

## خطرها و تهدیدهای محتمل بر تونل‌های درون‌شهری در حین بهره‌برداری

مهدی آشتیانی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران  
امیرعلی مصطفوی مقدم، دانش آموخته دکتری، شرکت مهندسی مشاور Hatch، ونکوور، بریتیش کلمبیا، کانادا  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.ashtiani@nit.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۳/۰۱ - پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵

صفحه ۴۴-۲۵

### چکیده

امروزه در شهرهای بزرگ، متروها و تونل‌های شهری به عنوان یکی از کلیدی‌ترین و مهمترین اجزای شبکه حمل و نقل شهری و زیرساخت‌های آن به شمار می‌آیند. احداث این نوع زیرساخت‌ها در کشورهای توسعه یافته و حصول نتایج مناسب از بکارگیری آن‌ها در کاهش مشکلات حمل و نقل شهری، لزوم توجه به استفاده گسترده از این مستحذات را در کشورهای در حال توسعه اجتناب ناپذیر می‌نماید. از طرفی، طراحی و اجرای چنین پروژه‌های عظیمی در داخل کشور که هزینه قابل توجهی برای ساخت آن صرف می‌شود، همواره ممکن است با خطرات و تهدیدهایی همراه باشد. این خطرات و تهدیدها همواره به عنوان یکی از اصلی‌ترین چالش‌های حرفه تونلسازی در هر سه فاز طراحی، اجرا و بهره‌برداری محسوب شده و برای نیل به پیشرفت و توسعه پایدار در زمینه ساخت و نگهداری سازه‌های زیرزمینی، بایستی مطالعه ایمنی و ارزیابی ریسک ناشی از وقوع آن‌ها به جد مدنظر قرار گیرد. در این خصوص، اولین گام شناسایی این نوع خطرات و تهدیدها و بررسی تبعات وقوع آن‌ها بر تونل‌های درون‌شهری است. در فاز بهره‌برداری، مطالعه و بررسی انواع خطرات و تهدیدهای مترتب بر تونل‌های درون‌شهری نشان می‌دهد که خطرانی از قبیل آتش‌سوزی (غیر عمدی)، تصادف وسائط نقلیه، ورود آب‌های سطحی و سیلاب، زلزله و عدم توجه به بحث تعمیر و نگهداری و همچنین تهدیدهایی از قبیل انفجار، انتشار عوامل شیمیایی، بیولوژیکی، رادیواکتیویته، حملات سایبری، آتش‌سوزی (عمدی) و عملیات‌های خرابکارانه را بایستی در مبحث مدیریت ریسک و تأمین ایمنی تونل‌های درون‌شهری لحاظ نمود.

واژه‌های کلیدی: ایمنی، تونل‌های درون‌شهری، تهدید، ریسک، خطر

### ۱- مقدمه

تونل‌ها، این امکان همچنان وجود خواهد داشت که در نتیجه وقوع خطرات و تهدیدهای احتمالی حین اجرا و بهره‌برداری، آسیب‌ها و خرابی‌هایی متوجه تونل گردیده و یا زندگی کاربران آن را به مخاطره اندازد. در نتیجه، وقوع این خطرات و یا حتی اشتباهات ممکن است پیامدهای سنگینی را برای سرمایه‌گذاران و کارفرمایان، در زمان ساخت و یا در مرحله بهره‌برداری به همراه داشته باشد. از این‌رو، تمامی تلاش‌ها باید در جهت پرهیز از خطرات و یا به حداقل رساندن پیامدهای آن‌ها صورت

نیاز به بهره‌گیری از زیرساخت‌های جدید در شهرهای پرجمعیت و همچنین لزوم افزایش کیفیت زندگی در مناطق شهری، ضرورت ساخت تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی را نمایان می‌سازد (Vrouwenvelder and Krom, 2004). هر چند، معمولاً فرآیند احداث تونل‌ها در محیط‌های شهری به گونه‌ایست که از نظر زیست‌محیطی مشکلات چندانی را برای شهر ایجاد نمی‌کنند، اما ساخت آن‌ها مستلزم صرف هزینه‌های گزاف است. در این خصوص، با فرض رعایت موارد ایمنی در

پذیرد. بنابراین، شناخت، ارزیابی، مدیریت و کنترل عوامل خطرزا که در اغلب موارد، امکان وقوع و همچنین تخمین بزرگای آن‌ها با عدم قطعیت بالایی همراه است، بایستی به جد مورد توجه قرار گیرد. یک روش مؤثر برای انجام این کار، استفاده از تجربیات کسب شده مشابه در موارد واقعی قبلی است. خطر<sup>۱</sup> به معنای عام عبارت است از وقوع هرگونه شرایط یا وضعیتی که پتانسیل عواقب ناخواسته و غیر عمدی (ناشی از حوادث طبیعی و یا ناشی از اشتباهات انسانی) از جمله رخداد خسارت‌های جانی و مالی، زیست محیطی، اقتصادی و تأخیر در پروژه را به دنبال داشته باشد. در این خصوص، انجام هر نوع عملیات عمرانی زیرسطحی درون شهری، ممکن است وقوع انواع مختلفی از خطر را در حین زمان ساخت و اجرا و همچنین طی دوران بهره‌برداری، به همراه داشته باشد که نوع و پتانسیل وقوع این خطرات می‌تواند برای هر پروژه متفاوت باشد. لذا، با توجه به انواع خطرپذیری این نوع عملیات، می‌توان بیان نمود که انسان‌ها، زیرساخت‌ها و همچنین محیط زیست، در معرض خطرات ناشی از این نوع عوامل قرار دارند. همچنین، تهدید<sup>۲</sup> به عنوان یک عامل عمدی تلقی می‌شود که با یک برنامه از پیش تعیین شده و به منظور آسیب رساندن و تحمیل خرابی و خسارت بر روی سازه‌ها و زیرساخت‌ها صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، تهدید معلول تلاش‌های هماهنگ و از پیش برنامه‌ریزی شده شخص، گروه و یا گروه‌هایی است که در جهت نیل به اهداف جنایتکارانه و تروریستی خود صورت می‌دهند. عواقب این تهدیدها ممکن است شامل به خطر افتادن سلامت افراد، از دست رفتن عملکرد سازه و زیرساخت‌ها، مختل شدن حمل و نقل عمومی و پیامدهای مخرب دیگر باشد. با بررسی‌های انجام شده در ادبیات فنی می‌توان پی برد که از سال ۱۹۹۰ تاکنون اغلب مخاطرات و تهدیدهای بوجود آمده در دوران بهره‌برداری از تونل‌ها در نتیجه عدم شناخت ناشی از وضعیت آب‌های زیرزمینی و سطحی، زلزله، آتش‌سوزی و عملیات خرابکارانه بوده که منجر به بروز آسیب به بخش‌هایی از محور تونل و یا عدم سرویس‌دهی تونل در یک دوره زمانی شده است. سیل در تونل حمل‌بار شیکاگو آمریکا در سال ۱۹۹۲، آتش‌سوزی در تونل Great Belt Link دانمارک در سال ۱۹۹۴، وقوع

گسیختگی در تونل آناتولیا ترکیه در سال ۱۹۹۹ ناشی از فعال شدن یک گسل در مجاورت آن و بمب‌گذاری انتحاری در داخل ایستگاه مترو مسکو در سال ۲۰۰۴، از جمله مثال‌های واقعی در این ارتباط می‌باشند (NCHRP, 2008; Wannick, 2006). در این ارتباط، بایستی اشاره نمود که در سالیان اخیر تعداد تونل‌های درون‌شهری در کشور افزایش یافته و به تبع آن، احتمال وقوع خطرات و تهدیدها برای این تونل‌ها در زمان بهره‌برداری نیز افزایش داشته است. لذا، در این مقاله سعی شده است بررسی نسبتاً جامعی بر روی خطرات و تهدیدهای محتمل برای تونل‌ها در مرحله سرویس‌دهی تونل انجام پذیرد. از این رو، با تبیین و شناسایی خطرات و تهدیدهای مترتب بر تونل‌ها در گام اول، می‌توان انتظار داشت که ارزیابی ریسک فضاهای زیرسطحی به درستی انجام شده و با پیش‌بینی برنامه عملیاتی برای هر یک از خطرات و تهدیدها، پیامدهای منفی آن‌ها را به حداقل رساند.

## ۲- انواع خطرها و تهدیدهای محتمل بر تونل‌های درون شهری

تمامی خطرات و تهدیدهای معرفی شده در این مقاله، در صورت وقوع اثرات منفی بر روی عملکرد تونل‌ها و زیرساخت‌های وابسته به آن خواهند داشت. تونل و زیرساخت‌های مرتبط با آن شامل تمامی اجزای سازه‌ای و سیویل و همچنین اجزای غیرسازه‌ای نظیر تمامی تجهیزات الکتریکی و مکانیکی داخل فضای تونل از قبیل تهویه و سیستم اطفاء حریق و ... می‌باشند. در ادامه آن دسته از خطرات و تهدیدهایی که ممکن است در طول دوران بهره‌برداری برای تونل‌ها رخ دهند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۲-۱- تقسیم‌بندی خطرات و تهدیدها

همانطور که از شواهد و تجربیات مرتبط با بهره‌برداری تونل‌ها پیداست، این احتمال وجود دارد که بنا به دلایل مختلفی، تونل‌ها در مرحله بهره‌برداری، با خطرات و یا تهدیدهایی مواجه شوند که سلامت و عملکرد آن‌ها را به مخاطره اندازد. همچنین، باید اشاره نمود که وقوع برخی از

به منظور پدیدار شدن هر نوع آتش‌سوزی، حضور سه پارامتر حتمی خواهد بود: سوخت، اکسیژن و منبع اشتعال. در تمامی تونل‌ها، هر یک از پارامترهای مذکور تا اندازه‌ای وجود داشته، به نحوی که نمی‌توان ریسک ناشی از آن‌ها را بطور کامل منتفی دانست. در سال‌های اخیر، آتش‌سوزی‌های متعددی در تونل‌ها رخ داده است که تبعات و خسارات بسیار سنگینی را چه برای تونل و چه برای استفاده‌کنندگان آن به همراه داشته است. شکل ۱ نمونه‌ای از خسارات بجای مانده از وقوع آتش‌سوزی در داخل تونل Mont Blanc (سال ۱۹۹۹) در مرز فرانسه و ایتالیا را نشان می‌دهد.



شکل ۱. اثرات بجای مانده از وقوع آتش‌سوزی کامیون در تونل

(Lonnermark, 2005) Mont Blanc

بررسی‌ها نشان می‌دهند اگرچه اکثر آتش‌سوزی‌های بزرگ بدلیل بروز تصادف داخل تونل‌ها بوجود آمده‌اند، اما این عامل دلیل اصلی آتش‌سوزی داخل این تونل‌ها نیست. آمارها نشان می‌دهند که اغلب آتش‌سوزی‌های رخ داده داخل تونل‌ها بدلیل

خطرات معرفی شده در این مقاله، چه در مرحله اجرا و چه در فاز بهره‌برداری محتمل است. نکته‌ی حائز اهمیت دیگری که در این بخش باید به آن اشاره کرد این است که یکی از نگرانی‌های عمده در مبحث خطرات و تهدیدها، وقوع آتش‌سوزی بوده که در بحث خطرات به عنوان رخداد حریق غیرعمدی و در بحث تهدیدها در زمره اقدام به خرابکاری (آتش‌سوزی عمدی) طبقه‌بندی گردیده است. این تمایز به این خاطر بوده که هرچند عواقب و پیامدهای هر یک از این دو برای تونل مشابه است، اما نحوه مواجهه و برنامه اجرایی برخورد با این دو نوع رویداد، با یکدیگر متفاوت می‌باشد.

