http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

فوق‌العاده اسفند ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۳ ص‌ص ۱۰۰-۱۱۱

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۲/۱/۱۸
تاریخ پذیرش ۹۲/٤/۲۸
ارائه در سایت ۹۲/۱۰/۳۰

بررسی تجربی و عددی جریان باد مقابل بر روی قطار مسافربری

مهرداد ربانی[۱]، احمدرضا فقیه خراسانی[۲*]

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
* یزد صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵، faghih@yazd.ac.ir

چکیده- در این پژوهش اثر جریان باد مقابل بر روی یک قطار مسافربری، بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در کار آزمایشگاهی مدل قطار در مقیاس ۱:۲۶ قطار واقعی ساخته شده که شامل لکوموتیو و یک واگن است. تعداد ۱۶ مانومتر فشار به منظور اندازه‌گیری فشار در نقاط مختلف مدل قطار به کار گرفته شده است و نتایج برای سرعت‌های مختلف جریان باد مقابل ارائه شده‌اند. در شبیه‌سازی عددی، جریان اطراف قطار به صورت سه‌بعدی، مغشوش و تراکم‌ناپذیر مدل‌سازی شده است. جهت بررسی دقت حل عددی، ضرایب فشار بدست آمده از شبیه‌سازی عددی در نقاط مختلف قطار با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج شبیه‌سازی عددی را صحه‌گذاری می‌کند. همچنین تأثیر تعداد واگن‌ها بر ضریب پسا و توزیع فشار در صفحه تقارن قطار به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد واگن‌ها تا ۷ عدد باعث افزایش ضریب پسا تا میزان ۱/۲۳۳۶ می‌شود، اما سرعت قطار تأثیر محسوسی بر مقدار ضریب پسای قطار ندارد. همچنین ضریب پسای هر واگن مسافربری میانی قطار به طور میانگین ۰/۱۳۲۱ می‌باشد.

کلیدواژگان: قطار، بررسی تجربی، شبیه‌سازی عددی، ضریب فشار، ضریب پسا.

Numerical and experimental investigation of headwind over a passenger train

M. Rabani[1], A.K. Faghih[2*]

1- MSc Student, Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran
2- Assist. Prof., Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran
* P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran. faghih@yazd.ac.ir

Abstract- Airflow over a passenger train has been investigated experimentally and numerically in this research. The experimental model was a 1:26 scale model of a real train including a locomotive with one wagon behind it. A total of 16 pressure tabs for train were employed to measure the air pressure at various points on the model for different air flow velocity. Turbulent, incompressible and 3D model of air flow has been applied in numerical simulation. The numerical results of pressure coefficients were compared with the results obtained by the experimental investigation for the numerical simulation verification. The wagon number affect on the train drag coefficient and air pressure distribution on the symmetry plane of the train have been investigated numerically. The results show that the drag coefficient increases to 1.2336 for a locomotive and 7 wagons behind it but the air flow velocity has not a sensible affect on the drag coefficient. The averaged drag coefficient of each intermediate wagon has been obtained 0.1321.

Keywords: Train, Experimental Investigation, Numerical Simulation, Pressure Coefficient, Drag Coefficient.

۱- مقدمه

یکی از موارد مهم در تأمین آسایش و راحتی مسافران هنگام حرکت قطار، توزیع فشار یکنواخت و مطلوب در اطراف بدنه قطار است. بهینه‌سازی عملکرد و افزایش ثبات قطارهای مسافربری که عامل تأثیرگذاری بر تغییرات فشار اطراف بدنه قطار است نیاز به آگاهی از رفتارهای آیرودینامیک قطار دارد.

در سرعت‌های بالا اثرات بادهای مقابل و جانبی و همچنین نیروهای پسا و مومنتم، از اهمیت بالایی برخوردارند و می‌توانند تعادل قطار را تحت تأثیر قرار دهند. از این رو تحقیقات وسیعی برای بررسی خصوصیات جریان اطراف قطارها و آیرودینامیک آنها به منظور بهبود کیفیت حمل و نقل و دسترسی به بازده بیشتر صورت پذیرفته است.

جریان هوای عبوری از روی یک قطار تحت یک باد جانبی توسط پژوهشگران متعددی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است [۱- ۷]. موضوع اصلی در این تحقیقات بررسی برخی از پارامترها از قبیل ضریب نیروی پسا، برآ و نیروی جانبی وارد بر قطار تحت جریان هوا بوده است. برخی دیگر از محققان به منظور درک صحیح رفتار جریان، ساختار جریان اطراف هوای قطار را به صورت عددی مورد بررسی قرار داده‌اند [۸-۱۰]. در شبیه‌سازی عددی از مقادیر دقیق عدد رینولدز استفاده می‌شود و حجم نتایج بالاست، بنابراین این شبیه‌سازی برای درک ساختار جریان و میدان‌های فشار بر روی فضای اطراف قطار، می‌تواند مفید باشد. بررسی ساختار جریان هوای اطراف قطار با سرعت بالا تحت بادهای مقابل نیز توسط سانکر و همکارانش [۱۱]، بیکر [۱۲] و مالد و همکارانش [۱۳] انجام شده است.

آیرودینامیک واگن‌های روباز در قطارهای باری یکی از مواردی است که تأثیر زیادی بر جریان هوای اطراف قطار دارد و می‌تواند بر ضرایب فشار و پسا در اطراف قطار تأثیرگذار باشد که توسط چورکو [۱۴]، آستاخو [۱۵] و هورنر [۱۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر تعداد واگن های روباز نیز توسط گلووانوزکی و همکارانش [۱۷] بررسی شده است. آن ها به منظور دست‌یابی به یک پیکربندی بهینه برای آیرودینامیک این گونه قطارها، تأثیر تعداد واگن‌ها را بر روی نیروهای پسا و جانبی وارد بر قطار، مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که پیکربندی بهینه، شامل مدل با ۶ واگن روباز با دو هندسه ساده شده در ابتدا و انتهای قطار است. جلیلی و همکارانش [۱۸] در یک کار تجربی اثر ابعاد مختلف سنگ آهن و نوع واگن‌های روباز در قطارهای باری را بر روی میزان اتلاف سنگ آهن، هنگام عبور جریان هوا بر روی قطار مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که واگن‌های نوع ۱ و ۳، کمترین میزان اتلاف را به ترتیب برای ابعاد ریز و درشت سنگ آهن دارند. از دیگر کارهایی که در زمینه بررسی جریان هوای اطراف قطار انجام شده است می‌توان به کار هلمس و همکارانش [۱۹] در تحلیل نیروهای آیرودینامیکی، هنگام عبور قطار با سرعت بالا از کنار کانتینر شامل بار و همچنین کار واسویک و همکارانش [۲۰] در تعیین حداقل وزن ترمزهای آیرودینامیکی هنگام حرکت قطار با سرعت بالا اشاره کرد.

در تمامی کارهایی که تاکنون انجام شده پایداری واگن و لکوموتیو به دلیل عبور باد موضوع اصلی بوده است ولی توزیع فشار در نقاط مختلف یک قطار مسافربری است که هدف اصلی این پژوهش است. آگاهی از نقاط پرفشار و کم فشار بر روی یک قطار می‌تواند در جهت بهبود کیفیت حمل و نقل و کاهش میزان مصرف سوخت قطار بسیار مفید باشد. از این رو در این پژوهش ضرایب فشار برخی از نقاط خاص بر روی لکوموتیو و واگن مسافربری پشت آن که تأثیر زیادی در پایداری قطار و آسایش مسافران دارد، در جریان باد مقابل با سرعت‌های مختلف به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر تعداد واگن‌های مسافربری بر ضرایب فشار و پسا نیز به صورت عددی بررسی شده است.

