

اثرات وزش باد بر حرکت قطارهای پرسرعت (۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) از منظر آیرودینامیک و ارائه راهکارهای اصلاحی

مسعود محبی*
محمدرضای رضوانی
محسن درگزی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
رئیس بخش ناوگان مرکز آموزش و تحقیقات، راه آهن جمهوری اسلامی ایران، تهران، ایران

چکیده

حرکت قطار اغتشاشاتی را در هوای اطراف خود ایجاد می کند که سبب تشکیل جریان هوایی در طول قطار می گردد. امروزه که شاهد گسترش خطوط قطارهای پرسرعت هستیم این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می کند. زیرا در زمان عبور قطار از نزدیک سازه هایی نظیر تونل ها، پل ها و غیره جریان های صوتی ای اطراف قطار در تعامل با سازه به وجود می آید که این جریان ها، امواج فشاری تولید می کنند. این امواج می تواند اثرات زیانباری بر قطارها و تجهیزات مجاور خطوط داشته و ایمنی و سلامتی انسان هایی را که در مجاورت خطوط آهن قرار دارند به خطر بیندازد. در این مقاله بامطالعه و ارزیابی استانداردهای آیرودینامیک قطارها ضمن تأکید بر مسئله وزش بادهای عمود بر حرکت قطارها که به مراتب آثار سوء ایمنی در پی دارد ضمن شبیه سازی اثرات بادهای عرضی بر قطارهای پرسرعت عبوری با محدوده سرعت ۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت به پارامترهای تأثیرگذار بر ایمنی حرکت قطار پرداخته شده و راهکارهایی جهت حفظ ایمنی حرکت قطار بیان می گردد. لازم به ذکر است باد عمود بر حرکت قطار در سرعت های بالا می تواند آثار سوء ایمنی داشته باشد که در این مقاله آثار آن بررسی شده و ملاحظات فنی در این خصوص ارائه می گردد. در ایران، به دلیل نبودن قطارهای پرسرعت تاکنون مطالعه ای روی این موضوع صورت نپذیرفته است ولی در کشورهای دارای خطوط آهن پرسرعت روی موارد مشابه تحقیقات گسترده انجام گردیده و نیز در جریان است.

واژه های کلیدی: آیرودینامیک، قطارهای پرسرعت، باد عرضی، راهکار اصلاحی، خط تهران-اصفهان.

The Impacts of Airstream on the Aerodynamic Behavior of High-Speed Trains (160-300 km/hr) and some Remedial Propositions

M. Mohebbi
M. A. Rezvani
M. Dargazi

School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
Manager, The Rolling Stock Department, Research and Training Center, Iran Railways, Tehran, Iran

Abstract

Trains on the move create disturbances in the surrounding air that provides the flow over the entire length of the moving vehicles. With the ever-increasing speed of the trains, this issue has become more imperative. When a high-speed train passes near the structures such as the tunnels, bridges, etc. interaction between the moving train and the structures generates noise flow around the train that is in turn responsible for the creation of pressure waves. Such pressure waves can cause detrimental effects on the trains and the track wayside equipment and endanger safety and wellbeing of people that either live or work near the tracks. In this research, with the review and evaluation of the trains' aerodynamic standards the issue of the effects of the crosswinds on the running safety of the high-speed trains is studied. By simulating the effects of the crosswinds on the aerodynamic behavior of the high-speed trains in the speed range of 160-300 km/hr, some of the parameters that are vital for the train dynamic safety are considered. Also, some propositions for increasing the train running safety and improving its ride and dynamic behavior are suggested. When the flow of wind is perpendicular to the direction of the train travel, it can cause deterioration of the train travel safety. Such issues are investigated in this research and some practical technical remedies are offered. It needs to be reminded that the high-speed trains do not operate in Iran. Therefore, some types of studies have never been performed. However, within the countries that already have the high-speed train systems, such studies, in the past and present, are quite common.

Keywords: Aerodynamic, High Speed Train, Crosswind, Corrective Solution, Tehran-Isfahan.

۱- مقدمه

فرآیند مربوط به اثرات آیرودینامیک قطارهای عبوری بامطالعه متون توسط ولپ^۱ [1] آغاز شد. این تحقیق، منابع مرتبط به اطلاعات و داده های قابل دسترسی برای ارزیابی اثرات آیرودینامیک یک قطار عبوری سرعت بالا بر قطارهای دیگری که از خط مجاور عبور می کنند و همچنین اثر قطار عبوری سرعت بالا از ایستگاه و تأثیر آن بر افرادی که در سکوی ایستگاه قرار دارند، را نشان می دهد. افرادی که تحت فشار و جریان هوای تحریک شده از قطار عبوری قرار گرفته اند، نیروهای

به منظور رسیدن به سرعت بالاتر و هنوز هم دوستدار محیط زیست بودن، قطارها را امروزه اغلب از مواد سبک تری می سازند. ترکیب وزن سبک و سرعت بالا منجر به افزایش نگرانی در خصوص پایداری قطارها، بخصوص هنگامی که در معرض بادهای عرضی قرار می گیرند می شود. اهمیت تحقیق حاضر در این است که به طور خاص به این موضوع که شماری از تصادفات جدی در سال های اخیر که بادهای شدید عامل اصلی خروج از خط بوده است می پردازد.

