ایمنی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی

۱. مبانی و عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی

کد موضوعی: ۲۵۰
شماره مسلسل: ۱۶۹۳۳
اسفندماه ۱۳۹۸

معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی
دفتر: مطالعات زیربنایی

به‌نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
مقدمه ۲
۱. مهم‌ترین حوادث آتش‌سوزی در تونل‌ها ۳
۱-۱. آتش‌سوزی در تونل‌های جاده‌ای ۳
۱-۱-۱. آتش‌سوزی در تونل مون‌بلان ۳
۱-۱-۱. آتش‌سوزی در تونل گوتهارد ۴
۱-۱-۱. آتش‌سوزی در تونل تائرن ۶
۱-۱-۱. درس آموخته‌های حوادث پیشین ۶
۱-۱-۱. سایر حوادث ۹
۱-۲. آتش‌سوزی در تونل‌های ریلی ۱۰
۱-۲-۱. آتش‌سوزی در متروی شهر باکو، آذربایجان ۱۱
۱-۲-۱. آتش‌سوزی در متروی شهر دائگو، کره جنوبی ۱۲
۱-۲-۱. درس آموخته‌های حوادث پیشین ۱۳
۱-۲-۱. سایر حوادث ۱۳
۲. اصول کلی ایمنی در تونل‌ها ۱۴
۲-۱. اصول کلی ایمنی در تونل‌های جاده‌ای ۱۵
۲-۱-۱. رفتار کاربران تونل ۱۶
۲-۱-۲. اقدامات مدیریتی و عملیاتی ۱۷
۲-۱-۳. هندسه تونل ۱۷
۲-۱-۴. امکانات سازه‌ای تونل ۱۸
۲-۱-۵. تجهیزات تونل ۱۸
۲-۲. اصول کلی ایمنی در تونل‌های ریلی ۱۹
۲-۲-۱. توصیه‌های ارائه شده توسط UNECE ۲۱
۲-۲-۲. مترو ۲۲
۳. روند توسعه دستورالعمل‌های ایمنی در انواع تونل‌ها ۲۴
۳-۱. تونل‌های جاده‌ای ۲۴
۳-۱-۱. دستورالعمل‌های ایمنی تونل‌های جاده‌ای تا قبل از سال ۱۹۹۹ ۲۴
۳-۱-۲. دستورالعمل‌های ایمنی تونل‌های جاده‌ای: پیشرفت‌های بعد از سال ۱۹۹۹ ۲۴
۳-۱-۲-۱. در سطح کشورها ۲۴
۳-۱-۲-۲. در سطح اروپا ۲۵
۳-۱-۲-۳. در سطح بین‌المللی ۲۶
۳-۲. تونل‌های ریلی و مترو ۲۶
۳-۲-۱. دستورالعمل‌های ایمنی برای تونل‌های ریلی و مترو ۲۶
۳-۱-۲-۱. هماهنگ‌سازی اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن ۲۷
۳-۱-۲-۲. گروه کارشناسان متخصص UNECE ۲۷
۳-۱-۲-۳. مشخصات فنی برای سازگارمندی ۲۷
۳-۳. مسیر توسعه دستورالعمل‌ها ۲۸
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۸
منابع و مآخذ ۳۰

ایمنی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی

۱. مبانی و عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی

چکیده

با توجه به گسترش ساخت انواع تونل‌های زیرزمینی نظیر تونل‌های جاده‌ای، ریلی و مترو در سطح جهان و همچنین وقوع حوادث مرگبار در تونل‌ها در طول سالیان گذشته، امروز اهمیت ایمنی در تونل‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. عوامل مختلفی در وقوع حوادث در تونل‌ها و خسارات حاصل از آن نقش دارند ازجمله حمل کالاهای خطرناک، تنوع و کارایی تجهیزات ایمنی نصب شده در تونل، عملکرد و واکنش نیروهای امداد و نجات، رفتار افراد و کاربران تونل‌ها در هنگام وقوع حوادث و میزان توجه آنها به موارد ایمنی و درنهایت نحوه عملکرد مرکز کنترل تونل و سیستم‌های تهویه اضطراری. بررسی حوادث تونل‌های ریلی نشان داده که عامل اصلی ایجاد حوادث در این تونل‌ها نقص فنی و الکتریسیته بوده است. همچنین بررسی حوادث تونل‌های جاده‌ای نشان داده که رفتارهای انسانی اصلی‌ترین عامل ایجاد خسارات جانی در آتش‌سوزی‌ها بوده است. براساس تجارب به‌دست آمده از حوادث پیشین، مسائل و ضوابط تأمین ایمنی آتش باید در مراحل طراحی تونل‌ها در نظر گرفته شده و نباید به بعد از ساخت تونل موکول شود. توجه به مسائل ایمنی تونل‌ها حدوداً پس از سال ۲۰۰۰ میلادی و به‌دنبال وقوع برخی فجایع در تونل‌های جاده‌ای (نظیر حادثه تونل مون‌بلان و تائرن) و تونل‌های ریلی (نظیر متروی باکو و متروی دائگوی کره جنوبی) اهمیت یافت و تحقیقات گسترده فنی در این زمینه آغاز شد. انجمن جهانی جاده‌ها، کمیسیون اقتصادی اروپا و اتحادیه اروپا بر روی دو هدف اساسی در تأمین ایمنی تونل‌های جاده‌ای اتفاق‌نظر دارند: اول، جلوگیری از وقوع حوادث بحرانی و دوم، کاهش آثار حوادث رخ داده. مجموعه اقدامات دستیابی به اهداف ایمنی و کاهش خطرات و ریسک در تونل‌های جاده‌ای نیز می‌تواند به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی شود: رفتار کاربران تونل، اقدامات مدیریتی و عملیاتی، هندسه تونل، امکانات سازه‌ای تونل و تجهیزات تونل. در تونل‌های ریلی مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های ایمنی که توسط اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن جهت افزایش به‌ترتیب کارایی و اثرگذاری به‌شرح زیر بیان شده است: پیشگیری از وقوع حوادث، کاهش آثار منفی حوادث رخ داده، تسهیل امکان فرار افراد و تسهیل امکان امدادرسانی. در تونل‌های ریلی، به‌دلیل آنکه مدت زمان مورد نیاز برای مداخله و امدادرسانی در مواقع اضطراری معمولاً بسیار زیاد است بنابراین توانایی نجات خویش نقش حیاتی ایفا می‌کند.

مقدمه

براساس آمار موجود، نرخ وقوع تصادفات جاده‌ای بسیار بیشتر از حوادث رخ داده در تونل‌هاست. این موضوع احتمالاً به این دلیل است که تونل‌ها نسبت به جاده‌ها تحت کنترل بیشتری قرار دارند. همچنین پدیده‌های جوی بر عملکرد تونل اثرگذار نبوده و تقاطع‌ها و پیچ‌های تند نیز در تونل‌ها وجود ندارد. علاوه بر این راننده‌ها به‌طور کلی در تونل‌ها رانندگی محتاطانه‌تری دارند. با وجود این، بدون شک عواقب آتش‌سوزی در یک تونل به مراتب جدی‌تر از نتایج آتش‌سوزی در محیط باز است. آمار نشان می‌دهد به‌ازای عبور هر صد میلیون خودرو در هر کیلومتر تونل تنها یک یا دو آتش‌سوزی وجود خواهد داشت. به‌طور مشابه، به‌ازای عبور هر صد میلیون خودروی سنگین در هر کیلومتر تونل نیز تنها هشت مورد آتش‌سوزی به‌وقوع خواهد پیوست که تنها یک مورد آن جدی خواهد بود. بر پایه آمار و اطلاعات موجود تخمین زده شده است که به‌ازای عبور هر هزار میلیون خودروی سنگین در هر کیلومتر تونل بین یک تا سه آتش‌سوزی جدی به‌وقوع خواهد پیوست.

اگرچه احتمال وقوع حوادث آتش‌سوزی مهیب درتونل‌ها با توجه به آمار بسیار اندک به‌نظر می‌رسد اما توجه به مواردی از قبیل ترافیک شدید بسیاری از تونل‌ها (برای مثال طبق آمار، در اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی در حدود ۳۷ میلیون خودرو در سال از تونل الب[1] آلمان عبور کرده است)، وجود تعداد بسیار زیاد تونل‌های جاده‌ای، ریلی و مترو در سراسر جهان و طول زیاد بسیاری از تونل‌ها، نشان می‌دهد که احتمال وقوع یک آتش شدید در تونل‌ها بیش از مقداری است که به‌نظر می‌رسد. درواقع حوادث آتش‌سوزی شدید و مرگبار در تونل‌ها هرساله اتفاق می‌افتد. این موضوع یک بحران جدی است که به‌دلیل ساخت تونل‌های بیشتر و طولانی‌تر در آینده و همچنین افزایش روز افزون ترافیک، پتانسیل وخیم‌تر شدن آن در آینده وجود دارد.

با توجه به اهمیت مسئله ایمنی در تونل‌های جاده‌ای، ریلی و مترو و همچنین وقوع حوادث مرگبار در تونل‌ها در طول سالیان گذشته، اهمیت ایمنی در تونل‌ها مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. لذا کشورهای مختلف با مشارکت سازمان‌های معتبر بین‌المللی به مسئله ایمنی در تونل‌ها پرداخته و به تهیه و به‌روزرسانی استانداردها و دستورالعمل‌های ایمنی همت گمارده‌اند. لذا با توجه به رشد روزافزون تونل‌های کشور و به‌خصوص تونل‌های جاده‌ای و قطار شهری، نیاز است تا اهمیت ایمنی در تونل‌ها بررسی شده و جوانب مختلف آن مورد توجه قرار گیرد. این موضوع کمک می‌کند تا دید جامعی نسبت به مسئله ایمنی در تونل‌ها به‌دست آمده و راهکارهای لازم جهت ارتقای شرایط موجود پیشنهاد شود.

هدف اصلی از نگارش گزارش حاضر آشنایی با مخاطرات تونل‌های جاده‌ای و ریلی از طریق مطالعه برخی از مهم‌ترین حوادث پیشین رخ داده در تونل‌هاست. این موضوع در قسمت اول گزارش مورد بررسی

1. Elb tunnel

قرار گرفته و مهم‌ترین درس‌آموخته‌های حاصل از حوادث پیشین مطالعه شده است. در ادامه و در قسمت دوم گزارش، اصول کلی ایمنی حاکم بر تونل‌ها به تفکیک تونل‌های جاده‌ای و ریلی بررسی شده است. در این قسمت از پرداختن به جزئیات خودداری شده و تنها مهم‌ترین عناوین و بخش‌های ایمنی در انواع تونل‌ها معرفی شده است. در انتها و در قسمت سوم گزارش نیز به بررسی سیر تاریخی توسعه و پیشرفت دستورالعمل‌های ایمنی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی پرداخته شده است.

۱. مهم‌ترین حوادث آتش‌سوزی در تونل‌ها

۱-۱. آتش‌سوزی در تونل‌های جاده‌ای

در این بخش برخی از مهم‌ترین حوادث آتش‌سوزی رخ داده در تونل‌های جاده‌ای جهان مطالعه شده و درس‌آموخته‌های این حوادث مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۱-۱. آتش‌سوزی در تونل مون‌بلان

یکی از ناگوارترین حوادث آتش‌سوزی در تونل‌های جاده‌ای جهان در تونل «مون‌بلان»[1] به‌وقوع پیوسته است. این تونل ۱۱۶۱۱ متری که در عمق ۳۸۰۰ متری رشته‌کوه‌های آلپ قرار دارد دو کشور فرانسه و ایتالیا را به هم متصل می‌کند. در تاریخ ۲۴ ماه مارس سال ۱۹۹۹ میلادی، خودروی سنگینی که در این تونل درحال حرکت از فرانسه به ایتالیا بود، طعمه حریق شد و علت این آتش‌سوزی داغ کردن موتور خودرو حدس زده شد. این خودرو در فاصله ۶ کیلومتری از ابتدای تونل متوقف شد و راننده آن که نتوانسته بود آتش را خاموش کند با پای پیاده به سمت ایتالیا فرار کرد. پس از چند دقیقه اپراتورهای تونل متوجه وقوع آتش شده و جلوی ورود خودروها به تونل را گرفتند. با وجود این در همین فاصله زمانی ۱۸ خودروی سنگین، ۹ اتومبیل سواری، یک دستگاه ون و یک موتورسیکلت از سمت فرانسه وارد تونل شده بودند. از مجموع این ۲۹ وسیله نقلیه، تنها ۴ خودروی سنگین توانستند از کنار خودروی آتش گرفته عبور کرده و در ایمنی کامل به سمت ایتالیا حرکت کنند، اما سایر ۲۵ دستگاه در دود گرفتار شده و درنهایت طعمه حریق شدند. هیچ‌کدام از سرنشینان این خودروها نجات نیافتند.

