a speed of 350 km/h. The model is developed in ANSYS Fluent by solving the Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) equations in conjunction with the RNG k- ϵ turbulence model to describe the unsteady flow characteristics inside the tunnel. The focus of this study is to analyze the formation and propagation of pressure waves during the initial stage of train entry into the tunnel, while evaluating the variation of the pressure field and its influence on the aerodynamic environment. The simulation results show that the initial compression wave is generated at the tunnel entrance and propagates along the tunnel length, while producing significant pressure fluctuations and affecting the airflow motion inside the tunnel. These results contribute to a better understanding of the aerodynamic characteristics during the initial stage of a high-speed train entering a tunnel.

Keywords: High-speed train, Pressure wave, Railway tunnel, Aerodynamics, CFD simulation.



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

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.136-147>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
tiendatck75@ut.edu.vn

Ngày nộp bài: 25/05/2026
Ngày nộp bài sửa: 07/08/2026
Ngày chấp nhận: 12/08/2026

Nghiên cứu đặc tính sóng áp suất khí tàu cao tốc đi vào hầm bằng phương pháp mô phỏng số CFD

Hoàng Văn Chuẩn, Nguyễn Thành Sa, Nguyễn Hồng Thắng, Lê Văn Vang, Trần Tiến Đạt*

Nhóm Trí tuệ nhân tạo trong Giao thông vận tải (AIT), 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 này sử dụng phương pháp động lực học chất lưu tính toán (CFD) để mô phỏng quá trình tàu cao tốc đi vào đường hầm với vận tốc 350 km/h. Mô hình được xây dựng trong ANSYS Fluent, giải hệ phương trình Navier–Stokes trung bình theo Reynolds kết hợp với mô hình rối RNG k- ϵ nhằm mô tả đặc tính dòng chảy không ổn định trong hầm. Trọng tâm của nghiên cứu là phân tích sự hình thành và lan truyền của sóng áp suất trong giai đoạn tàu bắt đầu đi vào hầm, đồng thời đánh giá sự biến đổi của trường áp suất và ảnh hưởng của nó đến môi trường khí động. Kết quả mô phỏng cho thấy sóng nén ban đầu hình thành tại cửa hầm và lan truyền dọc theo chiều dài hầm, đồng thời tạo ra các vùng biến thiên áp suất rõ rệt và ảnh hưởng đến chuyển động của dòng khí trong hầm. Những kết quả này góp phần làm rõ đặc tính khí động trong giai đoạn đầu của quá trình tàu đi vào hầm.

Từ khóa: Tàu cao tốc, Sóng áp suất, Đường hầm đường sắt, Khí động học, Mô phỏng CFD.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, sự phát triển nhanh chóng của hệ thống đường sắt cao tốc đã trở thành một xu hướng quan trọng trong lĩnh vực giao thông vận tải hiện đại. Với vận tốc khai thác đạt từ 250 km/h đến hơn 350 km/h, các vấn đề khí động học liên quan đến sự tương tác giữa đoàn tàu và môi trường xung quanh ngày càng trở nên đáng chú ý [1], [2]. Đặc biệt, khi tàu cao tốc đi vào đường hầm, không khí phía trước mũi tàu bị nén mạnh, hình thành một sóng nén ban đầu lan truyền dọc theo chiều dài hầm. Sóng này tiếp tục phản xạ và tương tác với các sóng giãn nở sinh ra ở phần đuôi tàu, tạo thành một hệ thống sóng áp suất phức

tạp. Hiện tượng này gây ra sự biến thiên áp suất lớn trong hầm và trở thành vấn đề quan trọng trong thiết kế và vận hành tàu cao tốc [3-6].

Nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung phân tích đặc tính khí động của sóng áp suất phát sinh khi tàu cao tốc di chuyển trong đường hầm cũng như các tác động liên quan. Jianming Du và cộng sự thông qua mô phỏng số ba chiều đã chỉ ra rằng các giá trị áp suất đỉnh trong hầm (bao gồm áp suất dương, áp suất âm và áp suất đỉnh) tăng đáng kể theo vận tốc tàu, với mối quan hệ gần dạng hàm lũy thừa từ 1,12 đến 2,33, cho thấy vận tốc tàu là một trong những yếu tố chi phối chính đến đặc tính sóng áp suất trong hầm [7]. Bên cạnh đó, các

nguyên cứu thực nghiệm và mô phỏng khác đã làm rõ sự phân bố áp suất dọc theo chiều dài hầm và ảnh hưởng của các điều kiện vận hành. Liu và cộng sự cho thấy vị trí xuất hiện áp suất cực đại có xu hướng dịch chuyển về phía cửa hầm khi vận tốc tàu tăng, đồng thời sự giao nhau của các đoàn tàu làm gia tăng đáng kể biên độ dao động áp suất và ảnh hưởng đến phân bố áp suất trong hầm [6].

Ngoài ra, đặc điểm dòng chảy không ổn định trong môi trường hầm và nhà ga ngầm cũng đã được nghiên cứu chi tiết. Các nghiên cứu cho thấy sự lan truyền và tương tác giữa sóng nén và sóng giãn nở đóng vai trò quyết định đến sự biến thiên áp suất cục bộ trong hầm [8]. Đồng thời, khi khoảng cách giữa các làn đường giảm, lực khí động tác dụng lên đoàn tàu cũng tăng đáng kể. Nghiên cứu điều tra các đặc điểm ảnh hưởng của lực khí động trong quá trình tàu hỏa đi qua với ba khoảng cách giữa các làn đường khác nhau (4,6 m, 4,8 m, 5,0 m). Lấy tốc độ 350 km/h làm tham chiếu, giá trị đỉnh của lực cản tăng lần lượt 1,85% và 2,71% đối với khoảng cách giữa các làn đường là 4,8 m và 4,6 m so với 5,0 m. Giá trị cực đại của lực ngang tăng lần lượt 20,10% và 42,91% đối với khoảng cách giữa các đường ray là 4,8 m và 4,6 m so với 5,0 m [9].

