

## خطرهای مترتب بر تونل‌های درون‌شهری در حین طراحی و اجرا

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](mailto:m.ashtiani@nit.ac.ir)

دریافت: ۹۷/۰۵/۲۵ - پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵

صفحه ۲۱۷-۲۰۷

### چکیده

امروزه، وجود محدودیت در فضاهای شهری، لزوم توجه به کاربری زمین از منظر زیست‌محیطی و اجتماعی و همچنین نیاز به توسعه شبکه حمل و نقل شهری، دست‌اندرکاران امر مدیریت شهری را ملزم به استفاده از فضاهای زیرسطحی به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها نموده است. استفاده از این نوع زیرساخت‌ها در کشورهای توسعه‌یافته، نتایج بسیار خوبی را در خصوص کاهش مشکلات ترافیکی و حمل و نقل شهری به همراه داشته است که لزوم استفاده از آن‌ها را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. از طرفی، پتانسیل وقوع خطرات و ریسک مترتب بر تونل‌ها همواره به عنوان اصلی‌ترین چالش تونلسازی در هر سه فاز طراحی، اجرا و بهره‌برداری محسوب شده و با توجه به هزینه بسیار بالای اجرا و بهره‌برداری این قبیل مستحقات، شناسایی این خطرات و بررسی پیامدهای وقوع آن‌ها بر تونل‌ها به منظور کاهش خسارات احتمالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در فازهای طراحی و اجرا، بررسی انواع خطرات مترتب بر تونل‌های شهری نشان می‌دهد که خطرانی از قبیل بروز اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی نظیر تهیه مشخصات فنی و برآورد پارامترهای طراحی، اشتباهات محاسباتی و عددی، اشتباهات مدیریتی و کنترلی، بروز خطا و اشتباهات در مرحله اجرای تونل، خطرات ناشی از ناشناخته بودن فضاهای زیرسطحی، وجود آب زیرزمینی، ورود آب‌های سطحی و سیلاب، اثرات زلزله روی تونل، خطرات ناشی از فرونشست زمین و خطرات ناشی از انتشار گازها را بایستی در محث مدیریت ریسک و تأمین ایمنی تونل‌های درون‌شهری لحاظ نمود.

واژه‌های کلیدی: ایمنی، تونل‌های درون‌شهری، خطر، طراحی و اجرا

### ۱- مقدمه

داشت این است که ممکن است در نتیجه وقوع خطرات و تهدیدهای احتمالی در حین اجرا و بهره‌برداری، آسیب‌ها و خرابی‌هایی متوجه تونل گردیده و یا زندگی کارگران و افراد استفاده‌کننده از 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

رشد شهرنشینی و افزایش جمعیت در کلان‌شهرها، موجب افزایش سفرهای روزمره درون‌شهری شده که در نتیجه آن نیاز به توسعه شبکه ارتباطی به منظور اتصال نواحی مختلف شهر به یکدیگر، بیش از پیش احساس می‌شود. همچنین، با توجه به قیمت بالای اراضی شهری در کلان‌شهرها، ساخت و بهره‌برداری از فضاهای زیرزمینی خصوصاً تونل‌ها جهت نیل به توسعه شهری همواره مورد توجه مدیران شهری بوده است. اما مسئله مهمی که بایستی در این بخش بدان توجه

اشتباهات در زمان طراحی و همچنین وقوع مخاطرات در حین اجرا نیز به مراتب افزایش می‌یابد. لذا، در این مقاله سعی شده است بررسی نسبتاً جامعی بر روی اشتباهات و خطرات مترتب برای تونل‌ها در زمان طراحی و اجرای تونل انجام پذیرد. انتظار می‌رود که با شناسایی خطرات مترتب بر تونل‌ها در گام اول، ارزیابی ریسک اجرای فضاهای زیرسطحی به درستی انجام پذیرد و با پیش‌بینی برنامه عملیاتی برای هر یک از خطرات، پیامدهای منفی آن‌ها را به حداقل رساند.

## ۲- تعریف خطر

خطر به معنای عام عبارت است از وقوع هرگونه شرایط یا وضعیتی که 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 درون‌شهری، ممکن است وقوع انواع مختلفی از خطر را در حین زمان ساخت و اجرا، 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، ممکن است همواره در معرض خطرات ناشی از این نوع عوامل قرار داشته باشند.

## ۳- تعریف گسیختگی و مودهای گسیختگی

### تونل‌ها

گسیختگی به منزله کاهش و یا از دست رفتن ظرفیت باربری جزئی از تونل و یا کل سازه تونل می‌باشد. گسیختگی زمانی آغاز می‌گردد که میزان تنش ایجاد شده در مصالح و یا اعضاء از مقاومت واقعی آن‌ها بیشتر شود که در اینصورت موجب ترک‌خوردگی، شکست اعضاء و یا ایجاد تغییرشکل‌های بیش از حد مجاز در سازه خواهد شد. میزان گسیختگی اجزای یک تونل را می‌توان از قله‌کن شدگی موضعی<sup>۱</sup> (یعنی، گسیختگی موضعی)، شکاف موضعی<sup>۲</sup>، گسیختگی جزئی یا کلی تا گسیختگی پیش‌رونده<sup>۳</sup> تقسیم‌بندی و دسته‌بندی نمود.

تلاش‌ها باید در جهت پرهیز از خطرات و یا به حداقل رساندن پیامدهای آن‌ها صورت پذیرد.