با توجه به جهت باد غالب (از سمت ایتالیا به فرانسه) و رژیم‌های تهویه متفاوت اتخاذ شده در دو انتهای تونل (تمامی فن‌ها در سمت ایتالیا شروع به دمش هوای تازه کرده درحالی‌که در سمت فرانسه برخی فن‌ها هوا را دمیده و برخی مکش کردند)، تقریباً تمامی دود حاصل از آتش‌سوزی به سمت فرانسه حرکت کرد. با توجه به اینکه سرعت جریان هوا بیش از یک متر بر ثانیه بوده است، دود در همه تونل پخش شده و در عرض چند دقیقه از شروع آتش‌سوزی هیچ هوای تازه‌ای در پایین‌دست آتش (سمت فرانسه) وجود نداشته است. آتش به سرعت رشد کرده و تمامی ۲۵ وسیله نقلیه پشت اولین خودروی

1. Mont Blanc

سنگین را درگیر می‌کند. اگرچه بعد از حدود ۵۳ ساعت از شروع آتش‌سوزی بالاخره آتش مهار گشته، اما تا حدود ۵ روز بعد از حادثه نیز هنوز برخی نقاط تونل درگیر آتش و حرارت بالا بوده‌اند. درمجموع ۳۸ کاربر تونل و یک آتش‌نشان در این حادثه جان خود را از دست دادند که ۲۷ نفر از آنها در خودروی خود، دو نفر در پناهگاه اضطراری تونل و الباقی در طول مسیر حرکت به سمت فرانسه بوده‌اند. این آتش‌سوزی در واقع بزرگ‌ترین آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای از نقطه‌نظر تعداد قربانیان بوده است. عکسی از آوار باقی‌مانده در تونل مون‌بلان بعد از اتمام عملیات اطفای حریق در شکل **۱** نشان داده شده است.

شکل ۱. عکسی از آوار باقی‌مانده بعد از پایان آتش‌سوزی در تونل مون‌بلان

Source: Recent achievements in modeling the transport of smoke and toxic gases in tunnel fires (2004)

آتش‌سوزی تونل مون‌بلان درواقع هجدهمین آتش‌سوزی ثبت‌شده خودروهای سنگین در این تونل از زمان افتتاح آن (در سال ۱۹۶۵ میلادی) بوده است. تمامی ۱۷ حادثه قبلی کوچک بوده و تنها ۵ مورد به دخالت آتش‌نشان‌ها نیاز داشته و هیچ‌کدام خسارت جانی به همراه نداشته است. تنها یک عامل سبب ایجاد چنین آتش‌سوزی مهیبی در تونل مون‌بلان نبوده و این آتش‌سوزی به‌علت ترکیب عوامل مختلف نظیر شرایط جوی، رژیم‌های تهویه مختلف در هریک از دو انتهای تونل، آتش‌زا بودن بار خودروهای سنگین و برخی موارد دیگر به یک فاجعه تبدیل شده است.

۲-۱-۱. آتش‌سوزی در تونل گوتهارد

تونل گوتهارد[1] به طول ۱۶٫۹ کیلومتر در کشور سوئیس و در زیر رشته‌کوه‌های آلپ واقع شده است. این تونل در زمان ساخت خود، در سال ۱۹۸۰ میلادی، طولانی‌ترین تونل جاده‌ای جهان به‌حساب می‌آمد اگرچه درحال حاضر نهمین تونل جاده‌ای طویل محسوب می‌شود. این تونل شامل یک مسیر دو طرفه بوده و در

1. Gotthard

راستای شمالی-جنوبی واقع شده است. در ۲۴ اکتبر سال ۲۰۰۱ میلادی یک خودروی سنگین بلژیکی که از سمت جنوب عازم شمال تونل بود، از سمت راست به دیواره تونل برخورد کرده و بعد از منحرف شدن به سمت مسیر مخالف، از سمت چپ نیز برخورد دیگری با دیواره داشته و درنهایت در وسط جاده و در مسیر مخالف متوقف می‌شود. در این حین یک خودروی سنگین ایتالیایی که از سمت شمال تونل عازم جنوب بوده است، تلاش می‌کند تا با کاهش سرعت و انحراف مسیر خود از برخورد جلوگیری کند، اما درنهایت دو خودرو با هم تصادف می‌کنند. مدت کوتاهی پس از تصادف، یکی از خودروها آتش گرفته و آتش به سرعت به خودروی دیگر نیز منتقل می‌شود. اندکی بعد هر دو خودرو به‌طور کامل طعمه حریق شده بودند. راننده خودروی ایتالیایی شروع به هشدار به سایر خودروهایی که از سمت جنوب وارد تونل می‌شدند کرده و آنها را به برگشت و خروج از تونل راهنمایی می‌کند. تیم آتش‌نشان حدود هفت دقیقه بعد از شروع آتش‌سوزی از سمت جنوب به محل حادثه رسیده است. این آتش‌سوزی در شکل ۲ نشان داده شده است.

آتش‌نشان‌ها به‌دلیل گستردگی و دمای بالای آتش نمی‌توانستند فاصله خود را تا خودروها به کمتر از حدود ۱۵ متر برسانند. علاوه‌بر این حدود سی دقیقه پس از شروع عملیات اطفای حریق، انفجاری رخ داد و عملیات خاموش کردن آتش را بیش از پیش دشوار کرد. از طرفی در سمت شمال محل حادثه نیز ردیفی از خودروهای سنگین در مسیر شمال به جنوب متوقف شده بودند که آتش به‌ترتیب به آنها نیز سرایت می‌کند. همچنین سیستم تهویه تونل به‌صورتی بوده که دود و گازهای سمی به سمت شمال هدایت شده و درنتیجه آتش‌نشان‌هایی که از این سمت به محل حادثه اعزام شده بودند نتوانستند عملیات اطفای حریق را انجام دهند. بالاخره آتش بعد از حدود ۲۴ ساعت تحت کنترل قرار گرفت و اجساد ۱۱ نفر در میان آوار واقع در سمت شمالی محل حادثه پیدا شد.

شکل ۲. عکس گرفته شده از صحنه آتش‌سوزی در تونل گوتهارد توسط آتش‌نشانان

Source: https://www.rts.ch.

۳-۱-۱. آتش‌سوزی در تونل تائرن

تونل تائرن[1] به طول ۶۵۴۶ متر در شهر سالزبورگ کشور اتریش و در سال ۱۹۷۵ میلادی ساخته شده است. این تونل چهار بانده بوده و ظرفیت عبور روزانه ۱۸هزار خودرو را دارد. در روز ۲۹ ماه می سال ۱۹۹۹ میلادی یک خودروی سنگین با صفی از خودروهای متوقف شده در ترافیک تونل و در فاصله ۸۰۰ متری از ورودی شمالی آن، برخورد کرد. به دنبال این حادثه هشت نفر بر اثر ضربه حاصل از تصادف در دم جان خود را از دست دادند. پس از آن آتش‌سوزی آغاز شده و به سرعت خودروی سنگین اول، یک خودروی سنگین دیگر با بار قوطی‌های رنگ و چهار خودروی بین آنها را دربرمی‌گیرد. در این حادثه چهار نفر بر اثر آتش جان خود را از دست دادند که به‌شرح زیر است:

۱. یک راننده خودروی سنگین در دود انباشته شده در تونل؛

۲. دو سرنشین خودروی سواری که خودروی خود را ترک نکرده بودند؛

۳. یک راننده خودروی سنگین که ابتدا فرار کرده، اما بعداً برای جمع‌آوری برخی مدارک به خودروی خود بازگشته بود.

آتش درنهایت ۱۶ خودروی سنگین و ۲۴ خودروی سواری را از بین برده و اطفای آن ۱۵ ساعت به طول انجامید. سیستم تهویه عرضی تونل در این مدت عملکرد مناسبی داشته است.

۴-۱-۱. درس آموخته‌های حوادث پیشین

به‌نظر می‌رسد رفتارهای انسانی اصلی‌ترین عامل ایجاد خسارات جانی در آتش‌سوزی‌های تونل‌های جاده‌ای است. برای مثال در آتش‌سوزی تونل مون‌بلان اگر افراد سریع‌تر خودروی خود را از محل حادثه دور کرده و از دود فرار می‌کردند، بسیاری از آنها نجات می‌یافتند. علاوه‌بر این اگر اپراتورهای تونل در هنگام وقوع آتش به جای دمش هوا به سمت آن هوا را از تونل تخلیه کرده بودند، اکسیژن کمتری برای تغذیه آتش در اختیار قرار گرفته، درنتیجه رشد آتش کاهش یافته و خسارات کمتری وارد می‌شد. درمجموع می‌توان به این نتیجه رسید که در نظر گرفتن مسائل ایمنی آتش در مراحل طراحی تونل‌ها امری ضروری بوده و نباید مسائل ایمنی به بعد از ساخت تونل موکول شود. این مهم تنها در صورتی‌که از حوادث پیشین درس گرفته شود به‌وقوع خواهد پیوست. خلاصه‌ای از مهم‌ترین درس‌آموخته‌های فجایع آتش‌سوزی در تونل‌های مون‌بلان، گوتهارد و تائرن در جدول ارائه شده است.

1. Tauern

جدول ۱. درس‌آموخته‌های سه فاجعه آتش‌سوزی در تونل‌های مون‌بلان، گوتهارد و تائرن

موضوع	اتفاق رخ داده	اثر	نتایج	درس‌ها
۱. آتش	رشد سریع آتش حتی اگر بار کامیون‌ها به‌عنوان بار خطرناک محسوب نشده باشد	--	دسترسی دشوار به آتش به‌دلیل دود و حرارت، عدم امکان استفاده از کپسول‌های آتش‌نشانی توسط کاربران	امکان آتش‌سوزی شدید خودروهای سنگین حتی بدون بارهای خطرناک، اصلاح تعریف بار خطرناک در تونل‌های جاده‌ای
۲. تجهیزات ایمنی	شناسایی سریع و دقیق محل آتش	++	بهینه‌سازی عملکرد سیستم تهویه	نیاز به سیستم‌های شناسایی آتش با توانایی و سرعت تشخیص بالا
	از کار افتادن سیستم شناسایی آتش	--	محل نامشخص آتش	نیاز به سیستم‌های شناسایی آتش قابل اطمینان
	اولین هشدار توسط حسگرهای دود و کدری‌سنج	+	هشدار سریع	تجهیز سیستم‌های شناسایی آتش به حسگرهای دود علاوه‌بر حسگرهای دما
	فوت دو نفر در پناهگاه تحت فشار به‌دلیل گرما	--	دو قربانی	اتصال پناهگاه‌های تحت فشار به یک مسیر تخلیه خروجی ایمن
	کارکرد مناسب کابل‌های نصب شده در داکت‌های هوارسان در طول زمان آتش‌سوزی و در مقابل از بین رفتن تجهیزات نصب شده داخل فضای تونل	++	امکان برقراری ارتباط در طول عملیات امداد و نجات	قرار دادن تجهیزات حساس به حرارت در داکت‌های هوارسان تا حد امکان
	عملکرد خوب سیستم جمع‌آوری مایعات	++	جمع‌آوری سوخت ریخته شده بر روی زمین (اگرچه آتش در جمع‌کننده دیده می‌شود، ولی به داکت‌های بعد از سیفون گسترش نمی‌یابد)	مناسب بودن سیستم‌های جمع‌آوری مایعات با نصب سیفون
۳. واکنش نیروهای امداد و نجات	رسیدن اولین آتش‌نشان‌ها از سمت دود گرفته تونل	--	عدم توانایی آتش‌نشان‌ها در نزدیک شدن به آتش	نیاز به اطلاع رسانی مناسب به آتش‌نشان‌ها در مورد میزان پیش‌روی دود
	درک اشتباه از محل آتش	--	دیر رسیدن به آتش تونل	احتیاج به آموزش آتش‌نشان‌ها
	ورود آتش‌نشان‌ها به تونل با تجهیزات نامناسب	--	گیرافتادن آتش‌نشان‌ها در تونل و مرگ یک آتش‌نشان	احتیاج به آموزش آتش‌نشان‌ها، همکاری میان اپراتورهای تونل و آتش‌نشان‌ها برای اطلاع از وضعیت داخل تونل
	رسیدن آتش‌نشان‌ها در کمترین زمان ممکن از لحاظ فنی به آتش	+	گسترش زیاد آتش و دشواری مقابله با آن حتی با وجود واکنش سریع آتش‌نشان‌ها	نیاز به تخلیه فوری تونل توسط خود افراد حاضر در هنگام وقوع آتش‌سوزی‌های بزرگ