Không chỉ giới hạn ở môi trường hầm, một số nghiên cứu còn mở rộng phân tích đến ảnh hưởng của sóng áp suất lên điều kiện vận hành và kết cấu. Kết quả cho thấy tải trọng khí động có thể đạt giá trị cực đại khoảng -394,78 N và gây ra hiệu ứng khuếch đại động với hệ số lên đến 1,556, từ đó làm giảm tuổi thọ mỏi của các cấu kiện trong hầm xuống khoảng 361.500 chu kỳ [10]. Đồng thời, sự biến thiên áp suất bên trong toa tàu khi đi qua hầm cũng được chứng minh là có ảnh hưởng trực tiếp đến sự thoải mái của hành khách [11], [12]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu về sóng nén ban đầu trong hầm dài cũng cho thấy chiều dài đoàn tàu và vận tốc có ảnh hưởng đáng kể đến áp suất âm cực đại trong hầm [3].

Mặc dù các nghiên cứu trước đây đã làm rõ nhiều khía cạnh của hiện tượng sóng áp suất khi

tàu cao tốc đi qua hầm, phần lớn chủ yếu tập trung vào cơ chế hình thành và lan truyền sóng trong quá trình tàu di chuyển bên trong hầm. Trong khi đó, giai đoạn tàu bắt đầu đi vào hầm – thời điểm hình thành sóng nén ban đầu với biên độ lớn nhất vẫn chưa được phân tích một cách đầy đủ, đây là giai đoạn có ảnh hưởng mạnh mẽ đến môi trường khí động cũng như tải trọng tác dụng lên kết cấu đường hầm [13].

Vì vậy, nghiên cứu này tập trung mô phỏng quá trình tàu cao tốc đi vào hầm dưới một điều kiện vận hành nhất định bằng phương pháp động lực học chất lưu tính toán (CFD). Mục tiêu của nghiên cứu là làm rõ đặc tính hình thành và lan truyền của sóng áp suất trong giai đoạn đầu, đồng thời đánh giá sự biến đổi áp suất và vận tốc dòng khí trong không gian hầm.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp số

2.1. Các phương trình chi phối

Dòng chảy không khí do tàu cao tốc di chuyển trong đường hầm là dòng chảy 3 chiều, không ổn định, nén được và có tính rối [14-16]. Để mô tả đặc tính của dòng chảy này, hệ phương trình Navier-Stokes trung bình theo Reynolds (RANS) được sử dụng, bao gồm phương trình liên tục, phương trình động lượng và phương trình năng lượng. Các phương trình chi phối được biểu diễn trong hệ tọa độ Descartes như sau:

Phương trình liên tục (1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Trong đó, ρ là khối lượng riêng của không khí, u_i là thành phần vận tốc không khí theo phương x_i và t là thời gian.

Phương trình động lượng (2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó, p là áp suất tĩnh, g_i là gia tốc trọng trường theo phương x_i , τ_{ij} là tensor ứng suất nhớt, được xác định bởi phương trình (3):

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3)$$

Trong đó, μ là độ nhớt động; δ_{ij} là delta Kronecker; $\overline{u'_i u'_j}$ là các thành phần của tensor ứng suất, biểu diễn ảnh hưởng của nhiễu loạn đến sự truyền động lượng của dòng chảy. Các chỉ số i, j, k tương ứng với các phương tọa độ x, y, z .

Phương trình năng lượng (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó, E là tổng năng lượng riêng, T là nhiệt độ, k_{eff} là hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng, $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ là tensor ứng suất hiệu dụng.

Tổng năng lượng riêng được xác định theo phương trình (5):

$$E = e + \frac{1}{2} (u_i u_i) \quad (5)$$

Trong đó, e là nội năng riêng.

Ở nghiên cứu này, ứng suất Reynolds được mô hình hóa theo giả thiết Boussinesq (phương trình 6) [17], [18]:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

Trong đó, μ_t là độ nhớt nhiễu loạn, k là động năng nhiễu loạn.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Với $C_\mu = 0,0845$; ε là tốc độ tiêu tán năng lượng nhiễu loạn.

Trong các nghiên cứu gần đây, mô hình nhiễu loạn RNG k- ε được coi là mô hình hiệu quả, đáng tin cậy. Do đó, mô hình này đã được sử dụng để tính toán theo phương trình (8) và (9):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[a_k u_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_\varepsilon u_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ + \frac{C_{1\varepsilon}^*}{k} G_k + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó, $u_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, G_k là tốc độ sinh động

năng nhiễu loạn do dòng chảy bị biến dạng hoặc trượt mạnh và các hằng số mô hình theo RNG k- ε tiêu chuẩn.

2.2. Mô hình dòng chảy

Trong nghiên cứu này, dòng chảy không khí trong đường hầm được xem xét là dòng chảy nén được. Giả thiết này được lựa chọn dựa trên vận tốc khai thác của tàu cao tốc, trong đó số Mach của dòng chảy đạt giá trị đáng kể. Cụ thể, với vận tốc tàu 350 km/h (tương đương 97,2 m/s) và vận tốc âm thanh trong không khí khoảng 340 m/s, số Mach của dòng chảy được xác định theo (10):

$$M_a = \frac{V}{a} \approx 0,3 \quad (10)$$

Giá trị này tiệm cận ngưỡng $M_a = 0,3$, là giới hạn thường được sử dụng để phân biệt giữa dòng chảy không nén được và nén được. Khi số Mach đạt đến khoảng này, các hiệu ứng nén của không khí, bao gồm sự biến thiên mật độ và áp suất bắt đầu đóng vai trò quan trọng. Trong quá trình tàu đi vào đường hầm, không khí phía trước mũi tàu bị nén mạnh, dẫn đến sự hình thành và lan truyền của sóng áp suất. Hiện tượng này làm phát sinh các biến thiên đáng kể về áp suất, mật độ và năng lượng của dòng chảy, do đó việc sử dụng mô hình dòng chảy nén được là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy của kết quả mô phỏng.

