جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه

(جلد سوم– ضوابط طراحی سیستم تهویه)

ضابطه شماره ۳–۸۰۵

معاونت فنی ، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

nezamfanni.ir

۱۴۰۱

باسمه‌تعالی

ریاست جمهوری
سازمان برنامه و بودجه کشور
رییس سازمان

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	**شماره:**	**۱۴۰۱/۴۷۷۱۹۸**
	تاریخ:	**۱۴۰۱/۰۹/۰۷**

موضوع: ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه

در چهارچوب ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور، ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و به استناد تبصره (۲) ماده (۴) «نظام فنی و اجرایی یکپارچه کشور» موضوع مصوبه شماره ۲۵۲۵۴/ت۵۷۶۹۷هـ مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ هیات محترم وزیران، به پیوست دستورالعمل شماره ۸۰۵، با عنوان «ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه» در قالب سه جلد زیر ابلاغ می‌شود:

جلد اول : ضوابط طرح هندسی

جلد دوم : ضوابط سازه مسیر

جلد سوم: ضوابط طراحی سیستم تهویه

رعایت مفاد این ضابطه از تاریخ ۱۴۰۲/۰۱/۰۱ برای همه قراردادهایی که از محل وجوه عمومی ویا به صورت مشارکت عمومی و خصوصی منعقد می‌شوند، الزامی است.

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.

سید مسعود میرکاظمی

ش‌ش: ۶۰۸۳۸۲۶

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایراد و اشکال نیست.

از این‌رو، ***از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:***

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی

web: nezamfanni.ir Email:nezamfanni@mporg.ir

بسمه تعالی

پیشگفتار

پس از ابلاغ ضوابط لازم‌الاجرای ۸۰۴ به منظور ایجاد اولویت‌های بالادستی در طراحی و ساخت ایستگاه‌های قطار شهری، مجموعه حاضر جهت تعیین ضوابط طراحی و ساخت مسیر قطار شهری تدوین شده است. مجموعه حاضر در هماهنگی با ضوابط ۸۰۴ تدوین شده است و انتظار می‌رود یکپارچگی و انسجام در نظر گرفته شده در فصول مختلف منجر به راهنمایی طراحان و تصمیم‌گیران در پیشبرد صحیح طرح ایستگاه‌ها و مسیر قطار شهری گردد. رعایت ضوابط حاضر در هماهنگی با مجموعه ۸۰۴ الزامی است.

ضوابط حاضر در ۳ بخش تدوین شده است:

جلد اول: طرح هندسی در خطوط قطار شهری و حومه

جلد دوم: طراحی سازه مسیر در خطوط قطار شهری و حومه

جلد سوم: طراحی سیستم تهویه در خطوط قطار شهری و حومه

علیرغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردید، این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن این ضابطه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن ضابطه، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع‌رسانی نظام فنی و اجرایی کشور برای بهره‌برداری عموم، اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده‌است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از این‌رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

در پایان از شرکت قطارشهری مشهد که در تهیه این ضابطه همکاری صمیمانه‌ای داشته‌اند قدردانی می‌نماید.

حمید امانی همدانی
معاون فنی، امور زیربنایی و تولیدی
پاییز ۱۴۰۱

تهیه و کنترل «ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه (جلد سوم- ضوابط طراحی سیستم تهویه)»

[ضابطه شماره ۳-۸۰۵]

اعضای گروه تهیه‌کننده:

علیرضا زمانی	شرکت مهندسین مشاور پژوهش	لیسانس مهندسی مکانیک
مائده بابانیانوری	شرکت مهندسین مشاور پژوهش	لیسانس مهندسی مکانیک
وحید علی اکبر	شرکت مهندسین مشاور پژوهش	فوق لیسانس مهندسی مکانیک

اعضای گروه هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه کشور):

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
وحید سعیدیان	معاون امور راه و ترابری و مدیریت عمران شهری و روستایی
فرزانه آقارمضانعلی	رییس گروه امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران
زینب سقائی نوش آبادی	کارشناس امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

فهرست مطالب

فصل ۱: طرح‌ریزی سیستم کنترل محیطی در خطوط قطار شهری ۱

۱-۱- مقدمه ۳

۱-۲- هدف و محدوده کاربرد ۳

۱-۳- معرفی ساختار نشریه طراحی سیستم تهویه در تونل‌ها و ایستگاه‌های قطار شهری ۵

۱-۴- ملاحظات کلی ۵

۱-۵- تعاریف و اصطلاحات ۶

۱-۶- فرایند کنترل محیطی در فضای قطار شهری ۸

۱-۶-۱- معیارها ۹

۱-۶-۲- تحلیل ۱۱

۱-۶-۳- کنترل ۱۵

۱-۷- مراحل طراحی سیستم تهویه ایستگاه‌ها و تونل ۱۵

فصل ۲: ضوابط طراحی سیستم تهویه ۲۱

۲-۱- الزامات کلی ۲۳

۲-۲- الزامات اختصاصی طراحی سیستم تهویه بر اساس سناریوی بهره‌برداری اضطراری ۲۳

۲-۳- الزامات اختصاصی طراحی سیستم تهویه بر اساس سناریوی بهره‌برداری نرمال ۲۸

۲-۴- الزامات سیستم تهویه پست کشش ۳۶

پیوست ۱: معیارهای محیطی آسایش انسان ۳۷

پیوست ۲: پیکربندی سیستم تهویه ۶۵

پیوست ۳: اصول محاسبات سیستم تهویه ۸۳

پیوست ۴: مشخصات فنی تجهیزات سیستم تهویه ۱۰۹

مراجع ۱۱۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: نمونه‌ای از مدل‌سازی یک‌بعدی یک قسمت از مسیر زیر زمینی ۱۴

شکل ۱-۲: نمونه‌ای از خروجی مدل‌سازی سه‌بعدی سناریوی حریق در سکوی ایستگاه ۱۴

شکل ۱-۳: مراحل طراحی سیستم کنترل محیطی ۱۵

شکل پ-۱-۱: پوشش راحت به‌صورت تابعی از t، M و V ۴۸

شکل پ-۱-۲: مقدار استاندارد Ia بر اساس سرعت هوا ۴۹

شکل پ-۱-۳: درصدی از افراد که خواستار محیط خنک‌تر در تابستان هستند ۵۱

شکل پ-۱-۴: نمونه تغییرات شاخص RWI در طول یک سفر با سیستم قطار شهری ۵۲

شکل پ-۱-۵: نمونه تغییرات شاخص HDR در طول یک سفر با سیستم قطار شهری ۵۴

شکل پ-۲-۱: نمونه فن محوری سیستم تهویه تونل ۶۸

شکل پ-۲-۲: مسیر جریان هوا در یک سیستم ایرواشر متداول مترویی ۶۹

شکل پ-۲-۳: مسیر جریان هوا در یک سیستم سرمایش ایستگاهی با برگشت هوا ۷۱

شکل پ-۲-۴: شماتیک سیستم تهویه UPE/OTE و خروج گرمای تولید شده توسط قطار از طریق این دو سیستم ۷۲

شکل پ-۲-۵: نمونه مسیرهای گذر هوای تهویه در ایستگاه زیرزمینی ۷۳

شکل پ-۲-۶: شماتیک مفهوم شفت اثر پیستونی ۷۴

شکل پ-۲-۷: شماتیک یک نمونه سیستم تهویه تونل و فضای عمومی ایستگاه ۷۵

شکل پ-۲-۸: شماتیک یک نمونه سیستم فشار مثبت پله فرار ۷۵

شکل پ-۲-۹: شماتیک یک نمونه سیستم فشار مثبت کراس پاساژ ۷۶

شکل پ-۲-۱۰: شماتیک یک سناریوی نمونه عملکرد سیستم تهویه در حالت حریق قطار در سکو ۷۷

شکل پ-۲-۱۱: شماتیک یک نمونه سیستم تخلیه دود تراز کنترل بلیط ۷۸

شکل پ-۲-۱۲: روند مواجهه با حریق در تونل ۷۸

شکل پ-۲-۱۳: مفهوم سرعت بحرانی در تونل ۷۹

شکل پ-۲-۱۴: شماتیک سناریوی تهویه PUSH-PULL در تونل ۷۹

شکل پ-۲-۱۵: شماتیک سناریوی تخلیه از شفت میانی ۸۰

شکل پ-۳-۱: اثر سرعت‌های مختلف طراحی بر نحوه توزیع گرما ۹۵

شکل پ-۳-۲: افت فشار در تونل در حالت ورود هوا ۹۹

شکل پ-۳-۳: افت فشار در تونل در حالت خروج هوا ۱۰۰
شکل پ-۳-۴: نمودار برای به دست آوردن $C\Delta pxi$ ۱۰۱
شکل پ-۳-۵: به دست آوردن ضریب پسای قطار ۱۰۲
شکل پ-۳-۶: نمودار ضریب پسای قطار و سرعت حرکت هوا در تونل ۱۰۳
شکل پ-۳-۷: حجم کنترل جهت تحلیل هوای ورودی و خروجی در اثر حرکت پیستونی قطار ۱۰۴
شکل پ-۳-۸: وضعیت‌های مختلف عملکرد سیستم فشار مثبت ۱۰۸

فهرست جدول‌ها

جدول پ-۱-۱: مشخصات برخی از شاخص‌های حرارتی رایج ۴۰

جدول پ-۱-۲: شرایط هوای طرح خارج پروژه ۴۲

جدول پ-۱-۳: پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص حرارت نسبی RWI و حرارت از دست رفته HDR ۴۵

جدول پ-۱-۴: نرخ متابولیک برای فعالیت‌های فیزیکی مختلف ۴۶

جدول پ-۱-۵: تأثیر عایق بر لباس بر اساس فعالیت‌های مختلف فیزیکی ۴۷

جدول پ-۱-۶: طبقه‌بندی ASHRAE و شاخص RWI متناظر با آن‌ها ۵۱

جدول پ-۱-۷: شرایط دمایی مجاز برای تونل در حالت نرمال و اضطراری ۵۴

جدول پ-۱-۸: شرایط آلایندگی مجاز گازها برای تونل و ایستگاه ۵۷

جدول پ-۱-۹: شرایط آلایندگی مجاز گازها برای تونل و ایستگاه ۵۹

جدول پ-۱-۱۰: شرایط آلایندگی مجاز گازها برای تونل و ایستگاه ۶۰

جدول پ-۱-۱۱: ماکزیمم زمان در معرض قرار گرفتن ۶۲

جدول پ-۲-۱: مقایسه دو سیستم تبخیری و تبریدی ۷۰

جدول پ-۳-۱: مشخصات قطار ۸۶

جدول پ-۳-۲: مشخصات منابع حرارتی ثابت در ایستگاه و تونل ۸۷

جدول پ-۳-۳: نحوه توزیع بار حرارتی ناشی از ترمزگیری ۹۶

جدول پ-۳-۴: نحوه توزیع بار حرارتی ناشی از ترمزگیری ۹۶

جدول پ-۳-۵: پارامترهای قطار و تونل برای محاسبه دبی تولید شده در اثر حرکت پیستونی قطار ۱۰۵

فصل ۱

طرح‌ریزی سیستم کنترل محیطی در خطوط قطار شهری

۱-۱- مقدمه

سیستم تهویه تونل از جهاتی در نوع خود منحصر به فرد تلقی می‌گردد، بدین معنا که می‌تواند در مواقع کارکرد معمول و اضطرار، شرایط محیطی قابل قبولی را برای افراد حاضر در مسیر تأمین نماید. در فرآیند طراحی مقدماتی سیستم تهویه، بر خلاف اکثر ساختمان‌ها که معمولاً عرض قابل توجهی به نسبت سایر ابعاد بنای ساختمان دارند، با یک تقریب، تونل، سازه‌ای با پیکربندی خطی به حساب آمده و این مفهوم در تونل هنگام مواجهه با حریق دارای اهمیت است چراکه نمی‌توان تونل را مشابه یک ساختمان معمولی در حین آتش‌سوزی ناحیه‌بندی نموده و هندسه خاص تونل پیچیدگی‌ها و اقتضائات خود را در مهار و سرکوب حریق و دفع دود الزام می‌نماید و لذا این شرایط، نیازمند اتخاذ رویکردی خاص در فرایند طراحی سیستم تهویه تونل می‌باشد.

سیستم تهویه تونل بایستی قابلیت انطباق با شرایط کارکرد معمول، ازدحام ترافیکی و اضطراری مواجهه با حریق را داشته باشد. همچنین ممکن است سناریوهایی برای عملیات تهویه موقت از قبیل تعمیرات و نگهداری در زمان‌های غیر بهره‌برداری نیز در طراحی سیستم تهویه در نظر گرفته شود.

از سوی دیگر، ایستگاه‌های زیرزمینی، بدلیل اتصال به تونل، تحت تأثیر جریان‌های هوا مابین ایستگاه و تونل بوده که بایستی جهت فراهم نمودن شرایط آسایش انسان‌ها در این ایستگاه‌ها، پس از شناسایی پارامترهای اثرگذار، چاره‌اندیشی در خصوص سیستم تهویه مناسب به عمل آید.

۱-۲- هدف و محدوده کاربرد

هدف از تدوین این نشریه، مدون کردن ضوابط و دستورالعملی در راستای طراحی تجهیزات تهویه و تهویه مطبوع در تونل‌های ارتباطی و فضاهای عمومی ایستگاه‌ها می‌باشد.

فضاهای عمومی ایستگاه‌ها و تونل‌ها شامل فضاهای عمومی سکو، ترازهای فوقانی سکو (شامل تراز فروش بلیط)، راهروها، پله‌ها و پله‌برقی‌ها، پله‌های فرار، آسانسورها، راهروهای ارتباطی بین تونل‌ها (در تونل‌های تک‌خطه)، ورودی‌های ایستگاه و خروجی‌های اضطراری می‌شود.

ضوابط مرتبط با تاسیسات مکانیکی فضاهای غیر عمومی ایستگاه‌ها در نشریه ۳-۸۰۴ گردآوری شده است. باتوجه به اینکه در نشریه ضوابط ایستگاه‌ها، به تاسیسات یکپارچه ایستگاه و تونل مانند تمهیدات جمع‌آوری و دفع پساب و نشتاب نفوذی به سازه تونل و ایستگاه، سیستم آبرسانی و همچنین شبکه آتش‌نشانی پرداخته شده است، تکرار آنها در این نشریه لازم نبوده و لذا حوزه مطالعاتی این ضابطه به مباحث تهویه و تهویه مطبوع در تونل و فضاهای عمومی محدود شده است.

در گردآوری این نشریه از استانداردها و ضوابط بین‌المللی و همچنین مطالعات طراحی سیستم تهویه در خطوط قطار شهری در شهرهای تهران، مشهد، تبریز، کرج، اصفهان، شیراز و اهواز بهره‌گیری شده تا به عنوان یک سند مرجع و قابل استفاده در فرایند طراحی خطوط آتی قطار شهری در کشور قابل بهره‌برداری باشد.

مهمترین عملکرد تجهیزات سیستم تهویه در مسیر خطوط قطار شهری، ایجاد شرایط دمایی قابل قبول و گردش هوا به منظور دفع غبار، دود و گازهای آلاینده در کارکرد بهره‌برداری نرمال از خط زیرزمینی قطار شهری و علاوه بر آن ایجاد مسیر امن و با شرایط محیطی قابل قبول در شرایط بحران ناشی از بروز حریق و نیز انسداد طولانی مدت مسیر ناشی از توقف پیش‌بینی نشده قطار در تونل می‌باشد.

سیستم تهویه در فضاهای عمومی و زیرزمینی قطار شهری می‌تواند شامل بخش‌های زیر باشد:

- سیستم تهویه و/یا تهویه مطبوع تونل
- سیستم تهویه و تهویه مطبوع فضای عمومی ایستگاه‌ها
- سیستم تخلیه دود ایستگاه
- سیستم تهویه و/یا تهویه مطبوع پایانه‌ها و پارکینگ‌های زیرزمینی

این نشریه به بررسی الزامات طراحی سیستم تهویه تونل و فضاهای عمومی ایستگاه‌ها پرداخته و بدین جهت بررسی سیستم تهویه دپوها و پارکینگ‌های زیرزمینی و همچنین بیان الزامات مربوط به برق‌رسانی به تجهیزات، کنترل و مانیتورینگ نیز در محدوده کاربرد این نشریه نمی‌باشد.

در دسته‌بندی فوق، فضاهایی از قبیل پله‌فرارها و کراس پاساژها (راهروهای ارتباطی مابین تونل‌های تک‌خطه) از جمله فضاهای جانبی تونل لحاظ شده‌اند، البته فضای عمومی ایستگاه خود نیز شامل پله فرار می‌باشد.

علاوه بر آن، الزامات سیستم تهویه پست کشش نیز به اختصار ارائه گردیده است.

مدارک زیر حاوی مقرراتی است که در متن این نشریه به آن‌ها ارجاع شده و بدین ترتیب می‌توانند در کنار ضابطه پیش‌رو مورد استناد قرار گیرند.

- نشریه شماره ۷۷۷ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی
- مقررات ملی ساختمان مباحث ۳، ۱۴، ۱۶و ۱۹
- استاندارد ملی ایران- شماره ۲۱۱۹۳ قسمت اول: سیستم‌های حمل و نقل ریلی درون‌شهری و حومه- ایمنی، الزامات ایمنی در مراحل طراحی ایستگاه‌ها، تونل‌ها و بهره‌برداری از آن‌ها
- استاندارد ملی ایران- شماره ۲۱۱۹۳ قسمت سوم: الزامات تجهیزات ایمنی، امدادرسانی، سامانه‌ها و تجهیزات پیشگیری و مقابله با حریق و دود

۱-۳- معرفی ساختار نشریه طراحی سیستم تهویه در تونل‌ها و ایستگاه‌های قطار شهری

نشریه حاضر در دو فصل اصلی و چهار پیوست تدوین گردیده است. در فصل اول به طور کلی به طرح‌ریزی کلیات و ارائه مبانی فرایند طراحی پرداخته شده است و در ابتدا چارچوب ضابطه، تعاریف، اصطلاحات و مراجع الزامی مورد استناد عنوان گردیده و سپس در بخش بعدی فصل اول، هدف از طراحی سیستم تهویه و مفهوم کنترل محیطی و در نهایت روند انجام فرایند طراحی سیستم تهویه شرح داده شده است.

در فصل دوم نشریه، الزامات عمومی مربوط به طراحی و ضوابط حاکم بر انتخاب تجهیزات عمده سیستم تهویه ارائه شده است.

مطالب ارائه شده در پیوست‌های نشریه، جنبه راهنمای طراحی سیستم تهویه را دارند که به صورت غیر الزامی، می‌تواند کنار سایر منابع و مراجع در فرایند طراحی مورد استفاده قرار گیرند.

در بخش نخست پیوست شماره یک، معیارهای محیطی آسایش افراد حاضر در فضاهای عمومی قطار شهری شرح داده شده و پس از آن، روش‌ها و ملاحظات تعیین محدوده شرایط آسایش در کارکرد نرمال، ازدحام و اضطرار ارائه شده است.

در پیوست شماره دو، برخی از پیکربندی‌های رایج در طراحی سیستم تهویه مرور شده و در انتهای فصل، مبانی حاکم بر طراحی ارائه گردیده است.

پیوست شماره سه به بیان چارچوب محاسبات استاتیک و دینامیک، محاسبه سرعت بحرانی و گذر حجمی هوای تهویه پرداخته است.

در پیوست شماره چهار نیز، نمونه‌ای از الزامات مربوط به مشخصات فنی تجهیزات اصلی سیستم تهویه برشمرده شده است.

۱-۴- ملاحظات کلی

در تدوین این نشریه، سه حالت بهره‌برداری عادی و شرایط اضطراری بروز حریق و همچنین توقف قطار در تونل (انسداد ترافیکی) مدنظر قرار گرفته و ضوابط طرح، الزامات انتخاب تجهیزات و مصالح، سناریوهای مختلف تهویه و تهویه مطبوع، عملکرد سیستم‌های کنترلی و... برای این حالت‌ها ارائه خواهد شد.

عملیات عادی بهره‌برداری شامل سیر قطارها در مسیر ریلی و توقف آن‌ها طبق برنامه در ایستگاه‌ها است. عملکرد پیستونی قطارهای متحرک، ابزار اصلی برای تامین جریان تهویه و حفظ شرایط محیطی قابل قبول در تونل‌ها است. از آنجایی که عملیات عادی، بخش عمده‌ای از کارکرد سیستم تهویه را به خود اختصاص می‌دهد، بایستی تلاش قابل توجهی برای بهینه سازی کارکرد این تجهیزات انجام گیرد.

حالت ازدحام ترافیکی ناشی از بروز تأخیر یا مشکلات عملیاتی در مسیر بوده که مانع از اعزام عادی قطارها می‌شود، در این صورت ممکن است قطارها در ایستگاه متوقف شده و یا در طول مدت عملیات ترافیکی در تونل توقف نمایند و بدلیل عملکرد قطارها و بویژه سیستم تهویه مطبوع آن‌ها، دمای تونل به تدریج بالا رود. این مدت زمان تأخیر معمولاً از ۳۰ ثانیه

تا ۲۰ دقیقه متغیر می‌باشد، اگرچه ممکن است گاهی اوقات تأخیرهای طولانی‌تری نیز تجربه شود. عمدتاً در طول فرایند ازدحام عملیات ترافیکی، تخلیه مسافران انتظار نمی‌رود و لذا در این سناریوی طراحی، عملکرد سیستم تهویه، بایستی بر استفاده از تهویه اجباری (مکانیکی) به منظور حفظ دمای تونل در محدوده قابل قبول و به منظور ادامه عملکرد سیستم تهویه مطبوع قطارها متمرکز شود. در نتیجه هدف اولیه و اصلی از تهویه اجباری در شرایط انسداد ترافیکی، حفظ آسایش مسافران با استفاده از سیستم تهویه مطبوع وسیله نقلیه برای جلوگیری از تخلیه مسافران قطار می‌باشد.

عملیات اضطراری در نتیجه بروز آتش‌سوزی در تونل یا ایستگاه‌های قطار شهری رخ می‌دهد. شرایط اضطراری آتش‌سوزی شامل آتش‌سوزی سطل زباله، آتش‌سوزی ادوات برقی در مسیر، آتش‌سوزی قطار و یا حتی هرگونه آتش‌سوزی عمدی می‌باشد. برخی از آتش‌سوزی‌ها ممکن است کل واگن‌های یک قطار را نیز درگیر نمایند.

جدی‌ترین وضعیت اضطراری آتش‌سوزی، مربوط به قطار متوقف شده در تونل است. این رویداد می‌تواند ترافیک را مختل نموده و نیاز به تخلیه مسافران را در بر داشته باشد. برای این مورد، سیستم تهویه تونل به منظور مدیریت و کنترل جریان دود و امکان تخلیه ایمن مسافران و ورود امن پرسنل امداد و نجات مورد نیاز است. علیرغم احتمال کم بروز حریق در تونل، آتش‌سوزی تونل‌ها به دلیل پیامدهای بالقوه ایمنی آن‌ها بایستی در فرایند طراحی مد نظر گرفته شوند.

کنترل حرکت دود در تونل از مهمترین مسائل طراحی ایمنی در تونل است. در فرایند هدایت دود در زمان حریق هدف اولیه ایجاد مسیری عاری از دود برای خروج افراد از محل وقوع حریق و همچنین تأمین دبی مورد نیاز هوا برای جلوگیری از برگشت لایه‌های دود در مسیرهای فرار مسافران است. با توجه به مدت زمان مورد نیاز برای مقابله و اطفای حریق، کارکرد تجهیزات و انتخاب مصالح مناسب تهویه مورد توجه ویژه قرار می‌گیرد.

به دلیل پیوستگی تونل با فضای سکوها و از طریق سکوها با سایر فضاها و ارتباطات عمودی و افقی در ساختمان ایستگاه، ایجاد طراحی یکپارچه در فضاهای عمومی و تونل برای مدیریت حرکت دود مورد نیاز می‌باشد. ضوابط مرتبط با طراحی سیستم تهویه به همراه معیارهای حاکم بر انتخاب رویه کنترل مسیر دود و ارائه تعاریف و روابط مورد استفاده در محاسبات استاتیکی، شبیه‌سازی یک بعدی و مدل سازی‌های سه بعدی در این ضابطه گردآوری می‌شوند.

با توجه به اینکه تدوین ضوابط دقیق طراحی برای تونل‌ها در دستورکار موسسات و شرکت‌های مطرح داخلی و بین‌المللی مدنظر می‌باشد و پیوسته در قالب مقالات جدید، نتایج تحلیل‌های مهندسی با لحاظ نمودن تجربیات عملی، تحلیل اطلاعات استخراج شده از سوانح روی داده و مقایسه رویکردهای کارایی‌محور در طراحی با روش‌های اتکای صرف به ضوابط تجویزی، در راستای بهینه کردن این ضوابط ارایه می‌شود، در پیوست این نشریه تلاش بر این است که در کنار پرداختن به برخی از ضوابط و چارچوب‌های موجود، به طور مختصر، به عناوینی از مقالات و مسیر تحقیقات اشاره شده است.

۱-۵- تعاریف و اصطلاحات

در این بخش، واژه‌های کلیدی نشریه همراه با معادل‌های انگلیسی برخی از آنها ارائه گردیده است.

اثر پیستونی[۱]

اثر قطار در حال حرکت بر روی هوای در تونل مشابه پیستونی است که هوا را در داخل یک استوانه به جلو رانده و در کل باعث ایجاد امواج فشاری در تونل می‌گردد.

ترمز بازیاب انرژی[۲]

سیستم ترمزی که در نتیجه تبدیل موتورهای الکتریکی قطار به ژنراتور از طریق سیستم کنترل، امکان بازیابی انرژی الکتریکی در فرایند ترمزگیری را فراهم می‌آورد.

دمپر[۳]

وسیله‌ای که جریان هوا یا محصولات احتراق و مقدار آن‌ها را با فرمان دستی یا خودکار تنظیم می‌کند.

دیفیوزر[۴]

یک کانال ساکن است که با ازدیاد سطح مقطع در طول آن، باعث کاهش سرعت سیال و افزایش فشار می‌گردد.

رکتیفایر[۵]

وسیله‌ای است که به جهت کاهش تلاطم جریان هوا ممکن است در ساختار سامانه تهویه به کار رود.

زمان توقف[۶]

مدت زمانی (به واحد ثانیه) که قطار در سکوی ایستگاه توقف می‌نماید.

سایلنسر

وسیله‌ای است که به جهت کاهش نویز و سر و صدای ناشی از عملکرد تجهیزات تهویه ممکن است در ساختار سامانه تهویه به کار رود.

سرعت بحرانی[۷]

حداقل سرعت پایای حرکت هوای تهویه به سمت حریق در مسیر یا گذرگاه محصور که برای کنترل لایه برگشتی در محل حریق لازم است، به طوری که یک محیط قابل تحمل در طول مسیر خروج از بالادست حریق و رسیدن به موقعیت‌های ایمن حفظ شود.

---

[۱] Piston effect

[۲] Regenerative braking

[۳] Damper

[۴] Diffuser

[۵] Rectifier

[۶] Dwell Time

[۷] Critical Velocity

سکوی جزیره‌ای[۱]

سکویی که تردد قطار در هر دو طرف آن امکان‌پذیر است.

سکوی یک‌طرفه

سکویی که تردد قطار در یک طرف آن امکان‌پذیر است.

سوزن[۲]

وسیله‌ای است که امکان تغییر از یک مسیر به مسیر دیگر را در تقاطع‌ها جهت ماشین‌های ریلی فراهم می‌سازد.

کراس پاساژ[۳]

مسیر دسترسی مابین تونل‌های یک طرفه در طرح تونل‌های دوقلو می‌باشد.

لایه برگشتی (برگشت دود)[۴]

حرکت معکوس دود و گازهای داغ برخلاف جهت حرکت هوای تهویه است.

ناوگان

رام‌های قطار که در شبکه قطار درون شهری جهت جابه‌جایی مسافر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هدوی[۵]

سرفاصله زمانی حرکت بین دو قطار متوالی را هدوی می‌گویند.

۱-۶- فرایند کنترل محیطی در فضای قطار شهری

اصطلاح "محیط" در فضای قطار شهری، عموماً دربرگیرنده همه پدیده‌هایی است که بر آسایش مسافران و پرسنل مستقر تأثیر می‌گذارند. دمای هوا، رطوبت و حرکت هوا، اهمیت ویژه‌ای در سطح آسایش افراد دارند، به غیر از این موارد، "محیط" همچنین شامل سر و صدا، گرد و غبار، بو و نوسانات گاهاً آزاردهنده فشار هوا نیز می‌باشد. درجه حرارت و سرعت هوا در فضاهای قطار شهری، عمدتاً با کنترل پارامترهای ساختاری عمده مانند هندسه ایستگاه، هواکش‌ها و پیکربندی هندسی خط و چیدمان آن و همچنین با نصب تجهیزات کنترل محیطی مانند تهویه مکانیکی تنظیم می‌گردند.

فضاهای قطار شهری، از دیدگاه خصوصیات محیط، ممکن است به چهار حوزه مجزا اما مرتبط تقسیم‌بندی گردد: فضاهای عمومی و غیر عمومی در ایستگاه‌ها، ناوگان قطار و مسیر تردد قطار. اهدافی که در مقوله کنترل محیط در تمامی این فضاها باید تحقق یابند عبارتند از: اولا ایجاد محیطی مناسب برای مراجعین و همچنین پرسنل عملیاتی و ثانیا حذف مقدار لازم

---

۱ Insular Platform

۲ Switch

۳ Cross passageway

۴ Back layering

۵ Headway

از حرارت تولید شده در کارکرد عادی سیستم به طوری که از طول عمر طراحی تجهیزات کاسته نشده و علاوه بر آن، میزان گرد و غبار و بوها در محیط کنترل گردد. ثالثا در صورت وقوع آتش‌سوزی یا موارد اضطراری مشابه، برای دفع دود و تامین هوای تازه برای افراد حاضر و پرسنل آتش‌نشانی و همچنین کنترل دمای محیط راهکار مناسب اتخاذ گردد.

در خطوط زیر زمینی قطار شهری، منابع اصلی تولید و افزایش حرارت شامل ناوگان قطار، تجهیزات ثابت مانند تأسیسات تونل، تولید حرارت متابولیک بدن انسان‌ها و جریان هوای ورودی، بسته به دمای آن می‌باشد که ظرفیت و نوع سیستم تهویه تونل بایستی متناسب با این موارد طراحی گردد و در این میان، عمدتاً حرارت آزاد شده از قطار در فرایند سیر در تونل، اصلی‌ترین منبع تولید گرما می‌باشد. بخشی از این حرارت تولیدی ممکن است در صورت وجود اختلاف بین دمای هوای داخل تونل و دمای بدنه تونل توسط زمین اطراف جذب گردیده و بخش دیگر در اثر حرکت پیستونی قطار در تونل از طریق کیوسک‌ها به بیرون منتقل گردد ولیکن برای ایجاد شرایط محیطی قابل قبول در تونل در کارکرد عادی، بایستی پس از شناسایی و محاسبه هر یک از فاکتورهای تولید و دفع گرما، مکانیزم مناسب تهویه جهت دفع حرارت مازاد (در صورت وجود) اتخاذ گردد.

اهمیت تجهیزات تهویه تونل در شرایط اضطرار، بدلیل حفظ جان مسافرین و ایجاد مسیر امن جهت تخلیه آنان، در مقایسه با عملکرد نرمال چشمگیر می‌باشد.

اساساً فرایند طراحی برای سیستم تهویه مطبوع در محیط خطوط قطار شهری، سه عامل اصلی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد: معیارها، تحلیل و کنترل. بررسی این عوامل را می‌توان در قالب سه سوال کلی مطرح نمود:

۱) محیط بهینه برای مسافران، پرسنل و تجهیزات در مترو چیست؟

۲) چه فاکتورهایی بر محیط تأثیر می‌گذارند؟ (شامل ماهیت دینامیکی، منابع و مقادیر گرما و جریان هوا)

۳) کدام استراتژی و تجهیزات می‌توانند برای کنترل فاکتورهای تأثیرگذار بر روی محیط به منظور رسیدن به معیارهای مطلوب طراحی به کار گرفته شوند؟

پاسخ‌گویی به این سؤالات، برای ایجاد یک سیستم بهینه با ظرفیت مناسب در چارچوب معیارهای طراحی، به‌تنهایی کافی نیست، بلکه اهداف طراحی باید دربرگیرنده نحوه استفاده از منابع دسترس‌پذیر، هزینه‌های کلی عملکرد سیستم، انرژی مصرفی و راندمان بهینه تجهیزات نیز باشد.

۱-۶-۱- معیارها

معیارهای در نظر گرفته شده بر نوع و ظرفیت سیستم‌های کنترل محیطی مورد نیاز، اندرکنش و وابستگی سیستم کنترل محیطی با دیگر مولفه‌ها مانند ناوگان، ایستگاه‌ها، سناریوهای بهره‌برداری و... تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال در تعیین معیارهای دمایی فضای عمومی یک ایستگاه یا یک بخش از یک خط زیرزمینی، طبیعت ناپایای قرارگیری افراد در خارج و داخل قسمت‌های مختلف محیط مترو بر طراحی سیستم، اثرگذار است.

محیط در فضای قطار شهری فاکتورهای زیادی را در برمی‌گیرد که شامل فردی که از سیستم استفاده می‌کند و محیط فیزیکی اطراف می‌شود. محیط فیزیکی اطراف خود شامل فاکتورهایی مانند دما، رطوبت، حرکت هوا، کیفیت هوا، تغییرات ناگهانی فشار، صدا و تراز ارتعاشات می‌باشد. ظرفیت انسان برای تطبیق با شرایط محیطی، وابسته به خصوصیات افراد مختلف؛ تابعی از سن، شغل، کارایی اعضای بدن و یا ناتوانی جسمی، درجه سازش با محیط می‌باشد. صدا، آلودگی‌ها، ارتعاش و بوهای اغلب ناخوشایند نیز از جمله فاکتورهای محیطی نامطلوب در داخل فضاهای قطار شهری هستند.

موضوع تبادل گرما بین انسان و محیط اطراف، از جنبه طراحی مهندسی ارزیابی می‌شود. عمده این ارزیابی‌های محیطی بر اساس پارامترهای حرارتی همچون دما و رطوبت (به عبارتی دمای مرطوب) می‌باشد.

میزان تحمل محیط‌های گرم توسط افراد مختلف نیز ممکن است از طرق متفاوتی سنجیده شود که بخشی مبتنی بر ارزیابی موارد به شرح زیر می‌باشد:

۱) درجه نارضایتی ایجاد شده، ۲) بازه زمان سپری شده قبل از شروع علائم منفی فیزیولوژیکی و روانی، ۳) تفاوت در میزان ناراحتی که توسط افراد مختلف احساس می‌شود.

به طور متوسط، برای افراد مختلف مدت زمانی که طول می‌کشد تا فرد به تعادل دمایی و یا یک حالت پایا با شرایط آسایش یا عدم آسایش برسد، حدود ۶ دقیقه می‌باشد. در ساعت‌های ازدحام که دما به حدود بیشینه خود می‌رسد، مسافر قبل از آنکه به تعادل دمایی با محیط ایستگاه برسد، احتمالاً طی بازه زمانی حدود ۳ تا ۴ دقیقه وارد قطار می‌شود. در این حالت طراحی شرایط محیطی ایستگاه مطابق با شرایط آسایش دیگر ساختمان‌ها (معمولاً بازه دمایی در محدوده ۱۸ الی ۲۴ درجه سانتیگراد) غیرضروری و غیراقتصادی به نظر می‌رسد، چرا که قطار می‌تواند با به‌کارگیری سیستم تهویه مطبوع، رنج دمای مناسب در زمان حضور مسافران را تأمین نماید.

همچنین دمای داخل تونل باید محیطی قابل‌تحمل برای پرسنل عملیاتی و نیز محدوده قابل‌قبول جهت اطمینان از صحت کارکرد تجهیزات را ایجاد نماید، چرا که عموماً خرابی تجهیزات به دلیل محدوده دمای بالای هوای محیط، غلظت بالای ذرات غبار با بار الکترواستاتیک و رطوبت نسبتاً بالا رخ می‌دهد.

هنگامی که شرایط آسایش مسافرین در محیط قطار شهری مورد بحث قرار می‌گیرد، پرسش اینجاست که شرایط آسایش محیطی برای مسافران چیست؟ این‌که مسافران چه شرایطی را ترجیح می‌دهند، به چه شرایطی عادت دارند و چه شرایطی را تاب می‌آورند، چارچوب تعیین معیارهای آسایش را شکل می‌دهد. طراحان تهویه مطبوع پیشنهاد می‌کنند که در فضاهای دارای تهویه مطبوع برای رسیدن به بیشترین درجه از آسایش مطلوب است که در فصل گرم، دما ۱۰ تا ۱۵ درجه فارنهایت (۵/۵ تا ۸/۳ درجه سانتیگراد) کمتر از دمای محیط بیرون باشد. در تابستان، سرمایش ناگهانی مسافران در هنگام ورود به فضاهای دارای تهویه مطبوع عمدتاً ناخوشایند می‌باشد و این مسئله هنگام ورود مسافران از سکو به واگن‌ها نیز باید در نظر گرفته شود. زیرا کارایی مناسب تهویه مطبوع واگن‌ها هنگامی احساس خواهد شد که اختلاف دمای بین سکو و واگن‌ها خیلی زیاد نباشد و مسافران هنگام ورود یا خروج از واگن‌ها، دچار شوک حرارتی نشوند. از آنجا که مسافران مدت زمان

کمی را در سکوها می‌گذرانند، دمای مطلوب برای سکوی ایستگاه، بین دمای محیط بیرون و واگن دارای سیستم تهویه مطبوع می‌باشد.

۱-۶-۲- تحلیل

دومین گام در فرایند طراحی سیستم تهویه تونل، تحلیل است. المان اصلی تحلیل، شناسایی بارهای حرارتی و موازنه حرارت می‌باشد. برای انجام این تحلیل نیاز است که بارهای حرارتی ورودی شناسایی شده و مقدارشان نیز مشخص شود. در بین تمامی بارهای حرارتی موجود، همان‌گونه که گفته شد مهم‌ترین آن‌ها، حرارت دفع شده ناشی از کارکرد قطار است و به‌عبارت دیگر، تحلیل بایستی مشخص کند که توزیع بارهای حرارتی چگونه است و چطور جریان هوای ایجاد شده توسط اثر پیستونی و/یا عملکرد فن‌ها و/یا سیستم تهویه مطبوع، بخش باقیمانده حرارت را پراکنده یا خارج می‌نماید.

ارزیابی حرارت ورودی و خروجی برای تخمین ظرفیت سیستم کنترل محیطی مورد نیاز، از آنجا که شامل تحلیل‌های آئرودینامیکی و ترمودینامیکی وابسته به یکدیگر می‌باشد، یک فرایند نسبتاً پیچیده بوده که محاسبه آن برای خطوط قطار شهری نیز منحصربه فرد است و در این فرایند بایستی تأثیرات سایر تجهیزات متروسیستم نیز مد نظر قرار گیرد.

فاز تحلیل فرایند طراحی، صرفاً یک عملیات محاسباتی ساده نبوده بلکه این فاز، یک فرایند برگشتی و تکرارپذیر است که به‌طور پیوسته ادامه یافته تا با توجه به ملاحظات طراحی به سرانجام مطلوب رسد. در این رهیافت تکرار پذیر، میزان بررسی و ارزیابی باید رابطه‌ای مناسب با دیگر بررسی‌های گسترده در کل سیستم داشته باشد.

درصورتی‌که حرارت تولیدشده در مسیر مترو بیشتر از ظرفیت محیط فیزیکی اطراف (شامل بدنه تونل و خاک) و سیستم تهویه برای خارج‌سازی آن باشد (در هنگامی‌که دمای محیط خارج بیشتر از دمای طراحی مترو باشد)، دمای هوا در داخل مترو از حد قابل قبول بالاتر می‌رود. بنابراین برای شروع تحلیل، لازم است که منابع حرارتی و راهکارهای دسترس‌پذیر به‌خوبی شناسایی شوند.

قسمتی از انرژی الکتریکی وارد شده به تجهیزات داخل تونل در نهایت به گرما تبدیل می‌شود که بزرگترین منبع تولید این حرارت، کارکرد قطارها و به طور عمده آن در سیستم‌های رانش، ترمز، تهویه مطبوع و تجهیزات جانبی قطار و همچنین تلفات سیستم برق‌رسانی و اتلاف ناشی از اصطکاک و نیروی درگ می‌باشد.

با توجه به اینکه مدل‌های ساده دستی جریان هوا و توزیع گرما در پیکربندی‌های هندسی پیچیده‌تر مرتبط با سیستم‌های حمل و نقل قطار شهری زیرزمینی، عمدتاً پاسخگوی ارزیابی دقیق و تحلیل سیستم نیست، لذا برای فرایند تحلیل نیاز به یک مدل کامپیوتری می‌باشد که بتواند به طور مداوم جریان هوای پیستونی ایجاد شده توسط مجموعه‌ای از قطارها را که در مسیر قطار شهری حرکت می‌کنند و با شفت‌ها و اجزای سیستم تهویه در هم آمیخته هستند را ارزیابی نماید.

