مقاله

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

محمدرضا بهمنی
کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

سید حسن مدنی
استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مجید عطایی پور
دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

شبیر ارشد نژاد
استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، گروه مهندسی معدن

چکیده

انجام تهویه مناسب در تونل‌ها، در زمان اجرا، امری مهم و حیاتی است. چگونگی انجام تهویه هم بر سلامت افراد فعال در تونل و هم بر کارآیی ماشین‌آلات و افراد تأثیر دارد. در مرحله اجرا، تونل به عنوان یک فضای بسته زیرزمینی تلقی می‌شود بنابراین کارکرد ماشین‌آلات حفاری، حمل و نقل و دستگاه شاتکریت، مقدار زیادی آلودگی ایجاد می‌کند که برای سلامت پرسنل مشغول به کار در تونل خطرناک است. در این پژوهش، بهترین سیستم تهویه برای تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه به دهدشت (قطعه سوم) در جنوب غربی استان کهگیلویه و بویر احمد، در حین اجرا طراحی شد. بدین ترتیب ابتدا سیستم تهویه دهشی، برای تهویه حین اجرای تونل، با استفاده از روابط موجود برای لوله‌هایی به قطر ۱/۲ متر طراحی شد. شدت جریان نهایی با اعمال نشت هوا برابر با ۲۵۳۶ متر مکعب در دقیقه (۴۲/۳ متر مکعب در ثانیه) به دست آمد. پس از تعیین شدت جریانی که باید به وسیله بادبزن تأمین شود، افت فشار ناشی از حرکت هوا در لوله برابر با ۴/۱ کیلو پاسکال محاسبه شد. در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده، بادبزن‌های مناسب برای هر دهانه به صورت ۵ بادبزن به حالت سری از شرکت Korfmann با مشخصه AL 12-750 (d) انتخاب شد، که در مجموع برای حفر کل تونل ۱۰ بادبزن به صورت سری مورد نیاز است، زیرا تونل از دو طرف حفر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه – دهدشت، سیستم تهویه حین اجرا، تهویه دهشی

۱- مقدمه

در زمان اجرای تونل‌ها، عامل آلوده‌کننده هوای تونل، تابع روش اجرا است. در مواردی که تونل به روش چالزنی و آتشباری حفر می‌شود، این فرآیند نقش اصلی در آلوده‌سازی را به عهده دارد.

ماشین‌آلاتی کـه در زمان اجـرای تـونـل در داخـل آن حرکت می‌کنند و نیز گـرد و غبـار تولیدی عوامل دیگری در آلوده کردن هوای تونل‌اند. ماشین‌های حفر تمام مقطع و یا بازویی نیز در آلوده کردن هوای تونل در زمان اجرا نقش دارند.

هدف‌های اصلی تهـویه تونل‌ها در زمـان اجـرا، رقیق کردن گازهـای سمی حاصل از آتشباری تا حد مجاز (در مواردی که تونل به روش چالزنی و آتشباری حفر می‌شود)، برطرف کردن گرد و غبار، تأمین هوای تـازه برای افرادی که در تونل به کار مشغول‌اند،

رقیق کردن گازها و دوده حاصل از حرکت وسایل حمل و نقل و بارگیری و در مواردی که تونل با استفاده از ماشین‌های تونل‌زنی حفر می‌شود، تأمین هوای تازه لازم برای عملکرد مناسب این دستگاه‌ها است. متداول‌ترین روش تهویه در این موارد، استفاده از لوله‌های تهویه (داکت) است اما در بعضی موارد به ویژه در مورد تونل‌های طویل، استفاده از دیواره تهویه و در مواردی که دو بخش تونل به صورت دوقلو هم‌زمان حفاری می‌شوند، استفاده از آن دو تونل از روش‌های دیگری است که در این مورد به کار می‌رود[۱]. مراحل طراحی سیستم تهویه در مرحله اجرا به شرح زیر است[۱]:

- انتخاب روش تهویه
- محاسبه شدت جریان هوای لازم
- محاسبه نشت هوا
- محاسبه افت فشار در لوله تهویه
- انتخاب بادبزن یا بادبزن‌ها

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

۲- پیشینه تحقیق

در مطالعه انجام شده به وسیله رضا رضائی و همکاران در سال ۱۳۹۶، سیستم تهویه تونل انتقال آب گلاب ۲ با استفاده از روابط تجربی موجود برای دو قطر لوله تهویه ۱ و ۱/۲ متر طراحی شد. در انتها با بررسی نتایج حاصل از مدلسازی و شدت جریان و افت فشار، بادبزن‌های مورد نیاز به منظور تهویه جبهه‌کار تونل گلاب۲ با دو قطر متفاوت ۱ و ۱/۲ متر طراحی شد[۲].

نوریان بیدگلی و همکاران در سال ۱۴۰۰ با محاسبه هوای موردنیاز برای افراد، ماشین‌آلات، کنترل گرد و غبار و نشت هوا در لوله‌های تهویه و همچنین محاسبه شدت جریان تهویه طبیعی ایستگاه و افت فشار تونل، سیستم تهویه حین اجرا برای ایستگاه سوم خرداد (12A) پروژه مترو قم، طراحی شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد، تهیه ۲ جت فن مدل IVH با قطر دهانه ۱۲۵ برای تهویه تونل، گزینه بهینه برای سیستم تهویه این ایستگاه است [۳].

در مطالعه‌ای، ویژگی‌های انتشار دود در آتش‌سوزی تونل در حین ساخت با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط یائو و همکاران در سال ۲۰۲۲ بررسی شد. همچنین روش بهبود کنترل دود نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که دود پس از برخورد به سطح حفاری، زمانی که آتش بسیار نزدیک به سطح حفاری است، همچنان ساختار لایه‌ای خوبی را حفظ می‌کند. در مقابل، لایه‌بندی دود پس از برخورد به سطح حفاری از بین می‌رود، پس از آن به نظر می‌رسد دود در تمام سطح مقطع تونل پخش می‌شود که آتش از سطح حفاری دور باشد. شفت به یک دسترسی معمولی برای تهویه طبیعی و خروج دود تبدیل می‌شود، که باعث می‌شود دود به سرعت تونل را پر کند زیرا گرداب بزرگی که از تعامل بین جریان هوا و جریان دود ایجاد می‌شود. یک دستگاه زهکشی در وسط شفت قرار داده شد تا دسترسی‌ها برای تهویه طبیعی و خروج دود را تقسیم کند، پس از آن افزایش دما در تونل به طور قابل توجهی کاهش و سرعت جریان جرمی دود از طریق شفت افزایش می‌یابد. این مطالعه برای مهندسی حفاظت در برابر آتش‌سوزی تونل، ارائه یک مبنای نظری و پشتیبانی فنی برای تشخیص آتش‌سوزی، هشدار اولیه و کنترل در تونل‌ها در حین ساخت مفید است[۴].

