

شبیه‌سازی انتشار آلودگی لکوموتیو ER24PC در تونل قطار خط تهران-تبریز

محمد رضا طلائی^{۱*}؛ مسعود فرجی^۲

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.3340.1232

واژگان کلیدی	چکیده
تهویه تونل آلاینده‌های لکوموتیو تونل تهران - تبریز قطار متحرک مش دینامیکی	شبیه‌سازی جریان سیال درون تونل روشی مناسب برای مطالعه و بررسی پراکنش آلاینده‌ها و ارزیابی راندمان تهویه تونل می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تونل خط تهران - تبریز که دارای طول ۸ کیلومتر است و از آن لکوموتیو ER24PC عبور می‌کند، پرداخته می‌شود. این تونل به دلیل طولی بودن و عبور قطارهای دیزل و لزوم خروج گازهای حاصل از احتراق موتور دیزل، تأمین هوای تازه برای مسافران و تأمین دمای مناسب برای سیستم موتور و کندانسورهای تهویه قطار حائز اهمیت است. در تحلیل عددی از نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. براساس استاندارد آلاینده‌های EU III A مقادیر محصولات احتراقی خروجی از لکوموتیو به دست آمده و در جعبه ابزار، جزء انتقالی نسبت مولار آلاینده‌های خروجی از لکوموتیو ER24PC در نرم‌افزار وارد شده است. در حالت بحرانی دو قطار در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است که با سرعت 50 km/h با استفاده از مش دینامیکی و وارد کردن کد حرکتی UDF، در دو خط به سوی یکدیگر حرکت می‌کنند. شبیه‌سازی با مدل آزمایشگاهی گزارش شده در مقالات تایید شده و عملکرد سیستم تهویه و حرکت قطار در پخش آلاینده‌ها و توزیع دما در طول تونل بررسی شده است.

۱- مقدمه

(*et.al.*, 2016) اثر انواع پارامترهای مختلف در سرعت بحرانی داخل تونل را با استفاده از شبیه‌سازی با نرم افزار FDS مورد بررسی قرار دادند. کارکی و همکاران (Karki, et.al., 2000) توسعه و اعتبار مدل CFD را برای شبیه‌سازی سیستم تهویه طولی با استفاده از جت فن‌ها بررسی کردند. آن‌ها کد سه‌بعدی کامپکت را برای شبیه‌سازی به کار بردند. آن‌ها فرآیند احتراق را شبیه‌سازی نکردند و آتش را به عنوان منبع گرما و جرم در نظر گرفتند. چن و همکاران (Chen, et.al., 2003a) کد کامپیوتری CFX4 با استفاده از حجم محدود را برای تحلیل کارایی سیستم تهویه ایستگاه مترو گونگ گان بکار بردند. در این شبیه‌سازی با صرف نظر از احتراق، آتش به عنوان منبعی از گرما، دود و CO_2 شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد انتخاب مدل آشفستگی نقش بحرانی در بهتر شدن

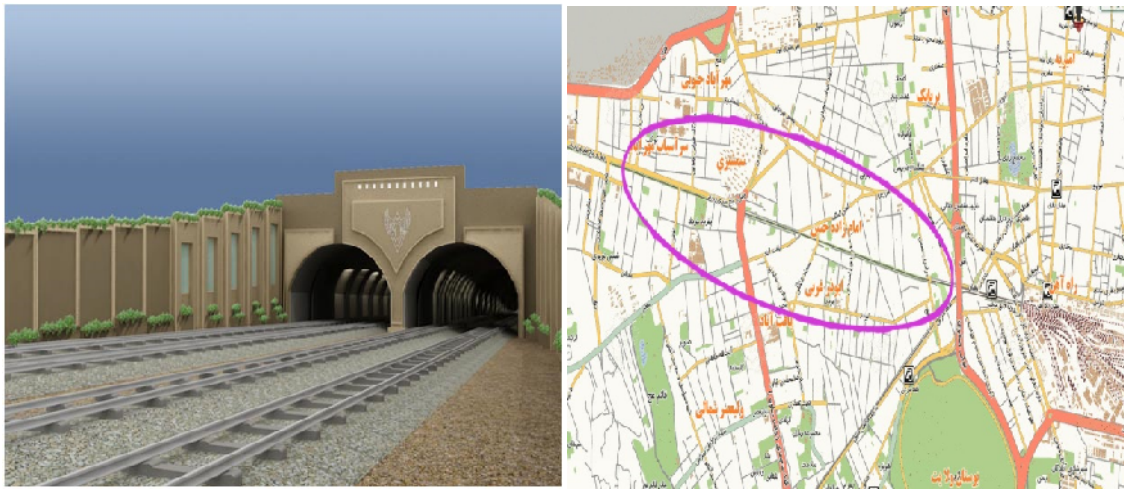
در افزایش جمعیت شهرها و لزوم استفاده هرچه بیش‌تر از سیستم‌های حمل و نقل در دهه‌های اخیر منجر به افزایش تعداد تونل‌ها و معبرهای زیرزمینی حمل و نقل شده است که این امر نشان‌دهنده ضرورت طراحی سیستم تهویه مناسب برای تولید آسایش مسافری در این مکان‌ها می‌باشد. بررسی و نحوه گسترش دود در یک لکوموتیو دیزل در فضای بسته‌ای مانند تونل یکی از مسائل مهم در کشورهای در حال توسعه می‌باشد این مساله بویژه در فضاهایی که میزان تولید آلاینده‌ها در آن‌ها زیاد بوده و یا دهانه ارتباطی آن‌ها با هوای آزاد فاصله زیاد می‌گیرد، حائز اهمیت است. بررسی رفتار آتش و دود و تعیین پارامترهای مؤثر بر آن در عملکرد بهینه سیستم تهویه مؤثر است. مونسان و همکاران (Mounesan,

بردند. نتایج نشان داد که اثر پیستونی قطار دما را کاهش می‌دهد. آن‌ها همچنان اثر سطح مقطع و طول مجرای تهویه و تغییر فشار ناشی از حرکت قطار را بررسی کردند. در این مقاله با توجه به شرایط خاص و استثنائی تونل تهران - تبریز به بررسی عملکرد سیستم تهویه آن پرداخته می‌شود. این تونل بزرگ با چهار خط و طول ۸ کیلومتر در داخل محیط شهری در ورودی به ایستگاه مرکزی تهران قرار گرفته و بمنظور عبور انواع لکوموتیوهای دیزلی از آن بهره‌برداری می‌گردد و لذا توزیع آلاینده‌ها درون آن حائز اهمیت است. نوع تونل مورد بررسی از نوع گود برداری و پوشش دهی (Cut and Cover) بوده و تهویه طولی از نوع دمنده مکنده (Push Pool) در آن برقرار است. این تونل با طول هشت کیلومتر یکی از بزرگترین تونل‌های در نوع خود می‌باشد و هم اکنون حتی بدون نصب سیستم تهویه در حال بهره‌برداری در دو خط می‌باشد و آلاینده‌های قطار در اثر موج حرکت قطار در طول تونل توزیع می‌گردد. لذا هدف این مقاله بررسی توزیع آلاینده‌های درون تونل در زمان تهویه خاموش در اثر حرکت قطار بوده و در ادامه اثر سیستم تهویه بر توزیع آلاینده‌ها نیز تعیین شده است. همچنین برای اولین بار در این پژوهش با بهره‌گیری از مش دینامیکی در نرم‌افزار فلوئنت، لکوموتیو ER24PC (زیمنس) بصورت سه بعدی و متحرک شبیه‌سازی شده و توزیع آلاینده‌های خروجی از آن بصورت نقطه متحرک در طول و عرض تونل بررسی و تاثیر حرکت قطار بر نحوه پخش CO تعیین گردیده است.