¹ VOLPE

قطارها نسبت به جریان بادهای عرضی می‌باشد در این مدل قطار پیدا گردید. در سال ۲۰۱۳ بررسی عددی بر روی مدل قطار پارسی توسط محبی و رضوانی [11] صورت گرفت که از نتایج آن می‌توان به اهمیت فاصله هوایی بین واگن‌ها در تغییرات ضرایب آیرودینامیک اشاره نمود. مطالعات عددی میسون و همکارانش [12] نشان داد بهبود هندسه زیربند قطار به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در بهبود ضرایب آیرودینامیک قطار نقش دارد. سوزوکی، تانموتو و مایدا [13] بیان کردند که مشخصه‌های آیرودینامیکی قطار بر روی بستر به توزیع لایه مرزی روی زمین بستگی دارد و ضریب نیروی جانبی قطار بر روی بستر با ارتفاع بلند، بیشتر از بستر با ارتفاع کم می‌باشد. کشورهای زیادی در زمینه اثرات آیرودینامیک قطارهای پرسرعت تحقیق می‌کنند. از جمله این کشورها می‌توان ژاپن، فرانسه و دیگر کشورهای اروپایی را نام برد.

۲- مروری بر استانداردهای آیرودینامیک قطارهای پرسرعت در دنیا

در حال حاضر استانداردهای بین‌المللی DB Ril 80404 آلمان که در سال ۲۰۰۶ تدوین گردید، استاندارد GM/RC2542 و GM/TR2142 انگلیس که در سال ۲۰۰۹ تدوین گردید وجود دارند. علاوه بر این مشخصه‌های فنی برای ماشین‌های ریلی پرسرعت برای بسیاری از خطوط ریلی موجود در راه‌آهن وجود دارد. و اخیراً استاندارد EN 14067:6-2010 در سال ۲۰۱۰ برای وسایل نقلیه ریلی جدید در اروپا تدوین گردیده است که شاید بتوان گفت مهم‌ترین استاندارد آیرودینامیک در حال حاضر دنیا در باب قطارها، استاندارد اروپایی EN 14067:6-2010 می‌باشد. استاندارد EN 14067:6-2010 می‌تواند به‌عنوان نقطه آغازی برای انجام تحقیقات در حوزه بادهای عرضی باشد. این استاندارد به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی مهم که جنبه‌های مختلف شبیه‌سازی‌های CFD، آزمایشات تونل باد، مدل‌های دینامیکی واگن‌ها و آیین‌نامه‌هایی برای ضمانت یک عملکرد مطمئن و ایمن را بیان می‌کند می‌باشد. آیین‌نامه حاضر، پیچیدگی‌ها و طبیعت بهم‌پیوسته مسائل بادهای عرضی را آشکار می‌سازد.

این استاندارد اروپایی بخشی از سری‌های " برنامه‌های کاربردی راه‌آهن - آیرودینامیک " می‌باشد که علاوه بر پوشش ارزیابی‌های باد عرضی، الزامات و روش‌هایی برای رفتار آیرودینامیک در فضای باز و تونل‌ها را بیان می‌دارد. عنوان کامل این استاندارد به‌صورت " EN 14067:6-2010 برنامه‌های کاربردی راه‌آهن - آیرودینامیک - بخش ۶: الزامات و روش‌های آزمون برای ارزیابی باد عرضی " می‌باشد و محدوده کاربرد آن در واگن‌های مسافری تا سرعت ۳۶۰ کیلومتر بر ساعت و واگن‌های باری تا سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد.

۳- بررسی آثار وزش بادهای عمود بر حرکت قطار و ارزیابی پایداری قطار در برابر باد عرضی در سرعت‌های ۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت

در این بخش به‌منظور بررسی تأثیرات بادهای عرضی بر حرکت قطارها با استفاده از ابزارهای CFD به مدل‌سازی این پدیده می‌پردازیم. بدین منظور در مرحله اول پس از ساخت هندسه قطار

آیرودینامیک را تجربه می‌کنند. برای افرادی که در فاصله ۲ متری از کنار یک قطار عبوری که با سرعت ۲۴۱ کیلومتر بر ساعت از ایستگاه عبور می‌کند قرار دارند، اثرات فشار و جریان هوای تحریک‌شده به‌قدری زیاد هست که می‌تواند سلامتی و ایمنی افراد را تحت تأثیر قرار دهد. هنگامی که قطاری از سکوی ایستگاه با سرعت بالا عبور می‌کند، اثر دنباله قطار با نوسانات توربولانت و ضرباتش در هوا، به همراه وزش گردوغبار و ذرات ریزه‌ای که با خود می‌آورد، موضوع مهمی است که آسودگی و ایمنی افراد حاضر در سکو را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مرزهای مربوط به عبور قطارهای پرسرعت و فاصله از قطار جزء ضوابطی است که سطوح ترانس آسودگی انسان را در برمی‌گیرد، و این فاکتورها بر سلامتی و ایمنی افراد در سکوه‌های ایستگاه تأثیرگذارند. مرز محدود حقیقی بایستی شامل اثرات بر افراد هنگامی که در معرض عوامل ترکیبی فشار، باد، نویز و وزش ذرات ریز بخصوص عملکرد توربولانت دنباله تولیدشده از قطار عبوری، باشد.