دستگاه حفاری تونل مقدار زیادی گرد و غبار در طول فرآیند حفاری تولید می‌کند. با این حال، تکنیک‌های تهویه و کنترل گرد و غبار موجود تنها می‌تواند بخشی از گرد و غبار ایجاد شده را کنترل کند. اگر گرد و غبار به طور موثر کنترل نشود، می‌تواند محیط کار تونل را آلوده کند و بر سلامت کارگران تأثیر جدی بگذارد. لیو و همکاران در سال ۲۰۲۲ در مقاله‌ای، روش شبیه‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های میدانی ترکیب کرده‌اند تا قانون انتشار آلودگی گرد و غبار را در یک تونل تحت حجم‌های مختلف مکش هوا و جایی که درگاه‌های مکش قرار دارند، مطالعه کنند[۵].

۳- مشخصات تونل مورد مطالعه

۳-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه

تونل شماره ۲ از قطعه ۳ جاده پاتاوه به دهدشت در جنوب غربی استان کهگیلویه و بویر احمد، در ۲۵ کیلومتری شمال دهدشت و در محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۴۶۳۶۰۰ تا ۴۶۴۴۰۰ و عرض جغرافیایی ۳۴۲۹۸۰۰ تا ۳۴۳۱۰۰۰ در مختصات UTM زون ۳۹ n واقع شده است(شکل ۱).

تونل مورد مطالعه به طول ۸۰۲ متر بخش از قطعه ۳ طرح

جاده پاتاوه به دهدشت است که در بخش‌های میانی آن و در حد فاصل کیلومتراژ ۴۱+۵۳۰ تا ۴۲+۳۳۲ قرار گرفته است. تراز ارتفاعی 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[۶].

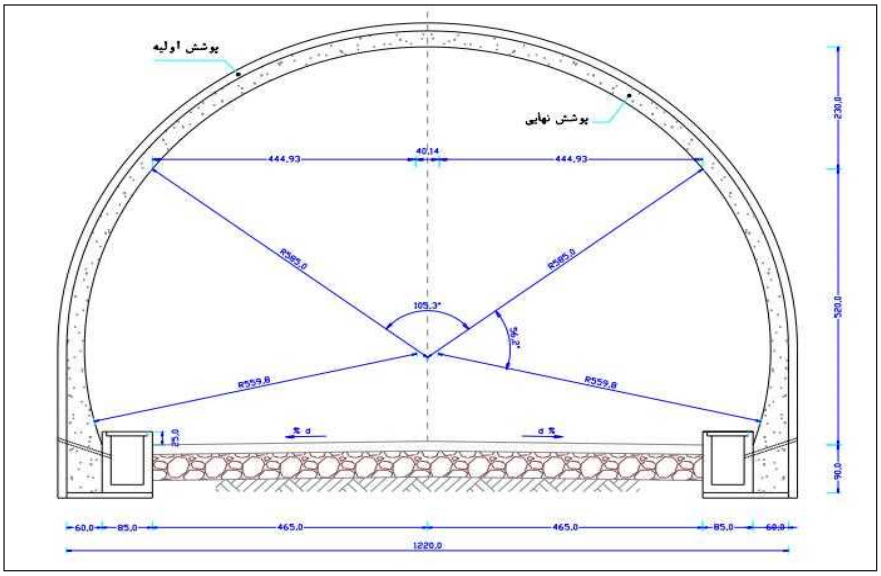
۳/۶۵ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به الزامات نشریه شماره ۱۶۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، گاباریت لازم برای آن طراحی شده است که مقطع تیپ تونل در شکل (۲) دیده می‌شود. شکل هندسی مقطع تیپ، از دو قوس دایره به شعاع‌های ۵/۸۵ و ۵/۶ متر در بخش فوقانی و طرفین تشکیل شده است. قائم نبودن دیواره‌های مقطع نه تنها به حفاری و کاهش حجم آن کمک می‌کند، بلکه

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی به تونل شماره ۲ (مقیاس تقریبی: ۱:۲۰۰۰۰۰) [۶]

۳-۲- شکل هندسی مقطع

تونل شماره ۲ راه پاتاوه- دهدشت برای دو خط عبور به عرض

در پایداری کناره تونل و کاهش نیروهای داخلی پوشش اولیه نیز بسیار مؤثر است[۶].



شکل ۲- مقطع قالب‌بندی و هندسه تونل۲[۶]

۳-۳- روش حفاری و اجرای تونل

شاید بتوان روش‌های احداث تونل را به چهار دسته کلی تقسیم‌نمود.

۱- روش سنتی (حفر آهسته و چند مقطعی تونل با احداث گالری‌های موقت و تعریض مقاطع تا رسیدن به مقطع آخر و تکمیل پوشش نهایی). اگر محیط دربردارنده زمین سنگی باشد، برای کندن و پیشروی از حفاری و انفجار استفاده می‌شود.

۲- روش کند و پوش (حفر ترانشه و ساخت سازه تونل و سپس پوشاندن آن با خاک)

۳- روش اتریشی (NATM) (حفر یک یا چند مقطعی به همراه رفتار سنجی تونل به منظور کنترل همگرایی و نیروهای ایجاد شده و نصب سیستم نگهداری مناسب در زمان مناسب). حفر سینه کار در این روش می‌تواند مکانیزه و یا با اصول حفاری و انفجار (در محیط سنگی) باشد.

۴- روش مکانیزه (حفاری تمام مقطع تونل با دستگاه TBM و نصب همزمان با پیشروی پوشش نهایی پیش ساخته).