۲- بررسی آزمایشگاهی

به منظور درک صحیح از رفتار جریان هوای در حال عبور از روی یک قطار مسافربری، مدلی از لکوموتیو با یک واگن در مقیاس مناسب ساخته شده و در تونل باد در سرعت‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج به صورت ضرایب فشار در نقاط مختلف لکوموتیو و واگن استخراج شده‌اند.

۲-۱- تونل باد

تونل باد یک ابزار تحقیقاتی است که از آن برای مطالعه تأثیرات جریان باد بر روی اجسام جامد استفاده می‌شود. در تونل‌های باد مدلی که از روی طرح اصلی و با استفاده از کمیتهای بدون بعد ساخته شده مورد آزمایش قرار می‌گیرد و پیچیدگی‌های موجود در جریان یک سیال به نمایش گذاشته می‌شود. تونل‌های باد به اشکال و گونه‌های متفاوتی طراحی و ساخته می‌شوند.

تونل باد مورد استفاده در این پژوهش، تونل باد کم سرعت دانشگاه یزد از نوع ایفل با اتاق آزمون بسته با سطح مقطع ۴۵۷ × ۴۵۷ میلی متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر است. این تونل باد قادر به تولید حداکثر سرعت باد ۳۰m/s و شدت اغتشاش

کمتر از ۰/۱۳ ٪ است (شکل ۱).

شکل ۱ نمای کلی از تونل باد مورد استفاده در این پژوهش

۲-۲- مدل قطار

مدل ساخته شده و مورد آزمایش در این پژوهش مدل کوچک شده لکوموتیو آلستوم[1] و یک نوع واگن قطارهای مسافربری خط ریلی کشور است (شکل ۳). آنچه در اینجا ضرورت پیدا می‌کند نحوه محاسبه نسبت اندازه مدل واقعی به اندازه مدل مورد آزمایش می‌باشد. از محدودیت‌های موجود در محاسبه این مقیاس، نسبت مساحت سطح مدل عمود بر جریان هوا به مساحت مقطع اتاق آزمون تونل باد (ضریب انسداد) می‌باشد. در این پژوهش ضریب انسداد برای جلوگیری از تأثیر دیواره-های تونل بر روی جریان عبوری از روی مدل حداکثر ۱۰٪ تعیین شده است [۱۷]. بنابراین چون مدل نسبت به مدل اصلی باید کوچک‌تر شود از این جهت با در نظر گرفتن حداکثر نسبت مساحت جلویی مدل به مساحت اتاق آزمون تونل باد (شکل ۲)، نسبت اندازه مدل واقعی به مدل آزمایشی به کمک رابطه (۱) محاسبه شده است. η در این رابطه مقیاس مدل می‌باشد.

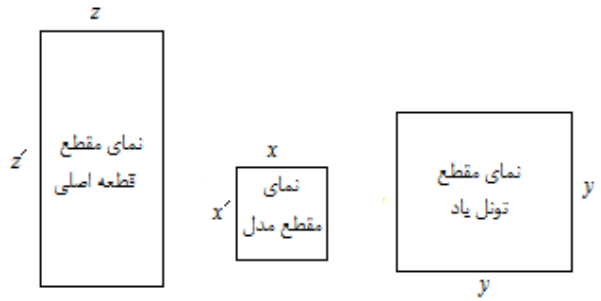
y=45.7 cm, z=285cm, z' =428 cm

$$\frac{xx'}{y^2}=0.1,\ \alpha=\frac{zz'}{xx'}=\frac{zz'}{0.1y^2}=\frac{10zz'}{y^2}=584.058$$

$$\eta=\sqrt{\alpha}=\frac{z'}{x'}=\frac{z}{x}=24.167 \qquad (۱)$$

بنابراین مقیاس مدل را می‌توان عددی بزرگتر از η انتخاب نمود که در این پژوهش این نسبت ۲۶ انتخاب شده است.

1. Alstom AD43C



شکل ۲ شماتیکی از حداکثر مساحت جلویی قطار و تونل باد جهت محاسبه اندازه مدل آزمایشگاهی

با توجه به اندازه‌های واقعی مربوط به لکوموتیو و واگن (شکل ۳- ب و ۳- ج) و با توجه به مقیاس محاسبه شده در رابطه (۱) که برابر ۱:۲۶ می‌باشد، تمامی اندازه‌های مربوط به مدل محاسبه و طبق این مقادیر، مدل در نرم‌افزار کتیا[2] طراحی شده است. ذکر این نکته نیز ضروری است که در طراحی مدل ساده‌سازی‌هایی انجام شده که هدف از این ساده‌سازی‌ها، اولاً سهولت ساخت و ثانیاً هموارکردن شبیه‌سازی عددی جریان هوا بر روی این مدل می‌باشد.

۲-۳- آزمایش در تونل باد

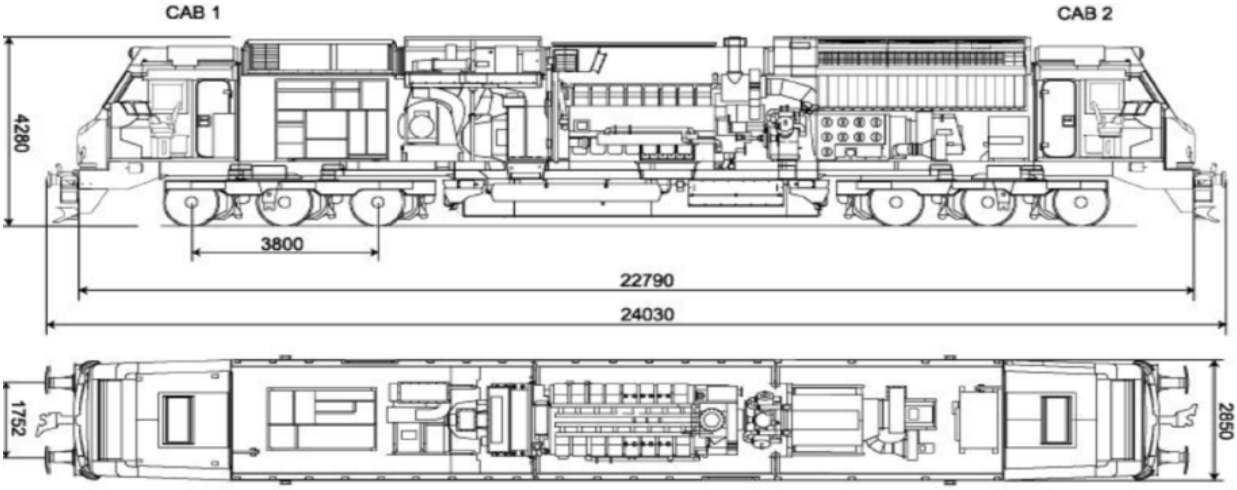
شکل ۴ نمای کلی از مدل نهایی مونتاژ شده لکوموتیو و واگن (الف) و چگونگی تثبیت مدل در تونل باد (ب) را نشان می‌دهد. با توجه به این که مدل تحت سرعت‌های مختلف (تا ۳۰m/s) آزمایش شده است، می‌بایست مدل در داخل اتاق آزمون ثابت و محکم شود. بنابراین پیچ‌های به اصطلاح چپ راست جهت ثابت کردن مدل در داخل تونل باد ساخته شده است. از این پیچ‌ها تنها در قسمت‌های انتهایی مدل که پس از آن تغییرات جریان بر روی نتایج اندازه‌گیری تأثیری ندارد، استفاده شده است (شکل ۴- ب). برای ثابت کردن قسمت‌های ابتدایی قطار نیز با اتصال آن بکمک یک سیم نازک به پنجره های اتاق آزمون، این کار انجام شده است.