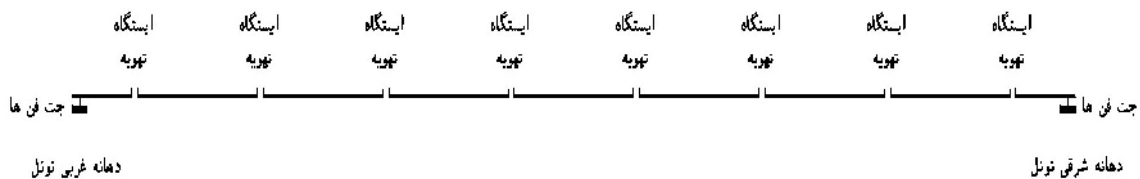
۲- روند شبیه‌سازی

تونل مربوطه در محدوده منطقه ۱۷ شهرداری تهران واقع شده است، که طول تونل ۸ کیلومتر با مقطع مستطیلی می‌باشد. عرض داخلی زیرگذر ۲۱ متر، ارتفاع گاباری ۷٫۷ متر می‌باشد. این تونل به جهت خارج کردن محدوده شهری از قرارگیری ناحیه جزیره ای در بین دو خط راه‌آهن تهران - اهواز و تهران - تبریز همانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، در خط تهران تبریز ایجاد شده است. سیستم تهویه تونل، طولی از نوع دمنده مکنده با هشت ایستگاه تهویه با فاصله تقریبی ۱۰۰۰m از یکدیگر است. شماتیک نوع سیستم تهویه طولی تونل در شکل ۲ ارائه شده است.

شبیه‌سازی دارد. چن و همکاران (Chen, et.al, 2003b) اثرهای انباشتگی دود را در ایستگاه مترو گونگ گان چین، با مدل کردن سه بعدی جریان دود بررسی کردند. به منظور بررسی اثر انباشتگی دود از هیچ سیستم تهویه طبیعی مکانیکی در طول محاسبات استفاده نشد. نتایج بررسی نشان داد که دو عامل مساحت و موقعیت بر انباشتگی دود در ایستگاه‌های زیر زمینی تاثیر می‌گذارند. در نتیجه این بررسی ابتدا عامل موقعیت باعث حرکت دود به سمت نزدیک‌ترین خروجی و سپس در صورت نبود این عامل، دود در نتیجه عامل مساحت به سمت خروجی با مساحت کمتر حرکت می‌کند. ریکو و همکاران (Ricco, et.al, 2007) خصوصیات موج‌های فشاری تولید شده توسط حرکت سریع قطار در داخل تونل را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنان بررسی عددی را با استفاده از یک کد یک بعدی با در نظر گرفتن اثرات لزجت به انجام رساندند، نتایج حاصل از بررسی آن‌ها حاکی از آن بود که حداکثر فشار (قله‌های نمودار فشار) وابستگی شدیدی به سرعت قطار و شکل دماغه دارد. کوللا و همکاران (Colella, et.al., 2009) یک مدل دو مقیاسه برای جریان تهویه در تونل‌ها ایجاد کردند. در این روش یک بعدی برای نواحی که در آن جریان توسعه یافته است، به کار می‌رود و در دیگر نواحی معادلات سه بعدی جریان سیال با جزئیات حل می‌شوند. هو و همکاران (Hu, et.al, 2008) سرعت بحرانی را برای آتش‌های نزدیک دیوار تونل مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هنگامی که منبع آتش در کنار دیواره است نسبت سرعت بحرانی بیشتری برای جلوگیری از برگشت و انتشار دود به بالادست، نسبت به زمانی که آتش در مرکز باشد نیاز است. سای و همکاران (Tsai, et.al, 2010) این پارامتر را برای دو آتش با فواصل مختلف مورد بررسی قرار دادند که برای دو آتش مجزا، سرعت بحرانی با جدایش آن‌ها کاهش می‌یابد. سای و همکاران (Tsai, et.al, 2011) تحقیق روی سرعت بحرانی را برای آتش نزدیک خروجی تونل انجام دادند و نشان دادند که با نزدیک شدن آتش به خروجی تونل، سرعت بحرانی کاهش می‌یابد. کی و همکاران (Ke, et.al., 2002) برنامه شبیه‌سازی محیط مترو (Subway Environment Simulation (SES)) را همراه با نرم‌افزار تجاری فونیکس (PHONICS) برای بیان اثر شرایط مختلف عملکردی در محیط مترو به کار



شکل ۱- نقشه موقعیت تونل و طرح دهانه یکی از ورودی های آن



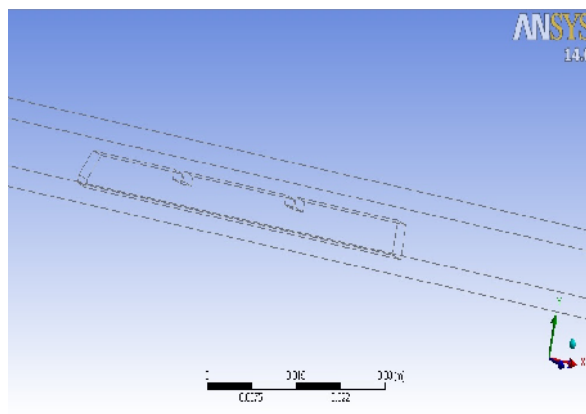
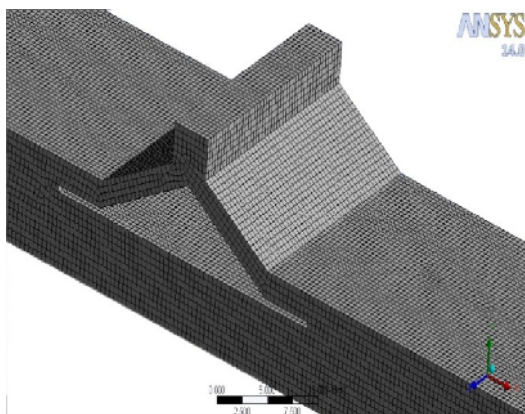
شکل ۲- شماتیک سیستم تهویه طولی تونل تهران تبریز

شرط مرزی سرعت ورودی با توجه به دبی هوای جریان یافته در بین دو ایستگاه تهویه و مقطع تونل در نظر گرفته شده، و در خروجی تونل شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است تا مدلساز تقریبی از حالت تهویه دمنده-مکنده در تونل باشد.

۲-۱- مدلسازی احتراق در لکوموتیو

در این پژوهش لکوموتیو به‌عنوان یک آلاینده نقطه‌ای متحرک به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در ادامه محاسبه و تخمین میزان نسبت مول محصولات احتراقی خروجی از لکوموتیو-دیزل ER24PC ارائه می‌گردد.

برای مدلسازی تونل مذکور، ابتدا هندسه تونل و قطار در نرم افزار گمبیت ترسیم و مش بندی شده که در شکل ۳ نشان داده شده است، سپس مدل مش زده شده با نرم افزار تجاری فلونت شبیه سازی شده است، برای مدلسازی گاز خروجی اگزوز قطار از مدل احتراقی سوخت دیزل در لکوموتیو زیمنس در حالت حرکت با سرعت مجاز 50 km/hr با توجه به استاندارد *EUIII* استفاده شده است. با توجه به این که در این مقاله هدف بررسی اثر حرکت لکوموتیو در انتشار آلاینده ها در تونل می باشد، لذا تنها طول ۲۰۰ متر از تونل در نظر گرفته شده است تا با توجه به انتخاب روش مش دینامیک برای قطار متحرک میزان زمان لازم برای محاسبات کاهش یابد و در ورودی تونل



الف- مدل شبیه‌سازی شده لکوموتیو و دو واگن در نرم‌افزار (ب) مدل مش زده‌شده در گمبیت در ناحیه ایستگاه تهویه

شکل ۳- شکل مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار Fluent

$$\frac{207 \left(\frac{gr}{kw} \right) * 750 kw}{3600 \left(\frac{s}{hr} \right) * 170 \left(\frac{kg}{kmol} \right)} = 0.254 mol/s \quad (3)$$

با توجه به استاندارد حاکم برای لکوموتیوهای ER24PC یعنی *EU: Nonroad Emission stage 3* نرخ آلاینده‌های مجاز لکوموتیو در حالت غیرپایدار، حالت بحرانی حرکت (هنگامی که قطار در تونل متوقف شده و سپس شروع به حرکت می‌کند) به میزان ارائه شده در جدول ۱ است (*EU Emission Standards EeroIII*).

