

اثر تعداد کانال‌های تهویه طبیعی بر عملکرد تهویه‌ای تونل‌های مترو

ایرج میرزایی
زاهد صفاری*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر، با شبیه‌سازی بر پایه روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی و داده‌های تجربی پژوهش‌های پیشین، مدل عددی سه بعدی تونل‌های متروی مجهز به کانال‌های تهویه طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر تعداد کانال‌های تهویه طبیعی در عملکرد تهویه‌ای تونل مترو می‌باشد؛ به همین جهت شرایط حاکم بر میزان ورود و خروج هوا از طریق این کانال‌ها در سه حالت متفاوت تعیین شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، تعداد کانال‌های مذکور بر میزان هوای ورودی به تونل تأثیر کمی داشته اما به ازای مجموع مساحت برابر برای مقاطع کانال‌ها، تونل مجهز به شش کانال تهویه، در حدود ۳۶/۶ درصد بر میزان هوای خروجی از تونل در مقایسه با حالت متداول که تونل دو کانال تهویه دارد، افزوده است. همچنین این نتایج نشان داده اند که محل تعبیه کانال‌های تهویه تأثیر زیادی بر میزان هوای ورودی و خروجی از آنها دارد، به طوری که در نزدیک ترین کانال به ورودی تونل بیشترین جرم هوای ورودی و در دور ترین کانال از ورودی تونل بیشترین جرم هوای خروجی وجود دارد. **واژه‌های کلیدی:** تهویه‌ای تونل مترو، کانال تهویه طبیعی مترو، جریان هوایی ناشی از قطار، تعداد کانال‌های تهویه.

The Effect of Natural Ventilation Duct Number in Subway Tunnel's Ventilation Performance

I. Mirzaee
Z. Saffari

Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran

Abstract

In this study, three-dimensional numerical model of a subway tunnel with natural ventilation channels is studied by computational fluid dynamics and experimental data of previous research. The main objective of this study is to investigate the effect of natural ventilation ducts on the subway tunnel's ventilation performance; thus the governing conditions of air suction and exhaust amount through these ducts is determined in three different cases. According to obtained results, the number of ducts had little effect on the amount of air suction in the tunnel, but tunnel equipped with six air ducts, in equal total area for section of ducts, has shown about 36.6 percent addition to the amount of output air of the tunnel in comparison with conventional case i.e. tunnel has two ventilation ducts. These results also indicate that the place of embedded ventilation ducts has a great effect on the amount of suction and exhaust air through them, so that in closest duct to tunnel's inlet has maximum entrance air and in the farthest duct to tunnel's outlet has maximum exhaust air mass.

Keywords: Subway tunnel's ventilation, Subway's Natural Ventilation Duct, Train-induced airflow, Ventilation Duct number.

۱- مقدمه

امروزه، سیستم‌های حمل و نقل عمومی به خدماتی ضروری در زندگی مدرن روزانه تبدیل شده‌اند. در میان تمام وسایل حمل و نقل در دسترس شهرهای بزرگ امروز، مترو از لحاظ ظرفیت عظیم و قابلیت اطمینان با صرفه‌ترین آنها می‌باشد. به همین دلیل بررسی عملکرد سیستم‌های قطار شهری و بهبود شرایط استفاده از آنها، به موضوع مطالعه‌ی تجربی و عددی بسیاری از محققان تبدیل گردیده است. با توجه به هزینه بر بودن مطالعات آزمایشگاهی و با توسعه دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) و با ظهور روز افزون کامپیوترهای قدرتمند، در حال حاضر استفاده از روش‌های شبیه‌سازی با CFD به منظور تجزیه و تحلیل مسائل مربوط به جریان سه بعدی در تونل مترو ممکن شده است. به عنوان مثال، یوان و یو [۱] یک شبیه‌سازی CFD را از طریق ساده‌سازی جریان هوای گذرا در یک فرایند پایا، به منظور بررسی زمان

- سرعت متوسط و درجه حرارت در یک ایستگاه از نوع سکو کنار^۲ انجام داده‌اند.

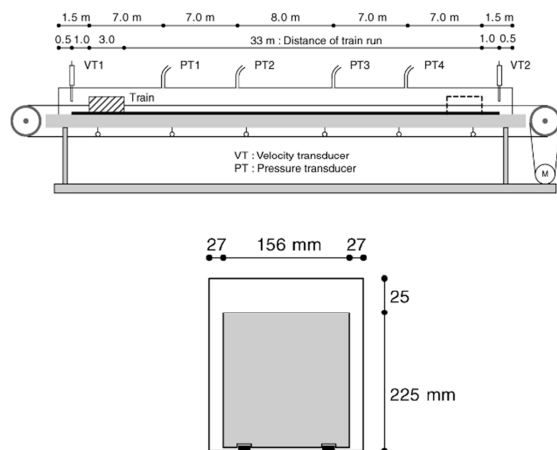
های و تائو [۲] با یک الگوریتم لایه‌بندی به تجزیه و تحلیل تهویه طبیعی برای جریان هوا ناپایای ناشی از قطار پرداخته‌اند. در حالی که کی و همکاران [۳] با استفاده از ابزار محاسباتی، بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های کنترل در یک محیط مترو را بررسی کرده‌اند.