## ۲-۲- انواع خطرات محتمل بر تونل‌ها در فاز

### بهره‌برداری

از جمله خطرانی که ممکن است تونل‌ها را در زمان بهره‌برداری تحت تأثیر قرار دهد می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

الف- آتش‌سوزی (غیرعمدی)

ب- نشت و تخلیه مواد شیمیایی خطرناک

ج- خطرات ناشی از تصادف وسائط نقلیه

د- ورود آب‌های سطحی و سیلاب

ه- اثرات زلزله روی تونل

و- انتشار گازها

ز- عدم توجه به امر تعمیر و نگهداری تونل‌ها

که در ادامه به تشریح هر یک از موارد فوق پرداخته می‌شود.

## ۲-۲-۱- آتش‌سوزی (غیرعمدی)

مروری بر سوابق آتش‌سوزی‌های رخ داده در داخل تونل‌هایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نشان می‌دهد که وقوع آتش‌سوزی‌های غیرعمدی در داخل آن‌ها بسیار محتمل‌تر از نوع عمدی آن است. آتش‌سوزی ممکن است سازه تونل و یا وسائط نقلیه داخل آن را دچار آسیب نموده و در صورتی که کنترل نشود، سلامت افراد داخل تونل را به مخاطره اندازد. حتی این امکان وجود دارد که در نتیجه وقوع آتش‌سوزی‌های بزرگ گسیختگی‌های کلی در سازه تونل رخ داده و آن را کاملاً تخریب نماید.

مترو، وجود ازدحام بالای مسافری است. مثال‌هایی از وقوع آتش‌سوزی‌های بزرگ در تونل‌های مترو عبارتند از:

- ایستگاه King Cross، انگلستان، سال ۱۹۸۷، آتش‌سوزی پله برقی، ۳۱ نفر کشته
- مترو باکو، آذربایجان، سال ۱۹۹۵، بروز نقص الکتریکی، ۳۰۰ نفر کشته
- مترو Daegu، کره جنوبی، سال ۲۰۰۳، آتش‌سوزی عمدی، ۱۹۴ نفر کشته

بایستی یادآور شد که وقوع هر نوع آتش‌سوزی همواره با تولید گرما، دود و مواد سمی همراه بوده که می‌تواند موجب آسیب رساندن به سازه و تجهیزات داخل تونل و افراد داخل آن گردد. در واقع در هنگام آتش‌سوزی، گرما عامل اصلی آسیب به سازه و تأسیسات داخل تونل بوده، در حالی که به ندرت دلیل اصلی مرگ انسان‌ها است. در این خصوص، عواملی که سلامت افراد داخل تونل را به صورت جدی تهدید می‌نماید، کاهش دید در نتیجه انتشار دود در محیط و همچنین استشمام گازهای سمی تولید شده در اثر آتش‌سوزی است (FIT, 2001a,b). همچنین، شدت و نوع ترکیبات شیمیایی دود ایجاد شده بر اثر آتش‌سوزی به نوع ماده سوختنی بستگی دارد. حجم دود تولید شده نیز به وسعت ناحیه آتش‌سوزی و همچنین ابعاد مقطع عرضی تونل - بخصوص ارتفاع تونل از سقف تا کف - وابسته است. در ادامه این مبحث، خطرات تهدیدکننده سلامت انسان‌ها در نتیجه وقوع آتش‌سوزی در داخل تونل که شامل کاهش وسعت دید، انتشار گازهای سمی و همچنین گرمای ناشی از آتش‌سوزی می‌باشند تشریح می‌گردند.

#### کاهش دید

ماهیت دود به گونه‌ای است که انتشار آن در محیط، باعث کاهش وسعت دید انسان و در نتیجه احتمال تصادف وسائط نقلیه با یکدیگر و یا با جداره تونل و یا موجب بروز مشکل در یافتن راه‌های فرار جهت خروج از محل آتش‌سوزی می‌شود. اثرات کاهش دید ممکن است در محلی دور از نقطه شروع آتش‌سوزی نیز محسوس باشد (Sturm et al., 2017).

بروز نقص فنی در تجهیزات الکتریکی و مکانیکی خودروها نظیر بالا رفتن بیش از حد درجه حرارت سیستم موتور و یا سیستم ترمز آن‌ها است (FIT, 2001b). بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهند که آتش‌سوزی‌های ثبت شده در تونل‌ها از حدود ۲۰ دقیقه تا ۴ روز به طول انجامیده‌اند. مدت زمان تداوم اکثر این نوع آتش‌سوزی‌ها بین ۳-۲ ساعت بوده است؛ اگرچه، چندین آتش‌سوزی نیز وجود دارند که برای کنترل و اطفاء آن‌ها مدت زمانی به مراتب بیش از ۳ ساعت صرف شده است (Lonnermark, 2005).

در ارتباط با وقوع آتش‌سوزی در تونل‌های مترو باید اشاره داشت که این قبیل حوادث، نسبت به آتش‌سوزی در تونل‌های ماشین‌رویی که تردد وسائط نقلیه سنگین حامل بار در داخل آن‌ها محدودیتی نداشته باشد، به مراتب با شدت کمتری اتفاق می‌افتند. از دلایل متداول آتش‌سوزی در تونل‌های مترو می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- بی‌دقتی مسافران در استفاده و یا جابجایی مواد اشتعال‌زا داخل مترو
  - از خط خارج شدن قطار و برخورد آن با سایر قطارها یا جداره تونل
  - بروز نقص الکتریکی در سیستم‌های راهبری، نیروی محرکه و روشنایی و یا نقص در سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی داخل واگن‌ها
  - بروز نقص مکانیکی در واگن‌ها نظیر سیستم ترمزها
  - بروز آتش‌سوزی عمدی
- یکی از عوامل تأثیرگذار بر افزایش شدت آتش‌سوزی در تونل‌های مترو، فاصله کوتاه بین ایستگاه‌های مترو است که این امر می‌تواند سبب گسترش آتش‌سوزی از داخل تونل به ایستگاه‌ها و یا از ایستگاهی به ایستگاه دیگر گردد. به عبارت دیگر، اکثر ایستگاه‌های مترو در زیرزمین واقع شده و این ایستگاه‌ها اغلب یکی از راه‌های دسترسی به مراکز خرید و ساختمان‌های دیگر می‌باشند. برای این نوع از شریان‌های دسترسی، یکی از خطرات متداول، شروع آتش‌سوزی از محل ایستگاه‌ها و تأسیسات مجاور و گسترش آن به محدوده مترو و یا سایر ایستگاه‌های مجاور است. مشکل دیگر در تونل‌های

است. استنشاق گازهای مخدر باعث تنگی نفس و در موارد شدیدتر، سبب مرگ فرد می‌گردد. این نوع گازها به سیستم عصبی بدن حمله نموده و سبب کاهش هوشیاری، مسمومیت و کاهش توانایی افراد در خروج از محل آتش‌سوزی می‌شوند. از این‌رو، در معرض قرارگیری بیش از حد (در بعضی موارد تا چند دقیقه) فرد با این نوع گازها، می‌تواند موجب از دست رفتن هوشیاری و در نهایت مرگ انسان گردد. استنشاق گازهای محرک نیز باعث آسیب به چشم‌ها، بینی، گلو و شش‌ها می‌گردد. علائم این نوع گازها بر روی بدن بصورت سوزش‌های کم تا شدید بافت‌های هر یک از اعضای مذکور نمایان می‌گردد.

در زمان وقوع آتش‌سوزی و وجود دود داخل تونل، سطوح مختلف گازهای مذکور (یعنی غلظت‌های متفاوت گازها) بسته به عواملی از قبیل میزان سلامتی فرد، وزن بدن، سن و سطح فعالیت فرد، می‌توانند بر روی سلامتی افراد واقع در تونل تأثیر بگذارند. پیامد اثرات این گازها بر روی انسان‌ها می‌تواند از بروز سردرد تا حتی مرگ متفاوت باشد. جدول ۱ حداقل میزان غلظت گازهای آزاردهنده برای تحت تأثیر قرار دادن افراد و محدود نمودن فرار آن‌ها از محل آتش‌سوزی را نشان می‌دهد (Purser, 2002).

جدول ۱. حداقل میزان غلظت گازهای آزاردهنده برای محدود

نمودن فرار افراد از محل آتش‌سوزی (Purser, 2002)

میزان موردنیاز برای ایجاد خروج افراد* (ppm)	میزان موردنیاز برای ایجاد اختلال در خروج افراد* (ppm)	گازهای سمی
۹۰۰	۲۰۰	HCl
۹۰۰	۲۰۰	HBr
۹۰۰	۲۰۰	HF
۱۲۰	۲۴	SO <sub>2</sub>
۳۵۰	۷۰	NO <sub>2</sub>
۲۰	۴	اکرولئین
۳۰	۶	فرمالدئید (HCHO)

\* این دو معیار براساس شاخص خروج نیمی از جمعیت از محل بروز حادثه تعریف شده‌اند.

کاهش دید اغلب با مفهوم چگالی نور بیان می‌شود. این پارامتر بیانگر میزان کاهش در شدت پرتوهای نور پس از طی فاصله از میان دود است. همچنین باید اشاره نمود که چگالی نور به زمان سپری شده از لحظه ایجاد دود نیز بستگی دارد. واحد دیگر اندازه‌گیری غلظت دود، ضریب کاهش نور است. چگالی نور و ضریب کاهش نور، هر دو به میزان غلظت ذرات دود اندازه‌گیری شده در محیط بستگی دارند. با استفاده از این پارامترها می‌توان میزان وضوح دید را تخمین زد.

البته بایستی توجه داشت که عوامل دیگری نظیر آزاردهندگی و یا غیرآزاردهندگی دود، بر کاهش دید انسان و همچنین سرعت جابجایی و حرکت وی در فضای حاوی دود نیز تأثیرگذار می‌باشند. دود آزاردهنده به دودی اطلاق می‌گردد که در صورت انتشار در محیط، اعضای بدن فرد نظیر چشم‌ها، دستگاه تنفس و ... را تحت تأثیر قرار داده و تحریک نماید. در این ارتباط، به منظور پی بردن به رابطه بین میزان وضوح دید در دود و سرعت جابجایی فرد حین خروج از فضای دود آلود، یک سری آزمایش واقعی انجام شد (Jin, 1978). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در محیط‌های حاوی دود غیر آزاردهنده با ضریب کاهش نور ۰/۵، سرعت حرکت تا ۰/۹۵ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. در حالی که، در محیط‌های حاوی دود آزاردهنده با همان ضریب کاهش نور، سرعت حرکت تا ۰/۴ متر بر ثانیه کاهش خواهد یافت.

