



تحلیل و مدل‌سازی آیرودینامیکی قطارهای پرسرعت در عبور از موانع کناری

وحید سرافرازی^۱ و محمدرضا طلایی^{۲*}^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران^۲ استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۲

چکیده

یکی از مسائل مرتبط با طراحی آیرودینامیکی قطار پرسرعت، مسئله جریان هوای ایجاد شده در اطراف قطار است. این خصوصیت علاوه بر اینکه موجب اتلاف قابل توجهی در انرژی و سوخت می‌شود، سبب ایجاد اثرات متعددی نیز در حول قطار می‌شود. یکی از این اثرات آیرودینامیکی که اهمیت اساسی برای ایمنی ساکنین و کارگران اطراف خط دارد، پدیده فشار هوا ناشی از سرعت قطار است که الزامات ایمنی مورد نیاز خود را ایجاد می‌کند. اهمیت این پدیده به دلیل آن است که وقتی قطار سرعت بالا از کنار یک مانع (انسان) عبور می‌کند، نیروهای آیرودینامیکی به صورت ناگهانی به آن وارد می‌شود. بنابراین، این موضوع باید در ایجاد حریم مجاز آیرودینامیکی برای افراد مورد توجه قرار گیرد. در این شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار محاسبات سیالاتی فلوئنت استفاده شده، معادله جریان آشفته با روش $k-\epsilon$ و شرایط مرزی قطار بصورت مش متحرک مدل شده است و ناحیه مورد بررسی، دارای ابعادی تا سی برابر مقیاس ارتفاع قطار است. هدف از این تحقیق، بررسی اثر پدیده فشار هوای ایجاد شده در اطراف قطار پرسرعت با سرعت سیر حدود ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت به کمک شبیه‌سازی در دو حالت عادی و با ترمز آیرودینامیک و بررسی اثرات سرعت باد ناشی از عبور قطار برای جلوگیری از به خطر افتادن ایمنی انسان‌ها و یافتن حریم مجاز برای ساکنین و کارگران کنار خط است. به عنوان خروجی، فاصله حریم مجاز ایستادن فرد در کنار ریل در عبور قطار، با سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت در حدود ۱/۶ متر و در حالت ترمزگیری آیرودینامیکی، ۳/۵ متر تعیین گردید.

کلمات کلیدی: آیرودینامیک قطار؛ نیروی پسا؛ مش متحرک؛ پدیده فشار هوا؛ حریم مجاز کنار خط.

Analysis and Modeling of Aerodynamic Pressure Wave Due to High-Speed Train Passage

V. Sarafrazi¹, M. Taleae^{2,*}¹ MSc graduate, Railway Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran² Assistant Professor, Railway Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Abstract

One of the important subjects in aerodynamic design of high speed train is the slipstream or air flow around the train. This issue not only waste a significant amount of energy and fuel but also reduce the overall efficiency of the train. Due to irregularity the turbulence air flow around the high speed trains aerodynamic drag, noise and vibration are the most phenomenon that concern in this area. The slipstream is one of these aerodynamics features that directly related to the safety of passengers and workers near the line. When high speed train passes near to a standing human body, the produced presuer wave forces on the body surface and may lead to fall. In this numerical simulation we used dynamic mesh method and turbulence equation k-e in computational fluid dynamic software (Fluent). The aim of this study is to investigate the effects of air pressure around the train of moving with 300 km/hr velocity. The pressure waves are calculated in both modes of regular passage and passing with operation of aerodynamic brake. The resules are determined as the safty distance of the passenger from the line due to the different speed.

Keywords: Aerodynamic Train; Drag Force; Dynamic Mesh; Slipstream.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱-۷۷۴۵۱۵۰۰؛ فکس: ۰۲۱-۷۳۰۲۱۵۷۲

آدرس پست الکترونیک: mrtalae@iust.ac.ir

۱- مقدمه

راه‌آهن‌های پرسرعت در طول چند سال گذشته در بسیاری از نقاط جهان رشد چشمگیر و پیوسته‌ای هم در سرعت و هم در تعداد خطوط داشته‌اند. در کشورهایمانند، سوئد، ایتالیا، ژاپن، آلمان و دیگر کشورها، بیشینه سرعت قطارها روی خطوط ریلی پرسرعت، بیش از ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت است. رکورد بالاترین سرعت، سال ۲۰۱۵ روی خطوط ریلی پرسرعت راه‌آهن ژاپن و در اختیار قطار مگلو هفت واگنه موجود در استان یاماناشی است که سرعت آن در مسیر آزمایشی به ۶۰۴ کیلومتر بر ساعت رسید [۱] البته لازم به ذکر است که سرعت سیر قطار پرسرعت ژاپن، ۴۳۰ کیلومتر بر ساعت است. نخستین قطار سریع‌السیر ایران نیز، در مسیر تهران-قم-اصفهان در حال ساخت است، طول این مسیر، ۴۱۲ کیلومتر بوده و برنامه حرکت قطار بر مبنای سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت طراحی شده است. نیروهای آیرودینامیکی تولید شده در چنین سرعت‌های بالایی، بسیار مورد توجه است؛ نیروهای آیرودینامیکی با مربع سرعت سیر قطار رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین این موضوع که در سرعت‌های بالا مشکلاتی وجود دارد که باید به آن رسیدگی شود، امری تعجب‌آور نخواهد بود. بهره‌برداری از این قطارهای پرسرعت در صورت فراهم نشدن شرایط کاری آن‌ها خطرناک خواهد بود. پدیده فشار هوا در مناطق اطراف یک وسیله نقلیه در حال عبور به وجود می‌آید که جریان هوا و نوسانات فشار شدید است. سرعت ناپایدار ناشی از عبور قطار، سرعت موج هوا^۱ نامیده می‌شود. سرعت موج هوای قطار، روی کارگران کنار خط، مسافری منتظر، صندلی چرخ‌دار و اشیای دیگر موجود روی سکوی ایستگاه و تجهیزات عمرانی اطراف خط تأثیرگذار است. بر طبق استاندارد مربوط به اتحادیه اروپا^۲ یک قطار در طول عبور کامل آن در هوای آزاد با سرعت عملکردی بین ۱۹۰ تا ۲۴۹ کیلومتر بر ساعت نباید سبب ایجاد سرعت موج هوا در کنار خط، بیشتر از مقدار ۲۰ متر بر ثانیه و برای سرعت عملکردی قطار بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، نباید باعث ایجاد سرعت موج هوا در کنار خط بیشتر از ۲۲ متر بر ثانیه شود. این مقادیر مجاز سرعت موج

هوا، می‌بایست برای ارتفاع ۰/۲ متری از تاج ریل و در فاصله ۳ متری از مرکز خط قطار اندازه‌گیری شود؛ همچنین مقدار تغییرات فشار باید بین قله‌ها تا اوج اندازه‌گیری شود و این تغییرات فشار می‌بایست در ارتفاع بین ۱/۵ متر تا ۳/۳ متر از بالای تاج ریل و در فاصله ۲/۵ متری از مرکز مسیر و در طول عبور تمام قطار (از جمله عبور سر، دم و کوپلینگ) اندازه‌گیری شود و برای قطار با بیشینه سرعت بین ۱۹۰ تا ۲۴۹ کیلومتر بر ساعت؛ تغییرات فشار نباید از ۷۲۰ پاسکال و برای قطار با بیشینه سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت و بالاتر، تغییرات فشار نباید از ۷۹۵ پاسکال تجاوز کند. [۲] لاوسون^۳ و همکارش (۱۹۳۷)، نشان دادند که مقدار آستانه سرعت موج هوا برای شرایط ناراحت‌کننده برابر ۵ متر بر ثانیه و بالاتر است که سبب ایجاد ناراحتی افراد در ناحیه پیاده رو سکو، ناحیه قدم زدن و یا نشستن می‌شود. مثلاً سرعت باد از ۲/۴ تا ۵/۵ متر بر ثانیه، سبب ایجاد مشکلاتی نظیر، خواندن متن در فضای ایستگاه خواهد شد. [۳] با توجه به مطالعات بوتما^۴ (۱۹۹۳)، مدت زمان متوسط بحرانی تندباد برای زن به وزن ۶۰ کیلوگرم و مرد به وزن ۷۵ کیلوگرم نسبت به آمدن تندباد با سرعت ۱۲ متربرثانیه قبل از این که تعادلشان را از دست بدهند، ۰/۵ ثانیه است. [۴] دگراف و وپرن^۵ (۱۹۹۷)، تحمل مردم را به شتاب باد بسته به جهت نیروی باد، بررسی کردند. آنها دریافتند که باد جانبی با شتاب ۰/۴۳ متر بر مجذور ثانیه می‌تواند سبب ناپایداری فرد شود. [۵] در مورد خطر این پدیده جردن^۶ و همکاران (۲۰۰۸)، نشان دادند که مردم تعادل خود را در تندبادی برابر ۱۲ متربرثانیه زمانی از دست می‌دهند که تندباد از یک طرف می‌آید و مردم روی سکو روبروی مسیر قطار هستند. علاوه براین، مدت زمان و شتاب وزش باد باید در نظر گرفته شود. [۶] خیرولینا^۷ و همکارانش (۲۰۱۵)، تأثیر عبور قطار مسافری و قطار باری را در شرایط ایجاد باد ناشی از پدیده فشار هوا روی لبه سکو و محل ایستادن مسافران داخل یک تونل زیر زمینی با روش شبیه‌سازی گردابه‌ای بزرگ^۸ مورد بررسی قرار دادند. مدل

³ Lawson⁴ Bottema⁵ De Graaf and Van Weperen⁶ Jordan⁷ Khayrullina⁸ Large-Eddy Simulations (LES)¹ Slipstream Velocity² TSI,2008/232/CE.