برای اندازه‌گیری فشار در نقاط مختلف قطار از تعدادی لوله فشار به عنوان مانومتر استفاده شده است. تعداد لوله‌ها ۱۷ عدد می‌باشد که برای اندازه‌گیری فشار (P) در ۱۶ نقطه مختلف قطار نشان داده شده در شکل ۵ و یک لوله نیز که در فاصله مناسب از جلوی مدل نصب شده برای اندازه‌گیری فشار

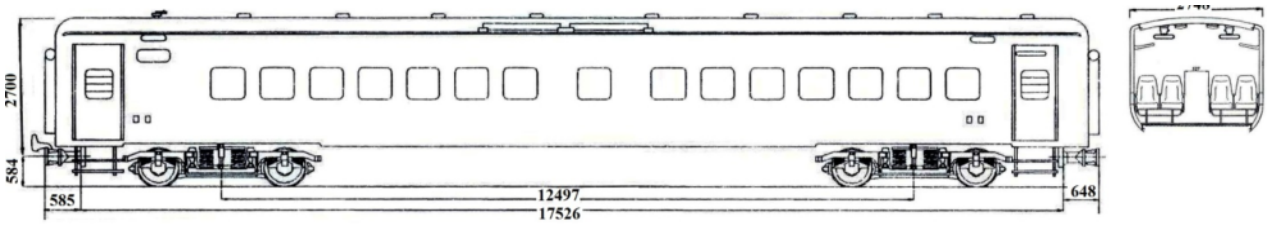
2.Catia

استاتیک جریان (P_∞)، استفاده شده است. تمام لوله‌ها درون قطار جمع‌آوری و بطور کامل از پشت واگن خارج شده است (شکل ۴- ب). از آنجا که در این آزمایش مقادیر فشار در هر نقطه توسط اختلاف ارتفاع آب داخل لوله‌های دستگاه مانومتر مشخص شده‌اند بنابراین تابعیت ضریب فشار (C_p) نسبت به پارامترهای مؤثر به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

(الف)

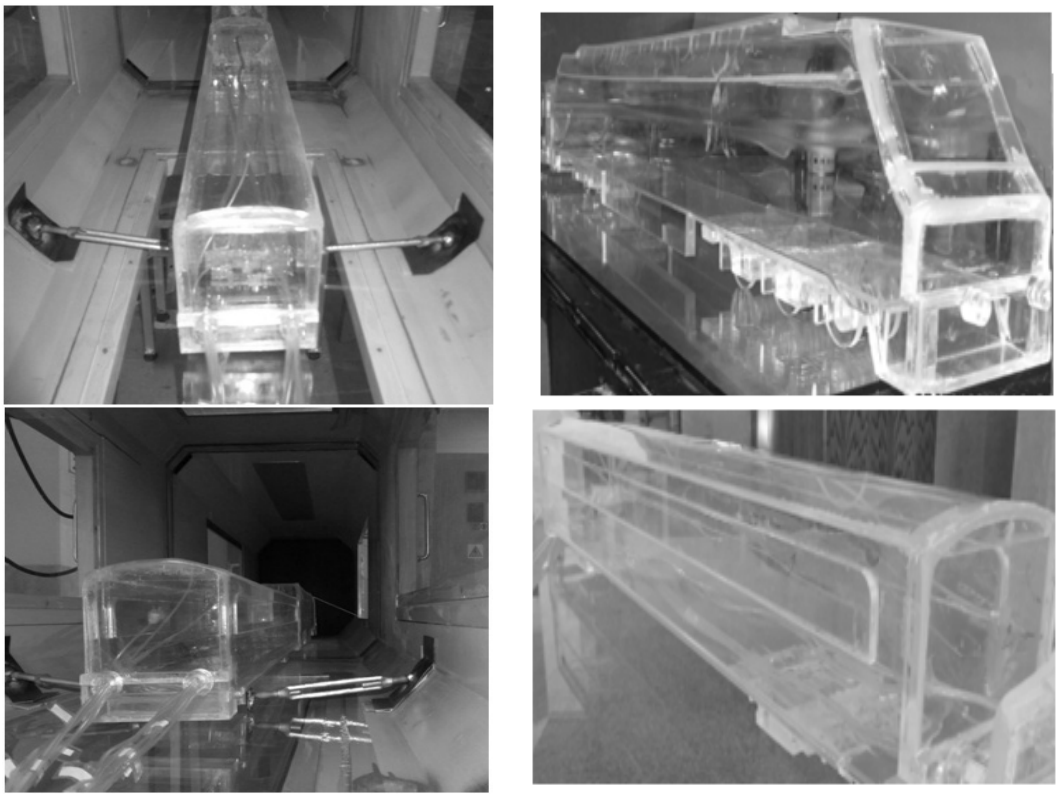


(ب)



(ج)

شکل ۳ الف- نمای کلی لکوموتیو آلستوم ب- ابعاد واقعی لکوموتیو آلستوم (ج): ابعاد واقعی واگن مسافربری



(الف) (ب)

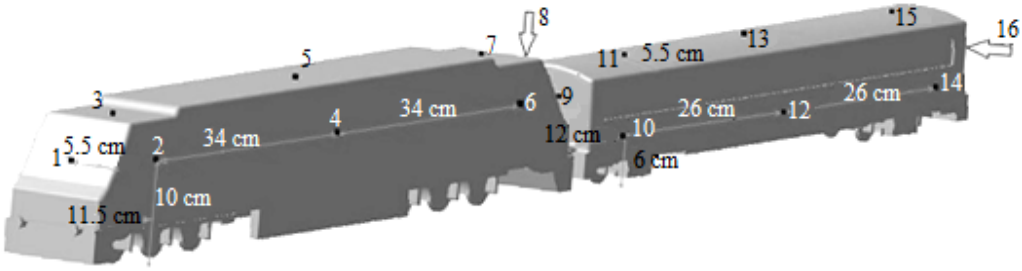
شکل ۴ الف- مدل نهایی مونتاژ شده لکوموتیو و واگن ب- نحوه تثبیت و آزمایش مدل در تونل باد

$$C_p = \frac{\rho_w g \Delta h}{\frac{1}{2}\rho_a V^2} \quad (۲)$$

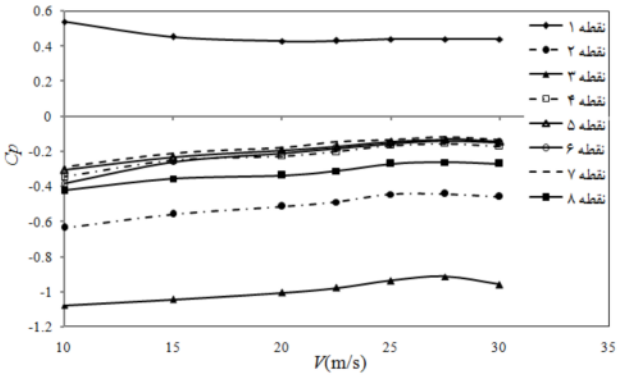
که در این رابطه Δh اختلاف ارتفاع آب اندازه‌گیری شده بـرای هر نقطه، ρ_w چگالی آب و ρ_a چگالی هوا می‌باشد.

پس از ثابت کردن و نصب لوله‌های فشار بر روی مدل در تونل باد، میزان فشار نقاط مختلف برای سرعت های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۲/۵، ۲۵، ۲۷/۵ و ۳۰ m/s بدست آمده است.

