



Analisi aerodinamica di un treno ad alta velocità utilizzando la tecnica fluidodinamica computazionale

Aerodynamic analysis of a high-speed train using computational fluid dynamics technique

Mohamad BARHM ^(*)
 Ali Mohammed QASIM ^(**)
 Galoyan KARLEN ^(***)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.09.2023.ART.1>)

Sommario - È stata condotta un'analisi del campo di fluidodinamica utilizzando la simulazione CFD per migliorare le prestazioni aerodinamiche e ridurre il coefficiente di resistenza dei treni per le elevate velocità. Un confronto tra due diverse geometrie ha rivelato ampie zone ad elevata variabilità nella parte anteriore e nelle carrozze, con conseguente bassa pressione e turbolenza. Sono stati proposti metodi di ottimizzazione per migliorare le prestazioni aerodinamiche e ridurre il coefficiente di resistenza. Lo studio dimostra la distribuzione delle forze aerodinamiche sulle carrozze dei treni e l'impatto del vento trasversale sui coefficienti aerodinamici. I risultati indicano che la modifica del modello della parte anteriore del treno riduce la turbolenza, migliora le prestazioni aerodinamiche, diminuisce la separazione del flusso e riduce il coefficiente di resistenza fino al 47% all'aria aperta e al 67% nelle gallerie. Questi risultati contribuiscono a ottimizzare il campo fluidodinamico del treno.

1. Introduzione

L'aerodinamica dei treni ad alta velocità è una scienza di base per risolvere il problema essenziale dello sviluppo di questi mezzi di trasporto. Quando il treno viaggia ad alta velocità, la resistenza dell'aria diventerà la resistenza più significativa. È molto importante studiare le caratteristiche aerodinamiche del treno, che influenzano direttamente la trazione, la stabilità di marcia, il comfort e la sicurezza del treno. Allo stato attuale, le letterature nazio-

Summary - A flow field analysis was conducted using CFD simulation to improve the aerodynamic performance and reduce drag coefficient of high-speed trains. A comparison of two different front shapes revealed extensive separation zones in the front and cabins, resulting in low pressure and air backflow. Optimization methods were proposed to enhance aerodynamic performance and reduce drag coefficient. The study demonstrates the distribution of aerodynamic forces on train cabins and the impact of crosswind on aerodynamic coefficients. Results indicate that reshaping the train's front reduces reversed flow, improves aerodynamic performance, decreases flow separation, and lowers drag coefficient by up to 47% in open air and 67% in tunnels. These findings contribute to optimizing the train's flow field.

1. Introduction

High-speed train aerodynamics is the key basic science to solve the essential problem of the development. When the train is running at high speed, air resistance will become the most important resistance. It is great significant to study the aerodynamic characteristics of the train, which directly affect the power supply, handling stability, comfort and safety of the train. At present, the national and international literatures on the aerodynamics of ordinary passenger trains are very mature, there are few interested researches, mainly focusing on the following aspects. G.J. GAO et al. [1] Investigated the flow characteristics and their effects on the snow

^(*) Dipartimento di Tecnologia Petrolifera, Koya Technical Institute, Erbil Polytechnic University, 44001 Erbil, Iraq - E-mail: barhm.mohamad@epu.edu.iq.

^(**) Dipartimento Istruzione Professionale, Ministero dell'Istruzione, Babel, Iraq - E-mail: mmm18926@gmail.com.

^(***) Dipartimento di Aerodinamica dei Velivoli, Istituto di Aviazione Mosca (Università Nazionale della Ricerca), 125993 Mosca, Russia - E-mail: karlen910@gmail.com.

^(*) Department of Petroleum Technology, Koya Technical Institute, Erbil Polytechnic University, 44001 Erbil, Iraq - E-mail: barhm.mohamad@epu.edu.iq.

^(**) Vocational Education Department, Ministry of Education, Babel, Iraq - E-mail: mmm18926@gmail.com.

^(***) Department of Aircraft Aerodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), 125993 Moscow, Russia - E-mail: karlen910@gmail.com.

nali e internazionali sull'aerodinamica dei treni passeggeri ordinari non sono aggiornate, ci sono poche ricerche interessate, concentrandosi principalmente sui seguenti aspetti. G.J. GAO *et al.* [1] hanno studiato le caratteristiche di flusso e i loro effetti sull'accumulazione della neve intorno alle zone dei carrelli di un treno ad alta velocità utilizzando una simulazione IDDES (*Improved Delayed Detached Eddy*). WEIDNER *et al.* [2] hanno utilizzato il CFD per studiare un modello di treno a due carrozze con diverse simulazioni di fondazione. Intanto le differenze di resistenza assoluta sono state monitorate tra le misurazioni del terreno in movimento e statiche. ZHANG *et al.* [3] ha anche utilizzato un modello di treno a tre carrozze: ha simulato la presenza di un terreno fermo e un terreno in movimento e ha valutato in che modo le ruote in rotazione influenzano il comportamento del terreno durante il movimento. La differenza di resistenza tra il comportamento del terreno con transito e quello fermo per la prima vettura era solo di due unità di resistenza, ma la resistenza complessiva è superiore del 6% se il terreno risulta in movimento.

2. Simulazione numerica

È stata applicata una condizione di limite di simmetria alla superficie superiore del dominio AEFB (*Aerodynamic External Fluid Border*). Il flusso atteso ha un effetto dominante sui risultati numerici delle caratteristiche di flusso intorno alla zona anteriore del treno all'aria aperta. Nel presente studio, le caratteristiche del flusso principale sono state caratterizzate mediante dall'energia cinetica turbolenta, k , e dalla velocità di dissipazione turbolenta ε . Sia l'energia cinetica turbolenta (TKE) che il tasso di dissipazione turbolenta sono stati calcolati dall'Eq. (1) e (2), rispettivamente:

$$k = \frac{3}{2} (IU_{ref})^2 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{0.5}}{(0.07H \cdot C_e^{0.25})} \quad (2)$$

dove la velocità media della risultante delle componenti del vento, U_{ref} , è in m/s ; I , l'intensità della turbolenza, è stata considerata pari all'1%; la lunghezza caratteristica, H è in m e C_e è una costante empirica. Il tunnel con la lunghezza più sfavorevole di $20 \times 10^4 mm$ è stato considerato per il treno regionale; queste lunghezze sono calcolate con le Eq. (3) e (4), rispettivamente da LIU *et al.* [4]:

$$L_{tl} = \frac{1+Ma}{Ma} L_{tr} \quad (3)$$

$$L_{tl} = \frac{1+Ma}{2Ma(1-Ma)} L_{tr} \quad (4)$$

dove $Ma = U_t/c$; Ma è il numero di Mach del treno; U_t è la velocità del treno; c è la velocità del suono locale, che in questo caso è $340m/s$; L_{tr} è la lunghezza del treno e L_{tl} è la

accretion around the bogie regions of a high-speed train using an Improved Delayed Detached Eddy simulation (IDDES). WEIDNER et al. [2] used CFD to investigate a two-car train model with different ground simulations. While the absolute drag differences were monitored between moving and static ground measurements. ZHANG et al. [3] also used a three-car train model. They simulated using a stationary ground and a moving ground and assessed how rotating wheels affect the moving ground results. The difference in drag between moving and static ground for the first car was only two drag counts, but the overall drag was 6% higher using the moving ground.

2. Numerical simulation

A symmetry boundary condition was applied to the upper surface of the domain AEFB. The expected flow has a dominant effect on the numerical results of flow characteristics around the train front region in open air. In present study, the features of the premier flow were simulated by the turbulent kinetics energy, k , and the turbulent dissipation rate, ε . Both of turbulent kinetics energy (TKE) and turbulent dissipation rate were calculated by Eq. (1) and (2), respectively:

$$k = \frac{3}{2} (IU_{ref})^2 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{0.5}}{(0.07H \cdot C_e^{0.25})} \quad (2)$$

where the average speed of the composed wind, U_{ref} , in m/s ; I , the turbulence intensity, was considered to be 1%; the characteristic length, H , in m ; and the empirical constant, C_e . The tunnel with the most unfavourable length is $20 \times 10^4 mm$ was considered for the regional train, respectively; these lengths are calculated by Eq. (3) and (4), respectively LIU *et al.* [4]:

$$L_{tl} = \frac{1+Ma}{Ma} L_{tr} \quad (3)$$

$$L_{tl} = \frac{1+Ma}{2Ma(1-Ma)} L_{tr} \quad (4)$$

where $Ma = U_t/c$; Ma is the Mach number of the train; U_t is the train speed; c is the local sound velocity, which is $340m/s$ in this case; L_{tr} is the train length; and L_{tl} is the tunnel length. The aerodynamic forces and pressure coefficients are applied as follows [5]:

$$C_x = \frac{F_x}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (5)$$

$$C_y = \frac{F_y}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (6)$$

lunghezza del tunnel. Le forze aerodinamiche e i coefficienti di pressione sono applicati come segue [5]:

$$C_x = \frac{F_x}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (5)$$

$$C_y = \frac{F_y}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (6)$$

$$C_z = \frac{F_z}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (7)$$

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (8)$$

dove F_x , F_y e F_z sono la resistenza media, la forza laterale e il sollevamento, rispettivamente, e P è la pressione statica locale. Inoltre, C_x , C_y , C_z sono rispettivamente il coefficiente medio di resistenza, il coefficiente di forza laterale, il coefficiente di portanza. C_p è il coefficiente medio di pressione. Inoltre, la pressione di riferimento P_∞ è stata considerata pari a 0 Pa; la densità dell'aria, ρ , è stata considerata pari a 1,225 kg/m³; e la velocità della risultante delle componenti del vento composto, U_{ref} , è in m/s. Inoltre, l'area di riferimento, A_{ref} , è stata considerata pari a 6,220146 m².

Nel caso di un treno che passa attraverso un tunnel in cui la compressibilità svolge un ruolo importante, il numero di Mach non è in genere sufficientemente basso da giustificare l'uso delle equazioni per condizioni di incomprimibilità. Il movimento del treno crea variazioni di pressione ed effetti di comprimibilità nell'aria circostante, rendendo il flusso significativamente non isotermico e comprimibile. Pertanto, per una rappresentazione precisa della dinamica del flusso, sono state applicate le equazioni comprimibili di Navier-Stokes. Le equazioni comprimibili di Navier-Stokes descrivono il comportamento di un fluido comprimibile, tenendo conto sia della conservazione della massa (equazione di continuità) che della conservazione della quantità di moto (equazione della quantità di moto) insieme agli effetti della viscosità e della conduttività termica. Queste equazioni derivano dalle leggi fondamentali della meccanica dei fluidi.

Le equazioni comprimibili di Navier-Stokes per un flusso tridimensionale possono essere riportate come:

- Equazione di continuità:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho y_i = 0 \quad (9)$$

- Equazioni di momentum:

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho y_i y_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho y'_i y'_j) \quad (10)$$

- Equazione dell'energia:

$$C_z = \frac{F_z}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (7)$$

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5\rho U_{ref}^2 A_{ref}} \quad (8)$$

where F_x , F_y , and F_z are the mean drag, lateral force and lift, respectively, and P is the local static pressure. Further, C_x , C_y , and C_z are the mean drag coefficient, lateral force coefficient, and lift coefficient, respectively, and C_p is the mean pressure coefficient. Moreover, the reference pressure P_∞ was considered to be 0 Pa; air density, ρ , was considered to be 1.225 kg/m³; and velocity of composed wind, U_{ref} , in m/s. Further, the reference area, A_{ref} , was considered to be 6.220146 m².

In the case of a train passing through a tunnel where compressibility plays a significant role, the Mach number is generally not low enough to justify using the incompressible equations. The motion of the train creates pressure variations and compressibility effects in the surrounding air, making the flow significantly non-isothermal and compressible. Therefore, for an accurate representation of the flow dynamics, the compressible Navier-Stokes equations were applied. The compressible Navier-Stokes equations describe the behaviour of a compressible fluid, taking into account both the conservation of mass (continuity equation) and the conservation of momentum (momentum equation) along with the effects of viscosity and thermal conductivity. These equations are derived from the fundamental laws of fluid mechanics.