عملکرد موفقیت‌آمیز مدل‌های کامپیوتری نشان داده است که شبیه‌سازی جریان هوای ناپایدار و شرایط محیطی نوسانی در یک خط قطار شهری امکان‌پذیر بوده و لذا استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری، به عنوان ابزار طراحی برای کنترل محیط مترو امکان‌پذیر و بعضاً ضروری می‌باشد.

در شبیه‌سازی کامپیوتری مربوط به فرایند طراحی سیستم تهویه، به طور معمول از مدل‌های یک‌بعدی و سه‌بعدی استفاده می‌گردد. مدل‌سازی یک‌بعدی، تأثیرات آیرودینامکی و ترمودینامیکی شبکه تونل‌ها، شفت‌ها و ایستگاه‌ها را در شرایط حرکت عادی قطارها در زمان‌های پیک بهره‌برداری و خارج از آن و با لحاظ نمودن اثرات پیستونی حرکت قطار و تبادلات حرارتی به اتمسفر از طریق شفت‌های تهویه و بدنه تونل و همچنین سناریوهای اضطراری در شرایط مختلف را شبیه‌سازی می‌نماید. در سناریوهای اضطراری آتش‌سوزی، حریق می‌تواند در موقعیت‌های مختلفی قرار گیرد.

در مدل‌سازی یک‌بعدی، نرخ جریان هوا در اثر عملکرد یک یا چند دستگاه فن در ایستگاه‌ها و شفت‌های میان‌تونلی قابل بررسی است و لذا امکان چاره اندیشی سناریوهای خرابی یک سامانه تهویه یا تغییر تعداد یونیت‌های تهویه بوسیله طراح در فرایند ارزیابی سیستم بهینه فراهم آمده است.

از جمله نرم‌افزارهای شبیه‌سازی یک‌بعدی موجود می‌توان از SES، ThermoTun و IDA Tunnel نام برد.

یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در این زمینه، SES (Subway Environment Simulation) می‌باشد که امکان طراحی و ارزیابی شرایط محیطی در خطوط قطار شهری زیرزمینی را میسر ساخته و به طور قابل توجهی در طراحی سیستم تهویه خطوط قطار شهری در کشور به کارگرفته شده است.

در این نرم‌افزار، داده‌های مربوط به دما و رطوبت هوای بیرون، اطلاعات مربوط به مشخصات قطار و مسیر و همچنین داده‌های آئرودینامیکی (از جمله اطلاعات فن‌ها و شفت‌های تهویه) به عنوان ورودی وارد شده و گرمای تولید شده و اثرات چاه حرارتی زمین اطراف، سیستم‌های تهویه مطبوع، تبادل هوا و حرارت بین تونل و هوای آزاد پیش‌بینی می‌گردد و لذا نتایج نهایی اطلاعاتی شامل دما، رطوبت و سرعت هوا را به عنوان خروجی استراتژی تهویه اتخاذ شده در سراسر سیستم نشان می‌دهد.

برنامه SES شامل چهار توالی محاسباتی وابسته به یکدیگر است:

- ماژول عملکرد قطار،
- ماژول آیرودینامیک،
- ماژول دما/رطوبت
- ماژول کنترل محیطی و چاه حرارتی.

علاوه بر این، نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی اثرات آیرودینامیکی و ترمودینامیکی حریق را نیز فراهم می‌کند. این زیربرنامه‌ها از مجموعه‌ای مشترک از پارامترهای توصیفی سیستم در تعامل با یکدیگر استفاده نموده و به طور پیوسته نتایج شبیه‌سازی پدیده‌های دینامیکی را ارائه می‌دهد که بر کیفیت محیط مترو حاکم است. ماژول عملکرد قطار، سرعت، شتاب، موقعیت و دفع گرمای قطارهای حاضر در مسیر را به صورت پیوسته تعیین می‌کند. زیربرنامه آیرودینامیکی از پارامترهای محاسبه شده ناوگان، همراه با آرایش هندسی سیستم و داده‌های عملکرد تهویه، برای محاسبه پیوسته مقادیر سرعت هوا در ایستگاه‌ها، تونل‌ها و شفت‌های تهویه استفاده می‌نماید. به نوبه خود زیربرنامه دما/رطوبت از پارامترهای محاسبه‌شده جریان

هوا همراه با داده‌های انتشار گرمای تولید شده ناوگان (در زیربرنامه عملکرد قطار) برای محاسبه توزیع گرمای محسوس و نهان در سراسر سیستم استفاده می‌کند.

بنابراین نرم افزار قادر به تعیین مداوم دما و رطوبت در همه موقعیت‌ها است. در نهایت، از سرعت‌های هوا محاسبه شده در زیربرنامه آیرودینامیکی توسط زیربرنامه عملکرد قطار برای تعیین جریان هوا در مجاورت قطارها استفاده می‌شود و می‌تواند ابزاری برای محاسبه درگ آیرودینامیکی وسیله نقلیه را فراهم نماید.

داده‌های تهویه و بار حرارتی برآورد شده در این زیربرنامه‌ها، همراه با اطلاعات تغییرات روزانه و سالانه دمای محیط بیرونی، توسط زیربرنامه کنترل محیطی و چاه حرارتی برای محاسبه تبادلات گرمایی بلند مدت بین هوای مترو و سازه و خاک اطراف تونل و همچنین در تعیین ظرفیت سرمایش مورد نیاز برای برآورد شرایط طراحی استفاده می‌گردد.

در نرم‌افزار SES، هندسه مسیر به بخش‌های زیر تقسیم‌بندی می‌گردد:

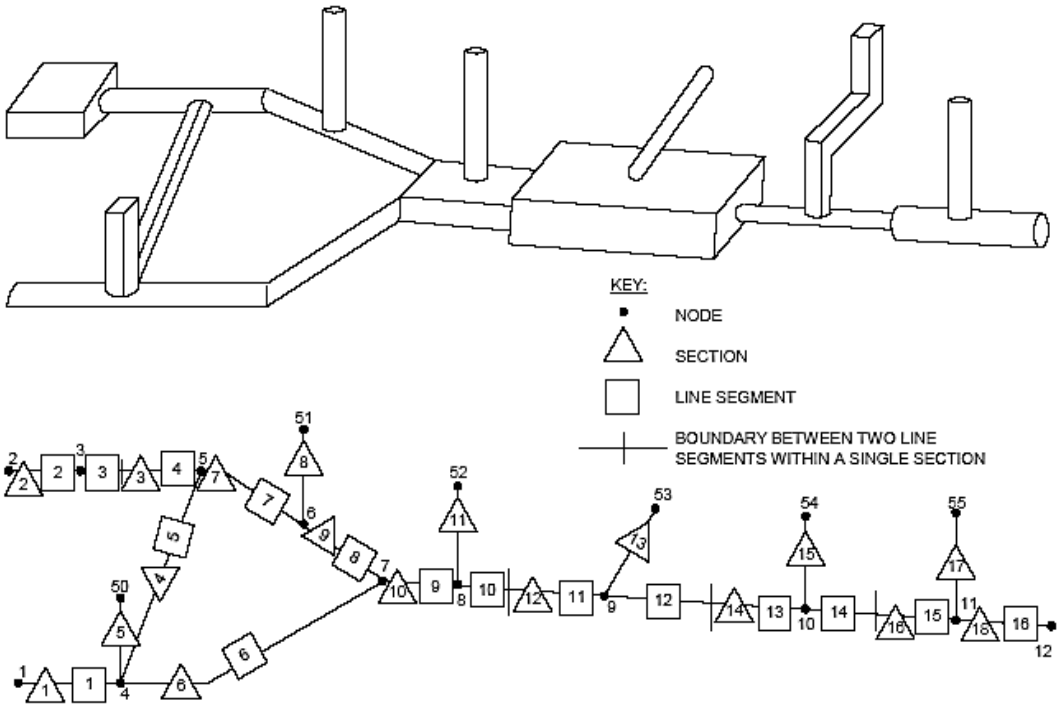
۱) سکشن‌ها که جریان هوا در آن‌ها بایستی یکنواخت باشد،

۲) گره‌هایی که نشان دهنده نقاط اتصال سکشن‌ها هستند،

۳) سگمنت‌ها که ویژگی‌های هندسی یکنواخت دارند (و در نتیجه سرعت هوا یکنواخت دارند)

۴) زیرسگمنت‌ها[1] که زیر مجموعه سگمنت‌ها بوده و فرض می‌شود شرایط دمایی و رطوبت یکنواختی دارند. این چهار ویژگی هندسی (سکشن‌ها، گره‌ها، سگمنت‌ها و زیرسگمنت‌ها) ارکان اصلی سیستم شبیه‌سازی شده مسیر مترو هستند.

شکل (۱-۱)، نمونه‌ای از مدل‌سازی یک‌بعدی یک قسمت از مسیر زیر زمینی را نشان می‌دهد.



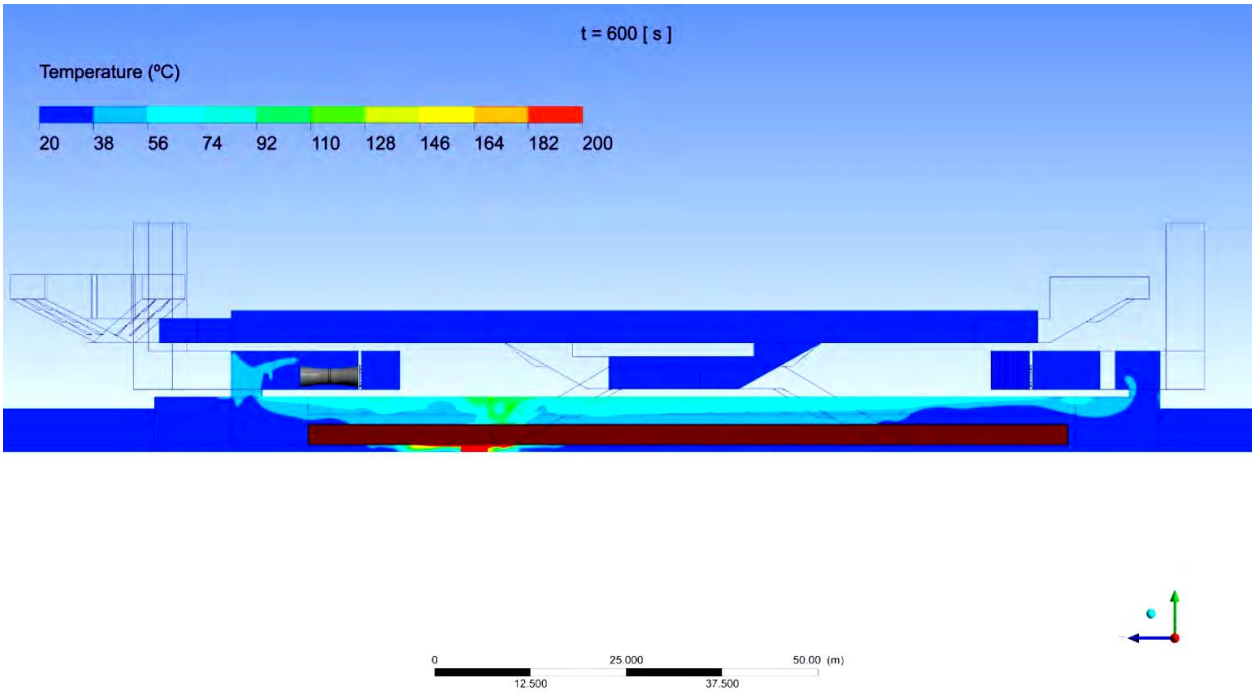
[1] Subsegments

شکل ۱-۱: نمونه‌ای از مدل‌سازی یک‌بعدی یک قسمت از مسیر زیر زمینی

در فرایند طراحی سیستم تهویه تونل، از شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان، جهت محاسبه ظرفیت و همچنین بسط و توسعه مفاهیم تهویه نرمال، ازدحام و اضطرار و ارزیابی سیستم تهویه مناسب استفاده شده و از شبیه‌سازی سه‌بعدی غالباً به منظور ارزیابی و بررسی کارایی سیستم در موقعیت‌هایی که توسط طراح به عنوان نقاط بحرانی شناخته شده‌اند و اعتباربخشی به طراحی و بررسی بیشتر و دقیق‌تر جوانب طراحی که توسط ابزارهای ساده‌تر قابل پیش‌بینی نبوده‌اند، استفاده می‌شود، چرا که به کارگیری مدل‌های معتبر CFD می‌تواند دید گسترده‌تری نسبت به رفتار احتمالی دود در هندسه مسیر و بویژه در همسایگی آتش ایجاد نماید. بنابراین شبیه‌سازی CFD علاوه بر اعتباربخشی و صحت‌سنجی روند طراحی پیش‌بینی شده توسط محاسبات استاتیک و شبیه‌سازی یک بعدی، می‌تواند به منظور بررسی نقاط بحرانی طراحی و صحت‌سنجی آن نیز مورد استفاده قرار گیرد.

روند انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی بر پایه تولید هندسه ساختمان و مدل سه بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای CAD، تولید شبکه و شبکه‌بندی، تنظیم و اجرای شبیه‌سازی می‌باشد و پس از انجام شبیه‌سازی بایستی خروجی شبیه‌سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

شکل (۱-۲) یک نمونه خروجی شبیه‌سازی سه‌بعدی از یک سناریوی حریق در سکوی ایستگاه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲: نمونه‌ای از خروجی مدل‌سازی سه‌بعدی سناریوی حریق در سکوی ایستگاه

از جمله نرم‌افزارهای شناخته شده برای انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی می‌توان از ANSYS FLUENT، CFX و FDS نام برد.

۱-۶-۳- کنترل

انتخاب سیستم کنترل، مرحله دیگر فرآیند طراحی می‌باشد، در این مرحله، انتخاب سیستم کنترل محیطی شامل سیستم تهویه یا تهویه مطبوع مناسب که بیشترین اثر را در رسیدن به معیارهای رضایت‌بخش و متناسب با شرایط موجود دارد، توسط طراح صورت می‌پذیرد، اگرچه همانگونه که گفته شد، فرآیند طراحی در این مرحله به پایان نرسیده و بهینه‌سازی به صورت جامع و با در نظرگیری کلیه فاکتورهای اثرگذار بر روی انتخاب سیستم، به طور معمول بایستی در یک فرایند تکرارپذیر به انجام رسد. بنابراین آگاهی از تجهیزات کنترل محیطی در دسترس، کاربرد و ویژگی‌های هر یک و شناسایی عوامل تأثیرگذار، برای ایجاد راه‌حل بهینه مورد نیاز است. همچنین به منظور دستیابی به سیستم مناسب تهویه با ظرفیت بهینه، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز در مراحل "تحلیل" و "کنترل" سیستم تهویه امری اجتناب‌ناپذیر بوده و عملاً تفکیک فرایندهای "تحلیل" و "کنترل" از همدیگر راهگشا نمی‌باشد.

۱-۷- مراحل طراحی سیستم تهویه ایستگاه‌ها و تونل

روند انجام فرایند طراحی سیستم کنترل محیطی در ایستگاه‌ها و تونل به شرح ذیل پیشنهاد می‌گردد، همچنین مراحل اعلامی بسته به ماهیت و ویژگی‌های هر پروژه طراحی ممکن است مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد.

شکل ۱-۳: مراحل طراحی سیستم کنترل محیطی

لازم به ذکر است، فرایند طراحی با بازگشت به مرحله مناسب و تکرار فرآیند و با استفاده از استراتژی‌ها و معیارهای موثر و در نظرگیری جوانب مختلف بهینه می‌گردد و گاهی اوقات، الزامات خاص برای یک پروژه، ممکن است انحراف جزئی از این رویکرد را الزام نماید.

- تعیین معیارهای طراحی و تبیین الزامات اولیه

شناسایی، مطالعه و تبیین استانداردها، ضوابط و معیارهای طراحی جهت طرح‌ریزی و مشخص نمودن چارچوب طراحی و تعیین ساختار کلی فرایند انجام کار، بایستی در این مرحله انجام پذیرد.

این مرحله شامل تبیین روش‌ها و روند تعیین دما، کیفیت هوا، سرعت هوا و تغییرات سریع فشار هوا نیز می‌باشد که مجموعاً معیارهای محیطی آسایش انسانی را تعیین می‌نمایند. معیارها برای کارکرد نرمال، باید بر اساس محدوده دمای محیط خارج که سیستم مترو تجربه می‌کند و همچنین ایجاد شرایط محیطی قابل تحمل برای شرایط اضطرار تعیین شوند. همچنین مطالعه طراحی‌های مشابه پیشین، ارزیابی نقاط ضعف و قوت آن‌ها و بررسی پیشرفت‌های علمی و اجرایی در حوزه تهویه نیز در این مرحله می‌تواند انجام گیرد.

- جمع‌آوری اطلاعات فیزیکی و عملیاتی متروسیستم

جمع‌آوری اطلاعات فیزیکی و عملیاتی متروسیستم و مسیر، شامل طول ایستگاه‌ها، مشخصات قطار، فاصله ایستگاه‌ها، سرفاصله حرکت قطارها، مشخصات مسیر و سایر اطلاعات مورد نیاز می‌باشد که در این گام از طراحی بایستی تدوین گردند.

- تعیین شرایط محیط طرح خارج

در مراحل اولیه طراحی سیستم کنترل محیطی، شرایط آب و هوایی فصول مختلف سال باید بر اساس دمای خشک و حباب خیس ایجاد شود، بدین منظور می‌توان از اطلاعات به‌روز هواشناسی و با تکیه بر روش‌های آماری، اطلاعات مورد نیاز را استخراج نمود.

- تعیین بارهای حرارتی وارد شده در سیستم و انجام محاسبات استاتیک

عمدتاً حرارت تولید شده در اثر کارکرد قطار و در کنار آن، عملکرد تجهیزات ثابت و سایر منابع تولید حرارت از جمله گرمای متابولیک افراد حاضر در محیط‌های قطار شهری بوده که بایستی در این مرحله مورد شناسایی قرار گرفته و با انجام محاسبات، برآورد کلی از حرارت تولید شده یا وارد شده به سیستم را برای حالت نرمال محاسبه نمود.

توضیح اینکه، علیرغم ماهیت متحرک قطار در تونل، محاسبات استاتیک با فرض عدم حرکت قطار انجام می‌پذیرد و لذا برای بررسی نحوه توزیع بارحرارتی، از فرمول‌های ریاضی و بر مبنای مفروضات و تجربیات پیشین استفاده می‌گردد و از این‌رو محاسبات استاتیکی بار، تا حدی از دقت پایین‌تری نسبت به محاسبات دینامیک توسط نرم‌افزارها و بر پایه مدل‌سازی برخوردار است.

- ارزیابی سیستم‌های تهویه و/یا تهویه مطبوع در دسترس با توجه به مقادیر بارهای حرارتی

پس از برآورد بار حرارتی، می‌توان گزینه‌های مختلف سیستم‌های تهویه و یا تهویه مطبوع دسترس‌پذیر را جهت پیش‌برد فرایند طراحی در شرایط کارکرد نرمال ارزیابی و نهایتاً انتخاب نمود. همچنین بخشی از حرارت تولید شده را می‌توان با اعمال تغییرات در طراحی کاهش داده و یا حذف نمود. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از سیستم تخلیه در تراز زیرسکو (UPE[1]) اشاره نمود که بایستی در این مرحله از طراحی، این راهکارها مورد ارزیابی اولیه قرار گیرند.

لذا انجام محاسبات استاتیک، تعیین تیپ کلی سامانه‌های تهویه نرمال و تخمین ظرفیت حدودی آن را میسر می‌سازد.

[1] Under Platform Exhaust

- انجام شبیه‌سازی یک‌بعدی، تعیین سرعت‌های بحرانی هوا و تعیین ظرفیت و مشخصات سیستم تهویه

شبیه‌سازی یک‌بعدی برای سناریوهای نرمال، ازدحام و اضطرار ناشی از حریق بایستی صورت پذیرد. در شبیه‌سازی یک‌بعدی حالت نرمال، ممکن است سیستم‌های تهویه مکانیکی، سیستم تهویه مطبوع تبخیری و یا سیستم تبریدی برای تونل به کمک محاسبات تکمیلی توسط طراح مجدداً ارزیابی گردیده و ظرفیت و نوع سیستم مشخص گردد.

در حالت اضطراری، سرعت‌های محاسبه شده حاصل از جریان هوای تهویه باید با حداکثر سرعت‌های هوای قابل استفاده تحت معیارهای ارائه شده در فصل دوم ضابطه و تغییرات سریع فشار هوا مقایسه شوند و در صورت عبور سرعت هوا از محدوده مجاز معیارها، بایستی تمهیدات لازم جهت کاهش سرعت هوا به کار گرفته شود.

همچنین در این مرحله لازم است به منظور دست‌یابی به مقادیر سرعت بحرانی در موقعیت‌های مختلف مسیر و به منظور بررسی و جلوگیری از پدیده برگشت دود در شرایط اضطرار، روند محاسباتی مربوطه طی شده و نتایج با مقادیر سرعت‌های جریان هوای گذری از خروجی شبیه‌سازی مقایسه گردد.

علاوه بر محاسبات لازم جهت مشخص نمودن نرخ تهویه مورد نیاز، ممکن است بررسی و ارزیابی بر اساس حفظ دمای هوای محیط ایستگاه و تونل در کمتر از ۱۴۰ درجه فارنهایت (۶۰ درجه سانتیگراد) صرفاً در اثر عملکرد پیستونی قطار انجام پذیرد. بدین ترتیب، اگر تمام تجهیزات کنترل محیطی در یک ایستگاه از کار بیافتند، دما از معیار دمای اضطرار تجاوز نمی‌نماید.

به طور کلی می‌توان سناریوهای مختلف کارکرد سیستم تهویه در شرایط ترافیک عادی و ازدحام در مسیر، امکان‌سنجی حذف شفت‌های میان‌تونلی، امکان استفاده از شفت‌های تهویه طبیعی و همچنین نیاز به استفاده از جت‌فن‌های کمکی را در این مرحله از طراحی ارزیابی نمود.

به علاوه تعیین فشار کاری فن و محاسبه مقادیر افت فشار نیز ممکن است در همین مرحله از طراحی صورت پذیرد.

پس از تدوین مفاهیم طراحی برای کارکرد نرمال، ارزیابی طراحی برای انطباق با معیارهای اضطراری و/یا سایر الزامات مربوط به سیستم های کنترل محیطی، به ویژه استانداردهای تهویه ضروری است. به عنوان مثال، اگر دمای طراحی در ایستگاه کمتر از محیط بیرون باشد، به منظور بهینه‌سازی و صرفه جویی در مصرف انرژی پیشنهاد می‌شود که ورود جریان هوای گرم بیرون به حداقل برسد، به طوری که به منابع افزایش حرارت در سیستم اضافه نشود. در این شرایط استفاده از شفت‌های تهویه نه تنها ممکن است غیرقابل توجیه باشد، بلکه در واقع ممکن است نامطلوب نیز باشد. با این حال، در شرایط اضطراری، زمانی که معیارهای کیفیت هوا بر معیارهای آسایش محیطی ارجح است، لازم است که مقادیر زیادی هوای تازه بیرون را بدون توجه به دمای آن وارد سیستم نمود. در این مورد، طراحی بر پایه معیارهای اضطراری، مفاهیم طراحی برای کارکرد عادی را نادیده می‌گیرد. با جانمایی دمپرها در شفت های تهویه که می‌توانند در حین کارکرد عادی بسته شوند، این معیارهای کاربردی چندگانه ، ممکن است همچنان برآورده شده و سیستم در سناریوهای مختلف، عملکرد متفاوت مورد نیاز را داشته باشد.

- طراحی اولیه سایر اجزای سیستم تهویه از قبیل جزئیات تجهیزات سرمایشی، سامانه فشار مثبت مسیرهای فرار و تجهیزات تخلیه دود ترازهای فوقانی سکو

با توجه به اندرکنش اجزای سیستم تهویه بر روی همدیگر و همچنین لزوم طراحی یکپارچه، لازم است سایر اجزای مجموعه در این مرحله طراحی گردند، به طور مثال در صورت استفاده از سیستم سرمایش تبخیری و رطوبت زنی در سامانه تهویه تونل، بایستی ظرفیت و مشخصات این تجهیزات مشخص گردد.

همچنین مشخصات کلی سایر اجزای سامانه تهویه از قبیل سایلنسرها، دمپرها و دیگر تجهیزات حوزه تهویه از قبیل تجهیزات فشار مثبت و تهویه فضاهای فرعی که مجزا از تهویه عمومی می‌باشند (نظیر تجهیزات تهویه پست کشش) در این مرحله بایستی مورد مطالعه قرار گیرند.

- تهیه نقشه‌های اولیه جانمایی و استقرار تجهیزات، کانال‌کشی و ارائه مسیرهای توزیع و تخلیه هوا

پس از مشخص شدن مشخصات کلی تجهیزات تهویه، در این مرحله، نقشه‌های جانمایی و استقرار تجهیزات ارائه گردیده و متعاقب آن مسیرهای عبور جریان هوا مشخص می‌گردند. لذا پس از روشن شدن طرح تهویه، الزامات ساختمانی مرتبط با تجهیزات تهویه نیز معلوم می‌شود.

- تهیه لیست اولیه تجهیزات، مصارف برقی و سایر فصل مشترک‌های تجهیزات تهویه

اینترفیس و فصل مشترک یکی از مباحث مهم در بحث طراحی تجهیزات متروسیستم می‌باشد که عدم توجه کافی به آن می‌تواند موجب دوباره کاری و یا بروز تداخلات در مرحله اجرا گردد، لذا در مرحله نهایی طراحی مقدماتی سیستم تهویه، می‌توان مصارف برقی و سایر فصل مشترک‌های سیستم تهویه را مشخص نمود.

لازم به توضیح می‌باشد که مراحل گفته شده صرفاً توصیف کلی فرایند طراحی مقدماتی سیستم تهویه می‌باشد و بسته به خصوصیت‌های هر پروژه، فرایند طراحی می‌تواند در بردارنده جنبه‌های بیشتری از طرح باشد، به طور مثال در تهیه اسناد مرتبط با تأمین تجهیزات، معیارهای مربوط به ایمنی و تبیین شاخص‌های RAMS[1] نیز می‌تواند در مرحله مقدماتی مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

روند طراحی تفصیلی، متناسب با ویژگی‌های پروژه، می‌تواند در گام‌های به شرح ذیل دنبال شود.

- تکمیل و تدقیق طراحی‌های مرحله مقدماتی

با توجه به اینکه در اکثر پروژه‌های طراحی و ساخت خطوط زیرزمینی قطار شهری، طراحی دیسیپلین‌های مختلف متروسیستم از قبیل تهویه، تأمین توان و... به طور موازی انجام می‌گیرد و علاوه بر آن ممکن است عملیات اجرایی ساخت نیز تا حدی با طراحی همزمان گردد، لذا متناسب با پیشرفت فرایند طراحی پروژه، تغییر و یا تدقیق متغیرهای اثرگذار بر روی سیستم تهویه امکان‌پذیر بوده و لذا عمدتاً نیاز به بازبینی مطالعات مقدماتی در مرحله طراحی تفصیلی می‌باشد که

[1] Reliability, Availability, Maintainability and Safety

لازم است برای مشخص شدن طرح نهایی و ظرفیت تجهیزات تهویه، فرایند بازبینی مطالعات مقدماتی انجام پذیرد. این فرایند بازبینی می‌تواند شامل شبیه‌سازی یک‌بعدی سیستم تهویه و سایر مراحل طراحی مقدماتی نیز باشد.

- طراحی سیستم تخلیه دود ترازهای فوقانی سکو و سایر اجزای سیستم تهویه از قبیل سامانه فشار مثبت مسیرهای خروج اضطراری

تکمیل طراحی‌های سیستم تخلیه دود ترازهای فوقانی سکو و سامانه‌های فشار مثبت مسیرهای خروج اضطراری و مشخص نمودن مشخصات نهایی تجهیزات مذکور در این مرحله صورت می‌پذیرد.

- صحه‌گذاری بر طراحی با انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی

همانگونه که پیشتر مطرح گردید، برای اعتبار بخشی به طراحی‌ها، می‌توان از شبیه‌سازی سه‌بعدی استفاده نمود، با انجام فرآیند شبیه‌سازی سه بعدی و با بررسی پارامترهایی نظیر سرعت هوا، دما، قدرت دید و میزان غلظت دود (شامل غلظت گاز مونوکسید کربن که بررسی آن از اهمیت ویژه‌ای در طراحی برخوردار است) می‌توان از صحت طراحی و کفایت ظرفیت تجهیزات تهویه اطمینان حاصل نمود.

این مرحله از طراحی می‌تواند شامل شبیه‌سازی آتش‌سوزی در ترازهای فوقانی سکو، سکو و همچنین تونل‌های ارتباطی باشد.

- تعیین جداول عملکردی و مشخصات فنی تجهیزات

پس از مشخص شدن ظرفیت تجهیزات و اطمینان از صحت طراحی صورت گرفته شامل سناریوهای کارکرد سیستم تهویه در شرایط متفاوت محیطی، در این مرحله بایستی سناریوهای عملکردی، جداول مشخصات فنی عمومی و خصوصی ارائه گردد.

جداول عملکردی سیستم تهویه شامل سناریوهای مختلف بهره‌برداری نرمال، ازدحام و اضطرار می‌باشد، به طور معمول سناریوی بهره‌برداری نرمال دربردارنده نحوه عملکرد سیستم تهویه در فصول مختلف سال، ساعات و روزهای متفاوت است، به طور مثال ممکن است در ساعات غیر اوج بهره‌برداری در فصول بهار و پاییز، دمای تونل صرفاً در اثر عملکرد پیستونی قطار در حد مجاز حفظ شده و یا در نقطه مقابل ممکن است بدلیل شرایط گرم محیطی، نیاز به ادامه عملکرد سامانه تهویه تونل تا مدت زمانی پس از اتمام بهره‌برداری از خط در شب هنگام، به منظور خنک‌کاری بدنه تونل باشد.

همچنین جداول عملکردی در حالت اضطرار نیز شامل سناریوهای عملکرد سیستم تهویه برای توقف و حریق قطار در موقعیت‌های مختلف تونل و ایستگاه می‌شود.

به علاوه سناریوهای مربوط به انسداد ترافیکی در تونل نیز بایستی در جداول لحاظ گردد.

- تهیه نقشه‌های چیدمان استقرار تجهیزات و سایر نقشه‌های تکمیلی، ارائه طرح کانال‌کشی و مسیرهای توزیع و تخیله هوا

در مرحله انتهایی طراحی پروژه، بایستی نقشه‌های کامل چیدمان تجهیزات، طرح کانال‌کشی و مسیرهای تهویه مشخص شده و ارائه گردد.

توضیح دیگر اینکه مراحل طراحی گفته شده شامل اخذ مدارک از تأمین کننده و سازندگان اجزای سامانه تهویه نبوده و پس از اخذ اطلاعات از سازندگان، می‌بایستی مدارک تکمیلی و نقشه‌های اجرایی تهیه و در روند طراحی پروژه جاری گردد.

فصل ۲

ضوابط طراحی سیستم تهویه

در این فصل به معیارهای مرتبط با طراحی سیستم تهویه در خطوط قطار شهری و تشریح بخش دیگری از الزامات حاکم پیرامون سیستم کنترل محیطی پرداخته می‌شود.

همچنین بخشی از ضوابط مرتبط با سیستم تهویه در خطوط قطار شهری در استاندارد ملی - شماره ۲۱۱۹۳ قسمت اول (سیستم‌های حمل و نقل ریلی درون‌شهری و حومه- ایمنی، الزامات ایمنی در مراحل طراحی ایستگاه‌ها، تونل‌ها و بهره برداری از آن‌ها) و قسمت سوم (الزامات تجهیزات ایمنی، امدادرسانی، سامانه‌ها و تجهیزات) ارائه گردیده است.

لازم به ذکر است ضوابط تست، تحویل‌گیری و نگهداری تجهیزات در قالب نشریه جداگانه‌ای ارائه می‌گردد.

۲-۱- الزامات کلی

- پیش از شروع عملیات اجرایی احداث خط زیر زمینی، بایستی حداقل مرحله طراحی مقدماتی سیستم تهویه انجام پذیرفته و به تأیید ذینفعان پروژه برسد.
- بهره‌برداری از هر ایستگاه سربسته و مسیر زیر زمینی، باید پس از تکمیل و راه اندازی سامانه‌های تهویه اضطراری همان ایستگاه و ایستگاه‌های مجاور و بر اساس سناریوهای حریق صورت پذیرد.
- علاوه بر مندرجات این نشریه، هر یک از الزامات کارفرمایی، پدافند غیرعامل و سازمان آتش‌نشانی شهری در صورت وجود بایستی مورد بررسی و استناد قرار گیرد.
- سناریوهای مختلف و امکان‌پذیر اضطرار، انسداد تونل و بهره‌برداری نرمال، بایستی جهت انجام فرایند طراحی، تدوین و در مدارک طراحی ارائه گردد.
- تمامی تجهیزات نصب شده در مسیر دود و حرارت بایستی تایپ‌تست‌ها و تأییدیه‌های معتبر جهت تحمل دمای طراحی را داشته باشند.

۲-۲- الزامات اختصاصی طراحی سیستم تهویه بر اساس سناریوی بهره‌برداری اضطراری

- عملکرد کلیه تجهیزات تهویه در مواقع اضطراری در راستای مدیریت انتشار و حرکت دود، زدودن دود و تأمین هوای تازه برای مسافران، کارکنان و پرسنل سازمان آتش‌نشانی در تمامی مراحل تخلیه مسافران و اجرای عملیات اطفاء حریق به صورت رضایت بخش و قابل اعتماد می‌باشد.
- مهم‌ترین وظیفه سیستم تهویه اضطراری در زمانی که یک قطار در تونل زیرزمینی دچار حریق شده است، کنترل و مدیریت حرکت دود می‌باشد.
- طراحی سامانه تهویه اضطراری بایستی شرایط و ملاحظات به شرح ذیل را شامل گردد:
  - تأمین نرخ جریان هوای مناسب برای رساندن هوایی غیر آلوده به مسیرهای خروج مسافران در جهت دور شدن از منطقه حریق و ایجاد مسیر ایمن جهت فرار مسافران

- تأمین سرعت هوای مناسب بالای قطار برای دور کردن دود از آتش در هر یک از دو جهت.
- جلوگیری از پدیده برگشت لایه دود.
- فراهم آوردن درجه حرارت قابل قبول در مسیرهای خروج اضطراری برای اینکه عملیات تخلیه انجام پذیرد.
- حفظ میدان دید افراد.
- دفع و تخلیه (و یا حداقل کاهش غلظت) گازهای سمی از جمله مونوکسید کربن
- توانایی راه‌اندازی کامل سامانه تهویه در مدت زمان حداکثر ۱۸۰ ثانیه
- حفظ حداکثر دمای میانگین هوا در مسیر فرار مسافران در مدت یک ساعت در کمتر از °C ۴۸
- احتساب حداکثر تعداد قطار حاضر در مسیر فرار مسافران در فرایند طراحی
- بررسی و تحلیل امکان انسداد مسیرهای خروج اضطراری در محاسبه بازه زمانی ایجاد محیط قابل تحمل توسط سامانه تهویه اضطراری
- حد مجاز پخش‌پذیری دود در مسیر فرار مسافرین باید بررسی گردیده و مقدار مجاز آن نباید از ۱۵۰ متر در تونل تجاوز نماید.
- تجهیزات سامانه تهویه باید به نحوی انتخاب گردند که قابلیت تحمل حداکثر درجه حرارت ایجاد شده در شرایط حریق به مدت یک ساعت را دارا باشند، این درجه حرارت در هر صورت نباید کمتر از ۱۵۰ درجه سلیسیوس در نظر گرفته شود.
- عملکرد فن در مواقع اضطراری از حالت توقف تا بیشترین دور نباید از ۳۰ ثانیه در راه‌اندازی مستقیم و ۶۰ ثانیه در فن‌های دور متغیر بیشتر گردد.
- سیستم تهویه اضطراری بایستی جریان هوای بدون آلاینده را در مسیرهای فرار از قطار آتش گرفته، تأمین نماید.
- حداقل سرعت هوا در بخشی از تونل که درگیر حریق شده است باید به اندازه‌ای باشد که مانع از وقوع بازگشت لایه‌ی دود در مسیرهای فرار گردد.
- بیشترین سرعت هوا در مسیرهای فرار مسافران نباید از m/s ۱۱ تجاوز نماید.
- دمای هوا در مسیر خروج و دور شدن از قطار آتش گرفته باید کمتر از ۶۰ درجه سانتیگراد باشد.
- سامانه تهویه اضطراری بایستی به گونه‌ای طراحی گردد تا دود و حرارت ناشی از حریق و سایر آلاینده‌ها حدالامکان در مسیر فرار مسافران قرار نگیرد و از گسترش آن به فضاهای اداری و فنی جلوگیری گردد.
- شرایط طراحی باید برای تمامی مسیرهای خروج اضطراری مسافران اعمال گردد. این مسیرها شامل مقاطع تونل‌های باز، فضای بین قطارها و دیوارهای تونل، فضای سکو و ورودی‌ها می‌باشد.

- در زمان اضطرار، مسیرهای فرار (تخلیه) با توجه به موقعیت قطار و محل آتش‌سوزی انتخاب می‌گردند. سیستم تهویه باید توانایی کنترل جریان هوا در هر یک از مسیرهای انتخاب شده از میان دو گزینه موجود را داشته باشد.
- با عملکرد فن‌های اضطراری سرعت هوا در تمامی مقاطع تونل در جلو و عقب بخشی که درگیر حریق شده است- نباید کمتر از ۲ متر بر ثانیه شود. هم چنین سرعت هوا بین دیواره‌های قطار و دیواره‌های تونل نباید کمتر از ۵ متر بر ثانیه باشد، این مقادیر بایستی با انجام محاسبات و مدل‌سازی تدقیق گردند.

- سیستم تهویه مکانیکی اضطراری، بایستی برای ایستگاه‌های زیر زمینی (و به طور کلی سربسته) و همچنین مسیرهای سربسته با طول بیشتر از ۱۰۰۰ft (۳۰۵ m) اجرا گردد.
- برای تونل‌های سربسته با طول کمتر یا مساوی با ۲۰۰ft (۶۱ m) نیاز به اجرای سیستم تهویه مکانیکی اضطراری تونل نمی‌باشد و برای تونل‌های با طول مابین ۲۰۰ft (۶۱ m) و ۱۰۰۰ft (۳۰۵ m) بایستی ارزیابی ریسک و قضاوت مهندسی جهت بررسی نیاز به تهویه مکانیکی اضطراری صورت پذیرد.
- فرایند تحلیل و صحت‌سنجی سیستم تهویه تونل حداقل شامل موارد زیر می‌گردد:
  - به کارگیری برنامه‌های شبیه‌ساز تحلیلی معتبر با تحلیل کمّی از جریان هوا و دود در سناریوهای حریق و همچنین استفاده از روش‌های معتبر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)
  - اندازه‌گیری جریان هوا در تست‌های سرد در فرایند پذیرش[1] به جهت صحه‌گذاری و اعتبار بخشی به طراحی و کارکرد سیستم تهویه مکانیکی تعبیه شده در چارچوب معیارها و طراحی صورت پذیرفته.
- سیستم‌های تهویه مختص به ایجاد شرایط آسایش کارکنان یا مسافران که هیچ‌گونه نقشی در اجرای سناریوهای اضطرار و حریق ندارند، در هنگام کشف حریق یا شروع سناریوهای اضطراری بایستی به منظور پیش‌گیری از تداخل با سیستم تهویه اضطراری خاموش شوند، مگر آنکه با ارزیابی و تحلیل، عدم اثرگذاری عملکرد آن‌ها بر روی سیستم تهویه اضطراری مشخص شود.
- فن‌های تخلیه هوا مرتبط با گازهای خطرزا مانند هیدروژن (از جمله تهویه اتاق‌های باتری) بایستی الزامات تهویه مطابق نشریه ۳-۸۰۴ و استاندارد NFPA 91 را رعایت نمایند، این فن‌ها و فن‌های مربوط به تهویه فضاهای حساس از جمله اتاق‌های کنترل، بایستی بدون اثرگذاری یا اثرپذیری از سیستم تهویه اضطراری، پس از ارزیابی ریسک، در زمان اضطرار به عملکرد خود ادامه دهند.
- فن‌ها و تجهیزات تهویه اضطراری، بایستی استحکام و مقاومت لازم را در برابر شدت جریانات هوای قابل گذر در سیستم، تغییرات متناوب فشار هوا و محدوده دمای هوای قابل دستیابی را داشته باشند. بازه واقعی این موج تغییرات فشار باید توسط مدل‌سازی کامپیوتری در مرحله طراحی تحلیلی محاسبه گردد.