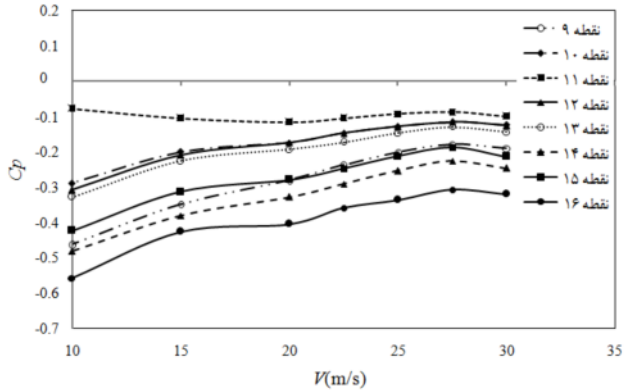
ضرایب فشار در سرعت ها و نقاط مختلف بر روی لکوموتیو در شکل ۶ و بر روی واگن در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش سرعت قطار، تقریباً در تمامی نقاط روی لکوموتیو و واگن ضریب فشار افزایش یافته است. به دلیل این که نقطه ۱ در نزدیکی نقطه سکون لکوموتیو است این نقطه در مقایسه با بقیه مکان‌ها دارای بیشینه ضریب فشار می‌باشد، از این رو می-توان میزان ضریب فشار در این نقطه را یک عامل تعیین کننده در تعیین میزان مصرف سوخت قطار در سرعت‌های مختلف در نظر گرفت. در نقطه ۳ به دلیل رخ دادن جدایی جریان موضعی، ضریب فشار نسبت به سایر نقاط کمینه است. برای بقیه نقاط روی سقف لکوموتیو و واگن تغییرات ضریب فشار در طول لکوموتیو محسوس نیست، بجز نقطه ۱۱ که در آن اختلاف ارتفاع لکوموتیو و واگن بر روی ضریب فشار تأثیر گذاشته است. در سطوح جانبی لکوموتیو تغییرات ضریب فشار چندان محسوس نیست، زیرا جریان هوای عبوری از روی قطار مؤلفه‌ای در راستای عمود بر سطوح جانبی قطار ندارد. نقطه ۹ که در جلوی واگن قرار دارد، اگرچه تحت تأثیر باد مقابل با افزایش فشار مواجه است ولی قدرت گردابه ایجاد شده در ناحیه جدایی جریان پشت لکوموتیو تأثیر بیشتری بر روی این نقطه گذاشته و از این رو ضریب فشار در این نقطه منفی شده است. در نقطه ۱۶ نیز به دلیل جدایی جریان و کاهش فشار موضعی در پشت واگن، ضریب فشار نسبت به سایر نقاط روی واگن کمتر است. نقطه ۸ نیز اگرچه مانند نقطه ۱۶ در مکان جدایی جریان روی لکوموتیو قرار دارد ولی از طرفی به دلیل قرار داشتن این نقطه در نزدیکی نقطه سکون واگن ضریب فشار آن در مقایسه با نقاط ۴، ۵، ۶ و۷ چندان کاهش نیافته است.



شکل ۵ مکان‌های مختلف اندازه‌گیری فشار بر روی لکوموتیو و واگن مسافربری



شکل ۶ توزیع فشار حاصل از اندازه گیری در نقاط مختلف لکوموتیو در سرعت های مختلف



شکل ۷ توزیع فشار حاصل از اندازه گیری در نقاط مختلف واگن در سرعت های مختلف

۲-۴- عدم قطعیت در اندازه‌گیری[1]

در انجام هر آزمایش خطاهایی شامل خطای چشم، خطای اندازه‌گیری و خطاهای محاسباتی وجود دارند که سبب ایجاد خطا در نتایج حاصل می شوند. از آنجا که پارامترهای گوناگونی در اندازه‌گیری مؤثر می‌باشند تعیین خطای دقیق در اندازه‌گیری هر کمیت بسیار مشکل است. با توجه به این نکته با استفاده از روش‌های موجود می‌توان با در نظرگیری چندین پارامتر مهم و تعیین کننده به صورت تقریبی خطاهای اندازه-گیری برای کمیت‌های مختلف را محاسبه نمود. در پژوهش حاضر مقادیر عدم قطعیت برای ضریب فشار حاصل از آزمایش در تونل باد محاسبه شده است.

برای محاسبه عدم قطعیت از روش ارائه شده توسط آدامز [۲۱] استفاده شده است. بر مبنای این روش اگر p تابعی از متغیرهای s، r و q باشد آنگاه دیفرانسیل کلی یا تغییرات کلی در p در اثر تغییرات جزئی δs، δr و δq به صورت رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\delta p=\sqrt{\left|\frac{\partial p}{\partial q}\right|^2(\delta q)^2+\left|\frac{\partial p}{\partial r}\right|^2(\delta r)^2+\left|\frac{\partial p}{\partial s}\right|^2(\delta s)^2} \quad (۳)$$

و میزان خطای p در اثر تغییرات این پارامترها به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\%Error=\frac{\delta p}{p}\times 100 \quad (۴)$$

برای محاسبه مقدار خطا در اندازه‌گیری ضریب فشار باید تابعیت آن از پارامترهای مختلف مشخص باشد. تابعیت ضریب فشار نسبت به پارامترهای موثر به صورت رابطه (۲) می‌باشد. با توجه به رابطه (۳) تغییرات ضریب فشار از رابطه (۵) بدست می‌آید.

$$\delta C_p=\sqrt{\left(\frac{\partial C_p}{\partial \rho_w}\delta\rho_w\right)^2+\left(\frac{\partial C_p}{\partial \Delta h}\delta\Delta h\right)^2+\left(\frac{\partial C_p}{\partial \rho_a}\delta\rho_a\right)^2+\left(\frac{\partial C_p}{\partial V}\delta V\right)^2} \quad (۵)$$

با توجه به رابطه (۵) میزان عدم قطعیت در سرعت ۱۵m/s

1. Uncertainty Analysis

به عنوان نمونه بدست آمده است.

در روز انجام این آزمایش دما و فشار محیط به ترتیب $T_a = ۲۶ \pm ۰/۵^{o}C$ و $P_a = ۹۰۱\ mbar$ گزارش شده است. همچنین خطای مشاهده اختلاف ارتفاع آب $۱\ mmH_2O$ و تغییرات سرعت هوا در تونل باد ۱ درصد می باشد.