جدول ۱- نرخ مجاز آلاینده‌های در تونل بر اساس استاندارد EUIII

آلاینده مضر	مقدار مجاز طبق استاندارد	مقدار مول مصرفی موتور در توان ۷۵۰ KW
CO	5.45 gr/kw.hr	0.041 mol/s
NO ₂	3.5 gr/kw.hr	0.0158 mol/s
NO	1.5 gr/kw.hr	0.01 mol/s
HC	1.6 gr/kw.hr	0.002 mol/s

با توجه به مقادیر مول محصولات احتراقی (*mol/s*) ۰٫۲۵۴ از سوخت دیزل سنگین به صورت زیر نوشته می‌شود:

طبق کاتالوگ‌های شرکت MTU در حالتیکه لکوموتیو با ماکزیمم سرعت خود یعنی $160 km/h$ حرکت کند، توان مصرفی موتور برابر 2400 کیلووات خواهد بود (*Disel Engin model 16V 4000 R43L*) اگر نسبت توان به سرعت به صورت رابطه خطی فرض شود، با یک تناسب ساده بدست می‌آید که برای سرعت $50 km/h$ (که سرعت قطار در تونل می‌باشد) توان مصرفی در حدود 750 کیلووات می‌باشد. طبق کتاب‌ها و اسناد موجود در مورد موتور دیزل اگر بازده احتراق را 95% درصد و بازده ژنراتور را 41% درصد در نظر گرفته شود (*Pulkrabek, 1997*)، انرژی ورودی به موتور به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{750}{0.95 * 0.41} = 1924 kw \quad (1)$$

ارزش حرارتی سوخت دیزل 44800 کیلوژول بر کیلوگرم می‌باشد (*Pulkrabek, 1997*). لذا نرخ مصرف سوخت بر اساس ارزش حرارتی و جرم مولکولی سوخت دیزل تعیین می‌گردد.

$$\frac{1924 kj/s}{44800 (kj/kg) * 170 (kg/kmol)} = 0.252 mol/s \quad (2)$$

البته محاسبه نرخ مصرف سوخت با توجه به مصرف ویژه سوخت که در کاتالوگ‌های شرکت مپنا ($207 [gr/kw.hr]$) (*Disel Engin model 16V 4000 R43L*) ارائه شده نیز به صورت ذیل انجام‌پذیر است، که نشان دهنده انطباق کافی می‌باشد.

۲-۲- حدود استاندارد آلاینده‌ها بر انسان

اصلی‌ترین آلودگی برای سلامتی و ایمنی انسان منواکسید کربن است. بنابراین اولین حد مجاز استاندارد برای این گاز وضع شده است. با افزایش تکنولوژی و بهینه کردن آلاینده‌های خروجی از اگزوز موتورها، گازهای مضر برای تنفس کاهش یافته است به طوری که بر اساس کاتالوگ‌های شرکت مینا (Disel Engin model 16V 4000 R43L)، آلاینده‌های خروجی از اگزوز لکوموتیو ER24PC حدود ۲۰ درصد لکوموتیو GT26 قدیمی است. براساس استانداردهای محیط زیست (NFPA 130, 2014) مقدار مجاز گاز CO برای تنفس انسان در جدول ۳ آورده شده است.

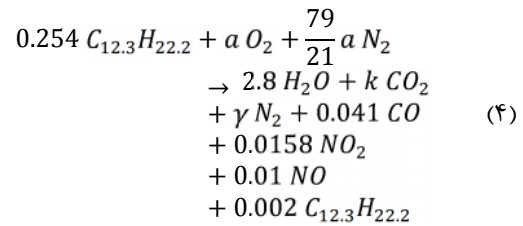
جدول ۳- حدود مجاز CO

حد مجاز ppm	زمان تنفس (دقیقه)
۳۵	۶۰
۴۵	۴۵
۶۵	۳۰
۱۲۰	۱۵

۲-۳- سناریو و مدلسازی حرکت قطار در تونل

عامل اصلی ورود آلاینده به داخل تونل، آلاینده‌های خروجی از اگزوز لکوموتیو است. سناریوهای مدل مورد بررسی در اینجا دو حالت حرکت لکوموتیو درون تونل در حالت تهویه خاموش و حالت تهویه روشن می باشد. بر این اساس مدلسازی تونل با شرایط مرزی فشار محیطی در ورودی‌ها بوده است و لذا هدف این مطالعه بررسی انتشار آلاینده‌ها در تونل به جهت حرکت لکوموتیو دیزل در آن می باشد.

به منظور بررسی توزیع آلاینده‌ها در تونل برای قطار متحرک، ابتدا هندسه (Geometry) مدل در نرم‌افزار گمبیت رسم و مش‌بندی شده است (شکل ۳). مدل مش زده شده به نرم‌افزار فلونت وارد شده و عمل شبیه‌سازی بر روی آن انجام می‌گیرد. در تحلیل عددی از نرم‌افزار فلونت استفاده شده و طول ۲۰۰ متر از تونل مدل شده است. براساس استاندارد آلاینده‌ی EU III A مقادیر محصولات احتراقی خروجی از لکوموتیو به دست آمده و در جعبه ابزار، جزء انتقالی از (transport species) نسبت مولار آلاینده‌های خروجی از



که با موازنه واکنش ضرایب مجهول به دست می‌آید:

$$k = 3.06, \gamma = 16.91, a = 4.5$$

مقدار مول هوای اضافه ورودی به موتور دیزل را ۳۰

درصد مول هوا معادله احتراق در نظر گرفته شده است.

$$excess\ air: 0.3 * a = 1.35\ mol/s \quad (5)$$

به این ترتیب مجموع مول‌های محصولات احتراق و با توجه به مجموع مول‌ها، دبی حجمی آلاینده‌های خروجی از اگزوز لکوموتیو از حاصل جمع مول‌های فرآورده‌های واکنش با ضرب در چگالی هوا به طریق زیر به دست می‌آید:

$$n = 24.19\ mol/s \quad (6)$$

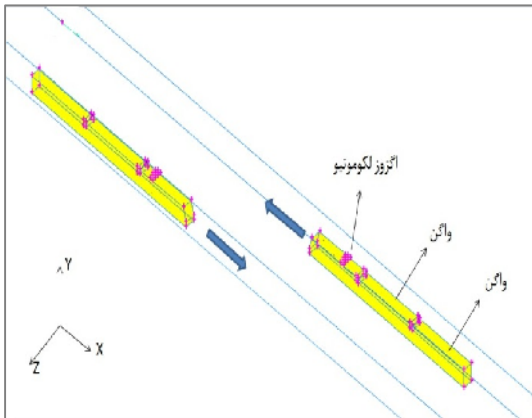
$$\frac{24.19\ (mol/s) * 28.96 * 10^{-3}\ (kg/mol)}{1.22\ kg/m^3} = 0.58\ m^3/s \quad (7)$$

در نهایت نسبت مول‌های محصولات احتراق که برابر

نسبت حجمی هر جزء می باشد، طبق جدول ۲ ارائه می‌شود:

جدول ۲- نسبت مول‌های آلاینده‌های خروجی از دیزل جهت وارد کردن در نرم‌افزار

آلاینده‌های خروجی از موتور لکوموتیو	درصد مولی آلاینده‌ها
CO	0.0017
CO ₂	0.1265
NO	0.00041
NO ₂	0.00065
H ₂ O	0.11575
N ₂	0.699
C _{12.3} H _{22.2}	0.00008
air	0.05591
Sum	1



شکل ۴- مدل سه بعدی ساخته شده در نرم افزار گمبیت

۴-۲- معادلات حاکم

معادله بقاء جرم یا پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شود (White, 2003):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (8)$$

معادله گذرای ناویر-استوکس (Navier-stokes Equations (NSE)) برای جریان تراکم‌ناپذیر و بدون نیروهای خارجی به شکل زیر است:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (9)$$

که در آن ρ ، u_i ، P و μ به ترتیب چگالی جریان، سرعت در جهت i ، فشار استاتیکی و لزجت جریان می‌باشند.

