



تحلیل و مدل‌سازی آیرودینامیکی اثر پارامترهای شکل دماغه قطار پرسرعت در واژگونی تحت اثر باد عرضی

رضا ازوجی^۱ و محمدرضا طلانی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

^۲ استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

چکیده

افزایش سرعت و کاهش وزن وسایل نقلیه ریلی در سال‌های اخیر، نگرانی‌ها پیرامون خطر ناپایداری و واژگونی این وسایل نقلیه را افزایش داده است. یکی از عوامل مؤثر در واژگونی و خروج از خط، وزش بادهای عرضی است که وقتی با سرعت بالای قطارهای تندرو همراه می‌شود، خطر خروج از خط و واژگونی را بیشتر می‌کند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن سه متغیر سرعت قطار، سرعت باد و زاویه وزش باد، شبیه‌سازی عددی جریان هوای اطراف مدل قطار ICE2 تحت اثر باد عرضی، به کمک روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده و ضرایب آیرودینامیکی تعیین شده است. به کمک نتایج این شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی تعادل قطار، شرط واژگونی قطار تحت بار عرضی در مسیر مستقیم بر اساس استاندارد En14067 مشخص شده و محدوده بحرانی حرکت قطار تعیین شده است. سپس با در نظر گرفتن ۵ پارامتر هندسی دماغه و اعمال روی هندسه پایه (مدل قطار ICE2)، ۸ هندسه جدید تولید شده است. با مقایسه نتایج ضرایب آیرودینامیکی شکل دماغه، اثر اعمال تغییر در پارامترهای هندسی در واژگونی قطار، مورد بحث قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، از میان پارامترهای هندسی در نظر گرفته شده، کاهش ضخامت دماغه و افزایش طول دماغه یا کاهش زاویه نوک دماغه که در نمونه‌های جدید دماغه قطار برندهای معروف دنیا دیده می‌شود، تأثیر مطلوب بیشتری در جلوگیری از واژگونی قطار دارند.

کلمات کلیدی: آیرودینامیک قطار؛ باد عرضی؛ پایداری حرکت؛ واژگونی قطار.

Aerodynamic Analysis and Modeling of Effect of Nose Shape Parameters on Overturn of High Speed Train under Crosswind

R. Ezoji¹, M.R. Talaei^{2,*}

¹ M.s. Student, Railway Eng., IUST Univ., Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Railway Eng., IUST Univ., Tehran, Iran.

Abstract

In recent years, increase of speed and reduce of weight of railway vehicles is under focus of transportation industries and train factories. This subject may increase the instability and overturning of these vehicles, under blowing crosswind. In this study, numerical simulation of crosswind induced air flow around an ICE2 train model, is performed with aid of computational fluid dynamic methods to obtain effective aerodynamic coefficients. According to the simulations the equilibrium of train is determined under crosswind in various incident angle and train velocity. Then, five geometrical parameters are considered and basic geometry is modified to generate eight new geometries. By comparing aerodynamic results of these 9 nose shapes, influence of each parameter is reported on the overturn of train. Investigations show from considered geometrical parameters, that thickness reduction of train nose and increase length of train nose or angle reduction of train nose tip have more favorable effect on safety of train movement to prevent of overturn.

Keywords: Train Aerodynamics; Crosswind Condition; Stability of Motion; Overturning of Train.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: +۹۸۲۱۷۳۲۲۸۵۳۵؛ فکس: +۹۸۲۱۷۳۰۲۱۵۷۲

آدرس پست الکترونیک: mrtalaei@iust.ac.ir

۱- مقدمه

ریلی با باد عرضی ممکن است، مشکلات باد عرضی را تشدید کند.

کشورهای پیشرفته، غالباً با وضع قوانین و استانداردها، می‌کوشند که سازندگان قطارهای تندرو و شرکت‌های بهره‌برداری کننده را به انجام آزمایش‌های میدانی در خصوص پایداری حرکت قطار و ایمنی و راحتی سفر ناشی از وزش باد عرضی ملزم کنند.

مسیر ریلی تهران-قم-اصفهان، یکی از کریدورهای ریلی مهم جابه‌جایی مسافر در کشور است که مرکز سیاسی-اقتصادی ایران، یعنی تهران را به مرکز جغرافیایی کشور و شهر مهم اصفهان مرتبط می‌سازد. طرح راه‌آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان با حد سرعت ۳۰۰ Km/hr و طول تقریبی ۴۱۰ Km، از ایستگاه راه‌آهن تهران آغاز شده است و با عبور از فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قم، دلیجان، میمه و مورچه‌خورت، در نهایت به شهر اصفهان می‌رسد.

بنا بر اطلاعات مرکز هواشناسی ایران، محور تهران-قم-اصفهان، دارای سرعت باد ۹۰ Km/hr تا ۱۱۰ Km/hr و جزء مناطق بادخیز ایران است. شرایط بیشینه وزش باد در آمار سازمان هواشناسی کشور در سال‌های ۱۹۵۱ الی ۲۰۱۴ میلادی برای این منطقه مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱- شرایط بیشینه وزش باد، برای ایستگاه‌های پروژه راه‌آهن پرسرعت تهران-قم-اصفهان [۲]

نام ایستگاه هواشناسی	سال وقوع	سرعت وزش باد (m/s)
تهران	۲۰۱۴	۳۰
فرودگاه امام خمینی (ره)	۲۰۱۴	۳۳
قم	۱۹۶۰	۳۱
دلیجان	۲۰۰۴	۳۰
میمه	۱۹۹۹	۲۰
مورچه‌خورت	۲۰۰۹	۲۴
اصفهان	۱۹۹۴	۳۰

با پیشرفت جوامع و نیاز به طی مسافت‌های طولانی در زمان کم، به تدریج سرعت قطارها افزایش یافته است؛ به گونه‌ای که امروزه، سرعت قطارهای سریع‌السیر، به بیش از Km/hr ۶۰۰ رسیده است و در بسیاری از شهرها و کشورهای جهان، قطارهای با سرعت حدود Km/hr ۳۰۰ درحال بهره‌برداری است. در چنین سرعت بالایی، نیروهای آیرودینامیکی بسیار قابل توجه بوده و در بحث مصرف انرژی، ایمنی و راحتی سفر نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. برای رسیدن به سرعت‌های بالاتر، قطارهای سریع‌السیر سبک‌تر ساخته می‌شوند؛ اما این وزن کم، می‌تواند قطار را با مشکل ناپایداری در اثر وزش بادهای عرضی مواجه کند. بادهای عرضی، به‌خصوص تندبادها، نیروی عرضی شدیدی به قطار وارد می‌کنند که گاه به تنهایی و گاه با همراهی نیروی گریز از مرکز در قوس‌ها می‌تواند موجب واژگونی قطار شود و صدمات جانی و مالی بسیاری به بار آورد. در سال‌های اخیر، مواردی از این گونه حوادث گزارش شده است که برای نمونه می‌توان به واژگونی قطار در مسیر مستقیم تحت اثر باد عرضی در سال ۲۰۰۲ در اتریش اشاره کرد.



شکل ۱- واژگونی قطار ناشی از وزش باد عرضی در اتریش،

[۱] ۲۰۰۲

علاوه بر موارد گفته شده، باد عرضی در خروجی تونل‌ها که ناگهان سرعت باد از صفر به مقدار بیشینه می‌رسد، بادهای با سرعت متغیر، روی پل‌ها و بسترهای مرتفع مواردی هستند که می‌توانند خطر باد عرضی را بیشتر کنند؛ همچنین همراهی خرابی‌های جزئی موجود در خطوط

و لایه مرزی اتمسفریک^۲ بهتر شبیه‌سازی شود. گوئو و همکاران [۸] برای بررسی تأثیر ارتفاع و تخلخل مانع بادشکن^۳ در یک سیستم قطار-پل، به اندازه‌گیری ضرایب آیرودینامیکی در تست‌های تونل باد مدل با سطح مقطع ثابت، پرداختند. بارکالا و مسگوئر [۹]، با انجام تست‌های تونل باد روی مدل عمومی دوبعدی قطار تندرو، در دو وضعیت روی زمین و پل، اثر انواع مختلفی از موانع روی نیروی عرضی و گشتاور غلتشی را بررسی کردند.

چیو [۱۰] و بیکر [۱۱ و ۱۲]، با روش‌های تحلیلی، توزیع فشار سطح قطار و ضرایب آیرودینامیکی را تعیین کردند. ددریچز و همکاران [۱۳] بر اساس نتایج بدست آمده از محاسبات عددی آیرودینامیکی و تست‌های تونل باد، پایداری حرکت سه مدل مختلف را حین عبور در مسیر مستقیم و سر قوس دارای برلندی^۴ مورد ارزیابی قرار دادند.

گیلارد [۱۴] پیرامون کاربردهای دینامیک سیالات محاسباتی^۵ در آیرودینامیک قطار، بحث و قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن را بیان کرد؛ همچنین به کمک حلگر ناویر استوکس رینولدز میانگین^۶، جریان اطراف سطح مقطع یک واگن میانی تحت باد عرضی 90° را شبیه‌سازی کرد. نتایج تست‌های تونل باد سوزوکی و همکاران [۱۵] که در سه وضعیت مختلف (دو حالت مشابه خاکریز^۷ و یک حالت مشابه پل) تحت باد عرضی با زوایای انحراف مختلف انجام شده بود، نشان داد که در تعیین ضرایب آیرودینامیکی، نه تنها هندسه قطار، بلکه شکل بستر نیز اهمیت دارد. کوپر [۱۶] به تعیین ضرایب آیرودینامیکی لازم برای واژگونی پرداخت. در مدل متحرک، ضرایب آیرودینامیکی نیرویی و گشتاوری اندکی کوچک‌تر بود.

خایر و همکاران [۱۷] با روش‌های عددی دینامیک سیالات ساختار جریان اطراف قطار ساده‌سازی شده InterRegio را با معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس رینولدز

با توجه به جدول فوق، حداکثر سرعت باد مشاهده شده در این مسیر 33 m/s است؛ لذا در بررسی‌های نرم‌افزاری انجام شده از سرعت بادهای 10 m/s ، 20 m/s و 30 m/s استفاده شده تا ضمن حفظ جامعیت بررسی‌ها، بحرانی‌ترین وضعیت نیز، مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به اینکه ایجاد خطوط و بهره برداری از قطارهای تندرو در ایران هنوز در گام‌های ابتدایی خود است و مسیر بسیاری از خطوط ریلی از نواحی با خطر وزش بادهای عرضی با سرعت بالاست؛ بررسی شکل دماغه قطار تندرو و تعیین میزان اثرگذاری پارامترهای هندسی مختلف در مشخصات آیرودینامیکی از طریق شبیه‌سازی‌های عددی و سپس مقایسه میزان ایمنی آنها می‌تواند گام نخست در راستای نیل به این مهم باشد. این شبیه‌سازی‌ها می‌تواند یک دید اولیه نسبت به طراحی شکل دماغه، برای حفظ ایمنی قطار تحت اثر باد عرضی به دست دهد.

در زمینه آیرودینامیک قطارهای تحت باد عرضی تست‌های تونل باد، تحقیقات و اندازه‌گیری‌های میدانی، شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی و حتی مواردی از پژوهش‌های تحلیلی وجود دارد.

بیکر و رابینسون [۳] به بررسی مسائل مختلفی که در اثر باد برای وسایل نقلیه زمینی ایجاد می‌شود و تعیین الزاماتی پرداختند که ایمنی وسایل نقلیه را تأمین می‌کند.