نویسندگان دیگر، مانند یانگ و همکاران [۴] تجزیه و تحلیل توزیع دما در ایستگاه زیر زمینی با روش مش^۳ غوطه ور را معرفی کرده‌اند. در پژوهشی دیگر اعتبارسنجی با الگوهای جریان و توزیع دما اندازه‌گیری شده‌ی تجربی به وسیله البیالی و خلیل [۵] ارائه شده است. وانگ و لی [۶] مطالعات عددی توزیع سرعت هوا با استراتژی‌های مختلف طراحی تهویه، برای کنترل زیست محیطی ایستگاه مترو انجام داده و جیا و همکاران [۷] به شبیه‌سازی عددی خصوصیات جریان در تونل متروی دو جهته و در یک ایستگاه مترو پرداخته‌اند.

^۲ side platform

^۳ Mesh

^۱ Computational fluid dynamics



شکل ۱- دیاگرام شماتیک از طرح تجربی [۸]

تونل مدل در مقیاس ۱:۲۰ تونل مترو واقعی ساخته شده است که ۳۹ متر طول، ۲۵۰ میلی متر ارتفاع و ۲۱۰ میلی متر عرض و خود قطار ۳ متر طول، ۲۲۵ میلی متر ارتفاع و ۱۵۶ میلی متر عرض دارد. نسبت انسداد قطار به تونل حدود ۰/۶۷ است. قطار متصل به کابل می‌تواند در ریل راهنما جلو یا عقب حرکت کرده و سرعت آن توسط یک موتور مجهز به اینورتر برق کنترل می‌شود. فاصله اجرا آزمایش ۳۳ متر بوده و دو سرعت سنج نصب شده ۰/۵ متر در داخل ورودی و خروجی تونل، و چهار فشارسنج ۸/۵ متر، ۱۵/۵ متر، ۲۳/۵ متر، ۳۰/۵ متر از ورودی تونل در امتداد مرکز سقف مدل تونل نصب شده است. هم سرعت و هم فشار اندازه‌گیری شده در ۰/۱ ثانیه از فواصل زمانی ثبت گردیده است. در بخش‌های آینده به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی از داده‌های وسائل سنجش مذکور استفاده می‌شود.

الگوی حرکت قطار به صورت نمودار سرعت-زمان در شکل ۲ نمایش داده شده است. در ابتدای حرکت قطار با شتاب ۱/۰ متر بر مجذور ثانیه حرکت کرده تا به سرعت ثابت ۳ متر بر ثانیه برسد. سپس مسیر آزمایش را با این سرعت ثابت که ماکزیمم سرعت قطار می‌باشد، به مدت ۸ ثانیه طی می‌کند و در انتهای مسیر با شتاب ۱/۰ متر بر مجذور ثانیه از سرعت خود کاسته تا متوقف شود. عدد رینولدز بر اساس قطر هیدرولیکی^۲ تونل مدل و حداکثر سرعت قطار $4/9 \times 10^4$ می‌باشد.

کیم و کیم [۸] یک مطالعه تجربی جریان تونل ناپایدار ناشی از حرکت قطار، در مدل تونل با مقیاس ۱:۲۰ بدون کانالهای تهویه انجام داده و همچنین آن دو در موردی دیگر [۹] تجزیه و تحلیل عددی اثرات محل مجرا بر عملکرد تهویه در تونل مترو را با استفاده از PSDs^۱ مطالعه کرده‌اند.

گنزالز و همکاران [۱۰] در چندین مورد به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد اثر پیستونی در سیستم های تهویه طولی پرداخته‌اند.

با توجه به مطالب ذکر شده، فراهم نمودن شرایط استفاده مناسب از سیستم‌های قطار زیر زمینی و در نتیجه بررسی شرایط تهویه‌ای آن از اهمیت به سزایی برخوردار است. جریان‌های هوایی ایجاد شده در تونل‌های مترو در اثر حرکت قطار در آن، یکی از موارد بسیار موثر در تهویه تونل می‌باشد که از آن به نام اثر پیستونی نیز یاد می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی عددی اثرات تعداد کانال‌های تهویه طبیعی بر عملکرد تهویه‌ای تونل مترو است.

