

## سیستم تهویه مناسب برای کنترل گاز متان در تونل های در حال ساخت (مطالعه موردی تونل البرز)

محمد جواد جعفری<sup>۱</sup>، نورالدین قراری<sup>۲\*</sup>، صادق حضرتی<sup>۳</sup>، مرتضی عالیقدری<sup>۳</sup>، سید احمد مختاری<sup>۳</sup>،  
زهرا روحی راد<sup>۴</sup>

۱. عضو هیئت علمی، دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران ۲. دانشجوی دکتری بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران ۳. عضو هیئت علمی، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی اردبیل، اردبیل ۴. کارشناس بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران  
\* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۲۱۲۲۴۳۲۰۴۰ فکس: ۰۲۱۲۲۴۳۲۰۳۶ ایمیل: ngharari@yahoo.uk.com

### چکیده

**زمینه و هدف:** روشهای مختلفی برای تهویه تونل های در حال ساخت می توان استفاده کرد. هر یک از روش ها دارای مزایا، محدودیت ها و معایبی است که در انتخاب آنها باید در نظر گرفته شود. تهویه نامناسب نرخ پیشروی را پائین آورده و شرایط کاری نامطلوبی را برای کارکنان تونل ایجاد می کند. این مسئله در تونل های گاز دار بحرانی تر بوده و ممکن است جان شاغلین در تونل و همچنین کل پروژه را بخطر اندازد. مقاله حاضر بر اساس یکسری استانداردهای رایج تهویه، راهنمایی هایی جهت انتخاب سیستم تهویه و اجرای بهینه آن و همچنین جنبه های طراحی تهویه در تونل های گازدار را بیان می کند.

**روش کار:** در انتخاب سیستم تهویه تونل البرز سیستم های معمول تهویه برای تونل های در حال ساخت مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت سیستم تهویه دهشی به عنوان مناسبترین طرح انتخاب شد. از آنجاییکه تهویه دهشی به فرم های مختلف قابل اجرا می باشد. در مقاله حاضر شش طرح برای سیستم تهویه تونل البرز مطرح و با هم مقایسه شدند. برای تعیین ظرفیت تهویه تونل میزان هوای لازم بر اساس معیارهای مختلف محاسبه شدند. هوای مورد نیاز برای تجهیزات دیزلی به عنوان هوای لازم برای تهویه تونل در نظر گرفته شد. با توجه به مزایا و معایب و محدودیت های استفاده از کانال هایی با قطر کم و زیاد، جهت انتخاب قطر بهینه، محاسبات تهویه برای قطرهای ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ سانتی متری انجام شد.

**یافته ها:** نتایج حاصل از مقایسه واریانت های مختلف تهویه نشان داد در تونل هایی با این شرایط، استفاده از تهویه دهشی با دو فن که به صورت موازی در بیرون از تونل قرار دارند به همراه یک کانال هوای مشترک (۱۴۰ سانتیمتر) مناسبترین طرح ممکن می باشد.

**نتیجه گیری:** تهویه مناسب عامل بحرانی در حفاری تونل های عمیق و گازدار است و استفاده از تهویه نامناسب ممکن است محیط کار، جان افراد و نرخ پیشروی را به طور جدی تحت تاثیر قرار دهد.

**واژه های کلیدی:** تونل البرز، تهویه، تونل های گازدار در حال ساخت

پذیرش: ۹۱/۴/۱

دریافت: ۹۰/۱۲/۵

و ۱۵ درصد از گاز با هوا مخلوط می شود قابل اشتعال است. مقدار ۵ درصد حد پایین انفجار است (LEL)<sup>۱</sup> و تراکم متان در این حد قابل انفجار نیست.

**مقدمه**  
بمحض اینکه گاز وارد تونل می شود باید میزان هوای کافی برای رقیق سازی فوری گاز متان تا سطح ایمن فراهم شود. متان زمانی که در محدوده بین ۵

<sup>1</sup> Lower Explosive Level

مقدار ۱۵ درصد حد بالای انفجار است و مخلوط گاز در تراکم بالاتر از این حد قابل انفجار نیست، اما چنانچه با هوای بیشتر مخلوط شود قابل انفجار خواهد شد. کاربرد همزمان سه عامل تهویه کافی، پایش منظم مقدار تراکم هوا و گاز و حذف منابع احتراق، خطر گاز متان را کاهش می دهد. زمانی که متان از لایه ها انتشار می یابد معمولاً در تراکم بالاست. هنگامیکه بطور پیشرونده با هوا اختلاط می یابد، تراکم از میان محدوده انفجار رد می شود و به زیر حد پایین انفجار می رسد. بنابر این بمحض اینکه گاز از لایه ها خارج می شود یک سیستم تهویه مناسب می تواند هوای تازه کافی را برای کاهش همه گاز به کمتر از حد پایین انفجار فراهم کند [۱].

تهویه همیشه یک عامل کلیدی برای فازهای ساخت و عملیاتی تونل های جاده ای بوده و فقط با وجود تهویه کافی یک محیط راحت و ایمن برای شاغلین در تونل های در حال ساخت ممکن است. بررسی ارتباط بین سیستم تهویه و ایمنی توسط فتیحی (۲۰۰۰) نشان داد که اگر چه بوجود آمدن مقررات جدید باعث کاهش الزامات تهویه شده، اما هنوز تهویه برای ایمنی تونل های جاده ای یک فاکتور مهم است و باید به آن توجه داشت [۲]. در ژاپن مطابق با قوانین استاندارد کارگری سیستم تهویه مهمترین و اولین عامل ایجاد ایمنی و سلامتی کار در تونل ها ی در حال ساخت شناخته می شود. تاکنون در بررسی سیستم های تهویه در جریان ساخت تونل، آن را موثرترین روش برای حذف مشکلات گردو غبار، دود و گازهای طبیعی تونل های در حال ساخت می داند [۳]. تهویه موقت تونلها، علی الخصوص تونلهای گاز دار نظیر تونل اکتشافی البرز نقش مهمی در حین حفاری ایفا می کنند. آنالیز ریسک حفاری یک تونل بلند گازدار توسط جعفری و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد که در چنین تونلهایی، سیستم تهویه بالاترین عدد اولویت ریسک را داشته و برخی از شکست (خرابی) های سیستم تهویه، جزو شکست های بحرانی دسته

