

"مقاله علمی-پژوهشی"

انتخاب و تحلیل روش مناسب تهویه تونل علوی، بندرعباس

راضیه اخباری^۱، فرهنگ سرشکی^{۲*}، سید حسن مدنی^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، razieakbari@aut.ac.ir

۲- استاد دانشگاه صنعتی شاهرود farhang.sereshki1@gmail.com

۳- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر hmadani@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱- تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳)

چکیده

با توجه به ترافیک موجود در داخل تونل‌ها، تهویه در این سازه زیرزمینی اهمیت بسزایی دارد. تهویه موجب کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت وسایل نقلیه در جو تونل می‌شود و شرایط بهتری را برای تنفس افراد در این فضای بسته ایجاد می‌کند. یکی از نکات مهم در ضرورت وجود تهویه مناسب در تونل‌ها، نقش بسزای آن در زمان بروز آتش‌سوزی و انتشار حجم بسیاری از دود در داخل تونل است. در این پژوهش، سیستم تهویه مناسب برای تونل علوی واقع در شهرک شهید رجایی، در استان هرمزگان، طراحی شده است. با استفاده از استانداردهای مختلف، لزوم استفاده از تهویه مکانیکی در این تونل مشخص و با توجه به مزیت‌های استفاده از تهویه طولی، این روش تهویه برای تونل علوی انتخاب شد. با استفاده از روش‌های کلاسیک و پیارک، شدت جریان نهایی ۱۵۵ مترمکعب در ثانیه برای تهویه این تونل محاسبه شد و سپس با در نظر گرفتن مولفه‌های مختلف فشار، افت فشار برابر با ۹۳ پاسکال بدست آمد. در نهایت با توجه به محاسبات، دو مدل جت فن از شرکت‌های Korfmann و Novenco برای تهویه تونل علوی مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه بهتر این دو جت فن در زمان آتش‌سوزی، به وسیله بسته نرم‌افزاری فلوننت، تونل در دو حالت تهویه نرمال و تهویه حین آتش‌سوزی به طور مجزا برای هر دو جت فن شبیه‌سازی شد. با مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار و با توجه به مشخصات فنی هر یک از جت فن‌ها، جت فن شرکت Novenco برای استفاده در تونل علوی مناسب تر شناخته شد.

کلمات کلیدی

ترافیک، تهویه طولی، پیارک، مدلسازی آتش، بسته نرم‌افزاری فلوننت

۱- مقدمه

مهمترین راه دسترسی به تونل علوی، استفاده از جاده ارتباطی شهر بندرعباس به بندر شهید رجایی و راه های منتهی به شهرک صنعتی است. این تونل برای عبور دو خط رفت و برگشت به عرض ۳/۶۵ متر در نظر گرفته شده و به دلیل محدودیت های زمانی و طول بلند، تونل از دو طرف حفر شده است. دهانه ورودی در ارتفاع ۵۱ متر از سطح دریا و دهانه خروجی آن در ارتفاع ۸۵ متر از سطح دریا قرار دارد. طول تونل ۱۹۱۴ متر و سطح مقطع آن ۶۵/۶ متر مربع و همچنین شیب آن ۱/۷ درصد به سمت شمال است. گستره مورد مطالعه در استان هرمزگان و در مجاورت شهر بندرعباس قرار گرفته و دمای متوسط سالانه این منطقه در حدود ۲۷ درجه سانتیگراد با رطوبت نسبی آن حداقل ۱۹ درصد و حداکثر ۱۰۰ درصد و دمای متوسط سالانه این استان در حدود ۲۷ درجه سانتیگراد است [۱۱]. مقطع تیپ تونل در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل هندسی مقطع تیپ (مقطع داخلی)، از قوسی دایره ای به شعاع ۵/۰۰ متر در بخش فوقانی و دیواره های طرفین تونل به ارتفاع ۲/۷ متر از سطح آسفالت (به صورت یک قوس با انحنای کم و شعاع ۲۱/۴ متر) تشکیل شده و به فواصل تقریباً ۵۰۰ متری، فضایی به عنوان پارکینگ در نظر گرفته شده است. سطح مقطع تونل و پارکینگ آن به ترتیب برابر با ۶۵/۶ و ۱۰۶/۵ متر مربع و محیط سطح مقطع مفید تونل و پارکینگ نیز به ترتیب برابر با ۳۱ و ۴۰/۱۴ متر است (شکل ۱).

یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیستم تهویه تونل در کنار طول، سطح مقطع و مختصات جغرافیایی تونل، وضعیت ترافیکی تونل است. به منظور تعیین آمار ترافیکی تونل علوی، ترافیک محورهای لار - بندرعباس، لار - بندر شهید رجایی، بزرگراه شیراز - فسا - بندرعباس و بزرگراه شهید رجایی و همچنین سفرهای انجام شده از شهرک علوی در نظر گرفته شده است. جدول ۱ مجموع ترافیک روزانه رفت و برگشت پیش بینی شده محور را طی دوران طرح نشان می دهد [۱۳]. در نهایت برای تونل علوی، ترافیک متوسط روزانه در سال ۱۴۱۵ که دارای بالاترین میزان ترافیک است در نظر گرفته شده است و با اعمال ضریب ۱۵ درصد، میزان ترافیک متوسط ساعتی، برابر با ۶۳۴ دستگاه در ساعت محاسبه شده است.

ایمنی در تونل‌ها، به‌عنوان فضای بسته که نقش مهمی در سیستم حمل نقل عمرانی و معدنی دارد و به‌علت محدودیت در دسترسی و ساخت آن‌ها بسیار مهم است. در این بین، تهویه، به‌عنوان یکی از ملاحظات ایمنی نقشی حیاتی دارد. تهویه حین بهره برداری در تونل‌ها، به‌منظور رساندن هوای تازه به داخل فضای محدود تونل‌ها، رقیق کردن گازهای آلاینده متصاعد شده از وسایل نقلیه موجود در تونل‌ها و همچنین خارج کردن دود ناشی از آتش سوزی های احتمالی در تونل انجام می‌گیرد. تهویه تونل‌ها، روش‌های مختلفی دارد که در انتخاب بهترین روش باید مسائل فنی و اقتصادی نیز در نظر گرفته شود. اغلب جریان هوای ناشی از حرکت خودروها (اثر پیستونی) و جریان هوای ناشی از تهویه طبیعی، برای رساندن هوای تازه و تخلیه هوای آلوده در تونل‌های کمتر از ۳۰۰ متر کافی است [۴-۱]. اما در تونل‌های طولانی‌تر، استفاده از تجهیزات مکانیکی ضرورت می‌یابد [۱، ۷-۵]. هدف از این مطالعه، در مرحله اول انتخاب تجهیزات مناسب تهویه تونل علوی بر اساس روش‌های مختلف و استانداردهای معتبر دنیا و انتخاب بهترین آن هاست. همچنین، با استفاده از کدهای دینامیک سیالات محاسباتی موجود، جریان حاصل از جت فن‌ها و تأثیر آن‌ها بر دود ناشی از آتش‌سوزی حاصل از انفجار یک تانکر حاوی سوخت در تونل، شبیه‌سازی و نتایج حاصل از جت فن‌های انتخابی با یکدیگر مقایسه شده است.

تصادفات فاجعه بار که در سال‌های ۱۹۹۹ (در کوه‌های مون بلان^۱ با ۳۹ کشته و تاورن^۲ با ۱۲ کشته) و ۲۰۰۱ (گلینال^۳ با ۸ کشته و سن گوتارد^۴ با ۱۱ کشته) اتفاق افتاد، مساله آتش سوزی در تونل‌ها را به‌خبری بسیار مهم در سرتاسر دنیا بدل کرد [۸ و ۹]. در طی این سال‌ها، مطالعات زیادی بر روی مقوله آتش انجام شده است. نتایج این پروژه‌ها برای فهم دینامیک آتش در تونل‌ها جهت پیشرفت روش‌های مقابله و محافظت مقابل آتش سوزی در تونل‌ها بسیار تأثیرگذار بوده است [۱۰].

۲- مشخصات تونل مورد مطالعه

تونل علوی به طول ۱۹۱۴ متر در بخش غرب - شمال غرب شهر بندرعباس و شمال - شمال غرب بندر شهید رجایی واقع شده است.