نظر گرفته شود. به عنوان نوآوری‌های این تحقیق در مقایسه با ادبیات فن موجود، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بررسی اثر موج فشاری تولید شده روی افراد کنار خط
- تعیین مقدار حریم مجاز کنار ریل پرسرعت بر مبنای واژگونی نفر بر حسب سرعت قطار
- بررسی پروفیل موج سرعت ایجاد شده از قطار در دو حالت حرکت عادی و مود ترمزگیری با ترمز آیرودینامیک و اثر آن بر حریم مجاز ایستادن افراد در کنار خط

۲- مدل‌سازی هندسه مدل

اولین گام ساخت، هندسه مطلوب است. هندسه سطوح اصلی قطار، از روی مدل قطار آلمان^۲ تهیه شده توسط کارخانه بمباردیر^۳ استخراج شده است. ساخت قطار شامل، یک واگن موتورکشنده^۴ و یک واگن کنترل^۵ به دنبال آن است. قطار به صورت متحرک در نظر گرفته شده است. مبدا مختصات در مرکز قطار و در بالای ریل قرار دارد. قطار مدل‌سازی شده، دارای طول ۳۵/۵۵ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۳/۸۵ متر است. قطار مدل‌سازی شده، دارای سطح مقطعی برابر ۸/۱۸۵ متر مربع است. [۹] مشخصه طول قطار، همان قطر هیدرولیکی^۶ d_h آن است و در این مدل، برابر ۳ متر است. [۱۰] نحوه چیدمان واگن‌ها در قطار پرسرعت آلمان به منظور کاهش حجم محاسبات مطابق با (شکل ۱) است.



شکل ۱- آرایش واگن‌ها در قطار پرسرعت با دو واگن [۸]

نمایی از هندسه مدل در نرم افزار سالیدورک،^۷ مطابق (شکل ۲) است و سطح مقطع مدل به همراه ابعاد آن، مطابق با (شکل ۳) است. پس از ساختن دامنه در نرم افزار سالیدورک، مدل به محیط نرم افزار انسیس^۸ وارد می‌شود.

محاسباتی آن‌ها شامل، یک قسمت ثابت (بستر و تونل) و یک قسمت متحرک (قطار) بود که توسط داده‌های تجربی حاصل از عبور قطار در تونل نتایج را صحت‌گذاری کردند. نتایج این تحقیق، نشان داد مسافرینی که روی سکو ایستاده‌اند، می‌توانند در اثر عبور قطار مسافری و باری به ترتیب با سرعت ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت و ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت تأثیر نیروی باد قوی را احساس کنند که این اثر باد ممکن است، برای مسافرن آزاردهنده و حتی خطرناک باشد و باید در طراحی تونل و سکو و در مقررات ایمنی راه‌آهن، مورد توجه قرارگیرد. [۷] نایانگ^۱ و همکارانش (۲۰۱۵)، شبیه‌سازی عددی و تجربی برای عبور قطار از زیر یک پل در ایستگاه راه‌آهن را برای مطالعه بارهای آیرودینامیکی وارد بر سازه‌های بالای سر قطار انجام دادند. شبیه‌سازی عددی، با استفاده از مش متحرک و مدل آشفتگی دو معادله‌ای و در نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفته است. توزیع فشار و ارتباط بین فشار و سرعت قطار مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد، هنگامی قطار از زیر یک پل عبور می‌کند، یک آشفتگی جریان ناپایدار و پیچیده بین قطار و پل به وجود خواهد آمد که این موضوع باید در طراحی سازه‌هایی مورد توجه باشد که در بالای قطار قرار می‌گیرند. [۸]

با توجه به مقالات ملاحظه می‌شود که بررسی نیروهای آیرودینامیکی در قطارهای پر سرعت از جمله دغدغه‌های جاری محققین بوده و استانداردها در این زمینه، تنها به بیان محدوده سرعت باد مجاز ایجاد شده در کنار خط پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق، مطالعه روی پدیده آیرودینامیکی فشار هوا به کمک شبیه‌سازی یک قطار پرسرعت در نرم‌افزار فلوئنت در دو حالت عادی و با ترمز آیرودینامیک و بررسی اثرات سرعت باد ناشی از عبور قطار برای جلوگیری از به خطر افتادن ایمنی افراد و یافتن حریم مجاز برای کارگران کنار خط و مسافرن منتظر است. در این تحقیق در مقایسه با سایر پژوهش‌ها، با مدل‌سازی قطار به صورت متحرک، تأثیر پدیده فشار هوا روی افراد کنارخط و مقدار حریم مجاز ایستادن در عبور قطار با دو حالت عادی و با ترمز آیرودینامیک، مورد بررسی قرار گرفته است. این مسئله می‌بایست در طراحی سکوها و مسیر عبور قطار پر سرعت در

² ICE

³ Bombardier Factory

⁴ A Leading Motor Car

⁵ A Trailing Control Car

⁶ Hydraulic Diameter

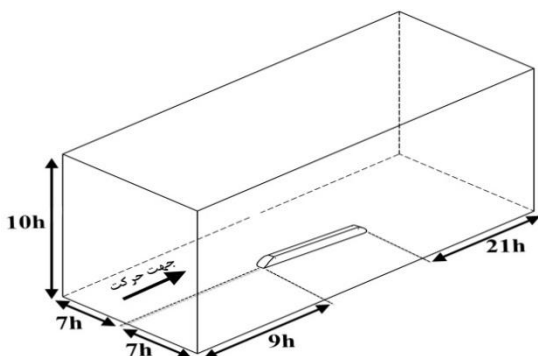
⁷ Solidworks

⁸ Ansys

¹ Na Yang

۳- دامنه محاسباتی مورد استفاده قطار پر سرعت

اندازه فیزیکی دامنه محاسباتی بایستی به قدر کافی بزرگ باشد تا از اثرات نادرست مرزها جلوگیری نماید؛ بنابراین در تحقیق حاضر دامنه در نظر گرفته شده شامل، یک مدل قطار روی بستر صاف مطابق (شکل ۵) است و دامنه محاسباتی اطراف قطار نیز، مکعب مستطیلی به ارتفاع $10h$ (ارتفاع قطار) در نظر گرفته شده است که این امر برای اجتناب از تاثیر شرایط دیواره در ورودی و خروجی بر نتایج است؛ همچنین ناحیه دنباله در پشت و جلوی قطار نیز، به اندازه کافی طولانی در نظر گرفته شده است؛ بدین صورت که مکعب قبل و بعد از محدوده قطار، به مقدار $9h$ و $21h$ امتداد داده می‌شود.



شکل ۵- دامنه محاسباتی هندسه قطار پر سرعت

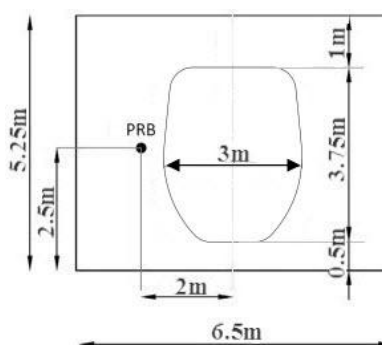
۴- مدل آشفتگی پیشنهادی برای قطار پر سرعت

معادلات ناویر- استوکس برای جریان آشفته در مقایسه با جریان آرام، بسیار پیچیده‌تر می‌باشند که این به خاطر نوسانات سرعت و فشار است. سرعت u (سرعت در جهت x) با اضافه کردن مؤلفه متوسط زمانی \bar{u} و مؤلفه نوسانی u' محاسبه می‌شود؛ همچنین فشار p نیز، به همین روش سرعت‌ها با اضافه کردن مؤلفه متوسط زمانی \bar{p} و مؤلفه نوسانی p' قابل محاسبه است. برای جریان تراکم ناپذیر با صرف نظر از جاذبه، معادله ناویر- استوکس در جهت x می‌تواند به صورت رابطه (۱) ساده‌سازی شود: [۱۱]

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} = \quad (1)$$

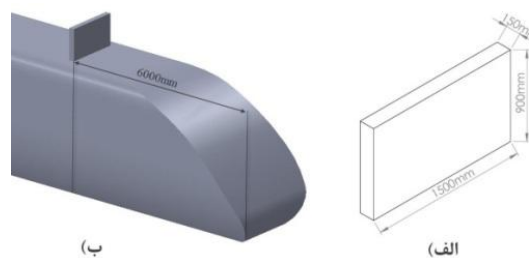


شکل ۲- نمایی از هندسه مدل‌سازی شده در سالدورک (الف) سطح مقطع مدل و (ب) مدل سه بعدی



شکل ۳- ابعاد سطح مقطع قطار مدل‌سازی شده در سالدورک

نقطه اندازه‌گیری^۱ (شکل ۳)، محل اندازه‌گیری تغییرات سرعت بر حسب زمان است. از آنجایی که قطار پر سرعت در دو مود، یعنی به همراه ترمز آبرودینامیک نیز در این تحقیق مدل‌سازی شده است. مشخصات پنل ترمزی که به صورت مستطیل شکل دارای طول $1/5$ متر، ضخامت $0/15$ متر و ارتفاع $0/9$ متر در بالای سر قطار و به فاصله 6 متر از دماغه قطار مدل‌سازی شده، در (شکل ۴) قابل مشاهده است.