بندی شدند [۴]. پاره شدن داکت تهویه در حین راه اندازی سیستم تهویه یک تونل بلند گاز دار در غرب کشور در سال ۱۳۸۵ منجر به کشته شدن ۴ نفر گردید [۵]. بررسی نقش سیستم تهویه توسط بلایندهم (۲۰۰۵) در یک تونل بلند نشان داد که در چنین تونل هایی تهویه ضعیف می تواند نرخ پیشروی را پایین آورد و پیشروی خوب در تونل های بلند به داشتن تهویه کافی بستگی دارد [۶]. توقف سیستم تهویه در تونل های حاوی گاز متان حتی به میزان اندک نیز می تواند نتایج فاجعه باری داشته باشد. اگر فن اصلی متوقف شود همه افراد باید از تونل خارج شوند و در توقف های بیشتر از ۱۵ دقیقه، تست متان باید انجام گیرد [۷]. اغلب سیستم های تهویه موقت تونلها برای حالت بدون گاز طراحی شده و در صورت مواجهه شدن با گاز، کمبود ظرفیت تهویه جان شاغلین تونل را تهدید می کند. طراحی، نصب و راهبری مناسب سیستم تهویه موقت می تواند ضمن رفع کلیه مشکلات فوق شرایط کاری مناسبی را در داخل تونل فراهم نماید. تونل های در حال ساخت را ممکن است به روش های مختلف تهویه نمود. هر یک از روش ها دارای مزایا، محدودیت ها و معایبی است که در انتخاب آنها برای استفاده در یک تونل باید در نظر گرفته شود. تهویه نامناسب نرخ پیشروی را پائین آورده و شرایط کاری بدی را برای کارکنان تونل ایجاد می کند. این مسئله در تونل های گاز دار ممکن است منجر به انفجار نیز بشود. انفجارات متعددی از گاز متان و سولفید هیدروژن در بسیاری از نقاط اتفاق افتاده است. سال ۲۰۰۴ در معادن چین ۶۳۰۰ نفر در اثر انفجار، حریق و سیل کشته شدند. سال ۲۰۰۴ در معدن باب نیز، واقع در جنوب شرقی ایران در یک حادثه انفجار ۹ نفر کشته شدند. سال ۲۰۰۶ در تونل نوسود به علت نشر گاز سولفید هیدروژن ( $H_2S$ ) ۴ نفر کشته شدند. در کشورهای دیگر نیز تجربه مشابهی وجود دارد [۸]. تونل مورد مطالعه بلندترین تونل (۶۳۷۴متر) از

سیستم های تهویه کمکی در جبهه کار: یک راه معمول برای تهویه جبهه کار تونل استفاده از سیستم تهویه کمکی است. سیستم تهویه کمکی با یک فن و کانالی که از تهویه اصلی جدا است جبهه کار را تهویه می کند. یکی از مشخصه های مهم سیستم های کمکی نیاز آنها به اورلاپ کردن با کانال تهویه اصلی است، چون که سیستم های کمکی در صورت اورلاپ نشدن مناسب افت راندمان بزرگی تحمل می کنند. دو نوع تهویه کمکی می تواند در جبهه کار وجود داشته باشد: مکشی و دهشی [۹،۱].

### مراحل طراحی تهویه

**الف) محاسبات حجم هوا:** مقدار هوای لازم برای تهویه تونل معمولاً بر اساس بیشترین تعداد افرادی که در یک زمان داخل معدن هستند، بیشترین میزان گازی که متصاعد می شود، آلودگی های ناشی از موتورهای دیزلی، رقیق کردن گازهای ناشی از آتشیباری، بیشترین میزان مصرف مواد منفجره، میزان گرد و غبار تولید شده، میزان حفاری و سطح مقطع جبهه کار محاسبه می شود. شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل بر اساس معیارهای یاد شده محاسبه شده و بزرگترین آنها به عنوان هوای لازم انتخاب می شود. تعدادی از معیارهای طراحی که در محاسبات طراحی تهویه در تونل ها و معادن استفاده می شود در زیر آمده است. این معیارها از آیین نامه های تهویه در تونلها و معادن، سازمان های فعال در زمینه تهویه و ایمنی تونل ها که در فرانس آمده، گرفته شده است.

- ۶- ۵ متر مکعب بر دقیقه هوا برای هر نفر از کارکنان تونل [۱۱،۱۲،۱۰].
- ۲۰۰ - ۱۰۰ فوت مکعب بر دقیقه هوا برای هر اسب بخار از موتورهای دیزلی [۱۴،۱۵،۱۳].
- ۲۰۰ - ۵۰ فوت مکعب بر دقیقه هوا برای هر تن از حفاری مواد معدنی و ضایعات تولید شده آن [۱۱].
- ۱/۶۸ - ۱/۸۴ متر مکعب بر دقیقه هوا برای هر متر مربع از سطح جبهه کار [۹].

تونل های در حال احداث پروژه بزرگراه تهران- شمال می باشد و از جمله تونل هایی است که وجود گاز متان در آن ثابت شده و در زمان های مختلف اندازه آن در محدوده انفجار ثبت شده است. نشر گاز  $H_2S$  نیز بارها حفاری تونل را متوقف ساخته است. هدف از انجام این مطالعه، بیان راهنمایی هایی در خصوص تهویه در تونل های گازدار و مقایسه کارآیی سیستم های مختلف تهویه در کنترل و رقیق سازی گازها و گرد و غبارهای موجود در تونل پیشگام البرز می باشد.