### گازهای سمی

گازهای سمی تولید شده در اثر آتش‌سوزی، در قالب دو گروه اصلی شامل گازهای مخدر مانند مونوکسیدکربن (CO)، دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>)، سیانید هیدروژن (HCN) و علاوه بر آن کمبود اکسیژن و همچنین گازهای محرک همانند کلرید هیدروژن (HCl)، فلورید هیدروژن (HF)، برمید هیدروژن (HBr)، دی‌اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>)، اکسیدهای نیتروژن (NO<sub>x</sub>) و اکرولئین (CH<sub>2</sub> CH CHO) طبقه‌بندی می‌گردند. در حالی که باور عمومی بر این امر استوار بوده که گرما دلیل اصلی تلفات در آتش‌سوزی‌ها است، اما خطر ناشی از انتشار این گازها بر سلامت افراد به مراتب بیشتر از گرما بوده و در واقع مهمترین علت اغلب تلفات جانی ناشی از آتش‌سوزی‌ها

جدول ۲. شدت انتقال حرارت بصورت تابش و ارتباط آن با زمان

رسیدن فرد به آستانه درد (API 521, 1999)

زمان رسیدن به آستانه درد (ثانیه)	شدت انتقال حرارت بصورت تابش (kW/m <sup>2</sup> )
۶۰	۱/۷۴
۴۰	۲/۳۳
۳۰	۲/۹۰
۱۶	۲/۷۳
۹	۶/۹۴
۶	۹/۴۶
۴	۱۱/۶۷
۲	۱۹/۸۷

مسئله مهم دیگری که بایستی بدان توجه داشت طراحی تونل در برابر حرارت است. جداره تمامی تونل‌ها با استفاده از انواع مختلفی از پوشش‌ها پوشانده می‌شوند؛ اما هدف از بکارگیری این پوشش‌ها در هر یک از تونل‌ها با یکدیگر متفاوت است. در بعضی موارد، صرفاً اجرای پوشش نازکی از بتن برای جلوگیری از نفوذ آب به داخل تونل کفایت می‌کند. در بعضی موارد نیز جنبه‌های زیبایی جداره تونل مدنظر هست. در موارد دیگر، یکی از اهداف اجرای پوشش برای تونل‌ها، محافظت جداره در برابر آتش‌سوزی می‌باشد. لذا به منظور طراحی این نوع پوشش‌ها، دانستن دمای طراحی در حین آتش‌سوزی داخل تونل‌ها بسیار مهم می‌باشد. در این میان، مطالعاتی به منظور بررسی تأثیر تهویه بر روی کاهش پیامدهای ناشی از آتش‌سوزی داخل تونل (بطور مثال، Tao et al., 2014; Vaitkevicius et al., 2016) و همچنین کاهش اثرات ناشی از آتش‌سوزی بر روی پوشش تونل (بطور مثال، Vollmann et al., 2015) انجام شده است.

#### نشت و تخلیه مواد شیمیایی خطرناک

هر تونل ممکن است در معرض خطر ناشی از نشت و تخلیه تصادفی مواد خطرناک قرار گیرد. مواد خطرناک ممکن است به شکل مایع، جامد و یا گاز باشند. حتی مقادیر اندکی از بعضی مواد می‌توانند باعث وارد شدن آسیب‌های جدی به کاربران تونل شوند. این نوع مواد ممکن است شامل سیالات شیمیایی

#### انتقال حرارت آتش‌سوزی به افراد و تجهیزات

همانطور که مشخص است در نتیجه وقوع آتش‌سوزی مقدار زیادی انرژی حرارتی آزاد شده و این انرژی باعث بالا رفتن دمای محیط می‌شود. در خصوص حوادث آتش‌سوزی که داخل فضاهای محبوس مانند تونل رخ می‌دهند، دمای محیط ممکن است تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بالا رود و در نتیجه، انتقال گرمای بیش از حد به پوست، باعث ایجاد درد و سوختگی در فرد خواهد شد. در یک آتش‌سوزی معمولاً نحوه انتقال انرژی گرمایی به محیط اطراف به دو صورت تابشی و همرفتی بوده که به شرایط محیط نیز بستگی دارد. در این میان، معمولاً در دمای بالای ۱۲۰ سانتی‌گراد، قسمت‌های نمایان پوست در معرض سوختگی ناشی از حرارت همرفتی قرار می‌گیرند.

همچنین بایستی توجه نمود که، رطوبت موجود در هوای گرم بطور قابل‌توجهی بر روی آسیب‌دیدگی دستگاه تنفسی تأثیرگذار است. بدلیل ظرفیت انتقال حرارتی قابل‌توجه هوای مرطوب نسبت به هوای خشک، در یک دمای یکسان، استنشاق هوای داغ مرطوب می‌تواند آسیب شدیدتری را نسبت به هوای خشک متوجه دستگاه تنفسی فرد نماید. گرمای موجود در هوای خشک با درجه حرارت ۳۰۰ سانتی‌گراد می‌تواند بعد از چند دقیقه باعث سوختگی حنجره شده، در حالی‌که سوختگی کامل دستگاه تنفسی در هوای مرطوب، تنها در دمای ۱۰۰ سانتی‌گراد روی خواهد داد.

از سوی دیگر، بایستی توجه داشت که منشاء عمده مخاطرات حرارتی در آتش‌سوزی‌های بزرگ، خطر ناشی از انتقال حرارت بصورت تابشی است. جدول ۲ بصورت کمی، رابطه بین شدت انتقال حرارت به روش تابش و زمان رسیدن به آستانه درد برای فرد را نشان می‌دهد.

به منظور درک هر چه بهتر این مسأله، بایستی توجه نمود که شدت انتقال حرارت بصورت تابشی در یک روز گرم تابستان در حدود یک کیلووات بر متر مربع بوده که البته بسته به موقعیت مکانی و زمانی، این عدد ممکن است تا حدودی تغییر نماید.

۲- انفجار ابر بخار<sup>۱</sup>: این سناریو مشابه سناریوی قبلی بوده با این تفاوت که در آن گلوله آتش ایجاد نمی‌شود. این حادثه زمانی رخ می‌دهد که تانکر حمل کننده گاز غیرقابل اشتعال تحت فشار، در معرض آتش قرار بگیرد. در نتیجه فشار بیش از حد، این امکان وجود دارد که دیواره تانکر دچار ترکیدگی و گسیختگی شود. پیامدهای این سناریو مشابه با پیامدهای سناریوی قبلی است اما اثرات آن به مراتب کمتر بوده و تنها محدود به ایجاد خسارات مالی می‌باشد.

۳- آتش سوزی‌های شعله‌ور شونده<sup>۲</sup>: این حادثه زمانی رخ می‌دهد که ماده قابل اشتعالی نظیر گاز یا گرد گوگرد، برای احتراق با هوا ترکیب شده و باعث انتشار سریع آتش در محیط گردد.

۴- نشت گازهای سمی: این حادثه زمانی رخ می‌دهد که تانکر حاوی گازهای سمی دچار گسیختگی شده و مواد از داخل آن به بیرون انتشار یابند. بسته به مشخصات مواد و شرایط آب و هوایی حاکم بر منطقه، این حادثه ممکن است برای افراد نزدیک به محدوده نشت مواد، کشنده باشد.

۵- حوضچه آتش<sup>۳</sup>: پیامدهای ناشی از این نوع آتش سوزی تا حد زیادی به اندازه و نوع گسترش آن بستگی دارند. پدیدار شدن حوضچه آتش ممکن است باعث برجای گذاشتن خسارات جانی و یا مالی گردد. اگر این نوع آتش سوزی داخل تونل رخ دهد، وسعت پیامدهای ناشی از آن به مشخصات هندسی تونل و حجم ترافیک عبوری بستگی خواهد داشت.

براساس تعاریف سناریوهای فوق‌الذکر، انجمن جهانی راه (PIARC, 2001) یازده نوع پیامد را تعریف کرده که به عنوان عواقب تصادفات و سائط نقلیه حاوی مواد خطرناک در نظر گرفته می‌شوند (جدول ۳). PIARC همچنین تخمینی کمی از حجم ماده شیمیایی، عرض درز ایجاد شده در تانکر در اثر گسیختگی و نرخ تراوش آن ماده که برای رخداد هر پیامد مورد نیاز می باشد را در این جدول ارائه نموده است.

#### ۲-۲-۳- خطرات ناشی از تصادف و سائط نقلیه

تصادف و سائط نقلیه در داخل تونل ممکن است به دو شکل مختلف رخ دهد که شامل تصادف بین سائط نقلیه و یا

خطرناک و همچنین ورود مواد پسماند ناشی از سائط نقلیه به داخل تونل باشند. از جمله این مواد می‌توان به کلر، اسیدسولفوریک، اسید هیدروکلریک، محلول آمونیاک، اسید نیتریک، اسید فسفریک، مواد شوینده، مواد خورنده و ... اشاره نمود (Bubbico, 2009).

در بسیاری از تونل‌های شهری در سراسر دنیا، حمل و نقل و سائیل نقلیه حاوی مواد خطرزا در داخل آن‌ها ممنوع است؛ اما معمولاً این‌گونه اقدامات به تنهایی نمی‌توانند مانع حمل و جابجایی این نوع مواد توسط و سائط نقلیه شخصی به داخل تونل شوند. همچنین این امکان وجود دارد که این نوع مواد به دلیل خطای راننده و یا حوادث ناگواری که در داخل تونل رخ می‌دهند نظیر برخورد به دیواره و تصادف با سایر و سائط نقلیه، منتشر گردند.

تصادف‌های رخ داده در تونل‌های Mont-Blanc و Tauern در سال ۱۹۹۹، که پیامد نشت و انتشار مواد شیمیایی خطرزا در داخل تونل را به همراه داشت، نشان داد که اگر چه احتمال وقوع این قبیل حوادث ناچیز است، اما پیامد انتشار آن‌ها می‌تواند چه برای افراد داخل تونل و چه برای سازه تونل فاجعه‌بار باشد.

براساس تحقیقات انجام شده توسط سازمان همکاری و توسعه اقتصادی<sup>۴</sup> و انجمن جهانی راه (OECD and PIARC, 1997)، بسته به جنس، ماهیت و حجم مواد شیمیایی خطرزا، سناریوهای مختلفی از خطر در هنگام نشت و انتشار آن‌ها داخل تونل ممکن است روی دهد. این سناریوها به شکل زیر تعریف می‌گردند:

۱- انفجار بخار متصاعد شونده از مایع داغ جوشان<sup>۵</sup>: این وضعیت زمانی روی می‌دهد که گلوله‌ای از آتش در نتیجه ترکیدن و گسیختگی دیواره یک تانکر حمل کننده گاز مایع متراکم قابل اشتعال و مواجهه آن برای مدتی با آتش بوجود آید. گرما باعث جوشش مایع، پخش شدن بخار گاز، ترکیدن و گسیختگی دیواره‌های تانکر و متعاقب آن انفجار بخار گاز قابل اشتعال می‌گردد. در صورت وقوع چنین حادثه‌ای، آسیب‌ها بسیار قابل توجه و گسترده خواهند بود. در صورت رویداد این حادثه در تونل، افراد داخل تونل از بین رفته و احتمالاً تونل تخریب خواهد شد.

- برخورد آن‌ها با دیواره تونل می‌باشد. هر یک از این نوع خطرات ممکن است پیامدهای مختلفی را به همراه داشته باشند که عبارتند از (Muller et al., 2008):
  - تصادف وسائط نقلیه بدون وقوع آتش‌سوزی و انفجار
  - آتش‌سوزی ناشی از تصادف وسائط نقلیه با یکدیگر و یا برخورد آن‌ها با دیواره تونل
  - انفجار ناشی از تصادف وسائط نقلیه با یکدیگر و یا برخورد آن‌ها با دیواره تونل
  - خروج و نشت مواد سمی از وسائط نقلیه حامل این نوع مواد
  - ورود آب به داخل تونل (در مورد تونل‌های واقع در زیر تراز آب زیرزمینی و یا تونل‌های مستغرق) بعد از برخورد شدید وسائط نقلیه با سازه تونل و ایجاد ترک خوردگی و احیاناً گسیختگی موضعی در دیواره آن
  - وقوع خطرات جانی ناشی از بروز تصادفات در داخل تونل به خاطر وجود فضای محدود
- انجمن جهانی راه، PIARC (2007) برخی آمار مربوط به تلفات جانی ناشی از حوادث و تصادفات حدود ۳۵ سال اخیر را در تونل‌ها ارائه نموده است (جدول ۴).

