Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)

Vol 19, No 63, 2024, pp 27-40
DOI: 10.22034/ijme.2024.2014505.1989

Iranian Society of Mining Engineering (IRSME)

Designing the ventilation system of tunnel No. 2 of the third section of the main road Pataveh-Dehdasht during utilization

Mohammadreza Bahmani[1], Hasan Madani[2*], Majid Ataee-pour[3], Shabir Arshadnejad[4]

1. M.Sc. student, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, Islamic Azad University, Markazi, Iran

Received: 2023/10/27 - Accepted: 2024/06/29

Abstract

Tunnel ventilation is essential in utilization. Because it provides safety and comfort for traffic in the tunnel, no tunnel or underground passage can be used safely and healthily without a proper and efficient ventilation system. In this research, the best ventilation system of tunnel number 2 of the main road from Pataweh to Dehdasht (third section) in the southwest of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad province was designed during operation. First, by using different standards, the necessity of using mechanical ventilation in this tunnel was determined, and considering the advantages of using longitudinal ventilation, this ventilation method was selected for the tunnel. Using the classic techniques and the PIARC method, the required flow intensity for tunnel ventilation was calculated. Then, considering different pressure components, the necessary pressure drop was also obtained. Statistical analysis was used to obtain the final flow intensity, and finally, the value of 155 cubic meters per second was obtained as the necessary airflow intensity in the tunnel. The total pressure drop in this tunnel is equal to 47 Pa. According to the calculations, the specifications of several fans were checked, and finally, 9 fans' model 900/403-6 from Novenco company were selected..

Keywords

Tunnel No. 2 of the main Pataveh-Dahdasht road, Ventilation system during utilization, Longitudinal ventilation, traffic.

* Corresponding Author

1- Introduction

Underground structures need ventilation. In the meantime, tunnels, as one of the most important communication arteries, need a ventilation system due to their type of use. A large volume of people and equipment is moved from one point to another through tunnels, resulting in the accumulation of pollution caused by vehicles passing through the tunnels. In the case of a lack of proper ventilation, breathing in such an environment is difficult and is associated with reduced visibility for drivers. On the other hand, in the event of unexpected incidents such as severe accidents and massive fires, it is difficult to access the place where the incident occurred; Therefore, until the rescue forces arrive at the scene of the accident, the role of the ventilation system is very vital in controlling and removing polluted air. The main pollution factors during road tunnels' operation are smoke and gases from the combustion of internal combustion gasoline and diesel engines. For these tunnels, in terms of hourly traffic, volume of pollution, specifications

The geometry and position of the tunnel, etc., and the possibility of natural or mechanical ventilation (longitudinal, transverse, and semi-transverse ventilation) are investigated [1].

The stages of tunnel ventilation system design in the operation phase are as follows [2]:

- Tunnel traffic estimation
- Investigating the necessity of mechanical ventilation
- Calculate the intensity of the required airflow
- Choosing the possible ventilation method or methods
- Calculation of pressure drop due to ventilation
- Selection of fans or fans

The purpose of this study is to design the ventilation system of tunnel No. 2 of the Pataveh-Dohdasht main road (third section) during operation.

2- Methods

2-1- Investigating the necessity of implementing mechanical ventilation

To investigate the necessity of using mechanical ventilation in tunnel No. 2, the pieces of 3 Pataveh Road obtained from the French, Japanese, Norwegian, German, English and American standards are used. Based on the calculations, it is necessary to make this tunnel artificially according to the standards. The final result is that, with the assumptions of the design, the use of mechanical methods for ventilation of the tunnel is required.

2-2- Calculation of the intensity of the required airflow

In calculating the flow intensity of this tunnel, three categories of pollutants, carbon monoxide, soot, and nitrogen oxides, were considered. Although the amount of carbon monoxide is often used as the basis for calculating the amount of air required for ventilation, in this tunnel, the amount of emissions of all pollutants and the amount of air required for each ventilation were calculated. Then, statistical analysis obtained the airflow intensity needed for this tunnel's ventilation.

2-2-1- Selection of final current intensity

The final flow intensity from the classic method during regular traffic, dense traffic, traffic jams, and during a fire equals 125 cubic meters per second. The required final flow intensity based on different pollutants was obtained by the Piark method, which is equal to 157 cubic meters per second. Averaging these two numbers, the final flow intensity equals 141 cubic meters per second. The determined flow intensity (141 cubic meters per second) was multiplied by 1.1 as a safety factor, and the ventilation system was designed based on it. As a result, the final flow intensity for the ventilation of tunnel No. 2 of the Pataveh-Dahdasht main road was equal to 155 cubic meters

per second.

2-3- Selection of ventilation system

Considering the tunnel's length and the project's budget, it is not possible to use transverse and semi-transverse ventilation methods. In Tunnel No. 2 of the Pataweh-Dohdasht main road, due to various factors and environmental restrictions, including the area's topography and the ventilation method's economy, a longitudinal ventilation system was considered for tunnel ventilation. Therefore, there are two options for ventilation of this tunnel: the first option is longitudinal ventilation using doils, and the second option is longitudinal ventilation using ceiling fans. Considering that the thickness of the overburden is high and the digging of the middle hole is not economically justified (Figure 2), also considering the calculated flow intensity (155 cubic meters per second) and the cross-sectional area of the tunnel (70 square meters), the speed The air inside the tunnel will be equal to 2.2 meters per second, which is less than 10 meters per second, and there is no need to dig dolls, so according to the dimensions of the tunnel, longitudinal ventilation using ceiling fans (jet fans) was chosen.

2-4- Calculate the total pressure drop of the tunnel

In the next step, considering the various pressure drop components, the pressure drop in this tunnel was calculated to calculate the required number of fans. Since the longitudinal ventilation system is chosen for tunnel ventilation, the total pressure drop will equal the sum of the partial pressure drops. Therefore, the total pressure drop in tunnel No. 2 of the main Pataveh-Dehdasht road is as follows:

$\Delta P_t = 0.3 + 2.9 + 25.997 + 2.903 + 15 = 47$ Pa

2-5- Fan selection

After determining the air pressure drop inside the tunnel, it is time to choose the fan.

Because the hydraulic diameter of this tunnel is equal to 8.5 meters, the distance between the fans was considered equal to 85 meters. As a result, according to the distance between the fans, the model 900/403-6 fan from Novenco company was selected.