ارانو و شویر [۱] با اجرای تست‌های تونل باد، ضرایب آیرودینامیکی یک مدل ساده شده قطار ICE2 با زاویه انحراف^۱ 0° تا 60° را تعیین کردند. روکی و همکاران [۴]، نتایج بدست آمده از تونل بادهای PMWT و TsAGI روی مدل ساده شده ICE2 را ارائه کردند. چیو و اسکوایر [۵] یک سری آزمایش روی جریان با زاویه انحراف بیشتر از 60° با مدل قطار عمومی انجام دادند. بیکر و همکاران [۶]، با تست‌های میدانی و تونل باد، به اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای متوسط و لحظه‌ای اعمالی به قطار تحت باد عرضی پرداختند. بیکر [۷] تست‌های تونل باد را برای یک مدل قطار مسافری سه واگنه متحرک تحت باد عرضی به مقیاس $1:50$ انجام داد تا اثر حرکت نسبی بین زمین و قطار

² Atmospheric Boundry Layer

³ Wind Barrier

⁴ Cant

⁵ Computational Fluid Dynamics (CFD)

⁶ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

⁷ Embankment

¹ Yaw Angle

سه‌بعدی یک قطار را حین حرکت روی پل و تحت باد عرضی، به دو روش مش ثابت و مش متحرک انجام دادند که پل به دو صورت بدون مانع و با مانع نرده‌ای بود. با توجه به اینکه جریان عبوری از قطار موجب ایجاد نیروهای آیرودینامیکی و نیروهای آیرودینامیکی به‌علت وجود سیستم تعلیق، موجب ایجاد تغییرمکان‌هایی در قطار می‌شود؛ لی و همکاران [۳۲] به شبیه‌سازی عددی جریان عرضی عبوری از یک مدل سه واگنه قطار تندرو به صورت کوپل شده با عملکرد دینامیکی قطار پرداختند. در این شبیه‌سازی‌ها از فرم گذرای معادلات RANS و روابط حاکم بر عملکرد دینامیکی سیستم تعلیق قطار استفاده شده است.

در اکثر مقالات و کارهای تحقیقاتی عددی پیشین راجع به حرکت قطار تحت باد عرضی، بررسی‌ها غالباً از یکی از سه دسته زیر بود:

- مقایسه نتایج روش‌های عددی متفاوت با تست‌های تونل باد برای تعیین دقیق‌ترین روش
- مقایسه ضرایب آیرودینامیکی یک هندسه در شرایط مختلف، نظیر روی سطح صاف، روی خاکریز، روی پل و ...
- بررسی یک یا چند هندسه متفاوت تحت باد عرضی، بدون اینکه ارتباطی هندسی بین اشکال وجود داشته باشد.

اما در این پژوهش، پارامترهای هندسی بخصوصی اعمال شده تا اثر این پارامترها بر تغییر ضرایب آیرودینامیکی و خطر واژگونی تعیین گردد. در تحقیقات پیشین، اکثر تغییرات هندسی اعمال شده در سطح مقطع مدل واگن بود، اما در این پژوهش روی پارامترهای هندسی دماغه تمرکز شده است. در کارهای پیشین، غالباً بررسی‌ها با دو متغیر زاویه نسبی باد (β) و سرعت نسبی (V_0) انجام شده بود، لذا به طور دقیق مشخص نبود، تأثیر سرعت قطار یا سرعت باد به طور مجزا، به چه صورت است. به طور مثال این پژوهش نشان می‌دهد که تأثیر افزایش سرعت باد در ضریب برآ افزایشی است، اما تأثیر افزایش سرعت قطار کاهش‌ی است یا مشخص می‌کند که تأثیر سرعت باد در افزایش خطر واژگونی، بسیار بیشتر از افزایش سرعت قطار است که با روش بکار گرفته شده در مقالات و پژوهش‌های پیشین تعیین نشده بود.

میانگین و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، در حالت پایا و تحت زوایای انحرافی مختلف تعیین کردند. همیدا و کراژنوویچ [۱۸]، همیدا [۱۹] و همیدا و بیکر [۲۰]، جریان اطراف یک قطار سه‌بعدی تحت باد عرضی را به روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ^۲ تحلیل کردند. ددریچز [۲۱] اثر باد عرضی با زاویه انحراف بین $12/3^\circ$ تا 40° را برای قطار سه واگنه ICE2، مورد ارزیابی قرار داد؛ همچنین حساسیت نتایج تحلیل عددی نسبت به تراکم و کیفیت شبکه، مدل آشفتگی، شم ۳ عددی، موقعیت مرزهای ورودی و خروجی، شدت آشفتگی و نرم افزار شبیه‌سازی جریان را مورد بررسی قرار داد. آلاین و پارادت [۲۲]، با شبیه‌سازی مدل ساده شده قطار و بوژی TGV به کمک معادلات RANS، ضرایب آیرودینامیکی را تحت باد عرضی با زوایای انحراف مختلف تعیین و با نتایج عددی و تجربی قطارهای TGV و ICE3 مقایسه کردند. ددریچز [۲۳] و رولن و همکاران [۲۴] با تست‌های تونل باد و روش‌های مختلف شبیه‌سازی عددی، به تعیین ضرایب آیرودینامیکی و ساختار جریان اطراف مدل قطار ICE2 تحت باد عرضی پرداختند. کراژنوویچ و همکاران [۲۵]، مدل سه واگنه قطار ICE2 را به همراه ریل و بوژی، تحت باد عرضی، حین خروج قطار از تونل، به روش شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده (DES) ۴، تحلیل کردند تا نیروها و گشتاورهای متغیر با زمان و مکانیزم جریان دریافت شود. ژانگ و لو [۲۶]، کراژنوویچ و همکاران [۲۷] و همیدا و کراژنوویچ [۲۸ و ۲۹]، به صورت گذرا جریان اطراف یک مدل قطار ساده شده تحت باد عرضی را به روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ، مورد ارزیابی قرار داده و مقادیر متوسط و لحظه‌ای ضرایب آیرودینامیکی را تعیین کردند. ژیانگ و همکاران [۳۰]، با مدل‌سازی یک پیکربندی قطار-پل، جریان عرضی و مشخصات آیرودینامیکی قطار را توسط معادلات RANS تعیین و سرعت بحرانی را با در نظر گرفتن تغییر مکان استاتیکی فنرها، نیروهای اینرسی لرزه‌ای عرضی و عمودی، نیروی گریز از مرکز و جاذبه محاسبه کردند. ژیانگ و همکاران [۳۱]، به کمک معادلات RANS، شبیه‌سازی

¹ Turbulence Model

² Large Eddy Simulation (LES)

³ Scheme

⁴ Detached Eddy Simulation

۲- شبیه‌سازی

۲-۱- تعریف مسئله

با توجه به اینکه واگن اول تأثیر بسیاری در پایداری حرکت کل قطار دارد، در پژوهش پیش‌رو، هدف دستیابی به یک دید کلی از اثر پارامترهای هندسی مختلف، سرعت قطار، سرعت باد و زاویه وزش باد عرضی بر مشخصات آیرودینامیکی واحد پیشرو^۱ یک قطار تندرو است. در ابتدا جریان عرضی در زاویه وزش بین 10° تا 120° برای مدل قطار سریع‌السییر بین شهری (ICE2)^۲ و سرعت قطار 100 m/s و سرعت باد 30 m/s مورد ارزیابی قرار گرفته است تا اثر زاویه وزش بر رفتار و مشخصات جریان تعیین گردد و ناحیه‌ای از زوایای عرضی مشخص گردند که بحرانی‌تر به نظر می‌رسند. سپس اثر تغییر سرعت باد در سرعت‌های 10 m/s ، 20 m/s و 30 m/s و اثر تغییر سرعت قطار در سرعت‌های 60 m/s ، 80 m/s و 100 m/s و زاویه وزش 90° برای همین مدل، مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، ۸ مدل قطار مختلف در سرعت قطار 100 m/s و سرعت باد 30 m/s و زاویه وزش بین 60° تا 120° شبیه‌سازی شده است. از مقایسه تغییر نتایج این ۸ مدل با مدل قطار ICE2، می‌توان به میزان و نحوه تأثیر پارامترهای هندسی مختلف بر مشخصات آیرودینامیکی و خطر واژگونی قطار پی برد.



شکل ۲- معرفی برخی از اجزای قطار واقعی

۲-۲- مبانی نظری و معادلات حاکم

با توجه به استاندارد EN14067-1:2003 که راجع به نمادها و نحوه تعریف متغیرهاست، دستگاه مختصات کارتزین به صورت شکل ۴ در نظر گرفته شده است [۳۳].

با توجه به این استاندارد، موقعیت مرکز دستگاه مختصات و محورهای آن به این صورت تعیین می‌شود:

- محور x موازی و در فاصله برابر از ریل‌ها و مبدأ آن در فاصله برابر از چرخ‌محورهای داخلی است.
- محور y عمود بر x در صفحه افقی و مبدأ آن خط میانی ریل‌هاست.
- محور z عمود بر صفحه افقی و مبدأ آن بالای ریل است.

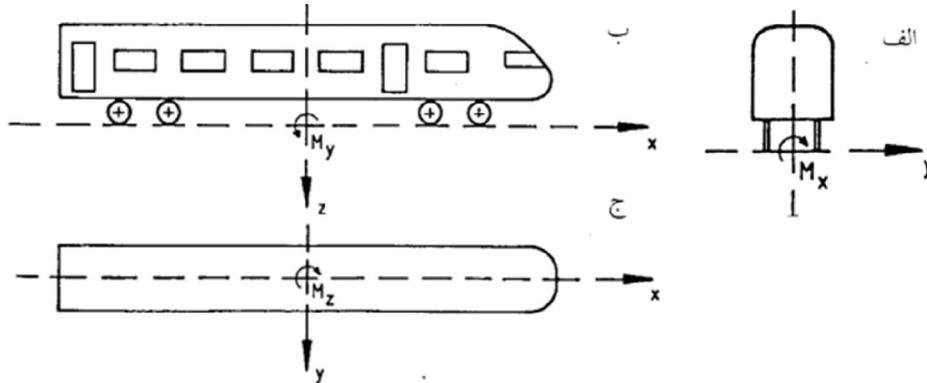
با توجه به استاندارد مذکور، سرعت باد نسبت به قطار (v_a) و زاویه انحراف نسبی (β)، بر حسب سرعت باد (v_w)، سرعت قطار (v_{tr}) و زاویه وزش باد (β_w)، به صورت شکل ۵ قابل تعریف است.

در این پژوهش، همانند غالب شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری انجام شده، بعلاوه هزینه زیاد محاسباتی از نظر نیاز به سخت افزار بسیار قدرتمند و زمان زیاد تحلیل، امکان شبیه‌سازی مدل قطار به صورت متحرک تحت وزش باد با سرعت v_w و تحت زاویه β_w وجود نداشته است؛ لذا برای غلبه بر چنین مشکلی، همانند بسیاری از مقالات و مراجع، مدل قطار، ثابت در نظر گرفته شده و برای لمس اثر سرعت قطار از سرعت نسبی باد به قطار (v_a) و زاویه انحراف نسبی (β) در نرم‌افزار شبیه‌سازی استفاده شده است. با این تفاوت که در برخی از پژوهش‌های قبلی، این مطلب نادیده گرفته شده و منجر به بررسی‌هایی شده که کاربردی نیست. به طور مثال در برخی مقالات جریان عرضی با سرعت 70 m/s و زاویه 90° ، مورد تحلیل قرار گرفته که معادل وضعیت سکون قطار و وزش بادی با سرعت 70 m/s ، عمود بر مسیر قطار است؛ حال آنکه باد با چنین سرعتی غالباً دور از انتظار است. علاوه بر این‌ها، وقتی در این مقالات از سرعت جریان 70 m/s صحبت می‌شود، اینکه چه سهمی از سرعت ناشی از باد و چه سهمی از آن ناشی از سرعت قطار است، قابل درک نیست؛ لذا در این مقاله، نمودارها بجای سرعت نسبی و زاویه انحراف نسبی، بر حسب سرعت باد و زاویه وزش ارائه شده است.

¹ Leading Unit² Inter-City Express 2



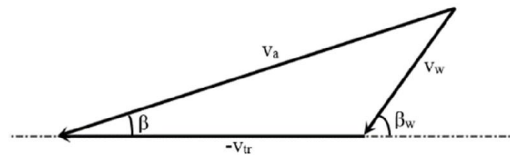
شکل ۳- واحد کنترل جلویی (محدوده مورد بررسی)



شکل ۴- نحوه تعریف دستگاه مختصات؛ الف) نمای از انتها، ب) نمای جانبی و ج) نمای فوقانی

- نیروی آیرودینامیکی عرضی قطار که به سمت مثبت محور y است، نیروی عرضی^۲ نامیده شده و با علامت F_y نشان داده شده است. گشتاور حول محور y ، گشتاور پرتابی^۳ نامیده شده و با علامت M_y نشان داده شده است.
- نیروی آیرودینامیکی که به سمت مثبت محور z است، برآ نامیده شده و با علامت F_z نشان داده شده است. گشتاور حول محور z ، گشتاور انحرافی نامیده شده و با علامت M_z نشان داده شده است.