جدول ۳. طبقه‌بندی پیامدهای ناشی از تصادف وسائط نقلیه حاوی مواد شیمیایی خطرناک (Nathanail et al., 2009)

شماره	توضیحات	ظرفیت مخزن	اندازه درز گسیختگی (میلی‌متر)	نرخ تراوش (کیلومتر بر ثانیه)
۱	انفجار بخار متصاعد شونده گاز مایع جوشان داخل مخزن در محیط	۵۰ کیلوگرم	-	-
۲	حوضچه آتش بنزن	۲۸ تن	۱۰۰	۲۰/۶
۳	انفجار ابر بخار بنزن	۲۸ تن	۱۰۰	۲۰/۶
۴	نشت کلر	۲۰ تن	۵۰	۴۵
۵	انفجار بخار متصاعد شونده گاز مایع جوشان داخل تانکر در محیط	۱۸ تن	-	-
۶	انفجار ابر بخار گاز مایع داخل تانکر در محیط	۱۸ تن	۵۰	۳۶
۷	آتش‌سوزی گاز مایع داخل تانکر در محیط	۱۸ تن	۵۰	۳۶
۸	رها شدن محلول آمونیاک داخل تانکر در محیط	۲۰ تن	۵۰	۳۶
۹	رها شدن آکروئین داخل تانکر در محیط	۲۵ تن	۱۰۰	۲۴/۸
۱۰	رها شدن آکروئین داخل مخزن در محیط	۱۰۰ لیتر	۴	۰/۰۲
۱۱	انفجار بخار متصاعد شونده مایع جوشان یا ترکیب ناشی از فشار بیش از حد دی‌اکسید کربن داخل تانکر	۲۰ تن	-	-



جدول ۴. آمار حوادث در تونل‌ها مربوط به ۳۵ سال اخیر (PIARC, 2007)

سال وقوع	نام تونل	موقعیت	طول تونل	فرم تونل	تلفات
۱۹۷۹	Nihonzaka	ژاپن	۲۰۴۵ متر	تکی دو طرفه	۷ کشته و دو زخمی
۱۹۸۲	Caldecott	آمریکا	۱۰۸۳ متر	سه قلو	۷ کشته و ۲ زخمی
۱۹۸۹	Brenner	اتریش	۴۱۲ متر	دوقلو	۲ کشته و ۵ زخمی
۱۹۹۵	Pfander	اتریش	۶/۸ کیلومتر	تکی دو طرفه	۳ کشته - سرنشینان یک اتومبیل
۱۹۹۶	Isolla delle Femmine	ایتالیا	۱۵۰ متر	تکی دو طرفه	۵ کشته و ۳۴ زخمی
۱۹۹۹	Mont-Blanc	فرانسه-ایتالیا	۱۱/۶ کیلومتر	تکی دو طرفه	۳۹ کشته و ۲۵ آتش‌نشان زخمی
۱۹۹۹	Tauern	اتریش	۶۴۰۰ متر	تکی دو طرفه	۱۲ کشته (۷ کشته ناشی از تصادف اتومبیل)
۲۰۰۱	Gleinalm	اتریش	۸/۸ کیلومتر	تکی دو طرفه	۵ کشته ناشی از تصادف اتومبیل
۲۰۰۱	St. Gotthard	سوئیس	۱۶/۹ کیلومتر	دو طرفه	۱۱ کشته
۲۰۰۵	Frejus	فرانسه-ایتالیا	۱۲۸۶۸ متر	تکی دو طرفه	۲ کشته و ۲۱ زخمی
۲۰۰۶	Viamala	سوئیس	۷۵۰ متر	دو طرفه	۹ کشته و ۶ زخمی

## ۲-۲-۴- ورود آب‌های سطحی و سیلاب

در مناطق با نزولات جوی بالا و یا در شهرهایی که سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی بطور مؤثری اجرا نشده و یا به درستی عمل نمی‌کنند، به هنگام بارندگی، همواره معابر دچار آب‌گرفتگی شده و آب‌های سطحی در قالب سیلاب‌های کوچک در معابر و خیابان‌ها جریان می‌یابند. در این بین، سازه‌های زیرزمینی مانند ایستگاه‌های مترو، تونل‌های شهری، شبکه‌های تأسیساتی و ... از جمله مستعدترین نواحی برای ورود آب‌های سطحی به داخل آن‌ها می‌باشند. در صورتی که این نوع سازه‌های زیرزمینی در برابر ورود آب‌های سطحی و سیلاب‌ها محافظت نشوند، امکان آب‌گرفتگی آن‌ها و حتی احتمال مسدود شدن‌شان نیز وجود خواهد داشت. یکی از خطراتی که تونل‌های درون‌شهری را در مواجهه با ورود آب‌های سطحی و سیلاب تهدید می‌کند، شیب طولی ناحیه ورودی یا خروجی تونل می‌باشد که در واقع عاملی جهت تسهیل ورود آب‌های سطحی به داخل تونل محسوب می‌گردد. در واقع، شیب طولی تونل سبب خواهد شد تا آب با سرعت قابل توجهی وارد تونل گردد. همچنین اگر حجم آب ورودی به داخل تونل از ظرفیت سیستم‌های زهکشی تونل بیشتر باشد، عملاً امکان تخلیه آن خصوصاً در ساعات اولیه آب‌گرفتگی

تونل تقریباً غیرممکن خواهد بود. از این‌رو، آب‌گرفتگی تونل می‌تواند خطراتی را متوجه افرادی که در حال عبور از تونل می‌باشند و همچنین سیستم‌های الکتریکی، مکانیکی و ... داخل تونل نماید.

## ۲-۲-۵- اثرات زلزله روی تونل

سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی (از قبیل ساختمان‌ها و پل‌ها) کمتر در معرض آسیب ناشی از زلزله قرار دارند، زیرا زمین اطراف، سازه‌های زیرزمینی را محصور کرده و لذا غالباً در حین وقوع زمین‌لرزه، ارتعاش سازه و زمین با یکدیگر هم‌فاز می‌باشد. به عبارت دیگر، تا زمانی که زمین اطراف سازه زیرزمینی پایدار باشد و فقط تغییرشکل‌های کوچکی را تجربه کند، تونل به جابجایی همزمان با زمین اطراف خود تمایل داشته و سطح عملکرد سازه‌ای خود را حفظ خواهد کرد. جدول ۵ ارتباط میزان جابجایی زمین در عمق (یعنی، تراز تونل) و میزان جابجایی در سطح زمین را نسبت به عمق قرارگیری تونل نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشخص است هر چه تونل به عمق برده می‌شود اثرات جابجایی ناشی از زلزله برای آن کاهش می‌یابد.

اجرای مقاطع ضخیم و پرمقاومت، بدون اقدام به پایدارسازی زمین اطراف آن، ممکن است موجب افزایش نیروهای ناشی از زلزله بر تونل گردد.

۶- آسیب وارده به تونل با توجه به بزرگای زلزله و همچنین فاصله سازه از مرکز زلزله، به شتاب و سرعت پیک زمین وابسته می‌باشد.

۷- مدت زمان تداوم لرزش‌های قوی زمین حین زلزله، یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر روی رفتار سازه‌های زیرزمینی بوده زیرا این عامل باعث بوجود آمدن گسیختگی‌های ناشی از خستگی در اجزای تونل و در نهایت وقوع تغییرشکل‌های بزرگ در تونل خواهد شد.

۸- وقوع لرزش‌های با فرکانس بالا در تونل که مربوط به زلزله‌های میدان نزدیک می‌باشد، می‌تواند باعث قلوه‌کن‌شدگی موضعی سنگ یا بتن در امتداد صفحات ضعیف گردد. این نوع فرکانس‌ها که به سرعت با فاصله گرفتن از کانون زلزله کاهش می‌یابند، در فواصل کم از گسل فعال‌شده (معمولاً کمتر از ۱۵ کیلومتر) بوجود می‌آیند.

۹- در صورتی که طول موج امواج لرزه‌ای برخورد کننده با سازه تونل بین یک تا چهار برابر قطر تونل باشد، دامنه این امواج ممکن است به محض برخورد با تونل تشدید شود.

۱۰- آسیب وارده به تونل‌ها در محل ورودی (پرتال) آن‌ها ممکن است به دلیل ناپایداری شبروانی در این ناحیه قابل توجه باشد. همانطور که پیشتر نیز عنوان گردید، مثال‌های مختلفی از وقوع زمین‌لرزه در کشورهای مختلف و اثرات آن بر سازه تونل در مقالات و گزارش‌های مختلفی ارائه شده است. به عنوان مثال، وقوع زلزله سال ۱۹۹۵ Hyogoken-Nambu باعث انهدام ایستگاه مترو Daikai در کوبه ژاپن شد ( Nakamura et al., 1996). در طراحی ایستگاه در سال ۱۹۶۲ بحث‌های لرزه‌ای در نظر گرفته نشده بود. شکل ۲ گسیختگی رخ داده در ستون‌های مرکزی ایستگاه را نشان می‌دهد که همراه با انهدام دال سقف و فرونشست لایه‌های فوقانی ایستگاه تا بیش از ۲/۵ متر می‌باشد.

جدول ۵. نسبت جابجایی در عمق به جابجایی در سطح زمین

(Power et al., 1996)

عمق تونل (m)	نسبت جابجایی زمین در تراز تونل به جابجایی در سطح زمین
$\leq 6$	۱/۰
۶-۱۵	۰/۹
۱۵-۳۰	۰/۸
$> 30$	۰/۷

در خصوص تجربیات حاصل از عملکرد سازه‌های زیرزمینی به ویژه تونل‌ها در حین زلزله، تاکنون گزارش‌های بسیار زیادی منتشر شده است (ASCE, 1974; JSCE, Sharma and Judd, 1991, 1988). با بررسی اجمالی گزارش‌های مذکور می‌توان مشاهدات کلی زیر را در مورد عملکرد لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی بیان نمود (Hashash et al., 2001; Fabozzi et al., 2017):

۱- بطورکلی، در هنگام وقوع یک زلزله، سازه‌های زیرزمینی آسیب‌های کمتری را نسبت به سازه‌های سطحی متحمل می‌شوند.

۲- آسیب‌های گزارش شده در سازه‌های زیرزمینی، با افزایش فاصله این سازه‌ها از سطح زمین کاهش می‌یابد. در واقع، بنظر می‌رسد که تونل‌های عمیق در برابر زلزله از پتانسیل خرابی به مراتب کمتری نسبت به تونل‌های سطحی برخوردار بوده و به میزان کمتری مستعد آسیب‌پذیری در برابر لرزش‌های ناشی از زلزله می‌باشند.

۳- سازه‌های زیرزمینی اجرا شده در خاک، آسیب بیشتری را در مقایسه با تونل‌های اجرا شده در سنگ‌های با مقاومت مناسب متحمل می‌شوند.