[1] Commissioning

- سیستم تهویه اضطراری تونل بایستی قابلیت شروع به کار به صورت اتوماتیک و دستی را داشته باشد (همچنین قابلیت کنترل از مرکز کنترل ترافیک و اتاق کنترل محلی).
- برای پست‌های برق، اتاق‌های توزیع و اتاق‌های حاوی تجهیزات کنترلی که برق‌رسانی به تجهیزات تهویه اضطراری از طریق آن‌ها صورت می‌پذیرد، چنانچه شرایط محیطی مطلوب آن‌ها، استفاده از سیستم تهویه یا سرمایش مکانیکی را نیاز داشته باشد تا دمای فضا در بازه محدودیت‌های عملیاتی تجهیزات الکتریکی باشد، چنین سیستم‌های تهویه یا خنک‌کننده مکانیکی باید در طراحی لحاظ شوند، به طوری که خرابی هر یک از واحدهای سرمایش یا جابجایی هوا، منجر به قطع منبع توان الکتریکی فن‌های تهویه اضطراری در طول مدت کار نگردد.
- تابلوهای کنترل محلی باید در دسترس باشند و همچنین در مسیر دود قرار نگیرند تا در شرایط اضطراری، امکان راه‌اندازی آن‌ها در محل میسّر باشد. سازه اطراف آن‌ها نیز باید حداقل دو ساعت مقاومت در برابر درجه حرارت طراحی را داشته باشد.
- کلیه مسیرها و دیوارهای مرتبط با سامانه‌های تهویه بایستی به صورتی محصور شوند تا امکان خروج و نشت دود به دیگر محیط‌های ایستگاه وجود نداشته باشد.
- کانال‌های فلزی، دمپرهای دود و دیگر تجهیزات سامانه تهویه که در مسیر دود هستند بایستی حداقل یک ساعت تحمل در مقابل حریق و همچنین دود و هوای داغ عبوری را داشته باشند.
- سامانه تهویه اضطراری بایستی ظرف حداکثر ۱۸۰ ثانیه به حداکثر توان عملکردی خود رسد و قابلیت ادامه کار تا حداقل مدت زمان یک ساعت را در شرایط اضطرار داشته باشد.
- طراحی سیستم تهویه مسیر بایستی در بردارنده تمام جزئیات مورد نیاز در زمان بهره‌برداری و اجرا و حداقل ملاحظات زیر را در برگیرد:
  - سناریوهای مختلف حریق و پروفیل‌های آتش
  - هندسه ایستگاه و خط ریلی
  - شرایط آب و هوایی و جغرافیایی طرح خارج پروژه شامل ارتفاع از سطح دریا، باد، دما و...
  - جزئیات مرتبط با تجهیزات کنترل محیطی شامل فن‌ها و مسیرهای گذر هوا و دود
  - برنامه رویه‌های از پیش تعیین شده واکنش‌های اضطراری که قابلیت عکس‌العمل سریع از مرکز کنترل در صورت وقوع آتش‌سوزی را فراهم آورد (جداول عملکردی سیستم تهویه).
  - ارزیابی و تحلیل قابلیت اطمینان تجهیزات که شامل تجهیزات مکانیکی، الکتریکی و کنترل می‌باشد.
- سناریوهای حریق در تونل و ایستگاه، قطع برق تجهیزات تهویه اضطراری، خروج از ریل قطار و از دست دادن یک فن که منجر به بیشترین تأثیر نامطلوب بر عملکرد سیستم تهویه می‌شود، بایستی در طراحی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد (بررسی سناریوهای افزونگی).

- طراحی و عملکرد سیستم سیگنالینگ شامل موقعیت بلوک‌های آن و سیستم تهویه باید به گونه‌ای هماهنگ گردند که با تعداد کل قطارهایی که می‌توانند در مواقع اضطراری بین محورهای تهویه قرار گیرند، مطابقت داشته باشند.
- سیستم تهویه برای استفاده در مواقع اضطراری باید قابلیت کار با ظرفیت کامل در حالت مکش و یا دهش هوا به منظور نتیجه‌گیری مطلوب از انجام سناریوی طراحی شده را داشته باشد.
- تمامی فن های تهویه اضطراری، موتورها و سایر قطعاتشان که در تماس با جریان دود و هوای داغ قرار دارند، باید برای کار کردن به مدت زمان یک ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد مناسب باشند.
- دمای هوای داغ ورودی فن باید با لحاظ شدن قدرت آتش طراحی شده در موقعیت مجاور مسیر ورودی سیستم تهویه اضطراری/ ایستگاه تعیین شود. نرخ جریان هوا باید بر اساس نرخ مورد نیاز برای دستیابی به سرعت بحرانی در مسیر سرپوشیده و دیگر الزامات از جمله ایجاد شرایط محیطی قابل تحمل باشد.
- اندازه‌گیری بازده و مشخصات عملکردی فن‌ها بایستی در شرایط مشابه شرایط پروژه از نظر دما، ارتفاع و رطوبت صورت پذیرد.
- فن‌های تهویه اضطراری تونل باید دو جهته باشند و توان تخلیه و تأمین هوای مورد نیاز در هر دو جهت را در شرایط مختلف داشته باشند.
- فن‌ها باید از نوع جریان - محوری و با موتور داخلی از نوع نیروی محرکه مستقیم[۱] باشد.
- موتور فن‌ها باید دو جهته (برگشت‌پذیر) باشند تا با توجه به سناریوی تخلیه (بسته به محل آتش‌سوزی در تونل) بتواند برای تأمین و یا تخلیه هوا مورد استفاده قرار گیرد.
- قابلیت ایجاد جریان هوا در هر دو سمت باید برابر باشد (ظرفیت جریان هوای برعکس باید ۱۰۰٪ ظرفیت هوای تخلیه باشد).
- مسیر خروجی از هواسازها و کانال‌های تخلیه دود نباید تا حد امکان از روی اتاق‌های اداری و فنی عبور نمایند.
- عبور کانال‌های هوای تهویه اضطراری از روی فضاهای حساس ایستگاه ممنوع می‌باشد.
- کابل‌های تغذیه هواسازها نبایستی در مسیر جریان دود و حرارت قرار گیرند. در صورت عبور کابل‌های تغذیه در مسیر دود، باید از داخل غلاف مقاوم در برابر حرارت و یا از کابل نسوز (متناسب با دمای طراحی) استفاده گردد.
- سیستم کنترلی سامانه تهویه بایستی به مرکز کنترل متصل بوده و تمامی اطلاعات مرتبط با عملکرد تهویه از جمله جهت دوران فن‌ها و عملکرد دمپرها، تحت نظارت کامل و مستمر مرکز کنترل باشد.
- در طراحی سیستم تهویه مسیر، درنظرگیری سناریوی ازدحام و انسداد ترافیکی در مسیر ضروری می‌باشد.
- ملاک اصلی طراحی در سناریوی ازدحام، کنترل دمای محیط و تأمین هوای تازه می‌باشد.

[۱] Internally mounted - Direct drive motor

- مسیرهای خروج اضطراری در تونل بایستی مجهز به سیستم فشار مثبت و تأمین هوای تازه باشند.
- هوای تازه سیستم فشار مثبت بایستی از موقعیت ایمن و سالم تأمین شود.
- در ایستگاه‌های زیر زمینی، در صورتیکه آسانسورها بخشی از مسیر فرار مسافران لحاظ شده باشند، بایستی مجهز به سیستم فشار مثبت باشند.
- حداقل اختلاف فشار مابین فضاهای فشار مثبت (مسیرهای خروج اضطراری) و فضاهای مجاور در زمان فعالیت فن مربوطه، بایستی 50pa+ در نظر گرفته شود.

۲-۳- الزامات اختصاصی طراحی سیستم تهویه بر اساس سناریوی بهره‌برداری نرمال

- برخی از محدوده‌های مجاز پارامترهای طراحی از جمله سرعت هوا و سطح صدا در پیوست یک نشریه درج گردیده که در کنار سایر مراجع طراحی و الزامات، می‌تواند در فرایند طراحی مورد نظر قرار گیرد.
- مدارک و گزارشات طراحی در حالت کارکرد عادی (شامل مدارک شبیه‌سازی یک‌بعدی)، بایستی دربردارنده حداقل ارزیابی‌هایی به شرح ذیل باشد:
  - سناریوی تهویه فصول مختلف و ساعات متفاوت روز
  - بررسی جریانات هوا در تونل
  - بررسی اثرات تنظیمات مختلف سیستم تهویه بر روی دمای هوا در تونل
  - بررسی امکان حذف شفت‌های میان‌تونلی (با لحاظ نمودن سناریوهای اضطرار و ازدحام)
  - کفایت استفاده از اثر پیستونی جهت تهویه تونل و شفت‌های تهویه طبیعی
  - ارزیابی و مقایسه انواع سیستم‌های مختلف تهویه از جمله سیستم تهویه تبخیری و یا تبریدی برای تونل و ایستگاه
  - ارزیابی نیاز به استفاده از جت فن در مقاطع مختلف تونل
  - ارزیابی سیستم‌های ایمنی از قبیل سیستم درهای محافظ سکو
  - ارزیابی سناریوهای افزونگی
- دمای هوا در فضای عمومی باید با توجه به شرایط دمای هوای خارج و سناریوهای مختلف بهره‌برداری امکان تغییر و نوسان داشته باشد. با این حال در شرایط بهره‌برداری نرمال در تابستان، اختلاف بین دمای هوا در بخش‌های داخلی ایستگاه زیرزمینی و دمای هوای بیرون نبایستی تفاوت شدیدی داشته باشد که در صورت استفاده از سیستم تهویه تبخیری این میزان، در حدود ۶ درجه سانتیگراد می‌باشد.
- سرعت مجاز هوا در فضاهای عمومی ایستگاه (سکو، فروش بلیط، مسیرهای دسترسی، پله‌برقی‌ها)، حداکثر ۵ متر بر ثانیه و میانگین ۳ متر بر ثانیه، در شرایط عملکرد عادی می‌باشد.

- اثرات تغییرات فشار، که در اثر حرکت قطار در خطوط زیرزمینی رخ می‌دهد، در مسیر حرکت و جابجایی مسافران باید مطابق زیر کنترل شود.
  - برای تغییرات فشار بالاتر از ۷۰۰ پاسکال، نرخ تغییرات نباید از ۴۲۰ پاسکال بر ثانیه بیشتر شود.
- در یک دوره زمانی متناسب با حداکثر دمای تابستانی، برای حفظ اختلاف ۶ درجه سانتیگراد بین هوای داخل و بیرون، ممکن است استفاده از تهویه اضطراری یا مکمل در مدت زمان محدود لازم شود. سیستم تهویه اضطراری برای تأمین میزان لازم تهویه با ایجاد کمترین سطح صدا، باید قابلیت کار با سرعت پایین مطابق با تنظیمات مورد نیاز (از طریق نیروی محرکه فرکانس متغیر و یا فن‌های چند سرعته) را داشته باشد.
- اثر پیستونی حرکت قطار باید به عنوان روش اصلی تهویه مسیر ریلی، سکو و فضاهای متصل مانند راهروها و مسیرهای دسترسی، سالن فروش بلیط و ارتباطات بین ترازها، در نظر گرفته شود. کفایت تهویه از طریق اثرات پیستونی باید از طریق مدل‌سازی یک بعدی مورد تایید قرار گیرد. این فرایند تحلیل باید پارامترهای زیر را شامل شود:
  - حفظ اختلاف دمای مجاز
  - در نظر گرفتن تمامی منابع تولید گرما در ایستگاه و تونل
  - در نظر گرفتن فضاهایی با سقف بلند (بیش از ۴ متر ارتفاع) و فضاهایی که در معرض انرژی خورشیدی (از طریق نورگیر) قرار می‌گیرند.
  - درهای محافظ سکو (در صورت وجود)
- فضاهای بسته یا نیم بسته ایستگاه باید برای حفظ تهویه موثر ناشی از اثرات حرکت پیستونی قطار از شرایط لازم برخوردار باشند. به موارد زیر باید توجه شود.
  - در ورودی‌های محصور تمهیداتی برای تخلیه فشار مثل بازشو در نظر گرفته شود.
  - استفاده از شفت‌های هوا در موقعیت‌های لازم
  - به کارگیری داکت یا گریل‌های ارتباطی برای پارتیشن‌ها (با در نظرگیری ناحیه‌بندی‌های مربوط به حریق)
  - تمهیدات لازم در صورت استفاده از درهای محافظ سکو
- در صورت کافی نبودن مقدار تهویه صورت گرفته در اثر حرکت پیستونی قطار باید سیستم‌های کمکی مکانیکی برای تهویه مورد استفاده قرار گیرند، سطح تهویه مورد نیاز مطابق با تحلیل‌های شبیه‌سازی یک بعدی و محاسبات استاتیکی اندازه‌گیری می‌شود. سیستم تهویه کمکی ممکن است شامل این موارد گردد:
  - استفاده از سیستم‌های تهویه اضطراری (به طور معمول در سرعت پایین)
  - سیستم تهویه کمکی برای مسیر، ایستگاه یا هر دو

- فضاهای باز و بزرگ با ارتفاع زیاد (سقف‌های بلند) ممکن است دچار مشکلاتی ناشی از جذب انرژی تابشی (در صورت وجود شرایطی نظیر استفاده از نورگیر)، لایه‌بندی هوا[۱] و غیره شوند. در این خصوص ملاحظات زیر باید مدنظر قرار گیرد:
  - هواکش در تراز سقف برای کنترل حرکت لایه‌های هوا و استفاده از "اثر دودکشی" برای کمک به تهویه طبیعی.
  - کنترل هوای گرم جمع شده در ترازهای فوقانی، برای کاهش احتمال ایجاد لایه‌های میانی دود
  - جداسازی دود در سقف از طریق شفت‌های خروجی و ونت‌هایی که استاندارد NFPA و یا سایر استانداردهای مشابه تعیین می‌کنند.
- کیوسک‌های ورود و خروج هوا در روی زمین باید با معماری فضای اطراف هماهنگ باشد.
- کیوسک ورودی هوا باید در فاصله‌ی مناسبی از شفت تهویه دود قرار گیرد تا دود دوباره به ایستگاه باز نگردد (ارزیابی‌های فنی در این خصوص ضرورت داشته ولیکن در نظرگیری فاصله ۵ متر توصیه می‌گردد).
- شفت ورود هوا به ایستگاه باید در فاصله‌ای مناسب از دیگر منابع آلودگی مانند مسیر تردد اتوبوس‌ها و ترافیک شهری واقع گردد.
- ضریب اطمینان مهندسی معادل ۱۰٪ باید در محاسبات مربوط به بارهای گرمایی و سرمایی اتاق‌ها و انتخاب تجهیزات وابسته لحاظ گردد.
- ضریب اطمینان باید در شرایط کاری قابل انتظار، بدترین شرایط و بار کامل مورد استفاده قرار گیرد.
- محاسبات سایز و انتخاب تجهیزات فن‌ها، باید با درنظرگیری ضریب اطمینان مناسب انجام پذیرد.
- علاوه بر ضریب اطمینان، باید محدوده‌های مجاز منطقی برای توسعه آتی پروژه، تغییر تجهیزات، حرارت‌های تولیدی تجهیزات و... در پنج سال نخست بهره‌برداری شناخته و یا پیش‌بینی شود.
- تمهیدات لازم برای تجهیزات اضافی در آینده، باید برای دوره‌هایی که این تغییرات قابل انتظار هستند مثلا برای ۵ سال نخست بهره‌برداری در نظر گرفته شوند. فضاهایی که برای این تجهیزات پیش بینی شده باید به طور واضح و مشخص در اسناد طراحی درج شده باشند.
- تجهیزات احتمالی آینده باید با سیستم‌های کنترلی حاضر قابل کنترل باشند یا تمهیداتی برای نصب و راه‌اندازی آن‌ها اندیشیده شود که خللی در عملکرد تجهیزات موجود وارد نشود.
- برای کاهش سطح آلودگی هوا در فضاهای عمومی ایستگاه، هوای بیرون پیش از هدایت به سیستم تهویه مطبوع ایستگاه باید فیلتر شود و ورودی‌های هوا (کیوسک‌های تهویه) در سطح خیابان نباید در معرض گرد و غبار، دود، بو، سر و صدا و آلودگی‌های ناشی از سایر منابع خارجی واقع شوند.

---

[۱] Stratification

- حداقل هوای تازه مورد نیاز برای هر فرد ۴/۱ lit/s (معادل ۸/۶ cfm) می‌باشد. این میزان هوای تازه می‌تواند در سیستم‌های بسته، در فصل گرم به میزان ۳/۵ lit/s (معادل ۷/۴ cfm) برای هر فرد و ده درصد نرخ هوای برگشت تغییر یابد.
- برای صرفه جویی در مصرف انرژی، سیستم بازیابی گرمایی همچون استفاده از سرمای هوای بیرون برای خنک کاری (به فرض تامین آب خنک در چیلر و...) هنگامی که دمای بیرون سردتر از محیط داخل است، با توجه به الزامات بخش تجهیزات می‌تواند ارزیابی و در نظر گرفته شود.
- علاوه بر ملاحظات طرح عمومی تهویه، حداکثر اختلاف فشار بین فضاهای غیر عمومی و فضای عمومی مجاور، باید ۶۲pa± باشد. این فشار در زمان کارکرد فن‌های تهویه اضطراری (حریق) و یا فشار ناگهانی (ضربه‌ای) حاصل از کارکرد ناوگان (اثر پیستونی) تغییر می‌کند.
- تمام فیلترهای هوا (در صورت استفاده) باید بر اساس رتبه بندی MERV یا استانداردهای مشابه (نظیر EN-779) باشند.
- فیلتر هوا به منظور فیلتراسیون فضای عمومی ایستگاه باید نرخ ۸ MERV و حداقل ضخامت نامی ۵۰mm باشد.
- فیلتر هوا به منظور فیلتراسیون بحرانی که برای عملکرد مناسب تجهیزات حساس نیاز می‌باشد باید از نرخ ۱۲ MERV و حداقل ضخامت نامی ۱۰۰mm باشد.
- سیستم هواساز باید به گونه‌ای طراحی شود که ۹۰٪ ظرفیت نامی طراحی را با در نظر گرفتن مقاومت نهایی پیشنهادی فیلتر، تامین نماید.
- نرخ بار فیلتر و سطح آن باید به گونه‌ای انتخاب شود که پس از ۶ ماه از بهره‌برداری معمول، بیش از ۷۵٪ بارگذاری نشده باشد.
- سرعت هوا بر روی فیلتر نباید بیش از ۲/۵ m/s (۵۰۰fpm) باشد. جریان هوا باید به صورت یکنواخت بر روی تمام سطح فیلتر پخش شود.
- قاب فیلتر باید با سایز استاندارد فیلتر و با درنظر گرفتن تفاوت‌های مجاز که بستگی به کارخانه‌های متنوع سازنده دارد، مطابقت داشته باشد. تعداد و نوع فیلترها باید تا حد ممکن مطابق با استانداردها باشد.
- برای خرید فیلتر و تعویض آن باید ابعاد دقیق، نوع و سایز آن دقیقاً تعیین شود تا در قاب‌های متصل به تجهیزات قابل نصب باشد.
- فیلترهایی که به منظور جلوگیری از نفوذ هوای آلوده از محیط بیرون تعبیه می‌شوند باید به گونه‌ای انتخاب شوند که دارای گواهی تأیید مربوطه باشند. فیلترهای جایگزین باید در نوع و سایز و کلاس مطابق با فیلتر اولیه باشند؛ هر تغییری باید مورد بازبینی بخش کنترل، تعمیر و نگهداری قرار گیرد.
- زمان تعویض فیلتر حتما باید در برگه‌ی مشخصات فنی سیستم ثبت شده و در دسترس باشد.

- تا حد امکان باید نصب تجهیزات به گونه‌ای باشد که برای تعویض فیلتر نیازی به ابزار ویژه‌ای نظیر نردبان نبوده و به سهولت امکان تعویض فیلترها فراهم شود.

یادداشت: برای ایمنی و سلامت کارکنان، نباید تعویض فیلتر بوسیله نردبان انجام شود و در صورتی که دسترسی به محل تعویض فیلتر آسان نباشد، باید برای حمل فیلتر از وسیله‌ای مناسب استفاده شود.

- توزیع کننده‌های هوا، گریل‌ها، دیفیوزها و رجیسترها باید به منظور پرتاب و پخش مناسب هوا، با حداقل میزان صدا و امکان عبور یکنواخت هوا با سرعت مناسب، در سیستم توزیع هوا درنظر گرفته شود.
- دریچه‌های (ورودی/خروجی/برگشتی) هوا باید به نحوی چیدمان گردند که حداکثر تعویض هوا را در کل فضا ایجاد نمایند و از ایجاد مسیر کوتاه (اتصال کوتاه بین محل ورود و خروج هوا) و ایجاد نقطه کور (فضای مرده) تهویه جلوگیری شود.
- مطالعات مهندسی (شامل بررسی فنی و اقتصادی) به منظور رسیدن به تنظیم دمای مورد نیاز در سکوی ایستگاه، پیرامون ضرورت استفاده از سیستم‌های UPE و OTE (تخلیه هوا از زیر سکوها و روی سقف قطار) بایستی انجام پذیرد، این سیستم‌ها شامل کانال‌های تخلیه متصل به فن‌های سانتریفیوژ یا محوری می‌باشند که در یکی از اتاق های تجهیزاتی در سکو یا ترازهای فوقانی جانمایی می‌شوند و هوا را مستقیماً به اتمسفر بیرون (سطح زمین) منتقل می‌کنند. عملکرد فن‌ها با توجه به اختلاف دمای هوای بیرون و دمای هوای سکو کنترل می‌گردد.
- مصالح، ساخت، اتصالات و سایر مواد جانبی باید بر اساس آخرین ویرایش استانداردهای SMACNA، AMCA و یا سایر استانداردهای مشابه در این زمینه انتخاب شوند.
- دمپرهای حجمی[۱] با تیغه‌های قابل تنظیم مخالف برای تمام انشعابات کانال‌هایی که به بیشتر از یک خروجی متصل هستند، می‌تواند تعبیه گردد. تمام دمپرها باید به قفل ربعی مجهز باشند.
- دمپرهای تقسیم جریان[۲] (دمپر لولایی) در محل هر یک از اتصالات چند انشعاب از کانال اصلی به منظور ایجاد تعادل داخلی، می‌تواند جایگزین دمپرهای تیغه مخالف (معکوس) گردد. این دمپرهای تقسیم باید مجهز به قفل دستی قابل تنظیم باشد.
- دمپرهای یک طرفه[۳] باید در کانال‌های تخلیه فن‌های خروجی (فن‌های تخلیه)، در جاهایی که بیش از یک فن تخلیه به پلنیوم متصل می‌شود، یا جاهایی که فن‌ها مستقیماً هوا را به فضای خارج تخلیه می‌کند، مورد استفاده قرار گیرد.
- کانال‌های هوا در هنگام عبور از مرز زون‌بندی‌های حریق، مجهز به دمپر حریق[۴] باشد.

---

[۱] Volume Damper

[۲] Splitter Damper

[۳] Backdraft Damper

[۴] Fire Damper

- تمامی زانوهای کانال باید شعاعی حداقل ۱/۵ برابر عرض کانال داشته باشند. جایی که انحنای شعاع کامل ممکن نباشد، زانویی باید مجهز به پره‌های برگردان[۱] باشد.
- دریچه‌های بازدید در کانال‌ها و پلنیوم‌ها برای دسترسی و بازبینی دمپرها، دمپرهای حریق و فیلترها باید وجود داشته باشد.
- کانال قابل انعطاف باید در نقطه اتصال به تمامی فن‌ها و اتصالات فن به کانال‌ها تعبیه گردد. طول این کانال‌های قابل انعطاف باید بر اساس انحنای عمودی و افقی انتخاب شود و حداقل مجاز برای سیستم در حال بهره‌برداری ۷۵ میلیمتر می‌باشد.
- در ایستگاه‌های زیر زمینی کانال تخلیه هوا (بجز هوای تخلیه شده از اتاق‌های باتری) می‌تواند از طریق یک شفت تخلیه به سطح زمین منتقل شده در نتیجه با یکدیگر مشترک شوند. همچنین کانال‌های دریافت هوای تازه از خارج ایستگاه می‌تواند از شفت مشترکی دریافت هوا داشته باشند. تحت هیچ شرایطی نباید شفت ورود و خروج هوا از ایستگاه در یک شفت مشترک ترکیب شوند.
- در کلیه فضاهای زیرزمینی در حمل و نقل ریلی (فضای عمومی و تونل)، امکانات لازم برای سناریوهای مختلف تهویه باید پیش‌بینی شود. سیستم تهویه باید شرایط قابل قبول محیطی را در طول عملکرد عادی قطار و شرایطی که منجر به عملکرد غیرعادی می‌شود و همچنین برای ایمنی کاربران و پرسنل از حریق و محصولات احتراق در حین حریق، فراهم نماید.
- دو شفت در دو انتهای سکو، اثرات پیستونی هوا (موج فشار هوا) که به وسیله قطار ایجاد شده را خارج می‌نماید تا این جریان هوا در سکو به مسافران منتقل نشود (Draught Relief). این شفت‌ها در ایستگاه‌های سکوکناری در هر دو انتهای سکو و در ایستگاه‌های جزیره‌ای در هر دو گوشه محوطه ایستگاه یا در دو انتهای سکو (در ابتدای تونل‌ها) تعبیه می‌گردد و یا می‌تواند در هر دو تیپ ایستگاه، به صورت مسیری موازی با سامانه فن‌ها در نظر گرفته شود.
- بازشوی این شفت در هر صورت بایستی به‌گونه‌ای تعبیه گردد که در صورت رها شدن شیء در داخل شفت، نباید این شیء مستقیما بر روی ریل بیفتد.
- بازشوهای شفت‌های تهویه در روی زمین باید حداقل فاصله افقی ۱۲ متر را از نزدیکترین ورودی یا خروجی ایستگاه و هم چنین شفت‌ها ورودی‌های هوای حفاظت نشده و سایر بازشوها و از یکدیگر داشته باشند.
- در صورتی که فاصله‌ی افقی ۱۲ متر بین شفت‌ها و ورودی‌های هوا و ایستگاه امکان‌پذیر نباشد، این فاصله را می‌توان ۴/۵ متر در نظر گرفت و در این صورت، نزدیک‌ترین شفت خروج هوا حداقل ۲/۵ متر بالاتر از ورودی‌ها و خروجی‌های ایستگاه یا ورودی‌های هوای بدون حفاظ و بازشوهای تامین هوا از بیرون تعبیه می‌گردد.

---

[۱] Turning Vane

- بازشوهای شفت‌های تهویه در سطح زمین باید به شکلی جانمایی شوند که تا جای ممکن مسیری مستقیم را تا هوای اتمسفر (هوای آزاد) تامین نمایند تا مسیر جریان هوا به بخش‌های زیرزمینی تسهیل گردد.
- در صورت جانمایی لوورهای شفت تهویه به عنوان جزئی از مسیرهای تهویه اضطراری و با امکان عبور دود از آن‌ها در نزدیکی تراز سطح زمین، در نظرگیری الزامات پدافند غیر عامل و حفظ حریم ایمن در اطراف آن‌ها الزامی می‌باشد و حداکثر سرعت عبور هوا از آن‌ها به ۲/۵ m/s محدود می‌گردد.
- برای جانمایی کیوسک‌های تهویه، با در نظرگیری الزامات ایمنی، اولویت با موقعیت‌های زیر می‌باشد:
  - فضاهای باز بالاتر از سطح زمین
  - فضای جداکننده مرتفع وسط بزرگراه‌ها.
  - پیاده‌روها
- ارتفاع انتهای لوور تهویه باید حداقل ۱۵۰ میلیمتر بالاتر از فضای اطرافش در سطح زمین باشد (در صورت امکان بهتر است این ارتفاع ۱۰۰۰ میلیمتر باشد) تا مانع از نفوذ آب‌های (پساب) سطحی به داخل شفت گردد.
- ارتفاع بازشوهای شفت باید بالاتر از تراز سیلاب‌ها در نظر گرفته شده و به گونه‌ای باشد که از سایر اثرات ناشی از سیل محافظت گردد.
- از نصب هواکش در سطوح در معرض سیل گرفتگی باید اجتناب گردد.
- لوورهای تهویه در دیواره‌های شفت باید حداقل ۳۰۰ میلیمتر بالاتر از سطوح مجاور قرار داشته باشند. در شرایطی که امکان دارد ارتفاع برف یا تراز پیش‌بینی شده برای سیل بیشتر از ۳۰۰ میلیمتر گردد، این میزان باید افزایش یابد.
- لوورها و شبکه‌های شفت تهویه وقتی که در فضاهای عمومی و قابل دسترس هستند، باید از شرایط محافظتی و ایمنی بالایی برخوردار باشند و طراحی‌شان به شکلی باشد که امکان دستکاری و تخریب در آنها وجود نداشته باشد.
- در صورت جانمایی دهانه‌های هوا در پیاده‌روها، سطح لوور نباید بیش از ۴۰٪ عرض پیاده‌رو را اشغال کنند و همچنین این پیاده‌روها مطابق با ضوابط شهرسازی بایستی امکان تعبیه شفت در آنها وجود داشته باشد. در غیر این صورت، برای تعبیه شفت هوا مناسب نیستند.
- ترجیحا شفت دسترسی آتش‌نشان (در صورت وجود) باید در کنار شفت تهویه تعبیه گردد.
- حداکثر سرعت هوا بر روی لوورها یا شبکه‌های عبور هوا بر شفت‌های تهویه باید با توجه به سطح مفید (مساحت مفید) لوورها محاسبه گردد.
- خروجی‌های شفت‌های تهویه باید مطابق با ضوابط زیر جانمایی، اندازه‌گذاری و طراحی شوند:
  - هوای تخلیه در پیاده‌رو (کنارگذر) در شرایط بهره‌برداری عادی- سرعت تخلیه هوا در شرایط پیک نباید بیش از ۲/۵ m/s باشد.

- شفت تخلیه‌ای که در پیاده‌رو قرار ندارد، نباید در شرایط بهره‌برداری نرمال، سرعت تخلیه هوا از ۵ m/s تجاوز نماید، همچنین طراحی صورت پذیرفته باید کنترل سطح صدا را رعایت نماید.
- در شرایط تخلیه هوا در شرایط اضطراری - حداکثر سرعت تخلیه هوا نباید از ۱۱ m/s بیشتر شود. همچنین برای اطمینان از خروج دود تا حد ممکن باید به مقدار ۱۱ m/s نزدیک باشد.

- شفت تهویه باید تا جایی که ممکن است به صورت مسیر مستقیم باشد تا حرکت هوا به سمت دهانه تخلیه (هوای آزاد اتمسفر) را تسهیل نماید. مقاومت در برابر جریان شفت تهویه (K فاکتور) باید تا حد امکان از مقاومت در فضای سکوها، پله‌ها و راهروهایی که منتهی به ورودی‌های می‌شوند، کمتر باشد.
- مقاومتی که در بند فوق به آن اشاره شد به طول معمول به عنوان "مولفه k" (K-factor) شناخته می‌شود. به منظور مدیریت بهینه فشاری که به دلیل حرکت قطار بر خروجی‌ها و مسیر حرکت مسافران القاء می‌گردد، این مولفه k، در مسیرهای بین ورودی‌ها (خروجی‌ها) و سکوها باید چندین مرتبه بیشتر از k فاکتور مربوط به درون شفت‌های اثر پیستونی باشد، اما نه آنچنان بزرگتر که بر بازده سیستم تهویه اضطراری (حریق) تاثیر منفی گذارد.
- در سطح زمین در محل خروجی هوا (گریتینگ‌های شفت‌ها) باید شیب بندی در اطراف شفت به شکلی باشد که امکان ورود آب به شفت به حداقل برسد. آب‌های نفوذی به شفت‌ها باید با تمهیدات مناسب به پست تخلیه پساب ایستگاه منتقل و تخلیه شود.
- ابزار کنترلی و مانیتورینگ باید برای دمپرهای موتوری و مجموعه فن‌ها مهیا گردد.
- به منظور بررسی وضعیت دمپرها (کاملاً بسته و کاملاً باز) باید سوئیچ‌هایی برای دمپرها در نظر گرفته شود.
- در طراحی شفت‌ها، باید از انبساط و انقباض ناگهانی در سطح مقطع شفت اجتناب شده و از حداقل تعداد زانوها و کمترین تغییر مسیر استفاده شود. به منظور کاهش افت فشار، ترجیحاً از پره‌های برگردان در محل زانویی‌ها استفاده شود.
- اجزاء دمپر (یاتاقان و نقاط محوری) باید جهت تعمیرات به راحتی در دسترس باشند. همچنین در برابر شن، ذرات ریز و آب‌های نفوذی که ازسطح زمین ریخته می‌شوند، محافظت گردند.
- ورودی‌های هوا که ممکن است در هنگام تخلیه دود در معرض دود قرار بگیرند باید به دمپرها و حس‌گرهایی مجهز شوند که در لحظه تشخیص دود بسته شوند. این الزامات باید در مورد تمام ساختمان‌های موجود و پیش بینی شده در طرح توسعه طرح‌های آتی که در مجاورت محل خروج دود واقع می‌شوند، رعایت گردد.
- تمامی تجهیزات انتخاب شده باید ضوابط مربوط به تراز سطح صدا را برای رسیدن به سطح استاندارد، به منظور حفظ آسایش و ایمنی در فضاهای پرسنلی (و فضاهای با حضور انسانی) و در فضاهای بیرونی به منظور رعایت محدودیت‌های محیطی و پیرامونی، رعایت کنند.
- تا جای ممکن، تجهیزات باید به شکلی انتخاب و سازماندهی شوند که به حداقل تعداد صداگیرها و پوشش‌های کانال و... احتیاج باشد.

- محاسبات میزان صوت و ارتعاش کانال بایستی بر اساس استانداردهای معتبر صورت پذیرد.
- میزان نشت هوا از کانال‌ها نباید از ۵ درصد افزایش یابد.
- استفاده از عایق پشم شیشه و مصالح سوختنی در کانال‌کشی ایستگاه‌های زیر زمینی ممنوع است.

۲-۴- الزامات سیستم تهویه پست کشش

- در طراحی سیستم تهویه پست کشش، نوع دستگاه سرمایشی و اگزاست بایستی با توجه به دمای محیط بیرون، دمای مناسب کارکرد تجهیزات و بهینه‌ترین شرایط عملکردی انتخاب گردد.
- طراحی سیستم تهویه برای پست‌های کشش، بایستی در سناریوهای کارکرد عادی در فصول مختلف سال، کارکرد های غیرعادی از جمله سناریوهای از دست رفتن پست‌های کشش مجاور و همچنین تطابق با عملکرد سیستم اطفای گازی (در صورت وجود) باشد.
- دریچه‌های هوا، در و دیوار فضا بایستی به‌گونه‌ای درزبندی شده باشند که دود و حرارت خارج از سامانه وارد فضا نشود.
- اتاق تهویه پست بایستی در محلی قابل دسترس باشد و امکان ورود دود و آلودگی محیطی به آن وجود نداشته باشد.
- جهت تأمین هوای تازه پست، بایستی هوای ورودی از فیلتر گذر نماید.
- در صورتیکه اتاق پست در محیط روباز نصب و از سامانه سرمایشی استفاده می‌گردد، باید فضا بطور کامل عایق باشد.

پیوست ۱

معیارهای محیطی آسایش انسان

مباحث ارائه شده در این بخش از ضابطه عمدتا پیرامون سطوح آسایش انسان در فضاهای عمومی قطار شهری می‌باشد. آسایش حرارتی انسان بر اساس رابطه با شرایط محیطی و اثرات فیزیکی، فیزیولوژیکی و روانی آن، بایستی برای شرایط کارکرد نرمال و اضطرار در فضاهای عمومی ایستگاه و تونل تعیین گردد.

همچنین معیارهای آسایش حرارتی از ماهیت گذرای حضور افراد در فضاهای عمومی قطار شهری تأثیر می‌پذیرد.

از آنجا که معیارهای شرایط آسایش در جوامع گوناگون (بسته به نوع پوشش، شرایط فیزیکی و...) متفاوت است، مقادیر دقیق و واحدی به عنوان یک معیار کلی و جهانی ارائه نشده است، اما می‌توان مهمترین معیارهای تأثیرگذار بر آسایش انسان را (در شرایط کارکرد نرمال تجهیزات) به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- دما و رطوبت
- کیفیت هوا
- سرعت هوا و تغییرات سریع فشار
- نویز و ارتعاشات

پ-۱-۱- دما و رطوبت

دما و رطوبت از جمله پارامترهای اساسی هستند که بر آسایش انسان تأثیر جدی می‌گذارند. همانگونه که گفته شد، در هنگام مشخص نمودن معیارهای آسایش حرارتی، باید به طبیعت‌گذرای حضور افراد در مترو توجه شود. به‌طور کلی، مسافران مدت زمان کمی را در ایستگاه می‌گذرانند. آن‌ها معمولاً به اندازه کافی در محیط قطار قرار می‌گیرند تا به یک تعادل حرارتی با محیط داخل قطار برسند. همچنین معمولاً قبل از ورود به محیط مترو نیز به اندازه کافی در خیابان بوده‌اند تا به یک تعادل کلی با محیط بیرون برسند. بنابراین فضای ایستگاه، مکانی گذرا بین دو محیطی است که در آن مسافران به تعادل حرارتی با محیط می‌رسند.

در هنگام تعیین معیارهای حرارتی همچنین باید متغیرهای فیزیولوژیکی و محیطی که آسایش افراد را در محیط مترو تأمین می‌کنند، در نظر گرفته شود. برخی شاخص‌های حرارتی در جدول (پ-۱-۱) خلاصه شده است. اگرچه متغیرهای مناسبی برای شاخص‌های حرارتی انتخاب شده‌اند، اما هیچ‌کدام به ماهیت گذرای متغیرهای مورد نیاز برای مشخص نمودن شرایط آسایش در محیط مترو به اندازه کافی توجه ندارند. به همین دلیل شاخص‌هایی از جمله حرارت نسبی[۱] و نرخ کسر حرارت[۲] معرفی شده‌اند.

[۱] Relative Warmth Index (RWI)

[۲] Heat Deficit Rate (HDR)

جدول پ-۱-۱: مشخصات برخی از شاخص‌های حرارتی رایج

شاخص‌ها	عوامل محیطی درنظرگرفته‌شده					
	دما	رطوبت	گرمای تابشی	نرخ متابولیک	پوشش	اهمیت
دمای مؤثر (ET)	بله	بله	خیر	خیر	بله	واکنش سریع به تغییرات در محیط
شاخص اثرات فیزیولوژیکی (E)	بله	بله	خیر	بله	بله	تأثیرات دماهای بالاتر، استرس، ناتوانی فیزیولوژیکی
شاخص تنش گرمایی (HSI)	بله	بله	بله	بله	خیر	تأثیرات دماهای بالاتر، استرس، ناتوانی فیزیولوژیکی
نرخ پیش‌بینی‌شده عرق‌ریختن در ۴ ساعت (P4SR)	بله	بله	بله	بله	خیر	تأثیرات دماهای بالاتر، استرس، ناتوانی فیزیولوژیکی
شاخص کرنش نسبی (RSI)	بله	بله	بله	بله	بله	تأثیرات دماهای بالاتر، استرس، ناتوانی فیزیولوژیکی و دماهای پایین‌تر

پ-۱-۱-۱- ملاحظات فیزیولوژیکی آسایش حرارتی

بدن انسان به‌صورت مداوم از طریق انجام واکنش‌های شیمیایی در حال تولید انرژی به منظور ادامه فعالیت می‌باشد که این واکنش‌ها عمدتاً توأم با تولید گرما است. نرخ این واکنش‌های شیمیایی که به تولید انرژی می‌انجامد، نرخ متابولیک نام دارد. از آنجایی‌که دمای بدن انسان باید تقریباً ثابت بماند، بدن به‌صورت پیوسته از طریق مکانیزم‌های همرفت، تابش و تبخیر در حال از دست این حرارت و یا گرفتن حرارت از محیط برای رسیدن به دمای ثابت مورد نیاز می‌باشد.

هنگامی که انسان در معرض محیط سرد قرار می‌گیرد، رگ‌های خونی موجود در نزدیکی پوست او منقبض شده و لذا جریان خون او در این رگ‌ها کاهش می‌یابد که در نتیجه آن انتقال حرارت کمتری به سطح پوست صورت می‌گیرد. تغییر در نرخ جریان خون به سطح پوست که به تنظیم دمای بدن کمک می‌کنند، تنظیمات وازوموتور[۱] نامیده می‌شود که به کاهش اتلاف حرارت بدن با مکانیزم‌های تابش و همرفت منتهی می‌گردد. اگر دمای داخلی بدن در صورت کاهش دمای محیط حفظ نشود، نرخ متابولیک بدن به صورت خودکار توسط حالتی مانند لرزیدن افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر زمانی‌که یک فرد در معرض محیط گرم قرار گیرد یا در حالت فعالیت فیزیکی باشد، رگ‌های خونی نزدیک سطح پوست او منبسط شده و اجازه می‌دهند خون بیشتری به طرف سطح پوست جریان یابد. با افزایش جریان خون در نزدیکی سطح پوست، دمای پوست بالاتر می‌رود. اگر افزایش دمای بدن ادامه یابد، مکانیزم خنک‌کاری تبخیری از طریق تعریق شروع می‌شود.

