

بررسی عددی پدیده اثر پیستونی درون یکی از تونل‌های سیستم قطار شهری شیراز همراه با اثر فن‌ها

طاهره ایزدی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

امید ابوعلی*، دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

E-mail: abouali@shirazu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۰۷ - پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۲۰

چکیده

حرکت سریع قطار در تونل، باعث ایجاد امواج فشاری و رفت و برگشت این امواج در طول تونل می‌شود. این پدیده که اثر پیستونی نام دارد تأثیر بسزایی بر سیستم‌های مربوط به تونل همچون سیستم تهویه می‌گذارد. علاوه بر این، افزایش فشار اولیه ناشی از ورود قطار به تونل مهم‌ترین و بیش‌ترین افزایش فشار مشاهده شده در طول تونل است، که خود از عوامل اصلی ایجاد تغییرات در توزیع فشار و خصوصیات جریان درون تونل می‌باشد. در نتیجه در مباحث مربوط به اثر پیستونی، محاسبه میزان این افزایش فشار اولیه ضروری به نظر می‌رسد. در اینجا ابتدا مدل عددی حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود صحت‌گذاری می‌گردد و پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل، نخست به بررسی عددی جریان سیال و پدیده اثر پیستونی در یکی از تونل‌های بسته سیستم قطار شهری شیراز پرداخته شده است. میدان جریان در اطراف قطار متحرک با استفاده از روش شبکه دینامیک به دست آمده و میزان افزایش فشار و تغییرات سرعت و فشار در طول تونل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج اولیه حاکی از آن است که بیش‌ترین تغییرات فشار و سرعت در محدوده اطراف قطار صورت می‌پذیرد که حداکثر سرعت در پشت قطار و حداکثر فشار، به طور معمول در جلوی قطار است به جز در انتهای حرکت شتاب‌دار منفی قطار، که در این حالت حداکثر فشار در پشت قطار می‌باشد. همچنین اثر فن‌های نصب شده در نزدیکی ورودی و خروجی تونل نیز در نظر گرفته شده است و تأثیر وجود فن بر مقدار افزایش فشار اولیه و نیز میدان جریان در اطراف بازشدگی فن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در دبی هوای جابه‌جا شده بین ایستگاه‌ها و تونل تحت تأثیر حرکت قطار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اثر پیستونی، تحلیل عددی، امواج فشاری، فن، شبکه دینامیک

۱- مقدمه

تحقیقات وسیعی در زمینه بررسی خصوصیات جریان در نتیجه عبور وسیله نقلیه، بهبود سیستم تهویه درون تونل‌ها، نحوه هدایت دود و گازهای ناشی از احتراق و آتش‌سوزی درون تونل انجام شده است. به عنوان نمونه دیمون (Dayman, 1982) از یک وسیله نقلیه در تونل با مقیاس ۳ به ۱۰۰ جهت مطالعه سرعت جریان هوایی که توسط حرکت وسیله نقلیه القا می‌شود و نیز تعیین میزان گردش هوا در داخل تونل استفاده کرد. نتایج به دست

حرکت قطار در یک تونل، باعث تغییرات زیادی در شرایط جریان هوای داخل تونل می‌شود. هم‌چنان که وسیله نقلیه در حال حرکت می‌باشد، باعث افزایش فشار در مقابل خود و تا حدودی کاهش فشار در پایین دست خود می‌گردد. عوامل مؤثر بر جریان که عموماً مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارتند از: سرعت قطار، ابعاد قطار و تونل، شکل دماغه قطار، فشار محیط و خصوصیات ترافیکی و ترابری داخل تونل.

خود از یک مدل قطار و تونل با مقیاس ۱ به ۲۰ استفاده کردند و برای حل عددی خود نیز از روش sharp interface برای یک جامد غوطه‌ور با مرز متحرک با شکل و خصوصیات هندسی مشابه با مدل تجربی استفاده نمودند. در بررسی عددی آنها که با استفاده از نرم‌افزار CFX4 صورت گرفت جریان سیال به صورت غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده و معادلات حاکم بر مسئله با این فرض حل شدند هم چنین جریان سیال در اطراف قطار برای یک شکل مشخص قطار و تونل با ابعاد مشخص حل شده است. در نهایت آنان دریافتند که حدود ۱۴ در صد اختلاف بین نتایج حاصل برای سرعت جریان هوا بین این دو روش وجود دارد. علاوه بر این، جانگ و چن (Jang and Chen, 2002) به محاسبه ضرایب ایرودینامیکی مربوط به تونل‌ها پرداختند و نیز لین و همکاران (Lin, Chuah and Liu, 2007) و یوان و یو (Yuan and You, 2007) به‌طور جداگانه به بررسی نحوه عملکرد سیستم تهویه در داخل تونل‌ها پرداختند.

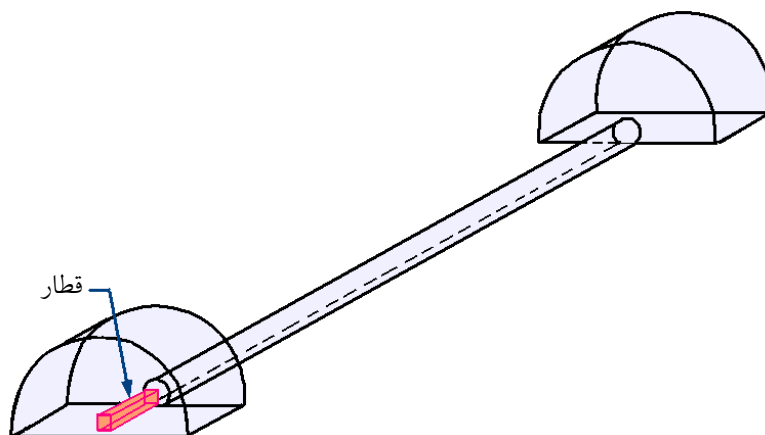
در این تحقیق جریان سه بعدی متلاطم در حالت تراکم‌پذیر غیردائمی در اطراف یک مدل سه بعدی قطار در یکی از تونل‌های سیستم قطار شهری شیراز مورد بررسی قرار گرفته و افزایش فشار ناشی از اثر پیستونی در تونل محاسبه گردیده است، پیش‌بینی این افزایش فشار گامی مؤثر در بهبود طراحی‌های اولیه سیستم تهویه در تونل‌ها می‌باشد.

۲- مدل‌سازی

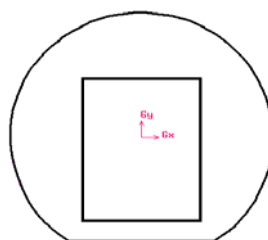
جهت حل جریان در اطراف قطار در حال حرکت، ابتدا مدلی از یک قطار در داخل تونل و ایستگاه در موقعیت اولیه، توسط نرم‌افزار تولید شبکه^۲ ساخته شده است (شکل ۱). طول تونل ۱۰۰۰ متر بوده که در ابتدا و انتهای آن ایستگاه‌هایی هر یک به طول ۱۲۰ متر قرار دارند. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است سطح مقطع تونل یک دایره ناقص به قطر ۶ متر می‌باشد که مدل قطار به صورت یک مکعب به ارتفاع ۳/۴ متر، عرض ۲/۷ متر و طول ۱۰۰ متر درون آن قرار دارد. در موقعیت اولیه، قطار در ایستگاه و در فاصله ۱۰ متر از ابتدای تونل قرار دارد.

آمده با نتایج حاصل از آزمایش میدانی^۱ هم‌خوانی خوبی داشت و حاکی از آن بود که می‌توان با مدل‌هایی با مقیاس کوچک، آزمایش‌های مفید با نتایج ایرودینامیکی قابل قبولی ارائه داد. همچنین چن و همکاران (Chen, Lee, Hsu, 1998) با در نظر گرفتن یک مدل وسیله نقلیه و تونل با مقیاس ۱ به ۲۰ خصوصیات جریان هوایی که به وسیله حرکت وسیله نقلیه القا می‌شود برای وسیله نقلیه با سرعت‌های مختلف، سایز و ارتفاع مختلف در تونل‌های یک طرفه و دو طرفه مورد بررسی قرار دادند. آنان اثبات کردند که سرعت جریان با افزایش ارتفاع تونل کاهش می‌یابد و نیز حرکت وسیله نقلیه به‌طور عمده سبب ایجاد سرعت القایی در جهت حرکت می‌شود. همچنین آنها نشان دادند پدیده اثر پیستونی در داخل تونل به سرعت، ارتفاع و اندازه وسیله نقلیه و نیز خصوصیات ترافیکی و ترابری داخل تونل وابسته است که سرعت وسیله نقلیه مهم‌ترین عامل مؤثر بر این پدیده می‌باشد. به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت وسیله، پروفیل سرعت القا شده اگر چه مشابه قبل است اما مقدار آن افزایش می‌یابد. همچنین کاهش ارتفاع و افزایش پهنای وسیله نقلیه، باعث افزایش سرعت القا شده می‌گردد اما تأثیر آنها بر پدیده اثر پیستونی نسبت به تأثیر سرعت وسیله کمتر است. مطالعه آنان بر روی تونل‌های دو طرفه حاکی از آن بود که اگر چه اثر پیستونی به دلیل خشی شدن سرعت جریان در دو مسیر مخالف هم به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما باز هم این پدیده در هر دو مسیر تونل دو طرفه وجود دارد به‌گونه‌ای که در حدود ۳۵ درصد تونل‌های یک طرفه می‌باشد.