3- Findings and Argument

Classical methods and the method proposed by the World Road Association (PAYAR) have been used to calculate the flow intensity required for the air conditioning of tunnel No. 2 of the Pataveh-Dohdasht main road. Since each of these methods has obtained a different value as the required airflow intensity, a statistical analysis has been used to obtain the final flow intensity, and finally, the value of 155 cubic meters per second as the required airflow intensity In tunnel No. 2, the main road of Pataveh-Dohdasht is considered. Considering the intensity of the airflow required for the ventilation of tunnel No. 2 of the Pataveh-Dohdasht main road, taking into account different pressure components, the total pressure drop in the Pataveh-Dohdasht main road tunnel No. 2 is equal to 47 pascals. After that, the specifications of several fans were checked, and finally, 9 fans model 900/403-6 from Novenco company were selected.

4- Conclusions

In this research, the selection of the ventilation system for tunnel number 2 from section 3 of the Pataweh road to Dehdasht in the southwest of Kohgiluyeh and Boyer Ahmed provinces was investigated during the operation. The tunnel length is 802 meters, and one lane for going and one for returning is installed. In the design of the ventilation system of this tunnel during the operation phase, traffic information was used from the information available in the study report of the second phase of tunnel No. 2 of the main Pataveh-Dehdasht road (third section). Classical methods and

Piark's method were used to calculate the required flow intensity for tunnel ventilation, using the statistical analysis of the selected final flow intensity was calculated by applying the safety factor equal to 155 cubic meters per second. The total pressure drop of the tunnel was calculated as 47 pascals. Finally, 9 fans model 900/403-6 from Novenco company are required.

References

1. Etihad Rah Consulting Engineers (2015), study report of the second stage of tunnel No. 2 of the main Pataveh-Dehdasht road (third part). Ministry of Roads and Urban Development of Iran. 303.
2. Instructions for ventilation of tunnels in the construction and operation phase; 2019; "Ministry of Industry, Mines and Trade, Mining Rules and Criteria Preparation Program", Publications of the Organization of Mining Engineering System No. 72, http://www.mimt.gov.ir/

نشریه مهندسی معدن ایران
Iranian Journal of Mining Engineering (IJME)
دوره ۱۹، شماره ۶۳، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۲۷ تا ۴۰
Vol 19, No 63, 2024, pp 27-40
DOI: 10.22034/ijme.2024.2014505.1989
انجمن مهندسی معدن ایران
Iranian Society of Mining Engineering (IRSME)

یادداشت فنی

طراحی سیستم تهویه تونل شماره ۲ قطعه سوم از راه اصلی پاتاوه- دهدشت در زمان بهره‌برداری

محمدرضا بهمنی[۱]، سید حسن مدنی[۲*]، مجید عطایی پور[۳]، شبیر ارشد نژاد[۴]

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
i.mohammadrezabahmani23@gmail.com
استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
hmadani@aut.ac.ir
دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
map60@aut.ac.ir
استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسالمی واحد محلات، مرکزی، ایران
s-arshadnejad@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

چکیده

تهویه تونل در مرحله بهره‌برداری با توجه به ایجاد امنیت و آسایش تردد در تونل، بسیار مهم است. بدون داشتن یک سیستم تهویه مناسب و کارآمد، هیچ تونل یا راه زیرزمینی، به طور امن و سالم قابل استفاده نیست. در این پژوهش، بهترین سیستم تهویه تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه به دهدشت (قطعه سوم) در جنوب غربی استان کهگیلویه و بویر احمد، در حین بهره‌برداری طراحی شد. ابتدا 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، انتخاب شد. با استفاده از روش‌های کلاسیک و روش پیارک، شدت جریان لازم برای تهویه تونل محاسبه شد و سپس با در نظر گرفتن مولفه‌های مختلف فشار، افت فشار لازم به دست آمد. برای به دست آوردن شدت جریان نهایی از یک تحلیل آماری استفاده شد و در نهایت مقدار ۱۵۵ متر مکعب در ثانیه به عنوان شدت جریان هوای لازم در تونل به دست آمد. افت فشار کلی در این تونل برابر ۴۷ پاسکال است. با توجه به محاسبات، مشخصات چندین بادبزن بررسی و سرانجام ۹ عدد بادبزن مدل ۹۰۰/۴۰۳-۶ از شرکت نوونکو انتخاب شد.

کلمات کلیدی

تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه – دهدشت، سیستم تهویه حین بهره‌برداری، تهویه طولی، ترافیک.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- آشنایی

سازه‌های زیرزمینی، نیازمند تهویه‌اند؛ در این بین برای تونل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین شریان‌های ارتباطی با توجه به نوع کاربری آن‌ها، نیاز به سیستم تهویه، بیش از پیش احساس می‌شود. حجم بالایی از افراد و وسایل از طریق تونل‌ها از یک نقطه به نقطه دیگر جابه‌جا می‌شود که نتیجه آن تجمع آلودگی ناشی از خودروهای عبوری در فضای تونل‌هاست. در صورت عدم تهویه مناسب، تنفس در چنین محیطی سخت و با کاهش دید رانندگان همراه است. از سوی دیگر، در صورت وقوع حوادث غیرمترقبه‌ای همچون تصادفات شدید و آتش‌سوزی‌های گسترده، دسترسی به محل وقوع حادثه سخت است؛ بنابراین تا رسیدن نیروهای امدادی به محل حادثه، نقش سیستم تهویه در کنترل و خروج هوای آلوده بسیار حیاتی است. عوامل اصلی آلودگی در حین بهره‌برداری تونل‌های جاده‌ای، دود و گازهای ناشی از احتراق موتورهای درون‌سوز بنزینی و گازوییلی‌اند. برای این تونل‌ها برحسب ترافیک ساعتی، حجم آلودگی، مشخصات هندسی، موقعیت تونل و نظایر آن، امکان انجام تهویه به روش‌های طبیعی یا مکانیکی (تهویه طولی و عرضی و نیمه عرضی) مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱].

مراحل طراحی سیستم تهویه تونل‌ها در مرحله بهره‌برداری به شرح زیر است [۲]:

- برآورد ترافیک تونل
- بررسی ضرورت انجام تهویه مکانیکی
- محاسبه شدت جریان هوای لازم
- انتخاب روش یا روش‌های تهویه ممکن
- محاسبه افت فشار ناشی از تهویه
- انتخاب بادبزن یا بادبزن‌ها

هدف از این مطالعه، طراحی سیستم تهویه تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت (قطعه سوم) در زمان بهره‌برداری است.

۲- پیشینه تحقیق

علیزاده در سال ۱۳۹۰ طراحی سیستم تهویه تونل دو طبقه بزرگراه شهید صیاد شیرازی را برای تامین هوای تازه و رقیق‌سازی آلاینده‌ها انجام داد. در این تحقیق پس از جانمایی مناسب چاه‌های تهویه برای هر یک از طبقات با مشخص کردن مکان و نوع بادبزن اصلی طراحی را انجام دادند [۳].