موضوع	اتفاق رخ داده	اثر	نتایج	درس‌ها
۴. رفتار افراد	اطلاع افراد از نیاز به فرار	++	قربانیان کمتر	احتیاج به اطلاع‌رسانی به افراد در مورد رفتار مورد انتظار از آنها
	باقی‌ماندن افراد در خودروهای خود	--	مرگ قربانیان به‌دلیل خفگی با دود	نیاز به اطلاع‌رسانی به افراد در مورد رفتار مورد انتظار از آنها
	پناه بردن سه نفر به فضای تعبیه شده جهت تماس تلفنی اضطراری	-	تفکر اشتباه این افراد در مورد پناه بردن به یک جای امن، احتیاج پیدا کردن به آتش‌نشان‌ها جهت نجات جان این افراد	اعلام غیر امن بودن مکان‌های تعبیه شده جهت تماس اضطراری به کاربران تونل، رفع امکان سردرگمی در شناسایی پناهگاه‌های تحت فشار و مسیرهای تخلیه اضطراری
	ورود برخی خودروها به تونل بعد از اعلام چراغ قرمز و آژیر در ورودی تونل	--	قربانیان بیشتر	نیاز به اطلاع‌رسانی به افراد در مورد رفتار مورد انتظار از آنها
	استفاده از خروجی‌های اضطراری توسط کاربران	++	قربانیان کمتر	نیاز به اطلاع‌رسانی به افراد در مورد رفتار مورد انتظار از آنها
	قربانی شدن رانندگان متوقف شده در فاصله ۳۰۰ تا ۶۰۰ متری آتش در تونل	--	کم‌بودن مدت زمان واکنش برای رسیدن به خروجی‌های اضطراری پس از دیدن دود توسط این افراد	اطلاع‌رسانی به کاربران تونل با این مضمون حرکت به سمت خروجی‌های اضطراری یا پناهگاه‌ها در هنگام توقف خودروها در تونل و عدم اطلاع از واقعه رخ داده
۵. عملکرد تونل	وجود دو مرکز کنترل مجزا که هر کدام نصف تونل را کنترل می‌کنند	--	کمبود همکاری میان اپراتورهای دو مرکز کنترل، پیچیدگی عملیات تهویه اضطراری و ارتباط با گروه‌های امداد و نجات	نیاز به وجود تنها یک مرکز کنترل برای هر تونل
	تأمین هوای تازه با حداکثر ظرفیت (و از کف تونل)	--	افزایش سرعت دود به سمت ورودی‌های تونل، گرفتگی بخش طولانی‌تری از تونل توسط دود	کاهش دمش هوای تازه اگر سرعت طولی جریان هوا کنترل نمی‌شود (یا به‌عبارتی در حالت تهویه عرضی)، نیاز به بررسی دوره‌ای روش‌های تهویه با توجه به توصیه‌های موجود
	توقف دمش هوای تازه از سقف پس از هشدار آتش	++	اجازه لایه‌ای شدن دود پس از دقایقی از شروع آتش	کاهش دمش هوای تازه در منطقه آتش به‌منظور لایه‌ای شدن دود
	عدم رعایت دستورالعمل‌های تهویه (دمش هوا به جای مکش آن)	-	عدم تخلیه دود در منطقه آتش، پخش دود و جلوگیری از لایه‌ای شدن آن به‌دلیل دمش هوا از سقف	نیاز به آموزش اپراتورهای تونل جهت اقدام مناسب هنگام وقوع شرایط اضطراری

موضوع	اتفاق رخ داده	اثر	نتایج	درس‌ها
	تشکیل صفی از خودروها در بخش عقبی آتش	--	حضور تعداد زیادی از مردم در منطقه خطرناک، گسترش آتش به سایر خودروها	رعایت فاصله ایمن تا آتش هنگام توقف خودروها در تونل، استفاده از موانع در تونل‌های بلند جهت جلوگیری از تجمع خودروها در منطقه خطر
	بسته شدن ورودی تونل در عرض ۳ دقیقه پس از شروع آتش‌سوزی	++	کاهش تعداد افراد حاضر در تونل	نیاز به آموزش کاربران تونل‌ها، استفاده از موانع به جای چراغ قرمز و آژیر برای بستن تونل‌ها
	عدم توانایی تعیین تعداد افراد حاضر در تونل در لحظه وقوع آتش و پس از آن توسط اپراتورهای تونل	-		شمارش تعداد خودروهای ورودی و خروجی
	فعال شدن مکش دود در نواحی دور از آتش (پایین دست) به‌دلیل فعال شدن حسگرهای آتش	-	افزایش سرعت هوای طولی و گسترش دود	در نظر گرفتن این موضوع توسط سیستم‌های اتوماتیک تهویه

Source: https://tunnelsmanual.piarc.org

۵-۱-۱. سایر حوادث

گرچه تعداد حوادث رخ داده در تونل‌های جاده‌ای به نسبت زیاد است، اما خلاصه‌ای از برخی از مهم‌ترین حوادث که منجر به فوت نیز شده در جدول بیان شده است.

جدول ۲. برخی از مهم‌ترین حوادث منجر به فوت رخ داده در تونل‌های جاده‌ای

سال	نام تونل	طول (متر)	کشور	فوت‌شدگان	مجروحان
۲۰۱۴	Yanhou	۸۰۰	چین	۴۰	-
۲۰۰۹	Eiksund	۷۷۷۰	نروژ	۵	-
۲۰۰۹	Follo	۹۰۰	نروژ	۱	-
۲۰۰۷	Newhall Pass	۱۷۰	آمریکا	۳	۲۳
۲۰۰۷	San Martino	۴۸۰۰	ایتالیا	۲	۱۰
۲۰۰۷	Burnley	۳۵۰۰	استرالیا	۳	۳
۲۰۰۶	Viamala	۷۴۰	سوئیس	۹	۶
۲۰۰۶	Eidsvoll	۱۲۰۰	نروژ	۱	۱
۲۰۰۵	Frejus	۱۲۸۷۰	فرانسه	۲	۲۱
۲۰۰۴	Baregg	۱۳۹۰	سوئیس	۱	۱

مأخذ: گردآوری نگارندگان.

۲-۱. آتش‌سوزی در تونل‌های ریلی

اکثر سیستم‌های حمل‌ونقل انبوه که برای حمل‌ونقل عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیستم‌های ریلی هستند که شامل قطارهایی با ظرفیت انتقال صدها مسافر است. مشخص است که این سیستم‌ها نسبت به حمل‌ونقل جاده‌ای در هنگام وقوع حوادث آتش‌سوزی پتانسیل بسیار بالاتری از نظر تعداد تلفات خواهند داشت. دو حادثه در سال‌های اخیر ابعاد وحشتناک حوادث آتش‌سوزی در سیستم‌های حمل‌ونقل انبوه (نظیر مترو) را مشخص کرده است. در سال ۲۰۰۳ نزدیک به ۲۰۰ نفر به دنبال یک حمله خرابکارانه در سیستم متروی کره جنوبی از بین رفتند. همچنین در سال ۱۹۹۵ میلادی نیز بیش از ۲۰۰ نفر بر اثر آتش‌سوزی ناشی از اتصال الکتریکی در قطار زیرزمینی در آذربایجان کشته شدند.

علل وقوع آتش‌سوزی در خطوط مترو عموماً به عوامل زیر نسبت داده می‌شود:

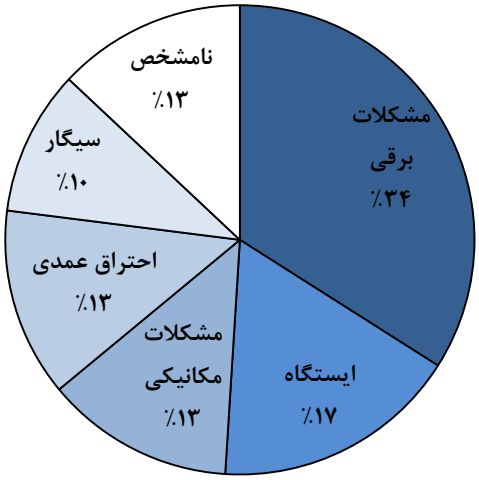
- جرقه به‌دلیل خرابی تجهیزات مکانیکی،
- اتصال کوتاه برق و بی‌دقتی افراد در کار با تجهیزات برقی،
- وجود و تجمع پسماندهای قابل اشتعال، مواد قابل اشتعال استفاده شده در قطار و بار مسافران،
- ایجاد عمدی حریق توسط افراد یا گروه‌های تروریستی.

اطلاعات درباره آتش نشان می‌دهد اگر آتش در همان مراحل ابتدایی کنترل شود، نتایج و عواقب آن به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. از طرفی با توسعه‌یافتگی آتش آثار مخرب آن به‌شدت افزایش یافته و توانایی کنترل آن نیز شدیداً کاهش می‌یابد. پتانسیل بروز هر نوع آتش‌سوزی در خطوط مترو ممکن است از مرتبه تنها چند آتش در سال باشد. همچنین این آتش‌سوزی‌ها با احتمال بالایی در همان مراحل ابتدایی ایجاد، کنترل شده و جلوی رشد و توسعه‌یافتگی آنها گرفته می‌شود. محققین احتمال وقوع یک آتش‌سوزی ریلی شدید را در حدود نیم حادثه در سال در سراسر جهان تخمین زده‌اند.

براساس اطلاعات حاصل از «روزنامه بین‌المللی راه‌آهن[1]» در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۷ میلادی نزدیک به ۳۰ حادثه آتش‌سوزی مهم در خطوط متروی جهان اتفاق افتاده است. از این تعداد تنها در ۵ حادثه ۴۳ نفر جان خود را از دست دادند. دلیل اصلی این آتش‌سوزی‌ها الکتریسیته معرفی شده است. سهم هر یک از عوامل ایجادکننده این آتش‌سوزی‌ها در شکل ۳ خلاصه شده است.

1. Railway Gazette International

شکل ۳. سهم هریک از علل وقوع حوادث آتش‌سوزی در خطوط متروی جهان در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۷



Source: Fire risk in metro tunnels and stations (2007)

۱-۲-۱. آتش‌سوزی در متروی شهر باکو، آذربایجان

بدترین حادثه آتش‌سوزی ثبت شده در تاریخ مترو مربوط به متروی باکو در آذربایجان به تاریخ ۲۸ اکتبر سال ۱۹۹۵ میلادی است. در این حادثه ۳۳۷ نفر جان خود را از دست دادند. علت وقوع آتش جرقه الکتریکی در سیم‌کشی نزدیک جعبه دنده واگن شماره چهار بوده است. از آنجا که این مترو در زمان وقوع حادثه بیش از ۳۰ سال قدمت داشته، واگن‌های آن از موادی ساخته شده بودند که در صورت آتش‌سوزی سبب انتشار گازهای سمی به هوا می‌شدند. هنگام وقوع آتش‌سوزی، قطار ۲۰۰ متر از ایستگاه اولدوز[1] دور شده و فاصله آن تا ایستگاه بعدی یعنی ایستگاه نریمانوف[2] نیز در حدود ۲۰۰۰ متر بوده است. بعد از شروع آتش، قطار در تونل متوقف و تونل پر از دود شده است. به‌علت دودگرفتگی، مسیر فرار مسافران به ایستگاه اولدوز بسته شده و لذا مسافران به سمت ایستگاه نریمانوف حرکت کرده‌اند. حدود ۱۵ دقیقه بعد از شروع آتش سیستم تهویه تونل به حالت اضطراری (مکش دود) تغییر حالت می‌دهد و باعث مکش دود به سمت ایستگاه نریمانوف می‌شود که درواقع مسیر فرار مسافران نیز بوده است. این موضوع سبب خفگی برخی مسافران بر اثر دودگرفتگی شده است. نزدیک به ۴۰ نفر در تونل فوت شده درحالی‌که تعداد بسیاری از مسافران در همان واگن‌های قطار جان خود را از دست داده بودند. تصویری از بقایای بر جای مانده از قطار بعد از پایان آتش‌سوزی در متروی باکو در شکل نشان داده شده است.