حل عددی مستقیم (Direct Numerical solution (DNS)) معادله ناویر استوکس به ظرفیت محاسباتی خیلی زیادی دارد و به ندرت در تحقیقات مهندسی به کار می‌رود. در اینجا از روش میانگین زمانی استفاده می‌شود و مقادیر لحظه‌ای متغیرهای میدانی جریان در معادله ناویر استوکس به صورت مجموع ترم متوسط زمانی متغییر و ترم نوسانی مربوطه نوشته می‌شود.

معادله انرژی از قانون اول ترمودینامیک به دست می‌آید که بیان می‌کند نرخ تغییر انرژی دو سیال برابر است با نرخ حرارت اضافه‌شده بر روی ذره و نرخ افزایش ناشی از منابع انرژی. بدین ترتیب معادله انرژی عبارت است از:

لکوموتیو ER24PC در نرم‌افزار وارد شده است. برای شبیه سازی از مدل آشفتگی $k-\omega$ استفاده شده و همچنین به منظور در نظر گرفتن نرخ آلاینده‌ها از خروجی اگزوز دیزل از جعبه ابزار *transport species* استفاده شده است و ضریب مول‌هایی که از حل معادله سوخت دیزل به دست آورده شده (جدول ۲) در این مرحله در قسمت شرایط مرزی قطار، وارد نرم‌افزار شده است.

به منظور در نظر گرفتن نیروی شناوری برای جریان دود در حل، شتاب گرانش به مساله وارد شده، که این کار در پنجره‌ی شرایط مرزی (Operating Condition) انجام گردید و از روش ناپایدار (unsteady) برای حل استفاده شده است. در قسمت شرایط مش دینامیکی به دو مرز دیواره قطار و خروجی اگزوز قطار کد UDF اعمال شده و این دو مرز با سرعت 14 m/s به صورت یک پارچه (Rigid body) متحرک مدل شده‌اند. شرط مرزی ورودی تونل، سرعت ورودی (Velocity inlet) در نظر گرفته شده است که به منظور بررسی در حالت تهویه خاموش سرعت را 0.1 m/s و به منظور بررسی در حالت تهویه روشن، سرعت جریان در هوای ورودی 1 m/s در نظر گرفته شده است و در خروجی تونل شرط مرزی فشار خروجی (Pressure outlet) اعمال شده است. این سرعت با توجه به سطح مقطع تونل ($21 \times 7.7 \text{ m}^2$) و دبی فن‌های دمنده و مکنده و طراحی شده دو سمت مدل تونل (حدود $3 \text{ m}^3/\text{hr}$ یا $90 \text{ m}^3/\text{s}$) انتخاب شده است تا مدلساز تقریبی از عملکرد سیستم تهویه دمنده-مکنده بوده و بتوان در این حالت به بررسی توزیع آلاینده‌ها در اثر حرکت قطار نیز پرداخت لذا تنها طول 200 متر از تونل در نظر گرفته شده است تا با توجه به انتخاب روش مش دینامیک برای قطار متحرک میزان زمان لازم برای محاسبات کاهش یابد. در مدل در نظر گرفته شده که دو لکوموتیو به همراه دو واگن در این مقطع در حال حرکت به سمت هم با سرعت 50 km/h همانند آنچه در شکل ۴ نشان داده شده هستند.

هستند، بهتر عمل می‌کند. مدل‌های $k - \varepsilon$ از آنجا که از دسته مدل‌های رینولدز بالا می‌باشند (یعنی فقط در نواحی با عدد رینولدز پائین محسوب می‌شوند)، با مشکلات عدیده‌ای مواجه می‌شوند ولیکن مدل $k - \omega$ Wilcox را می‌توان برای پیش‌بینی تغییرات متغیرهای آشفتگی تا لب دیوارهای جامد (و البته با استفاده از المان‌های متراکم نزدیک دیواره) مورد استفاده قرار داد. بعد از گسسته‌سازی معادلات حاکم، برای حل معادلات از حل‌کننده segregated نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. با استفاده از این حل‌کننده معادلات حاکم به‌طور متوالی حل می‌شوند. بعد از معادله بقای جرم، معادله بقای جرم، معادله تصحیح فشار (بقای جرم) و بعد از آن آشفتگی و دیگر کمیت‌های اسکالر تعریف نشده حل می‌شوند و کلیه این مراحل در هر گام زمانی تکرار می‌شود. برای مرتبط کردن معادلات فشار و بقای جرم الگوریتم سیمپل (Simple Algorithm) به کار رفت. این الگوریتم یک روش حدس و تصحیح برای فشار و بقای جرم است که برای محاسبه جریان آرام، پایا و دو بعدی تشریح می‌شود. بنابراین با استفاده از این الگوریتم معادلات سرعت و تصحیح فشار را به هم مرتبط شده است. روند تصحیح فشار در الگوریتم سیمپل به صورت زیر است:

- ۱) حدس اولیه برای میدان سرعت و فشار
- ۲) حل معادلات مومنوم
- ۳) تصحیح فشار و سرعت‌ها
- ۴) جایگذاری مقادیر فشار و سرعت تصحیح شده به عنوان حدس اولیه
- ۵) تکرار روند تا رسیدن به همگرایی

در صورتی که روش‌های جبری حل معادلات گسسته شده به یک سری متغیرهای غیر خطی وابسته اعمال شود، تغییرات در متغیرها در هر تکرار می‌تواند به اندازه‌ای بزرگ باشد که باعث ایجاد ناپایداری محاسبات گردد. برای جلوگیری از واگرایی در محاسبات یک ضریب مادون رهایی (Under Relaxation Factor) در طول روند تکرار استفاده می‌شود. ضریب مادون رهائی مطابق رابطه‌ی زیر در محاسبات وارد می‌شود:

$$\varphi = \gamma \varphi_{new} + (1 - \gamma) \varphi_{old} \quad (16)$$

در این رابطه γ معروف به ضریب مادون رهائی و مقدار آن کمتر از یک است. در این شبیه‌سازی مقدار کمیت γ

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(\rho u_i) + \frac{\partial(u_i \tau_{ji})}{x_j} + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (10)$$

که در آن E انرژی مخصوص سیال است و به صورت مجموع انرژی داخلی i ، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل تعریف می‌گردد. حالت عمومی مدل‌های $k - \omega$ از فرکانس آشفتگی ω به جای نرخ اضمحلال لزج ε برای مشخص کردن آشفتگی استفاده می‌کند. چنین مدل‌هایی به طور واضحی به انواع مدل $k - \varepsilon$ نزدیک و مرتبط هستند، در اینجا به بررسی نوع ویلکوکس مدل $k - \omega$ پرداخته شده است.

در مدل $k - \omega$ Wilcox، ارتباط بین مقیاس آشفتگی طولی و سرعتی یعنی δ_t و u_t با k و فرکانس آشفتگی ω توسط روابط (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده‌اند.

$$\delta_t \propto \sqrt{\frac{k}{\omega}} \quad (11)$$

$$u_t \propto \sqrt{k} \quad (12)$$

همان‌طور که دیده می‌شود، تغییری در روابط اساسی و طول مقیاس‌ها و ... دیده نمی‌شود.

فرکانس آشفتگی ω را می‌توان توسط عبارت $\varepsilon = \omega k$ به مقادیر k و ω مربوط ساخت و ویسکوزیته آشفتگی μ_t نیز توسط رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k}{\omega} \quad (13)$$

معادلات انتقال برای k و ω در مدل Wilcox در روابط (۱۴) و (۱۵) مشخص شده‌اند.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,j} \right)_{,j} + G + B - \rho \omega k \quad (14)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_j \omega_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \omega_{,j} \right)_{,j} + C_1 \frac{\omega}{k} G + C_1 (1 - C_3) \frac{\omega}{k} B - C_2 \rho \omega \quad (15)$$

مدل $k - \omega$ Wilcox نسبت به مدل استاندارد $k - \varepsilon$ در جریاناتی که شامل کاهش سرعت (Deceleration) و جدایش ناشی از گرادیان فشار معکوس

موردقبول قرار گیرد.