The compressible Navier-Stokes equations for a three-dimensional flow can be written as:

- Continuity equation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho y_i = 0 \quad (9)$$

- Momentum equations:

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho y_i y_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho y'_i y'_j) \quad (10)$$

- Energy equation:

$$\rho \left[\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E y) \right] = -\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (11)$$

where ρ represents the fluid density; t denotes time; y is the velocity vector; y' is the pulsating velocity, the subscripts i , $j=1,2,3$ represent the x , y , z directions respectively; p is the pressure; g is the gravitational acceleration; τ is the stress tensor; E is the total energy per unit volume; k is the thermal conductivity; T is the temperature, and q is the heat source term.

These equations are nonlinear and coupled, making their analytical solution difficult in most cases. As a result, numerical methods and computational fluid dynamics

$$\rho \left[\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E\mathbf{y}) \right] = -\frac{DP}{Dt} + \nabla \cdot (k\nabla T) + q \quad (11)$$

dove ρ rappresenta la densità del fluido; t indica il tempo, \mathbf{y} è il vettore di velocità, \mathbf{y}' è la velocità pulsante, i pedici $i, j = 1, 2, 3$ rappresentano rispettivamente le direzioni x, y, z , p è la pressione, g è l'accelerazione gravitazionale, τ è il tensore di tensione, E è l'energia totale per unità di volume, k è la conducibilità termica; T è la temperatura e q è il termine della fonte di calore.

Queste equazioni sono non lineari e accoppiate, rendendo la loro soluzione analitica difficile nella maggior parte dei casi. Di conseguenza, i metodi numerici e le tecniche di fluidodinamica computazionale (CFD) sono comunemente impiegati per risolverli per applicazioni pratiche di ingegneria.

2.1. Modello e caso di studio

In questo studio, un treno regionale è stato impiegato come modello per le simulazioni numeriche, illustrato nella Fig. 1(a). Come illustrato nella Fig. 1(b), il modello impiegato per le simulazioni numeriche è stato semplificato secondo le norme CEN [6] e [7]. La dimensione del treno è presentata nella Fig. 2; la lunghezza (L) e l'altezza (H) di un modello in scala del treno sono state fissate rispettivamente a 50491 mm e 4596,19 mm.

2.2. Condizioni di contorno

Le condizioni al contorno per il dominio computazionale sono presentate nella Fig. 2. I valori di riferimento e le condizioni dell'aria sono: velocità dell'aria 40 m/s, pressione di riferimento era 101325 Pa, e la temperatura di ri-

(CFD) techniques are commonly employed to solve them for practical engineering applications.

2.1. Model and case

In this study, regional train was employed as the model for numerical simulations, which is illustrated in Fig. 1(a). As illustrated in Fig. 1(b), the model employed for numerical simulations was simplified in accordance with the CEN standards [6] and [7]. The size of the train is presented in Fig. 2; the length (L) and height (H) of a scaled model of the train were 50491mm and 4596.19mm, respectively.

2.2. Boundary conditions

The boundary condition for the computational domain is presented as Fig. 2. The reference values and air conditions as follows; Air speed 40 m/s, ref. pressure was 101325 Pa, and reference temperature was 288.15 K. In order to develop a wake-flow the computational domain length behind the train must be larger than in front of the train as well as the width of the computational domain for developing the vortex shedding from the train in the cases with wind tunnel.

2.3. Grid generation

2.3.1 Regional train

CAD Model imported directly into ANSYS Workbench Design Modeler as a STEP file. Fluid volume is created using the Design Modeler Fill operation and converting start point and endpoint surfaces. Meshing was performed using Fluent method available within the framework of the ANSYS mesh generator. The mesh is adjusted to the tetrahe-



(a)



(b)

Figura 1 – Treno regionale selezionato per questo studio. (a) Il treno nella realtà - (b) Il modello del treno implementato nelle simulazioni numeriche.

Figure 1 – Regional train in this study. (a) The train in reality - (b) The train model implemented in numerical simulations.

ferimento era 288,15 K. Al fine di sviluppare un flusso di scia, la lunghezza del dominio computazionale dietro il treno deve essere maggiore di quella di fronte al treno, nonché la larghezza del dominio computazionale per lo sviluppo del vortice della vorticità lungo il treno nei casi con tunnel del vento.

2.3 Generazione della meshatura

2.3.1 Treno regionale

Modello CAD è importato direttamente in ANSYS *Workbench Design Modeler* come file STEP. Il volume del fluido viene creato utilizzando l'operazione di riempimento del modellatore di progettazione e convertendo le superfici del punto iniziale e del punto finale. La soluzione Transiente è stata eseguita utilizzando il metodo *Fluent* disponibile nell'ambito del generatore di mesh di ANSYS. La *mesh* è formata da tetraedri ed è stata applicata sul modello con 5 363 986 elementi e 2 279 801 nodi, (Fig. 3). Il coefficiente di resistenza all'aperto è stato posto pari a 0,857 e in galleria pari a 1,672 con dimensione in scala.

2.3.2. Treno ottimizzato

I dati post-elaborazione sono stati importati direttamente nella funzione di ottimizzazione della topologia ANSYS, all'interno di uno spazio definito da superfici di delimitazione, migliorano la zona di alternanza della pressione e l'uniformità della velocità ed esportano il design ottimizzato come un file .STL. La lunghezza del treno suggerita di 5120,5 mm è stata presa in considerazione per l'analisi aerodinamica; per la lunghezza del tunnel è stata fissata la distanza di 20×10^3 mm. La rete tetraedrica è stata applicata sul modello ottimizzato (Fig. 4) con 1.600.000 elementi finiti. Il coefficiente di resistenza all'aperto è stato pari a 0,38 e in galleria pari a 0,55 con dimensione in scala.