Vì các lý do trên, mô hình dòng chảy nén được được áp dụng trong nghiên cứu, và hệ phương trình chi phối bao gồm phương trình liên tục, phương trình động lượng và phương trình năng lượng được sử dụng để mô tả đầy đủ đặc tính khí động học trong đường hầm.

2.3. Phương pháp số CFD

Phần mềm ANSYS Fluent được sử dụng để thực hiện các mô phỏng số trong nghiên cứu này. Trường dòng chảy bên trong đường hầm được mô phỏng bằng hệ phương trình Navier–Stokes trung bình theo Reynolds (RANS) kết hợp với mô hình rối RNG k- ε . Các phương trình chi phối được giải bằng phương pháp thể tích hữu hạn kết hợp với thuật toán SIMPLE để liên kết áp suất và vận tốc. Trong thuật toán này, trường vận tốc và áp suất

được giải theo dạng tách rời và được hiệu chỉnh thông qua phương trình hiệu chỉnh áp suất nhằm đảm bảo thỏa mãn phương trình liên tục. Quá trình lặp được thực hiện cho đến khi nghiệm hội tụ [19].

Các phương trình dòng chảy được rời rạc hóa bằng sơ đồ bậc hai cho áp suất và vận tốc. Phương pháp này giúp nâng cao độ chính xác tính toán và đã được áp dụng trong các nghiên cứu trước đây [20]. Tiêu chuẩn hội tụ được thiết lập thông qua giá trị dư của các phương trình liên tục, động lượng và năng lượng, lần lượt là 10^{-5} , 10^{-5} và 10^{-5} . Mô phỏng không ổn định được thực hiện với bước thời gian $\Delta t = 0,0005$ s. Số vòng lặp tối đa trong mỗi bước thời gian được đặt là 20 nhằm đảm bảo độ hội tụ của nghiệm tại từng thời điểm.

3. Mô hình hình học và miền tính toán

3.1. Mô hình hầm và các điểm bố trí theo dõi áp suất

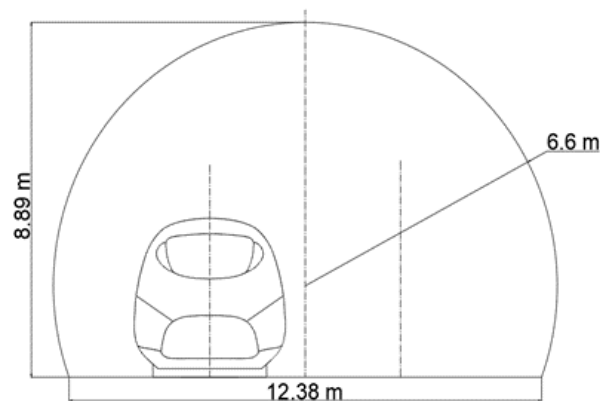
Trong nghiên cứu này, một mô hình đường hầm đường sắt cao tốc đường đôi điển hình tại Trung Quốc được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu [7]. Cấu hình hình học của đường hầm được minh họa trong Hình 1. Khoảng cách tâm giữa hai

đường ray trong đường hầm là 5,0 m. Diện tích của mặt cắt ngang và chiều dài hầm lần lượt là 100 m^2 và 1000 m.

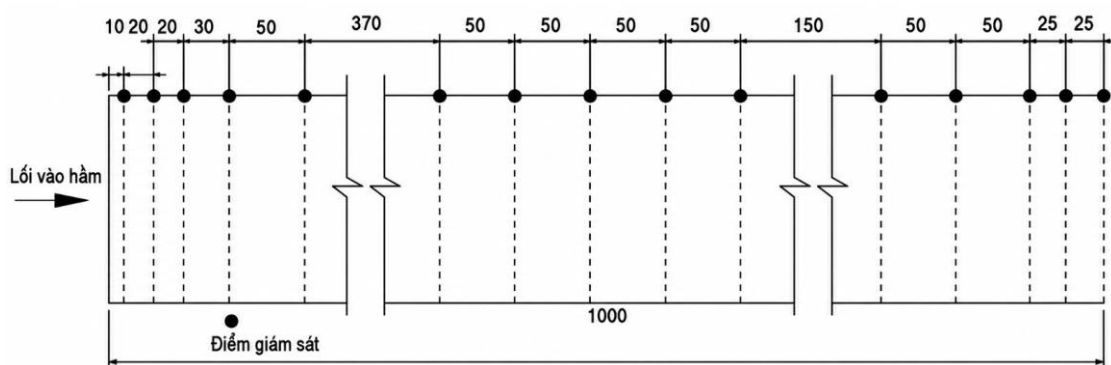
Hình 2 thể hiện bố trí các điểm quan trắc trong mặt phẳng dọc đường hầm. Tổng cộng bố trí 15 điểm đặt trên đỉnh dọc theo đường hầm. Các điểm tập trung dày hơn ở giai đoạn khi tàu đi vào cửa hầm để theo dõi diễn biến khi tàu đi vào hầm. Cơ sở thiết lập dựa trên các nghiên cứu trước đây [7].