۲-۵- اعتبارسنجی حل

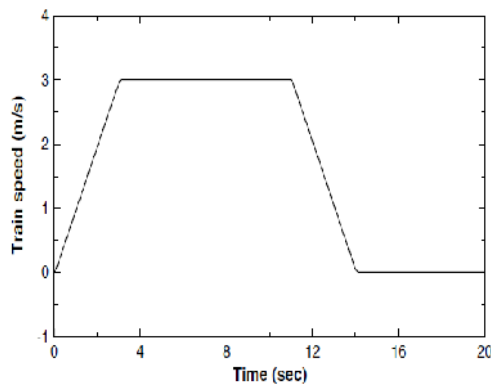
روش عددی به کار رفته در این مطالعه با استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی و مطالعه تجربی کیم و کیم (Kim & Kim, 2007) مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در این مدل، قطار با طول ۳ متر، عرض ۱۵۶ میلی‌متر و ارتفاع ۲۲۵ میلی‌متر درون تونلی با طول ۳۹ متر، عرض ۲۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر قرار دارد. قطار در موقعیت اولیه ۱/۵ متر از ابتدای تونل قرار دارد. که جزئیات مدل در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. در ابتدا قطار با شتاب $1 \text{ m}^2/\text{s}$ شروع به حرکت کرده و تا ثانیه سوم حرکت با همین شتاب ادامه می‌دهد، سپس با سرعت ثابت 3 m/s تا ثانیه ۱۱ به حرکت خود ادامه می‌دهد و بعد از آن با شتاب $-1 \text{ m}^2/\text{s}$ شروع به کاهش سرعت کرده تا توقف کند (شکل ۴).

در این مقاله برای اعتبارسنجی حل از تغییرات فشار در نقطه *PT1* به فاصله ۸٫۵ متر از ابتدا تونل استفاده می‌گردد که در شکل ۳ محل آن قابل ملاحظه می‌باشد. افزایش یا کاهش فشار به دلیل موج فشاری ناشی از تغییر در روند حرکت قطار می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، حل عددی ارائه شده هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی و عددی کیم (Kim & Kim, 2007) دارد.

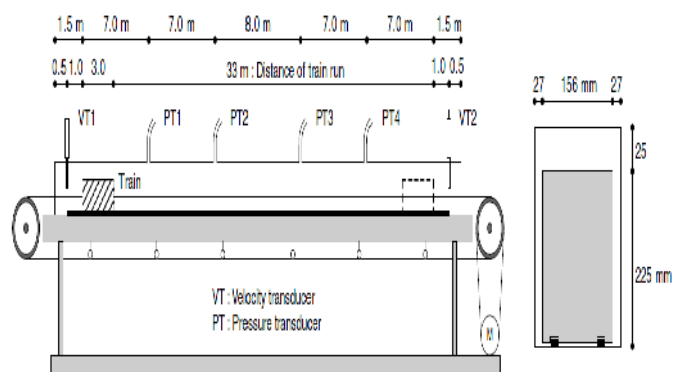
برای مؤلفه‌های سرعت بین $0.4 - 0.6$ برای مؤلفه‌های آشفستگی جریان بین $0.5 - 0.7$ و برای مؤلفه فشار بین $0.2 - 0.3$ انتخاب شده است.

مقادیر مورد استفاده در مدل نرم افزاری *Fluent-CFX* در مدل فوق در ادامه ذکر گردیده است. برای مدل‌سازی اغتشاشات در نزدیکی دیواره از توابع دیواره (*Standard Wall Function*) استفاده گردیده است. برای حل معادلات کوپل‌شده‌ی فشار - سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده گردید. دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت مخلوط به ترتیب گاز ایده‌آل و قانون اختلاط (*Mixing Law*) در نظر گرفته شد. روش‌های گسسته‌سازی (*Discretization*) برای معادلات عبارت‌اند از روش استاندارد برای معادلات فشار و اختلاف بالادست مرتبه‌دوم (*Second Order Upwind*) برای معادلات ممنتوم، انرژی جنبشی توربولانس، نرخ اضمحلال انرژی جنبشی توربولانس، ویسکوزیته توربولانس، انرژی و انتشار منواکسید کربن استفاده شده است.

معیار همگرایی مورد استفاده در این پروژه معیار باقیمانده خطا می‌باشد، بدین معنا که اختلاف بین دو جواب به‌دست‌آمده در دو تکرار متوالی که برحسب مقدار مطلق بزرگ‌ترین باقیمانده در پنج تکرار اول نرمال شده است از معیار تعیین‌شده کوچک‌تر باشد. در این پروژه مقدار باقیمانده خطا همواره باید کوچک‌تر از 10^{-4} باشد تا همگرایی جواب



ب) برنامه حرکت قطار در تونل

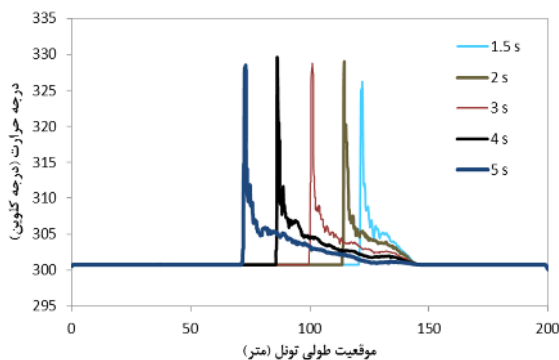


الف) مدل آزمایشگاهی حرکت قطار در تونل

شکل ۵- مدل آزمایشگاهی کیم (Kim & Kim, 2007)

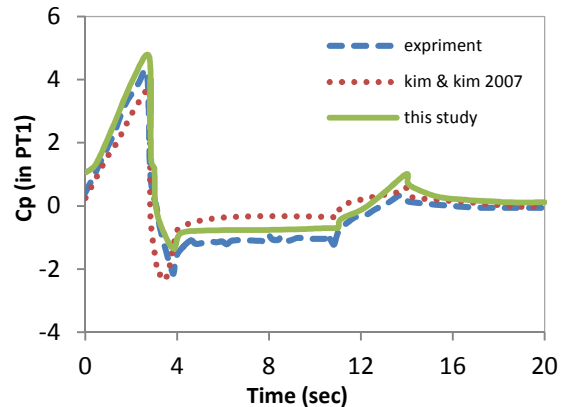
۳- نتایج شبیه سازی

در قسمت شبیه‌سازی مش دینامیکی همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است دو قطار با سرعت 50 km/h به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند. نتایج درحالتی که سیستم تهویه تونل خاموش است بررسی شده است. در شکل ۸ نمودار درجه حرارت در طول یک مسیر در تونل در ارتفاع 4.8 متر از کف در بالای بالای لوکومتیو در زمان‌های مختلف حرکت قطار اول رسم شده است. قطار اول از موقعیت $x = 140 \text{ m}$ با سرعت 14 m/s در جهت منفی x تونل حرکت کرده و در ثانیه دوم حرکت گازهای خروجی از آگزوز دارای ماکزیمم درجه حرارت 330 درجه کلون می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، به دلیل حرکت قطار به جلو، دبی خروجی از آگزوز به سمت عقب سوق پیدا کرده و لذا تا نقطه شروع حرکت قطار تأثیر توزیع درجه حرارت ناشی از گازهای احتراق ادامه دارد. با ادامه حرکت قطار درجه حرارت هوا در طول تونل افزایش پیدا می‌کند ولی تأثیر درجه حرارت تا نقطه آغازین حرکت لکومتیو همچنان ادامه دارد. نمودارها نشان دهنده توزیع دما و الاینده‌ی در تونل در اثر حرکت منبع آلاینده است.