شهبازی و همکاران در سال ۱۳۹۱ به طراحی سیستم تهویه برای تونل شهری نیایش با استفاده از روش‌های نیمه تجربی ارایه شد. طراحی با توجه به استاندارد پیارک برای کنترل آلودگی‌ها انجام شد. نتیجه این پژوهش انتخاب سیستم تهویه طولی به عنوان کارآمدترین سیستم بود و تعداد جت فن‌ها در تونل‌های شمالی، جنوبی و کردستان به ترتیب ۱۰۱، ۴۶ و ۴ دستگاه برآورد شد [۴].

اعرابیان در سال ۱۳۹۶ به طراحی سیستم تهویه تونل طویل راه آهن تهران تبریز پرداخت و با توجه به شرایط بهره‌برداری و نوع ناوگان عبوری، حجم هوای مورد نیاز برای شرایط بهره‌برداری عادی، ترافیکی و اضطراری محاسبه و با توجه به آن سیستم تهویه انتخاب شده و در انتها شرایط عملکردی سیستم تهویه در شرایط مختلف ارایه شد. حجم هوای مورد نیاز بر اساس رقیق‌سازی آلاینده‌ها و حفظ دمای محیط در شرایط عادی و ترافیکی به ترتیب ۱۰۸ و ۲۳۹ متر مکعب در ثانیه محاسبه شده است. در شرایط اضطراری بروز حریق برای جلوگیری از عقب‌زدگی دود، با توجه به قدرت حریق و محاسبات انجام شده سرعت بحرانی برابر با ۲٫۵۲ متر در ثانیه و حجم هوای مورد نیاز با توجه به سطح مقطع تونل برابر ۳۲۴ متر مکعب در ثانیه به دست آمد. با توجه به بررسی‌های انجام شده و قرارگیری تونل در محدوده شهری و الزامات خاص آن، مناسب‌ترین سیستم تهویه استفاده از دو بادبزن محوری با ظرفیت سیستم تهویه در شرایط اضطراری که برابر ۱۶۲ متر در ثانیه در فاصله هر ۱۰۵۰ متر در طول تونل و نصب جت فن‌ها در دو سر تونل است. این سیستم تهویه جوابگوی سیستم تهویه در شرایط مختلف است [۵].

اخباری و همکاران در سال ۱۳۹۹ به طراحی سیستم تهویه مناسب برای تونل علوی واقع در شهرک شهید رجایی در استان هرمزگان پرداخته‌اند. 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 روش انجمن جهانی راه (پیارک[1])، شدت جریان نهایی ۱۵۵ متر مکعب در ثانیه برای تهویه این تونل محاسبه شد و سپس با در نظر گرفتن مولفه‌های مختلف فشار، افت فشار برابر با ۹۳ پاسکال به دست آمد. در نهایت با توجه به محاسبات، دو مدل

1- Piarc

جت فن از شرکت‌های نوونکو[1] و کورفمن[2] برای تهویه تونل علوی مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه بهتر این دو جت فن در زمان آتش‌سوزی به وسیله بسته نرم‌افزاری فلوئنت، 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 نوونکو برای استفاده در تونل علوی مناسب‌تر شناخته شد [۶].

حقانی پیوندی و همکاران در سال ۱۴۰۰ با استفاده از نرم‌افزار افدیاس آتش‌سوزی داخل تونل شبیه‌سازی شده است و تاثیر استفاده همزمان از تهویه طولی و سیستم مکش دود از سقف در شرایط کاری که سیستم مکش دود در بالا دست منبع آتش باشد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده همزمان از تهویه طولی و سیستم مکش دود از سقف در پایین دست منبع آتش منجر به گسترش جریان دود در هر دو سمت منبع آتش شده و هیچ مسیر کاملا ایمنی برای امدادرسانی وجود نخواهد داشت. این شرایط کاری با توجه به کاهش میزان زاویه انحراف شعله باعث افزایش میزان بیشینه دما می‌شود [۷].

کنگ[3] و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی طول جریان برگشتی دود در داخل تونل‌های شیب‌دار مجهز به سیستم تهویه طبیعی در شرایط قرارگیری منبع آتش در فاصله‌های طولی مختلف پرداختند. شبیه‌سازی در داخل تونلی با شیب ۴ درصد و با استفاده از نرم‌افزار اف دی اس انجام شد. نتایج نشان داد جریان برگشت دود آتش در تونل شیب‌دار عمدتا به وسیله طول پایین دست هدایت می‌شود. همچنین رابطه جدیدی برای پیش‌بینی طول جریان برگشتی دود در داخل تونل‌های شیب‌دار ارایه شد [۸].

جی یویانگ[4] و همکاران در سال ۲۰۲۱ حرکت دود در یک تونل به صورت عددی با برخی معادلات بررسی کردند. یک آزمایش عددی با دینامیک سیالات محاسباتی انجام شد. در مرحله اولیه آتش‌سوزی تونل، سرعت فن‌های تهویه را می‌توان به عنوان سرعت بحرانی تنظیم کرد تا حرکت دود و انتشار دمای بالا را کاهش دهد. با این حال، در مرحله تخلیه، سرعت تهویه باید کاهش یابد تا از انتقال سریع دود و آسیب رساندن به افراد در پایین دست جلوگیری شود. بدون سیستم تهویه طولی، دود به طور متقارن در تونل پخش می‌شود. هنگامی که تونل دارای سیستم تهویه طولی باشد، دود در بالادست تونل پخش نمی‌شود، اما به سرعت به سمت پایین دست پخش می‌شود. اگر مردم همچنان در امتداد خط مرکزی پایین دست باشند، ممکن است با دود تهدید شوند. این مطالعه مزایا و معایب سیستم تهویه طولی را نشان می‌دهد و نشان می‌دهد که سرعت فن‌های تهویه باید با دقت انتخاب شود [۹].

سیهویی[5] و همکاران در سال ۲۰۲۲ تاثیر حالت تهویه طولی، حالت تهویه عرضی و حالت نیمه عرضی تهویه را بر تخلیه پرسنل به تجزیه و تحلیل پرداختند. مشخص شده است که با حالت تهویه نیمه عرضی، پرسنل کمترین آسیب را می‌بینند و علاوه بر این، تهویه نیمه‌عرضی نیاز به سرمایه‌گذاری مهندسی بالاتری دارد که بیش از ۲۰۰۰ یوان در هر متر تونل است. در صورت فراهم بودن شرایط اقتصادی پیشنهاد می‌شود به جای حالت تهویه طولی، حالت نیمه‌عرضی تهویه در نظر گرفته شود. نتایج تحقیق می‌تواند راهنمایی برای طرح کنترل اضطراری برای عملیات آتش‌سوزی تونل مترو ارایه دهد [۱۰].