پ-۱-۱-۲- ملاحظات محیطی آسایش حرارتی

فاکتورهای محیطی اصلی که بر آسایش حرارتی تأثیر می‌گذارند، همان‌هایی هستند که بر انتقال حرارت بدن موثرند، یعنی: دما، رطوبت، سرعت هوا و نوع پوشش. بدن انسان با ادراک شرایط حرارتی خود و همچنین محیط اطراف و یکپارچه‌سازی این اطلاعات به یک نتیجه کلی در مورد آسایش خود می‌رسد. این احساس آسایش، فیزیولوژیکی، روان‌شناختی و ذهنی

[۱] Vasomotor Adjustments

است. برای توسعه و ارائه معیارهای حرارتی باید شاخص‌هایی تعریف شوند که علاوه بر شرایط آسایش انسان، دربرگیرنده پارامترهای فیزیکی برای تنظیم و مشخص نمودن نوع تجهیزات کنترل محیط نیز باشد.

پ-۱-۱-۳- اطلاعات هواشناسی موقعیت احداث پروژه

وجود داده‌های دقیق و به‌روز هواشناسی مربوط به موقعیت احداث پروژه، اهمیت چشمگیری در کیفیت انجام طراحی داشته و لذا ضروری است این اطلاعات از مراجع قابل استناد اخذ و در مدارک طراحی ارائه گردد. از مهمترین این موارد می‌توان، دما، رطوبت نسبی، فشار، سرعت باد و فشار جزئی بخار را نام برد.

پ-۱-۱-۳-۱- دما

دما یکی از مهمترین معیارهای آسایش مسافران در محیط خطوط قطار شهری و فاکتوری اساسی در انتخاب سیستم تهویه مطبوع و تعیین ظرفیت آن می‌باشد و بدین جهت وجود اطلاعات دقیق شرایط دمایی محیط بیرون شامل دمای متوسط روزانه در ماه‌های مختلف سال و تغییرات روزانه (در ساعات صبح و عصر)، ماهانه و سالانه آن در طراحی سیستم تهویه مورد استناد قرار می‌گیرد. همچنین ضروری است اطلاعات دمایی شامل دمای خشک و مرطوب و نقطه شبنم باشد.
لازم به ذکر است جهت بدست آوردن داده‌های مربوط به دمای کمینه، بیشینه و تغییرات دما، در صورت عدم وجود اطلاعات قابل استناد، نیاز به استخراج اطلاعات با روش‌های آماری مطابق روش‌های پذیرفته شده از جمله استاندارد ASHRAE یا نشریه شماره ۲۷۱ می‌باشد.

پ-۱-۱-۳-۲- رطوبت نسبی

میزان رطوبت نسبی هوا نیز از پارامترهای تأثیرگذار بر انتخاب نوع سیستم تهویه مطبوع می‌باشد (به طور مثال در صورت بالا بودن میزان رطوبت نسبی امکان استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع تبخیری وجود نداشته و یا بازدهی آن بسیار پایین می‌باشد) و لذا بایستی اطلاعات مربوط به رطوبت نسبی نیز مشابه اطلاعات دمایی استخراج و میزان کمینه و بیشینه آن مشخص گردد.

پ-۱-۱-۳-۳- فشار

فشار هوا و ارتفاع موقعیت پروژه از سطح دریا از جمله فاکتورهای تأثیرگذار در محاسبات سیستم تهویه مسیر بوده که اطلاعات آن نیز بایستی جمع‌آوری و در جداول شرایط آب و هوایی طرح خارج ارائه گردد.

پ-۱-۱-۳-۴- سرعت باد

سرعت باد در محاسبه شاخص (RWI) هنگام ورود مسافر به داخل ایستگاه و همچنین در طراحی جت‌فن‌ها در دهانه تونل اثرگذار است و لذا مشابه موارد پیشین در این بخش نیز با استفاده از داده‌های هواشناسی، تغییرات سرعت باد در طول سال به‌صورت میانگین، کمینه و بیشینه و همچنین مقدار متوسط آن بایستی ارائه گردد.

پ-۱-۱-۳-۵- فشار بخار

فشار جزئی بخار نیز ممکن است بر روی احساس راحتی تأثیرگذار باشد و لذا برای انجام محاسبات و طراحی سیستم تهویه، اطلاعات مربوط به آن نیز بایستی اخذ و ارائه گردد.

با توجه به مطالب ارائه شده، شرایط طرح خارج در به دست آوردن شاخص‌های آسایش افراد در فصل تابستان و زمستان نقشی کلیدی دارند و لذا این اطلاعات بایستی در قالب جداولی مشابه جدول (پ-۱-۲) ارائه گردند.

جدول پ-۱-۲: شرایط هوای طرح خارج پروژه

		مقدار
شرایط جغرافیایی	طول جغرافیایی (deg)	
	عرض جغرافیایی (deg)	
	ارتفاع از سطح دریا (ft)	
	فشار بارومتریک (in.w)	
	ضریب محسوس	
	ضریب نهان	
	اندازه تغییرات سالانه دما (^oF)	
شرایط تابستانی	دمای خشک (^oF)	
	تغییرات روزانه (^oF)	
	دمای مرطوب (^oF)	
	رطوبت نسبی (٪)	
	مقدار رطوبت (gr/lb)	
	نقطه شبنم (^oF)	
	سرعت باد (کمینه، متوسط، بیشینه) (m/s)	
	دمای خشک / مرطوب صبحگاهی (^oF)	
	دمای خشک / مرطوب عصرگاهی (^oF)	
	فشار بخار (in.w)	
شرایط زمستانی	دمای خشک (^oF)	
	رطوبت نسبی (٪)	
	سرعت باد (کمینه، متوسط، بیشینه) (m/s)	
	دمای خشک / مرطوب صبحگاهی (^oF)	
	دمای خشک / مرطوب عصرگاهی (^oF)	

پ-۱-۱-۴- تعیین شرایط آسایش در داخل ایستگاه

هدف از وجود سیستم تهویه، حفظ شرایط آسایش از لحاظ دما، سرعت و تغییرات سریع فشار هوا در شبکه و تأمین شرایط مناسب کیفیت هوا شامل پارامترهایی از جمله آلودگی‌های باکتریایی، دی‌اکسید کربن، مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن

و ذرات معلق است. اگرچه تعریف معیار جهانی برای موضوع شرایط راحتی در داخل ایستگاه زیرزمینی با توجه به شرایط متفاوت جوامع مختلف دشوار است، اما همان‌گونه که پیشتر گفته شد، برای تعیین شرایط آسایش معیارهایی توسط مراجع مختلف مشخص شده‌اند از جمله آن‌ها می‌توان به RWI، HDR نام برد. همچنین اخیراً، مدل‌های آسایش حرارتی گذرایی پیشنهاد شده‌اند که به طور جامع‌تری به مفهوم آسایش حرارتی پرداخته‌اند و به طور مثال در ارزیابی شرایط آسایش، ادراک آسایش حرارتی موضعی و کل بدن انسان را در محیط گذرا بررسی کرده‌اند[۱].

این پیوست به معرفی شاخص‌های حرارتی حرارت نسبی و نرخ کسر حرارت می‌پردازد، ولیکن استفاده از شاخص‌های محیطی پیشرفته‌تر در فرایند طراحی در صورت امکان‌پذیر بودن، ارجح است.

پ-۱-۱-۴-۱- شاخص آسایش حرارتی در کاربری قطار شهری

شاخص حرارت نسبی (RWI) و نرخ کسر حرارت (HDR) شاخص‌هایی هستند که برای کنترل دما در مترو پیشنهاد می‌شوند. این دو شاخص به‌صورت اختصاصی برای کاربری مترو و یا پدیده‌های گذرا توسعه داده شده‌اند. این شاخص‌ها بر اساس شاخص کرنش نسبی (RSI)[۲]، که نسبت تنش حرارتی واقعی به بیشینه تنش حرارتی قابل تحمل افراد است، تعریف شده‌اند. تنش حرارتی زمانی اتفاق می‌افتد که علیرغم تأثیرات تنظیم وازوموتور، حرارت تولید شده در اثر متابولیسم در بدن، بیشتر از حرارت دفع شده توسط مکانیزم‌های تابش و جابه‌جایی باشد. مقدار حرارت دفع شده توسط تعریق در بدن برای ثابت نگهداشتن بدن در دمای پایدار، معیاری از تنش حرارتی است. فلذا شاخص RSI، معیاری از مقدار واقعی تعریق مورد نیاز بدن به مقدار بیشینه قابل تحمل تعریق است. ازآنجاکه شاخص کرنش نسبی نمایانگر آسایش حرارتی نمی‌باشد، معیاری مناسب برای کاربرد در محیط مترو نیست.

برای محیط گرم بر اساس تئوری شاخص کرنش نسبی (RSI) و نتایج آزمایشی که بر اساس آسایش افراد توسط موسسه ASHRAE انجام شده است، شاخص حرارت نسبی (RWI) توسعه داده شده است. برای محیط سرد شاخص کرنش نسبی (RSI) با شاخصی دیگر به نام نرخ کسر حرارت (HDR) تطبیق داده شده است.

شاخص حرارت نسبی (RWI) با توجه به شرایط رطوبت و فشار بخار، توسط دو معادله (پ-۱-۱) و (پ-۱-۲) محاسبه می‌شود. اگر فشار بخار آب در هوا بزرگ‌تر از ۰/۶۷ in-Hg (۲۲۶۸,۸۸Pa) باشد، RWI از رابطه (پ-۱-۱) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۱-۱)
$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 1.13(T - 95) + RI_a}{70(1.73 - P)}$$

اگر فشار بخار آب در هوا کوچک‌تر یا مساوی با ۰/۶۷ in-Hg (۲۲۶۸,۸۸Pa) باشد، RWI از رابطه (پ-۱-۲) محاسبه می‌شود:

---

[۱] از جمله مقاله:

Guan, D., D. Abi-Zadeh, M. Tabarra, and H. Zhang. 2009. Transient thermal comfort model for subways. Presented at 13th International Symposium of Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, British Hydromechanics Research Group, New Jersey.

[۲] Relative Strain Index (RSI)

رابطه (پ-۱-۲)

$$RWI = \frac{M(I_{cw} + I_a) + 1.13(T - 95) + RI_a}{74.2}$$

شاخص نرخ کسر حرارت (HDR) در واحد $\frac{BTU}{hr.ft^2}$ نیز به صورت رابطه (پ-۱-۳) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۱-۳)
$$HDR = \frac{D}{H} = -M - \frac{1.13(T-87)}{I_{cw}+I_a} + 9 - \frac{+RI_a}{I_{cw}+I_a}$$

پارامترهای استفاده شده در معادلات که شاخص‌های RWI و HDR را می‌سازند در جدول (پ-۱-۳) آمده‌اند و در ادامه توضیح داده می‌شوند.

جدول پ-۱-۳: پارامترهای تأثیرگذار بر شاخص حرارت نسبی RWI و حرارت از دست رفته HDR

پارامتر	تعریف	واحد
M	نرخ متابولیک	$\frac{\text{Btu}}{\text{hr.ft}^2}$
Icw	عایق‌بندی لباس بر اساس فرض لباس خیس	clo
Ia	تأثیر عایق‌بندی لایه مرزی هوا	clo
t	دمای هوای خشک	F
t-95	تفاوت دمای هوای خشک و متوسط دمای پوست یک شخص، دقیقاً قبل از آنکه شخص احساس عدم آسایش گرمایی داشته باشد	F
t-87	تفاوت دمای هوای خشک و متوسط دمای پوست یک شخص، دقیقاً قبل از آنکه شخص احساس عدم آسایش سرمایی داشته باشد	F
R	حرارت تابشی ورودی متوسط از منابعی به غیر از دیوارها در دمای اتاق	$\frac{\text{Btu}}{\text{hr.ft}^2}$
D	حرارت از دست رفته	$\frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2}$
H	زمان در معرض قرار گرفتن	hr

عباراتی که برای تعیین شاخص‌های RWI و HDR در معادلات فوق بکار رفته‌اند، در ادامه توضیح داده خواهد شد.

پ-۱-۱-۴-۲- نرخ متابولیک (M)

نرخ متابولیک در افراد به جنسیت، سلامتی، سطح فعالیت‌های فیزیکی و در نهایت محیط بستگی دارد. در حین بیشتر فعالیت‌های فیزیکی، به دلیل پایین بودن کارایی حرارتی بدن انسان، تقریباً تمام انرژی متابولیک در بدن به حرارت تبدیل می‌شود. نرخ متابولیک می‌تواند به صورت مستقیم از طریق روش‌های کالری‌متری (اندازه‌گیری گرمای آزاد شده از بدن در بازه زمانی معین) یا بطور غیر مستقیم و با دقت نسبتاً بالایی از طریق نرخ اکسیژن مصرف شده، اندازه‌گیری شود. نرخ متابولیک برخی از فعالیت‌هایی که ممکن است در محیط مترو صورت پذیرد، در جدول (پ-۱-۴) آورده شده است. این نرخ در واحد سطح بدن یک انسان متوسط با مساحت $۱۹/۵\text{ft}^2$ و با فرض نسبت نرخ متابولیک به مساحت سطح پوست برابر برای مردان، زنان و کودکان در جدول درج شده است.

همچنین مقادیر نرخ متابولیک مربوط به فعالیت‌های مختلف را می‌توان از استاندارد ملی ۲۳۰۲۹ نیز استخراج نمود.

جدول پ-۱-۴: نرخ متابولیک برای فعالیت‌های فیزیکی مختلف[۱]

فعالیت	Btu per(hr)	Btu per(hr)(sq ft)
مبنا (استراحت مطلق)	۲۹۱	۱۵
استراحت نشسته	۳۸۴	۲۰
استراحت ایستاده	۴۳۰	۲۲
فروش بلیط به‌صورت نشسته	۴۹۰	۲۵
فروش بلیط به‌صورت ایستاده	۵۴۹	۲۸
فروش بلیط به‌صورت نشسته (ساعات شلوغی)	۵۵۸	۲۹
فروش بلیط به‌صورت ایستاده (ساعات شلوغی)	۶۰۰	۳۱
قدم‌زدن گاه‌به‌گاه	۷۶۱	۳۹
پیاده‌روی (۲ مایل‌برساعت)	۷۶۱	۳۹
تعمیرات سبک	۹۵۴	۴۹
پیاده‌روی (۳ مایل بر ساعت)	۱۰۵۰	۵۴
پیاده‌روی (۴ مایل بر ساعت)	۱۳۹۰	۷۱
پایین‌رفتن از پله‌ها	۱۴۴۰	۷۴
تعمیرات متوسط	۱۴۹۰	۷۶
بارکشی	۱۶۰۰	۸۰
تعمیرات سنگین	۱۸۰۰	۹۲
دویدن (۵/۳ مایل بر ساعت)	۲۲۶۸	۱۱۶
پیاده‌روی (۵ مایل بر ساعت)	۲۳۳۰	۱۲۰
پیاده‌روی تند (۵/۳ مایل بر ساعت)	۲۵۸۰	۱۳۲
بالارفتن از پله‌ها	۴۳۶۵	۲۲۴

پ-۱-۱-۴-۳- نرخ متابولیک در حالت ناپایا

همان‌طور که گفته شد نرخ متابولیک برای برخی از فعالیت‌ها در حالت پایا در جدول (پ-۱-۴) آورده شد. از آنجا که نوع فعالیت فیزیکی مسافران در مترو اغلب در حال تغییر می‌باشد، نرخ متابولیک آن‌ها نیز پیوسته تغییر می‌یابد. نرخ متابولیک مربوط به تغییر از یک فعالیت به دیگر فعالیت‌ها را می‌توان به صورت تقریبی بر اساس آزمایش‌های کمبود اکسیژن سنجید. نرخ مصرف اکسیژن به‌طور متوسط در بازه‌های زمانی ۶ دقیقه‌ای تغییر می‌کند و فرض می‌شود تغییر نرخ متابولیک نیز در یک بازه ۶ دقیقه‌ای تغییر یافته و لذا می‌توان با یک تقریب خطی، نرخ متوسط متابولیک را برای فعالیت‌های گوناگون که در یک بازه ۶ دقیقه‌ای اتفاق می‌افتند را از رابطه (پ-۱-۴) میان‌یابی نمود.

[۱] Adopted from ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1972

رابطه (پ-۱-۴)

$$M_T = M_I - \frac{T}{6}(M_I - M_F)$$

که در آن M_T نرخ متابولیک در زمان سپری شده T بر حسب $\frac{\text{Btu}}{\text{hr.ft}^2}$ است. T زمان سپری شده بر حسب دقیقه، M_I نرخ متابولیک اولیه و M_F نرخ متابولیک نهایی و هر دو بر حسب $\frac{Btu}{hr.ft^2}$ می‌باشند.

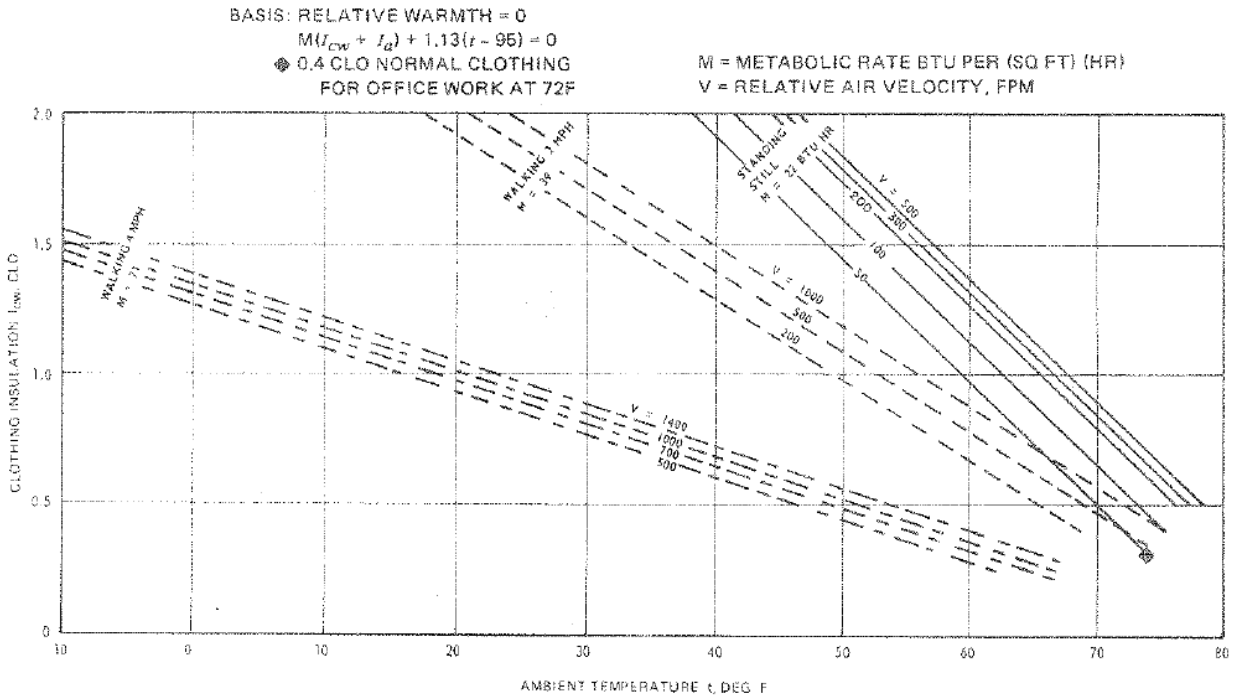
پ-۱-۱-۴-۴- عایق لباس (I_{cw})

تأثیر عایقی لباس I_{cw} بر اساس فرض لباس- خیس[1] می‌باشد. واحد عایق لباس clo می‌باشد. یک تعریف از واحد clo عبارت است از میزان عایقی از پوشش است که برای ثابت نگاه داشتن دمای بدن فرد در ۹۲ F (۳۳/۳ °C) در حالیکه دمای اتاق ۷۰F (۲۱/۱ °C) و سرعت هوا کمتر از ۱۰ فوت بر دقیقه و رطوبت کمتر از ۵۰ درصد است، با نرخ متابولیک ۱۸/۵ $\frac{Btu}{hr.ft^2}$ لازم است. در هنگام فعالیت بدنی میزان عایق‌بندی لباس به دلیل تعریق بدن و در نتیجه نم‌دار شدن لباس کاهش می‌یابد. عایق‌بندی لباس، I_{cw}، هنگامی‌که شرایط هوای بیرون نسبتاً سرد است از شکل (پ-۱-۱) تعیین می‌شود. مقادیر عایق لباس به دست آمده در این شکل بر این اساس است که فرد به‌گونه‌ای لباس پوشیده باشد که در شرایط محیطی مشخص شده، احساس راحتی کند. بنابراین I_{cw} تنها بر اساس نوع فعالیت شخص و شرایط محیطی به دست می‌آید و لذا این رویکرد نیاز به جزئیات و مشخصات لایه‌های لباس‌های پوشیده شده را برطرف می‌نماید.

جدول پ-۱-۵: تأثیر عایق بر لباس بر اساس فعالیت‌های مختلف فیزیکی

فعالیت	سرعت ناشی از فعالیت V_b fpm	عایق *I_{cw} Clo (با فرض لباس مرطوب)	نرخ متابولیک M Btu per (hr)(sq ft)
استراحت مطلق	۰	۰/۶	۱۵
استراحت نشسته	۲۰	۰/۶	۲۰
فروش بلیط نشسته	۵۰	۰/۴	۲۵
فروش بلیط ایستاده	۳۰	۰/۵	۲۸
قدم زدن گاه‌به‌گاه	۱۰۰	۰/۴	۳۹
پیاده‌روی (۲ مایل بر ساعت)	۲۰۰	۰/۴	۳۹
پیاده‌روی (۳ مایل بر ساعت)	۳۰۰	۰/۳۵	۵۴
پیاده‌روی (۴ مایل بر ساعت)	۴۰۰	۰/۳	۷۱
* مقادیر I_{cw} برای تیپ جامه کاری است که در هنگام خشک بودن لباس، معادل 1 clo اثر عایقی دارند.			

[1] Wet-cloth



شکل پ-۱-۱: پوشش راحت به‌صورت تابعی از t، M و V

پ-۱-۱-۴-۵- مقادیر عایق‌بندی لباس در حالت ناپایا

برای شرایط گذرای موجود در مترو مقادیر I_{cw} با فرض داشتن زمان گذرای ۶ دقیقه‌ای مشابه نرخ متابولیک محاسبه می‌شود. برای محاسبه I_{cw}، در حالتی که فرد یک لباس سبک تابستانی پوشیده باشد، ابتدا مقادیر عایق‌بندی در حالت پایا از جدول (پ-۱-۵) خوانده شده و سپس از رابطه (پ-۱-۵)، I_{cw} در زمان گذار محاسبه می‌شود.

رابطه (پ-۱-۵)
$$I_{cwT} = I_{cwI} - \frac{T}{6}(I_{cwI} - I_{cwF})$$

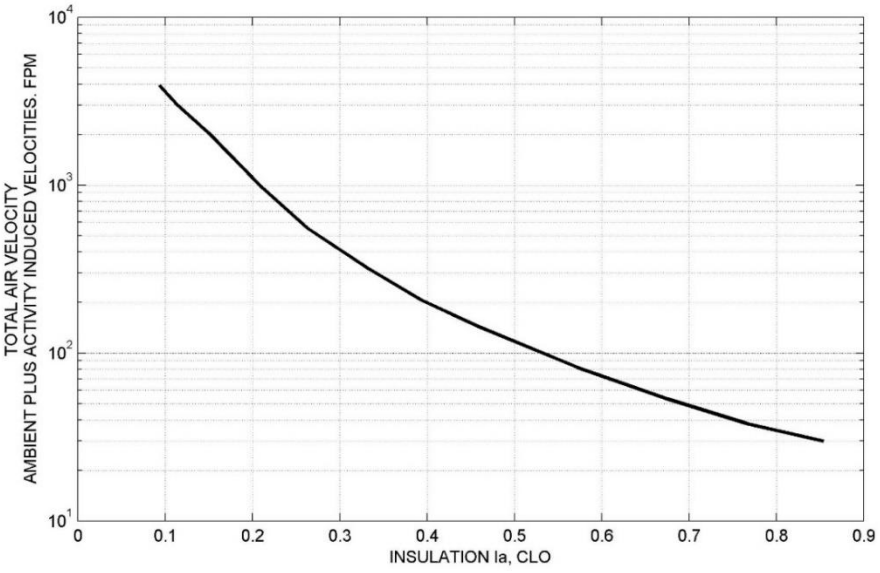
که در آن I_{cwT} عایق‌بندی لباس در زمان سپری شده T بر حسب clo است. T زمان سپری شده بر حسب دقیقه، I_{cwI} مقدار عایق‌بندی لباس در زمان اولیه و I_{cwF} مقدار عایق‌بندی لباس در زمان نهایی و هر دو بر حسب clo می‌باشند.

در فصول سردتر، زمانیکه لازم است لباس‌های ضخیم‌تری نسبت به فصل تابستان پوشید، مقدار clo متناسب با پوشش مسافران در حین تغییر سطح فعالیت، از شکل (پ-۱-۱) و در چارچوب نوع پوشش مسافران در شرایط طراحی تعیین می‌گردد.

پ-۱-۱-۴-۶- تأثیر عایق‌بندی لایه مرزی هوایی (I_a)

تشکیل لایه مرزی هوا روی پوست و یا لباس باعث اهمیت این پارامتر در محاسبه شاخص RWI می‌شود که آن را با I_a نشان می‌دهند و همچنین واحد اندازه‌گیری آن نیز clo است. این پارامتر با تغییر نوع فعالیت فیزیکی و همچنین سرعت هوا تغییر می‌کند. اما برای این پارامتر مقدار گذرا در مدت شش دقیقه تعریف نمی‌شود. شکل (پ-۱-۲) تغییرات این

پارامتر را با سرعت کلی هوا نشان می‌دهد[1]. مقادیر سرعت‌های القایی ناشی از فعالیت‌های فیزیکی در جدول (پ-۱-۵) آورده شده‌اند. سرعت هوای محیط V_a از شرایط هوا در محیط بیرون یا جریان هوا در ایستگاه به دست می‌آید.



شکل پ-۱-۲: مقدار استاندارد Ia بر اساس سرعت هوا

کاهش سرعت هوا یا کاهش سطح مؤثر در معرض هوا در هنگام ازدحام بر احساس آسایش فرد تأثیر می‌گذارد (مسافران در هنگام ازدحام نمی‌توانند تأثیر وزش باد ملایم را حس کنند). سرپا ایستادن به‌صورت شانه به شانه در حدود ۱۰ درصد و ایستادن به‌صورت فشرده در حدود ۳۰ درصد سطح موثر را کاهش می‌دهد و متعاقباً میزان عایق‌بندی را افزایش می‌یابد. قسمتی از اثر ازدحام را می‌توان با تهویه مستقیم هوا به‌صورت عمودی و رو به پایین کاهش داد.

- **دما (T)**

اختلاف دمای پوست بدن و هوای محیط بر انتقال حرارت از سطح پوست تأثیر می‌گذارد. فرض می‌شود که دمای پوست بسته به گرم یا سرد بودن هوای بیرون، بین ۹۵F (۳۵ °C) و ۸۷F (۳۰/۵ °C) باشد. بیشتر افراد هنگامی‌که دمای متوسط پوست بدنشان ۹۱F (۳۲/۷ °C) باشد، احساس راحتی می‌کنند.

- **تابش (R)**

تابش معمولاً در زیر اشعه آفتاب دارای اهمیت می‌باشد. در فضای ایستگاه زیرزمینی می‌توان از این عبارت صرف‌نظر کرد. در فضای آزاد بیرون از مترو، برای افراد ایستاده یا در حال حرکت، به طور متوسط مقداری در حدود $۱۰ \frac{\text{Btu}}{\text{hr.ft}^2}$ و در بیشترین حالت یعنی هوای صاف و حداکثر زاویه تابش آفتاب، می‌تواند به مقدار $۴۵ \frac{\text{Btu}}{\text{hr.ft}^2}$ برسد.

- **فشار بخار (P)**

[1] سرعت کلی هوا برابر مجموع سرعت هوای محیط به علاوه سرعت هوای القاء شده در اثر فعالیت فیزیکی می‌باشد.

فشار جزئی بخار آب در هوا می‌تواند بر احساس راحتی افراد تأثیر بگذارد. داده‌های موسسه ASHRAE نشان می‌دهد که در فشارهای جزئی کمتر از ۰/۶۷ in-Hg (۲۲۶۸,۸۸Pa) شاخص RWI مستقل از رطوبت است. در فشارهای بالاتر از این مقدار، میزان راحتی افراد تحت تأثیر رطوبت قرار می‌گیرد.

- **نرخ افت حرارت تبخیری**

افت حرارت تبخیری در هوای گرم پس از اینکه نرخ حرارت انتقال داده شده از بدن به محیط در اثر مکانیزم‌های جابه‌جایی و تابشی برای حفظ دمای بدن در مقادیر قابل‌قبول، کافی نباشد، رخ می‌دهد و غدد تعریق برای دفع حرارت بدن فعال می شوند. در محیط‌های نسبتاً سرد، عمدتاً ضرورتی به عملکرد این مکانیزم نیست و بنابراین خنک‌کاری از طریق تبخیر در دستگاه تنفسی که به طور معمول مقادیری در حدود $۹\frac{\text{Btu}}{\text{hr.ft}^2}$ از سطح پوست دارد، صورت نمی‌پذیرد.

- **زمان در معرض قرار گرفتن (H)**

مدت زمانی H (بر حسب ساعت) که فرد در محیطی مشخص قرار می‌گیرد.

- **حرارت هدر رفته (D)**

در یک محیط سرد وقتی که مکانیزم تنظیم وازوموتور بدن انسان متناسب با حرارت از دست رفته نباشد، دمای بدن افت می‌کند. این حرارت هدر رفته از بدن را با D نشان می‌دهند. مطالعات در زمینه این افت دما نشان می‌دهد که انرژی هدر رفته از بدن می‌تواند به میزان ۱۵ تا $۳۰\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2}$ از مساحت بدن، بدون از دست رفتن احساس آسایش رخ دهد. اما اگر دمای داخلی بدن شخص ثابت بماند و دمای متوسط پوست شخص نیز کمتر از ۸۷ F (۳۰/۵ °C) نگردد، حرارت هدر رفته از بدن نباید از $۹\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2}$ بیشتر شود. بنابراین مقدار $۹\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2}$ اثر قابل ملاحظه‌ای در محاسبات دارد و همچنین مقدار $۲۰\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2}$ به عنوان آستانه ناراحتی فرض می‌شود. کاهش مقدار D تضمین‌کننده آسایش بیشتر نیست، زیرا در این حالت دمای بدن صرفاً با سرعت کمتری افت پیدا می‌کند و اثر این اتلاف حرارت در بدن انباشته می‌گردد.

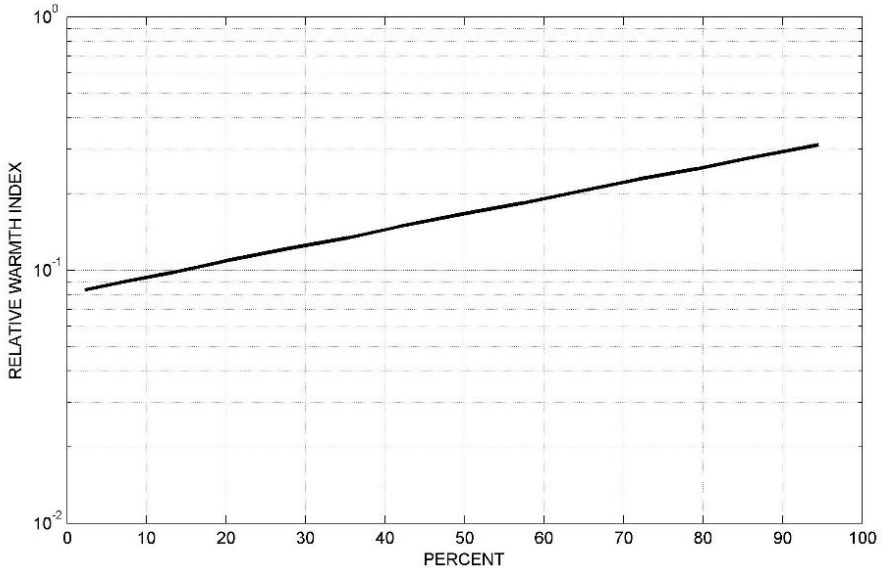
پ-۱-۱-۴-۷- دامنه آسایش برای شاخص حرارت نسبی

تقریباً مقادیر شاخص حرارت نسبی یکسان می‌تواند صرف‌نظر از شرایط محیط و نوع فعالیت بدنی (که البته از ترکیب آن‌ها مقدار شاخص حرارت نسبی (RWI) به دست می‌آید)، نشان‌دهنده سطح آسایش مشابهی باشد. جدول (پ-۱-۶) شاخص حرارت نسبی را به طبقه‌بندی آسایش در مرجع ASHRAE مرتبط می‌کند. از این طریق شاخص حرارت نسبی می‌تواند به‌صورت کمّی برای ترکیبی از شرایط محیطی و فعالیت بدنی به کار رود.

جدول پ-۱-۶: طبقه‌بندی ASHRAE و شاخص RWI متناظر با آن‌ها

طبقه‌بندی شرایط آسایش از دیدگاه ASHRAE	شاخص گرمای نسبی
گرم	۰/۲۵
کمی گرم	۰/۱۵
راحت (مناسب)	۰/۰۸
کمی خنک	۰/۰۰

برای اینکه مشخص شود با مقادیر جدول (پ-۱-۶) و مقادیر کمی RWI چه درصدی از افراد احساس راحتی می‌کنند، می‌توان از نمودار شکل (پ-۱-۳) استفاده نمود. محور افقی درصدی از افراد است که برای احساس آسایش در تابستان به محیطی خنک‌تر نیاز دارند.



شکل پ-۱-۳: درصدی از افراد که خواستار محیط خنک‌تر در تابستان هستند

پ-۱-۱-۴-۸- نحوه کاربرد شاخص حرارت نسبی (RWI)

معیار RWI به دو طریق انتخاب می‌گردد:

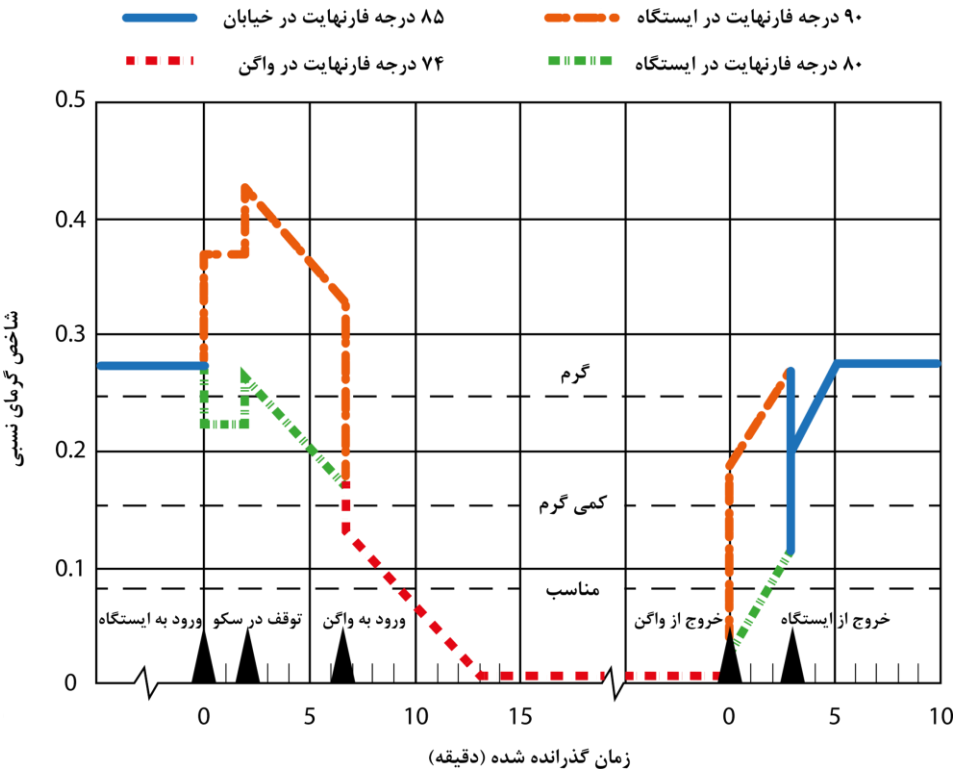
- در نظرگیری شاخص RWI که برای یک درصد معین از افراد رضایت‌بخش باشد.
- در نظرگیری شاخص RWI در تطابق با شرایط محیطی یا خصوصیات سیستم حمل نقل

پ-۱-۱-۴-۹- معیار دما و رطوبت

معیار شرایط محیطی برای فضای خطوط قطار شهری می‌تواند از حداقل مورد نیاز برای حفظ سلامت افراد تا حد ایده‌آل متفاوت باشد. یکی از اهداف طراحی، تنظیم شرایط محیطی با ایجاد معیارهای RWI و HDR که بتوان از طریق آن‌ها به سطح رضایت‌بخشی از آسایش رسید، می‌باشد.

به طور مثال در تعیین معیاری برای دما، رطوبت و سرعت هوا در ایستگاه با آب و هوای گرم، شاخص RWI می‌تواند به صورت یکپارچه برای کل ایستگاه و یا به صورت جداگانه برای تراز طبقه میانی یا تراز سکو لحاظ شود. شرایط محیطی در ایستگاه باید همانند شرایط محیطی بیرون یا بهتر از آن باشد، فلذا دو روش کلی برای طراحی شرایط محیطی ایستگاه را می‌توان به کار برد، روش اول انتخاب یک مقدار ثابت برای شاخص RWI است و روش دوم تنظیم مقدار برای شاخص RWI ایستگاه، بین مقدار RWI برای محیط بیرون ایستگاه و محیط داخل قطار است. در این حالت محیط ایستگاه حداقل شرایط آسایش محیط خارج ایستگاه را دارا بوده و همچنین حالت گذرا از محیط بیرون به محیط واگن تهویه شده را فراهم می‌آورد.

شکل (پ-۱-۴) تغییرات شاخص RWI در طول سفر در یک خط قطار شهری برای دو مقدار دمای طراحی برای محیط داخل ایستگاه را به طور نمونه نمایش می‌دهد.



شکل پ-۱-۴: نمونه تغییرات شاخص RWI در طول یک سفر با سیستم قطار شهری

پ-۱-۱-۴-۱۰- شاخص HDR برای شرایط زمستانی

کسر گرما در یک محیط سرد زمانی رخ می‌دهد که اثر وازوموتور برای جبران تلفات حرارتی بدن کافی نباشد و دمای بدن افت کند. شاخص HDR بیانگر نرخ از دست رفتن گرمای بدن می‌باشد و تفاوت‌هایی با شاخص RWI از نظر کاربرد دارد، زیرا کاهش شاخص RWI نشان دهنده شرایط محیطی مناسب‌تر برای افراد می‌باشد چرا که تغییری در دمای بدن و تلفات حرارتی از طریق تعریق (که روشی برای کنترل دمای بدن و نشان‌دهنده احساس ناراحتی است) ایجاد نمی‌شود، اما کاهش شاخص HDR، لزوماً احساس آسایش بهتری را نشان نمی‌دهد و دمای بدن (علیرغم کاهش سرعت آن) پیوسته کاهش می‌یابد.

تفاوت عمده بین استفاده از مفهوم HDR برای آسایش حرارتی در یک محیط سرد و استفاده از مفهوم RWI برای یک محیط گرم این است که در ارزیابی شرایط آسایش، بزرگی کسر گرمای انباشته مهمتر از شاخص HDR است در حالی که شاخص RWI خود مستقیماً نشان‌دهنده میزان نارضایتی است.

واکنش به کمبود گرما تجمعی است، بدین معنا که در استفاده از شاخص معیار HDR، پیشینه و شرایط قبلی افراد در تعیین آسایش حرارتی مهم است. به عنوان مثال، شخصی که در خارج از منزل با کمبود گرمایی در حدود آستانه آسایش او پیاده به سوی ایستگاه حرکت می‌کند، هنگامی‌که وارد ایستگاهی می‌شود که گرمتر از فضای خارج است، شرایط محیطی ایستگاه می‌تواند باعث شود کسری گرما تا فراتر از آستانه آسایش کاهش یابد. در این حالت، شخص ممکن است در هنگام حضور در ایستگاه احساس سرمای ناخوشایندی داشته باشد. با این حال، همین فرد هنگام ورود به همان ایستگاه در حالی که احساس آسایش حرارتی دارد، می‌تواند همچنان از نظر حرارتی، آسوده باشد.