یکی از پژوهش‌های تجربی مهم در بررسی جریان‌های ناپایای ایجاد شده در اثر حرکت قطار در داخل تونل توسط کیم و کیم [۸] صورت گرفته است. در مطالعه جاری با الگو برداری از این کار تجربی، هندسه‌ای مشابه آن طراحی شده و بعد از اعتبارسنجی نتایج عددی به دست آمده و مقایسه آنها با نتایج تجربی، روش عددی مورد استفاده به تونلی با تعداد مجراهای تهویه ای متفاوت که به سقف تونل متصل‌اند، تعمیم داده شده است و جریان سه بعدی تونل به صورت عددی در سه تعداد مجرای تهویه‌ی مختلف شبیه‌سازی گردیده است. نتایج عددی به دست آمده از تجزیه و تحلیل، جهت نشان دادن اثرات تعداد و محل کانال‌ها، در جریان جرمی هوای مکیده شده به داخل یا خارج از تونل از طریق کانال‌های تهویه استفاده می‌گردد.

رئوس مطالب این پژوهش عبارتند از:

تعیین معادلات حاکم بر این نوع از مسائل، به دست آوردن شبیه‌سازی مناسب برای شبکه یا مش بندی محدوده محاسباتی و حل معادلات حاکم در این محدوده محاسباتی، مقایسه نتایج حل عددی با نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی، بررسی تأثیر تعداد کانال‌های تهویه بر میزان جرم ورودی و خروجی از تونل و در نهایت مقایسه عملکرد در سه نوع حالت مورد مطالعه در این پژوهش.

۲- مدل محاسباتی

۲-۱- مدل هندسی

مشابه مدل تجربی مورد استفاده [۸]، تونلی با مشخصات هندسی موجود در شکل ۱ به صورت زیر و بدون کانال تهویه در نظر گرفته می‌شود. (از آنجایی که توضیح آزمایش تجربی برای بیان شرایط هندسی و زمانی حاکم بر مسئله ضروری است در این قسمت به بیان شرایط مذکور در آزمایش پرداخته می‌شود).

^۲ Hydraulic diameter

^۱ Platform Screen Doors

در حالت تونل با کانال های چهارتایی (حالت دوم) مقطع هر کانال 0.15×0.05 و در حالت تونل مجهز به کانال های شش تایی (حالت سوم) 0.1×0.05 متر مربع است. همچنین ارتفاع کانال های تهویه و فاصله از ورودی و خروجی تونل در هر سه حالت مورد بررسی یکسان در نظر گرفته شده است.

فاصله کانال ها از یکدیگر برابر بوده و در حالت اول $24/5$ متر، در حالت دوم $8/74$ متر و در حالت سوم $5/08$ متر می باشد.

۲-۲- معادلات حاکم

امروزه مدل های دو- معادله ای بسیاری وجود دارد که مورد استفاده قرار می گیرند. در میان آنها مدل $K - \epsilon$ که بر اساس همسانی توربولانس است، در جریان های تراکم ناپذیر کاربرد زیادی پیدا کرده است. مدل توربولانس بر پایه RNG از معادلات لحظه ای ناویر-استوکس با استفاده از روش های ریاضی معروف به روش های "Renormalization Group" (RNG) به دست آمده اند. روابط (۱) تا (۷) معادلات حاکم برای جریان ناپایای تونل ناشی از حرکت قطار شامل معادله پیوستگی، مومنتوم و معادلات مربوط به مدل توربولانت $K - \epsilon$ در زیر مدل RNG می باشد.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \quad (3)$$

$$F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu_{eff} S_{ij})$$

مدل $K - \epsilon$ در زیر مدل RNG:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho K u_i) \quad (4)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + G_K + G_b - \rho \epsilon - Y_\mu$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} (G_K) \quad (5)$$

$$+ C_{3\epsilon} G_b - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} - R_\epsilon$$

$$d \left(\frac{\rho^2 K}{\sqrt{\epsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (6)$$

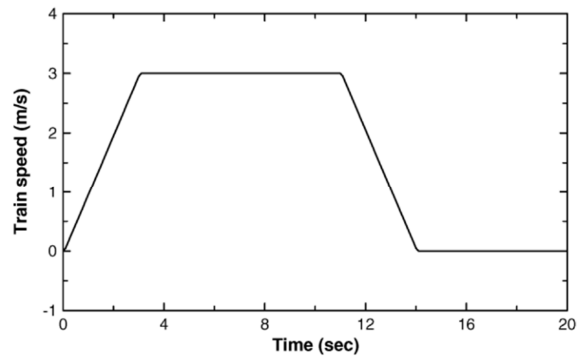
$$\hat{v} = \mu_{eff} / \mu \quad (7)$$

که در معادلات فوق برخی از ثابت ها به صورت زیر است:

$$\alpha_k = \alpha_\epsilon \approx 1.393$$

$$C_{1\epsilon} = 1.42 \quad \text{و} \quad C_{2\epsilon} = 1.68 \quad \text{و} \quad C_v = 100$$