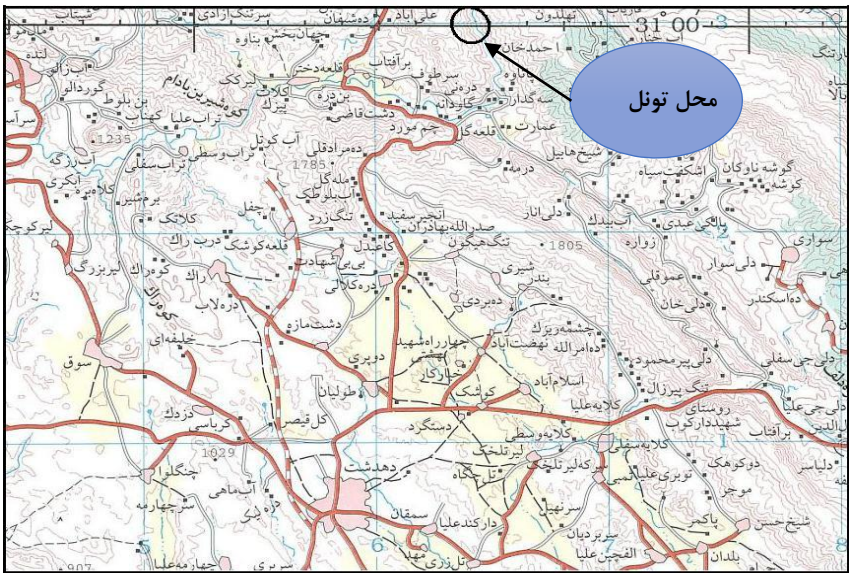
متفاوت از تونل‌های خطی مستقیم معمولی، تونل‌های مارپیچی دارای روند دایره‌ای با انحنا و شیب آشکارند که تفاوت‌های خاصی را بین تهویه ساختمانی دو نوع تونل، به ویژه از نظر میدان جریان هوای تهویه و انتشار آلاینده تضمین می‌کند. جیاشه بای[6] و همکاران در سال ۲۰۲۲ با تکیه بر پروژه تونل مارپیچ واقعی، مکانیزم انتشار آلاینده‌های تهویه را در ساخت تونل مارپیچی بررسی کردند [۱۱].

۳- مشخصات تونل مورد مطالعه

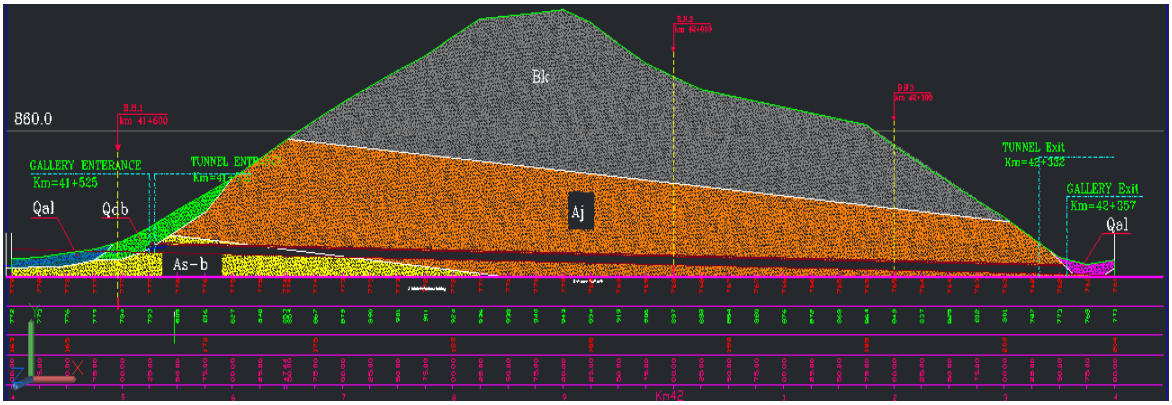
تونل شماره ۲ از قطعه ۳ جاده پاتاوه به دهدشت در جنوب غربی استان کهگیلویه و بویراحمد، در ۲۵ کیلومتری شمال دهدشت و در محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۴۶۳۶۰۰ تا ۴۶۴۴۰۰ و عرض جغرافیایی ۳۴۲۹۸۰۰ تا ۳۴۳۱۰۰۰ در مختصات UTM واقع شده است (شکل ۱). تونل مورد مطالعه بخشی از قطعه ۳ طرح جاده پاتاوه به دهدشت و در حدفاصل کیلومتراژ ۴۱+۵۳۰ تا ۴۲+۳۳۲ این قطعه واقع شده است. تونل شماره ۲ به طول ۸۰۲ متر از تونل‌های این قطعه در

1- Novenco
2- Korfmann
3- Kong
4- Ji Yuyang
5- Sihui
6- Jiashe Bai

بخش‌های میانی آن واقع شده‌است. تراز خط پروژه در دهانه‌های ورودی تونل ۷۷۶٫۵۵ متر و در دهانه‌های خروجی ۷۶۲٫۰۵ متر و شیب تونل ۱٫۸ درصد و از ورودی به خروجی سر پایین است. حداکثر ارتفاع روباره در تونل شماره ۲، حدود ۱۷۳ متر می‌رسد که در شکل ۲ نیمرخ طولی تونل نشان داده شده است [۱]. در منطقه‌ای که تونل واقع شده است، دما برابر با ۲۹۳٫۱۵ کلوین و فشار ۷۰۰ میلی‌متر جیوه در نظر گرفته شده است [۱۲].