دهه‌های اخیر، تحولات در مهندسی راه‌آهن، سبب رفتار سریع‌تر، راحتی بیشتر و مصرف انرژی بیشتر قطارها شده است. بر این اساس، بهبود عملکرد آیرودینامیک قطارها یکی از اهداف اصلی فرآیند طراحی می‌باشد. یکی از مسائل حل‌نشده و معضلات رفتار آیرودینامیک قطارها، وابستگی ضرایب آیرودینامیک محاسبه‌شده در شبیه‌سازی‌های عددی و اندازه‌گیری شده در تونل‌های باد، نسبت به رفتار در مقیاس کامل می‌باشد. شماری از مطالعات قبلی [2]، ساختار جریان اطراف قطارهای پرسرعت را در زوایای انحرافی نسبی خط‌ساز و واژگون کننده در نظر می‌گرفتند. محققان زیادی [3-5] در کشورهای اروپایی، مسئله‌ای که قطارها با آن درگیر هستند بخصوص برای قطارهای پرسرعت را در نظر گرفتند. تحقیقات تجربی انجام‌شده توسط بیکر و گاتورپ [6] در مدل‌های مقیاس نشان دادند که اختلافات ناچیز در نتایج به تنظیمات متفاوت آزمایش به‌عنوان مثال لایه مرزی اتمسفری و حرکت زمین بستگی دارد. کوپر [7] روشی برای تخمین احتمال واژگونی قطار در بادهای عرضی معرفی کرد. مطالعات او بر روی مدل در مقیاس ۱:۱۵ بود. بر اساس نتایج او، معادلات بدست آمده به تغییرات پارامترهای ورودی بسیار حساس می‌باشد. دقت لازم برای تعیین این پارامترها، فراتر از قابلیت‌های فناوری موجود است. ماسبرنات و همکارانش [8] محاسبات سه‌بعدی میدان جریان در اطراف قطار پرسرعت فرانسوی TGV^۱ را انجام دادند. معادلات ناویر استوکس تراکم پذیر متوسط رینولدز بر روی شبکه بدون ساختار با استفاده از روش المان محدود گسسته سازی شدند. گیلارد [9] به بحث پیرامون ظواهر مختلف کاربردهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۲ در آیرودینامیک قطار با استفاده از حل‌کننده‌های ناویر استوکس متوسط رینولدز پرداخت که در آن جریان اطراف یک مقطع عرضی دوبعدی واگن میانی با ۹۰ درجه زاویه انحرافی را شبیه‌سازی نمود. تحقیقاتی در سال ۲۰۱۴ توسط رضوانی و محبی [10] بر روی مدل قطار ICE2^۳ آلمان صورت گرفت و در آن ضرایب آیرودینامیک این مدل قطار و ضریب مومنتم واژگونی حول ریل بادپناه در زوایای باد عرضی متفاوت پیدا گردید. همچنین منحنی مشخصه باد که عاملی برای محدودیت افزایش سرعت

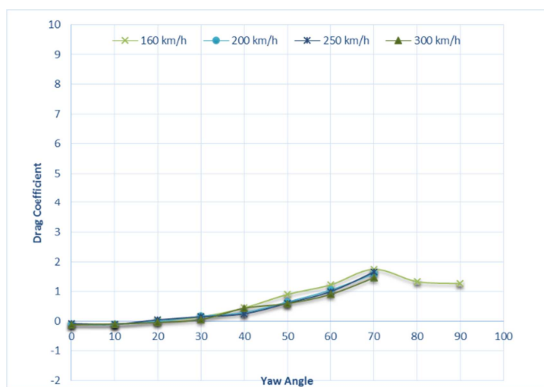
¹ Train à Grande Vitesse

² Computational Fluid Dynamics

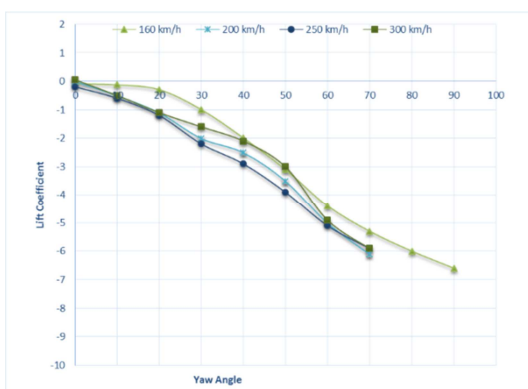
³ InterCity Express 2

می‌باشند. علاقه اصلی به مومنتم چرخشی هست چراکه محتمل‌ترین علت خروج از خط قطار می‌باشد. علاوه بر این، قطار می‌تواند مومنتمی که میل به پیچش یا بالا بردن قطار حول محور عرضی آن دارد را تجربه کند که مومنتم پیچشی نامیده می‌شود. مومنتم سوم می‌تواند به‌عنوان تلاشی برای دوران قطار حول محور عمودی‌اش شرح داده شود که مومنتم انحرافی نامیده می‌شود. نیروهای پسا، جانبی و بالابرنده از محاسبات در جهت خاص هر یک بدست می‌آید. به‌منظور کارآمدتر ساختن آن‌ها در مقایسه با مطالعات قبلی و آینده، این اعداد به فرم ضرایب بی‌بعد ارائه می‌شوند. شکل‌های ۱ الی ۷ تغییرات ضرایب آیرودینامیک برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف باد قطار ICE2 را نشان می‌دهد.