از جمله مخاطراتی که ممکن است در حین مراحل طراحی و اجرا متوجه تونل‌های شهری گردند، می‌توان به مواردی از قبیل خطرات ناشی از عدم شناخت وضعیت زیر سطح زمین و یکسان نبودن مشخصات لایه‌های خاک و سنگ پیرامون تونل در طول مسیر (جنبه‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی)، روش اجرا (شامل روش حفاری، مقاومت پوشش، شاتکریت و ...)، خطاهای انسانی (در مرحله طراحی و حفاری)، شرایط ناشناخته وجود سفره‌های آب زیرزمینی و عدم اطلاع از تراز دقیق آن‌ها، وجود گسل‌ها و پتانسیل وقوع زلزله و جابجایی‌های بزرگ، احتمال نشست آب شهری به داخل تونل به علت فرسودگی شبکه آب و همچنین فاضلاب به داخل آن به دلیل عدم وجود شبکه یکپارچه فاضلاب در سطح شهر، وجود حفرات زیرزمینی مانند قنات‌ها و عدم اطمینان از موقعیت دقیق اجرای تأسیسات شهری در طول و عرض یک معبر، از جمله آب، گاز، فاضلاب و تجهیزات الکتریکی (بدلیل عدم وجود نقشه‌های چون‌ساخت) که ایمنی و امنیت تونل را به مخاطره بیندازد، اشاره نمود. با بررسی‌های انجام شده در ادبیات فنی می‌توان پی برد که از سال ۱۹۹۰ تاکنون اغلب مخاطرات بوجود آمده در حین اجرای تونل‌ها در نتیجه عدم شناخت ناشی از وضعیت و شرایط ژئوتکنیکی، سوابق لرزه‌خیزی محل پروژه و همچنین وضعیت آب زیرزمینی بوده که منجر به گسیختگی بخش‌هایی از محور تونل شده است. گسیختگی تونل Heathrow انگلیس در سال ۱۹۹۴ ناشی از اجرای نامناسب تونل و وقوع گسیختگی در تونل آناتولیا ترکیه در سال ۱۹۹۹ ناشی از فعال شدن یک گسل در مجاورت آن از جمله مثال‌های واقعی در این ارتباط می‌باشند (Wannick, 2006). در شهر تهران نیز تاکنون حوادثی چند در حین حفاری تونل‌های ماشین‌رو و مترو به وقوع پیوسته است که ممکن است دلیل آن عدم بررسی جامع میزان پتانسیل وقوع مخاطرات باشد، در این رابطه می‌توان به ریزش تونل شهری توحید، ریزش تونل خط ۳ مترو در حوالی پادگان قلعه مرغی، جنوب میدان منبریه و ریزش خط یک مترو در نزدیکی قلهک اشاره کرد. در این ارتباط، با توجه به افزایش ساخت تونل‌های درون‌شهری در کشور، احتمال وقوع

مربوطه و بیمه، حادثه مذکور خسارات مالی به ارزش ۴۰ میلیون دلار برای ۵/۵ هفته پمپاژ آب از داخل تونل و دو میلیارد دلار خسارات ناشی از عدم کسب درآمد، کاهش درآمدهای مالیاتی و آسیب به تونل برجای گذاشت.



شکل ۱. خرابی های برجای مانده در نتیجه ورود سیل به تونل حمل بار شیکاگو

#### ۴-۲- گسیختگی تونل Heathrow، انگلستان

موقعیت: لندن، انگلیس  
 زمان وقوع: ۲۳-۲۰ اکتبر، ۱۹۹۴  
 طبقه بندی حادثه: اجرای نامناسب تونل و گسیختگی آن  
 طول تونل: ۸۸۵ متر  
 مجروحین و کشته ها: بدون کشته و مجروح

گسیختگی های تونل مذکور در سه نوبت در فاصله زمانی کمتر از یک روز نسبت به یکدیگر و در بخش ترمینال مرکزی فرودگاه Heathrow اتفاق افتادند (شکل ۲). براساس بازرسی های انجام گرفته، دلایل گسیختگی تونل عبارت بودند از:

۱. کیفیت نامناسب شاتکریت اجرا شده
۲. استفاده دیرهنگام از قاب های مشبک<sup>۴</sup> و همچنین تفاوت محسوس فرم (شکل) آن ها نسبت به پروفیل تونل
۳. خرابی درزها در محل اتصال چندین سگمنت تونل به یکدیگر
۴. طراحی نامناسب و ناکارآمد تونل
۵. اجرای سه تونل بطور همزمان

خرابی های رخ داده در این تونل، خسارت مالی در حدود ۱۵۰ میلیون پوند را برای شروع دوباره اجرای تونل به همراه داشت.

زمانی که گسیختگی تونل و یا پوشش آن بصورت موضعی یا کلی باشد و منجر به گسترش آسیب به محیط خاک اطراف تونل (یعنی، گسیختگی تونل) و یا ورود آب (یعنی، سیلاب) گردد، این نوع گسیختگی ها به عنوان گسیختگی های کلی در نظر گرفته می شوند. اما در صورتی که ناپایداری، سازه های زیرزمینی مجاور را نیز در بر گرفته و یا آسیب به سازه های روستحی نیز وارد شود، این نوع گسیختگی به عنوان گسیختگی پیش رونده محسوب می گردد. وقوع سیلاب در زیرساخت های زیرزمینی سیستم های حمل و نقل را نیز می توان به عنوان گسیختگی پیش رونده در نظر گرفت.

