عنوان مقاله:

بررسی تخصصی انواع تهویه تونلی
روش‌ها، طراحی، الزامات و تجهیزات صنعتی

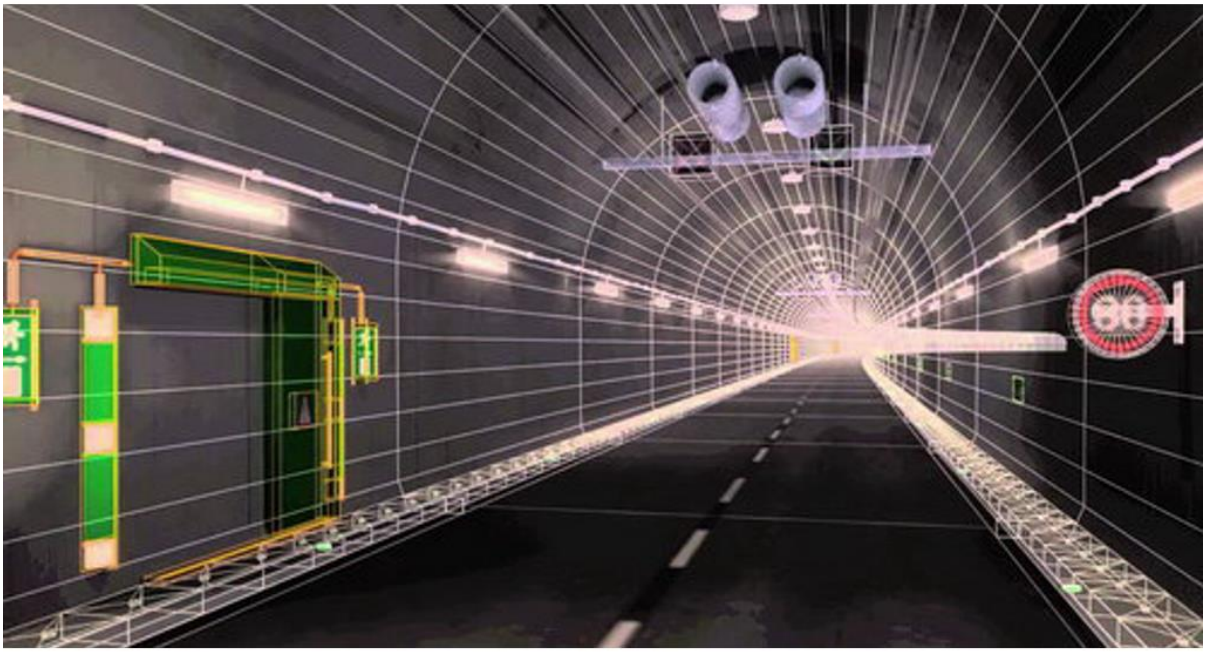
دکتر عظیم ملک زاده

dr.malekzadeh1981@gmail.com

بخش ۱: مقدمه

اهمیت تهویه در تونل‌ها

تونل‌ها به‌عنوان فضاهای بسته و عمیق زیرزمینی، چه در مترو و بزرگراه‌ها و چه در معادن، دارای چالش‌های خاصی در زمینه کیفیت هوا، دما، رطوبت و تخلیه گازهای مضر هستند. بدون سیستم تهویه تونل، فعالیت انسان در چنین محیط‌هایی خطرناک و گاهی کشنده خواهد بود.



در این مقدمه، به اهمیت سیستم تهویه در تونل‌ها و هدف کلی این مقاله می‌پردازیم.

چرا تهویه در تونل اهمیت دارد؟

۱-تأمین اکسیژن تازه برای کارگران یا رانندگان

۲-تخلیه گازهای سمی و آلاینده‌ها مانند CO، NOx ، متان، دیزل، گردوغبار

۳-کنترل دما و رطوبت در تونل‌های طولانی

۴-ایمنی در برابر آتش‌سوزی یا انفجار گاز

۵-جلوگیری از تراکم دود در زمان حوادث یا تصادفات

۶-حفظ کیفیت هوای قابل‌تنفس طبق استانداردهای بین‌المللی EN، OSHA، NFPA

انواع تونل‌هایی که به تهویه نیاز دارند:

نوع تونل	نیاز تهویه
تونل مترو	دائم و اضطراری
تونل بزرگراهی	(دائم) در حال تردد خودروها
تونل راه‌آهن	دائم + تهویه لوکوموتیو
تونل‌های در حال ساخت	تهویه موقت + پرتابی
معادن زیرزمینی	مداوم، با کنترل گازهای سمی
تونل آب یا کابل	تهویه فصلی یا هنگام تعمیرات

استانداردهای بین‌المللی و ملی مهم در طراحی تهویه تونل

- NFPA130 (ایمنی حریق در تونل‌ها و متروها)
- PIARC Guidelines (برای تهویه تونل‌های جاده‌ای)
- EN12011-3 (تهویه دود و آتش)
- OSHA (حد مجاز آلاینده‌ها برای کارگران)
- آیین نامه ایمنی در تونل سازی شورای عالی حفاظت فنی(مصوب ۱۳۹۹)

آیین نامه ایمنی در تونل سازی شورای عالی حفاظت فنی(مصوب ۱۳۹۹)

کلیات

هدف و دامنه کاربرد: این آیین نامه به استناد ماده ۸۵ قانون کار، به منظور صیانت از منابع انسانی و مادی کشور و پیشگیری از حوادث ناشی از کار در کارگاه های تونل سازی به غیر از معادن تدوین شده است.