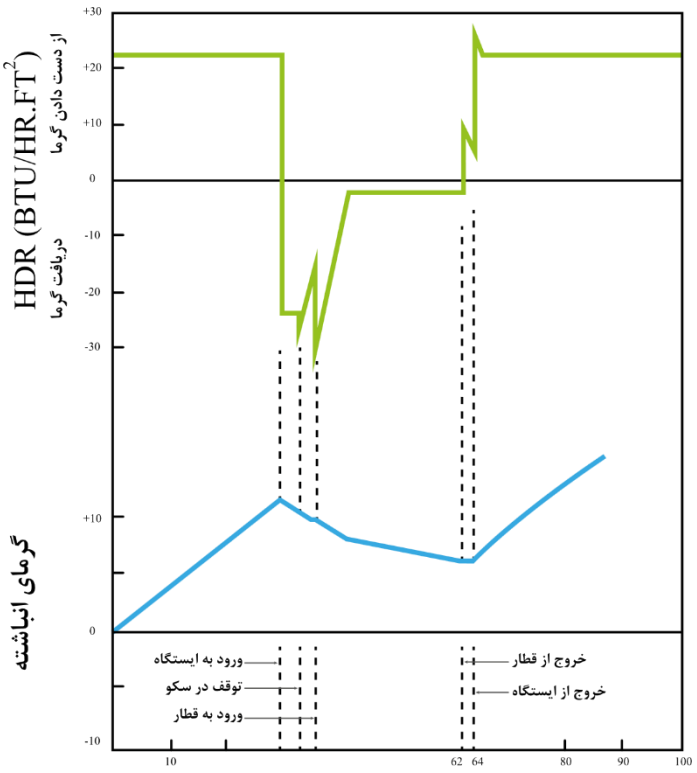
آسایش حرارتی در یک محیط سرد مستقیما به مقدار و نوع پوشش بستگی دارد.

نکته قابل توجه آن است که شاخص HDR زمانی استفاده می‌شود که دمای هوای بیرون سرد بوده و احتمالا افراد تلفات حرارتی بالاتر از $Btu/hr.ft^2$ ۹ را تجربه می‌کنند؛ لذا حداقل دمای طراحی در ایستگاه می‌تواند با توجه به این محدودیت محاسبه گردد و در نتیجه می‌توان از شاخص HDR برای طراحی سیستم‌های کنترل محیطی در فضای عمومی ایستگاه استفاده نمود تا در شرایط هوای سرد، مانع از تجربه کمبود گرمای بیشتر در محیط ایستگاه نسبت به فضای باز بیرون شد، یعنی شاخص HDR زمانی که مسافران در ایستگاه هستند، منفی باشد.

شاخص HDR نیز مانند RWI به نوع فعالیت بدنی، عایق لباس و سرعت هوا وابسته است. به همین علت سناریویی جهت تعیین HDR و دمای ایستگاه نیاز است.

همچنین علاوه بر این موارد، در تعیین دمای طراحی برای فصل سرد، بایستی کمینه دما جهت جلوگیری از یخزدگی تجهیزات را نیز مد نظر قرار داد.

شکل (پ-۱-۵) یک نمونه تغییرات شاخص HDR در فرایند سیر مسافر را نمایش می‌دهد.



شکل پ-۱-۵: نمونه تغییرات شاخص HDR در طول یک سفر با سیستم قطار شهری

پ-۱-۱-۵- دمای طراحی تونل

شرایط دمایی در تونل در کارکرد نرمال، ازدحام و اضطراری در جدول (پ-۱-۷) فهرست شده است. این موارد می‌تواند متناسب با شرایط طراحی و الزامات هر پروژه، تدقیق گردد.

جدول پ-۱-۷: شرایط دمایی مجاز برای تونل در حالت نرمال و اضطراری

شرایط عملیاتی سیستم	شرایط دمایی	°F	°C
شرایط نرمال	دمای مطلوب	۹۵	۳۵
	متوسط حداکثر دما	۱۰۴	۴۰
	بیشینه دما در ساعات شلوغی	۱۱۳	۴۵
شرایط ازدحام جمعیت	بیشینه دما در زمان عملکرد مناسب وسایل	۱۰۴	۴۰
	بیشینه دما در مکان شلوغی	۱۱۳	۴۵
شرایط اضطراری	بیشینه دما در مسیرهای فرار	۱۲۲	۵۰

پ-۱-۱-۶- کیفیت هوا

معیارهای کیفیت هوا در این بخش، محدودیت‌های عملی در مورد کمّیت و ماهیت آلاینده‌های موجود در هوا که بر مسافران و کارکنان در فضاهای عمومی قطار شهری تأثیرات قابل توجه می‌گذارد را ارائه می‌دهد.

کیفیت هوای مورد نیاز در فضاهای عمومی، در اینجا توسط سه عامل میزان بوها، ذرات معلق و گازها سنجیده می‌شود.

کیفیت هوا در محیط قطار شهری همانند هوای محیط خارج آن هنگامی که محتوی غلظتی از آلاینده‌ها که برای زیان رساندن به سلامت، آسایش و سطح دید افراد کافی نباشد و موجب ناخرسندی انسان‌ها نشود، تمیز اتلاق می‌گردد.
کیفیت هوا در محیط قطار شهری بستگی به میزان آلاینده‌های تولید شده موجود در هوا و همچنین کیفیت هوای ورودی به محیط دارد، مسافران و پرسنل قطار شهری ممکن است، یک یا چند مورد از اثرات آلاینده‌ها را که دارای غلظت کافی هستند، تجربه نمایند:

- آزار دهنده، مانند بوهای نامطبوع
- ناتوانی کوتاه مدت، مانند خواب‌آلودگی ناشی از افزایش سطح دی‌اکسید کربن که پس از مدت کوتاهی بعد از کاهش سطح CO_2 به حد نرمال، برطرف می‌گردد.
- تجمع طولانی مدت سموم و مواد زیان‌آور، به طور مثال ناشی از تماس طولانی مدت با گرد و غبار سیلیس در هوا

برای کنترل میزان آلاینده‌ها، بایستی میزان ورود آن‌ها به محیط را کنترل و از انتقال و پخش آن‌ها بوسیله هوا جلوگیری نمود، در جایی‌که به کارگیری این روش امکان‌پذیر نباشد، بایستی غلظت آلاینده‌ها از طریق رقیق‌سازی با تهویه هوای تازه کاهش یابد.
در فرایند طراحی، بایستی دهانه‌های ورود هوا به فضای قطار شهری بگونه‌ای انتخاب گردد که از ورود هوای آلوده یا بی‌کیفیت به طور مثال در نزدیکی سطح زمین، جاییکه امکان ورود دود خودروها وجود دارد، خودداری نمود.

پ-۱-۱-۶-۱- میزان بوی مجاز

بازخورد افراد نسبت به بوها، نوع و میزان آن‌ها متفاوت بوده و گستره وسیعی دارد، لذا در اینجا تنها به راهکارهای کنترل منابع ایجاد بو پرداخته می‌شود. منابع اصلی تولید بو در محیط‌های قطار شهری عبارت‌اند از: بوهای محیط بیرون که ممکن است از طریق شفت‌های هوا وارد شوند، فضاهای بوناک داخل ایستگاه از جمله سالن غذاخوری، سرویس‌های بهداشتی، اتاق جمع‌آوری فاضلاب، اتاق تی‌شوی و همچنین بوی ناشی از تعریق افراد.
واکنش‌های فردی به بوها بسیار متفاوت است. بوهایی که برای برخی افراد خوشایند است، ممکن است برای دیگران ناخوشایند باشد و آستانه‌ای که افراد مختلف می‌توانند آن را حس کنند نیز بسیار متفاوت است. هدف استراتژی‌های کنترل بو باید کاهش یا از بین بردن منابع بو یا غلظت بوهای موجود در هوا باشد که می‌تواند به افراد برسد.
لذا توصیه این ضابطه آن است که حتی‌الامکان شفت‌های تهویه در موقعیت‌های تولید بو در محیط‌های شهری به طور مثال در محل‌های توقف وسایل نقلیه قرار نگیرد و منابع انتشار بو در محیط‌های قطار شهری به خوبی تهویه شوند.

پ-۱-۱-۶-۲- میزان ذرات معلق

ذرات معلق موجود در هوا در محیط‌های قطار شهری می‌تواند به همراه ورود هوای بیرون وارد محیط داخل شده و یا در شرایط نرمال، در اثر عملکرد ناوگان یا افراد حاضر در محیط قطار شهری تولید شده باشد. با جانمایی مناسب شفت‌های تأمین هوا در سطح خیابان و استفاده از فیلتر در سیستم تهویه مطبوع، از ورود ذرات معلق با اندازه‌های بزرگ تا حد زیادی جلوگیری می‌گردد.، با این وجود تجمع ذرات معلق قابل استنشاق در ایستگاه همچنان وجود دارد.

غلظت ذرات معلق موجود در محیط قطار شهری بزرگتر از غلظت ذرات معلق هوای محیط باز بیرون در شرایط عادی ارزیابی می‌گردد.، این ذرات می‌تواند شامل براده آهن یا اکسید آن و ذرات آزبست (ناشی از عملکرد ترمز، چرخ و ریل)، گرافیت (ناشی از جاروبک‌های کلکتورهای الکتروموتورهای قطار)، مو و ذرات ارگانیک (ناشی از حضور انسان‌ها) و گرد و غبار (ناشی از منابع مختلف) باشد که بیشتر آن‌ها در کف فضا می‌نشینند ولی می‌توانند دوباره به هوا بلند شده و باعث آلودگی مجدد هوا شوند که این ذرات دوباره به پا خواسته، منبع ثانویه آلودگی هوا توسط ذرات معلق نامیده می‌شود. هر دو عامل اولیه (ذرات معلق وارد شده از بیرون یا تولید شده) و ثانویه در محاسبه کل ذرات معلق موجود در هوا لحاظ می‌گردند.

یکی از اثرات تجمع بیش از حد ذرات معلق، کاهش میدان دید افراد می‌باشد، هنگامی‌که مسافران نتوانند به راحتی اجسام در فاصله دور در انتهای ایستگاه را تشخیص دهند، متوجه فاکتور آزار دهنده وجود ذرات معلق می‌شوند، همچنین مسافران ممکن است اثر ذرات موجود در هوای مترو را حتی اگر غلظت آن زیاد هم نباشد را در اطراف منابع نوری مشاهده نمایند.

حد مجاز ذرات هم به نوع و میزان آن بستگی داشته و هم وابسته به زمان تماس با محیط آن می‌باشد و به‌عبارت‌دیگر غلظت نسبتا بالای ذرات معلق را می‌توان برای مدت زمان کوتاه تحمل نمود، در صورتیکه تماس طولانی با غلظت کمتر ذرات معلق نیز می‌تواند زیان‌بار باشد. لذا مسافرینی که به صورت گذرا در محیط قطار شهری تردد می‌نمایند، نسبت به کارکنان مترو که حداقل ۴۰ ساعت در هفته در مترو حضور دارند، می‌توانند در معرض ذرات بیشتری در زمان کوتاه قرار گیرند. محدودیت‌های مجاز ذرات آلاینده با جزئیات در استانداردهایی نظیر ACGIH[۱] و یا OSHA[۲] درج گردیده است.

پ-۱-۱-۶-۳- میزان مجاز گازها

اگر آلاینده‌های گازی در غلظت کافی وجود داشته باشند، اثرات آزاردهنده، ناتوان کننده یا سمی دارند. چنین آلاینده‌هایی ممکن است با هوای بیرون وارد محیط قطار شهری شوند یا ممکن است در مترو ایجاد شوند.

[۱] The American Conference of Governmental Industrial Hygienists

[۲] Occupational Safety and Health Administration

عمده آلاینده‌های گازی مانند اکسید نیتروژن، مونوکسید کربن، هیدروکربن‌ها و... از بیرون وارد فضای ایستگاه می‌شوند. تولید گاز دی‌اکسید کربن که ناشی از تنفس افراد بوده و گاز ازون نیز در اثر کارکرد تجهیزات برقی در ولتاژ بالا در فضای محیط قطار شهری تولید می‌شود. راه حل کاربردی برای حفظ غلظت این آلاینده‌ها در رنج مجاز، جایگزینی هوای موجود با هوای تازه است، همچنین در جدول (پ-۱-۸)، میزان مجاز گاز مونوکسید کربن نیز بدلیل امکان ورود آن به فضای ایستگاه و تونل از شفت‌های تهویه ارائه شده است.

برای برقراری شرایط فوق حداقل نرخ تهویه برای هر فرد باید ۸/۶cfm در ایستگاه و تونل‌ها می‌باشد. حد مجاز برخی از آلاینده‌های گازی در محیط مترو بر حسب میلی‌گرم در مترمکعب در جدول (پ-۱-۸) ارائه شده است.

جدول پ-۱-۸: شرایط آلایندگی مجاز گازها برای تونل و ایستگاه

نوع آلاینده گازی	غلظت مجاز (mg/m^3)
دی اکسید کربن	۹۰۰۰
مونوکسید کربن	۵۵
ازون	۰/۲

پ-۱-۱-۷- سرعت هوا و تغییرات سریع فشار

عملکرد پیستونی قطار در تونل باعث حرکت هوا و تغییرات فشار هوا در محیط مترو می‌شود. از نقطه نظر تهویه، این حرکت هوا مفید است، اما اگر اثرات تهویه پیستونی بیش از حد مشخصی باشد، ممکن است مسافران سرعت هوای ناخوشایندی را تجربه کنند. برهم‌کنش قطار با هوای تونل و سرعت بالای هوا باعث ایجاد تغییراتی در فشار هوا در مترو می‌گردد. معیارهای حداکثر سرعت هوا و نرخ تغییر فشار در این بخش آورده شده است.

پ-۱-۱-۷-۱- سرعت هوا

تأثیر سرعت هوا از دو طریق برای افراد مشخص می‌گردد، بر روی تعادل حرارتی بدن انسان اثر گذاشته و می‌تواند سبب نارضایتی گردد، اگرچه در روزهای گرم، جریان هوا با سرعت بالا می‌تواند اثر خنک‌کردن مطلوبی را داشته باشد، اما در نقطه مقابل و در روزهای سرد، سرعت‌های مشابه هوا ممکن است باعث سرمای نامطوب شود و اثر دیگر آنکه می‌تواند باعث پخش شدن گرد و غبار در هوا یا درهم ریختن فرم موی سر و لباس افراد شود که در نتیجه می‌تواند باعث نارضایتی گردد. سرعت هوا هم بر تبادل گرمای همرفتی و هم بر راندمان خنک‌کنندگی تبخیر عرق تأثیر می‌گذارد. هنگامی‌که دمای هوا کمتر از دمای پوست است، یعنی از حدود ۸۷F (۳۰/۵ °C) تا ۹۵F (۳۵ °C)، همرفت و تبخیر مکانیسم‌های خنک‌کننده مؤثری هستند و سرعت بالای هوا خنک‌کنندگی قابل‌توجهی بدن را ایجاد می‌کند. هنگامی که دمای هوا بالاتر از دمای پوست باشد، مکانیزم همرفت بدن را گرم می‌کند، اما تعریق آن را خنک می‌کند. زمانی که دمای هوا بالاتر از دمای پوست باشد، سرعت هوای بهینه‌ای وجود دارد که حداکثر اثر خنک‌کنندگی را فراهم نماید، برای این سرعت، تنش حرارتی وارد شده به بدن کمترین میزان است. سرعت‌های کمتر از این نرخ بهینه، تنش گرمایی را افزایش می‌دهند، زیرا با کاهش شدید

راندمان اثر خنک کنندگی تبخیری همراه هستند که منجر به تعریق بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، سرعت هوا بالاتر از این مقدار بهینه نیز باعث ایجاد تنش گرمایی بیشتر در نتیجه جذب گرمای حاصل از همرفت از جریان هوای گرم می‌شود.
سرعت هوای نسبتاً بالا برای دوره‌های زمانی متناوب قابل قبول است. قرار گرفتن مسافران نیز در معرض جریان هوای ناشی از عملکرد اثر پیستونی در سیستم مترو، متناوب به حساب آمده و زمانی که افراد تحت میزانی از تنش حرارتی قرار گرفته باشند، اثر جریان هوا با سرعت‌های نسبتا بالا، می‌تواند تا حدی رضایت بخش باشد. بنابراین حد بالایی برای سرعت هوا از دیدگاه آسایش حرارتی در ایستگاه‌ها برای روزهای گرم وجود ندارد و در روزهای سرد نیز، معیارهای آسایش حرارتی شاخص HDR غالب خواهد بود و حداکثر سرعت هوا با لحاظ شدن سایر متغیرهای معادله کسر گرما مشخص می‌شود.
در نظر گرفتن مزاحمت ناشی از انتشار گرد و غبار در هوا و یا به‌هم ریختگی فرم موی سر و لباس مسافران، پارامترهای محدود کننده حداکثر سرعت هوا در محیط قطار شهری هستند که بایستی در تعیین حداکثر سرعت هوا لحاظ گردند.
لذا اثر پیستونی قطار موجب حرکت هوا و همچنین تغییر فشار در سیستم مترو می‌شود. از نقطه نظر تهویه، حرکت هوا مفید است اما اگر تهویه پیستونی زیادی انجام شود، منجر به عدم آسایش در اثر ایجاد سرعت زیاد هوا خواهد شد. سرعت هوا در فضاهای تردد مسافران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است بخصوص در گالری‌های ورودی ایستگاه و دسترسی‌های به طبقات که سطح مقطع کاهش می‌یابد و در نتیجه سرعت هوا ممکن است افزایش یابد.

پ-۱-۱-۷-۲- احساس ناراحتی

میزان سرعت هوای مجاز باید از منظر ایجاد گرد و غبار، به هم ریختن موی سر، چادر و لباس مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس مقیاس بیوفرت ارائه‌شده توسط هندبوک SEDH، حداکثر سرعت هوا در شرایط نرمال در ایستگاه نباید از 1000 FPM (۵ m/s) فراتر رود.

پ-۱-۱-۷-۳- نوسانات فشار

نوسانات فشار یک پدیده اجتناب‌ناپذیر در محیط قطار شهری می‌باشد که بر اثر حرکت قطار و جابه‌جایی هوا بوجود می‌آید. میزان بزرگی این تغییرات فشار، اثرات فیزیولوژیکی مختلفی را بر مسافران و پرسنل دارد، حساس‌ترین عضوی که خیلی سریع این نوسانات را حس می‌کند، گوش انسان است.
تغییرات فشار هوا در کوتاه مدت اما به سرعت روی می‌دهد که باعث می‌شود افراد بیشتر احساس ناراحتی کنند، زیرا گوش آن‌ها باید تغییرات فشار را از راه‌های معمول خود تنظیم نماید. افرادی که دچار سرماخوردگی شده‌اند یا در ناحیه سینوس دچار مشکل هستند، احساس نارضایتی بیشتری نسبت به سایر افراد در مواجهه با تغییرات فشار هوا خواهند داشت.
احساسات مختلفی که توسط گوش ممکن است درک شود، در جدول (پ-۱-۹) درج گردیده است.

جدول پ-۱-۹: شرایط آلایندگی مجاز گازها برای تونل و ایستگاه

علائم ادراک شده در گوش	اختلاف فشار در گوش میانی و فشار هوای محیط ,PSI
احساس قابل درک پر شدگی در گوش	۰/۰۶-۰/۱۰
افزایش احساس پرشدگی در گوش	۰/۱۰-۰/۱۹
احساس متمایز پر شدگی، کاهش شدت صدا	۰/۱۹-۰/۲۹
افزایش ناراحتی ناشی از وزوز گوش، خش خش، غرش؛ ممکن است شامل درد و سرگیجه خفیف باشد	۰/۲۹-۰/۵۸

نخستین علائم پرشدگی در گوش در فشار PSI ۰/۰۶ شروع شده و بدن سالم انسان می‌تواند در مدت زمان کمتر از یک ثانیه با این فشار به تعادل برسد.

سینوس‌ها دومین عضو حساسی هستند که تغییرات فشار را حس می‌کنند، تأثیر افزایش و کاهش فشار بر روی سینوس‌ها به میزان احتقان در دهانه مجرای سینوس‌ها بستگی دارد. اگرچه تأثیرات احساس شده برای کاهش یا افزایش فشار در ظاهر یکسان است، این تغییرات، اثرات فیزیولوژیکی متفاوتی بر روی بدن می‌گذارند و با وجود اینکه تغییرات فشار به سرعت و در زمانی کوتاه رخ می‌دهند، افراد تا زمان کاهش اختلاف فشار مابین هوای محیط و حفره‌های سینوس و گوش احساس نارضایتی دارند و لذا بایستی تا حد امکان تغییرات فشار هوا را در حد قابل قبول حفظ نمود.

برخی از پارامترهای محیطی اثرگذار در شرایط آسایش در محیط قطار شهری در مقالات علمی مختلف[1] بررسی و گردآوری شده است.

پ-۱-۱-۸- معیارها در شرایط اضطراری

شرایط اضطراری به وقوع وضعیت‌های غیر معمول عمدتا ناشی از حریق اتلاق می‌گردد که موجب توقف حرکت حداقل یک قطار شده و مسافران مجبور به ترک قطار و ورود به تونل و یا تخلیه ایستگاه می‌شوند و همچنین ممکن است از سناریوهای عملکرد پیش‌گیرانه سیستم کنترل محیطی تونل به منظور جلوگیری از خارج شدن مسافران از قطار متوقف شده نیز در حوزه تهویه تونل، شرایط اضطراری تعبیر گردد.

فراهم کردن شرایط مناسب برای تخلیه مسافران بر اساس استاندارد NFPA130، نیازمند رعایت حدود قابل‌قبول از پارامترهایی است که در ادامه تعریف می‌شوند.

[1] از جمله مقاله:

Yueming Wen et al., Environmental and Health Effects of Ventilation in Subway Stations: A Literature Review, International Journal of Environmental Research and Public Health 2020

پ-۱-۱-۸-۱- غلظت گازهای سمی و کیفیت هوا

میزان متوسط مجاز گازهای سمی در حالت نرمال و دائمی در بخش قبل ارائه گردیده است. در زمان حریق که به دلیل اشتعال ناوگان یا جرقه و آتش‌سوزی تجهیزات الکتریکی، مقدار بیشتری گازهای سمی تولید می‌شود و می‌بایست محدوده مجاز غلظت گازهای سمی با توجه به زمان فرار که مسافران در معرض هوای آلوده قرار دارند، مشخص گردد. به‌ویژه وقتی که حریق در میانه قطار باشد و مسافران در دو سمت قطار قرار داشته باشند و یک طرف در معرض هوای تازه و طرف دیگر در معرض هوای آلوده قرار می‌گیرد. گازهای ناشی از حریق تجهیزات الکتریکی عمدتا موقتی بوده و با توجه به قطع برق متوقف می‌گردد. اما گازهای ناشی از حریق ناوگان در مدت زمان بیشتری تولید می‌شود و معمولاً میزان آن نیز بیشتر خواهد بود.

با توجه به آنکه از میان گازهای منتشرشده، گاز مونواکسید کربن خطرناک‌تر است، غلظت مونواکسید کربن برای کمّی کردن اثر گازهای سمی استفاده می‌گردد. بر اساس استاندارد NFPA130، معیار کسر دوز موثر[۱] در نظر گرفته شود:

رابطه (پ-۱-۶)

$$FED_{co} = \sum_{t_1}^{t_2} (\frac{[CO]}{35000})\Delta t$$

که به صورت در معرض بودن گاز در یک بازه زمانی معین تعریف می‌گردد.

ΔT: بازه زمانی انباشته

CO: غلظت متوسط گاز مونوکسید کربن در بازه زمانی ΔT در واحد PPM

در جدول (پ-۱-۱۰) حد ۰/۵ برای معیار FED، برای جمعیت بالغ سالم، ۰/۳ برای افراد حساس‌تر و مقدار ۲ برای عامه جمعیت شامل افراد آسیب‌پذیر، مشخص گردیده است و همچنین مقادیر زمانی متناسب با مقادیر FED به جهت لحاظ شدن عدم قطعیت، تا ۳۵ درصد کاهش یافته‌اند.

جدول پ-۱-۱۰: شرایط آلایندگی مجاز گازها برای تونل و ایستگاه

زمان (دقیقه)	حد استقامت افراد		
	AEGL 2	۰/۳	۰/۵
۴	-	۱۷۰۶	۲۸۴۴
۶	-	۱۱۳۸	۱۸۹۶
۱۰	۴۲۰	۶۸۳	۱۱۳۸
۱۵	-	۴۵۵	۷۵۸
۳۰	۱۵۰	۲۲۸	۳۷۹
۶۰	۸۳	۱۱۴	۱۹۰
۲۴۰	۳۳	۲۸	۴۷

[۱] Fractional Effective Dose (FED)

انتخاب مقدار حد آستانه FED باید به روشی مناسب برای اهداف طراحی ایمنی انجام شود. مقدار ۰/۳ معمول است ولی بسته به شرایط، مقادیر دیگری نیز می‌توان انتخاب نمود.

معیار دیگری که جهت ارزیابی مقدار آلاینده‌ها در محل آتش گرفته استفاده می‌شود، معیار غلظت زمانی C_T ارائه شده در هندبوک SEDH است. برحسب این‌که زمان اشتعال کوتاه و یا طولانی باشد، دو رابطه جهت تعیین C_T ارائه شده است:

رابطه (پ-۱-۷)

$$C_T = \frac{S}{Q}$$

رابطه (پ-۱-۸)

$$C_T = \frac{S'}{Q}T$$

که در آن:

C_T: مقدار آلاینده برحسب $mg\text{-}min/m^3$

S: مقدار کل آلاینده تولیدی برحسب mg

Q: دبی هوای کل از میان تونل m^3/s

S': نرخ جرمی تولیدی آلاینده‌ها برحسب mg/min

T: زمان حضور مسافر در تونل برحسب min

رابطه اول با فرض کوتاه بودن زمان اشتعال می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که قبل از خروج مسافر از محل آتش گرفته، اشتعال آن به پایان می‌رسد. رابطه دوم برای اشتعال از نوع خودنگهدار[۱] است و از آنجایی که زمان اشتعال در مترو طولانی است، از رابطه (پ-۱-۸) استفاده می‌شود.

پ-۱-۱-۸-۲- دما

مطابق با هندبوک SEDH حداکثر دمای در معرض قرار گرفتن افراد ۱۴۰F (۶۰ °C) می‌باشد، در استاندارد NFPA130 مطالعات دقیق‌تری به عمل آمده است. بر اساس این استاندارد بدن شخص در معرض حرارت، در یک بازه زمانی مشخص، مقدار خاصی از گرما را جذب می‌کند. بر اساس FED[۲] های افزایشی در این زمینه نیز، روش مشابهی همانند معیار ارائه برای گازهای سمی، قابل استفاده می‌باشد.

رابطه (پ-۱-۹)

$$FED = \sum_{t_0}^{t} \left(\frac{1}{t_{rad}} + \frac{1}{t_{conv}}\right)\Delta t$$

[۱] Self Sustaining

[۲] Fraction Effective Dose

قرار گرفتن در معرض حرارت تشعشعی به مواردی اطلاق می‌شود که بر روی افراد حاضر در محدوده زیر یا مجاور لایه دود تجربه می‌شود. حد پایداری برای قرار گرفتن افراد در معرض گرمای تابشی تقریباً ۱/۷ کیلووات در مترمربع است. در محدوده پایین‌تر از این شار حرارتی، در معرض قرار گرفتن افراد را می‌توان تقریباً به طور نامحدود و بدون تأثیر قابل توجهی در زمان موجود برای فرار تحمل نمود. قرار گرفتن در معرض گرمای تابشی ۲/۵ $kW \cdot m^2$ را می‌توان برای چند دقیقه تحمل کرد و بالاتر از این مقدار آستانه، زمان سوختن پوست در اثر گرمای تابشی به سرعت طبق رابطه (پ-۱-۱۰) کاهش می یابد.

$$t_{rad} = 1.33 \times q^{-1.35}$$

رابطه (پ-۱-۱۰)

کسری دوز معادل گرمای جابجایی انباشته شده در دقیقه، T_{conv} است. گرمای همرفتی که در هر دقیقه انباشته می‌شود به میزان پوشیدن لباس و ماهیت لباس بستگی دارد.

در حالت پوشش کمتر:

$$t_{conv} = (5 \times 10^7) \times T^{-3.4}$$

رابطه (پ-۱-۱۱)

که در آن t_{rad} و t_{conv} زمان برحسب دقیقه، q شار حرارتی تابشی برحسب KW/m^2 و T دما برحسب (^oC) هستند.

جهت راحتی مسافران لازم است که مقدار FED، کمتر از ۰/۳ باشد. در صورتیکه فرض شود، مسافران با پوشش کم هستند، شار گرمایی تشعشعی صفر و همچنین دمای در معرض بودن افراد ثابت باشد؛ درجه حرارت قابل قبول مربوط به NFPA130، با توجه به رابطه (پ-۱-۱۱)، قبل از رسیدن به حد آستانه FED، به صورت جدول (پ-۱-۱۱) است. لازم به ذکر است که با توجه به تجربی بودن روابط و عدم وجود قطعیت در معادلات، از زمان محاسبه شده از رابطه (پ-۱-۱۱)، ٪۲۵ کاسته شده است.

جدول پ-۱-۱۱: ماکزیمم زمان در معرض قرار گرفتن

دمای در معرض بودن (^oC)	زمان دوام آوردن (min)
۸۰	۳/۸
۷۵	۴/۷
۷۰	۶/۰
۶۵	۷/۷
۶۰	۱۰/۱
۵۵	۱۳/۶
۵۰	۱۸/۸
۴۵	۲۶/۹
۴۰	۴۰/۲

با توجه به جدول (پ-۱-۱۱)، با افزایش دمای محیط، زمان در معرض بودن به صورت نمایی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال در محدوده دماهای ^oC ۸۰ و ^oC ۵۰، باید مسافرین به ترتیب در کمتر از ۴ و ۱۹ دقیقه از محل خارج شوند.

پ-۱-۱-۸-۳- سرعت هوا

سیستم تهویه در حالت اضطراری باید قادر باشد هوای گرم، دود و ذرات تولیدی ناشی از تجهیزات الکتریکی را خارج کند. در این صورت ممکن است نیاز باشد سرعت هوا بیشتر از حالت نرمال باشد. در سرعت‌های بالاتر از ۲۲۰۰ fpm (۱۱m/s) فرار برای برخی مسافرین ممکن است مشکل گردد. حداقل سرعت هوا در زمانیکه هوای تازه نقش هدایت‌کننده مسافران به سمت خروج را بازی می‌کند باید ۵۰۰fpm (۰/۷۵ m/s) باشد.

پ-۱-۱-۸-۴- ارتفاع دود

ارتفاع دود به‌عنوان یک معیار مورد توجه است. مطابق با استاندارد NFPA92 در صورتیکه ارتفاع دود از قد میانگین افراد بیشتر باشد، در محدوده مجاز قرار دارد. بنابراین مبنای بررسی ارتفاع دود میانگین قد افراد و معادل ۱/۷ متر در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌سازی حریق و بررسی ارتفاع دود برای مسیر فرار مسافرین، ارتفاع مجاز دود در تمامی نقاط مسیر فرار مطابق با استاندارد NFPA130، باید ۲ متر باشد و برای مسیرهای سقف کوتاه (کمتر از ۳ متر) استثنائا باید در مجاورت حریق دود تا حد امکان کنترل شود.

پ-۱-۱-۸-۵- سطح دید

بر طبق استاندارد NFPA130، سطح دود باید به‌طور پیوسته در حدی نگه داشته شود که یک علامت که از داخل با نوری با توان ۸۰ lux روشن می‌شود، از فاصله ۳۰ متری و همچنین درها و دیوارها از فاصله ۱۰ متری قابل رؤیت باشند.

پ-۱-۱-۸-۶- میزان تولید صدا

مقادیر سرعت هوا و میزان تولید صدای مجاز، بایستی با نشریه شماره ۳-۸۰۴ و شرایط خاص هر پروژه منطبق گردد، در اینجا به بیان برخی از الزامات در زمینه تهویه پرداخته می‌شود.

در حالت اضطراری سطح صدا می‌تواند برای چند لحظه می‌تواند به ۹۰ dB (A) رسیده اما سپس باید به ۸۵ dB (A) کاهش یابد.

علاوه بر سیستم‌های تهویه و تجهیزات مکانیکی، دو عامل اصلی تولید صدا در ایستگاه، حرکت قطار و جابه‌جایی مسافران در سکو می‌باشد.

سطح صدای (سطح فشار صوتی) ناشی از کارکرد تجهیزات تهویه در شرایط نرمال باید مطابق با ضوابط ذیل باشد:

- در فضاهای عمومی ایستگاه کمتر از ۶۰ dB (A)
- در تونل کمتر از ۸۰ dB (A)
- در فاصله یک متری از کیوسک تهویه در سطح خیابان
  - از ۱۱ شب تا ۷ بامداد کمتر از ۵۵ dB (A)
  - از ۷ بامداد تا ۱۱ شب ۶۰ dB (A)

- در شرایط اضطراری و ازدحام:
  - در تونل کمتر از ۸۵ dB (A)
  - در ایستگاه و فضاهای عمومی کمتر از ۷۵ dB (A)

پ-۱-۱-۸-۷- محدوده‌های مجاز سرعت و فشار هوا

- درخروجی از لوورهای کیوسک تهویه ۵ متر بر ثانیه
- درخروجی از لوورهای کیوسک تهویه (با ارتفاع کمتر از ۳ متر) ۲/۵ متربرثانیه
- در شفت‌های تهویه ۱۱ متربرثانیه
- در نزدیکی فن‌های تهویه ۱۲/۵ متربرثانیه
- ماکزیمم افت فشار اصطکاکی در شفت تهویه ۱/۲۳ پاسکال برمتر
- محدوده مجاز سرعت جریان هوا درون کانال اصلی کمتر از ۸ متر بر ثانیه
- محدوده مجاز سرعت جریان هوا درون انشعاب‌ها ۶-۵ متربرثانیه
- محدوده مجاز سرعت جریان هوا در دریچه‌های رفت ۴-۳ متربرثانیه
- محدوده مجاز سرعت جریان هوا در دریچه‌های برگشت ۴-۳ متربرثانیه
- ماکزیمم افت فشار استاتیکی در شفت‌های تهویه ۲۰۰ پاسکال

پیوست ۲

پیکربندی سیستم تهویه

در این بخش، پس از معرفی اجزای عمده سیستم تهویه به بیان برخی از طراحی‌های معمول سیستم تهویه خطوط قطار شهری داخل کشور پرداخته شده است.

پ-۲-۱- معرفی تجهیزات اصلی سیستم تهویه تونل

دمای هوا، کیفیت هوا، سرعت هوا و تغییرات فشار هوا در فضاهای قطار شهری به طراحی سیستم تهویه آن بستگی دارد. در درجه اول جریان هوای تهویه توسط حرکت قطارها ایجاد می‌شود و عملکرد پیستونی قطارها در تونل باعث می‌شود که با حرکت قطار به سمت یک شفت تهویه، هوا از هواکش خارج شده و پس از عبور قطار، هوای تازه به درون هواکش جریان یابد. اگر تهویه ناشی از حرکت قطار در تونل جهت ایجاد شرایط محیطی قابل قبول کافی نباشد، تهویه مورد نیاز با به کارگیری فن‌های مکانیکی و دیگر تجهیزات تکمیل می‌گردد. همچنین در مواقع اضطراری، فن‌ها ملزم به انجام عملیات تهویه نیز هستند.

تجهیزات غیر فعال سیستم تهویه از قبیل دمپر، دیفیوزر و لوور در فصل اول نشریه و در قسمت تعاریف معرفی گردیده‌اند و از این‌رو در این قسمت به معرفی دیگر اجزای سامانه تهویه پرداخته می‌شود.

تجهیزات عمده یک سامانه تهویه می‌تواند شامل فن‌ها، کانال‌کشی، شفت‌های تهویه، دمپرها، سیستم سرمایش، سایلنسر، سیستم فیلتراسیون و دیفیوزر باشد.

پ-۲-۱-۱- فن‌ها

فن‌ها جزء اصلی سامانه تهویه هستند که با اعمال کار بر روی هوا یا دود، باعث افزایش فشار و ایجاد جریان اجباری می‌گردند. عمده فن‌های به کار رفته در سیستم تهویه تونل و ایستگاه از نوع محوری[۱] می‌باشند. کاربرد فن‌های سانتریفوژ بدلیل ضرورت نیاز به معکوس شدن جهت حرکت جریان در برخی سناریوهای عملکردی تهویه و طرح کانال‌کشی پیچیده‌تر، عمدتاً محدود به سیستم‌های تخلیه دود و فشار مثبت شده است.

فن‌های تهویه تونل معمولاً دارای نسبت فشار[۲] بالایی نیستند و لذا معمولاً از فن‌های محوری مدل Tube-Axial و Vane-Axial بدین منظور استفاده می‌گردد. این فن‌ها به منظور ایجاد جریان اجباری هوا در مسیر قطار شهری طراحی شده و لذا برای فراهم نمودن امکان عملکرد در کارکرد معمول و اضطرار، مجهز به درایوهای سرعت متغیر[۳] (VFD) هستند. همچنین از منظر نحوه نصب، فن‌های تهویه تونل می‌توانند به صورت افقی و یا عمودی نصب گردند.

شکل (پ-۲-۱) نمونه فن محوری مورد استفاده در سیستم تهویه تونل را نمایش می‌دهد.

---

[۱] Axial

[۲] Pressure Ratio

[۳] Variable Frequency Drive

شکل پ-۲-۱: نمونه فن محوری سیستم تهویه تونل

در صورتیکه در اثر عملکرد فن‌های تهویه، بدلیل شرایط هندسی مسیرهای عبور هوا، جریان مورد نظر در تونل ایجاد نشود، می‌توان با به کارگیری جت فن‌ها، جریان مورد نیاز را بوجود آورد. همچنین از جت فن‌ها در دهانه‌های تونل و تقاطع‌ها برای حذف و یا کاهش تأثیر گذاری محیط خارجی بر سیستم از نظر تبادلات هوایی استفاده می‌گردد.

پ-۲-۱-۲- سیستم سرمایش (تهویه مطبوع)

در صورتیکه تعویض هوا، به تنهایی شرایط محیطی طراحی شده را در شرایط کارکرد معمول برآورده نسازد، از سیستم سرمایش در فضای عمومی ایستگاه و تونل استفاده می‌گردد. لازم به توضیح است از سیستم گرمایش به طور معمول در ایستگاه و تونل به دلایلی که در بخش بعدی ارائه خواهد گردید، استفاده نمی‌شود.

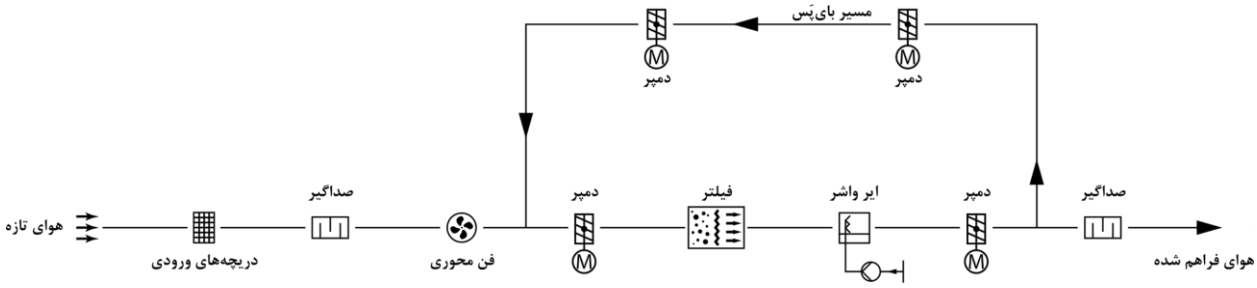
در نتیجه سیستم تهویه مطبوع می‌تواند بخشی از ساختار سیستم کنترل محیطی در فضای زیرزمینی قطار شهری باشد که عمدتاً منحصر به سیستم سرمایش است.

سیستم سرمایش برای مناطق عمومی ایستگاه باید قابلیت تغییر از حالت تمام بار به حالت نیمه بار را در پاسخ به نوسانات بار حرارتی طی ساعات مختلف روز و همچنین قابلیت حفظ شرایط محیطی طراحی شده مورد نیاز را دارا باشد، با این حال نباید انتظار داشت که این سیستم از هر یک از تغییرات ناگهانی که در مقدار بار حرارتی و به تبع تغییرات آنی دما که معمولاً بدلیل ماهیت دینامیکی جریان هوا در محیط ایستگاه رخ می‌دهد، پیروی کند. این تکانه‌ها و نوسانات دمایی ناشی از آن، به نوبه خود ممکن است در حجم، دما و سایر خصوصیات هوای مطبوع تأمین شده برای فضای عمومی ایستگاه از طریق سیستم کنترل تهویه مطبوع منعکس گردیده ولی با این وجود مسافران در معرض نوسانات دمایی سریع قرار گیرند، به خصوص وقتی این ناپایداری سیستم تهویه مطبوع در بازه‌های زمانی باشد که در طی آن‌ها، سرفاصله حرکت قطار کمتر از زمان پاسخگویی سیستم سرمایش به تغییرات باشد.