### روش کار

مطالعه انجام گرفته یک مطالعه مروری بر روی تهویه در تونل های گازدار و الزامات طراحی تهویه در این تونل ها می باشد. بطور کلی دو سیستم تهویه به طور همزمان یا به تنهایی در تونل های در حال ساخت مورد استفاده قرار می گیرد که عبارتند از:

**سیستم تهویه اصلی:** سیستم تهویه اصلی هوا را از دهانه تونل به پشت چرخ دنده ماشین حفاری تونل<sup>۱</sup> (TBM) انتقال می دهد. اینها در دو گروه دهشی یا مکشی طبقه بندی می شوند. در سیستم دهشی فن ها در سطح قرار گرفته و هوا در طول کانال به داخل تونل هدایت می شود. در سیستم مکشی، هوا از طریق کانال به بیرون از تونل هدایت می شود. انتخاب هر یک از این سیستم ها به عنوان سیستم اصلی تهویه تونل به تجهیزات مورد نیاز برای پیشروی، دمای محل، تجهیزات مورد نیاز برای حمل و نقل، نوع و اندازه کانال مورد استفاده، اینکه از اسکرابر استفاده شده، مقدار هوا، گاز خیز بودن تونل، مشخصات کیفیت هوای مورد نیاز، اندازه و نوع فن مورد نیاز، هزینه و به اینکه به هر حال یک سیستم ثانویه مورد استفاده قرار گرفته یا نه بستگی دارد [۹،۱].

<sup>1</sup> Tunnel Boring Machine

چگونگی نصب و فشار استاتیک در کانال دارد. با افزایش فشار استاتیک و طول کانال نشتی افزایش می یابد [۹،۱۱،۲۱،۲۲].

د) **انتخاب سیستم تهویه:** تهویه دهشی به فرمهای مختلفی قابل اجرا می باشد. در این مطالعه برای انتخاب مناسبترین تهویه از نظر ایمنی، فنی و اقتصادی شش طرح برای سیستم تهویه تونل البرز مطرح و با هم مقایسه شدند (شکل ۱).

۱- استفاده از یک فن در ابتدای تونل به همراه یک کانال

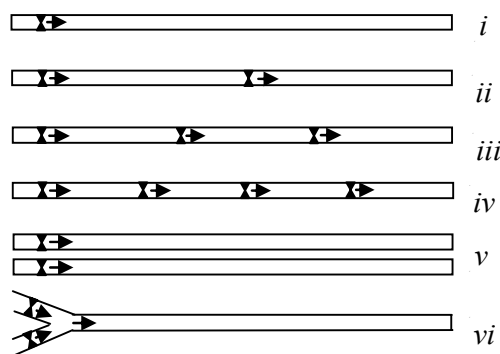
۲- استفاده از یک فن در ابتدای تونل و یک فن کمکی مشابه در متر ۳۲۰۰، به همراه یک کانال هوا.

۳- استفاده از یک فن اصلی در ابتدای تونل و دو فن کمکی مشابه در مترهای ۲۰۵۰ و توسط یک کانال هوا.

۴- استفاده از یک فن در ابتدای تونل و سه فن کمکی مشابه در مترهای ۱۵۵۰، به همراه یک کانال هوا.

۵- استفاده از دو فن جدا در ابتدای تونل به صورت موازی و استفاده از دو کانال هوای مجزا به صورت موازی.

۶- استفاده از دو فن به حالت موازی در ابتدای تونل و یک کانال هوا به صورت مشترک.



شکل ۱. شش طرح تهویه البرز

ه) **محاسبات مربوط به مقاومت جریان هوا:** پس از انتخاب نوع لوله تهویه، بایستی افت فشار بین دو سر آن را محاسبه نمود تا بتوان بر حسب آن، فن مناسب را انتخاب کرد. افت کلی از مجموع افتهای

محاسبه هوای مورد نیاز بر اساس این فاکتورها بدون در نظر گرفتن نوع تونل و مشخصات ابعادی آن، وسایل حفاری و معیارهای مختلفی همچون معیار حداکثر سرعت تهویه، معیارهای ترمودینامیک، معیار انتشار گاز رادون، معیار ضریب اصطکاک، معیار تصاعد گاز قابل اشتعال، متوسط حداقل سرعت هوا ممکن است منجر به اشتباه شود. بنابراین طراح با توجه به مشخصات تونل، تجربه قبلی و عوامل تاثیر گذار دیگر که ذکر شد مناسبترین معیارها را انتخاب و طراحی را انجام می دهد.

- ۱۵/ متر بر ثانیه سرعت هوا در جبهه کار [۱۶،۱۰].

- ۴-۱ متر بر ثانیه سرعت هوا در جبهه کار [۱۷].

- ۵۱-۲۵/ متر بر ثانیه سرعت هوا در جبهه کار [۱۱].

- ۵/ متر بر ثانیه برای کل سطح مقطع فضاهای زیر زمینی [۹].

- ۴/۱ متر بر ثانیه سرعت هوا در جبهه کار جهت حفاظت از گردو غبار و گاز متان [۱۸].

- ۱۵-۲۵/ حداقل و حداکثر سرعت هوا برای معادن [۱۹،۲۰].

ب) **لوله های تهویه و انتخاب لوله:** نوع لوله به سیستم تهویه (مکشی یا دهشی) و شرایط محیط کار بستگی دارد. قطر کانال معمولاً با توجه به قطر فن انتخاب می شود. اما به هنگام انتخاب قطر باید به سطح مقطع تونل و تجهیزات دیزلی و سایر محدودیتها نیز توجه کرد. سه نوع عمومی از لوله های تهویه برای تهویه جبهه کار استفاده می شود: سخت، قابل انعطاف و لوله های سیمی تقویت شده [۲۱،۲۲،۱۱،۹].