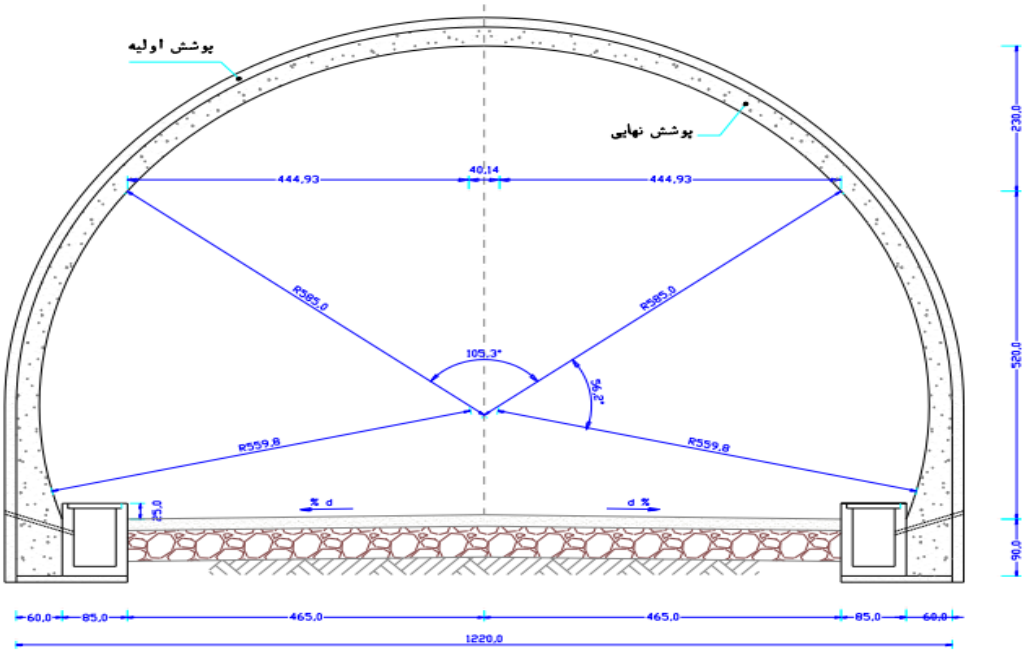
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به تونل شماره ۲ (مقیاس تقریبی: ۱:۲۰۰۰۰۰) [۱]



شکل ۲- نیمرخ طولی تونل شماره ۲ قطعه سوم از راه اصلی پاتاوه-دهدشت [۱]

تونل شماره ۲ راه پاتاوه- دهدشت برای دو خط عبور هرکدام به عرض ۳٫۶۵ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به الزامات نشریه شماره ۱۶۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، گاباریت لازم برای آن طراحی و مقطع تیپ تونل در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل هندسی مقطع تیپ، از دو قوس دایره به شعاع‌های ۵٫۸۵ و ۵٫۶ متر در بخش فوقانی و طرفین تشکیل شده است. قائم نبودن دیواره‌های مقطع نه تنها به حفاری و کاهش حجم آن کمک می‌کند، بلکه در پایداری کناره تونل و کاهش نیروهای داخلی پوشش اولیه نیز بسیار موثر است [۱].

کلیدی‌ترین داده لازم برای طراحی تهویه تونل‌ها در مرحله بهره‌برداری، آگاهی از حجم و ترکیب ترافیک است. اگر ترافیک تونل از قبل از سوی کارفرما تعیین شده باشد، این داده مبنای مطالعات بعدی قرار می‌گیرد. در بعضی موارد، به هنگام طراحی تهویه، حجم و ترکیب ترافیک تونل مشخص نیست و طراحان تهویه باید در این مورد تصمیم‌گیری کنند [۲]. در تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت (قطعه سوم)، ترافیک ساعتی ۲۰ سال پس از شروع بهره‌برداری معادل ۱۱۸۸ وسیله نقلیه سواری در ساعت (در مسیر رفت و برگشت) که ۸۷ دستگاه آن وسایل نقلیه سنگین و ۴۰۶ دستگاه آن وسایل نقلیه سبک‌اند [۱].



شکل ۳- مقطع قالب‌بندی و هندسه تونل۲ [۱]

۴- بررسی ضرورت اجرای تهویه مکانیکی

برای بررسی لزوم استفاده از تهویه مکانیکی در تونل شماره ۲ از قطعه ۳ جاده پاتاوه به دهدشت از استاندارد کشورهای فرانسه، ژاپن، نروژ، آلمان، انگلیس و آمریکا استفاده شد. بر اساس نتایج محاسبات انجام شده مطابق با استانداردها لازم است تا تهویه این تونل به صورت مصنوعی انجام شود. نتیجه‌گیری نهایی این است که با مفروضات پیش‌بینی شده طرح، استفاده از روش مکانیکی برای تهویه تونل مورد بحث ضرورت دارد.

۵- محاسبه شدت جریان هوای لازم

در محاسبات شدت جریان این تونل، سه دسته آلاینده مونوکسید کربن، دوده و اکسیدهای ازت در نظر گرفته شد. اگر چه برای محاسبه مقدار هوای لازم برای تهویه، اغلب مقدار مونوکسید کربن به عنوان مبنای محاسبات قرار می‌گیرد اما در مورد این تونل، میزان انتشار همه آلاینده‌ها و به دنبال آن میزان هوای لازم برای تهویه هر کدام محاسبه شد و سپس از طریق تحلیل آماری، شدت جریان هوای لازم برای تهویه این تونل به دست آمد. از آن‌جا که هر دو خط رفت و برگشت در یک تونل قرار دارند، محاسبات برای هر خط به طور جداگانه انجام شد زیرا در یکی شیب مثبت و در دیگری شیب منفی 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 روش‌های کلاسیک و روش پیارک برای هر سه آلاینده در سه حالت ترافیکی روان، نیمه سنگین و سنگین محاسبه شد.

۵-۱- محاسبه شدت جریان با روش‌های کلاسیک به هنگام ترافیک عادی، ترافیک متراکم، راه‌بندان و هنگام آتش‌سوزی

شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل مورد بحث در حالت‌های مختلف در جدول ۱ درج شده است.

جدول ۱- شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل موردمطالعه به روش‌های مختلف (m^3/s)

روش / مبنای محاسبه	رقیق کردن مونواکسید کربن	رقیق کردن دوده	رقیق کردن اکسیدهای ازت	در حالت ترافیک متراکم		در حالت راه‌بندان	در حالت آتش‌سوزی
				رقیق کردن منواکسید کربن	رقیق کردن دوده		
آمریکایی	۳۰	۳۱	۶۳	۱۰۹	۱۸۷	۱۲۸	۲۵۸
انگلیسی	۳۷	۸۹					
نروژی	۲۴	۸۱					
فرانسوی	۳۴	۱۰۴					

با توجه به اینکه داده‌ها بسیار پراکنده‌اند، از تحلیل آماری برای به دست آوردن میانگین این مقادیر استفاده شود. بنابراین، شدت جریان نهایی با میانگین‌گیری از اعدادی به دست می‌آید که در محدوده رابطه ۱ قرار گیرند:

$$m - \delta < Q_{final} < m + \delta \quad (۱)$$

که در آن:

δ: انحراف معیار داده‌ها

m: میانگین داده‌ها

با توجه به رابطه ۱ و محاسبه انحراف معیار و میانگین برای شدت جریان نهایی از روش کلاسیک به هنگام ترافیک عادی، ترافیک متراکم، راه‌بندان و هنگام آتش‌سوزی، داده‌هایی که بین دو مقدار ۳۳٫۳۳ و ۲۵۸ متر مکعب در ثانیه باشند، انتخاب شدند. در نهایت با میانگین‌گیری از این داده‌های منتخب مقدار ۱۲۵ متر مکعب در ثانیه به دست آمد.