لازم به ذکر است که تمامی مراحل حفر این تونل که در چهار لایه سنگی می‌باشد. بنابراین استفاده از روش اتریشی (NATM) به صورت دو مقطعی (با توجه به دهانه بزرگ تونل) و حفر با روش حفاری و انفجار، روش پیشنهادی برای حفر و پیشروی می‌باشد. در این روش، با توجه رفتار تونل و محیط دربردارنده آن می‌توان اقدام به طراحی بهینه نمود. فلسفه تونلسازی اتریشی را می‌توان در یک جمله ساده خلاصه نمود. دو ویژگی مهم سیستم نگهداری عبارتست از نه آنقدر سخت و نه آنقدر دیر. این عبارت به آن معنی است که در این روش نیازی به نصب سیستم نگهداری خیلی سخت و نصب زود هنگام آن نیست و همچنین نباید در نصب سیستم نگهداری بیش از حد مجاز تأخیر نمود و یا از سیستمی خیلی نرم استفاده کرد[۶].

به دلیل ارتفاع روباره قابل توجه در تونل و در نتیجه افزایش میزان تنش‌های برجا، حفاری تمام مقطع تونل باعث القای نیروهای زیادی بر پوشش شود. باتوجه به شرایط نسبتاً مناسب توده سنگی و به منظور کاهش نیروهای وارد بر پوشش، حفاری تونل به صورت دو مرحله‌ای (طاق و پاطاق) در نظر گرفته شده است. در این روش مقطع فوقانی تونل به ارتفاع ۵ تا ۶ متر حفاری و سپس پوشش اولیه اجرا می‌شود. پس از حفر طول قابل ملاحظه‌ای از تونل (معمولاً کل تونل) اقدام به کف‌برداری با حفاری و انفجار به روش پله‌ای با چال‌هایی به قطر کوچک تا متوسط، می‌شود. با توجه به طول، روش اجرا و سطح مقطع حفاری، تهویه حین اجرای تونل اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد [۶].

۳-۴- ماشین‌آلات مورد نیاز

حفاری تونل از طریق دو دهانه پیش‌بینی می‌شود بنابراین تجهیزات کارگاهی و ماشین‌آلات مورد نیاز باید در دو طرف تونل مستقر شوند. ماشین‌آلات مورد نیاز با روش انفجاری به شرح جداول ۱ و ۲ خواهد بود[۶]:

جدول ۱- ماشین آلات مورد نیاز تحکیم جداره تونل برای هر دهانه[۶]

شرح عملیات	ماشین آلات مورد نیاز	تعداد دستگاه
بتن پاشی	دستگاه شاتکریت	۱ دستگاه
بتن پاشی	کمپرسور هوای فشرده ۹۰۰ cfm	۱ دستگاه
نصب مهاری	دریل واگن	۱ دستگاه
جوشکاری	موتور جوش	۲ دستگاه
تزریق سیمان	دستگاه تزریق سیمان دستی	۱ دستگاه

جدول ۲- ماشین آلات مورد نیاز برای حفاری تونل از هر دهانه [۶]

شرح عملیات	ماشین آلات مورد نیاز	تعداد دستگاه
چالزنی برای آتشباری	جامبو دو چکشه	۱ دستگاه
بارگیری و تخلیه مصالح	لودر	۲ دستگاه
بارگیری و تخلیه مصالح	کامیون	۲ دستگاه
برق مصرفی کارگاه	ژنراتور برق	۱ دستگاه
چالزنی دستی برای رگلاژ	چکش و سرپایه	۲ دستگاه
هوای فشرده	کمپرسور ۲۴۰۰ cfm	۱ دستگاه
پمپاژ آب‌های نفوذی	پمپ لجن‌کش	۲ دستگاه
روشنایی	تابلوی برق	۴ دستگاه
حفاری	پرفراتور ۱۸کیلوگرم	۲ دستگاه
حفاری	پرفراتور ۱۱ کیلوگرم	۲ دستگاه

۴- انتخاب روش تهویه

تهویه این تونل از طریق سیستم دهشی هوای تازه را به محل جبهه حفاری می‌رساند. در این روش گرد و خاک، دودهای سمی ناشی از حفاری و انفجار و کارکرد ماشین‌آلات داخل تونل پس از رقیق شدن تحت رانش هوای دمیده شده از محل جبهه حفاری به طرف دهانه تخلیه می‌شود.

طولی از تونل که باید تهویه شود نصف کل تونل است، زیرا تونل از دو طرف حفر می‌شود. همین طول مورد نظر، خود به سه بخش تقسیم می‌گردد تا در مراحل آغازین عملیات ساخت، شدت جریان زیاد باعث بروز مشکل برای پرسنل داخل تونل نشود.

۵- محاسبه شدت جریان هوای لازم

شدت جریان هوای لازم برای تهویه جبهه‌کار تونل باید بر اساس موارد زیر به طور جداگانه محاسبه شود:

- حداکثر تعداد نفراتی که در تونل به کار مشغول‌اند.
- هوای لازم برای برطرف کردن آلودگی‌های حاصل از ماشین‌آلاتی که در تونل کار می‌کنند.
- هوای لازم برای رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری
- هوای لازم برای برطرف کردن گرد و غبار
- هوای لازم بر اساس حداقل سرعت هوا
- هوای لازم برای عملکرد مناسب ماشین‌های تونل‌زنی
- هوای لازم برای رقیق کردن گازهای سمی و قابل انفجار در مواردی که تونل در زمین‌هایی حفر می‌شود که احتمال تصاعد چنین گازهایی پیش‌بینی می‌شود.

پس از آنکه شدت جریان هوای لازم بر اساس موارد یاد شده به طور مجزا محاسبه شد، بزرگ‌ترین آن‌ها به عنوان شدت جریان انتخاب می‌شود. این شدت جریان باید با توجه به میزان نشت هوا و ضرایب دیگری که شرح آن خواهد آمد، تصحیح شود تا شدت جریان نهایی به‌دست آید[۱].

۵-۱- محاسبه شدت جریان هوا بر اساس حداکثر تعداد نفرات

بر اساس استاندارد ایران، به ازای هر نفر از افراد در هر دقیقه، باید ۶ متر مکعب هوای تازه در نظر گرفته شود، بنابراین شدت جریان هوای لازم (Q) طبقه رابطه (۱) محاسبه می‌شود[۱]:

$$Q = 6n$$

Q= شدت جریان هوا (m^3/min)

n= تعداد نفرات در تونل

بنابراین اگر در صورت لزوم و در شرایط بحرانی ۱۲ نفر در تونل باشند، سیستم تهویه باید حداقل شدت جریانی برابر ۷۲ متر مکعب در دقیقه را تأمین کند.