#### ۴-۱- مثال هایی از گسیختگی و آسیب های وارده به تونل ها در اقصی نقاط جهان (NCHRP, 2008)

##### ۴-۱-۱- وقوع سیل در تونل درون شهری حمل بار

##### شیکاگو، آمریکا

موقعیت: شیکاگو، ایلینویز  
 زمان وقوع: ۱۳ آوریل، ۱۹۹۲  
 طبقه بندی حادثه: سیل در تونل حمل بار واقع در زیر سطح آب زیرزمینی، که منجر به عدم سرویس دهی تونل گردید.  
 طول تونل: ۸۰ کیلومتر  
 مجروحین و کشته ها: بدون مجروح و کشته

اجرای شمع در کف رودخانه شیکاگو سبب نشست آب به داخل تونل راه آهن زیرزمینی شد. با ورود آب به داخل تونل، سرتاسر طول ۸۰ کیلومتری آن را آب فراگرفت (شکل ۱). اگرچه این حادثه تلفات جانی در پی نداشت، لیکن در اثر آسیب ناشی از سیلاب به بیش از ۵۰ ساختمان مجاور تونل، ساکنین ساختمان ها مجبور به تخلیه آن ها شدند. سیلاب به فروشگاه ها نیز سرایت کرده و سبب تعطیلی مراکز خدماتی در بخش های تجاری شهر شیکاگو گردید. بیش از ۲۵۰۰۰۰ نفر از ساختمان های پرجمعیت و معروف شهر شیکاگو از قبیل برج Sears، مرکز بازرگانی Merchandise و فروشگاه زنجیره ای MarshalField تخلیه شدند. با توجه به بررسی های انجام شده و گزارش های ارائه شده از طرف سازمان های



شکل ۲. خرابی های ناشی از گسیختگی تونل زیر محوطه فرودگاه Heathrow

زمین لرزه ای در محدوده حفاری ها می باشد. از این رو، مسلم است که باید در مراحل اولیه هر پروژه تلاش های زیادی برای دستیابی به یک تصویر روشن از شرایط و خصوصیات زمین انجام پذیرد. این بدین معنی است که منابع (چه از نظر مالی و چه نیروی انسانی) و زمان کافی بایستی به منظور جمع آوری اطلاعات زمین شناسی، ژئوتکنیکی و زمین لرزه ای و بررسی های اکتشافی در پروژه های حفاری تونل تخصیص یابند تا بتوان از پیچیدگی ها و مشکلات خاصی که در خصوص عدم شناخت شرایط زمین اطراف تونل وجود دارد، تا حد زیادی کاست.

ج- روباره تونل: با کاهش روباره تونل، پتانسیل و احتمال آسیب سازه ای به تونل افزایش می یابد. هر چه روباره تونل کاهش یابد احتمال گسترش گسیختگی بوجود آمده در اطراف تونل به سطح زمین افزایش یافته که این امر به نوبه خود موجب افزایش آسیب رسانی به سازه های اطراف تونل واقع در روی سطح زمین نیز خواهد شد.

د- شرایط آب زیرزمینی: قرار گرفتن تونل در معرض آب زیرزمینی، پتانسیل آسیب پذیری آن را افزایش می دهد. در این خصوص بایستی خاطرنشان ساخت که هرچه اندازه دانه های خاک اطراف تونل بزرگتر باشد، به دلیل افزایش میزان نفوذپذیری مصالح، احتمال آسیب وارده به تونل و شدت آن بیشتر خواهد بود. همچنین، برای یک تونل واقع در محیطی با جریان ملایم آب (بطور مثال، تونل های مستغرق خاکریزی شده توسط مصالح شنی) یا جریان زیاد آب (بطور مثال، تونل های مستغرق خاکریزی شده توسط مصالح سنگریزه ای درشت دانه)، به دلیل جاری شدن سیل و همچنین

## ۵- فاکتورهای کلیدی در ارزیابی آسیب پذیری

### تونل های حمل و نقل

به دلیل ماهیت منحصر به فرد سازه های زیرزمینی در تأثیرپذیری از عوامل و شرایط واقع در زیر سطح زمین، آسیب پذیری تونل ها باید با در نظر گرفتن اثرات متقابل عامل و یا عوامل خرابی و همچنین نوع و وضعیت سازه و زمین اطراف آن بررسی و ارزیابی گردد. عوامل کلیدی که می توانند بر روی میزان آسیب پذیری سازه ای در مواجهه با خطرات و تهدیدها تأثیرگذار باشند، به شرح ذیل می باشند:

الف- روش اجرای تونل: بطور کلی، پتانسیل آسیب پذیری تونل های مستغرق و حفاری روباز و محیط اطراف آنها در حین اجرا، به دلیل عمق پوشش کم تونل به طور معمول و همچنین طبیعت مصالح خاکریز اطراف آن، به مراتب بیشتر از تونل های اجرا شده با ماشین های حفاری تونل می باشد. اگر بنا به هر دلیلی، شکافی در تونل مستغرق ایجاد شود، امکان ورود آب به داخل تونل و جاری شدن سیل در آن بسیار محتمل خواهد بود و در صورتی که تونل ها به یکدیگر متصل باشند ممکن است در بسیاری از شریان های زیرزمینی سیستم حمل و نقل جاری شدن سیل به وقوع بپیوندد.

ب- نوع و شرایط زمین و خاک اطراف تونل: وجود عدم قطعیت در شناخت وضعیت محیط پیرامون تونل ها، بارها به عنوان یکی از دلایل اصلی گسیختگی آن ها عنوان شده است و متخصصین بسیاری در خصوص تأثیرگذاری پارامترهای مرتبط با این عامل در یک پروژه خاص تونل تأکید داشته اند (Seidenfu, 2006). در این زمینه، یکی از مهمترین چالش ها، عدم امکان شناسایی کامل شرایط زمین شناسی، ژئوتکنیکی و

مراحل طراحی و اجرا تقسیم‌بندی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۶-۲- انواع خطرات محتمل بر تونل‌ها در مراحل طراحی و اجرا

انواع خطرات محتمل بر تونل‌ها در مراحل طراحی و اجرا عبارتند از:

الف- بروز اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی، تهیه مشخصات فنی و برآورد پارامترهای طراحی