برای ساده تر کردن مقایسه نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی برای هندسه های مختلف، اغلب فرم بی بعد آن ها ارائه می شود. در این پایان نامه برای بی بعد سازی از همان روابط موجود در استاندارد به صورت (۱-۶) استفاده شده است:



شکل ۵- نحوه تعریف سرعت باد نسبت به قطار (v_a) و زاویه انحراف نسبی (β)

مطابق استاندارد EN14067-1:2003 و شکل ۶ نحوه تعریف نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی به صورت زیر است:

- نیروی آیرودینامیکی قطار در راستای طولی آن و به سمت جلو که موازی محور x و به سمت مثبت آن است، نیروی پسا^۱ نامیده شده و با علامت F_x نشان داده شده است. گشتاور حول محور x ، گشتاور غلتشی نامیده شده و با علامت M_x نشان داده شده است.

² Lateral Force-Side Force

³ Pitching Moment

¹ Drag Force

موقعیت عرضی مرکز جرم است که در صورت عبور قطار از قوس دارای بربلندی^۱، مخالف صفر خواهد بود. M_m گشتاور بازگرداننده ناشی از جرم وسیله نقلیه در مسیر مستقیم است. f_{AQ} ضریب بار برداری نامیده می‌شود. f_m ضریب روش و معیاری از عدم قطعیت نتایج است که برای واگن‌های مسافری و لکوموتیوهای با عرض خط استاندارد^۲، برابر ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود [۳۴].

یک کاربرد رابطه (۷) تعیین سرعتی است که منجر به واژگونی می‌شود. در این صورت، ضریب بار برداری برابر ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود [۳۴] و با ثابت فرض کردن ضریب گشتاور غلتشی و به کمک روابط (۸ و ۹)، سرعت بحرانی تعیین می‌شود. برای استفاده از دو رابطه (۸ و ۹)، باید جفت‌های متناظر $C_{Mx,lee}$ و β را در نظر گرفت که به ازای هر $C_{Mx,lee}$ و β ، یک v_a^2 بدست آمده است. در دو رابطه فوق، v_a^2 و β معلوم هستند و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف بین 0° تا 180° برای β_w ، مقادیر مختلفی از v_w و v_{tr} تعیین می‌شود. با تکرار مراحل فوق برای تمامی جفت‌های متناظر $C_{Mx,lee}$ و β و مقایسه کمترین v_w در یک v_{tr} مشخص، نمودار سرعت بحرانی بدست می‌آید.

$$v_a^2 = (v_w \cdot \cos \beta_w + v_{tr})^2 + (v_w \cdot \sin \beta_w)^2 \quad (8)$$

$$\tan \beta = \frac{v_w \cdot \sin \beta_w}{v_w \cdot \cos \beta_w + v_{tr}} \quad (9)$$

کاربرد دیگر مربوط به تعیین بربلندی یا شعاع انحنای لازم برای عبور ایمن قطار از قوس است. کاربرد سوم که در این مقاله از آن استفاده شده، تعیین معیاری برای سنجش میزان خطر حرکت یک قطار متحرک با سرعت ثابت تحت باد عرضی است. برای این منظور، تمامی گشتاورها محاسبه و در رابطه (۷) جایگزین می‌شود و تنها ضریب بار برداری مجهول فرض می‌شود. در این حالت ضریب بار برداری، خود معیاری از خطر واژگونی است.

$$C_{Fx} = \frac{2F_x}{\rho U^2 S} \quad (1) \quad \text{ضریب نیروی پسا}$$

$$C_{Fy} = \frac{2F_y}{\rho U^2 S} \quad (2) \quad \text{ضریب نیروی عرضی}$$

$$C_{Fz} = \frac{2F_z}{\rho U^2 S} \quad (3) \quad \text{ضریب نیروی برآ}$$

$$C_{Mx} = \frac{2M_x}{\rho U^2 S D_h} \quad (4) \quad \text{ضریب گشتاور غلتشی}$$

$$C_{My} = \frac{2M_y}{\rho U^2 S D_h} \quad (5) \quad \text{ضریب گشتاور پرتابی}$$

$$C_{Mz} = \frac{2M_z}{\rho U^2 S D_h} \quad (6) \quad \text{ضریب گشتاور انحرافی}$$

که در روابط (۱-۶) ρ چگالی سیال در ورودی، U سرعت جریان در ورودی، S مساحت مشخصه و D_h قطر هیدرولیکی سطح مقطع قطار است. مطابق استاندارد، S و D_h به صورت ثابت، به ترتیب برابر 10 m^2 و 3 m در نظر گرفته می‌شود [۳۳].

از نظر پایداری حرکت قطار، مهم‌ترین عامل، گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه است که با $M_{x,lee}$ نشان داده می‌شود و از گشتاور نیروهای ناشی از فشار سطح قطار حول ریل دور از باد (بادپناه)، به وجود می‌آید. در صورتی که در رابطه (۴)، به جای گشتاور غلتشی (M_x)، گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه ($M_{x,lee}$) قرار بگیرد، ضریب گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه ($C_{Mx,lee}$) حاصل می‌شود.

علاوه بر ارائه ضرایب آیرودینامیکی، برای مقایسه ساده‌تر خطر واژگونی، ضریب بار برداری تعریف شده است. تعریف این ضریب به کمک رابطه موجود در استاندارد En14067-6:2010 [۳۴] که از تعادل نیروهای وارد بر قطار استخراج شده، انجام شده است (مطابق شکل ۶).

رابطه تعادل گشتاورها حول ریل بادپناه، به صورت زیر قابل بیان است:

$$\sum M = f_{AQ} \cdot \frac{1}{f_m} \cdot M_m + M_{CoG} + M_{Ia} - M_{x,lee} = 0 \quad (7)$$

$M_{x,lee}$ گشتاور آیرودینامیکی غلتشی حول ریل بادپناه است که از شبیه‌سازی بدست می‌آید. M_{Ia} گشتاور ناشی از شتاب عرضی خنثی نشده است که به پاسخ سیستم تعلیق حین عبور از قوس بستگی دارد. M_{CoG} گشتاور ناشی از تغییر

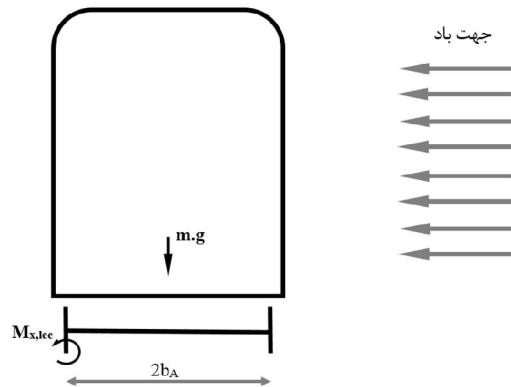
¹ Cant

² Standard Gauge (1435mm)

در رابطه اخیر، \bar{v} تانسور تنش سیال، \vec{g} بردار شتاب گرانش و \vec{F}_B بردار نیروهای حجمی خارجی است. به حرکت سه بعدی، ناپایا و اتفاقی^۱ سیال که در رینولدزهای بالا قابل مشاهده است، جریان آشفته گفته می شود. برای کاهش هزینه محاسباتی، به جای شبیه سازی عددی مستقیم^۲ از مدل آشفته برای تحلیل جریان استفاده می شود. در این مقاله با توجه به عدد رینولدز بالای جریان، از مدل آشفته $k-\epsilon$ قابل درک^۳ ارائه شده توسط شیه و همکاران [۳۵]، به فرم تراکم پذیر برای حل جریان، تعیین توزیع فشار اطراف مدل ها و تعیین ضرایب آیرودینامیکی بکار گرفته شده است.

به طور کلی دو روش برای تحلیل رفتار جریان نزدیک دیواره وجود دارد؛ در روش اول با استفاده از مش های لایه مرزی متراکم و مدل آشفته مناسب، معادلات مدل های آشفته در لایه مرزی حل می شود. در روش دوم به جای حل معادلات مدل آشفته در مش های لایه مرزی، از توابع دیواره^۴ برای تقریب متغیرهای جریان در سلول مجاور دیواره استفاده می شود. با توجه به هزینه محاسباتی کمتر و دقت مناسب، در این مقاله از روش دوم و تابع دیواره مقیاس پذیر^۵ استفاده شده است.

تابع دیواره استاندارد حاصل کار لاندنر و اسپالدینگ [۳۶] است که کاربرد گسترده ای در تحلیل جریان های صنعتی دارد. محدوده مقادیر y^* که تابع دیواره برای آنها مناسب است، به عدد رینولدز کلی جریان بستگی دارد. حد پایین، همواره در محدوده $15 \sim y^*$ است. پایین تر از این مقدار، تابع دیواره بدتر عمل می کند و دقت حل مناسب باقی نمی ماند (بجز تابع دیواره مقیاس پذیر). حد بالا به شدت به عدد رینولدز جریان وابسته است. تابع دیواره مقیاس پذیر از بدتر شدن نتایج تابع دیواره استاندارد در شرایطی که شبکه بگونه ای ریز شده است که $11 < y^*$ ، جلوگیری می کند. این تابع دیواره نتایجی برای شبکه هایی که به حد دلخواه ریز



شکل ۶- طرحواره قطار، نحوه اثر نیروی گرانش و گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه

با توجه به شکل ۶، ضریب بار برداری که با فرض حرکت در مسیر مستقیم و صرف نظر کردن از M_{COG} و M_{Ia} بدست آمده، ضریب بار برداری آیرودینامیکی نامیده شده، با علامت $f_{\Delta Q, aero}$ نشان داده شده و از رابطه (۱۰) بدست آمده است.

$$f_{\Delta Q, aero} = \frac{M_{x, lee} \cdot f_m}{M_m} \quad (M_m = m \cdot g \cdot b_A / 2) \quad (10)$$

در رابطه محاسبه عدد رینولدز، d طول مشخصه است که در غالب مقالات و مراجع به صورت ثابت و برابر ۳ m در نظر گرفته می شود [۳۴].

با توجه به ابعاد بزرگ قطار و سرعت بالای جریان، در بحث آیرودینامیک وسایل نقلیه ریلی، غالباً با جریان آشفته مواجه هستیم. در این مقاله عدد رینولدز در محدوده 1.5×10^7 تا 3.3×10^7 است.

عدد ماخ به صورت نسبت سرعت سیال به سرعت صوت تعریف می شود که معیاری از تراکم پذیری جریان است. در این مقاله عدد ماخ در محدوده ۰.۱۹-۰.۴ است و شبیه سازی ها به صورت گاز ایده آل تراکم پذیر انجام شده است.

