



Numerical Analysis of the Effect of Train Movement Inside Underground Subway Tunnels on the Air-Exchange Systems by Comparing Fan-Off and Fan-On Conditions

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Izadi T. ^{*1} MSc,
Mehrabian M.A. ¹ PhD,
Abouali O. ² PhD

How to cite this article

Izadi T, Mehrabian M.A, Abouali O. Numerical Analysis of the Effect of Train Movement Inside Underground Subway Tunnels on the Air-Exchange Systems by Comparing Fan-Off and Fan-On Conditions. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(11):2679-2687.

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

²Thermo-Fluid Department, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Postal code: 7618868366
Phone: +98 (34) 32111763
Fax: +98 (34) 33257165
t.izadi@eng.uk.ac.ir

Article History

Received: November 16, 2018
Accepted: May 21, 2019
ePublished: November 2, 2019

ABSTRACT

Nowadays, metro system is widely used for public transportation. Its regular operation consumes large amounts of electrical energy in comparison to other urban systems, while a considerable part of its non-traction energy is consumed for air exchange and ventilation of tunnels and stations. In this research, the train movement inside the four stations and connecting tunnels of underground subway system is simulated. The tunnel and station models contain important units such as ticket hall, staircases, platforms and ventilation systems. The numerical model is validated by comparing the results with the experimental data available in the literature. The flow field inside the tunnel and stations induced by the train movement is calculated and compared in fan-off and fan-on conditions. The results show that the train movement changes the flow direction around the fans and grille openings and can severely affect the air-exchange performance. The flow field inside the tunnels and stations is completely dependent on the piston effect caused by the train movement. Because of the train movement, the volume OF flow exchange through station entrances, and also through station and tunnel inlets becomes ten times of that on the steady state condition with the stationary train. Also the air flow induced by the train movement is much higher than the flow generated by the air-exchange system. Therefore, the optimal use of the piston effect has a significant effect on reducing the energy consumption.

Keywords Underground Subway System; Air-Exchange System; Comparison of Fan-On and Fan-Off Condition; Piston Effect; Numerical Modelin

CITATION LINKS

[1] Environment Report [2] Assessing the potentials of energy-saving strategies for an underground mass rapid transit system with platform doors [3] A study on the energy consumption unit of subway stations in Korea [4] Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system [5] A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system [6] CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform [7] Analysis and optimization of ventilation systems for an underground transport interchange building under regular and emergency scenarios [8] Numerical analysis of piston effect in one of the tunnels of Shiraz subway system including the effect of fans [9] Numerical and experimental investigation of headwind over a passenger train. Modares Mechanical Engineering [10] Influence of mechanical ventilation shaft connecting location on subway tunnel ventilation performance [11] Numerical analysis of aerodynamic characteristics of high-speed train with different train nose lengths [12] Enhancing the piston effect in underground railway tunnels [13] Energy performance investigation of an innovative environmental control system in subway station [14] Natural wind utilization in the vertical shaft of a super-long highway tunnel and its energy saving effect [15] Effects of the ventilation duct arrangement and duct geometry on ventilation performance in a subway tunnel [16] Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnel [17] ANSYS Fluent User's Guide [18] Nature of pressure waves induced by a high-speed train traveling through a tunnel [19] Turbulence Modeling for CFD [20] Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway

بررسی عددی تاثیر حرکت قطار درون تونل‌های زیرزمینی قطار شهری بر عملکرد سیستم تعویض هوا با مقایسه حالت فن روشن و خاموش

طاهره ایزدی* MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

مظفرعلی مهربان PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

امید ابوعلی PhD

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

سیستم مترو به عنوان سیستم حمل و نقل عمومی امروزه به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع سیستم یکی از پرمصرف‌ترین سهم مصرف انرژی در آن به جز مصارف جابجایی مسافران، مربوط به سیستم تهویه تونل و ایستگاه است. در این پژوهش، حرکت قطار درون چهار ایستگاه و تونل‌های بینابین از سیستم قطار شهری زیرزمینی مدل‌سازی شده است. مدل تونل و ایستگاه‌ها با در نظر گرفتن مواردی مثل سالن بلیت، راه پله‌ها، سکوی تردد مسافران و سیستم تهویه شبیه‌سازی شده است. ابتدا صحت حل عددی با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی منتشرشده در پژوهش‌های قبلی بررسی شده، سپس میدان جریان ناشی از حرکت قطار در تونل و ایستگاه‌ها در حالت‌های فن روشن و فن خاموش محاسبه و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حرکت قطار بر میدان جریان در اطراف بازشدگی فن‌ها و نیز دریچه‌های تهویه سقف سکو تاثیر گذار بوده و عملکرد سیستم تعویض هوای طراحی شده را به شدت تغییر می‌دهد. علاوه بر این میدان جریان در کل تونل و ایستگاه‌ها به طور کامل متأثر از حرکت قطار و اثر پیستونی ناشی از آن است. حرکت قطار سبب می‌شود که مقدار دبی تبادل شده از درب‌های ورودی ایستگاه و نیز دبی تبادل شده بین هر ایستگاه و تونل اصلی تقریباً به ده برابر حالت پایا برسد. همچنین جریان هوایی که از حرکت قطار نشأت می‌گیرد چندین برابر جریان هوایی است که از عملکرد سیستم تعویض هوا به وجود می‌آید. بنابراین استفاده بهینه از اثر پیستونی می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: سیستم قطار شهری زیر زمینی، سیستم تعویض هوا، مقایسه فن روشن و خاموش، اثر پیستونی، مدل‌سازی عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

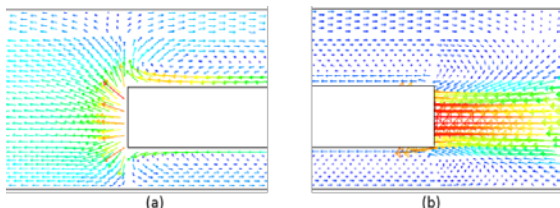
*نویسنده مسئول: tizadi@eng.uk.ac.ir

۷۵ درصد از کل انرژی مصرفی، بجز مصارف جابجایی، در سیستم‌های تهویه و HVAC مصرف می‌شود. بنابراین هرگونه تغییر در عملکرد سیستم تهویه و یا حتی روشن کردن آن در موارد ضروری، می‌تواند تاثیر چشم‌گیری در کاهش انرژی مصرفی داشته باشد.