فصل چهارم مصوبه : تهویه

ماده ۱۲ ـ تأمین هوای کافی و سالم در کلیه جبهه کارهای زیر سطح زمین برای پیشگیری از تجمع ذرات گرد و غبار، فیوم، دمه یا گازهای خطرناک الزامی است.

ماده ۱۳ - استفاده از روش تهویه مکانیکی برای عملیات تونل سازی الزامی است، مگراین که کارفرما با ارائه نقشه ها و محاسبات تهویه مورد تأیید مراجع دارای صلاحیت نشان دهد که تهویه طبیعی در تمام فصول سال برای تأمین حجم و جریان هوای مورد نیاز، کافی است.

ماده ۱۴ ـ در صورت استفاده از روش تهویه مکانیکی، باید سامانه تهویه تونل از قابلیت معکوس کردن جهت جریان مکانیکی هوا، در شرایط لازم برخوردار باشد.

ماده ۱۵ - حداقل هوای سالم مورد نیاز در زیر سطح زمین برای هر کارگر شاغل ۶ مترمکعب بر دقیقه است؛ سرعت خطی جریان هوا در تونل یا چاه، مناطق عملیاتی و حفاری که تولید آلاینده در اتمسفر داخل چاه یا تونل می‌کند، باید حداقل ۱۵ /۹ (نه و پانزده صدم) متر در دقیقه باشد.

ماده ۱۶ ـ سامانه تهویه باید قابلیت انتقال فیوم و دود حاصل از انفجار را به خارج از محیط کار و فضای باز داشته و درهای تهویه باید در هنگام استفاده، بدون در نظر گرفتن جهت جریان هوا بسته شوند.

ماده ۱۷ - بکارگیری تمهیدات لازم برای جلوگیری از ایجاد گرد و غبار در ضمن حفاری با ماشین آلات و همچنین در زمان بارگیری و حمل و نقل ضروری است.

ماده ۱۸ ـ استفاده از سامانه تهویه موقت تا زمان نصب سامانه تهویه دائمی، برای حفاری زیرزمینی الزامی است؛ این سامانه باید کلیه شرایط مورد نیاز برای اجرای حفاری را مطابق با استانداردها و مشخصات فنی، عمومی و نظر مهندس ناظر دارا باشد.

ماده ۱۹ ـ در حفاری زیرزمینی برای به حداقل رساندن گرد و غبار، باید چال زنی به روش تر انجام گیرد.

ماده ۲۰ ـ دود و گرد و غبار ناشی از عملیات انفجار باید از نزدیکترین فاصله ممکن به جبهه کار به بیرون تونل هدایت شود، این فاصله نباید بیش از ۳۰ متر باشد.

ماده ۲۱ ـ سامانه تهویه باید دود و گرد و غبار ناشی از عملیات انفجار و فعالیت های اجرایی را به نحوی انتقال دهد که مجدداً به داخل تونل و کارگاه های مجاور وارد نشود.

www.atghvac.com www. azintahvieh.com

ماده ۲۲ ـ کلیه دستگاه ها و مجاری تهویه باید در وضعیت مطلوب نگهداری و از هرگونه آسیب دیدگی حفاظت شود و در صورت خرابی سریعاً تعمیر گردد .

ماده ۲۳ ـ سامانه تهویه هوا در عملیات احداث تونل‌های گازدار باید خصوصیات زیر را دارا باشد:

الف) مقاومت در برابر حریق

ب) مجهز به سامانه اتصال به زمین و تجهیزات جانبی متناسب با طبقه بندی محیط های قابل اشتعال و انفجار و سایر موارد مرتبط.

بخش۲:انواع روش‌های تهویه در تونل‌ها

انتخاب روش تهویه در تونل به عوامل مختلفی بستگی دارد؛ مثل طول تونل، کاربری (جاده‌ای، ریلی، معدنی، خدماتی)، شرایط ژئوتکنیکی، میزان تردد، گازهای خطرناک، و الزامات ایمنی. سیستم تهویه می‌تواند موقت، دائم، یا اضطراری باشد.