1. Uldus
2. Narimanov

شکل ۴. تصویری از بقایای به‌جامانده از قطار بعد از اطفای حریق در متروی باکو

Source: https://news.az

۲-۲-۱. آتش‌سوزی در متروی شهر دائگو، کره جنوبی

صبح روز سه‌شنبه ۱۸ فوریه سال ۲۰۰۳ میلادی، اقدام خرابکارانه در ایستگاه متروی «ژانگنگو[1]» در نزدیکی مرکز شهر دائگو[2] در کره جنوبی منجر به مرگ دست‌کم ۱۸۹ نفر شده است. فرد مجرم که قصد خودکشی داشته، با استفاده از مقدار اندکی بنزین و یک فندک در قطار متوقف شده در ایستگاه آتش روشن کرده است. آتش به سرعت رشد کرده و تمام ۶ واگن قطار را دربرگرفته است. بعد از آنکه اپراتورهای مترو متوجه وجود آتش شده‌اند، قطار دیگری وارد ایستگاه شده و در کنار قطار آتش گرفته متوقف شده و درنتیجه آتش به آن نیز منتقل شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که ابتدا درهای قطار دوم برای مدت اندکی باز شده و سپس به‌دلیل آنکه فضای ایستگاه پر از دود شده بوده، درها بسته شده‌اند. مدت کوتاهی بعد سیستم خودکار شناسایی آتش، برق هر دو قطار را قطع کرده و درنتیجه قطار دوم نتوانسته از ایستگاه خارج شود. به راننده فرمان داده شده تا سریعاً از قطار خارج شود، اما راننده در حین خروج دچار یک اشتباه مهلک شده و کلید اصلی متصل به باتری‌های قطار را که برای باز و بسته شدن درها استفاده می‌شود، قطع کرده است. درنتیجه ۷۹ مسافر داخل قطار به دام افتاده و در آتش سوخته‌اند. علاوه‌بر این صدها نفر ازجمله فرد مجرم به‌دلیل تنفس دود دچار آسیب جدی شده و تحت مراقبت‌های پزشکی قرار گرفته‌اند. تصویری از بقایای بر جای مانده از یکی از قطارها بعد از اتمام آتش‌سوزی در شکل ۵ نمایش داده شده است.

1. Jungango
2. Daegu

شکل ۵. تصویری از دو آتش‌نشان در حال بررسی بقایای یکی از قطارها بعد از اتمام آتش‌سوزی

Source: https://en.wikipedia.org.

۳-۲-۱. درس آموخته‌های حوادث پیشین

اکثر آتش‌سوزی‌ها در تونل‌های ریلی به‌دلیل نقص‌های مکانیکی یا الکتریکی شروع شده و تنها درصد بسیار اندکی نتیجه مستقیم خطاهای انسانی بوده است. درواقع تعداد اندکی از آتش‌سوزی‌ها به‌دلیل اثر مستقیم خطاهای انسانی بوده و حدود دوسوم به‌دلیل نقص‌های مکانیکی و الکتریکی رخ داده است. همچنین حدود یک‌دهم آتش‌سوزی‌ها به‌صورت عمدی ایجاد شده است.

توضیحاتی که در بخش‌های قبل ارائه شد، نشان می‌دهد که می‌توان درس‌های ارزشمندی از حوادث پیشین به‌دست آورد. لذا باید حوادث مهمی که در تونل‌ها رخ می‌دهند به خوبی ثبت و ضبط شوند. در همین راستا اتحادیه اروپا پایگاه‌های داده برخط را به‌منظور ثبت و ضبط حوادث راه‌اندازی کرده است. علاوه‌بر این قانونگذاران توانایی این را دارند تا ثبت وقایع را به یک فرایند اجباری تبدیل کنند. به‌طور مثال مقامات فرانسوی با انتشار بخشنامه‌ای اپراتورهای تونل‌ها را موظف کرده‌اند تا تمامی حوادث مهم در تونل‌ها را براساس یک چارچوب از پیش تعیین شده گزارش کنند. این بخشنامه به‌عنوان ساختار پایه در پایگاه داده برخط تصادفات تونلی استفاده شده است که از طریق وب‌سایت European Thematic Network of Fires in Tunnels در دسترس است.

۴-۲-۱. سایر حوادث

گرچه تعداد حوادث رخ داده در تونل‌های قطار و مترو بسیار کمتر از موارد اتفاق افتاده در تونل‌های جاده‌ای است، اما معمولاً خسارات جانی و مالی بیشتری را به همراه دارد. برخی دیگر از حوادث مربوط به تونل‌های قطار در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. برخی از مهم‌ترین حوادث منجر به فوت رخ داده در تونل‌های ریلی

سال	نوع سیستم	کشور	فوت‌شدگان	مجروحان	توضیحات
۲۰۰۸	تونل ریلی	انگلستان/فرانسه	-	-	خسارات شدید
۲۰۰۰	قطار کابلی*	اتریش	۱۵۵	-	آتش‌سوزی
۲۰۰۰	مترو	فرانسه	-	۲۴	خروج قطار از خط
۱۹۹۹	مترو	آلمان	-	۶۷	برخورد دو قطار
۱۹۹۹	تونل ریلی	ایتالیا	۴	۹	آتش‌سوزی عمدی

*. Funicular Train

مأخذ: گردآوری نگارندگان.

۲. اصول کلی ایمنی در تونل‌ها

با افزایش تعداد تونل‌های درحال ساخت و یا برنامه‌ریزی شده برای ساخت و همچنین رشد حجم ترافیک در تونل‌های موجود، اهمیت مسائل ایمنی به‌شدت افزایش یافته است. حوادث در تونل‌های جاده‌ای و شهری به مراتب کمتر از جاده‌هاست و می‌توان گفت تونل‌ها محیط رانندگی کنترل شده و ایمن‌تری را ایجاد می‌کنند. با وجود این، عواقب و صدمات حاصل از حوادث در محیط‌های بسته تونل‌ها می‌تواند به‌مراتب خطرناک‌تر و زیان‌بارتر از حوادث رخ داده در جاده‌ها باشد و بازخورد شدیدتری را در جامعه ایجاد کند.

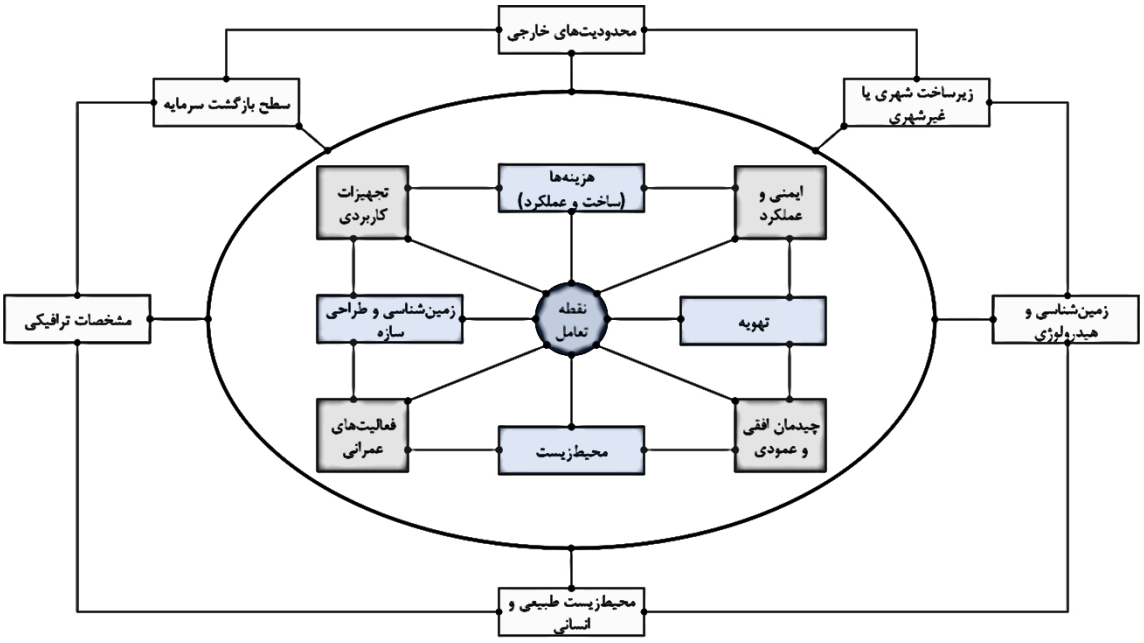
علاوه‌بر این، به دنبال فجایع رخ داده در تونل‌های مون‌بلان، تائرن و گوتهارد (که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفت) در بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ میلادی، این نتیجه به‌دست آمد که باید شناخت تمامی جنبه‌های ایمنی در تونل‌ها تقویت شود. این موضوع سبب تغییر روند طراحی و ساخت تونل‌ها و همچنین وضع قوانین محدودکننده شده که آثار مهمی بر تجهیزات مورد نیاز تونل‌ها و مهندسی عمران آنها گذاشته است. درواقع پس از گزارش حادثه آتش‌سوزی در تونل مون‌بلان در سال ۱۹۹۹ میلادی، تعدادی از کشورها در سراسر جهان مرور و به‌روزرسانی استانداردها و دستورالعمل‌های ملی را آغاز کردند.

باید توجه داشت که یک تونل در واقع سیستم پیچیده‌ای است که نتیجه تعامل پارامترهای فراوانی است. این پارامترها را می‌توان در مجموعه‌های مختلفی دسته‌بندی کرد که اصلی‌ترین این مجموعه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. شایان ذکر است که این پارامترها متغیر بوده و پارامترهای هر مجموعه می‌تواند با پارامترهای سایر مجموعه‌ها تعامل داشته باشد. همچنین اهمیت و ارزش نسبی پارامترها براساس ماهیت هر تونل می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال:

- معیارهای تعیین‌کننده و وزن پارامترهای مختلف برای یک تونل شهری و یک تونل جاده‌ای یکسان نیست،

- پارامترهای اثرگذار بر تونل‌های کوتاه و بلند با هم متفاوت است،
- میان تونل‌هایی که در آنها خودروهای حامل کالاهای خطرناک تردد می‌کنند و تونل‌هایی که فقط مخصوص عبور و مرور خودروهای سواری است، تفاوت وجود خواهد داشت،
- معیارهای در نظر گرفته شده برای یک تونل جدید با معیارهای لحاظ شده در یک تونل قدیمی که باید مرمّت و بهسازی شود تا در تطابق با استانداردهای ایمنی قرار گیرد نیز یکسان نخواهد بود.

شکل ۶ . مجموعه‌های اصلی سیستم پیچیده تونل‌ها



Source: https://tunnelsmanual.piarc.org

۱-۲. اصول کلی ایمنی در تونل‌های جاده‌ای

مدیریت ایمنی در تونل‌های جاده‌ای چالش‌های خاصی را به همراه دارد. برای مثال خطرات وسایل نقلیه باربر می‌تواند قابل ملاحظه باشد و همچنین عواقب حوادث رخ داده ممکن است به‌شدت تحت تأثیر رفتار انسان‌ها قرار بگیرد، زیرا رفتار انسانی به سختی قابل پیش‌بینی است. بنابراین برای در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های سیستم شامل زیرساخت‌ها، عملکرد، سرویس‌های اضطراری، کاربران و وسایل نقلیه باید یک رویکرد جامع پیاده‌سازی شود.