سیستم سرمایشی به کار رفته می‌تواند از نوع تبریدی و یا تبخیری باشد. انواع سیستم‌های تبخیری می‌تواند از نوع مه‌پاش با فشار بالا و یا صرفاً ایرواشر با فشار پایین بوده و همچنین سیستم تهویه مطبوع ایستگاه، می‌تواند در قالب پکیج مجزا تأمین و اجرا گردیده و یا به عنوان جزئی از سامانه تهویه ایستگاه، عمل رطوبت‌زنی را انجام دهد.

عمده سیستم‌های سرمایشی به کار رفته در ایستگاه‌ها از نوع ایرواشر می‌باشد، دستگاه ایرواشر دستگاهی است که بوسیله آن می‌توان عمل سرمایش از طریق رطوبت زنی را در ظرفیتی بالا انجام داد.

شکل (پ-۲-۲) یک تیپ مرسوم یونیت تهویه ایستگاهی مجهز به سرمایش تبخیری را نمایش می‌دهد، در این شکل، مسیر بای‌پس برای حالت اضطرار در نظر گرفته شده است.



شکل پ-۲-۲: مسیر جریان هوا در یک سیستم ایرواشر متداول مترویی

همچنین طراحی در شرایط محیطی گرم‌تر می‌تواند بر اساس سیستم تبریدی نیز صورت پذیرد.

پ-۲-۱-۳- سیستم تبخیری و تبریدی

هر یک از این سیستم‌ها دارای معایب و مزیت‌هایی می‌باشد که این موارد متناسب با شرایط اقلیمی و مورد استفاده آن‌ها در ایستگاه‌های قطار شهری بایستی بررسی گردد. نمونه‌ای از این مقایسه به‌صورت خلاصه در جدول (پ-۲-۱) ارائه شده است:

جدول پ-۲-۱: مقایسه دو سیستم تبخیری و تبریدی

نوع سیستم / شرح فاکتور مقایسه	تبخیری (ایرواشر)	تبریدی (کویل آبی یا DX)
نرخ هوادهی	حجم هوادهی به‌مراتب بیشتر، توان مصرفی برق فن بیشتر	حجم هوادهی کمتر
میزان آسایش و کیفیت هوا	عملکرد نامناسب در مناطق خیلی گرم و مرطوب، سطح آسایش کمتر در ایستگاه به علت رطوبت بالا	کیفیت مناسب‌تر، عملکرد بهتر در مناطق گرم، رطوبت تحت کنترل، مشکلات بهداشتی کمتر
توان مصرفی سیستم	مصرف برق متوسط، مصرف آب به‌مراتب بیشتر	مصرف برق به نسبت بیشتر، مصرف آب مناسب یا بدون مصرف آب
فضای مورد نیاز در ایستگاه	جانمایی با فضای بیشتر	جانمایی با فضای کمتر
فضای موردنیاز در خارج از ایستگاه	نیاز به درنظرگرفتن فضای اضافه در خارج از ایستگاه ندارد	مکانیزم چیلر یا کندانسینگ یونیت نیاز به محوطه اضافی در خارج ایستگاه دارد
امکان بازیابی هوا و کاهش مصرف	امکان سیرکولاسیون به دلیل بالا رفتن رطوبت وجود ندارد	امکان سیرکولاسیون هوا وجود دارد
قدرت انعطاف در بازه‌های دمایی مختلف	کارایی و راندمان کم در دماهای بالا و یا رطوبت بالا	قابلیت انعطاف در بازه‌های دمایی مختلف
به‌کارگیری از سیستم در شرایط اضطراری	کاربری دوگانه (هم سرمایش و هم خروج دود) ، صرفه‌جویی در هزینه‌ها	سیستم دوگانه بسیار سخت و پرهزینه
هزینه تعمیر و نگه‌داری	هزینه تعمیر و نگه‌داری کمتر	تعدد تجهیزات، پیچیدگی تعمیر، هزینه تعمیر و نگه‌داری بیشتر
سرعت تغییرات در مقابل نوسانات بار حرارتی	به نسبت کمتر	به نسبت بیشتر
کنترل پذیری	به نسبت کمتر	به نسبت بیشتر

در نتیجه، با توجه به شرایط جغرافیایی محل اجرای پروژه و ارزیابی فنی، اقتصادی سیستم‌های مختلف، بایستی انتخاب سیستم تهویه مطبوع مناسب صورت پذیرد.

پ- ۲-۱-۳-۱- سناریوی حالت کارکرد نرمال

در فصل سرد، سیستم گرمایش معمولاً در مکان‌های عمومی ایستگاه‌های زیرزمینی و تونل تامین نمی‌شود، گرمای آزاد شده در محیط مترو بواسطه عملکرد قطارها، اتلاف حرارتی سیستم روشنایی و سایر تجهیزات الکتریکی به طور کلی برای حفظ دمای ایستگاه در سطحی که مسافران گذر از محیط باز بیرون به محیط داخل وسیله نقلیه مجهز به سیستم گرمایش را سپری کنند، کافی است. همچنین دمپرهای مورد استفاده در شفت‌های تهویه ایستگاه می‌توانند به منظور کاهش جریان هوای بیرون و حفظ گرمای داخل ایستگاه در فصل سرد بسته شوند.

لذا در فصول سرد، استراتژی‌های تهویه معمولاً بر اساس دو اصل زیر در نظر گرفته می‌شود:

- کاهش تجدید هوای تازه در شبکه به منظور جلوگیری از ورود هوای سرد فضای باز به ایستگاه
- استفاده از حرارت آزاد شده در شبکه توسط قطارها، مسافرین و تجهیزات کمکی جهت حفظ دمای طراحی

همچنین در فصل سرد ممکن است تمهیداتی جهت جلوگیری از یخزدگی لوله‌ها از قبیل استفاده از سیستم کابل حرارتی[۱] در نظر گرفته شود. علاوه بر آن، سیستم آتش‌نشانی تونل ممکن است به صورت خشک طراحی گردد که شرح آن در نشریه شماره ۳-۸۰۴ ارائه گردیده است.

در صورت کاهش چشمگیر دمای هوا در فصل سرد در موقعیت محل پروژه، به منظور جلوگیری از یخزدگی در ورودی‌های ایستگاه و فضاهای عمومی از قبیل سکو و تراز بلیط‌فروشی، ممکن است از سیستم‌های گرمایش تابشی با منبع توان الکتریکی استفاده نمود.

در فصول گرم، به‌منظور محدود نمودن افزایش دمای تونل و ایستگاه، گرمای آزاد شده در شبکه باید پراکنده شود. استراتژی در نظر گرفته شده می‌تواند به شرح زیر باشد:

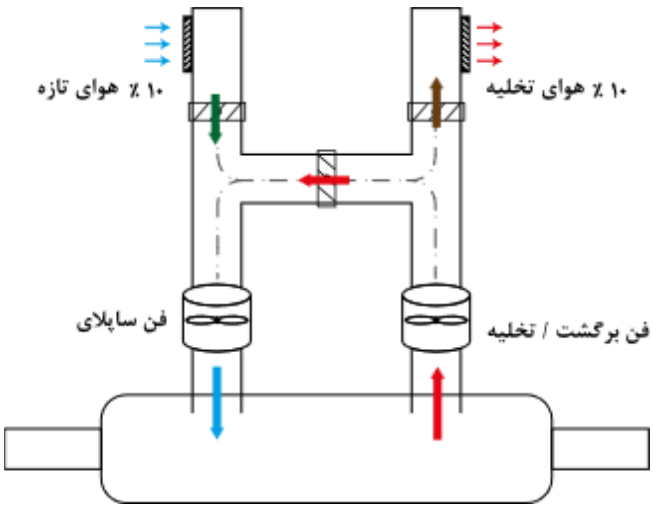
- تجدید هوای تازه در تونل و ایستگاه‌ها برای رقیق کردن هوای گرم

هوای تازه مستقیماً از فضای باز گرفته شده و در سطوح مختلف ایستگاه‌ها و تونل‌ها عرضه می‌شود. متناسب با بار حرارتی تولیدی در ایستگاه‌ها و تونل‌ها و شرایط طرح داخل و خارج ممکن است هوای ورودی نیازمند سرمایش باشد.

- خروج هوای گرم آزاد شده توسط قطارها از ایستگاه

این استراتژی می‌تواند با بکارگیری تجهیزات UPE[۲] و یا OTE[۳] و همچنین از طریق شفت‌های تهویه امکان‌پذیر گردد.

- کنترل دما با خنک کردن هوای برگشتی از طریق تبرید مکانیکی و با تأمین هوای تازه محدود به حداقل تعویض هوا که در این حالت ممکن است در زمان‌های غیر از اوج گرما و به طور مثال در ساعات ابتدایی صبح در فصل بهار یا پاییز، دمپرها باز شده و ایستگاه و تونل بواسطه تهویه طبیعی، خنک‌کاری شوند.



شکل پ-۲-۳: مسیر جریان هوا در یک سیستم سرمایش ایستگاهی با برگشت هوا

[۱] Heat Tracing

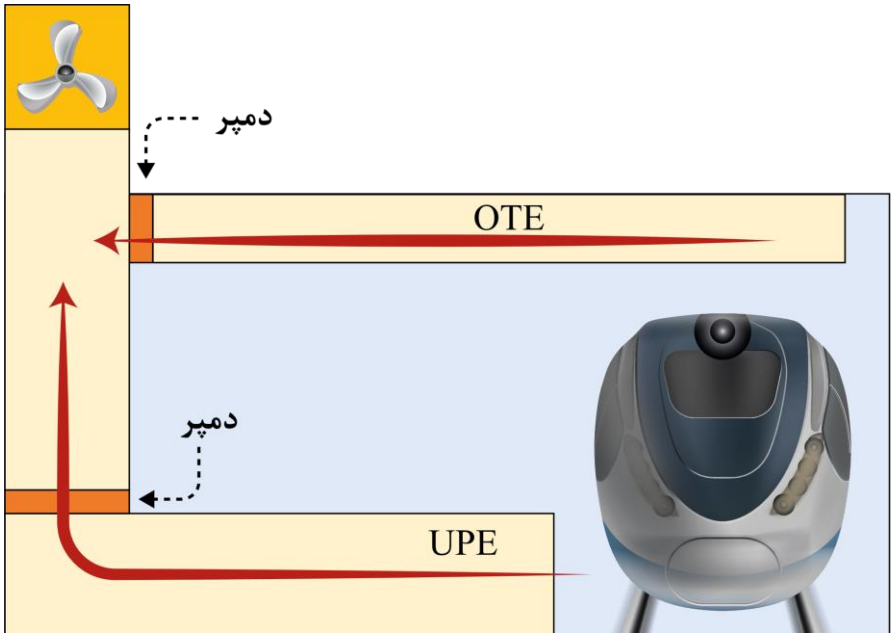
[۲] Under Platform Exhaust

[۳] Over Train Exhaust

پ-۲-۱-۴- سیستم‌های UPE و OTE

خروج هوای گرم توسط دو سیستم UPE و OTE (تخلیه زیر سکو و تخلیه بالای مسیر) انجام‌پذیر است. سیستم UPE یک استراتژی جانبی برای خروج هوای گرم و گرمای انباشته شده در زیر قطار و تولید شده توسط موتور و سیستم ترمزی است. سیستم OTE برای خروج گرمای آزاد شده توسط سیستم‌های جانبی قطار همچون سیستم تهویه قطار که معمولاً بر روی سقف قطار نصب می‌شوند، در ایستگاه به‌کاربرده می‌شود. بکارگیری این سیستم‌ها، روش‌هایی کارآمد جهت محدود کردن انتشار گرمای تولید شده توسط قطار در ایستگاه محسوب می‌شوند و در صورت عدم استفاده از این دو سیستم نیاز است بار گرمایی تولید شده توسط قطار در محیط ایستگاه در ظرفیت سیستم تهویه ایستگاه محاسبه گردد.

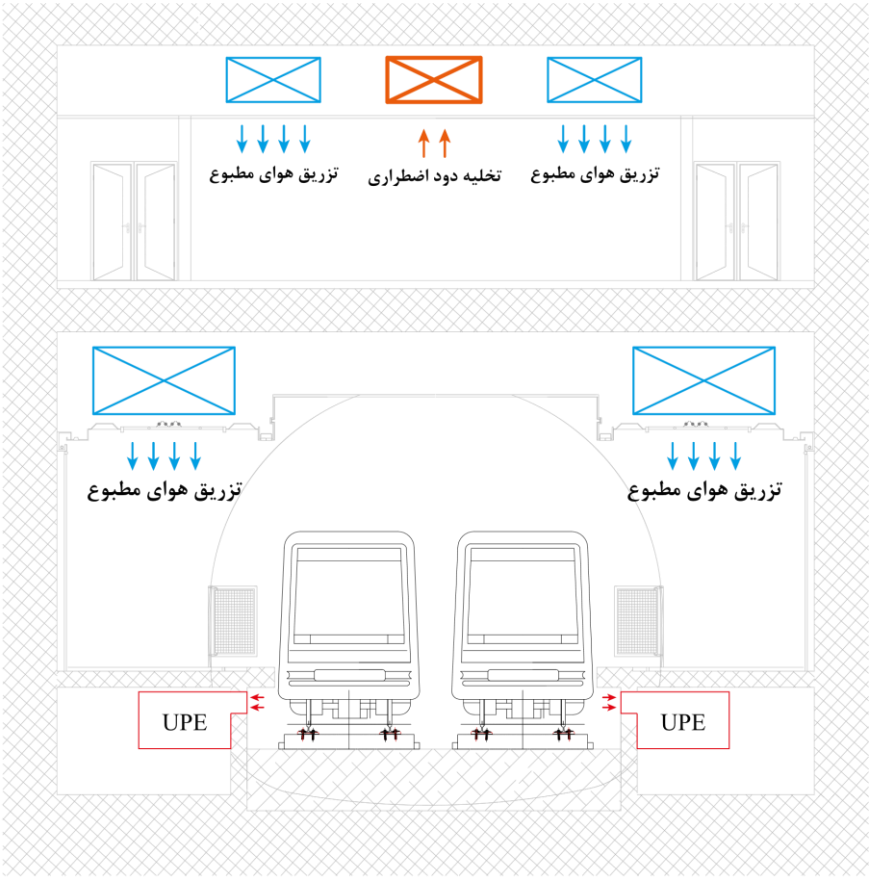
علاوه بر این استفاده از سیستم OTE در حالت اضطراری جهت خروج دود به هنگام آتش‌سوزی قطار در ایستگاه نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.



شکل پ-۲-۴: شماتیک سیستم تهویه UPE/OTE و خروج گرمای تولید شده توسط قطار از طریق این دو سیستم

یک فرم از سیستم تهویه در مقطع ایستگاه در شکل (پ-۲-۵) نمایش داده شده است. این سیستم ترکیبی از UPE و تغذیه هوای تازه در ترازهای مختلف ایستگاه است. برای جلوگیری از بروز فشار منفی در ایستگاه که منجر به انتقال حرارت از تونل به ایستگاه و همچنین ورود گرد و غبار از ورودی‌های ایستگاه می‌شود، تغذیه هوای ورودی تازه باید دست کم برابر با دبی هوای خارج شده باشد. برای حالتی که تضمین شرایط دمایی قابل‌قبول در ایستگاه با استفاده از سیستم تهویه مطبوع مذکور امکان‌پذیر نباشد، نرخ دبی ورودی باید افزایش یابد. در غیر این صورت می‌توان با استفاده از یک سیستم

تهویه مطبوع اضافی در ایستگاه در این خصوص چاره‌اندیشی نمود (مسیر تخلیه دود فوقانی سکو نیز در شکل (پ-۲-۵) به تصویر کشیده شده است).



شکل پ-۲-۵: نمونه مسیرهای گذر هوای تهویه در ایستگاه زیرزمینی

علی‌رغم محاسن استفاده از سیستم‌های UPE و OTE، مشکلات به شرح ذیل در بکارگیری این سیستم‌ها متصور می‌باشد.

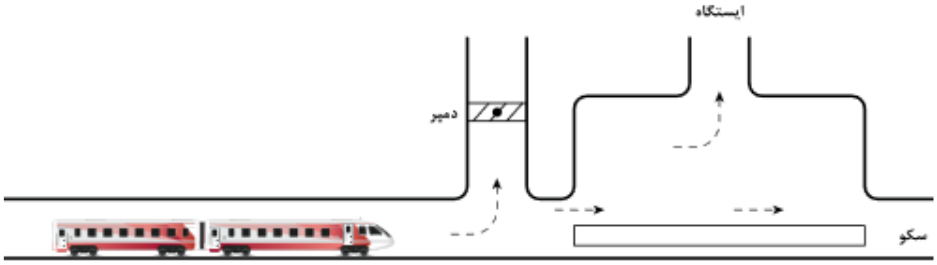
- اشغال فضای بیشتر با توجه به محدودیت فضا در عمده طرح‌های معماری ایستگاه‌ها
- مشکلات اجرایی در کانال‌کشی در محدوده ریلی ایستگاه و بر روی قطار
- مشکلات اجرایی در اجرای کانال UPE در محدوده زیر سکوی ایستگاه
- امکان بروز تداخلات در اجرای کانال‌کشی‌ها
- هزینه قابل توجه تأمین و نصب تجهیزات مذکور

پ-۲-۲- طرح تهویه تونل

با توجه به محدوده مطلوب شرایط محیطی داخل تونل و در نظرگیری شرایط طرح خارج، ضرورت خنک‌کاری تونل بایستی در فرایند طراحی بررسی گردد. در تونل‌ها انتخاب استراتژی مناسب برای تهویه عمدتاً بر پایه معیار دما صورت می‌گیرد.

این معیار به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که تمامی تجهیزات (شامل تجهیزات و سیستم‌های تهویه قطار) در این شرایط به‌خوبی کار کنند. در ساعات اوج شلوغی و یا توقف یک قطار در داخل تونل، دما به تدریج افزایش می‌یابد و لذا لازم است سیستم مناسب برای ایجاد شرایط آسایش در تونل مورد ارزیابی قرار گیرد.

به منظور استفاده از اثر پیستونی حرکت قطار در شرایط نرمال، جلوگیری از ورود هوای گرم از تونل به ایستگاه و همچنین کنترل سرعت هوای ورودی از تونل به ایستگاه، معمولا یک مسیر بای‌پس به همراه دمپر موتوری از تراز تونل تا سطح خیابان ادامه پیدا کرده است. بنابراین در زمان‌هایی که دمای طرح خارج مناسب باشد، بار حرارتی با به کارگیری اثر پیستونی عبور قطار در تونل به بیرون منتقل خواهد گردید. در مواقع ازدحام یا بالا بودن دمای محیط خارج، ممکن است، استفاده از این سیستم به تنهایی ناکارآمد گردیده و نیاز به استفاده از تهویه مکانیکی بوجود آید.



شکل پ-۲-۶: شماتیک مفهوم شفت اثر پیستونی

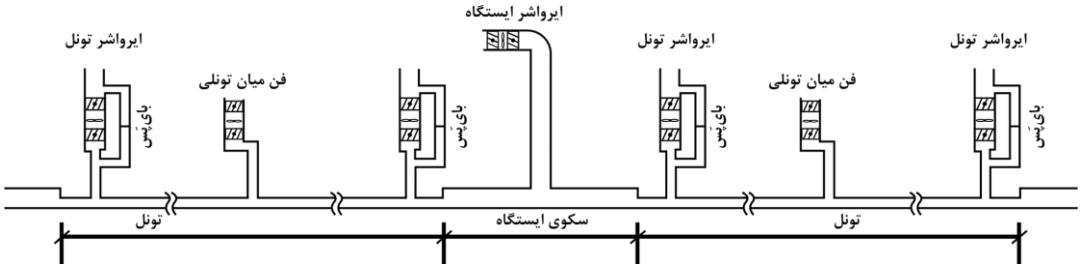
اثرات موقعیت‌های مختلف جانمایی و نحوه چیدمان شفت اثر پیستونی در مقالات مختلف پژوهشی بررسی شده است[۱].

پ-۲-۳- هوای تازه و جایگزین

به منظور حفظ محیط‌های عمومی ایستگاه با شرایط قابل قبول و تأمین هوای تازه، بایستی حداقل به‌ازای هر نفر هوای تمیز با دبی ۴/۱ lit/s (معادل ۸/۶ cfm) را فراهم نمود. در صورت استفاده از سیستم تبخیری برای ایستگاه که با ۱۰۰٪ هوای تازه کار می‌کند نیازی به بررسی این پارامتر در فصل گرم نمی‌باشد.

در شکل (پ-۲-۷) یک نمونه سیستم تهویه مکانیکی مسیر زیر زمینی نمایش داده شده است.

[۱] به عنوان نمونه مقاله: Shahryari et al. Effectiveness of Implementation Draught Relief Shaft in Subway Railway Tunnels, Conference Paper · May 2014

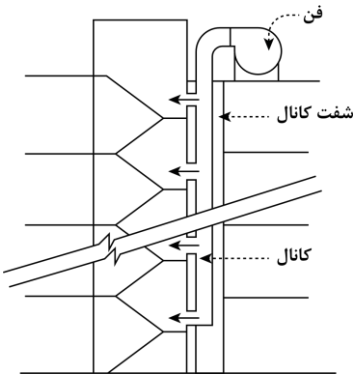


شکل پ-۲-۷: شماتیک یک نمونه سیستم تهویه تونل و فضای عمومی ایستگاه

در طرح ارائه شده، یک سامانه تهویه مختص فضای عمومی ایستگاه (VE5)، دو سامانه مختص نیم‌تونل‌ها (VE3 و VE4) و همچنین سامانه‌های میان‌تونلی با نام‌های (VE1 و VE2) نام‌گذاری گردیده‌اند.

پ-۲-۴- سیستم فشار مثبت پله فرارها[1] و مسیرهای خروج اضطراری

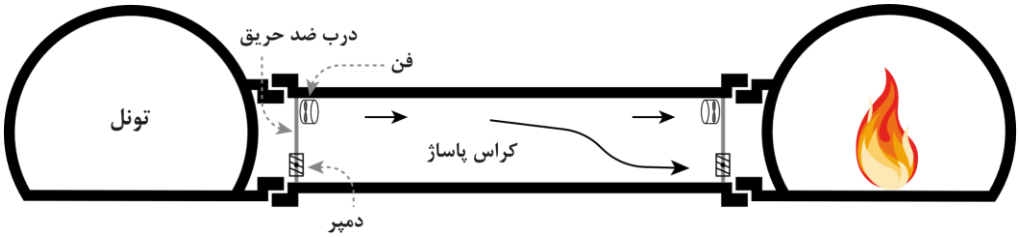
طبق تعریف، سامانه‌ای که با ایجاد فشار در دهلیز پلکان، از ورود و نفوذ دود به داخل دهلیز پلکان جلوگیری کرده و آن را به صورت مکانی امن و عاری از دود و حرارت، جهت فرار افراد و یا دسترسی نیروهای امدادی نگاه می‌دارد.
شکل (پ-۲-۸) یک نمونه از سیستم فشار مثبت پله‌های فرار را نمایش می‌دهد.



شکل پ-۲-۸: شماتیک یک نمونه سیستم فشار مثبت پله فرار

همچنین کراس پاساژها نیز از جمله مسیرهای خروج اضطراری هستند که حداکثر در فواصل ۲۴۴ متری در تونل‌های دو قلو جانمایی گردیده‌اند. در موقعیت اتصال کراس پاساژها به هر یک از تونل‌ها بایستی درب ضد حریق و سیستم فشار مثبت لحاظ شود.

[1] Stairwell pressurization



شکل پ-۲-۹: شماتیک یک نمونه سیستم فشار مثبت کراس پاساژ

پ-۲-۵- مبانی اولیه طراحی سیستم تهویه در شرایط اضطراری

عملکرد تهویه اضطراری حداقل با فرض سناریوهای آتش‌سوزی به شرح ذیل طراحی می‌گردد، در تمامی موارد بررسی و مشخص نمودن قدرت حریق، رفتار دود و انواع سناریوهای عملکردی امکان‌پذیر و در دسترس در فرایند طراحی ضروری است، به طور مثال ممکن است در فرایند دفع دود ناشی از حریق قطار در تراز سکو، افزایش فشار هوا در تراز فوقانی و پله‌های دسترسی به سکو به منظور جلوگیری از گسترش دود و همچنین بستن دمپرهای حریق روی مسیر کانال تأمین هوای تازه پست‌های برق طرفین سکو (LPS) به منظور جلوگیری از انتشار دود (در صورت تأمین هوای جبرانی اگزاست پست‌ها از فضای سکو) ضروری بوده و و علاوه بر آن‌ها، دمیدن هوای تازه از ایستگاه‌های مجاور به سمت ایستگاه دچار حادثه الزامی باشد که بایستی این موارد در فرایند طراحی به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

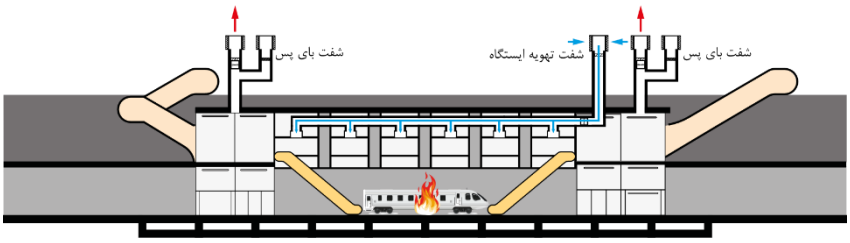
- آتش‌سوزی قطار در تراز سکو
- آتش‌سوزی کوچک در سکو
- آتش‌سوزی در ترازهای فوقانی سکو
- آتش‌سوزی در تونل

پ-۲-۵-۱- آتش‌سوزی قطار در تراز سکو

عملکرد سیستم تهویه در این سناریو می‌تواند بر مبنای مکش دود از طرفین سکو، تخلیه دود توسط سیستم OTE و یا سیستم اگزاست و تخلیه دود در تراز سکو باشد، همچنین ممکن است نیاز به افزایش فشار هوا در تراز بلیط فروشی به منظور جلوگیری از گسترش و انتشار دود در پله‌های دسترسی باشد. به جهت لزوم بررسی نحوه انتشار دود و رفتار حریق، افزایش ارتفاع لایه دود و متعاقباً احتمال کاهش میدان دید و بروز مشکلات مترتب در فرایند تخلیه مسافران از سکوها و علاوه بر آن‌ها، صحت‌سنجی طراحی صورت پذیرفته، نیاز به انجام شبیه‌سازی سه بعدی در مراحل طراحی مواجهه با این سناریوی حریق می‌باشد.

در نتیجه اهداف اصلی عملکرد سیستم تهویه در وضعیت اضطراری حریق قطار در تراز سکو، شامل خارج‌سازی دود به صورت لایه‌ای، جلوگیری از انتشار دود به فضاهای دیگر ایستگاه و ایجاد مسیر امن برای فرار و عملیات پرسنل امداد می‌باشد.

در شکل نمونه (پ-۲-۱۰)، فضای تراز فوقانی سکو تا حدی نسبت به سکو فشار مثبت شده و دود از شفت‌های تهویه دو سمت سکو مکش و تخلیه شده است.



شکل پ-۲-۱۰: شماتیک یک سناریوی نمونه عملکرد سیستم تهویه در حالت حریق قطار در سکو

پ-۲-۵-۲- آتش‌سوزی کوچک در تراز سکو

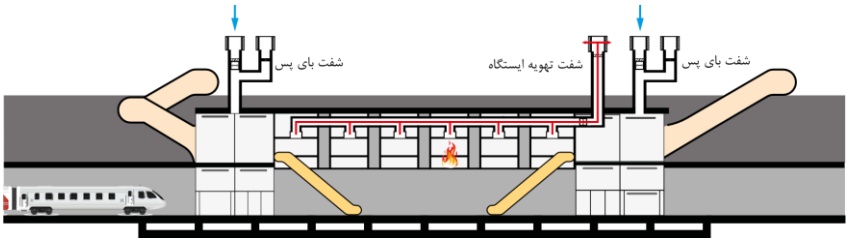
عملکرد سیستم تهویه در این سناریو، می‌تواند بر مبنای مکش دود از طرفین سکو، سیستم OTE و یا سیستم اگزاست و تخلیه دود در تراز سکو باشد، همچنین ممکن است نیاز به افزایش فشار هوا در تراز بلیط فروشی به جهت جلوگیری از گسترش دود باشد. به جهت لزوم بررسی نحوه انتشار دود، افزایش ارتفاع لایه دود و احتمال کاهش سطح دید یا بروز مشکل در فرایند تخلیه مسافران از سکو و همچنین صحت سنجی طراحی صورت پذیرفته، نیاز به انجام شبیه‌سازی سه بعدی در فرایند طراحی مواجهه با این سناریوی حریق می‌باشد. پیش از انجام فرایند طراحی، مشخص نمودن قدرت حریق و نرخ گسترش آن ضروری بوده و در این خصوص می‌توان از داده‌های مراجعی نظیر NFPA 92 بهره برد.

پ-۲-۵-۳- آتش‌سوزی در ترازهای فوقانی سکو

به جهت دفع دود ناشی از حریق احتمالی در ترازهای فوقانی سکو، بایستی تمیهدات لازم اندیشیده شود و لذا ممکن است تخلیه دود از طریق یک سامانه فن مجزا صورت پذیرفته و یا این سامانه با سیستم تهویه ایستگاهی ادغام گردد. ظرفیت سامانه تخلیه دود بایستی به اندازه‌ای باشد که دود تولید شده تخلیه شده و به اندازه کافی هوای تازه از طریق ورودی‌ها وارد فضای ایستگاه شود و از مشکلاتی نظیر مکش هوا به جای تخلیه دود[1] جلوگیری گردد.

شکل (پ-۲-۱۱) یک نمونه از سیستم تخلیه دود تراز کنترل بلیط را نمایش می‌دهد.

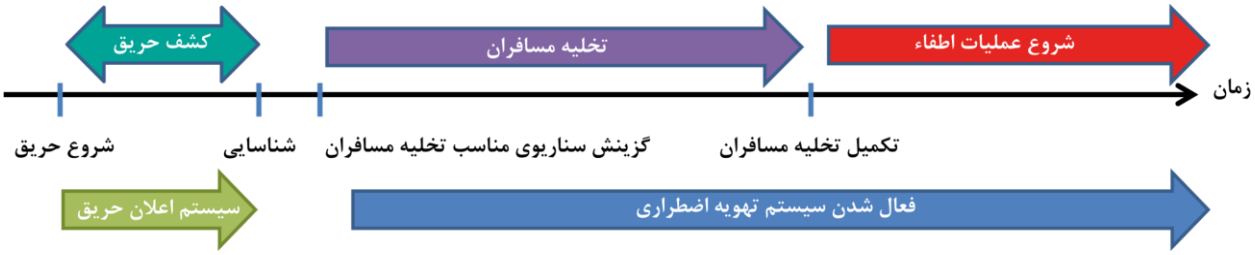
[1] Plug Holing



شکل پ-۲-۱۱: شماتیک یک نمونه سیستم تخلیه دود تراز کنترل بلیط

پ-۲-۵-۴- آتش‌سوزی در تونل

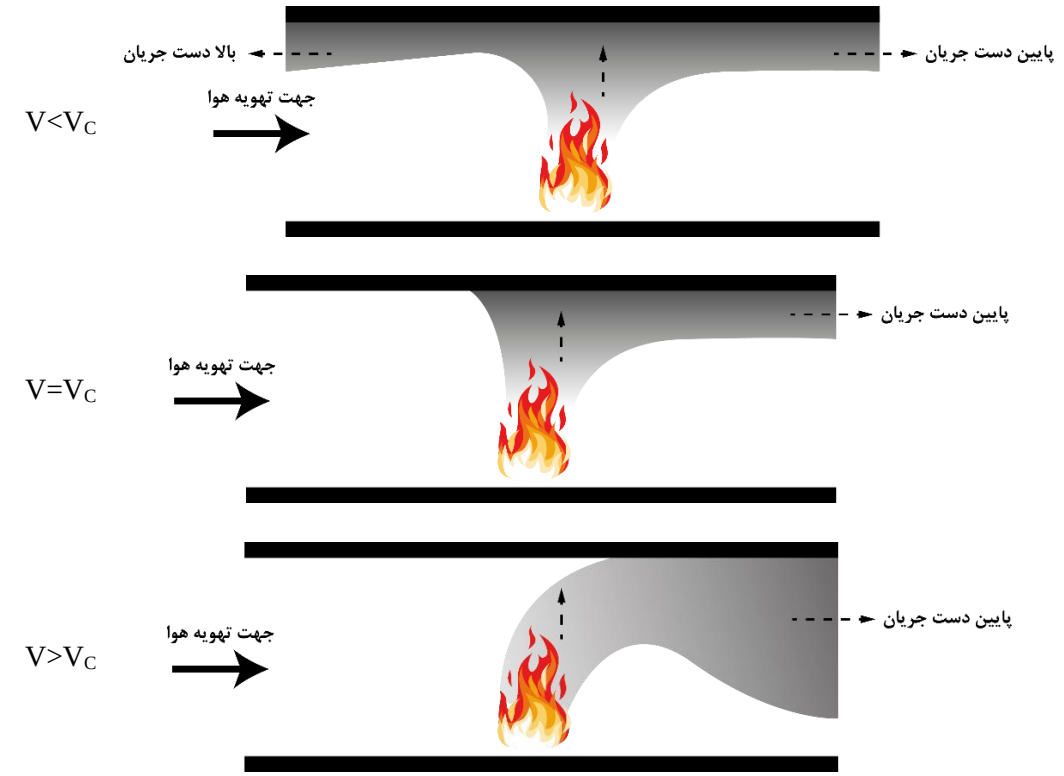
به طور کلی می‌توان روند مواجهه با حریق در تونل را مطابق شکل (پ-۲-۱۲) توصیف نمود.



شکل پ-۲-۱۲: روند مواجهه با حریق در تونل

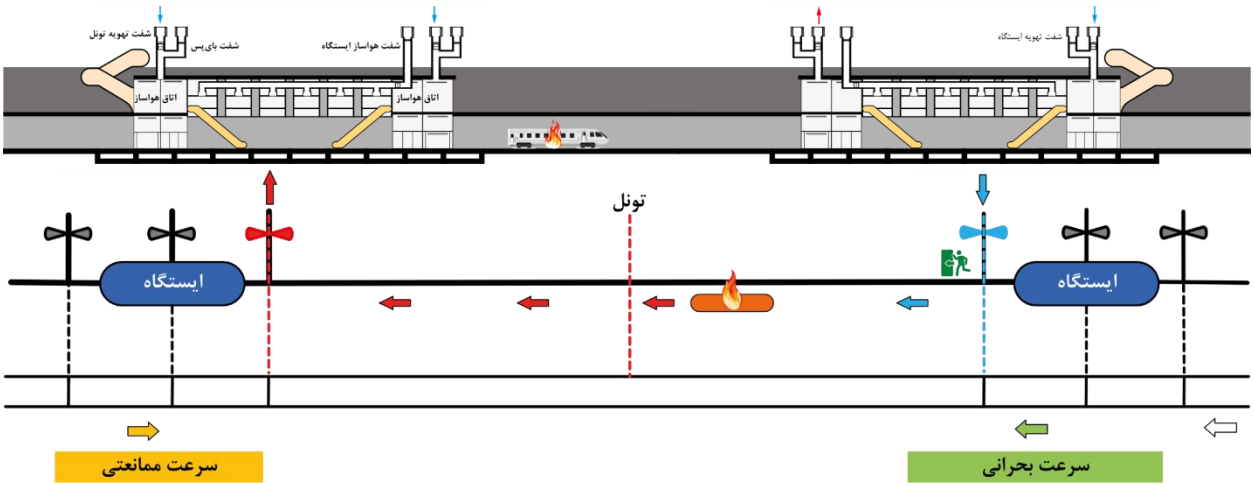
در این حالت، ارجح است قطار به نزدیکترین ایستگاه هدایت شده و در آنجا متوقف شده و سپس سناریوهای دفع دود و اطفاء حریق اجرا گردد، در غیر این صورت، تشخیص سناریوی مناسب عملکرد سیستم تهویه در این حالت نسبتاً پیچیده می‌باشد، زیرا بسته به موقعیت واگن دچار حریق، ممکن است مسافران در زمان تخلیه قطار، به هر دو سمت تونل حرکت کنند. لذا راهنمایی مسافران جهت انتخاب صحیح مسیر حرکت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در صورت عدم امکان مشخص نمودن موقعیت دقیق حریق و رفتار مسافران در هنگام فرار، فرض بر حرکت مسافران به نزدیکترین مسیر خروج است.

یکی از مفاهیم مورد توجه در این سناریو، پدیده برگشت دود می‌باشد، به جهت جلوگیری از بروز این پدیده در تونل، بایستی، سرعت جریان هوا به حد خاصی که سرعت بحرانی (V_C) نامیده می‌شود، برسد.



شکل پ-۲-۱۳: مفهوم سرعت بحرانی در تونل

سناریوی دفع دود در این حالت، عمدتاً به روش دهش- مکش[1] می‌باشد، یعنی هوا از یک سمت به طرف حریق هدایت شده و از سمت دیگر هوا و دود به بیرون کشیده شده و در نهایت تخلیه می‌گردد.



شکل پ-۲-۱۴: شماتیک سناریوی تهویه PUSH-PULL در تونل

[1] PUSH-PULL

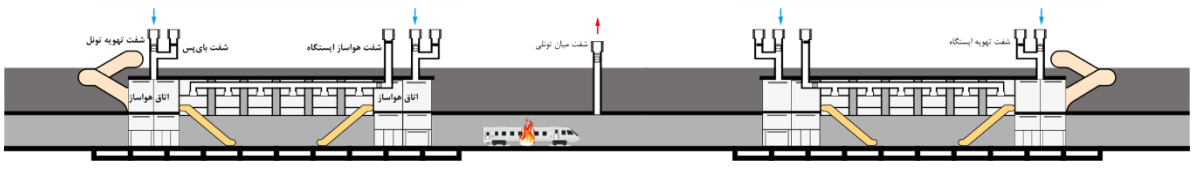
گذشته از موارد ذکر شده یکی از موارد مهم دیگر، در نظر گرفتن خطر توقف حرکت قطاری دیگر در تونل بالادست قطار آتش‌گرفته است به‌نحوی که هیچ شفتی بین دو قطار نباشد. در این موارد توصیه شده است که از هدایت دود به سمتی که قطارمتوقف شده در آن قرار گرفته است (و به‌صورت اولیه در منطقه امن قرار دارد)، پرهیز شود.

جهت سرعت طولی اولیه هوا در تونل نیز برای انتخاب جهت مناسب تهویه اضطراری دارای اهمیت است. علاوه بر این برای معکوس شدن جهت جریان هوا (برخلاف جهت اینرسی هوا در تونل) چند دقیقه وقت لازم است. لذا انتخاب جریان هوای اضطراری در خلاف جهت اثر پیستونی در درجه اول توصیه نمی‌شود.

برای جلوگیری از بازگشت دود در مسیر خروج مسافران باید نرخ جریانی در تونل ایجاد شود که دستکم برابر با سرعت بحرانی در تونلی که در آن آتش وجود دارد، باشد. هدف بعدی جلوگیری از انتشار دود به سمت ایستگاه پایین‌دست شفت مکنده است.

هر دوی این سرعت‌ها می‌توانند با استفاده از شفت میان تونلی شکل (پ-۲-۱۵) و بدون شفت میان تونلی شکل (پ-۲-۱۴) به دست آیند. در هر دو حالت، سناریوی تهویه بر اساس به کارگیری شفت‌های تهویه واقع در انتهای ایستگاه (که متصل به تونل دچار آتش‌سوزی است) می‌باشد. شفت‌های تهویه‌ای که مواجه با آتش‌سوزی نیستند، می‌توانند برای کنترل سرعت هوا در تونل دچار آتش‌سوزی یا کمک به سامانه‌های اصلی تهویه اضطراری استفاده شوند. در تونل‌های با شیب زیاد که شفت‌های تهویه اصلی نمی‌توانند سرعت هوا را در تونل‌های دچار آتش کنترل کنند، استفاده از جت‌فن‌ها ضروری است.

به‌طور کلی استفاده از شفت میان‌تونلی زمانی که امکان حضور هم‌زمان دو قطار در یک جهت از مسیر تونل وجود داشته باشد توصیه می‌شود، هر چند این سناریو ممکن است در طراحی‌های مختلف از طرق مختلفی حل شود.به عنوان مثال تعداد قطارهایی که می‌توانند به‌طور هم‌زمان در یک جهت از مسیر تونل بین دو شفت تهویه وجود داشته باشند علاوه بر بُعد مسافت، به فاصله زمانی حرکت قطارها و سرعت متوسط آن‌ها در تونل نیز بستگی دارد که از طریق برنامه‌ریزی در روال بهره‌برداری و اعزام قطارها، این موضوع تا حدودی قابل کنترل است.



شکل پ-۲-۱۵: شماتیک سناریوی تخلیه از شفت میانی

پ-۲-۶- ایمنی سیستم تهویه

سیستم تهویه بایستی دارای قابلیت اطمینان و ایمن باشد، بطوریکه در فرایند طراحی سیستم تهویه هر پروژه، الزامات مربوط به قابلیت اعتماد، قابلیت نگهداری، در دسترس بودن و ایمن بودن (RAMS) مطابق الزامات و استاندارد EN 50126 سنجیده شده و شاخص‌های RAMS توسط سازنده و طراح سیستم تهویه اعلام گردد.