جدول ۱) زیرسیستم‌های عملکرد در مترو (مصرف‌کننده‌های انرژی غیر از مصارف محرک کششی)؛ مجموع انرژی سالانه به ازای هر مسافر و هر سطح از شبکه؛ نتایج به دست آمده از ایستگاه‌ها و خطوط متروی سئول^[3]

امکانات موجود در ایستگاه‌های سیستم مترو	نسبت (%)	KJ/pass.	MJ/m ²
تهویه مکانیکی	۵۵/۰	۱۰۷	۱۵۷
سیستم‌های تهویه مطبوع (HVAC) در ایستگاه‌ها	۱۸/۵	۳۵	۵۳
روشنایی (ترانسفورماتور و اتاق‌های برق)	۹/۰	۱۷	۲۵
آسانسورها، پله برقی‌ها	۱۷/۵	۳۳	۵۰

از طرفی در تونل‌های سیستم مترو عملکرد سیستم تهویه و تعویض هوا به شدت تحت تاثیر حرکت قطار در داخل تونل می‌باشد. زیرا همچنان که وسیله نقلیه در حال حرکت است، باعث افزایش فشار در مقابل خود و تا حدودی کاهش فشار در پایین دست خود می‌گردد. این پدیده که به نام اثر پیستونی شناخته می‌شود، در فضاهای سرپسته مثل تونل‌ها و زیرگذرها اثرات بیش‌تری از خود بر جای خواهد گذاشت. فرم تقریبی خطوط جریان در اطراف یک مدل ساده از قطار در داخل تونل به صورت نمایش داده شده در شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱) نمونه‌ای از خطوط جریان در اطراف یک مدل قطار در تونل؛ (a) ناحیه جلو قطار، (b) ناحیه پشت قطار

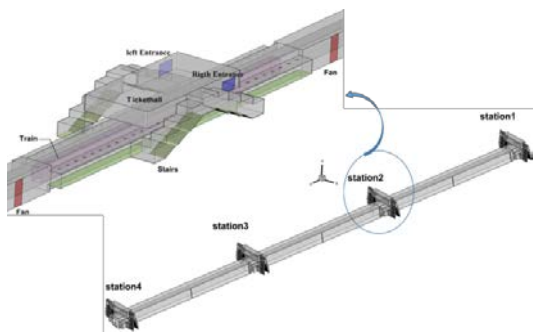
در محدوده روبروی قطار، جریان هوا به وسیله مقطع قطار، به سمت جلو و انتهای تونل حرکت داده می‌شود و به عنوان خطوط جریان هوای اصلی در نظر گرفته می‌شود. در پشت قطار، شکل خطوط جریان پیچیده‌تر می‌گردد. جریان هوایی که از جلو آمده به سمت پشت قطار چرخیده و ممکن است در این نواحی ایجاد ورتکس نماید. همچنین یک جریان هوا نیز ناشی از کاهش فشار در پشت قطار، از ورودی تونل به سمت پشت قطار در حرکت خواهد بود.

حرکت قطار در تونل، باعث تغییرات زیادی در خصوصیات جریان می‌شود. همچنین به علت بسته بودن فضا، همواره مطالعات دقیقی جهت بررسی سلامت مسافران، کیفیت حمل و نقل، بهبود سیستم تهویه و در نهایت دسترسی به بازده بیشتر مورد نیاز است. بدین منظور تحقیقات وسیعی در سراسر جهان انجام شده است. به عنوان نمونه کی و همکاران^[4] و لین و همکاران^[5] به طور جداگانه به بررسی نحوه عملکرد سیستم تهویه در داخل تونل‌ها پرداختند. یوان و یو^[6] نشان دادند که مدل‌های توربولانسی دو معادله‌ای می‌توانند جهت محاسبه میدان جریان و دما در مدل‌سازی ایستگاه‌های زیرزمینی دارای سیستم تهویه به خوبی مورد استفاده

به دست آمده و مورد تحلیل قرار گرفته است. جهت بررسی متقابل تاثیر سیستم تعویض هوا بر اثر پیستونی ناشی از حرکت قطار و نیز تاثیر حرکت قطار بر عملکرد سیستم تعویض هوا، شرایط فن‌روشن و فن‌خاموش مقایسه شده است.

۲- مدل‌سازی

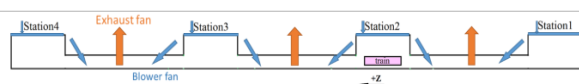
جهت حل میدان جریان در اطراف قطار متحرک، ابتدا مدلی از یک قطار در داخل تونل و ایستگاه در موقعیت اولیه، توسط نرم‌افزار تولید شبکه ساخته شده است (شکل ۲). همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، دامنه محاسباتی از ۴ ایستگاه سکو طرفین تشکیل شده که در موقعیت اولیه مدل قطار به شکل یک مکعب مستطیل به ارتفاع 3.7 m ، عرض 2.65 m و طول 100 m در ایستگاه دوم قرار دارد و حرکت آن از ایستگاه دوم به ایستگاه سوم مدل‌سازی می‌گردد. ایستگاه‌ها و تونل‌ها به صورت دوطرفه بوده و هر تونل دارای طول 1000 m ، عرض 8.22 m و ارتفاع 6.68 m می‌باشد. هر ایستگاه شامل یک سالن بلیت است که دو عدد درب، جهت ورود و خروج به سطح خیابان در دو طرف آن قرار دارد. این سالن به وسیله دو گروه از راه‌پله به قسمت سکو متصل می‌گردد. همچنین، قسمت پیاده‌روی مسافران نیز برای هر سکو مدل‌سازی شده است.



شکل ۲) نمایی از دامنه محاسباتی به همراه مدل قطار در موقعیت اولیه

در ایستگاه سیستم تهویه و تعویض هوای تونل و ایستگاه نیز به صورت زیر می‌باشد:

در هر ایستگاه، در قسمت سقف سکو تعداد ۶۰ دریچه کوچک به ابعاد $0.425\text{ m} \times 0.825\text{ m}$ قرار دارد که هر دریچه، هوا را به میزان 1200 cfm ($2026.64\text{ m}^3/\text{h}$) به درون سکو می‌دمد. در ابتدا و انتهای هر تونل و به فاصله 12 m از ورودی ایستگاه‌ها، یک بازشستگی فن به ابعاد $3\text{ m} \times 6.68\text{ m}$ وجود دارد که هرکدام از این فن‌های دمنده، هوا را به مقدار $8000\text{ m}^3/\text{h}$ و با زاویه 45° درجه به سمت مرکز تونل می‌دمند. در وسط هر تونل یک بازشستگی فن قرار دارد که هوا را به میزان $25000\text{ m}^3/\text{h}$ از داخل تونل مکش می‌کند. شماتیکی از فن‌های دمشی و مکشی از نمای جانبی در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳) شماتیک فن‌های دمشی و مکشی درون تونل‌ها و ایستگاه‌های شبکه محاسباتی

برای مدل‌سازی عددی حرکت قطار در داخل تونل و ایستگاه‌ها، شبکه محاسباتی مناسب ایجاد شده که این شبکه در محدوده