اولین مرحله در ارزیابی ملزومات، تعریف اهداف ایمنی است. این اهداف معمولاً در سطح ملی و در تطابق با قوانین، مقررات و استانداردهای ملی تنظیم می‌شوند. اصل بنیادی در تونل‌ها که باید دنبال شود این است که در هنگام وقوع شرایط اضطراری، کاربران تونل بتوانند خود را نجات دهند. پس از این مرحله (مرحله نجات جان خویش)، سرویس‌های امداد و نجات وارد عمل شده و ضمن کنترل آتش به

افراد جامانده در تونل یاری می‌رسانند. اهداف ایمنی می‌تواند به طرق مختلفی تعریف شود، اما انجمن جهانی جاده‌ها،[1] کمیسیون اقتصادی اروپا و اتحادیه اروپا بر روی دو هدف اساسی زیر اتفاق نظر دارند:

- جلوگیری از وقوع حوادث بحرانی در تونل‌ها،
- کاهش آثار حوادث رخ داده.

ایمنی یکپارچه در تونل‌ها نیازمند توجه به هر دو هدف فوق است. اقدامات مورد نیاز جهت دستیابی به اهداف ایمنی و کاهش خطرات و ریسک می‌تواند به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی شود:

- رفتار کاربران تونل،
- اقدامات مدیریتی و عملیاتی،
- هندسه تونل،
- امکانات سازه‌ای تونل،
- تجهیزات تونل.

در ادامه هریک از دسته‌های فوق به اختصار توضیح داده شده است.

۱-۱-۲. رفتار کاربران تونل

سازمان مدیریت تونل نقش بسیار مهمی در تأمین ایمنی تونل ایفا می‌کند، زیرا این سیستم است که تعیین می‌کند کاربران تونل در شرایط عادی و اضطراری با چه مواردی مواجه شوند. ماهیت قوانین ترافیکی، رانندگانی که ملزم به رعایت آنها هستند و همچنین میزان اجرای این قوانین سهم بسزایی در سطح ایمنی تونل‌ها دارد. علاوه‌بر این مشخصات وسایل نقلیه استفاده‌کننده از تونل و باری که حمل می‌کنند نیز نقش مهمی در ایمنی تونل بازی می‌کند. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده با توجه به کاربران تونل‌ها را می‌توان به‌شرح زیر خلاصه کرد:

۱. در طراحی و عملکرد تونل‌ها باید فاکتورهای انسانی لحاظ شود،

۲. رانندگان باید آگاهی بیشتری نسبت به نحوه رفتار مناسب در تونل‌ها داشته باشند،

۳. در فاصله حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ متری از ورودی تونل‌ها نباید تعداد زیادی علائم رانندگی نصب شده باشد،

۴. تجهیزات ایمنی تونل‌ها باید حتی در شرایط عادی عملکردی نیز به‌راحتی قابل تشخیص باشند.

همچنین در مورد اپراتورهای تونل و گروه‌های امداد و نجات اضطراری نیز ضروری است تا:

– در طول فرایند طراحی تونل همکاری و مشورت داشته باشند،

– برنامه‌های احتمالی برای عملیات آتش‌نشانی و حفاظت کاربران تونل را پیاده‌سازی کرده و به‌روزرسانی کنند،

1. World Road Association

– بازدیدهای آشنایی با تونل را ساماندهی کرده و تمرین‌هایی برای تست آموزش‌های عملیاتی ترتیب دهند،

- اقدامات مورد نیاز جهت کاهش زمان لازم برای تجهیز سرویس‌های اضطراری را تعریف کنند،

- تحلیل‌های بعد از حوادث رخ داده در تونل‌ها را سازماندهی کنند.

به‌طور کلی طراحی برای استفاده بهینه انسان باید شامل ارزیابی توانایی‌ها و محدودیت‌های انسان باشد تا این اطمینان حاصل شود که سیستم‌ها و فرایندهای حاصل همگام با توانایی‌ها و محدودیت‌های افراد است. توانایی‌ها و محدودیت‌های انسانی به آن دسته از فرایندهای فیزیکی، شناختی و روان‌شناختی اطلاق می‌شود که با ادراک، پردازش اطلاعات، انگیزه، تصمیم‌گیری و اقدام انسان‌ها سروکار دارد.

۲-۱-۲. اقدامات مدیریتی و عملیاتی

فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری می‌تواند در سه بخش زیر در نظر گرفته شود:

۱. مدیریت روزانه: این بخش شامل تمام فعالیت‌های مربوط به پایش ترافیک و اطمینان از عملکرد مناسب تمام تجهیزات در طول عملکرد عادی و درمواقع اضطراری است. درواقع هدف از مدیریت روزانه اطمینان از عملکرد مناسب تمام تجهیزات الکترومکانیکی و سازه‌ای تونل است.

۲. آموزش کارمندان: اپراتورها، پلیس، تیم آتش‌نشان و سایر سرویس‌های اضطراری باید آموزش‌های ابتدایی را دیده و تمرین‌های مخصوص به خود را انجام دهند.

۳. بهبود مستمر ایمنی: این فعالیت شامل تمامی مطالعات و طرح‌هایی است که با هدف بهبود ایمنی تونل انجام می‌شود (برنامه‌ریزی‌های اضطراری، بازخوردهای حوادث گذشته، تعویض تجهیزات تونل و ...).

براساس دستورالعمل‌های اروپایی (دستورالعمل 2004/54/EC) در مورد حداقل الزامات ایمنی برای تونل‌ها در شبکه جاده‌های اروپایی، ایمنی تنها مربوط به سازه‌ها و تجهیزات نبوده و فعالیت‌های مربوط به تعمیرات و نگهداری نیز نقش بسزایی در ایمنی دارند.

۳-۱-۲. هندسه تونل

مشخصات هندسی تونل باید در همان مراحل ابتدایی طرح تونل تعریف و تبیین شود. این مشخصات دارای ماهیت‌های بسیار متفاوتی بوده و می‌تواند در دسته‌های زیر تقسیم‌بندی شود:

۱. رابطه بین روش ساخت تونل و شکل سطح مقطع آن (دایره‌ای، مستطیلی و ...)،

۲. مفاهیم تئوری مربوط به حجم ترافیک،

۳. تراز کلی جاده به همراه تونل، تعداد مسیرها و خطوط جاده، شیب بیشینه، حداقل شعاع جاده، توقفگاه‌های بین راهی و سایر موارد،

۴. مشخصات هندسی مخصوص سایر مواردی که خارج از سطح مقطع اصلی تونل است نظیر خروجی‌های اضطراری، گالری‌های فرار، کنارگذرها، تقاطع‌ها و ...؛

۵. آثار مشخصات هندسی تونل بر ایمنی آن.

۴-۱-۲. امکانات سازه‌ای تونل

علاوه‌بر هندسه سطح مقطع تونل و تراز جاده که برای عملکرد مناسب ترافیک نیاز است، تجهیزات مخصوصی در اغلب تونل‌های جاده‌ای به‌منظور تأمین نیازهای ایمنی در محیط تونل تعبیه می‌شود. این تجهیزات را می‌توان به‌طور خلاصه به شکل زیر شرح داد:

۱. **خروجی‌های اضطراری:** این خروجی‌ها در تمامی تونل‌ها بجز تونل‌های بسیار کوتاه تعبیه می‌شوند تا کاربران تونل بتوانند با پای پیاده از تونل خارج شده و وارد محیط امن شوند. این خروجی‌ها در انواع مختلفی نظیر تقاطع‌های بین تونلی، گالری‌های ایمنی و برخی موارد دیگر ساخته می‌شوند.

۲. **امکانات ایمنی برای خودروها:** برخی امکانات نظیر توقفگاه‌های کنار تونل، دوربرگردان‌ها و تقاطع‌های بین دو تونل در مواقعی که خودرویی خراب شود یا برای ایجاد مسیر حرکت برای خودروهای اضطراری (آمبولانس، آتش‌نشانی و ...) و یا کنترل ترافیک در هنگام وقوع حوادث، کاربرد دارند.

۳. **تورفتگی‌های ایمن:** این تورفتگی‌ها یا عقب‌نشینی‌ها در فواصل مشخصی در طول دیواره تونل‌ها ایجاد می‌شود تا سرنشینان خودروهای آسیب‌دیده بتوانند از جاده اصلی دور شده و از خطر برخورد با خودروهای درحال حرکت در امان بمانند.

۴. **زهکشی تونل:** این سیستم‌ها جهت جمع‌آوری آب‌های نشت کرده از دیواره تونل و یا مایعات نشت کرده از تانکرها (مخصوصاً مایعات آتش‌زا) طراحی شده و نقش بسیار مهمی در کاهش خطرات و آتش‌سوزی‌ها دارند.

۵-۱-۲. تجهیزات تونل

اگر طول تونل‌های جاده‌ای از چند صد متر بیشتر باشد باید تجهیزات خاصی جهت افزایش ایمنی کاربران در هر دو وضعیت عادی و اضطراری تدارک دیده شود. به نظور کاهش ریسک وقوع تصادفات، محدود کردن عواقب آن و همچنین افزایش سطح آسایش و ایمنی کاربران تونل‌ها تجهیزات متنوعی می‌تواند در تونل‌ها نصب شود. این تجهیزات را می‌توان به‌طور خلاصه به‌شرح زیر دسته‌بندی کرد:

۱. **منبع تغذیه برق:** مقدار قابل توجهی انرژی الکتریکی برای تغذیه تجهیزات نصب شده در تونل‌ها مورد نیاز است. منبع تغذیه برق تونل‌ها باید توان لازم را در شرایط عادی و اضطراری تأمین کند. این سیستم‌ها باید حتی درمواقع قطع برق نیز کار کنند تا حداقل تجهیزات ضروری تونل‌ها را تغذیه کنند.

۲. **سیستم SCADA[1]:** این سیستم وظیفه پایش وضعیت تجهیزات نصب شده در تونل‌ها را به‌عهده دارد.

۳. **سیستم‌های ارتباطی و هشدار:** این سیستم‌ها شامل تجهیزاتی است که برای بررسی دوره‌ای وضعیت تونل استفاده شده و همچنین به اپراتورهای تونل در مورد خطرات و تصادفات اطلاع‌رسانی

1. Supervisory Control And Data Acquisition Systems

می‌کند. ازجمله این سیستم‌ها می‌توان تلفن‌های اضطراری، زنگ‌های هشدار و سیستم‌های تشخیص دود و آتش را نام برد.

۴. سیستم‌های نظارت و کنترل ترافیک: این سیستم‌ها معمولاً در تونل‌های با ترافیک بالا نصب می‌شود که درواقع دوربین‌های نظارت بر ترافیک هستند و گاهی با دستگاه‌های ترددشمار نیز تجهیز می‌شوند.

۵. سیستم‌های روشنایی: در اغلب تونل‌ها نفوذ نور طبیعی سطح قابل قبولی از روشنایی را برای کاربران ایجاد نمی‌کند. درنتیجه نیاز است تا سیستم روشنایی مصنوعی در تونل جهت تأمین سطح قابل قبول روشنایی و راحتی کاربران نصب شود.

۶. سیستم تهویه: سیستم تهویه در تونل‌ها دو هدف مشخص دارد: اول در شرایط عملکرد عادی، کیفیت مناسب هوا در تونل را از طریق رقیق کردن آلاینده‌ها تأمین می‌کند ودوم در مواقع آتش‌سوزی، از طریق کنترل جهت جریان دود در مسیر مناسب، محیط تونل را تا حد ممکن برای کاربران و تیم‌های امداد و نجات ایمن می‌کند.