در این بخش، انواع اصلی روش‌های تهویه در تونل را معرفی و مقایسه می‌کنیم:

۱. تهویه طبیعی Natural Ventilation

- استفاده از جریان طبیعی هوا بدون تجهیزات مکانیکی
- معمولاً در تونل‌های کوتاه و کم‌تردد یا در زمان‌هایی که سیستم مکانیکی فعال نیست

مزایا:

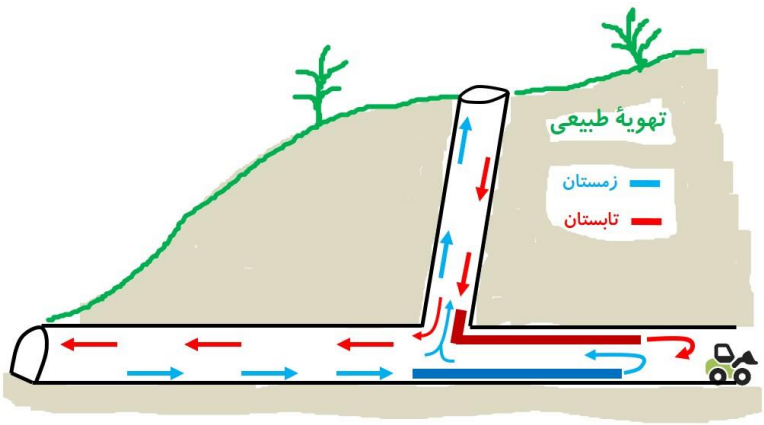
- بدون هزینه انرژی، نگهداری پایین

معایب:

- کاملاً وابسته به شرایط جوی (دما، فشار)، کنترل‌ناپذیر، ناکارآمد در تونل‌های عمیق یا پر رفت‌وآمد

کاربرد:

- فقط در تونل‌های کوتاه یا با تردد بسیار کم



www.atghvac.com www. azintahvieh.com

۲–تهویه مکانیکی طولی Longitudinal Ventilation

- رایج‌ترین نوع تهویه در تونل‌های جاده‌ای و مترو
- جریان هوا از یک سمت تونل وارد و از سمت دیگر خارج می‌شود.
- معمولاً با استفاده از جت‌فن‌ها Jet Fans انجام می‌شود.

چهار مدل رایج سیستم تهویه طولی:

- جت فن بدون سیستم اضافه
- هواساز با نازل سکاردو
- جت فن ها به همراه فن محوری در شافت تونل
- تخلیه طولی با جت به همراه فن محوری

مزایا:

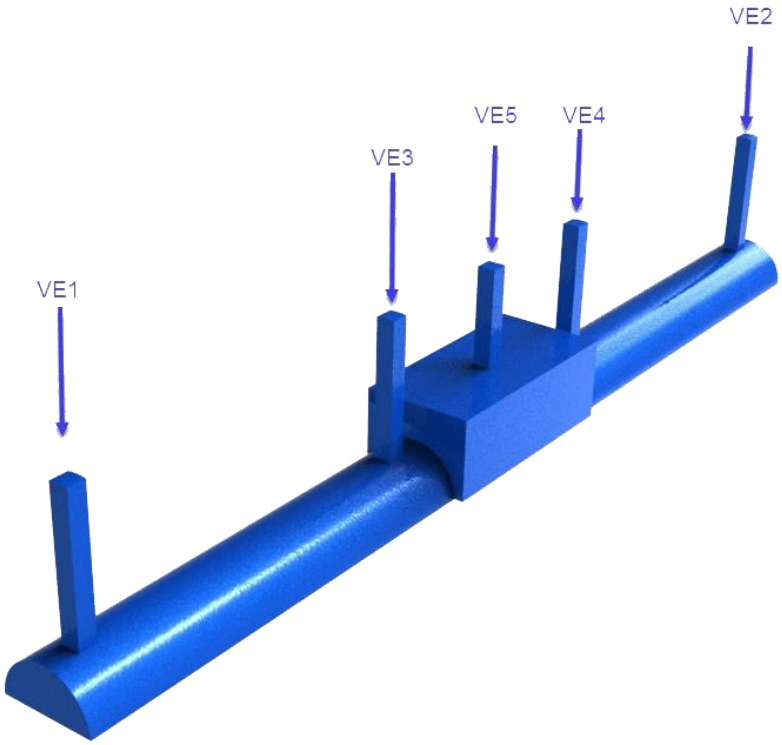
- نصب ساده، کنترل‌پذیری بالا، مناسب برای تونل‌های متوسط

معایب:

- نیاز به تعداد زیاد جت‌فن در تونل‌های خیلی طولانی، افزایش مصرف برق

کاربرد:

- تونل‌های جاده‌ای با جریان یک‌طرفه یا دوطرفه، تونل مترو



مثال : سیستم تهویه مترو تهران

نوع سیستم تهویه مترو تهران، سیستم تهویه طولی دمنده/ مکنده با دو شفت میان تونلی است که در این سیستم برای هر ایستگاه تعداد پنج عدد هواکش در نظر گرفته شده است.

هرایستگاه دارای سه نوع هوا ساز است. هواساز VE5 وظیفه تصفیه هوا و نم زنی را برعهده دارد، خروجی این هواساز مستقیما به سکوهای ایستگاه هدایت می شود. هواسازهای VE3 و VE4 هوا را پس از نم زنی بدون تصفیه، به ابتدا و انتهای سکوها هدایت می کنند.