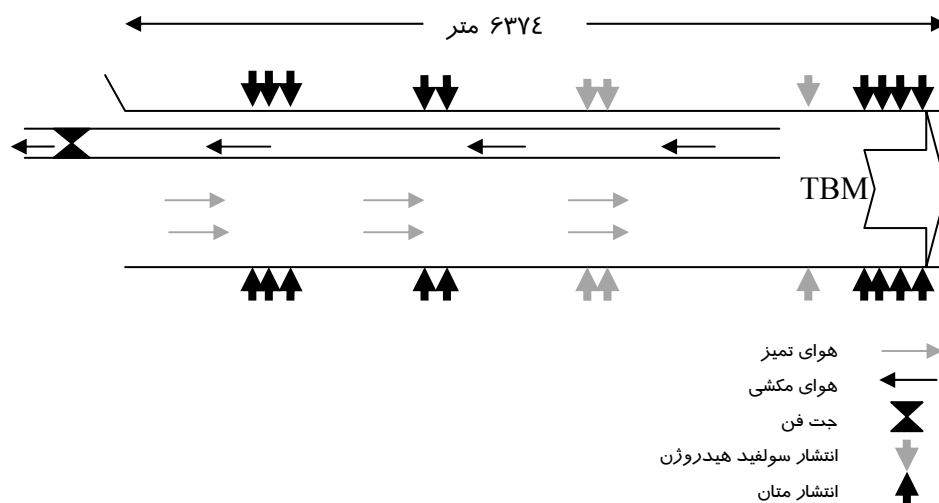
ج) **بررسی اثر نشتی هوا:** نشتی هوا به طور معمول در سیستم های تهویه وجود دارد و زمانی مقدار آن کم است که سیستم تهویه خوب عمل کند. مقدار نشتی هوا باید در طراحی سیستم تهویه و انتخاب فن مد نظر قرار گیرد. نشتی هوا بستگی به شرایط کانال،

وجود TBM با طول ۱۵۰ متر و قطر کاترهد ۵/۲ متر از دیگر عوامل محدود کننده استفاده از این روش بود بدلیل اینکه ما برای نزدیک شدن به جبهه کار فقط قسمت کوچکی از بالای تونل و TBM را می توانستیم استفاده کنیم و در صورت استفاده از این تهویه، نیاز به سیستم های تهویه کمکی (شکل ۳) نیز به غیر از تهویه اصلی داشتیم. محل نصب تهویه کمکی و نیاز به اورلاپ کردن منظم (با پیشروی) جهت جلوگیری از کاهش کارایی فن های کمکی و همچنین بازگشت مجدد هوا از مشکلات عمده این روش بود. موارد دیگری همچون هزینه کانال مصرفی بیشتر، راهبری انرژی بالاتر، تعمیر و نگهداری سخت تر، استهلاک بیشتر فن اصلی و کانال، رقیق نشدن گاز متان و سولفید هیدروژن در متراژهای مختلف تونل همچنین عدم کنترل رطوبت حاصل از جریان آب های زیرزمینی از محدودیت های دیگر استفاده از این روش برای تونل البرز بود.

ناشی از اصطکاک یا مالش و افت های ناشی از اتصالات تشکیل می شود که در هر مورد بایستی آنها را جداگانه محاسبه کرد [۱۱،۲۱،۲۲].

### یافته ها

در انتخاب سیستم تهویه تونل البرز استفاده از سیستم دمشی و یا مکشی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقایسه هزینه های ساخت، راهبری، امکان ساخت سیستم، جنبه های ایمنی، سهولت تعمیر و نگهداری و محدودیت های فنی اجرای طرح در نظر گرفته شدند. مطالعات تهویه مکشی در جبهه کار تونل البرز (شکل ۲) نشان می دهد که با توجه به گاز خیز بودن تونل در متراژهای مختلف، در صورت استفاده از تهویه مکشی گازهای تولید شده در متراژهای مختلف تونل به طرف جلو و جبهه کار هدایت می شود و خطر گاز گرفتگی به دلیل غلظت های بالای متان و سولفید هیدروژن در جبهه کار وجود دارد.

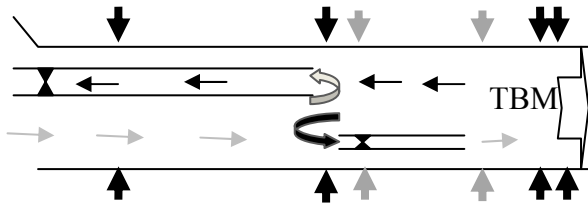


شکل ۲. تهویه مکشی تونل البرز

کار، شتاب حرکت هوا در یک تهویه دهشی آن را جلوتر می راند که این مزیت به ما کمک می کند ان را در فاصله بیشتری از جبهه کار نسبت به تهویه مکشی نصب کنیم. با توجه به اینکه در حفاری TBM اکثر افراد در منطقه نزدیک به جبهه کار مشغولند با

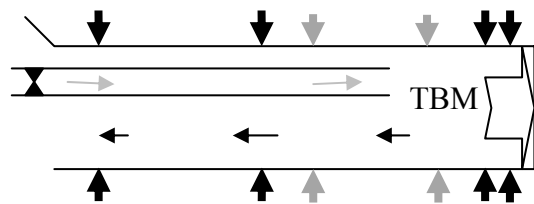
مطالعات تهویه دهشی در جبهه کار (شکل ۳) نشان می دهد که این تهویه برای تونل های گازدار با شرایط تونل البرز بهتر است بدلیل اینکه فضای کافی در بالای تونل برای نصب تهویه کمکی وجود ندارد، همچنین با توجه به نبود فضای کافی در نزدیک جبهه

جبهه کار، تعمیر و نگهداری راحت تر و در نهایت هزینه راهبری پایینتر است. از همه مهمتر در این روش گاز سولفید هیدروژن و متان رقیق شده و در محدوده غیر قابل انفجار قرار می گیرند.



شکل ۳. تهویه کمکی با اورلاپ ضعیف

وجود تهویه دهشی جریان معین و دائمی از هوای تازه در محل کار کارگران برقرار خواهد بود. از مزایای دیگر این روش استفاده از کانال های قابل انعطاف، نیاز نداشتن به هیچ گونه سیستم اورلاپ در



شکل ۴. تهویه دهشی تونل البرز

عنوان هوای مورد نیاز برای تهویه تونل در نظر گرفته شد:

- مواد حفاری شده به سرعت از تونل خارج می شد  
- در صورت استفاده از این میزان هوا هزینه های زیادی برای جابجائی آن صرف می شد و سرعت جریان هوا نیز زیاد می شد.