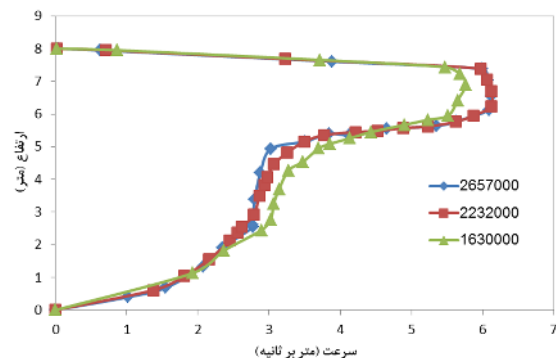
شکل ۸- نمودار درجه حرارت در طول تونل در زمان‌های مختلف حرکت قطار اول

همزمان با شروع حرکت قطار اول، قطار دوم نیز با همان سرعت 14 متر بر ثانیه از $x = 60 \text{ m}$ در جهت مثبت تونل شروع به حرکت می‌کند. در شکل ۹ نمودار درجه حرارت در طول تونل در زمان‌های مختلف حرکت برای قطار دوم در مسیر روبرو و کانتور

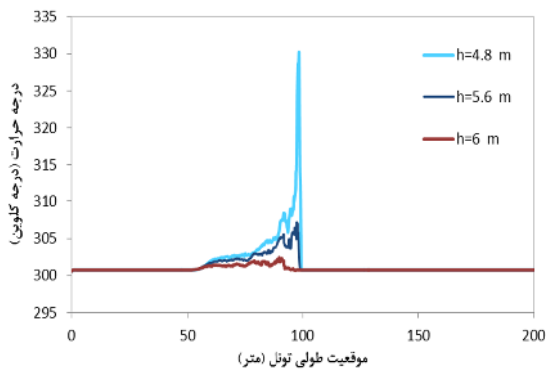


شکل ۶- اعتبار سنجی روش عددی مش دینامیک

برای بررسی استقلال حل از شبکه سناریویی شبیه‌سازی گردیده است که در این سناریو دبی تزریقی نازل ساکاردو برابر 700 مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. شیب تونل صفر لحاظ گردیده است و سه شبکه مختلف جهت مطالعه استقلال حل از شبکه استفاده گردیده‌اند. شبکه‌های حاوی 1630000 سلول، 2232000 و 2657000 سلول می‌باشند که به ترتیب در نقطه مورد اندازه‌گیری ایجاد سلولهایی به ابعاد $0.2, 0.35, 0.7$ متر می‌نمایند. نتایج پروفیل سرعت عمودی در فاصله 20 متری بعد از نازل ساکاردو رسم شده است که پروفیل‌های مذکور در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که شبکه شامل 2232000 سلول برای انجام شبیه‌سازی کفایت می‌نماید و نتایج تقریباً بعد از این مرحله بدون تغییر اند.

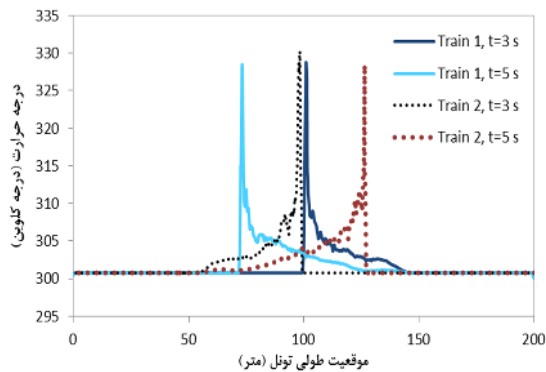


شکل ۷- پروفیل سرعت در فاصله 20 متری بعد از خروجی نازل ساکاردو



شکل ۱۰- نمودار درجه حرارت در طول تونل در زمان $t=3$ s برحسب ارتفاع‌های مختلف از کف تونل

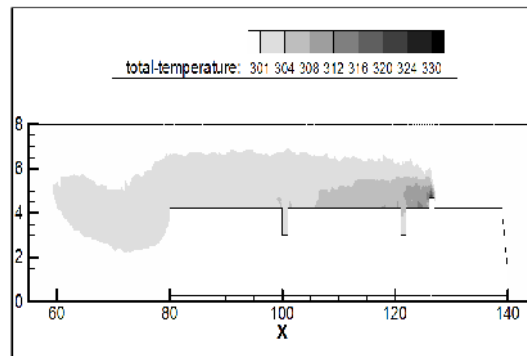
در شکل ۱۱ به‌منظور بررسی توأمان و دقیق‌تر رفتار درجه حرارت در هر دو لکوموتیو، ثانیه سوم و پنجم حرکت هر دو قطار در یک نمودار ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، در موقعیت $x=100$ m که دو قطار به هم می‌رسند، شرایط بحرانی تمرکز دود (البته در خطوط رفت و برگشت) در تونل دیده می‌شود که باید در بررسی میزان آلودگی تجمعی در این نقطه در نظر گرفته شود.



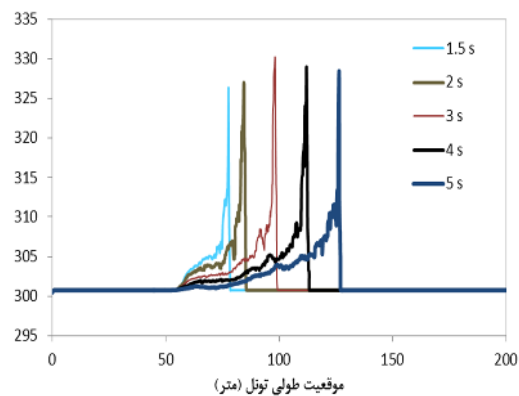
شکل ۱۱- نمودار درجه حرارت در طول تونل در زمان‌های $t=3$ s و $t=5$ s برای هر دو قطار

به جهت بررسی توزیع دود در مقطع تونل در لحظه بحرانی رسیدن دو قطار به هم پروفیل توزیع دما در عرض نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۱ نمودار درجه حرارت در عرض تونل در زمانی که دو قطار به یکدیگر می‌رسند (حالت بحرانی) در ارتفاع‌های مختلف از کف تونل را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که زمانی که دو قطار در خطوط

توزیع دمای روی اگزوز قطار در ثانیه پنجم حرکت برای قطار دوم نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شرایط قطار دوم در مقابل نیز دارای شرایط مشابه قطار اول بوده و شکل ۱۰ نمودار درجه حرارت در طول تونل در ثانیه سوم حرکت بر حسب ارتفاع‌های مختلف از کف تونل را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نمودار قابل مشاهده است، در ارتفاع ۴٫۸ متر که در دهانه خروجی اگزوز لکوموتیو است، دارای ماکزیمم درجه حرارت و با افزایش ارتفاع تغییرات درجه حرارت کاهش می‌یابد که در ارتفاع ۶ متر از کف تونل (حدوداً زیر سقف) این تغییرات دارای نوسانات حداقلی می‌گردد.



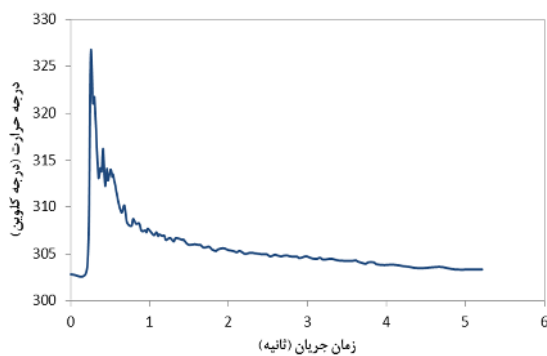
الف) کانتور توزیع دما در $t=5$ s برای قطار دوم



ب) توزیع دما در اثر حرکت قطار

شکل ۹- نمودار درجه حرارت در طول تونل در زمان‌های مختلف حرکت قطار دوم

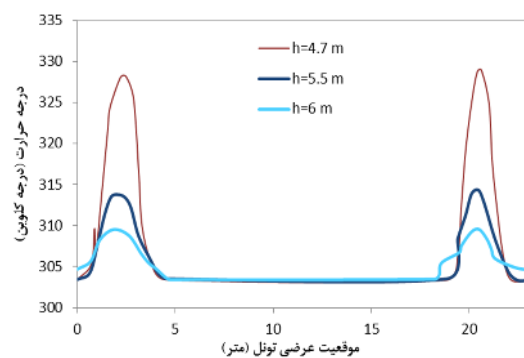
در رسیدن به این نقطه و دورشدن از آن می‌باشد. در نمودار به خوبی می‌توان دید که دمای محصولات احتراقی تجمع شده در تونل بعد از گذر قطار با سرعت سیر 50 km/hr به سرعت کاهش می‌یابد. ولذا در ادامه به بررسی توزیع آلاینده‌ی ناشی از حرکت قطار در تونل پرداخته می‌شود.