۵-۲- محاسبه شدت جریان هوا بر اساس ماشین‌آلاتی که در تونل کار می‌کنند

در مورد تونل‌هایی که با روش‌های سنتی مانند آتشباری و روش جدید اتریشی حفر می‌شوند، مهم‌ترین ماشین‌آلاتی که در مرحله حفاری در تونل کار می‌کنند، ماشین‌های بارگیری و حمل و نقل‌اند که عمدتا با موتور دیزلی کار می‌کنند.

طبق استانداردهای موجود برای این ماشین‌آلات باید به شرح روابط ۲ و ۳ شدت جریان هوای تازه در نظر گرفته شده و از طریق سیستم تهویه تأمین شود[۱]:

$$Q = 2{,}2N_{hp} \quad m^3/min$$

$$Q = 3N_{kw} \quad m^3/min$$

N_{hp}= مجموعه توان وسایل حمل و نقل موجود در تونل (اسب بخار)

N_{kw}= مجموعه توان وسایل حمل و نقل موجود در تونل (کیلووات)

بنابر هندسه مقطع تونل و روش اجرا (حفاری و انفجار)، مجموع توان موتورهای آن‌ها به تقریب برابر با ۷۰۰ اسب بخار در نظر گرفته شده است.

طبق رابطه ۲ شدت جریان هوای تازه برابر ۱۵۴۰ متر مکعب در دقیقه به دست می‌آید.

طبق استانداردهای موجود، در مورد محاسبه شدت جریان هوای لازم بر اساس ماشین‌آلات دیزلی، باید شدت جریان هوای لازم بر اساس حداکثر نفرات نیز با آن جمع و به عنوان شدت جریان موردنیاز در نظر گرفته شود، بنابراین با این توصیف مقدار دبی هوای موردنیاز برای آن‌ها برابر با ۱۶۱۲ متر مکعب در دقیقه می‌باشد.

۵-۳- محاسبه شدت جریان هوا بر اساس رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری

برای محاسبه شدت جریان هوا برای رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری در کشورهای مختلف، استانداردهای متفاوتی وجود دارد که در ادامه تشریح شده است:

۵-۳-۱- استاندارد روسیه

در این استاندارد، برای روش‌های دهشی، مکشی و ترکیبی، فرمول‌های مختلفی وجود دارد، با توجه به اینکه تهویه این تونل از طریق سیستم دهشی هوای تازه را به محل جبهه حفاری می‌رساند، محاسبه میزان هوا در ادامه توضیح داده شده است.

یکی از معروف‌ترین فرمول‌ها در این زمینه فرمول ورونین به شرح رابطه (۴) است[۱]:

$$Q = \frac{7,8}{t}\sqrt[3]{mV^2} \quad m^3/min$$

که در آن:

t= زمان تهویه (دقیقه)

m= مقدار ماده منفجره مصرف شده (کیلوگرم)

V= حجم قسمتی است که باید تهویه شود (متر مکعب).

در این مورد فرمول دیگری نیز موسوم به فرمول موستل به شرح رابطه (۵) وجود دارد:

$$Q = \frac{21,4}{t}\sqrt[3]{mV} \quad m^3/min$$

توصیه می‌شود که شدت جریان با هر دو فرمول محاسبه شده و میانگین آن‌ها به عنوان شدت جریان موردنظر انتخاب شود.

برای محاسبه V یعنی حجم قسمتی که باید تهویه شود، از رابطه (۶) استفاده می‌کنند[۱]:

$$V = LA$$

که در آن:

L= طول قسمت مورد نظر (متر)

A= سطح مقطع تونل (متر مربع)

قسمت اعظم گازهای سمی ناشی از آتشباری در فاصله L از جبهه‌کار متمرکزند که در این فاصله از رابطه تجربی (۷) به دست می‌آید[۱]:

$$L = 450\frac{m}{A}$$

بنابراین در صورتی که طول تونل خیلی زیاد باشد به جای طول کلی تونل، طول L را که از رابطه (۷) به دست می‌آید به کار می‌برند که معمولاً ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر به دست می‌آید. اگر طول تونل کمتر از طولی باشد که از رابطه (۷) حاصل می‌شود، در محاسبات باید طول تونل را به کار برد[۱].

رابطه ۷ با فرض آنکه ضریب اصطکاک تونل α در تونل معادل ۰/۰۰۱۷۵ در سیستم متریک باشد ارائه شده است و بنابراین در مواردی که ضریب اصطکاک تونل کمتر از این مقدار باشد، مقدار هوا زیادتر از حد لزوم و در مواردی که بیشتر باشد، هوای محاسبه شده کمتر از آنچه که لازم است خواهد شد که باید آن را بر اساس ضریب α=۰/۰۰۱۷۵ تعدیل کرد[۱].

مقدار ماده منفجره موردنیاز ۱۳۱ کیلوگرم فرض شد. سطح مقطع تونل ۶۵ متر مربع و مدت زمان موردنظر جهت انجام تهویه برای رقیق کردن گازها، ۳۰ دقیقه اختیار شد.

طبق رابطه(۷) مقدار L برابر ۹۰۷ متر بدست آمده است که با توجه به توضیحات قبل چون از طول تونل یعنی ۸۰۲ متر بیشتر است پس در محاسبات طول تونل (۸۰۲ متر) به کار می‌رود.

طبق رابطه (۶) مقدار V برابر ۵۲۱۳۰ مترمکعب به دست آمده است.

با توجه به روابط (۴) و (۵) داریم:

$$Q = \frac{7,8}{30}\sqrt[3]{131\times(52130)^2} = 1842,7 \quad m^3/min$$

میانگین مقادیر به دست آمده از روابط بالا برابر با ۱۸۵۳/۴ متر مکعب در دقیقه است.

۵-۳-۲- استاندارد ایالات متحده آمریکا

با فرض آنکه گازهای حاصل از آتشباری تا فاصله ۲۱ متری از جبهه‌کار پخش می‌شوند، شدت جریان لازم برای تهویه جبهه‌کار از رابطه (۸) به دست می‌آید[۱]:

$$Q = \frac{21An}{t} \quad m^3/min$$

که در آن:

t= زمان تهویه (دقیقه)

A= سطح مقطع تونل (مترمربع)

n= تعداد دفعاتی که در فاصله زمانی t باید هوای جبهه‌کار تعویض شود (معمولاً آن را ۵ نوبت در نظر می‌گیرند).