بین هر دو ایستگاه مترو نیز یک کانال مشترک خروجی مربوط به دو نوع هواکشVE1و VE2 وجود دارد. وظیفه هواکش بین ایستگاه تخلیه هوای مصرف شده ایستگاه و نیم تونل منتهی بر هریک از هواکش است. کانال خروجی هواکش های بین ایستگاهی به هم متصل و در روی سطح زمین به اتاقک تخلیه ختم می شود.

تجهیزات مورد استفاده در سیستم تهویه مترو تهران

تجهیزات هواکش				
نوع هواکش	هواسازشامل صداگیر،هواشوی...	فیلتر هوا	فن محوری	دمپردود
VE5	دارد	دارد	دارد	دارد
VE3&VE4	دارد	ندارد	دارد	دارد
VE1&VE2	ندارد	ندارد	دارد	دارد

در سه یا چهار طرف اتاقک تخلیه و در ارتفاع حدود ۲ متر، دریچه های خروج هوا تعبیه شده اند. در مترو تهران، کلیه تاسیسات مکانیکی و برقی بالاخص سیستم تهویه توسط سیستم BAS نظارت و کنترل می شود. تمام ایستگاه ها و هواکش ها دارای حسگرهای دما بوده این حسگرها دما را دریافت و آن را به یک جریان الکتریکی تبدیل می کند. در دو سکوی هر ایستگاه چهار حسگر دما و یک حسگر رطوبت نصب شده است.

۳. تهویه مکانیکی عرضی Transverse Ventilation

- در این روش، هوا از طریق کانال‌های جداگانه وارد و خارج می‌شود.
- معمولاً در تونل‌های با ترافیک سنگین یا با کنترل کیفی سخت‌گیرانه

مزایا:

- کنترل دقیق بر کیفیت هوا، امکان تخلیه دود به‌صورت جداگانه

معایب:

- هزینه بسیار بالا، نیاز به کانال‌کشی وسیع، تعمیرات پیچیده

کاربرد:

- تونل‌های حیاتی، بلند، یا VIP، مثل تونل‌های زیر دریا یا مناطق شهری شلوغ

۴. تهویه نیمه‌عرضی Semi-Transverse Ventilation

- ترکیبی از روش طولی و عرضی
- هوا به‌صورت مکانیکی وارد یا خارج می‌شود، ولی طرف دیگر با جریان طبیعی یا طولی

مزایا:

- انعطاف‌پذیر، صرفه‌جویی در مصرف انرژی

معایب:

- نیاز به طراحی دقیق برای توزیع یکنواخت هوا

کاربرد:

- تونل‌هایی با طول متوسط که در برخی ساعات ترافیک سنگین دارند.

۵. تهویه تونل در حین ساخت Temporary Construction Ventilation

- مخصوص پروژه‌های در حال حفاری یا ساخت تونل
- استفاده از فن‌های پرتابی Axial Booster Fans به همراه کانال‌های فلکسیبل

مزایا:

- جابجایی هوای تازه تا اعماق تونل، انعطاف‌پذیر، قابل حمل

معایب:

- نیاز به نگهداری منظم، حساس به آسیب فیزیکی کانال

کاربرد:

- پروژه‌های مترو، معدن، کابل‌کشی، تونل‌سازی TBM

۶. تهویه اضطراری و حریق Emergency / Smoke Extraction Ventilation

- در هنگام آتش‌سوزی یا نشت گاز، به‌صورت اتوماتیک یا دستی فعال می‌شود

هدف: خارج‌کردن سریع دود و گازهای خطرناک و تأمین مسیر فرار برای افراد

سیستم‌ها شامل: جت‌فن‌های ضد حریق/ فن‌های سانتریفیوژ فشار بالا/ دمپرهای اتومات حریق/ کنترل هوشمند BMS

کاربرد: الزامی برای تمامی تونل‌های شهری و بین‌شهری طبق استاندارد NFPA130

جدول مقایسه روش‌های تهویه تونل:

نوع تهویه	مناسب برای	هزینه	کنترل کیفیت هوا	توضیحات
طبیعی	تونل کوتاه	خیلی کم	بسیار پایین	فقط در شرایط خاص قابل استفاده است
طولی	جاده‌ای، مترو	متوسط	متوسط	ساده‌ترین روش، با جت‌فن
عرضی	زیر دریا، VIP	خیلی بالا	بسیار بالا	مناسب تونل‌های پرخطر
نیمه‌عرضی	تونل متوسط	بالا	بالا	ترکیبی و اقتصادی‌تر از عرضی
موقت (ساخت)	تونل‌سازی، TBM	متغیر	خوب	انعطاف بالا، وابسته به فن پرتابی
اضطراری	همه‌ی تونل‌ها	بالا	حیاتی	برای آتش‌سوزی و حوادث اجباری است

ر

بخش۳ : تجهیزات اصلی در سیستم تهویه تونل

طراحی یک سیستم تهویه مؤثر برای تونل‌ها نیازمند انتخاب و به‌کارگیری تجهیزات خاصی است که بتوانند در شرایط دشوار زیرزمینی، هوای کافی با کیفیت مناسب را تأمین و آلاینده‌ها را تخلیه کنند. این تجهیزات باید علاوه‌بر راندمان بالا، مقاومت در برابر رطوبت، گردوغبار، حرارت و حتی حریق داشته باشند.