نتایج بدست آمده از محاسبات شدت جریان به روش کلاسیک نشان می دهد که در روش فرانسوی در میان دیگر روش ها، شدت جریان با سخت گیری بیشتری نسبت به دیگر روش ها محاسبه شده و مقدار بالاتری حاصل می شود. در محاسبه شدت جریان به روش پیارک، خودروهای موجود در تونل به سه دسته سواری، کامیونت و ماشین های سنگین تقسیم شده اند. شدت جریان هوا با استفاده از رابطه ۱ برای هر وسیله نقلیه حساب شده است [۱۵].

(۱)

$$Q = \sum (n_{veh} \cdot Q_o) \cdot \frac{1}{C_{adm} - C_{amb}}$$

که در آن Q شدت جریان هوا (m^3/h)، n_{veh} تعداد وسایل نقلیه در داخل تونل، Q_o میزان انتشار مونوکسید کربن یا اکسید ازت ($g/h/veh$) و دوده C_{adm} ($m^2/h/veh$) حد مجاز آلاینده (g/m^3)، C_{amb} مقدار آلاینده موجود در هوای بیرون تونل (g/m^3) است.

میزان انتشار گازهای آلاینده (Q_o) از روابط ۲ و ۳ محاسبه می شود:

برای ماشین های سواری و کاری سبک:

$$Q_o = q_{ex}(v, i) \cdot f_h \cdot f_t \cdot f_e \quad (2)$$

برای ماشین های سنگین:

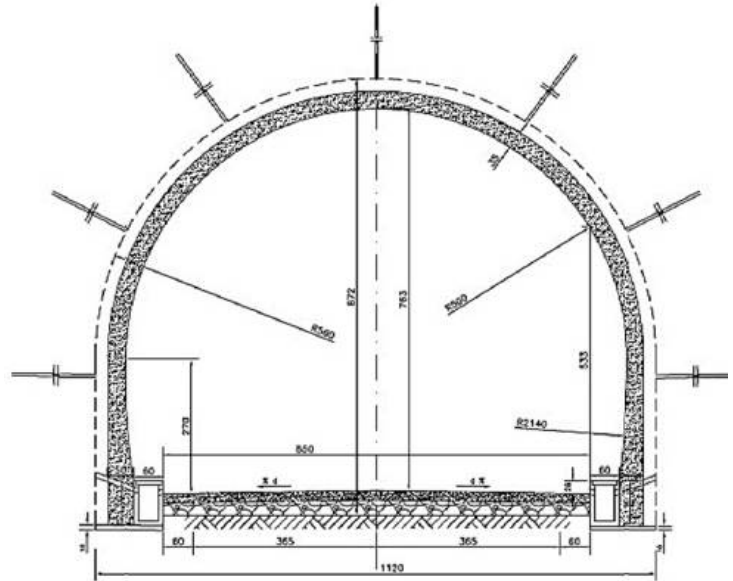
$$Q_o = q_{ex}(v, i) \cdot f_h \cdot f_t \cdot f_e \cdot f_m \quad (3)$$

که در آن، $q_{ex}(v, i)$ فاکتور انتشار پایه آلاینده است که بسته به سرعت حرکت و شیب جاده بدست می آید (بر حسب $g/h/veh$ برای مونوکسید کربن و اکسیدهای ازت و یا $m^2/h/veh$ برای دوده)، f_h ضریب ارتفاع، f_t ضریب زمان، f_e ضریب تأثیر مربوط به استانداردهای مختلف و f_m ضریب جرمی برای ماشین های سنگین است.

در این روش نیز شدت جریان برای هر سه آلاینده به طور جداگانه محاسبه شد (جدول ۳).

برای بدست آوردن سرعت بحرانی در تونل علوی، ابتدا شدت جریان در مواقع آتش سوزی محاسبه شد. برای محاسبه این مقدار، انرژی حاصل از انفجار یک تانکر سوخت برابر با 200 MW در دمای 2000°C مد نظر قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل بدون بعد [۱۶] که از رابطه ۴ بدست می آید، سرعت بحرانی و شدت جریان مورد نیاز محاسبه شد:

$$u_c^* = \begin{cases} 0.81Q^{*1/3}, & Q^* \leq 1 \\ 0.43, & Q^* > 0.15 \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۱- مقطع تیپ تونل علوی [۱۲]

۳- بررسی ضرورت اجرای تهویه مکانیکی

برای بررسی لزوم استفاده از تهویه مکانیکی در تونل علوی از استانداردهای فرانسه، نروژ و انگلیس استفاده شد که بر اساس تمامی آنها استفاده از تهویه مکانیکی در این تونل ضرورت دارد [۱۴].

۴- محاسبه شدت جریان هوای لازم

در محاسبات شدت جریان این تونل، سه دسته آلاینده مونوکسید کربن، دوده و اکسیدهای ازت در نظر گرفته شده اند. اگر چه برای محاسبه مقدار هوای لازم برای تهویه، اغلب مقدار مونوکسید کربن به عنوان مبنای محاسبات قرار می گیرد، اما در مورد تونل علوی، به علت موقعیت این تونل و عبور تعداد بالای وسایل نقلیه سنگین نسبت به دیگر وسایل نقلیه، میزان تولید دوده بالا است و به همین دلیل، میزان انتشار همه آلاینده ها و به دنبال آن میزان هوای لازم برای تهویه هر کدام محاسبه شده و سپس از طریق تحلیل آماری، شدت جریان لازم برای تهویه تونل علوی به دست آمده است. در این راستا پس از آن که مقدار مجاز هر آلاینده در تونل بر اساس وضعیت ترافیکی مشخص شد، شدت جریان با استفاده از دو روش کلاسیک (روش انگلیسی، فرانسوی و نروژی) و روش پیارک برای هر سه آلاینده در سه حالت ترافیکی روان، نیمه سنگین و سنگین محاسبه شد (جدول ۲).

جدول ۱- میزان ترافیک روزانه عبوری از مسیر در دوره طرح [۱۳]

سال	ترافیک متوسط روزانه ^۵	سال	ترافیک متوسط روزانه	سال	ترافیک متوسط روزانه	سال	ترافیک متوسط روزانه
۱۳۹۶	۲۰۰۵	۱۴۰۱	۲۴۳۹	۱۴۰۶	۲۹۶۷	۱۴۱۱	۳۶۱۰
۱۳۹۷	۲۰۸۵	۱۴۰۲	۲۵۳۶	۱۴۰۷	۳۰۸۶	۱۴۱۲	۳۷۵۴
۱۳۹۸	۲۱۶۸	۱۴۰۳	۲۶۳۸	۱۴۰۸	۳۲۰۹	۱۴۱۳	۳۹۰۴
۱۳۹۹	۲۲۵۵	۱۴۰۴	۲۷۴۳	۱۴۰۹	۳۳۳۷	۱۴۱۴	۴۰۶۰
۱۴۰۰	۲۳۴۵	۱۴۰۵	۲۸۵۳	۱۴۱۰	۳۴۷۱	۱۴۱۵	۴۲۲۳

جدول ۲- شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل علوی با استفاده از روش‌های کلاسیک بر حسب m^3/s

عامل آلاینده	روش	شرایط ترافیکی		
		روان (۶۰ km/h)	نیمه سنگین (۴۰ km/h)	سنگین (۱۰ km/h)
CO	انگلیسی	۵۱	۷۳	۱۴۸
	نروژی	۳۱	۳۸	۱۱۱
	فرانسوی	۵۱	۶۸	۲۷۱
دوده	انگلیسی	۲۸۳	۱۸۶	۳۶۰
	نروژی	۹۵	۹۵	۹۵
	فرانسوی	۲۶۰	۳۱۲	۴۶۸
NO _x	کلاسیک	۱۵۸	۱۵۸	۱۵۸

جدول ۳- شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل علوی با روش پیارک (m^3/s)

عامل آلاینده	شرایط ترافیکی		
	روان	نیمه سنگین	سنگین
CO	۸۵	۱۱۴	۲۰۸
دوده	۷۴	۶۵	۱۰۷
NO _x	۲۷۹	۲۷۰	۳۱۵

همانطور که مشاهده می شود، شدت جریان محاسبه شده از روش‌های مختلف، پراکنده است و این امر به دلیل مبنای مختلف روش‌ها و در نظر گرفتن استانداردهای ناوگان حمل و نقل متفاوت در هر روش است. به همین سبب، برای انتخاب شدت جریان نهایی در این پژوهش، تحلیلی آماری بر روی داده های حاصل انجام شد. بدین صورت که شدت جریان نهایی با میانگین گیری از اعدادی به دست آمد که در محدوده زیر قرار گیرند [۱۷]:

$$m - \delta < Q_{final} < m + \delta \quad (7)$$

که در آن، δ انحراف معیار داده ها و m میانگین آن ها است. با توجه به این رابطه و محاسبه انحراف معیار و میانگین برای شدت جریان های حاصل از دو روش کلاسیک و پیارک، داده هایی که بین دو مقدار ۱۰۷ و ۳۴۵ مترمکعب در ثانیه باشند، انتخاب شدند. در نهایت با میانگین گیری از این داده

که در آن، u_c^* سرعت بحرانی بدون بعد و Q^* آهنگ رهایش گرمای بدون بعد است که از روابط ۵ و ۶ به دست می آید.