ب- اشتباهات محاسباتی و عددی

ج- اشتباهات مدیریتی و کنترلی

د- بروز خطا و اشتباهات در مرحله اجرای تونل

ه- خطرات ناشی از ناشناخته بودن فضاهای زیرسطحی در مناطق شهری

و- وجود آب زیرزمینی

ز- ورود آب‌های سطحی و سیلاب به داخل تونل

ح- اثرات زلزله روی تونل

ط- خطرات ناشی از فرونشست زمین

ی- خطرات ناشی از انتشار گازها

## ۶-۲-۱- بروز اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی، تهیه مشخصات فنی و برآورد پارامترهای طراحی

بروز اشتباهات در مرحله برنامه‌ریزی ممکن است ناشی از برآورد نامناسب و تصمیم‌های نادرست مهندسی در خصوص اجرا و مباحث فنی، ترتیب و توالی اجرای مراحل حفاری تونل و همچنین عدم رعایت معیارها و ضوابط جهت حصول به مشخصات فنی مناسب (بطور مثال، مشخصات فنی موردنیاز برای انتخاب مصالح مورد استفاده در پوشش تونل) باشند. بدیهی است عواقب ناشی از اتخاذ این نوع تصمیم‌گیری‌ها در مرحله برنامه‌ریزی ممکن است برای تونل بسیار خطرناک و بعضاً فاجعه‌آمیز باشد.

خطاها و اشتباهات متداول در مرحله برنامه‌ریزی عبارتند از:

- انتخاب نادرست تراز و مسیر تونل در نتیجه عدم در نظرگیری لایه‌های مناسب زمین‌شناسی برای عبور آن و همچنین و عدم برخورداری از ضخامت کافی روبراه در طول مسیر تونل

آسیب‌های وارده بر سیستم‌های عملیاتی، احتمال آسیب کلی سیستم بسیار بالا خواهد بود.

ه- مشخصات سازه، پوشش و سیستم نگهداری تونل مشخصات سازه‌ای تونل در میزان پتانسیل آسیب‌پذیری این نوع سازه نقش بسیار مهمی دارد. بطور کلی، یک پوشش سازه‌ای با ضخامت بیشتر، مقاومت نسبی سازه‌ای بزرگتر، مسلح‌کننده‌های محصورکننده بیشتر (در پوشش‌های بتنی) و دارای قابلیت شکل‌پذیری بالاتر، تحت اثر بارگذاری‌های بسیار بزرگ (مانند، انفجار، زلزله و ...) عملکرد بهتری دارد.

## ۶- انواع خطرهای محتمل بر تونل‌های درون شهری

بایستی بیان نمود که تمامی خطرات معرفی شده در این مقاله ممکن است اثرات منفی بر روی عملکرد معمول و متداول تونل‌ها و زیرساخت‌های وابسته به آن داشته باشند. تونل‌ها و زیرساخت‌های مرتبط با آن‌ها در واقع 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 خطراتی که ممکن است در طول دوران طراحی و اجرا برای تونل‌ها رخ دهند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. لذا، در مبحث بعدی ابتدا به تقسیم‌بندی انواع خطرات پرداخته شده و سپس هر یک از آن‌ها تشریح می‌گردند.

## ۶-۱- تقسیم‌بندی خطرات

همانطور که از شواهد و تجربیات مرتبط با اجرای تونل‌ها پیداست، این احتمال وجود دارد که بنا به دلایل مختلفی، تونل‌ها در زمان طراحی و اجرا با خطراتی مواجه شوند که سلامت آن‌ها را به مخاطره اندازد. در این قسمت سعی شده است که این نوع خطرات به تفکیک زمان وقوع در مرحله موردنظر (یعنی طراحی یا اجرا) تقسیم‌بندی شوند. باید اشاره نمود که برخی از خطرهای منحصراً در زمان اجرا و یا قبل از آن و برخی دیگر در زمان بهره‌برداری رخ می‌دهند؛ اما مجموعه‌ای دیگر از خطرهای وجود دارند که در مرحله اجرا و بهره‌برداری مشترک می‌باشند. از این‌رو، در مقاله حاضر کلیه خطرهای محتمل در قبل از مرحله بهره‌برداری تونل یعنی

- اتخاذ مقادیر نادرست برای پارامترهای طراحی
- مدلسازی نادرست اثرات متقابل آب و خاک بر سازه تونل
- استفاده از برنامه‌های کامپیوتری نامتناسب و یا نامعتبر در تحلیل و طراحی
- بروز اشتباهات عددی در جمع‌آوری اطلاعات مربوط به پایش تونل‌ها
- عدم موفقیت در پردازش سریع و دقیق اطلاعات عددی پایش
- وجود پیچیدگی‌های ذاتی در مصالح (از قبیل وجود ناپوستگی در توده‌سنگ، اثرات مقیاس، مصالح موجود در محدوده تحت تأثیر حفاری و ...) و اثرات مستقیم آن بر مدلسازی
- بروز اشتباهات فردی و یا عدم تجربه کافی در نحوه مدلسازی، تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از تحلیل
- در نظر گرفتن فرضیات ساده‌سازی نادرست در مدلسازی تونل و یا استفاده از روش‌های تحلیل عددی نامتناسب