مهم‌ترین اجزای سیستم تهویه تونلی :

۱. فن‌های محوری Axial Fans

- پرکاربردترین نوع فن در تهویه تونل، به‌ویژه در پروژه‌های در حال ساخت
- برای تأمین هوای تازه یا تخلیه گازهای آلوده

ویژگی‌ها:

- دبی بالا تا $200,000\ m^3/h$
- مناسب برای نصب در ورودی یا خروجی تونل
- در برخی مدل‌ها دارای پره‌های قابل تنظیم و بدنه ضدزنگ

نمونه:

- فن آکسیال فشار بالا با موتور 400 ولت، IP55، قطر 1200 mm

۲. جت‌فن Jet Fan

- برای ایجاد جریان هوای طولی در تونل
- بدون نیاز به کانال‌کشی؛ با نصب روی سقف یا دیواره‌های تونل

کاربرد:

- هدایت جریان هوا در تونل‌های جاده‌ای
- تخلیه دود و گازهای ناشی از خودروها
- تهویه اضطراری در زمان آتش‌سوزی

ویژگی‌ها:

- مقاوم به حرارت بالا (مثلاً ۳۰۰°C برای ۲ ساعت)
- عملکرد دوطرفه (مکش و دهش)
- کنترل توسط سیستم BMS

نمونه:

- Jet Fan با توان ۱۵ kW، ساختار دبل اینلت، دارای توری محافظ

۳. فن‌های پرتابی قابل حمل Booster Fans

- برای تونل‌های در حال ساخت با حفاری دستی یا TBM
- همراه با کانال‌های فلکسیبل برای رساندن هوا تا اعماق تونل

ویژگی‌ها:

- نصب سریع و حمل آسان
- عملکرد مداوم و مقاوم به گردوغبار
- برخی مدل‌ها دارای صداگیر و پایه لرزه‌گیر هستند

کاربرد:

- پروژه‌های مترو، انتقال کابل، نیروگاه، معدن‌کاری

۴. فن سانتریفیوژ Centrifugal Fan

- برای مکش گازهای خطرناک یا تهویه اضطراری
- ایجاد فشار بالا برای تخلیه هوا از فواصل طولانی

ویژگی‌ها:

- بدنه فلزی سنگین، مقاوم در برابر آتش
- مناسب برای اتصال به داکت یا سیستم فیلتر

مدل‌های دو طرف مکش Double Inlet یا با پروانه Backward-curved رایج هستند.

۵. کانال‌های انتقال هوا Ventilation Ducts

- برای رساندن یا خارج کردن هوا در مسیرهای طولانی
- در دو نوع فلزی (سخت) و فلکسیبل (نرم) تولید می‌شوند.

کانال‌های فلکسیبل:

- سبک، جمع‌شونده، نصب آسان
- PVC، PU، برزنت صنعتی
- قطرهای ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر
- مقاوم در برابر پارگی، رطوبت، شعله و گاز

برندهای معتبر دارای اتصال سریع زیپی، روکش آنتی‌استاتیک و UV مقاوم هستند.

۶. دمپر، صداگیر و توری محافظ

دمپرها: کنترل جهت و شدت جریان، ضد برگشت، ایمنی در برابر حریق

صداگیرها: کاهش نویز فن‌ها در محیط‌های بسته

توری محافظ: جلوگیری از ورود اشیای خارجی یا برخورد افراد با پره‌ها

۷. تابلو برق، کنترلر و سیستم BMS

- کنترل هوشمند سرعت فن‌ها، دمای موتور، وضعیت اضطراری
- سیستم BMS تونل امکان مدیریت فن‌ها بر اساس سنسور گاز، دود یا دما را فراهم می‌کند.
- امکان اتصال به اینورتر، PLC، مانیتورینگ از راه دور و سیستم هشدار در مواقع بحرانی

۸. سنسورها و تجهیزات ایمنی

- سنسورهای گاز (CO، CH4، NO2)
- دتکتور دود و حرارت
- سیستم هشدار صوتی و نوری
- کلید قطع اضطراری Emergency Stop

این تجهیزات نقش حیاتی در جلوگیری از خفگی، انفجار یا مسمومیت ایفا می‌کنند.

بخش۴: طراحی مهندسی سیستم تهویه تونل

(اصول محاسبه، مدل‌سازی، جانمایی و انتخاب تجهیزات)

طراحی سیستم تهویه تونل نیازمند محاسبات دقیق و مهندسی است. بدون طراحی علمی، حتی بهترین تجهیزات هم نمی‌توانند عملکرد مؤثر و ایمنی لازم را فراهم کنند. این بخش برای مهندسان مشاور، طراحان سیستم‌های مکانیکی، مشاوران پروژه‌های راه‌سازی و معدن بسیار کاربردی است.