قرار گیرند. دمینگو و همکاران^[7] انواع مختلف سیستم‌های تهویه را در ایستگاه‌های زیرزمینی مادرید از نقطه نظر پایین نگه‌داشتن دما و آلاینده مورد بررسی قرار دادند. در مطالعات آنان حرکت قطار و تاثیر آن بر عملکرد سیستم تهویه مورد بررسی قرار گرفته است. *ایزدی و ابوعلی*^[8] به مطالعه افزایش فشار اولیه ناشی از اثر پیستونی در تونل‌های سیستم ریلی پرداختند. در مطالعه آنان، یک تونل یک‌طرفه با مقطعی به شکل دایره ناقص در نظر گرفته شده است. همچنین قطار از فضای آزاد وارد تونل شده و در نتیجه ایستگاه‌ها مدل‌سازی نشده است. ورود قطار از فضای آزاد سبب تشکیل موج فشاری می‌گردد. با حرکت این موج در طول تونل و رسیدن آن به هر مکان، اولین و بیشترین افزایش فشار در آن مکان مشاهده می‌گردد. آنان در پژوهش خود نشان دادند که در شرایط فن روشن، اندازه حباب جدایی تشکیل شده روی سر قطار بیشتر بوده و در نتیجه افزایش فشار اولیه تا حدودی بیشتر از حالت فن خاموش می‌گردد. *ربانی و فقیه‌خراسانی*^[9] اثر جریان باد بر یک قطار مسافری را به صورت عددی و تجربی مطالعه کرده و تاثیر تعداد واگن‌ها را بر ضریب پسا و توزیع فشار در صفحه تقارن قطار مورد بررسی قرار دادند. *ژوریو و همکاران*^[10] با مطالعه شدت جریان جرمی عبوری از شفت مکانیکی و نیز میدان جریان درون تونل به بررسی تاثیر مکان قرارگیری شفت مکانیکی بر عملکرد سیستم تهویه پرداختند. در پژوهش آنان نیز، حرکت قطار و اثر پیستونی ناشی از آن در نظر گرفته نشده است. نیو و همکاران^[11] اثر شکل دماغه قطار را بر خصوصیات جریان درون تونل مورد بررسی قرار دادند. *کراس و همکاران*^[12] با استفاده از مدل‌های دوبعدی، تلاش نمودند تا با تغییر خصوصیات قطار، جریان هوای حاصل از حرکت قطار را افزایش داده و در نتیجه کیفیت تهویه ایستگاه زیرزمینی را بهبود بخشند. *ژانگ و همکاران*^[13, 14] نیز با ارائه و بررسی سیستم‌های کنترلی جدید در جهت کاهش مصرف انرژی، تحقیقاتی را صورت دادند. از آنجا که طراحی و عملکرد سیستم تهویه و در نتیجه اثر آن بر میدان جریان، وابسته به خصوصیات و هندسه ایستگاه و تونل می‌باشد، تحقیقات متعددی در نقاط مختلف جهان جهت بررسی عملکرد سیستم تهویه صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به کار *هوانگ و همکاران*^[15] براساس یکی از ایستگاه‌های زیرزمینی کره و نیز *گنرالز و همکاران*^[16] براساس یکی از ایستگاه‌های زیرزمینی اسپانیا اشاره کرد. در تمامی مدل‌های ذکر شده از تونل‌های زیرزمینی در این پژوهش‌ها، تنها دو ایستگاه ساده به همراه تونل بینابین مدل‌سازی شده است. علاوه بر این، همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، بیشتر مطالعات بر سیستم تهویه بدون در نظر گرفتن حرکت قطار و اثر پیستونی ناشی از آن بوده است و در مواردی که حرکت قطار مدل‌سازی شده، ایستگاه‌ها به صورت ساده و بدون در نظر گرفتن سکوی مسافران، سالن بلیت و غیره شبیه‌سازی شده‌اند. در این پژوهش، جریان سه‌بعدی متلاطم در حالت تراکم‌پذیر غیردائمی در اطراف یک مدل سه‌بعدی از قطار متحرک در تونل و ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی دقیق مسئله و کم‌کردن تاثیر تقریب شرایط مرزی، ۴ ایستگاه از مجموعه ایستگاه‌های زیرزمینی سیستم قطار شهری مدل‌سازی شده که حرکت قطار بین دو ایستگاه وسط و تونل بینابین در نظر گرفته شده است. ایستگاه‌ها شامل قسمت‌هایی از قبیل سالن بلیت، راه‌پله و سکوی تردد مسافران و نیز سیستم تهویه و تعویض هوا هستند و مدل ایستگاه و تونل، مشابه بخشی از سیستم قطار شهری شیراز می‌باشد. در هر لحظه از حرکت، میدان جریان

$$E = \begin{bmatrix} (e+p)u + u\bar{\rho}k \\ \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} (e+p)v + v\bar{\rho}k \\ \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} (e+p)w + w\bar{\rho}k \\ \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \end{bmatrix}$$

$$E_v = \begin{bmatrix} \frac{u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - u\overline{\rho u''u''} - v\overline{\rho v''v''} - w\overline{\rho w''w''}}{-q_x - \overline{\rho u''h''} + u''\tau_{xx} + v''\tau_{xy} + w''\tau_{xz} - \frac{\rho v''(u''u'' + v''v'' + w''w'')}{2}} \\ 0 \\ \tau_{xx} - \overline{\rho u''u''} \\ \tau_{xy} - \overline{\rho u''v''} \\ \tau_{xz} - \overline{\rho u''w''} \end{bmatrix}$$

$$F_v = \begin{bmatrix} \frac{u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - u\overline{\rho v''v''} - v\overline{\rho v''v''} - w\overline{\rho v''w''}}{-q_y - \overline{\rho v''h''} + u''\tau_{xy} + v''\tau_{yy} + w''\tau_{yz} - \frac{\rho v''(u''u'' + v''v'' + w''w'')}{2}} \\ 0 \\ \tau_{yx} - \overline{\rho v''v''} \\ \tau_{yy} - \overline{\rho v''v''} \\ \tau_{yz} - \overline{\rho v''w''} \end{bmatrix}$$

$$G_v = \begin{bmatrix} \frac{u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - u\overline{\rho w''w''} - v\overline{\rho w''v''} - w\overline{\rho w''w''}}{-q_z - \overline{\rho w''h''} + u''\tau_{xz} + v''\tau_{yz} + w''\tau_{zz} - \frac{\rho w''(u''u'' + v''v'' + w''w'')}{2}} \\ 0 \\ \tau_{zx} - \overline{\rho w''w''} \\ \tau_{zy} - \overline{\rho w''v''} \\ \tau_{zz} - \overline{\rho w''w''} \end{bmatrix}$$

- (۳) اطراف قطار ریزتر می‌باشد. پس از بررسی‌های مربوط به استقلال حل عددی از تعداد شبکه محاسباتی، تعداد ۵/۵ میلیون سلول مناسب شناخته شد. نتایج حاصل از این مدل نسبت به مدلی با ۱۰/۵ میلیون سلول، دارای اختلافی در حدود یک درصد می‌باشد. برای حل میدان جریان از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت نسخه ۲۰۱۶ [17] استفاده گردیده است. از آنجا که قطار متحرک است، موقعیت شبکه عددی نسبت به زمان در حال تغییر بوده و در نتیجه از تکنیک شبکه دینامیک استفاده شده است. بدین منظور کد مورد نظر برای حرکت قطار نوشته شده است. در نهایت جهت مدل‌کردن حرکت قطار، از روش لایه‌های دینامیکی استفاده شده است. در این روش همراه با حرکت قطار، لایه‌هایی از سلول در مجاورت مرز متحرک اضافه یا کم می‌شود. به این صورت که لایه سلولی که در همسایگی مرز متحرک قرار دارد با توجه به طول خود می‌تواند تفکیک شده یا در لایه کناری خود ادغام گردد. با در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه دینامیک و بررسی استقلال حل از گام زمانی، گام زمانی $\Delta t = 0.01s$ مناسب ارزیابی شده است. سیستم مورد استفاده دارای ۱۶ هسته (Core (TM) i7-6900k CPU @ 3.20GHz و ۴.0GB حافظه بوده که مدت زمان ۱۰ روز جهت انجام محاسبات صرف شده است.