طبق رابطه (۸) داریم:

$$Q = \frac{21\times65\times5}{30} = 227.5 \quad m^3/min$$

بنابراین مقدار شدت جریان ۲۲۷/۵ متر مکعب در دقیقه به دست آمده است.

اگر رقیق کردن مونواکسید کربن مبنای کار قرار گیرد، در این صورت شدت جریان هوای لازم از رابطه (۹) محاسبه می‌شود[۱]:

$$Q = \frac{5mb}{t} \quad m^3/min$$

که در آن:

m= وزن ماده منفجره‌ای که در هر نوبت آتشباری مصرف می‌شود(کیلوگرم)

b=حجم گاز مونواکسید کربن حاصل به ازای هر کیلوگرم ماده منفجره(لیتر)

t= زمان تهویه (دقیقه)

پارامتر b علاوه بر نوع ماده منفجره، به عوامل دیگری نیز وابسته است که از آن جمله می‌توان به روش آتشباری، چگالی خرج گذاری، مقطع حفاری و امثال آن اشاره کرد اما مقدار متوسط آن را می‌توان ۳۶/۵ lit/kg در نظر گرفت[۱].

بنابراین اگر رقیق کردن مونوکسید کربن مبنای کار قرار گیرد، میزان شدت جریان لازم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{5\times131\times36.5}{30} = 797 \quad m^3/min$$

۵-۳-۳- روش محاسبه مستقیم

در این روش که در ایران عمل می‌شود، فرض می‌کنند که حجم گازهای سمی حاصل از انفجار هر کیلوگرم ماده منفجره طبق دستورالعمل‌های ایمنی نباید از ۴۰ لیتر تجاوز کند و عیار مجاز گازهای حاصل از آتشباری را نیز ۰/۰۰۸ درصد در نظر می‌گیرند، بنابراین اگر در هر نوبت آتشباری m کیلوگرم ماده منفجره مصرف شود، شدت جریان هوای لازم برای تهویه جبهه‌کار از رابطه(۱۰) به دست می‌آید[۱]:

$$Q = \frac{500\ m}{t} \quad m^3/min$$

که در آن t زمان تهویه جبهه‌کار بر حسب دقیقه است.

بنابراین با توجه به رابطه (۱۰) داریم:

$$Q = 500 \times \frac{131}{30} = 2183.3 \quad m^3/min$$

در نتیجه با روش مستقیم شدت جریان لازم برابر ۲۱۸۳/۳ متر مکعب در دقیقه به دست آمده است.

۵-۴- محاسبه شدت جریان هوای لازم بر اساس میزان گرد و غبار تولید شده

بسته به نوع سنگ و شیوه بارگیری، شدت جریان هوای لازم برای برطرف کردن گرد و غبار از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود[۱]:

$$Q = \frac{60I}{N_P - N_O} \quad m\text{^}3/min$$

که در آن:

Q= شدت جریان هوا (متر مکعب بر دقیقه)

I= ضریب شدت گرد و غبار که از جدول ۳ به دست می‌آید (در اینجا ۵۱۰).

N_P= میزان گرد و غبار مجاز موجود در مسیر برگشت هوا (به طور متوسط ۴۰۰ ذره در هر سانتی‌متر مکعب)

N_o = میزان گرد و غبار موجود در هوای بیرون تونل (۲۰۰ ذره در هر سانتی‌متر مکعب)

جدول ۳ - مقادیر ضریب هنگام کار دستگاه‌های حفار بارکننده [۱]

نوع عملکرد و سختی در مقیاس پروتودیاکنوف	بارگیری سنگ به روش مرطوب		بارگیری سنگ به روش خشک	
	Iav	*I*	*Iav*	*I*
حفار بارکننده				
سختی ۶ تا ۱۰	۱۸۳	۱۷۲ تا ۲۰۴	۵۲۵	۴۷۱ تا ۵۷۳
سختی ۱۰ تا ۱۶	۱۵۹	۱۴۷ تا ۱۷۲	۴۹۲	۴۴۰ تا ۵۴۵
بارکننده اسکریپر				
سختی ۶ تا ۱۰	۲۰۷	۱۸۸ تا ۲۲۶	۳۵۳	۳۲۸ تا ۳۷۸
سختی ۱۰ تا ۱۶	۱۵۱	۱۴۰ تا ۱۶۳	۳۰۰	۲۶۹ تا ۳۳۲

طبق رابطه(۱۱) داریم:

$$Q = \frac{60\times510}{400-200} = 153 \quad m^3/min$$

بنابراین محاسبات انجام شده میزان شدت جریان در این مورد برابر ۱۵۳ متر مکعب در دقیقه به دست آمده است.

۵-۵- محاسبه شدت جریان هوای لازم بر اساس تعداد دفعات تعویض هوای جبهه‌کار

برای اینکه هوای موجود در جلوی لوله تهویه به حد کافی رقیق شود، باید حداقل معادل سه برابر حجم این قسمت از بن‌بست، هوای تمیز وارد کرد، بنابراین اگر A سطح مقطع تونل و d فاصله لوله تهویه تا انتهای بن‌بست و t زمان لازم برای تهویه باشد، شدت جریان هوای لازم از رابطه (۱۲) به دست می‌آید[۱].

در سیستم دهشی، با افزایش فاصله لوله تهویه تا انتهای بن‌بست، از اثر بخشی تهویه کاسته می‌شود. بنابراین باید سعی شود تا جایی که امکان دارد انتهای لوله نزدیک سینه‌کار نگه داشته شود، یعنی این فاصله از ۱۰ تا ۱۵ برابر قطر لوله بیشتر نباشد.

$$Q = \frac{3Ad}{t} \quad m^3/min$$

که در آن Q شدت جریان هوای لازم در لوله تهویه بر حسب متر مکعب در دقیقه است.

d فاصله لوله تهویه تا انتهای بن‌بست برابر ۱۰ متر، زمان تهویه (t) برابر ۳۰ دقیقه و سطح مقطع تونل(A) برابر ۶۵ مترمربع می‌باشد. بنابراین با توجه به رابطه (۱۲) داریم:

$$Q = \frac{3\times65\times10}{30} = 65 \quad m^3/min$$

بنابراین محاسبات انجام شده میزان شدت جریان لازم در این مورد برابر ۶۵ متر مکعب در دقیقه به دست آمده است.