۷. تجهیزات آتش‌نشانی برای کاربران و تیم‌های اضطراری: هدف اساسی تجهیزات آتش‌نشانی در تونل‌های جاده‌ای تأمین ابزاری برای مبارزه با آتش در تونل با کمترین آثار منفی بر کاربران و سازه تونل است. سیستم‌های حیاتی جهت مبارزه با آتش در تونل‌های جاده‌ای عبارتند از: تشخیص، هشدار، ارتباط رادیویی، تلفن اضطراری، تلویزیون مداربسته، بلندگوها، تأمین و توزیع آب، سیستم‌های اطفای حریق ثابت، کپسول‌های آتش‌نشانی قابل حمل و تهویه اضطراری.

۸. تابلوهای راهنما: این تابلوها یکی از ابزارهای در دسترس اپراتورهای تونل جهت ارتباط با کاربران تونل است.

۹. موانع: هنگام وقوع حوادث شدید (تصادفات، آتش‌سوزی و ...) در تونل‌ها، باید در همان مراحل ابتدایی از ورود افراد و وسایل‌نقلیه به تونل جلوگیری شود. در بسیاری از کشورها این تجربه به‌دست آمده است که اگر تونل تنها به‌واسطه تابلوهای ایست بسته شود کافی نبوده و باید حتماً از موانع نیز در ورودی تونل درمواقع ضروری استفاده شود.

۲-۲. اصول کلی ایمنی در تونل‌های ریلی

سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی با تراکم بسیار بالای افراد (با قابلیت جابه‌جایی همزمان بیش از ۱۰۰۰ نفر) شناخته می‌شوند. این افراد معمولاً هیچ اطلاعی از وضعیت تونل نداشته و نمی‌توانند بر آن اثرگذار باشند. در شرایط نادر وقوع حوادث، این افراد نیازمند اطلاعات و هدایت سریع هستند تا به خروجی‌های اضطراری دست پیدا کنند. از آنجا که مدت زمان مورد نیاز برای مداخله و امدادرسانی در تونل‌های ریلی

درمواقع اضطراری معمولاً بسیار زیاد است ،بنابراین توانایی «نجات خویش»[1] نقش حیاتی در تونل‌های ریلی ایفا می‌کند. با توجه به تعداد بالای افراد، تجهیزات مناسب جهت نجات جان خویش باید مهیا شود. حداقل امکانات مورد نیاز در تونل‌های ریلی جهت نجات جان خویش را می‌توان به‌شرح زیر بیان کرد:

- پیاده‌راه (با عرض ۰٫۸ تا ۱٫۲ متر)،
- علائم راهنما روی دیوارهای تونل،
- نرده،
- روشنایی،
- زنگ‌های هشدار.

عموماً در تونل‌های تک‌مسیره (تونل‌هایی که یک ریل برای حرکت قطار وجود دارد) تنها یک پیاده‌راه وجود دارد درحالی‌که در تونل‌های دو مسیره (تونل‌هایی که دو ریل برای حرکت همزمان قطارها در خلاف جهت هم وجود دارد) دو پیاده‌راه تعبیه می‌شود. نمونه‌ای از پیاده‌راه در یک تونل دو مسیره در شکل **۷** نشان داده شده است.

شکل ۷. یک تونل ریلی دو مسیره مجهز به دو پیاده‌راه در دو سمت تونل

Source: System approach to underground safety (2019)

با وجود اهمیت در نظر گرفتن ملزومات ایمنی در تمام تونل‌های ریلی، تفاوت‌های فاحشی میان سیستم‌های ایمنی تونل‌ها نظیر خروجی‌های اضطراری و سیستم تهویه در کشورهای مختلف وجود دارد. در اروپا خروجی‌های اضطراری در تونل‌های تک‌مسیره و دومسیره به‌ترتیب به ازای هر ۵۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر تعبیه می‌شوند. همین رویکرد در استاندارد NFPA 130 (انجمن ملی حفاظت در برابر آتش یا همان

1. Self-rescue

NFPA یک سازمان غیرانتفاعی بین‌المللی است که با هدف کاهش مرگ‌ومیر، جراحات و خسارات جانی و مالی به‌دلیل آتش و الکتریسیته فعالیت می‌کند) نیز لحاظ شده اما فواصل بین خروجی‌ها به‌ترتیب ۲۴۴ متر و ۷۶۲ متر در نظر گرفته شده است.

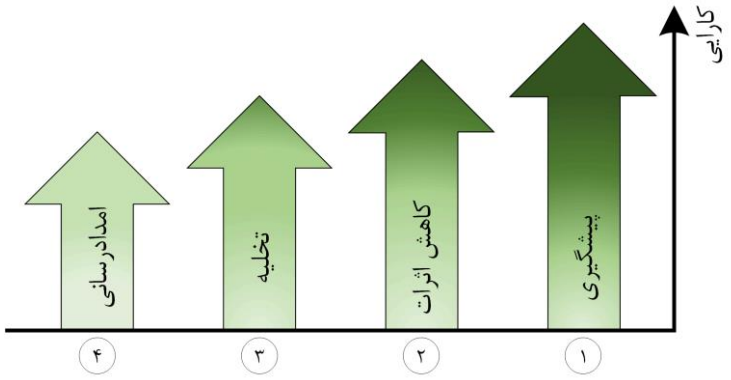
درحالتی که تعداد افراد زیادی در یک تصادف ریلی درگیر شده باشند، مدت زمان لازم جهت نجات جان خویش می‌تواند ۱۵ تا ۳۰ دقیقه باشد. لذا تهویه مناسب تونل در طول مدت زمان فرایند نجات جان خویش جهت ایجاد شرایط قابل تحمل برای افراد داخل تونل مورد نیاز است. البته باید توجه داشت موضوع تهویه اضطراری در تونل‌های ریلی کماکان یک مسئله بحث‌برانگیز است.

مجموعه‌ای از دستورالعمل‌های ایمنی توسط «اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن»[1] جهت افزایش ایمنی در تونل‌های ریلی در قالب یک جزوه تهیه و ارائه شده است. بر این اساس اولویت‌های ارائه شده جهت افزایش ایمنی در تونل‌های ریلی به‌ترتیب کارایی و اثرگذاری به‌شرح زیر بیان شده است:

۱. پیشگیری از وقوع حوادث،
۲. کاهش آثار منفی حوادث رخ داده،
۳. تسهیل امکان فرار افراد؛
۴. تسهیل امکان امدادرسانی.

اهمیت و کارایی این اقدامات به‌ترتیب اولویت در شکل ۸. نمایش داده شده است.

شکل ۸. اولویت اقدامات ایمنی در تونل‌ها به‌ترتیب کارایی براساس توصیه اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن



۱-۲-۲. توصیه‌های ارائه شده توسط UNECE

کمیته حمل‌ونقل داخلی «کمیسیون اقتصادی سازمان ملل متحد برای اروپا (UNECE)»[2] یک گروه از

1. International Union of Railways (UIC)
2. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)

کارشناسان را برای تهیه گزارشی در مورد مسائل ایمنی در تونل‌ها ایجاد کرد که هدف اولیه آنها تونل‌های جاده‌ای بود. پس از اتمام کار این گروه در سال ۲۰۰۱ میلادی، از گروه دیگری دعوت شد تا مسائل ایمنی در تونل‌های ریلی را مورد بررسی قرار دهد. این گروه در سال ۲۰۰۳ میلادی گزارشی را کامل کرده و برای تأیید کمیته حمل‌ونقل داخلی به این کمیته ارسال کرد. این گروه مطالعه خود را براساس تونل‌های طویل (بیش از یک کیلومتر) در محدوده کشورهای تحت UNECE آغاز کرد. همچنین این گروه اسناد ایمنی تونل‌های موجود را از کشورهای عضو UNECE، اتحادیه اروپا و سازمان‌های بین‌المللی مرتبط جمع‌آوری و بررسی کرده و از جزوه منتشرشده توسط اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن نیز به‌طور خاص بهره برده است.

توصیه‌های گروه کارشناسان UNECE برمبنای همان اولویت‌بندی ارائه شده توسط «اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن (UIC)» است که در شکل ۸. نمایش داده شده است. علاوه‌بر این، کمیسیون UNECE بیان می‌کند که ایمنی مقرون‌به‌صرفه در تونل‌ها درواقع نتیجه ترکیب بهینه زیرساخت‌ها، قطارها و اقدامات عملیاتی است. این کمیسیون توصیه می‌کند که مالکان زیرساخت‌ها و قطارها باید برنامه جامعی از ایمنی برای همه تونل‌ها (درحال ساخت جدید یا موجود) که شامل نقشه‌های اضطراری درمواقع خطر است، داشته باشند.

۲-۲-۲. مترو

سیستم حمل‌ونقل پر سرعت مترو در بسیاری از شهرهای بزرگ نقش ستون فقرات تحرک و پویایی شهر را بازی می‌کند. اولین سیستم تونل‌های مترو در نیمه دوم قرن ۱۹ میلادی در شهرهای لندن و نیویورک راه‌اندازی شد و پس از آن در طول دهه‌ها رشد کرد. این موضوع یکی از دلایل ناهمگونی متروها از نظر ایمنی است. علاوه‌بر این استانداردهای ایمنی ممکن است از یک کاربر به کاربر دیگر تفاوت چشمگیری داشته باشند.

شبکه‌های مترو عموماً سیستم‌های بسته‌ای هستند که توسط یک اپراتور که کنترل کاملی بر عملکرد قطار دارد، اداره می‌شوند. با وجود ویژگی‌های مشترک فراوان با تونل‌های ریلی، تفاوت‌های اساسی میان تونل‌های مترو و تونل‌های ریلی (قطارهای بین شهری) وجود دارد که عبارتند از:

۱. تونل‌های بین ایستگاه‌ها در مترو کوتاه بوده و مدت زمان حرکت بین ایستگاه‌ها در حدود ۲ تا ۳ دقیقه است،

۲. مدت زمان توقف قطار در ایستگاه‌ها کوتاه بوده و معمولاً کمتر از یک دقیقه است،

۳. واگن‌های مترو همگن‌تر بوده و کنترل بیشتر و بهتری بر روی آنها وجود دارد،

۴. احتمال توقف قطار مترو خارج از ایستگاه‌ها (در فواصل بین ایستگاه‌ها) بسیار کم است؛

۵. کالاهای خطرناک توسط قطارهای مترو جابه‌جا نمی‌شود.

بنابراین در خطوط مترو ارتباط تنگاتنگی میان تونل‌ها و ایستگاه‌های زیرزمینی از نقطه‌نظر ایمنی

وجود دارد. درواقع ایستگاه‌ها دسترسی به قطارها و همچنین تجهیزات را برای تخلیه و نجات در شرایط اضطراری فراهم می‌کنند. قطارهایی که دچار حادثه می‌شوند باید حتی‌الامکان در نزدیک‌ترین ایستگاه متوقف شوند.

سیستم‌های حمل‌ونقل مترو در مقایسه با سایر روش‌های حمل‌ونقل سابقه بهتری از نظر ایمنی بر جای گذاشته‌اند. با این‌حال به‌دلیل تعداد بالای افراد در قطارهای مترو، پتانسیل آسیب درمواقع اضطراری بسیار بالاست. حوادث پیشین رخ داده نظیر حادثه متروی باکوی آذربایجان و متروی دائگوی کره جنوبی (که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفتند)، مثال‌های مناسبی جهت تبیین پتانسیل بالای این سیستم حمل‌ونقل از نظر خسارات در هنگام وقوع حوادث است.

مقاومت قطارهای مترو در برابر آتش نقش اساسی در ایمنی مترو ایفا می‌کند. قطارهای مدرن تنها در صورتی که منبع آتش انرژی بسیار بالایی داشته باشد، نظیر آتش‌سوزی مایعات توسط افراد خرابکار، شعله‌ور می‌شوند. آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس انجام شده نشان داده است که واگن‌های ریلی می‌توانند در صورت وجود منبع جرقه کافی به حداکثر نرخ آزادسازی حرارتی در حدود ۷۵ تا ۸۰ مگاوات نیز برسند. همچنین تحقیقات نشان داده است مدت زمان گسترش آتش به شدت به جنس مواد استفاده شده در واگن‌ها نظیر صندلی‌ها بستگی دارد. نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه آتش‌سوزی واگن‌های قطار در تونل‌های زیرزمینی در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل ۹. آزمایش آتش‌سوزی در یک قطار زیرزمینی

Source: Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel (2012)

۳. روند توسعه دستورالعمل‌های ایمنی در انواع تونل‌ها

۳-۱. تونل‌های جاده‌ای

۳-۱-۱. دستورالعمل‌های ایمنی تونل‌های جاده‌ای تا قبل از سال ۱۹۹۹

اگرچه تا قبل از سال ۱۹۹۹ میلادی ایمنی تونل‌ها مورد توجه عموم مردم نبوده، اما در برخی کشورها به این موضوع پرداخته شده بود. علاوه‌بر تجارب به‌دست آمده از مشاوران، پیمانکاران و اپراتورها، فعالیت‌های پژوهشی نیز برای گسترش دانش پایه و فنی در زمینه آتش‌سوزی تونل‌ها انجام شده بود. با وجود این تنها تعداد محدودی از کشورها قوانین و مقررات را در این زمینه تنظیم کرده بودند.