۳- معادلات حاکم بر جریان

جریانی که به وسیله حرکت قطار در داخل تونل القا می‌شود به طور قابل توجهی دارای خصوصیات غیردائمی است که از موج‌های فشاری حاصل می‌شود. ثابت شده که اگر چه عدد ماخ بر مبنای سرعت قطار تقریباً کوچک است اما تاثیر تراکم‌پذیری جهت مطالعه جریان باید در نظر گرفته شود. دلیل عمده آن به دو مقیاس زمانی که در این مسئله دخالت دارند برمی‌گردد. اولین مقیاس، زمانی است که برای قطار جهت ورود به تونل (یا خروج از تونل) صرف می‌شود و دومین مقیاس، زمانی است که موج‌های فشاری جهت حرکت با سرعت صوت در طول تونل طی می‌کنند. تراکم‌پذیری ناشی از حرکت غیریکنواخت زمانی اهمیت می‌یابد که این دو مقیاس از درجه بزرگی یکدیگر باشند. حال آن که شرط عدد ماخ خیلی کوچکتر از یک، جهت برقراری فرض جریان غیرقابل تراکم، زمانی صادق است که تنها یک مقیاس زمانی، حرکت جریان را کنترل کند [18].

معادلات حاکم بر جریان سیال لزج تراکم‌پذیر، معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و معادله حالت گاز ایده‌آل می‌باشد. از آنجا که جریان سیال به صورت متلاطم می‌باشد، برای شبیه‌سازی جریان از مدل‌سازی تلاطم استفاده می‌شود. در نتیجه برای حل از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس (RANS) به همراه مدل $k-\epsilon$ (از نوع استاندارد و با در نظر گرفتن Standard Wall Functions در نزدیکی دیواره) استفاده می‌کنیم.

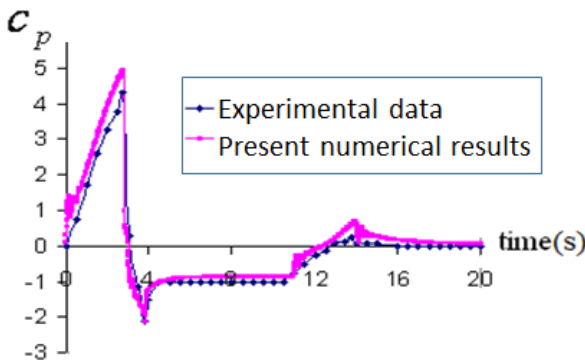
معادله متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس در دستگاه کارتزین در فرم بقایی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q_t + \partial(E - E_v)/\partial x + \partial(F - F_v)/\partial y + \partial(G - G_v)/\partial z = 0 \quad (1)$$

که در آن:

$$Q = \begin{bmatrix} e + \bar{\rho}k \\ \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \end{bmatrix} \quad (2)$$

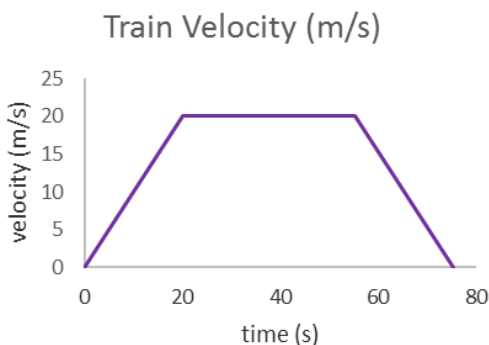
است. این مدل آزمایشگاهی، مدلی از یک قطار و تونل مکعبی شکل با مقیاس ۱ به ۲۰ است [20] در این مدل، قطار با طول ۳m، عرض ۱۵۶mm و ارتفاع ۲۲۵mm درون تونلی با طول ۳۹m، عرض ۲۱۰mm و ارتفاع ۲۵۰mm قرار دارد. قطار در موقعیت اولیه در تونل و در فاصله ۱/۵m از ابتدای تونل قرار دارد. حرکت قطار به صورت شتاب‌دار، با حداکثر سرعت ۳m/s در نظر گرفته شده است. نمودار تغییرات ضریب فشار (c_p) برحسب زمان در مکانی به فاصله ۸/۵m از ابتدای تونل روی دیواره فوقانی آن در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، حل عددی ارائه شده هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد. در نتیجه پس از اطمینان از صحت حل عددی ارائه شده، به حل جریان در مدل اصلی برای ۴ ایستگاه مترو و تونل‌های بینابین پرداخته شده است.



نمودار ۱) ضریب فشار برحسب زمان در مکانی به فاصله ۸/۵m از ابتدای تونل در مدل آزمایشگاهی مرجع [20] و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از حل عددی حاضر

۲-۴- بررسی تاثیر عملکرد فن بر اثر پیستونی با مقایسه حالت فن روشن و خاموش

جهت بررسی تاثیر فن بر اثر پیستونی و میدان جریان در داخل تونل و ایستگاه، حرکت قطار در هر دو حالت فن روشن و فن خاموش مدل‌سازی شده و میدان جریان در هر لحظه به دست آمده است. در شرایط فن روشن، پیش از آن که قطار در طول ایستگاه و تونل شروع به حرکت نماید، ابتدا جریان ایجاد شده به وسیله دمش و مکش فن‌ها، در دامنه محاسباتی حل می‌شود تا این که شرایط پایدار جریان قبل از حرکت قطار، حاصل گردد. سپس حرکت قطار با نمودار سرعتی که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود، مدل‌سازی شده و دبی ورودی یا خروجی از درب‌های ایستگاه دوم و سوم در زمان‌های مختلف به دست آمده و برای شرایط فن روشن و خاموش در نمودارهای ۳ و ۴ مقایسه شده است.



نمودار ۲) نمودار سرعت قطار بر حسب زمان

در این معادلات w, v, u مؤلفه‌های سرعت میانگین، p فشار متوسط، ρ چگالی متوسط، e متوسط انرژی داخلی و u_i'' ترم نوسانی سرعت نسبت به سرعت میانگین می‌باشد. ترم‌های $-\overline{\rho u_i'' u_j''}$ - مؤلفه‌های تانسور تنش رینولدز می‌باشند که با استفاده از فرض بوسینیسک و از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$(9)$$

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

که در آن:

$$(10)$$

$$\overline{\rho k} = \frac{\rho(u''u'' + v''v'' + w''w'')}{2}$$

لزجت تلاطم نیز به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$(11)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = 0.09$$

k و ε در رابطه بالا، از حل معادلات زیر حاصل می‌گردند [19]:

$$(12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$(13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

در این معادلات G_k تولید انرژی جنبشی تلاطم ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط را نشان می‌دهد. Y_M نیز نشان‌دهنده تعامل انبساط نوسانی در اغتشاش تراکم‌پذیر با میزان اتلاف کلی است. $C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ اعداد ثابت و σ_k و σ_ε اعداد پرانتل مغشوش به ترتیب برای k و ε هستند که مقدار آن‌ها برابر است با:

$$\sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{1\varepsilon} = 1.44$$

شرط مرزی فشار روی ورودی‌های ایستگاه از سطح خیابان شرط برابری با فشار اتمسفریک می‌باشد. برای حل عددی از روش حجم محدود و از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. گسسته‌سازی معادلات به صورت ضمنی بوده که ترم زمان به صورت ضمنی مرتبه اول و ترم‌های جابجایی معادلات مومنتیوم، انرژی و نیز معادلات تلاطم به صورت اپویند مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند.