۵-۲- محاسبه شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل مورد بحث به روش پیارک

در روش پیارک، یک رابطه عمومی برای محاسبه شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل‌ها بر مبنای آلوده‌کننده‌های مختلف ارایه شده و در آن نوع و تعداد وسایل نقلیه، میزان آلاینده‌های ناشی از آن‌ها، میزان آلودگی محیط و حد مجاز آلودگی‌ها مطابق رابطه ۲ ارایه شده است [۲]:

$$Q = \frac{NLQ_o}{3600(C_o - C_1)} \quad (۲)$$

که در آن:

Q: شدت جریان هوای لازم (مترمکعب بر ثانیه)

N: تعداد اتومبیل در هر کیلومتر از تونل ($\frac{veh}{km}$)

L: طول تونل (کیلومتر)

Q_o: میزان آلاینده تولیدی وسیله نقلیه (که واحد آن در مورد گازها g/h/veh و در مورد دوده m^2/h/veh است)

C_o: حد مجاز آلاینده (ppm یا گرم بر مترمکعب)

C_1: میزان آلاینده موجود در هوای محیط بیرون تونل (ppm یا گرم بر مترمکعب) است.

مهم‌ترین پارامتر در رابطه پیارک، میزان آلاینده تولیدی Q_o است که طبق رابطه ۳ تعریف می‌شود [۲]:

$$Q_o = q_{ex}(v,i).f_h.f_m \quad (۳)$$

که در آن:

Q_o: میزان انتشار مونوکسید کربن

NO_x (g/h/veh) و یا دوده (m^2/h/veh یا g/h/veh)،

$q_{ex}(v,i)$: فاکتور انتشار پایه برای آلاینده‌های خروجی از اگزوز وسایل‌نقلیه با توجه به سرعت متوسط و شیب تونل

f_h: ضریب تصحیح ارتفاع

f_m: ضریب تصحیح جرم

در روش پیارک نیز مانند روش‌های کلاسیک، شدت جریان هوای تازه برای تهویه گازهای مونوکسید کربن، اکسیدهای ازت، دوده و ذرات معلق در هوا محاسبه می‌شود. در جدول ۲ نتایج حاصل از روش پیارک برای محاسبه شدت جریان لازم به منظور تهویه تونل مورد بحث به تفکیک شرایط ترافیکی و آلاینده‌ها درج شده است. شدت جریان نهایی مورد نیاز بر اساس آلوده‌کننده‌های مختلف به روش پیارک از میانگین‌گیری برای بدترین حالت، یعنی شرایط ترافیکی سنگین انجام می‌شود که برابر با ۱۵۷ متر مکعب در ثانیه به دست می‌آید.

جدول ۲- شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل مورد مطالعه با روش پیارک (مترمکعب بر ثانیه)

عامل آلاینده	شرایط ترافیکی		
	روان	نیمه سنگین	سنگین
مونوکسید کربن	۸۰	۹۸	۱۲۲
دوده	۶۶	۳۸	۷۹
NO_x	۱۸۷	۱۷۴	۲۶۹

۵-۳- انتخاب شدت جریان نهایی

شدت جریان نهایی از روش کلاسیک به هنگام ترافیک عادی، ترافیک متراکم، راه‌بندان و هنگام آتش‌سوزی برابر با ۱۲۵ متر مکعب در ثانیه و شدت جریان نهایی مورد نیاز بر اساس آلوده‌کننده‌های مختلف به روش پیارک برابر با ۱۵۷ متر مکعب در ثانیه به دست آمد که با میانگین‌گیری از این دو عدد شدت جریان نهایی برابر با ۱۴۱ متر مکعب در ثانیه به دست می‌آید. شدت جریان تعیین شده (۱۴۱ متر مکعب در ثانیه)، در عدد ۱٫۱ به عنوان ضریب ایمنی ضرب شد و طراحی سیستم تهویه بر اساس آن انجام گرفت. در نتیجه شدت جریان نهایی برای تهویه تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت برابر با ۱۵۵ متر مکعب در ثانیه به دست آمد.

۶- انتخاب سیستم تهویه

با توجه به طول تونل و بودجه پروژه استفاده از روش تهویه عرضی و نیمه عرضی امکان‌پذیر نیست. در تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت با توجه به عوامل مختلف و محدودیت‌های محیطی از جمله توپوگرافی منطقه و اقتصادی بودن روش تهویه، سیستم تهویه طولی برای تهویه تونل در نظر گرفته شد. بنابراین برای تهویه این تونل دو گزینه وجود دارد، گزینه اول تهویه طولی با استفاده از دویل و گزینه دوم تهویه طولی با استفاده از بادبزن سقفی است. با توجه به اینکه ضخامت روباره زیاد است و از لحاظ اقتصادی حفر دویل میانی توجیه‌پذیر نیست (شکل ۲)، همچنین با توجه به شدت جریان محاسبه شده (۱۵۵ متر مکعب در ثانیه) و سطح مقطع تونل (۷۰ متر مربع)، سرعت هوا در داخل تونل برابر با ۲٫۲ متر در ثانیه خواهد شد که از ۱۰ متر در ثانیه کمتر است و نیازی به حفر دویل نیست، در نتیجه با توجه به ابعاد تونل، تهویه طولی با استفاده از بادبزن‌های سقفی (جت فن) انتخاب شد.