α_k و α_ϵ به ترتیب اعداد پیرانتل موثر معکوس برای k و ϵ ، C_v و $C_{2\epsilon}$ و $C_{1\epsilon}$ ثابتهایی برای حل معادلات، μ_{eff} لزجت موثر، R_ϵ اثرات تغییرات سریع، G_K تولید انرژی آشفتگی به علت گرادیان سرعت متوسط، G_b تولید انرژی جنبشی به علت بویانسی و Y_μ بیانگر سهم

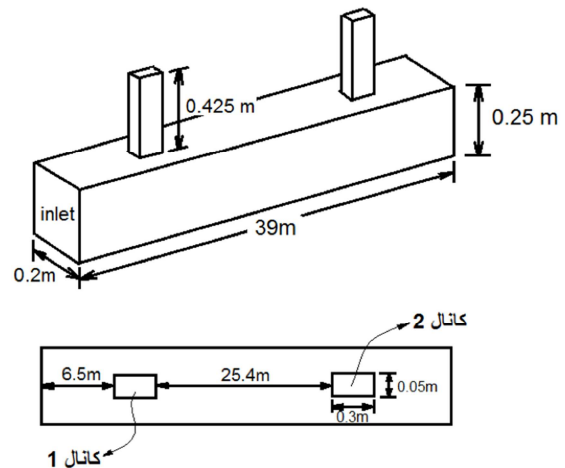


شکل ۲- الگوی حرکت قطار [۸]

در خلال این مطالعه دو نوع هندسه تونل بدون کانال تهویه و با کانال تهویه در نظر گرفته شده است که تونل بدون کانال، جهت اعتبارسنجی نتایج عددی به کار رفته است و دقیقاً با مشخصات آزمایش تجربی یکسان می باشد.

در بخش اصلی پژوهش همان هندسه اصلی تونل اما با کانالهای تهویه طبیعی متصل به سقف تونل که جهت مکش هوا به داخل یا دمش آن به خارج از تونل، با استفاده از اثر پیستونی ناشی از حرکت قطار درون تونل در نظر گرفته شده است.

کانال های تهویه در سه تعداد مختلف دو، چهار و شش تایی، به منظور بررسی اثر تعداد کانال ها بر عملکرد تهویه ای تونل بررسی گردیده اند که به عنوان نمونه تونل مجهز به دو کانال تهویه که در تونل های مترو جهت استفاده از خاصیت پیستونی متداول است در شکل ۳ نمایش داده شده و همان گونه که مشاهده می شود، نامگذاری کانال ها از سمت ورودی تونل در نظر گرفته شده است. این روند نامگذاری در دو حالت دیگر نیز صادق می باشد.



شکل ۳- هندسه تونل مجهز به دو کانال تهویه طبیعی

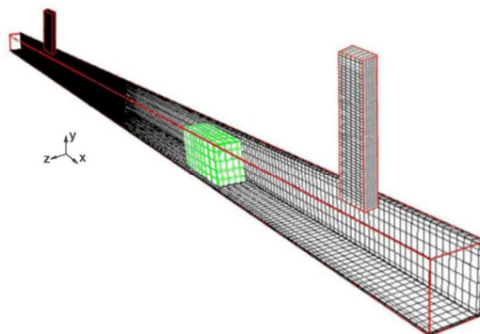
به منظور اختصار در ادامه مقاله حاضر، تونل مجهز به دو، چهار و شش کانال تهویه، به ترتیب به صورت "حالت اول"، "حالت دوم" و "حالت سوم" بیان می گردد.

ذکر این نکته ضروری است که مجموع مساحت مقاطع کانال های مورد بررسی در هر سه حالت 0.03 متر مربع می باشد. پس در نتیجه

انبساط مقادیر نوسانی در جریان تراکم پذیر آشفته به نرخ اتلاف کلی می‌باشند. (سایر پارامترها در قسمت نمادها ذکر شده است).

۳-۲- تولید شبکه^۱

برای تونل و کانال‌های نصب شده‌ی مورد بررسی، شبکه‌بندی با سازمان^۲ و سه بعدی در نظر گرفته شده و در شکل ۴ به عنوان نمونه ساختار شبکه‌بندی در حالت اول نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل هم دیده می‌شود، به منظور شبیه‌سازی بهتر مسئله، با نزدیکتر شدن به گوشه‌های تونل و کانال‌های تهویه‌ی نصب شده، اندازه شبکه ریزتر می‌گردد.