۴- تونل‌های پوشش‌دار و تزریق شده نسبت به تونل‌های بدون پوشش در سنگ، در برابر زلزله ایمن‌تر هستند. همچنین می‌توان پتانسیل آسیب لرزه‌ای وارد بر سازه تونل را با پایدارسازی زمین اطراف تونل و همچنین با بهبود اتصال پوشش با زمین اطراف آن از طریق تزریق کاهش داد.

۵- تونل‌ها تحت بارهای متقارن بالاخص ناشی از خاک، در برابر زلزله پایدارتر هستند. تقویت پوشش تونل از طریق

محصورکننده سازه زیرزمینی؛ (۳) مشخصات سازه؛ و (۴) شدت زمین‌لرزه (St. John and Zahrah, 1987).

ب- گسیختگی زمین: این پدیده شامل انواع ناپایداری‌های زمین از قبیل وقوع گسلش، زمین‌لغزش، روانگرایی و بالاآمدگی و فرونشست تکنیکی (یعنی، جابجایی‌های اعمالی توسط گسل‌های شیب‌لغز در سطح زمین) می‌باشد. اگرچه آسیب ناشی از این نوع ناپایداری‌ها معمولاً بصورت متمرکز و موضعی می‌باشد، اما وقوع هر کدام از آن‌ها می‌تواند بطور بالقوه برای سازه تونل فاجعه‌بار باشد.

#### ۲-۲-۶- انتشار گازها

تونل‌ها در حین اجرا به ندرت در معرض انتشار گازهای طبیعی زیرزمینی قرار می‌گیرند. اما هرگاه این گازها به نحوی وارد فضاهای زیرزمینی شوند، قادر خواهند بود که ترکیب هوای داخل تونل را تغییر داده و خطراتی را برای افراد داخل آن ایجاد نمایند. مهمترین این گازها عبارتند از: متان، دی‌اکسیدکربن، متواکسیدکربن، سولفید هیدروژن، دی‌اکسیدگوگرد و رادون. این گازها را می‌توان به دو دسته گازهای قابل اشتعال و گازهای سمی تقسیم‌بندی نمود. منابع تولید این گازها متفاوت بوده و دانستن آن جهت ارزیابی مخاطرات ناشی از آنها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. شناسایی گازها و محل تجمع آنها به سادگی امکان‌پذیر نیست. برای نیل به این هدف باید در فاز اکتشافی پروژه‌های تونلی، اقدامات ویژه‌ای صورت گیرد. بخشی از این اقدامات شامل شناخت از ناحیه جغرافیایی، نصب ایستگاه‌های رفتارسنجی، تفسیر شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، بررسی روش‌های ژئوفیزیکی برای اکتشاف مخازن گاز و اندازه‌گیری میزان گاز در نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌های مسیر تونل است (قیاسوند، ۱۳۸۶). از سوی دیگر، هنگام احداث تونل‌ها در مناطق شهری، احتمال برخورد ماشین‌آلات حفاری با مجاری فاضلاب و در نتیجه ورود فاضلاب به داخل تونل وجود دارد. مشکل دیگر در زمان اجرا و بهره‌برداری تونل‌ها، ورود گازهای ناشی از این فاضلاب‌ها به درون تونل می‌باشد. گازهای فاضلاب ممکن است شامل سولفید هیدروژن، آمونیاک، متان، دی‌اکسید کربن،



شکل ۲. خرابی ایستگاه مترو در زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه ژاپن  
(الف) ستون‌های آسیب‌دیده؛ (ب) فرونشست سطح زمین  
(Uenishi and Sakurai, 2000)

#### دیدگاه مهندسی در تحلیل و طراحی تونل در برابر زمین‌لرزه

بطور کلی، اثرات زلزله بر روی سازه‌های زیرزمینی به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌گردد:

الف- لرزش زمین: ارتعاشات لرزه‌ای زمین ناشی از تغییرشکل ایجاد شده در اثر انتشار امواج لرزه‌ای می‌باشد. این لرزش‌ها ممکن است صدها کیلومتر مربع از نواحی مجاور محل گسیختگی گسل را تحت تأثیر قرار دهند. در واقع، همچنان که امواج منتشر شده ناشی از لرزش در زمین باعث بروز تغییرشکل در آن می‌گردند، سازه تونل نیز تا حدود زیادی از این تغییرشکل تبعیت خواهد نمود؛ هر چند که ممکن است تونل در نتیجه لرزش‌های وارده دچار آسیب نیز گردد. در این خصوص بایستی اظهار نمود که عوامل اصلی مؤثر بر نوع و میزان آسیب‌های ناشی از وقوع لرزش در تونل‌ها عبارتند از: (۱) شکل، ابعاد و عمق سازه زیرزمینی؛ (۲) مشخصات توده

• تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی نظیر سیستم‌های هشداردهنده، دوربین‌ها و حسگرهای کنترل‌کننده وضعیت تونل و کنترل شرایط عملکردی و سرویس‌دهی آن‌ها. بسته به وضعیت و شرایط تونل بایستی اقدامات موردنیاز برای حفظ عملکرد و سرویس‌دهی مورد انتظار از آن و همچنین تضمین ایمنی آن برای تمامی کاربران صورت گیرد. این امر مستلزم تعیین و اجرای برنامه زمانی تعمیر و نگهداری اجزای مختلف تونل همراه با انجام بازرسی‌های دوره‌ای و منظم بوده که در برخی موارد ممکن است حتی منجر به مسدود نمودن موقت تونل نیز گردد. بازرسی‌های دوره‌ای و منظم به نوبه خود به چهار دسته بازرسی‌های سطحی، کلی، جامع<sup>۱۱</sup> و ویژه<sup>۱۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند که در زیر معرفی گردیده‌اند (DMRB, 1995):

**الف- بازرسی سطحی** - نوعی از بازرسی برای بررسی نقص‌های آشکار در تونل می‌باشد. منظور از نقص‌های آشکار مواردی است که عدم توجه به آن‌ها می‌تواند منجر به وقوع تصادف یا تحمیل هزینه‌های هنگفت تعمیرات به تونل گردد. این نوع بازرسی در مواقعی از قبیل دوره‌های منظم تعمیر و نگهداری و یا در شرایط خاص نظیر مسدود نمودن تونل انجام می‌شود.

**ب- بازرسی کلی** - این نوع بازرسی شامل بازرسی‌های چشمی کامل از المان‌های شاخص هر یک از اجزای تونل و تجهیزات آن می‌باشد. منظور از المان‌های شاخص، عناصری بوده که به عنوان نماینده آن جزء تونل محسوب شده و در بازرسی کلی تنها بازرسی این نوع المان کفایت کرده و می‌توان نتایج حاصل از بازرسی آن را به سایر المان‌های آن جزء خاص تعمیم داد. در صورتی که المان یا المان‌های شاخص در بازرسی کلی مردود گردند، بایستی از آن جزء خاص، بازرسی جامع و یا ویژه به عمل آید.

**ج- بازرسی جامع** - این بازرسی شامل بررسی تفصیلی و از نزدیک تمام بخش‌های قابل دسترسی تونل می‌باشد. باید اشاره نمود در صورت انجام این نوع بازرسی در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر از مقادیر ارائه شده در جدول ۶، نیازی به انجام بازرسی‌های کلی نخواهد بود.

دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن باشند. این نوع گازها بخاطر بوی بد، اثرات مخرب‌شان بر روی سلامتی افراد و همچنین به عنوان یک عامل محرک‌زا در آتش‌سوزی و یا انفجار بسیار خطرآفرین می‌باشند. همچنین، گازهایی از قبیل گاز مونوکسیدکربن، دی‌اکسید نیتروژن و ... که در نتیجه احتراق سوخت در موتورهای درون‌سوز تولید می‌شوند، نیز از جمله گازهایی هستند که در مرحله بهره‌برداری ممکن است خطراتی را برای سلامتی افرادی که از تونل استفاده می‌کنند، به همراه داشته باشند (Bari and Naser, 2010). استفاده از سیستم‌های تهویه مناسب یکی از عواملی است که می‌تواند خطر ناشی از مسمومیت با این نوع گازها را داخل تونل کاهش دهد (پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۲).

#### ۲-۲-۷- عدم توجه به امر تعمیر و نگهداری تونل‌ها

در تونل‌های ماشین‌روی درون شهری احتمال هرگونه آسیب و خرابی ناشی از عوامل مختلف از قبیل تصادف و سائیدگی با دیواره تونل، آتش‌سوزی، ترک‌خوردگی، آلودگی ناشی از ترافیک عبوری (بطور مثال، دود خروجی از آگزوز اتومبیل‌ها) و ... بر روی سازه و همچنین تجهیزات آن از قبیل تجهیزات الکتریکی، مکانیکی و ... وجود دارد. در این خصوص، انجام بازرسی‌های دوره‌ای و اقدام به تعمیر و نگهداری تونل امری بسیار حیاتی و ضروری می‌باشد. از این‌رو، باید سازه و تجهیزات کنترلی الکتریکی و مکانیکی را در بهترین شرایط عملکردشان نگهداری نمود تا از خرابی هر یک از این سیستم‌ها جلوگیری به عمل آید (Baji et al., 2017). اجزای یک تونل که مشمول برنامه‌ریزی دقیق جهت اقدام به بازرسی، ارزیابی، نگهداری و تعمیر می‌باشند عبارتند از:

- المان‌های سازه‌ای تونل و شرایط عملکردی آن‌ها (Yuan et al., 2012)
- سیستم‌های روسازی و زهکشی تونل و کنترل شرایط عملکردی و سرویس‌دهی آن‌ها
- اجزای سیستم تهویه تونل و شرایط عملکردی و سرویس‌دهی آن‌ها
- اجزای سیستم روشنایی تونل و شرایط سرویس‌دهی آن‌ها

که فواصل زمانی ارائه شده در جدول فوق می‌تواند بسته به شرایط هر منطقه و یا کشور کاهش یابد.

## ۲-۳- انواع تهدیدهای مترتب بر تونل‌ها در فاز بهره‌برداری

از جمله تهدیدهایی که ممکن است تونل‌ها را در زمان بهره‌برداری تحت تأثیر قرار دهد می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

الف- تجهیزات انفجاری دست‌ساز کوچک

ب- تجهیزات انفجاری متوسط و بزرگ مقیاس

ج- عوامل شیمیایی

د- عوامل بیولوژیکی

ه- عوامل رادیواکتیوی

و- حملات سایبری

ز- آتش‌سوزی (عمدی)

ح- عملیات خرابکارانه سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و ارتباطی

که در ادامه به تشریح هر یک از موارد فوق پرداخته شده است.

د- **بازرسی ویژه**- این نوع بازرسی شامل بررسی از نزدیک موارد خاص و یا تشخیص نقص‌های خاصی می‌باشد که در بخش‌های ویژه‌ای از تونل تحت اثر حوادث غیرمترقبه بوجود می‌آیند. منظور از حوادث غیرمترقبه به عنوان مثال، وقوع فرونشست بیش از حد مجاز طراحی در بالای تونل، شرایط تونل بعد از وقوع سیلاب، تصادف‌های بزرگ، زلزله و یا آتش‌سوزی‌ها بوده که در صورت بروز چنین حوادثی، بایستی بازرسی ویژه برای تونل انجام گیرد. علاوه بر این، بازرسی ویژه بایستی در فواصل زمانی حداکثر شش ماه برای اجزایی از سازه نظیر سیستم روسازی که در طراحی آن‌ها از فرضیات بارگذاری مشخصی استفاده شده و یا به منظور کنترل عدم اعمال بارهای غیرطبیعی به تونل انجام گیرد. به عبارت دیگر بایستی در حین بهره‌برداری از تونل، صحت‌سنجی بین داده‌های بارگذاری در حین طراحی و مقادیر واقعی آن‌ها صورت گیرد. این امر با انجام بازرسی ویژه برای تونل صورت می‌پذیرد.