۶-۵- محاسبه شدت جریان هوا بر اساس حداقل سرعت هوا

برای آنکه هوا بتواند گازها و گرد و غبار موجود در جبهه‌کار تونل را به بیرون هدایت کند، سرعت هوا در مسیر برگشت آن نباید از حداقل تعیین شده کمتر باشد.

برای این منظور بر اساس نوع سیستم تهویه (دهشی و یا مکشی) مقدار سرعت مجاز جریان هوا تعیین می‌شود، با توجه به اینکه تهویه این تونل از طریق سیستم دهشی هوای تازه را به محل جبهه حفاری می‌رساند، حداقل سرعت هوا نباید کمتر از ۰/۲۵ متر در ثانیه باشد. بدین ترتیب اگر سطح مقطع تونل A متر مربع باشد، شدت جریان هوای لازم از این بابت از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود[۱]:

$$Q = 0/25A \quad m^3/s \quad = 15A \quad m^3/min$$

سپس با توجه به سطح مقطع تونل (۶۵ متر مربع)، مقدار شدت جریانی برابر با ۹۷۵ متر مکعب در دقیقه محاسبه گشت.

شدت جریان محاسبه شده با روش‌های مختلف در جدول(۴) ارائه شده است.

جدول ۴- شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل حین اجرا با روش‌های مختلف

روش	Q (m^3/min)
محاسبه شدت جریان هوا بر اساس حداکثر تعداد نفرات	۷۲
محاسبه شدت جریان هوا بر اساس ماشین‌آلاتی که در تونل کار می‌کنند	۱۶۱۲
محاسبه شدت جریان هوا بر اساس رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری (استاندارد روسیه)	۱۸۵۳/۴
محاسبه شدت جریان هوا بر اساس رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری (استاندارد ایالات متحده آمریکا)	۷۹۷
محاسبه شدت جریان هوا بر اساس رقیق کردن گازهای حاصل از آتشباری (روش محاسبه مستقیم)	۲۱۸۳/۲
محاسبه شدت جریان هوای لازم بر اساس میزان گرد و غبار تولید شده	۱۵۳
محاسبه شدت جریان هوای لازم بر اساس تعداد دفعات تعویض هوای جبهه‌کار	۶۵
محاسبه شدت جریان هوا بر اساس حداقل سرعت هوا	۹۷۵

پس از محاسبه شدت جریان مورد نیاز بر اساس موارد یاد شده، بزرگترین آن‌ها به عنوان شدت جریان نهایی انتخاب می‌شود. شدت جریان انتخاب شده، شدت جریانی است که باید به جبهه‌کار دمیده شده و یا از آن مکیده شود. از آنجا که هوا در طول حرکت در لوله‌های تهویه، نشت قابل‌توجهی دارد، بنابراین شدت جریانی که باید در ابتدای لوله به وسیله بادبزن تأمین شود، معادل جمع شدت جریان نهایی به اضافه میزان نشت خواهد بود[۱].

شدت جریان نهایی انتخاب شده را باید در ضریب ایمنی ضرب کرد تا در موارد اضطراری و پیش‌بینی نشده مشکلی پیش نیاید. بسته به مورد، این ضریب ایمنی بین ۱/۱۰ تا ۱/۱۵ انتخاب می‌شود [۱].

ضریب ایمنی برابر با ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است. شدت جریان نهایی انتخاب شده برابر با ۲۱۸۳/۳ متر مکعب در دقیقه

است که در ضریب ایمنی (۱/۱۵) ضرب می‌شود.

پس حداقل شدت جریان هوای موردنیاز بر اساس سناریوهای مختلف و بر حسب اولویت و همزمانی عملیات اجرایی برابر خواهد بود با ۲۵۱۱ متر مکعب در دقیقه، که در ادامه نشت هوا محاسبه و با آن جمع می‌شود.

۶- انتخاب لوله تهویه

با توجه به شدت جریان زیاد مورد نیاز برای تهویه تونل‌های با مقطع بزرگ، استفاده از لوله‌های با قطر بالاتر توصیه می‌شود مگر اینکه فضای کافی برای نصب لوله‌های بزرگ در دسترس نباشد [۱].

در ایران معمولا از لوله‌های برزنتی با قطرهای ۱، ۱/۲ و ۱/۵ متر استفاده می‌شود [۱].

در این تونل برای انتقال هوا از لوله‌های برزنتی ۱۲۰ سانتی‌متری باید استفاده شود.

۷- محاسبه نشت هوا

با توجه به مطالب یاد شده، ابتدا باید میزان نشت هوا در لوله را با توجه به مشخصات آن محاسبه کرد و از جمع آن با شدت جریان نهایی انتخاب شده برای تهویه جبهه‌کار، شدت جریانی را که باید از ابتدای لوله عبور کند (یا به وسیله بازدبزن تولید شود) به دست آورد، که در رابطه (۱) نشان داده شده است [۱]:

$$Q_f = Q_o + \Delta Q \qquad (۱)$$

که در آن:

Q_f = شدت جریانی که باید در ابتدای لوله تأمین شود.

Q_o = شدت جریان نهایی انتخاب شده (بخش ۴)

$Q\Delta$ = نشت هوا

برای محاسبه نشت هوا روابط مختلفی ارائه شده است که استفاده از رابطه تجربی (۲) در این مورد توصیه می‌شود [۱]:

$$\frac{Q_f}{Q_o} = [(\frac{KD}{3}\frac{L}{l}\sqrt{R})\times 10^{-6}+1]^2 \qquad (۲)$$

که در آن:

Q_f= شدت جریانی که باید به وسیله بادبزن تأمین شود (مترمکعب در دقیقه)

Q_o = شدت جریان نهایی انتخاب شده برای جبهه‌کار (مترمکعب در دقیقه)

L = طول کلی لوله (متر)

l = طول هریک از قطعات لوله (متر)

D = قطر لوله (متر)

R = مقاومت آیرودینامیکی لوله (کیلومورگ)

K = ضریب نفوذپذیری اتصالات قطعه‌ها که عبارت از مقدار هوایی است (مترمکعب در ثانیه) که از یک اتصال از لوله‌ای به قطر یک متر و تحت اختلاف فشار یک میلی‌متر آب عبور می‌کند.