#### ۶-۲-۳- اشتباهات مدیریتی و کنترلی

- اطلاعاتی که قبل از اجرای تونل و در نتیجه حفر گمانه‌ها از بررسی و شناخت وضعیت لایه‌های زمین‌شناسی و پروفیل محیط خاک در برگرفته تونل بدست می‌آید و براساس آن طراحی صورت می‌گیرد، بایستی حتماً در هنگام اجرا پایش و صحت‌سنجی گردند. هدف از انجام عملیات پایش، تدقیق و به روز نمودن اطلاعات بدست آمده از وضعیت سازه تونل و محیط پیرامون آن و همچنین اعتبارسنجی پیش‌بینی‌ها و تخمین‌های انجام شده اولیه حین طراحی می‌باشد که شامل نقشه‌برداری از سینه‌کار و دیواره‌های تونل، نصب حسگرها و به دنبال آن اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها، نشست‌ها، لرزش‌ها و تراز آب زیرزمینی حین اجرای تونل می‌باشد. از این‌رو، کنترل پایداری سازه تونل و محیط پیرامون آن در حین اجرا، بایستی به صورت پیوسته و از طریق مقایسه بین پیش‌بینی‌ها و تخمین‌های مختلف در مراحل برنامه‌ریزی و طراحی و اندازه‌گیری‌ها در مرحله اجرا صورت گیرد.
- در این خصوص، موارد احتمالی که رویداد آن‌ها در قالب اشتباهات مدیریتی، نظارتی و کنترلی ممکن است احداث تونل را به مخاطره اندازند، عبارتند از:
- بهره‌گیری از طراحان فاقد تجربه کافی
  - بهره‌گیری از مدیران کارگاهی فاقد تجربه کافی

- تخمین و برآورد اولیه نادرست مشخصات محیط پیرامون تونل و مصالح و در نهایت انتخاب پوشش نامناسب برای تونل
- انتخاب روش‌های حفاری و نگهداری تونل بدون توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه
- عدم کفایت مشخصات فنی پیشنهادی برای مصالح در ساخت تونل
- عدم کفایت مشخصات فنی روش‌های پیشنهادی جهت تعمیر پوشش تونل
- عدم برنامه‌ریزی یا برنامه‌ریزی نادرست در مواقع اضطراری و پیش‌بینی نشده
- انتخاب روش نادرست حفاری

بایستی خاطر نشان ساخت که جهت حصول به یک برنامه‌ریزی صحیح و منسجم و همچنین عدم مواجهه با هر یک از اشکالات فوق، باید پارامترها و مشخصات توده دربرگیرنده تونل به عنوان داده‌های ورودی در طراحی آن، پس از تعیین در محل و آزمایشگاه، مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گرفته و از میزان صحت و اعتبار آن‌ها اطمینان حاصل گردد.

#### ۶-۲-۲- اشتباهات محاسباتی یا عددی

اشتباهات محاسباتی به نحوه محاسبه و استخراج پارامترهایی برمی‌گردند که اساساً در محل و یا در آزمایشگاه تعیین می‌شوند و یا اینکه مستخرج از تحلیل داده‌های حاصله از پایش تونل‌ها می‌باشند. عموماً در مرحله برنامه‌ریزی و طراحی، این نوع اشتباهات ناشی از عدم دقت در انجام محاسبات می‌باشند که منجر به تخمین مقادیر غیرواقعی و یا نادرست پارامترهای مربوط به توده دربرگیرنده تونل و مصالح مورد استفاده در ساخت تونل می‌گردد. همچنین، در مرحله ساخت و اجرای تونل، اشتباهات محاسباتی بیشتر به نحوه پردازش و استفاده از اطلاعات پایش حین حفاری برمی‌گردد. اشتباهات عددی نیز از جمله دیگر موارد خطا بوده که در مرحله انجام تحلیل‌های موردنیاز برای طراحی و اجرای تونل‌ها و همچنین تفسیر نتایج حاصل از آن‌ها رخ می‌دهند که اصولاً در مرحله طراحی تونل حادث می‌گردند.

انواع خطاها و اشتباهات محاسباتی و عددی محتمل در تحلیل، طراحی و اجرای یک تونل عبارتند از:

- ناتوانی مدیریتی در یادگیری و تجربه اندوزی از تجارب قبلی (چه تجارب خوب و چه تجارب بد)
- بهره‌گیری از پیمانکاران اجرایی فاقد صلاحیت و تجربه کافی
- نظارت نامناسب بر فعالیت‌های اجرایی حین طراحی و ساخت
- ناتوانی و عدم تجربه کافی در استفاده از اطلاعات بدست آمده از پایش تونل و تجزیه و تحلیل آن‌ها
- استفاده از ابزارهای پایش دارای عملکرد نامناسب و دقت ناکافی: استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری و حسگرها و بهره‌گیری از نتایج حاصله از آن‌ها به منظور اعتبارسنجی طراحی‌های انجام شده، تعیین احتمال وقوع خرابی‌ها و همچنین بکارگیری آن‌ها در پروژه‌های آتی، مدنظر می‌باشند. از این‌رو، ابزارهای پایش باید بگونه‌ای باشند که اطلاعات درست و دقیقی را در اختیار مهندسين قرار دهند. به عبارت دیگر، استفاده از ابزارهای معیوب و با دقت ناکافی، پتانسیل وقوع خطر برای سلامت و ایمنی تونل‌ها را افزایش خواهد داد. از این‌رو، بایستی با تدوین یک برنامه زمانبندی مناسب و متعاقب آن با انجام عملیات بازرسی دوره‌ای منظم، از صحت و دقت این نوع ابزارها اطمینان کافی حاصل نمود.

#### ۶-۲-۴- بروز خطاها و اشتباهات در مرحله اجرای تونل

بروز خطاها و اشتباهات در مرحله اجرای تونل، در نتیجه کیفیت نامناسب عملیات حفاری، استفاده از مصالح و ابزار معیوب و عدم کنترل کیفیت آن‌ها، عدم تطابق مابین موارد طراحی و اجرا و همچنین برآورده نشدن معیارها و مشخصات فنی تونل بوجود می‌آیند. برای مثال، تزریق کمتر از حد نیاز گروت جهت اتصال پوشش تونل، ممکن است سبب تغییرشکل محیط اطراف تونل، افزایش نشست روی سطح زمین و در نتیجه آسیب رسیدن به سازه‌های اطراف تونل و همچنین تأخیر در اجرای تونل شود. همچنین اگر در زمین‌های نسبتاً ناپایدار و یا شدیداً ناپایدار از سیستم نگهداری در زمانی مناسب استفاده نشود، ممکن است حفراتی در تونل ایجاد شده و در نهایت باعث گسیختگی آن شود.