شکل ۴- شبکه‌بندی منظم مورد استفاده برای شبیه‌سازی

برای نمایش مرزهای متحرک از مدل مش متحرک و با توجه به ویژگی‌های حرکت قطار در تونل مترو، روش لایه‌های دینامیک در این مطالعه استفاده شده است.

۴-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی مجموعه به شرح زیر است: شرط مرزی ورودی فشار^۳ در ورودی تونل استفاده شود. شرایط مرزی خروجی فشار^۴ در خروجی تونل و در خروجی از هر مجرای تهویه به عهده گرفت. شرط عدم لغزش^۵ در مرز جامد از تونل و کانال‌های تهویه اجرا شده است.

۵-۲- مدل عددی

در حالت کلی دو نوع روش حل عددی برای مجموعه معادلات موجود می‌باشد که عبارتند از:

۱. حل مجزا^۶
۲. حل پیوسته^۷

تفاوت این دو روش همان گونه که از اسمشان پیداست، در این است که هنگام انتخاب روش مجزا معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت جداگانه حل می‌شوند؛ در حالی که در روش حل پیوسته معادلات مذکور همزمان با هم حل می‌گردند. در مطالعه حاضر روش

حل مجزا انتخاب شده که در روش مذکور خطی‌سازی معادلات به صورت ضمنی^۸ می‌باشد.

معادلات با روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و از آنجایی که مسئله مورد بررسی گذرا می‌باشد، برای کوپلینگ فشار و سرعت روش PISO انتخاب گردیده و گسسته‌سازی معادلات مومنتوم، انرژی توربولانت و نرخ اتلاف آشفتنگی با روش QUICK صورت گرفته است. روش PRESTO جهت تصحیح معادلات فشار در حالتی که همانند این مسئله، گرادیان‌های فشار زیادی وجود دارد، به کار برده شده است. از آنجایی که اندازه مش‌ها خیلی ریز نمی‌باشند، بنابراین برای آنالیز مشتقات زمانی جریان ناپایا از روش باد سوی مرتبه اول^۹ بهره گرفته شده است.

در محاسبات اندازه گام زمانی برابر ۰/۰۵ ثانیه، گام مکانی ۰/۳ متر و سرعت ماکزیمم برابر ۳ متر بر ثانیه بوده و عدد کورانت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CLF = U_{T-Max} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (8)$$

مقدار عدد کورانت در طول فرآیند ۰/۵ می‌باشد.

معیار همگرایی در این مطالعه بدین صورت انتخاب گردیده که مقادیر باقی مانده‌ها کمتر از 10^{-6} باشد.

۳- اعتبار سنجی نتایج و استقلال از شبکه

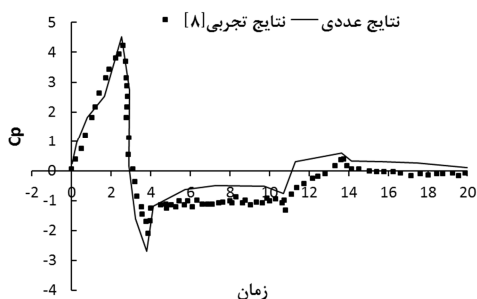
اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در این مطالعه با دو نمودار موجود در شکل‌های ۵ و ۶ که به ترتیب مربوط به تغییرات ضریب فشار در زمان انجام آزمایش و در محل نصب فشارسنج ۱ و ۲ است، بررسی می‌گردد.

ضریب فشار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_p = P / \frac{1}{2} \rho U_{T-Max}^2 \quad (9)$$

همان گونه که در بخش‌های قبل نیز ذکر شد سرعت ماکزیمم در این مسئله ۳ متر بر ثانیه می‌باشد.

با توجه به آنچه در دو شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، نتایج عددی اختلاف ناچیزی با داده‌های تجربی دارند و اختلاف موجود قابل صرف نظر می‌باشد، بنابراین روش‌های عددی مورد استفاده در مطالعه حاضر، قابل استفاده برای مدل‌سازی جریان هوای ناپایای ناشی از حرکت قطار داخل یک تونل مترو است.