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_o \cdot C_p \cdot T_o \cdot g^{1/2} \cdot H^{5/2}} \quad (5)$$

$$u_c^* = \frac{u_c}{\sqrt{gH}} \quad (6)$$

که در این روابط، Q آهنگ رهایش گرما (kW)، ρ_o جرم مخصوص هوا (kg/m^3)، C_p گرمای ویژه هوا ($J/kg.K$)، T_o دمای محیط آتش سوزی (K)، g شتاب گرانش زمین (m/s^2)، H ارتفاع تونل (m) و u_c سرعت بحرانی (m/s) است. طبق روابط یاد شده، سرعت بحرانی برابر با $3/718 m/s$ به دست می آید. همچنین با توجه به سطح مقطع تونل علوی، شدت جریان لازم برای تهویه در این حالت برابر با $244 m^3/s$ خواهد بود.

حدود ۹۰ درصد کل افت فشار استاتیکی را تشکیل می دهد. به همین دلیل، در بسیاری از موارد، ۱۰ درصد به این مقدار می افزایند و نتیجه برابر افت فشار استاتیکی کل در نظر گرفته می شود. افت های موضعی که در اثر وجود انحنای در مسیر، بزرگ یا کوچک شدن سطح مقطع و یا تغییر شکل آن به وجود می آید نیز بخش دیگری از افت فشار استاتیکی را تشکیل می دهد. افت فشار دینامیکی نیز تابع سرعت خروجی هوا است [۱۴].

با توجه به آن که در سیستم تهویه طولی، شدت جریان هوا در طول تونل ثابت است. بنابراین افت فشار استاتیکی از رابطه ۱۱ بدست می آید:

$$\Delta P_f = RQ^2 \quad (11)$$

که در آن، ΔP_f افت فشار استاتیکی بر حسب میلی متر آب (کیلوگرم نیرو بر متر مربع)، Q شدت جریان هوا بر حسب متر مکعب بر ثانیه و R مقاومت آیرودینامیکی (مجموع مقاومت های اصطکاکی و موضعی) تونل بر حسب کیلومتر است [۱۸]. برای محاسبه مقاومت اصطکاکی تونل از رابطه ۱۲ استفاده می شود:

$$R = \frac{\alpha p}{\Delta^3} \quad (12)$$

در این رابطه α ، ضریب اصطکاک تونل، l طول تونل بر حسب متر، p محیط تونل بر حسب متر و A سطح مقطع تونل بر حسب متر مربع است [۱۸]. در این رابطه مقدار α با توجه به پوشش بتنی صاف تونل برابر با $10^{-4} \times 14/4$ در نظر گرفته شد. با توجه به رابطه ۱۲، مقاومت تونل برابر با $10^{-3} \times 0/3$ کیلومتر محاسبه شده و در نهایت افت فشار استاتیکی نیز ۷۱ پاسکال به دست آمد.

افت فشار دینامیکی هوا نیز از رابطه ۱۳ محاسبه می شود:

$$\Delta P_D = \gamma \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

که در این رابطه، ΔP_D افت فشار دینامیکی هوا بر حسب کیلوگرم نیرو بر متر مربع (kg/m^2)، γ وزن مخصوص هوا که برابر با $1/2 \text{ kg}/\text{m}^3$ در نظر گرفته شده است، V سرعت هوا بر حسب متر در ثانیه و g شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه است که به این ترتیب، افت فشار دینامیکی در تونل علوی برابر با ۳ پاسکال به دست آمده است.

برای محاسبه افت فشار ناشی از باد محلی، از رابطه ۱۴ استفاده شده است:

های منتخب، مقدار $155 \text{ m}^3/\text{s}$ به عنوان شدت جریان نهایی در تونل علوی انتخاب شد.

از آنجا که عملیات حفاری تونل علوی در حال حاضر به اتمام رسیده است و ارتفاع روباره نیز به اندازه ای است که از لحاظ اقتصادی حفر دوپل میانی توجیه پذیر نیست و همچنین طول زیاد تونل و بودجه پروژه باعث شده است تا استفاده از روش تهویه عرضی و نیمه عرضی امکان پذیر نباشد، سیستم تهویه طولی با استفاده از بادبزن های سقفی در نظر گرفته شد. علاوه بر عوامل یاد شده، در هنگام آتش سوزی، این نوع سیستم تهویه، جریان دود را از بالادست منبع آتش سوزی خارج می کند که باعث می شود این امکان برای مسافران داخل تونل فراهم شود تا از مسیر پایین دست منبع آتش سوزی از تونل خارج شوند.

در قدم بعد با در نظر گرفتن مولفه های مختلف افت فشار، به منظور محاسبه تعداد جت فن مورد نیاز، افت فشار در تونل علوی محاسبه شد.

به طور کلی، افت فشار تونل از رابطه ۸ به دست می آید:

$$\Delta P_T = \Delta P_{en,ex} + \Delta P_p + \Delta P_s + \Delta P_D \pm \Delta P_w \quad (8)$$

که در آن، ΔP_T افت فشار کلی، $\Delta P_{en,ex}$ افت فشار مربوط به دهانه های ورودی و خروجی، ΔP_p افت فشار مربوط به اثر پیستونی ناشی از حرکت خودروها در داخل تونل، ΔP_s افت فشار استاتیکی، ΔP_D افت فشار دینامیکی، ΔP_w افت فشار مربوط به باد محلی است که همگی بر حسب پاسکال هستند. افت فشار مربوط به دهانه ورودی و خروجی با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ بدست می آید:

$$\Delta P_{en} = \xi \rho v^2 \quad (9)$$

$$\Delta P_{ex} = 1/2 \rho v^2 \quad (10)$$

در این رابطه ξ ضریب افت فشار مربوط به شکل دهانه که برای تونل علوی ۰/۱ در نظر گرفته شده است، ρ جرم مخصوص هوا که برابر با $1/2$ کیلوگرم بر متر مکعب است، v سرعت متوسط هوا در داخل تونل بر حسب متر بر ثانیه که در مورد تونل علوی برابر با $2/4$ متر بر ثانیه است. بر این اساس افت فشار دهانه ورودی و خروجی در تونل علوی به ترتیب برابر با $0/691$ و $3/456$ پاسکال به دست آمد.

در مورد افت فشار استاتیکی، مهمترین عامل این فشار، افت فشار حاصل از اصطکاک هوا با جداره تونل است. این بخش

با توجه به رابطه ۸، افت فشار کلی برابر با ۹۳ پاسکال به دست آمد.

برای انتخاب سیستم تهویه، مدل های مختلف از جت فن های موجود در چندین شرکت با در نظر گرفتن مشخصات فنی آن ها در نظر گرفته شد که در جدول های ۴ الی ۷ مشخصات آن ها ارائه شده است.

$$\Delta P_w = 1/2 \gamma V_w^2 \quad (14)$$

که در آن، ΔP_w افت فشار ناشی از باد محلی بر حسب پاسکال، γ وزن مخصوص هوا که برابر با ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته می شود و V سرعت باد محلی بر حسب متر در ثانیه است که برای تونل علوی برابر با ۴/۹ متر در ثانیه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، این مقدار برای تونل علوی برابر با ۱۴ پاسکال محاسبه شده است.