- برخی از متداول‌ترین خطاهای اجرایی عبارتند از:
  - اجرا نشدن ضخامت تعیین شده پوشش تونل در طراحی
  - مقاومت و ضخامت ناکافی شاتکریت، که باعث کاهش مقاومت نهایی پوشش می‌شود
  - نصب دیر هنگام سیستم نگهداری، که در نتیجه باعث افزایش طول حفاری شده بدون نگهداری و همچنین کاهش محدوده اطمینان پایداری تونل می‌شود
  - نصب نادرست انکرها و قاب‌های مشبک
  - ریزش مصالح حفاری تونل و مصالح بازگشتی<sup>۵</sup> ناشی از پاشش شاتکریت بر روی بتن کف
  - تعمیرات نامناسب پوشش اجرا شده
  - برداشت و تفسیر نادرست از گزارش‌ها (گزارش‌های طراحی، بررسی اطلاعات پایش و ...)
  - استفاده از ماشین‌های حفاری با عملکرد نامناسب: نوع روش و نوع ماشین حفاری بسته به نوع زمین و شرایط زمین‌شناسی منطقه تعیین می‌گردد. اگر بنا به هر دلیلی نوع ماشین حفاری درست انتخاب نشود ممکن است خسارت‌های جانی و اقتصادی زیادی را به پروژه تحمیل کند. بطور مثال، برای حفاری در زمین‌هایی که سطح آب زیرزمینی بالاست و احتمال ورود آب به داخل تونل وجود دارد، باید از ماشین‌های حفاری فشار تعادلی زمین<sup>۶</sup> و یا سپر گل حفاری<sup>۷</sup> استفاده نمود یا در صورتی که حفاری در زمین‌های نرم انجام می‌گیرد، نمی‌توان از دستگاه‌های حفاری از قبیل روددر<sup>۸</sup> استفاده کرد و حتماً باید از ماشین‌های حفاری تمام مقطع<sup>۹</sup> بهره جست.

#### ۶-۲-۵- خطرات ناشی از ناشناخته بودن فضاهای زیرسطحی در مناطق شهری

با افزایش روزافزون میزان جمعیت در مناطق شهری و صنعتی شدن شهرها و همچنین به منظور بالا بردن کیفیت زندگی مردم، نیاز به توسعه بیش از پیش زیرساخت‌ها و تأسیسات شهری از قبیل شبکه‌های آبرسانی، انتقال برق و گاز، جمع‌آوری فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، تونل‌های مترو و ...، روز به روز نمود بیشتری پیدا می‌کند. امروزه، برای ساخت و توسعه این نوع زیرساخت‌ها و تأسیسات بخصوص در کلان‌شهرها، سعی می‌گردد تا از فضاهای زیرسطحی بیشترین استفاده به عمل آید. استفاده از این نوع فضاها علاوه بر حفظ زیبایی شهر، مشکلات کمتری را برای

ممکن است منجر به انفجار داخل فضای تونل، ورود فاضلاب و آب به داخل فضای آن و بصورت عام موجب وقوع ریزش‌های موضعی و حتی کلی گردد.

همچنین عدم در نظر گرفتن اثر موانع تأسیساتی-که از مجاورت یک تونل عبور می‌نمایند- در تحلیل و طراحی آن ممکن است سازه را در حین مراحل اجرا و بهره‌برداری دچار مشکل نماید. به عنوان مثال، چنانچه در اطراف سازه تونل، حفره یا حفراتی وجود داشته باشند که تأثیر آن‌ها بر سازه در تحلیل و طراحی بررسی نشده باشد، ممکن است سازه را در حین اجرا و یا دوره بهره‌برداری دچار تغییر شکل‌های زیاد نموده که وقوع این نوع تغییر شکل‌ها می‌تواند نشست‌های قابل توجهی را در اطراف سازه تونل بوجود آورده و در نهایت موجب فرونشست سطح زمین و یا خرابی سازه‌ای در تونل شوند.

#### ۶-۲-۶- وجود آب زیرزمینی

تونلسازی در فضاهای زیرسطحی اشباع و حاوی آب زیرزمینی، همواره مخاطره آمیز بوده و مشکلات و چالش‌های بسیاری را در حین عملیات حفاری متوجه تونل‌ها نموده است. مشکلاتی که ممکن است در اثر وجود آب زیرزمینی در اطراف تونل برای این سازه بوجود آید را می‌توان از بررسی‌های گسترده در موقعیت‌های مختلف و با استفاده از گمانه‌های اکتشافی پیش‌بینی نمود. هر چند، پیش‌بینی دقیق مقدار دبی آب ورودی به تونل معمولاً دشوار می‌باشد. قرارگیری تراز زیرین تونل در زیر تراز آب زیرزمینی و یا در معرض حفرات زیرزمینی<sup>۱۱</sup> قرار گرفتن تونل‌ها در حین اجرا، می‌تواند احتمال جریان یافتن مصالح اشباع و سست به داخل فضای تونل را میسر سازد. در نتیجه، شناسایی و پیشگیری این قبیل شرایط مخاطره‌آمیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده و حیاتی است.