3.2. Mô hình tàu cao tốc

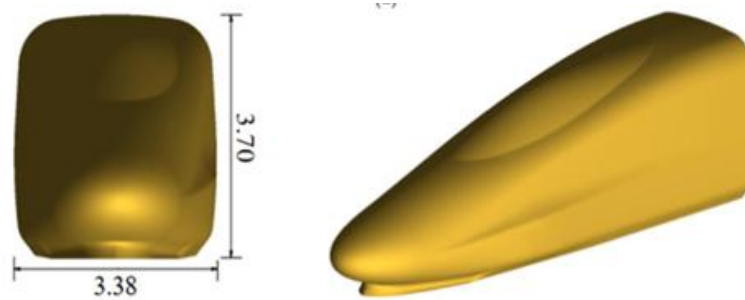
Trong nghiên cứu này, một mô hình tàu tương tự CRH380A được mô phỏng như Hình 3. Các bộ phận phụ trợ như cần lấy điện và các chi tiết ngoại vi khác không được xét đến do ảnh hưởng của chúng đến đặc tính khí động học là không đáng kể, đồng thời việc giản lược này giúp nâng cao hiệu quả tính toán. Diện tích mặt cắt ngang không đổi của thân tàu được xác định là $11,22 \text{ m}^2$, tương ứng với tỷ lệ tắc nghẽn của đường hầm là 0,11, và có chiều dài là 203 m [7]. Khi mô phỏng tính toán, tốc độ tàu thiết lập không đổi ở mức 350 km/h.



Hình 1. Thông số hình học hầm



Hình 2. Sơ đồ bố trí các điểm giám sát theo dõi áp suất



Hình 3. Mô hình tàu cao tốc CRH380A

3.3. Miền tính toán và thiết lập điều kiện biên

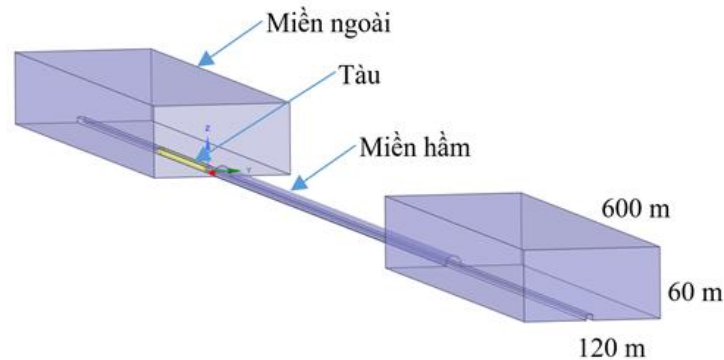
Miền tính toán

Miền tính toán của mô phỏng bao gồm một miền đường hầm và hai miền không gian bên ngoài, như được minh họa trong Hình 4.

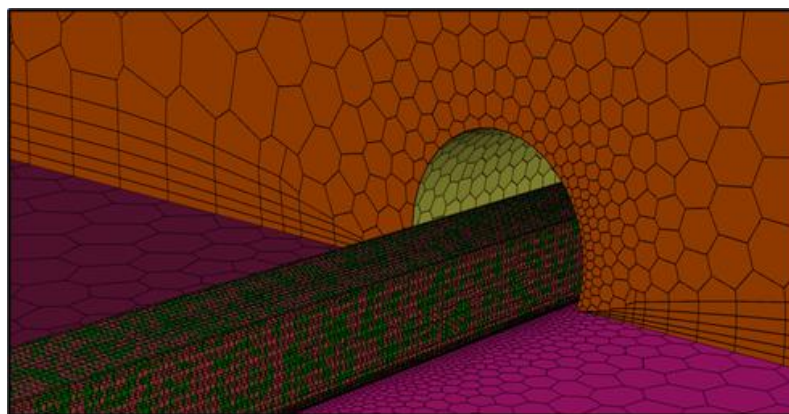
Hai miền bên ngoài được xây dựng dưới dạng các hình hộp chữ nhật có kích thước và hình dạng

giống nhau. Kích thước của các miền này được lựa chọn đủ lớn nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của điều kiện biên đến trường dòng chảy bên trong đường hầm [21].

Vị trí ban đầu của đoàn tàu được thiết lập cách cửa hầm 50 m về phía trước, phù hợp với các nghiên cứu trước đó [22], [23].



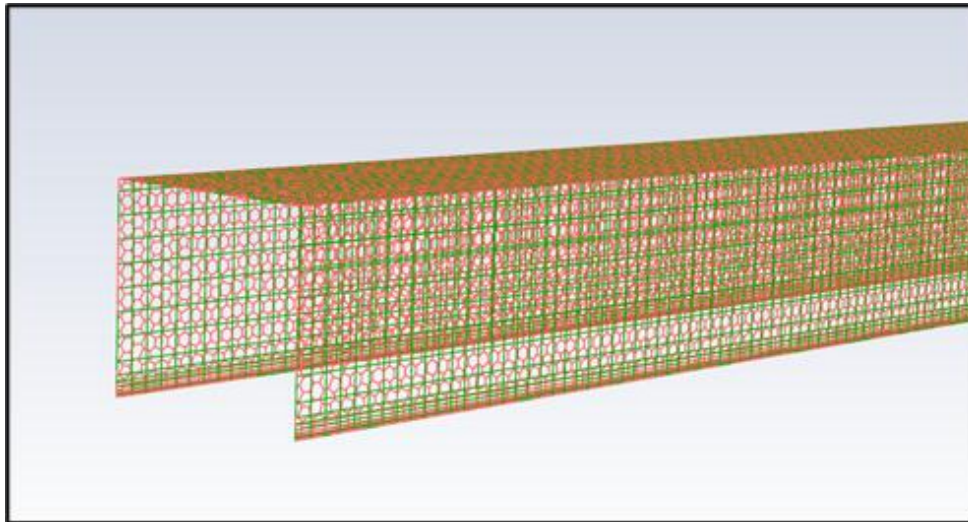
Hình 4. Miền tính toán mô phỏng bên ngoài và không gian hầm



Hình 5. Cấu trúc lưới khi thiết lập cho tàu và hầm

Lưới tính toán được xây dựng cho toàn bộ miền mô phỏng, bao gồm miền hầm tĩnh và miền tàu chuyển động được thể hiện ở Hình 5. Miền tàu được bố trí như một miền động bao quanh thân tàu và trượt dọc theo trục hầm trong quá trình tính toán, trong khi miền hầm và các miền trước, sau hầm được giữ cố định. Hình 6 thể hiện bề mặt tiếp

giáp giữa miền động và miền tĩnh được thiết lập dưới dạng mặt tiếp xúc (interface), bảo đảm trao đổi thông tin dòng chảy giữa hai miền. Bài toán được thiết lập dưới dạng không ổn định theo thời gian (transient), và chuyển động của miền tàu được xử lý bằng kỹ thuật lưới động (dynamic mesh) kết hợp phương pháp phân lớp (layering).