جدول ۴- مشخصات فنی جت فن های شرکت Korfmann سری AL

مدل	توان (kW)	سرعت دوران (m/s)	فشار خروجی (Pa)	شدت جریان (m ³ /s)	قطر بدنه (mm)	قطر لوله شیپوری (mm)	ارتفاع (mm)	وزن (kg)
AL 12-450	۴۵/۰	۲۹/۲	۵۲۰	۳۳/۰	۱۲۰۰	۱۲۶۰	۱۵۷۵	۱۰۰۰
AL 12-550	۵۵/۰	۳۳/۶	۷۰۰	۳۸/۰	۱۲۰۰	۱۲۶۰	۱۵۷۰	۱۱۰۰
AL 12-750	۷۵/۰	۳۸/۵	۹۰۰	۴۳/۵	۱۲۰۰	۱۲۶۰	۱۶۱۰	۱۳۶۰

جدول ۵- مشخصات فنی جت فن های شرکت Novenco سری AUR

مدل	توان (kW)	سرعت دوران (RPM)	سرعت هوا (m/s)	شدت جریان (m ³ /s)	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	وزن (kg)
Novenco 900/403-6	۱۵	۱۴۷۰	۲۷/۴۲	۱۷/۴۴	۱۱۱۵	۱۱۱۸	۴۶۰
Novenco 1000/403-6	۲۲	۱۴۷۰	۳۰/۳۲	۲۳/۸۱	۱۲۱۵	۱۲۱۸	۵۱۰
Novenco 1120/403-6	۳۰	۱۴۷۰	۳۲/۲۶	۳۱/۷۹	۱۳۳۸	۱۳۳۹	۵۶۰
Novenco 1250/403-6	۳۷	۱۴۷۰	۳۲/۱۸	۳۹/۴۹	۱۶۵۰	۱۵۶۰	۶۱۰

جدول ۶- مشخصات فنی جت فن های شرکت ابزار تونل جهان (ATJ) مدل JAR ۱۲

مدل	بیشینه نیرو (N)	شدت جریان (m ³ /s)	سرعت (m/s)	توان موتور (kW)	سرعت دوران (rpm)
JAR 12-22/4	۹۴۶	۳۰/۶	۲۷/۱	۲۲	۱۵۰۰
JAR 12-30/4	۱۰۹۲	۳۳/۳	۲۹/۴	۳۰	۱۵۰۰
JAR 12-37/4	۱۲۵۰	۳۵/۶	۳۱/۵	۳۷	۱۵۰۰
JAR 12-45/4	۱۴۴۰	۳۸/۲	۳۳/۷	۴۵	۱۵۰۰

جدول ۷- مشخصات فنی جت فن های شرکت تجهیز تونل جوان

مدل	توان (N/kW)	سرعت دوران (rpm)	قطر (cm)	شدت جریان (m ³ /s)	فشار (Pa)
JF60	۱۵ (۱۸/۵)	۳۰۰۰	۶۰	۸/۹	۳۲۰۰
JF70	۳۷	۳۰۰۰	۷۰	۱۲/۸	۴۰۰۰
JF90	۵۵ (۷۵)	۳۰۰۰	۹۰	۱۸/۲۲-۵	۵۲۰۰-۴۸۰۰

فن ها هستند که به ترتیب برابر با ۰/۹، ۰/۸ و ۱ در نظر گرفته شده اند. اگر فاصله بین جت فن ها، برای جت فن های بدون تیغه منحرف کننده هوا، حداقل ۱۰ برابر قطر هیدرولیکی و برای جت فن های مجهز به تیغه منحرف کننده هوا، ۶ تا ۸ برابر قطر هیدرولیکی تونل باشد، ضریب فاصله طولی برابر با ۱ در نظر گرفته می شود. پس از محاسبه فشار محوری جت فن ها، برای محاسبه تعداد فن ها برای نصب در طول تونل، طبق رابطه ۱۶، افت فشاری که باید در طول تونل ایجاد شود بر فشار محوری جت فن مورد نظر تقسیم شده است. فاصله بین ردیف

به منظور انتخاب بهترین جت فن برای این طرح، ابتدا فشار محوری برای برای هر جت فن از رابطه ۱۵ بر حسب پاسکال محاسبه شد:

$$P_{jetfan} = \rho Q (V_{jetfan} - V) \left(\frac{1}{A} \right) (\eta_1 \eta_2 \eta_3) \quad (15)$$

که در آن، ρ وزن مخصوص هوا (۱/۲ kg/m³)، V_{jetfan} سرعت هوای خروجی از هر جت فن (m/s)، V سرعت هوای داخل تونل (m/s)، A سطح مقطع تونل (m²)، η_1 ضریب کارکرد جت فن، η_2 ضریب نصب جت فن و η_3 ضریب فاصله طولی بین جت

۱۱	۸/۶۴	Novenco 1000/403-6
۸	۱۲/۳۴	Novenco 1120/403-6
۷	۱۵/۲۵	Novenco 1250/403-6

جدول ۹- فشار محوری جت فن ها و تعداد آن ها برای جت فن های شرکت ابزار تونل جهان

مدل	$(Pa) P_{jetfan}$	تعداد جت فن برای نصب در تونل
JAR 12-22/4	۹/۸۳	۱۰
JAR 12-30/4	۱۱/۶۹	۸
JAR 12-37/4	۱۳/۴۷	۷
JAR 12-45/4	۱۵/۵۴	۶

جدول ۱۰- فشار محوری جت فن ها و تعداد آن ها برای جت فن های شرکت تجهیز تونل جوان

مدل	$(Pa) P_{jetfan}$	تعداد جت فن برای نصب در تونل
JF60	۳/۳۷	۲۸
JF70	۵/۱۴	۱۹
JF90	۹/۲۰	۱۱

های هر جت فن ۸ تا ۱۰ برابر قطر هیدرولیکی تونل در نظر گرفته شده است.

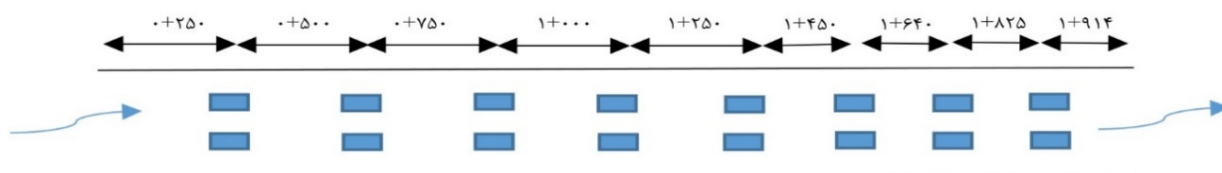
برای محاسبه تعداد جت فن ها از رابطه ۱۶ استفاده شد [۱۹]:

$$n = \left[\frac{\Delta P}{P_{jetfan}} \right] + 1 \quad (16)$$

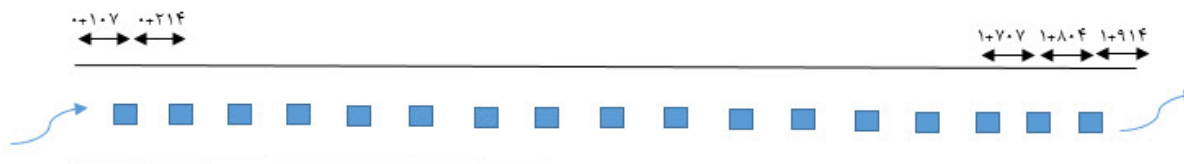
در جدول های ۸ تا ۱۰، فشار محوری جت فن های انتخاب شده از شرکت های مختلف همراه با تعداد مورد نیاز از هر جت فن آورده شده است.

جدول ۸- فشار محوری جت فن ها و تعداد آن ها برای جت فن های شرکت Novenco

مدل	P_{jetfan} (Pa)	تعداد جت فن برای نصب در تونل
Novenco 900/403-6	۵/۶۷	۱۷



شکل ۲- شمایی از نصب جت فن های شرکت Korfmann در تونل علوی



شکل ۳- شمایی از نصب جت فن های شرکت Novenco در تونل علوی

جدول ۱۱- آرایش جت فن ها برای تهویه تونل علوی با استفاده از دو مدل جت فن مختلف

مدل جت فن	تعداد کل	تعداد در هر ردیف	فاصله ردیفها از هم
Novenco (900/403-6)	۱۷	۱	تقریباً ۱۰۴ متر
Korfmann (AL12-450)	۱۶	۲	تقریباً ۲۵۰ متر

۵- مدلسازی آتش

با وجود نرم افزارهای مختلفی که برای شبیه سازی عددی مساله های مبنی بر دینامیک سیالات محاسباتی وجود دارد، به علت سهولت دسترسی، در این پژوهش از بسته نرم افزاری انسیس فلونت ۷ استفاده شده است. در این قسمت با در نظر گرفتن یک سناریو آتش در تونل، شرایط ایجاد شده در تونل به وسیله نرم افزار شبیه سازی شد. پس از آن که آتش سوزی در

با توجه به فاصله مناسب میان تعداد جت فن های مدل Novenco 900/403-6، این مدل جت فن نیز انتخاب شده است. در نهایت دو مدل جت فن از شرکت های Korfmann و Novenco انتخاب شد که آرایه آن ها در تونل در شکل های ۲ و ۳ و جدول ۱۱ آورده شده است.