شکل ۴- نمایی از مدل قطار با ترمز آبرودینامیک (الف) ابعاد پنل (ب) فاصله از دماغه قطار

^۱ PRB

۵- شرایط مرزی مورد استفاده قطار پر سرعت

شرایط مرزی مورد استفاده قطار پر سرعت شرایط ورودی، خروجی، دیواره و تقارن مطابق (شکل ۶) است. شرط مرزی دیواره، یک شرط مرزی عدم لغزش است که به معنی سرعت مماسی صفر است. دیواره‌ها نفوذ ناپذیر هستند که به معنی جزء نرمال صفر است؛ چون هیچ مایعی از طریق دیواره عبور نمی‌کند. دو مدل دیواره ثابت و متحرک وجود دارد. دیواره متحرک، به معنی آن است که ذرات مایع در مجاورت دیوار با سرعتی برابر دیواره حرکت می‌کنند. در مورد قطار پر سرعت همه هندسه قطار متحرک فرض شده و دیواره‌ها، زمین، هوای اطراف و موانع ثابت فرض شده‌اند [۸] و برای تعیین تلاطم ذرات کنار دیواره، از تابع دیواره نامتعادل^۱ استفاده شده است. [۱۴] متحرک فرض شدن قطار به معنی آن است که حرکت نسبی بین قطار و بستر خط وجود دارد.

از شرط مرزی سرعت ورودی برای تعیین سرعت و پارامترهای اسکالر جریان در مرز ورودی استفاده شده است و با توجه به اینکه در دینامیک سیالات محاسباتی پس از گسسته سازی معادلات نیاز به اعمال شرایط اولیه است برای این حالت در مرز ورودی شرط اولیه مقدار سرعت جریان هوا برابر صفر اعمال شده است و حل معادلات جریان از این مرز آغاز می‌شود. در مورد قطار، نوع جریان از نوع جریان خارجی است و برای جریان‌های خارجی سطح آشفتگی پایین است. مولفه سرعت مربوط به قطار متحرک به صورت $(U_{\infty}, 0, 0)$ در نظر گرفته شده است. مقادیر آشفتگی مشخص شده برای هندسه قطار شامل، شدت آشفتگی (TI) و مقیاس طول آشفتگی (L_t) نسبت به زمان و در سطح ورودی ثابت در نظر گرفته شده است. وینترگست و همکارش^۲ [۱۵] در تحقیقات مقدار شدت آشفتگی را برابر ۳ درصد و مقیاس طول آشفتگی را برابر $0.1 d_h$ تخمین زدند. شرط مرزی خروجی از نوع شرط مرزی فشار خروجی است و لازم است که فشار استاتیک در مرز خروجی جریان مشخص گردد. برای سطوح کناری و بالایی هوای مدل شده اطراف قطار، شرط مرزی تقارن مورد استفاده قرار گرفته است. در شرط مرزی تقارن، مؤلفه عمودی سرعت و گرادیان‌های نرمال تمام

با جایگزینی مقادیر سرعت و فشار به صورت مجموع مولفه متوسط زمانی و مولفه نوسانی و ساده‌سازی، معادله ناویر-استوکس برای جریان آشفته در جهت x ، مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right\} - \frac{\partial}{\partial x} \bar{u}'^2 - \frac{\partial}{\partial y} \bar{u}'\bar{v}' - \frac{\partial}{\partial z} \bar{u}'\bar{w}' \quad (2)$$

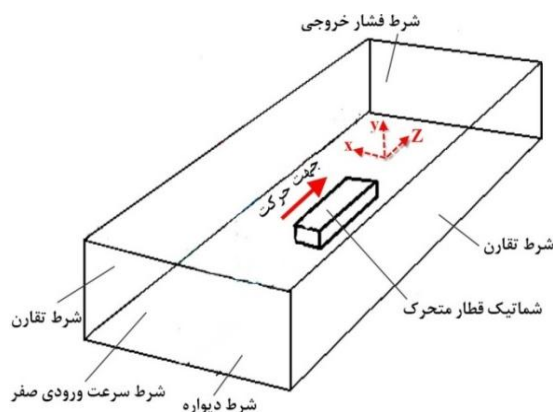
مشکل شبیه سازی جریان آشفته با حرکات گردابه در سیالات آشکار می‌شود. این حرکات از مقیاس‌های طولی متفاوتی هستند که می‌توانند تا حداقل مقدار ۱ میکرومتر باشند. حفظ مسیر همه این حرکات کوچک، نیازمند مش آنقدر ریزی است که کامپیوترهای امروزی قدرت حل آن را ندارند. برای جبران این مشکل، مهندسان مجبورند مقادیر متوسط خصوصیات جریان را در نظر بگیرند. این عمل با شکل‌های متوسط زمانی معادله ناویر - استوکس انجام می‌گیرد که طی آن شش داده نامعلوم $(\rho \bar{u}'^2, \rho \bar{v}'^2, \rho \bar{w}'^2, \rho \bar{u}'\bar{v}', \rho \bar{u}'\bar{w}', \rho \bar{v}'\bar{w}')$ به نام تنش‌های رینولدز بوجود می‌آیند. تنش‌های رینولدز، خصوصیات جریان را بیان می‌کنند و تعیین مستقیم آن‌ها غیر ممکن است. مدلسازی جریانات آشفته به کمک مدل آشفتگی صفر معادله ای، خواص همگرایی و پایداری بهتری نشان می‌دهد. متأسفانه هیچ مدل آشفتگی وجود ندارد که بتواند بصورت جامع در تمامی مسائل مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب یک مدل آشفتگی مناسب به در نظر گرفتن ملاحظات از قبیل، فیزیک جریان، تکنیک مسلم برای گروه خاصی از مسائل، دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی موجود و زمان لازم برای شبیه‌سازی بستگی دارد. نایانگ و همکاران [۱۲] پاسخ سرعت فشاره‌های ناشی از عبور قطار بر سازه پل در بالای سر قطار را بررسی کردند و در شبیه‌سازی خود از نرم افزار فلوئنت و مدل آشفتگی جریان $k-\epsilon$ استفاده کردند که کمتر در پیش‌بینی رفتار جریان در نزدیک دیواره موفق است. از آنجایی که نیروهای وارد بر موانع، موضوع بحث این تحقیق است و اینکه روش $k-\epsilon$ دارای دقت بالا، قدرت حل بالا و در عین حال هزینه معقول در زمان تحلیل است؛ بنابراین در این تحقیق، از روش $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. [۱۳]