بنابراین با درنظر گرفتن تغییرات ناچیز چگالی آب به علت تغییر دمای محیط ($\delta\rho_w = ۰$) مابقی تغییرات بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta\Delta h = 1\,mmH_2O = 0.001\,mH_2O \qquad (۶)$$

$$\delta V = 0.01V = 0.01\times 15 = 0.15\ \ m/s \qquad (۷)$$

با استفاده از قانون گاز کامل می‌توان تغییرات چگالی هوا نسبت به تغییر دما را تعیین نمود.

$$\rho_a = \frac{p}{RT} \Rightarrow \delta\rho_a = -\frac{p}{RT^2}\delta T \qquad (۸)$$

$$\Rightarrow \delta\rho_a = -\frac{0.901\times 100}{0.287(273.15+26)^2}\times 0.5 = -0.00175 \qquad (۹)$$

با در نظر گرفتن بیشینه تغییرات ارتفاع آب که در طول انجام این آزمایش بدست آمده است $۱۳\ mmH_2O$- که C_p متناظر با آن ۱/۰۷۷۴- است و همچنین چگالی آب kg/m^3 ۹۹۷ و چگالی هوا $۱/۰۴۹\ kg/m^3$ در دمای $۲۶^{o}C$ می‌توان مابقی پارامترهای مورد نیاز را بصورت روابط (۱۰) تا (۱۲) بدست آورد.

$$\frac{\partial C_p}{\partial \Delta h} = \frac{\rho_w\, g}{\frac{1}{2}\rho_a V^2} \Rightarrow \frac{\partial C_p}{\partial \Delta h} = \frac{997\times 9.8}{\frac{1}{2}\times 1.049\times 15^2} = 82.8 \qquad (۱۰)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial \rho_a} = -\frac{\rho_w g \Delta h}{\frac{1}{2}\rho_a{}^2 V^2} \Rightarrow \frac{\partial C_p}{\partial \rho_a} = -\frac{997\times 9.8\times(-0.013)}{\frac{1}{2}\times 1.049^2\times 15^2} = 1.026 \qquad (۱۱)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial V} = -\frac{2\rho_w g \Delta h}{\frac{1}{2}\rho_a V^3} \Rightarrow \frac{\partial C_p}{\partial V} = -\frac{2\times 997\times 9.8\times(-0.013)}{\frac{1}{2}\times 1.049\times 15^3} = 0.144 \qquad (۱۲)$$

حال با استفاده از رابطه (۵) میزان درصد خطای ضریب فشار بدست آمده از نتایج تجربی مشخص می‌شود.

$$\delta(C_p) = \sqrt{(82.8\times 0.001)^2 + (1.026\times(-0.00175))^2 + (0.144\times 0.15)^2} = 0.086 \qquad (۱۳)$$

$$\%Error = \left|\frac{0.086}{-1.0774}\right|\times 100 = 8 \qquad (۱۴)$$

بنابراین، میزان عدم قطعیت بیشینه در محاسبه ضریب فشار در سرعت ۱۵m/s، ۸± درصد می باشد. این مقدار برای سایر سرعت‌ها نیز تعیین شده که در نمودارهای رسم شده مربوط به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی (شکل ۱۱) مشخص شده است.

۳- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش، مدل سه بعدی از لکوموتیو و واگن مسافربری ساخته شده در مقیاس ۱:۲۶، به صورت عددی شبیه‌سازی شده و اثر افزایش تعداد واگن و افزایش سرعت بر توزیع فشار و ضریب پسا بررسی شده است.

۳-۱- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

شرایط مرزی مسأله مورد بررسی (شکل ۸) عبارتند از:

- در ورودی، سرعت V_x در جهت x انتخاب شده است و سرعت در جهت‌های y و z صفر در نظر گرفته شده است.
- در خروجی‌ها، فشار استاتیک صفر در نظر گرفته شده است.
- شرط مرزی غیرلغزشی[1] در سطوح قطار و زمین در نظر گرفته شده است.

اندازه دامنه محاسباتی به گونه‌ای انتخاب شده که اغتشاشاتی که در دنباله آیرودینامیکی آخرین واگن[2] ظاهر می‌شود، از بین برود. از این رو اگر طول لکوموتیو L فرض شود، میدان حل، مکعب مستطیلی در نظر گرفته شده که فاصله آن از طرفین قطار به اندازه $۴L$، از جلو قطار به اندازه $۵L$، از پشت قطار به اندازه $۱۲L$ و از بالای قطار به اندازه $۱۰L$ می‌باشد.

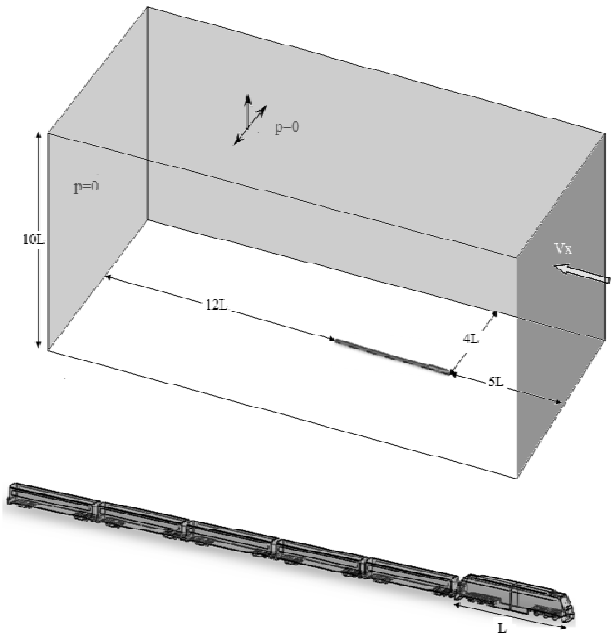
به منظور شبکه‌بندی میدان محاسباتی و انتخاب شبکه با دقت مناسب، ۶ شبکه به ترتیب با تعداد ۷۴۳۲۵۷، ۹۲۵۶۰۸، ۱۲۴۳۵۶۰، ۱۵۳۴۸۹۱، ۱۷۱۷۶۳۹ و ۱۹۲۶۰۷۴ در نظر گرفته شده و تغییرات ضریب پسا در این ۶ شبکه در شکل ۹

1. No Slip
2. Aerodynamic Trail of Last Wagon

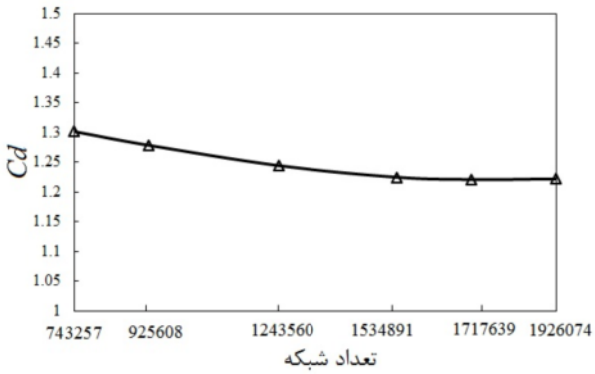
مورد بررسی قرار گرفته است که ضریب پسا به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_x} \qquad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵) F_x برآیند نیروهای اصطکاکی و فشاری وارد بر سطح و A_x بیشینه مساحت قطار در جهت x است.

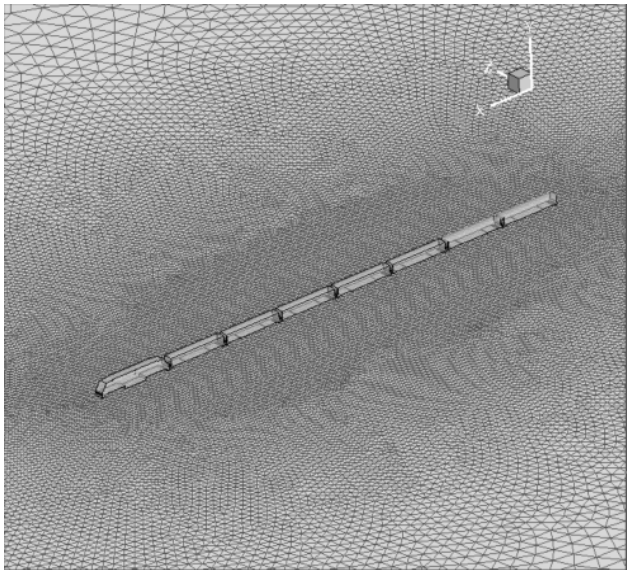


شکل ۸ نمایی از شرایط مرزی و اندازه میدان محاسباتی



شکل ۹ تغییرات ضریب پسا در شبکه بندی‌های مختلف برای لکوموتیو به همراه ۷ واگن در سرعت ۳۰m/s

همان طور که مشاهده می‌شود تغییرات ضریب پسا از ۱۵۳۴۸۹۱ تا ۱۹۲۶۰۷۴ کمتر از ۱٪ است بنابراین تعداد ۱۵۳۴۸۹۱ شبکه تطبیق شده جهت شبیه‌سازی دقیق و کاهش زمان محاسبات، در نظر گرفته شده است. شکل ۱۰ نمایی از تراکم شبکه اطراف قطار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ نمایش شبکه بندی در میدان محاسباتی

برای اطمینان از حضور سلول‌ها در مناطق کوچک جدایی جریان، تطبیق شبکه به گونه‌ای انجام شده که تراکم شبکه در این نواحی به اندازه کافی زیاد باشد. بنابراین در نزدیکی لکوموتیو و واگن‌ها شبکه تراکم بیشتری داشته و با افزایش فاصله از قطار از شدت این تراکم کاسته شده است [۲۲].