جدول ۶ دوره‌های بازرسی معمول برای تونل‌ها را بر حسب نوع بازرسی موردنیاز ارائه می‌دهد. بایستی توجه داشت

جدول ۶. دوره‌های بازرسی سازه و تجهیزات تونل براساس انواع بازرسی‌ها (DMRB, 1995)

نوع بازرسی	جزء مورد بررسی	حداقل فواصل زمانی موردنیاز
بازرسی سطحی	سازه تونل- سیستم روسازی و زهکشی- تجهیزات الکتریکی و مکانیکی	در دوره‌های زمانی تعمیر و نگهداری یا شرایط خاص نظیر بسته شدن تونل
بازرسی کلی	سازه تونل- سیستم روسازی و زهکشی	هر ۲ سال یکبار
	تجهیزات الکتریکی و مکانیکی	بصورت سالانه
بازرسی جامع	سازه تونل- سیستم روسازی و زهکشی	حداکثر هر ۶ سال یکبار
	تجهیزات الکتریکی و مکانیکی	حداکثر هر ۳ سال یکبار
بازرسی ویژه	سازه تونل- سیستم روسازی و زهکشی	حداکثر هر ۶ ماه یکبار

## ۲-۳-۱- تجهیزات انفجاری دست‌ساز کوچک

آتش‌زای بسیار کوچکی تعریف می‌شوند که به راحتی می‌توان آن‌ها را مخفی نمود. تجهیزات دستی کوچک به راحتی در داخل وسایل یک شخص قابل پنهان کردن بوده و شاید فقط با استفاده از تجهیزات تجسسی پیشرفته و یا مشاهدات نزدیک قابل شناسایی باشند. الگوی خرابی وسایل منفجره به این

مواد قابل انفجار اغلب وقتی در معرض اکسیداسیون سریع (یعنی، اشتعال) قرار می‌گیرند، به سرعت تجزیه می‌گردند. در واقع، انفجار در نتیجه آزاد شدن ناگهانی حجم قابل توجهی گاز ناشی از تجزیه مواد منفجره در محدوده زمانی بسیار اندک پدید می‌آید. تجهیزات انفجاری کوچک به عنوان مواد قابل انفجار یا

شش تن ماده TNT تقریباً معادل انرژی آزاد شده یک زلزله با بزرگای ۴ ریشتر می‌باشد.

### ۲-۳-۳- عوامل شیمیایی

عوامل شیمیایی به پنج دسته کلی طبقه‌بندی می‌گردند که تماماً برای سلامتی انسان‌ها خطر آفرین بوده و می‌تواند سبب معلولیت، آسیب جدی جسمی و یا حتی مرگ افراد شوند:

۱- **عامل اعصاب:** مقدار بسیار کمی از این عامل می‌تواند به سیستم عصبی شخص، آسیب وارد سازد. راه انتقال این مواد از طریق سیستم تنفسی و پوست می‌باشد. عوامل اعصاب به شدت کشنده بوده و در مدت زمان بسیار کوتاهی قادر خواهند بود تا فرد را تحت تأثیر قرار دهند. علائم این نوع عامل شامل ایجاد مشکلات تنفسی، وقوع حمله‌های ناگهانی، سردرد و ترشح آب دهان می‌باشد. از گازهای اعصاب مشهور می‌توان به سارین<sup>۱۳</sup>، سومان<sup>۱۴</sup> و تابون<sup>۱۵</sup> اشاره نمود.

۲- **عامل آبله:** این عامل همچنین به عنوان عامل شیمیایی گاز تاول‌زا نیز معروف است که شامل گازهای فوسژن و خردل می‌باشند. گازهای تاول‌زا از طریق چشم‌ها، پوست و شش‌ها جذب می‌شوند. آن‌ها به بافت‌های بدن حمله کرده و موجب بروز تاول‌های شدید بر روی آن شده و در نهایت منجر به حملات ناگهانی، ورم ریوی و یا حتی نابینایی می‌شوند. البته این عوامل قابل درمان بوده و اول بار طی جنگ جهانی اول مورد استفاده قرار گرفتند.

۳- **عامل لخته‌کننده خون:** این عامل به سرعت، توانایی بدن در جذب اکسیژن برای رگ‌های خون‌رسان را کاهش می‌دهد، که در نتیجه از رسیدن اکسیژن به اندام‌های بدن جلوگیری می‌کند. انواع متداول این نوع عامل شامل سیانید هیدروژن و کلرید سیانوژن<sup>۱۶</sup> بوده که هر دو این عوامل در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. عوامل لخته‌کننده خون از طریق پوست یا از راه دستگاه تنفسی وارد بدن می‌شوند و علائم آن شامل تشنج به همراه قرمز شدن لب‌ها، حالت تهوع و قطع تنفس می‌باشد. مشکلات ناشی از این نوع عامل نیز قابل درمان می‌باشند.

صورت است که به هر جسمی که در محدوده انفجار واقع می‌شود، نیروی فشاری قابل توجهی وارد نموده که منجر به بروز آسیب برای آن‌ها می‌گردد. این مواد منفجره قابلیت مجروح کردن و یا از بین بردن افراد را در محدوده انفجار خود دارا می‌باشند.

### ۲-۳-۲- تجهیزات انفجاری متوسط و بزرگ مقیاس

همانطور که مشخص است در اثر وقوع انفجار، یک موج انفجار پدید می‌آید که از مرکز انفجار به شکل کروی به تمامی جوانب گسترش می‌یابد. منشأ بروز موج انفجار ایجاد گازهای سوزان و فشرده‌ای است که از مرکز انفجار با سرعت به خارج حرکت کرده و فشار اتمسفر را در آن ناحیه بالا می‌برند. به این اضافه فشار که حاصل از فیزیک امواج انفجار می‌باشد، فشار انفجاری اطلاق می‌گردد. با وقوع یک انفجار، فشار انفجاری حاصله با فاصله گرفتن از مرکز انفجار کاهش می‌یابد.

انتقال تجهیزات انفجاری متوسط و بزرگ مقیاس معمولاً با استفاده از وسائط نقلیه سبک و یا سنگین از قبیل سواری و یا کامیونت صورت می‌پذیرد و یا اینکه این نوع تجهیزات بطور مخفیانه در موقعیت از قبل تعیین شده در داخل تونل و قبل از انفجار جاسازی می‌شوند. قدرت تخریب مواد منفجره متوسط و بزرگ مقیاس بسیار زیاد بوده و به اشخاص و اموال در معرض آسیب جدی می‌رسانند. از این‌رو، با توجه به آن‌که در فضای محبوس تونل، بخش عمده‌ای از انرژی ناشی از انفجار توسط اجزا و بخش‌های مختلف تونل جذب می‌گردد، وقوع خرابی‌ها و آسیب‌های عمده و جدی به سازه و تجهیزات تونل امری دور از واقعیت نخواهد بود.

از مواد منفجره متداول می‌توان به TNT و دینامیت اشاره نمود. مقدار انرژی که در صورت انفجار TNT آزاد می‌گردد برابر  $980-1100 \text{ cal/gram}$   $(1980-1764 \text{ BTU/lb})$   $4602-8100 \text{ kJ/kg}$  می‌باشد. البته اندازه‌گیری این نوع انرژی تا حدی دشوار می‌باشد (Crowl, 2003). همچنین، مقدار انرژی آزاد شده توسط دینامیت تقریباً برابر  $1800 \text{ cal/gram}$   $(7500 \text{ kJ/kg})$  می‌باشد. به عنوان یک معیار ذکر این نکته خالی از لطف نمی‌باشد که انرژی آزاد شده ناشی از انفجار

ببرند. البته بایستی خاطر نشان ساخت که درمان برای برخی از عوامل بیولوژیکی و نه همه آنها، امکان پذیر است.

انتشار عوامل بیولوژیکی در تونل‌ها باعث سرایت آلودگی به زیرساخت‌های تونل، تجهیزات آن و محدوده‌ها و فضاهای اطراف تونل خواهد شد که در صورت بروز چنین رخدادی تمامی این فضاها بایستی ضدعفونی شده و رفع آلودگی گردند. در هنگام ضدعفونی نمودن محیط، تمامی تجهیزات باید قرنطینه شده و با تجهیزات دیگر جایگزین شوند.

#### ۲-۳-۵- عوامل رادیواکتیوی

حملات رادیواکتیوی پیامدهای مخربی بر روی سیستم حمل و نقل، محیط زیست و جامعه خواهند داشت. آلودگی‌های رادیواکتیوی ساختار سلولی قربانیان را تخریب کرده و باعث بیماری و در نهایت از بین رفتن آنها خواهند شد. یک قربانی ممکن است نشانه‌های با تأخیری را در صورت در معرض قرار گرفتن در برابر اشعه تجربه کرده و علائم و اثرات این آلودگی را با بیماری شبیه آنفولانزا اشتباه بگیرد. ساخت، انتقال و استفاده از عوامل رادیواکتیوی بسیار دشوار است.

پس از اینکه در یک تونل آلودگی‌های رادیواکتیوی منتشر می‌شوند، تجهیزات و امکانات تونل خارج از سرویس بوده و بایستی کنار گذاشته شوند. برای پاکسازی محیط آلوده شده با این عوامل، تلاش زیادی نیاز بوده تا استفاده مجدد از این امکانات و تجهیزات امکان پذیر گردد.

#### ۲-۳-۶- حملات سایبری

برای حصول اطمینان از عملکرد صحیح و ایمن تونل و تجهیزات و متعلقات آن، استفاده از تلویزیون‌های مدار بسته، تجهیزات سنجش کیفیت هوا و شبکه به‌هنگام ترافیکی متداول می‌باشند. در این خصوص، انجام تلاش‌های هماهنگ برای از کار انداختن سیستم‌های کنترل مورد استفاده در تونل یک نوع تهدید به شمار می‌رود. معمولاً این نوع حملات به شبکه‌های کنترل عملکرد تونل بصورت از راه دور و مجازی صورت می‌پذیرد. استفاده از ویروس در شبکه‌های کنترل از راه دور جهت مختل نمودن وظیفه آنها یک روش متداول در این زمینه محسوب می‌گردد.

۴- عوامل خفه‌کننده: استنشاق این عامل از تنفس فرد جلوگیری کرده و اگر تدبیری برای آن در نظر گرفته نشود، ممکن است باعث خفگی شود. عوامل خفه‌کننده شامل ترکیبات متداول از قبیل گاز کلر، آمونیاک، کلرید هیدروژن و فسفر می‌باشند. نشانه‌های معمول این نوع عامل شامل سرفه، نفس زدن و احساس سوزش در چشم‌ها، بینی و گلو هستند. داروهای شناخته شده‌ای در مقابل این عوامل شیمیایی وجود ندارند اما روش‌های موفق درمانی در این زمینه موجود است.

#### ۵- عوامل تحریک کننده: عواملی هستند که برای ناتوان

ساختن موقتی یک فرد طراحی شده‌اند. این عوامل معمولاً اثرات دراز مدتی نداشته و یا منجر به مرگ نمی‌شوند. انواع متداول این عوامل شامل اسپری فلفل و گاز اشک‌آور می‌باشند. تمامی این نوع گازها، اثراتی از قبیل جاری شدن اشک از چشم، سرفه و سوزش گلو و بینی را به همراه خواهند داشت. این اثرات موقتی و قابل درمان می‌باشند.