قانون بقای جرم و بقای اندازه حرکت سیالات به فرم تراکم پذیر مطابق روابط (۱۳) و (۱۴) است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}_B \quad (14)$$

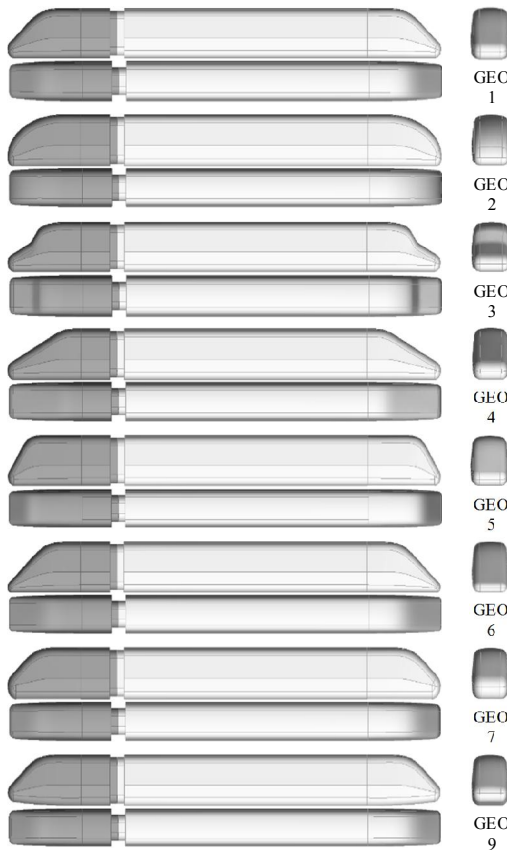
¹ Random

² Direct Numerical Simulation (DNS)

³ Realizable

⁴ Wall Function

⁵ Scalable



شکل ۸- مدل‌های مورد بررسی

۲-۴- دامنه محاسباتی

بر اساس استاندارد EN14067-6:2013، حداقل فاصله لازم بین نوک دماغه و مرز جلویی، ۸ برابر ارتفاع مشخصه (h_c) و فاصله بین انتهای مدل و مرز انتهایی ۱۶ برابر این مقدار است [۳۴]. ارتفاع مشخصه به صورت مجموع ارتفاع قطار و فاصله قطار از کف است.

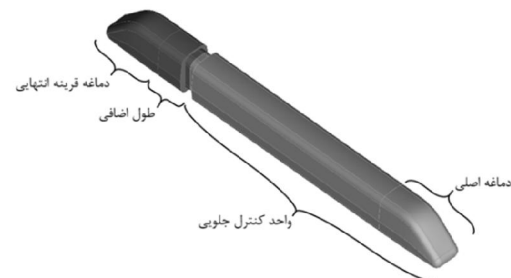
رولن و همکاران [۲۴] از دامنه محاسباتی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۷، ۱۹ و ۷ برابر ارتفاع قطار (h_{tr}) استفاده کردند که فاصله نوک دماغه از بالادست جریان، ۵ برابر ارتفاع قطار بود.

کراژنویچ و همکاران [۲۵] از دامنه محاسباتی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵۱، ۲۶ و ۱۰ برابر ارتفاع قطار استفاده کردند.

هستند، دارد و برای شبکه‌هایی که مش‌هایی درشت‌تر از $11 < \gamma^*$ دارند با تابع دیواره استاندارد یکسان است.

۲-۳- مدل‌سازی

اولین گام در انجام شبیه‌سازی عددی، تولید هندسه مطلوب است. هندسه باید مطابق با مدل فیزیکی و بدون شکاف، ناپیوستگی و موارد ناخواسته باشد. در شکل ۷ قطار ICE2 و قسمت‌های مختلف آن نشان داده شده است.



شکل ۷- معرفی برخی از اجزای قطار واقعی

در این پژوهش برای بررسی اثر پارامترهای هندسی نظیر: زاویه نوک دماغه (طول دماغه)، ضخامت نوک دماغه، ارتفاع نوک دماغه و ...، ۹ هندسه تولید شده است. مدل قطار ICE2 به عنوان هندسه پایه در نظر گرفته شده و ۸ هندسه دیگر با اعمال پارامترهای هندسی بدست آمده است. این هندسه‌ها در مقیاس ۱:۱ و با ساده سازی جزئیاتی نظیر، برف پاک‌کن‌ها، برآمدگی و فرورفتگی پنجره‌ها، پانتوگراف و زوائد جزئی با حذف چرخ محورها و بوژی‌ها تولید شده است. طبق استاندارد EN14067-6:2013، هندسه‌ها شامل یک واحد کنترل جلویی با طول اصلی و یک دماغه و اندکی طول اضافی به صورت قرینه در پشت واحد جلویی است. با توجه به اینکه در شرایط معمول بهره‌برداری، پس از واحد کنترل جلویی، چند واگن قرار می‌گیرد، این نحوه مدل‌سازی سبب ایجاد شباهت بیشتر با شرایط معمول بهره‌برداری می‌شود و از ایجاد الگوهای جریان غیر واقعی و جدایش جریان غیر واقعی جلوگیری می‌کند. در تمامی هندسه‌ها طول واحد کنترل جلویی ۲۶/۵۷ m و طول کل ۳۵/۵۷ m است. عرض هندسه‌ها ۲/۹۹ m و ارتفاع آن‌ها ۳/۷۵ m است.

جدول ۲- مقایسه شبکه‌های محاسباتی تولید شده

نام مدل	ویژگی مدل	پارامتر مورد بررسی		
		انحنای فوقانی دماغه	زاویه نوک دماغه	ضخامت نوک دماغه
GEO1	مدل پایه - ICE2	*	*	*
GEO2	دماغه بیضی شکل	*		
GEO3	دماغه دو قوسی	*		
GEO4	زاویه نوک دماغه کمتر	*		
GEO5	زاویه نوک دماغه بیشتر	*		
GEO6	نوک دماغه نازک‌تر		*	
GEO7	نوک دماغه ضخیم‌تر		*	
GEO9	ارتفاع نوک دماغه بیشتر			*

ریز	متوسط	درشت
ارتفاع اولین لایه (mm)	۰/۲ تا ۰/۵	۰/۲ تا ۰/۵
اندازه مش سطحی (mm)	۳۰ تا ۵۶	۴۰ تا ۶۵
تعداد مش سطحی	۳۳۷ هزار	۲۸۴ هزار
تعداد مش حجمی	۷ میلیون	۵/۹ میلیون

در این مقاله، با توجه به بررسی سرعت بیشتر نسبت به کارهای پیشین، ابعاد محتاطانه‌تری انتخاب شده است. فاصله نوک دماغه تا بالادست جریان h_c 15، فاصله انتهای قطار تا پایین دست جریان $32h_c$ ، ارتفاع دامنه محاسباتی h_c 11 و عرض آن $40h_c$ در نظر گرفته شده است.

۲-۵- شبکه محاسباتی

در این پژوهش، در ابتدا به کمک نرم افزار ICEM CFD، چند شبکه محاسباتی با کیفیت مش و تعداد متفاوت تولید شده است. در تمامی شبکه‌های محاسباتی تولید شده، مش‌ها از نوع چهار وجهی-منشوری است. با وجود اینکه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ قابل درک، معادلات را در لایه مرزی حل نمی‌کند و تنها از توابع دیوار برای تقریب زدن متغیرهای جریان نظیر k ، ϵ و ... استفاده می‌کند؛ اما برای همگرایی بهتر، از ۵ لایه مش لایه مرزی روی کل سطح مدل استفاده شده است که در دو ستون اول جدول ۳ به ترتیب ارتفاع اولین لایه مش لایه مرزی و اندازه هر ضلع آن روی سطح مدل ارائه شده است.

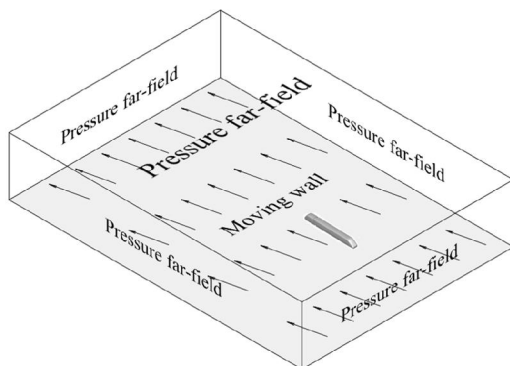
جدول ۳- مقایسه شبکه‌های محاسباتی تولید شده

مش‌های تولید شده از نوع بدون سازمان^۱ هستند و به کمک ابزارهای تولید مش خودکار نرم افزار، تولید شده‌اند تا زمان مراحل پیش پردازش کاهش یابد. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی، از سه شبکه محاسباتی با مش‌های درشت، متوسط و ریز در شبیه‌سازی جریان اطراف مدل قطار ICE2 در دو زاویه انحراف 0° و 10° و سرعت جریان 70 m/s استفاده شده است.

¹ Unstructured

فشار دور دست است. در واقع با این کار سرعتها به دید ناظر متحرک داخل قطار است؛ همچنین فشار دور دست فشار نسبی صفر یا فشار مطلق برابر یک اتمسفر در نظر گرفته شده است که با توجه به داشتن سرعت و فشار، خود به عنوان شرط مرزی ورودی و شرط مرزی خروجی نیز عمل می کند.

- با توجه به اینکه یک روش مدلسازی بستر، به صورت سطح صاف است که در این پژوهش نیز به همین صورت مدلسازی شده است، از شرط عدم لغزش در کنار شرط مرزی دیواره متحرک با سرعت نسبی بین باد و قطار استفاده شده است.
- باید یادآوری کرد که استفاده از دو شرط فوق، موجب ایجاد یک پروفیل سرعت یکنواخت می شود.

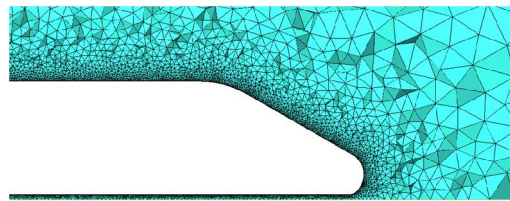


شکل ۱۰- شرایط مرزی بکار گرفته شده در شبیه سازی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبار سنجی

برای بررسی صحت نتایج، در شکل های ۱۱ و ۱۲، نتایج مربوط به شبیه سازی جریان با سرعت قطار ۱۰۰ m/s، سرعت باد ۳۰ m/s و زاویه وزش باد بین ۱۰° تا ۱۱۰° که معادل سرعت جریان ۱۳۰ m/s تا ۹۴ m/s و زاویه انحراف بین ۲/۳۵ تا ۱۷/۴° است، با نتایج تست های تونل باد اورلانو و شوبر [۱] با سرعت جریان ۷۰ m/s و زاویه انحراف بین ۰° تا ۲۰° مقایسه شده است.



شکل ۹- نمای جانبی از مش های نزدیک سطح

جدول ۴- نتایج شبیه سازی با شبکه های محاسباتی مختلف

درشت	متوسط	ریز	
۰/۱۷۵	۰/۱۷۷	۰/۱۸۱	ضریب برآ (۰°)
-۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۰۲	ضریب نیروی جانبی (۰°)
۰/۰۹۶	۰/۱۰۶	۰/۱۰۴	ضریب برآ (۱۰°)
۰/۹۶۲	۰/۹۷۱	۰/۹۶۹	ضریب نیروی جانبی (۱۰°)

همانطور که از جدول ۴ مشاهده می شود، نتایج حاصل از سه شبکه محاسباتی بسیار بهم نزدیک است؛ لذا در ادامه از شبکه محاسباتی میانی برای سایر تحلیل ها نیز استفاده شده است. برای سایر هندسه ها نیز، از روش مش زنی و ابعاد مش مشابه با مش میانی استفاده شده است.

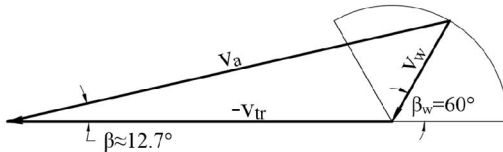
۲-۶- شرایط مرزی و پردازش

مرحله پردازش، یعنی حل معادلات حاکم بر سیال، به کمک نرم افزار ANSYS Fluent انجام شده است. این نرم افزار بر مبنای حجم محدود کار می کند. در این پژوهش، از تنظیمات حل بر مبنای فشار با طرح گسسته سازی SIMPLE و معادلات مرتبه دوم استفاده شده است. استفاده از مرتبه دوم، همگرایی معادلات را دشوار، اما دقت حل را افزایش می دهد. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ قابل درک و تابع دیواره مقیاس پذیر بکار گرفته شده است. علاوه بر این ها، شرایط مرزی اعمال شده در نرم افزار به صورت زیر است:

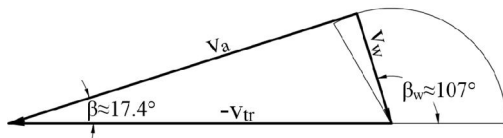
- برای تمام سطح مدل از شرط عدم لغزش استفاده شده است.
- برای مرزهای پیرامون و بالای دامنه محاسباتی از شرط فشار دور دست استفاده شده که خود شامل: عدد ماخ جریان، مؤلفه های بردار سرعت جریان و

۲-۳- بررسی اثر تغییر زاویه وزش باد بر هندسه پایه
ابتدا در یک سرعت قطار ثابت و یک سرعت باد ثابت، اثر تغییر زاویه وزش باد مورد ارزیابی قرار گرفته است تا محدوده بحرانی زاویه وزش باد تعیین گردد. در این ارزیابی، سرعت قطار ثابت و برابر با 100 m/s ، سرعت باد ثابت و برابر 30 m/s در نظر گرفته شده است؛ همچنین محدوده مورد بررسی برای زاویه وزش باد بین 10° تا 120° (با گام 10°) است.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، برای نمونه، نحوه تأثیر سرعت قطار، سرعت باد و زاویه وزش باد در ایجاد زاویه نسبی باد به قطار و سرعت جریان، به ترتیب در دو زاویه وزش باد کمتر از 90° و بیشتر از 90° (در سرعت قطار 100 m/s و سرعت باد 30 m/s) نشان داده شده است. قطاع دایره‌ای مشخص شده در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، نشان دهنده محدوده زوایای وزش باد مورد بررسی (0° تا 120°) است که معادل زاویه نسبی باد به قطار 0° تا $17/4^\circ$ است؛ همچنین شکل ۱۵، زاویه وزش باد منجر به حداکثر زاویه نسبی باد به قطار را نیز نشان می‌دهد.