مراحل طراحی مهندسی تهویه تونل:

۱. تعیین اهداف تهویه

- تأمین اکسیژن کافی برای افراد یا خودروها
- تخلیه گازهای آلاینده (CO، NO2، دیزل، متان)
- کنترل دما و رطوبت
- تهویه اضطراری در شرایط آتش‌سوزی یا نشت گاز

۲. جمع‌آوری اطلاعات پروژه

اطلاعات مورد نیاز	توضیح
طول و قطر تونل	برای محاسبه افت فشار و حجم هوا
نوع کاربری	مترو، بزرگراه، معدن، تونل زیرزمینی
نوع تردد	خودرو، قطار، نیروی انسانی، ماشین‌آلات
حجم آلاینده‌ها	بسته به نوع سوخت و دستگاه‌ها
تعداد افراد یا وسایل نقلیه	برای تعیین حجم هوای تازه مورد نیاز
دمای محیط، رطوبت، ارتفاع از سطح دریا	بر عملکرد فن‌ها تأثیر می‌گذارد

۳ .محاسبه دبی مورد نیاز(Air Flow Rate)

طبق استاندارد PIARC وOSHA ، حداقل میزان هوای تازه برای تردد خودروها در تونل:

- **خودروهای سواری:** ۴۰ تا ۶۰ m^3/h به‌ازای هر خودرو
- **خودروهای دیزلی:** ۶۰ تا ۱۰۰ m^3/h
- **برای تونل مترو:** ۶ تا ۸ بار تعویض هوای کامل در ساعت

مثال:

تونل ۱۲۰۰ متری با قطر ۷ متر و ۲ لاین خودرو

حجم تونل ≈ ۴۶،۰۰۰ m^3

نیاز به تهویه = ۶ × ۴۶،۰۰۰ = ۲۷۶،۰۰۰ m^3/h

۴. محاسبه افت فشار سیستم

افت فشار تابعی از موارد زیر است:

- طول تونل
- تعداد زانویی‌ها یا پیچ‌ها
- سطح زبری دیواره‌ها
- وجود فیلتر یا دمپر
- نوع و قطر کانال‌ها (در سیستم‌های کانال‌دار)

از فرمول‌های دارسی–ویسباخ یا معادل‌های صنعتی برای برآورد استفاده می‌شود.

۵. انتخاب نوع سیستم تهویه

شرایط	سیستم پیشنهادی
تونل زیر ۵۰۰ متر با تردد سبک	تهویه طولی با جت‌فن
تونل بیش از ۱ کیلومتر	تهویه نیمه‌عرضی یا عرضی
تونل در حال ساخت	تهویه پرتابی با کانال فلکسیبل
تونل ریلی یا معدنی با آلودگی بالا	تهویه عرضی + سانتریفیوژ فشار قوی
پروژه‌ای با آتش‌سوزی محتمل	فن ضد حریق + سیستم اضطراری خودکار

۶. جانمایی فن‌ها و تجهیزات

- باید به‌گونه‌ای طراحی شود که:
- در شرایط معمول، هوا به‌طور یکنواخت جریان یابد
- در شرایط اضطراری (آتش، گاز)، تخلیه سریع و مؤثر انجام شود
- فن‌ها قابل دسترسی برای نگهداری باشند
- صدا در نقاط حساس کنترل شده باشد (استفاده از صداگیر)

۷. مدل‌سازی (CFD**پیشرفته**)

- در پروژه‌های بزرگ، با استفاده از نرم‌افزارهای CFD مانند TunnelVent / FDS/ ANSYS Fluent مسیر حرکت هوا مدل‌سازی می‌شود.
- نقاط با افت فشار زیاد یا گردش غیرمطلوب شناسایی می‌گردد.
- رفتار دود در آتش‌سوزی شبیه‌سازی می‌شود.
- تعداد بهینه‌ی فن، توان آن‌ها و مکان نصب بهینه‌سازی می‌شود.

۸. تست و تأیید سیستم تهویه

پس از اجرا، سیستم باید از نظر:

- دبی واقعی هوا
- افت فشار
- سطح صدا
- عملکرد اضطراری
- پاسخ به سنسور دود یا گاز

تحت تست قرار گیرد و گزارش رسمی تهیه شود.

بخش ۵: الزامات ایمنی و استانداردهای جهانی در تهویه تونل‌ها

در طراحی، نصب و بهره‌برداری از سیستم تهویه تونل، رعایت دقیق استانداردهای جهانی و الزامات ایمنی یک اصل غیرقابل چشم‌پوشی است. خطا در تهویه می‌تواند منجر به خفگی، آتش‌سوزی گسترده، انفجار، یا مرگ افراد شود. به همین دلیل، اغلب کشورها و نهادهای بین‌المللی، مقررات سخت‌گیرانه‌ای در این زمینه وضع کرده‌اند.