۷- محاسبه افت فشار کلی تونل

در قدم بعد با در نظر گرفتن مولفه‌های مختلف افت فشار، برای محاسبه تعداد بادبزن مورد نیاز، افت فشار در این تونل محاسبه شد که مقدار افت فشارهای مختلف در داخل تونل در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- افت فشارهای مختلف در داخل تونل مورد بحث

نوع افت فشار	مقدار افت فشار (پاسکال)
افت فشار در دهانه ورودی تونل	۰٫۳
افت فشار در دهانه خروجی تونل	۲٫۹
افت فشار استاتیکی	۲۵٫۹۹۷
افت فشار دینامیکی	۲٫۹۰۳
افت فشار ناشی از باد محلی	۱۵

از آنجا که سیستم تهویه طولی برای تهویه تونل انتخاب شده است، افت فشار کلی برابر با مجموع افت فشارهای جزیی است. بنابراین افت فشار کلی در تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت به صورت زیر است:

$$\Delta P_t = 0.3 + 2.9 + 25.997 + 2.903 + 15 = 47 \text{ Pa}$$

۸- انتخاب بادبزن

پس از تعیین افت فشار هوا در داخل تونل، نوبت به انتخاب بادبزن می‌رسد. به این منظور، در ادامه مشخصات فنی تعدادی بادبزن از چندین شرکت مطرح در زمینه تهویه در جداول ۴ تا ۶ درج شده است تا از میان آن‌ها مناسب‌ترین نوع بادبزن برای تونل انتخاب شود.

جدول ۴- مشخصات فنی بادبزن‌های شرکت Novenco سری AUR [۱۳]

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 ۵- مشخصات فنی بادبزن‌های شرکت ابزار تونل جهان (ATJ) مدل JAR۱۲ [۱۴]

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 ۶- مشخصات فنی بادبزن‌های شرکت تجهیز تونل جوان [۱۵]

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

جدول ۷- ضریب نصب بادبزن (η_2) در حالت‌های مختلف [۲]

وضعیت بادبزن نصب شده در سطح مقطع تونل	η_2
یک بادبزن چسبیده به سقف و دیواره تونل	۰/۷
یک بادبزن که بدنه آن تا سقف و دیواره تونل به اندازه نصف قطر دهانه خروجی بادبزن فاصله دارد	۰/۸
یک بادبزن که بدنه آن تا سقف و دیواره تونل به اندازه قطر دهانه خروجی بادبزن فاصله دارد	۰/۹
یک بادبزن در تو رفتگی (دیواره یا سقف) تونل	۰/۸
چندین بادبزن در تو رفتگی (دیواره یا سقف) تونل	۰/۷

به منظور انتخاب بهترین بادبزن برای این طرح، ابتدا فشار محوری برای هر بادبزن از رابطه ۴ بر حسب پاسکال محاسبه شد [۲]:

$$P_j = \rho Q_j (V_f - V_T) \frac{1}{A_T} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \quad (۴)$$

سپس تعداد بادبزن‌های لازم را از رابطه ۵ به دست آمد [۲]:

$$n_j = \frac{\Delta P_T}{P_j} \quad (۵)$$

که در این روابط:

n_j: تعداد بادبزن‌های سقفی لازم

ΔP_T: کل افت فشار تونل (پاسکال)

P_j: فشار محوری هر بادبزن (پاسکال)

ρ: جرم مخصوص هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)

Q_j: شدت جریان هوای خروجی از بادبزن (مترمکعب در ثانیه)

V_f: سرعت هوای خروجی از بادبزن (متر در ثانیه)

V_T: سرعت هوای داخل تونل (متر در ثانیه)

A_T: سطح مقطع تونل (مترمربع)

η_1: ضریب کارکرد بادبزن سقفی که مقدار آن به طور معمول ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود.

η_2: ضریب نصب که به وضعیت قرار گرفتن بادبزن‌ها در سقف تونل بستگی دارد و مقدار آن از جدول ۷ تعیین می‌شود.

از آنجا که با نصب تیغه‌های منحرف‌کننده هوا[1] در خروجی بادبزن از برخورد مستقیم هوا با دیواره تونل جلوگیری می‌شود، بنابراین مقدار η_2 افزایش می‌یابد اما از سوی دیگر، این تیغه، افت ناشی از آشفتگی در بادبزن را سبب می‌شود که کاهش فشار محوری بادبزن را در پی دارد. برای بادبزن‌هایی که در فرورفتگی تونل نصب می‌شوند و سطح تونل ناصاف است، نصب تیغه‌های منحرف‌کننده همواره توصیه می‌شود [۲].

η_3 ضریب فاصله طولی بین بادبزن‌ها که مقدار آن به قطر هیدرولیکی تونل وابسته است. اگر فاصله بین بادبزن‌ها برای بادبزن‌های بدون تیغه‌های منحرف‌کننده هوا، حداقل ۱۰ برابر قطر هیدرولیکی و برای بادبزن‌های با نصب تیغه‌های منحرف‌کننده هوا (۵ تا ۱۰ درجه انحراف)، ۶ تا ۸ برابر قطر هیدرولیکی باشد، ضریب فاصله طولی برابر واحد در نظر گرفته می‌شود اما در صورتی که این فاصله کمتر شود، ضریب فاصله طولی به شدت کاهش می‌یابد [۲].

پس از محاسبه تعداد بادبزن‌های لازم، بسته به نوع بادبزن‌های انتخابی، بادبزن‌ها باید به فواصل حداقل ۸ تا ۱۰ برابر قطر هیدرولیکی تونل نصب شوند. اگر تعداد بادبزن‌های محاسبه شده زیاد باشد به گونه‌ای که نتوان آن‌ها را در ردیف‌های تک‌واحدی نصب کرد، باید از آرایه ۲ یا ۳ واحدی استفاده کرد. اگر آرایه ۲ واحدی از تعداد بادبزن‌های محاسبه

1- Deflector

شده زیادتر شود باید موقعیت بادبزن‌ها را به گونه‌ای انتخاب کرد که پس از چند موقعیت ۲ واحدی، یک موقعیت تک‌واحدی انتخاب شود. همین شیوه را در موردی که آرایه ۲ واحدی جوابگو نباشد اما آرایه ۳ واحدی نیز از حد لازم زیادتر شود نیز می‌توان به کاربست [۲].

تعداد بادبزن‌ها باید برای بدترین حالت ترافیکی و آلودگی تونل تعیین شود. در صورت استفاده از آرایه‌های چند واحدی در موارد اوج ترافیک همه به کار افتند اما در مواقع عادی تنها از یک یا دو بادبزن از هر موقعیت، استفاده شود [۲].

در جدول‌های ۸ تا ۱۰، فشار محوری بادبزن‌های انتخاب شده از شرکت‌های مختلف همراه با تعداد مورد نیاز از هر بادبزن آورده شده است.