¹ Non-Equilibrium Wall Functions

² Wintergerste & Casey

نسبی بین اجزای ثابت و متحرک (مانند ماشین دوار)، منجر به استفاده از روش تحلیل گذرا برای شبیه‌سازی دوره ای زمان خواهد شد، اما روش المان بندی پویا اجازه می‌دهد تا مرزهای موجود در یک منطقه جداگانه را داخل همان منطقه حرکت دهید. مرزها می‌توانند نسبت به یکدیگر حرکت چرخشی یا انتقالی داشته، یا تغییر شکل دهند. بسیاری از مسائل را می‌توان با هر دو روش حل کرد؛ روش المان بندی پویا می‌تواند برای حالتی که مش تغییر فرم داشته و یا حرکت مش تابعی از راه حل است، مورد استفاده قرار گیرد. حرکت پیستون داخل سیلندر موتور، نمونه تحلیلی است که می‌توان در آن المان بندی پویا را مورد استفاده قرار داد. این نوع المان بندی را در فلوئنت می‌توان برای مدل جریان هایی که در آن شکل دامنه با زمان به دلیل حرکت مرزهای دامنه در حال تغییر است، مورد استفاده قرار داد. المان بندی پویا را می‌توان برای جریان های تک فاز یا چند فاز اعمال کرد. المان بندی متحرک می‌تواند برای حالت پایدار زمانی نیز استفاده شود که در این حالت حرکت مش در حل حالت پایدار مفید خواهد بود. به روز رسانی المان‌ها در نرم افزار فلوئنت به صورت خودکار در هر گام زمانی بر اساس موقعیت قرارگیری مرزها صورت می‌گیرد. برای استفاده از المان بندی پویا، شما نیاز دارید که از یک حجم مش شروع و حرکت هر ناحیه از مدل را شرح دهید. فلوئنت اجازه توصیف حرکت با استفاده از پروفیل‌های مرزی را به کمک توابع تعریفی کاربر^۴ به شما می‌دهد. اگر مدل شامل نواحی متحرک و ثابت باشد، شما نیازمند شناسایی این مناطق بوسیله گروه بندی آنها به صورت سلول‌های منطقه مربوطه و المان بندی اولیه خواهید بود و بعلاوه نواحی که دارای تغییر فرم در اثر حرکت هستند، باید به صورت نواحی جداگانه گروه بندی شده، المان بندی اولیه شود. شبکه بندی شش وجهی^۵ با لایه‌های منشوری^۶ در در نزدیک سطح دیواره به منظور بهبود رفتار دیواره، نتایج رضایت بخش تری داشته است. [۱۲] شبکه بندی شش وجهی بیرونی در مناطق اطراف قطار به منظور ایجاد ساختاری مناسب پالایش شده است. به نظر می‌رسد که پالایش المان بندی و بهبود آن در قسمت دم و دماغه قطار و

متغیرها در مرز تقارن صفر است؛ بنابراین با تعریف مرز تقارن برای یک سطح، تمام شارها در آن سطح صفر می‌باشند؛ همچنین از آنجائیکه، تنش برشی در سطح تقارن صفر است، میتوان اینگونه تفسیر کرد که یک شرط مرزی تقارن، به نوعی شرط مرزی دیواره لغزان در یک جریان آشفته را ارضاء می‌کند. [۹]



شکل ۶- شرایط مرزی اعمال شده برای قطار متحرک

۶- المان بندی قطار پر سرعت

به منظور ساختن المان بندی با کیفیت بالا و داشتن تعداد سلول مناسب نیاز است که بخشی از دامنه محاسباتی خیلی خوب ساخته شود و دیگر بخش‌ها تا حد امکان با سلول های بزرگتری المان بندی شوند. با انتخاب کردن سطوحی خاص که در برابر تغییرات هندسه ناگهانی قرار دارند مانند، دماغه و دم قطار، احتمال پالایش در این نواحی وجود دارد. با توجه به آنچه در مقدمه این تحقیق بیان شد، از آنجائیکه در این تحقیق بر خلاف کارهای پیشین قطار ثابت نبوده، متحرک فرض شده است؛ بنابراین استفاده از روش المان بندی متحرک^۱ مورد نیاز است. به طور کلی دو نوع المان بندی متحرک با نام المان بندی لغزشی^۲ و المان بندی پویا^۳ وجود دارد. روش المان بندی لغزشی اجازه می‌دهد که مسئله را به مناطق جداگانه ای که نسبت به یکدیگر حرکت دارند تقسیم کرد. حرکت‌ها می‌تواند چرخشی یا انتقالی باشد. حرکت

⁴ User-Defined Functions (UDFs)

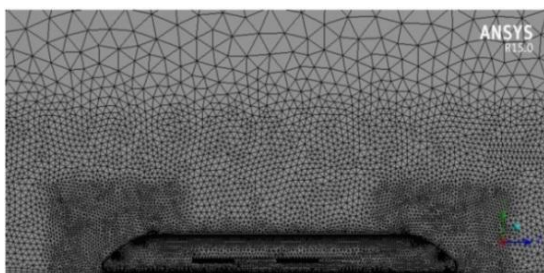
⁵ Trim-Hexahedral Grids

⁶ Prism Layers

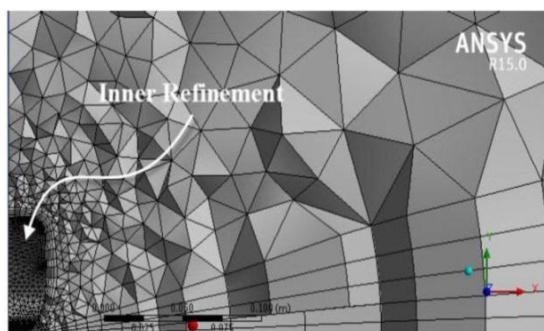
¹ Moving Element

² Sliding Mesh

³ Dynamic Mesh



شکل ۸- المان بندی شش وجهی در اطراف قطار پر سرعت

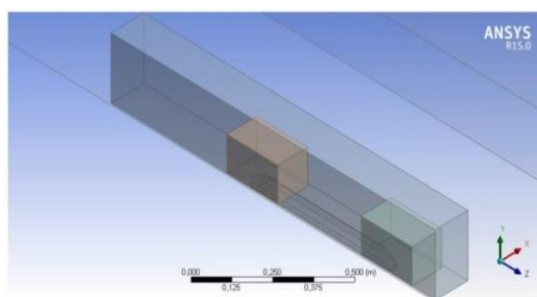


شکل ۹- توزیع فضایی المان ها در مقطع برش خورده قطار

۷- شبیه سازی قطار پر سرعت

با توجه به اینکه در تعریف قطار پرسرعت توسط اتحادیه بین المللی راه آهن‌ها،^۷ سرعت قطار پر سرعت بالاتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. مقدار سرعت قطار برابر ۵۶ متر برثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به مقدار چگالی هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، ویسکوزیته ۱۸/۲۷ میکرو پاسکال - ثانیه، قطر هیدرولیکی ۳ متر مقدار عدد رینولدز جریان ۱۱۲۶۴۰۰۰ خواهد شد. شبیه سازی قطار پر سرعت در حالتی که قطار از کنار مانع استوانه ای شکل عبور کند، در ۲ حالت باز یا بسته بودن ترمزآیرودینامیک انجام شده است. دو مانع استوانه ای شکل در کنار قطار، دارای شعاع ۰/۵ متر و ارتفاع ۲/۵ متر بوده، در فاصله افقی ۳ متر از بدنه قطار و ۱ متر از دماغه قطار قرار داده شده است. مقدار گام زمانی نیز برابر ۰/۰۰۰۶ ثانیه است که در نهایت برای تحلیل جمعا حدود ۱۰ روز زمان صرف شده است و از یک کامپیوتر ۱۶ هسته‌ای و دارای ۱۶ گیگابایت حافظه استفاده شده است. تنظیمات مربوط به حلگر نرم افزار فلوئنت نیز، مطابق با

نواحی جلوی آن نیاز است. المان‌های مورد استفاده روی موانع نیز به دلیل اهمیت تاثیر پدیده فشار هوا روی آنها باید پالایش گردد. به منظور پالایش المان‌بندی، از روش گسسته‌سازی ترجیحی منهارت و ونگل سال (۱۹۹۳) [۱۶] استفاده شده است. دامنه پالایش شامل، یک مکعب به ابعاد $8/97 d_h$ در طول، $4 d_h$ در عرض و $1/83 d_h$ در ارتفاع اطراف قطار و یک مکعب به ابعاد $0/65 d_h$ در طول، $4 d_h$ در عرض و $0/42 d_h$ در ارتفاع در دماغه و دم قطار است. نمایی از نحوه المان بندی در شبیه سازی، مطابق (شکل ۷) است.



شکل ۷- ساختار توزیع المان بکار رفته در شبیه سازی

برای یک شبکه بندی متوسط^۱ اندازه پایه^۲ المانی برابر ۰/۵ متر که در نواحی نسبتا دور اندازه کمینه^۳ المان ۲۰ درصد اندازه پایه و اندازه هدف^۴ ۸۰ درصد اندازه پایه است، مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه المان‌ها در نقاط دور از میدان بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است؛ زیرا حل دقیق و با المان بندی عالی در این نقاط نیاز نبوده، حجم محاسبات و زمان تحلیل را افزایش می‌دهد. ضخامت لایه‌های منشوری^۵ ۲۵ درصد، تعداد لایه‌های منشوری^۵ کشیدگی لایه‌های منشوری^۶ ۱/۲ و نرخ رشد با سرعت کم برای ایجاد اندازه المان برابر در لایه‌ها در نظر گرفته شده است. [۱۷] نمایی از المان بندی در نزدیکی قطار مطابق (شکل ۸) است و توزیع فضایی المان‌ها نیز، مطابق (شکل ۹) است که در آن از ۲/۸ میلیون المان با شبکه بندی متوسط استفاده شده است.