اکثر فعالیت‌های صورت گرفته برای تولید توصیه‌های بین‌المللی توسط «سازمان جهانی جاده‌ها (PIARC)»[1] انجام شده بود. کمیته فنی PIARC در موضوع عملکرد تونل‌های جاده‌ای در سال ۱۹۵۷ تأسیس شده است. این ارگان غیرسیاسی و غیرانتفاعی درحال حاضر بیش از ۱۰۰ عضو دولتی و ۲ هزار عضو دیگر در ۱۳۰ کشور مختلف دارد. دامنه فنی این کمیته شامل هندسه، تجهیزات، ایمنی، بهره‌برداری و محیط‌زیست تونل‌های جاده‌ای است. این کمیته با جنبه‌های ساختمانی تونل‌ها که به «سازمان بین‌المللی تونل‌ها (ITA)»[2] مرتبط می‌شود، کاری ندارد. از سال ۱۹۹۶ تاکنون هر دو سازمان نام برده در موضوع ضد حریق بودن سازه‌های تونل درحال همکاری با یکدیگر هستند.

۳-۱-۲. دستورالعمل‌های ایمنی تونل‌های جاده‌ای: پیشرفت‌های بعد از سال ۱۹۹۹

۳-۱-۲-۱. در سطح کشورها

به فاصله اندکی پس از آتش‌سوزی تونل مون‌بلان، علاوه‌بر تحقیقات قضایی، تحقیقات فنی توسط دولت‌های فرانسه و ایتالیا ترتیب داده شد که منجر به انتشار دو گزارش ملی و یک گزارش مشترک میان دو کشور شد. ۴۱ توصیه شامل آموزش و اطلاع‌رسانی به کاربران و قوانین سختگیرانه‌تر در مورد ابعاد تونل و قابلیت حریق خودروها جهت بهبود ایمنی تونل مون‌بلان و سایر تونل‌های مشابه منتشر شد.

در فرانسه بررسی تمام تونل‌های طولانی‌تر از یک کیلومتر ظرف مدت سه ماه انجام شد. یک سال بعد یک بخشنامه جدید در مورد ایمنی تونل‌های جاده‌ای منتشر شد که تنها می‌توانست در سطح ایالت اعمال شود. در سال ۲۰۰۲ میلادی قانونی تصویب شد تا فرایندهای مشابه در همه تونل‌ها صرفنظر از مالک آن لازم‌الاجرا باشد. در سوئیس، یک کارگروه تونل، ایمنی کلی تونل‌های جاده‌ای را بررسی کرده و در مورد کاربران، بهره‌برداری، زیرساخت و وسایل نقلیه توصیه‌هایی را ارائه کرد. در سایر کشورهای اروپایی نظیر اتریش و نروژ نیز اقدامات مشابهی صورت پذیرفت.

1. Permanent International Association of Road Congresses
2. International Tunneling and Underground Space Association

۲-۲-۱-۳. در سطح اروپا

به‌منظور هماهنگ‌سازی طرح‌های ملی، مدیران جاده‌های غرب اروپا کارگروهی متشکل از نمایندگان کشورهای آلپ ایجاد کرده و سرانجام در سپتامبر سال ۲۰۰۰ میلادی توصیه‌هایی را تصویب کردند. این کار توسط «کمیسیون اقتصادی سازمان ملل متحد برای اروپا (UNECE)» دوباره و به‌صورت گسترده‌تری آغاز شد. این سازمان که مقر آن در ژنو قرار دارد متشکل از ۵۵ کشور بوده و برخی از توافق‌های اروپایی در زمینه علائم جاده‌ای، ترافیک جاده‌ای، حمل‌ونقل کالاهای خطرناک و غیره را مدیریت می‌کند. کمیته حمل‌ونقل داخلی کمیسیون UNECE گروهی از متخصصان در زمینه ایمنی تونل‌های جاده‌ای را گردهم آورد. گزارش نهایی این گروه که شامل توصیه‌هایی در همه جنبه‌های ایمنی تونل‌های جاده‌ای (شامل کاربران، بهره‌برداری، زیرساخت و خودروها) بود در دسامبر سال ۲۰۰۱ میلادی منتشر شد. این گزارش توسط همه کشورهای عضو تأیید شده و منجر به اصلاحاتی در توافق‌های اروپایی تحت مدیریت UNECE گردید.

پس از درخواست سران کشورها، اتحادیه اروپا نیز در این موضوع ورود کرد. در گام نخست، ایمنی تونل‌ها در پنجمین برنامه چارچوبی برای تحقیق و توسعه (با عنوان «رشد رقابتی و پایدار»[1]) گنجانده شد. در این زمینه بر روی پروژه‌های تحقیقاتی و شبکه‌های موضوعی مهمی سرمایه‌گذاری شد که عبارتند از:

- **FIT**: دستورالعمل‌ها و پایگاه‌های داده (۲۰۰۵-۲۰۰۱)،
- **DARTS**: طراحی جدید بادوام و مقرون به‌صرفه (۲۰۰۴-۲۰۰۱) ،
- **Safe Tunnel**: اقدامات ایمنی پیشگیرانه (۲۰۰۴-۲۰۰۲)،
- **Sirtaki**: مدیریت تونل پیشرفته (۲۰۰۴-۲۰۰۲)،
- **Virtual Fires**: شبیه‌ساز آتش در تونل‌ها (۲۰۰۴-۲۰۰۲)،
- **UPTUN**: ارتقای تونل‌های موجود، نوآوری (۲۰۰۶-۲۰۰۲)؛
- **SafeT**: دستورالعمل‌های اروپایی هماهنگ (۲۰۰۶-۲۰۰۳).

در گام دوم، اتحادیه اروپا تصمیم گرفت تا بخشنامه‌ای[2] در زمینه «حداقل الزامات ایمنی» برای تونل‌ها در شبکه جاده‌های اروپایی تنظیم کند. این بخشنامه در واقع یک سند قانونی بود که پس از تصویب، اجرای آن در همه کشورهای عضو اجباری شد. این دستورالعمل در سال ۲۰۰۴ میلادی با شماره ۲۰۰۴/۵۴/EC به تصویب پارلمان و شورای اروپا رسید. کشورهای عضو باید با استفاده از این بخشنامه، قوانین ایمنی تونل‌های جاده‌ای را در داخل کشور به تصویب و اجرا برسانند.

1. Competitive and Sustainable Growth
2. Directive

۳-۲-۱-۳. در سطح بین‌المللی

پس از آتش‌سوزی‌های سال ۱۹۹۹ میلادی، کمیته فنی PIARC در زمینه عملکرد تونل‌های جاده‌ای، تصمیم گرفت تا تأکید بیشتری بر ایمنی در تونل‌ها داشته باشد. کارگروه‌های تشکیل شده توسط PIARC گزارش‌های زیر را تولید کرده‌اند:

۱. کارگروه ۱ (بهره‌برداری): گزارشی در مورد «مثال‌های عملکرد خوب در زمینه بهره‌برداری و نگهداری از تونل‌های جاده‌ای»،

۲. کارگروه ۲ (آلودگی، تهویه و محیط‌زیست): گزارشی در مورد «انتشار خودروها و احتیاج به هوا برای تونل‌های جاده‌ای»،

۳. کارگروه ۳ (عوامل انسانی ایمنی): بروشور در زمینه «رانندگی ایمن در تونل‌های جاده‌ای» تهیه شده توسط کمیسیون اروپا،

۴. کارگروه ۴ (سیستم‌های ارتباطی و هندسه): گزارشی در مورد «سیستم‌های مدیریت حوادث ترافیکی استفاده شده در تونل‌های جاده‌ای» و «طراحی سطح مقطع برای تونل‌های جاده‌ای دو طرفه»،

۵. کارگروه ۵ (کالاهای خطرناک): نهایی کردن مدل‌های ارزیابی کمی خطرات و پشتیبانی تصمیم‌گیری که به‌طور مشترک با OECD[1] (سازمان توسعه و همکاری اقتصادی) توسعه داده شده است؛

۶. کارگروه ۶ (کنترل آتش و دود): گزارشی در مورد «سیستم‌ها و تجهیزات کنترل دود و آتش در تونل‌های جاده‌ای».

همچنین در چارچوب همکاری دو سازمان ITA و PIARC در زمینه ضد حریق بودن سازه‌های تونل، ITA گزارشی را با عنوان «دستورالعمل‌ها برای ضد حریق بودن سازه‌ها در تونل‌های جاده‌ای» منتشر کرده است.

۳-۲. تونل‌های ریلی و مترو

۳-۲-۱. دستورالعمل‌های ایمنی برای تونل‌های ریلی و مترو

تا قبل از حدود سال ۲۰۰۰ میلادی تعداد بسیار محدودی از الزامات مخصوص ایمنی تونل‌های ریلی در قوانین ملی کشورها موجود بود. درواقع به‌طور کلی ایمنی در سیستم‌های ریلی بیشتر از جاده‌ها بوده و تونل‌های ریلی نیز بخش خطرناک ویژه‌ای از سیستم ریلی محسوب نمی‌شوند. قوانین ایمنی اعمال شده بر روی کل سیستم حمل‌ونقل ریلی خود به خود ایمنی را در تونل‌های ریلی نیز بهبود می‌بخشد. این موضوع در مورد تونل‌های مترو نیز صادق بوده و قوانین ملی بسیار اندکی به‌طور خاص با ایمنی تونل‌های مترو سر و کار دارند. این وضعیت در مورد ایستگاه‌های مترو کمی متفاوت بوده و ایستگاه‌ها عموماً تحت

1. Organization for Economic Co-operation and Development

تأثیر قوانین مرتبط با ساختمان‌های عمومی هستند. در اصل احتمال توقف قطار در تونل و نه در ایستگاه بسیار اندک بوده و حتی در چنین مواردی، ایستگاه مسیرهای تخلیه را تأمین می‌کند.

۱-۱-۲-۳. هماهنگ‌سازی اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن

اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن (UIC) واقع در فرانسه، سازمان اصلی راه‌آهن در جهان است. این سازمان «بروشورهایی»[1] را منتشر می‌کند که گرچه الزام قانونی ندارند، اما جدیدترین فناوری‌ها و دستاوردها را معرفی می‌کنند. در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۲ میلادی یک گروه کاری شامل ۱۴ مدیر زیرساخت‌های راه‌آهن و بهره‌برداران، یک بروشور در مورد ایمنی در تونل‌های ریلی تنظیم کردند که در آگوست سال ۲۰۰۳ میلادی تحت عنوان «UIC-Codex 779-9 R» چاپ شد. این بروشور تونل‌های جدید و موجود بالای یک کیلومتر (تونل‌های کوتاه‌تر از ۱۵ کیلومتر) و با ترافیک مختلط مسافر و بار را پوشش می‌دهد. این بروشور درواقع مجموعه‌ای از بیش از ۵۰ اقدام در زمینه زیرساخت‌ها، وسایل حمل‌ونقل ریلی و بهره‌برداری است. هر اقدام با جزئیات و با توجه به هزینه و فایده توضیح داده شده و درنهایت منجر به توصیه‌هایی شده است که تمایز میان تونل‌های موجود و تونل‌های جدید را نیز لحاظ کرده است.