از سوی دیگر، وجود جریان آب زیرزمینی، فرآیند حفاری تونل را در تمامی مراحل تحت تأثیر قرار خواهد داد. در حین حفاری تونل، وجود گرادیان هیدرولیکی ناشی از آب زیرزمینی ممکن است سبب شسته شدن مصالح اطراف این سازه زیرزمینی گردد. بعلاوه، در اثر این گرادیان، فشارهای هیدرودینامیک در محیط پیرامون بوجود خواهد آمد که موجب کاهش پایداری سینه حفاری تونل خواهد شد. بعد از اتمام عملیات حفاری، این امکان نیز وجود

رفت‌وآمد مردم در هنگام اجرای تأسیسات به همراه خواهند داشت. در این خصوص یکی از اقدامات مهم در زمینه کاهش مخاطرات ناشی از احداث تونل‌ها در محیط‌های شهری، تهیه نقشه‌های چون ساخت مربوط به تأسیسات فوق‌الذکر پس از اتمام عملیات اجرایی آن‌ها می‌باشد تا بدین وسیله نسبت به موقعیت دقیق اجرای آن‌ها اطلاعات کافی فراهم گردد. یکی از موارد کاربرد این نقشه‌ها، استفاده از آن‌ها هنگام برنامه‌ریزی به منظور تعیین بهترین مسیر و موقعیت ممکن و همچنین انتخاب شیب مناسب برای احداث یک سازه زیرزمینی می‌باشد. از این‌رو، عدم وجود نقشه‌های چون ساخت برای تأسیسات شهری می‌تواند مشکلات زیادی را در فاز برنامه‌ریزی به لحاظ ناشناخته بودن فضای زیرسطحی و عدم اطلاع دقیق از موقعیت تأسیسات معارض، متوجه احداث تونل نموده و علاوه بر افزایش پتانسیل خطرات متنوع وارد بر این نوع سازه زیرزمینی، هزینه و زمان اجرای پروژه را به نحو قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد.

تهران از جمله کلان‌شهرهایی است که تأسیسات قابل توجهی در فضاهای زیرسطحی آن تعبیه شده که ممکن است اجرای تونل‌ها را در این شهر همواره با مشکلات و خطراتی همراه نماید. از دیگر مشکلاتی که در شهر تهران و در بحث اجرای فضاهای زیرزمینی وجود دارد تعارض این نوع فضاها با قنوت زیرزمینی می‌باشد که به وفور در زیر سطح زمین یافت می‌شوند. نبود نقشه‌های مربوط به موقعیت دقیق این قنوت، نیز همواره مشکلاتی را برای احداث فضاهای زیرزمینی ایجاد کرده است.

در این ارتباط، عدم توجه کافی به موقعیت دقیق تأسیسات زیرزمینی و قنوت در فازهای شناسایی و طراحی فضاهای زیرزمینی، نبود نقشه‌های چون ساخت تأسیسات، عدم هماهنگی و همکاری بین سازمان‌های ذیربط در فازهای ابتدایی پروژه در خصوص شناسایی محل تأسیسات حین تعیین مسیر تونل و احتمال برخورد حفاری با هر یک از تأسیسات و موانع طبیعی فوق‌الذکر، از جمله خطراتی است که تونل‌های زیرسطحی در شهر تهران را در مرحله اجرا همواره تهدید می‌کنند. در واقع، این خطرات می‌توانند در حین اجرا و در صورت برخورد با هر یک از موانع تأسیساتی از قبیل لوله‌های گاز، مجاری فاضلاب، لوله‌های آب و یا موانع طبیعی نظیر قنوت روی دهند که به ترتیب



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 درون شهری 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، 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 کار و یا عبور از تونل می‌باشند، تجهیزات و ماشین‌آلات اجرا و همچنین سیستم‌های الکتریکی، مکانیکی و ... داخل تونل نماید.

#### ۶-۲-۸- 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 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 تمایل به جابجایی همزمان با زمین اطراف خود را داشته و سطح عملکرد سازه‌ای خود را حفظ خواهد کرد.

اما مسئله مهمی که در خصوص اثر زلزله بر روی تونل در زمان اجرا باید توجه داشت احتمال کم همزمان شدن عملیات ساخت تونل با وقوع زلزله می‌باشد. با توجه به مدت زمان نسبتاً کوتاه اجرای تونل در مقایسه با دوره بازگشت زلزله‌ها، این امکان وجود دارد که بتوان تأثیر زلزله بر روی اجرای تونل را نادیده گرفت.

خواهد داشت که آب موجب نرم‌شدگی خاک‌های سیلتی و رسی شود. زمین‌هایی که شامل انیدریت<sup>۱۱</sup> و یا کانی‌های رسی خاصی نظیر مونت‌موریونیت<sup>۱۲</sup> هستند، تمایل به متورم شدن دارند. متورم شدن این خاک‌ها، فشارهای اضافی به پوشش تونل وارد خواهند نمود که در صورت لحاظ نکردن آن‌ها در طراحی ممکن است پوشش تونل دچار ترک‌خوردگی و احیاناً گسیختگی گردد که در نهایت هجوم آب و مصالح خاکی را به داخل تونل به همراه خواهد داشت. در مرحله بهره‌برداری، پوشش آبنند تونل‌ها باید قبلاً برای فشار هیدرواستاتیک ناشی از محیط اشیاع پیرامون خود طراحی شده باشد. همچنین، سیستم‌های زهکشی تونل‌ها نیازمند نگهداری و تعمیرهای دوره‌ای منظم به منظور حصول اطمینان از فرآیند دائمی زهکشی می‌باشند.