¹ Medium Mesh

² Base Size

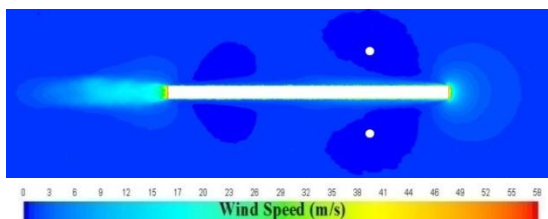
³ Relative Minimum Size

⁴ Relative Target Size

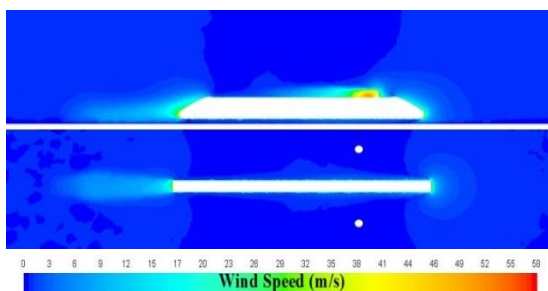
⁵ Prism Layer Thickness

⁶ Prism Layer Stretching

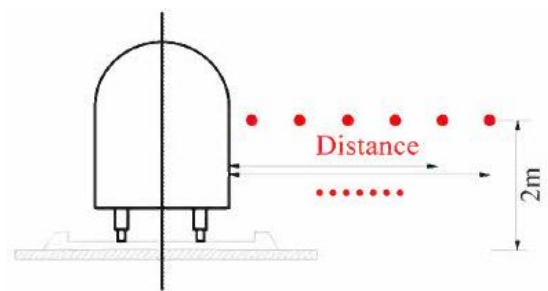
⁷ International Union of Railways (UIC)



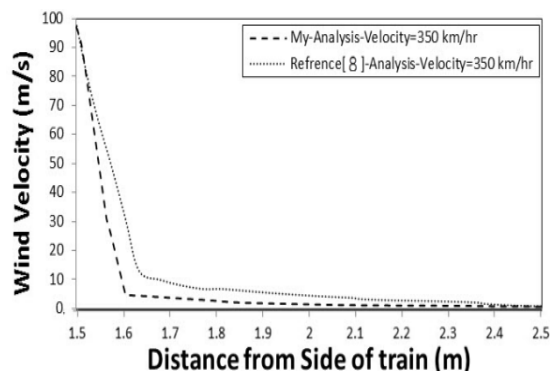
شکل ۱۰- تغییرات پروفیل سرعت در مقطع قطار بدون ترمز آیرودینامیک پس از عبور دماغه از موانع کنار قطار



شکل ۱۱- تغییرات پروفیل سرعت در مقطع قطار با حضور ترمز آیرودینامیک پس از عبور دماغه از موانع کنار قطار



شکل ۱۲- نقاط اندازه گیری مقدار سرعت باد بر حسب فاصله از بدنه قطار [۸]



شکل ۱۳- مقایسه پروفیل سرعت در کنار قطار بین مدل سازی انجام شده در اینجا و تحقیق مرجع [۸]

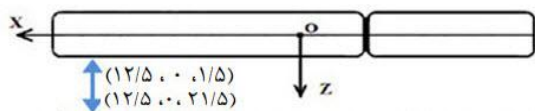
(جدول ۱) است. همانطور که در (شکل ۱۰) مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه سرعت روی بدنه قطار است و مقدار سرعت با دور شدن از دماغه به صورت شعاعی کاهش پیدا می‌کند؛ از طرف دیگر، پس از عبور قطار از کنار موانع قرار گرفته در اطراف آن آشفتگی ناشی از سرعت قطار در پشت آن بصورت گردابه‌هایی مشاهده می‌شود که با دور شدن از دم قطار از بین می‌رود.

جدول ۱- تنظیمات محاسباتی در نرم افزار فلونت

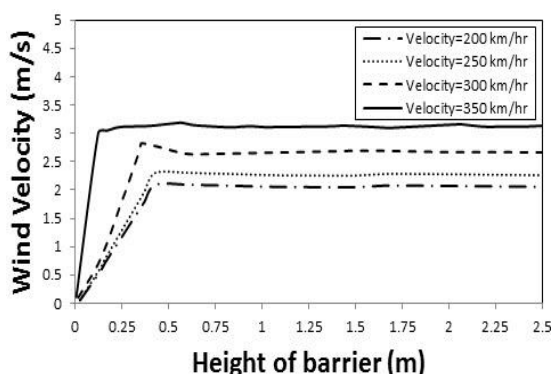
تنظیمات کلی	مشخصات مربوط به تنظیم مورد نظر
حلگر	Pressure-based with air of constant density (Mach number~ 0.09)
شرایط مرزی ورودی و خروجی	Pressure outlet with zero static pressure (stationary subdomain) Velocity inlet with zero velocity and pressure outlet with zero static pressure (moving subdomain) No-slip; y+ at the sidewalls of the train reaches maximum and train surfaces value of 175, wall functions are employed if the grid is too coarse to resolve the laminar sublayer (Ground surface, tunnel Wall)
روش حل	Pressure-velocity (SIMPLE)
روش گسسته سازی	Least Squares Cell Based 2nd order Implicit, Non-Iterative Time Advancement (NITA) Cell zone conditions Moving mesh for train subdomain

مطابق (شکل ۱۱)، حضور ترمز آیرودینامیک سبب ایجاد سرعت بیشینه در پشت پنل ترمزی و ایجاد گردابه جریان در محل ترمز آیرودینامیک شده است. به منظور بررسی صحت نتایج تغییرات موج سرعت هوا ناشی از عبور قطار در کنار قطار در فواصل مختلف بدست آمده است و با نتیجه موجود در (شکل ۱۳) که در پژوهش نایانگ و همکارانش سال ۲۰۱۵ انجام شده است مقایسه گردید که طی این مقایسه کاملا مشهود است که نتایج مشابهت قابل قبولی دارند. در این تحلیل، محور مرکزی قطار مطابق (شکل ۱۴) در وسط آن قرار گرفته است که با توجه به این موضوع، فاصله بدنه خارجی قطار تا مرکز مختصات در راستای قائم برابر ۳/۸۵ متر و در عرض حدود ۱/۵ متر خواهد بود.

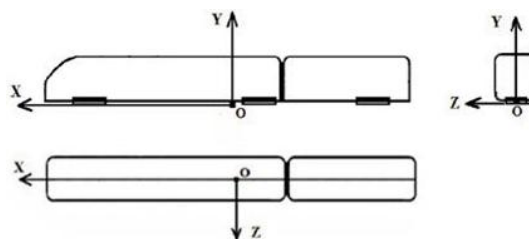
تغییرات پروفیل سرعت بر حسب زمان در نقطه اندازه‌گیری نشان داده شده در (شکل ۳) نیز، مطابق (شکل ۱۶) خواهد بود که بر طبق آن نقاط بحرانی مسئله، در زمان عبور دماغه و دم قطار از کنار موانع است و همچنین نشان دهنده تغییرات ناگهانی سرعت باد بر روی موانع در حین عبور قطار است. در ادامه به بررسی اثر سرعت‌های مختلف قطار بر سرعت بر روی سرعت موج هوای تولید شده در اطراف قطار پرداخته شده است. بدین منظور، سرعت قطار بر سرعت را به ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت افزایش داده، نتایج مربوط به سرعت موج هوا و فشار هوای ایجاد شده در اطراف قطار، مورد بررسی قرار گرفت. البته لازم به ذکر است که این بررسی در حالت حضور و عدم حضور ترمز آیرودینامیک بررسی شده است که با توجه به محدوده مجاز فشار هوا در اطراف قطار در استاندارد، می‌توان حریم مجاز برای سکو و ایستادن افراد در کنار خط و همچنین حریم مجاز برای حضور موانع در کنار قطار را تعیین کرد. خط اندازه‌گیری با مختصات مبدا و مقصد (۱/۵، ۰، ۱۲/۵) و (۲۱/۵، ۰، ۱۲/۵) در کنار قطار مطابق (شکل ۱۷) برای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف بر اساس فاصله از بدنه قطار انتخاب شده است.