Hình 6. Bề mặt tiếp giáp giữa hai miền “interface”

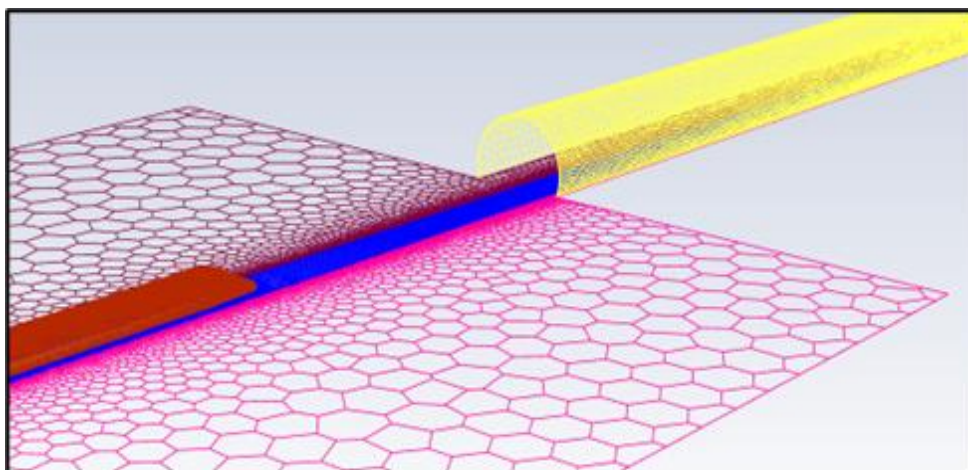
Lưới bề mặt được tinh chỉnh tại các khu vực có biến thiên hình học và gradient áp suất lớn, như mũi tàu, cửa hầm và khe giữa tàu với thành hầm, với kích thước phần tử nhỏ nhất khoảng 20 mm và lớn nhất khoảng 500 mm, hệ số tăng trưởng lưới 1,2. Lưới thể tích sử dụng phần tử polyhedral nhằm nâng cao chất lượng lưới và độ ổn định hội tụ. Tại các bề mặt tường, lưới lớp biên dạng prism layer được tạo với 10 lớp và hệ số tăng trưởng 1,2 để mô tả lớp biên dòng chảy gần tường. Đối với miền tàu chuyển động, lưới được tăng thêm theo hướng chuyển động phù hợp với chiều dài thực tế trước và sau miền tàu, hệ số tăng trưởng 1,0, nhằm tương thích với phương pháp layering và bảo đảm chất lượng lưới trong quá trình mô phỏng.

Điều kiện biên

Các điều kiện biên trong mô phỏng được thiết lập nhằm phản ánh môi trường khí động trong và

ngoài hầm, đồng thời hạn chế ảnh hưởng của phản xạ sóng áp suất tại biên tính toán. Cụ thể, tại các biên của miền ngoài, điều kiện biên áp suất được thiết lập áp suất đầu vào/ áp suất đầu ra (pressure inlet/ pressure outlet) với áp suất dư (gauge pressure) bằng 0 Pa. Cách thiết lập này cho phép dòng chảy trao đổi với môi trường bên ngoài một cách tự nhiên và giảm thiểu sai lệch.

Thành hầm và bề mặt tàu được xem là nhẵn, nhằm mô tả ảnh hưởng của độ nhớt lên dòng chảy mà không xét đến độ nhám bề mặt. Các bề mặt phía dưới của miền tính toán cũng được mô hình hóa như điều kiện tường, đại diện cho mặt đất thể hiện ở Hình 7. Chuyển động của tàu được mô phỏng thông qua phương pháp lưới động, trong đó tàu chuyển động với vận tốc không đổi dọc theo trục hầm nhằm thể hiện rõ quá trình hình thành và lan truyền sóng áp suất theo thời gian.



Hình 7. Các bề mặt khi thiết lập điều kiện tường

Tại thời điểm ban đầu, không khí trong toàn bộ miền tính toán được giả thiết đứng yên với vận tốc bằng 0 km/h và đồng đều, tương ứng với áp suất dư bằng 0 Pa trong mô phỏng.

4. Kết quả

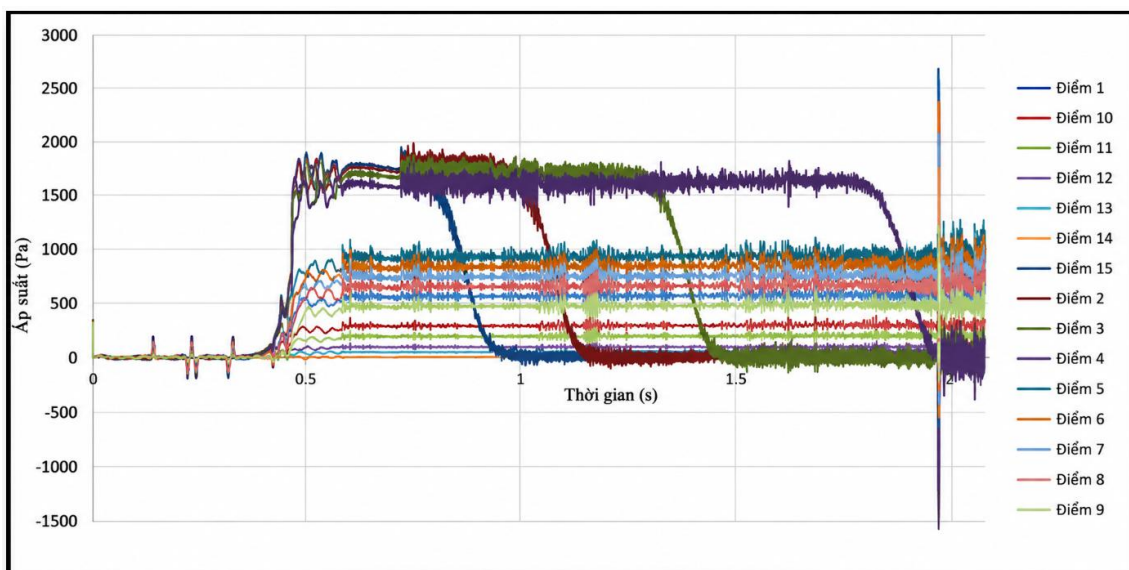
4.1. Áp suất khí động theo thời gian khi tàu đi vào hầm