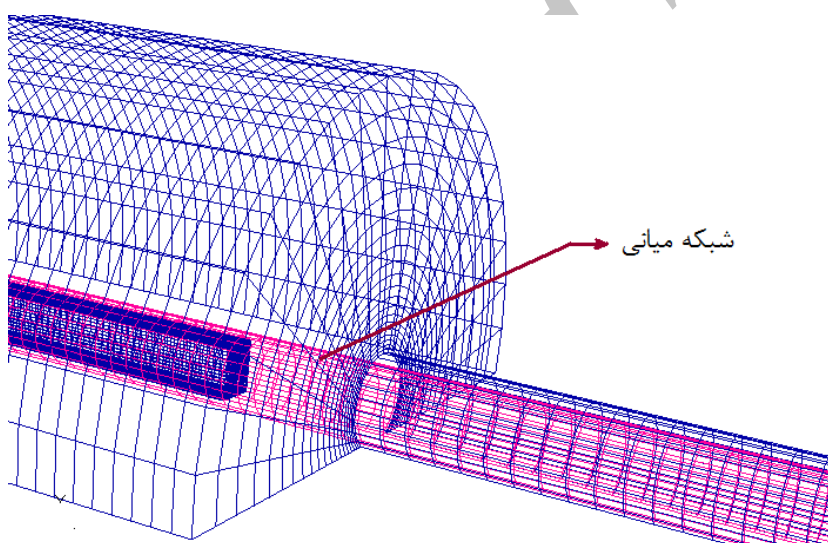
ریکو و همکاران (Ricco, Baron and Molteni, 2007) خصوصیات موج‌های فشاری تولید شده توسط حرکت سریع قطار در داخل تونل را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنان بررسی عددی را با استفاده از یک کد یک بعدی با در نظر گرفتن اثرات لزجت به انجام رساندند. نتایج حاصل از بررسی آنها حاکی از آن بود که حداکثر فشار (قله‌های نمودار فشار) وابستگی شدیدی به سرعت قطار و شکل دماغه دارد. همچنین کیم و کیم (kim and kim, 2007) با مدل‌سازی عددی و روش‌های تجربی جریان هوای سه بعدی و غیر یکنواخت القا شده توسط قطار را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای روش تجربی



شکل ۱. نمایی از مدل قطار و تونل ارایه شده جهت سیستم قطار شهری شیراز



شکل ۲. مقطع تونل و قطار



شکل ۳. نمایی از شبکه میانی موجود به دلیل اختلاف سطح مقطع از ایستگاه به تونل

بوده و در نتیجه از تکنیک شبکه دینامیک استفاده شده است. بدین منظور یک UDF^۵ نوشته شده است و به حرکت قطار نسبت داده شده است. در نهایت جهت مدل کردن حرکت قطار در تونل از روش لایه‌های دینامیکی^۶ 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

برای مدل‌سازی عددی حرکت قطار در داخل تونل و ایستگاه، شبکه محاسباتی مناسب ایجاد شده و برای حل میدان جریان از نرم‌افزار فلونت نسخه ۶.۳.۲۶^۳ استفاده شده است. از آنجا که با تغییر سطح مقطع از تونل به ایستگاه مواجه هستیم از یک شبکه میانی^۴ استفاده می‌گردد (شکل ۳). همچنین از آنجا که قطار متحرک است موقعیت شبکه عددی نسبت به زمان در حال تغییر

در قسمت جلو قطار که سلول‌ها در مجاورت مرز متحرک (قطار) در حال فشرده شدن می‌باشند، این فشردگی تا برقراری شرط زیر صورت می‌پذیرد:

$$h_{\min} < \alpha_c h_{ideal}$$

با برقراری شرط فوق، لایه فشرده شده با لایه مجاور خود ادغام شده و در نتیجه طول سلول‌های مجاور قطار به میزان مطلوب خواهد رسید (شکل ۵).

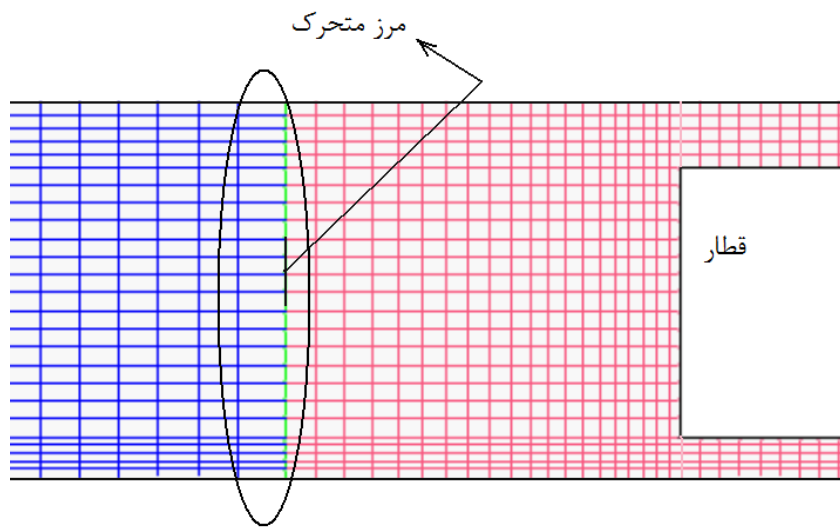
با تنظیم پارامترهای و می‌توان میزان کشیدگی و فشردگی سلول‌ها را تعیین کرد (Fluent User Guide Version 6.3.26).

متحرک قرار دارد با توجه به طول خود می‌تواند تفکیک شده یا در لایه کناری خود ادغام گردد.

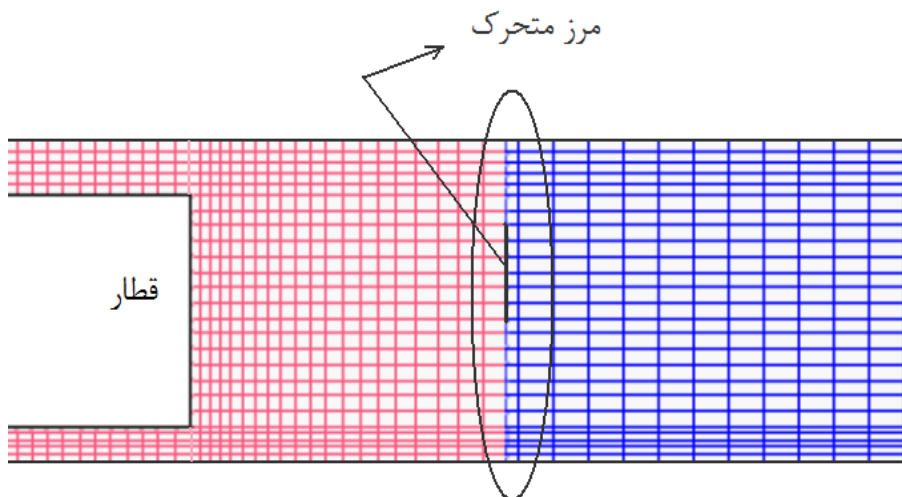
در قسمت پشت قطار که سلول‌ها در لایه مجاور مرز متحرک (قطار)، در حال کشیده شدن هستند، طول لایه تا حدی که شرط زیر برقرار گردد، افزایش می‌یابد:

$$h_{\min} > (1 + \alpha_s) h_{ideal}$$

که h_{ideal} طول اولیه در نظر گرفته شده برای سلول است. با برقرار شدن شرط فوق لایه سلول به دو لایه مجزا تفکیک می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴. کشیدگی سلول‌ها در مجاورت مرز متحرک در قسمت پشت قطار



شکل ۵. فشردگی سلول‌ها در مجاورت مرز متحرک در قسمت جلو قطار

۳- معادلات حاکم بر جریان

جریانی که به وسیله حرکت قطار در داخل تونل القا می‌شود به طور قابل توجهی دارای خصوصیات غیر دائمی است که از موج‌های فشاری ناشی می‌شود. اگر چه عدد ماخ بر مبنای سرعت قطار تقریباً کوچک است اما تأثیر تراکم‌پذیری جهت مطالعه جریان باید در نظر گرفته شود، دلیل عمده آن به دو مقیاس زمانی که در این مسئله دخالت دارند بر می‌گردد. 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 غیر یکنواخت 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 غیر قابل تراکم زمانی صادق است که تنها یک مقیاس زمانی، حرکت جریان را کنترل کند.

معادلات حاکم بر جریان سیال لزج تراکم‌پذیر، معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و معادله حالت گاز ایده‌ال می‌باشد. از آنجا که جریان سیال به صورت متلاطم می‌باشد، برای شبیه‌سازی جریان از مدل‌سازی تلاطم استفاده می‌شود که در نتیجه برای حل از معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس (RANSE) به همراه مدل $k-\varepsilon$ استفاده می‌شود.

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

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

که در آن:

$$Q = \begin{bmatrix} e + \bar{\rho}k \\ \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} (e + p)u + u\bar{\rho}k \\ \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} (e + p)v + v\bar{\rho}k \\ \rho v \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

در این معادلات، u, v, w مؤلفه‌های سرعت میانگین، p فشار متوسط، ρ چگالی متوسط، θ 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:

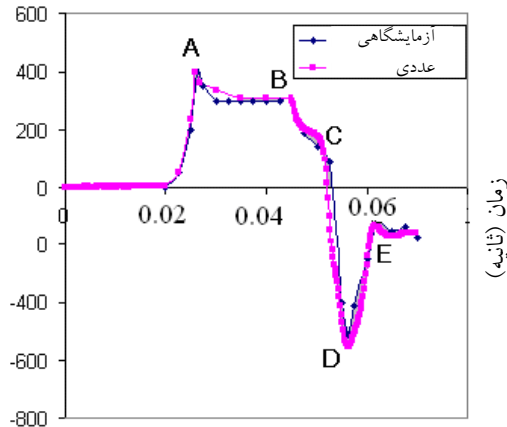
$$-\overline{\rho u_i'' u_j''} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij}$$

که در آن:

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

با ورود قطار به تونل، موج فشاری ایجاد شده توسط جلوی قطار در طول تونل حرکت کرده و زمانی که به مکان اندازه‌گیری فشار می‌رسد حداکثر افزایش فشار را ایجاد می‌کند (نقطه A). فشار پس از اندکی کاهش، همچنان ثابت باقی می‌ماند تا زمانی که موج انبساطی ایجاد شده ناشی از ورود انتهای قطار به تونل، به مکان مورد نظر رسیده (نقطه B) و سبب کاهش فشار می‌گردد. عبور قطار از مکان سنجش فشار (نقطه C) باعث افت شدید فشار نسبی و منفی شدن آن می‌شود. زمانی که موج فشاری به انتهای تونل رسید به صورت موج انبساطی منعکس می‌شود. با رسیدن این موج انبساطی به مکان مورد نظر، فشار کم شده و به حداقل مقدار خود می‌رسد (نقطه D). این موج انبساطی پس از رسیدن به ابتدای تونل دوباره به صورت موج فشاری منعکس شده و با رسیدن به محل اندازه‌گیری فشار سبب افزایش فشار در آن می‌گردد (افزایش تا نقطه E).