جدول۸- فشار محوری بادبزن‌ها و تعداد آن‌ها برای بادبزن‌های شرکت Novenco

مدل	P_j (Pa)	تعداد بادبزن برای نصب در تونل
Novenco 900/403-6	۵٫۴۳	۹
Novenco 1000/403-6	۸٫۲۶	۶
Novenco 1120/403-6	۱۱٫۸	۴
Novenco 1250/403-6	۱۴٫۶۱	۳

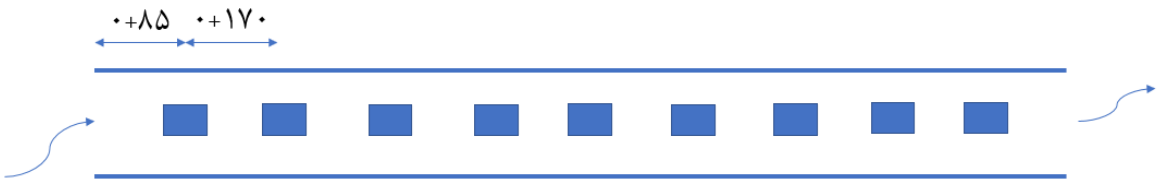
جدول ۹- فشار محوری بادبزن‌ها و تعداد آن‌ها برای بادبزن‌های شرکت تجهیز تونل جوان

مدل	P_j (Pa)	تعداد بادبزن برای نصب در تونل
JF60	۲٫۴۷	۱۹
JF70	۳٫۷۸	۱۲
JF90	۶٫۷۸	۷

جدول ۱۰- فشار محوری بادبزن‌ها و تعداد آن‌ها برای بادبزن‌های شرکت ابزار تونل جهان

مدل	P_j (Pa)	تعداد بادبزن برای نصب در تونل
JAR 12-22/4	۹٫۴	۵
JAR 12-30/4	۱۱٫۱۸	۴
JAR 12-37/4	۱۲٫۸۷	۴
JAR 12-45/4	۱۴٫۸۵	۳

با توجه به این که قطر هیدرولیکی این تونل برابر با ۸٫۵ متر است بنابراین فاصله بین بادبزن‌ها را برابر با ۸۵ متر در نظر گرفته شد. در نتیجه با توجه به فاصله بین بادبزن‌ها، بادبزن مدل 900/403-6 از شرکت نوونکو انتخاب شد. در شکل ۴ شمایی از نصب این مدل بادبزن در تونل مورد بحث نشان داده شده است.



شکل ۴- شمایی از نصب بادبزن‌های شرکت Novenco در تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، انتخاب سیستم تهویه برای تونل شماره ۲ از قطعه ۳ جاده پاتاوه به دهدشت در جنوب‌غربی استان کهگیلویه و بویر احمد، در حین بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفت. طول تونل ۸۰۲ متر و یک خط برای رفت و یک خط نیز برای برگشت تعبیه شده است. در طراحی سیستم تهویه این تونل در مرحله بهره‌برداری، اطلاعات ترافیک از اطلاعات موجود در گزارش مطالعات مرحله دوم تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت (قطعه سوم) استفاده شد. از روش‌های کلاسیک و روش پیارک برای محاسبه شدت جریان لازم برای تهویه تونل استفاده شد با استفاده از تحلیل آماری شدت جریان نهایی انتخاب که با اعمال ضریب ایمنی برابر با ۱۵۵ متر مکعب در ثانیه محاسبه شد. افت فشار کل تونل برابر با ۴۷ پاسکال محاسبه شد که در نهایت ۹ عدد بادبزن مدل 900/403-6 از شرکت نوونکو لازم است.

منابع

۱. مهندسین مشاور اتحاد راه (۱۳۹۵)، گزارش مطالعات مرحله دوم تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه- دهدشت (قطعه سوم). وزارت راه و شهرسازی ایران. ۳۰۳.

۲. دستورالعمل تهویه تونل‌ها در مرحله احداث و

بهره‌برداری؛ ۱۳۹۹؛ «**وزارت صنعت، معدن و تجارت، برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن**»، انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن شماره۷۲، http://www.mimt.gov.ir/

۳. علیزاده، حمیدرضا؛ ۱۳۹۰؛ «**طراحی سیستم تهویه تونل دو طبقه بزرگراه شهید صیاد شیرازی در دور بهره‌برداری**»، همایش ملی تونل، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، شماره ۹.

۴. شهبازی، سینا؛ امجدی، محمد؛ و حیدری نژاد، قاسم؛ ۱۳۹۱؛ «**طراحی سیستم تهویه برای تونل شهری نیایش**» کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع ، شماره۴.

۵. اعرابیان، محسن؛ ۱۳۹۶؛ «**طراحی سیستم تهویه تونل زیرزمینی خط آهن تهران تبریز**»، سومین کنفرانس منطقه‌ای و دوازدهمین کنفرانس تونل ایران ، تهران.

۶. اخباری، راضیه؛ سرشکی، فرهنگ؛ و مدنی، سیدحسن؛ ۱۴۰۰؛ «**انتخاب و تحلیل روش مناسب تهویه تونل علوی بندرعباس**»، مهندسی معدن، ۱۶(۵۰)، ۷۳-۸۶. SID. https://sid.ir/paper/412203/fa

۷. حقانی پیوندی، سیدامید؛ براتی، ابراهیم؛ جلالی، شهره؛ ۱۴۰۰؛ «**شبیه‌سازی استفاده همزمان تهویه طولی و مکش از سقف در بالادست آتش در آتش‌سوزی داخل تونل**»، هفدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، مشهد https://civilica.com/doc/1378165.

8. J. Kong, Z. Xu, W. You, B. Wang, Y. Liang, T. Chen, Studyof smoke back-layering length with different longitudinal fire locations in inclined tunnels under natural ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, 107 (2021) 103663.

9. Xiao, K., & Ji, Y. (2021, March). The Effect of Longitudinal Ventilation System on Smoke Movement and People's Evacuation in Tunnel Fire. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 687, No. 1, p. 012142). IOP Publishing.

10. Dong, S., Zhang, X., & Wang, K. (2022). Study on fire ventilation control of subway tunnel: a case study for Dalian Subway. (14), 8695.

11. Bai, J., Wu, Z., Chen, T., Li, W., Zhang, P., & Li, Y. (2022). Influence of Ventilation Duct Parameter Optimization on Pollutant Diffusion in Spiral Tunnels. *Sustainability*, *14*(17), 10540.

۱۲. پایگاه اینترنتی سازمان هواشناسی کشور، http://www.irimo.ir/far/index.php

13. Novenco Marine & Offshore website, http://www.novencogroup.com/.

۱۴. وب سایت شرکت ابزار تونل جهان، http://www.abzartunnel.com/.

۱۵. وب سایت شرکت تجهیز تونل جوان، http://tajhiztunnel.com/.