شکل ۱۷- مختصات و موقعیت محل اندازه‌گیری در کنار قطار

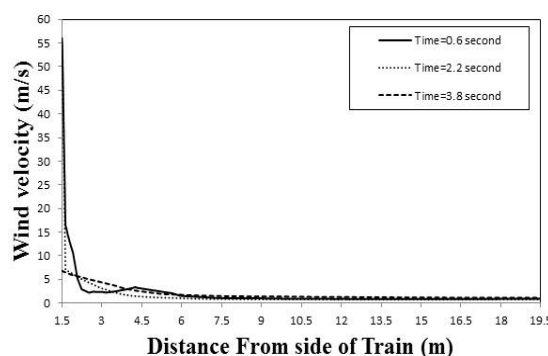


شکل ۱۸- تغییرات سرعت هوا در ارتفاع موانع موجود کنار قطار در لحظه عبور دماغه از محل اندازه‌گیری

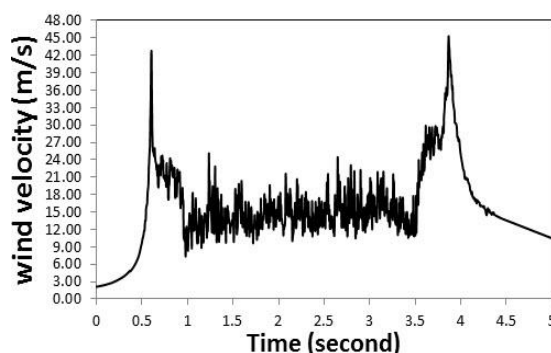


شکل ۱۴- دستگاه مختصات قرار گرفته روی قطار برای مدل‌سازی در نرم افزار

بدین منظور در (شکل ۱۵)، محور افقی از صفر شروع نشده است و مقدار ابتدایی آن ۱/۵ متر است که با توجه به دستگاه مختصات ارائه شده در (شکل ۱۴) این مقدار محل بدنه کناری قطار را مشخص می‌کند. مطابق (شکل ۱۵) با گذشت زمان، سرعت موج هوای ایجاد شده در اطراف قطار افزایش می‌یابد و از طرف دیگر، این مقدار سرعت موج هوا با دور شدن از بدنه قطار کاهش می‌یابد.

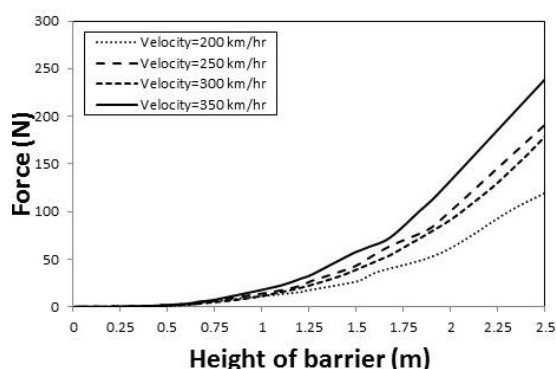


شکل ۱۵- تغییرات سرعت بر اساس فاصله از بدنه قطار در زمان عبور سر، وسط بدنه قطار و دم قطار از مانع

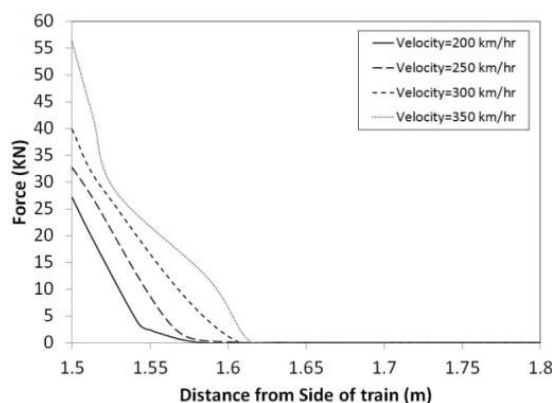


شکل ۱۶- تغییرات پروفیل سرعت بر حسب زمان برای مانع کنار قطار بر سرعت

که در آن چگالی هوا و A سطح مقطع قرار گرفته در مقابل باد و C_p ، ضریب فشار آیرودینامیک است. با توجه به در دست داشتن تغییرات سرعت بر حسب فاصله از بدنه قطار، می‌توان مقدار نیروی حاصل شده از سرعت باد را بر حسب فاصله به ترتیب در جهت عرضی و عمودی از بدنه قطار محاسبه کرد. در ضمن تغییرات سرعت هوا و ضریب فشار برای موانع موجود در کنار قطار، مطابق (شکل ۱۸) و (شکل ۱۹) بدست آمده است. بنابراین با ضرب مربع نمودار سرعت در ضریب پسای آیرودینامیک و اعمال ضریب $0.5\rho A$ که در آن A سطح مقطع تصویر شده انسان در معرض باد است و تقریباً برابر 0.71 مترمربع در نظر گرفته شده است، می‌توان توزیع نیروی اعمالی به فرد موجود در کنار قطار را مطابق (شکل ۲۰) بدست آورد. نمودار نیرو بر حسب فاصله از بدنه قطار و در کنار قطار نیز، مطابق (شکل ۲۱) بدست می‌آید.

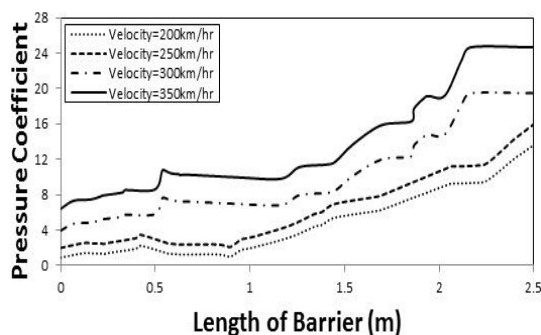


شکل ۲۰- پروفیل نیروی وارد بر مانع کنار قطار در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه گیری



شکل ۲۱- تغییرات نیروی حاصل از عبور قطار در سرعت های مختلف در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه گیری

به منظور مقایسه تاثیر سرعت قطار روی موج فشاری حاصل از عبور قطار، تغییرات سرعت موج هوا روی موانع کنار قطار برای چهار سرعت مختلف برای حالتی بدست آمده است که دماغه قطار از محل اندازه گیری عبور کند. تغییرات سرعت موج هوای ایجاد شده روی مانع کنار قطار، مطابق (شکل ۱۸) است که با افزایش سرعت قطار، مقدار سرعت موج هوای ایجاد شده در اطراف قطار افزایش خواهد یافت. همچنین تغییرات ضریب فشار هوای ناشی از عبور دماغه قطار برای این چهار سرعت برای مانع کنار قطار، مطابق (شکل ۱۹) است. همانگونه که مشاهده می‌شود، میزان افزایش موج سرعت و فشار ناشی از عبور قطار با افزایش سرعت قطار افزایش می‌یابد که در نتیجه، وجود این پدیده در سرعت‌های بالای قطار، خطر آفرین خواهد بود. تغییرات پروفیل سرعت و ضریب فشار برای موانع قرار گرفته در کنار قطار به صورت آنچه در (شکل ۱۸) و (شکل ۱۹) قابل مشاهده است، بدست می‌آید. همانطور که در (شکل ۱۹) مشخص است، مقدار ضریب فشار روی مانع قرار گرفته در کنار قطار و در قسمت فوقانی آن بیشینه و با نزدیک شدن به سمت تحتانی، مانع کاهش می‌یابد و مقدار سرعت در قسمت تحتانی مانع صفر و پس از افزایش به صورت خطی در طول ارتفاع مانع ثابت می‌ماند.



شکل ۱۹- تغییرات ضریب فشار در ارتفاع مانع موجود کنار قطار در لحظه عبور دماغه از محل اندازه گیری

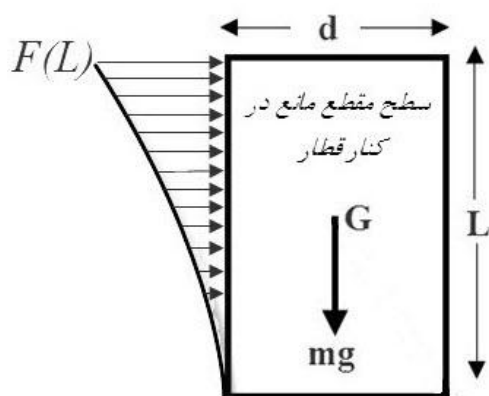
نیروی وارد از طرف باد با سرعت V_w با رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^2 \quad (3)$$

شده برای قطار با ترمز آیرودینامیک نسبت به پالس فشاری ایجاد شده توسط قطار بدون ترمز آیرودینامیک، دارای نوسان زیاد و در بعضی حالات کمتر است. [۱۹]

۸- حریم مجاز برای موانع قرار گرفته در کنار قطار

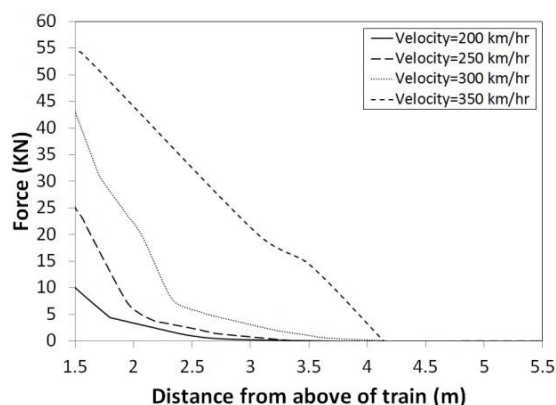
به منظور یافتن فاصله مجاز برای قرارگیری افراد یا موانع در کنار قطار نیاز است تا به کمک سرعت بدست آمده، مقدار نیروی وارد بر فرد را محاسبه کرد. بدین منظور در (شکل ۲۳)، مدل سطح مقطع یک فرد ایستاده نشان داده شده که به صورت مستطیلی به عرض d و ارتفاع L فرض شده است که نیروی آیرودینامیک وارد بر آن (F)، دارای توزیعی مطابق با (شکل ۲۰) است که توسط لایه مرزی باد ایجاد شده است.