شکل ۵- مقایسه تغییرات C_p بین نتایج تجربی و عددی در محل نصب PT1 (فشارسنج ۱)

- 1 Pressure Inlet
- 2 Pressure Outlet
- 3 Grid generation
- 4 Structured grid
- 5 No-slip condition
- 6 Segregated solution
- 7 Coupled solution

⁸ Implicit

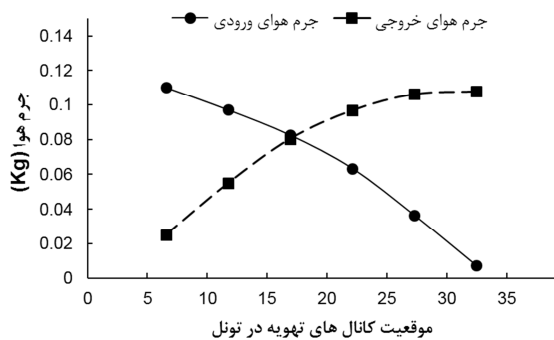
⁹ First upwind schemes

جدول ۱ مربوط به جرم هوای ورودی به تونل برای سه حالت مورد مطالعه می باشد و جرم هوای ورودی از طریق کانال های موجود در تونل را به صورت جدا گانه نمایش داده و کل جرم ورودی به تونل را در هر یک از حالات بیان می کند. همان گونه که در جدول مذکور مشاهده می گردد، در تمامی حالت ها جریان هوای ورودی از طریق کانال ۱ بیشترین مقدار را داراست و با نزدیک شدن به خروجی تونل از میزان جریان ورودی به تونل کاسته می شود.

جدول ۱- جرم جریان هوای ورودی (Kg) در کانال های تهویه برای حالات مورد بررسی

حالت	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
کانال ۱	۰/۳۶۷۹	۰/۱۳۴۸	۰/۱۱۰۱
کانال ۲	۰/۰۲۴۵	۰/۱۲۸۲	۰/۰۹۷۱
کانال ۳	—	۰/۰۹۴۸	۰/۰۸۲۶
کانال ۴	—	۰/۰۴۰۵	۰/۰۶۳۵
کانال ۵	—	—	۰/۰۳۶۶
کانال ۶	—	—	۰/۰۰۷۳
مجموع کانال ها	۰/۳۹۲۴	۰/۳۹۸۳	۰/۳۹۷۲

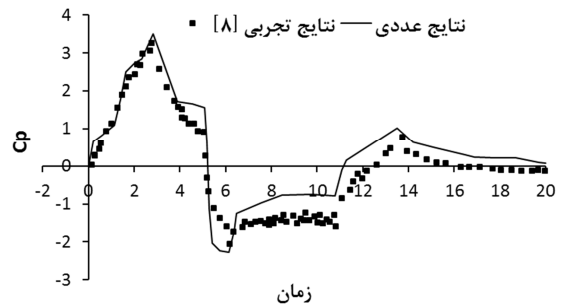
همچنین جریان ورودی به تونل در هر سه حالت مورد مطالعه تقریباً یکسان بوده و اختلاف ناچیزی با هم دارند. به عنوان نمونه در شکل ۸ مقادیر ورود و خروج جریان هوا در " حالت ۳ "، با توجه به موقعیت کانال با یکدیگر مقایسه گردیده که مبین حداکثر و حداقل جریان های مذکور در این حالت می باشد.



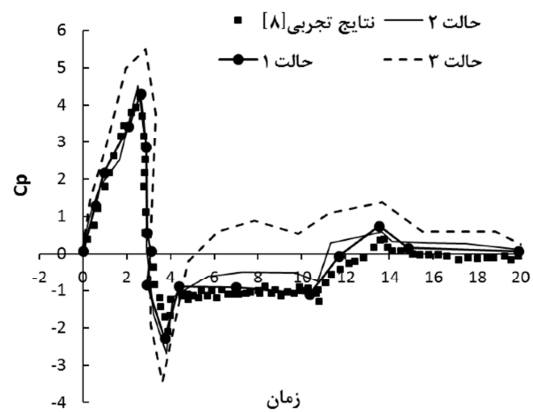
شکل ۸- جرم هوای ورودی و خروجی از کانال های تهویه در طول تونل

۴-۲- اثرات تعداد کانال های تهویه بر جریان هوای خروجی از تونل مترو

همانند بخش قبلی جرم جریان هوای خروجی از تونل در مدت شروع حرکت قطار تا توقف آن در جدول ۲ بیان شده است. طبق این جدول نزدیکترین کانال به خروجی تونل یا به عبارتی آخرین کانال تهویه ای در تونل دارای بیشترین جرم هوای خروجی از آن را داراست و همچنین در کانال های نزدیک تر به ورودی تونل مقدار جریان هوای خروجی کاهش می یابد. این مطلب نیز به وضوح در نمودار مربوط به شکل ۸ مشخص است. جریان هوای خروجی برای مجموع کانال های



شکل ۶- مقایسه تغییرات C_p بین نتایج تجربی و عددی در محل نصب PT2 (فشارسنج ۲)



شکل ۷- استقلال از شبکه با مقایسه تغییرات C_p بین نتایج تجربی و عددی در محل نصب PT1 (فشارسنج ۱)