مقدار عددی ضریب K در مورد لوله‌های مختلف متفاوت و مقدار آن در مورد لوله‌های برزنتی $۱/۵\times ۱۰^{۳}$ است.

بنابراین در این تونل با جای‌گذاری مقادیر زیر در رابطه (۲) داریم:

D= ۱/۲ متر

L= ۳۹۰ متر

l= ۱۰ متر

R= ۰/۰۴۰ کیلومورگ

K= ۱۵۷۰

$$\frac{Q_f}{Q_o} = [\frac{1570\times 1.2\times 390\times\sqrt{0.04}}{10\times 3}\times 10^{-6}+1]^2 = 1.01$$

$$Q_f = Q_o\times 1.01 = 2511\times 1.01 = 2536 \quad m^3/min$$

بنابراین با اعمال نشت شدت جریانی که باید در ابتدای لوله تأمین شود (Q_f)، برابر ۲۵۳۶ متر مکعب در دقیقه به‌دست آمد.

۸- محاسبه افت فشار در خط لوله

پس از تعیین شدت جریانی که باید به وسیله بادبزن تأمین شود، باید افت فشار ناشی از حرکت هوا در لوله را محاسبه کرد تا به کمک آن بتوان بادبزن مناسب را برگزید [۱].

افت فشار کلی خط لوله از مجموع افت فشارهای اصطکاکی، موضعی و دینامیکی طبق رابطه (۳) به دست می‌آید [۱]:

$$P_t = \Delta P_f + \Delta P_l + \Delta P_v\Delta \qquad (۳)$$

که در آن:

ΔP_t = افت فشار کلی خط لوله

ΔP_f = افت فشار اصطکاکی

ΔP_l = افت فشار موضعی

ΔP_v = افت فشار دینامیکی

افت فشار اصطکاکی، موضعی، دینامیکی و افت فشار کلی خط لوله بر حسب کیلو پاسکال محاسبه و در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵- محاسبه افت فشار در خط لوله (بر حسب کیلو پاسکال)

افت فشار اصطکاکی	۲/۹
افت فشار موضعی	۰/۳
افت فشار دینامیکی	۰/۹
افت فشار کلی خط لوله	۴/۱

در نتیجه مقدار افت فشار کلی خط لوله برابر ۴/۱ کیلو پاسکال به دست آمد.

۹- محاسبه توان بادبزن‌ها

اگر P فشار کلی بادبزن (که معادل ΔP_t است) و Q_f شدت جریان آن باشد، توان مصرفی بادبزن از رابطه (۴) [محاسبه می‌شود [۱]:

که در آن:

$$N = \frac{PQ_f}{\eta_1 \eta_2} \qquad (۴)$$

η_1= راندمان بادبزن (در اینجا ۰/۸)

η_2= راندمان موتور الکتریکی (در اینجا ۰/۸)

P= فشار کلی بادبزن بر حسب پاسکال (در اینجا ۴۱۰۰ پاسکال)

Q_f= شدت جریان بادبزن بر حسب مترمکعب بر ثانیه (در اینجا ۴۲/۳ متر مکعب بر ثانیه)

N= توان مصرفی بادبزن بر حسب وات

با توجه به رابطه(۴)برای محاسبه توان مصرفی بادبزن داریم:

$$N = \frac{4100 \times 42.3}{0.8 \times 0.8} = 270984 \quad W$$

بنابراین توان مصرفی بادبزن برابر ۲۷۰۹۸۴ وات یا ۲۷۱ کیلو وات است.

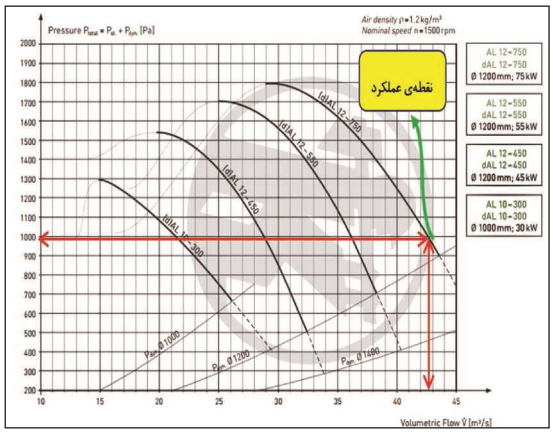
۱۰- انتخاب بادبزن

آخرین مرحله از طراحی تهویه حین اجرا، انتخاب بادبزن یا بادبزن‌های لازم است. با توجه به شدت جریان کلی و افت فشار کلی ΔP_t، با مشورت سازنده بادبزن مناسبی با نقطه عملکرد Q_f و ΔP_t انتخاب می‌شود که راندمان قابل قبولی داشته باشد[۱].

این شیوه انتخاب بادبزن در صورتی قابل اجراست که طول قسمتی از تونل که در هر مرحله باید تهویه شود از ۲۰۰ متر تجاوز نکند و در صورتی که طول تونل بیشتر باشد، یا باید با احداث دویل‌هایی (شافت) تا سطح زمین، تونل را به قطعات کوتاه‌تر از ۲۰۰ متر تقسیم کرد و یا در صورتی که امکان احداث دویل یا دویل‌ها نباشد، باید چندین بادبزن را به کار گرفت[۱].

در این تونل برای انتقال هوا از لوله‌های برزنتی ۱۲۰۰ میلی‌متری باید استفاده شود و همچنین با توجه به شدت جریان تولیدی موردنیاز و افت فشار درون لوله تهویه بادبزن مناسب انتخاب می‌شود.