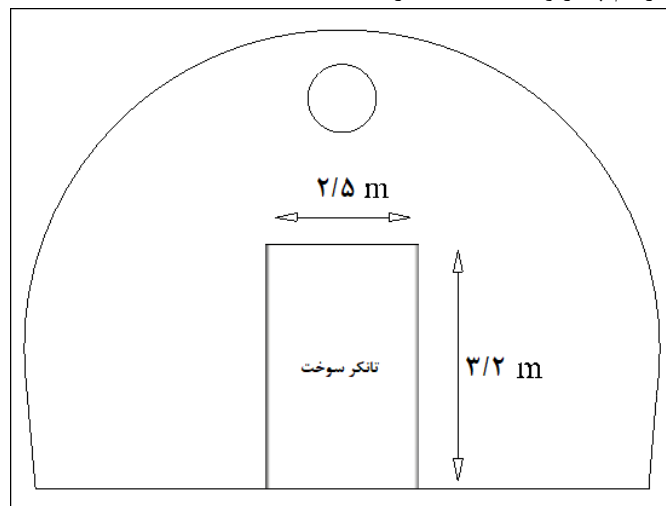
نیز فعال شدند. از آن جا که زمان در تغییرات رفتار دود تأثیر گذار است، مساله وابسته به زمان^{۱۰} حل می شود. برای بررسی تغییرات دمایی، معادله انرژی نیز فعال و برای شبیه سازی آتش سوزی از مدل چند فازی^{۱۱} استفاده شد و محاسبات حجم سیال^{۱۲} انجام گرفت. به دلیل آن که بیشتر حجم دود از گاز دی اکسید کربن تشکیل شده است، این گاز به عنوان نماینده دود حاصل از آتش منظور و در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. چگالی گاز در دمای متوسط آتش که در این پژوهش 400°C فرض شده، محاسبه و مقدار گاز (دود) خروجی در هر ثانیه از سقف تانکر محاسبه و وارد نرم افزار شد. در آخر نیز، از الگوریتم سیمپل برای محاسبه استفاده و مساله برای حل آماده شد.

تونل رخ می دهد، تونل یک طرفه شده و وسایل نقلیه از تونل خارج می شوند به طوری که در پایین دست آتش، هیچ وسیله نقلیه ای وجود نداشته باشد. در این وضعیت، جت فن ها برای تامین سرعت بحرانی و جلوگیری از پدیده عقب زدگی در بالا دست آتش به فعالیت خود ادامه می دهند.

۵-۱- معادلات و قوانین حاکم بر مدلسازی

محاسبات در مدل سازی تونل علوی توسط بسته نرم افزاری فلوئنت انجام گرفته است که در آن از روش حجم محدود^۸ برای حل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس^۹ استفاده می شود.

برای مدلسازی جریان سیال در مورد تونل علوی، معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس فعال شده اند. سیال داخل تونل به عنوان گاز ایده آل تراکم پذیر و جریان به شکل آشفته در نظر گرفته شد و معادلات گاز ایده آل تراکم پذیر و $\epsilon - k$ استاندارد



شکل ۴- نمای رو به رو از نحوه قرارگیری تانکر سوخت در تونل

مش بندی تونل و جت فن ها، از نوع مش سازمان یافته و المان شش وجهی استفاده شد. با بالا رفتن تعداد مش در مدل، دقت حل مساله بالا می رود، اما پس از مقدار معینی، میزان بالا رفتن دقت حل به میزان ناچیزی افزایش می یابد. بنابراین، به دلیل آن که تعداد زیاد مش، زمان اجرای مدل را بسیار بالا می رود، برای جلوگیری از این اتلاف وقت، تعداد مش بهینه شد.

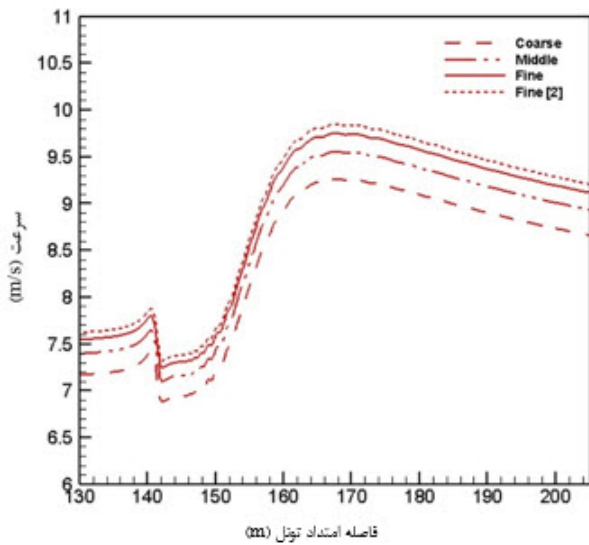
یکی از نکات مهم در شبیه سازی عددی، عدم وابستگی نتایج آن به تعداد شبکه محاسباتی است. در این بخش با تغییر تعداد شبکه در راستای طول تونل و استخراج داده های سرعت برای هر یک از شبکه های استفاده شده، عدم وابستگی نتایج به

۵-۲- هندسه

محدوده مورد مطالعه، شامل تونل، جت فن ها (از دو شرکت Novenco و Korfmann) و تریلی حامل تانکر سوخت است. تانکر حاوی سوخت برای سهولت در مدل سازی به شکل یک مکعب مستطیل در نظر گرفته شد (شکل ۴).

۵-۳- مش بندی تونل

شبکه بندی مدل در نرم افزار شبکه بندی انسیس^{۱۳} انجام شد. از آنجا که طول تونل زیاد است، انتخاب نوع مش تأثیر به سزایی در زمان اجرای مدل و آهنگ همگرایی آن دارد. به علاوه می بایست نوعی از المان مش بندی انتخاب شود که دقت کافی برای حل مساله داشته باشد. به همین علت، برای

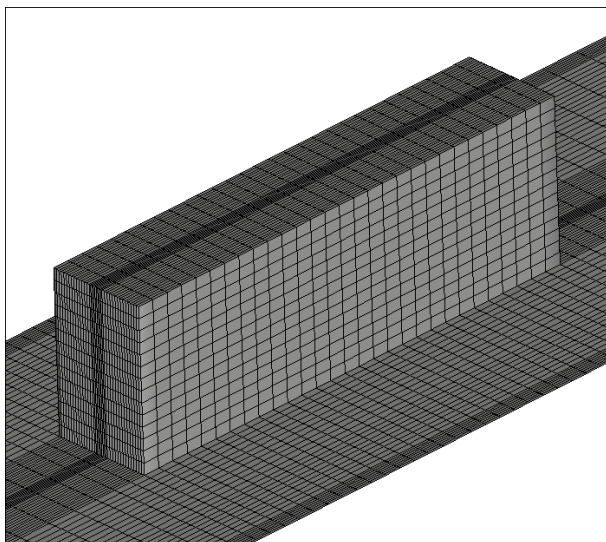


شکل ۶- نمودار استقلال از شبکه

۴-۵- شرایط مرزی

برای جهت گیری رفتار مساله برای حل آن، شرایط مرزی به شکل زیر اعمال شد:

- برای اعمال شرایط مرزی در دهانه تونل، از آن جایی که ابتدا و انتهای تونل به فضای آزاد راه دارد و فشار نسبی هوا برابر با صفر است، از شرایط مرزی فشار $\square\square\square$ استفاده شد.
- دیواره ها و کف تونل و همچنین دیواره های جت فن به عنوان دیواره در نظر گرفته شد.



شکل ۷- مش بندی تانکر حاوی سوخت در تونل مجهز به جت فن

شرکت Novenco

- برای آن که نشان داده شود که ورودی و خروجی جت فن ها باز است و سیال در آن جریان دارد،

تعداد سلول های محاسباتی بررسی شد. شبکه در راستای طولی در هر گام به نسبت ۱/۴۴ رشد کرده و داده های سرعت مطابق شکل ۵ در ارتفاع ۵ متری از کف تونل برای طولی معادل ۸۰ متر در راستای طولی تونل استخراج و با یکدیگر مقایسه شد.