۴- نتایج

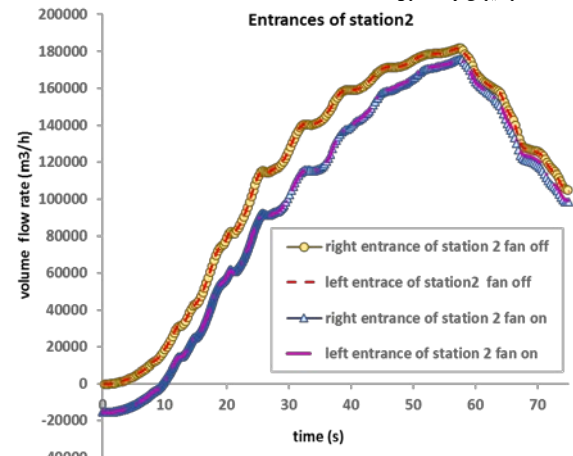
۴-۱- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

جهت بررسی صحت حل عددی ارائه شده، با مدلی که نتایج آزمایشگاهی آن در دسترس بوده مقایسه‌هایی صورت پذیرفته

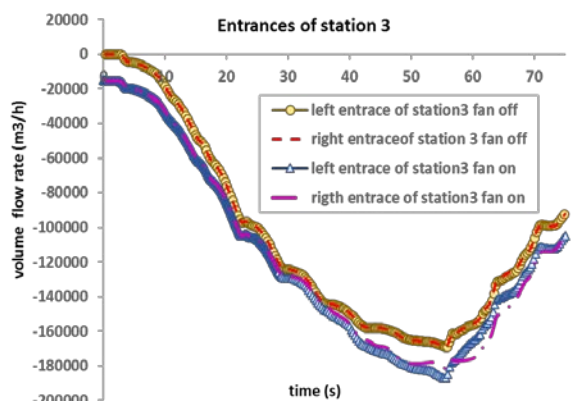
آن دارد (نمودار ۴). از طرف دیگر، به عنوان نمونه در نمودار ۴ مشاهده می‌شود که در شرایط فن روشن، دبی خروجی از هر کدام از درب‌های ایستگاه سوم در ثانیه صفر (که جواب حل پایایی مسئله بوده است) $15800 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد که با حرکت قطار و اثر پیستونی ناشی از آن، در حدود زمان 55 s ، به میزان $185000 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌رسد. بنابراین همان گونه که در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، بر اثر حرکت قطار، مقدار دبی وارد شده از درب‌های ورودی ایستگاه دوم و نیز دبی خارج شده از درب‌های خروجی ایستگاه سوم تقریباً بیش از ۱۰ برابر شرایط پایایی است که در آن فن‌ها روشن بوده و حرکت قطار در نظر گرفته نشده است. در نتیجه جهت انجام مطالعات و محاسبات مربوط به سیستم تعویض هوا، در نظر گرفتن اثر پیستونی، ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر موارد ذکر شده، به طور کلی در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که اگرچه تونل دوطرفه بوده و قطار در سمت چپ حرکت می‌کند، اما مقدار دبی در تمام طول حل، در هر دو درب ورودی سمت چپ و سمت راست تقریباً یکسان است.

با درک بهتر روند تغییرات جریان ناشی از حرکت قطار در داخل تونل و ایستگاه، به مقایسه حالت فن روشن و فن خاموش در هر دو ایستگاه می‌پردازیم. در نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که روند تغییرات دبی برای هر دو حالت فن روشن و فن خاموش مشابه یکدیگر و متأثر از حرکت پیستونی است. یک اختلاف تقریباً یکنواخت بین دبی هوا در دو نمودار حالت فن روشن و فن خاموش وجود دارد که دلیل پیدایش این تفاوت، مقدار اولیه دبی‌ها حاصل از عملکرد سیستم تعویض هوای روشن می‌باشد. در شرایط فن روشن، قبل از حرکت قطار و ایجاد اثر پیستونی آن، ناشی از عملکرد مکشی و دمشی فن‌ها، جریان از کلیه درب‌های ورودی ایستگاه‌ها به میزان $15800 \text{ m}^3/\text{h}$ خارج می‌شود. به عبارتی در هر تونل، هوا به میزان $250000 \text{ m}^3/\text{h}$ از طریق فن مکند میانی، کشیده شده و به میزان $160000 \text{ m}^3/\text{h}$ از طریق فن‌های دمنده ابتدا و انتها به درون تونل دمیده می‌شود (شکل ۳). در نتیجه هوای باقی‌مانده به میزان $90000 \text{ m}^3/\text{h}$ از ایستگاه‌ها، به درون تونل مکیده می‌شود. از طرف دیگر برای هر ایستگاه، دبی کل $121600 \text{ m}^3/\text{h}$ از طریق دریچه‌های تهویه به درون ایستگاه دمیده می‌شود. از این میزان، همان مقدار $90000 \text{ m}^3/\text{h}$ به درون تونل‌ها مکیده شده و مابقی به میزان $31600 \text{ m}^3/\text{h}$ از طریق درب‌های ورودی به بیرون رانده می‌شود ($15800 \text{ m}^3/\text{h}$ از هر درب ورودی). بنابراین همان طور که در نمودار ۳ و نمودار ۴ نیز مشهود است، در شرایط فن روشن، مقدار دبی اولیه در درب‌های ورودی منفی و به سمت محیط بیرون می‌باشد. این در حالی است که در شرایط فن خاموش جریان مؤثری در کل دامنه وجود ندارد و میزان دبی درب ورودی‌های ایستگاه تقریباً صفر است. بنابراین همان طور که در نمودار ۳ و نمودار ۴ مشاهده می‌شود تفاوت اولیه در میزان دبی‌ها، تا زمان پایانی در کل نمودارها مشاهده می‌شود. در واقع پس از شروع حرکت قطار، عمده جریان و خطوط اصلی آن در داخل تونل و ایستگاه‌ها تحت تاثیر حرکت قطار و ناشی از اثر پیستونی است و تاثیر فن‌ها ناچیز می‌باشد.

در حدود زمان $t=35 \text{ s}$ قطار به محل بازشدگی فن مکشی میانی می‌رسد و با قرارگرفتن در مسیر این بازشدگی، مانع از عملکرد صحیح آن می‌گردد (بین زمان $t=35 \text{ s}$ تا $t=40 \text{ s}$) و در نتیجه فن میانی میزان دبی خروجی خود را از جریان هوای اطراف قطار مکش می‌کند. بنابراین در حدود این زمان، مقدار دبی هوایی که از ایستگاه دوم کشیده می‌شود و نیز مقدار دبی هوایی که از ایستگاه



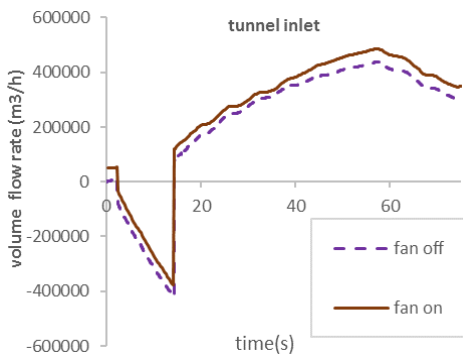
نمودار ۳) مقایسه تغییرات دبی هوا نسبت به زمان بر درب‌های ورودی ایستگاه دوم (ایستگاه شروع حرکت) در حالت فن روشن و فن خاموش



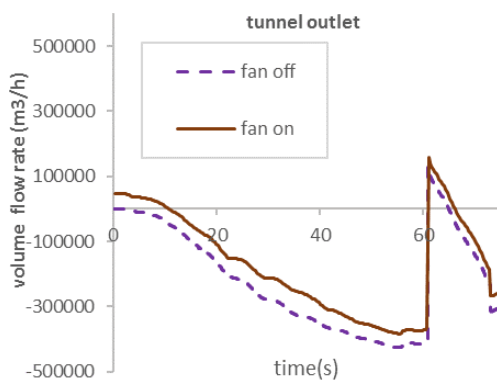
نمودار ۴) مقایسه تغییرات دبی هوا نسبت به زمان بر درب‌های ورودی ایستگاه سوم (ایستگاه مقصد) در حالت فن روشن و فن خاموش