۳-۲- معادلات حاکم

سیستم آیرودینامیکی قطار با استفاده از مدل جریان سه بعدی، دایم، مغشوش و تراکم‌ناپذیر و فرض سیال نیوتنی حل شده است. معادلات حاکم معادلات بقای جرم و مومنتم هستند که در مختصات کارتزین به صورت روابط (۱۶) تا (۲۱) نوشته می‌شوند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱۶)$$

$$\rho\left(\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho\left(\overline{u_i' u_j'}\right)\right) \qquad (۱۷)$$

در معادله (۱۷) ترم $-\rho\left(\overline{u_i' u_j'}\right)$ متوسط تنش های رینولدز است و نشان دهنده تأثیر حرکت ادیها[1] بر تغییر شکل سیال است. بر اساس فرض بوزینسک در مورد ترم تنش های رینولدز می‌توان رابطه (۱۸) را نوشت.

1. Eddy

$$-\rho\left(\overline{u_i'u_j'}\right)=\mu_t\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \qquad (۱۸)$$

μ_t لزجت توربولانسی و k انرژی جنبشی توربولانس است و به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$k=\frac{1}{2}\left(\overline{u_i'u_i'}\right) \qquad (۱۹)$$

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۲۰)$$

C_μ ثابت مدل و ε نرخ اتلاف است و به کمک رابطه (۲۱) تعریف می‌شود.

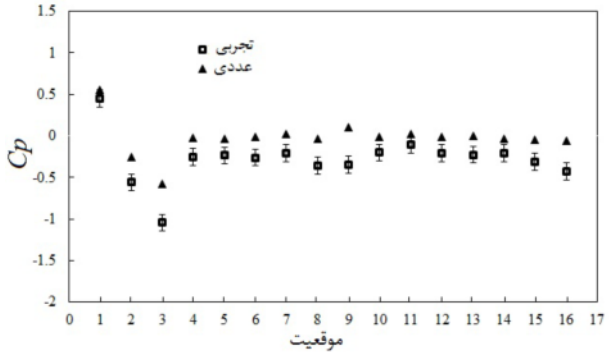
$$\varepsilon=\frac{\mu}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\right)\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\right)} \qquad (۲۱)$$

برای حل این معادلات از نرم‌افزار تجاری فلوئنت[1] استفاده شده است. در مقایسه با روش‌های استاندارد تحلیلی مدل k- ε RNG به علت دقت بالای آن برای شبیه‌سازی توربولانس در این مطالعه انتخاب شده است. از روش مرتبه دوم[2] برای گسسته‌سازی معادلات و از روش سیمپل[3] برای کوپل کردن معادلات سرعت و فشار استفاده شده است [۲۳].

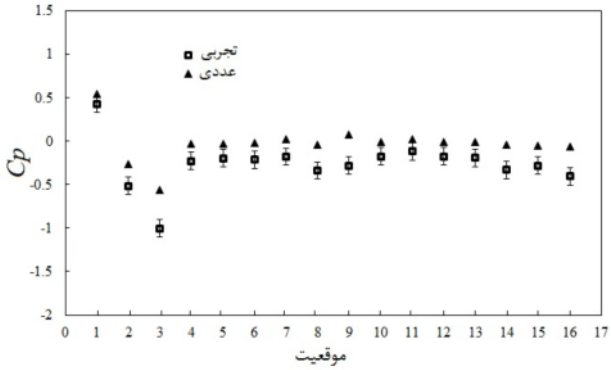
۴- نتایج و بحث

برای اعتبارسنجی روش عددی، ضرایب فشار حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های حاصل از کار آزمایشگاهی برای سرعت‌های ۱۵، ۲، ۲۵ و ۳۰m/s در شکل ۱۱ مقایسه شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است نقطه ۱ به دلیل قرار داشتن در نزدیکی نقطه سکون لکوموتیو و نقطه ۳ به دلیل قرار داشتن در منطقه جدایی جریان به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار ضریب فشار در سرعت‌های مختلف هستند که این مقادیر در سرعت ۳۰m/s (حالت د) به ترتیب در حدود ۰/۴۵ و ۰/۹۵- حاصل از آزمایش در تونل باد و ۰/۵۴ و ۰/۶۱- حاصل از شبیه‌سازی عددی است. چون قطار در معرض باد جانبی نیست تغییرات ضریب فشار در نقاط روی سطح جانبی لکوموتیو (۴ و ۶) و نقاط روی سطح جانبی واگن (۱۰، ۱۲ و ۱۴) تقریباً یکسان است. با افزایش سرعت، تغییرات ضریب فشار در طول واگن و لکوموتیو یکنواخت‌تر شده است.

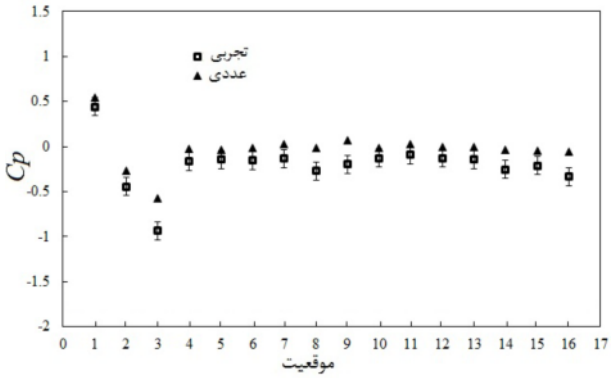
1. Fluent
2. Second Order
3. Simple



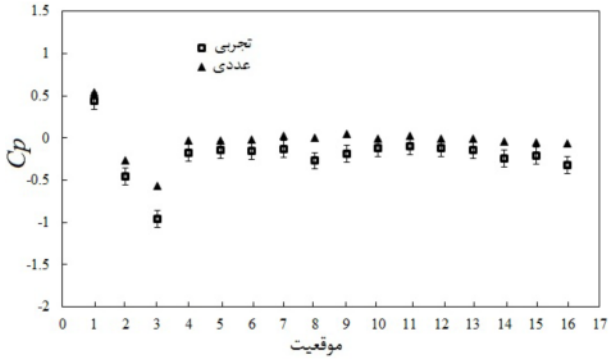
الف- سرعت ۱۵m/s



ب- ۲۰m/s



ج- ۲۵m/s



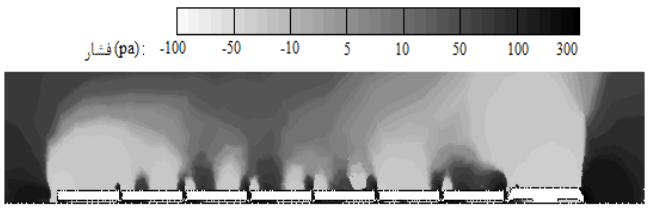
د- ۳۰m/s

شکل ۱۱ توزیع فشار در نقاط مختلف قطار در سرعت‌های مختلف

داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی به دلیل خطاهایی که در داده‌برداری و روش عددی وجود دارد هیچ‌کدام دقیق نیستند، به همین دلیل اختلاف موجود در نتایج قابل توجیه است. این اختلاف در نقاطی که جدایی جریان اتفاق می‌افتد به خصوص در نقطه ۳ که محل رخ دادن جدایی جریان بر روی لکوموتیو است محسوس‌تر می‌باشد، زیرا در این مکان‌ها پدیده ریزش گردابه‌ها اتفاق می‌افتد که پدیده‌ای ذاتاً غیردایم است.