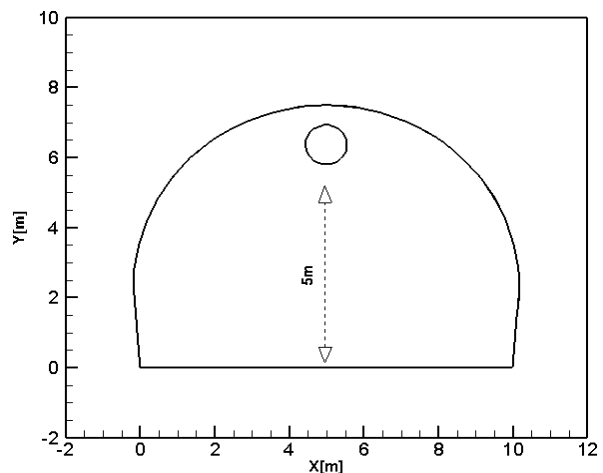
در جدول ۱۲، تعداد شبکه در نظر گرفته شده در ۴ حالت آورده شده است که نمودار سرعت آلاینده در امتداد تونل در هر یک از این حالتها در شکل ۶ نشان داده شده است.

محاسبه شده در هر گام

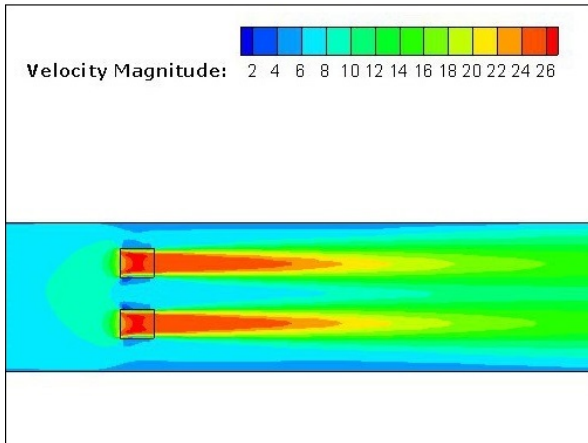
شماره گام	گام اول	گام دوم	گام سوم	گام چهارم
تعداد شبکه	۹۰۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰۰	۱۹۰۰۰۰۰	۲۶۰۰۰۰۰

در واقع شکل ۶ داده های سرعت در هر گام شبکه را نشان داده و مشخص می کنند تقریباً با چه تعداد شبکه ای دیگر تغییر چشم گیری در نتایج ایجاد نمی شود؛ چرا که تعداد شبکه بیشتر دقت شبیه سازی را از یک سو و زمان شبیه سازی را از سوی دیگر افزایش می دهد. با توجه به اختلاف کم نتایج در گام سوم و چهارم، تعداد شبکه در سومین گام برای تمام سناریوهای بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

در نتیجه، برای حالتی که از ۱۷ جت فن شرکت Novenco با آرایه تکی استفاده شد، تونل به ۳،۸۲۴،۸۱۸ المان و برای حالتی که از جت فن شرکت Korfmann با آرایش دو قلو استفاده شد، تونل به ۴،۱۳۱،۶۸۱ المان تقسیم شد (شکل ۷).



شکل ۵- محل داده برداری سرعت در بررسی استقلال از شبکه



شکل ۹- نمای سه بعدی از سرعت جریان هوا در تونل مجهز به جت فن های شرکت Korfmann در حالت تهویه نرمال

با توجه به شکل های ۸ و ۹، منحنی های هم سرعت استخراج شده از نرم افزار که سرعت جریان هوای موجود در تونل را در یک طیف رنگی آبی تا قرمز نشان می دهند، نواحی با رنگ آبی پررنگ تر نشان دهنده قسمت هایی از تونل است که سرعت هوا در آن کمتر است و هر چه رنگ نواحی به قرمز نزدیک تر می شود، سرعت هوا در آنجا افزایش می یابد. با توجه به نتایج حاصله، از آن جا که جت فن ها توانسته اند سرعت هوا داخل تونل را به سرعت بحرانی که در فصل قبل محاسبه شد برسانند، عملکرد جت فن ها در حالت عادی قابل قبول است.

ب) پس از تعادل جت فن ها با هوای داخل تونل و پایداری سرعت هوا، داخل تونل آتش سوزی شروع شده و گاز دی اکسید کربن با آهنگ ۹/۹ کیلوگرم در ثانیه وارد تونل می شود. آتش توسط اپراتور تشخیص داده می شود و با ادامه فعالیت تجهیزات تهویه تا تثبیت سرعت طولی، سرعت هوا در تونل در حال افزایش است در این مرحله با گذر زمان، آهنگ آتش سوزی تا زمان ۲۳۵ ثابت است. شکل های ۱۰ و ۱۱ منحنی های هم سرعت هوا را در هر دو مدل تونل نشان می دهند.

دهانه های جت فن ها به عنوان اینتریور^{□□} به فلوئنت معرفی شد. سپس برای شبیه سازی جریان هوای داخل جت فن ها، از قرار دادن منبع مومنتوم روی سیال با استفاده از تراست ارائه شده جت فن در کاتالوگ مربوطه استفاده شد.

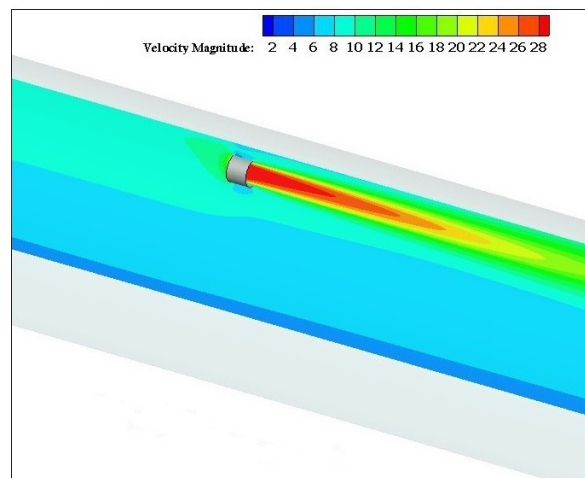
- دیواره های تانکر به عنوان دیوار به نرم افزار معرفی شد و برای نشان دادن دود خروجی از سقف تانکر از شرایط مرزی ورود آهنگ جرمی^{□□□} استفاده و درجه و آهنگ تولید حرارت به سایر سطوح مکعب مستطیل اعمال شد. آهنگ رهائش گرما^{□□□□} در حدود ۲۰۰ MW در نظر گرفته شد [۲۰].

۵-۵- اجرای مدل و نتایج مدل سازی

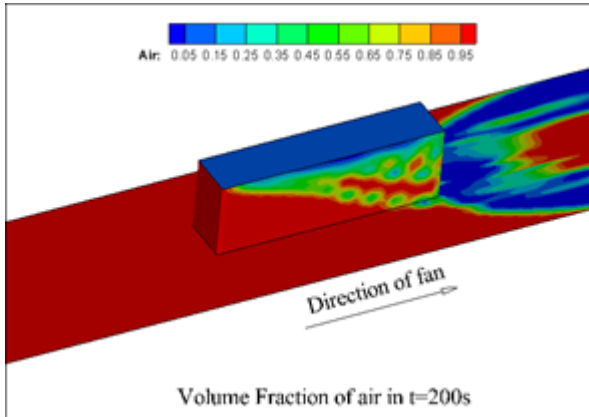
در مجموع کل زمان شبیه سازی ۳۰۰ ثانیه بود که با استفاده از تابع تعریف شده کاربر^{□□□□□□} پروفیل جرم ورودی به داخل تونل نوشته شده و وارد نرم افزار فلوئنت شد. در ابتدای حل، فرض بر این بود که حجم سیال فاز دوم داخل تونل صفر بوده است. با توجه به گذرا بودن حل، گام زمانی^{□□□} ۰/۵ برای شبیه سازی انتخاب شد.