در ادامه، در جدول ۷ خلاصه‌ای از انواع هر یک از عوامل شیمیایی فوق‌الذکر به همراه مقادیر حدی زیان‌آور آنها برای افراد ارائه شده است.

#### ۲-۳-۴- عوامل بیولوژیکی

اثر عوامل بیولوژیکی خطرناک بر زیرساخت‌های حمل و نقل و کاربران آن به عنوان یک تهدید با پتانسیل آسیب بسیار بالا ولی با احتمال وقوع بسیار کم مطرح می‌باشد. این عوامل که شامل انواع باکتری‌ها، ویروس‌ها و سموم می‌باشند، می‌توانند برای انتقال و سرایت گسترده در بین جمعیت داخل تونل مورد استفاده قرار گیرند. این عوامل می‌توانند در هوا رها شده و در بین افراد مبتلا شده اثرات آبی و یا با تأخیری از خود نشان دهند. ساخت، استفاده و انتقال عوامل بیولوژیکی بسیار دشوار می‌باشد. اثربخشی آنها به میزان باد، رطوبت و همچنین عملکرد و توان سیستم‌های تهویه هوا وابسته می‌باشد. نشانه‌های عوامل بیولوژیکی متغیر بوده و احتمالاً آثاری شبیه به خستگی و یا اثرات شبیه آنفولانزا در بین افراد ممکن است مشاهده گردد. همچنین افرادی که به این عوامل مبتلا شده باشند ممکن است از فلج موضعی، تورم، خارش یا تب رنج

### ۲-۳-۷- آتش سوزی (عمدی)

این عمل به منظور آسیب رساندن به اشخاص و تجهیزات داخل تونل صورت می‌پذیرد. اقدام به آتش سوزی عمدی که به منظور آسیب رساندن یا تخریب دارایی‌ها انجام می‌شود، ممکن است جان کاربران تونل را به خطر بیندازد. وقوع آتش سوزی‌های عمدی باعث می‌شود که امکان استفاده از تونل در یک دوره زمانی خاصی از بین برود.

همچنین باید اشاره نمود با توجه به استفاده قابل توجه از تجهیزات الکتریکی و مکانیکی در داخل تونل‌های مترو جهت کنترل حرکت آن‌ها، احتمال انجام این قبیل عملیات‌های خرابکارانه در تونل‌های مترو نسبت به تونل‌های ماشین‌روی درون شهری بیشتر است.

جدول ۷. مقادیر زیان‌آور عوامل شیمیایی خطر آفرین برای سلامتی افراد

عامل	نوع	مقدار و اثر روی سلامتی انسان‌ها
اعصاب	سارین	استنشاق این گاز با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در مدت یک دقیقه مرگبار است
	سومان	استنشاق این گاز با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در مدت یک دقیقه مرگبار است
	تابون	استنشاق این گاز با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در مدت یک دقیقه مرگبار است
لخته‌کننده خون	سیانید هیدروژن	وجود این نوع گاز با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در هوا به مدت ۱۰ دقیقه یک فرد را از بین خواهد برد. همچنین تخمین زده می‌شود که غلظت ۳۲۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب از این ماده در هوا در مدت یک دقیقه یک فرد را از پای در خواهد آورد.
	کلرید سیانوژن	وجود این نوع گاز با غلظت ۲/۵ میلی‌گرم بر مترمکعب در هوا در مدت چند دقیقه باعث جاری شدن اشک در یک فرد شده و وجود این نوع ماده با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در هوا در مدت ۱۰ دقیقه مهلک و کشنده است.
خفه‌کننده	محلول آمونیاک	حد مجاز تماس یک فرد با این نوع ماده در ایالت متحده آمریکا ۳۵ میلی‌گرم بر مترمکعب است؛ در حالی که حد خطرناک برای سلامتی در حدود ۲۱۰ میلی‌گرم بر مترمکعب است. بوی آمونیاک در غلظت بیشتر از ۳۵ میلی‌گرم بر مترمکعب قابل تشخیص می‌باشد.
	کلر	کلر در غلظتی برابر با ۰/۱۴ میلی‌گرم بر مترمکعب در هوا قابل شناسایی است. استنشاق این گاز در غلظت ۲۱ میلی‌گرم بر مترمکعب ممکن است باعث سرفه و استفراغ شود و مقدار در حدود ۴۲ میلی‌گرم بر مترمکعب به شش‌ها آسیب خواهد رساند. در ضمن، در غلظت حدود ۷۰ میلی‌گرم بر مترمکعب در هوا بعد از چند نفس عمیق، مرگ‌آور است.

### ۲-۳-۸- عملیات خرابکارانه سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و ارتباطی

اقدام به ایجاد خرابی‌های عمدی در سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و ارتباطی تونل به عنوان یک تهدید برای تمام تونل‌های زیرسطحی مطرح می‌باشد. وقوع این نوع خرابکاری‌ها، کاهش عملکرد سیستم را به دلیل کاهش ایمنی و کارایی سیستم‌های عملیاتی به همراه خواهد داشت. از این رو، این امکان وجود دارد که شرایط استفاده مناسب و ایمن از تونل برای استفاده عموم از دست برود. اقدام به عملیات خرابکارانه

همچنین ممکن است موجب گردد سیستم‌های تخلیه آب، انتقال برق، تهویه هوا یا پایش ترافیک عبوری از داخل تونل در یک دوره زمانی طولانی غیرقابل استفاده شوند. جایگزینی و تعویض سیستم‌های از کار افتاده در واقع می‌تواند باعث تحمیل هزینه‌های زیاد و همچنین هزینه‌های غیرمستقیم ناشی از عدم برخورداری از آن‌ها در زمان تعویض و نصب گردیده و حتی در شرایط بحرانی‌تر مسدود شدن تونل را به همراه داشته باشد. در واقع، بروز آسیب‌های جدی به سیستم‌های مکانیکی،



الکتریکی و ارتباطی تونل ممکن است عملکرد تونل را به نحو قابل توجهی به مخاطره اندازد.

### ۳- رتبه‌بندی پیامدهای ناشی از خطرات و تهدیدها روی ایمنی و عملکرد

بسته به نوع و میزان خطرها و یا تهدیدهای وارده بر یک تونل، دامنه پیامدها و آسیب‌های ناشی از آن‌ها بر روی ایمنی و نحوه عملکرد این نوع سازه متغیر خواهد بود. جدول ۸ رتبه‌بندی کیفی پیامدهای ناشی از خطرات و تهدیدهای محتمل بر روی نحوه عملکرد و ایمنی تونل را که با سیستم رتبه‌بندی FTA (FTA, 2003) تطابق دارد، معرفی نموده است (NCHRP, 2008). بدیهی است میزان وقفه در عملکرد و شرایط سرویس‌دهی زیرساخت‌های حمل و نقل با شدت خطرات و تهدیدهای مترتب بر تونل‌ها رابطه مستقیمی دارد. بطور مثال، اگر منبع تولید نیروی الکتریکی و همچنین سیستم‌های اعلام وضعیت اضطراری تونل مورد حملات چند منظوره قرار گیرند، این امر ممکن است منجر به آن گردد که اکثر سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و ارتباطی تونل از کار بیفتند. بنابراین ملاحظه می‌گردد که این قبیل تهدیدها ممکن است تبعات منفی مضاعفی را برای تونل به دنبال داشته باشند و برای راه‌اندازی و سرویس‌دهی مجدد تونل، کنترل و رفع عیوب تمامی سیستم‌ها ضروری خواهد بود که این امر طبیعتاً صرف زمان و هزینه قابل توجهی را می‌طلبد.

### ۴- نتیجه‌گیری

افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش سفرهای درون‌شهری در کلان‌شهرها، نیاز به ساخت تونل‌های بیشتر را بیش از پیش، پررنگ‌تر می‌کند. با توجه به مثال‌های موجود از خرابی‌های بوقوع پیوسته در تونل‌ها در سرتاسر جهان می‌توان اینطور نتیجه گرفت که طراحی و ساخت این نوع سازه‌ها ممکن است همواره با بروز خطرات و تهدیدهایی همراه باشد. در این راستا، در این مقاله تا حدودی با خطراتی که سلامت و ایمنی تونل‌ها و کاربران آن‌ها را تهدید می‌کنند، آشنایی صورت گرفته است. پیامدهای نامناسب ناشی از این خطرات که شامل ایجاد وقفه در

نحوه سرویس‌دهی سیستم حمل‌ونقل درون‌شهری، تهدید برای جان انسان‌ها، وقوع زیان‌های اقتصادی و ... می‌باشند، آسیب‌های زیادی به سرمایه‌گذاران این بخش، متولیان امر و در نهایت مردم وارد خواهند کرد. خطرات و تهدیدهایی که در زمان بهره‌برداری تونل، احتمال مواجه شدن با آن‌ها وجود دارد به شرح ذیل می‌باشد:

۱- وقوع آتش‌سوزی (غیر عمدی یا عمدی): آتش‌سوزی در داخل تونل می‌تواند سلامت کاربران و سازه تونل و تجهیزات داخل آن را تحت تأثیر قرار دهد. این موضوع در نتیجه ممکن است منجر به فوت افراد و یا حتی خرابی کلی تونل گردد. بطورکلی، تأثیر آتش‌سوزی بر روی تونل و کاربران آن را می‌توان در سه بخش، کاهش دید، وجود گازهای سمی و انتقال حرارت ناشی از آن به افراد و تجهیزات خلاصه نمود.

۲- نشت و تخلیه مواد شیمیایی خطرناک: در بسیاری از تونل‌های موجود در سرتاسر دنیا، عبور وسائط نقلیه حامل مواد خطرناک و شیمیایی از داخل آن‌ها ممنوع است. لیکن در صورت عبور وسائط نقلیه حامل مواد خطرناک و شیمیایی از داخل تونل، احتمال بروز خطرات ناشی از انتشار این نوع مواد وجود دارد که بسته به جنس، ماهیت و حجم مواد خطرناک و شیمیایی، سناریوهای مختلفی ممکن است در تونل بوجود آید.

۳- تصادف وسائط نقلیه: تصادف داخل تونل ممکن است ناشی از برخورد وسائط نقلیه به یکدیگر و یا برخورد به دیواره تونل باشد. این قبیل تصادفات ممکن است باعث تخریب بخشی از تونل و یا حتی موجب آتش‌سوزی داخل تونل شده و پیامدهای مخرب قابل توجهی را به همراه داشته باشند.

۴- ورود آب‌های سطحی و سیلاب: ورود آب‌های سطحی به تونل می‌تواند در نتیجه عوامل مختلفی از قبیل عدم اجرای مؤثر سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی، شیب طولی زیاد ورودی تونل و عدم کارکرد مناسب زهکش‌های اجرا شده در تونل رخ دهد. از این رو، ورود آب به داخل تونل و آبگرفتگی آن می‌تواند خطرات زیادی را متوجه کاربران تونل و کاهش سطح ایمنی تونل نماید و همچنین خرابی سیستم‌های الکتریکی، مکانیکی و ارتباطی تونل را منجر شود.