فشار (پاسکال)



شکل ۶. مقایسه تغییرات فشار نسبی بر حسب زمان با نتایج Ricco (Baron and Molteni, 2007) در مکانی به فاصله ۰/۹ متر از ابتدای تونل برای سرعت ثابت برابر با ۳۰/۶ متر بر ثانیه

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود حل عددی ارائه شده همانند نتایج آزمایشگاهی، تغییرات موجود در نمودار فشار را به خوبی مدل کرده است.

مدل آزمایشگاهی دوم، مدلی از یک قطار و تونل مکعبی شکل با مقیاس ۱ به ۲۰ است (kim and kim, 2007). 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 در تونل و در فاصله ۱/۵ متر از ابتدای تونل قرار دارد. حرکت قطار به صورت شتاب‌دار مورد بررسی قرار گرفته است که نحوه تغییر سرعت قطار بر حسب

لرجت تلاطم نیز از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

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

$$C_\mu = 0.09$$

k و ε موجود در رابطه بالا، از حل معادلات زیر حاصل می‌شوند (Wilcox, 1993):

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

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

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 پراوتل مغشوش به ترتیب برای k و ε هستند که مقدار آنها برابر است با:

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

۴- نتایج

۴-۱- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

جهت بررسی صحت حل عددی ارائه شده، با مدل‌هایی که نتایج آزمایشگاهی آنها در دسترس بوده مقایسه‌هایی صورت پذیرفته است.

مدل اول، حرکت یک پرتابه استوانه‌ای با سرعت ۳۰/۶ متر بر ثانیه در داخل یک تونل استوانه‌ای است که در واقع نمونه‌ای از حرکت قطار سریع‌السیر در تونل می‌باشد (Ricco, Baron and Molteni, 2007). در این مدل آزمایشگاهی طول تونل ۶ متر و قطر آن ۹۹ میلی‌متر بوده و همچنین طول پرتابه ۰/۶ متر و قطر آن ۳۸ میلی‌متر می‌باشد. مدل قطار (پرتابه) در موقعیت اولیه در ایستگاه و در فاصله ۰/۷ متر از ابتدای تونل قرار گرفته است. شکل ۶ تغییرات فشار نسبی نسبت به زمان را در مکانی به فاصله ۰/۹ متر از ابتدای تونل و بر روی دیواره فوقانی آن نمایش می‌دهد. این تغییرات به‌طور عمده به دلیل رفت و برگشت موج‌های فشاری در طول تونل ایجاد شده است. به این صورت که

با اطمینان از صحت حل عددی ارائه شده، به حل جریان در اطراف مدل قطار مربوط به سیستم قطار شهری شیراز پرداخته شده است.

۴-۲- بررسی خصوصیات جریان در اطراف مدل قطار

مربوط به سیستم قطار شهری شیراز

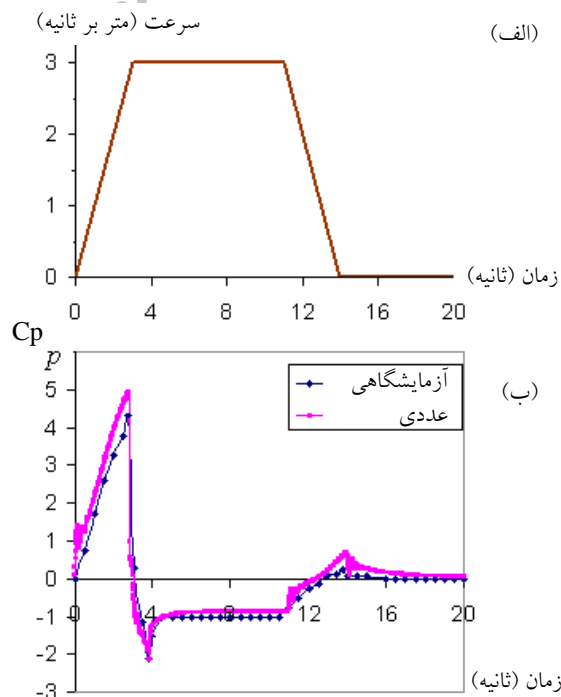
در این حالت، مدل قطار و تونل مورد بررسی با مقیاس ۱ به ۱۰ نسبت به طرح اصلی در نظر گرفته شده‌اند. هم چنین حرکتی که به قطار نسبت داده شده است یک حرکت شتاب‌دار، با حداکثر سرعت ۲۰ متر بر ثانیه می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده، نمودار فشار بر حسب زمان در مکانی به فاصله ۲۱ متر از موقعیت اولیه قطار (۲۰ متر از ابتدای تونل)، نشان داده شده است. با توجه به سرعت نسبتاً بالای قطار، رفت و برگشت امواج فشاری در طول تونل صورت می‌پذیرد. در نتیجه تغییرات موجود در نمودار فشار، هم ناشی از تغییر سرعت و هم حرکت موج‌های فشاری می‌باشد.

با توجه به شکل، پس از آن که قطار در $t=0/48$ وارد تونل شد، موج فشاری حاصل از آن در $t=0/58$ به مکان اندازه‌گیری فشار رسیده و سبب می‌گردد فشار در این مکان افزایش یابد (افزایش تا نقطه A). برگشت این موج فشاری به صورت موج انبساطی انعکاسی از انتهای تونل می‌بایست در زمان $t=18$ سبب کاهش فشار گردد. اما اثر کاهشی این موج کمتر از اثر افزایشی ایجاد شده ناشی از حرکت شتاب‌دار (افزایش سرعت) می‌باشد. ورود انتهای قطار به تونل و رسیدن موج انبساطی آن به این مکان در زمان $t=1/548$ سبب کاهش فشار می‌گردد (نقطه B). اما اثر افزایشی سرعت تا حدودی فشار را در این مکان دوباره زیاد می‌کند (نقطه C) تا این که رسیدن موج فشاری انعکاسی از انتهای تونل (انعکاس موج انبساطی اولیه) در زمان $t=1/948$ سبب افزایش بیشتر فشار تا نقطه D می‌گردد. رسیدن قطار به مکان اندازه‌گیری فشار در زمان $t=2/058$ ، سبب می‌شود فشار به‌طور ناگهانی افت کند. پس از آن فشار نسبی از 100 pa - در جلوی قطار (نقطه E) تا 250 pa - در محدوده پر سرعت و کم فشار پشت قطار (نقطه F) تغییر می‌کند. در زمان $t=2/568$ که مکان سنسور در پشت قطار قرار می‌گیرد فشار افزایش یافته و به نزدیکی فشار اتمسفر می‌رسد (نقطه G) و تا زمان $t=5/68$ به دلیل رفت و برگشت مداوم امواج در حدود همین فشار نوسان می‌کند. از زمان $t=5/68$ (نقطه H) به بعد، به دلیل حرکت شتاب‌دار منفی قطار، فشار در مکان مورد نظر رو به افزایش خواهد بود.

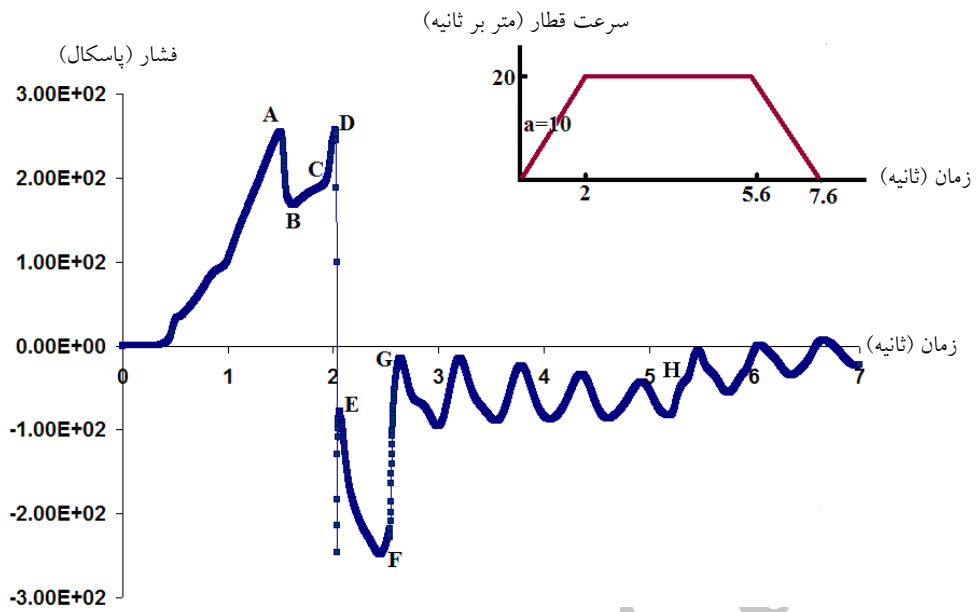
زمان در شکل ۷- الف و نمودار تغییرات ضریب فشار C_p بر حسب زمان در مکانی به فاصله ۸/۵ متر از ابتدای تونل بر روی دیواره فوقانی آن در شکل ۷- ب نشان داده شده است.

در این مدل، از آن‌جا که حداکثر سرعت موجود ۳ متر بر ثانیه می‌باشد، افزایش یا کاهش فشار به دلیل تغییر در روند حرکت قطار می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت و در نتیجه 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، بیشترین مقدار فشار را در مکان مورد نظر خواهد داشت. پس از آن که قطار با سرعت ثابت و شتاب صفر، به حرکت خود ادامه می‌دهد، فشار کاهش می‌یابد و زمانی که مکان اندازه‌گیری فشار در پشت قطار قرار می‌گیرد، فشار در آن به کمترین مقدار خود خواهد رسید و تا زمان کاهش سرعت تقریباً در این فشار باقی خواهد ماند. سپس زمانی که قطار در حال کاهش سرعت و حرکت به صورت شتاب‌دار منفی می‌باشد، فشار در مکان مورد نظر رو به افزایش خواهد بود.