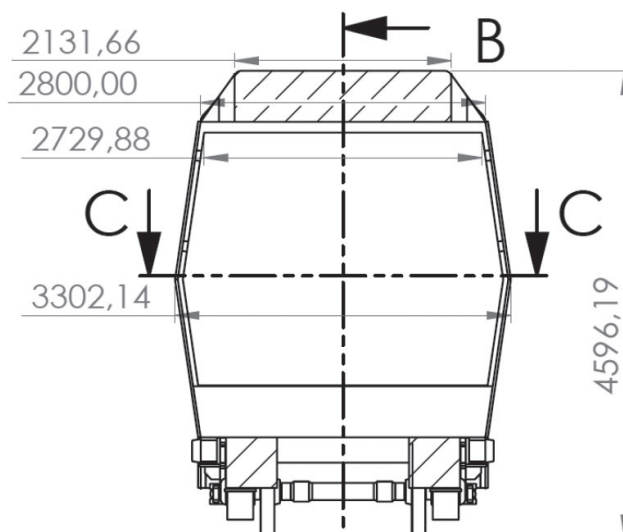


Figura 2 – Dimensioni del modello di treno regionale.
Figure 2 – Size of the regional train model.

dral mesh was applied on the model with 5 363 986 cells and 2 279 801 nodes, as shows in Fig. 3. The drag coefficient in open air was equal to 0.857 and in tunnel equal to 1.672 with scaled dimension.

2.3.2 Optimized train

Post-process data imported directly into ANSYS topology optimization function. within a space defined by imported bounding surfaces, improve the pressure alternating zone and the velocity uniformity, and export the improved design as an .STL file. The suggested train length 5120.5 mm was considered for the aerodynamic analysis for tunnel length 20×10^3 mm. The tetrahedral mesh was applied on the optimized model with 1.600.000 cells, as shows in Fig. 4. The drag coefficient in open air was equal to 0.38 and in tunnel equal to 0.55 with scaled dimension.

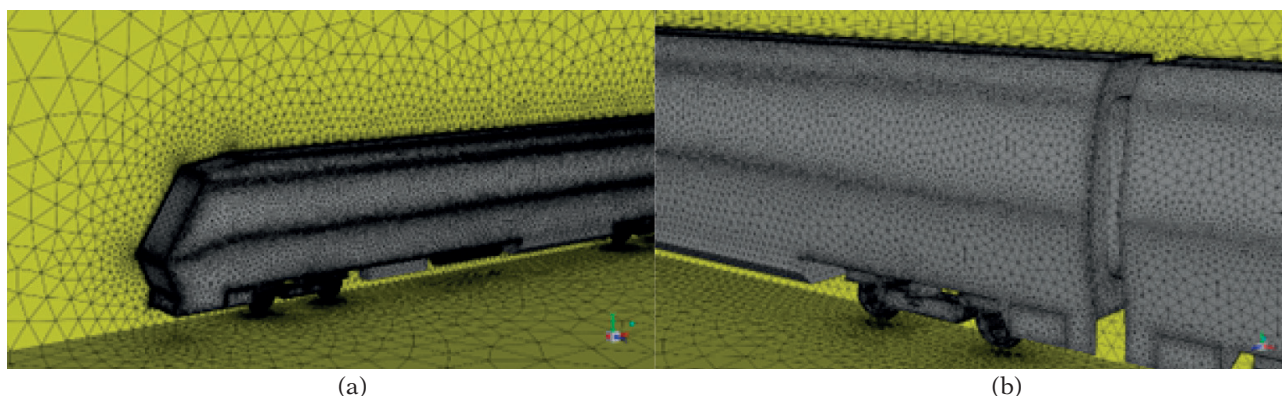


Figura 3 – Meshatura discreta nel modello di treno regionale. (a) Mesh attorno alla sezione anteriore della prima carrozza e al piano del treno regionale - (b) Mesh sulla superficie laterale dello spazio tra le carrozze.

Figure 3 – Discrete mesh in regional train model. (a) Mesh around the front section of the first car and floor of the regional train - (b) Mesh on the side surface of the inter-carbody gap.

2.4. Trattamento dei dati

È stata adottata una formulazione a volume finito basata sul codice commerciale CFD per risolvere le equazioni sia incompressibili che comprimibili di Navier-Stokes. Una condizione di stato iniziale ibrido è stata selezionata e di solito preferita: accelera il calcolo complessivo. La parte di soluzione standard riempie solo le proprietà archiviate con valori costanti, mentre l'inizializzazione ibrida risolve centinaia di iterazioni di un complicato sistema di equazioni e quindi di solito ottiene una previsione ottimale per le variabili di flusso, in particolare per il campo di pressione. Al fine di facilitare il confronto e l'analisi, sono stati certificati la forza, la pressione, la velocità e altri parametri per un intervallo medio del tempo (non dimensionale) dopo aver considerato il parametro della fluttuazione periodica, che è stato impiegato nei riferimenti HEMIDA e KRAJNOVIĆ [8] e ZHANG et al. [3].

2.4. Data processing

A finite volume formulation based on CFD commercial code was adopted to solve the both incompressible and compressible Navier-Stokes equations. Hybrid initialization was selected and preferred usually; it accelerates the overall computation. Standard initialization is just filling the filed properties with constant values, while hybrid initialization solves hundreds of iterations of a complicated equation system and thereby usually gets an optimum prediction for the flow variables, particularly the pressure field. In order to facilitate the comparison and analysis, the force, pressure, velocity and other parameters were monitored by applying the average value of non-dimensional time after the parameter of the periodic fluctuation, which has been employed in the references HEMIDA and KRAJNOVIĆ [8] and ZHANG et al. [3].

3. Risultati e discussione

3.1. Prestazioni aerodinamiche del treno regionale all'aria aperta

La Fig. 5 illustra la pressione intorno a un treno che passa all'aria aperta, ovviamente la pressione sulla parte anteriore della locomotiva è abbastanza alta da creare una scia vorticoso. Si può vedere dalla linea di flusso nella cabina anteriore l'effetto del vortice esterno; quindi, risulta più facile per il flusso d'aria cambiare direzione e creare una maggiore intensità di turbolenza. L'energia cinetica turbolenta è un indice per misurare l'intensità della turbolenza. Nella Fig. 5 si può notare che l'area con bassa pressione appare sul lato sottovento del treno.