از سوی دیگر، با توجه به آن‌که تونل‌های حمل و نقل درون‌شهری نظیر تونل‌های مترو با یکدیگر در ارتباط هستند، اگر در بخشی از سازه یک تونل واقع در محیط اشیاع از آب، گسیختگی بوجود آید، یعنی به عنوان مثال پوشش تونل دچار شکاف موضعی شده و یا درز اتصال سگمنت‌ها دچار گسیختگی گردد، وقوع این امر می‌تواند سبب ورود آب به داخل تونل و متعاقب آن آب‌گرفتگی کامل تونل و در ادامه جاری شدن سیل و انتقال آن به سایر تونل‌های متصل گردد. همچنین این احتمال وجود دارد که جاری شدن سیل، باعث ورود حجم قابل‌توجهی خاک از قبیل ماسه، سیلت، شن، یا واریزه‌های زون‌های گسله به داخل تونل گردد. از این‌رو، در مدت زمان کوتاهی ممکن است بخش قابل‌توجهی از فضای داخلی تونل با واریزه یا گل ناشی از ورود مصالح اطراف پر شوند که وقوع این پدیده می‌تواند باعث مسدود شدن بخشی از تونل گردد. بعلاوه، وقوع پدیده شل‌شدگی خاک زیر پی سازه‌های فوقانی تونل در اثر وقوع رویداد فوق‌الذکر ممکن است سبب فرورفتن و نشست قابل‌توجه پی سازه‌ها و یا حتی انهدام کامل سازه گردد.

#### ۶-۲-۷- 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 عمل نمی‌کنند، به هنگام بارندگی، همواره معابر دچار آب‌گرفتگی شده و آب‌های سطحی در قالب

می‌باشد. شناسایی گازها و محل تجمع آنها به سادگی امکان پذیر 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 معمولاً شامل سولفید هیدروژن، آمونیاک، متان، دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن می‌باشند. این نوع گازها بخاطر بوی بد، اثرات مخرب‌شان بر روی سلامتی افراد قابل توجه بوده و همچنین به عنوان یک عامل محرک‌زا در آتش‌سوزی و یا انفجار بسیار خطرآفرین می‌باشند.

#### ۷- 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 خطراتی همراه باشد. در این راستا، در این مقاله تا حدودی با خطراتی که سلامت و ایمنی تونل‌ها را در مراحل طراحی و اجرا تهدید می‌کند، آشنایی صورت گرفته است. از پیامدهای نامناسب ناشی از این خطرات می‌توان به مواردی نظیر تهدید برای جان انسان‌ها، وقوع زیان‌های اقتصادی و ... اشاره نمود که عواقب سنگینی را برای سرمایه‌گذاران این بخش، متولیان امر و در نهایت مردم به همراه خواهد داشت. از این‌رو، جایگاه این مقاله را می‌توان به عنوان مقدمه‌ای برای تأمین ملاحظات ایمنی و ارزیابی ریسک پروژه‌های تونل درون‌شهری در حین طراحی و اجرا تلقی نمود تا با شناسایی خطرات بالقوه و ارزیابی

#### ۶-۲-۹- خطرات ناشی از فرونشست<sup>۱۳</sup> زمین

اجرای تونل در مناطق شهری ممکن است با وقوع اثرات مخرب بر روی ساختمان‌ها، سازه‌ها و تأسیسات مجاور محل حفاری همراه باشد که انتخاب روش حفاری صحیح تا حد زیادی خطرات ناشی از آن را کاهش خواهد داد. اما نباید فراموش نمود که به هر حال، حفاری تونل باعث ایجاد دست‌خوردگی خاک و بهم خوردن تعادل تنش اطراف محدوده حفاری تونل می‌گردد که در نتیجه آن، تغییرشکل‌هایی در محیط اطراف تونل و در نهایت، در لایه‌های فوقانی ناحیه حفاری تونل و همچنین در سطح زمین بوجود خواهد آمد. در صورتی که این تغییرشکل‌ها به سطح زمین برسند، بر روی سازه‌های روستی مجاور بخش حفاری اثرات منفی خواهند گذاشت. از مشخصه‌های تونل‌های شهری می‌توان به عمق کم روباره آن‌ها، دهانه بزرگ این فضاها و همچنین قرارگیری ساختمان‌ها بر روی آن‌ها و یا در مجاورت آن‌ها نام برد که همگی کنترل نشست سطحی را دشوار می‌کنند.

از جمله دیگر خطراتی که ممکن است برای تونل‌ها حادث گردد، شسته شدن مصالح محیط اطراف تونل در دوره بهره‌برداری به دلایل مختلف می‌باشد که به مرور موجب از بین رفتن خاک اطراف آن و در نهایت نشست تونل می‌گردد. این پدیده علاوه بر این که به سازه تونل آسیب می‌رساند، ممکن است اثرات ناشی از آن به سطح زمین نیز منتقل شده و اثرات مخربی را بر سازه‌های سطحی به همراه داشته باشد.

#### ۶-۲-۱۰- خطرات ناشی از انتشار گازها

تونل‌ها در حین اجرا به ندرت در معرض انتشار گازهای زیرزمینی طبیعی قرار می‌گیرند. اما هرگاه این گازها به نحوی وارد فضاها یا 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: گاز متان، دی‌اکسیدکربن، مونواکسیدکربن، سولفید هیدروژن، دی‌اکسیدگوگرد و گاز 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

#### ۹- 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.

-National Cooperative Highway Research Program (2008), "Transportation Security: Making Transportation Tunnels Safe and Secure", NCHRP Report 525, p. 167.

-Seidenfu, T. (2006), "Collapses in Tunnelling", Master of Science Thesis, EPFL university, Lausanne, Switzerland.

-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.

دقیق ریسک مورد انتظار در پروژه، بتوان ایمنی آن را افزایش داد.

#### ۸- پی‌نوشت‌ها

1. Local Spalling
2. Local Breach
3. Progressive Failure
4. Lattice
5. Rebound Material
6. Earth Pressure Balance
7. Slurry shield
8. Roadheader Machine
9. Full-Face Tunnel Boring Machine
10. Cavities
11. Anhydrite
12. Montmorillonite
13. Subsidence