در شکل ۱ مشاهده می‌گردد که ضریب نیروی پسا با افزایش زاویه انحرافی افزایش می‌یابد و این افزایش تا زاویه ۷۰ درجه ادامه دارد و بعداز آن با افزایش زاویه، ضریب نیروی پسا کاهش می‌یابد. همچنین مشخص است که افزایش سرعت باد، تأثیر چندانی بر ضریب نیروی پسا ندارد. که این موضوع با توجه به دماغه آیرودینامیک قطار ICE2 انتظارش می‌رفت.



شکل ۱- تغییرات ضریب نیروی پسا برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف برای قطار ICE2



شکل ۲- تغییرات ضریب نیروی بالابرنده برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف برای قطار ICE2

پرسرعت در نرم‌افزارهای CAD^۱، توسط نرم‌افزارهای CFD پدیده عبور جریان هوا را بر قطار بررسی می‌کنیم و با بدست آوردن ضرایب نیروها و مومنتم‌های آیرودینامیک قطار، مهم‌ترین فاکتور این مبحث یعنی پایداری در برابر باد عرضی را بدست آورده و محدوده سرعت مطمئن و ایمن برای فعالیت این قطارها را پیشنهاد می‌دهیم.

اولین گام ساخت هندسه مطلوب است. برای ساخت هندسه مناسب که محدوده سرعت ۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت را پوشش دهد از هندسه قطار ICE2 که توسط کارخانه قطار بمباردیر تولید می‌گردد استفاده شده است. تغییرات شامل مقیاس ۱:۱۰ مدل قطار می‌باشد. ساخت قطار شامل یک واگن موتور مقدم و یک واگن کنترل به دنبال آن می‌باشد و نمونه ساده‌شده‌ای با توجه به مدل ICE2 بکار گرفته شده است.

ابعاد مدل و نمونه واقعی قطار در جدول ۱ ذکر شده است. بوژی‌ها برای مدل قطار ساده‌سازی شده‌اند. هندسه قطار با دقت بسیار بالایی تا حد امکان ایجاد شده است. قطار به‌صورت ساکن در نظر گرفته شده و از باد برآیند در سرعت مشخص استفاده می‌گردد. این عمل با جایگذاری مجموعه واگن در زاویه انحرافی بدست می‌آید. در نمونه قطار در مقیاس کامل این عمل می‌تواند با حرکت روبه‌جلوی قطاری در سرعت مشخص و بادی که با سرعت نسبی خاصی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به وجوه جانبی قطار می‌وزد مقایسه گردد.

مبدأ سیستم مختصات کارترین در مرکز قطار و در بالای ریل قرار گرفته است. برای محاسبات، CFD به فاصله خاص در جلو و پشت قطار نیاز دارد. بعد از ساختن دامنه در Solidworks، مدل به محیط نرم‌افزار Ansys وارد می‌شود.

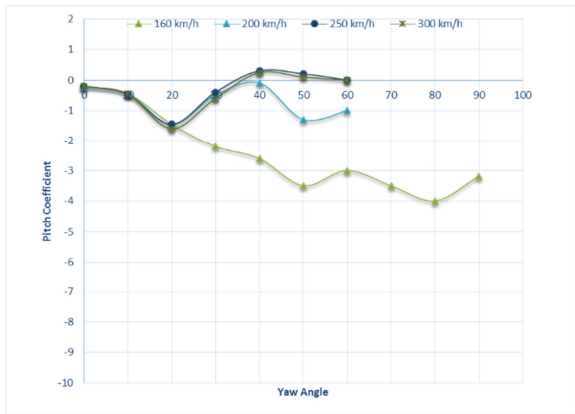
جدول ۱- ابعاد واقعی و مدل مقیاس قطارهای ICE2

قطار ICE2	ابعاد واقعی (متر)			ابعاد مدل مقیاس (متر)		
	طول	عرض	ارتفاع	طول	عرض	ارتفاع
	۳۵.۵۷	۲.۹۹	۳.۸۵	۳.۵۵۷	۰.۲۹۹	۰.۳۸۵

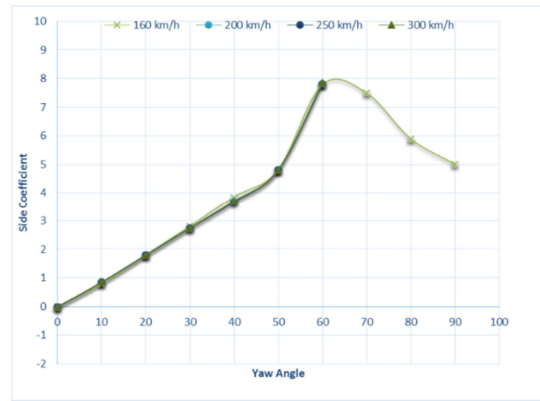
پارامترهای موردعلاقه در شبیه‌سازی، ضرایب نیروها، مومنتم‌ها و میدان سرعت پیرامون قطار می‌باشد. نیروها و مومنتم‌ها، به‌عنوان برآیند نیرو و مومنتم برای کل مجموعه قطار مشخص می‌شود. در CFD این امکان وجود دارد که برای هر واگن مجزا این نیروها را بدست آورد، اما این کار با تجهیزات مقیاس یافته در تونل باد امکان‌پذیر نیست.