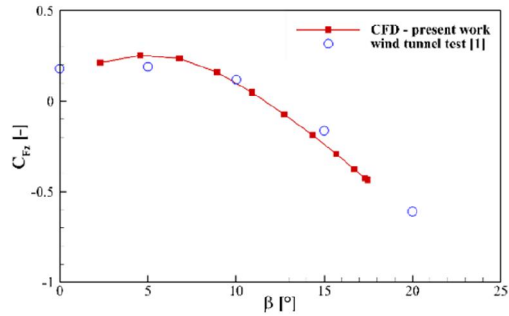


شکل ۱۴- نحوه تأثیر سرعت قطار، سرعت باد و زاویه وزش باد در زوایای وزش باد کمتر از 90°

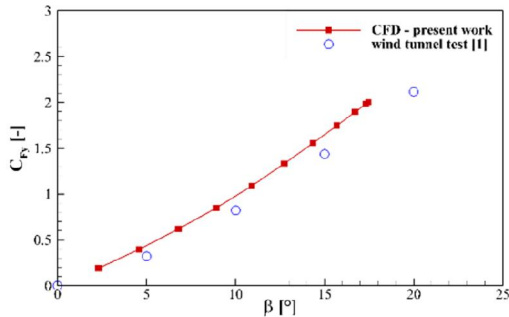


شکل ۱۵- نحوه تأثیر سرعت قطار، سرعت باد و زاویه وزش باد در زوایای وزش باد بیشتر از 90°

برای مشاهده کیفی اثر تغییر زاویه وزش باد بر میدان فشار و سرعت هندسه پایه، خطوط جریان، کانتور فشار سمت بادگیر و کانتور فشار سمت بادپناه، به ترتیب، در زوایای 30° ، 60° ، 90° و 120° ارائه شده است.

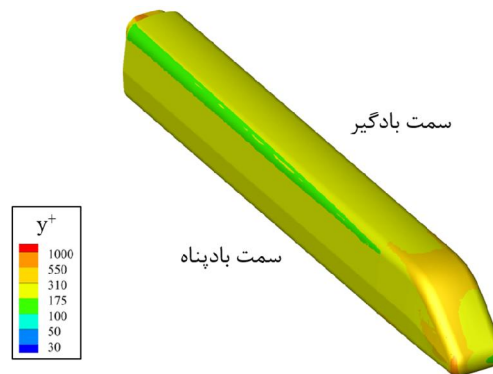


شکل ۱۱- مقایسه نتایج ضریب برآ بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تست‌های تونل باد



شکل ۱۲- مقایسه نتایج ضریب نیروی جانبی بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تست‌های تونل باد

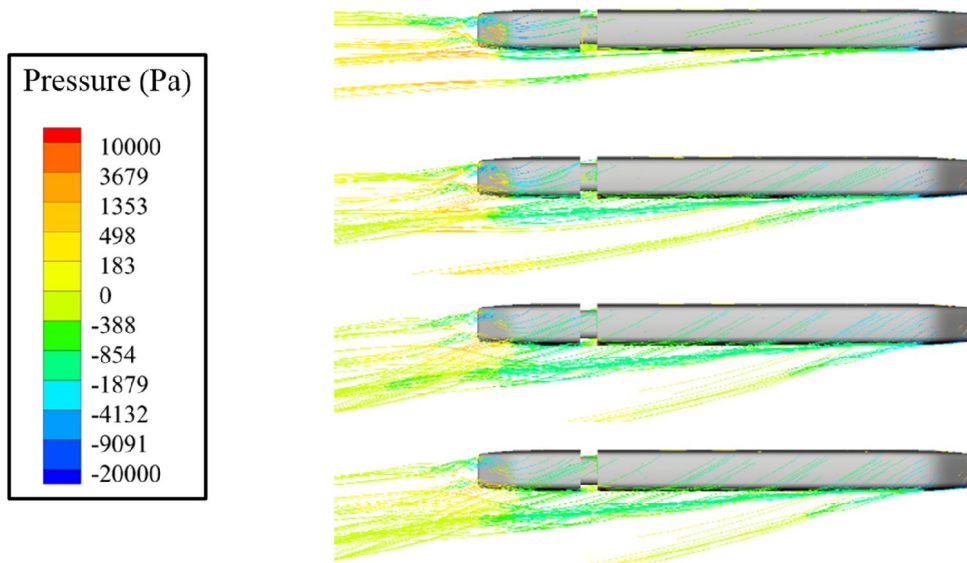
همانطور که از شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده به نتایج تونل باد نزدیک است که نشان‌دهنده صحت نتایج بدست آمده است. علاوه بر این‌ها، کانتور y^+ مربوط به شبکه محاسباتی با اندازه مش متوسط در شکل ۱۳ ارائه شده است.



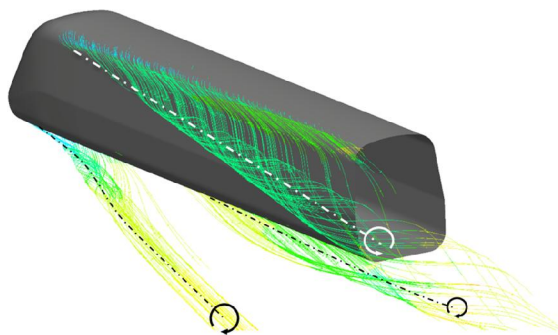
شکل ۱۳- کانتور y^+ مربوط به شبکه با مش متوسط

داد که در زوایای نسبی باد به قطار کم تا 40° یا حداکثر 50° و برای یک هندسه قطار ایده‌آل، الگوی ویک‌ها به صورت شکل فوق خواهد بود. با توجه به اینکه تمامی بررسی‌های این پژوهش در همین محدوده قرار می‌گیرد، تطابق خوبی بین الگوی خطوط جریان ارائه شده در شکل ۱۸، با مقاله کپلی، شکل ۱۷ مشاهده می‌شود.

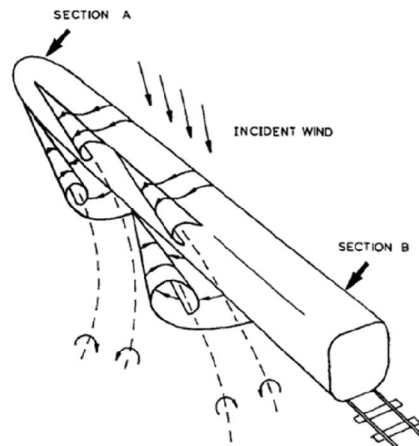
از مقایسه خطوط جریان در زوایای وزش مختلف مشاهده می‌شود که در زوایای وزش کوچک، جدایش جریان و ویک‌ها غالباً به ناحیه انتهای قطار محدود می‌شود، اما با افزایش زاویه وزش باد، آشفتگی جریان افزایش یافته و جدایش جریان از سطوح فوقانی و تحتانی قطار نیز رخ می‌دهد و الگوهایی نظیر الگوهای ارائه شده در مقاله کپلی [۳۷]، شکل ۱۷ را به وجود می‌آورد. نتایج کار کپلی نشان



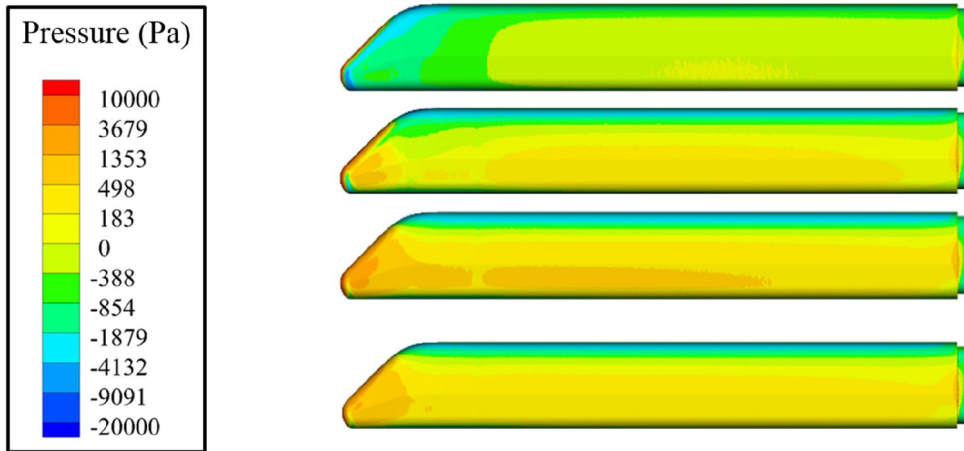
شکل ۱۶- خطوط جریان هندسه پایه



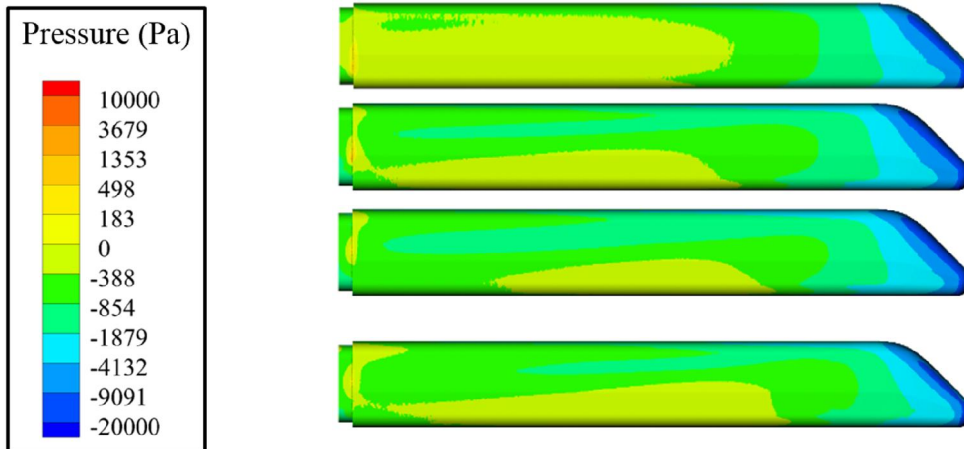
شکل ۱۸- الگوی ویک‌های بدست آمده از شبیه‌سازی عددی در زاویه نسبی باد به قطار $16/7^\circ$



شکل ۱۷- الگوی ویک‌ها در زاویه نسبی باد به قطار زیر 40° [۳۷]