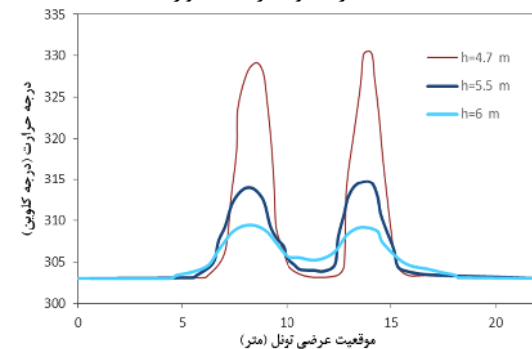
شکل ۱۳- نمودار دمای هوا بر حسب زمان برای نقطه‌ای از تونل در ارتفاع ۴٫۸ متر

شکل ۱۴ نموداری از توزیع آلاینده CO در طول تونل و بر حسب درصد مولی و ppm را برای قطار اول نشان داده می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با مقایسه حداکثر غلظت کربن منواکسید و مقدار مجاز آلاینده کربن منواکسید برای تنفس (جدول ۳) مشخص می‌گردد که این مقدار از حد مجاز خیلی کمتر می‌باشد و این آلاینده‌ی موجب اختلال در عملکرد سیستم تنفس انسان نمی‌شود. این مساله در مرحله اول به دلیل شرایط کاری لکوموتیوهای شرکت مپنا در رعایت استاندارد $EU 3$ می‌باشد، البته نرخ گذر پایین عبوری قطار در تونل نیز تأکیدی بر این مسئله می‌باشد، به عبارت دیگر با نرخ گذر ($Head$ way) حدود یک قطار $ER24PC$ در هر نیم ساعت از تونل می‌توان گفت که اثر پیستونی حرکت قطار می‌تواند در توزیع آلاینده‌ها کمک نماید و محدوده‌های مجاز آلاینده CO در تونل تأمین گردد. شکل ۱۵ کانتور توزیع آلاینده CO در ثانیه پنجم حرکت نشان داده شده است.

نزدیک دیواره تونل حرکت می‌کنند (خطوط ۱ و ۴) از توزیع آلاینده‌ی یکدیگر متأثر نمی‌شوند (شکل ۱۲ الف) و در حالتی که دو قطار در خطوط نزدیک هم قرار دارند (خطوط ۲ و ۳) شکل ۱۲- ب، درجه حرارت تولید شده در خطوط رفت در خطوط برگشت نیز تأثیرگذار است. لذا به عنوان پیشنهاد می‌توان گفت که جداسازی خطوط رفت و برگشت بوسیله دیوار حائل میانی می‌تواند به عملکرد سیستم تهویه در هر مسیر کمک نموده و از تأثیر آلاینده‌ی در حالت بحرانی تلاقی دو قطار جلوگیری نماید.



الف) در خطوط نزدیک دیواره

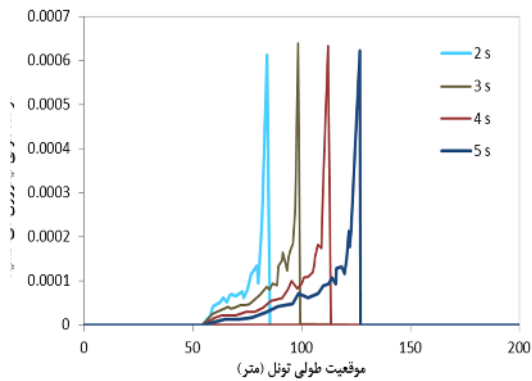


ب) در خطوط رفت و برگشت نزدیک به یکدیگر

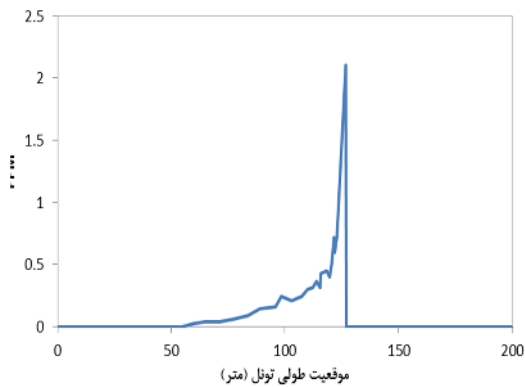
شکل ۱۲- نمودار دمای هوا در عرض تونل در زمان $t = 3/08 \text{ s}$ بر حسب ارتفاع‌های مختلف از کف تونل

شکل ۱۳ نمودار درجه حرارت برای یک نقطه معین (نقطه‌ای به فاصله ۵ متر قبل از رسیدن آگزوز لکوموتیو و در ارتفاع ۴٫۸ متر از کف تونل) بر حسب زمان حرکت لکوموتیو رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند تغییرات درجه حرارت یک نقطه بر حسب زمان مطابق با روند حرکت لکوموتیو

همان طور که از شکل های آلاینده ها قابل مشاهده است روند پخش آلاینده‌ها مشابه روند توزیع درجه حرارت می‌باشد و در شکل ۱۷ کانتور توزیع آلاینده NO_2 در ثانیه پنجم حرکت نشان داده شده است.

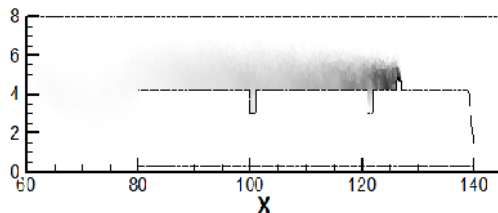
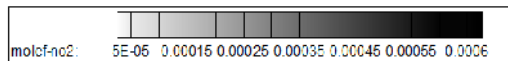


الف) درصد مولی آلاینده NO_2 در زمان های مختلف حرکت

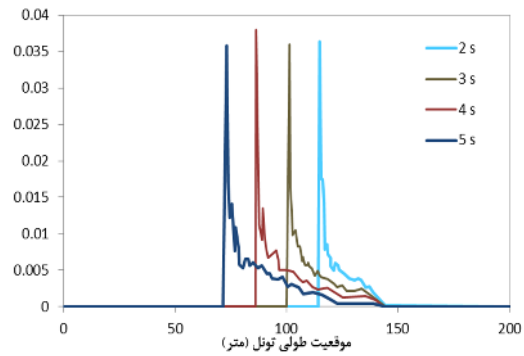


ب) غلظت آلاینده NO_2 در زمان پنجم حرکت

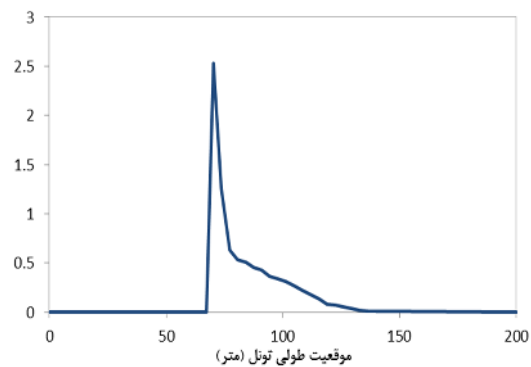
شکل ۱۶- نمودار توزیع آلاینده NO_2 در طول تونل در زمان های مختلف حرکت قطار دوم