همان‌طور که بیان گردید هنگامی که قطاری تحت باد عرضی قرار می‌گیرد نیروها و مومنتم‌های آیرودینامیک را تجربه می‌کند. نیروهای آیرودینامیک شامل نیروی پسا که در برابر حرکت روبه‌جلوی قطار مقاومت می‌کند، نیروی جانبی که در نتیجه باد جانبی است و قطار را به کنار هل می‌دهد و نیروی بالابرنده که به سمت بالاست و تمایل به بلند کردن قطار از ریل دارد می‌باشد. همچنین مومنتم‌های آیرودینامیک با توجه به نیروهای مذکور قرار داده شده در اطراف محور دوران در جهت هر نیرو در نظر گرفته می‌شوند. محورهای مومنتم چرخشی، پیچشی و انحرافی در همان جهت نیروهای پسا، جانبی و بالابرنده به ترتیب

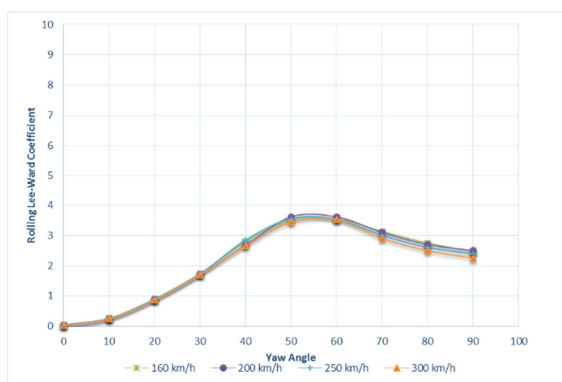
¹ Computer Aided Design



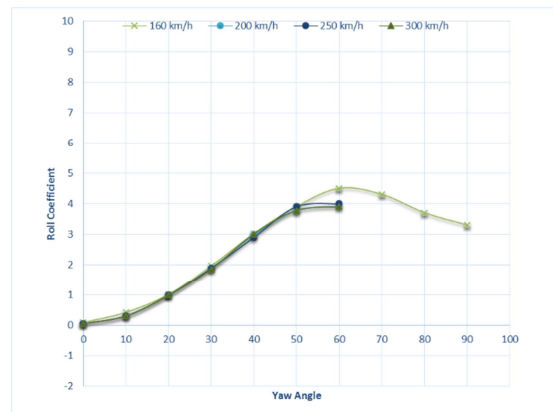
شکل ۶- تغییرات ضریب مومنتم پیچشی برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف برای قطار ICE2



شکل ۳- تغییرات ضریب نیروی جانبی برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف برای قطار ICE2



شکل ۷- ضریب مومنتم چرخشی حول ریل بادپناه برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف برای قطار ICE2



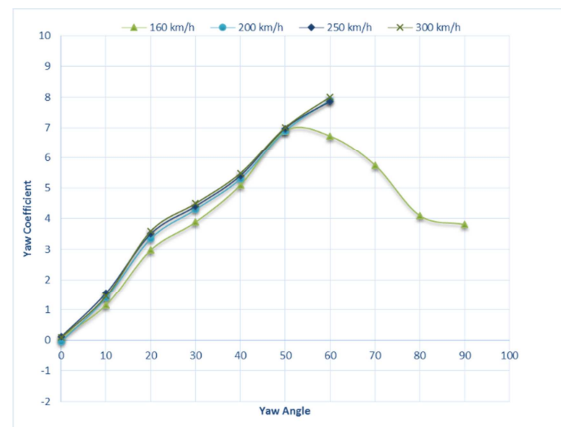
شکل ۴- تغییرات ضریب مومنتم چرخشی برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف برای قطار ICE2

شکل ۳ ضریب نیروی جانبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست نیروی جانبی با افزایش زاویه انحرافی، افزایش می‌یابد و رفتار مجانب ماندنی برای زوایای بیشتر از ۵۰ درجه وجود دارد. ضریب نیروی جانبی به سرعت باد وابستگی چندانی ندارد. مومنتم چرخشی که مهم‌ترین پارامتر در پایداری قطار در برابر باد عرضی است در شکل ۴ نشان داده شده است. مومنتم چرخشی مسئول باربرداری از مجموعه چرخ‌ها در طرف بادگیر می‌باشد. مومنتم چرخشی با افزایش زاویه انحرافی، افزایش می‌یابد و رفتار مجانب ماندنی برای زوایای حدوداً ۵۰ درجه مشاهده می‌شود. مومنتم چرخشی با افزایش سرعت باد تغییرات چندانی ندارد.

مومنتم انحرافی در شکل ۵ نشان داده شده است. مومنتم انحرافی به‌طور یکنواخت با افزایش زاویه انحرافی افزایش می‌یابد و وابستگی کوچکی به سرعت جریان باد دارد. مومنتم انحرافی به توزیع بار بین طرف بادگیر و بادپناه تأثیرگذار است.

نتایج مومنتم پیچشی برحسب زاویه انحرافی در شکل ۶ نشان داده شده است. مومنتم پیچشی، ضریبی است که اثر تغییر سرعت باد را نسبت به بقیه، بیشتر نشان می‌دهد. به‌رحال مقادیر نسبتاً کوچک هستند و اثر کمی بر عملکرد آیرودینامیک نسبت به واژگونی دارد.