برای اینکه استقلال از شبکه نتایج به دست آمده، نمایش داده شود، تعداد مش ها در سه تعداد و حالت زیر برای محدوده محاسباتی شبکه بندی شده است:

- ۱) شبکه بندی ریز (حالت ۱): ۲۶۷۷۲
- ۲) شبکه بندی متوسط (حالت ۲): ۱۴۹۶۰
- ۳) شبکه بندی درشت (حالت ۳): ۷۸۶۵

در سه شبکه بندی فوق مقایسه تغییرات C_p بین نتایج تجربی و عددی در محل نصب PT1 (فشارسنج ۱) به صورت شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، نتایج در دو حالت ۱ و ۲ با دقت بسیار خوبی با داده های تجربی مطابقت دارد. بنابراین به منظور صرفه جویی در هزینه محاسباتی، شبکه بندی متوسط (حالت ۲) برای تحلیل مسئله استفاده می شود.

۴- نتایج عددی

۴-۱- اثرات تعداد کانال های تهویه بر جریان هوای ورودی به تونل مترو

در این بخش از مقاله حاضر به بررسی میزان تغییرات جرم هوای ورودی و خروجی به تونل از طریق کانال های تهویه، در مدت حرکت قطار تا توقف آن، در حالت های مختلف موجود پرداخته می شود.

موجود در حالات مورد بررسی، "حالت ۳" بیش‌ترین خروجی و "حالت ۱" کمترین خروجی را دارد.

جدول ۲- جرم جریان هوای خروجی (Kg) در کانال‌های تهویه برای حالات مورد بررسی

حالت	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
کانال ۱	۰/۰۶۵۹	۰/۰۳۵۲	۰/۰۲۵۱
کانال ۲	۰/۲۷۹۱	۰/۱۰۸۵	۰/۰۵۴۹
کانال ۳	—	۰/۱۳۸۱	۰/۰۸۰۴
کانال ۴	—	۰/۱۶۹۲	۰/۰۹۶۸
کانال ۵	—	—	۰/۱۰۶۲
کانال ۶	—	—	۰/۱۰۷۸
مجموع کانال‌ها	۰/۳۴۵۰	۰/۴۵۱۰	۰/۴۷۱۲

ذکر این نکته حائز اهمیت است که اختلاف موجود در مجموع هوای ورودی و خروجی برای کانال‌های تهویه، از طریق قسمت ورودی یا خروجی تونل جبران می‌شود. در ابتدا و انتهای تونل یا همان محل ایستگاه‌ها دستگاه‌هایی برای تهویه مطبوع مجموعه مترو تعبیه شده اند، و هرچه کانال‌های تهویه طبیعی میزان بیشتری از هوای تونل را وارد یا خارج نمایند از میزان مصرف انرژی توسط دستگاه‌های مذکور کاسته می‌شود.

۴-۳- عملکرد کانال‌های تهویه طبیعی در تونل مترو

در جدول ۳ به مقایسه میزان جریان ورودی به تونل یا خروجی از آن، از طریق کانال‌های تهویه نصب شده پرداخته و درصد افزایش یا کاهش جریان‌های هوایی "حالت‌های ۲ و ۳" در مقایسه با "حالت ۱" که با تعبیه دو کانال در تونل شکل غالب تونل‌های مترو می‌باشد، بیان می‌گردد.

جدول ۳- تغییرات درصد جرم هوای ورودی و خروجی به تونل از طریق کانال‌های تهویه در حالات جدید مورد بررسی

حالت	حالت ۲	حالت ۳
در صد افزایش جرم هوای ورودی	۱/۵۰	۱/۲۲
در صد افزایش جرم هوای خروجی	۳۰/۷۲	۳۶/۵۸

با توجه به جدول ۳ جریان هوای خروجی از تونل در "حالت ۳" بیشترین میزان افزایش را نسبت به "حالت ۱" داشته و در حدود ۳۶/۶ درصد عملکرد خروجی کانال‌ها را افزایش داده است. در "حالت ۲" این افزایش برابر ۳۰/۷۲ درصد می‌باشد. برای جریان هوای ورودی، در "حالت ۲" افزایش ۱/۵۰ درصدی وجود داشته و در "حالت ۳"، ۱/۲۲ درصد به جریان ورودی افزوده شده است که در برابر افزایش میزان عملکرد تخلیه ای کانال‌ها ناچیز می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر تغییرات به وجود آمده در تهویه طبیعی تونل‌های مترو از طریق تعبیه تعداد کانال‌های تهویه مرسوم و افزایش تعداد این کانال‌ها، به صورت جداول و اشکال متنوعی نشان داده و میزان

جریان هوای ورودی و خروجی تونل مترو بیان گردید و به منظور تعیین مقادیر مذکور، روش‌های محاسبات عددی، مدل‌های توبولانس و هندسه مناسب تعیین شد.