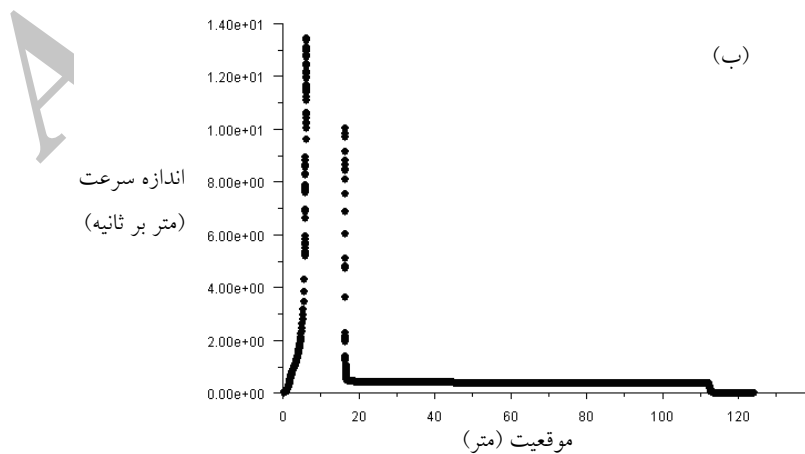
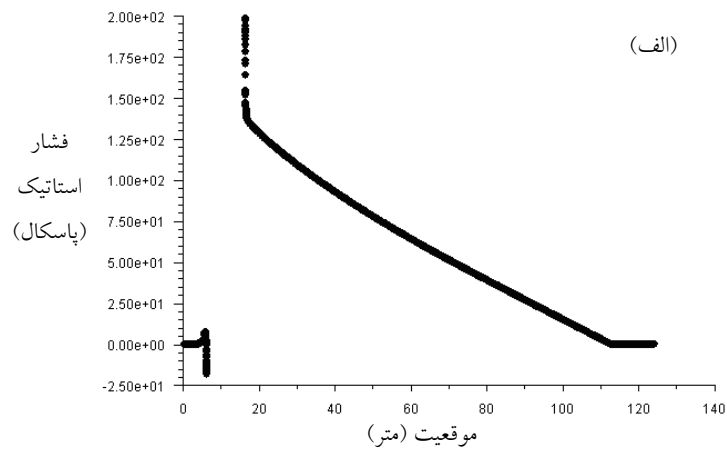
همان‌گونه که در شکل ۷- ب مشاهده می‌شود، حل عددی ارائه شده هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۷. نمودار الف) تغییرات سرعت بر حسب زمان ب) مقایسه حل عددی و مدل آزمایشگاهی (kim and kim, 2007) برای ضریب فشار در مکانی به فاصله ۸/۵ متر از ابتدای تونل



شکل ۸. نمودار تغییرات فشار بر حسب زمان در مکانی به فاصله ۲۰ متر از ابتدای تونل برای مدل قطار شهری شیراز



شکل ۹. توزیع الف) فشار استاتیکی، ب) اندازه بردار سرعت در خط میانی تونل در زمان $t=1s$

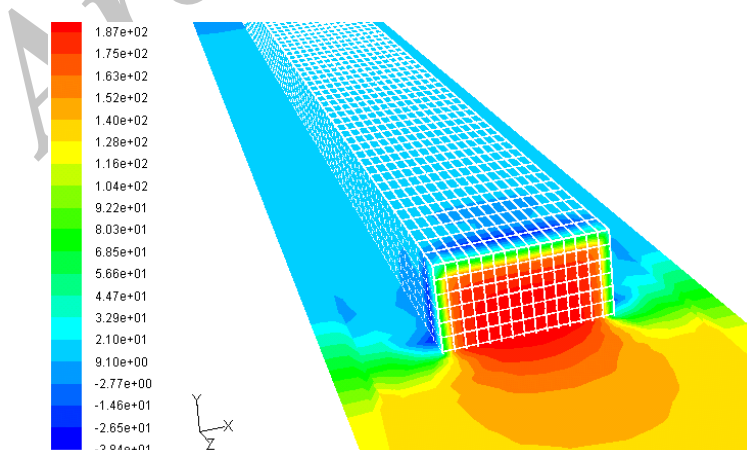
توزیع فشار استاتیک و اندازه بردار سرعت در طول تونل در زمان $t=0.5$ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این زمان، قطار با سرعت ثابت ۲۰ متر بر ثانیه در حال حرکت است و در فاصله ۷۹ متر از ابتدای تونل قرار دارد. در این زمان نیز فشار در ورودی تونل فشار اتمسفر می‌باشد که به یک فشار نسبی منفی در پشت قطار خواهد رسید. همچنین وجود افزایش فشار در جلو قطار سبب می‌شود، حداکثر اختلاف فشار بین جلو و عقب قطار در حدود ۴۰۰ پاسکال گردد. سرعت در جلو قطار برابر با سرعت قطار می‌باشد که با دور شدن از قطار از هر دو طرف (پشت و جلو) سرعت به ۵ متر بر ثانیه خواهد رسید. مشاهده می‌شود که در این حالت سرعت جریان در دیگر نقاط دامنه جریان، صفر نیست. علاوه بر این، کانتور توزیع فشار استاتیک روی قطار و کف تونل در این زمان ($t=0.5$)، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

نحوه توزیع سرعت و فشار در زمان $t=6.8/6.8$ در شکل ۱۳ آورده شده است. در این حالت قطار در حال کاهش سرعت و به عبارتی حرکت به صورت شتاب‌دار منفی می‌باشد. سرعت قطار در این زمان $2/4$ متر بر ثانیه می‌باشد و قطار در فاصله ۸۸ متر از ابتدای تونل قرار دارد. در این زمان همانند زمان‌های قبل فشار در ورودی و خروجی تونل فشار اتمسفر می‌باشد اما از آنجا که سرعت قطار در حال کاهش است، قطار در مقابل جریان پر سرعت پشت خود، همانند سدی عمل می‌کند و در نتیجه سبب افزایش فشار در قسمت پشت می‌گردد که با دور شدن از قطار این فشار کمتر خواهد بود. در قسمت جلوی قطار نیز فشار به طور تقریبی همان فشار اتمسفر می‌باشد. همچنین سرعت جریان در قسمت پشت و جلوی قطار برابر با سرعت قطار است که با دور شدن از قطار از هر دو طرف، به سرعت ۵ متر بر ثانیه می‌رسد.

علاوه بر آن که تغییرات فشار نسبت به زمان در یک مکان مورد بررسی قرار گرفت، جهت تحلیل پدیده اثر پیستونی در تونل باید توزیع فشار و سرعت در طول تونل در زمان‌های مختلف بررسی گردد. همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده، تغییرات فشار استاتیک و اندازه بردار سرعت در زمان $t=1.8$ در خط میانی تونل رسم شده است. در این زمان سرعت قطار ۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد و قطار در فاصله ۴ متر از ابتدای تونل قرار دارد.

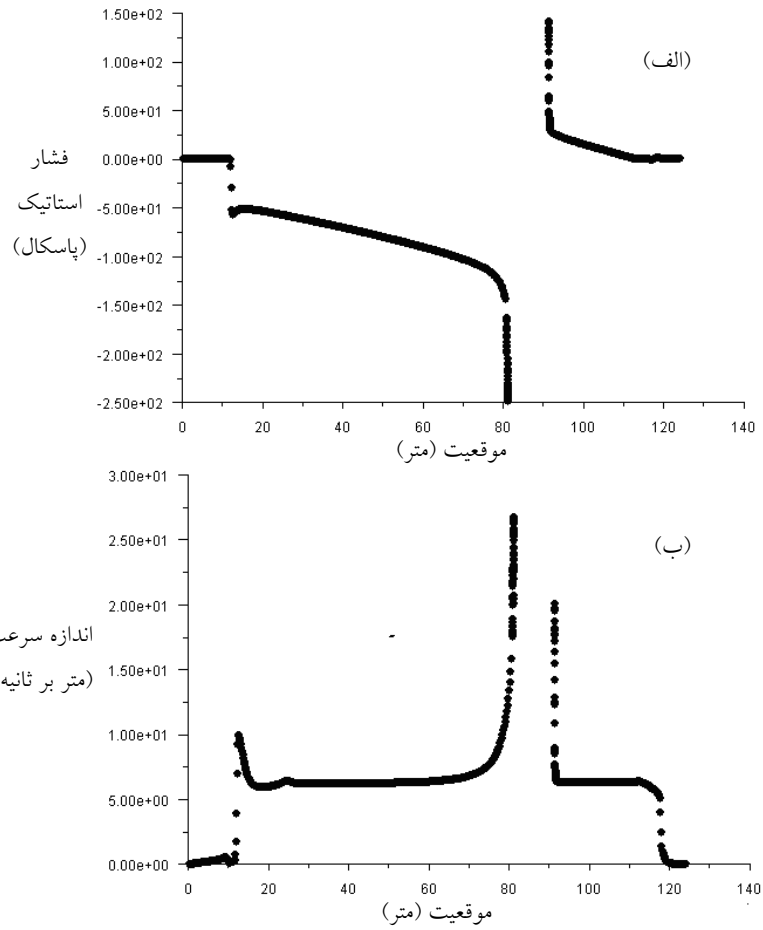
ناپیوستگی‌های موجود در این نمودارها مربوط به مکان قرارگیری قطار است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در زمان $t=1.8$ فشار در ورودی تونل همان فشار اتمسفر بوده که ناگهان در پشت قطار به فشار نسبی منفی کاهش می‌یابد و دلیل آن حرکت سریع هوا ناشی از حرکت سریع قطار است که موجب کاهش فشار در پشت قطار می‌گردد. فشار در جلوی قطار به دلیل رانش شدید هوا به شدت افزایش می‌یابد که این فشار با دور شدن از قطار کمتر خواهد بود. در این زمان، حداکثر اختلاف فشار بین جلو و عقب قطار در حدود 225 pa می‌باشد. هم‌چنین سرعت جریان در جلوی قطار برابر با سرعت قطار است که با دور شدن از قطار به مقدار صفر می‌رسد. اما در پشت قطار، جریان هوایی که از جلو آمده به سمت پشت قطار می‌چرخد. علاوه بر آن جریان هوایی نیز ناشی از کاهش فشار در پشت قطار، از ورودی تونل به سمت پشت قطار در حرکت است. در نتیجه سرعت جریان در پشت قطار بیشتر از سرعت قطار خواهد بود.