چرا ایمنی در تهویه تونل اهمیت دارد؟

- وجود گازهای سمی مانند CO، CH_4، NO_2
- تولید ذرات معلق خطرناک توسط خودروها یا دستگاه‌ها
- خطر تجمع دود در هنگام آتش‌سوزی
- لزوم ایجاد مسیر فرار و تهویه اضطراری
- جلوگیری از انفجار در معادن یا تونل‌های حاوی متان

مهم‌ترین استانداردها و مراجع جهانی:

استاندارد	موضوع	مرجع
NFPA130	تهویه و کنترل دود در تونل‌های حمل‌ونقل ریلی و مترو	ایالات متحده
PIARC	راهنمای جامع تهویه تونل‌های جاده‌ای	سازمان راه‌سازی جهانی
EN12101-3	فن‌های مقاوم به حریق	اتحادیه اروپا
OSHA 1910&1926	تهویه در کارگاه‌ها و فضاهای بسته	آمریکا
ISO21927	کنترل دود و گرما در تونل‌ها	استاندارد جهانی
ATEX Directive	ایمنی تجهیزات در محیط‌های قابل انفجار	اتحادیه اروپا

الزامات کلیدی ایمنی در طراحی تهویه تونل

۱. فن‌های مقاوم به حرارت

باید در برابر دماهای بالا (۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای حداقل ۲ ساعت) عملکرد خود را حفظ کنند.

۲. سنسورهای گاز و دود

نصب حسگرهای CO، NO_2، CH_4، O_2، و دتکتور دود در فواصل مشخص برای مانیتورینگ دائمی هوا الزامیست.

۳. تهویه اضطراری Emergency Ventilation

سیستم تهویه باید بتواند در مواقع بحرانی مسیری امن برای خروج افراد ایجاد کند.

۴. کنترل خودکار و دستی

سیستم باید مجهز به BMS یا PLC باشد تا در حالت عادی و اضطراری، پاسخ هوشمند و سریع بدهد.

۵. صدا، لرزش و نگهداری

حداکثر سطح صدای مجاز برای فن‌ها در محدوده ۸۰ دسی‌بل

نیاز به نگهداری دوره‌ای، دسترسی آسان به تجهیزات و تهیه دستورالعمل بهره‌برداری

طبقه‌بندی سطح تهویه بر اساس خطرات

سطح تهویه	شرایط معمول	الزامات ویژه
پایه	تونل کوتاه، بدون سوخت فسیلی	تهویه طولی ساده
متوسط	تردد دیزلی محدود، بدون خطر انفجار	تهویه با کنترل گاز و دما
بحرانی	مترو، تونل طولانی، مواد قابل اشتعال	فن ضد حریق، سیستمBMS ، سنسور، مسیر فرار
بسیار خطرناک	معادن زیرزمینی، متان‌دار	تجهیزات ضد جرقه(Ex) ، تهویه چندمرحله‌ای

اقدامات تکمیلی ایمنی:

- آموزش پرسنل در خصوص کار با سیستم تهویه
- داشتن طرح مدیریت بحران و تخلیه دود
- تست دوره‌ای سیستم با سناریوهای آتش یا گاز
- استفاده از UPS یا ژنراتور پشتیبان برای فن‌های اضطراری

بخش ۶: مقایسه تهویه در تونل مترو، جاده‌ای، معدنی و خدماتی

هر نوع تونل بسته به عملکرد، شرایط محیطی، میزان آلاینده‌ها و نوع تردد، نیازمند سیستم تهویه مخصوص به خود است. در این بخش به تفکیک، تفاوت‌ها و شباهت‌های تهویه در تونل‌های مختلف را بررسی می‌کنیم.

الف) تهویه تونل مترو (شهری / بین‌شهری)

ویژگی‌ها:

- تردد قطارهای برقی یا دیزلی
- حضور دائم مسافر و پرسنل
- ریسک بالای آتش‌سوزی و قطع برق
- فضای بسته با حداقل امکان تهویه طبیعی

نوع تهویه مورد نیاز:

- ترکیبی از تهویه طولی و عرضی
- فن‌های جت و سانتریفیوژ مقاوم به حرارت
- تهویه اضطراری و دودگیر اتومات
- مانیتورینگ لحظه‌ای گاز و دما

چالش‌ها:

- کنترل دود هنگام آتش‌سوزی
- تعویض هوای مداوم بین ایستگاه‌ها
- مصرف انرژی بالا، نیاز به UPS یا ژنراتور

ب) تهویه تونل جاده‌ای

ویژگی‌ها:

- عبور خودروهای بنزینی و دیزلی
- تولید CO، NOx، HC و ذرات معلق
- معمولاً تونل‌های طویل، با دهانه‌های مشخص

نوع تهویه:

- طولی Longitudinal با جت‌فن سقفی
- در تونل‌های بسیار بلند، نیمه‌عرضی یا عرضی
- سیستم‌های تشخیص آلاینده و سرعت باد

چالش‌ها:

- نوسان شدید ترافیک
- لزوم تهویه هوشمند بر حسب آلودگی
- کنترل دود در حوادث رانندگی

پ) تهویه تونل معدنی (زیرزمینی)

ویژگی‌ها:

- تردد مداوم ماشین‌آلات دیزلی
- حضور گازهای قابل انفجار مثل متان
- حرارت، رطوبت و گردوغبار بالا
- محیط بسیار عمیق و خطرناک

نوع تهویه:

- سیستم چندمرحله‌ای با فن‌های فشار بالا
- پرتاب هوا با کانال فلکسیبل و دمنده قوی
- فن‌های ضد جرقه Explosion Proof
- تهویه رفت و برگشتی

چالش‌ها:

- انفجار گاز، نشت CO
- طول مسیر زیاد تا ته چاه
- نیاز به فن دائم‌کار، قوی و قابل اعتماد

ت) تهویه تونل خدماتی (کابل، آب، مخابرات)

ویژگی‌ها:

- دسترسی دوره‌ای برای تعمیرات
- بدون تردد دائمی انسان یا خودرو
- تولید گرما یا گاز در اثر تجهیزات

نوع تهویه:

- تهویه موقت یا دوره‌ای با فن‌های قابل حمل
- استفاده از تهویه طبیعی در برخی پروژه‌ها
- سیستم هشدار گاز، دما یا آتش برای زمان ورود پرسنل

چالش‌ها:

- کنترل دمای تجهیزات الکتریکی
- تهویه در فضای محدود با دسترسی سخت

جدول مقایسه سیستم تهویه انواع تونل‌ها:

نوع تونل	نوع تهویه	گازهای خطرناک	سیستم اضطراری	تجهیزات اصلی
مترو	ترکیبی (طولی + عرضی)	دود, CO_2, CO	دارد	فن مقاوم به حریق، BMS
جاده‌ای	طولی یا نیمه عرضی	CO, NOx	دارد	جت‌فن، سنسور گاز
معدنی	رفت‌وبرگشتی با فشار بالا	CH_4, CO و گردوغبار	حتماً باید باشد	فن ضد انفجار، کانال فلکسی
خدماتی	طبیعی یا موقت	گرما، بخار	گاه‌به‌گاه	فن پرتابی کوچک، هشدار دما

جمع‌بندی نهایی:

۱-تهویه تونل یکی از مهم‌ترین ارکان ایمنی و بهره‌برداری در پروژه‌های عمرانی، معدنی، ریلی، جاده‌ای و خدماتی به شمار می‌رود. بدون وجود یک سیستم تهویه مؤثر، فعالیت در فضای بسته و پرخطر تونل‌ها عملاً غیرممکن خواهد بود و تهدیدی جدی برای سلامت، ایمنی و حتی جان انسان‌ها محسوب می‌شود.

۲-در این مقاله، به‌صورت جامع و تخصصی، تمامی جنبه‌های مربوط به تهویه تونل را مورد بررسی قرار دادیم؛ از معرفی انواع روش‌های تهویه (طبیعی، طولی، عرضی، اضطراری و پرتابی)، تا بررسی تجهیزات مورد نیاز مانند فن‌های محوری، جت‌فن‌ها، فن‌های سانتریفیوژ، کانال‌های فلکسیبل، سنسورها، و سیستم‌های کنترلی هوشمند.

۳-همچنین به بررسی دقیق استانداردهای جهانی (مانند NFPA130، PIARC، EN12101 و OSHA) پرداختیم که طراحی و اجرای این سیستم‌ها را هدایت می‌کنند و در نهایت، با مقایسه تخصصی تهویه در انواع تونل‌ها (مترو، جاده‌ای، معدنی و خدماتی)، دید واضح‌تری نسبت به تفاوت‌های عملکردی و الزامات فنی به‌دست آوردیم.

نکات کلیدی:

- انتخاب روش تهویه تونل باید بر اساس نوع کاربری، طول مسیر، سطح خطر، نوع آلاینده‌ها و شرایط جغرافیایی انجام شود.
- تجهیزات تهویه باید مقاوم در برابر رطوبت، گرما، گازهای سمی و آتش‌سوزی باشند.
- استفاده از سیستم‌های کنترلی هوشمند BMS، سنسورهای دقیق، و فن‌های ضدحریق یا ضد انفجار برای پروژه‌های حساس حیاتی است.
- تهویه تونل در شرایط بحران (مثل آتش‌سوزی یا نشت گاز) نقش نجات‌دهنده‌ای ایفا می‌کند و باید با طراحی مهندسی دقیق پیش‌بینی شود.
- طراحی باید هم از نظر عملکرد فنی و هم از نظر صرفه‌جویی در مصرف انرژی و هزینه نگهداری بهینه شود.

نتیجه نهایی:

سیستم تهویه تونل، قلب تپنده‌ی ایمنی و بهره‌وری در پروژه‌های زیرزمینی است. انتخاب درست روش، تجهیزات و طراحی، نه‌تنها سلامت کارگران، رانندگان و ساکنان را حفظ می‌کند، بلکه ضامن پایداری و بهره‌وری در طول عمر پروژه خواهد بود. مشاوران، مجریان و ناظران باید با نگاه فنی و دقیق، از استانداردهای روز دنیا برای طراحی و اجرای این سیستم‌ها استفاده کنند.