ضریب مومنتم چرخشی حول ریل بادپناه در شکل ۷ مشخص است. همان‌طور که قبلاً بیان گردید مومنتم چرخشی حول ریل بادپناه، متغیر بسیار مهمی می‌باشد که با واژگونی مرتبط است. این متغیر را



شکل ۵- تغییرات ضریب مومنتم انحرافی برحسب زاویه انحرافی در سرعت‌های مختلف برای قطار ICE2

در شکل ۲ شاهد نیروی کمی برای زوایای انحرافی کوچک تا حدوداً ۱۰ درجه توسط ضریب نیروی بالابرنده هستیم. برای زوایای بزرگ‌تر از ۱۰ درجه، ناپایداری‌ها رشد داشته و بشدت افزایش می‌یابند. وابستگی کوچکی برای زوایای انحرافی بزرگ نسبت به سرعت باد مشاهده می‌گردد.

۵- معرفی فناوری‌های کنترل وزش باد بر قطار پرسرعت

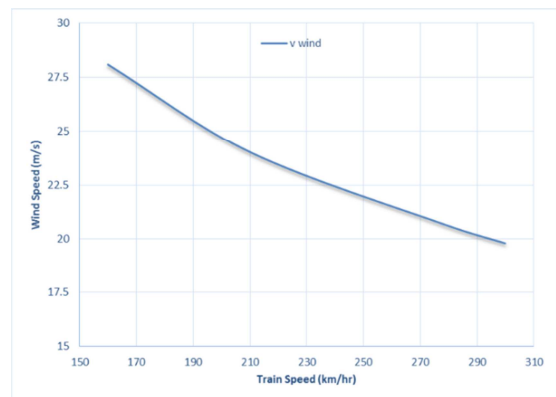
یکی از مهم‌ترین اهداف احداث و بهره‌برداری راه‌آهن در نقاط مختلف جهان انتقال و جابجایی بار و مسافر به شکلی راحت و سریع با ایمنی بسیار بالا می‌باشد، که سال‌هاست در این راستا برخی از کشورهای پیشرفته در جهت دستیابی به اهداف قیدشده تلاش‌های فراوانی انجام داده‌اند در این راه نیز موفقیت‌های بی‌شماری کسب نموده‌اند. مطالعه بادهای عرضی روی قطارهای پرسرعت از دهه ۹۰ میلادی آغاز شد، اما در دهه گذشته بود که آثار باد عرضی سبب شد تا توجه کاملی را از جوامع علمی و تولیدکنندگان ماشین‌های ریلی و مدیران راه‌آهن به‌سوی خود جذب کند. باد همیشه وجود داشته است و قطارها نیز همواره قبل از آنکه نیروی جانبی باد خطری محسوب شود به حرکت خود ادامه داده‌اند. بنابراین چرا باد عرضی به‌عنوان مشکلی مطرح گردیده که در گذشته نبوده است؟

در سال‌های اخیر، تولیدکنندگان ماشین‌های ریلی دنبال توسعه وسایل نقلیه جدید سریع‌تر که مسافت بین شهرها را در حداقل زمان ممکن طی کند و افزایش تعداد صندلی‌های هر واگن هستند. وسایل مرسوم حمل‌ونقل که با راه‌آهن به رقابت می‌پردازند ماشین‌های جاده‌ای هستند و اگر به‌طور خاص بر حمل‌ونقل مسافر تمرکز کنیم این اتوبوس‌ها هستند که با راه‌آهن به رقابت می‌پردازند. پرواز تنها گزینه برای پوشش مسافت‌های بزرگ نسبت به قطار است چراکه محدودیت‌های زیرساخت و واگن‌ها را ندارد. در این سناریو، فردی که می‌خواهد مسافت کوتاه و متوسطی را رفت‌وآمد کند می‌تواند سفر با یک قطار یا ماشین را انتخاب نماید. قطارها در جایگاه دوم نسبت به جاده‌ها و اتومبیل‌ها هستند که روزبه‌روز در حال بهبود هستند. بنابراین حمل‌ونقل ریلی تا حدودی به حمل‌ونقل کالا و بار محدود گردیده است. اما به تدریج جاده‌ها از اتومبیل‌ها اشباع شد و بار دیگر حمل‌ونقل ریلی پس از سال‌ها جدایی از محور اصلی خود، در نظر مردم مورد توجه بیشتری واقع گرفت. از طرفی دیگر ماشین‌های جاده‌ای بر محیط زیست به علت آلایندگی‌های سوخت‌های فسیلی تأثیرات مخربی دارند و از این رو قطارهای برقی به‌عنوان بهترین جایگزین در حال رشد هستند. و این منجر به توسعه صنعت راه‌آهن و تبدیل آن به اقتصادی سودآور در بسیاری از کشورها گردانیده است. بنابراین صنعت راه‌آهن به تحولات فناورانه که باعث بهبود راحتی مسافر و سرعت سفر می‌شود به پژوهش پرداخته است.