3.2. Analisi del campo di flusso attorno al treno regionale

Quando il treno regionale attraversa una galleria, crea un campo di flusso complesso che può avere effetti significativi sul treno e sulla galleria stessa, come mostrato nella Fig. 6. Quando il treno entra nel tunnel, spinge l'aria davanti ad esso, creando una zona di alta pressione. Questa zona di alta pressione può far sì che l'aria fuoriesca dall'ingresso del tunnel, creando una zona di bassa pressione dietro il treno. Ciò può causare turbolenze e vortici nel flusso d'aria,

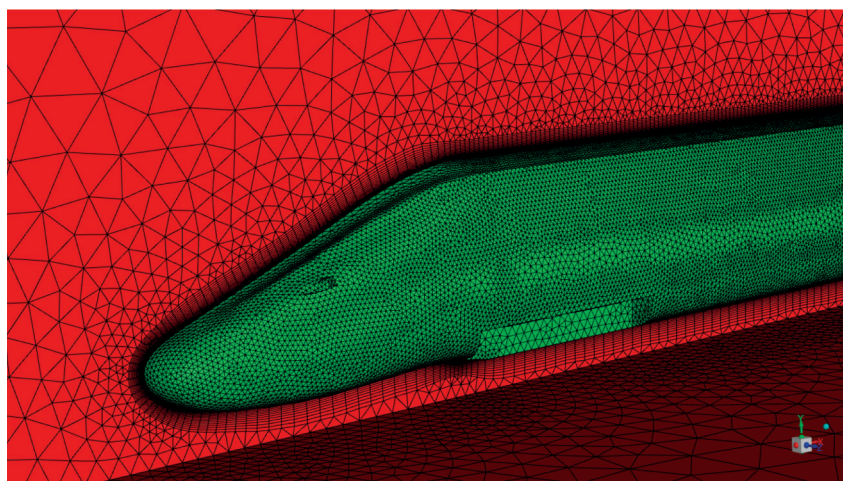


Figura 4 – Meshatura fem dello strato limite del modello di treno ottimizzato.
Figure 4 – Boundary layer computational mesh of the optimized train model.

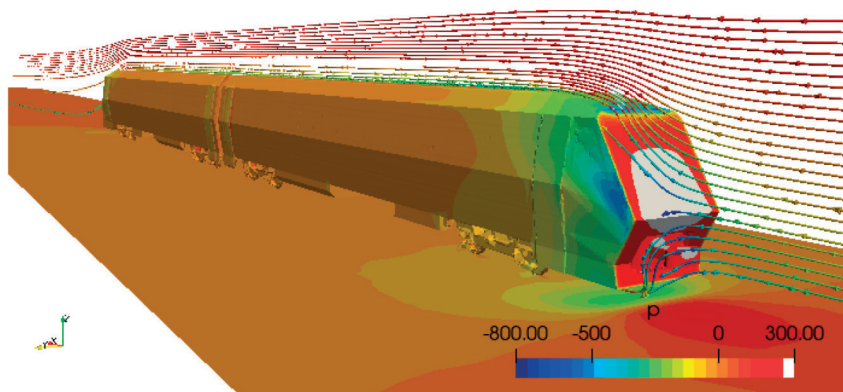


Figura 5 – Contorno della pressione in diverse sezioni del treno regionale.
Figure 5 – The pressure contour in different section of the regional train.

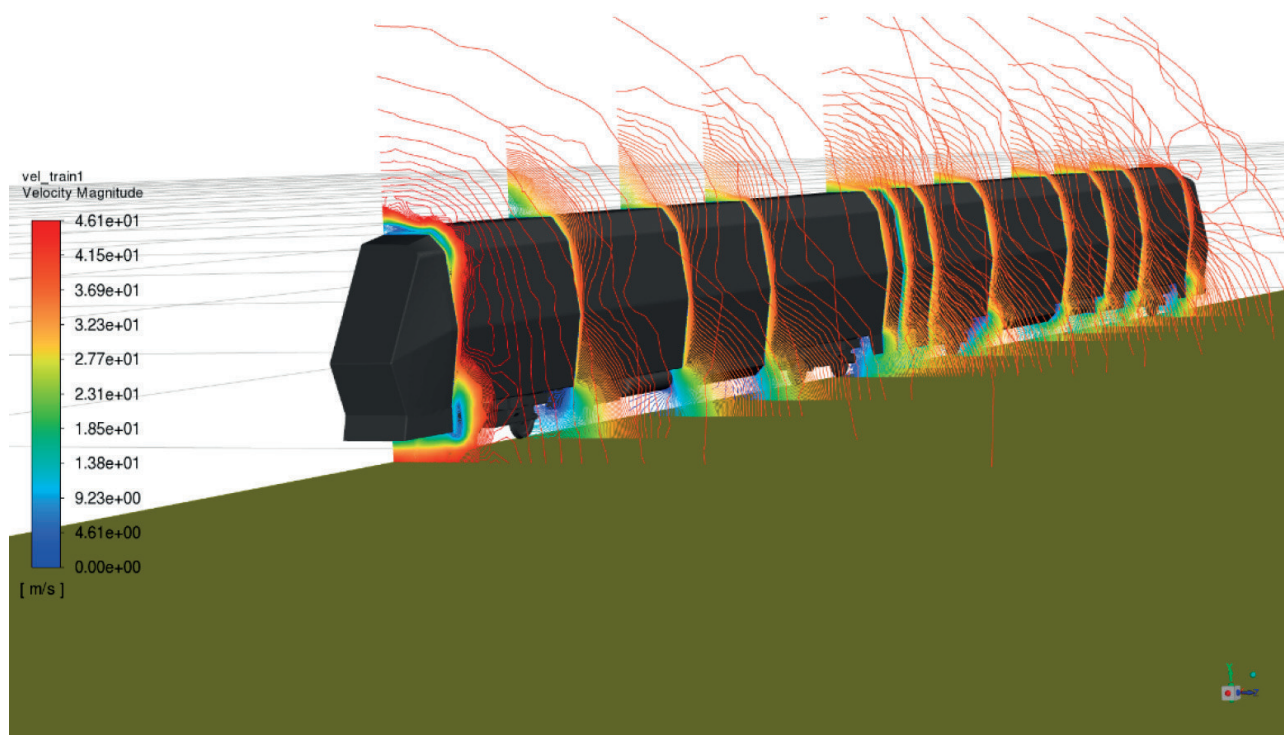


Figura 6 – Distribuzione del campo di velocità in prossimità dei vagoni regionali all'aria aperta.
 Figure 6 – Distribution of the velocity field near the regional train cars in open air.

che possono aumentare la resistenza sul treno e generare rumore.