۵- اثرات زلزله بر روی تونل: در صورت مناسب بودن شرایط خاک اطراف تونل، سازه‌های زیرزمینی نسبت به

مقیاس‌های گوناگون ایجاد نمایند و ضمن آسیب رساندن به کاربران تونل، منجر به خرابی کلی تونل شوند.

۹- استفاده از عوامل شیمیایی، بیولوژیکی و رادیواکتیوی: بطورکلی این قبیل عوامل با توجه به نوع و مقدار موجود در محیط می‌توانند برای افراد داخل تونل خطر آفرین بوده و موجب معلولیت، آسیب جسمی و یا حتی مرگ شوند. در خصوص تجهیزات تونل نیز باید اشاره نمود که در صورت وقوع این قبیل عوامل در تونل، در بسیاری از موارد نیاز به تعویض تجهیزات وجود خواهد داشت.

۱۰- حملات سایبری و خرابکارانه: این نوع عملیات می‌توانند منجر به کاهش سطح عملکردی تونل و یا حتی مسدود شدن آن‌ها شوند. در صورت بروز آسیب‌های جدی به سیستم‌های الکتریکی، مکانیکی و ارتباطی موجود در تونل، این امکان وجود دارد که عملکرد این شریان حیاتی را به نحو قابل توجهی به خطر بیندازد.

در انتها بایستی یادآور شد که جایگاه این مقاله را می‌توان به عنوان مقدمه‌ای برای انجام ملاحظات ایمنی و ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل درون‌شهری در مرحله بهره‌برداری تلقی نمود تا با شناسایی خطرات بالقوه و ارزیابی دقیق ریسک مورد انتظار در پروژه، بتوان ایمنی آن را افزایش داد.

سازه‌های سطحی کمتر در معرض آسیب ناشی از زلزله قرار می‌گیرند. اگرچه خرابی‌هایی از تونل‌ها نیز در زلزله‌های گذشته گزارش شده است.

۶- انتشار گازها: احتمال ورود گازهای ناشی از فاضلاب و یا گازهای طبیعی زیرزمینی به تونل در زمان بهره‌برداری وجود دارد که این گازها علاوه بر بوی بد و اثرات مخرب بر سلامتی افراد، ممکن است موجب آتش‌سوزی یا انفجاز شوند. همچنین، در صورت تولید گازهای ناشی از عبور و مرور وسائط نقلیه و عدم تهویه مناسب، این امکان وجود دارد که غلظت این گازها بالا رفته و برای کاربران تونل مشکلاتی را از سردرد تا مرگ ایجاد نمایند.

۷- عدم توجه به امر تعمیر و نگهداری تونل: در صورت وقوع هر گونه آسیب و خرابی در تونل و عدم بازرسی منظم تونل‌ها، امکان پیشرفت آسیب‌ها و خرابی‌ها وجود دارد که در نهایت ممکن است به عدم سرویس‌دهی تونل و یا حتی خرابی کلی تونل منجر شود. لذا تمامی بخش‌های تونل از قبیل سازه، روسازی و تجهیزات آن باید در دوره‌های زمانی مشخص مورد بازرسی و ارزیابی قرار گرفته و عملیات تعمیر و نگهداری در مورد آن‌ها انجام پذیرد.

۸- استفاده از تجهیزات انفجاری: مواد منفجره بسته به نوع و میزان آنها می‌توانند پس از انفجار، خرابی‌های مختلفی را در

جدول ۸. رتبه‌بندی کیفی پیامدهای ناشی از خطرات و تهدیدها روی ایمنی و عملکرد تونل (NCHRP, 2008)

رتبه‌بندی پیامد	اثر پیامد بر ایمنی جانی	اثر پیامد بر سرویس‌دهی تونل	اثر پیامد بر مدت زمان موردنیاز جهت بازگرداندن تونل به وضعیت سرویس‌دهی
بسیار فاجعه‌آمیز	به منظور حفظ ایمنی جانی، تونل بایستی بسته شود	تونل قادر به سرویس‌دهی نبوده و بایستی بسته شود	چندین ماه تا یک سال طول می‌کشد
فاجعه‌آمیز	به منظور حفظ ایمنی جانی، تونل بایستی بسته شود	تونل قادر به سرویس‌دهی نبوده و بایستی بسته شود	چندین هفته تا چند ماه طول می‌کشد
بحرانی	وقایع، ایمنی جانی را تهدید می‌کنند	نیاز به توقف در سرویس‌دهی تونل می‌باشد	چندین روز تا چند هفته طول می‌کشد
جدی	وقایع، ایمنی جانی را تهدید می‌کنند	نیاز به توقف در سرویس‌دهی تونل می‌باشد	۲۴ ساعت تا چند روز طول می‌کشد
۱۷ مرزی	وقایع، ایمنی جانی را تهدید می‌کنند	نیاز به توقف کوتاه مدت در سرویس‌دهی تونل می‌باشد	کمتر از یک ساعت طول می‌کشد
قابل اغماض	وقایع، ایمنی جانی را تهدید نمی‌کنند	وقایع، بر روی سرویس‌دهی تونل تأثیری نمی‌گذارند	وقایع، بر روی شرایط سرویس‌دهی تونل تأثیری نمی‌گذارند

Underground Space Technology, Vol. 25, pp. 70-77.

- Bubbico R., Cave S.D., Mazzarotta B., and Silveti B. (2009), "Preliminary study on the transport of hazardous materials through tunnels", Accident Analysis & Prevention, Vol. 41, pp. 1199-1205.

- Crowl, D.A. (2003), "Understanding Explosions", CCPS Publication, p. 214.

- DMRB (1995), "Inspection and Records for Road Tunnels", Design Manual for Roads and Bridges, Vol. 3, Sec. 1.

- Fabozzi S., V.Licata V., Autuori S., Bilotta E., Russo G. and Silvestri F. (2017), "Prediction of the seismic behavior of an underground railway station and a tunnel in Napoli (Italy)", Underground Space, Vol. 2, pp. 88-105.

- FIT (2001a), "Fire in Tunnels: Design Fire Scenarios", European Thematic Network Fire in Tunnels, WTCB, Brussel, Belgium, pp. 161.

- FIT (2001b), "Fire in Tunnels: General report", European Thematic Network Fire in Tunnels, WTCB, Brussel, Belgium, pp. 76.

- FTA- U.S. Department of Transportation and Federal Transit Administration (2003), "The Public Transportation System Security and Emergency Preparedness Planning Guide", FTA Final Report.

- Hashash Y.M.A., Hook J.J., Schmidt B. and Yao J.I.C. (2001), "Seismic design and analysis of underground structures", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, pp.247-293.

- Jin T. (1978), "Visibility through fire smoke, Journal of Fire and Flammability", Vol. 9, pp.135-155.

- JSCE (1988), "Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures in Japan", Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo.

- Lonnermark A. (2005), "On the Characteristics of Fires in Tunnels", PhD Thesis, Lund University, pp.122.

- Muller C.P., Kampmann J., Tonnesen M. and Kroon I.B. (2008), "Design of the Busan Geoje immersed tunnel for accidental events and

## ۵- پی‌نوشت‌ها

1. Hazard
2. Threat
3. Arson
4. The Organization for Economic Co-operation and Development
5. Boiling Liquid Expandable Vapor Explosion
6. Vapor Cloud Explosion
7. Flash Fire
8. Pool Fire
9. Superficial Inspection
10. General Inspection
11. Principle Inspection
12. Special Inspection
13. Sarin
14. Soman
15. Tabun
16. Cyanogens Chloride
17. Marginal

## ۶- مراجع

- پژوهشکده حمل و نقل (۱۳۸۲)، "آلودگی ناشی از دی‌اکسید نیتروژن در تونل‌های راه"، وزارت راه، مسکن و شهرسازی.

- قیاسوند، ص.، (۱۳۸۶)، "تونلسازی در زمین‌های گازدار (مسائل زمین‌شناسی - مخاطرات مهندسی)"، پنجمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، پژوهشکده سوانح طبیعی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، تهران.

- API 521 (1999), "Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems", Washington, DC: American Petroleum Institute.

- ASCE (1974), "Earthquake damage evaluation and design considerations for underground structures", American Society of Civil Engineers, Los Angeles Section, pp. 174.

- Baji H., Li C.Q., Scicluna S., and Dauth J. (2017), "Risk-cost optimised maintenance strategy for tunnel structures", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 69, pp. 72-84.

- Bari S., and Naser J. (2010), "Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel", Tunnelling and

- tunnel fire event", Case Studies in Fire Safety, Vol. 7, pp. 36-43.
- Tao D., Dong Y., Shini P., Yimin X., and Fan Z., (2014), "Longitudinal Ventilation for Smoke Control of Urban Traffic Link Tunnel: Hybrid Field-network Simulation", Procedia Engineering, Vol. 84, pp. 586-594.
  - Uenishi K., Sakurai S. (2000), "Characteristics of the vertical seismic waves associated with the 1995 Hyogo-Ken Nambu (Kobe), Japan earthquake estimated from the failure of the Daikai underground station", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29 (6), pp. 813-821.
  - Vaitkevicius A., Colella F., and Carvel R., (2016), "Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires", Fire Technology, Vol. 52, pp. 1619-1628.
  - Vollmann G., Thewes M. and Kleen E. (2015), "Development of a highly ductile sprayed concrete as a counter-measure for explosion and fire impacts on underground structures", ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, Dubrovnik, Croatia.
  - Vrouwenvelder A.C.W.M., Krom A.H.M. (2004), "Hazards and the Consequences for Tunnel Structures and Human Life", First International Symposium of Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Prague, pp. 23-32.
  - Wannick, H.P. (2006), "The Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works: Future Tunneling Insurance from the Insurers' Point of View", ITA Conference, Seoul, South Korea.
  - Yuan Y., Bai Y., and Liu J. (2012), "Assessment service state of tunnel structure", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 27, pp. 72-85.
  - extreme loads", World Tunnel Congress - Underground Facilities for Better Environment and Safety, India, pp. 374-382.
  - Nakamura S., Yoshida N., Iwatate T. (1996), "Damage to Daikai Subway Station during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake and Its Investigation", Japan Society of Civil Engineers, Committee of Earthquake Engineering, pp. 287-295.
  - Nathanael E.G., Zaharis S., Vagiokas N. and Prevedouros P.D. (2009), "Risk Assessment for the Transportation of Hazardous Materials through Tunnels", the 89th Annual Meeting of TRB and publication in the Transportation Research Record, p. 21.
  - NCHRP (2008), "Transportation Security: Making Transportation Tunnels Safe and Secure", National Cooperative Highway Research Program Report 525, p. 167.
  - OECD and PIARC (1997), "Transport of dangerous goods through road tunnels: Current National and International Regulations.
  - PIARC (2001), "Safety in Tunnels: Transportation of Dangerous goods through road tunnels".
  - PIARC (2007), "Integrated approach to road tunnel safety", PIARC Technical Committee C3.3 Road tunnel operation, p. 86.
  - Power M.S., Rosidi D., Kaneshiro J. (1996), "Vol. III Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels", Report Draft, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
  - Purser D.A. (2002), "Toxicity Assessment of combustion products", In: P.J. DiNenno (Ed) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy M.A., 2-83-2-171.
  - Sharma S., Judd W.R., (1991), "Underground opening damage from earthquakes", Eng. Geol. 30, pp. 263-276.
  - St. John C.M., Zahrah T.F. (1987), "A seismic design of underground structures", Tunneling Underground Space Technology, Vol. 2 (2), pp. 165-197.
  - Sturm P., Beyer M. and Rafiei M., (2017), "On the problem of ventilation control in case of a