با توجه به وابسته بودن حل به زمان، کل زمان حل به سه مرحله تقسیم شد:

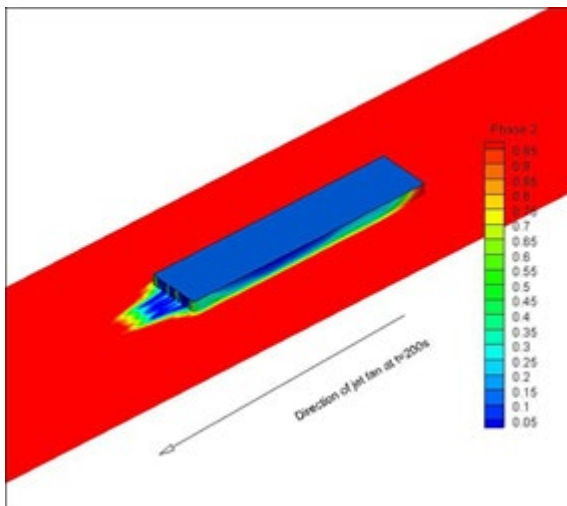
الف) در ابتدای زمان، فرض بر این بوده که آتش سوزی شروع نشده و تا رسیدن جت فن ها به شرایط پایدار به مدت ۱۸۵ ثانیه شبیه سازی تونل بدون در نظر گرفتن وقوع آتش انجام شده است.



شکل ۸- نمای سه بعدی از سرعت جریان هوا در تونل مجهز به جت فن های شرکت Novenco در حالت تهویه نرمال

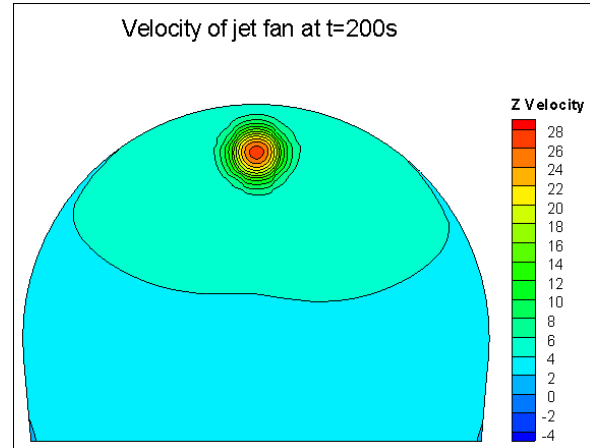


شکل ۱۲- منحنی کسر حجمی هوا در زمان شروع آتش سوزی پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه از اجرای مدل در مدل مجهز به جت فن شرکت Novenco بر حسب درصد وجود سیال

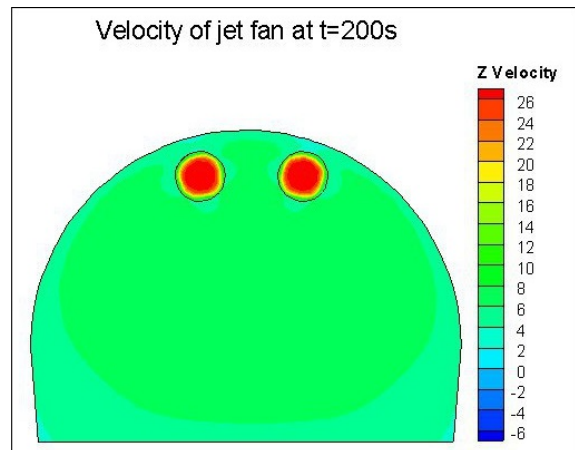


شکل ۱۳- منحنی کسر حجمی هوا در زمان شروع آتش سوزی پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه از اجرای مدل در مدل مجهز به جت فن شرکت Korfmann بر حسب درصد وجود سیال

ج) در مرحله بعد آهنگ آتش سوزی افزایش پیدا کرده و نرخ آزادسازی دود به مقدار اوج خود یعنی ۱۶/۴ کیلوگرم در ثانیه رسیده است. در این بخش آتش سوزی به مدت ۶۵ ثانیه طول کشیده و پس از آن حل متوقف شده است. هر دو مدل جت فن در این زمان به سرعت بحرانی رسیده و توانسته اند از بروز پدیده عقب زدگی در تونل جلوگیری کنند. مقدار بیشینه دما در تونل نیز در این زمان برابر با ۴۷۳ k است. شکل های ۱۴ و ۱۵ منحنی های کسر حجمی دی اکسید کربن را در هر دو تونل در مرحله آخر شبیه سازی نشان می دهند.



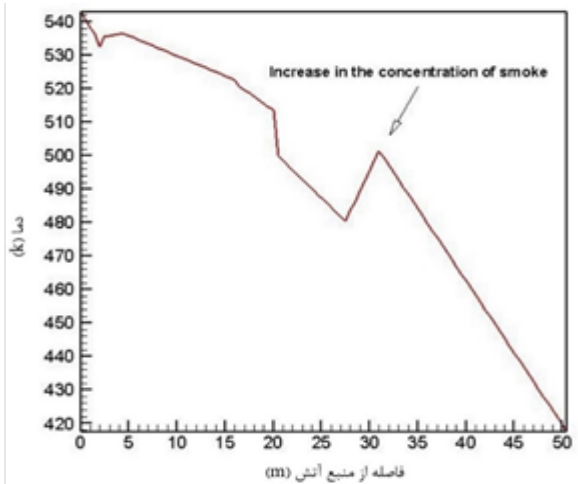
شکل ۱۰- منحنی های هم سرعت جت فن شرکت Novenco پس از رسیدن به تعادل پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه از اجرای مدل



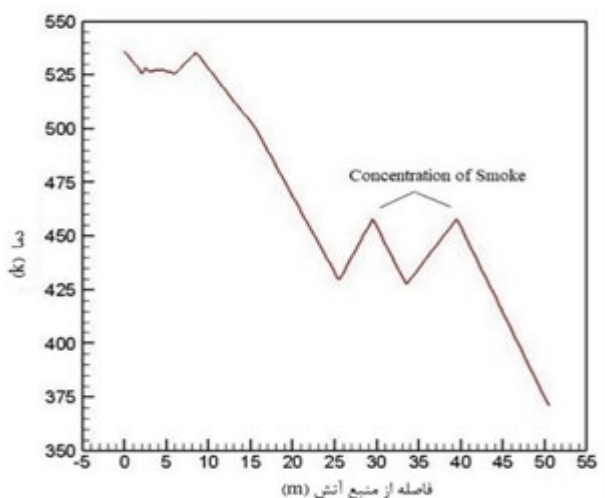
شکل ۱۱- منحنی های هم سرعت جت فن شرکت Korfmann پس از رسیدن به تعادل و گذشت ۲۰۰ ثانیه از اجرای مدل

شکل های ۱۲ و ۱۳ نیز منحنی کسر حجمی دی اکسید کربن را در هر دو مدل پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه از اجرای مدل نشان می دهد. قسمت های با رنگ آبی تر نشان دهنده وجود دی اکسید کربن بیشتر و قسمت های قرمز نشان از وجود درصد بالاتری از هوا است. از آنجا که هنوز ابتدای آتش سوزی است، پدیده عقب زدگی و رفتار خاصی در دود مشاهده نمی شود. سرعت منفی نشان دهنده پدیده عقب زدگی است.

شرکت Novenco حدود ۱۲۰ درجه سانتیگراد بوده است. با این حال، نمودار مربوط به شرکت Korfmann دو آنومالی دارد که به عنوان نقاط تمرکز دود تعبیر شده اند. این در حالی است که جت فن شرکت Novenco یک آنومالی تولید کرده است.



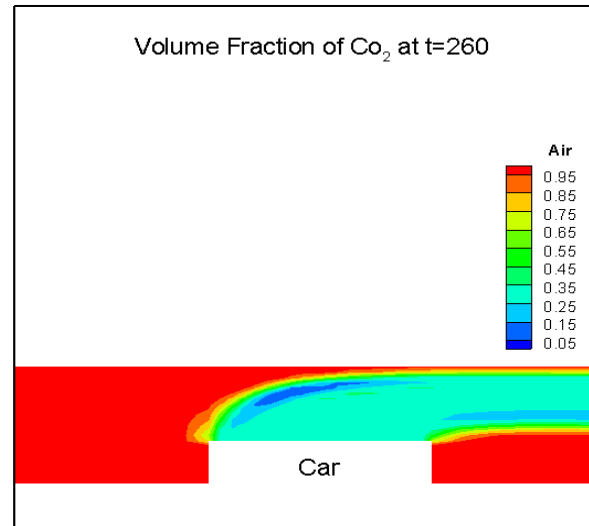
شکل ۱۶- نمودار تغییرات دما در فاصله ۵۰ متری از منبع آتش در تونل مجهز به جت فن شرکت Novenco