ابتدا به بررسی تغییرات دبی هوا نسبت به زمان در ایستگاه دوم و سوم پرداخته و سپس حالت‌های فن روشن و خاموش مقایسه می‌گردد. لازم به ذکر است که در این نمودارها، دبی مثبت نشان‌دهنده ورود جریان به ایستگاه و دبی منفی نشان‌دهنده خروج جریان از ایستگاه می‌باشد. همان طور که قبلاً توضیح داده شد با حرکت قطار، جریان هوا به وسیله پیشانی قطار به سمت جلو حرکت داده می‌شود. همچنین کاهش فشار و ورتکس‌های ایجاد شده در پشت قطار سبب می‌شود که هوا از اطراف به سمت پشت قطار کشیده شود. در نتیجه همان گونه که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود با شروع حرکت شتاب‌دار قطار از ایستگاه دوم، هوا از سطح خیابان به درون محوطه ایستگاه دوم کشیده می‌شود. از آنجا که قطار با شتاب مثبت حرکت می‌کند، با گذشت زمان هوای بیشتری را به سمت جلو هل داده و نیز افت فشار در پشت قطار بیشتر می‌گردد. این مسئله سبب می‌شود که دبی ورودی به ایستگاه دوم در طول زمان مرتباً افزایش یابد. در حدود زمان $t=20 \text{ s}$ حرکت شتاب‌دار قطار تبدیل به حرکت سرعت ثابت می‌شود. شیب نمودار دبی کاهش یافته و به عبارتی افزایش دبی ورودی از ایستگاه دوم با شیب کمتری صورت می‌پذیرد. در زمان $t=55/255 \text{ s}$ که قطار ترمز گرفته و حرکت شتاب‌دار منفی را شروع می‌کند، دبی ورودی از ایستگاه دوم کاهش می‌یابد. همین روند در ایستگاه سوم که ایستگاه مقصد است، مشاهده می‌شود با این تفاوت که با حرکت قطار، دبی از ایستگاه سوم خارج می‌گردد. میزان خروج دبی نیز بستگی به حرکت قطار و نحوه تغییر سرعت

اولیه دبی جریان، تا انتهای حرکت قطار تقریباً به طور یکنواخت ثابت باقی می‌ماند. در نتیجه با وجود اینکه سیستم مدل‌سازی شده، یک تونل دوطرفه بوده که نسبت گرفتگی کمتری را نسبت به تونل‌های یک‌طرفه دارد، با حرکت قطار و ایجاد اثر پیستونی ناشی از آن، میدان جریان در کل تونل و ایستگاه‌ها به طور کامل متأثر از حرکت پیستونی می‌باشد. همچنین جریان هوایی که از حرکت قطار ایجاد می‌شود چندین برابر جریان هوایی است که از عملکرد سیستم تعویض هوا به وجود می‌آید. بنابراین اگر هد-وی قطارها (Head Way؛ زمان مابین حرکت دو قطار متوالی) به اندازه‌ای باشد که به صورت هم‌زمان دو قطار در تونل قرار نداشته باشند تا اثر پیستونی یکدیگر را کاهش دهند، این اثر پیستونی برای تعویض هوای داخل تونل کافی می‌باشد.



نمودار ۵) مقایسه تغییرات دبی هوا نسبت به زمان روی صفحه‌ای در ابتدای تونل در حالت‌های فن روشن و فن خاموش



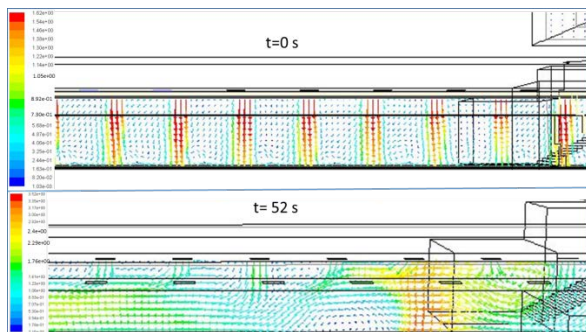
نمودار ۶) مقایسه تغییرات دبی هوا نسبت به زمان روی صفحه‌ای در انتهای تونل در حالت‌های فن روشن و فن خاموش

پس از مقایسه میدان جریان، فشار نیز در داخل تونل در شرایط فن روشن و فن خاموش مقایسه شده است. نمودار تغییرات فشار برحسب زمان در مکانی نزدیک وسط سقف تونل و به فاصله ۵۰۰m از ابتدای آن (محل فن مکنده میانی) در نمودار ۷، در دو حالت فن روشن و فن خاموش مقایسه شده است. همان گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود فشار اولیه داخل تونل و ایستگاه در هر دو حالت همان فشار اتمسفر (فشار نسبی صفر) است. با شروع حرکت شتاب‌دار قطار، هوا در مقابل قطار با شدت بیشتری به جلو رانده شده و در نتیجه فشار افزایش می‌یابد. زمانی که قطار به حداکثر سرعت خود رسیده ($t=20s$)، بیشترین مقدار فشار را در مکان مورد نظر خواهیم داشت. با شروع حرکت سرعت ثابت قطار، فشار کاهش یافته و زمانی که پیشانی قطار به مکان اندازه‌گیری فشار می‌رسد ($t=35s$)، فشار به طور ناگهانی افت می‌کند. با دور شدن

سوم به بیرون رانده می‌شود، کاهش می‌یابد. این امر سبب می‌شود که در حدود این زمان اختلاف مقدار دبی‌ها در دو حالت فن روشن و خاموش تا حدودی تغییر کند. از طرف دیگر، تقریباً در زمان $t=60s$ قطار به محل بازشدگی فن دمنده در مجاورت ایستگاه سوم می‌رسد و مانع از عملکرد صحیح آن می‌شود، در نتیجه با قرارگرفتن قطار در مسیر دمش هوا توسط این فن به درون تونل، دبی هوای بیشتری از ایستگاه دوم به سمت داخل کشیده می‌شود. از طرف دیگر، اثر دمشی این فن در جلوی قطار، سبب کاهش قدرت اثر پیستونی و اثر فشاری پیشانی قطار می‌گردد که در نتیجه، خروج هوا از ورودی‌های ایستگاه سوم کاهش می‌یابد؛ به خصوص ورودی سمت چپ که در همان سمت حرکت قطار قرار دارد.