Per ridurre questi effetti, la tecnica ottimale per snellire il flusso d'aria intorno al treno consiste nell'utilizzare una forma aerodinamica per la parte anteriore del treno, come geometrie affusolate o ogive aerodinamiche. La forma scelta aiuta a ridurre la quantità di aria che viene spinta davanti al treno, il che può ridurre la resistenza e la turbolenza.

La visualizzazione e l'analisi dei modelli di flusso intorno a diverse forme di veicoli come si può vedere nella Fig. 7. Non vi è alcun cambiamento significativo nel campo di flusso sul lato sopravento e sul lato sottovento del veicolo in caso di campo indefinito.

3.3. Analisi sulla pressione pulsante

Secondo la Fig. 8 (a, b), l'onda di pressione generata quando il veicolo è investito da vento trasversale causa un rapido aumento della forza di resistenza del veicolo e cambiamenti della forza di resistenza delle vetture centrali e di coda sono fondamentalmente gli stessi della vettura di testa. Pertanto, prima che il treno entri ed esca dal tunnel, il centro di controllo del treno dovrebbe ridurre la velocità del treno per controllare l'aumento della forza di resistenza. La Fig. 8 (a) mostra la distribuzione della pressione in corrispondenza delle sezioni del veicolo di testa

3. Results and discussion

3.1 Aerodynamic performance of the regional train in the open air

Fig. 5 illustrates the pressure around a train passing in open air; obviously the pressure at front locomotive is high enough to create wake vortex. It can be seen from the streamline at the front cabin cause effect of the external vortex, therefore easier to the airflow to change the direction, and create higher the turbulence intensity. Turbulent kinetic energy is an index to measure the turbulence intensity. It can be seen on Fig. 5 the area with low negative pressure appears on the leeward side of the train.

3.2 Analysis of flow field around the regional train

When the regional train passes through a tunnel, it creates a complex flow field that can have significant effects on the train and the tunnel itself, as shown in Fig. 6. As the train enters the tunnel, it pushes air in front of it, which creates a high-pressure zone. This high-pressure zone can cause air to rush out of the tunnel entrance, creating a low-pressure zone behind the train. This can cause turbulence and eddies in the air flow, which can increase drag on the train and create noise.

To reduce these effects, the optimum technique to streamline the flow of air around the train is to use aerody-

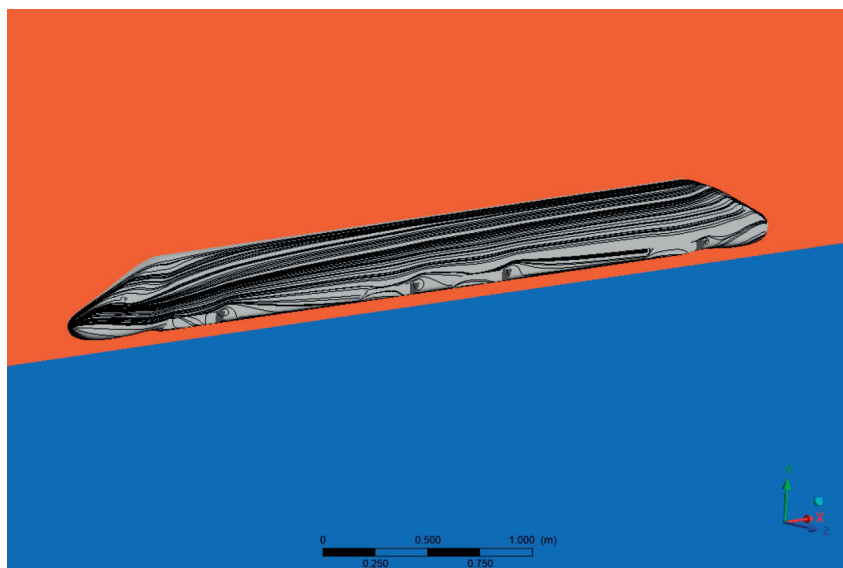


Figura 7 – Linee di flusso del treno ottimizzato che passa all'aria aperta.
Figure 7 – Streamlines of optimized train passing in open air.

namic shape for the front of the train, such as tapered noses or streamlined cowls. The selected shape helps to reduce the amount of air that is pushed ahead of the train, which can reduce drag and turbulence.

To visualize and analyze the flow patterns around different car shapes as it can be seen on Fig. 7. There is no significant change in the flow field on the windward side and the leeward side of the car body in case of open air.

3.3 Analyses on the alternating pressure

According to Fig. 8 (a, b), the pressure wave generated when the head car passing under the influence of the crosswind causing the car drag force to increase rapidly and the drag force

del treno regionale. Tuttavia, l'aumento della pressione positiva è maggiore nelle sezioni centrali e finali. Mentre la forza laterale negativa sui carrelli aumenta notevolmente, fenomeno che rappresenta la ragione principale della significativa diminuzione della forza laterale quando la carrozza principale entra nel tunnel.

Si può vedere dalla Fig. 8 (b) che la forza laterale non influenza più la carrozza centrale e finale a causa della sua geometria, i cambiamenti nella forza aerodinamica del treno e i cambiamenti aerodinamici dei due treni sono i più drammatici quando passano nello spazio aperto. Le ragioni dei cambiamenti aerodinamici sul treno sono discusse nel momento in cui il cambiamento aerodinamico dei veicoli di testa e di coda è più evidente.

Ciò indica che la ragione per mantenere stabile la forza laterale del veicolo di testa non è più concentrata dello stesso veicolo, ma è causata dall'azione combinata della pressione sotto il vagone di testa. Questo caso concorda quanto teorizzato da Du *et al.* [9].