- رکورد ۳۲ متر حفاری در روز که برای این TBM در نظر گرفته شده بود در عمل هیچگاه این رکورد محقق نشد.

جدول ۱. مقدار هوای مورد نیاز برای پارامترهای مختلف

پارامتر	هوای مورد نیاز، متر مکعب بر ثانیه
۱ کارگران	۴
۲ تجهیزات دیزلی	۳۷/۲۱
۳ سرعت هوا	۱۷
۴ مواد حفاری	۱۱۵/۴

با توجه به روش اجرایی تونل کانال های کیسه ای قابل انعطاف، از جنس پلیستر با آستر PVC (ساخت شرکت GIA سویس) جهت محاسبات در نظر گرفته شد و با توجه به محدودیت های موجود، به منظور بدست آوردن قطر بهینه محاسبات تهویه برای قطر های ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ سانتی متری انجام شد. در طرح پنجم به دلیل محدودیت قرارگیری دو کانال با قطرهای مذکور در فضای بالای تونل از قطرهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ سانتی متری استفاده شد و

در خصوص معیارهای سرعت گفته شده در قسمت متد، اعمال برخی از این معیارها در حفاری تونل ها عملاً غیر ممکن است زیرا به دلیل سطح مقطع بزرگ تونل ها که در برخی موارد تا ۱۰۰ متر مربع هم می رسد میزان هوای لازم بسیار زیاد شده و جابجائی آن نا ممکن می گردد و اصولاً این اعداد برای مقاطع کوچک تونل و معدن کاربرد بیشتری دارد. در ضمن سرعت های بالا برای کارکنان تونل ایجاد مزاحمت هم می کنند و هزینه های عملیاتی سیستم تهویه بالا خواهد رفت. در این مطالعه با توجه به حداقل و حداکثر سرعت هوا در استانداردهای مختلف، گاز خیز بودن تونل، قابل پیش بینی نبودن تصاعد گاز در مترهای مختلف تونل، سطح مقطع بزرگ تونل، ملاحظات اقتصادی و طراحی قبلی که برای ۳۰۰۰ متر از تونل مورد مطالعه انجام شده بود در طراحی تهویه تونل مورد نظر با ۶۳۷۴ متر عمق، سرعت ۸/ متر مکعب بر ثانیه در جبهه کار به عنوان حداقل سرعت طراحی در نظر گرفته شد. مقدار هوای مورد نیاز نیز برای پارامترهای مختلف بر اساس استانداردهای ذکر شده در قسمت متد محاسبه شد (جدول ۱) و بیشترین هوا برای میزان حفاری بدست آمد، اما با توجه به دلایل زیر در این طراحی هوای مورد نیاز برای تجهیزات دیزلی به

محاسبات هر ۳ قطر مذکور برای ۶ طرح در نظر گرفته شده، انجام شد که محاسبات آن در جدول ۲-۱ آمده است.

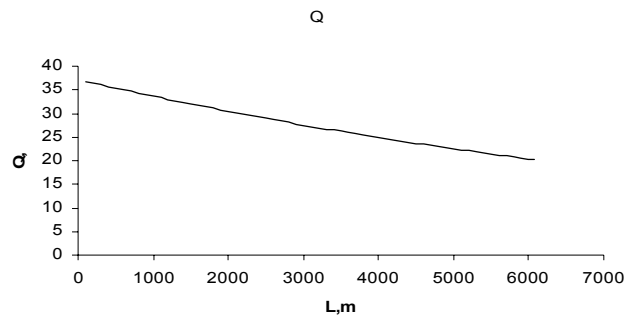
مطابق با اعلان فروشنده کانال، نشتی کانال برای هر ۱۰۰ متر از طول کانال ۱٪ در نظر گرفته شد. و مقدار هوای مورد نیاز در سینه کار پس از محاسبات نشتی از طریق فرمول زیر برای ۶۰۶۴ متر از طول

کانال بدست آمد. در صورتیکه جت فن نصب شده در ورودی تونل ۳۷/۲۱ متر مکعب هوا به کانال تزریق کند بر اساس ۱٪ نشتی کانال در هر ۱۰۰ متر مقدار هوای دریافت شده در مترهای مختلف مطابق شکل ۵ خواهد بود بنابراین با در نظر گرفتن نشتی در طول کانال، هوایی که به جبهه کار می رسد تقریباً برابر ۲۰/۲۳ متر مکعب بر ثانیه خواهد بود.

$$Q=Q_0(1-\% \text{ Leakage}/L)^{L/L'}$$

$$Q=Q_0(1-0.01)^{L/100}=Q_0(.99)$$

$$Q=37/21 \times (.99)^{60/64} = 20/23$$



شکل ۵. مقدار هوا در مترهای مختلف تونل

تمامی قطرها و طرح های تهویه تونل البرز بعمل آمد، که نتایج آن بطور خلاصه در جدول ۲ آمده است.