در شکل ۱۲ توزیع فشار در صفحه تقارن قطار که نشان دهنده شدت نیروهای آیرودینامیکی و توزیع آن‌ها در طول قطار است، در سرعت ۳۰m/s نشان داده شده است. با توجه به این شکل نتایج شبیه‌سازی سه بعدی قطار مسافربری به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- لکوموتیو بیشترین نیروی پسا را در مقایسه با واگن‌ها تجربه می‌کند. علت آن قرار داشتن لکوموتیو در میدان جریان بدون مانع و مساحت جلویی بیشتر آن نسبت به واگن‌ها است.
- آخرین واگن مقاومت در برابر هوای بیشتری را در مقایسه با دیگر واگن‌ها تحمل می‌کند، زیرا این واگن در جلوی منطقه کم فشار هوا[1] قرار دارد.
- منطقه کم فشار پشت آخرین واگن، بر روی واگن جلوی آن (واگن ۶)، تأثیر گذاشته و باعث افزایش مقاومت در برابر هوا به میزان تقریباً ۵٪ در این واگن در مقایسه با میانگین این مقدار بر روی واگن‌های میانی (به جز واگن ۱و ۷) شده است.
- الگوی جریان بر روی سه واگن میانی ۳، ۴ و ۵ از نظر مشخصه‌های جریان و خصوصیات آیرودینامیکی به هم شبیه است. با توجه به منحنی عملکرد لکوموتیو آلستوم میزان نیروی پیشران واقعی لکوموتیو در سرعت‌های مختلف، تعیین و درصد نیروی پسا نسبت به آن مشخص شده است [۲۴].



شکل ۱۲ توزیع فشار بر روی قطار مسافربری در صفحه تقارن قطار (حرکت قطار از چپ به راست است)

5. Base Drag

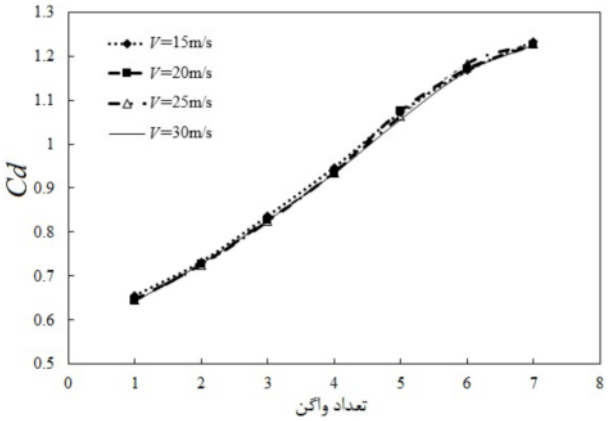
نسبت نیروی پسا به نیروی پیشران واقعی لکوموتیو (سهم اثر باد) حاصل از شبیه‌سازی عددی، در جدول ۱ برای سرعت-های مختلف ارائه شده است. نسبت نیروی پسا به نیروی پیشران واقعی لکوموتیو (سهم اثر باد) حاصل از شبیه‌سازی عددی، در جدول ۱ برای سرعت‌های مختلف ارائه شده است.

همان طور که از جدول مشخص است با افزایش سرعت و افزایش تعداد واگن‌ها نسبت نیروی پسا به نیروی پیشران واقعی لکوموتیو افزایش می‌یابد که این نشان دهنده تأثیر بسزای نیروهای آیرودینامیکی در بررسی جریان هوا بر روی قطار بخصوص در سرعت‌های بالا است. یک روش ساده و در عین حال مطمئن برای تحلیل این نیروها استفاده از ضرایب آیرودینامیکی مانند ضریب پسا است که به عوامل مختلفی از جمله هندسه قطار، جهت وزش باد و تعداد واگن‌هایی که در پشت لکوموتیو قرار می‌گیرند بستگی دارد.

در شکل ۱۳ تغییرات ضریب پسا بر حسب تعداد واگن‌ها (شامل لکوموتیو) در سرعت‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰m/s نشان داده شده است.

جدول ۱ درصد نسبت نیروی پسا به نیروی پیشران واقعی لکوموتیو

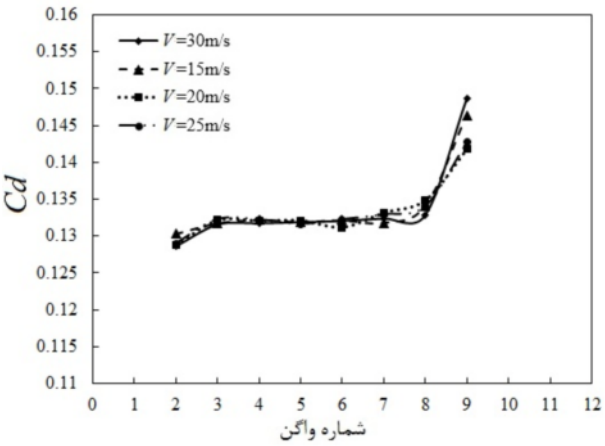
سرعت (m/s)	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
لکوموتیو با ۱ واگن	۰/۶۳۷	۱/۴۲۳	۲/۷۱۲	۴/۶۶۹
لکوموتیو با ۲ واگن	۰/۷۱۲	۱/۶۰۰	۳/۰۴۵	۵/۲۸۶
لکوموتیو با ۳ واگن	۰/۸۱۳	۱/۸۲۲	۳/۴۶۳	۶/۰۰۴
لکوموتیو با ۴ واگن	۰/۹۲۱	۲/۰۵۸	۳/۹۳۱	۶/۷۸۲
لکوموتیو با ۵ واگن	۰/۱۰۰	۲/۲۶۹	۴/۲۸۶	۷/۳۵۸
لکوموتیو با ۶ واگن	۱/۱۳۵	۲/۵۷۵	۴/۹۷۳	۸/۴۶۴
لکوموتیو با ۷ واگن	۱/۲۰۰	۲/۶۹۵	۵/۱۶۰	۸/۸۹۴



شکل ۱۳ تغییرات ضریب پسا بر حسب تعداد واگن‌ها در سرعت‌های مختلف

افزایش تعداد واگن‌ها تا ۷ عدد، باعث افزایش ضریب پسا تا میزان ۱/۲۳۳۶ در سرعت ۱۵m/s شده است. این افزایش در ابتدا تا ۵ واگن زیاد است اما با افزایش تعداد واگن‌ها شیب این تغییرات کاهش می‌یابد. از طرفی سرعت قطار تأثیر محسوسی بر مقدار ضریب پسای قطار ندارد.