Hình 8 trình bày biến thiên áp suất theo thời gian tại các điểm đo dọc theo chiều dài hầm khi đoàn tàu di chuyển từ ngoài vào trong hầm.

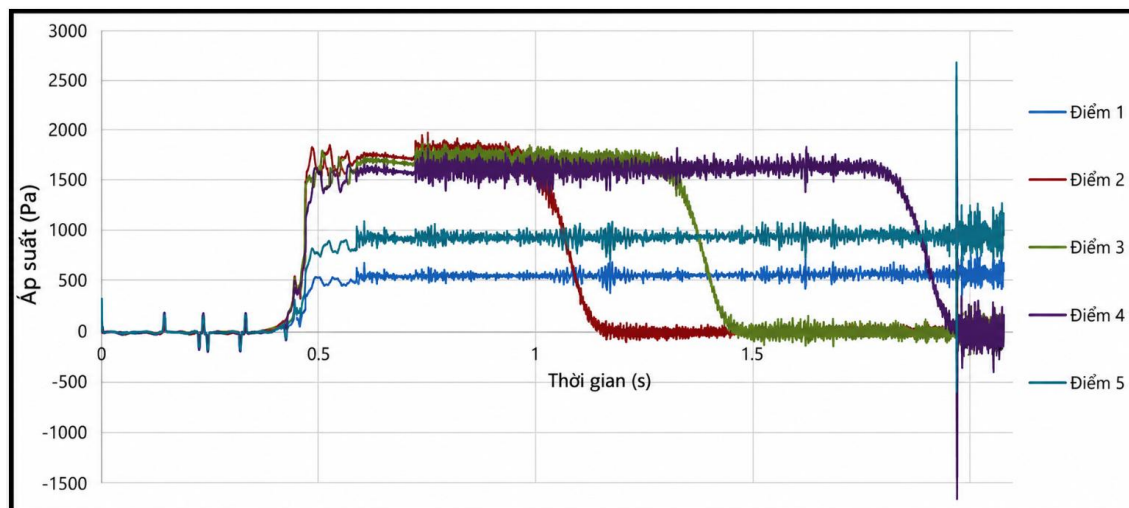
Kết quả cho thấy quá trình biến thiên áp suất có thể chia thành ba giai đoạn chính: giai đoạn

trước khi tàu vào hầm; giai đoạn tàu bắt đầu vào hầm và hình thành sóng nén ban đầu; và giai đoạn sóng áp suất lan truyền trong hầm.

Trước khi tàu đi vào hầm $t < 0,45$ s, áp suất tại các điểm đo dao động quanh giá trị ban đầu với biên độ dao động trong khoảng ± 50 Pa. Tuy nhiên, tại một số thời điểm xuất hiện các đỉnh áp suất cực bộ có thể đạt tới khoảng 150 - 200 Pa. Các dao động này tương đương khoảng 8 - 12% so với áp suất cực đại trong hầm và chủ yếu do nhiễu dòng, sự thay đổi trường dòng khí khi đoàn tàu tiến gần đến cửa hầm nhưng chưa đi vào trong hầm.



Hình 8. Kết quả mô phỏng áp suất tại các vị trí theo dõi



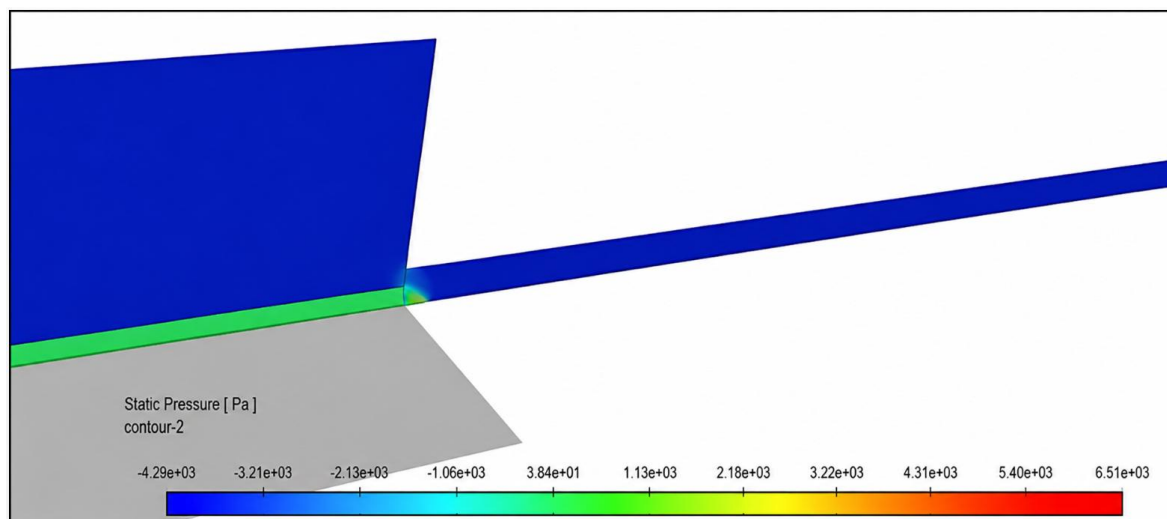
Hình 9. Áp suất các điểm theo dõi khi tàu đi vào hầm