شکل ۱۷- کانتور توزیع آلاینده NO_2 در طول تونل در ثانیه پنجم حرکت

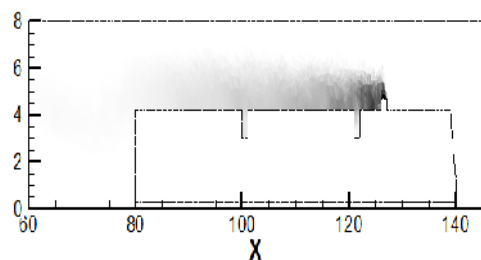
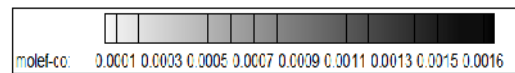


الف) درصد مولی آلاینده CO در زمان های مختلف حرکت



ب) غلظت آلاینده CO در زمان پنجم حرکت

شکل ۱۴- نمودار توزیع آلاینده CO در طول تونل در زمان های مختلف حرکت قطار اول

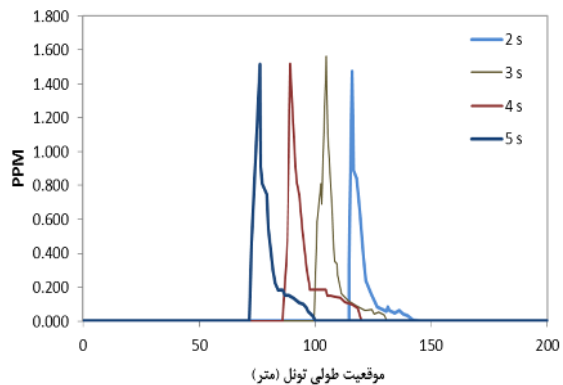


شکل ۱۵- کانتور توزیع آلاینده CO در طول تونل در ثانیه پنجم حرکت

شکل ۱۶- الف نمودار توزیع آلاینده NO_2 در طول تونل در زمان های مختلف و شکل ۱۶- ب نمودار غلظت NO_2 بر حسب ppm برای حرکت قطار دوم نشان داده شده است.

در شکل ۱۸ درصد مولی کربن منواکسید در حالتی که فن‌های تهویه روشن و سرعت تهویه 1 m/s می‌باشد، بررسی شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود غلظت CO برخلاف زمانی که تهویه خاموش بود (شکل ۱۴ الف) تا ابتدای حرکت قطار ادامه پیدا نخواهد کرد و اثر غلظت بعد از حدود ۲۵ متر از بین می‌رود.

در شکل ۱۸ درصد مولی کربن منواکسید در حالتی که فن‌های تهویه روشن و سرعت تهویه 1 m/s می‌باشد، بررسی شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود غلظت CO برخلاف زمانی که تهویه خاموش بود (شکل ۱۴ الف) تا ابتدای حرکت قطار ادامه پیدا نخواهد کرد و اثر غلظت بعد از حدود ۲۵ متر از بین می‌رود.



شکل ۱۸- نمودار غلظت CO در طول تونل برای قطار اول در حالت تهویه روشن

- نوع لوکوموتیو عبوری و استاندارد آلاینده‌ی آن در صورت وجود
- میزان ترافیک حداکثری حرکت قطار

۵- نمادها

نمادهای به کار رفته در این مقاله، همراه با واحد اندازه‌گیری هر یک از آنها در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
ρ	kg/m^3	چگالی جریان
u_i	m/s	سرعت در جهت i
P	pa	فشار استاتیکی
μ	$kg/m.s$	لزجت جریان
E	j	انرژی مخصوص سیال
ω	-	فرکانس آشفته‌گی
ϵ	$kj/m^3.s$	نرخ اضمحلال لزج
δ_t	-	مقیاس آشفته‌گی طولی
u_t	-	مقیاس آشفته‌گی سرعتی
μ_t	$kg/m.s$	ویسکوزیته آشفته‌گی
γ	-	ضریب مادون رهایی
φ	-	تابع پتانسیل
k	-	انرژی جنبشی آشفته‌گی
S_m	kw	منبع در معادله بقای جرم
S_E	kw	منبع در معادله بقای انرژی
τ_{ji}	$kg/m.s^2$	مؤلفه تانسور تنش
B	-	چشمه نشر انرژی تابشی
G	-	تابع فاکتورگیری

۴- نتیجه‌گیری

مدلسازی توزیع آلاینده‌ها در اثر حرکت قطار دیزل در تونل نمونه موردی تهران تبریز در حالتی که تهویه تونل خاموش می‌باشد انجام شد. با مطالعه نمودارهای توزیع دما و غلظت آلاینده‌های به دست آمده می‌توان گفت که در اثر حرکت قطار به سمت جلو، هوایی که توسط قطار شکافته می‌شود از اطراف و بالای قطار عبور کرده و این دبی باعث راندن دود به سمت عقب قطار می‌شود. لذا حرکت نمونه قطار $ER24PC$ که دارای استاندارد $EUIII$ می‌باشد در حالت تهویه خاموش تونل خود می‌تواند توزیع آلاینده‌های تونل را در مقدار مجاز تضمین نماید. و این مساله در حالتی که فن‌ها تهویه روشن می‌باشند (سرعت 1 m/s) توزیع دما و غلظت CO و سایر آلاینده‌ها در فاصله کمتری از عبور لوکوموتیو محو می‌شوند. و لذا به طور کلی در حالت ترافیک معمول گذر قطار در تونل تهران تبریز (حدود هر نیم ساعت) عبور لوکوموتیوهای زیمنس

۶- مراجع

- Chen, F., Guo, S. C., Chuay, H. Y., & Chien, S. W. (2003a). Smoke control of fires in subway stations. *Theoretical and computational fluid dynamics*, 16(5), 349-368.
- Chen, F., Chien, S. W., Jang, H. M., & Chang, W. J. (2003b). Stack effects on smoke propagation in subway stations. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 15(5), 425-440.
- Colella, F., Rein, G., Borchiellini, R., Carvel, R., Torero, J. L., & Verda, V. (2009). Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two-scale modelling approach. *Building and Environment*, 44(12), 2357-2367.
- Diesel Engines for Push-pull trains and locomotives with Emissions Stage EU III A, Engine model 16V 4000 R43L. Available from: www.desa.ir/fa/moshakhasatmtu.pdf
- EU Emission Standards for Heavy-Duty Diesel and Gas Engines: Transient Testing, Tier Euro III, Test ETC, October 2000. Available from: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>
- Hu, L. H., Peng, W., & Huo, R. (2008). Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 68-75.
- Karki, K. C., Patankar, S. V., Rosenbluth, E., & Levy, S. (2000, November). CFD model for jet fan ventilation systems. In BHR group conference series publication (Vol. 43, pp. 355-380). Bury St. Edmunds; Professional Engineering Publishing;
- Ke, M. T., Cheng, T. C., & Wang, W. P. (2002). Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system. *Building and Environment*, 37(11), 1139-1152.
- Kim, J. Y., & Kim, K. Y. (2007). Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), 166-172.
- Mounesan, M., Talaee, M. R., & Molatefi, H. (2016). Investigation of Effective Parameters on Critical Ventilation Velocity in Underground Tunnels. *Mechanical Engineering*, 48(1).
- National Fire Protection Association. (2014). NFPA 130: standard for fixed guideway transit and passenger rail systems. NFPA.
- Pulkrabek, W. W. (1997). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine* (No. 621.43 P8).
- Ricco, P., Baron, A., & Molteni, P. (2007). Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(8), 781-808.
- Tsai, K. C., Chen, H. H., & Lee, S. K. (2010). Critical ventilation velocity for multi-source tunnel fires. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(10), 650-660.
- Tsai, K. C., Lee, Y. P., & Lee, S. K. (2011). Critical ventilation velocity for tunnel fires occurring near tunnel exits. *Fire Safety Journal*, 46(8), 556-557.
- White, F. M. (2003). *Fluid mechanics*. 5th. Boston: McGraw-Hill Book Company