شکل ۱۹- کانتورهای فشار نسبی سمت بادگیر هندسه پایه

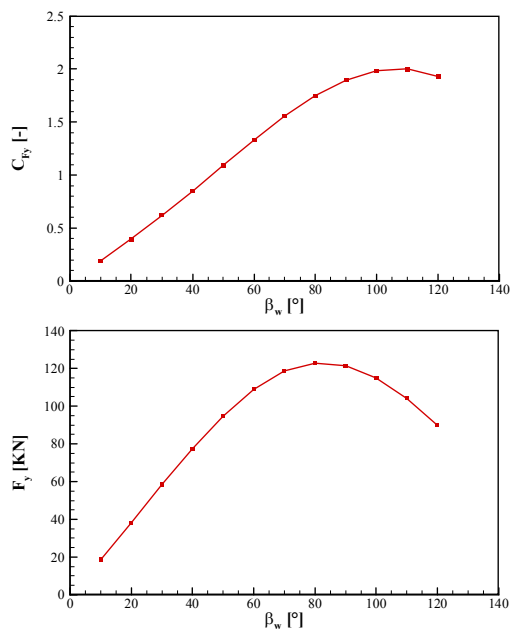


شکل ۲۰- کانتورهای فشار نسبی سمت بادپناه هندسه پایه

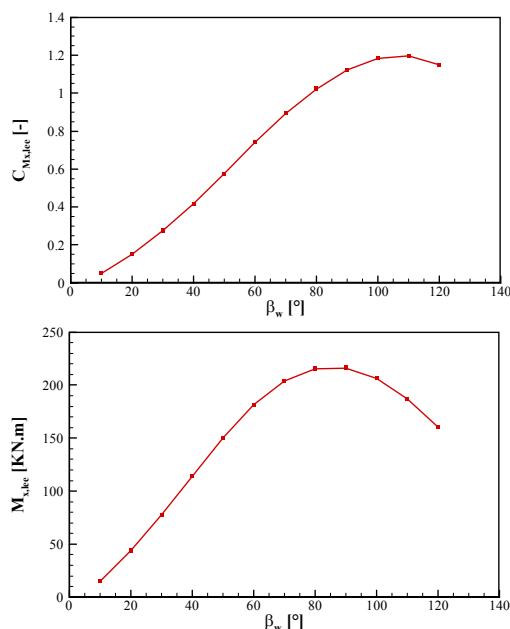
ایجاد نیروی قائم اضافی به خط و زیر سازی می شود و در زوایای وزش کوچک (حدود 20°) رخ می دهد. بیشینه منفی، نشان دهنده حداکثر نیروی رو با بالاست که عامل ایجاد ناپایداری در حرکت قطار است و در زوایای وزش 90° تا 100° رخ می دهد. باید توجه کرد که برای بی بعدسازی مطابق استاندارد، از سرعت نسبی باد به قطار در مخرج کسر استفاده شده است و در زوایای وزش کوچک، سرعت نسبی ناشی از سرعت قطار و سرعت باد در نظر گرفته شده، بیشتر از سرعت نسبی در زوایای وزش بزرگ است؛ لذا با وجود اینکه از نظر ضریب برآ، بیشینه منفی در زاویه حدود 110°

در شکل های ۱۹ و ۲۰، مشاهده می شود که توزیع فشار نسبی در سمت بادگیر، در محدوده اعداد مثبت و در سمت بادپناه، در محدوده اعداد منفی است. این اختلاف فشار عامل ایجاد نیروی عرضی شدید بر هندسه موجود در مسیر باد عرضی است. از طرف دیگر مشاهده می شود که اختلاف فشار در زوایای وزش باد کوچک، کمتر است که عامل کمتر بودن نیروی عرضی در این زوایاست.

از شکل ۲۱ مشاهده می شود که ضریب و نیروی برآ دارای یک بیشینه مثبت و یک بیشینه منفی است. بیشینه مثبت، نشان دهنده حداکثر نیروی رو به پایین است که سبب



شکل ۲۲- بررسی اثر زاویه وزش باد بر ضریب و نیروی جانبی برای هندسه ۱، ICE2

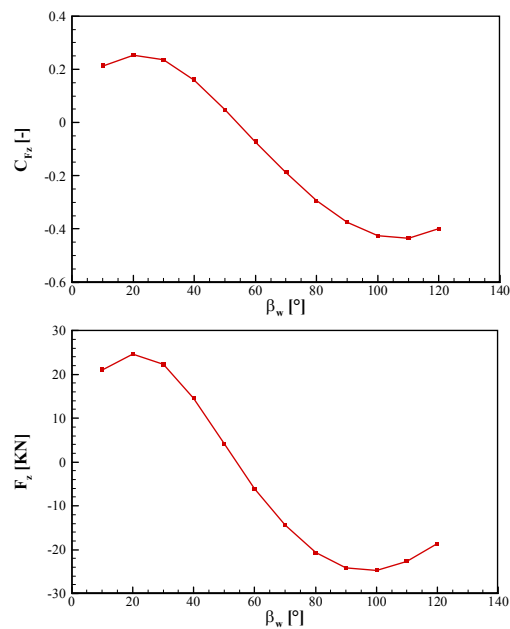


شکل ۲۳- بررسی اثر زاویه وزش باد بر ضریب و گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه برای هندسه ۱، ICE2

رخ می‌دهد، اما از نظر نیرویی که از نظر پایداری حرکت قطار نیز دارای اهمیت است، بیشینه منفی نیروی برآ، در زاویه حدود ۹۰° تا ۱۰۰° مشاهده می‌شود؛ بنابراین در بررسی تأثیر زاویه وزش، سرعت قطار و سرعت باد نمودارهای مربوط به ضریب و نیرو یا ضریب و گشتاور هر دو ارائه شده است.

از شکل ۲۲ مشاهده می‌شود که ضریب و نیروی جانبی با افزایش زاویه وزش باد، به تدریج افزایش یافته و در زاویه وزش باد حدود ۱۱۰° حداکثر ضریب نیروی جانبی و در محدوده ۸۰° تا ۹۰° حداکثر نیروی جانبی رخ می‌دهد. همواره نیروی جانبی مثبت است که نشان می‌دهد، هیچگاه نیروی جانبی در خلاف جهت وزش باد نیست.

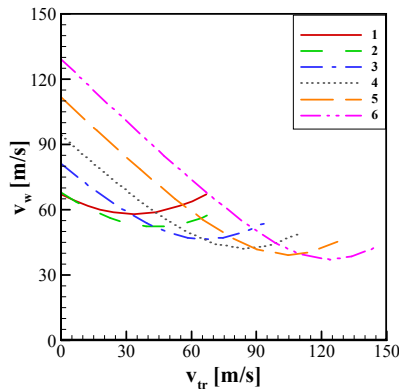
همانطور که از شکل ۲۳ قابل مشاهده است، بیشینه ضریب گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه، در زاویه وزش باد حدوداً ۱۰۰° و بیشینه گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه در محدوده زاویه وزش باد ۸۰° تا ۹۰° اتفاق می‌افتد؛ لذا برای بررسی اثر سرعت باد و سرعت قطار بر ضرایب و نیروهای آیرودینامیکی واگن جلویی، تحلیل‌ها در زاویه وزش باد ۹۰°



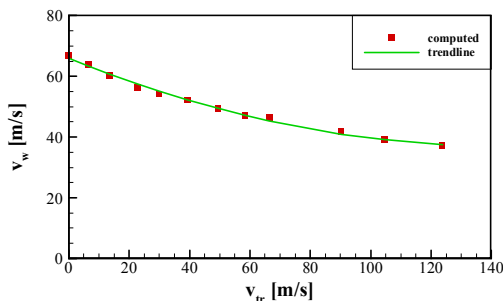
شکل ۲۴- بررسی اثر زاویه وزش باد بر ضریب و نیروی برآ برای هندسه ۱، ICE2

جدول ۵- جدول زاویه نسبی باد (β) و سرعت برآیند باد و قطار (V_a) محاسبه شده بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های این پژوهش و مرجع [۱]

شماره خط	V_a [m/s]	β [°]
۱	۶۶/۸۳	۶۰
۲	۶۷/۶۴	۵۰
۳	۸۱/۱۳	۳۵
۴	۹۴/۲۴	۲۷
۵	۱۱۱/۶۶	۲۱
۶	۱۲۹/۲۱	۱۷



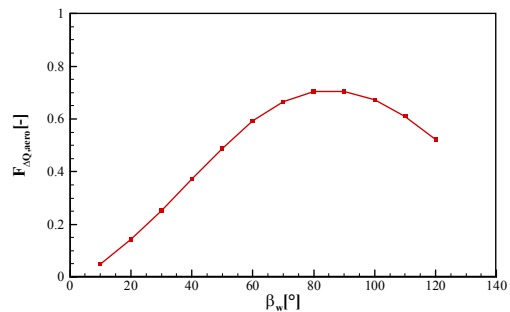
شکل ۲۴- منحنی‌های مولد منحنی سرعت بحرانی واژگونی بر اساس زاویه نسبی باد (β) و سرعت برآیند باد و قطار (V_a)



شکل ۲۵- نمودار سرعت باد بحرانی بر حسب سرعت قطار برای هندسه ۱، ICE2

انجام شده است؛ همچنین زاویه وزش باد مورد بررسی، برای مقایسه عملکرد هندسه‌های مختلف در سرعت قطار m/s ۱۰۰ و سرعت باد m/s ۳۰، از ۶۰° تا ۱۲۰° تعیین شده است که شامل ناحیه بحرانی، از نظر ایمنی و پایداری حرکت قطار باشد.

در شکل ۲۴ نمودار اثر زاویه وزش باد بر ضریب بار برداری آیرودینامیکی، برای هندسه ۱ (مدل قطار ICE2)، در سرعت قطار m/s ۱۰۰ و سرعت باد m/s ۳۰ ارائه شده است.



شکل ۲۶- بررسی اثر زاویه وزش باد بر ضریب بار برداری آیرودینامیکی برای هندسه ۱، ICE2

با توجه به نمودار ارائه شده، در سرعت قطار و سرعت باد مورد بررسی، بیشترین خطر واژگونی برای مدل قطار ICE2 در زاویه وزش باد بین ۸۰° تا ۹۰° درجه ایجاد می‌شود. برای تعیین نمودار سرعت بحرانی واژگونی بر اساس نتایج بدست آمده در سرعت‌های مختلف قطار و باد و زوایای وزش، ابتدا با توجه به توضیحات فصل ۲ (روابط ۷ تا ۹)، جدول زاویه نسبی باد (β) و سرعت برآیند باد و قطار (V_a)، به صورت جدول ۵ تشکیل می‌شود.

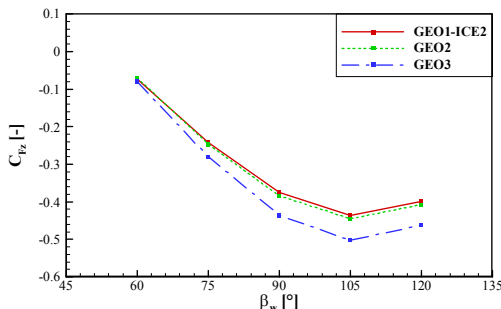
برای هر زاویه نسبی باد (β) و سرعت برآیند باد و قطار (V_a) می‌توان منحنی‌ای رسم کرد که در آن زاویه وزش باد β_w متفاوت، ولی زاویه نسبی باد (β) و سرعت برآیند باد و قطار (V_a) یکسان است، یعنی شکل ۲۵. پایین‌ترین نقاط منحنی مذکور، آستانه واژگونی و در واقع نقاط نمودار سرعت بحرانی واژگونی، شکل ۲۶ را ایجاد می‌کنند.

شکل ۲۶ سرعت باد آستانه واژگونی قطار ICE2 (مدل پایه)، در هر سرعت قطار مشخص را معلوم می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود، در سرعت قطار کم، سرعت بحرانی باد بیشتر است؛ در این محدوده سرعت قطار، سرعت بحرانی باد

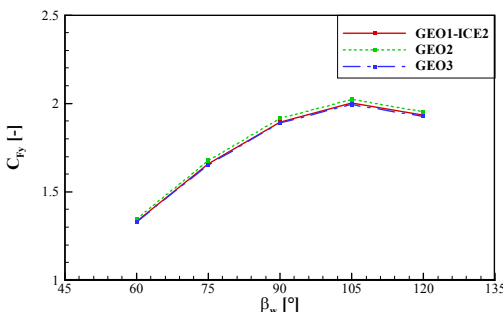
مقایسه شده است. مزیت هندسه ۲ در عمل، سهولت ساخت و فضای بیشتر کابین برای راهبر قطار و مزیت هندسه ۳ امکان داشتن زاویه دید مناسب برای راهبر قطار در کنار یک دماغه کشیده است.