Quan sát các điểm giám sát ở vị trí đầu cửa hầm thể hiện ở Hình 9, áp suất tăng lên một cách nhanh chóng. Áp suất tại các điểm gần cửa hầm

tăng từ khoảng 100 –200 Pa lên khoảng 1600 – 1800 Pa, tương đương mức tăng khoảng 800%. Như vậy, trong thời gian khoảng 0,5s khi mũi tàu đi

vào hầm, áp suất trong hầm tăng khoảng 7 - 9 lần so với trạng thái ngay trước khi tàu vào hầm. Điều này cho thấy hiệu ứng piston khi tàu đi vào hầm là rõ rệt và là nguyên nhân chính tạo ra sóng nén ban đầu trong hầm.

Các kết quả trên Hình 10 và cả quá trình mô phỏng cho thấy vùng có áp suất cao trong và khi sóng áp suất lan truyền sâu vào trong hầm và biên độ áp suất giảm dần khoảng 80 - 90%, vận tốc dòng khí giảm tương ứng.



Hình 10. Phân bố áp suất khi tàu đi vào hầm

4.2. So sánh áp suất cực đại giữa các vị trí trong hầm

Áp suất cực đại tại các điểm đo dọc theo hầm có xu hướng giảm dần theo khoảng cách từ cửa hầm. Cụ thể, áp suất cực đại tại các điểm đặc trưng được trình bày theo Bảng 1.

So sánh với áp suất cực đại tại cửa hầm, áp

suất cực đại giảm khoảng 25 – 30% tại khu vực cách cửa hầm 100 – 150 m, khoảng 40 – 50 % tại khu vực giữa hầm và khoảng 80 – 90 % tại khu vực cuối đường hầm. Điều này cho thấy năng lượng của sóng áp suất bị suy hao đáng kể khi lan truyền dọc theo hầm do ma sát với thành hầm và tổn thất năng lượng do nhiễu loạn dòng khí.

Bảng 1. Áp suất cực đại phân bố tại các điểm theo dõi

Điểm	Áp suất cực đại (Pa)
Điểm 2 - 3	~ 1800
Điểm 4 - 6	~ 1300 - 1650
Điểm 7 - 9	~ 900 - 1100
Điểm 9 - 11	~ 300 - 800
Điểm 12 - 15	~ 150 - 300

4.3. Đánh giá tác động sóng áp suất lên môi trường hầm

Ở giai đoạn đi vào cửa hầm, sự hình thành sóng nén ban đầu làm áp suất trong khu vực gần cửa hầm tăng nhanh trong thời gian rất ngắn chỉ trong khoảng 0,1 – 0,15s. Sự biến thiên áp suất lớn với độ dốc cao có thể tạo ra tải khí động đáng kể lên lớp lót hầm và các kết cấu lắp đặt gần cửa hầm như hệ thống cáp điện, giá đỡ dây tiếp xúc và các

thiết bị treo trong hầm.

Ngoài ra, khi sóng nén lan truyền trong hầm, áp suất tại khu vực giữa hầm vẫn duy trì ở mức khoảng 900 – 1200 Pa, tương đương khoảng 50 – 65% áp suất cực đại gần cửa hầm. Sự chênh lệch áp suất này làm dòng khí trong hầm chuyển động dọc theo chiều dài hầm, từ đó làm gia tăng lực khí động tác dụng lên các cấu kiện nhẹ, các thiết bị kỹ thuật và hệ thống lắp đặt trong hầm. Mặc dù giá trị

áp suất tuyệt đối không quá lớn so với khả năng chịu lực của kết cấu bê tông, nhưng tải trọng khí động dạng xung và lặp lại nhiều lần khi tàu đi qua có thể gây rung động cục bộ và ảnh hưởng đến độ bền mỏi của các thiết bị lắp đặt trong hầm.

Đối với hành khách trên tàu, sự thay đổi áp suất đột ngột khi tàu đi vào hầm cũng có thể gây ra cảm giác khó chịu do chênh lệch áp suất giữa bên trong và bên ngoài toa tàu. Trong trường hợp hệ thống điều áp của toa tàu không đủ hiệu quả, sự thay đổi áp suất trong thời gian rất ngắn có thể gây ra cảm giác khó chịu cho hành khách. Do đó, việc đánh giá mức độ biến thiên áp suất và tốc độ biến thiên áp suất theo thời gian đóng vai trò quan trọng trong thiết kế khí động học của tàu và thiết kế kết cấu hầm.

5. Kết luận

Từ kết quả mô phỏng CFD đối với trường hợp tàu cao tốc di chuyển vào đường hầm với vận tốc 350 km/h, có thể rút ra một số kết luận như sau:

(1) Khi mũi tàu bắt đầu đi vào cửa hầm, sóng nén ban đầu được hình thành và tạo ra đỉnh áp suất lớn nhất tại khu vực gần cửa hầm. Giá trị áp suất cực đại tại vị trí này cao hơn khoảng 7–9 lần so với trạng thái trước khi tàu đi vào hầm, cho thấy giai đoạn đi vào hầm là thời điểm xuất hiện biến thiên áp suất lớn nhất trong điều kiện mô phỏng đã xét.

(2) Áp suất giảm dần theo chiều dài hầm khi sóng nén lan truyền, với mức giảm khoảng 35–45% tại khu vực giữa hầm và khoảng 80–90% tại khu vực cuối hầm so với khu vực gần cửa hầm. Tuy nhiên, dao động áp suất vẫn được duy trì trong suốt quá trình lan truyền của sóng.