شکل ۱۴، تغییرات ضریب پسا در واگن‌های میانی (به تنهایی) در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در محاسبه ضریب پسا برای هر واگن میانی از رابطه (۱۵) استفاده شده است که در این رابطه F_x مجموع نیروی اصطکاکی و نیروی فشاری وارد بر هر واگن می‌باشد. همان گونه که پیش از این نیز در شکل ۱۲ اشاره شد، منطقه کم فشار پشت آخرین واگن بر روی واگن جلوی آن (واگن ۶) تأثیر گذاشته و باعث افزایش ۵ درصدی ضریب پسای این واگن در مقایسه با واگن‌های ۳، ۴ و ۵ شده است. متوسط ضریب پسا بر روی سه واگن میانی ۳، ۴ و ۵ برابر با ۰/۱۳۲۱ می‌باشد که می‌توان این مقدار را به عنوان ضریب پسای هر واگن میانی قطار مسافربری در در نظر گرفت.



شکل ۱۴ تغییرات ضریب پسا در واگن‌های میانی در سرعت‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر جریان باد مقابل بر روی ضرایب فشار و پسا یک قطار شامل لکوموتیو و واگن‌های پشت آن در سرعت‌های مختلف باد بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر بدست آمده است:

- نقطه ۱ به دلیل قرار داشتن در ناحیه سکون جلوی لکوموتیو و نقطه ۳ به دلیل قرار داشتن در ناحیه جدایی جریان بر روی لکوموتیو به ترتیب دارای بیشینه و کمینه ضریب فشار به ترتیب در حدود ۰/۴۵ و ۰/۹۵- حاصل از آزمایش در تونل باد و ۰/۵۴ و ۰/۶۱- حاصل از شبیه‌سازی عددی در سرعت ۳۰m/s هستند.

- مقایسه بین نتایج تجربی و عددی ضریب فشار در نقاط مختلف بر روی قطار، نتایج عددی را صحه گذاری می‌کند. نقطه ۳ بر روی سقف جلوی لکوموتیو محل رخ دادن جدایی جریان است، از این‌رو بیشینه خطا در این نقطه در نمودارها قابل مشاهده است.

- با توجه به الگوی توزیع فشار بر روی قطار شامل لکوموتیو و ۷ واگن، مقدار متوسط پارامترهای آیرودینامیکی بر روی سومین، چهارمین و پنجمین واگن می‌تواند به عنوان پارامترهای مشخصه آیرودینامیکی هر واگن میانی در یک قطار مسافربری طویل در کشور باشد. مقدار متوسط ضریب پسا برای هر واگن میانی بطور مستقل ۰/۱۳۲۱ بدست آمده است.

- افزایش سرعت تأثیر محسوسی در ضریب پسا قطار نداشته ولی افزایش تعداد واگن باعث افزایش ضریب پسا قطار شده است که ب یشینه مقدار آن برابر ۱/۲۳۳۶ در سرعت ۱۵m/s می‌باشد.

ضریب پسا یک عامل تأثیرگذار در میزان مصرف سوخت قطار می‌باشد، بنابراین با توجه به جدول ۱ بطور مثال برای حالت لکوموتیو با ۷ واگن در سرعت ۳۰ m/s می‌توان گفت، میزان مصرف سوخت نسبت به حالتی که قطار در خلاء حرکت می‌کند، تقریباً به اندازه ۸/۸۹۴ درصد افزایش می‌یابد.

۶- مراجع

[1] Copley J.M., "The Three-Dimensional Flow around Railway Trains", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 26, No. 1, 1987, pp. 21-52.

[2] Chiu T.W., Squire L. C., "An Experimental Study of the Flow Over a Train in a Crosswind at Large Yaw Angles Up to 90° ", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 45, No. 1, 1992, pp. 47-74.

[3] Chiu T.W., "Prediction of the Aerodynamic Loads on a Railway Train in a Cross-Wind at Large Yaw Angles Using an Integrated Two- and Three-Dimensional Source/Vortex Panel Method", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 57, No. 1, 1995, pp. 19-39.

[4] Hoppmann U., Koenig S., Tielkes T., Matschke G.,

"A Short Term Strong Wind Prediction Model for Railway Application: Design and Verification", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 90, No. 10, 2002, pp. 1127-1134.

[5] Baker C.J., "Some Complex Applications of the Wind Loading Chain", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, No. 12-15, 2003, pp. 1791-1811.

[6] Suzuki M., Tanemoto K., Maeda T., "Aerodynamic Characteristics of Train/Vehicles under Cross Winds", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 91, No. 1-2, 2003, pp. 209-218.

[7] Baker C.J., Jones J., Lopez-Calleja F., Munday J., "Measurements of the Cross Wind Forces on Trains", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 92, No. 7-8, 2004, pp. 547-563.

[8] Durst F., Khier W., Breuer M., "Flow Structure around Trains under Side Wind Conditions: a Numerical Study", *Computers & Fluids,* Vol. 29, No. 2, 2000, pp. 179-195.

[9] Diedrichs B., "On Computational Fluid Dynamics Modeling of Crosswind Effects for High-Speed Rolling Stock", *Journal of Rail and Rapid Transit* Vol. 217(F), No. 3, 2003, pp. 203- 226.

[10] Hemidia H.N., *Large-Eddy Simulation of the Flow around Simplified High-Speed Trains under Side Wind Conditions*, Licentiate Thesis, Göteberg , CHALMERS University of Technology, 2006.

[11] Sanquer S., Barré C., Virel M., Cléon L., "Effect of Cross Winds on High-Speed Trains: Development of a New Experimental Methodology", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 92, No. 7-8, 2004, pp. 535-545.

[12] Baker C.J., "The Flow around High Speed Trains", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 98, No. 6-7, 2010, pp. 277-298.

[13] Muld T.M., Efraimsson G., Henningson D.S., "Flow Structures around a High-Speed Train Extracted Using Proper Orthogonal Decomposition and Dynamic Mode Decomposition", *Computers & Fluids*, Vol. 57, 2012, pp. 87-97.

[14] Churkov N.A., "Railway Train Aerodynamics", *Zheldorizdat, Moscow*, 2007, p. 332.

[15] Astakhov P.N., "Railway Consist Travel Resistance", *Transport, Moscow*, 1966, p. 178.

[16] Hoerner F.S., *Fluid-Dynamic Drag*, Hoerner, Bricktown, NJ, 1965.

[17] Golovanevskiy V.A., Vitaly V., Chmovzh V.V., Girka Y.V., "On the Optimal Model Configuration for Aerodynamic Modeling of Open Cargo Railway Train", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Vol. 107-108, 2012, pp. 131-139.

[18] Jalili M.M., Faghih A.K., Jahanmehr M., Behafarin V., "Experimental Analysis of Container Waste Due to Wind Erosion from Different Freight Wagons", *IMECE*, Denver, Colorado, 2011.

[19] Holmes S., Schroeder M., Toma E., "High-Speed Passenger and Intercity Train Aerodynamic Computer Modeling", *IMECE*, Orlando, Florida, 2000.

[20] Vasović I., Maksimović M., Puharić M., Matić D., Linić S., "Structural Analysis of Aerodynamic Brakes in High-Speed Trains", *Scientific Technical Review*, Vol. 61, No. 2, 2011, pp. 10-15.

[21] Adams L.F., *Engineering Measurements and Instrumentation*, London, The English University Press Ltd., 1975.

[22] Plewa T., Linde T., Weirs G., *Adaptive Mesh Refinement—Theory and Applications*, Chicago IL, Springer, 2005, p. 554.

[23] Wilcox D.C., *Turbulent Modeling for CFD*, Second Ed., California, DCW Industries, 1994, p. 552.

[24] www.wagonpars.com