جهت تکمیل این مقایسه و بررسی تاثیر عملکرد فن بر میدان جریان داخل تونل، صفحاتی در ابتدا و انتهای تونل در نظر گرفته شده و تغییرات دبی جریان نسبت به زمان روی این دو صفحه در نمودارهای ۵ و ۶ در دو حالت فن روشن و خاموش مقایسه شده است. در این حالت نیز، دبی مثبت نشان‌دهنده ورود جریان به تونل و دبی منفی نشان‌دهنده خروج جریان از تونل می‌باشد. صفحه ابتدایی در محل اتصال ایستگاه دوم به تونل قرار دارد و همان طور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود با گذشت زمان دبی بیشتری از ایستگاه به داخل تونل کشیده می‌شود. در زمان $t=2s$ که قطار در حال عبور از این صفحه و ورود از ایستگاه دوم به تونل می‌باشد، جهت جریان تغییر کرده و از تونل به ایستگاه می‌باشد. در واقع با ورود قطار به تونل، حجم هوا در تونل کاهش می‌یابد زیرا قطار حجم خاصی از تونل را اشغال می‌کند. برای جبران این کاهش حجم، بخشی از هوا از طریق فاصله بین قطار و تونل، از تونل خارج شده و سبب می‌شود که جهت جریان به طور ناگهانی به سمت ایستگاه دوم تغییر نماید. از آنجا که قطار در حال شتاب‌گیری است، مقدار دبی خارج‌شده از تونل با گذشت زمان افزایش می‌یابد. سپس در زمان $t=14s$ که قطار کاملاً ایستگاه دوم را ترک می‌کند، جهت جریان به طور ناگهانی تغییر کرده و دوباره از ایستگاه به داخل تونل و پشت قطار خواهد بود. در نمودار ۶ تغییرات دبی هوا نسبت به زمان روی صفحه انتهایی نشان داده شده است. این صفحه در انتهای تونل و محل اتصال تونل به ایستگاه سوم قرار دارد. با گذشت زمان دبی خروجی از تونل و نیز از این صفحه افزایش می‌یابد بجز در فاصله زمانی $t=61s$ تا $t=71s$ که قطار در حال عبور از این صفحه و ورود به ایستگاه سوم است. در این زمان جهت جریان به طور ناگهانی به سمت داخل تونل تغییر می‌کند. اما چون قطار در حال شتاب‌گیری منفی است، مقدار دبی ورودی به تونل با گذشت زمان کاهش می‌یابد. با خروج کامل قطار از تونل، جهت جریان هوا روی این صفحه تغییر کرده و دوباره به سمت ایستگاه سوم باز می‌گردد. در نمودارهای ۵ و ۶ نیز مشاهده می‌شود که بر اثر حرکت قطار و اثر پیستونی آن، مقدار دبی تبادل شده از ورودی هر ایستگاه به تونل، تقریباً ۱۰ برابر حالت پایا می‌گردد. همان طور که از مقایسه حالت‌های فن روشن و فن خاموش در نمودارهای ۵ و ۶ نیز مشاهده می‌شود، مقدار دبی جریان هوا و تغییرات آن نسبت به زمان، در داخل تونل و ایستگاه وابسته به حرکت قطار و اثر پیستونی بوده و روشن‌بودن فن، فقط سبب می‌شود که مقدار اولیه دبی‌ها اندکی متفاوت گردد. به عبارتی در شرایط فن روشن، دبی جریان در هر دو صفحه به میزان $45000 m^3/h$ و به سمت داخل تونل بوده، حال آن که در شرایط فن خاموش جریان خاصی درون تونل وجود ندارد. این تفاوت در مقدار

همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در لحظه اول و قبل از شروع حرکت قطار ($t=0/s$)، جریان از هر دو طرف تونل به وسیله فن مکنده میانی جذب شده و به بیرون هدایت می‌گردد. در نتیجه جهت جریان در هر دو طرف تونل، به سمت وسط تونل می‌باشد. اما با شروع حرکت قطار، جریان هوا به طور عمده از ایستگاه دوم (ایستگاه شروع حرکت) به سمت ایستگاه سوم (ایستگاه مقصد) هدایت می‌شود. در نتیجه همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، میزان جریان هوای کمتری تحت تاثیر فن میانی قرار گرفته است و عمده جهت جریان در نیمه دوم تونل، برخلاف شرایط طراحی فن، به سمت ایستگاه مقصد است. این اثر تا پایان حل ($t=75s$) و حتی پس از توقف قطار در ایستگاه سوم، باقی می‌ماند. شکل ۵ جریان هوای خارج شده از دریچه‌های تهویه، نصب شده روی سقف سکو را در شروع حرکت و مدتی پس از آن، در ایستگاه دوم نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود این دریچه‌های تهویه، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که جریان ورودی از آن‌ها مستقیماً به درون سکو هدایت گردد. اما با حرکت قطار و ایجاد اثر پیستونی ناشی از آن، حتی در زمان $t=52s$ که قطار به طور کامل از این ایستگاه فاصله گرفته است، جریان ورودی از دریچه‌ها تحت تاثیر اثر پیستونی قرار گرفته و تغییر جهت می‌دهد. همچنین تاثیر جریان هوای ایجاد شده توسط دریچه‌های تهویه، در مقابل جریان هوای ایجاد شده ناشی از اثر پیستونی ناچیز و قابل اغماض است.



شکل ۵ بردارهای سرعت (m/s) روی صفحه گذرنده از میان دریچه‌های تهویه سقف سکو و تغییر این بردارها ناشی از اثر پیستونی

۵- نتیجه‌گیری

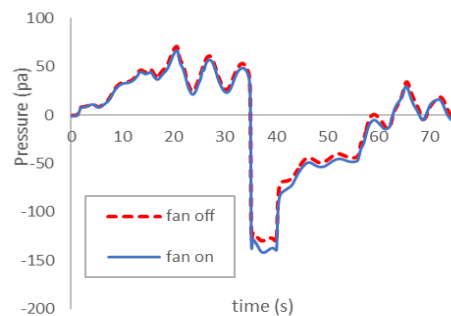
در این پژوهش، حرکت قطار در ایستگاه و تونل‌های زیرزمینی سیستم قطار شهری به کمک تکنیک شبکه دینامیک، مدل‌سازی شده است. پس از مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی، صحت حل عددی مورد تایید قرار گرفته است. سپس به حل میدان جریان در نمونه‌ای از تونل‌ها و ایستگاه‌های زیرزمینی سیستم قطار شهری پرداخته شده است. مدل مورد بررسی، تونل‌های دوطرفه و ایستگاه‌های سکو طرفین می‌باشد. اگرچه تنها حرکت یک قطار در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که حرکت قطار و اثر پیستونی ناشی از آن سبب می‌شود که مقدار دبی تبادل شده از درب‌های ورودی ایستگاه و نیز دبی تبادل شده بین هر ایستگاه و تونل اصلی تقریباً ۱۰ برابر حالت پایا گردد.

جهت بررسی تاثیر عملکرد فن‌های سیستم تعویض هوا بر میدان جریان، نتایج حاصل از حل میدان جریان و میدان فشار در دو حالت فن روشن و فن خاموش محاسبه و مقایسه شده است.

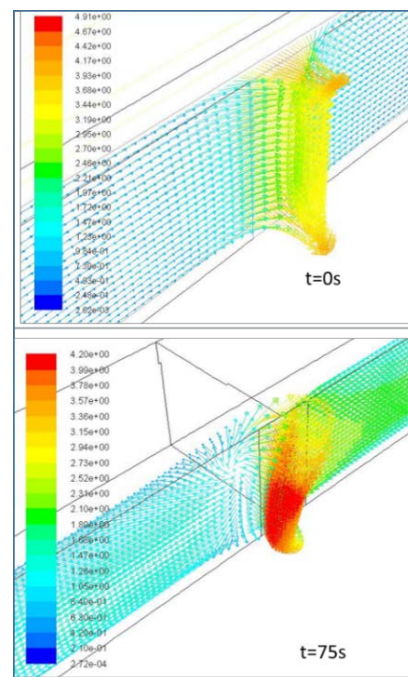
قطار و محدوده کم‌فشار پشت آن ($t=40s$)، فشار در مکان اندازه‌گیری افزایش می‌یابد و تقریباً در همین محدوده باقی می‌ماند. سپس با شروع حرکت شتاب‌دار منفی قطار ($t=55s$)، فشار در مکان مورد نظر رو به افزایش خواهد بود. دیگر نوسانات موجود در نمودار فشار به دلیل تشکیل و رفت‌وبرگشت امواج فشاری می‌باشد.