همچنین جهت حصول اطمینان از عملکرد سیستم تهویه در مواقع بحران، در طراحی سیستم تهویه تونل و ایستگاه بایستی معیار افزونگی رعایت گردد که این مهم می‌تواند از طرق مختلف از جمله رعایت افزونگی فیزیکی یا افزونگی در عملکرد تجهیزات حاصل گردد. لذا در صورت خرابی یکی از فن‌ها، فن دیگر وارد عمل شده و یا اینکه با عملکرد سامانه‌های تهویه مجاور، اثرات خرابی فن مذکور تا حد زیادی جبران می‌گردد.

پیوست ۳

اصول محاسبات سیستم تهویه

در قسمت ابتدای این پیوست، اصول انجام محاسبات استاتیک ارائه خواهد گردید و پس از آن به ارائه کلیاتی پیرامون چارچوب محاسبات گذر هوای سیستم تهویه پرداخته خواهد شد.

لازم به ذکر است روابط ارائه شده در این بخش از پیوست ضابطه، جنبه راهنمایی داشته و در صورت وجود روش‌های محاسباتی دقیق‌تر، امکان استفاده از روش‌های جایگزین وجود خواهد داشت.

مرجع قابل استناد در این بخش، به شرح ذیل می‌باشد:

- Subway Environmental Design Handbook (Vol. 1/ Principles and Applications, Second Edition) [SEDH]
- Subway Environmental Design Handbook (Vol. 2/ Subway Environment Simulation Computer Program) [SEDH]

در قسمت انتهایی فصل نیز، روش محاسبات سیستم فشار مثبت و نیز ملاحظات مربوط به سیستم تخلیه دود ایستگاهی تشریح گردیده است.

پ-۳-۱- اصول محاسبه بار حرارتی به روش استاتیک

پ-۳-۱-۱- مشخصات قطار و شرایط سیر قطار در خط ریلی

برای انجام محاسبات مربوط به سیستم تهویه تونل، بایستی اطلاعات ورودی به شرح جدول (پ-۳-۱) از سازنده ناوگان یا گزارشات طراحی ناوگان و مطالعات بهره‌برداری اخذ و در گزارشات طراحی سیستم تهویه ارائه گردد.

توضیح دیگر اینکه یکای اندازه‌گیری متداول پارامترهای ورودی، بسته به مورد در دستگاه‌های SI و IP، کنار توضیح مشخصات، در ردیف‌های جدول و داخل پرانتز درج شده است.

جدول پ-۳-۱: مشخصات قطار

نماد	شرح پارامتر ورودی	مقدار
N	تعداد واگن در هر قطار	
l	طول قطار (m)	
W	جرم هر واگن با مسافرین (tons)	
-	تعداد مسافرین در هر واگن	
W_e	جرم معادل یک واگن مستقل شامل مسافرین با لحاظ نمودن اینرسی دورانی (tons)	
n	تعداد قطار عبوری از هر ایستگاه در یک ساعت	
A	سطح مقطع پیشانی قطار (ft^2)	
r	میزان بازگردانی انرژی در هنگام ترمز[۱](%)	
a_a	حداکثر شتاب افزاینده (m/s^2)	
a_d	حداکثر شتاب کاهنده (m/s^2)	
U	ماکزیمم سرعت (m/s)	
$\bar{U}$	سرعت متوسط قطار(m/s)	
t_a	زمان شتاب‌گیری (s)	
t_r	زمان حرکت با سرعت بیشینه (s)	
d_a	فاصله مورد نیاز جهت شتاب‌گیری قطار تا سرعت ماکزیمم و ترمزگیری (ft)	
C_D	ضریب درگ ایرودینامیکی	
V_o	ولتاژ برق خط (V)	
t_d	زمان توقف قطار در ایستگاه (s)	
H	هدوی (s)	
t_t	زمان مورد نیاز هر قطار برای عبور از هر ایستگاه(s)	
ε_m	راندمان ترکیبی موتور	
T	توان سرمایشی هر واگن (Ref.tons)	
W_{AX}	توان ورودی به کمپرسورهای قطار (kw)	
f	درصد زمانی فعالیت کمپرسور (بدون بعد)	

پ-۳-۱-۲- مشخصات منابع حرارتی ثابت در ایستگاه و تونل

مشخصات منابع حرارتی ثابت ایستگاه در جدول (پ-۳-۲) بایستی بر اساس طرح ایستگاه‌ها تکمیل گردد.

[۱] Regenerative Braking Effectiveness

جدول پ-۳-۲: مشخصات منابع حرارتی ثابت در ایستگاه و تونل

نماد	شرح پارامتر ورودی	مقدار
t_{av}	مدت زمان میانگین حضور مسافران در محیط ایستگاه (hr)	
W_L	توان روشنایی تونل در واحد طول (W/ft)	
W_{SL}	توان روشنایی ایستگاه در واحد سطح (W/ft^2)	
L	طول تونل (ft)	
A_S	سطح روشن ایستگاه (ft^2)	
W_{EL}	توان بیشینه پله‌برقی‌ها (hp)	
W_{ES}	توان بیشینه آسانسورها (kw)	
L_F	میانگین ضریب بار (مربوط به پله برقی‌ها)، بدون بعد	
L_F	میانگین ضریب بار (مربوط به آسانسورها)، بدون بعد	
W_{FC}	توان گیت‌ها، (kw)	
-	تعداد آسانسور در ایستگاه	
-	تعداد گیت‌های فروش بلیط	
-	تعداد پله‌برقی‌ها در ایستگاه	
-	بیشترین تعداد مسافر در ایستگاه در زمان پیک	
q_{SEN}	حرارت محسوس ناشی از حضور هر مسافر در ایستگاه (Btu/h)	
q_{LAT}	حرارت نهان ناشی از حضور هر مسافر در ایستگاه (Btu/h)	
W_K	توان سایر تجهیزات (kw)	

مطالبی که در ادامه ارائه می‌شوند، برگرفته از مندرجات ارائه شده در هندبوک SEDH، جلد اول، قسمت سوم، استراتژی طراحی و ارزیابی‌های مربوط به محیط مترو است که در آن معادلات مورد نیاز جهت محاسبه بار حرارتی در فضاهای قطار شهری ارائه شده است.

در سیستم‌های حمل و نقل مترو، منابع عمده تولید حرارت را می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی نمود:

- بار حرارتی ناشی از شتاب گرفتن قطار
- بار حرارتی قطار در بالاترین سرعت
- بار حرارتی ناشی از ترمز گرفتن قطار
- بار حرارتی ناشی از سیستم تهویه مطبوع قطار و سیستم‌های جانبی
- بار حرارتی ناشی از مسافرین
- بار حرارتی ناشی از جریان هوا از فضای بیرون و همچنین بین دو ناحیه با دماهای مختلف

پ-۳-۲- بار حرارتی ناشی از شتاب گرفتن قطار

در هنگام شتاب گرفتن قطار، بار حرارتی از طریق نیروی درگ آیرودینامیکی، مقاومت‌های مکانیکی، تلفات سیستم برق‌رسانی و تلفات موتور تولید می‌شوند. به عبارتی:

رابطه (پ-۳-۱) $$q_a = q_D + q_M + q_m + q_{3R}$$

q_a بار حرارتی جذب شده توسط ایستگاه و تونل در طی فرایند شتاب‌گیری، (Btu/h)

q_D بار حرارتی ناشی از درگ ایرودینامیکی، (Btu/h)

q_M بار حرارتی ناشی از نیروی مقاومت مکانیکی، (Btu/h)

q_m بار حرارتی ناشی از تلفات موتور کشنده، (Btu/h)

q_{3R} بار حرارتی ناشی از تلفات برق بالاسری یا ریل سوم ، (Btu/h)

پ-۳-۲-۱- بار حرارتی ناشی از نیروی درگ ایرودینامیکی

نیروی درگ ایرودینامیکی به صورت رابطه (پ-۳-۲) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۲)

$$F_D = 4.3 \times 10^{-6} A \delta C_D \overline{U}^2$$

F_D نیروی درگ ایرودینامیکی، (lb_f)

δ چگالی وزنی هوا، (lbf/ft^3)

C_D ضریب درگ ایرودینامیکی، بدون بعد

$\overline{U}$ سرعت متوسط قطار، (fpm)

A سطح مقطع پیشانی قطار، (ft^2)

بار حرارتی ناشی از درگ ایرودینامیکی به صورت رابطه (پ-۳-۳) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۳)

$$q_D = \frac{F_D d_a n}{778}$$

q_D بار حرارتی ناشی از درگ ایرودینامیکی، (Btu/h)

d_a فاصله مورد نیاز جهت شتاب‌گیری قطار تا سرعت ماکزیمم، (ft)

n تعداد قطارهای عبوری از ایستگاه در یک ساعت

پ-۳-۲-۲- بار حرارتی ناشی از مقاومت‌های مکانیکی

نیروی مقاومت مکانیکی یک واگن به صورت رابطه (پ-۳-۴) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۴)

$$F_M = 1.3 + \frac{116}{W} + (5.1 \times 10^{-4})\overline{U}$$

F_M نیروی مقاومت مکانیکی یک واگن، (lb_f/ton)

W وزن یک واگن به همراه مسافران داخل آن، (tons)

$\overline{U}$ سرعت متوسط قطار، (fpm)

بار حرارتی ناشی از نیروی مقاومت مکانیکی به صورت رابطه (پ-۳-۵) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۵)

$$q_M = \frac{F_M d_a W N n}{778}$$

q_M بار حرارتی ناشی از نیروی مقاومت مکانیکی، (Btu/h)

N تعداد واگن در هر قطار

پ-۳-۲-۳- بار حرارتی ناشی از تلفات موتور

بار حرارتی ناشی از تلفات موتور کشنده به صورت رابطه (پ-۳-۶) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۶)
$$q_m = (KE + q_D + q_M + q_{SR})\left(\frac{1-\varepsilon_m}{\varepsilon_m}\right)$$

q_m بار حرارتی ناشی از تلفات موتور کشنده، (Btu/h)

KE انرژی جنبشی قطار در سرعت ماکزیمم، (Btu/h)

q_M بار حرارتی ناشی از مقاومت‌های مکانیکی، (Btu/h)

q_D بار حرارتی ناشی از درگ ایرودینامیکی، (Btu/h)

q_{SR} بار حرارتی ناشی از تلفات مقاومتی در شروع حرکت، (Btu/h)

ε_m بازده موتور و درایو، بدون بعد

برای محاسبه انرژی جنبشی از رابطه (پ-۳-۷) می‌توان استفاده کرد:

رابطه (پ-۳-۷)
$$KE = 11.1 \times 10^{-6} W_e N n U^2$$

W_e وزن معادل یک واگن به‌همراه مسافران داخل آن و همچنین اینرسی دورانی، (tons)

U سرعت ماکزیمم قطار، (fpm)

همچنین بار حرارتی ناشی از تلفات مقاومت در شروع حرکت نیز به صورت رابطه (پ-۳-۸) قابل تخمین است:

رابطه (پ-۳-۸)
$$q_{SR} = 2 \times KE_{step\,1}\left(1 + \frac{1-\varepsilon_m}{\varepsilon_m}\right)$$

q_{SR} بار حرارتی ناشی از تلفات مقاومتی در شروع، (Btu/h)

KE_{step1} انرژی جنبشی قطار در سرعت گذار[۱]، (Btu/h)

پ-۳-۲-۴- بار حرارتی ناشی از تلفات شبکه برق‌رسانی

اتلاف حرارتی ناشی از تلفات برق بالاسری یا ریل سوم به قطار به صورت رابطه (پ-۳-۹) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۹)
$$q_{3R} = 0.65\frac{(KE + q_D + q_M + q_m + q_{SR})^2 R}{n t_a V_0^2}$$

q_{3R} بار حرارتی ناشی از تلفات برق بالاسری یا ریل سوم، (Btu/h)

R مقاومت تماسی و مقاومت در حین حرکت، (milli-ohm)

t_a زمان شتاب‌گیری تا رسیدن به بیشترین سرعت، (s)

V_0 ولتاژ، (V)

[۱] Transition speed

پ-۳-۳- بار حرارتی قطار در بالاترین سرعت

زمانی‌که قطار با بیشترین سرعت در حال حرکت است، اتلاف حرارتی توسط نیروی درگ ایرودینامیکی، مقاومت مکانیکی، تلفات شبکه برق‌رسانی و همچنین تلفات ناشی از موتور صورت می‌پذیرد. بار حرارتی ناشی از درگ ایرودینامیکی و مقاومت مکانیکی همانند فرایند شتاب‌گیری محاسبه می‌شود، با این تفاوت که در محاسبات به‌جای سرعت متوسط باید از سرعت ماکزیمم و همچنین بجای فواصل شتاب‌گیری نیز از فاصله‌ای استفاده نمود که قطار با سرعت بیشینه حرکت می‌کند.

بار حرارتی ناشی از تلفات موتور کشنده نیز بر همین مبنا و مطابق قسمت شتاب‌گیری محاسبه می‌شود و در سرعت ماکزیمم، موتور بایستی تنها بر نیروی درگ ایرودینامیکی و نیروی مقاومت مکانیکی غلبه کند. به همین دلیل بار حرارتی ناشی از موتور کشنده در سرعت بیشینه به صورت رابطه (پ-۳-۱۰) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۱۰)
$$q_m = (q_D + q_M)\left(\frac{1-\varepsilon_m}{\varepsilon_m}\right)$$

بار حرارتی ناشی از برق بالاسری یا ریل سوم نیز مانند قبل محاسبه می‌شود با این تفاوت که در این حالت تلفات مقاومت در شروع حرکت و انرژی جنبشی قطار درنظر گرفته نشده و برای پارامتر زمان نیز، زمان حرکت در سرعت کامل درنظر گرفته می‌شود.

به عبارتی:

رابطه (پ-۳-۱۱)
$$q_{3R} = 0.65\frac{(q_D + q_M + q_m)^2 R}{n t_r V_0^2}$$

q_{3R} بار حرارتی ناشی از تلفات سیستم برق‌رسانی، (Btu/h)

R مقاومت تماسی و مقاومت در حین حرکت، (mili-ohm)

t_r زمان حرکت با سرعت بیشینه، (s)

V_0 ولتاژ، (V)

رابطه (پ-۳-۱۲)
$$q_A = q_D + q_M + q_m + q_{3R}$$

q_A بار حرارتی جذب شده توسط ایستگاه و تونل در طی دوره حرکت قطار با سرعت ثابت، (Btu/h)

q_D بار حرارتی ناشی از درگ ایرودینامیکی، (Btu/h)

q_M بار حرارتی ناشی از نیروی مقاومت مکانیکی، (Btu/h)

q_m بار حرارتی ناشی از تلفات موتور الکتریکی، (Btu/h)

q_{3R} بار حرارتی ناشی از تلفات سیستم برق‌رسانی طی دوره حرکت با سرعت ثابت، (Btu/h)

پ-۳-۴- بار حرارتی در فاز ترمزگیری قطار

در مدت زمانیکه قطار ترمز می‌گیرد، بار حرارتی تولیدی ناشی از نیروی درگ ایرودینامیکی، مقاومت مکانیکی و انرژی جنبشی تبدیل شده به حرارت در حین ترمزگیری می‌باشد. بار حرارتی ناشی از نیروی درگ ایرودینامیکی و مقاومت مکانیکی مشابه فاز شتاب‌گیری محاسبه می‌شوند. البته لازم به ذکر است که در این محاسبات زمان و فاصله طی شده برای حالت کاهش شتاب درنظر گرفته می‌شود. در حین ترمز گرفتن قطار، مقداری از انرژی جنبشی به صورت انرژی گرمایی تلف می‌شود و مقداری از این انرژی نیز مجدداً به شبکه برق‌رسانی بازگردانده می‌شود. اگرچه محاسبه مقدار انرژی جنبشی بازگردانده شده در هر توقف قطار دشوار است، اما در قطارهای امروزی متوسط انرژی باز گردانده شده به کل انرژی مصرف شده توسط موتور قطار حداکثر ٪۴۰ می‌باشد که در برخی از مواقع اتفاق می‌افتد.

بار حرارتی بدست آمده از تلفات انرژی جنبشی به صورت رابطه (پ-۳-۱۳) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۱۳)
$$q_B = KE \times (1 - r)$$

q_B بار حرارتی جذب شده توسط ایستگاه و تونل در طی فرایند ترمزگیری قطار، (Btu/h)

r میزان بازگردانی انرژی در هنگام ترمز[1] (%)

پ-۳-۵- تهویه مطبوع قطار و وسایل جانبی

پ-۳-۵-۱- گرمای ازدست‌رفته از تجهیزات جانبی خارجی قطار

وسایل جانبی خارجی شامل کمپرسور سیستم پنوماتیک جهت ترمز اصطکاکی، کنورتر مربوط به آن و سایر وسایل جانبی قطار هستند که بطور مستقیم حرارت را به داخل تونل منتقل می‌کنند. حرارت منتقل شده به صورت (پ-۳-۱۴) محاسبه می‌شود:

رابطه (پ-۳-۱۴)
$$q_{AX} = 0.948 \times W_{AX} \times \mathrm{f} \times \mathrm{N} \times \mathrm{n} \times t_t$$

q_{AX} حرارت منتقل شده از وسایل جانبی و خارجی قطار ، (Btu/h)

W_{AX} نرخ توان ورودی وسایل جانبی خارجی قطار، (kW)

f درصد زمان کارکرد تجهیزات، بدون بعد

N تعداد واگن‌های یک قطار، بدون بعد

n تعداد قطار عبوری از هر ایستگاه در هر ساعت

t_t زمان مورد نیاز یک قطار برای عبور از هر ایستگاه (s)

[1] Regenerative Braking Effectiveness

پ-۳-۵-۲- نرخ آزادسازی انرژی حرارتی توسط سیستم تهویه مطبوع قطار

نرخ آزادسازی انرژی حرارتی توسط سیستم تهویه مطبوع قطار به صورت رابطه (پ-۳-۱۵) محاسبه می‌شود:

$$q_{AC} = 4.51 \times \mathrm{T} \times \mathrm{N} \times \mathrm{n} \times t_t$$ رابطه (پ-۳-۱۵)

q_{AC} حرارت منتقل شده از سیستم تهویه مطبوع به ایستگاه و تونل، (Btu/h)

T نرخ تهویه مطبوع هر واگن (Ref.ton)

N تعداد واگن‌های یک قطار، بدون بعد

n تعداد قطار عبوری از هر ایستگاه در هر ساعت

t_t زمان مورد نیاز یک قطار برای عبور از هر ایستگاه (s)

همچنین روابط دیگری برای محاسبه نرخ آزادسازی انرژی حرارتی توسط سیستم تهویه مطبوع قطار در ضمیمه E جلد دوم هندبوک SEDH ارائه شده است.

پ-۳-۵-۳- بار حرارتی داخل تونل

حرارت ناشی از روشنایی داخل تونل به صورت رابطه (پ-۳-۱۶) محاسبه می‌شود:

$$q_{TL} = 3.41 \times W_L \times L$$ رابطه (پ-۳-۱۶)

q_{TL} حرارت ناشی از روشنایی داخل تونل، (Btu/h)

W_L توان روشنایی تونل در واحد طول، (W/ft)

L طول تونل، (ft)

پ-۳-۵-۴- بارهای حرارتی داخل ایستگاه

در محیط ایستگاه عمده بار حرارتی ناشی از حضور مسافرین در ایستگاه، پله‌برقی، آسانسور، گیت‌های فروش بلیط و روشنایی ایستگاه است.

- بار حرارتی روشنایی ایستگاه:

$$q_{SL} = 3.41 \times W_{SL} \times A_S$$ رابطه (پ-۳-۱۷)

q_{SL} حرارت ناشی از روشنایی داخل ایستگاه، (Btu/h)

W_{SL} توان روشنایی ایستگاه در واحد سطح، (W/ft^2)

A_S مساحت روشنایی ایستگاه، (ft^2)

می‌توان جهت افزایش دقت محاسبات، در این مرحله بار حرارتی تابلوهای تبلیغاتی نصب شده در ایستگاه را نیز در بار روشنایی ایستگاه لحاظ نمود.

- بار حرارتی ناشی از حضور مسافرین:

رابطه (پ-۳-۱۸) $q_{PS} = N_P \times t_{av} \times q_{SEN}$

رابطه (پ-۳-۱۹) $q_{PL} = N_P \times t_{av} \times q_{LAT}$

q_{PS} حرارت محسوس ناشی از حضور مسافران (Btu/h)

q_{PL} حرارت نهان ناشی از حضور مسافران (Btu/h)

N_P تعداد مسافران حاضر در ایستگاه در ساعت پیک، (تعداد مسافر بر ساعت)

t_{av} متوسط زمان حضور مسافران در محیط ایستگاه (hr)

q_{SEN} گرمای محسوس هر مسافر (Btu/h)

q_{LAT} گرمای نهان هر مسافر (Btu/h)

- بار حرارتی عملکرد پله‌برقی‌ها

رابطه (پ-۳-۲۰) $q_{EL} = 2545 \times W_{EL} \times L_F$

q_{EL} حرارت ناشی از عملکرد پله‌برقی‌ها در داخل ایستگاه، (Btu/h)

W_{EL} توان پله‌برقی‌ها، (hp)

L_F میانگین ضریب بار (مربوط به پله‌برقی‌ها)، بدون بعد

- بار حرارتی عملکرد آسانسورها

در صورت انتقال گرمای ناشی از کارکرد آسانسورها به محیط ایستگاه، بار گرمایی را می‌توان از رابطه (پ-۳-۲۱) محاسبه نمود.

رابطه (پ-۳-۲۱) $q_{ES} = 3412.1 \times W_{ES} \times L_F$

q_{ES} حرارت ناشی از عملکرد آسانسورها در داخل ایستگاه، (Btu/h)

W_{ES} توان آسانسورها، (KW)

L_F میانگین ضریب بار (مربوط به آسانسورها)، بدون بعد

- بار حرارتی کارکرد گیت‌های مسافری

رابطه (پ-۳-۲۲) $q_{FC} = 3412.1 \times W_{FC}$

q_{FC} حرارت ناشی از عملکرد گیت‌های مسافری در داخل ایستگاه، (Btu/h)

W_{FC} توان گیت‌ها، (KW)

- بار حرارتی کارکرد سایر تجهیزات ایستگاهی

رابطه (پ-۳-۲۳) $q_K = 3412.1 \times W_K$

q_{FC} حرارت ناشی از عملکرد سایر تجهیزات در داخل ایستگاه، (Btu/h)

W_K توان سایر تجهیزات، (KW)

همچنین در صورتیکه ایستگاه‌ها به صورت روزمینی ساخته شده باشند و یا نورگیر در آن‌ها تعبیه شده باشد، بایستی گرمای مربوط به تابش خورشید نیز در محاسبات لحاظ گردد.

پ-۳-۵-۵- انتقال حرارت از طریق دیواره تونل و ایستگاه

دیواره تونل و زمین اطراف آن نقش متعادل کننده دمای هوای تونل را بر عهده دارند. هنگامیکه دمای تونل افزایش می‌یابد انتقال حرارت از طریق دیواره تونل و ایستگاه باعث کاهش دما می‌گردد و هنگامیکه دمای تونل کاهش می‌یابد انتقال حرارت از زمین به تونل و ایستگاه باعث تعدیل دما می‌گردد. این پدیده به نام اثر چاه حرارتی (Heat Sink Effect) شناخته می‌شود و به عبارتی مفهوم این پدیده آن است که محیط فیزیکی اطراف تونل دارای ظرفیت ذخیره گرما می‌باشد. این پدیده به عوامل مختلفی از قبیل جنس دیواره، جنس خاک اطراف، دمای دیواره و دمای خاک بستگی دارد.

برای محاسبه اثر چاه حرارتی، در منابع روابط ریاضی فرمول‌بندی شده است، ولی به عنوان یک تقریب اولیه، می‌توان اثر انتقال حرارت چاه حرارتی را از حدود $BTU/hr.ft^2$ ۱/۵ در فصل سرد، $BTU/hr.ft^2$ ۵ در صورت فعال بودن فن‌های تهویه در فصول دیگر، به طور میانگین $BTU/hr.ft^2$ ۷ و حداکثر مقدار $BTU/hr.ft^2$ ۱۲ در نظر گرفت.

این پدیده در نرم‌افزار SES با استفاده از زیر برنامه Heat Sink محاسبه می‌گردد.

پ-۳-۶- بار حرارتی ناشی از جریان هوای وارد شده به ایستگاه

یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار در محاسبات بار حرارتی فضاهای مترو بار حرارتی ناشی از جریان هوای بیرون به ایستگاه و تونل از طریق ورودی‌ها می‌باشد. با توجه به حرکت متناوب قطار، با ورود قطار به ایستگاه به دلیل اثر پیستونی، هوا از طریق ورودی‌های ایستگاه به فضای بیرون هدایت شده و خروج قطار از ایستگاه باعث مکش هوای بیرون به داخل می‌گردد. با توجه به متفاوت بودن شرایط دمایی داخل و خارج و مقدار جریان هوا، بار حرارتی منتقل شده قابل توجه می‌باشد.

پ-۳-۷- نحوه توزیع بار حرارتی

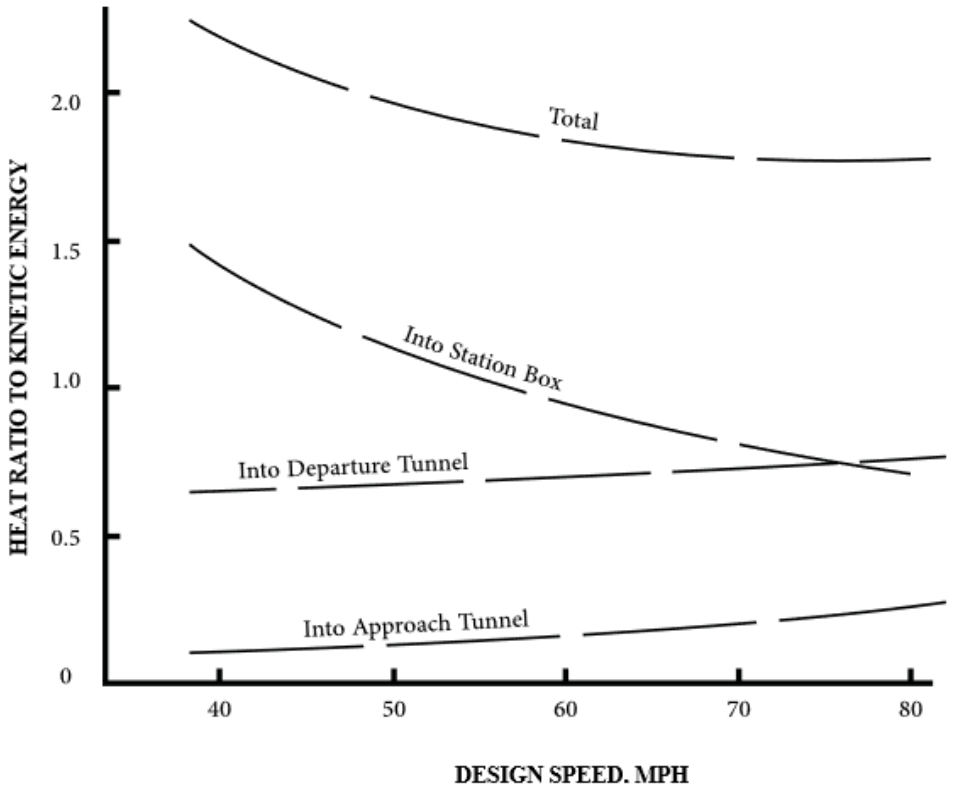
محاسبه بارهای حرارتی عمده در فضای عمومی قطار شهری، اولین قدم در طراحی سیستم تهویه و تهویه مطبوع می‌باشد. قدم بعدی، تعیین نحوه توزیع این بار حرارتی است. با توجه به متفاوت بودن شرایط طرح داخل ایستگاه و تونل، چگونگی توزیع بار حرارتی در تعیین ظرفیت سیستم تهویه هر بخش از مسیر تاثیرگذار می‌باشد. هنگامیکه محاسبات با استفاده از مدل‌سازی یک‌بعدی انجام می‌گیرد، با توجه به در نظر گرفتن حرکت قطار و توزیع بار حرارتی طی عملکردهای متفاوت قطار در موقعیت‌های گوناگون (بسته به شتابگیری، ترمزگیری و حرکت سرعت ثابت، ورود و خروج هوا از ورودی‌ها و غیره) بار حرارتی هر بخش به صورت جداگانه و با دقت نسبتاً خوبی محاسبه می‌گردد. در حل استاتیک که با استفاده از فرمول‌های ریاضی و بدون در نظر گرفتن حرکت قطار انجام می‌گیرد، امکان در نظر گرفتن این توزیع به راحتی وجود نداشته، اما

همانطور که در هندبوک SEDH ذکر شده، می‌توان با استفاده از تجربیات و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته پیشین، توزیع حرارت قابل قبولی را بدست آورده و در محاسبات استاتیکی استفاده نمود.

در این حالت، می‌توان مسیر را به سه بخش مجزا تقسیم نموده و توزیع حرارت را در هر بخش مشخص نمود:

- محدوده ایستگاه (Station Box)
- محدوده قبل از ایستگاه (Approaching Tunnel)
- محدوده تونل بعد از ایستگاه (Departure Tunnel)

نحوه توزیع حرارت تا حد زیادی بستگی به مشخصات مسیر (از قبیل تک خطه و یا دو خطه بودن تونل) و سرعت حرکت قطار داشته و حرارت به طور مساوی در طول مسیر توزیع نمی‌گردد، به طور مثال شکل (پ-۳-۱) تأثیر سرعت طراحی حرکت قطار بر روی توزیع حرارت را نمایش می‌دهد.



شکل پ-۳-۱: اثر سرعت‌های مختلف طراحی بر نحوه توزیع گرما

بر اساس اطلاعات جلد اول هندبوک SEDH توزیع حرارت به شرح زیر تخمین زده می‌شود، این موارد را می‌توان با در نظرگیری فرضیات صحیح بر حسب شرایط هر پروژه و استفاده از تجربیات مشابه پیشین تدقیق نمود.

- تمامی حرارت تولیدی ناشی از شتاب‌گیری قطار در داخل بخشی از تونل مجاور ایستگاه که فرایند شتابگیری در آن صورت می‌گیرد (Departure Tunnel) توزیع می‌شود.

- تمام بار حرارتی ناشی از حرکت با سرعت ماکزیمم در داخل تونل توزیع می‌شود.
- حرارت تولیدی ناشی از ترمزگیری قطاری که با سرعت 80 km/h در حال حرکت است به صورت جدول (پ-۳-۳) توزیع می‌شود.

جدول پ-۳-۳: نحوه توزیع بار حرارتی ناشی از ترمزگیری

حرارت در تونل بعد از ایستگاه	حرارت در محدوده ایستگاه	حرارت در تونل ورودی به ایستگاه
٪۲۸	٪۶۵	٪۷

- بار حرارتی ناشی از وسایل جانبی خارجی و تهویه مطبوع قطار در طول فاز شتاب‌گیری، ترمزگیری و توقف در محدوده ایستگاه نیز به‌صورت جدول (پ-۳-۴) توزیع می‌شود:

جدول پ-۳-۴: نحوه توزیع بار حرارتی ناشی از ترمزگیری

حرارت در تونل بعد از ایستگاه	حرارت در محدوده ایستگاه	حرارت در تونل ورودی به ایستگاه
٪۲۷	٪۶۰	٪۱۳

- تمام بار حرارتی ناشی از عملکرد سیستم تهویه مطبوع قطار و وسایل جانبی خارجی در طول حرکت با سرعت ماکزیمم در داخل تونل توزیع می‌شود.

در بخش بعدی، گذر حجمی مورد نیاز سیستم تهویه برای ایستگاه و تونل به صورت مجزا ارائه شده است.

پ-۳-۸- گرمای اضافه شده یا برداشته توسط جریان هوا

تهویه هوای تونل و ایستگاه‌ها در مسیر زیرزمینی به وسیله دو مکانیزم اثر پیستونی قطار در تونل و سیستم تهویه مکانیکی انجام می‌گیرد. سیستم تهویه مترو با تعویض هوای داخل با هوای تازه بیرون این کار را انجام داده که می‌تواند علاوه بر آن از طریق مکانیزم‌های تبخیری یا تبریدی سرمایش مورد نیاز را نیز در صورت لزوم فراهم سازد. هوای تزریق شده از طریق سیستم تهویه (در صورت عدم استفاده از مکانیزم‌های سرمایش)، موازنه انرژی در داخل سیستم را تغییر می‌دهد. اگر هوای بیرون خنک‌تر از هوای داخل باشد، سیستم تهویه، دمای هوای داخل را کاهش می‌دهد و برعکس، اگر هوای داخل خنک‌تر از هوای اتمسفر بیرون باشد، سیستم تهویه موجب افزایش دما می‌شود.

همانطور که گفته شد در اثر حرکت قطار در داخل تونل نیز، فرایند تهویه صورت می‌پذیرد. حرکت قطار در تونل‌ها و ایستگاه‌ها مانند حرکت یک پیستون در داخل سیلندر است و می‌تواند هوا را جابه‌جا کند لذا عمل تهویه که از طریق این مکانیزم صورت می‌گیرد، اثر پیستونی نامیده می‌شود. با درجه اهمیت کمتر نوعی از تهویه نیز توسط نیروی شناوری و

اختلاف دمای هوا به وجود می‌آید. تهویه در اثر این دو مکانیزم ممکن است به وسیله تهویه فن‌ها تکمیل شود و در برخی از سیستم‌ها نیز تهویه مکانیکی، مکانیزم غالب می‌باشد.

عمل تهویه همواره می‌تواند از طریق حرکت هوا بواسطه اثر پیستونی قطار در مسیرهای ورودی و خروجی ایستگاه‌ها و مدخل‌های ورودی و خروجی تونل و یا از طریق سیستم تهویه مکانیکی از شفت‌ها و یا ترکیبی از این دو صورت پذیرد.

حرارت برداشته شده یا اضافه شده به سیستم مترو از طریق ورود و خروج هوای تهویه در اثر مکانیزم‌های بیان شده از رابطه (پ-۳-۲۴) به دست می‌آید.

رابطه (پ-۳-۲۴)

$$q = 1.1\ Q\ \Delta T$$

که در آن $q[\frac{Btu}{hr}]$ نرخ حرارت محسوس اضافه شده یا برداشته شده از طریق تهویه، $Q[\frac{ft^3}{min}]$ نرخ دبی متوسط تهویه، $\Delta T[F]$ اختلاف بین دمای متوسط مترو و دمای هوای بیرون می‌باشد.

روابط حاکم بر جریان هوا را می‌توان بر پایه معادلات اساسی حاکم بر سیالات توصیف نمود.

معادله برنولی رابطه‌ای اساسی است که به منظور تخمین افت فشار در طول یک مسیر در سیستم تهویه مترو در شرایط پایا به فرم رابطه (پ-۳-۲۵) تغییر یافته است.

رابطه (پ-۳-۲۵)

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2g} + \mathrm{F} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_r$$

Z هد ارتفاعی (ft)

P فشار استاتیکی (lbf/sq.ft)

ρ دانسیته (lbf/cu.ft)

V سرعت سیال (fpm)

در معادله بالا، F برابر هد انرژی اضافه شده به سیستم در واحد ft می‌باشد.

h_f و h_r افت هد اصطکاکی و افت هد مقاومتی[۱] (تلفات موضعی) هستند و از روابط زیر به دست می‌آیند، یکای هر دو این پارامتر، ft می‌باشد.

رابطه (پ-۳-۲۶)

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

f ضریب اصطکاک دارسی (بدون بعد)

L طول تونل (ft)

D قطر هیدرولیکی تونل (ft)

رابطه (پ-۳-۲۷)

$$h_r = C\frac{V^2}{2g}$$

[۱] resistance energy head loss

C ضریب تلفات (بدون بعد)[۱]

$C_{\Delta ps}$ افت فشار در مسیر شفت‌های تهویه ، $C_{\Delta p}$ افت فشار در مسیر تونل و $C_{\dot{m}} = \frac{A_v V_v}{AV}$ که نسبت نرخ دبی جرمی هوای درون شفت به هوای عبوری از تونل می‌باشد، پارامترهای مهمی هستند که بایستی در فرایند طراحی مشخص شوند.

$C_{\Delta ps}$ افت فشار در مسیر شفت‌های تهویه در بردارنده تمامی افت‌ها از جمله افت‌های در تراز سطح زمین (به جز در موقعیت فصل مشترک با تونل) بوده که محاسبه آن علاوه بر هندسه شفت به جهت جریان نیز وابسته است.

برای به دست آوردن این پارامترها از دو پارامتر جدید φ و ψ استفاده می‌شود.

رابطه (پ-۳-۲۸)

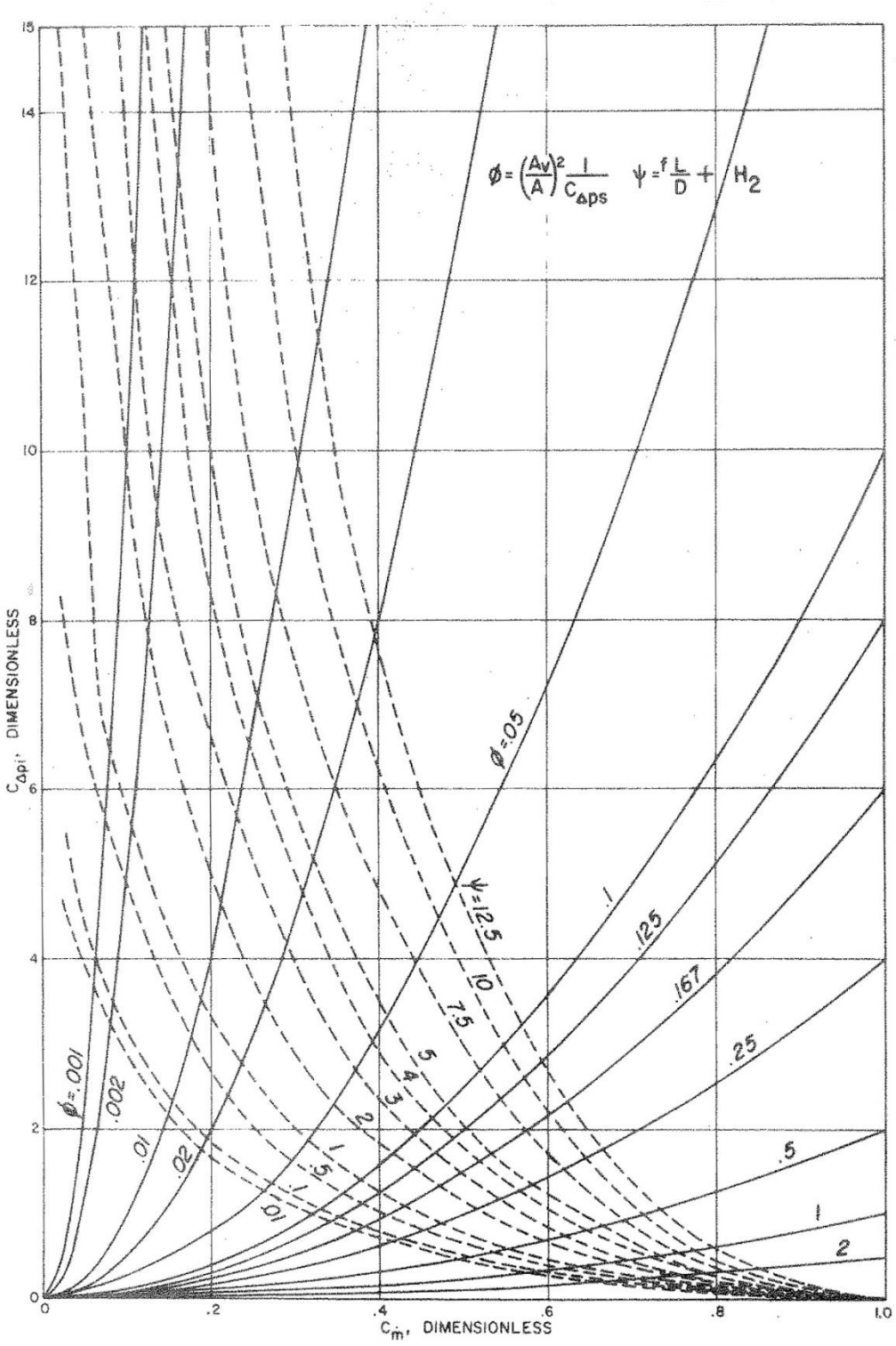
$$\varphi = \left(\frac{A_v}{A}\right)^2 \frac{1}{C_{\Delta ps}}$$

رابطه (پ-۳-۲۹)

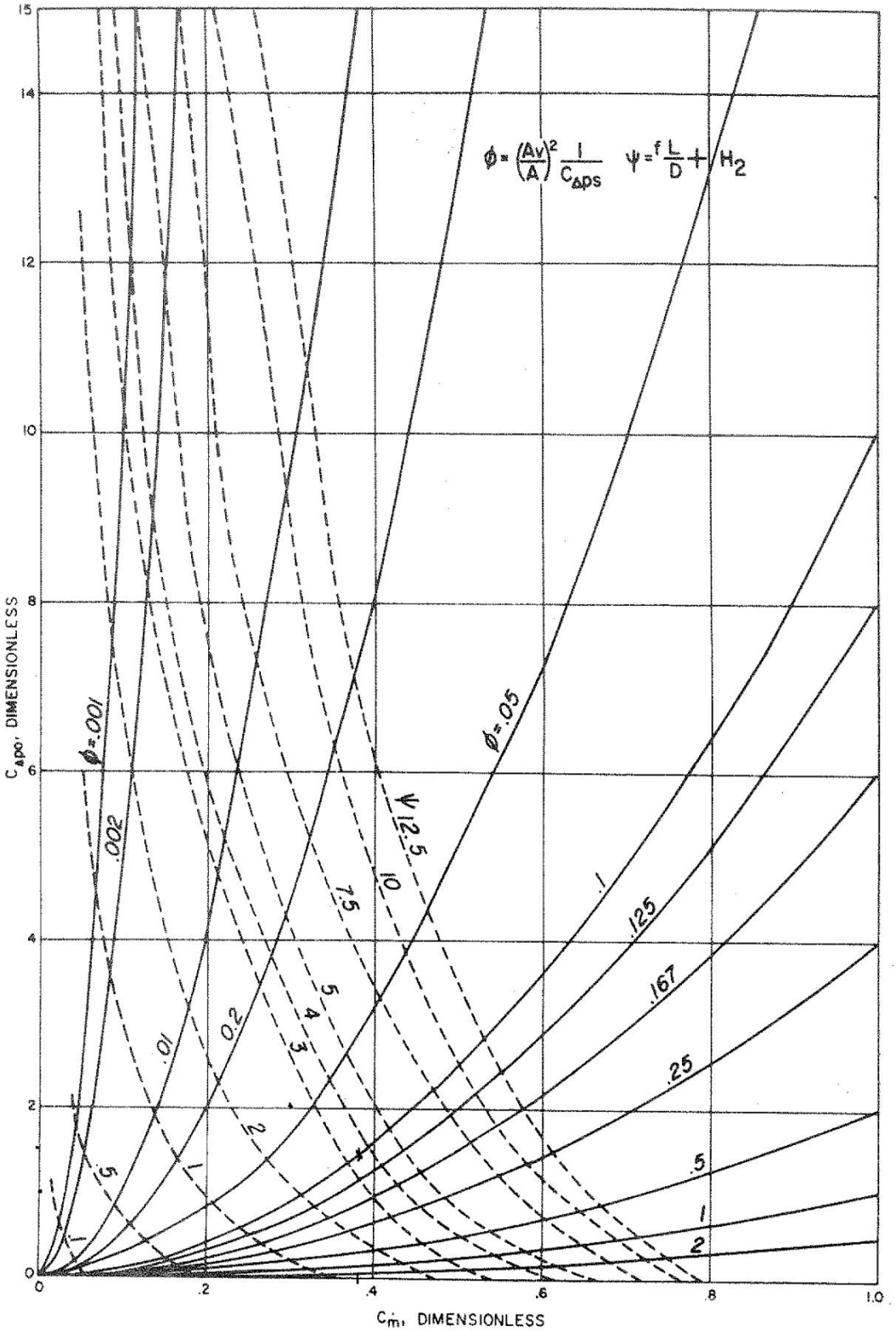
$$\psi = f\frac{L}{D} + H_2$$

φ و ψ از مشخصات هندسی سیستم و ضرایب افت فشار محاسبه شده به دست می‌آیند. L فاصله بین دو شفت مجاور است و H_2 افت فشار مربوط به دیگر اثرات مانند تغییر سطح مقطع تونل است. با داشتن φ و ψ و استفاده از نمودارهای اشکال (پ-۳-۲) و (پ-۳-۳) می‌توان $C_{\dot{m}}$ و $C_{\Delta p}$ را پیدا نمود.