شکل ۲۳- توزیع بار گسترده ناشی از موج هوا روی فرد کنار قطار

به منظور محاسبه نیروی لازم برای واژگونی موانع می‌بایست این توزیع نیرو را به صورت بارگسترده روی سطح مانع اعمال کرد و سپس با انتگرالگیری از این توزیع نیرو، مقدار موثر و نقطه اثر آن را محاسبه کرد. همانطور که در (شکل ۲۰) مشاهده می‌شود، توزیع نیروی ناشی از سرعت باد برای موانع قرار گرفته در کنار خط را می‌توان با یک تابع درجه دو تقریب زد که در قسمت تحتانی مانع، مقدار نیرو برابر صفر و با نزدیک شدن به سمت قسمت فوقانی مانع، مقدار نیرو بیشینه می‌شود. این توزیع نیرو در (شکل ۲۰) برای موانع موجود در کنار قطار با سرعت‌های مختلف عبوری ارائه شده است؛ لذا بصورت ساده سازی شده نیروی توزیع

به جهت بررسی صحت مقادیر حداکثر نیروهای اعمالی آیرودینامیکی در کنار خط مقایسه‌ای با مرجع [۱۸] انجام شده است. ساموئل و مارتین^۱ (۲۰۰۰)، تاثیر سرعت باد حاصل از عبور قطار با سرعت ۲۷۵ کیلومتر بر ساعت روی یک کانتینر موجود در فاصله ۱/۵ متری کنار خط را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و ماکزیمم نیروی ۳۰ کیلو نیوتن را بدست آوردند که طی مقایسه مشاهده می‌شود، حدود ماکزیمم نیروهای بدست آمده در این تحقیق و مقاله مذکور مشابهت دارند. نمودار مربوط به نیروی ایجاد شده توسط عبور قطار روی موانع کنار قطار برای حالتی که در آن ترمز آیرودینامیک عمل کرده است نیز، در عبور دماغه قطار از محل اندازه‌گیری مطابق (شکل ۲۲) بدست می‌آید.



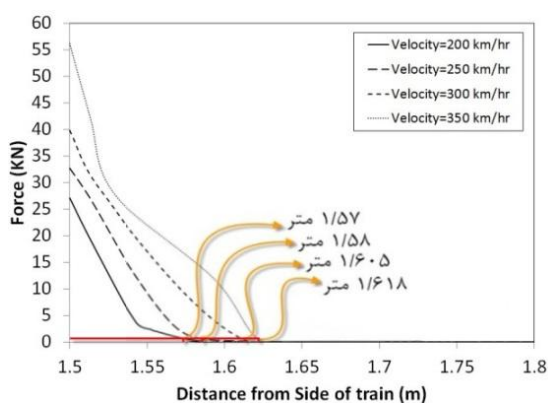
شکل ۲۲- تغییرات نیروی وارد بر کنار قطار با ترمز آیرودینامیک در لحظه عبور دماغه از نقطه اندازه‌گیری

همانطور که در (شکل ۲۲) ملاحظه می‌شود، به جهت حضور پنل باز شده ترمز آیرودینامیک موج‌های فشاری در کنار خط در فاصله بیشتری احساس می‌شوند و این مسئله با آشفتگی ایجاد شده در جریان هوای اطراف قطار ناشی از حضور پنل ترمز مطابقت دارد. در تحقیق منگ و یانگ^۲ (۲۰۱۱) که تاثیر پالس‌های فشاری ناشی از عبور دو قطار در کنار یکدیگر در حالت حضور ترمز آیرودینامیک یا عدم حضور آن را بررسی کرده‌اند نیز برای حالتی که یک قطار دارای ترمز آیرودینامیک و دیگری فاقد ترمز باشد، پالس فشاری ایجاد

¹ Samuel & Martin

² Meng-ling & Yang-yong

که در آن F_{min} کمینه نیروی لازم برای واژگونی فرد، m جرم فرد، g شتاب جاذبه و d پهناى فرد است. با در نظر گرفتن فردی با جرم متوسط ۸۰ کیلوگرم و ابعاد متوسط $1.77m$ و $L = 0.4m$ مقدار نیروی حداکثری $F(L)$ برای واژگونی فرد، مقدار ۲۱۵ نیوتن محاسبه می‌شود. از طرف دیگر، به منظور صحت سنجی بر اساس گزارشات ارائه شده در تحقیقات پیشین، فرد تعادل خود را در تندبادی برابر ۱۲ متربرثانیه [۲۰] زمانی از دست می‌دهد که تندباد از یک طرف می‌آید و مردم روی سکو روبروی مسیر قطار هستند. در این حالت با در نظر گرفتن سطح مقطع بدن انسان به صورت (شکل ۲۴) و متوسط ضریب درگ حدود ۱/۲، مجدداً مقدار حداقل نیروی لازم برای واژگونی فرد از رابطه $F(L) = \rho AC_p V^2 / 2$ حدود ۲۱۵ نیوتن بدست می‌آید. حال با داشتن نمودار مقدار نیروی حداکثری در ارتفاع $1.77m$ و $L =$ تعیین پروفیل نیروی اعمالی در این نقطه مقدار فاصله به عنوان حریم مجاز فرد در کنار قطار برای عدم ایجاد این نیرو، قابل دستیابی است. برای حالتی که قطار فاقد ترمز آیرودینامیک است، این مقادیر در ارتفاع $L = 1.77m$ به صورت (شکل ۲۵) رسم شده و در (شکل ۲۶)، تغییرات این حداقل فاصله مجاز بر حسب سرعت های مختلف قطار ترسیم شده است. همانطور که در (شکل ۲۵) مشاهده می شود به منظور جلوگیری از واژگونی افراد ایستاده در اطراف قطار می بایست این حریم مجاز با قراردادن علائم هشداردهنده مشخص گردد تا از بروز حادثه جلوگیری شود.



شکل ۲۵- مقدار فاصله مجاز برای عدم اعمال نیروی حداکثری در سر فرد در کنار قطار بدون ترمز آیرودینامیک بر حسب فاصله از قطار

شده روی مانع را می‌توان با رابطه (۴) و بصورت منحنی درجه دو تخمین زد:

$$W(y) = \frac{F(L)}{L^2} y^2 \quad (4)$$

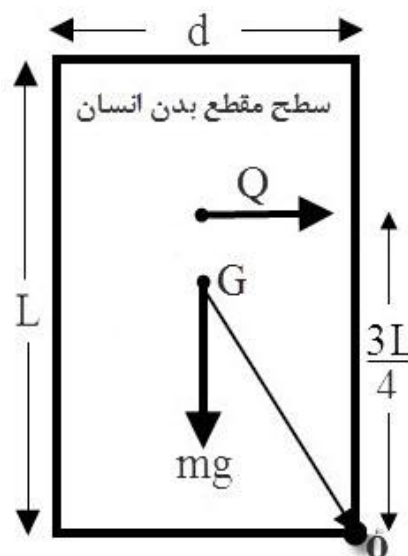
در آن W ، توزیع نیروی ناشی از باد را نشان می‌دهد. به این ترتیب مقدار نیروی موثر ناشی از این توزیع Q به کمک رابطه (۵) و مرکز اعمال این نیروی موثر \bar{x} ، به کمک رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$Q = \int W(y) dy \quad (5)$$

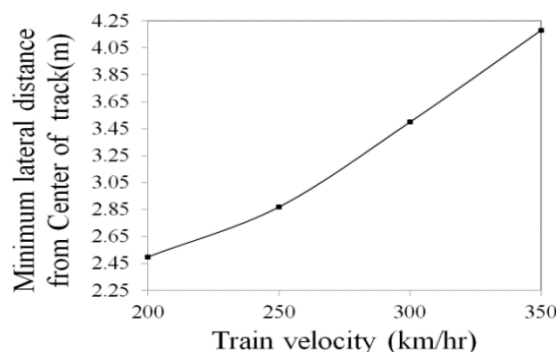
$$\bar{x} = \frac{\int yW(y) dy}{Q} \quad (6)$$

حال با توجه به اینکه مقدار نیروی موثر از رابطه (۵) برابر $LF(L)/3$ و مرکز اعمال این نیروی موثر نیز از رابطه (۶) برابر $3L/4$ بدست آمد حال می‌توان به صورت استاتیکی و با برابر صفر قراردادن گشتاور وارد بر فرد مطابق (شکل ۲۴)، نیروی $F(L)$ لازم مربوط به واژگونی فرد را با استفاده از رابطه (۷) تعیین کرد:

$$\sum M_o = 0 \rightarrow Q \times \frac{3L}{4} = m \times g \times \frac{d}{2} \rightarrow \frac{LF(L)}{3} \times \frac{3L}{4} = \frac{mgd}{2} \rightarrow F(L) = \frac{2mgd}{L^2} \quad (7)$$