با در نظر گرفتن صفحه میانی افقی در طول تونل (صفحه‌ای افقی که از وسط تونل و قطار می‌گذرد) کانتور فشار استاتیک روی این صفحه و در اطراف قطار در زمان $t=1.8$ ، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به تشکیل نقطه سکون در دماغه قطار حداکثر فشار در دماغه شکل می‌گیرد.

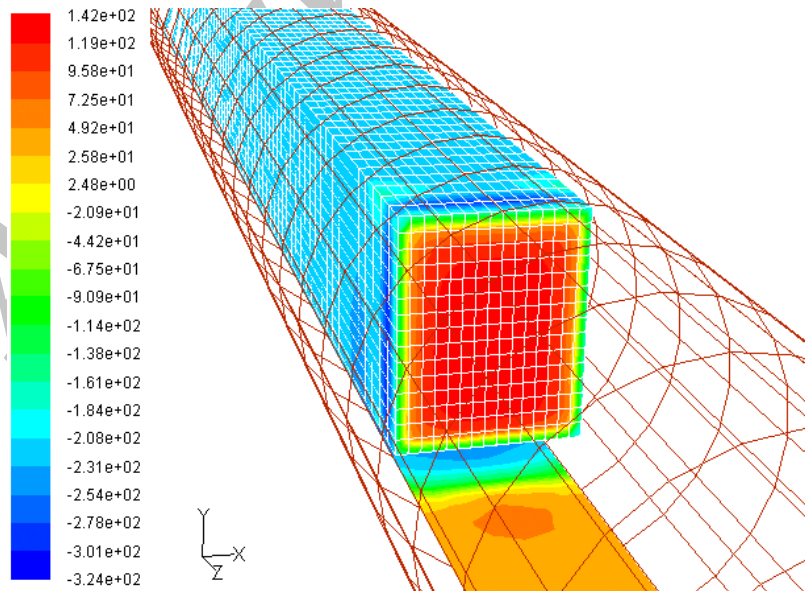


شکل ۱۰. کانتور فشار استاتیک (پاسکال) روی یک صفحه میانی افقی و در اطراف قطار در زمان $t=1.8$

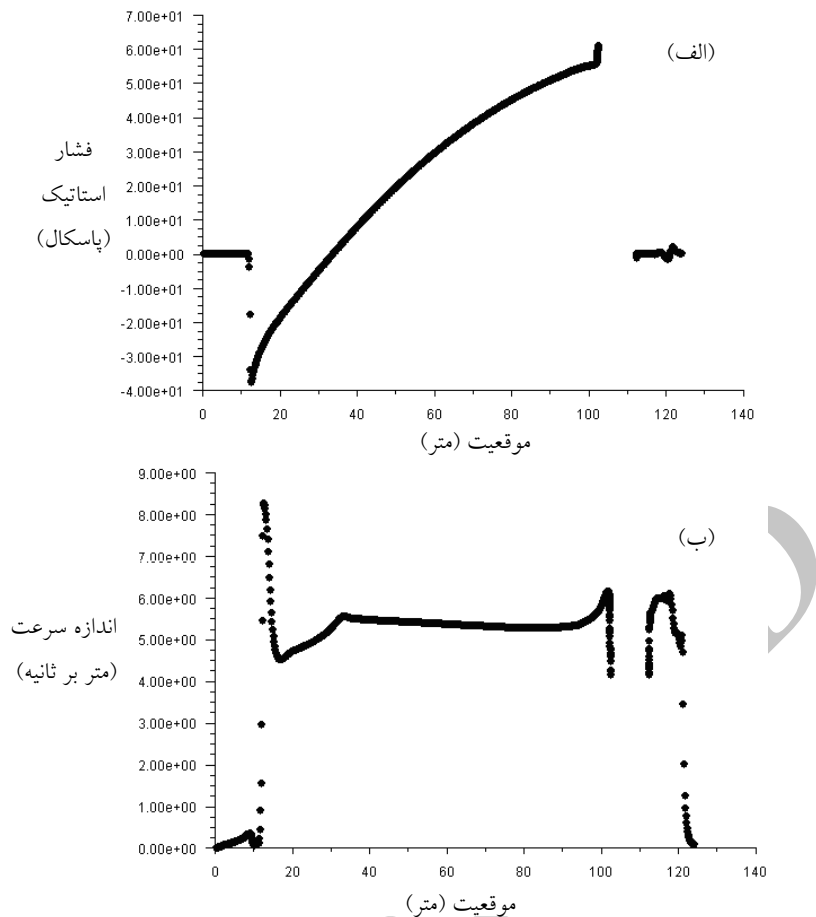
ایزدی و ابوعلی



شکل ۱۱. توزیع الف) فشار استاتیک ب) اندازه بردار سرعت در خط میانی تونل در زمان $t=0s$



شکل ۱۲. کانتور توزیع فشار استاتیک روی قطار و کف تونل در زمان $t=0s$



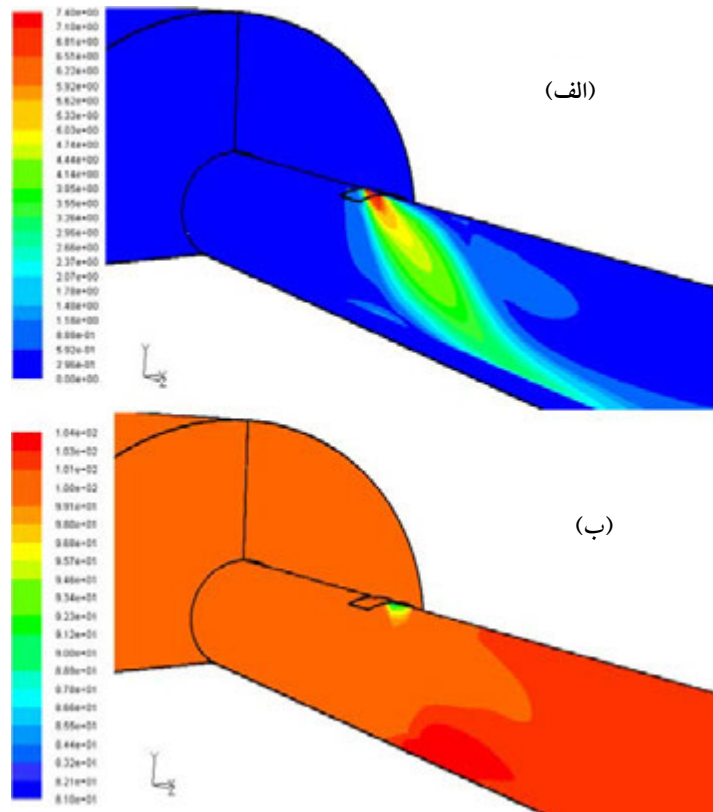
شکل ۱۳. توزیع الف) فشار استاتیک ب) اندازه بردار سرعت در خط میانی تونل در زمان $t=6/68s$

۳-۴- بررسی اثر فن بر پدیده اثر پیستونی و خصوصیات

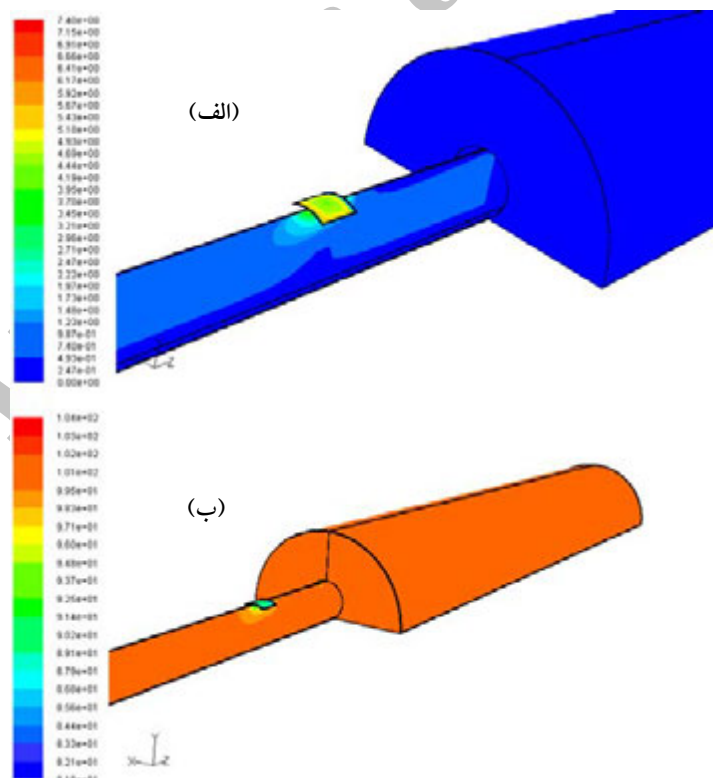
جریان درون تونل در سیستم قطار شهری شیراز

در این قسمت با توجه به وجود فن در نزدیکی ورودی و خروجی تونل در سیستم قطار شهری شیراز، اثر آنها نیز در نظر گرفته شده است. به صورتی که کانال فن ورودی به طول ۱/۵ متر و عرض ۲/۵ متر در سقف تونل و در فاصله ۱۲ متر از ابتدای آن قرار داشته و کانال فن خروجی به طول و عرض ۳ متر در سقف تونل و به فاصله ۱۵ متر از انتهای آن قرار دارد. حرکت قطار در تونل و ایستگاه‌ها با سرعت ثابت ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شرط مرزی مربوط به ورودی باز شو فن‌ها، شرط دبی جرمی ثابت می‌باشد. ایستگاه‌ها دارای فشار نسبی ۱۰۰ پاسکال می‌باشند. فشار کارکرد نیز، همان فشار اتمسفر منطقه شیراز می‌باشد که برابر ۸۷ کیلوپاسکال است. زاویه جریان ورودی (از فن ورودی) ۴۵ درجه و زاویه جریان خروجی (از فن خروجی) ۹۰ درجه می‌باشد. با در نظر گرفتن نیمی از مدل (به دلیل تقارن موجود در مدل)، دبی