یکی از مهم‌ترین موضوعات در این زمینه، مسئله باد عرضی می‌باشد که افزایش سرعت قطار، سبب تولید نیروهای آیرودینامیک بزرگ‌تری می‌گردد. هدف صنعت راه‌آهن این است که قطارهای پرسرعتی با سرعت بالای ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت بسازد که نه تنها با حمل‌ونقل جاده‌ای بلکه با حمل‌ونقل هوایی نیز رقابت کند. این هدف تا حدودی با طراحی وسایل نقلیه سبک‌تر انجام می‌شود که با کمک مواد جدید بکار رفته در شاسی وزن کلی قطار را کاهش می‌دهد. بنابراین در باب رسیدن به ایمنی و پایداری قطار و کنترل وزش بادهای عمود بر قطار بایستی موارد زیر را در نظر داشت:

شاید بتوان مهم‌ترین منحنی دانست که پایداری قطار تحت اثر بادهای عرضی را توسط این منحنی می‌توانیم بدست آوریم. در این منحنی رفتار قطار در سرعت‌های ۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت که متناسب با نیاز ما می‌باشد آورده شده است. این ضریب با افزایش زاویه تا ۶۰ درجه رشد زیادی دارد و همان‌طور که مشاهده می‌شود در سرعت‌های بالای باد، بشدت کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان این‌طور استنباط کرد که با توجه به افزایش ضریب مومنتم چرخشی حول ریل بادپناه در زوایای انحرافی بالا، احتمال واژگونی قطار در این زوایا بیشتر می‌باشد. با ضریب مومنتم چرخشی حول ریل بادپناه و با حداقل وزن ممکن و به کمک رابطه می‌توان بیشینه سرعت مجاز قطار را برای هر سرعت بادی که جلوگیری از واژگون شدن می‌نماید محاسبه نمود.

محدودیت سرعت قطار نسبت به وزش باد در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که احتمال اینکه قطاری در سرعت‌های بالاتر، پایدارتر باشد اگر فشار هد دینامیکی، افزایش آرامی با سرعت قطار در مقایسه با افزایش ضریب مومنتم چرخشی داشته باشد بیشتر است. به‌عنوان مثال در شرایط وزش بادی با سرعت ۲۵ m/s، حداکثر سرعت مجاز قطار برای جلوگیری از واژگونی نباید فراتر از ۱۹۵ km/h رود. بنابراین با این نمودار می‌توان حد ایمن و مطمئن قطار را در شرایط وزش باد عرضی پیدا نمود.



شکل ۸- محدودیت سرعت قطار محاسبه‌شده نسبت به وزش باد برای قطار ICE2

۴- شاخص آیرودینامیکی

از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در ارزیابی پروژه راه‌آهن پرسرعت نوع ناوگان می‌باشد. انتخاب ناوگان مناسب می‌تواند بسیاری از مشکلاتی که در آینده امکان رخ دادن برای راه‌آهن وجود دارد را به حداقل برساند. در این راستا در انتخاب ناوگان مناسب از دید آیرودینامیک نیز نکات زیادی نهفته است که بایستی آن‌ها را در نظر داشت. بایستی بدنه از لحاظ آیرودینامیکی مناسب باشد یعنی بدنه ناوگانی انتخاب گردد که کلیه ضرایب آیرودینامیک را به حداقل ممکن برساند که با انتخاب این موضوع می‌توان به در مصارف انرژی صرفه‌جویی داشت، سرعت سیر و آسایش مسافری را افزایش داد و ایمنی را به بالاترین حد خود رساند.

۵-۱- خطوط مستقیم

بدیهی است وسایل نقلیه سریع‌تر، نیازمند خطوط بهتر می‌باشد بنابراین دولت بایستی خطوط جدیدی را برای قطارهای پرسرعت بسازد. این خطوط تاجاییکه ممکن است بایستی به‌صورت خط مستقیم باشد و در منحنی‌ها دارای شعاع بسیار بزرگ باشد. برای مثال خطی که قطاری با سرعت ۳۳۰ کیلومتر بر ساعت در آن حرکت می‌کند در منحنی نیاز به شعاع حداقل ۷۰۰۰ متر دارد. مشخص است که طراحی این خطوط شامل تعداد زیادی از پل‌ها و بسترها جهت تحقق این شرایط می‌باشد اما این خود سبب افزایش بارهای باد می‌شود که بایستی قطار را در برابر آن مقاوم ساخت.

۵-۲- قطار مناسب از لحاظ مشخصه‌های آیرودینامیکی

در باب رسیدن به‌سرعت بالاتر و پایداری قطار بایستی قطاری انتخاب گردد که با توجه به شرایط محیطی و منطقه از لحاظ مشخصه‌های آیرودینامیکی مناسب باشد. چراکه وجود این نوع قطار سبب تشکیل گردابه‌ها و جدایش جریان هوا از انتهای قطار می‌گردد که در پایداری مناسب است. بدین منظور بایستی قطاری انتخاب گردد که دماغه باریک داشته باشد، محل بوژی‌ها از لحاظ آیرودینامیکی دارای پوشش باشد، پانتوگراف قطار دارای شکل بهینه‌تری باشد تا مانعی در برابر جریان هوا نباشد. درزهای بین درب‌های قطار به‌طور مناسب پوشش داشته باشد و فاصله هوایی بین واگن‌ها نیز حدالمقدور پوشیده باشد تا ضرایب آیرودینامیک قطار به حداقل ممکن رسیده و ایمنی افزایش یابد.

۵-۳- نصب تجهیزات بادشکن

در حال حاضر یک نیاز واضح و روشن از کاهش تأثیر باد بر قطارهای پرسرعت با توجه به دلایلی که در بخش قبل توضیح داده شد وجود دارد. تولیدکنندگان می‌توانند رفتار قطار در برابر بادهای عرضی را بهینه‌سازی کنند اما پارامترهای تأثیرگذار بسیاری هستند که وابسته به برخی از جنبه‌های مهندسی و نقشه‌برداری از محیط اطراف مسیر می‌باشند.