از دید ضریب برآ، هندسه‌های عملکرد بهتری دارد که در تمامی زوایای وزش باد، مقدار کوچک‌تری داشته باشد. مقادیر مثبت نشان دهنده اعمال نیروی قائم رو به پایین بر خط و زیر سازی و به معنای افزایش هزینه نگهداری خط است و مقادیر منفی، نشان دهنده خطر واژگونی است. با توجه به شکل ۲۸، از دید ضریب برآ، هندسه ۱ بعلت داشتن مقادیر کوچک‌تر، عملکرد بهتری دارد.

از دید ضریب نیروی جانبی، هندسه‌ای که مقادیر کوچک‌تر داشته باشد، عملکرد بهتری دارد. از این نظر، با توجه به شکل ۲۹، عملکرد سه هندسه بسیار نزدیک است؛ هر چند که عملکرد هندسه ۱ و ۳ اندکی بهتر از هندسه ۲ است.



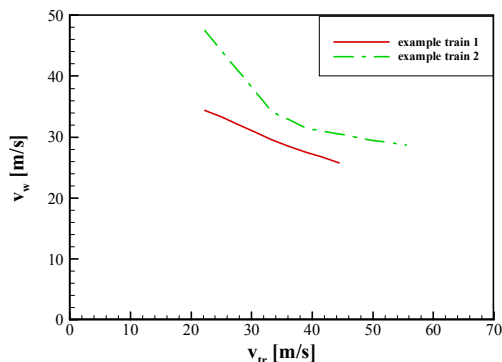
شکل ۲۸- نمودار ضریب برآ بر حسب زاویه وزش باد برای هندسه‌های ۲، ۱ و ۳



شکل ۲۹- نمودار ضریب نیروی جانبی بر حسب زاویه وزش باد برای هندسه‌های ۲، ۱ و ۳

آنچنان بالاست که تقریباً وقوع واژگونی غیر محتمل به نظر می‌رسد؛ بنابراین برای مقایسه عملکرد آیرودینامیکی هندسه‌های مختلف، بررسی‌ها به سرعت قطار ۱۰۰ m/s و سرعت باد ۳۰ m/s محدود می‌شود.

برای مقایسه، منحنی سرعت بحرانی دو قطار مختلف که بر اساس جداول و داده‌های موجود در استاندارد En14067-6:2010 ترسیم شده، در شکل ۲۷ ارائه شده است.



شکل ۲۷- نمودار سرعت باد بحرانی قطار نمونه ۱ و قطار نمونه ۲ (ترسیم شده بر اساس مرجع [۳۳])

۳-۴- مقایسه عملکرد هندسه‌های مختلف تحت باد عرضی

برای مقایسه عملکرد آیرودینامیکی هندسه‌های مختلف تحت اثر باد عرضی، هندسه‌هایی که تفاوت آن‌ها، تنها در یک پارامتر هندسی است با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به اینکه در بخش قبل روند تغییرات ضرایب آیرودینامیکی (بخصوص ضریب گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه) در زوایای وزش باد مختلف تعیین و علت تفاوت ناحیه بحرانی بین ضرایب آیرودینامیکی و ضریب بار برداری (که ناشی از گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه است)، از نظر زاویه وزش باد مشخص شد، در ادامه، برای مقایسه عملکرد هندسه‌های مختلف، تنها از ضرایب آیرودینامیکی و ضریب بار برداری استفاده شده است.

۳-۴-۱- اثر قوس فوقانی دماغه بر عملکرد آیرودینامیکی

در این بررسی هندسه ۱ یعنی مدل قطار ICE2، با هندسه ۲ (دماغه به شکل ربع بیضی) و هندسه ۳ (دماغه دوقوسی)

سرعت حدود ۳۰۰ Km/hr و بالاتر (در این مقایسه سرعت در نظر گرفته شده است) استفاده نمی شود و کاربرد این هندسه، بیشتر در سرعت های متوسط است. شاید یک دلیل این موضوع، همان پایداری حرکت ضعیف تر و ایمنی کمتر حرکت تحت باد عرضی باشد. از بین دو هندسه ۱ و ۳، در حداکثر ضریب بار برداری، هر دو عملکرد یکسانی از خود نشان می دهند، اما در زوایای وزش کمتر که خطر واژگونی کمتر است، هندسه ۳ اندکی بهتر عمل کرده است.

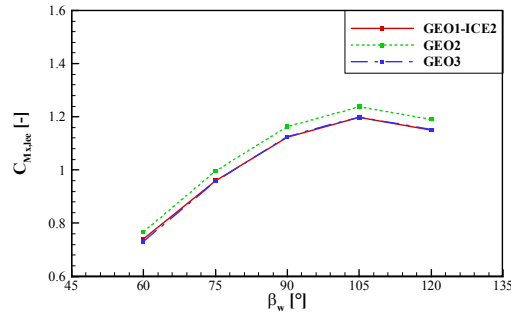
با توجه به اینکه نمودار بار برداری آیرودینامیکی، امکان مقایسه منطقی و ساده هندسه های مختلف از نظر خطر واژگونی را فراهم می آورد، برای بررسی اثر سایر پارامترهای هندسی، صرفاً از نمودار بار برداری آیرودینامیکی استفاده شده است.

۳-۴-۲- اثر زاویه نوک دماغه بر عملکرد آیرودینامیکی

دومین بررسی مربوط به زاویه نوک دماغه و در واقع کشیدگی دماغه است. در این بررسی، هندسه ۱ به عنوان هندسه پایه در نظر گرفته شده است و هندسه ۴ معادل زاویه نوک دماغه کمتر یا همان دماغه کشیده تر و هندسه ۵، معادل زاویه نوک دماغه بیشتر یا همان دماغه کوتاه تر است.

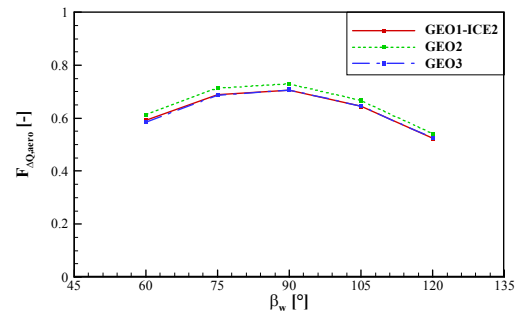
گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه، از اثر نیروی جانبی و نیروی برآ به وجود می آید. نیروی برآ در هندسه ۴ بیشتر از دو هندسه دیگر است؛ اما نیروی جانبی در هندسه ۴ کوچک تر است و به علت ارتفاع کمتر سطح فوقانی دماغه نسبت به دو هندسه دیگر در فاصله کمتری نسبت به محل تماس چرخ و ریل، یعنی محور گشتاور اعمال می شود، لذا گشتاور این نیرو نیز کوچک خواهد بود. همانطور که در شکل ۳۲ نشان داده شده است، هندسه ۴ دارای ضریب گشتاور غلتشی و ضریب بار برداری کوچک تری است که مطلوب تر است.

عملکرد هندسه ۴ به مراتب بهتر از عملکرد هندسه ۱ و ۵ است؛ بنابراین می توان از کشیده تر کردن دماغه (نسبت به هندسه پایه) یا به عبارت دیگر، کاهش زاویه نوک دماغه، به عنوان یک راه مؤثر برای کاهش خطر واژگونی نام برد. در سرعت های بالا، معمولاً هندسه دماغه تا حدودی کشیده تر و دارای زاویه نوک دماغه کمتری است که هم از نظر ایمنی و هم از نظر دوست دار محیط زیست بودن، مناسب عمل کند.



شکل ۳۰- نمودار ضریب گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه بر حسب زاویه وزش باد برای هندسه های ۳ و ۲، ۱

از دید ضریب گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه که مهمترین ضریب آیرودینامیکی از نظر پایداری حرکت قطار است، هندسه ای عملکرد بهتری دارد که دارای ضریب کوچک تری باشد. از این رو، با توجه به شکل ۳۰، هندسه ۱ و ۳ نسبت به هندسه ۲، عملکرد بهتری از خود نشان داده اند. باید توجه داشت که این ضریب خود نشان دهنده اثر دو ضریب برآ و ضریب نیروی جانبی است؛ لذا هندسه ۲ که ضریب برآ بزرگتری داشت، با وجود ضریب نیروی جانبی نزدیک به هندسه های ۱ و ۲، ضریب گشتاور غلتشی بزرگ تری کسب کرده است.



شکل ۳۱- نمودار ضریب بار برداری آیرودینامیکی بر حسب زاویه وزش باد برای هندسه های ۳ و ۲، ۱

نمودار ضریب بار برداری آیرودینامیکی امکان مقایسه منطقی عملکرد سه هندسه، از نظر ایمنی و پایداری حرکت را فراهم می آورد. با توجه به شکل ۳۱، در تمامی زوایای وزش باد، هندسه ۲ عملکرد ضعیف تری دارد. باید این نکته را بیان کرد که معمولاً از این هندسه دماغه در قطار های تندرو با

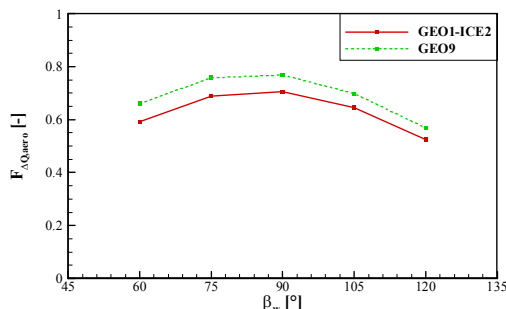
نمودار ضریب بار برداری شکل ۳۳ نیز نشان می‌دهد که از کاهش ضخامت نوک دماغه، می‌توان به عنوان یک اقدام مؤثر برای کاهش خطر واژگونی قطار حین حرکت تحت باد عرضی بهره جست.

۳-۴-۴ اثر ارتفاع نوک دماغه بر عملکرد آیرودینامیکی

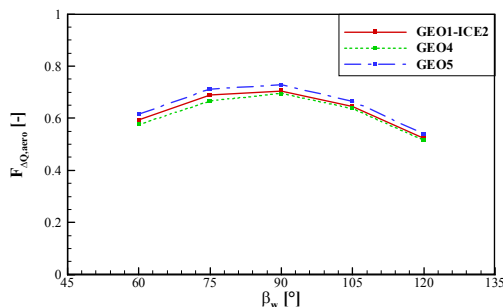
در بررسی چهارم، اثر ارتفاع نوک دماغه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در هندسه پایه یعنی هندسه ۱ نوک دماغه در ارتفاعی قرار دارد که زیر دماغه کاملاً مسطح است، اما در هندسه ۹ که به عنوان هندسه با ارتفاع نوک دماغه بیشتر در نظر گرفته شده است، سطح زیر دماغه با یک قوس به سطح زیر بدنه متصل می‌شود.

از دید ضریب گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه و ضریب بار برداری، عملکرد هندسه پایه بهتر از هندسه ۹ یعنی هندسه با ارتفاع دماغه بیشتر است. افزایش ارتفاع دماغه از یک طرف باعث افزایش ضریب برآ و از طرف دیگر، با جابه‌جایی توزیع نیروهای جانبی به سمت بالا، باعث افزایش فاصله توزیع نیروهای جانبی از محور گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه شده است، افزایش گشتاور گشتاور غلتشی حول ریل باد پناه و ضریب بار برداری دور از انتظار نیست که این موضوع را می‌توان از شکل ۳۴ نیز مشاهده کرد.

با توجه به شکل ۳۴، افزایش ارتفاع نوک دماغه مطلوب نبوده است چرا که خطر واژگونی برای هندسه ۹ بیش از هندسه پایه است. شاید یک دلیل عمده که غالباً دماغه قطارهای تندرو به‌گونه‌ای ساخته می‌شود که زیر دماغه صاف باشد، همین پایداری بیشتر و خطر کمتر واژگونی تحت باد عرضی باشد.