[۱] برای بدست آوردن مقادیر C می‌توان از مراجعی نظیر هندبوک SEDH، SMACNA HVAC DUCT DESIGN و همچنین I. E. Idelchik - Handbook of Hydraulic Resistance استفاده نمود.



شکل پ-۳-۲: افت فشار در تونل در حالت ورود هوا



شکل پ-۳-۳: افت فشار در تونل در حالت خروج هوا

پ-۳-۹- نرخ جریان هوای تولید شده به وسیله اثر پیستونی قطار

در اثر حرکت قطار در تونل و ایستگاه، هوا در سیستم مترو به حرکت در می‌آید. اگر از اثرات پدیده‌های پیچیده سیال در نزدیکی قطار صرف‌نظر شود و در جلو و پشت قطار به بررسی اختلاف فشار سیال که در نهایت موجب حرکت هوا می‌شود پرداخته شود، ضریب نیروی پسای وارد بر قطار را می‌توان از رابطه (پ-۳-۳۰) به دست آورد.

رابطه (پ-۳-۳۰)

$$C_D = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2g}U^2\sigma} - f_t\left(\frac{|\sigma-\beta|(\sigma-\beta)}{(1-\sigma)^2}\right)\left(\frac{l}{d\sqrt{\sigma}}\right)$$

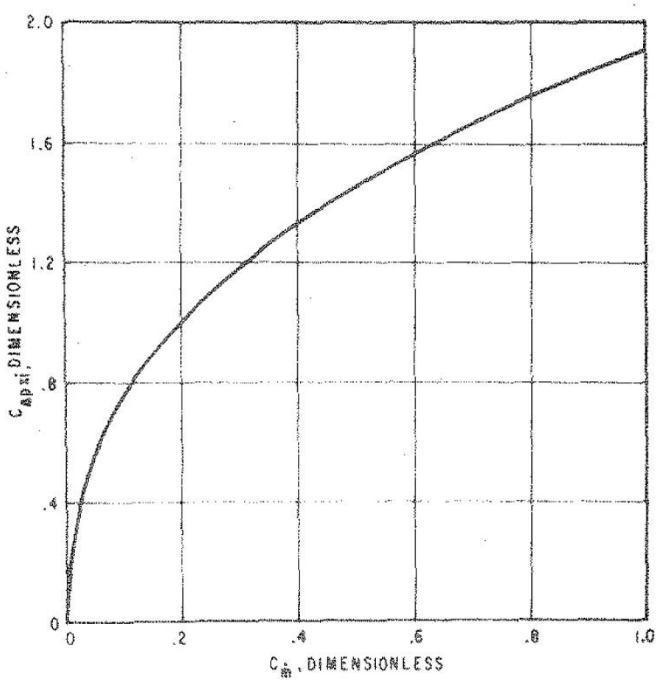
که در آن $\Delta p[\frac{lb_f}{ft^2}]$ اختلاف فشار استاتیکی دو طرف قطار، $U[fpm]$ سرعت قطار، σ نسبت سطح مقطع روبرویی قطار به سطح مقطع تونل، f_t اصطکاک قطار، β نسبت سرعت هوا در تونل به سرعت قطار، $l[ft]$ طول قطار و $d[ft]$ قطر هیدرولیکی قطار می‌باشد.

افت فشار را می‌توان از رابطه (پ-۳-۳۱) نیز به دست آورد:

رابطه (پ-۳-۳۱)

$$\frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2g}U^2\sigma} = \frac{\beta^2}{\sigma}\left[C_{\Delta po} + \frac{f}{D}(L-l) + C_{\Delta pi} + C_{\Delta pxi}\right] = \beta^2\Omega$$

$C_{\Delta pxi}$ از نمودار شکل (پ-۳-۴) به دست می‌آید.



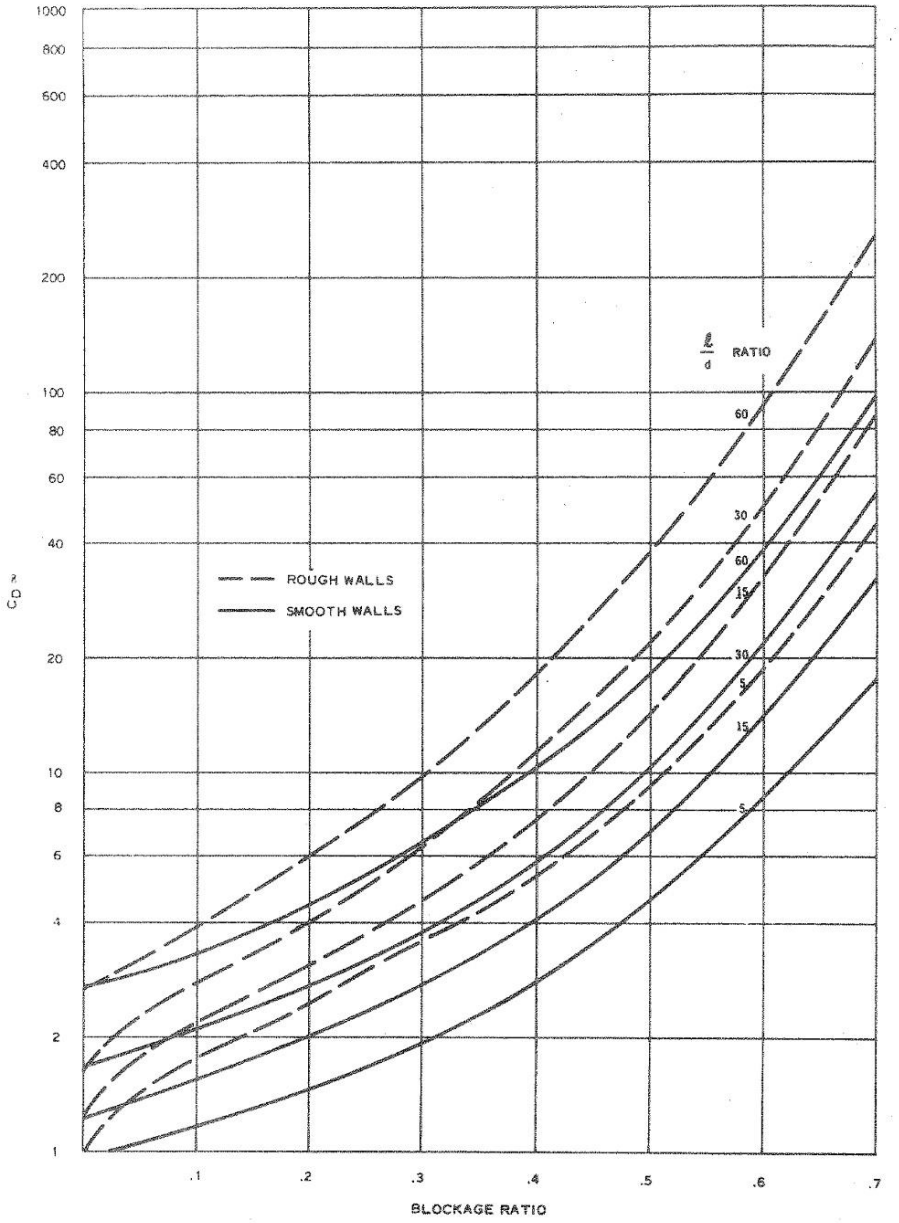
شکل پ-۳-۴: نمودار برای به دست آوردن $C_{\Delta pxi}$

مطالعات تجربی نشان می‌دهد که ضریب پسا را از رابطه (پ-۳-۳۲) نیز می‌توان به دست آورد:

رابطه (پ-۳-۳۲)

$$\frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2g}U^2\sigma} = C_{D\infty}(1-\beta^2)$$

$C_{D\infty}$ را می‌توان از شکل (پ-۳-۵) به دست آورد.



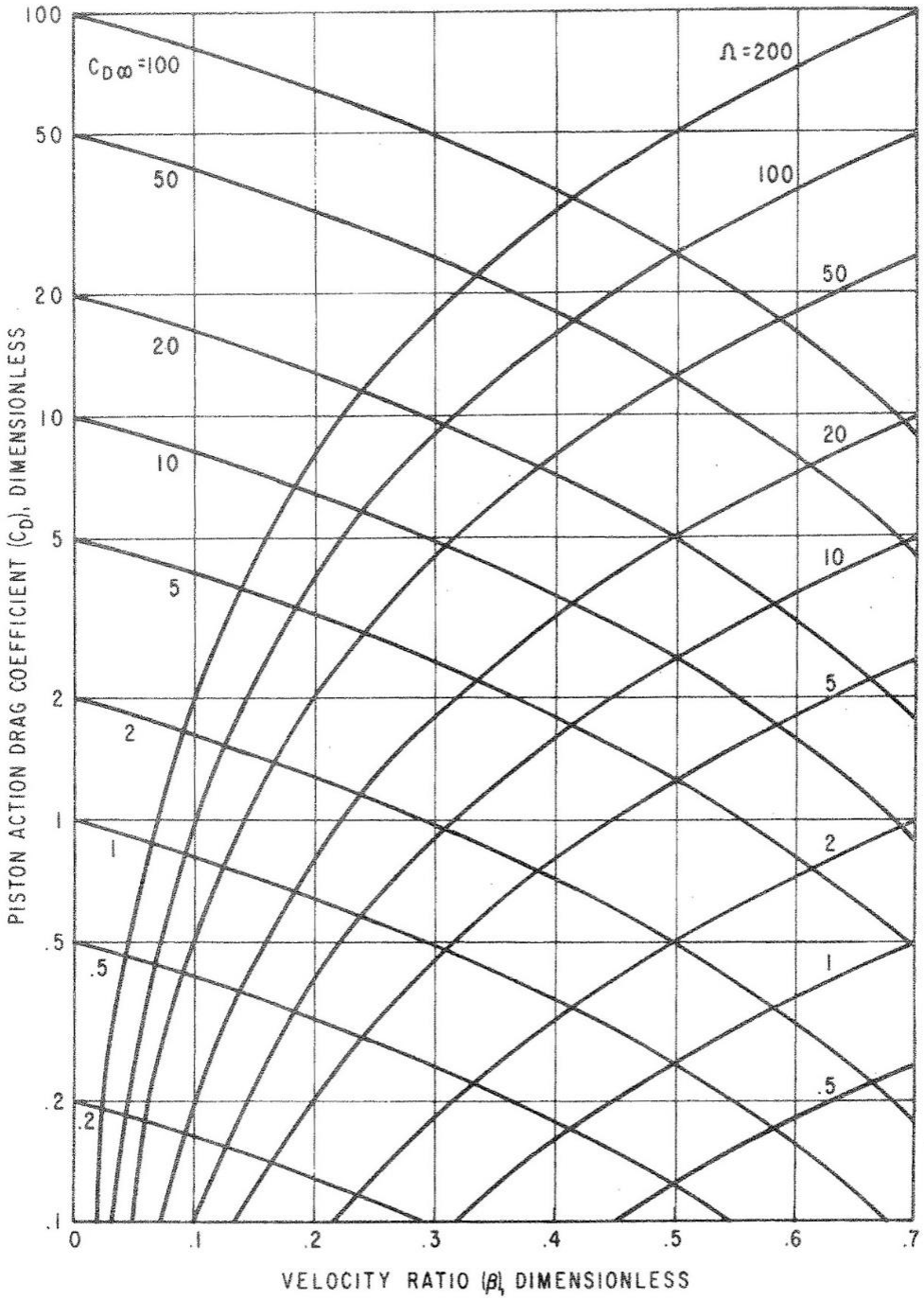
شکل پ-۳-۵: به دست آوردن ضریب پسای قطار

Ω نیز از رابطه (پ-۳-۳۳) قابل محاسبه است:

رابطه (پ-۳-۳۳)

$$\Omega = \frac{1}{\sigma}\left[C_{\Delta po} + \frac{f}{D}(L-l) + C_{\Delta pi} + C_{\Delta pxi}\right]$$

با استفاده از مقادیر به دست آمده برای Ω و $C_{D\infty}$ می‌توان با مراجعه به شکل (پ-۳-۶) C_D و β را به دست آورد.



شکل پ-۳-۶: نمودار ضریب پسای قطار و سرعت حرکت هوا در تونل

با به دست آمدن سرعت هوا در تونل می‌توان به محاسبه نرخ حرارت خارج شده توسط تهویه هوا پرداخت.

پ-۳-۱۰- نرخ هوای تهویه و حرارت خارج شده

همانطور که گفته شد، نرخ هوای تهویه بستگی به اثر پیستونی قطار و همچنین تهویه مکانیکی توسط فن‌ها دارد. بنابراین می‌توان با استفاده از روابط گفته شده با حدس نرخ دبی هوای تهویه، میزان حرارت داده شده یا برداشته شده از سیستم را محاسبه نمود. همچنین اگر حرارت برداشته شده و ملاحظات دمایی معلوم باشد، نرخ دبی مورد نیاز قابل محاسبه است.

$$q = 1.1\ Q\ \Delta T$$ رابطه (پ-۳-۳۴)

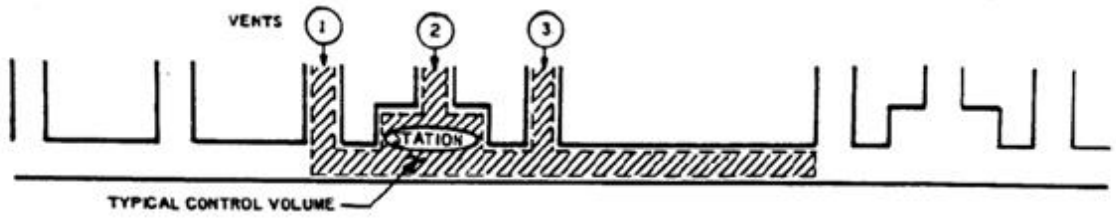
برای تقریب اولیه می‌توان از رابطه (پ-۳-۳۵) برای به دست آوردن دبی استفاده کرد:

$$Q = NnaU\frac{\beta}{\sigma}\frac{C_{\dot{m}}}{2}$$ رابطه (پ-۳-۳۵)

که در آن N تعداد شفت‌های بدون فن در حجم کنترل، n تعداد قطارهای گذری از حجم کنترل در هر دقیقه (تعداد متوسط در هر دوجهت) و U سرعت متوسط قطار است و از رابطه (پ-۳-۳۶) به دست می‌آید:

$$U = \frac{distance\ between\ stations\ [ft]}{(travel\ time + 0.25)[min]}$$ رابطه (پ-۳-۳۶)

با در نظر گرفتن حجم کنترلی مشابه شکل (پ-۳-۷) می‌توان به محاسبه دبی هوای ورودی به ایستگاه توسط حرکت پیستونی قطار پرداخت.



شکل پ-۳-۷: حجم کنترل جهت تحلیل هوای ورودی و خروجی در اثر حرکت پیستونی قطار

برای محاسبه دبی حرکت پیستونی قطار، بایستی اطلاعات جدول (پ-۳-۵) متناسب با شرایط پروژه تکمیل گردد.

جدول پ-۳-۵: پارامترهای قطار و تونل برای محاسبه دبی تولید شده در اثر حرکت پیستونی قطار

داده	مقدار
سطح مقطع جلویی قطار	
سطح مقطع تونل	
نسبت انسداد در تونل σ	
سطح مقطع شفت A_v	
امپدانس شفت $C_{\Delta ps}$	
φ	
قطر هیدرولیکی D	
فاصله بین دو ایستگاه L	
ضریب اصطکاک تونل f	
ψ	
$C_{\dot{m}}$	
هدوی	
n	
N	
U	

پ-۳-۱۱- محاسبات جریان تخلیه دود

پ-۳-۱۱-۱- دبی جریان دود

در ایستگاه آتش با دو قدرت در نظر گرفته می‌شود، آتش‌سوزی قطار و آتش‌سوزی کوچک در سکو، در این قسمت فرض شده است که با توجه به نزدیکی دیواره تونل به قطار و همچنین چاه حرارتی دیواره تونل، قدرت آتش در یک ضریب ۷۰٪ ضرب شده (۳۰٪ حرارت آتش از طریق تابش به دیواره‌ها منتقل می‌شود) و مقدار بخش همرفتی آن برای محاسبات بار حرارتی آتش در تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد، این در حالی است که به دلیل عدم وجود دیواره‌های نزدیک به آتش در ایستگاه و همچنین عدم وجود چاه حرارتی دیوارها در ایستگاه، تقریبا ۱۰۰٪ حرارت آتش به صورت همرفتی به محیط ایستگاه وارد می‌شود.

بر اساس استاندارد NFPA 92B، دبی جرمی دود از رابطه (پ-۳-۳۷) بدست می‌آید:

رابطه (پ-۳-۳۷)

$$m_f = 0.071 E_c^{1/3} . z^{5/3} + 0.0018 E_c$$

m_f = دبی جرمی دود (kg/s)

E_c = بخش همرفتی از نرخ انتقال حرارت آتش (kw)

z = ارتفاع محدود کننده

دبی حجمی و دمای دود از طریق زیر بدست می‌آید:

رابطه (پ-۳-۳۸)

$$q_f = \frac{m_f}{\rho_f} = \frac{m_f}{\rho_a} \cdot \frac{T_f}{T_a}$$

q_f = دبی حجمی دود (m^3/s)

ρ_a = چگالی هوای تازه (kg/m^3)

T_a = دمای مطلق هوای تازه (K)

T_f = میانگین دمای مطلق دود (K)

پ-۳-۱۲- سرعت بحرانی

دبی هوای مورد نیاز هنگام حریق در تونل بر اساس مفهوم سرعت بحرانی می‌باشد. سرعت بحرانی حداقل سرعتی می‌باشد که عدم وقوع برگشت دود را تضمین می‌کند.

سرعت بحرانی از رابطه (پ-۳-۳۹) و (پ-۳-۴۰) بدست می‌آید:

رابطه (پ-۳-۳۹)

$$V_c = K \cdot K_g \cdot \left(\frac{gHQ}{\rho_\infty C_p A T_f}\right)^{\frac{1}{3}}$$

رابطه (پ-۳-۴۰)

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty C_p A V_c} + T_\infty$$

V_c = سرعت بحرانی (m/s)

g = شتاب جاذبه (m/s^2)

H = ارتفاع تونل (m)

Q = نرخ انتقال حرارت آتش (kw)

ρ_∞ = چگالی هوای محیط (kg/m^3)

C_p = گرمای ویژه هوا در فشار ثابت (kJ/kg.K)

A = سطح مقطع خالص تونل (m^2)

T_f = دمای دود (K)

K_g = ضریب تصحیح شیب (-)

K = ضریب برابر با ۰/۶۱

T_∞ = دمای هوای محیط (K)

پ-۳-۱۳- جریان هوای اضطراری

کل جریان هوای تخلیه مورد نیاز از قانون‌های زیر بدست می‌آید:

- تأمین جریان بالاسر قطار در حد سرعت بحرانی برای جلوگیری از وقوع جریان لایه برگشتی

- تأمین حداقل سرعت ممانعتی در طرف دیگر محل تخلیه برای جلوگیری نفوذ دود به ایستگاه و در نظر گرفتن جریان هوای اجتناب‌ناپذیری که از ورودی‌های ایستگاه می‌آید.
- در نظر گرفتن انبساط حرارتی هوا

مقدار کل دبی تخلیه از رابطه (پ-۳-۴۱) بدست می‌آید:

رابطه (پ-۳-۴۱)

$$Q_e = V_c A + \frac{Q_c}{\rho_0 C_p T_0} + V_{adj} A$$

که:

Q_e برابر با مقدار کل دبی تخلیه هوا

$\frac{Q_c}{\rho_0 C_p T_0}$ قسمت انبساط حرارتی

V_c سرعت بحرانی

V_{adj} سرعت مجاور مورد نیاز

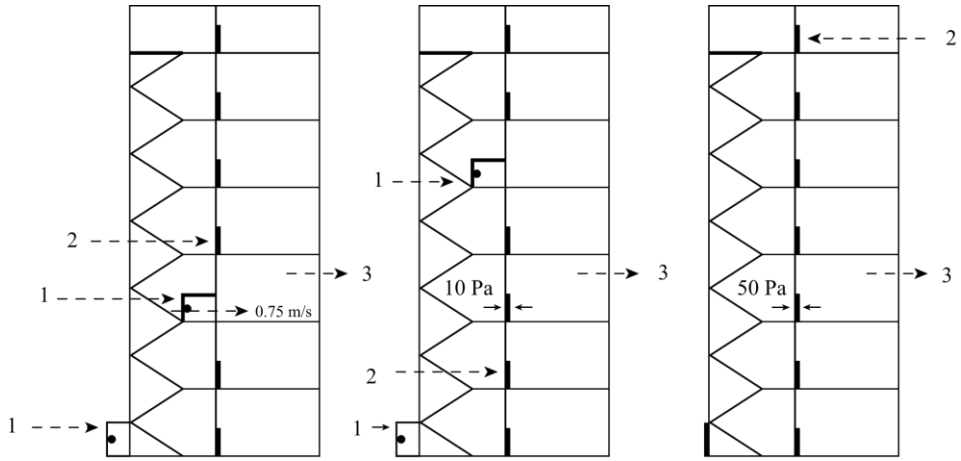
A مساحت سطح مقطع خالی تونل

پ-۳-۱۴- سیستم فشار مثبت مسیرهای خروج اضطراری

مبنای طراحی سیستم فشار مثبت مسیرهای خروجی اضطراری، مشابه مبنای استاندارد BS EN 12101-6 می‌باشد. بر طبق این استاندارد، طراحی سیستم ایجاد اختلاف فشار در مسیرهای فرار بایستی با فرض ملاحظات به شرح ذیل صورت پذیرد:

- هنگامی که درِ واسط بین فضای پله فرار و فضاهای مرتبط با آن (در سطح سکو و یا سطح زمین) باز باشد، حداقل 0.75 m/s سرعت هوا در بازشوی در، حفظ گردد.
- هنگامی که درِ واسط بین فضای پله فرار و تمامی فضاهای مربتط با آن (در سطح سکو و یا سطح زمین) بسته باشند، حداقل اختلاف فشار هوای 50 pa+ وجود داشته باشد.
- در حالیکه درِ دهانه متصل به فضایی غیر از فضای دچار حریق و درِ خروجی در سطح زمین، هر دو باز باشند و درِ دهانه فضای دچار حریق بسته باشد، در این حالت حداقل اختلاف فشار در پشت درِ فضای وقوع حریق، حداقل اختلاف فشار 10 pa+ وجود داشته باشد.

شکل (پ-۳-۸) به طور خلاصه وضعیت‌های مختلف عملکرد سیستم فشار مثبت را در مسیر فرار نشان داده است.



شکل پ-۳-۸: وضعیت‌های مختلف عملکرد سیستم فشار مثبت

همچنین نیروی لازم برای باز کردن در، طی حالت فعال شدن سیستم فشار مثبت نبایستی بیشتر از 100N باشد.

محاسبات دبی فن فشار مثبت به شرح ذیل صورت می‌پذیرد.

رابطه (پ-۳-۴۲)

$$Q = AV$$

Q: دبی هوای گذری در پله فرار (m^3/s)

A: مساحت درب (m^2)

مطابق مفاد استاندارد، محاسبه بیشترین نیروی لازم برای باز کردن در از رابطه (پ-۳-۴۳) بدست می‌آید، مشخص است که بیشترین نیرو زمانی لازم است که تمامی درها بسته هستند، همچنین درهای سطح خیابان بدلیل اینکه رو به بیرون باز می‌شوند، نیازی به محاسبه نیروی لازم ندارند.

رابطه (پ-۳-۴۳)

$$P = \frac{2(100 - F_{dc})(W_d - d)}{D_A \times W_d}$$

F_{dc}: نیروی لازم برای باز کردن در

P: اختلاف فشار در دو طرف در

W_d: عرض در

d_a: مساحت در

d: فاصله دستگیره تا نزدیک‌ترین لولای عمودی

همچنین برای محاسبه سیستم فشار مثبت کراس پاساژها نیز می‌توان از مبانی مشابه با پله‌های فرار استفاده نمود، بدین معنی که با تعبیه یک فن فشار مثبت به همراه کانال‌کشی متصل به هر دو تونل و یا دو فن مجزا، در هنگام مواجهه با حریق، با عمکلرد فن، مسیر کراس پاساژ با هوای تأمین شده از تونل با عمکلرد معمول فشار مثبت می‌گردد.

این سیستم نیز مشابه پله‌های فرار مجهز به دمپر و در مقاوم در برابر حریق می‌باشد.

پیوست ۴

مشخصات فنی تجهیزات سیستم تهویه

برخی از الزامات تأمین هر یک از فن‌های تخلیه دود تونل و ایستگاه، درهای ضد حریق، دمپر، سایلنسر و فن‌های فشار مثبت در این بخش ارائه گردیده است، لیکن ممکن است بعضی از این موارد به طور کلی در خصوص پروژه‌های طراحی و تأمین تجهیزات عمومیت نداشته باشند و طبق شرایط پروژه مشخصات فنی اصلاح و تدقیق گردند.

پ-۴-۱- الزامات اختصاصی فن‌های تخلیه دود تونل

- هر یونیت فن تخلیه دود، بایستی در راه‌اندازی به صورت مستقیم، حداکثر ظرف مدت زمان ۳۰ ثانیه به دور نامی خود رسد، این مدت زمان در صورت استفاده از درایو کنترل سرعت (VSD) نبایستی بیشتر از ۶۰ ثانیه باشد.
- فن‌های تخلیه دود بایستی دارای گرید حریق مطابق استاندارد EN12101-3 یا استانداردهای هم‌تراز و دارای گواهینامه مربوطه باشند.
- در صورت عملکرد فن در حالت‌های مکش و دهش، توصیه می‌گردد هر دو سمت فن مجهز به دیفیوزر باشد.
- منحنی عملکرد فن باید به گونه‌ای باشد که افزایش ۱۵ درصدی در فشار استاتیکی (از نقطه کار) باعث کاهش بیشتر از ۱۵ درصد نرخ جریان هوای مشخص نشود.
- تغییر ۳۰۰Pa نباید باعث حرکت نقطه کار فن در امتداد منحنی به ناحیه عملکرد ناپایدار شود.
- جریان هوا در جهت معکوس بایستی حداقل ۹۵٪ جریان نامی هوا باشد.
- حداقل بازده آئرودینامیکی فن، ٪۷۵ و حداقل راندمان الکتروموتور، ٪۹۰ باشد.
- الکتروموتور، حداقل بایستی مشخصات کلاس H عایقی و IP54 را داشته باشد.
- حداقل عمر بیرینگ‌ها، ۴۰۰۰۰ ساعت باشد.
- سطح صدای ناشی از عملکرد فن، در فاصله یک متری از فن، کمتر یا مساوی ۸۵ دسیبل باشد.
- حداقل ضریب قدرت الکتروموتور، ۸۰ درصد می‌باشد.
- تمام موتورها باید مجهز به گرمکن ضد رطوبت (به دلیل عملکرد غیر مستمر) باشند. موتورها باید قابلیت تعداد ۱۰ استارت در ساعت را داشته باشند.
- اتصال انعطاف‌پذیر فن بایستی از مواد خود اطفاء[1] ساخته شده باشد.
- سیم پیچ الکتروموتور مجهز به سنسور دما و بیرینگ آن نیز مجهز به سنسور دما و ارتعاش باشد.
- فن نیز مجهز به سنسور ارتعاش جهت مانیتورینگ ارتعاشات باشد.
- فن‌ها بایستی قابلیت عملکرد در بازه دمایی °C (۲۵۰+) ~ °C (۳۰-) را به مدت یک ساعت داشته باشند.

[1] Self Extinguishing Material

پ-۴-۲- الزامات اختصاصی جت فن‌ها

- جت فن‌ها از نظر گرید حریق مشابه فن‌های محوری و با قابلیت دوام عملکرد به مدت یک ساعت در دمای ۲۵۰ °C و دارای تأییدیه مربوطه باشند.
- جت فن‌ها در صورت لزوم بایستی قابلیت کارکرد در هر دو جهت را داشته باشند.
- حداقل راندمان جت‌فن‌ها، ٪۹۰ باشد.
- عمر بیرینگ الکتروموتور، حداقل ۲۰۰۰۰ ساعت باشد.
- جت فن‌ها مجهز به سنسور ارتعاش و دمای الکتروموتور باشند.
- سایلنسر جت فن‌ها، از نوع مقاوم به حریق باشد.
- فاصله نصب جت فن‌ها به صورت موازی، حداقل دو برابر قطر آن‌ها باشد و همچنین به اندازه قطر جت فن از دیوار فاصله داشته باشند.
- حداقل ضریب قدرت الکتروموتور، ۸۰ درصد می‌باشد.
- جریان هوا در جهت معکوس بایستی حداقل ۹۵٪ جریان نامی هوا باشد.

پ-۴-۳- الزامات اختصاصی فن‌های فشار مثبت

- طراحی و نصب این فن‌ها در صورت وجود ضوابط سازمان آتش‌نشانی، بر این اساس صورت پذیرد.
- فن ها باید قادر به تطبیق فشار استاتیک و تغییرات جریان تا حداقل ۱۵٪ ± مقدار طراحی شده باشند.
- الکتروموتورها باید دارای حداقل کلاس عایقی کلاس F (IEC 60085)، کاملاً محصور و دارای درجه بندی برای کار مداوم در دمای محیط ۴۰ درجه سانتیگراد باشند.
- توان نامی پلاک موتور باید حداقل ۱۵ درصد بیشتر از توان جذب شده شفت در شرایط طراحی باشد.
- مشخصات عملکردی فن از جمله راندمان بایستی در شرایط موقعیت نصب پروژه بررسی گردد.
- پروانه فن‌ها می‌بایست به صورت استاتیکی و دینامیکی بالانس گردد (balancing class G 2.5 to ISO 14694) و به نحو ایمنی به شفت مهار شده باشد.
- ساختار فن‌ها می‌بایست به نحوی طراحی گردد که دسترسی آسان به کلیه قطعات برای تعمیر و تعویض مهیا باشد.
- رنگ اپوکسی بدنه با ضخامت حداقل ۷۵ میکرون صورت پذیرد.
- انتخاب جهت ورود و خروج هوا و اعمال آن در ساخت فن‌ها، می‌بایست پس از نهایی شدن نوع فن و با توجه به الزامات محل نصب صورت پذیرد.

- لازم است در خصوص الکتروفن‌هایی که در خارج از محدوده داخلی ایستگاه قرار می‌گیرند، محفظه برای متعلقاتی نظیر الکتروموتور، پولی، تسمه‌ها و... بصورت باکس تعریف شود.
- راندمان فن‌ها حداقل ۷۰ درصد و راندمان موتور ۹۰ درصد باشد.

پ-۴-۴- الزامات اختصاصی درهای ضد حریق

- درهای ضد حریق از لیست مورد تأیید سازمان آتش‌نشانی (در صورت وجود) انتخاب گردند.
- ضروری است این درها، دارای تأییدیه UL یا گواهینامه‌های هم‌تراز آن باشند.
- لازم است درهای هوابند اتاق‌های تهویه به مدت یک ساعت در برابر دمای ۲۵۰ °C مقاوم باشند.
- درهای ضد حریق بایستی در برابر تغییرات فشار 2000 Pa±، میزان نشت کمتر از ۰/۵٪ داشته باشند.
- لازم است درهای ضد حریق مجهز به آنتی پنیک و آرام بند باشند.
- درهای ضد حریق بایستی عایق صوت باشند.

پ-۴-۵- الزامات اختصاصی دمپرهای مسیر تخلیه دود

- دمپرهای نصب شده در مسیر اصلی تخلیه دود از نوع سخت-کار و با گرید مقاومت در برابر حریق باشند.
- دمپرهای نصب شده در مسیر اصلی تهویه باید به گونه‌ای طراحی شود که حداکثر فشار نوسانی ۲۰۰۰Pa را تحمل نموده و دارای عمر حداقل ۳۰ سال باشند. تعداد چرخه‌های مورد انتظار در سال در اثر نوسان فشار ۲۰۰,۰۰۰ سیکل برآورد می‌گردد.
- دمپرها مجهز به محرک و سوئیچ یا نشانگر تغییر وضعیت باشند.
- مجموعه‌های ماژول دمپر باید دارای سطح خالص خالص حداقل ۹۰ درصد باشند.
- لازم است دمپرها به مدت یک ساعت در برابر دمای ۲۵۰ °C مقاوم باشند.

پ-۴-۶- الزامات اختصاصی سایلنسرها

- ساینلسرها بایستی حداقل به مدت یک ساعت در برابر دمای ۲۵۰ °C مقاوم باشند.
- افت فشار استاتیکی سایلنسرها در حداکثر جریان هوای عملیاتی نباید از ۱۰۰ Pa تجاوز کند. اسپلیترهای ایرفویل شکل برای محدود کردن افت فشار توصیه می‌شود.
- حداقل دانسیته مواد پرکننده بافل‌ها، ۸۰ kg/m^3 پیشنهاد می‌گردد.
- سایلنسرها بایستی در برابر اختلاف فشار ۲۰۰۰ pa به مدت یک ساعت مقاوم باشند.

مراجع

مراجع:

1- NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems
2- NFPA 92: Standard for Smoke Control Systems.
3- Subway Environmental Design Handbook (Vol. 1/ Principles and Applications, Second Edition) [SEDH]
4- Subway Environmental Design Handbook (Vol. 2/ Subway Environment Simulation Computer Program) [SEDH]
5- Eglinton Crosstown LRT Project (Toronto) Articles
6- ASHRAE Handbook – Fundamental (2017)
7- ASHRAE Handbook – HVAC Applications (2019)
8- ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment (2016)
9- ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2016), Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality
10- Emergency Scenarios for Tunnels and Underground Stations in Public Transport
11- Safe and Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Compared Fire Safety Features for Metro Tunnels, Daniel Gabay, RATP, France
12- Computational Modeling of Fire Safety in Metro-Stations, by Philip McKeen (Ryerson University (2009), Toronto)
13- Modeling Tunnel Ventilation and Fires ITA-COSUF Workshop 2014, Francesco Colella Ph.D.

۱۴-استاندارد ملی ایران- شماره ۲۱۱۹۳ قسمت اول: سیستم‌های حمل و نقل ریلی درون‌شهری و حومه- ایمنی، الزامات ایمنی در مراحل طراحی ایستگاه‌ها، تونل‌ها و بهره‌برداری از آن‌ها

۱۵-استاندارد ملی ایران- شماره ۲۱۱۹۳ قسمت سوم: الزامات تجهیزات ایمنی، امدادرسانی، سامانه‌ها و تجهیزات پیشگیری و مقابله با حریق و دود

۱۶-گزارش "مبانی طراحی سیستم تهویه" خط ۱ قطار شهری تبریز

۱۷-گزارش "Preliminary Study " خط ۲ تبریز

۱۸-گزارش "SES -Tunnel Ventilation" خط ۷ تهران

۱۹-مدارک طراحی سیستم تهویه خط ۲ مشهد

۲۰-گزارش "طراحی پایه سیستم تهویه خط ۲ قطار شهری اصفهان (نرمال و اضطراری) برای ۱۶ ایستگاه "H2-V2

۲۱-گزارش طراحی پایه سیستم تهویه و دفع دود خط ۳ قطار شهری اصفهان و حومه

۲۲-گزارش " HVAC Basic Design For Shiraz Urban Railway Line 3"

۲۳-گزارش "محاسبات طراحی سیستم تهویه و دفع دود در ایستگاه امام حسین (ع)"

۲۴-گزارش "Design Criteria for Tunnel Ventilation" خط A قم

۲۵-گزارش شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی سیستم تهویه خط ۲ کرج

۲۶-گزارش طراحی بیسیک سیستم تهویه خط ۱ اهواز

۲۷-گزارش محاسبه و شبیه‌سازی سیستم تهویه نرمال ایستگاه توحید

۲۸-گزارش "تخصصی سناریوهای کنترل دود و آتش با سامانه تهویه و کنترل خودکار BAS ایستگاه‌ها و تونل های خط ۴ متروی تهران"

۲۹-گزارش "طراحی سیستم تهویه خط ۳ قطار شهری تبریز"

۳۰-گزارش معرفی نرم‌افزارها/ طراحی سیستم تهویه خط ۳ قطار شهری تبریز

۳۱-مقررات ملی مباحث ۳، ۱۴، ۱۶ و ۱۹

۳۲-مقالات انجمن تونل ایران

۳۳-مقالات اشاره شده در متن نشریه

۳۴-ضوابط منتشر شده توسط سازمان آتش‌نشانی شهر تهران

خواننده گرامی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هشتصد عنوان نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **nezamfanni.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization

Specifications for Design of Urban and Suburban Railways

Vol. III:

Ventilation System Design

No.805-3

Deputy of Technical and Infrastructure
Development Affairs

Department of Technical and Executive
Affairs, Consultants and Contractors

nezamfanni.ir

2022

این ضابطه

با عنوان جلد سوم « ضوابط طراحی خطوط قطار شـهری و حومه» ملاک طراحی سـیسـتم تهویه در خطوط قطار شهری و حومه‌ای کشور است.