شکل ۲۴- سطح مقطع بدن انسان به همراه نیروهای وارد بر آن



شکل ۲۸- تغییرات حداقل فاصله مجاز برای موانع کنار قطار دارای ترمز آیرودینامیک بر حسب سرعت

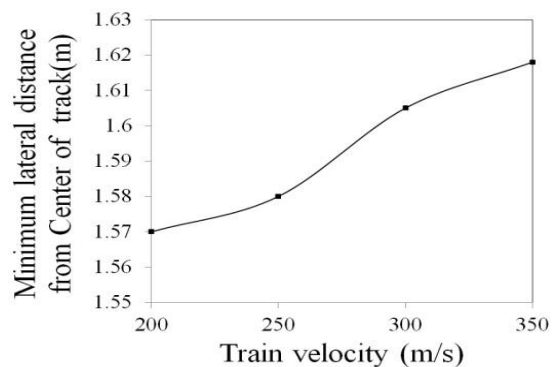
۹- نتیجه‌گیری

این پژوهش اثر سرعت باد ناشی از عبور قطار روی مسافران منتظر، کارگران قرار گرفته در کنار قطار را مورد بررسی قرار داد. اثر پدیده فشار هوا در مود عادی یا با حضور ترمز آیرودینامیک، مورد بررسی قرار گرفت. برای این شبیه‌سازی از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار فلونت استفاده شد. مدل محاسباتی به منظور صحت‌گذاری توسط نتایج ارائه شده برای یک قطار که توسط نایانگ و همکارانش [۸] (۲۰۱۵) انجام شده است و تغییرات سرعت هوای ایجاد شده برای آن در کنار قطار و در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت ارائه شده بود، مورد تایید قرار گرفت. بین نتایج این پژوهش و نتایج مربوط به پژوهش نایانگ و همکارانش، تطابق مناسبی مشاهده شد. به عنوان نتیجه‌گیری نهایی، مقدار حریم مجاز برای قرار گرفتن مسافران در کنار قطار بر سرعت در حضور و عدم حضور ترمز آیرودینامیک و در سرعت‌های مختلف قطار بر سرعت به صورت (جدول ۲) بدست آمد. بنابراین حریم مجاز برای سرعت ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت در حضور ترمز آیرودینامیک، باید حداقل برابر ۴/۱۸ متر از مرکز خط قطار باشد.

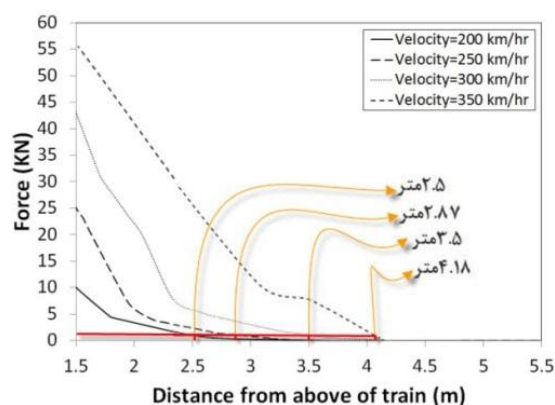
جدول ۲- کمینه فاصله مجاز برای حضور افراد در کنار قطار

سرعت قطار (km / hr)	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
عدم حضور ترمز آیرودینامیک	۱/۵۷ (متر)	۱/۵۸ (متر)	۱/۶ (متر)	۱/۶۱۸ (متر)
حضور ترمز آیرودینامیک	۲/۵ (متر)	۲/۸۷ (متر)	۳/۵ (متر)	۴/۱۸ (متر)

در بیشینه سرعت قطار در این تحقیق که برابر ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت است، افراد می‌بایست در فاصله بیشتر از ۱/۶۱۸ متری از مرکز خط قرار گیرند. این مسئله مجدداً در حالت بحرانی عبور قطار با ترمز آیرودینامیک نیز بررسی شده است. در (شکل ۲۷) و (شکل ۲۸)، تغییرات این حداقل فاصله مجاز در سرعت‌های مختلف قطار ترسیم شده است. لذا با توجه به آشفستگی بیشتر ایجاد شده توسط ترمز آیرودینامیک ملاحظه می‌شود که فاصله حریم مجاز در این حالت، افزایش یافته است. مثلاً در بیشینه سرعت قطار در این تحقیق که برابر ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت است، موانع می‌بایست در فاصله بیشتر از ۴/۱۸ متری از مرکز خط قرار گیرند.



شکل ۲۶- تغییرات حداقل فاصله مجاز برای موانع کنار قطار فاقد ترمز آیرودینامیک بر حسب سرعت



شکل ۲۷- مقدار فاصله مجاز برای عدم اعمال نیروی حداکثری در سر فرد در کنار قطار با ترمز آیرودینامیک بر حسب فاصله از قطار

- passage of high-speed train. *J Wind Eng Ind Aerod* 140: 19-33.
- [9] Dhanabalan Y (2013) Numerical study of a wind tunnel setup for measuring train slipstream with Detached Eddy Simulation.
- [10] Axelsson N, Ramnefors M, Gustafsson R (1998) Accuracy in computational aerodynamics, Part1: stagnation pressure. SAE 980037.
- [۱۱] غضنفری م، حسینی تهرانی پ (۱۳۹۴) بهبود ضخامت و وزن نمونه جدید پنل ترمز آئرودینامیکی قطارهای پرسرعت با استفاده از نرم افزار انسیس. چهارمین کنفرانس بین المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه آهن، ایران - تهران، محل دائم نمایشگاه‌های بین المللی تهران.
- [12] Guillou F (2012) CFD Study of the Flow around a High-Speed Train.
- [13] Stathopoulos T (2002) The numerical wind tunnel for industrial aerodynamics: real or virtual in the new millennium?. *Wind Struct* 5 (2-4): 193-208.
- [۱۴] رضوانی م، محبی م (۱۳۹۲) شبیه سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافربری پارسی تحت اثر بادهای عرضی. فصلنامه مهندسی حمل و نقل ۳۶۴-۳۴۵: ۴(۴).
- [15] Casey M, Wintergerste T (2000) Special interest group on quality and trust in industrial CFD Best Practice Guidelines. ERCOFTAC.
- [16] Manhart M, Wengle H (1993_ A spatiotemporal decomposition of a fully inhomogeneous turbulent flow field. *Theor Comp Fluid Dyn* 5: 223-242.
- [17] Muld TW (2012) Slipstream and Flow structures in the near wake of high-speed trains. Doctoral Thesis in Engineering Mechanics, KTH, Stockholm
- [18] Holmes S, Schroeder M, Toma E (2000) High-speed passenger and intercity train aerodynamic computer modeling. In the 2000 International Mechanical Engineering Congress ME2000.
- [19] Meng-ling W, Yang-yong Z, Chun T, Wei-wei F (2011) Influence of aerodynamic braking on the pressure wave of a crossing high-speed train. *J Zhejiang Univ Sci A* 12(12): 979-984.
- [20] De Graaf B, Van Weperen W (1997) The retention of balance: An exploratory study into the limits of acceleration the human body can withstand without losing equilibrium. *Human Factors: J Hum Factors Ergon Soc* 39(1): 111-118.

۱۰- علائیم، نشانه‌ها و ارقام

زمان و ضخامت،	t
مؤلفه سرعت در جهت طولی،	u
مؤلفه سرعت در جهت عرضی،	v
مؤلفه سرعت در جهت عمودی،	w
لزجت دینامیکی،	μ
چگالی،	ρ
شتاب جاذبه،	g
ضریب پسای فشاری	C_p

۱۱- مراجع

- [1] Gebicki M (2014) What's the world's fastest passenger train. *Stuff.co.nz*.
- [2] TSI, 2008/232/CE (2008) Technical specification for interoperability of high speed rolling stock (TSI HS RST). Official Journal of the European Union.
- [3] Lawson TV, Penwarden AD (1975_ The effects of wind on people in the vicinity of buildings. Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, 605-622. Cambridge University Press, Heathrow.
- [4] Bottema M (1993) Wind climate and urban geometry. Proefschrift/ PhD Thesis, Eindhoven University of Technology. ISBN 90-386-0132-8.
- [5] De Graaf B, Van Weperen W (1997) The retention of balance: An exploratory study into the limits of acceleration the human body can withstand without losing equilibrium. *Human Factors: J Hum Factors Ergon* 39(1): 111-118.
- [6] Jordan S, Johnson T, Sterling M, Baker C (2008) Evaluating and modeling the response of an individual to a sudden change in wind speed. *Build Environ* 43:1541-1534.
- [7] Khayrullina A, Blocken B, Janssen W, Straathof J (2015) CFD simulation of train aerodynamics: Train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *J Wind Eng Ind Aerod* 139: 100-110.
- [8] Yang N, Zheng XK, Zhang J, Law SS, Yang QS (2015) Experimental and numerical studies on aerodynamic loads on an overhead bridge due to