همان گونه که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود، تغییرات فشار در هر دو حالت فن روشن و خاموش تقریباً یکسان است و همانند نمودار دبی جریان، تفاوت اندکی تنها پس از زمان $t=35s$ ایجاد می‌شود. این زمان، همان زمانی است که قطار به مکان فن مکشی میانی و مکان اندازه‌گیری فشار می‌رسد. از آنجا که در حالت فن روشن، دبی هوای بیشتری از اطراف قطار کشیده می‌شود، در نتیجه افت فشار بیشتری را در این حالت در نمودار فشار مشاهده می‌نماییم. این نتایج تاکید می‌کند که اثر پیستونی قطار به اندازه‌ای قوی است که توزیع فشار صرف نظر از روشن یا خاموش بودن فن‌ها، به شدت تحت تاثیر این اثر می‌باشد.

جهت مشاهده تاثیر حرکت قطار بر خطوط جریان خروجی از بازشدگی فن‌ها در تونل، بردارهای سرعت روی صفحه‌ای در مجاورت بازشدگی فن مکنده میانی در شکل ۴ نمایش داده شده است.



نمودار ۷ مقایسه تغییرات فشار نسبت به زمان در مکانی نزدیک وسط سقف تونل و به فاصله ۵۰۰m از ابتدای آن، در حالت‌های فن روشن و فن خاموش



شکل ۴ بردارهای سرعت (m/s) روی صفحه‌ای در مجاورت فن مکنده شفت میانی و تغییر این بردارها ناشی از اثر پیستونی در زمان‌های مختلف

5- Lin CJ, Chuah YK, Liu CW. A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system. *Applied Thermal Engineering*. 2008;28(5-6):372-379.

6- Yuan FD, You SJ. CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007;22(4):474-482.

7- Domingo J, Barbero R, Iranzo A, Cuadra D, Servert J, Marcos MA. Analysis and optimization of ventilation systems for an underground transport interchange building under regular and emergency scenarios. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011;26(1):179-188.

8- Izadi T, Abouali O. Numerical analysis of piston effect in one of the tunnels of Shiraz subway system including the effect of fans. *Transportation Research Journal (TRJ)*. 2012;9(3 suppl 32). [Persian]

9- Rabani M, Faghih Khorasani A. Numerical and experimental investigation of headwind over a passenger train. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;13(13):100-111. [Persian]

10- Juraeva M, Ryu KJ, Jeong SH, Song DJ. Influence of mechanical ventilation shaft connecting location on subway tunnel ventilation performance. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013;119:114-120.

11- Niu J, Wang Y, Zhang L, Yuan Y. Numerical analysis of aerodynamic characteristics of high-speed train with different train nose lengths. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;127 Part C:188-199.

12- Cross D, Hughes B, Ingham D, Ma L. Enhancing the piston effect in underground railway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017;61:71-81.

13- Zhang H, Cui T, Liu M, Zheng W, Zhu C, You S, et al. Energy performance investigation of an innovative environmental control system in subway station. *Building and Environment*. 2017;126:68-81.

14- Zhang Z, Zhang H, Tan Y, Yang H. Natural wind utilization in the vertical shaft of a super-long highway tunnel and its energy saving effect. *Building and Environment*. 2018;145:140-152.

15- Huang Y, Gong XL, Peng YJ, Lin XY, Kim CN. Effects of the ventilation duct arrangement and duct geometry on ventilation performance in a subway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011;26(6):725-733.

16- González ML, Vega MG, Oro JMF, Marigorta EB. Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014;40:22-37.

17- ANSYS. ANSYS Fluent User's Guide [Internet]. Canonsburg: ANSYS, Inc.; 2016 [cited 2018 Mar 01]. Available from: Not Found

18- Ricco P, Baron A, Molteni P. Nature of pressure waves induced by a high-speed train traveling through a tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007;95(8):781-808.

19- Wilcox DC. *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd Edition. California: DCW Industries; 2006.

20- Kim JY, Kim KY. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007;22(2):166-172.

نتایج حاکی از آن است که تغییرات فشار کاملاً متأثر از حرکت قطار بوده و در هر دو حالت فن روشن و فن خاموش تقریباً یکسان است. تغییرات دبی جریان نسبت به زمان، در داخل تونل و ایستگاه‌ها نیز وابسته به حرکت قطار و اثر پیستونی بوده و روشن بودن فن‌ها، فقط سبب می‌شود که مقدار اولیه دبی‌ها تا حدودی متفاوت باشد. به عبارتی با حرکت قطار و ایجاد اثر پیستونی حاصل از آن، میدان جریان به طور کامل متأثر از حرکت پیستونی بوده و جریان هوایی که از حرکت قطار ایجاد می‌شود چندین برابر جریان هوایی است که از عملکرد سیستم تعویض هوا به وجود می‌آید. بنابراین اگر هد-وی قطارها به اندازه‌ای باشد که به صورت هم‌زمان دو قطار در تونل قرار نداشته باشند، این اثر پیستونی برای تعویض هوای داخل تونل کافی می‌باشد. در نتیجه در شرایط کارکرد معمولی، خاموش کردن فن‌ها می‌تواند مفید باشد؛ خصوصاً که تاثیر بسزایی در کاهش مصرف انرژی الکتریسته نیز دارد. لذا وجود یک سیستم کنترل که متناسب با دمای هوا یا پارامترهای دیگر بتواند سیستم تعویض هوا را به خصوص در تونل‌ها به مدار بیاورد برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ضروری به نظر می‌رسد. این می‌تواند باعث کاهش هزینه جاری شود. علاوه بر این، حرکت قطار بر میدان جریان در اطراف بازشدگی فن‌ها نیز تاثیرگذار بوده و باعث تغییر عملکرد سیستم تعویض هوا و تغییر جهت خطوط جریان در اطراف بازشدگی فن‌ها نسبت به حالت طراحی می‌گردد. با بررسی دریچه‌های تهویه نصب شده روی سقف سکو، مشاهده می‌شود که جریان هوای خروجی از این دریچه‌ها نیز به شدت تحت تاثیر اثر پیستونی قرار می‌گیرد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان موردی بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان موردی بیان نکردند.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: طاهره ایزدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ مظفرعلی مهربابان (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)؛ امید ابوعلی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪)

منابع مالی: نویسندگان موردی بیان نکردند.

منابع

1- London Underground. Environment Report [Internet]. London: London Underground; 2006 [cited 2018 Sep 01]. Available from: <http://content.tfl.gov.uk/environmental-report-2006.pdf>

2- Hu SC, Tung YC, Hsu MF. Assessing the potentials of energy-saving strategies for an underground mass rapid transit system with platform doors. *International Journal on Architectural Science*. 2006;7(3):67-76.

3- Hong W, Kim S. A study on the energy consumption unit of subway stations in Korea. *Building and Environment*. 2004;39(12):1497-1503.

4- Ke MT, Cheng TC, Wang WP. Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system. *Building and Environment*. 2002;37(11):1139-1152.