(3) Kết quả phân bố áp suất cho thấy sự hình thành gradient áp suất trong hầm, kéo theo chuyển động của dòng khí dọc theo chiều dài hầm dưới tác động của hiệu ứng piston. Hiện tượng này làm thay đổi trường áp suất và trường vận tốc của dòng khí trong miền tính toán.

Nghiên cứu này mới chỉ xem xét một điều kiện vận hành và một mô hình hình học cụ thể. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình cần được mở rộng cho các vận tốc khai thác, hình dạng mũi

tàu và chiều dài hầm khác nhau, đồng thời đối chiếu với dữ liệu thực nghiệm nhằm đánh giá và nâng cao độ tin cậy của mô hình mô phỏng.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, các tác giả đã sử dụng ChatGPT của OpenAI nhằm hỗ trợ hiệu chỉnh cách diễn đạt, cải thiện tính rõ ràng, mạch lạc một phần của bản thảo. Sau khi sử dụng công cụ AI tạo sinh, các tác giả đã kiểm tra, rà soát, chỉnh sửa và xác minh toàn bộ nội dung khi cần thiết, đồng thời chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên gốc, các kết quả nghiên cứu, nội dung khoa học và phiên bản cuối cùng của bài báo được công bố.

Tài liệu tham khảo

- [1] C. Baker. (2010). The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(6–7), 277–298. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.11.002>
- [2] J. Du, L. Zhang, M. Yang, F. Wu, K. Li. (2020). Moving model experiments on transient pressure induced by a high-speed train passing through noise barrier. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 204, 104267. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104267>
- [3] K. Wei, Y. Mei, Q. Sun, X. Hu. (2024). Propagation characteristics of initial compression wave induced by 400 km/h high-speed trains passing through very long tunnels. *Applied Sciences*, 14(13), 5946. <https://doi.org/10.3390/app14135946>
- [4] Z. Liu, F. Liu, S. Yao, D. Chen, M. Yang. (2023). Research on numerical simulation of transient pressure for high-speed train passing through the most unfavourable length tunnel. *Transportation Safety and Environment*, 5(3), tdac059. <https://doi.org/10.1093/tse/tdac059>
- [5] H.B. Kwon, S.H. Yun, S.W. Nam. (2012). Numerical simulation of pressure change inside cabin of a train passing through a tunnel. *Journal of Computational Fluids Engineering*,

- 17(1), 23-28. <https://doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.1.023>
- [6] T. Liu, Z. Jiang, X. Chen, J. Zhang, X. Liang. (2019). Wave effects in a realistic tunnel induced by the passage of high-speed trains. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.023>
- [7] J. Du, Q. Fang, J. Wang, G. Wang. (2022). Influences of high-speed train speed on tunnel aerodynamic pressures. *Applied Sciences*, 12(1), 303. <https://doi.org/10.3390/app12010303>
- [8] Y. Xie, Q. Li, F. Jiang. (2023). CFD investigation of the unsteady airflow and pressure characteristics in the underground highway station with the train passing. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(3), 1268–1283. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2077737>
- [9] X. Duan, Y. Mei, X. Hu, C. Qi. (2024). Influence of speed and line spacing on aerodynamic forces in high speed train passing in tunnels. *Scientific Reports*, 14(1), 26814. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78046-6>
- [10] Z. Shu, H. Wang, X. He, Z. Li, P. Deng. (2026). Aerodynamic effects of high-speed trains passing through tunnels on the fatigue performance of catenary anchorage structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 168, 107226. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107226>
- [11] B. Mu, C. Chen, L. Yang. (2025). Model of interior pressure fluctuation in high-speed trains considering the dynamic characteristics of variable air volume systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 258, 106021. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2025.106021>
- [12] C. Li, M. Liu, R. Chang, X. Wang, W. Liu, H. Zhang. (2022). Air pressure and comfort study of the high-speed train passing through the subway station. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103881. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103881>
- [13] P. Galvín, J. Domínguez. (2007). High-speed train-induced ground motion and interaction with structures. *Journal of Sound and Vibration*, 307(3–5), 755–777. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.07.017>
- [14] M. Rabani, A.K. Faghih. (2015). Numerical analysis of airflow around a passenger train entering the tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.005>
- [15] Q. Fang, D. Zhang, Q. Li, L.N.Y. Wong. (2015). Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.001>
- [16] W. Yang, E. Deng, M. Lei, P. Zhang, R. Yin. (2018). Flow structure and aerodynamic behavior evolution during train entering tunnel with entrance in crosswind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 229–243. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.018>
- [17] T.-H. Liu, X.-D. Chen, W.-H. Li, T.-Z. Xie, Z.-W. Chen. (2017). Field study on the interior pressure variations in high-speed trains passing through tunnels of different lengths. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 169, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.07.004>
- [18] C.-R. Chu, S.-Y. Chien, C.-Y. Wang, T.-R. Wu. (2014). Numerical simulation of two trains intersecting in a tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 161–174. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.02.013>
- [19] Y. Huang, W. Gao, C.-N. Kim. (2010). A numerical study of the train-induced unsteady airflow in a subway tunnel with natural ventilation ducts using the dynamic layering method. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 22(2), 164–172. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60042-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60042-1)

- [20] T. Liu, S. Geng, X. Chen, S. Krajnović. (2020). Numerical analysis on the dynamic airtightness of a railway vehicle passing through tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103286. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103286>
- [21] J. Niu, Y. Sui, Q. Yu, X. Cao, Y. Yuan. (2019). Numerical study on the impact of Mach number on the coupling effect of aerodynamic heating and aerodynamic pressure caused by a tube train. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 190, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.04.001>
- [22] T. Liu, Z. Chen, X. Chen, T. Xie, J. Zhang. (2017). Transient loads and their influence on the dynamic responses of trains in a tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 66, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.04.009>
- [23] Z. Jiang, T. Liu, X. Chen, W. Li, Z. Guo, J. Niu. (2019). Numerical prediction of the slipstream caused by the trains with different marshalling forms entering a tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 189, 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.04.002>