جرمی از فن ورودی ۹/۰۳ کیلوگرم بر ثانیه و دبی جرمی از فن خروجی ۲۰/۱۳۵ کیلوگرم بر ثانیه است. در این حالت، پیش از آن که قطار در طول ایستگاه و تونل شروع به حرکت نماید، ابتدا جریان ایجاد شده به وسیله دهش و مکش فن‌ها، در دامنه محاسباتی حل می‌شود تا این‌که شرایط پایدار جریان قبل از حرکت قطار، حاصل گردد. با حل جریان ناشی از فن‌ها نتایج به صورت زیر حاصل می‌شود. دبی جرمی وارد شده از ایستگاه ورودی به تونل، ۲/۸ کیلوگرم بر ثانیه است و دبی جرمی وارد شده به تونل از ایستگاه متصل به خروجی تونل، ۸/۳۰۷ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. روشن است که به دلیل وجود مکش از فن خروجی که در نزدیکی ایستگاه خروجی قرار دارد، دبی جرمی بیشتری از این ایستگاه به درون تونل وارد می‌شود. با در نظر گرفتن صفحه میانی که از وسط تونل و ایستگاه عبور می‌کند، کانتورهای سرعت و فشار در طول تونل و در اطراف بازشدگی فن ورودی و خروجی و نیز بردارهای سرعت در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ آورده شده است.



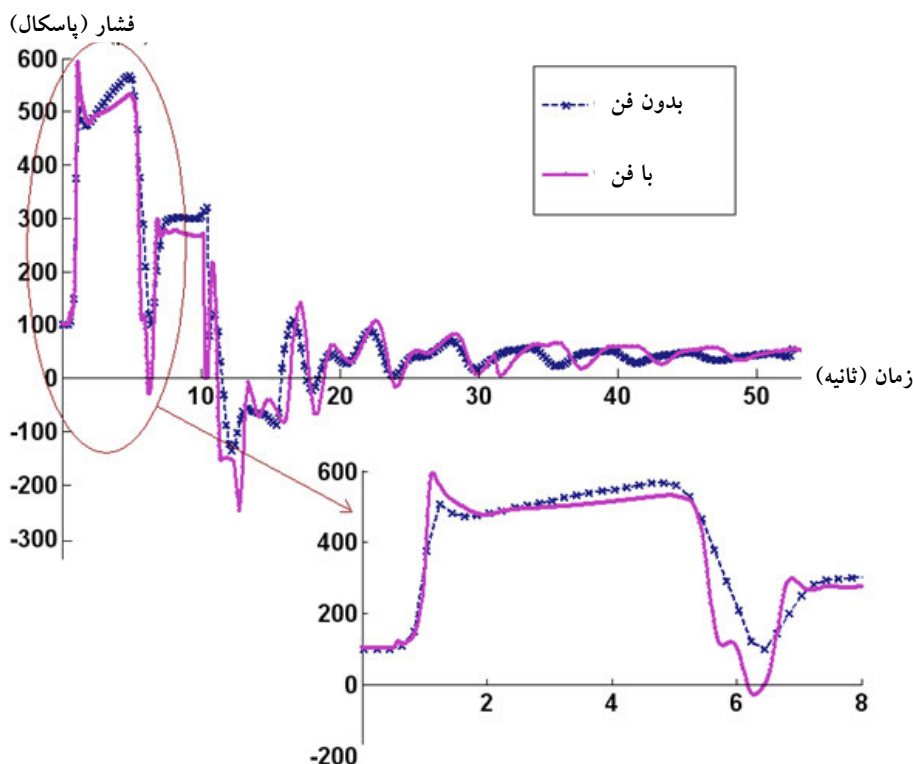
شکل ۱۴. کانتورهای الف (سرعت ب) فشار اطراف بازشدگی فن ورودی در صفحه میانی گذرنده از وسط تونل و ایستگاه



شکل ۱۵. کانتورهای الف (سرعت ب) فشار اطراف بازشدگی فن خروجی در صفحه میانی گذرنده از وسط تونل و ایستگاه

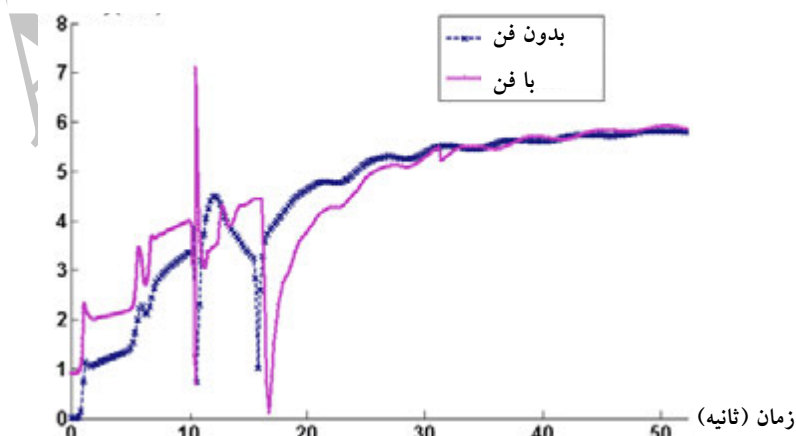
تونل به ایستگاه وارد شود. همچنین حداقل فشار در نزدیکی فن خروجی می‌باشد که با توجه به دبی زیاد فن خروجی و نیز حداکثر سرعت جریان در آنجا این موضوع طبیعی می‌باشد. پس از به‌دست آوردن شرایط پایدار جریان، حرکت مورد نظر (سرعت ثابت ۲۰ متر بر ثانیه) به قطار اعمال می‌گردد. نمودار تغییرات فشار و سرعت جریان برحسب زمان در مکانی نزدیکی وسط تونل و به فاصله ۲۰۰ متر از ابتدای آن در شکل ۱۶ و ۱۷، در دو حالت فن روشن و خاموش مقایسه شده است.

حداکثر فشار در اطراف بازشو فن ورودی به علت برخورد جریان ورودی با کف تونل می‌باشد. زاویه جریان ورودی ۴۵ درجه برای جریان فن ورودی، مکش مناسبی را برای جریان ورودی از ایستگاه فراهم کرده است. اگر جریان ورودی به صورت عمودی وارد تونل می‌شد (این حالت نیز شبیه‌سازی شده اما نتایج آن به دلیل خلاصه‌نویسی آورده نشده است)، آنگاه جریان عمودی ورودی از فن به تونل همانند یک سد برای جریان درون تونل عمل می‌کند و حتی باعث می‌شود مقداری از جریان فن ورودی

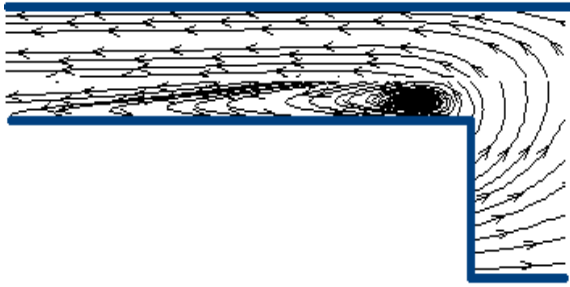


شکل ۱۶. مقایسه تغییرات فشار برحسب زمان در مکانی وسط سقف تونل و به فاصله ۲۰۰ متر از ابتدای آن در دو حالت فن روشن و خاموش

سرعت (متر بر ثانیه)



شکل ۱۷. مقایسه تغییرات سرعت جریان برحسب زمان در مکانی وسط سقف تونل و به فاصله ۲۰۰ متر از ابتدای آن در دو حالت فن روشن و خاموش



شکل ۱۸. تشکیل حباب جدایی روی سر قطار

همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در شرایط وجود فن روشن در ابتدای حرکت، سرعت جریان در حدود ۱ متر بر ثانیه می‌باشد، که با ورود قطار به تونل همانند شرایط فن خاموش، سرعت جریان افزایش می‌یابد. خط عمودی پر سرعت نشان‌دهنده زمان رسیدن قطار به مکان سنجش سرعت است. پس از این‌که مکان سنجش سرعت در پشت قطار قرار می‌گیرد، نمودار سرعت جریان در شرایط فن روشن و خاموش به هم نزدیک می‌شود. در این حالت در شرایط فن روشن، جریانی از ورودی تونل به پشت قطار فرستاده می‌شود. تغییرات دبی جریان فرستاده شده از ایستگاه اول و دوم به درون تونل در زمان‌های مختلف در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