3.4. Treno che attraversa un tunnel

Il campo di flusso attorno ai treni che passano nel tunnel è uno stato di

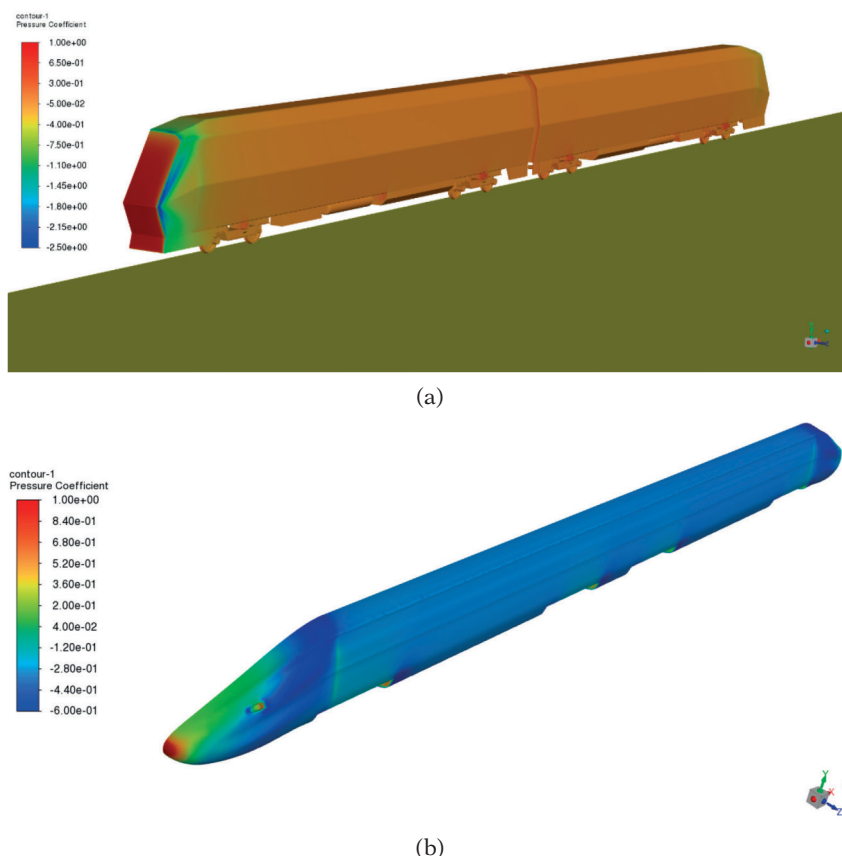


Figura 8 – Contorno di pressione tra treno regionale e treno ottimizzato. (a) Distribuzione della pressione sul regionale - (b) Distribuzione della pressione sul treno ottimizzato.

Figure 8 – Pressure contour between regional train and optimized train. (a) Pressure distribution on the regional - (b) Pressure distribution on the optimized train.

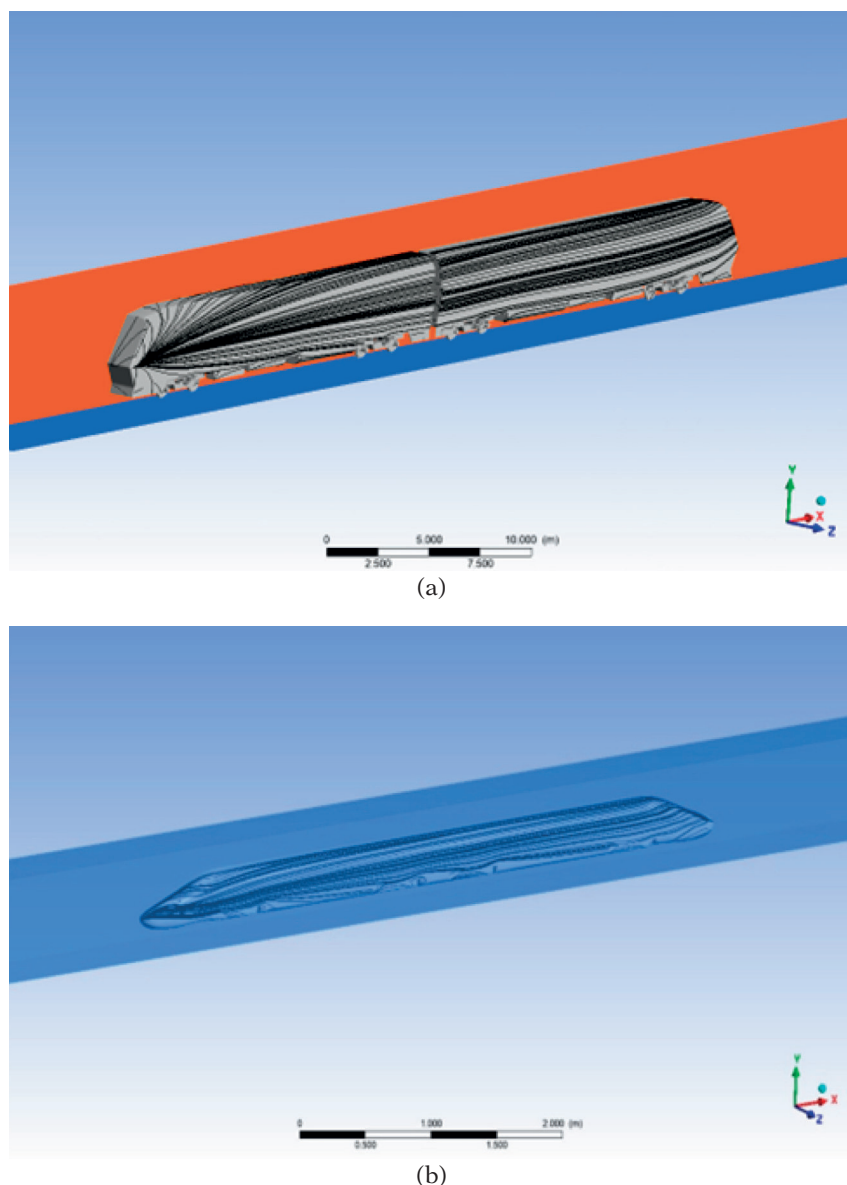


Figura 9 – Campo di flusso intorno ai treni che passano nel tunnel: (a) Linee di flusso del treno regionale che passa attraverso un tunnel; (b) Linee di flusso del treno ottimizzato che passa attraverso un tunnel.

Figure 9 – The flow field around the trains passing in the tunnel; (a) Streamlines of regional train passing through a tunnel; (b) Streamlines of optimized train passing through a tunnel.

pressione negativa, in particolare nella zona di intersezione come illustrato nella Fig. 9 (a). Inoltre, diminuisce la pressione positiva e aumenta la pressione negativa nella condizione di applicazione di pressione pulsante ciclicamente causata dal treno.