۲-۱-۲-۳. گروه کارشناسان متخصص UNECE

پس از نهایی شدن گزارش ایمنی تونل‌های جاده‌ای در سال ۲۰۰۱ میلادی که در بخش۲-۲-۱-۳ بیان شد، کمیسیون UNECE بار دیگر گروهی از متخصصان را این بار برای بررسی ایمنی در تونل‌های ریلی تشکیل داد. این گروه فعالیت خود را به خطوط ریلی اصلی سنگین که در مسیرهای بین‌المللی و بین کشورهای اروپایی وجود دارد، معطوف کرد. توصیه‌های این گروه در دسامبر سال ۲۰۰۳ میلادی نهایی شده و به کمیته حمل‌ونقل داخلی UNECE فرستاده شد.

این گزارش برای تونل‌های جدید مجموعه‌ای از بهترین روش‌های موجود (نظیر آنچه در بروشور UIC بود) را تهیه کرده و در ضمن ۱۹ اقدام را به‌عنوان حداقل استاندارد ایمنی قابل اجرا در کشورهای عضو مشخص کرده است. برای تونل‌های موجود نیز توصیه‌هایی با هدف کاهش خطرات تصادفات ارائه شده است.

۳-۱-۲-۳. مشخصات فنی برای سازگارمندی

«سازمان اروپایی برای سازگارمندی راه‌آهن (AEIF)» طرح «مشخصات فنی برای سازگارمندی» را در زمینه ایمنی تونل‌های راه‌آهن آغاز کرد. درواقع این سازمان توسط کمیسیون اروپا موظف به وضع این مشخصات فنی شده است. این سازمان نمایندگان مدیران زیرساخت‌ها، شرکت‌های راه‌آهن و صنایع را گردهم جمع کرده است. این سازمان درواقع به‌صورت مشترک توسط UIC، UNIFE (اتحادیه صنایع راه‌آهن اروپا) و UITP (اتحادیه بین‌المللی حمل‌ونقل عمومی) تأسیس شده و توسط اتحادیه اروپا حمایت می‌شود.

---

1. Leaflets

۳-۳. مسیر توسعه دستورالعمل‌ها

اگرچه نگرانی در مورد ایمنی در تونل‌ها تنها به‌دنبال آتش‌سوزی‌های شدید حوالی سال ۲۰۰۰ میلادی آغاز نشده است، اما این فجایع به‌دلیل درگیری افکار عمومی و رهبران سیاسی منجر به وفور طرح‌های مختلفی شده است. اولین و مهم‌ترین اقدامات، مربوط به تونل‌های جاده‌ای بوده است. علاوه‌بر کارهای بین‌المللی قبلی توسط PIARC، ITA و OECD اقدامات جدیدی در بسیاری از کشورها انجام شده و پروژه‌های پژوهشی و شبکه‌های موضوعی توسط اتحادیه اروپا راه‌اندازی شده است. برای جلوگیری از ناهماهنگی بین کشورها، هماهنگی مقررات و توصیه‌ها دنبال شده و تا حدی نیز حاصل شده است که در درجه اول به‌دلیل فعالیت گروه کارشناسان متخصص در زمینه ایمنی تونل‌های جاده‌ای (ایجاد شده توسط کمیسیون UNECE) بوده است. این فعالیت‌ها منجر به انتشار یک بخشنامه در زمینه «حداقل الزامات ایمنی در تونل‌های جاده‌ای» توسط پارلمان و شورای اروپا با شماره ۲۰۰۴/۵۴/EC شده است.

تحولات مشابهی برای تونل‌های ریلی نیز رخ داده است. در وهله اول، سازمان‌های راه‌آهن به‌صورت مشترک بر روی توصیه‌های ایمنی کار کردند که نتایج حاصل در بروشور UIC (UIC-Codex 779-9 R) منتشر شد. کار آنها به‌عنوان مبنایی برای گروهی از کارشناسان متخصص در زمینه ایمنی تونل‌های ریلی که توسط کمیته حمل‌ونقل داخلی کمیسیون UNECE گرد هم آمدند، مورد استفاده واقع شد. این گروه متخصص در هایت توصیه‌ها و استانداردهایی را به‌عنوان حداقل استانداردهای ایمنی در تونل‌های ریلی جدید منتشر کردند. گام دیگری نیز در یک گروه‌کاری AEIF صورت پذیرفت که هدف آن ارائه مشخصات فنی برای سازگارمندی خطوط ریلی اروپا از نظر ایمنی بود.

دستورالعمل‌های کنونی و آینده به سمت اهداف ایمنی مشترک همگرا بوده و نه تنها زیرساخت‌ها، بلکه کل سیستم متشکل از کاربران، بهره‌برداری، زیرساخت و وسایل نقلیه را در نظر می‌گیرند. این رویکرد جامع با حرکت دستورالعمل‌های ایمنی از قوانین کاملاً تجویزمحور به سمت رویکردهای عملکردمحور، حداقل به‌عنوان یک مکمل، همراه خواهد شد. در بسیاری از موارد ابزار و تفکرات هنوز برای طراحی کاملاً مبتنی‌بر عملکرد آماده نشده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم جدید، پیاده‌سازی روش‌های اجباری با هدف اطمینان از ایمنی یک تونل در هنگام افتتاح و پس از آن است که این مهم از طریق بازرسی‌های منظم سازه و عملکرد قابل حصول است. همچنین تونل‌های موجود نیز باید بررسی شده و حداقل استانداردها نیز رعایت شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

باید توجه داشت اگرچه نرخ وقوع تصادفات جاده‌ای به مراتب بیشتر از تصادفات و حوادث اتفاق افتاده در تونل‌هاست، اما عواقب آتش‌سوزی در تونل بسیار شدیدتر از نتایج مربوط به آتش‌سوزی در محیط‌های

باز است. در گذشته فجایع وحشتناکی در تونل‌های جاده‌ای (نظیر حادثه تونل مون‌بلان) و تونل‌های ریلی (نظیر حادثه آتش‌سوزی متروی باکوی آذربایجان) رخ داده است. کارشناسان همواره تلاش کرده‌اند تا با بررسی دقیق حوادث گذشته از درس‌آموخته‌های آن در جهت بهبود ایمنی و ارتقای استانداردها در طراحی و ساخت تونل‌های جدید و بهبود تونل‌های پیشین استفاده کنند.

اگرچه موضوع ایمنی زیرساخت‌های زیرزمینی یک مبحث نسبتاً رشد یافته است اما از طرفی بسیار ناهمگون است. از یک سو زیرساخت‌های مرسوم زیرزمینی نظیر تونل‌های جاده‌ای و ریلی به خوبی ارزیابی شده و استانداردهای مناسب و راه‌حل‌های فنی جهت طراحی، ساخت و عملکرد آنها در دسترس است. ازسوی دیگر سطح، فرهنگ و استانداردهای ایمنی شدیداً از یک کشور به کشور دیگر و از یک کاربر به کاربر دیگر متفاوت است. درواقع تا قبل از حدود سال ۲۰۰۰ میلادی ایمنی تونل‌ها چندان مورد توجه عموم مردم نبوده و تنها در برخی کشورها و سازمان‌های بین‌المللی به این موضوع پرداخته شده بود. اکثر فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه ایمنی تونل‌های جاده‌ای تا آن زمان توسط سازمان جهانی جاده‌ها انجام شده بود.

پس از حدود سال ۲۰۰۰ میلادی و به‌دنبال وقوع برخی فجایع در تونل‌های جاده‌ای و تونل‌های ریلی، تحقیقات فنی در زمینه ایمنی تونل‌ها گسترش یافت. در سطح اروپا، کمیته حمل‌ونقل داخلی کمیسیون اقتصادی سازمان ملل متحد برای اروپا (UNECE) به همراه اتحادیه اروپا و در سطح بین‌المللی کمیته فنی سازمان جهانی جاده‌ها و اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن، به تحقیق و پژوهش در زمینه ایمنی انواع تونل‌های جاده‌ای و ریلی پرداختند. ماحصل فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه ایمنی تونل‌های جاده‌ای را می‌توان بخشنامه اتحادیه اروپا در زمینه «حداقل الزامات ایمنی» برای تونل‌های جاده‌ای در شبکه جاده‌های اروپایی دانست. همچنین در زمینه تونل‌های ریلی نیز اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن بروشورهایی را در مورد ایمنی در تونل‌های ریلی تنظیم کرد که در آگوست سال ۲۰۰۳ میلادی چاپ شدند. البته شاید بتوان جامع‌ترین فعالیت صورت گرفته در زمینه ایمنی تونل‌های ریلی را مربوط به گزارش منتشر شده توسط UNECE در دسامبر سال ۲۰۰۳ میلادی دانست.

در گزارش حاضر به جزئیات دستورالعمل‌های ایمنی پرداخته نشد، ولی اصولی کلی ایمنی در انواع تونل‌ها با توجه به فعالیت سازمان‌های فوق‌الذکر بیان شد. به‌طور کلی می‌توان گفت نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که عوامل اثرگذار بر ایمنی تونل‌ها را می‌توان در ۴ دسته اصلی زیر بررسی کرد:

۱. کاربران تونل،
۲. نوع عملکرد تونل،
۳. زیرساخت‌ها،
۴. وسایل نقلیه.

علاوه‌بر این بررسی‌ها نشان داده است که سطح اثرگذاری و کارایی همه اقدامات ایمنی با یکدیگر یکسان نیست. درواقع اقدامات مرتبط با پیشگیری از وقوع تصادفات و کاهش آثار آن به مراتب کاراتر از اقدامات بعدی مربوط به تخلیه تونل و عملیات امدادرسانی است. دستورالعمل‌های کنونی و آینده نه تنها زیرساخت‌ها، بلکه کل سیستم متشکل از کاربران، بهره‌برداری، زیرساخت و وسایل نقلیه را در نظر می‌گیرند. این رویکرد جامع با حرکت دستورالعمل‌های ایمنی از قوانین کاملاً تجویزمحور به سمت رویکردهای عملکردمحور، حداقل به‌عنوان یک مکمل، همراه خواهد شد.

منابع و مآخذ

1. M. Perard, "Statistics on breakdowns, accidents and fires in French road tunnels", *Proceeding of 1st International Conference on Tunnel Incident Management*, Korsør, Denmark, , 1996.
2. F. Ruckstuhl, "Accident statistics and accident risks in tunnels", *Report on the OECD seminar on road tunnel management*, Lugano, Switzerland, 1990.
3. K. Pucher and R. Pucher, "Fire in the Tauern tunnel", *International Tunnel Fire and Safety Conference*, 1999.
4. G. Eberl, "The Tauern tunnel incident. What happened and what has to be learned", *Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, held Madrid, Spain, 2-6 April 2001.
5. D. Lacroix, "The Mont Blanc tunnel fire. What happened and what has been learned", *Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, held Madrid, Spain, 2-6 April 2001.
6. L. Poon and R. Lau, "Fire risk in metro tunnels and stations", *International Journal of Performability Engineering*, vol. 3, no. 3, 2007.
7. T. Andersen and B. J. Paaske, "Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept" Delft University, Netherlands, 2002.
8. A. Lönnermark, A. Claesson, J. Lindström, Y. Z. Li, M. Kumm, and H. Ingason, "Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel", 2012.

مرکز پژوهش‌ها
مجلس شورای اسلامی

شناسنامه گزارش	شماره مسلسل: ۱۶۹۳۳

عنوان گزارش: ایمنی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی ۱. مبانی و عوامل مؤثر بر ایمنی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی

نام دفتر: مطالعات زیربنایی (گروه مسکن و شهرسازی)
تهیه و تدوین‌کنندگان: بیژن فرهانیه، علی مصطفی‌زاده ابوالمعالی، علی کاظمی‌پور پاپکیاده، امید ادیبی، اسماعیل محمدیان
ناظران علمی: حسین افشین، محمدتقی فیاضی
اظهارنظرکننده: سارا حمیدپور
ویراستار تخصصی: ـــــ
ویراستار ادبی: ـــــ

واژه‌های کلیدی:
۱. ایمنی
۲. آتش‌سوزی
۳. تونل جاده‌ای
۴. تونل ریلی
۵. بخشنامه
۶. دستورالعمل

تاریخ انتشار: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