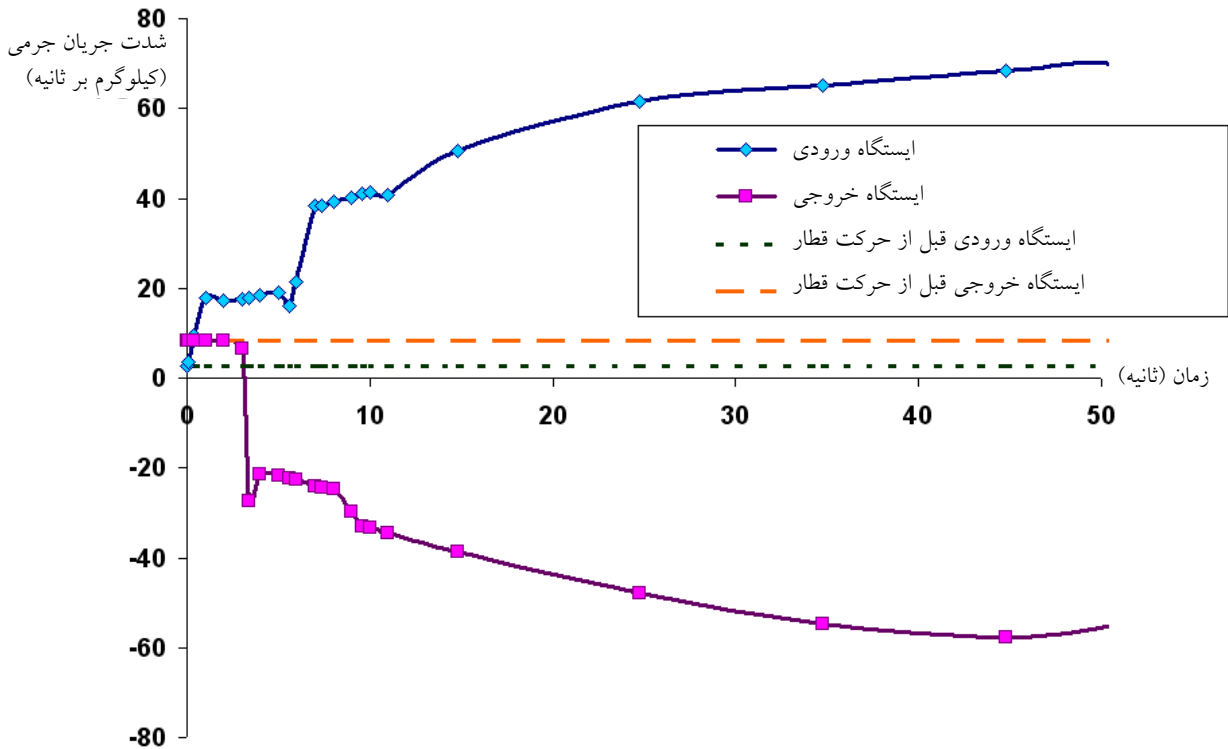
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ابتدا به دلیل خاصیت مکش فن خروجی، جریان از ایستگاه دوم (ایستگاه نزدیک به فن خروجی) نیز به درون تونل کشیده می‌شود. اما پس از ورود قطار به تونل در زمان $t=0/5S$ ، به تدریج دبی جرمی ورودی از ایستگاه اول بیشتر و دبی جرمی ورودی از ایستگاه دوم کمتر می‌شود. به طوری که در نهایت جریان از ایستگاه دوم فقط خارج می‌گردد.

در نمودار شکل ۱۹ دبی مثبت به مفهوم ورود به تونل و دبی منفی به مفهوم خروج از تونل می‌باشد. البته تحلیل کامل‌تر و دقیق‌تر این مسئله با در نظر گرفتن منحنی عملکرد فن‌ها ممکن خواهد بود. اما همین نتایج نشان‌دهنده پتانسیل تأثیر زیاد حرکت قطار در تونل بر جریان ورودی و یا خروجی از ایستگاه‌ها به تونل و نیز عملکرد فن‌ها می‌باشد که به طور حتم باید مورد نظر طراحان سیستم تهویه تونل و ایستگاه‌ها قرار گیرد.

در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که در شرایط فن روشن، در ابتدا افزایش فشار اولیه بیشتر از حالت فن خاموش است. دلیل این مسئله به بزرگتر شدن و بیشتر شدن قطر حباب جدایی^۸ بر روی سقف مدل قطار بر می‌گردد (شکل ۱۸).

به این صورت که در حالتی که فن روشن است، جریان هوایی از ایستگاه ورودی به درون تونل وارد می‌شود. زمانی که در ایستگاه قطار در حال حرکت و نزدیک شدن به ابتدای تونل است، این جریان هوا با عبور از روی سر قطار سبب بزرگتر شدن حباب جدایی می‌گردد. با بزرگتر شدن حباب جدایی، نسبت گرفتگی (نسبت سطح مقطع قطار به سطح مقطع تونل) افزایش می‌یابد. هر چه این نسبت بزرگتر باشد، افزایش فشار اولیه بیشتری مشاهده می‌گردد. بنابراین، همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، در شرایط فن روشن، با بزرگتر شدن حباب جدایی و از آنجا افزایش نسبت گرفتگی، افزایش فشار اولیه بیشتری ایجاد می‌گردد. همچنین پس از این، به دلیل جریان هوای ایجاد شده ناشی از فن‌ها، فشار نسبت به حالت فن خاموش افت اندکی دارد. در زمان $t=5/3S$ که موج انبساطی انعکاسی از انتهای تونل به مکان سنجش فشار می‌رسد، فشار در این مکان افت می‌کند. از آنجا که این موج در واقع انعکاس موج فشاری اولیه است، خصوصیات موج فشاری را دارد. در نتیجه همان‌طور که موج فشاری اولیه افزایش فشار بیشتری را ایجاد می‌کرد، این موج نیز کاهش فشار بیشتری را ایجاد می‌کند. در حدود همین زمان نیز $(t=5/9S)$ ، ورود انتهای قطار به تونل و ارسال موج انبساطی، کاهش بیشتری در نمودار فشار ایجاد می‌کند. انعکاس موج فشاری اولیه (موج انبساطی انعکاسی) از ابتدای تونل، مجدداً سبب افزایش فشار با مقداری بیشتر از حالت فن خاموش می‌گردد. رسیدن قطار به مکان سنجش فشار در زمان $t=10/2S$ سبب افت شدید فشار و منفی شدن آن می‌گردد. در زمان عبور بدنه قطار از این مکان (فاصله زمانی $t=10/2S$ تا $t=15/2S$)، عبور امواج فشاری و انبساطی انعکاس یافته از ابتدا و انتهای تونل، سبب ایجاد تغییراتی در نمودار فشار می‌گردد.

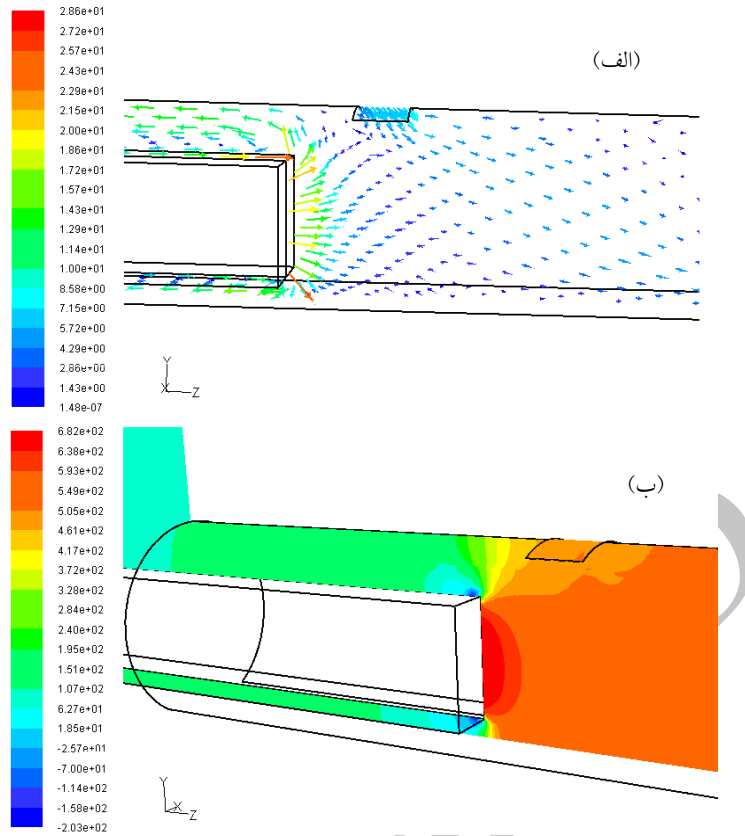
از طرف دیگر در حالت فن روشن، وجود حباب جدایی بزرگ روی سر قطار سبب افت بیشتر فشار در مکان سنجش فشار، هنگام عبور بدنه قطار از این مکان می‌گردد.



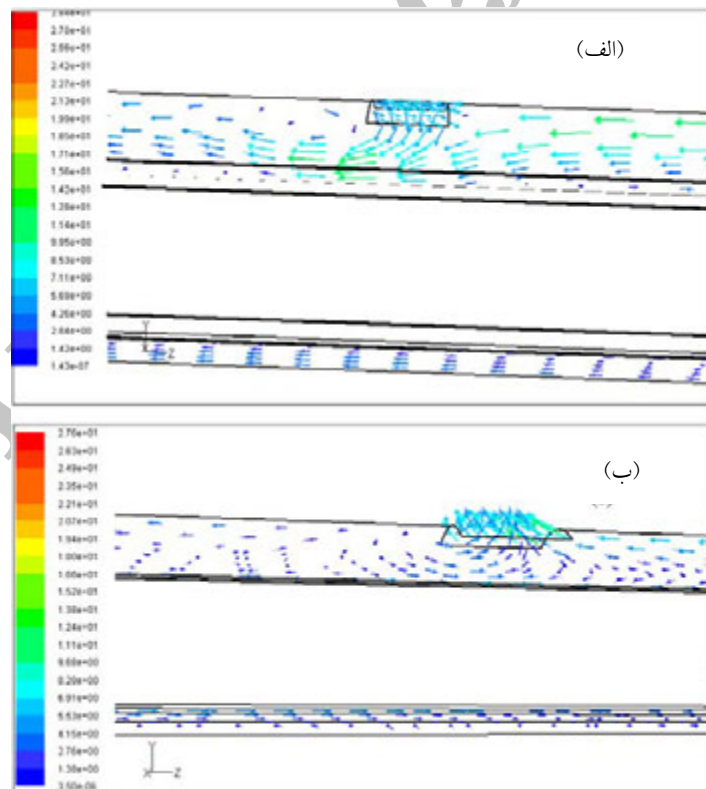
شکل ۱۹. مقایسه دبی جرمی وارد شده به تونل از ایستگاه‌های ورودی و خروجی

(شکل ۱۴- الف) که به مقدار $28/6$ متر بر ثانیه در حالت عبور قطار در زمان $t=1s$ (شکل ۲۰- الف) و $28/4$ متر بر ثانیه در زمان $t=2s$ (شکل ۲۱- الف) افزایش یافته است. تغییرات قابل توجه فشار و سرعت در تونل و اطراف بازشدگی فن ورودی تحت تأثیر حرکت قطار، می‌تواند عملکرد فن را به شدت تحت تأثیر قرار دهد و باید در طراحی اولیه فن‌ها مد نظر قرار گیرد. همچنین در این شکل‌ها، تغییرات شدید ایجاد شده تحت تأثیر حرکت قطار در اطراف بازشدگی فن خروجی نیز مشاهده می‌شود. به ترتیبی که در حالت عبور قطار از نزدیکی بازشدگی فن خروجی در زمان $t=50/8s$ ، فشار از 100 پاسکال به 233 پاسکال (شکل ۲۲) و سرعت از $7/4$ متر بر ثانیه به $27/6$ متر بر ثانیه (شکل ۲۱- ب) افزایش یافته است.