شکل ۳۴- نمودار ضریب بار برداری آیرودینامیکی بر حسب زاویه وزش باد برای هندسه‌های ۹ و ۱

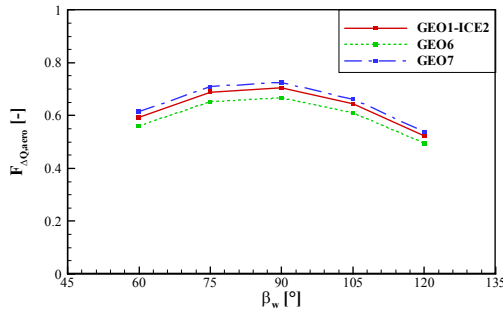


شکل ۳۲- نمودار ضریب بار برداری آیرودینامیکی بر حسب زاویه وزش باد برای هندسه‌های ۱، ۴ و ۵

۳-۴-۳ اثر ضخامت نوک دماغه بر عملکرد آیرودینامیکی

بررسی سوم مربوط به ضخامت نوک دماغه است. برای این منظور، هندسه ۱ به عنوان هندسه پایه، هندسه ۶ به عنوان دماغه با ضخامت کمتر و هندسه ۷، به عنوان دماغه با ضخامت بیشتر در نظر گرفته شده است.

با توجه به شکل ۳۳، از دید ضریب گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه و ضریب بار برداری، عملکرد هندسه ۶ یعنی دماغه با ضخامت کمتر نسبت به هندسه پایه بهبود یافته است؛ در حالی که عملکرد هندسه ۷ از هندسه پایه ضعیف‌تر شده است. برای توضیح این نتایج، باید این نکته یادآوری شود که افزایش ضخامت دماغه، توزیع نیروهای جانبی تا نواحی بالاتری امتداد یافته و لذا گشتاور برآیند این نیروها حول محور گشتاور یعنی ریل بادپناه، مقدار بیشتری شده است و برعکس آن کاهش ضخامت دماغه، توزیع نیروهای جانبی را به محور گشتاور نزدیک‌تر کرده و منجر به گشتاور غلتشی کمتری شده است.



شکل ۳۳- نمودار ضریب بار برداری آیرودینامیکی بر حسب زاویه وزش باد برای هندسه‌های ۱، ۶ و ۷

کاهش ضخامت دماغه قطار نیز به دلیل مشابه با کاهش زاویه نوک دماغه، با کاهش مطلوب ضریب بار برداری و کاهش خطر واژگونی همراه است. افزایش ارتفاع نوک دماغه با انتقال بخش بیشتری از جریان به زیر سطح قطار، افزایش نامطلوب نیروی برآ (رو به بالا) و ضریب بار برداری را به همراه دارد و در نتیجه افزایش خطر واژگونی را موجب می‌شود.

بر اساس پارامترهای هندسی بررسی شده، بطور خلاصه می‌توان گفت که برای حفظ ایمنی و جلوگیری از واژگونی قطار تحت اثر باد عرضی بهتر است، دماغه قطار کشیده‌تر و ضخامت و ارتفاع نوک دماغه آن کمتر باشد که این رویه را در قطارهای تندرو جدید ساخته شده نظیر شکل ۳۵ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۳۵- نمونه‌ای از هندسه دماغه قطارهای تندرو جدید

۵- فهرست علائم

ضریب آیرودینامیکی نیرویی	C_F
ضریب آیرودینامیکی گشتاوری	C_M
طول مشخصه، m	d
نیروی حجمی خارجی، N	F_B
ضریب روش	f_m
ضریب بار برداری	F_{AQ}
ضریب بار برداری آیرودینامیکی	$F_{AQ,aero}$
شتاب گرانش، m/s^2	g
ارتفاع مشخصه، m	h_c
ارتفاع قطار، m	h_p
انرژی جنبشی آشفستگی	k
گشتاور ناشی از تغییر موقعیت مرکز جرم، N.m	M_{COG}
گشتاور ناشی از شتاب عرضی خنثی نشده، N.m	M_{Ia}
گشتاور ناشی از وزن واگن، N.m	M_m
فشار، Pa	p
مساحت سطح مقطع (مساحت مشخصه)، m^2	S
زمان، s	t
سرعت جریان (از دید ناظر داخل قطار)، m/s	U
مؤلفه راستای x بردار سرعت، m/s	u
مؤلفه راستای y بردار سرعت، m/s	v

۴- نتیجه گیری

گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه که بر اثر دو نیروی برآ و نیروی جانبی حول ریل بادپناه به وجود می‌آید، مهم‌ترین ضریب آیرودینامیکی از نظر خطر واژگونی است که از مقادیر کم در زوایای وزش باد کوچک به تدریج افزایش می‌یابد و در زاویه وزش باد حدود 80° تا 90° به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

ضریب بار برداری که معیاری از خطر واژگونی است با افزایش گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه افزایش می‌یابد.

استفاده از هندسه دماغه ربع بیضی (هندسه ۲) که بعضاً در سرعت‌های متوسط و پایین بکار گرفته می‌شود، در سرعت‌های بالا مناسب نیست، زیرا خطر واژگونی بیشتری دارد.

کاهش زاویه نوک دماغه یا به عبارت دیگر، افزایش طول و کشیدگی دماغه، با کاهش مطلوب ضریب بار برداری و کاهش خطر واژگونی همراه است؛ زیرا توزیع نیروهای جانبی را به محور گشتاور غلتشی حول ریل بادپناه نزدیک کرده و مقدار گشتاور ایجاد شده توسط نیروی جانبی را کوچک‌تر می‌کند.

- [10] Chiu T (1991) A two-dimensional second-order vortex panel method for the flow in a cross-wind over a train and other two-dimensional bluff bodies. *J Wind Eng Ind Aerod* 37(1): 43-64.
- [11] Baker C (1991) Ground vehicles in high cross winds part II: Unsteady aerodynamic forces. *J Fluid Struct* 5(1): 91-111.
- [12] Baker C (1991) Ground vehicles in high cross winds part III: The interaction of aerodynamic forces and the vehicle system. *J Fluid Struct* 5(2): 221-241.
- [13] Diedrichs B, Ekequist M, Stichel S, Tengstrand H (2004) Quasi-static modelling of wheel-rail reactions due to crosswind effects for various types of high-speed rolling stock. *P I Mech Eng F-J Rai* 218(2): 133-148.
- [14] Gaylard A (1993) The application of computational fluid dynamics to railway aerodynamics. *P I Mech Eng F-J Rai* 207(2): 133-141.
- [15] Suzuki M, Tanemoto K, Maeda T (2003) Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. *J Wind Eng Ind Aerod* 91(1): 209-218.
- [16] Cooper R (1981) The effect of cross-winds on trains. *J Fluid Struct* 103(1): 170-178.
- [17] Khier W, Breuer M, Durst F (2000) Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study. *Comput Fluids* 29(2): 179-195.
- [18] Hemida H, Krajnovic S (2006) Exploring the flow around a generic high-speed train under the influence of side winds using LES. Paper presented at the Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering, Yokohama, Japan.
- [19] Hemida H, Krajnovic S, Davidson L (2005) Large eddy simulations of the flow around a simplified high speed train under the influence of cross-wind. Paper presented at the Proc. 17th AIAA Computational Dynamics Conference, Toronto, Ontario, Canada.
- [20] Hemida H, Baker C (2010) Large-eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind. *Comput Fluids* 39(10): 1944-1956.
- [21] Diedrichs B (2003) On computational fluid dynamics modelling of crosswind effects for high-speed rolling stock. *P I Mech Eng F-J Rai* 217(3): 203-226.
- [22] Allain E, Parodot N (2014) Aerodynamics in train cross wind studies. *Int J Aerodyn* 4(1-2): 10-23.
- [23] Diedrichs B (2008) Aerodynamic calculations of crosswind stability of a high-speed train using control volumes of arbitrary polyhedral shape. *BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*, Milano, Italy, July.
- m/s، سرعت نسبی باد به قطار، v_a
- m/s، سرعت قطار، v_{tr}
- m/s، سرعت باد، v_w
- m/s، مؤلفه راستای Z بردار سرعت، w
- فاصله بی بعد در راستای عمود بر دیواره y^*
- زاویه انحراف، β
- زاویه وزش باد، β_w
- نرخ اضمحلال ε
- چگالی، ρ kg/m³

۶- مراجع

- [1] Orellano A, Schober M (2006) Aerodynamic performance of a typical high-speed train. *WSEAS transactions on Fluid Mechanics* 1(5): 379-386.
- [2] Meteorological info from Iran Meteorological Organization on <http://www.irimo.ir>
- [3] Baker C, Robinson C (1990) The assessment of wind tunnel testing techniques for ground vehicles in cross winds. *J Wind Eng Ind Aerod* 33(1-2): 429-438.
- [4] Rocchi D, Schober M, Orellano A, Cheli F, Tomasini G (2009) Comparison of wind tunnel tests results on the ATM train. *Proceedings of the Euromech Colloquium 509, Vehicle Aerodynamics*, 24-25.
- [5] Chiu T, Squire L (1992) An experimental study of the flow over a train in a crosswind at large yaw angles up to 90. *J Wind Eng Ind Aerod* 45(1): 47-74.
- [6] Baker C, Jones J, Lopez-Calleja F, Munday J (2004) Measurements of the cross wind forces on trains. *J Wind Eng Ind Aerod* 92(7): 547-563.
- [7] Baker C (1986) Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments. *J Wind Eng Ind Aerod* 24(3): 227-251.
- [8] Guo W, Wang Y, Xia H, Lu S (2015) Wind tunnel test on aerodynamic effect of wind barriers on train-bridge system. *Sci China Technol Sci* 58(2): 219-225.
- [9] Barcala M, Meseguer J (2007) An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross wind on a two-dimensional model of a railway vehicle on a bridge. *P I Mech Eng F-J Rai* 221(4): 487-494.

- under strong crosswind. Paper presented at the Applied Mechanics and Materials.
- [31] Xiang CQ, Guo WH, Zhang JW (2013) Study on numerical simulation method of aerodynamic performance of high-speed train on bridge. Paper presented at the Applied Mechanics and Materials.
- [32] Li T, Zhang JY, Zhang WH (2013) A numerical approach to the interaction between airflow and a high-speed train subjected to crosswind. *J Zhejiang Univ-Sc A* 14(7): 482-493.
- [33] En14067-1 (2003) Railway applications—Aerodynamics—part 1: symbols and units, in.
- [34] En14067-6 (2010) Railway applications—Aerodynamics—part 6: requirements and test procedures for cross wind assessment, in.
- [35] Shih TH, Liou WW, Shabbir A, Yang Z, Zhu J (1995) A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Comput Fluids* 24(3): 227-238.
- [36] Launder BE, Spalding DB (1983) The numerical computation of turbulent flows. In *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion* (pp. 96-116).
- [37] Copley J (1987) The three-dimensional flow around railway trains. *J Wind Eng Ind Aerod* 26(1): 21-52.
- [24] Rolen C, Rung T, Wu D (2004) Computational modelling of cross-wind stability of high-speed trains. Paper presented at the Proc. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering.
- [25] Krajnović S, Georgii J, Hemida H (2007) DES of the flow around a high-speed train under the influence of wind gusts. Paper presented at the 7th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements, Limassol, Cyprus: IEEE.
- [26] Zhuang Y, Lu X (2015) Numerical investigation on the aerodynamics of a simplified high-speed train under crosswinds. *Theor. App Mech Lett* 5(5): 181-186.
- [27] Krajnović S, Ringqvist P, Nakade K, Basara B (2012) Large eddy simulation of the flow around a simplified train moving through a crosswind flow. *J Wind Eng Ind Aerod* 110: 86-99.
- [28] Hemida H, Krajnović S (2009) Exploring flow structures around a simplified ICE2 train subjected to a 30 side wind using LES. *Eng Appl Comp Fluid* 3(1), 28-41.
- [29] Hemida H, Krajnović S (2010) LES study of the influence of the nose shape and yaw angles on flow structures around trains. *J Wind Eng Ind Aerod* 98(1): 34-46.
- [30] Xiang CQ, Guo WH, Zhang JW (2014) Study on critical speed of high-speed train running on bridge