برای این منظور از شکل (۳) که متعلق به شرکت Korfmann است[۷]، استفاده شد و مشخصات بادبزن و لوله تهویه در جدول (۶) نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی انتخاب بادبزن[۷]

جدول ۶- انتخاب بادبزن برای لوله تهویه با قطر ۱/۲ متر

تعداد بادبزن	نوع بادبزن	افت فشار کل (pa)	شدت جریان تولیدی ($\frac{m^3}{s}$)	طول لوله تهویه (m)	قطر لوله تهویه (m)
۵	(d) AL 12-750	۴۱۰۰	۳/۴۲	۳۹۰	۲/۱

در ضمن باید عنوان شود برای حفر کل تونل نیاز به ۱۰ بادبزن به صورت سری است، چون تونل از دو طرف حفر می‌شود، که برای هر دهانه نیاز به ۵ بادبزن به صورت سری است. چونکه در حالت سری افت فشار بادبزن‌ها با هم جمع می‌شوند و با توجه به اینکه افت فشار کلی برای یک دهانه ۴۱۰۰ پاسکال محاسبه شده است و طبق شکل ۳ افت فشار هر بادبزن نزدیک به ۱۰۰۰ پاسکال است، پس برای هر دهانه ۵ بادبزن به صورت سری انتخاب شده است.

۱۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، انتخاب سیستم تهویه برای تونل شماره ۲ از قطعه ۳ جاده پاتاوه به دهدشت در جنوب غربی استان کهگیلویه و بویر احمد، در حین اجرا مورد بررسی قرار گرفت. طول تونل ۸۰۲ متر و یک خط برای رفت و یک خط نیز برای برگشت تعبیه شده است. برای انجام این کار از اطلاعات موجود در گزارش مطالعات مرحله دوم تونل شماره ۲ راه اصلی پاتاوه – دهدشت (قطعه سوم)، که بر اساس برداشت‌های صحرایی انجام شده و آزمایشات مربوطه و نتایج آن به مهندسین مشاور ارسال شده است، استفاده شد. سپس مشخص شد شدت جریان برابر با ۲۵۳۶ متر مکعب در دقیقه (۴۲/۳ متر مکعب در ثانیه) لازم است، و افت فشار کلی برای لوله به طول ۳۹۰ متر برابر با ۴/۱ کیلو پاسکال محاسبه شد. که برای تأمین این مقدار هوا نیاز به ۵ بادبزن به صورت سری از شرکت Korfmann با مشخصه 12-750 AL (d) است. که در مجموع برای حفر کل تونل نیاز به ۱۰ بادبزن به صورت سری می‌باشد، چون تونل از دو طرف حفر می‌شود.

نتایج حاصل از طراحی سیستم تهویه برای تونل شماره ۲ از قطعه ۳ جاده پاتاوه به دهدشت در جنوب غربی استان کهگیلویه و بویر احمد، در مرحله اجرا در این تحقیق به شرح زیر است:

۱- سیستم تهویه دهشی با لوله به قطر ۱/۲ متر

۲- شدت جریان نهایی با اعمال نشت هوا برابر با ۲۵۳۶ متر مکعب در دقیقه (۴۲/۳ متر مکعب در ثانیه)

۳- افت فشار ناشی از حرکت هوا در لوله برابر با ۴/۱ کیلو پاسکال

۴- با توجه به اینکه تونل از دو طرف حفر می‌شود، برای هر دهانه ۵ بادبزن به صورت سری از شرکت Korfmann با مشخصه ۱۲-۷۵۰ AL(d) انتخاب شده است، که در مجموع برای حفر کل تونل نیاز به ۱۰ بادبزن به صورت سری است.

۱۲- پیشنهادات

۱- گاهی ممکن است در طول تونل (قسمت‌های حفاری شده) یا در محدوده سیستم پشتیبانی دستگاه وقوع حوادثی مانند آتش‌سوزی در تونل اتفاق بیفتد. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود مسئله آتش‌سوزی و سرعت بحرانی انجام شود.

۲- با توجه به اینکه در این پژوهش سیستم تهویه حین اجرا برای لوله با قطر ۱/۲ متر طراحی شد، پیشنهاد می‌شود سیستم تهویه حین اجرا برای لوله با قطر ۱ متر نیز طراحی و نتایج با پژوهش حاضر مقایسه شود.

منابع و مراجع

[۱] دستورالعمل تهویه تونل‌ها در زمان احداث و بهره‌برداری (۱۳۹۹)، وزارت صنعت، معدن و تجارت، برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن، انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن شماره ۷۲، http://www.mimt.gov.ir

[۲] رضایی، رضا و بخشنده امنیه، حسن و سجادی، بهرنگ، (۱۳۹۶)، طراحی سیستم تهویه تونل انتقال آب گلاب در حین حفاری،کنفرانس بین المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری، مدیریت شهری و محیط‌زیست،کرج https://civilica.com/doc/711095

[۳] دلاکی، علی و نوریان بیدگلی، مجید و الوندی، حامد،(۱۴۰۰)،طراحی سیستم تهویه بهینه حین اجرا در ایستگاه‌های قطار شهری (مطالعه موردی: ایستگاه سوم خرداد (۱۲A) پروژه مترو قم)، هفتمین کنگره سالانه بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران.

[4] Yao, Yongzheng, et al. "Numerical study of the characteristics of smoke spread in tunnel fires during construction and method for improvement of smoke control." *Case Studies in Thermal Engineering* 34 (2022): 102043.

[5] Liu, Changqi, Qiu Bao, and Wen Nie. "The influence of ventilation parameters on dust pollution in a tunnel's environment using the CFD method." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 230 (2022): 105173.

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

[7] Korfmann Lufttechnik GmbH website, http://www.korfmann.com

تعرفه اشتراک مجله سازمان نظام مهندسی معدن ایران

فرم اشتراک	درج آگهی در مجله	ارسال نسخه چاپی	درج آگهی در سایت	اشتراک سالیانه (ریال)
طلایی	۴ فصل	۵ نسخه هر شماره	۴ فصل	۳۰۰/۰۰۰/۰۰۰
نقره ای	۲ فصل	۴ نسخه هر شماره	۲فصل	۲۰۰/۰۰۰/۰۰۰
برنز	۲ فصل	۳ نسخه هر شماره	۱ فصل	۱۰۰/۰۰۰/۰۰۰
معمولی		۲ نسخه هر شماره	۴ فصل	۳۰/۰۰۰/۰۰۰

با توجه به جدول بالا، مبلغ مربوطه را به شماره حساب ۵۹۵۳۵۹۲۷ بانک تجارت به نام سازمان نظام مهندسی معدن ایران واریز نمایید و فیش واریزی را به ایمیل **imepub@ime.org.ir** ارسال بفرمایید.
(در قسمت موضوع حتماً قید شود: خرید اشتراک مجله)