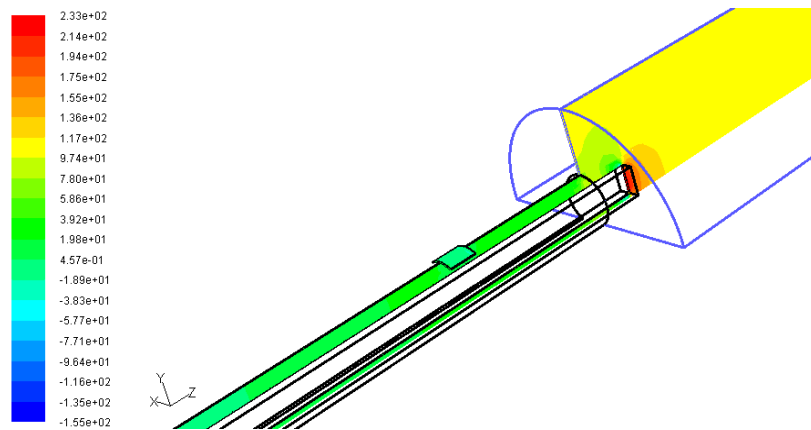
در شکل‌هایی که در ادامه آورده می‌شود، تأثیر عبور قطار بر جریان ورودی و خروجی فن‌ها و نیز کانتورهای فشار و سرعت در اطراف بازشدگی فن‌ها در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با رسیدن سر قطار و عبور بدنه آن از بازشدگی فن ورودی و فن خروجی، جهت جریان در عبور از بازشدگی‌ها تغییر می‌کند. همچنین با ورود قطار به تونل و ایجاد تغییر فشار در طول تونل، فشار در محل بازشدگی فن‌ها نیز تغییر می‌کند که این مسئله می‌بایست در محاسبات مربوط به فن‌ها در نظر گرفته شود. مقایسه شکل ۲۰- ب و شکل ۱۴- ب نشان می‌دهد که حداکثر فشار در تونل و اطراف دهانه ورودی از فشار 100 پاسکال بدون حرکت قطار، به فشار 682 پاسکال در شرایط عبور قطار افزایش یافته است. حداکثر سرعت قطار در تونل قبل از عبور قطار، $7/4$ متر بر ثانیه می‌باشد



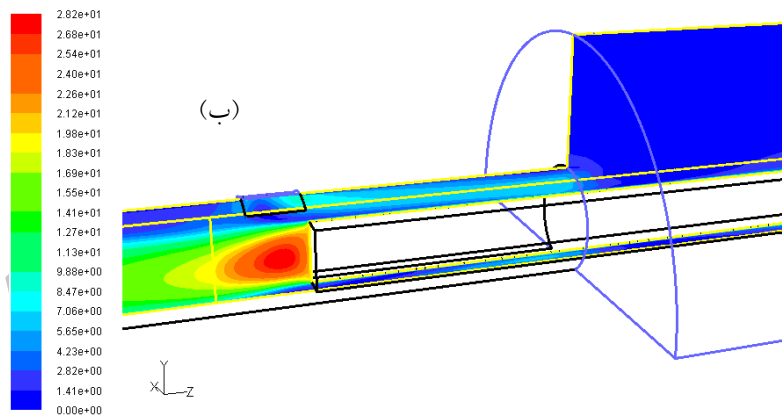
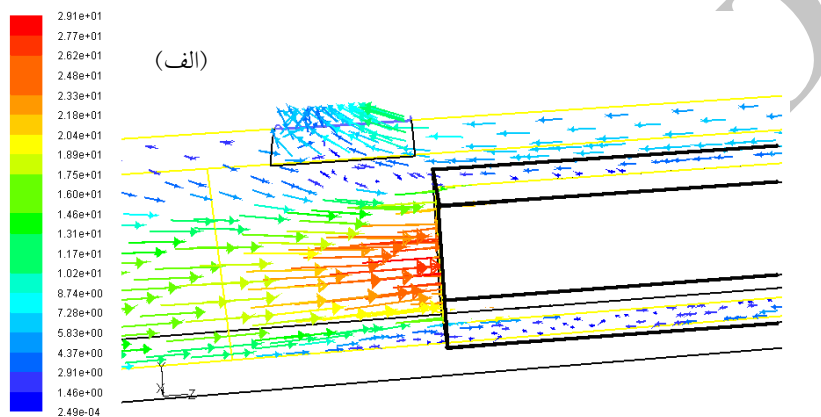
شکل ۲۰. الف) بردار سرعت ب) کانتور فشار روی صفحه میانی، در محل بازشدگی فن ورودی قبل از رسیدن قطار به این محل در زمان $t=1s$



شکل ۲۱. تغییر جهت بردارهای سرعت ناشی از عبور قطار از محل بازشدگی الف) فن ورودی در زمان $t=2s$ ب) فن خروجی در زمان $t=0.1s$



شکل ۲۲. کانتور فشار روی صفحه میانی، در محل بازشدگی فن خروجی هنگام عبور قطار از این محل در زمان $t=50/8s$



شکل ۲۳. الف) بردارهای سرعت ب) کانتور سرعت جریان روی صفحه میانی در محل بازشدگی فن خروجی هنگام عبور قطار از این محل در زمان

$t=54/8s$

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا مدل عددی ارائه شده با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود در منابع علمی صحت‌گذاری شده است. سپس میدان جریان در اطراف مدلی از یک قطار متحرک در یک نمونه از ایستگاه و تونل سیستم قطار شهری شیراز بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان‌دهنده این است که بیشترین تغییرات فشار و سرعت در محدوده اطراف قطار صورت می‌پذیرد. سیالی که در قسمت جلو قطار است با سرعت قطار به سمت جلو رانده می‌شود که در نتیجه افزایش فشار را در محدوده جلو قطار خواهد داشت. اما در قسمت پشت قطار، جریان هوایی که از جلو آمده به سمت پشت

3. Fluent 6.3.26
4. Grid Interface
5. User Defined Function
6. Dynamic Layering Method
7. Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations
8. Separation Bubble

۸- مراجع

- Fluent User Guide Version 6.3.26
- D. C. Wilcox, (1993) "Turbulence modeling for CFD", DCW Indusric Inc. La Canada, California.
- T. Y. Chen, Y. T. Lee, C. C. Hsu, (1998) "Investigation of piston effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels". Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 73, pp. 99-110.
- B. Dayman, (1982) "Small-scale aerodynamic testing for highway tunnels", Proc.4th Int. Symp. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels.
- H. M. Jang and F. Chen, (2002) "On the determination of the aerodynamic coefficients of highway tunnels". Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp. 869-896.
- J. Y. kim and K. Y. Kim, (2007) "Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway". Tunneling and Underground Space Technology 22, pp. 166-172.
- C. J. Lin, Y. K. Chuah and C. W. Liu, (2007) "A Study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system". Applied Thermal Engineering.
- P. Ricco, A. Baron and P. Molteni, (2007) "Nature of pressure waves induced by a high-speed train traveling through a tunnel". Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95, pp. 781-808.
- F. D. Yuan and S. J. You (2007) "CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform". Tunneling and Underground Space Technology 22, pp. 474-482.

قطار می چرخد و همچنین جریان هوایی نیز ناشی از کاهش فشار در پشت قطار، از ورودی تونل به سمت پشت قطار در حرکت است. در نتیجه سرعت جریال در پشت قطار بیش تر خواهد بود. در زمانی که قطار در حال کاهش سرعت می باشد، تجمع جریان در پشت آن، سبب افزایش فشار در پشت قطار می گردد که با دور شدن از قطار، فشار در پشت آن کمتر خواهد بود. در این حالت فشار نسبی در پشت قطار، دیگر منفی نمی باشد. در نتیجه حداکثر فشار، معمولاً در جلوی قطار است به جز در انتهای حرکت شتاب دار منفی، که در این حالت در پشت قطار می باشد. تغییرات فشار ایجاد شده در تونل، گاهی اوقات به حدود ۴۰۰ پاسکال می رسد. با توجه به این که این عدد در حدود اختلاف فشارهای مدنظر فن ها برای این گونه تونل ها می باشد، تأثیرات این تغییر فشار می بایست حتماً در طراحی سیستم تهویه تونل ها مد نظر قرار گیرد. همچنین نتایج حاصل از مقایسه حالت فن روشن و خاموش نشان می دهد که اندازه حباب جدایی در حالت فن روشن بیشتر است و در نتیجه افزایش فشار بیشتری مشاهده می شود. همچنین تداخل حرکت قطار و جریان های ورودی و خروجی از بازشدگی فن ها باعث تغییرات میدان سرعت و فشار در اطراف این بازشدگی ها می شود. اما به طور کلی تغییرات فشار نسبت به زمان، در حالت فن روشن و خاموش با تقریب مناسبی شبیه به هم می باشد. حرکت قطار دبی ورودی یا خروجی به تونل از سمت ایستگاه ها را به شدت تحت تأثیر خود قرار می دهد.

۶- سپاسگزاری

از همکاری مسئولان محترم سازمان قطار شهری شیراز برای ارایه اطلاعات مربوط به مشخصات تونل ها و سرعت قطار تقدیر و تشکر می گردد.

۷- پی نوشت ها

1. Test Field
2. Gambit 2.3.16