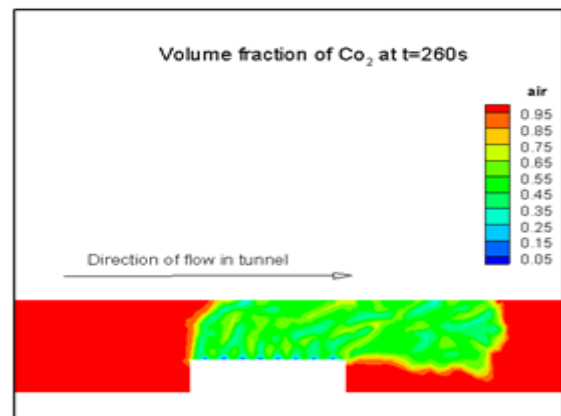
شکل ۱۷- نمودار تغییرات دما در فاصله ۵۰ متری از منبع آتش در تونل مجهز به جت فن شرکت Korfmann

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، تونل علوی واقع در شهرک شهید رجایی در استان هرمزگان از نظر طراحی سیستم تهویه مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از معیارهای مختلف (کلاسیک و پیارک) شدت جریان لازم برای تهویه این تونل برابر با مقدار ۱۵۵ متر مکعب بر ثانیه بدست آمد. همچنین با توجه به مقدار مذکور، میزان اختلاف فشار لازم جهت تهویه تونل نیز برابر با ۹۳



شکل ۱۴- منحنی کسر حجمی هوا در مدل مجهز به جت فن شرکت Novenco پس از گذشت ۲۶۰ ثانیه از اجرای مدل بر حسب درصد وجود سیال



شکل ۱۵- منحنی کسر حجمی هوا در مدل مجهز به جت فن شرکت Korfmann پس از گذشت ۲۶۰ ثانیه از اجرای مدل بر حسب درصد وجود سیال

در این مرحله، منحنی های کسر حجمی نشان می دهند که در هر دو مدل جت فن ها توانسته اند از بروز پدیده عقب زدگی جلوگیری کنند. اما در مدل شرکت Novenco جت فن ها عملکرد بهتری داشته و لایه دود را به خوبی در جهت جریان هدایت کرده است.

برای درک بهتر عملکرد جت فن ها در شبیه سازی، نمودارهای تغییرات دما در بازه ۵۰ متری از منبع آتش در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.

نمودار مدل شرکت Korfmann نسبت به مدل شرکت Novenco شیب کلی بیشتری دارد و دما در مدل Korfmann در فاصله ۵۰ متر از منبع آتش در حدود ۱۸۰ درجه سانتیگراد کاهش یافته است. این در حالی است که این اتفاق برای مدل

- [5] Goossens, M., Mittelbach, F., & Samarin, A. (1994). *The LATEX companion* (Vol. 2). Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- [6] Ferro, V., Borchiellini, R., & Giaretto, V. (1991). Description and application of tunnel simulation model. In *Proceedings of Aerodynamics and Ventilation of vehicle tunnels conference* (pp. 487-512).
- [7] McCormick, S. (1994). Multilevel Projection Methodology. *Computational Techniques and Applications: CTAC93*, 54-57.
- [8] Leitner, A. (2001). The fire catastrophe in the Tauern tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, 217-223.
- [9] Leitner, A. (2001). The fire catastrophe in the Tauern tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, 217-223.
- [10] Maeviski IY. NCHRP Synthesis (2011): Design Fires in Road Tunnels – A Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board: Washington, D.C.

[۱۱] پایگاه اینترنتی سازمان هواشناسی کشور،

<http://www.irimo.ir/far/index.php>

- [۱۲] مهندسین مشاور اتحاد راه (۱۳۹۴)، گزارش مطالعات زمین شناسی و طراحی تونل علوی، شرکت مادر تخصصی ساخت و توسعه شهرهای جدید شرکت شهر جدید علوی.
- [۱۳] مهندسین مشاور اتحاد راه (۱۳۹۴)، گزارش ترافیکی تونل علوی، شرکت مادر تخصصی ساخت و توسعه شهرهای جدید شرکت شهر جدید علوی.

[۱۴] مدنی، حسن (۱۳۷۷) تونلسازی، جلد دوم: خدمات فنی، تهران، مرکز نشر دانشگاهی، X-۹۶۴-۴۶۳-۰۵۳.

[15] Sturm, P. J., Brandt, R., Hervé, F., Zumsteg, F., Borchiellini, R., Norris, H., ... & Henn, M. (2012). Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation.

[16] Heskestad G (2002) Scaling the interaction of water sprays and flames. *Fire Safety Journal* 37:535-548.

[۱۷] یزدان پرست، مهدی. (۱۳۹۵). مدلسازی آتش و آلودگی‌های ناشی از آن در تونل پاتاوه-دهدشت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

[۱۸] مدنی، حسن (۱۳۶۶) تهویه در معادن، تهران، مرکز نشر دانشگاهی، ۰-۰۲۶۴-۰۱-۰۹۶۴-۰۹۷۸.

[19] Vega, M. G., Diaz, K. M. A., Oro, J. M. F., Tajadura, R. B., & Morros, C. S. (2008). Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: memorial tunnel case. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 539-551.

پاسکال در نظر گرفته شد. با توجه به مقادیر یاد شده، در نهایت دو سیستم تهویه با استفاده از جت فن های دو شرکت Novenco و Korfmann برای تهویه تونل انتخاب شد. جت فن های شرکت Novenco با آرایه تکی در ۱۷ ردیف و به فاصله حدودی ۱۰۰ متر از یکدیگر و جت فن های شرکت Korfmann با آرایش دو قلو در ۸ ردیف به فاصله تقریبی ۲۵۰ متر از یکدیگر طراحی شد. برای شبیه سازی آتش از بسته نرم افزاری فلوئنت استفاده شد. نتایج در قالب منحنی و نمودار برای هر دو مدل با جت فن های شرکت Novenco و Korfmann استخراج شد. مدل ساخته شده با جت فن Novenco در مدت زمان کمتری نسبت به مدل ساخته شده با جت فن Korfmann به همگرایی رسید. با اینکه جت فن شرکت Korfmann نیز قادر به کنترل لایه دود بود، اما جت فن شرکت Novenco با توجه به منحنی های کسر حجمی استخراج شده از نرم افزار به شکل بهتری قادر به جلوگیری از عقب زدگی لایه دود است. همچنین با اینکه جت فن های شرکت Korfmann دمای تونل را با سرعت بیشتری کاهش داده اند، اما در نمودار دمای این جت فن دو آنومالی مشاهده شده است که در مقایسه با جت فن دیگر با یک آنومالی، نقطه ضعف محسوب می شود. در آخر با توجه به اینکه جت فن های شرکت Novenco قابلیت معکوس شدن و هزینه سرمایه ای و جاری پایین تری دارند، استفاده از این نوع جت فن برای تونل علوی مناسب تر است.

منابع و مراجع

- [1] Casale, E., Charvier, J. M., & Lemaire, G. (1996). Tunnel ventilation system modeling. *Tunnel Engineering Handbook*. Chapman & Hall, New York, 69-81.
- [2] 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.
- [3] Du, T., Yang, D., Peng, S., Liu, Y., & Xiao, Y. (2016). Performance evaluation of longitudinal and transverse ventilation for thermal and smoke control in a looped urban traffic link tunnel. *Applied Thermal Engineering*, 96, 490-500.
- [4] Shao, S., Yang, X. G., & Zhou, J. W. (2016). Numerical analysis of different ventilation schemes during the construction process of inclined tunnel groups at the Changheba Hydropower Station, China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59, 157-169.

¹- Mont Blanc

²- Tauern

³- Gleinalm

⁴- Saint Gotard

1- Average Daily Traffic (ADT)

۶- جت‌فن‌های Korfmann توسط شرکت مشاور بررسی و انتخاب شده اند و بدین منظور از روش گومنیوک (مدنی، ۱۳۷۷، صفحه ۲۶۴) استفاده شده و از طریق رسم نمودار منحنی های مشخصه جت فن و لوله‌های کوتاه متصل به آنها مدل AL 12-450 انتخاب شده است.

⁷- Ansys Fluent CFD Package

⁸- Finit volume method

⁹- Navier-Stokes

¹⁰- Transient

¹¹- Multiphase

¹²- Volume of Fluid (VOF)

^{xiii}- ANSYS ICEM CFD

^{xiv}- Pressure inlet and outlet boundary condition

^{xv}- Interior

^{xvi}- Mass flow inlet

^{xvii}- Heat Release Rate (HRR)

^{xviii}- User-Defined Function (UDF)

^{xix}- Time Step