در ادامه به برخی از نتایج و نکات مهمی که در خلال این پژوهش بدست آمده اشاره می‌شود:

(۱) به ازای مجموع مساحت ثابتی از مقاطع کانال‌های تعبیه شده در تونل، تعداد کانال‌های مذکور تأثیر نسبتاً ناچیزی بر میزان هوای مکیده شده به داخل تونل دارند.

(۲) حداکثر جریان ورودی به تونل از طریق کانال‌های تهویه در "حالت ۲" رخ داده و به میزان ۱/۵۰ درصد بیش تر از "حالت ۱" یا تعداد مرسوم کانال تهویه طبیعی در تونل‌های مترو می‌باشد.

(۳) برخلاف عبارت (۱) میزان هوای خارج شده از تونل به وسیله کانال‌های تهویه به شدت تحت تأثیر تعداد کانال‌ها بوده، به طوری که "حالت ۳" دارای بیش‌ترین جریان خروجی از کانال‌های مذکور است.

(۴) حداکثر جریان خروجی از تونل و از طریق کانال‌های تهویه در "حالت ۳" رخ داده و در حدود ۳۶/۶ درصد بیش تر از "حالت ۱" یا تعداد مرسوم کانال تهویه طبیعی در تونل‌های مترو می‌باشد.

(۵) با افزایش فاصله بین کانال تهویه و ورودی تونل، دبی جریان مکش از طریق کانال کاهش قابل توجهی یافته در حالی که دبی جریان خروجی از طریق کانال تا حد زیادی افزایش می‌یابد، یعنی محل تعبیه کانال تأثیر به‌سزایی در مکش و دمش توده جریان از طریق کانال تهویه دارد.

۶- نمادها

ضریب فشار	C_p
عدد کورانت	CLF
نیروهای حجمی (N)	F_i
تولید انرژی آشفتگی به علت گرادیان سرعت	G_K
تولید انرژی جنبشی به علت بویانسی	G_b
اثرات تغییرات سریع	R_ε
فشار (Pa)	P
فشارسنج	PV
نرخ کرنش لزجی (s^{-1})	S_{ij}
مولفه‌های سرعت کارتزین (m/s)	$u_{i,j,k}$
سرعت ماکزیمم قطار (m/s)	U_{T-Max}
سرعت سنج	VT
مولفه‌های مختصات کارتزین	$x_{i,j,k}$
بیانگر سهم انبساط مقادیر نوسانی در جریان تراکم پذیر آشفتگی به نرخ اتلاف کلی	Y_μ
گام زمانی (s)	Δt
گام مکانی (m)	Δx
اعداد پیرانتل موثر معکوس برای k	α_k
اعداد پیرانتل موثر معکوس ε	α_ε

δ_{ij}	دلتای کرونیگر
μ_{eff}	لزجت موثر ($Pa \cdot s$)
ρ	چگالی (kg/m^3)

۷- مراجع

- [1] Yuan F.D., You S.J., CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22 (4), pp. 474–482, 2007.
- [2] Hai T.B., Study of piston wind in subway tunnel based on numerical simulation, In: *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*, Chengdu, China, (2010).
- [3] Ke M.T., Cheng T.C., Wang W.P., Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system, *Building and Environment*, 37(11), pp. 1139–1152, 2002.
- [4] Yang H., Jia L., Yang L., Numerical simulation of the impact of both air conditioning system and trains movement on platform air temperature distribution, In: *Proceedings of the ASME 2008 Heat Transfer Summer Conference*, ASME Paper HT2008-56201, (2008).
- [5] El-Bialy E.M., Khalil E.E., Experimental and numerical investigation of indoor environmental quality in a subway station, In: *Proceedings of the Tenth International Congress of Fluid Dynamics*, Paper ICFD10-EG-3160, 2010.
- [6] Wang Chun., Li Qingjian., Numerical simulation of air distribution of different ventilation strategy designed for environmental control of metro station". *China Railway Science*, 28 (3), pp. 93–98, 2007.
- [7] Li, J., Peng, H.L., Sh, J., "Numerical simulation of flow characteristics in bi-directional subway tunnel, *Journal of Thermal Science and Technology*, 5(4), pp. 331–334, 2006.
- [8] Kim J.Y., Kim K.Y., Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, pp. 166–172, 2007.
- [9] Kim J.Y., Kim K.Y., Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97, pp. 174–179, 2009.
- [10] Gonzalez M.L., Vega M.G., Oro F.J.M., Marigorta E.B., Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, pp. 22–37, 2014.