برای محاسبه افت فشار در شش طرح تهویه، انتخاب فن مناسب، و مقایسه آنها، یک برنامه محاسباتی بر روی Excel طراحی شد و محاسبات لازم برای

جدول ۲. نتایج محاسبات تهویه برای طرح های تونل البرز

طول کانال مورد نیاز، متر	تعداد هواکش	توان پیشنهادی هواکش، کیلووات	توان مورد نیاز هواکش، کیلووات	فشار کل هواکش، پاسکال	میزان گذر هوای هواکش، فوت مکعب بر دقیقه	قطر، سانتی متر	طرح
۶۰۶۴	۱	۴۰۷۸	۳۳۹۸/۲	۵۶۸۵	۳۷/۲۱	۱۰۰	۱
۶۰۶۴	۱	۷۶۰	۶۳۳/۵	۱۰۵۸	۳۷/۲۱	۱۴۰	۱
۶۰۶۴	۱	۲۳۵	۱۹۶/۱	۳۲۷/۴	۳۷/۲۱	۱۸۰	۱
۶۰۶۴	۲	۲۹۴۰	۲۴۵۰	۴۰۹۱/۲	۳۷/۲۱	۱۰۰	۲
۶۰۶۴	۲	۵۵۲	۴۲۹/۸۵	۷۶۸/۸	۳۷/۲۱	۱۴۰	۲
۶۰۶۴	۲	۱۷۲	۱۴۲/۱۸	۲۳۸/۴۵	۳۷/۲۱	۱۸۰	۲
۶۰۶۴	۳	۲۱۱۶	۱۷۶۳/۳۱	۲۹۴۴/۲	۳۷/۲۱	۱۰۰	۳
۶۰۶۴	۳	۴۰۱	۳۳۴/۱۲	۵۵۷/۹	۳۷/۲۱	۱۴۰	۳
۶۰۶۴	۳	۱۳۶	۱۰۴/۶۴	۱۷۴/۷۳۵	۳۷/۲۱	۱۸۰	۳
۶۰۶۴	۴	۱۷۱۹	۱۴۳۲/۱۱	۲۳۹۱	۳۷/۲۱	۱۰۰	۴
۶۰۶۴	۴	۳۲۸	۲۷۳/۲۸	۴۵۶/۲۹	۳۷/۲۱	۱۴۰	۴
۶۰۶۴	۴	۱۰۳	۸۶/۱۸	۱۴۳/۹	۳۷/۲۱	۱۸۰	۴
۱۲۱۲۸	۲	۱۷۲۳	۱۴۳۵/۶۸	۴۷۹۳	۳۷/۲۱	۱۰۰	۵
۱۲۱۲۸	۲	۵۶۰	۴۶۷	۱۵۵۹/۲۳	۳۷/۲۱	۱۴۰	۵
۱۲۱۲۸	۲	۲۲۲	۱۸۵/۳۷	۶۱۸/۸۴	۳۷/۲۱	۱۸۰	۵
۶۰۸۸	۲	۲۱۰۲	۱۷۵۱/۷۶	۵۸۴۸/۲۶	۱۸/۶۱	۱۰۰	۶
۶۰۸۸	۲	۴۱۶	۳۴۶/۲۶	۱۱۵۶	۱۸/۶۱	۱۴۰	۶
۶۰۸۸	۲	۱۱۶	۹۶/۳۳	۳۳۱/۶	۱۸/۶۱	۱۸۰	۶

## بحث

با توجه به مزایا و معایب و محدودیت های استفاده از کانال هایی با قطر کم و زیاد جهت انتخاب قطر بهینه محاسبات تهویه برای قطر های ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ سانتی متری انجام شد. در مقایسه قطرهای مذکور هزینه های کانال مورد نیاز، محدودیت های فنی در نصب و تاثیر قطر کانال در افت فشار و توان هواکش در نظر گرفته شدند. همانطور که در جدول مشخصات طرحهای پیشنهادی مشخص است، با افزایش قطر کانال مقدار افت کاهش یافته و توان بادبزن کمتر شده است. بنابراین کمترین میزان افت و توان را در قطر ۱۸۰ و ۱۴۰ سانتی متر می توان پیدا کرد. طول کانال مورد نیاز در تمامی طرح ها به جز طرح پنجم که در آن از دو کانال موازی استفاده شده تقریباً برابر می باشد. در تونل البرز با توجه به اینکه طول کانال تهویه زیاد می باشد و افت فشار زیادی در مسیر هوادهی ایجاد می کند، همچنین به دلیل مقطع بزرگ تونل و امکان استفاده از کانال بزرگ مقطع پیشنهاد شد از کانال با قطر ۱۴۰ سانتی متر استفاده شود. استفاده از کانال با قطر ۱۸۰ سانتی متر به علت فضای محدود بالای تونل و همچنین هزینه های بالای اجرای آن توجیه پذیر نیست و در صورت استفاده از قطر ۱۰۰ سانتی متر همچنانکه در جداول نتایج تهویه برای سیستم های تهویه آمده است قدرت هواکش انتخابی بسیار بالا خواهد بود و تهیه آن مشکل است. همچنین در این قطر فشار کل هواکش بالاست و ممکن است کانال مورد نظر مقاوت کافی برای این فشار نداشته باشد.

پس از مقایسه ۶ واریانت مختلف تونل البرز بستن سری بادبزن ها که در طرح های ۲ و ۳ و ۴ پیشنهاد شده بود بنا به دلایل کاهش شدید راندمان، ایجاد مکش شدید در پشت بادبزن، از کارافتادگی سیستم تهویه در صورت از کار افتادن یکی از بادبزن های سری شده، هزینه زیاد سرمایه گذاری اولیه به دلیل

تعداد زیاد بادبزن ها و متعلقات مربوطه، افزایش هزینه های سرویس دهی به مجموعه بادبزن ها، سرو صدای زیاد داخل تونل، کاهش عمر بادبزن ها در داخل تونل (بدلیل وجود رطوبت و گاز سولفید هیدروژن و آلاینده های دیگر)، لزوم برق رسانی و مشکلات ناشی از آن به بادبزن های داخل تونل و هزینه های ناشی از آن، لزوم سرویس دهی در داخل تونل و اشغال فضا در داخل تونل کنار گذاشته شد.