برخی خطوط بیشتر در معرض بادهای عرضی نسبت به بقیه هستند از این‌رو اقدامات اصلاحی برای کاهش سرعت باد محلی نیاز است که از جمله آن تجهیزات بادشکن که قطار را در برابر باد محافظت می‌کند می‌باشد. واضح است که افزودن دیوارهای بادشکن در نزدیکی خط می‌تواند سرعت بادی که به‌قطار می‌رسد را کاهش دهد. وجود این دیواره‌ها در محل‌های بادخیز، در پل‌ها و بسترها که سرعت باد شدت پیدا می‌کند، در ورود و خروج به تونل‌ها که با تغییرات فشار روبرو هستیم بسیار لازم و کاربردی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضمن بررسی اثرات وزش باد بر حرکت قطارهای پرسرعت با دامنه ۱۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت به‌منظور دستیابی به طرح راه‌آهن پرسرعت در کشور و بالخصوص مسیر تهران-اصفهان بایستی راهکارهای فنی زیر را مدنظر قرار دهیم:

- استفاده از قطارهای پرسرعت مناسب از لحاظ مشخصات آیرودینامیکی
- ساخت خطوط به‌صورت مستقیم و در منحنی‌ها دارای شعاع بسیار بزرگ
- افزایش ضخامت لایه بالاست و استفاده از مواد پرکننده سخت‌تر
- بررسی زیرسازی در ارتباط با خواص هیدرولیکی و مکانیکی خاک زیرین و قرار دادن لایه‌های متوالی باکیفیت‌های مختلف جهت همگن کردن خواص سختی خط
- همچنین با پیدا کردن محدودیت سرعت قطار نسبت به وزش باد، پی برده می‌شود که احتمال اینکه قطاری در سرعت‌های بالاتر، پایدارتر باشد اگر فشار هد دینامیکی، افزایش آرامی با سرعت قطار در مقایسه با افزایش ضریب مومنتم چرخشی داشته باشد بیشتر است.
- و درنهایت به‌منظور افزایش ایمنی و پایداری قطار و جلوگیری از حوادث ناگوار ریلی در خطوط اکیداً پیشنهاد می‌گردد در مناطق بادخیز، در پل‌ها و بسترهای با ارتفاع زیاد و در ورود و خروج از تونل‌ها از دیوارهای بادشکن استفاده گردد. این دیواره‌ها به طرز چشمگیری در کاهش اثرات بادهای عرضی رسیده به قطارها نقش داشته و ایمنی را ارتقا می‌بخشند.

۶- مراجع

- [1] Lee H. S., Assessment of Potential Aerodynamic Effects on Personnel and Equipment in Proximity to High-Speed train Operations., *Volpe National Transportation Systems Center.*, Vols. Report number: DOT/FRA/ORD-99/11, DOT- VNTSC-FRA-98-3., 1999.
- [2] Baker C. J. and Robinson, C.G., The Assessment of Wind Tunnel Testing Techniques for Ground Vehicles in Cross Winds, *Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 33, pp. 429-438, 1990.
- [3] Baker C. J., The Wind Tunnel Determination of Crosswind Forces and Moments on a High Speed Train, *Notes on Numerical Fluid Mechanics*, Vol. 79, pp. 46-60, 2002.
- [4] Baker C.J., Jones, J., Lopez-Calleja, F., and Munday J., Measurements of The Cross Wind Forces on Trains, *Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 92, pp. 547-563, 2004.
- [5] Baker C. J., The Flow around High Speed Train, *BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications Milano, Italy*, 2008.
- [6] Baker C. J., and Gawthrope R.G., The Effect of Turbulence Simulation on the Wind Induced Loads on Ground Vehicles, *Proceedings of Aerodynamics and Transportation II, ASME*, 1983.
- [7] Cooper R., The Probability of Trains Overturning in High Winds," *Proceedings of the Fifth Conference on Wind Engineering*, pp. 1185-1194, 1979.
- [8] Masbernat F., Wolffhugel Y.F. and Dumas, J.C., CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train, *GEC ALSTHOM Technical Review*, Vol. 11, 1993.
- [9] Gaylard A., The Application of Computational Fluid Dynamics to Railway Aerodynamics," *Journal of Rail and Rapid Transit*, pp. 133-207, 1993.
- [10] Rezvani M. A., Mohebbi, M., Numerical Calculations of Aerodynamic Performance an ATM Train at Crosswind Conditions, *Journal of Wind and Structures*, Vol. 18, pp.

529-548, 2014.

[۱۱] محبی مسعود، رضوانی محمدعلی، شبیه‌سازی عددی جریان هوای اطراف قطار مسافری پاریسی تحت اثر بادهای عرضی، *مجله علمی پژوهشی مهندسی حمل‌ونقل*، جلد ۴، ۱۳۹۲.

[12] Masson E., Allain E. and Parardot N., CFD Analysis of the Underfloor Aerodynamic of a Complete TGV High Speed Train Set at Full Scale, *EUROMECH Colloquium 509 Vehicle Aerodynamics - External aerodynamics of railway vehicles, trucks, buses and car*, 2009.

[13] Suzuki M., Tanemoto K. and Maeda T., Aerodynamic Characteristics of Train/Vehicles under Cross Winds, *Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 91, pp. 209-218, 2003.