La Tab. 1 mostra un confronto dei coefficienti di resistenza dell'intero veicolo ottenuti dal test in galleria del vento Du et al. [9] e dalla simulazione numerica.

4. Conclusions

In this paper the latest CFD technique was implemented to simulate external flow field of regional train and new suggestion was made for better size and the structure of the regional train. The drag and lateral force of the whole train in open air and inside the tunnel affected by design of locomotive. To reduce the drag coefficient, and enhance ridding comfort through noise, vibration and harassment (NVH),

changes of the middle and the tail cars are basically the same for the head car. Therefore, before the train enters and exits the tunnel, the train control center should reduce the train speed to control the increase of drag force. Fig. 8 (a) shows the pressure distribution at the sections of the head car of regional train. However, the increase in the positive pressure is much larger at the mid and end sections. While the negative lateral force on the bogie increases greatly, which is the main reason for the significant decrease in lateral force when the head car enters the tunnel.

It can be seen from Fig. 8 (b) the lateral force no longer influences on the mid and end car due to its design, the changes in the aerodynamic force of the train that the aerodynamic changes of two trains are the most dramatic when passing in open air. The reasons for the aerodynamic changes on the train are discussed at the moment when the aerodynamics change of the head and tail cars are the most obvious.

This indicates that the reason for keeping the lateral force of head car stable is no longer concentrated on the head car bogie but caused by the combined action of the pressure under the head car. This case agreed with Du et al. [9].

3.4. Train passing through a tunnel

The flow field around the trains passing in the tunnel is a state of negative pressure, especially the intersection region as illustrated in Fig. 9(a). Moreover, it decreases the positive pressure and increases the negative pressure in the alternating pressure caused by the train.

A comparison of the drag coefficients of the whole car obtained by wind tunnel test Du et al. [9] and numerical simulation is shown in Tab. 1.

4. Conclusioni

In questo documento è stata implementata l'avanzata tecnica CFD per simulare il campo di flusso esterno di un treno regionale ed è stato dato un nuovo suggerimento per una migliore geometria e struttura del veicolo. La resistenza e la forza laterale di tutto il treno in ambiente aperto e all'interno del tunnel interessate dalla progettazione della locomotiva. Per ridurre il coefficiente di resistenza e migliorare il comfort di guida rispetto al rumore e delle vibrazioni (NHV), è stata apportata la modifica principale al design che potrebbe limitare il fenomeno del colpo d'ariete del flusso d'aria sulla locomotiva, motivo per cui il treno ottimizzato ha una parte anteriore ridefinita. L'area di separazione del flusso d'aria sul bordo inferiore della locomotiva ottimizzata è piccola e, in questa condizione, si può ottenere un migliore effetto di riduzione della resistenza fino al 47% in ambiente aperto e al 67% in galleria. Pertanto, questo documento propone un piano di ottimizzazione ragionevole per ottenere una transizione graduale degli effetti aerodinamici verso la parte posteriore del treno selezionato.

Tabella 1 – Table 1

Confronto della prova in galleria del vento e risultati numerici
Comparison of the wind tunnel test and numerical results

Parametro Parameter	Valore di prova di Du et al. [9] Test value by Du et al. [9]	Valore di simulazione di Du et al. [9] Simulation value by Du et al. [9]	Valore di simulazione per treno regionale Simulation value for regional train	Valore di simulazione per treno ottimizzato Simulation value for optimized train
Coefficiente di resistenza del veicolo C_D Vehicle drag coefficient C_D	0,5018	0,4582	1,672	0,55

the major modification has been made to the design which may limiting airflow blows to the locomotive that's why the optimized train has sharp front. The airflow separation area at the lower edge of the optimized locomotive is small, and at this time, it can achieve a better drag reduction effect up to 47% in open air and 67% in tunnel. Therefore, this paper proposes a reasonable optimization plan to achieve smooth transition to the rear of the selected train.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] G.J. GAO, Y. ZHANG, X. MIAO, J. WANG, J. ZHANG, C. JIANG (2021), "Influence of bogie fairing configurations on the snow accretion around bogie regions of a high-speed train under crosswind conditions", Mechanics Based Design of Structures and Machines, DOI: 10.1080/15397734.2021.2003711.
- [2] D. WEIDNER, D. STOLL, T. KUTHADA, A. WAGNER (2022), "Aerodynamics of High-Speed Trains with Respect to Ground Simulation". Fluids, 7, 228. <https://doi.org/10.3390/fluids7070228>.
- [3] J. ZHANG, J.J. LI, H.Q. TIAN, G.J. GAO, J. SHERIDAN (2016), "Impact of ground and wheel boundary conditions on numerical simulation of the high-speed train aerodynamic performance". Journal of Fluids and Structures, 61:249–261, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.10.006>.
- [4] H. LIU, F. NIU, Y. NIU, J. XU, T. WANG (2016), "Effect of structures and sunny-shady slopes on thermal characteristics of subgrade along the Harbin–Dalian Passenger Dedicated Line in Northeast China". Cold Regions Science and Technology 123:14–21. doi:10.1016/j.coldregions.2015.11.007.
- [5] J.Q. NIU, D. ZHOU, T.H. LIU, X.F. LIANG (2017), "Numerical simulation of aerodynamic performance of a couple multiple units high-speed train", Vehicle System Dynamics, DOI: 10.1080/00423114.2016.1277769.
- [6] CEN European Standard (2009), "Railway applications-aerodynamics. Part 4: requirements and test procedures for aerodynamics on open track", CEN EN 14067-4.
- [7] CEN European Standard (2010), "Railway applications-aerodynamics. Part 6: requirements and test procedures for cross wind assessment", CEN EN 14067-6.
- [8] H. HEMIDA, S. KRAJNOVI (2009), "Transient simulation of the aerodynamic response of a double-deck bus in gusty winds". Journal of Fluids Engineering, 131(3):031101, <https://doi.org/10.1115/1.3054288>.
- [9] L. DU, M. BIAN, C.J. ZHANG (2022), "Aerodynamic Response Analysis of High-Speed Trains Passing through High Platforms under Crosswind". Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 15, No. 5, pp. 1525-1543, <https://doi.org/10.47176/jafm.15.05.1045>.