مقایسه ۶ واریانت تونل البرز نشان می دهد که به کارگیری سیستم های بادبزن در ابتدای تونل و حداقل رساندن تعداد بادبزن ها با اضافه کردن تجهیزات جانبی، بخصوص دستگاههای کنترل دور موتور برای برطرف کردن عیب بزرگ این سیستم ها که مصرف زیاد انرژی در طول پروژه است، به لحاظ فنی و اقتصادی نتایج بهتری را در بر خواهد داشت. این سیستم تهویه که می تواند در طرح های ۱ و ۵ و ۶ به کار گرفته شود از یک سو برتری های سیستم بستن سری بادبزن ها با افزایش طول کانال را دارد و از سوی دیگر معایب این سیستم را مرتفع می سازد. پس از کنار گذاشتن ۳ طرح از طرح های پیشنهادی برای تونل البرز ۳ طرح باقی مانده برای مقایسه، عبارتند از طرح های ۱ و ۵ و ۶. این مطالعه نشان می دهد استفاده از دو فن به حالت موازی در ابتدای تونل و یک کانال هوا به صورت مشترک (طرح ششم) مناسبترین طرح ممکن برای تونل البرز می باشد. مزایای این طرح در صورت استفاده شامل موارد زیر می باشد:

- مشکلات ناشی از بستن سری بادبزن ها با افزایش طول کانال را نخواهیم داشت.
- همانطور که در جدول نتایج محاسبات تهویه برای سیستم های تهویه در ۶ طرح پیشنهادی مشخص است در مقایسه تعداد و توان هواکش مورد نیاز، این سیستم نسبت به طرح هایی که در



جلالی و مطالعه ژوکی<sup>۱</sup> که در سالهای ۲۰۱۱ و ۲۰۱۰ انجام گرفت مبین این مطلب است که قابلیت اطمینان در سیستم های تهویه بخصوص در تونل ها و معادن گازدار برای ایمنی کل سازه های زیرزمینی ضروری است و برای این منظور استفاده از جت فن ها به صورت موازی یا سری پیشنهاد می شود [۲۷،۲۸].

ما در این مطالعه به دلیل محدودیت زمانی و... نتوانستیم قابلیت اطمینان هر یک از طرح های پیشنهادی را با استفاده از روش های ارزیابی قابلیت اطمینان به صورت کمی محاسبه نماییم.

### نتیجه گیری

با توجه به اینکه در تونل های گازدار توقف سیستم تهویه حتی به میزان اندک نیز منجر به نتایج فاجعه باری می شود استفاده از دو فن در ابتدای تونل این امکان را فراهم می آورد که در صورت نقص و یا تعمیر یکی از فن ها ، فن دوم به کار خود ادامه دهد و از تراکم های خطرناک گاز متان و سولفید هیدروژن جلوگیری نماید. از طرف دیگر مشکل توقف حفاری به دلیل نقص در سیستم تهویه به علت وجود دو فن در ابتدای تونل تا حدودی مرتفع خواهد شد. این طرح مناسبترین طرح برای کنترل مصرف انرژی در متراژهای مختلف تونل می باشد. اگر چه استفاده از TBM الزامات تهویه را نسبت به روش های انفجاری کاهش می دهد ولی TBM ها هنوز برای کنترل گردوغبار، گازهای طبیعی و گرمای ناشی از خود و سنگ ها نیاز به سیستم تهویه دارند. تهویه مناسب عامل بحرانی در حفاری تونل های عمیق و گازدار است و استفاده از تهویه نامناسب ممکن است محیط کار ، جان افراد و نرخ پیشروی را به طور جدی تحت تاثیر قرار دهد.

آنها از بادبزن های سری استفاده شده علاوه بر مزایای دیگر، تعداد هواکش و توان کمتری نیاز دارد. در این طرح برای کنترل مصرف انرژی در متراژهای مختلف تونل به هنگام حفاری می توان از الکتروموتورهای با دور متغیر مانند موتورهای دو دور (دالاندر) یا دستگاههای کنترل دور موتور استفاده نمود. که در این صورت چندین حالت تهویه وجود خواهد داشت. مثلاً چنانچه هواکش ها با دو دور متغیر (دور کم و بالا) کار کنند چهار حالت تهویه خواهیم داشت که می توان در هر زمان از دور مورد نیاز استفاده کرد و مصرف برق و انرژی را به حالت بهینه رساند. همچنین در صورت از کار افتادن یک فن ، می توان از فن دیگر برای کاهش تراکم گاز متان و سولفید هیدروژن استفاده کرد. یک مشکل اجرایی در این نوع طرح خروج هوا از هواکش جانبی در صورت خاموش بودن آن وجود دارد که برای اجتناب از آن می توان از دمپر استفاده کرد.

- یکی از مهمترین مزیت های این طرح نسبت به طرح پنجم استفاده از طول کانال و توان هواکش کمتر می باشد.

- از مزایای این طرح نسبت به طرح اول این است که در صورت از کار افتادن یکی از بادبزن ها، عملاً سیستم کارایی خود را از دست نخواهد داد و با شدت جریان کمتری به کار خود ادامه می دهد. همچنین در این طرح حالت های تهویه بیشتری وجود دارد، در حالی که مجموع قدرت در دو هواکش مورد نیاز طرح ۶ ، برابر با هواکش مورد استفاده برای طرح ۱ است.

خسرو تاش در سال ۱۳۸۲ از روش تهویه دهشی به صورت متمرکز در تونل آب نیروگاه سیمره استفاده کرد، او هم نتایج مشابه با نتایج این مطالعه بدست آورد با این تفاوت که در آن مطالعه محاسبات طرح های مختلف تهویه و مقایسه بر اساس آن، انجام نگرفته بود [۲۶]. مطالعات دیگر همچون مطالعه

<sup>1</sup> Zhuqi

**References**

- 1- Fred N, Kissell. Handbook for Methane Control in mining. NIOSH. 2006: 3-10, 169-178
- 2- Tarada F. Ventilation with Safety. Switzerland. World Tunneling. 2000: 1-6
- 3- Takano Y. Ventilation System in Tunnel during Construction Works. proceedings of the Sino-Japanese Modern Engineering and Technology Symposium, Chiyoda Engineering Consultants, Co., Ltd, Tokyo, Japan. 2001: 1-11
- 4- Jafari MJ, Gharari N, Sheikhi HR. Risk Assessment of a Tunneling Process Using Machinery Failure Mode and Effects Analysis. Applied science research. (Submitted). 2008.
- 5- Gharari N. Risk Assessment in Tunnelling with TBM Using FMEA Method and Temporary Ventilation Design [Dissertation]. Tehran, Shahid Beheshti Unive. 2007: 57-69
- 6- Blindheim. Clearing the Air on Long Tunnel Drives. Tunnel and Tunneling International. 2005; 37(1): 31-36
- 7- Criffin M. Methane Dangers for Mining Operation Safety. 1997.11-18 available from: <http://www.mshaha.com/article.html>.
- 8- Jafari MJ, gharari N, sheikh HR. The Reliability of a Tunnel Boring Machine. International journal of occupational hygiene. 2009; 1(1): 19-24
- 9- Desouza E. Auxiliary Ventilation Operation Practices. In: Ganguli, Rajive; Bandopadhyay, Sukumar. Mine Ventilation, Taylor & Francis Routledge. 2004: 341-349
- 10- MIOSHA-STD-1402. Department of Labor & Economic Growth Directors Office Occupational Health Standards. Part665. Underground Construction, Caissons, Cofferdams and Compressed Air. 2004: 6-20
- 11- Bossard CF, Lefever GG. A Manual of Mine Ventilation Design Practices. Second Edition. U.S.A. 1983: 123-150
- 12- Hartman HT. Introductory: Mining Engineering. New York. 1998: 462-465
- 13- Occupational safety and health administration (OSHA). Tunneling. 1996. <http://www.osha.gov/doc/outreachtraining/htmlfiles/tunnel.html>.
- 14- Baker R. Handbook of Highway Engineering. Society for Mining Metallurgy. New York. 1975: 643-644
- 15- Hall CG. Mine Ventilation Engineering. Society for Mining Metallurgy. New York. 1981: 275-307
- 16- Wallace KG, Duckworth IJ. Design of a recovery ventilation system for the Deer Island Outfall Tunnel. Mine Ventilation, Taylor & Francis Routledge. 2004: 213-215
- 17- Mcpherson MG. Subsurface Ventilation and environmental Engineering. Springer. First edition. USA. 1993: 283-293
- 18- Karmis M. Mine Health and Safety Management. Society for Mining Metallurgy. USA. 2000: 276-285
- 19- Institution of work and insurance. Occupational health and protection center. Iran, 2002.
- 20- Ministry of mine and industry. Mine safety regulation. Mine safety and protection office. Iran, 2002. 120-125
- 21- Madani H. Mine ventilation. Amirkabir publication. Tehran. Second edition. 1992: 1-200
- 22- Scots G. Mine Ventilation. Moscow. First Edition. 1969: 19-16
- 23- Bickel JO, Kuesel TR, King EH. Tunnel Engineering Handbook. Second Edition Chapman and Hall. New York (ITP). 1996: 436-438
- 24- Bickel JO. Tunnel Engineering Handbook's. Chapman and Hall. New York. 1982: 234-245
- 25- Occupational Safety and Health (OHS). Tunnel under Construction New South Wales Australia. 2006: 1-30
- 26- Khosrotash M. using of ventilation system in a water tunnel and its result. 6<sup>th</sup> Iranian tunneling conference. Tehran. 2003: 26-31
- 27- Jalali SE, Forouhandeh SF. Reliability estimation of auxiliary ventilation systems in long tunnels during construction. Safety science. 2011: 664-669
- 28- Zhuqi M. Reliability evaluation of mine ventilation systems based on multi-state system theory. 8<sup>th</sup> IEEE international conference on control and automation. china. 2011: 1092-1097

## Appropriate Ventilation System for Control of Methane in Tunnels during Construction (A Case Study: Alborz Tunnel)

Jafari MJ<sup>1</sup>, Gharari N\*<sup>2</sup>, Hazrat S<sup>3</sup>, Alighadri M<sup>3</sup>, Mkhtari S A<sup>3</sup>, Rohirad Z<sup>4</sup>

1. Associate Prof, Dept of Occupational Health Eng, Shahid Behehsti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
2. PH.D student, Dept of Occupational Health Eng, Shahid Behehsti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
3. Lecturer, Dept of Environmental Health Eng, Ardabil University of Medical Sciences, Ardabil, Iran
4. BSc in occupational health, Shahid Behehsti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

\*Corresponding Author. Tel: +982122432040 Fax: +982122432036 E-mail: [ngharari@yahoo.uk.com](mailto:ngharari@yahoo.uk.com)

Received: 23 Feb 2012 Accepted: 21 Jun 2012

### ABSTRACT

**Background & Objectives:** Different methods can be used for ventilation of tunnel during construction. Each method has advantages, limitations, and disadvantages that should be considered in selection of methods. Inefficient ventilation can lowered production rate and provide undesired work conditions for employees. This issue is critical in gaseous tunnels and may imperil the workers lives and the whole project. This paper presents a series of guidelines for selection of ventilation system, optimal implementation, and aspects of ventilation system design in gaseous tunnels based on common ventilation standards.

**Methods:** Common ventilation systems in tunnels during construction were compared for selection of Alborz tunnel ventilation system. Air-supply ventilation system was selected as the best design. Whereas air-supply ventilation system may be applied in different forms, six distinct designs were compared for Alborz tunnel. In order to determine tunnel ventilation capacity, air volume required was calculated based on different criteria. Air volume required for diesel equipment was considered as the air requirements of tunnel ventilation. Considering advantages, disadvantages, and limitations of the small and large diameter channel applications, ventilation system calculations were conducted for the diameters 100, 140, and 180 cm to select optimum size.

**Results:** The results from comparison of different ventilation variants showed that using two parallel jet fans on tunnel surface in a joint canal (140 cm) is the most appropriate design for tunnels with these characteristics.

**Conclusion:** Poor ventilation is a critical factor in deep underground and gaseous tunnel drilling and improper ventilation may substantially affect the work environment, life, and production rate.

**Key worlds:** Alborz Tunnel; Ventilation; Gaseous Tunnel during Construction